

第 41 回地盤震動シンポジウム(2013)報告

佐藤浩章*

1. はじめに

第 41 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分かった新たな知見と予測地震動への反映—巨大地震に備えるための地盤震動研究 (その 3) —」が、日本建築学会地盤震動小委員会の主催で、2013 年 11 月 26 日(火)10:00~17:30、建築会館ホールにて開催された。123 名の参加者を集めた。司会は、第一部：松島 (京都大学)・高井 (北海道大学)、第二部：大野 (東北大学)・神野 (九州大学)、総合討論：上林 (京都大学)・吉村 (大阪大学) が担当した。第一部では、主旨説明、「過去の海溝型巨大地震による強震動・被害と予測地震動への反映」(4 題)があった。昼食休憩後、第二部では、特別講演として「海溝型巨大地震による液状化の発生と予測」と「東北地方太平洋沖地震における石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動に関する幾つかのこと」の 2 題、さらに「来るべき巨大地震に備えて」(3 題)があった。その後、「来るべき巨大地震の予測地震動と利活用について」と題した総合討論を行い、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、今回のシンポジウムの趣旨説明として、ここ 3 年間、テーマとして連続して取り上げてきた東北地方太平洋沖地震については今回を最終回とし、東北地方太平洋沖地震で得られた知見を、これからの巨大地震にどのように活かしていくかを取り上げることが述べられた。次に、文部科学省・地震本部から公表された南海トラフの地震および相模トラフの巨大地震の予測地震動についての紹介が行われ、巨大地震に備えて、それを再現できるような地震動予測手法の確立やレベル 2 を超える地震動への建物側の対応も重要となるといったことを指摘し、議論への参加を求めた。

3. 話題提供・特別講演

川辺 (京都大学) は、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の強震動の検証と広域長周期地震動シミュレーションと題して、現在提案されている震源モデルおよび地下構造モデルによって、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動をどの程度再現できるかについての報告を行った。まず、東北地方太平洋沖地震の観測記録にみられる空間的な特徴として、短周期成分は震源近傍で大きいのに対し、長周期成分は関東平野、濃尾平野、大阪平野といった遠い地点でも大きくなることを応答スペクトルに基づき指摘した。長周期地震動のシミュレーションでは、周期 4 秒から 10 秒を対象とし、地下構造として地震本部の 2012 年版のモデルを用い、関東平野での観測記録との合致度が 2009 年版よ

りも向上したことを示した。両者の地下構造モデルの違いの一つに、海溝軸付近の地下構造の違いが挙げられ、シミュレーション動画からも、2012 年版の地下構造モデルを用いた場合には、海溝軸付近でトラップされた大きな地震波が効率的に関東平野に入射していく様子が明確にみられた。こうした点から、広域の長周期地震動の予測では、伝播経路の地下構造が重要であり、また残された課題としては減衰定数の設定が挙げられることを指摘した。なお、冊子に掲載の OSKH02 の観測記録のスペクトル(図 10)に訂正がある旨も併せて報告された。

野津 (港湾航空技術研究所) は、強震動パルスの生成に着目した海溝型巨大地震の震源モデルと題し、東北地方太平洋沖地震の震源モデルとして何を用いるべきか、またそれを踏まえ、将来の海溝型巨大地震の予測地震動にはどのような震源モデルを用いるべきかについて報告した。強震動パルスとは、ノースリッジ地震や兵庫県南部地震など M7 クラスの内陸地殻内地震の震源近傍の強震動にみられた構造物被害に結びつく工学的に重要な周期 1 秒から 5 秒の帯域のパルスの強震動を意味する。この強震動パルスが、M9 クラスの東北地方太平洋沖地震でも同様に観測されたことを示し、このパルスを再現できる震源モデルとして、数 km のパッチでモデル化した SPGA(Strong-motion Pulse Generation Area)モデルを提案した。さらに、SPGA モデルと SMGA モデルを用いた複数の東北地方太平洋沖地震の震源モデルとの比較を、周期 1 秒から 5 秒の波形(強震動パルス)の再現、1~2 秒震度など複数の指標で行い、SPGA モデルの方が優れていることを示した。こうした点から、構造物の耐震検討に用いる予測地震動を作成するための将来の海溝型巨大地震の震源モデルとして、現状では SPGA によるモデル化が望ましいことを指摘した。

香川 (鳥取大学) は、3 次元地下構造を考慮した 1946 年南海地震の震源モデルとそれを用いた強震動評価と題して、昨年公表された長周期地震動予測地図に反映されている西南日本の 3 次元地下構造モデルの構築とそれに伴う昭和南海地震の震源モデルの再評価、さらに地震動予測の結果について報告した。3 次元地下構造モデルの構築では、地震記録の R/V スペクトルやレシーバー関数を用いた 0 次モデルのチューニング、中小地震のシミュレーションによる波形チェックにより行い、その際に、特に山地部において新たに S 波速度 2.4km/s と 2.0km/s の地殻最上部層を考慮した。次に、構築した 3 次元地下構造のグリーン関数を用いて昭和南海地震の震源インバージョンを行った結果、既往のモデルよりも地震モーメントやすべり量が大きくなることを示した。これは、既往の 1 次元地下構造

のグリーン関数の方が、後続に大きな振幅が現われており、その違いに起因すると指摘した。また、3次元地下構造のグリーン関数を用いると、震源時間関数に変化することにより、近地地震のみならず遠地地震や地殻変動のデータに対する説明性も向上することも示した。昭和南海地震の地震動評価は、インバージョンによる震源時間関数にパルスを加える方法で、周期5秒以上の震源モデルを用いて周期2秒以上まで評価した結果を紹介した。最後に、今回の領域は、南海トラフ巨大地震の領域にも該当するため、成果はその予測にも有益な情報となると述べた。

関口（千葉大学）は、埋立地の液状化被害分布に与えた表層地盤構造の影響と題して、千葉市美浜区の液状化による噴砂と地盤構造の関係について報告した。噴砂について、その程度を小規模（半径1m程度以下）、大規模、なしの3段階に分類して調査し、大規模な噴砂はおもに海側で発生しているが、被害箇所のすぐ隣の地区で発生しない場合もあると指摘した。微動H/Vスペクトルのピーク周期と被害の関係を調べたところ、大規模噴砂がみられた海側でピーク周期が長い傾向がみられたが、一概には説明できないと述べた。さらに、微動アレイ探査によるS波速度構造とボーリング柱状図とを比較した結果、被害のあった地点では、地表付近に砂が存在し、N値やS波速度の小さい層が厚く、被害のない地点では、比較的浅い層からN値やS波速度が相対的に大きい特徴があった。また、S波速度が同じでもシルトが多い地点や、砂が厚くてもS波速度が大きい地点は被害が少ないなどの関係もみられた。最後に、被害分布には、埋め立て時の状況も関係し、浚渫工事で用いた排砂管の近傍では重い砂が堆積しやすく、今回の液状化は、過去の写真からそこで発生しているようにみえると述べた。

吉田（東北学院大学）は、海溝型巨大地震による液状化の発生と予測と題した講演を行った。まず、液状化地盤における加速度記録の特徴について、過去の事例から長周期化と最大加速度の低下、またパルス状の大振幅波形がみられることがあげられると述べた。前者はせん断強度の低下、後者は液状化で緩んだ土の骨格が再構成され、せん断強度が増大することで加速度の大きなパルスが発生しており、パルスの発生時刻は上昇した間隙水圧の下がる時刻と対応していることを示す国外の事例についても紹介した。同様のパルス波形は、2007年新潟県中越沖地震の際の柏崎市内でもみられたが、周辺に噴砂はなくN値も大きかったことから、揺すりこみ沈下の可能性も指摘できるが、将来、地盤中の杭の状況が確認できるときに判断できるだろうと述べた。次に、道路橋示方書や基礎構造設計指針の液状化予測で用いられているFL値について、長継続時間の地震動の取扱いと精度という観点で報告した。道路橋示方書のFL値による液状判定結果を286地点約1300の液状化層を対象に有効応力解結果との比較により検証した結果、継続時間20秒の波では正解率（同じ判定）が84%、危険側の評価が1.4%と良好であった一方、継続時間600秒の想定東南海地震波では、危険側の評価が50%を超えた。そこで、

地震動の繰返し回数による液状化強度に対応する係数(C_2 または C_w)を0.5にすると、危険側の評価は低下する一方で正解率も低下することを示した。最後に、長継続時間の地震動に対する液状化予測については、 C_w を0.7~0.85とすることで対応できるとする研究もあるが、最大加速度、繰返し数、サイト依存性といった指標を適切に導入していくことが精度を上げるためには重要であり、また、どこまでの精度を要求するのかといった議論も重要であると述べた。

座間（横浜国立大学）は、2011年東北地方太平洋沖地震における石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動に関する幾つかのことと題した講演を行った。石油タンクのスロッシングは、長周期地震動の大きさを把握するに適切な現象で、スロッシングによる最大波高は、近似的に速度応答スペクトルに比例し、地震記録がない場合でもどの程度の長周期地震動に見舞われたか油痕による波高によって把握できることを、過去の地震による事例とともに紹介した。2003年十勝沖地震では、スロッシングによる大規模な被害が発生し、それを契機として、設計用の速度応答スペクトルを最大2倍、それに併せて液面高さも最大2倍の低下、さらに浮き屋根の補強等の対策を講じることを行政として定めた結果、東北地方太平洋沖地震では、多くの地点で被害を低減できたことを実際に得られた地震記録とともに示した。南海トラフ巨大地震のような複数のセグメントが連動する地震の場合については、現在の地震地帯構造ごとに気象庁の1倍強震計から作成した速度応答スペクトルの経験式を、各セグメントで合算して評価できることが、東北地方太平洋沖地震の観測記録との対応から明らかとなった。したがって、今後は、連動性の評価が重要であり、また最近公表されている巨大地震の予測地震動については、石油備蓄が事業として成り立たなくなるような液面高さの低下を必要とする可能性があり、予測の際には信頼性をどのように担保するのかも念頭において欲しいと述べた。

森川（防災科学技術研究所）は、新たな南海トラフ沿いの巨大地震の震源像と長周期地震動と題して報告を行った。まず、新たな震源像について、これまでの長期評価では、同じ場所で同じような地震が繰返し発生する固有地震の概念で評価していたが、東北地方太平洋沖地震を受け、過去に発生が確認されていない地震についても科学的知見に基づき考慮する必要があると述べた。その結果、南海トラフ沿いの最大クラスの地震の震源域は、浅い部分は海溝軸、深い部分は低周波地震の発生域、さらに日向灘までの連動を考慮したMw9.1程度になることを紹介した。次に、南海トラフの新たな震源像に基づく長周期地震動の3次元シミュレーションについて、震源モデルの不確実性を考慮し、単独から日向灘を含む4連動について50通り、最大クラスについて50通りの計100通りの震源モデルによる計算結果を紹介した。振幅の絶対値については、信頼性がどの程度担保されているかの評価が難しいことから、震源モデルの違いによる結果のばらつきに主眼を

おいており、結果として、単独破壊よりも震源域が広がる連動破壊を考慮した最大クラスの地震の方がばらつきは大きいことを示した。最後に、最大クラスの地震が将来に起こり得るのかを明らかにする調査研究やさらにケース数を増やした計算も必要であると述べた。

関口（京都大学）は、上町断層帯と大阪平野南部の地下構造に関する新たな知見とそれに基づく地震動予測と題して報告を行った。まず上町断層帯に関する新たな知見として、これまで枝分かれしてモデル化されていた桜川撓曲、住之江撓曲が一続きの前縁断層であること、南の沿岸部では河成段丘面上に形成された地形変動から約 26km の断層が認められたと述べた。次に、地下の 3 次元的な断層面形状が上盤側の褶曲構造を再現するバランス断面法から決定され、平均変位速度についても地層変形量と地質年代により把握できたことから、地震シナリオの構築をこれらの情報に基づく断層面の応力分布に、不均質性を考慮した動的破壊シミュレーションで行ったと紹介した。地下構造のモデル化では、反射法探査、微動アレイ探査、常時微動連続記録の地震波干渉法、H/V スペクトル、中小地震のレーザー関数解析を用いて、2 系統ある大阪平野モデルの両者の長所を取り入れるように行ったと述べた。最後に、工学的基盤までをハイブリッド法（差分法+SGF）、それ以後を DYNEQ(等価線形解析)にて計算した地震動予測の結果について、既往の想定結果と比較したところ、大阪府の想定よりは大きく、地震本部の想定と同等か少し大きくなるレベルになったと述べた。

斎藤（豊橋科学技術大学）は、巨大地震による入力地震動と建物応答レベルと題して、これまでの発表で紹介された南海トラフ巨大地震と上町断層系の予測地震動を用いた超高層建物の解析結果について報告した。まず、現在の耐震設計基準について、1995 年兵庫県南部地震の経験から、新耐震は妥当といわれているが、結果として余力を持つこととなった要因を十分に評価はできていないと述べた。現状の超高層建物の応答解析の精度としては、東北地方太平洋沖地震の再現解析からも軽微な損傷までは可能であるが、層間変形角が 1/100 を超えるあたりから、より精緻なモデル化が必要であることを E ディフェンスでの加振試験と再現解析から指摘した。次に、南海トラフ巨大地震と上町断層系の予測地震動を用いた解析（37 階の RC 造）について、前者は大阪臨海部での最大 300kine の予測地震動に対し、層間変形角 1/50、塑性率 3、後者は大阪中心部での最大 400kine の予測地震動に対し、層間変形角 1/30、塑性率 4~5 という結果となり、将来の巨大地震では、超高層建築物の設計クライテリアを超える応答が生じる可能性があることを述べた。最後に、こうした巨大地震への対策として、新耐震以降の建築物の耐震グレードアップ、新築の免震化の促進、また地震後の住民避難の観点から、モニタリングによる早期の損傷把握も重要であると述べた。

4. 総合討論

総合討論が始まる際に、司会から討論の視点として、以

下の 2 点に関して議論を進めたいとの方針が示された。

- ① 東北地方太平洋沖地震以降の調査研究から分かった新たな知見
 - ② 予測地震動への反映と今後の地盤震動研究の方向性
- まず、①について以下のような討論が行われた。

永野（東京理科大学）：野津さん(SPGA モデル)と川辺さん(SMGA モデル)の計算結果がそれほど変わらないが、震源モデルの正解がいくつかあるということか。また、佐藤(智)さんとの違いはなぜか。

野津（港湾航空技術研究所）：計算結果は結構違う。耐震検討に重要な周期 1~5 秒を合わせるという観点でみると SMGA モデルはかなり外れており、SPGA を用いるべきである。SMGA でもパルスが再現できている FKS004 は、フォワード・ディレクティブティによるものであり、そのため西側の志津川では合っていない。

佐藤（清水建設）：プレート境界の短周期レベルのスケーリング則を検討するモデルであるため、周期 0.1 秒から 20 秒を一つのモデルで説明できるように作っており、周期 1~5 秒での比較は適当ではない。周期 1~5 秒を説明するためには、震源モデルの階層性が重要と考えている。

石井（清水建設）：耐震検討にパルスが重要はよくわかる。SPGA モデルを予測問題として使おうとすると、どのサイズのパッチをどこにおけばよいのか。

野津（港湾航空技術研究所）：過去の海溝型地震の記録にもパルスは共通してみられるので、南海トラフ巨大地震でもパルスはあるとして考える。場所や大きさの予測は出来ないで、厳しいシナリオもあるかもしれないが、多くのケースを考え、最終的に社会的な判断が必要と思われる。

上林（京都大学）：講演の質疑で紹介できなかった東北地方太平洋沖地震を予測対象として、モデルの不確実性を考慮した検討結果を紹介していただきたい。

森川（防災科学技術研究所）：東北地方太平洋沖を予測問題として複数のモデルで検討した結果、観測記録の速度応答スペクトルは、計算結果のばらつきの中にほぼ収まるので、数十通りの平均で、レベルがみえてくるのではないかと。

野津（港湾航空技術研究所）：構造物は非線形応答するので、線形の応答スペクトルではなくて波形、パルス幅での検討もあれば、工学的にも使いやすい。

上林（京都大学）：地下構造の話も少し議論したい。

早川（清水建設）：東北地方太平洋沖地震の新たな知見として海溝軸の浅いところにアスペリティをおいているが、関東平野の長周期地震動にどの程度影響しているのか。

森川（防災科学技術研究所）：4 連動の場合は、長周期が大きくなる。最大クラスの場合は、強震動生成域の滑り量の影響の方が大きい。

上林（京都大学）：液状化や基礎、建物について議論したい。

なお、斎藤先生のご講演で質問のあった解析された入力波のレベルだが、建物の共振周期で 200~300kine となる波形を選択しており、これより大きい波形はたくさんあった。永野（東京理科大学）：2012 年版と 2009 年版の地下構造モデルは、前者は基盤構造の変化がなめらか、後者は変化がくっきりとみられる。どちらがベターなのか。

香川（鳥取大学）：どちらがベターかは難しいが、山地部の

チューニングができていますので、平野に入射してくるところまでは2012年版の方がよい。2012年版は広域を意識したモデルであり、盆地構造のみを対象とするのであれば2009年版でもそれなりの結果は得られる。

加藤（小堀鐸二研究所）：3次元グリーン関数の波形インバージョンはプレート境界地震で特に影響があるのか。内陸地殻内地震では従来の1次元グリーン関数でも十分か。

香川（鳥取大学）：固いサイトを選んでいるため、範囲の狭い内陸地震よりも海溝型地震の方が3次元地下構造の影響をより受ける。特に深い構造による影響が大きい。

松島（京都大学）：短周期まで考えるならば、内陸地殻内地震でも3次元グリーン関数を使用すべき。

永野（東京理科大学）：東海・東南海地震で東北地方太平洋沖地震での浦安と同じような液状化がでるのか。評価には、1秒以下の短周期地震動の情報まで必要か。

吉田：液状化はおもに埋め立て地で起こると考えられるが、浦安は珍しい浚渫の埋め立て地である。液状化には、せん断応力が影響するので、1秒以下の地震動はそれほど影響しないかもしれない。自然地盤の液状化は、隅田川沿いの旧河道等で発生しており、大きい河川がどのように変化したかが重要である。

次に、②予測地震動への反映と地盤震動研究の方向性について、以下の討論が行われた。

吉村（大阪大学）：M9クラスの地震の震源モデルについて、どのように設定すべきか、表層付近の地盤はどこまできめ細かくモデル化すべきか、レベル2を凌駕する地震動に対する合意形成や対策・補強法について議論してほしい。

松島（京都大学）：SMGAモデルとSPGAモデルの比較は適切ではなく、SMGAのなかの不均質をみていると考えればよい。滑り速度時間関数と震源時間関数の比較についても同様で、直接対比するには次元（階層）を揃えるべき。

吉村（大阪大学）：破壊開始点やアスペリティ位置の設定についてはどう思うか。

松島（京都大学）：東北地方太平洋沖地震では、大滑り領域の中にSMGAはなく、SMGAの中にSPGAはなかった。いくつかのパターンを想定していくしかない。

吉村（大阪大学）：複数のモデルを検討しているが、起こりうる確からしさの重みは考慮しているのか。

森川（防災科学技術研究所）：最大クラスよりも従来のM8クラスの方が発生しやすいとは考えている。

吉村（大阪大学）：SMGAの配置に確からしさの重みは考慮しているのか。

森川（防災科学技術研究所）：現状では、拘束が難しいので、極端なケースを考えて、上限と下限を抑えるというのが、今のところの方針である。

川辺（京都大学）：中村・宮武の滑り速度時間関数により、周期10秒以下であれば、東北地方太平洋沖地震の観測記録も説明できる。SMGAについては十分であると考えている。

久田（工学院大学）：いろいろな滑り速度時間関数でチェックの方がよい。また、これまで経験した巨大地震では、振幅に頭打ちがあったが、現状のシミュレーションはどんどん大きくなっており、整合性が必要である。上町断層の

ケースについていえば、大阪全域が震度7となっているが、あり得るのか。台湾の集集地震は同様のスケールだが、断層のすぐ隣の台中市で震度7はいくつあったらだろうか。

関口（京都大学）：地震動が大きくなった要因として、上町断層が浅く、さらに浅い部分に大きなすべりと応力降下量があり、かつ破壊開始点も深くディレクティブティ効果も最大となっている点がある。大阪府の計算結果と違う点を含めて、計算結果の妥当性については、今後検討していく。

吉村（大阪大学）：震源や地下構造の多様性を考えると、地震動が大きくなるが、設計側からの意見をいただきたい。

松島（京都大学）：兵庫県南部地震において、新耐震が大丈夫であったのは、たまたま余力があったという点について、斎藤先生と同意見である。それを踏まえて、新耐震は今回の予測地震動についても大丈夫といえるか教えてほしい。

瀬尾（宮城教育大学）：東北地方太平洋沖地震から学んだこととして、巨大地震の強震動のレベルには上限があると考えられるべき。現状の予測地震動は、やったらこうなったという段階であり、もう少し現実的なものになるように見直した上で、実務の人と議論することを考えるべき。本テーマでもう一度やってはどうか。

北川（元慶応大学）：兵庫県南部地震では、新耐震における大地震の水平力1.0Gは観測記録のレベルとも合致した。被害については、ピロティ構造、途中階といった評価していない部分で発生しており、要因は説明できる。新耐震は、最低基準と考えるべきであり、その点では適合しているといえる。近年、多くの強震観測記録が得られているが、観測記録は地震についての情報を一番有していると考えられる。これまで波形の分析から何を引き出すことができたのか、シミュレーション結果と比較するだけに用いているのではないか。

香川（鳥取大学）：観測記録は十分に分析しつくしていると考えている。ただ、プロジェクトとして推進される研究は、回答ありきで、シミュレーション結果の理解が追いついていない部分もある。今後、検討していくべきであろう。

5. まとめ

最後に、地盤震動小委員会幹事の永野（東京理科大学）から、過去、地盤震動シンポジウムにおいて、1995年兵庫県南部地震は4回、2011年東北地方太平洋沖地震は今回を含めて3回のシンポジウムを開催したが、2つの震災を比べて、議論している内容は大きく変わってはいない。つまり、地盤震動に関しては、過去の地震について学んでいくことが、必ず将来の地震に対して役に立つと考えられる。最近では、本シンポジウムで取り上げたような、これまで想定していない大きな地震動が建物に入ってくる可能性が、耐震設計における共通認識となりつつある。そうした状況を踏まえ、振動運営委員会では今年2つの出版物が刊行された。また、地盤震動小委員会においては、実務の人にも使ってもらえる「基礎から学ぶ地盤震動」の刊行準備をしている。本シンポジウムやこれらの刊行物を通して、地震動や地盤震動研究について、より一層の関心をもっていただきたいと、まとめがあった。

（文中敬称略）