

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS023-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

IISEE 地震カタログのウェブインターフェースの改善 Improvement of web interface of the IISEE earthquake catalog

原 辰彦^{1*}, 横井 俊明¹

Tatsuhiko Hara^{1*}, Toshiaki Yokoi¹

¹ 建築研究所 国際地震工学センター

¹IISEE, BRI

We introduce recent developments of the web interface of the IISEE (International Institute of Seismology and Earthquake Engineering) earthquake catalog, "IISEE's CMTs, Aftershock Distributions, Fault planes, and Rupture processes for recent large earthquakes in the world" (http://iisee.kenken.go.jp/eqcat/Top_page_en.htm). In this catalog, we have been providing earthquake information (CMT, aftershock distribution, fault plane, and rupture process) determined by the analytical techniques developed by the IISEE and visiting researchers since 2008.

We have modified the top of the search page of this catalog so that registered events are shown on the Google Map. Users can select an event on the Google Map, and display earthquake information for that event in another window. In the web interface, we have implemented a function to forward earthquake information to web calculators of PGA, PGV, intensities, etc. using a set of attenuation equations. Calculation results are shown on maps drawn by the GMT (Generic Mapping Tools. Wessel and Smith, 1998). Earthquake source parameters for this calculation can be changed by users for their purposes and conditions such as soil, earthquake type, etc. This improved web interface is now available at our web site as a test version (http://iisee.kenken.go.jp/cgi-bin/eqcatalog.newv4/eqcatalog2_eng.cgi). We plan to implement a function to download calculation results using attenuation equations. Through these developments, we are improving combination among this earthquake catalog, strong motion calculations, and the other earthquake catalog available at our web site, "Catalog of Damaging Earthquakes in the World" (Utsu, 2004. The later updates are added by the IISEE).

キーワード: 地震カタログ, 減衰式, ウェブインターフェース

Keywords: earthquake catalog, attenuation equation, web interface

SSS023-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

強震波形データの即時連続伝送実験 - リアルタイム強震動モニタリングの実現に向けて -

A feasibility study of fast and continuous strong-motion observation

功刀 卓^{1*}, 中村 洋光¹, 青井 真¹, 内藤 昌平¹, 安達 繁樹¹, 藤原 広行¹

Takashi Kunugi^{1*}, Hiromitsu Nakamura¹, Shin Aoi¹, Shohei Naito¹, Shigeki Adachi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ NIED

緊急地震速報をはじめとする現在の地震早期警報の多くは、震源近傍の観測点の地震記録から地震諸元（震央位置、深さ、規模）を推定し、距離減衰式を用いて任意の点の強震動指標（震度、最大加速度、等）を予測する手法をとっている。当然ながら、この予測値は、震源諸元の推定と距離減衰式に起因する誤差を含む。一方で、地震発生から一定の時間が経過すれば各観測点には主要動が到達し、これまで予測対象としていた強震動指標の実測値が観測されはじめる。これらの実測値を予測に組み合わせれば、地震早期警報における強震動指標予測の確度は向上すると考えられるが、そのためには強震動情報をリアルタイムに得る必要がある。防災科学技術研究所では、地震早期警報の高度化および、発災可能性の早期把握に資するため、リアルタイム強震動モニタリングシステムの開発に着手する。このシステムの中核の一つは、強震波形データをリアルタイムで連続収集することである。本講演では、このために行った、K-NET 観測点を利用した強震波形データの即時伝送実験の結果について報告する。なお、本実験で収集している強震波形データは、長周期地震動による長尺物揺れを予測する、超高層建築物への around-site warning system（中村・他、本連合大会）の実証実験において、入力波形（代用波）として用いることも計画している。

K-NET で運用中の強震計は、当初より波形連続伝送の機能を持っている。この伝送はパケット長を 1 秒単位で行うものであったが、今回の実験では伝送の即時性を向上させるためパケット長を 0.1 秒単位で行うようにした。波形フォーマットは WIN32 型式を拡張した強震 WIN32 型式を用いている。通信は TCP を用いて、輻輳制御および伝送順序の保証を行っている。標準的な構成の K-NET 観測点の場合、3 成分の 100Hz サンプルングデータを 64kbs のベストエフォート型回線で伝送している。35 観測点の 38 時間の波形データを対象に伝送遅延について調査したところ、97% のパケットでサンプルングから伝送完了までが 0.2 秒以内であり、パケット長の短縮による伝送の即時性の向上が予想通りに達成されていることがわかった。

キーワード: 強震観測, 強震計, 地震早期警報

Keywords: strong-motion observation, strong-motion seismograph, earthquake early warning

常時微動から建物の応答特性を抽出する新しい方法の提案 A New Method to Extract Building Response Parameters from Microtremor Data

王 欣^{1*}, 入倉 孝次郎¹, 正木 和明¹

Xin Wang^{1*}, Kojiro Irikura¹, Kazuaki Masaki¹

¹ 愛知工業大学

¹ Aichi Institute of Technology

Generally, a building can be considered as a system which is composed of the upper structure, the base, and the supporting ground of the building. Therefore, the response of a building system can be seen as a composition of the response of the upper building (fixed-base building) and the response of rigid-body due to the soil-structure interaction including rocking and horizontal vibration (sway). In order to fulfill the building damage analysis meticulously, extracting the response parameters of (A) the building system, (B) the fixed-base building, and (C) the soil-structure interaction from ground motion records of buildings is very necessary. There have been proposed many methods to extract the building response parameters (A)-(C) respectively. The methods so far used need to have many observation points on the first and top floors. We proposed a simple and easy method to extract all of the building response parameters (A)-(C) from the fewest points, one on the first floor and one on the top of the building. Microtremor records are often used to extract building response parameters, because they can be easily obtained at any time.

The new method to extract the building response parameters (A)-(C) from microtremor records of the 1F and the top of the building is presented based on the Deconvolution method, which was proposed by Snieder and Afak (2006) based on the interferometry method and was improved by Todorovska (2009a, 2009b). It is a very good method to extract the response parameters of fixed-base buildings and the base rocking vibration. The feasibility of this method to extract the response parameters from observed records on buildings during earthquakes has already been proved by the proposers. Based on the deconvolution method, in this paper, a method to extract the response frequencies of the building system (), the fixed-base building (), rigid-body rocking (), and rigid-body sway () from microtremor records on the top and the base of buildings is proposed. The feasibility of our method is examined by comparing the extracted building response parameters from microtremor data recorded on a 6-story building (Building No.2 in the Yakusa campus of the Aichi Institute of Technology) with those extracted from earthquake records on the same building and the numerical analysis results obtained based on the multi-degree-of-freedom model of this building. This method not only makes the extraction of building response parameters easier using only the records of the base and the top floor of buildings, but also provides an approach to extract the S-wave velocity traveling within the buildings using the records of the inter floors.

キーワード: 常時微動, 構造物の応答パラメータ, Deconvolution Method, 被害度, S波伝播速度

Keywords: Microtremor, Response Parameters, Deconvolution Method, Damage Level, S-wave Velocity

SSS023-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

Multiple, Three-Dimensional Interactions between the Ground and a Group of Structures Subjected to Seismic Impact Multiple, Three-Dimensional Interactions between the Ground and a Group of Structures Subjected to Seismic Impact

上西 幸司^{1*}, Ioan R. Ionescu²
Koji Uenishi^{1*}, Ioan R. Ionescu²

¹ 神戸大学都市安全研究センター, ²LPMTM, University of Paris 13

¹Res Ctr Urb Safety & Security, Kobe Univ, ²LPMTM, University of Paris 13

In our earlier study, using a fully coupled, two-dimensional ground-structure model, we have investigated the dynamic interactions between a set of identical buildings in a town and shown the collective behavior of the buildings during a seismic excitation: Due to the multiple interactions through (the waves in) the ground, the eigenfrequencies of the collective building system, i.e., town, become lower than the resonant frequency of a single building. This shift of eigenfrequencies may be called the "town effect" (or "city effect"). Our analysis is different from the conventional ones where each structure is handled individually, and the frequency shifts and "unexpected" structural behavior may be recognized only if the mechanical movement of the structural group is analyzed jointly. In the study, however, we have just considered the anti-plane shearing of a linear elastic half space on which identical buildings, each consisting of an elastic spring that connects a concentrated mass at the top and the rigid foundation at the bottom, stand. In this contribution, we shall briefly summarize some quantitative information about the two-dimensional anti-plane town effect and show its significance by investigating the actual structural damage patterns found on the occasions of several earthquakes in Europe and Japan. Then, we shall further consider the in-plane and three-dimensional cases and generalize the mathematical statement of the related problems. Since the "town effect" may be induced by dynamic structural impact in general (e.g., blasting), the simple analytical models handled here may contain the essential features that will play an important role in evaluating the dynamic performance of a group of structures in urban environments around the world.
Keywords: earthquake hazard, collective behavior, city effect, town effect, dynamic ground-structure interaction

SSS023-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

アンケート震度調査にもとづく2009年12月の伊豆半島東方沖地震の詳細震度分布 Seismic intensity of the two earthquakes (Dec.17-18,2009) off the east Izu Peninsula, based on a questionnaire survey

望月 麻紗樹^{1*}, 小山 真人², 林 能成³

Masaki Mochizuki^{1*}, Masato Koyama², Yoshinari Hayashi³

¹ 静岡大学教育学部, ² 静岡大学防災総合センター, ³ 関西大学社会安全学部

¹ Faculty of Education, Shizuoka University, ² CIREN, Shizuoka University, ³ Faculty of Safety Science, Kansai Univ.

1978年以降46回目となる伊豆半島東方沖の群発地震が2009年12月に発生し、17日23時45分、18日8時45分には伊東市大原で最大震度5弱を観測する大きな揺れが起こった。この地震によって、これまでにない多数の家屋の一部損壊・半壊が伊東市内で発生した。震度5弱の揺れでこれほどの被害が出ることは通常考えにくく、また被害の局地性が強いことから、地盤特性に左右されたとみられる。そこで、伊東市内の詳細な震度分布と地盤特性を調べるために、2010年2月中旬から末にかけて伊東市内の10の小学校の全保護者世帯、ならびに特に被害の大きかった2地区(長美代町、小室1丁目)とそれに隣接する2地区(城星町、小室2丁目)の町内会の全世帯に対して質問紙による調査を行った。それらの設問ならびに震度の算出と気象庁震度への変換は、太田ほか(1998, 自然災害科学)のアンケート震度調査法にもとづいた。

回収された2990枚の調査票の内、2557枚を有効回答とした。なお、12月17日と18日の二つの地震を区別するための設問を用意したが、両地震の発生間隔が短かったことと、地震発生からアンケート調査までやや間が空いたことから、実際の区別は難しかった。そこで、両地震の震源と規模がほぼ同じであることから、両地震を一つの地震とみなして分析した。

伊東市内は地形の起伏が激しいことから、メッシュ単位で平均をとらずに、近傍三点の平均値として各地の震度を求めた。その結果、気象庁の震度観測点のある伊東市大原付近では平均震度5弱(4.6)となって気象庁の発表と一致したが、小室1丁目と長美代町はともに平均震度5強(5.4)、最頻値は震度6弱相当となり、気象庁発表を上回る強い揺れが起きたことが判明した。一方、城星町の平均震度は5強、最頻値は5弱、小室2丁目では平均震度・最頻値ともに震度5弱に留まった。

次に、レーザー測量による1mメッシュの標高データを用いた赤色立体地図、ならびに既存の火山地質図(小山, 2010, 伊豆新聞社など)を用いて、地形・地質と震度分布とを比較した。上記4地区は標高100?150mの平坦な台地上にある。この台地は新第三系の火山岩類を基盤として、その上位を伊豆東部火山群起源の厚さ数m?10数mの溶岩流・火山灰・火山礫層・褐色ロームなどが覆うが、厚い溶岩流に覆われるのは小室2丁目のみである。上記したように震源に近い2地区(小室1丁目、長美代町)の震度が大きい一方で、ほぼ同じ距離にある小室2丁目の震度が小さいのは、厚い溶岩流(小室山火山起源)が強固な地盤をつくっているためであろう。

複数の活断層が破壊する地震の震源モデル化手法の検討 - 地盤条件を考慮した震度分布に基づく濃尾地震の断層モデルと強震動評価 Examination of construction methodology of source model in case of multi-segment rupture

栗山 雅之^{1*}, 佐藤 浩章¹

Masayuki Kuriyama^{1*}, Hiroaki Sato¹

¹ 電力中央研究所

¹ CRIEPI

複数の活断層が同時に破壊した地震の一例である 1891 年濃尾地震の震源像を調べておくことは、連動性を考慮した強震動予測のための震源モデル化手法を確立するために重要である。Kuriyama and Iwata(EPS in press) は、濃尾地震を対象として複数の特性化震源モデル(入倉・三宅, 2001)を構築し、仮定したモデルごとに、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)を用いて地震動を計算して求めた震度と、アンケート調査に基づく震度分布(村松・小見波, 1992)から推定した震度を比較することで、複数の活断層が同時に破壊する地震の震源モデル化手法を検討してきた。彼らが比較に用いたアンケート調査に基づく震度(村松・小見波, 1992)は濃尾平野で空間的に高密度であり、その震度の発生要因を精査することで、濃尾地震の震源像について更に詳細な議論ができると考えられる。

栗山・佐藤(2010)では、濃尾地震時に濃尾平野内で認められた激震域のアンケート調査地点を必須として、地盤の卓越周期と震度・被害率の関係を調べるために常時微動観測を行った。我々はその関係に基づいて表層地盤の影響を取り除いた震度分布を推定した。その結果、震度7の地点は、活断層研究会(1991)が示した伏在断層(岐阜-一宮線)の推定位置の北側部分に沿って直線状に分布することが分かった。これは、愛知県(1998)の反射法探査の結果とも調和的と考えられる。そこで、本研究では、岐阜-一宮線がないとした場合、岐阜-一宮線の全域が活動した場合、および、北側部分のみが活動した場合について強震動シミュレーションを行い、シミュレーション結果による震度分布を用いて 1891 年濃尾地震の震源像について検討する。

強震動シミュレーションを行うための震源モデルとして、広帯域の強震動予測で広く用いられている入倉・三宅(2001)の特性化震源モデルを用いた。ここでは、岐阜-一宮線がないモデル、岐阜-一宮線の全域が破壊するモデル、および、北側部分のみが破壊するモデルという3つのモデルを構築した。尚、Kuriyama and Iwata(EPS in press)を参考に、アスペリティの断層面積に占める割合は、Somerville et al. (1999)に従って22%とし、破壊開始点は温見断層の北西端と仮定した。強震動シミュレーションは、根尾谷断層の南部から濃尾平野南部にかけての地域で、基準地域メッシュ(3次メッシュ)ごとに、統計的グリーン関数法を用いて行った。本稿では、特徴的な被害分布の発生への震源断層の影響を調べる目的で、地震基盤上面での水平成分の加速度波形を計算して震度分布を求めた。尚、速度構造モデルは、堀川・他(2008)を用いている。

本稿では、地震基盤上面でのシミュレーション結果による震度分布と、栗山・佐藤(2010)による表層地盤の影響を取り除いた震度分布を比較した。その結果、岐阜-一宮線が無いとした場合にシミュレートした震度分布では、震度7の地点が直線上に認められた濃尾平野の北西部において、比較的大きな震度が直線状に分布することはなかった。また、岐阜-一宮線の全域が活動したとする場合には、岐阜-一宮線の南側半分の直上周辺で北側部分と同程度の震度が計算され、濃尾平野で見られた震度分布のように、岐阜-一宮線に沿った南北での相対的な震度の差は認められなかった。一方で、北側部分のみが活動した場合のシミュレーション結果による震度の分布は、栗山・佐藤(2010)の震度分布と整合する結果となった。尚、ここでは、地震基盤上面でのシミュレーション結果と比較したが、岐阜-一宮線に沿った南北方向で、地震基盤から $V_s600\text{m/s}$ 相当の工学的地盤までの増幅率のレベルは著しく変化しないため、面的分布の特徴は工学的基盤でも同様のものになると推察される。これについては、今後、地震基盤から工学的基盤までの増幅率を考慮した比較検討を行う。

謝辞 本研究では、濃尾平野の速度構造モデルとして、堀川・他(2008)を使用させて頂きました。

キーワード: 1891年濃尾地震, 常時微動のH/Vスペクトル比の卓越周期, アンケート震度, 強震動評価, 震源モデル化手法
Keywords: The 1891 Nobi earthquake, Predominant period of H/V spectral ratio of microtremors, Questionnaire-based intensity,

Strong ground motion simulation, Source-model construction methodology

震源パラメータのばらつきを考慮した相模トラフ沿いの地震の震源モデルと地震動の予測

Broadband ground motion simulation for great earthquakes along Sagami Trough

関口 春子^{1*}, 吉見 雅行², 堀川 晴央²

Haruko Sekiguchi^{1*}, Masayuki Yoshimi², Haruo Horikawa²

¹ 京都大学防災研究所, ² 産総研 活断層・地震研究センター

¹ DPRI, Kyoto University, ² AFERC GSJ/AIST

関東地震は、陸域直下の比較的浅いところで起きる海溝型巨大地震である。1923年の大正関東地震は、日本で史上最大の被害を生んだ。繰り返し間隔は200年程度であり、重要構造物の寿命と比較すれば十分近い将来に次の関東地震が起こる可能性がある。

我々は、波形インバージョンによる震源モデル (Sato et al., 2005) に、より短波長の不均質を追加して1923年関東地震の広帯域震源モデルを作成し、関東平野の広帯域地震動をシミュレーションし、震度分布や地震動波形の再現に一定の成功を収めた (Sekiguchi and Yoshimi, 2010)。しかし、次に相模トラフ上で起きる地震は、1923年の地震と同じとは限らない。実際、同じく相模トラフ沿いで発生した1703年元禄関東地震は、1923年の大正関東地震の破壊域に加え、さらに東の領域へ破壊が伝播し、その結果、房総半島の地殻変動量や九十九里での津波高が、大正関東地震より有意に大きくなったと解釈されている (松田・他, 1974; 宍倉, 2000; 羽鳥・他, 1973)。

ひとつの震源域で起こる地震は、ほぼ一定の境界条件 (ほぼ一定したプレート境界形状、沈み込み速度など) から生じる固有性と、複雑系に発生する非線形現象が本質的に持つ変動性とを合わせもつと考えられる。例えば福島沖などのプレート境界面上で繰り返し活動しているとされるアスペリティ (永井・他, 2001) は、固有性の現れと考えられる。一方、そのような固有の場があっても、地震破壊がトリガーされる場所、そのときの応力蓄積レベルやその分布が変動することによって、破壊の広がり方が変わり、応力降下量、破壊域、地震規模が変わる。地震動を特徴付けるパルスの周期は比較的安定するかもしれないが、地震動の大きさも、地震動が最大となる地域も変わる。

本研究では、相模トラフ沿いの大地震について、アスペリティ分布は震源域に固有としつつ、各震源パラメータに変動を織り込んで地震シナリオ群を作成し、地震動分布がどのような幅で変化するかを把握する。考慮する破壊域は、相模トラフのうち、大正関東地震の断層面で、かつ、元禄関東地震でも動いたとされる部分、および、その南東側の、大正関東地震では破壊がおよばず元禄関東地震で動いたとされる部分とする。この想定震源域内の固有アスペリティとして、大正関東地震の断層面上には、この地震のインバージョン解析で共通して得られている2つのアスペリティを設定する。それ以外の断層セグメントでは、そのサイズに応じて適当なアスペリティを仮定する。

変動幅を与える震源パラメータは、平均応力降下量、平均破壊伝播速度、破壊開始点位置、すべりと破壊伝播速度の空間的に小スケールの不均質成分である。平均応力降下量と平均破壊伝播速度については、過去の地震の震源モデルのコンパイルから推定される変動量を用い、平均値 ± 1 を変動幅として設定する。破壊開始点については、地震記録から決められた大正関東地震の開始点のほかには、候補地点を挙げる有力な根拠が見つからないため、地震動分布への影響を考えていくつか設定する。

地震動の計算は、工学基盤面を地表とする地震動を低周波数成分と高周波数成分に分け、低周波数成分 (< 0.5 Hz) は3次元差分法 (Pitarka, 1999)、高周波成分 (> 0.5 Hz) は統計的グリーン関数法 (大西・堀家 (2004) を基本に一部改変) で行い、これらを足し合わせてから浅層地盤の応答を等価線形化手法 (DYNEQ: 吉田・末富, 1996) で付加する、というハイブリッド法を採る。3次元差分法計算に用いる地盤構造モデルは、内閣府中央防災会議 (2004) にて使用されているものを採用する。

計算された地震動分布の比較から、関東平野中心部の広い領域で地震動レベルを大きく変化させるのは、応力降下量の変化と破壊開始点の移動であることが分かった。破壊伝播速度の変動幅はあまり大きくないため、影響は相対的に小さい。大正関東地震で破壊の広がらなかった千葉県沖の断層セグメントの影響は、神奈川県から千葉県南部下に広がる大正関東地震の断層セグメントに比べると非常に小さい。

キーワード: 地震動予測, 関東地震, 海溝型地震, アスペリティ, ばらつき

Keywords: ground motion prediction, Kanto earthquake, interplate earthquake, asperity, variation of parameter

規格化短周期エンベロープを用いた想定東南海・南海地震の断層破壊の即時的イメージング実験

Feasibility of near-real-time imaging of the rupture of megathrust earthquakes by normalized short-period envelopes

青木 重樹^{1*}, 吉田 康宏¹, 勝間田 明男¹
Shigeki Aoki^{1*}, Yasuhiro Yoshida¹, Akio Katsumata¹

¹ 気象庁気象研究所

¹ Meteorological Research Institute

1. はじめに

巨大地震の断層の広がりやアスペリティの配置は、津波や強震動の発生に直接結びつく重要な要素であるが、波形インバージョンによる震源過程解析は人の判断を必要とする場合が多く時間を要する。青木・他 [(2010, 地震学会), (2011, 本大会)] は、地震発生直後に人手を介さず迅速にこれらを推定することを目指して、短周期エンベロープの規格化振幅分布を利用した震動源探索手法を開発し、2003年十勝沖地震や1994年三陸はるか沖地震に適用した結果、破壊強度の大局的な時空間分布の把握に成功した。

今世紀前半にも発生が懸念されている東南海・南海地震については、連動して発生した場合、マグニチュードはM8.5前後、断層の全長は500km程度 [地震調査委員会, 2001] となると想定されている。また、複数のアスペリティが存在し、紀伊半島沖の破壊開始点からパイラテラルに破壊が進行すると想定されている。今まで本手法を用いて解析した地震は、高々M8.0程度までで、主としてユニラテラルに破壊が進行したもののみを取り扱ってきた。そのため、このような巨大で複雑な破壊に対して、本手法の適用可能性を調査することは重要であり、本講演ではこの点について理論エンベロープを用いて考察した結果を報告する。

2. 手法

本手法は、断層面の同定を目的に考案された Source-Scanning Algorithm [Kao & Shan, 2007] と同様に、断層面を事前設定することなく、破壊開始点(震源)周辺に3次元的に配置した格子上で、各観測点のエンベロープの最大値で規格化された振幅をS波走時分だけ時刻を戻して足し合わせることで、震源域での時空間的な強度をイメージングする手法である。

今までは、断層長が100km~150km程度の地震を対象としてきたため、震源域全体を単一の観測点グループを用いてイメージングしてきた。しかし、東南海・南海地震のように数百kmにも及び震源域に複数のアスペリティがあるような場合の適用可能性は未知である。そこで本報告では、従来のように震源域を一体として強度をイメージした場合(ケース1)と、震源域を分割して、その周辺の観測点のみを用いて解析した場合(ケース2)の両者を比較することとした。

理論エンベロープについては、中央防災会議(2005)が連動型の強震動予測に用いたアスペリティ分布に基づいたエネルギー時刻歴に、内部減衰を考慮した地震波散乱理論 [Saito et al., 2002, 2005] に基づくエンベロープを畳み込むことにより算出した。

3. 想定東南海・南海地震への適用実験

震源格子は、ケース1の場合、想定震源域とその周辺領域(トラフ軸と平行1000km×トラフ軸と直交200km×深さ95km)に4km間隔で配置した。ケース2の場合は、ケース1の領域をトラフ軸と平行方向に200km間隔で100kmずつオーバーラップさせながらの9分割した。各格子では震源時から180秒間の強度を計算した。理論エンベロープは、気象庁津波地震早期検知網の加速度計と、気象庁および海洋研究開発機構の既設のケーブル式海底地震計の設置点において計算した。

ケース1の場合は、破壊開始点から500km以内の84観測点を用いた。その結果、東南海地震側の最も破壊開始点に近いアスペリティは、おおそイメージ出来たものの、それ以外は最大強度0.7を超えてイメージすることは出来なかった。

ケース2の場合は、各領域内の基準点から250km以内の20~37観測点を用いた。その結果、9か所設定したアスペリティのうち、最も小さな二つのアスペリティを除いて、その時空間的に近接した場所にピークが現れ、その強度は0.7を超えていた。なお、解析領域の端において、偽の強度が出現しやすい傾向があったが、領域を重ね合わせて解析することにより、信頼度の評価を行うことが可能となった。

以上のように、東南海・南海地震のような巨大で複雑な破壊をする地震については、解析領域を分割し、その領域に近接したデータのみを用いたほうが、良好にイメージングを行える可能性があることがわかった。今後は、偽の像の出

現を抑え、分解能を高める領域の設定方法についても検討が必要であろう。

なお、本解析においては、データは震源時から7分程度必要であり、計算時間はIntel Xeon X5550(2.66GHz)を用いてケース1の場合15.4分で、ケース2の場合は、各領域は48~99秒で、全領域合せても約10.6分であった。なお、計算時間については、適切な格子数の設定や処理の並列化を行えば更なる低減が可能である。

キーワード: 即時的処理, 震源過程解析, 数値実験, 東南海・南海地震

Keywords: Near-real-time processing, Source process, Simulation, The Tonankai and Nankai Earthquakes

曲面断層モデルを用いた震源過程解析 東北日本で発生した2つのスラブ内地震への適用

Source inversion using curved fault model: Application to the two intraslab earthquakes in northeast Japan

鈴木 亘^{1*}, 青井 真¹, 関口 春子²

Wataru Suzuki^{1*}, Shin Aoi¹, Haruko Sekiguchi²

¹ 防災科学技術研究所, ² 京都大学防災研究所 / 防災科学技術研究所

¹NIED, ²DPRI, Kyoto Univ./NIED

複雑な断層面形状を持つ地震の震源過程解析を行うために、我々は曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法の開発を行ってきた。同手法では、断層面の通る点列を設定し非一様有理 B スプライン (Non-Uniform Rational B-Spline; NURBS) を用いて補間することにより曲面断層面を構築する。この曲面断層に対し、マルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法を適用して断層破壊過程を推定する。本研究では、強震記録を用いた震源過程解析から断層面が単純な平面ではないことが示唆されている 2003 年宮城県沖の地震 (Wu and Takeo, 2004; 青井・他, 2005) および 2008 年岩手県沿岸北部の地震 (Suzuki et al., 2009) の東北日本で発生した 2 つのスラブ内地震を解析対象として、曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法の適用性、有用性などについて検討を行う。これらのスラブ内地震で観測された波形記録の多くでは、浅部の地下構造により二次的に生成された地震波の影響が小さいため、理論的グリーン関数を用いた波形モデリングに基づいて震源メカニズムの変化を検出することが比較的容易であった。

2008 年岩手県沿岸北部の地震について、まず Suzuki et al. (2009) の提案した 2 枚矩形断層モデルの断層面間の隙間を埋めるように曲面断層モデルを構築し震源過程解析を行った。2 枚矩形断層を用いた解析では北部の断層面に大きいすべりが得られていたが、曲面断層を用いた解析では隙間であった領域まですべりが広がり、最大すべり量は 2 枚矩形断層を用いた結果と比べて小さく推定された。また隙間を挟んだ南部の断層面の断層端に推定されていた面積の小さなアスペリティが、曲面断層を用いた解析では明瞭には見られなくなった。推定された地震モーメントはともに F-net と Global CMT のモーメントテンソル解析による値の 1.3 ~ 1.6 倍ほど大きかったが、曲面断層を用いて推定された値は 2 枚矩形断層を用いた解析の値より 10% ほど小さかった。これらの結果は、矩形断層を用いた解析では手法上の制約のために断層端となっていた領域ですべりが過大に推定されていたが、曲面断層を用いて現実に近い断層形状を考慮したことで妥当なすべり分布を推定できた可能性を示している。しかしながらすべり分布から計算されるモーメントテンソルより震源メカニズム解を描くと、曲面断層を用いた結果は 2 枚矩形断層を用いた結果とほぼ同じ形状をしており、モーメントテンソル解析の結果とは異なっている。2 枚矩形断層モデルは破壊開始点の位置する南部では P 波初動解、北部ではモーメントテンソル解の節面に対応しており、曲面断層モデルもこの形状に基づいて構築されているが、必ずしも断層面の北部の形状がモーメントテンソル解の節面と対応する必要はない。

そこですべり分布から得られるモーメントテンソルとモーメントテンソル解析の結果との差異を小さくすることを目的に、断層面北部の形状の検討を行った。走向を反時計回りに 20 度回転した曲面断層モデルを用いた解析から、当初の曲面断層モデルを用いた解析結果よりもモーメントテンソル解のメカニズムに近い結果が得られた。ただし地震モーメントは当初の結果と同程度であり、モーメントテンソル解の値とは開きがある。今後はモーメントテンソル解との差異を生じる原因を精査し、曲面断層形状の修正を図る。

2003 年宮城県沖の地震については、Wu and Takeo (2004) では傾斜方向に、青井・他 (2005) では走向方向に異なる矩形面を配置した断層面モデルが提案されている。針生・小原 (2005) が均質観測点法を用いて推定した詳細な余震分布を参照すると、深さ断面では深さ方向に傾斜角が変化し折れ曲がるような形状を示し、水平分布では余震域の南部と北部で走向の違いが見られる。この余震分布のように走向、傾斜ともに変化する断層面を構築するには、曲面断層モデルが有効である。そこで P 波初動解、モーメントテンソル解および余震分布を参考に曲面断層モデルを構築し震源過程解析を行った。大局的には 2 枚矩形断層を用いた青井・他 (2005) と整合的なすべり分布が推定された。合成波形は基本的に観測波形に一致しているが、十分に再現できていないフェイズも存在する。1 枚の矩形断層を用いた解析から、再現が充分でない理由は、断層面形状の設定に適切でない点が残っており、震源メカニズムの変化を完全には説明できていないためと考えられる。今後は波形やモーメントテンソルの再現を参照して最適な震源モデルを推定し、解析した 2 つのスラブ内地震についてアスペリティの広がりや応力降下量分布に注目して曲面断層モデルを用いた震源過程解析手法の有用性について検討を行う。

キーワード: 震源インバージョン, 曲面断層, 強震記録, スラブ内地震

Keywords: source inversion, curved fault, strong motion, intraslab earthquake

2008年 Wenchuan 地震における震源モデルの改良 Improvement of Source model for simulating strong ground motions during the 2008 Wenchuan earthquake

倉橋 奨^{1*}, 入倉孝次郎¹

Susumu Kurahashi^{1*}, Irikura Kojiro¹

¹ 愛知工業大学

¹ Aichi Institute of Technology

1. Introduction

The Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 7.9 (United States Geological Survey, USGS) struck the western part of Sichuan Province on 14 May 2008, China, resulting in about 70,000 fatalities as well as huge damage to infrastructures and buildings. Causes of serious damage of structures should be attributed to characteristics of strong ground motions and vulnerability of structures.

The strong motion records during the Wenchuan earthquake will be very useful not only in making source modeling for estimating strong ground motion but also in clarifying the relation between structural damage and strong ground motions through reproduction of ground motions at damage sites. We estimated the characterized source model for simulating ground motions using the empirical Green's function (EGF) method and the hybrid method for the 2008 Wenchuan earthquake (Kurahashi and Irikura, 2010). However, it has some problems. One of the problems is that the ground motions at Wolong station (WCW) in backward direction to Asperity 2 have smaller amplitudes, compared with the observed. Second, the contribution from asperities on the north-east segment to ground motions was not considered. In this study, to improve these two problems, the analysis was performed by the discrete wave number method. This model is a tentative version.

2. Analysis

We adopt basically the characteristic source model for the south-west segment reported by Kurahashi and Irikura (2010). The best model was determined by try and error. We used the observed records at 13 stations including the WCW, SFB and MZQ near the source fault. We find that the observed records at WCW are reproduced considering the rupture starting point of Asperity 2 not at the edge of the asperity area but inside it. This means that the rupture on Asperity 2 propagated not uni-laterally but bi-laterally. As a result, the area of Asperity 2 became larger of fit the observed records in forward direction such as SFB and MZQ as well as those in backward direction such as WCW.

Next, we estimated the contributions of asperities on the north-east segment to ground motions as stations in north-east direction.

There are several observation stations near the northeast segment. Remarkable wave pulses at the stations were not observed.

In this study, the best model was determined by try and error comparing the observed and the calculated motions. As a result, we presumed four asperities at the north-east segment. The stress drops on asperities are taken from 10 to 13 MPa. In future, we attempt to simulate ground motions using the empirical Green's function method.

経験的グリーン関数法と3次元有限要素法による2009年駿河湾の地震の強震動シミュレーション Simulation of Strong Ground Motions during the 2009 Suruga-bay Earthquake using Empirical Green's Function and 3D-FEM

佐口 浩一郎^{1*}, 倉橋 奨², 正木 和明², 入倉 孝次郎²
Koichiro Saguchi^{1*}, Susumu Kurahashi², Kazuaki Masaki², Kojiro Irikura²

¹ 株式会社日本アムスコ, ² 愛知工業大学
¹Nihon Emsco Ltd., Co., ²Aichi Institute of Technology

1. はじめに

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震の際、中部電力浜岡原子力発電所構内において5号機では他の観測点に比べ2倍程度の地震動が観測された。本研究では、鉛直アレイ観測点である3号機(3G1S)の地中観測点(深度150m)における中小地震記録から経験的グリーン関数法により2009年駿河湾の地震の本震時における浜岡原子力発電所直下の入射地震動の推定を行い、NIED(J-SHIS)による深部地盤モデルに中部電力の調査による浅層地盤を反映させた地下構造モデルを用いて3次元FEM解析による強震動シミュレーションを実施することにより、特に地震動の大きかった5号機における本震記録の再現を試みる。

2. 経験的グリーン関数法による入射地震動の推定

既往の震源モデル¹⁾では、原子炉建屋に設置されている観測波形の特徴から、アスペリティ1の解析には8月13日12:42の余震を、アスペリティ2の解析には8月13日18:11の余震をグリーン関数として用いた波形の合成が行われている。本研究においても、同様にこれらの2つの余震を用いて原子力発電所敷地直下の地震基盤内(深度6km)における入射地震動の波形合成を行った。なお、グリーン関数として用いる余震記録は3号機地盤系の記録から1次元重複反射理論により地震基盤における入射波を算出し使用した。3号機において合成した波形は最大振幅および各パルスともに概ね観測波形を再現しており、地震基盤内における入射地震動の合成波形が妥当であると思われる。

3. 3次元有限要素法による深部地盤構造モデル

2009年駿河湾の地震の後、中部電力浜岡原子力発電所の敷地内および周辺地域では、反射法による地下構造探査が実施されている²⁾。本研究では、この反射法探査結果から震源(各アスペリティ)と浜岡原子力発電所が含まれるよう50km×50km×10km程度の領域を3次元地下構造モデルとして新たに構築した。モデル化に際しては、反射法探査結果による浅部地下構造が存在する部分については、反射法探査結果をそのまま用い、探査結果のない部分についてはNIED(J-SHIS)モデルにて補完することによりモデル化を行った。

4. 3次元有限要素法による強震動シミュレーション

3次元有限要素法による強震動シミュレーションでは、局所的な対象領域のみをモデル化し、遠方の震源による地震力と等価な地震力を入射境界面から入力する手法³⁾⁴⁾を用いる。浜岡原子力発電所直下の地震基盤内(深度6km)における入射地震動の3成分を、各アスペリティからの合成波形としてモデル下部境界および震源側の側方境界において平面波として入射させ解析を行った。対象とする周期帯域は0.5秒以上とし、入射角は各アスペリティから入射地震動の合成位置(3号機直下6km)に対しての入射角とした。モデルの外側領域においては吸収領域を設けた。解析の結果、各観測点における観測記録との整合性は概ね調理的であった。

謝辞

本研究では、中部電力 から提供された地震観測記録を使用しています。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 倉橋奨・入倉孝次郎・宮腰研: 近地強震記録を用いた2009年駿河湾を震源とする地震の震源モデルの構築と強震動シミュレーション, 日本地震工学会・大会 - 2009 梗概集, 216-217, 2009
- 2) 中部電力(株): 地下構造調査結果を踏まえた解析用地盤モデルに基づく検討について(検討資料集), 原子力安全保障院, 耐震・構造設計小委員会, 地震・津波・地質・地盤合同WG資料, 合同 W42-1-1, 2010.1
- 3) Jacobo Bielak, Kostas Loukakis, Yoshiaki Hisada, Chiaki Yoshimura: Domain Reduction Method for Three-Dimensional

Earthquake Modeling in Localized Regions , Part I : Theory , Bulletin of the Seismological Society of America , 93 , pp.817-824 , 2003

4)Chiaki Yoshimura , Jacobo Bielak , Yoshiaki Hisada , Antonio Fernandez:Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions , Part II : Verification and Applications , Bulletin of the Seismological Society of America , 93 , pp.825-841 , 2003

キーワード: 経験的グリーン関数法, 3次元有限要素法, 2009年駿河湾の地震, 強震動シミュレーション

Keywords: empirical Green's function method, 3-D finite element method, 2009 Suruga-bay earthquake, simulation of strong ground motions

3次元速度構造モデルを考慮した理論的グリーン関数による2007年新潟県中越沖地震の震源過程解析 Source process inversion of the 2007 Chuetsu-oki earthquake using theoretical 3-D Green's functions

引間 和人^{1*}, 植竹 富一¹

Kazuhito Hikima^{1*}, Tomiichi Uetake¹

¹ 東京電力(株) 技術開発研究所

¹R & D Center, TEPCO

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震(Mj 6.8)では震源近傍に位置する柏崎刈羽原子力発電所(KKサイト)において複数の強震計において大振幅の加速度波形が観測された。これらの観測記録には同じ発電所敷地内であるにも関わらず観測波形の特徴に相違が存在し、特に波形に見られる3つの明瞭なパルスの振幅およびパルス間の大小関係がサイト内の北部と南部の観測記録で異なっていた。東京電力(2008)や徳光・他(2009)は、2次元断面での地震動シミュレーションを行い、サイト内の褶曲構造がこれらの要因の一つであることを明らかにした。それらの結果を受け、早川・他(2011)では、サイト近傍の3次元速度構造モデルを構築し、余震記録のシミュレーションによりモデルの有効性を確認した。

一方、中越沖地震に対する強震記録を使用した震源過程解析では、例えば、引間・纈纈(2008)では観測点毎に最適化された速度構造モデルを使用してグリーン関数を計算してはいるものの、1次元成層構造モデルを仮定しているため、得られた結果の精度・分解能には限界があった。そこで、本研究では、より詳細な震源像を得ることを目標とし、早川・他(2011)により構築された3次元速度構造モデルにより計算されるグリーン関数を使い、あらためて震源過程解析を試みた。

2. 解析データ・解析方法

解析には、引間・纈纈(2008)と同様に震源周辺に設置されたK-NETおよびKiK-netの地中波形記録に加えてKKサイトの観測波形を使用した。K-NET, KiK-net 観測点は加速度波形に0.03~0.5Hzのバンドパスフィルタをかけ積分した速度波形を0.2s間隔でリサンプリングし、KKサイト内の観測波形は、0.03~1.0Hzのバンドパスフィルタを適用し、0.1s間隔のサンプリングとした。

グリーン関数の計算は、KKサイト内の観測点については、早川・他(2011)の3次元速度構造モデルを水平方向50m間隔で格子化したグリッドモデルを使い、速度-応力型のスタガードグリッドによる3次元差分法により計算した。一方、周辺の観測点に対しては、現段階では、使用している3次元速度構造モデルのチューニングが必ずしも十分ではないこと、また計算機能力の制約から計算領域を大きくとることができないため、引間・纈纈(2008)の1次元速度構造と同じものを使用している。なお、引間・纈纈(2008)に比べてKKサイトでのグリーン関数の信頼性は向上していると考えられるため、サイト内の波形のウェイトを他地点に比べて重くして解析を行った。

断層面については、引間・纈纈(2008)と同じ長さ30km×18km、走向=38deg、傾斜=34degの震源から南西に延びる南東に傾き下がる面とした。この断層面を2km×2kmの小断層に分割してmulti-time windowによるインバージョンを行った。なお、芝・他(2011)と同様に走向方向に傾斜角が変化するような断層面についても検討する予定である。

3. 解析結果

予察的な解析では、破壊開始点の南側(破壊開始点とKKサイトの間)、およびKKサイトの南西の沖合に最終すべりが大きな領域(アスペリティ)が存在する結果が得られた。サイト内の観測記録の特徴は十分再現されている。すべり分布の主要な特徴は以前の結果と大きくは変わらないが、南部のアスペリティは以前よりも南側の陸に近い領域に移動した。

しかし、multi-time window解析を行っているため、同じ小断層で複数回のすべりが生じたり、南部で局所的に破壊伝播速度および伝播方向が急変しているように見えるなど、すべりの時間変化は複雑である。これらは解析上の誤差である可能性もあるが、芝(2008)は南部のアスペリティ(第3アスペリティ)での破壊伝播速度の加速または海側からの破壊を指摘しており、それらに対応している可能性もある。

4. おわりに

予察的な結果であるが、3次元速度構造を考慮した解析により、KKサイトでの観測記録を再現可能な結果が得られた。また、他の解析結果(例えば、芝(2008))などとも概ね調和的なすべり分布となっている。しかし、サイト外の周辺の観測点については、3次元速度構造モデルが十分なものとはなっていないため、従来のグリーン関数を使用せざるを得なかった。引き続き構造モデルの改良を行いながら、震源像の精度向上を目指したい。

キーワード: 中越沖地震, 震源過程, 3次元速度構造, 強震動

Keywords: Chuetsu-oki earthquake, Source process, 3-D velocity structure, strong motion

高精度余震分布と三次元速度構造モデルに基づく2007年新潟県中越沖地震の震源モデルの再評価

Source model of the 2007 Chuetsu-oki earthquake based on precise aftershock distribution and 3-D velocity structure

芝 良昭^{1*}, 引間 和人², 植竹 富一², 水谷 浩之², 津田 健一³, 早川 崇³, 田中 信也⁴

Yoshiaki Shiba^{1*}, Kazuhito Hikima², Tomiichi Uetake², Hiroyuki Mizutani², Kenichi Tsuda³, Takashi Hayakawa³, Shinya Tanaka⁴

¹ 電力中央研究所, ² 東京電力, ³ 大崎総研, ⁴ 東電設計

¹ CRIEPI, ² TEPCO, ³ ORI, ⁴ TEPCO

一般に震源インバージョン解析では、断層のすべり分布を求める前提となる初期断層面をメカニズム解や余震分布に基づき先験的に決定しておく必要がある。しかしながら2007年新潟県中越沖地震では、震源が海域に位置していたことや、震源域の地下構造が複雑であったことなどから、本震発生直後における余震の震源決定精度が低く、本震の断層面推定が困難であった。その後、海底地震計による震源直上での余震観測が行われた結果、高精度の余震分布が求められ、本震の断層面は南東傾斜であることが明らかとなっている(Shinohara et al., 2008)。一方で、海底地震計記録に基づく余震分布を詳細に検討すると、本震断層の北部から南部に向かって断層傾斜角が浅くなっているようにも見える。本検討ではこれらの知見を参考にして、断層の傾斜角が変化する曲面断層を初期モデルとして設定し、震源インバージョン解析、ならびに特性化震源モデルを用いた広帯域強震動シミュレーションを実施した。

本検討では、本震断層面を北部、中部、南部の三領域に分割し、北部は傾斜角40度、南部は同30度の平面断層として、両者を繋ぐ遷移領域(中部断層)において傾斜角が徐々に変化するものとした。断層の走向は全領域で39度としている。北部と南部の傾斜角の差は10度と小さいため、中部断層の傾斜角は直線状に変化するものとし、全体として想定している地震発生層(上限6km, 下限17km)の範囲内で余震の断面分布とできるだけ調和するように断層面を求めた。初期断層面全体の断層長は28kmで、北部、中部、南部の各領域はそれぞれ7km, 10km, 11kmである。解析には芝(2008)と同様に、経験的グリーン関数法と焼きなまし法を組み合わせた非線形探索手法を用いた。得られたすべり分布モデルと、1枚平面断層を仮定した芝(2008)のモデルとを比較した結果、すべり量が相対的に大きいアスペリティの位置は、震源に最も近い第一アスペリティがやや北西に移動した以外に大きな変化は見られず、平面断層の仮定はおおむね妥当であることがわかった。さらにインバージョン結果を基に特性化震源モデルを作成し、柏崎刈羽原子力サイト内の原子炉建屋基礎版上観測記録、およびサービスホール鉛直アレイ最深部の記録を対象に広帯域シミュレーションを実施し、モデルの妥当性を検証した。その結果、芝(2008)による平面断層の特性化モデルと比較して、第一アスペリティの面積を20%縮小し、かつ応力降下量を10%低減したモデルが観測記録をよく説明できることがわかった。

一方、柏崎刈羽原子力サイトでは、断層南部のアスペリティから放射されるパルス波の振幅が敷地北部と南部で大きく異なり、断層北部の領域で発生した余震記録を経験的グリーン関数を用いたシミュレーションではこうした差異を再現できないことが問題となっていた。ここではサイト直下の褶曲構造を含む詳細な三次元速度構造モデル(早川・他, 2011)を用いた差分法による理論合成波形と、第三アスペリティ近傍で発生したMw3.5の余震記録から、ハイブリッド法による広帯域の本震波形の合成を試みた。その結果、大振幅のパルス波が観測されたEW成分について敷地北部と南部の観測速度波形記録の違いを定量的に再現することができた。

謝辞: 東京大学地震研究所 篠原教授には海底地震計記録に基づく余震分布データを提供して頂きました。

キーワード: 2007年新潟県中越沖地震, 震源モデル, 余震分布, 三次元速度構造モデル, 震源インバージョン解析, ハイブリッド法

Keywords: the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake, source model, aftershock distribution, 3-D velocity structure model, source inversion analysis, hybrid simulation

2007年新潟県中越沖地震震源域の3次元速度構造モデルの検討 - 柏崎刈羽原子力発電所直下の褶曲モデルの取り込み - Modeling 3D Velocity Structure in the Fault Region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake with Folding Structure

早川 崇^{1*}, 津田 健一¹, 植竹 富一², 引間 和人², 徳光亮一², 南雲 秀樹³

Takashi Hayakawa^{1*}, Kenichi Tsuda¹, Tomiichi Uetake², Kazuhito Hikima², Ryoichi Tokumitsu², Hideki Nagumo³

¹(株)大崎総合研究所, ²東京電力(株), ³東電設計(株)

¹OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC., ²TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, ³TOKYO ELECTRIC POWER SERVICES CO.,LTD.

・はじめに

2007年新潟県中越沖地震(M6.8)では柏崎刈羽原子力発電所において大振幅の地震動が観測された。また発電所サイトの南側では地震動の最大速度が北側に比べて大きく、サイト内でも地震動の相違が認められた(例えば 土方, 2011)。徳光他(2009)では、サイト内の大振幅や地震動の相違の原因としてサイト直下の褶曲構造を指摘している。本研究では、この研究を進展させ、褶曲構造をモデル化した3次元速度構造モデルを構築し、その検証を行った。

・3次元速度構造モデルの作成

独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)による中越地域の広域の3次元速度構造モデル(JNES, 2008)(以後、広域モデル)に、徳光・他(2009)による柏崎刈羽原子力発電所直下の精緻な二次元褶曲構造モデルを補間して作成した詳細な三次元速度構造モデル(以後、ローカル褶曲モデル)を取り込み、新たに3次元速度構造モデルを構築した。

広域モデルの地層は、魚沼層群+灰爪層(S波速度0.70~1.08km/s)、西山層(0.70~1.08)、椎谷層(0.84~1.68)、上部寺泊層(1.87)、下部寺泊層(2.20)、七谷層+グリーンタフ(2.64)、基盤岩類(3.15)からなる。発電所をほぼ中心とした東西方向に7.5km、南北方向に9.5kmの矩形の領域で、広域モデルの下部寺泊層より上層をローカル褶曲モデルで置換した。発電所近傍において、広域モデルの下部寺泊層はローカル褶曲モデルの下部寺泊層より深いため、ローカル褶曲モデルの下部寺泊層の上面とその上層の褶曲構造は保持されている。置換したままではローカル褶曲モデルと広域モデルの鉛直境界面で速度構造の不連続が発生するため、広域モデル側の接続部で滑らかに速度層が変化するように修正して不連続面からの人工的な波を低減した。

・3次元速度構造モデルの検証

モデルの検証として、中越沖地震の余震2007年7月16日21:08のM4.4の地震(以後、EQ1)と2007年7月16日17:42のM4.2の地震(以後、EQ2)、2004年中越地震の余震2004年10月23日19:46のM5.7の地震(以後、EQ3)の発電所内の観測記録を三次元差分法(Pitarka, 1999)によりシミュレーションした。対象周期は0.25秒以下とし、震源は点震源でモデル化した。震源およびメカニズムは、観測波形をもとに再検討したが、メカニズムとモーメントはF-netによる推定値を用いるのが適当と判断した。震源位置については、全地震とも震央は気象庁による推定値を用いたが、深さについては、EQ1は気象庁の値を用い、EQ2は震源近傍の発電所とK-NET柏崎等の記録の水平2成分の振幅比が再現できる深さとして7kmを採用した。震源時間関数の形状は二等辺三角形とし、継続時間は震源に近い岩盤の観測記録のS波初動のパルス幅から読み取った。その結果、EQ1は0.7秒、EQ2は0.4秒、EQ3は1.44秒とした。

シミュレーションの結果、全地震とも原子炉建屋1号機と5号機の観測記録をほぼ再現することができた。3次元速度構造モデルはこれらの地震に対して有効と考えられる。第三アスペリティ近傍で発生したEQ2は、観測波では1号機が5号機に比べ2倍程度振幅が大きい。計算波でもこの相違が再現されている。EQ2によるサイト周辺の計算波は褶曲構造による波動の集中により向斜軸付近で大きいことがスナップショットなどで確認されており、向斜軸の上に位置する1号機の記録が大きい原因として褶曲構造の影響が強く示唆される結果となった。

・まとめ

発電所付近の褶曲構造を取り込んだ3次元速度構造モデルを構築した。中小地震の発電所内での観測記録のシミュレーションを行い、速度構造モデルの有効性を確認した。震源域の南部で発生した余震(EQ2)の観測記録に見られる敷地の南部と北部での振幅の相違が確認されるなど、敷地内で観測された地震動の特徴が再現されることが確認された。発電所内で観測された地震動の変動が敷地内の比較的微細な褶曲構造によって生じていることを強く示唆しているものと思われる。

参考文献

芝：2007年新潟県中越沖地震の震源過程の解明と広帯域強震動評価、電力中央研究所報告、2008年、N08007

徳光亮一・他：2007年新潟県中越沖地震で見られた柏崎刈羽原子力発電所における地震動特性と地質構造の関係、第120回物理探査学会学術講演会論文集、2009年、pp.113-116.

土方勝一郎：新潟県中越沖地震の地震動と原子力発電所の建物挙動、日本地震工学会誌、2011年

独立行政法人原子力安全基盤機構、平成19年度 2007年新潟県中越沖地震・震源周辺域の地下構造モデルの作成技術資料、2008年

Pitarka, A.: 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 1999年, pp.54-68

キーワード: 2007年新潟県中越沖地震, 柏崎刈羽原子力発電所, 3次元速度構造モデル, 褶曲, 地震動シミュレーション

Keywords: 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake, Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, 3D velocity model, Fold, ground motion simulation

近畿北部地殻内の三次元減衰構造手法を用いた Q_s 値の検討 Three Dimensional Attenuation Structure beneath the Northern Kinki Region, Japan

中村 亮一^{1*}, 川里 健²

Ryoichi Nakamura^{1*}, Kawasato Takeshi²

¹ 東電設計株式会社, ² 日本原子力発電株式会社

¹Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd., ²The Japan Atomic Power Company

1. はじめに

均質 Q_s 構造を仮定したスペクトルインバージョン (以下「UQSI」と称する) が、全国各地で検討されている。天池ほか (2006) は、地殻内地震では、用いるデータの震源距離の範囲が小さくなるほど小さな Q_s が求まる傾向があることを指摘した。それによると震源距離が 80 km 以内で $[35 \sim 70]f^{(0.8 \sim 1.0)}$ 程度、震源距離が 60 km 以内で $[20 \sim 50]f^{(0.8 \sim 1.0)}$ 程度である。しかし、その原因は解明されているとはいえない。一方、三次元 Q_s 構造を仮定したブロックインバージョン (以下「3DQSI」と称する) において、最近、日本列島全体を対象にして詳細なブロックサイズ ($0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10 \text{ km}$) による検討がなされ、中越地域など上部地殻は下部地殻より Q_s 値が小さいことが示された (Nakamura et al., 2010)。本研究では、これよりもやや粗くしたブロックサイズを採用した 3DQSI を実施した。その結果、近畿北部において良好な解像度が確保でき、この地域における既往の UQSI による Q 値と比較できたので、ここに報告する。

2. 方法及びデータ

本研究では、東経・北緯方向に 0.2° とし、深さ方向は 10 km のブロックサイズを用いた。参考として深さ方向に 20 km のケースも実施した。

データは、Nakamura et al.(2010) と同じで防災研 K-NET 及び KiK-net による 1997 年～2007 年の浅発中小地震 ($h = 30 \text{ km}$, $M = 6.0$) による 14,831 記録である。その他の解析条件は中村 (2009) と同様である。

ほとんどの UQSI では、伝播の波線を直線と仮定しているのに対して、本検討 3DQSI では地殻の速度構造の変化に対応した波線が用いているため曲線である違いがある。速度構造には気象庁の震源決定に用いられている JMA2001 の構造を用いた。

3. 結果及びまとめ

チェッカーボード解析を実施し、中越地域や飛騨地域のほか、近畿北部地域で深さ 0-10 km 及び 10-20 km において、良好な解像度であることが確認できた。求めた Q_s 構造は、深さ 0-10 km において活火山及び第四紀火山の地域で Low- Q_s とある傾向がある。

このうち、近畿北部地域においてこれらの火山が含まれない地域として、3つの区域 (A 区域: $135.4^\circ \sim 136.6^\circ \text{E}$, $35.0^\circ \sim 36.0^\circ \text{N}$, B 区域: $135.2^\circ \sim 136.2^\circ \text{E}$, $35.0^\circ \sim 36.0^\circ \text{N}$, C 区域: $135.4^\circ \sim 136.6^\circ \text{E}$, $35.0^\circ \sim 35.5^\circ \text{N}$) をとり、平均 Q_s を求めた。それを、Fig.1 に示す。A, B 区域は、若狭湾を含むがその部分は、解像度がやや劣るが、C 区域は若狭湾を含まず解像度の良い場所である。区域による違いはほとんどなく、また、深さ 0-10 km よりも 10-20 km の方が Q_s 値は大きい。図中に記した佐藤ほか (2007) が震源距離 60 km 以内の観測点のデータから求めた値 ($Q_s = 50f^{1.1}$) と比較すると、深さ 0-10 km の結果との対応がよい。

ブロックサイズを深さ方向に 20 km をとった場合には、深さ 0-20 km での Q 値は、 $Q_s = 50f^{1.1}$ より大きくなるが、扱う観測点を 60 km 以内に制限すると $Q_s = 50f^{1.1}$ とほぼ同等となることが確認された。

現在、気象庁が震源決定に用いている速度構造 (JMA2001) に基づき、波線追跡してみると、震源深さ 10 km 程度の場合に、60 km 以内の観測点までの震源からの波線はほぼ上向きになり、100 km 程度では震源から下向きに射出された波線が深い場所にいったんもぐってから観測点に到達する。

佐藤 (2007) ほかの結果は、震源距離 60 km 以内のデータに基づくものであることから、上向きの波線が多く、このため求めた Q 値は浅い部分を主に反映したものと考えられ、本研究の 0-10 km の結果がこれに整合したと考えられる。

謝辞: K-NET, KiK-net のデータを使用させていただきました。また、東京電力植竹富一博士には、データの扱いにおいてご配慮いただきました。文献: 佐藤智美・壇一男・岡崎敦・羽田浩二 (2007) 地震学会大会予稿集, P3-066, 天池文男・植竹富一・八代和彦 (2006) 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 210-213, 中村亮一 (2009) 学位論文, Nakamura, Uetake and Midorikawa (2010) 第 13 回日本工学シンポジウム論文集, CD-ROM

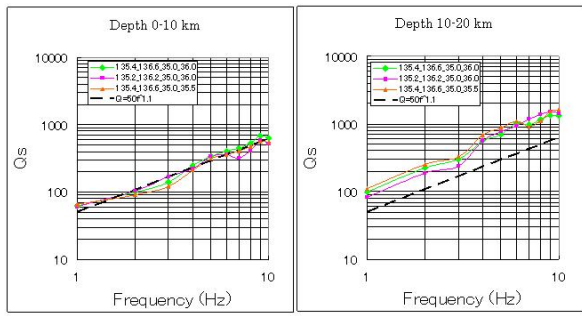


Fig.1 Comparison of Q_s values at the north Kinki region. Color solid lines: average Q_s by 3DQSI method (This study). Broken line: Q_s by UQSI method after Satoh et al(2007)

キーワード: 三次元減衰構造, スペクトルインバージョン, Q_s , トモグラフィー, 深さ依存性, 近畿地方
 Keywords: 3-D attenuation structure, Q_s , spectral inversion, tomography, depth dependence, the Kinki region

東京湾岸におけるやや長周期地震動特性 Characteristics of long-period ground motion in the Tokyo bay area

東 貞成^{1*}, 植竹 富一², 佐藤 浩章¹
Sadanori Higashi^{1*}, Tomiichi Uetake², Hiroaki Sato¹

¹ 電力中央研究所, ² 東京電力株式会社

¹CRIEPI, ²TEPCO

大規模堆積平野である関東平野の周期数秒から十数秒の帯域のやや長周期地震動特性について把握するため、著者らは東京湾岸の火力発電所に設置された広帯域強震計の観測記録と3次元数値シミュレーションによる波形計算結果との比較を行ってきた。今回は2006年に伊豆半島東方沖で発生したM5クラスの地震について検討を行い、後続波群の現れ方に震源の深さと相模湾の厚い堆積構造の位置関係が影響を及ぼしている可能性を指摘した。

関東平野のやや長周期地震動特性の検討には、表面波の励起が顕著な伊豆半島東方沖地震がよく用いられるが、今回は2008年5月8日に茨城県沖で発生した気象庁マグニチュード7.0の地震(深さ50km)を対象として、地震波が平野の反対側から到来したときの地震動特性を東京電力東京湾岸観測点だけでなくK-NET, KiK-net記録も含めて検討した。

地下構造モデルは茨城県沖の震源域までがモデル化されて公開されている、地震調査研究推進本部(2009)の「長周期地震動予測地図」2009年試作版モデルを用いた。モデル化領域は東経138.2~142.0度、北緯34.5~36.5度の範囲である。3次元シミュレーションは差分法を用い、格子点間隔は水平方向400m、鉛直方向100m~400m、時間間隔は0.01秒として30,000ステップ(300秒間)の計算を行った。観測記録及び計算結果には0.08~0.12Hz(7~12秒)のバンドパスフィルターをかけ、震源から東京湾岸西部と東部の観測点を結ぶ測線上で比較した。

計算ケースとしては、震源モデルは点震源を仮定し、気象庁震源(深さ50km)でF-netによるメカニズム解を用いて、Q値をオリジナルモデルの $Q=Vs/5$ の場合と $Q=Vs/2.5$ とした場合、及び $Q=Vs/5$ で震源モデルとして気象庁震源でF-netによるメカニズム解を用いた場合と、気象庁年報のCMT解を用いた点震源(深さ28km)の場合の合計3ケースを検討した。差分計算におけるQ値の導入はGraves(1996)に従い、レファレンス周波数は0.1Hzとした。震源モデルはF-net、気象庁CMT解ともメカニズムはほぼ同じであるが、CMT解の方が南側に震央がずれており、深さが50kmから28kmへとかなり浅く求まっている。この地震の気象庁初動押し引きに基づくメカニズム解は求められておらず、気象庁震源の位置でF-netメカニズム解を用いたが、実際にはF-netメカニズム解は深さ35kmに求まっている。そこで便宜上、F-netメカニズムを用いた震源を深い震源、気象庁CMT解を浅い震源と呼ぶことにする。

深い震源でQ値を変化させた場合の計算結果を比較した結果、0.08~0.12Hzの周期帯域においては振幅、波群の性状ともほとんど変化は見られなかった。震源に最も近いIBR018, IBRH20からCHB004, CHB006では計算振幅は観測振幅より1/3~1/4の過小評価となっており、特に東岸側の観測記録に見られる振幅の大きな後続波群の再現ができていない。西岸側では東京~横須賀の波形の再現性は東岸側に比べると良い。

次に、 $Q=Vs/5$ のモデルで2種類の異なる震源を用いたケースを比較すると、波群の現れ方が大きく異なる結果となった。浅い震源の方が、全体的に振幅が大きい。また、CHB009, CHBH10では観測記録ではいくつかの波群に分かれている様子が見られるが、深い震源では再現できていないのに対して、浅い震源では振幅も含め再現されている。そのほかの地点でも、深い震源の場合と比較して浅い震源の方が大振幅の後続波群が見られる観測記録の再現ができており、波形の再現性から見て震源深さは50kmよりも浅い可能性がある。ただし、M7.0にもかかわらず点震源を仮定している影響があるので断定はできない。

今後、伊豆半島東方沖の地震による地震動特性とあわせて地震波の伝播特性を把握し、やや長周期地震動特性の詳細把握と地下構造モデルの改良に向けた検討を行う。

本報告では防災科学技術研究所K-NET, KiK-netの記録を利用させていただきました。

キーワード: 長周期地震動, 関東平野, 堆積盆地, 3次元シミュレーション, 広帯域強震観測, 2008年茨城県沖地震

Keywords: Long-period seismic ground motion, Kanto plain, Sedimentary basin, Three-dimensional simulation, Broadband strong motion observation, Off Ibaraki Pref. earthquake in 2008

SSS023-P17

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

2010年12月22日父島近海の地震 (Mj7.4) による東京湾岸地域の長周期地震動 Long-Period Ground Motion in the Tokyo Bay area from the Chichi-jima Kinkai earthquake (Mj=7.4) of Dec. 22, 2010.

植竹 富一^{1*}

Tomiichi Uetake^{1*}

¹ 東京電力

¹Tokyo Electric Power Company

1. はじめに

2010年12月22日に父島近海で、気象庁マグニチュード7.4の地震が発生した。この地震により、東京都小笠原村で震度4、関東地方を中心に、北海道の一部から中部地方にかけて震度2~1が観測された。震源深さが8kmと浅く、規模の大きな地震であったため、長周期地震動の励起が期待される。東京電力では2005年9月より長周期地震動の記録の蓄積を目的に、東京湾岸で速度型強震計による地震観測を実施している。父島近海の地震でも記録長1800秒(30分)にわたる長周期地震動が卓越する記録を観測することができたので、観測記録の特徴について報告を行う。

2. 観測地点

東京湾岸における速度計観測点は、東京湾東岸に5点(富津、袖ヶ浦、姉崎、五井、千葉)、西側に8点(横須賀、南横浜、横浜、鶴見、東扇島、川崎、大井、品川)である。センサーは速度型強震計(東京測振:VSE-355G3)を用い、100Hzサンプリングで観測を行っている。なお、センサーは低層建物のコンクリート床面に設置されているが、長周期地震動の観測上は影響が少ないと考えられる。震央と観測点の距離は、990kmから1030kmである。震央から見た観測点の方位は337度から340度である。

3. 観測記録の特徴

東京湾岸ではトリガー方式ではあるが、後続波群が長時間継続し、1800秒に及ぶ記録が得られている。東側と西側では波形の特徴が異なり、東側ではS波到達後180秒後に大振幅の後続波が目立ち、この波群は観測点毎に大きく異なっている。一方、西側では後続波群の中で特別に振幅の大きな波群はない。水平動の最大振幅は、東京湾西岸で0.5~0.8cm/s、東京湾東岸では1.1~1.7cm/sで、東岸は西岸に比べ2倍以上となっている。一方、上下動は0.2~0.3cm/sで最大振幅は東西で同程度である。なお、最大速度値は、表面波と考えられる後続波部分で発生しており、S波到達から3分以上経過してから最大振幅を記録している場合もある。観測波形のマルチプルフィルター解析結果をみると、後続波は周期10秒前後の波動成分で成り立っており、西岸の大井と東岸の姉崎を比較すると、大井では8秒が、姉崎では10秒強の周期が卓越している。

減衰常数5%の速度応答スペクトルの周期2秒以上を見ると、西側では、周期10秒を中心に8秒から12秒にかけて、ピーク値が3~4cm/sの幅広い山となっているのに対し、東側では10秒付近に6~9cm/sの顕著なピークが見られる。10秒付近のピークは東側が西岸に比べ2倍以上の応答値を示している。この差は、減衰が小さくいとより顕著で、0.1%の応答スペクトルでは、東京湾西側では10cm/s程度であるのに対し、東側の千葉や姉崎では30cm/sに達する。ただし、上下動には特徴的なピークが無く、応答値も水平動に比べて小さく、減衰5%で1cm/s、減衰0.1%で2cm/s程度である。なお、減衰が小さい場合、後続の小振幅の繰り返し波の影響が大きく、最大応答値は観測された速度波形の最大値発生時刻よりも遅れて生じる。ちなみに加速度波形では、継続時間が1分程度であり、加速度の大きな時間帯から何分も遅れて最大値を示すことになる。

4. まとめ

東京湾岸で得られた父島近海の地震の記録について特徴を抽出した。東京湾岸では概ね周期10秒前後の地震動が卓越し継続時間が長い。東岸の水平動波形には大振幅の後続波が見られ、最大振幅は西岸の2~3倍の値を示している。一方、上下動の振幅値は同程度であった。応答スペクトルを作成すると低減衰ほど西側との差が大きくなる。応答波形の最大値発生時刻は、地動の加速度最大値や速度最大値発生時刻より何分も遅れる。長周期で減衰が小さな構造物の応答は、加速度の大きな時間帯から何分も遅れて最大値を示すことは重要である。

キーワード: 長周期地震動, 東京湾岸, 父島近海地震, 応答スペクトル

Keywords: Long-period Ground Motion, Tokyo Bay Area, Chichi-jima Kinkai Earthquake, Response Spectrum

SSS023-P18

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

稠密強震観測データを用いた長周期地震動の地域性に関する検討 超高層建築物への around-site warning に向けて Regional characteristics of the long-period ground motion observed at the super-dense seismic observation network

中村 洋光^{1*}, 功刀 卓¹, 青井 真¹, 藤原 広行¹, 西山 秀樹², 渡邊 明彦², 岩田 雅史³, 中井 敦子³, 早川 俊彦⁴
Hiromitsu Nakamura^{1*}, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Hideki Nishiyama², Akihiko Watanabe², Masafumi Iwata³, Atsuko Nakai³, Toshihiko Hayakawa⁴

¹(独)防災科学技術研究所, ²三菱電機ビルテクノサービス株式会社, ³三菱電機株式会社, ⁴三菱スペース・ソフトウェア株式会社

¹NIED, ²MELTEC, ³Mitsubishi Electric Corporation, ⁴MSS

2003年十勝沖地震では、震央から約250km離れた苫小牧市の石油タンクに火災や浮屋根沈没等の大きな被害が発生し、長周期地震動によって励起されたスロッシングがその原因として指摘された。また、2004年新潟県中越地震では、震央から約200km離れた首都圏で、長周期地震動により超高層ビルが共振し、エレベータにロープの損傷等の多くの被害が発生した。これらの地震被害を契機として長周期地震動対策の重要性が再認識され、昇降機耐震設計・施工指針(2009)においては、長周期地震動対策として、120mを超える高さの構造物に設置されるエレベータに対して長尺物振れ管制運転を標準仕様として定める等している。しかしながら、長周期地震動を検知するためには、P波管制運転用のセンサ(P波センサ)と比較して観測精度の高い地震計が必要とされ、そのような地震計を含む装置は高価である。更に、整備の行き届いた状態でないと長周期地震動を計測することが難しいため、メンテナンスにかかる費用も高く、既存の超高層ビルではこのような装置の普及が十分に進んでいない現状がある。

一方、一般的に地震波の周期が長くなると、局所的な地盤構造の影響を受けにくくなるため、距離が離れている地点でもそれよりも十分に波長の長い長周期帯域では地震記録が同程度となることが知られている。この性質を用いれば、対象となる超高層ビル群の周辺域で観測された地震記録を、それぞれのビルに入力された地震波として代用し(代用波)、個々のビル及びエレベータロープの揺れを推定することで長周期地震動に対応した安価な管制運転を行うシステム(around-site warning system)を構築できる可能性がある。そこで、本研究では上記システム構築の可能性を検証することを目的として、日本でも有数の超高層ビルが建ち並ぶ新宿区に設置された地震計(K-NET 新宿;新宿区上落合)で得た強震記録を代用波として利用できる可能性を、東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム(SUPREME)で得た記録を用いて検討したので報告する。

検討対象とした地震は、SUPREMEで多くの加速度記録が得られている2004年新潟県中越地震、2005年宮城県沖の地震、2007年新潟県中越沖地震である。データは、加速度記録から、周期3秒から8秒まで0.5秒ごとにそれぞれ減衰率0, 1, 2, 5%とした速度応答及び変位応答を用い、K-NET 新宿の応答値を基準とした応答値比を算出した。その結果、応答値比の空間分布と地下構造との関係について、2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、周期5秒以下の短周期側ではJ-SHISで公開している浅部地盤の増幅率とよい相関を示し、5秒以上の長周期側ではS波速度900m/s下面の深さ分布とよい相関を示した。対象とした3地震の解析結果を総合すると、K-NET 新宿から数kmの領域内における周期3~8秒の応答値のレベルは、K-NET 新宿で観測されるレベルのファクター2程度以内であった。今回は限られた地震での解析結果ではあるが、ファクター2の範囲であれば、K-NET 新宿の記録を限られた領域で長周期地震動の代用波として利用することは可能であることが示された。

謝辞

本研究では、東京ガス株式会社の超高密度リアルタイム地震防災システムの記録を使わせて頂きました。

キーワード: 強震観測, 長周期地震動, K-NET, 超高層, エレベータ, 警報システム

Keywords: strong motion observation, long-period ground motion, K-NET, skyscraper, elevator, warning system

擬似逆行列法を使った地下構造の推定 Estimation of Underground Structure with Pseudo-Inverse Matrix Calculation

今枝 佑輔^{1*}, 盛川 仁¹

Yusuke Imaeda^{1*}, Hitoshi Morikawa¹

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科

¹Tokyo Institute of Technology

目に見えない地下構造を探るには、重力や磁場といった遠隔作用で働く力・物理量を使って調べることが必要である。例えば地下の密度構造は、万有引力の法則により地表面の重力場分布に反映されている。地球規模で大局的に決まる重力加速度 g に比べて局所的な密度構造が作り出す重力異常(加速度)が十分小さい場合には、密度分布と異常重力の鉛直成分の間には線形関係が成り立つ。数式を使って表現すれば $Ax=b$ 、ここでベクトル x は M 個の点での異常密度を決める密度データ、ベクトル b は N 個の点での重力異常値を表す観測量、大きさ $N \times M$ の行列 A は密度ベクトル x と観測量ベクトル b を線形に結びつける万有引力から決まる変換行列である。つまり観測データの逆変換を行うことで、地下密度構造を決定できることが期待される。

そこで今回は、異常重力場データから地下の密度構造を推定するためのプログラムを開発し、これについて発表する。

地下密度構造から重力場を計算する $Ax=b$ の逆変換を行うには、行列 A の逆行列計算が必要になる。通常、逆行列は正方行列に対してしか定義されていない。一方で観測点の数 N と地下構造モデルの代表点の数 M は一般には一致しない。そこで正方行列でない場合にも拡張定義された擬似逆行列の使用を考える。

擬似逆行列を求める手順は以下の通り。

1. 行列 A に左右から直交行列を掛けて二重対角行列 $B=Q_L A Q_R$ を作る
2. $B^T B$ から正方三重対角行列を作り、この行列の固有値と右固有ベクトルを求める
3. M 個の右固有ベクトルを規格化して並べた直交行列 Q_V と Q_R から右直交変換行列 $V=Q_R Q_V$ を作る。
4. 行列 A と行列 V の積を直交行列 U と三角行列 の積に分解する ($AV=U$)
2. の段階で行列 $V^T B^T B V$ が対角化されているので、三角行列 は対角成分以外が 0 になり対角行列になる
5. 以上の操作により行列 A は直交行列 U と V 、対角成分に特異値 σ_i が並んだ特異値対角行列 を使って
$$A = U \Sigma V^T$$

と分解される。(特異値分解)
6. 対角成分に $1/\sigma_i$ が並んだ対角行列 Σ^+ を定義する
7. 擬似逆行列 $A^+ = V \Sigma^+ U^T$ を定義する。

ここで手順 2. において行列の固有ベクトルを求めるには、一般に QR 法と呼ばれる反復手法が使われることが多い。これには通常 $O(M^3)$ 程度の計算量が必要である。そこで今回は QR 法による固有ベクトル計算の代わりに I-SVD 法を使うことでこの部分の計算量を $O(M^2)$ に抑えることにし、プログラム中最も重い部分の計算時間を劇的に軽減することに成功した。但し、その前処理段階である 1. の部分の計算量が $O(M^3)$ であるのでプログラム全体の計算量としては $O(M^3)$ のままである。

一方、ほぼ二次元平面上に分布する観測量から地下に三次元分布する密度構造を決定するような問題は、非常に悪条件な問題になることが多い。そのため計算機の丸め誤差の影響が数値計算の限界を決めてしまう。そこで今回は非常に悪条件な問題に対しても計算続行が可能になるように、多倍長計算のライブラリを組み込んだプログラムを開発した。丸め誤差を非常に小さく取れるため、悪条件の問題からそうでない問題まで、同一プログラムを使い統一的に理解することが可能になった。

また様々なテスト計算の結果、観測データに含まれるノイズレベルを正しく把握した上で、ノイズレベル以下に対応する特異値を 0 とした近似擬似逆行列を定義し、これにより逆変換を行うことが有効であることがわかった。一方、精度のみを追求して実装した今回の多倍長計算は通常の倍精度計算に比べて極度に遅い(100 倍以上)。今後は無駄な多倍長計算部を極力減らし計算の高速化を図ると共に、重力異常データのみならず磁気異常データを使用することで、問題自体が内包する悪条件性を回避できるかについて検討する予定である。

キーワード: 密度構造, 重力探査, インバージョン, 擬似逆行列

Keywords: density structure, gravity survey, inversion, pseudoinverse

SSS023-P20

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

比較的長い波長のレイリー波基本モードの位相速度と深部地下構造の平均 S 波速度の関係

Prediction of average S-wave velocity for deep subsurface structure from fundamental mode Rayleigh wave phase velocity

糸井 達哉^{1*}
Tatsuya Itoi^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科
¹The University of Tokyo

レイリー波基本モードの位相速度と深部地下構造の平均 S 波速度の経験的な関係を提案する。

J-SHIS の全国の深部地下構造から約 5km 間隔で海上部分を除く地点で、最表層（工学的基盤相当）から S 波速度が 2.5km/s 以上となる層までの層構造の一次元鉛直分布を抽出し、その中で最表層の S 波速度が 1km/s 以下の約 15000 地点を検討対象とする。水平成層地盤を仮定し、波長が 100m から 1000m の範囲で各地点におけるレイリー波基本モードの位相速度分散曲線を透過反射マトリクス法（久田、1997）で計算する。

位相速度分散曲線と平均 S 波速度の関係はよく似ており、ある平均深さの平均 S 波速度は同じ長さの波長の位相速度よりも 1.1 倍程度大きい。波長ごとにもとめた両者の比率は、幾何平均値が 1.1 程度、常用対数標準偏差は 0.02 から 0.05 程度となった。またこの比率は波長と無関係にほぼ一定であり、波長 100 から 1000m で幾何平均も 1.1 となる。

以上の結果を用いると、今後、微動アレイ観測から求める位相速度分散曲線から深部地盤構造の初期モデルが簡易に評価できるようになる可能性がある。

謝辞

防災科学技術研究所（J-SHIS）の公開深部地下構造モデル（藤原・他、2009）を利用しました。また、レイリー波の位相速度分散曲線の計算には久田嘉章先生（工学院大学）のプログラム（久田、1997）を利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

藤原広行、河合伸一、青井真、森川信之、先名重樹、工藤暢章、大井昌弘、はお憲生、早川譲、遠山信彦、松山尚典、岩本鋼司、鈴木晴彦、劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第 337 号、2009 年。

紺野克昭、片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案、土木学会論文集、No.647 / I-51、2000 年、pp.415-423。

長郁夫、多田卓、篠崎祐三：極小アレイによる新しい微動探査法：浅部地盤平均 S 波速度の簡便推定、物理探査、61(6)、pp.457-468、2008 年。

久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第 501 号、1997 年、pp.49-56。

キーワード: レイリー波, 平均 S 波速度, 深部地下構造, 位相速度

Keywords: Rayleigh wave, Average S-wave velocity, Deep subsurface structure, Phase velocity

地表・地中地震計アレー記録による複素スペクトル比の推定法と数値実験 Estimation of Complex Spectral Ratio of Surface and Borehole Seismometry and Numerical Tests

吉田 邦一^{1*}

Kunikazu Yoshida^{1*}

¹(財)地域地盤環境研究所

¹Geo-Research Institute

地表・地中記録のスペクトル比の計算法について、最小二乗法を元に誤差の取り扱いを変えたいいくつかのスペクトル比の推定法をあげ、スタッキング法と平滑化の影響を考慮した簡単な数値実験を行った。観測点付近の表層の構造が地震動に与える影響を評価するため、鉛直アレーの地震動記録のスペクトル比から求めた伝達関数をもとに表層付近の地盤の速度・減衰構造の同定がしばしば行われている。ところが、同定の対象となるスペクトル比の推定においてノイズの考慮が不十分なため、不適切な減衰が求められている可能性がある。

N個のイベントで記録が得られているとき、イベント*i*での地表と地中の記録のフーリエ変換をそれぞれ $y_i(f)$, $x_i(f)$ とする。鉛直アレーに限らずスペクトル比のスタッキングは、幾何平均 H_G あるいは幾何平均と等価な対数平均 H_L により行われることがある。ところが、幾何平均ではノイズを必ずしも正しく評価できないことが知られている上、複素スペクトル比を推定できない。複素数でノイズを考慮したスタッキング法としては、最小二乗法として直線のあてはめを行う手法がある。 $y_i(f)$ にノイズ n が含まれる場合は $y_i(f)=H_1 x_i(f)+n_i(f)$ と書ける。この式の H_1 に関する最小自乗法の解は $H_1=C_{xy}(f)/S_{xx}(f)$ である。ここで、 $C_{xy}(f)$, $S_{xx}(f)$ はそれぞれ $x(f)$ と $y(f)$ のクロススペクトルと $x(f)$ のパワースペクトルの平均である。一方、 $x_i(f)$ にノイズ $e_i(f)$ が含まれる場合の最小二乗解を求めると $H_2=S_{yy}(f)/C_{yx}(f)$ となる。ここで、 $S_{yy}(f)$ は $y(f)$ のパワースペクトルである。位相差スペクトルは、 H_1 , H_2 共に C_{xy} の位相成分で求められる。ノイズを考慮したときに、 C_{xy} の期待値にはノイズの項が残らないことから、位相差スペクトルはノイズの影響を受けにくいことが予想される。 H_1 や H_2 は誤差の仮定に非対称性を持つので、石田(1992)に準じ、これらの幾何平均 H_3 を計算する場合も検討した。

鉛直アレー記録への適用を念頭に、これらのスペクトル比の推定法を数値実験で比較した。数値実験では入射波の振幅は周波数によらず一定とし(すなわち時間領域での地表波形はデルタ関数)、周波数領域において半無限均質媒質中に鉛直入射する平面波による鉛直アレーでの地表と地中の擬似観測記録を作成した。この擬似観測記録に一樣乱数を加え、20通りのノイズを含む擬似観測記録を作成した。

スタック方法の違いによる推定値の差を求めるため、ノイズの含まれる20通りのスペクトルの組から、上記4通りの推定方法によりスペクトル比を推定した。 H_1 では、スペクトル比は低周波数側や谷の部分でほぼ1を示し、ノイズにもかかわらずよく推定されているが、スペクトル比の山の部分は頭打ちとなり、ピーク周波数付近では逆に谷となっている。 H_2 では、スペクトル比のピーク形状が最も明瞭に求められているが、谷の部分で1にならず過大評価になっている。 H_3 では、 H_1 と H_2 の中間の値を示し、滑らかな結果を示すが、スペクトル比のピーク形状は H_2 によるものほど明瞭ではない。 H_G は、この計算では H_1 に近く、スペクトル比の谷は1に近づくがピークでは大きな凸凹が見られノイズの影響を強く受けている。 H_1 と H_2 のスペクトル比のピーク周辺の形状は、これらの周波数では地中記録のS/N比が非常に悪い条件下での処理となるため、地中ノイズの取り扱いの差が大きく影響し、 H_2 で明瞭なピークが見られるのに対し、 H_1 で大きく形が歪む。一方で、スペクトル比の谷の部分では、地表のノイズが結果に影響し、 H_2 が過大評価となる。位相差スペクトルは安定して求められた。

スペクトルの平滑化が結果に与える影響について考察する。ノイズの含まれない擬似観測記録のスペクトルから S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を計算し、これらをParzenウィンドウにより平滑化した。求めた S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を用いて H_1 , H_2 , H_3 を求めた。 H_G はフーリエスペクトルを平滑化して求めた。ノイズの含まれないデータであるが、スタック処理によるものと同様の傾向が見られた。すなわち H_1 ではスペクトル比のピーク周波数で谷が見られる一方、 H_2 によるピークは平滑化にもかかわらず非常に明瞭に見られる。スタッキングと平滑化を同時に適用した結果は、スタッキングのみで求めたスペクトル比と比べ、滑らかなスペクトル比となった。計算手法による傾向の違いはスタッキングのみや平滑化のみで求めたものと同様であった。

以上の検討から、全体のスペクトル比を俯瞰する場合は H_3 あるいは H_G が適し、ピークが重要な時は H_2 を、谷が重要な時は H_1 が有用である。また、位相差スペクトルの推定値は安定している。

キーワード: 地震計鉛直アレー, 複素スペクトル比, 伝達関数

Keywords: seismic vertical array, complex spectral ratio, transfer function

SSS023-P22

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

雑微動データのフーリエ変換振幅スペクトルに基づいて地盤振動特性を推定する試み

Estimating small-scale site effect as functions of the frequency range from 2 to 4Hz by observing microtremors

田中 寅夫^{1*}, 大久保 慎人¹, 青木 治三¹
Torao Tanaka^{1*}, Makoto OKUBO¹, harumi aoki¹

¹ 東濃地震科学研究所
¹ TRIES

地下浅部の地盤が地震動を大きく増幅して地震災害をもたらすことは良く知られた事実である。わが国で一般的な低層木造建造物の固有振動数が2~4 Hzであることから、この振動数では地下浅部地盤による地震波の増幅が大きく影響する。したがって地震波を増幅する site effect を詳細に調査して最大地震動の増幅を確度高く決定することが、地震動被害を減少させるためにも基本的な課題となる。このためには、簡便な計測により何時でも簡単に調査が可能な雑微動の測定による方法を確認することが有効であると考えられる。このような観点に立って、われわれは1999年から東濃地域で展開されてきた TRIES 高密度地震観測網によって得られた地震記録および雑微動記録のフーリエ変換による振幅スペクトル解析を進めてきた。これまでの連合大会において2004年の紀伊半島南東沖地震、07年の能登半島地震について報告した結果に加えて、TRIES 観測網周辺で発生した局所地震、小地震について順次解析をすすめてきた。TRIES 観測網では加速度地震計による1/100秒サンプリングの地震データを集録している。表面波が最大振幅となる規模の大きい地震の場合は、20秒間の表面波データを解析したが、近地地震や小地震では最大振幅が3~5秒間に現れることから、原記録上で最大振幅を与えるS波部分を3~5秒間解析した。他方、雑微動の解析にはこれらの地震動によってトリガーが作動してからP波初動が到達する直前までの約10秒間のデータを使用した。振動数帯域2~4Hzでの雑微動の上下・南北・東西3成分をそれぞれスペクトルで表し、これを site effect とした。予備的な解析から、この site effect と、観測された最大地震波の振幅スペクトルとの間には0.7程度の相関が得られた。地震発生メカニズムや地震動の到来方向など様々な要因が site effect に関係するため、単純で防災に有効なパラメータをどのように選ぶかが今後の課題である。また「約10秒の間に観測される雑微動は、どの程度定常的であるか」という本研究の前提条件もさらに詳しく調べる必要がある。データ解析を更に進めて、最大地震動の予測を試みるなど、site effect を改良して行きたい。

キーワード: ザツビドウ, ジバン, サイトトクセイ, コユウシンドウ, フーリエヘンカン, サイダイシンプク

Keywords: microtremor, ground soil, site effect, characteristic oscillation, Fourier transform, maximal amplitude

高知市平野部における常時微動H/Vスペクトル卓越周期の空間分布 Spatial distribution of predominant period derived from H/V spectra in Kochi Plain

久保 篤規^{1*}, 田嶋 佐和², 原 忠³

Atsuki Kubo^{1*}, Sawa Tajima², Tadashi Hara³

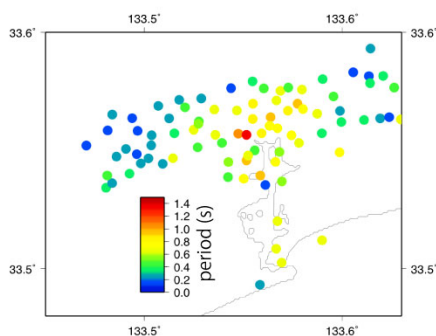
¹ 高知大学理学部地震観測所, ² 高知大学理学部応用理学科, ³ 高知大学南海地震防災支援センター

¹Earthq. Obs. Fac. Sci. Kochi Univ., ²Fac. of Sci. Kochi Univ., ³Sect. of Disast. Prev. Kochi Univ.

高知市は、南海地震の際に強震動、地盤沈下と津波による浸水被害に襲われることが予想される。平野部の堆積層形成は、強震動には増幅率の増大をもたらす、低地帯において進行が激しいと考えられる。このような特徴から、強震動による被害分布と浸水による被害分布は、空間的にかなり相関の高いものになる可能性がある。高知平野の堆積層/基盤構造を明らかにしていくことは、防災対策を考える上でも重要である。

ここでは常時微動のH/Vスペクトルに注目し観測を実施した。すでに高知平野（高知市）における微動H/Vスペクトルの研究は複数あるが（森伸一郎ら、2001；岡崎、2009）、これまでの研究では測線に沿った測定が多く、まだ高知平野においてはまだ面的な研究には至っていない。そこで本研究では特に測線を設定せず、高知市平野部において平均0.5kmから1km間隔の観測点間隔を目標にして観測を実施し、結果として88点の観測を実施した。観測には白山工業（株）JU210微動計を用いた。各観測点では11分以上の観測を行い、そのうち20秒から40秒分のデータを選びH/Vスペクトルを計算した。解析には先名・藤原（2008）により公開されているソフトウェアを用いた。

議論の緒として、H/Vスペクトルの卓越周期の分布を調べた（図）。高知市平野部は東西に伸びており、その西端の朝倉では0.3s以下で、や南国市との境界付近0.6s以下であった。これに対して海域へ開口部である浦戸湾周辺（潮江、本町、高須など）では0.6s以上で最大1.45sの卓越周期を有する。このような卓越周期の分布を説明する堆積層/基盤構造を推定していく必要がある。比較的長い周期の領域は、南海地震時の地盤沈下・津波浸水域に一致しており、このような地域では対応する周期の増幅による強震動被害と浸水被害の両方の対策を重点化する必要性が見えてくる。



キーワード: 常時微動, 卓越周期, 表層地盤, 高知平野

Keywords: Micro tremor, Predominant Period, Surface Basement, Kochi Plain

島原半島地域における微動 H/V スペクトル比を用いた地盤構造推定 Estimation of subsurface structure using microtremor H/V spectral ratio in the Shimabara peninsula

糸谷 夏実^{1*}, 松島 健¹

Natsumi Itoya^{1*}, Takeshi Matsushima¹

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

¹SEVO, Kyushu University

近年、構造物の長大化に伴い、長周期地震動の被害予測が重要となっている。全国の長周期地震動の卓越周期分布図(中央防災会議, 2008)によると関東平野などの第四紀層が厚い堆積盆地の他、火山地域である長崎県島原半島地域も長周期地震動が増幅されることが推定されている。特に半島中央部にある雲仙地域においては、関東平野と同程度に長周期地震動が増幅するという結果が得られている。そこで本研究では、地盤構造の評価法として微動 H/V スペクトル比(水平動/上下動スペクトル比)に着目し、島原半島内 60 箇所で微動観測を行い、半島内の地盤構造の推定を試みた。

<観測方法>

微動 3 成分の移動観測を行った。微動測定は、固有周期 120 秒の広帯域地震計を用い、各観測点で基本 3 日間地震計を土中に埋設して測定した。データロガーは LS7000XT を使用し、100Hz サンプリングで記録した。

<解析方法>

水平動(NS・EW)・上下動(UD)の3分間データを選び出し、FPAC(大崎, 1994)よりパワ・スペクトルを算出する。それぞれ成分ごとに30回のアンサンブル平均を行う。水平動と上下動のパワ・スペクトルの比を計算し、H/V スペクトル比を導出する。ここで水平動の合成についてはNS成分とEW成分の相乗平均とした。

島原半島内の60観測点より、各点H/Vスペクトル比の1次卓越固有周波数(0.1~1.0Hzで存在する最も低い卓越周波数)を周期に換算し、コンターマップを作成した。新期火山噴出物が堆積している島原半島東部の雲仙地溝内では5~6秒のピークが見られ、水平動の長周期成分が卓越している。特に科学掘削が行われたUSDP2地点では、雲仙火山噴出物が厚さ約1.2kmにわたり堆積していることが分かっており(星住他, 2001)、この厚い火山噴出物が水平動長周期成分の卓越の原因と考えられる。

また人工地震探査の報告(雲仙火山人工地震探査グループ, 1995)によると、雲仙岳西部域では $V_p=3.5\text{km/s}$ の速度を持つ高速度層が地表近くまで迫っている。この地点での微動H/Vスペクトル比は、この構造を反映してH/Vスペクトル比に明瞭なピークが現れず、H/Vスペクトル比の値はほぼ一定になった。

次に、人工地震探査で求められているP波速度からLudwig et al. (1970)を用いてS波速度や密度を算出し、観測H/Vスペクトル比とレイリー波から計算された理論H/Vスペクトル比の1次卓越固有周波数が合うように層厚のみを調整し、トライアンドエラーで構造を決めた。USDP2地点では $V_s=600\text{m/s}$ 層の深さが約1.2kmとなり、科学掘削によって得られた雲仙火山噴出物の厚さとよく一致している。

島原半島中央部の矢岳観測点を中心とした約4kmの範囲においても、局所的に水平動長周期成分が卓越している。周囲の地点と同じ速度パラメーターを使用して構造を決めると、矢岳観測点の基盤深度は約1000mと求まる。しかし、付近の地質構造図や人工地震探査の結果ではこのような局所的な凹地は見られない。そこで、基盤深度を大きく変えずに第1層、第2層のS波速度を約50%小さくして構造を決めた。矢岳観測点付近には豊富な温泉源もあることから、半島中央部の長周期地震動の要因として低速度層の存在も十分に考えられる。

本研究で求められた微動H/Vスペクトル比の卓越周期分布図は、地質図や人工地震探査の結果とよく対応し、島原半島の地盤構造を強く反映している。島原半島における長周期地震動の増幅は、厚い火山噴出物層や低速度層の存在が原因と考えられる。

キーワード: 微動, H/V スペクトル比, 地盤構造, 長周期地震動

Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, subsurface structure, long-period ground motion

SSS023-P25

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

Period-Dependent Site Amplification and Source Process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Sequence Period-Dependent Site Amplification and Source Process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Sequence

Rami Ibrahim^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Kazuhito Hikima²
Rami Ibrahim^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Kazuhito Hikima²

¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ²TEPCO

¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ²TEPCO

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake on 14 June 2008 mainly struck the Tohoku region, northeastern Japan. The JMA magnitude M_{JMA} was estimated to be 7.2 and the moment magnitude M_W by Global CMT Project was 6.9. The 5% damped acceleration and velocity response spectra maps reveal different features in the source area and at other stations out of the source area. The predominant period was shown in a short period range of 0.1-0.2 s. AKTH04 station which is located at 22 km away from the source area was recorded a JMA-intensity of 6 upper as large as in the source area. The large acceleration amplitude was observed at short periods at the same station. Large velocity amplitudes at stations MYG005 and MYG006 were observed at periods of 2, 3, and 5 s to the south of the source area. In this study, we use aftershock data to obtain amplification factors in and around the source area. The H/V spectral ratios were investigated at 27 station sites close to the source area. The data recorded by K-NET and KiK-net were used for five aftershocks. The spectral ratios of the horizontal components (H/H spectral ratio) of surface and borehole data were investigated for KiK-net stations. H/H spectral ratios of soft soil sites to hard rock sites were also calculated for comparison with previous studies. Amplification factors of 3 to 6 at short periods of 0.1 to 0.5 s are observed at many stations such as AKTH04, AKTH06, IWTH19, and so on. The stations of MYG005, MYG006, IWT011 and IWTH20 have shown amplification factors of 3 to 5 at long periods of 3 to 5 s. On the other hand AKT023, IWT010, and MYGH04 show flat response spectra compared to hard rock sites. The results reveal that the different features shown by response spectra can be attributed to the site effects. The H/V and H/H spectral ratios were used to get information about the predominant periods and the amplification factors at the station sites. The peak velocity amplitude distribution maps were calculated for different period ranges of 0.1-0.2, 0.2-0.3, 0.3-0.5, 0.5-1, 1-2, 2-3, 3-5, and 5-10 s. We are going to collect site amplification factors for the mentioned period ranges. The collected data will be used to retrieve the period-dependent source process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake.

キーワード: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, source process, amplification

Keywords: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, source process, amplification

SSS023-P26

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

大阪平野南部における微動アレイ探査 Microtremor array survey in southern Osaka plain

吉見 雅行^{1*}, 関口春子², 浅野公之², 堀川晴央¹, 岩田知孝², 木村治夫¹

Masayuki Yoshimi^{1*}, haruko Sekiguchi², kimiyuki Asano², haruo Horikawa¹, tomotaka Iwata², haruo Kimura¹

¹産総研 活断層・地震研究センター, ²京都大学防災研究所

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²DPRI, Kyoto Univ.

大阪平野南部地域の S 波速度構造を得るため、泉大津市夕凧 (YNG)、堺市中区八田荘 (HAT)、堺市東区日置荘 (HKS)、堺市南区富蔵 (TMK)、羽曳野市羽曳が丘 (HBK)、和泉市いぶき野 (IBK) の 6 地点にて 2010 年 11 月 5-10 日に微動アレイ探査を実施した。最大アレイ半径は、YNG: 750m, HAT, HKS, HBK で 1000m, IBK:400m, TMK:300m である。場所に応じ 2 個ないし 3 個の同心正三角形の頂点および重心に地震計を配置し、大アレイでは 60-120 分程度、中アレイ (半径 100-300m 程度) では 30-60 分、小アレイでは 30 分程度の観測を昼間に行った。使用機器は VSE-15D1 (東京測振) と LS7000XT (白山工業) である。得られた測定記録から SPAC 法および拡張 SPAC 法により位相速度を求めた結果、高周波数領域 (3-5Hz) では 0.3-0.5km/s に漸近し低周波数領域 (0.3-0.5Hz) で 1.5 km/s に達する分散曲線が得られた (YNG では 0.3Hz で 1.0km/s)。ただし、0.4Hz 以下の帯域でコヒーレンスが低い観測記録が多く、低周波数側の観測位相速度については今後検討が必要である。

次に、分散曲線を満足する S 波速度構造を推定した。S 波速度 3.2km/s の基盤の上に、3 層の堆積層 ($V_s=0.35, 0.55, 1.0$ km/s) を仮定したモデルと、ミラージュー的な速度構造 ($V_s \text{ max}=1000\text{m/s}$) を仮定したモデルにつき別々に GA により速度構造を探索した。その結果、両者とも基盤深度についてはほぼ同様で、YNG で 1400-1600m, HAT で 1000-1200m, HBK で 700-900m, HKS で 1100-1400m, IBK で 500-700m, TMK で 400m 程度の値が得られた。これらは、既存ボーリングや反射法による推定深度と整合的である。今後は基盤深度に影響する低周波数側の位相速度について別途観測するなど再検討し、3 次元速度構造モデルの改良へつなげる予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省平成 22 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」によって行われました。

キーワード: SPAC 法, S 波速度構造, GA

Keywords: SPAC method, S wave velocity structure, GA

SSS023-P27

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

石垣島・西表島の強震観測点におけるS波速度構造探査 Explorations of S-wave velocity structure around the K-NET stations in Ishigaki and Iriomote island, Japan

山田 伸之^{1*}, 竹中 博士², 奥平 良太², 後藤 史紀², 藏本 稔大²

Nobuyuki Yamada^{1*}, Hiroshi Takenaka², Ryota Okudaira², Fuminori Goto², Toshihiro Kuramoto²

¹ 福岡教育大学, ² 九州大学

¹Fukuoka University of Education, ²Kyushu University

琉球海溝に沿って点在する南西諸島では、島ごとに頻度の程度にばらつきはあるものの、過去に主にプレート境界で発生する地震による被害に見舞われている。また、一部の島々では、近い将来に震度6弱以上の強い揺れに見舞われる可能性が高いと評価されているとともに、活断層の存在も指摘される島もあり [例えば、地震調査研究推進本部ホームページ]、将来的に地震による被害を受ける危険性は低くないといえる。

これまでに、山田・他(2010a, b)などでは、沖縄島南部の那覇市内や宮古島における微動アレイ探査実施の結果を報告し、S波速度構造を解明してきている。また、著者の一人の山田は、今回の地点を含め、奄美大島から西表島までの南西諸島の各島のK-NETやF-net観測点周辺を中心に20地点以上の微動アレイ観測をすでに実施してきている。なお、これらについては、別途報告を行う予定である。こうした一連の探査によって、具体的な物性値であるS波速度構造情報を蓄積させることは、地震動を評価する上で意義あることであると考えられる。今回の対象地域周辺である西表島近海では、1991~92年の群発地震に関連した各種調査分析もなされ [例えば、瀬戸・他(1993)]、また、例えば、藤井・木崎(1983)などでは八重山諸島に関する地質構造について示されているが、S波速度構造に関する情報は示されていない。

本発表では、先島諸島南部の石垣島および西表島の国内最西端に位置する強震観測点周辺で実施した微動アレイ探査結果について報告する。ここで報告する探査結果は、石垣市新栄町(IGK)、石垣市伊原間(IBM)、竹富町上原(UHR)であり、それぞれK-NET観測点のOKN009, OKN010, OKN011に隣接する地点である。なお、石垣島の中央部にはF-net観測点も存在する。微動アレイ観測は、2010年9月7, 8日の日中から夜間に実施した。いずれの地点も、海岸に近い位置であり、IGKとIBMで数mから10m程度、UHRで20~30mの標高であった。アレイ配置はやや長周期帯域をターゲットとして、最小半径100mから最大半径500m程度とした。IGKのみは、最大半径1km程度のやや大きめの配置を設定した。アレイ半径に応じて30分から60分間の常時微動の収録を行った。観測には、ポータブル地震計(SMAR-6A3P)を7セット用いた。現段階では、上記の観測で得られた微動記録の分析作業中であるが、後の解析には十分耐えうる微動記録が得られている。なお、いずれの地点も微動の卓越周期は約4.0sとやや長くなっていた。宮古島の場合も同様に、微動のスペクトル性状は周期数秒のやや長周期帯域で卓越する傾向があった。今後解析を進め、先の沖縄島や宮古島でのS波速度構造を参照にし、詳細な速度構造の解明を行う予定である。また、強震記録を参考にしながら、逆解析で得られた速度構造の妥当性についても視野に入れたいと考えている。

キーワード: 微動アレイ観測, S波速度構造, 石垣島・西表島

Keywords: Microtremor array measurements, S-wave velocity structure, Ishigaki & Iriomote Islands

SSS023-P28

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

常時微動観測による鳥取砂丘・湖山池周辺の地盤構造推定

Determination of subsurface structure of Tottori dunes and around Koyama Pond in Tottori Plain from Microtremor Observat

石田 勇介^{1*}, 大永夕陽¹, 野口竜也¹, 香川敬生¹

Yusuke Ishida^{1*}, Yuhi Onaga¹, Tatsuya Noguchi¹, Takao Kagawa¹

¹ 鳥取大学

¹Tottori University

鳥取平野では常時微動や重力異常を用いた地盤構造探査 (Noguchi and Nishida, 2002) がこれまでも精力的に実施されているが、市街域を除いては観測点間隔が概ね 500 m とやや粗く、地域毎の地盤震動特性を把握しきれないでいた。そこで、データを補間するために湖山池の北・東岸域および鳥取砂丘地内で、高密度の常時微動 3 成分単点観測と 4 点微動アレイ観測を実施し、詳細な地盤震動特性の把握と地下構造の推定を試みた。

3 成分単点観測にはアカシ GPL-6A3P (過減衰電磁式加速度計) を用い、約 10 分間の記録から交通振動の影響の小さい区間を複数選定し、その平均スペクトル比から卓越周期を推定した。微動アレイ観測には勝島製作所 PK-110V (電磁式 1 秒速度計) および Geo Space の 2Hz 速度計、4.5Hz 速度計を用い、ケーブルを用いて 1 収録機で同時観測を行った。アレイの径を 2.5 m ~ 50 m の範囲で複数実施し、解析にあたっては SPAC 法 (岡田・他, 1990) および CCA 法 (長・他, 2004) を用いた。

3 成分観測記録を用いた H/V 解析により対象地域の地盤卓越周期分布を推定したところ、これまでにみられなかった分布形状が得られた。これは地形・地質図などの資料から古地形を反映した結果となっているものと考えられる。

アレイ解析からは、ボーリングなどの既存調査や先に実施した H/V 解析による卓越周期と矛盾しない地下構造を推定することができた。これらの物性値を用いることにより、調査地域の卓越周期分布から基盤深度分布を推定することが可能となる。

今後は、鳥取平野における詳細地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションを実施する基礎を固めてゆきたい。

謝辞 観測にあたっては、鳥取大学工学部地圏環境研究室の方々に協力頂きました。

キーワード: 常時微動, 鳥取砂丘, 湖山池, 地盤構造

Keywords: Microtremor, Tottori dunes, Koyama Pond, subsurface structure

SSS023-P29

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

微動観測によるインドネシア・パダンの地下構造推定

Determination of underground structure of Padang, Indonesia by microtremor observations

野口 竜也^{1*}, 上村 修史¹, 佐藤 篤², Rusnardi Rahmat Putra², 小野 祐輔¹, 清野 純史², 池田 達紀², 香川 敬生¹
Tatsuya Noguchi^{1*}, Shuji Uemura¹, Atsushi Sato², Rusnardi Rahmat Putra², Yusuke Ono¹, Junji Kiyono², Tatsunori Ikeda²,
Takao Kagawa¹

¹ 鳥取大学, ² 京都大学

¹Tottori Univ., ²Kyoto Univ.

パダン市では2009年スマトラ島沖の地震(Mw7.6)の際、特に沖積平野に位置する市街地で甚大な被害が発生している。野口ら(2010)により、インドネシア・パダン市において60点の単点3成分観測および12地点の微動アレイ観測を実施され、地盤構造や地盤の卓越秋季分布が得られている。本研究ではさらに深部の地盤構造を推定するために、3地点で大規模の微動アレイ観測を実施した。また、微動単点3成分観測を新たに63点で実施した。

その結果、アレイ観測記録の解析より、工学的基盤より深部のS波速度1500 m/sまでの4層の地盤構造モデルを得ることができた。S波速度1500 m/sまでの基盤深度は、最深部で約200mに達することがわかった。3成分単点観測記録から得られたH/Vは、2~3秒にみられる明瞭な一つのピークを持つ単峰型、2~3秒の長周期側と0.1~1秒の短周期側に二つのピークをもつ複峰型の地点に分類できた。ピーク周期分布については、詳細な分布図が得られ、長周期側のピーク周期は1.5~3.0秒で、海岸部で長くなる傾向があり、また南側平野部の内陸部で山地側から平野部にかけて急変する地域が、南北方向に分布することがわかった。

キーワード: 微動観測, S波速度構造, H/V, インドネシア・パダン

Keywords: Microtremor observation, S-wave velocity structure, H/V, Padang, Inonesia

地震波干渉法を用いた台湾新竹市の地盤構造の推定 Estimation of velocity structure using seismic interferometry at Hsinchu, Taiwan

松本 敬太郎^{1*}, 盛川 仁¹, 谷川 正真¹, 陳 慧慈², 曹 栄凱²

keitaro matsumoto^{1*}, Hitoshi Morikawa¹, Masachika Tanigawa¹, Huei-Tsyr Chen², Tsao Jung-Kai²

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科, ² 台湾国立中央大学土木系

¹Tokyo Institute of Technology, ²National Central University

新竹市は、成長著しい台湾におけるハイテク産業の中心地であると同時に、周辺には大きな断層が複数存在する地震危険度の高い地域である。台湾史上最大の被害を出した1935年の新竹・台中地震では中心被災地であり、近年では1999年の集集地震でも被害が出たことが記憶に新しい。今後の地震防災の観点から、地震動予測を行う必要性が高く、そのための地盤モデルの構築は不可欠である。

過去の研究で既に、新竹市において重力探査に基づく基盤形状の三次元モデルの構築(正坂ほか, 2007)小アレイを用いた微動探査などが行われている(川連ほか, 2009; 岩堀ほか, 2009)。しかし、重力探査の結果からは市の北西臨海部から南東内陸部に向かって基盤面が深くなっていくような構造が示唆されたが、一方の微動観測においては深部構造を探査するために必要な微動の長周期成分が捉えられておらず、重力探査の結果との整合性がはっきりしていない。

そこで、本研究では新竹市内の複数の観測点で長期間の微動観測を実施し、地震波干渉法を用いた解析を通じて地盤構造の推定を試みた。地震波干渉法は、2つの観測点で同時記録された地震波の相互相関関数からインパルス応答関数(グリーン関数)を求めることができ、近年世界的に注目を集める地下探査法である。計算の特性上、より多く、より長期のデータを用いることによって関係のない信号を打ち消し、2点間のグリーン関数を表す波形を得ることができる。相似地震や人工震源のコーダ波などを用いることも多いが、上記のような性質があるため、長期間に渡って連続した大量のデータを集めることができる微動とは相性が良い解析手法であると言える。また、長期間の記録をスタックすることでノイズを抑えることができ、同じ微動を用いた地下探査法でも、過去に行われた微動アレイ探査より長周期成分を捉えることが期待できる。

これまでの微動観測で、微動の長周期成分のパワーが非常に小さく、深い構造を知るためには非常に高感度、低ノイズでの観測が必要であることが明らかとなっていた。そのため、新たに、超低ノイズのデータロガーを開発し、また、動コイル型の速度計および加速度計を用いて観測を行った。新竹市南東部に位置する基盤が深いと推定された地域を取り囲む点、また、もっとも基盤が深いと考えられる位置の直上にも観測点を設置した。基盤の深い地域を挟んで東西および南北に測線を設定し、5台の速度計、2台の加速度計を国民小学校内に設置した。観測はサイトによって異なるが8月末から10月下旬までの約50日間で、24時間の連続観測を行った。カットオフ周波数が40Hzの1次のベッセル型フィルタをアンチエイリアスフィルタとし256倍のゲインをかけて0.01秒間隔のサンプリングでローカルなSDカード上に記録した。時刻はGPSを用いて校正され、サンプリング間隔以上の精度で各地点のデータは同期されている。GPSの受信のエラーや電源環境の変動により、ごく一部の時間帯で数分間のデータが欠測したが、それ以外はほぼ完全な連続観測を行うことができた。また、速度計については設置状態でステップレスポンスを記録し、後処理で厳密な計器補正をすることで長周期領域での精度を確保している。

得られた記録の上下動成分から相互相関関数を計算し、各観測点間のグリーン関数を求めた。得られたグリーン関数がRayleigh波によるものであると云う仮定のもとで、マルチプルフィルタ解析を行い、表面波群の周期帯ごとの群速度を算出した。さらに、この周期と群速度の関係を満たすような地下構造モデルを逆解析によって求め、これを既往の研究結果と比較した。その結果、重力探査から求められる密度構造と微動から求められる速度構造が必ずしも整合しない場合のあることがわかった。現時点では、2地点間の地盤構造モデルは平均的な成層構造モデルであるため、複雑な三次元構造を反映したものではない。したがって、現時点での結果がそのまま結論となるわけではないことを考慮したうえで、今後は密度構造と速度構造の不整合性についてより詳細な検討を行っていく予定である。

キーワード: 地震波干渉法, 地盤構造解析, グリーン関数, 微動探査

Keywords: Seismic interferometry, Green's function, microtremor

大阪堆積盆地構造モデルの検証と高度化 - 関西地震観測研究協議会の連続観測記録を用いた解析 -

Estimation of inter-station Green's functions by CEORKA continuous data for validating velocity model of Osaka basin

赤澤 隆士^{1*}, 染井 一寛¹, 浅野 公之², 岩田 知孝²

Takashi Akazawa^{1*}, Kazuhiro Somei¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata²

¹ 地盤研究財団, ² 京大・防災研

¹G.R.I., ²DPRI, Kyoto Univ.

関西地域に強震計を展開している関西地震観測研究協議会（関震協）は、広帯域速度計の利点を活かし、大地震から近地で発生した MJ2 程度の小地震に至るまで、高精度な地震観測記録を多数得てきた。同協議会では、1994 年 4 月の観測開始以来、地震観測記録の収録にトリガ方式を採用してきた。一方で、2009 年から、リアルタイム地震速報を目指した連続観測データのリアルタイム送信が可能な観測システムの構築に取り組んでおり（赤澤・他、2009、2010）、大阪堆積盆地内の観測点から順次、連続記録観測を進めている。

新しく導入したデータロガーにより収録される観測記録の精度評価を行うため、新データロガーの観測データと微動観測に広く利用されている SMAR-6A3P で常時微動記録を同時収録し、それらの比較検討を行った。新データロガーで収録された記録には、0.2 ~ 30Hz の範囲で微動が確認された。本研究では、この微動を十分に記録している連続観測記録を用いて、地震波干渉法を適用して観測グリーン関数を求め、それを利用した堆積盆地構造モデルの検証およびその高度化を目指す。このような方法は、山中・他 (2009) が関東平野に適用しており、都市圏の強震動予測の高度化に資することができると思われる。本報告はその序報である。

地震波干渉法による相互相関解析処理には、山下・他 (2010) での解析手法を参考にす。これまでに、堺新湊観測点 (SNM; 堺市堺区) と福島観測点 (FKS; 大阪市福島区) の記録を利用して両地点間の観測グリーン関数を抽出した。相互相関関数の計算に使用する 1 つの記録長は、観測点間の距離 (約 14km) を考慮して 10 分間とし、1 ヶ月程度の連続記録により、約 4 千スタックを行った。信号波群の粒子軌跡は Rayleigh 波基本モードの特徴を有し、信号波群には分散性が見られた。現在連続観測が行われている観測点ペアデータを使って解析を行い、大阪平野全体での空間的な特徴把握を進めるとともに、地下構造モデルとの関係を検討する。

参考文献

赤澤・他 (2009), 関西地震観測研究協議会の強震観測システムのリアルタイム化に関する検討, 日本地震学会講演予稿集, 2009 年度秋季大会, A21-6.

赤澤・他 (2010), 関西地震観測研究協議会の強震観測システムのリアルタイム化に向けた取り組み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, HDS023-09.

山下・他 (2010), 地震波干渉法による西日本の地殻速度構造 (1) - 表面波群速度の推定 -, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, 175-180.

山中・他 (2009), 南関東および相模湾地域の堆積層の S 波速度構造モデルの検証のための地震波干渉法による表面波群速度の推定, 日本地震学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, B31-05.

地震波干渉法によるグリーン関数の合成に関する数値シミュレーション Simulation for retrieving Green's function with seismic interferometry

堤 若菜^{1*}, 山中 浩明¹, 地元 孝輔¹

wakana tsutsumi^{1*}, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo institute of technology

地震波干渉法とは、ある2観測点における微動の長期観測記録の相互相関から観測点間のグリーン関数を合成するという手法であり、近年注目を集めている。たとえば、南関東地域で観測された微動に地震波干渉法を適用した山中ほか(2010)は、地震記録との比較から地震波干渉法によりグリーン関数の表面波成分を抽出できることを確認し、深部地盤における既存のS波速度構造モデルの検証が出来る可能性を示した。しかし、微動の観測によって得られた相互相関関数の中には、理論的には正負の遅れ時間で非対称な波形などの解釈の困難なものがあり、振動源の非等方的な分布や局所的地下構造の強い不均質性の影響を受けていると考えられている。

そこで、微動の観測データを用いる場合を想定し、差分法を用いた3次元弾性媒質での地表震源における波動場の計算を行い、地震波干渉法によってグリーン関数の合成を試みた。水平成層構造と振動源の水平面における等方均質分布を仮定した場合、地震波干渉法によってグリーン関数の表面波成分が合成できることを確認した。しかし、実体波の反射波や屈折波などz方向に伝播する波は合成されない可能性があることが分かった。これは地表に振動源があるとしている微動に地震波干渉法を用いる場合の本質的な問題である可能性がある。また、局所的に停留位相点(Snieder et al., 2006)以外に強い振動源が存在すると、相互相関関数の正側と負側で大きく波形が変わってしまうことからグリーン関数の合成は困難であることがわかった。しかし、波形の位相は一致しており、群速度の評価などでは大きな問題にならない場合も多いこともわかった。不整形な地下構造の例として、観測点の一方がS波速度の小さい盆地の内部にある場合は、相互相関関数の正側と負側で波形が異なるものの、位相はグリーン関数との類似性を示した。一方で観測点の両方が盆地の内部にある場合は2つの観測点に対する地下構造の対称性にかかわらずグリーン関数との一致度合いが低かった。不整形な地下構造では、S波速度の異なる媒質の境界における表面波の反射が、2次的振動源となって相互相関関数の対称性とグリーン関数の合成に及ぼす影響が大きいと考えられる。

キーワード: 地震波干渉法

Keywords: seismic interferometry

数値シミュレーションによる地震波干渉法の適用条件に関する検討 Estimation of application conditions for seismic interferometry based on numerical simulation

染井 一寛^{1*}, 宮腰 研¹, 羽田 浩二²
Kazuhiro Somei^{1*}, Ken Miyakoshi¹, koji hada²

¹ 地盤研究財団, ² ニュージェック

¹G.R.I., ²NewJec Inc

地震波干渉法によって地下構造イメージングを行うためには、観測波形記録の自己相関解析、あるいは相互相関解析による仮想震源に対するレスポンス関数の合成を行い、さらにレスポンス関数に対して重合処理を行う、という大まかに分けてこの2段階を踏むこととなる。自然地震記録を用いる場合、使用する地震の数や震源分布、その震源特性、また、解析周波数範囲によって、レスポンス関数の特徴が異なると予想される。地下構造イメージングを正確に行うためには、観測記録から得られたレスポンス関数に対する適用条件について予め想定しておくことが重要である。そこで本研究は、地震波干渉法による地下構造イメージングのための適用条件について、数値シミュレーションを用いた定量的な評価を行った。

本研究では、シミュレーション波形を用いた自己相関解析による2つの検討を行った。1つは、対象とする地下構造モデルの地震基盤上面深度（対象深度）と解析に使用する適切な周波数範囲の関係を評価する。また、地震記録を用いる場合、震源のライズタイムも観測記録の周波数特性に影響するものと考えられるため、対象深度と解析周波数範囲、ライズタイムに注目した。評価基準は、設定した対象深度と評価された深度との差とした。もう1つは、重合処理を施す地震数とS/Nの関係である。1地震の相関関数からでは、屈折波や透過波等の影響により、明瞭な反射波位相を検出できないことが多い。このため、S/Nを上げる目的で、通常、複数の地震の相関関数を重合（スタック）する。ここでは、具体的にどの程度の地震数を重合することで、顕著な反射波位相が見られるか、という点に注目し検討を行った。評価基準は、得られるレスポンス関数のS/N値とした。また、これらの検討に用いる理論波形は、擬似的な観測点と震源を幾つか仮定し、離散化波数法（Bouchon, 1981）、反射透過係数行列法（Kennett and Kerry, 1979）による数値シミュレーションを基に作成した。

結果は、地震基盤上面深度が浅いほど高周波数帯域の情報が必要であることがわかった。対象深度100 - 1000mの範囲では、ライズタイム0.5秒以下の地震を扱う方が良いこと、また、500m以浅の深度に対しては、低周波数側のカットオフ1.0Hz以上の処理を施したものが望ましいと考えられる。さらに、重合地震数とレスポンス関数のS/Nは明瞭な比例関係を示したが、重合地震数50程度で十分なS/Nが得られていることが確認できた。ただし、理論波形はノイズの影響を含んでいないため、実際の観測記録を利用する際、ここで示した重合数以上の地震数や、適切な地震を精査する必要があると考えられる。

以上を踏まえて、大阪堆積盆地の強震観測記録を用いて自己相関解析を行い、地震基盤深度を推定した結果、既往の構造モデル（例えばKagawa *et al.*, 2004）の基盤深度と概ね良い対応を示した。

謝辞

独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net の強震波形記録, F-net のモーメントテンソル解, 気象庁一元化震源カタログによる震源情報を使用しました。記して感謝致します。

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関関数, 数値シミュレーション, 適用条件, 大阪堆積盆地

Keywords: seismic interferometry, auto-correlation function, numerical simulation, application conditions, Osaka basin