

第 35 回地盤震動シンポジウム (2007) 報告

神野 達夫*

1. はじめに

第 35 回地盤震動シンポジウム (2007) 「頻発する内陸地殻内地震の地震動とその解釈—新・入力地震動作成手法の使い方と検証 (その 1)—」が、日本建築学会構造委員会振動運営委員会地盤震動小委員会の主催により、2007 年 11 月 16 日 10:00 ~17:30 に建築会館ホールにて開催された。およそ 180 名が参加し、盛況であった。

司会は、午前の部を前田寿郎 (早稲田大学)、鎌田泰子 (神戸大学)、午後の部を飛田 潤 (名古屋大学)、小山 信 (建築研究所)、総合討論を釜江克宏 (京都大学)、高井伸雄 (北海道大学) がそれぞれ担当した。主旨説明の後、午前中に 7 題、午後に特別講演および 4 題の話題提供があり、引き続き総合討論、まとめが行われた。

2. 主旨説明：加藤研一 (地盤震動小委員会主査／鹿島建設)

現在、地盤震動小委員会では地震と建設サイトを特定したシナリオ型強震動予測手法に基づく設計用入力地震動作成指針を作成している。この指針を提案する上で、その適用性を十分に確認することは重要であり、そのためには近年多発している被害地震の強震動を解明することが必要となる。1995 年兵庫県南部地震以後、頻繁に内陸地殻内地震が発生するようになり、特に 2007 年は 3 月に能登半島地震、7 月に新潟県中越沖地震が発生した。本シンポジウムでは、これらの地震をはじめ、近年発生した様々な内陸地殻内地震を取り上げ、現状の地震動予測レベルの到達点を地震動研究者と設計実務者間で認識し、議論することを目的としたとの説明があった。さらに、地盤震動小委員会の今後の活動方針についても説明があった。

3. 2007 年能登半島地震の解明を目指して

3. 1 活断層研究から見た特徴：遠田晋次 (産業技術総合研究所)

2007 年能登半島地震の変動地形学の観点から見た特徴としては、明瞭な地表地震断層は陸上では確認されなかったが、この地震によって海岸線において最大約 40 cm の隆起と約 10 cm の沈降が認められた。それ以外にも複数の隆起海成段丘が判読されている。このような海岸線の隆起・沈降の痕跡等の地形データならびに地質情報等を総合的に用いることで能登半島地震の地震発生長期予測は可能であったと言える。

また、過去に発生した内陸地震のマグニチュードと地表地震断層の出現率に関して再検討を試みた。その結果、マグニチュード 7.0 以上の地震で出現率は 44 % であり、活断層を線的な意味においてのみ評価した場合、調査を完璧に実施しても約半分の地震を予測できないことになる。

以上より、断層線のみにとらわれず、面的な拡がりや断層運動・地殻変動を評価するといった内陸地震評価の新たな視点・評価軸を確立するとともに、高精度かつ信頼できる内陸地震予測地図や実用的な地震地体構造図等を社会に提供していくことの必要性が指摘された。

3. 2 震源過程から見た特徴：岩田知孝 (京都大学)

震源メカニズムと余震分布から得られる 2007 年能登半島地震の震源断層の特徴について述べられた後、強震記録と測地データを用いた震源インバージョンの結果について報告が行われた。

余震記録のモデリングに基づいてチューニングした地下構造モデルを用いたグリーン関数による解析を行った結果、破壊は断層面の深部から浅部に向かって進展したこと、すべりの方向は右横ずれを主として南東の上盤が上がる動きを含んでいること、すべりの大きな領域が破壊開始点から浅い側に向かう 6 km×8 km 程度の範囲に集中していることが報告された。さらに、遠地地震、強震記録、GPS 測地データ、InSAR など、様々なデータを用いて求められた震源モデルの紹介と比較が行われた。その結果、多くのモデルのすべりは、破壊開始点から浅い側に大きいすべりの領域が広がっていること、破壊開始点を含むアスペリティがほとんどのモデルで観察されること、経験的グリーン関数法による広帯域の地震波形を用いた震源モデルは複数のすべり領域を示唆しており、被害の大きかった地域の地震動を評価するにはこれらの分析結果を比較検討しながら震源像を評価していく必要があることなどが指摘された。

3. 3 強震動から見た特徴：野津 厚 (港湾空港技術研究所)

2007 年能登半島地震で観測された強震記録の特徴について既往の研究成果を参考にしながら、まとめられた結果について報告が行われた。計測震度相当値、最大加速度、最大速度などの地震動指標の分布からは、JMA 輪島と K-NET 穴水にお

* 広島大学大学院工学研究科

いて 90 kine を超える非常に強い揺れが観測され、震度も 6 強であった。一方、震源断層の近傍でも K-NET 富来や JMA 富来ではさほど大きな最大速度は観測されなかった。また、観測された強震記録のフーリエスペクトルと別途算出されたサイト増幅特性について考察が行われ、輪島と羽咋は低周波側でのサイト増幅特性が大きく、能都、穴水、富来、七尾では、低周波側での増幅率が小さく、高周波側でそれぞれピークを有していることが明らかになり、K-NET 富来における最大速度がやや小さかったのはサイト増幅特性に起因することが明らかになった。さらに、近接した 2 地点間のスペクトル比から、強い非線型挙動を示した観測点があると推察されること、フーリエ位相は、震源のサイズよりも伝播経路およびサイト特性の影響をより強く受けていることなどが指摘された。

3. 4 地盤震動から見た特徴：山中浩明（地盤震動小委員会幹事／東京工業大学）

2007 年能登半島地震による強震動を理解することを目的として、地震直後に行われた地盤震動に関する調査研究の結果を概観し、能登半島地震の本震や余震の記録に見られる地盤震動特性と地下構造の関係について検討した。

この地震では、地盤の非線形効果、表層、あるいは深部の地盤構造の影響、地盤構造の 2・3 次元の影響、やや長周期の地震動、ディレクティブティなど、地盤震動研究において注目すべき多くの現象が観測された。特に地盤における速度コントラストが大きいため、観測された地震動にはサイト特性の影響が明瞭に認められた。こうした地盤震動特性を理解するためには、既存の強震観測点での記録だけでは不十分であり、余震観測は効果的であると考えられる。今回の地震で被災した地域では地盤構造データが豊富にあるわけではないため、地震後に実施された微動探査や地震記録を用いた地下構造の推定が地盤震動特性を理解するために非常に有益であることなどが指摘された。

3. 5 構造物被害と地震動の関係：境 有紀（筑波大学）

2007 年能登半島地震において計測震度 6 弱以上を記録した全ての強震観測点と 5 強を記録した一部の強震観測点周辺の被害調査を実施し、建物被害データと観測された強震記録を用いて、建物被害と地震動の性質の関係についての考察を行った。

2007 年能登半島地震では、様々な周期特性をもった地震動が観測され、震度 6 強を観測した全ての観測点周辺で全壊木造建物が見られたが、震度

6 弱を観測した観測点周辺では、被害レベルにばらつきが見られた。1~2 秒応答が大きい地震動が発生した観測点周辺では、古い木造建物に大きな被害が見られた。

さらに、これまでに収集した強震記録と被害データに 1.5 秒程度以上のやや長い周期が卓越した地震動が発生した 2007 年能登半島地震、および 2007 年新潟県中越沖地震で得られたデータも加えて、建物被害と対応した地震動の周期帯について再検討を行った結果、周期 1~1.5 秒の地震動が建物被害とより高い相関を持つという結果が報告された。

4. 2007 年新潟県中越沖地震の強震動と被害

4. 1 強震動の特徴：青井 真（防災科学技術研究所）

2007 年新潟県中越沖地震において観測された強震記録やその記録の解析から得られた震源過程の特徴について報告が行われた。

観測された最大の地表最大加速度は、K-NET 柏崎で観測された 813 gal であり、この記録には地盤の顕著な非線形性が認められた。観測された地震動は経験的な距離減衰式と調和的であり、地震動の周期成分としては 2~3 秒程度の比較的長周期の揺れが支配的であった。余震分布は非常に複雑であり、そのため南東傾斜、および北西傾斜の 2 つの共役な断層面が想定された。強震記録による震源インバージョンでは、これら 2 つの断層面について検討を行った。その結果、双方ともモーメントマグニチュードは 6.7 であり、破壊開始点におけるすべりは小さく、大きなすべりは破壊開始点から南西へおよそ 10 km 離れた領域で発生している。このすべりの大きな領域は、2 つの断層面が交差する付近である。防災科学技術研究所の余震分布やモーメントテンソル解は南東傾斜を支持しているが、震源インバージョンの結果から断層面を特定することは困難であることが述べられた。

4. 2 構造物被害と地震動：中村友紀子（新潟大学）

2007 年新潟県中越沖地震において、震度 6 強、および 6 弱が観測された強震観測点周辺を中心とした構造物の被害調査を実施し、その概要について報告がなされた。木造は、古い構法の建物や開口の大きい店舗併用住宅の被害が目立った。鉄筋コンクリート造の学校建物では、地盤の変状が大きく、隣り合う建物が別々に振動したことによるエキスパンションジョイントの被害や 2005 年新潟県中越地震でも被災し、今回より大きな被害が

生じた建物があった。塀の被害では、石塀の転倒率が大きかった。

また、建物被害と地震動の強さ指標の相関を検討した結果、全壊家屋が生じた地点が3箇所と少ないため、各指標間の差は小さかったが、1~2秒平均速度応答の相関が最も高くなった。全壊の発生していた3箇所のうち2箇所が隣接しており速度応答もほぼ等しかったため、そのスペクトル特性のまま、周期2秒以上で高い相関となる結果となった。しかし2005年新潟県中越地震時のデータも加えると、2007年新潟県中越沖地震のみの場合よりも建物被害と相関の高い周期帯が1~2秒に明瞭に現れることが指摘された。

5. 特別講演「ローカルサイトエフェクト研究を振り返って」：工藤一嘉（日本大学／東電設計）

「ローカルサイトエフェクト研究を振り返って」と題して、まずESG研究のこれまでの経緯について紹介があり、その後、最近Turkey Flatで実施されたサイトエフェクトに関するBlind Predictionと第3回国際ESGシンポジウム（2006年、フランス・グルノーブル）における微動による地下構造探査のBlind Predictionの概要および結果について講演が行われた。

今回のTurkey FlatにおけるBlind Predictionでは、サイトの近傍で発生した地震が対象であった。対象地点の直下の地震動を用いた予測結果のばらつきは小さいが、1km程度離れた路頭岩盤点の記録を用いた予測結果は観測を過大評価した。これは震源近傍では入力地震動の空間変動が極めて大きいことを意味している。

微動による地下構造探査のBlind Predictionでは、参加者の推定結果は実務上許容される誤差範囲内に概ね収まっている。しかし、長周期側で位相速度を過大評価する傾向があること、複雑な構造では、位相速度に対して部分的に高次モードが影響することから分散曲線の連続性に留意する必要がある。さらに本来、地下構造探査の実務では可能な限り地質や物理探査資料を参照して構造を推定することが常套であるが、今回の予測はこのような資料が全くない状況で実施されており、解析環境としては極めて厳しいものであったこと、推定された地下構造は、10m以浅ではばらつきが大きいが、それ以深では比較的精度が高いこと、予測された地下構造を用いたS波の伝播時間は出題のそれと大きく変わらず、地震動の増幅を評価するには一定の利用価値があることなどが指摘された。

6. 近年発生した内陸地殻内地震による地震動の解釈

6. 1 福岡県西方沖地震—福岡市内の強震動パルス：川瀬 博（九州大学）

福岡県西方沖地震について、福岡市内の観測記録に見られたディレクティブパルスに着目し、地震および地震動の特性、さらにそのシミュレーションに関する研究結果のレビューが行われた。

今回の地震でも地震動の特性は震源・伝播経路・サイト（地盤増幅）の3要素で決定されることが確認された。震源は比較的単純なアスペリティ分布であり、その短周期生成能も平均的であった。また、被害の集中した天神地区では特に浅い表層地盤の影響が顕著に現れたものと考えられる。さらに、フォワードモデリングによって観測された速度波形の再現を試みた検討結果では、経験的グリーン関数法によるインバージョン結果を初期モデルにして観測された速度パルスが再現できるようにそれをチューニングした結果、中央区の断層走向の延長線上で観測された周期1秒前後の速度パルスを説明するためには、約5km四方程度の単一アスペリティにおいてかなり高速の破壊を考える必要があることがわかった。地震調査研究推進本部の検証では、いわゆる入倉レシピは概ね有効であることが示されていることが報告された。

6. 2 新潟県中越地震—大加速度記録の発生要因：芝 良昭（電力中央研究所）

2004年新潟県中越地震の震源域およびその周辺において観測された大加速度強震記録について、その発生要因に関する知見をこれまでに発表された文献を紹介・整理するとともに、震源インバージョンに基づく加速度地震動の再現性の検討について報告がなされた。

本震の震源域における最大加速度分布は、逆断層の上盤効果を考慮することで既往の地震のばらつきの範囲内に収まる。既往の研究によると、地震規模については、今回の本震は魚沼丘陵に沿う地質構造から予測される最大規模であったこと、広帯域強震動シミュレーションから推定されたアスペリティ面積や実効応力は既往のスケールに則ることが指摘されている。高実効応力のバッチ領域により局地的に大加速度が生じる可能性やリフト堆積物による厚い堆積層や褶曲構造に起因する地盤の不整形性が強震動に与える影響については更なる検討が必要であることが指摘された。さらに、本シンポジウムの主テーマである設計用入力地震動策定の指針化という観点から、2004年新潟県中越地震とその地震動特性の予測可能性に

についても考察が行われた。

6. 3 宮城県北部地震—震源近傍の強震動の再現：大野 晋（東北大学）

震源近傍での記録が得られていない 2003 年宮城県北部地震を対象として、その地震の概要、ならびに半経験法及び理論的地震動評価法を用いて地下構造及び震源のモデル化を行い、震源域での地震動を推定した結果について報告が行われた。

宮城県北部地震の強震動は、1 つのアスペリティを設定することで説明が可能であるが、その面積は既往の地震に比べてやや小さめであった。震源域の地震動を推定した結果、工学的基盤で 45～60 cm/s、地表で 80～90 cm/s 程度であり、地表では工学的基盤に比べ、周期 0.5～2 秒を中心に地震動が増幅された。推定された地震動のレベルは、大局的には墓石の転倒率調査の結果やアンケート震度などと整合する。

6. 4 内陸地殻内地震による地震動の相互比較—類似点と相違点：久田嘉章（工学院大学）

近年明らかになった震源近傍の強震動特性であるフリグステップ、ディレクティブティパルス、ランダム波の成因と実例を紹介し、フリグステップとディレクティブティパルスが現れる場合、告示レベルである 100 cm/s 程度の応答スペクトルを凌駕する可能性が高いことの説明があった。近年発生した「震源を特定しにくい地震」である、2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震といった内陸地殻内地震の特性とその震源近傍の強震動特性を観測記録、および特性化震源モデルなどを用いて調べた。その結果、これらの地震は高角逆断層の地震であり、破壊伝播が近づき（フォワード領域）、ディレクティブティパルスが現れる震源近傍の観測点では 100 cm/s 程度のスペクトルレベルを凌駕すること、逆に破壊伝播が離れ（バックワード領域）、ランダム波に近くなる領域では軟弱地盤や堆積盆地の観測点を除き、100 cm/s 程度以下のスペクトルレベルとなる。また、特性化震源モデルを用いた場合、フォワード領域でのディレクティブティパルスの計算には優れているが、アスペリティ内で単純な破壊過程を仮定すると、特にバックワード領域での波形が滑らかになり、過小評価になる場合があることが指摘された。

7. 総合討論

最近発生した内陸地殻内地震に関する 11 題の

話題提供、ならびに特別講演に引き続き、総合討論が行われた。司会の釜江より現在作成中の指針の概要および位置付け、本シンポジウムとの関係、さらに総合討論における論点について説明があった。その後、これまでの話題提供についての簡単なレビューに引き続き、総合討論が行われた。

7. 1 活断層調査によって得られる情報

釜江より、活断層調査によって得られる情報から強震動予測に必要な情報がどの程度得られるのか、また得られた情報の精度はどの程度かについて会場に問いかけが行われた。これに対して遠田は、地表に現れた活断層情報と実際の地下の断層の乖離が最も大きな問題である。アスペリティや破壊開始点の位置など不確定要素が非常に多く、情報をいくら集めても断層破壊のシナリオを特定することは困難であることから、多くのシナリオを考える必要があると指摘した。また、断層を特定しにくい断層については、個々の活断層の調査だけでなく、地層の変形量からその地域を「Zone」として捉え検討する必要があることも指摘した。

藤原（防災科学技術研究所）からは、地震調査推進本部において長期評価手法の見直しが始まっており、ある断層帯において発生する地震のうち最大ではなく一回り小さい地震、あるいは地表に現れにくい断層による地震をどのように扱うかが議論されていることが紹介された。

また、諸井（鹿島建設）より、地震動の予測の観点を考えると、活断層は地表に断層が現れたかどうかではなく、対応する活断層があるか否かで分類すべきではないかとの意見があった。これに対して遠田は、地表に現れる断層が少しでも、それが何度も繰り返されたとき、どのようになるかについては今後の議論をしていかなければならないと答えた。能登半島地震はどのような断層に分類されるかとの問いに対しては、海域調査で若干のずれは見つかっているが、地質の累積のデータがなければ、特定しにくい地震であったと判断できると回答した。さらに、諸井、川瀬から、活断層情報を出す側とそれを利用して強震動予測を行う側の情報の認識が異なることが指摘された。

7. 2 活断層の情報に基づく震源断層のモデル化

野津は、最近の地震を見ると少し小さめで強い地震動を出すアスペリティを設定した方が地震動を良く再現できるのではないかという印象を持っており、レシピの見直しも必要ではないかとの意見を述べた。これに対して釜江は、必ずしもこれ

までの枠組みにとらわれる必要はないが、最近の地震において特殊な現象が起きている可能性を否定できる状況でもなく、ばらつきの範囲内であるとの考え方もできることから、結論を出すには早計ではないかと指摘した。また、浅野（京都大学）からは、アスペリティの大きさはスケーリング則のばらつきの範囲内であるとの回答があった。

一方、加藤からは2007年能登半島地震、あるいは2005年新潟県中越地震における複数の研究者による震源インバージョン結果のばらつきの要因について質問が出された。これに対して、芝は2005年新潟県中越地震について、対象周波数、余震分布をもとに決められる初期断層面の設定の仕方、断層面の大きさがばらつきの要因であるが、定性的には共通している部分があるのも事実であると答えた。一方、浅野は2007年能登半島地震について、断層面の設定の仕方、観測点の選び方、グリーン関数を計算する際の地下構造モデルなどがばらつきの要因と考えられるが、特性化を行うとそれほど大きな違いはないとの印象を持っていると答えた。

また釜江は、強震動の予測をする上でアスペリティの場所と破壊開始点の設定は非常に重要であるが、現状では地質学的情報に頼るのみであると指摘した。これに対し川瀬は、強震動予測をする際に複数のシナリオを用意し、その一つとしてディレクティブパルスが最も大きく出るようなアスペリティの位置と破壊様式を想定することは重要だが、発生確率も考慮に入れる必要があり、最悪のシナリオに対して設計をするかどうかは別の問題であると述べた。

7. 3 深部・浅部地盤構造のモデル化

藤原から、策定中の指針では計算方法の標準化だけでなく、計算に用いるパラメーターをどのように準備していくかについての方向性も示してほしいとの要望が述べられた後、現在、防災科学技術研究所において地震動の予測をする際に初期モデルとして利用可能な全国的な深部地盤モデルのデータベース化を行うプロジェクトが実施されており、平成20年度中に公開できる見通しであることが紹介された。また、日本全体の地下構造のモデルは個々の研究者の独自の努力だけではできないため、データの標準化、あるいは誰でも安心して利用できるデータセット構築のためのシステム作成に関する提言を学会等で行うべきであるとの指摘がなされた。これに対して山中は、このデータベースは、利用者から新たな探査結果やモデルに対する評価がフィードバックされ、より良いデ

ータベースに更新されていくシステムを持つことが望まれると述べた。

また、地盤の非線形性に関連して野津は、一般的には地盤をサンプリングし、室内試験によって地盤の特性を把握すれば、地盤の非線形性を考慮した地震動の計算は可能である。この際、工学的基盤より深い地盤については線形を仮定しているが、実際には非線形化している事例も見られる。したがって、工学的基盤以深は線形という仮定の妥当性が今後の課題の一つになることを指摘した。

7. 4 高精度な被害予測のモデル化、耐震設計への適用

釜江より、構造物の設計や被害予測を行う側から指針あるいは強震動予測に何を求めるかとの問いかけがなされた。これに対して、境は、既存不適格建物を減らすことが地震被害の軽減につながる。そのためには周期1秒程度までの地震動の予測が重要である。しかもそれは波形ではなく、まずはスペクトルレベルで十分であると述べた。

さらに鱒沢（工学院大学）は実務経験者の立場から、予測される地震動は、手法、あるいはアスペリティ、破壊開始点の位置によって大きく異なる。建物の固有周期に対して最も危険なシナリオを想定し、そのシナリオが実際に起きた際の建物の挙動をどのレベルに押さえるべきかを適切に設定することが重要である。現段階では、1つの地震動を与ええることは難しいが、複数の地震動を想定することが建物の安全性の一助にはなると思われると述べた。

最後に釜江が、本シンポジウムで話題となった5つの地震等から得られた新しい知見が指針にフィードバックできるように今後も努めるべきであると述べて総合討論を閉めた。

8. まとめ：野畑有秀（地盤震動小委員会幹事／大林組）

地盤震動小委員会では、耐震設計への適用を最終目的とし、震源・伝播・地盤震動に関する強震動研究の最新動向を把握し、学会員に周知・議論する場をシンポジウムや指針を通して提供することのマニフェストに基づき、次年度以降、「設計用入力地震動作成指針」を刊行し、シンポジウムでは、ベンチマークテストやブラインドテストのような地震動作成に関する現在の実力を再確認するための企画を行っていききたいとの予定が述べられ、本シンポジウムは閉会となった。

（文中敬称略）