

M6.5 中国雲南省昭通地震における建物被害と強震動特性の関係—その1：現地調査報告および建物被害分析 Relationships between building damage and characteristics of strong ground motions during the M6.5 Zhaotong Earthquake-I

王欣^{1*}; 馬強²; 司宏俊³; 党紀⁴; 吳浩⁵; 倉橋 奨⁶

WANG, Xin^{1*}; MA, Qiang²; SI, Hongjun³; DANG, Ji⁴; WU, Hao⁵; KURAHASHI, Susumu⁶

¹ 東北大学災害科学国際研究所, ² 中国地震局工程力学研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 埼玉大学, ⁵ 愛知工業大学地域防災研究センター, ⁶ 愛知工業大学

¹IRIDeS, Tohoku University, ²Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, ³Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ⁴Saitama University, ⁵DPREC, Aichi Institute of Technology, ⁶Aichi Institute of Technology

2014年8月3日16時30分(北京時間)に中国雲南省昭通市魯甸(ルーデン)県龍頭山鎮付近(27.110N、103.330E)でマグニチュード6.5の地震が発生した。震央付近で最大震度IX(JMA震度の5強と相当)で、最大加速度は震央から約8kmを離れた龍頭山鎮で949galで記録された。死者数が617人(2014年8月8日15時現在)で、このうち約85%(526人)は龍頭山鎮に集中した。建物倒壊による人的被害が圧倒的に多く、建物の耐震性能不足と強震動特性の両面から原因が考えられる。

被害現場の建物被害状況および地盤の増幅と周期特性を究明するため、本研究では2014年11月9日~12日に現地調査を実施した。現地調査の内容として、断層近傍の強震動観測点および昭通市内において、建物被害の調査および地盤常時微動観測を行っている。現地調査を実施した強震動観測点を図1に示す。本震時に図1に示す強震動観測点の記録の最大加速度(PGA)が昭通市15gal、茨院45gal、龍頭山949gal、鉛場137gal、馬樹135galである。PGAの距離減衰式によって、断層最短距離の増大と共にPGAが急速に減少することが分かった。

被災地ではレンガ造建物がよく使用され、龍頭山鎮では建物の倒壊が多く見られる。王らが提案した2008年四川地震の建物の被害関数に基づいて予測した龍頭山鎮の倒壊率は79%で、この予測値と建物被害現地調査の結果がよく一致する。鉛場と馬樹にレンガ造建物の壁にひび割れが見えるが、建物倒壊が殆どない。昭通市内では建物被害が殆ど見えない。

地盤常時微動観測は高感度速度計を用いて100Hzのサンプリングレートで各地点に30分で実施した。H/Vスペクトルにより龍頭山鎮の強震動観測点の地盤の卓越振動数は約4Hzであり、他の強震動観測点とほぼ同じであることが分かった。しかし、龍頭山の建物被害が地盤状況によって異なることが見られている。

キーワード: 中国雲南省昭通地震, 建物被害調査, 地盤常時微動, レンガ造建物

Keywords: Zhaotong Earthquake, Onsite Investigation, Ground Microtremor Measurement, Masonry Buildings



2014年中国雲南省昭通地震(M6.5)における建物被害と強震動特性の関係—その2 : 大加速度の生成メカニズム Relationships between building damage and characteristics of strong ground motions during the M6.5 Zhaotong Earthquake-2

倉橋 奨^{1*}; 入倉 孝次郎¹; 王 欣²; 司 宏俊³; 馬 強⁴; 呉 浩¹
KURAHASHI, Susumu^{1*}; IRIKURA, Kojiro¹; WANG, Xin²; SI, Hongjun³; MA, Qiang⁴; WU, Hao¹

¹ 愛知工業大学, ² 東北大学災害科学国際研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 中国地震局工程力学研究所
¹ Aichi Institute of Technology, ² IRIDeS, Tohoku University, ³ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ⁴ Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration

2014年8月3日16時30分(北京時間)に中国雲南省昭通市を震源としたマグニチュード6.5の地震が発生した。この地震により震央付近の龍頭山鎮では、617人の死者が出るなどの被害が発生した。この地震では、震央の極近傍の龍頭山鎮観測点(LLT)での最大加速度は949galとなっており、特に、観測波形には、特徴的なパルス波形が2つ観測されている(図(b))。

地震動と被害との関係を解明するためには、この大加速度の地震動の生成メカニズムの解明が必要である。そこで、本研究では、観測記録を用いて本地震の震源モデルを構築し、大加速度の地震動の生成メカニズムの解明することを目的としている。

本地震の余震分布(中国地震局、2014)を図(a)に示す。図のように、南東-北西方向に沿った面(ここでは断面Aと呼ぶ)と南西-北東方向に沿った面(ここでは断面Bと呼ぶ)が見られ、すなわち、くの字になっていることがわかる。中国地震局による被害分布は、断面Aに沿っていることから、断面Aが主要な断面である可能性がある。

一方で、断面Aおよび断面Bにおいて、遠地実体波による波形インバージョンが実施されている(中国地震局)。この結果では、どちらの断面が動いたかは明瞭に示されていない。

そこで、ここでは、まずは経験的グリーン関数法により、短周期地震動の大局的な震源モデルの構築を試みた。ただし、断層面等が明確でないため、震源極近傍のLLT観測点については、除外して行った。利用した観測点は4観測点であるが、震源の南側に偏っている。要素地震の地震モーメントやメカニズムなど、震源パラメータの情報は非常に乏しいが、地震モーメントはマグニチュードから、メカニズムは本震と近似していると仮定して実施している。小断層の足し合わせ数と応力降下量比は、本震と要素地震のスペクトル比から計算している。

以上、情報が乏しいながらも解析した結果、断面Aでも断面Bでも、遠くの観測点については、概ね表現できることがわかった。各断面は10km×10km、応力降下量は10MPa程度で表現できた。しかしどちらの断面が動いたか、両方とも動いたかの判断はできない。

以上のことから、震源極近傍の観測記録から生成メカニズムを解明していく必要があることがわかった。そこで次に、震源極近傍の観測点LLTの波形に注目し、波形のパーティクルモーションから、S波の到来方向を推定する。

P波初動の水平動のパーティクルモーションを見ると、やや北西-南東方向に振動している。最初の地震動は観測点の北西方向から来ていることが推測される(図(c)左図)。次に、S波の第1パルスおよび第2パルスのパーティクルモーションを検討する。その結果、第1パルスの初動は北西-南東方向に振動し(図(c)中図)、第2パルスは北東-南西方向に振動している(図(c)右図)ことが見て取れる。これらのパルスが、SH波が卓越していると考え、振動方向と直交する方向から波が到来していることとなる。すなわち、第1パルスと第2パルスでは、到来方向が異なることがわかる。余震分布と観測点との幾何学的な関係から考えると、第1パルスは断面Aから、第2パルスは断面Bから到来していることが考えられる。

今後、断層の位置を確定させるとともに、各断層面を仮定して震源極近傍の観測点LLT観測点も含めた、強震動生成域の推定を試みる。

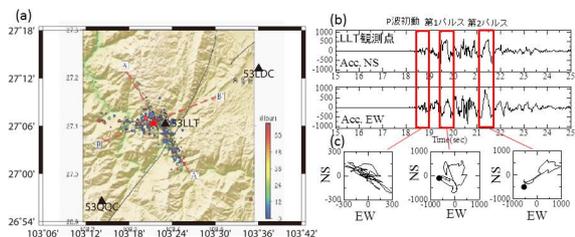
キーワード: 中国雲南昭通地震, 大加速度, 強震動生成域

Keywords: Zhaotong Earthquake, large acceleration, strong-motion generation area

SSS25-02

会場:A04

時間:5月25日 09:15-09:30



2014年中国雲南省昭通地震(Ms6.5)における建物被害と強震動特性の関係—その3 :
龍頭山強震点周辺建物被害要因及び地盤震動特性
Relationships between building damage and strong ground motions characteristics during
the 2014 Zhaotong Earthquake-III

呉浩^{1*}; 王欣²; 司宏俊³; 党紀⁴; 馬強⁵; 林国良⁶; 入倉孝次郎¹; 倉橋奨¹
WU, Hao^{1*}; WANG, Xin²; SI, Hongjun³; DANG, Ji⁴; MA, Qiang⁵; LIN, Guoliang⁶; IRIKURA, Kojiro¹;
KURAHASHI, Susumu¹

¹ 愛知工業大学, ² 東北大学, ³ 東京大学, ⁴ 埼玉大学, ⁵ 中国地震局工程力学研究所, ⁶ 雲南省地震局
¹Aichi Institute of Technology, ²Tohoku University, ³The University of Tokyo, ⁴Saitama University, ⁵China Earthquake Administration, IEM, ⁶Yunnan Province Earthquake Administration

Many of the buildings near the Longtoushan (LTS) strong-motion station were heavily damaged or collapsed during the 2014 Zhaotong earthquake (Ms 6.5) which occurred on Aug. 3, 2014. The largest PGA with approximately 1 g was recorded at LTS during the mainshock. In contrast, the damage of buildings was minor near other stations, and the strong-motion records there were lower than 150 gal.

We conducted an almost three-day field survey near five strong-motion stations around the epicenter. We found that the causes for heavy damage of buildings near the LTS station were complicated, such as geological failure (e.g. landslide), insufficiently seismic resistant structural design, inappropriate construction, and site effect (transfer function and nonlinear effect), and so on. We also found that the collapse of many buildings in the EW direction was obviously heavier than that in the NS direction near the LTS station. It can be explained by the higher pseudo-velocity response spectrum in the range of 0.5 s to 1.0 s in the EW direction.

We also conducted microtremor measurement at six sites around the LTS station to examine the variation of site effects in this area. We found that the predominant periods at heavily damaged sites were similar, i.e., 0.25 s, while the predominant periods at light damaged sites were about 0.15 s.

In addition, we obtained several aftershock records as well as mainshock record, and the boring data near the LTS station. These data can be used to clarify the site effect characteristic at the LTS station.

キーワード: 昭通地震, 強震動, 常時微動, サイト特性

Keywords: Zhaotong Earthquake, ground motion, microtremor, site effect

STRONG GROUND MOTION SIMULATION of THE 24 MAY 2014 NORTH AEGEAN SEA EARTHQUAKE (Mw 6.9) in TEKIRDAG and SURROUNDING ARE STRONG GROUND MOTION SIMULATION of THE 24 MAY 2014 NORTH AEGEAN SEA EARTHQUAKE (Mw 6.9) in TEKIRDAG and SURROUNDING AREA

KARAGOZ Ozlem^{1*}; 地元 孝輔¹; 山中 浩明¹; Ozel Oguz³; citak seckin ozgur⁴

KARAGOZ, Ozlem^{1*}; CHIMOTO, Kosuke¹; YAMANAKA, Hiroaki¹; OZEL, Oguz³; CITAK, Seckin ozgur⁴

¹Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, ²Department of Geophysical Engineering, Canakkale Onsekiz Mart University, Canakkale, Turkey, ³Department of Geophysical Engineering, Istanbul University, Istanbul, Turkey, ⁴JAMSTEC

¹Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, ²Department of Geophysical Engineering, Canakkale Onsekiz Mart University, Canakkale, Turkey, ³Department of Geophysical Engineering, Istanbul University, Istanbul, Turkey, ⁴JAMSTEC

The Marmara Region (NW Turkey) was affected from destructive earthquakes since historical times. The North Anatolian Fault with 1,200 km length is the main source of the earthquakes in the region. The most recent 1999 Kocaeli Earthquake (Mw 7.4) damaged residential and industrial areas of the large cities in Marmara. The future earthquake is expected on the north-western segment of the fault close to the city of Tekirdag.

In this study, we simulated strong ground motion records of the 24 May 2014 North Aegean Sea Earthquake (Mw 6.9) in Tekirdag and surrounding area. We used one-dimensional homogeneous horizontal layer model at each AFAD (Republic of Turkey Prime Ministry Disaster & Emergency Management Presidency Earthquake Department) strong motion station site in Tekirdag and surrounding area (i.e. 5904, 5902, 5907, 5906), Canakkale (i.e. 1701, 1710), Gokceada (1711), Edirne-Enez (2201). We combined our shallow model (0-250 m) that obtained from our previous microtremor explorations (Karagoz et al., 2014) and the deeper parts were taken from previous crustal studies in the region. The outer fault parameters of the mainshock (seismic moment, strike, dip, and rake) were determined by previous focal mechanism solutions studies while the inner fault parameters were estimated by following the recipe of Irikura and Miyake (2011).

The fault plane (background) and asperities were divided into several subfaults that were assumed as single double-couple point source. We defined appropriate Kostrov-like slip-velocity function (modified by Nakamura and Miyatake, 2000) for the asperity areas to simulate high frequency ground motions. The synthetic seismograms were obtained using a deterministic discrete wave number method for each sub-fault and were summed to get full waveform at the station around the epicentre in a broadband frequency range (0.1-10Hz).

The simulated peak ground velocities at the ground surface were estimated by multiplying the simulated ground motion at the top layer of $V_s=780$ m/s from the discrete wave number method with 1D amplification factors of S-waves in the shallow soil layers derived from the microtremor explorations. For validation, the results converted accelerations and were compared with S-wave portions of the recorded acceleration waveforms at the strong motion stations.

キーワード: Discrete wave form method, earthquake waveform simulation, Gokceada, site effect, Tekirdag

Keywords: Discrete wave form method, earthquake waveform simulation, Gokceada, site effect, Tekirdag

強震波形から推定した2014年長野県北部地震の震源過程 Source Rupture Process of the 2014 Northern Nagano Earthquake Estimated by Strong Motion Data

浅野 公之^{1*}; 岩田 知孝¹; 久保 久彦¹
ASANO, Kimiyuki^{1*}; IWATA, Tomotaka¹; KUBO, Hisahiko¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2014年11月22日22時8分に長野県北部の北安曇郡白馬村付近で発生した $M_{JMA}6.7$ の地震(以下、2014年長野県北部の地震)では、最大震度6弱の地震動が観測された。Global CMT ProjectやF-netから公開されているモーメントテンソル解によれば、北北東-南南西の走向をもつ東側隆起の逆断層で発生した地震と考えられる。また、この地震は糸魚川-静岡構造線断層帯の神城断層の活動に関連していると報告されている(例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2014)。本研究では、この地震の震源像の実態を把握するため、強震波形記録を用いたインバージョン解析によって、2014年長野県北部の地震の震源過程を推定した。

解析には震源域周辺のK-NET、KiK-net、気象庁、長野県の強震観測点から12点の波形記録を用いた。加速度記録を速度に積分し、0.05-1Hzのバンドパスフィルターを適用した波形記録から、S波到着1秒前より15秒間を抽出した波形をインバージョンのためのデータとした。この地域の地下構造は複雑であり、単一の数値構造モデルを用いてグリーン関数を計算することは適切ではない。本研究では、地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル(Koketsu et al., 2012)から観測点ごとに直下の一次元構造を抽出した速度構造モデルを使用し、離散化波数法(Bouchon, 1981)及び透過・反射係数行列法(Kennett and Kerry, 1979)によりグリーン関数を計算した。

余震分布(例えば、防災科学技術研究所, 2014)及び地表地震断層の分布から断層面が複雑であることが推測される。本研究では、震源断層の北部と南部で傾斜の異なる2枚の平面断層を組み合わせたモデルで断層モデルを表現した。南部は走向 25° 、傾斜 65° 、北部は走向 25° 、傾斜 50° と仮定した。南部の断層面の先端は神城断層の地表トレースに対応するようにしている。全体の断層サイズは長さ22km、幅14kmとし、これを $2\text{km} \times 2\text{km}$ の小断層で分割した。各小断層には時間幅1秒のsmoothed ramp関数を0.5秒ずらしで6個並べて、その小断層でのモーメント時間関数を表現した。

インバージョン手法はマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン(Hartzell and Heaton, 1983)を用い、時空間のすべりの平滑化(Sekiguchi et al., 2000)の強さ及び第一タイムウィンドウの破壊伝播速度はABIC最小規準(Akaike, 1980)により決定した。すべり方向は $45^\circ \pm 45^\circ$ の範囲に拘束している。

破壊開始点から約5km北のやや深いところにすべり量の大きな領域が推定され、最大すべり量は1.8mと推定された。この領域では周辺に比べ余震数が少ない。各機関によるモーメントテンソル解のセントロイドが北側深部に推定されていることも整合している。また、地表に近いところでも0.3~0.5m程度のすべりがあり、これらのすべりは地表地震断層とも関係していると考えられる。全体の地震モーメントは $3.85 \times 10^{18}\text{Nm}$ 、モーメントマグニチュードは6.3である。断層全体の平均すべり量は約0.4mである。これらの断層パラメータを既往の内陸地殻内地震と比較したところ、これまでの日本の内陸地殻内地震の断層パラメータのばらつきの範囲内であった。地表地震断層に関しては、地震規模に比べ、地表変位量が大きいことが指摘されているものの、強震動に関わる震源過程としては、平均的な地震であったといってもよい。

今後も詳細な余震分布や地表地震断層調査の結果が報告されると考えられる。これらの情報を踏まえ、震源モデルの見直しを図っていく必要がある。

謝辞: 独立行政法人防災科学技術研究所強震観測網(K-NET及びKiK-net)、気象庁震度計、東京大学地震研究所首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)より公開されている長野県震度情報ネットワークシステムの強震波形、気象庁一元化震源カタログを使用した。データ公開に関わられる皆様に記して感謝する。

キーワード: 2014年長野県北部地震, 震源過程, 強震記録

Keywords: the 2014 northern Nagano earthquake, source process, strong motion data

2014年長野県北部の地震の余震と微動の観測による白馬村の地盤増幅特性の評価 Site amplification in Hakuba from microtremor and aftershock observation of the 2014 Northern Nagano Earthquake

地元 孝輔^{1*}; 山中 浩明¹; 佐口 浩一郎¹; 津野 靖士²; 盛川 仁¹; 飯山 かほり¹; 後藤 浩之³
CHIMOTO, Kosuke^{1*}; YAMANAKA, Hiroaki¹; SAGUCHI, Koichiro¹; TSUNO, Seiji²; MORIKAWA, Hitoshi¹; IYAMA, Kahori¹; GOTO, Hiroyuki³

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科, ² 鉄道総合技術研究所, ³ 京都大学防災研究所

¹Tokyo Institute of Technology, ²Railway Technical Research Institute, ³DPRI

2014年11月22日に発生した長野県北部の地震では、最大震度6弱が観測され、震度5強が観測されたK-NET白馬から南におよそ5kmの白馬村堀之内や三日市場では建物被害が顕著であった。そこで、11月24日から12月4日にかけてK-NET白馬から白馬村堀之内、三日市場の周辺で余震観測と微動探査を実施し、地下構造による地盤増幅特性について調べた。

臨時余震観測は、加速度計JEP6A3とデータロガーLS7000XTまたはLS8800を用いた13観測点で10日ほど行った。震度1以上の余震は30ほど観測され、最大加速度にして30gal程度の余震記録が得られた。建物被害が顕著であった堀之内と三日市場からその西側の沖積低地にかけて大きな加速度が得られ、長い後続位相も確認される。また、速度応答スペクトルはK-NET白馬に比べて周期0.5から1秒程度で大きくなっている。三日市場の山裾の余震観測点に対するスペクトル比を求めたところ、堀之内では周期0.5秒から1秒程度にピークを持つことがわかった。

各余震観測点では20m程度以下の微動アレイと単点微動観測を行った。さらに、堀之内近くでは、神城断層の東側と西側で最大680mほどの微動アレイ観測も実施し、SPAC法を適用して位相速度の推定を行った。20m程度のアレイ観測記録からは、3Hzから30Hz程度までの位相速度分散曲線が得られ、K-NET白馬で最も速い。堀之内や三日市場では、100から200m/s程度の位相速度が得られた。大きなアレイでは周期1秒以上で1000m/s以上の位相速度が観測された。位相速度の逆解析によりS波速度構造を推定し、K-NET白馬ではS波速度300m/s程度の表層が10m未満であったものの、堀之内や三日市場では200m/s以下の低速度層が10m程度存在し、さらに400m/s以下の層が50m程度と深いことがわかった。大きなアレイ観測により得られた位相速度の逆解析では、断層の西側では東側に比べて深い構造であることがわかった。S波速度1000m/s以上の層までの深さは、西側で700mほど、東側で、400mほどであった。K-NET観測点の1km西にあるKiK-net観測点の検層結果では、それが100m以下であることから、被害が大きかった地域付近では深部地盤も深いことがわかる。

推定されたS波速度構造によってS波地盤増幅特性を求めた。表層地盤による地盤増幅は、K-NET白馬では周期0.1秒程度で卓越するものの、堀之内や三日市場では周期1秒程度で卓越する。余震観測記録のスペクトル比と同様にして地盤増幅特性の比を求めて比較したところ、卓越周期はおおよそ類似したものとなった。しかし、概して観測されたスペクトル比のほうが大きく、深部地盤による増幅効果の影響なども考慮する必要がある。

キーワード: 2014年長野県北部の地震, 地盤増幅特性, 余震観測, 微動, 神城断層

Keywords: 2014 Northern Nagano Earthquake, Site Amplification, Aftershock observation, Microtremors, Kamishiro Fault

2014年11月22日長野県北部の地震による長野善光寺の石灯籠の被害と強震動 Damages of Stone Lanterns at Zenkoji Temple, Nagano, Caused by Northeastern Nagano Earthquake, November 22, 2014

加藤 護^{1*}

KATO, Mamoru^{1*}

¹ 京大院人間・環境学

¹GSHE, Kyoto University

2014年11月22日に長野県北部を震源とする気象庁マグニチュード6.7の地震が発生した。震源地付近で震度6弱の強い揺れとなり、白馬村や小谷村などで家屋等に多大な被害が出た。長野市中心部に存在する長野善光寺でも鐘楼の土台の破損や多数の石灯籠の倒壊など被害が出た。この地域の歴史地震のひとつに1714年の地震があるが、この際にも善光寺の石灯籠の被害が生じたとの記録が残っている。白馬盆地の被害分布を考え合わせると今回の地震と揺れの特徴が類似していた可能性が示唆される。

糸魚川・静岡構造線北部で発生する地震による地震動予測を精緻化するうえで今回の地震で生じた長野善光寺に代表される長野市街の被害を整理しその原因となった強震動を検討することは重要であると考えられる。以上を踏まえわれわれは11月22日の地震によって生じた長野善光寺の石灯籠の現地調査を行った。本発表では調査の結果を整理し、この被害を引き起こした強震動の特徴に関する予察を示す。

被害の調査は地震翌日の11月23日に行った。11月30日及び12月1日に追加調査を行ったが、既に一部で復旧が始まっており両日の結果に差異がある場合は23日に確認した被害を採用した。われわれは1847年善光寺地震による石灯籠の被害の把握を目的として2013年夏に善光寺石灯籠の悉皆調査を行っている(日岡, 2014; 加藤・日岡, 2014)。今回の調査は2013年の調査記録をベースとしている。日岡(2014)などでは石灯籠のみを調査対象としていたが、今回は石塔の被害も確認できたので合わせて報告する。

なお、長野市中心部では長野地方気象台で震度5強、防災科研K-net NGN004観測点で震度4が観測されている。

被害発生後の改変の可能性がほぼない石灯籠65基、石塔12基について部位の落下や転倒を確認した。石灯籠の被災率は約3割5分程度である。この他に部位の回転などの被害も確認された。被害を受けた石灯籠などの分布は境内内で偏りがないように見える。落下や倒壊の方位は偏って分布しており、被害を引き起こした強震動の特徴を反映していると考えられる。

石灯籠などの小型構造物は一般に0.3~0.5Hz程度の固有周期を持つ。善光寺に近い長野地方気象台の波形はこの周期帯の成分に富んでいたことから長野善光寺の石灯籠の被害はこの短周期の揺れを反映している可能性が考えられる。

謝辞：気象庁と防災科研で公開されている強震波形記録を用いました。

キーワード: 強震動, 2014年長野県北部地震

Keywords: String Motion, Northern Nagano Earthquake, 2014

2011年東日本大震災に伴う死者の年齢等依存性(5) 死亡率算定法の再改訂 Age-dependent Mortality in the 2011 East Japan Giant Earthquake (5) Additional Revision of the Current Equation

太田 裕^{1*}; 志垣 智子²; 小山 真紀³
OHTA, Yutaka^{1*}; SHIGAKI, Tomoko²; KOYAMA, Maki³

¹ 東濃地震科学研究所, ² 高齢者住宅研究所, ³ 京大院医学研究科
¹Tono Res. Inst. Earthq. Science, ²Inst. Elderly Housing Sci., ³Medical Inst., Kyoto Univ.

1. 前承け

前報までは地震・津波等に伴って発生する急性期の死者について、年齢区分別の発生状況を調べ、算定式の構成を行ってきた1)。その当初段階では伝統に従って、被災域における年齢区分別[死亡者数/母数人口]を基本式としてきた。その結果、この関係式は高齢者の死亡実態はよく反映するものの、乳幼児・若年者については過少評価となっている場合が間々あり、年齢区分でみた死者発生の実態を正しく評価し得ていないことを例示してきた(周知の片田2)が活用する算定式も上記の伝統手法と同等であり、同様の問題を内蔵している)。そこで、2つの算定法を新たに導入することで事態の改善を試みた。1つは「平常時、1年間」の年齢区分別死者数と対比する尾崎法3)を小改訂したものであり、他の1つは経済学者 Sen が主唱する『乳幼児・若年者の死亡は、相応の生存ができたならばあったであろう可能性の全てを剥奪するものである4)』との主唱に添う形で“年齢の逆数”を重みとする損失量を導入した新しい構成式を提示した。そして、これらの式を活用することで、伝統評価法がもつ問題点のうち、特に乳幼児・若年層に対する評価の是正を試みたものである。

2. 年齢区分別死亡率の算定法の再改定

本論はこの延長線上にあり、先ず上記の改訂尾崎法がもつ欠点について再度の改訂を行った。すなわち、伝統の算定法では死亡率を最終出力としているのに、前報までの改訂版尾崎式では、縦軸が死者の絶対数を与える形に止まっており、両者の直接対比が出来ないままとなっていた。本報では先ず、この点に注目し、縦軸を死亡率に変換・表示できるように、さらなる改訂を試みた。その結果、この再改訂版算定法を主体とすること、そして、余命特性損失評価法を適宜介在させることで地震・津波等の災害に伴う急性期の死亡率を年齢区分別にみる算定法は一応の到達点に達し得たものと、筆者らは考えている次第である。

以下では、今回得た再改訂版算定式を活用して、県別および市町村別にみた年齢依存性についていくつかの考察を行っている。

3. 県および市町村単位でみた年齢区分別死亡率

1) 岩手県/釜石の奇跡

今回の地震津波に対して、東北3県のうち特に岩手県においては乳幼児～若年層の高い生存率がよくいわれている。このことは在来の伝統法によった場合でも、年齢区分別平滑化曲線とのズレ(実測値<平滑曲線)を見ることで容易に想像できるところである。つまり、岩手県(詳しくは釜石市と周辺地域)の奇蹟といわれる根拠をあたえている2)。しかし、今回得た再改訂版を使って算定し直して「釜石等周辺地域も乳幼児・若年者の、津波による死亡率は平常時・1年間のそれ以下とはとてもいえない」結果となっていることが確認出来る。つまり大方の努力にも拘わらず、この年代の死亡率はなお相当に高いことを示している。同様の結果は、期待特性損失量の算定結果からもハッキリと確認できる。

2) その他の特異変化

同様の視点で、県・市町村別に実際の年齢依存性曲線と平滑曲線とのズレに注目してみると、特異事例のいくつかは浮上する。年齢を昇順にみていくと、県別のみならず、市町村別にみても多くの場合、20～30代で実測値>平滑値(乳幼児等とは逆のズレ)となるゾーンが目立つ。これは若者～壮年なるが故の対津波公務活動(沿岸域水門の管理とか避難誘導等)に従事した結果の Negative な反映であろうか。一方、さらに高齢者側では3県共に65才前後で死亡率が局所的に急増していることを示すズレ(実測値>平滑曲線)が目立っている。これについては東北沿岸域の家族構成(複数世代の多少等)とか相互支援を考慮することで実態解明への手掛かりが得られることを期待している。

4. 終りに

従来のように、伝統の死者発生率を単純にみた場合、年齢に対して右上がりの形、J字型分布の関係が得られ、乳幼児の死亡率が低いようにみえたとしても、視点を変えて平常時のそれと比べてみることで彼らの死亡率が未だ相当に高いことが、今回までの試算で初めて明瞭になった。今回までの成果は、先に得たU字型の分布1)についても、今一度立ち入った考察が必要なことを示唆している。

文献等

- 1) 太田・小山, 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(2~4) 2013, 14年春 J p GU 大会.
- 2) 片田, 人が死なない防災, 集英社新書, 2012.
- 3) 尾崎, 地震災害時および災害後の健康被害, 厚生学の指標, 59, 2012.

SSS25-08

会場:A04

時間:5月25日 11:00-11:15

4)Amatya Sen, Wikipedia で Sen の項を検索.

キーワード: 東日本大震災, 年齢区分別死亡率, 算定法改訂, 災害弱者

Keywords: East Japan Earthquake, Age-band specific Mortality, Revision of Evaluation Equation, Disaster-Vulnerable Persons

S波ピーク領域と距離別の速度を使って解析した2011東北沖地震の多重震源の解析 Multiple Seismic Origins of the 2011 Tohoku Earthquake Analyzed by S-Wave Peak and Regions

沼倉 政幸^{1*}

NUMAKURA, Masayuki^{1*}

¹元 千葉県 佐倉東高校 教諭

¹Last position Sakura Higashi High School

1, Introduction

Within the field of research on the 2011 Tohoku earthquakes, analyses of the vicinity of the ocean trench axis have made remarkable progress. In contrast, opinion is divided regarding regions closer to land. One example concerns the question of whether tremors that reached the Kanto region originated from the ocean trench axis. Many studies emphasize land-based seismic origins for these tremors, but the precise locations from which these tremors originated remains to be determined in detail. Considering that this earthquake was a ones-in-several-hundred-years event, it can hardly be said that our understanding of the earthquake as a whole has progressed to a fully satisfactory state.

The S-wave and P-wave data available for this earthquake are mixed together and hence difficult to use. Multiple large-amplitude contributions following S-wave initial shocks, S-wave peaks, were present. These data may be used for analyses, despite their mixed nature, if they can be well separated. Due to the paucity of previous research on this subject, we have tested our methods on other large earthquakes in Japan. Method is indicated to 3-1-2 Results of validation.

2, Method

2-1 We determined epicenters by following the Omori method of drawing three circles on map.

2-2 We use Omori's formula. (However, we use distant-dependent velocities.)

$$r=k \times t \quad k1=(Vp \times Vs)/(Vp-Vs)$$

2-3 We used S-wave peak travel times and velocities. The method is indicated to 3-1-2.

3, Results

3.1 Validation.

3-1-2 2004 Niigata Chuetsu earthquake

Epicenter 37.29N 138.87E Depth 12km Start ; 17:56:00

Ojiya Distance 13.9km Traveltime S-wave peak 8.73s

Velocity peak 3.19km/s Acceleration 0.365 Constant 1.16 Time arrival 56:08

Tokamachi Distance 24.1km Travel time S-wave peak 12.60s

Velocity peak 3.83km/s Acceleration 0.304 Constant 1.16 Time arrival 56:12

Kashiwazaki Distance 31.0km Travel time S-wave peak 14.90s

Velocity peak 4.16km/s Acceleration 0.280 Constant 1.16 Time arrival 56:14

Travel time is peak time at many stations. (2) $r=1/2 \times a \times t^2$ (3) $r=1/2 \sqrt{(kt^3)}$

(4) $r=1/2 \times v \times t$ (5) $k=v \times a$ (6) $v=2r/t$ (7) $a=2r/t^2$ (8) $a=dv/dt$

It is sufficiently possible to calculate in this equation (2), but coefficient " a " is not constant. Therefore, I prepare the equation (3). The equations (2) and (3) are function that the distance and time of the hypocenter and observation point. In those equations, the function (5), which is in inverse proportion to " v " and " a " , is contained.

3-2 Seismic origins of 2011 Tohoku Earthquake

P-1-2 (Epicenter announced by United States Geological Survey)

Epicenter 37.291N 138.867N Depth 30km Start: 46minites, 24 seconds

Oshika Distance 81.5km Travel time S-wave peak 43.3s

Velocity peak 3.76km/s Acceleration 0.0868 Constant 0.327

Time arrival 47:07

Utatsu Distance 94.1km Travel time S-wave peak 47.6s

Velocity peak 3.95km/s Acceleration 0.0829 Constant 0.327

Time arrival 47:11

Tsukidate Distance 130.9km Travel time S-wave peak 59.3s

SSS25-09

会場:A04

時間:5月25日 11:15-11:30

Velocity peak 4.41km/s Acceleration 0.0744 Constant 0.327
Time arrival 47:23

P-3, Epicenter 38.045N141.47E Depth30km Start: 47minites, 37 seconds

Oshika Distance 41.8km Travel time peak 20.0s

Velocity peak 4.18km/s Acceleration 0.209 Constant 0.873

Time arrival 47:57

Kamaishi Distance 143.6km Travel time peak 45.4s

Velocity peak 6.33km/s Acceleration 0.139 Constant 0.873

Time arrival 48:22

Hitachi Distance 180.2km Travel time peak 53.0s

Velocity peak 6.80km/s Acceleration 0.128 Constant 0.873

Time arrival 48:30

P5 (May be divided into 5 epicenters in all)

In the first phase, P1-2 and P1-3 gave a strong motion to Miyagi and Iwate. In the third phase, Max acceleration of Tsukidate and Oshika was observed by P3. It is both epicenter third phase and trench axis that gave a strong motion to Kanto.

キーワード: S波ピーク, 2011東北沖地震

Keywords: S-Wave Peak, 2011 Tohoku Warthquake

多段階不均質震源モデルに基づく2011年Mw9.0東北地震の強震動の再現 Simulation of strong ground motions from the Evaluation of the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake

入倉 孝次郎^{1*}; 倉橋 奨¹
IRIKURA, Kojiro^{1*}; KURAHASHI, Susumu¹

¹ 愛知工業大学地域防災研究センター

¹ Aichi Institute of Technology, Disaster Prevention Research Center

1. はじめに

2011年東北地震の震源近傍域で得られた強震加速度波形に、顕著な複数のパルスの波群が見られる。これらの波群は、強震動観測記録を用いたセンブル解析や逆伝播法解析により、震源断層の中で西端に近いプレート沈み込みのダウン・ディップに沿って、南北方向に並ぶ4~5つの位置から生成された、と考えられる。

我々は、過去の起こった中小地震の強震動記録を経験的グリーン関数として特性化震源モデルを仮定して、本震の地震動のシミュレーションを行い、観測記録との比較により、5つの強震動生成域からなる短周期生成モデルを求めた。この解析で、震源近傍域の強震動記録で見られる顕著な波群は、沈みこむプレートのダウン・ディップに位置する強震動生成域から生成された、ことを明らかにした。さらに、ここで得られた強震動生成域モデルと数値的グリーン関数を用いて、より長周期の地震動のシミュレーションを行い、この短周期震源モデルの有効な周期範囲は0.1~10秒であることを確認した。さらに、各波群に見られるパルスの波形をより精度良く再現するには、強震動生成域は一様な実効応力ではなく、強震動生成域ごとに立ち上がりに大きな実効応力を有する不均質なモデルの設定が必要であることを確認した。

切迫性の指摘されている南海トラフ地震など、すべり込み型巨大地震に対する防災・減災対策を効果的に進めるためには、信頼性の高い強震動や津波の予測技術の確立が必要とされている。本研究は、2011年東北地震の強震動観測データから明らかになった多段階不均質モデルに基づき、信頼性ある強震動予測手法について検討することを目的としている。

2. 2011年東北地震の強震動再現のための多段階不均質震源モデル

この地震の短周期震源モデルは、多くの著者により試みられ、強震動生成域の数は4~5個、それらの位置はダウン・ディップの近くに位置するなど、共通性のある結果が得られている(Asano and Iwata, 2012; 佐藤, 2012; 川辺・釜江, 2013; Kurahashi and Irikura, 2013)。しかしながら、強震動観測点は、震源断層の西側のみで、震源域の広さ(400 x 200 km²)に比べると、観測点の数は十分でないため、強震動生成域の位置は必ずしもユニークには決まらない。Kurahashi and Irikura(2013)は、強震動生成域内で応力パラメータの不均質を設定しているが、他の著者が示しているように、強震動生成域は一様と設定しても、観測波形に見られる5つの波群とほぼ同様のスペクトル特性をもつ合成波形のシミュレーションは可能である。また、これらのSMGA(強震動生成域)モデルを用いると、工学的に重要な2~10秒の長周期地震動の再現に有効であることがわかってきた(川辺, 2012; 倉橋・入倉, 2014)。

野津(2014)は、これまでに発表されたこの地震の短周期震源モデルを用いて強震動予測の有効性について検討した。野津らによるSPGA(強震動パルス生成域)モデル、疑似点震源モデルと3つのSMGAモデルを用いたシミュレーション結果を比較した結果、構造物に影響の大きい周期1~2秒の卓越するパルス波形の再現には、SPGAモデルや疑似点震源モデルは有効だが、SMGAモデルは過小評価になると結論している。一方で、野津らのモデルは、強震動生成域を極めて狭くしているため、構造物への影響の大きい破壊的強震動の特徴である破壊の指向性効果や2~10秒の長周期地震動の再現が可能かなど、巨大地震に対する強震動予測としての有効性に問題がある。

もう1つの問題として、この地震の強震動波形の特徴の1つであるパルスの波形の再現には、破壊開始点付近に大きな実効応力をもつ不均質モデルが必要と考えられる。そのためには、適切な経験的グリーン関数の選定が必要とされる。

Kurahashi and Irikura(2013)では、強震動のシミュレーションのために、経験的グリーン関数として2005年宮城沖地震(Mw 7.2)の後半部分を用いている。この地震の強震動再現のための震源モデルは、震源域で発生した小地震(M 4.1)記録を経験的グリーン関数として用いると、東西に並ぶ2つのSMGAからなっていることがわかる。それらのSMGAの大きさは約8 x 8 km²である。それぞれSMGA内で、破壊は東から西(海側から陸側)方向に進んでおり、震源に近い宮城県内の観測点では破壊伝播の指向性パルスが顕著に見られる。これは先行研究のSuzuki and Iwata(2008)とほぼ同じ結果である。

このことから、東北地震の強震動は、Mw 7.2の宮城県沖地震の記録を用いなくても、Mw 4クラスの地震記録を用いて、約8 x 8 km²の要素地震を合成し、それを経験的グリーン関数として、Kurahashi and Irikura(2013)の提唱する多段階不均質モデルの手順に従って強震動シミュレーションを行えば、観測に見られるパルスな形状をもつ強震動でかつ0.1~10秒の広帯域強震動の再現が可能となる。

SSS25-10

会場:A04

時間:5月25日 11:30-11:45

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 沈み込み地震, 強震動, 特性化震源モデル, 強震動生成域, 経験的グリーン関数法

Keywords: the 2011 Tohoku earthquake, subduction earthquake, strong ground motion, characterized source model, strong motion generation area, the empirical Green's function method

神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構調査 (2) 県西部+熱海・伊東 Field Survey for the Memorial Matters from the 1923 Great Kanto Earthquake in Western Kanagawa Prefecture, Japan

武村 雅之^{1*}
TAKEMURA, Masayuki^{1*}

¹ 名古屋大学減災連携研究センター
¹ Disaster Mitigation Research Center, Nogyo- Univ.

関東大震災の研究は震災直後に被害調査を含む多くの研究がなされたあと、1990年代から2000年にかけて武村らを中心として、地震計による地震記録の発掘と解析による本震・余震の解明、被害データの整理分析による詳細震度分布の評価などが行われた。また東京両国の被服廠跡の火災による大量死や小田原市根府川・米神における土砂災害など関東大震災を構成する個々の大惨事についても実態解明にあたってきた [武村 (2009)]。一方、市民がより身近なものとして関東大震災を理解し防災意識の向上に役立てるべく、当時の人々が記した日記などに科学的な解説を加えることによって、体験談のもつ臨場感と科学的客観性を融合させ時代を超えて震災を理解できるようにする取り組みも行ってきた [武村 (2005、2008)]。

さらに現代人が震災を日常的に意識するために有効なものとして、様々なところに人知れず建つ慰霊碑や記念碑や震災の爪痕を残す遺構などがあることに目を付けた。関東大震災の慰霊碑や記念碑については力武 (1994-1997)、神奈川県立歴史博物館 (2003)、上西 (2012) や Web サイト「関東大震災の跡と痕を訪ねて」などでも紹介されている。各自治体の教育委員会などによる石造物調査もある。しかしながらこれらの調査結果はそれぞれ限定的であり誤りも多く、震災を生き抜いた当時の人々の意思を知り、現代人に震災を伝えるには不十分であると判断した。このため、従来の調査結果をすべて踏まえさらに調査対象を広げ、正確を期すため全ての対象物の現地調査を行うことにした。

武村 (2012) による『関東大震災を歩く』吉川弘文館では、東京都 23 区内を対象として、震災の慰霊碑、記念碑、多くの犠牲者が出た場所や逆に多くの避難者の命を救った場所の現在の様子、震災で破壊された跡またはその再生を伝えるもの、復興過程で生まれた建物や施設、震災後の帝都復興事業による土地区画整理で郊外へ移転を余儀なくされた多くの寺院、さらには関東大震災以前から江戸・東京をたびたび襲った自然災害についての記念碑や遺構も調査しまとめた。調査地点は 180 カ所、対象物は 260 にのぼった。

今回その調査を神奈川県下 (静岡県伊豆地方も含む) に広げた。神奈川県を西部、中部、東部の 3 地域に分け、2014 年 3 月に中部地域、2015 年 3 月には西部地域ならびに熱海・伊東地域の調査結果をまとめた。今回まとめた西部地域では、慰霊碑 31、復興碑など記念碑 58、その他エピソードを伝えるもの 38、消滅したもの 1、他の災害 42 の合計 170 を対象とした。他の災害として主なものは元禄地震や富士山の宝永噴火や関東地震の影響で起った水害である。現状の調査結果はすでに防災講演会や市民向け現地ツアー、文書館や博物館、防災団体へのデータ提供などの形で活用を進めている。

史上最悪の自然災害である関東大震災の慰霊碑・記念碑や被害の実態を今に伝える遺構、ならびに復興の記念物などを通じて、当時の人々の意志を受け止める。そのことを通じて現代社会に生きる人々の震災への理解を深め、防災意識の向上に繋げる。それこそが本調査研究の究極の目的である。本研究調査は JSPS KAKENHI 25350496 の助成を受けたものである。

キーワード: 関東大震災, 慰霊碑, 神奈川県

Keywords: Great Kanto Earthquake, Memorial tower, Kanagawa Prefecture

地震ザブトンを用いた地震動体験の防災効果測定に向けた検討 Effects on disaster prevention by The Portable Earthquake Simulator "Jishin-The-Vuton"

東 宏樹^{1*}; 内藤 昌平¹; 藤原 広行¹
AZUMA, Hiroki^{1*}; NAITO, Shohei¹; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所

¹NIED

1. はじめに

地震ザブトンは地震動の忠実な再現を目指して作られた可搬型シミュレータである。兵庫県南部地震のJR 鷹取波（震度7）や東北地方太平洋沖地震のK-NET 仙台波（震度6強）のような観測波形をはじめ、新宿の高層階で実測されたデータ、想定東海地震の新宿高層30F建てのような想定の高層長期地震動にいたるまで14の波形を、VUTON クローラという機構を持ったロボットによって水平2次元で再現できる。体験時には同一の揺れによって一般的な部屋がどうなるかを振動台で撮影された映像を、音とともに同時再生し、よりリアルな地震時の状況再現のための工夫がなされている。

2. 調査概要

防災科研では2014年から地震ザブトンの運用を正式に開始し、所内見学や近隣で行われる各種防災訓練、ワークショップなどでの利用に供している。調査はこれらのイベント等における体験者に対し体験終了時のタイミングで簡単な質問用紙を記入してもらうことで行なった。質問用紙は一人あたりの地震動体験の時間を考慮し、記入待ち行列が発生しない概ね1分程度で記入を終える5?6項目程度の無記名のチェックシートで構成した。

3. 調査結果

以下に2014年8月2日から12月7日まで所内見学を含む断続的な14日間のイベント時に行われた調査結果の概要を示す。身長等の安全上の理由で地震ザブトンを体験できない未就学児を除く12歳以下の子供から66歳以上の高齢者まで幅広いデータを得たが、割合としては56歳?65歳が32%、66歳以上が42%と高齢者側に偏りが見られ、これは実際に防災訓練等に参加する年齢構成を反映しているものと思われる(N=137)。体験後の率直な感想としてはこわかった(40%)・おもしろかった(31%)・ひとにすすめたい(29%)がほぼ同割合の結果となっている(N=220, 複数選択可)。体験した地震動は震度7が体験できる兵庫県南部地震のJR 鷹取波(29%)と新潟県中越地震のK-NET 小千谷波(21%)が多いが、直下型以外にも東北地方太平洋沖地震で観測された各地の波形(あわせて15%)や長周期地震動(あわせて17%)など適度な分散が見られた。これら地震動の体験後に地震の対策を「する」と答えた人は91%にのぼり、地震ザブトンの地震動体験は耐震対策の意識を向上させる効果が見られた(図1)。

4. おわりに

実際に地震の揺れを体験することで地震対策を行う意識が向上することが明らかになった。これらは他の災害と比べても比較的低頻度である地震において、平時にわがこと化を促進し対策行動を引き起こすことが困難であるという既往の問題の解決に有効なアプローチであることを示唆している。今後はこうした検証を高度化しつつ他機関とも連携して母数を増やし、上記課題の解決に向けた取り組みを加速していきたい。さいごに実験にご協力いただいた防災科研アウトリーチグループと阿見町、つくば市の皆様に、御礼を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

松平 昌之(白山工業(株)) 山口 龍介(東工大) 平山 義治(白山工業(株)) 王猛(東工大) 吉田 稔(白山工業(株)) 翠川三郎(東工大) 広瀬茂男(東工大): 全方向移動型可搬式地震動シミュレータ“地震ザブトン”の開発、第27回日本ロボット学会学術講演会

キーワード: 地震ザブトン, 地震動体験, 防災効果測定

Keywords: "Jishin-The-Vuton", Strong motion experience, measurement on countermeasure

SSS25-12

会場:A04

時間:5月25日 12:00-12:15



波相論と液状化 Wave features Theory and Liquefaction

西澤 勝^{1*}
NISHIZAWA, Masaru^{1*}

¹ なし

¹ none

1. まえがき

図-1 に従って液状化した場合の波形について、詳しく述べる。日本では昨年地震学会が、新潟地震 50 年ということで行われた。

2. 要旨

NZ 地震で倒壊した CTV ビルに近い、クライスチャーチにおける地震波相 (Wave Features Theory) を図-1 に示してある。右側に主として、CTV ビルにとって大切なことを、二つ示した。つまり、地盤が液状化すると、(1) 地震波の位相がずれるため、建物に回転力というか、ねじれが生ずる。そのねじれは、東西南北はむろん、上下方向にも生じて建物に影響を与える。(2) これは CTV ビルだけでなく、クライスチャーチの平野 (?) 一帯が液状化 (日本の浦安と同様) しているため、ここ全体の液状化対策が必要となる。以下図-1 に従って説明する。

図-1 の東西、南北の水平波相 (Wave features) が軟弱地盤 (Soft Ground) の波形。振動数も主要動以後のそれも異なっている。一番下の鉛直方向の波相が実際の地震波 (Seismic Wave) に最も近い。このことから、この軟弱地盤は、そんなに厚くないことが判る。主要動 (7~8 秒) 以後の波相 (Wave features) も波打っていることから、他の地震計 (この地区だけで 10 個程の地震計が設置されている) これら一帯が全体として波打っている。つまり、東京浦安も同様であるが、これら一帯が広く液状化し、波打ったと考えられる。全体を波動理論 (Wave theory) の考えで扱う必要がある。一番下の鉛直方向の波相 (Wave features) の中心線の上下で、下の揺れの振幅が上側の振幅より、振幅が小さいのが目立つ。他の地震計でもかなり認められる。これは軟弱地盤の下によりかたい地層があるためと考えられる。

つまり、軟弱な地層の下に硬い地層があるため、波が反射を受け、中央線上部より下部の振幅が小さくなる。これは、地震波だけでなく、日常の生活でもよく見られる現象である。トランポリンのようなものも一種のこの考えで良いと考える。

この、クライスチャーチの波形は日本では、1964 年の新潟地震の川岸町県営アパート 3 号棟の地下室の強震計で見事にとらえられている。図-2 にそれを示した。図-3 は 30 秒間のランニング・スペクトルで、最初と最後では、ずいぶん異なっていることが判る。

なお、新潟地震の波形というランニング・スペクトルの図は参考文献にも示したが、大崎順彦先生の著書「新・地震動のスペクトル解析入門」より転用させていただいた。新潟平野は大きな地震が来ると、NZ や浦安のように広域な液状化をおこし易いと考える。

参考文献

(1) 大崎順彦 著：新・地震動のスペクトル解析入門

(2) MASARU NISHIZAWA : The Great Kanto Earthquake (of 1923) and TOKOHAMA(1). Japan Geoscience Union Meeting 2014

Keywords: Wave Features Theory, Liquefaction, Phase, Relation

SSS25-13

会場:A04

時間:5月25日 12:15-12:30

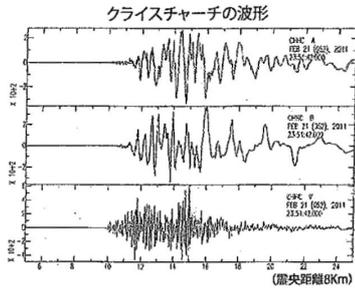


図-1

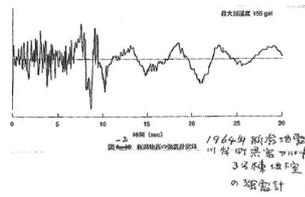


図-2

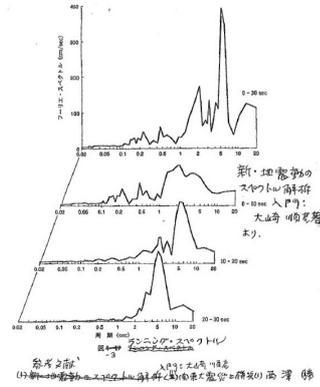


図-3

海溝型プレート内地震のための地震動予測式の補正項に関する検討 An additional correction term of ground-motion prediction equation for intra-plate earthquakes

森川 信之^{1*}; 藤原 広行¹
MORIKAWA, Nobuyuki^{1*}; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED

沈み込んだプレート内で発生するスラブ内地震は、同規模のプレート間地震と比べて短周期地震動が強く励起され、その強さには震源深さ依存性があること（例えば、Asano et al., 2003）やプレートによる違いがあること（例えば、池田・他、2004）が指摘されている。一方で、海溝軸より沖側で発生する、いわゆる「アウターライズ地震」は沈み込むプレート内の浅い地震であるものの、その短周期地震動の強さは震源が深いスラブ内と同程度であるとする検討結果もある（例えば、川端・他、2010）。

海溝型プレート内地震を対象とした強震動予測において、短周期地震動の励起特性を震源の深さやプレートの違いを踏まえて適切にモデル化することが重要である。我々は新しい地震動予測式を提案している（Morikawa and Fujiwara, 2013；以下、MF13式）が、海溝型プレート内地震に対する地震動強さの評価に関して、伝播経路特性としての異常震域の補正項を既に求めているものの、上述のような地震動強さの震源深さ依存性やプレートの違いは考慮されていない。そこで、MF13式に付与する補正項を求めるという観点から強震動記録の分析を行う。

はじめに、地震動強さの最大振幅についてMF13式による予測値との残差を求め、続いて地震ごとの残差の平均値（震源特性値）と観測点ごとの残差の平均値（観測点特性値）を求める。このとき、予測値は異常震域の補正も含めて求める。このようにして得られた各地震の「震源特性値」について震源の深さやプレートの違いに関する比較を行う。検討には、MF13式を求めるために用いた強震動データベースの中から、5地点以上地表で観測されているMw5.0以上の地震の強震動記録を用いる。

フィリピン海プレートの地震と比べて、太平洋プレートの地震の「震源特性値」が大きい傾向が見られる一方で、震源が深くなるほど「震源特性値」が大きくなるという傾向も見られる。ただし、現状のデータにおいてばらつきが大きいことに加え、太平洋プレートは震源が深い（50km以深）地震が多く、フィリピン海プレートは震源が浅い（50km以浅）地震が多いため、両者の影響を分離することは困難である。従って、予測式の補正項としては当面どちらかの影響のみをモデル化し、不確かさ（ばらつき）を別途考慮することで対応せざるをえないと考えられる。

参考文献：

- Asano, K., T. Iwata and K. Irikura (2003): *Earth Planets and Space*, 55, pp. e5-e8.
池田孝・武村雅之・加藤研一（2004）：日本建築学会構造系論文集，586，pp. 53-61.
川端渉・笹谷努・高井伸雄・前田宜浩（2010）：第13回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 275-280.
Morikawa, N. and H. Fujiwara (2013): *Journal of Disaster Research*, 8, pp. 878-888.

キーワード: スラブ内地震, アウターライズ地震, 地震動予測式

Keywords: intra-slab earthquakes, outer-rise earthquakes, ground-motion prediction equation

中国・四国・九州地方における地震動の距離減衰分布 Attenuation characteristics of strong ground motions in Chugoku, Shikoku and Kyushu districts

池浦 友則^{1*}

IKEURA, Tomonori^{1*}

¹ 鹿島技術研究所

¹ Kajima Tech. Res. Inst.

■はじめに

西南日本の中国・四国・九州地方における強震動の距離減衰特性を検討する。この地域はフィリピン海プレートが屈曲して沈み込む領域にあたり、周辺には大規模な火山帯が存在するなど、構造的な条件がやや複雑である。また、東北日本に比べて地震活動度が低いため、強震動の距離減衰特性を正しく把握するのがやや難しい地域でもある。とはいえ、1997年3月26日と5月13日の鹿児島県北西部地震、1997年山口県北部地震、2000年鳥取県西部地震、2005年福岡県西方沖地震と内陸の被害地震がいくつかあり、2001年芸予地震のようなスラブ内の被害地震も発生している。これらの地震による強震動の距離減衰特性を正しく把握しておくことは有意義であろう。

■西南日本地域における K-NET・KiK-net のサイトファクター評価

中国・四国・九州地方における K-NET・KiK-net 地点で隣接観測点のネットワークを構成し、最小二乗法を用いてすべての隣接観測点間の平均スペクトル比を同時に満足するように、参照観測点に対する相対サイトファクターを評価した。隣接観測点としては地点間距離 25km 以内を目安とし、各隣接 2 地点間の平均スペクトル比を求める記録は、①震源から 2 観測地点に伸ばした直線の角が 5 度以内、②両地点の PGA が 100Gal 以下、③両地点の震源距離が 300km 以内、の 3 条件を満足することとしている。

最終的に中国・四国・九州地方の K-NET と KiK-net で隣接観測点 2173 ペアを用い、630 点（地表と地中は別地点扱い）の相対サイトファクターを評価した。最短の隣接 2 地点間距離は 0.1km、隣接 2 地点間で用いた地震数はペア毎に大きく異なり 4~108 地震、最大規模の地震は 2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分の紀伊半島沖地震 (M7.4) である。参照観測点としては YMGH12 美東の地中 (GL-102m, $V_p=6000$ m/s, $V_s=3250$ m/s) を採用した。なお、九州地方北西部では、隣接する観測点ペアで上記の条件を満足する地震が乏しく、隣接観測点間の相対サイトファクターが安定的に評価できないため除外した地点も多い。

■内陸地震とスラブ内地震の距離減衰特性の検討

各 K-NET・KiK-net 地点の観測地震動スペクトルを、上記で得られた相対サイトファクターで割算して距離減衰特性を検討した。2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震 (M7.3, h9km) による高周波数領域の距離減衰特性は地点毎の揺れ易さの違いが排除されて非常によくまとまり、両対数図上でみると震源距離 10~500km の範囲でほぼ線状の分布となった。ただし、震源付近から震源距離 200km 前後までの区間とそれ以降では明らかに傾斜が異なり、遠方の傾斜が急である。震源距離 200km は概ね九州地方にさしかかる距離であり、この折れ曲がり九州地方に入って以降の高減衰を示唆する。

2001 年 3 月 24 日芸予地震 (M6.7, h46km) による距離減衰分布も、周波数 10Hz 程度以下の範囲では 2000 年鳥取県西部地震ほどではないが、ある程度よくまとまり、震源距離 50~400km の範囲で比較的単純な距離減衰分布の特徴を示した。ただし、20Hz 程度の高周波数になると、距離減衰効果に地点によるばらつきが認められ、早めに減衰する地点とそうでない地点との違いがやや明瞭になった。

さらに、この特徴は 2014 年 3 月 14 日伊予灘のスラブ内地震 (M6.2, h78km) でより顕著に観察された。この地震で震源距離 80~350km の範囲の距離減衰分布を検討したところ、観測地震動の場合は高周波数になるほどダンゴ状の分布であるが、相対サイトファクターで割算することにより、いくつか枝状の距離減衰分布が浮かび上がることが分かった。枝状の距離減衰分布の様子は周波数帯域によって変化し、2Hz 付近の振幅は中国>四国>九州、一方、10Hz 以上の振幅は四国>中国>九州であった。また、20Hz 付近では $forearc > backarc$ という単純な構図も見える。

最近の伊予灘のスラブ内地震としては他に 1998 年 5 月 23 日 (M5.4, h86km)、2006 年 9 月 26 日 (M5.3, h70km) があり、これらでも類似の特徴が見いだされた。そのため、このような複雑な距離減衰特性は、この地域特有の現象と考えることができ、筧 (2014) が指摘しているとおおり、沈み込んでいるフィリピン海プレートの形状や高減衰の火山帯の分布といった構造的な要因を踏まえて定量的に解釈される必要がある。

■参考文献：池浦・加藤 (2011) 日本地震工学会論文集、筧 (2014) 日本地震学会 2014 年秋季大会

■謝辞：防災科研 K-NET・KiK-net の記録を使用させていただきました。記して感謝します。

キーワード: 強震動, 距離減衰特性, サイトファクター, 西南日本

Keywords: strong motions, attenuation characteristics, site factor, southwest Japan

周波数・震源距離依存型のラディエーション係数のモデル化に関する検討 Study on frequency and hypocentral distance dependent radiation coefficient

長坂 陽介^{1*}; 野津 厚¹
NAGASAKA, Yosuke^{1*}; NOZU, Atsushi¹

¹ 独立行政法人 港湾空港技術研究所
¹ Port and Airport Research Institute

強震動シミュレーションにおいて、揺れの向きは震源メカニズムに応じたラディエーション係数により考慮することができる。しかし、理論的なラディエーション係数 (Aki and Richards, 2002) を用いると、観測よりも極端な方向性が出てしまう。実際には地中での散乱などによりある程度平均的 (=等方的) な値に近づくと考えられるため、適切にラディエーション係数をモデル化することができれば強震動シミュレーションの精度の向上が期待される。

ラディエーション係数のモデル化については多くの既往研究がある。Liu and Helmberger (1985) はラディエーション係数には周波数依存性が存在し、高周波数ほど平均的な傾向になることを指摘している。強震動シミュレーションのためのモデルの提案としては、例えば釜江ら (1990), Pitarka et al. (2000), Pulido (2002) などがある。これらはいずれも Boore and Boatwright (1984) の方法により理論的ラディエーション係数を空間的に平均する方法を採用しているが、高周波数になるほど平均をとる範囲を広げることで周波数依存性を考慮している。また、佐藤 (2002) は 2000 年鳥取県西部地震とその余震記録の分析を行い、経験的モデルを提案している。このとき、観測フーリエスペクトルの水平 2 成分の比をラディエーション係数の水平 2 成分の比とみなしており、また、周波数だけでなく震源距離にも依存したモデルとなっている。いずれの既往研究においても、ラディエーション係数が理論的から平均的に遷移する周波数帯は、たとえば Pitarka et al. (2000) では 1~3Hz など、構造物に対する影響が大きい周波数帯となっている。

著者らは観測記録に見られるラディエーション係数は理論的な値と平均的な値の重みづけ平均として表されると仮定し、その重みづけ係数 (α とする) が周波数や震源距離によってどのように変化するかを観測記録に基づいて調べてきた。2000 年鳥取県西部地震の観測記録の分析により α は周波数・震源距離双方に依存することが分かり、最終的には $\alpha = \exp(-\pi f r / Q_R V_S)$ としてモデル化することを提案している。この式は震源から対象地点までの波数が多いほど平均的なラディエーション係数に近づくことを表しており、 Q_R は周波数・震源距離への依存度を決定する係数となっている。

2000 年鳥取県西部地震は観測記録が豊富であり、また震源過程も詳細に研究されている地震であるという利点があるが、震源過程の複雑さから理論的ラディエーション係数を正確に知ることが困難である。そのため、今後は点震源とみなせるような地震についても提案モデルの適用性と係数 Q_R の値について検討を行い、報告する予定である。

キーワード: ラディエーション係数, 強震動シミュレーション
Keywords: radiation coefficient, strong ground motion simulation

長周期地震動に対する構造および震源起因の付加体効果 Effects of Accretionary Prisms on Long-Period Ground Motions Associated with Velocity Structure Models and Sources

郭雨佳^{1*}; 瀨瀬 一起¹; 三宅 弘恵¹
GUO, Yujia^{1*}; KOKETSU, Kazuki¹; MIYAKE, Hiroe¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

南海トラフで発生する海溝型地震が、大阪・濃尾・関東平野などに長周期地震動をもたらすことが知られている。そのような長周期地震動の生成・伝播過程に影響を及ぼす要素の一つとして、南海トラフに沿って発達している付加体の存在が挙げられる。Yamada and Iwata (2005), Yoshimura *et al.* (2008), 渡辺・他 (2014) は、付加体は地震波の直達部の振幅を減衰させる一方で、波全体の継続時間を延ばす効果があることを指摘した。後藤・永野 (2013), 渡辺・加藤 (2013) は付加体効果における震源位置依存性を示した。一般に、陸側に比べて海域の速度構造モデルは高い不確定性を伴っている。特に、地震波に支配的な影響を及ぼす S 波速度構造に対する検討は一部の地域を除き、まだ十分になされていない。このように、付加体効果の評価において、付加体モデルを含む海域の速度構造モデルの不確定性だけでなく、海溝型地震の震源の広域性や多様性を考慮に入れることが必要不可欠である。また、大阪・濃尾・関東の各平野の長周期地震動の卓越周期が異なるため、付加体効果を周波数ごとに議論することも重要である。

本研究ではまず、構造モデルの違いから生じる付加体効果の変化を明らかにするため、2004年9月5日19時7分頃 (JST) に発生した紀伊半島南東沖地震の前震 (M_w 7.2) を対象に三次元波動場シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、以下に示す付加体の層構造が異なる3つの速度構造モデルを使用した。(A) 全国1次地下構造モデル (Koketsu *et al.*, 2008, 2012)、(B) 付加体の S 波速度に関する既往研究 (Takahashi *et al.*, 2002; Tsuji *et al.*, 2011, 2014) や J-SHIS 深部地盤モデル (藤原・他, 2009, 2012) を参考に、モデル A の付加体領域内の層構造を変化させたモデル、(C) モデル A の付加体層の S 波速度を 3.2 km/s に置換し、付加体なしと仮定したモデル。これらのモデルによる計算結果に対して周波数ごとに比較検討を行った。波形計算にはボクセル有限要素法 (Ikegami *et al.*, 2008) を使用し、地形や海水および広帯域 Q 値一定の減衰を計算に取り入れた。計算の有効周波帯域は 0.05-0.3 Hz である。震源は Yamada and Iwata (2005) の点震源を使用し、震源時間関数は八木 (2004) を使用した。

次に、先行研究で示唆されている付加体効果の震源依存性に着目し、上記と同じ計算手法と速度構造モデルを用いて、震源の位置や破壊伝播効果を考慮した場合の付加体効果を調べた。震源として、内閣府 (2012) で想定されている四国沖から東海沖にかけての強震動生成域の位置を参考に、複数の面震源を仮定した。

シミュレーションの結果、以下の知見が得られた。付加体ありの場合の直達波の振幅は、付加体なしの場合と比べて必ずしも小さくなるとは限らない。大阪・濃尾平野では、堆積層の厚い地点における最大振幅が付加体モデルに依存する傾向にあるが、地震波の伝播経路の大部分を付加体が占める関東平野ではこうした特徴は見られず、付加体ありの場合の最大振幅がおおむね小さい。付加体東縁における長周期地震動の伝播特性はモデル A と B の間で異なり、モデル B の場合、伊豆半島や関東平野において周期 9-12 秒の後続波がより発達する可能性がある。また、付加体の後続波に対する増幅効果 (継続時間伸長効果) は、トラフ寄りの浅い震源の破壊伝播方向側で顕著である。

キーワード: 長周期地震動, 付加体, 南海トラフ, 海溝型地震, 地震動シミュレーション, 速度構造モデル

Keywords: Long-period ground motion, Accretionary prism, Nankai Trough, Subduction earthquake, Ground motion simulation, Velocity structure model

南海トラフにおけるやや長周期地震動の観測とシミュレーションによる再現 Long-period ground-motion observations and simulations in the Nankai Trough, south-west Japan

中村 武史^{1*}; 竹中 博士²; 岡元 太郎³; 大堀 道広⁴; 坪井 誠司¹

NAKAMURA, Takeshi^{1*}; TAKENAKA, Hiroshi²; OKAMOTO, Taro³; OHORI, Michihiro⁴; TSUBOI, Seiji¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 岡山大学, ³ 東京工業大学, ⁴ 福井大学

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Okayama University, ³Tokyo Institute of Technology, ⁴University of Fukui

海洋研究開発機構では、紀伊半島沖の水深 1,900-4,400 m の海底に 20 点から成る地震観測網 (DONET) を 2010 年に設置した。各海底観測点には強震計を備えており、リアルタイムで気象庁や防災科学技術研究所などの機関にデータ配信を行っている。南海トラフをはじめとする観測点周辺の地域で発生する大地震に対し、海底における強震観測データは、早期地震警報のためのリアルタイム解析や断層震源解析への活用が期待されている。

本研究では、海底強震観測データを用いて、2013 年 4 月に淡路島で発生した地震 (Mw 5.8) 時の海底におけるやや長周期成分の地震動の解析を行った。陸上の強震観測データ (K-NET) と比較を行ったところ、4 秒以上の帯域において、海底観測点では最大振幅値が数倍大きい値を示すことが分かった。一方、1 秒以下の短周期成分では振幅値に大きな違いを見出すことはできなかった。地震動の継続時間については、陸上では数 10 秒程度の継続時間であった。一方、海底では減衰が小さく、100 秒以上にわたって地震動が継続していることが分かった。震源及び海底観測点周辺の領域における 3 次元波動場のシミュレーションを試みたところ、10-20 秒の帯域において、振幅の増幅や震動長大化の特徴について観測データと整合的な結果を得ることができた。シミュレーションから得られたスナップショットでは、表面波が付加体へ入射後、振幅の増幅や波群の伝播速度が低下する様子が確認できた。また、表面波の波線追跡でも同様に、付加体で表面波群の伝播速度が急激に低下することを確認した。これらは、陸上の堆積平野部でこれまで多く観測された堆積層表面波と同様の特徴を示しており、海底観測点で見られたやや長周期成分の特徴的な波群は、低速度構造かつ盆地形状を成す付加体内で発達した表面波の伝播によるものと考えられる。

やや長周期地震動の帯域 (2-20 秒) は、早期地震警報における地震の規模推定や波形インバージョンなどでの断層震源解析時に重要な帯域である。本研究のシミュレーションでは、2 秒までの計算精度があるものの、やや長周期地震動の帯域の内、10 秒より短周期側の観測波形の再現はできていない。これは、シミュレーションで用いた S 波速度構造モデルと実際の構造との間に乖離があるためと考えている。今後は、コアロギングデータや変換波データなどを活用して、付加体における S 波構造の詳細な解析を行い、構造モデルを更新する必要があると考えている。

キーワード: 長周期地震動, やや長周期地震動, 強震動, 南海トラフ, 海底観測

Keywords: Long-period ground motion, strong motion, Nankai Trough, seafloor observation, DONET

理論的手法による長周期地震動評価の広帯域化に向けた検討 Approach to broaden the period-range of long-period ground motion evaluation based on theoretical method

前田 宜浩^{1*}; 岩城 麻子¹; 森川 信之¹; 今井 隆太²; 青井 真¹; 藤原 広行¹
MAEDA, Takahiro^{1*}; IWAKI, Asako¹; MORIKAWA, Nobuyuki¹; IMAI, Ryuta²; AOI, Shin¹;
FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所, ² みずほ情報総研

¹ NIED, ² Mizuho Information & Research Institute, Inc.

はじめに

我々は、3次元差分法による大規模地震動シミュレーションに基づいた海溝型巨大地震による長周期地震動のハザード評価に関する研究を行っている。これまで、不確実性を考慮して設定した多数の震源モデルや、堆積層やプレートなどが考慮された3次元地下構造モデルを用いた地震動シミュレーションにより、超高層建物や石油タンクなどに影響を及ぼす周期3~20秒程度の長周期地震動を対象とした検討を行ってきた。一方、多数存在するより小規模な構造物への影響を評価するためにはより短周期帯までの地震動評価が必要であった。そのためには、理論的手法による地震動計算を短周期側へ拡張するアプローチと、統計的または経験的手法を取り入れた広帯域地震動計算手法の導入によるアプローチ(岩城・他、本大会)が考えられる。本研究では前者のアプローチに関して、相模トラフの地震を対象として、これまでよりも精緻にモデル化された地下構造、震源モデルを用いて、長周期地震動評価の広帯域化に向けた検討を行う。

地下構造モデル

本研究では、防災科学技術研究所において南関東地域を対象として作成中の浅部・深部統合地盤モデル[例えば、Senna et al.(2013、JDR)]を用いる。浅部・深部統合地盤モデルは、これまで別々にモデル化が行われてきた工学的基盤よりも浅い地盤モデル(浅部地盤構造)と、それよりも深い地盤モデル(深部地盤構造)を統合し、両方の地盤構造の影響を受ける周期帯(周期0.5秒から2秒)における増幅特性などをより適切に評価することで、強震動の予測精度の向上を目指すものである。浅部・深部統合地盤モデルを用いて $V_s=350\text{m/s}$ 以下の速度層(ここでは $V_s=250\text{m/s}$ 層と仮定)までが考慮された計算を行い、これまでの $V_s=500\text{m/s}$ の工学的基盤上での計算結果と比較したところ、低速度層がモデル化された地域では地震動の最大振幅や継続時間が増大する傾向がみられた。また、フーリエスペクトルの比較からは、両者の差異は主として周期2秒よりも短周期帯域において認められた。

震源モデル

これまでの長周期地震動シミュレーションでは特性化震源モデルを用いているため、アスペリティサイズよりも小さなスケールの不均質性が十分に考慮されていない。そこで、マルチスケールの不均質性(関口・吉見, 2006, 月間地球)を考慮した震源モデルを作成し、その効果について検討した。ここでは、相模トラフで想定されるM8級の地震に対して、破壊開始点やアスペリティ配置を変えた274個のシナリオについて、破壊伝播に対してそれぞれ異なる不均質性を付与した震源モデルを作成した。不均質性を付与した影響は、長周期帯域に比べ短周期帯域において大きくなる傾向がみられた。また、破壊開始点やアスペリティ配置に依存している傾向もみられた。

まとめ

これまで行ってきた長周期地震動シミュレーションを周期1秒程度まで広帯域化する上で、より精緻にモデル化された地下構造モデルや震源モデルを用いる重要性が示唆された。一方で、本研究では、低速度層までを考慮した周期1秒程度までの長周期地震動の計算を差分法により行っているが、これまでよりも格子サイズや時間刻みが小さくなっており、計算に要する時間が増大するとともに、多タイムステップの計算を安定して行うことが難しくなりつつある。長周期地震動評価の広帯域化を図るためには、地下構造モデルや震源モデルのみならず、適切な計算手法についての検討も重要な課題である。

謝辞 本研究は文部科学省の「平成26年度長周期地震動ハザードマップ等支援事業」による。

キーワード: 長周期地震動, 差分法, 地下構造モデル, マルチスケール不均質

Keywords: long-period ground motion, FDM, velocity structure model, multi-scale heterogeneity

相模トラフの海溝型巨大地震を対象とした広帯域地震動計算手法の検討 Broadband ground motion simulation techniques applied to megathrust earthquakes in the Sagami trough

岩城 麻子^{1*}; 前田 宜浩¹; 森川 信之¹; 藤原 広行¹
IWAKI, Asako^{1*}; MAEDA, Takahiro¹; MORIKAWA, Nobuyuki¹; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED

将来起こりうる海溝型巨大地震に対する地震動評価において、周期1~数秒程度以上の長周期地震動については、震源破壊過程と3次元波動伝播過程を適切にモデル化した上で理論的手法によって評価することができると考えられる。岩城・他(2014)では、相模トラフで発生しうるマグニチュード8程度以上の海溝型巨大地震を対象として、震源パラメータの不確実性を考慮した多数の震源モデル(シナリオ)について三次元差分法による地震動シミュレーションに基づく長周期地震動ハザード評価を行った。その際、震源モデルや地下構造モデルの精度を考慮して周期3秒以上の帯域を対象とした。

一方で、相模トラフの地震は震源域が首都圏直下まで広がることや、マグニチュード7程度の地震の発生も切迫しているとされていることから、これまでの長周期地震動ハザード評価を踏まえた上で、より短周期の地震動も含めた広帯域地震動ハザード評価を行うことが重要な課題となっている。そのためには、理論的手法による地震動計算を短周期側へ拡張するアプローチ(前田・他、本大会)と、統計的または経験的手法を取り入れた広帯域地震動計算手法の導入によるアプローチが考えられる。

本検討では、大正関東地震に相当する震源域を持つ数ケースの地震を対象として、広帯域地震動計算手法として従来広く用いられているハイブリッド法(先名・他, 2004)による計算を行う。また、岩城・藤原(2013)などで提案された広帯域地震動計算手法の適用を試み、結果について計算手法同士の比較や理論的手法による地震動との比較を行う。後者の手法は周波数帯域間の加速度エンベロープの比の経験的特性を利用して、長周期地震動波形から短周期へ広げるものである。ここでは便宜上ERF(envelope ratio function)法と呼ぶことにする。

どちらの手法についても、長周期側は全国一次地下構造モデル(暫定版;地震調査委員会, 2012)を基本としたモデル(以下mod-JIVSM)を用いて三次元差分法(GMS;青井・他, 2004)で計算する。その際、数値計算上は周期1秒まで有効となるように計算を行うが、mod-JIVSMが周期2秒以上を対象としていることから、波形合成における接続周期は2秒とする。短周期側は、ハイブリッド法では統計的グリーン関数法によって計算し、ERF法では経験的なERFと長周期側の波形を利用して短周期地震動波形を作成する。統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルは、周期0.5-2秒程度の地震動をより適切に評価することを目的として作成中の浅部深部統合地盤モデル(Senna et al., 2013)とする。

関東平野内の代表地点において、ハイブリッド法、ERF法、および差分法による波形やフーリエスペクトルをそれぞれ比較した。ハイブリッド法とERF法は接続周期である2秒から1秒の間で差分法に比べてスペクトル振幅が有意に大きい。ハイブリッド法とERF法の速度波形における最初に到達する主要動部分の振幅レベルは互いにおおむね一致するが、後続動ではハイブリッド法の短周期成分が小さくなる傾向が見られ、特に振幅の大きい後続波群を持つ場合にハイブリッド法とERF法の違いが顕著であった。現行のハイブリッド法では、長周期と短周期の波形を重ね合わせるタイミングに任意性があり、特に巨大地震では両者の波形の走時のずれが顕著に表れる可能性がある。

ここで検討した手法は、今後面的評価も含めた広帯域地震動ハザード評価に現実的な計算量で寄与できることが期待される。地震動予測式等との比較によってこれらの手法の適用性検証や手法同士の比較検討を行うことも重要である。

キーワード: 海溝型巨大地震, 長周期地震動, 広帯域地震動, 相模トラフ, 関東平野

Keywords: megathrust earthquake, long-period ground motion, broadband ground motion, Sagami trough, Kanto plain

弾塑性有限変形解析による断層的破壊に伴う不規則波生成シミュレーション Simulation of irregular wave generation due to fault formation by an elasto-plastic finite deformation analysis

山田 正太郎^{1*}; 野田 利弘¹; 浅岡 顕²
YAMADA, Shotaro^{1*}; NODA, Toshihiro¹; ASAOKA, Akira²

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

著者らはこれまでに、慣性力を考慮した水～土連成弾塑性有限変形解析コード **GEOASIA**¹⁾ を用いて横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯の生成シミュレーションを行っている²⁾。本研究では、同解析コードを用いて、高い脆性を有する地盤を対象に、正断層および逆断層の生成と、それに伴う地震動の発生シミュレーションを実施した。この解析コードが搭載する構成式 **SYS Cam-clay model**³⁾ は広範な土材料を同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式である。また、使用した解析コードは速度型の運動方程式を忠実に時間積分して運動を求める動的問題にも対応可能なコードであり、せん断帯発生に伴う波動生成や波動伝播も再現可能^{4),5)}である。この特徴を活かし、今回は特に、断層破壊に伴う振動の発生に着目して解析を行った。平面ひずみ条件下で、解析断面側方から変位制御により地盤を圧縮したところ、ひずみの局所化に伴う進行性破壊現象として逆断層的な破壊が発生した(図1)。この破壊は加速度的に進行し、それに伴って地盤内に振動が発生した。この際、非破壊領域に蓄えられた弾性エネルギーが一気に解放されることを確認した。水平成層地盤を対象にした解析では、破壊が急速に進行するため、初動で最大加速度に達し、その後指数関数的に減衰する人工地震と同様な特徴を持った振動が発生した(図2)。一方で、ランダムな初期不整を与えた地盤では、大きな破壊イベントの中に小さな破壊イベントが幾つも存在することに起因して、自然の地震波にも似た不規則な振動が発生した(図3)。なお、解析断面側方から変位制御により地盤を伸長した場合には、正断層的な破壊が生成され、やはりランダムな初期不整を有する地盤では、不規則な振動が発生した。

- 1) 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*, **48(6)**, 771-790.
- 2) 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡顕, 川合裕太 (2014): 横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, SSS31-08.
- 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*, **42(5)**, 47-57.
- 4) Noda, T., Xu, B. and Asaoka, A. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based on dynamic soil-water coupled finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, **53(5)**, 653-670.
- 5) 浅岡顕, 山田正太郎, 野田利弘 (2013): 地表面載荷による地盤の破壊現象と破壊に伴う振動の発生に関する数値解析, 日本地球惑星科学連合大会 2013 年大会, SSS28-18.

キーワード: 正断層, 逆断層, 地震波, ひずみの局所化, 慣性力, 弾塑性体

Keywords: natural fault, reverse fault, seismic wave, strain localization, inertial force, elasto-plastic body

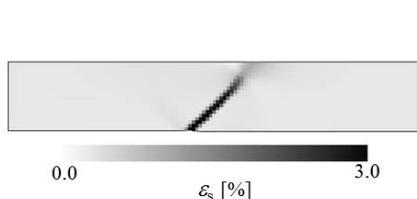


図1 逆断層の破壊発生時のせん断ひずみ分布

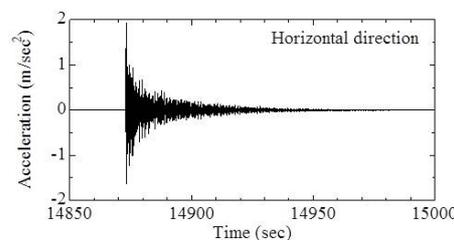


図2 水平成層地盤において発生した振動

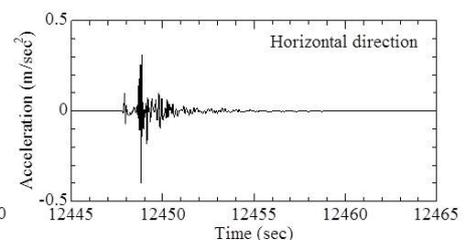


図3 ランダムな初期不整を有する地盤において発生した振動

Estimation of shallow shear wave velocity in Bandung basin, Indonesia using horizontal to vertical (H/V) spectral ratio
Estimation of shallow shear wave velocity in Bandung basin, Indonesia using horizontal to vertical (H/V) spectral ratio

Pramatadie Andi Muhamad^{1*}; 地元 孝輔¹; AFNIMAR Afnimar²; 山中 浩明¹
PRAMATADIE, Andi muhamad^{1*}; CHIMOTO, Kosuke¹; AFNIMAR, Afnimar²; YAMANAKA, Hiroaki¹

¹Tokyo Institute of Technology, ²Bandung Institute of Technology

¹Tokyo Institute of Technology, ²Bandung Institute of Technology

Bandung, the third populous city in Indonesia with population of around 2.7 million, is located in the western part of Java island. The city lies on a basin structure called Bandung basin. The concern of seismic risk in this area becomes important as existing of 24 km-long Lembang fault in the northern part. As part of potential seismic hazard estimation, Microtremors measurement is one of effective tool to estimate shear wave velocity profile and site amplification factor, especially in the urban area. A 3 component microtremors measurement is conducted in 76 sites to observe horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio that reflected to the ground characteristic. In the previous work, the obtained shear wave velocity models from Spatial Autocorrelation (SPAC) are used as reference model. Estimation of the ground structures are using the tuning factor to fitting the observed H/V spectrum with the theoretical ellipticity of fundamental mode of Rayleigh wave from the velocity model. From the obtained velocity model, we observed the thicknesses of soft layer (<500 m/s) from north to south of basin are changing from around 8 to 12 m in edge of basin area and around 40 m at the central of basin. The obtain profiles provide detail structure information in Bandung basin. Also the calculation of AVS30s and site amplification factor were conducted in each site, to understand the potential seismic hazard in the area. We also discuss a spatial variation of the amplification of earthquake ground motion using the obtained profiles.

キーワード: H/V spectral ratio, S-wave velocity, shallow soil, Bandung basin, amplification

Keywords: H/V spectral ratio, S-wave velocity, shallow soil, Bandung basin, amplification

地震波干渉法結果のデコンボリューションに基づく位相情報の抽出—数値計算に基づく手法の検証と実記録への適用— An evaluation to trace phase of surface wave using the seismic interferometry

元木 健太郎^{1*}; 加藤 研一¹
MOTOKI, Kentaro^{1*}; KATO, Kenichi¹

¹ 小堀鐸二研究所
¹ Kobori Research Complex

1. はじめに

地震波干渉法の適用例として、長時間の微動記録から2地点間の群速度が評価されている。地震波干渉法によってグリーン関数が再現できるとすれば、表面波の波群の情報だけでなく、位相情報も有効に活用できると考えられる。Behm et al.(2014)は地震波干渉法の結果による近傍観測点の位相の時間差は、群速度から求められる時間差よりもばらつきが小さいことを示しているが、実記録に基づくのみで検証はなされていない。本検討では、地震波干渉法によって得られる波の位相伝播を活用するための評価法を示し、解析的な検討から適用性を確認した後、実観測記録に適用した事例を示す。

2. 評価法について

グリーン関数の位相を用いて地下構造モデルとの関連付けを行うためには、伝播する波を追跡できるように、波長に対して観測点間隔を十分に短くすることが望ましい。しかし、地震波干渉法によって評価できる波長範囲は、空間エリアジングが起きる短波長のみに限られる。そこで本検討では、対象地域の外の観測点に対して、対象地域内の観測点の相互相関関数を求める。対象地域の端の評価波形と、対象地域内の評価波形のデコンボリューションにより、対象地域内の波の伝播を評価する。本検討では、上下成分を対象とした。

解析的検討では擬似的に equipartition を表現するために、周辺からの波を相反定理により有限差分法を用いて評価する。周辺の発振点は40km×90kmのエリアに0.2km間隔に90651地点を配置する。4kmの測線を対象地域として0.4km間隔で評価点(以降、評価点)を配置し、地震波干渉法を適用するための点は、測線の延長上に18km離れた点(以降、基準点)を測線の両側に配置した。モデルは単純化のために2層モデルとし、水平成層構造モデル、測線に対して直交する方向に不整形なモデル(2次元不整形モデル)、堆積層の形状が盆地となるような3次元不整形モデルと、徐々に不整形性が強くなるモデルを設定した。基準点を加振した時の各評価点の差分法の結果をグリーン関数として、地震波干渉法による結果をデコンボリューションして波の伝播を評価する手法の適用性について検討した。

3. 解析的検討による適用性の確認

水平成層構造モデルの場合、相互相関関数のデコンボリューション波形は、グリーン関数のデコンボリューション波形に近く再現性は高い。2次元不整形の場合、デコンボリューションをとる方向、すなわち波の伝播方向によって結果が異なった。硬い地盤上の評価波形に対するデコンボリューション波形においては、地震波干渉法の結果はグリーン関数とよく対応する。軟らかい層上の評価波形に対するデコンボリューション波形は、層境界に達するまでの波の伝播は地震波干渉法とグリーン関数でよく対応するものの、層境界で反射する位相については地震波干渉法とグリーン関数で若干の位相ずれが生じた。3次元不整形の場合は、デコンボリューションをとる方向に加え、地震波干渉法を適用する際の波の伝播方向によって結果が異なる。硬い地盤から軟らかい地盤へ波が伝播することを評価する際は、地震波干渉法を適用する際の伝播方向と、デコンボリューションをとる方向を合わせると、地震波干渉法の結果はグリーン関数の結果とよく対応する結果が得られた。しかし、やわらかい層から硬い層へ伝播する方向に対しては、解析の方向を合わせても地震波干渉法の結果とグリーン関数の結果は対応せず、グリーン関数を再現することはできなかった。硬い地盤から軟らかい地盤への波の伝播であれば、解析する処理の方向に注意を払えば、3次元不整形地盤においても地震波干渉法によって波の伝播を評価できることを示した。

4. 実データへの適用例

実記録の検討では、Hi-net 一関西(N.ICWH)と一関東(N.ICEH)間を対象地域として、その2点の延長線上近くに位置している藤沢(N.FSWH)と東和(N.TOWH)を、地震波干渉法を適用するための基準点として選定した。1か月間の記録を用いて、地震波干渉法を適用した。記録は計器特性を補正し、データ処理方法は地元・山中(2012)の方法を参照した。記録から求めた波形とJ-SHISの3次元地下構造モデルを用いた解析解の比較を行った。

藤沢を基準として地震波干渉法の結果をデコンボリューションした波形と、東和を基準として処理した結果の波形はよく対応しており、基準点によらず安定して波形が求められることを確認した。3次元地下構造モデルによる解析解と、観測記録から得られた波形は概ね対応する結果が得られ、実観測記録でも適用できることを示した。

今後の課題として、例えば関東平野の盆地端部付近の観測点に適用して表面波の生成が本手法で追跡できるかどうかの検討を行いたい。

SSS25-23

会場:A04

時間:5月25日 17:00-17:15

キーワード: 地震波干渉法, デコンボリューション
Keywords: seismic interferometry, deconvolution