

2016年熊本地震における益城町の建物被害分布に及ぼす地盤震動特性の影響に関する研究

西村 綾乃

1. はじめに

2016年4月14日21時26分頃、熊本県熊本地方の深さ11kmを震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震（以降、前震）、さらに4月16日1時25分頃には、同じく熊本県熊本地方の深さ12kmを震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震（以降、本震）が発生した。これらの地震により、益城町は2度の震度7の地震動に見舞われ、甚大な建物被害が生じた。

このような被害を受け、境・他¹⁾は、益城町の地震観測点である KiK-net 益城ならびに益城町宮園震度計（以降、宮園震度計）の周辺において建物の悉皆調査を実施し、建物の被害分布を求めた。この結果から、両観測点の周辺では、被害の様子に違いがあり、またそれぞれの観測点の周辺においても被害の分布に偏りがあることが明らかにされている。この原因としては、建築年代、階数、用途、構造種別、地盤震動特性、宅地開発プロセスの違いなど様々なものが考えられる。

そこで本研究では、建物被害の状況に加え、それらの建物の詳細な諸元の明らかにされている日本建築学会による悉皆調査の結果²⁾から、KiK-net 益城と宮園震度計周辺のデータを抽出・整理する。さらに、被害の状況の違いや分布の偏りの原因として考えられるもののうち、地盤震動特性に着目し、当該観測点の周辺で高密度単点微動観測を行い、その結果から得られる微動の水平動と上下動のスペクトル比（微動 H/V スペクトル）や別途行われた極小微動アレイ観測の結果を用いて、建物被害分布に及ぼす地盤震動特性の影響について検討する。

2. 益城町における強震動

益城町には、防災科学技術研究所が管理・運営する KiK-net 益城観測点と熊本県の宮園震度計の2つの常設の地震観測点がある。宮園震度計は益城町役場の建物内に設置されている。両者の距離はおおよそ700mである。前震では、KiK-net 益城では震度6強、宮園震度計では震度7を観測した。秦らは、この地震によって被災した益城町の中心部において臨時に地震計を設置し、本震の観測に成功した³⁾。宮園震度計、KiK-net 益城、および秦らによる TMP01 の位置関係を図1に示

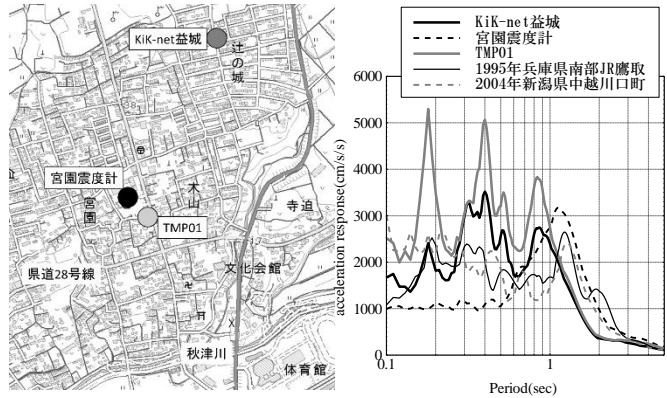


図1 強震観測点

図2 加速度応答スペクトル

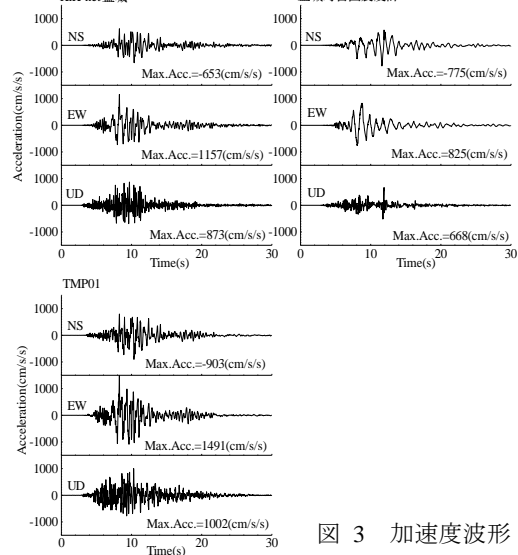


図3 加速度波形

す。また、これらの観測点において観測された本震の加速度応答スペクトル（減衰5%）を図2、加速度波形を図3に示す。なお図2には、過去に内陸地殻内地震で震度7相当の揺れを観測した地点の加速度応答スペクトルも併せて示す。

KiK-net 益城と TMP01 において水平動の最大加速度は NS 成分よりも EW 成分の方が大きく、1100cm/s/s を超える。また、宮園震度計の加速度応答は建物の大きな被害を引き起こす 1-2 秒応答⁴⁾が非常に大きく、周期 1 秒付近ピークの応答値は、過去に大きな被害が生じた 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取の 1.2 倍、2004 年新潟県中越地震の川口町の 1.3 倍と大きく上回っている。また KiK-net 益城と TMP01 は、応答値は異なるが 0.2 秒、0.4 秒、0.8 秒付近にピークがある。このように KiK-net 益城、TMP01 の応答は 1 秒以下の周期帯

にもピークを持っているのに対し、宮園震度計の応答は周期 1 秒付近のピーク以外に目立ったピークが見られない。これは宮園震度計が建物内部に設置してあったこと、建物の基礎に被害があったことなど⁵⁾から、地盤と建物の動的相互作用が原因であると考えられる。

3. 被害の状況

前震後の建物被害は主に益城町の県道 28 号線と秋津川に挟まれた地域に集中していたが、本震後に宮園震度計の北側の地域にまで広がった。日本建築学会九州支部熊本地震災害調査委員会で行われた、益城町の役場を含む中心市街地を対象に建物被害の悉皆調査²⁾の結果を基に作成した、KiK-net 益城と宮園震度計から半径 200m 範囲内における建物被害度分布図を図 4 に示す。被害度は岡田・高井⁶⁾に従い、D0～D6 の 7 段階で評価している。KiK-net 益城周辺における大破・全壊率は 4.2%であり、西側と南側の建物が比較的大きな被害を受けている。また、宮園震度計周辺における大破・全壊率は 30.8%であり、南西に全壊被害(D4～D6)が多くみられる。

KiK-net 益城周辺と宮園震度計周辺は木造建物が多く、大きな被害がみられた。そこで木造建物の被害度と築年数の関係を図 5 に示す。KiK-net 益城周辺は、D4 は築 15～36 年のものがあり、新耐震以降(築 35 年以内)の建物にも大きな被害が出ているが、2000 年の耐震基準改正後の建物で大きな被害を受けたのは、築 15 年の 1 棟のみであった。また、築年数の長い建物でも無被害や軽微な被害のものが多かった。一方、宮園震度計周辺では、築年数が古いものほど被害度が大きい場合が多く、KiK-net 益城周辺よりは被害度と築年数にある程度の相関がみられた。しかし新耐震以降の建物でも被害度が D4 以上のものが 17 棟ある。新耐震以降の建物であり、築 15～35 年で被害度が D4 の建物は、宮園震度計よりも南西の、被害が集中していた地点に多く見られ、11 棟であった。

4. 高密度単点微動観測

4.1 観測の概要

本研究における高密度単点微動観測の観測地点は KiK-net 益城、宮園震度計を中心とした半径 200m の円内を 40m メッシュで分割して設定した。2016 年 10 月 17～20 日、23～25 日の 7 日間で、KiK-net 益城周辺で 62 箇所、宮園震度計周辺で 58 箇所、計 120 箇所において観測を行った。KiK-net 益城周辺は測線 A～H、宮園震度計周辺は測線 I～Q と設定した。計測は主に昼

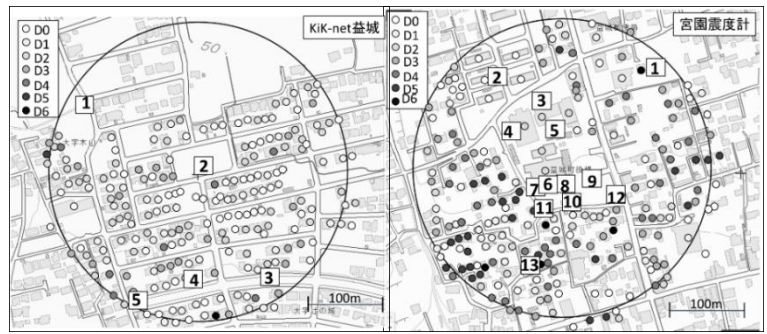


図 4 建物被害度分布と微動アレイ探査位置(左: KiK-net

益城、右: 宮園震度計) 円は半径 200m を示す

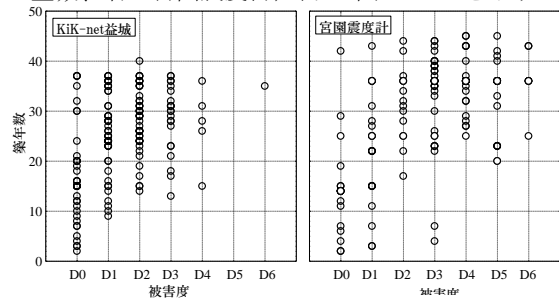


図 5 被害度と築年数

間に実施し、微動計は JEP-6A3-10 (ミットヨ社製、感度: 10V/g)、収録器は GPL-6A3P (ミットヨ社製) である。益城町役場の敷地内の 8 つの点では、微動計で観測された記録を AD 変換しノートパソコンに転送するトランスミッター RS-AD24 (アルニック社製) を用いた。観測時間は 1 地点 15 分間とした。

4.2 解析の概要

観測した記録は、20.48 秒を 1 サンプルとし、10.24 秒ずつずらしながら、86 サンプルに分割した。全サンプルからフーリエスペクトルを求め、バンド幅 0.2Hz の Parzen-Window で平滑化した。次に、平滑化した各成分のフーリエスペクトルから、次式で微動 H/V スペクトルを算出した。

$$H/V = \sqrt{(NS)^2 + (EW)^2} / UD$$

ここで、NS、EW、UD はそれぞれ南北方向、東西方向及び上下方向のフーリエスペクトルである。算出した全微動 H/V スペクトルの平均との差が一番大きい微動 H/V スペクトルを除外する。次に除外した微動 H/V スペクトル以外の全微動 H/V スペクトルの平均との差が一番大きいものを除外する。これを 20 サンプルになるまで繰り返し、残った 20 サンプルの平均を各地点の微動 H/V スペクトルとした。なお、20 サンプルの微動 H/V スペクトルから読み取ったピーク周期の平均を地盤の卓越周期とした。

4.3 解析の結果

KiK-net 益城、宮園震度計周辺の微動 H/V スペクトルから得た卓越周期の分布と測線名を併せて図 6、図 7 に示す。KiK-net 益城周辺の 62 観測点のうち 55 箇所

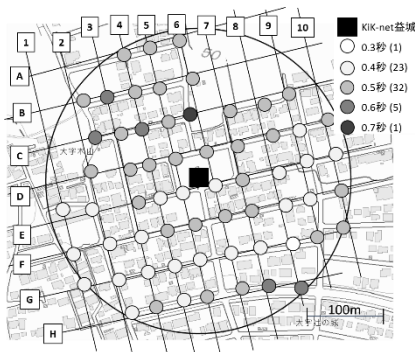


図6 KiK-net 益城周辺卓越周期分布図

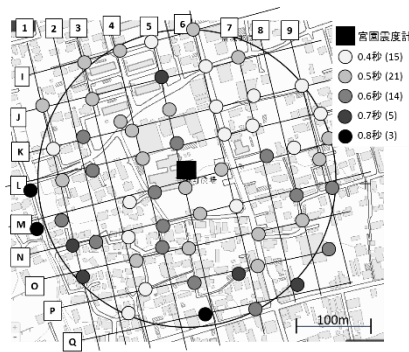


図7 宮園震度計周辺卓越周期分布図

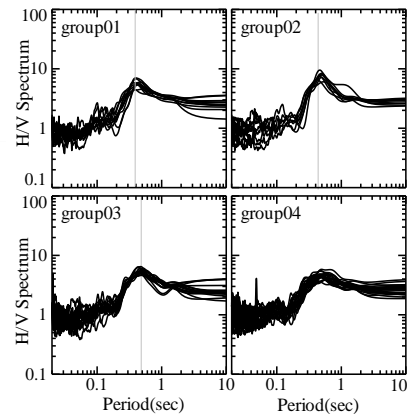


図8 H/V スペクトル形状によるグループ分け

の卓越周期が 0.4~0.5 秒であり、北側では 0.5 秒、南側では 0.4 秒のものが多い。卓越周期分布に大きな差は見られないが、図 8 のように微動 H/V スペクトルの形状には違いがみられ、以下の 4 つのグループに分けられる。

group01:卓越周期が 0.4 秒付近でピークが明瞭

group02:卓越周期が 0.5 秒付近でピークが明瞭であり、
振幅が 8 前後

group03:卓越周期が 0.5 秒付近でピークが明瞭であり、
振幅が 5 前後

group04:ピークが不明瞭

非木造の建物の被害が見られた地点の微動 H/V スペクトルは、group01 に分類されるものが多い。しかし KiK-net 益城の南側以外の地点ではあまり被害分布との関連性は見られなかった。

宮園震度計の周辺において、卓越周期は 0.4~0.8 秒の間でばらつきがみられた。北東の地点の建物被害はまばらであり、この周辺の卓越周期は 0.4~0.5 秒のものが多い。南西は北東に比べると建物被害が多く集中している。全壊木造被害が特に多い南西の地点では卓越周期が 0.6~0.8 秒のものが多い。北東に位置する観測点 (J07、K07、K08、) と南西に位置する観測点 (O01、N01、N02) の微動 H/V スペクトルの一例を図 9 に示す。南西の地点の微動 H/V スペクトルは北東の地点のものに比べて卓越周期が長い。さらに、北東に位置する地点の微動 H/V スペクトルのピークは明瞭であるが、南西に位置する地点はピークが不明瞭なものが多い。

5. 地盤増幅特性

5.1 解析概要

高口・他 (私信) による、KiK-net 益城と宮園震度計周辺における極小微動アレイ観測結果を用い、これらの地点の地盤増幅特性を検討する。観測地点を図 4 に示す。各観測地点における地盤増幅特性を 1 次元解析 (SHAKE) ⁷⁾ によって算出した。本解析に必要な地盤物性値は各層の層厚、S 波速度、密度、減衰定数 (Q 値)

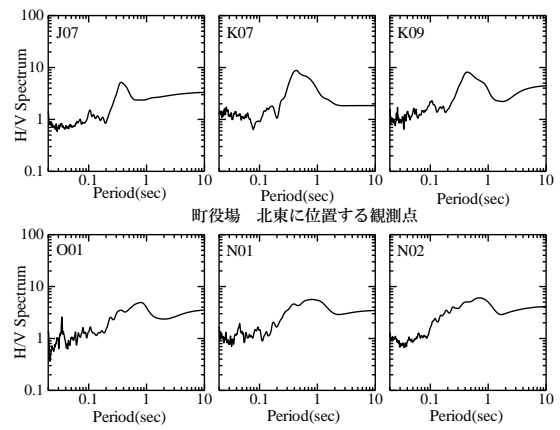


図9 宮園震度計周辺 H/V スペクトルの比較

である。各観測点における工学的基盤 ($V_s=500\text{m/s}$ とする) 以浅の S 波速度構造については、高口・他 (私信) による微動アレイ観測結果を用い、工学的基盤以深の層に関しては、KiK-net 益城の地下構造を参考に推定した。密度については太田・他 ⁸⁾ による S 波速度との関係式を用いて算出し、Q 値は、S 波速度 (単位 m/s) の 1/10 として周波数依存性は考慮していない。

5.2 解析結果

KiK-net 益城周辺観測点 (KiK1、2、3、4、5) の地盤増幅特性を図 10 に示す。KiK-net 益城とその北側に位置する KiK1、2 の地盤増幅率は 0.7 秒付近にピークがあるが、微動 H/V スペクトルの卓越周期は 0.5 秒程度である。D5 以上の被害もあった KiK3、4、5 の地盤増幅特性は 0.6 秒付近にピークがあり KiK3、4 に関しては微動 H/V スペクトルの卓越周期と概ね一致している。

図 11 に建物の中小被害と関係がある 0.5~1 秒周期帯 ⁴⁾ における増幅率の平均と被害度との関係を示す。なお被害度は増幅率を求めた観測地点に一番近い建物とした。被害度 D2 の MSK4、MSK10 の増幅率が大きく、D0 の MSK2 の増幅率との差は 1.5 程度であった。

次に建物の大破・倒壊など大きな被害と関係がある 1~2 秒周期帯 ⁴⁾ での地盤増幅率に着目し、図 12 に被害度と 1~2 秒周期帯における増幅率の平均の関係を

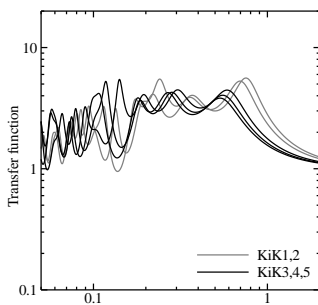


図 10 KiK-net 益城周辺
地盤増幅特性の比較

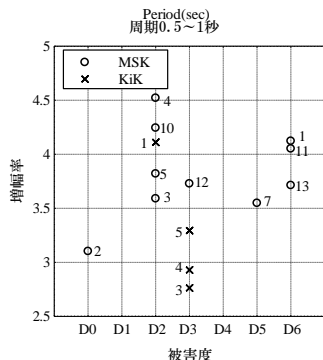


図 11 0.5～1 秒周期帯
における地盤増幅率

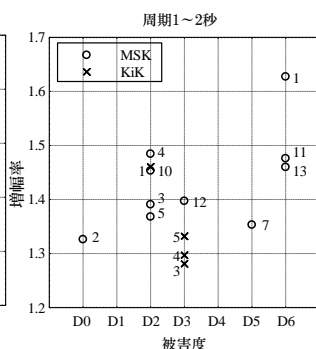


図 12 1～2 秒周期帯
における地盤増幅率

示す。KiK-net 益城周辺の地盤増幅率は宮園震度計周辺のものより全体的に小さく、建物被害分布と調和している。また、被害度の大きい MSK1 と、D4 以上の被害が集中していた宮園震度計より南西の MSK11、13 では他の地点と比べると地盤増幅率の値が比較的大きい。しかし、宮園震度計周辺で最も小さな値であった MSK2 の地盤増幅率との差は 0.3 であった。

6. まとめ

日本建築学会が行った益城町市街地における悉皆調査の結果から、KiK-net 益城、宮園震度計周辺のデータを抽出・整理し、その結果と高密度単点微動観測と極小微動アレイ観測結果との比較から、建物被害分布に及ぼす地盤震動特性の影響について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- KiK-net 益城周辺の大破・全壊率は 4.2%であり、大きな被害は観測点の西側と南側に見られた。
- 宮園震度計周辺の大破・全壊率は 30.8%であり、役場の南西側に全壊建物が多く見られた。
- 築年数と建物被害度との関係を分析した結果、宮園震度計周辺においてはある程度の相関が見られた。
- KiK-net 益城周辺の卓越周期は 0.4～0.5 秒の地点が多く、ばらつきは小さいため、地盤構造に大きな差はないと考えられるが、H/V スペクトルの形状には差がみられ、4 グループに大別できた。非木造の建物被害が多かった観測点の H/V スペクトルは group01 に分類されるものが多い。
- 宮園震度計周辺では、卓越周期分布にばらつきが

あり、地盤構造が一様でないことが示唆される。建物被害の集中していた南西に位置する地点の卓越周期は他の地点に比べてやや長く、0.6～0.8 秒の地点が多い。

- KiK-net 益城周辺の卓越周期はほぼ均一であるのに対し、宮園震度計周辺はばらつきがあることから、この 2 点の周辺は地盤の性状が異なる。
- 地盤増幅特性を算出した結果、建物の中小被害と関係のある 0.5～1 秒周期帯において増幅率の差は 1.5 程度、建物の大きな被害と関係のある 1～2 秒周期帯において増幅率の差は 0.3 程度であった。
- 現段階では地盤震動特性と建物被害度との強い相関は確認できていないが、地盤の非線形化も考慮し、より詳細な検討が必要である。

謝辞

防災科学技術研究所、気象庁、熊本県、新潟県、JR 総合技術研究所の波形データを使用させていただいた。

参考文献

- 1) 境有紀、汐満将史、神野達夫：建物被害の観点から見た地震動の性質、第 44 回地盤震動シンポジウム、pp.47-54、2016
- 2) 菊池健児、田中圭：益城町の悉皆調査、2016 年熊本地震災害調査報告会資料、2016 年度日本建築学会大会（九州）災害部門緊急報告会、pp.83-93、2016
- 3) Hata, Y., H. Goto and M. Yoshimi: Preliminary Analysis of Strong Ground Motions in the Heavily Damaged Zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the Main Shock of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.0) Observed by a Dense Seismic Array, Seismological Research Letters, Vol. 87, No. 5, pp. 1044-1049, 2016.
- 4) 境有紀、神野達夫、瀬野一：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案、日本建築学会構造系論文集、第 585 号、pp.71-76、2004
- 5) 護雅史：地震記録に基づく益城町役場の地盤—建物応答、第 44 回地盤震動シンポジウム、pp. 101-107、2016
- 6) 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集、No. 524、pp. 65-72、1999.
- 7) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 8) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸：耐震・振動・制御、共立出版、p. 339、2001