

第33回 地盤震動シンポジウム(2005)報告

佐藤吉之*

第33回地盤震動シンポジウム(2005)「地震動予測地図を考える—地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)—」が日本建築学会地盤震動小委員会主催で2005年11月18日(金)10:00-17:30、建築会館ホールにて約170名の参加者を集めて開催された。

司会は、午前の部は早川崇(清水建設)と飛田潤(名古屋大学)が、午後の部は小山信(建築研究所)と高井伸雄(北海道大学)が、総合討論は加藤研一(鹿島建設)と久田嘉章(工学院大学)がそれぞれ担当した。

主旨説明

はじめに地盤震動小委員会主査の川瀬博(九州大学)より、今回のテーマに関する主旨説明が行われた。平成14年から「地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか」を中期テーマに据えたシンポジウムを実施しており、今回はその4回目である。中期テーマでは、兵庫県南部地震以後に進展した強震動予測技術を実務(耐震設計)に展開・活用することを目的としている。第1回から第3回までのシンポジウムの概要の紹介の後、今回のテーマは構造設計における地域係数について検討することを目的とし、題材としてその基礎データとなる地震動予測地図を取り上げたという背景の説明がなされた。

セッション1

セッション1では地震動予測地図の事例紹介として5人の講師による講演が行われた。

藤原広行(防災科学技術研究所)は「全国を概観した地震動予測地図について」と題して、2005年3月に地震調査研究推進本部(以下、推本)により公開された確率論的および震源断層を特定した地震動予測地図に関する説明を行った。予測地図作成のフローを説明しながら、その中で用いられた地震発生確率、距離減衰式のばらつき等に関する問題点について説明がなされた。Web上で公開した予測地図の閲覧システム(J-SHIS)には30万件近いアクセスがあり、社会からの関心が高いことが紹介された。今後の課題として、結果としての地図やハザード曲線だけではなく、その作成の基となる震源モデルや地下構造モデルの公開を行

い、データを共有する必要性について述べられた。その具現化策の一つとして統合化地下構造データベースの構築を挙げ、来年度以降の公開を目指して準備を進めていることが紹介された。

額田一起(東京大学)は「海溝型地震の震源モデルと首都圏の強震動評価」と題する講演を行った。まず首都圏で想定するべきシナリオ地震についての説明の後、海溝型地震の震源のモデル化についての説明が行われた。海溝型地震では同じアスペリティの破壊が繰り返されるといふ説が提唱され、一つ前の地震の震源モデルが得られている場合には、想定震源モデルとしてそのモデルを適用できること、過去の地震のモデルが得られていない場合には、特性震源化モデルの手法を用いて震源断層をモデル化できることが説明された。また最近得られた知見として、大大特プロジェクトにおける反射法によるフィリピン海プレート上面形状のイメージングが紹介された。その成果の一つとしてプレート上面が東京湾北部では従来のモデルよりも約10km浅く、同地域に想定されている東京湾北部地震の地震動予測値に影響を与える可能性が示された。またプレート上面の地震波反射率を1923年の関東地震の断層モデルと比較すると、高い反射率を示す領域はアスペリティの位置に対応することから、震源モデルの構築において、反射率から想定地震のアスペリティ分布を予測できる可能性があることが紹介された。

関口春子(産業技術総合研究所)は「内陸地殻内地震の強震動評価—上町断層を例として」と題して動的シミュレーションによる断層破壊の合理的予測に関する講演を行った。まず上町断層を対象とした地震動シミュレーションについて、計算のフロー・地下構造モデルの概要を説明した後、動的シミュレーションに関する説明が行われた。この手法では活断層で観測される変位量に基づいて断層面上の不均質なすべり分布を仮定する。次にそのすべり分布に基づき静的応力降下量の分布を算出、次いで断層面上の初期応力場と強度の分布を設定し破壊の動的シミュレーションを実施する。講演では破壊開始点を変えた場合の破壊進展のパターンの違いについて見られる等の説明がなされた。本手法を適用することにより従来よりも合理性のある

* (株)竹中工務店 技術研究所

地震シナリオ（破壊領域、すべり分布）の設定ができることが紹介された。

釜江克宏（京都大学）は「南海地震における近畿圏の強震動予測」と題する講演を行った。研究の背景として、長周期地震動の評価およびその影響としてのスロッシングなどの問題があることを挙げ、2004年の紀伊半島沖で観測された地震記録を例として具体的な説明が行われた。次に南海地震を想定した差分法による地震動のシミュレーション事例を紹介し、大阪平野内における予測地震動に関して評価を行った。その結果、大阪平野では周期5～6秒に卓越周期が見られること、六甲アイランドでは他地点に比べて振幅が顕著に大きいことが確認された。2004年の紀伊半島沖地震の記録でも六甲アイランドは多地点に比べて振幅が大きく、おそらく盆地端部の影響の寄与が推定される。また震源の影響度としては、3つのアスペリティのうち、大阪平野の方向に向けて破壊が進行する一つのアスペリティの寄与度が大きいことを述べ、断層破壊過程の設定の重要性を指摘した。次に建物への影響として、既存高層ビルの一次固有周期に関して神戸側では2～3秒が、大阪側では5秒程度が多いことを挙げ、大阪では予測地震動の卓越周期に近い建物が多いことから、より深部の地盤構造を考慮した入力地震動評価の必要性を示した。また最近の地震では経験されていない非常に継続時間の長い揺れが予測されたので、それに対する人々のパニックを防止するような準備も減災戦略として重要であるとした。

特別講演

特別講演では福岡大学の多賀直恒教授をお招きし、「福岡地震と地域係数」と題して、お話しいただいた。多賀教授はまず不確定性のある地震活動の地域性・周期性を設計体系の中に取り込んだものが地域係数であるとの説明を行った後、今回の福岡の地震のような「想定外」の地震を耐震設計の中でどのように扱うべきかについて論じた。既存の住宅建築4400万戸のうち耐震性が不足したものが約1400万戸あり、想定外の地震による被害の大半はこれらの建物から生じることが予想される。法体系や地域係数を見直してもその対象は新築の建物に限られるため、防災対策としては既存の建物の耐震化が最も重要と考えられる。しかし、既存建物の耐震化については法律上の強制力が無く、思うように進んでいない。その一因として、日本では不動産の価値が土地で決まり、建物自体の価値が評価され難いことを挙げ、耐震化した建物の価値を高く評価する

ことや税制上の優遇等の社会的な仕組みが重要であるとした。

次に被害調査結果に基づき福岡県西方沖地震の特徴に関して説明が行われた。全体の被害および玄海島での被害について、兵庫県南部地震の神戸市内および鹿児島県北西部地震の北薩摩地域での被害と比較した説明が行われた。応急危険度判定で危険・要注意と判定された建物は兵庫県南部地震、鹿児島県北西部地震では1/3程度であったが、福岡市内、玄海島ではその比率がそれぞれ5割、8割程度となり、最大震度6弱であった今回の地震でも地域を限定すると被害比率が高いことが確認された。また、福岡市内では警固断層の周辺に被害建物の集中が見られたが、建築学会の福岡市街地での悉皆調査によると、断層周辺の非木造建物の被害状況では7割が無被害であり、被害率は大きくないことが判明した。また中高層マンションについて建築年を1981年で分けて比較しても被害の比率に差が見られないことから、耐震設計法の違いによる差は見られない。また、過去に大地震を経験していない地域であるにもかかわらず、構造体の被害には重大なもの無く、被害としてはガラス等の二次部材、あるいは室内の被害、ブロック塀の被害が目立った。生じた被害も過去の再現的なものが多いことを挙げ、「想定外」という地震の特徴は被害上では現れず、今回の地震では特徴的な事象は発現しなかったと述べた。

次に地域係数に関する説明に移った。まず耐震設計法の変遷に関する説明が行われ、濃尾地震を機に編纂が始まった歴史地震資料をデータとする河角マップに基づいて1950年の建築基準法で導入された地域係数が設定され、1981年に改正され現在に至ることが説明された。せん断力係数に地震動が影響する要素を繰り返すことが耐震設計の課題であり定量的な研究が進んだ地盤の影響については、その影響の評価・導入が進んだ。一方、定量的な検討が困難な地域係数については長い間検討されず放置されてきた感がある。今回の地震動予測地図の公開によって、地域係数を再評価する基本データが得られたことになる。しかし、現時点では公開された値（危険度）を利用者自身が咀嚼し判断しなければならず、この点に問題があると感じる。例えば、福岡市の警固断層では地震発生確率の再評価が行われ、30年間での確率が0.4%から6.5%に引き上げられた。この上昇分をどのように受けとり、対策に反映させるべきか否かは、当事者側に任されている。現在公開されている地震動予測地図が被害の予測にどのように繋がるかということについても検討を進めな

ければならない。

セッション2

本セッションでは「地震動予測地図の要素技術と耐震設計への活用」に関する5つの講演が行われた。

三宅弘恵（東京大学）は「擬似動的震源モデルによる予測強震動の距離減衰特性」と題する講演を行った。一般的に用いられる運動学的な震源モデルでは、ライズタイムや破壊伝播速度といったパラメータを先験的に与えるが、より物理的には断層面上の摩擦の構成則に従うようにそれらを決めるべきである。しかし想定した断層滑りに適合したパラメータを決めるには、膨大な量の数値シミュレーションが必要である。そこで予め構築した経験式や理論式をシミュレーションの代わりに用いて、断層パラメータをより簡便に決定する擬似動的震源モデルを開発した。本手法を用いた強震動予測事例が紹介され、断層面上のすべり分布・応力降下量分布が同じでも、破壊開始点が異なると破壊の進展様式やすべり速度の分布が変化し、その結果震源近傍では従来の距離減衰式以上のばらつきが表れる場合があることが説明された。このように地震記録の少ない震源近傍の地震動の特性についても、動力学的な特徴を最大限に取り入れた震源モデルを用いることにより、新しい知見を得ることができると述べた。また、本手法を組み込んだ米国における次世代距離減衰式(NGA)プロジェクトの紹介が行われ、従来型の経験的な距離減衰式に震源断層モデルによる強震動予測結果を取り込み精度向上を目指していることが説明された。

池浦友則（鹿島建設）は「地震動のばらつき評価」と題し、確率論的地震動評価に影響が大きい距離減衰式のばらつきに関する講演を行った。まず距離減衰式のばらつきには地震現象そのもの持つばらつきと式のモデル化の不適切さに起因するばらつきが含まれること、後者に関しては観測点や地震毎の補正を行うことにより減少することを過去の研究事例を挙げて説明した。次に本題である地震現象が本来持つばらつきの検討の説明が行われた。ほぼ同じマグニチュード・震源距離を持つ地震記録における応答スペクトルの比の検討を行った結果、震源が近接するという条件に絞っても地震のばらつきが残ることが明らかになった。このばらつきは場所がほぼ同じでも地震波の励起特性の違いがあることに起因しているだろうとの説明がなされた。また大地震・大振幅の地震動のばらつきが小地震・小振幅の地震動よりもばらつきが小さくなること

が指摘されていることを挙げ、その原因として地震規模とともにアスペリティの数が増え、ばらつきが均される効果が考えられると説明した。

石川裕（清水建設）は「設計地震動への確率論的予測地図の活用と課題」と題する講演を行った。まず土木学会において取りまとめ中の性能照査用地震動に関して、それが使用性照査用と安全性照査用の二種類の地震動から成ること、前者は確率論的手法で後者は原則としてシナリオ型地震動評価手法で設定することを説明した。後者でシナリオ型評価を選ばれたのは、安全性評価の対象となる最大級の地震については発生確率の地域差が大きく、確率レベルからのアプローチが困難であること、一様ハザードスペクトルを用いた波形予測を行うと、内陸地震の震源近傍の地震動の特徴が再現できないからであると説明した。しかしシナリオ的手法だけでこと足りるのはその地域の最大級の地震像が明確な場合であり、それ以外の場合には確率論的手法によるカバーが必要になるとして、両手法の併用の必要性について説明した。次に、両手法の融合法についての説明が行われた。ここでは手法の融合とともに、アウトプットの組合せ・補完により新たな表現法を創出する結果の融合法が提案された。融合の実例として、特定の確率レベルにおいてハザード曲線への寄与度が高い複数の地震を抽出し、その寄与率に比例した数の地震動波形を生成して検討用地震動とする「生起確率付地震動波形群」が紹介された。最後に、今後の設計用地震動設定にも設計者の主体性が必要とされるとし、そのためには推本の J-SHS のような共通基盤を維持・発展させていく必要性が述べられた。

大川出（建築研究所）は「確率論的予測地図と地域係数」と題する講演を行った。まず河角マップに基づいた旧地域係数および1981年に改正された現行の地震地域係数についての説明が行われた。次に、推本から公開された地震動予測地図による知見を今後地域係数に反映する場合の課題が挙げられた。例えば、予測値図で使用されている計測震度・最大速度と応答スペクトルとの関係をどうするか。また、予測される地震動強さの地域分布のパターンが再現期間によって変わることが、推本による予測値を用いて説明された。この特性を反映させると設計レベルによって地域係数が変わることになるが、それが設計法として適切であるかどうかという問題も検討しなければならないとした。予測地図を設計用地震動に繋げるには以上のようにいくつかの課題があるが、それを実現している例として米国の NEHRP プロジェクトが紹介された。このプロジ

エクトでは米国全土の地震ハザード解析による加速度応答値が公開され、それに基づき設計用応答加速度スペクトルが設定されることが説明された。最後に、全国的な地震動予測地図の成果を活用するためには、より地震動に近い観点から地震荷重を設定する枠組みの構築が必要になるとの考えが述べられた。

野畑有秀（大林組）は「設計用入力地震動と予測地図」と題する講演を行った。まず実務に近い立場から、現在の設計用地震動のレベルと予測地図の比較および地震動の空間的なゆれの差をどう解釈するかという点について論じた。基本となる設計用地震動として告示スペクトル（極稀）を取り上げ、それを一様ハザードスペクトルと比較することにより、再現期間との対応について説明した。その結果、東京では再現期間が概ね500年であるのに対して、大阪では100-200年となり、南海・東南海地震の発生確率が高いことが反映され、地域差が大きいことを示した。次に、個々の震源からの地震動予測値と超過確率の関係（イベントカーブ）とハザードカーブとの比較が示され、ハザードカーブから具体的な地震像イメージするために、イベントカーブによる検討が有効であることを示した。次に確率論的な地震動予測結果を用いた耐震性能評価について、モデル建物を用いた評価事例を挙げて、説明が行われた。その際にも建築主への説明のしやすさ等を考えると、全震源からの寄与が統合され、個別の地震像が見えないハザードカーブを基にするよりも、地震発生確率を持つシナリオ群を設定し、その個々の地震動に対する被害確率を算定するイベントカーブに基づく解析の方がより望ましいとの意見が述べられた。

最後に、シナリオ的手法による推本および中央防災会議による南海地震の予測地震動を示し、同じ地震でも異なるシナリオ間で数倍のレベルの差があること、近年の大地震による地震動のスペクトルは上記の予測波とほぼ同レベルであることを説明した。さらに、これらの予測波・観測波が告示波を超えるレベルであることを指摘し、予測地震動を今後設計に活用するためには、このレベルの差を設計上でどのように説明するかが課題であること、その検討のためには設計基準から保証される耐震性能ではなく、真の性能評価の解明が必要であると述べた。

総合討論

まず、司会の加藤研一によりこれまでの討論における論点の整理が行われた。地震動予測地図に関しては、河角マップを第一世代とすると、現在公開されている

マップは第二世代といえる。まず、このマップの予測精度、到達レベルと留意点および今後の展開について、提供者、研究者、設計者それぞれの立場から意見を出してもらいたい。次に、今後も増加する新しい知見を取り込んだ将来の第三世代マップ（アドバンスマップ）に向かうために何が必要かについて意見を伺うという、討論の方向性が示された。

まず提供者の立場として藤原広行から地震動の予測精度に関する意見が出された。予測地図の精度について定量的な説明すること自体が今後5年間の重要な課題と考えている。その際、計算の過程で用いた不確定要素を明示した説明が必要である。例えば海溝型地震については強震動評価の精度が支配的で、内陸地震では発生確率の幅が大きいためその設定の影響が大きいであろう。震源断層を特定できない地震については規模別発生頻度がグーテンベルグ-リヒター式に従う領域型震源として扱っているが、そのような地震についても今後震源断層をできるだけ特定してモデル化することが精度向上のポイントとなるであろう。この意見に対して加藤からはそのモデル化の可能性についての質問が出され、藤原から、例えば現在ハザード計算で震源断層として用いている計350程の活断層以外の活断層にも地震を設定することにより、カバー率を上げられるとの答えが得られた。

次に関口春子からシナリオ地震による強震動予測の精度について意見が述べられた。予測の精度の議論は難しいとした上で、将来地下構造モデルが実用上完璧になれば、震源モデルの問題に絞ることができる、その段階では考えられ得る震源モデルについて複数の波形を予測し、可能性のある地震動の範囲を把握することで予測結果の妥当性を判断できる状況になるのではないかと述べた。また今回の予測ではいくつかの地点で1gを越すような大振幅の波形が得られているが、最近強震観測網の増加により大振幅の記録が得られる頻度が多くなってきたためか、自治体の防災担当者からは特に驚いた反応はないと述べた。

額縁一起からもシナリオ型地震に関する予測精度について意見が出された。兵庫県南部地震以後、地震予知分野を非難する風潮も見られたが、着実に研究が進められ講演で紹介したアスペリティの繰り返し破壊説がまとめ上げられた。これは今後の地震予知の指導的原理の一つとなると思うが、強震動予測でもそのような予知分野の成果を取り入れ、予測精度の精度向上を目指しているとコメントした。

次に、設計者の立場から今後予測地図を実務におい

てどのように展開していくのかという話題に移った。設計への適用に関して山根尚志（日研設計）から、現状の予測地図をそのまま設計に適用するのは難しいこと、設計に使うためには例えば地盤の卓越周期が決まれば、大体の地震動レベルが決まるという安定性が重要であること、多くの案件に対して予測地図の結果を安定して適用できる手法が整備されれば設計に使用できるであろうとの意見が出された。次に予測結果の提供のされ方について、単一の予測波だけが良いか、あるいはパラメータの組合せによる複数の予測波を公開し、選択はユーザーが行うが良いかという問いが川瀬博から出された。山根からは、周期特性が異なる複数の波があるのであれば、そのまま提供する方が良いのではないかと、例えば計算パラメータの違いで周波数特性の異なる複数波が得られるとしたら、その全てを検討に用いた方が良いのではないかと意見が述べられた。

次に釜江克宏の講演で説明された南海地震の六甲における予測波が非常に大きなレベルを示すことを挙げ、その精度についての質問が加藤研一から出された。これに対して釜江は紀伊半島沖の地震でも六甲の記録は大きな応答を示すので、非現実的な予測値ではないだろうと述べた。さらに、このような大きな予測地震動が今後も得られるであろうが、地震動のみの予測精度だけではなく、建物応答にいたる最終的な影響を含めた議論が必要であると提言した。

同じく予測地震動のレベルに対する問いが川瀬博から出された。観測波としてエルセントロやタフト波を用いた設計が現在行われているが、それらを超える地震動が観測されている。地震動の研究は観測事実に合わせているので、今後予測波が現在の設計用地震動のレベルを超えることが予想される。設計者はこの点についてどのように考えるか。これに対して山根尚志からは、内陸地震については予測地震動の大きさだけでなく、その発生確率も考慮した検討を行い、設計用地震動として用いるかの判断が必要である。一方、海溝型地震による長周期地震動については、実際に発生する可能性が高いと認識しなければならない。昨今の実記録（例えば応答速度が100cm/sを越すような堆積平野内での記録）を鑑み、長周期地震動については現在今後のレベル設定についての検討を行っているとのコメントが得られた。

次に、福岡県西方沖地震を振り返り、当該地域の地

域係数0.8という値の妥当性について質問が出された。これについて多賀直恒は0.8で問題が無かったとの意見を述べ、その理由として、今回被害が生じた建物については設計年代が古い等の原因を見つけることができ、また過去の他の被害地震と比較しても震度6弱に対する被害として特異な点は見られないことを挙げた。川瀬博は、想定外の地震といわれているが、仮に3万年に1回程度の地震とすると、過去に例の無い場所で起きたということは推本の評価通りに起きた地震とも考えられること、そのような頻度だとしたら地域係数0.8は妥当であるという説明で人々は納得するのではないかと述べた。この意見に対して石川裕も、確率論的評価の中では今回のような地震は低確率ではあるが想定されていることを述べた。このような地震は地域を限定すると発生頻度が小さく評価されるが、日本全体での発生数の期待値は実際に発生している地震数と整合することを述べた。したがって、低確率で評価されている地震についても、日本全体で見ただけではどこかで発生し得るという認識を持つことが必要であると述べた。

最後に、次世代の予測地図の方向性について意見が求められた。三宅弘恵は講演で紹介した次世代型距離減衰式を例に挙げ、この式は地表面を断ち切る活断層はそうでないものに比べて、地震動のレベルが低いという知見も導入しており、このような細かい条件も距離減衰式に取り込み、精度の向上を目指していることが説明された。また擬似的解析では震源近傍における地震動のばらつきが大きく、それによって振幅レベルが大きくなる可能性を指摘したが、今度はそのような検討とともにその上限値についての検討も工学的利用のために必要であることを述べた。

まとめ

地盤地震動小委員会幹事の山中浩明が講演・討論で述べられたポイントを整理して全体のまとめを行った。最後に来年度は中期テーマ「地盤地震動研究を耐震設計に如何に活かすか」（その5）としてこれまでの成果を総括する内容のシンポジウム計画していることを述べ、閉会とした。