

## 7. 平成28年熊本地震における地盤振動特性と建物被害との関係

呉浩、入倉孝次郎、正木和明

### 1. 序

平成28年熊本地震の本震(Mj7.3)により、益城町では多くの全壊建物が県道28号の南側に集中した。これまでに、変動地形学の研究者と、地盤震動や耐震構造の研究者がそれぞれ被害集中の原因を分析したが、意見が分かれた。前者は被害集中した地域に地表断層が現れたことから、地表断層のすべりが被害集中の主たる原因だと主張してきた。これに対し、後者は現地で被害調査を行い、地表断層による建物被害は断層の直上に限られており地盤変形によるもので地震動によるものではないとして、前者による解釈に疑問を呈している。今回の地震動による被害では兵庫県南部地震のような山地と盆地のエッジ効果が被害集中は見られないが、益城町の中心街のような断層近傍域の被害は地震波が垂直方向に伝播することで生じるディレクトリティ効果で生成された大きな速度パルスによるとしている<sup>[1]</sup>。また、地盤で微動観測を行い、H/Vスペクトル比の卓越周期やピーク値は建物被害との間に明瞭な対応関係は見られないとする研究報告もある<sup>[2]</sup>。一方、建築学会が行った建物の悉皆調査<sup>[3]</sup>や古い年代と本震直後の航空写真の比較<sup>[4]</sup>などから、被害集中した地域で旧耐震あるいは古い建物が多数を占めていたことが分かってきた。

昨年度の報告<sup>[5]</sup>(本文中で前報という)で、拡散波動場に基づく微動H/Vから強震観測点の地盤構造の同定手法を確立した。本報告はこの手法を適用し、益城町に被害集中した地点で、微動観測の記録から地盤の地下構造を同定する。そして、同定した地下構造に基づき、地盤による地震動の増幅特性を評価して、卓越周期のみで議論することではなく、周期ごとの地盤の増幅率を用いて、旧耐震の建物被害との関係について考察する。

### 2. 微動観測及び対象地点

2016年熊本地震における大きな被害が出た益城町市街地で、2017年3月と7月、2回分けて、合計60か所で微動観測を行った。本震から約1年経ったため、本震の強震動による地盤特性の非線形等の変動は回復したと考えられる<sup>[6]</sup>。図1に悉皆調査から求めた旧耐震建物の倒壊率の図に微動観測地点の分布を重ね合わせて示した。微動観測点の半数以上は倒壊率がゼロとなる地域に分布している一方、倒壊率が25%から75%以上の地域にも分布している。これらの倒壊率の地域的な変化と地盤の震動特性の関係を議論するため、図2に示されるような三つの測線を沿って微動H/Vの比較を行った。

観測した微動記録を、タイムウインドー(40.96秒)ごとに区切って、交通など近くの振動源により生じた大きなノイズが含まれるタイムウインドウを取り除いて、水平直交両成分(南北と東西)と上下成分の平均パワースペクトルを求め、上下成分の平均パワースペクトルに対する水平成分の平均パワースペクトルの比をとって、その平方根をH/Vと定義する。次に、H/Vに対数平滑化を行う。図3に三つの測線にある微動観測点のH/Vをそれぞれ比較した。West to East 1測線において、各地点のH/Vの形はほぼ一緒で、おおよそ0.5秒に卓越し、最大振幅は4~6である。West to East 2測線において、各地点のH/Vの形もほぼ一緒で、おおよそ0.7秒に卓越し、最大振幅は5~7である。これは両方向に地盤が大きく変わらないことを意味すると考えられる。一方、North to South測線において、地盤の卓越周期は0.4~0.7秒で、最大振幅は5~8で、大きく変わることが分かった。測線南半分の観測点の地盤の卓越周期は北半分よりやや長いことから、地盤は北側よりやや柔らかいことを示唆した。地盤による地震動増幅率と建物被害との関係を議論するには、被害が大きい地点と被害が小さい地点の地

盤構造の比較が必要である。このため、被害状況が異なり、かつ地盤が違うと考えられるNorth to South方向に沿ったMKB203、MSK204とMSK205三地点を議論の対象地点として選定する。対象地点周りの旧耐震建物倒壊率は表1に示す。

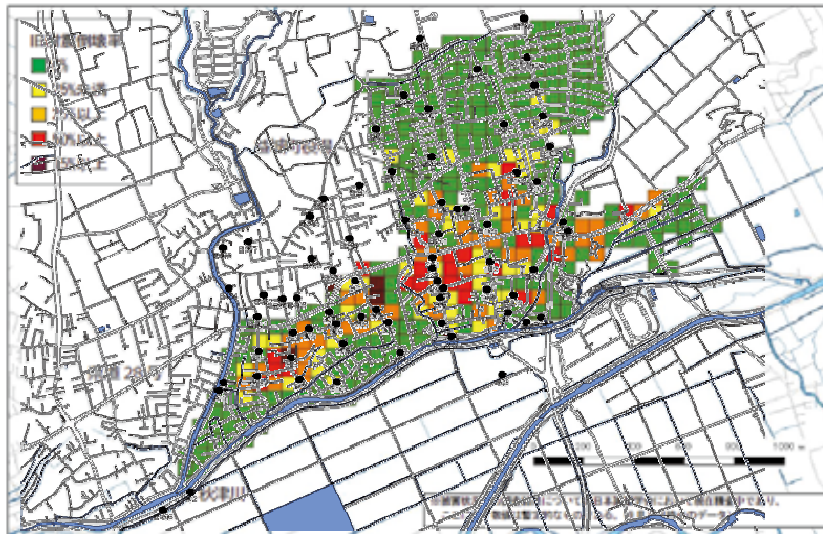


図 5.2-10 1981年5月以前建築（旧耐震）の建築物の倒壊率の分布（国土地理院地図を編集）

図1 微動観測点（黒丸）と旧耐震建物倒壊率（50mメッシュ）の分布図（文献<sup>[3]</sup>に加筆）



図2 微動観測点（黒丸）の分布。3つの測線（West to East 1, North to South, West to East 2）微動観測点を配置する。県道28号の南側と北側の観測点を区別するため、北側の観測点の名称は「B」を数字の前につけた。

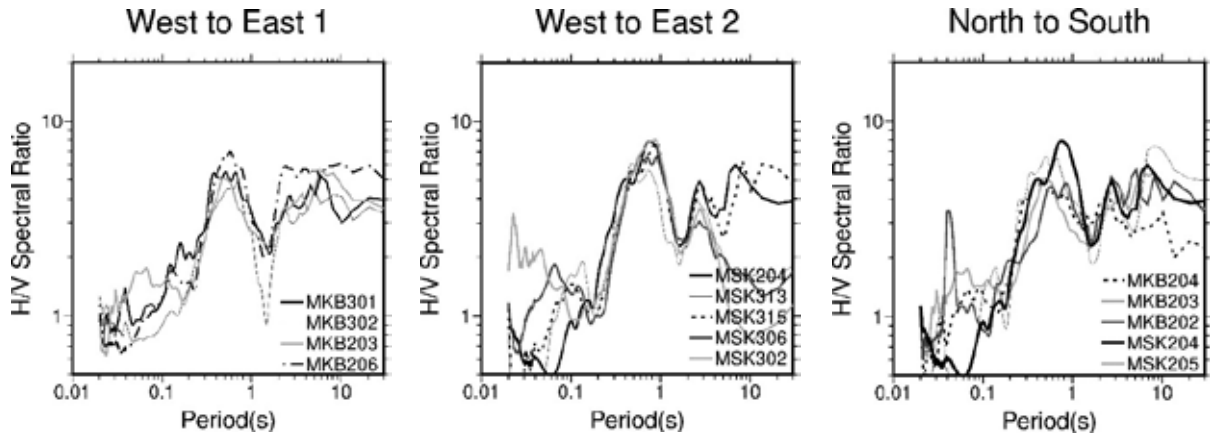


図3 微動観測地点の水平／上下スペクトル比 (H/V)

表1 対象地点周り (50mメッシュ) の旧耐震建物倒壊率

場所	倒壊率
MSB203	0%
MSK204	50%以上
MSK205	25%未満

### 3. 対象地点の地盤構造の同定

益城町に被害が集中した市街地については、すでにいろんな研究者によって、地盤構造が推定されている。しかし、それらの研究は浅層地盤の推定がほとんどである<sup>[7, 8, 9]</sup>。一方、筆者ら<sup>[10]</sup>は深部構造の重要性を指摘した。その後、Yamanaka et al.<sup>[11]</sup>、先名ら<sup>[12]</sup>、林田ら<sup>[13]</sup>も深部構造の地盤の震動特性への影響を議論したり、観測から深部も含む地盤構造を同定したりした。図3に示したように、対象地点ともに微動H/Vは約2.5秒にピークが見られることから、ここでの3地点では深部構造が共通であると考えられる。

前報で同定した益城町強震観測点KMMH16の地盤構造を参照し、浅層地盤で低速度と高速度の逆転層はないと修正し、深部構造をそのまま利用して、対象地点の初期地盤構造モデルとする。深部構造が共通と仮定し、表2に示した第9層から基盤までの構造を固定し、浅部構造を同定することにする。同定するパラメータはS波速度のみである。密度や層厚は固定し、P波速度は同定されたS波速度から初期モデルのポアソン比より算出した。

図4の上段に各種のH/Vを示し、下段に同定したS波速度構造を示した。表層地盤のS波速度はMKB203、MSK205、MSK204の順に遅くなることで、地盤は順次に柔らかくなることを示唆した。MSK204の表層地盤が一番柔らかく、深部構造とのコントラストが大きく、地盤増幅が一番大きいと考えられる。

表2 初期地盤構造モデル

No	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thickness(m)
1	1.40	303.9	139.3	5.0
2	1.50	380.0	240.0	12.0
3	1.60	1000.0	400.0	8.0
4	1.70	1180.0	500.0	18.0
5	1.75	1590.0	760.0	28.0
6	1.80	1860.0	820.0	32.0
7	1.85	2300.0	900.0	11.0
8	1.90	2700.0	976.0	86.0
9	2.10	3350.0	1565.0	517.0
10	2.20	4286.0	2141.0	321.0
11	2.40	5000.0	2300.0	310.0
12	2.50	5500.0	3200.0	254.0
13	2.70	5700.0	3300.0	5000.0
14*	3.50	13200.0	6600.0	-

\*Cap layer

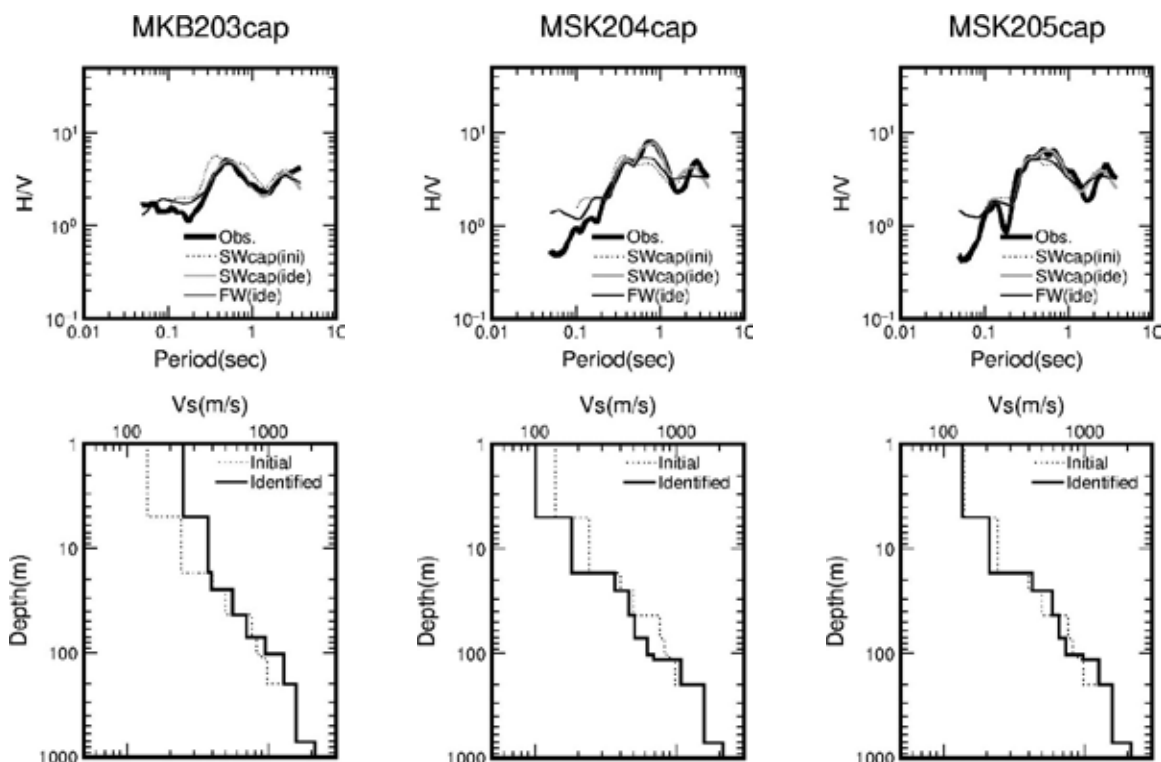


図4 対象地点のH/V及び同定した地盤構造（深部構造は共通とする）。上段に水平／上下スペクトル比（H/V）を、下段に地盤構造（S波速度は深さに沿って変化する）を示した。黒太線は観測（Obs）H/Vを、点線は初期地盤構造を用いて算出した理論表面波（SWcap）H/Vを、灰色線は同定した地盤構造（下段で黒い実線で示すもの）を用いて算出した理論表面波（SWcap）H/Vを、黒細線は同定した地盤構造（キャップ層を除いて）を用いて算出した理論全波動（FW）H/Vを示す。

#### 4. 地盤増幅と建物被害率との関係の考察

図4に示したS波速度を用い、水平動の地盤増幅率を求めて、図5に示す。MKB203の地盤は0.2秒から0.7秒の間で増幅が横ばいで、最大増幅率は約9である。MSK205の地盤は0.3秒と0.7秒にそれぞれピークがあり、最大増幅率は約14である。MSK204の地盤は0.4秒と0.8秒にそれぞれピークがあり、最大増幅率は約16である。今回は線形解析で震動特性を計算したが、強震動時には地盤の非線形の影響により図4に示す卓越周期は長くなると考えられ、建物の倒壊を引き起こす周期帯（1秒程度）と重なり、被害をもたらすと考えられる。そこで、対象地点の中で増幅率が最も大きく、かつ1秒近くにピークがあるMSK204で被害がもっとも大きく、次いでMSK205であり、MKB203で被害が一番低いと考えられる。これは表1に示した旧耐震建物倒壊率の大小とよく対応していることが分かった。

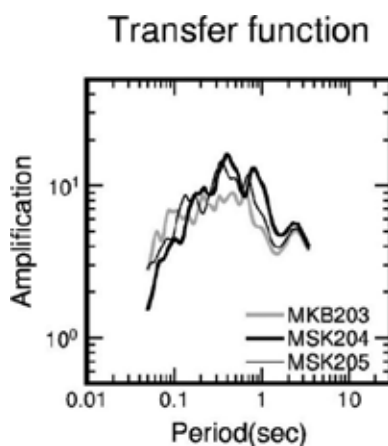


図5 地盤の増幅率。黒く太い線はMSK204の、黒く細い線はMSK205の、灰色線はMKB203の地盤構造を用いて算出した地盤増幅率を示した。

#### 5. 結論

2016年熊本地震における益城町市街地において、微動H/Vに顕著な違いが見られる3地点（MKB203, MSK204, MSK205）を選んで、地盤構造を同定した。3地点の地盤は卓越周期や増幅率がそれぞれ異なった。これらの地点の中で、1秒程度で、地盤増幅率が一番大きい地点で、悉皆調査の旧耐震建物倒壊率が一番高かった。1秒程度で、地盤増幅率が一番小さい地点で、倒壊率が一番低かった。地盤特性の違いは、建物被害率の違いが出た原因の一つであることを示唆した。なお、今後、非線形<sup>[14]</sup>を考慮した地震動の推定や構造別の被害データの収集などを含めて、さらなる検討が必要であろう。

#### 謝辞

国土地理院の基盤数値地図データを利用した。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Kawase H, Matsushima S, Nagashima F, Baoyintu and Nakano K (2017). The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey of the 2016 Kumamoto earthquake. Earth, Planets and Space, 69:3.
- [2] 杉野未奈、山室涼平、小林素直、村瀬詩織、大村早紀、林康裕 (2016)。2016年熊本地震における益城町の建物被

- 害の分析。日本地震工学会論文集、第16巻、第10号
- [3] 高山峯夫 (2016)。建築物の被害一特に益城町の被害一。防災学術連携体2016年熊本地震・3ヶ月報告会
- [4] 山田真澄 (2017)。2016年熊本地震で益城町に現れた震災の島とその生成要因の考察。日本地震工学会論文集、第17巻、第5号
- [5] 呉浩、入倉孝次郎、正木和明、倉橋奨 (2017)。拡散波動場に基づく微動H/Vを用いた地盤構造の同定及び精度の検証。愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書、平成28年度Vol.13
- [6] Hata Y, Yoshimi M, Goto H, Hosoya T, Morikawa H and Kagawa T (2017). Recovery process of shear wave velocities of volcanic soil in central Mashiki Town after the 2016 Kumamoto earthquake revealed by intermittent measurements of microtremor. *Earth, Planets and Space*, 69:72.
- [7] 新井洋、柏尚稔 (2016)。2016年熊本地震における益城町中心部の建物基礎・地盤被害と微動特性、日本地震工学会・大会—2016梗概集
- [8] 長郁夫、中澤努、佐藤善輝、坂田健太郎、卜部厚志 (2017)。常時微動による熊本県益城町の地盤と建物被害に関する検討。第45回地盤震動シンポジウム
- [9] Chimoto K, Yamanaka H, Tsuno S, Miyake H and Yamada N (2016). Estimation of shallow S-wave velocity structure using microtremor array exploration at temporary strong motion observation stations for aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68:206.
- [10] 呉浩、倉橋奨、正木和明、入倉孝次郎 (2016)。熊本地方における強震観測点の地盤特性と地盤構造の同定。日本地球惑星科学2016年連合大会
- [11] Yamanaka H, Chimoto K, Miyake H, Tsuno S and Yamada N (2016). Observation of earthquake ground motion due to aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake in damaged areas. *Earth, Planets and Space*, 68:197.
- [12] 先名重樹、神薫、若井淳、東宏樹、内藤昌平、森川信之、前田宜浩、岩城麻子、山田隆二、河合伸一、松山尚典、藤原広行 (2017)。2016年熊本地震の断層周辺における浅部・深部統合地盤モデルの構築。日本地球惑星科学2017年連合大会
- [13] 林田拓己、山田真澄、Jim Mori、山田雅行、羽田浩二、藤野義範 (2017)。2016年熊本地震の余震観測記録に基づく益城町周辺の深部地盤構造の推定。日本地震学会2017年度秋季大会予稿集
- [14] 山田雅行、山田真澄、羽田浩二、藤野義範、Jim Mori、坂上啓、林田拓己、深津宗祐、西原栄子、大内徹、藤井章男 (2017)。2016年熊本地震における益城町での被害メカニズムの解明～地盤特性の影響～。土木学会論文集A1 (構造・地震工学)、地震工学論文集第36巻