

2016年熊本地震による益城町中心部の木造住宅被害分布に関する地盤要因の可能性

正会員 新井 洋\*<sup>1</sup> 同 柏 尚稔\*<sup>2</sup>

2016年熊本地震 地盤の非線形性 散乱減衰

1. はじめに

2016年熊本地震では益城町中心部の多数の木造住宅に甚大な被害が生じたが、その様相は場所により大きく異なっている。この原因を検討するため、図1のSite K(防災科研 KiK-net 益城)の鉛直アレイ本震記録<sup>1)</sup>とSite M, Fの地盤調査に基づいて、4月16日EW成分の強震動の再現解析を行った。

2. 地盤モデルと本震の再現解析の概要

Site K, M, Fの地盤モデルを表1-3<sup>2)</sup>に示す。地盤層厚と各層の土質区分・単位体積重量はボーリング・地下水位・物理試験から設定した。S波速度はPS検層と微動アレイ探査から設定した。動的変形特性は乱さない土試料と岩石試料の繰返し三軸試験から設定した(図2: Site K ロームは修正R-Oモデル<sup>3), 4)</sup>, その他は修正HPモデル<sup>5), 6)</sup>)。また、吉田ら<sup>7)</sup>を参考に、福島・翠川<sup>8)</sup>の散乱減衰を要素レイヤー減衰  $[c] = \alpha[m] + \beta[k]$ により模擬するため、土質ごとに $\alpha, \beta$ を同定した(図3: S波速度による補正あり)。ただし、粘土・シルトでは、散乱減衰が過大に評価されないよう、補正係数の値を半分とした。

Site K, M, Fの本震の再現解析の概要を図4に示す。なお、有効応力解析の結果、3地点とも液状化しなかった(地盤モデルの液状化パラメータは省略)。分離解析で得られた基盤入射波は、最大加速度 $4.3\text{m/s}^2$ 、最大速度 $0.73\text{m/s}$ であった。詳細は文献2(<http://www.kenken.go.jp/>より入手可)を参照されたい。

3. 地盤特性が地表の強震動に与えた影響

Site K, M, Fの解析で得られた地表強震動の時刻歴を図5に示す。Site Kの解析波(赤線)は、加速度では観測波(黒線)の振幅を過小評価気味であるが、速度では観測波の振幅・位相とも、よく再現できている。得られた解析波(速度)の大小はSite F < Site K < Site Mの順となっている。

図6(a)に、Site Kの解析で得られた地盤の最大せん断ひずみの深さ方向分布を示す。図2との対比から、粘性土層と砂礫層では顕著な非線形化が、凝灰岩の上部では若干の非線形化が示唆される。Site M, Fでも同様の傾向が見られた。

図6(b)-(d)に、Site K, M, Fの解析で得られた地盤の最大速度の深さ方向分布を示す。図には、粘性土・砂/砂礫・岩の動的変形特性(非線形性)と散乱減衰を無視した場合の解析結果も、それぞれ示す。凝灰岩上面以浅の堆積層の非線形性と散乱減衰が地盤応答に大きく影響した可能性が示唆される。

図7に、Site K, M, Fの解析で得られた地表、凝灰岩上面、基盤入射波の加速度フーリエ振幅スペクトルと地表/凝灰岩上面のフーリエ振幅比スペクトルを示す。図6-7より、得られた再現強震動について、次のi)-iv)の可能性を指摘できる。

- i) 凝灰岩上面では、基盤入射波と大差なく、卓越周期0.8秒程度、最大速度0.8-0.9m/s程度である。
- ii) Site Kでは、凝灰岩上面以浅の堆積層(とくに粘性土層)の

表1 Site Kの地盤モデル(地下水位13.55m)

層上面深さ D <sub>0</sub> (m)	土質区分	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 V <sub>s</sub> (m/s)	動的変形特性	要素レイヤー減衰	
					$\alpha$	$\beta$
0.00	ローム(粘土)	15.7	80	図2(a)	$5.3 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-1}$
1.70	凝灰質シルト	15.7	120	図2(a)	$4.5 \times 10^{-1}$	$4.2 \times 10^{-1}$
4.80	凝灰質シルト	15.7	170	図2(b)	$3.3 \times 10^{-1}$	$3.5 \times 10^{-1}$
13.55	凝灰質砂礫	18.6	350	図2(b)	$1.1 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
31.60	砂礫	18.6	380	図2(b)	$1.0 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
34.35	固結シルト	15.7	310	図2(a)	$2.6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-1}$
36.90	凝灰岩	15.7	310	図2(a)	$2.6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-1}$
40.80	凝灰岩	19.6	650	図2(b)	$2.2 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-1}$
71.00	安山岩	20.6	1180	弾性	$1.4 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$
98.00	安山岩	22.1	1870	弾性	$1.7 \times 10^{-1}$	$8.5 \times 10^{-2}$
112.00	凝灰質砂礫	22.1	2210	図2(b)	$1.3 \times 10^{-1}$	$7.9 \times 10^{-2}$
134.00	溶結凝灰岩	22.1	840	図2(b)	$7.6 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-3}$
148.00	溶結凝灰岩	22.1	2030	弾性	$1.4 \times 10^{-1}$	$8.2 \times 10^{-2}$
175.00	自破砕状安山岩	22.1	790	図2(b)	$2.0 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-1}$
223.00	安山岩	23.5	2260	弾性	$1.3 \times 10^{-1}$	$7.8 \times 10^{-2}$
255.00	基盤	23.5	2260	弾性	-	-

表2 Site Mの地盤モデル(地下水位1.60m)

D <sub>0</sub> (m)	土質区分	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)	動的変形	要素レイヤー減衰	
					$\alpha$	$\beta$
0.00	凝灰質シルト	15.7	90	図2(a)	$4.3 \times 10^{-1}$	$4.6 \times 10^{-1}$
3.00	凝灰質シルト	15.7	130	図2(a)	$3.7 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-1}$
8.00	凝灰質砂	18.6	240	図2(b)	$7.3 \times 10^{-1}$	$3.5 \times 10^{-1}$
14.69	凝灰質砂	18.6	340	図2(b)	$6.4 \times 10^{-1}$	$3.0 \times 10^{-1}$
36.00	凝灰質砂礫	18.6	470	図2(b)	$9.6 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-3}$
51.00	凝灰岩	-	-	Site Kと同じ	-	-
265.20	基盤	-	-	Site Kと同じ	-	-

表3 Site Fの地盤モデル(地下水位0.60m)

D <sub>0</sub> (m)	土質区分	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)	動的変形	要素レイヤー減衰	
					$\alpha$	$\beta$
0.00	凝灰質シルト	15.7	80	図2(a)	$4.5 \times 10^{-1}$	$4.8 \times 10^{-1}$
12.10	凝灰質シルト	15.7	100	図2(a)	$4.1 \times 10^{-1}$	$4.4 \times 10^{-1}$
13.60	凝灰質シルト	15.7	90	図2(a)	$4.3 \times 10^{-1}$	$4.6 \times 10^{-1}$
17.60	粘土	15.7	130	図2(a)	$3.7 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-1}$
21.70	粘土	15.7	250	図2(a)	$3.4 \times 10^{-1}$	$3.1 \times 10^{-1}$
22.30	砂礫	18.6	310	図2(b)	$1.1 \times 10^0$	$1.5 \times 10^{-3}$
23.60	砂礫	18.6	290	図2(b)	$1.2 \times 10^0$	$1.6 \times 10^{-3}$
26.80	凝灰質砂礫	18.6	380	図2(b)	$1.0 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
28.80	凝灰質砂礫	18.6	410	図2(b)	$1.0 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
51.70	砂礫	18.6	480	図2(b)	$9.5 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-3}$
56.50	固結シルト	15.7	310	図2(a)	$2.6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-1}$
58.40	固結シルト	15.7	390	図2(a)	$2.4 \times 10^{-1}$	$2.5 \times 10^{-1}$
61.30	凝灰岩	-	-	Site Kと同じ	-	-
275.50	基盤	-	-	Site Kと同じ	-	-

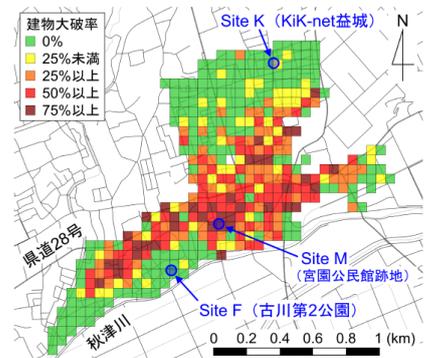


図1 益城町中心部の建物大破率と検討3地点

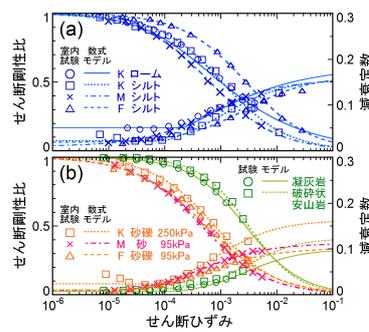


図2 地盤の動的変形特性

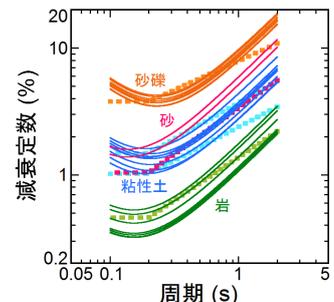


図3 散乱減衰(点線)と設定した要素レイヤー減衰(実線)

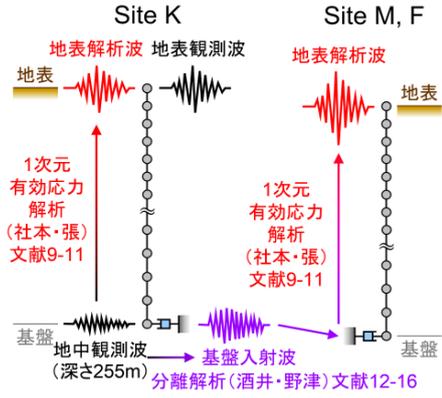


図4 Site K, M, F 本震の再現解析の概要

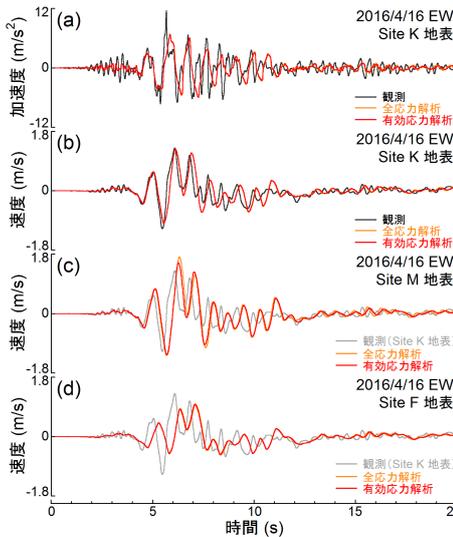


図5 Site K, M, F 地表の解析波と観測波の比較

非線形化により周期 0.7-3 秒の成分が増幅されて、地表最大速度 1.3m/s 程度に達している。

- iii) Site M の凝灰岩上面から砂層上面までの最大速度の増幅は、Site K の凝灰岩上面から砂礫層上面までのそれより大きい。これは、砂の散乱減衰が砂礫のそれより小さいためと考えられる(図3)。即ち、Site M では、凝灰岩上面以浅の堆積層による周期 0.7-3 秒の成分の非線形増幅が Site K よりも大きく、地表最大速度 1.6m/s 程度に達している。
- iv) Site F は、Site K, M に比べて、粘性土層が厚く、凝灰岩上面以浅の堆積層の固有周期が長い。このため、粘性土層が非線形化した結果、入射波の卓越周期 0.8 秒周辺の増幅特性が谷(増幅率 1)となり、凝灰岩上面以浅では増幅が小さく、地表最大速度 1.0m/s 程度となっている。

#### 4. 木造住宅モデルの最大応答

Site K の地表観測波と Site K, M, F の地表解析波を入力として、木造住宅を模擬した基礎固定 2 質点系モデル<sup>17)</sup>の地震応答解析を行った。図8に、解析で得られた木造住宅モデルの最大応答(層間変形角)  $R_{max}$  を降伏ベースシヤ係数  $C_y$  に対して示す。 $C_y < 0.7$  程度では、Site K の解析波に対する  $R_{max}$  は観測波に対するそれと整合しており、3 地点の  $R_{max}$  の大小は Site F

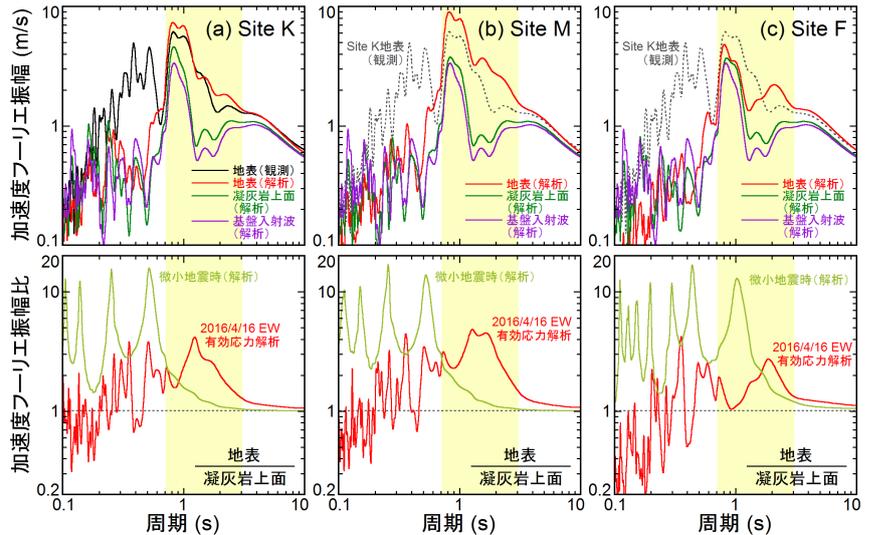


図7 Site K, M, F 解析波の加速度フーリエ振幅スペクトルとフーリエ振幅比スペクトル

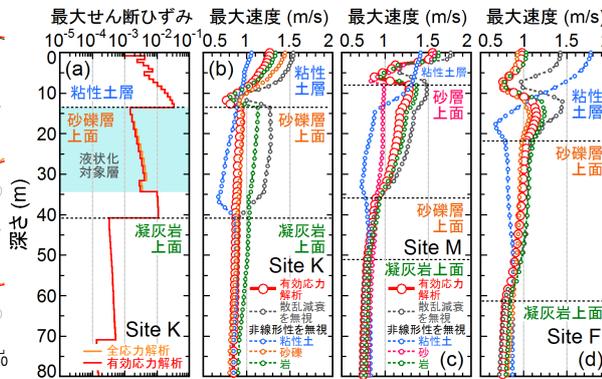


図6 Site K, M, F 解析波の最大地盤応答の深さ方向分布

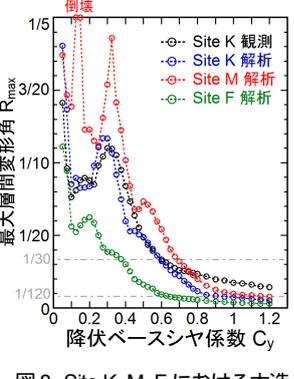


図8 Site K, M, F における木造住宅モデルの最大応答

< Site K < Site M の順となっている。また、3 地点の  $R_{max}$  と建物大破率の分布(図1)は調和的である。以上より、この地域の木造住宅の甚大な被害分布は、工学的基礎を含む表層地盤の非線形増幅特性と散乱減衰が地表の強震動に与えた影響の場所による差異として、定性的に説明できると考えられる。

#### 5. まとめ

防災科研 KiK-net 益城の本震記録と益城町中心部 3 地点の地盤調査に基づいて、2016 年熊本地震(4 月 16 日 EW 成分)の再現解析を行った。地表の強震動と木造住宅の甚大な被害分布には、工学的基礎を含む表層地盤の非線形増幅特性と散乱減衰が強く影響した可能性を指摘した。

謝辞: 防災科学技術研究所により公開された地震観測記録を使用した。地盤モデルの作成で使用した深さ 51-255m のボーリングと PS 検層のデータおよび岩石試料は益城町より提供いただいた。記して謝意を示す。

【参考文献】1) 防災科研 強震観測網 <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> 2) 新井: R3 建研講演会, 38-49, 2022. 3) Jennings: J. Eng. Mech., ASCE, 90(2), 131-166, 1964. 4) 龍岡, 福島: 生産研究, 30(9), 356-359, 1978. 5) 中川ほか: AIJ 構造系論文集, 666, 1407-1414, 2011. 6) Ishihara et al.: 51CNMG, 373-380, 1985. 7) 吉田ほか: AIJ 大会, 構造 II, 417-418, 2019. 8) 福島, 翠川: AIJ 構造系論文集, 460, 37-46, 1994. 9) 社本ほか: AIJ 構造系論文集, 433, 113-119, 1992. 10) Zhang et al.: S&F, 37(2), 51-19, 1997. 11) Shamoto et al.: S&F, 37(2), 71-80, 1997. 12) 酒井ほか: JSCE 論文集, 577 / I-41, 53-64, 1997. 13) 酒井: 京大博論, 1998. 14) 酒井ほか: JSCE 論文集, 612 / I-46, 373-378, 1999. 15) 野津: JSCE 地震工学研究発表会, 2017. 16) 野津: JGS 大会, 1969-1970, 2018. 17) 村瀬ほか: JAEE 論文集, 18(2), 147-165, 2018.

\*1 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員・博士(工学)

\*2 大阪大学 大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

\*1 Chief Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

\*2 Assoc. Prof., Osaka Univ., Dr. Eng.