

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地点の単点微動観測、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 $\partial^2(z) = 0$ 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なるとなるべく、ため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た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。この問題がた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 ϵ_i とし、 $\epsilon_i > 0$ (for $b_i \neq 0$) 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, 減少の割合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て、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る振動数であり、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多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多い。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。

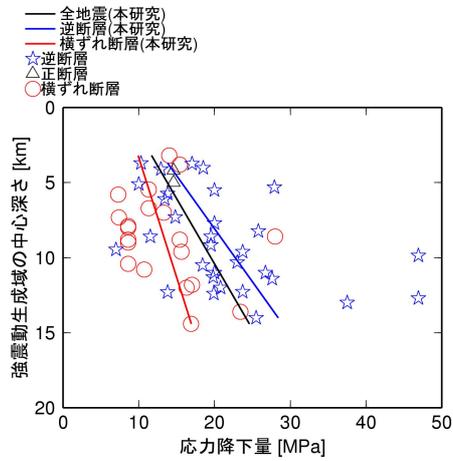
キーワード: 強震動生成域, 応力降下量, 深さ, 経験的グリーン関数法, 地殻内地震

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則(Somerville et al., 1999)に基づいている。このスケール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則は, 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則は, 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*}, 瀧 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.

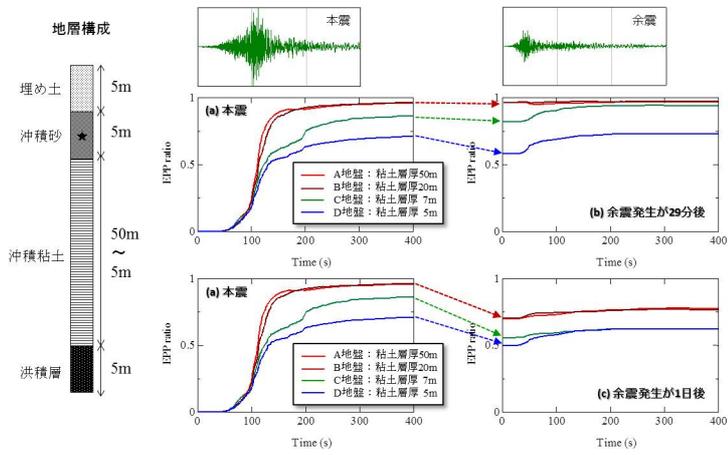
キーワード: 液状化, 粘土層厚, 本震 - 余震間隔, 弾塑性地震応答解析

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を確認された。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