

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～

山田 雅行¹・山田 真澄²・羽田 浩二³・藤野 義範⁴・Jim MORI⁵・坂上
啓⁶・林田 拓己⁷・深津 宗祐⁸・西原 栄子⁹・大内 徹¹⁰・藤井 章男¹¹

¹正会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:yamadams@newjec.co.jp

²非会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:masumi@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

³非会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:hadakj@newjec.co.jp

⁴非会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:fujinoys@newjec.co.jp

⁵非会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:mori@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁶非会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:sakaue.hiromu.72x@st.kyoto-u.ac.jp

⁷非会員 (国研)建築研究所 国際地震工学センター (〒305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地)
E-mail:takumi-h@kenken.go.jp

⁸正会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:fukatsuss@newjec.co.jp

⁹非会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:nishiharako@newjec.co.jp

¹⁰非会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:ouchitr@newjec.co.jp

¹¹非会員 (株)ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail:fujiiko@newjec.co.jp

平成 28 年熊本地震によって被災した益城町の倒壊建物が集中している地域を対象とした悉皆調査から、対象地域の狭い範囲において被害分布の急変が見られた。この建物被害の違いを説明することを目的として、常時微動を用いて地盤特性の調査を行い、その地盤調査結果に基づいて、地表面での揺れの推定を試みた。

治水地形分布図において氾濫平野または旧河道とされる比較的被害の小さい地区は、軟弱な堆積層が 5m 程度以上存在するエリアであることがわかった。また、非線形地震応答解析を適用した結果、本震時の地表面の揺れにおいて低周波数成分が卓越していたことが、このエリアの被害が比較的の小さかったことの要因と考えられる。

Key Words: 2016 Kumamoto earthquake, damage mechanism, Mashiki-town, Local soil conditions

1. はじめに

平成 28 年熊本地震(前震：4 月 14 日、本震：4 月 16 日)は、熊本県益城町に 2 度の震度 7 に上る揺れを生じさせ、甚大な被害をもたらした。多くの建物被害を生じた要因

として、断層変位、揺れ、地盤変状や液状化、建物の強さなど、さまざまな要因が議論され、それらを解明する調査も行なわれている^{例えば 1)}。

著者らは、木造家屋の倒壊が多数発生した益城町の中心部のうち、ほぼ東西を走る県道 28 号線とその南側を

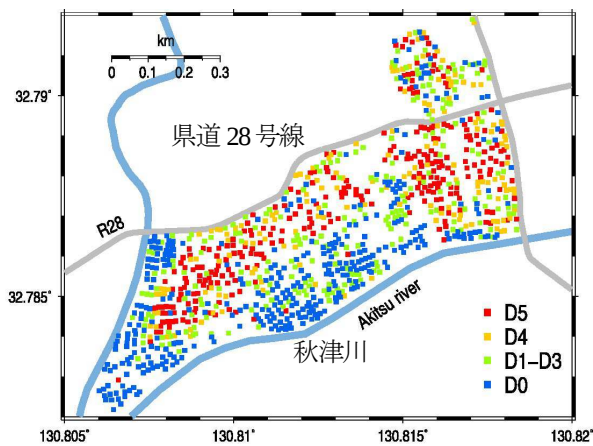


図-1 悉皆調査による建物の被害パターン分布²⁾

平行に流れる秋津川の間、倒壊建物が集中している地域を対象として悉皆調査を行った²⁾。その結果を図-1 に示す。図中の各点が各建物を示し、色分けは岡田・高井(1999)³⁾の被害パターンにしたがっている。通常は、D4とD5が全壊建物に相当する。図-1に示す対象地域の狭い範囲において、北半分と東側に倒壊建物が集中していることがわかる。一方で、南側の秋津川沿いの地域や西側を流れるその支流沿いでは、比較的被害が小さいと言える。このように狭い調査範囲の中でも建物被害の大きい地区と小さい地区の分布が顕著に見られた。

図-2に治水地形分布図(国土地理院)を示す⁴⁾。対象地域は段丘面、氾濫平野、旧河道の3つに分類されており、図-1で被害の大きい地区は段丘面のエリア、比較的被害の小さい地区は氾濫平野または旧河道のエリアに概ね対応している。

このように、対象地域の狭い範囲において被害分布が急変した要因として、地盤の堆積環境の違い、すなわち断層近傍の強い地震動が表層地盤構造の違いによって大きく変化したことが考えられる。そこで著者らは、益城町における調査地域において、建物被害の程度が異なる原因を解明することを目的として、同町中心部の揺れの違いを明らかにすべく、常時微動を用いて地盤特性の調査を行った。また、その地盤調査結果を用いて、地表面での揺れの推定を試みた。

2. 常時微動を用いた地盤特性の調査

常時微動を用いた地盤調査を行った結果について報告する。

(1) 常時微動観測

常時微動観測は、半径 60cm の円に内接する正三角形の頂点と、その中心の合計 4 点に微動計を配置する極小アレイに、正三角形の中心点から 5~10m 程度離れた 1



図-2 治水地形分布図(2007~2014 更新版)⁴⁾

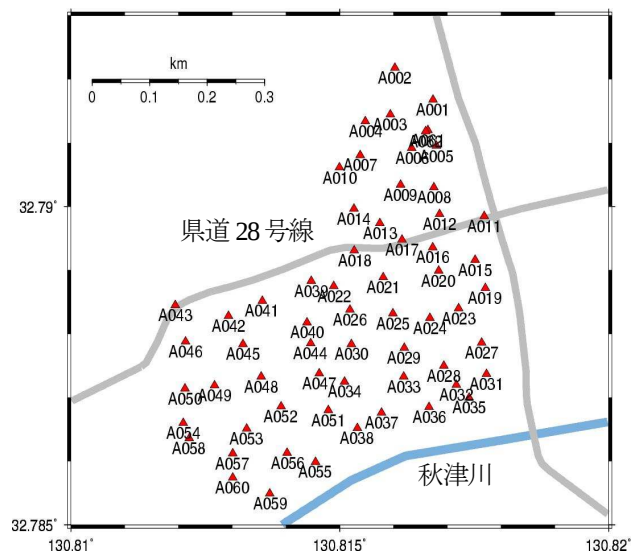


図-3 常時微動観測点配置



図-4 常時微動観測状況

点を加えた 5 点の観測を基本と考えた。長ら⁵⁾によると、このように観測されたデータに、CCA 法(Centerless Circular Array method)を適用することによって、波長が数 10m から 100m 程度までの表面波位相速度を推定すること、すなわち、深さ数 10m 程度までの地盤構造の推定が可能とされている。著者らは、平成 28 年 6 月に、益城町

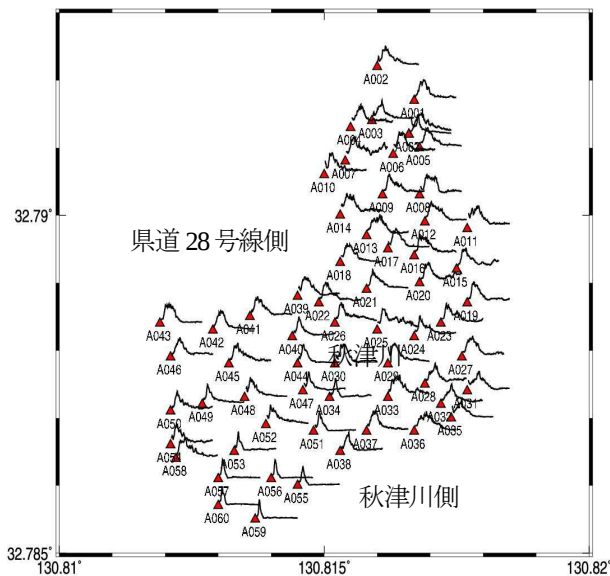


図-5 H/V スペクトルの分布

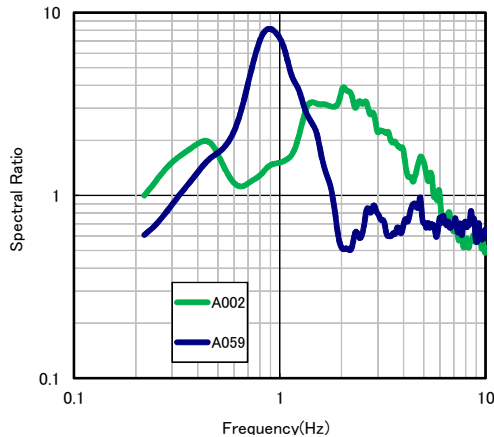


図-6 H/V スペクトルの例

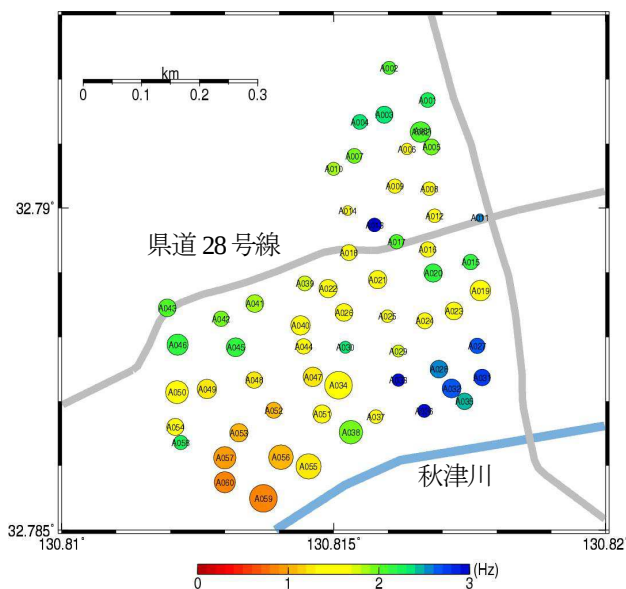


図-7 ピーク周波数とピーク振幅の分布

中心部において、約 60 箇所の常時微動観測を行った⁵⁾同時に余震観測も行った⁷⁾。観測点は、将来的に地域防災計画にも活用できる可能性も考慮して、3 次メッシュ

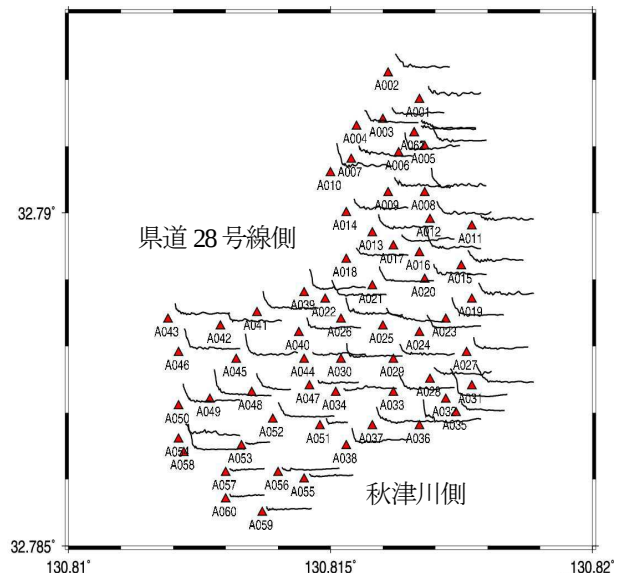


図-8 位相速度分散曲線分布

(1km メッシュ)を縦横 16 等分した約 62.5m メッシュごとに配置した。図-3 に常時微動観測点配置図を示す。図-4 に常時微動観測状況の写真を示す。

(2) 常時微動観測結果

(a) H/V スペクトルのピーク周波数とピーク振幅分布

まず、H/V スペクトルのピーク周波数とピーク振幅を算定した。H/V スペクトルの算出においては、各観測記録について擾乱の少ない 40.96 秒間のデータを 5 区間抽出し、スペクトルを計算した。スペクトルの平滑化については、水平成分、鉛直成分ともにバンド幅 0.2 Hz の Parzen ウィンドウを用いている。さらに、各観測点において、5 点で算定された H/V スペクトルを平均した。また、直交する 2 つの水平成分を相乗平均した。

図-5 に H/V スペクトルの分布を示す。図-1 において比較的被害の小さい地区、すなわち、南西側(図の左下)の地区に着目すると、図-5 の H/V スペクトルは周辺に比べて、ピークの形状が明瞭でかつシャープであることがわかる。図-6 に、最も南に位置する A059 と最も北に位置する A002 の H/V スペクトルの比較を示す。

図-7 に、ピーク周波数とピーク振幅の分布を示す。円内の色がピーク周波数、円の大きさがピーク振幅を示す。同様に南西側(図の左下)の地区に着目すると、1 Hz 付近の低周波が卓越し、かつ、ピーク振幅が大きく幅が狭いことがわかる。

一般に、H/V スペクトルが比較的 low frequency で大きな振幅を示す場合、その地区の被害は大きくなることが予想される。しかし、益城町の当該地区では、真逆の傾向を示していることになる。

(b) アレイ観測による位相速度の算定

上述のような傾向を解明するために、半径 60cm の円

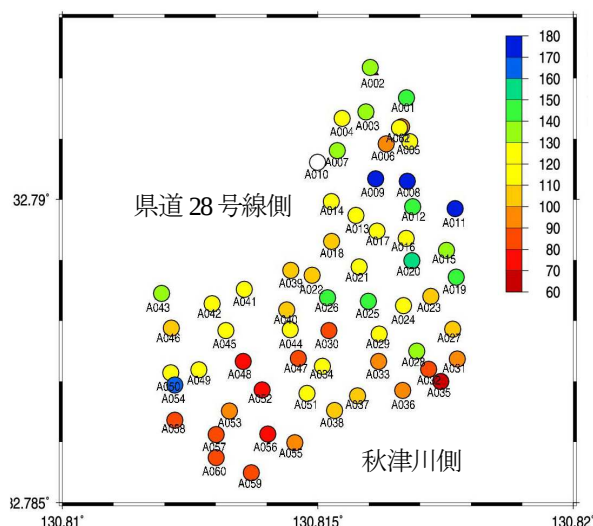


図-9 最低位相速度の分布(単位: m/s)

に内接する正三角形(極小アレイと呼ぶ)に 1 点を加えた 5 点の観測結果から, CCA 法および SPAC 法を用いて, 位相速度の分散曲線を求めた. 図-8 に分散曲線の分布を示す.

算定した位相速度の分散曲線に対して, 10~20Hz の区間の位相速度の中央値を最低位相速度として求めた. 図-9 にその分布を示す. 最低位相速度分布をみると, 対象地域の南部に分布するおおよそ 90m/s 以下の地区は, 図-1 における比較的被害の小さい地区, および, 図-2 における氾濫平野または旧河道のエリアと非常によく一致している.

(b) H/V スペクトルおよび位相速度分散曲線を用いた地盤モデルの推定

周辺の既往ボーリングデータを参考に表-1 のように標準モデルを仮定した. この標準モデルに対して, H/V スペクトルおよび位相速度分散曲線を説明できるように層厚を調整するインバージョンを行った. 図-10 にインバージョン結果の代表例(A026, A056)を示す. 図-11 に位相曲線分散曲線と H/V スペクトルのフィッティング結果を示す. 位相曲線分散曲線と H/V スペクトルともに, 観測値と計算値は概ね良い対応を示している.

図-10 を見ると, 被害が大きく, 治水地形分布図で段丘面に位置する A026 地点は, $V_s=70\text{m/s}$ の第 1 層が薄く, 一方, 被害が比較的小さく, 氾濫平野または旧河道のエリアに位置する A056 地点は, 軟弱な表層と考えられる第 1 層が 10m 以上もあるという結果となった. 図-12 に第 1 層の層厚分布を示す. 第 1 層の層厚が 5m 程度以上の地区は, 図-1 における比較的被害の小さい地区, および, 図-2 における氾濫平野または旧河道のエリアと非常によく一致している.

表-1 標準モデル

	密度(t/m^3)	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$
第1層	1.40	350	70
第2層	1.55	750	140
第3層	1.75	1350	180
第4層	1.95	1500	350
工学的基盤層	2.10	2300	820

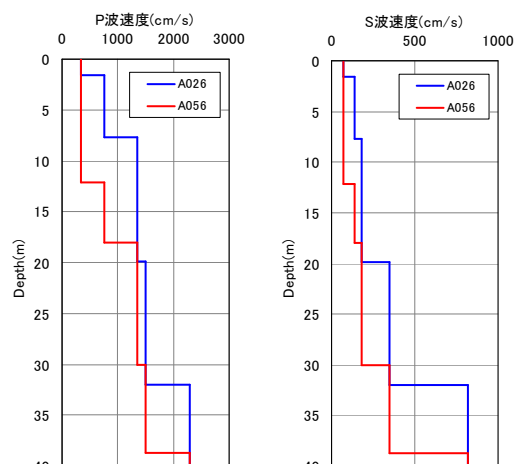
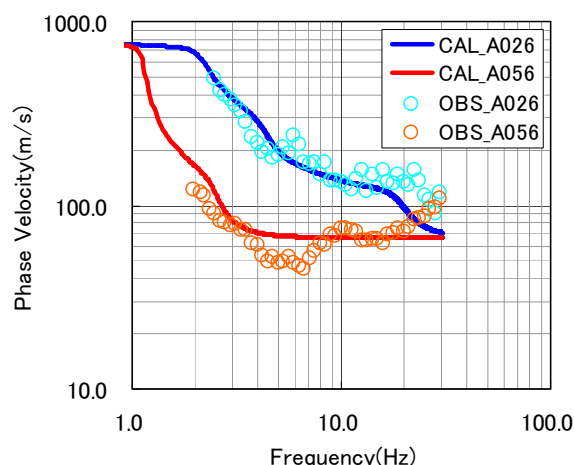
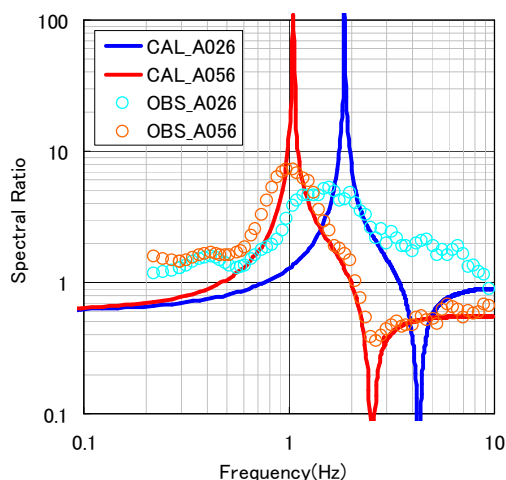


図-10 代表的な地盤モデル



(1)位相速度分散曲線(計算値: 基本モード)



(2)H/V スペクトル(計算値: 基本モード)

図-11 観測値と計算値のフィッティング結果

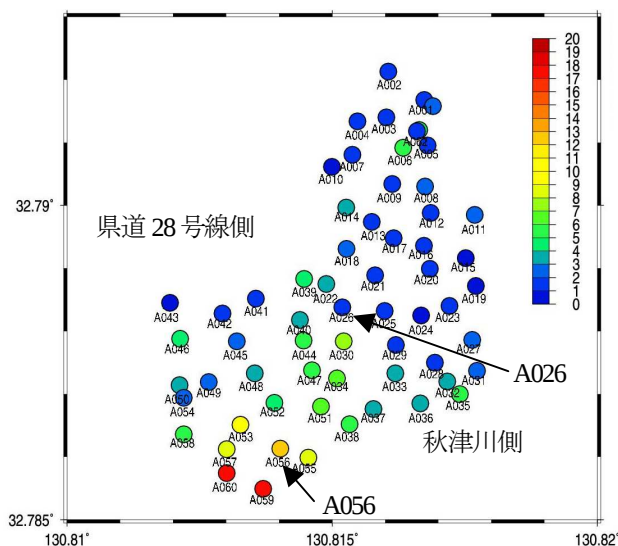


図-12 第1層($V_s=70\text{m/s}$)の層厚分布(単位: m)

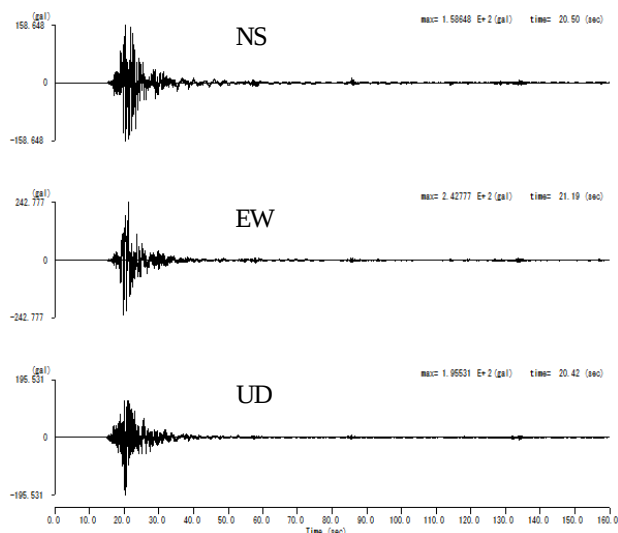


図-13 KiK-net 益城における4月16日の地震の地中観測記録

3. 非線形地震応答解析を用いた地表面地震動の試算

前章において、益城町の対象地域の常時微動観測点において、工学的基盤から地表までの地盤モデルを推定した。本章では、この地盤モデルに対して、非線形地震応答解析を適用し、本震時の地表面の揺れの再現を試みる。非線形応答解析として、YUSAYUSA-2⁹⁾を用いて、全応力解析を実施した。

(1) 工学的基盤における入力地震動

工学的基盤における入力地震動は、KiK-net 益城(KMMH16)における4月16日の地震(本震)の地中観測記録をそのまま用いた。図-13に波形図を示す。

(2) 非線形特性

ここでは、非線形特性として、道路・橋梁の分野で多

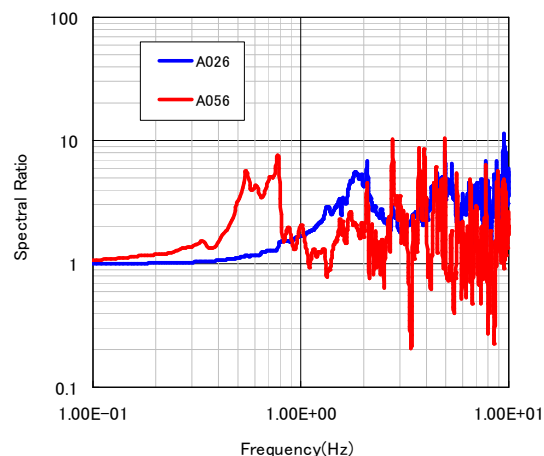


図-14 入力に対する非線形応答解析結果の比

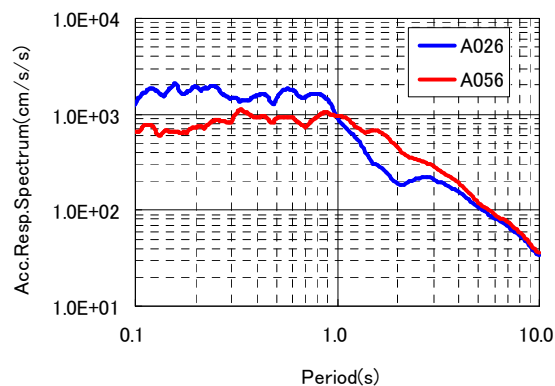


図-15 応答スペクトルの比較

く用いられてきた、せん断剛性一ひずみおよび減衰一ひずみの関係⁹⁾を適用した。表-1の第1層～第3層に対して、文献⁹⁾に記載された沖積粘性土、第4層に対して沖積砂質土(=洪積砂質土)の非線形特性を用いた。

(3) 地表面地震動の試算結果

図-14に、A026、A056地点における非線形地震応答解析結果のフーリエスペクトルを工学的基盤の入力地震動としたKiK-net 益城における本震の地中観測記録のフーリエスペクトルで除したスペクトル比を示した。A026地点は一般的な木造家屋の卓越周波数と考えられている2Hz付近の地盤増幅が大きく、A056地点はそれよりもはるかに低周波数(0.5～0.7Hz)の増幅が大きいことがわかる。図-15に、A026、A056地点における応答スペクトルを示す。1-2Hz(周期0.5～1秒)の帯域は、相対的にA026が大きいことがわかる。

非線形地震応答解析を適用した結果、本震時の地表面の揺れにおいて低周波数成分が卓越していたことが、A056地点を含む地区の被害が比較的の小さかったことの一因と考えられる。入力地震動の違いや非線形特性の与え方によっては、さらに減衰も大きかった可能性が考えられる。

4. おわりに

平成 28 年熊本地震によって被災した益城町の倒壊建物が集中している地域を対象とした悉皆調査から、対象地域の狭い範囲において被害分布の急変が見られた。この建物被害の違いを説明することを目的として、常時微動を用いて地盤特性の調査を行い、その地盤調査結果に基づいて、地表面での揺れの推定を試みた。

治水地形分布図において氾濫平野または旧河道とされる比較的被害の小さい地区は、軟弱な堆積層が 5m 程度以上存在するエリアであることがわかった。また、非線形地震応答解析を適用した結果、本震時の地表面の揺れにおいて低周波数成分が卓越していたことが、このエリアの被害が比較的の小さかったことの一因と考えられる。

今後は、被災地域におけるボーリング調査などのさらに詳細なデータなどとの対比を行い、本稿の結果の検証を進めていく予定である。

謝辞：被災された益城町の方々にお見舞いを申し上げるとともに、被害調査や微動観測をお許しいただいたことに御礼申し上げます。K-NET、KiK-net の強震観測記録については(国研)防災科学技術研究所の HP (<http://www.kik.bosai.go.jp>)より入手しました。

参考文献

- 1) 日本建築学会 災害委員会：2016 年熊本地震 災害調

査報告会，2016。

- 2) 山田真澄，Jim Mori，坂上啓，林田拓己，山田雅行，羽田浩二，藤野義範，深津宗祐，西原栄子，大内徹，藤井章男：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：その 1 建物被害調査，日本地震学会 2016 年度秋季大会，2016。
- 3) 岡田成幸，高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文報告集，No.524，pp.65-72，1999。
- 4) 国土地理院：治水地形分類図，電子国土 Web，[http://maps.gsi.go.jp/\(2016.8.27閲覧\)](http://maps.gsi.go.jp/(2016.8.27閲覧))。
- 5) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y. : Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, J. Geophys. Res., 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235,2006。
- 6) 山田雅行，山田真澄，Jim Mori，坂上啓，林田拓己，羽田浩二，藤野義範，深津宗祐，西原栄子，大内徹，藤井章男：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：その 2 常時微動観測結果，日本地震学会 2016 年度秋季大会，2016。
- 7) 林田拓己，山田真澄，Jim Mori，坂上啓，山田雅行，羽田浩二，藤野義範，深津宗祐，西原栄子，大内徹，藤井章男：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：その 3 余震観測，日本地震学会 2016 年度秋季大会，2016。
- 8) 吉田望，東畑郁生：YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法(改訂版 Version2.10)，2005。
- 9) 建設省土木研究所：地盤地震時応答特性の数値解析法—SHAKE:DESRA—，土研資料第 1778 号，1982。

INVESTIGATION OF BUILDING DAMAGE IN MASHIKI-TOWN FOR THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE –EFFECT OF LOCAL SOIL CONDITIONS–

Masayuki YAMADA, Masumi YAMADA, Jim MORI, Hiromu SAKAUE,
Takumi HAYASHIDA, Koji HADA, Yoshinori FUJINO, Sosuke FUKATSU,
Eiko NISHIHARA, Toru OUCHI and Akio FUJII

We performed a detailed survey of bulidings in central Mashiki town, which was heavily damaged by the 2016 Kumamoto earthquakes. The percentage of severely damaged buildings (damage ratio) varies greatly within this small area. In order to analyze the cause of the heterogeneous distribution, we performed a microtremor survey to study the effect of the local site response on ground motions during the Kumamoto earthquakes. Our results show that the area where buildings were less severely affected has a thick sediment deposit with a low shear wave velocity of 70m/s. From a nonlinear earthquake response analysis, the lower frequency content caused by the shallow layer was dominant during the mainshock, and there were relatively smaller amplitudes at 1-2 Hz. We suggest that this nonlinear response was an important factor contributing to the damage distribution.