2016年熊本地震による益城町の地震被害と 地盤震動特性の相関に関する研究

長尾 毅¹・Tara Nidhi Lohani²・福島康宏³・伊藤佳洋⁴ 北後明彦⁵・尾茂淳平⁶

 「正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) E-mail:nagao@people.kobe-u.ac.jp
 ²非会員 神戸大学 技術専門職員 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) E-mail: tnlohani@tiger.kobe-u.ac.jp
 ³正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11) E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp
 ⁴正会員 株式会社ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20) E-mail: itoys@newjec.co.jp
 ⁵非会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) E-mail: hokugo@kobe-u.ac.jp
 ⁶正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11) E-mail: oshige-ju@ej-hds.co.jp

2016年熊本地震は各地に大きな被害をもたらしたが,特に熊本県益城町においては甚大な住宅が生じた. 現地における特に甚大な住宅被害は県道28号と秋津川の間に挟まれたエリアに局在しており,局所的な地 盤条件によって住宅被害の甚大なスポットが生じたことが示唆された.本研究では,住宅被害の激しかっ たエリアを中心に常時微動観測を実施し,地盤条件と住宅被害の相関について考察した.常時微動観測は 単点観測とアレイ観測を併用するとともに,本震直後と3ヶ月経過後の条件の結果を比較することで地盤 非線形の影響を検討した.さらに常時微動観測時に得られた余震記録から,サイト増幅特性の推定を試み た.

Key Words : The 2016 Kumamoto Earthquake, microtoremor, phase velocity, H/V spectrum, average S-wave velocity

1. はじめに

2016 年熊本地震は布田川・日奈久断層帯を震源断層 とする一連の地震である.地震活動は非常に活発であり, 長期間にわたり余震活動が続いている.2016年8月末の 時点では2016年4月14日の前震(Mj65)と同4月16 日の本震(Mj7.3)がこれまでに生じた特に大きい地震 である.これらの地震により,熊本県益城町では住宅等 に大きな被害が発生するとともに,益城町役場に設置さ れた震度計が前震・本震ともに震度7を記録したことが 繰り返し報道されている.しかしながら,益城町役場の 震度計は役場庁舎内に設置されているため,その記録は 純粋な地盤震動の記録とはいえないとともに,現地の被 災状況を見る限りにおいて益城町全体が震度7の揺れに 2度みまわれたとは考えにくい.

益城町における特に甚大な住宅被害は益城町役場より

南の方角の県道 28 号線と秋津川の間に挟まれたエリア に局在しており,甚大な住宅被害の生じた地点では古い 住宅と比較して耐震性が高いと考えられる比較的新しい 住宅も倒壊する現象が見られた.このことから,局所的 な地盤条件によって住宅被害の程度に差が生じたことが 示唆された.

本研究では、住宅被害の激しかったエリアを中心に常 時微動観測を実施し、地盤条件と住宅被害の相関につい て考察した.常時微動観測は単点観測とアレイ観測を併 用し、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数と位相 速度の観点から地盤震動特性を評価した.常時微動観測 は本震直後と3ヶ月以上経過後に行い、それらの結果を 比較することで本震直後の地盤非線形の影響を検討した. さらに常時微動観測時に得られた余震記録から、サイト 増幅特性の推定を試みた.



図-1 加速度フーリエ振幅スペクトル

2. 益城町における地震動

益城町に設置されていた地震計のうち益城町役場の震 度計は前述のように役場庁舎内に設置されたものである ため、地盤震動としてKiK-net¹の益城強震観測点

(KMMH16)により観測された地表の地震動の特徴を 述べる.2016年4月14日の前震(Mj6.5)の加速度最大値 は760Gal(NS)及び925Gal(EW)であり、2016年4月16 日(Mj7.3)の本震の加速度最大値は653Gal(NS)及び 1157Gal(EW)であった.前震・本震何れも水平成分の うち東西成分の方が加速度振幅は大きかった.それぞれ の地震動のフーリエ振幅スペクトル(EW)を図-1に示 す.水平成分のうち加速度振幅の大きかったEW成分を 示している.前震が2-3Hzの成分が卓越するのに対して、 本震では卓越周波数は1Hz程度であり、かつ0.5Hz以下の 帯域の振幅も本震の方が大きい.単にマグニチュードや 加速度最大値の違いだけではなく、周波数特性としても 前震よりも本震の方が住宅被害をもたらしやすい地震動 であったといえる.

3. 常時微動観測

(1) 観測方法

常時微動観測は、2016年4月、5月、7月に実施した. 観測日は表-1に示すとおりであり、観測点位置は図-2に 示すとおりである.記号ASなどは、最初の文字(A, M, J)が観測月の頭文字、2番目の文字がアレイ観測(A) と単点観測(S)の違いを示す.AA8、JA7はKiK-net益城 (KMMH16)であり、AA2、AS16は震度計の設置され ていた益城町役場である.4月の観測のうち、本震前日 の4月15日の観測地点はAS28、AS34の2地点のみであり、

表-1 常時微動観測一覧

観測日	観測記号	アレイ半径
2016/4/15-4/18	AA, AS	7,14m
2016/5/1-5/5	MS	—
2016/5/20-5/22	MA	7,14m
2016/7/22-7/26	JA, JS	4,8,16,32mを標準

その他の地点は本震発生後の観測点である.また,図中のBED151857などの記号は、(一社)全国地質調査業協会連合会が緊急公開している平成28年(2016年)熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト²により公開されているボーリングに対応している.

アレイ観測については、4月・5月の観測は2点のみの 同時観測であり、7月の観測は中心1点及び円周上3点の 計4点の同時観測である.観測時間は4月・5月の観測は6 分間とし、7月のアレイ観測(JA)はアレイ半径 4,8,16,32mを標準とし、観測時間はそれぞれ6,8,11,11分間 とした.ただし地点によっては現場状況のためアレイ半 径が若干異なっている.さらに、幾つかの地点では32m 以上のアレイ半径を設定し、観測時間は20分間としてい る.7月の単点観測(JS)は11分間である.サンプリン グ周波数は100Hzである.観測に用いた機器はサーボ型 加速度計(白山工業製、JU210³)である.

益城町の調査地域は北側が標高が高く,南側が標高が 低くなっている.このため住宅等の建築にあたり平坦な 敷地を確保するために盛土工事が行われている地点が非 常に多い.今回の常時微動観測では,観測結果に及ぼす 盛土の影響を避けるために基本的に盛土以外の場所を観 測地点としている(AA2などのごく一部を除く).

図-2に示す楕円で囲まれた領域が概ね今回の熊本地震 で最も被害の激しかった領域である. 写真-1~写真-4に 代表的な被害状況を示す. 写真-3の地点は楕円領域内で あるが,局所的に被害が少ない地点であり,写真-4の地 点はほとんどの住宅が壊滅的な被害を受けていた.

(2) 解析方法

常時微動観測結果のうち単点の3成分記録からはHV スペクトルを算出した.常時微動HVスペクトルの算出 においては,長周期の波動成分の影響は低いと判断した ため,各観測地点について擾乱の少ない40.96秒間のデ ータを3区間抽出し,その平均値としている.水平成分 は直交する2成分の2乗平均の平方根とした.スペクトル の平滑化については,上記の理由により水平成分,鉛直 成分ともにバンド幅0.2HzのParzenウィンドウを用いてい る.また,アレイ観測記録からは空間自己相関法⁴を用 いて位相速度を算出した.その際,円中心と円周上の頂 点の組み合わせに加えて,円周上の頂点同士の組み合わ せによっても解析を行った.



図-2 観測地点 (OpenStreetMap⁵⁾ に加筆)



写真-1 被害状況(AA1, JA4地点)



写真-2 被害状況(AS33地点)



写真-3 被害状況(AA7, JA2地点)



写真-4 被害状況 (AS26, AA5, JA9地点)



図-3 常時微動H/Vスペクトル卓越周波数(単位:Hz, AA・AS・MA・MS, OpenStreetMap⁵⁾に加筆)



図-4 常時微動H/Vスペクトル卓越周波数(単位:Hz, JA・JS, OpenStreetMap⁵⁾に加筆)



図-5 ピーク周波数変化の例

4. 常時微動H/Vスペクトルの検討

常時微動H/Vスペクトルよりピーク周波数を読み取り, コンター表示した結果を図-3(4月・5月結果)及び図-4 (7月結果)に示す.全体的な傾向として,県道28号線 よりも北側の,被害の比較的少ないエリアではピーク周 波数が相対的に高く,逆に県道28号線よりも南側の被害 の大きいエリアではピーク周波数が相対的に低い結果と



peak frequency A&M(Hz)

図-6 ピーク周波数の変化

なっている. ただし, 北側のエリアではMA2(図-3), JA6(図-4)ではピーク周波数が周辺と比較して低く, 逆に南側のエリアではAA7, MA10(図-3), JA2, JA3

(図4)ではピーク周波数が周辺と比較して高いなど, 局所的に地盤条件の異なる地点が存在するといえる.こ れらのピーク周波数と住宅被害の相関としては、ピーク 周波数の低い地点周辺では住宅被害の程度が大きく、地 盤条件が住宅被害の程度に影響したことが考えられる.

さらに、4月・5月観測結果と7月観測結果を比較する と、前者では強震動による地盤非線形の影響が強く残っ ており、ピーク周波数が後者よりも低い地点が多いこと が分かる.4月・5月観測地点と7月観測地点のうち、同 じ地点で行われた観測結果について、ピーク周波数の変 化を図-6に示す. 北 (north) として図示したのはJA7・ AA8のKiK-net益城であり、ピーク周波数に変化はない. 県道28号に近い地点をmiddle, 南側の地点をsouthとして 示しているが,前者ではAS28・JA16,後者ではAA7・ JA3の各1点を除いて、4月・5月観測時は7月観測時と比 較してピーク周波数が低い. そしてピーク周波数の変化 している地点は住宅被害の程度が大きく、ピーク周波数 の変化の少ない地点は住宅被害の程度が比較的小さい地 点であることから、地盤剛性の低下の程度が大きい地点 ほど被害が大きかったといえる. 中間地点のうちピーク 周波数の変化の大きい地点は被害の大きかったAAI・ JA4地点とAS6・JA10地点であり、南側地点のうち7月の ピーク周波数が3Hzと高いにもかかわらず4月観測時に はピーク周波数が大きく低下していたのは被害程度が中 程度のAS23・JA2地点である.7月観測時の結果を剛性 回復時の結果とみなして地震発生前の地盤条件とみなす とき, 単純にピーク周波数が高い地点ほど地震被害が少 ないというわけでもないことが分かる.



図-7 観測位相速度 (JA)





period(s)

0.1

1

図-8 観測位相速度 (JA)

10 0.01



observed

10 0.01



JA20



図-10 位相速度の精度(JA)

5. 位相速度の検討

(1) 観測された位相速度

図-7~図-9に7月の常時微動アレイ観測により得られ た位相速度を示す.7mなどの数値はアレイ半径の値で あり、各アレイ半径の観測結果をもとに地点ごとに位相 速度を設定した(observed).ピーク周波数と同様に、 位相速度についても地点毎に異なる値が得られている. 検討対象範囲内では、短周期側ではJA6の200m/s程度が 最高の値であり、秋津川に近いJA8の60m/s程度やJA14の 70m/s程度が最も小さい値である. JA14は周期0.7秒程度 で位相速度がようやく200m/s程度に達するなど、相当な 軟弱地盤であるといえる.ピーク周波数も0.8Hzと7月観 測地点の中で最も低かった.ただし、JA14は周辺に古 い住宅が多く存在していたが、被害の程度としては小規 模であった. 逆に写真-4に壊滅的な被害状況を示した JA9は、最低の位相速度は100m/s程度であるが、位相速 度は全観測点の中で必ずしも際立って低い値というわけ ではない.

次に観測により得られた位相速度の精度の検証を行った. KiK-net益城(JA7)においては、S波速度(Vs)が2700m/sまでの地盤構造が公開されている. 公開されているS波速度構造からHaskell[®]の方法を用いて特性方程式を解くことにより理論位相速度を求め、JA7の観測位相速度との比較を行った.

ボーリングデータ³公開地点については,BED151857 のボーリング地点の直近でJA27の観測を実施している. 当該ボーリングは深度25mまでのもので,N値のみの公 開であり,最下層はN値30~40程度である.N値とVsと の関係についてはImai⁷による研究がよく知られており, 沖積砂質土,洪積砂質土について,それぞれ式(1),式 (2)の関係が得られている.

$$V_{\rm s} = 80.6N^{0.331} \tag{1}$$

$$V_s = 97.2N^{0.323} \tag{2}$$

この関係を用いて N 値から S 波速度を評価した.理 論位相速度の算出にあたり,S 波速度以外に各層の密度 と V_p の情報が必要となるため,既往のデータを整理し た文献 8)を参考にして V_s との平均的な関係をそれぞれ 式(3),式(4)のように仮定し⁹,これに基づいて算定した.

$$\rho = 1.7 + 0.32 \times 10^{-3} V_S \tag{3}$$

$$V_P = 100\sqrt{V_S} \tag{4}$$

ここに、 ρ :密度(t/m³)、 V_S :S 波速度(m/s)、 V_P :P 波速 度(m/s)である. 位相速度の比較を図-10に示す. JA7については,低周 期側で観測位相速度は理論位相速度を若干下回っている. また周期0.3秒以上の帯域で観測位相速度は理論位相速 度を下回っている.このため周期0.3秒(波長150m程 度)以下の帯域では概ね精度は確保されているものと考 えられる.次にJA27については,0.3秒以上の帯域でボ ーリングデータによる理論位相速度は観測位相速度を下 回るが,これはボーリングデータによる最深部のS波速 度が260m/sであるためであり,それよりも短周期側では 両者は概ね整合しているため,観測結果は一定水準で精 度を有するものと考えられる.

(2) 地盤の平均S波速度

得られた位相速度をもとにS波速度構造を推定することも可能であるが、以下では地盤の平均S波速度について評価を行った.既往の研究¹⁰により、地盤の平均S波速度は特定の波長の位相速度とよく対応することが指摘されている.また、AVS30等の地盤の平均S波速度は地 震動増幅率などとよく対応することが指摘されている¹¹⁾. 本研究では**表-2**に示す関係¹⁰を用いて、各地点の地盤の 平均S波速度を評価した.なおJA7(KiK-net益城)はPS 検層結果が公開されているが、他地点と精度を揃える観 点から上記の方法で平均S波速度を評価した.

図-11~図-12に平均S波速度のうちAVS10, AVS30のコ ンター図を示す.県道28号線よりも北の観測点について は平均S波速度は南側地点よりも概ね高く,全体的な傾 向としては被害程度と平均S波速度の相関性が認められ る.ただし,北側地点のうち周辺と比較してピーク周波 数が若干低かったJA6,JA21は平均S波速度は周辺よりも 高いなど,地点毎に詳細な傾向は異なっている.さらに, 南側の観測点では,秋津川周辺の観測点(JA8,JA14, JA18,JA22)の平均S波速度が非常に低い結果となって おり,被害の最も激しかったJA9の値を下回っている. このように,平均S波速度についても,ピーク周波数と 同様に,その値の大小が被害程度と対応する地点が多い ものの,全ての地点で被害程度の差を説明することはで きない.

表-2 平均S波速度と位相速度の関係¹⁰⁾

平均S波速度	位相速度(数値は波長)				
AVS10	C15				
AVS15	C20				
AVS20	C30				
AVS25	C35				
AVS30	C40				



図-11 AVS10 (単位:m/s, OpenStreetMap⁵⁾ に加筆)



図-12 AVS30 (単位:m/s, OpenStreetMap⁵⁾ に加筆)



図-13 ピーク周波数と平均S波速度の関係

図-13にピーク周波数と平均S波速度の関係を示す.ピ ーク周波数の値と平均S波速度には比較的強い相関が認 められる. ただし、図中にAVS10の値に対してマークを 付けた地点は他の観測点と比較して傾向が異なる. これ ら地点の被害の程度はJA9が大規模被害, JA6が中規模 被害、JA14とJA21は小規模被害とそれぞれ異なっている. 傾向の異なり方は、他地点と比較してピーク周波数に対 するAVSの値が大きいということであり、これはピーク 周波数の出現に寄与している基盤の深さが他地点と比較 して深いためだと考えられる. JA6, JA21はAVS10の値 がそれぞれ199m/s, 166m/sと比較的大きいことから、比 較的剛性の高い地盤の層厚が厚いことが想定され、これ が基盤深さが深いものの大規模被害に至らなかった原因 と考えられる. 一方JA9はAVS10の値は115m/sで検討対 象地点の中では中程度の値である. しかしながらピーク 周波数は1.3Hzと低く、比較的剛性の低い地盤が厚く堆 積していることが考えられる. そのように基盤深さが深 いために3次元的な地震動伝播の影響で地震動の増幅が 大きく、これが大規模破壊が生じた原因である可能性が ある. このほか、JA14はAVS10とAVS30の値が何れも 100m/s以下と非常な軟弱層が非常に厚く堆積している地 盤条件であり、この地点が小規模被害にとどまった原因 は今後更に検討を行う必要があるが、例えば強震時に非 常に大きく剛性低下が生じた結果として長周期化が進み, このため地表の揺れが少なかった可能性などが考えられ る.

常時微動HVスペクトルのピーク周波数や平均S波速 度は常時微動観測点の直下の地盤構造を強く反映してい るものと考えられるが,これら指標と被害程度の相関が 高くない地点については,地震動の多次元的な伝播の影 響などの観点から,今後更に検討を行う必要があると考 えられる.

6. 余震記録をもとにしたサイト増幅特性の評価

(1) 基準強震観測点のサイト増幅特性

熊本地震では余震活動が活発であったため、常時微動 観測時に余震記録が取得された地点があった.それら余 震記録は常時微動H/Vスペクトル等の解析時には使用し ていないが、常時微動観測点と強震観測点における余震 の同時記録と強震観測点におけるサイト増幅特性¹⁹を用 いて、式(5)によって常時微動観測地点のサイト増幅特 性の評価を行うことが可能である¹³.

$$G_t(f) = \frac{O_t(f)}{O_r(f)} \frac{P_t(f)}{P_t(f)} G_r(f)$$
(5)

ここに, *G*: サイト増幅特性, *P*: 伝播経路特性, *O*: 観測地震動, *f*: 周波数であり, 添字の*r*, *t*はそれぞれ基 準地点, 対象地点である.

その場合, KiK-net益城またはK-NET熊本との同時記録 とすることが現実的であるが, KiK-net益城はスペクトル インバージョンに用いた地震記録数が2と少なく, この ため精度に問題があることが考えられる. さらにK-NET 熊本は2015年3月に移設されており, 文献12)で示されて いるサイト増幅特性は移設前の地点の増幅特性である.

このため、2016年4月25日以降に発生したM4.0以上の 記録から、両地点のサイト増幅特性を評価した.表-3に 検討に用いた地震を示す.まずKMM008とKMM011との 同時記録およびそれらのサイト増幅特性を用いて KMM006のサイト増幅特性を評価した.NS、EWそれぞ れの地震記録のフーリエ振幅スペクトルをバンド幅 0.05HzのParzenウィンドウを用いて平滑化して比を取り、 伝播経路の影響については、加藤¹⁴⁾により鹿児島県お よび熊本県を対象に求められているQ値(Q=104×f⁰⁶³) によって補正を行った.次に、KMMH16については、 新たに評価されたKMM006との比によってサイト増幅特 性を評価し、文献12)に示されたサイト増幅特性とそれ ぞれ重み50%で平均化して最終的なサイト増幅特性とし た.

表-3 サイト増幅特性評価に用いた地震(全て2016年)

Date	Lat.	Lon.	М	006	008	011	H16
4/25 00:44	32.7	130.7	4.4	0	0	0	0
4/28 15:30	32.8	130.5	4.7	0	0	0	0
5/4 19:20	32.813	130.822	4.0	0	-	0	-
5/5 10:31	33.000	131.133	4.6	0		1	0
5/5 10:40	32.992	131.122	4.9	0		1	0
5/12 17:04	32.697	130.665	4.1	0	0	0	0
5/13 01:03	32.705	130.667	4.1	0	0	0	0
5/14 18:45	32.738	130.600	4.0	0	0	1	0
6/18 20:46	32.7	130.7	4.5	0	-	0	0
7/9 18:05	32.7	130.6	4.4	0	\bigcirc	0	0

注:右4列の006等は地震観測点コードKMM006等を示す



図-14 基準強震観測点のサイト増幅特性

図-14に基準強震観測点のサイト増幅特性評価結果を示す. 図中のref:KMM008などの表記はKMM008との比により評価された結果であり,赤実線が最終的に得られたサイト増幅特性である.また,参考のために各地点の7月観測時の常時微動H/Vスペクトルを示している.

KMM006については、KMM008との比とKMM011との 比とでばらつきが少なく、かつ得られたサイト増幅特性 の2-3Hzのピークは常時微動H/Vスペクトルのピークとも 対応しており、合理的な結果が得られていると考えられ る.

KMMH16については、常時微動H/Vスペクトルの3Hz のピークとサイト増幅特性の3.4Hz程度のピークには若 干のずれが認められるが、既往の研究^{DD}に見られたピー クやディップが抑えられた結果となっており、概ね妥当 な結果であると考えられる.

(2) 常時微動観測点のサイト増幅特性

余震記録が取得できた常時微動観測地点(4月観測の6

地点)のサイト増幅特性は,KMM006とKMMH16との同時記録および図-14に示したこれらのサイト増幅特性を用いて評価した.検討に用いた地震を表-4に示す.各微動観測地点とも基準強震観測点であるKMM006やKMMH16との同時記録が得られているのは1地震であることから,NS,EWそれぞれの地震記録のスペクトル比を取る際には,KMM006やKMMH16のサイト増幅特性を評価する際よりもバンド幅の広い0.20HzのParzenウィンドウを用いている.

図-15に余震記録が取得できた常時微動観測地点のサ イト増幅特性評価結果を示す. 図中のref:KMM006の表 記はKMM006との比により評価された結果, ref:KMMH16の表記はKMMH16との比により評価された 結果であり、赤実線が両者を平均することにより得られ たサイト増幅特性である. 図中には、基準強震観測点 KMM006やKMMH16のサイト増幅特性を示しているが、 いずれの地点でも1Hz前後の周波数領域において基準強 震観測点より大きな増幅倍率となっている. 特に1-2Hz の帯域ではかなり大きな倍率評価となる地点が多く、特 にAS23、AS24では最大倍率が100倍程度と極めて大きな 増幅倍率が算出されている.

これらのうち、AS23地点(=JA2地点)でのサイト増幅 特性のピーク周波数は約1.5Hzで、4月観測時の常時微動 のH/Vスペクトル比のピーク周波数と調和的であるが、 7月観測時のの常時微動のH/Vスペクトル比のピーク周 波数3Hzと比べると明らかに低周波数となっている.また、AS24はほぼJA1と同地点であり、前者は1.6Hz、後者 は2.5Hzのピーク周波数であり、やはりサイト増幅特性 のピーク周波数は4月観測時の常時微動H/Vスペクトル のピーク周波数と調和的であるが、7月観測時の常時微 動H/Vスペクトルのピーク周波数より低い.

これらの地点の構造物の被害は限定的なもので, AS23は古い住宅も多い地点であるが被害は中程度にと どまっていた. AS24は戸建て住宅は多くない地点であ るが,建築されてからかなりの年数が経過していると見 られる工場を含めて被害はほとんど見られない地点であ る. 従ってこれらの地点のサイト増幅特性は被害程度と 調和的ではなく,ここで得られたサイト増幅特性はあく

表4 余震記録が取得できた常時微動観測地点のサイト増幅 特性評価に用いた地震(全て2016年)

Date	Lat.	Lon.	М	余震観測点
4/15 17:39	32.841	130.885	3.6	AS34, AS35
4/16 12:59	32.738	130.757	3.7	AS23
4/16 13:09	32.652	130.736	3.7	AS06, AS24
4/16 15:15	32.821	130.821	3.6	AS31

注: いずれもKMM006, KMMH16で記録が得られている.



図-15 余震記録が取得できた常時微動観測地点のサイト増幅特性

までも前震や本震の影響により地盤が非線形化し剛性が 大きく低下した状態での,地震発生前の時点よりも倍率 の大きな増幅特性であり,設計・防災等のための強震動 評価や前震・本震による各地点の地震動評価などに対し て,そのまま用いることはできない可能性が高いものと 考えられる.なお,AS34,AS35は4月15日すなわち本震 前の余震記録によるものであり,それら以外の地点は本 震後の余震記録による増幅特性である.

また,7月常時微動観測時にも余震記録が取得されて いることから,今後はそれらについてもサイト増幅特性 の評価を行う予定である.

7. まとめ

本研究では、2016年熊本地震により甚大な住宅被害の 生じた熊本県益城町を対象に常時微動観測を実施し、地 盤震動特性と地震被害の関係を検討した.本研究により 得られた主要な結論は以下の通りである.

①熊本地震の前震・本震発生後から5月初旬までの時点では7月下旬の時点と比較して強震動の作用による地盤 非線形の影響のために剛性が低下した地点が存在しており,被害の大きい地点ほど.剛性低下の程度は大きい傾向があった.

②常時微動HVスペクトルのピーク周波数と位相速度よ り評価した平均S波速度は、被害の大きい地点程低い傾向があった.ただし、幾つかの地点では傾向が異なっていた.

③熊本地震の前震・本震直後の余震記録からサイト増幅

特性を推定した結果,非常に高い増幅倍率が得られた. これは地盤非線形による剛性低下の影響が考えられ,余 震記録からサイト増幅特性を精度良く評価するためには 剛性低下の影響を除去する必要があるものと考えられる.

今後は、常時微動観測結果をもとに、詳細な地盤構造 を評価するとともに、壊滅的な被害が生じた原因につい て多次元の地震応答解析により分析を行う予定である.

謝辞:K-NETおよびKiK-netの強震観測記録については独 立行政法人防災科学技術研究所のホームページ (http://:www.kik.bosai.go.jp)より入手しました.常時微動観 測の実施にあたり、神戸大学工学研究科博士課程後期課 程建築学専攻・清水隆平氏に協力いただきました.ここ に感謝します.

参考文献

- 1) Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada: New strong-motion observation network: KiK-net, Eos Trans. Am. Geophys. Union, 81, 329.
- (一社) 全国地質調査業協会連合会:平成 28 年(2016 年)熊本地震 復興支援 ボーリング柱状図 緊急公開サイト, http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/index.html, 平成 28 年 8月 31 日閲覧.
- 3)先名重樹,安達繁樹,安藤浩,荒木恒彦,飯澤清典, 藤原広行:微動探査観測システムの開発,物理探査学 会学術講演会講演論文集,Vol.115, pp.227-229, 2006.

4)Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo, Vol.35, pp.415–456, 1957.

5) https://openstreetmap.jp, 平成 28 年 8月 31 日閲覧.

- 6)Haskell, N. A. : The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin of Seismological Society of America, 43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 7)Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. IXth ICSMFE, 1977.
- 8)岡田広,松島健,森谷武男,笹谷努:広域・深層地盤調査の ための長周期微動探査法,物理探査,No.43,Vol.6, pp.402-417, 1990.
- 9)長尾 毅,山田雅行,野津 厚:常時微動 HV スペクトルを 構成する波動成分に関する一解釈,土木学会論文集 A1 (構 造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.48-62, 2012.
- 10)長尾 毅, 紺野克昭:常時微動アレー観測に基づく表層地 盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究,土木学会論文集, No.696, I-58, pp.225-235, 2002.
- 11) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく 地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論 文集, Vol6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 12) 野津 厚,長尾 毅:スペクトルインバージョンに基づく 全国の港湾等におけるサイト増幅特性,港湾空港技術研究所 資料, No.1112, 2005.
- 13) 土木学会: 2016 年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編, 2016.
- 14)加藤研一: K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部 地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価,日本建築学会 構造系論文集,第543号, pp.61-68, 2001.

A STUDY ON THE CORRELATION BETWEEN GROUND VIBRATION CHARACTERISTIC AND DAMAGE LEVEL OF STRUCTURES AT MASHIKI TOWN BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takashi NAGAO, Tara Nidhi LOHANI , Yasuhiro FUKUSHIMA, Yoshihiro ITO, Akihiko HOKUGO and Junpei OSHIGE

The 2016 Kumamoto Earthquake caused severe damage on structures such as houses at Mashiki Town in Kumamoto Prefecture. Authors conducted microtremor observation at various sites in Mashiki Town in order to discuss the relationship between ground condition and damage level of structures. H/V spectra and phase velocities were evaluated from the microtremor records and average S-wave velocities were also evaluated from the phase velocities. It was found that both peak frequencies and average S-wave velocities are low at most of the sites where structures were severely damaged. Site amplification factors at some sites were evaluated from the aftershock records obtained during microtremor observation.