

2016年熊本地震によって誘発された地震による 大分自動車道並柳橋での強震動の推定

秦吉弥¹・矢部正明²・池田隆明³

¹正会員 博士(工学) 大阪大学 准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 博士(工学) (株)長大 副技師長 構造事業本部 耐震技術部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)

³正会員 博士(工学) 長岡技術科学大学 教授 大学院工学研究科 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

1. はじめに

2016年4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の大規模地震(以後、2016年熊本地震の前震と呼ぶ)および4月16日1時25分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の大規模地震(以後、2016年熊本地震の本震と呼ぶ)による強震動の作用を伴う橋梁の深刻な被害が数多く報告^{1),2)}されている。これらの被災経験を踏まえ、当該橋梁に作用した地震動を推定することによって被災メカニズムに関する議論が可能になるため、前震時および本震時に被災橋梁に作用した強震波形を推定することは非常に重要^{3),4)}であると言える。この点に関して本稿の第一著者を中心とする研究グループ^{5),6),7),8),9)}では、当該橋梁サイトを対象に臨時余震観測を行い、得られた記録に基づいて、2016年熊本地震の前震もしくは本震時に当該橋梁に作用した地震動を推定しているが、いずれも熊本県内の被災橋梁を対象としている。

一方で、大分県内では、2016年熊本地震の本震によって誘発された地震(以後、誘発地震と呼ぶ)¹⁰⁾によって、主桁の変形や支承の破壊などの被害^{1),2)}が大分自動車道並柳橋(図-1参照)において発生した。さらに、図-1に示すように、並柳橋の近傍では、由布岳PA周辺の切土斜面が崩壊しており、これらの被災・崩壊地点では局所的に大きな地震動が誘発地震時に作用した可能性が高い。この点に関して著者は¹¹⁾は、並柳橋と切土斜面崩壊の地点の中間付近において臨時地震観測を実施し(図-1参照)、得られた観測記録に対してスペクトルインバージョンを適用し、臨時地震観測点の位置相当におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)を評価している。

上述した背景を踏まえ本稿では、並柳橋周辺で得

表-1 由布市内で得られた誘発地震記録の一覧

	K-NET湯布院	湯布院町川上
最大加速度PGA (Gal)	725	540
最大速度PGV (cm/s)	82.9	62.6
気象庁計測震度	6.1	5.9

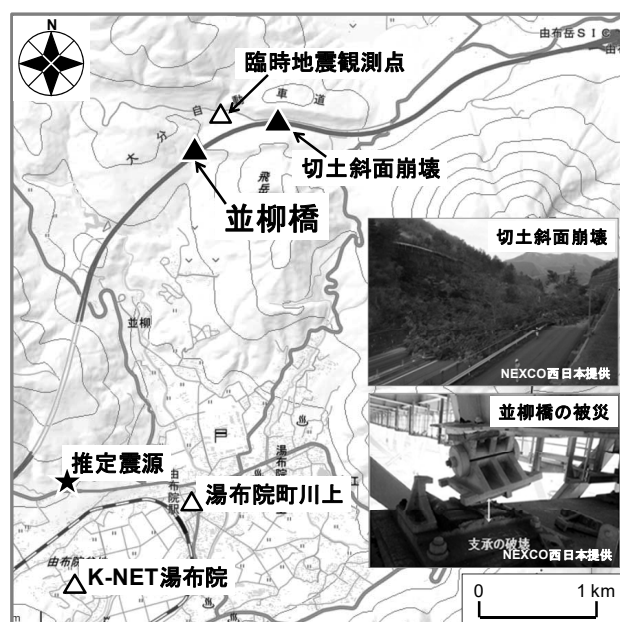


図-1 並柳橋の被災とその近傍で発生した切土法面の崩壊状況、および並柳橋周辺の既存強震観測点の分布

られた誘発地震記録と評価したサイト増幅特性に対して、サイト増幅特性置換手法^{12),13),14),15)}を適用することによって、誘発地震時に並柳橋に作用した地震動を推定した結果について報告する。

なお、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)および2016年熊本地震による被害調査・分析小委員会(委員長：池田隆明)の活動の一環として実施したものである。

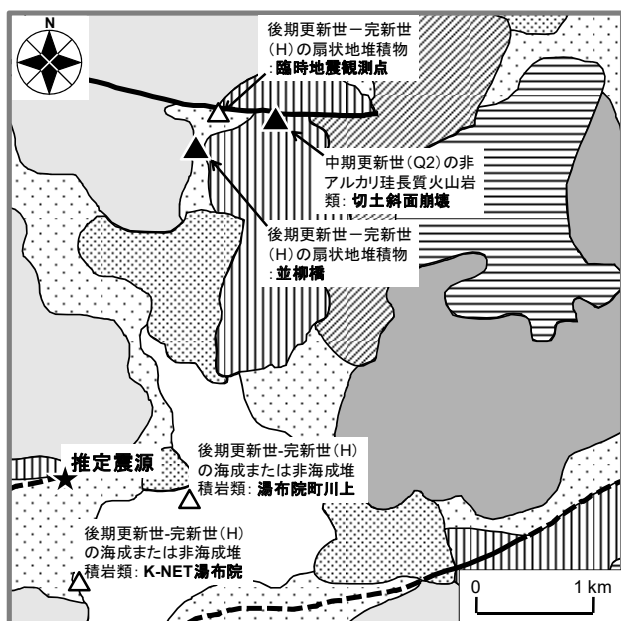


図-2 並柳橋とその周辺の地質区分(文献18)に一部加筆

2. 誘発地震記録の整理

表-1は、誘発地震時に並柳橋周辺の既存強震観測点で得られた最大加速度値 PGA 、最大速度値 PGV (ともに三成分合成)、気象庁計測震度¹⁶⁾の一覧を示す。なお、並柳橋では、誘発地震時に地震観測は実施されていない。表-1に示すとおり、K-NET湯布院と湯布院町川上は比較的近くの位置関係であるにも関わらず、観測された誘発地震による地震動の特性が類似しているとは言い難い。これは、推定震源¹⁷⁾からの距離のほかに、両観測点におけるサイト特性が大きく影響していると推察される。両観測点に対して並柳橋は、推定震源からの距離に有意な差異があるだけでなく、図-2に示すように地質区分¹⁸⁾にも差異が生じている。これらは、誘発地震時に作用した地震動の特性が並柳橋と周辺の両観測点(K-NET湯布院や湯布院町川上)では大きく異なっていた可能性を示唆するものである。

3. 常時微動H/Vスペクトルの評価

並柳橋付近における臨時地震観測地点の位置を選定するため、並柳橋付近、切土斜面崩壊地点付近、臨時地震観測の候補地点の計三地点において常時微動計測(単点計測)を実施した。写真-1および写真-2に並柳橋付近および切土斜面崩壊地点付近での常時微動計測状況をそれぞれ示す。

計測機器は、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁹⁾を共通採用した。計測機器の詳細につ



写真-1 並柳橋左岸アバット付近での常時微動計測状況



写真-2 切土法面の崩壊地点付近での常時微動計測状況

いては文献19)を参照されたい。計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動H/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。図-3に常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。ここに、常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルタを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を十区間抽出し、フーリエ振幅スペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、十区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁹⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-3に示すとおり、並柳橋付近と臨時地震観測の候補地点の比較では、ピーク周波数やスペクトル形状などの常時微動H/Vスペクトルの特徴が類似していることから、臨時地震観測の実施地点に関する適用性を確認できる。さらに、並柳橋付近と切土斜面崩壊地点付近におけるH/Vスペクトルの特性も同様に類似していることから、本稿による誘発地震にお

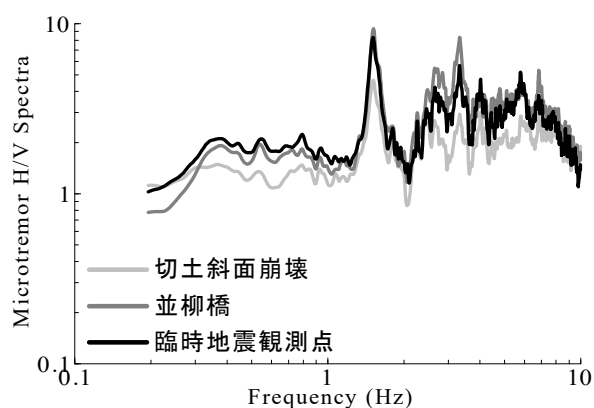


図-3 常時微動H/Vスペクトルの比較

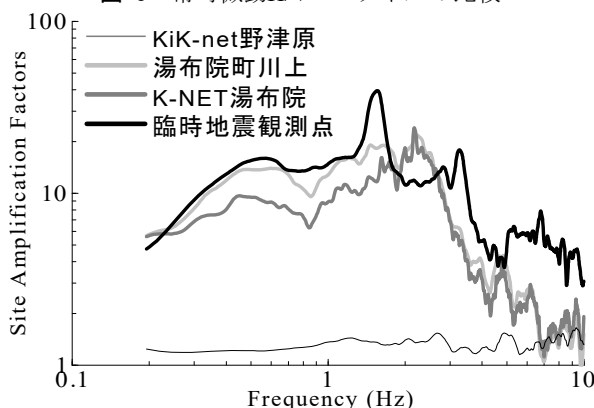


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)¹¹⁾の比較

ける並柳橋での推定地震動(後述)を、誘発地震時に切土斜面の崩壊地点に作用した地震動として工学的な援用が可能であることが示唆される。

4. 臨時地震観測に基づくサイト増幅特性

2. および3. で得られた知見を踏まえ、本研究では、並柳橋の近傍において2016年4月29日に地震計を臨時設置し、七日間の地震観測を実施した。その結果、2016年熊本地震とその誘発地震による余震記録を並柳橋の近傍(およびK-NET湯布院)において同時に得ることができた。なお、地震計は一体型微動探査兼地震計機器¹⁹⁾を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。観測方向は、N-S・E-W・U-D方向の計三成分である。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続するシステムとした。

図-4は、スペクトルインバージョンに基づく並柳橋(臨時地震観測点)、K-NET湯布院、湯布院町川上におけるサイト増幅特性(ともに地震基盤～地表)¹¹⁾を比較したものである。図-4に示すとおり、並柳橋とその周辺の既存強震観測点での比較では、サイト増幅特性に明確な差異が確認できる。具体的には、並柳橋では、1～2Hz付近(地震被災に大きな影響を及ぼすやや短周期帯域²⁰⁾を含む周波数帯域)および3

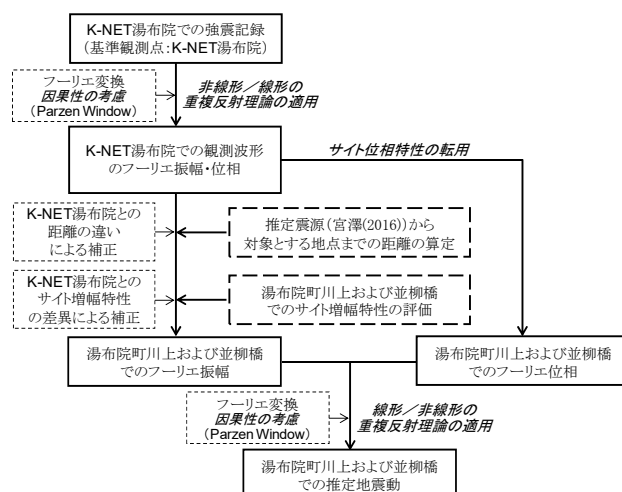


図-5 サイト増幅特性置換手法による地震動推定フロー

Hz以上の周波数帯域において明らかにサイト増幅特性が卓越していることが読み取れる。これらの知見は、並柳橋とその周辺の既存強震観測点(誘発地震記録有)では、誘発地震時に作用した地震動特性が大幅に異なっていたことを示しており、並柳橋におけるサイト特性(地盤震動特性)を十分に考慮して誘発地震時の地震動を推定する必要性が高いことをあらためて示唆するものである。

5. 地震動推定手法とその適用性

本研究では、並柳橋、および図-1に示すように並柳橋から最も近い既存強震観測点である湯布院町川上(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丸山の手法^{12),13),14),15)}に基づいて行った。図-5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K-NET湯布院(並柳橋周辺に位置するもう一つの既存強震観測点)を選定した。

次に、基準観測点(K-NET湯布院)での誘発地震記録(図-6(a),(b)および図-7(a),(b)参照)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距離の違い(推定震源¹⁷⁾から基準観測点・推定点までの距離の違い)による補正^{21),22)}を施し、さらに推定点と基準観測点のサイト増幅特性の比を乗じることにより、推定点での誘発地震時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、基準観測点での誘発地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²³⁾を行うことで、推定点における誘発地震時の地震動を推定した。

図-6(c),(d)および図-7(c),(d)に誘発地震時の加

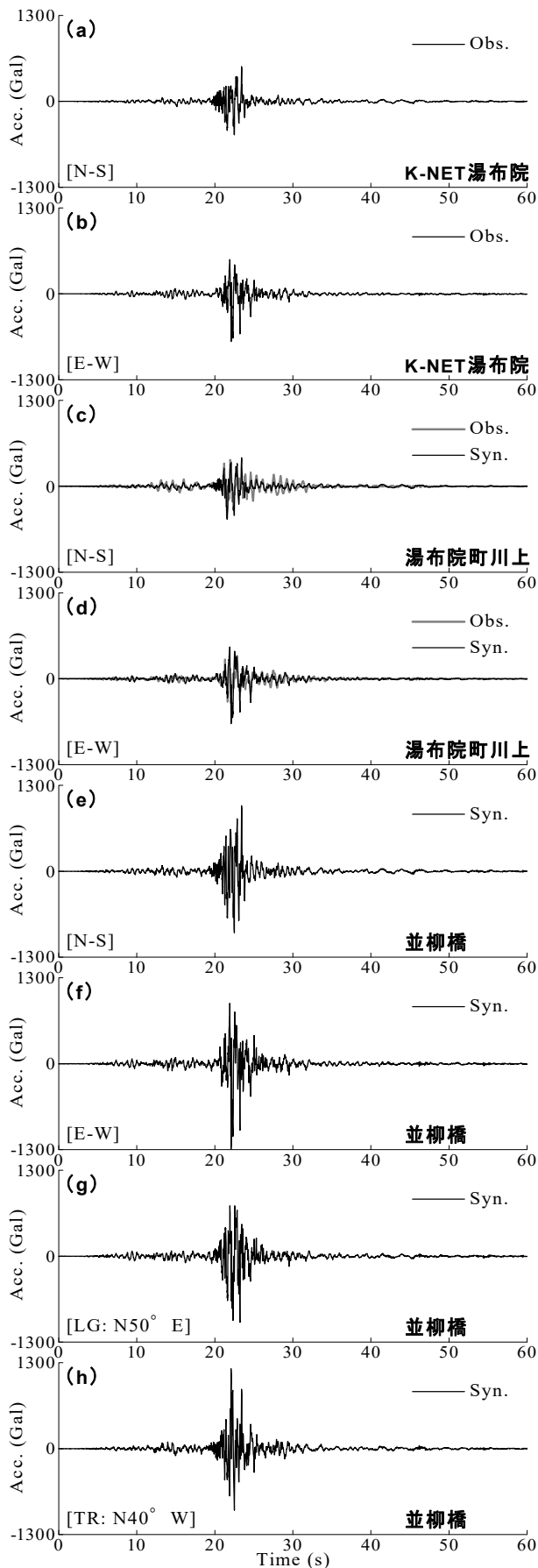


図-6 地震動推定手法の適用性の確認，および並柳橋での推定地震動（時刻歴加速度波形）

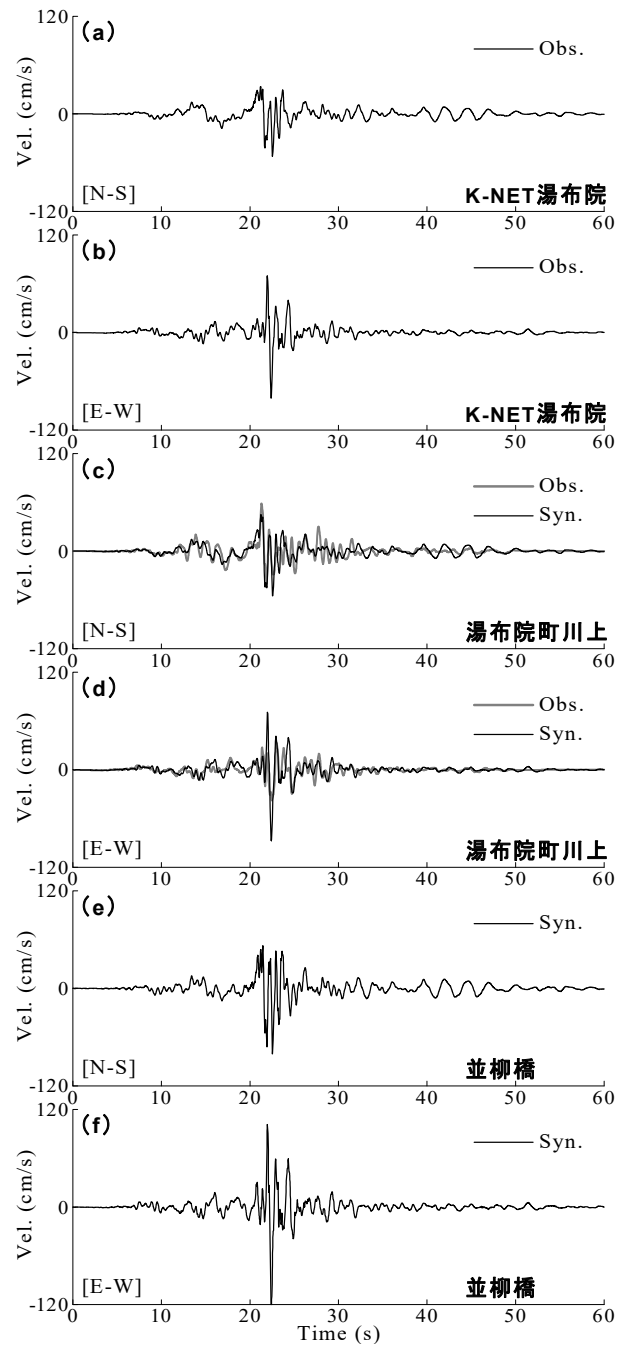


図-7 地震動推定手法の適用性の確認，および並柳橋での推定地震動（時刻歴速度波形）

速度波形および速度波形について，観測波と推定波（強震動推定結果）で比較したものを示す．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．図-6(c),(d)および図-7(c),(d)に示すとおり，観測波と推定波が比較的良い一致を示している．図-8(a),(b)は，絶対加速度応答スペクトル（全て減衰定数5%）を観測波と推定波で比較したものである．図-8(a),(b)に示すとおり，若干過大に評価する傾向があるものの，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．

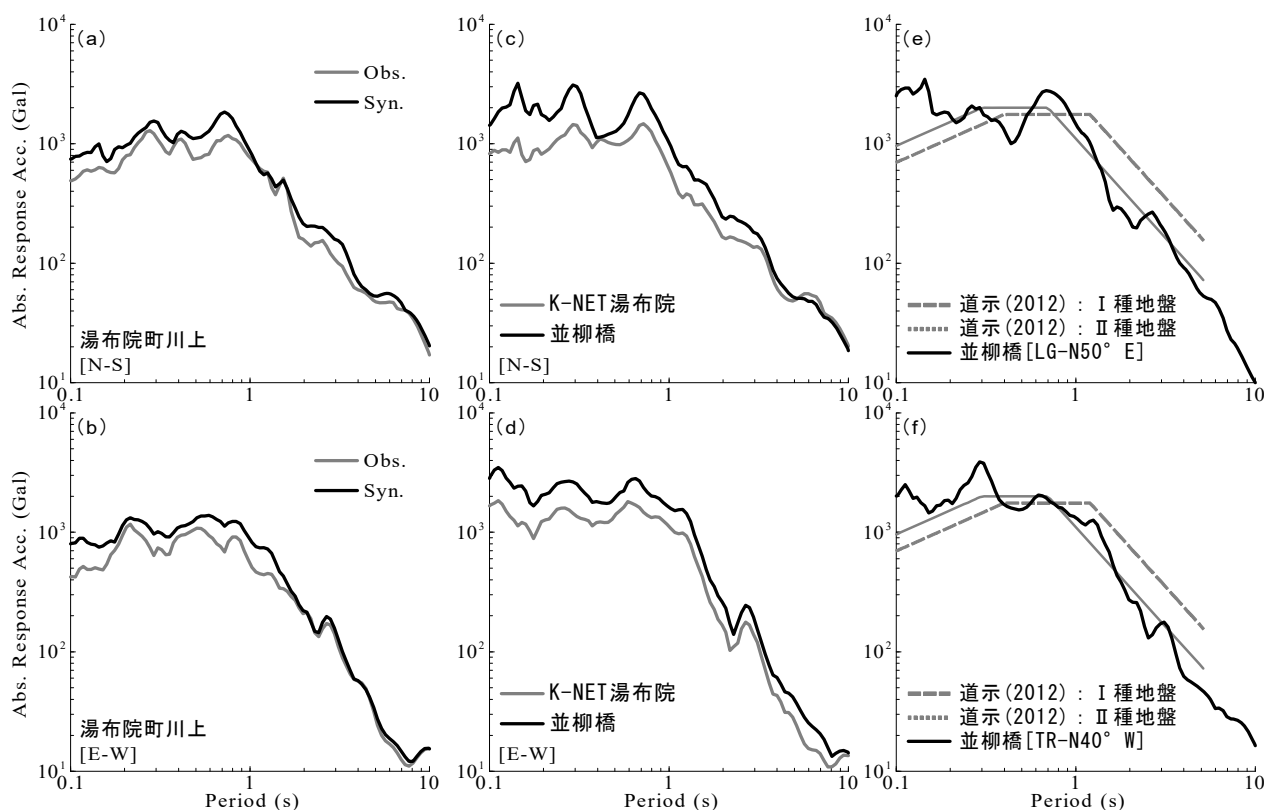


図-8 地震動推定手法の適用性の確認，および並柳橋での推定地震動（絶対加速度応答スペクトル）

すなわちこれは，上述した並柳橋（臨時地震観測点）におけるサイト増幅特性を入力として，サイト増幅特性置換手法を適用すれば，誘発地震時に並柳橋に作用した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。

6. 並柳橋における地震動の評価

図-6(e),(f)および図-7(e),(f)は，誘発地震時における並柳橋での推定加速度波形および推定速度波形である。図-8(c),(d)には，図-6(e),(f)で示した並柳橋における推定地震動を入力波とした絶対加速度応答スペクトル（減衰定数5%）を示す。図-6(a),(b),(c),(d)と図-6(e),(f)による加速度波形の比較，図-7(a),(b),(c),(d)と図-7(e),(f)による速度波形の比較，および図-8(c),(d)と図-8(e),(f)による応答スペクトルの比較によれば，並柳橋ではK-NET湯布院および湯布院町川上よりも明らかに大きな地震動が誘発地震時に作用したことが読み取れる。さらに，並柳橋の推定地震動による気象庁計測震度¹⁶⁾の値は6.5と算定され，周辺で得られた観測記録（表-1参照）を大きく上回る推定結果が得られた。

図-6(g),(h)は，並柳橋の推定地震動（図-6(e),(f)参照）を橋軸方向と橋軸直交方向に座標変換したものであり，その絶対加速度応答スペクトル（減衰定

数5%）を図-8(e),(f)に示す。図-8(e),(f)には，道路橋示方書(2012)²⁴⁾によるレベル2・タイプ2地震動の標準加速度応答スペクトル（I種およびII種地盤）についても同時に示している。図-8(e),(f)に示すとおり，並柳橋では，設計標準スペクトルと同等もしくは周期帯（やや短周期帯域²⁰⁾を含む）によっては上回る地震加速度応答を示していることが読み取れる。

7. まとめ

本稿では，2016年熊本地震の本震による誘発地震時に並柳橋に作用した地震動を，現地での臨時地震観測により得られた記録に基づくサイト増幅特性と，サイト増幅特性置換手法の組合せによって推定した。その結果，周辺のK-NET湯布院などよりも明らかに大きく，道路橋示方書(2012)による設計標準スペクトルと同等もしくはそれ以上の地震動が誘発地震時に並柳橋に作用したことが明らかとなった。今後は，本稿で推定した地震動を入力波とした並柳橋の動的解析などを行っていきたくと考えている。

謝辞：（国研）防災科学技術研究所K-NETおよび大分県による地震観測波形データを使用しました。臨時地震観測の際には，現地住民の皆様などにご支援いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松田泰治, 山尾敏孝, 葛西昭: 平成28年熊本地震による道路橋の被害, 日本地震工学会誌, No.29, pp.15-17, 2017.
- 2) 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.
- 3) 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としての Evidence-Based Designの提案とその実現に向けた課題, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 4) 秦吉弥, 野津厚: 被害地震の揺れに迫る一地震波形デジタルデータCD付き一, 大阪大学出版会, 2016.
- 5) 秦吉弥, 矢部正明, 栢木正喜, 高橋良和, 葛西昭, 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九州自動車道沿い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.251-264, 2017.
- 6) 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.
- 7) Hata, Y., Yabe, M., Kasai, A., Matsuzaki, H., Takahashi, Y. and Akiyama, M.: Ground motion estimation for the elevated bridges of the Kyushu Shinkansen derailment caused by the foreshock of the 2016 Kumamoto earthquake based on the site-effect substitution method, *Earth, Planets and Space*, Springer, Vol.68: 199, 2016.
- 8) 秦吉弥, 葛西昭, 矢部正明, 山内政輝: 臨時余震観測に基づく2016年熊本地震によって被災した安見下鶴橋および二俣橋での強震動の評価, 第2回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.47-52, 2017.
- 9) 秦吉弥, 矢部正明, 葛西昭, 高橋良和, 松崎裕, 秋山充良: 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, 日本地震工学会論文集, Vol.17, No.2, 2017. [掲載決定]
- 10) 例えば, 鈴木亘: 熊本地震の強震動と震源過程, 平成28年(2016年)熊本地震報告会〜防災科学技術研究所最初の3ヶ月間の取り組み〜講演要旨集, 2016.
- 11) 秦吉弥, 門田浩一, 矢部正明, 池田隆明: スペクトルインバージョンに基づくサイト増幅特性に関する評価—2016年熊本地震の誘発地震による大分県内の被災地を例として—, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10, 2017. [掲載決定]
- 12) Maruyama, Y., Yamazaki, F. and Hamada, T.: Microtremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways, *Proc. of the 6th international conference on seismic zonation*, pp.1361-1366, 2000.
- 13) 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.
- 14) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之: 常時微動H/Vスペクトルに基づく2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市地下鉄高架橋被災地点での地震動の評価, 第16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, pp.117-122, 2013.
- 15) 秦吉弥, 常田賢一, 嶋川純平: 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波板海岸駅〜吉里吉里駅付近での地震動の評価, 第17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.155-160, 2014.
- 16) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 17) Miyazawa, M.: An investigation into the remote triggering of the Oita earthquake by the 2016 M_w 7.0 Kumamoto earthquake using full wavefield simulation, *Earth, Planets Space*, Springer, Vol.68: 205, 2016.
- 18) (国研)産業技術総合研究所: 地質図表示システム(地質図Navi), 地質調査総合センターホームページ, 2013. (最終閲覧日: 2017年5月23日)
- 19) 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, 第115回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 20) 川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) (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.