

1. はじめに

第 46 回地盤震動シンポジウム「地盤構造はどこまで分かるのか？」が、日本建築学会地盤震動小委員会と地盤基礎系振動小委員会の主催で、2018 年 11 月 2 日(金)10:00-17:30、建築会館ホールにて開催された。参加者は合計 210 名(動画配信 28 名含む)であった。司会は、午前:神野(九州大学)・森川(防災科学技術研究所)、午後:大野(東北大学)・高橋(名城大学)、松島(京都大学)、上林(京都大学)・川辺(大阪大学)、総合討論:引田(鹿島建設)・三浦(広島大学)が担当した。

午前は、主旨説明に続き「平成 30 年大阪府北部の地震・平成 30 年北海道胆振東部地震」(2 題)の講演、「地盤構造評価の新展開と課題」(3 題)があった。昼食休憩後、「地盤増幅特性評価の新展開と課題」(3 題)の講演の後に、川瀬(京都大学)による特別講演「地盤構造と地震動増幅 一我々はどこから始めてどこまで掘り進んだのか？」があった。続いて、「地盤構造評価の検証と活用事例」(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永野(東京理科大学)が、今回のシンポジウムの主旨説明を行った。1995 年兵庫県南部地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震等で地盤構造・地盤増幅特性の重要性が顕在化したことが述べられた。また、地盤震動小委員会が中心となり微動アレイ解析のベンチマークテストが実施され重要な成果が得られていること、微動や強震記録に基づいて地盤構造やそれに伴う地盤増幅特性を評価し、設計用入力地震動に反映させるなどの活用事例も近年多くみられることから、今年度のシンポジウムは、地盤構造とそれに伴う地盤増幅特性をテーマとして開催するとの説明がなされた。また、2018 年に発生した大阪府北部の地震、北海道胆振東部地震について地震動、地盤震動の観点から速報がなされることが紹介された。シンポジウムの終わりには「地盤構造評価の現状と課題」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

上林(京都大学)は、「平成 30 年大阪府北部の地震」と題して、大阪府北部の地震の特徴を紹介した。相対的に揺れが強い領域が、震央から南西―北東方向に分布し、

大阪府中～北部、京都府南部、滋賀県南部、奈良県北部及び兵庫県東部の広い領域で震度 4 以上になったと紹介された。住家被害は大阪府で突出して多く、屋根瓦の落下やずれ、石灯籠、墓石、塀の転倒、外壁のひび割れ脱落が見られたと述べられた。また、26,000 基余りの墓石の転倒率調査の結果が紹介された。転倒率が高い領域は震度分布と同様に震央から南西―北東方向に分布し、北摂山地の山際などでも多く、住家被害が大きい地域に隣接していることが述べられた。本震発震機構と地震活動の分布などから推定される本震の震源断層は、概ね南北 2 つの断層で構成され、特に横ずれ成分が卓越する断層は南西方向に破壊が進むことが紹介された。箕面市に東西に分布する地溝帯上の観測点において震度 6 弱に相当する観測記録が複数点で得られ、特に東西成分の振幅が大きくなる傾向があることが述べられた。

高井(北海道大学)は、「平成 30 年北海道胆振東部地震」と題して、北海道胆振東部地震についての報告を行った。地震動の分布は、厚真町鹿沼で震度 7 を記録、震央から 60 km 離れた札幌市東区でも震度 6 弱を記録していること、広い範囲で大きな加速度が記録されていることを紹介した。震央付近の山間部では広範囲にかけ崩れが発生し、それに伴い土木物・建築物に被害が生じ、札幌市等で液状化による家屋被害が生じたこと、北海道電力苫東厚真火力発電所で被害が発生し、北海道全域の停電が発生したことが述べられた。液状化被害については、2003 年十勝沖地震における液状化発生地点と場所が異なっており、現在の地下水位等の地盤状況の違いと合わせて周波数 1Hz 以上における周波数特性と液状化発生への影響の検討が必要であると指摘した。震源の南に位置する HKD126 地点においては、建物被害を発生させる周期 1~2 秒が優勢な強震記録が観測されており、複雑な地殻・浅部地盤構造について地下構造・余震観測・微動観測を基に検討を実施する予定であることを述べた。

大堀(福井大学)は、「地盤構造評価ベンチマークの概要と成果」と題して、不整形地盤構造モデルを用いた微動アレイ解析による位相速度・H/V スペクトルを用いた地下構造を推定するベンチマークテストについて紹介した。二つの水平成層を傾斜基盤面で接続した単純な 3 次元地下構造モデルを対象としたテストでは、SPAC 法・FK 法のいずれも f_{sw} (全モードを考慮して得られる Rayleigh 波の見かけ位相速度のピーク周波数) よりもやや高い周波数帯域では参加者の結果のばらつきが小さく、理論値との良

い対応が見られたことが述べられた。次に、大阪堆積盆地のブライントテストについては、平行成層性の高いサイトでは、比較対象値（観測点直下の1次元構造によるRayleigh波の見かけ位相速度）に対応する結果が得られたが、比較対象値に比べやや位相速度が速くなるバイアスが見られ、各サイトの不整形性の度合いや卓越する波動の到来方向を関連づけて再検討する必要性が述べられた。また、全体を通して個々のチームやケース毎にばらつきがあるものの、それらのアンサンブル平均は、不整形性の強いサイトを除けばターゲットとなる速度構造に収束する傾向が見られ、異なる条件下でのインバージョン結果の平均値が意味のある結果が得られる可能性があることと結論付けた。今後の課題としては、位相速度とH/Vスペクトルを同時に考慮することでのパラメータの推定精度の向上などを挙げた。

長（産業技術総合研究所）は、「SPAC系微動アレイとその適用範囲」と題して、SPAC法、CCA法およびノイズ補正CCA法に着目し、それらの手法の適用限界の生成要因から、長波長側、短波長側の適用限界について述べた。SPAC法やCCA法の長波長側の適用限界はインコヒーレントノイズに起因するバイアスに規定されることを示した。ノイズ補正を適用しても、数Hz以下では極小アレイの適用には難があり、これは微動レベルが1Hz付近に強度の谷があるという一般的傾向と関係している可能性があることと述べた。短波長側の適用限界は方位エイリアジングに規定されることを紹介した。また、これに関連して、SPAC法における2点アレイの適用性について、微動が135度程度の広がりから到来すれば $(rk(\omega) < 20)$ の範囲で r :観測点間距離、 $k(\omega)$:波数、真値に近いSPAC係数を評価することが可能であることが示された。

松島（京都大学）は、「拡散波動場理論に基づく水平上下スペクトル比の概要とその適用例」と題して、拡散波動場理論に基づく水平上下スペクトル比の理論の概要および主にMHVR（常時微動の水平上下スペクトル比）の適用事例について述べた。これらの適用事例によって、観測MHVRは、拡散波動場理論に基づく理論または解析MHVRによって、これまで提案されてきていた理論MHVRと同程度もしくはそれ以上の精度で再現できることが示された。不整形地盤におけるMHVRについて、観測MHVRのピーク振幅と直下の1次元構造を用いた計算結果の差は30~40%よりも大きくなることが指摘されていること、拡散波動場理論に基づく解析により観測MHVRをよく再現することができることを示した。解析MHVRは水平成層を仮定できないような不整形地盤を含む三次元地盤構造にも適用可能であり、より複雑な環境での地盤構造推定に適用できる可能性があることを述べた。

佐藤（浩）（電力中央研究所）は、「地震波干渉法の概要・適用例」と題して、地震波干渉法について、その概

要と表面波としての特徴を利用した深部地盤構造評価に関連した適用例を紹介した。時空間でランダムに発生する地表の微動源で囲まれた2点について、2点周辺付近の震源からの位相の振幅は足し合わされ、それ以外の震源からの波は互いに打ち消しあうこと、空間的に一様となる条件を満足できるように、少なくとも1ヶ月、数ヶ月から数年といった長期間の観測を実施することが求められることを示した。地震波干渉法解析により推定された表面波の群速度を用いることにより、地下構造が急変していない地域では2地点間の平均的な地下構造を推定可能であることを示し、群速度トモグラフィーの適用事例が紹介された。また、微動アレイ探査と組み合わせることにより、微動アレイ探査単独では推定が困難な深部地盤構造の推定精度の向上に役立つことを示した。

元木（小堀鐸二研究所）は、「常時微動H/Vピーク周期のばらつきに基づく基盤傾斜判定法の提案」と題して、常時微動に基づく基盤傾斜の簡易な判別法について紹介した。微動HVS（微動記録の水平上下スペクトル比）のピーク周期の空間変動係数に着目して、基盤が平坦な2サイト、傾斜している2サイトにおける観測と数値解析に基づくシミュレーションを実施し、ピーク周期の変動係数が、基盤が傾斜しているサイトと平坦なサイトでその振幅に顕著な違いが見られ、シミュレーションによって概ね観測記録のピーク周期の変動係数を再現できることを示した。さらに、ピーク周期の変動係数から推定したパワースペクトルが、 T_z （地表から最下層上面までの鉛直方向のS波走時）のパワースペクトルに対応することを示し、ピーク周期の変動係数が地盤の凹凸の大きさを表すことを示した。ピーク周期変動係数により基盤傾斜の有無を判別できる可能性についても示した。

仲野（安藤ハザマ）は、「スペクトルインバージョンによる地盤増幅特性の評価」と題して、スペクトルインバージョンで評価される地盤構造に着目し、その物理的解釈、地盤増幅特性と地下構造モデルとの関係についての考察が紹介された。スペクトルインバージョンにより評価された地盤増幅特性の内、S波を対象として評価した場合のS波サイト特性は一次元重複反射理論の計算結果と整合すること、S波とその後続動を含めて評価した全サイト特性は、S波サイト特性に比べて長周期域でピークがより明瞭になり、大阪平野や関東平野などの堆積盆地やその沿岸部で顕著にみられることを示した。地盤増幅特性の主な活用例として、①地下構造モデルの推定、②強震動予測、③地震ハザード評価、④サイスミックゾーネーションが示され、個々の活用事例について紹介された。

三浦（広島大学）は、「平均S波速度による地盤増幅特性の評価」と題して、平均S波速度から周期毎の地盤増幅特性を評価する方法に着目し、平均S波速度と理論増幅率との関係を整理し、考慮する地盤深さと周期特性の関係

について述べた。また、近年の地殻内地震を対象として、距離減衰式と Vs30（地表から深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度）による地盤増幅モデルを用いた計算値と観測値を比較することによって、地震動予測式の誤差の大きさに関する検討結果についても紹介された。

川瀬（京都大学）は、「地盤構造と地震動増幅 ―我々はどこから始めてどこまで掘り進んだのか?」と題して、特別講演を行った。まず、地盤震動研究の発展の略歴史について紹介し、地盤構造と地震動増幅の研究がどのように始まり、どのように進展してきたかについて述べた。その中で、新潟地震での液状化被害と長周期地震動の関係、北伊豆地震での最大振幅を示した盆地生成 Love 波、FEM・BEM シミュレーションによる盆地表面の応答に現れたエッジ効果などを例に挙げ、「見ようとしたくないものは見えない」事例を紹介し、人間の思い込みの恐ろしさについて言及した。次に、拡散波動場に基づく EHVR（地震動水平上下スペクトル比）あるいは MHVR（微動水平上下スペクトル比）を用いた地下構造逆算法の有効性について紹介した。また、EHVR あるいは MHVR を拡散波動場の考えに基づいて再解釈し、1 回または 2 回、経験的補正関数を掛け合わせるにより、直接的に HSAF（水平動のサイト増幅特性）を評価できる方法の概要と適用事例について紹介した。高周波数領域の増幅特性も工学的基盤以浅のみで決まっておらず、本手法では、地震基盤をリファレンスとしていることにより、絶対振幅の利用が可能であると述べた。

浅野（京都大学）は、「大阪平野・京都盆地の地盤構造モデル検証事例」と題して、大阪平野及び京都盆地を対象に、近年の地盤構造モデル（特に深部地盤構造）の検証事例をレビューした。地盤構造モデルの検証には、地震動シミュレーションによる手法のほかに、地震波干渉法、レシーバー関数解析、拡散波動場理論など地震学分野で開発された新たな手法が地盤震動分野に取り入れられていることを紹介した。特に地震活動が相対的に低い西日本地域で、観測点間のグリーン関数をより積極的に利用すべきであると述べた。このように多種多様な手法やデータを用いた検証を進めることで、よりロバストかつ信頼性の高い地盤モデルの構築が可能であると述べた。

先名（防災科学技術研究所）は、「関東地域における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築」と題して、ボーリングデータ・多数の常時微動による微動アレイ探査の記録を収集し、地盤の S 波速度構造、Q 値および増幅特性などを求め、地盤モデルの高度化を行ったと紹介した。全体的な傾向として、広帯域全体の周波数特性が既往地盤モデルに比べ改善され、特に防災の観点で重要な周期 1 秒付近およびそれよりも長周期側において大幅に改善されていることが示された。この結果は、ボーリング柱状図データを集めたことによる浅部地盤モ

デル詳細化の効果だけでなく、浅部と深部をつなぐ、S 波速度 300~700 (m/s)程度の工学的基盤周辺の構造の精度が高くなったためであると述べた。

佐藤（智）（大崎総合研究所）は、「相模トラフの地震による地震動評価事例」と題して、M8 クラスの相模トラフ沿いの地震・プレート沈み込みに伴う M7 クラスの首都直下地震に対する超高層建築物の設計用入力時震動策定を目指した、長周期・長時間地震動の経験的予測式の作成・適用について紹介した。工学的基盤での群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数は、浅部・深部統合地下構造モデルに基づく工学的基盤から地表までの T_s （地盤固有周期）より長周期側でも、 T_s との相関がみられ、工学的基盤以深の地下構造を用いたシミュレーションでは上記の影響を反映できないこと、大正関東タイプ地震と元禄関東タイプの地震に適用し、本郷での復元記録とほぼ同レベルになったことが示された。

4. 総合討論

参加者を交えた議論に先立ち、司会の引田（鹿島建設）・三浦（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。

永野（前掲）：浅野先生のご講演では、いろいろなデータに基づいて地盤モデルが構築されているが、地震や手法によって理論値に合ったり、合わなかったりしていると思うが、どこで判断しているのか。

浅野（前掲）：手法によってみている空間スケールが異なるためと考えられる。段々と改良されていることを確認しながら、ステップアップして行ければよいと考えている。

久田（工学院大学）：上林先生、高井先生のご発表について、震源の近傍でパルス的な波が観測されているが、地盤の影響、破壊伝播による指向性パルスなど考えられるが、両先生のご見解を伺いたい。

上林（前掲）：いろいろな震源モデルが提唱されているが、点震源モデルでも観測波形をよく再現できており、M6 前半の地震なので、ディレクティブティ効果をあまり考慮しなくても観測記録を再現ができていないかと考えている。

浅野（前掲）：長周期帯域では点震源でも再現できるが、より広帯域で見ればディレクティブティの効果があると考えられる。

高井（前掲）：今のところは、フォワードディレクティブティ等があるかは現時点では不明である。

瀬尾（元東京工業大学）：観測データが飛躍的増え、多数のデータを説明する複雑なモデルが提案されているが、将来の地震の地震動を予測するうえで、その結果をどのように活かすかについてどのように議論をしていけばいいのか。

北川（元慶応大学）：地震動に合うように地盤モデルをAIによって修正していく方法もあるのではないかと考える。学習進化という新しい概念を地盤震動分野でも取り入れる必要があると考える。

川瀬（前掲）：これまでの地震動予測では、決定論的に地震動を予測しようとして、波形まで予測をしようとして研究が行われてきた。米国でも non ergodic な予測が良いといわれ始めている。平均 Vs を使ったサイト特性と個別のサイト特性を使った予測では、平均的な予測のばらつきが倍半分違う結果であった。ばらつきを考慮する予測方法を行うのであれば、きちんとした地盤モデルを作成する効果があると考えられる。

瀬尾（前掲）：震源モデルについて、多数の観測データを説明するため、パラメータが多い複雑な震源モデルが提案され、将来起こる地震の予測の際に、パラメータの多い複雑な震源モデルを用いることについて問題は無いのか。パラメータの少ないアバウトな震源モデルでは誤差は大きいかもしれないが、極端に外れることはない。逆にパラメータの多い複雑な震源モデルでは、パラメータを間違えると大きく外れた予測を行う可能性もあるのではないかと考える。このような議論をもう少し行うべきでは。

浅野（前掲）：実際に発生した地震の現象を理解するためにはある程度複雑な震源モデルが必要であると考えられる。将来発生する地震の地震動予測を行う上で、必要な条件を示したものが強震動レシピであると考えられる。最近では数多くのシミュレーションを行うことが可能となっているので、パラメータにばらつきを与えて、計算結果がどの程度ロバストであるか、あるいは不確実性があるかを示していくことが必要であると考えられる。

早川（清水建設）：精度良い地震動予測を行うために、精度良い地下構造を知るのが第一目的ではなく、正しいグリーン関数が知りたい。想定地震の震源域で発生した地震のシミュレーションを行って、検証された地盤モデルを用いて、地震動予測を行うのが良いのではないかと考える。川瀬先生に質問したが、先生の方法では、位相は予測できないのではないかと考える。位相を評価するためにはやはり地下構造モデルを用いた予測が必要ではないかと考える。

川瀬（前掲）：実部と虚部が求まっているので、ヒルベルト変換を用いれば位相まで評価できる。また、佐藤（智）さんのご発表では、群遅延時間の平均・標準偏差のサイト係数は、表層の影響を受けにくいとのことであったので、S波の部分については震源と伝搬経路で評価できると考える。また、観測波の位相を使うという方法も考えられる。

植竹（東京電力ホールディングス）：松島先生のご発表について、どのくらいの時間測定を行えば安定する結果となると考えられるのか。

松島（前掲）：可能であれば何回か測定して、安定する

ことを確認するしかないかと考える。どのくらい測定すればよいのかについての検証は行っていない。見たい周期帯、地盤構造によって異なると考えている。

加藤（小堀鐸二研究所）：川瀬先生のご発表で、米国の地盤震動研究はオープンソースを用いることで非常に進歩し、一方、日本ではガラパゴス化が進んでいるのご発表があったが、どのような意味でガラパゴス化が進んでいるのか。それを打破するためには何が必要か。

川瀬（前掲）：海外では、非破壊的地盤探査手法のマニュアル作りを行って、ブラインドプレディクションを行っている。日本発の技術では、長さんらのBIDOや防災科研のGMSなどは一般的に使われているが、測定方法のマニュアル作成、プログラムの公開等を行い、例えば発展途上国の技術者の人材育成などを行うことが重要であると考えられる。海外技術者からのフィードバックを受け、国内の技術者の技術力の向上にもつながる。

久田（前掲）：地盤データのメンテナンスについてどのようにすればよいか。

先名（前掲）：SIPの中では社会実装や国際標準化がうたわれている。社会実装の中で地盤モデルを活用したり、観測システムを活用し外貨を獲得したりして、その資金でデータを維持する努力がなされている。この取り組みを続けてゆきたい。国の予算がない中で、社会実装や国際標準化を進めてゆくしかないと考えている。

大堀（前掲）：JST、JICAなどのプロジェクトで技術移転を行うプロジェクトが進行し、常時微動観測の分野でも現地の技術者を育てるご努力がされている。そのような視点でコメントをいただきたい。

三浦（前掲）：ペルー、コロンビアのSATREPSに携わっているが、現地の技術者に微動探査の測定方法、解析方法などを教え、現地の技術者が実際にデータを取り、地盤モデルの構築までできるように支援をしている。このような取り組みの結果、微動探査の技術が世界で使われるようになってきていると感じる。

川瀬（前掲）：個別のご努力も大事だが、All JAPANとして、プラットフォームを作って技術の展開を図り、世界標準にしていく戦略を持つことが大事ではないかと考える。OPEN STREET MAPのようなプラットフォームを作って、データをアップロードできるような世界的な仕組みが日本主導でできるとよい。

先名（前掲）：微動探査、広域地盤モデルに関する国際標準化のワーキンググループのコンビーナを務めている。そこでは微動観測のマニュアル化を進めている。日本発の技術を落とし込むスタートラインに立っている。皆様のご支援をいただいてより良いものにしてゆきたいと考えている。

（文中敬称略）