

戦略的国際科学技術協力推進事業
国際緊急共同研究・調査支援プログラム（J-RAPID）

1. 研究・調査課題名：「東北地方太平洋沖地震における非線形地盤応答の定量的評価」
2. 研究・調査期間：平成 23 年 10 月～平成 25 年 3 月
3. 支援額： 総額 6,710,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	川瀬 博	京都大学 防災研究所	教授
研究者	松島信一	京都大学 防災研究所	准教授
研究者	浅野公之	京都大学 防災研究所	助教
研究者	長嶋史明	京都大学 防災研究所	研究員
研究者	佐藤智美	清水建設 技術研究所	主任研究員
研究者	早川 崇	清水建設 技術研究所	主任研究員
参加研究者 のべ 10 名			

相手側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	フロレン・ドマルタン	BRGM(フランス地質調査所)	研究員
研究者	ファビアン・ボニージャ	IFSTTAR(フランス交通通信科学技術研究所)	主任研究員
研究者	ルカ・レンテイ	IFSTTAR (フランス交通通信科学技術研究所)	研究員
研究者	セリーヌ・ゲリス	IRSN(フランス原子力安全研究所)	研究員
研究者	ジュリー・レグニエ	CETE(フランス通産省技術研究センター)	研究員
研究者	エヴリン・フォレスト	BRGM(フランス地質調査所)	主任研究員
参加研究者 のべ 7 名			

5. 研究・調査の目的

東北地方太平洋沖地震では宮城県・茨城県・栃木県・千葉県を中心に加速度が大きく継続時間の長い観測記録が多数得られている。本共同研究では、構造物の耐震設計に資するため、その東北地方太平洋沖地震の本震およびその観測点を中心に独自に展開する余震観測ネットワークで得られた観測記録を用いて、その強震動特性の特徴を抽出、特に地盤の非線形応答特性を明らかにすることを目的とする。

6. 研究・調査の成果

6-1 研究・調査の成果

震源特性に関する研究成果

- ・東北地方太平洋沖地震本震の入力地震動の検討に必要な震源モデルの推定を周期 0.1-10 秒の帯域で、経験的グリーン関数法を使用した広帯域地震動シミュレーションに基づいて行い、本研究の研究対象地域である東北地方から関東地方の地震動は、4 つの強震動生成域の寄与によることを説明できた。推定された震源モデルによって広域での地震動波形や応答スペクトルを再現した。

- ・経験的グリーン関数法に基づき、2011 年東北地方太平洋沖地震の周期 0.1～20 秒程度の強震動を生成する強震動生成域から成る震源モデルの推定を行った。周期 20 秒程度以上の長周期の地震動や津波を生成する領域は海溝軸付近に推定されているが、強震動生成域の位置はこれらとは異なり、陸域にあることを確認した。この周期帯域の強震動の励起特性を表す短周期レベルは、過去のマグニチュード 6～7 クラスのプレート境界地震のスケーリングと整合することがわかった。

地盤構造に関する研究成果

- ・防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET の築館観測点 (MYG004) およびその周辺での臨時強震動観測記録の水平上下スペクトル比に着目して同定した地盤特性から、築館周辺では地震基盤が深さ約 2.5km であること、10～20m 程度で S 波速度が 500m/s と浅層地盤が比較的薄い地盤であるために高振動数が卓越することがわかった。
- ・K-NET 古川観測点 (MYG006) およびその周辺で同様に地盤構造を同定したところ、この地域では地震基盤の深さが約 2000m であることを示すことができた。余震観測データに基づき、東北地方太平洋沖地震の際に被害の大きかった地点での臨時強震動観測点とそれほど被害が大きくなかった MYG006 とを比較すると、両者とも卓越する 3Hz 付近で被害の大きかった地点のほうが約 1.5 倍大きかったことがわかった。
- ・K-NET 鉾田観測点 (IBR013) およびその周辺での地盤同定結果から、この地域の地震基盤は 1400～1600m 程度であることを示すことができた。IBR013 と同じ敷地での臨時強震動観測点と比較すると両者の震動が卓越する約 5Hz では IBR013 の方が約 3 倍大きいことがわかり、IBR013 で東北地方太平洋沖地震の際に大加速度が観測されたにもかかわらず周辺の被害がそれほど大きくなかった原因であると推察された。
- ・防災科学技術研究所の基盤強震観測網 KiK-net の岩瀬観測点 (IBRH11) およびその周辺での地盤同定結果からは、深さ 100～250m 程度で地震基盤となり全体的に浅層地盤の厚さが薄いことがわかった。

非線形応答に関する研究成果

- ・引き戻し解析により、推定された MYG004 での本震時の第一波群の基盤地震動は最大加速度が 450cm/s^2 程度であったこと、浅層地盤のみならず S 波速度が 2000m/s 程度の岩盤においても非線形化しており、その結果卓越振動数が 5Hz 程度にまで下がっていたことがわかった。
- ・2003 年宮城県北部地震等の過去の地震でも大加速度記録が MYG004 で観測されているので、4Hz と 10Hz にある S 波卓越振動数がどのように非線形化しているかを特定した。それを拘束条件として、剛性—ひずみ曲線と減衰—ひずみ曲線を用いて、第 1 層と第 2 層に非線形性を与えて等価線形化法による応答解析を実施した結果、第 1 層と第 2 層の非線形特性は平均と平均+標準偏差との中間的な非線形特性を有しているものと推定された。
- ・東北地方太平洋地震の観測データからフランス側の研究チームが見出した地盤の非線形挙動が明瞭に観測された地点を含む、複数の強震観測地点での本震時のサイト特性の推定を試み、既往の研究結果と比較したところ、地盤の非線形挙動が観測された地点では、サイト特性の値が小さくなったものの、明瞭な卓越周波数の低下は見られないことを明らかにした。
- ・IBRH11 での大振幅地震動は、推定した観測点直下の大きなインピーダンスコントラストと地盤の非線形性の影響を考慮すると、ほぼ再現できることを示した。またアレー微動、及び、弱震動の地中に対する地表のスペクトル比から推定した地下構造モデルを用いた拡散波動場理論に基づく水平上下比と弱震動の水平上下比がよく合うことも示し、拡散波動場理論の有効

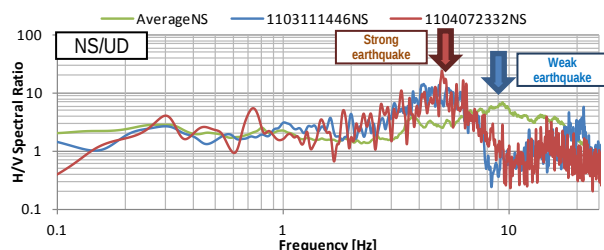


図 K-NET 築館 (MYG006) における本震と最大の加速度を与えた余震、および中小地震の水平上下比

性を検証できた。

フランス側の研究成果

- ・強震時の卓越振動数の変化を調べ、東北地方太平洋沖地震の際には、低下した卓越振動数は 300 秒が経過しても強震前の状態に戻らないこと、二次以降の卓越振動数が受ける影響がより大きいことを示すことができた。
- ・作用した強震動と地盤の非線形の度合いを簡易に測る手法を用いて観測点の地盤特性を考慮して最大加速度とせん断ひずみとの関係を調べたところ、KiK-net 山元 (MYGH10)、KiK-net 岩瀬 (IBRH11)、KiK-net 石下 (IBRH10)、KiK-net つくば (IBRH19) の観測記録に非線形の影響が顕著に出ていることがわかった。
- ・非線形の影響が大きいと同定された IBRH19 において、地中と地表の強震動観測記録から地盤構造を同定したところ、東北地方太平洋沖地震の際には、S 波速度 2300m/s の層も非線形化していたことがわかった。
- ・IBRH19 と IBRH11 を含む三次元地盤構造を考慮した強震動シミュレーション結果から、地盤増幅特性は地形効果によって水平成層構造を考慮した場合とは異なることを示し、地形効果を考慮することが重要であることがわかった。

7. 主な論文発表・特許等（5 件以内）

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	Ariane Ducellier (BRGM), Hiroshi Kawase (DPRI, Kyoto University), and Shinichi Matsushima (DPRI, Kyoto University), Validation of a New Velocity Structure Inversion Method Based on Horizontal - to - Vertical (H/V) Spectral Ratios of Earthquake Motions in the Tohoku Area, Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, 103, 2A, 958-970, 2013.	相手側と共著
論文	Asano, Kimiyuki (DORI, Kyoto University) and Tomotaka Iwata (DORI, Kyoto University), Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, Vol.64, 1111-1123, 2012.	