

臨時地震観測に基づくサイト増幅特性置換手法を用いた 2004年新潟県中越地震における JR飯山線魚野川橋梁での地震動の評価

秦吉弥¹・古川愛子²

¹正会員 博士(工学) 大阪大学 助教 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) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

1. はじめに

無筋コンクリート橋脚は、1914年に鉄道において初めて鉄筋コンクリートの設計施工基準が規定され、鉄筋コンクリート橋脚が全国に普及し始めるまで数多く建造された。現在でも、我が国には無筋コンクリート橋脚を有する在来鉄道が多数存在し、近年発生した大規模地震の強震動の作用による被害¹⁾が発生している。典型的な被害形態は、打ち継ぎ目における水平ずれと、打ち継ぎ目下側端部のコンクリートの剥離である。切迫度が高まっている南海トラフ巨大地震の発生やその前後に頻発が懸念されている内陸地殻内地震の発生に備えたインフラ施設の耐震安全性の確保は喫緊の課題²⁾である。

上述した背景を踏まえ、古川ほか³⁾は、2004年新潟県中越地震の強震動の作用によって被災したJR飯山線魚野川橋梁14P橋脚(以後、魚野川橋梁と呼ぶ)を対象に、改良版個別要素法⁴⁾による地震応答解析に基づいた被災メカニズムの分析を試みている。その際、入力地震動としては、魚野川橋梁近傍の既存強震観測点の一つである新潟県北魚沼郡川口町役場(現在の長岡市役所川口支所：図-1参照)で得られた本震観測記録を援用している。近接した二地点間では地盤震動特性の違いに主に起因して、得られる観測地震動の特徴にも有意な差異が確認できる場合がある⁵⁾ことから、本稿では、2004年新潟県中越地震時に魚野川橋梁に作用した強震波形について検討を行った事例について紹介する。

具体的には、まず、魚野川橋梁の極近傍において臨時地震観測を行い、得られた観測記録に基づいてサイト増幅特性を評価した。次に、川口支所での本震観測記録に対して、サイト増幅特性置換手法^{6,7)}

を適用し、越後川口ICならびに新川口変電所での本震観測記録の再現を行い、地震動推定手法の適用性を確認した。最後に、サイト増幅特性置換手法を用いて魚野川橋梁における本震時の地震動を推定した。

2. 地盤震動特性の評価

(1) 本震観測記録の整理

図-2に魚野川橋梁周辺の既存強震観測点で得られた本震記録(気象庁計測震度⁸⁾)の分布を示す。図-2に示すとおり、本震による震源(震央)からの一様な距離減衰とはなっていないこと、比較的近傍で得られた本震観測記録であるにも関わらず気象庁計測震度の値が観測点ごとに異なっており、サイト特性の影響が示唆される。よって、魚野川橋梁と川口支所(図-1参照)においても本震時に作用した強震動の特性が異なっている可能性がある。



図-1 JR飯山線魚野川橋梁被災地点周辺の観測点の分布

(2) 臨時地震観測の実施

本研究では、魚野川橋梁の極近傍(図-1参照)において地震計を臨時設置し、地震観測を実施した。地震計は、加速度計(一体型微動探査兼地震計機器⁹⁾)を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。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。観測期間¹⁰⁾は、2011年3月24日～4月27日までの約一か月間である。その結果、17地震による記録を臨時地震観測点とK-NET小出において同時に得ることができた。

(3) サイト増幅特性の評価

図-3および図-4は、臨時地震観測点(魚野川橋梁)におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)とその周辺の既存強震観測点におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)¹¹⁾を水平方向および鉛直方向について比較したものである。ここに、魚野川橋梁におけるサイト増幅特性(水平方向)は、臨時地震観測点とK-NET小出で同時に得られた計17つの地震記録を対象に、両地点の距離の違いに関する補正^{12),13)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(臨時地震観測点/K-NET小出)を計算し、この比率をK-NET小出における既存のサイト増幅特性¹⁴⁾に掛け合わせることで地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を算定¹⁵⁾した。一方で、魚野川橋梁におけるサイト増幅特性(鉛直方向)は、臨時地震観測点で得られた計17つの地震記録のフーリエスペクトル比(鉛直/水平)をそれぞれ計算し、このフーリエスペクトル比の平均を上述した堀之内庁舎のサイト増幅特性(水平方向)に掛け合わせることで算定¹⁶⁾した。

図-3および図-4に示すように、水平方向および鉛直方向ともに魚野川橋梁と川口支所では、サイト増幅特性が比較的類似していることが読み取れる。しかしながら、水平方向のサイト増幅特性(図-3参照)において、魚野川橋梁では2.5Hz付近に明瞭なピーク周波数が確認でき、川口支所との差異がより顕著に表れており、川口支所で得られた本震観測記録を、本震時に魚野川橋梁に作用した地震動とみなすのは必ずしも適切ではないことが示唆される。

4. 地震動推定手法

本研究では、サイト増幅特性置換手法^{6),7)}を用いて、魚野川橋梁、越後川口IC、新川口変電所(以後、推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。

図-5に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、基準点として、魚野川橋梁に最も近い既存強震

観測点でかつ本震記録が得られている川口支所(図-1および図-2参照)を選定した。

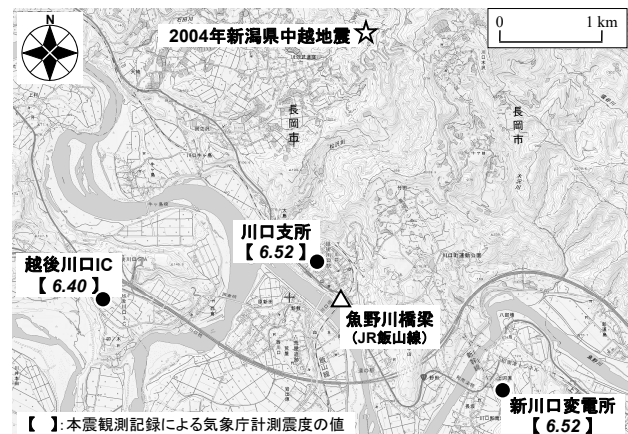


図-2 魚野川橋梁周辺の観測点で得られた計測震度分布

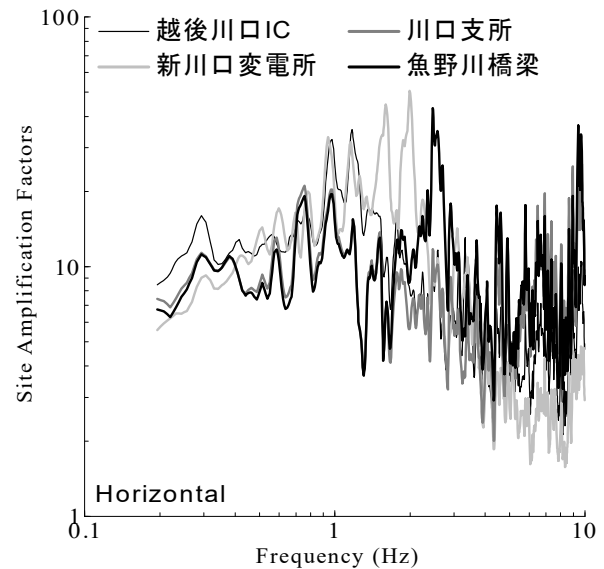


図-3 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較(水平方向)

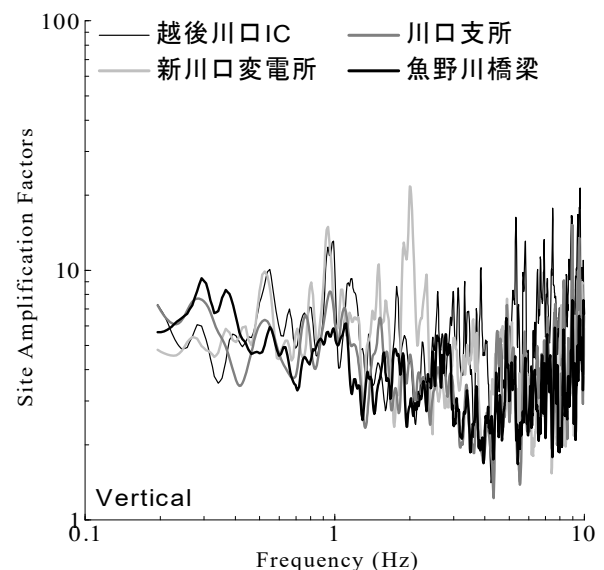


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較(鉛直方向)

次に、基準点で得られた本震観測記録に対して非線形／線形の重複反射理論¹⁷⁾を適用し、工学的基盤～地表の地盤非線形の影響が含まれていない地表面相当の地震動を評価した。そして、この地表面地震動のフーリエ振幅に対して、基準点と推定点の距離の違いによる補正^{12),13)}を施し、さらに推定点～基準点間におけるサイト増幅特性の比(推定点／基準点)を乗じることにより、推定点におけるフーリエ振幅を計算した。その際、水平2成分ならびに鉛直成分それぞれについて同様の計算を行った。

最後に、得られた推定点におけるフーリエ振幅と基準点で得られた本震観測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¹⁸⁾を行うことで、推定点における本震時の地震動を計算した。なお、この地震動に対して線形／非線形の重複反射理論¹⁷⁾を適用し、工学的基盤～地表の地盤非線形の影響を考慮した推定点での地震動を評価した。

なお、サイト増幅・位相特性置換手法¹⁹⁾ではフーリエ位相として、推定点で得られた中小地震観測記録の中から適切なものを使用している。しかしながら、上述した臨時地震観測の期間内において本震の震源域で発生した中小地震による記録を得ることができなかったため、サイト増幅特性置換手法^{6),7)}の概念に基づき基準点で得られた本震観測記録のフーリエ位相を援用した。

5. 地震動推定結果

図-6は、越後川口ICおよび新川口変電所における本震観測記録の速度波形(観測波)と、サイト増幅特

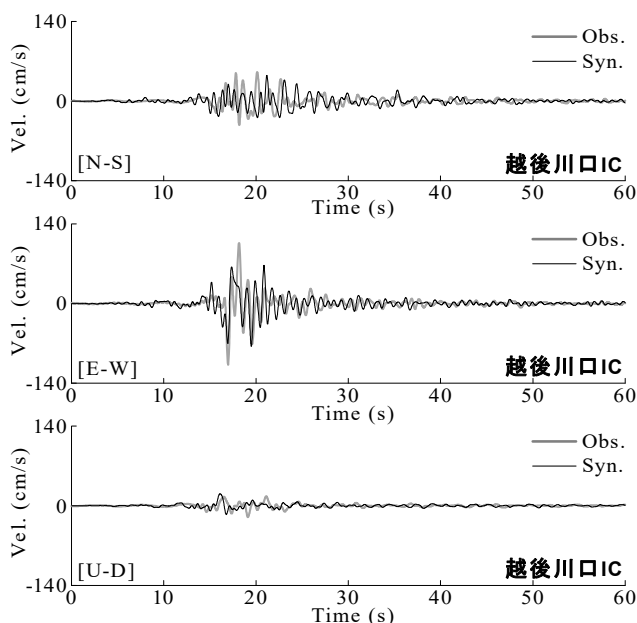


図-6 地震動推定手法の適用性確認(速度波形(0.2~2Hz)の比較)

性置換手法に基づく速度波形(推定波)を水平2成分ならびに鉛直成分について比較したものである。ここに、速度波形(観測波および推定波)については、やや短周期帯域^{20),21)}を含む0.2~2Hzのバンド・パスフィルタを施している。図-6に示すとおり、観測波と推定波には比較的良い一致が確認できる。

図-7は、越後川口ICおよび新川口変電所での観測波と推定波(ともにフィルタ処理なしの加速度波形)による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を水平2成分ならびに鉛直成分について比較したものである。図-7に示すとおり、観測波と推定波による応答スペクトルには比較的良い一致が確認できる。

図-6および図-7により得られた知見を踏まえれば、川口支所で得られた本震観測記録を基準として、サイト増幅特性置換手法を適用すれば、本震時における魚野川橋梁での強震波形を一定の精度で推定でき

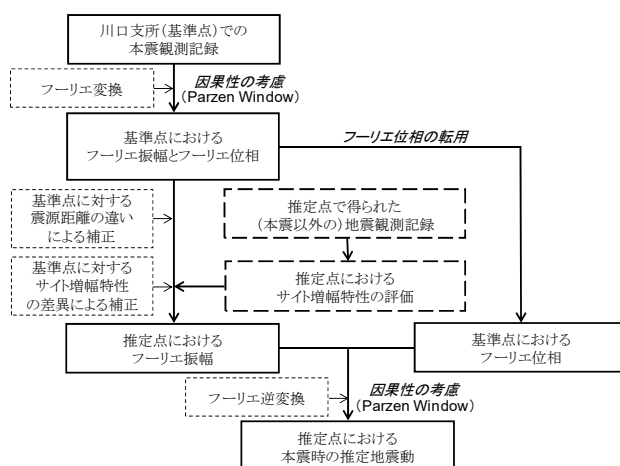
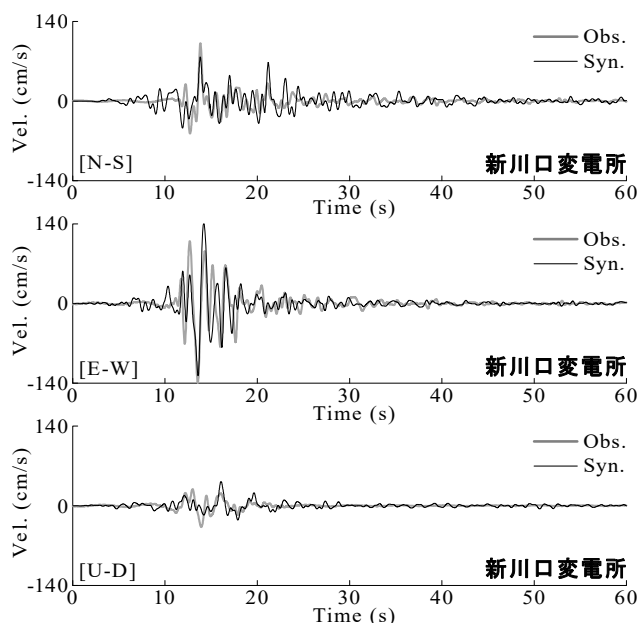


図-5 サイト増幅特性置換手法による地震動推定フロー



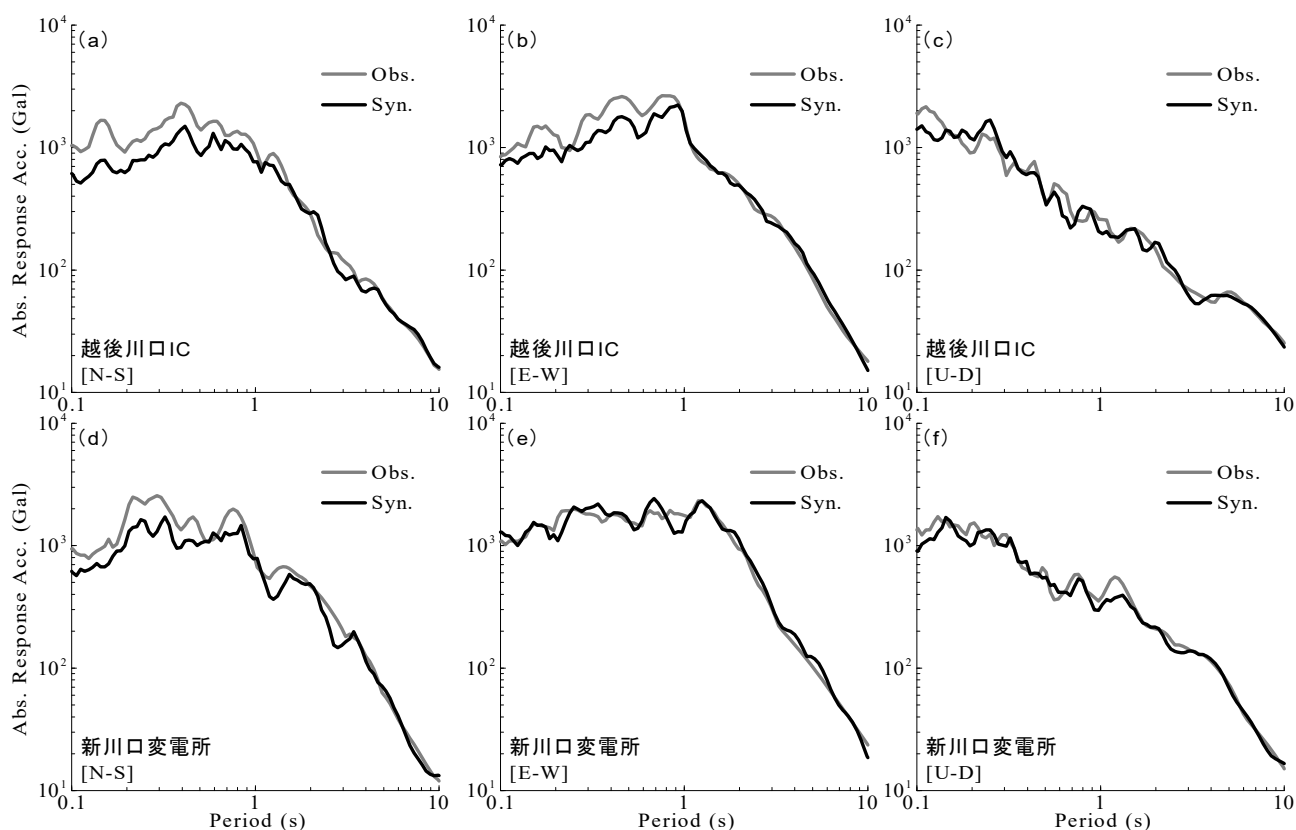


図-7 地震動推定手法の適用性確認（絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較）

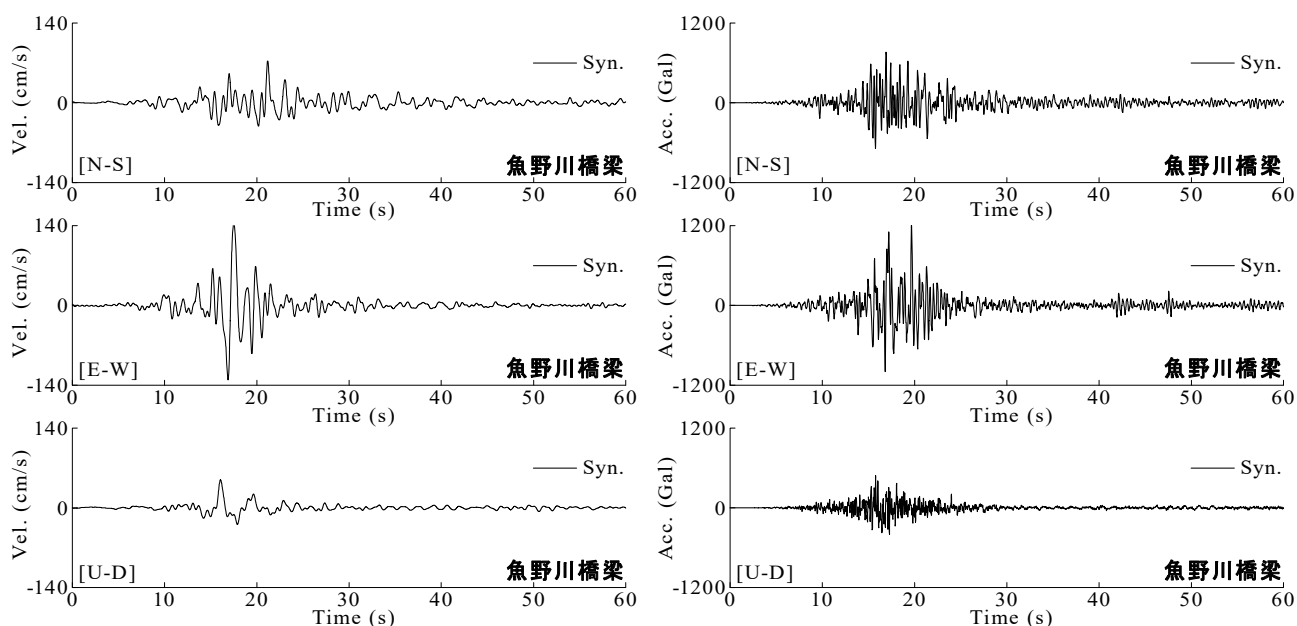


図-8 2004年新潟県中越地震における魚野川橋梁での推定地震動（左：速度波形(0.2～2Hz)・右：加速度波形)

る可能性が高いことを示唆するものである。

図-8は、魚野川橋梁における本震時の推定地震動（速度波形(0.2～2Hz)および加速度波形(フィルタ処理なし))である。また、図-9には、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%)を示す。さらに、図-9には、本震前(1999年10月)および本震後(2012年9月)における鉄道構造物等

設計標準・同解説^{22),23)}に基づく設計標準スペクトル(ともに、内陸型地震を対象としたスペクトルII)についても同時に示している。

図-8に示すとおり、魚野川橋梁における推定地震動は、越後川口ICおよび新川口変電所での観測地震動(図-7参照)に対して、速度振幅が比較的大きくなっているのが読み取れる。また、図-9に示すとおり、

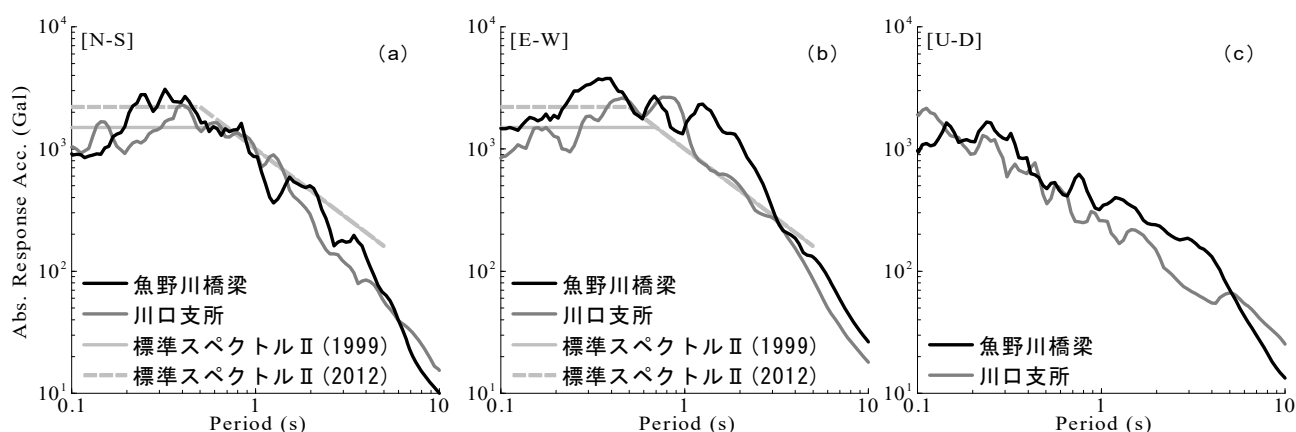


図-9 2004年新潟県中越地震における魚野川橋梁での推定地震動（絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)）

魚野川橋梁における推定地震動の応答スペクトルは本震前の設計標準スペクトル(1999)²²⁾を0.2～0.7s(N-S成分)もしくは0.1～3s(E-W成分)付近の周期帯でそれぞれ上回っている。一方で、図-9に示すとおり、本震後の設計標準スペクトル²³⁾に対して、0.2～0.5s(N-S成分)もしくは0.2～3s(E-W成分)付近の周期帯でそれぞれ上回っている。

6. まとめ

本研究では、サイト増幅特性置換手法を用いて、2004年新潟県中越地震における魚野川橋梁での強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 魚野川橋梁と川口支所(近傍の既存強震観測点)におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較によれば、2.5Hz付近のピーク周波数の有無などによる差異が確認できる。
- 2) サイト増幅特性置換手法を利用すれば、2004年新潟県中越地震における魚野川橋梁周辺(越後川口ICおよび新川口変電所)で得られた観測地震動を一定の精度で再現することが可能である。
- 3) 魚野川橋梁における推定地震動は、0.2～0.7s(N-S成分)もしくは0.1～3s(E-W成分)付近の周期帯において、鉄道構造物等設計標準・同解説(1999)の設計標準スペクトル(スペクトルⅡ)をそれぞれ上回る加速度応答を示す。
- 4) 魚野川橋梁における推定地震動は、0.2～0.5s(N-S成分)もしくは0.2～3s(E-W成分)付近の周期帯において、鉄道構造物等設計標準・同解説(2012)の設計標準スペクトル(スペクトルⅡ)をそれぞれ上回る加速度応答を示す。

今後は、本稿で推定した魚野川橋梁における本震時の強震動を入力波とした改良版個別要素法による地震応答解析などを実施していきたいと考えている。

謝辞：本研究では、(国研)防災科学技術研究所K-NET、新潟県、NEXCO東日本、JR東日本による地震観測波形データをそれぞれ利用させていただきました。臨時地震観測の実施にあたっては、地域住民の皆様等にご協力・ご支援いただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、九州工業大学災害調査団：平成16年新潟県中越地震-第二次被害調査速報版-(平成16年11月8日)、九州工業大学工学部建設社会工学科維持管理研究室(幸左研究室)ホームページ、2004. www.civil.kyutech.ac.jp/pub/kosa/ijikenHP/tyuuetujisin20041025.pdf (last accessed: 2016/06/19)
- 2) 例えば、南海トラフ地震に関する被害予測と防災対策研究委員会：平成25年度・平成26年度報告、(公社)地盤工学会関西支部ホームページ、2015. <http://www.jgskb.jp/comm/kenkyuuiinnkai/> (last accessed: 2016/06/19)
- 3) 例えば、水上輝、古川愛子、清野純史：鉄道無筋コンクリート橋脚の耐震対策に関する基礎的研究、土木学会第70回年次学術講演会講演概要集、I-85, pp. 169-170, 2015.
- 4) Furukawa, A., Kiyono, J. and Toki, K.: Proposal of a numerical simulation method for elastic, failure and collapse behaviors of structures and its application to seismic response analysis of masonry walls, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, pp.51-68, 2011.
- 5) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
- 6) Maruyama, Y., Yamazaki, F. and Hamada, T.: Micro-tremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways, *Proc. of the 6th international conference on seismic zonation*, Palm Springs, USA, pp.1361-

- 1366, 2000.
- 7) 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.
- 8) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 9) 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.
- 10) 秦吉弥, 酒井久和, 一井康二, 野津厚, 丸山喜久: サイト特性置換手法に基づく2007年新潟県中越沖地震における青海川地すべり地での地震動の評価, 土木学会論文集A1, Vol.68, No.2, pp.265-270, 2012.
- 11) 秦吉弥, 一井康二, 丸山喜久, 福島康宏, 酒井久和, 中村晋: 位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用—2004年新潟県中越地震における検討—, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 12) 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.
- 13) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 14) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 15) (公社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 16) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に—, 土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 17) 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, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No.4, pp.195-214, 2016.
- 18) 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.
- 19) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp. 688-700, 2011.
- 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) 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優位性の評価—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, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 22) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計, 丸善株式会社, 467p., 1999.
- 23) (公財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計, 丸善出版, 418p., 2012.