2016年熊本地震で被災した県道338号横江大橋における地震動の推定

秦吉弥¹⁾, 矢部正明²⁾, 葛西昭³⁾, 高橋良和⁴⁾, 松崎裕⁵⁾, 秋山充良⁶⁾

- 1) 正会員 大阪大学 大学院工学研究科, 准教授 博(工)
e-mail : hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp
- 2) 正会員 (株)長大 構造事業本部, 副技師長 博(工)
e-mail : yabe-m@chodai.co.jp
- 3) 正会員 熊本大学 大学院先端科学研究部, 准教授 博(工)
e-mail : kasai@kumamoto-u.ac.jp
- 4) 正会員 京都大学 大学院工学研究科, 教授 博(工)
e-mail : takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp
- 5) 正会員 東北大学 大学院工学研究科, 助教 博(工)
e-mail : hiroshi.matsuzaki.e3@tohoku.ac.jp
- 6) 正会員 早稲田大学 創造理工学部, 教授 博(工)
e-mail : akiyama617@waseda.jp

要 約

本稿では, 2016年熊本地震の強震動の作用により橋脚の大規模な沈下を伴う深刻な被害が発生した横江大橋を対象に, 本震時に作用した地震動を推定した結果について報告する. 具体的には, まず, 横江大橋において常時微動計測を行い地盤震動特性の局所的な変化はないことを確認した. 次に, 横江大橋および周辺の既存強震観測点において臨時地震観測を同時に実施し, 得られた記録に基づいてサイト特性を評価した. 最後に, サイト増幅特性置換手法を用いて, 本震時に横江大橋に作用した地震動を推定した.

キーワード: 微動および余震観測, 地盤震動特性, 2016年熊本地震

1. はじめに

2016年熊本地震の本震による強震動の作用により, 横江大橋(図1参照)では, 中間橋脚が横梁部まで約2m沈下するなどの深刻な被害が高橋¹⁾によって報告されている. これまで秦ほか²⁾は, 2016年熊本地震による被災橋梁に作用した地震動を事後評価する試みを継続的に行っているが, 図1の枠内図に示すように, いずれも震源断層³⁾近くの被災橋梁を対象としており, 震源断層から比較的離れた被災橋梁を対象とはしていない. 上述した背景を踏まえ, 本稿では, 横江大橋の被災に関する詳細な分析を今後行っていく上で必要不可欠となる本震時に横江大橋に作用した強震波形を推定した.

2. 本震観測記録の整理, および常時微動計測・臨時地震観測に基づくサイト特性の評価

図1は, 横江大橋周辺で得られた本震記録の分布である. 図1に示すように, 氷川町役場と八代市鏡支所の二つの既存観測点があり, 得られた本震記録の地震動指標値に有意な差異が見受けられることから, サイト特性の影響が示唆される. そこで本研究では, まず, 横江大橋の右岸部・中州(中間)部・左岸部の三地点(図1参照)において常時微動計測を行った. 図2に当該三地点における常時微動H/Vスペクトルの比較を示す. ここに, 常時微動の計測方法や得られたデータ処理方法等については既往研究⁴⁾と同様

である。図2に示すように、当該三地点でのH/Vスペクトルの特徴が類似していることから、横江大橋地点での局所的な地盤震動(サイト)特性の変化は小さいと考えられる。また、横江大橋近傍における既存のボーリング調査結果⁵⁾に基づいて計算された表層地盤(工学的基盤～地表)の固有周期0.598s(固有周波数1.67Hz)とH/Vスペクトルのピーク周波数が比較的良好一致を示していることも確認できる。

次に、横江大橋エリア内でのH/Vスペクトルの類似性を踏まえて、横江大橋[左岸](図1参照)に臨時地震観測点を設けた。観測期間は、2016年11月20日～12月24日の約一か月間である。観測機器および観測条件などの地震観測システムは、先行研究²⁾と同様である。なお、本稿では、同様の地震観測システムを氷川町役場と八代市鏡支所の震度計の極近傍においてもそれぞれ設置した(図1の枠内写真による一例参照)。これは、地方自治体で得られた観測地震動のデータが公開されるのは、その規模が比較的大きい場合に限定されているためである。その結果、以下に示す熊本県熊本地方を震源とする地震(EQ-1, EQ-2, EQ-3: 図1の枠内図参照)による記録を横江大橋・氷川町役場・八代市鏡支所で同時に観測できた。

EQ-1: 2016/11/23 20:10 (M_j 3.6) / EQ-2: 2016/12/05 11:52 (M_j 3.7) / EQ-3: 2016/12/07 01:46 (M_j 2.9)

図3は、EQ-1, 2, 3による水平動(二成分合成)に基づくフーリエスペクトルの比率(横江大橋もしくは八代市鏡支所/氷川町役場)を比較したものである。ここに、このスペクトル比は、氷川町役場に対する震源距離の違いによる補正^{6,7)}を実施済みであり、対象三地震(EQ-1, 2, 3)による平均を採用している。図3に示すように、5～10Hzもしくは0.4～2Hzの周波数帯域において八代市鏡支所もしくは横江大橋のスペクトル比が1.0をそれぞれ連続的に上回っていることから、サイト増幅特性の影響が確認できる。

3. サイト増幅特性置換手法に基づく地震動の推定

本研究では、サイト増幅特性置換手法⁸⁾を用いて、横江大橋および八代市鏡支所(以後、二地点まとめて推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。図4に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、基準観測点として氷川町役場を選定した。次に、基準観測点での本震観測記録によるフーリエ振幅を計算し、そのフーリエ振幅に対して基準観測点と推定点の震源距離の違いによる補正^{6,7)}を施し、さらに推定点と基準観測点のサイト増幅特性の差異を表す比率(図3参照)を乗じることにより、推定点での本震時における地震動のフーリエ振幅を推定した。その際、水平二成分それぞれについて同様の計算を行った。最後に、得られたフーリエ振幅と、基準観測点での本震記録のフーリエ位相を組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換⁹⁾を行うことで、推定点における本震時の地震動を推定した。

図5および図6は、八代市鏡支所における本震観測記録(観測波)と地震動推定結果(推定波)を加速度波形および速度波形について比較したものである。なお、ここでは、バンド・パスフィルタなどの波形処理は行っていない。その際、0.2Hz未満および10Hzより高周波数でのフーリエ振幅の推定にあたっては、基準観測点のフーリエ振幅を直接転用した。図5および図6に示すとおり、観測波と推定波が比較的良好一致を示している。図7(a), (b)は、絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したものであるが、観測波と推定波による応答スペクトルが概ね類似していることが確認できる。さらに、推定波による三成分合成PGA・三成分合成PGV・計測震度は、326Gal・55cm/s・5.5とそれぞれ算定され、観測波による同種の地震動指標値(図1参照)に対して類似もしくは一致していることが確認できた。すなわち、図5、図6、図7(a), (b)における観測波と推定波の類似性は、横江大橋に対して同条件にてサイト増幅特性置換手法を適用すれば、本震時の横江大橋での地震波形を一定の精度で推定できる可能性が高いことを示唆するものである。

図8および図9は、本震時の横江大橋での推定加速度および速度波形であるが、氷川町役場や八代市鏡支所での観測地震動に対して比較的大きな地震動が推定されており、鉛直動が気象庁計測震度に及ぼす影響は小さいことを考慮して¹⁰⁾、水平地震動(水平二成分)による気象庁計測震度¹¹⁾は6.3と算定された。図7(c), (d)は、横江大橋での推定地震動(図8参照)による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を、道路橋示方書(2012年版)¹²⁾に基づく標準スペクトル(地域別補正係数0.85)を比較したものであるが、概ね0.5～1sの周期帯域で標準スペクトルと同等程度もしくはそれ以上の加速度応答を示している。

最後に、地盤の非線形応答に関する留意事項について以下に述べる。図3に示すとおり、氷川町役場に比べて八代市鏡支所のほうが高周波帯域のサイト増幅特性が比較的大きいにも関わらず、本震時に記録された三成分合成PGAは氷川町役場の記録のほうが大きくなっている(図1参照)。これは、本震時に地盤が非線形応答を示し加速度の減衰が生じた可能性を示唆するものである。一方で、横江大橋における

地盤地表面相当の推定地震動(図8および図9参照)には, 上記の非線形応答の影響が含まれていないため, 現地でのボーリング調査結果などを踏まえた線形の重複反射理論を適用¹³⁾するなどして, 工学的基盤相当(例えば, FEM解析モデルの底面相当)の地震波形を計算し, 当該波形を入力地震動とした動的解析を行うことで横江大橋の被災に関する詳細な分析を実施していく必要がある。

図1 横江大橋周辺での本震記録と, 臨時観測された中小地震の分布

図2 H/Vスペクトルの比較

図3 基準点に対するフーリエスペクトル比の比較

図4 サイト増幅特性の置換による地震動推定フロー

図5 推定手法の適用性確認(速度波形の比較)

図6 推定手法の適用性確認(加速度波形の比較)

図7 応答スペクトルに基づく地震動推定手法の適用性確認, および推定地震動の応答スペクトルの特徴

図8 横江大橋での推定地震動の加速度時刻歴

図9 横江大橋での推定地震動の速度時刻歴

4. まとめ

本研究では、2016年熊本地震の本震によって深刻な被害が発生した横江大橋(八代市鏡町)において、臨時地震観測などを実施し、得られた観測記録に基づいて、本震時に横江大橋に作用した地震動を推定した。今後は、本稿で推定した地震動を入力波とした動的解析などを実施していく予定である。

謝 辞

熊本県による地震観測波形データを利用しました。常時微動計測や地震観測などでは八代市鏡町の住民の皆様等にご大変お世話になりました。本研究は(公社)土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会(委員長:矢部正明 (株)長大)の活動の一環として実施しました。

参考文献

- 1) 高橋良和：2016年熊本地震による橋梁の被害報告，橋梁と基礎，Vol.50, No.9, pp.32-37, 2016.
- 2) 例えば，秦吉弥，矢部正明，葛西昭，松崎裕，高橋良和，秋山充良：臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の強震動の作用によって被災した橋梁地点でのサイト増幅特性の評価，第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.127-134, 2016.
- 3) 秦吉弥，矢部正明，野津厚，葛西昭，高橋良和，松崎裕，秋山充良：臨時余震観測に基づく2016年熊本地震における西原村および南阿蘇村の被災橋梁に作用した地震動の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.63A, pp.265-278, 2017.
- 4) 例えば，秦吉弥，矢部正明：サイト増幅特性の差異に着目した2011年東北地方太平洋沖地震におけ

る第一宮中架道橋での地震動の評価, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.83-90, 2016.

- 5) 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, 地質情報整備活用機構HP, 2016. <http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/> (last accessed: 2016/12/31)
- 6) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 7) 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, No.543, pp.61-68, 2001.
- 8) 例えば, 村岡七重, 丸山喜久, 山崎文雄: 余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, pp.179-186, 2006.
- 9) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 10) 例えば, 中村豊: 合理的な地震動強度指標値の検討—DI値を中心にした地震動指標値間の関係—, 土木学会地震工学論文集[報告], Vol.27, Paper No.290, 2003.
- 11) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 12) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説—V耐震設計編, 丸善出版, 318p., 2012.
- 13) 秦吉弥, 片岡正次郎, 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震による観測記録を用いた他地点での地震動推定に関する精度評価, 日本地震工学学会論文集, Vol.16, No.4, pp.195-214, 2016.

(受理: 2017年1月 4日)

(掲載決定: 2017年2月22日)

Ground Motion Evaluation at Yokoe Bridge site in Yatsushiro City for the Main Shock of the 2016 Kumamoto Earthquake

HATA Yoshiya ¹⁾, YABE Masaaki ²⁾, KASAI Akira ³⁾, TAKAHASHI Yoshikazu ⁴⁾,
MATSUZAKI Hiroshi ⁵⁾ and AKIYAMA Mitsuyoshi ⁶⁾

1) Member, Associate Professor, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

2) Member, Vice Chief Engineer, Research and Development Center, Chodai Co., Ltd., Dr. Eng.

3) Member, Associate Professor, Graduate School of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

4) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

5) Member, Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

6) Member, Professor, School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Serious damage was caused to Yokoe Bridge in Yatsushiro City during the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake. In this report, seismic waveforms during the 2016 main shock in the bridge were estimated using the site-effect substitution method. The site effect at the bridge was evaluated based on temporary seismic observations. Difference of the site effects between the bridge site and the present observation stations was also indicated.

Key Words: Microtremor and seismic observation, Ground shaking characteristics, The 2016 Kumamoto Earthquake