

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動と地震動災害 趣旨説明にかえて 2011 Tohoku Earthquake: strong motion and seismic disaster: purpose of the session

干場 充之^{1*}, 浅野 公之²

HOSHIBA, Mitsuyuki^{1*}, ASANO, Kimiyuki²

¹ 気象研究所, ² 京都大学防災研究所

¹Meteorological Research Institute, ²DPRI, Kyoto Univ.

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、未曾有の大きな被害となった津波を発生させたほか、東北から関東に至る広域で強震動をもたらした。K-NET 築館(MYG004)では、3成分合成で2900galを超える加速度が観測され、震度階としても震度7の揺れとなった。震央から350km以上離れた群馬県や埼玉県でも震度6弱の揺れとなるなど、震度6強や震度6弱の強震動の範囲も東北地方から関東地域の非常に広い範囲に及んでいる。さらに、この地震の地震動の継続時間は極めて長い。東方地方の加速度記録には、一度極大値が現れたのち、およそ50秒後に2回目のピークが現われている。また、関東地方の記録では、P波の着震から最大加速度が現れるまでに120秒程度かかっている観測点が多い。さらに、長周期の地震動により、東北や関東地方ばかりでなく、大阪の超高層ビルでも大きく揺れている。

一方、これらの強震動により、建物の被害、天井の落下や空調・照明などの損傷等が生じた。また、今回の地震被害の特徴として、東京湾岸や利根川地域などでの広範囲での液状化に伴う被害が挙げられる。

この地震の地震動の特徴や被害を正確な把握し、さらに、それをもたらした原因の追及することは今後の超巨大地震に備える上で重要である。そこで、日本地震学会強震動委員会と大会・企画委員会の共同提案をうけて、本セッション「2011年東北地方太平洋沖地震の強震動と地震動災害」を開催することとなった。

本セッションでは、招待講演として、これらの地震の強震動の特徴のレビューと、被害の特徴についての報告をしてもらう予定である。

東方地方太平洋沖地震の強震動と地震動被害、またそれらの教訓について、幅広い議論をしていきたい。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 地震動, 強震動, 地震動災害, 被害

Keywords: The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, strong ground motion, seismic disaster

東北地方太平洋沖地震の特徴 Characteristics of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

青井 真^{1*}, 功刀 卓¹, 鈴木 亘¹, 森川 信之¹, 藤原 広行¹

AOI, Shin^{1*}, KUNUGI, Takashi¹, SUZUKI, Wataru¹, MORIKAWA, Nobuyuki¹, FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所

¹NIED

東北地方太平洋沖地震は日本周辺で発生した地震としては有史以来最大規模のものであり、断層に沿って稠密な観測網により強震記録の得られた初めての M9 クラスの地震である。北海道から九州にいたる 1223 点の K-NET 及び KiK-net 観測点で地震動が記録され、特に岩手県から千葉県にかけての 20 観測点で 1g を超える加速度が記録された。最も大きな最大加速度 (PGA) である 2933 gal (3 成分合成) が K-NET 築館で観測された。震度 7 を記録したのはこの観測点のみであるが、断層が極めて大きかったことを反映し、地震動が大きかった地域は広域にわたっている。震度 6 強を記録した地域は宮城、福島、茨城、栃木県にまたがる差し渡し約 300 km にも及び、震度 5 弱の揺れは東北地方及び関東地方の大部分を含む極めて広い地域で観測された。今回の地震における被害の直接的な原因の多くは津波であるが、強震動による被害も多く報告されている。一方で、純粹な揺れによる被害率という観点では過去の同程度の震度と比較して有意に低いとの調査結果が多い。PGA や震度が大きかった割に建物被害が少なかった理由として、周期 0.5 秒以下の短周期成分が卓越したために PGA や震度が大きくなったが、低層建築物に大きな被害を与える周期 1-2 秒の地震動がさほど大きくはなかったことが挙げられる。川瀬 (1998) が大破以上の被害が出る閾値として提案している PGA が 800 gal 以上かつ最大速度 (PGV) が 100 cm/s 以上を目安に今回の地震動を考えると、PGA がこれより大きかった地点は多いが、PGV に関しては K-NET 築館でわずかに 100 cm/s を超えたのみであり、1995 年兵庫県南部地震や 2004 年新潟県中越地震などの過去において大きな被害を生じた地点における地震動は全て PGA のみならず PGV も大きかったのとは対照的である。このように短周期が卓越したのは、薄く堆積した S 波速度が遅い表層によって短周期成分が選択的に大きく増幅したためであると考えられる。距離減衰式を用いて評価したサイト増幅特性 (森川・他, 2007) において周期 0.1-0.5 秒の増幅度が大きな観測点と観測された震度の相関が高い一方、それらの観測点の多くでは周期 1-2 秒の増幅率が特に系統的に大きいわけではない。地震動の大きさは、震源放射特性や断層距離にも大きく影響され、また地盤応答の非線形性の影響を受けるなど単純な線形増幅の仮定に基づく議論では不十分であることは明らかであるが、大きな震度が観測された主要因の一つは短周期成分の増幅特性であると考えられる。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 震度, PGA, PGV, K-NET, KiK-net

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, seismic intensity, PGA, PGV, K-NET, KiK-net

東京湾岸における 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震波の位相速度 Phase velocities of long period waves in the Tokyo bay area from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

植竹 富一^{1*}

UETAKE, Tomiichi^{1*}

¹ 東京電力株式会社

¹Tokyo Electric Power Company

地震波の伝播速度は、地震動特性の分析や地下構造モデルの検証にとって重要な情報である。東北地方太平洋沖地震の記録から長周期地震動の伝播速度を評価することは、南海トラフ巨大地震で首都圏に到来する長周期地震動に備えるためにも重要な情報になると考えられる。東京電力では、東京湾岸の火力発電所及び技術開発研究所の計 13 地点に広帯域速度型強震計 (VSE-355G3) を設置して、地震観測を実施している。2011 年東北地方太平洋沖地震では、東京湾岸のすべての地点で記録を取得する事が出来た。観測された速度波形を見ると、長周期 (周期約 20 秒) で大振幅のパルス波が北東方向から南西方向に伝播していることがわかる。このパルス波は、上下動で特に明瞭である。

川崎を中心に品川から横浜までの 6 地点の上下動記録 (記録長 300 秒) を対象に、周波数 - 波数スペクトル解析を行い、位相速度と伝播方向の推定を行った。周波数 0.04Hz では、位相速度 3.6km/s、0.05Hz で 4.0 km/s でほぼ震央方向 (N40E) から波が到来しており、波形から波群の立ち上がり評価した場合と対応している。0.06Hz から 0.17Hz までは分散性が見られ、周波数 0.06Hz で 4.3km/s、0.17Hz で 3.4km/s となっている。速度分散性と地下構造の関係を見るために、長周期地震動予測地図 2009 年試作版の地下構造モデルから川崎火力近傍の地下構造を抽出し、レーリー波の位相速度を計算した。観測記録から評価した位相速度は、基本モードの位相速度より速く、一次高調モードに近い値となっている。周波数 - 波数スペクトルの解析結果は、非定常な波動伝播の影響を受ける可能性もあることから、狭帯域フィルター波形を用いてセンブランス解析を行い、区間毎の位相速度も評価した。フィルターの中心周期は 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20 秒とし、周波数領域で、中心周波数の $\pm 20\%$ 幅のコサイン型のフィルターをかけた。解析区間長は 40 秒間とし、20 秒ずつずらして区間毎に位相速度を求めた。周期 12, 15, 20 秒の結果については、基本モードに対応する位相速度を示す解析区間も見られた。一方、周期 5, 6, 7, 8, 9, 10 秒については、一次高調モードと速度が一致する区間が得られている。なお、トランスパース成分を用いて同様に位相速度を求め、ラブ波の理論位相速度と比較したところ、周期 5~10 秒で一次高調モードとの対応の良い傾向が見られた。

以上の検討から、2011 年東北地方太平洋沖地震による東京湾岸の長周期地震動では、基本モードでなく高次モードが卓越した可能性が示唆される。基本モードが卓越した場合、振幅がより大きくなると考えられることから、さらなる検討が必要と考える。

キーワード: 位相速度, 長周期地震動, 東京湾岸, 東北地方太平洋沖地震, 周波数 - 波数スペクトル解析, センブランス解析

Keywords: Phase Velocity, Long-period Seismic Motion, The Tokyo Bay Area, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Semblance Analysis

異なる断層モデルに基づく等価震源距離を用いた2011年東北地震の最大値距離減衰特性について

Attenuation characteristics of peak motions during the 2011 Tohoku earthquake using EHD based on different fault models

司 宏俊^{1*}, 纈 纈 一起¹, 三宅 弘恵¹, Ibrahim Rami¹
SI, Hongjun^{1*}, KOKETSU, Kazuki¹, MIYAKE, Hiroe¹, IBRAHIM, Rami¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The M_w 9.1 Tohoku earthquake, occurred on 2011 March 11, caused over 15,000 people dead and over 3300 people missing. The earthquake, ruptured all the segments from off-Iwate to off-Ibaraki along the Japanese trench, for a total distance of about 480 km (e.g., Yokota et al., 2011), with a moment magnitude of 9.0 - 9.1, is one of the largest mega-thrust earthquakes in the world.

During the earthquake, abundant strong motion datasets have been derived. These datasets indicated that the observed PGAs and PGVs are generally less than the predictions by the existing attenuation models using fault distance (e.g., Boore, 2011; Si et al., 2011). On the other hand, it is also indicated that, by using equivalent hypocentral distance (EHD), the observations are generally consistent the predictions by Si and Midorikawa (1999)(e.g., Kanda et al., 2011; Nishimura et al., 2011; and Ohno, 2011). Since arguments on the appropriateness of EHD as a distance measurement still remain (e.g., Fukushima, 1994), it is needed to confirm the calculated EHDs and their variation.

In this study, considering that the EHD generally depends on the fault model used in the calculation, the variation of EHDs and its impact on attenuation characteristics of PGA and PGV are discussed based on 3 typical slip models proposed for the Tohoku earthquake. The first two models are the models proposed by Yokota et al. (2011) based on the joint inversion of teleseismic, strong motion, geodetic and Tsunami datasets, and Shao et al. (2011) based on the inversion of teleseismic datasets, relatively. The two models are characterized by the location of most ruptured area, around (Yokota et al., 2011) or easterly (Shao et al. (2011)) of the hypocenter. The third model is a uniformly distributed slip model, in which the slips are normalized to unit slips.

Using the EHDs calculated by the 3 fault model, The attenuation characteristics of PGAs and PGVs observed are compared with those predicted by Si and Midorikawa (1999). The results indicated that, (1) there are difference between the results based on different slip models, and the fitting is generally better by using the model by Yokota et al.(2011); (2) for part of the stations around Kanto area there are large differences between EHDs calculated from the uniformly distributed slip model and the inverted ones, leading to the differences in the attenuation characteristics for PGAs and PGVs.

Acknowledgement The strong motion data recorded by K-NET and KiK-net are used in this study.

キーワード: 等価震源距離, 距離減衰特性, 2011年東北地震, 断層モデル

Keywords: Equivalent hypocentral distance, Attenuation characteristics, 2011 Tohoku earthquake, Fault model

東日本大震災において東京湾岸で発生した地盤の液状化 Soil liquefaction in Tokyo Bay area during the 2011 Great East Japan Earthquake

安田 進^{1*}
YASUDA, Susumu^{1*}

¹ 東京電機大学理工学部
¹Tokyo Denki University

2011年東日本大震災では東京湾岸で激しい液状化が発生した。地震後から約10日かけて著者達は液状化地点の調査を行い、暫定版の液状化発生地図を作成した。液状化による被害は甚大であったため、国土交通省関東地方整備局は地盤工学会に研究をし、共同で液状化地点の確定を行った。図1がこの結果作成されたもので、暫定の地図から少し修正してある。この地図に示されるように、新木場から浦安市、市川市、船橋市、習志野市、千葉市にかけて激しい液状化が発生した。この間に液状化した面積は約41 km²である。これは2011年ニュージーランド・クライストチャーチ地震で液状化した面積より広がった。これらの地区は1966年頃以降に海底の土砂を浚渫して埋め立てられた。その埋立土が液状化したと考えられる。

液状化した地区の震度は気象庁震度階で5弱から5強であり、地表最大加速度も160 to 230 cm/s²程度にもかわらず、地表は噴砂で覆われるまでの激しい液状化が発生した。住民からのヒアリングによると噴水が発生した時刻は場所によって異なっていた。これは液状化した深さや地下水位が場所によって異なっていたことを意味していると考えられる。また、一部の住民の方によると噴水は本震では発生せず、余震で発生したとのことである。したがって、本震の継続時間が長かったことや、29分後の余震の影響によって激しい液状化が生じたと言える。

液状化した地盤の特徴として、1) 多量の噴砂が生じ地盤の沈下量も大きかった、2) 歩道や小路で座屈のような突き上げが発生した、ということが上げられる。前者は液状化した砂が非常に細粒であったためにこのようになったと考えられる。後者は液状化した地盤の一種のスロッシングによって生じたのではないかと考えられる。下水道管は蛇行し、また、マンホールは水平方向にずれて液状化した砂が入り込むといった被害が発生したが、このような特異な被害もスロッシングによって発生したのではないかと考えられる。

東北から関東にかけて、約、27,000軒の家屋が液状化により被災したが、そのうち、約半数は東京湾岸の液状化によるものであった。最も被災戸数が多い浦安市においては半壊以上の戸数が3,680戸に及んだ。これらの家屋は大きく沈下し、また、傾斜していた。

キーワード: 東日本大震災, 液状化, 埋立地, 戸建住宅, 下水管渠

Keywords: Great East Japan earthquake, Liquefaction, reclaimed land, house, sewerage pipe

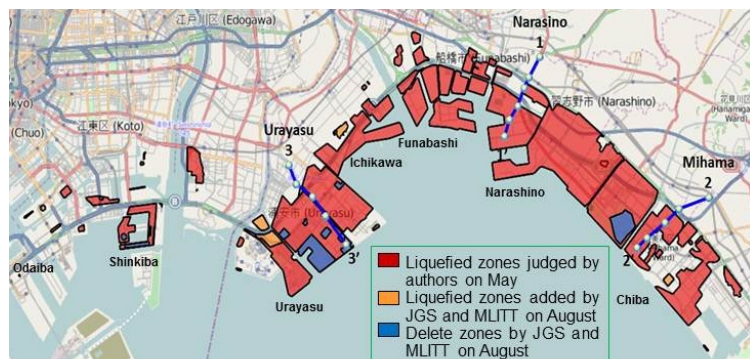


Figure 1 Liquefied area from Odaiba in Tokyo to Chiba City (Joint research by Kanto Regional Development Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism and JGS)

表層地盤液状化被害の非一様性に及ぼす深部傾斜地層の影響 Non-uniformity of Surface Layer Liquefaction Damage Caused by Layered System Organization and Dip of Deeper Layer

浅岡 顕^{1*}, 野田 利弘², 中井 健太郎²
ASAOKA, Akira^{1*}, NODA, Toshihiro², Kentaro Nakai²

¹ (財)地震予知総合研究振興会, ²名古屋大学大学院
¹Association for the Development of Earthquake Prediction, ²Nagoya University

東北地方太平洋沖地震では、浦安市をはじめ、沿岸部埋立地盤において液状化現象が広範に発生した。その特徴として、(1)震源から約450km離れており、周辺のK-netなどの地表面観測記録では最大100~200gal程度にもかかわらず、比較的長周期の揺れが継続し、(2)細粒分を多く含む埋土層も含めて広範に液状化したこと、などが挙げられている。(2)については地震動が長く継続した点がよく指摘されている。著者らは、液状化被害が軽微であった陸側は沖積砂層直下の軟弱粘土層厚が10m程度と薄いのに対し、液状化被害が甚大であった海側へ向かうほど、軟弱粘土層厚(N値0)が厚くなっている地層構成に着目して、多層系地盤の一次元弾塑性地震応答解析の結果、地震動の継続時間の長さに加え、液状化層以深の軟弱粘土層の存在によって、地震波がやや長周期の範囲で増幅され、これによる大きな塑性ひずみによって、液状化しにくいclayey sandさえもが大きな被害を受けた可能性があることを示した。本稿では、さらに上記の粘土層とその下部に位置する洪積層との境界の傾斜に着目して二次元解析を実施し、この解析から、一次元解析では液状化しない場合でも、この傾斜境界の存在によって、地盤内に液状化が非一様に発生することを示す。なお、これらの解析は、砂から中間土、粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル)を搭載した水~土骨格連成有限変形解析コードGEOASIAによる。

図1は、一次元地盤モデルの解析結果であり、解析対象地盤の地層構成と埋土層中央部における時間-過剰間隙水圧比関係を示す。ここでは入力地震動はAsaoka et al.(2011)と同じであるが、層序はより現実に即してモデル化し、埋土層(約0~-5m)と沖積砂層(-5m~-10m)の弾塑性材料定数は液状化しにくい値に変更して解析している。このため、埋土層では過剰間隙水圧比が0.8程度でとどまり、液状化には至っていない。図2は、二次元の解析結果であり、地震開始から150秒後(入力地震波の最大加速度時)のせん断ひずみ分布と、図中点Aで示した埋土層の時間-過剰間隙水圧比関係を示す。この図から、点A近傍で特に大きなひずみが発生し、過剰間隙水圧比が0.95を超えて液状化が発生している。これは、入力地震波が粘土層で増幅されることに加えて、沖積粘土層と洪積層の境界が傾斜しているためである。計算は、地震動のSV成分の発生とともに、洪積層での反射を伴う地震波の多次元的な伝播を示している。表層では点Aのほかにもあちこちで局所的に大きな塑性変形が発生している。

液状化被害の程度が空間的に非一様で、そのばらつきが大きいことも今回の震災の一つの特徴である。地盤材料の不均質性はよく指摘されるが、今回の解析結果は均質な地盤材料であっても層序の不均質性に起因する地盤変状のばらつきが大きいことを示した。これらは一次元解析では考慮しえない事項であり、多次元有効応力解析の必要性が強調される。

Asaoka, A., Noda, T. and Nakai, K. (2011): The effect of stratum organization on the occurrence of liquefaction in silty sand, 日本地震学会講演予稿集 2011 年度秋季大会, p.56.

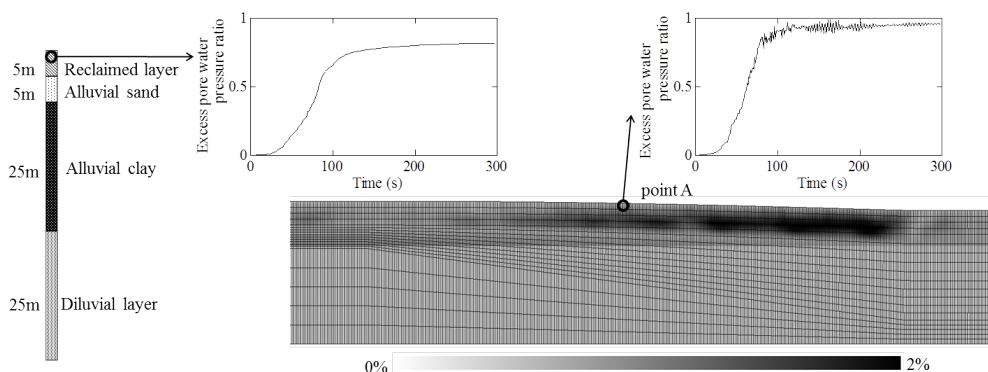


Fig.1: 1D analysis result of excess pore water pressure ratio at the center of the reclamation layer

Fig.2: 2D analysis result of shear strain distribution at 150s after earthquake and excess pore water pressure ratio at the center of the reclamation layer at point A

強震記録から推定された2011年東北地方太平洋沖地震群の曲面断層上での震源過程 Rupture processes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake sequence on the curved fault derived from strong-motion records

鈴木 亘^{1*}, 青井 真¹, 関口 春子², 功刀 卓¹

SUZUKI, Wataru^{1*}, AOI, Shin¹, SEKIGUCHI, Haruko², KUNUGI, Takashi¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 京都大学防災研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と呼ぶ)は、東北地方から関東地方にかけての広範囲にわたり非常に強い地震動をもたらした(青井・他, 2012, 地震第2輯)。われわれは強震記録を用いて東北沖地震の震源過程の推定を行い、地震波放射特性を検討してきた。解析に用いている強震記録の周波数帯域は被害に直接結びつく地震動の帯域より低い、推定されたすべり分布、すべり破壊の時間進展と地震波放射過程は東北沖地震の強震動生成を理解するために有用な知見となる。また東北沖地震の約30分後の3月11日15時15分に茨城県沖で発生したM7.6の最大余震は関東地方に再度強い揺れをもたらすなど、東北沖地震直後の余震群により断続的に強震動が続いた。本研究ではこれら東北沖地震群の震源過程をお互いに整合的な曲面断層モデルで解析することで、それぞれのすべり分布や時間進展を比較し地震波励起の関係について検討を図る。

曲面断層の表現とインバージョン手法は鈴木・他(2010, 地震学会)に基づいており、Nakajima and Hasegawa(2006, GRL)、Nakajima et al.(2009, JGR)、Kita et al.(2010, EPSL)をコンパイルした太平洋プレート上面形状データの北緯35.5度から40.5度程度の範囲について深さ8 kmから60 kmの形状をNURBS(スプライン関数の一種)により表現した。これにより東北沖地震本震、15時8分の岩手県沖の余震(M7.4)、15時15分の茨城県沖の最大余震(M7.6)の断層面を柔軟に構築することが可能となった。

本震についてK-NETおよびKiK-netによる0.01-0.125 Hz速度波形記録を用いて解析した結果では、宮城県はるか沖の破壊開始点より浅い領域に低周波数帯域に富む地震波を放射した大すべりが見られ、破壊開始点より陸側の領域で加速度波形に見られる2つの波群を生成した可能性のある2回の破壊が生じ、破壊開始から100秒後以降に福島県沖で関東地方に強い揺れをもたらした破壊が生じたという特徴が見られる。これは矩形断層を用いた結果と大局的には共通した特徴である。矩形断層は東北沖地震の震源域の平均的なプレート形状を模して、特に破壊開始点付近をよく近似しているが、プレート形状は沈み込みにつれ傾斜角が急となり、また走向も震源域南部および北端では矩形断層の走向とは異なる。このように形状に差異の見られる福島県沖での100秒後以降の破壊の規模は、曲面断層による結果の方が大きめに推定されている。

茨城県沖の最大余震について、南北およそ100 km東西およそ80 kmの範囲のプレート境界面を切り出し、0.01-0.25 Hzの強震記録を用いて震源過程を推定した。破壊開始点の水平位置は気象庁による震央位置とし、小断層は深さ2.5 kmごとに走向方向約10 kmの広がりを持つように分割した。すべりの大きい領域は破壊開始点よりも沖側に広がり、最大すべり7.5 mが破壊開始点の東南東約20 kmの領域に推定された。このすべり領域は2008年に発生したM7.0の地震の震央の南に広がる。破壊開始後約8秒間の破壊は顕著ではなく、8秒後から破壊開始点東方の大すべり領域の破壊が開始して、この領域の破壊は10秒以上続いた。その後の破壊は破壊開始点南部と陸よりの領域でも見られる。南部での目立った破壊は銚子沖で終了している。モーメントマグニチュードは7.9であり、Global CMTの推定値と同規模でF-netによる7.8より大きい。プレート境界モデルより10 km程度深い気象庁の破壊開始点深さと15度程度傾斜角が急なF-netの震源メカニズムから構築した矩形断層を用いた解析でも、破壊開始点より沖側にすべりの大きい領域が推定されている。ただし断層面形状以外はほぼ同じ解析条件であるが最大すべり量は13 m弱と大きく、すべり量などをより信頼性高く推定しスケーリングなどの議論に用いるためには、曲面断層により断層面形状をできるだけ正確にモデル化することが望ましいと考えられる。

強震動パルスの生成に着目した2011年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデル Construction of a source model for the 2011 Tohoku, Japan, earthquake with special reference to strong motion pulses

野津 厚^{1*}

NOZU, Atsushi^{1*}

¹ 港湾空港技術研究所

¹Port and Airport Research Institute

2011年東北地方太平洋沖地震は、今日のような密な強震観測網が構築されて以来、初めて発生したM9クラスの巨大地震である。今後、他の地域を対象として、同程度の規模の地震を想定した強震動評価を行う機会が増えるものと考えられるが、その際に用いられる震源のモデル化手法および強震波形計算手法は、今回の強震記録によって適用性が確認されたものでなければならない。その際、工学的観点からは、0.2-2Hz程度の強震動の再現性に特に注意を払う必要がある。著者は、この地震の発生以前の段階において、海溝型巨大地震による0.2-2Hz程度の帯域の強震動の予測に関して次のような提案を行っていた（例えば野津，2010）。

1) 震源モデルとしては、海溝型地震の震源近傍で実測されるパルスの幅と調和的な（小さめの）アスペリティの組み合わせからなる震源モデルを用いること。

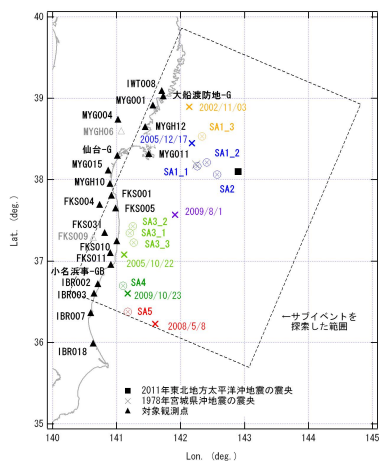
2) 波形の計算には経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法（古和田他，1998；野津他，2009）を用いること。

これらのスキームがM8クラスの地震に対して有効であることについては既往の研究で確認を行っている。しかしながら、同様のスキームがM9クラスの地震に対しても適用可能であるかについてはこれまで確認されていない。そこで、本研究では、このスキームのM9クラスの地震に対する適用性を調べることを目的とし、東北地方太平洋沖地震を対象として、実際に小さめのアスペリティの組み合わせからなる震源モデルを新たに作成し、それによる強震動シミュレーションを実施した。その結果、宮城県沖から茨城県沖にかけて、一辺が数km程度の9つの小さめのアスペリティを配した震源モデルを用いれば、各地で実際に観測された強震動、特に、工学上重要性の高い0.2-2Hzの帯域の速度波形（パルス状のものを含む）を精度良く再現できることがわかった。

本研究で用いた小さめのアスペリティは、松島・川瀬（2006）が提唱したスーパーアスペリティに対応するものであるとされる。しかしながら、アスペリティという用語の用法そのものが現時点では流動的であり、terminologyについてはさらなる工夫が必要である。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 強震動, 強震動パルス, 震源モデル, スーパーアスペリティ

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, strong ground motion, strong motion pulse, source model, super asperity



2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルのポストディクション Postdiction of Source Model for the 2011 Tohoku Earthquake

三宅 弘恵^{1*}, 纈織 一起¹

MIYAKE, Hiroe^{1*}, KOKETSU, Kazuki¹

¹ 東大地震研

¹ Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

これまで、過去の地震について強震動評価を行い、強震動予測手法の適用可能性を確認し、将来の地震について強震動予測を行う研究が多数なされている。本発表では、地震後に、地震前の知見を利用して強震動予測を行う方法をポストディクション (postdiction = prediction after the fact) と定義し、2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルがどの程度、事後予測可能であったのかを検討する。また、経験的グリーン関数法等を用いて、観測波形に対するポストディクションを行う。

<地震前に設定可能と仮定するパラメータ>

断層面は、南海トラフ等に倣い、長期評価されている複数のセグメントである、宮城県沖・三陸沖南部海溝寄り・福島県沖・茨城県沖がプレート境界の逆断層地震として同時破壊すると仮定する。三陸沖中部は非地震性すべり域として、三陸沖北部から房総沖の海溝寄りは津波地震あるいは正断層型の領域と考え、断層面を設定しない。この場合、想定される断層面積は約 35,000 km² となり、Murotani et al. (2008) および佐藤 (1989) のプレート境界地震のスケール則に従うと、地震規模は Mw 8.3 および 8.5 となる。すなわち、869年貞観地震の地震規模に留まり、東北地方太平洋沖地震の地震規模には達しない。

特性化震源モデルの設定は、強震動予測レシピに準拠するが、Miyake and Koketsu (2010) による二段階コーナー震源スペクトルモデルを導入する。これは、1978年宮城県沖地震や2003年十勝沖地震などのプレート境界地震において、アスペリティ面積と強震動生成域に乖離を解消するため、アスペリティの半分の面積と倍の応力降下量を強震動生成域に与え、短周期レベルを上げる方法である。アスペリティ総面積は、Murotani et al. (2008) に従い、断層面積の20%とする。アスペリティは、長期評価されている各セグメントに原則1つ、過去の地震のアスペリティ位置に配置する。強震動生成域は、断層面積の10%を占めるものとし、その応力降下量は Murotani et al. (2008) の場合は 14 MPa、佐藤 (1989) の場合は 30 MPa となる。

破壊開始点は、太平洋プレート境界で発生する地震では、海溝側から陸側へ破壊が進行するケースが多いため、その事例を踏襲して宮城県沖海溝寄りの中央東端に設定する。また、断層面における破壊進行方向は震源から同心円上とし、各アスペリティおよび強震動生成域における破壊はマルチハイポセンターを適用する。

<地震前に設定困難と仮定するパラメータ>

東北地方太平洋沖地震では、主に長周期成分を生成するアスペリティ領域と、主に短周期成分を生成する強震動生成域の場所や面積が大きく異なる結果もある。本設定においては、強震動生成域はアスペリティの半分の面積を有するが、場所は重なる(内包される)と仮定する。また、東北地方太平洋沖地震に見られたような、同じ場所における複数回のすべりや、破壊進行方向の逆転は考慮できない。

<問題点>

地震前の知見に基づくと、東北地方太平洋沖地震の震源モデルは貞観地震の地震規模に留まる可能性がある。仮に、M9クラスの地震規模を想定する場合、プレート境界地震のスケール則に依っては、三陸沖北部から房総沖に至る全領域を海溝寄りも含めて断層面と仮定する必要があるが、東北地方に収まらない。また、地震前の知見からこのような断層面の設定を行うことは極めて難しい。結果として、東北地方太平洋沖地震の断層面積は、Murotani et al. (2008) のスケール則の標準偏差分の1に概ね相当していることから、超巨大地震を含む海溝型地震の予測においては、地震規模を先に与えてから断層面積を設定し、断層面積のばらつきを導入する方法が提案される。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 震源モデル, スケール則, 評価, 予測, ポストディクション

Keywords: Tohoku earthquake, source model, scaling, validation, prediction, postdiction

GPU 計算による 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震動大規模シミュレーション GPU-accelerated large-scale simulation of seismic wave propagation from the 2011 Tohoku-Oki earthquake

岡元 太郎^{1*}, 竹中 博士², 中村 武史³, 青木 尊之¹

OKAMOTO, Taro^{1*}, TAKENAKA, Hiroshi², NAKAMURA, Takeshi³, Takayuki Aoki¹

¹ 東京工業大学, ² 九州大学, ³ 海洋研究開発機構

¹Tokyo Institute of Technology, ²Kyushu University, ³JAMSTEC

The Tohoku-Oki earthquake on March 11, 2011 (MJMA 9.0) generated strong shaking reaching the maximum intensity (seven) on the JMA's scale and caused devastating tsunamis with run-up heights exceeding 30 m. Such mega-thrust earthquake was not expected to occur along the plate interface off the northeastern Japan. Thus it is very important to study this event for understanding the geophysical condition of the generation of mega-thrust earthquake, the characteristics of the induced strong ground motions, and the mechanism of the excitation of the large tsunamis.

The ground motion records of this event are quite important data for the quantitative studies on the earthquake source and the induced damages. However, modeling of the ground motions is not a simple task because of the strong lateral heterogeneity in and around the Japan trench: all of steeply varying topography, oceanic water layer, thick sediments, crust with varying thickness and subducting oceanic plate can affect the seismic waves radiated from suboceanic earthquakes [1,2]. Thus the structural model is an important factor in the study of waveform modeling.

The modeling of the ground motion induced by this event is a computational challenge: large memory size and fast computing devices are required because the huge fault size of the earthquake (about 500 km x 200 km) imposes a very large domain size for the simulation. For example, for a finite-difference domain of 960 km long, 480 km wide and 240 km deep and for a grid spacing of 0.15 km, a quite large grid size of 6400 x 200 x 1600 or 33 billion of grid points are necessary.

Therefore, we need to develop numerical methods that can precisely incorporate the effects of the heterogeneous structure including the land-ocean topography. Further, we need to confirm the feasibility of the methods in the case of large-scale problem: the computation must be done within a tolerable time.

Thus, in this paper we use a 3-D finite-difference time domain (FDTD) method [3,4]. In the method we implement the schemes to incorporate the land and ocean-bottom topography, oceanic layer and other lateral heterogeneity. In order to simulate the wave propagation with a large grid size, we adopt the GPU (graphics processing unit) computing to our finite-difference program. We use the TSUBAME supercomputer in Tokyo Institute of Technology which has a peak performance of 2.4 peta-flops. Currently, we have succeeded to simulate the wavefield from the whole fault of 2011 Tohoku-Oki earthquake by using 1000 GPUs of the TSUBAME supercomputer with 33 billion of grid points and a grid spacing of 0.15 km. We present the results of the simulation of the wave propagation based on a preliminary source model of the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

[1] Okamoto, Earth Planets Space, 54, 715-720, 2002.

[2] Nakamura et al., submitted paper.

[3] Okamoto et al. Earth Planets Space, 62, 939-942, 2010.

[4] Okamoto et al., in GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering, Yuen, D. et al. (Eds.), 250 p., Springer, due February 29, 2012. (ISBN 978-3-642-16404-0)

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, strong ground motion, finite-difference, FDTD, multi-GPU

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の長周期地震動シミュレーション Long Period Ground Motion Simulation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0)

川辺 秀憲^{1*}, 釜江 克宏¹, 上林 宏敏¹

KAWABE, Hidenori^{1*}, KAMAE, Katuhiro¹, UEBAYASHI, Hirotohi¹

¹ 京都大学 原子炉実験所

¹RRI, Kyoto University

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方の宮城県沖で Mw9.0 の巨大な海溝型地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方から関東地方の広い範囲で強い地震動により多くの被害が発生した。また、巨大な津波により東日本の太平洋沿岸部に激甚な被害をもたらされた。一方、今回の東北地方太平洋沖地震では、地震の規模を考えると超高層ビルに影響を及ぼす周期帯の長周期地震動は比較的小さかった。しかし、超高層ビルにおいて天井の落下、内装材、エレベータなどの被害が発生しておりなど、今後の巨大地震の長周期地震動に対する対策を検討するうえでも、今回の地震の長周期地震動の増幅や減衰等の伝播特性を把握しておく必要がある。そこで本稿では、周期 3~10 秒の長周期地震動を対象とした地震動シミュレーションを行い、現在提案されている震源及び地下構造モデルを用いることにより、どの程度、東北地方太平洋沖地震の地震動を再現できるかを検証する。

2. 地震動シミュレーションの概要

ここでは、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによって求めた震源モデル (川辺・他、2011) を用いる。このモデルは周期 0.1~10 秒の地震動を対象として求めたモデルであり、宮城県沖、岩手県南部沖、福島県沖、茨城県沖の 5 カ所に強震動生成領域 (SMGA) を配置した震源モデルとなっている。

地下構造モデルは、地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」2009年試作版 11) で宮城県沖地震の長周期地震動予測に使用され、そのホームページでデータが公開されているモデル (以下、推本モデルと呼ぶ) を用いた。

地震動の計算は、スタagger グリッドを用いた空間 4 次・時間 2 次の精度の 3 次元差分法 (Pitarka, 1999) により実施した。差分法解析対象領域は東西 412km、南北 471km の領域とし、深さ方向は 100km までを対象とした。差分格子の間隔は水平方向 0.3km、鉛直方向 0.1~0.6km とした。地下構造モデルの物性値、差分格子の間隔及び震源モデルの有効周期から、本シミュレーションの有効周期は周期 3~10 秒である。

3. 結果

図 1 に観測波形と計算波形の比較を示す。全体的に見ると、関東平野の北側から平野に入射し、平野内で地震動の継続時間が伸びるといった現象は再現できている。詳細に見てみると、宮城県 (MYGH12) から茨城県 (IBR016) までは、主要動の振幅や特徴的な波群を再現できているが、計算波形の後続波の振幅は観測波より若干小さくなっている。関東平野内 (埼玉県の SIT010 から南側) の観測点では、主要動部分については、計算波形の NS 成分はどの観測点でも過大評価となっているが、EW 成分や UD 成分の振幅は観測とよく対応している。特に UD 成分については、振幅だけでなく計算波形の位相も観測波形を比較的良好に再現できている。また、関東平野内の観測点では、後続波の振幅が観測より小さくなっている。後続波の振幅が小さくなった原因として、今回用いた震源モデルは SMGA のみをモデル化し、それ以外の場所からは地震動を放出しないモデルであったこと、堆積盆地の減衰定数の設定が不適切であることなどが考えられる。この点については今後検討していく予定である。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所による KiK-net 及び K-NET の地震観測記録並びに気象庁の震源データを使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

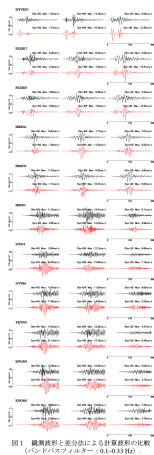
キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 強震動, 震源モデル, 強震動生成領域, 差分法

Keywords: 2011 Tohoku-Chiho Taiheiy-Oki Earthquake, strong ground motion, source model, strong motion generation area, finite difference method

SSS37-11

会場:303

時間:5月21日 11:45-12:00



地震動特性と建物被害に着目した2011年東北地方太平洋沖地震の教訓 Lessons of the 2011 Tohoku earthquake Focused on Characteristics of Ground Motions and Building Damage

源 栄 正 人^{1*}

MOTOSAKA, Masato^{1*}

¹ 東北大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Tohoku University

The author addresses firstly the observed high acceleration records with PGA of 2,700 cm/s/s and the corresponding JMA seismic intensity 7 at the K-NET Tsukidate station during the 2011 Tohoku Earthquake (M9.0). Structural damage was quite light in the surrounding area. The relation between high acceleration record and building damage is discussed by referring to the questionnaire intensity by authors and by mentioning unfavorable behavior with partial uplifting and slipping of the foundation of the seismometer based on the non-stationary spectral analysis and particle orbit analysis.

Many long-duration records observed during the earthquake, especially in geological basin, are also discussed. A base-isolation device with lead damper of a building in Osaki city was damaged. Many numbers of displacement cycles may affect on the damage of the seismic elements of structures due to ground motion with long duration.

Next, ground motion characteristics during the 2011 Tohoku earthquake are compared to those during the 1978 Miyagi-ken Oki earthquake (M7.4) at the same observation site. The author addresses observation records at basement floor of Sumitomo building near Sendai station, which is recognized as engineering bedrock motion. The comparison shows that the ground motion during the 2011 earthquake is larger in PGA and response spectra than 1978 earthquake, but the amount of structural damage is smaller in 2011 earthquake due to progress of seismic design and seismic retrofits. Difference of ground motion due to geological conditions is also discussed based on strong motion networks including the authors' DCRC network.

Regarding specific building damage of 8- and 9-story buildings at Aobayama campus of Tohoku University, ground motion amplification in the site was discussed based on the observation records at a 9 story SRC building of Departments of Civil Engineering and Architecture (THU building). During the 2011 earthquake, THU building was resonantly shaken and damaged (Photo 1) by the amplified ground motion compared to more than two times at the period range of 1sec compared to Sumitomo station, which is one of major reasons of the structural damage (Fig.1). The amplification was also recognized during the 1978 earthquake. Dynamic behavior of the damaged THU building due to the amplified ground motion is also discussed.

As other specific building damage, the two pile foundation buildings which were damaged during the 1978 earthquake comparatively discussed. An example of the pile foundation damage of the building constructed after the Japanese Building Code issued in 1981 is addressed. As damage of non-structural elements, the tremendous number of ceiling board dropped during the main shock and the major aftershock. Some of them caused killed persons for the first time. The 400 valley-filled housing lands' failures were caused in Sendai City. These damages are strongly related to the long duration ground motion.

Finally, the following learning and lessons from the 2011 earthquake are addressed for stronger earthquake countermeasures of urban and building structures: 1) Necessity of the seismic microzoning considering ground motion difference due to geological conditions, 2) Necessity of appropriate seismic indices corresponding to objective building damage, 3) Reconsideration of the setting place / setting method of the seismometer, 4) Necessity to evaluate the safety of structural elements for number of displacement cycles due to the long-duration earthquake and repetition by many aftershocks, 5) Consideration of non-stationary of ground motion the nonlinearity of the building for the huge earthquake, 6) Total balance of structural element, non-structural elements, and equipments, and also balance of foundation and superstructure for synthetic seismic performance of the whole building, 7) Evaluation of residue performance of the buildings damaged by past earthquakes and this earthquake.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 地震動特性, サイト増幅特性, 建物被害, 共振, 長い継続時間

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, ground motion characteristics, site amplification characteristics, building damage, resonance, long duration

SSS37-12

会場:303

時間:5月21日 13:45-14:03



Photo 1 One of damaged four corner columns of THU building

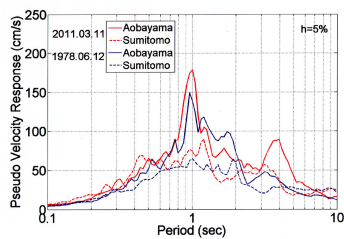


Fig.1 Site specific spectral ground motion amplification in Aobayama hill, Sendai

2011年東北地方太平洋沖地震による新宿・超高層建築の揺れと被害 Response and Damage of High-Rise Buildings in the Nishi-Shinjuku Area, Tokyo, Japan, during the 2011 Tohoku Earthquake

久田 嘉章^{1*}, 山下哲郎¹, 村上正浩¹, 久保智弘¹, 新田龍宏¹, 新藤 淳², 相澤幸治³

HISADA, Yoshiaki^{1*}, Tetsuo Yamashita¹, MURAKAMI, Masahiro¹, KUBO, Tomohiro¹, Tatsuhiro Arata¹, Jun Shindo², Koji Aizawa³

¹ 工学院大学, ²NKSJ リスクマネジメント株式会社, ³ 気象庁

¹Kogakuin University, ²NKSJ Risk Management, Inc., ³Japan Meteorological Agency

昨年度の報告(久保ほか, 2011)に続き, 2011年東北地方太平洋沖地震による新宿駅西口地域での超高層建築の揺れと被害に関して, 工学院大学新宿校舎と隣接するSTEC情報ビルの強震観測データ, および周辺の超高層建築を含めたヒアリング調査結果などをもとに報告する。

工学院大学新宿校舎は1989年竣工の29階, STEC情報ビルは28階建ての鉄骨造建築であり, 双方・2成分とも固有周期は1次モードが約3秒, 2次モードが約1秒である。両建物では地下100mから屋上階まで約8階ごとに強震観測を実施している。Table 1とFigure 1に2011年東北地方太平洋沖地震における最大加速度・変位・計測震度の値を示す(周期5秒以上をカット)。1階では最大加速度, 変位, 計測震度がそれぞれ約100 gal, 7 cm, 震度4程度が, 屋上階では約300 gal, 35 cm(1階に対する相対変位は約30 cm), 震度6弱まで増幅した。1階の5%速度応答スペクトルは1秒から5秒まで約0.3 m/s程度のほぼフラットな振幅特性を示しており, 高さ方向の最大振幅値の分布も加速度や計測震度では中間階でも大きな値となっており, 2次モードの影響がみられる。一方, これまで地震や余震を含めて, 固有周期と建物の振幅との関係性を調べると, 本震の後では前よりも5%程度の固有周期の低下が見られた。また振幅が大きくなると固有周期も増大する, 振幅依存性が再確認された。これは間仕切り壁やカーテンウォールなどの非構造部材やその接合部の剛性低下が大きく影響していると考えられる。一方, 建物の被害に関して, 工学院大学では天井の落下(28, 27, 21, 14階), 天井のたわみ(28, 26, 23, 20, 19, 16, 14階), 非固定の本棚転倒と間仕切り壁の変形(24階), 非固定のテレビ・他の転倒(28, 16階), など中層階以上で非構造部材の損傷があった。一方, 中層棟建物とのエキスパンションジョイントカバーの破損や, 非常用エレベータではロープが絡まり, 器具の破損により3週間程度停止してしまった。さらに工学院大学ではアンケート震度調査(太田ほか, 1998)をもとに, 項目をオフィスビルに調整して実施している。住宅やマンションと比べ, 殆どの什器類は固定しており, 全体として室内被害は大きくはなく, 計測震度と比べてアンケート震度はやや小さめの値となった。一方, 他の新宿駅西口地域での超高層建築の強震観測記録や被害・初動対応に関して, アンケート調査も実施している(新藤ほか, 2011; Hisada et al., 2012)。工学院大と同規模のビルではほぼ同程度の揺れを示し, より高層の建物である都庁第一本庁舎(48階建て)や新宿センタービル(54階建て)では, 最大相対変位50~70 cm程度の値が報告されている。被害状況は工学院大学とほぼ同様であり, 構造的な被害はなく, 非構造・什器類の被害であり, 中層階以上で一部であるが天井や石膏ボードの落下, スプリンクラーの破損と漏水, エレベータの非常停止と閉じ込め事故なども生じている。その他詳細な内容は当日報告する。

謝辞: 本研究は工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターと新宿駅周辺防災対策協議会との連携のもとに行われています。

参考文献:

久保ほか(2011), 超高層ビルにおける緊急地震速報とオンサイト情報の利活用について, 日本地球惑星科学連合2011年大会

久保ほか(2011), 2011年東日本大震災における新宿駅西口・超高層建物のアンケート調査, その1)工学院大学新宿校舎における揺れとアンケート震度調査, 2011年日本地震工学会・大会

新藤ほか(2011), 2011年東日本大震災における新宿駅西口・超高層建物のアンケート調査, (その2)事業者を対象とした被害と初動対応に関するアンケート調査, 2011年日本地震工学会・大会

Hisada et al. (2012), SEISMIC RESPONSE AND DAMAGE OF HIGH-RISE BUILDINGS IN TOKYO, JAPAN, DURING THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE, One Year after 2011 Great East Japan Earthquake - International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake -

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 長周期地震動, 超高層建築, 数値解析, 被構造部材, 初動対応

Keywords: 2011 Great East Japan earthquake, Long-Period Strong Ground Motion, High-Rise Building, Numerical Analysis, Non Structural Elements, Emergency Response

SSS37-13

会場:303

時間:5月21日 14:03-14:18

Table 1 Max. amplitudes of of the Kogakuin and STEC buildings during 2011 East Japan earthquake
 (a) Kogakuin University Building (b) STEC Office Building

Floor		29	25	22	16	8	1	BBF-100m
Relative Displacement to 1F (cm)	EW	30.5	28.7	24.8	-	-	0.0	
	NS1	33.7	28.0	25.9	16.9	-	0.0	
Absolute Displacement (cm)	EW	30.6	28.1	25.1	-	-	5.7	6.5 5.8
	NS1	34.7	29.8	26.9	17.8	-	6.2	7.1 6.3
Acceleration (cm/s/s)	EW	234.6	134.7	151.7	-	-	187.1	81.9 63.3 49.9
	NS1	231.6	151.4	153.4	237.4	-	186.2	87.8 66.8 49.5
JMA Intensity	EW	5.9	5.2	5.1	-	-	4.5	4.4 4.1
	NS1	5.9	5.2	5.1	-	-	4.5	4.4 4.1

Floor		28	22	15	8	1	BBF
Relative Displacement to 1F (cm)	EW	32.7	27.3	18.8	7.8	0.0	
	NS1	29.7	23.5	15.2	7.0	0.0	
Absolute Displacement (cm)	EW	34.4	28.9	20.5	9.9	-	
	NS1	29.0	23.2	15.8	8.3	-	
Acceleration (cm/s/s)	EW	161.0	124.7	152.2	154.7	-	
	NS1	248.9	175.3	245.0	180.0	-	
JMA Intensity	EW	5.6	4.9	5.5	5.3	4.6	
	NS1	5.6	4.9	5.5	5.3	4.6	

Note: NS1=West Side, NS2=East Side
 The JMA intensities of the shaded cells are calculated using the two horizontal components

Note: NS1=East Side, NS2=West Side

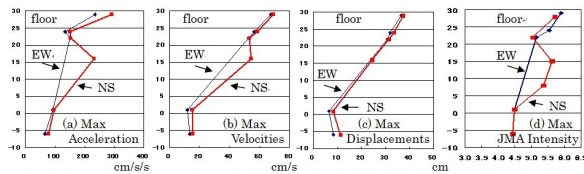


Fig.1 Maximum Accelerations, Velocities, Displacements, and the JMA Intensities of Kogakuin Univ.

巨大地震における余震ハザードの定量化に関する基礎的研究 Fundamental analysis on quantification of aftershock ground motion hazard

廣瀬 満仁^{1*}, 糸井達哉¹, 高田毅士¹
HIROSE, Mitsuhiro^{1*}, Tatsuya Itoi¹, Tsuyoshi Takada¹

¹ 東大・工・建築

¹Dept.of Architecture, Univ. of Tokyo

近年発生した巨大地震では、本震による被害に加えて、余震の脅威を表す事例も多く発生している。クライストチャーチ地震(2011年)、トルコ東部ワン地震(2011年)では余震により建物が倒壊し多くの死傷者が出た。新潟県中越地震(2004年)など近年の地震被害では余震が企業の事業継続計画へ及ぼす影響が問題となった。東北地方太平洋沖地震(2011年)では余震による構造物被害の事例は少ないものの、土砂崩れ、津波、停電、鉄道や高速道路の通行止め、火災等、余震の影響は広範囲に渡っている。意思決定の面でも、避難所の使用妥当性、事業継続性、復興作業開始時期などについては余震ハザードを考慮に入れた合理的判断が求められる。余震ハザードを定量的に扱うことができれば、緊急時の対策立案や復旧活動の意思決定に対する議論の合意形成に役立てることができ、近い将来の発生が予想されている東海・東南海・南海連動型地震に対しても有用な知見となることが期待できる。

そこで本研究では東北地方太平洋沖地震の余震記録を解析することで、1). 余震の地震動強さ(ここでは最大速度)の確率論的モデル化と2). そのパラメータの評価手法に関する考察を行い、確率論的余震ハザードの定量化に関する基礎的検討を行う。2011年3月11日から142日間の、岩手県、宮城県、福島県内の防災科学技術研究所強震観測網(K-NET)計62地点における観測記録を対象として、地震動強さを表す指標として最大速度(PGV)に着目している。確率紙へのプロット、統計的適合度検定から、本研究においては余震による地震動強さ分布を極値II型分布(Frechet分布)でモデル化することを試みる。更に、観測された本震最大速度と余震の確率分布の関係を調べ、モデル化した確率分布のパラメータを本震の観測記録を用いて推定する手法を構築する。本手法を用いることにより、本震発生直後の余震ハザード評価が可能になると考えられる。

また、本研究は5ヶ月間の余震ハザードに基づいており、余震発生数の時間変化を考慮できていないが、改良大森式等を用いた時間の概念の組み込みが今後の課題である。また、工学的な応用のため、応答スペクトルなど他の地震動指標について解析を行い、余震の周期特性の分析を行うことも予定している。今後、他の巨大地震についても余震の解析を行い、同様の結果が得られるかを確認する予定である。

キーワード: 地震ハザード, 余震, 確率論的手法, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: seismic hazard analysis, aftershock, probabilistic method, the 2011 Tohoku earthquake

南海トラフの海溝型巨大地震による長周期地震動シミュレーション Long-period ground motion simulation of great Nankai Trough, Japan, earthquakes

前田 宜浩^{1*}, 森川 信之¹, 青井 真¹, 藤原 広行¹

MAEDA, Takahiro^{1*}, MORIKAWA, Nobuyuki¹, AOI, Shin¹, FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ NIED

2011年東北地方太平洋沖地震でも明らかのように、海溝型巨大地震の震源モデルを事前に予測することは極めて困難である。したがって、海溝型巨大地震による長周期地震動予測では、限られた少数の震源モデルを対象とするのではなく、震源モデルの不確実性を考慮して多数のシナリオに基づいた地震動計算を行い、各シナリオによる長周期地震動の予測に加え、それらのばらつきを定量的に評価することが重要だと考えられる。海溝型巨大地震の震源モデルの不確実性については、東北地方太平洋沖地震から得られた知見を活用することができる。特に長周期地震動を対象とする場合には、海溝沿いのすべりの大きな領域の影響を評価しておく必要がある。本研究では、南海トラフで発生すると考えられているM8~9程度の海溝型地震を対象とした地震動シミュレーションを行い、震源モデルの違いが地震動予測結果に与える影響について検討した。なお、本検討では現状の海溝型地震のレシピに従って作成した特性化震源モデルに基づいて地震動を計算しているため、おおよその振幅レベルの把握と震源モデル間の相対的な比較を行うこととした。また、地震動計算には、GMS (Ground Motion Simulator) を用いた。

まず、東北地方太平洋沖型の地震を対象とした予備解析を行った。地震動計算に用いる特性化震源モデルは、震源域、破壊開始点、海溝沿いの領域については2011年東北地方太平洋沖地震を参照し、その他のアスぺリティ等については「レシピ」に従って機械的に設定して求めた。この震源モデルは実際の震源過程を忠実に再現したものではないため、計算結果が観測記録に比べて過大評価となる地域や過小評価となる地域がみられたものの、大局的には観測記録の地震動レベルと整合する結果が得られた。

次に、南海トラフの地震を対象とした解析を行った。震源モデルについては、震源域の拡がり(単独型・連動型)、アスぺリティや海溝(トラフ)沿いのすべりの大きな領域の位置、破壊開始点の位置について複数のケースを設定し、さらに、すべり量(カスケードモデル・スケーリングモデル)や震源時間関数の形状を変えた複数のモデルを作成した。これらの震源モデルに対して地震動計算を行い、震源モデルの違いが長周期地震動にどのような影響を与えるかについて調べた。最大地動速度の空間分布に対しては、破壊開始点の位置による影響が強く現れていた。また、連動型であってもカスケードモデルを適用した場合には、単独型の地震動分布を重ね合わせた分布となるのに対し、スケーリングモデルを適用した場合には全体的に振幅レベルが増大していた。トラフ沿いの領域については、すべりの大きな領域との位置関係によって、特に強い影響を受ける地域が見られた。ただし、今回の検討で対象としている周期帯(やや長周期帯)の地震動に対しては、震源時間関数の違いによる影響が大きく、特に海溝沿いの領域に対してどのような震源時間関数を設定するかは、今後の重要な課題である。

本研究は、「長周期地震動予測地図作成等支援事業」によった。

キーワード: 南海トラフ, 長周期地震動, 差分法, 不確実性, GMS

Keywords: Nankai trough, long-period ground motion, finite difference method, uncertainty, GMS

東北地方太平洋沖地震を踏まえた、南海トラフ地震の時間差連動による長周期地震動の再評価

Re evaluation of the elongation of the long period ground motion due to Nankai Trough earthquake which occurs by linkage

古村 孝志^{1*}, 前田 拓人¹

FURUMURA, Takashi^{1*}, MAEDA, Takuto¹

¹ 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター / 地震研究所

¹ CIDIR/ERI Univ. Tokyo

<はじめに>

東北地方太平洋沖地震で観測された長周期地震動の特性と、過去の昭和東南海・南海地震の強震観測記録を比較から、想定される東海・東南海・南海地震の連動とその時間差発生（時間差連動）を考えた地震動シミュレーションに基づき、想定される南海トラフ巨大地震の長周期地震動の評価を行った。

<東北地方太平洋沖地震と長周期地震動の生成>

東北地方太平洋沖地震では、M9 地震の 500km*200km にもわたる広大な震源域が、3分近い時間をかけて大きくズレ動いたことに加え、海溝寄りの浅部プレート境界において 50m を越える大きなズレ動きが発生した特徴がある。こうした巨大地震の複雑な断層運動により放射された地震動は、短周期～長周期の広い帯域で大きなエネルギーを持ち、かつ揺れの継続時間が非常に長かった。観測された高周波の強震波形記録には、少なくとも3つの強い波群が認めらる。特に震源インバージョンからは宮城県沖の2カ所がそれぞれ1分程度の時間差で大きくズレ動き、複雑で継続時間の長い地震動が強く放射されたことがわかる。

都心で観測された長周期地震動の速度応答スペクトルは、固有周期 0.5～40 秒の範囲で 40cm/s の平坦な応答（減衰=5%の場合）を示しており、これまでの大地震で繰り返し観測された、関東平野での周期 6～10 秒の強い応答ピークは見られなかった。また、最大速度応答も、過去に発生した 2004 年新潟県中越地震（M6.8）、2004 年紀伊半島南東沖の地震（M7.4）、および 2007 年新潟県中越沖地震（M6.8）のせいぜい 1.2～1.5 倍程度であった。しかしながら、東北地方太平洋沖地震による長周期地震動の揺れはこれまでの M7 クラスの地震のものよりずっと長く、最大速度 20cm/s の揺れが、1/10（2cm/s）に弱まるまでに 10 分以上の時間がかかっていた。

<南海トラフ地震の長周期地震動生成条件>

これまでの強震観測から、関東平野で生成する長周期地震動は、能登半島や東北の地震では小さく南海トラフの地震や中越地方の内陸地震では大きいことが指摘されており（たとえば、早川、2008）、その原因として、南海トラフの沈み込み帯構造と表面波（長周期地震動）の生成過程の特徴が議論されている。南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの上面には、地震波速度の遅い付加体が数 km の厚さで覆っており、周期数秒以上の長周期の表面波が強く増幅されるほか、生成した表面波がトラフ軸に沿って関東平野に誘導される過程が、強震観測データで認められ、そして地震波伝播シミュレーションで検証されている（たとえば、Ikegami and Koketsu, 2008；Furumura et al., 2008）。いっぽう、東北地方沖の日本海溝では、太平洋プレートが堆積物を巻き込むように急角に沈み込んでおり、南海トラフに見られるような付加体は発達していない。また、海溝付近の堆積物も陸からずっと離れた位置にあり、北海道～東北～関東に向かう表面波を増幅・誘導する効果は小さいと考えられる。

<南海トラフ地震の時間差連動による長周期地震動>

南海トラフでは、近年の地震発生履歴や南海トラフの沈み込み帯構造の水平変動から、東海、東南海、南海地震、の3つの地震セグメントを分けて活動を議論することが多い。南海トラフ地震の連動発生の影響評価では、3つの地震セグメントが同時にズレ動く場合に加え、数分から数十分の時間差で順番にズレ動く時間差連動についても検討が必要であろう。

特に、名古屋や大阪など、3つの地震セグメントからほぼ等しい距離にある平野では、時間差連動による2・3回の大揺れと、強い揺れの継続時間が2～3倍長くなる危険性がある。3つの地震セグメント個々をズレ動かした長周期地震動シミュレーション結果は、3つの長周期地震動の震幅はほぼ等しく（40cm/s程度）、また継続時間（ここでは、最大震幅の1/10になるまでの時間を定義）も10分程度となった。そして、3つの地震セグメントが数分の時間差で連動発生した場合には、最大震幅は変化しないが、継続時間が20～30分以上に長くなることが再確認できた。

こうした、長時間の揺れは減衰の小さな建物に長時間にわたって共振を起こし、材料疲労の蓄積など大きな影響を与えるものと考えられる。しかしながら、応答スペクトルや震度は最大値により規定され、揺れの継続時間の問題はここから読み取ることができないこと注意が必要である。さらに、時間差連動による継続時間の長大化が平野部の液状化

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS37-16

会場:303

時間:5月21日 14:48-15:03

に及ぼす影響も検討が必要であろう。巨大地震の発生とその時間差連動による長時間の地震動継続の問題は、たとえば震動の累積エネルギーなどの別の指標を用いて評価する必要がある。

本研究は、H20-24年度文部科学省委託研究「連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究」により行われました。

キーワード: 地震, 東北地方太平洋沖地震, 長周期地震動