

常時微動を用いた大阪平野南部における地盤構造の推定

Estimation of underground structures using microtremors in the southern part of the Osaka Plain

飛田 幸樹^{1*}, 川瀬博², 松島信一²Koki Tobita^{1*}, KAWASE, Hiroshi², MATSUSHIMA, Shinichi²¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 京都大学防災研究所¹ Graduate School of Engineering, Kyoto University, ² DPRI, Kyoto University

都市圏での広域の高精度の強震動予測を考えた場合、地下の地盤構造を的確に捉えた上で、地震動の増幅特性を正確に把握する必要がある。また、地質・ボーリング情報に基づいて既往の研究でも数多くの地下構造モデルが提案されているが、それらは常時微動観測や地震動観測等の地盤振動観測データによって検証される必要がある。

本研究では、他の地域に比べて比較的地盤情報が少ないとされる大阪平野南部において常時微動観測を行い、観測記録から得られる H/V スペクトル比（以下、H/V と呼ぶ）に着目して、既往の研究から構築した地盤構造を初期モデルとして算出した微動の理論 H/V と比較することで、修正地盤構造を同定するとともにその方法の有用性について検討した。

微動 H/V の理論計算については、拡散場理論に基づけば、微動 H/V はその地点を加振点及び受振点とする点加振グリーン関数の虚部の比に対応するという理論が提案されている (Sanchez-Sesma *et al.*, 2011)。この提案理論に基づき、与えられた地盤モデルに対する微動 H/V を算出する理論計算手法が開発されており、本研究ではこれを用いた。まず、3つの強震動観測点 (OSK006, OSK007, OSKH03) で公開されている地盤構造をもとに地盤構造モデルを構築し、上記の理論計算手法を用いて理論 H/V を算出し、観測 H/V と比較することで、理論 H/V の計算とそれに基づく本研究での地盤構造推定方法に対して検証を試みた。結果として、両者の H/V は良く対応することが分かり、このことから本研究で用いている理論計算手法で、既往の研究から構築した地盤構造初期モデルの理論 H/V を算出し、観測 H/V と合うように地盤構造を同定していけば、堆積盆地内の観測点については、その場所の実際の地盤構造に近い構造が得られると期待できる。

そこで本研究での地盤構造同定方法として、地盤構造モデルの層厚と S 波速度を探索変数としたグリッドサーチを行い、観測記録と地盤構造モデルから得られる H/V の振幅の残差二乗和が最小になるような修正地盤構造を同定した。結果として、観測 H/V に対する理論 H/V の残差は初期モデルから大幅に改善され、観測 H/V の共振ピーク振動数と振幅に合うような修正地盤構造モデルを精度よく同定できた。

また、その同定結果を既往の研究と比較することで、拡散場理論に基づく微動の理論 H/V の新提案理論と、それに従った本研究での同定方法の有用性に対して検証を試みた。まず、上町断層帯付近で行われた微動アレイ観測 (地震調査研究推進本部, 2011) に基づく推定 S 波速度構造と、その推定地点から最も近くに位置する本研究の微動観測点での地下構造推定結果を比較した。結果は、両者の推定 S 波速度構造はその距離に応じた良い対応を示すことがわかり、本研究の同定結果の妥当性が示された。次に、本研究の同定モデルから得られる理論 H/V とレイリー波の楕円率に基づく H/V を観測 H/V と比較した。その結果、理論 H/V とレイリー波の H/V は同様な山谷の振動数特性を示し、本研究で用いた新提案理論との対応が示された。しかし、レイリー波の H/V では、観測 H/V には見られない振幅の急激な落ち込みや 1 次ピーク振動数での振幅の過大な卓越が見られたことから、従来の微動 H/V の解釈であるレイリー波の H/V の振幅情報を地盤構造同定に利用することは難しく、本研究で用いた拡散場理論に基づく微動の理論 H/V の新提案理論の方が有用性が高いことが示された。

最後に本研究では、今回得られた修正地盤構造モデルを強震動計算に応用する場合について検討を行った。本研究の修正地盤構造モデルは各層で個別の速度構造を与えているが、有限差分法等の領域型数値計算法で強震動計算を行う場合、同一速度構造モデルの方が利用しやすい。そこで、上記の個別速度構造を持つ修正地盤構造モデルの結果を参考にして、各観測点の初期モデルとしてあらかじめ同一速度構造与えた上で、層厚のみを対象として再度同定を行った。結果として、同一速度構造モデルでも初期モデルに比べて残差が大幅に改善されるとともに、その理論 H/V と推定地盤構造、および地盤の増幅率は個別速度構造モデルのものとはほぼ同一の結果を示すことがわかり、強震動計算のモデルとしてこの同一速度構造モデルを採用できる可能性が示された。

今後は、本研究で提案した地下構造に基づいて、大阪平野南部での強震動予測について検討を行いたい。また本研究では、上町・生駒断層帯を横切るような東西測線上で 1km ごとに微動観測点を選定しているが、今後は断層付近においてさらに細かい間隔で配置した観測点で常時微動観測を行うことにより、断層周辺の複雑な地下構造の推定に対する本研究での提案手法の適用性についても検討していきたい。

キーワード: 常時微動, H/V スペクトル比, 大阪平野, 拡散場理論

Keywords: microtremors, H/V spectral ratio, Osaka Plain, diffuse field theory

微動探査による表層地盤モデルの不確かさが地盤増幅特性に及ぼす影響 Estimation of variation in site amplification due to uncertainty of shallow Vs profile from microtremor exploration

山中 浩明^{1*}

Hiroaki Yamanaka^{1*}

¹ 東工大 総合理工

¹Tokyo Institute of Technology

地震動の予測結果のばらつきの評価では、断層パラメータの変動による影響を考慮する場合がほとんどである。しかし、地震動特性のばらつきには、地震波が伝播する地殻やマントル、さらに深部・表層地盤構造モデルの不確かさによる影響も含まれている。しかし、地下構造の不確かさが地震動特性のばらつきに与える影響も検討されることは少ない。ひとつの原因として、物理探査や地震学的分析の結果による地下構造モデルに対して、モデルパラメータの確からしさなどが明示されることが少ないことも考えられる。

本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC法）による微動探査データの逆解析から得られるS波速度構造モデルのモデルパラメータの不確かさを求め、それが地盤増幅特性のばらつきへ及ぼす影響について検討を行った。

MCMC法は、観測値と理論値の誤差が最小となるひとつのモデルを探すのではなく、誤差に基づいてモデルパラメータの確率分布に比例するようなモデルを数値的にサンプリングする方法である（山中, 2011）。この方法では、得られる解は、ひとつのモデルではなく、モデルパラメータの確率分布となる。したがって、サンプルされたモデルに対する増幅特性を評価すれば、増幅特性のばらつきの評価が可能となる。

ここでは、能登半島沖地震の際に被害が生じた石川県門前町で実施された、表層地盤を対象とした微動探査結果を例にして検討を行う。山中ほか（2008）によって観測された、周期1秒程度以下のレイリー波の位相速度に対して、山中（2011）によるMCMC法を適用し、サンプルされたすべてのモデルに対する工学的基盤より浅い表層地盤の1次元増幅特性を計算した。さらに、すべてのモデルの増幅特性を平均し、その標準偏差によって周期帯域ごとの増幅特性のばらつきを評価した。その結果、1次モードの卓越周期も含めて広い周期帯域で増幅特性のばらつきは同程度の約30%であることがわかった。また、平均された地盤増幅特性では、短周期帯域で平坦な形状となっている。サンプルされたモデルがそれぞれ異なる高次モードのピークを持っており、平均によってそれらのピークと谷が平滑化されているものと考えられる。一方、通常の位相速度の逆解析で得られるひとつのモデルには、高次モードが卓越する短周期帯域でもピークが認められる。しかし、これらの短周期の高次モードのピークでの増幅特性の信頼性は、今回検討した微動探査による地盤モデルでは低くなっていると考えられる。

キーワード: 増幅特性, 表層地盤, 微動探査, S波速度構造, 逆解析, マルコフ連鎖モンテカルロ法

Keywords: amplification, shallow soil, microtremor exploration, S-wave velocity profile, inversion, Markov chain Monte Carlo method

地震動H/Vスペクトル比を用いた地盤構造の推定と強震動予測

Soil structure inversion and strong motion estimation based on H/V spectral ratio for earthquakes

長嶋 史明^{1*}, 川瀬 博¹, 松島 信一¹, フランシスコ J. サンチェスセスマ², 早川 崇³, 佐藤 智美³, 大島 光貴³

Fumiaki Nagashima^{1*}, Hiroshi, Kawase¹, Shinichi Matsushima¹, Francisco, J. Sanchez-sesma², Takashi Hayakawa³, Toshimi Satoh³, Mitsutaka Ohshima³

¹ 京都大学, ² メキシコ国立自治大学, ³ 清水建設

¹ Kyoto University, ² Universidad Nacional Autonoma de Mexico, ³ Shimizu Corporation

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、多くの観測点で1Gを超える加速度や6強以上の震度が観測された。宮城県大崎市にあるK-NET古川(MYG006)では最大加速度 585.7m/s^2 、震度6強が観測され、周囲の建物は強震動や地盤の液状化により深刻な被害を受けた。我々は臨時余震観測を行いK-NET古川周辺の地下構造を推定するとともに、本震時のサイト増幅特性についての検討を行った。

MYG006周辺に5点臨時余震観測点を設置し、2011年6月から6か月間連続余震観測を行った。MYG006で記録された63地震を用いてNSとEW両方向に対しH/Vスペクトル比(HVR)を計算しその平均をとった。MYG006を含む全観測点で0.2Hzに共通のピークが見られ、1.5Hzあたりまで同様の形状を示した。これは古川地域で共通の深部地盤の影響が現れたものと考えられる。

MYG006において、上記の弱震の平均と本震、2011年4月7日の最大余震のHVRとの比較を行った。本震と最大余震ではHVRは同様の形状を示したが、弱震平均よりも長周期側にシフトしており、これは地盤の非線形の影響であるとされる。また、本震、最大余震では建物被害を引き起こすと思われる0.5~2Hzの周波数範囲に大きな増幅が見られ、これが古川地域の建物被害の一因であると考えられる。

弱震動のHVRを再現できるように観測点直下の地盤構造を同定した。初期モデルには先行研究(川瀬・松尾2004)をベースに、より複雑な構造を表現できるように2層増やしたものをを用いた。理論HVRはKawase et al.(2011)の拡散波動場理論に基づいて計算し、S波速度と層厚を変数として観測HVRとの残差を最少とするようハイブリッドヒューリスティック法(山中2007)を用いて同定した。初めに全観測点で共通の深部地盤を同定するために、1秒以上の長周期で全ての観測HVRに合うよう深部3層を同定した。その後個々の観測HVRに合うように0.1~20Hzの範囲で浅部構造を同定した。結果として、観測HVRを広い周波数範囲でよく再現できる構造が得られた。

同定した構造を用いて、地盤の非線形を考慮し等価線形解析で表層を剥ぎ取った。0.1~20Hzの周波数範囲で本震の地震動を地震基盤面まで剥ぎ取った。得られた基盤波の最大加速度はNS方向で 159.5m/s^2 、EW方向では10Hz以上の周波数域で大きく増幅されて 454.2m/s^2 となった。

逆算した基盤波を用いて、ある臨時余震観測点での本震時の地震動を推定した。対象の観測点はMYG006の近くの観測点であり、同定した速度構造もMYG006と似ているので、MYG006での土質構造を参考にG/G0曲線等を与えた。推定した地震波の最大加速度はMYG006での観測波とほぼ同じとなり、地震基盤から表層の伝達関数は地盤の非線形により両者とも同程度長周期側へシフトした。

我々はK-NET古川周辺で臨時余震観測を行い、得られた地震動のHVRから弱震時および強震時の地盤の増幅特性を把握した。得られた弱震時の増幅特性を再現するよう、拡散波動場理論に基づいて地盤構造の同定を行い、広い周波数範囲で観測結果をよく再現できる構造が得られた。また、本震時の地震基盤面の地震動を逆算し、臨時観測点で強震動予測を行った。予測結果はMYG006と似た非線形挙動を示した。

キーワード: H/Vスペクトル比, 強震動, 拡散波動場理論

Keywords: H/V spectral ratio, strong motion, diffuse field theory

CCA法の実用化による浅部微動探査の新展開

A new development in shallow explorations using microtremors based on a practical use of a CCA method

長 郁夫^{1*}, 先名 重樹², 中澤 努¹, 藤原 広行²

Ikuo Cho^{1*}, Shigeki Senna², Tsutomu Nakazawa¹, Hiroyuki Fujiwara²

¹産総研, ²防災科研

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

我々は常時微動の上下動アレイ観測からレーリー波の位相速度を抽出する道具として Centerless Circular Array 法 (CCA 法) の開発を 10 年近く続けてきた。開発初期は、地震計 3 個からなる不規則アレイへの適用性をもって CCA 法の特徴とした (Cho et al. 2004)。後に、データの質によっては SPAC 法よりもアレイサイズに比べて長波長を扱えることを示した (Cho et al., 2006)。近年は、半径 1 m 以内のアレイ (極小アレイ) でもノイズを補正しながら解析することにより、波長 100 m 以上の波を扱えることを示した (Cho et al., 2013)。このように、我々はこれまで CCA 法の手法開発を主眼としてきたが、今回は実用化とその応用について検討したので以下に報告する。

2. コヒーレンス CCA 法と疑似 S 波速度断面

CCA 法の実用化のために我々は基礎式に含まれるクロススペクトルをコヒーレンスに置き換えた (以下、コヒーレンス CCA 法と呼ぶ)。これは実用法として定着した SPAC 法でもクロススペクトルの代わりにコヒーレンスが用いられていることからの着想である。様々なサイト、サイズのアレイデータにコヒーレンスを用いる SPAC 法と CCA 法の両方を適用して比較し、コヒーレンス CCA 法の信頼性と安定性を確認した。特に極小アレイにおけるノイズ補正の安定化に効果があり、多くの場合において SPAC 法を適用した場合の解析能力をはるかにしのぐことが明らかになった。

我々はアレイ半径に対する解析可能波長帯域、解析結果の信頼性、安定性の観点から、コヒーレンス CCA 法による極小アレイ ($r < 1$ m) と、必要に応じて 3 点からなる不規則形の「小アレイ」 ($r < 10$ m) を別途実施することで従来よりも実用的な浅部 (深さ数 10 m ~ 100 m 程度) 構造探査が可能になると考えている。3 点からなる不規則小アレイは路地や 5 m 幅の道路の両側の空きスペースに設置できることから市街地での観測に効果がある。CCA 法による極小アレイや小アレイは観測が簡単なので、測線に沿う複数点で観測して「疑似 S 波速度断面」 (凌他, 2003) や「チェーンアレイ」 (原口他, 2010) と呼ばれるような 2 次元構造解析を実施するのも簡単である。これらは適当な変換式によって分散データを S 波速度構造に変換する簡易逆解析である。

3. H/V 構造

H/V スペクトルに関する過去の研究は微動の振幅情報が地下構造推定に有効なことを表している。H/V スペクトルのピーク周波数は速度コントラストの強い軟弱層の厚さや速度に、ピーク高は層間の速度コントラストあるいはインピーダンス比に関連すると考えられている (例えば, Konno and Ohmachi, 1998)。しかし H/V で地盤構造を推定しようとするすべての既存研究には、(i) H/V スペクトルのピークによって示される深さスケールの解釈には地盤速度と層厚のトレードオフに起因する任意性がある、(ii) ピークが低く複数あるためにピークの読み取り自体が難しい場合も多い等の問題が常につきまってきた。

この問題は、単点観測の隣で上下動極小アレイを実施するか、あるいは単に 3 成分地震計で極小アレイを実施することで解決できる。アレイ解析で得られる周波数と波長の関係を H/V スペクトルに適用すれば、周波数 H/V の関係を波長 - H/V の関係に変換できるからである。波長に適切なファクターをかけて深さとみなせれば、H/V スペクトルのピークに対応する深さスケールが一目で分かるようになる。スペクトル全体が速度コントラストの情報になるので、ピークの読み取りが難しいような場合も問題にならない。深さ H/V の関係をここでは H/V 構造と呼ぶ。H/V 構造は、定性的には速度コントラストもしくはインピーダンス比の構造に対応すると考えられる。

4. CCA 法による疑似 S 波速度断面・H/V 断面

我々は、浅部構造探査のために 3 成分単点観測と CCA 法による極小アレイ、小アレイを多点で展開して疑似 S 波速度断面と H/V 断面 (それぞれ疑似 S 波速度構造, H/V 構造の空間補間で得られる 2 次元プロット) を解析し、統合的に解釈することを提案する。こうすることでこれまでよりも多くの情報を簡易に抽出できると期待する。CCA 法による極小アレイ・小アレイ観測は作業コストが低いので多点データの取得に適する。またアレイサイズが小さいので水平方向の空間分解能が高い。今後は適用例を増やしながらか本提案の有効性を検証していきたいと考えている。

防災科学技術研究所と白山工業 (株) の共同開発による微動 / 強震観測キット JU215 (先名他, 2006) はこの目的に適し

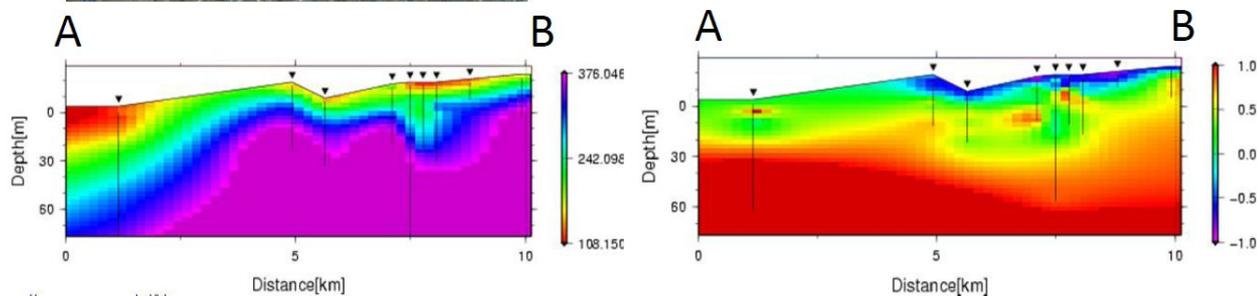
ている．図1は約10 kmの測線に沿う疑似S波速度断面とH/V断面である．これは調査員一名が現地調査を含むのべ二日間の観測でJU215により得たデータの解析結果である．発表では，JU215によるデータの解析例（つくば，柏，浦安，潮来等）と地質構造との関係を示しながら手法の有効性と課題について報告する．

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, 探査, アレイ

Keywords: microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, expolation method, array



図1 上: 柏測線(約10 km) .
下: 疑似S波速度断面(左)とH/V断面 (右).



スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 Statistical properties of strong ground motions based on the spectral inversion method

仲野 健一^{1*}, 川瀬 博², 松島 信一²

Kenichi Nakano^{1*}, KAWASE, Hiroshi², Shinichi Matsushima²

¹ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻, ² 京都大学防災研究所

¹ Graduate students, School of engineering, Kyoto University, ² Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

スペクトルインバージョン手法に基づいて強震動波形のフーリエスペクトルから強震動特性(震源特性、経路特性、サイト増幅特性)を分離する研究はすでに川瀬・松尾(2004)等により試みられている。しかし、応答スペクトルから強震動特性を分離する研究はほとんどおこなわれていない。これは、分離した応答スペクトルの諸特性の物理的意味が明確ではないためである。しかしながら、加速度フーリエスペクトルとその速度応答スペクトルには類似性があることが指摘されており、応答スペクトルを用いた検討も試みる価値がある。また川瀬・松尾(2004)のデータはK-NET、KiK-net、気象庁震度計などの強震ネットワークが本格的に普及し始めた1996~2002年のものであり、それから約10年以上が経過しているため、その間に蓄積されたデータは膨大な量になっている。そこで今回は1996~2011年のデータ(M_j 4.5以上)を用いて、フーリエおよび応答スペクトルから強震動特性の分離・解析をおこない、新しく得られた強震動特性について整理した。

加速度フーリエスペクトルから分離された強震動特性は、地震タイプや領域を問わず、川瀬・松尾(2004)のものと良い一致が得られた。経路特性のうち得られた Q 値は彼らの結果に比べてより安定した振動数に対して線形性の高い傾向となった。また地殻内地震において、従来求められていなかった北海道周辺の Q 値が新たに求まった。またサイト増幅特性も彼らのものと良い一致をみせた。震源特性を一般的によく用いられるBruneの応力降下量に変換して比較したが、これも彼らの結果と顕著に異なることがわかった。推定された応力降下量は、海溝型地震・スラブ内地震において平均で約8MPa、地殻内地震において平均で約1MPaとなり、既往研究で報告されている応力降下量と対応する値となった。

加速度応答スペクトルから求めた Q 値はフーリエスペクトルのそれと1Hz以上の範囲で非常に良い一致をみせたが、約1Hz以下では異なる傾向を示し、応答スペクトルから分離して求めた Q 値は約1Hz以下でも線形的な周波数依存性を呈示した。サイト増幅特性もフーリエスペクトルのものと良い一致を示したが、やはり約1Hz以下では振幅値は減少せず高い値のままフラットな傾向を示すサイトが多いことがわかった。震源特性は擬似速度震源スペクトルとしてフーリエスペクトルから求めたものと比較したが、その傾向は地震タイプごとに異なること、応答スペクトルから分離して求めたものはやはり約1Hz以下で高い値を保つことがわかった。約1Hz以下のこれらの差異は、フーリエスペクトルで卓越する短周期の振幅がインパルス入力として応答スペクトルの長周期側へ影響を与えたため生じているものと推測される。

強震動予測の高度化に活用するため、加速度フーリエスペクトルから分離した震源特性に着目しその統計的性質について検討した。Bruneの応力降下量を川瀬・松尾(2004)のものと同一のデータであるかどうかを t 検定により検定したところ、地殻内地震のみ有意差なしと判定された。また、東北地方太平洋沖地震の前後でも同様に t 検定をおこなったが、地震規模や地震タイプに関係なく有意差なしと判定された。このことから、東北地方太平洋沖地震による応力降下量への影響はほとんどみられないことがわかった。また経験的グリーン関数法においてアスペリティ面積を決定する重要な指標の一つである短周期レベル A について、一般的によく用いられる壇・他(2001)、佐藤(2003)の関係式と比較した。その結果、壇・他(2001)とは同一のデータセットとみなされなかったが、海溝型地震においては、本研究で推定した回歸式は彼らのものとは平均的に近いものであることがわかった。また、佐藤(2003)の得た A の分布と検定したところ、海溝型地震・スラブ内地震については同一のデータセットとみなせることがわかったが、地殻内地震では有意差ありとなった。両者の平均値はほぼ同じなので、これはその分散の違い(本研究の方が大きい)によるものと考えられる。また佐藤(2003)のデータと共通の地震で直接比較をおこなったが、その相関係数はどの地震タイプでも約80%以上であり、非常によく一致していることがわかった。

以上のことから、1996~2011年のデータセットを構築し、そのフーリエスペクトルから分離して得られた強震動特性の統計的性質に関する新しい知見を得ることができた。また、新しい試みとして応答スペクトルから分離した強震動特性についても新たな知見が得られた。今回新たに得られた震源特性をマグニチュードで回歸し、その震源特性にフィッティングさせたスペクトル予測式を構築することが今後の課題である。

キーワード: 応答スペクトル, 強震動特性, Q 値, 応力降下量, 短周期レベル A

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-05

会場:103

時間:5月19日 10:15-10:30

Keywords: response spectrum, strong motion properties, Q value, stress drop, short-period level A

TOWARD BETTER ESTIMATIONS OF GROUND-MOTION VARIABILITY TOWARD BETTER ESTIMATIONS OF GROUND-MOTION VARIABILITY

Fabrice Cotton^{1*}, Rodriguez-Marek Adrian², Archuleta Ralph³, Causse Mathieu⁴

Fabrice Cotton^{1*}, Rodriguez-Marek Adrian², Archuleta Ralph³, Causse Mathieu⁴

¹Disaster Prevention Research Institute (Kyoto Univ.) and ISTerre (Grenoble Univ.), ²Civil and Environmental Engineering Department, Virginia Tech, Pullman, USA, ³Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, California,

⁴Institut des Sciences de la Terre, University Joseph Fourier, Grenoble, France

¹Disaster Prevention Research Institute (Kyoto Univ.) and ISTerre (Grenoble Univ.), ²Civil and Environmental Engineering Department, Virginia Tech, Pullman, USA, ³Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, California,

⁴Institut des Sciences de la Terre, University Joseph Fourier, Grenoble, France

The random ground-motion-prediction variability strongly influences the seismic hazard curve computation, in particular for long return periods. One of the key challenges of seismology is to be able to calibrate and analyze the physical factors that control the ground-motion variability. The exponential growth of seismological near-field records provides the opportunity to separate the source, propagation, and site factors controlling the ground-motion variability (Al-Atik et al., 2010; Rodriguez et al., 2011). Ground-motion variability is usually divided into between-events variability and within-event variability. We describe and discuss some recent results and analysis performed on these two variability components. In a recent study (Rodriguez-Marek et al., 2013) we estimate the within-event variability for five databases from different regions worldwide (California, Switzerland, Taiwan, Turkey, and Japan). We investigate the potential dependency of the within-event variability on region, V_{s30} , distance and magnitude. The results show that the variability of the within-event variability across the different regions is small when compared with the within-event standard deviation. In other words, the event-corrected single-station standard deviation is remarkably stable across tectonic regions. Our results also suggest that moderate earthquakes are more variable for a given magnitude than large ones and that some stations are also showing larger variability of ground motions than others. Our analysis of the between-event variability shows (Cotton et al., 2013) that the between-event ground-motion variability gives an upper boundary to the earthquake stress-drop variability. This quantification of stress-drop variability offers a new way to calibrate future earthquakes ground-motion simulations.

キーワード: strong-ground motion, seismic hazard, stress drop, variability

Keywords: strong-ground motion, seismic hazard, stress drop, variability

強震動波形記録を用いた経験的グリーン関数法による2011年3月11日15時15分茨城県沖地震 ($M_w 7.9$) の震源モデル Source model of the 2011 Ibaraki-oki earthquake by the empirical Green's function method using strong-motion data

久保 久彦^{1*}, 浅野 公之¹, 岩田 知孝¹
Hisahiko Kubo^{1*}, Kimiyuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2011年茨城県沖地震 ($M_w 7.9$) は2011年3月11日15時45分 (JST) に茨城県沖で発生した地震であり, 同日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震 ($M_w 9.1$) の最大余震である. Kubo *et al.* (2012) では強震波形記録 (0.02-0.2 Hz) とGPSデータを用いた震源インバージョンによって2011年茨城県沖地震の時空間的なすべりモデルを構築した. 本研究では同地震の強震動生成と震源破壊過程の関係をより詳細に調べるために, 経験的グリーン関数法を用いた広帯域強震動波形のモデリング (0.1-10 Hz) を行い, 強震動生成領域 (Miyake *et al.*, 2003; 以下, SMGA) で構成される2011年茨城県沖地震の震源モデルを構築した上で, Kubo *et al.* (2012) による震源モデルとの比較を行った.

2011年茨城県沖地震の強震動波形記録において, S波の初動が到着して数秒後に, 大振幅の主要動が到着しているという特徴が見受けられる. このことから2011年茨城県沖地震における初期破壊の存在が示唆されるため, 本研究では震源で初期破壊が発生して数秒後に主破壊 (SMGAの破壊) が発生したという震源モデルを仮定する.

SMGAの破壊開始の位置と遅れ時間は, S波の初動と主要動の到達時刻の差を用いて, Takenaka *et al.* (2006) や Suzuki and Iwata (2007) と同様の手法で推定した. SMGAの大きさや配置, ライズタイム, 破壊伝播速度に関しては, 経験的グリーン関数法 (Irikura, 1986) による波形合成を行い, グリッドサーチすることによって決定した. その評価については加速度エンベロープと変位波形の残差の和により行った (三宅・他, 1999; Miyake *et al.*, 2003). 解析にはKiK-net 6観測点での強震動波形記録を用いた. 小地震の重ね合わせ数および大地震と小地震の応力降下量の比については, 観測スペクトル比を用いた source spectral ratio fitting method (Miyake *et al.*, 1999, 2003) によって決定した. 小地震と大地震の地震モーメント比についてはF-net 2観測点における観測スペクトル比の低周波数領域におけるフラットレベルから推定した. 経験的グリーン関数には2005年10月19日20時44分に茨城県沖で発生した地震 ($M_w 6.3$) を採用した.

解析の結果, SMGAの破壊は初期破壊から9秒後に震源から南東に約10kmから始まったことが分かった. 推定されたSMGAはKubo *et al.* (2012) が推定した大すべり領域よりも深い場所に位置しており, 一部が重なっている. SMGAの大きさは28km*28kmであり, 大すべり領域の大きさ (60km*30km) よりも一回り小さい. SMGAのライズタイムは2.8秒, 地震モーメントは 3.4×10^{20} Nm ($M_w 7.6$), 応力降下量は42MPaと推定された. SMGA内の破壊は主として南西方向に4.0km/sの破壊伝播速度で進展する. 他方で, Kubo *et al.* (2012) による震源モデルでは破壊は南東方向に伝播している.

本研究とKubo *et al.* (2012) の両方の結果を踏まえると, 2011年茨城県沖地震の震源破壊過程は次のように考えられる. 破壊開始から約10秒後に開始点よりやや浅いところで主破壊が開始した. 主破壊の前半では比較的短周期の地震波が多く放出された. 主破壊全体としては大きなすべりを伴いながら南東方向に進んでいった.

謝辞: 本研究では防災科学技術研究所 KiK-net, F-net で観測された強震動波形記録を使用しました.

キーワード: 2011年茨城県沖地震, 震源過程, 強震動生成領域, 経験的グリーン関数法

Keywords: The 2011 Ibaraki-oki earthquake, Source process, Strong motion generation area, The empirical Green's function method

経験的グリーン関数法を用いた2011年3月11日(Mw7.6)三陸沖アウターライズ地震の震源モデル Source Modeling of Sanriku-oki 2011(Mw7.6) Outer Rise Earthquakes Using the Empirical Green's Function Method

高井 伸雄^{1*}, 宮原有史¹, 重藤迪子¹, 笹谷努¹
Nobuo Takai^{1*}, Yuji Miyahara¹, Michiko Shigefuji¹, Tsutomu Sasatani¹

¹ 北海道大学大学院工学研究院
¹Hokkaido University Faculty of Engineering

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震発生直後の15時26分に三陸沖でアウターライズ地震(Mw7.6)が発生しており、この地域では1933年三陸沖地震(Mw8.4)に次ぐ規模である。その後も、三陸沖ではアウターライズ地震が頻発し、地震前には観測記録が稀少で検討できなかった強震動特性の検討が徐々になされている。本地震の震源特性を検討することは、1933年昭和三陸地震はもとより、当地域で将来発生が指摘されるさらに大規模なアウターライズ地震における強震動特性を評価する上で非常に重要である。そこで、本稿では経験的グリーン関数法(EGF法)を用いて、2011年三陸沖アウターライズ地震(以降2011OR)の震源モデルを推定し、得られた震源パラメータを既往のスケール則等から検討を行う。

2. 解析に用いる地震とデータ

要素地震として、本地震の震央付近でメカニズム解が類似している2011年5月5日23時58分に発生した地震(Mw6.1)を用いる。地震記録は、防災科学技術研究所のKiK-net及び北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターで得られた記録を使用した。

3. 経験的グリーン関数法による震源のモデル化

本研究で推定する震源モデルは、できるだけ単純なモデルで広帯域強震動を説明できるものとするため、震源断層面に矩形の強震動生成領域(SMGA)が配置されているモデルを想定した。この場合、広帯域強震動の地震波は、すべて震源断層面内のSMGAからのみ放射されるとし、背景領域の寄与はないものと仮定している。断層面の推定は、Obana et al.(2012)による海底地震計を用いた余震観測の結果より、断層面は西側に傾斜する節面であると推定した。SMGAの長さの比Nと応力降下量の比Cの推定は、横井・入倉(1991)に基づき、 $N=5$, $C=1.632$ を得た。以上の設定から、SMGAの大きさ、破壊開始点、すべりの立ち上がり時間、破壊伝播速度を求めるため、グリッドサーチを行った。得られた破壊開始点南側に位置し、南北の観測点の波形の包絡形状の違いから推定される伝播方向と合致して、南から北へ向かっての破壊進行であることが確認できた。また、加速度波形の包絡形状、速度・変位波形の形状等がよく再現できた。

4. 微視的断層パラメータ

推定した断層モデルから得られるパラメータを既存のスラブ内地震のスケール則と比較すると、笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の M_0 とアスペリティ総面積(=SMGA)の関係、 M_0 と短周期レベルの関係と整合性の高い値が得られた。また、浅野・岩田(2010)によるスラブ内地震の震源深さと応力降下量の関係と比較すると、本アウターライズ地震は浅い地震であるにもかかわらず、深いスラブ内地震と同等に応力降下量が大きいたことが確認できた。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のKiK-net及びF-net、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、Global-CMTより提供されたデータを使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

キーワード: アウターライズ地震, 震源特性, 経験的グリーン関数法

Keywords: Outer-rise Earthquake, Source Characteristics, Empirical Green's function method

マグニチュード9まで適用可能な距離減衰式(2)

Development of a new ground motion prediction equation applicable up to Mw9 (2)

森川 信之^{1*}, 藤原 広行¹

Nobuyuki Morikawa^{1*}, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

防災科学技術研究所では、地震ハザード評価への適用を目的とした計測震度、最大加速度、最大速度ならびに加速度応答スペクトルの距離減衰式に関する検討を進めている。観測史上最大規模である平成23年東北地方太平洋沖地震(以下、M9地震)の発生を受けて、既往の距離減衰式では外挿となるマグニチュード9まで直接適用可能な距離減衰式の導出を前回試みた。しかしながら、震源の近傍において振幅を過大評価をしている傾向が見られ、記録の無いマグニチュード8クラス以上かつ断層最短距離30km以下の範囲においても過大評価となっている可能性が高いことを明らかにした(森川・藤原、2012)。そこで、改良に向けた検討を行った。

前回の検討からの改良点は以下の通りである。

- 1) 2011年および2011年に発生した地震による強震動記録を追加することにより、東北地方太平洋沖地震の余震や誘発されたと思われる多くの地震が追加された。
- 2) マグニチュードの二次式による表現に関して、マグニチュードに関する頭打ちを導入した。
- 3) 近距離のデータに大きな重みを付して回帰した。具体的には、10km未満は8.0、10~20kmは4.0、20~40kmは2.0、40km以上は1.0、とした。
- 4) 海溝型地震に関して、プレート間地震とプレート内地震を基本式導出の段階で区別した。

上記、3)の効果により、震源近傍での予測値が前回の検討結果と比べて小さくなることが確かめられた。ただし、回帰におけるデータの無いMw7以上かつ30km以内に関する不確かさは残されており、今後海外の記録等も用いた検討が必要である。

謝辞: 防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、気象庁の震度計および港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測網をはじめとした多数の機関により観測、提供された強震動記録を使用しました。

キーワード: 距離減衰式, 強震動, 地震ハザード評価

Keywords: ground motion prediction equation, strong ground motion, seismic hazard assessment

海溝型巨大地震の強震動予測レシピの考え方 (2)

How to construct a recipe for predicting strong ground motions from great subduction earthquakes

入倉 孝次郎^{1*}, 倉橋 奨¹Kojiro Irikura^{1*}, Susumu Kurahashi¹¹ 愛知工業大学¹ Aichi Institute of Technology

1. はじめに

2011年東北地震は、震源近傍域で極めて密な強震動観測データが得られた初めてのMw9.0の超巨大な海溝型地震である。南海トラフに繰り返し発生してきた東海、東南海、南海地震は、東北地震と同じタイプの海溝型巨大地震である。したがって、この東北地震の強震動データの解析により、強震動生成のための震源断層モデルを明らかにすることができれば、将来の海溝型巨大地震に対する被害軽減対策を考える上で重要な信頼性の高い強震動予測が可能となる。

2. 東北地震の短周期震源モデル

この地震の震源近傍での強震動記録には、孤立した複数のパルス状の波群がみられる。センブランス解析により、これらの波群は5つの強震動生成域から到来した波動であることが分かった。フォーワード・モデリングによりシミュレーションを行った結果、観測波形によく一致する合成記録が得られ、最適な短周期震源モデルが推定された。

しかしながら、上記の合成波形は、詳細にみると、観測波形に見られる各波群の始まりの衝撃的波形が再現できていない。これまでの強震動生成の震源モデルは、強震動生成域の内部で一様な応力パラメータを持つと仮定しているが、強震動生成域の応力パラメータが一様ではなく、不均質性を有するとして、強震動生成域の破壊開始点付近に大きな応力パラメータの小領域を設定して、強震動のシミュレーションを行うと、観測に見られる衝撃的な波形の再現が可能となる。応力パラメータの不均質性がどの程度考慮すればいいか、強震動予測にとって重要な問題である。

3. 周期依存の震源モデル

この地震の短周期地震モデルの強震動生成域は、バックプロジェクション法により推定された短周期地震波の放射は震源より西側でプレートの沈み込みのダウンディップの先端域に集中している結果(例えば、Ishii, 2011)とよく一致している。

一方、この地震の地殻変動データなど超長周期のデータを用いた逆解析により推定された震源モデルでは、震源よりも東側で震源断層の浅い側で大きなすべりが推定されている(例えば、国土地理院, 2012)。スマトラ地震(Mw 9.2)や2010年チリ地震(Mw 8.8)でも、破壊過程が深さ依存の性質をもつことはLay et al.(2012)13)により研究されている。

これらの海溝型巨大地震は、広い断層破壊域のなかで、深いところで短周期が生成され、大きなすべりを生じた浅いところではほとんど生成されなかった、と考えられる。

4. 海溝型巨大地震の巨視的・微視的震源パラメータのスケーリング則

海溝型巨大地震の巨視的震源パラメータのスケーリングは、Mw8.4以下の地震について、断層面積 S は地震モーメント M_0 の $2/3$ 乗に比例して大きくなる(Murotani et al. (2008))。田島・他(2012)はMw8.4以上の地震を加えると、 $S \propto M_0$ 関係はMurotani et al.(2008)の延長よりも小さくしている。東北地震の $S \propto M_0$ 関係は、田島・他(2012)の関係に良くのっている。

海溝型巨大地震の強震動生成域の面積に関して、これまで長周期強震動データから求めたすべり分布による S_{aL} は断層面全体の約20%程度と評価されていたが、短周期強震動データにより推定された強震動生成域 S_{aS} は S_{aL} の約3分の1になる。加速度震源スペクトル(A)と地震モーメント(M_0)の関係から推定される強震動生成域の面積(S_a)は S_{aL} にほぼ一致する。これらの関係から評価された強震動生成域の応力パラメータはばらつきはあるが、中央値(median)を求めると約26MPaとなる。

5. 海溝型巨大地震の強震動予測のためのレシピの考え方

2011年の東北地震の短周期震源モデルとして推定された5つの強震動生成域の位置は、地震調査委員会による「地震活動の長期評価」16)のために設定した領域分けに係りづけられる。(図1)。

これらの解析結果をもとにして、海溝型巨大地震のレシピの考えは以下にまとめられる。

a. 全破壊域およびセグメントを与える。

東北地震を例にとると、強震動生成のための地震セグメントは、過去の地震活動から分けられた、三陸沖中部、三陸沖南部、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖の5つとする(図1左)。海溝寄りの津波地震セグメントからは、強震動の生成は小さいと考えられるので、ここでは排除する。

b. 各セグメントに強震動生成域は1つ設定。2つ以上を設定しても、強震動への影響は大きくはない。

c. 強震動生成域での応力降下量は25~30 MPa

長大横ずれ断層の地震の強震動予測レシピの検討

Study on a recipe for strong ground motion prediction for large inland earthquakes along long strike-slip faults

小穴 温子^{1*}, 石井 透¹, 壇 一男¹, 藤原 広行², 森川 信之²

Atsuko Oana^{1*}, Toru Ishii¹, Kazuo Dan¹, Hiroyuki Fujiwara², Nobuyuki Morikawa²

¹ 清水建設技術研究所, ² 防災科学技術研究所

¹Institute of Technology, Shimizu Corporation, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

地震調査研究推進本部(地震本部)による強震動予測のための「レシピ」において、断層が長大になると、手順に従って計算される背景領域のすべり量が負となって断層モデルを設定できない場合があり、一つの課題となっている(地震本部、2005a)。その課題に対して、壇・他(2011)は、長大横ずれ断層においても断層パラメータを組むことができる、横ずれ断層による内陸地震を対象としたアスペリティモデルの新しい設定方法を提案している。

本検討では、全長約360kmに及び中央構造線断層帯沿いの地震を対象として、上記の壇・他(2011)による方法および地震本部(2005b)によるアスペリティモデルの設定方法に基づいて複数の断層モデルを設定し、統計的グリーン関数法を用いて強震動を試算し、それらの結果の妥当性と問題点について検討した。

地震本部(2005b)の検討を参照して適用した場合のうち、短周期レベルの経験式からアスペリティの面積を求めたケース(参考ケースA)では、背景領域のすべり量が負となり、断層モデルが設定できないことを確認した。そこで、断層モデルを破綻させないように、地震本部(2005b)の検討と同様に工夫を加えたモデルを2つ考え、アスペリティの面積をSomerville *et al.* (1999)の経験的な比率である22%とし、円形クラックの式により平均応力降下量を与えた参考ケースBと、Fujii and Matsu'ura (2000)に基づき平均応力降下量を3.1 MPaとしたケースCを設定した。また、それらとは別に、壇・他(2011)の提案した方法を適用した断層モデルとしてケースDを設定した。

それぞれのケースの断層モデルを用いた強震動の試算結果と司・翠川(1999)の距離減衰式による推定値を比較した。参考ケースBの試算結果は、短周期レベルが他のモデルの約3倍に設定されたため、最大速度が震源近傍で平均的に300 cm/s程度となり、距離減衰式を大幅に上回る結果となった。ケースCの試算結果は、概ね距離減衰式のばらつきの範囲内ではあるが、震源近傍では最大速度が平均的に150 cm/s程度となり、式の平均値よりもやや大きめに評価された。ケースDの試算結果は、震源近傍では最大速度が平均的に100 cm/s程度となり、距離減衰式と整合した。したがって、長大横ずれ断層の強震動評価において、壇・他(2011)による断層パラメータの設定方法は適切であると評価できる。

キーワード: 長大断層, 断層モデル, 強震動予測

Keywords: very long fault, fault model, strong motion prediction

震度分布に基づく太平洋プレート内のスラブ内地震の短周期励起特性 Short-period radiation properties of intra-slab earthquakes in the subducting Pacific plate from seismic intensity data

神田 克久^{1*}, 広谷 浄², 石川 和也²

Katsuhisa KANDA^{1*}, HIROTANI, Kiyoshi², ISHIKAWA, Kazuya²

¹ 小堀鐸二研究所, ² 東北電力

¹ Kobori Research Complex Inc., ² Tohoku Electric Power Co., Inc.

沈み込む海洋プレート内部で発生するスラブ内地震は、同じ地震規模で比較すると内陸地震やプレート境界地震よりも短周期地震動の励起が大きく、広範囲に大きな加速度を生じさせることがある。ここでは、太平洋プレート内部で発生するスラブ地震で被害地震となった宮城県沖と釧路沖の3つに地震を対象として、震度データを用いて短周期地震動の励起特性について分析を行うとともに、震度インバージョン解析を用いて断層面の短周期地震波発生域を評価する。

宮城県沖では2003/5/26 (MJ7.1、深さ72km)、2011/4/7 (MJ7.2、深さ66km)のM7クラスのスラブ内の被害地震が発生している。2003/5/26の地震では岩手県南部および宮城県周辺で震度6弱を観測し、負傷者174人、全壊2棟の被害が生じた。2011/4/7の地震では宮城県栗原市や仙台市宮城野区で震度6強を観測したほか、岩手県南部および宮城県周辺で震度6弱を観測するなど広い範囲で強い揺れを観測し、この地震により死者4人、負傷者296人の被害が生じた(総務省消防庁)。まず、それぞれの余震の計測震度データを用いて距離減衰式を作成し、震度観測点の揺れ易さの震度尺度である相対震度を評価した。また、本震、余震を含めて距離減衰式の残差項を評価し、それぞれの地震の震度に関係した短周期地震動の励起の差を分析した。短周期地震動の励起は震源深さに対して大きくなるという依存性があることが分かった。この短周期地震動の励起の深さ依存性はこの地域のプレート境界地震でも同様であることが指摘されており[Lay et al.(2012)]、深さによって断層の特性が影響を受けると考えられる。また、短周期地震動の励起は2003/5/26の地震と2011/4/7の地震では異なることも分かった。この差は、マントルウェッジにおけるQ値の空間的な構造と関係している可能性がある。震度インバージョン解析を行い断層面の短周期地震波発生域を求めて波形インバージョンによるすべり分布を比較すると、すべりの大きい領域と概ね対応していることが分かった。

釧路沖では1993/1/15 (M7.5、深さ101km)の地震が発生し、釧路が震度6で、死者2名、負傷者966名、全壊53棟の被害が発生した。この地震の周辺で発生した最近の地震を宮城県沖の地震と同様な手法で分析した。釧路沖の地震の短周期地震動の励起は宮城県沖と類似しており、深さに依存して大きくなる傾向も同じだった。1993年釧路沖地震では、計測震度は観測されていないので気象庁発表体感震度とアンケート震度のデータを用いて、震度インバージョン解析を行い、断層面上の短周期地震波発生域を明らかにした。

キーワード: 震度インバージョン, 短周期地震動, 宮城県沖, 釧路沖地震, スラブ内地震, 震源深さ

Keywords: seismic intensity inversion, short-period energy radiation, the 1993 Kushiro-oki Earthquake, off Miyagi Prefecture, intra-slab earthquake, focal depth

動力学的震源モデルを用いた上町断層帯で発生する地震の強震動予測 Strong ground motion prediction of the Uemachi fault zone using dynamic rupture scenarios

加瀬 祐子^{1*}, 関口 春子²Yuko Kase^{1*}, Haruko Sekiguchi²¹産総研 活断層・地震研究センター, ²京大防災研¹AFERC, AIST, ²DPRI, Kyoto Univ.

地震動予測に用いる地震シナリオは、対象とする断層の個性を反映して設定されたものほど、実現性が高くなり、予測精度を向上させるものと期待される。これまで、地形・地質学的データに基づいて断層形状と応力場を想定し、その条件下で物理的に起こりうる破壊過程を数値計算で求めるという手順で、強震動予測のための地震シナリオを作成することを試みてきた。今回は、上町断層帯における重点的な調査観測で取得された地形・地質学的データに基づく上町断層帯の断層面三次元形状および断層走向に沿った平均上下変位速度分布を用いて、動力学的震源モデルを作成し、上町断層帯で発生する地震の強震動予測をおこなった。

上町断層帯は、大阪平野の中央部にほぼ南北走向で位置し、長さは約 48 km、地震発生層の主要部分では、50-60 度で東に傾斜する。この断層の破壊過程をシミュレーションするための応力場については、まず、想定される平均的なすべり分布モデルを作成し、これを応力場パラメータに変換した上で、高周波数域の地震動を生成するために必要な短波長の不均質を付加するという流れで設定した。初めに、反射法地震探査やボーリング調査などの結果に基づいて作成された平野の堆積層構造モデル（堀川ほか、2003）、および、段丘面の詳細な標高分布（近藤ほか、本大会）を用いて、上町断層帯の走向に沿った累積変位量の空間変化を求めた。新淀川の南側での段丘面の標高から、この地点での最新イベントによる地表上下変位量は 1.3 m と推定されている（近藤ほか、本大会）。これらのデータから、1 回の地震で生じる地表変位量の平均像を作成し、走向方向のすべり量分布とした。傾斜角方向のすべり量分布は、予備的な動的破壊の数値実験により作成した。広域応力場は、テクトニックな応力場（Yamashita et al., 2004）を考慮し、主応力は深さに比例、最大主応力の向きは東西方向、最小主応力の向きは鉛直方向で、大きさはかぶり圧に等しい、とした。次に、上町断層帯の断層面三次元形状（木村ほか、2012）の上にこのすべり量分布を与えたときの応力変化分布を Okada (1992) により求め、これを静的応力降下量分布の長波長成分とした。応力降下量分布の短波長成分は、フラクタル的な不均質分布を作成した。それらを合成することで、それぞれ異なる乱数から作成された複数の静的応力降下量分布を生成した。更に、応力降下量と法線応力変化の不均質は水平方向の主応力の不均質によって生じると仮定し、応力降下量の走向方向成分と傾斜角方向成分から、最大水平圧縮応力と最小水平圧縮応力の不均質分布を求めた。最後に、静摩擦係数は断層面で均一とし、断層面上の法線応力分布に乗じて、断層面上の強度不均質の初期値分布とした。ここで、静摩擦応力が剪断応力の絶対値を下回る地点は、剪断応力を支えるだけの強度を持たないと考えられるため、剪断応力の初期値を動摩擦係数と等しいと置き直した。こうして得られた応力場モデルに対し、複数の破壊開始点を設定し、すべりに依存する摩擦構成則を仮定して、差分法（Kase, 2010）により動的破壊過程を計算した。応力場の不均質を反映して、破壊はなめらかに伝播せず、ところどころで壊れ残りも生じた。浅い部分での強度が小さいものの、破壊が浅い部分で先行する様子は、ほとんど見られない。破壊開始点の位置により、破壊域の広がり方が異なり、Mw6.5-7.0 の地震シナリオが得られた。地震調査研究推進本部の「レシビ」に従って断層長さから推定されるこの断層帯の起こす地震規模は Mw7.1 であり、我々のモデルはこれに比べてやや小さい。得られた地震シナリオのうち断層面全体が破壊する最も大きいレベルのものによる地震動は、すべり量の大きい北部領域で特に大きくなり、断層近傍では 100 cm/s を越えた。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C) 課題番号 21510190 および文部科学省（平成 24 年度）科学技術基礎調査等委託事業「上町断層帯における重点的な調査観測」として実施されました。

キーワード：動力学的震源モデル, 上町断層帯, 強震動予測, 地形学, 地質学

Keywords: dynamic rupture, the Uemachi fault zone, ground motion prediction, geomorphology, geology

内陸浅発地震によって励起された Diffracted P and S waves Diffracted P and S Waves Excited by Shallow Inland Earthquakes

重藤 迪子^{1*}, 笹谷努¹, 高井伸雄¹

Michiko Shigefuji^{1*}, Tsutomu Sasatani¹, Nobuo Takai¹

¹ 北海道大学大学院工学院

¹Hokkaido University

本研究では、内陸浅発地震で観測された Diffracted P and S waves の励起特性と地下構造との関係について検討を行う。2010年12月2日石狩地方中部の地震 (Mw4.6, h=5.0 km) の震央から北北西の測線 (NNW 測線) における観測記録には、直達波と同じ見かけ速度を有し、振幅の大きい特異な後続波が P 波, S 波に対して確認できる。NNW 測線付近以外ではこの特異な波の励起は確認できない。直達波と後続波の卓越周期はほぼ等しく、その見かけ速度は地震基盤相当 ($V_p \approx 6 \text{ km/s}$, $V_s \approx 3 \text{ km/s}$) で、後続波と直達波の走時差は P 波では約 2 秒, S 波では約 4 秒である。また、直達波の振幅は、ある距離以遠で震央距離の自乗に反比例して減衰する。一方、その距離における後続波は、直達波の振幅を上回ることが分かる。この特異な後続波は、約 2 分後に発生した余震の記録においても確認できる。

以上から、この後続波は表面波や地殻内の不連続面による反射波とは異なり、直達波が自由表面と地震基盤上面 (境界面) で反射した波であると考えられる。さらに、直達波および後続波の見かけ速度からこれらが地震基盤上面に沿って水平方向に伝播していること、直達波の距離減衰関係が Head wave のそれと類似していることから、これらは Diffracted P and S waves である可能性が高い (Ben-Menahem and Singh, 1981)。Diffracted P and S waves は、理論的には、震源が境界面下に位置し、かつ境界面に近接している場合に、堆積層へ透過する角度が臨界面角相当に達して励起されることが知られているが、強震記録に基づきこれらの波の検討を行った既往研究例は無い。そこで、これを検証するために、3次元差分法 (Aoi and Fujiwara, 1999; Pitarka, 1999) により、石狩平野の地下構造モデル (吉田ほか, 2007) を用いた強震動シミュレーションを実施した。震源パラメータには Shigefuji et al. (2012) を用い、点震源を仮定した。最小格子間隔は地震規模を考慮して 0.025 km とした。有効周波数は 2 Hz 以下である。本計算条件では、この NNW 測線における地震基盤上面は水平方向に起伏が乏しく、その深さは約 4 km、震源はそのすぐ下 5 km に位置する。

NNW 測線における計算波形の特徴は、上述の観測記録のそれと調和的である。これらの結果から、NNW 測線の観測記録に見られる直達波および特異な後続波は、直達および反射 Diffracted P and S waves であり、震源が地震基盤上面直下に位置していることで励起されたことが明らかになった。また、NNW 測線付近以外では、計算波形においても Diffracted P and S waves の励起は確認できない。これは Diffracted P and S waves が平行成層とほぼ仮定できる地下構造によって励起されるためである。一方で、今回の強震動シミュレーションは、地下構造モデルの検証でもあり、観測波形と計算波形との良い一致から、NNW 測線に沿った地域の深部地盤構造の妥当性も検証できたと言える。Diffracted P and S waves は地下構造の検証にも有用な情報を含んでいることが分かった。

謝辞: 本研究では、防災科学技術研究所の K-NET、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、気象庁、札幌市、北海道ガス (株)、上山試錐工業 (株) による観測記録を使用しました。記して感謝の意を表わします。

キーワード: Diffracted P and S waves, 内陸浅発地震, 三次元シミュレーション, 深部地盤構造

Keywords: Diffracted P and S waves, Shallow Inland Earthquakes, Three dimensional simulation, Deep subsurface structure

2011年東北地方太平洋沖地震の際の広域での表層地盤の非線形挙動 Nonlinear behavior of soft soil deposits in wide area during the 2011 Tohoku earthquake

若井 淳^{1*}, 野津 厚¹
Atsushi Wakai^{1*}, Atsushi Nozu¹

¹ 港湾空港技術研究所
¹Port and Airport Research Institute

地震動が構造物に与える影響を正確に理解する上で、表層地盤の非線形挙動が地震動に与える影響を評価することは重要である。2011年東北地方太平洋沖地震では、全国をカバーする強震観測網により、非常に広範な地域で強震記録が得られている。本研究では、これらの観測記録の地表フーリエスペクトルのピーク周波数が線形時サイト増幅特性（地震基盤～地表）のピーク周波数からどの程度移動したかを表す指標に基づいて、非線形挙動強さを評価する。そして、地震動強さを表すいくつかの指標（PGA, PGV 及び PSI 値）と非線形挙動強さとの関係を調べ、それらの関係を適切に表現する経験式を提案した。その結果、非線形挙動強さは PGV と最も相関が良く、その関係は双曲線モデルで最も適切に表現されることがわかった。また、非線形挙動強さの経験式からの偏差が線形時のサイト増幅特性のピーク周波数と相関があることがわかった。

キーワード: 非線形挙動, 強震動, 2011年東北地方太平洋沖地震, 経験式
Keywords: nonlinearity, strong motion, the 2011 Tohoku earthquake, empirical equation

大阪堆積盆地三次元地盤速度構造モデルの改良 Improvement of Three-Dimensional Velocity Structure Model of the Osaka Sedimentary Basin

吉見 雅行^{1*}, 浅野 公之², 関口 春子², 林田 拓己¹, 堀川 晴央¹, 竿本 英貴¹, 岩田 知孝²

Masayuki Yoshimi^{1*}, Kimiyuki Asano², Haruko Sekiguchi², Takumi Hayashida¹, Haruo Horikawa¹, Hidetaka Saomoto¹, Tomotaka Iwata²

¹ (独)産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, ² 京都大学防災研究所

¹AFERC, GSJ/AIST, ²DPRI, Kyoto Univ.

1. はじめに

文部科学省委託研究「上町断層帯における重点的な調査観測」の一環で、大阪堆積盆地地盤速度構造モデルの開発を行った。大阪盆地における強震動予測の高度化のためには、妥当な震源像の策定と並び、地震動の増幅特性に大きく寄与する堆積層速度構造モデルの精緻化が重要である。既存の速度構造モデルをベースに、微動アレイ探査、単点微動観測、中小地震記録のレシーバ関数解析など新たに実施した観測・解析結果をもとに、地盤速度構造モデル作成手法の開発も行いながら、堆積盆地の地盤速度構造モデルの高度化を進めてきた(関口・他, 2012, 2013)。本発表では、このうち地盤速度構造モデルの改良に関する報告を行う。

2. 速度構造モデル改良に資する新たな観測および解析

大阪堆積盆地では、これまでも各種の物理探査が行われ、それらによる速度構造情報が三次元地盤速度構造モデル作成に用いられてきた(香川・他, 2002; 堀川・他, 2003; 大阪府, 2005; Iwata et al., 2008)。本プロジェクトでは、2010~2012年度にかけて、6地点での微動アレイ探査(吉見・他, 2012)、100点での単点微動観測(浅野・他, 2012a)、15地点での連続微動観測(浅野・他, 2012b)、2本のP波反射法地震探査(岩田・他, 2012, 2013)を実施した。また、大阪府震度計などの中小地震記録を収集し、レシーバ関数法によるPS-P時間の抽出(堀川, 2012)や差分法による中小地震の地震動シミュレーション(関口・他, 2012)を行った。これらの解析結果に既存の物理探査データを加え、速度構造情報改良のためのデータセットとして準備した。

大阪府2004モデル(大阪府, 2005)から計算される位相速度、H/Vスペクトル比の卓越周期、PS-P時間をこれらデータセットと比較した結果、特に、大阪平野南東部の丘陵域、大阪湾岸南部、大阪盆地北端部付近などで、モデル改良の必要性が見出された。

3. 物性値経験式の検討

本研究では既存の速度構造モデル(堀川・他(2003)、大阪府(2005))をベースに改良を行った。これらのモデルでは、モデル領域が断層によってブロック分割され、各ブロックの堆積層のP波速度は堆積年代と埋没深度との経験式によって与えられる。各深度での堆積年代は、ボーリングと反射法地震探査に基づく鍵層(Ma10, Ma3, Ma-1, 福田火山灰層, 松山-ガウス境界, 神戸層群上面)深度および基盤深度を用いて設定されている。S波速度と密度は、P波速度と深度から松本・他(1998)の経験式により求めた間隙率を用い、Gassmann(1951)の関係式を適用して算定されている。本研究では、P波速度に関しては、反射法探査の区間速度と比較し、堀川・他(2003)による経験式が観測結果をよく説明することを確認した。一方、S波速度に関しては、大阪層群のP波速度とS波速度の既往経験式を、大阪堆積盆地内での既存のPS検層結果と比較したところ、Nakagawa et al.(1996)によるP波速度とS波速度の経験式がPS検層結果をよく再現することがわかった。

ただし、これら経験式は平野部のPS検層結果をよく説明するが、地表付近にS波速度の大きな堆積層がある状況をうまく表現できない。そこで、特に丘陵域における大阪層群の堆積環境の違いや削剥等の効果を念頭に、P波速度算定時の埋没深度を補正することとし、この補正量をMa10層の削剥量として見積もり、新たに導入した。

4. モデルの改良

関口・他(2013, 本大会)が堀川・他(2003)および大阪府(2004)のモデルをベースに再構築した地盤速度構造モデルをもとに、本研究で得られた各地点での微動アレイ位相速度、単点微動H/Vスペクトル、レシーバ関数PS-P時間を合わせるように、基盤深度や鍵層深度の修正を実施した。これにより、各種の観測データの再現性が向上した。今後、改良後のモデルについて、連続微動観測によって得られた観測点間グリーン関数および中小地震波形記録をターゲットとした三次元地震動シミュレーションを行い、速度構造モデル改良の成果を確認する。

謝辞: 本研究は文部科学省委託「上町断層帯における重点的な調査観測」の一部として実施しました。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-16

会場:103

時間:5月19日 15:15-15:30

キーワード: S波速度, 強震動予測, 上町断層, H/V スペクトル, 微動アレイ, レシーバ関数解析

Keywords: S-wave velocity, strong ground motion prediction, Uemachi fault, H/V spectra, ambient noise survey, receiver function analysis

3次元速度構造モデルの記述方法の開発 - 大阪堆積盆地 Description of 3D velocity structure: Osaka Basin

関口 春子^{1*}, 竿本 英貴², 吉見 雅行², 浅野 公之¹, 堀川 晴央², 林田 拓己², 岩田 知孝¹

Haruko Sekiguchi^{1*}, Hidetaka Saomoto², Masayuki Yoshimi², Kimiyuki Asano¹, Haruo Horikawa², Takumi Hayashida², Tomotaka Iwata¹

¹ 京大防災研, ² 産総研 活断層・地震研究センター

¹ DPRI, Kyoto Univ., ² AFERC, AIST

1. はじめに

文部科学省委託「上町断層帯における重点的な調査観測」のプロジェクトの一環で、大阪堆積盆地地盤構造モデルの開発を行った。物性値構造の本質的な改良もさることながら、3次元速度構造モデルの構成方法についても改良を行った。本稿では、3次元速度構造モデルの構成方法について、過去の本地域を対象としたモデルのレビュー、本研究での方針と手法について述べる。一方、物性値構造の修正過程については、吉見・他(2013、本大会)で、モデルの概要については関口・他(2013、本大会)で述べる。

2. 大阪堆積盆地の既存地盤構造モデル

大阪堆積盆地は、他地域に比べて地下構造探査密度が高く、早くから3次元堆積層構造モデルが作られている。既存モデルは大きく分けて、香川ほか(1993)に始まるJ系統モデル(香川ほか, 1993; 宮腰ほか, 1997; 宮腰ほか, 1999; 香川ほか, 2002; Iwata et al., 2008; Iwaki and Iwata, 2011)と、産総研モデル(堀川ほか, 2003)に始まるH系統モデル(堀川ほか, 2003; 大阪府, 2004)の2つがある。この2つの系統は、地層境界面形状や物性値(P波速度, S波速度, 密度)構造の記述方法が大きく異なる。J系統モデルでは地層境界面がスプライン関数で与えられている。堆積層部分は、反射法地震波探査や常時微動アレイ観測の結果を基に3層に分割され、同一層内は同一の物性値が配されている。そのため、任意の場所の物性値を簡単に決めることができる。数値計算の様々なグリッド間隔への対応が簡単であり、ユーザーによる不適当な内外挿処理も防ぐことができる。一方、H系統モデルでは、地質構造を忠実に表現し逆断層形状などの急峻な形状も組み込めるよう、モデルは固定の3次元メッシュで記述されている。堆積層内に6枚の鍵層構造を作って堆積年代を与え、物性値は埋没深度と堆積年代に依存した経験式で与えており、PS検層結果に見られるミラージュ層の様相に対応している。

2つの系統の長所や短所は、裏返しの関係にある。H系統モデルは、実際の地下構造をできるだけ再現するように精巧に作られているが、任意グリッドで切り出すのが難しくモデル自体の修正作業はモデル作成者以外には困難という欠点がある。一方、J系統モデルは、三次元不均質構造の記述方法が明快なため、地震動計算やモデル自体の修正作業が比較的容易だが、地下構造の表現の精緻さにおいて劣るという欠点がある。どちらも、あらゆる物理探査モデルをコンパイルして3次元構造モデルを作成しているが、H系統モデルでは、ボーリングデータと地質構造の再現に重きがおかれ、J系統モデルでは、地震動データに基づくモデル化と三次元モデル構築作業の明確化に重きが置かれたことに起因しているのである。

3. モデルの構成方法

本研究で作成する地下構造モデルとしては、H系統モデルのように地層境界面や物性値構造を可能な限り探査データに忠実に精緻に表現しつつ、J系統モデルのように地層境界面を関数系で表現し、任意の間隔のメッシュで物性値構造が取り出すことが可能なものを目指すこととした。これを実現するため、次の3つの柱で3次元モデルを構成した。

- 1) 断層などの急峻な構造変化を境界とするブロックに分割する
- 2) ブロック毎に地層境界面を複雑な形状に対応できる関数形で表現する
- 3) 物性値(P波速度, S波速度, 密度)を深さ、堆積年代、地域性に依存した式で与える
- 4) 任意の地点の地層境界面深度や地域係数を抽出し、物性値を計算するツールとデータセットを地下構造モデルとする

1) および3) はH系統モデルで採用されている方法を踏襲したもので、3) については物性値式の改良を行った(吉見・他, 2013)。2) について、次節で説明する。

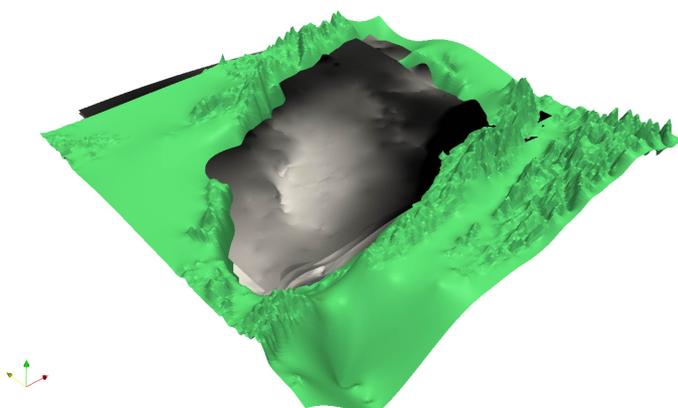
4. 地層境界面の関数形による記述

大阪堆積盆地ではこれまでに多くの反射法探査やボーリング掘削, H/V解析や微動解析が行われており、地層境界面に関する情報が比較的豊富である。加えて、本事業を通じて新たな情報が得られた。これらの情報を統合し、適切な補間によって合理的な地層境界面を生成することを目指した。

近年の3次元レーザースキャナーの発達にともない、多くの点群から面を合理的に生成する手法についての研究がコンピュータ・グラフィックスの分野を中心として活発に行われている。この分野における研究成果の1つとして、放射基底関数 (Radial Basis Function: RBF) を用いた補間法が挙げられる (RBF法)。RBF法は実装が比較的容易であり、従来用いられているスプラインを利用した補間に比べ、(1) 平滑度を調整できることや (2) 外挿時にロバストであることなどの利点がある。図は地震基盤、神戸層群、福田火山灰層、Ma-1層、Ma-3層、Ma-10層の各地層境界についてRBF法を用いて生成した境界面を示す。

キーワード: 地層境界, 鍵層, 補間, 放射基底関数

Keywords: layer boundary, key layer, Radial Basis Function, interpolation



Overview of the studies on bedrock depth distribution beneath Istanbul, Turkey by microtremor measurements Overview of the studies on bedrock depth distribution beneath Istanbul, Turkey by microtremor measurements

Oguz Ozel^{1*}

Oguz Ozel^{1*}

¹Istanbul University Engineering Faculty Geophysics

¹Istanbul University Engineering Faculty Geophysics

On August 17, 1999, a devastating earthquake with a moment magnitude of $M_w=7.4$ struck the Kocaeli and Sakarya (Adapazari) provinces, and part of suburbs of Istanbul in the northwestern of Turkey, a very densely populated region in the industrial heartland of Turkey. This earthquake is considered to be the largest event to have devastated a modern, industrialized area since the 1923 Great Kanto earthquake. This earthquake caused about 30,000 losses of life and collapsed thousands of buildings. Thus, total loss figure amounted to about \$16 Billion. Following the losses during this large earthquake, there has been a broad recognition among Turkey governmental, non-governmental and academic organizations of the need for extensive response planning based on detailed risk analysis of likely seismic hazard, microzonation studies and ground-motion researches in Turkey, in general, and Istanbul particular. In this frame, several studies are performed to map the bedrock depth distribution in the west part of Istanbul. Local S-wave velocity-depth profiles and bedrock depth distribution are key factors in assessing seismic hazard and earthquake ground motion characteristics since they allow determination of the amplification potential of geological formations overlying bedrock. In a project supported by Istanbul University, S-wave velocity structure beneath the European side of Istanbul is determined. One of the aims of the project is to improve the knowledge about the influence of local geology on the expected earthquake ground motion. In this project, both array measurements and single station microtremor measurements at 40 sites are conducted. In another study by Birgoren et al. 2009, an empirical relationship between the thickness of Tertiary-Quaternary sediments overlying Palaeozoic bedrock and their resonance frequencies is calculated for the Istanbul region and the bedrock depth distribution beneath the city is presented. The bedrock distribution beneath populated areas of Istanbul is obtained by applying the derived relationship from this study to 86 strong-motion sites, where the resonance frequencies are known. Picozzi et al. 2008, have investigated the site characterization by seismic noise in Istanbul. Single station seismic noise measurements were carried out at 192 sites in the western part of Istanbul, Turkey. This extensive survey allowed the fundamental resonance frequency of the sedimentary cover to be mapped, and identify areas prone to site amplification. There sults obtained by this study are in good agreement with the geological distribution of sedimentary units, indicating a progressive decrease of the fundamental resonance frequencies from the northeastern part, where the bedrock outcrops, towards the southwestern side, where a thickness of some hundreds meters for the sedimentary cover is estimated. From these studies and the other studies, not mentioned here, the conclusion is that the bedrock dips towards SW from NE and S-wave velocity structure shows the presence of strong impedance contrast being responsible of seismic ground motion amplification. On the other hand, the particular distribution of fundamental resonance frequencies indicates that local amplification of the ground motion might play a significant role in explaining the anomalous damage distribution in the west part of Istanbul after the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake.

キーワード: Earthquake disaster, Microtremor, Dominant frequency, Istanbul

Keywords: Earthquake disaster, Microtremor, Dominant frequency, Istanbul

GPS 波浪計の Soliton と 2011 東日本大震災の地震波との関係 The Relationship between Soliton in GPS Wave gage and Seismic Wave of 2011 the Tohoku District Pacific Ocean Earthquake

西澤 勝^{1*}Masaru Nishizawa^{1*}¹ なし¹ none

1. まえがき

本論文では東日本大震災によって発生した津波の岩手県南西沖の GPS Wave gage でとらえた Soliton(図 1) と実際に観測された Seismic Wave 特にここでは主として Strong-motion accelerograms recorded at K-NET Tsukidate (MYG004) の関係について述べる。

2. Soliton と Seismic Wave

文献 (1) の尾池和夫著「日本列島の巨大地震」p10 の図 1 において、1 が Soliton、2-7 が Break down of Solitary wave Solitons であることは 2012 日本地球惑星科学連合学会 (JpGU)(S-SS30-P12) と 2012, 10, 日本地震学会秋季大会 (D22-01) で述べたとおりである。この Soliton を発生させるべき地盤変動が、実際の地震波 (Seismic Wave) でとらえられているかを検証した。K-NET 築館 (MYG004) の加速度記録を見てもらいたい。ここは観測された最大の加速度 (3 成分合成値) で 2,993gal を記録した所である。上から NS、EW、UD と Seismic Wave が示されている。今 Soliton を考えると、最も注目すべきは UD 方向つまり、上下方向の加速度 (PGA) or 速度 (PGU) である。MYG004 の UD の加速度の Seismic Wave は、地震発生後 50 秒足らずで第 1 回目の地震を感じる。その後多少の変動があるのは見たとおりであるが、90 秒過ぎぐらいに急激な加速度の上下変動が認められる。筆者は、この 90 秒過ぎぐらいの急激な加速度の上下変動、つまり海底断層の急激な上下変動が先の GPS Wave gage 1 の Soliton を発生させたものと考え、おそらく PGU で 80-90cm/s ぐらいはあったものと思われる。NS、EW にも認められることは、地震波を見た通りであるが、Soliton を考える場合は特に UD 変動が大切である。その海底変動が海水に伝わる。液体中は P 波つまり縦波として伝わり、それが海面になって波 (Wave) を発生する。今回の巨大地震では、MYG004 での急激な UD 変動が P 波 (縦波) として海水中を伝わり、海面に水位変動、特に Soliton を発生させた。巨大地震の場合は Solitary Wave であったり、Soliton であったりするわけである。これは 2012 年函館での地震学会で述べた通りである。自然災害における Soliton 発生を著者が知るの他に 2 つほどある。1 つは同じ 2012 年地震学会で発表された、京大防災研の山田真澄氏の“地盤の深層崩壊”で、もう一つは新幹線がトンネルに入ると反対側の出口の空気の変動に Soliton が認められる。このように、Soliton は発生原因となる源の“急激”な変動があった場合に発生しやすいと考えて良い。MYG004 は K-NET で地表面に設置された地震計による地震波である。

Soliton と Solitary Wave の関係は文献で述べたが、Science of Form で数学の Normal Distribution との関係などは良く理解する必要がある。Fourier Spectrum の Frequency 表示の重要性も理解できると思われる。なお、今回の東日本大震災の地震波では、主として福島県以北では、2 つの主要動が認められる。一つ目は水面にゆっくりした上昇をもたらし、二つ目の地震は Soliton を発生させる地震である。したがって、一つ目と二つ目の地震の発生原因は全く異なり、一つ目はプレート型であり、二つ目はいわゆる断層型という海底の急激な上下変動によるものである。

3. まとめ

GPS Wave gage の Soliton 発生原因である Seismic Wave が 2011,3,11 東日本大震災の場合、K-NET MYG004 の UD 成分に美しく認められた。

参考文献

1. 尾池和夫著 「日本列島の巨大地震」 岩波科学ライブラリー 185, p10, 図 2
2. 地震動によるフーリエスペクトルの山の形 (正規分布形) の考察
Study of Shape of Mountain (Normal Distribution) of Fourier Spectrum of Earthquake Motion
西澤 勝, Masaru Nishizawa
Japan Geoscience Union Meeting 2012, (May 20-25, 2012), S-SS30-P12, (2012, 日本地球惑星科学連合学会)
3. Handling by Solitary Wave and Soliton of Earthquake Motion
西澤 勝, Masaru Nishizawa
2012, 10 月日本地震学会秋季大会 (D22-01)
4. 東日本大震災調査報告, 2012,3, 主要災害調査 48 号
NIED(独) 防災科学技術研究所
5. 「東日本大震災の科学」, 東京大学出版会, 2012, 11
6. 「巨大地震・巨大津波」, 朝倉書店, 2012, 11

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-19

会場:103

時間:5月19日 16:30-16:45

7. 科学, 岩波書店, vol. 81, No.5, May, 2011

2011年東日本大震災に伴う人間被害 (3) 死者の年齢依存性 その2 Severity of Mortality in the 2011 East Japan Earthquake (3) Examination of Age-dependency Part II

太田 裕^{1*}

Yutaka Ohta^{1*}

¹ 太田 裕

¹Ohta, Yutaka

1. はじめに

地震の襲来時には災害弱者(子供と年配者)で死亡率が特に高くなることがいわれている。しかし、こういった事実が常に出現しているかについては未だ定かではない。この問題に関わって、前報では死亡率の年齢依存性に注目し、内陸性・海洋性地震の資料を使って実状把握に努めた。その結果、年齢を横軸(右向きに昇順)、縦軸を死亡率とした関係でみると両端に位置する子供と年配者の双方で大きな値をとり、中間の青・壮年期で小さくなる分布-英語のU字型をもつ-が存在することを確認した。その一方で、加齢と共に死亡率が右上がりに漸増する-英語のJ字型-分布をもつものもあることが判った。死亡率が低い場合、年齢に依存しないFlat型(F型)となる様子もみられた。第3報となる本報告では、これらの成果をさらに的確にすべく対象とする地震・津波群を追加し、詳しい分析を心がけた。併行して、疫学分野で疾病率等の説明に多用されるBeta密度関数導入によって、この問題が統一的に扱えることを確認した。

2. 対象とした地震群

1) 外国の地震

代表事例として2004年インド洋地震(M9.0)がある。特にスマトラ北部(西岸,東岸)においては組織的な調査が実施されており、相互比較を可能とする資料も豊富である(Doocy et al, 2007)。この調査では典型的なU字型分布を示すが、さらに半島の東西で津波高さが大きく違うことに対応した死亡率となっている。一方、トルコの内陸地震群(1970 Gediz, M7.1, 1976年 East Turkey, M7.4)では地震毎に様相を大きく異にしている。Gediz地震では死亡率が多様に変化した数少ない事例となっている。震央に近く、大規模な延焼火災があった地区ではU字型となるものの、震央距離の増大でJ型となり、やがてF型に近い形となる等、単一の地震で3つの異なるパターンを示す、稀な事例である。また、1976年東部地震では年配層の死者発生率が逆に低減するという意外性を示す。地震の発生が午後2時22分で、年長者のほとんどが農事に従事し、屋外にいたためと考えられる。

2) わが国の地震

関連研究の先駆は恐らく山下(2005)による1933三陸沖津波地震(M8.3)であろう。U字型に近い関係となり、子供・年配者で死亡率が高いことを指摘している。1993年北海道南西沖地震についても同様の考察を行っており、U字型を思わせる分布を与えている。前者は地動が弱く津波が不意打ち的に襲来したケ-スであり、後者は震源が近く津波の第1波が5分以内に到着し、また夜分という悪条件が重なったことに起因する。

一方、年齢と共に死亡率が上昇するJ字型分布の典型事例は近年の2大地震-1995年神戸の地震と今回の東日本大震災である。神戸の地震は地震発生が早朝のため、家族が在宅しており年少者へのケアが最大限行き届いたことが挙げられ、年少死者低減に大きく寄与した。一方、東日本大震災では地震発生が午後2時45分で、津波襲来までの時間が1時間近くあったこと、当日が水曜日で学童・生徒のほとんどが在校状態で、教職員のコントロール下にあったこと、さらに東北沿海岸一帯では「地震と津波は一体として受け止め、迅速な避難をすべし」という災害文化が相当定着していた点が大きかった。

3. 結果のまとめ

これらの結果は、以下のように取り纏め出来る。

1)当初は死亡率の低いF(lat)型-年齢に依存しない-で始まり、外力の上昇と共に年少者・年配者に厳しいU字型に移行する。外力が強い程U字型の底部が深くなる。U字型分布は外力が相当大きく、他方支援態勢とか防災認知が不十分な場合に出現する、最悪の形態である。

2)死亡率の推移は2個のパラメータをもつBeta密度分布を導入することで統一的に表現できる。

3)行動能力が大きく低下し、対災害感性も劣化した年配層の救済を如何に達成するかが世界的には勿論、わが国においても特段の難問として横たわっている。

参考文献

- H. Ohashi and Y. Ohta, Importance of Indoor and Environmental Performance, Proc. 8th WCEE, 1984.
- S. Doocy, A. et al, Tsunami mortality in Aceh Province, Bull. World Health Org. 85, 273-28, 2007.
- 太田裕, 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(2)死者発生時の年齢依存性(1)2012年地震学会秋季大会.
- 山下文男, 溺死者の最多は子供と老年世代, 歴史地震, 20, 165-167, 2005.

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-20

会場:103

時間:5月19日 16:45-17:00

キーワード: 東日本大震災, 国内外地震, 死者, 年齢依存性

Keywords: 2011 East Japan Earthquake, Inland and Oceanic Earthquake, Mortality, Age-dependency

地震ハザード情報を RESTful に提供する J-SHIS Web API の開発 Development of J-SHIS Web APIs provide seismic hazard information via REST scheme.

東 宏樹^{1*}, 早川 俊彦², 浅香 雄太², 藤原 広行¹

Hiroki Azuma^{1*}, Toshihiko Hayakawa², Yuta Asaka², Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 独立行政法人防災科学技術研究所, ² 三菱スペース・ソフトウェア株式会社

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.

1. J-SHIS Web API

地震ハザードステーション J-SHIS は 2005 年から地震本部の公表する地震動予測地図の情報を主に人間が読めるかたち(地図)で提供してきた。2012 年 4 月からは機械が読める(プログラミング可能な)データ形式で API (Application Programming Interface) を公開している。この J-SHIS Web API (以下、本 API) は値を様々なデータと組み合わせて使用(マッシュアップ)することや、地震ハザード情報を再解釈してグラフや図にするなど別の形式での表現を可能にした。

2. 具体的に何ができるのか

本 API を利用すると、J-SHIS のデータを HTTP にて直接取得・検索できるので、独自に作成したウェブページで地震ハザード情報や表層地盤データなどを表示したり、モバイル端末上で現在位置のメッシュに影響の大きい地震断層を検索するアプリケーションなどを作成したりすることが可能となる。具体的には緯度経度情報や地域メッシュの情報を元にその地点の地震ハザード情報を JSON 形式および XML 形式で問い合わせることができ、戻り値を様々な形に加工して Web サービスやモバイルアプリケーション等で活用する事が可能である。

3. Restful な設計

本 API は、REST (REpresentational State Transfer) に準拠した設計をなされている。REST とは分散システムを連携させるための設計原則で、Web の設計思想に従い、1) ステートレス性、2) 情報操作メソッドの制限、3) すべてのリソースを URI で一意に表現、といった項目からなる概念である。J-SHIS は地震ハザードに関連する情報の一次的な Web リソースとして機能することが求められているため、REST の概念に従った設計により取得する情報の所在が永続的であることが明確になり、外部利用者の利便性が高まる。また、REST な設計は Web サーバの数で性能がスケールするため、今後 API の利用が増えた場合の対策としても重要である。リクエストに対するレスポンスは Web リソースの標準的な表現である XML (GML) の他、JavaScript から利用しやすい JSON (GeoJSON) を選択可能とした。

4. 9 つの公開 API

2013 年 1 月時点で提供中の API は以下の 9 種類である。確率論的地震動予測地図に関する API として 1. 地震ハザード情報提供 API、2. ハザードカーブ情報提供 API、表層地盤に関する API として 3. 表層地盤情報提供 API、4. 表層地盤物性値情報提供 API、深層地盤タブに関する API として 5. 深部地下構造情報提供 API、6. 深部物性値情報提供 API、想定地震に関する API として 7. メッシュ別被害地震検索 API、被災人口に関する API として 8. 自治体別被害地震検索 API、上記のデータを横断的にデータ抽出する API として 9. メッシュ検索 API がある。

5. 利活用事例

本 API を用いて作られているサービスやアプリケーションは既に複数存在する。具体例として朝日新聞デジタルの「揺れやすい地盤」や「インフラリスク」、大和ハウス工業の「ココゆれ」、スマートフォンアプリケーション「もしゆれ」等が挙げられる。このようにオープンなデータ公開形式は使用する側の創意工夫で思いがけない価値を生むこともあり、今後も任意地点を指定可能な地震動ハザード評価データのより一層の幅広い利活用が期待される。

建物用 IT 強震計を用いた地域防災情報システム～地域の地震速報メールの活用～ Regional Disaster Information System by using IT Kyoshin Seismometer for Buildings : Making the Regional Earthquake Earl

鷹野 澄^{1*}, 伊藤 貴盛¹

Kiyoshi Takano^{1*}, Takamori Ito¹

¹ 東京大学情報学環 / 地震研究所

¹ III & ERI, University of Tokyo

我々は建物用 IT 強震計 (鷹野他 2005) を提唱して、これまで大学の建物等に設置して学内ネットワークを介して情報を収集し学内に提供するシステムを構築してきた (鷹野他 2012 など)。これに対して、建物用 IT 強震計の地域の防災情報システムとしての活用の可能性を検証するために、実際にある地域の協力を得て複数の一般の住宅に設置させていただき、様々な課題を抽出している。ここでは、その中で、地域の地震速報メールの活用について紹介し議論する。

地震時には、気象庁から各市区町村の震度が発表されるが、身近な住宅やオフィスにおける実際の揺れはこれとは異なることが多い。日頃から、気象庁が発表する地域の揺れだけでなく、身近な地域の揺れと建物の中の揺れを知ること、自助・共助による地域防災力の向上に寄与すると考えられる。

現在我々は、茅ヶ崎市のある自治体の中の複数の住宅の中に、実際に建物用 IT 強震計を設置し、一般の住宅における地震観測を継続的に行っている。このシステムで我々は、地域の地震速報メールを開発して利用している。

地域の地震速報メールは、地震が発生したときに IT 強震計を設置したお宅 (利用者) に配信されるもので、IT 強震計によって得られた自宅の周辺地盤、1 階床、2 階床、天井裏などの揺れと、同じ地域の複数の建物の平均の揺れを同時にメールで送るものである。情報は簡易震度 (K) で送られて、メールの送り先としては、自分や家族等の複数の携帯電話等のメールアドレスが設定できる。

このメールの活用方法としては (1) 周辺の建物の平均的な揺れと比較して自宅の揺れやすさを知り防災対策に役立つ、(2) 大地震発生の際には、自宅や周辺の被害の状況を推測して迅速な対応を取る、などが考えられる。また任意の携帯電話に送れるので、(3) 勤務先から自宅の揺れがわかる、(4) 高齢者が住んでいるお宅では離れた身内に自宅の揺れを伝えられる、(5) 近隣の自主防災組織で情報を共有して初動体制の確立などに活用する、など様々な利用が考えられる。

本報告では、このシステムの概要と課題等について発表する。

参考文献

鷹野澄・伊藤隆盛, 2005, 建物用 IT 強震計システムの開発, 地震工学会, 2005.11

鷹野澄・伊藤隆盛, 2012, 建物用 IT 強震計の地震速報メールとその活用方法, 地震学会, 2012

キーワード: IT 強震計, 地域防災情報, 地震速報

Keywords: IT Kyoshin Seismometer, Regional Disaster Information, earthquake early information

2011 東北地方太平洋沖地震の地震動と建物被害率の関係

Relationship between damage ratios and ground motion characteristics during 2011 Tohoku Earthquake

呉 浩^{1*}, 正木 和明², 入倉 孝次郎³

Hao Wu^{1*}, Kazuaki Masaki², Kojiro Irikura³

¹ 愛知工業大学大学院工学研究科, ² 愛知工業大学都市環境学科, ³ 愛知工業大学地域防災研究センター

¹Graduate School of Engineering, Aichi Institute of Technology, ²Department of Urban Environment, Aichi Institute of Technology, ³Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology

The relationship between ground motion indices, e.g., PGA, PGV, I_{JMA} , SI, and three different building damage ratios, i.e., total collapse ratios (TCRs), collapse ratios (CRs) and damage ratios (DRs), were constructed for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. It was found that DRs relate better with ground motion indices than TCRs or CRs. It was also found that PGA was sensitive to predominant period of velocity response spectrum. Large PGA was not related with high DR if the predominant period is shorter than 0.4s or longer than 2.0s. However, the damage ratios are calculated based on an administrative unit, large variability can be seen from the fragility curves. It is necessary to examine the variability of ground motions within a small district, if the ground motions are estimated properly.

As the earthquake motions H/V can be represented theoretically, in proportional to the ratio of transfer functions between S- and P-wave, it has been suggested that H/V of earthquake motions can be used to determine the velocity structures. It implies that the microtremor H/V can also be used to estimate the velocity structures at damaged sites, if the consistency of H/V spectral ratios between microtremors and earthquakes can be confirmed there. The ground motions at some damaged sites are estimated by using the underground velocity structures inverted from the microtremor H/V spectra ratios. Then the estimated ground motions are used to be related with damage ratios at the damaged sites.

キーワード: 建物被害率, H/V スペクトル比, 速度構造, 推定した地震動

Keywords: building damage ratio, H/V spectral ratio, velocity structure, estimated ground motions

インドヒマラヤ地域における強震動観測ネットワーク Strong ground motion observation network in Himalaya, India

瀧澤 一起¹, 鷹野 澄¹, 古村 孝志¹, 大木 聖子¹, 増田 徹^{1*}, 伊藤 貴盛², Rajender Kumar Chadha³, Davulurib Srinagesh³
Kazuki Koketsu¹, Kiyoshi Takano¹, Takashi Furumura¹, Satoko Oki¹, Tetsu Masuda^{1*}, Takamori Ito², Rajender Kumar Chadha³,
Davulurib Srinagesh³

¹ 東京大学地震研究所, ² 慶應義塾大学, ³ インド国立地球物理研究所

¹Earthquake Research Institute, ²Keio University, ³National Geophysical Research Institute

自然災害を予防・軽減するための対策には自然現象と社会基盤に関する情報の収集と分析が必要であり、また災害発生時における救援活動や復旧・復興活動の計画には災害状況の把握が不可欠であることは過去の経験から指摘されているが、技術的基盤や運用環境は未だに整備されておらず世界的な課題となっている。「自然災害の減災と復旧のための情報ネットワーク構築に関する研究」はこの課題に対する JST と JICA の国際共同研究「地球規模課題国際科学技術協力プロジェクト」のひとつであり、日本から慶應義塾大学、東京大学、インドから Indian Institute of Technology Hyderabad、CSIR:National Geophysical Research Institute、Indian Institute of Technology Kanpur、Indian Institute of Technology Madras、International Institute of Information Technology Hyderabad、India Meteorological Department Hyderabad、India Meteorological Department Pune が参加している。

インドにおいては、毎年発生するモンスーンによる豪雨や洪水による死者数百名～数千名、家屋倒壊等数千万人を引き起こす気象災害、また、死者数 2 万人以上の 2001 年のインド西部地震やパキスタン側を含めて死者数 9 万人以上の 2005 年のカシミール地震などの地震災害に見舞われている。災害の規模は極めて大きいことが特徴的である。我が国においても、台風や活断層前線による豪雨と洪水による気象災害、また、近年内陸で発生した地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震など大規模な地震や津波による災害を多く経験している。

防災の観点からみると、インドでは、電力、道路、上下水道などの基本的な生活インフラが発展段階であるため、未整備段階にあるインフラに自然災害による影響が及んだ場合、生活の復旧に支障をきたし大きな混乱に陥りやすい。我が国においては、災害時における情報技術の活用については比較的意識が高く一定の経験を有しているものの、1995 年兵庫県南部地震、2004 年福井・新潟豪雨、2011 年東北地方太平洋沖地震などでは災害時の情報の取り扱いが問題になるなど課題も多い。

本研究の目的は、地震及び気象現象の観測網を整備しグローバル情報ネットワークを活用して地震及び気象に関するデータを収集することにより防災のための分析を行う基盤を構築すること、災害が発生した時に被災地への通信インフラを短時間で提供することにより災害情報を共有できるようにし救援活動や復旧・復興を効率的に行うための基盤の構築に関する技術開発をすること、インドをフィールドとして我が国が経験した防災に関する問題点を実証的に検証することによって地球規模で対応可能な自然災害に対する総合技術基盤を確率することである。このプロジェクトは、地震災害の軽減、気象観測基盤の構築、持続可能な通信基盤の構築、緊急事態および減災のための情報通信プラットフォームの開発の四つの研究項目から構成されている。

地震災害の軽減に関する研究の目的は、インドの中で地震活動度の高いヒマラヤ地域とそれに隣接し人口の密集するヒンドスタン平野を対象として、強震動の観測、GPS による地殻変動観測、建物振動観測のネットワークを構築することにより、地震ハザード及び地震リスクを把握しヒンドスタン平野の将来の地震災害の軽減を目指すものである。本報告ではこのうちインドにおける強震動観測ネットワークの構築について紹介する。インドは高温多湿な気候である。センサーモジュールと通信モジュールは、そのような環境下で十分な精度を持って動作が保証されることが条件となる。また、十分整備されているとは言えないインフラ環境で実装展開可能であることも条件となる。また、観測データの有効性を考慮して近地地震の強震動に加えて遠地地震による長周期地震動も十分な精度で観測できるように速度型強震計を選択した。観測点はインド北部ヒマラヤ地域の地震活動度の高い領域に 26 地点を選んで配置した。今後、観測点と NGRI に置く観測センターとをネットワークで繋ぐ予定である。また、ネットワークのデータ、GPS 観測ネットワークのデータ、地質調査データ、及び既存の観測資料を用いて、当該地域の地震活動及び震源からヒンドスタン平野への強震動伝播の特徴の分析、建物への影響評価を行う予定である。

キーワード: 強震動, 観測, ネットワーク, ヒマラヤ

Keywords: strong ground motion, observation, network, Himalaya

大阪堆積盆地 3次元速度構造モデルの開発

Newly developed 3D velocity structure model of the Osaka sedimentary basin

関口 春子^{1*}, 吉見 雅行², 浅野 公之¹, 堀川 晴央², 竿本 英貴², 林田 拓己², 岩田 知孝¹

Haruko Sekiguchi^{1*}, Masayuki Yoshimi², Kimiyuki Asano¹, Haruo Horikawa², Hidetaka Saomoto², Takumi Hayashida², Tomotaka Iwata¹

¹ 京大防災研, ² 産総研 活断層・地震研究センター

¹DPRI, Kyoto Univ., ²AFERC, GSJ/AIST

1. はじめに

文部科学省委託研究「上町断層帯における重点的な調査観測」の一環で、強震動予測の高度化のため、大阪堆積盆地の3次元速度構造モデルの開発を行っている。微動アレイ探査、連続微動観測、反射法地震探査を実施し、また、3次元速度構造モデル構成手法の開発も行いながら、速度構造モデルの検証・改良を行った。本稿では、速度構造モデル作成の全容と得られたモデルのパフォーマンスの検証について述べる。速度構造モデルの構成手法の詳細については竿本・他(2013, 本大会)で、速度構造モデルの物性値構造の検証・改良の詳細については吉見・他(2013, 本大会)で紹介する。

2. 既存の大阪堆積盆地地盤構造モデル

大阪堆積盆地に関しては、地層境界面形状や物性値(P波速度, S波速度, 密度)構造の表現方法の大きく異なる2系統の3次元堆積層構造モデルが作られている。香川ほか(1993)に始まるJ系統モデル(宮腰ほか, 1997; 宮腰ほか, 1999; 香川ほか, 2002; Iwata et al., 2008; Iwaki and Iwata, 2011)と、産総研モデル(堀川ほか, 2003)に始まるH系統モデル(大阪府, 2004)である。大局的には、どちらのモデルも比較的良く地震動応答を再現することが既存研究で確認されている。

3. 改良モデルの構成方法

本研究で作成する地下構造モデルとしては、H系統モデルのように地層境界面や物性値構造を可能な限り探査データに忠実に精緻に表現しつつ、J系統モデルのように地層境界面を関数系で表現し、任意の間隔のメッシュで物性値構造が取り出すことが可能なものを目指した。そのため、ベースモデルには地質構造を忠実に表現したH系統の大阪府(2004)モデルを採用し、作業としては、新しい探査・解析結果に加え既存探査・解析結果も見直してベースモデルの地層境界面形状や物性値の経験式を修正し、地層境界面形状を複雑な面に対応できる関数系で表現することとした。

4. モデルの改良作業

本プロジェクトでは、15地点での連続微動観測、6地点での微動アレイ探査、100点の単点微動観測、2本のP波反射法地震探査を実施した。また、大阪盆地内と周辺の100点近い既存強震・震度観測点のデータを収集した。これらのデータを基に、表面波位相速度・群速度、H/Vスペクトルピーク周波数、地震波走時、地震波形の観点からベースモデルを検証し、地層境界面形状や物性値経験式に関し必要な修正を施した。特に、既存の探査データが相対的に疎だった大阪平野南部地域において、本プロジェクトによりデータが増え、地層境界面形状、物性値構造ともに大きく変更された。地層境界面形状のモデル化については、コンピュータグラフィックスの進歩とともに発展した曲面形成技術を応用する。点群を関数で近似して複雑な局面を表現する各種方法の中から、本研究に有用なものを検討し、適用した。

5. モデルのパフォーマンスの検証

作成された3次元速度構造モデルの地震動伝播における性能を検証するため、中小地震観測波形と、本プロジェクトで実施した連続微動観測点における観測点間グリーン関数をターゲットにした波形モデリングを行った。

謝辞: 文部科学省委託研究「上町断層帯における重点的な調査観測」として実施した。

キーワード: 地層境界, 物性値経験式, 物理探査, 微動

Keywords: layer boundary, empirical formula for medium properties, physical prospecting, microtremor

長期微動観測と重力探査の組み合わせによる深部地盤構造の推定手法の開発 Development of estimation method of deep ground structure using long-term microtremor observation and gravity survey

松本 敬太郎^{1*}, 盛川 仁², 陳 慧慈³

keitaro matsumoto^{1*}, Hitoshi Morikawa², Huei-Tsyr Chen³

¹ 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, ² 東京工業大学大学院総合理工学研究科, ³ 台湾國立中央大學土木系

¹Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, ²Tokyo institute of technology, ³National central university

工学的基盤より深い地震基盤までの地下領域は深部地盤と呼ばれる。深部地盤構造は長周期地震動や地震動の局所的増幅の要因となることが知られており、大きな被害が発生している。しかし、深部地盤構造はこれまで表層地盤構造のように全国の広い範囲で十分に検討されてきたとは言えない。そこで、本研究では比較的低コストで簡便な深部地盤構造探査手法の提案を目的とする。

地盤構造探査には様々な手法があるが、中でも低コストで簡便な手法としては重力探査や微動探査などが挙げられる。ただ、持ち運んで観測に用いるような小型地震計は一般に長周期微動に対して感度が悪いため、微動探査では深部地盤構造を捉えるのが難しい場合も多かった。しかし、近年注目を集める地震波干渉法を長期間の微動観測記録に適用すれば、従来の手法より長周期の微動を捉え、深部地盤構造をより精度良く推定できる可能性がある。そこで本研究では地震波干渉法を用いることで、長期微動観測と重力探査の双方から深部地盤構造を推定し、両者を組み合わせることで地震波速度情報に対しても密度情報に対しても高い分解能を持つモデルを作成する手法を提案する。

提案手法では、地震波干渉法による長期微動解析を援用し、重力解析のパラメータを変更することにより重力と微動双方の情報に基づく、より信頼性の高い地盤構造モデルを作成する。既往研究によって確立された解析手法を組み合わせる他に、独自に考案した工程を2つ追加している。ひとつは、地震波干渉法で空間自己相関法のような方位平均近似を用いたことである。地震波干渉法は微動震源が観測点の周辺に不均等に分布している時、特に観測期間が短い場合には解析精度があがらないという問題があるが、この工夫によって地域一帯の平均地盤情報を得ることができるようになった。ここで得られた情報は重力解析のパラメータ設定に用いた。もうひとつは、微動解析から得られた分散曲線と重力解析から得られた分散曲線を比較し、合わない場合に重力解析のパラメータを変更する際、対象地域内に構造境界を設定したことである。重力探査では一般に、対象地域全体で均等な地盤パラメータを与えるが、地盤構造が複雑な地域が解析対象の場合、局所的に表層密度が変化するような状況は多く考えられる。そこで、微動と重力から得た分散曲線を比較した時、一致度が低い場合には構造境界を与えて異なる密度の地盤をモデルに導入する仕組みを追加した。

提案手法の妥当性を調べるため、台湾新竹市での実観測記録に適用したところ、狙いどおり微動と重力双方の情報に基づく地盤構造モデルを作成した。今後の課題としては、得られた修正モデルを用いて数値計算を行い、実際の地震動がどの程度再現されるかを検証していく必要がある。また、クロスコヒーレンスのS/N比を短期間の記録長でも向上させる手法について検討していきたい。

キーワード: 長期微動観測, 重力探査, 地震波干渉法, 深部地盤構造

Keywords: long-term microtremor observation, gravity survey, seismic interferometry, deep ground structure

微動観測による富士山の固有振動特性の推定 Estimation of vibration mode of Mt. Fuji from microtremor measurements

小嶋 薫^{1*}, 山中 浩明¹, 地元 孝輔¹, 佐口 浩一郎¹
Kaoru Kojima^{1*}, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹, Koichiro Saguchi¹

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科

¹ Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

あらゆるものは固有振動数を持っており、固有振動特性を理解することで、その物性値や形状を推定することができる。そこで山体における固有振動特性を観測から推定できるかどうかを、微動観測と有限要素法を用いた固有値解析によって検証した。観測によって観測から固有振動特性を理解できれば、火山においてマグマの貫入による物性値の変化を検知できる可能性があり、火山噴火予知につながると思われる。

対象としたのは、日本最高峰であり代表的な火山の一つである富士山である。微動観測は2012年8月6日から9日に実施し、富士山の南斜面において、2合目及び5合目から10合目の計7点で同時観測を行った。観測には、3成分加速度計とデータロガーを用いた。得られた観測記録からスペクトル解析を行った結果、南北成分では0.2Hz付近で卓越振動数が確認できた。また、卓越振動数における固有振動モードからは6合目付近で振動モードが変化していることが確認できた。さらに、卓越振動数付近での相互相関関数からも、6合目において他の地点との遅れ時間が大きく、6合目を境に振動モードが変化している可能性が示唆された。これは、6合目が古富士火山と新富士火山の境界付近に位置していることや、宝永火山付近に位置していることから、その周辺で地下構造が変化している可能性が考えられる。しかし、今回用いた記録は短期間の記録であったため、今後は長期間の観測記録から検討する必要がある。

固有値解析では、富士山を直径20km、高さ3kmの簡単な円錐形モデルとして解析を行った。その結果、1次固有振動数は約0.2Hzとなり、観測結果とほぼ同じ結果が得られた。このことから富士山の1次固有振動数は0.2Hz程度であることが推定でき、観測によって固有振動特性を推定できる可能性を示せた。ただし、モデルが非常に簡単なモデルであったため、今後は実際のモデルに近づけて検討していく必要がある。さらに、物性値の変化によって固有振動数がどのように変化するか検証していくことが今後の課題である。

本研究を行うにあたり、観測に参加していただいた方には多大なるご協力をいただきました。また、山小屋の方々にも大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

キーワード: 富士山, 振動特性, 火山

Keywords: Mt.Fuji, frequency characteristics, volcano

微動・重力・磁気データを用いた地盤構造モデル推定の試み 鳥取平野における適用例

A method to construct subsurface structure model using microtremor, gravity and magnetic data in the Tottori plain.

石田 勇介^{1*}, 野口 竜也¹, 香川 敬生¹, 盛川 仁²

Yusuke Ishida^{1*}, Tatsuya Noguchi¹, Takao Kagawa¹, Hitoshi Morikawa²

¹鳥取大学大学院 工学研究科, ²東京工業大学大学院 総合理工学研究科

¹Tottori University Graduate School of Engineering, ²Built Environment, Tokyo Institute of Technology

任意の地点での地震動をシミュレーションするためには、地震基盤相当 ($V_S=3000\text{m/s}$ 前後) までの地盤構造 (特に速度構造) をモデル化する必要がある。地震調査研究推進本部によって全国を対象とした3次元地盤構造モデルが構築されているが、モデルの精度が十分ではない地域が一部見受けられる。モデル化に際して、人工地震探査または深層ボーリング等がおこなわれている地域においては地層境界が把握されているため、それらの探査結果をリファレンスデータとして用いることにより比較的高精度な地盤構造のモデル化がなされている (例えば, Kagawa et al., 2004)。しかし、一般的に人口が密集している平野または盆地部では、人工地震探査といった大規模な探査システムを必要とする物理探査を実施することは困難であるため、先に挙げたような探査データを取得することは容易ではない。したがって、比較的容易な探査システムであり、なおかつ、地震動計算の際に重要なパラメータとなる速度構造または密度構造を直接的に求められる等の理由から、常時微動探査や重力探査が全国各地で精力的におこなわれている (例えば, 野口・他, 2003)。しかし、観測が容易である一方で、解析におけるパラメータ設定において自由度があることによりモデルを一意に決定することが困難な場合がある。そのため、近年では異なる物理量を有するデータを用いて同時解析することにより、推定されるモデルの精度を向上させる等の工夫がしばしばなされている (例えば, 坂井・盛川, 2005)。

本稿では、微動および重力データに加えて磁気データを用いた地盤構造のモデル化を試みた。適用事例として、鳥取平野を対象としてモデル化をおこなった。対象領域において地震基盤相当の地層を構成している岩体として、花崗岩および堆積岩が存在している (地質調査総合センター, 2003)。これらの間には、 0.2t/m^3 程度の密度差があり、その影響により均質2層地盤 (堆積層 2.0t/m^3 , 地震基盤 2.4t/m^3) を仮定した重力解析では、一部の地域において明らかに実構造と乖離した結果がもたらされることが指摘されている (野口・他, 2003)。この問題を解決するために、本稿では微動および重力データの他に磁気データを用いるとともに、多層モデルを仮定した重力解析をおこなった。具体的には、重力ポテンシャルと磁気ポテンシャルの関係式であるポアソンの関係式を用いた MWP (moving window Poisson analysis) 法 (Chandler et al., 1951) によって密度構造の急変部となる構造境界を推定した上で、推定された構造境界位置を重力解析における解析条件に取り入れ、観測重力異常値を満足するようにモデル深度を変動させることで対象領域内の地震基盤深度分布を推定した。その後、堆積層 (地震基盤上面から工学的基盤) について、重力解析により推定された地震基盤深度をリファレンスデータとして、微動アレイ探査により得られている位相速度データ (野口・他, 2003) を用いて焼きなまし法を採用した逆解析をおこなうことで、対象領域内において共通したS波速度構造モデルを推定した。その結果、堆積層3層と基盤岩層よりなる3次元地盤構造モデルを構築した。

引用文献

Kagawa, T., Boming Zhao, Miyakoshi, K., and Irikura, K.: Modeling of 3D basin structures for seismic wave simulations based on available information on the target area: case study of the Osaka basin, Japan, Bulletin of the seismological society of America, Vol.94, No.4, pp.1353-1368, 2004.

野口竜也・西田良平・岡本拓夫・平澤孝規: 人工地震・微動・重力観測による鳥取平野の地盤構造の推定, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.197, 2003.

坂井公俊・盛川 仁, 重力及び微動データの併合処理による2次元地盤構造の高精度推定のための基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, vol.28, No.61, 2005.

産業技術総合研究所地質調査総合センター (編): 100万分の1日本地質図, 第3版 CD-ROM 第2版, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2003.

Chandler, V.W., Koski, J.S., Hinze W.J., and Braile, L.W.: Analysis of multisource gravity and magnetic anomaly data sets by moving-window application of Poisson's theorem, Geophysics, Vol.46, No.1, pp.30-39, 1981.

キーワード: 地盤構造モデル, 常時微動探査, 重力探査, 磁気データ, MWP (moving window Poisson analysis) 法, 鳥取平野
Keywords: subsurface structure model, microtremor survey, gravity survey, magnetic data, MWP (moving window Poisson analysis) method, Tottori plain

強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの検討

Modeling of a subsurface structure from a seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation

先名 重樹^{1*}, 前田 宜浩¹, 稲垣 賢亮², 松山 尚典², 藤原 広行¹

Shigeki Senna^{1*}, Takahiro Maeda¹, Yoshiaki Inagaki², Hisanori Matsuyama², Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 応用地質

¹NIED, ²OYO corp

1. はじめに

これまでに筆者らは、強震動評価の高度化を目的とし、広帯域の地震動特性を評価できるような地盤モデルを構築するため、今まで別々にモデル化を実施してきた浅部地盤モデルと深部地盤モデルを統合し、地震観測記録を再現できるような地盤モデルの構築を行ってきた。本報告では、ここ4年間で検討してきた、南関東(栃木・群馬を除く5都県)地域および、ひずみ集中帯(新潟・山形・秋田)地域における、地盤モデル作成の流れと、最終的に作成された地盤モデルの周期特性・増幅特性の評価方法を取りまとめた。

2. 収集データの概要

本研究では、広帯域の評価を面的に実施するため、可能な限りのボーリングデータ、地震観測記録および物性値データ(主に微動観測データ)を収集した上で、データベース化している。なお、地震観測記録は、全ての地域において、防災科研 K-NET, KiK-net, 気象庁, 自治体のデータを収集している(観測開始~2011年12月まで(途中記録が取得されていない観測地点を含む))。微動観測データは、単点観測は約2km間隔(4167地点)、アレイ観測は5~10km間隔(371箇所)でおおよそ地震観測点を中心に取得している。

3. 検討の内容

浅部・深部統合地盤モデルの作成においては、主に、以下の項目について検討している。

- ・浅部地盤モデルの構築と既往深部地盤構造モデルとの結合処理(初期地盤モデルの作成)。
- ・常時微動観測(アレイ・単点)の最適な展開方法と解析方法の検討と結果のまとめ。
- ・地震観測記録のR/Vスペクトルによる、J-SHIS深部地盤モデルの修正。
- ・スペクトルインバージョンによる、地震観測点のサイト増幅特性と作成した地盤モデルの増幅特性との比較。
- ・減衰係数(Q)の推定
- ・単点微動(H/Vスペクトル比)による2秒よりも短周期部分のジョイントインバージョンによる、地盤構造モデルの修正。

上記の検討結果を取りまとめた上で、地盤増幅特性・周期特性・減衰特性等についての既往の地盤モデルとの結果比較と、地域特性に関する類型化についても検討している。なお、最終的な地盤モデルは、微地形区分と同じサイズ(約250mメッシュ単位)で作成している。

4. 検討結果とまとめ

本検討では、初期地質モデルを作成し、微動アレイ探査、常時微動測定結果を用いて、浅部・深部統合地盤モデルを作成した。さらに、作成した浅部・深部統合地盤モデルを用いて、地盤の周期・増幅特性についての検証を行った。深部地盤モデルを作成した結果、南関東地域では、既往の結果(大大特モデル:三宅・他(2006)やJ-SHIS深部地盤モデル+既往の浅部地盤モデル)と比較すると、どの地域においても、広帯域全体の周期特性が改善されており、特に地震被害に影響が大きいとされる周期1秒付近において、大幅に改善される結果が得られた。この結果は、柱状図データを集めたことによる浅部モデルの詳細化による効果だけでなく、浅部と深部をつなぐ $V_s=300\sim 700$ (m/s)程度の工学的基盤周辺の構造について、微動観測による位相速度と周期特性(H/Vスペクトル比)等を利用した構造モデルの修正によって、より精度の高い地盤モデルの構築が可能であることを示唆している。今後において日本全国全ての地域で実施できれば、今後の地震ハザード評価の品質向上に大きく寄与できるものと考えられる。

キーワード: 速度構造モデル, 微動観測, 地震動予測, ボーリングデータ

Keywords: Velocity structure model, Microtremor survey, Strong motion evaluation, Borehole data

微動探査によるインドネシア・パル市における地盤構造推定 Determination of underground structure of Palu City, Sulawesi, Indonesia by microtremor observations

福田 大地^{1*}, 野口 竜也¹, 小野 祐輔¹, 香川 敬生², 良元 泰雄², 清野 純史², Rusnardi Rahmat Putra²
Daichi Fukuda^{1*}, NOGUCHI, Tatsuya¹, ONO, Yusuke¹, KAGAWA, Takao², YOSHIMOTO, Yasuo², KIYONO, Junji², PUTRA, rusnardi R.²

¹ 鳥取大学, ² 京都大学

¹Tottori University, ²Kyoto University

インドネシア・パル市はスラウェシ島北部に位置し、近海には複数のプレート境界が存在する。市街地西部には活断層が走っているにも関わらず、地震動予測に必要な地盤構造に関する情報がほとんど存在しない。そこで本研究では、この地域の地盤構造を推定するために126点の3成分単点観測、10地点の微動アレイ観測を実施した。

3成分観測記録からH/Vを算出し、卓越周期を読み取りその分布図を作成した。H/Vの卓越周期分布について、平野部では卓越周期が1秒前後となる領域が広範囲に見られ、山地に近い地点ではピークが不明瞭になり短周期となった。卓越周期1秒の地点は地質図より沖積層の地域に集中しており、これは東西の山地境界部でグラーベン構造となっている可能性を示唆している。

アレイ観測記録から、S波速度140m/s~1200m/sの3~5層の地盤構造モデルが推定できた。得られた地盤構造モデルについて、8地点では第1層目が $V_s=200\text{m/s}$ 以下であったのに対して、2地点は山地に近く $V_s=200\text{m/s}$ 以下の層が欠損していた。S波速度構造モデルの妥当性を確認するために、観測H/Vと得られた地盤モデルによるレイリー波基本モードの理論H/Vとの比較を行った結果、5地点で卓越周期がほぼ一致した。これは、推定された地盤モデルが適切に推定出来ていることを示している。これら5点の地盤モデルより1/4波長則を用いて2層モデルに単純化することで、堆積層の層厚を推定した。その結果、H/Vの卓越周期が $V_s=300\text{m/s}$ 以下の層の層厚に対応していることがわかった。

キーワード: 微動観測, S波速度構造

Keywords: Microtremor observation, S-wave velocity structure

重力と磁気を使った地下構造同時推定のための数値計算コードの開発 Development of Numerical Code for Simultaneous Estimation of Subsurface Structure with Gravity and Magnetic Data

今枝 佑輔^{1*}, 盛川 仁¹Yusuke Imaeda^{1*}, Hitoshi Morikawa¹¹ 東工大 総合理工¹Tokyo TECH Dept. of Built Environment

1. はじめに

地下構造の推定には重力探査、磁気探査、微動観測など様々な観測が行われる。しかし一般に地下構造モデルを表現するためのパラメータ数 M に比べて、得られる観測データ量 N は少ない。そこで独立な観測データを統合的に使用して、情報量を増やした解析をしていくことがより正しい地下構造モデルを構築していく近道と考えられる。従って重力と磁気(加えて微動など)の統合データ処理法を構築していくことは重要である。本発表では磁気と重力の統合処理プログラムの開発について、またその際にどのようなことに気を付けなければならないかについて発表する。

2. 手法

地下構造モデルとして適当な試行モデルから出発する。地下構造は上下方向に N_z 層のレイヤーを考え、 k 番目のレイヤーを水平方向に $N_x \times N_y$ 個の点に分割、合計で $M = N_z N_x \times N_y$ 個のモデル点を使い地下構造を表現する。各レイヤー密度は適当な値を設定し計算を通じて固定値とする。各モデル点の深さ z は変数として可変にする。この試行モデルから表面上に設定した N 個の観測点での重力異常と磁気異常を計算し、実際の観測量との誤差が少なくなるよう各モデル点の深さ z を反復補正、改良する。

2.1 重力と磁気計算

地下の密度異常や磁化異常などが観測点に作る異常値の計算には、四角柱がつくる理論解を使う。角柱の作る重力は古くから計算されてきているが、本発表では \arctan を使った表式を採用する。実際の計算では以下のステップを踏んで重力を計算する。

1. 無限平板のつくる重力場の理論解を考える
 2. 各点で深さが変化すると、各点で角柱状に密度が置き換わる
 3. 置き換わる角柱部分の体積が観測点に及ぼす重力差を計算しステップ1の理論解に加える。
- 反復改良計算の場合はステップ2からスタートし、反復前の重力値に加える。磁気についても同様に計算する。

2.2 更新量計算

モデル点 i での深さ z_i を z_i だけ変化させたとき、重力や磁場の変化量 b_i は感度行列 A を使って線形近似できる。ここで感度行列 A の計算に重力と磁気の両方を考え、観測量と理論解との差 b も重力と磁気を同時並列に取り扱うことで統合処理を行う。感度行列 A は特異値分解し、擬似逆行列を構成することで b から補正量 z を求める。この z を使い b が0に収束するよう逐次試行モデルを反復改良していく。

3. 計算上のポイント

感度行列計算に現れる微分計算は、実際には数値微分で置き換えて計算する。実際に計算を実行すると、隣り合うモデル点での補正量が極端に異なってしまう問題が起こりうる。この場合、物理的に妥当な収束値が得られない。これを回避するために、計算上の要請として $\frac{\partial}{\partial z}(z) = 0$ を拘束条件として課し変換行列を $N \times M$ の感度行列の代わりに $(N + M) \times M$ の拘束条件付きの感度行列を再構成する。境界条件としては z 方向上端(表面)では補正量が0、それ以外の境界では微分値が0であることを要請した。特異値分解のスキームとしては特異ベクトルの直交性が良くかつなるべく誤差がたまらないよう、I-SVD アルゴリズムを採用し、倍精度の数値特異値分解計算コードを開発した。ただしそれでも場合によってはまるめ誤差の影響が大きく、良好な結果を得るには特異値計算部分の最下層 Do ループを4倍精度化する必要があった。この問題がまるめ誤差のみに起因していることは、全4倍精度計算や多倍長精度ライブラリを組み込んだ計算結果と比較することで確認した。また行列自体がなるべく悪条件にならないように、感度が悪いモデル点からの寄与は予め増幅して行列を設定しなおすことで行列の正則化を図った。また擬似逆行列を構成する際に特異値を $\frac{1}{\epsilon + \sqrt{\lambda_i}}$ ($\epsilon > 0$) と取り直すことで正則化を図った。この置換は、逆行列を使った Newton-Raphson 法による解の探索と再急降下法による解の探索のハイブリッド計算を行ったことに相当する。

以上の計算により重力と磁気を統合処理することで、疑似観測量から元となる多層地下構造を再現することができた。ポスターでは、微動データの統合処理の可能性についても議論したい。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

キーワード: 数値計算, 地下構造, 特異値分解

Keywords: numerical calculation, subsurface structure, singular value decomposition

中京地域堆積盆周辺の Hi-net 微動データから求めた相互相関関数の S/N 比と表面波群速度の推定精度の検討 Relation between S/N ratio of cross-correlation function and capability of group velocity estimation with seismic noise

林田 拓己^{1*}, 吉見 雅行¹, 堀川 晴央¹
Takumi Hayashida^{1*}, Masayuki Yoshimi¹, Haruo Horikawa¹

¹ 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

¹ Geological Survey of Japan, AIST

1. 背景

近年, 既往の 3 次元速度構造モデルの検証・高度化に地震波干渉法が適用されはじめている (例えば山中・他, 2010; Asano et al., 2011; Hayashida and Yoshimi, 2012). 我々はこれまで, 中京地域を対象に, (独) 防災科学技術研究所の Hi-net 観測点記録から得られる観測点間の相互相関関数を用いて既往の速度構造モデルの評価を行ってきた (林田・他, 2012). 相互相関関数に見られる信号波群のラグタイムより推定した各観測点間の表面波 (Rayleigh 波) 群速度は, 既往の速度構造モデルに基づく理論分散曲線とも概ね調和的であるが, なかには推定値と理論値が乖離するものも存在する. こうしたものの多くは, 波群の形状が複雑でシグナル成分の読み取りに困難を伴うことが原因であり, 相互相関関数の品質が群速度の推定精度に影響を及ぼすことが推察される.

2. 手法

本研究では, 1 時間分の連続波形記録から導出した Hi-net 観測点ペアの相互相関関数 (3 成分 × 95 ペア) を用いて, スタッキング処理回数の増加に伴うシグナル (相互相関関数の最大振幅値とする), ノイズ (波群到達後の相互相関関数の平均振幅値とする) および S/N 比の推移を調べた. なお, 観測点間の距離は 15.2-87.7 km と広範囲に及び, 観測点間の方位角もほぼ全方位にわたっているため, これらの推移の特徴と観測点間距離・方位との関連も検討した.

3. 結果

全ての観測点ペアにおいて, ノイズはスタック回数の平方根に反比例して減少する傾向が見られた. シグナルも同様に減少するが, 減少の度合いはペアによって異なる. S/N 比はスタック期間が 4 ヶ月を超えるあたりからほぼ横ばいになる. S/N 比が 30 を超えるペアでは時間零を対称軸として明瞭な波群が確認され, 表面波の群速度が比較的容易に推定される傾向にある. S/N 比は特に観測点の空間配置によって大きく変動し, 北北西-南南東の方位角を持つ観測点ペアにおいて顕著に高い値 (>100) を示す. 一方, 地震計の埋設深度が深い観測点を含むペアなどでは低 S/N 比 (<20) となり, 群速度の推定は困難となる. このように, 振幅情報の定量的評価は地震波干渉法解析における表面波群速度推定の際の指標たりうる. また, S/N 比の変動パターンは周波数帯域によっても異なっており, 0.2Hz 以上の周波数帯域での群速度の推定が困難なペアも存在する. これらの要因を総合的に評価することで, 地震波干渉法解析が適用可能な観測点ペアを選定する必要がある.

キーワード: 地震波干渉法, 雑微動, 表面波, 速度構造モデル, 中京地域

Keywords: seismic interferometry, ambient noise, surface wave, velocity structure model, Chukyo area

マレーシア・ペナン島における微動探査を用いた地盤構造の推定 Estimation of Ground Structure By Microtremor Observation in Penang Island, Malaysia

濱崎 翔平^{1*}, Tze Liang LAU², 盛川 仁¹, 小倉 祐美子¹
Shohei Hamasaki^{1*}, LAU, Tze Liang², MORIKAWA, Hitoshi¹, OGURA, Yumiko¹

¹ 東京工業大学, ² マレーシアサイエンス大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²Universiti Sains Malaysia

2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震は、マグニチュード(Mw)9.1を記録し、各地に甚大な被害をもたらした。マラッカ海峡を挟んでスマトラ島の北東側に位置するマレー半島でも揺れが感じられた。その後もスマトラ島沖では頻繁に大きな地震が発生しており、クアラルンプールやジョージタウンなどのマレーシアの都市でも揺れが感じられ、地震に慣れていない人々の混乱が問題となっている。

元来、マレー半島南部とボルネオ島北部を領域とするマレーシアは地震被害の少ない地域である。しかし、マレーシア政府は近年頻繁に起こるスマトラ島沖での地震を受け、構造物に対する耐震設計基準の本格的な導入を検討しており、導入に向けた様々な調査、研究が進められつつある。こうした背景のもとで、構造物を支える地盤構造についても、地震動予測の観点から新たに調査、研究の機運が高まっている。

本調査では、マレー半島北西に位置するペナン島を対象地域として、地盤構造の推定を目的とした微動アレー観測を行った。マレーシア有数の都市であるジョージタウンを中心としたペナン島は、東海岸地域を中心にコンドミニアムやホテルなどの超高層ビルや大型商業施設が立ち並んでいる。しかし、多くの構造物は地震を十分には考慮していない設計であり、どのような地盤構造の上に建設されているのかも必ずしも明らかではない。そこで本調査では、ペナン島東海岸地域を中心に地盤構造が構造物に与える影響を明らかにし、また、耐震設計基準導入における地震動マイクロゾーニングを進めるための基礎資料とすべく微動探査を行った。微動探査は、2012年7月31日から8月14日にかけての15日間で実施した。アレー観測は、東海岸地域を中心に16サイト計34アレーを構成した。空間自己相関法(SPAC法)による解析を行うために、アレーは正三角形の中心と頂点からなる4点で構成され、これら4点での同時観測を行った。

解析では、SPAC法を用いてRayleigh波の位相速度の分散曲線を推定し、さらに逆解析によって観測地点でのS波速度構造を推定した。理論分散曲線の計算は、地盤構造を平行成層であると仮定し、Haskellのマトリクス法を用いて行った。また、各アレーの中心点における微動の水平成分と鉛直成分のスペクトル比(以下、H/Vとする)を求めた。

サイトPDE(北東部の海沿いの公園)では、3アレーを構成して観測を行った。SPAC法により推定した分散曲線を用いて速度構造モデルを推定すると、表層50m程度までのS波速度が220m/s、それ以深のS波速度が500m/s以上という結果となった。次に、推定された速度構造モデルの妥当性を観測されたH/Vと速度構造モデルのRayleigh波の基本モード楕円率との比較によって検討した。結果として、推定された速度構造モデルはある程度は妥当なものであると考えられる。また、第2層を基盤と見なして1/4波長則を適用したときの卓越周期とH/Vより得られる卓越周期はよい対応を示していると考えられる。

全サイトにおけるH/Vに基づいた卓越周期の推定では、海に近い地点ほど卓越周期が長周期側になることが明らかになった。また、ほとんどのサイトにおいて、H/Vの卓越周期がはっきりと見えることから、S波速度コントラストの大きい地盤構造であることが推定される。H/Vにより得られた各サイトの地盤の卓越周期は多くの建物の固有周期と一致する範囲となり、このような地盤特性が建物に大きな被害をもたらすことが考えられる。今後さらに地盤構造を明らかにしたうえで、地震動予測を進めていく必要がある。

謝辞:本研究の観測においては、Universiti Sains Malaysiaの学生諸氏および東京工業大学学部生の中村翔平氏の協力を得た。また、本研究の一部は(独)国際協力機構(JICA)によるSpecial Research Program for Alumni Members(SRA)の支援を受けた。

キーワード: 空間自己相関法, 微動探査, H/Vスペクトル比, マレーシア

Keywords: SPAC method, Microtremor observation, H/V spectrum, Malaysia

つくば市における2011年東北地方太平洋沖地震による建物被害調査地域の微動探査による地盤構造推定 Determination of subsurface structure in the building damage area of Tohoku earthquake (March, 2011), Tsukuba City using

川向 藍子^{1*}, 野口竜也², 香川敬生², 福田大地², 長郁夫³, 先名重樹⁴, 岡田真介⁵

aiko kawamuki^{1*}, Tatsuya Noguchi², Takao Kagawa², Daichi Fukuda², Ikuro Cho³, Shigeki Senna⁴, Shinsuke Okada⁵

¹ 協和設計(株), ² 鳥取大学, ³ 産総研, ⁴ 防災科研, ⁵ 東北大学

¹ Kyowa sekkei Co.,Ltd., ² Tottori Univ., ³ AIST, ⁴ NIED, ⁵ Tohoku Univ.

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、茨城県つくば市では計測震度6弱を記録した。これにより屋根瓦落下等の被害が発生した。特に顕著な被害であった屋根瓦の被害率をマップにしたものをもとに、微動探査を行った。微動探査により地下地盤構造を明らかにし、被害率の高い地域と低い地域とで違いがあるかを検討した。また、推定した地下地盤構造の応答計算を行うことで観測地域の特性を検討した。

観測地域はつくば市の今鹿島 島間である。微動の3成分単点観測を71点とアレイ観測を20点行った。観測機器は加速度計JU215とJU310を用いた。各点15分間の観測時間とした。サンプリング周波数は100Hzとし、アレイ配置は4台の地震計を用い中心に1台、他の3台を円周上に正三角形となるように配置した。アレイ半径は0.6mを主とし、10m, 30mも行った。

アレイ観測の観測データは、CCA法とSPAC法、ノイズ補正CCA法により位相速度分散曲線を求めた。この位相速度分散曲線から、6層から成る地盤構造モデルをフォワードモデリングから推定した。この際、12層目を観測より得られた位相速度分散曲線より求め、3~6層目を既存のモデルを参考にした。これにより得られた地盤構造モデルを用いて応答倍率計算と、K-NET IBR011の東北地方太平洋沖地震の際の地震波形から応答スペクトル計算を行い、この地域の地盤震動特性を検討した。

3成分単点観測から得られたH/Vスペクトルより、短周期側の卓越周期の有無がみられた。被害率の高い地域では短周期側にピークがある観測点が少なく、反対に低い地域の観測点では短周期側にピークのある点が多かった。アレイ観測からは既存推定モデルより、地表面下10mにおいて詳しい地盤構造を推定することができた。しかし、この地表面下10mにおいて被害率の高い地域と低い地域とで大きな差が生じなかったため、被害率の大小に直接関係しないものと考えた。次に、基盤風化部までの堆積層によって被害に差が生じたのではないかと考えた。被害率の高い地域の堆積層は平均して50mであるのに対し、被害率の低い地域の堆積層は75mである。この違いによって被害率に差が生じたのではないかと考えられる。推定された地盤構造から応答計算を行った。これにより観測地域の地盤によって地震応答が増幅する周波数帯(3.5~6.5Hz)が明らかとなった。東北地方太平洋沖地震の際の地震波を絶対加速度応答スペクトルとしたグラフにおいて、3.5~6.5Hzの周波数帯に着目すると、大きい値を示していた。

以上のことより、本研究の観測地域は東北地方太平洋沖地震の際の基盤までの地震動の特性は同じだったものの、被害率の高い地域では堆積層により増幅され、さらに共振作用が起こり、瓦屋根の被害を増大させたと考えられる。

キーワード: 微動, 地盤構造, 瓦屋根被害, つくば市

Keywords: microtremor, Determination of subsurface structure, tiled-roof damage, Tsukuba City

微動および重力異常を用いた倉吉平野および大山北麓の地盤構造推定 Determination of subsurface structure in Kurayoshi plain and North part of Daisen, using microtremor and gravity anomaly

野口 竜也^{1*}, 足立大樹¹, 奥田峻¹, 伊藤佳洋¹, 香川 敬生¹

Tatsuya Noguchi^{1*}, Daiki Adachi¹, Shun Okuda¹, Yoshihiro Ito¹, Takao Kagawa¹

¹ 鳥取大学

¹Tottori Univ.

鳥取県中部は、倉吉市、北栄町、湯梨浜町があり、農業や漁業が盛んで、温泉地も数多く存在する。この地域では、1983年鳥取県中部、2000年鳥取県西部地震、2002年鳥取中西部の地震で、倉吉市街地の一部地域で住宅の一部破損やブロック塀の被害等が発生している。これらの被害は地盤構造の影響が示唆される。また、大山地域は休日には観光客が集まり、観光スポットとなっている。そこで本研究では、倉吉平野の東郷池を周辺と大山北麓地域で微動および重力探査を実施し、既往の研究によるデータを含めて地盤構造の推定を行った。

微動観測は単点3成分観測を倉吉平野65点、大山北麓75点、アレイ観測を倉吉平野5地点、大山北麓75点で実施した。アレイ観測では3地点(YRH, HKE, HSD)で中心と円周上に4台のセンサーを配置する正三角形アレイとし、アレイ半径は全地点で0.6~200mとした。観測時間はアレイ半径3~30mでは10分間程度、60m~200mでは観測時間は40分程度とした。重力観測はラコスト・ロンバーグ重力計を用いて、倉吉平野83点、大山北麓39点で実施した。位置の決定にはディファレンシャルGPS(Mobile Mapper CX:Magellan)を用いており、標高は1m以内で決定されている。

3成分の観測波形記録からはH/Vを求め、ピーク周期を読み取った。卓越周期の分布をみるためスプライン法を用いた補間によりコンターマップを作成した。アレイ観測の記録については、SPAC法、CCA法を用いて位相速度を求め、S波速度構造を推定した。観測された重力データからドリフト補正、潮汐補正、地形補正等の補正を施し、既存データと重力データベースのデータも組み合わせ、仮定密度 2.5g/cm^3 として重力異常を求め、密度構造を推定した。

キーワード: 微動, 重力異常, 地盤構造, 倉吉平野, 大山北麓

Keywords: microtremor, gravity anomaly, subsurface structure, Kurayoshi plain, Northern part of Daisen

2011年東北地方太平洋沖地震によって被災した大崎市古川の地盤構造の推定 Estimation of ground structure using gravity survey method around Furukawa, Japan, where was severely damaged by the 2011

Sripunyaphikhup Sakkrawit^{1*}

Sakkrawit Sripunyaphikhup^{1*}

¹ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

¹Tokyo Institute of Technology, Graduate school of science and engineering

Estimation of ground structure using gravity survey method around Furukawa, Japan, where was severely damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

SRIPUNYAPHIKHUP, Sakkrawit1, GOTO, Hiroyuki2, MORIKAWA, Hitoshi1, INATANI, Masayuki2, OGURA, Yumiko1, TOKUE, Satoshi1, ZHANG, Xinrui1, HAMASAKI, shohei1, IWASAKI, Masahiro3, ARAKI, Masayuki4, SAWADA, Sumio2

1Tokyo Institute of Technology, 2Kyoto University, 3Osaki City Government, 4aLab Co.Ltd.

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake caused vast damages to Japan, especially in the Northeastern part of country. Most of those damages came from the resulting Tsunami, some came from liquefaction, whereas only a few places were damaged by earthquake ground motions.

Furukawa in Osaki city is one of a few places, where was severely damaged by ground motions. Nevertheless, the level of damage to the structure within this town was totally different even the size of this town is not big, about 2km x 2km. In addition, there are 2 seismometers installed in this town, which are JMA-Furukawa and K-NET-MYG006 stations. Although distance between these 2 stations is about 1 kilometer, the velocity response spectrums of both seismometers were different about two times.

Therefore, investigation of ground structure is necessary. We carried out gravity survey in this town with the observation interval less than a few hundred meters because there was an estimation of depth to the engineering bedrock in this area is less than 50 meters. Moreover, we also carry out another observation using very dense sensors installed in this town to ensure the results of research. Within the area 2km x 2km, 34 sensors have been installed.

The Bouguer anomaly, as a result from gravity survey, has some significant variations in some places, which correspond to the most severely damaged places. Furthermore, residual anomaly as extracted from regional anomaly also states the similar fashion to both Bouguer anomaly and severe damaged places. Moreover, simulated 3-D map showing the altitude of basement, or engineering bedrock with the density of 2.4 g/cm³, presents the variations of the depth in 2km x 2km with the maximum different depth up to 67 meters.

These results from gravity survey are also corresponding to the latest result from very dense sensors project, which measured the arrival time of surface wave at every sensors from earthquake event on December 07, 2012 with epicenter off the Pacific coast.

Because the ground structure beneath this town is quite complicated and generate ground motions non-uniformly, so we will use receiver function analysis technique to supplement our study to better understand the characteristics of ground structure in this area.

Keywords: Furukawa, Osaki, Miyagi, 2011 Tohoku earthquake, gravity survey, ground structure, dense seismic array observation

東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測点における雑微動と地震動最大振幅との関係

Relation between microtremor amplitudes and largest seismic oscillations observed at TRIES seismographic stations

田中 寅夫^{1*}

Torao Tanaka^{1*}

¹ 田中寅夫, ² 大久保慎人, ³ 青木治三

¹TANAKA, Torao, ²OHKUBO, Makoto, ³AOKI, Harumi

東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測点は 1999 年 5 月に先ず TRIES 点で地震が記録され、続いて瑞浪消防署、犬山など観測網が拡げられてきた。雑微動と地震動最大振幅の関係の調査は、この観測初期段階の観測環境を調査することも目的のひとつとして、先ず、TRIES および犬山 2 観測点から解析を始めた。1999 年 6 月 3 日に両観測点で記録された福井岐阜県境で発生した地震を始めとし 2000 年 1 月 6 日京都府南部の地震まで全 9 個の地震について、地震の主要動部分すなわち S 波または表面波部分を、振動数帯域 2.0~4.0Hz に限定して離散フーリエ変換し、スペクトル振幅最大値とその振動数を決定した。他方、雑微動については、トリガーによる記録開始から P 波初動到来までの長さ 5 秒間程度の 100Hz サンプリングデータから、地震動の S 波、表面波については、3 秒~10 秒間の記録を解析した。上下、南北および東西の 3 成分について、地震動はスペクトル最大振幅とその振動数、雑微動については、スペクトル最小振幅とそれを与える振動数を決定した。これは雑微動の最も静かな環境を想定している。離散スペクトル振動数を 2.0~4.0Hz までの区間について 0.1Hz 刻みで求めた。地震動最大振幅と雑微動の最小振幅の関係から地震の規模や伝播経路の影響を除き site effect のみを求めるため、「犬山」の地震動と雑微動の結果をそれぞれ「TRIES」の地震動と雑微動で除して比を求めて、「犬山」観測点の「TRIES」を基準とした site effect と考えた。これらの 3 成分について得られた結果から、軟弱な地盤による地震波の増幅は、昨年の報告で述べたように、雑微動最小振幅を与え振動数であり、それは原因がばらばらで雑多な振動では引き起こされにくく、地震動では卓越的に増幅されるとの解釈が可能である。

キーワード: ザツビドウ, ジシンドウ, リサン フーリエ ヘンカン, ジバン, サイダイ シンプク, サイト トクセイ

Keywords: microtremor, seismic waves, discrete Fourier transform, ground soil, maximum amplitude, site effect

関東平野の堆積層内の散乱および減衰構造の周波数依存性

Frequency dependence properties of seismic wave scattering and attenuation at the Kanto basin

武村 俊介^{1*}, 吉本 和生¹

Shunsuke Takemura^{1*}, Kazuo Yoshimoto¹

¹ 横浜市立大学

¹Yokohama City University

はじめに

地震時に観測される高周波数地震動は、地下構造中に含まれる短波長の不均質構造による地震波散乱の影響で複雑な様相を呈する。地殻の極浅部の盆地堆積層内においては不均質性が特に強いことが知られており、高周波数地震動の複雑な様相はより顕在化すると考えられる。

そこで本研究では、盆地堆積層内の高周波数地震動の伝播特性の解明のため、関東平野を対象として盆地堆積層内における各周波数の散乱係数および非弾性減衰の推定を行う。

Monte Carlo 法による散乱構造の推定

関東平野近隣で発生した Mw4.5-5.5 の地震を用いて推定を行った。観測波形に 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 Hz のバンドパスフィルターをかけ、3 成分合成二乗振幅エンベロープ (以下、観測エンベロープ) を合成した。観測エンベロープとモンテカルロ法 (Yoshimoto, 2000) により合成されたエンベロープ (以下、計算エンベロープ) を比べ、残差二乗和が最小となるような散乱係数 g_0 および非弾性減衰 Q_I^{-1} をグリッドサーチにより求めた。

盆地堆積層内のパラメーターを正確に推定するために、岩盤点に設置されている F-net の波形記録を用いて地殻およびマントルのパラメーターを先に推定し、そのパラメーターを用いて関東平野内の K-NET/KiK-net により堆積層内のパラメーターの推定を行った。

推定結果

グリッドサーチにより推定された結果は、地殻内では 1-2 Hz で散乱係数 $g_0 = 2.51 \times 10^{-3}$ 、非弾性減衰 $Q_I^{-1} = 5.74 \times 10^{-3}$ 、2-4 Hz で $g_0 = 2.93 \times 10^{-3}$ 、 $Q_I^{-1} = 3.35 \times 10^{-3}$ 、4-8 Hz で $g_0 = 3.98 \times 10^{-3}$ 、 $Q_I^{-1} = 2.28 \times 10^{-3}$ 、8-16 Hz で $g_0 = 5.41 \times 10^{-3}$ 、 $Q_I^{-1} = 1.33 \times 10^{-3}$ となった。関東地方において MLTWA による推定結果と比較 (例えば、Fehler et al., 1992; Yoshimoto and Okada, 2009) すると、非弾性減衰については同程度の値となっているが、散乱係数は小さく推定されている。岩盤点に設置されている F-net の波形のみを用いて推定したため、浅部不均質の影響が少なく散乱係数が小さく推定されたと考えられる。

盆地内での推定結果は、1-2 Hz で散乱係数 $g_0 = 0.126$ 、非弾性減衰 $Q_I^{-1} = 6.71 \times 10^{-3}$ 、2-4 Hz で $g_0 = 0.0708$ 、 $Q_I^{-1} = 5.96 \times 10^{-3}$ 、4-8 Hz で $g_0 = 0.126$ 、 $Q_I^{-1} = 6.68 \times 10^{-3}$ 、8-16 Hz で $g_0 = 0.0891$ 、 $Q_I^{-1} = 4.71 \times 10^{-3}$ となり、すべての周波数において地殻内の値よりも大きく推定された。散乱係数についてはリソスフェアと火山地域で推定されたものの値となっている (例えば、Sato et al., 2012)。また、S 波の減衰 $Q_S^{-1} (= Q_{Scat}^{-1} + Q_I^{-1})$ は、1-2 Hz で 2.68×10^{-2} 、2-4 Hz で 1.16×10^{-2} 、4-8 Hz で 1.17×10^{-2} 、8-16 Hz で 6.48×10^{-3} となった。木下・大池 (2002) による 0.5-2 Hz では $Q_S^{-1} = (50f)^{-1}$ で 2-16 Hz では 9.09×10^{-3} という推定結果と大きく違わない。

謝辞

防災科学技術研究所の K-NET/KiK-net および F-net の波形記録を使用させていただきました。

キーワード: 地震波散乱, 盆地構造, 減衰構造

Keywords: Seismic wave scattering, basin structure, intrinsic attenuation

KiK-net 地中観測点記録を用いた関東地方南部の堆積層における S 波減衰特性の推定 Estimation of S-wave attenuation in the sedimentary layer beneath southern Kanto by using KiK-net borehole records

福嶋 林太郎^{1*}, 中原 恒¹, 西村 太志¹
Rintaro Fukushima^{1*}, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku Univ.

1. はじめに

日本の大都市圏は、厚い堆積層の上に位置しており、地震動が増幅されやすい環境にある。地震防災を考える上では、堆積層における地震波（特に S 波）の増幅特性に加えて、減衰特性（ Q_s^{-1} 値）を正しく評価することが重要である。現在では、日本全国に展開された観測網のデータを利用できるため、多くの観測点において S 波の減衰特性を推定できることが期待される。本研究では、防災科学技術研究所基盤強震観測網 KiK-net の関東地方南部における観測点の地中地震記録を使用し、 Q_s^{-1} 値を推定したので、その結果について報告する。

2. データ

使用した観測点は千葉 (CHBH10)、横浜 (KNGH10)、所沢 (SITH04) の 3 点であり、設置期間が長く、観測されたイベント数も比較的多い。設置深度はすべて 2000m である。土質は観測点によって異なるが、いずれの観測点もセンサーが基盤に入っていないため、地中観測点から地表までを均質と仮定することにより堆積層の Q_s^{-1} 値を推定できる。2003 年 5 月から 2011 年 2 月の期間に観測された全イベントのうち、震央距離 150km 以内、最大加速度 100cm/s^2 以下、そして入射 S 波と反射 S 波が時間的に明瞭に分離して観測されているものを選択すると、解析イベント数は千葉、横浜、所沢でそれぞれ 89、38、20 個となった。マグニチュードは 2.7 から 6.1 である。解析には 1-10Hz のバンドパスフィルタを掛けた速度波形のトランスバース成分を用いた。サンプリング周波数は時期により 200Hz と 100Hz と異なっている。

3. 手法

Fukushima et al. (1992) は千葉県千倉において、地中観測点の地震波形から、入射 S 波と地表からの反射 S 波を切り出し、その伝達特性から泥岩質堆積層の 1-5Hz における Q_s^{-1} 値を求めた。本研究では Fukushima et al. (1992) の手法を少し変更して用いる。解析では、入射波の始点 ($t1[s]$)、終点 ($t2[s]$)、入射波と反射波とのラグタイムを決める必要がある。まずは波形からこれらを目視で読み取り初期値とする。次に $t1$ を固定したまま $t2$ を 1 サンプル間隔ずつ変える。ここで $t2-t1$ が入射波と反射波の時間長に対応する。 $t1$, $t2$ を与えると、ラグタイムは入射波と反射波の共分散を最大にするように自動的に決まる。そこで結局 $t2$ を決めればよいことになり、その決定のために入射波と反射波に対して係数 C を計算する。係数 C は、入射波パワースペクトルの平方根と入射波と反射波とのコヒーレンスの積を 1-10Hz で積分したものであり、入射波のパワーの大きさと、入射波と反射波の波形の相関の高さを表す指標である。この係数を用いることにより、波形の相関が高く、かつ他のフェーズよりも振幅の大きい入射波と反射波を自動的に切り出すことができる。入射波の始点の読み取りを信じて $t1$ を固定する点、ラグタイムの推定に共分散を用いた点、そして係数 C においてコヒーレンスの絶対値を用いた点が本研究の変更点である。最後に、入射波と反射波のクロススペクトルを入射波パワースペクトルで割ったものを地盤浅部の応答関数（システム関数）として求め、 Q_s^{-1} 値を計算する。この手順は Fukushima et al. (1992) に従う。

4. 結果

Q_s^{-1} 値が負になったり、3 点以上の周波数で Q_s^{-1} 値が求められなかったりしたイベントを除き、最終的に千葉、横浜、所沢でそれぞれ 42、20、14 個のイベントに対し Q_s^{-1} 値を求めることができた。 Q_s^{-1} 値が周波数のべき乗に従うと仮定し、各観測点で得られた結果を 1-5Hz の周波数帯において $L1$ ノルムを用いてフィッティングしたところ、千葉と横浜ではべきがそれぞれ -0.76、-0.50 となり、1Hz での Q_s^{-1} 値は 0.020、0.032 となった。一方所沢では、べきが -0.04 と小さく、周波数依存性はほとんど見られなかった。また、 Q_s^{-1} の値は Fukushima et al. (1992) による千葉県千倉の結果と比べて小さくなった。千倉の設置深度が 732m であるのに対して、本研究で用いた観測点の設置深度は 2000m である。そのため、 Q_s^{-1} 値の深さ依存性によるものと考えられる。現在のところ、求められた Q_s^{-1} 値のばらつきは ± 1 桁程度とやや大きいため、今後この要因について検証する必要がある。また、より多くの観測点で同様の解析を行い、 Q_s^{-1} 値と土質や S 波速度、深さなどとの関係を調べる予定である。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所の基盤強震観測網のデータを利用させていただきました。記して感謝いたします。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-P15

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

キーワード: 地震波減衰, 堆積層

Keywords: seismic wave attenuation, sedimentary layer

2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2)の強震記録に基づく震源過程解析 Examination of source process for the 2011 off Miyagi earthquake of M 7.2 using strong-motion records

芝 良昭^{1*}

Yoshiaki Shiba^{1*}

¹ 電力中央研究所

¹ CRIEPI

2011年4月7日に発生した宮城県沖のM7.2の地震は、東北地方太平洋沖地震の余震、誘発地震としては最大級のスラブ内地震である。宮城県内では最大震度6強が記録され、震度5強以上の領域は岩手県から福島県にかけて広がっている。本稿では、震源域の直上近傍で観測された強震記録を用いて、インバージョン解析に基づく震源過程の検討を実施した。解析手法には Shiba and Irikura (2005) による経験的グリーン関数法と高速焼きなまし法を組み合わせた震源インバージョン手法を用いた。同手法は、比較的低周波数帯域の波形記録から断層面上のすべり量とライズタイムの時空間分布を求めた後に、これを事前分布としてより広帯域の波形記録から実効応力とすべり量の分布モデルを決定するものである。断層面モデルは、F-net のメカニズム解から余震分布との比較により東傾斜の高角の面を採用した。経験的グリーン関数には、4月28日に発生したM4.8の余震の記録を用いた。本震断層面の分割サイズは、硬質地盤上に設置されているF-net観測点の記録から、余震の震源スペクトルを推定し、そのコーナー周波数から決定した。解析には、防災科学技術研究所のKiK-net観測点21地点とK-NET観測点1地点の、計22観測点のデータのうち、水平2成分の加速度記録を速度波形に変換して用いた。解析周波数の上限は、すべり量とライズタイムを求めるインバージョン解析では1Hz、実効応力とすべり量の同時インバージョン解析では5Hzとしている。解析の結果、断層面上のすべり分布は破壊開始点から浅い側に広がる単一のアスペリティで概ね説明できることがわかった。アスペリティの大きさはおよそ15km × 10kmの範囲で、断層面全体の約14%に相当する。またアスペリティのライズタイムは1秒前後と短く、すべり速度、および実効応力が大きいことが示唆された。一方、より広帯域の波形記録を用いて行った実効応力とすべり量の同時インバージョン結果から得られた震源モデルでは、断層面上の実効応力が大きい強震動生成領域とすべり量が大きいアスペリティは空間的にほぼ重なることがわかった。ただし、詳細にみると、実効応力の分布は、アスペリティの西側、すなわち断層すべりの終端部付近で相対的に大きい。実効応力の最大値としては120MPaが得られたが、アスペリティ全体の平均的な実効応力値はおよそ70MPaとなった。この値は、フォワードモデリングによって推定された特性化震源モデル(原田・釜江, 2011; 染井・他, 2012)における強震動生成領域の応力降下量値と調和的である。

キーワード: 2011年宮城県沖地震, スラブ内地震, 震源過程, インバージョン解析, 強震記録, 実効応力

Keywords: 2011 off Miyagi earthquake, intra-slab earthquake, source process, inversion analysis, strong motion record, effective stress

強震波形による2011年4月11日福島県浜通りの地震の震源過程と地表地震断層の比較

Estimation of the rupture process of the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake using strong ground motion data

田中 美穂^{1*}, 浅野 公之¹, 岩田 知孝¹

Miho Tanaka^{1*}, Kimiyuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ DPRI, Kyoto University

1. はじめに

2011年4月11日17時16分(JST)に福島県浜通りの地震(Mw6.6)が発生した。この地震は2011年東北地方太平洋沖地震による誘発地震と考えられており、CMT解は東北東-西南西方向に張力軸をもつ正断層型であった。堤・遠田(2012)など地震後の調査では井戸沢断層と湯ノ岳断層の2条の地表地震断層が確認された。この2条の地震断層の位置関係は共役ではない。気象庁による震源は井戸沢断層寄りに位置するため、湯ノ岳断層が井戸沢断層の後に破壊したと考えられる。内陸正断層型の地震で地表での変位が認められる例は稀である。本研究では井戸沢断層と湯ノ岳断層の2枚の断層面モデルを設定し、強震波形を用いてこの地震の震源過程を解析した。また、求められたすべり分布と地表での変位量分布との比較を行った。

2. データと解析手法

用いた強震波形は、防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net, 気象庁震度計の計19観測点での加速度波形を積分して得た3成分速度波形である。解析にはこれらの波形に0.1~1.0Hzのバンドパスフィルターをかけ、10Hzでリサンプリングし、S波到達1秒前から35秒間の波形を用いた。グリーン関数の計算は、離散化波数法(Bouchon,1981)、透過・反射係数行列法(Kennett and Kerry,1979)により行った。ここで用いた速度構造モデルは、全国1次地下構造モデル(Koketsu et al.,2012)から各観測点直下の速度構造を抜き出し、観測点ごとに一次元速度構造モデルとして与えた。

設定した断層面モデルは、井戸沢断層モデル、湯ノ岳断層モデルともに一枚の平面で表した。それぞれの走向、傾斜、大きさは156°と130°,73°と62°,22km×14kmと16km×14kmである。走向、傾斜はFukushima et al.(2013)を参考に、大きさに関しては本震後1日間の余震分布を参考に決定した。また、それぞれの断層モデル上での破壊開始位置は、井戸沢断層は気象庁震源位置を断層面にのりようおよそ1.8km移動させた位置とし、湯ノ岳断層は深さおよそ12.3kmで断層面の北端、中央、南端の3通りで解析した。

解析手法はmultiple time window linear source inversion(Hartzell and Heaton,1983)により行った。すべり角はdip方向±45°の範囲で拘束した。2km×2kmのサブ断層サイズを用い、各サブ断層の震源時間関数は継続時間1秒のsmoothed-ramp関数6つを0.5秒間隔で配置し表現した。破壊伝播速度は、井戸沢断層の破壊開始点でのS波速度の60%(2.04km/s)を用いた。湯ノ岳断層の破壊開始時刻は、井戸沢断層での破壊開始後4.5,5.0,5.5,6.0,6.5秒の5通りの解析をした。

3. 結果

湯ノ岳断層の破壊開始は井戸沢断層の4.5秒後、破壊開始位置は北側の場合に残差が小さかった。地震モーメントは 1.0×10^{19} Nm(Mw6.6)であった。すべりの大きい領域は井戸沢断層で破壊開始点の北側の浅い領域、湯ノ岳断層では北側深い領域と北側から南側にかけてやや深い領域に見られた。最大すべり量はそれぞれ1.6m,2.2mで、湯ノ岳断層のほうが大きかった。井戸沢断層では地表での変位量の大きい領域は断層面モデルの中央部に位置しており、求められた浅い領域のすべり量の大きい領域と対応していた。湯ノ岳断層では地表での変位量は北側から南側にかけて全体的に分布しており、求められた浅い領域のすべり量分布と対応していた。

破壊伝播速度、湯ノ岳断層の破壊時間差はともに小さいほど残差が小さいという傾向があり、今後パラメータの範囲を広くとり、解析を行う。また、湯ノ岳断層の破壊開始位置の深さについても考察する。

4. 謝辞

本研究には防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net観測点のデータ、気象庁の震度計のデータを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。

キーワード: 2011年福島県浜通りの地震, 井戸沢断層, 湯ノ岳断層, 震源過程, 強震波形

Keywords: the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake, the Itozawa fault, the Yunodake fault, source process, strong motion data

地殻内地震に対する既存の広帯域震源モデルに基づく強震動生成域の応力降下量と深さの関係

Relation between stress drops and depths of strong motion generation areas based on previous broadband source models

佐藤 智美^{1*}, 岡崎 敦²Toshimi Satoh^{1*}, OKAZAKI, Atsushi²¹ 清水建設技術研究所, ² 関西電力土木建築室¹ Shimizu Corporation, ² Kansai Electric Power Company

三宅・他(1999)は、経験的グリーン関数法に基づき1997年鹿児島県北西部の地震の近傍の広帯域の強震波形が、強震動生成域により説明できることを示した。この研究以降、多くの地震に対して経験的グリーン関数法により、強震動生成域が推定されている。一方、地殻内地震に対する周期1秒程度以上を対象とした波形インバージョンによる不均質震源モデルに基づき、アスペリティ(Somerville et al., 1999)の応力降下量と深さとの関係が検討され、深いほど応力降下量が大いという関係式が提案されている(Asano and Iwata, 2011)。そこで、本研究では、日本の地殻内地震に対して経験的グリーン関数法で強震動生成域からなる広帯域震源モデルが推定されている文献を調査し、強震動生成域と深さとの関係について検討を行った。

2011年4月までのMw5.5以上の地震を対象とした結果、22の文献が対象となり、横ずれ断層6個、逆断層6個、正断層1個の計13個が選択された。Mwは5.7~6.9の範囲にある。同じ地震に対して複数のモデルが推定されている場合には独立に扱ったため、全体で25ケースの震源モデルが対象となった。なお、複数個の強震動生成域も独立に扱った。

図には、全25ケースの強震動生成域の中心深さ h と応力降下量 $stress$ の関係を示す。ばらつきが大きい、横ずれ断層、逆断層、全地震の3つのデータセットで、 h [km]と $stress$ [MPa]の回帰式を作成した結果、(1)~(3)式が得られた。

$$stress=0.63h+7.88 \quad (\text{標準偏差} = 5.26) \quad \text{横ずれ断層 (1)}$$

$$stress=1.42h+8.54 \quad (\text{標準偏差} = 8.39) \quad \text{逆断層 (2)}$$

$$stress=1.15h+7.98 \quad (\text{標準偏差} = 8.05) \quad \text{全地震 (3)}$$

逆断層の方が横ずれ断層より、同じ深さでの応力降下量が大い。データの深さの最大値が15km弱であることから、 $h=15$ kmでの応力降下量を求めると、横ずれ断層、逆断層、全断層で、それぞれ、17.3MPa、29.8MPa、25.2MPaとなる。深くなるほど、逆断層と横ずれ断層の応力降下量の違いが大きくなる。

次に、強震動生成域の総面積 S_a と地震モーメント M_0 の関係についても検討を行った。同じ地震の S_a を対数平均して、横ずれ断層、逆断層、全地震の3つのデータセットで、 M_0 [dyne·cm]と S_a [km²]の回帰式を作成した結果、(4)~(6)式が得られた。

$$S_a = 4.57 \times 10^{-16} M_0^{2/3} \quad (\text{標準偏差} = 0.18) \quad \text{横ずれ断層 (4)}$$

$$S_a = 3.64 \times 10^{-16} M_0^{2/3} \quad (\text{標準偏差} = 0.09) \quad \text{逆断層 (5)}$$

$$S_a = 4.02 \times 10^{-16} M_0^{2/3} \quad (\text{標準偏差} = 0.15) \quad \text{全地震 (6)}$$

全地震の S_a は、長周期波形インバージョン結果に基づくSomerville et al.(1999)のアスペリティの総面積の約0.8倍であり、横ずれ断層では0.9倍、逆断層では約0.7倍である。この関係は佐藤(2010)とほぼ同じである。アスペリティの方が強震動生成域より長周期の地震動から推定されているためと考えられる(佐藤, 2010)。

一方、クラックモデルの短周期レベル A は(7)式で表される(Brune, 1970)。

$$A=4\pi(S_a/\pi)^{0.5} stress V_s^2 \quad (7)$$

ここで、 V_s は震源のS波速度、 π は円周率である。 $V_s = 3.4$ km/sとし、(1)~(3)式、(4)~(6)式を(7)式に代入し A を算出した。その結果、全地震では、深さ約7km以深で壇・他(2001)の M_0 - A 関係より大きくなった。また、横ずれ断層では約10km以深で、逆断層では約5km以深で、壇・他(2001)の M_0 - A 関係より大きくなった。 A が逆断層の方が横ずれ断層より平均的に大きいという結果は、スペクトルインバージョンに基づく既往の結果(佐藤, 2010)とも整合する。

以上のように、強震動生成域の応力降下量は、強震動生成域の応力降下量は、ばらつきは大きいものの深さが深いほど大きい傾向があり、同じ深さでは逆断層の方が横ずれ断層より大きい事が分かった。現行の強震動レシポの枠組には応力降下量の深さ依存性等は考慮されないが、今後更にデータの検証、拡充を行なう事により強震動予測の高度化が図られる可能性がある。

謝辞：本研究は、12電力による電力共通研究「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震動評価手法の高度化に関する研究」の成果の一部である。記して感謝致します。

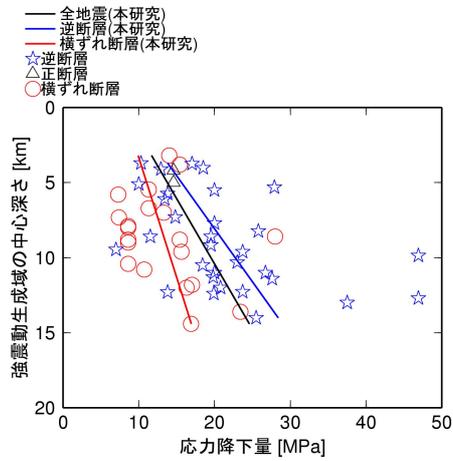
キーワード: 強震動生成域, 応力降下量, 深さ, 経験的グリーン関数法, 地殻内地震

Keywords: strong motion generation area, stress drop, depth, empirical Green's function method, crustal earthquake

SSS33-P18

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30



沈み込み帯構造を用いた2011年東北地震の長・短周期パルス源の決定 Determination of long- and short-period pulse sources of the 2011 Tohoku earthquake using the subduction zone structure

樋口 駿^{1*}, 纈纈 一起¹, 三宅 弘恵¹
Shun Higuchi^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

2011年3月11日に発生した東北地震は、プレート境界の海溝型地震である。この地震では強震記録に複数の地震波パルスを見ることが出来る。プレートの沈み込み帯の地震波速度構造の不均質性を反映させたモデルを用いて、これらのパルス源を決定することは重要だと考えられる。

我々はこれまで K-NET および KiK-net の強震波形に因果律を満たすフィルタを適用し、積分して長周期帯域 (10~100 s) および短周期帯域 (0.01~10 s) の速度波形を得た後、主要な長・短周期パルスを3つずつ同定して、それらの初動の到着時から震源決定を行ってきた。地下構造モデルには、全国1次地下構造モデル (Koketsu *et al.*, 2008) の三次元速度構造を使用した。また、震源決定には Lomax *et al.* (2000) による確率論的非線形震源決定手法 NonLinLoc を用いており、震源の不確かさを確率密度分布によって表現している。これまで得られた結果では、長周期パルス源は Koketsu *et al.* (2011) や Yokota *et al.* (2011) での強震データのインバージョン結果と整合的であり、短周期パルス源は Asano and Iwata (2012) などの経験的グリーン関数法による強震動生成域と良く一致しており、相対的に見て長周期源が浅部に、短周期源が深部に求められた。

本研究ではこれまでの結果に加えて、第2パルス前後の速度波形に対して、位相ずれのないフィルタを適用して長周期第2パルスの波形を得て、パルスの最大振幅の到着時を読み取り、同様の解析手法で震源決定を行った。その結果と初動の結果を合わせると、第2パルスに相当するすべりが破壊開始から約56秒後に震央のやや東側で始まり、沖合ではなく陸側へと進展する破壊過程が示唆された。今後、同様の解析手法を本震の震源域の様々な規模の地震に対して行うことにより手法の妥当性を確認し、その上で結果に対する詳細な考察を加える予定である。

謝辞：本研究には防災科学技術研究所の K-NET・KiK-net の観測データおよび気象庁一元化震源の検測値を使用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 2011年東北地震, 強震動, 三次元速度構造, 震源過程

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, strong ground motion, 3-D velocity structure, source process

長大活断層帯のセグメントにおけるアスペリティと地表地震断層の関係 Relationship between asperity and surface earthquake faults for behavioral segments in a long active fault zone

栗山 雅之^{1*}, 佐藤 浩章¹

Masayuki Kuriyama^{1*}, SATO, Hiroaki¹

¹ 一般財団法人電力中央研究所

¹ Central Research Institute of Electric Power Industry

はじめに

複数の活動セグメントが破壊する地震の強震動予測のための震源モデル化手法を高度化するためには、各セグメントの特徴をモデルに反映することが重要である。そこで、本研究では、横ずれ型の内陸地殻内地震の震源断層モデルにおける震源パラメータと地表変位量等の地質学的なパラメータをセグメントごとに抽出し、パラメータ間の関係を整理する。これらの関係に基づき、地表付近で得られる情報を用いた、各セグメントごとの微視的な震源パラメータのモデル化の可能性について検討する。

対象地震と検討手法

対象とした地震は7地震である：1979年 Imperial Valley 地震 (Hartzell and Heaton, 1983; Sharp *et al.*, 1982), 1992年 Landers 地震 (Wald and Heaton, 1994; Sieh *et al.*, 1993), 1995年兵庫県南部地震 (Sekiguchi *et al.*, 2000; 栗田ほか, 1996), 1999年 Duzce 地震 (Birgoren *et al.*, 2004; Akyuz *et al.*, 2002), 1999年 Hector Mine 地震 (Ji *et al.*, 2002; Treiman *et al.*, 2002), 1999年 Kocaeli 地震 (Sekiguchi and Iwata, 2002; Barka *et al.*, 2002), 2002年 Denali 地震 (Asano *et al.*, 2005; Haeussler *et al.*, 2004)。断層破壊域(セグメントの長さ×幅)とアスペリティ領域は、Somerville *et al.* (1999)の手法を参考にし、各地震の震源断層を構成するセグメントごとに定義した。アスペリティに関するパラメータは、アスペリティの平均すべり量と面積を用いた。一方で、地表地震断層に関するパラメータは、地表変位量の最大値とトレンチ調査による平均活動間隔を利用した。また、地表変位量分布の形状を表すパラメータを、地表変位量の最大値とセグメントの長さの積で定義して用いた。尚、本研究で用いたセグメントは、すべり量が断層長に比例すると考えられる範囲に限定するために、すべり量が頭打ちしない長さ60km以下 (Romanowicz, 1994)、アスペクト比(セグメントの長さ/セグメントの幅)2.5以下となる場合を対象とした。

アスペリティの平均すべり量及び面積に関する検討

アスペリティの平均すべり量と、地表付近で得られる情報であるセグメントの長さ、地表変位量の最大値、及び平均活動間隔の関係を調べた結果、相関係数でそれぞれ0.49, 0.61, 0.94が得られた。尚、平均活動間隔は、情報のある1992年 Landers 地震, 1995年兵庫県南部地震及び1999年 Hector Mine 地震で破壊したセグメントを対象とした。アスペリティの平均すべり量と平均活動間隔には高い正の相関が認められ、また、アスペリティの平均すべり量と地表変位量の最大値にも相対的に高い相関がある。後者の関係において、対象とするセグメントから、地表変位量の最大値が相対的に大きいアスペリティの上端が地表に達している2つのセグメントを除外すると相関係数として0.91が得られる。このことは、アスペリティの上端が地表に達している場合とそうで無い場合を分けてモデル化する必要性を示唆すると考えられる。

アスペリティの面積は、地表変位量分布の形状を表すパラメータと相対的に高い相関(相関係数:0.62)が認められた。この関係から顕著に外れる1999年 Kocaeli 地震の2つのセグメントを除くと、相関係数は0.94に向上することが分かった。除外したセグメントは、すべり量が相対的に大きい領域が震源断層面上に点在しアスペリティの抽出過程で面積が過小評価となる可能性があるセグメント、地表変位量が観察されているものの震源インバージョンで震源断層面上のすべりが推定されていないセグメントである。

以上から、地表変位量の最大値はアスペリティの平均すべり量と高い相関があるだけでなく、セグメントの長さを介してアスペリティの面積とも相関があり、アスペリティをモデル化する上で有用なパラメータであると考えられる。今後、セグメントの微視的震源パラメータと、震源域近傍の地質学的、地震学的構造との関係についても検討する。

謝辞

震源モデルに関する情報は、SRCMOD(<http://equake-rc.info/srcmod/>)の情報、ならびに京都大学防災研究所 浅野公之博士に、ご提供頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 長大活断層帯, セグメント, アスペリティ, 地表地震断層

Keywords: long active fault zone, behavioral segment, asperity, surface earthquake fault

近年発生した内陸地殻内地震の震源インバージョン結果に基づいた震源パラメータのスケールリング則の見直し Updating of source scaling relationships evaluated from the waveform inversion of recent inland crustal earthquakes

宮腰 研^{1*}, 入倉 孝次郎²

Ken MIYAKOSHI^{1*}, IRIKURA, Kojiro²

¹ 地盤研究財団, ² 愛工大

¹GRI, ²AIT

1. はじめに

強震動予測手法(入倉・三宅, 2001:以下, レシピ)は, 主に強震動記録を用いた震源インバージョン結果等により推定された震源パラメータのスケールリング則(Somerville et al., 1999)に基づいている。このスケールリング則の基になったデータは15個の内陸地殻内地震(Mw5.7~7.2)であり, 1995年兵庫県南部地震を除くとすべて米国カリフォルニアの地震の強震動記録を用いた解析結果であった。国内でも1995年以前に被害地震は発生しているが, 当時の強震動観測体制が貧弱だったため, 強震動記録を用いた震源インバージョンによる精度よい断層破壊過程の結果が得られておらず, アスペリティ面積や応力降下量などの強震動予測において重要な断層パラメータの推定が困難であった。一方, 1995年兵庫県南部地震以降, 国内の強震動観測網(K-NET, KiK-net等; 防災科学技術研究所)の充実によって, 震源近傍の強震動記録が多く観測されるようになり, 強震動の生成メカニズムの解明が進むと共に, 震源インバージョン結果が数多く蓄積された。このため, 本検討では1995年以降に発生した国内の内陸地殻内地震の震源インバージョン結果を収集し, 震源パラメータの見直しおよびスケールリング則の再評価を行った。

2. 使用データ

収集した震源インバージョン結果は国内で発生した15個(横ずれ断層:7個, 逆断層:7個, 正断層:1個)の内陸地殻内地震(Mw5.6~6.9)である。収集した震源インバージョンのターゲット波形の周期は0.05秒~0.5秒であった。一方, Somerville et al.(1999)の収集した震源インバージョン結果のそれは0.05秒~0.2秒である。ターゲット波形の周期を比較した場合, 見かけ上, Somerville et al.(1999)の収集した震源インバージョン結果の方が, より短周期まで精度があるように考えられる。しかしながら, 震源インバージョンで用いたグリーン関数に, その周期まで精度があるかどうかの検証が行われていないものも多く, 周期帯域に関する精度の取扱には注意が必要と考える。

3. 震源パラメータ

Somerville et al.(1999)の規範に従い, 最終すべり量に基づいて断層破壊領域(Total rupture area)を抽出し, 次にアスペリティ領域(Combined area of asperities)を抽出した。本検討で用いた15個の震源インバージョン結果から抽出される断層破壊面積のスケールリングは, Somerville et al.(1999)とほとんど変わらない結果が得られた。一方, 抽出されたアスペリティ面積のスケールリングは, Somerville et al.(1999)に比べて小さい結果となり, アスペリティ面積比(アスペリティ面積/破壊断層領域: Sa/S)は0.17であった。これはSomerville et al.(1999)のアスペリティ面積比(0.22)に比べて優位に小さい結果である。なお, 断層タイプでアスペリティ面積比(Sa/S)をみると, 横ずれ断層・逆断層では0.16, 正断層では0.22となっている。

4. 考察

このようにSomerville et al.(1999)の結果と本検討の結果が異なる原因として, 震源インバージョンのターゲット周期が考えられたが, 前述したように, 両者の周期範囲に大きな相違は認められない。しかしながら, 国内の強震動観測網の充実で, 震源近傍データが豊富になり, そのデータに基づいた震源インバージョン結果による震源像の解像度は, Somerville et al.(1999)に比べて, 向上している可能性が考えられる。ここで求められたアスペリティ面積が強震動予測に有効かどうかは, 今後, 統計的あるいは経験的グリーン関数法を用いた波形シミュレーションを実施し, 観測波形との比較によって検証を行う必要がある。

謝辞: 京都大学防災研究所・浅野博士, 関口准教授, 岩田教授, 産業技術総合研究所・堀川博士, 東京電力・引間博士, 防災科学技術研究所・鈴木博士, 青井博士に震源インバージョン結果をご提供頂きました。また, 気象庁の震源インバージョン結果を利用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 強震動, 強震動予測レシピ, 経験的スケールリング則, 震源インバージョン

Keywords: strong ground motion, a recipe for predicting strong ground motion, empirical scaling relations, waveform inversion

スラブ内地震の強震動予測のための断層パラメータ設定方法の構築に向けた検討 Examinations toward establishing procedure of evaluating fault parameters for predicting strong motions from intra-slab

新井 健介^{1*}, 石井 やよい¹, 小穴 温子¹, 壇 一男¹, 石井 透¹, 花村 正樹¹, 藤原 広行², 森川 信之²

Kensuke Arai^{1*}, Yayoi Ishii¹, Atsuko Oana¹, Kazuo Dan¹, Toru Ishii¹, HANAMURA, Masaki¹, Hiroyuki Fujiwara², Nobuyuki Morikawa²

¹ 清水建設, ² 防災科学技術研究所

¹ Shimizu Corporation, ² National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

スラブ内地震の強震動を高い精度で予測するためには、スラブ内地震の震源特性に基づく断層パラメータ設定方法の構築が必要である。これまで、そのような研究が笹谷・他(2006)や壇・他(2006)により行われているが、提案されている断層パラメータ設定方法が実際の地震記録の再現によって十分検証されているとはいえない。そこで、本研究では、2011年4月7日に宮城県沖で発生したスラブ内地震(MW 7.1, MJ 7.2)による地震動を再現しつつ、既存の断層パラメータ設定方法の適用可能性と問題点を指摘し、併せて問題点の克服に向けた工夫の提案を試みた。

2011年4月7日のスラブ内地震では、笹谷・他(2006)の式あるいは壇・他(2006)の式のまま短周期レベルを与えると地震動評価結果が過小となる可能性があったが、それを避けるために対象地震に関する原田・釜江(2011)の知見を参照・適用して短周期レベルを大きくすると、背景領域のすべり量(地震モーメント)が負になって断層パラメータを設定出来なくなったり、設定出来たとしても不自然なモデルになることが明らかになった。そこで本研究では、この問題に対する工夫・対処方法として、それぞれの式を使い短周期レベルを大きくしつつアスペリティ面積を小さくする方法とクラックモデルを用いる方法の計三通りの方法も併せ示した。

笹谷・他(2006)および壇・他(2006)の方法に三通りの工夫案を加えたこれらの計五通りの方法を用い、2011年4月7日の宮城県沖のスラブ内地震の断層モデルを設定し、経験的グリーン関数法によりKiK-netの観測点での強震動を評価し、観測記録との比較も交えて検討した。その結果、笹谷・他(2006)および壇・他(2006)の方法では、特に震源に近い地点では観測記録に対して地震動評価結果が小さめになったが、上述の工夫を施した場合には観測記録の説明性が改善された。

キーワード: スラブ内地震, 強震動予測, 断層モデル

Keywords: Intra-slab earthquakes, Strong motion prediction, Fault model

三次元速度構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の震源過程解析 Source Process Analysis of the 1995 Kobe Earthquake Using 3-D Velocity Structures

郭 雨佳^{1*}, 纈纈 一起¹, 大野 大地²
Yujia Guo^{1*}, Kazuki Koketsu¹, OHNO, Taichi²

¹ 東京大学地震研究所, ² 応用アール・エム・エス株式会社

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²OYO RMS Corporation

1995年1月17日、明石海峡の直下を震源とする兵庫県南部地震(M_{JMA} 7.3)が発生し、甚大な被害をもたらした。この地震では、神戸の市街地の「震災の帯」と呼ばれる地域に震度7の非常に激しい揺れが集中した。その生成には、この地域に特有な三次元速度構造が深く関わっていることが既存の研究(e.g., Kawase, 1996; Furumura and Koketsu, 1998)によって明らかになっている。これは、三次元速度構造が強震動に大きな影響を与えることを意味するだけでなく、強震動などのデータを用いてこの地震のより詳細で精度の高い震源像を求めるためには、三次元速度構造を考慮に入れることが不可欠であることを意味している。しかし、過去に行われた震源過程解析では一次元水平成層構造モデルや半無限構造モデルが仮定されており、三次元速度構造の影響が十分に検討されてこなかった経緯がある。

そこで本研究では、三次元速度構造の影響を受けていると考えられる、大阪平野の堆積盆地内に位置する強震および測地観測点に対して、三次元速度構造モデルを用いてグリーン関数を計算した。そして、強震記録・遠地実体波・測地記録のデータセットを用いてジョイントインバージョンを実行して震源過程の解析を行った。なお、三次元グリーン関数の精度を保つため、ジョイントインバージョンを行う前には、余震の観測波形を用いて既存の三次元速度構造モデルを改良し、より精度の高いモデルを構築した。

得られた震源モデルを先行研究の一つであるYoshida *et al.* (1996)と比較すると、地震モーメントと最大すべり量ともに、本研究のほうがやや大きかった。次に、すべりの空間分布を比較したところ、神戸直下に大きなすべりの領域が明瞭に現れたことや、淡路島側の断層浅部におけるすべり量が大きいなどの違いが見られた。これらの違いは、神戸側の甚大な被害や淡路島の野島断層に出現した地表地震断層などと整合的である。また、三次元グリーン関数を計算した強震観測点については、余震記録を用いて改良された三次元速度構造モデルを解析に使用することで、観測波形に対する再現性が改善されたことを確認した。

キーワード: 震源過程, ジョイントインバージョン, 三次元グリーン関数, 速度構造

Keywords: Source process, Joint inversion, 3-D Green's function, Velocity structure

東日本大震災で発生した広範な液状化被害に及ぼす本震 - 余震時間間隔の影響 Main shock-aftershock interval effect on the liquefaction damage in Tohoku Region Pacific Coast Earthquake

浅岡 顕^{1*}, 野田 利弘², 中井 健太郎²

Akira Asaoka^{1*}, Toshihiro Noda², Kentaro Nakai²

¹ 公益財団法人 地震予知総合研究振興会, ² 名古屋大学

¹ Association for the Development of Earthquake Prediction, ² Nagoya University

3.11 地震では、浦安市をはじめとして、東京湾沿岸部の埋立て地盤において液状化現象が広範囲に発生した。その特徴として、1) 震源から離れており、観測された加速度はさほど大きくないにもかかわらず、浦安市のように甚大な液状化被害が多く発生したこと、2) 従来は液状化しにくいと考えられていた細粒分を多く含む地層でも液状化が発生したことが挙げられる。その原因として、地震動が長く継続した点がよく指摘されているが、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 さえも大きな被害を受けた可能性があることを示してきた^{1),2)}。

上記 1)2) 以外にも、本震からわずか 29 分後に茨城県沖で最大震度 6 強の余震が発生し、液状化被害が拡大したことも本震災の特徴として挙げる事ができる。本稿では、本震 - 余震時間間隔に着目し、実際と同様に 29 分後に余震が発生した場合と、仮に 1 日後に余震が発生した場合の液状化被害に与える影響を数値解析的に検討している。なお著者らはこれまで資料不足から、土の弾塑性性状はそれらしい仮想のものを用いていたが、本稿では、浦安市で実施したボーリング調査および同地点から採取した不攪乱試料の各種力学試験を SYS カムクレイモデル³⁾ で再現し、浦安市軟弱地盤の正確な弾塑性定数を用いている。新しい定数を用いても、粘土層厚の差異が表層の液状化の程度に大きく寄与していたことは確認済みである (図 1(a))。図 1(b) は、余震が 29 分後に発生した時の時間 - 過剰間隙水圧比関係である。粘土層厚の薄い D 地盤では、本震・余震ともに液状化していないが、粘土層厚の厚い A, B 地盤では、本震だけでなく余震でも再度、液状化が発生している。C 地盤は本震では液状化しなかったものの、本震 - 余震間での過剰間隙水圧の消散が不十分だったため、余震時に液状化してしまっている様子がうかがえる。図 1(c) は、仮想的に余震が 1 日後に発生した時の時間 - 過剰間隙水圧比関係である。本震 - 余震間に過剰間隙水圧の消散が進んだため、余震ではいずれの地盤においても液状化は発生していない。以上から、深部に堆積する粘土層厚の差異による加速度の増幅特性の違いが過剰間隙水圧の上昇の程度にも影響を与え、本震と余震における液状化発生の有無にも寄与した可能性を示した。これは、東日本大震災における本震 - 余震間隔の短さが、東京湾沿岸部埋立て地盤の液状化被害を拡大させてしまったことを示唆している。一連の解析は、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 GEOASIA⁴⁾ によるものである。また、入力地震動は浦安市から比較的近い東京都港湾局品川観測所での観測データを用いて実施した。

1) 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. (in Japanese).

2) Asaoka, A., Noda, T. and Nakai, K. (2011): Non-uniformity of Surface Layer Liquefaction Damage Caused by Layered System Organization and Dip of Deeper Layer, Japan Geoscience Union Meeting, SSS37-06.

3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57.

4) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol. 48, No. 6, pp. 771-790.

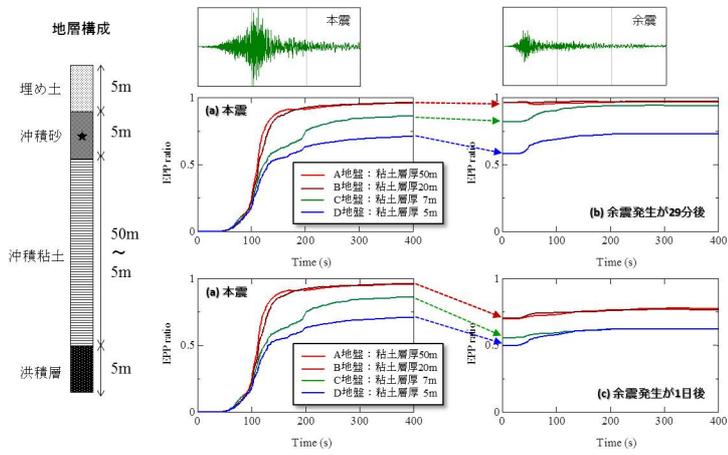
キーワード: 液状化, 粘土層厚, 本震 - 余震間隔, 弾塑性地震応答解析

Keywords: Liquefaction, Clay layer thickness, Main shock ? aftershock interval, Elasto-plastic seismic response analysis

SSS33-P24

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30



経験的グリーン関数を用いた地震動の合成結果にみられる非線形性の影響について Effect of the non-linearity of the ground in synthetic ground motion by using Empirical Green's Function

返町 雄一^{1*}, 山中 浩明¹

Yuichi Sorimachi^{1*}, Hiroaki Yamanaka¹

¹ 東京工業大学 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

¹Tokyo Institute of Technology

日本は世界でも有数の地震大国であり、現在地震被害の軽減という観点から強震動を検討・評価する事は大変重要な課題となっている。一般的に工学的な地震動評価問題では0.1秒から10秒程度の周期帯域で地震動を検討することが求められる。このうち、強震動で1秒未満の周期をもつ地震動は、アスペリティと呼ばれる強震動生成領域から来るものであり、これら短周期成分は伝播経路特性の影響を強く受けるため、理論的に求めるためには膨大な地下構造のデータや計算量が必要になってくる点などから、もっと汎用性が高い評価方法が求められている。今回は経験的グリーン関数法を用い、得られた震源モデルから再度、周辺観測点での本震を合成・再現し、観測波形との差から地盤の非線形性の影響を評価することを検討した。

日本で発生した5つの地殻内地震について、過去にインバージョンによって得られた震源モデルを用いて、K-net観測点で観測波形と合成波形を比較する。この時には、既往の研究で得られている震源モデルを良く近似する、特性化震源モデルを用いた。まず、観測・合成波形を比較する事により、観測点での地盤の非線形性がどのように表れているのかを調べた。観測波形のPGA・PGVの大きさに対し、合成波形のPGA・PGVの再現度合いを確認すると観測波形のPGAが200gal以上、PGVが10kine以上である時に、合成波形が観測波形から大きくずれる傾向があることがわかった。そこで各観測点の地盤の非線形性を定量評価するため、DNL(本震と余震時のH/Vスペクトルの比を各周波数領域で足し合わせたもの)を用い、観測波形のPGAの大きさと非線形性の関係を調べた。すると、PGAが200以上を観測した地点では、DNLが6以上となっており、200gal以下の観測点ではDNLが4程度であることから、DNLが地盤の非線形性を評価する指数として最適であることがわかった。これは既往の研究(野口2009)の結果とも一致する。次に、各観測点の地下20mまでの平均S波速度であるVs20を用いて各観測点の地下構造の違いが観測と合成のPGA比とPGV比にどのように影響があったのかを評価した。この結果では、Vs20の違いに関わらず、比は大きくばらつきが出てしまっていた。この事の原因として、震源モデルをアスペリティのみの特性化震源モデルと置いたため、全ての観測点で充分に良いモデルではなかった事、地盤増幅特性の評価とは別に震源破壊過程の影響が含まれていた可能性がある。

今回の事から、本震時に強く揺れが発生した地域では地盤の非線形性の効果がより強く出ている傾向があり、観測波形と合成波形との差を定量的に評価し、経験的グリーン関数法による結果に加える事で、より適切な地震動の強さの評価ができる可能性がある。また、現在は波形再現の評価はPGA・PGVを使っているが、実際の観測波形では瞬間的なパルスによる影響が入ってしまうため、スペクトル積分値や計測震度などの評価基準を用いることを検討する。

本研究を行うにあたり、過去に起きた地震の震源モデルは既往の研究により求められているモデル・パラメータを参考にさせていただきました。また、(独)防災科学研究所のK-net及びKiK-netの各観測点地震記録を使わせて頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

キーワード: 経験的グリーン関数, 非線形性, DNL, 強震動

Keywords: Empirical Green's Function, non-linearity of soil, DNL, strong motion

震度分布を用いた即時震源域推定

Rough and rapid estimation of rupture area for gigantic earthquakes from seismic intensity distribution

上野 寛^{1*}, 勝間田 明男¹, 甲斐田康弘², 横田 崇¹

Hiroshi UENO^{1*}, Akio Katsumata¹, Yasuhiro KAIDA², Takashi YOKOTA¹

¹ 気象研究所, ² 応用地質株式会社

¹Meteorological Research Institute, ²OYO Corporation

気象研究所では、海溝沿い巨大地震発生直後にその震源断層の広がりや断層のすべり分布を把握する手法開発を行っている。巨大地震の震源域のおおよその広がりを地震発生直後に把握できる手法として、横田・甲斐田(2011)は震度分布から推定する手法を提案した。今回、この手法を用いて、より早く解析できるかどうか、また過去の地震についても適用できるかどうかを検証したので、報告する。

2011年東北地方太平洋沖地震において、経験的手法である震度の距離減衰式から求められるモーメントマグニチュード(M_w)は8.2~8.3程度である(例えば、南海トラフの巨大地震モデル検討会、2012)。この飽和する特性を利用して、M_w8.0を超える地震を対象に、震度分布から震源域を推定する手法を横田・甲斐田(2011)は提案した。この手法はプレート境界面上における仮定された震源と観測点の距離とM_w8.0とした場合の距離減衰式から計算される断層最短距離との関係から、震源域ではないと判断されるプレート境界面上のポイントを探るものである。横田・甲斐田(2011)では観測点側から見て反対側(沖合側)の震源域の広がりについての情報がないため、海溝軸より沖合までの広い範囲までを震源域として推定してしまっていた。また、遠くの小さい震度のデータも使用していたため、解析可能となる時間は遅くなる。東北地方太平洋沖地震の場合だと、解析可能開始時間は地震発生時から7, 8分以上を要してしまう。今回はある設定値(今回4.5と設定)以上の震度のみを用いて、この手法で推定された震源域について議論する。大きい震度のみを使用することにより、東北地方太平洋沖地震の場合だと、解析可能開始時間は3分程度に短縮することが出来た。また、ある程度大きい震度を観測するためには、近い距離である必要があるため、従来の方法では沖合側に推定していた震源域広がりを抑制することが出来た。

なるべく短時間に震源域を推定できるよう、東北地方太平洋沖地震、十勝沖地震及び過去の大地震について検証を行ったので、報告する予定である。

キーワード: 震源域推定, 震度分布

Keywords: Rapid estimation of rupture area, seismic intensity distribution

長周期地震動の継続時間の面的分布について The Surface Distributions of the Durations of the Low Frequency Seismic Waves

武藤 大介^{1*}, 勝間田 明男¹

Daisuke MUTO^{1*}, Akio Katsumata¹

¹ 気象研究所

¹ Meteorological Research Institute

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震をはじめとする大地震の際に、概ね周期 2 秒以上の長周期地震動が観測され、高層ビルや長大構造物において被害が発生する事例もあった。しかしこれまで、観測された長周期地震動について、気象庁から発表する手段がなかった。そこで平成 23 年以降、気象庁では長周期地震動に関する情報のあり方等を検討してきており、今後情報を発表する方針である。

強震動の場合、一般には震度が、事業者等の高度利用者では加えて PGA、PGV などがよく用いられている。これに対して長周期地震動の場合には、まずいくつかの代表的な周波数の最大速度 (最大振幅) が重要となろう。また、長周期の地震動は短周期のそれに比べて減衰が遅く、揺れが長時間継続するため、その継続時間等の時間履歴が重要と考えられる。

震度については全国に約 4300 点ある震度計によって面的に密に把握することができる。しかし長周期地震動の把握に有用な早期に時系列データを入手できる強震計については、独立行政法人防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net、F-net と気象庁の強震観測網をあわせても約 1500 点しかない。これらのデータから各地の長周期地震動を推定しなければならない。武藤・勝間田 (2012) は、深部地盤モデルの一次固有周期等を用いて、最大速度を面的補間することを提案したが、地震動の時系列についても同様に既知の構造を用いて補間することが出来るか検討した。

長周期地震動の時系列については、(1)P 波到達時刻から最大速度出現時刻までの時間、(2)大きな地震動が継続する時間、の 2 つの値を検討対象とした。このうち (2) については、様々な定義が考えられる。たとえば、ある閾値以上の振幅が観測されている時間長を求める方法や、地震波のエネルギーを積算し、地震動が収束するまでのエネルギーに対して一定の割合を超えた時間を取る方法 (より短周期の波については、たとえば、Izutani and Hirasawa(1987)、Lomax(2005) など)、波形を包絡型モデルに当てはめてそのパラメータを求める方法 (加速度波形については、たとえば、佐藤・他 (1994) など) などがある。ここではまず、Izutani and Hirasawa(1987) の方法を用いて、速度応答時系列の継続時間を求めた。周期 0.2 秒の速度応答時系列から求めた P 波の継続時間と、周期 2~10 秒の速度応答時系列から S 波および表面波の継続時間の比は、周期ごとに観測点によらず概ね一定であることを明らかにした。一方で、ある閾値以上の振幅が観測されている時間長は、既知の構造との間に相関があることが分かった。この 2 点を利用すれば、ある観測点における短周期地震動の継続時間から、その周囲の長周期地震動の継続時間を予測することが出来る。発表では予測精度と問題点についても考察する。

謝辞:

この研究には、独立行政法人防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net、F-net のデータを使用した。

参考:

武藤大介・勝間田明男, 2012, 長周期地震動の面的分布の即時把握について, 日本地震学会秋季大会, P2-52.

Izutani, Y. and T. Hirasawa, 1987, Use of strong motion duration for rapid evaluation of fault parameters, J. Phys. Earth, 25, 171-90.

Lomax, A. 2005, Rapid estimation of rupture extent for large earthquake: Application to the 2004, M9 Sumatra-Andaman mega-thrust, Geophys. Res. Lett., 32, L10314.

佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明, 1994, ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 461, 19-28.

キーワード: 長周期地震動, 地震動継続時間, 深部地盤構造

Keywords: low frequency seismic wave, ground motion duration, deep subsurface structure

岩手県奥州市前沢区における超高密度アンケート震度調査と微動探査による浅部 S 波速度構造 Ultra high density questionnaire seismic intensity survey and the shallow S-wave velocity structures

山本 英和¹, 高倉 恵¹, 齊藤 剛^{1*}
Hidekazu Yamamoto¹, Mugumi Takakura¹, Tsuyoshi Saito^{1*}

¹ 岩手大学工学部
¹ Faculty of Engineering, Iwate University

岩手県奥州市前沢区は、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では被害はなかったもの、平成 23 年 4 月 7 日に発生した余震では多数の住宅被害が発生した。この被害の差の原因を調査するため、本研究では超高密度アンケート震度調査、1 点 3 成分常時微動観測、極小微動アレー観測を実施した。

区域内の詳細震度分布を解明するために、前沢小学校、前沢中学校、前沢行政区を対象に 3 月本震及び 4 月余震の超高密度アンケート震度調査を実施した。奥州市前沢区の震度計設置位置での 250 m メッシュで平均化した震度は、3 月の本震で 5.5、4 月の余震で 5.5 であった。気象庁が発表した奥州市前沢区の震度は 3 月の本震で 5.5、4 月の余震で 5.8 とどちらも震度 6 弱であり、両者はほぼ一致した。住宅被害が多かった前沢区五十人町では、3 月の本震では震度 5 強と震度 6 弱が分布するのに対し、4 月の余震では震度 6 弱と 6 強が分布し、その大半を震度 6 強が占めていることがわかった。

次に、地盤振動特性を解明するために、前沢区中心部において全 56 箇所て 1 点 3 成分常時微動観測を実施した。住宅被害が多い前沢区五十人町と二十人町の微動の H/V スペクトル比が、5.0Hz 付近で卓越する特徴がみられた。またこの卓越周波数が存在する周波数帯の速度振幅の大きさは、住宅被害が多い五十人町と二十人町の観測点がそれ以外の観測点よりも大きいことがわかった。

浅部地盤構造を明らかにするために、前沢区中心部において全 19 箇所て小規模サイズの微動アレー観測を実施した。取得した微動データから算出した位相速度より導いた疑似 S 波速度構造及び推定 S 波速度構造をみると、五十人町に位置する観測点の多くは、深さ 0~2m で S 波速度が約 100m/s と非常に遅いことがわかった。

前沢区における既存のボーリングデータや表面波探査結果とを比較し、本研究におけるアンケート震度調査や微動観測の有効性を検討した。その結果、微動アレー観測から導いた浅部の推定 S 波速度構造とボーリングデータや表面波探査結果が一致する観測点が多数存在し、半径が小さい微動アレー観測であっても浅部地盤の速度構造を推測するには有効であることが示された。また対象地域の前沢区中心部は狭い範囲で地盤内の速度の変化が急激であることが示された。岩手県奥州市前沢区中心部の 2011 年 4 月 7 日の地震により住宅被害を受けた地域の地盤は、堅い基盤の上に軟弱地盤が薄く重なっていると推測できる。

キーワード: 平成 23 年東北地方太平洋沖地震, 2011 年 4 月 7 日の余震, アンケート震度調査, 地震被害, 岩手県奥州市前沢区, 微動アレー探査

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, aftershock at April 7 in 2011, Questionnaire Seismic Intensity Survey, earthquake damage, Maesawa Town, Oshu City, Iwate Prefecture, microtremor array survey

液状化発生率と強震継続時間の関係の検討

Relationship between liquefaction occurrence ratio and strong ground motion duration

先名 重樹^{1*}, 若松 加寿江², 松岡 昌志³
Shigeki Senna^{1*}, Kazue Wakamatsu², Masashi Matsuoka³

¹ 防災科学技術研究所, ² 関東学院大学, ³ 東京工業大学
¹NIED, ²Kanto-Gakuin Univ, ³Tokyo Tech Institute

1 はじめに

東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけての極めて広い範囲で液状化が発生した。特に関東の被害範囲・規模は非常に大きなものであった。被害が大きくなった理由について、今回の地震の余震を含めた継続時間の長さが液状化の発生率と被害規模を大きくしたとの研究報告もなされている。本報告では、液状化の発生率について、311地震の地震動の継続時間の影響の検討を目的として、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体の地震計の波形記録から、震度および功刀・他(2008)による「リアルタイム震度」を計算し、液状化発生地点のデータと松岡・他(2011)の液状化発生率を計算する手法を用いて継続時間の長さが液状化に与える影響を検討した。

2 計測震度とリアルタイム震度分布の計算について

継続時間の考慮をするにあたり、まず、松岡・他(2011)による、液状化発生率の計算方法に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震の液状化発生地点に基づく、液状化発生率を計算した。なお、311地震については、海岸付近は津波により液状化の痕跡が明瞭ではない(または、調査が十分ではない)ことから、津波被害エリアの微地形区分を除いて評価した。入力としての地震動強さの指標は、計測震度とし、地形・地盤分類 250m メッシュマップから推定した地盤の平均 S 波速度 (V_{s30}) による地盤増幅率を考慮した上で空間補間したものから地表の計測震度を求めている。継続時間の考慮については、功刀・他(2008)の「リアルタイム震度」を用い、液状化が発生する計測震度 4.5~5.0 をターゲットとして、その震度よりも大きくなる部分の面積 (I_s) を求め、その面積の大きさが液状化を発生させる継続時間とみなし、各々の地震について液状化発生率との比較を行った。使用した強震観測記録については、防災科研の K-NET、KiK-net、気象庁および自治体震度計等の地震観測記録を筆者らが独自に収集しデータベース化したものを使用した。

3 液状化発生率と継続時間との関係

計測震度区分における液状化発生率(液状化メッシュ数/全メッシュ数)を微地形区分ごとに計算した。ここで、発生率とはメッシュ内で液状化が 1ヶ所以上発生する割合を示す。なお、全メッシュ数が 10 個未満については算出される発生率の信頼性が低いと考えて検討対象外とした。計測震度と液状化発生率の関係と比較した結果、埋立地・旧河道・干拓地については、松岡・他(2011)の結果よりも発生確率が全体的に大きく、やや低震度から液状化が発生し始めているように見える。また、関東地方と東北地方を比べると、関東地方のほうがより発生確率が大きく、東北地方の結果は、相対的に小さくなっている。一方、継続時間 (I_s) は、東北地方は非常に大きく、関東地域はそれに比べて小さいことが分かった。これらの結果より、液状化発生率と強震動継続時間の関係を東北地方と関東地方で比較すると、関東地方の方がより低震度・低継続時間で液状化が発生したということが明らかになった。

4 まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震における、微地形毎の液状化発生率と計測震度および継続時間の関係を検討した。その結果、特に液状化が発生しやすい微地形において既往の結果よりも発生確率が大きくなり、強震動継続時間の大きさも液状化発生率に影響を与えることが分かった。液状化の発生率や強震動継続時間による液状化の発生状況は、東北地方と関東地方で大幅に異なることから、今後地域性の考慮した検討を行い、新しい液状化発生率の関係式およびマップを作成する予定である。

謝辞

各自治体における強震観測記録およびソフトウェアを提供していただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- ・先名重樹、長谷川信介、前田宜浩、藤原広行：東北地方太平洋沖地震における利根川流域の液状化被害、日本地震工学会論文集「東北地方太平洋沖地震特集号」掲載予定
- ・国土交通省関東地方整備局：東北太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明(報告書)、<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/>
- ・松岡昌志、若松加寿江、橋本光史：地形・地盤分類 250m メッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法、日本地震工学会論文集、第 11 巻、第 2 号、2011 年、pp.20-39.

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-P29

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

・若松加寿江：2011年東北地方太平洋沖地震による東北地方の液状化地点の地形・地盤特性, 第47回地盤工学研究発表会発表論文集, 2012年、pp.1505-1506.

・若松加寿江、松岡昌志：地形・地盤分類 250mメッシュマップ全国版の構築、日本地震工学会大会-2008梗概集、2008年、pp.222-223 (デジタルデータは <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)

キーワード: 液状化, 液状化発生率, 強震継続時間, リアルタイム震度, 微地形区分

Keywords: Liquefaction, Liquefaction occurrence ratio, Strong ground motion duration, Realtime intensity, Geomorphologic classification

携帯情報端末を利用したクラウド型地震センサネットワークの実証実験 On-site experiment of seismic monitoring network by utilization inside sensors of mobile terminal

内藤 昌平^{1*}, 東 宏樹¹, 先名 重樹¹, 吉澤 睦博¹, 中村 洋光¹, 藤原 広行¹, 吉田 稔²

Shohei Naito^{1*}, Hiroki Azuma¹, Shigeki Senna¹, Mutsuhiro Yoshizawa¹, Hiromitsu Nakamura¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Minoru Yoshida²

¹ 防災科学技術研究所, ² 白山工業株式会社

¹NIED, ²Hakusan Corp.

スマートフォンやタブレット端末、携帯型音楽プレーヤなどの携帯情報端末には小型、軽量かつ安価な MEMS 型加速度センサが使用されており、通信機能やバッテリー等も標準で搭載されている。このような普及率が高い携帯情報端末を地震観測に利用し、観測した地震記録を即時にクラウドサーバ上で集約することができれば、観測の専門知識を持たない一般の方でも局所的な揺れの情報を記録することができる。また、多点に展開されたセンサ情報を利用者がクラウド上で共有することで個人・地域コミュニティの防災意識向上および建物・地盤の揺れやすさに対する情報の蓄積、建物耐震化の促進等に役立つ効果が期待される。このようなクラウド型地震センサネットワークシステムの実験として、iPhone/iPad/iPod touch に内蔵されている MEMS 加速度センサを利用した試験的な地震観測システム「i 地震クラウドシステム（以下、「i 地震）」が 2010 年 8 月一般向けに公開された。（吉田ほか,2011 日本地球惑星科学連合大会）

これまで茨城県つくば市内の地震計台上における K-NET02 型強震計との並行観測試験や 3 軸振動台による 0.5 ~ 10Hz、最大加速度 1500gal の正弦波加振実験の結果から「i 地震」を使用した観測では MEMS センサ自体が発生する ± 5gal 程度のノイズがデータに影響を及ぼすものの、計測震度 2.5 以上の演算に関しては ± 0.1 程度の誤差範囲内で算出する性能があることが確認されている（内藤ほか,2012 日本地震工学会年次大会）。

今回この「i 地震」を利用した携帯情報端末に搭載されている MEMS 加速度センサの性能や地震観測への適用性についての検討、および地域防災意識向上に向けた実証実験の取り組みについて報告する。

「i 地震」端末の建物の強震観測への適用可能性を検討するため、茨城県つくば市内の建築年代、工法が異なる 2 ~ 3 階建て RC 造建物 5 棟の異なるフロア内に計 2 台ずつ設置し、2012 年 1 月から地震観測を開始した。設置後、最大で震度 4 に相当する多数の地震記録を取得することができた。波形から速度応答スペクトルを算出したところ 1 棟のみ他と比較して応答値が高い建物が確認された。これは東北地方太平洋沖地震時も天井設備等の非構造部材の被害が最も大きく発生した建物であった。別途 JU-310 微動計（白山工業社製）による微動観測を行ったが、H/V スペクトル比でみるとこの建物による増幅率が他と比較して最も大きく、「i 地震」による地震観測記録と調和的な結果となった。

また、社会的な課題点抽出を目的として、2012 年 1 月から神奈川県藤沢市周辺や新潟県長岡市内において地盤や構造種別、築年数、およびネットワーク環境の異なる 30 棟以上の建物内に「i 地震」を設置し、連続観測の実証実験を行っている（東ほか,2012 日本地球惑星科学連合大会）。この実験において設置担当作業は地域と繋がりが深い NPO 法人が担当しており、住宅の揺れやすさに関する情報の蓄積や情報共有による防災意識の向上という設置趣旨に対して好意的に受け止められたケースが多かった一方、通信等設置環境が多様であること、端末を設置することによる住民側の利点がわかりづらいこと、メンテナンスのための人材や計測の安定性の確保が求められること等、多数の課題も散見された。

今後はこれらの課題を解決するようなより高精度かつ信頼性が高い計測システム、あるいは一般の方でも設置するメリットを実感できるようなシステム開発を目指すとともに、この「i 地震」と、非専門家によって得られた微動観測記録を携帯情報端末を利用してクラウド環境にアップロードし自動的に解析を行うシステム「i 微動」（先名ほか,2012 日本地球惑星科学連合大会）とのデータ連携を強化し、地盤と建物それぞれの影響によるハザード情報を可視化するシステムの開発に取り組み、ユーザ主体でデータ提供や情報活用を促進できるようなセンサネットワークシステムのさらなる普及を目指した活動を行う予定である。

キーワード: MEMS, クラウド, センサネットワーク, 実証実験

Keywords: MEMS, Cloud, Sensor Network, On-site experiment

地震動評価のための岩石コアを用いた室内試験による減衰評価の適用性 Attenuation measurements by laboratory tests using rock core samples for earthquake ground-motion estimation

佐藤 浩章^{1*}, 野口 科子¹, 岡田 哲実¹

Hiroaki Sato^{1*}, Shinako Noguchi¹, Tetsuji Okada¹

¹ 電力中央研究所

¹ Central Research Institute of Electric Power Industry

はじめに

岩盤の減衰評価は、地震学では震源特性の評価、建築・土木工学では硬質地盤上の構造物の耐震設計用入力地震動を評価するサイト特性に重要となる。地震観測から得られる地表に近い岩盤の減衰は亀裂や不均質によって高減衰 (Low Q) となることが知られており [例えば Abercrombie(1997)], 耐震設計においては実際の岩盤の状況 (亀裂や不均質等) に応じて付加される減衰効果を適切に評価できることが望ましい。そのための一つの方策として、顕著な亀裂や不均質が存在しない岩石コアによる減衰を測定するとともに、実際の岩盤で地震波により評価される減衰との差異を明確にして、それらを岩盤の状況に応じて整理することが有効と考えられる [佐藤 (2012)]。

そこで本稿では、岩石コアの減衰測定として、同一の岩石コアに対して実施した超音波計測による減衰測定結果と一軸圧縮の繰り返し変形試験による応力ひずみの履歴曲線から得られる減衰測定結果に基づき、地震動評価のための減衰評価における岩石コア試験の適用性を検討した。

岩石コアの室内試験

試験に用いた岩石コアは、GL-131 m ~ -132 m (標高約-10 m) の位置で採取された白亜紀後期から古第三紀の江若花崗岩 (花崗斑岩) で、佐藤・岡田 (2011) で用いられたコアと同一で、直径 50 mm、高さ 100 mm の円筒形の供試体 4 本 (湿潤密度 2.6g/cm³) である。

(1) 超音波計測試験

超音波計測は、100 kHz の捻り波による S 波タイプの発振器を用い、供試体の上下に発振器と受振器をグリセリンペーストを用いて接着して実施した。発振器への入力電圧は 900 V、供試体に対しては 1 MPa の一軸載荷条件下で計測を行った。受振波はサンプリング間隔 100 MS/s で収録し、128 回スタックした波形を減衰評価に用いた。超音波計測の結果、S 波速度は約 3000m/s であった。

(2) 一軸圧縮繰り返し変形試験

一軸圧縮繰り返し変形試験は、無拘束圧状態で空圧サーボ載荷装置を用いて、周波数 0.1Hz の正弦波の繰り返しにより実施した。なお、応力ステップは 10 通り、ひずみレベルで 4×10^{-7} から 2×10^{-4} の範囲である。データは、ひずみレベル 10^{-6} 以下ではひずみゲージの出力を 20 倍に、 10^{-5} 以上では出力を 10 倍に増幅して、データロガーにて 10Hz のローパスフィルター処理を施して収録した。

減衰評価結果

超音波計測による受振波形を用いた減衰評価は、パルスライズタイム法 [Gladwin and Stacey(1974)] とスペクトル比法 [Toksoz et al.(1978)] を用いた。パルスライズタイム法では、入射波のライズタイムを発振器と受振器を接触させて得た受振波から求め、係数 C を 0.293 [佐藤・岡田 (2012)] として減衰を評価した。スペクトル比法では、減衰が既知の同サイズの供試体としてアルミニウム ($Q=150000$ [Zamanek and Rundnik(1961)]) をリファレンスとして用い、アルミニウム供試体と岩石コア供試体による受振波のスペクトル比を用いた。4 つの供試体に対する減衰は、パルスライズタイム法で減衰定数 $h=0.009 \sim 0.014$ ($Q_s=37 \sim 54$)、スペクトル比法で $h=0.011 \sim 0.02$ ($Q_s=25 \sim 47$) となり、ほぼ同様の評価結果が得られた [佐藤・岡田 (2012)]。

一軸圧縮繰り返し変形試験による応力ひずみ関係については、ひずみが 2×10^{-5} より小さいレベルでは各供試体ともに繰り返し変形による履歴ループが不安定な形状となり、減衰評価が難しいことが分かった。それ以上のレベルでは、ひずみに対して増加する減衰定数のひずみ依存性がみられ、得られたひずみ範囲において最小の 2.6×10^{-5} で 4 つの供試体に対して $h=0.008 \sim 0.01$ ($Q_s=50 \sim 63$) が得られた。この結果を超音波計測による結果と比較すると、超音波計測のひずみレベルはこれを大きく下回るものであるが、概ね同様の結果が得られたと位置づけられる。このことは、使用した波の対象周波数が、超音波計測で 100kHz、一軸圧縮繰り返し変形試験で 0.1Hz であることから、微小ひずみ域では周波数によらずほぼ同じ減衰の測定結果が得られる可能性を示唆するものである。

以上から、地震動評価 (0.1 ~ 20Hz) を目的とした微小ひずみ域での減衰測定として、超音波計測を用いた測定も有効であると考えられる。今後は、岩石コアによる微小ひずみ域の減衰と岩盤地点における地震 (弱震) 記録による減衰の評価結果から、岩石コアとは異なる実際の岩盤地点に特有の顕著な亀裂や不均質に伴う減衰の付加効果について検討する。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS33-P31

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

謝辞：岩石コアは日本原子力発電(株)より提供を受けた．計測ではダイヤコンサルタントの納谷氏にご協力いただいた．関係各位に謝意を表します．

キーワード: 岩石コア, 減衰測定, 超音波計測, 一軸圧縮繰り返し試験, 地表に近い岩盤, 地震動評価

Keywords: rock core sample, attenuation measurement, ultrasonic wave measurement, cyclic uni-axial compression test, near surface rock, earthquake ground-motion estimation