

1. はじめに

第47回地盤震動シンポジウム「強震動予測研究と設計用入力地震動—この10年を振り返り考える」が、日本建築学会地盤震動小委員会の主催で、2019年11月15日(金)10:00-17:10、建築会館ホールにて開催された。参加者は合計187名(うち、有料参加者166名、動画配信17名含む)であった。司会は、午前:大野(東北大学)・神野(九州大学)、特別講演:引間(東京電力ホールディングス)、午後:松島(京都大学)・高井(北海道大学)、大堀(福井大学)・三浦(広島大学)、総合討論:高橋(名城大学)・関口(千葉大学)が担当した。

午前は、主旨説明に続き「この10年間の主な地震の強震動とその解釈」(3題)の講演と、額瀨(東京大学)による特別講演「断層近傍の強震動について」があった。午後は、昼食休憩後、「強震動予測研究の現在地」(4題)の講演があり、続いて「設計用入力地震動の策定及び適用事例」(3題)の講演の後に総合討論が行われた。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

地盤震動小委員会主査の上林(京都大学)が、今回のシンポジウムの主旨説明を行った。冒頭、2018年に大阪を襲った地震と台風が複合的に住家被害を拡大した可能性に触れ、発生頻度が高い中規模地震へのレジリエンス向上の重要性を指摘した。また、2009年に「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法」を発売以降、約10年間で震度7を記録した3地震を含めて地震観測記録が蓄積され、震源モデルの取り扱いや長周期長時間地震動などの新たな課題や再認識すべき課題が提起されたこと、これらの課題に対する研究・評価の現状を研究者と設計者で共有することは将来起こる地震の耐震検討を行う上で有益であることから、今年度のシンポジウムは、最新知見を活かした強震動予測研究と設計用入力地震動の策定をテーマとして開催するとの説明がなされた。シンポジウムの終わりには「強震動予測研究を設計用入力地震動にいかにか活かすか」のテーマで総合討論が予定されており、幅広い議論を行いたいとの主旨説明がなされた。

3. 話題提供・特別講演

浅野(京都大学)は、「平成30年北海道胆振東部地震の強震動と震源モデル」と題して、2018年の北海道胆振東部地震の強震動の特徴とそれを説明する震源モデルに

ついて報告した。震源域周辺で観測された強震観測記録では、3つの波群が認められ3つの強震動生成域(SMGA)が必要なこと、北寄りの観測点では周期1秒未満が卓越するのに対し中～南寄りの観測点では周期1～2秒程度が卓越しているのは震源の破壊様式だけでなく地盤構造の違いも寄与していることが指摘された。また、強震記録の震源インバージョン解析と差分法長周期地震動シミュレーションから、震源域から西～南西方向の厚真から鶴川における大きな地震動は、断層の深部から浅部に向かって逆断層滑りが進行したことによる指向性効果と勇払平野の厚い堆積層地盤による地震動増幅効果で概ね説明できることが述べられた。

永野(東京理科大学)は、「平成28年(2016年)熊本地震—震源近傍記録の再現とその解釈」として、熊本地震本震の既往震源モデルの概観と、大振幅パルス性地震動の生成要因と解釈、浅部領域の断層破壊の影響を紹介した。震源モデルについては、インバージョン解析モデルでは各モデルに共通して滑り量が大きい領域が西原村から南阿蘇村にかけての深さ12km程度から浅部に位置する一方で出ノ口断層の正断層滑りの有無に差があること、測地データに基づくモデルでは阿蘇カルデラ内のセグメントが南東傾斜であること、特性化震源モデルでは長周期再現のため地震発生層以浅の滑り破壊(LMGA、長周期地震動生成域)が提案されていることが指摘された。また、特性化震源モデルに基づく強震動再現解析等の結果から、益城町の周期1秒前後の大振幅速度パルスは震源の破壊伝播効果とサイト増幅からの寄与、西原村の周期3秒前後の大振幅速度パルスは正断層の指向性効果とLMGAの寄与によることと、LMGAの浅部破壊はFP成分のみ寄与することが示された。但し予測問題における適切な評価は震源設定に課題があり、非常に難しいと述べた。

吉田(地域地盤環境研究所)は、「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の強震動による震源モデルと津波シミュレーション」として、長周期の近地強震動から求めた震源モデルと短周期地震動から求めた震源モデルの差違と、長周期の近地強震記録に基づくすべり分布モデルを用いた津波シミュレーションについて紹介した。長周期(周期10秒以上)の震源モデルでは海溝軸沿いの大すべり域が特徴的であるのに対して、短周期(周期10秒以下)の震源モデルでは陸寄りに強震動生成領域(SMGA)が推定されており、長周期成分のすべり分布と短周期成分の震源像が異なることが特徴だと述べた。但し、長周

期震源モデルの最大モーメントレート (PMR) 分布の高 PMR 領域と SMGA の位置に対応が見られることから、長周期成分と短周期成分の震源像の整合性が議論できる可能性がある」と指摘した。また、近地強震記録によるすべり分布モデルを用いた津波シミュレーションの結果が比較的良好に津波の観測記録を再現できることから、近地強震動から求めた震源モデルには妥当性があると述べた。

額瀨 (東京大学) は、「断層近傍の強震動について」と題して、特別講演を行った。講演では、理論的アプローチの観点からの 1995 年兵庫県南部地震から 2016 年熊本地震に至る私的な研究史の紹介として、断層近傍での長周期パルス波の研究進展の歴史とディレクティブティ効果、フリリング効果についての説明がなされた。まず、兵庫県南部地震の観測記録に見られた長周期のパルス波について、従来の日本の記録には見慣れないものであったため当時の研究者には戸惑いがあったとの事情が述べられた後、ディレクティブティ効果によるパルス波の生成について「科学」1996 年 2 月号で最初に原理を明確に図式したことが紹介された。また、被害地域が活断層系から海側に離れて細長く分布する「震災の帯」のメカニズムについても、堆積盆地端部の地震波の増幅的干渉の他に、ディレクティブティ効果と堆積層増幅だけでも帯が生成し得るが、現実にはこれら二つが複合したとの研究事例が紹介された。次に、2008 年の長周期地震動のレビュー (Journal of Seismology 掲載) において、遠方の長周期地震動とは別に、長周期のパルス波が震源断層近傍において普遍的であることを指摘したことが紹介された。また、2015 年のネパール・ゴルカ地震の長周期パルス波について、逆断層破壊が走向方向に伝播していても低角逆断層であるためディレクティブティ効果が現れることを説明した。最後に、熊本地震で観測された長周期パルスについて、断層直交成分ではなく断層平行成分が大きい等の特徴から発生要因としてフリリング効果が挙げられていることに対して、Dreger et al.(2011)の検討結果やシミュレーション結果を示して西原村観測点を含む現状の観測記録はディレクティブティ効果で説明できることを述べた。講演後の質疑応答では熊本地震のパルス波とフリリング効果の解釈について活発な議論がなされた。

三宅 (東京大学) は、「強震動予測の震源モデル化の現状」と題して、この 10 年間に発生した M9 クラスの海溝型超巨大地震と長期評価された活断層による内陸地震が強震動予測の震源モデル化に与えた影響と課題を紹介した。海溝型超巨大地震については、日本では 2011 年東北地方太平洋沖地震、海外では 2010 年チリ・マウレ地震で様々な震源モデル化の知見が得られていることを紹介し、実適用事例として北米カスケード地域の M9 プロジェクトと内閣府の南海トラフ巨大地震の長周期予測に言及した。長期評価された活断層の震源モデル化については、依然

として研究が進展中だとした上で、断層長さや断層幅や、震源モデル化の考え方を課題に挙げた。また、海外の熊本地震再現の研究事例を紹介し、日本の震源に囚われない設定、様々な滑り時間関数の試行などの例を挙げて、自由な発想に基づく震源モデル化の重要性を指摘し、さらに、浅いすべりの震源モデル化に役立てるための断層近傍での強震観測の重要性も指摘した。海溝型の長周期地震動予測の震源モデル化では、様々なモデルが提案・利用されているが、未反映要因として付加体表層が地下構造に含まれないことや震源スペクトルが ω 二乗モデルに従うか不明という点に留意し、震源効果を付与し過ぎていないか注意が必要と述べた。今後の展開として、機械学習を利用した長周期応答スペクトルから短周期応答スペクトルの予測といった広帯域化や、海溝型地震と活断層地震が混合した「新型」地震の震源モデル化への応用を挙げた。

鈴木 (応用地質) は、「関東地方における深部地盤構造モデルについて」と題して、関東地方における工学的基盤以深の地下構造の物理探査データとモデル化について紹介した。物理探査データについては、深度 3km に達するボーリング孔があり PS 検層が実施され速度構造が把握されていること、夢の島人工地震実験等の大規模な屈折法地震探査で関東中心部での基盤深度構造が把握されていること、堆積平野の地下構造調査や大大特の調査で反射法探査が実施されていること、近年は S 波速度構造探査として微動アレイ探査が実施されていることを述べた。深部地盤構造のモデル化については、3 次元速度構造のモデルが 1 次元構造や反射法探査結果等の 2 次元構造を空間補間することで作成されていることを述べ、田中他 (2005) が大大特プロ等の大規模反射法・屈折法探査データと重力データから 3 次元構造モデルを推定した例を示した。自然地震の地震記録を用いて表面波の分散性などでモデルが調整されて 0.5 次モデルが得られ、さらに地震動の再現計算によってモデルが調整されて 1 次モデル (J-SHIS モデル、全国 1 次地下構造モデル) が得られていると述べた。また、内閣府では地震動 R/V スペクトル比とレイリー波の高次モード考慮した H/V スペクトル比によって全国 1 次モデルの修正がなされ、地震調査研究推進本部 (2017) では小アレイ・大アレイデータを用いて工学的基盤以浅を含む浅部深部統合地下構造モデルが提案されており、これらでは地震動の再現計算による検証も実施されていることを述べた。今後は、地震観測波形のインバージョンによるモデル修正や海域の地下構造の修正が必要であると指摘した。

川辺 (大阪大学) は、「強震動計算手法の現状」と題して、近年に強震動計算によく用いられている計算手法をレビューし、手法毎の長所・短所や計算時の注意点について紹介した。強震動計算手法のレビューとして、波数

積分法、経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法、3次元差分法、ハイブリッド法の詳細の説明がなされた。また、計算時の注意点として、統計的グリーン関数法における周期と要素断層波のエンベロープ継続長さの関係、および震源近傍での近地項と中間項の考慮の必要性、差分法における解析領域端部での吸収境界条件と反射波の大きさを挙げた。さらに、ベンチマークテストで同一の問題設定でも研究者間で異なる地震動計算結果となった例や大阪府北部での地震動再現計算で場所によって過大評価となった例を示して、地震動計算を行う際には震源のモデル化、地盤のモデル化などパラメータの設定に注意する必要があることを指摘した。今後の課題として、段差構造を考慮しないとうまく再現できない例と、表層地盤の非線形性の考慮における工学的基盤以深での非線形の影響の取り扱いを挙げた。

小山(国土技術政策総合研究所)は、「南海トラフ地震の設計用長周期地震動」と題して、設計用地震荷重・地震動と超高層建物の設計用地震動の変遷と、南海トラフ地震の長周期地震動への対策の概要を振り返るとともに、内閣府が取り組んでいる相模トラフ沿いの巨大地震等による長周期地震動に対する国交省の対応状況を紹介した。南海トラフ地震の設計用長周期地震動について、策定に用いた「基整促波の作成方法」の特徴は、地震記録に基づく方法であることと、地震規模・震源からの距離・サイト係数から評価することと述べた。また、区域分けと簡略化スペクトルの決定手順について示し、町丁目ごとに求めた pSv スペクトルから告示スペクトル約 80cm/s の1倍、1.5倍、2倍を目安に簡略化したことを説明した。相模トラフ沿いの地震の設計用長周期地震動への取り組みについては、内閣府の検討状況を注視しながら、南海トラフ地震用に作成した回帰式(基整促の作成方法)を相模トラフ地震に適用できるように、また任意地点での計算に対応できるように、改良に努めていると述べた。

野津(港湾空港技術研究所)は、「土木分野における設計用入力地震動—特にサイト波について」と題して、土木分野における設計用地震動をめぐる様々な考え方を紹介し、強震動研究の成果の活用を今後どのように促していくかという点についての考えを提示した。強震動研究の成果を設計地震動の設定に取り入れようとする機運は、土木学会の提言では極めて前向きであるが、実際の建造物の設計に用いられる指針類、例えば道路橋示方書ではスペクトルが設定されていて研究成果活用の余地が無く、土木分野全体としての機運はさほど高くない状況であると述べ、その背景には強震動研究の成熟度に対する疑念があると指摘した。このような研究成果活用の機運が低い中で活用を促すためには、強震動研究の成果をパッケージとして引き渡すだけでなく、地震動に関して確実に言えることとまだまだ分からないことを丁寧に説明す

ることが重要だと指摘した。また、地震動へのサイト特性の影響について、鳥取県西部地震での境港周辺での観測振幅の差違や八戸港での観測卓越周期の共通性を例に挙げて、現状、地点間の相対的な揺れ易さ、地点毎の卓越しやす地震動の周期などについてはかなりの確実性をもって指摘できるようになっていると述べた。一方、地震規模や発生位置の不確実性のために振幅レベルの将来予測は依然として大きな不確実性を伴うが、耐震設計用の地震動としてサイトスペシフィックな地震動を選択することは、建造物が要求性能を満足できない事態を回避する可能性を高め、地盤との固有周期の一致を回避することに繋がり、「少しでも地震に強い社会をできれば小さなコストで」という目標に寄与すると述べた。

佐分利(竹中工務店)は、「300m 超高層建物と入力地震動」と題して、大阪市阿倍野区の「あべのハルカス」(2014年竣工)の耐震設計において多様な検討を行い、高い安全性と冗長性を確保した性能設計に取り組んだ事例を紹介した。建屋概要は、地上60階、地下5階で高さ300m、地下深さ30m、S造で建屋上部はセットバックしているとの説明があった。設計は2008年から実施し、当時は南海トラフ地震が注目されていたが、まだ2015年の大震研の上町断層地震波や2016年の国交省の南海トラフ基整促波(長周期地震動)は出ておらず、超高層長周期建物の是非に対しては様々な指摘があり評価には6か月掛かった、との説明があった。耐震設計の耐震性能グレードはレベル2で弾性設計とし、最大級地震(余裕度検討レベル)で通常レベル2相当の建屋性能を目指したと述べた。入力地震動の設定は、通常標準3波と告示波レベル1・2に加えて、地域波として東南海地震、東南海・南海地震、上町断層地震2ケース、余裕度検討用に告示波1.5倍を設定したと述べた。さらに地震動のばらつき検討として、東南海・南海地震波では卓越周期を建屋周期に合うように調整した地震波での検討を実施し、上町断層地震では計画地とは別の算定点での地震波を加えたり、高次モード(2次、3次)に等しい卓越周期を持つ地震波をパラメータ調整して作成したりなどして追加して地震応答解析検討を実施したとの説明があった。

4. 総合討論

「強震動予測研究を設計用入力地震動にいかにか活かすか」をテーマとして総合討論がなされた。参加者を交えた議論に先立ち、司会の高橋(前掲)が本日の各講演内容を振り返り、論点を整理した。その後、会場からの発言が続いた。

高橋(前掲): まずは地盤モデルについて。浅野先生のご講演では、北海道で地盤モデルに課題があるとの話があったが、どういうことか。

浅野(前掲): 長周期シミュレーションでは、深い地盤

構造 (Vs600m/s 以上) だけを使用し、その結果を地表記録と比較してマップに示した。一方、追分での KiK-net 観測記録で地表と地中の比較では地中 15cm/s で地表 105cm/s となっていることから、浅い地盤の影響が大きいという趣旨の話である。他地域では防災科技研が精緻なモデルを作成しているが、労力とお金がかかるため、いろいろな調査結果をうまく統合する必要があると考える。

源栄 (東北大学) : 地盤構造の深部と浅部の統合モデルについて、深部構造では 3 次元不整形性を考慮しているが、表層も明らかに不整形があるところは成層構造でやる場合でも特記しておかないとまずいのではないかと。一律に 500m メッシュとか 250m メッシュとかやるときに抜けているとまずい。昔に嶋先生から東京都の被害予測モデルでは 100m メッシュでやるときに不整形性があるところは補正について特記すると聞いた記憶がある。機械的に一次元成層でやると、そこが抜けてしまう。仙台の青葉城では 70~80m ある崖の上と下で周波数 2Hz が 4 倍ぐらい違うが、これが同じメッシュになるのは良くない。

もう一つ、耐震設計で一番問題になるのは共振問題。共振が発生するところは 3 か所ある。深部地盤と表層地盤で一致して共振、そこに SSI (地盤と建物) で一致なら数倍、最後は建屋内の床応答。原発で建屋劣化して周期が変わったらどうなるか、外力減ればよいが増えたらどうするかの問題がある。3 つともあるとオーダー違いになるが、そういうのが佐分利さんのご発表した設計に反映されていないようで、共振問題という言葉が出なかったのには非常に残念に思う。

鈴木 (前掲) : 地盤モデルは、最新のモデルが一番良いと思ってやっている。但し、防災科技研の最新モデルでも深部構造 5km メッシュ、小アレイの部分でも 1km メッシュで作られている。建物建設時には表層は PS 検層をするので、中間層については個々の場所で地盤調査、例えば微動アレイ探査や微動卓越周期の確認、をすべきと考える。

表層部分の不陸については、三次元的な微動アレイ探査等による工学的基盤の凸凹分布データはあるので、そういったデータをモデルに反映する仕組みを考えていくのが必要と思う。

源栄 (前掲) : 少しでも特別なことをしている場合には特記事項としておくことが必要と思う。

鈴木 (前掲) : 浅い地盤の不均一性は非常に大きいので、少しの場所の違いで卓越周期が変わることはある。地質構造をコメントするようにはしている。

源栄 (前掲) : 不均質地盤の地盤震動は、平均より大きくなる場所と小さくなる場所がある。大きくなる場所が、余裕度の中でカバーできるような設計外力の考え方なら良い。周期についても確率の考え方で周期をずらして、余裕度としてどう考えるかの問題と考える。

高橋 (前掲) : 次に、予測問題における難しさについて。永野先生からコメントを頂きたい。

永野 (前掲) : 熊本地震では断層をどうモデル化するかの一見解がないので難しい。自分としては一番重いのは浅部の表層地盤の非線形と感じる。東北地方太平洋沖地震の際に周期 2~3 秒が増幅していたのが驚きだった。佐分利さんのご発表での地震動は周期 1 秒応答で 300~400cm/s となっていたが、浅いところの非線形の取り扱いはどのようにしたのか。

鈴木 (前掲) : 現在作られているモデルでは、非線形の検証はあまり検討されていない。観測データがない中では難しいため、結局、関東地震の時の震度で比較となってしまうて、まだまだ課題はある。

佐分利 (前掲) : 周期 1 秒応答で約 400cm/s となる地震波を作った際には、地盤は非線形になっていると分かったが、特段の検討を行っていない。

高橋 (前掲) : 震源について、三宅先生からコメントを頂きたい。

三宅 (前掲) : 震源モデル化については講演で申し上げた以上のことはないが、ばらつきや不確実性については、コンピュータの値を振っただけの場合と、元々は用意した選択肢が足りていなかった場合がある。多くの方と議論を重ねたり、同じ組織内だけだと同じ考え方になるので、いろいろな人とやってみるのが良いと思われる。

久田 (工学院大学) : 予測問題はすごく難しい。気になったのは、理学系では科学的知見に基づいて進めるが、最近では少ないが工学的判断がすごく重要と思っている。例えば、レシピで誰にでも同じに地震動になるというのが実際には違って強くも弱くもできてしまう。例えば都心南部直下地震だと鉛直断層なので断層直上はほとんど揺れなくなるが、関東平野のような地盤が悪いところで直下の地震が告示レベルより小さくなることをエンジニアとしてどう判断するかという問題。折角なら大きな地震動を出した方が良くと思うが、レシピだと小さいものが出てくる。相模トラフの関東地震でも東京ではあまり大きくないと一般的には言われているが、そうではないのではという話があり昔の記録に疑義が出たりもしている。内閣府の検討については早く結果を出してほしいと思っているが、全然進んでいない。大正関東がレベル 2 以下になるのか、逆に直上はシミュレーションではかなり大きくなるが当時の横浜をみると見渡す限り震度 7 にはならないのではと思える。最低基準のレベル 2 と比較してどうなのかをエンジニアとしての感覚・判断を持つべきと感じる。

高橋 (前掲) : 相模トラフ地震のレベル感については、小山さんからコメントをお願いしたい。

小山 (前掲) : 南海トラフ地震の時の例から判断すると、国交省がレベル感を独自に決めることはない。既往のレ

ベルとかを参照して工学的判断で決めている。また、上部構造には余裕度があるのでそれも考慮に入れてレベルを決めることになるのではと考える。

高橋（前掲）：次に、地震動について確実に分かること・分からないこと、設計に対してどういう入力地震動を考えるか与えるかについて。野津さんからコメント・補足があればお願いしたい。

野津（前掲）：瀬瀬先生との議論にあった新しい橋で入力地震動のレベル下げられるかは確かに難しいが、コストが限られた中では提案した考え方で下げても良いと考える。あるいは別の考え方として、既存不適格の橋の補強の際に、どのレベルまでやるか検討する場合にサイト特性を考えれば、無駄な投資を減らせるという捉え方もできる。

源栄（前掲）：昔に同じ問題で自治体（仙台市）の優先度評価システムを作った。地盤の揺れを考慮して判断するシステムを作って公開して、論文にもなっているので参考にして下さい。予算が限られているときは積極的にそういうシステムを使うべきと考える。

永野（前掲）：建築では佐分利さんの事例のように地震動レベルは上に上げるセンスとなっていて、なかなか下げることはない。下げるのは大丈夫かなと不安に思うので、上げるセンスでコンセンサスを持っていくのが良いと思うがどうか。

野津（前掲）：どの橋が一番危ないかを考えるべきと思う。揺れにくい場所で地震動がこれを超えないと決めるのは難しいが、サイト特性が小さいところでは道路橋示方書レベルはかなり大きく、想定外のレベルとなる。それを心配するならサイト特性が大のところでは想定外の地震がくることを考えるべきと思う。社会全体の安全性能を考えたときにどこを優先すべきかと考えれば、サイト特性が大きいところへお金を集中すべきという判断になるのでは、と思う。

永野（前掲）：優先順位という話ならよく理解できる。但し、建築は個別なので、この建物だけ下げるということに問題が起きる可能性がある。

野津（前掲）：何に対して下げるのかを考えなければいけない。地盤の良いところの建物は地盤が悪いところの建物よりも安全だということを認識しないとイケない。

高坂（FEArch）：大阪や名古屋で構造設計をしているが、構造設計者として一番困るのは、あるクライテリアを確実にクリアしないとイケないということ。一方で、長周期地震動設定は設計ができるレベルをなめながらやっているのではないかと感じているが、性能設計の立場からはむしろ躊躇わずにばらついた情報をもらう方が色々と検討できる。設計に対する価値観を見直して、大きいレベルだがレアな現象を考慮するかどうかということクライアントと議論できるようになれば良いと感じる。非

常に正確なものを出さなければいけないとは考えずに、構造設計者には躊躇なく出してもらいたい。

北川（至誠館大学）：構造設計者がそのような意見をもっているのは素晴らしい。強震動研究の波はシミュレーションから出ている。設計用というのは経済性、社会性、憲法の財産権の問題を含んだものとなっている。推定結果なのでどう使うかはかなり考えないとイケない。入力地震動がどんどん大きくなると設計ができないが、その辺りの考え方についてのギャップがこの委員会と実際の設計の間にあるのではないかと。

上林（前掲）：設計での使い方の一つとして、佐分利さんの検討用地震、ばらつきとかはパフォーマンスを計るという意味では有用と思う。

（文中敬称略）