

平成28年熊本地震における 御船 IC 大速度記録の原因分析

豊増 明希¹・後藤 浩之²・澤田 純男³・高橋 良和⁴

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: toyomasu@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu4v@kyoto-u.ac.jp

平成28年(2016年)熊本地震の前震および本震において、九州自動車道御船 IC では周辺に比べて大きな速度記録が観測された。本研究では御船 IC において大速度記録が観測された原因を分析することを目的とし、常時微動観測による地盤構造の調査と、御船 IC における熊本地震の前震および本震記録の再現解析を行った。常時微動観測の結果、御船 IC において推定される地盤構造が周辺観測点と異なることが確認された。推定された地盤構造を用いて、嘉島町役場の観測記録から御船 IC の波形を求めたところ、観測記録を良好に再現した。この結果から、熊本地震の前震および本震において観測された大速度記録の原因の一つとして、御船 IC の地盤による地震波の増幅が考えられる。

Key Words: *the 2016 Kumamoto earthquake, microtremor observation, equivalent linear method, site amplification*

1. はじめに

平成28年(2016年)熊本地震は、4月14日に発生した Mw6.2 の地震(前震)を起点とする一連の地震活動であり、4月16日には Mw7.0 の地震(本震)が発生している¹⁾。14日の前震では益城町宮園において、16日の本震では益城町宮園と西原村小森において震度7を観測した²⁾。

この地震により複数の観測点で強い地震動が観測されたが、そのうちの1つとして九州自動車道御船 IC の記録があげられる。図-1 に前震と本震の震央(★)、CMT 解、震源断層³⁾および御船 IC(■)の位置を示す。震央と震源断層については前震のものを青色で、本震のものを赤色で表示した。御船 IC は前震および本震の震央からいずれも約3kmの距離にあり、嘉島町と御船町の町境に位置している。嘉島町と御船町は、前震と本震で震度7を観

測した益城町の南隣に位置する自治体であり、嘉島町鯉、嘉島町上六嘉の集落では死者が出るなど地震動被害の少ない地域である。

御船 IC における地震計の極近傍の構造物として、トールゲートがある(図-2)。トールゲートは1995年兵庫県南部地震以降に耐震補強されている。オリジナルの構造は約40mのPCプレキャスト屋根版を高さ4.7mのRC柱3本で支持するものであり、屋根部まで含めると最高6.14mである。RC柱は4本の杭基礎により支持されている。御船 IC の同型式の標準設計より、耐震補強前の一次固有周期は0.394秒(走行方向)、0.259秒(桁行き方向)である。耐震補強として新たに2本の鋼製柱が追加され、補強後の一次固有周期は0.390秒(走行方向)である。地震前の状況が把握できていないものの、地震後の調査では、御船 IC トールゲートには大きな被害は発

生しておらず、屋根版と RC 柱の接合部付近において軽微な欠けが確認できる程度であった。また、御船 IC のバスストップ付近には、ロッキング橋脚を有する 3 径間連続橋である高木橋（橋長約 40m）があり、桁端部にコンクリートの剥落を伴う損傷が確認できる。

御船 IC の前震・本震時の速度記録は、それぞれ約 2km、約 3km 離れた嘉島町や御船町の自治体地震計の記録と比べても大きい。前震、本震時のそれぞれについて、嘉島町、御船 IC、御船町での速度波形と加速度応答スペクトルの比較を図-3～図-6 に示す。本震の南北成分について比較すると、嘉島町、御船町における最大水平速度がそれぞれ、88.3 cm/s、45.1 cm/s であるのに対し、御船 IC においては 127.3 cm/s である。御船 IC の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）は 1 秒付近の応答が比較的大きく、特に本震の南北成分は兵庫県南部地震の鷹取波を上回る応答レベルである。このため、御船 IC の記録は地震工学上無視できるものではない。

そこで本研究では、御船 IC において大速度記録が観測された原因を分析するため、表層の地盤構造に着目する。嘉島町、御船 IC、御船町の 3 地点において常時微動観測を実施し、ボーリングデータと統合して表層の地盤構造を推定する。そして、地盤の非線形応答を考慮した前震記録と本震記録の再現解析を行うことで、御船 IC における大速度記録の成因について考察する。

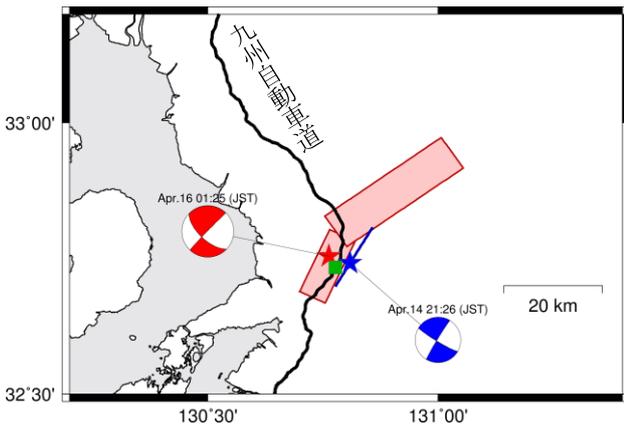


図-1 前震と本震の震央(★), CMT 解、震源断層³⁾および御船 IC(■)の位置



図-2 御船 IC 近傍における構造物の状況

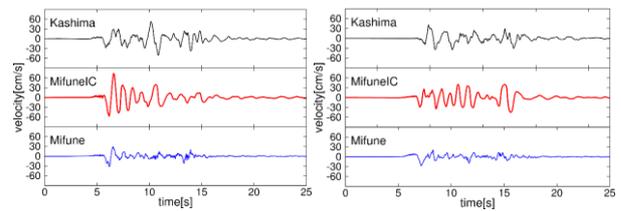


図-3 熊本地震の前震(4/14 発生, Mw6.2)における速度波形の比較(左:東西成分, 右:南北成分)

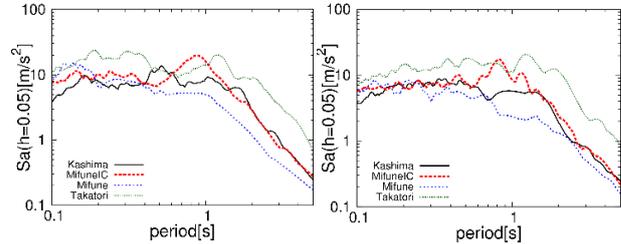


図-4 熊本地震の前震における加速度応答スペクトルの比較(左:東西成分, 右:南北成分)

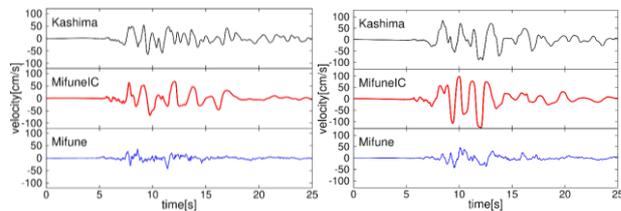


図-5 熊本地震の本震(4/16 発生, Mw7.0)における速度波形の比較(左:東西成分, 右:南北成分)

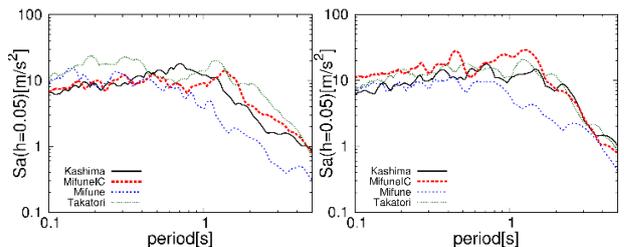


図-6 熊本地震の本震における加速度応答スペクトルの比較(左:東西成分, 右:南北成分)

2. 常時微動測定

熊本地震の発生を受け、熊本地区および阿蘇地区において地盤構造を推定するための調査・研究が進められている。地元では、阿蘇市、南阿蘇村、熊本市、益城町、西原村の全 26 地点において常時微動観測に基づいて地盤構造を推定している⁴⁾。また、建物被害の集中した益城町市街地においては、さまざまな研究機関による地盤調査⁵⁾と地盤応答解析⁶⁾が実施されている。しかし、御船 IC 周辺の地盤に着目した研究は見当たらないため、表層の地盤構造を推定することを目的とした常時微動測

定を実施した。

(1) 観測の概要

a) 微動アレー観測

嘉島町役場と御船 IC、御船町役場の3地点において微動アレー観測を実施した。観測は2016年12月12日、12月14日の計2日間行った。加速度センサーにはJU210を用いている。全ての測定においてセンサーを円周上の3点と中心の計4点に配置してアレーを構成した。各アレーでは、それぞれ30分間連続で測定することを基本とした。

御船 IC ではアレー半径1m、3m、5m、10mの計4回の観測を。嘉島町役場ではアレー半径1m、3m、16m、50mの計4回、御船町ではアレー半径1m、5mの計2回測定を行った。嘉島町役場と御船町役場においては、強震観測点を含む、あるいはその極近傍においてアレーを展開した。御船 IC では、ボーリングデータによる地盤情報を使用するため、ボーリング地点の近傍であって強震観測点から約350mの地点にアレーを展開した。それぞれのアレー観測地点を、御船 IC は MIC、嘉島町役場は KSM、御船町役場は MFN として図-7 に示す。

b) 単点観測

嘉島町役場から御船 IC を通り御船町役場に至る約5kmの測線において常時微動単点観測を行った。観測は2016年10月24日、25日および12月12日の3日間で実施し、測線上約250m間隔を基本として計27地点で実施した。加速度計 GPL-6A3P を使い、サンプリング周波数は100Hzである。各地点では常時微動を11分間連続で測定することを基本とした。単点観測地点を図-7 に●で示す。

各地点の H/V スペクトル比を求め、地盤の卓越周波数を調査したところ、御船町役場周辺の卓越周波数は嘉島町や御船 IC 周辺と比べて高く、また嘉島町と御船 IC とでスペクトル形状が異なることが確認できた。

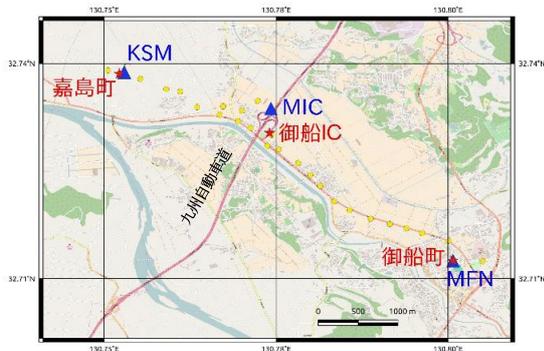


図-7 強震観測点の位置(★)と微動アレー観測(▲)、単点微動観測(●)の実施箇所

(2) 位相速度の推定

微動アレー観測の記録を基に CCA 法⁸⁹⁾を用いて、位相速度を推定した。図-8 に推定した位相速度を示す。各アレー半径の結果のうち右下がりになる箇所を抽出して、アレー地点の位相速度とした。紫、青、緑、赤の線の内、太線で示した区間がアレー半径毎に抽出された位相速度である。

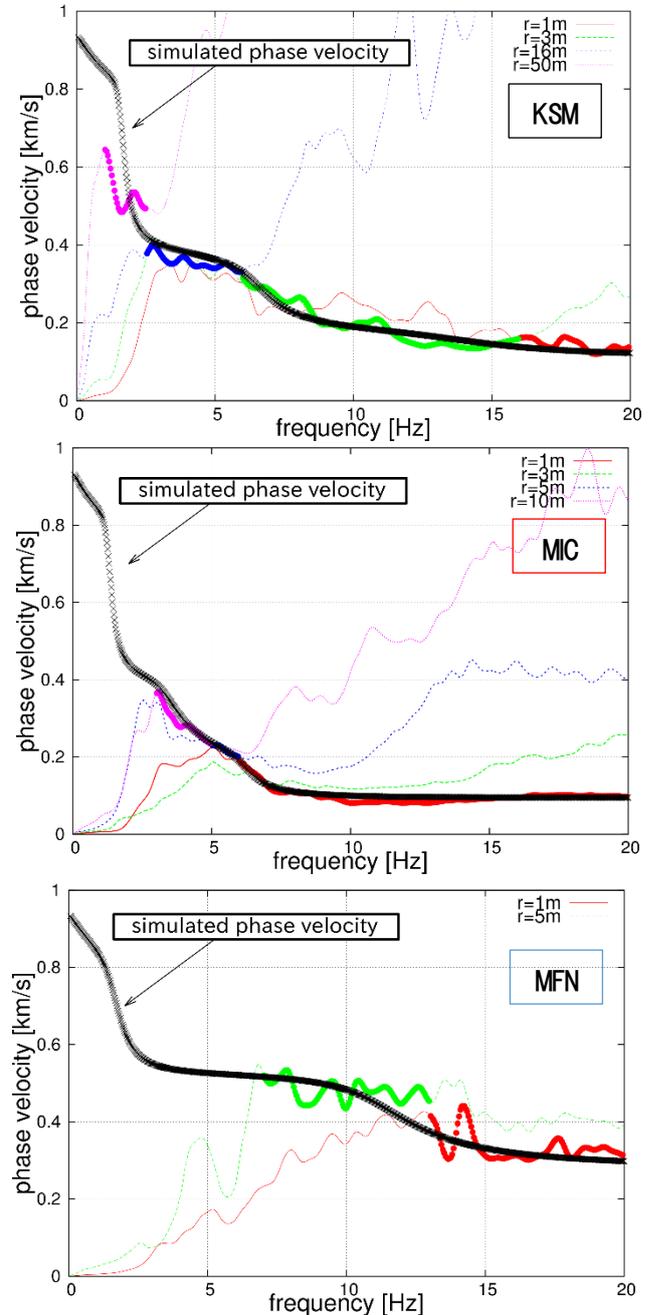


図-8 微動アレー観測結果に基づいて推定した位相速度

3. S波速度構造の推定

(1) ボーリングデータによる層境界の設定

本研究では嘉島町役場、御船 IC、御船町役場の3地点におけるボーリングデータを使用し、土質区分や色調、

N 値などの特性が大きく変化する深さを層境界に設定した。具体的には、嘉島町では地表から 3.5 m までの深さを粘性土の層、3.5 m から 14 m までの層を主に砂礫からなる層、14 m から 29 m までの層を茶灰色と灰白色の礫混じり砂礫からなる層とに分け、それぞれを単一の色、密度をもつと仮定する。御船 IC では地表から 7 m までの深さを粘性土の層、それ以深を主に砂礫からなる層とする。御船町では地表から 10.5 m までを N 値 40 から 50 程度の砂礫・火山灰質砂の層、10.5 m から 14 m までを N 値 20 程度の粘性土の層、それ以深を N 値 50 以上の砂質頁岩からなる層とした。図-9 に、各地点の地盤情報と設定した層境界を赤線で示している。

(2) S 波速度構造の推定

設定した層境界を固定し、微動アレー観測による位相速度を再現するように各層の S 波速度を推定した。なお、各層の P 波速度と密度は周辺の防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 観測点における検層データを参照して設定した。微動アレー観測による位相速度が Rayleigh 波基本モードの位相分散曲線により説明できると仮定し、計算値と観測値の残差ができる限り小さくなるように S 波速度を推定した。

嘉島町 (KSM) と御船 IC (MIC) では、ボーリング深度までの情報で十分に位相速度が再現されなかったため、全地点に共通する基盤をボーリング深度以深に設定し、この深さを単点観測で得られた H/V スペクトル比と地盤構造から計算される Rayleigh 波基本モードの楕円率のピーク周波数が対応するように設定した。

表-1 および図-9 に、推定された地盤構造、S 波速度分布を示す。また図-8 に、この地盤構造により求められる位相分散曲線を黒線で表している。3 地点全てにおいて観測された位相速度を良好に再現している。

推定した S 波速度構造に関して粘性土の層に着目すると、KSM では S 波速度 120 m/s の砂礫混じり粘性土の層が 3.5m, MFN では粘性土の層が存在しないのに対し、MIC では S 波速度 100 m/s の粘性土からなる層が 7m 堆積している。このため MIC は、嘉島町 (KSM) や御船町 (MFN) と比べて軟弱地盤であることが確認された。

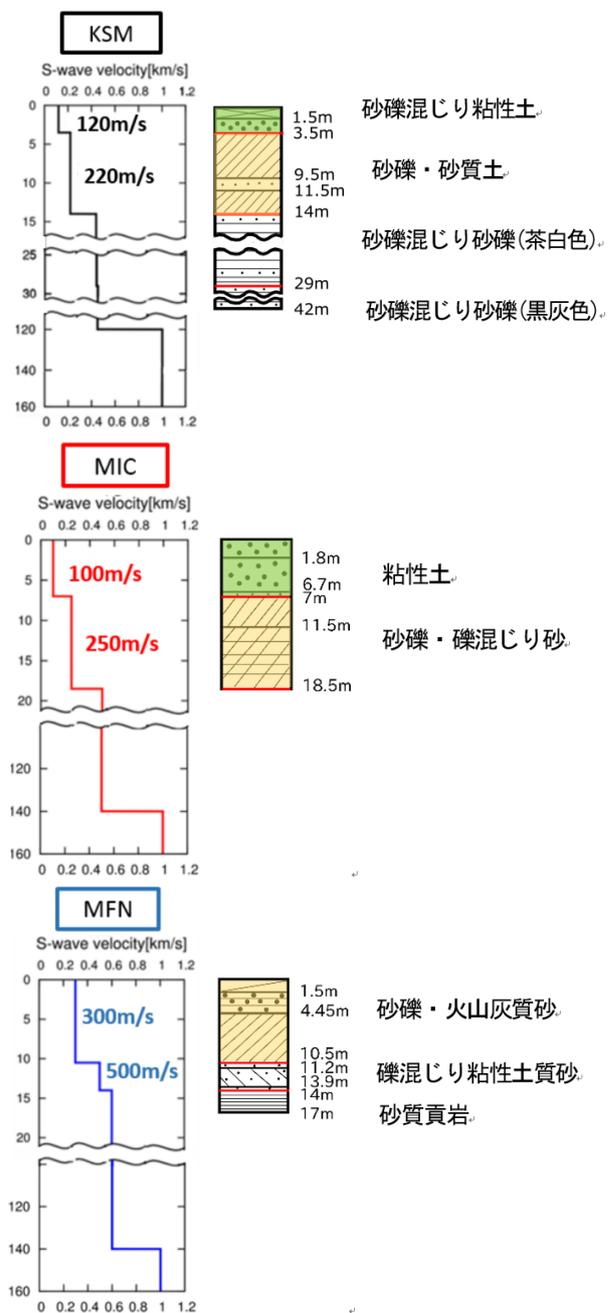


図-9 ボーリングデータと推定した S 波速度構造

4. 御船 IC における熊本地震観測記録の再現解析

(1) 解析方法

推定した地盤構造と嘉島町の地震記録を用いて、熊本地震の前震および本震の再現解析を行う。まず、嘉島町で観測された地表地震動を嘉島町の地盤モデルを用いて S 波速度 1000 m/s の基盤に引き戻す。そして、嘉島町と御船 IC において基盤入射波が等しいと仮定し、御船 IC の基盤に嘉島町の基盤入射波を入力することで、御船 IC の地表地震動を求める。観測点間の距離が約 2 km あるため、震源距離や放射特性の補正も必要とも考えられるが、表層地盤の違いによってのみ説明できる部分を確認する

表-1 推定された地盤構造

(a) KSM

Top depth of the layer (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (t/m ³)
0	120	250	1.55
3.5	220	550	1.65
14	440	1550	1.70
29	450	1600	1.75
120	1000	2200	1.75

(b) MIC

Top depth of the layer (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (t/m ³)
0	100	250	1.55
7	250	700	1.55
18.5	500	1600	1.75
140	1000	2200	1.75

(c) MFN

Top depth of the layer (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (t/m ³)
0	300	1000	1.60
10.5	500	1100	1.65
14	600	1200	1.70
140	1000	2200	1.75

ため、ここではこれら補正を行っていない。また、本研究の地盤応答解析には等価線形化法(SHAKE)を用いた。

本解析では嘉島町と御船 IC の 1, 2 層目は非線形挙動を示す層、以深の層は弾性挙動を示す層と仮定した。いずれも 1 層目は粘性土、2 層目は砂礫・砂質土であるため、1 層目に土木研究所の実験式に基づく材料特性(沖積粘土)¹⁰を、2 層目に土木研究所の実験式に基づく材料特性(砂)¹⁰を採用した。約 1 m 毎に層分割を行い、同じ層では厚さを均等にした。

(2) 御船 IC における再現解析結果

本論文では、本震記録が顕著であり、かつ前震記録にパルス状の後続波群のみられる南北成分に着目して結果を示す。図-10、図-11に前震および本震の御船 IC における再現波形と応答スペクトルの比較をそれぞれ示す。前震および本震の双方において、観測波形の位相特性や振幅特性をよく再現している。

本震の最大速度に着目すると、127 cm/s の観測値に対して 102 cm/s と計算され、完全に一致していないものの、嘉島町の最大値 88.3 cm/s を上回る結果である。また、前震記録に表れたパルス状のフェーズも良好に再現されている。応答スペクトルは、全体的な形状をよく再現しているが、周期 1 秒付近の加速度応答は前震・本震ともに過小評価である。

以上の解析結果は嘉島町と御船 IC の両地点で同一の入力波を仮定しているため、表層地盤の違いのみで御船

IC における前震記録と本震記録をある程度再現できたといえる。すなわち、御船 IC における大速度記録の要因の一つとしては、地盤構造の違いによる地震波の増幅が考えられる。

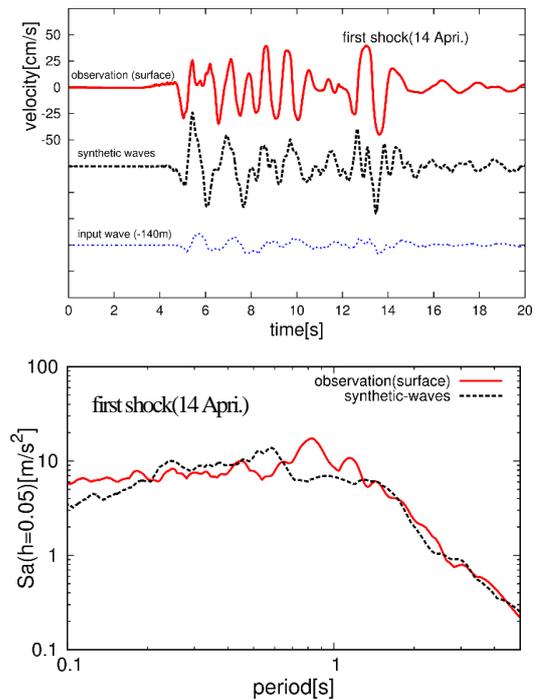


図-10 御船 IC における前震の再現波形と応答スペクトルの比較

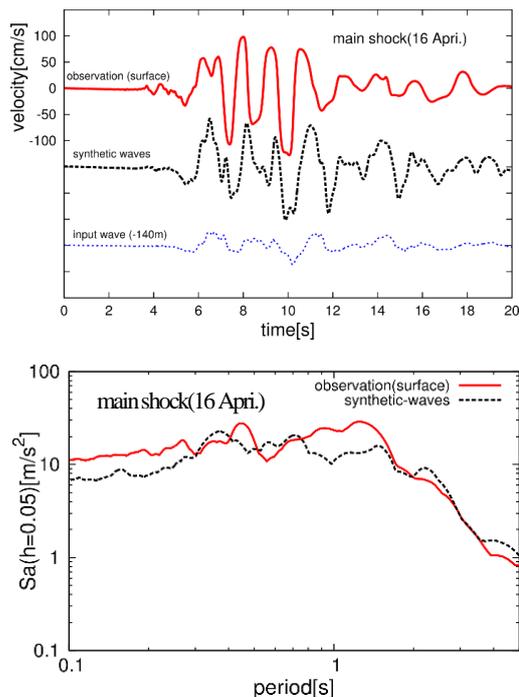


図-11 御船 IC における本震の再現波形と応答スペクトルの比較

5. 結論

平成 28 年熊本地震の前震および本震において、御船 IC では周辺の嘉島町や御船町の記録と比べ、大きな速度記録を観測した。本研究では、その原因について表層地盤に着目して分析をした。

常時微動観測により御船 IC および嘉島町、御船町の強震観測点近傍の地盤構造を推定したところ、表層地盤の違いが明らかとなった。加えて、推定された地盤構造を用いて嘉島町の記録から御船 IC の地震動を求めたところ、前震および本震の速度波形を良好に再現した。本解析は、嘉島町と御船町 IC の両地点で同一の入力波を仮定しているため、表層地盤の違いのみで御船 IC における前震記録と本震記録をある程度再現できたといえる。すなわち、御船 IC における大速度記録の要因の一つとして、表層地盤の影響による地震波の増幅が示された。

謝辞：御船 IC での地震記録は、西日本高速道路株式会社より、嘉島町、御船町の地震記録は熊本県より提供いただきました。また、嘉島町、御船町、西日本高速道路株式会社のポーリングデータ、および防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net の地盤情報を使用させていただきました。常時微動観測にあたっては (株) ニュージェックの羽田浩二様にご協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：地震月報（カタログ編），
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html> (2017 年 8 月 16 日閲覧)
- 2) 気象庁：平成 28 年 4 月 地震・火山月報（防災編），

- <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/monthly/201604/201604index.html> (2017 年 8 月 16 日閲覧)
- 3) Asano, K., and T. Iwata : Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, Vol. 68, No. 147, 2016.
- 4) Chimoto, K., Yamanaka, H., Tsuno, S., Miyake, H. and Yamada, N.: 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*, Vol.68, No.206, 2016.
- 5) 国土交通省：熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する中間報告，2016。
http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi08_hh_000032.html (2017 年 8 月 16 日閲覧)
- 6) 山田雅行, 山田真澄, 羽田浩二, 藤野義範, Mori J., 坂上啓, 林田拓己, 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～地盤特性の影響～, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 印刷中.
- 7) Goto, H., Hata, Y., Yoshimi, M., and Yoshida, N.: Nonlinear site response at KiK-net KMMH16 (Mashiki) and heavily damaged sites during the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.1), Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 印刷中.
- 8) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y.: A new method to determine phase velocities Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, Vol.69, pp.1535-1551, 2004.
- 9) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y.: Centerless circular array method: Interfering phase velocities of Rayleigh waves in broad wave-length ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, Vol.111, 2006.
- 10) 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.

Generation mechanism behind the strong velocity record at Mifune interchange on Kyushu Expressway during the 2016 Kumamoto earthquake

Aki TOYOMASU, Hiroyuki GOTO, Sumio SAWADA and Yoshikazu TAKAHASHI

In April, 2016 a series of earthquakes named as the “2016 Kumamoto earthquakes” struck at central Kyushu area in the south-west of Japan. During the first and main shocks, large velocity records were obtained at the Mifune interchange on the Kyushu expressway. The records were much larger than observation records in the surrounding area. Our research focuses on studying the generation mechanism of the strong velocity records at the Mifune interchange. In this study, we conduct microtremor observations and estimate shallow S-wave velocity structures at Mifune interchange and two other neighborhood locations. Based on the obtained shallow S-wave velocity structures, the velocity waves at Mifune interchange were simulated for both the first and main shock events. The simulation results were compared with the observation records and found to be good agreement. The study found that the site amplification by the shallow subsurface soil layer caused strong velocities at the Mifune interchange on the Kyushu expressway.