

KiK-net 益城の地盤ボーリング調査と微動アレイ探査

正会員 ○新井 洋*1
同 柏 尚稔*2

2016年熊本地震 KiK-net 益城 ボーリング
標準貫入試験 PS 検層 微動アレイ探査

1. はじめに

2016年熊本地震による益城町中心部の甚大な建物被害のメカニズムを解明する上で、近傍の地表・地中鉛直アレイ地震記録が得られている防災科学技術研究所 KiK-net 益城観測点¹⁾の地盤特性を正確に把握する必要がある。そこで、この地点(辻の城公園)のボーリング調査と微動アレイ探査を行い、その結果に基づく地盤モデルの妥当性を弱震記録から検証する。

2. ボーリング調査

調査は2017年1月30日~2月7日に実施した。掘削深さは防災科研の公開情報²⁾を参考に60mとし、深さ1mごとに標準貫入試験とPS検層(深さ14m以深はサスペンション式、それ以浅はダウンホール式)を行った。得られた土柱図とN値の深さ方向分布およびS波速度(V_s)構造を、既往のPS検層結果³⁾と比較して図1に示す。本PS検層による各地層の V_s は既往のPS検層の値に比べて全体的に小さく、深さ41m以浅では両者の V_s 構造に地盤層序を含めて顕著な差異が見られる。

3. 微動アレイ探査

微動のアレイ観測は2017年1月20日の日中に行った。アレイの形状は直線(センサ間隔0.5m)および中心1点を持つ5角形(等半径2, 5, 10, 20, 40m)とした。各アレイともセンサには固有周期1秒の鉛直動速度計6台を用い、アレイごとに微動を同時観測した。観測波形は増幅後、サンプリング周波数100-500HzでA/D変換(24bit)した。記録波形が定常性を保っている区間を選び、1024ポイントのデータを20-60セット程度作成して、以後の解析に用いた。

得られた鉛直動データセットに対してF-kスペクトル解析⁴⁾を行い、周期一位相速度の関係(分散曲線)を求め、既報³⁾の微動H/Vスペクトルと並べて図2に○印で示す。これらがレイリー波および表面波によるものと考え、高次モードの影響を考慮した同時逆解析⁴⁾を行った。この際、深さ69m以浅の地盤構造は図1から6層にモデル化した。また、各層の厚さ・密度・P波速度は本地盤調査の結果から仮定し、 V_s のみを同定した。深さ69-234mの地盤構造は既往のPS検層結果³⁾を用い、それ以深の地盤構造は文献5を参考に仮定した(表1)。なお、水平動のレイリー波/ラブ波振幅比の値は1とした。

逆解析から推定された地盤の V_s 構造を図1に赤線で示す。ここで、図2の実線は、推定地盤構造に対応するレイリー波の理論分散曲線⁶⁾と表面波の理論H/Vスペクトル⁷⁾である。図2から、いずれの理論値も観測値の傾向を概ね説明しており、推定 V_s 構造の妥当性が示唆される。図1から、推定された各層の V_s は、深さ14m以深では両PS検層結果の中間的な値であ

るが、それ以浅では地表から深さ1.7mまでを除いて本PS検層結果に近い値となっている。

表1 KiK-net 益城(辻の城公園)で仮定した地殻構造

深さ(km)	密度(Mg/m^3)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
-3	2.4	4.5	2.4
-17	2.7	5.9	3.5
-33	3.0	6.6	3.8
	3.3	7.6	4.3

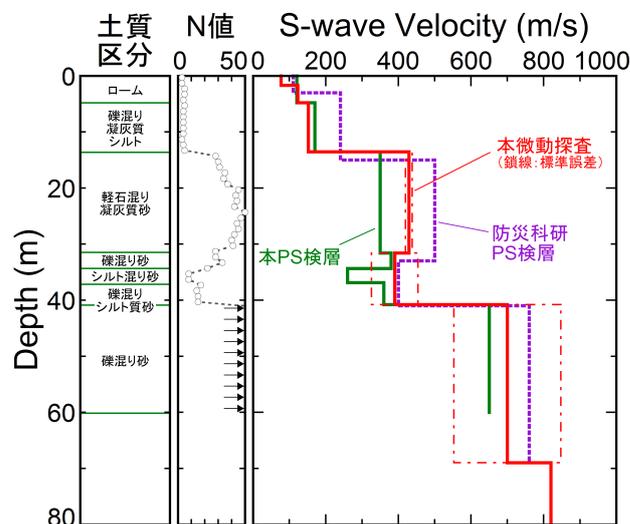


図1 KiK-net 益城(辻の城公園)の地盤ボーリング調査と微動探査の結果

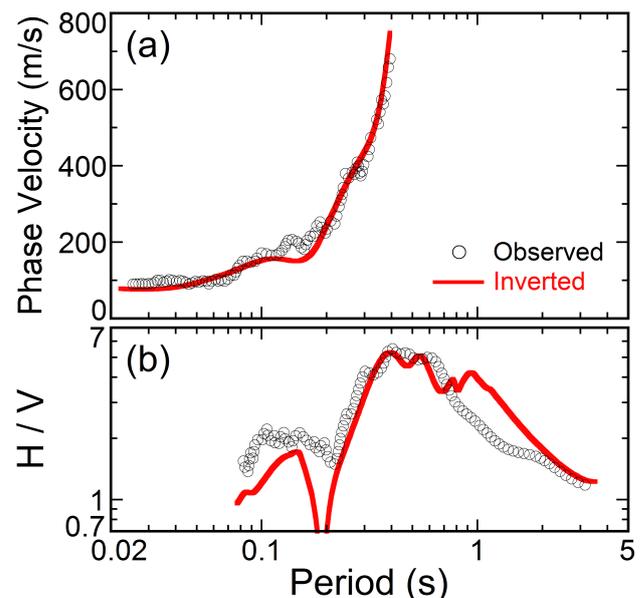


図2 微動の鉛直動の分散曲線とHVスペクトル(実線は逆解析理論値)

表2 対象とした鉛直アレイ弱震記録

	発震日時	深さ (km)	M_J	PGA (cm/s^2)		計測震度
				EW	NS	
熊本地震前	20-May-02 22:19	14	4.2	14.9	10.4	2.2
	2-Sep-02 5:48	12	3.8	23.4	33.5	2.6
	10-Nov-02 19:35	11	3.6	17.7	12.7	2.0
	7-Mar-03 15:31	14	3.7	9.3	16.0	2.0
	20-Apr-07 2:33	13	3.8	10.5	6.4	2.0
	25-Apr-11 2:48	12	4.1	9.7	11.6	2.0
	28-Jun-11 21:18	11	4.2	14.0	12.4	2.3
	5-Oct-11 23:33	10	4.5	28.1	65.7	3.3
	12-Mar-12 7:58	8	3.9	11.9	21.7	2.5
	30-Jul-16 19:58	11	3.2	15.5	14.9	2.3
熊本地震後	9-Aug-16 22:49	5	3.8	57.1	28.6	3.2
	31-Aug-16 19:46	13	5.2	70.5	58.7	3.8
	1-Sep-16 6:33	12	4.8	48.4	34.1	3.7
	7-Sep-16 1:56	13	3.9	16.2	22.7	2.3
	8-Sep-16 15:15	7	3.5	27.3	14.9	2.4
	13-Sep-16 23:20	10	3.4	14.2	9.1	2.2
	11-Oct-16 6:45	12	3.8	11.3	7.3	2.1
	11-Nov-16 10:12	12	4.2	29.8	27.3	3.0
	2-Dec-16 6:19	8	3.6	23.5	25.5	2.8

4. 鉛直アレイ弱震記録を用いた地盤モデルの検証

防災科研で公開されている KiK-net 益城の地震記録⁹⁾のうち、震央距離 30km 以下、気象庁マグニチュード 3-5 程度、計測震度 2-4 程度の弱震 19 記録 (表 2) を対象とした。この際、地震により大ひずみ履歴を受けた地盤の剛性が低下・回復する場合のあること^{例えば 8), 9)}から、熊本地震以後 3 ヶ月間の地震は除外した。対象とした弱震記録の地表/地中 (深さ 252m) 水平動フーリエ振幅スペクトル比の熊本地震前後における平均値を図 3(a)に示す。熊本地震後のスペクトル比は EW, NS 成分とも熊本地震前のそれと大差ないように見える。このことから、本地盤調査で得られた V_s 構造は熊本地震前の状況に近いと想像される。一方、EW, NS 成分のスペクトル比のピーク周期は 0.3 秒以上で大きく異なり、地盤震動特性の異方性が示唆される。

防災科研 PS 検層、本 PS 検層、本微動探査による V_s 構造から地盤モデルを作成し、地中記録を E+F 入力とした重複反射理論による S 波の鉛直方向伝播解析¹⁰⁾を行って、地表記録の再現を試みた。この際、地盤モデルの減衰は V_s に応じて 2-4% の値を仮定した。再現解析で得られた地表/地中スペクトル比を図 3(b)に、地表加速度・速度の最大値を図 4 に、それぞれ観測値と比較して示す。図 3(b)から、解析値の周期特性は EW 成分の観測値のそれと調和的である。また、図 4 から、解析値は観測値と概ね整合している。ただし、これらの解析値と観測値の対応性は、防災科研 PS 検層の地盤モデルによる場合よりも、本 PS 検層・微動探査の地盤モデルによる場合の方が、多少なりとも改善されている。解析による地盤の最大せん断ひずみは 10^{-5} 程度以下であった。以上の結果は、本地盤調査による V_s 構造の妥当性を支持している。

なお、本微動探査による V_s 構造 (図 1 赤線) の深さ 14m 以深 ($V_s > 400\text{m/s}$) および深さ 41m 以深 ($V_s = 700\text{m/s}$) を最下層と仮定して文献 10 の方法で算定した地盤の固有周期は 0.36 秒および 0.47 秒で、後者は図 3 の地表/地中スペクトル比 (EW 成分) の 2 次ピーク周期に対応している。また、図 2 との対比から、H/V スペクトルの周期 0.4-0.5 秒のピークは深さ 41m の V_s コントラストを反映したものと考えられる。

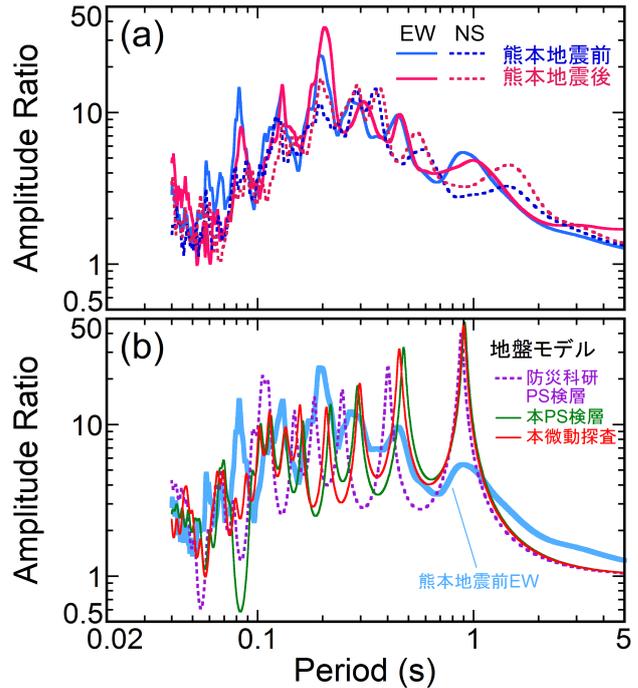


図3 鉛直アレイ弱震記録の水平動の地表/地中スペクトル比 (熊本地震前後における平均値) と地盤モデルによる再現解析値の比較

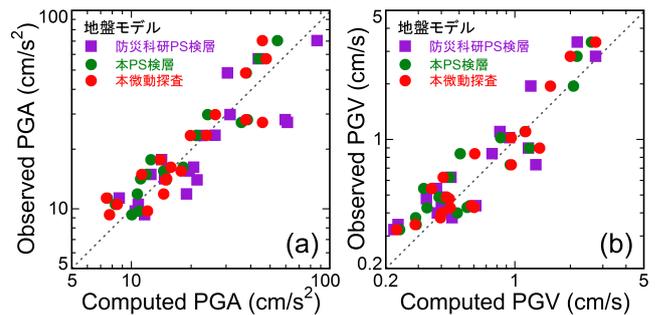


図4 鉛直アレイ弱震記録の地表加速度・速度の最大値と地盤モデルによる再現解析値の比較 (EW 成分)

5. まとめ

KiK-net 益城 (辻の城公園) のボーリング調査と微動アレイ探査を行い、この地点の鉛直アレイ弱震記録をより適切に説明できる地盤モデル (S 波速度構造) が得られた。なお、本地盤調査では粘性土と砂質土の試料採取および室内試験 (圧密・三軸圧縮・動的変形) も行っている。これらの結果と非線形性状を考慮した熊本地震の地盤応答解析は別の機会に報告したい。

謝辞 微動のアレイ観測では、国総研中川貴文主任研究官および建研中川博人主任研究員の協力を得た。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) Capon: Geophysics, **34**(1), 21-38, 1969. 3) 新井, 柏: JAE 大会, P2-39, 2016. 4) Arai & Tokimatsu: BSSA, **95**(5), 1766-1778, 2005. 5) 地震本部: 布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価, 2003. 6) Tokimatsu et al.: J. Geotech. Eng., ASCE, **118**(10), 1529-1543, 1992. 7) 時松, 新井: AIJ 構造系論文集, **511**, 69-75, 1998. 8) Tokimatsu & Hosaka: Soils & Foundations, **26**(1), 53-64, 1986. 9) 新井ほか: 12JEES, 1414-1417, 2006. 10) Schnabel et al.: EERC Report, 72-12, 1972.

*1 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員・博士(工学)

*2 国土技術政策総合研究所 建築研究部 主任研究官・博士(工学)

*1 Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

*2 Senior Researcher, Building Dept., NILIM, Dr. Eng.