2016 年熊本地震の本震の際に震源近傍で 観測された地震動に関する 2,3 の考察

野津 厚¹·長坂 陽介²

 ¹正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail:nozu@pari.go.jp
 ²正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail:nagasaka-y@pari.go.jp

2016年4月16日に発生した熊本地震の本震(M7.3)においては、震源近傍の益城町宮園と西原村小森の自治体震度計において震度7を観測したほか、益城町の建物被害集中域において本震の地震動が観測されている.本稿では、これらの記録について、観測地震動のスペクトル特性、地震波の到来のタイミングなどの観点から分析を行い、益城町の周期1秒の大振幅地震動の成因、西原村小森の観測記録に見られる周期数秒での加速度応答と断層変位との関係などについて考察を行う.

Key Words: The 2016 Kumamoto Earthquake, spectral acceleration, rupture process, near-field term, intermediate-field term

1. はじめに

2016年4月16日に発生した熊本地震の本震(M7.3) においては、震源近傍の益城町宮園と西原村小森の自治 体震度計¹⁾において震度7を観測した.また、防災科学 技術研究所の観測網²⁾によっても広域で多数の強震記録 が得られている.さらに、益城町の建物被害集中域にお いて、4月14日の前震(M6.5)の後に開始された臨時 地震観測により、本震の地震動が観測されている³⁾.

この地震では、新しい耐震基準で建てられた建物の中 にも大きな被害を受けたものがあり^{例えば 9}、また、土木 構造物にも顕著な被害を受けたものがある^{例えば 9}、震源 近傍で得られた強震記録の特性について分析し理解を深 めることは重要であると考えられる.

本稿では、これらの記録について、観測地震動のスペ クトル特性、地震波の到来のタイミングなどの観点から 分析を行い、益城町の周期1秒の大振幅地震動の成因、 震源近傍に特有の近地項や中間項の影響などについて考 察を行う.

2. 震源近傍における観測地震動の主な特性

すでに多くの研究者によって観測地震動の特性の分析



図-1 本震の震源過程⁶と対象とした観測地点の位置関係

が行われているが、ここでは以下の考察との関係で必要 な事項をまとめる. 図-1 は本研究で対象とする観測地 点と本震の震源過程⁶との関係を示したものである. 図 のコンターは経験的グリーン関数を用いた波形インバー ジョンにより推定された本震の断層面上における最大す べり速度の分布である. この図は本震の断層面を南東側 からみた図である. 本研究で対象とする観測点のうち、 KiK-net 益城、益城町宮園(益城町役場の震度計), MI,



図-2 KiK-net 益城, M1, M2, S3の各地点で観測された本震の 地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)

M2, S3 地点は破壊開始点(図の★)と主要なアスペリ ティとの間に位置している.一方,西原村小森(西原村 役場の震度計) はほぼ主要なアスペリティの真上に位 置している.図-1には、参考のため、特徴的な被害が 発生した場所についても示している.

図-2 は KiK-net 益城, M1, M2, S3 地点で観測された 本震の地震動の加速度応答スペクトルを示したものであ る.成分としてはより振幅の大きい EW 成分を示してい る.また参考のため、1995 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された地震動の NS 成分の観測波形の加速 度応答スペクトルと、道路橋示方書⁷タイプ 2 地震動

(II種地盤)の加速度応答スペクトル(補正係数なし) を同時に示している.益城で観測された4つの地震波の 中で最も小さい KiK-net 益城の加速度応答スペクトルで も,周期 1s付近で鷹取の記録を上回っている.MI地点 の地震動は KiK-net 益城と周期特性が似ており全体に大 きくなっている.M2地点の地震動は周期 1sでさらに大 きくなっている.そして,S3地点の地震動は周期 1sで さらに大きくなっている.

ここで, KiK-net 益城→S3 と南下するほど周期 ls の成 分が大きくなっている. S3 地点で地震動が大きいのは 建築学会による悉皆調査の結果[®]とも整合する.悉皆調 査の結果で最も全壊率が高かったのは県道 28 号線の南 側であり, S3 地点はまさにそこに当たっている.

図-3 は図-2 に対して益城町宮園での加速度応答スペクトルを重ね書きしたものである.この図から,益城町 宮園(益城町役場)での記録は他の記録と比較して短周 期成分が少ないことがわかる.これは,益城町宮園の記 録だけが建物内の記録であることから,入力損失の影響



 図-3 図-2に益城町宮園での加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を重ね書きしたもの



図-4 図-2 に西原村小森での加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を重ね書きしたもの

であると考えれば理解しやすい.一方,周期 ls 付近の 成分に着目すると、益城町宮園の記録だけ他の記録より も長周期化していることもわかる.この点については、 理由は明確ではないが、基礎の損傷の影響などの理由 ではないかと考えられる.

図-4 は図-2 に対して西原村小森での加速度応答スペクトルを重ね書きしたものである.西原村小森の記録は周期 0.5-0.8s 付近の他,周期 2s 以上で鷹取の記録を上回っている.従って,この記録は固有周期の長い構造物の



図-5 益城町宮園での加速度波形を補正せず台形公式で積分した結果と直線のフィッティング



図-6 図-5の速度波形から赤色の直線を差し引くことで求めた補正後の速度波形を台形公式で積分した結果

耐震設計を考える上で極めて重要な記録であると言える.

このように、益城町で観測された地震動と西原村で 観測された地震動は一部の周期帯で兵庫県南部地震の 観測地震動および既往の設計地震動を上回っており、 特に重要であると考えられるため、以下においては、 これらの記録について、波の到来のタイミング、成因、 近地項や中間項の影響などについて分析を行う.

3. 益城町で観測された地震動について

本章では、益城町で観測された地震動のうち、特に 建物被害の原因となったと考えられる周期 ls の成分に 着目して、その到来のタイミング、成因、近地項や中 間項の影響などについて考察を行う.

(1) 周期 1s の成分の到来のタイミング

まず、波の到来のタイミングについて検討するため の準備として、益城町宮園で観測された加速度波形を 積分し変位波形を求める. 図-5 の黒線は益城町宮園で の加速度波形を補正せず台形公式で積分した結果であ る.この結果を見ると、主要動到達のタイミングで波 形が折れ曲がっていることがわかる.これは、主要動 到来のタイミングで地震計が傾斜し、重力加速度に sin θ (θは傾斜角)を乗じた値が水平成分に載ったため であると考えられる. そこで,図5に赤線で示すよう に, 速度波形の主要動前後の部分に対してそれぞれ直 線のフィッティングを行い、この直線を速度波形から 差し引くことで速度波形の補正を行った.次に、補正 後の速度波形を台形公式で積分することで変位波形を 求めた. その結果を図-6 に示す. NS 成分には北向きの, EW 成分には東向きの, UD 成分には下向きの残留変位 が生じていることがわかる.この結果は、この地震の 断層運動の向きと整合的である.

図-7 に益城町宮園における EW 成分の加速度,速度, 変位波形の比較を示す.ここで,変位波形のうち赤で 着色した部分は,残留変位に向かって変位が増加しは じめる前の部分である(変位の値が最後に 0 となるよ り前の部分を着色した).また速度波形および加速度 波形においても対応する部分を赤で着色している.こ の結果を見ると,残留変位に向かって変位が増加しは じめる時刻には,加速度波形における周期 ls の主要動 はすでに到来し終えていることがわかる.

一般に益城町宮園で観測されたような残留変位を伴 う波形は近地項および中間項⁹によるものであるが,近 地項および中間項は距離の自乗に反比例して減衰し遠 方まで届かないため,残留変位を伴う波形は観測点極 近傍での断層運動を反映したものとなる.従って,残 留変位のタイミングは,観測点極近傍での断層運動の タイミングを反映している.従って,益城町において 周期 ls の成分が「残留変位に向かって変位が増加し始 めるタイミング」より前に到来していることは,周期 ls の成分の発生源が地表付近ではなく深部にあったこ とを示唆している.

(2) 中小地震の位相特性との比較

同様の議論は本震の観測波形と中小地震の観測波形 のフーリエ位相特性の比較からも可能である. 図-8 は KiK-net 益城の地中における本震の観測波形と,その位 相を中小地震の位相に置き換えた波形を比較したもの である.ここで中小地震としては 4/15 0:50 に発生した 地震と 4/16 4:51 に発生した地震を用いている.これら の地震は本震の破壊開始点の近傍で深さ 13km および 14km で発生したものである.また,ここで示している 速度波形は加速度波形の 0.2Hz 以下をカットして周波数 領域で積分したものである.

この結果から、本震時に観測された波形の主要な部 分は中小地震の位相によって再現されていることがわ かる.このことは、本震時の波形の主要な部分(ただ し0.2Hz以上の部分)とこれらの中小地震とでは伝播経 路特性およびサイト特性が類似していることを示すと 考えられる.このことも、益城町の周期 ls の成分が深 部から到来していることを示唆すると考えられる.

(3) 周期 1s の大振幅地震動の成因

益城町では結果的にいずれの観測点においても周期 lsの成分が卓越することとなったが(図-2),その成 因については表-1のように整理できると考えられる. この中で,まず,KiK-net 益城での周期 lsの成因がサイ ト特性でない理由としては次の2点を挙げることがで きる.

まず一点目の理由として, KiK-net 益城における経験 的サイト増幅特性(図-9)¹⁰が, 0.4-4Hz でまんべんな く大きな値を示すものの, 1Hz付近(1s付近)で顕著に 大きくはないことが挙げられる.

表-1 益城町における周期 ls の大振幅地震動の成因

	震源特性	サイト特性
KiK-net 益城	0	×
S3 地点	0	0



また、二点目の理由として、本震時の KiK-net 益城に おける地表と地中のフーリエスペクトルの比較(図-10)からわかるように、本震時に周期 1s の成分は地中 でも観測されていることが挙げられる.

以上の二点から、少なくとも KiK-net 益城における周 期 ls の卓越は震源特性に由来し、震源断層の破壊過程 の中に周期 ls の成分を卓越させるような性質があった と考えられる.

ただし、益城町の他の地点、例えば S3 地点において は事情が異なっていたと考えられる. 土木学会の速報 会において秦¹¹は S3 地点でのサイト増幅特性が 1Hz 付 近に顕著なピークを有していることを示している. この性質は KiK-net 益城とは異なっている. したがって, 表-1 に示すように, S3 地点では震源特性とサイト特性の双方に周期 1s を大きくする要因があり,それにより 周期 1s の大振幅地震動が生じたと考えることができる.





図-10 KiK-net 益城における本震時のフーリエスペクトル

4. 西原村で観測された地震動について

西原村で観測された地震動は,周期 0.5-0.8s の卓越も 顕著であるものの,ここでは周期 2s 以上の成分に着目 して検討を行う.図-11 上は固有周期 3s で減衰定数 5% の1自由度系に対して西原村小森の波形(EW 成分)を 入力した場合の加速度応答を示しているが,加速度応 答は 12.5s 付近で最大となっている.そして,この時刻 は,入力した加速度波形(図-11 中)の振幅が最大とな っている時刻には対応しておらず,観測点の極近傍に おいて断層運動が停止したと考えられる時刻に生じて いる(図-11下の変位波形参照).従って,西原村小森 の記録が周期 2s以上で鷹取の記録を上回る大きな加速 度応答を示すのは,観測点の極近傍における断層運動 の停止に関連していると考えられる.

5. まとめ

本研究では 2016 年熊本地震の本震の際に震源近傍で 得られた記録について分析を行った.本研究の結果か ら次のことが推察される.①益城町における大被害の 原因となったと考えられる周期 1s の成分は「残留変位 に向かって変位が増加し始めるタイミング」より前に 到来しており,周期 1s の成分の発生源は地表付近では なく深部にあったと考えられる.②益城町の S3 地点で は震源特性とサイト特性の双方に周期 1s を大きくする 要因があり,それにより周期 1s の大振幅地震動が生じ た.③西原村小森の記録が周期 2s 以上で鷹取の記録を 上回る大きな加速度応答を示すのは,観測点の極近傍 における断層運動の停止に関連していると考えられる.

謝辞:防災科学技術研究所,熊本県,気象庁,大阪大 学秦吉弥博士,JR による強震記録を利用しています. 記して謝意を表します.なおJR の波形はJR 警報地震 計(FDシリアル番号 R-087)によります.

参考文献

- Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, Jour. Japan Association for Earthq. Eng., Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, Jour. Japan Association for Earthq. Eng., Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 3) Hata, Y., Goto, H., and Yoshimi, M.: 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, 2016 (in print).
- 高山峯夫:調査の概要,2016 年熊本地震災害調査 報告会,2016 年度日本建築学会大会(九州), pp.2-4,2016.
- 5) 高橋良和:平成 28 年熊本地震先遣隊被害調査概要, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 地震被害調査結果 速報会,土木学会,http://committees.jsce.or.jp/eec2/ node/76
- 6) 港湾空港技術研究所地震防災研究領域:2016 年熊 本地震(本震)の震源モデル(第二版)-デジタル



図-11 上から順に,固有周期 3s で減衰定数 5%の1自由度系に対して西原村小森の波形(EW 成分)を入力した場合の加速度応答,入力した加速度波形,対応する変位波形.

データ付きー, http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2016/jr_47.html

- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 IV 耐震設計
 編, pp.19-22, 2012.
- 菊地健児,田中圭:益城町の悉皆調査,2016 年熊 本地震災害調査報告会,2016 年度日本建築学会大 会(九州),pp.83-93,2016.
- 9) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Press, 2002.
- 10) 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の強震観測地点におけるサイト増幅 特性,港空研資料, No.1112, 2005.
- (11) 秦吉弥: 地震動・地盤震動, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 地震被害調査結果 速報会, 土木学会, http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/76

(????.?.?受付)

PRELIMINARY ANALYSIS OF NEAR-SOURCE STRONG MOTION RECORDS DURING THE MAIN SHOCK OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Atsushi NOZU and Yosuke NAGASAKA

This article present the results of some preliminary analyses of the near-source strong motion records during the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake. The results indicate that the devastating ground motion with a predominant period of 1 s observed at Mashiki originated from the deeper part of the fault, rather than the shallower part. The results also indicate that both the source effect and the site effect contributed to the generation of extreme ground motions such as those observed at S3 station in Mashiki.