

KiK-net 益城観測点における 2016 年熊本地震の散乱減衰を考慮した 1 次元有効応力解析

2016 年熊本地震 1 次元有効応力解析 散乱減衰

建築研究所 国際会員 新井 洋  
大阪大学 正会員 柏 尚稔

1. はじめに

2016 年熊本地震による益城町の建物被害要因を解明するためには、この地域の地盤特性が強震動に与えた影響を評価する必要がある。その一環として、防災科研 KiK-net 益城観測点の鉛直アレイ本震記録<sup>1)</sup>の再現解析は不可欠と考えられる。そこで、現地調査と室内試験に基づく地盤モデルに散乱減衰を考慮した 1 次元有効応力解析を行い、本震記録の説明を試みた。

2. 解析手法と地盤モデルの概要

1 次元有効応力解析は、社本・張の方法<sup>2-4)</sup>によった。用いた地盤モデルを表 1<sup>5)</sup>に示す。地盤層序と各層の土質区分・単位体積重量は、ボーリング・地下水位測定・物理試験の結果等から設定した。S 波速度は、PS 検層と微動アレイ探査の結果から設定した。動的変形特性は、採取した乱さない土試料と岩石試料の繰返し三軸試験の結果から設定した(図 1)。図 1 の数式モデルは、(a)が修正 R-O モデル<sup>6, 7)</sup>、(b)-(e)が修正 HP モデル<sup>8, 9)</sup>である。液化化特性は、南西に約 1.4km 離れた古川第 2 公園の近傍地点で深さ 14-15m から採取した乱さない土試料(凝灰質砂礫)の非排水繰返し三軸試験の結果から設定した(図 2)。散乱減衰は、吉田ら<sup>10)</sup>を参考に、福島・翠川<sup>11)</sup>の散乱減衰を地盤各層の要素レイヤー減衰  $[c] = \alpha[m] + \beta[k]$  を用いて擬似的に扱うため、粘土・シルト・砂礫・岩に分けて係数  $\alpha, \beta$  を最小 2 乗法により同定した(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。

表 1 の地盤モデルを S 波に対して 10Hz 以下の周波数成分を表現できるよう多質点系に置換し、2016 年熊本地震(4 月 16 日 EW 成分)の 1 次元有効応力解析を非排水条件で行った。この際、系の底面は粘性境界<sup>12)</sup>とし、深さ 255m の地中観測波<sup>1)</sup>を最深部の質点の応答として与え、酒井の方法<sup>13-15)</sup>による基盤入射波の分離解析を並列して行った。この分離解析は野津の方法<sup>16, 17)</sup>によっても同じ結果が得られることを確認している。解析の時間積分は Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ , 間隔 1/1000 秒以下で各地層のせん断ひずみ増分が  $10^{-6}$  以下となるよう細分割)を用いた。加速度から速度と変位を求める方法は 1 質点系(固有周期 20 秒, 減衰定数 0.707)の相対速度応答と相対変位応答によった。詳細は文献 5 ([http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/r03/pdf/T05\\_Arai.pdf](http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/r03/pdf/T05_Arai.pdf))を参照されたい。

表 1 KiK-net 益城観測点の地盤モデル(地下水位 13.55m)

層上面 深さ (m)	土質区分	単位 体積 重量 (kN/m <sup>3</sup> )	S波 速度 (m/s)	動的 変形 特性	拘束圧 依存性	静止 土圧 係数	液化化 特性	要素レイヤー減衰	
								$\alpha$	$\beta$
0.00	ローム (粘土)	15.7	80	図1(a)	なし	1.0		$5.3 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-4}$
1.70		15.7	120					$4.5 \times 10^{-1}$	$4.2 \times 10^{-4}$
4.80	凝灰質シルト	15.7	170	図1(b)	なし	1.0		$3.3 \times 10^{-1}$	$3.5 \times 10^{-4}$
13.55	凝灰質 砂礫	18.6	350	図1(c)	あり	0.5	図2	$1.1 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
31.60		18.6	380					$1.0 \times 10^0$	$1.4 \times 10^{-3}$
34.35	固結 シルト	15.7	310	図1(b)	なし	1.0		$2.6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-4}$
36.90		15.7	310					$2.6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-4}$
40.80	凝灰岩	19.6	650	図1(d)	なし	1.0		$2.2 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-4}$
71.00		20.6	1180					$1.7 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-4}$
98.00	安山岩	22.1	1870	弾性	-	1.0		$1.4 \times 10^{-1}$	$8.5 \times 10^{-5}$
112.00		22.1	2210					$1.3 \times 10^{-1}$	$7.9 \times 10^{-5}$
134.00	凝灰質砂礫	22.1	840	図1(c)	あり	0.5		$7.6 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-3}$
148.00	溶結凝灰岩	22.1	2030	弾性	-	1.0		$1.4 \times 10^{-1}$	$8.2 \times 10^{-5}$
175.00	自破砕状安山岩	22.1	790	図1(e)	なし	1.0		$2.0 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-4}$
223.00	安山岩	23.5	2260	弾性	-	1.0		$1.3 \times 10^{-1}$	$7.8 \times 10^{-5}$
255.00	基盤	23.5	2260	弾性	-	-		-	-

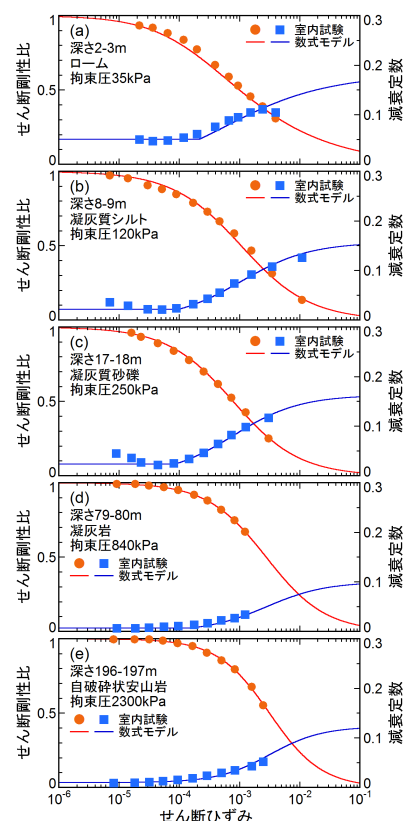


図 1 動的変形特性

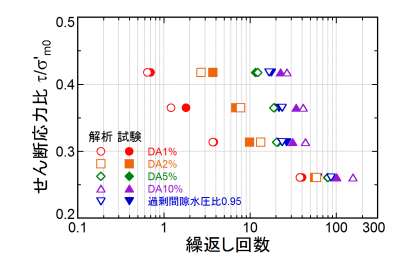


図 2 液化強度曲線

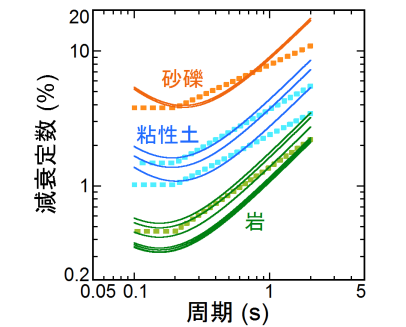


図 3 散乱減衰(点線)と設定した要素レイヤー減衰(実線)

### 3. 地盤の非線形性状と散乱減衰が強震動に与えた影響

地震応答解析の結果（時刻歴）を、図 4(a)-(c)地表の解析波と観測波の時刻歴の比較、(d)過剰間隙水圧比が最大となった地層の時刻歴、(e)-(f)深さ 255m の地中観測波から分離された基盤入射波の時刻歴として示す。図 4(a)-(c)より、地表の解析波（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、速度と変位では観測波の振幅・位相とも、よく再現できている。図 4(a)-(c)の橙線は、参考のため行った全応力解析の結果で、有効応力解析の結果（赤線）と、ほとんど差異が見られない。これは、図 4(d)より、過剰間隙水圧比が最大 0.9 程度までしか上昇せず、液状化の発生に至らなかったためと考えられる。また、図 4(e)-(f)より、深さ 255m の基盤入射波は、最大加速度  $4.3\text{m/s}^2$ 、最大速度  $0.73\text{m/s}$  であった。

図 5(a)に、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。地盤のせん断ひずみは、粘性土層の最深处で最大 3-4% に達している。その下の砂礫層（S 波速度  $350\text{-}380\text{m/s}$ ）では、最大せん断ひずみが 0.5% 程度に達しており、図 1(c)との対比から、顕著な非線形化が生じた可能性が示唆される。間隙水圧の影響は、ほとんど見られない。また、凝灰岩の上部（S 波速度  $650\text{m/s}$ ）では、最大せん断ひずみが 0.04% 程度に達しており、図 1(d)との対比から、若干の非線形化が生じた可能性が示唆される。

図 5(b)-(c)に、解析で得られた地盤の最大加速度と最大速度の深さ方向分布を示す。図には参考のため、粘性土・砂礫・岩の動的変形特性（非線形性）を無視した場合および散乱減衰を無視した場合の解析結果を、それぞれ重ね描いている。図より、凝灰岩上面以浅の堆積層の非線形性や散乱減衰を無視すると、地盤応答が大きく変化することから、これらが地盤応答に与えた影響の大きいことが示唆される。

図 6 に、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および地表/凝灰岩上面の加速度フーリエ振幅比スペクトルの周期特性を示す。図 6(a)の黒線は、地表観測波の加速度フーリエ振幅スペクトルである。図から、本解析では周期 0.3-0.5 秒にピークをもつ成分波を再現できておらず、これが図 4(a)の加速度時刻歴の過小評価に繋がったと考えられる。図 5 と図 6 より、凝灰岩上面の地震動は、基盤入射波から大きく増幅しておらず、卓越周期 0.8 秒程度、最大速度  $0.9\text{m/s}$  程度である。地震動は、凝灰岩上面以浅の堆積層（とくに粘性土層）の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  $1.3\text{m/s}$  程度に達している。

4. まとめ  
防災科研 KiK-net 益城の鉛直アレイ本震記録と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。解析結果から、地表の強震動には、従来は工学的基盤と仮定される場合の多かった地層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。

### 4. まとめ

防災科研 KiK-net 益城の鉛直アレイ本震記録と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。解析結果から、地表の強震動には、従来は工学的基盤と仮定される場合の多かった地層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) 社本ほか：AIJ 構造系論文報告集, 433, 113-119, 1992. 3) Zhang *et al.*: S&F, 37(2), 51-19, 1997. 4) Shamoto *et al.*: S&F, 37(2), 71-80, 1997. 5) 新井：R3 建研講演会, 38-49, 2022. 6) Jennings: J. Engineering Mechanics, ASCE, 90(2), 131-166, 1964. 7) 龍岡, 福島：生産研究, 30(9), 356-359, 1978. 8) 中川ほか：AIJ 構造系論文集, 666, 1407-1414, 2011. 9) Ishihara *et al.*: 5ICNMG, 373-380, 1985. 10) 吉田ほか：AIJ 大会, 構造 II, 417-418, 2019. 11) 福島, 翠川：AIJ 構造系論文集, 460, 37-46, 1994. 12) Lysmer and Kuhlemeyer: J. Engineering Mechanics, ASCE, 95(4), 859-877, 1969. 13) 酒井ほか：JSCE 論文集, 577/1-41, 53-64, 1997. 14) 酒井：京大博士論文, 1998. 15) 酒井ほか：JSCE 論文集, 612/1-46, 373-378, 1999. 16) 野津：JSCE 地盤工学研究発表会, 2017. 17) 野津：JGS 大会, 1969-1970, 2018.

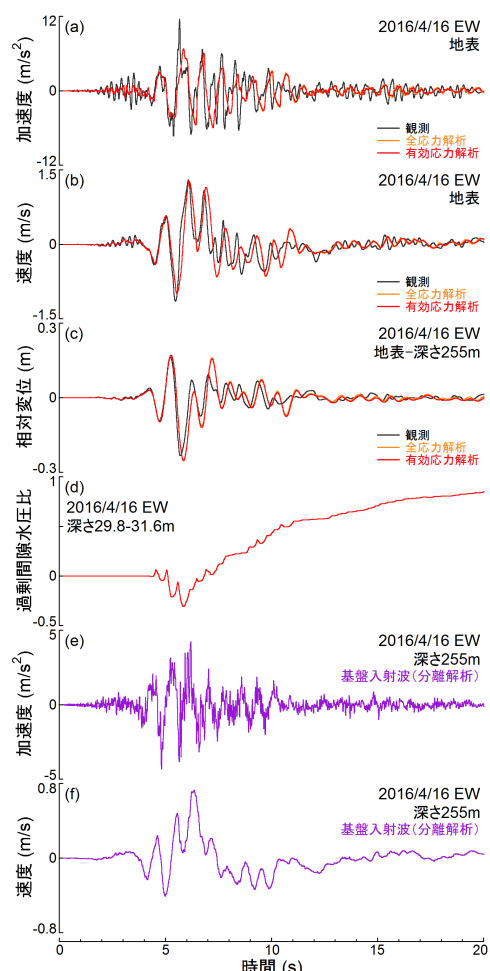


図 4 地震応答解析の結果（時刻歴）

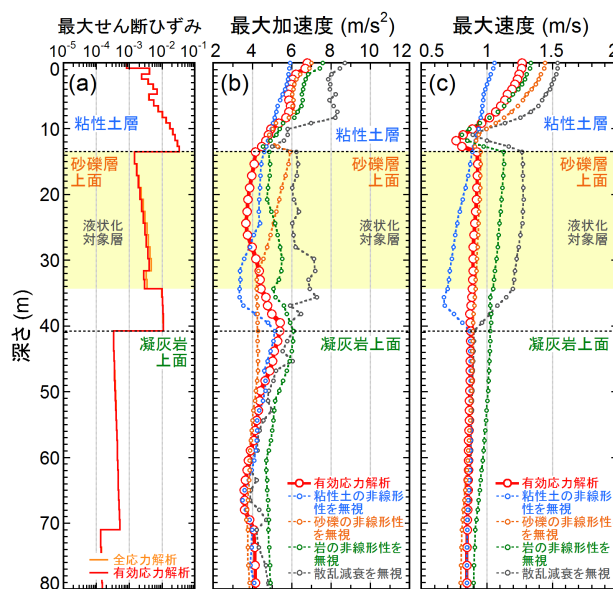


図 5 地震応答解析の結果（最大応答の深さ方向分布）

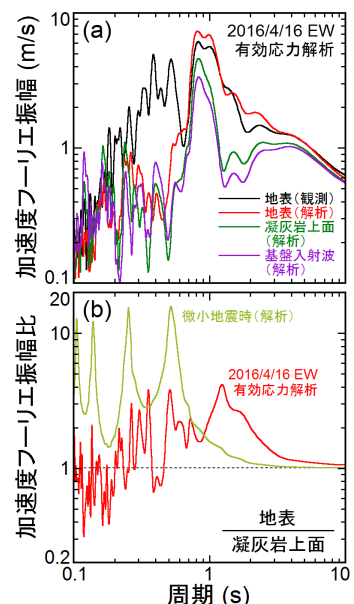


図 6 地震応答解析の結果（加速度フーリエ振幅スペクトル）