

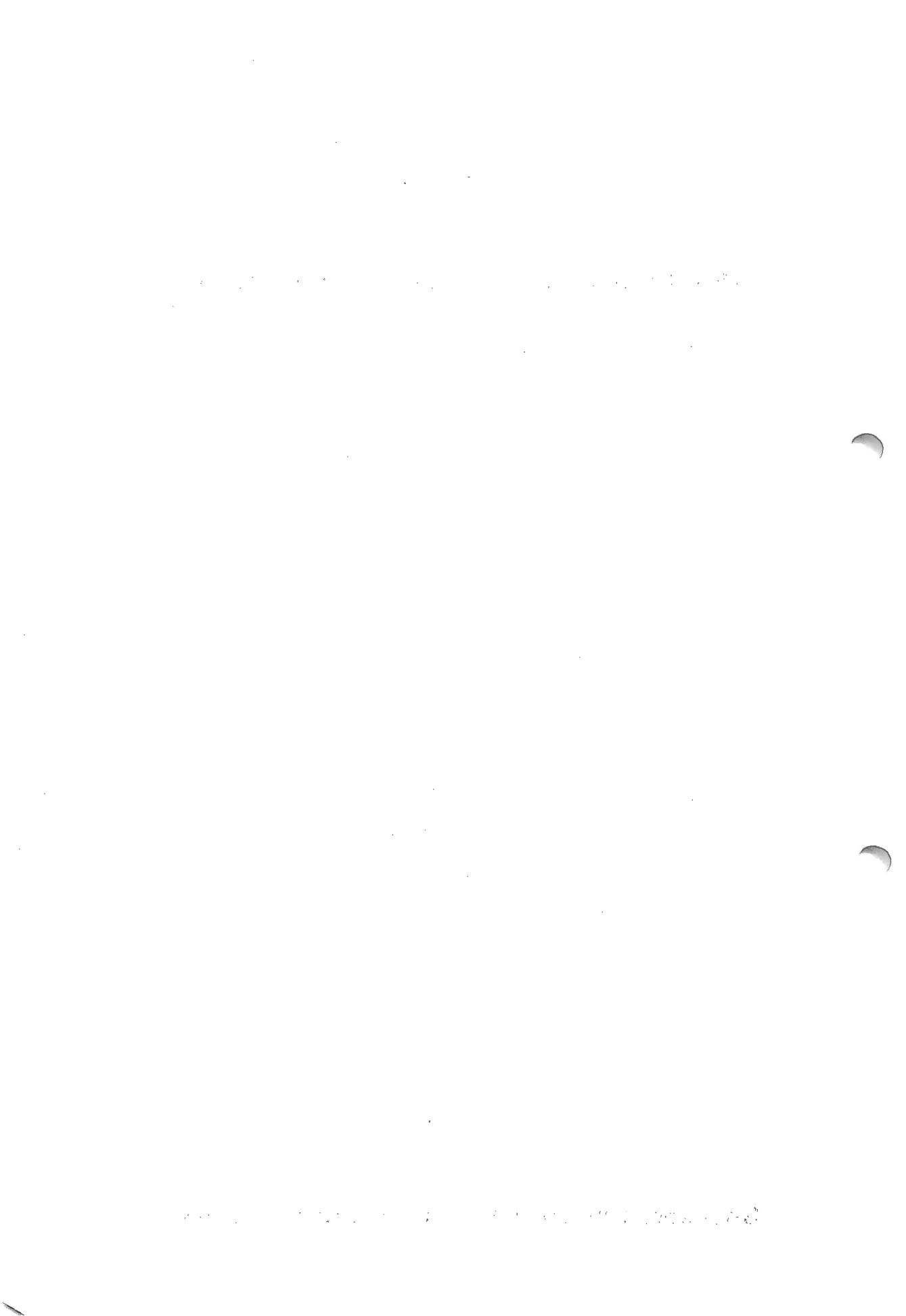
第18回 地盤振動シンポジウム

やや長周期地震動

—現時点で予測はどこまで可能か—

1990. 7. 13

日本建築学会 構造委員会
振動運営委員会 地盤振動小委員会



The 18th Symposium on Ground Vibrations (1990)

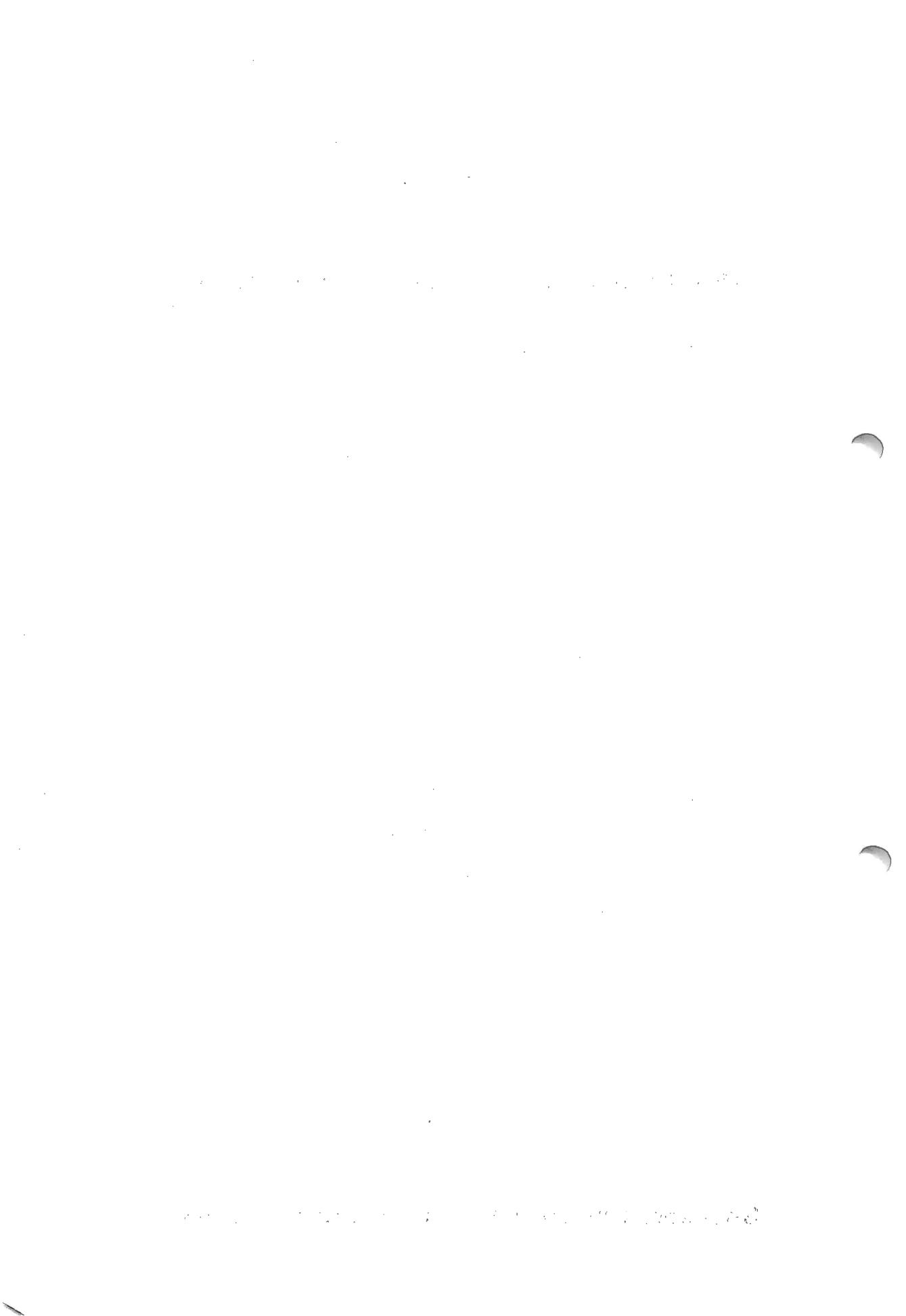
Long-Period Earthquake Ground Motion on Sedimentary Basin

—Is Quantitative Prediction ? —

JULY 1990

Tokyo

Sponsored by Architectural Institute of Japan



第18回地盤震動シンポジウム(1990)

やや長周期地震動

— 現時点での予測はどこまで可能か —

I 主旨説明

- I-1 やや長周期地震動問題の地震工学における新たな展開 —主旨説明にかえて— 長橋 純男(長崎総合科学大) 1

II 工学的ニーズ

- II-1 やや長い周期特性をもつ地震動に関する研究の工学的利用 萩尾 堅治(大成建設技研) 7
- II-2 石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動 座間 信作(自治省消防研) 15

III 研究の蓄積

- III-1 震源過程の取り扱いなどについて 井上 涼介(茨城大) 21
- III-2 関東平野の深い地盤とやや長周期地震動 山中 浩明(東工大) 27
- III-3 大阪平野の地下構造とその地震動の特徴 堀家 正則(大阪工大) 37

IV 予測手法の現状と限界

- IV-1 やや長周期地震動の各種予測手法のレビューと研究展望 野田 茂(鳥取大) 45
- IV-2 断層の不均質性を考慮した広い周波数帯域の強震動の合成 岩田 知孝(京大防災研) 55
- IV-3 堆積盆地地形において生成される表面波に関する解析検討 源栄 正人(鹿島建設小堀研) 61
- IV-4 表層地質が地震動に及ぼす影響に関する研究事例と今後の課題 川瀬 博(清水建設大崎研) 71

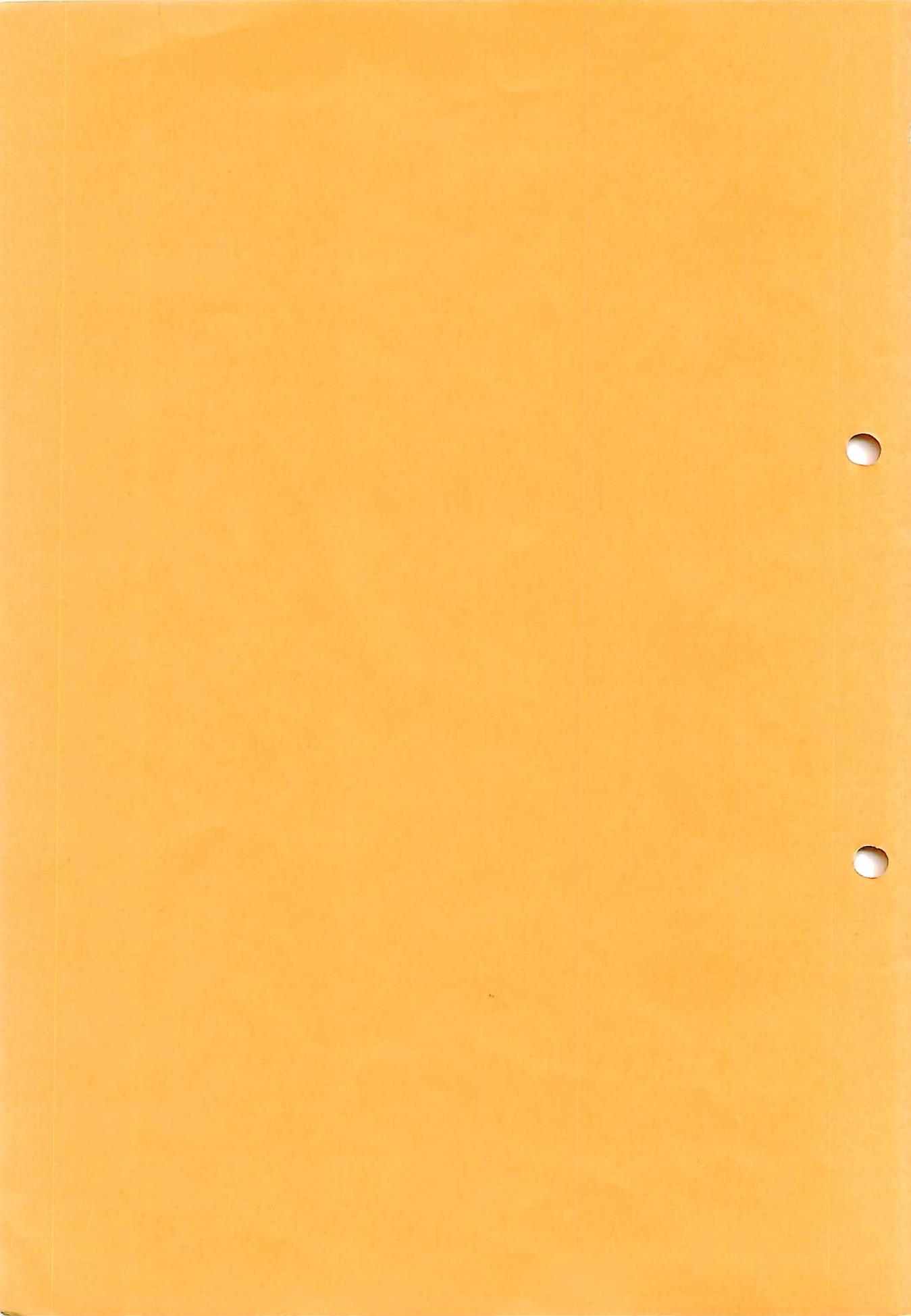
- V 資料：これまでに開催された地盤震動シンポジウムの報告 地盤震動小委員会 79

70分

The 18th Symposium on Ground Vibrations (1990)
Long-Period Earthquake Ground Motion on Sedimentary Basin
—Is Quantitative Prediction Possible ? —

I -1	On the Problems With Respect to Long Period Strong Motion in Earthquake Engineering by Nagahashi Sumio	1
II-1	Practical Application of Research on Earthquake Ground Motion in the Intermediate Period Range of 1~10 second. by Hagiwara Kenji	7
II-2	Liquid Sloshing of Oil Storage Tank and Long Period Ground Motion by Zama Shinsaku	15
III-1	Review of the Research on Strong Ground Motion in the Period of 2 to 20 sec by Inoue Ryosuke.....	21
III-2	Structure of Deep Sedimentary Basin beneath the Kanto Plain and its Effects on Long-period Ground Motions by Yamanaka Hiroaki	27
III-3	Subsurface Structure of the Osaka Basin and Seismic Motions Influenced by it by Horike Masanori	37
IV-1	Review and Future Prospect of Prediction Methods of Long-period (2-20 sec) Ground Motions by Noda Shigeru	45
IV-2	Simulation of Wide-Frequency-Band Strong Ground Motions based on the Heterogeneous Rupture Process by Iwata Tomotaka	55
IV-3	Analytical Investigation of the Diffracted Surface Wave Generated in a Sedimentary Basin by Motosaka Masato	61
IV-4	A Brief Review of Studies on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion and their Perspective by Kawase Hiroshi	71
V	Data : Past Reports of the Symposia on Ground Vibration by the Ground Vibration Research Committee	79

I. 主 旨 說 明



やや長周期地震動問題の地震工学における新たな展開

～主旨説明にかえて～

On the problems with respect to long period strong motion in earthquake engineering

長橋 純男
NAGAHASHI Sumio

The nineteenth symposium on the ground vibrations is held with the subject on long period earthquake strong motion. This subject has been discussed several times in the past symposiums since the first symposium in 1972. Especially, in the twelfth symposium in 1984 with the subject on the 1983 Japan Sea Earthquake ($M=7.7$), which caused severe damages of oil-sloshing in the several huge oil tanks (the sloshing period of 8 or 11 seconds) in Niigata Pref., the importance of understanding on the characteristics of long period strong motions was emphasized in comparison with the current design code of oil tanks. Also in the fourteenth symposium held at ten months after the 1985 Mexico Earthquake ($Ms=8.1$), the propagations of long period seismic waves in soft basin were discussed by use of many accelerograms observed in the Mexico City. Then, this symposium is held on the basis of the up-to-date studies in this field.

§ 1. はじめに

此度の第18回地盤震動シンポジウムがテーマとする「やや長周期地震動」については、そもそも18年前にこの地盤震動シンポジウムが初めて開催されたとき（第1回地盤震動シンポジウムは1972年8月31日に開催された）から、地震工学の重要な研究課題として指摘されてきた問題である¹⁾。特に、『いわゆる長周期問題について』と題して問題提起を行った太田は、「耐震工学で長周期といっている周期5～10秒の波は、地震学では、むしろ短周期とみなされている」ことを指摘するとともに、「地震時の長周期成分と脈動、さらには地層構成との間に密接な関係がある」ことを例示したうえで、「理論地震記象と基盤以浅の地盤特性とを組み合わせれば、長周期問題に関して設計に役立つ情報が得られる」可能性を示唆している。そして、この第1回地盤震動シンポジウムでの討論の中で、「この長周期が地震計の盲点になっており、既存の記録だけからの判断は危険である」ことが指摘されると共に、1964年新潟地震の教訓をもふまえて、「この長周期成分による石油タンク内のスロッシングが大災害の原因になる」という警告もなされているのであり、今回の地盤震動シンポジウムで取り上げる問題点の少なからざる部分については、したがって当シンポジウムのスタート時点から相当鮮明に意識されていたものといっても過言ではあるまい。

ところで、この周期帯域（取り敢えずは「周期1～2秒から十数秒程度の帯域」としておく）を「やや長周期」と呼び始めるようになったのは、いったい何時頃からであろうか。文献上において筆者の目にとまった限りでは、1970年12月に開催された第3回日本地震工学シンポジウムにおいて嶋が発表した論文²⁾の中に「やや長周期の波」という表現があるので、この頃には関連分野の研究者の間ではこの呼称が用いられ始めていたことになろうか。折しも、その2年前の1968年4月には地上36階建ての三井霞が関ビルが竣工したが、その翌月には1968年十勝沖地震が発生し、八戸港湾や青森港湾などで観測されたS M A C 記録には周期2.5～3.0秒の地震動成分が卓越して

記録され、大いに注目されていた。嶋が「やや長周期の波」という表現を用いた1970年の地震工学界は、その様な事情を背景としていた時期である。

§ 2. 地盤震動シンポジウムと「やや長周期地震動」

さて、当地盤震動シンポジウムでこの「やや長周期地震動」の表現が用いられるようになったのは、『資料集』にこの表現が初めて現れたことでいうならば、1974年11月に開催された第3回地盤震動シンポジウムのときからである。このシンポジウムは、1974年5月に発生した1974年伊豆半島沖地震 ($M_{JMA} = 6.8$) の地震観測記録をテーマとしたものであるが、この地震の際に首都圏及び静岡県の合計十五ヶ所で観測された短周期地震計による記録全体を総括した小林は「今回の資料はすべて短周期地震計を用いた記録であるが、それにもかかわらずいずれの観測点でも2乃至4秒の周期の地震動が顕著に記録されている。規模の大きな地震では長い周期の地震動が発生しやすい事は知られているが、今後の一つの問題点としてその性質を十分検討する必要がある」と締め括っている。この点はそれ以降も度々指摘されてきた問題であり^{4), 5)}、1930年北伊豆地震など伊豆半島周辺で発生する地震の際に東京で観測される地震動にはやや長周期地震動成分が卓越する、ということはよく知られた観測事実であって、今年2月20日に発生した1990年伊豆大島近海地震 ($M \approx 6.5$) の際に首都圏の各地で観測された記録⁶⁾においてもあらためて8~9秒のやや長周期地震動が確認されたところである。また、最近ではこの様な現象を、相模湾から関東平野南西部までの伝播経路全体にわたる地下構造を取り込んで、解析的に理解しようとする試みも行われている⁷⁾。

それはともかくとして、いずれにせよ、やや長周期地震動の特性には、単に表層地盤の性質のみならず、深い基盤構造の影響が強いために深部地下構造の情報が不可欠であることは、例えば1976年1月に開催された第4回地盤震動シンポジウム『強震動におけるやや長周期成分について～耐震解析用地震動の再検討～』において指摘された如く、1968年十勝沖地震の八戸港湾でのSMAC記録にみられた約2.5秒の卓越周期成分は、深さ400m程度までの地下構造を反映したものとみなすことができる⁸⁾ことからも知れる通りである。また、この第4回地盤震動シンポジウムでは、1974年伊豆半島沖地震の際に東京大学地震研究所で観測された大森式長周期地震計による変位記録の解析結果について工藤・田中が報告しており⁹⁾、「大振幅を与える10秒付近の波は表面波であり、R成分は分散性レーレー波、T成分はラブ波であることが推定される。…（これらの）実測値は、（首都圏基盤構造研究グループによって）東京で求められた構造に非常に良く一致する」ことを紹介している。観測記録についての同様な指摘はその後、1974年伊豆半島沖地震から4年後の1978年に発生した2つの被害地震、すなわち1978年伊豆大島近海 ($M_{JMA} = 7.0$) および1978年宮城県沖地震 ($M_{JMA} = 7.4$) の際に、東京で観測された地震動記録の波形分析を行った横田¹⁰⁾によてもなされており、とりわけ伊豆方面で発生する比較的マグニチュードの大きな浅い地震による東京の地震動記録にしばしばみられる7~9秒の卓越周期成分には明瞭な分散性が認められることから、このやや長周期成分はラブ波と考えられること、また上下動の速度記録には5秒の成分が卓越している点にも鑑みて、この周期成分はレイリー波とみなされようこと、などの解析結果を示している。

この様な強震地動のやや長周期成分にみられる表面波について、工藤は更に議論を進め、前記第4回地盤震動シンポジウムの2年後に開催された第6回のシンポジウムにおいて、1974年伊豆半島沖地震、1931年西埼玉地震および1930年北伊豆地震によるいずれも大森式長周期地震計で観測された変位記録について、震源パラメータと震源～サイト間の平均的な地下構造について適当なモデルを与え、表面波として想定した理論地震記象を求めるべく、5秒より長い周期のラブ波に関しては、周期領域のみならず時間領域においても観測記録を比較的よく説明することが出来ることを例示している¹¹⁾。また工藤は、伊豆半島から東京までの地下構造に2種類のモデルを用いて理論地震記象を求めて地下構造の影響を探っているが、その比較例の場合では振動継続時間にかなりの影響がでていることを示し、震源から観測点までの深さ数kmまでの地下構造が周期数秒～10秒の波には大変に重要なことを指摘している¹²⁾。したがって、やや長周期成分の卓越する強震動を予測するには、将来発生しうる

地震の震源パラメータを適切に仮定するという、これまたなかなかの難問に加えて、震源から観測点までの地下構造に関する確かな情報が不可欠となるわけであり、この基礎的なデータを得ることが地震工学上の重要な研究課題となってきた次第である。その意味で、前記の Yamanaka et al.⁷⁾などにみられる最近の研究は、工藤¹²⁾のおよそ10年後の時点における1つの興味深い試みということができよう。

この様な研究は、当時他にも幾つか発表されている。工藤¹²⁾とほぼ同時期に、井上ほか¹³⁾は1946年南海地震(Ms=8.2)が再び同じ場所で起こるとしたときの周期5秒以上の表面波成分を、明石海峡大橋の両サイドの2地点(明石と児島)を対象として正規モード理論によりシミュレートしているが、断層パラメータとして安藤モデルを用いた場合の理論地震動の応答変位スペクトル(h=2%)は、水平2成分・鉛直成分とも20~30cm、また応答加速度スペクトルを、本州四国連絡橋公団『耐震設計基準』で規定されている値と周期6~15秒の範囲で比較すると、水平動に関してはかなり下回るが、鉛直動では規定値を上回る場合がある、としている。

以上に概観した如く、当地盤震動シンポジウムでは、そのスタートの時点から始まって以降これまで幾たびもこの『やや長周期地震動』の問題を取り上げてきたものである。とくに、1983年日本海中部地震をテーマに開催された第12回地盤震動シンポジウムでは、新潟県下の大型石油タンク(スロッシング周期8~11秒)から石油が溢流した事故にも関連して、また1985年メキシコ地震をテーマとして地震10ヶ月後に開催された第14回地盤震動シンポジウムでは、とくに堆積盆地平野における地震動特性に関連して、いずれも「やや長周期地震動」の問題について以下の如き幾つかの重要な論点が提起された。

§. 3 大型石油タンクのスロッシング被害と「やや長周期地震動」

かつて、『地盤種別と地震動』をテーマとして開催された第5回地盤震動シンポジウムにおいて岡田・鏡味は、1961年~1974年の期間に発生したM≥5.4の138浅発地震(H≤60km)による、全国の気象庁観測点で観測された1倍強震計及びウィーヘルト地震計の記録を用いて、やや長周期における地盤の“搖れ易さ”を全国94観測点について求めているが¹⁴⁾、そこで「全国で4番目に搖れ易い」と判定された新潟と、「全国で2番目に搖れ難い」と判定された佐渡相川での1983年日本海中部地震のときの気象庁1倍強震計記録を比べると、相川のE-W成分が1.25cmの振幅を記録しているのに対して、新潟では水平2成分ともオーバースケールしている(3cmを超過、工藤¹⁶⁾はS M A C 記録の解析結果、及び振り切れなかった上下動を用いレーリイ波としての合成記録から判断して、「最大変位10~20cm」と推定している)。新潟と相川は震源からの方位がほぼ同じであり、震央距離も両者共270km程度であるにも拘らずこの様な顕著な差異が生じたのは、やや長周期帯域における地盤特性の相違によるものと考えられた¹⁵⁾。

ちなみに、気象庁の観測記録についてその最大振幅データを用いた議論は、上記の岡田・鏡味¹⁴⁾のほかにも、たとえば北川・尾崎¹⁷⁾は気象庁記録の振幅及び周期をデータとして全国各観測点のやや長周期帯域での地盤特性を評価したうえで地震動期待値を求めており、また長橋¹⁸⁾は関東地方の地殻・上部マントル中における距離減衰特性を抽出することを試みているが、1倍強震計記録の時刻歴データのそれ自体を用いた考察も、とくに1983年日本海中部地震以降しばしばなされるようになってきた^{15), 18), 19), 21), 24), 25)}。これは、気象庁1倍強震計(振子の固有周期は水平2成分6秒、鉛直成分5秒)が、幾つかの問題点はあるものの、周期数秒のやや長周期地震動を記録するのに適した地震計であり、かつその40年近い観測歴及び観測点の全国的な分布密度において、他に替え難い長所を有している点に依っている²⁰⁾。そこで、この気象庁1倍強震計による観測記録を地震工学においてより積極的に活用しようと、振り切れた記録の修復に関する研究²³⁾や他のS M A C 記録との比較により観測記録の信頼性に関する吟味²²⁾も行われているところである。また、1923年関東地震のときに東京大学地震研究所で観測された今村式2倍強震計記録は、一部に欠落部分があるものの約20分にわたって記録されたものであり、関東地震の地震動の全体像を知るうえでの貴重なデータであるが、横田ほか²⁶⁾は最近この強震計の大型

振動台実験も行ったうえで振子の周期特性の補正や飽和波形の修復などをほどこして、記録の復元を試みている。これによれば、周期2秒～15秒の帯域で最大変位は14.5cm、最大速度は約26cm/sとなり、最初から3分間は振幅10cm以上の地動が続き、次の3分間は5～10cm、…という具合で関東平野の地下構造によるラブ波と考えられる周期7～8秒の成分や周期1.4秒の大きな振幅が6分間も継続しているという。この様な、重要な基礎的データを確実に整理しておくことは大変に貴重な仕事であると思われる。

さて、論点を再び1983年日本海中部地震に戻すことにする。この地震の際に新潟県内にあった約200基の特定屋外タンク貯蔵所(危険物貯蔵量1000m³以上)のうち、何れも3万m³クラス以上の浮屋根式の石油タンク10基(スロッシング周期T_s=8.7～10.8秒)で石油の溢流事故が発生した^{18),27)}。このうちで最高のスロッシング高さを記録したのは4.5mであり、当該タンクの半径31m、スロッシング周期T_s=10.0秒を用いて地動の速度応答スペクトル(h=0.1程度)を逆算すると「S_v=270cm/sec」という数字がでてくる。また、山田ほか²⁸⁾は同様の方法で、スロッシング高さから逆算して求めた応答スペクトルを求めており、これらの数字は自治省令(1983年告示)が想定しているところの「S_v=100cm/sec程度の地震動」をはるかに超えるものである。そこで工藤は、「溢流を発生させないために設定されている入力地震動レベル(速度応答≈100cm/sec)は全国平均で相当安全側に考慮されているといえる。しかし、新潟の事例から、地域性を考慮した詳細な規準値の設定が要請される」ことを提言している¹⁸⁾。

ところで、やや長周期地震動の問題を扱う論文の冒頭には、「高層ビル」、「長大橋梁」、「大型石油タンク」などの構造物を対象とした耐震設計との関わりから、やや長周期地震動の研究の意義・必要性が述べられていることが少なくないが、これらの中で、特段に問題となる程度の地震被害をこれまで実際に我が国で経験したことのある構造物は、石油タンクがその主要なものである。この様な耐震設計上の大きな具体的課題もあって、石油タンクのスロッシングに関する観測及び解析の両面からする研究が注目されるところである。自治省消防庁が行っている川崎のスロッシング観測については、1984年長野県西部地震(M_{JMA}=6.8)や1987年千葉県東方沖(M_{JMA}=6.7)などの地震の記録がこれまでにも紹介されている²⁹⁾。

§ 4. 堆積盆地平野における波動伝播と「やや長周期地震動」

1985年9月19日に発生した1985年メキシコ地震(M_s=8.1)は、震源域内では加速度振幅が比較的小さかった(Zacatulaの記録が最大で271gal)にもかかわらず、震源から400kmも離れたメキシコ市に甚大な被害をもたらし、同じメキシコ市の周辺硬質地盤上では30～40galの加速度振幅レベルであったのに対し、軟弱地盤上に位置するSCTでは164galの最大加速度振幅を記録したことと、周期2～4秒のやや長周期のピート状の加速度波形が3分間にも及んで継続していることが際だった特徴である³⁰⁾。また、盆地低地部で観測された地震動の加速度フーリエスペクトルのCU観測点(丘陵部硬質地盤)での地動に対するスペクトル比によれば55.5倍もの增幅率に達するサイトもみられる³¹⁾。この様な現象は地表数十m(30～60m程度か³²⁾)以浅のV_s=35～80m/secの軟弱な湖成粘土層の增幅作用によるところが大であると考えられ^{30),32)}、このことはまた、低地部で観測された地震動記象の卓越周期は人間活動に起因すると考えられる「やや長周期の常時微動」の卓越周期とよく対応することが確認されている³³⁾ことからも理解されることである。この様な極軟弱な地盤あるいは堆積盆地における增幅作用は、我が国においても大いにその可能性が予測されることから、この問題の重要性が強く認識され、先にも述べた如く、地震の僅か10ヶ月後に開催された第14回地盤震動シンポジウムにおいても、我が国の事情との関わりもふまえながら多角的に議論されたものである。そして、例えばその後に開催された第7回日本地震工学シンポジウム(1986年12月)や第9回世界地震工学会議(1988年8月)などにおいても、このテーマに関連した論文がかなり多くの研究者から発表された次第である。したがって、ここにその研究動向の全体像について整理して紹介することは難しいので、ここでは、以下に幾つかの論文で提起された重要な論点を例示することにより、「主旨説明」の筆者の役割を締め括ることとさせていただきたい。

メキシコ市の湖底部の軟弱地盤で観測された地震動の特徴の1つに、ピート状の後続波の問題があることは先に記したことであるが、太田ほか³⁴⁾はこの現象の因果関係を理解するために、基盤境界には2次元BEMを、盆地内部にはFEMを用いた混合モデルによって盆地の解析モデルを作り、SV波の入射問題として周期範囲が1～7秒の解析を行った結果、最表層（厚さ40m、Vs=40m/s）の入射側地点では周期4秒付近で增幅率40を超える伝達関数が得られたこと、またピート状の後続波はこれら地表近くの層構造によるものと理解することができること、などを示している。この様な堆積盆地での地震動にみられる後続波の生成について干場ほか³⁵⁾は、京都盆地における1984年長野県西部地震の余震観測記録と、近年しばしば引用される[Aki and Larner(1970)]の方法を複数の曲がった不規則な境界にも適用できるように拡張した方法でシミュレーションした波形とを比較することにより、この様な後続波は盆地縁辺部で2次的に生成される表面波によるものであることを示すと共に、この様な現象の解析的説明には水平成層構造を仮定した Haskell 法では不十分であると指摘している。成層構造における1次元波動論では説明がむずかしい後続波の問題については、この他にも、波線理論に基づき逆三角形（幅11km・最深部深さ456m）でモデル化したメキシコ盆地（Vs=500m/sec）の表面に、厚さ50m前後のやや傾斜した粘土層（Vs=60m/sec）をかぶせた地盤構造モデルにSH波を入射させてさせてシミュレートしたもの³⁶⁾、あるいは幅10km・厚さ1kmの盆地構造（Vs=1km/s）の一部表面に、厚さ250mの軟らかい層（Vs=250m/sec）をのせた地盤構造モデルにSH波やSV波を入射させて解析した Kawase and Aki³⁷⁾など、不規則境界をもつ地盤構造における2次元波動伝播の研究が種々なされているところである。メキシコ地震は「被害と地震動記録」という事実をもって、地盤震動の研究に新たなステップを促したことになろう。

§ 5. むすび

今回の第18回地盤震動シンポジウムが『やや長周期地震動－現時点で予測はどこまで可能か－』をテーマとして此度開催されるはこびとなったのは、以上の様な地震被害・観測および研究のこれまでの蓄積を背景としたものである。したがって、当シンポジウムでは、「やや長周期地震動」の問題に関する最近のホットな研究成果を第一線の研究者に御紹介戴くと共に、この問題についての論点を参会者の皆様方に御討議いただき、併せて、重要な情報が実際問題において有効適切に活用されるための諸問題など、今後の課題を展望していただければ、と願うものである。

ところで、今回のテーマ「やや長周期地震動」であるが、地震学では周期数十秒～数百秒を「長周期」とよぶことが多いので、ここで対象としている数秒～20秒程度の周期範囲を「やや長周期」と呼んでいるわけであるが、さて、この「やや長周期地震動」を英文表記する場合にはどの様な表現が相応しいのであろうか…。今回のシンポジウムで研究成果を御紹介下さる方々の論文に用いられている表記だけに限っても様々であるのだが、例えば工学関係者と地震学者の間には認識の差異があろうし、同じ工学関係者でも建築構造物を扱う立場と石油タンクや長大橋梁を扱う立場とでは、事情が相違する。いうまでもなく、どの表記法を探るかは、この様な事情を背景にその研究者の「やや長周期地震動」に関するものの考え方を強く反映したものなのであるから、表記法の統一を考えるにしても慎重を期さなければならない。そこでこの問題については地盤震動小委員会においても少しく検討したのであるが、此度の地盤震動シンポジウムにおいて学界各位の御意見も承ったうえで、小委員会で再度検討し振動運営委員会にお諮りしようということに取り敢えずは致した次第である。今回のシンポジウムでは、この点についてもひろく御意見を賜りたいと願っている。

なお、1972年に第1回地盤震動シンポジウムが開催されて以来、シンポジウムで紹介された研究成果や論点として討議された内容については、その概要を小委員会にて取りまとめたのち、日本建築学会編集委員会の御好意により『建築雑誌』の「レター欄」等に1～2頁を載いて、毎回のシンポジウムにつき御報告してきた。これらを通覧すると、過去20年間の地盤震動研究の流れがよく理解され、これだけでも貴重な資料であると思われる所以、今回のこの資料集の末尾に一挙転載することにした。併せて御参照いただければさいわいである。

参考文献

- 1) 坂本功：シンポジウム「建築物の耐震設計に考慮すべき地震動」の報告、日本建築学会『建築雑誌』、Vol. 87 No. 1057, 1972年10月
- 2) 鳩悦三：強震地動に見られる表面波成分、第3回日本地震工学シンポジウム（1970）講演集、1970年11月
- 3) 小林啓美：伊豆半島沖地震（1974年5月9日）の地震観測資料について、第3回地盤震動シンポジウム資料集、1974年11月20日
- 4) 田中貞二・吉沢静代・大沢勝：やや長周期帯域における強震動の特性－長周期低倍率地震計記録の解析－、東京大学地震研究所彙報、Vol. 54、1979年
- 5) 横田治彦・片岡俊一・田中貞二：東京で観測されるやや長周期地震動とその特性、第7回日本地震工学シンポジウム（1986）講演集、1986年12月
- 6) 工藤一嘉・座間信作・瀬尾和大・山田真・若松邦夫の各委員による地盤震動小委員会資料、1990年3月29日及び5月24日
- 7) Yamanaka, H., K. Seo and T. Samano : On the Seismic Motions Observed in the Southwestern Kanto Plain during an Earthquake near the Izu-Oshima Island, Japan, Proc. of the National Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1989年12月
- 8) 鏡味洋史：やや長周期微動による深い地盤特性の把握と強震記録の解釈、第4回地盤震動シンポジウム資料集、1976年1月20日
- 9) 工藤一嘉・田中貞二：東京で観測された長周期地震動－1974年伊豆半島沖地震の東京における変位記録－、第4回地盤震動シンポジウム資料集、1976年1月20日
- 10) 横田治彦：東京都港区芝浦における地中地震観測（1978年伊豆大島近海地震、1978年宮城県沖地震の記録）、第7回地盤震動シンポジウム資料集、1979年3月27日
- 11) 工藤一嘉：長周期地震動－強震地動の表面波に関する検討－、第6回地盤震動シンポジウム資料集、1978年3月28日
- 12) 工藤一嘉：やや長周期の地震波形予測と周辺問題、第10回地盤震動シンポジウム資料集、1982年4月6日
- 13) 井上涼介・藤野陽三・松原勝己・伯野元彦：断層震源モデルを適用した周期10秒前後の地盤震動評価の試み、土木学会論文報告集、第317号、1982年1月
- 14) 岡田成幸・鏡味洋史：やや長周期の地盤特性とその全国分布、第5回地盤震動シンポジウム資料集、1977年2月18日
- 15) 武村雅之：強震地動、第12回地盤震動シンポジウム資料集、1984年6月26日
- 16) 工藤一嘉：深い地盤による長周期地震動の卓越－1983日本海中部地震による新潟での石油溢流、長周期地震動強さの地域性に関する－、第12回地盤震動シンポジウム資料集、1984年6月26日
- 17) 北川良和・尾崎昌凡：地震動の地域特性に関する研究（その2）やや長い周期領域（2～数秒）での地盤特性を考慮した地震動期待値、日本建築学会論文報告集、第277号、1978年3月
- 18) 長橋純男：設計用地震動への活かされ方－関東地方における地震動の場合－、第13回地盤震動シンポジウム資料集、1985年7月9日
- 19) 小林啓美：地震動の観測と事象、第13回地盤震動シンポジウム資料集、1985年7月9日
- 20) 井上涼介：やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望、土木学会論文集、第374号／I-6、1986年10月
- 21) 山田善一・野田茂：日本海中部地震時の周期10秒前後の地震動特性、日本建築学会構造系論文報告集第378号、1987年8月
- 22) 山田善一・野田茂：長周期帯域（2～20秒）における気象庁変位強震計とS M A C型加速度計記録の信頼度について、日本建築学会構造系論文報告集、第379号、1987年9月
- 23) 山田善一・野田茂・岡田三郎・吉田隆治：振り切れた1倍強震計記録の修復波形による長周期応答スペクトル、土木学会論文報告集、第386号／I-8、1987年10月
- 24) 井上涼介：気象庁1倍変位強震計記録から、第16回地盤震動シンポジウム資料集、1988年7月14日
- 25) Koyama, S., K. Seo and T. Samano : On the Significant Later Phase of Seismograms at Kumagaya, Japan, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1988年8月
- 26) 横田治彦・片岡俊一・田中貞二・吉沢静代：1923年関東地震のやや長周期地震動－今村式2倍強震計による推定－、日本建築学会構造系論文報告集、第401号、1989年7月
- 27) 工藤一嘉・坂上実：1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について－新潟における石油溢流の問題点－、東京大学地震研究所彙報、Vol. 59、1984年
- 28) 山田善一・家村浩和・野田茂・岡田三郎：タンクのスロッシングおよび地震記象からみた長周期地震動の特徴、土木学会論文集、第362号／I-4、1985年10月
- 29) 座間信作・吉原浩：大型円筒貯槽におけるスロッシング観測（その2）、消防研究所報告第67号、1989年3月
- 30) 太田外気晴：工学的立場から－1985年メキシコ地震の被害と地盤振動－、第14回地盤震動シンポジウム資料集、1986年7月11日
- 31) Singh, S. K., J. Lerma, T. Dominguez, M. Ordaz, J. M. Espinosa, E. Mena, and R. Quaas : The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site, EARTHQUAKE SPECTRA, Vol. 4, No. 4, 1988年11月
- 32) 瀬尾和大：地下構造に基づく地震記象の解釈、第14回地盤震動シンポジウム資料集、1986年7月11日
- 33) 瀬尾和大：微動観測とその工学的利用－メキシコ・アメリカの事例から－、第17回地盤震動シンポジウム資料集、1989年7月13日
- 34) 太田外気晴・源栄正人・稗圃成人・金田正毅・喜多村英司：1985年メキシコ地震における地震動特性とその検討、第7回日本地震工学シンポジウム（1986）講演集、1986年12月
- 35) 干場充之・堀家正則・出射隆文・岩田知孝：地表付近の地質構造の地震動への影響－堆積盆地での地震動の解析と数値計算－、地震 第2輯、第41巻、1988年
- 36) Sanchez-Sesma, F., S. Chavez-Perez, M. Suarez, M. A. Bravo, and L. E. Perez-Rocha : The Mexico Earthquake of September 18, 1985 - On the Seismic Response of the Valley of Mexico, EARTHQUAKE SPECTRA, Vol. 4, No. 3, 1988年8月
- 37) Kawase, H. and K. Aki : A Study on the Response of a Soft Basin for Incident S. P. and Rayleigh Waves with Special Reference to the Long Duration Observed in Mexico City, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 79, No. 5, 1989年10月

II. 工学的ニーズ



やや長い周期特性をもつ地震動に関する研究の工学的利用

Practical application of research on earthquake
ground motion in the intermediate period range of 1 ~10 second.

萩尾 堅治
HAGIO Kenji

The relation of researches on earthquake ground motion in the intermediate period range of 1~10 second and the practical application for the earthquake resistant design of building are discussed in this paper. As the concluding remarks, some tasks in both research and design field are pointed out as follows. (1) Investigation of seismic activity to make clear the remarkable source mechanism in the district. (2) Investigation of deep soil structure concerning to regional characteristics of the earthquake ground motion in the district. (3) Regional earth-quake measurement in the district to make clear the regional ground motion in the intermediate period range. (4) Quantitative response analysis of the earthquake ground motion in the intermediate period range to make clear the effect of them as input motion in structural design.

1. はじめに

1968年十勝沖地震で取得された八戸港湾の強震計記録の検討を発端として、地盤震動のやや長周期成分に関する研究が始められてから既に20年を経ている。この間、地震動観測、常時微動測定、発破試験による実測と理論モデルによるシミュレーションを通して、実体波と表面波の両面からやや長周期成分の解明が進められ、多くの新たな知見が得られている。

また、やや長周期地盤動の及ぼす影響が大きいと考えられる固有周期の長い大型構造物、すなわち、超高層ビル、超高煙突、長大橋、大屋根架構、大型タンク等の建設事例は増し、更に、長周期特性を利用した新しい構造である免震構造の実用化や、長周期成分の増幅が顕著な埋立地盤を敷地とする臨海部の開発計画が進められ、100階建を越す超々高層ビル構想も表われてきていている。

しかし、このような研究の進展と実構造物の増加という現状にありながら、やや長周期成分を耐震設計入力としていかに定量的に評価すべきかという明確な基準はない。

本論では、やや長周期地盤動に関する研究成果の工学的利用の現状をみるという観点から、やや長周期地盤動に関してこれまでに得られた知見と長周期特性を

もつ構造物の耐震設計の現況を概観し、研究成果の積極的利用を図るために解決されるべき問題について考えてみる。

2. やや長周期地震動に関する知見

図1は、やや長周期地震動に関する事項やこれまでに得られた知見を周期軸上に表わしたものである。以下、同図を参考に主な項目についてふれてみる。

(1) やや長周期領域の地震動成分

やや長周期という呼び方は、1秒程度から10数秒程度の周期帯を対象としているが、その境界は必ずしも明確ではない。下限は、従来の中低層構造物の耐震設計で着目してきた加速度の卓越する短周期領域の長い側にあり、上限は、地震学でいう周期数十秒以上の長周期表面波より短かい側で、かつ、構造物の耐震設計上評価する必要のある周期までをさしている。従って、当初、数秒までと表現されていた上限も構造物の大規模化等に伴ない最近では10数秒までと言われるようになってきている。

この領域では、実体波、短周期表面波の複雑な波動が混在しており、その成因を解明するには、広範囲の観測と深い地盤構造の解明が必要である。

(2) 地震計の周期特性

地震学では周期数十秒から数分の地震動を計る地震計を長周期地震計と呼び、周期数分の1秒を計るものと短周期地震計と呼んでいます。工学では構造物に地震力として作用する強い加速度を記録する目的から、短周期成分に着目したSMAC型強震計が数多く設置されている。SMACにより貴重な被害地震の地震動記録が多数得られているが、やや長周期成分についての信頼度は乏しいため、最近では長周期特性をもった速度計が使われるようになってきている。気象庁の一倍変位強震計は、やや長周期成分を精度良く把えるが、旧タイプのものは3cmで振り切れてしまうため、大きな地震では、主要動部分が欠落してしまっている。しかし、最近の研究により、計器特性の詳細な検討による補正や、小地震記録を活用した大地震記録の復元等が行なわれ、強震記録として再検討されている。¹⁾²⁾

(3) 強震記録にみる長周期成分

強震時のやや長周期成分が実測された代表的な例としては、1923年関東地震の東京本郷記録にみる13.5秒³⁾、1968年十勝沖地震の八戸記録にみる2.5秒⁴⁾、1983年日本海中部地震の新潟記録にみる10秒と八郎潟記録にみる3.2秒⁵⁾、1985年メキシコ地震のSCT（通信運輸省）記録にみる2秒等がある。

(4) 地域的な周期特性

やや長周期成分に関する地域的な周期特性が把握されている例としては、常時微動のアレー測定により厚い沖積層の深さに対応する卓越周期の変化が把握された八戸の0.2～2.5秒、濃尾平野の1.5～5秒、メキシコ市の1～4秒がある。また、複数の地震記録の検討から地域的に特有な表面波が生じているとみられているものの例として、東京の1～5秒及び7～8秒⁶⁾、新潟平野の10秒⁷⁾、大阪平野の1秒⁸⁾が知られている。この他、全国に置かれている気象庁地震計記録に基づきやや長周期成分に着目して、各地の相対的な揺れやすさの分布を示したものとして、1～数秒の範囲をまとめて扱った岡田、鏡の研究⁹⁾、3.5.7.10秒について示した工藤の研究¹⁰⁾、2.3.4.5秒について示した北川、尾崎の研究¹¹⁾がある。

(5) 長い周期特性をもつ構造物

高層建物の設計周期を略算式 $T = 0.02h$ (h : 軒高m、T : 周期 sec) で計算すると、やや長周期地震動が問題となる1～2秒以上の周期をもつ建物は、ほぼ

50m以上の高層及び超高層建物が対象となる。横浜に建設中の超高層ビル（ランドマークタワー）は、70階建、高さ296m、固有周期6秒である。一方、長周期特性を利用した免震構造建物の周期は1～5秒の間にあり。建物以外では、固有周期16.8秒に達する明石架橋等の大型橋梁や、15秒に及ぶスロッシング周期をもつ大型石油タンクがある。

以上の構造物のうち、我国でやや長周期地震動が原因となって地震被害を生じたものは、低減衰のスロッシング振動現象による大型石油タンクの被害だけであり、他の超高層、大型橋梁、免震建物では、地震被害を生じるような大地震を未だ経験していない。

3. 長周期構造物設計の現状

3. 1 耐震設計入力の考え方

構造物の耐震設計における地震波伝播現象の考え方を図2に示す。震源での断層運動によって生じた地震波動は、実体波あるいは表面波として岩盤や地盤を伝播し、構造物の応答をひき起す。ここに到る過程では、断層による地震波の発生、基盤中の伝播、表層地盤中の増幅、地盤と構造物の相互作用、構造物での増幅という現象が生じている。耐震設計では、これらの現象に関する実測データや解析モデルの研究ならびに過去の地震被害を参考にして、設計用地震入力を設定し、構造物が所定の耐震性を保持するよう設計目標を定めている。

設計用地震入力を定める方法は、2通りに大別される。1つは、具体的な設計入力を定めることなく、過去の地震活動、地震被害、設計検討例に基づいて地震波伝播の最終段階である構造物の応答をせん断力係数のような形で規定してしまう方法である。改正された建築基準法（1981年施行）いわゆる新耐震設計法でも、高さ60m以下の一般建築物については、図3に示す地震活動の地域性や図4に示す建物の固有周期と地盤の種別に応じた応答特性を考慮した修正震度法の考え方を採用し、次式を用いて応答を規定する方法をとっている。

$$Q_i = C_i \sum w_i$$

Q_i : i階の水平せん断力

$\sum w_i$: i階より上部の総重量

C_i : せん断力係数

$$C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

Z : 地震地域係数

R_t : 振動特性係数

A_i : せん断力係数の高さ方向の分布

C₀ : 標準せん断力係数（1次設計 0.2以上
上、2次設計 1.0以上）

もう1つは、具体的に設計用入力地震動を想定し、応答計算を行う方法である。

新耐震設計法では、高さ60mを越す高層建築物や免震構造のような新しい構造物については、未だ大地震に遭遇しておらず耐震性実証の経験が得られていないことから、日本建築センターの構造評定を経て建設大臣の認定を受けることを義務づけており、構造評定の過程で設計用入力地震動を設定し、動的応答解析を行うことが必要とされている。この場合、設計者は、学会の技術指針等を参考にしながら建物の重要度、経済性、社会的要求等と敷地条件に応じた地震危険度を勘案して設計用地震入力を設定し、解析により地震応答を予測することとなる。

3. 2 高層建築物の評定例

高層建築物の設計の現状を設計指針と評定例からみてみる。

(I) 設計指針

高さ60m以上の高層建築物の設計用地震入力については、1986年8月に建築センターの高層建築物構造評定委員会から「高層建築物の動的解析用地震動について」という指針が出され、2段階の設計目標とその検討に用いられるべき動的解析用地震動の種類と強さの原則を示した。設計目標としては、

レベル1：建築物は、その敷地において耐用年数中に一度以上遭遇する可能性が大きい地震動に対して損傷を受けることなく、主体構造は概ね弾性的な挙動で応答すること。

レベル2：建築物は、その敷地において過去に起きたことのある地震動のうち最強と考えられるもの及び、将来起きることが考えられる最強の地震動に対して、倒壊あるいは外壁の脱落等人命にかかる可能性のある破損を生じないこと。

を掲げている。また、地震動の種類と強さについては、

種類：標準的な地震動波形、地域特性を表すような地震動波形、及び長周期成分等を含む地震動波形

等を含めて3種類以上設定する。

強さ：建築基準法にお想定している地震動の強さを基に、建設地域における地震の活動度等を考慮して地震動波形の最大速度を基準化し、設計目標レベル1、レベル2に応じた2種類以上を設定する。

と原則を示している。更に、具体例として、種類については過去の地震記録を挙げ、強さについては東京礫層を支持層とする剛強な地下及び基礎構造を有する建築物の場合を例示し、地表面位置の入力地震動の最大速度値をレベル1で25kine以上、レベル2で50kine以上としている。

(2) 評定例

高層建築物の評定例は、1966年2月から1988年8月までの約23年で540件にのぼる。評定物件の軒高と固有周期を図5に示す。1981年に新耐震設計法が施行される以前のデータも含まれているため軒高60m以下のものもあるが、最高軒高は約300m、固有周期は最長約6秒まで連続して分布している。図6は設計に採用された地震波と採用件数を示すが、基準地震動とも言うべきEL CENTROとTAFTの採用が圧倒的である。また、評定物件が、関東に集中している故か TOKYO 101がこれに次ぎ、長周期成分を含むHACHINOHEがこれに次いでいる。HACHINOHEは1986年8月の指針発表後の増加が顕著である。

地震動の強さは、指針発表前は全体の12.5%が最大加速度を尺度としていたが、発表後は最大速度で基準化するものが殆んどで、全体の98.5%を占める。採用加速度は、レベル1で200、250Galが多く、レベル2では250～500Galに分布し、400Galが大半を占める。採用速度は、レベル1で25kine、レベル2で50kineの指針で例示された値に集中している。

解析モデルは、1階床固定のせん断型又は曲げせん断型モデルが大半で一部ロッキング、スウェイを考慮したものもある。建屋の減衰定数はS造で2%とするものが殆んどで、その他の構造型式では3～5%の値がとられている。設計に用いられたせん断力係数と建屋周期の関係は、図7に示す通りであり、R_tを2種地盤の振動特性係数とすると、ほとんどがC_B=0.2 R_t～0.3 R_t（但し、C_Bは0.05を下限値とする）の範囲に納まる。

最大変形角については、S造が大きく、レベル1で

1/200 前後、レベル2で1/100 前後に集中しており、応力よりも変形の制約が大きいものと思われる。SRC 造等、他の構造では全体にバラツキが大きく、かつ、変形角は小さくなる。

3. 3 免震構造物の評定例

(1) 設計指針

日本建築学会では、1989年 9月に免震構造設計指針制定し、設計用地震応答予測について次のように述べている。

設計方針：免震層はアイソレーターとダンパーから成るものとし、設計用地震入力による応答解析結果に基づき、アイソレーターについては最大変位と最大軸力、ダンパーについては必要エネルギー吸収量がそれのもつ許容値以内であることを確認する。

入力地震動：「入力地震動の設定は、免震建物の大変形時における周期が地震動のやや長周期帯域に属することを留意しつつ、地震学、地震工学の知見を参考として、個々の建物について適切になされることが望ましい。」とし、3波程度の地動加速度記録を設定し、地震動の強さは、振動系に投入される総エネルギーの速度換算値 $V_E = \sqrt{2E/M}$ (E : 総エネルギー入力、M : 上部構造全質量) が下記の値を満足するように設定するものとしている。

第1種地盤で $V_E = 100 \text{ cm/s}$

第2種地盤で $V_E = 150 \text{ cm/s}$

第3種地盤で $V_E = 200 \text{ cm/s}$

(2) 評定例

免震構造物の評定例は、1985年 7月から1989年 8月までの約 4年間で39件に達している。大変形時の固有周期を図8に示す。ほとんどが2~3秒に設計されいており、特に2秒のものが多い。

採用地震波とその件数を図9に示す。EL CENTRO、TAFT、HACHINOHE が殆どの建物で採用されており、約半数の建物で人工地震波が採用されている。地震動の強さは殆どが速度で基準化されており全体の92.3%を占める。

採用加速度は、レベル1で300Gal、レベル2で 450 Gal に統一されている。採用速度はレベル1では殆どが25kineであり、レベル2では全て50kineである。免震層のモデル化は、スウェイモデルが多いが、ロッキ

ング・スウェイモデルも約30%の建物で採用されている。

図10に1階の最大せん断力係数を示す。最大せん断力係数は、固有周期が長くなる程小さくなる傾向を示し、0.09~0.33に分布している。

図11に免震層の最大相対変位を示す。相対変位は固有周期が長くなる程大きくなる傾向を示し、12~30cmに分布している。

4. やや長周期成分を考慮した地震動の計算

やや長周期成分を考慮した地震動の最近の計算例を3つ紹介する。

(1) 小林・翠川の断層破壊モデルを用いた例¹⁵⁾

小林・翠川の方法により、近い地震の断層の破壊を考慮して基盤入射波を推定した例である。この方法では、図12に示すように、断層面上の各要素から観測点に到達する地震波の包絡形を断層面全体にわたって重ね合せることにより地震動強さを評価している。各要素からのインパルスの強さは、地震のマグニチュードと断層中心と観測点の距離を与えて実験式から求めた基盤入射波速度応答スペクトルを用いて定めており、0.1~5 秒の周期成分を考慮することができる。基盤入射波の加速度応答の計算結果を図13に示す。

(2) Olson の地震波伝播モデルを用いた例¹⁷⁾

大型橋梁の設計用加速度応答スペクトルの短周期域を建設省土木研究所距離減衰式により求め、長周期領域をOlson の地震波伝播モデル¹⁶⁾を用いて補った例である。短周期域については、過去の地震動の統計分析による実験式を用いて、0.1~3 秒のスペクトルを求め、長周期領域については、図14に示す地震波伝播モデルにより、深い地盤構造を考慮した FEM モデルで Green 関数を求め、分割された断層要素から発せられる要素地震を重ね合せした時刻歴波形を算定した後、2~10秒の応答スペクトルを求めている。加速度応答スペクトルの計算結果を図15に示す。

(3) 周期帯別地盤構造を考える横山の方法の例¹⁸⁾

横山は足柄平野の地震動予測を行うために、基盤地震動を入力として、3秒以上のやや長周期領域における深い地盤構造の增幅効果に着目した堆積盆地の2次元FEM モデルの地盤応答と、3秒以下の短周期領域に着目した1次元振動重複反射モデルの地盤応答を時

間領域で合成し、地表面地震動を求める方法を示した。足柄平野の解析モデルを図16に、計算結果を図17に示す。

5. 研究成果の工学的利用の現状と課題

やや長周期地震動に関する研究成果の工学的利用については、2～3章でみた如く、長周期構造物の設計基準や指針で、設計用地震入力を設定する際にやや長周期成分の影響を考慮して設定する必要のあることが説かれてはいるものの、具体的に、研究で明らかにされた現象をとり入れた設定法が示されている分ではない。

その事由の一つとしては長周期構造物の大地震における地震応答を判断するのに必要なこの周期帯を正確にとらえた地震動記録が少く、かつ、対象構造物の大震験経験もないことが挙げられる。もう一つの事由は、やや長周期地震動の特性については震源の断層運動や敷地周辺の広範囲にわたる深い地盤構造や地形の影響を考慮しなければならないが、これを適正に評価するために必要な各地域毎の研究とデータの整理が一部の地域に片寄り全国的には整っていないことである。

このような状況からみると基準、指針への反映という意味では、研究成果が利用される段階には到っていない。

ただし、特定の地域に限れば、4章では示したように、ある程度長周期地震動現象を考慮した設計入力設定が可能であり、この意味では、研究成果が充分活かされているといえよう。

以上、やや長周期地震動に関する工学的利用の現状をみてきた。これらをふまえて、研究成果を実際の耐震設計に活用するためになされるべき今後の課題を示す

参考文献

- 1) 横田治彦、他：1923年関東地震のやや長周期地震動 建築学会論報集 401号 1989
 - 2) 工藤一嘉：深い地盤による長周期地震動の卓越 第12回地盤震動シンポ 1984
 - 3) 森岡敬樹：1923年関東大地震の地動 第4回地盤震動シンポ 1976
 - 4) 1968年十勝沖地震災害調査報告 日本建築学会 1968
 - 5) 1983年日本海中部地震震害調査報告書：土木学会 1986
 - 6) 1985年メキシコ地震災害調査報告 日本建築学会 1987
 - 7) 鮎谷洋史：やや長周期微動による深層地盤探査の問題 第17回地盤震動シンポ 1989
 - 8) 横田治彦、他：東京で観測されるやや長周期地震動とその特性 第7回日本地盤工学シンポ 1986
 - 9) 横山正義：新潟におけるやや長周期地震動と堆積盆地地形の関係 構造工学論文集 Vol.36 1990
 - 10) 岩崎好規、他：大阪平野の深層構造に起因する地震動の特性解析の試み 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告 第2号 1988
 - 11) 四田成幸、他：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み すと以下の通りである。
 - (1) 地震活動の地域性に着目し、地域に及ぼす影響の大きな特定の震源特性を明らかにする。
 - (2) 地盤震動の地域性に着目し、各地域の深い地盤構造の解明を含めて、その成因を明らかにする。
 - (3) やや長周期地震動の解明に有効な観測体制の確立とデータの蓄積を計る。
 - (4) やや長周期成分を含む地震動が、構造物に与える影響を定量的に検討し、設計用入力としての位置づけを明確にする。
- ## 6. むすび
- やや長周期地震動の特性は深い地盤構造と強いかかりのあること、地震動の長周期成分が震源特性に大きく影響されることとは、既にこれまでの研究で指摘されてきた通りである。この意味で、各地域に固有な地震動のくせを耐震設計に考慮することは、重要であると思う。
- 一定の耐震安全性を確保する目的からすれば全国的な設計手法の標準化を図ることは重要であるが、やや長周期地震動のような地域性の強いものに関しては各地域毎に固有の設計用入力の考え方があつても良いと思う。
- 最後に、本論をまとめるに際して、日本建築センター設計用入力地震動研究委員会WG-II Cがまとめられた「日本建築センター評定、評価データの整理結果」を引用し、シンポジウム：基盤構造と地震動（1989年7月於東京大学地震研究所）における河村社一氏の講演「設計用地震動と基盤構造」の資料を参考にさせて頂いた。資料の引用、参照に快諾を頂いた関係各位に深く感謝致します。

建築学会論報集 267号 1978

- 12) 工藤一嘉：日本各地における地震動の増幅特性 第7回日本地盤工学シンポ 1986
- 13) 北川良和、他：地震動の地域特性に関する研究 建築学会論報集 277号 1979
- 14) 琴川三郎、他：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定 建築学会論報集 282号 1979
- 15) 河村社一、他：地盤と建物の相互作用を考慮した耐震判定指標 建築学会 九州大会梗概集 [B] 構造 I 591～596 1989
- 16) Olson, A. II et al.: The discrete wave number/finite element method for synthetic seismograms. Geophys. J.R. Astro. Soc., Vol. 77 1984
- 17) 横山正義、他：（仮題）斜張橋の弾塑性地震応答解析 （構架 1990年8月号 投稿予定）
- 18) M. Yokoyama, et al.: Estimation of motion at Ashigara valley by two-dimensional finite element method. Proc. of National symposium on effect of surface geology on seismic motion 251～256 1989

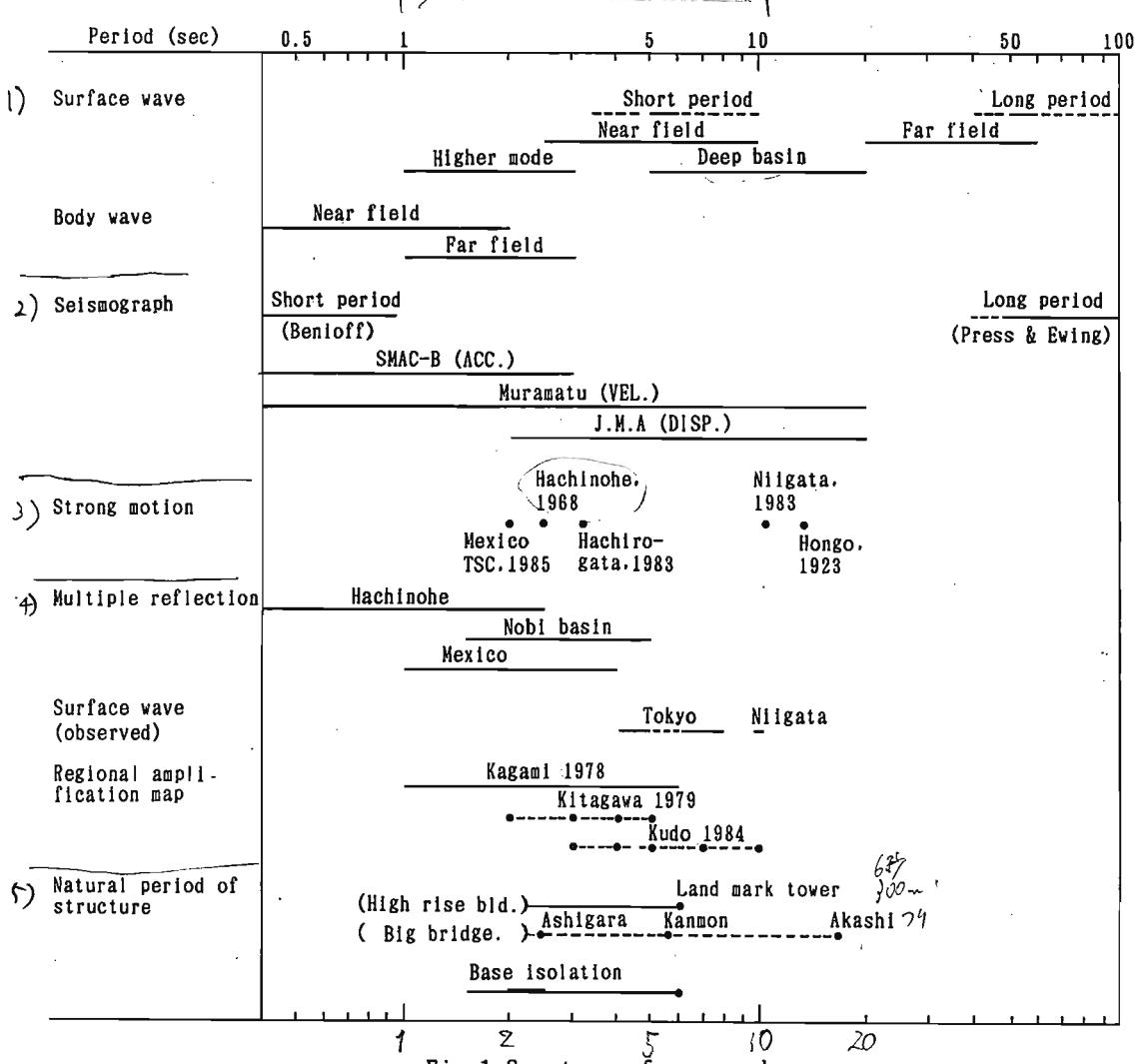


Fig.1 Spectrum of research

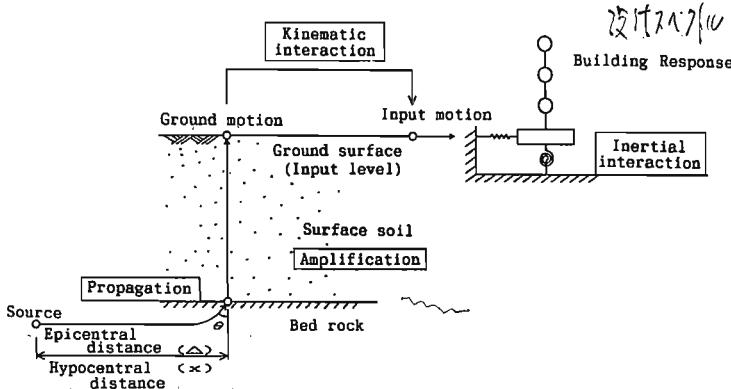


Fig.2 Outline of seismic propagation
(Kawamura 1989)

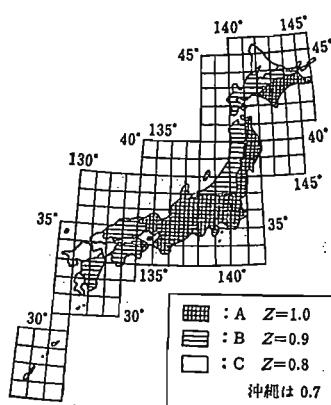
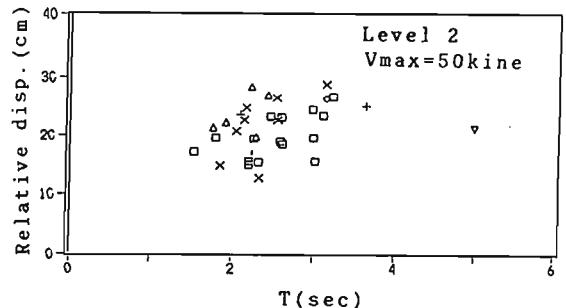
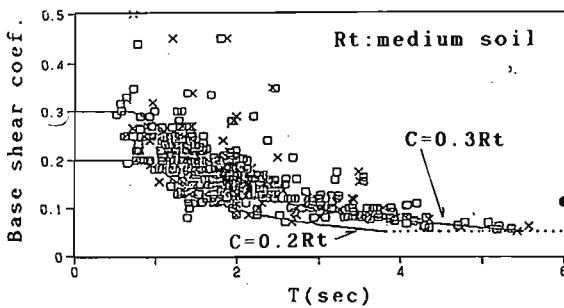
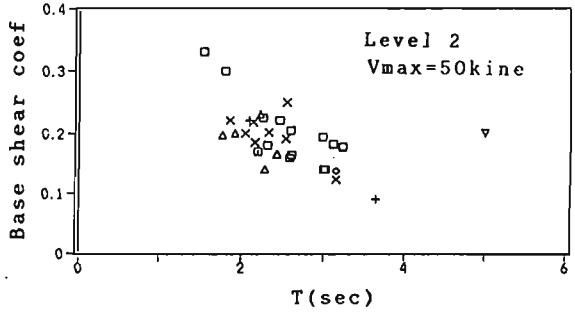
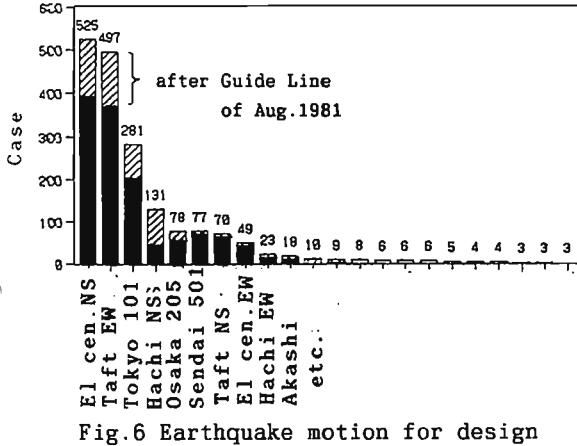
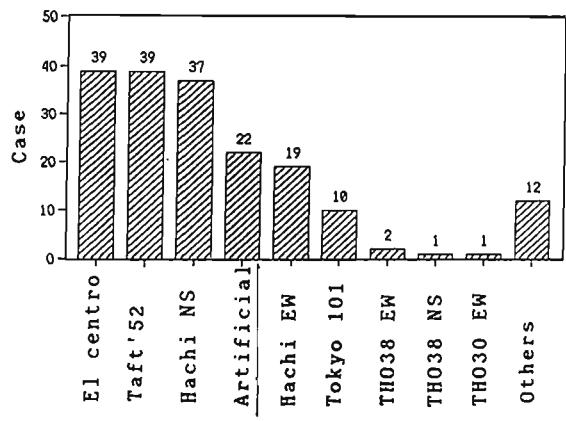
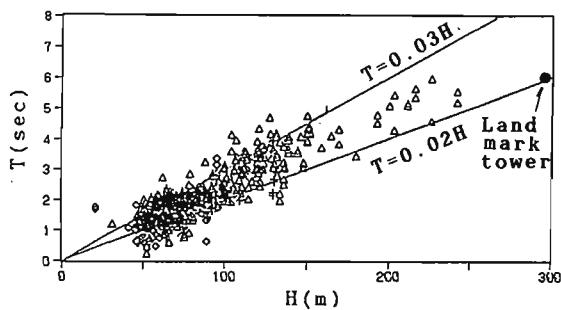
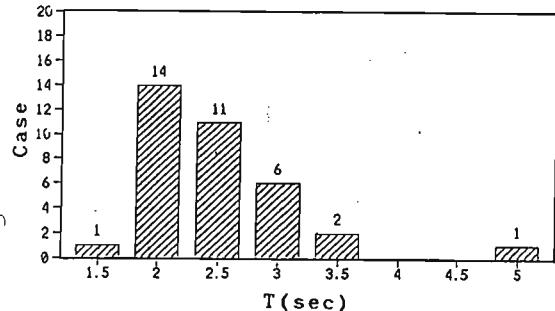
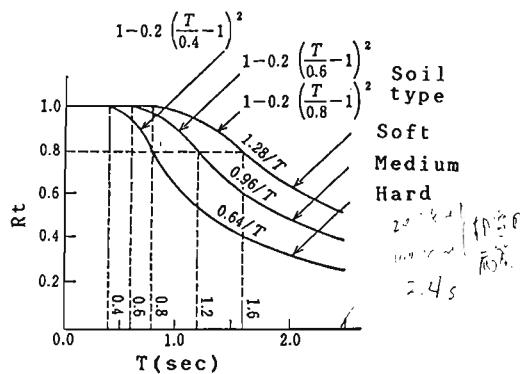


Fig.3 Zoning coefficient



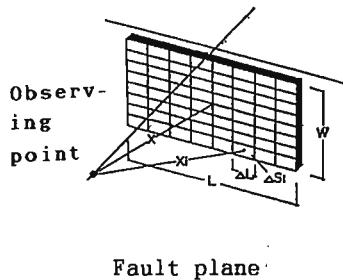


Fig.12 Division of fault and envelop of incident wave (Midorikawa 1979)

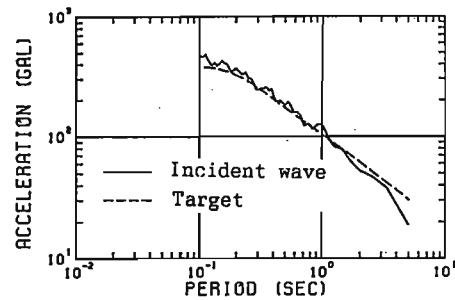
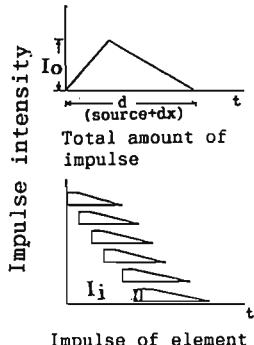


Fig.13 Response spectrum of incident wave from bed rock (Kawamura 1989)

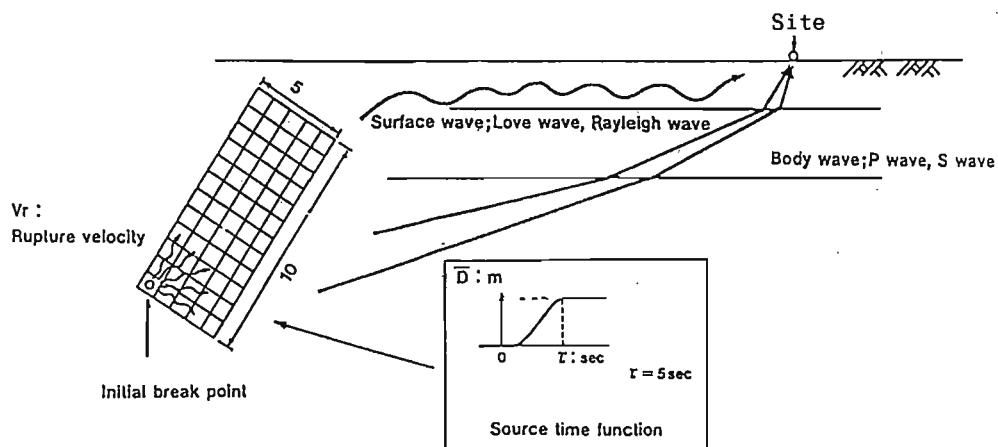


Fig.14 Image model of Olson's method (Olson 1984)

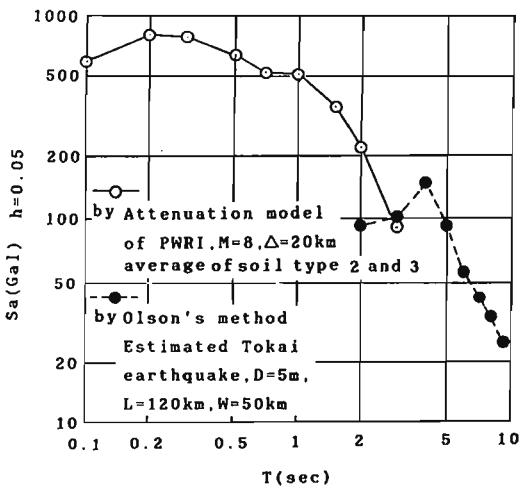


Fig.15 Response spectrum for bridge design (Yokoyama 1990)

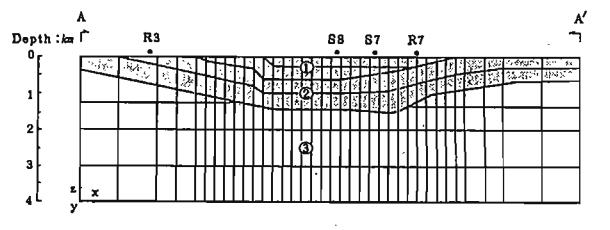


Fig.16 2 Dimensional FEM model of Ashigara basin (Yokoyama 1989)

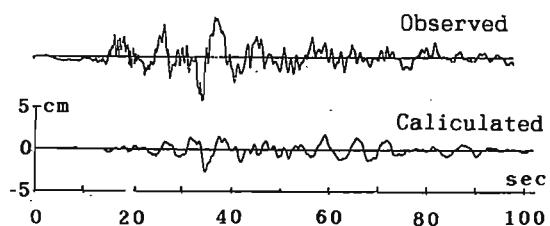


Fig.17 Estimated ground motion (Yokoyama 1989)

石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動

Liquid sloshing of oil storage tank and long period ground motion

座間 信作

Shinsaku Zama

This paper presents the damage to cylindrical liquid storage tanks due to liquid sloshing. The damage is classified as (a)Buckling or failure of the fixed or floating roof, (b)Failure of the accessories of the floating roof, (c)Separation of the perimeter weld between the roof and the tank shell, (d)Overflow of the liquid, and (e)Occurrence of the fire in and around the tank.

And, also clarifies the behavior of liquid sloshing of a large cylindrical tank by the observation of the sloshing and seismic ground motions. Sloshing is explained as the resonance between liquid motion in a tank and ground motion, and well estimated by the 3-D response analysis. As the maximum wave height of liquid sloshing is easily calculated if Sv (damping $\approx 0.1\%$) is given, Sv at the tank site can be estimated as a function of period, by using the data of maximum wave height measured at many tanks after an earthquake. This is very important, because most of tank sites have not seismographs which can measure the long period ground motions.

1. はじめに

やや長周期地震動を扱った論文の緒言に必ずといってよい程取り上げられるものに屋外貯蔵タンク内容液の揺動（以下、石油タンクのスロッシングという）がある。石油タンクはJ I C S Tでは特殊構造物に分類されており、建築の分野では一般的ではないかも知れない。しかしやや長周期地震動によって励起されたスロッシングによって唯一被害を受けており、これが論文の緒言に取り上げられる所以となっているのであろう。

石油タンク（スロッシングを含む）に関する規則は消防法令にあり、馴染みが薄いと思われる。そこでこの小文では、先ず石油タンクに関する基礎的事項について概観し、次いでスロッシングによる過去の石油タンク被害事例について紹介する。更に、やや長周期地震動による石油タンクのスロッシング現象を観測、解析に基づき明らかにし、問題点を提示することにする。

2. 石油タンクに関する基礎的事項

・石油タンクの種類

タンクは地中（含む岩盤）、地上タンクに大別される。ここで扱う石油タンクは地上タンクに属し、更に地上タンクはガスホルダーと液体貯蔵用タンクに分けられ、石油タンクは後者に属する。液体貯蔵用タンクは更にいくつかに分類されるが、ここでいう石油タンクはその中の円筒縦型タンクである。

石油タンクは一般に屋根の形状によって分類される（Fig.1）¹⁾。開放型は、屋根付タンクに比べ安い費用で建設されるが、爆発や火災を引き起こす可能性のある液体等は貯蔵できない。固定屋根式（Fig.2）は、揮発損失が比較的少ない石油類（重油、灯油、軽油等）の貯蔵に多く用いられ、一般に容量約4万kl以下のものに多く採用されている。タンク径が大きくなるに従い、屋根自重が増し支持方法が困難となるため、大型タンクへの適用は難しい。浮屋根式（Fig.3）は直径の大きい大型タンクも製作が可能で

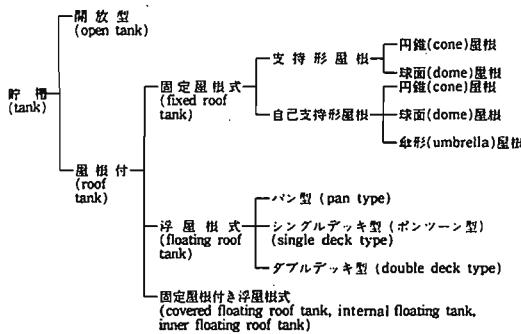


Fig.1 Classification of liquid storage tank by the roof type.

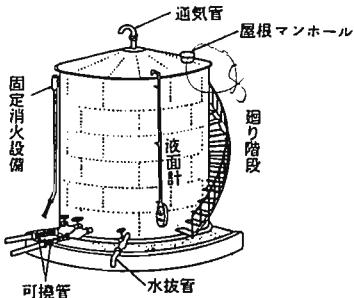


Fig.2 Typical structure of a cone roof tank.

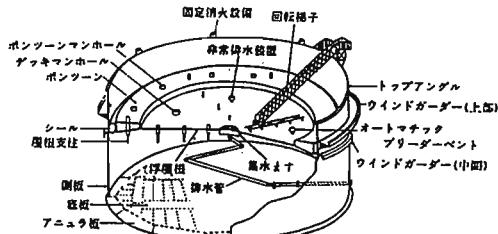


Fig.3 Typical structure of a floating roof tank.

あり、原油やガソリン等揮発損失を考慮する必要のある石油類の貯蔵に多く用いられる。屋根と側板のシール部から雨水が侵入するので、貯蔵液体の品質保証が要求されるものには採用されない。大規模石油備蓄の主力をなすものである。固定屋根付浮屋根式は揮発損失が多く、貯蔵液に雨水の混入を避けたい場合等に多く用いられる。石油タンクは万一爆発が発生した時に周囲への影響を最小限にとどめるために、屋根が吹き飛ぶように設計されている。浮屋根式はもちろんあるが、固定式では屋根板と側板との接続部が最も弱く溶接されている²⁾。

・石油タンクの分布

Fig.4に容量1,000kl以上 の特定屋外貯蔵タンクを有する石油コンビナート等特別防災区域（黒丸）を

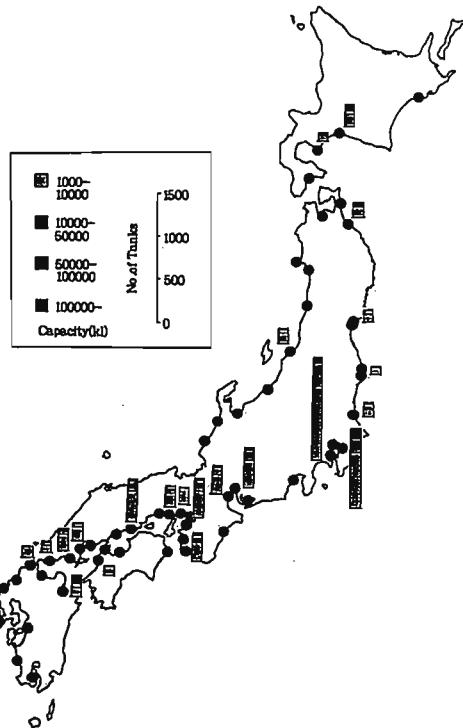


Fig.4 Location of the districts having tank with a capacity of more than 1,000kl.
Bars indicate the number of tanks by capacity.

示す。但し当該区域が極めて近いものはまとめて1点としている。また沖縄県は描かれていない。内訳棒グラフは容量1,000kl以上の石油タンクを100基以上持つ区域の容量別（千～1万kl, 1万～5万kl, 5万～10万kl, 10万kl以上）タンク基数を示したものである（平成元年4月1日現在）。1,000kl以上の石油タンク数は8,244基で東京湾沿岸だけでその1/4以上を占めている。全体の内訳は、千～1万kl：5,530基, 1万～5万kl：1,783基、5万～10万kl：524基、10万kl以上：407基となっている³⁾。

3. スロッシングによる被害事例

地震による石油タンクの被害は多種にわたる⁴⁾が、その形態を地震動の特性（短周期、やや長周期地震動）から分類すると、主に次のようになる。

・短周期地震動によるもの

側板下部の座屈、側板とアニュラ板接合部の破壊、タンクの傾斜・沈下、横ずれ、転倒、接続配管の破損、アンカーボルトの引き抜け等。

これらが原因となった二次的被害の最も大なるものとして底部からの貯液の流失が挙げられる（1978年宮城県沖地震等）。

- ・やや長周期地震動によるもの

貯液の溢流、固定屋根の破損・変形、浮屋根・ポンツーンの座屈・破損、回転梯子・踊り場の損傷、ウェザーシールドの損傷、消火・散水・融雪用等の配管設備の損傷、ガイドポール・ゲージポール等の変形、エアーホームダムの変形等。

これらはスロッシングによるもので、1964年新潟地震等で大規模なタンク火災をもたらした。

以下、国内外のスロッシングによるタンク被害状況を年代順に述べる。

(1)関東地震(1923.9.1 M=7.9)⁵⁾

横須賀軍港箱崎山の山腹造成地にあった総貯蔵量約10万tの重油タンク群が壊滅的な打撃を受けた。このうち、容量6,000tの満液タンクでは屋根板を突き破って、油が間欠的に溢流したといわれ、その際発火・炎上・爆発に至ったと報告されている。

(2)ロングビーチ地震(1933.3.10 M=6.3)⁶⁾

被害のほとんどが配管廻りとされており、一部スロッシングによると思われる水タンクの屋根が飛ばされた例が報告されている。

(3)カーン郡地震(1952.7.21 M=7.7)⁷⁾

震央付近の製油施設に多くの被害があり、スロッシング固有周期6~7秒程度の浮屋根式タンクに貯液の噴出・溢流が生じている。また浮屋根が回転し、シール部等が破損したタンクがあった。

(4)アラスカ地震(1964.3.27 M=8.3)⁸⁾

スロッシングによる被害が多くみられた地震として、後述の新潟地震とともにスロッシングの研究に影響を与えた地震である。震央から150km以内の4地区にタンク群があり、原因は不明であるが3地区で発火炎上している。この地震で、浮屋根の座屈・固定式屋根の陥没、旋回流によるガイドポールの屈曲、回転梯子の脱落・変形、屋根・側板接合部の破損、浮屋根及びその付属設備の破損等、スロッシングによるタンクの代表的な被害形態がみられた。

(5)新潟地震(1964.6.16 M=7.5 h=40km)⁹⁾

製油所内の3万kI浮屋根式タンクがスロッシングを起こし、浮屋根が3~4回大きく揺ればね上がった

とき、タンク側板を越えて溢流した原油に着火したことが目撃された。このタンク火災は隣接のタンクを巻き込み約半月間燃え続けた。ちなみにこのタンクの諸元は直径51.5m、高さ14.5m、液面高さ（推定）13.05m、空間高さ1.45m、スロッシング固有周期8.8秒である。この他、スロッシング波頭による屋根と側板との接合部の破断とそれに伴う油の流出、屋根骨の倒壊、側板上部の変形、ゲージポールの曲がり、ポンツーン、デッキ、シール機構の損傷等が認められた。

(6)チリ中部地震(1965.3.27 M=7.3 h=61km)¹⁰⁾

震央の南西約50kmにあったConcon製油所において、浮屋根式タンク2基の屋根、回転梯子が変形し、その内の1基で原油の溢流があった。

(7)サンフェルナンド地震(1971.2.9 M=6.4)¹¹⁾

タンクの被害は比較的軽微であった。震央から南へ約60km離れたLong Beach、西南西に約70km離れたOxnardで、浮屋根の回転、沈没がみられた。

(8)宮城県沖地震(1978.6.12 M=7.4 h=40km)¹²⁾

東北石油仙台製油所内の2~3万kIタンク3基の側板と底板の接合部付近で破断が起り、約7万kIの油が流出した被害が注目された。スロッシングによる被害としては浮屋根上への貯液の漏出、回転梯子の変形・座屈シール板の変形・破断、固定消火設備の損傷等が挙げられる。

(9)インペリアルバレー地震(1979.10.15 M=6.6)¹³⁾

インペリアル断層から約5kmにあるエルセントロ発電所の6基の燃料油タンクのうち最大のタンク（固定屋根式、容量約14000kI）において、屋根の損傷、屋根と側板の溶接部の開口、貯液の溢流があった。他のタンクでも僅ながら同様の被害があった。

(10)コーリンガ地震(1983.5.2 M=6.5 h=10km)¹⁴⁾

コーリンガー市街の北~北東に位置する6ヶ所のタンクサイトにある石油タンクにおいて、"elephant foot"と呼ばれる側板下部の座屈、底板の亀裂、浮屋根の損傷、貯液の溢流、固定式屋根の損傷及び配管の継手部の損傷等の被害があった。スロッシングによる浮屋根の損傷は11基のタンクでみられ、油の溢流を起こしたタンクが多数あった。なおタンクサイトでの地表最大加速度は0.39~0.82gとされている。

(11)日本海中部地震(1983.5.26 M=7.7 h=14km)¹⁵⁾

この地震で震源に近い秋田のみならず、遠くはなれた新潟、苫小牧で石油タンクに被害が認められた。スロッシングについては多数のタンクで貯液の揺動の痕跡、溢流、浮屋根と付属設備に損傷が認められている。このようなスロッシングに着目して液面波高の測定や詳細な被害調査が行なわれたのが本地震の特徴で、その後の石油タンクのスロッシングに対する安全性についての問題提起の契機となった。秋田では浮屋根・付属設備と側板内部に突出した設備とが衝突したことによってリング火災が発生した。新潟では浮屋根式タンクから貯液が溢流し、中にはスロッシング波高が4.5mにも達したものもあった。

これらの被害に対し、ウェザーシールドの材質を金属以外のものにする、タンク側板内部の各種設備を可能な限り突出させない、必要な空間容積を確保する等を中心に総合的な対策が考えられている。また地震によってはタンク頂部からの貯液の溢流が避けられないことがあり、これに対し引火防止、溢流危険物の拡散防止等の対策が講じられている。スロッシングの制振方法についてはいくつかの研究がなされている¹⁶⁾が未だ実用化には至っていない。

4. スロッシングの観測

前節で示したタンク被害をもたらすスロッシングについては古くから多くの理論・実験的研究がなされている^{17)、18)}ものの、実際の大型石油タンクのスロッシング挙動の観測はあまり行なわれていない。ここでは川崎市にある10,000kL水タンクでの観測とその解析結果^{19)、20)}について述べる。

スロッシング観測はFig.5に示すように固定屋根式のタンクに液面計2台、動水圧計2台を取り付けて行なわれている。また地震動観測はタンク近傍の地中(GL-1m)において0.04~30Hzで平坦な周波数特性を持つ速度型強震計によって行なわれている。

スロッシングを発生させた地震の特徴としては、概して地震規模が大きく、震源が遠くかつ浅いことが挙げられる。しかし1987年千葉県東方沖地震では近くでやや深いにも拘らず、1984年6月以来の観測期間中最大のスロッシングが発生している。

スロッシングを起こした地震の典型的な地震波形

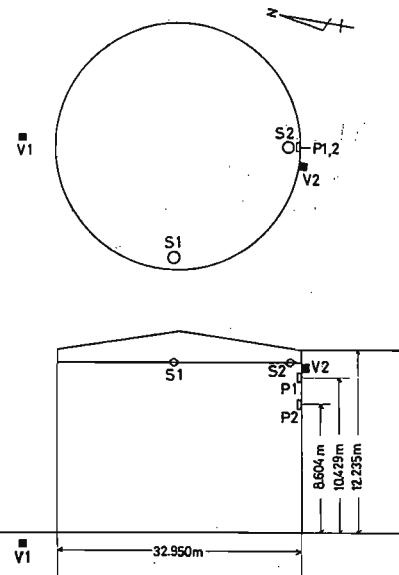


Fig.5 Outline of the observation system.
V:velocity type seismometer. S:liquid-level meter.
P:dynamic hydraulic pressure guage.

と液面変位記録をFig.6に示す。ここでEW, NSは地震動の東西、南北成分を、S1, S2はタンク西側及び南側に設置された液面計による記録である。この地震(1984年9月19日房総半島南東沖、M6.6、△=230km、深さ13km)の主要動はP波初動から約25秒後に始まり、約1分間継続しているが、この間の液面変位記録には際だった挙動はみられない。一方、スロッシングは180秒付近で急に励起され、以降殆ど同程度の振幅をもって続く。この180秒付近の地震記録を見ると、やや周期の長い波が3~4波あり、この波群がスロッシングを大きく励起させたものであることが分かる。この波群の平均周期は約6.7秒で地震時のこのタンクのスロッシング基本固有周期6.78秒に極めて近い。このことからスロッシング現象は、タンク貯液の地震動に対する共振現象であることが明瞭にみてとれる。

1984年長野県西部地震でも明瞭なスロッシング記録が得られている(Fig.8参照)。上述したようにスロッシング現象の把握には基本固有周期が重要なfactorとなっている。Fig.7はスロッシング記録から得られる固有周期と速度ボテンシャル理論から得られるそれ(図中矢印)と比較したもので、5次モードまで一致している。

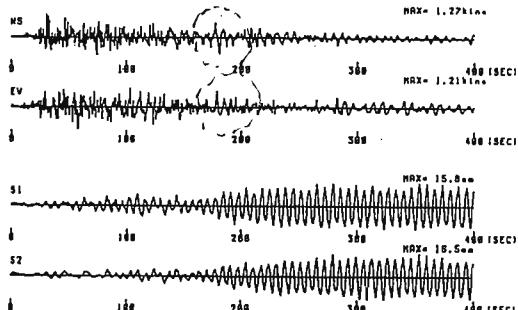


Fig. 6 Example of typical seismic and sloshing waveforms.

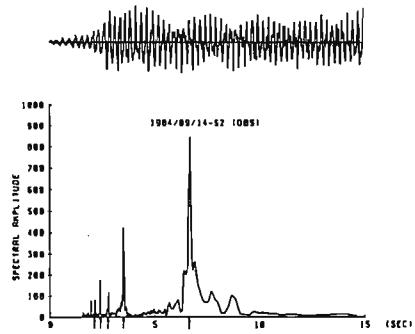


Fig. 7 Fourier amplitude spectrum of the sloshing waveform.

Arrows under the horizontal axis indicate the theoretical natural periods of sloshing during the 1984 Naganoken Seibu earthquake.

スロッシングの減衰定数もスロッシング応答計算には極めて重要で、この記録の430~720秒の間の振幅の変動から求めると、0.069% ($\pm 0.05\%$) となり、従来からよく用いられている減衰定数0.1%という値に近い。

5. スロッシング応答解析

タンクヤード内で得られた地震記録をタンクへの入力地震動とし、スロッシングの応答を求め観測波形と比較する。タンクの本体、基礎を剛、貯液を非圧縮性流体で満たし、微小波高であると仮定すると、速度ボテンシャルが存在し連続の式が成立する。これに境界条件を与えることによって3次元入力地震動に対するスロッシングの応答を求めることができる¹⁹⁾。その結果をFig.8に示す。最大波高については観測値と計算値とはよい一致が得られている。また波形についても若干高次モードのずれが認められるもののよくシミュレートできていることが分かる。このように地震動が与えられればスロッシング応答

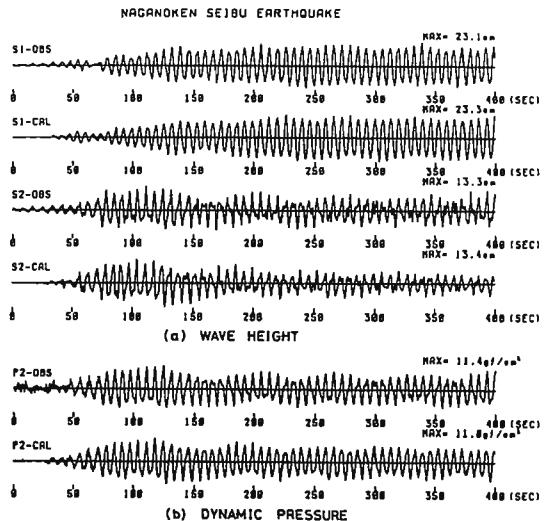


Fig. 8 Comparison between the observations and calculations with respect to the sloshing wave height(a) and the dynamic pressure(b) due to the 1984 Naganoken Seibu earthquake.

はかなりの精度で評価できる。この場合は、最大波高が20cm程度と小さく微小波高の仮定が成立する範囲にあるが、波高が大の時この仮定は崩れ非線形応答解析を行なう必要がある。しかしその場合でも、例えば島田他(1986)²¹⁾から線形応答解析結果の10%程度の増大を考えればよいことが分かる。

6. タンクサイトでの速度応答スペクトルの推定

スロッシングの最大波高(η)の算定式としてよく用いられる速度応答スペクトル法²²⁾では、

$$\eta \sim D/2g \cdot 0.837 \cdot (2\pi/T_s) \cdot Sv$$

ここで、 D, g, T_s, Sv は、各々タンク直径、重力加速度、スロッシング基本固有周期、速度応答スペクトルである。この式は、一方向のみの加振を受けたときの1次モードのみを考慮した場合のものであるが、前節で述べた3次元応答解析法による結果と大きくは異なる。 T_s はタンク直径と液深が与えられれば求めることができ、その精度は4節で示した通りである。日本海中部地震の時の ように側板の油痕から最大波高を測定できる。従って上式を用いることによって速度応答スペクトルを推定できる。諸元の異なるタンクが多数あればその地域での減衰約0.1%のSvを周期の関数として求めることができる。Fig. 9a²³⁾は日本海中部地震の際、苦小牧で得られたスロ

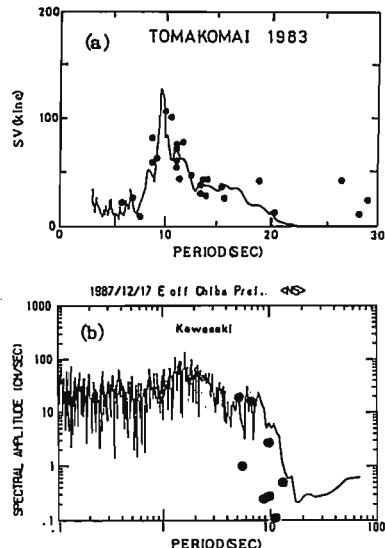


Fig. 9 Velocity response spectra estimated from the sloshing data and the acceleration spectra.
(a) Tomakomai in the 1983 Japan Sea earthquake.
(b) Kawasaki in the 1987 Chibaken-Toho-Oki earthquake.

スッシング波高から求めたSvと苦小牧測候所の一倍強震計記録から得た加速度スペクトルとを重ねて示したもので、両者の対応は極めてよいことが分かる。即ちSvさえ正確に与えられればスロッシング応答はかなりの精度を持って評価できることが分かる。同様にFig.9b²⁸⁾は1987年千葉県東方沖地震の際の川崎の場合である。スロッシングデータは少ないが、Svの上限は数秒から10数秒のスペクトルにはほぼ一致している。この場合、スロッシングデータから得られたSvは、ほぼ等しいスロッシング周期を持つタンクでも異なっているのが認められるが、この原因として、データが1台の液面計による計測であるため必ずしも最大波高を与えているわけではないこと、ガイドポールの位置等のタンク本体の構造が異なること等が挙げられる。従って、多数のタンクについて波高の測定をすることが必要となる。1000k1以上の石油タンクを有する特定屋外貯蔵所ではやや長周期地震動を測定できる地震計が殆ど無い²³⁾状況を考えると、比較的大きな地震の度にスロッシングデータを収集することが極めて重要となる。

7. おわりに

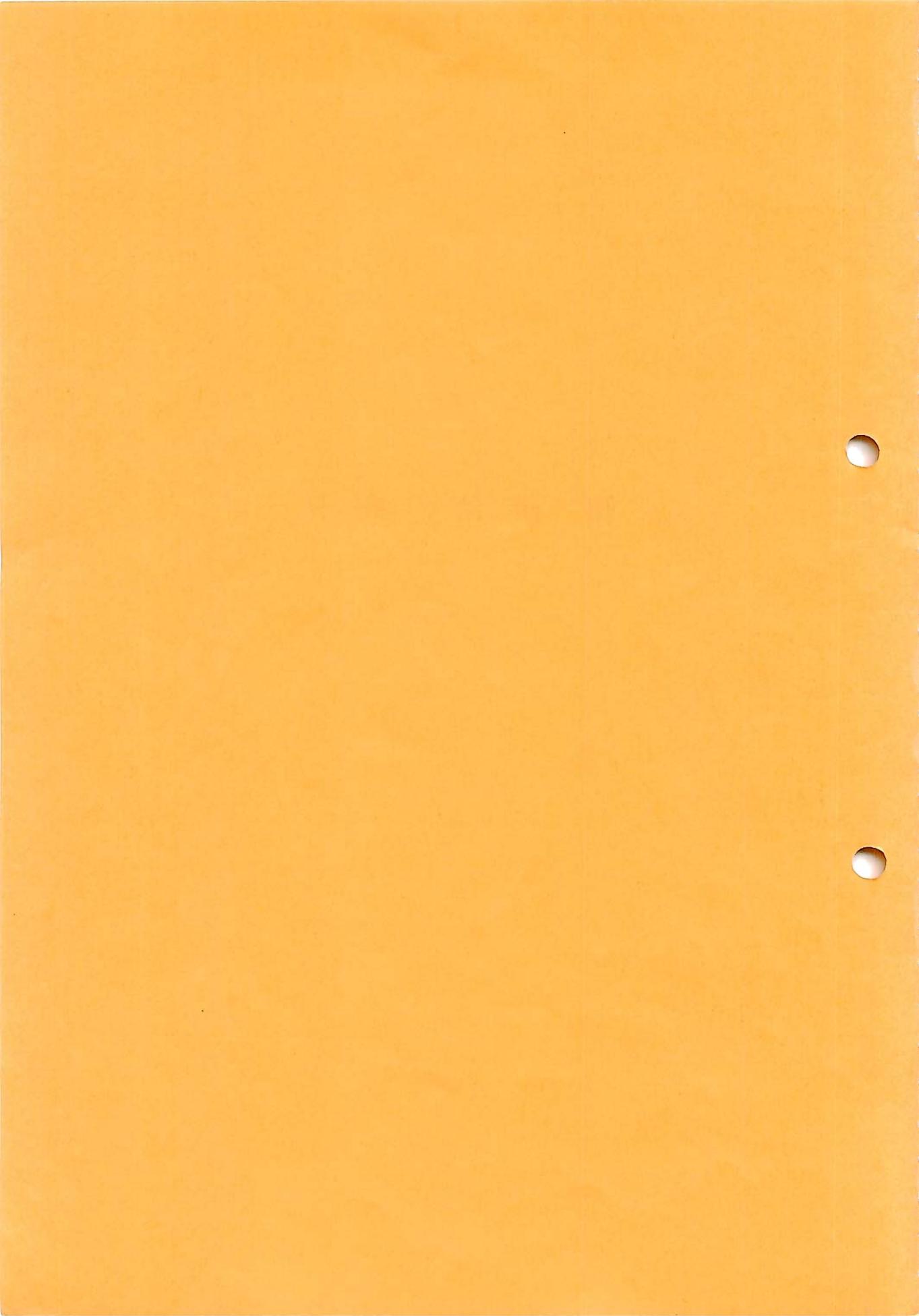
スロッシングによるタンク被害の予測には速度応

答スペクトルの評価が絶対的な意味を持つ。現行の空間容積の確保の計算式²⁴⁾に用いられているSvの値は周期・地域に関係なく一律113kineとなっている。しかし過去の地震記録の解析からこれを上回るものも報告されている²⁵⁾。一方でこれらの地震に対し基準値を下回る地域も多く存在するし、周期についてみても同様のことがいえる。従って地域、周期特性を考慮したSvの評価が要求される。

参考文献

- 1) 危険物保安技術協会：屋外貯蔵タンクの基礎知識(1983)
- 2) 岡林郁夫：石油タンクの基礎的理論と実際、鹿島出版会(1983)
- 3) 消防庁特殊災害室：石油コンビナート等災害対策関係資料(1989)
- 4) 危険物保安技術協会：スロッシング現象に関する文献的調査検討報告書(1986)
- 5) 平野正勝：水路、41(1982)
- 6) Wiegel,R.L ed.: "Earthquake Engineering", Prentice-Hall(1970)
- 7) Steinbrugge,K.V. and D.F.Moran:B.S.S.A.,44,(1954)
- 8) Rinne,J.E: "The Prince William Sound Earthquake of 1964", II-A,U.S.Department of Commerce(1967)
- 9) 消防庁編：新潟地震火災に関する研究、非常火災対策の調査研究報告書、全国加除法令出版(1985)
- 10) 柴田 碧：生産研究、26-7(1974)
- 11) 柴田 碧：生産研究、23-8(1971)
- 12) 消防庁危険物技術基準委員会：東北石油仙台製油所石油タンク破損原因調査報告書、および同付属書(1979)
- 13) Horoun,M.A., J.Tech.Topics in Civil Engineering 109-1(1983)
- 14) Manos,G.C and Clough,R.W: Earthquake Engineering & Structural Dynamics,13(1985)
- 15) 吉原 浩、座間信作、亀井浅道：消防研究所技術資料,14(1984)
- 16) 例えは、榎本梅六：安全工学、7-3(1988)
- 17) Senda,K. and K.Nakagawa,Tch.Rep. of the Osaka Univ.,117(1954)
- 18) 曽我部潔、重田達也、柴田碧：東京大学生産研究所報告,26(1977)
- 19) 座間信作、吉原浩、亀井浅道：消防研究報告61(1986)
- 20) 座間信作、吉原浩：消防研究報告67(1989)
- 21) 鳥田三朗、山田晋一、家村浩和、野田茂：土木学会論文集365(1986)
- 22) 坂井廉一：圧力技術, 18(1980)
- 23) 自治省消防庁：屋外タンクのスロッシングに関する調査結果報告書その2(1980)
- 24) 自治省：告示第119号(1983)
- 25) 松本智良、井上涼介、安達基久：地震学会講演予稿集(1985)

III. 研究の蓄積



震源過程の取り扱いなどについて

Review of the research on strong ground motion
in the period of 2 to 20 sec

井上 涼介
Ryosuke Inoue

Recent studies on source process and estimation of Green's function in the period of 2 to 20 sec are reviewed to develop the method of more quantitative prediction of strong ground motion in this period range. A lot of data are needed for this purpose, and it is proposed that seismograms recorded by JMA 59-type displacement seismometer with magnification of 100 are to be analysed.

[1] はじめに

本稿では、やや長周期帯域（約2～20秒）の強震動予測にまつわる話題について、震源過程の取り扱いを中心述べる。但し、最近の研究については4.(1),(2)などで各著者から触れられると思うので、ここでは、まずそれらへのつなぎとしてやや古い研究を紹介し（[3]～[6]）、次いで、現行の強震動予測法の問題点（[6]）、気象庁地震計記録の利用（[7]）といったテーマについて、ややアラカルト的に述べる。

[2] 断層モデル

断層モデルによる地動の数学的表示、すなわち断層面上での任意の「食い違いの時間一空間関数 $D(x, y, t)$ 」に対する地動 $U(t)$ は

$$U(t) = \iint_S \dot{D}(x, y, t) * G(x, y, t) dS \quad (1)$$

ここに、*は時間合積を、 \dot{D} は食い違い速度を、 G はダブルカップル点震源に対する媒質のインパルス応答（グリーン関数）を、それぞれ表す

と書ける。右辺の被積分関数の \dot{D} の項が震源過程を、 G が伝播経路による項を、それぞれ表している。断層モデルにおいては、与観測記録から震源過程を推定する際にも、逆に与震源過程から強震動予測を行う際にも、この式が基礎となる。

[3] 巨視的モデルとその工学的应用

式(1)において、 D の関数形と破壊の伝播速度 V_R を面上で一定としたモデルを以後「巨視的モデル」と呼ぶことにする（井上1986, 1988）。 D の関数形としては「傾斜関数」（Haskell 1964）、「指指数型関数」（Brune 1970）などが用いられる。震源過程を断層の長さ(L)、幅(W)、破壊伝播速度(V_R)、食い違いの最終変位(D_f)、立ち上がり時間(τ)の5ヶのパラメータで記述するモデルを「Haskellモデル」と呼ぶことがある。巨視的モデルは、主に震源のプロセスタイム（ $\sqrt{\text{断層の代表長}} / V_R, \tau$ ）より長い周期成分について、観測波形と理論波形の比較により1970年代前半に確立されたが（Kanamori and Anderson 1975）、1985年現在で、世界の約100個の浅発地震に対して巨視的パラメータの値が求められている（菊地1987）。但し、そのうち τ 、 V_R の求められている地震は、それぞれ約3割、約4割であり、それらにも数割程度の不確定性があることに注意する必要がある。

以下、巨視的モデルの工学への応用例を示す。まず、特定の地震について、この帯域における波形を求めた例を示す。工藤（1978a, b）は、巨視的モデルと半無限水平成層構造の正規モード解（例えばHarkrider 1964, 1970）を組合せて、表面波（Love波）を計算した（図1）。図より、波形の主要部に限れば、理論解は観測波形とよく一致している（後続部の不一致については[6]参照）。次に周波数領域で、地震とそれによる地動の平均像を半理論的に求めた例を示す。一様無限媒質中で細長い断層が長手方向に破壊するとき、理論上は実体波の震源スペクトルにはプロセスタイムの逆数に対応した2個の折れ点周波数 ω_1, ω_2 が生じ、加速度振幅スペクトルは $\omega > \omega_2$ の帯域で一定、 $\omega < \omega_1$ の帯域で ω^{-2} に比例する（Savage 1972）。これは「 ω^2 モデル」（Aki 1967, 震源変位スペクトルが高周波帯域で ω^{-2} に比例することにちなむ）の一種であるが、太田・鏡味（1976）は $T_c = 2\pi / \omega_2$ から決まる周期を「工学上考慮すべき周期の上限」と呼び、これ以下の周期帯域における加速度振幅スペクトル（S波）の強度を、マグニチュード M と巨視的パラメータの間の実験式と、理論スペクトルとの組合せにより推定する半実験式を導いた。また工藤（1978a）は太田らの試みを表面波（Love波の正規モード解）に拡張し、地下構造を適当に仮定することにより、東京での加速度振幅スペクトル強度を M と Δ から推定する半実験式を導いた。図2にこ

これらの式による推定値と観測値（東京での観測 SV の周期 2~10 秒の範囲での最大値）の関係を示す（工藤 1978a）。この T_c は、本来の意味からいって「巨視的モデルの適用可能な周期の下限」と読み代えるべきであろうが（この点に関しては、[4] 2) の Brune モデルも参照）、これらの試みは断層モデルの立場から地動レベルを推定する枠組みを示した点が重要である。なお、Hasegawa (1974) も北アメリカ西部の地震について、同様のことを試みていている。

[4] 震源モデル研究の展開

実際の観測波形は、巨視的モデルと簡単な媒質のモデルを組み合わせて計算した波形よりも、一般にはるかに複雑である。これは、媒質の不均質性が震源過程と波の伝播過程を複雑にするためであるが、本節と次節では、この点を考慮した震源過程とグリーン関数の評価法に関する前節以降の研究に触れる（但し、後者の研究が進歩すれば震源過程がより良く推定できるから、両者の研究は必ずしも独立ではない）。

1) 多重震源解析 震源過程を、より単純な破壊事象 (event) が時間-空間的に連鎖したものと見なして（多重震源モデル）、個々の event からの要素波形を重ね合わせたものを観測波形と比較することにより、各 event の地震モーメントや破壊開始時刻などを推定する研究を、多重震源解析と呼んでいる。その際、各 event の震源メカニズムや立ち上がり時間などは、パラメータの数を減らすために同一と仮定することが多い。同解析は Kanamori and Stewart (1978) による Guatemala 地震の解析を皮切りにして、その後数多くの大地震について研究が進められている（例えば菊地 1988）。ここでは日本の大地震を扱った研究例（対象周期数～30 秒）を表 1 に掲げる（井上 1986）。同表において、例えば 1968 年十勝沖地震についての 2 研究を比べてみると、モーメント放出の大きい箇所は略一致しているものの、各 event のモーメントの総和に関してはファクター 5 位の開きが見られる。このような不一致は他の地震の解析例についても見られる（井上 1986）。このような差は、震源過程を求める際の制約条件の差や、地下構造の仮定、観測記録の質などの要素が複合したためと思われるが、この点に関しては、今後様々な面から検討してゆく必要がある。

2) 震源スペクトルのスケーリング則 スケーリング則—すなわち、地震の規模に応じた種々のパラメータの変化のしかた—のうち、震源スペクトルのそれは、地震動の平均像を議論する場合や、地震動を模擬する際の制約条件として重要である（たとえば入倉 1984, 1989）。このスケーリング則に関しては、Brune (1970) のモデル (ω^2 モデルの一種) が、単純で簡便なことから、やや長周期帯域（たとえば Boore 1986, Houston and Kanamori 1986）から、短周期（たとえば Boore 1983, 木下 1989）にいたるまで、最も使われている（このモデルは断層面上での応力降下を一定と仮定しているので、巨視的モデルの一種と言える）。このモデルによれば、震源スペクトルと折れ点周波数 f_c は、

$$\hat{M}(w) = \frac{M_0 \cdot w_c^2}{w_c^2 + w^2} \quad \text{ここに} \quad f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 0.49 \beta \left[\frac{\Delta \sigma}{M_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\Delta \sigma$ は、 f_c 以上の帯域に本モデルを適用する場合は、もともとの定義（断層面全体でのグローバルな応力降下量）ではなく、短周期成分を規定する応力の単位をもつたパラメータ（Boore 1983, 木下 1988）とみなすべきものである。通常はさらに、 $\Delta \sigma$ が一定という仮定を付け加えるので、このモデルによれば、震源スペクトルは結局、地震モーメントだけで決まるところになる。やや長周期帯域における震源スペクトルのこのモデルからのずれについては、Koyama et al. (1982), Gusev (1983) などの研究がある。どちらも大地震になると、やや長周期帯域で震源変位スペクトルに ω^{-1} に比例する領域ができるとするモデルであるが、震源スペクトルの構造については今後さらに検討してゆかねばならない（Boore 1986, 入倉 1989）。なお、震源スペクトルは振幅スペクトルのみを対象とするが、同一の振幅スペクトルには時間領域で無数の波形が対応することを心にとめておく必要がある。

最後に、大地震の震源加速度スペクトルの短周期成分を説明するモデルとして、Papageorgiou and Aki (1983) の多重クラック・モデルに触れておく。このモデルによれば、個々のクラックから生じる地震波のスペクトルは、クラック半径に比例した折れ点周期をもつ ω^2 モデルに従い、それらの重ね合わせ方（たとえば一様ランダム）によって、断層全体のスペクトルの ω^2 モデルからのずれを表すことが出来る。

3) 多重震源の力学モデル 震源過程は力学的过程であるから、多重震源解析の結果や震源スペクトルの形状は、最終的には適当な力学モデルにより説明されなければならない。震源の多重性をもたらす断層面上での強度の不均質性を取り入れた代表的モデルとして、アスペリティー・モデル (Lay and Kanamori 1982) とバリアー・モデル (Aki 1979) があり、これらのモデルに基づく震源過程の数値シミュレーションも多数行われている（たとえば Das and Kostrykina 1986）。一方、最近の室内実験の結果によれば、断層運動中の摩擦応力は、これらのモデルや Brune モデルなどとは異なり、すべり速度に依存するという。この場合には、強度をレオロジー的に考

ねばならない（菊地1988）が、この点を取り入れた力学モデルの構築に関しては、今後の研究に待つところが大きい。

【5】グリーン関数の評価法に関する研究の展開

本節では表題のテーマについて、解析的手法（微分方程式を数値的に解く方法も含める）と半経験的手法の2つに分けて概観する。

1) 解析的手法の展開 正規モード理論では鉛直下方のみ不均質な構造（媒質）を対象とするのに対し、不規則成層構造などの2次元、3次元の不均質構造を対象とした解析手法が近年次々と開発され、特定の地点（メキシコ市など）について多くの数値計算が行われている（須藤・竹中1989）。解析的手法はモデルの各パラメータの感度解析をするのに最も有効である（Aki1988）。詳しくは、4.(3),(4)などに譲るが、近年この帯域の強震動特性に関する研究の中心が、震源の問題からこの分野に移りつつある。

2) 半経験的手法 グリーン関数をより小さい地震の実記録で置き換える「半経験的手法（Hartzell 1978）」は、解析的手法が地震波の発生・伝播過程を計算機上でシミュレーションするのに対し、いわば天然自然にシミュレーションさせた結果を用いる手法であるとも言える。Kanamori (1979) 以来、理工学双方の研究者により、観測記録に基づく有効性の検証や、強震動予測（Heaton and Hartzell 1986）に用いられ（表2）、対象周期範囲もやや長周期から短周期にまで及んでいる。本手法による波形合成法にまつわる問題点は入倉（1989）に詳しいが（次節では、それ以外の問題点にも触れる）、本手法は発想的にも大変優れており、解析的手法を使おうとする際の問題点、すなわち現時点で地下の3次元的構造が詳しく知られている地点が殆ど無いことや、数値計算にかなりの時間と手間がかかることなどを考え合わせると、今後も広く用いられて行くものと思われる。

【6】やや長周期帯域の強震動予測

断層モデルに基づいて、大地震におけるこの帯域の強震動を模擬した比較的研究例を表2に示す（藤野ほか1982、井上1986）。Kanamori(1979)による、多重震源モデルと半経験的手法を組み合わせて模擬した試み以来、工学の分野にもこの方法が急速に広まった。その精度は震源過程とグリーン関数をどこまで正確に評価できるか否かにかかっているが、これらに関しては今後の研究に待つところが大きい（前者に関しては、【4】1) 参照）。ここでは後者に関して、以下少し論じてみたい。この帯域の構造物は一般に減衰定数が小さいため、厚い沖積層が堆積していて地動の後続部が長く続く地点（東京、新潟など）を対象とした場合、後続部が応答に及ぼす影響を無視できない（例えば田中ほか1979、浜崎1982）。そのような地点では、地動特性に及ぼす伝播経路の影響が相対的に大きくなるため、後続部まで含めたグリーン関数の評価法の確立が必要となる。その際、アレー観測で調べた波形後続部の弾性波動論的性質が、一般にかなり複雑（たとえば御子柴ほか1989）であることや、【5】2)で述べた理由により、当面は半経験的手法などの実データを加味した方法が実用的であろう。藤野ほか（1982）、入倉（1984）などは、後続部まで含めて、半経験的手法で本震波形をうまく再現できた例である（但し両研究とも、対象地点は1箇所だけである；表2）。前者の場合、グリーン関数が観測点（東京本郷）と震源（伊豆）を結ぶpathでほぼ決ってしまうことと、eventの重ね合わせの個数が5個と少なかったことが、成功した理由であろう。わが国のsubduction zoneにおける一般の大地震を対象にした場合、断層の長さが100kmを越え、深さ方向の広がりも無視できないから、グリーン関数が各eventの発生位置（従ってpathの差）にかなり依存することも考えられる。野田（1986）は、小地震の実記録を用いる際に、震源深さの差による表面波動起の差を正規モード理論を用いて補正した試みであるが、波形の後続部に関しては、この方法ではうまく取り扱えない（井上1986）。後続部の扱いかたを含めたグリーン関数の正確な評価法を確立するためには、結局、わが国の東北太平洋沿岸沖のように、ほぼ同じ震源域で小地震から大地震までかなり頻繁に起こっている地震群の数多くの記録を対象にして、理論的手法から統計的手法までの様々な方法で解析を積み上げてゆくのが一番の近道であろう。

【7】気象庁地震計記録の利用

【4】、【6】でも述べたように、合理的な強震動予測手法の開発に当り、今後この帯域の地震記録のデータベースの蓄積が不可欠である。その目的に沿った観測網も、近年、着実に整備されつつある。東京を例にとれば、東工大の17地点（村松式速度計など）、国立防災センターの29地点（江東区20、府中9；電磁式速度計）、大林組の4地点（電磁式速度計）など、各機関がアレー観測を実施している。後続波群の詳しい解析などは、これらのアレーによる記録に待つところが大きい。ただ、現状ではこれらの記録は一般的な研究者が利用できないことに不満が残る。そこで、気象庁地震計—すなわちWiechert式地震計、59型電磁地震計、一倍強震計、87型電磁強震計など（図3）による記録の利用が考えられる。気象庁地震計の記録は、観測点間の距離が大きい（数十km）ものの、観測網が全国に展開されている、昭和初期からの主な地震記録が各官署で保存されている（59型直視式地震計を例にとると、1成分でも全振幅が1cm以上の記録紙は永久保存される（気象庁地震課1982））といったメリットも

加わる。一倍強震計の記録に関しては、筆者らの提案がきっかけとなって（土木学会1982）、これまで多くの機関で大地震の記録の数値化が進められてきた。Wiechert式および59型地震計は、観測対象の地動レベル（周期数秒）で 10^{-1} mm程度と、微動（同 10^{-3} mm程度）と一倍強震計の対象レベル（同10mm程度）の間にあり、 $\Delta =$ 数百kmの地点を例にとると、M=5~6の地震が対象となる。これらの地震計による記録の波形全体を使った解析は、筆者の知る限りこれまで殆ど成されてこなかったが、筆者は今後、これらによる豊富な記録を使って、[6]で述べたような波形後続部の解析、半経験的手法による波形合成法の検討、改良、などの諸テーマについて研究を進めて行きたいと思っている。また、これらの記録の波形後続部とやや長周期微動および地下構造との関係（鏡味1989）、あるいは「やや長周期ゆれやすさ」との関係（岡田・鏡味1978）の検討なども今後に残された重要なテーマであろう。

[8]あとがき

筆者の勉強不足から、最近の研究については余り紹介出来なかつたことをお詫び申し上げる。この点については発表時にできるだけ補足したい。

[謝辞]

[3]の内容のアウトラインは、地盤震動小委員会の席上、工藤氏から示された。木下氏、佐間野氏からは、それぞれ防災センター、東工大の観測網などに関し、御教示頂いた。ここに謹んで感謝の意を表する。

[参考文献]

- Aki,K.(1967): Scaling law of seismic spectrum, Jour. Geophys. Res., 72, 1217-1231.
- Aki,K.(1979): Characterization of barriers on an earthquake fault, J. Geophys. Res., Vol.84, 6140-6148.
- Aki,K.(1988): Seismological synthesis of strong ground motion, Proc.9WCCE, Vol.VIII, 9-17.
- Boore,D.M.(1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1865-1894.
- Boore,D.M.(1986): Short-period P- and S-wave radiation from large earthquakes: Implications for spectral scaling relations, Bull. Seism. Soc. Am., 76, 43-64.
- Brune,J.N.(1970): Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
- Das,S. and B.V.Kostrov(1986): Fracture of a single asperity on a finite fault: A model for weak earthquakes?, Earthquake source mechanics, Maurice Ewing Vol.6, Am. Geophys. Union, 91-96.
- 土木学会（1982）：屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書。
- 浜崎義弘（1982）：やや長周期の地震動に関する研究，卒業論文，筑波大学基礎工学類。
- 藤野陽三・浜崎義弘・井上涼介（1982）：半経験的手法による地震動模擬，屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書，土木学会，127-139。
- Fukuyama,E. and K.Irikura(1986): Rupture process of the 1983 Japan Sea earthquake using a waveform inversion method, Bull. Seism., Soc. Am., 76, 1623-1640.
- Gusev,A.A.(1983): Descriptive spectral model of earthquake radiation and its application to an estimation of short-period strong motion, Geophys. J. R. Astro. Soc., 74, 787-808.
- Harkrider,D.G.(1964): Surface waves in multilayered media, Part I, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.54, 627-679.
- Harkrider,D.G.(1970): Surface waves in multilayered media, Part II, ibid., Vol.60, 1937-1987, 1970.
- Harzell,S.H.(1978): Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Letters, Vol.5, No.1, 1-4.
- Hasegawa,H.S.(1974): Theoretical synthesis and analysis of strong motion spectra of earthquakes, Can. Geotech. J., Vol.11, 278-297.
- Haskell,N.A.(1964): Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.54, 1811-1842.
- Heaton,T.H. and S.H.Hartzell(1986): Estimation of strong ground motions from hypothetical earthquakes on Cascadia subduction zone, Pacific northwest, USGS Open-file Report 86-328.
- Houston H. and H.Kanamori(1986): Source spectra and great earthquakes: teleseismic constraint on rupture process and strong motion, 76, 19-42.

- 井上涼介(1986)：やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望，土木学会論文集，第374/I-6，1-23。
- 井上涼介(1988)：動的解析と耐震設計（土木学会編），技報堂出版，9-13，25-28。
- Irikura,K(1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.33, Part2, 63-104.
- 入倉孝次郎(1984)：地震動予測－1983年日本海中部地震および余震群の震源パラメータのスケーリング則－，第12回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，37-46。
- 入倉孝次郎(1989)：経験的グリーン関数法による強震動予測－波形合成の手続きとその問題点－，京大防災研年報，第32号B-1, 41-52。
- 鏡味洋史(1989)：やや長周期微動による深層地盤特性探索の問題、第10回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，31-40。
- Kanamori,H.(1979): A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.69, No.6, 1645-1670.
- Kanamori,H. and Anderson,D.L.(1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1095.
- Kanamori,H and G.S.Stewart(1978): Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976, J.Geophys. Res., Vol.83, No.B7, 3427-3434.
- 菊地正幸(1987)：地震の事典（宇津津治編），朝倉書店，第6章，235-238。
- 菊地正幸(1988)：多重震源の解析，地震，第2輯，第41巻，619-628。
- Kikuchi,M. and Y.Fukao(1985): Iterative deconvolution of complex body waves from great earthquakes—the Tokachi-Oki earthquake of 1968, Phys. Earth Planet Inter., 37, 235-248.
- 木下繁夫(1988)：fmax 周辺の話題，地震，第2輯，第41巻，629-640。
- 気象庁(1967)：地震観測指針（観測編），pp.18。
- 気象庁地震課(1982)：気象官署における地震記象紙の保存について，測候時報，49.5, 289-320。
- 緋嶋一起・竹中博士(1989)：近地地震波の伝播に関する理論，地震，第2輯，第42巻，391-403。
- Koyama,J , M.Takemura and Z.Suzuki(1982): A scaling model for quantification of earthquakes in and near Japan, Tectonophys., 84, 3-16.
- 工藤一嘉(1978a)：長周期地動—強震地動の表面波に関する検討－，第6回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，9-16。
- Kudo,K(1978b): The contribution of Love waves to strong ground motions, Proc. 2nd Intern. Conf. Microzon., 765-776.
- Lay,T. and H.Kanamori(1981): An asperity model of great earthquake sequences, Earthquake Prediction, Maurice Ewing Series 4, Am. Geophys. Union, 579-592.
- 御子柴 正・木下繁夫(1989)：千葉県東方沖地震におけるやや長周期後続波の特性，土木学会第44回年次学術講演会，900-901。
- Mori,J and K Shimazaki(1985), Inversion of intermediate-period Rayleigh waves for source characteristics of the 1968 Tokachi-Oki earthquake, J. Geophys. Res., 90, 11874-11882.
- 野田 茂(1986)：断層モデルを用いた地盤震動の評価に関する研究，学位論文，京都大学工学部，197-226。
- 岡田成幸・鏡味洋史(1978)：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量的評価の試み，日本建築学会論文報告集，第267号，29-38。
- 太田 裕・鏡味洋史(1976)：耐震工学上考慮すべき地震波の周期の上限と振幅の下限，日本建築学会論文報告集，第249号，53-60。
- Papageorgiou, A.S. and K.Aki(1983): A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion, I, Description of the model, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73., 693-722.
- Savage,J.C.(1972): Relation of corner frequency to fault dimensions, J. Geophys. Res., Vol.77, 3788-3795.
- 田中貞二・吉沢静代・大沢 肥(1979)：やや長周期帯域における強震動の特性，地震研究所い報，Vol.54, 629-655.

(茨城大学工学部)

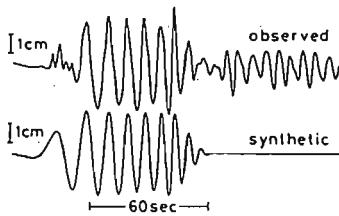


図1. 観測波形（東京本郷）
と理論波形との比較
(1974年伊豆半島地震)
(Kudo1978b)

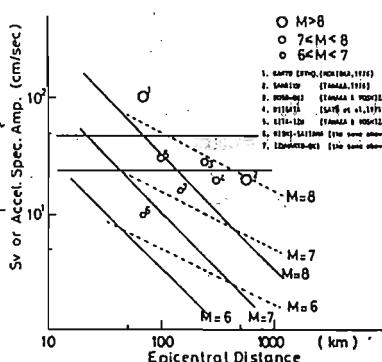


図2. 観測値（東京）と
半実験式との比較；
実線：実体波、鎖線：表面波
(工藤1978a)

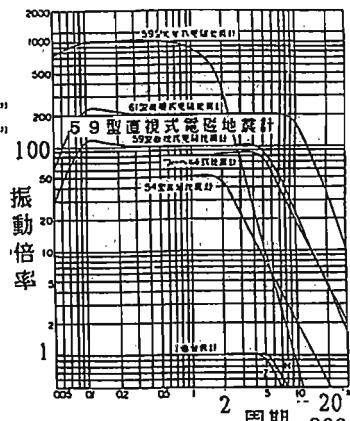


図3. 気象庁地震計の
振幅特性（気象庁1967）

表1. 多重震源解析に関する研究例（井上1986を一部修正）

文献	対象地震	M, Mo	記録 ($\times 10^2$ dyne·cm)	対象周期 (秒), 波	グリーン間数	逆問題を解いて求める 震源パラメータ	その他	各eventのモーメントの総和
Kikuchi & Fukao(1985)	1968年 十勝沖地震	7.9 28	WSSN (Press-Ewing型) (P波)	約20-30	解析的手法 (破壊理論)	各eventのモーメント m_i > 0 m_iと破壊開始時間t_i (制約条件)	23.5	
Mori & Shimazaki(1985)	1968年 十勝沖地震	7.9 28	JMA 一倍強震計	約10-25	解析的手法 (Rayleigh波) (正規モード解)	各eventのモーメント	V_R=3.1 km/s (bilateral)	4.7
Fukuyama & Irikura(1986)	1983年 日本海中部 地震	7.7 4.55	JMA 一倍強震計, 59型地震計	数20 (主にS波)	半經驗的手法 (2個の余震記録)	各eventの相対モーメント と破壊開始時間	相似則を 採用	

表2. やや長周期帯域の強震動模擬に関する主な研究
(藤野ほか1982, 井上1986を一部修正)

文献	対象地震, M, Mo	予測or 検証 ($\times 10^2$ dyne·cm)	対象周期 (秒), 波	震源過程	グリーン間数	制約条件	備考
Kanamori 1979	San Andreas 断層（横ずれ） ~8, 7	予測	約1-10	多重震源 (ランダム)	半經驗的（1968年Borrego Mt.地震の記録）	①長周期—各eventのMoの合計=大地震のMo, ②10秒—各eventのMoの最大値 $\leq 5 \times 10^2$ 程度, ③1秒—CaliforniaでのMoの上限(7.1)程度	Harzelの方法をはじめて 強震動予測に通用
井上・藤野 ほか 1982	1946年 南海道地震 8.2, 15	予測	約5-15	多重震源 (表面波) (ランダム)	解析的（正規 モード解）	①Kanamori①と同じ, ②各event のすべり速度=100km/ke	工学の分野では先駆的 試み
藤野ほか 1982	1930年 北伊豆地震 7.0, 0.27	検証	約2-20	5個のevent (主に表面波) の一様破壊	半經驗的（1974年伊豆半島沖地震の記録）	①Kanamori①と同じ	後続部まで含めてかなり 再現できた（1地点）
入倉 1983	1980年伊豆半島 東方沖地震 6.7,	検証	約0.2-10	巨視的 (速度計記録) (一様破壊)	半經驗的（同地震の 余震記録）	①Kanamori①と同じ, ②相似則を 用いて震源過程を時間-空間的に 分割	周期1秒以上の成分につ いてはかなり再現できた (3地点)
入倉 1984	1983年日本海 中部地震 7.7, 7.5	検証	約2-30	巨視的 (一様破壊)	半經驗的（同地震の 余震記録）	①Kanamori①と同じ, ②多重 クラックモデルに基づきすべり 速度などのパラメータを決める	後続部まで含めてかなり 再現できた（1地点）
野田 1986	1946年 南海道地震 8.2, 15	予測	約2-20	多重震源 (ランダム)	半經驗的（同地震の 余震記録）	①Kanamori①と同じ, ②入倉 (1983) ②と同じ	正規モード理論を応用して 余震の本震との震源深さの 差による表面波動起の差を 補正

関東平野の深い地盤とやや長周期地震動

Structure of Deep Sedimentary Basin beneath the Kanto Plain
and its Effects on Long-period Ground Motions中山 浩明
YAMANAKA Hiroaki

ABSTRACT

Effects of deep sedimentary basin on long-period ground motions were discussed through the case study in the Kanto plain, Japan. First results of seismic surveys in the area were reviewed and features of structure of deep sedimentary basin several kilometers down to the Earth's crust were explained. We, then, investigated dispersive characteristics of long-period Love wave observed through a seismic array in the area. Group velocities calculated for Love wave in 1D models of sediments are coincident with observed ones. 2D hybrid modeling, in which normal mode summation technique is incorporated into finite difference method, was conducted to simulate Love-wave propagation in the sedimentary layers. A fair good agreement between observed and computed ground motions could be achieved by considering realistic 2D models of subsurface structure corresponding to propagation paths of the seismic waves from the source to sites. The importance of knowledge of subsurface structure from source to each site was confirmed in this study. For rational and precise prediction of long-period ground motions, such basic data should be accurately prepared.

1. はじめに

1968年十勝沖地震の際に八戸で得られた強震記録に周期2.5秒の成分が卓越して認められたことを契機としてやや長周期帯域の地震動についての研究が地震工学上の大きな課題のひとつとして掲げられるようになった。この地盤震動シンポジウムにおいても1976年の第4回には「強震動におけるやや長周期成分について」と題して多くの研究成果が発表されている。それ以外にも、頻繁に過去のこのシンポジウムの場においてやや長周期地震動について議論されているようである。今回、筆者に与えられた課題は関東平野を対象としたやや長周期地震動に関する研究について過去から現在に至るまでのレビューを行うことである。やや長周期地震動が工学上注目され始めた当初から関東平野を対象とした研究は行なわれており、すでに20年近くにわたる研究の蓄積がある。それらをすべて網羅することは筆者の能力をはるかに越えることである。また、今回のシンポジウムのテーマにあるように「予測はどこまで可能か?」という質問には明確な答えを用意することはできない。ここでは、筆者らのグループがここ数年にわたって行ってきた関東平野南西部での研究を中心にやや長周期地震動の特性をどこまで理解できる

かについて述べることにする。

すでに多くの研究で指摘されているように観測記録に見られるやや長周期帯域の地震動を構成する主な波動は表面波であると考えられる。表面波の発生・伝播について工藤¹⁾が分かりやすい形でまとめているように、やや長周期帯域の表面波の特性を知る際には短周期の実体波の場合とは異なり、震源の影響とP波速度5km/s程度を有する地殻最上層にいたるまでの深い地盤の構造の影響の両者を考慮することが重要となる。とくに、堆積層は不規則な形状を呈したり、不均質であることが多く、表面波が深い地盤内でどのように伝播、増長していくかを知るには伝播経路にあたる地下構造の状態を知る必要がある。こうした認識の下で深い地盤構造の調査研究がいくつかの地域で行われ、次第に深い地盤構造に関する知見が蓄積されていった。それと平行して、やや長周期帯域まで十分な精度を有する地震記録を得る努力も積み重ねられてきた。とくに表面波の伝播の議論には1点の観測では不十分で、問題とする波動の波長に見合った地震計配置のアレイ観測が望ましい。そうして観測された記録は解析やモデリングを通して、現在我々が手にできる知見で地震動特性のどの部分までの解釈ができる、あるいはできないの

かを明確にしてくれるであろう。さらに、それは地下構造モデルの改善やモデリング手法の改良などにつながり、やや長周期地震動予測の精度の向上に寄与できるものと考えられる。

こうした観点から、本論ではまず関東平野の深い地盤の構造について概観する。次に、同地域で行われているやや長周期地震動を対象としたアレイ観測網で得られた観測記録にみられる表面波成分の特徴について述べ、さらに堆積層で表面波が増長していく過程を数値モデリングにより調べることにする。本論では関東平野の一地域での研究結果についてのみ説明しているが、これによってやや長周期地震動の予測に関する問題点の一端でも整理できれば、幸いである。

なお、やや長周期地震動予測のアプローチとしてはいくつかの半経験的な地震動予測方法も提案され、活用されているが、本論では触れないことにする。

2. 関東平野の深い地盤の構造

2-1 関東平野での人工地震探査

地震工学的目的に沿った関東平野における深い地盤構造の探査は1975年に東京都夢の島を発破点として首都圏基盤構造研究グループ（代表：鳴悦三東京大学名誉教授）によって初めて実施された。以来、夢の島を初めとしていくつかの場所で人工地震が行われ、その度に2次元的な深い地盤の構造断面が求められている。さらに、完全な形ではないにしろ、3次元的に深い地盤の構造も分かってきた。この一連の研究の概略や背景は瀬尾²⁾によって第13回の本シンポジウムの際に述べられている。また、1989年には夢の島における人工地震探査実験を総括する意味で「基盤構造と地震動」と題したシンポジウムが行われ、夢の島人工地震実験資料集がまとめられた。その中には関東平野の深い地盤の探査に関する研究論文リストや実験結果が示されており、関東平野の深い地盤の構造についての概略を知ることができるであろう。ここでは、最近、実施された人工地震探査の結果も含めて関東平野の深い地盤構造の特徴についてまとめてみる。

Fig.1には今までに関東平野周辺で実施された人工地震探査の発破点と測線の位置が示されている。探査測線はかなりの数におよび、とくに南西部では比較的密に探査されていることがわかる。これらのうちいく

つかの測線で明らかにされた地下構造^{3)~7)}をFig.2に示す。基盤層（ここでは、各断面図の最下層を意味する）のP波速度は5.3から5.6km/sと求められており、地域によって基盤速度が異なっている可能性がある。この基盤層上面までの深さは夢の島（Fig.2のYMS）の周囲10~20kmの範囲ではほぼ一定で2.3km程度である。関東平野の西側では測線Bの地下構造のごとくP波速度5km/s以上の地層が露頭となっており、典型的な堆積盆地の端部の形状を呈している。また、北東に向かうE測線では筑波山付近で基盤の高まりが見られ、さらにその北側で再度堆積層が厚くなる傾向が見られる。一方、夢の島の南側に設けられた測線では地層構成が北側のそれとは異なる結果が得られている。神奈川県江ノ島に向かうC測線では基盤層の上にVp4.7km/s層がかなりの厚さで存在している。また、D測線ではさらに複雑な

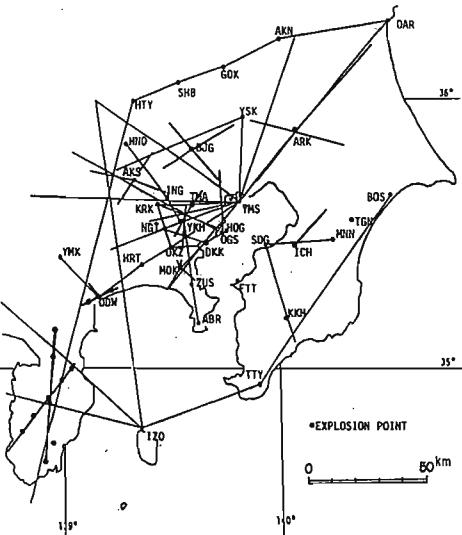


Fig.1. Map showing explosion sites and surveying profiles in seismic refraction surveys in the Kanto district.

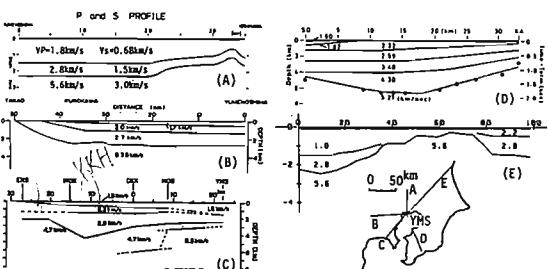


Fig.2. Subsurface structures deduced from seismic refraction surveys; (A) by Shima et al.(1976), (B) by Yamanaka et al.(1988), (C) by Yamanaka et al.(1990), (D) by Zama et al.(1986) and (E) by Hasegawa et al.(1984).

速度構成で、基盤層までの深さも6kmにも達している。関東平野の南端ではC, D測線の断面図に見るように基盤層が露頭となっているわけではなく、堆積層が有為な厚さで存在していることがわかる。これは後で述べるように関東平野のやや長周期地震動の特性を考える上で無視できない問題を投じるものである。C測線での基盤層上面には段差が認められる。その位置は立川断層の南東方向の延長線上にあり、首都圏の地震防災上気に係る存在であるが、逆発破の観測が行われていないので、未だ推定の域を出ない。しかし、人工地震の観測波形に見られる顕著な位相についての検討から段差の存在を支持する結果が得られている⁸⁾。

上記の結果は各測線での走時解析によるものであり、地震動予測という工学的な目的のためには特定の測線の断面図よりは3次元的に地盤構造に関する情報を用意して置くことが重要であろう。関東平野全体の3次元的な基盤構造は、最近、夢の島人工地震探査の全データを使ってFig.3のようなタイムタームの分布として求められている⁹⁾。タイムタームは堆積層の厚さに第1次近似的に比例する量であり、図のセンターは基盤層までの深さを表わした等深度線と考えてよい。仮に地層構成が夢の島のそれと同じであるとすれば、2.3倍することによって基盤層の深さが得られる。この図からも先に述べた地盤構造の特徴を読み取ることができ。夢の島から北東および西に向かって基盤深度は次第に小さくなり、タイムタームがゼロとなる地点がみ

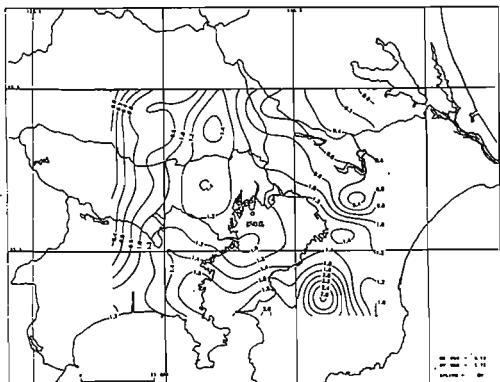


Fig.3. Time term map for the Kanto plain (Research Group on Underground Structure in the Tokyo Metropolitan Area, 1989). This roughly shows 3D feature of deep sedimentary layers. The P-wave velocity of the basement is determined 5.6km/s for the northern part and 5.4km/s for the southern part of the plain.

られる、つまり、そこで基盤層が露出していると考えられる。また、南関東には2つの大規模の凹状基盤構造が房総半島中部と横浜市南部に見られる。とくに房総半島中部ではかなり急激に向斜した基盤となっている。これらの人工地震探査の他に東京湾では反射法により3次元地下構造が求められている¹⁰⁾。この反射法探査結果と陸上での人工地震探査の結果はかなり整合性がよいことが認められており⁴⁾、これら2種類の探査結果からある程度の精度の範囲で関東平野の3次元的な深い地盤の構造モデルを作成することが可能であろう。

以上はP波速度の構造であるが、地震工学的な目的にはS波速度がより重要である。最も簡単に深い地盤のS波速度を求めるには考えている地層が露出している地点での弾性波探査がよいだろう。しかし、それは間接的であり、S波速度構造を知るには至らない。人工地震探査の際にSV波成分の観測も一部の点で行われ、Fig.2のA測線の構造にはその結果も示されている。しかし、一般に人工地震実験から深い地盤のS波速度構造を求ることはかなり難しい。そこで、関東平野の3カ所にある国立防災センターの深井戸においてダウンホール法によるP, S波速度検層が行なわれ、精度のよい速度構造が求められた¹¹⁾。また、座間は基盤層と堆積層の境界面でのPS変換波が地震観測記録に見られることを指摘し、その走時差から堆積層での平均的なS波速度を求めている¹²⁾。人工的な振動源を必要としないことや関東平野では地震観測点が比較的密にあること等を考えると、この方法で比較的容易にS波速度に関する情報が得られる可能性があり、興味深いものである。微動からS波速度構造を求める試みも行われているが¹³⁾、関東平野で得られるやや長周期微動には発生源の影響等¹⁴⁾によって今ひとつはつきりしないところがあるようと思える。

2-2 関東平野南西部の深い地盤構造の増幅特性

関東平野南西部 (Fig.2のB測線とC測線で挟まれた地域) での深い地盤構造の特徴は4.7km/s層が厚く存在していることや基盤面に段差があること等であるが、最もやや長周期地震動の増幅に関して重要な点は堆積層の構成である。つまり、C測線の断面図に見るように東京付近 (YMS) と横浜付近 (MOKとDKKの間) ではVp1.8 km/s層 (2.2km/s層も同類であるとした) とVp2.9km/s

層の層厚の比が逆の傾向になっている点である。この点について検討するために鉛直に入射するSH波の增幅特性を江ノ島から夢の島に至る間の数地点に対して求めてみた。SH波の增幅特性としたのは簡単のためで、ほかに深い意味はない。増幅率を求めた地点はほぼFig. 2のC測線上にある大船、横浜、川崎、夢の島の4点で、各点の地盤構造と増幅特性がFig. 4に示されている。周期数秒以上の帯域に注目すると、大船は別にして横浜から夢の島に向かって卓越周期が長くなる傾向が見られる。また、スペクトル形状にも横浜と夢の島では大きな違いが認められる、すなわち、横浜に対しては周期4-10秒の間でほぼ一定のスペクトル振幅が得られているが、夢の島のスペクトルは卓越したピークを周期10秒付近に有しており、極めて特徴的なスペクトル形状を呈している。これは上に述べたように堆積層の構成が異なるためと考えられる。このようにFig. 3にある基盤層上面までの深さだけでなく、堆積層中にある境界面の深さもやや長周期地震動には無視できない影響を有しており、今後の考えるべき課題のひとつであると考えている。

3. 観測されたやや長周期の表面波成分とその特徴

やや長周期地震動の特性を議論する際にはSMAC型強震計に代表されるような従来の強震計で得られた地震記録では精度上の問題があり、望ましくない。ダイナミックレンジの広い記録器や速度型強震計などの開発により最近になって信頼性のあるデータが蓄積されつつある。波長が数キロ以上であるやや長周期の表面波の伝播過程を議論する際には広い地域にわたって配置された観測点での記録を見ることが望ましい。関東平野でのこうした観測の多くは東京や横浜などの首都圏中心部で行われ（木下¹⁵⁾; Seo et al.¹⁶⁾），北関東

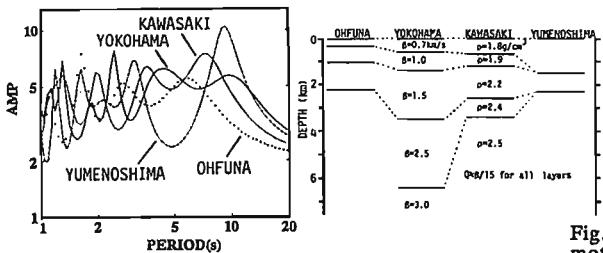


Fig.4. Subsurface structural models for several points in the Kanto plain and their amplification factors of SH wave.

ではKudo et al.¹⁷⁾による比較観測の例があるが、あまり多くの観測結果は報告されていない。ここでは、筆者らが行っている関東平野南西部でのアレイ観測網で得られたいいくつかの地震記録に卓越してみられた表面波成分と深い地盤の関係について調べる。

3-1 関東平野南西部のアレイ観測

関東平野南西部において筆者らが行っているアレイ観測の観測点がFig. 5に示されている。観測点のなかで浅川（ASK）は高尾山山麓に位置し、基盤層が観測点近傍で露頭となっており、ほぼ岩盤上にあると考えてよい。その他は堆積層上である。観測点は対象地域を南西-北東方向と南東-北西方向に横切る2つの直線状に配置されている。伊豆大島や伊豆半島周辺の地震の際にはしばしばやや長周期成分が卓越して認められることが指摘されており（例えば、横田¹⁸⁾），神奈川県江ノ島（ENS）から北東に伸びる観測点アレイはこうした地震動を観測することを目的のひとつとしている。観測にはおもに速度型強震計が用いられ、やや長周期成分まで問題なく観測できる。波動伝播を論じるには記録の絶対時刻を得ることが重要で、校正された時計信号も記録されている。なお、この観測は1975年に始められ、順次グレードアップされたもので、その背景は瀬戸尾²⁾により述べられている。

3-2 長野県西部地震の観測記録

まず、アレイ観測網の西側で1984年9月14日に発生した長野県西部地震（M6.8）による地震動について検討を行なう¹⁹⁾。観測された記録から2-20秒のバンドパスフィルタリングしたTransverse方向の速度波形がFig. 6に示されている。堆積層上で得られた波形には分散性

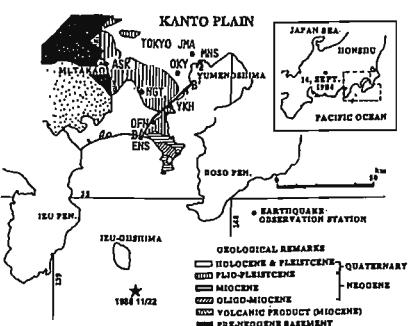


Fig.5. Observation sites for earthquake ground motions in the southwestern Kanto plain (solid circles). Stars indicate epicenters of the events discussed in this study. ASK station is located nearly on hard rock and others are on sediments.

を有したやや長周期成分が顕著に認められる。とくに長津田(NGT)と横浜(YKH)の波形には2つの波群があり、初めの位相はS波初動の到着に引続いて分散している。一方、後続する分散性の位相は見かけ速度0.6km/sを有している。また、江ノ島でのやや長周期成分はそれほど顕著ではない。これはC測線の地下構造に見られるように V_p 1.8km/s層が江ノ島付近に存在しないためであると考えられる。

長津田と横浜で得られたやや長周期成分についてマルチフィルター解析を行い、この2点間の平均的な群速度を求めるとFig.7のようになる。この2点の中間で地震探査から求まる地盤構造に対して計算されるラブ波の基本モードの群速度の分散曲線は実線で示すごと

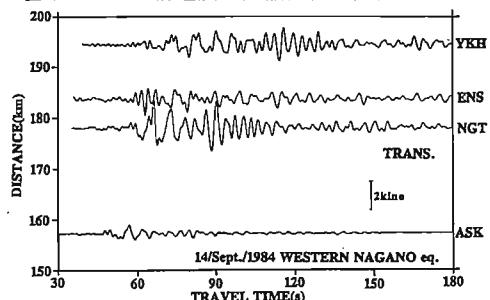


Fig. 6. Transversely polarized velocities observed during the Western Nagano earthquake of Sep. 14, 1984. All the traces are filtered in a period range of 2 to 20 sec.

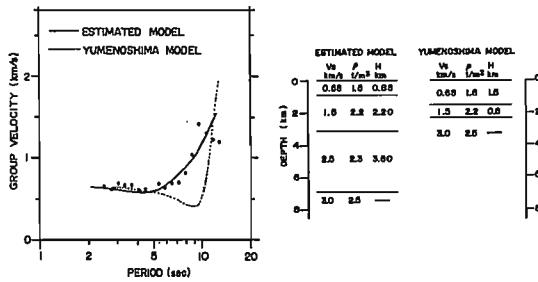


Fig. 7. Group velocities observed and calculated ones for Love wave in the above structural models.

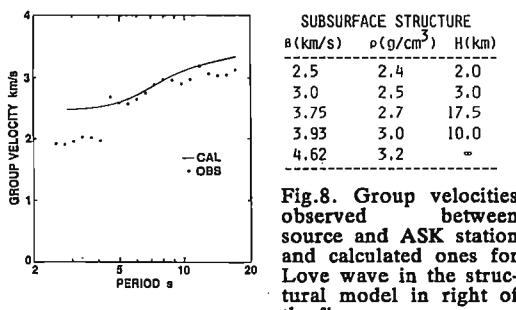


Fig. 8. Group velocities observed between source and ASK station and calculated ones for Love wave in the structural model in right of the figure.

くで、観測値とよく一致している。また、図中の破線は夢の島の地盤構造から期待される分散曲線であるが、観測値とはかなり異なっている。山崎・工藤²⁰⁾によれば、この地震の際に夢の島付近で観測された群速度はFig.7に破線に近いものとなっている。このように、東京と横浜周辺の深い地盤構造の差異はやや長周期の表面波の伝播にかなり大きな影響を与えており、関東平野の深い地盤の影響をひとつの平行層モデルで評価することの難しさを示している。

次に平野に入射してくる波動について考えてみる。岩盤上の観測点である浅川での記録にも分散性が認められるので、堆積層に入射した波動はやや長周期帯域では主に表面波であったと考えられる。そこで、浅川で得られた記録から震源での初期位相を無視し、震央と浅川との間の群速度を求めるところ、Fig.8のようになる。周期5秒より長周期側では2.5km/sから3.0km/sの間で正分散している。一方、周期5秒以下では2km/s程度になっているが、これは周期5秒以上の位相とは異なる位相によるものである。この群速度に合う地殻モデルをTakeo and Mikami²¹⁾の結果を参照して決め、ラブ波の基本モードの群速度を計算すると、Fig.8の実線のようになり、周期5秒以上の観測値をよく説明することができる。震源と浅川との間はほとんどが中部山岳地帯に属し、その間に有為な厚さをもつ堆積層が存在しないことを意味していると考えられる。

3-3 伊豆大島近海の地震の地震記録

次に関東平野の南で発生した地震の観測記録について検討を行なう。検討には1986年11月22日の伊豆大島近海の地震(M6.0)の記録を用いた。観測された速度のTransverse成分に2-20秒のバンドパスフィルター処理を行なった結果がFig.9に示されている。この地震も震源が浅く、分散性を有したやや長周期成分が顕著に観測されている。江ノ島から北東方向の直線上にある4観測点間でそれぞれ群速度を求め、地盤構造との対比を行なった²²⁾。Fig.10に観測された群速度が示されている。江ノ島-大船(OFN)間で得られる群速度にはかなりばらつきが認められるが、北に行くに従い、群速度が遅くなる傾向がある。また、大船-大岡山間で得られた群速度はKudo²³⁾が横浜と東京での1974年伊豆半島沖地震の記録から求めたラブ波の群速度に近い値となっている。これらの観測点はほぼFig.2のC測線上

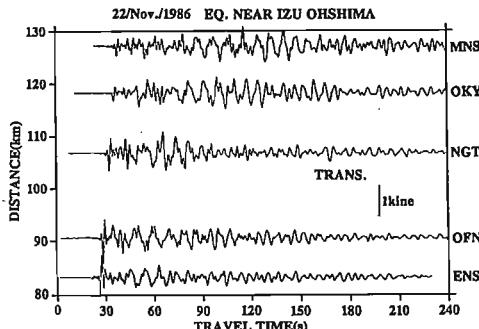


Fig. 9. Transversely polarized velocities observed during an earthquake near the Izu-Oshima island of Nov. 22, 1986. All the traces are filtered in a period range of 2 to 20 sec.

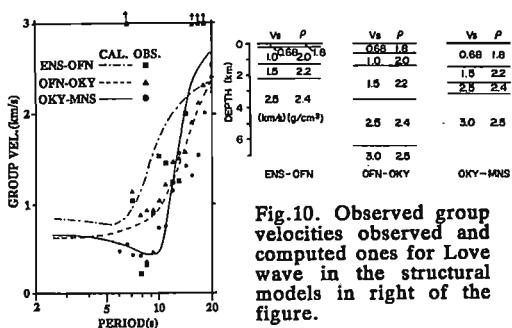


Fig. 10. Observed group velocities observed and computed ones for Love wave in the structural models in right of the figure.

に位置しており、それを基にしたそれぞれの観測点間の平行層モデルから求まるラブ波の基本モードの群速度もFig. 10に示されている。江ノ島-大船間の群速度はあまり説明できていないが、その他の2区間での群速度に対しては比較的よい一致が得られている。江ノ島と大船の間では最上層のVp1.8km/s層が途中で存在しなくなっている、その間では不規則な地盤の影響が著しく現れているものと思われる。

江ノ島で得られた記録にも分散性が認められるので、震央と江ノ島間の群速度を求めてみた。長野県西部地震の際に浅川で得られたものと異なり、Fig. 11の観測された群速度は堆積層上での群速度と同程度である。観測に合うように地下構造を求めるラブ波の基本モードの群速度でよく説明できる。相模湾には厚い堆積層が存在していることが地球科学的な研究から指摘されており²⁴⁾、Fig. 11の構造モデルにあるVs1.0km/s層と1.5km/s層はそれに対応しているものと考えられる。また、工藤・他²⁵⁾は伊豆半島のS波速度構造を表面波の分散解析から求めているが、それによると表層のS波速度は1.45km/sであり、相模湾と伊豆半島の地下構造にも違いがあると考えられる。

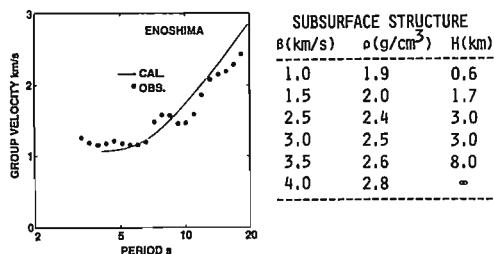


Fig. 11. Group velocities observed between source and ENS station (solid circles) and calculated ones for Love wave in the structural model in lower-left of the figure.

4. やや長周期表面波伝播の数値モデリング

3で示したように関東平野で観測されたやや長周期成分は震源で発生した表面波が堆積層を伝播しながら増長した結果であると理解できた。不規則な形状を有する堆積層を伝わるやや長周期の表面波の数値モデリングはいくつかの手法により行なわれている。関東平野を対象として観測記録との比較を行なっている例としては正規モード理論¹⁾、境界要素法²⁶⁾、有限差分法¹⁹⁾、波線理論を利用した方法^{15), 27)}などの研究がある。ここでは、正規モード理論と有限差分法を組み合わせて、やや長周期帯域の表面波伝播のモデリングを行ない、観測波形との比較を試みる。

4-1 解析方法

ここで用いた方法はRegan and Harkrider²⁸⁾が遠地地震によるLg波の解析に用いたものと基本的には同じであるが、ここでは震源距離100km程度の波動を考えているので、若干の改良を加えた。

まず、震源から観測点までの地下構造を2つの領域に分けて考える。震源から平野端部までは平行層で近似され、震源はダブルカップル点震源と仮定する。次に正規モード理論²⁹⁾により平野端部での表面波（ラブ波）の変位スペクトルを求める。そこで各周期での鉛直方向の変位の分布を考慮して、鉛直に並ぶいくつかの点での変位波形を求める。こうして得られた変位波形を差分近似で離散化された平野の地盤内での波動伝播の計算の入力として用いる。地盤は2次元モデルとし、表面波の伝播を考慮して、円筒座標系での不均質場のスカラー波動方程式をTikhonov and Samarski³⁰⁾による方法で差分近似することによってexplicitに解くことにした。モデルの上面は自由表面とし、その他ではReynold³¹⁾による吸収境界の条件を課した。なお、計算に際しては人工地震探査から求められる地下

構造を忠実にモデル化するようにした。

4-2 長野県西部地震の地震動のモデリング

この地震はほぼ東西方向に走行を持つ右横ずれ型の断層で、震源過程はすでに詳しく解析されている²¹⁾。それを参考にして決めた断層パラメーターは $\lambda=173^\circ$, $\delta=74^\circ$, $V_R=2.5\text{km/s}$, $M_0=3 \times 10^{25}\text{dyne-cm}$, $\tau=1\text{s}$, $W=6\text{km}$, $L=12\text{km}$, $d=6\text{km}$, bilateral破壊伝播モードである。震源深さは気象庁によって2kmと決められているが、断層面でのすべり量の分布²¹⁾を考慮して6kmとした。このパラメータと前述した震央から浅川までの地殻構造を用い、周期4秒以上のラブ波の基本モードの寄与のみを考えて、浅川での変位波形を求めた。浅川で得られた変位波形と計算された波形の比較がFig.12に示されている。振幅の大きい部分については波形の対応は良いが、図の40秒以降の中程度の振幅の部分は全く評価できていないことがわかる。この部分の位相の浅川への到着時刻を考慮すると、この発生原因を震源過程に求めるることは難しく、堆積層の影響をサイトの影響とすれば、バスの影響によるものと考えられる。

前述したように関東平野南西部の堆積層の構造は東京と横浜付近ではそれぞれ異なっているので、2つの地域に分けてモデリングを試みた。まず、浅川と横浜の間にに対するモデリングの結果について示す。地下構造はFig.13のようにモデル化した。堆積層の部分は人工地震探査の結果により、基盤層より下層は震源と浅川までの速度構造が平野にも連続していると仮定したが、その辺の確認はない。Fig.14は地表面で計算され

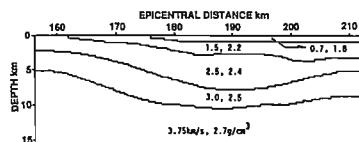


Fig.13. Structural model from ASK to YKH.

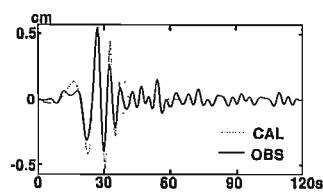


Fig.12. Comparison of observed and computed displacement at ASK station.

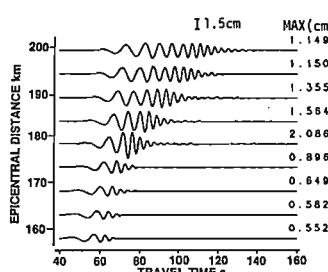


Fig.14. Computed displacements on the free surface of the model in Fig.13.

た変位波形である。Vs0.7km/s層が現れ始める地点から、振幅が大きくなり、分散により継続時間も伸びていることが分かる。S波速度0.7km/sを有する表層の横方向の広がりが表面波の增幅、とくに、継続時間に大きな影響を与えていていると考えられる。

次に、浅川と東京（夢の島）の間について考える。Fig.15は浅川から夢の島に至る地下構造で、堆積層の部分はFig.2のB測線の地盤構造を用いた。Fig.16は地表面で計算された変位波形を示している。堆積層がほぼ平行層と見なせるようになる震源距離180kmを過ぎたあたりから見かけ速度の遅い顕著な位相が現れてくる。これはFig.7の夢の島の地下構造に対するラブ波の分散曲線に見られるエアリー相に対応する位相であると考えられる。Fig.14に示した浅川-横浜間の結果に比べると、かなり違っており、2つの地域の深い地盤構造の差異を顕著に反映した結果であるといえる。

観測された変位と計算結果の比較はFig.17に示されている。長津田と横浜での観測記録にあるように2つの波群は認められず、計算の方はひとつの波群でなめらかに分散していることが分かる。東京気象庁はほぼ浅川-夢の島間に位置しており、1倍強震計による記録と比較した。観測された変位波形にはエアリー相に對応する位相が70秒附近に現れており、計算にもほぼ同時刻に認められ、概ね観測を説明できている。しかし、観測の100秒附近の中程度の位相は全く再現できなかつた。これらはFig.12に見るよう浅川での計算波形に後続する位相は含まれていないためによるもので、

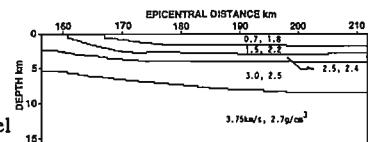


Fig.15. Structural model from ASK to Tokyo.

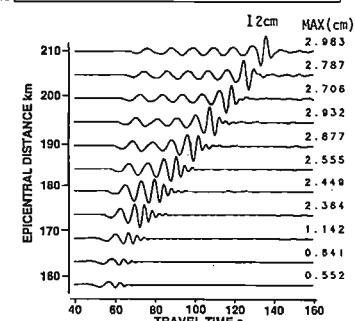


Fig.16. Computed displacements on the free surface of the model in Fig.15.

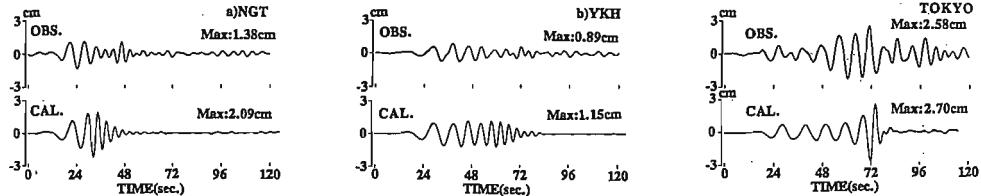


Fig.17. Comparison of observed and computed displacements at NGT, YKH and Tokyo stations.

震源と浅川の間の地下構造も堆積層上での地震動に無視できない影響を与えていていることがわかる。

4-3 伊豆大島近海の地震の地震動のモデリング

次に、伊豆大島近海の地震の観測記録の合成を試みた。この地震のメカニズム解は一応は求められているが、複雑であると指摘されている³²⁾。そのメカニズム解を参考にして仮定した断層パラメータは次のとくで、 $\lambda=0^\circ$, $\delta=65^\circ$, $V_r=2.5\text{km/s}$, $M_0=1*10^{25}\text{dyne-cm}$, $\tau=1\text{s}$, $W=6\text{km}$, $L=12\text{km}$, $d=13\text{km}$, bilateral破壊伝播モードである。Fig.12の震央-江ノ島間の地下構造を用い、カットオフ周期を5秒とし、ラブ波の基本モードのみの寄与を考えて江ノ島での変位波形を求める

とFig.18のようになる。振幅の最大値はほぼ合っているが、計算された波形の継続時間はかなり短くなっている。仮定した断層パラメータにも任意性は残っているが、震源から平野縁部にいたるまでの地下構造の影響が十分に評価されていないことが一因であろう。また、長野県西部地震の浅川の場合と比べると、平行層では説明できない後続する位相の勢力が強くなっていることがわかる。これは相模湾に存在する堆積層の影響が著しいものであることを示唆している。

この地震に対しては江ノ島から南砂（MNS）までの堆積層での表面波伝播の解析を行なう。堆積層の部分をFig.2のC測線の結果に従い、Fig.19のような地下構造モデルを計算に用いた。Fig.20は地表で計算された変位波形を示している。江ノ島までの地下構造にVs1.0km/s層が存在しているので、関東平野に到達する表面波は分散し、継続時間が長くなり、結果として平野の地震動も継続時間が長くなっている。震央距離115kmを越えた付近から地震動の分散性状が異なっており、堆積層の変化の影響が認められる。

各観測点で観測および計算された変位波形がFig.21に比較されている。大船（OFN）や大岡山（OKY）での計算波形の150秒付近に見られる小振幅の位相は右端で

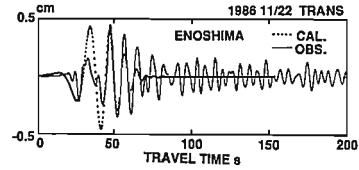


Fig.18 Comparison of observed and computed displacements at ENS station.

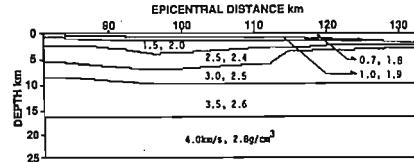


Fig.19. Structural model from ENS to MNS.

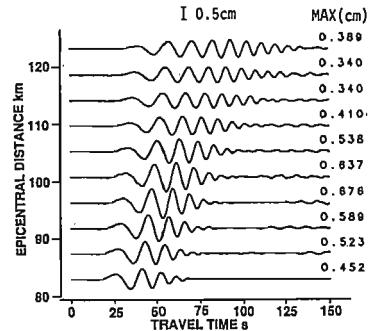


Fig.20. Computed displacements on the free surface of the model in Fig.19.

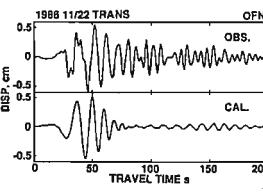


Fig.21. Comparison of observed and computed displacements at OFN, OKY, MNS stations.

の吸収境界が完全に反射波を消せないことによるものである。最大振幅は概ね合っていると言えるが、継続時間は計算されたほうが短く、江ノ島での観測波形を十分に説明できなかつたことがこの主な原因と考えられる。この地震の震源過程は複雑であることや震源深さが15kmであるために表面波成分以外の寄与も考えられること等で、幾つかの改良の余地はありそうである。しかし、それだけでは平野縁部の江ノ島での観測波形の長い継続時間を説明するには不十分で、相模湾に存在する厚い堆積層の不規則な影響も考慮することによりよい地震動の再現が可能であると考えられる。そのためにはまず同地域の地下構造を明らかにする必要がある。

5. おわりに

関東平野の深い地盤の構造について概観し、関東平野南西部でアレイ観測された地震記録の解析と数値モデリングを通して、深い地盤構造でのやや長周期帶域の表面波の伝播について述べてきた。関東平野では深い地盤構造の特徴がかなり明らかとなり、適当な断層モデルを仮定し、伝播経路に対応する地域の深い地盤の構造の2次元的な影響を考慮することで任意の地点でのやや長周期地震動の主要な部分を再現することは可能であると考えられる。しかし、長大構造物の耐震性を考える際には主要動に後続する位相の存在も無視できない。こうした成分の予測には3次元的な堆積層や震源の影響に加えて、震源から平野の堆積層に波動が入射するまでにどのように変化しているのを明らかにすることも重要であろう。したがって、やや長周期地震動の精度の高い予測を行なうには、震源、バスそしてサイトの影響を分離して考えるよりはひとつのシステムとして考えるほうがよいのではないかと考えている。とくに関東平野の南で発生する浅い地震による地震動予測には注意が必要であろう。

本論では2つの地震による表面波成分についてのみ議論してきたが、多くの地震についても検討し、地下構造モデルや予測手法の妥当性などを吟味していくことが今後の課題のひとつであると考えている。そのためにも深い地盤の精度の高い物理探査と質の良い地震観測は大切であり、地味ではあるが、進めるべきテーマであると思う。また、本論ではラブ波についての議

論しか行なっていないが、レイリー波についても同様な考え方でそれほど問題はないように思えるが、地下構造の3次元的な影響とも関わり合うので今後検討していきたいと考えている。

【謝辞】

本論は過去数年間に行なった研究の一部をまとめたもので、東京工業大学瀬尾和大助教授、佐間野隆憲助手、翠川三郎助教授にはご助言や地震観測に際してのご協力を頂きました。深く感謝致します。南砂での観測記録は竹中工務店技術研究所小林喜久二氏のご厚意によるものです。また、気象庁からは東京および横浜での1倍強震計のご提供を受けました。記して感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 工藤一嘉：長周期地動、第6回地盤震動シンポジウム、9-16, 1978.
- 2) 瀬尾和大：深い地盤の震動特性を探る、第13回地盤震動シンポジウム、27-34, 1985.
- 3) 鳩 悅三・他：東京の基盤構造その2、地震研彙報、51, 45-61, 1976.
- 4) 山中浩明・他：人工地震による首都圏南西部の地下構造探査(3)、地震、41, 527-540, 1988.
- 5) 東京工業大学発破実験グループ：人工地震による首都圏南西部の地下構造探査(4)、地震学会講演予稿集、No.2, 25, 1989.
- 6) 座間信作・他：地下構造と石油タンクのスロッシング、消防研究所技術資料、17, 33-42, 1986.
- 7) 長谷川功・他、夢の島－大洗の地下構造、地震学会講演予稿集、No.2, 232, 1984.
- 8) 山中浩明・他：関東平野南西部に見られる基盤の段差構造、地震学会講演予稿集、No.1, 258, 1988.
- 9) 首都圏基盤構造研究グループ：夢の島人工地震実験資料集、1989.
- 10) 加藤茂：東京湾におけるマルチチャンネル反射法音波探査、水路部研究報告、19, 1-57, 1984.
- 11) 山水史生・他：やや深い構造のS波速度(3)、地震、34, 465-479, 1981.
- 12) 座間信作：東京湾岸で観測されるP波初動付近の位相について、地震学会講演予稿集、No.2, 10, 1989.

- 13) Horike, M : Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized area, *J. Phys. Earth*, 33, 59-96, 1985.
- 14) 鏡味洋史 : やや長周期微動による深層地盤特性探索の問題, 第17回地盤震動シンポジウム, 31-40, 1989.
- 15) 木下繁夫 : 深層井観測により推定された厚い堆積層の地震応答特性, 防災センター研究報告, 38, 25-145, 1986.
- 16) Seo, K and H. Kobayashi : On the rather long-period earthquake ground motions due to deep ground structure of Tokyo area, Proc 7th World Conf. Earthq. Eng., 1, 9-16, 1980.
- 17) Kudo, K. et al. : Comparative observation of ground motions at different soil condition from moderately large earthquake, 8th World Conf. on Earthq. Eng., 2, 769-776, 1984.
- 18) 横田治彦・他 : 東京で観測された地震動のやや長周期成分とその特徴, 第5回日本地震工学シンポジウム, 145-152, 1978.
- 19) Yamanaka, H. et al. : Effects of sedimentary layers on surface-wave propagation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 631-644, 1989.
- 20) 山崎謙介, 工藤一嘉 : 強震動および津波の予測と破壊能評価に関する研究(代表: 平澤朋朗) 文部省科学研費重点領域研究研究成果, 64-72, 1990.
- 21) Takeo, M. and N. Mikami : Inversion of strong motion seismograms for the source process of the Naganoken-Seibu earthquake of 1984, *Tectono-physics*, 144, 271-285, 1987.
- 22) Yamanaka, H. et al. : On seismic motions observed in the southwestern Kanto plain during an earthquake near the Izu-Oshima Island, Japan, Proc. of the National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 55-60, 1989.
- 23) Kudo, K. : A study on the contribution of surface waves to strong ground motions, Proc. 7th World Conf. on Earthq. Eng., 2, 499-506, 1980.
- 24) 笠原敬司・他, マルチチャンネル反射法地震探査による伊豆東方沖地下構造調査(3), 地震学会講演予稿集, No.2, 200, 1989.
- 25) 工藤一嘉・他 : 伊豆半島におけるS波速度の推定, 地震研彙報, 53, 779-792, 1978.
- 26) 山本俊六・他 : 関東平野におけるやや長周期地震動, 地震学会講演予稿集, No.2, 23, 1989.
- 27) Seo, K. and H. Kobayashi : The influences of ground structure on earthquake ground motions, 3rd Int'l Conf. on Seismic Microzonation, Proc., 2, 637-648, 1982.
- 28) Regan J. and D.G. Harkrider : Numerical modeling of SH Lg waves in and near continental margins, *Geophys. J. Int.*, 98, 107-130, 1989.
- 29) Harkrider D.G. : Surface waves in multilayered elastic media Part.2, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 1937-1987, 1970.
- 30) Mitchell, A.R. and D.F. Griffiths : The finite difference method in partial differential equations, John Wiley & Sons Ltd, 23-26, 1985
- 31) Reynolds, A.C. : Boundary condition for the numerical solution of wave propagation problems, *Geophysics*, 43, 1099-1100, 1978.
- 32) 気象研究所地震火山研究班 : 強震記録から推定した11月22日9時41分の地震のメカニズム解(速報), 火山噴火予知連絡会会報, 38, 23-25, 1988.

東京工業大学 日本学術振興会特別研究員

〒227 横浜市緑区長津田町4259

大阪平野の地下構造とその地震動の特徴

Subsurface structure of the Osaka basin and seismic motions influenced by it

堀家 正則

Horike Masanori

Surveys of the subsurface structure of the Osaka basin were conducted in the 1960's and from the middle of the 1980's. As results of the surveys in the first period, the Osaka basin was known to consist of two sub-basins, Osaka bay basin and Kawachi basin, devided by the subsurface mountain range, Uemachi elevation. In the second period, various geophysical explorations revealed the outline of the interface between the Osaka bay basin and the bedrock. Large-amplitude wave trains, running after main portion of S waves, were detected in seismic motions in the osaka plain by Toriumi, who afterwards identified these waves as surface waves generated at the periphery of the osaka basin. Generation of the type of waves suggests that the whole subsurface structure must be considered in the prediction of seismic motions in sedimentary basins.

(1) はじめに

関西地方は、大阪・京都・神戸等の大都市が存在しており、大地震に襲われれば、構造物の破壊や都市機能のマヒにより、これらの都市と周辺の住民の生活が重大な困難におちいると予想される。また、関西地方の都市機能のマヒは、関西地方以外にも様々な分野に悪影響を及ぼすと考えられる。従って、関西地方においても、地震防災対策を確立することは、緊急の課題である。

ところで、地震防災対策を確立する際に最も基本的な情報は、予測精度の高い地震動の強さである。この地震動を予測する手法は、大別して二通りある。第一の方法は、小地震の地震動をグリーン関数とみなし、大地震の地震動を予測する方法である (IRIKURA, 1983)。第二の方法は、グリーン関数を解析的または数値的に求めようとするものである。この方法はLAMB(1904)にはじまり、より現実的な震源と地下構造に適用できるように、現在でも発展している。この第二の方法により、正確に地震動を予測しようとすれば、当然正確な地下構造を知る必要がある。特に、多くの大都市の存在する堆積盆地・平野では、その柔らかい堆積層のグリーン関数に対する寄与は、震源から基盤岩までのそれよりもはるかに大きくなると考えられるので、より正確な堆積盆地・平野の地下構造の推定は、これらの地域での地震動予測にとって、極めて重

要である。

大阪平野においても、地震動予測のも問題から近年基盤岩までの地下構造探査が行われるようになり、その構造が明らかになりつつある。一方大阪平野では、平野内の地震動観測により、堆積盆地構造における地震動について重要な知見が得られている。そこで、本報告ではまず、これまで行われてきた基盤構造探査の研究とその結果を述べ、次に大阪平野の地震動の研究を述べる。

(2) 大阪平野の地下構造

図1からわかるように、大阪平野と大阪湾は、北は六甲・北摂山地、東は生駒山地、南は和泉山地、西は淡路島により囲まれた、典型的な堆積盆地である。ここでの基盤構造を推定することは、地震工学的な目的からではなく、大阪平野の地盤沈下防止の目的から始められた。この研究は、IKEBE et al. (1970)によりまとめられているので、基盤構造に関する部分のみを以下に述べる。図2では、図1に示した位置における深層ボーリングの結果をほぼ東西に並べた。この図より、大阪平野の基盤構造について次の三点が明らかになった。(1) 大阪湾岸部 (No. 6 のボーリング地点) の基盤岩深度は 90 m 以上である。このボーリング探査を実施する前に、

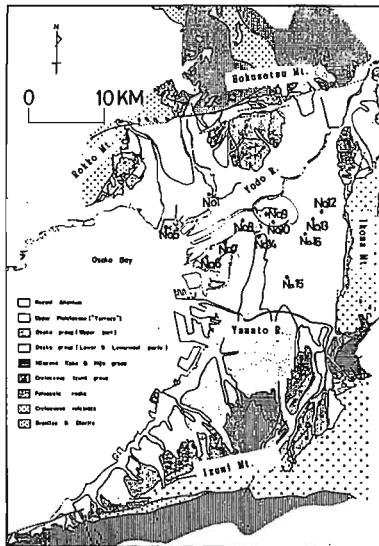


Fig. 1 Geologic map of the Osaka basin. Solid circles attached to number denote locations of boring sites(after IKEBE et al., 1970).

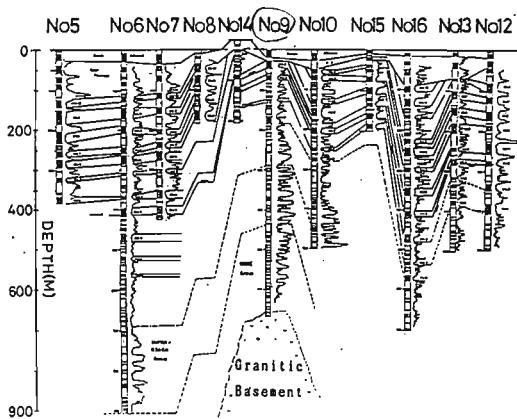


Fig. 2 Correlations of well-logs at boring sites in Fig. 1. Solid and dashed lines connect the same geologic strata between well-logs (afetr IKEBE et al., 1970).

当ボーリング地点で行なわれた反射波探査の結果から、基盤岩の深度は約1500mであり、深さ160mと60mに強い反射面があることが推定された。(2) 湾岸部から東に約10kmのNo. 9のボーリング地点では、深度657mで花崗岩からなる基盤岩に達した。また地層の対応から、この基盤岩は、西側では400m以上、東側では100m以上盛り上がっていることもわかった。更に、重力マップからこの基盤の盛り上がりは、南に延びていることがわかり、地下山脈である上町台地が確認された。(3) 上町台地と生駒山地の間の基盤岩

の最深部(No. 16のボーリング地点)は、700m以上である。

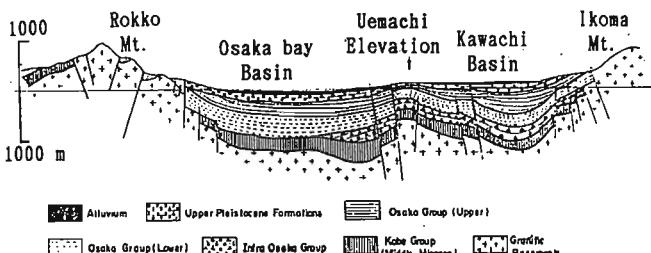


Fig. 3 Diagrammatic profile of the Osaka basin
(after IKEBE et al., 1970)

IKEBE et al. (1970)は、以上のボーリングの結果とさらに多くの地質及び地球物理学的資料を元に図3に示す様な大阪平野の北西一南東断面地盤モデルを作成している。このモデルでは、大阪平野の基盤は花崗岩からなり、上町台地により分けられた二つの盆地構造(大阪湾と河内盆地)から成るとしている。また両盆地の基盤までの最大深度は、大阪湾側で1500m程度、河内盆地側で1300mとしている。

地盤沈下の研究の終了した1970年以降しばらく、地下構造探査の研究はほとんど途絶えたが、1980年代半ばになり地震工学の目的から、探査が再び行なわれるようになり、現在も活発に行なわれている。以下では主に1980年代半ばから行われた、反射法、屈折法、微動、重力による探査から推定された大阪平野の基盤構造について述べていく。

中川・他(1984)は、大阪市大近くの大和川を利用したエーガンを振源とした単純な反射法探査を行い約600mの深さまでのP波構造を明らかにした。しかし、この方法では、分解能の高い視覚に捉えられる連続した地下構造をえることは、困難である。吉川・他(1987)は、CDP法により図4に示す2測線と大阪湾岸部の1測線で探査を行なった。その結果得られた反射断面を図5に示す。まず、大阪湾岸部の反射断面図から、湾岸部は、ほぼ水平成層構造であることがわかる。深度700mまで明瞭な反射面を多数含んでいが、それより深くなると反射面は減り、1400mより深くなると反射面がほとんど見えなくなる。得られた区間速度から判断して、700mの深さに堆積層内の境界があり、1400mの深さに基盤岩の境界があると考えている。この結果は、大阪湾岸部にあるボーリング掘削点(No. 9)でのIKEBE et al. (1970)の反射波探査の結果と一致して

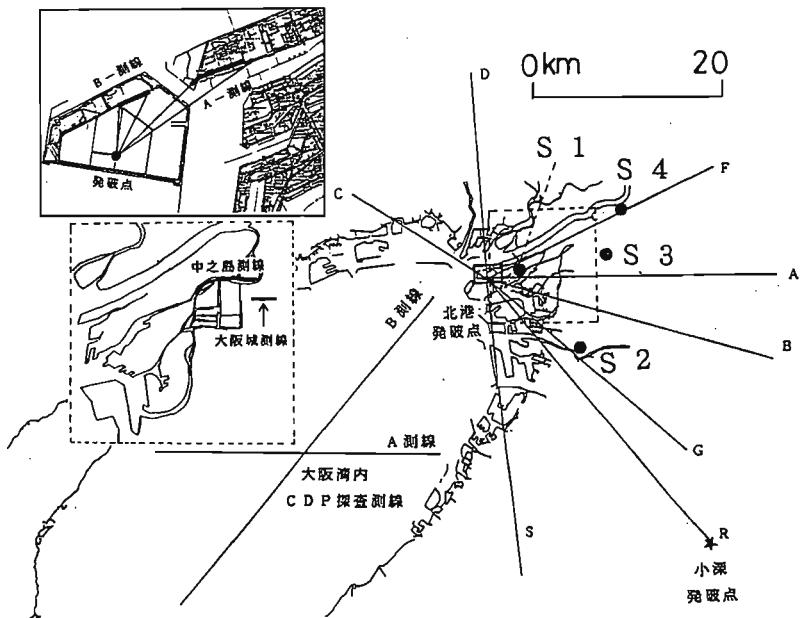


Fig. 4 Map showing the locations of measurement lines for refraction and reflection surveys, and array experiment sites for long-period microtremors. Lines in the basin, attached to capital letters C, D, F, A, B, G, R, and S, are for refraction surveys. Two lines in the Osaka bay and two lines in dashed square are for CDP surveys. Thick-line rectangular enclosing Hokkou explosion site are enlarged at left upper corner and two thick line in it are for reflection survey lines. Four solid circles denote array experiment sites.

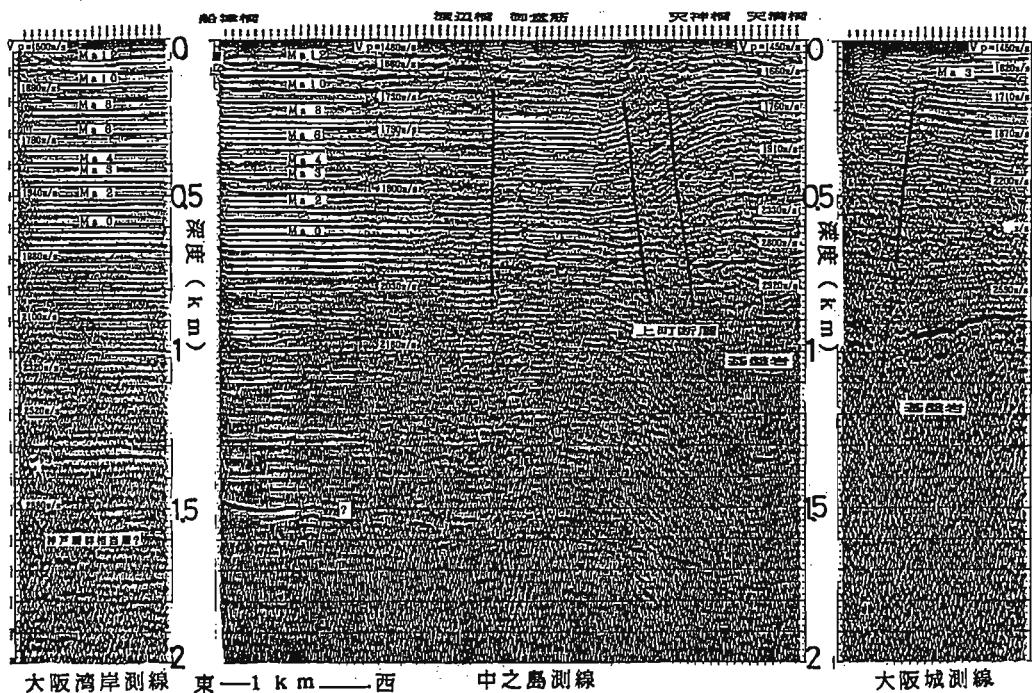


Fig. 5 Seismic cross sections beneath the osaka plain. The left is along the coast of the Osaka bay, the middle along line Nakanosima, and the right along line osaka-jyo.

いる。中之島測線の反射断面図からは、上町台地の正確な位置と、その西側が逆断層であることが読み取れる。大阪城測線では、900m付近に基盤岩と考えられる強い反射面があることがわかる。また、この大阪城測線の基盤面は、中之島測線の深さ800mの基盤面につながるであろうと予想されている。岩崎・他(1990)は、図5に示す大阪湾内の2測線でCDP探査を行い、大阪湾内の大きな基盤形状を明らかにした(図6)。大阪湾の基盤は、東西断面では西に向かって大阪湾岸部からだんだん深くなり淡路島西方で最大深度3000mとなり、段差約1kmの断層により浅くなり淡路島につながる。横田(1989)は、大阪湾北港を発破点とした爆破探査実験に際して、発破点から0.6km~2kmの範囲に地震計を設置(図4)し、図7に示す基盤からの明瞭な反射波を含む記録を得た。この記録の解析の結果、極めて信頼性の高い大阪湾岸部の基盤深度1600mを得た。以上の反射法による探査により、大阪平野(大阪湾も含める)の基盤形状は、上町台地から西に向かって深くなり、湾岸部で約1500mであり淡路島の東側で約3000mと最深になっていることがわかった。

1988年、大阪湾北港埋め立て地で2回、河内長野市小深(図4)で1回の爆破実験が行われた。測線と発破地点は、図4に示す。放射線上に張られた8本の測線上で、以下にのべるグループにより爆破地震動が観測された。測線C・Dは、大阪平野地震動観測グループ(代表・鳥海、1988)と香川・他(1990)により独立に観測された。測線F・A・Bは、地震動観測グループにより観測された。測線Gは、中川・他(1989)により測定された。測線Rは、中川・他と香川・他により共同観測された。この測線のみが河内長野市小深発破の逆測線の記録を観測している。また、測線Sは、香川・他により測定された。まず、大阪平野地震動観測グループ(1988)により推定された地下構造の結果を述べる。観測されたA測線の記録は、図10に示すように屈折波と直接波の立ち上がりの明瞭な記録である。この記録から得られた走時曲線の解析の結果、図8の上側にしめす地下構造断面図を推定している。基盤のP波速度は、5.8km/sであり、湾岸部の基盤までの深さは約1500mとしている。基盤は、東に向かってやや浅くなり約400mの段差のある上町台地に達する。さらに東

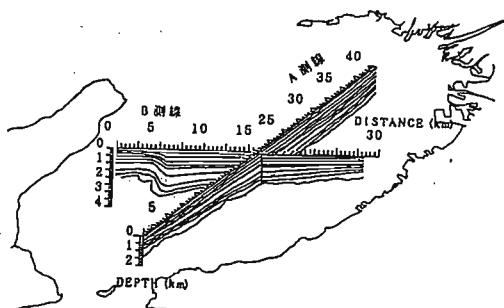


Fig. 6 Seismic cross section in the Osaka bay.

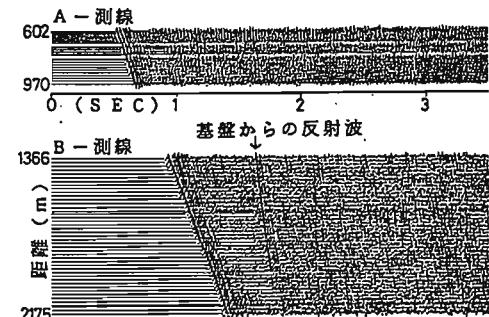


Fig. 7 Record section of reflection waves at short distances from Hokko explosion site

に進むと基盤は最深度1000mの盆地状となり生駒山地達する。F・B測線についてもほぼ同様の結果を得ている。青木・他(1989)も、反射波探査の結果を考慮して、レイトレーシングによる詳細なA測線の解析を行っている(図9)。上町台地までは、ほぼ同じであるがそれより東はやや異なっている。この不一致は、片測線の記録のみから、上町台地より東側の構造決定は、難しいためと考えられる。従って、更に適切な探査を行う必要があると考えられる。測線Dの結果を図8の下側に示す。平野中央部では、基盤は穏やかに浅くなり、北摂山地に近づくにつれ急速に浅くなっている。測線Cからは、測線Dとよくにた結果をえている。香川・他(1990)もこれらの測線についてはほぼ同様の結果を得ているが、基盤の速度がやや小さく約5.4km/sとしている。図10は、香川・他(1990)による測線D・Sの解析結果である。解析は、反射波探査の結果を用いて、タイムターム法により行っている。この図から、大阪湾岸部の南北方向の基盤は、大和川河口付近を最深部(約2000m)にして、すり鉢状をしていることがわかる。図11は、中川・他(1989)による測線R

の解析結果である。解析は、反射探査とボーリングによる情報を考慮して、はぎ取り法により行っている。そのためかなり詳細な基盤形状を推定している。香川・他(1990)も測線Rの走時曲線を、はぎ取り法により解析し、中川・他(1989)よりやや変化に乏しいがよく似た結果を得ている。

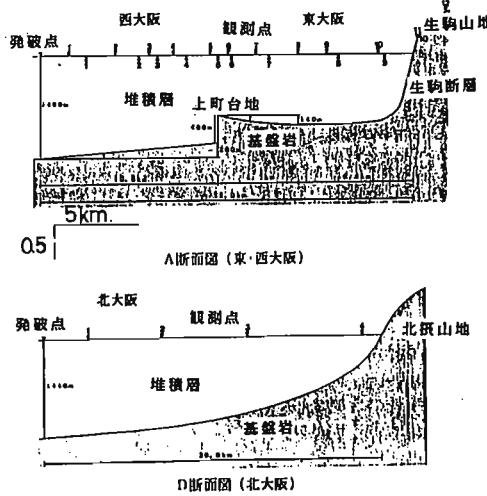


Fig. 8 Estimated cross section from refraction surveys along lines A and D

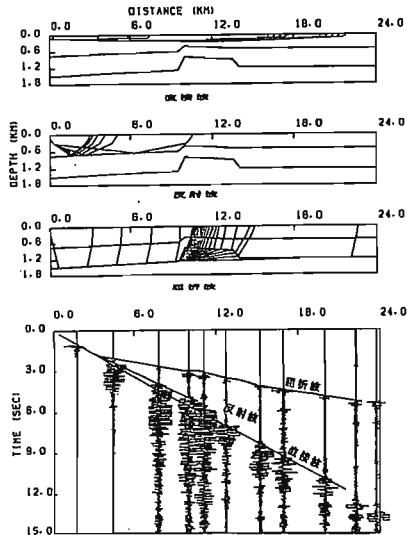


Fig. 9 Analysis of seismic explosion data along line A by the ray tracing. The upper three diagrams show the rays for direct, reflection and refraction waves. The bottom shows record section and calculated travel-time curves for three waves.

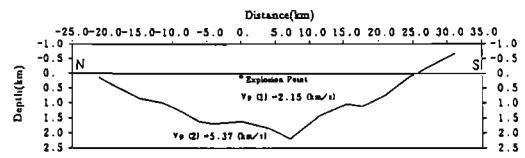


Fig. 10 Travel-time curves(lower diagram) and inferred cross section along lines D and S.

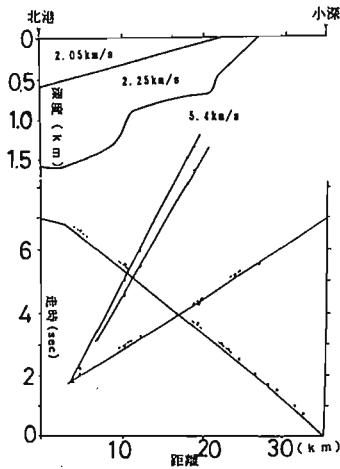


Fig. 11 Travel-time curves(lower diagram) and inferred cross section along line R.

反射及び屈折法探査により推定されるのは、境界の形状とP波速度である。しかし、地震動の予測には、S波速度も重要である。大阪平野における基盤岩までのS波速度構造は、HORIKE(1985)により図4のS2地点において長周期微動のアレイ観測により推定したレーリー波の位相速度のインバージョンにより推定された。青木・他(1990)は、反射波探査や爆破探査によりP波構造が比較的よくわかっている大阪平野内約3ヶ所(図4のS1, S3, S4)でこの長周期微動による探査を行い基盤岩までのS波速度構造を推定している。得られたS波速度モデルを図12にまとめて示す。この図から大阪湾岸部(S1)では、かなり深い所まで軟弱な層が続いているのがわかる。

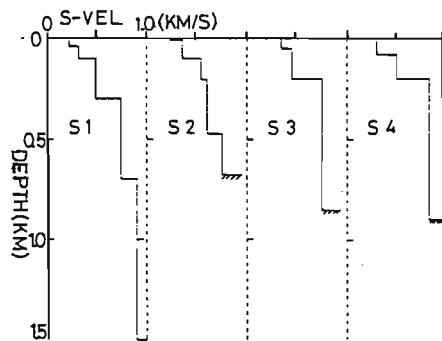


Fig. 12 Inferred S-wave-velocity structure in the Osaka plain from array experiment of long-period microtemors.

大阪平野及びその周辺大部分の重力測定も、地盤沈下防止対策の研究の一環としてまとめられている (IKEBE et al., 1970)。その後、領木・中川 (1984) と伊藤・他 (1989) による大阪平野内での部分的な探査と解析が行われているが、大阪平野全体の重力測定結果を用いた基盤構造の推定は行われていない。弾性波探査により、基盤構造がかなり明らかになってきた現在、重力による方法は、大阪平野全体の三次元基盤構造推定のための有力な方法であると思われる。

大阪平野の基盤構造の探査は、1970年までの地盤沈下防止の研究と最近の地震動予測のための研究から、かなり明らかになりつつある。しかし、淀川と北摂山地間、上町台地と生駒山地間の基盤構造等は、まだまだ不明であり今後の地下構造探査が必要であると思われる。また山地から堆積層に移る盆地周辺域の探査は、堆積層表面波の発生を考える際に重要であるが、従来からの手法より分解能の高い手法が必要であり、新たな探査法の開発という問題も含んでいるように思われる。

(3) 大阪平野の地震動の研究

大阪平野における地震動の研究は、1970年に大阪市大医学部構内（大阪市阿倍野区）にて強震動観測の開始により始まった。鳥海 (1975) は、平野内の観測点の記録と岩盤上の記録の比較の結果、平野内の記録は継続時間が伸びており、とりわけ比較的高周波を多く含む S 波主要動の後に 1 秒から 2 秒の周期の波（図 13 のあとゆれ-1）が続いていることに気付いた。模型実験により、この後続波は、大阪平野にトラップされた表面波であることを示唆した。また、鳥海 (1980) と鳥

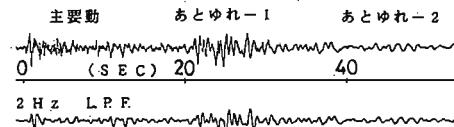


Fig. 13 Example of seismic motions containing locally generated surface waves (atoyure).

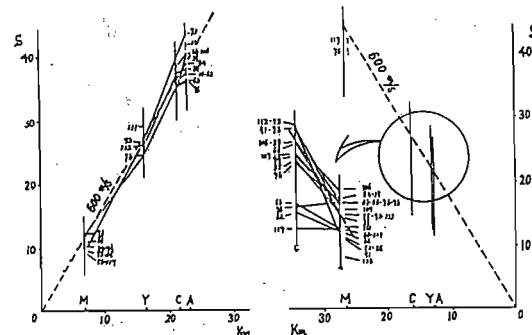


Fig. 14 Measured average group-velocity (600m/s) of surface waves, atoyure-phase in frequency range 1 s to 2 s. The left and the right diagrams show group velocities of surface waves generated at the edges between Rokko mountains and the osaka basin and between Ikomayama and the osaka basin, respectively.

海・他 (1982) は、この後続波が震源距離に関係なく主要動の一定時間後に現れるところから、大阪平野と周辺山地境界で生じた表面波であることを以下のように実証した。第一は、周辺山地から生成・伝播してくる表面波とすれば、周期 1 秒から 2 秒の平均群速度が 0.6 km/s となり矛盾がない (図 14)。第二は、後続波は、バンドパスフィルターによる解析により分散していることを示した。以上の大阪平野における堆積層表面波の研究から、堆積盆地の地震動は、直下の地下構造のみでなく盆地構造全体の影響を考慮すべきであることを明らかにした。

以上述べたように大阪平野の地震動に対する影響は明らかになってきているが、解明すべき問題もまだ多く残っている。たとえば、なぜ六甲山地と生駒山地から堆積層表面波が強く放出されるのか、また上町台地や新たに発見され断層が地震動にどのように影響しているにか等の問題である。これらを含めた疑問は、より適切に配置した地震計アレイ観測とより詳細な大阪平野の地下構造探査により解明されていくとおもわれる。これらの研究には、大阪平野の地震動予測に関心のある多くの研究者の協力が必要となると思われる。

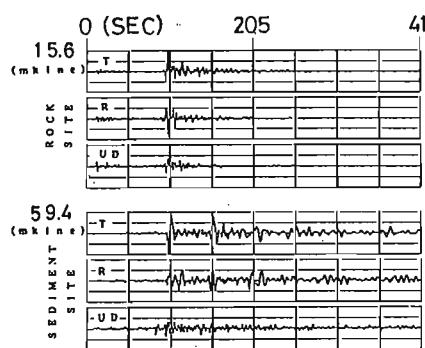


Fig. 15 Examples of seismic motions recorded by newly deployed seismic array (triangles in Fig. 16) in Osaka plain.



Fig. 16 Locations of strong motion observation sites in the Osaka plain. Solid circles are stations installed by Toriumi and his colleagues and triangles by Matsunami and his colleagues.

大阪平野の地震動の研究は、これまで鳥海を中心とした大阪平野地震動観測グループにより行われてきた。しかし、1988年から京大防災研により三成分の広帯域・広動帯域強震計の大坂平野への展開（図1中の黒三角印）が始められた。図1ではそれにより得られた岩盤上と平野で得られた記録例である（松波・他、1989）。たとえば、これらの異なるグループ間のデータの交換により地震動の問題が解決されるかもしれない。

最後に、関西地方では、京都盆地においても地下構造探査と地震動の研究が精力的に行われている。しかし、

このことについては、紙面の関係で別の機会にゆずりたい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、鳥海勲氏（大阪工大）、中川康一氏（大阪市大）、香川敬生氏・澤田純男氏（大阪土質）、横田裕（阪神コンサルタント）、入倉孝次郎氏（京大防災研）から資料を頂いた。記して、感謝します。

参考文献

青木義彦、堀家正則、竹内吉弘、1989、大阪平野の速度構造推定、地震学会予稿集(2), p. 113

青木義彦、尾崎昌弘、辻本厚詞、堀家正則、竹内吉弘、1990、大阪平野のS波速度構造の推定、建築学会近畿支部報告集, p. 341—344。

IKEBE, N., J., IWATA, and J., TAKENAKA, 1970,

Quaternary Geology of Osaka with Special Reference to Land Subsidence, Journal of Geoscience, Osaka City University Vol. 13, p. 39-98.

伊藤潔、村上寛史、中村佳重郎、1989、有馬・高槻構造線周辺における重力測定、地震2, 42, p. 485—496。

IRIKURA, K., 1983, Semi-Emperical Approach to Prediction of Strong Ground Motions During Large Earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 33, p. 64-104.

岩崎好規、澤田純男、香川敬生、松山紀子、大志万和也、井川猛、1990、大阪湾における反射地震探査、物探学会論文集, p. 54—57。

大阪平野地震動観測グループ（代表・福井大学・鳥海勲），1988、地震学会予稿集, p. 67。

香川敬生、澤田純男、岩崎好規、江見晋、1990、発破実験より推定される大阪堆積盆地構造、地震（投稿中）

鳥海勲、1975、平野の地震動特性について、第4回地震工学国内シンポジウム, p. 129—135。

鳥海勲、1980、大阪平野の地震動特性—あとゆれの伝達経路について—、日本建築学会梗概集（近畿）, p. 487—488。

鳥海勲、大場新太郎、村井信義、1982、第6回日本地震工学シンポジウム, p. 465—471。

- 中川康一, 三田村宗樹, 中井明彦, 辻彰洋, 岩崎好規,
1989, 大阪平野における人工地震観測と地下構造,
応用地質学会 関西支部概要集, p. 30-33。
- HORIKE, M., 1985, Inversion of Phase Velocity of
Long-Period Microtremors to the S-Wave-Velocity
Structure Down to the Basement in Urbanized Area,
J.P.E. Vol. 33, p. 59-96.
- LAMB, H., 1904, On the Propagation of Tremors over
the Surface of an Elastic Solid, Philosophical
Transaction of the Royal Society of London A203,
P. 1-42.
- 松波孝治, 岩田知孝, 藤原広行, 入倉孝次郎, 1989,
大阪平野及びその周辺部における高周波数帯・広動帶
域 地震波観測, 地震学会予稿集, p. 74。
- 領木邦浩, 中川康一, 1984, 大阪平野中央部における
重力測定と基盤構造, 地震予稿集, p. 208。
- 横田裕, 1989, 私信
- 吉川宗治, 町田善之, 寺本光男, 横田裕, 長尾英孝, 梶
原正章, 1987, 大阪市内における反射法地震探査,
物探学会文集, p. 114-117。

IV. 予測手法の現状と限界



やや長周期地震動の各種予測手法のレビューと研究展望

REVIEW AND FUTURE PROSPECT OF PREDICTION METHODS OF LONG-PERIOD (2-20 SEC) GROUND MOTIONS

野田 茂
Shigeru NODA

ABSTRACT

This paper begins with a brief historical review of the theoretical approaches towards fault dislocation theory. This is followed by a classification of the existing models used in predicting long-period (2 to 20 sec) ground motions. A procedure of predicting strong ground motions is then presented using empirical Green's function and the spectral law of seismic waves. This paper also includes the elucidation of the engineering characteristics of JMA strong motion seismograph records as well as the correction method of SMAC accelerograms for a period range of about 4 sec. An effort to point out the strengths and weakness of the engineering approach is made using seismological methods of synthesis. It is emphasized that long-period ground motions can be considerably well simulated using a synthetic method for heterogeneous crustal structure and faulting models.

1. まえがき

最近のビルの高層化、橋の長大化やタンクの大型化とともに、やや長周期地震動の性状の考察が重要になってきている。1983年5月26日の日本海中部地震では、各地で周期10秒前後の波が卓越し、大型石油タンクのスロッシング現象が生じた。1985年9月19日、メキシコ市は、震央距離の遠い（約390km）巨大地震の洗礼を受けた初の近代都市となった。メキシコ地震のように、地盤などの悪い条件がそろえば、早くから伝播してきた地震波は中高層ビルを破壊するのであるから、やや長周期波は今後の地震工学の新たな問題と言える。なお、本小文では、やや長周期帯域を約2～20秒として取り扱っている。これは、構造物の固有周期と気象庁1倍強震計の記録精度などを勘案して決めたものである。

従来は、加速度型強震計記録に基づく短周期（数秒より短い）波の研究が日米を中心に極めて盛んであった。しかし、数秒より長い周期成分の工学的重要性が認識されだしたのは比較的最近であり、その研究の歴史は浅い。我が国におけるかなりまとまった研究成果としては、次のものが挙げられる。

- 1) 長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究（小林啓美）¹⁾
- 2) 屋外タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する研究（土木学会）²⁾

- 3) 長周期（約2～20秒）地震動の工学的特性に関する研究（片山恒雄）³⁾
- 4) スロッシング現象に関する文献的調査報告書（危険物保安技術協会）⁴⁾
- 5) やや長周期（周期約2～20秒）地震動のデータを用いた震源過程の解析（伯野元彦）⁵⁾
- 6) 広帯域（周期0.1～20秒）地震動特性に関する研究（伯野元彦）⁶⁾
- 7) 長大構造物の耐震安全性に関するやや長周期地震動の発生機構に関する研究（瀬尾和大）⁷⁾
- 8) 屋外タンクのスロッシングに関する調査報告書（自治省消防庁）⁸⁾

上記のプロジェクト研究では、1) 加速度計（主にSMAC-B₂型強震計）、2) 速度型地震計や3) 気象庁変位型強震計の記録、および4) 断層震源モデルによる計算波形、の解析から得られる地震動のやや長周期成分の工学的特性を総合的に取りまとめている。それぞれの時点で実施されたこれらの研究は、1) 時宜を得たテーマについて総合的に整理し、新しい知見と見解を提示している、2) 現象の解明に大きく貢献している、3) 内容、手法に独創性が見られる、4) 応用性、有用性、発展性が大きいなど、貴重な成果となっている。

本小文では、1) やや長周期地震動データベースの解析とそれらの工学的模擬地震波作成への応用、2) 断層

震源モデルに基づく理学的理論地震波合成と3) 実地震記録をグリーン関数とした経験的グリーン関数法による波形合成について、主な研究成果のレビューを行うとともに、将来の展望について議論する。

なお、同様の主旨により、井上¹⁰⁾は、やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望についてまとめている。その内容としては、やや長周期地震動の観測に使われる地震計、大地震時におけるやや長周期帯域での観測記録と各種耐震設計基準、1倍強震計記録、断層震源モデルを用いた震源過程の研究と工学的な地震動予測を含んでいる。

Joyner と Boore¹⁰⁾は、記録の測定と処理、強震動を支配する要因分析、回帰式の展開に基づく経験的強震動予測、不均質な破壊過程を導入した確率的震源モデルに基づく強震動予測、および経験的関係と理論的関係を相補的に導入したハイブリッド・モデルに基づく強震動予測（いわゆる経験的グリーン関数法）について、最近の研究成果を取りまとめている。

2. 理論地震波合成法によるやや長周期地震動の評価

断層震源モデルを適用して地震動を計算するためには、1) 震源の表し方（どのような震源要素に還元するか）、2) グリーン関数の評価（震源要素に対する合成記録の計算）と3) インバージョン法（最適値の評価と数学的技法）について検討しなければならない。本章では、理論地震波合成法について簡単に述べる。なお、紙面の都合上、必要な論文以外は参考文献として掲げていないことをおことわりしておきたい。

(1) 解析的方法の歴史的発展

断層震源モデルと波動理論の数理的展開については、AkiとRichardsやBen-MenahemとSinghのテキストに詳細に説明されている。地理物理学の分野で急速に発展している断層モデルを用いた震源過程の研究は、工学の分野では比較的なじみの薄い問題である。こうしたことから、その基本的考え方が文献2)、9)、11)において要領よくまとめられている。また、Malら、AkiやBooreは、断層モデルを用いた強震動予測に関する諸研究の成果を紹介している。これらの文献は、断層モデルになじみの薄い地震学者にとって有益な資料となっている。

断層モデルに正しい数学的な表示が与えられたのは、1960年代前半のことである。丸山やBurridgeとKnopoffは、断層面上に変位の食い違いが生じたときとダブルカッパル力が作用したときの弾性波の式が理論的に等価であることを示している。

一般に、地震波形は、断層面上での食い違いの時間・空間関数と各面要素の破壊により発生した波動場のグリーン関数の合積により求められる。食い違い関数は、運動学的モデル（あるいはdislocation モデル）や応力緩和モデル（stress relaxation モデル）によって求められる。応力緩和モデルでは、断層面上での食い違い量を、境界条件のもとで弾性体の運動方程式を解くことにより求めている。従って、厳密な破壊力学的考察を行うことができる。しかし、一般には、断層面上で指定すべき応力条件がよくわかっていないことと簡便さから、運動学的モデルがよく採用されている。

Haskell は、簡略化した断層運動の物理過程として初めて地震震源を考察し、理論地震記象の算定式を示した。無限媒質中において計算を行う Haskell の断層モデルは大変単純なものである。すなわち、このモデルでは、断層面を矩形とし、面上での食い違いの大きさはどこでも一定で、かつ食い違いの時間的变化はランプ関数で示され、破壊フロントは一定速度で一方向に拡がると仮定している。計算上の基本的なパラメーターは、断層面の長さ L と幅 W 、食い違い量 D 、ライズタイム τ と破壊伝播速度 V_b の5つである。しかし、その単純さにもかかわらず、この Haskell モデルは震源過程の研究に大きな威力を発揮した。

1966年Parkfield 地震のとき、断層からわずか80m離れた観測点で、大変貴重な加速度記録が得られた。変位波形は特徴的なパルス形を示していた。Akiは、Haskell モデルを用いて、断層のごく近傍において計算した理論地震波形と実測波形が大局的によく似ていることを示した。これは、断層運動の動的過程に関する研究の可能性があざやかに実証された初のケースであった。この論文は、Preprintの段階から地震学者の間に伝わり、衝撃を与えたようである。

しかし、現実の断層運動は、Haskell モデルのように単純で一様なものではなく、大変ぎくしゃくしていて複雑である。こうしたことから、断層モデルを改良して、断層面上での食い違いあるいは応力分布の非一様性を導入することが試みられてきた。その結果、観測波形を十分に再現できることが次第にわかってきた。非一様性は、遠方の地点における実体波の解析などから、様々な地震波について見出されてきた。この問題は多重震源解析に対応し、1970年代後半から、C.I.T. の金森のグループを中心として、続々と研究が行われた。この非一様性が著しいほど、地震波の高周波成分は増すことになる。

一方、波動伝播媒質の構成においても次第に精緻化さ

れ、より現実的なモデル化が試みられるようになってきた。すなわち、地盤モデルは、一様無限媒質 → 一様半無限媒質 → 水平成層半無限媒質 → 傾斜構造 → 局地的な構造の不規則な地盤というように発展してきた。それとともに、グリーン関数の計算法（決定論的モデル）が改良され、計算時間が速くかつ有効な手法が提案されてきた。例えば、グリーン関数の主な評価法としては、波数積分法、波線理論による方法、離散型波数有限要素法などがある。

(2) 断層モデルの改良

地動の変位や速度波形の計算と同じような決定論的処理法のみを用いる場合、加速度波形を再現することは難しい。こうしたことは、断層モデルを用いた強震動模擬に関する研究の進展に伴ない、明らかになってきたことである。この困難さを回避するため、破壊伝播の巨視的特徴を決定論的に、かつ断層運動を支配する動力学量のいくつかを確率論的に取り扱ったハイブリッド・モデルが構築されるようになってきた。

このような断層モデルの改良法の代表例としては、①バリア・モデル、②アスペリティ・モデルや③階層モデルがある。バリアとは断層面上でのすべりの生じにくい場所、アスペリティとはずれ破壊に対する抵抗（破壊強度）の大きい所のことである。両モデルは、断層面上の破壊強度の不均質分布に注目したものであり、ぎくしゃくした断層運動の破壊過程を考慮して短周期成分発生の原因を説明できる。このようなモデルは多重震源解析によっても求められる。すなわち、震源過程を多重eventの重ね合わせで表わし、各eventの震源パラメーターを求めれば、震源の局所的な破壊過程が得られる。

多重震源は、断層面上でのすべりの不均一性と破壊伝播の不連続性によって特徴づけられる。階層性は地震の複雑さを規定する要因であり、Fukaoらによって提案された概念である¹¹⁾。Fig.1は階層モデルの概念図を示したものである。階段的な破壊過程は、断層面上で繰り返し成長する。

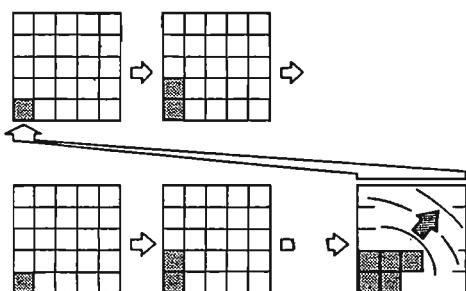


Fig.1 Hierarchical model of rupture expansion

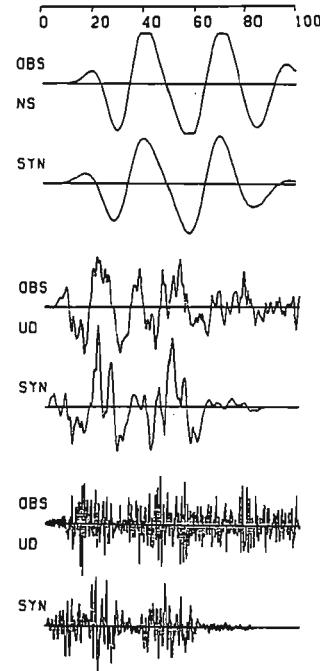


Fig.2 Observed seismograms and synthetic ones for three hierarchical model
(The 1985 Mexico earthquake)

菊池^{5), 11)}は、1985年メキシコ地震を対象として、長周期解と階層モデルに基づいて、短周期地震動の評価を試みている。GDSN (Global Digital Seismograph Network) の記録が用いられた。Fig. 2は、3階層の構造を考えたときの、合成波形と観測波形の比較の一例である。上段から、各図は、長周期、中周期、短周期の帯域におけるGDSN記録に対応している。コーダ部を除くと、合成波形は観測波形とよく一致していることがわかる。

一般に、断層モデルを工学的に応用するための配慮がなされている最近の研究の中で、特色あるモデルとしては、次のようなものがある。

- ①地震発生過程（特に応力降下量）を確率過程とみなすモデル
- ②小地震記録から大地震記録を合成するモデル
(いわゆる経験的グリーン関数法)
- ③断層面上に強度の異なるバリアを設けるモデル
で、断層面上の不規則性を動力学的にとらえて、
波動方程式を解く方法
- ④厳密な破壊力学の考察をもとにしたモデル
- ⑤の平澤モデルでは、断層面上の応力降下量の不均質性を確率論的に与え、それをモデル化して、加速度振幅の評価を行っている。実際の断層面は、曲がっていたり、枝分かれしたり、雁行していく一枚でないことが多い。
- ⑥のモデルでは、こうしたことが原因で生じる断層面上

の破壊強度の不均質性を、物理量に表示している。④のモデルを用いると、破壊面での変位の食い違いの関数形を求め、破壊の生成・伝播により放射される短周期弾性波の破壊面近傍での特性がわかる。

(3) 地震動スペクトルの推定

断層破壊の確率モデルを考慮し、地震波形そのものではなく、そのスペクトルの性質を推定する方法がある。

例えば、PapageorgiouとAkiの研究がある。この研究では、バリア・モデルをもとにして、長方形の断層面上を小断層すなわち円形クラックの集合体であるとしている。小断層面の間隔にバリアを設け、断層面上を破壊が進行するとき、次々とクラック破壊が伝播するというマルティ・クラックモデルが提案されている。この研究では、各クラックの破壊はまったくincoherentに生じるとし、個々の円形クラックから発生する地震動の加速度パワースペクトルを加え合わせることにより、強震動のパワースペクトルを評価している。

このような強震動予測法ではパワースペクトルしか求められない。しかしながら、複雑な破壊過程を単純化して、高周波成分まで取り扱えることができる。また、この方法は、決定論的モデルと確率論的モデルの双方の特徴を活かしたハイブリット・モデルとなっており、将来の地震動を予測する上で地震工学上極めて有効である。

一方、Gusevは、種々のマグニチュードスケールの関数をもとにして、加速度スペクトルのスケーリング則を与えていた。現時点では平均的な意味ではあるが、観測データとよく対応している。震源域の物理的性質の研究が進展するに伴い、今後、このような地震動スペクトルの推定法に関して注目していく必要がある。

泉谷や佐藤の研究は、平澤の断層モデルをもとにして、確率過程論から加速度波形の推定を試みたものである。断層モデルの工学的応用分野の研究は、現在、成熟した段階に達しつつある。こうしたことから、両者の研究では断層モデルの特徴をできるだけ活かして強震動予測を行うことを試みており、今後の発展が望まれる。

(4) 地震工学分野への適用

最近では、吊橋、超高層ビルや石油タンクなどの固有周期の長い大型あるいは長大な構造物が出現してきた。しかし、それらの耐震設計を十分に保証するだけの強震記録はほとんど存在しない。こうしたことから、地震学と工学との新しい境界領域として、大地震時の強震動を知ろうとする研究分野が要請されてきた。地盤構造を考慮した理論地震動のシミュレーションは近年数多く行われるようになってきており、その結果は観測記録ともよ

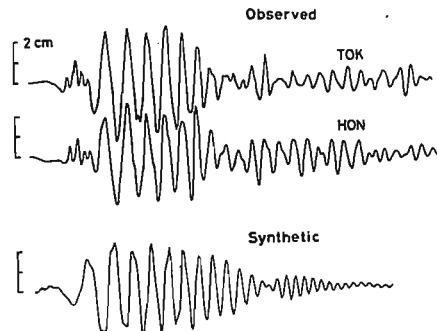


Fig. 3 Synthetic Love wave compared with observed transverse waves at Tokyo and Hongo
(The 1974 Izu Peninsula earthquake)

く対応している。土木・建築の分野では、構造物の設計用入力地震動や応答スペクトルの作成という意味から、断層震源モデルの有効性が検討されている。

工藤¹²⁾は、地下構造を適当に選べば、正規モード解が周期10秒前後の地震動（表面波の卓越する記象）を解釈する上で有効なことを示した。その成果は、土木・建築の地震工学者がやや長周期地震動を解析する上で、大きな助かりを与えたのではなかろうか。

Fig. 3は、1974年伊豆半島沖地震における東京での記録をシミュレートしたものである。ここでは、垂直不連続面を有する2つの成層地下構造を仮定している。断層震源モデルと正規モード解で励起されたLove波は、Alsopの方法によって垂直境界を透過し、東京で記録される。図より、コーダ部に若干の問題は残すものの、波動伝播方向の地盤の不均質性を考慮する上で、この方法は大きな役割を果たしたことがわかる。

土木の分野において比較的最初の段階で、断層モデルの適用によって地震動模擬を行った研究に、井上ら¹³⁾やFujinoら¹⁴⁾の研究が挙げられる。井上らは、断層震源モデルと正規モード解を用いて吊橋の補鋼桁の応答スペクトルを求め、一方藤野らは大型石油タンクのスロッシング現象の解明にこの方法を適用し、断層モデルを工学的に発展させるように努めた。これらの研究とほぼ同時期に、断層モデルを適用した論文が発表された。塩野¹⁵⁾は、井上らと同じ意図で長大構造物の設計用入力地震動の評価を行った。その後、断層モデルを用いた強震動予測や応答スペクトルに関する研究が盛んに見られるようになってきた。

断層震源モデルの工学的応用の分野は研究の歴史が浅いが、今後の有効利用という点で、大いに期待がもてる方法と言える。仮想東海地震のような巨大地震や長大構造物の設計用入力地震動の評価の際、この手法を用いて

求めた結果は今後貴重な財産を形成していくものと考えられる。

3. 経験的グリーン関数法による

やや長周期地震動の評価

(1) 波形合成法

グリーン関数の評価法としては、前述したように、理論的方法と経験的グリーン関数法（小地震記録の変換法）の2種類がある。このような解析法の多様さは、基本法の組み合せの多様さによる。

2. で述べた解析的なグリーン関数では、1) 震源での破壊機構を予測しがたいこと、2) 伝播経路や地盤構造などの複雑な影響を直接見積もることができないこと、かつ3) 非常にやっかいなグリーン関数を計算するのに膨大な時間を要すること、などの問題がある。

1978年、このような問題点を克服する有効な方法が提案された。この方法は、本震と同一の震源域で生じた小地震の記録の実際の地震動記録をグリーン関数として用いるため、経験的グリーン関数法（半経験的方法）と呼ばれている。この方法は、断層震源モデルと実記録の双方を活用するもので、伝播経路の3次元的な不均質性の影響を自動的に含ませることができる。

1978年にHartzel¹⁶⁾の先駆的研究が発表されて以来、この手法の有効性を検証する研究が数多く行われてきた^{2), 5), 6), 11), 17), 18)}。その結果、大地震時の複雑な強震動特性の推定が可能となってきた。

Kanamori¹⁹⁾は、経験的グリーン関数法の意義をいちばんよく認識し、San Andreas断層でのM 8クラスの巨大地震を対象として、地震動予測という立場で工学的応用を図った。ただし、グリーン関数の求め方にやや問題があつたり、実記録がないために、結果の妥当性が検証できなかつた。しかし、この論文は工学的有用性という点で秀でており、地震工学者に与えたインパクトは大きかった。

数多くの研究者がこの経験的グリーン関数法を適用してきた。それぞれ、基本的立場は同一であるが、対象とした地震や地震動、対象周期、グリーン関数（用いた地盤記録）、補正法、断層面での破壊過程を考慮した重ね合わせ方式などが異なっている。

本小文では、入倉の論文^{17), 18)}に従って、経験的グリーン関数法による波形合成の手続きとその問題点の概略を紹介する。

合成に必要なパラメーターは次のようにして与えられる。

1) 重ね合わせるべき小地震の数は、大地震と小地震

のモーメント比により決まる。

- 2) 大地震の断層面の分割個数は、大地震と小地震の断層面積比で決められる。
- 3) 2) で分割された個々の小領域から、大地震と小地震のすべり量の比に相当する個数の小地震が大地震時に各小断層から発生する地震波を計算する。上記のパラメーターを用いて、 ω^{-2} モデル（スペクトルのスケーリング則）と経験的グリーン関数法を結びつけることにより、大地震時の強震動が合成される。一つの合成法では、断層面上でのすべりやすべり速度が一様なモデルを考える。すなわち、大地震と小地震の応力降下量は一定とする。大地震と小地震の変位スペクトル比および加速度スペクトル比は、それぞれの地震モーメントの比およびモーメント比の3乗根となり、断層分割要素数が決まる。

断層面のすべりの空間的分布や破壊伝播の様子は不均質である。そこで、断層面での不均質すべりを考慮した波形合成法も提案されている。この場合、 ω^{-2} モデルに従うことは先の合成法と同じである。しかし、すべり速度、ライズタイムや破壊伝播速度は空間的に任意とする。ただし、すべり量については拘束条件を与える。

Fig. 4は、インバージョン法によって求められたすべり速度と破壊伝播速度から得た合成波形と観測波形の比較である。対象地震は1980年伊豆半島東方沖地震、対象地点は震源近傍の川奈である。計算の結果、震源に極めて近い地域での波形合成には、1)震源での不均質な断層運動の詳細が必要になる、2)特に高周波地震波の生成域の

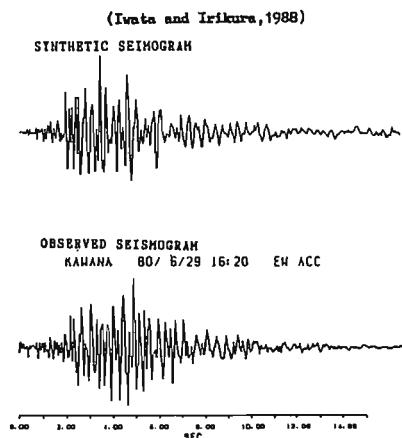


Fig. 4 Comparison of observed acceleration seismogram with synthesized one at Kawana based on heterogeneous faulting model (The 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki earthquake)

推定が重要なことが指摘された。

(2) 問題点と解決への道

小地震の波形には、複雑な伝播経路の情報が全て含まれている。従って、震源において適切な方法でそれらの記録を重ね合わせれば、伝播経路のわずらわしい影響の評価を避けて、大地震時の波形を推定することが可能となる。現状では、複雑な震源過程や伝播特性を全て理論的に考慮することは困難である。Hartzellの方法は、この問題を実記録波で代用することにより処理する巧みな方法と言える。しかしながら、小地震の選択の基準や重ね合わせ方、スケーリング則、震源深さの違いによる補正など、まだ改良すべき余地は残っている。

経験的グリーン関数法の問題点について、入倉¹⁸⁾は次のように指摘している。

1) 震源スペクトルのスケーリング則

合成法は、大地震および小地震が ω^{-2} スケーリングモデルに従うとして定式化されている。この問題については多くの議論がある。今後、日本付近の地震波の解析により、観測事実に促して、スケーリング則に対する考え方の違いを整理していくなければならない。

2) 応力降下量一定の条件

応力降下量が一定と考えられる地震は、マグニチュードMが約4以上の地震である。従って、Mが4以下の小地震を経験的グリーン関数として用いるときには、注意を要する。小地震の応力降下量が大地震のそれより小さくても、 ω^{-2} モデルに従っているならば、応力降下量の比の分だけ、小地震の波形振幅を拡大すればよい。

3) 震源の放射特性の影響

小地震と大地震の発震機構は一般には同一とみなしている。しかし、現実には異なることが考えられるし、例え同じであっても、分割された小断層毎のグリーン関数では震源放射特性の補正を必要とする。このような断層メカニズムの変化を考慮した成功例が報告されている^{6), 11), 18)}。こうした方法はやや長周期帯域では成功する可能性がある。しかし、高周波の放射特性は散乱などによって平滑化されてしまうために、統計的な考え方導入しなければならない。

4) 地震動の距離減衰特性

特に、断層傍接地点では、幾何減衰 $1/\Delta$ だけでなく、媒質の非弾性減衰も考慮しなければならない。また、やや長周期帯域の波形合成に当たっては、 $1/\sqrt{\Delta}$ の距離減衰の補正も必要となる。

5) みかけ上の周期性

ライズタイムや分割小断層の大きさにより、合成波形は周期性を持つ。しかし、破壊伝播速度の空間的変化を考えれば、みかけ上の周期性はなくなる。

異なる2つの小地震（余震）を考える。2つの地震がほぼ同一場所で発生し、規模もほとんど等しくても、やや長周期帯域での震源スペクトルにかなりの違いがあることが指摘されている^{5), 6)}。このような場合、大地震の性質（多重震源性、アスペリティの分布、破壊強度の不均質性など）を調べておかなければならない。また、小地震の震源深さと震源過程を検討しておくことが重要となる。

深さ方向の震源域の拡がりが無視できない断層に対しては、震源深さの差による表面波励起の差を正規モード解で補正することが試みられている²⁰⁾。また、要素地震の選び方としては、前述の ω^{-2} モデル以外に、強震記録を震源時間関数でdeconvolutionし、本来の意味に近いグリーン関数を得ることも提案されている⁸⁾。

経験的グリーン関数法は震源の物理的意味が明確になっている上に、大いに魅力的な方法である。ただし、合成に必要なパラメーターは決定論的に与えられるものではない。従って、確率過程としてのアプローチが必要であろう。また、今後は予測誤差解析も重要視されなければならない。

4. やや長周期地震記録の処理と

その工学的地震動予測への応用

(1) 強震計記録のデータベースの活用

SMAC-B₂型強震計記録（以下SMAC記録とする）は、建設省土木研究所と運輸省港湾技術研究所などの機関によって、観測・数値化され、公表されている。SMAC記録はこれまでの多くの地震に際して得られている。強震記録には膨大な蓄積がある。これらの記録が地震工学の分野で貴重な財産となっていることは衆知の事実である。また、地震工学の発展に対する貢献度は極めて高いものとなっている。

SMACは、大地震時においても、震源域での地動を記録できる利点がある。一方で、計器特性上の不利な点（長周期帯域での記録振幅が小さい）、数値化の際に生じる精度の劣化や記録長が短い（最大3分）などの理由のため、記録精度が安定しているのは主に4秒程度までとされている。しかし、数秒以上のやや長周期帯域でも、記録精度の劣化の原因とその補正法を見出すことが出来れば、SMAC記録を有効に利用することが可能である。

以上の観点から、土岐ら^{21) 22)}は、加振実験および数値化手法によって、SMAC記録の長周期成分に混入する誤差の原因を探査し、実証分析を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) ペン先と記録紙との間に固体摩擦が存在し、SMACの振動系と記録系を連結する連結バネの復元力が不足するため、記録波形に零線ドリフトが生じる。
- 2) 零線ドリフトは $1/f$ ノイズである。SMACノイズのレベルは、平滑化したフーリエ振幅スペクトルと周波数の積の極小値から算定する。
- 3) 原波形のフーリエスペクトルからSMACノイズ成分を引き、これを逆フーリエ変換して補正記録が求められる。

Fig. 5は、上記に示したSMAC強震記録の補正法の概念図を示したものである。図の左列から、加速度波形、フーリエスペクトルと応答スペクトルを、図の上段から、原波形、SMACノイズと補正波形を示している。

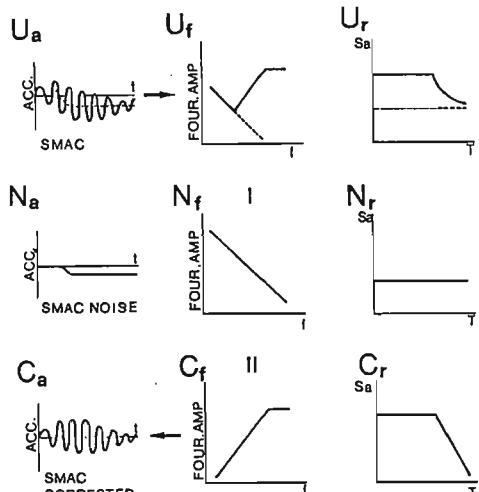


Fig. 5 Procedure of correction of SMAC record

土岐ら²²⁾は、上記の提案手法を用いて、SMAC記録9.8成分を補正し、マグニチュード、震央距離、地盤種別に関して、加速度と変位応答スペクトルの回帰式を求めた。その結果、従来の回帰式よりも、周期2~10秒の帯域での予測精度はかなり向上することがわかった。

気象庁1倍強震計の記録精度はやや長周期帯域(約2~20秒)でよいことが検証されている^{23) 24)}。そこで、この強震計記録を数値化し、各種補正を施して補正地震動を求め、それを工学的分野に利用することが、各研究機関で実施してきた^{1)~3) 5) 23)~25)}。数値化された主な地震波は、1960年三陸沖地震、1961年北美濃地震、1964年新潟地震、1968年日向灘地震、1968年十勝沖地震、

1978年宮城県沖地震、1985年日本海中部地震と1987年千葉県東方沖地震である。

現在までのところ、数値化記録は、1) 地動最大振幅や応答スペクトルの回帰予測式、2) やや長周期帯域での記録精度が劣化するSMAC記録の信頼度の確保、3) 地下構造の推定や震源過程のインバージョンなど、やや長周期地震動の工学的特性の総合的な検討に利用されてきた^{1)~3) 5)~7) 11) 20)~26)}。各研究成果については参考文献を参照されたい。

建設省土木研究所²⁵⁾では、5地震(1964年新潟地震、1968年日向灘地震、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震)の数値化記録から、やや長周期地震動の距離減衰式を求めている。最大地動については式(1)が、加速度応答スペクトルについては式(2)が採用されている。

$$X (M, \Delta, G C_i) = a (G C_i) \cdot 10^{b(G C_i) M} (\Delta + 30)^c (G C_i) \quad \dots \dots (1)$$

$$S_A (T, h, M, \Delta, G C_i) = a (T, h, G C_i) \cdot 10^{b(T, h, G C_i)} (\Delta + 30)^c (T, h, G C_i) \quad \dots \dots (2)$$

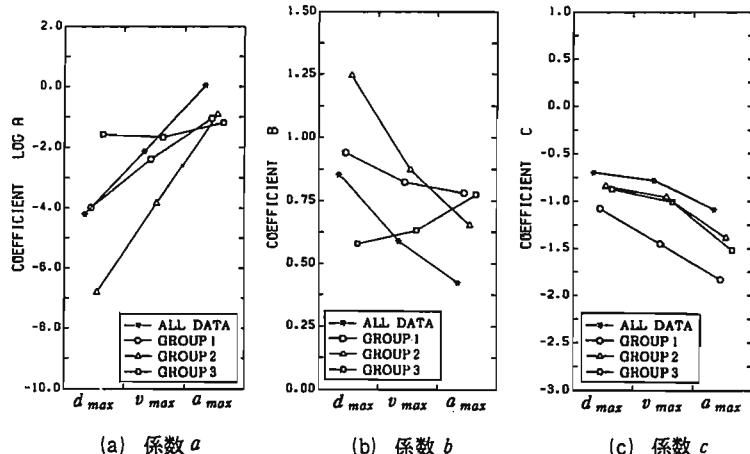
ここで、Xは最大地動(最大変位、最大速度、最大加速度)、Mはマグニチュード、Δは震央距離、G C_iは地盤種別、Tは固有周期、hは減衰定数である。

Fig. 6は、式(1)の回帰係数a、b、cを、最大地震動および地盤の種別ごとに示したものである一方、減衰定数2%に対する式(2)の回帰係数はFig. 7のようになる。図から、例えば、固有周期が長くなるほど、加速度応答スペクトルの距離減衰式はマグニチュードの影響を強く受け、かつ距離減衰が小さくなる特徴を有していることがわかる。こうした回帰予測手法の精度を高めるためには、今後中小地震も含めて、さらに多くの地震の強震計記録を数値化し、なるべく多くのデータベースを作っていく必要がある。

気象庁1倍強震計は、水平成分の記録最大振幅が約土3cmであるため、震源近くの強震動に対しては振り切れてしまうことが多い。上述の数値化された変位計記録にはこれらの振り切れた記録は通常含まれていない。そこで、山田ら²⁶⁾は、振り切れた1倍強震計記録の合理的な修復法を開発し、それを用いて過去のいくつかの振り切れた実地震記録の修復を試みた。

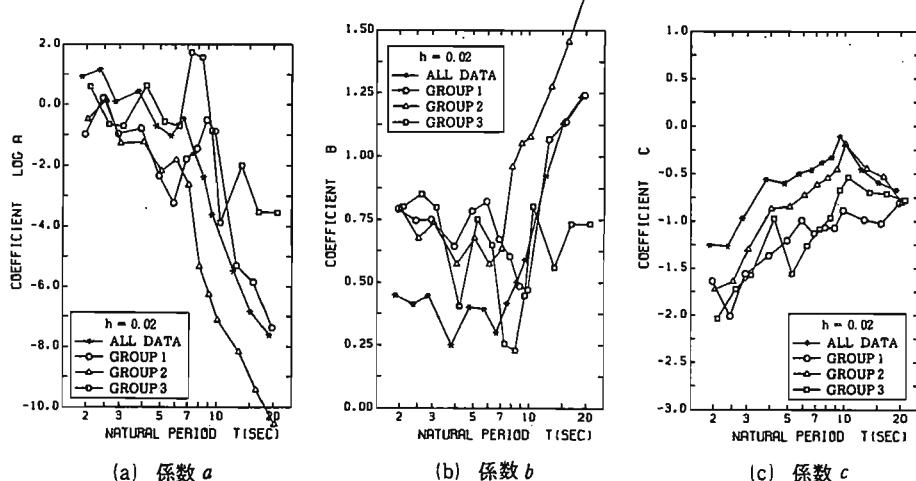
(2) 断層震源モデルに基づく地震動模擬

気象庁1倍強震計によるデータベースを用いた回帰式は工学者向きで大変便利である。しかし、この結果は、



(a) 係数 a (b) 係数 b (c) 係数 c

Fig. 6 Regression coefficients for estimating peak values of long-period (2 - 20 sec) ground motions



(a) 係数 a (b) 係数 b (c) 係数 c

Fig. 7 Regression coefficients for estimating acceleration response spectra in the period range of 2 to 20 sec

あくまでも点震源モデルによる模擬に基づくものである。従って、拡がりをもった断層面の破壊に伴う地震動模擬には適さない。物理的には、より優れた断層震源モデルの考え方を導入していく必要がある。

将来的には、1) やや長周期地震動データベースに基づく統計的グリーン関数の作成(4.(1))と、2) それを用いた経験的グリーン関数法による波形合成を行うことが望ましい。特に、この方法では、破壊過程の不均質性や震源パラメーターに幅をもたせることにより、確率過程としての地震動を模擬することができる。

上記の予測法を試みた例としては神山²⁷⁾の論文がある。ただし、この論文では、周期4、5秒以下の短周期地震動を対象としている。ここでは神山の方法を紹介することにより、やや長周期地震動の予測問題の参考にしたい。

神山は、まず、理想化された不均質断層モデルとSMAC

強震記録を用いて、断層の不均質性の平均像を明らかにするとともに、震源スペクトルの簡単な統計的スケーリング則を求めた。次に、このスケーリング則と不均質断層の破壊パターンを考慮して、中小地震の加速度記録から大地震時の加速度波形を予測した。既往の経験的グリーン関数法では、地震モーメントを中心としたスケーリング則を用いて、中小地震記録を時間領域で重ね合わせる。一方、この方法では、震源スペクトルのスケーリング則により、周波数領域で重ね合わせ、これを逆フーリエ変換して合成波形を予測する。

神山の研究の特徴は、震源スペクトルの相似則と要素地震数の決定にある。これらはSMAC記録の統計処理により求めている。要素地震数（破壊クラック数）については、マグニチュード $M \geq 6$ のとき、 M による変化が少なく、10～20（平均16）となることを明らかにした。

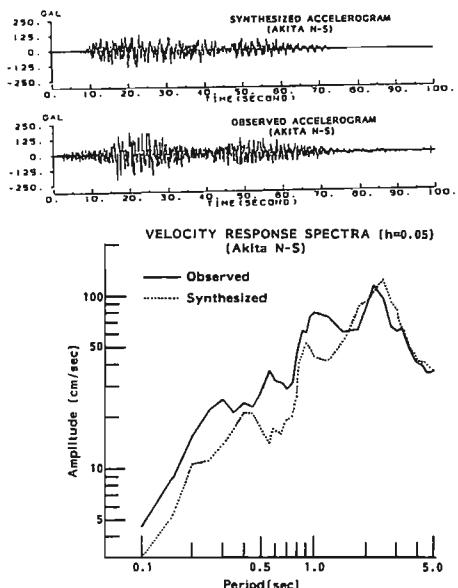


Fig.8 Comparison between synthesized accelerogram and velocity response spectra and observed ones at Akita during the 1983 Nihonkai-chubu earthquake

震源スペクトルについては、マグニチュード、震源深さ、震源距離と地盤条件を代表するダミー変数を用いて統計処理し、重回帰モデルから得ている。

Fig.8 は、1983年日本海中部地震による秋田港湾での合成波形と観測波形、およびそれに対する速度応答スペクトル(5%)を比較したものである。加速度振幅、継続時間、波形形状とスペクトル特性について検討した場合、細部を除くと、予測結果は実測記録を比較的よく再現していることがわかる。

この方法の最大の特徴は、従来工学分野で多用されてきた統計回帰式を有効に利用することにより、簡易的に加速度波形を予測していることである。この方法をさらに改良するためには、3.(2)で述べたように、波形合成法の問題点を解決していかなければならない。

5. あとがき

本小文では、やや長周期(約2~20秒)地震動の評価について、各種の方法(理学的理論地震波合成、経験的グリーン関数法、工学的予測法)をレビューした。本文中でも述べたことであるが、地震動予測が工学分野で定着していくためには、次の課題が残されている。

第1は、断層震源モデルによる解析方法において、震源パラメーターや地下構造の3次元的な不均質性を考慮することである。そのためには、世界中に地震観測網を充実させること、特に大地震の発生が予想さ

れる地域においては地下構造の探査を積極的に進めるここと、3次元媒質中における地震動解析の有効な方法を構築することなど、これらの問題に対して、地道ながら多くの時間をかけた作業を積み重ねなければならない。

第2は、経験的グリーン関数法の改善を行うことである。本方法による地震動模擬は多くのメリットを有しているが、反面、1)軟弱地盤での震動特性や非線形性との複合作用をどのようにモデルに取り組むのか、2)断層面外の小地震記録をグリーン関数として用いるとき、震源のメカニズムや地下構造の問題も含めて、どのようにこれを補正したらよいのか、3)周波数特性あるいはメカニズムの特異な小地震記録をどのように取り扱うのか、あるいは4)上記1の課題とも関連するが、より短周期成分まで現実に表現できるように、震源過程の3次元的不均質性を考慮した合成はどのようにすればよいか、というような問題が残っている。

第3は、断層震源モデルによる地震動予測が主に成功し得る周期帯域は数秒~数10秒であるが、この帯域における記録の数値化データベースを構築することである。そのためには、気象庁1倍強震計を始めとする変位型地震計あるいは最近のデジタル式強震計に着目して、できるだけ多くの地震の多くの数値化記録が必要であるし、また振り切れた記録に対しては合理的に修復しなければならない。こうした作業は地道ではあるが、息の長い研究を行っていけば、工学的には今後大きな役割を果たしていくものと考えられる。このような研究が進めば、断層モデルを用いた理論解析と実測による特性に注目した両面のアプローチが相互に補完されていく可能性がある。

地震動予測法の体系化は、以上のような諸問題を克服し、実用化に向けての研究の蓄積を待たなければならぬ。

参考文献

- 1) 小林啓美(研究代表者) : 長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No.A-53-1, 昭和53年5月.
- 2) (社) 土木学会 : 屋外タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書, 昭和57年12月.
- 3) 片山恒雄(研究代表者) : 長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究, 昭和59年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書, 昭和60年3月.
- 4) 危険物保安技術協会 : スロッシング現象に関する文献的調査検討報告書, 昭和61年3月.

- 5) 伯野元彦(研究代表者) : やや長周期(周期約2~20秒)地震動のデータを用いた震源過程の解析, 文部省科学研究費重点領域研究(1)成果, 昭和63年3月.
- 6) 伯野元彦(研究代表者) : 広帯域(周期0.1~20秒)地震動特性に関する研究, 昭和63年度科学研究費補助金重点領域研究(1)研究成果報告書, 平成元年3月.
- 7) 瀬尾和大(研究代表者) : 長大構造物の耐震安全性に関するやや長周期地震動の発生機構に関する研究, 昭和63年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, 平成元年3月.
- 8) 自治省消防庁: 屋外タンクのスロッシングに関する調査報告書, 昭和63年度災害対策総合推進調整費, 平成元年3月
- 9) 井上涼介: やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp. 1~23, 1986年10月.
- 10) Joyner, W. B. and Boore, D. M.: Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground-Motion Evaluation Edited by J. L. Von Thun, Geotechnical Special Publication No. 20, A. S. C. E., pp. 43~102, June 1988.
- 11) 菊池正幸(研究代表者) : インバージョン法による巨大地震の震源過程の研究, 昭和59年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, 昭和63年3月.
- 12) 工藤一嘉: 正規モード解による強震地動の研究とその応用, 東北大学提出博士論文, 1979年9月.
- 13) 井上涼介・藤野陽三・松原勝巳・伯野元彦: 断層震源モデルを適用した周期10秒前後の地震動評価の試み, 土木学会論文報告集, 第317号, pp. 47~60, 1982年1月.
- 14) Fujino, Y. and Ang, A. O. H-S.: Prediction of seismic response of long-period structures, Journal of the Structural Division, A. S. C. E., Vol. 108, No. ST7, pp. 1575~1588, July 1982.
- 15) Shiono, K.: A study into evaluation of seismic input motions to large-scale structures with due to consideration of surface waves, A Thesis submitted to Hokkaido University, May 1982.
- 16) Hartzell, S. H.: Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Letters, Vol. 5, No. 1, pp. 1~4, January 1978.
- 17) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 33, Part 2, No. 298, pp. 63~104, June 1983.
- 18) 入倉孝次郎: 経験的グリーン関数法による強震動予測-波形合成の手続き(Procedure)とその問題点-, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-1, pp. 41~52, 平成元年4月.
- 19) Kanamori, H.: A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes, B. S. S. A., Vol. 69, No. 4, pp. 1645~1670, December 1979.
- 20) 山田善一・野田茂: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期(約2~20秒)地震動の予測, 自然灾害科学, 第5巻, 第1号, pp. 31~55, 昭和61年3月.
- 21) 土岐憲三・澤田純男・中瀬仁・杉山和久: S M A C 強震記録の長周期成分の補正法について, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, pp. 19~44, 昭和62年4月.
- 22) 防災研究協会: 強震記録における長周期成分の信頼度に関する研究(その3), 昭和62年3月.
- 23) 山田善一・野田茂・嶋田三朗・吉田隆治: 振り切れた1倍強震計記録の修復波形による長周期応答スペクトル, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp. 417~426, 1987年10月.
- 24) Shino, I.: Evaluation of engineering properties of long-period strong ground motion from displacement seismograph records, A Thesis submitted to University of Tokyo, September 1989.
- 25) 佐々木康・田村敬一・相沢興: 気象庁1倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析-(その5) 1987年宮城県沖地震記録の解析-, 土木研究所資料, 第2664号, 昭和63年8月.
- 26) 山田善一・野田茂・広瀬鉄夫: 日本海中部地震時のやや長周期の速度応答スペクトルの統計解析モデル, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 645~658, 1978年3月.
- 27) Kamiyama, M.: Synthesis of strong motion accelerograms from small earthquake records by use of a scaling law of spectra, Structural Eng. /Earthquake Eng., Vol. 5, No. 1, pp. 173S~182S, April 1988.

断層の不均質性を考慮した広い周波数帯域の強震動の合成

Simulation of Wide-Frequency-Band Strong Ground Motions based on the Heterogeneous Rupture Process

岩田 知孝
IWATA Tomotaka

An simulation method is derived based on the heterogeneous rupture process to accomplish strong ground motion predictions in wide-frequency-band of the earthquake engineering interest. We compare synthetic waveforms with observed ones in the case of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki, the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes and point out the necessity of the heterogeneous faulting model for the strong motion prediction even if in the lower frequency range (<1Hz).

1・はじめに

地震工学上強震動予測の必要な周波数帯域は0.05～10Hz程度であると考えられ、このうちほぼ1Hzを境にそれそれ低周波数（長周期）、高周波数（短周期）震動予測問題として捉えられている。多くの強震動予測に関する研究者は、各々の予測問題に対して、短周期震動予測問題では主に不均質な断層運動モデルの必要性を考え、長周期震動予測問題においては主に伝播経路・サイト特性である（堆積層上の観測点を考えている）より深い地質構造や水平方向の不規則地質構造の地震波に対する影響を推定することが焦点と考えてきた。このなかで長周期予測問題における震源特性の重要性を指摘する。

理学の分野では、運動学的断層モデル（Kinematic faulting model）である Haskellモデル（Haskell, 1966=長さし、幅W、変位量D、破壊伝播速度V_r、立ち上がり時間Tの5つのパラメータで規定される矩形の断層モデルで）を仮定し、多くの地震・地殻変動記録から震源パラメータが推定された。更にこれらのパラメータから大地震と小地震間の相似則が Kanamori and Anderson(1975)、Geller(1976)等によりまとめられ、平均的な断層運動特性が得られた。この Haskellモデルは断層面上ですべり量や立ち上がり時間、すべり速度が均一として、矩形の断層形状を考える等の物理的に受け入れ難いモデルではあるものの、コーナー周波数（fc～L/V_r）より低周波数側の地震記録をよく説明し、長周期（低周波数）地震動予測問題の時の震源モデルとして最も多く用いられてきた。しかしながら近年、デジタル地震記録の利用と計算機の利用により波形を用いる震源過程の推定、即ち震源トモグラフィーの研究により、大地震は不均質な断層破壊過程を示していることがわかつてき（例えばKikuchi and Kanamori, 1982; Takeo, 1987, 1988; Fukuyama and Irikura, 1986, 1989等多数）、長周期（低周波数）の強震動予測にも不均質な断層運動過程を考慮する必要性が生じている。この不均質断層運動はコーナー周波数付近及びそれよりも高周波数側における震動予測に大きく関係する。

具体的には、マグニチュード7以上の巨大地震においては、そのコーナー周波数は0.1Hz以下（断層長さし>30kmとなる）となり、我々の考える低周波数強震動予測問題においてもその断層運動の不規則性が成功的な予測に重要なファクターとなっていることがわかる。本論においては特に地震工学上の低周波数強震動予測方法の一手法として、経験的グリーン関数法に不規則断層運動モデルを組み合わせた強震動予測手法を報告し、いくつかの地震例について合成波形と観測波形の比較をしながら、強震動予測手法への不規則断層運動モデルの必要性を論

じる事とする。ここではグリーン関数計算手法として経験的グリーン関数法を用いたが、他の理論的手法においても不規則断層運動モデルを組み込めば何等差はない。

2・不規則断層運動を考慮した経験的グリーン関数法の伝達関数の定式化

大地震時の強震動予測手法として、大地震の震源領域で生じた小地震の記録をグリーン関数として大地震記録をシミュレートするいわゆる経験的グリーン関数法は、小地震記録が伝播経路・サイト特性を含んでいると考えられ、大地震と小地震間の震源特性の差を補正し、その間の伝達関数を得れば、強震動予測が達成される。Hartzeil(1978)、Kanamori(1978)等によってはじめられた経験的グリーン関数法による大地震記録の推定は、先ず Irikura (1983)により震源の相似則と組み合わされて発展してきた。Irikura(1983)は、Haskellモデルに基づいて小地震記録を大地震と小地震の震源モーメント比だけ時空間的に足し合わせることにより、グリーン関数として用いる小地震記録のコーナー周波数程度より低周波数側で、合成波形と観測波形の一致をえた。また、大地震の Rise time と Rupture time が一致する仮定（ Haskell モデルに簡単に動的破壊伝播の性質を考慮した）のもとで更に高周波数領域まで予測可能であることを示した。この後、Irikura(1986, 1988, 1989)は ω^{-2} モデル (Aki, 1967; Brune, 1970) と動的破壊過程 (Dynamic rupture process) にもどづいた大地震と小地震間の震源特性の違いを考慮し、単一クラックモデルや單一アスペリティモデルに対応する波形合成に必要な不規則断層運動を考慮した伝達関数を定式化した。この伝達関数は Irikura(1988)、Iwata and Irikura(1990)に詳しい。これらの断層モデルに基づいた波形シミュレーションがいくつかの地震の近地地震記録に対して行われ、不均質断層運動モデルの必要性が吟味される。

3・経験的グリーン関数法による強震動波形の合成

3-1 1980年伊豆半島東方沖地震

1980年伊豆半島東方沖地震 ($M = 6.7$) の震源パラメーターや小地震の震源パラメーターは Table 1 に示され、観測点と震源位置の関係が Fig. 1 に示される。Fig. 2 には本震とグリーン関数として用いられた余震の J-I-Z における変位振幅スペクトルが示されている。これから、この2つの地震の震源スペクトルは ω^{-2} モデルに従うと考えられる。断層の大きさは $15 \times 7.5 \text{ km}^2$ とし、 ω^{-2} モデルに基づく均質断層モデルにより合成が行われた。震源距離約 100km の OMM の速度記録と約 20km の J-I-Z、約 10km の KWN での加速度記録の合成が行われ、

OMMでの観測速度記録と合成記録がFig. 3に、JIZの加速度記録がFig. 4に、KWNの加速度記録がFig. 5にそれぞれ示される。震源からやや離れたOMMやJIZでの合成波形は最大速度振幅、最大加速度振幅や包絡観測波形に関して観測波形によく一致している。しかしながら震源に近いKWNでは ω^{-2} モデルに基づく波形合成法であるのでその振幅スペクトルはよく再現されているものの合成波形は観測波形に一致しているとは言い難い。KWNにおける不一致は、断層近傍域においては不規則な破壊過程の影響を強く受けていると考えられるのに対して、ここでの震源モデルでは断層面上のすべり量やライズタイムを一定としているためにおこっていると考えられる。

この地震についていくつかの地震波の波形インバージョンによって、震源過程が推定されている。これらのインバージョン結果がFig. 6に示される。Takeo(1988)は震源近傍の気象庁1倍強震計の変位記録を用いて断層面上のすべり量と破壊伝播の空間分布を求めた。最適解としては断層の大きさが $20 \times 12 \text{ km}^2$ で断層面の深い方と南側で大きな最終変位量が得られ、破壊伝播速度は約1km/sのゆっくりとしたものになっている(Model A)。Fukuyama and Irikura(1989)は強震速度記録を用いて断層面上のすべり速度(応力降下量に対応)と破壊伝播速度を求めた。断層面の大きさは $15 \times 7.5 \text{ km}^2$ で平均破壊伝播速度は約3km/sとなつた(Model B)。岩田・入倉(1989)は強震加速度記録を用いてトモグラフィーの方法で断層面上のすべり速度強度分布を得ている。この方法では破壊伝播速度を仮定しているが、断層領域を基に仮定する必要がない。すべり速度強度分布は不均質であることがわかる(Model C)。Model DはModel Cと余震分布とともにアスペリティモデルを仮定したものである(入倉・岩田、1989)。これらのインバージョン結果による不均質な断層モデルを基にクラックモデルに対する表現式を用い、KWNにおける合成波形が観測波形と共にFig. 7に示される。Model BやCの不均質断層モデルに基づく合成波形、及びModel Dのアスペリティモデルによる合成波形が観測波形をよく説明している。このModel Dのアスペリティモデルより合成されるOMMの波形が、均一断層モデルの合成波形、観測波形とともにFig. 8に示される。この地震の場合は單一アスペリティモデルにより低周波数域から高周波数(数Hz)までよく予測できたと結論付られる。

3-2 1944年東南海地震

3-1において取り上げられた1980年伊豆半島東方沖地震については、多くの良質の地震記録が得られている地震であって、その震源過程が多くの研究者によって求められていた。これらのモデルを基に、広い周波数範囲、特に震源近傍域の高周波の卓越した記録に対する強震動予測には不均質断層運動モデルの導入が必要であることを示した。1で述べたように、巨大地震時の地震工学的な低周波数地震動予測に不均質断層運動モデルが不可欠かどうかを吟味するには我々は過小の記録しか持っていない。その中で南海トラフ沿いに生じた1944年12月7日東南海地震(M=7.8)、1946年12月21日南海地震(M=8.0)は重要と考えられる。3-2及び3-3項では、これら2つの地震例を取り上げて断層運動の不規則性と強震動生成の関係を議論することとする。

これら2つの地震に対しては世界大戦中、直後ながら国外では世界規模の地震ネットワークによる遠地地震記

録が得られている。国内では気象庁の前身である中央気象台により近地の変位強震記録が得られ、本震及び余震の震源決定も行われている。また他研究機関において沿岸地域の潮位記録、更に地震前後の測地データも得られている。これらのデータを用いることにより、2つの大地震の震源過程が詳細に推定され、今後発生するであろう南海トラフでの大地震の震源特性や、地震によって引き起こされる地盤運動特性を予測することが可能になると考えられる。

1944年東南海地震や1946年南海地震の断層パラメータは、はじめにKanamori(1972)により遠地の長周期表面波及び余震分布を用いて決定された。その後多くの研究者が測地データ及び津波データも用いて、これらの地震の震源モデルの改良を行ってきた。これらの震源モデルは長周期(周期100秒程度)遠地表面波や津波データ、測地データ等の準静的な記録からみた震源過程を表している。この長周期又は準静的記録より推定された断層モデルを初期モデルとし、3-1で得られた知見を組み込んで、地震工学的上重要な低周波数(周波数0.1Hzより1Hz前後)の地震波を推定する(入倉・岩田、1990)。

ここで用いた1944年東南海地震の記録は三島(現)測候所で得られたものである。経験的グリーン関数として用いた地震記録は同一地震計によって得られた1945年三河地震(1945年1月13日、M 6.8)のものである。東南海地震の三島における強震記録はClipしているが、その震動継続時間や卓越周期、Later Phaseの存在により強震記録からみた震源過程をある程度予測できる。

初期モデルには、余震分布、地殻変動記録を基に決定されたAndoモデル(Ando, 1975)と津波のシミュレーションにより潮位記録の定量評価を行ったAidaモデル(相田, 1979)を選んだ。これらの断層モデルと観測点がFig. 9(a)及び(b)において余震分布図上にプロットされる。余震分布はMICRO SEISによるもので、本震後1カ月間に生じた余震が示されている。Table 2にはAndoモデルとAidaモデルの断層パラメータ、及び三河地震の断層パラメーターが示される。

Fig. 10にAndoモデルによる合成波形と観測波形の比較がなされる。Fig. 10(a)が南北動、(b)が東西動の観測波形、合成波形、小地震(三河地震)の観測波形を表している。(a)の南北動において、合成波形は観測波形の主要動部分の振幅・卓越周期、後続波群の到達時刻・卓越周期をよく説明していることがわかる。(b)の東西動においては、グリーン関数に用いた地震記録が1分程度しかないので主要動の部分しか比較できないが、合成波形の振幅がClipしている観測値を上回っており、一応の妥当性が示されている。

Aidaモデルに基づく南北動に対しての合成波形と観測波形がFig. 11に示される。合成波形は観測波形に比して震動継続時間が長く、後続波の振幅、継続時間とも過大評価となっており、この様に断層面が広いモデルでは強震記録を説明できないことがわかる。

この結果を踏まえて観測波形により一致する合成波形を得るために、Andoモデルをもとに修正震源モデルを試してみる。この東南海地震で強震を生じた断層領域の大きさを余震活動域から予測してみる。Fig. 12に、Andoモデルを含む本震後1年間の余震分布が示される。これからAndoモデルの断層面に対して発震点より北東半分は比較的の余震活動が活発であったのに対して西南半分は活動が低調であったことがわかる。ここから断層領域をAndoモデルの断層域の半分程度の面積に限定し、波形合

成を行う。このアスペリティモデルがFig. 12に示され、アスペリティの部分が網掛けで示される。合成波形結果（南北成分）が観測波形と共にFig. 13に示される。この合成波形は観測波形の主要動及び後続波群によく一致していることが分かる。

ここまで各震源モデルの検討から、1944年東南海地震の強震記録からみた震源過程は、Andoモデルで提案された断層面もしくはそれより限定された小さな領域に大きな滑り速度（Slip Velocity）の分布を考えるアスペリティモデルで説明されると考えられる。

3-3 1946年南海地震

3-2項と同じ様に1946年南海地震に対して、敦賀気象台の本震記録が長周期記録から得られた震源モデルによって再現されるかどうかを経験的グリーン関数法を用いてForward Modelingによって確かめた。敦賀気象台では、本震記録はClipしているものの、同一震源域で生じた余震記録（M 7.0）が得られている。この記録を用いていくつかの本震の断層モデルをもとに南海地震本震波形を合成し、観測波形の卓越周期、振幅（合成波形振幅がClipした観測振幅以上であるか）、震動継続時間等を説明するかどうかをおこなった。1946年南海地震の断層モデルは遠地長周期地震記録からKanamori(1972)が（Plane 1）、測地・津波データからAndo(1982)が2枚の断層モデル（Plane 2及び3、即ちマルチショック）を提案している。Fig. 14にKanamoriモデル及びAndoモデルが本震後一週間の余震分布と共に示される。Table 3には本震及びグリーン関数に用いた余震の震源パラメーターがまとめられる。Kanamoriモデルに基づく合成波形が本震及び余震の観測波形（東西成分）とともにFig. 15に示される。主要動部分においては合成波形はClipしている観測値を上回っているが、観測波形に見られる震動継続時間や特徴的なS波到着後約60秒後の長周期Phaseは再現されていない。Fig. 16にはAndoモデルに基づく合成波形が示される。2枚の断層面のうちPlane 3の破壊開始はPlane 2の破壊開始より35秒後、破壊速度を2.0km/s、ライズタイムを長く（1.8秒）している。Ando Model 2においてはPlane 2及び3に対する合成に ω^{-2} モデルを仮定したが、Ando Model 3においてはPlane 3の合成には ω^{-3} モデルを仮定した。

2枚の断層面を考える事によって合成波形と観測波形の震動継続時間や包絡波形もよく一致するようになった。Ando Model 2では後続波部分が過評価となっており、Ando Model 3による予測が適当と考えられる。しかしながら Ando Model 3においても長周期Phase自体は再現されていない。第2震（Plane 3）に対する断層運動を他の観測点記録も用いて更に調べる必要があるが、ここでの結論はAndoモデルに基づく合成波形が観測波形をよく説明し、ここでは破壊速度とすべり速度の不均質性が低周波数域の地震波の生成に関係していることが判った。

4・まとめ

ここでは強震動予測のためには比較的低周波数領域の予測であっても不規則断層運動の導入が必要であることをいくつかの地震を例にとり、経験的グリーン関数法による合成波形と観測波形の比較により示してきた。M=6.7の中規模地震（1980年伊豆半島東方沖地震）に対する震動予測を考えた時、震源の極近傍域を除いては ω^{-2} モデルを基にした比較的単純な断層モデルで観測波形によく一致する波形が得られた。特にコーナー周波数より

低周波数で極めてよい一致が得られている。一方M=8クラスの巨大地震（1944年東南海及び1946年南海地震）の場合に周波数0.05~1Hz程度の地震工学的に重要な低周波数範囲の予測のためには、地殻変動・津波記録や遠地地震記録等準静的な記録を用いて提出されている断層域に均一なすべりを持つモデルより、断層域の中のある限られた領域から地震波が生成されるとするいわゆるアスペリティモデルに基づく合成波形が観測波形をよく説明している。これは今までに提案されてきた震源分布や遠地記録から得られてきた断層規模をもとに求められた従来の相似則からは強震動予測にそれを生じることを示唆し、アスペリティ領域の位置・規模を正確に推定しておくことが強度の高い強震動予測につながる。巨大地震時に強震動を引き起こすアスペリティ領域は、地殻内の不均質領域に対応していると考えられ、地震活動や弹性波速度分布等から推定される可能性がある（浜田, 1987）。注目しているサブダクションゾーンにおいての不均質領域の分布からアスペリティの位置や大きさが与えられれば、将来生じる大地震時の強震動が高い確度で予測可能となろう。

謝辞

この原稿をまとめるに当たって京都大学防災研究所入倉孝次郎氏には議論と有益な助言を頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- 相田 勇, 1978. 地震研究所彙報, 54, 329-341.
Aki, K. 1967. J. Geophys. Res., 72, 1217-1231.
Ando, M. 1974. Tectonophysics, 22, 173-186.
Ando, M. 1975. Tectonophysics, 27, 119-140.
Ando, M. 1982. P.E.P.I., 28, 320-338.
Brune, J. N. 1970. J.G.R., 75, 4987-5009.
Das, S. and B. V. Kostrov, 1983. J.G.R., 88, 4277-4278.
Fukuyama, E. and K. Irikura, 1988. B.S.S.A., 76, 1623-1640.
Fukuyama, E. and K. Irikura, 1989. G.J. Int., 99, 711-722.
Geiller, R. J. 1976. B.S.S.A., 66, 1501-1523.
浜田信生, 1987. 気象研究所研究報告, 38, 77-158.
Hartzel, S. 1978. G.R.L., 5, 1-4.
Haskell, N. A. 1966. B.S.S.A., 56, 125-140.
Haskell, N. A. 1969. B.S.S.A., 59, 865-908.
Irikura, K. 1983. B.D.P.I., 33, pp. 63-104.
Irikura, K. 1986. Proc. 7JEEES, pp. 151-156.
Irikura, K. 1988. Proc. 9WCEE, vol. 8, 37-42.
入倉孝次郎, 1989. 京都大学防災研究所年報, 32B-1, 41-52.
入倉孝次郎・岩田知孝, 1989. 1989年地震学会春季大会, B-30.
入倉孝次郎・岩田知孝, 1989. 1989年地震学会秋季大会, A-4.
入倉孝次郎・岩田知孝, 1990. 強震動及び津波の予測と破壊能評価に関する研究（代表者平澤朋郎），文部省科学研究費重点領域研究, 115-124.
岩田知孝・入倉孝次郎, 1989. 地震第2輯, 42, 49-58.
Iwata, T. and K. Irikura, 1990. Submitted to 8JEEES.
Kanamori, H. 1972. P.E.P.I., 5, 129-139.
Kanamori, H. and D. L. Anderson, 1975. B.S.S.A., 65, 1073-1095.
Kanamori, H. 1979. B.S.S.A., 69, 1645-1670.
Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1982. B.S.S.A., 72, 491-506.
佐藤良輔編, 1989. 日本の地震パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会.
Takeo, M. 1987. B.S.S.A., 77, 480-513.
Takeo, M. 1988. B.S.S.A., 78, 1074-1091.

Table 1 Origin times and hypocenter of the earthquakes used for the synthesis.

	M	D	H	M	LAT. (deg.)	LONG. (deg.)	DEPTH (km)	MAG. (JMA)
P4	6	28	12	5	34.934	139.234	18.9	4.9
MAIN	6	29	16	20	34.904	139.230	17.9	6.7
A1	6	30	2	23	34.847	139.245	18.4	4.9
A3	7	27	18	6	34.942	139.220	17.3	4.6

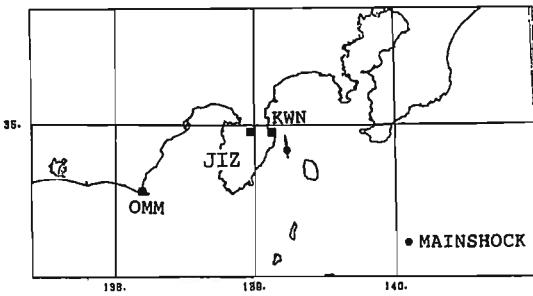


Fig.1 Map of station locations and epicenters of the mainshock.

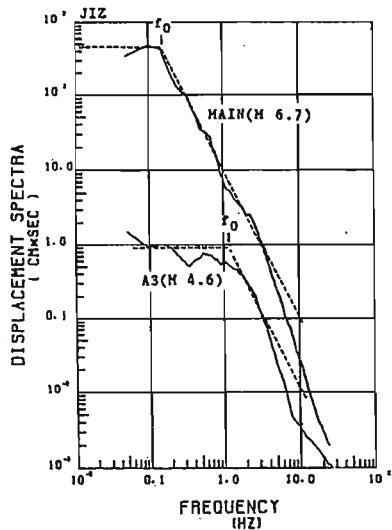


Fig.2 Displacement spectra of the mainshock and the small event with $M=4.6$.

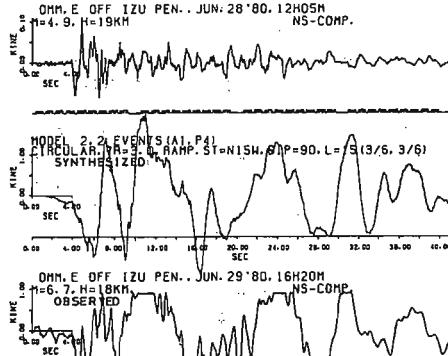


Fig.3 Comparison of the synthesis with the observed seismograms at OMM. From upper to lower, the record (NS comp.) of the small event, the synthesis, and the record of large event.

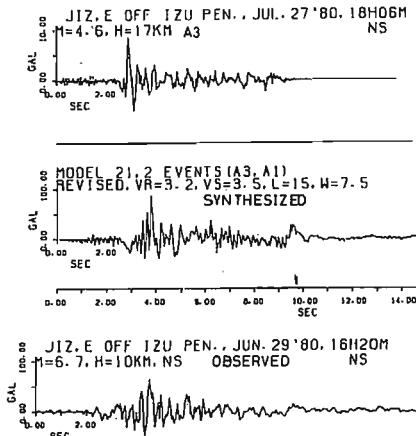


Fig.4 Comparison of the synthesis with the observed seismograms (NS component) at JIZ.

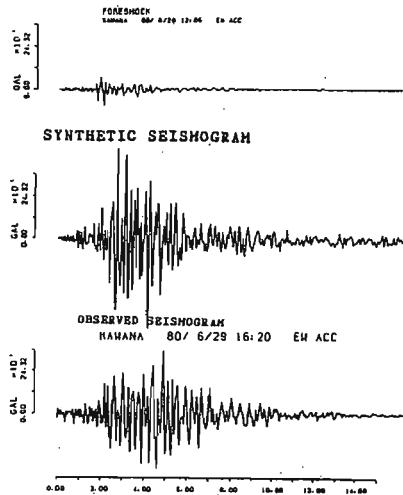


Fig.5 Comparison of the synthesis with the observed seismograms (EW component) at KWN.

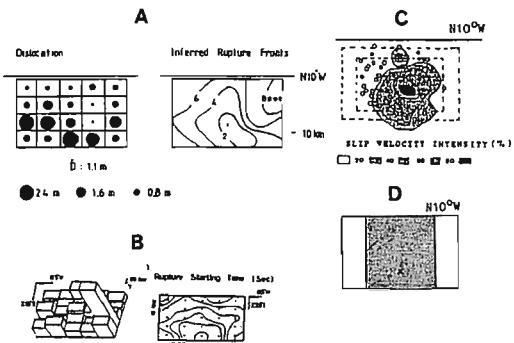


Fig.6 Rupture processes of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Okii earthquake from different waveform inversion methods. (A) by Takeo(1988), (B) by Fukuyama and Irikura(1989), and (C) by Iwata and Irikura(1989). (D) shows a simplified asperity model inferred from these inversion results.

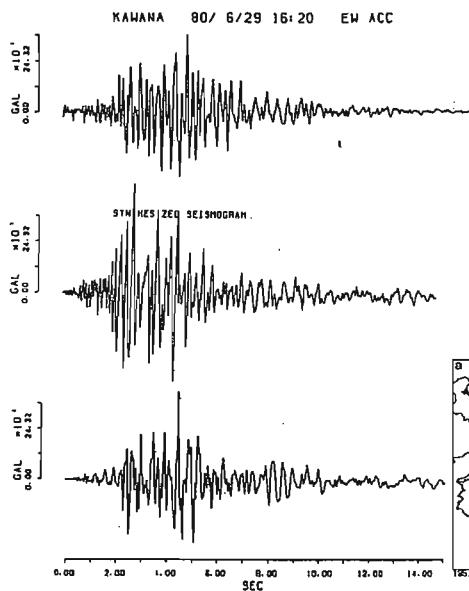


Fig.7 Comparison of the synthetics with the observed seismograms. From upper to lower, observed accelerogram at KWN, synthetics from uniform slip model, and those from the asperity model.

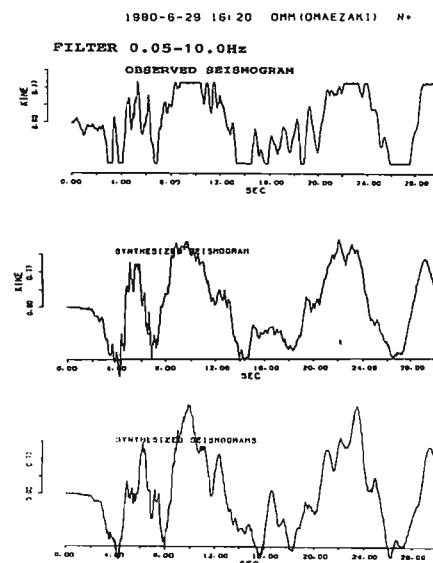


Fig.8 Comparison of the synthetics with the observed seismograms at OMM. The arrangement is the same as Fig.7.

Table 2 Source parameters of the 1944 Tonankai and the 1945 Mikawa earthquakes.

	Moment (dyn. cm)	STRIKE (deg.)	DIP (deg.)	RAKE (deg.)	Length (km)	Width (km)	Dislocation (cm)
1944 Tonankai	1.5228						
Ando Model		240	25	108	130	70	400
Aida Model	(S)	225	30	72	154	67	215
(N)	225	30	72	84	78	140	
1945 Mikawa	8.7825						
Ando Model		180	30	117	12	11	225

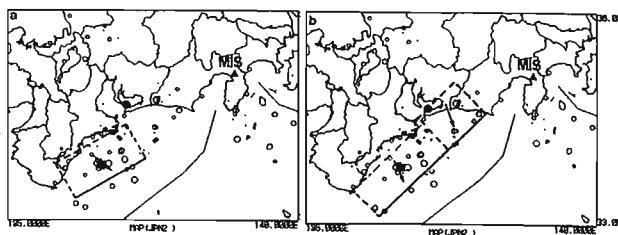
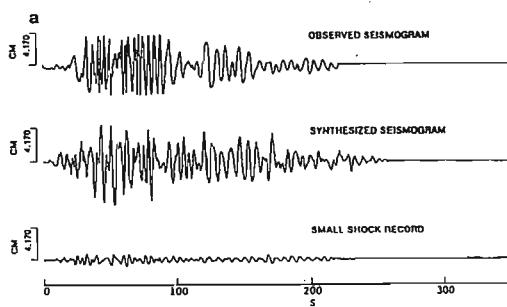


Fig.9 Source models for the 1944 Tonankai earthquake. (a) shows the Ando model and (b) shows the Aida model. Stars indicate the epicenter and arrows indicate the slip direction, respectively.



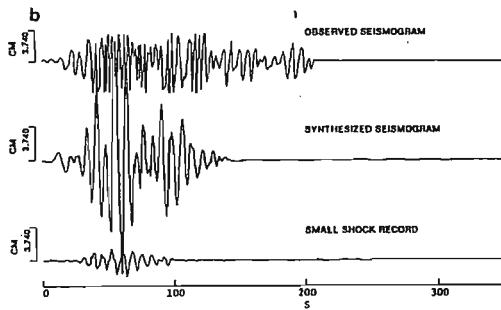


Fig.10 Comparison of the synthetics from the Ando model with the observed displacement seismograms. (a) shows the NS component and (b) shows the EW component respectively.

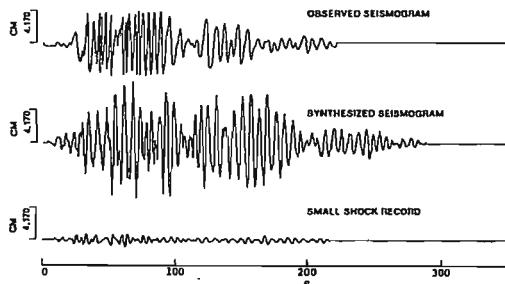


Fig.11 Comparison of the synthetics from the Aida model with the observed seismograms. Traces show the NS components.

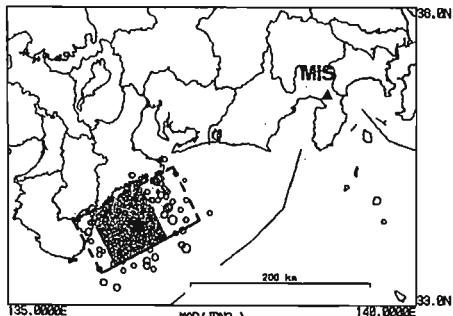


Fig.12 An asperity model for the purpose to accomplish the prediction of strong ground motion. Hatched region indicates the asperity.

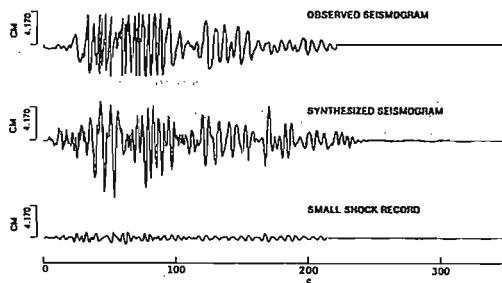


Fig.13 Comparison of the synthetics from the asperity model with the observed seismograms.

Table 3 Source parameters of the 1946 Nankai earthquake and its aftershock.

Kanamori(1971): Surface Wave Data	Ando(1982)	Tsunami Records
M = 8.1 - 8.4	M = 8.2	
Focal Depth = 30km	Eastern Segment	
Moment = 1.5×10^{28} dyne-cm	Moment = 1.5×10^{28} dyne-cm	
Area = $\approx 120 \times 80$ km 2	Area = $\approx 150 \times 70$ km 2	
U = 3.1m	0 = 3.0m	
$\Delta\sigma$ = 33bar	$\Delta\sigma$ = 36bar	
	Western Segment	
	Moment = 1.5×10^{28} dyne-cm	
	Area = $\approx 150 \times 70$ km 2	
	U = 6.0m	
	$\Delta\sigma$ = 72bar	

Empirical Green's Function
M = 7.0 (from JMA)
Moment = 5×10^{27} dyne-cm

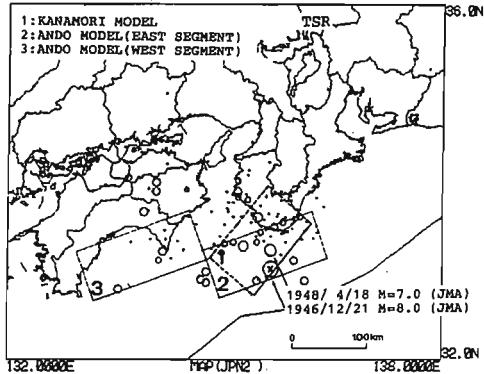


Fig.14 Source models for the 1946 Nankai earthquake. Plane 1 shows the Kanamori model and Plane 2 and 3 show the Ando model.

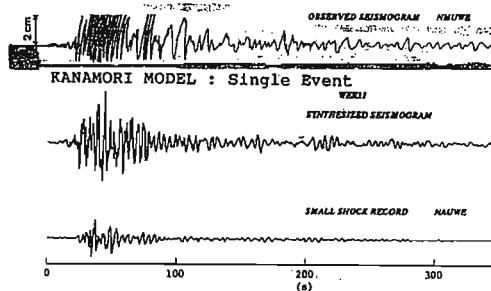


Fig.15 Comparison of the synthetics from the Kanamori model with the observed seismograms. Traces show the EW components.

ANDO MODEL 2 : Two Events
1st Event: ω^{-2} model, 2nd Event: ω^{-2} model



ANDO MODEL 3 : Two Events
1st Event: ω^{-2} model, 2nd Event: ω^{-3} model

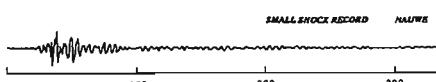


Fig.16 Comparison of the synthetics from the Ando model with the observed seismograms.

堆積盆地地形において生成される表面波に関する解析検討

Analytical Investigation of the Diffracted Surface Wave
Generated in a Sedimentary Basin

鹿島建設小堀研究室 源栄 正人
Masato Motosaka

Earthquake ground motions observed on a sedimentary basin are reportedly characterized by larger amplitude and longer duration due to intermediate period component. In order to make these ground motion characteristics more clear, it is important to pursue analytically the generation process of the diffracted surface wave and its propagation within a basin.

For the purpose, this report describes the following three items: ① Methodological review on the wave propagation theory in irregular sites including comparison study by the several different methods. ② Qualitative investigation of influence factors on the generation of the diffracted surface wave induced by the incident body wave using a typical idealized model. ③ Simulation analysis of the earthquake records observed in Tokyo Bay Area due to the 1990.2.20 Near Izu-Ohshima Earthquake. Contribution of the diffracted surface wave is investigated.

1. はじめに

堆積盆地内における地震動特性は振幅の増大と後続位相による継続時間の増大に特徴づけられ、観測記録の分析においてもやや長周期成分をもつ後続位相の存在が指摘されている^{1), 2), 3)}。これらの地震動特性に対する検討を行うための不整形地盤の波動伝播解析に関する手法の開発は1970年前後よりさかんに行われてきているが、堆積盆地内における表面波の生成・伝播に関しては図-1に示すような様々な影響因子が考えられる。すなわち、盆地構造により実体波から生成される表面波成分と震源から盆地端部までの伝播過程で生成された表面波が盆地内に透過して增幅された成分があるものと思われるため、入射波としてどのような波（実体波入射、表面波入射^{4), 5)}、震源考慮^{6), 7), 8)}）を考えるか、また、どのような地盤媒質（弾性体、2相混合体^{9), 10)}、非線形性考慮¹¹⁾、減衰性¹²⁾）を扱うかのといった問題や、解析次元の問題（1次元、

2次元、3次元）、さらに、堆積盆地内のかなり柔らかい地盤を対象にするような場合には重力波^{12), 13)}の影響等の検討すべき諸因子があるように思われる。

本報告では、堆積盆地地形における地震動特性の検討を対象とした解析に関し、以下の項目について整理や解析検討を行うものである。

- ① 解析手法の整理、
- ② 理想的堆積地盤モデルを用いた表面波の発生に及ぼす影響因子とその定性的性質の整理検討、
- ③ 関東平野の堆積地盤構造により発生する表面波の解析検討事例

2. 堆積盆地地形における波動伝播解析手法

2. 1 種々の解析法の概要

解析手法の分類整理に関する詳細は文献14) や文献15) を参照されたいが、ここでは解析手法を以下に示す5つに大別し、それぞれの手法の特徴を整理する。

(1) 域域型解法

有限要素法(FEM)と有限差分法(FDM)が代表で解析対象領域全体について離散化する手法で基本原理はFEMでは変分原理、FDMでは波動方程式の差分近似である。この手法では複雑な不均質地盤を取り扱える反面、適切な解析領域の設定と領域端部の境界処理をしないと解が異なることや、入力データの作成に労力を要するなどの問題がある。この手法では要素分割に注意すればそれなりの解は得られるが、一般

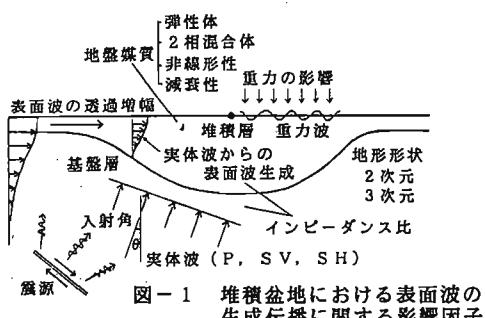


図-1 堆積盆地における表面波の生成伝播に関する影響因子

に、地盤の波動伝播解析では膨大な自由度が必要となる。したがって、エネルギー伝達境界等の適切な境界処理による領域の縮小と文献16) のような Hyper-element の併用によって自由度を少なくすることが望まれる。多くの研究は実体波入射を対象にしているが表面波入力に対しては文献4)などがある。

(2) 境界型解法（積分方程式法）

境界面だけを離散化する手法で境界要素法（BEM）、境界積分方程式法（BIEF）に代表されるように、Green 関数を含む境界積分方程式を離散化する方法がある。この方法では領域型解法に比べ自由度が少ない点や入力データ作成面、境界処理に煩わされない点等が利点であるが、Green 関数の計算に時間要する点や媒質や形状が複雑な場合には難点がある。実体波入射を対象とした研究がほとんどであるが、成層場のGreen 関数を用いることにより、表面波入射問題の解析もできる。なお、Green 関数の計算法として水平方向に加振点が周期的に配置されているという仮定の導入により計算の効率化を図ることができる^{6), 17)}。

離散波数積分法（AL 法、波数離散型解法）は波動方程式の一般解と境界条件から導かれる波数に関する無限積分方程式を解くのに、地形の水平方向への周期性を仮定して離散化する方法¹⁸⁾ であり、境界型解法のひとつとして位置づけられる。この方法では比較的長周期成分を対象とした不整形の多層地盤¹⁹⁾ の解析を計算上、効率的に行える利点があるが、急峻な地形や高振動数領域に対しては適用しにくい。

(3) 固有関数展開法（波動関数展開法）

解析対象となる系の波動方程式を満足し、直交性を有する固有関数の線形和として散乱変位場を表現し、境界条件を適用して固有関数の刺激係数を求める方法であり、係数等置による方法と最小 2乗法を用いる方法とがある。前者は半円形²⁰⁾、橢円形²¹⁾ の谷や盆地に限定されるが演算時間はかなり少なく厳密解が得られる。後者は任意形状への適用が可能で、多層堆積地盤への適用法²²⁾ も提案されているが、用いている固有関数の性質から偏平な堆積地盤構造には適していないとは言い難い。

表面波入射問題の一解析法である Alsop により提案された方法⁵⁾ もラブ波を対象とした固有関数を用いており、固有関数展開法の一つとして位置づけられる。

(4) 波線理論に基づく手法

波線理論は波動の伝播経路を幾何学的に追っていき、各境界面での反射係数と透過係数をもとに波動の重ね合わせを行う方法である。この方法は回折波を無視した高周波近似の解析法であるため、他の手法が苦手とする高振動数領域における解を求めるのにはよいが、低振動数領域における解の信頼性が低い。通常の波線理論の他に、これを基本として改良した波線追跡法²³⁾、Gaussian Beam 法²⁴⁾、折り紙法等²⁵⁾ がある。

(5) ハイブリッド法

以上の解析法の 2つ以上の組合して解析する方法でそれぞれの長所を取り入れ、短所を補うことにより、より効率的に解析を行うための解法である。基本的に領域型解法と境界型解法の組み合わせがほとんどで、FEM と BEM^{26), 27)} や、FEM と BIEF²⁸⁾、FEM と AL 法²⁹⁾ 等の組合解法が提案されている。

2. 2 地盤媒質の非線形性を考慮した解析法

以上に示した解析法は線形解析を対象にしたものであるが軟弱地盤を対象にするような場合には媒質の非線形性を考慮した波動伝播解析が必要となる。この場合、非線形性を表現する構成方程式をどうするかという問題があり、これについては文献30) や文献31) 等を参照するとして、ここでは解析手法の問題に若干ふれておく。

図-2 は地盤震動問題や構造物と地盤の動的相互作用解析における非線形解析手法を分類したものであり³²⁾、領域型の一体解析法と前述のハイブリッド法の非線形解析への発展形に相当する時間領域におけるサブストラクチャ法に大別される。前者は FEM や FDM における時刻歴での境界処理を適宜うまく行うことによって、解析領域全体の非線形性を考慮することができる。なお、時刻歴での境界処理法をまとめた文献としては文献33) 等がある。ただし、解析領域の外は線形と仮定せざるを得ないので解析領域の取り方に配慮が必要である。後者は非線形性を考慮する領域が閉じられている場合（Nonlinear Island）のみ、適用可能であり、コンポリューション積分として表される境界条件を適宜評価する方法³⁴⁾、および、非線形性の影響を運動方程式の右辺にいわゆる擬似外力として取り入れ周波数領域における解析を構成則を満足す

るまで繰り返し収束計算を行う方法がある^{35), 36), 37)}。

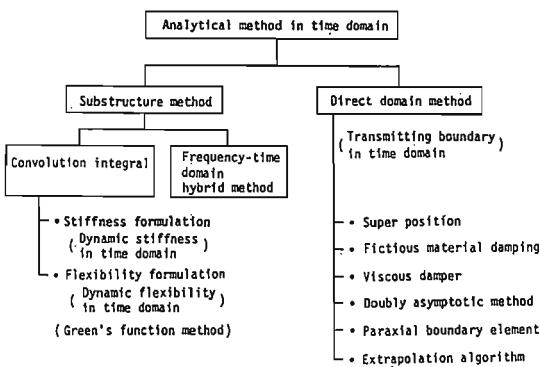


図-2 地盤の動力学における非線形解析手法の分類

2.3 種々の解析法による同一問題の解析

ここでは図-3に示すようなcosine型の堆積地盤モデルを用いた2次元S H波入射問題を種々の解析法により検討した例を示す。解析法としてはB E M、B E M+F E M、A L法+F E M、A L法、さらに、文献22)に基づく波動関数展開法(ここでW F法と称す)の5種類の方法により解析を行い同じ結果が得られるこの確認と演算時間の比較を行う。この場合、解析条件は $\rho_1 v_{s1} / \rho_2 v_{s2} = 0.5$ 、 $d = 0.32b$ とし、入射角は $\theta = 1^\circ$ 、 $\eta = 2b / \lambda_2 = 0.5$ とした。B E Mモデルの堆積層と基盤層の境界、および堆積層の地表の離散点は図-3に示すハイブリッド解析で用いたF E Mモデルに対応させ、それぞれ16、14とし、基盤層の地表面部分は領域内の点として求めた。A L法では水平方向の地形の周期を $L = 16b$ 、FFTのための離散データ数は128、片側離散波数は16とした。また、波動関数展開法では展開項数を $M = 5$ とした。

図-4は解析結果として地表面における変位、および基盤層と堆積層の境界面における変位をB E Mによる結果を基本にして、他の解析法による結果を比較して示したものであり、どの手法でもほぼ同様の結果が得られることが分かる。ちなみに、演算時間はB E M、B E M+F E M、A L法+F E M、A L法、波動関数展開法の順に少なくなりB E Mを1とするとそれぞれ、0.52、0.41、0.34、0.06であるが、演算時間の短い解析法ほど、形状や解析振動数範囲に制限があるので、解析の目的に応じた手法の選択が重要である。

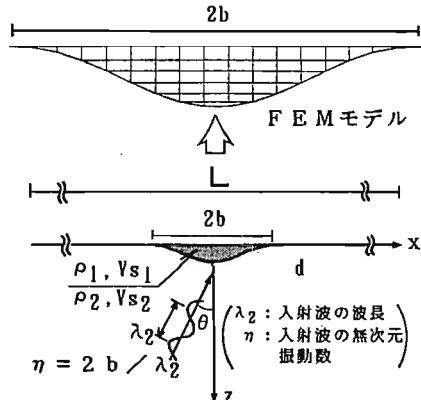


図-3 種々の解析法による同一問題解析のための地盤モデル

応答倍率

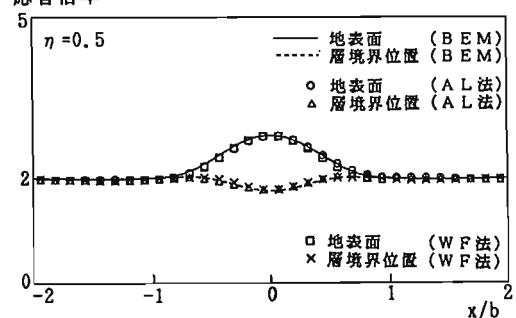
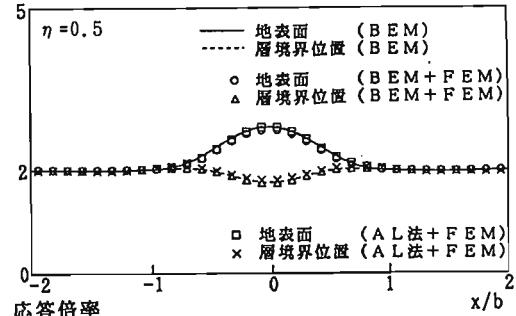


図-4 種々の解析法による結果の比較

3. 表面波の発生に及ぼす影響因子と

その定性的性質

3.1 2次元モデルによる解析検討

(1) 検討内容 実体波が堆積盆地内に入射した場合の表面波の励起に及ぼす影響因子として、①盆地端部の形状、②堆積層と基盤層のインピーダンス比、③入射角、④堆積層の地盤減衰、⑤S H波入射とS V波入射の違いに着目し、これらの影響因子が堆積盆地内の波動伝播特性に及ぼす定性的性質を解析検討により整理するとともに、1次元波動論による解析との違いを比較検討する。

(2) 解析対象および解析ケース 理想的堆積盆地 地形として、これまでいくつかの研究で用いられている図-5に示すような平底型の堆積盆地^{38), 39), 40)}を幅10km, 深さ400mの形状とし、堆積層と基盤層の地盤物性については表-1に示す値として解析する。

解析ケースは表-2に示す6ケースでケース1を基に5つの影響因子の検討を行うための解析ケースである。

図-6には参考のために盆地中央部の地盤構造に対するラブ波とレーリー波の基本モードの分散曲線を示す。

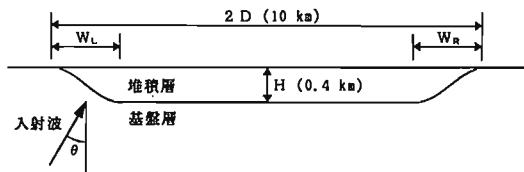


図-5 解析対象地盤モデル

表-1 基本モデル(ケース1)
の地盤物性値

	S波速度 m/sec	密度 t/m³	減衰定数 %
堆積層	500	2.0	1
基盤層	1300	2.3	0.5

表-2 解析ケース

ケース	入射波	端部形状 (W_L=W_R)	インビーダンス比	堆積層 減衰定数	入射角 (度)
1	SH	1.6 km	3	1 %	30
2	SH	3.2 km	3	1 %	30
3	SH	1.6 km	6°	1 %	30°
4	SH	1.6 km	3	1 %	0
5	SH	1.6 km	3	5 %	30
6	SV	1.6 km	3	1 %	0

*基盤層の物性値をVs=2400m/sec, ρ=2.5t/m³とした。

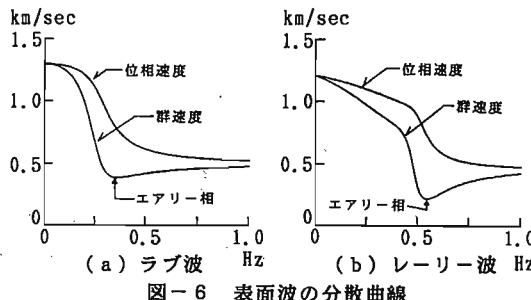


図-6 表面波の分散曲線

(3) 解析手法および解析条件 ここでは前述の種々の解析手法のうち、比較的演算時間が少なくて偏平な堆積地盤にも適用性のあるAL法を用いて0~1Hzまでの振動数領域を対象とした解析を行った。地形の水

平方向の周期(L)を20km, FFTのための離散データ数は最も波長の短い成分に対しても5点以上確保するために256とし、片側離散波数Nは斜め入射に対しても反対側から跳ね返ってくるラブ波やレーリー波の基本モードが表現できるように、次式により振動数(f)により変化させた。

$$N \approx L f (1/\beta_{\min} + \sin \theta / \beta_{\max})$$

ここに、 β_{\min} 、 β_{\max} は堆積層と基盤層のS波速度、 θ はSH問題では1、P-SV問題では堆積層のS波速度とレーリー波速度の比である。

また、入力波としてはRicker波を最大振幅が1となるように規準化して用いた。

(4) 解析結果およびまとめ

図-7には各ケースに対する盆地中央部の周波数応答特性を1次元波動論による結果と比較して示す。

図-8と図-9は盆地中央部の1次卓越周期($T_1=3.2$ s)と同じ卓越周期を有するRicker波($tp=ts=3.2$ s)を入射したときの盆地内の各点における応答波形につい

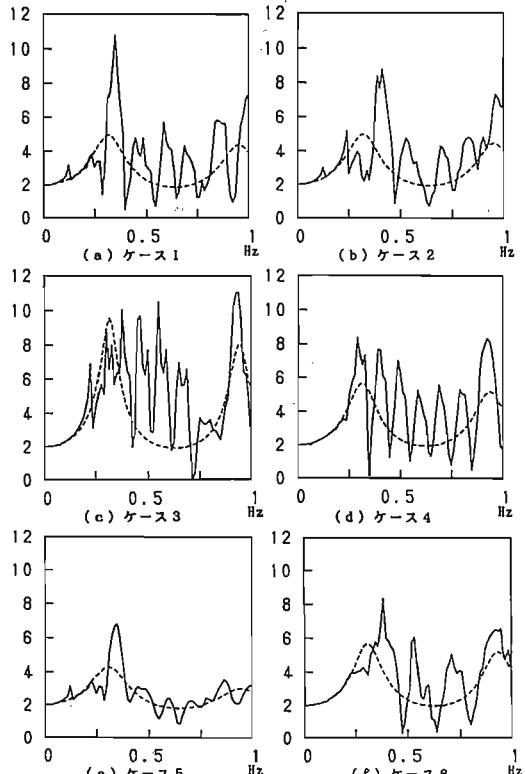


図-7 盆地中央部の周波数応答特性(入射波に対する応答倍率、点線は一次元波動論による)

附図 30

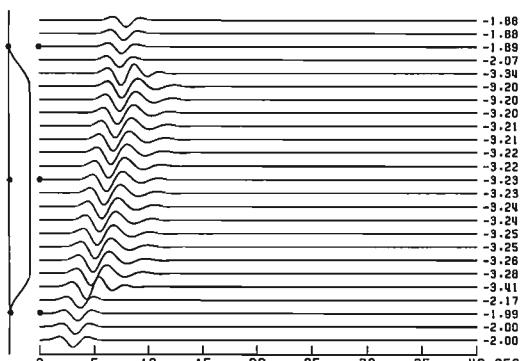


図-8 Ricker波入射時の時刻歴応答(一次元波動論)

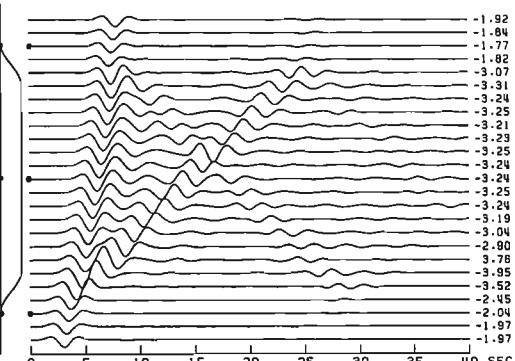


図-9 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース1)

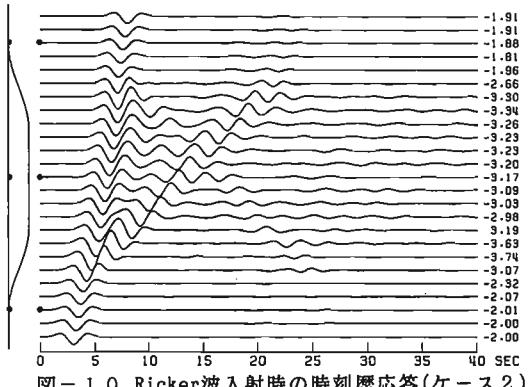


図-10 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース2)

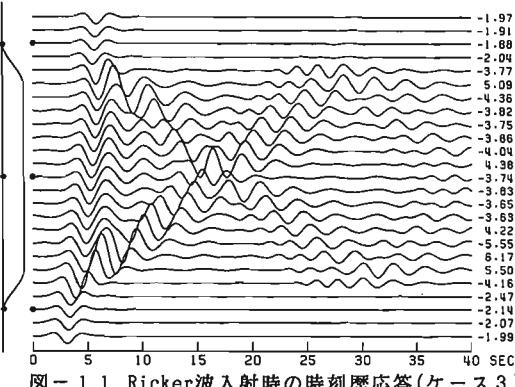


図-11 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース3)

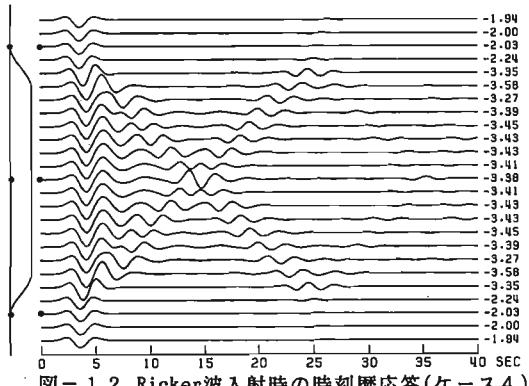


図-12 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース4)

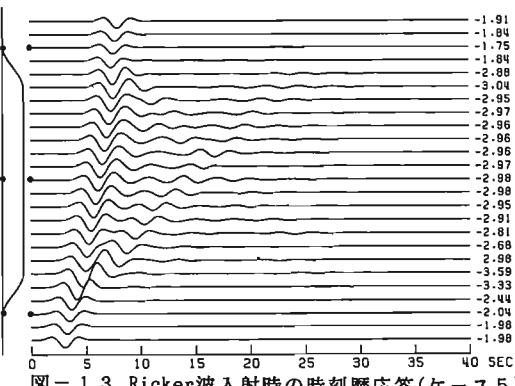


図-13 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース5)

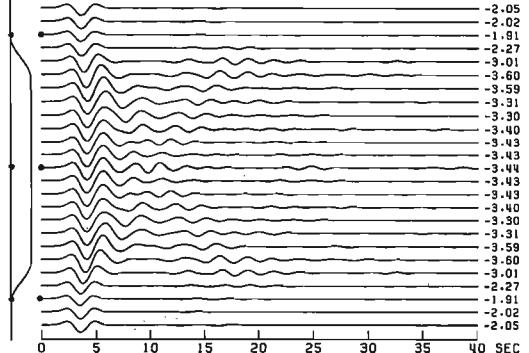


図-14 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース6:水平)

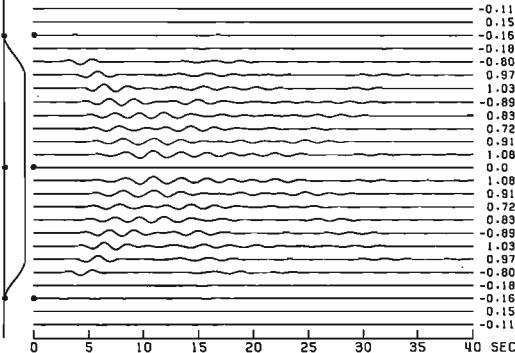


図-15 Ricker波入射時の時刻歴応答(ケース6:上下)

て、それぞれ、ケース1に対応する1次元波動論による結果と2次元解析による結果を示したものである。また、図-10～図-15はそれぞれケース2～ケース6の場合について示したものである。

ただし、ケース6については励起される上下動成分も示した。

図-16はRicker波に対する応答波形を卓越周期の異なるRicker波($tp=2.0\text{s} \sim 6.0\text{s}$)について解析を行い、実体波部分と表面波部分の振幅の最大値を各ケースごとに示したものである。

これらの図より以下のことが分かる。

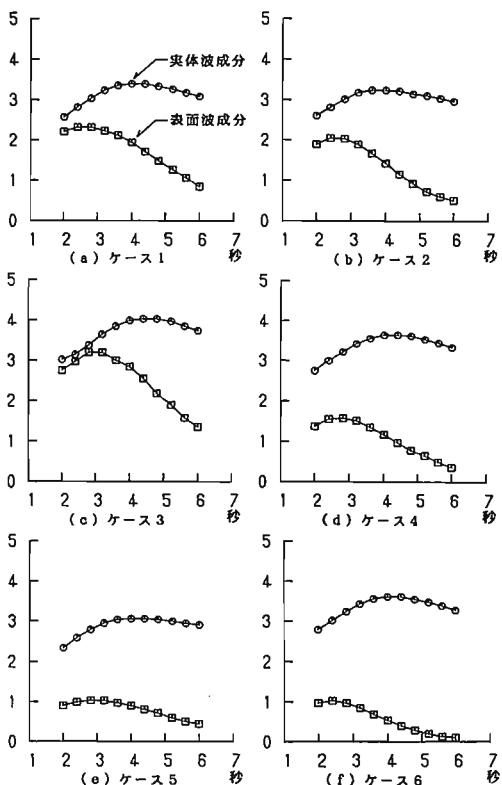


図-16 実体波成分と表面波成分の最大振幅

I. 1次元解析と2次元解析の比較：

①盆地中央の周波数応答倍率曲線は堆積盆地構造により発生する表面波の影響で1次元解析の場合に比べかなり変動の激しいものとなる。この変動量は堆積層の減衰の増大や、盆地端部の傾斜が緩やかになることにより小さくなる。

②盆地内の時刻歴応答特性に関する1次元解析と2次元解析の違いについては、実体波から生成される表面波により、入射側傾斜部における振幅の増大と盆地内の継続時間の増大に特徴づけられる。

II. 堆積盆地内における波動伝播特性：

①盆地端部の傾斜部から平坦部にかわるところで実体波と表面波が重なり合って振幅が大きくなる。特に、斜め入射のときの入射側で大きな振幅となる。

②盆地の両端で表面波が励起されるが、斜め入射では入射側から発生する表面波の方が反対側から発生する表面波より振幅が大きい。発生した表面波は平坦部を特定の位相速度、群速度で伝播するのが確認できる。

③盆地中央部では両側から伝播してきた表面波が干渉しあって振幅が大きくなったり、小さくなったりするとともに、位相が変化する。

④盆地端部で発生した表面波が反対側の端部まで伝播してまた反射して戻ってくるのが確認できる。

III. 各影響因子に対する性質：

①盆地端部の形状の比較（ケース1と2）については端部の傾斜が急な方が励起される表面波は大きく、盆地中央部への到達時間が遅れるため応答波形の継続時間が長くなる。

②インピーダンス比の比較（ケース1と3）については堆積層と基盤層のコントラストが強いほど大きな表面波が励起され、実体波の振幅に対する表面波の振幅比も大きくなる。

③入射角の違いの比較（ケース1と4）については鉛直入射より斜め入射の方が大きな表面波が励起される。

④減衰定数の違いによる比較（ケース1と5）については伝播経路の長い表面波の方が影響されやすく、減衰定数が大きくなると、盆地中央部における実体波に対する表面波の振幅の比は小さくなるとともに、継続時間も短くなり、1次元解析による結果に近づく。

⑤S H波入射とS V波入射の違いによる比較（ケース4と6）については上下動を伴う表面波（レーリー波）の発生するS V波入射の方が表面波の水平動振幅は実体波に比べて小さめである。

なお、ここでは示さないが、S V波入射時の上記の諸影響因子に対する性質は入射角が臨界角より小さい時はS H波入射時の性質とほぼ同様である。

3. 2 3次元モデル解析による定性的性質

ここでは、既往の研究から堆積盆地の3次元解析について、用いられている解析手法と得られている波動伝播特性に関する知見をまとめる。

解析手法としてはFEM⁴¹⁾、BEM⁴²⁾、AL法^{7), 43)}、波動関数展開法^{44), 45)}、波線理論²³⁾による研究例があり、多くは軸対称問題を対象とした周波数応答特性の研究であるが、非軸対称問題について周波数応答特性ばかりでなく、盆地内の時刻歴応答特性まで検討している研究例もある。このうち、文献43)では図-17に示すような3次元モデルを用いて、2次元解析や1次元解析と比較して次のような結論を示している。

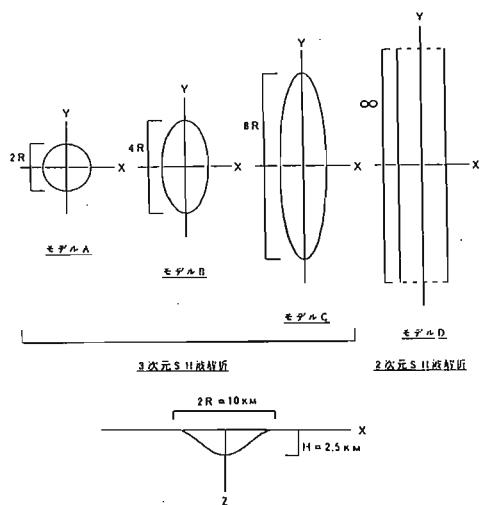


図-17 3次元非軸対称地盤モデルを用いた研究例
(文献43)より引用)

①周波数応答特性については、軸対称、非軸対称いずれの場合も、解析次元が高くなるにつれて、卓越振動数が高くなり、応答倍率も大きくなる。但し、非軸対称の場合の卓越振動数は長軸方向の広がりにより、軸対称の場合に比べて低くなり、2次元解析による結果に近づく。

②Ricker波入射に対する時刻歴応答特性については、周波数応答特性が反映され、入射波の卓越振動数が高くなるにつれ、多次元の解析ほど振幅レベルが大きくなる。継続時間については入射波の卓越周期が盆地中央の地盤構造における1次卓越周期 T_1 とした場合には解析次元による違いはほとんど見られない。しかし、入射波の卓越周期が T_1 より短くなるにつれ解析する

次元の高いほど継続時間が長くなる傾向がある。

③盆地形状を長軸方向に長くしても(短軸方向の4倍)短軸上の応答には3次元構造の影響が表れ、振動数が高くなるにつれて2次元解析結果よりも、大きな応答を示す。

4. 関東平野の堆積地盤構造により発生する表面波の解析検討

4. 1 検討内容

1990年2月20日の伊豆大島近海地震の際の東京湾臨海部の東京都江東区において図-18に示すような継続時間が数分にもおよび、卓越周期が約8秒の地震動が観測されおり⁴⁶⁾、この卓越成分は軌跡の分析より、ラブ波であることが報告されている。この表面波は関東平野の堆積盆地構造により実体波から2次震源的に発生する表面波成分と震央付近で生成された表面波が堆積盆地内に透過して増幅された成分が含まれているものと考えられる。

ここでは、実体波から2次震源的に発生する表面波成分に着目し、関東平野の堆積盆地構造に基づいた2次元S-H波入射解析により、Ricker波を入力した時の応答特性と伝播経路の途中にある神奈川県葉山町での観測記録を用いた地震応答特性の検討を行う⁴⁷⁾。

4. 2 解析対象地震記録

江東で観測された記録のT方向成分と葉山で観測された記録のT方向成分を図-19に示す。江東の記録には継続時間が数分にもおよび、卓越周期が約8秒の表面波が見られる。一方、葉山の記録は加速度計で観測されており記録時間は30秒程度である。また、図-20の速度応答スペクトルに見られるように葉山の記録には周期8秒の成分が特に多く含まれているわけではない。

4. 3 解析モデルおよび解析方法

東京湾を南西-北東に切る断面の葉山より北側を対象にして文献48)～50)により推定した地盤構造と地盤物性を図-21および表-3に示す。地盤構造の推定に際しては洪積層から沖積層の層厚が不確定なため最表層をP波速度で1.83km/sの1層とした。解析モデルは、図-22に示すように葉山より南側を便宜上、点線で仮定し、AL法を用いた検討を行う。モデル化に際してはP波速度が4.8km/sの層を5.6km/sの層に

含め、地盤に与える減衰をほぼ $Q = Vs(\text{m/s})/15$ で仮定した。解析モデルへの入射波はRicker波および葉山における入射波とし、基盤への入射角については、中部日本の平均的地下速度構造⁵⁾により算定した $\theta = 50^\circ$ とした。ここで、解析の対象とした振動数領域は $0 \sim 0.4\text{Hz}$ とした。なお、Ricker波については $\theta = 0^\circ$ の場合も検討した。

図-23には参考のために江東における地盤構造に対するラブ波の分散曲線を示す。

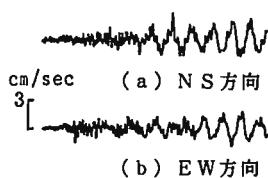


図-18 東京都江東区における速度観測記録

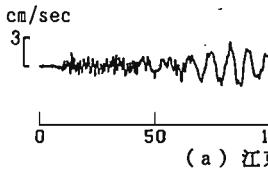


図-19 解析対象地震波形 (T 方向)

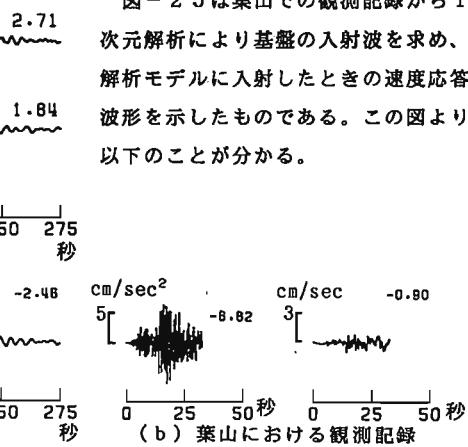


図-25は葉山での観測記録から1次元解析により基盤の入射波を求め、解析モデルに入射したときの速度応答波形を示したものである。この図より、以下のことが分かる。

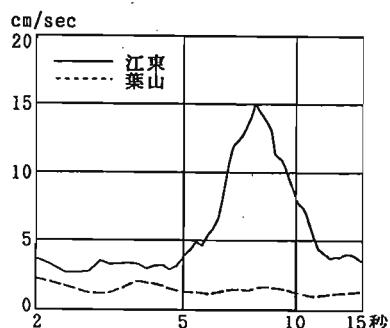


図-20 速度応答スペクトル ($h=5\%$)

表-3 地盤物性			
層	P波速度 km/sec	S波速度 km/sec	密度 t/m^3
I	1.83	0.7	2.0
II	2.8	1.3	2.3
III	4.8	2.4	2.5
IV	5.6	2.9	2.5

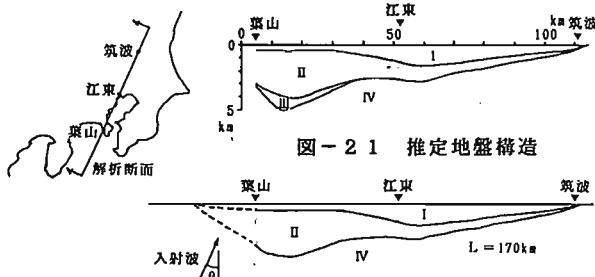


図-21 推定地盤構造

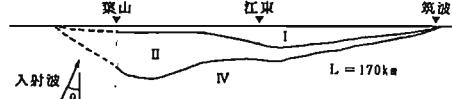


図-22 解析モデル

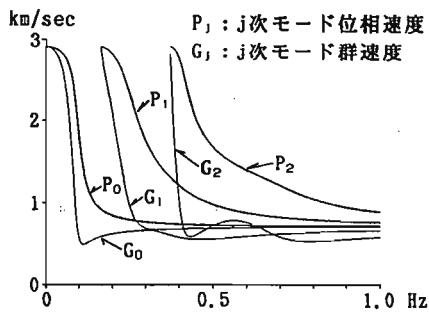


図-23 ラブ波の分散曲線

4.4 解析結果

解析モデルにRicker波($T_p=8\text{s}, T_s=16\text{s}$)を $\theta = 50^\circ$ と $\theta = 0^\circ$ で入射したときの応答波形を図-24に示す。この図より以下のことが分かる。

- ①斜め入射の方が表面波の励起は鉛直入射よりも顕著で実体波と同等の振幅の表面波が発生する。
- ②斜め入射の場合、入射側端部から表面波が発生し、振幅は盆地中央部が最も大きく、入射側と反対の端部になるほど減衰する。また継続時間は盆地内部に入るほど延びる傾向が見られる。

図-25は葉山での観測記録から1次元解析により基盤の入射波を求め、解析モデルに入射したときの速度応答波形を示したものである。この図より、以下のことが分かる。

- ①応答波形は入射側の基盤が最も深い所で振幅が大きくなり、奥になるに従って継続時間が伸びている。
 ②特定の群速度で伝播する表面波群が存在している。

図-26に江東における速度観測記録、および解析モデルで江東に対応する位置の速度応答波形および1次元波動論による速度応答波形を比較して示す。この図より以下のことが分かる。

- ①1次元解析では継続時間が全く足りない。
 ②観測波形と2次元モデルによる解析波形の始めの1分間程度の波形特性はかなり似たものとなっているが、それ以後については解析で得られる表面波のパワーが観測に比べてかなり小さくなっている。

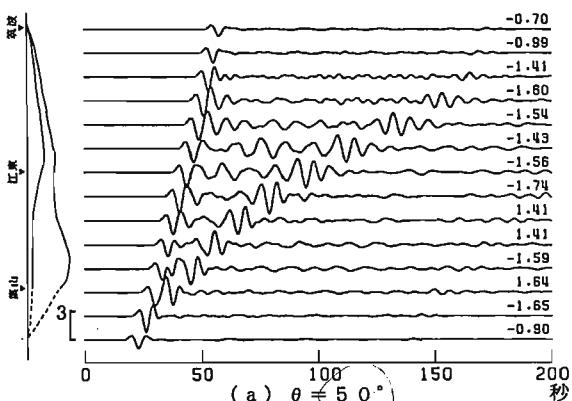


図-24 Ricker波($T_p = 8\text{ s}$)入射時の応答波形

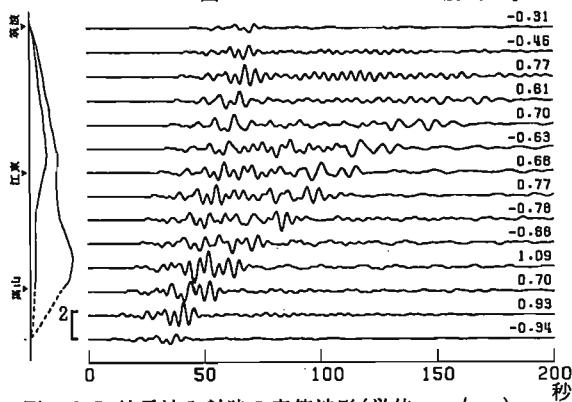
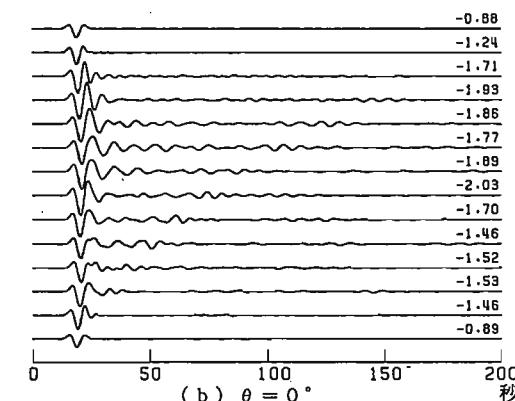


図-25 地震波入射時の応答波形(単位: cm/sec)

4.5 考察

本解析で後続表面波が十分に表現されなかった原因として、入射波に用いた葉山の観測記録が短いこと、2次元の実体波入射問題としたことが考えられる。しかし、Ricker波入射解析によれば、江東付近では実体波成分と同程度の振幅を持つ表面波群が約1分遅れて到達する程度なので、葉山の観測記録がより長い時間得られていたとしても江東の観測に見られる様な振幅、継続時間を持つ表面波にはならないと思われる。したがって、震源付近で生成された表面波が堆積盆地内に透過して增幅された成分が大部分で実体波から2次震源的に発生した表面波成分の影響は量的には少ないと思われる。

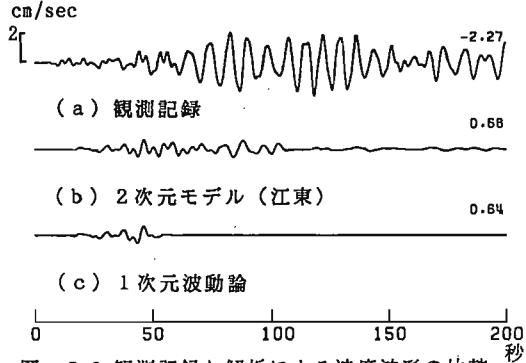


図-26 観測記録と解析による速度波形の比較

5.まとめ

本報告では堆積盆地に起因する表面波の生成・伝播に関する検討を行うための種々の解析手法を整理し、その特徴を示すとともに、実体波入射の表面波の生成・伝播に及ぼすいくつかの影響因子に関して理想的な堆積盆地モデルを用いた解析例を示し、その定性的性

質の整理・検討を行った。さらに、関東平野の地盤モデルを用いて、東京湾臨海部における1990.2.20 伊豆大島近海地震の際の観測記録に見られる表面波を対象に、実体波入射により生成される表面波の寄与に関する検討例を示した。

<謝辞>

関東平野の地盤構造の推定にあたり鶴悦三鹿島建設
機関間に御指導をいただきました。また、本報告作成

に当たり鹿島建設技術研究所の丹羽正徳、稗圃成人、
野沢貴の各氏、および、小堀研究室の釜田正毅氏にご
協力頂きました。ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 濑尾和大：深い構造を探る、第13回地盤震動シンポジウム、1987.
- 2) 烏海勲、大場新太郎、村井信義：大阪平野における地盤動の伝播について、第5回日本地震工学シンポジウム、1982
- 3) 木下繁夫：傾斜基盤におけるSH波の全反射伝播、地盤、第38巻、1985.
- 4) Lymer, J. and Drake, L. A.: A Finite Element Method for Seismology, Methods in Computational Physics, Vol.11, 1972.
- 5) Alsop, L. E.: Transmission and refraction of Love waves at vertical discontinuity, J. Geophys. Res., Vol.71, No.16, 1966.
- 6) Bouchon, M. and Aki, K.: Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.67, 1977.
- 7) 上林宏敏、堀家正則、竹内吉弘：断層震源による不規則境界を有する3次元堆積盆地の地震応答、表層地質が地盤動に及ぼす影響シンポジウム、1989.
- 8) Sato, T. and Kawase, H.: The effect of the source location on the response characteristics of a sediments-filled basin, Proc. National Symposium on effects of surface geology on seismic motion, 1989.
- 9) Gelli, L., Bard, P. Y. and Schmit, D.: Seismic wave propagation in a very permeable water-saturated surface layer, J. J. Geophys. Res., Vol.92, No.B8, 1987.
- 10) 源栄正人、大堀康弘：波数離散型解法（AL法）を用いた不規則不整形地盤の解析－2相混合体層を含む不整形多層地盤系のP-S-V波入射問題への適用－、表層地質が地盤動に及ぼす影響シンポジウム、1989.
- 11) Iai, S., Matunaga, Y. and Kameoka, T.: Non-linear 2D finite element analysis of Surface ground, Proc. National Symposium on effects of surface geology on seismic motion, 1989.
- 12) Matsuzawa, T.: On the possibility of Gravity waves in soil and allied problems, Journal of Institute of Astronomy and Geophysics, 3, pp161-174., 1925.
- 13) Lomnitz, C.: Gravity waves in Sediments, 東京工業大学地震工学研究グループ討議会資料（第24回）、昭和62年11月。
- 14) 多賀有恒：地盤震動における地形・地盤の不整形性の影響、第10回地盤震動シンポジウム、1982.
- 15) 繁縦一起、竹中博士：近地地震波の伝播に関する理論、地震II、第42巻、第3号、1989.
- 16) Kausel, E. and Roesset, M.: Semianalytic hyperelement for layered strata, ASCE, JEMD, 1977.
- 17) Kawase, H.: Time domain response of a semicircular canyon for incident SV, P, Rayleigh wave calculated by the discrete wavenumber boundary method, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.78, 1988.
- 18) Aki, K. and Larner, K. L.: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, J. Geophys. Res., Vol. 75, 1970.
- 19) 堀家正則：複数の曲がった境界を有する減衰のある媒質の地震応答計算法へのAL法の拡張とそれを用いた堆積盆地の地震動の特性、地震II、第40巻、1987.
- 20) Trifunac, M. D.: Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.61, 1971.
- 21) Wong, H. L. and Trifunac, M. D.: Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.64, 1974.
- 22) Eshraghi, H. and Dravinski, M.: Transient scattering of elastic waves by dipping layers of arbitrary shape. part-1 Antiplane strain model, Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol.18, 1989.
- 23) Lee, J. J. and Langston, C. A.: Wave propagation in a three-dimensional circular basin, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1983.
- 24) 香川明生、山田善一、野田茂：実体波Gaussian Beam を用いた不整形地盤の震動解析、第19回地震工学研究発表会、1987.
- 25) Sanchez-Sesma, F. J., Chavez-Garcia, F. J. and Bravo, M. A.: Seismic response of a class of alluvial valley for incident SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.78, 1988.
- 26) 福和伸夫、佐藤俊明、川瀬博、中井正一：不整形性を有する沖積地盤の地震観測シミュレーション-BEMとFEMの結合解法による解析－、構造工学論文集、31B、1985.
- 27) 源栄正人、太田外気晴、釜田正毅、喜多村英司：1985年メキシコ地震における地盤動特性に関する解析的検討、第14回地盤震動シンポジウム、1986.
- 28) Mita, A. and Takanashi, W.: Dynamic Soil-structure interaction, 5th International conference on Boundary Elements, Hirishima, 1983.
- 29) 源栄正人、浦尾謙二：波数離散型解法を用いた不規則不整形地盤の波動伝播解析－波数離散型解法とFEMの結合解法－、日本建築学会学術講演梗概集、1989年
- 30) Desai, C. S. and Sirewardane, H. J.: Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials, Prentice-Hall, 1984.
- 31) 松本崇、濱本卓二（執筆担当）：地盤と構造物の相互作用における非線形性、建築構造力学の最近の発展－応力解析の考え方－、日本建築学会、926～980頁、1987年
- 32) 源栄正人：埋込み構造物と地盤の動的相互作用解析に関する研究、東北大学生位論文、1988年
- 33) Wolf, J. P.: Comparison of time-domain transmitting boundaries, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, 1986.
- 34) Wolf, J. P. and Motosaka, M.: Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in the time domain, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.18, pp345-364 & pp365-376, 1989.
- 35) Sakurai, S., Kitamura, Y. and Simizu, N.: Three-dimensional elasto-plastic analysis of structure foundation by means of integral equation method, 4th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, 1982.
- 36) Mattheus, W.: A strategy for the solution of soil dynamic problems involving plasticity by transform, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.18, pp1601-1611, 1982.
- 37) Darbre, G. R. and Wolf, J. P.: Criterion of stability and implementation issues of hybrid frequency-time domain procedure for nonlinear dynamic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp569-581, 1988.
- 38) Bard, P. Y. and Bouchon, M.: The seismic response of sediment-filled valleys. part I. The case of incident SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.70, 1980.
- 39) 篠崎祐三：不整形地盤の短周期地震動、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988年
- 40) 大堀道広、南忠夫：堆積盆地における地震動の増幅特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989年
- 41) 鈴木崇伸、伯野元彦：消波境界を持つ有限要素法による波動伝播解析、東京大学地震研究所彙報、59、1984.
- 42) Tong, J., Kuribayashi, E.: The three-dimensional response of axisymmetric sediment-filled valleys, Soil and Foundation, Vol.28, 1989.
- 43) 大堀道広：不整形性を有する冲積地盤の地震動特性、東京大学学位論文、1990年3月
- 44) Lee, V. W.: Three-dimensional diffraction of plane P, SV & SH waves by a hemispherical alluvial valley, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 1984.
- 45) Sanchez-Sesma, F. J.: Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1983.
- 46) 丹羽正徳、大保直人、鈴木康嗣、野澤貴：東京湾臨海部の地震動特性に関する研究 その1 1990.2.20伊豆大島近海地震の記録にみられるやや長周期地震動について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月
- 47) 釜田正毅、源栄正人、丹羽正徳、稗圃成人：東京湾臨海部の地震動特性に関する研究 その2 堆積盆地構造により発生する表面波に着目した解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月
- 48) 首都圏基盤構造グループ：夢の島人工地震実験資料集、基盤構造と地盤動、1989.7.
- 49) 加藤茂：東京湾におけるマルチチャンネル反射音波探査、水路部研究報告、第19号、1984.3.
- 50) Kudo, K.: The contribution of Love waves to strong ground motion, Proceedings of the 2nd International Conference on microzonation for safer construction, 1978.11~12.
- 51) 市川政治、望月英志：近地地震用走時表について、気象研究所研究報告、第22巻、第3-4号、1971年11月

表層地質が地震動に及ぼす影響に関する研究事例と今後の課題

A brief review of studies on the effects of surface geology
on seismic motion and their perspective川瀬 博
Hiroshi Kawase

The state of the art on the effects of surface geology on seismic ground motion is briefly summarized in three aspects, namely, development of simulation methods, delineation of geological structures, and seismic motion measurement. It is found that we have already developed numerical techniques capable to model complicated structures in the earth's crust and that it would be a matter of time for us to use three-dimensional, realistic model. However, we still need to improve understanding on geological structures and coverage of observation networks. For smaller scale basins ($\leq 1\text{km}$) or longer period range ($\geq 2\text{sec}$) we can simulate observed seismograms by current techniques and current level of knowledge on geologic structures. By filling in the deficiency of our knowledge we will extend the range for quantitative seismic motion prediction. As a final note inappropriateness of the response spectra with 5% damping to extract the characteristics of seismic motions is emphasized.

1. はじめに

1930年代のSezawa-Ishimotoの先駆的研究から始まった表層地質が地震動に及ぼす影響に関する研究は80年代後半に入りて世界的にかつてない高い関心を集めている。諸外国にとって、Mexico地震のもたらした衝撃がそれに大きく寄与していると思われる。つまり、①震源が遠くても表層地盤の影響で大被害が発生する、②表層地盤によって周期が長い波も短い波と同様に増幅される、ということが理屈では理解していくも実感として捉えていなかったのではなかろうか。

堆積層の厚い日本においては、被害との関連という意味ではsourceやpathの影響よりもsiteの影響の方が時に大きいことは当然のことと考えられていたが、②の周期に関する意外性は日本でも一部で指摘されていた。しかしsiteの影響として共振のような現象が支配的なら、無次元振動数 ka (k ; wavenumber, a ; characteristic length)で無次元化されるので、長周期だからどうということはいえず、 ka が同じでかつ a で測った無次元形状が同じなら、応答は同じになる。

日本にMexico地震が与えた真の衝撃は、③表層地盤が継続時間を著しく延伸させ得ることを示したことであろう。勿論それ以前に、堆積盆地では水平方向に伝播する波が発生することは理論でも観測でも報告されていたが、その効果があれほどの大被害に関与するような重要なものと認識されていたとは言い難い。

以上のことから、ここではメインテーマの「やや長周期」にあまりこだわらず、むしろ水平方向に閉じた表層地盤(堆積盆地)が地震動にもたらす影響、特に継

続時間延伸効果について、研究の現状を簡単に紹介し、その中で我々が直面している課題を抽出することを試みる。なおここに示す研究事例は多くの研究中の一部にすぎないことをお断りしておく。必要なら Sanchez-Sesma(1987), Aki(1988)を参照されたい。

2. 研究のトライアド(3極)構造

表層地盤が地震動にもたらす影響に関する研究は、次の3つの柱によって支えられている(図1)。

① 解析手法の開発

地震波動伝播解析用の理論モデル構築・解析コード開発とその検証を行う。

② 地下構造の把握

表層から深層まで2-3次元的広がりで調査する。

③ 観測データの収集

地震観測ネットワークを敷設し、地震動データを収集・処理・分析する。

①はプログラム本体、②は入力データ、③は出力のターゲットに当たる。すべてがそろっていれば理想的なシミュレーションが可能となる。以下このトライアド構造に即して研究の現状を述べ、その後予測の現状をまとめる。最後に観測データ利用上の問題点について述べる。

3. 解析手法に関する研究

水平方向に変化する地層中の地震波動伝播に関する理論的研究は、Aki & Larner(1970)による通称Aki-Larner法とTrifunac(1971)による固有関数展開を先駆として、それ以後これらの手法の展開と新しい手法の導入が次々と図られ、この20年間に著しく進展した。

例えばAki-Larner法はBard & Bouchon(1980a, b)により時間領域に拡張され、堆積盆地内では盆地端部からの表面波が後続動となって現れることを示した。Bardらによるその後の研究は堆積盆地の応答に関する理論的検討としては最も詳細なもの1つといえる。ただBard & Bouchon(1980b)のP-SV波場の解には隣接盆地からの散乱波が含まれている(Kawase & Aki, 1989)。Aki-Larner法はさらに3次元問題に拡張され(Niwa & Hirose, 1985; 堀家, 1988; 大堀, 1990)、低振動数域での3次元的挙動が検討されている。Rayleighの仮定による誤差については、理論的に問題なしとするSanchez-Sesma et al.(1989)と数値的に問題ありとする篠崎(1990)の報告があり、決着がついていない。

Trifunac(1971)の半円筒形盆地に対する固有関数展開による厳密解は、その後半楕円形盆地や谷地形、半球形地形に拡張された。これらは数値解の精度検証に役立つが、対象は単純な地形に限られる。

一方、複雑な地盤形状を自由にモデル化できる手法としてFDM-FEMが用いられてきた。上の2手法と同じ頃Boore(1970)やLysmer & Drake(1972)はFDMやFEMで不整形地盤解析を試みた。以後Clayton & Engquist(1977), Fuyuki & Matsumoto(1980), Boore et al.(1981), 座間(1981), Ohtsuki & Harumi(1983), Frankel & Clayton(1984)等による応用・拡張が行われた。3次元への拡張も近似的に(Helmberger & Vidale, 1988)、あるいは直接(Etgen & Yomogida, 1988)試みられ、並列計算機を前提とした開発が進展しつつある。

FDM-FEM等の領域型解法は有限領域の解析には適しているが、無限に広がる媒体の解析には無反射境界等の工夫が必要となる。積分方程式法(BIEM)やその応用である境界要素法(BEM)は、自動的に無限遠への波動逸散が考慮でき無限媒体の解析に適している。BIEMの不整形地盤解析に対する応用はWong & Jennings(1975)によって初めて行われた。その後小堀・篠崎(1977), Sanchez-Sesma & Esquivel(1979), Wong(1982), Dravinski(1982), Kawase et al.(1982), Mossessian & Dravinski(1987), Kawase(1988)等により様々な改良・拡張が施された。Sanchez-Sesma(1983), Mossessian & Dravinski(1989)等は3次元へ拡張している。また、Toki & Sato(1983), 福和ほか(1985), Mossessian & Dravinski(1987)等により、お互いの利点を生かすFEM-BEM結合法も提案されている。

以上のような波動方程式の解を忠実に表現しようとする手法は、*a priori*に適応振動数範囲を仮定してはいけないが、現実には高振動側には限界がある。これは波動場や境界条件を表現するのに必要な自由度が[振動

数×次元]に比例するからである。特にFEM・BEM等陰解法を用いるものはこの2乗~3乗で演算時間が増大する。従って陽解法が使えるFDMの方が細かい境界条件にこだわらなければ有利である。額縁・竹中(1989)はFDMを最終兵器とまで呼んでいる。

一方で、あらかじめ特定の範囲でのみ成立する仮定を用いて解析効率をあげる試みがなされてきた。例えば高振動数域では波は局所的に波線で近似される。この波線理論を適用した例としてHong & Helmberger(1978), Nowack & Aki(1984), Moczo et al.(1987)等がある。SH波場の場合これらはその高周波近似にもかかわらず他の手法とよく一致した解を与える(Kohketsu, 1987)。しかし3次元の場合(Lee & Langston, 1983)には物理的に不可解な結果となっており、波線理論が安易に拡張できないことを示唆している。

また、正規モード理論による理論地震動は浅くて遠い震源ならよい近似となるが、これと表面波のモード変換を考慮した近似解法(Alsop, 1966)を組合せると、観測点近傍の地盤特性を考慮した表面波伝播解析が高速に行える(工藤, 1979)。Regan & Harkrider(1989)はモード変換係数を求めず、遷移域をFEMでモデル化し、表現定理で結合する手法を提案している。

以上のように、堆積盆地のような水平方向に変化する地層中の地震波動伝播に関する解析手法は既に多くの蓄積がある。現実の地盤を考えた時、2次元なら完全に実用域にあるといえる。3次元場については未だ発展途上だが、今の計算機能力の向上度を考慮すればその実用化も時間の問題であろう。解の精度については、過去においてはチェックが不十分な場合も見られたが、今日では比較的容易に相互チェックができるので、適用範囲さえ守れば問題ないと思われる。

4. 地下構造の解明

解析手法の入力データとなる地盤の速度構造の詳細を明らかにすることは、手法の開発と等しく重要である。現在日本で深い地下構造が最も詳細に調べられているのは東京を中心とした関東平野南西部であろう。これは主として首都圏基盤構造研究グループの長年に渡る精力的な研究によるもので、その最新の成果は山中ほか(1988)および本シンポジウムに示されている。

しかしそこで指摘されているように1km以浅の速度構造はよくわかっていない。表層($\leq 100m$)部分については何点かでPS検層が行われており、その値を基準にして地質データによるmicrozonationが試みられているが(Shima, 1978)、同じ地層は同じ速度とする仮定が必要である。N値からS波速度 β を推定する方法もある(e.g., Sugimura et al., 1982)。

大阪平野・淡尾平野をはじめとする他の沖積平野においても、深い地下構造はある程度探査されているが、表層についてはやはり点でしか把握されておらず、面的データはボーリングによるものが主である。

一方で常時微動を用いた表層地盤構造推定の試みもなされた。常時微動の卓越振動数は、基盤とのインピーダンス比が大きいときには表層地盤の共振振動数 f_r とよい相関がある。しかし、この場合基盤深さHまたは表層のS波速度 β のどちらかが既知である必要がある($f_r = \beta/4H$)。これに対し、常時微動をアレーで同時観測し、求められる各周期毎の表面波伝播速度から地層構造を推定することをHorike(1982), 坂尻・鏡味(1982), 松島・岡田(1989)等が試みている。

以上のように、地盤の速度構造については着々とデータが収集されつつあるものの、大都市が立脚する数10km×数10kmの堆積盆地の3次元構造を解明するには至っていないのが現状である。特に表層地盤の面的な把握が十分なされていない。長周期であれば境界の微細な構造の与える影響は小さいが、短周期では無視できないし、短周期はsite近傍だけで決まるとは言えない(後述)。盆地の面的な速度構造の把握が精度よい地震動予測には欠かせないのである。

ここでは地盤の諸性状のうち地盤の速度構造についてみてきた。それは速度構造(特にS波)が地震動に対し最も影響が大きいからである。しかし地盤の減衰も劣らず重要である。特に軟弱層(減衰大)や大規模盆地(伝播距離大)では影響が顕著となる。残念ながら減衰については速度構造以上に不確定性が大きい。その原因・性質も含め今後の調査・研究に待つところが多い。

5. 観測データの収集

地盤データを入手し、開発した手法でシミュレーション解析した後、その予測が正しいかどうかを観測データと比較して検証しなければならない。日本における強震観測は既に30年以上の歴史があるが、水平方向に変化する地盤による影響をとらえようという観点で行われている観測ネットワークは多くない。

Vancouverで開かれたESGの第1回workshopで、日本における候補地として図2に示す7か所が挙げられているが(ESG Subcommittee, 1987)、上記の観点から計画されたものは少なく、対象となった足柄平野の観測ネットワークはその数少ないうちの1つである(工藤, 1988)。この他現在関東周辺で行われている地震観測は第16回地盤震動シンポジウムで報告されている。大域的には気象庁1倍強震計の記録が使える(e.g., 佐藤, 1989; Sasatani et al., 1989; Yamamoto et al., 1989)。

地震観測は息の長い、手間暇とお金のかかる仕事である。それ故得られたデータは貴重であり最大限有効

活用すべきである。逆に後で有効利用できるようなデータを収集すべきであるともいえる。これが今後の課題のように思われる。

6. シミュレーションの現状

漸く本題の水平方向に変化する地質構造が地震動に与える影響に関するシミュレーション解析の現状について私見を述べる。結論から先に言うと、小規模盆地およびやや長周期域については定量的な予測がおおむね可能だが、表層地盤が重要な役割を果たす場合については定性的な一致に留まっているのが現状である。

6.1 小規模な堆積盆地

我々は時に小規模な堆積盆地がもたらす影響を観測する機会に恵まれる。何処までが小規模かは問題だが、一応幅1km以下とする。小規模盆地はimpedance contrastが大きいことが多く、地盤調査も密な観測も比較的容易である。このような例として河川敷の埋没谷の地震観測結果をシミュレーションしたOhtsuki et al.(1984), 福和ほか(1985)の例がある。図3に地震計の配置と地盤構造を、図4-5に夫々の解析と観測の比較を示す。どちらもよく一致しており、特に図5では1次元波動論と比較し主要動後半部が改善されているのがわかる。この他Garm, USSRにおける観測との比較がAki(1988)に紹介されている。

6.2 大規模な堆積盆地

盆地のサイズが大きくなるに従い解析は困難の度合いを高める。地盤の情報は不確実性を強め、観測は広域に渡り、表層から深層までの構造が等しく影響し始め、解析モデルのサイズは計算能力の限界に達する。

それでも着目周期がやや長周期の場合はfeasibilityが高い。例えばYamanaka et al.(1989)は山中ほか(1988)の地盤構造を用いて3~20秒の波に着目してシミュレーション解析を行っており(図6)、前半部の振幅が少し小さいものの最大値とその現れ方はよく再現されている。また佐藤(1989)は、1961年北美淡地震の神戸と大阪における気象庁1倍強震計記録に着目し、震源から大阪平野までを軸対象FEMと薄層要素法でモデル化し再現を試みている。図7に解析モデルを、図8に神戸と大阪における解析と観測の比較を示す。震央距離が約200kmと大きいこと、地盤定数の不確実性が大きいこと、震源を含めた純粋な理論波形であること等を考えると大変よい対応といるべきであろう。

Vidale & Helmberger(1989)のSan Fernando地震におけるSan Fernando valleyとLos Angeles basin(図9)のシミュレーションもやや長周期(2~10秒)を対象にしたもので、結果は非常によく合っているが(図10)、その震源の表現に苦労が隠されている。即ち、他で決められた震源解を用いず、深さ10kmのstrike-slipの点震源と

している。さらに震源時間関数をD068の観測波に合うように決めている。従って震源を含めたモデル化とはいっても純粹な理論波形ではなく、盆地端部での観測波でコントロールが効いているのである。

同じやや長周期域であっても表層地盤の影響が大きい場合にはシミュレーションは相当困難になる。Mexico Cityがその好例であり、CDAOやSCTで観測された後続相を再現するため多くの研究がなされてきたが、地盤情報が少なくまた観測点が少なかったため定性的な説明に留まっているのが現状である。日本の研究については第14回地盤震動シンポジウムを、米国他の研究についてはEarthquake Spectra, 4, No.3 & 4 (1988) 及びEngineering Seismology and Site Response, Computational Mechanics Publications(1989)を参照されたい。これらMexico Cityの地盤解析を通して我々が学んだ教訓は、①表層地盤のみの継続時間延伸効果は小さくまた単調減少する(Kawase, 1987; Bard et al., 1988)、②表層地盤と深層地盤の影響は分離できない(Kawase & Aki, 1989)、ことであると私は考える。これらを示した解析例をモデルとともに図11~13に示す。現在多くの観測点がMexico City内で稼働中なので(Singh et al., 1988)、今後のデータが待たれる。

一方、日本の沖積平野の表層地盤の卓越周期は一般にMexico Cityのそれより短く、1秒かそれ以下のことが多い。また地形も複雑で表層厚も大きく変化しているのが通例である。日本ESG委員会主催でblind testが行われた足柄平野はそうした日本の平野の好例であろう(Japanese Working Group on ESG, 1989)。図14に軟弱地盤上での観測波形とその非定常スペクトルを示す。主要動の卓越周期は約0.5秒である。ここで着目すべきは主要動の15秒~20秒後に現れる後続相で、その卓越周期は約1秒である。これが水平方向に閉じた盆地地形の影響であると考えて川瀬ほか(1989)は、図15に示すモデルで解析し、図16(Ricker wavelet入射)・図17(岩盤上の観測波入射)を得た。確かに後続相の振幅は増大し、スペクトル比も1次元波動論よりは改善されているが、より低い振動数・より大きな增幅が必要なことがわかる。つまりより深く柔らかい洪積層が要請されている。またここでも先に述べた②表層地盤と深層地盤の影響は分離できないことが示された。blind testに関する全体評価は笹谷(1990)を参照されたい。

以上のように大規模な堆積盆地のシミュレーションは、やや長周期域においては適切な地盤モデルと適切な入力があればかなり精度よく再現することが可能である。しかし短周期になればなるほど困難さが増大し、1秒よりも短周期域では定性的な議論がかろうじ

てできるところといわざるを得ない。これは単に周期の問題ではなく、我々が持っている情報の不足に起因するところ大と考える。その意味で、合っているよう見える長周期域のシミュレーションをpin point matchingではない多次元的なものとし、より詳細な検討をもとに再現可能領域を広げていく必要があろう。

また佐藤(1989), Sato & Kawase(1989)が指摘しているように今後はsiteの影響を考える時sourceとpathの影響も同時に考える方向で研究していく必要がある。

7. データ利用上の問題

鳥海(1975)が大阪平野における観測記録から2次の表面波の存在を初めて指摘、“あとゆれ”と名付けてから今日に至る間の理論的・観測的研究成果をこうして並べてみると、堆積盆地の与える影響は本質的には2次の表面波による継続時間延伸効果であることが再度確認される。構造物の非線形応答を考えればこの継続時間特性の重要性はいくら強調してもしきりでない。しかるに、地震動データを分析しその性質を抽出するのに、この継続時間因子が入ってこない尺度が未だ多用されているのは憂うべきことと言わざるを得ない。

図18はRicker waveletを重ね合わせて作った継続時間の異なる5つの波である。これらの5%応答スペクトルを図19に示す。急速に頭打ちとなることが明らかである。これは理論的にCaughey & Stumpf(1961)によって示されている。一方フーリエスペクトル(図20)は当然線形に増加する。Mexico Cityのシミュレーションで5%応答スペクトルが1次元地盤で説明できるという報告(e.g., Seed et al., 1988)は事の本質を見誤ったものといえる。5%応答スペクトルの歴史的意義を否定するものではないが、地震動を特徴づける尺度として最適かどうか見直すべき時に来ているのではなかろうか。

8. まとめ

水平方向に閉じた堆積盆地が地震動にもたらす影響について、研究の現状と今後の課題について著者なりの認識をまとめてみた。主な結論は以下の通り。

- ① 解析手法は既に多くの蓄積があり、2次元は実用域にあり、3次元の実用化も時間の問題である。
- ② 地下構造データ・観測データの収集は理論的検討も生かしつつさらに継続していく必要がある。
- ③ 現状では小規模盆地あるいはやや長周期域についてはおむね定量的な評価が可能になりつつあるが、表層地盤の影響が大きい場合には定性的な評価に留まっている。予測能力向上には地下構造データ・観測データの蓄積が欠かせない。
- ④ 2次の表面波による継続時間延伸効果をとらえるためには5%の応答スペクトルは適当でない。

参考文献

- Aki(1988), Recent Advances in ground-motion evaluation, ASCE Geotechnical Special Publication 20, 103-165.
- Aki & Larner(1970), JGR, 75, 933-954.
- Alsop(1966), J. Geophy. Res., 71, 3969-3984.
- Bard & Bouchon(1980a), BSSA, 70, 1263-1286.
- Bard & Bouchon(1980b), BSSA, 70, 1921-1941.
- Bard et al.(1988), Earthq. Spectra, 4, 609-633.
- Boore(1970), J. Geophy. Res., 75, 1512-1527.
- Boore et al.(1981), BSSA, 71, 117-125.
- Caughey & Stumpf(1961), J. Appl. Mech., 28, 563-566.
- Clayton & Engquist(1977), BSSA, 67, 1529-1540.
- Dravinska(1982), BSSA, 72, 596-614.
- ESG subcommittee(1987), presented at 1st ESG workshop.
- Etgen & Yomogida(1988), EOS, 69, No.44, 1325.
- Frankel & Clayton(1984), BSSA, 74, 2167-2186.
- 福和ほか(1986), 構造工学論文集, 31B, 1-10.
- Fuyuki & Matsumoto(1980), BSSA, 70, 2051-2069.
- Helmberger & Vidale(1988), BSSA, 78, 109-121.
- Hong & Helmberger(1978), BSSA, 68, 1313-1330.
- Horike(1982), 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, 173-183.
- 堀家(1988), 地震学会予稿集, 1, 251.
- Japanese Working Group on ESG(1989), Proc. National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Tokyo.
- Kawase(1987), Ground Motion Engineering Seismology, Ed. Cakmak, Elsevier Scientific Publishing Co., 467-476.
- Kawase(1988), BSSA, 78, 1415-1437.
- Kawase et al.(1982), JEES, 1641-1648.
- Kawase & Aki(1989), BSSA, 79, 1361-1382.
- 川瀬ほか(1989), Proc. National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 299-310.
- 小堀・篠崎(1977), 地震, 30, 127-142.
- Kohketsu(1987), Bull. Earthq. Res. Inst., 62, 201-245.
- 橋本・竹中(1989), 地震, 42, 391-403.
- 工藤(1979), 東京大学理学部博士論文。
- 工藤(1988), 第16回地盤震動シンポジウム, 21-26.
- Lee & Langston(1983), BSSA, 73, 1637-1653.
- Lymer & Drake(1971), BSSA, 61, 1233-1252.
- 松島・岡田(1989), 第17回地盤震動シンポジウム, 41-46.
- Moczo et al.(1987), J. Geophy., 62, 38-49.
- Mossessian & Dravinska(1987), BSSA, 77, 1784-1803.
- Mossessian & Dravinska(1989), Wave Motion, 11, 579-592.
- Niwa & Hirose(1985), Proc. 5th Int. Conf. Numerical Method in Geomechanics, 143-149.
- Nowack & Aki(1984), J. Geophy. Res., 89, 7797-7819.
- 大堀(1990), 東京大学工学部博士論文。
- Ohtsuki & Harumi(1983), Earthq. Eng. Struct. Dyn., 11, 441-462.
- Ohtsuki et al.(1984), Earthq. Eng. Struct. Dyn., 12, 795-816.
- 坂尻・鏡味(1982), 第6回日本地震工学シンポジウム, 497-504.
- Regan & Harkrider(1989), Geophy. J., 98, 429-446.
- Sanchez-Sesma(1983), BSSA, 73, 1621-1636.
- Sanchez-Sesma(1987), Soil Dyn. Earthq. Eng., 6, 124-132.
- Sanchez-Sesma & Esquivel(1979), BSSA, 69, 1107-1120.
- Sanchez-Sesma et al.(1989), BSSA, 79, 1995-1999.
- Sasatani et al.(1989), Proc. National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 61-66.
- 笹谷(1990), 地震工学振興会ニュース, 111, 3-6.
- 佐藤(1989), 東北大工学部博士論文。
- Sato & Kawase(1989), Proc. National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 133-138.
- Seed et al.(1988), Earthq. Spectra, 4, 687-729.
- Shima(1978), 2nd Int. Conf. Microzonation, San Francisco, 435-443.
- 篠崎(1980), 地震学会予稿集, 1, 155.
- Singh(1988), Earthq. Spectra, 4, 75-100.
- Sugimura(1982), 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, 1439-1450.
- Toki & Sato(1983), Boundary Elements V, Springer-Verlag, 699-708.
- 鳥海(1975), 第4回日本地震工学シンポジウム, 129-136.
- Trifunac(1971), BSSA, 61, 1755-1770.
- Vidale & Helmberger(1988), BSSA, 78, 122-141.
- Wong(1982), BSSA, 72, 1167-1183.
- Wong & Jennings(1975), BSSA, 65, 1239-1257.
- Yamamoto et al.(1989), Proc. National Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 97-102.
- 山中ほか(1988), 地震, 41, 527-539.
- Yamanaka et al.(1989), BSSA, 79, 631-644.
- 座間(1981), 地震研究所彙報, 66, 741-777.

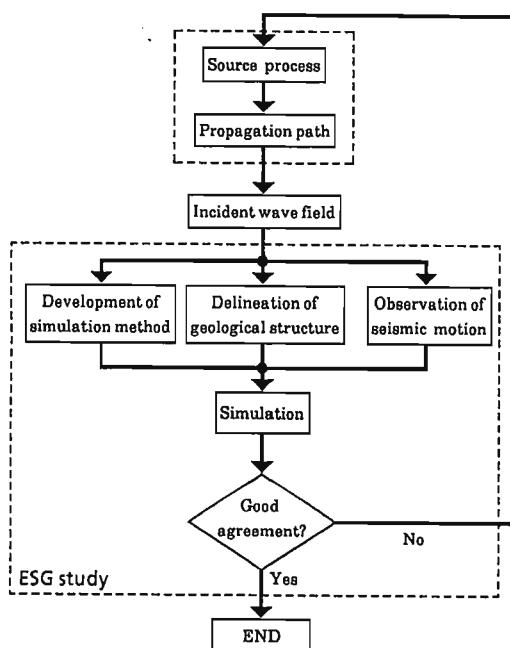


図1 ESG研究のトライアド(3極)構造
Fig.1 Triadic structure of ESG study

Site No.	Site Name	Array Size	#1	#2	#1	#2	Rock Outcrop	Remarks
1	Sendai	12x12km	11	22	M	PS-L	In site	Variety of soil type & topography
2	Taira	Down Hole	1	4	M	PS-L	vicinity	Pore pressure & strain.
3	Chiba	300x300m	15	29	M	PS-L	none	Very dense, Strata.
4	Kanto	40x40km	23	-	M	Rfr.	In site	Long-period wave propagation.
5	Yokohama	150x200m	3	6	M	PS-L	none	High velocity contrast
6	Ashigara	10x15km	15	3	8	PS-L	In site	Variety of soil type, Valley
7	Tatara	145x145m	4	8	L	PS-L	vicinity	High velocity contrast

Note
 #1: Numbers of observation stations.
 #2: Numbers of down hole seismometer.
 *1: Seismic activity (High, Medium, Low)
 *2: Geophysical data (PS-L:P-S-wave velocity logging, Rfr:refraction data)

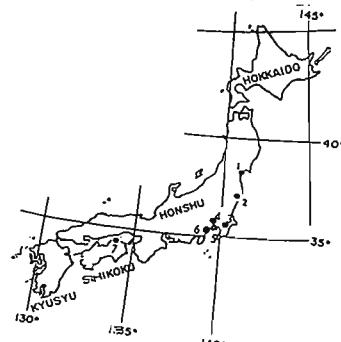


図2 日本の主な強震動アレー観測網 (ESG Subcommitte, 1987)
Fig.2 Major strong-motion array networks in Japan

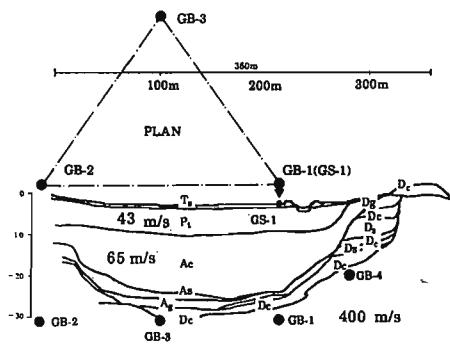


図3 小規模な軟弱堆積盆地の観測網
(Ohtsuki et al., 1984, 福和ほか, 1985)
Fig.3 Observation at small sediment-filled valley

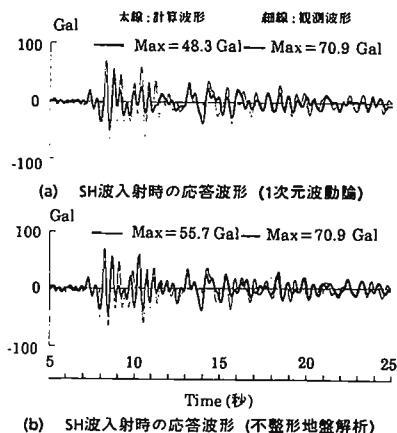


図5 観測とシミュレーションの比較 (福和ほか, 1985)
Fig.5 Comparison of observed and simulated seismograms

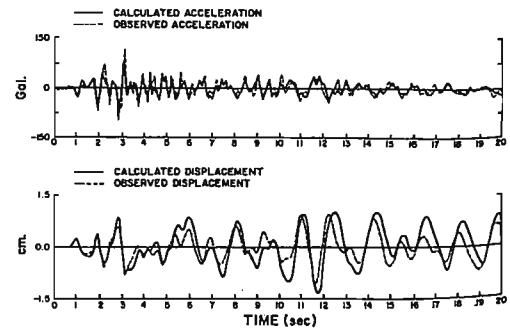


図4 観測とシミュレーションの比較 (Ohtsuki et al., 1984)
Fig.4 Comparison of observed and simulated seismograms

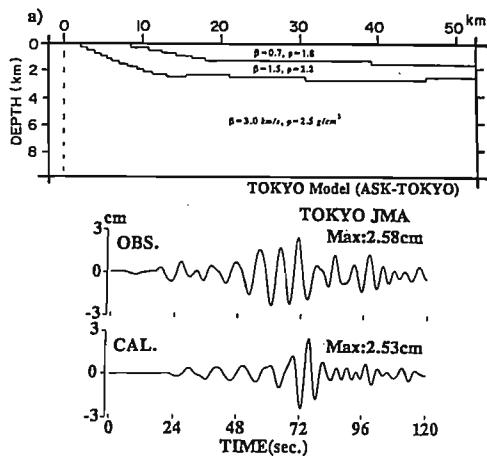


図6 東京の深い構造を用いたシミュレーション
(Yamanaka et al., 1989)

Fig.6 Simulation using deep basin structure beneath Tokyo

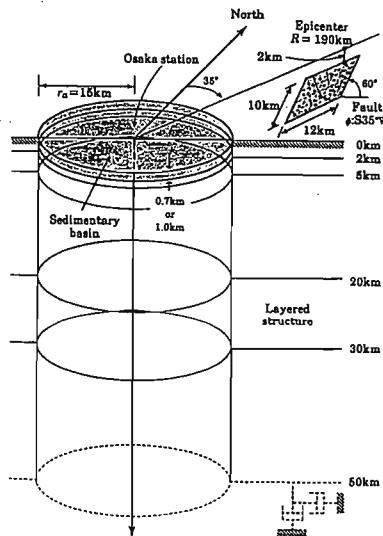


図7 大阪平野のシミュレーション用モデル (佐藤, 1989)
Fig.7 Simulation model for the Osaka basin

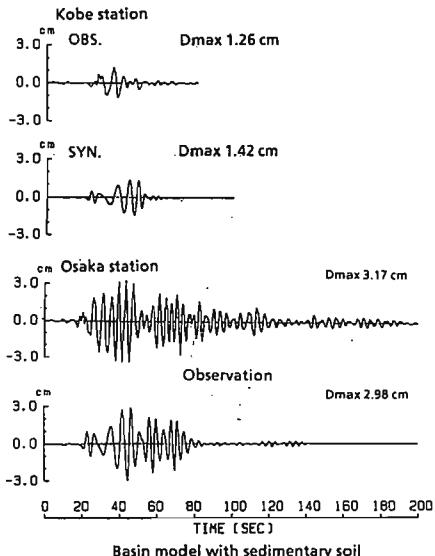


図8 観測とシミュレーションの比較 (佐藤, 1989)
Fig.8 Comparison of observed and simulated seismograms

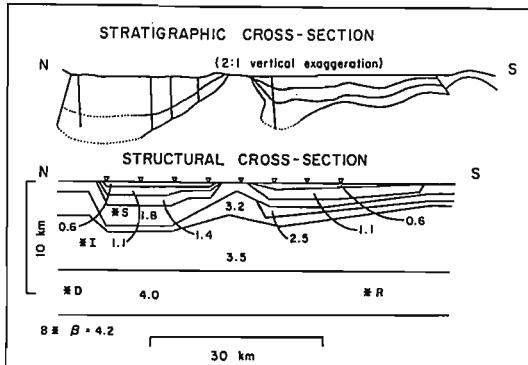


図9 サンフェルナンドー口サンジェルスの地盤モデル
(Vidale & Helmberger, 1989)

Fig.9 Velocity structure of San Fernando-Los Angeles area

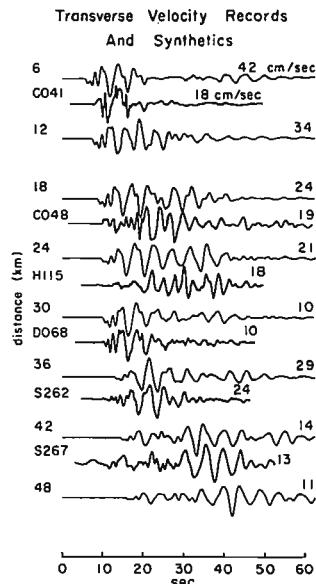


図10 観測とシミュレーションの比較 (Vidale & Helmberger, 1989)
Fig.10 Comparison of observed and simulated seismograms

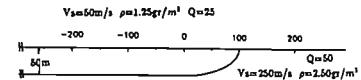


Figure 5: 2-D model for surface layer irregularity

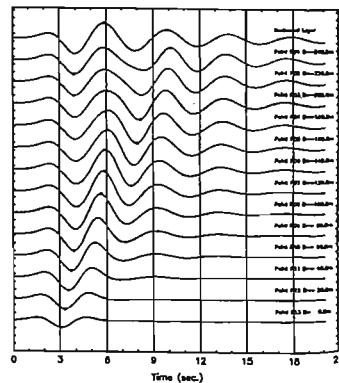


図11 表層の局所的な不整形性が与える影響 (Kawase, 1987)
Fig.11 Effect of local variation in the surface layer thickness

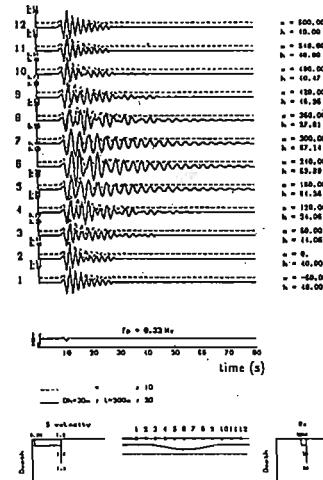


図12 表層の局所的な不整形性が与える影響 (Bard et al., 1988)
Fig.12 Effect of local variation in the surface layer thickness

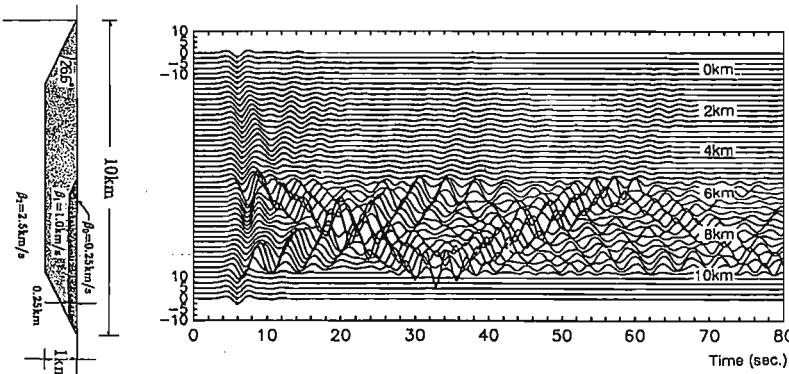


図13 浅い構造と深い構造の相互連成効果 (Kawase and Aki, 1989)
Fig.13 Interaction between shallow and deep basin structures

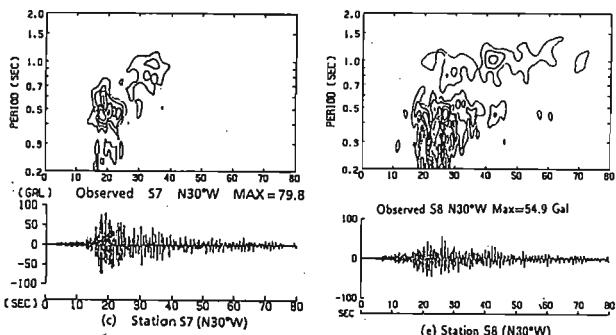


図14 足柄平野内で観測された波形と非定常スペクトル(川瀬ほか, 1989)
Fig.14 Seismograms and spectra recorded in the Ashigara valley

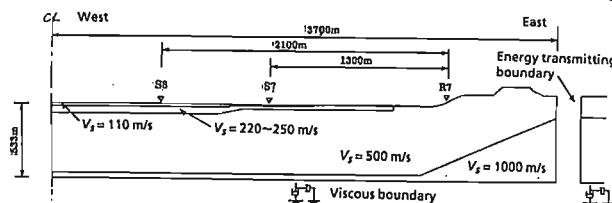


図15 足柄平野のシミュレーション用モデル(川瀬ほか, 1989)
Fig.15 Simulation model for the Ashigara valley

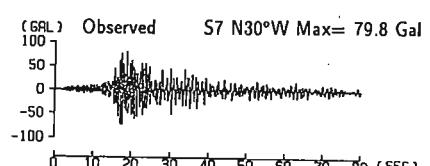
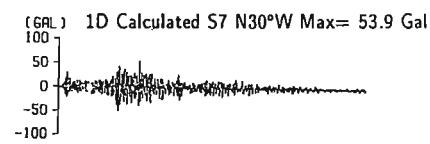
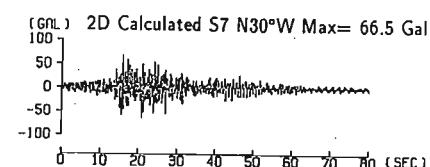


図17 観測とシミュレーションの比較(川瀬ほか, 1989)

Fig.17 Comparison of observed and simulated seismograms

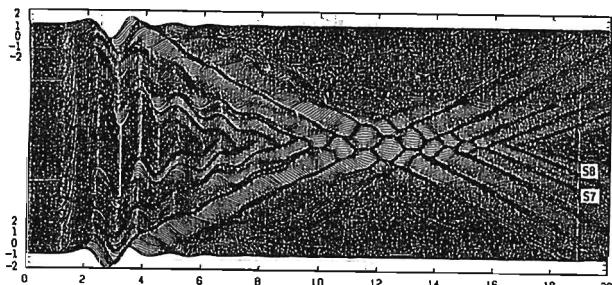


図16 足柄平野のRicker waveletに対する応答(川瀬ほか, 1989)
Fig.16 Theoretical response of the Ashigara valley for Ricker wavelet input

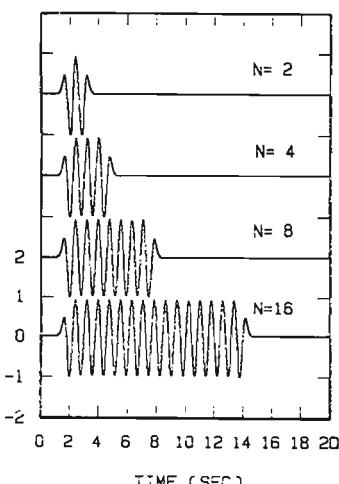


図18 異なる数のRicker waveletの重ね合わせによる人工波
Fig.18 Wave trains by different numbers of Ricker wavelet

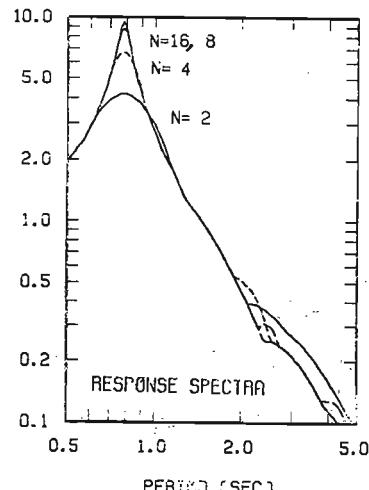


図19 繼続時間の異なる人工波の減衰5%の応答スペクトル
Fig.19 Response spectra ($h = 0.05$) for waves with different durations

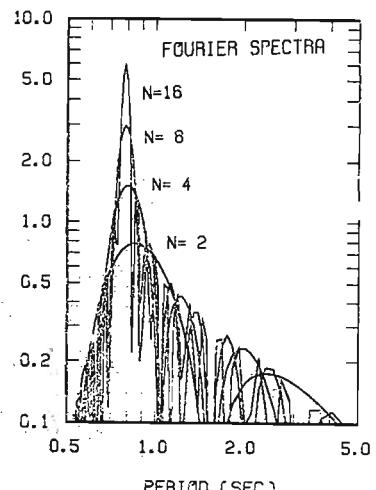


図20 繼続時間の異なる人工波のフーリエスペクトル
Fig.20 Fourier spectra for waves with different durations

V. 地盤震動シンポジウム報告
第1回～第17回（除く12回）



シンポジウム「建築物の設計に考慮すべき地震動」の報告

本会構造標準委員会振動分科会による地盤震動小委員会では、昨年6月の発足以来、「地盤の動特性と地盤動」を主なテーマとして、関連する各種問題点の討議を続けてきた。その討議の中で、地盤震動に関する問題は、非常に多岐多様にわたることが認識され、今後できるだけ多く、シンポジウムを開いて、広く意見や考え方、あるいは研究成果や体験などを出してもらうべきである、ということに委員の意見が一致した。そこで今回は、その第1回として、なるべく総合的なものを取り上げることにし、「構造物の耐震設計において地盤動をいかに考えるべきか、地盤学・地盤工学および設計的見地から自由討議し、今後の研究の方向性を見い出す。」という主旨で、表題のシンポジウムが、8月31日、振動分科会の主催のもとに開かれたわけである。

当日は約120名の会員が参加したが、最初に山原（清水建設・本小委員会幹事）から、あいさつを兼ねた主旨説明があり、その後、問題提起という意味で、5人の委員が講演を行なった。

まず村松（岐阜大）より、「強震動の観測値」という題で、「建物は震度6に対してもつよう設計する」ということを前提として、このような大地震時のゆれ方の大さきを推定する具体的方法が紹介された。そのひとつとして、震央距離と地動速度の間には、マグニチュードをパラメータとして、一定の関係があり、その外挿によって、大地震時の速度が推定できそうなどと、また、各都市の地盤記録を比較すると、都市によってゆれ方の大小があり、このちがいが、巨視的にみた地盤性状と関係があるであろうことなどが指摘された。

つぎに「いわゆる長周期問題について」において太田（東大震研）は、まず、耐震工学で長周期といっている周期5~10秒の波は、地盤学では、むしろ短周期成分とみなされていることを指摘した。つぎに、基盤に達する波は、震源の断層の動きをモデル化すれば理論的に計算ができるこことを、実例によって示した。また、地盤時

長周期成分と震動、さらには地層構成との間に密接な関係があることを、東京と銚子の地震記録の比較および川崎での震動測定の結果から示した。このような理論地盤気象と、基盤以浅の地盤特性とを組み合わせれば、長周期問題に関して、設計に役立つ情報が得られるということが示唆された。

3番目に小林（東工大）は、「耐震設計に用いるべき地盤動の強さについて——加速度のもつ意味について——」において、東京・川崎の数値解析的な被害率の分布が、関東大地震のときの実際の被害率とよく合うことを示した。その際、最大加速度について、数値解析値または地震観測の値は、従来の地震強さの評価値より、2~3割大きいことが指摘された。さらに、短周期側を除いては、最大速度または減衰の大きい変位応答スペクトルが、構造物被害に対して高い相關性をもつに反して、最大加速度は、地盤の一般的な建築物に対する破壊力の指標としては、不適当であることを強調した。

つぎに、「地盤力をうける建物の耐力および变形性能」において和泉（建研）は、現実に建物を設計しなければならない、という立場に対する理解に立って、主に、新しい地盤荷重規準案を取り上げた。構造・重要度などにしたがって、計算手法を5段階に分けるという考え方のほか、レベル3の一例として、速度スペクトル、地盤の振動特性、塑性率などを含んだ案が紹介された。なお、電算機を用いた「高度」な計算法によって、かえって建物が余力を失うという危険性を報告するとともに、現段階における耐震設計法は、「強さ」そのものよりもむしろ、建物の「性質」をよくするためのものになっていることを強調した。

最後に、田治見（日大、本小委員会主査）から、「応答解析に用いられている地盤動」という題で、建築センターの審査会資料をもとにした現状の紹介があった。一般に、設計用地盤力の条件と考えられているものとして、複数、地盤特性、大地震の性格、スペクトルの場合は平滑化、の4点があげられた。実際には、実記録のほかに、修正地盤動、ランダム地動が用いられ

ており、修正地盤動の一種として、スペクトルに谷が生じないように直した波形の紹介がされた。また、地盤動の任意の選択による応答計算結果のバラツキは、構造物側のパラメータのバラツキと一緒にして処理すべきであろうと述べた。なお、地盤動の強さの設定には、加速度以外に、その2乗平均あるいは速度も用いられ始めていることが報告された。

以上の問題提起のあと、自由討議が行なわれたが、その内容を2、3拾ってみる。

まず「基盤」について、最近次第に深く設定する傾向にあるが、一方そこでの入力も同時に知る必要があること、地盤の増幅度を考えるためにには、相当深いところにくる必要があることなどが指摘され、また、銚子での地盤動は、東京での基盤の振動とみなしうる可能性があろうという希望的意見も出た。なお、基盤を設定する場合、地層名ではなく、物理的な値たとえばS波速度によるべきである、という発言には賛意が多かった。

つぎに表面層成分が、果たして建物を破壊するだけの勢力をもつか否かという疑問に対しては、この周期が、地震計の盲点になっており、既存の記録だけからの判断は危険であるとの指摘があった。また、この成分による石油タンク内のスロッシングが、大災害の原因になるという警告がなされた。

地盤の振動が、重複反射理論で前提としているように実体波によるものか、それとも表面波によるものかという問題については、現時点では、そのどちらに仮定しても、実際の現象をある程度説明できそうであるとのことであった。

主題が総合的であり、また問題提起の幅も広かつたため、この地盤震動のもの問題の多様さに困惑されて、議論の密度が上がらなかったのは、ややもの足りない感じであったが、次回からは、もっと個別的なテーマを取り上げる方針なので、参加者の積極的な発言をお願いしたい。

（地盤震動小委員会・坂本功）

ニュース

レター

□中国支部長佐藤重夫博士中国新聞社文化賞を受賞

本会中国支部支部長 佐藤重夫博士は、このたび中国新聞社より第 30 回中国文化賞を受賞され、去る昭和 48 年 11 月 21 日贈呈式が行われました。

中国文化賞は、中国地方における地域社会文化の発展に功績のあった者に贈られる賞であります。佐藤博士の受賞は、同博士が昭和 25 年広島大学工学部土木建築工学科（現在は分離）の助教授として赴任されて以来今日まで、広島を中心とした中国地方一円の社会文化の発展に、大学における建築学の研究ならびに教育をとおして貢献された功績に対するもので、建築関係では最初の受賞であります。

同博士は内にあっては建築計画、設計、歴史、選択と極めて広い分野にわたって博識であり、これを研究、教育の場にいかんなく発揮され、とくに民衆の研究は四十余年の長きにわたって現在なお続行されております。また、この間、本会の中国支部支部長をはじめとする学会活動は勿論、社会的には建築審査会委員、自然保護審査会委員、文化財専門委員など多数の委員として、博士の人間本源の発想は、文化財行政や都市計画と建築行政に反映され、不斷の指針を与えてまいりました。これは、自然環境保全に対する諸提言、古文化財の調査と指定活動などとなって現われ、昭和 42 年の原爆ドーム（旧産業奨励館）永久保存の浜井広島市長への進言とその実現、建築博物館の提言（建築雑誌 1973 年 7 月号）と実現化活動はその一例といえるでしょう。

同博士の進取に満ちた行動は、今後さらに中国地方を中心として、広く發展し、地域社会に大きく貢献されることでしょう。先生のご健康と今後のご活躍を祈りたいと思います。

（正会員 株代仁朗）

□シンポジウム「ストレン・レベルによる地震動」の報告

本会構造標準委員会振動分科会の地盤震動小委員会では、47 年 8 月の第 1 回シンポジウム「建築物の設計に考慮すべき地震動」にひき続いて、今年度はその第 2 回目として、表記のシンポジウムを 48 年 11 月 30 日に開催した。前回盛況であったことにかんがみ、今回は渋谷の渋谷会館ホールに会場を移し、また 66 ページからなる資料集も準備された。

今回「ストレン・レベル」ということがテーマにとりあげられたのは、地震の波動あるいは地盤の振動を考える場合に、完全弾性論のみで扱うことは不十分で、歪の大小による何らかの非線形性を考慮しなければならないという認識によるものである。そしてこの問題を解説する糸口を、地震学の専門家との交流を通じて見出そうと意図したところに、このシンポジウムの特徴があるといえるだろう。

以下目次の紹介を兼ねて、各講演内容をごく簡単にまとめてみる。

- 震源域におけるストレン・レベル（笠原慶一・東大震研）断層震源モデルとそれによって発生する波動の性質
- 地盤動災害から見たストレン・レベル（村松郁崇・岐阜大）震度 6 に相当する地盤被害、波形記録から地盤のゆれ方の推定
- 破壊領域と地震波の特性（工藤一喜・東大震研）発破等による人工地震を用いて地盤の歪の効果を検討することの可能性
- 常時微動と地震〔動〕の〔周期〕特性比較（田中貞二・東大震研、角田智彦・大林組、山原浩・清水建設）常時微動および（強さの異なる）地震動の周期・増幅特性の比較、またはそれらと地盤性状の関連
- 強震記録から推定される地盤のストレン・レベル（土岐義三・京大防

災研）実際の記録をもとに検討した歪レベルによる地盤の弾性的性質の変化

6. 地盤の動力学的性質とその応用（原昭夫・太田外気晴・鹿島建設）動的 3 軸試験機による土の物性把握と、その結果の応答解析への応用例

7. 軟弱地盤における地震動（設計の立場から）（田治見宏・日大）杭基礎をもつ建物-地盤の動的解析によく使われる 5 種のモデルの紹介

8. Strain Level から見た地震動（太田裕・北大）Strain の立場から地震動を見ることの重要性と現時点での種々の問題点

9. 地震工学における MICRÖZÖNATION (小林啓美・東工大) マイクロゾーン化に関する国際会議の内容と問題点の紹介

このシンポジウムは、表題である「ストレン・レベル」そのものについてはあえて定義を行うことなく、講師の方々にはそれぞれのイメージをもとにして自由に御講演頂いたので、内容は上記のように非常に多岐にわたったが、それだけ問題点が多く掘り起されたわけであり、今回の企画のひとつの目的は迫せられたように思われる。今後、地震学に限らず、土質力学等、隣接諸分野との積極的な交流を通して、構造設計における地震動をどう考えればよいかという問題の解決に近づくことを期待したい。

（地盤復旧小委員会 坂本 功）

□文化財の収蔵と公開について

今日ほど文化財の保護と公開が熱心に行われている時代はない。

すでに昭和 25 年には文化財保護法が制定されていたが、昭和 43 年 6 月に文化庁が設置されるに伴い文化財保護行政は一段と進展し、いまや、都市や神社、公園などの文化財収蔵・展示施設をはじめとして、地方の町村にいたるまで郷土資料館などが設置される時代となった。

このような時代の到来は、第二次大戦後のめざましい経済復興にともなう開発ならびに建設工事による現状変更や生活の安定化にしたがって生じた空前の旅行ブームが大きな役割を果したことでもまた否めない。

とくに、最近の旅行ブームはこれまでかえりみられず廣く埋れていた多くの文化財を白日のもとに引き出す結果となつた。

從来、破れるにまかせてあった多くの有形文化財の修理、修復が盛に行われるようになつた一方では、千年のねむりからさめた文化財が白日のもとにさらされることによって急激に老化、崩壊を早める恐れもでてきているわけである。

高松塙壁画に象徴されるごとく、発掘が行われずその存在が知られなければ公開の必要を生じなかつたものが、ひとたび保護の手段を講まれば一瞬にしてこれを失い、悔を千載に残す結果ともなりかねない。

ここに文化財保護のジレンマとむずかしさがあり、文化財保護の仕事にたずさわる人々の苦労がある。

とくにわが国のごとく、四季寒暖の差が激しく、しかも西面海に囲まれた湿润な気候風土においては文化財の収蔵条件はきわめて劣悪であつて、從来多くの文化財がこの海上の島国に運ばれてきたこと自体むしろ奇跡であるといつてよい。

一口に文化財といつてもその材質は實に千差万別であつて布、紙、皮、漆、金属、木材、土などきわめて広範におよび、さらにそれらが複雑に組合わされているのが実状であるから、それらのすべてに共通する最適収蔵環境条件を決定することはなかなか困難である。

この点で長年月の生活体験の中から生れた日本の土蔵はよくわが国の気候風土にマッチした優れた構造形式の収蔵施設といふことができる。

すなわち、白漆喰で塗装された土蔵の外壁や軒を長く突きだした置屋根は強烈な日射熱を遮断し、高く張った床は地面からの湿気を防ぎ、一尺近い厚

を表明したい。(以上、ただし 62 回の論文一覧表は省略)
(京都大学教授 堀江悟郎)

□シンポジウム「地盤における観測地震波とその考察」

—1974 年伊豆半島沖地震についての報告—

本会構造標準委員会振動分科会の地盤震動小委員会によるシンポジウムも今日で第3回目を迎え、この 1月 14 日、東京大学工学部 11 号館の特別教室で開催された。資料集は前回より充実し、当日の講演概要 7 編と、各所における伊豆半島沖地震の観測資料 15 編とから成っている。

今回のテーマでは、1974 年 5 月 9 日に起った伊豆半島沖地震の際に、いろいろな場所で得られた地震記録とその解析を軸にして、建物の構造設計にあたって、地震の入力をどのように考えればよいか、という点を探ろうとする意図されている。

司会(松山豊、建研)と小委員会主査(田治見宏、日大)のまえおきに統いて、構造標準委員会の梅村委員長(東大)からあいさつを兼ねて、先日視察と指導をして来られたペラーの震害の模様と耐震設計の現状について紹介があった。

以下当日の順序に従って、各講演内容と主な質疑応答とを、ごく簡単にまとめてみる。

1. 伊豆半島沖地震の地盤観測資料について(小林啓美、東工大) 資料集に載っている記録と観測場所などについての概観と、緑ヶ丘での記録にバンド・バス・フィルターをかけた波形から求めた各周期帯毎の水平変位のオーピットの包絡線の紹介がなされた。この例では方向性があるが、一般的にどのような傾向を示すものかについての討論があった。

2. 東京椎名町における地震観測結果とその検討(太田外 気晴、鹿島技研) 18階建 RC 建物に関して行なわれている建物・地盤の地震動観測結果のうち、伊豆の地震を含む 3 回の地震記録と、その解析結果の報告があり、地震毎の記録波形の物質の違いなどが指摘された。

3. 稲毛海岸埋立地に杭支持された建物の地震動観測(河村壯一、大成建設) 7 階建の P C 建物を中心にして行なわれている建物・地盤の地震動観測結果を検討して得られた傾向を紹介したもので、上下動/水平動の比率や、スペクトルの性状などが示された。

4. 東海道新幹線沿線の強震記録(藤原俊郎、鉄道技研) 新幹線ぞいの変電所 28か所のうちの 2/3 で作動した強震計による記録を、主に最大加速度についてまとめたものが紹介された。なお、この地震に起因する故障などは皆無であったとのことである。沼津で 225 gal もあったのに無被害であったことについて、討議が行われた。

5. 伊豆半島沖地震の断層(村井 勇、東大震研) 地震学の方面からの地震断層の話で、この地震の後に発見された断層について、多くのスライドによる紹介がなされた。断層にもメインの断層と副の断層があること、断層と地割れとは専門家にも区別がつきにくいこと、断層のごく近くでは加速度は必ずしも大きくなかったらしいことなど、建築構造の人にとっては興味深い指摘が多く、活気のある討論が行われた。

6. 工学における地盤観測の窓(後藤豊俊・太田 裕、北大) 地盤観測の現状あるいは将来の方向に関する、地震学から地盤工学に対する問題提起で、ヨモグタイム・地震計の性能と守備範囲・設置場所の偏りなどについて指摘があり、また、ミニコンを用いた観測システムの紹介がなされた。ここでも活発な討議が行われ、工学の方面でも、観測体制をみなおしてゆく動きのあることが紹介された。

7. 直下型地震とその考察(森岡敬樹、早大理工研) 東京強震(1894)、竜ヶ崎地震(1921)、浦賀水道地震(1922) という古い地震の東京本震における変位記録をもとに、その加速度波形を再現し、直下型地震の性質を調べたものであり、主要動は短く波形が単純であることが指摘された。伊豆の地震も直下型であり、東京でもその可能性が云々されている折でもあるので、その性質、強さなどが議論された。

以上の一連の講演の後、田治見主査より、資料集の後半に載っている観測記録について、卓越周期、長周期、増幅率、スペクトルの形等の点について、まとめとコメントとがなされた。

残った時間で、地盤のばらつき、長周期問題、理論値と観測値の対応などについて討論が行われたが、特に、断層と震害の関係に関する議論の中で、村井先生が、因果関係を速断してしまう前に問題を整理して、ひとつ一つの要因を十分にチェックしてゆくべきであることを指摘されたのが印象的であった。

(地盤震動小委員会 坂本 功)

□第 67 回 総 会 報 告

第 10 期の最初で通算 67 回目の総会が 1 月 20 日から 3 日間六本木の日本学術会議大講堂で開かれた。

沖縄県在住の科学者として伊藤嘉昭(沖縄県農業試験場)および大城立裕(沖縄県沖縄史料編集所)の両氏が 9 期と同様オブザーバーとして参加された。

初日の総会は午前 9 時 36 分に成立し、事務局長が会長の選出まで議長の職務を行った。会長・副会長・選出に備えてあらかじめ 10 期会員選挙当選者の選舉公報などを配布した旨の報告があり、直ちに從来の方法にしたがって会長・副会長を選出することにした。その結果会長に越智勇一會員、人文科学部門からの副会長に高橋幸八郎會員、自然科學部門からの副会長に伏見康治會員を選んだ。つづいて午後からの各部会では部長・副部長および幹事 2 名ずなわち部の役員を選出して部会を終了した。その後、運営審議会が開かれた。運営とよばれているこの会は、会長・副会長および各部の役員計 31 名で組織されており、会議の運営に関する事項を審議するものである。

総会 2 日目は定期 9 時 30 分に成立し直ちに 9 期の活動全般に関する諸報告がはじまった。9 期の会長・副会長からそれぞれ所管事項について報告があった。とくに野村平蔵前副会長からは昭和 50 年度政府予算案において本会議予算の若干の増があり、49 年度の会員選挙に於ける臨時の経費を除けば 28% 増になることが報告された。

つづいて各部および 6 つの常置委員会の報告が行われた。これらの報告に対する質問も多かった。特別委員会の報告は総会 3 日目に行われることになった。9 期の審議は 8 期のまとめ「70 年代以降の科学技術について」で展開された基本的な考え方をなむち人間の尊厳に基づいた清新な科学・技術政策の樹立に寄与するため多くの新しい特別委員会が設けられた。その成果として環境問題、科学の基本問題、産業・国民生活、都市・地域・国土問題の諸特別委員会から、人間性と科学、人間の生命・能力、科学者と平和、社会福祉、資源・エネルギー、物価、国土開発に関する提言など從来の期には見られなかった新しい報告があった。

各部各委員会の報告には 10 期への引き継ぎ事項がつねに含まれており、9 期をひきついで 10 期の活動を行っていくことができるよう配慮されている。

総会 2 日目の最後に常置委員会・特別委員会の設置に関する申合せを行った。常置委員会はその名の通り各期を通して常置されている委員会である。創立 25 周年を前にを迎えた学術会議としては、今後の活動を新しく発展させるため、そのあり方、とりあげるべき課題等を再検討し、きたる 68 回総会で今期の常置および特別委員会を設置することにした。このためさしあたっては国際事業に関する特別委員会のみ從来通り設置することとし、一方、常置委員会の委員は各部から 4 名づけ選出してもほとんど全会員が 10 期の活動のあり方、とりあげるべき課題、設置すべき常置・特別委員会などの審議にあたることにした。またこれらに関する各部・各常置委員会の意見を集約しながら原案作成に資するため、運営審議会付属委員会検討小委員会を設けることにした。

3 日目午後の総会では「瀬戸内海における重油流出事故による被害情況の調査・研究に関し、緊急に予算措置を講ずること〔要望〕」を政府にだすこととした。この「要望」の審議に際して、多くの会員から積極的な発言があり、事故に対する調査資料の整備とその中間の報告を望む意見が多く述べられた。

学術会議ではすでに 9 期において国際環境保全科学会議の開催を決定していたが、今回会長・事務局の努力で会議開催の経費の一部が政府予算案に計上され、名実ともに学術会議が主催する国際会議となつた。

(日本学術会議)

ニュース

レター

ニュース・レター

□第4回 地盤震動シンポジウム「強震動におけるやや長周期成分について——耐震解析用地震動の再検討」——報告

本会構造標準委員会振動分科会の地盤震動小委員会による第4回目の地盤震動シンポジウムは、1月20日、渋谷の東学会館で275名の会員を集めて開催された。また、シンポジウムの終了後、懇親会が催され、シンポジウムにひき続き熱心な討論が行われた。今回のシンポジウムでは、耐震解析用地震動の再検討という意味で、特にやや長周期成分の問題について焦点をあて、理論面、実験面、理論面からの最新の研究の講演並びに討論が展開された。資料集は講演概要13編から成っているが、他にもう1題を加えて計14題についてそれぞれ20分程度の講演が行われた。さらに全講演終了後、約1時間程度の自由討議時間が設けられ、本シンポジウムのテーマについて研究者サイドおよび実施設計者サイドから活発な意見が出された。以下、順を追って各講演内容を簡単に記す。

1. 震度と地震波の周期成分に関する私案（問題提起として）（木村俊彦・木村俊彦構造設計事務所）本シンポジウムのテーマに関する問題提起的な意味で、地震動の周期特性等、設計体系上考慮すべき要因について注意が喚起された。

2. 耐震工学上考慮すべき周期の上限と振幅の下限（太田裕・北大）地盤基盤での地震動の加速度スペクトル強度はある一定周期範囲で一定であるが、ある周期（折点周期 T_c ）を境に急激にその強度が減少するとし、 T_c とマグニチュード M との関係についての半実験式が提案された。また「高層建築指針」によって設計した建物が危険状態にならない最低の加速度振幅についてもその自安が紹介された。

3. EL CENTRO 1940 および TAFT 1952 の地震動のやや長周期成分の強さに関する二・三の考察（長橋純男・東工大）強震記録を最大加速度あるいは最大速度によって基準化した場合、EL CENTRO あるいは TAFT というボビューラーな地震波は、その長周期成分に着目した場合、他の地震波に比べて強いとはいえないという指摘がなされた。

4. 1968年十勝沖地震、八戸港湾の強震記録にみられるやや長周期成分について（田中貞二・東大震研）八戸における地震観測の結果から、周期2～3秒のやや長周期成分の振幅は、マグニチュード M が大きい地震程大きいという傾向が示された。

5. 1968年十勝沖地震、やや長周期微動による深い地盤特性の把握と強震記録の解釈（猪俣洋史・北大）八戸、青森、宮古、室蘭各地におけるやや長周期微動、地下構造、強震記録にみられるやや長周期成分についての検討結果が紹介された。

6. 1968年十勝沖地震、理論地震動との比較による2,3の考察（石田勝彦・東大震研）1968年の十勝沖地震について断層モデルによる理論地震動を求める、これとの対比による観測地震動に関する分析結果が紹介された。

7. 関東地震の記録（山原信一・清水建設）関東地震の記録を復原し、スペクトル分析を行った結果から、この地震がとくに他の地震に比べ、やや長周期成分も含めて、それ程例外的なものではなかったことが紹介された。

8. 1923年関東大地震の地動（森岡敬樹・早大理工研）関東地震時にユーリング地震計により記録された波を復元し、その復元波形に対する分析結果として、例えば13秒という長い周期成分の波が卓越していることなどが紹介された。

9. 東京で観測された長周期地震動——1974年伊豆半島沖地震の東京における変位記録（工藤一彦・田中貞二・東大震研）伊豆半島沖地震の震源における変位記録の分析によって、観測された波の大振幅部分が表面波であること、その群速度の分散性は東京の地下構造での分散曲線と非常によく一致することなどが紹介された。

10. 東京で観測された長周期地震動——三陸沖地震の加速度記録（田中貞二・東大震研）1933年の三陸沖地震（M8.3）の東京における加速度記録を分析し、東京で観測された他の記録の特徴も考慮しつつ、10～15秒の卓越した長周期成分が東京の基盤構造に強く関係した表面波であることなどが紹介された。

11. 大阪で観測された長周期地震動——越前岬沖地震（1963.3.27）その他について（角田智彦・若松邦夫・大林組）越前岬沖地震時のSMAC記録（OSAKA 201～206）および最近2年間の気象庁記録等から大阪地方における長周期問題を検討し、今後さらに観測・解説面での研究審議の必要性が指摘された。

12. 大阪平野の震動特性について（大場新太郎・大阪工大）周辺を山で囲まれた大阪平野なるものを考えたとき、大阪市で観測される地震動の特性が震央距離によって明確に分類されることが紹介され、次いでこのような場合の地震動特性は平野外部での伝播過程と内部における平面的拡がり、地盤条件に起因するものと分けて考えるべきであるとの指摘がなされた。

13. 震源と地震動の周期との関係（村松部栄・岐阜大）大地震時の震度6の地域が余震域とほぼ一致すること、被害地震についての断層モデルによる理屈地図から、やや長周期成分およびその振幅等に関する分析例が紹介された。

14. 地盤探査と耐震解析用地震動（小林啓美・東工大）地震動のやや長周期成分が眼光を浴びはじめた経緯の紹介の後、1968年十勝沖地震後の八戸での地盤探査例。また最近行われた東京都での地盤探査（夢の島での発破による）例について紹介があった。その他特に地震動のやや長周期成分に着いて、各方面からいろいろ問題を投げかける資料がそろってきつつあり、耐震解析用地震動の再検討が急ピードでなされつつあるとの現状が紹介された。

以上の講演の後、問題を、1. 現象としての長周期地震動、2. この長周期地震動の構造への影響、3. 全般的問題の3点に分け、順を追って自由討議が行われた（司会、山原信一・清水建設）。1については、断層モデルによる理屈地図の実用化の可能性の議論、地震基盤での地震動のスペクトル特性についての議論がなされた。前者については実用化云々の話は別にして、設計者として震源から出発する心構えが必要であることが指摘された。後者については、地震基盤では加速度スペクトル強度一定、換算すれば速度応答スペクトル一定という点に關し、理論及び観測面での一致が確認された。2については、設計者サイドでは設計用地震動をどのように考え、かつ選択しているかということで、設計者として長周期で強い波は15階以上のものでは使わないこと、検討はするが審査会などには出ないこと、検討に使う波は適当に強いとみられるものを選んでいるが、本当のところそれでよいのかよくわからないこと、どれを使うべきか教えて欲しい、などの発言があった。また同じく設計者サイドから設計用地震波としてEL CENTRO、TAFTなどが今日広く使われているのは、設計者側にのみ責任があるわけではなく、審査会にも責任の一端があるのではないか、との意見も出された。さらに、地震波を加速度で基準化するか、速度で基準化するか、あるいは長周期領域での減衰率についての議論が行われた。3については、地震の卓越周期の推定精度と計器の周期特性との関連性が、とくに長周期部分に焦点をあてて議論された。また基盤での実測例が工学の方では極めて少ないことも指摘された。

約1時間の自由討議の後、最後にまとめとして田治見主査により、各講演で指摘されたポイント、討議内容について整理がなされ、研究というものはその進展につれて収束するよりも発散するもので、最終的に何かを得ようとするよりも、研究の過程から何かを得るべきであり、この立場から、利用のためのソフト面の整備がなされるべきであるとの考え方が示された。

（地盤震動小委員会 山崎 谷）

ニュース

レター

ニュース・レター

□第5回地盤震動シンポジウム概要報告

開催日時：昭和52年2月18日 9:00～16:45

会 場：東京・四谷 土木学会図書館

テー マ：地盤種別と地震動

司 会：長橋純男（長崎造船大）副司会：森岡敬樹（早大理工研）

日本建築学会構造標準委員会振動分科会の地盤震動小委員会主催によるこのシンポジウムも5回目を迎え、多数の熱心な会員を集めて上記により開催された。

講演に先立ち本小委員会、田治見主査から小委員会の活動状況およびシンポジウムの目的なり意義についての説明の後、下記13題の講演が行われた（共同研究の場合は講演者の氏名を先に記載した）。

1. 木造住家の倒壊率より推定される地震動の強さの分布（村松郁栄・岐阜大）
2. 滅害・墓石調査による地震動の推定について（望月利男、官野道雄・都立大）
3. 通信調査による震度分布の地域性（茅野一郎・東大震研）
4. 地表の強震記録からみた地盤の振動特性（土田 驚・運輸省港湾技研）
5. 地盤と地震記象（勝又 譲・気象庁地震観測所）
6. 地盤種別と地震動の平均的特性（太田外気晴・安藤治彦・鹿島建設技研）
7. 地中地震観測から（東京近郊・関東ローム層）（角田智彦・大林組技研）
8. 東京の軟弱地盤における地中地震観測（横田治彦・清水建設）
9. 各種地盤での地表・地中地盤特性（河村壮一・大成建設）
10. 支障地盤による地震波の増幅特性への基盤岩地形の影響（入倉孝次郎・京大防災研）
11. 屋近傍の振動性状について（小牧昭三・埼玉大、大保直人・東大生研）
12. 東京都23区の予想震度分布（鷗 悅三・東大震研）
13. やや長周期の地盤特性とその全国分布（岡田成幸・鏡味洋史・北大）

各講演の詳細は資料集をご参照願うことにして、ここでは極く簡単に概要を紹介する。

講演1,2および3は、地動の観測結果が得られていない場合に、木造住家の倒壊、墓石の転倒、人体感覚等から地動の強さあるいは型式を推定する方法、ならびに結果を紹介し、さらに地盤および地形条件との関係を検討したものである。

4, 5, 6, 13はいずれも強震計による多数の観測結果に基づき、地盤と地盤動との関係を論じているが、4および6が地盤種別と地盤動の主として短周期領域のスペクトル特性を追求しているのに対し、5および13は気象庁観測網のデータに基づきやや長周期領域における地動の振幅との関係を論じている。このため、「地盤」としてはやや深い構造を対象としている点が注目される。

つぎに7, 8, 9は東京およびその近郊の各種地盤における地中地震観測結果に関するものであり、極表層への入力と出力とから伝達特性、減衰定数等を算定した結果について述べている。また同時に工学分野における基盤の取扱いに関し、問題の提起がなされた。

船直（深さ）方向地盤の振動特性を論じた上記研究に対し、10および11は水平方向の地盤振動、とくに地動と微地形との関連を実験的に追求した。

12は東京23区をカバーする816地点について地盤の揺れ易さ（震度予想）の分布図を作成している。これの作成に当ては23区共通の地震基盤設定に特別な工夫がなされており、地表層の土質のどれかを標準とすれば（この場合関東ローム層）あとは各地の表層のS波速度を知ることにより、その地点の標準地盤に対する相対的な揺れ易さが求められるようになっている。

以上13題の講演に引き続いだ、小一時間にわたって、特に問題を絞ることなく自由な討議がなされた。ここで主な議題となったのは、i) 基準法施行令に基づく（現行の）地盤種別について、ii) 地盤種別と平均スペクトル、iii) 工学的な地震基盤の位置設定、iv) 地中地震観測結果の設計へのフィードバックに関して、などであった。

i) に関しては、木造家屋の被害を対象に決められた(1 sec程度以下の周期領域)地盤種別を、構造物周期の増長につれて、そのまま数sec程度の周期領域の問題を検討するに際して、拡大解釈してよいか等の意見に対し、一方では極表層地盤とその下位の地盤との間にはかなりの深さにわたって相関があるのではないかとする意見もあった。この問題は、上記ii)およびiii)にも関連する大きな問題であり、今後さらにデータを収集し検討する必要があるのではないかとするのが大方の意見であった。iii)に関しては、対象とする目的により基盤面は可変と考えてよいであろうという点でほぼ意見の一一致がみられた。ただしこの場合、設定位置に応じた基盤入力の考え方方が問題となると思われる。この問題に対し、地中地震観測結果が有益な資料を提供するであろう。iv) では、東京を例にとれば、東京疊層あるいは第三紀層等における、いわゆる基盤動観測資料を多く収集し、設計者はこれらの結果を取扱選択すべきであろうとの発言があった。

熱のこもった討論は上記以外の議題に関しても予定時間を越えて行われたが、時間切れとなったのが惜しまれる。

（森岡敬樹・記）

ニュース

レター

ニュース・レター

□第6回地盤震動シンポジウム報告

日本建築学会構造標準委員会の振動分科会（主査 小堀謙二）地盤震動小委員会（主査 田治見 宏）共催による第6回地盤震動シンポジウムが、3月 28 日東京大学工学部 11 号館講堂において開催された。

本シンポジウムは昭和 47 年以降毎年 1 回の開催が恒例化されたもので、今回はその第6回目ということで主題を「地盤震動研究の現状と展望」として、地盤震動に関する既往の研究を見直すとともに将来の展望について考えてみることにした。プログラムの構成は、第Ⅰ部を「既往の研究のレビューと紹介」と題して講演形式で、第Ⅱ部を「今後の展望について」と題してパネルディスカッション形式で行うことにして、つきの各氏に講演または話題提供をお願いした。（敬称略）

第Ⅰ部（既往の研究のレビューと紹介）

- | | |
|--------------|-------------|
| 1. 地盤基盤と地震動 | 入倉孝次郎（京大） |
| 2. 長周期地動 | 工藤 一嘉（東大震研） |
| 3. 最大地震動の予測 | 服部 定賀（建研） |
| 4. 地中地震観測 | 田中 肇二（東大震研） |
| 5. 地震波の種類と識別 | 塩野 計司（北大） |

第Ⅱ部（今後の展望についてパネルディスカッション）

- | | |
|----------------------------|-------------|
| 1. 災源から構造物 | |
| (1) 災源と地震入力の諸問題 | 太田 裕（北大） |
| (2) 地震灾害予測 | 小林 啓美（東工大） |
| (3) Seismic Risk の耐震設計への応用 | 北川 良知（建研） |
| 2. 構造物の設計に関して | |
| (1) 地盤と構造物の動的相互作用からみた入力地震動 | 鈴木 有（金沢工大） |
| (2) 地震動と地盤の減衰特性 | 太田外気晴（鹿島技研） |
| (3) 設計面からみた地盤震動研究の動向と今後の展望 | 山原 浩（清水研） |

司会 長橋純男（長崎造船大）、河村壮一（大成）、横田治彦（清水）

シンポジウムの当日は早朝より強い雨が降り参加者の出足が心配されたが約 220 名という予想を大幅に上回る聴講者が出席した。本シンポジウムは回を重ねるごとに参加者が増え、この分野における一般の关心が年々非常に高まりつつあることを物語っている。

午前 9 時 30 分に開会され、まず田治見主査（日大）より地盤震動小委員会の活動の概況と、今回のシンポジウムの企画の経過等について報告があった。つづいて、主として地盤学の分野で活躍されている各研究者により、それぞれのテーマについて既往の研究のレビューと紹介、それに現状の問題点等について講演があった。地盤基盤に関する考え方、長周期地動、最大地盤動の予測、地中地震観測、地震波の識別といずれも今日当面する重要な課題であり、工学分野の人達に多くの知見を与えるものであったと思われる。

第Ⅱ部のパネルディスカッションは、便宜上震源から構造物に至る過程と構造物の設計上の問題点の 2 つのグループに分けて行われた。ここでは工学分野の人達が主体となり、かなり打ち解けた雰囲気の中で話題提供と意見交換が行われた。今回は地盤震動に関する諸問題を総合的にとらえたため、個々の問題について討議を深めることはできなかった。しかしこの分野において当面する研究課題を、大勢の参加者とともに相互に確認し合ったことに今回のシンポジウムの意義があったと思われる。（清水研 山原 浩記）

□ISO/TC 92 第 10 回全体会議報告

1977 年 9 月 5 日から 5 日間、ISO/TC 92 の第 10 回全体会議が、ハンガリーのブダペストで行われた。

筆者は、日本建築学会、国際学術交流部会、ISO/TC 92 分科会を代表して同会議に出席してきたので、会議の概要を報告する。

会場は、ブダペストの中央をブダ地区とペスト地区に二分して流れるドナウ川の辺りにある古いホテル 'Gellér' で、24 カ国から約 70 名の人達が集まつた。議長は英國火災研究所の P. H. Thomas 博士が終始つとめ、毎日、朝 8 時 15 分～30 分から、夜の 5 時 30 分～8 時まで、熱心に各ワーキンググループ (WG) の議長報告、同報告に対する討議等が行われた。

全体会議は、2 年に 1 回開催されるもので、過去 2 年間の各 WG の活動報告とそれに関する討議および今後 2 年間の活動方針に関する討議等が主として行われる。同会議に日本から出席するのは、前回のロンドンの会議に理科大的川越邦雄教授が出席されたのに続き 2 度目である。公用語は英語とフランス語で、通訳はハンガリー第一の通訳と言われる女性の K. Lomná 博士が連日つとめた。同女史は 24 カ国語を話すと言われ、日本語も多少話されたのにはビックリした。

会議の 3 日目は早朝より出席者員が、2 台のバスに乗ってハンガリーの古伊万里町 2 カ所と同國の建築研究所の新設されたばかりの火災研究施設を見学した。同研究所では、当日のために多大の費用をかけて、実大の耐火建築物の火災実験を準備し、ISO メンバーと RILEM のメンバー（同一時期に理事会がブダペストで行われた）の前で、第 1 回目の実験を成功裡に遂行した。

RILEM の理事会には、白山建築研究所所長（当時）が出席されており、ハンガリーの大平原の中にある研究所の火災実験場の草原の中で、突然お会いしたのには、いささか驚いた。ハンガリーの連中は、新しい火災研究施設がよほど自慢らしく、得意になって装置の説明をしてくれた。

会議内容を下記にまとめておく。

(1977 年 9 月 5 日)

1. 開会ハンガリーの Mr. Bocsa
2. 会員変更の報告、アイルランド、ヴェネズエラが加わった。
3. 代表者選の点呼
4. 起草委員の任命 Mr. Foster (UK) 他 4 名
5. 会議事項の採択
6. 第 9 回全体会議の報告 Mr. Curtis 他
7. WG 7 (調査と相互関係) の報告および討議 Prof. Minne 他
8. リエゾン報告 ISO/TC 61 (プラスチック), ISO/TC 38 (織物), CIBW 14 (防火), ISO/TC 59 (建物構造), ISO/TD 3 (建物) に関する報告および討議

(1977 年 9 月 6 日)

9. WG 2 (試験方法) の報告および討議 Dr. Vandeveld 他
10. WG 4 (火災に対する反応) の報告および討議 Mr. Becker 他
11. WG 3 (ドアアッセンブリー) の報告および討議 Mr. Malhotora 他

(1977 年 9 月 7 日)

12. ハンガリー建築研究所その他見学

(1977 年 9 月 8 日)

13. WG 11 (耐火性) の報告および討議 Prof. Petterson 他
14. WG 9 (煙突および煙道) の報告および討議 Prof. Odeon 他
15. WG 6 (用語) の報告および討議 Mr. Laurin 他
16. WG 10 (測定装置) の報告および討議 Mr. Bellison 他
17. WG 12 (火災時の毒性危険) の報告および討議 Dr. Robertson 他

(1977 年 9 月 9 日)

18. WG 13 (屋根の防火試験) の報告および討議 Mr. Laurin 他
19. WG 14 (換気ダクト) の報告および討議 Prof. Petterson 他
20. 決議の確認
21. 仕事の進行、期限および優先権の再確認

ど行かれなくても、それ程心配されるようなことでもないのにと思ったが、先生は学会の研究協議会には建築そして研究を見つめる場として常に大きな期待をかけておられたのである。大会後、再度病院を訪ね、建築計画委員会の委員長不在が長びいているが一日も早いご返復を希求している旨を述べると、ちょっと考えてから2月には出られるようになるからと仰わされた。そして2月10日未明に帰らぬ人となって病院を出られたのである。最後まで、建築を愛し、それ故に孤独だった先生は、ご自分の道をすべてご存知だったような気がする。おいたわしく思うと同時に、その早すぎた他界に傍け、建築界にとって一つの星の消えた淋しさを感じる。心からご冥福を祈りたい。

(筆者、清水建設研究所次長)

故 池辺陽先生を偲んで／坂田種男

池辺陽先生が他界されたことは、日本の建築界にとって驚きであり、また大きな損失であるといえる。

昨年6月頃から、先生のおからだの変調にまわりにいた我々の中にも気付いていた人はいた。しかしその頃ちょうど歯の治療をされ白い歯が揃い、前にも増してお元気なようにうかがえた。その裏で癌が刻々と進行していたとは、知る由もなかった。

先生はいつも昼食はピール2本にサンドイッチ二つ、少し栄養になるものをと六本木あたりのレストランなどへお供しても、ウイスキーのオンザロックで食事にはほとんど手をつけられなかった。からだに良いわけはないが、これが先生の日常の習慣と我々は理解してしまったし、ご自分でもウイスキーばかりで太らないから栄養失調になるかもしれないと言われたこともあった。

しかし先生は、夏のゼミをはじめ、種々の研究活動や講演会などには積極的に我々に及ばない精力的なお仕事をされておられたし、学会活動の中でも重責を果たしてきた。東大をはじめ、東京芸大、九州芸工大等において多くの学生を指導され、建築はもちろん芸術の面でも優秀な人材を世に送りだされた。一方、ご自身の研究活動においても日本というよりむしろ世界の建築計画の理論と設計の分野における指導的な役割を果たしておられたといえよう。

先生についていろいろなことが心にうかぶ。ISO TC/59のロンドン会議へおられた時の事、夏のゼミナールで池辺研の人達との研究、各種委員会での作業。そしてそこではいつも先生の一貫した理論が展開されていた。創造的であり、理論派であり、そして芸術家でもあったといえる先生の思想は私達と大いに論議を湧かし、その中でひとつひとつ実験作品を手がけておられた。

それらは建築生産の手法からの構成材の使われ方、空間の処理、人間と環境と工業との結びつき、GMモジュールの構成と適要、性能に関する評価など、実験住宅の中に的確に表現されていた。その中で材料も集成材、合板、石綿スレートなどを使った作品などが多く、先生の独創性がうかがえる多くの作品を残されているといえよう。

一方、先生の国際性に対する積極的な対応は、IMG international modular groupの会員になられ、その後CIBも手がけられた。亡くなるまで当学会の中でのISO TC/59 Building constructionの主査として、毎日届けられる原案や質問書に目を通し、決定を下し、サインをされていた。お忙しい先生にとって、大変なご苦労であったといえるが、いつも私達の説明を煙草をくわえながらニコニコと聞かれて、指示されていたことは、今でも私の現実の中に残されているようだ。

東京大学宇宙研究のための建築群として、多くの施設の設計をされたことも、先生のお仕事の一つとして知られている。

また先生は趣味も多く、暇をみてはパイプをご自身で削り、それで美味そうに煙草を吸っていた。音楽もお好きで、フルートを旅先にももってこられてふいておられたお姿も目に浮かぶ。

昨年の秋、入院された頃から、ご自分ではすでに何かを解っていらしたのかもしれない。著書の出版について研究室の方達と毎日打合せをされていたし、国際コンペの審査にお出掛けになったり、セミナーの司会に病をおして出席されたり、研究室の出身者の結婚式には媒酌人の労をとられたり、我々としては終始はらはらしていたが、先生がきめられたことはどうにも動かせるものではなかった。ただひとつ、昨年の学会の北海道秋季大会には参加を入院のために中止された。その時計画されていた池辺研究室の旅行には“私は行かれないから代りに頼む”といわれたのを覚えている。元気そうにしておられても、ご自分ではやはりおからだがつらかったのかもしれない。

まだお若く、現職の中でお仕事も研究も、これから我々の期待に大きく応えていただけたのにと思うと、病とはいえ残念でしかたがない。今は先生の作品や種々の研究、論文などに先生を偲び、ご冥福を祈るのみである。

(筆者、千葉大学工学部建築学科講師)

□第7回地盤震動シンポジウム報告／山原 浩

日本建築学会構造標準委員会の振動分科会（主査：小堀謙二）、地盤震動小委員会（主査：田治見宏）共催による第7回地盤震動シンポジウムが、3月27日（火）日本大学理工学部9号館地下大講堂にて開催された。

昨年、伊豆大島近海地震（1月14日、M=7.0）、宮城県沖地震（2月20日、M=6.8）、1978年宮城県沖地震（6月12日、M=7.4）と、相次ぐ地震の発生によって樹木に少なからぬ被害を蒙った。これらの地震による地動は、強震計、地震計、地中地震計等によりかなり広域にわたって記録された。それらの記録を分析し対比することによって、地震時の地動の性質について何か新しい知見を得ることができるかもしれない。また、各種都市施設の被害、宅地造成の地崩れ、地盤種別による被害の較差など、地盤震動に関わる諸問題が再認識された。そこで今回のテーマを「最近の被害地震に見られる地盤震動の諸問題」とし、上記3つの地震によって得られた各種の調査資料を持ち寄り、とくに地盤震動の観点から討議を行うことにした。以上の企画の主旨に沿い、つぎの各氏からそれぞれ資料が提供された（敬称略）。

I 地震観測記録より

須藤 研（建設省建研）、田中貞二（東大震研）、柴田明徳（東北大学）、岩崎敏男（建設省土研）、河村壮一（大成建設）、横田治彦（清水建設）、丹羽正徳（鹿島建設）、阿部康彦（竹中工務店）、瀬尾和大（東京工大）、森岡敬樹（早大）、宮島信雄（新日鉄）、大谷圭一（防災センター）、橋本 紘（熊谷組）、野路利幸（三井建設）、北川良和（建設省建研）、電力中央研究所

II 地盤種別から見た被害より

渡部 丹（建設省建研）、渋谷純一（東北大学）、表俊一郎（九州産業大）、田中礼治（東北工大）

III 埋設管の被害より

片山恒雄（東大生研）

IV 宅地造成の被害より

阪口 理（建設省建研）

V 特別講演

土地条件図の見方

原田美道（日本地図センター）

なお、司会は山原 浩（清水建設）と北川良和（建設省建研）が交替で当たった。

シンポジウムは、約 170 名の聴講者の出席をえて午前 9 時 30 分に開会された。まず、田治見主査（日大）から地盤震動小委員会の活動概況と、今回のシンポジウムの企画の経過等について報告があり、引き続いてプログラムにしたがい資料を提供された各氏（敬称略）の講演に入った。

須藤は、弹性はねかえり説にもとづく断層モデルを想定し、地震波の理論解析結果と観測波形との比較について説明した。とくに宮城県沖地震については、破壊の進行方向が異なる 2 つの破壊面を想定している点が興味深い。田中は、伊豆大島付近に震源をもつ地震と、宮城県沖に震源をもつ地震について、最大加速度の距離による減衰の傾向について報告した。とくに前者の地震について既往の実験式と比較すると、 M にして約 0.7 も小さくなっている。同規模（気象庁マグニチュード）の地震でも、発震機構などの違いによって、最大加速度値および距離減衰の傾向が著しく異なることを指摘している。

柴田は、2 月と 6 月の 2 つの宮城県沖地震において、仙台市内の 4 か所で観測された強震記録について、観測波形とスペクトル特性を紹介した。とくに同一地点で観測された規模の異なる 2 つの地震の特性比較に興味が集まつた。岩崎は、宮城県内にある橋梁とフィルダムで観測された強震記録とスペクトル特性について紹介した。とくに後者の記録は、仙台市内の建物の地階で観測されたものと、波形特性が類似していることを示している。

東京およびその近郊で観測された地震記録とそれらの解析結果については、合計 13 の機関からそれぞれ資料が持ち寄られた。時間の制約もあり、それらの資料を 4 つの観点から整理し、北川（全体の概要）、瀬尾（地震波の伝播機構）、工藤（基盤動）、河村（地盤の増幅・減衰特性）の 4 氏によるジェネラルレポーター方式がとられた。資料提供者の研究的関心がそれぞれ異なるうえに、資料の表現方法も必ずしも統一されていないので、ジェネラルレポーターは大変苦労されたものと思われる。

構造物の地震被害を論ずるとき、地盤や地形の条件を無視することはできない。渡部は、東北大学で得られた強震記録の一般的な性質を紹介し、その記録をもとに硬質および軟質地盤上の加速度波形の推定を行つた。また、コンクリートブロック塀や木造住宅の被害分布と地盤条件との間に密接な関係があることを示した。渋谷は、仙台市内の建物について構造種別ごとの被害建物の地域的分布と、それらの地域の表層地盤の構成および振動特性との関係について述べた。常時微動による建物の周期が、地震後に明らかに伸びているというデータにも興味が集まつた。表は、アンケート調査により求められた震度分布と、地盤地質や気象学震度との対応等について紹介した。地震に対する人間の反応も、適切な調査方法によってかなり客観的に把え得ることを示唆している。

1978 年宮城県沖地震によって社会問題として再認識されたものに、ブロック塀の倒壊、ガス・水道等の都市施設の破壊、宅地造成地の被害などがある。田中は、仙台市とその近郊において 7256 件もの各種塀の被害状況を調査し、その統計的分析結果について詳しく紹介した。片山は、地下埋設管について行った被害調査と地盤との関連を報告した。地下埋設管の被害の直接の原因は、地震による增幅とか相対変位といった動的な効果ではなく、むしろ亀裂とか沈下といった地震後に残る静的な永久変位であることを強調している。坂口は、伊豆大島近海地震と宮城県沖地震によ

る山崩れや盛土の崩壊の被害例を示し、丘陵地や山岳地の宅地の安全性について一般的見解を述べた。

今回のシンポジウムでは、地盤震動の分野でも最近話題に上るようになつた「土地条件図の見方」について、日本地図センターの原田美道氏に特別講演をお願いした。土地条件図は土地利用に関する諸々の情報を含むものであり、地震被害等に関連づけて今後大いに利用されるものと思われる。

今回は、実際の地震と被害をテーマにかなり具体性をもつた内容であったが、会場の出席者は最後まで熱心に聴講し、学会事務局諸氏の協力もあって盛況裏に幕を閉じることができた。

（筆者、清水建設研究所）

□今井兼次先生アルフォンソ十世勲章受章

本会名誉会員 今井兼次先生は、スペイン政府から文学・芸術・自然科学などの分野で著しい功績のあった人に授与されるアルフォンソ十世賢王勲章を受けられました。心からお喜び申し上げます。

今井兼次— 心の樹液を求めつづける／池原義郎

心の深いレベルで、人々と共に生きながら制作する精神的な建築家達に注目し、自らも心の作家たらんことを生涯の目標としていた若き建築家・今井兼次教授は“中世精神の新しき樹液に満たされた近代建築家の一人”アントニオ・ガウディに目を向けないはずはなかった。1922 年英誌 “Builder” の中で“過去 25 年間に於ける創造的建築の最大なる作品、石そのものの裡に秘められた精神的象徴” のサリバンの言葉に接し、1926 年渡欧の機会を得、ガウディの死の直後、サグラダ・ファミリアをバルセロナに訪ねた。作品そのものとそれを支えている建築家としての人間性に強く感じ、帰国するや直ちに学会誌、その他の誌上に、あるいは若手建築家による展覧会に、建築界に顕みられることのなかつたこの建築家を紹介した。しかしヨーロッパの主流の動きに心を奪はれていた当時の建築界は、この紹介に目を向けることはなかった。ヨーロッパから帰國後 2 年 J.F. Rafols 著 “Gaudi” が弟子 D. スグラニエス氏から送られてきた。これはガウディに関する最初のまとまった著作であった。この著者は教授の手もとに萌芽を待つ種子のように秘蔵された。1954 年コルビュジエのロンシャンの礼拝堂が建設されたのを契機として、建築界の一隅から、合理主義一辺倒のかたむきから、目を別のものに向けようとする動きが動きはじめようとしていた。そのとき、教授はミニコ会修道院の渡辺吉徳神父の協力を得て Rafols の著作の翻訳のための努力と、ガウディの内面を掘り下げ、その作品の内側にある精神を明らかにする研究を深めることを決意した。その情熱は 1958 年の“日本ガウディ友の会” の設立となつて顯われる。これはバルセロナにある“ガウディ友の会” の当時の中心者であった故エンリケ・カサネリエス氏の情熱と敬虔の念にあふれた励ましと共に、ガウディに関する実なる資料が蓄積された。それらをもとに少しずつ翻訳作業を進めながらガウディ研究が今日までつづけられてきたのである。しかし、それはガウディの人と作品の単なる研究分析というものではなく、ガウディの内側に深く秘められた客観的内面性と制作に総合された姿に接したいという強い願いであったといえよう。そして、それに勇気づけられながら、自らも心の作家として、人々の心の中に生きつづける建築の制作を進めるのである。60 才を越えてから建築家今井兼次は、その意欲はますます高まり純化し、作家としての気持は深く内側でふくらみつつ秘められていくのである。

（筆者、早稲田大学教授）

地震危険度研究の諸問題 ——第8回地盤震動シンポジウム報告—

「第8回地盤震動シンポジウム」は、『地震危険度研究に関する最近の動向』をテーマとして、1980年3月28日(金)日本大学理工学部9号館において開催された。参加者はおよそ270名であり、これまでの8回のシンポジウムのうちで最も多く、学界内部にとどまらず、このテーマへの社会的関心が全般に高いことを示唆したものとみなせよう。以下に、本シンポジウムの開催主旨、13題の講演概要、および提起された幾つかの研究課題について、報告する。

構造標準委員会振動分科会地盤震動小委員会

1. 地震危険度研究の背景

わが国の地震危険度研究は、30年前に発表されたいわゆる「河角マップ」に始まる。これは、震災予防調査会の創設当初よりその調査研究課題の1つとされ、そののち大森房吉・今村明恒・武者金吉らの長年にわたる尽力によって蒐集された被災地図資料を基に成績された、わが国地震工学界念願の画期的な収集であった。この成果は直ちに『建設省告示 1074 号』の中に、いわゆる「地域係数」としていかされ、耐震設計用地震荷重にかかる通達行政の指導規則の1つとして、大きな貢献をしてきたものである。さらにこの研究は、「村松マップ」や「金井マップ」など、それぞれ特色を有する多くの研究蓄積をふまえて、地震資料評価・地震波動距離減衰曲線式・地動強さ予測の統計処理法など諸々の改善がなされ、かつ行政的判断をも加味して、『建設省告示 1621 号』としての法改正(1978年)へ結実したものである。これら一連の研究は、日本列島全体を対象として、過去に発生した地震資料から時間領域における平均的な地震危険度を評価するものであり、1つのMacrozoning 研究とみなされるものである。

他方、最近の首都圏・東海地方・近畿圏などの各自治体においては、その近傍において将来に発生が予想される幾つかの地震を対象として、現実の諸条件をふまえた regional scale での危険度予測が、試みられるようになってきている。これらいわば Microzonating 研究では、単に確率統計的手法による地動強さの予測にとどまることなく、具体的に想定した震源断層を対象に、基盤構造・表層地盤の影響を加味した波動伝播として、各地点の地動強さを予測するとともに、建築物・土木構造物の被害のほか、地盤崩壊や液状化による被害分布の予測まで包含するに至っている。また、このような自然科学的問題に加えて、被災者・避難者の心理的諸問題や、地震災害の経済的・社会的影響の予測あるいは事前の対策など、社会科学的問題をもかかえ、文字通り学際的な研究課題へと展開しつつある。

本シンポジウムは、このような多様な地震危険度予測の研究について、主として地盤震動研究の観点からその方法論を中心として、国内外の研究現況を知り、将来を展望することを目的に、開催を企画したものである。

2. 講演要旨

本シンポジウムは、第1部「地震危険度の研究—過去・現在・将来」(講演番号 A~E)、および第2部「最近の研究から」(F~M)により構成されている。以下に各講演の要旨を手短に紹介する。

A. 北川良和(達研)：「地震危険度—法規的にみた現状での取扱いから」 地震設計における地震強度の低減係数としての地域係数マップを法規として作成する立場から、河角マップ(1951)以来の10余年の地震危険度研究の諸成果を活かしつつ、前述の『建設省告示 1621 号』としてまとめられるに至った考え方を示している。また、地震予知が正確にはなしえない現時点では、ある耐用年限の構造物の設計用地震荷重を、過去の地震資料を用いて想定する方法の確立のために必要な、今後の研究課題を示している。

B. 尾崎昌凡(千葉大)：「地震資料からみた地震危険度」 1644~1972 年の 329 年間の地震資料を用い、一部マグニチュードの再評価も施して、これに Gumbel の極値統計理論を適用した地動強さの期待値算定法を示している。また、東京中心部における期待値を例に手順の詳細を紹介するとともに、日本全国を緯度経度 0.5 度ごとの細目点について求めた、地震基盤における最大速度値の期待値分布を示している。

C. 大家道男(達研)：「地震危険度予測への展望—地盤学と地震工学の接点—」

地震が発生しても、それによって生じうる災害をなるべく少なくおさえるためには、災害予防を視座に据えた地盤予知が必要である。既往の地震危険度研究は、地震発生を統計的事象とみなすことに基礎をおいているものが多い。しかし、地震活動の空白域・震源の移動、あるいはプレート相互の間欠的な運動に起因するとみられる地震活動の活動期と静穏期などの事実は、地震発生を統計的事象とはみなしがたいことを示唆している。また、地震の大きさを左右する要因も、在来のマグニチュードや点震源を前提とする震源距離のような地震が起こってみなければ知り得ない予見性の無い尺度ではなく、断層の諸元や地震モーメントのごとく、物理的により明瞭な尺度の方が適切であり、さらに地動強さに関わるものとしては震源付近の初期応力の分布状況などが重要な因子となる。これらをふまえて論者は、統計的手段により以前に地震現象の物理的理説がいかに地震危険度研究にとって必要であるかを強調し、そのための地震学者と地震工学者の学際的協力を訴えている。

D. 伯野元彦(東大震研)：「地震危険度“雑感”」

この報告は、地震学と地震工学との接点が、必ずしも問題無しとはしがたい現況を、諸例を挙げて指摘するとともに、当面する防災工学上の観点から 2, 3 の提言を試みていく。たとえば、活断層の調査に基づく地震発生の推定、あるいは震源モデルを用いた地動強さの推定について、その合理性は評価しつつも、すべての活断層を知ることの困難さ、震源モデルのパラメータが多くなるほど総合的推定精度が低下する矛盾、等が指摘された。また、いわゆる理論地震記象において短周期成分の推定精度が低いことを補う一方でとして、震源モデルから求めた表面波に、地盤の増幅作用を考慮した S 波によって短周期成分を構成し重ね合わせること、などが提案されている。

E. 太田外氣晴(鹿島技研)：「地震危険度—最近の国際会議等からみた米国の現状」

米国における地震危険度研究の水準を示す好例として、1978 年にサンフランシスコで開催された第2回国際マイクロゾーニング会議における発表論文、『Progress on Seismic Zonation in the San Francisco Bay Region』の概要を紹介したものである。これは、序文を含めて 9 篇の論文により成り、活断層の運動に基づくマグニチュードの推定、断層モデルによる地動振幅分布の計算、地盤特性の評価に始まって、液状化地盤や地すべりの被害予測、地盤被害による経済的損失の事前評価、地震危険度研究成果の具体的な活用法、等の広範囲にわたる総合的危険度研究である。なお本報告には、危険度予測の基礎的研究である米国西海岸における強震観測体制に關し、その運営組織・推進計画まで含めて、併せて紹介されている。

F. 和泉正哲(東北大)：「地域地震危険度の評価—仙台の場合」

従来の耐震工学は主として構造本体の耐震問題を対象としてきたが、1978 年宮城県沖地震による被害の実相は、非構造部材による人的被害、あるいは単に個々の建物の被害をこえて、ライフラインの被害等都市全体の規模に立った防災計画をも、研究の対象とすべき必要性を示している。このような研究領域拡大の社会的要請への対応として、非構造部材の耐震問題や構造体の立体振動問題など構造工学自体の領域拡大をはかるとともに、入力地震動の推定には地盤学の成果を応用することが必要であり、都市生活機能の問題では人文・社会・自然科学の共同作業の進展が期待されるとしている。また、その試みの例として、地盤動の非定常性にかかる位相特性の理解、都市生活機能の防災力解析の数学モデルとして System dynamics の手法の適用などを紹介している。

G. 裏俊一郎（九産大）：「地域地盤危険度の評価—川崎の場合」

1966 年に設置された川崎市防災会議地盤専門部会が、この 14 年間に展開してきた地域地盤危険度研究の実際を紹介するとともに、防災行政により有用なものとして生かしてゆくための今後の課題について述べている。川崎市は全国有数の臨海工業地帯を擁し、そのコンビナート地区の耐震化は急務の行政的課題であり、加えて 1974 年 12 月には地震予知連絡会による京浜地区直下に地震発生の可能性があると発表される事態が生じたこともあって、生々しい現実感を帯びた調査研究を展開してきた。川崎市があまり大きな面積を占める地域でなかったことと相まって非常に有用なデータが提供され、地域地盤危険度の定性的評価をよりよく可能とする多くの新しい方法が開発されて、その成果は市当局との充分な連携協同のもとに、その時に応じて日々と行政にも反映してきた。これらの手法は、地域地盤危険度研究の先駆として、今後の研究および防災行政に寄与するところ大であるとおもわれるが、本報告ではそのなかから、地震動期待値、地盤増幅率分布、建築物被害予測、地盤液状化危険度予測、土木構造物被害予測、火災被害予測、地震時人間心理の問題、および用途地域区分を考慮した総合危険度評価、についてその概要を紹介している。

H. 鳩悦三（東大震研）：「地域地盤危険度の評価—震害予測のための地盤力推定」

断層モデルから出発して、将来予想される地震による地盤力分布を推定する方法を、東京都 23 区を対象例として述べたものである。近年の地盤学の発展により、震源断層生成の把握、半無限媒質上に成層構造を考えた場合の理論地震記象の計算、またその基礎データである基盤構造の推定などが可能となってきたが、これらの成果をつなげ、かつ後述（K. 鈴木・佐藤論文）の長周期加速度から短周期加速度を推定する方法を扱って、仮想東海地震・仮想関東地震・仮想荒川地震による東京 23 区の地動加速度を推定している。ローム層地盤を対象とすれば、前二者による地動加速度はそれぞれ 170 gal および 370 gal と推定され、また仮想荒川地震によっては断層近傍で 250 gal 程度と推定されている。また、他の地盤における振幅に換算するための、ローム層を標準地盤とする振幅比（ピート層 1.6～砂層 0.9）のゾーニングマップも示されている。

I. 星月利男・宮野道雄（都立大）：「地震被害に及ぼす地盤の寄与」

地震時における木造住家の被害率と地盤特性との相関性についてはしばしば指摘してきたところである。本報告ではこれを、1923 年関東地震、1891 年濃尾地震および 1948 年福井地震を対象として、木造住家全被率と「測地学モデル」の fault trace からの距離との関係が、地形・地盤の特性によって明瞭に相対することを示している。しかし、1978 年宮城県沖地震による仙台市における住家被害については、地形・地盤との相関性が必ずしも明瞭ではなく、とくに低地の微地形の間の被害率の差異は混沌としている。その理由として、新旧建物の耐震性の差異とその地盤の信頼性が指摘されている。とりわけ、最近の都市型専用住宅の耐震性の向上が著しいことを、調査結果に基づいて示している。したがって、地形・地盤と震害との関係を知るためにあたっては、相当詳細なきめ細かい調査が必要であり、例えば住家被害も一部損壊まで考慮に入れたり、人的被害との相関性を吟味すべきことを提起している。

J. 村松郁崇（岐阜大）：「強震地動の短周期成分と長周期成分の予測」

観測された地震動記録について目立った震動を読み取り、これをその速度振幅と周期との関係で表したもののが包絡線を \dot{a}_L とすれば、 $S_{\dot{a}}(h=0)$ ある V は加速度フーリエスペクトル \dot{U} と比較的よく似た形となる。このことを、大森式地震計によって観測された北伊豆地震、西埼玉地震などいくつかの大規模な地震の記録について示すとともに、これらには平均して長周期成分が優勢に含まれていることを指摘している。また、村松が自ら製作した速度型強震計による静岡県での多点観測記録のフーリエスペクトルの比較によって、それぞれの周期特性が各観測点の地下構造との対応で理解できるとしている。このように、短周期から長周期（おおよそ 0.1～10 秒）まで測定可能な強震計による観測資料により各種地盤における地盤動の周期成分の割合が求められるならば、これらの結果を地下構造および震源理論の知識と合わせることによって、強震動の予測に役立て得ることを示している。

K. 鈴木保典・佐藤良輔（東大）：「断層モデルによる短周期加速度・速度の推定」

地盤学で用いられている通常の断層モデルでは、例えはくい違いの時間間数は段階間数またはランプ間数を仮定し、破壊伝播も一様な速度で円状または線状に伝わると仮定することが一般的であるが、このような単純なモデルでは、5～10 秒以上の実体波・表面波の観測波形についてはよく説明しうるもの、それより短い周期成分については説明が困難である。とはいっても、短周

期の地震波を発生させるために、断層モデルを複雑にしたとしても、その物理的意味は疑問である。そこで、通常のいわゆる "high-cut" モデルの断層モデルから計算によって求めた地震動を用いて、短周期成分まで含んだ加速度・速度の最大値を推定する手法を述べたのが、本報告である。すなわち、実際に観測された強震加速度記録を 0～ v Hz の low pass filter に通して、その時の最大振幅と cut-off 周期 $T (= 1/v)$ との関係を調べ、その関係を多くの記録から平均的な実験式を作成し、これを用いて cut-off 周期 T の理論地盤記録の最大振幅から、短周期成分を含む地動の最大加速度・速度を推定するものである。この方法により、仮想駿河湾地震による水平加速度・速度の相対値コンターが、安政東海地震の震度分布と類似していることを示すとともに、関東地震の断層モデルによる場合の東京本郷での地動振幅は、水平成分で 95 kine, 410 gal となる計算例も紹介している。

L. 球川三郎（東工大）：「地盤断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定」

震源特性を考慮した地盤基盤での入射波の強さに、地盤の増幅特性を加えて、震源域での地動強さを推定する簡単な手法を提案したものである。地盤の増幅特性の評価は、深い地盤構造まで知られている地域が現状ではわずかであることに鑑み、加速度振幅の増幅率については表層地盤の地質条件と増幅率との関係を平均的に求め、また速度振幅の増幅率については、最大加速度振幅を支配する周期よりやや長い周期成分の影響をうけるため、より深い地盤構造まで考慮し、深さ 30 m までの平均的 S 波速度との関係で対応づけられることを示している。これらを用いて、関東地震・濃尾地震・安政東海地震などによる地動振幅分布を震度分布・被害率分布と比較し、最大加速度分布に加えて最大速度分布まで併せて考慮するならば、この方法の妥当性が示されるとしている。さらに、大地震時の震度分布予測への適用例として、仮想東海地震による最大加速度分布を紹介している。

M. 佐藤一之・太田裕（北大）：「震度分布から震源モデルへトルコ・チャルドラン地震（1976）の場合」

1976 年 11 月 24 日トルコ東部に発生したチャルドラン地震（死者 3,840, 大破以上家屋 9,232）を対象として、震源から震度の空間的分布に至るプロセスをできる限りとり入れたモデルを導入して観測との比較を行い、さらに観測された震度分布のパターンから震源に関する情報がどの程度まで解説できるかを、モデルに含まれるバラメータの感度解析により考察したのである。解析モデルは、ある地点の震度は断層面との各セグメントの Slip 量による寄与の総和に、地盤の影響を加味したものである。ここに、あるセグメントの Slip 量が距離 r だけ離れた地点の地動強さに対する寄与は r^P に逆比例するとしており、また地盤の影響は 3 種の岩質区分によってそれぞれの係数を数値化理論を用いて定めている。このモデルを、波形解析結果より定めた断層形状・Slip 量分布の諸量に適用して、震度分布の計算値と実測値を地表の 233 セグメントについて検定平方和が最小になる条件から、 P を求めている ($P \neq 2.0$)。そして、このモデルによる震度分布が、断層線に対しても断層と直交する方向に対しても対称から著しくずれており、実際の震度分布をよく説明できることを示している。また、震度分布から実験式に開いた諸因子の感度解析を通じて震源パラメータのいくつかを推定しうることを示し、それが World-wide に展開された地震観測網による資料より定められた値と良い一致を示すことを指摘している。

3. 地震危険度研究の課題

以上が、本シンポジウムで報告された 13 題の講演要旨である。これらの報告相互の間で議論されている問題、および当日会場においてフロアの参加者から出された質疑あるいはコメントをもとに、地震危険度研究の今後の課題について、以下にまとめてみた。

「河角マップ」から始まって尾崎らの研究に至る一連の Macrozoning 研究に既して共通していることは、

a. 過去に発生した地震の資料をもとに過去の地震活動度を基に、その統計的処理によって将来の地震危険度を予測すること

b. 震源を「点震源」として扱っていること
に要約できよう。前者については、震源域の個性によってその再来周期にはかなりの幅があるものの、地震は同一震源で繰り返し発生する、という事実を背景としたものであるが、同時にまた、地震発生の時・所・規模の三要素を満たす正確な震源予知がまだ不可能な現状を考慮したものであり、このことは河角自身も当初よりその論文中で述べていたことである。後者は、地震活動の減衰曲線式の適用と併せて、その取扱いの簡便さによるものといえよう。

ところで、点震源を前提とするならば、震度分布は概して同心円状になる

(はずである。しかし、[翠川]が関東地震や淡尾地震などによって、また[佐藤・太田]がチャルドラン地震によってそれぞれ示しているごとく、震源域近傍における震度分布は一般に同心円状とはみなしがたい分布性状を示している。[大塚]は、点震源地震学が地震の物理を探究する地震学において、有効な方法として数多くの成果をもたらした意義を評価しつつも、これを地震によって生ずる地表面近傍での諸現象・諸波形を対象とする地盤工学にそのまま適用することには問題の多いことを強調した。事実、震源はあるディメンジョンをもった断層であり、その形状・位置、くい違い度とその時間間数、および波形などによって、地震波動の伝播は異なり、したがってその震度分布も様々な分布形状を示す。そして、このような震源の諸特性は必ずしも偶然性によるものではなく、それぞれの震源域に固有の“くせ”によるものであろうとみなされている。歴史地盤を研究している宇佐美龍夫は、過去の地盤資料を用いていたり、この地盤の起り方の“くせ”を充分理解したうえで活用すべきであり、そのためには単に震央位置や地震規模のみならず、むしろ被害分布の調査を詳細に行う必要がある、それによってその震源域固有の震源特性にかかるるより豊かな情報がえられるであろうことを提言した。また、震央位置と地震規模のデータのみを減衰曲線式にあてはめて得られる地動強さの推定値が、被害分布から推定される地動強さと著しく矛盾する場合のあることにも、宇佐美は注意を喚起している。

さて、前述の[翠川]や[佐藤・太田]は、震源をしかるべき断層として取り扱うことによって、同心円的ではない実際の震度分布性状をよく説明しうるとしているのであるが、断層モデルによる地動強さの推定には少なからぬ問題点が残っていることも事実である。

まず第一に、断層モデルによる地動強さの推定の精度にからむ問題である。[鈴木・佐藤]も指摘しているように、およそ周期5~10秒以上の実体波・表面波については、通常の断層モデルから発生する理論波形によって説明可能であるが、工学が対象とする通常の構造物の固有周期のような、より短い周期成分によって支配される加速度・速度については説明が困難な実情である。この短周期成分の問題については、[大塚]はなめらかな断層上にいろいろな障害物を並べて短周期成分を発生させるバリアモデルを、また[伯野]はその地点で観測された小規模地震による観測記録の短周期成分特性から抽出してこれをhigh-cutモデルによる理論記象に重ね合わせる金森博の方法を、それぞれ紹介している。また[船]は、これとの関連で、断層の生成・機構が概略的にしか解明されていない現在、断層モデルをこれ以上複雑にすることは無意味であり、むしろ断層における短周期の地震波の発生機構を理論および観測の両面から徹底的に明確すべきことを強調した。[鈴木・佐藤]によって提案された方法も、このような実情をふまえてなされた簡便な手法といえよう。

断層モデルの第二の問題は、活断層の諸特性に関する資料が、わが国の地域全体にわたっては均質に得られていないことである。また、断層モデルによる理論地震記象を計算するには、地下構造の資料が必要であるが、これについても実測資料の得られている地域は、極めてわずかである。[尾崎]は、アメリカのごとく San Andreas 断層近傍に活断層が集中しているのとは違い、わが国の場合は日本列島全体がいわば“活断層だらけ”であることを指摘し、また[伯野]もあらゆる活断層を海底まですべてしらべることは困難であり、人が多く住んでいる沖積平野では見付けにくい事情を指摘してい

る。また地下構造については、[翠川]が地盤の増幅特性を地表面近傍の表面の地質条件あるいはS波速度という比較的簡単な指標によって表現することを試みたのも、上記の事情を考慮したものであり、したがって[佐藤・太田]が岩質区分をもとに数量化理論を援用して地盤効果の定量化を試みた意義も、充分評価さるべきものといえよう。

第三の問題は、少なくとも現在の地震学においては、将来の地震発生についてその時間に関する予知能力がほとんど期待しない、という事実である。地震危険度研究の成果が、建築行政においては設計震度の地域低減率として活用され、また1つの経済行為としての性格をも併せ有する構造物の建設において、当該建築物の耐用年限に見合った設計荷重を求められるならば、地震発生の時間に関する予知能力の問題は地震危険度研究において避け得ることのできない課題である。アメリカに比するならば段階に過去の地震資料が豊富ながにあって、過去の地震資料の統計的処理によって求めたそれぞれの再来期間に対応する地震動期待値の現実的有用性は、この点に求められるものとみなせよう。たしかに[大塚]が指摘するごとく、地震の発生は純粹の統計的事象ではないし、また1964年新潟地震で被害を受けた所の大部分は、河角マップにおいて最大加速度期待値の特に低い地域に該当していた、という皮肉なことも生じる。これに関連して[伯野]は次のように要約している。震度期待値の考え方には2つある。1つはある地域に強い地震が起ると将来その地域に期待される震度は若干あがるという考え方、つまり、その地域にはその強さの地震が近い将来起っても不思議はないとする考え方である。もう1つは、強い地震が起ってしまったのだから、その地域の地盤に蓄えられた歪エネルギーは放出されてしまったので、もう当分は地震はないと考え、震度期待値は下げてよいという考え方である。この2つの考え方を比べると、地盤学的には後者の方が合理的といえよう。いわゆる「地震の空白城」の概念は、地震予知にとって1つの有力な判断基準ともなっているものである。しかしながら、過去の地震資料の統計的処理に基づく地震危険度研究の以上のような問題点にもかかわらず、この在来の手法の現実的有効性はなお活きつづけるべきものであろう。なぜならば、地震予知能力の現時点での水準もさることながら、工学的実用性を考慮した次のような[北川]の視点も重視すべきだからである。すなわち、社会的、経済的に影響度の大きい耐震設計での地震強度の低減係数としての地域係数マップ等は、当面短期地震予知等に左右されることは、からである。

以上にみてきたように、従来の手法にも、また新しい断層理論に基づく手法にも、現状においては共に一長一短があり、しばらくの間は両者の長所をもって相補い合う必要があろう。しかし、いずれにせよ地震危険度研究の課題は、いわゆる地域係数マップにとどまるものではなく、[太田]が紹介したような San Francisco Bay Region の Microzonation 研究や、[荻]が報告した川崎市防災会議地盤専門部会が統一模索研究をしたところ、地震災害がいうまでもなく我々の日常生活に重要な関わりを有するものであり、生活空間にみあつたきのこまさで、より具体的な地震災害の諸相を対象とする危険度予測およびそれに基づく防災科学の進展をめざす研究手法の発展こそが、我々の課題であることを肝に銘ずべく、良い機会を提供した実り豊かな一里塚として、このシンポジウムを総括することが許されよう。

[文責 長崎総合科学大学教授 長橋純男]

学会短信

NEWS

□第9回地盤震動シンポジウム

報告

<構造標準委員会>

第9回地盤震動シンポジウムは、『構造物の耐震性能を考慮した入力地震研究の諸問題』なるテーマで、1981年4月3日、日本大学理工学部9号館において開催した。参加者は約300名であり、9回のシンポジウムのうちで最も多く、特に若い研究者、実務家の多かったのが特徴的である。これは“近い将来の耐震設計が、震源から建物頂部まで”的時代になるであろうとの予測に対する、高い関心の現れと評価される。

ところで我が国では、1980年7月14日新耐震設計法が公布され、本年6月1日より施行された。そこでの設計目標に対する地震入力レベルは Macrozoning の型で示されており、その論拠等は第8回のシンポジウムでも報告され、活発に議論された。

一方、大規模地震対策特別措置法の成立もあって、より大なる入力地震動に対する既存構造物の耐震診断、被害想定なども実施されつつある。このような局面を直視して、構造物の耐震性能評価に関する基本問題である入力地震動について上部構造の崩壊まで考えに入れたテーマが選定されたところに本シンポジウムの意義がある。

開催主旨ならびにプログラムは本誌本年2、3月号に掲載されているが、司会、発表者とそのテーマのみ再掲すれば、

司会 大坪道男（建設省建築研究所）、多賀直恒（名古屋大学）、田中利男（都立大学）

1. 耐震物の耐震性能と入力地震動
シンポジウムのテーマ選定の主旨説明
太田外気研（鹿島建設）

2. 耐震構造物の耐震性能

2.1 構造崩壊からみた応答、地震動及び震源
山田 駿（神戸大学）、河村 康（神戸大学）

2.2 鋼構造物の応答特性と考慮すべき地震入力

秋山 宏（東京大学）

3. 最近の地震における事例から

3.1 建物の地震時挙動と入力特性（宮城県沖地震の場合）
柴田明臣（東北大）

3.2 住友金属仙台ビルの耐震設計と地震挙動
野口 司（日建設計）、内田直樹（日建設計）

4. 入力地震動の評価手法とその問題

4.1 強震記録からみた地震動の強さの評価
田中貞二（東京大学）

4.2 理論地震動の工学への適用性について
石田勤助（電力中央研究所）

4.3 最大加速度予測のための震源モデル
平澤朋郎（東北大）

5. 入力地震動研究の動向

田治見 宏（日本大学）

以上9題の内容は、講演資料集として学会より頒布されているので、詳細はこれにゆずり、本シンポジウムにおいて提起されたいいくつかの研究課題を主に報告する。

今回のテーマは、①構造物に対する入力地震動の作用をどのように考え、地動効果をいかに定量化すべきか、②そのような外力効果に対する構造物の抵抗力をどのように評価すべきかという2つの論点をもっていると考えることもできる。

山田・河村は構造物の崩壊性状、崩壊規準の分類、それぞれの極限耐震性の評価手法、それに用いる震源モデルまで遡った入力地震動の包括的評価を概説し、最終的には構造物の損傷率を地震のマグニチュードと震央距離で評価しようとする。

地震入力をエネルギーとして捉える試みがなされてきたが、Housnerらの方法論を実証発展させ具体的に応用しうる段階にまで、この研究を進めたのは秋山である。秋山は、地震により構造物に加えられるエネルギーの総量は極めて安定した量であることを示し、地震動の構造物に対する効果を総エネルギー入力と捉え、構造物の抵抗力としてこれに対応すべきものは、骨組のエネルギー吸収能力であることを導いた。

柴田、青柳・内田は1978年6月宮城県沖地震の事例から、入力地震動特性との对比で、建物の挙動を分析しているが、このような検討は①、②に関する問題解決の基礎を与える。また柴田は地層構造と地震動特性、地震動の強さの評価、現存建物群の震害と地盤の関係を検討した。

青柳・内田は、我が国ではじめての強震体験をもつ高層ビルの設計から地震時挙動までを概説した。これら2つの報告は、その教訓など今後の設計に、また耐震診断にかかるところが多い。

以下の3題は、方法等は異なるがいずれも比較的短周期の地震動の特性、強さの評価をテーマにした研究成果の報告である。

田中は、地震被害が、地震動のどのような特性によるものか観測的に明らかにされていない点に鑑み、強震記録の整理を試み被害地震ならびに地盤の悪いサイトでは、最大加速度と最大速度の比が比較的小さいことを示した。

石田は、Haskell Modelによる地震動が複雑な断層運動のうち、短周期域の地震動特性に大きく影響を及ぼすと考えられる微細な断層運動効果を、ある種のLow-Pass Filterにより除去したものの視点に立ち、Filterを観測記録を参照して簡略化し、そのパラメータを決定する地盤の速

度応答スペクトルの予測手法を提案した。

また、平沢はすでに提案されている断層面上の、強度の不均一性を表す幾つかのModelを基本とし、地震動の最大加速度を求める確率論的手法を提案するとともに宮城県沖地震への応用例を示した。

最後に、田治見は地盤震動シンポジウムの重要課題として常に掲げられてきた入力地震動に関する研究を、前回（8回）までの資料を中心にreviewしているが、その内容は個々の部分における諸問題、また全体をいかにして一貫性をもって捉えるかについて必然的に大きな課題が山積していることを含蓄している。

本シンポジウムの主旨を踏まえ、田治米辰雄は①入力地震動と②構造物の両モデルの精度のバランスについて疑義を提起した。これに対し、山田・河村は構造物についても、今後に残された課題として、崩壊規準の定式化、任意履歴下における損傷率の妥当性の検証等を挙げている。一方、秋山は大変難しい問題としながらも構造物については、その吸収エネルギーが適切に判定しえれば、比較的モデル化が容易であるとの考え方を示した。

入力地震動は、シンポジウムの定常的な主要話題であり、特に第8回から今回に継続し、断層運動をも考慮した比較的短周期域の地震動評価手法も幾つか提案された。しかし、近い将来、地震動の短周期成分についての決定論的な予測は困難であるとの考え方方が支配的であることからすれば、上記の幾つかの提案については今後の観測、あるいは地震被害・震度分布との調和に関する検討が、一層重要な課題として提起される。さらに、構造物の被害現象を問題にする立場からみれば、いまなお地震動の強さを評価する充分な尺度も得られていない。

ところで、常に問題になる地震工学と地震学の間の視点の相違、この垣根の除去が地盤震動小委員会あるいはシンポジウムの1つの目標もあるが、例えば地震のマグニチュードは両者にとって重要な指標であるにもかかわらず、宮村折三が指摘したように、その定義は地震工学の面からみて必ずしも明快でないし、適切でもない。

これらと関連して山田・河村は地震学・地盤震動学・構造工学の物理量に関する共通言語、情報交換用Formatの確立の必要性を強調した。（都立大学 望月利男）

学会短信

NEWS

設計用入力地震動研究の現状と展望—第10回地盤震動シンポジウム報告—

第10回地盤震動シンポジウムは「設計用入力地震動研究の現状と展望」をテーマとして、1982年4月6日(火)、東学会館ホールにおいて開催された。参加者はおよそ310名で、これまでのシンポジウムのうちで最も多く、シンポジウムへの参加者が年々増加していることから、地盤震動シンポジウムの意義が一般に定着してきたと思われる。

シンポジウムの開催主旨およびプログラムは、「建築雑誌」2、3月号に掲載されているので詳細はこれらにゆずるが、設計用入力地震動に対する研究者と実務家の認識と、それを取り扱い方に関する意志の疎通を図るために、パネルディスカッションにも力点を置いたプログラム構成となつたことが、今回のシンポジウムの大きな特徴と言えよう。

講演要旨

A. 大沢洋「地震観測—設計用入力地震動研究に関連して」

一般的地震観測の歴史、工学的目的をもって行われてきた強震観測の最近の動向と問題点、今後の見通しなどについての概略が述べられ、従来の1点観測体制から群列高密度(アレー)観測体制への移行の必要性や、データの有効利用のためのデータバンクの確立の意義などが強調された。

B. 小林啓美「地震観測資料の解釈と活用—地震波の減衰の実験式と震度分布の作成—」

強震記録をもとにして、地震波の距離減衰の実験式を提案し、地震断層パラメータが与えられた場合に、地震基盤より浅い地盤の增幅特性を考慮して、地表の地震動強さを推定する方法を中心にして論じられている。

C. 入倉孝次郎「地震動予測」

大地震の地震動を予測する方法として、大地震と小地震の間の相似則をもつて、1個の小地震記録から本震地震動を合成する方法が述べられており、その方法を1980年伊豆半島東方沖地震にあてはめ、本方法の適用性と現時点での限界が検討されている。

D. 竹内吉弘「模擬地震波の設計への利用」

模擬地震波を地震応答解析に用いる理由と、その作成上の問題点について述べ、地

震応答解析を通じて耐震安全性を検討する場合、入力地震波は確率変数であることを認識した上で、構造物系の動力学モデル化、耐震安全性の評価規準を含めて、応答解析結果を総合的に検討することが必要であることを述べている。

E. 山本鎮男・清水信行「やや長周期成分の設計への活用」

超高層建物や平底円筒形槽に影響を及ぼす、やや長周期地震動(周期5秒~15秒程度)を外乱としたときの塔状構造物・スロッシング等の設計例を示し、スロッシング解析等は、地震動の大きさには支配されるために、設計の立場として震源のモデル・伝播経路について統計的な裏付けがされた応答スペクトル値が提案される必要があることが述べられている。

F. 久徳啓治「設計用入力地震動に考慮すべき諸要因について—設計地震動のたてまえと耐震設計の本音—」

設計用入力地震動に関して、構造物の当該敷地で存続期間中に頻発する地震波を理論的に正確に予測する手法を確立する必要があることを強調し、そのためには、設計入力の問題は理学的研究者と工学的研究者の境界領域のテーマと認識し、より以上の協力と、さらに構造設計者との交流が不可欠であることを訴えている。

G. 欠野克己・寺本隆幸「検討用地震動についての要望」

検討用地震波として、地震波形の採用については設計者が地域条件・地盤条件・建物特性を考え合わせて慎重に決定すべきであり、そのためには必要な環境整備として、記録波形の整理・公表、地動加速度レベルの決定法の確立、国内の各地に対して想定すべき地震波形の確定等の要望が出されている。

H. 多賀恒伸「地盤震動における地形・地盤の不整形性の影響」

不整形地盤の分類についての提案と、この不整形地盤の形態と地盤震動の係わりに関する研究の現状が紹介され、土勝沖地震のハゴグランドホテル・八戸東高等の被害例と不整形地盤との関連から、不整形地盤が地盤震動に大きな影響を与えることを示している。

I. 工藤一嘉「やや長周期の地震波形予測と周辺問題」

やや長周期地震動を理論的にもとめる方法として、正規モード解をもちいる方法は有用であるが、この方法をもちいる場合に、(1) 地震が大きくても断層パラメータに不確定な要素が混入する、(2) 地下深部の構造がわかっている地点が少ない、といった問題点のあることを指摘し、地盤構造の決定パラメータのゆらぎは、最大変位振幅よりもむしろ地震波の継続時間に大きく影響し、最大変位振幅については、断層パラメータが推定されれば、ある程度は予測可能であることを示している。

J. 高梨晃一「耐震実験と地震波」

近年構造解析の基礎となっている解析モデルが、対象としている構造物の力学的特性(特に構成方程式)を的確に表現しているか否かが根本的に問われるようになってきた。そこで正確な(耐震)実験による崩壊過程の現出と、その正確な記録が重要となってきた。その目的で行われた、主として鉄骨造の実験例を整理した結果が示されている。

パネルディスカッションは、データバンク確立に関する諸問題について総合討論が行われた。まず大沢から、「地震観測はそれぞれの機関の研究者がそれぞれの目的を持って、観測に従事しているために、データの公表にはおのずと制約がある。また観測から記録の数値化までの作業は一般に評価されにくく、データバンクを確立するためには、まずこれらの作業に対する社会的評価を与え、作業の結果も業績とし得るような発表形態を考える必要がある」という意見が述べられ、久徳・欠野から、「設計者の立場としては、例えば建築センター等で使用料を払って簡単にデータが入手できるような方式と、地震入力に関する手法についても理解しやすいようにしてほしい」という希望が出され、竹内からは、「データは、多点同時観測記録で、絶対時刻、計器特性の情報も不可欠である」という意見がだされた。

最後に小林の、「地震動研究において、工学と地質学の間のギャップを埋めるために、地震動研究者の肩をよくする必要があること、また多少の仮定や精度上に問題があつても、震源から構造物への設計入力地震動までの流れ図を作る必要がある」という意見をもって、シンポジウムを閉会した。(構造標準委員会振動分科会地盤震動小委員会)

(文責 石田勝彦/電力中央研究所)

学会短信

構造委員会

地震動研究の蓄積とその活用

第11回地盤震動シンポジウム報告

第11回地盤震動シンポジウムは、「地震動研究の蓄積とその活用」をテーマとして、1983年7月15日(金)9:00~17:00、日本建築学会ホールにおいて約310人の参加の下で開催された。今回は記念出版物「地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み」の内容紹介も含めて、この出版物に立脚するものとすべくテーマが設定された。本シンポジウムの第Ⅰ部は、この出版物の内容紹介と、併せて個人的見解を含む講演、第Ⅱ部では他学会や建築構造設計の実務家からの立場で地震動予測の話題提供、さらに第Ⅲ部では、第Ⅰ部とⅡ部を総合して「地盤震動からみた地震防災への諸問題」についてのパネルディスカッションという形で進められた。

以下に講演内容を概説する。(敬称略)

第Ⅰ部は出版物の内容紹介を中心に講演が行われた。はじめに、地盤震動小委員会主査の太田外気暗(鹿島建設技研)により、本シンポジウムの主旨説明がなされ、記念出版物刊行までの経過や出版物の概略をはじめとして、出版物に載せることができなかったテーマや将来の課題とすべきテーマについての説明がなされた。

出版物の2章(地震および地盤波動)および3章(強震地動)は鈴木保典(東大)により紹介された。鈴木は、断層モデルに関する、近年その有効性が認められてきた半経験的方法や、細部は確率論的に扱うハイブリッドモデルに触れ、ハイブリッドモデルを用いての短周期波の計算には現在のところまだ信頼性に欠けるところがあると述べた。さらにマグニチュードの定義に関して、モーメントマグニチュードなどいくつかのものがあるが、それらの値の間にほんの少しある違いがあり、距離のとり方を含めて注意が必要だと指摘した。

4章(地盤特性と地盤震動)は萩尾堅治(大成建設技研)により紹介された。紹介に先立ち、萩尾は、地盤震動研究の対象が多様化し扱う空間的領域が拡大してきているが、地震学と工学のつながりにより、震源から構造物の応答に至るまでの一通りの筋道はできていると述べ、これらの筋道で不充分な部分を確定することが今後の課題であるとしている。出版物の内容としては、

基盤の概念、地盤特性と地震被害との相関性、地盤種別の地震応答スペクトル特性、基盤地震動特性と表面地盤の增幅特性の分離、表面地盤のモデル化、などの解説がなされた。

7章(設計用入力地震動)および5章(地震動観測)は横田治彦(清水建設研究所)により紹介された。横田は、現在行われている設計用入力地震動設定の手順をまとめこれをフローチャートで解説した。また、設計用入力地震動を考えるときに避けて通ることのできない“ばらつき”的問題に触れ、工学および地震学におけるリニアとログのスケールの違いに関する問題点を指摘した。さらに、日本では観測し難い震源域での地震動として、1983年5月2日のCoalinga地震(M=6.5)の調査報告をしている。

6章(サイスミック・ゾーニエイション)は鏡味洋史(北大)により紹介された。鏡味は、はじめに、サイスミック・ゾーニエイションの術語の使い方の問題に触れ、これに連関して用いられるテクニカル・タームの整理を行った。内容紹介としては、マイクロ・ゾーニエイション手法の説明および実例、国際マイクロ・ゾーニエイション会議の内容などが解説された。

第Ⅱ部は、他学会や建築構造設計の実務家からの立場で地震動予測の話題が提供された。

嶋悦三(東大震研)は、「埼玉県における地震動予測の試み」として、地震学の立場から埼玉県の地震動予測の実例を詳細に解説した。

亀山弘行(京大)は、「上木分野における工学的地震動予測とその問題点」として、上木学の立場から地震動予測の問題点を述べた。

柴田智(東大生研)は、「産業施設の耐震設計と地盤動」として、過去の被害地震における産業施設の被害に基づき問題提起をした。その他に、断層近傍の被害など、過去の被害地震における地盤動についての興味ある現象が示された。

青柳司(日建設計)は、「建築構造設計の分野から」として、建築構造設計の立場から地震動予測に関する検討例を紹介し、さらに東京近辺の高層建物の設計用地盤入力の設定に關し、速度応答スペクトルに基づき、いくつかの方法の相互比較を行った。

第Ⅲ部パネルディスカッション「地盤震動からみた地震防災への諸問題」では、Ⅰ、Ⅱ部の講演者がパネラーとなり議論が展開された。以下、それらの概要を示す。

鷲は、埼玉県を例に地震動予測からさらに進んで、火災の予測など被害予測的具体例を示している。

亀田は、ライフライン系ではマイクロ・ゾーニングの問題が現実の課題として重要になってきていると指摘した。

横田は、アメリカにおける地震危険度評価の現状に触れ、アメリカでは地震動の推定からさらに進んだところで研究が行われていること、地震学から行政までを含めた関係者の協力の下に一連の仕事になっているなどを紹介した。

柴田は、産業施設の危険度評価の問題に触れ、危険度評価においては、主観的な工学的判断の集積も必要としており、これは工学である程度工学ではないわけの分からないものであり、社会科学者との共同研究も必要であろうと述べた。

一方、会場の参加者からも以下のようない見が述べられた。

小林(東工大)は、防災の問題に関して、深い地盤の構造が分かっていないのに防災の問題にまで話が踏み込めるのかどうか疑問であるとし、積極的に調査をして深い地盤構造のデータを蓄積する必要があると指摘した。

表(九産大)は、マグニチュードはログ・スケールで決められているのにもかかわらず、かなり細部にまで突っ込んで設計の方に使われているのは、地震学に携わる者の立場から見ると非常に恐いことであると述べた。また、マグニチュードの見直しが行われている一方で、それを基にして入力地震動を決めることが行われていることを考えると、近い将来に何らかの混亂が生じる可能性があると述べた。

金井(日大)は、断層の上のいくつかの地震被害の例をあげ、断層直上の建物被害の理由に関する疑問点を述べた。

以上のように第11回地盤震動シンポジウムでは、記念出版物「地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み」を基に議論が行われ、今までの研究の問題点や今後の課題など、地盤震動研究の方向を見極める上で重要な意義のある多くの意見が出された。

(勝倉 裕/東北大)

第13回地盤震動シンポジウム「地震動観測のあり方とその利用法」

1. 主旨と概要

地震に伴う震動現象の詳細を知る唯一の手段ともいえる地震動の器械観測が開始されて約100年になる。近年は、電子技術の急速な進歩による機器の高性能化、観測および解析技術の向上によって、様々な目的をもった観測がそれに適した方法で行われるようになった。その結果、地震動観測に関する研究の分野は格段に広がり、課題も極めて多岐に及んでいる。この現状をふまえて標題のシンポジウムが地盤震動小委員会で企画され、昭和60年7月9日に建築会館ホールにおいて開催された。当日は254名の方が出席され、活発な討議が行われた。以下に当日の発表と討論の要約を報告する。

2. 第Ⅰ部 地震動観測に関する研究の課題

主査の太田外気晴（鹿島建設技研）より、第2期に入った昨年のシンポジウムで行われた課題の整理と問題点の見直しを受けて、今年度は地盤震動の基本である地震動観測をテーマとした旨の主旨説明があった。引き続き鏡味洋史（北大）の司会により発表および討議に入った。

多賀直恒（名大）は、「課題の整理、地震動観測に求められているものは何か？」と題し、問題の所在、地震動研究の基本的視点、観測の課題、観測資料の整理、地震動観測と耐震設計との関係、地震動を対象とする関連分野との境界領域、の全般的な6項の話題について、観測する側、観測記録を利用する側の両者の立場から整理を行った。特に重要な課題は、観測のネットワーク化、記録のデータベース化であり、その体制整備と、それを支える財政的援助が不可欠であることを指摘した。

小林啓美（東工大）は「地震動の観測と事象」と題し、記録された地震動記象には震源、伝播、地盤の情報がすべて入っているはずであり、その情報を考察するには地震動記象のアナログ記録を直接眺めることが重要であると述べ、1984年長野県西部地震における関東地方の深い地盤構造、1983年日本海中部地震における断層破壊の停止、1977年ブランチア地盤における波動伝播経路の影響等の事例を紹介した。これらの事象は、デジタル記録では見

落とされがちで、アナログ記録によって見出されるものであろうと指摘した。

3. 第Ⅱ部 何をどのように計測するのか

村松郁栄（岐阜大）は「震度VIの地震動を探る」と題し、耐震設計および地震学にとって有用な震度VIの強震動を再現する試みとして、余震記録をGreen関数とみなす方法による本震の合成を4種の地震について行い、振り切っていた本震記録の再現等の成果を示した。これについて、武村雅之（鹿島建設技研）より震源モデルの断層くいちがいをランダムとしているが、その度合によって結果は変化するとと思われる質問があり、村松はランダムとした結果はくいちがいがスムーズとステップとしたモデルの中間にあると回答した。

鶴尾和大（東工大）は「深い地盤の震動特性を探る」と題し、地震記録は複雑な中にもある秩序を有しているとし、例として南関東平野の観測記録において、平野外縁から入射した地震波のやや長周期成分が平野の中を進むに従って成長している現象がみられることを示した。これは、夢の島発破実験等で確認された関東平野地下構造の深さ2~3kmに及ぶ堆積層内のS波の重複反射によるものと考えられ、これらの結果から地震観測が発破実験と同様に地盤構造を知る手段となることを指摘した。

太田外気晴は「硬質地盤の震動特性を探る」と題し、最近の地中地震観測をまとめると深層の観測が増え、基盤における地震動特性解明を目的とした観測が目立つことを指摘した。また、南関東の広域アレー観測と基盤層からの鉛直アレー観測の実施例から、観測、解析における問題点とその解決法（例えば地震計のノイズの除去）、平均応答スペクトルにみられる地盤条件による差異、表層地盤の減衰性と增幅特性等について報告し、今後の耐震設計にとっての重要性を指摘した。

佐藤暢彦（東大生研）は「地震時地盤ひずみの観測」と題し、加速度計による高密度アレー観測、地盤ひずみ計によるひずみの直接観測、埋設管に貼付したストレイン・ゲージによるひずみ観測から構成される、地中構造物の耐震設計に活用できる地震時の地盤の動ひずみの情報を得ることを

目的とした観測システムを紹介した。成果の一例として、地盤ひずみ計と埋設管によるひずみの波形はよく一致していること、アレー観測では埋設方位をも含めた精度を高める必要があること等を報告した。

工藤一嘉（東大震研）は「地震想定と強震観測」と題し、地震予知と関連して検討・実施されている地震を特定した強震計配置についてその特徴と問題点を整理した。地震予知には超長期予測、長期予測、および短期予測の3段階が考えられるが、わが国で全段階取り組まれているのは「東海地震」のみであること、IAEE主催のアレー観測に関するワーク・ショップで優先地域と指摘された中部地方では危険度が高いにもかかわらず十分な観測網がないこと、これに対し米国の Parkfield Array では断層に沿って驚異的な高密度強震観測アレーが配置されていること等を報告した。

北川良和（建研）は「建物を含む系の地震観測」と題し、建物で観測された地震動は、震源特性、伝播特性、および基盤から建物までの增幅特性から構成され、それらが評価される上での誤差のオーダーは各々異なっており、そこから観測目的と必要精度に応じた観測システムと配置計画が考慮されるべきとし、さらに既存の観測網の再配置、観測成果を活用するためのデータ公表についての責任分担の明確化が必要と指摘した。金井清（日大）からは配置計画に関して上下動観測が今後考慮されるべきとの発言があった。

以上、第Ⅰ部と第Ⅱ部の発表に関して以下の討論がなされた。

鏡味より観測で設定すべき地震の上限について質問が出され、村松から震源における最大値はひずみの大きさと解放速度で決まり、最大速度としては100kine程度を考えるべきであること、加速度最大値は周期に依存するので定め難いとの回答があった。これに関して小林より、村松による長野県西部地震の震央域では10gを超える上下動加速度がありえたとの報告に対しての質問があり、現地で見られたものと同等の石が飛んだ距離を得るために実験で要した速度に周期を考慮すると10gを超える加速度となる旨回答があった。

小林より太田が報告した4観測点のうち1点は異なるプレート上にあるなど条件がそろっていないがとの質問が出され、地盤

活動度、システムの保全管理等から観測点が決まったとの回答があった。

米国のアレー観測は震源近傍に重点がおかれており、被害の大きい都市部でも密な観測が必要ではないかとの鏡味の意見に対し、工藤は観測データの数は震源近傍で特に少ないと、また被害を想定した観測も当然重要で米国でも実施されていると述べた。また、工藤が示した「日本の活断層」(東大出版会)の図で平野部が空白であることについて小林より意見を求められ、平野部は堆積層が厚く断層を評価する上で難しく、活断層による震度予測にも影響は表れている旨回答があった。

水畑耕治(神戸大)は、北川が提起した地震計の再配置の問題に関連して、神戸地方のように地震の少ない地方にあっては、活用できるレベルの地震動をいかに多く観測するかが問題であり、同一観測網の中でも再配置が必要との意見を述べた。

4. 第Ⅳ部 強震記録から何を学びどう活かすか

引き続き、勝倉裕(東北大)の司会により、石田勝彦(電中研)は「記録から何を学びどう活かすか」と題して、地震被害および地震記録に表れる地盤性状の多様性の主因の一つである震源過程の重要性を述べ、震源過程に関わる理論研究の流れをまとめた。震源過程と工学との結びつきの一例として、原子炉施設の基準地盤動評価について点震源と面震源評価の意味と問題点を整理し、さらに活断層の評価法、震央域での地震動、特に短周期成分に依存する加速度等の問題点をあげ、耐震設計に震源過程を取り入れるには幅広い知見の導入とその工学的適用が重要であると指摘した。

翠川三郎(東工大)は「1979年インペリアルバレー地震から学んだもの」と題し、インペリアル断層付近のアレー観測網を紹介し、観測記録から、断層運動が複雑であったこと、地震動記録には観測点と断層の位置関係や地盤構造の影響が現れていること等の成果が得られたことを報告し、また加速度の距離減衰式がいくつか提案されているが、これらの結果には差がありデータ不足を感じると述べた。最後に、この観測記録には問題点がいくつか残されてはいるものの、今後のアレー観測計画にとって貴重な前例になろうとまとめた。

横田治彦(清水建設技研)は「1983年

コーリング地震から学んだもの」と題し、いわゆる直下型地震に相当する震央距離10km位置の観測記録について短周期成分を中心に検討した結果、余震記録をGreen関数として用いる合成法によって得られた本震の合成地震動は記録とよい一致を示したこと、同様の方法で本震記録が得られなかつた震源近傍の数地点で推定した地震動と被害状況・アンケート調査による震度推定値と比較した結果、良い対応を示したことを報告した。

次に、長能正武(竹中工務店技研)の司会のもとに、渋谷純一(東北大)は「1978年宮城県沖地震から学んだもの」と題し、この地震で改めて認識された沖積平野部で被害が大きく山地部で被害が小さい現象から、震害に及ぼす地盤条件の影響が大きいことを指摘し、地盤条件の影響評価のため不可欠な問題である表層地盤の非線形性、深い地盤構造の影響について強震記録と比較して検討した結果から建物への入力地盤動の特性を解明する上で強震記録が果たす役割の大きさを示した。

長橋純男(長崎経科大)は「設計用地震動への活かされ方」と題し、深い波動伝播媒体としての地盤の地域特性が工学にとって無視し得ない問題であることを強調し、関東地方を例にとって、北緯36度近辺より南側では北関東よりも高周波数成分の少ないことを種々の研究成果を用いて説明し、これらは深い地下構造の速度あるいはQ構造の影響によるもので、テクトニクスと高い相関にあると述べ、アレー観測による研究事例を交えて今後この地域特性について取り組む必要があるとまとめた。

討論に入り、北川より基準地震動の策定に断層運動を考慮する手順があるが、その信頼度はいかほどかとの質問があり、石田は具体的なことは分からぬが最終的には工学的判断に基づいて定められているようであると回答した。

地震動の距離減衰性の検討に米国では断層からの最短距離をとっていることに對し、村松から意見を求められ、翠川は断層からの地震波射出の最も大きい点から距離をとることができれば、地震動振幅の距離に対する変化のばらつきは小さくなろうが、断層が複雑なときや断層破壊が全域に亘ってスムーズなときには地震波射出の中心を定めるのは難しいと述べた。

太田から、基盤から地表への波動伝播に關し入射角の問題があるが、スネルの法則が後続波でも成り立つか、またそれを確認するためにはどのような検討が必要かとの質問があり、渋谷からはランニング・スペクトルによる解析で時間による伝播特性の変化はみられなかったこと、翠川からは全時間領域で伝播特性が同一とは考えられないことが回答された。

工藤から、マグニチュードが小さい地震記録で見出された地域特性がマグニチュードの大きい地震に対しても適用しうるのか、また小地震の記録を使って大地震の再現が可能との発表が多いが、将来大地震記録は不要になるかとの質問があり、前者に對して長橋は微小地震からマグニチュード6-7までは適用しうるとの見解を示した。また後者の質問については、村松より本震記録があるから余震記録を使った手法の検証が可能であること、武村からは断層パラメータなどが確定できない予測の立場から行った解析では妥当とはいえない結果となつた例があると回答された。

総合討論では、正木和明(愛工大)より1974年伊豆半島沖地震で断層直上にある家屋に顕著な被害がなかったが何故かとの質問があり、村松から震動がショック的であったことによるのではないかとの回答があつた。これに關して翠川からインペリアルバレー地震で加速度は1.5g、速度で100kineにも達しているにもかかわらず家屋に被害がなかったこと、金井から1891年濃尾地震等においても家屋が倒壊しなかつた例があったことが報告され、震央域における地震挙動の解明が課題として述べられた。小林からは深い構造において、震源からの波動が直達せず曲がって伝播することがあり、観測記録の直交変換による考察には問題があると意見が述べられた。

水畑は、地震活動の低い関西における観測例の紹介を求められ、10年来行っている25階建の高層住宅の観測システム、地震観測例およびその解析結果を報告した。

最後に、森岡敬樹(早大)により総括が行われ、シンポジウムを閉会した。

(記録:藤堂正喜/戸田建設)

第14回地盤震動シンポジウム

「メキシコ地震を探る—日本の事例と比較して」

1985年9月19日にメキシコの太平洋岸で発生した地震がメキシコ市を中心に1万人に近い死者、倒壊建物約500棟に達する大被害をもたらしたことは記憶に新しい。被災後、わが国からも各方面的調査団が赴き、種々の分野からの調査報告がなされている。この中で地震と地盤動に関する問題に焦点を当て、それらの特徴を解明すべく

標記テーマのシンポジウムが地盤震動小委員会で企画され、昭和61年7月11日に建築会館ホールにおいて開催された。当時は300名近くの方が参加され、長崎純男（長崎経科大）、入倉孝次郎（京大）、渋谷純一（東北大）による司会のもとに、話題の提供と活発な討議が行われた。以下に当日の発表と討論の概要を報告する。

まず、北川良和（建研）から主旨説明としてメキシコ地震の特徴が挙げられ、今回のシンポジウムでは震源および伝播過程、メキシコ市における地盤動（各種地盤）と被害との関連（特にRC造10～15階建物に被害が多い）、地震動の継続時間（後続位相）、軟弱地盤特性（地震動の周期2～4秒で卓越）、盆地状の不整形地盤の震動特性に焦点をあて、それら事象の説明を試み、さらにわが国における関連事例も紹介していることを説明した。

基調報告

阿部勝征（東大）は、「地震学的立場から一発生機構からみたメキシコ地震の特徴」と題し、今回の地震はミショアカン空白域として以前から指摘されていた所にココスプレートとアメリカプレートとの相対運動によって発生したもので、島弧・陸弧に典型的な低角逆断層型の巨大地震であり、この規模の地震としては余震が非常に少ない特徴を有していること、1983年日本海中部地震などと同様のマルチブルショックであり地震動の継続時間を長くする一因となっていること、他の巨大地震と比較すると周期1秒～10秒の周期成分が小さく均質で大きなアスペリティのため断層破壊が

なめらかであったと考えられることを指摘した。この地震について入倉孝次郎（京大）より日本の地震、特に太平洋岸のブレートもぐり込み付近で生じる地盤との類似性について意見を求められ、普通それらの地震は1985年チリ地震と似ていてメキシコ地震と似ているものとしては1964年新潟地震があると述べた。

太田外気晴（鹿島建設）は、「工学的立場から—1985年メキシコ地震の被害と地盤震動」と題し、メキシコは火成岩が広く分布している国でありメキシコ市の旧湖地区の表層は軟弱な粘土層であること、この軟弱層の影響により固有周期1秒～3秒の10階建以上の建物の被害率が大きいがこの周囲帯で地震動が大きくなることは被害の多かった地区に近いSCT地点での観測記録の応答スペクトルからはもちろん、モデル化した地盤による計算でも確認できたとし、課題としてメキシコ市旧湖における地盤物性の歪依存性の把握、盆地状地形の影響の把握を挙げ、後者については簡単な波動伝播の実験による現象説明の例を示した。またメキシコ市旧湖南のCDAOでの地震動の主要動は180秒近くも続いているが、これとよく似た記録が1983年日本海中部地震で八郎潟に得られていることを指摘し、わが国の高層建築耐震設計用の地盤荷重について見直す機会が与えられたことを述べた。

地盤震動の課題

工藤一嘉（東大）は「強震観測体制について」と題し、まず今回の地震ではメキシコが高密度観測網を設置していて、デジタル地震計による記録の概要を地震後3日には公表したこと、被害地で地震記録が得られたことなどの特徴があるとし、メキシコの地震観測の変遷としては1960年代にわが国の強震計SMACが設置され、1970年代にはメキシコ市周辺で先進的な強震観測システムが設置されていることを挙げた。今回、多くの記録が得られた強震観測網は

大地震の発生が予想された太平洋岸ゲロ州を中心に1985年2月より設置が始まっていたもので、地震が起きたミショアカン州には地震前2カ月までに設置されたばかりであり合目的な観測の意義は大きいとし、ここの観測網はメキシコ市への地震波の伝播経路に沿ったネットがあるのでに対しあわが国の東海地震については東京方面などへのそのような観測網がないことを指摘した。小林啓美（東工大）より1960年代にメキシコ市に設置されたわが国の強震計による記録が今回得られていないことについて意見を求められ、工藤はメンテナンスがなされていないことによるものではとの回答および海外援助では10年くらいのメンテナンス期間をつけておくべきと述べた。

次に武村雅之（鹿島建設）は、「震源域及びその周辺地域における強震地動特性」と題し、1968年十勝沖地震および1983年日本海中部地震と比較することによってメキシコ地震の震源と波動伝播の特性を明らかにすることにして、メキシコ地震の太平洋岸に沿っての最大加速度の距離減衰は伝播経路の地盤の特性の類似性から十勝沖地震の場合に似ていること、一方300km近く離れたメキシコ市、岩盤上の記録の最大変位は大きく長周期では減衰しにくい何らかの伝播過程を考えてみると必要があること、距離が100km以下の震源近傍の最大加速度はほぼ一定で他の地震の最大加速度より小さいが、これについては半經驗的地震動評価法による検討から断層破壊の不均質性が小さかったことが一因であろうと指摘した。岩崎好規（大阪土質試験所）より断層の不均質性に関する地震動評価法による結果と観測記録とのスペクトルの関係について質問があり、スペクトルのピークはよく対応している旨回答があった。また横田治彦（清水建設）からは観測計器の違いによる影響について質問があり、影響はあるが今回発表の傾向には問題がないとした。

殿内啓司（応用地質）は、「日本の軟弱地盤とその震動特性」と題し、日本の軟弱地盤が分布する26の沖積平野に焦点をあて、それらのうち代表的な軟弱地盤の地質

構造をみると、中にはメキシコ市の旧湖地区と同様に非常に軟弱な土層が10m以上にわたって存在する地盤があること、地盤沈下量の経年変化についても関東平野にはメキシコ市同様年間10cm程度の沈下をしている所があることを指摘し、軟弱地盤による地震動の増幅がメキシコ市ほどではないが周期1秒以上で10倍程度に達する地盤があることを解析によって明らかにし、このように地震動が地盤に大きく左右されることから全国的なマイクロゾーニング作業が必要であろうとした。田守伸一郎（信州大）より、わが国とメキシコとの土質試験法の違いの有無について質問があり、詳しいことは分からぬがメキシコ市の土質の含水比は非常に高く日本とは異なるとの回答があり、片山幾夫（東電設計）からは地盤による地震動の増幅は土の非線形性から入力地震動の大きさにも依存すること、小林啓美（東工大）からはメキシコ市と土質条件が似ている所としては阿蘇のカルデラ地区があろうとの意見があった。

河野允宏（京大）は、「地盤構成と微動および地震動特性について」と題し、まず地震後にメキシコ市の多数の地点で行った常時微動観測結果では旧湖地区の中心に向かって軟弱層が厚くなるに従って常時微動の卓越周期が長く振幅が大きくなっていることを紹介し、この結果が地震観測記録の特徴と調和したことから常時微動特性の地盤による変化を解析的に説明することは意義があるとして旧湖地区を半球形の盆地でモデル化した波動論による解析を行い、その結果と常時微動の結果を比較して解析結果が全体的に震動分布をよく表せたことを報告した。瀬尾和火（東工大）は、常時微動の震動源は軟弱地盤では人工的なものが大部分を占め、一方硬質地盤は異なる震動源によるものと考えているが、本論では両者の震動源を同一とみなして解析している点について質問があり、河野は異なる日時に小林らによって行われていた常時微動結果と本微動結果は類似のものであることから同じ震動源による結果と判断した旨回答があった。

川瀬博（清水建設）は、「強震地動の時

間変動特性に着目した不整形地盤解釈」と題し、メキシコ市における地震動記録について粒子軌跡などによる波動の識別を行って旧湖地区で得られた記録には表面波が混在すること、水平成層地盤モデルによる解析ではピーク周期はよく一致するものの増幅率や波形後半部については再現性がよくないことからメキシコ市特有の1km近くの深い構造からなる盆地状の不整形性を考える必要を説き、このモデルについて境界要素法と波線合成法の2法によって表面波解析を行い、前者の方法では進行方向に発生した表面波によって後者では盆地端部からの反射波によって後続の大振幅波形が生成されるなど波動発生メカニズムの2種の可能性を指摘した。藤堂正喜（戸田建設）による2方法での地盤モデルが同一でないことから差が生じたのではないかとの質問に対し、同様のモデルで行っても大差がないとの回答を、また工藤による後続波を表面波として解析したのかとの質問に対し結果的に表面波が発生する解析を行った旨回答があった。

統いて渋谷純一（東北大）の司会により、瀬尾和火は「地下構造に基づく地震現象の解釈」と題し、メキシコ市の旧湖地区の2地点 CDAO と CDCAF での観測記録は、両者が1.3km しか離れていないにもかかわらず CDAO のみに大振幅の後続位相が現れていることから、この現象は CDAO 付近のみの極く浅い軟弱層による局地的な影響であろうとし、一方関東平野で観測される後続位相は数km の深い堆積層によるものでこれでは下方基盤から上昇していく波動前半部に対し平野外縁から入射し平野内を伝播していく波動によって後続位相が生成されているとして、CDCAF の局地的な地盤構造で同様の波動伝播を考えれば CDAO のみに生じた後続位相が説明できることを報告した。武村より CDCAF についても深い地盤構造部の横からやってくる波を考慮する必要はないかとの意見に対し必要なかろうとの回答が、源菜正人（鹿島建設）より CDAO の浅い層の横からの波動の震動源は何かとの質問に、2次的なものと考えている旨回答があった。

鳥海熙（福井大）は「堆積層表面波の構造について—大阪平野の場合」と題し、鳥海らが20数年来大阪平野で観測している記録には主要動に続く比較的振幅の大きい後揺れ（後続位相）が2度続く現象があり、この原因として大阪平野がその下部岩盤と生駒、六甲の両山地に囲まれていて、その両山地から平野堆積層に入射、伝播する表面波が考えられ、これによって主要動と後揺れの時間差などを矛盾なく解釈できるとし、さらに浅い木製の箱の中にスピンジ粒を入れ外部から衝撃を加える模型実験を行って上記現象の検証ができたこと、変位ボテンシャル法による理論計算によって表面波発生のメカニズムを把えたことを報告した。川瀬からの大阪平野のより軟らかい表層の影響はないのかとの質問に対し、堆積層全体で表面波が生成されるとの見方をとっているとの回答があった。

渡部丹（都立大）は「設計基準の立場から」と題し、メキシコの耐震基準を紹介し、その考え方はわが国の現在の耐震設計法からみても先進的なものであるが、被害からみて建物の荷重分布、2方向荷重の影響、隣棟間隔、およびじん性能力による荷重低減規定に問題があり、メキシコ市における観測地震動の解析からば建物のじん性能力は4以上は確保される必要があったことを指摘し、メキシコ市が震源から300km 以上離れていたながらかなり大きい地震動になった原因として震源からメキシコ市に至る地盤や地盤構造の話題があることや、メキシコ市特有の地形等が考えられるとして、わが国においても東海地震などで周期数秒の継続時間の長い地震動が生じる可能性があり高層建物の耐震設計には留意すべき点であろうとした。萩尾堅治（大成建設）より被害と相互作用の関係はないか、瀬尾によるチャンネルの影響は走時からあまり考えられないがとの質問に対し、今後の検討課題であると述べた。

小林啓美は「サイスミックマイクロソーネイションの立場から」と題し、地盤被害を想定する場合に、耐震設計、都市計画、都市防災のいずれを目的とするかによって検討する内容が異なり、都市計画、防災の

観点から局地的な地盤条件による地表地震動の分布、即ち地震被害分布を想定することがサイスミックマイクロゾーネイションの意義であり、メキシコ市においては地盤資料が不足していることから常時微動観測結果による補完を行うことによってマイクロゾーネイションが可能となろうとの立場を取ったことを明らかにした。この目的のため市内 95 カ所で常時微動を観測した結果は地盤のコントラストを明瞭に現しており地震観測記録の特徴と調和したことから、常時微動結果の補完によるメキシコ市の加速度応答マップを作成し、その結果が被害、無被害分布とよく対応していることを報告した。入倉より金井の常時微動では卓越周期のみを取り扱っている、一方本論は振幅も考慮していくて震動源をホワイトノイズ的としているが同様の考え方を日本にも適用しうるかとの質問に対し、山に囲まれたメキシコ市のような条件にあれば可能である旨回答があった。

この後、源栄正人よりメキシコ市観測記録の後続位相は、近くにある小火山が 2 次的な震動源となって引き起こした可能性があることを解析結果を使って紹介があり総合討論に入った。

阿部は断層のアスペリティのサイズが大きくかつ均質であることは短周期成分が小さいこと、余震数が少ないと調和するがアスペリティモデルによる地震動計算法が定式化されているわけではないことを、岩崎は、同じ埋設物でありながら地下数米にある地下鉄はほとんど無被害で深いところにある下水施設の被害が大きいことをいかに説明しうるかが課題として残されたことを、鏡味洋史（北大）からは、石狩平野の軟弱地盤においても所によって震動が大きく異なることが指摘された。

周期 4~5 秒までにわたる日本におけるマイクロゾーネイションへの常時微動の有効性について小林は実際に応用した上で考える立場が必要であるが、地震現象の特徴の一つとして「やや長周期」といっているのは深い構造に起因するものをいっているのでメキシコ市のように常時微動で出た長周期とは同一ではないことを補足した。

常時微動を工学上実用化した金井清（北大）は、当時の状況を考えて論文では一応適用範囲を周期 1~2 秒に限ったがそれ以上の周期に適用できないわけではないことを、またメキシコ市については 1957 年の地震での建物の衝突による被害に印象が残っていることが述べられた。

最後に森岡敬樹（早大）は、今回の地震では震源付近で大きくなかった地震動がメキシコ市の地表にいたる経路の中でいかに成長したかを建物被害は如実に現しており、地盤震動小委員会で 10 数年来培ってきた成果を踏まえてメキシコ地震解明に取り組むべくこのシンポジウムを開催したが、本日の討議ですべての結論が得られたわけではなく今後研究すべき課題も分かってきたとし、同時に今後の海外での地震調査の方法また現地における資料収集法の重要性が痛感されたことを述べ閉会とした。

●藤堂正喜／戸田建設

訂正

●本誌 10 月号「インテリジェントビルの話題」の図一-2 ビルディングオートメーションの歴史とトレンド（55 ページ）の縦軸の指標として「ビルディングオートメーションの性能」と追加させていただきます。（事務局）

第15回地盤震動シンポジウム記録

「地盤における地震動の減衰評価」

構造委員会振動運営委員会地盤震動小委員会

標記テーマのシンポジウムが昭和62年8月27日に建築会館ホールにおいて開催された。170名近くの方が参加され、石田勝彦（電力中央研）、渋谷純一（東北大）、長能正武（竹中工務店技研）の司会のもと、話題の提供と活発な討議がかわされた。以下に当日の発表と討議の概要を報告する。太田外気暉（鹿島技研）より、地盤の減衰性は地盤震動問題の中で非常に重要かつ難しい課題であるが、何がどこまで分かっているのか？それをどう使えば良いか？残る問題は何か？の明快な話題提供を基に、討論を進めていただきたい旨挨拶があった。引き続き State of the Arts 報告として、長橋純男（長崎大）は、「地盤動の減衰評価に関する最近の研究動向～地殻・上部マントルから表層地盤まで～」と題し、地盤波動の伝播過程における減衰作用全体を ATTENUATION と DAMPING の2つの観点から整理し、紹介した。前者は地殻・上部マントルにおける Q 構造の評価、断層の広がりや破壊過程を考慮した理論的な距離減衰則、地域性を考慮した距離減衰式の検討、物理的基礎に基づいた距離減衰式の見直し、データベースに対する回帰手法の検討等に関するものである。後者は鉛直アレー観測等による硬質地盤における Q 値もしくは減衰定数の評価、現位置試験による減衰定数の評価法、非線形性に焦点をおいた軟弱地盤の減衰定数および力学モデルの設定、模型地盤での減衰評価、土の要素としての減衰定数の把握等に関するものである。最後に、本シンポジウムの各講演概要を全体の研究動向とからめて紹介し、ここで提起された研究成果と問題点をどのように耐震設計に取り込むかが今後の課題であると指摘した。

第Ⅰ部

田中貞二（清水大崎研）は「地震動強さの距離減衰」と題し、距離減衰式を考える際に考慮すべき諸項目の留意点等について述

べた後、坪井式および最近10年間に提出された最大加速度、速度並びに変位の距離減衰式に対し、マグニチュード係数、距離係数等がどの程度の値を示しているかを定量的に考察した結果について報告した。特に、距離減衰勾配に関して、種々のデータを寄せ集めて一括回帰の方法でマグニチュード係数と距離係数を同時に求めた場合、距離係数を過小評価するが、地殻ごとに距離以外の項を層別因子とした2段階回帰の方法では、距離係数は個々の地殻の減衰勾配に適合した値に改善されたとし、層別因子による回帰分析の有効性を指摘した。石田勝彦より、加速度の距離係数を坪井式によるものと比較している理由について質問があり、坪井式は2~4秒程度の波に対するものであるが、加速度あるいは速度については、少なくとも坪井式の距離係数よりも小さいものは理解しにくいという意味で比較した旨回答があった。

石田寛（鹿島技研）は「室内試験、S 波検層および観測地盤動に基づく地盤の減衰評価」と題し、硬質地盤の福島県富岡地点で実施した3種類の手法による減衰評価結果について報告した。室内試験より得られる減衰は現位置データの解析結果と比べて小さい値を示したこと、この理由として、室内試験では内部減衰が支配的で、現位置のものはそのほかに層全体の細かい亀裂等の影響があるとし、その根拠として、ROD（長さ 10 cm 以上のコア採取率）が減衰定数と良い相関性を示すことを指摘した。観測地盤動の解析により求められる減衰は S 波検層のものと比べて大きいことについては、地盤波動の伝播の複雑性によるものと述べた。また、比較的明快な条件の基で得られる S 波検層による減衰を用いた解析波形と観測波形との対応度は良いことから、S 波検層による減衰評価の妥当性を述べた。横田治彦（清水大崎研）より、他の地盤動についての最適化の結果、周辺の地盤の

成層性について質問があり、前者に関しては未検討であること、また後者については近傍のボーリング結果等から判断してほぼ成層をなしている旨回答があった。

大川出（建設省建研）は「表層地盤における土の非線形性の取扱い」と題し、完全弾塑性型の履歴に対する等価な減衰定数の評価法および土の非線形性を表現する Bi-linear モデル、Hardin-Drnevich (HD) モデル、Ramberg-Osgood (RO) モデルの各モデルに対する特徴等について既往の研究結果を基に紹介した後、東京下町地区的動的都市地盤図について説明を行った。これはボーリングデータに基づき、N 値 50 以上の砂または砂礫層を見かけの基盤とし、表層地盤には大崎、原による非線形モデルを設定し、最大加速度 100, 300 gal の人工地震波を基盤に入力し、逐次積分法を用いて地表面での動特性を評価したものである。最大応答加速度に対して地盤の非線形性の影響はきわめて大きいことを指摘した。

第Ⅱ部

武村雅之（鹿島小堀研）は「地球内部における地盤波の減衰と距離減衰式」と題し、地球内部の減衰構造を取り上げ、Q 値に対する最近の研究の状況、知見を紹介した後、地震学の最近の成果を踏まえて距離減衰式を見直し、現状の距離減衰式に対する問題点を示し、物理的解釈に基づく新しい距離減衰式の提案例を示した。これは距離減衰式による地震動評価結果に普遍性を与えるために不可欠であり、地震学的な研究成果を工学上の地震動評価に役立てるためにも重要であると結んだ。石田勝彦より、式本来の簡便さについて質問があり、簡便さを今後生かすためにも式の限界を知ることが大切であり、このような考察が必要である旨回答があった。塙一男（清水大崎研）より、Q 値の周期依存性、地域性とマグニチュードの決定について質問があり、マグニチュードを決定する波がやや長周期成分の表面波であると思われる所以 Q 値の異なる上部マントルの影響は少ない旨回答があった。

岡田成幸（北大）は「高密度震度調査資

料にもとづく地震動の減衰特性と地盤増幅特性の考察」と題し、まず1987年日高山脈北部地震等広域で得られている震度分布を平滑化することにより、北海道全体の減衰傾向が把握できたこと、宇津による異常震域の分布傾向と類似していることを述べた。次に、減衰傾向が同等と思われる地域での局地的地震増幅特性に関して、1982年浦河沖地震の調査から、日高海岸線150km内で観測された震度がその測線下のマクロな地質構造と対応すること、札幌市域内の500mメッシュ間にみられるミクロな震度差は地表下10m内の地盤条件の違いによってもたらされることを述べた。さらに、1986年沼田町付近の局発地震の調査結果から、断層極近傍の震度の揺らぎは幾何減衰ではなく説明できるるとし、震度調査の有効性、将来性について述べた。武村雅之より、平滑化により深い構造の特性と長周期成分のどちらが見えるかについて質問があり、震度は短周期のみならず3~4秒程度の長周期も反映していると思われる所以深い構造の情報も得られる旨回答があった。

北澤巧次（大成技研）は「表層地盤の減衰特性の観測と実験」と題し、海岸埋立地の地中・地表の地震動観測結果より求めた表層地盤の減衰特性および振動台加振実験から得られた剪断土槽中の模型砂地盤の減衰性等について報告した。伝達関数のスペクトルフィッティング法により求めた実地盤のモード減衰定数は高次減少型を示し、それらは1次 $h_1 = 0.1$ の Maxwell 型減衰で表しうること、剪断土槽を用いた模型地盤に対しても実地盤と同様、高次減少型を示すことを指摘した。さらに、減衰型の違いが地震応答に及ぼす影響として、減衰特性を $h_1 = 0.1$ の Maxwell 型とする場合と $h = 0.02$ の履歴型減衰とする場合との比較を行った結果、後者は最大加速度で10~20%，剪断歪で30~40%程度大きい応答を示すことを指摘した。渋谷純一より、模型地盤の伝達関数のピークに関するモデルについて質問があり、Maxwell 型と履歴型の中間的な結果も得られている旨回答があった。武村雅之より、モードで整理した

場合の減衰定数のばらつきについて質問があり、今後検討したい旨回答があった。

田藏隆（清水技研）は「地盤の非線形地震応答特性」と題し、まず、等価線形解析法と逐次積分法、および履歴型応力ひずみ関係の力学モデルに対する数値解析上の特徴、限界等について、既往の研究、田藏らの実施した地表面最大加速度435ガルに達する強震記録のシミュレーション解析結果等に基づいて説明を行い、修正ROモデルによる逐次積分法による解析結果と強震記録との対応度は良いことを示した。次に、非線形地震応答に伴う卓越周期と減衰定数の時間的变化を含めた同定について、主要動付近での長周期かつ高減衰側への推移について説明した。最後に、動的応答特性について一般的評価を行い、耐震設計法確立に対する一試案を紹介した。渋谷純一より、非線形地震応答解析における土の剛性低下および減衰の取り扱い方について質問があり、建設省土研の提案以外のモデルについて検討を行っていない旨回答があった。

引き続いて総合討論に入り、田中貞二はデータベースが均質であり、かつ距離減衰式に対して詳細な吟味がなされていること、大沢洋（東大震研）は使用する記録で用いられた計器特性の限界を知り、式の吟味をすることが重要であること、鶴悦三（東大震研）はマグニチュードと距離のみから精度の高い最大加速度を求めるのは難しく、距離減衰式は大まかな目安を決めるものであり継続時間も含めて考慮すべきであること、野田茂（京大）は震源に関しては面的な広がりを考慮した形で距離減衰式を考えるべきであることを述べた。また、マグニチュードのみを使用することの是非に関して、鈴木保典（東大）は現状ではマグニチュードに変わるものがないこと、翠川三郎（東工大）は本質的に問題は改善されないが、マグニチュードから地震モーメントに変えたことにより現象との適合は良くなかったこと、武村雅之はやや長周期の波でマグニチュードを決定する現在のシステムに疑問があることを述べた。距離減衰式の地域性に関して、武村雅之は太平洋側と

日本海側ではかなり様相が異なるため、現状ではこの2地域程度に分けるのが適当であること、青柳栄（東電設計）は東京湾周辺の土丹層での地震観測結果を用いた回帰式の作成例を示し、観測結果を基に各地域での回帰式を作成すべきであることを述べた。表層地盤の減衰に関して石田勝彦より、地盤柱状図と V_s の資料のみが与えられた場合、研究者、実務者がどのような判断基準に基づいて減衰定数を推定するかを紹介した後、減衰は土質に影響されるのか剛性に依存するのかについて質問があり、原昭夫（鹿島技研）は同一の岩でも亀裂等の影響により減衰の値は異なること、石田寛は亀裂の少ないコアサンプルでは剛性との相関も考えられるが、層全体としてみれば剛性より亀裂の影響が大きいことを述べた。また、ある地点の減衰を推定することに関して太田外気晴は普遍的性質を調べるために関連資料を数多く集めて決めなければならないこと、原昭夫は微小歪時の土の減衰はかなり小さいこと、石田寛は震源、波動伝播の単純さから考えて、S波検層から得られる減衰がシミュレーション用としては最適であること、青柳栄は土の要素としての減衰を2~3%程度と仮定した重複反射変位相差モデルあるいは散乱減衰モデルで、複数の観測結果を良く説明できること、微小歪時での減衰は室内試験の2~3%程度の値が適当であることを述べた。

最後に小林啓美（東工大名誉教授）より、距離減衰および地盤の非線形応答問題に対して影響度の非常に大きい震源距離の考え方、地盤の物性に関する凍結サンプリングの問題について、話題が全くなかったことは残念であったとの感想を述べた。北川良和（建設省建研）は今後の研究課題、方向について総括し、減衰問題は未だ不明確なところが多々あり、耐震設計に適用する場合の諸々の減衰に関して、与えられた値、式を受身の姿勢で用いるのではなく、各人が再度見直す気持ちをもつことが大切であると述べ閉会した。

●文責：若松邦夫／大林組技術研究所

NEWSLETTER

第16回地盤震動シンポジウム記録

地盤条件が地震動評価に与える影響——観測記録からの考察

地震動の性質が地盤条件に大きく支配されることを日本ではよく知られているが、世界的に見ると必ずしも日本ほどの認識が持たれ、積極的な研究が進められているわけではない。しかし、最近ではこの問題に対する認識のされ方にも変化が見られ、国際地震学地球内部物理学協会(IASPEI)と世界地震工学会(IAEE)が共同で、各国の研究者に呼びかけて、「表層地質が地震動に及ぼす影響(ESG)」の研究が発足した。

標記シンポジウムは、上記ESGワークショップを側面から支援することも考慮しながらテーマを設定したもので、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震観測の状況を取り入れ、1988年7月14日に建築会館ホールにおいて開催された。シンポジウムには160名近くの方が参加され、午前の司会者・武村雅之(鹿島小堀研)、午後の司会者・萩尾堅治(大成技研)、総合討論の座長・石田勝彦(電力中央研)のもとで、話題の提供と活発な討論がかわされた。以下に、当日の発表プログラムを示し、次に発表と討議の概要を報告する。

1.はじめに

2.古くて新しい課題

2.1 地盤条件の影響に関する研究の歩み

—日本における代表的な強震記録を中心について—

2.2 関東地域における地中・広域観測

2.3 地盤特性を考慮した強震動予測—米国の現状

2.4 IASPEI/ESGに関する活動の経緯と第2回ワークショップ

3.何を観測できたか—千葉県東方沖地震の観測記録から—

3.1 地盤分類と地震特性

3.2 広域・地中観測から

3.3 気象庁1倍位変強震計記録から

3.4 千葉県東方沖地震による地震動と地盤歪の記録

4.総合討論

5.まとめ

はじめに

まず、地盤震動小委員会の主査・長橋純男(長崎経科大)より、シンポジウムの焦点と主旨および話題提供の概要説明があり、千葉県東方沖地震データの提供機関へのお札が述べられるとともに、討論を活発に進めて頂きたい旨の挨拶があった。

古くて新しい課題

鏡味洋史(北大)は、2.1について、強震観測開始前の地震動の比較観測(卓越周期・増幅率)に関する研究や強震観測の初期に得られた地震記録を紹介した後、1960年以降の代表的な地震について、発生日、記録の特徴、問題の提起、問題の解決と対応を年表形式で説明し、強震記録の歴史と経過の紹介が各種の問題提起につながればよいと結んだ。服部定育(建設省建研)より、強震計の設置はどのようにすればよいかという質問があり、1) 東京近辺にあるものを全国にばらまく、2) 一点よりもアレー観測網を拡大する必要性がある旨の回答があった。

木下繁夫(国立防災科学技術センター)は、2.2について、2.1の歴史に対して近代的システムの紹介を中心に、長所短所を有するいくつかの方法の組み合せから結論を導き、地震記録を正しく認識する上で何が大切な力を説いた。特に、関東地域中央部における堆積層が地震動特性に与える影響を、1) 堆積層での減衰特性、2) 弹性波速度と密度構造、および3) 基盤での入力地震動の観点から説明した。久田嘉章(早大)より、千葉県東方沖地震の記録波形のみかけ速度は2.5 km/secとされたが、これは波群の速度に相当するのかとの質問があり、波面の速度である旨回答があった。

さらに、堆積層だと周期8秒で2.5 km/secでは速いのではないかとの再質問があったが、武村雅之より、表面波は後述の山田真(早大)によって確認されていると述べられた。武村雅之より、防災センターにおける強震観測の目的について質問

があり、地盤予知を主体とした地中地震観測と軟弱地盤を対象にした地表観測が実施されており、さらには硬い地盤での観測(筑波)が最近開始された旨回答があった。

司会の武村雅之は、古くは震源の米国、地盤の日本であったが、最近米国でも地盤の研究が盛んになり、日本でも新しい発想のもとで地盤震動を捉えることが重要であると指摘した。

これを受け、入倉孝次郎(京大防災研)は、2.3について、米国地震学会誌(BSSA)の論文を観測・理論・半経験的方法に3分類し、地盤条件の影響の評価、伝播経路の減衰特性と距離減衰曲線、不整形地盤での震動特性の計算法、地盤構造と震源を考慮した地震動の計算法および観測と理論のハイブリッドモデルに基づく半経験的方法を説明することにより、米国における最近の研究動向と到達点および今後の課題を述べた。武村雅之より、弱震動と強震動では地盤特性が異なるのではないかとの質問があり、Tuckerの研究を基にして、米国では地盤の非線形性まで考えなくともよいとの結論がある旨回答があった。岩崎好規(大阪土質試験所)は、米国土木学会が開催した「地震工学と土質力学」の会議を報告し、米国では観測事実から地盤の非線形性の結果を積み上げる傾向にあるとの意見を述べた。

工藤一嘉(東大地震研)は、2.4において、ESGワークショップの目的・経緯を説明した後、テストフィールドとして指定されたTurkey Flat(米国)と足柄平野(日本)の紹介、各研究分野からの希望や研究の紹介、今後の活動方針の議論を中心にして、第2回ワークショップ(1988年8月1日)が日本で開かれる予定であると述べた。司会の武村雅之は、地震・土質・土木などの分野別にあるいは国際的にも地盤震動に対する取り組み方が異なるので、ESGワークショップを開催する意義は高いと指摘した。

何を観測できたか—千葉県東方沖地震の観測記録から—

午後の司会者・萩尾堅治より、千葉県東方沖地震の記録を用いて地盤条件が地震動特

性に与える影響を分析した結果を話題とし、討論を進めて頂きたい旨挨拶があつた。

まず、武村雅之は、地震震源、発震機構と余震分布、震源パラメーター、テクトニクスとの関連による発生原因などの観点から、千葉県東方沖地震の概要を説明した。

太田外気晴（鹿島技研）は、3.1で、多数地点の強震記録を利用して、1) 最大加速度の地盤分類による差異・距離減衰、2) 表層地盤における増幅（スペクトル・歪）と3) 最大加速度の方位依存性を中心とした話題提供を行った。さらに、ESGにかかわる研究課題と検討の方針を明確にした後、世界の研究者と共同研究を進めていく必要性を、また、ESGの日本側委員会では地盤動の歪依存性を取り扱った方がよいという印象を述べた。田中貞二（清水大崎研）より、最大加速度の距離減衰曲線は1種地盤とそれ以外の地盤種別でかなり異なるが、層別因子を含む解析をすると、田中らと太田らの結果はよく対応している旨の意見があった。

山田真は、3.2で、瀬尾和大（東工大）、横田治彦（清水技研）と共に、平面的抜かり・深さ方向分布のデータから何が言えるかを目的に、3機関の記録波形を分析した結果を報告した。直下・浅発地震（房総半島東岸、東京都東部、伊豆大島近海）との比較がなされ、千葉県東方沖地震は震源がやや深いために際だった特徴が現れにくく、後続位相は顕著でなかったが、長周期成分に注目すると後続位相も認められること、広域観測データによって地震波の伝播過程がわかること、余震記録を用いた本震地動の再現性がよいことや多地点の記録の特徴が述べられた。石田勝彦より、目的の異なる機関のデータの利用限界について質問があり、波形比較の際、絶対時刻を精度よく合わせる作業が難しい旨回答があった。

井上涼介（茨城大）は、3.3で、1倍強震計記録に注目し、数値化と補正によって求めた地動変位と加速度フーリエスペクトルの一例を紹介した。さらに、ダブルカッフル型点震源モデルによる実体波初動部の

解析結果に対し、観測点の地震モーメントを推定することにより、本多モデルは第1近似として利用可能だが、3次元的構造の不規則性による散乱の効果を考慮する必要があると述べた。岩崎好規より、銚子におけるS波の継続時間は東京に比べて長いのかとの質問があり、ほぼ同程度かやや短いとの、さらに震源時間はほぼ同じかとの再質問に対し、1次近似的にはほぼ同じである旨回答があった。

佐藤暢彦（東大生研）は、3.4において、東大生研千葉実験所内にある観測システムを紹介し、観測結果として、1) 地表層での増幅率の見方には十分注意を要すること、2) 地表層の挙動はおよそせん断振動で説明できること、3) 観測地域内における加速度波の位相の対応はよいが、最大振幅にはかなり大きなばらつきがあること、4) 300 gal を越しても地盤の振動特性や地盤動と地盤歪の関係は変わらないこと、5) 地盤歪波形は埋設管の袖歪波形とよく似ていること、6) 地盤動の破壊強さを評価するには加速度よりもSI値が適切であることを示した。横田治彦より、建物（弱小モデル）の基礎上の最大加速度について質問があり、現在まだ把握していないとした。岩崎好規より、SI値が25 kine より大きい地震は特徴的であるかとの質問があり、被害と地震記録は必ずしも直結しないが、SI値と最大加速度の関係はある旨回答があった。

萩尾堅治は、各機関より提供された千葉県東方沖地震観測資料に基づき、1) 資料集作成の経緯、2) 感想、3) 情報の見方に対する視点と4) 今後の資料集のあり方について報告した。

総合討論

引き続いて、総合討論に入り、司会の石田勝彦は、地震記録を具体的にどのように捉え、正しく認識すればよいかという視点のもとで、話題提供を促した。

瀬尾和大は、地震動観測の目的を明確にしてどのような体制を整えればよいかを知ること、一点ではなくアレー観測によって波の伝播過程を調べる必要性を強調し、事例を上げて記録の正しい認識法を説明し

た。

木下繁夫は、関東平野の基盤震動から伝播経路と震源スペクトルを調べ、 $Q\omega^{\alpha}$ の関係を指摘した。横田治彦は、現在、地震をミクロに捉えることが中心になっているが、設計の立場とはかなりの隔たりがあることなどを指摘した。

大川出（建設省建研）は、仙台の高密度アレー観測から何を得ようとしているかという質問に対し、耐震設計用地震動の特性把握や建物の破壊原因の解明を目的として実施していると述べた。武村雅之は、地震は震源・伝播経路・地盤のように分解して捉えると理解しやすいとした。鏡味洋史は、東京101などの地震記録をいまだ設計用に利用しているのは波形合成法などが必ずしも十分完成していないことに原因があると発言した。

統いて、北川良和（建設省建研）より、波形合成法はスマートだが、誰が実施してもうまくいくのかとの質問が出された。渡辺孝英（清水大崎研）は、ポイントは小地震の選び方にあるとし、建設予定地点で要素波が得られれば設計に利用可能な旨回答した。岩崎好規は、小地震と大地震のスケーリング則りや要素波の足し合せ方が必ずしも明確になっていないことに留意し、ケーススタディを積み重ねていくことが重要であると述べた。武村雅之は、合成法は地盤の非線形挙動に対して成功しない事例があり、合成の際にも記録を正しく認識する必要性があると指摘した。太田外気晴より、多数の機関でデータについて討論をすることが重要だと感想が述べられた。

まとめ

最後に、北川良和は、1) 解析の発展に伴い、生きたデータをどのように使うのかを考える、2) 目的を明らかにして正しい目で捉える、3) 地盤定数を適切に評価することが重要だと総括した。さらに、今後積極的な観測によってグループを拡め、記録をじっくり眺めることが大切であると發言した。

司会の石田勝彦は本日のシンポジウムで観測班が拡がることを期待したいと述べ、閉会した。（記録：野田茂／鳥取大学）

「微動の工学的利用について—その現状と可能性—」

標記シンポジウムが、1989年7月13日に建築会館ホールで開催された。約220名余の方が参加され、瀬尾（東工大）、横田（清水建設技研）、若松（大林組技研）の司会で話題提供および討議が行われた。

まず、本シンポジウム開催の趣旨説明に立った地盤震動小委員会主査の長橋（長崎経科大）から、地盤震動シンポジウムで今まで扱われた微動についての話題を振り返り、工学的に頻繁に利用されている割には謎の多い微動について、本シンポジウムでその発生源から工学的利用の在り方に至るまでの幅広い議論が行われんことを望むという要望が述べられた。

第一部は、「微動の基本的性質について」と題して4人の話題提供が行われた。最初に講演に立った宮崎（愛知佐織工高）は、「微動研究の現状」（多賀（名大）共同発表）と題し、従来の微動の研究をその本性を追究する研究と工学への応用を図る研究に分類して紹介した。さらに宮崎によるやや長周期微動の研究成果として、瀬尾平野での微動の特性およびモデル解析による平野の振動特性の評価結果等が紹介された。瀬尾平野における微動のスペクトルには、それぞれ振動源依存および地盤特性依存と推定される2つのピークがみられるとのことであった。講演後、入倉（京大防災研）から、平野における微動の特性を解析的に説明する際には、基盤から単なるSH波の入射を考えるだけでなく、微動の発生過程も考慮のうえ表面波の入射も検討すべきではないかとのコメントが出された。

次に小林（竹中工務店技研）は、「やや長周期微動の基礎的性質と地下構造推定への応用」と題して、地下深部構造推定への応用を目的に、微動の発生源を追求するため微動の振幅と人間行動、風速、気圧との関連を明らかにした研究を紹介した。対象とした地域は関東平野で、それによれば周期1秒以下の微動の発生源は人間行動で、

構造委員会振動運営委員会地盤震動小委員会
いわゆる當時微動に対応する。また1から2秒は風浪、2秒以上は外洋波浪（うねり）に起因すると結論づけた。小林は以上の結論から、やや長周期微動を強い周期特性をもつレーリー波と見なし、発生源の特性に依存しない上下動と水平動とのスペクトル比から地下深部構造を推定する試みを示した。講演後、小林は、長橋の質問に答え、微動の励起される限界周期は5秒程度であるとの見解を述べた。

次に鏡味（北大）は「やや長周期微動による深層地盤特性探索の問題」について実例をもとに解説した。それによれば、過去の微動観測の結果は3ケースに分類され、1番目は堆積層の卓越周期が確かにスペクトルに見える場合、2番目はスペクトルの振幅変化のみが堆積層の変化に応じて見える場合、3番目は深層地盤構造との関係らしきものが何も見られない場合である。鏡味によれば3番目の場合も意外に多く、その原因としては、発生源で励起されるやや長周期微動の周期帯が狭いこと、基盤と表層地盤との速度コントラストが小さく地盤の卓越周期が明瞭でないことが考えられるとしている。今後高精度の微動の活用をするためには、微動観測に使用する地震計の特性向上、アレーによる微動観測、スペクトルの卓越周期のみにとらわれない解析、地震観測の併用等が必要であると指摘した。

松島（北大）は、「長周期微動の利用による深層地盤構造の推定」（岡田（北大）共同発表）と題し、鏡味がその重要性を指摘したアレーによる微動観測と、スペクトルの卓越周期にとらわれない地下構造推定法を示した。方法はまず微動の同時アレー観測を行い、その記録をもとに空間自己相關法や周波数一波数法を用いてレーリー波の分散曲線を推定する。さらに分散曲線からインバージョンによって地下構造を推定するものである。講演後、インバージョン

の際の地下構造の初期モデル依存性（山中（東工大））および解析における地盤の平面層仮定の妥当性（久田（早稲田大））について議論がなされた。

昼休みの後、特別講演にうつり、まず金井（元日大）による講演が行われた。講演の詳細は別途『建築雑誌』に掲載されるのでそちらを参照願いたいが、微動にまつわる数々の興味深い歴史的エピソードの紹介がなされた。また微動研究を混乱なく理解するうえで、(1) Observation Field の研究と (2) Source や Path に関する研究に分類する視点の重要性が指摘された。

引き続き、「當時微動測定方法の問題点」と題して、長年當時微動の測定にあたってきた長田（東大震研）は、當時微動に対する風や交通機関等の外乱の影響や地震計の設置状況の影響等を数々の測定記録をもとに解説し、微動測定のノウハウを経験的な立場から明らかにした。

第二部は「微動観測とその工学的利用」と題して4人の話題提供者が講演を行った。まず最初に野越（秋田大）は「微動のマイクロゾーニングへの応用」と題して主に短周期微動（當時微動）の工学的応用について話題提供を行った。そのなかで、工学的色彩の強い微動の応用においても微動の基礎的性質の研究が不可欠であるとし、短周期微動は上下動がレーリータイプの表面波、水平動はラブ波とS波の両方の性質をもっているとの考え方を示した。工学的応用例としては、地震による震度分布と微動の関係、浅層地下構造と微動の関係、液状化被災地域の微動特性等について述べた。講演後、入倉、工藤（東大震研）は、液状化する地盤をあらかじめ微動の特性により予測しようとする提案に対し、土質や地下水の状況にも関連する液状化現象を微動のスペクトルのみから予測することに対する疑問が出された。これに対し、野越は地下水位や地層構成等他のデータとの組合せは必要だとしつつも、経験的に液状化する地盤の地層構成と微動特性に相関があることを強調した。

次に入倉は、「微動観測による基盤構造の不規則性の推定」と題して、断層により

基盤が不規則に変化している場合、アレーにより観測された微動の振幅変化が段差の位置や大きさの評価に有効であることを実例および理論的検討結果によって示した。理論的結果によれば、基盤の不規則な変化に対し、従来よく注目される微動の卓越周期が必ずしも変化しない場合があることを同時に指摘した。先に話題提供された松島による方法も踏まえ、微動による地下構造の探査にはアレー観測が不可欠であることを強調した。講演後、工藤は工学的利用の面から見た場合アレー観測には大変な労力がかかるということを問題として取り上げた。それに因し、野越は、工学的利用に際してはアレー観測ができない場所もあり、アレー観測ができるところで微動の本性を調べ、応用には1点観測もやむなしとの立場を示した。これに対して入倉は、微動測定を物理探査法の一つとして位置付けると、いまだに誰でも使える技術になっているとは思えない。このため、波動論の専門家以外の人がデータ解析をすることを想定すれば、誤った解釈が起こりやすい1点観測はやめ、アレー観測が必要条件であると反論した。

次に郁(Hao)（東工大）が「中国における微動の工学的利用の可能性について—唐山及び北京での測定事例から—」(佐間野、瀬尾(東工大)共同発表)と題し、中国での微動測定の実例を紹介した。1976年の唐山地震の際に、低震度異常域となった正田周辺地域の地下構造を調べるために発破実験が行われ、その際行った微動測定の結果について述べたものである。発破実験により求められた地下構造とやや長周期微動の卓越周期が定性的に対応することが示された。また同様の結果が北京での微動測定においても得られていることが示された。

最後の話題提供として瀬尾は「微動観測とその工学的利用—メキシコ・アメリカの事例から—」と題して講演した。その中で、しかるべき計器さえ設置すれば、微動はどこでも測定できるということが、微動を大変わりにくくしている原因だとし、微動から地盤特性を引き出すためには、微動をいかに測定するか、測定結果を

いかに読み取るか、の手順を交互に繰り返し、各地の地震・地盤環境に見合った最善の方法を見つけることが重要であると指摘した。講演後、入倉は、瀬尾がメキシコ盆地の微動は同じ数秒の卓越周期をもつものでも場所によってその発生源が異なると指摘したのを踏まえ、微動を地盤の伝達関数とみなす場合、発生源についての配慮が必要であるとコメントした。

このあと引き続き総合討論に入った。討論の議題は(1)微動の正体、(2)工学的利用上の限界の2点に整理できる。微動の正体については主に短周期微動に議論が集中した。まず、中村(鉄道総研)は首都圏における微動の観測結果をもとに、上下動は表層地盤で増幅され難く言わば基盤の動きを表し、水平動との比は相対的に、表層地盤の増幅特性を示すと主張した。これに対し、小林(東工大)はアルメニアでの観測事実をあげ、微動の上下動成分が大きくなる場合もあるとし中村の指摘に疑問を示した。また入倉は波動論的にどのような波を考えても、水平動と上下動の比が表層地盤の増幅率にはなりえないと反論した。次に久田は、従来から常時微動をSH波として取り扱うことが多いが何故SH波だと考えられるのかとの疑問を提起した。これに対し、入倉はSH波であるかどうかは多分に経験的なものであるが、短周期微動に対する分散性が決まらない、発振源が地表にあっても表面波が地盤の不均質性によりS波に変換される可能性もある等のことからS波の可能性も十分考えられるとした。これに対し、岡田は分散性が決まらないのは解析の際に仮定するスペクトルの定常性が原因であり発振源として地表をたくものが多いくことを考えると短周期微動の正体は表面波である可能性が高いと主張した。太田(鹿島建設技研)は、この問題に対し微動測定を地中と地表で同時に行うことを探査した。これに対し田中(清水建設大崎研)は、鉛直アレーによる過去の観測経験からその場合でも複数の孔における観測が必要だと述べ、短周期微動の複雑さは多数の振動源があることによるため、夜間に1つの交通機関を走らす等して振動源

が1つしかない場合の特性をまず調べる必要があるとの意見を示した。野越もこの意見に賛成し、興味ある人はどんどん微動特性の解明にあたって欲しいと述べた。

次に、利用上の限界に討議が進み、武村(鹿島建設小堀研)は大陸の中央部等海岸から遠く離れた地域での地盤調査を想定し、そのような地域でもやや長周期微動が観測されるかと質問を行った。これに対し、岡田は過去に観測されたという報告があることを、金井は Gutenberg の報告を引用し脈動の原因は波浪だけではないことをあげて、大陸中央部でもやや長周期微動利用の可能性があることを指摘した。次に、中村は微動を単なる加振機と考えればその正体を特定することなく工学的に利用できるのではないかとの考え方を示した。これに対し、工藤と岡田は振動論的に取り扱える建物についてはそのような考えが成り立つ可能性があるが、横からの入力がある等周辺と一緒にある地盤ではそうはいかないとの見解を示した。討議の最後にあたり小林(東工大)は、微動はあくまで地盤調査の主役でなく、あくまではかに調査の手段がない場合に利用してきた。外国ではまだまだそのような状況が多く微動に期待せざるを得ない場面も多い。それらの要求に的確に答えてゆくためには、微動の適用可能な範囲を明確にしておく必要があると述べた。

以上の話題提供および討議を踏まえ地盤震動小委員会幹事の北川(建研)はシンポジウムのまとめとして、微動は比較的身近に測定され利用されることが多く、本シンポジウムにおける多数の参加者の活発な議論がものがたるように関心も非常に高いテーマである。しかしながら、現象的には未解明の問題点も多く適用範囲も明確になっていない現状である。中途半端な理解はかえって誤った解釈を与えるため、利用にあたっては十分な見識が必要であるという旨意で締め括り閉会した。

●武村雅之／鹿島建設小堀研究室

金井清先生の語る常時微動あれこれ

構造委員会振動運営委員会地盤震動小委員会

ここに掲載されたお話を、去る7月13日に建築会館ホールで行われた第17回地盤震動シンポジウム「微動の工学的利用について—その現状と可能性—」での金井清先生の特別講演によるものです。

*

実は、主査（地盤震動小委員会）から裏話をしてくれということがありましたので、簡単に引き受けたわけです。ところが、学会の予告によると、特別講演となっておりますので驚いたわけです。結局、ご期待にはそえないと思いますけれども、以前「地震工学振興会ニュース」に書いた中で、今日の主題に関係した部分を拾い上げて話をさせていただきたいと思います。

有名なベン・グーテンベルグ（B.Gutenberg）という人をご存じだと思うんですけども、彼の学位論文は脈動であったわけです。1911年古い話です。私は、このベン・グーテンベルグと2回ぐらいいやく話をする機会がありました。初めて会いましたのは、戦後間もなく、彼が地震研究所に来ましたときに会ったわけです。私もそのときはまだ40ちょっと前ぐらいで、若氣のいたりで「ロード・レイリー（Lord J.W.S.Rayleigh）」が予告した波をレーリーウエーブと言っているけれども、いま地震で言われているレーリーウエーブは、ロード・レイリーとは関係ないのではないか。ロード・レイリーの予告したのは、半無限彈性体の表面に速度一定で伝播する波があると言ったので、いま言われているディスパーシブな波は、妹沢（克惟）が初めて発表したので、レーリーウエーブではないのではないか」と言いました、「うーん」と言っていました。

ご承知だと思いますけれども、学士院は会員でなければ発表できません。妹沢先生が、この波を初めて学士院で発表したときは会員でなかったものですから、寺田（寅彦）先生が発表を読まれました。妹沢先生はそれにM2波という名をつけたんですが、寺田先生は、「これはおかしいよ。妹沢ウエーブでいいんじゃないか」と言い、長岡（半太郎）先生が、「うん、それいいじゃないか」と言いました。けれども、妹沢先生は、聞いてきかないふりをしておられてM2波で発表されたわけです。

戦争中に妹沢先生が亡くなられて、戦後になつて長岡先生から私に「妹沢君も死んだことだし、寺田君も妹沢波でいいんじゃないか」と言っていたんだから、君、妹沢波で発表したらどうか」という話があったわけです。その当時の地震学者の主だった人の意向を聞きましたところ反対する人は一人もいなかっただけで、「ああ、いいよ、いいよ」と言う積極的な人もそうたくさんではなかったという状態であったのですから、私

が独断でM1波のほうをレーリー波として、M2波を妹沢波という名をつけたわけです。今日にいたっても、これは失敗したと思うんですけども、その当時、長岡、寺田岡先生のおっしゃったように、レーリー波を抹殺して妹沢波としておくべきであったと、今でも反省しているわけです。

ついでですけれども、その当時、地震研究所にいた精衛工学の泰斗であった西村（源六郎）教授が最も積極的で、絶対に妹沢波にしなければ駄目だという意見であったわけです。今日も、レーリー波という名前がたくさん出るんですけども、何かちょっとレーリーの予告した波との混亂があるように感じられるところがあるわけです。

二度目にグーテンベルグに会ったのは、私がCALTEC (California Institute of Technology) に部屋を借りていたときです。これは、ハウスナー（G.W.Housner）がグーテンベルグと喧嘩させようと思って会わせたわけです。誰に、どうして頼まれたのか思い出せないんですけども、松代で取れた地震記録をグーテンベルグに会ったら見せてやってくれと頼まれていたので、それを見せましたところ、すぐにグーテンベルグは「ああ、またレーリー波の話か」と言いました。「いや、今日はレーリー波の話ではないんだ」と言いましたが、また妹沢波の話をするとかと思ったらしい。

私も、昔は地震学者の間では表面波男と言われていて、それに没頭していたのですから、表面波の話をグーテンベルグとどんどんしていたわけです。

すると、途中でハウスナーが今日のお二人の会合は、そういう意味ではない。地盤の話をしてももらいたいんだと盲々たわけです。そうしたら、グーテンベルグは色をなしました。30年ぐらい前ですから、いま言葉を思い出せないんですけども、地震工学に間にがないとか、興味がない

というような軽らかい言葉ではなかったような感じがするんです。とにかく、「工学が嫌いなんだ」といった印象が残っています。そして、「帰る」と言って、立っちゃったんです。「まあまあ」ということで止めたところが、「それでは、1930年代に書いた論文のオリジナルなレコードを金井に貸すから、それを煮て食おうが、焼いて食おうが自由に使ってくれ。どんな使い方をしても文句は言わないから」ということであったわけです。

それで、喧嘩別れでなく済んだんですけども、その2ヶ月ぐらい後の1960年の1月にグーテンベルグは亡くなりました。

グーテンベルグの兄弟分のリヒター（C.F.Richter）にその話をしたら、それはおれが探しでやろうということだったんです。けれども、結果リヒターから返事があって、「グーテンベルグのデータの中からハウスナーあたりのアメリカの

地盤工学者が問題にしている1930年代の論文のオリジナルレコードを探し出すのは人件費の高いアメリカでは無理だから諦めてくれ」ということでそれなりになつたわけです。その当時アメリカでは、本人はそうではなかったらしいんですけども、グーテンベルグは地盤問題に対しては否定的だと考えられていきました。少なくともアメリカの地盤工学者たちは、日本で言えば石本流の考え方には否定的だと考えていたわけです。今でもそう思っている人が多いんです。

それで、そのままにしておいてはというので、NSF (National Science Foundation) のお金でアメリカ西部の5州で強震計の設置場所、ならびに将来強震計を置くところ、あるいはグーテンベルグのフィールド、その他普通の地震の観測場所で、常時微動を測ることになりました。ここに見えています田中（貞二）君とUCLA (University of California, Los Angeles) の人と、その当時のUSCGS (U.S.Coast and Geodetic Survey) の人などで、300ヶ所で常時微動を測ったといいきさつがあったのは、もとをただせば、グーテンベルグから始まった話であったわけです。

もう一つ、今日の話に關係する真話ですけれども、いわゆる「卓越周期」は石本（巴四雄）先生が言い始めました。その前に、末広（恭二）先生や今村（明恒）先生や火森（房吉）先生も、地震にこういう周期があるようだということは言つておられたんですけども、それを系統的にやらされたのが石本先生だったわけです。その方法論として、石本先生は頻度曲線というものをつくられた。頻度曲線にはピークがあるということで、そのピークを称して卓越周期と名をつけられたわけです。

ところが、頻度曲線のピーク位置が各場所について一定であるということは、簡単にでたものではなかったんです。というのは、今までゼロクロッシングの方法でますやられたんです。いちばん最初に本郷の東大の構内と丸ノ内の中ビルの機でやられたんですけども、地震ごとに必ずしも一致してないんです。その当時、我々の仲間では石本先生のことを、フランス学派と言っていました。いわゆるインスピレーションが非常に強い先生で、あの先生のいろいろな研究はほとんどインスピレーションでした。それに封したのが妹沢先生の積み重ね、いわゆるドイツ学派的と言いました。

石本先生は、卓越周期があるのだということインスピレーションがあったわけです。ですから、それが出てこないので、地震ごとに変わるのは解析の方法が悪いか、何かがあるのだということでトライ・アンド・エラー・メソッドでやられたのが、ゼロ線に平行線を引き、その平行線が波を切る間の時間を読むことでした。もちろん先生がやられたわけではなく、お手伝いの人がやったわけです。平行線をいろいろな幅でやってみると、ある幅

で、だいたいと音でいいか、全くと言でいいか、先生は全くとおっしゃっているんですけれども、ある場所については一定のところに出た。これを「岸越周期」と名づけられたわけです。

そのお手伝いをした一人が鈴木正治（助教授）さんで、西村源六郎先生のところにいて、早く死んだ人なんです。この人と私は連名で二つ三つの研究もやりましたが、その人は早く死んだので、その方法を聞く暇がなかったし、書いたものにもないんです。その後、石本先生の直弟子の地盤予知の萩原（尊禮）さんとか、名古屋大学にいらっしゃった飯田（汲井）さんにお話を聞きますと、「そういう話を聞いた記憶は確かにありますけれども、どういう方法でやったという記憶はない」ということで今日それを探すわけにはいかないわけです。とにかくゼロクロッシングとか何か簡単にできたものではないんです。

今は頻度曲線をあまり使う人はいないんですけども、戦後の一時期はたくさん的人が頻度曲線を使っていました。それを特に工学の人たちがやってみたところ、地震ごとに迫っています。「石本先生は嘘をついたんだ。各場所で頻度曲線の指標になる周期は一定だなんてとんでもない。やるたびに違う」という不満もあったんですねけれども、それは当たり前のことで、そう簡単に出たものではなかったわけです。私が戦後、常時微動に关心を持ちはじめて、いちばん頭に浮かんだのが石本先生のことです。同じ場所で、同じことをやって、同じものが出来ることをやろうとしたんですねけれども、常時微動にその方法を使う意味があるのかどうかはわからぬということで、今日おみえになっている田中君がさんざん苦労したんです。とにかく、石本先生のやられた本郷と九ノ内との頻度曲線と同じようなものが出来るような肝臓と解析方法を常時微動について試みようとしたしました。これもトライ・アンド・エラーで、時間帯も長くやればいいというばかりではなくて、何分間やったらいいだろうかというようなことをやり始めたのが常時微動の研究の発端であったということです。

時間がだいぶたちましたが、あまりそういう話ばかりしていき申し訳ありません。そこで、私の気のついた今日の話に関わる言葉をご紹介します。微動、脈動、アーストリマース（Earth tremors）、マイクロサイズムス（Microseisms）、ボーデンウンルヘ（Bodenruhe）、パルセーション（Pulsation）。順序は不同なんです。いちばん初めがパルセーションだったかもしれません。とにかく、日本語では二つ、微動、脈動があり、英語が三つ、ドイツ語が一つです。私の感じでは、土地の震動ではドイツ語が一番いいような気がするんです。というのは、アーストリマースは辞書を引くと、地震もあり脈動にもなっています。どうも曖昧なんですね。日本語でも昔、微動といったものもあり、脈動といったものもあり曖昧です。

このシンポジウムの予告にも、言葉にいろいろ

混乱があると書いてありますけれども、初めから混乱があったわけです。ただ、これは私が数十年前から考えていたんですけども、微動を対象とする研究にはこれを二つに分けたほうが混乱が起こらないのだと思います。一つは（a）オブザベーションフィールド（observation field）のことを調べよう。もう一つは、（b）微動のソース（source）とか伝播のパス（path）を調べようとする目的を二つに分けて、これをはっきりさせて2いたほうがいいのではないかと、昔からそう考えていました。

いま南カリフォルニア大学にいる安芸（敬一）君とも1960年代に講論をしたことがあるんですけども、最近彼が国立防災科学技術センターで火山微動について特別講演をやりました。彼のペーパーによりますと、二つにはっきり分けています。彼はオブザベーションフィールドに対して、同じ言葉ですけれどもレコーディングサイトという言葉を使っています。レコーディングサイトに関する研究と、ソース、パスに関する研究の二つに分けて話しておられます。その点は、私と安芸君は一致しているんですけども、こう分けると、後のことが非常に整理しやすい。しかし、これを完全に分けることはできっこないです。オブザベーションフィールドのことを知るためにには、ソースやパスのことがなければいけない。ただ、主目的がこっちにあるんだということがはっきりすると、あとやつていくことが混乱を招かない。別の言葉でいえば、同じ土俵の上に乗ることができるのではないかと思っています。安芸君も同意見のようです。

そういう意味で今までやってきたのをざっと並べますと、（1）長周期微動に対してそれを（a）オブザベーションフィールド的に言うのが大森先生や和達（清夫）先生の脈動です。それを英語でバルサトリー・モーションズ（Pulsatory motions）と言っています。脈動について今の若い人はそうでもないんですけども、我々の年代の外国人は（a）目的的脈動については日本流の脈動とか、大森式脈動と言っておりました。それから（b）ソースとかパスを主目的とするものをウェーハート流の脈動とか、ヨーロッパ流の脈動という表現をしていました。

日本で始まった脈動いわゆる長周期微動は（a）だったわけです。大森先生の1909年か1908年に出版されたペーパーには、脈動というのは地盤の固有振動だとちゃんと出ています。それから大森先生より1年後に出版されたウェーハート（E. Wiechert）の論文には、脈動は波が海岸にぶつかるから出るんだということを書いていて、初めから全然違っているわけです。その後、戦後ですけれども、地震研究所の中に、地盤研究会ができて、ここでは1秒以上のものを脈動と見て、それから1秒以下のものを常時微動としています。地盤研究会は研究者の4、5人で、自分たちの研究費の中から金を

出し合ったちっちゃな会だったんです。そこで、守備範囲を決めるときに、こういう定義をつくったわけですが、「常時微動」はずっとこのまま生きています。別に學問的な分類ではなく、予算を取るための作文を書くときに、こっちは1秒以上、こっちは1秒以下としたわけです。ソースやパスを対象とした方の脈動がウェーハートの脈動です。日本では岸上（冬彦）さんとか三東（哲夫）さんが、こっちはやっております。岸上さんとか三東さんは、大森先生や和達さんがやられたのと違うことをやっていたんです。

それから短周期微動のほうです。（a）の方は大森先生が1908年に長周期と短周期に分けられて、長周期は4秒ないし8秒を脈動と看され、1秒以下を微動という名前をつけられたんです。これを引き継いで石本先生が微動というので研究された。これが今常時微動のものです。これをマイクロトリマース（Micro-tremors）といいます。マイクロトリマースにハイフンがあります。われわれが「常時微動」をやりだしたというわけではないんですけども、このときにはマイクロトリマースのハイフンを取ったんです。

これは、1960年のアメリカの地質学会の大会でマイクロトリマースというので発表した時、亡くなったデューク（C.M.Duke）等が、アメリカではこういう方面の発表は初めてなのでみんながわからないだろうからと、その言葉をどうすればいいか考へてくれたわけです。少なくとも固有名詞にしたほうがいい。普通名詞ではないという印象を与える。そのためには、ハイフンを取ったほうがいいということになったわけです。大森先生はハイフンをつけたけれども、ハイフンをつけると普通名詞になってしまいます。固有名詞にするためにハイフンを取らうということです。それから、このsは複数のsではないんだ、常時微動は英語でこういうsなんだ、という注釈つきで、常時微動をMicrotremorsという英語にしたわけです。

それから（b）の方は、複種微動という人がある。複微動という人がある。これはおかしいんですけれども、自然微動といった人もいるわけです。それから安芸さんは（b）の目的も常時微動、英語ではマイクロトリマース（Microtremors）と言っています。

誤解のないようにもう一度繰り返しますと、（a）をやる人は（b）をやってはいけないとか、（b）をやる人は（a）をやってはいけないということではありません。どうせこれらは間違なければできないことなんですから、誤解がないように。このように整理したら、混乱が多少避けられるのではないかと思うわけです。30分では常に短し深に長じで、4分残りましたが、これで終わらせいただきまます。

●武村雅之／鹿島建設小堀研究室

