

第40回地盤震動シンポジウム(2012)報告

元木健太郎*

1. はじめに

第40回地盤震動シンポジウム「2011年東北地方太平洋沖地震から何を学び、どう活かすか—巨大地震に備えるための地盤震動研究(その2)—」が、日本建築学会地盤震動小委員会の主催で、2012年11月6日(火)10:00~17:30、建築会館ホールにて開催された。194名の参加者を集めた。司会は、第一部：関口(京都大学)・鈴木(応用地質)、第二部：高井(北海道大学)・高橋(応用地質)、総合討論：神野(九州大学)・加藤(小堀鐸二研究所)が担当した。第一部では、主旨説明、「2011年東北地方太平洋沖地震に関する最新の知見」(7題)があった。昼食休憩後、第二部では、「40周年記念事業等に関する報告」、「今後の地盤震動研究へのメッセージ」(2題の特別講演)、「大都市で予測される地震像」(4題)があった。その後、「将来の地震被害の軽減に寄与する地盤震動研究のあり方」と題して総合討論を行い、最後にまとめが行われた。以下、本シンポジウムの概要について報告する。

2. 主旨説明

最初に、地盤震動小委員会主査の久田(工学院大学)より、シンポジウムプログラムの紹介と最近の地震動予測に関する疑問が示された。それは、公的機関による想定地震の結果が、最悪のケースを想定していることから、過去の地震の震度記録と比較して過大な評価になっていることや、地震発生確率の不確実さをもった値であることが伝えられていないことである。被害規模が大きすぎて、どこから手をつけていいのかが見えなくなり、かえって防災活動を抑制してしまうのではないかと指摘した。このような最近の動向も踏まえて、研究者と実務者を交えて議論をしたいと主旨説明があった。

3. 話題提供・特別講演

佐藤(清水建設)は、強震記録に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル—過去のプレート境界地震との比較から—と題して、2011年東北地方太平洋沖地震と既往の震源モデルについて、周期帯毎の生成域に注目して整理した結果を報告した。まずは、2011年東北地方太平洋沖地震のSMGAの4モデル(川辺・他、入倉・倉橋、浅野・岩田、佐藤)と野津のスーパーアスペリティモデルを比較して、東北地方太平洋沖地震のSMGAは共通して陸に近い海域に評価されていることを示した。一方、津波などを引き起こした長周期域の滑り分布は、海溝付近に求められており、短周期発生機の場合と異なる。2004年スマトラ地震、2010年チリ地震でも東北地方太平洋沖地震と同様に深い場所で短周期、浅い場所で長周期が生成されていることが明らかにされている(Lay et al. 2012)。日

本で発生した過去の地震では、1968年十勝沖地震、1994年三陸はるか沖、1978年宮城県沖は短周期成分と長周期成分の生成位置が異なり、2003年十勝沖地震は短周期と長周期が近く求められ、地震によって短周期と長周期の生成域の現れ方の違いを示した。Mo-A関係とSa-Mo関係において、東北地方太平洋沖地震は既往の経験式の延長上に位置していることを示した。

松島(京都大学)は、局所的に大きな加速度の記録の原因の解釈と題して、震度7を観測したK-NET 築館(MYG004)とKiK-net 芳賀(TCGH16)に注目して、今まで報告されている研究成果を整理して報告した。築館に関して、Nagashima et al.(2012)、Hayakawa et al.(2012)、山中・他(2012)からの3つの成果を比較し、芳賀に関して、山中・他(2012)と田中・野畑(2012)の成果を比較した。複数の結果の解釈は必ずしも整合していない。研究者間の違いをどうコンセンサスを得るかが今後の課題であることを示した。

大野(東北大学)は、仙台市内の地盤震動と地下構造との関係と題して、仙台地域の本震記録と地下構造モデルの関係を整理して説明がなされた。仙台市内の地盤モデルを用いた理論増幅率と住友生命ビルに対する観測記録のスペクトル比を比較した。現状の地下構造モデルでは観測スペクトル比の南部地域など振幅を説明できない地点もあるが、周期特性は概ね整合している結果が得られている。観測記録を用いて地盤モデルを介し基盤まで戻して、Kriging法による空間補間で周期帯毎(0.2秒、1.0秒、3.2秒)の空間分布を求めた。短周期域(0.2秒)では造成宅地のあたりが大きくなり、1.0秒では仙台市東部で大きくなる。長周期では入射方位依存性が見られ、南側から到来する地震については帯状に振幅の大きい地域が分布していることを示した。

藤本(千葉科学大学)は、東北地方太平洋沖地震の強震記録に基づく表層地盤増幅特性と題して、表層地盤の影響に着目して、表層の増幅特性と観測記録を比較した検討を報告した。ここでは、震央距離が200km以内の観測点を対象としている。弱震時のS波のH/Vスペクトルが増幅率との対応がよく、H/Vスペクトルが増幅率を表している。H/Vピーク周期は、強震時に弱震時の3倍程度まで長周期に延びている。長周期化の変動はPGVと相関が高い。ピーク周期の比からせん断剛性比を算出し、経験式による有効せん断ひずみとせん断剛性比の関係は、過去の地震で得られた関係と調和的な結果が得られた。本震前後の弱震H/Vスペクトル比に変化がほとんど見られず、せん断剛性

はほぼ回復していることを確認した。

森川（防災科学技術研究所）は、M9に対応した新しい距離減衰式と題して、Mと振幅の関係を距離減衰式の観点から検討した結果を示した。推本(2011)が示した日本海溝沿いの各発生領域からの断層最短距離を用いている。M9.0を既往の式に入力すると過大評価になってしまう。Mに係る項を2次式とする、または頭打ちする式として回帰した。その際頭打ちするMや極大になるMは回帰の前の試行錯誤により求めた。2次式や頭打ちの式はどちらも説明性は既往の式よりも高くなるが、どの式がいいかは判断できない。地盤モデルに関する残差を比較検討した結果、深部地盤を考慮した場合、0.5秒以上、浅部地盤を考慮した場合、0.1~2.0秒の帯域で残差が小さくなる結果を示した。

津野（鉄道総合技術研究所）は、関東平野で観測された長周期地震動と題して、関東平野の記録を収集して長周期に注目して整理した結果を報告した。小田原と川崎で周期3秒が卓越しており、小田原では川崎よりも震源から離れているにもかかわらず、川崎の約100cm/sの2倍以上の200cm/sも応答を示す地点もある。小田原の3秒の卓越は時間一周波数解析から、主要動部分で3秒が卓越しており、それは実体波の1次元増幅特性で説明が可能であることを示した。M6クラス以上の地震を対象として、関東平野のpSvのKiK-net地中記録の平均pSvに対する比を算出して示した。到来方向によって増幅率が変わり、東北地方からの増幅は小さく、西からの地震は増幅が大きいことを示した。

永野（東京理科大学）は、首都圏における超高層建物応答から見た地盤震動と題して、首都圏の超高層建築の応答を揺れや家具等の移動に関するアンケートで調査した結果を報告した。観測記録が得られている建物で周期1.5~3.5秒の擬似速度応答をキャリブレーションして、観測が得られていない建物で応答加速度を評価した。また壁紙の亀裂等のアンケートでも層間変形角を推定した。沿岸部で亀裂の被害が多く、表層地盤が大きく影響していると考えられる。建物・基礎・地盤をモデル化したシミュレーションでも周期2秒付近まで表層地盤で増幅することを確認した。首都圏に建つ建物を一事例として、強震記録を用いてシミュレーションした結果、1/300程度の相関変形角が評価され、実際の被害と対応していることを確認した。

加藤（小堀鐸二研究所）は40周年記念事業等に関する報告と題して、地盤震動シンポジウムのバックナンバーの公開が紹介された。1972年に委員会が発足して1973年地盤震動シンポジウムが始まってからの印刷物が公開された（第1回は、印刷物はなく、瀬尾先生のメモ書き）。過去の資料で長周期地震動の問題は以前より提起されていたことを紹介した。周期数秒から20秒程度は、理学分野で扱われている20秒以上の長周期と区別するために、「やや」長周期と呼ばれていた。その他、刊行物を4冊出版し

ており、2冊は廃版となっている。

入倉（愛知工業大学）は、海溝型巨大地震の強震動予測のための震源モデルの構築と題して、東北地方太平洋沖地震の整理と今後の地震動予測の方向性を示した。東北地方太平洋沖地震の短周期発生域は陸域の深い場所で生成されており、長周期を生成したアスペリティ（海溝沿いの浅い場所）と位置が異なっている。P波短周期のバックプロジェクションの結果でも同じ生成位置が推定されている。チリ地震やスマトラ地震でも深い部分で短周期を、浅い部分で長周期を生成したと研究結果がある。超巨大地震のSMGAは、共通してダウンディップエッジ（プレート境界地震が発生する領域の下端）に推定されている。今後の強震動予測のためのレシピの考え方として、超巨大地震のSMGAはダウンディップエッジ付近に各セグメントに対して一つずつ配置することが一つの案として提示した。超巨大地震に対してはマグニチュードから決める方法より、場所と応力降下量と面積から推定する方が適しているという考えを述べた。

太田（足利工業大学）は、長周期地震動の評価の足取りから地殻変動までと題して、長周期地震動の研究の事例と東北地方太平洋沖地震の記録に関する考察をした。昔はエルセントロ、タフトくらいしか記録がなかった時代から、長周期地震動で注目を集めた1968年十勝沖地震の八戸の記録、メキシコの長周期地震動について事例をたどりながら説明した。長周期地震動が、八戸では約400mの地盤が、メキシコでは表層地盤が地盤増幅に影響したことを示し、表層地盤と建物の共振を回避することが大事であることを強調した。また地震計の基礎がロッキングした事例として、1993年釧路沖地震の釧路気象台の記録を紹介した。2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET牡鹿の加速度記録を基線補正して、2階積分した変位波形はGPSによって計測した変位波形とよく対応することを示した。積分によって得られた残留変位による距離減衰式を作成した。

上林（京都大学）は、大阪平野における長周期地震動の増幅特性と題して、大阪平野の長周期地震動の歴史と地下構造モデルと増幅特性について報告した。鳥海によるアレ観測から、大阪平野の長周期（あとゆれ）に注目した観測が始まった。2004年紀伊半島沖の地震と2011年東北地方太平洋沖地震のpSvを比較すると、多くの地点で紀伊半島沖の地震の方が大きいまたは同等の振幅であった。大阪の3次元モデルは、スプライン関数によって補完したスプラインモデルと、地質学的解釈に基づくグリッドモデルの2つのモデルが提案されていることを示した。グリッドモデルを用いた3次元シミュレーションにより地震基盤からの増幅特性を評価した。増幅特性は、堆積層を考慮した評価結果を、堆積層を除いた評価結果に対する比で求めている。シミュレーションによる評価結果は佐藤・他(2010)による増幅特性とよく対応したことを確認した。

吉村（大阪大学）は、南海トラフの地震による関東平野

などの大規模平野の地震動と題して、大規模シミュレーションに関して発表した。864×300×50kmの領域をモデル化し、周期2.5秒以上の周期を対象とした。地震は南海トラフで発生する3連動地震を対象とした。中央防災会議(2003)の震源モデルを参照し、地下構造モデルについては、既往研究の成果を参照した。最表層は工学的基盤相当の $V_s=500\text{m/s}$ とし、付加体も考慮したモデルである。紀伊半島沖から破壊が開始するケースと南海地震の西端から破壊が開始するケースの2ケースをシミュレーションした。KiK-net 此花、名古屋三の丸、新宿の評価結果では、pSvのピーク値で150~200cm/sの振幅となった。東北地方太平洋沖地震の観測記録との比較において、震源からの距離がほぼおなじとなるような地点として、大阪、名古屋は仙台の記録と、東京は東京の記録と比較した。長周期地震動は南海トラフで発生した時の地震動の方が大きくなる結果を示した。

額綱一起(東京大学)は、「首都直下地震騒動」に見る地盤震動研究のあり方と題して、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトで行った東京湾北部地震を対象にした地震動評価について説明があった。東京湾北部地震の震源は中央防災会議のモデルを参照しており、その仮定が結果に与える影響が大きいことを強調した。報道発表資料をトレースし、東京湾北部地震の報道のされ方について問題提起した。また、「長周期地震動」という言葉について、マスコミ用語であり、以前は、脈動成分を含まないように、周期20秒以上を測定する地震計があったが、現在では理学分野においても長周期がこのくらいという明確な区分はない。相対的なものだけであるとの見解を示した。

遠田(東北大学)は、首都直下地震で想定される地震像についてと題して、プレートの研究の観点からみた首都直下で発生する地震像を説明した。発表に先立ち、地質学、地形学は実験して確認することができず、確定的なことをいうことは難しく、知見は解釈にすぎないという認識が必要であること、また、シナリオにとらわれすぎないことが重要であると考えを述べた。フィリピン海プレートと関東で発生する地震の説について、研究成果を紹介した。近年良く参照されるフィリピン海プレートの石田モデルは、過去のプレートの動きとの整合性など、そのモデルに矛盾点が多いことを示した。微小地震の分布と、P波の速度構造から、関東平野直下にプレートのフラグメントが存在する仮説が考えられる。関東平野は活断層によって生じたものではなく、広大な平野が形成されていることとフラグメントの存在は整合する。フラグメントモデルは関東直下で発生仕組みも従来のモデルより理解しやすいことも示した。

4. 総合討論

総合討論が始まる際に、司会から以下の3点に関して議論を進める提案がなされた。

- ・東北地方太平洋沖地震は説明できたのか。
- ・現在行われている巨大地震の予測結果の解釈

・今後の地盤震動研究の方向性

加藤(小堀鐸二研究所):短周期と長周期のソースについて、位置が異なる考えは共通認識として固まったのか。
佐藤(清水建設):違うことは必ずしも共通認識ではないが、調べてみると違うことが多い。

入倉(愛知工業大学):海溝型の地震は前のモデルから求められていた。記録がたくさん得られているから、共通認識を持つことはこれからの課題。まだ整理する必要がある。

石井(清水建設):浅いところにはSMGAを置かない理由を教えてください。置いたとしても影響がないからか、実際にSMGAがないことが確認されたのか。南海トラフでは、沖合が陸域に近づいているので、モデル化が結果に及ぼす影響は大きい。

入倉(愛知工業大学):東北地方太平洋沖地震について、震源から西方向のみの強震動記録を用いた検討では海溝よりのところにおいてもおこななくても結果は大きく変わらない。しかし、様々な方位の記録を用いたバックプロジェクションによる結果では深い結果となっている。深い部分がSMGAであることは間違いないと思う。

野津(港湾空港研究所):震源について、まだ議論を残しているところがあると思う。2秒程度のパルスでPGVが決まっている。そういうパルスは大事であり、さらなる議論は必要である。

加藤(小堀鐸二研究所):SA(スーパーアスペリティ)と他のモデルは違うが、波形は両方とも説明ができる。モデル間の議論が必要ではないか。

野津(港湾空港研究所):多くのSMGAは包絡波形で決まっているのではないか。パルスの再現についても工学的に重要な要素である。

佐藤(清水建設):0.2~20秒全部でフィッティングするように作成しており、スーパーアスペリティモデルで注目している1~5秒の帯域には限っていない。周期帯が違うので違いが生じていると考えられる。

入倉(愛知工業大学):我々に課せられている問題は大きく外すことがないモデルを提示することである。詳細にしすぎると問題が難しくなる。ただし、詳細なモデル化も個別に研究を進めるべきであると思う。

瀬尾(東京工業大学):関東平野の地震動で78年宮城沖の記録を見ると、ほぼ実体波で説明できるようなものであった。ところが伊豆の地震では長周期がたくさん含まれていた。今回の地震でも同じようなもので、納得のできる説明が欲しい。

津野(鉄道総研):ラブ波とレイリー波の分離は難しい。感覚的には、5秒以上はラブ波が、4秒以下はレイリー波が卓越したと考えている。基本モードだけではないと考えている。植竹さんも同様な見解を示している。

吉村(大阪大学):方位が関係している。南海トラフ沿いの地震では付加体が通り道になって、効率的にやってくる。

植竹(東京電力):京浜地域のアレイ観測を使って、東北の地震時の位相速度から判断すると基本モードのラブ波ではない。

額綱（東京大学）：付加体はウェーブガイドにもなるし、増幅もあるし、影響が大きい。一方、日本海溝には付加体はない。だから、伝播経路の影響が大きいと考えられる。

遠田（東北大学）：日本海溝はプレートの沈み込み角度が急ですし、太平洋プレートが沈み込む前に曲がっている。そこに正断層群がたくさんできて、亀裂に堆積物がたまって、それをプレートの中に押し込む形になって、南海トラフと全然構造が違う。こういう理由で日本海溝には、厚い付加体は存在しない。

加藤（小堀鐸二研究所）：付加体の減衰は大きくないか。
額綱（東京大学）：付加体は堆積層と同じ。増幅もあって、減衰もある。

加藤（小堀鐸二研究所）：関東平野の長周期は、レイが重なって振幅が大きくなるイメージがある。

久田（工学院大学）：マントルウェッジの話で津波が大きくなった原因について、プレートに亀裂が生じて、プレートから軟らかいものが染み出してきたという説を考えると、南海トラフでは津波は起きにくいということになるのか。

遠田（東北大学）：まだ分かっていないところが多い。1つの解釈では、陸側のプレートは地震後引っ張りの応力になっているように、大きく動いている。逆に西日本では分岐断層が多い。動き方が違う。東日本では勢いづいて先端まで大きく動くことがあって、西日本では、陸側で分岐して変位が分散するということがある。その時に津波の生じ方は違ってくると思われる。

久田（工学院大学）：P54 図 11 を見ると、湾岸地域と山の手地域で4秒まで応答スペクトルが変わっているように見える。その帯域まで表層地盤が影響するのか。

永野（東京理科大学）：まだよくわからない。相互作用みたいなものもあるかもしれないし、深い地盤も考えないといけないと思う。

永野（東京理科大学）：金森先生が注目した KiK-net 此花の上と下の記録の比で30倍も出ているという結果について、説明してほしい。

上林（京都大学）：98 ページの図 15 を見ると、経験的増幅特性で約20倍。計算結果は2Eに対する比をとっているんで、E+Fを考えると説明できる可能性はある。

山中（東京工業大学）：最近、大規模計算が行われるようになってきて、対象周期が短くなってきた。グリッド、震源モデル、地下構造モデル化の精度が厳しくなっていないか。その下限の周期と超高層の周期が近いことが気になっている。現実と違うところになっていないか。

吉村（大阪大学）：計算機の負荷で2秒くらいになっている。ベンチマークの結果でグリッドの影響によって結果が変わることが分かったので、細かくする必要はあると思う。

上林（京都大学）：やや長周期の地震動評価に沖積層も入れたモデル化も必要になってくるのでは。

加藤（小堀鐸二研究所）：物理探査の観点からみた限界は。

山中（東京工業大学）：震源は未知なところが多いけど、地盤はやればやるほど蓄積されるものだと思ったが、松

島さんのレビューでは、必ずしも合致していなかった。本来ならば収束しているはずなのに、そう簡単ではなかった。

松島（京都大学）：どの周期がどう増幅するという解釈が違くと、異なる結果が出ると思う。そういう情報のすり合わせは必要と思う。

河西：地震動シミュレーションに地球シミュレータや京などのスーパーコンピュータは使っているのか。

吉村（大阪大学）：大成建設のスーパーコンピュータで2日間計算。京までのパフォーマンスはない。

神野（九州大学）：予測結果をどうとらえるかについて、ユーザー側の意見は？

宮崎（ダイナミックデザイン）：地震動研究が進んで、どんどん振幅が大きくなっている。設計者として仕方がないと思っている。実務者として、実際の地震動がなかなか入手できないのが問題。研究者と設計者の間に行政という存在がある。

神野（九州大学）：施主に説明するに足りる情報が研究者は提供できているか？

宮崎（ダイナミックデザイン）：強震動予測結果があれば、設計を行えるが、そのデータを手にいられなければ難しい。

早川（清水建設）：大きなコンピュータを使えば、精密な地震動を計算できるという話には簡単につながらない。モデルの精度を超えることはない。

河西：道具は使ってこそだと思ふ。モデル化の話はクリアした前提の話として。

早川（清水建設）：問題点は計算機の問題ではなく、実際の地盤を忠実にモデル化しているかの問題が先にある。

吉村（大阪大学）：新しいモデルを作成すると観測記録を説明できるかの検討は行っている。

額綱（東京大学）：地下構造も重要だが、最大のあいまいさは震源モデル。トータルの精度を上げるためには震源モデルも重要である。

太田（足利工業大学）：大阪の咲洲庁舎で被害があったが、東京での被害の話はほとんど聞こえてこない。それはなぜ。

久田（工学院大学）：咲洲庁舎は地盤と建造物の1次周期が近かった。関東の大部分はスペクトルでほぼフラットでどこかの周期が突出して大きくなることはなかったからだと思う。

5. まとめ

最後に、地盤震動小委員会幹事の吉村（大阪大学）から、東北地方太平洋沖地震について最新の研究で明らかにされたこと、今後の地震動予測における注意点、実務者と研究者の関係について再確認した。地震を経験して、また新たな問題も明らかにされており、今後起こりうる南海トラフ地震に対して、地盤震動研究者と設計者と一緒にさらなる検討をしていかなければならないとまとめた。

（文中敬称略）