

## 第 39 回地盤震動シンポジウム(2011)報告

高橋 広人\*

## 1. はじめに

標記シンポジウムが、日本建築学会地盤震動小委員会の主催で、2011年11月15日(火)10:00~17:30、建築会館ホールにて約200名の参加者を集めて開催された。司会は、午前の部：高井伸雄(北海道大学)・関口春子(京都大学)、午後の部：神野達夫(広島大学)・上林宏敏(京都大学)、総合討論：松島信一(京都大学)・野津厚(港湾空港技術研究所)が担当した。午前の部は、主旨説明、「震源と地盤震動」では、5題の話題提供があった。昼食休憩後、午後の部は、源栄正人(東北大学)により「東日本大震災を経験して思う地盤震動研究の重要性」と題する特別講演、「構造物の振動被害と応答」では3題、「津波と構造物被害」では2題の話題提供があった。その後、「東北地方太平洋沖地震で提起された課題と今後の地盤震動研究」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嘉章(工学院大学)より、Mw9.0の東北地方太平洋沖地震は、事前には全く想定されておらず、強震動予測やサイト波の策定など、地盤震動研究に関連する様々な分野で大きな影響を与えている。そこで、東北地方太平洋沖地震について震源モデルから様々な被害まで、現時点で得られている知見を理解し、巨大地震に備えるための地盤震動研究とその周辺領域に関しての方向性の議論をお願いしたいとシンポジウムの主旨説明があった。

## 3. 話題提供・特別講演

「震源と地盤震動」では、5題の話題提供があった。

遠田晋次(京都大学)は「東北地方太平洋沖地震で明らかになった長期評価の課題と今後」と題して、海溝型地震にも内陸地震と同程度の数千年程度の長期的な地震履歴を考慮した評価が求められ、その手ごかりが古地震学・地震地質学的視点であること、また、東北地方太平洋沖地震に伴う大規模な地殻変動によって応力場が劇的に変化したことを $\Delta CFS$ (静的クーロン応力関数の変化)を用いた検討結果により紹介し、地震ハザードの再評価が必要であることを述べた。

北川(山口福祉文化大学):地震ハザードの変化の南海トラフへの影響はあるか。

遠田：計算上も観測上も南海トラフへの影響は見られていない。

三宅弘恵(東京大学)は「2011年東北地方太平洋沖地震の震源像」と題して、複数の研究者による周期約10~100秒程度を対象とした長周期震源モデル及び周期0.1~10秒程度の短周期・広帯域震源モデルに関する解析例を紹介し、それらの共通点・相違点を挙げた。また、強震動予測レシピについて、アスペリティがすべりも応力降下量も大きい領域とする仮定はM5~7クラスの内陸活断層における解析結果を海溝型巨大地震や内陸長大断層に援用しているものであり、適用には注意が必要であることを述べた。大野(東北大学):地震モーメントと面積の関係はレシピで用いられている関係と比べてどうなっているか。三宅：従来の関係の1/5、人によっては1/10程度となっている。

大野晋(東北大学)は「2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動」と題して、観測された強震記録の概要と主な特徴について紹介した。既往の被害地震と比べて短周期が大きく長周期が小さめであること、距離減衰式との比較では等価震源距離では概ね整合すること、また1978年宮城県沖地震(M7.4)の波形が記録された住友生命ビルにおける観測記録を挙げて今回の地震は継続時間は非常に長いが応答スペクトルでは3割増程度に留まっていることを紹介した。

永野(東京理科大):仙台市内のスペクトル分布に関して、同じ地域でスペクトルに差異が見られるのは地盤の影響と思われるが地盤の状況はどうなっているか。

大野：分解能のある地盤データがないので、現在検討中である。

時松孝次(東京工業大学)は「2011年東北地方太平洋沖地震での地盤と基礎の被害」と題して、東京湾岸及び利根川流域の液状化被害、東北地方の液状化や津波などによる基礎被害について紹介した。液状化が生じた箇所は概ね新しい埋立地であり直接基礎建物の沈下・傾斜などの被害が生じたこと、細粒分を多く含んだ砂が液状化した可能性があること、基礎構造設計指針による液状化判定法は沈下予測も含めて被害状況と調和的であったこと、女川や陸前高田の建設年代の古い杭基礎建物の転倒や杭の引き抜き被害は地震力または液状化による地盤のせん断強

度の低下と津波による水平力・浮力の組合せの可能性があることが紹介された。

川辺秀憲(京都大学)は「2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション」と題して、経験的グリーン関数法を用いて求めた震源モデルと地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」に使用された地下構造モデルを用いて周期4～10秒の長周期地震動を三次元有限差分法によりシミュレートし、東北地方太平洋沖地震の再現性の検証結果を紹介した。結果は地域や周期により観測記録と振幅が対応しないところはあるものの、波群や周期特性の傾向として概ね整合することを示した。

山中(東京工業大学)：時松先生の講演でK-NET稲毛の周期が4秒にのびている結果が紹介されたが、差分法の結果はあまり大きくなっていないように見えるが。

川辺：コンターに用いた色の表現上の問題で、小さいとは考えていない。

昼食休憩後、源栄正人(東北大学)により「東日本大震災を経験して思う地盤震動研究の重要性」と題して特別講演があった。本震直後のご自身の被災状況、仙台地域を中心とした地震の特徴、地震観測記録の地盤構造と対比させた分析、東北大学工学部における地震動の増幅と研究棟建物の被害状況、仙台市内における地盤条件に起因する建物被害などについて講演された。地盤調査に基づく卓越周期とは異なる周期に卓越が見られたことや傾斜地盤を伝播する表面波の卓越周期の方位依存性など地盤震動研究における課題について言及された。

「構造物の振動被害と応答」では3題の話題提供があった。

境有紀(筑波大学)は「東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害」と題して、ゆれによる木造・中低層RC建物被害と発生した地震動との対応について紹介した。特徴として震度の割に建物被害が小さいこと、0.5秒以下の極短周期が卓越しているところがほとんどであることを挙げ、建物被害が小さかったのは地震動に含まれる周期1～2秒の成分が小さいため建物耐震性が高いためではないこと、また、JMA古川など周期1～2秒の卓越を示した箇所において被害が大きくならなかったことを挙げ、木造・中低層RC建物被害が最大応答を引き起こすパルス一波でほぼ決まることを示した。

小山信(建築研究所)は「建築構造物での強震記録」と題して、東北地方太平洋沖地震の際に建築物で得

られた強震記録についてレビューし、(独)建築研究所の強震観測網で得られた強震記録のうち代表的なものを紹介した。本震の前後で固有周期と減衰が変化し今も回復していない例、東京湾岸と大阪湾岸の1階の記録において周期7秒の応答スペクトルのレベルが大差ないこと、大阪湾岸では超高層建物が共振して大きな変位応答となったことなどが紹介された。久田(工学院大学)：建物の減衰の評価方法はどのようにしているか。

小山：1自由度系でモデル化し、観測記録に合うように固有周期と減衰を探索している。

木村雄一(大成建設)は「長周期地震動対策を行った超高層ビルの観測記録と制振効果」と題して、2009年7月に制振補強工事を行った新宿センタービルの地震観測記録と補強効果について紹介した。補強前後の地震観測記録に基づく同定から補強により減衰定数の増加を確認したこと、制振効果について解析に基づいて検証したことを紹介した。

松島(京都大学)：ダンパーがある場合とない場合の挙動の観測との比較はされているか。

木村：建物は最終的に1次モードでゆれており、解析とあっていることを確認している。また2次・3次モードについてはモーダル解析で加速度があっているのを確認している。

久田(工学院大学)：耐震壁はどうなったか。

木村：塑性域に入っていないことは確認している。オイルダンパーの効果と考えている。

「津波と構造物被害」では2題の話題提供があった。

穴倉正展(産業技術総合研究所)は「地質情報に基づく869年貞観地震の復元と東北地方太平洋沖地震との比較」と題して、津波堆積物調査に基づいて推定した貞観地震の浸水域分布を説明可能な断面モデルについて紹介した。さらに東北地方太平洋沖地震と比較して、仙台・石巻平野の浸水域に関してはほぼ同程度であることを紹介した。

野津(港湾空港技術研究所)：貞観地震の震源モデルのすべりは7mだが、東北地方太平洋沖地震ではすべりは海溝沿いに40～50mといわれている。これらの違いについて。

穴倉：海溝沿いにすべりがなくても浸水する。このため海溝沿いのすべりの評価は難しいと考えている。

中埜良昭(東京大学)は「2011年東北地方太平洋沖地震における津波の波力と構造物の被害」と題して、津波荷重に関して津波被害調査に基づく検討結果について紹介した。津波波力について浸水深に基づく

衝撃波力を考慮した式と抗力による式の両面から検討し、得られた浸水係数から両者が平均的に整合すること、遮蔽物の有無によって波力低減効果の差が見られたことを紹介した。

宮崎（ダイナミックデザイン）：波力のかかる方向に関して、引き波の影響は。

中埜：波力の式では浸水深が影響する。方向については設計用の津波荷重の評価方法で「すべての方向を考慮せよ」の文言が入る予定。

宮崎：建物は同じ方向に倒れていたか。

中埜：実際には様々な方向に倒れていた。方向については今後検討したい。

源栄（東北大学）：津波により流されてきた物の衝突の影響は。

中埜：スマトラの地震のときに計算したことがある。車・バス・小型漁船は影響ないが、タンカーなどは別。構造性能が担保されるか今回の地震だけでは分からない。

源栄：建物の開口部の方向、大きさの影響があったか。

中埜：事実としてあったと思う。開口率という考え方ができるが検討していきたい。浮力の影響も検討したい。

久田（工学院大学）：東海地震では津波だけではなく地震も大きく影響すると思うが。

中埜：一般の建物ではダブルで効いてくる。今回の式は津波避難ビルを想定しているが、地震にも津波にも耐える構造を考える必要がある。

#### 4. 総合討論

以上の講演の後、総合討論では東北地方太平洋沖地震について、震源・長期評価、強震動・地盤震動、液状化・津波被害、荷重、振動被害と応答の4つのセクションに分けて議論が展開された。

##### (1) 震源・長期評価

加藤（小堀鐸二研究所）：地殻変動によって応力場が変わり、地震が発生する場所、メカニズムも変わった。想定を根本からやり直すことになるのか。また応力場の変化した状態はいつ戻るのか。

遠田（京都大学）：根本からやり直すということにはならないと思う。浜通りは本震の震源に近いので変動の影響が大きいので起こったが、震源から遠い場所では規模の大きい地震は起きていないので既存の主要活断層を考えればよい。バックグラウンド地震として扱っていたものは見直す必要がある。活断層によっては動きやすくなったものそうでないものメリハリをつけて考慮するべき。また、7年前のスマトラ地震の後まだ余効変動が続いている。応力場

はしばらく戻らないだろう。

久田（工学院大学）：海溝軸付近ですべったのが津波に重要と考えていた。貞観地震のシミュレーションと違うようだが。

宍倉（産業技術総合研究所）：海溝軸付近のすべりから生じるパルスみたいな津波は三陸に影響し、仙台平野や石巻の奥まで浸水させるには、シミュレーション上では影響が小さいと考えている。

久田（工学院大学）：東北地方太平洋沖地震の震源は想定されているプレート境界面でちゃんとすべったのか。

三宅（東京大学）：多くの研究ではプレート境界面がすべったとされている。ただ微小地震から検討している東北大の方たちは若干深いところがすべったといわれている。JAMSTECの海溝軸付近を掘る調査で分かると思う。

野津（港湾空港技術研究所）：源栄先生の講演にあった仙台における地震動の周期特性から2波目が宮城県沖地震に対応するのではという推測は強震波形に基づく震源過程と比較してどう考えるか。

三宅（東京大学）：震源の距離と面積のトレードオフがある。研究者によって解釈が異なっているので今後の研究成果に期待したい。

川辺（京都大学）：震源決定をする際に岩手、福島の波群を見る際にどの波群が1つ目2つ目と解釈するかによる。どちらも検討して陸に近い方を1つ目と解釈した。ただ読み方によって結果が変わることもある。

源栄（東北大学）：到来方向によって卓越する周期が異なる。卓越する周期で考えれば2波目が宮城県に対応すると説明がつく。

野津（港湾空港研究所）：地元の地盤震動特性の分かる方の知見を活かしていきたい。1978年宮城県沖地震の波形、スペクトルは1波目と2波目どちらが似ているか。

源栄（東北大学）：増幅の仕方は方向によって違う。1波目が増幅しないとすると方向が違うとしか考えられない。非定常性の考慮が必要。

##### (2) 強震動・地盤震動

宮崎（ダイナミックデザイン）：周期1~10秒においてはスペクトルに卓越する成分がなくフラットだった。M7くらいの地震で見られる1~3秒のパルスが5~6秒に移ると思っていたが、どう解釈していいのか。南海トラフの巨大地震においても同じことを期待していいのか。

源栄（東北大学）：現象としてどこで一番変位が出たのか。速度応答で告示の80kineに対して今回の地震をどう見るかという見解と思う。

大野（東北大学）：仙台で M7 と M9 の地震でスペクトルが大きく異なるのは周期 10 秒以上である。インバージョンでも海溝沿いの領域で長周期の波を出したといわれているのでそこが卓越周期となったと考えられる。他の地域で同じことが言えるかは分からない。

三宅（東京大学）：応答スペクトルでフラットになってしまうのは関東平野内の話と思うので川辺先生にコメントをお願いしたい。

川辺（京都大学）：全体像はつかめていないが、関東平野では、短周期は震源から遠いために減衰して落ちる。長周期は平野内でトラップされて釣り合いが取れてフラットになったと考えている。

宮崎（ダイナミックデザイン）：複数の地点で加速度記録を直接フィルターなしで積分した波形で 100 秒から波形の軸の傾きが変化している。地盤の傾きを捉えているのではと考えているが。

野津（港湾空港研究所）：地震計が傾いた可能性と地殻変動の可能性がある。青井さんにお聞きしたい。

青井（防災科学技術研究所）：加速度記録をフィルターなしで積分した波形がおかしな挙動をすることはよく知られていて、うまく積分できていない場合は適切な処置をしなければならない。要因として考えられるのは地殻変動として広域に地盤が傾いている場合やローカルに液状化などの要因により地震計が傾いている場合がある。今回は地震計の性能がよくなっているので地震計そのものが傾いたと考えるのが適切と考える。

太田（足利工業大学）：議論の中で地震計の周期特性について明確にした方がいいのでは。

青井（防災科学技術研究所）：30Hz でハイカットしているが 30Hz より低周波数側はほぼフラット。ただし位相特性までを議論するためには補正が必要。

### (3) 液状化・津波被害、荷重

長橋（千葉工業大学）：基礎構造設計指針では  $a_{max}$  を用いている。今回の地震では液状化に継続時間の影響があると思う。繰り返し回数を指針に入れていくことになるか。

時松（東京工業大学）：難しい問題である。浦安は埋立厚さが 10m だが、本震で液状化したのはそのうち下位の一部の層だったかもしれない。しかし、液状化しなかった上部の埋立層も、下層からの浸透流に

より水圧が上昇し、その状態で余震が起こったことで液状化し、被害を拡大させた可能性がある。このような余震の影響を考慮することは難しく今後の課題である。現行の建築基礎構造設計指針では、マグニチュードを指標として繰り返し回数の影響を評価しており、液状化の判定、沈下予測ともに現象を説明できている。大幅な変更はないと考えている。

中埜（東京大学）：女川で建物が転倒しているのが液状化によるものといわれているがメジャーな影響としてあることなのか。液状化した状態はどれくらいの時間続くのか。

時松（東京工業大学）：液状化の痕跡はある。ただ杭基礎であっても水平力で直接基礎相当となり波力を受けて転倒したと考えている。転倒そのものには液状化の影響は小さいのではないかと。液状化のつづく時間については透水係数による。仙台は無次元化スペクトルで見てもすぐに周期が戻っているのが比較的早く水圧が抜けた。浦安は細粒分が多く液状化した層が厚いため数時間というオーダーで液状化状態が続いたと思われる。

### (4) 振動被害と応答

久田（工学院大学）：大阪の咲洲庁舎の建物の周期がなぜ設計周期 5.5 秒と異なる 6 秒だったのか。

小山（建築研究所）：建築研究所での解析がまだ出ていないので分からない。また詳細な解析の予定はないが、大阪府が調査を進めておりその結果が出ると思うのでそちらを見てほしい。

源栄（東北大学）：建てられた建物の周期が設計周期からのびることはそれほど驚くことではないのではないか。

## 5. まとめ

最後に、地盤震動小委員会幹事の永野正行（東京理科大学）が、東北地方太平洋沖地震は 1995 年兵庫県南部地震と比べて、規模、被害地域、被害の様相、地震動のあらゆる面で異なるものであり、今回のシンポジウムは東北地方太平洋沖地震で何が起こったかを整理することを目的とした。研究者も設計者も南海トラフの地震でどうなるのが注目するところであり、次年度以降も引き続き議論していく予定であるとまとめた。

(文中敬称略)