

熊本地震による KiK-net 益城での観測地震動と 事前の活断層評価に基づく推定地震動との比較

福島 康宏¹・後藤 浩之²・長尾 毅³・尾茂 淳平⁴・末富 岩雄⁵

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)
E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)
E-mail: oshige-ju @ej-hds.co.jp

⁵正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)
E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

2016 年熊本地震は、地震調査研究推進本部による長期評価が行われている活断層の活動により発生した地震であった。益城町に顕著な被害を生じさせた 4 月 16 日 1 時 26 分頃発生した地震の規模は $M_{JMA}7.3$ であったが、震源断層に対応する布田川断層帯布田川区間の事前の評価では $M_{JMA}7.0$ と、実際に発生した地震のほうが大きな地震規模であった。

本検討では、KiK-net 益城サイトを対象として、観測された地震動と事前の活断層評価に基づき推定される地震動との比較を行った。

Key Words: the 2016 Kumamoto Earthquake, KiK-net Mashiki, predicted ground motions, recipe for strong-motion prediction, site amplification factor

1. はじめに

平成 28 年 (2016 年) 熊本地震は、2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動を指すものである¹⁾。このうち、2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分頃に発生した $M_{JMA}6.5$ の地震と 2016 年 4 月 16 日 1 時 26 分頃に発生した $M_{JMA}7.3$ の地震では、熊本県益城町で震度 7 を観測し、住宅など甚大な被害が生じている。気象庁では報道発表資料等において前震や本震といった呼び方をしていないが、以降では、わかりやすさのため、便宜的に 4 月 14 日の $M_{JMA}6.5$ の地震を前震、4 月 16 日の $M_{JMA}7.3$ の地震を本震と呼ぶこととする。

熊本地震は、地震調査研究推進本部により活断層の長期評価²⁾や強震動評価^{3,4)}が行われている主要活断層帯の活動により発生した地震である。一連の地震は、布田

川・日奈久断層帯を震源断層とする活動であり、前震は日奈久断層帯の高野一白旗区間の活動、本震は布田川断層帯の布田川区間の活動と考えられている⁵⁾。しかし、布田川断層帯の布田川区間についての事前の評価⁶⁾では、断層長が約 19km で予測される地震規模は $M_{JMA}7.0$ 程度とされていたのに対し、4 月 16 日に発生した本震では、断層長さが 27km 以上、地震規模も $M_{JMA}7.3$ と、いずれも事前に評価されていたより大きな地震であった。

そこで、本検討では、サイト増幅特性が評価されており、表層地盤の PS 検層データも公開されている KiK-net⁷⁾益城 (KMMH16) サイトを対象として、事前評価されていた活断層の評価結果に基づいた地震動推定を行い、熊本地震本震の地表観測記録 (震度 6 強相当) との比較を行う。地震動の推定は、野津・長尾⁸⁾によりスペクトルインバージョンに基づき評価されている KiK-net 益城

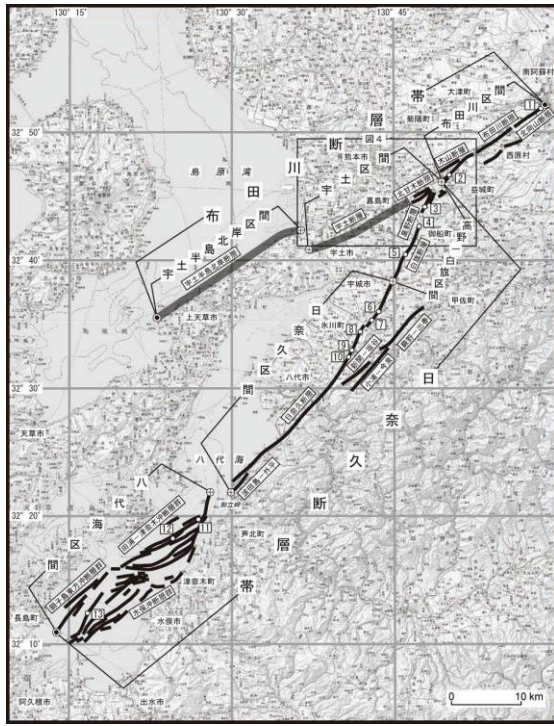


図-1 地震調査研究推進本部⁹⁾による布田川・日奈久断層帯の位置

サイトでの経験的サイト増幅特性を考慮した統計的グリーン関数法^{9),10)}を用いている。

2. KiK-net 益城近傍の活断層の事前評価

地震調査研究推進本部では、主要活断層帯の1つである布田川・日奈久断層帯の長期評価を行っており⁹⁾、各活動区間において地震発生の特性を予測している。図-1に活断層分布、表-1に各活動区間の諸元を示す。日奈久断層帯全体と布田川断層帯布田川区間が同時に活動する場合、地震規模が最大で $M_{JMA}8.2$ と想定されている。また、今後30年以内の発生確率は、日奈久断層帯の八代海区間が最も高く、国内の主な活断層帯の中では発生確率が高いグループに属している。

3. KiK-net 益城での熊本地震の観測地震動

KiK-net 益城サイトで観測された本震の強震記録の時刻歴波形および減衰5%の加速度応答スペクトルを図-2に示す。本震の加速度最大値はNS成分が 653cm/s^2 、EW成分が 1157cm/s^2 と、EW成分のほうが大きかった。加速度応答スペクトルも、ほぼ全ての周期帯でEW成分のほうがNS成分より大きく、特に周期1秒付近では

表-1 布田川・日奈久断層帯の各活動区間の地震規模と今後30年以内の発生確率⁶⁾

活動区間	断層長 M_{JMA}	30年以内の 発生確率
布田川断層帯		
布田川区間	約19km 7.0	ほぼ0%–0.9%
宇土区間	約20km 7.0	不明
宇土半島北岸区間	約27km以上 7.2以上	不明
全体が同時活動	約64km以上 7.5–7.8以上	不明
日奈久断層帯		
高野–白旗区間	約16km 6.8	不明
日奈久区間	約40km 7.5	ほぼ0%–6%
八代海区間	約30km 7.3以上	ほぼ0%–16%
全体が同時活動	約81km 7.7–8.0以上	不明
日奈久断層帯全体と布田川断層帯布田川区間 が同時活動	- 7.8–8.2	不明

2000cm/s^2 を超える非常に大きな応答加速度となっている。

4. 事前の活断層評価に基づく KiK-net 益城での地震動の推定

(1) 地震動推定の流れ

熊本地震本震の震源断層の一部となった布田川断層帯布田川区間が活動した場合の KiK-net 益城サイトでの地震動の推定を行う。表-1に示した布田川・日奈久断層帯の各活動区間の地震による面的な強震動評価は、地震調査研究推進本部「全国地震動予測地図」³⁾や防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」⁴⁾で実施されているが、ここでは、KiK-net 益城サイトでのサイト増幅特性を考慮した地震動の推定を行う。本検討の地震動推定の流れは以下の通りである。

- ① 統計的グリーン関数法により、線形の増幅特性を考慮した地表面の地震動を求める。
- ② ①で求めた地表面地震動より、線形の重複反射理論により工学的基盤での地震動を求める。
- ③ ②で求めた工学的基盤での地震動より、表層地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行い、地表面地震動を求める。

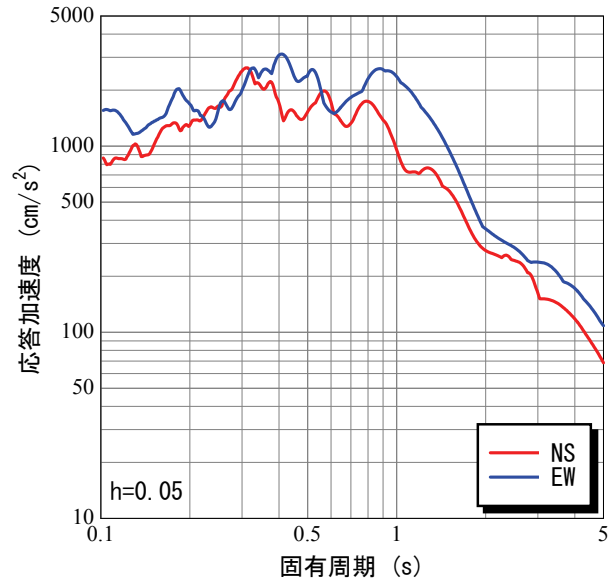
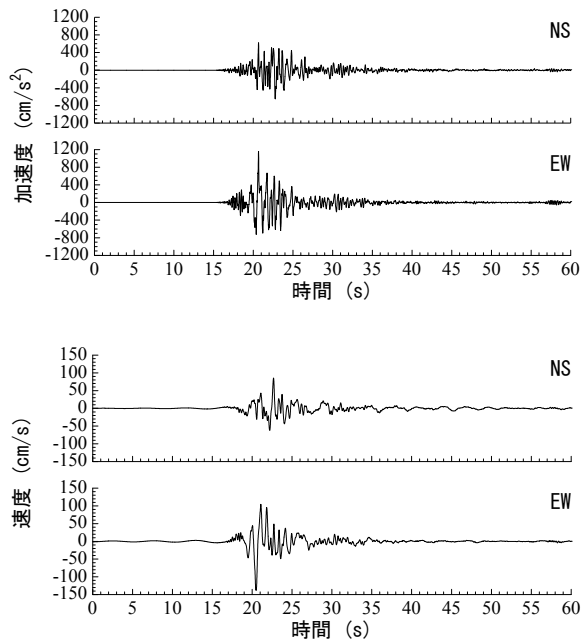


図-2 KiK-net 益城サイト（地表面）で観測された熊本地震本震の強震記録

表-2 布田川断層帯布田川区間の震源パラメータ⁴⁾

巨視的震源パラメータ	「長期評価」または設定方法	設定値
活断層長さ L	「約 19 km」	19 km
マグニチュード M	「7.0 程度」	7.0
断層モデル原点	地中の上端における北端	北緯 32.8882° 東経 131.0274°
走向 θ	長期評価の端点を結ぶ方向	N233.2°E
傾斜角 δ	「高角」	90°
すべり角 γ	「南東側隆起の上下成分を伴う右横ずれ断層」	-160°
断層モデル上端深さ	微小地震の発生と地震基盤深さを参考	3 km
断層モデル長さ L_{model}	手続き化の方法に従い設定	24 km
断層モデル幅 W_{model}	手続き化の方法に従い設定	14 km
断層モデル面積 S_{model}	$S_{\text{model}} = L_{\text{model}} \times W_{\text{model}}$	336 km ²
地震モーメント M_0	$\log M_0 = 1.17M + 10.72$	7.40E+18 Nm
モーメントマグニチュード M_w	$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$	6.5
静的応力降下量 $\Delta\sigma$	$\Delta\sigma = 7/16 \cdot M_0 / R^2$	2.9 MPa
平均すべり量 D_{model}	$D_{\text{model}} = M_0 / (\mu \cdot S_{\text{model}})$	0.7 m
短周期レベル A	$A = 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3}$	1.03E+19 Nm/s ²
微視的震源パラメータ	設定方法	ケース 1・2
全面積 S_a	$S_a = \pi r^2, r = 7\pi/4 \cdot M_0 / (A \cdot R) \cdot \beta^2$	60.9 km ²
平均すべり量 D_a	$D_a = \gamma_D \cdot D_{\text{model}}, \gamma_D = 2.0$	1.4 m
実効応力 σ_a	$\sigma_a = \Delta\sigma_a = 7/16 \cdot M_0 / (r^2 \cdot R)$	16.1 MPa
地震モーメント M_{0a}	$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a$	2.68E+18 Nm
第 1 断層帯面積 S_{a1}	$S_{a1} = S_a$	60.9 km ²
平均すべり量 D_{a1}	$D_{a1} = (\gamma_1 / \Sigma \gamma_i^2) \cdot D_a$	1.4 m
実効応力 σ_{a1}	$\sigma_{a1} = \sigma_a$	16.1 MPa
計算用面積	2km メッシュサイズ	60 km ²
第 2 断層帯面積 S_{a2}	$S_{a2} = 0$	—
平均すべり量 D_{a2}	$D_{a2} = (\gamma_2 / \Sigma \gamma_i^2) \cdot D_a$	—
実効応力 σ_{a2}	$\sigma_{a2} = \sigma_a$	—
計算用面積	2km メッシュサイズ	—
背景領域面積 S_b	$S_b = S_{\text{model}} - S_a$	275.1 km ²
平均すべり量 D_b	$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b)$	0.5 m
実効応力 σ_b	$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (D_a / W_a) \cdot \sigma_a$	2.7 MPa
地震モーメント M_{0b}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	4.72E+18 Nm
計算用面積	2km メッシュサイズ	276 km ²

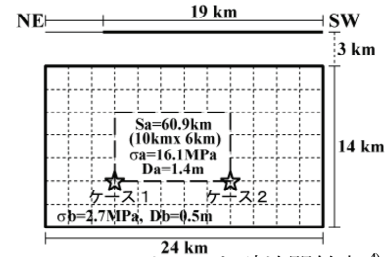


図-3 アスペリティと破壊開始点⁴⁾

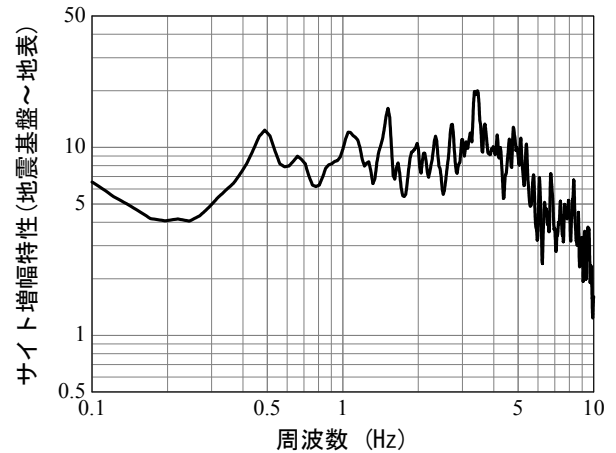


図-4 KiK-net 益城のサイト増幅特性⁸⁾

(2) 地震動推定の条件

a) 統計的グリーン関数法による地震動推定

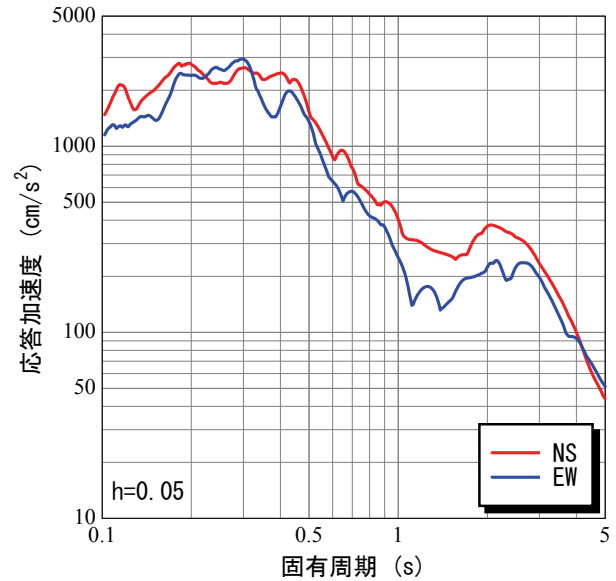
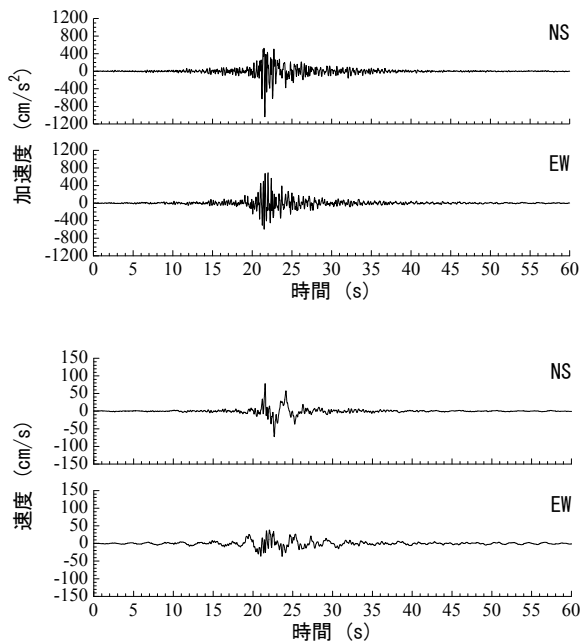
防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」⁴⁾では、地震調査研究推進本部「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」¹⁰⁾に基づき、布田川断層帯布田川区間の強震動評価が行われている。本検討では、震源特性としては、J-SHIS で用いられているレシピ準拠の震源パラメータを用いることとする。これを表-1 に示す。また、アスペリティや破壊開始点の

位置についても図-3 に示す J-SHIS の設定を用い、北東側のアスペリティ下端から破壊する場合をケース 1、南西側のアスペリティ下端から破壊する場合をケース 2 とする。

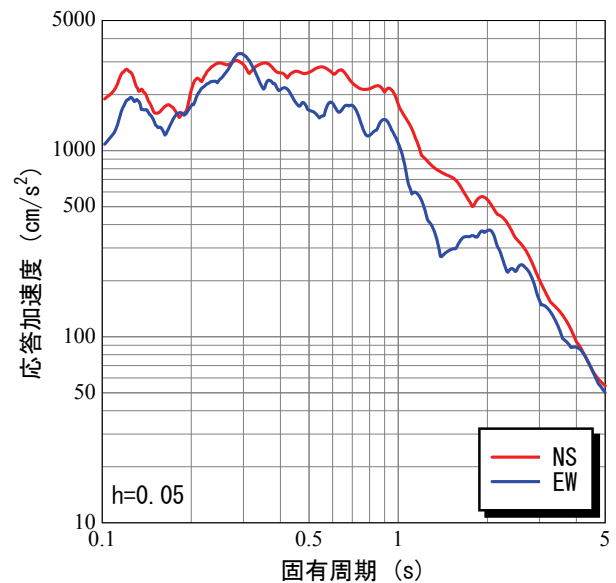
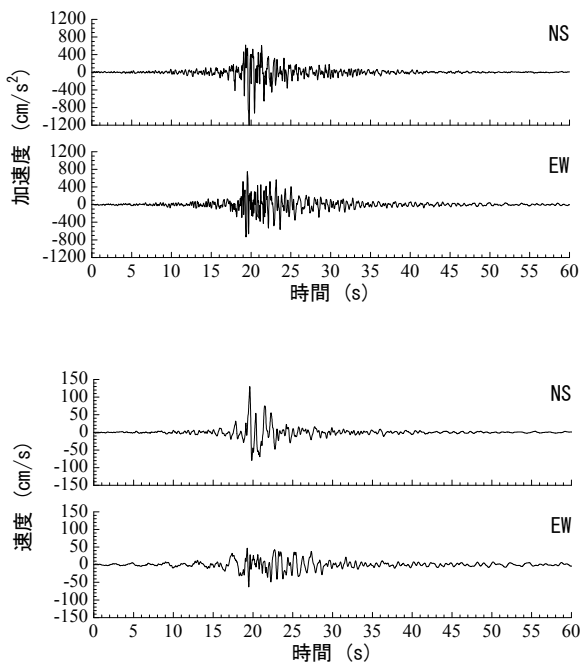
伝播経路特性については、加藤¹²⁾により鹿児島県および熊本県を対象に求められている Q 値を用いた。

$$Q = 104 \times f^{0.63} \quad (2)$$

サイト特性のうち、地震基盤から地表面のサイト増幅特性は、野津・長尾⁸⁾によりスペクトルインバージョン



(1)破壊開始点ケース 1



(2)破壊開始点ケース 2

図-5 KiK-net 益城サイト（地表面）で推定される布田川断層帯布田川区間の地震による地震動

により求められている経験的サイト増幅特性を用いる。これを図-4に示す。なお、野津・長尾⁸⁾によるKiK-net益城におけるサイト増幅特性は、スペクトルインバージョンに用いた地震記録数が2と少ないことから、地震後に長尾ほか¹³⁾や長坂・野津¹⁴⁾により見直しが行われているが、本検討では、地震前に得られていた情報に基づき地震動推定を行っている。また、サイト位相特性の補正には、KiK-net 益城サイトで得られている強震記録のう

ち、2002年9月2日5時48分頃発生した熊本地方を震源とする $M_{\text{JMA}}3.8$ の地震のものを用いる。

強震波形の合成は、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法^{8),9)}を用いている。放射特性係数は全方位への平均値0.63とし、水平2成分へ分配する係数は野津ほか¹⁵⁾に基づき、断層走向直交成分を0.85、断層走向平行成分を0.53としている。

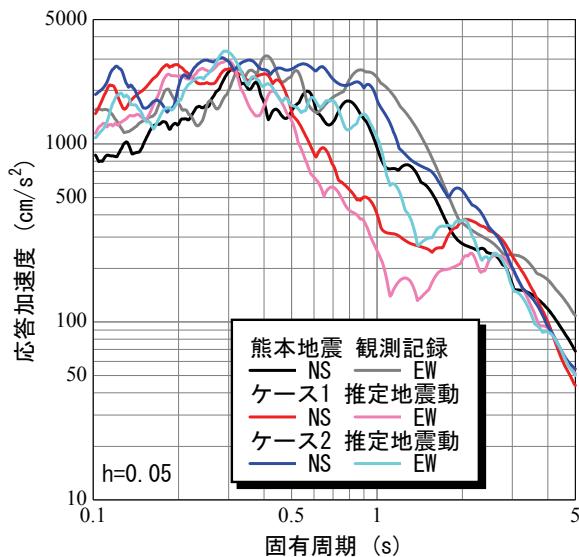


図-6 加速度応答スペクトルの比較

b) 工学的基盤への引き戻しと表層地盤の非線形性を考慮した地表面への引き上げ

前項の条件で求められる地表面地震動は、図-4 に示すサイト増幅特性が考慮されることから、表層地盤が線形応答した場合の地震動である。そこで、KiK-net 益城での PS 検層結果⁷⁾に基づき、工学的基盤（深さ 15m の軽石凝灰岩層上面）まで線形の重複反射理論で引き戻し、非線形性を考慮して地表面地震動を求める。非線形性の考慮には、Suetomi and Yoshida¹⁶⁾の等価線形化法を適用した。動的変形特性は、平均粒径などの一般的なパラメータのみからなり適用範囲の広い安田・山口¹⁷⁾を、散乱減衰の考慮には、地盤材料ごとの既往の研究がとりまとめられている福島・翠川¹⁸⁾を用いている。

(3) 地震動推定結果

前節の条件で求めた、布田川断層帯布田川区間の地震による KiK-net 益城サイトでの地表面地震動を図-5 に示す。

破壊開始点のケース 1, 2 とも、断層走向直交成分により近い NS 成分のほうが EW 成分より加速度振幅、速度振幅、応答加速度とも大きい結果となっている。ケース 1 と 2 を比較すると、ケース 2 の条件で推定される地震動のほうが大きな地震動となっている。

5. 熊本地震本震の観測地震動と布田川断層帯布田川区間の地震の推定地震動の比較

図-2 に示した熊本地震本震での強震記録と、図-5 に示した布田川断層帯布田川区間の地震による推定地震動

について、減衰 5%の加速度応答スペクトルで比較したものを図-6 に示す。

熊本地震本震の観測記録は、NS 成分より EW 成分のほうが大きい、推定地震動のほうは NS 成分のほうが EW 成分より大きい結果となっている。これは、断層走向との関係のみでなく、KiK-net 益城サイトでの増幅特性に波動伝播方向が影響していることなどを考慮する必要があることを示していると考えられる。

観測記録で大きな EW 成分と推定地震動で大きな NS 成分を比較すると、ケース 2 の推定地震動では概ね観測記録と同程度の応答加速度を推定できているものの、周期 1 秒前後では観測記録を下回っている結果となった。

6. まとめ

2016 年熊本地震 ($M_{JMA}7.3$) で大きな地震動を観測した KiK-net 益城サイトにおいて、震源断層である布田川断層帯布田川区間の地震による地震動を、事前の活断層評価 ($M_{JMA}7.0$) に基づき推定した。

その結果、事前に想定される地震規模は観測されたものより小さいものの、加速度応答スペクトルで比較すると観測記録の大きさに近い地震動が推定された。ただし、住宅被害などにとって重要な周期 1 秒前後の周期帯では観測記録を下回っており、事前の活断層評価に基づく地震動予測によってレベル 2 地震動を設定する際には、過小評価とならないように何らかの配慮をする必要があると考えられる。

なお、本検討では、地表面地震動による比較を行っているが、地震動推定の際の表層地盤の地震応答は、PS 検層結果のみから地盤モデルを設定しているため、推定誤差は大きいと考えられる。事前の評価と実際に発生した地震の震源特性の相違が地震動の相違に与える影響を議論するため、今後、KiK-net 益城サイトでの表層地盤の非線形性の影響をとり除いた工学的基盤で地震動の比較を行う予定である。

謝辞：防災科学技術研究所 KiK-net 観測記録を使用しました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成 28 年(2016 年)熊本地震」について (第 23 報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/21a/201604211030.html> (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)。
- 2) 地震調査研究推進本部：主要活断層帯の長期評価, http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/ (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
- 3) 地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図, http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/s

- hm_report/ (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
- 4) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の評価, http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：布田川断層帯・日奈久断層帯の評価 (一部改訂), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 7) 防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 8) 野津厚, 長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
 - 9) 古和田明, 田居 優, 岩崎好規, 入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp. 97-104, 1998.
 - 10) 野津厚, 菅野 高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法－内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討－, 港湾空港技術研究所資料, No.1120, 2006.
 - 11) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 12) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 543 号, pp.61-68, 2001.
 - 13) 長尾 毅, Tara Nidhi Lohani, 福島康宏, 伊藤佳洋, 北後明彦, 尾茂淳平：2016 年熊本地震による益城町の地震被害と地盤震動特性の相関に関する研究, 第 36 回地震工学研究発表会, 2016. (投稿中)
 - 14) 長坂陽介, 野津厚：K-NET 熊本(KMM006)と KiK-net 益城(KMMH16)のサイト増幅特性の再評価－デジタルデータ付き－, http://www.pari.go.jp/bsh/jbnkzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2016/jr_48.html (平成 28 年 9 月 1 日閲覧)
 - 15) 野津厚, 井合進, W.D.Iwan：震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用、港湾技術研究所報告, Vol.40, No.1, pp.107-167, 2001.
 - 16) Suetomi, I. and Yoshida, N.: Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp. 765-772, 1998.
 - 17) 安田進, 山口勇：種々の不撓乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
 - 18) 福島美光, 翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 460 号, pp.37-46, 1994.

(2016. ?? 受付)

COMPARISON OF THE OBSERVED GROUND MOTION AT KIK-NET MASHIKI SITE BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE AND THE ESTIMATED GROUND MOTION BASED ON THE INFORMATION OF THE ACTIVE FAULT

Yasuhiro Fukushima, Hiroyuki Goto, Takashi Nagao, Jumpei Oshige and Iwao Suetomi

The 2016 Kumamoto earthquake was occurred by the active fault which has been evaluated by the Headquarters for Earthquake Research Promotion. The magnitude of the main shock that caused severe damage on structures at Mashiki Town in Kumamoto Prefecture was $M_{JMA}7.3$, but, the magnitude of the Futagawa segment of Futagawa fault zone through the Mashiki Town has been evaluated $M_{JMA}7.0$.

In this study, the estimated ground motion based on the information of the active fault was compared with the observed ground motion by the main shock at the KiK-net Mashiki site.