

サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震 における新那珂川大橋および旭高架橋での地震動の評価

秦吉弥¹・高橋良和²・後藤浩之³・野津厚⁴

¹正会員 工博 日本工営株式会社 中央研究所 主任研究員（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

²正会員 工博 京都大学 准教授 防災研究所地震災害研究部門（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

³正会員 工博 京都大学 助教 防災研究所地震災害研究部門（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

⁴正会員 工博（独）港湾空港技術研究所 チームリーダー（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)では、津波だけでなく地震動による橋梁の被災が数多く報告されている¹⁾。特に、仙台東部道路東部高架橋、仙台北部道路利府高架橋、東水戸道路新那珂川大橋、国道6号線日立バイパス旭高架橋では、ゴム系支承の損傷を伴う地震動による深刻な被害が発生している²⁾。

この経験を踏まえた今後の橋梁の耐震性評価のためにも、被災地点での地震動を推定することは非常に重要³⁾である。そこで本研究では、サイト特性置換手法⁴⁾を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震における新那珂川大橋および旭高架橋（以後、対象地点と呼ぶ）での地震動を推定した。具体的には、まず、対象地点の極近傍での余震観測結果および常時微動計測結果などに基づいて、対象地点におけるサイト特性を評価した。次に、サイト特性置換手法を用いて対象地点周辺の既存強震観測点での本震記録の再現解析を行い、地震動推定手法の適用性を確認した。最後に、サイト特性置換手法を用いて対象地点での地震動を推定した。

なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会(委員長：幸左賢二 九州工業大学教授)が実施している委員会活動の一環として実施したものである。また、東部高架橋および利府高架橋での本震時における地震動の推定に関しては別稿⁵⁾を参照されたい。

2. 強震観測記録の整理

図-1および図-2に対象地点周辺の既存強震観測点での最大速度値PGV(3成分合成)および計測震度の分布を示す。被災地点では、本震時に強震観測が実

施されていない。図-1および図-2に示すとおり、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地震動の特性が大きく異なっている場合がある。これは、各強震観測点でのサイト特性が影響しているためと考えられ、対象地点とその周辺の観測点においても地震動の特性が異なっている可能性がある。

3. 地盤震動特性の評価

(1) 常時微動計測と余震観測

余震観測の実施に先立ち、対象地点周辺における地盤ボーリングデータ利用の可能性および地震計設置位置の妥当性などを判断するため、図-3および図-4に示す地点において常時微動計測を実施した。計測方法および常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法などは、既往の方法⁶⁾を採用した。

図-5および図-6に各計測地点での常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。図-5に示すとおり、新那珂川大橋サイトでは、左岸側ならびに右岸側でのH/Vスペクトルの特性が非常に類似している。また、3計測点でのN値の分布特性についても類似しており、N値換算⁷⁾に基づく表層地盤(工学的基盤深度58m)の推定固有周波数(0.8 Hz：III種地盤)と常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数が概ね一致している。一方で、図-6に示すとおり、旭高架橋サイトでは、被災地点とその近傍のボーリング地点ではH/Vスペクトルの特性が類似しているものの、N値換算⁷⁾に基づく表層地盤(工学的基盤深度10m)の固有周波数(6.7Hz：I種地盤)と常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数(0.7Hz)の間には大きな乖離が生じている。さらに、K-NET日立と被災地点での比較では、H/Vスペクトルの形状やピーク周波数に非常に大きな差異が確認でき、旭高架橋サイト周辺においてサイト

特性が急変していることを示唆している。これは、図-7に示す旭高架橋サイト周辺の重力異常図⁸⁾にも顕著に表れており、重力値が太平洋側に向かって急激に低下しているため、深部地下構造が旭高架橋サイト周辺の地盤震動特性に大きな影響を及ぼしているものと推察される。

そこで、本研究では、対象地点の極近傍(図-3および図-4参照)において2012年3月25日に地震計を設置し、4月14日までの26日間の余震観測を実施した。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。観測方向は、橋軸直角方向、橋軸方向、鉛直方向の計3成分である。トリガー加速度レベルは設定せず、



図-1 新那珂川大橋周辺の強震観測点の分布

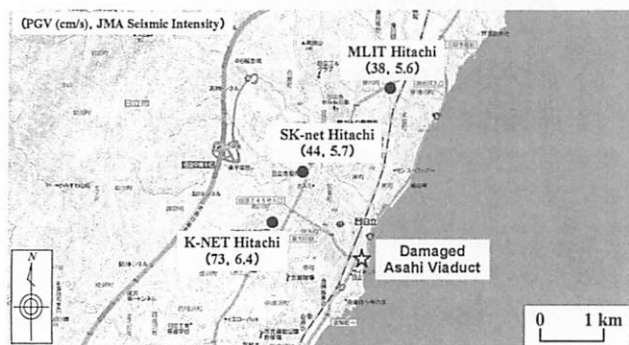


図-2 旭高架橋周辺の強震観測点の分布

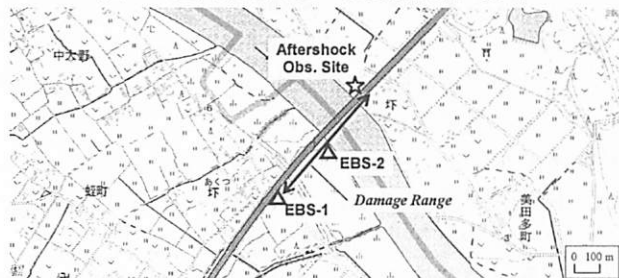


図-3 新那珂川大橋周辺でのボーリング地点と微動計測点



図-4 旭高架橋周辺でのボーリング地点と微動計測点

常時観測を継続するシステムとした。

(2) 線形時のサイト増幅特性

図-8および図-9に対象地点(余震観測地点)におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)と、その周辺の

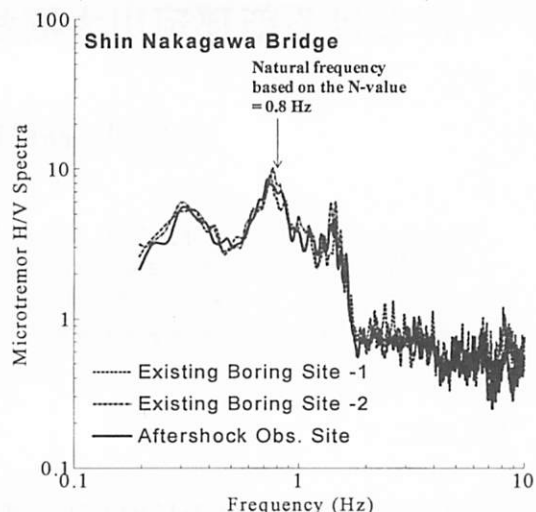


図-5 常時微動H/Vスペクトルの比較[新那珂川大橋]

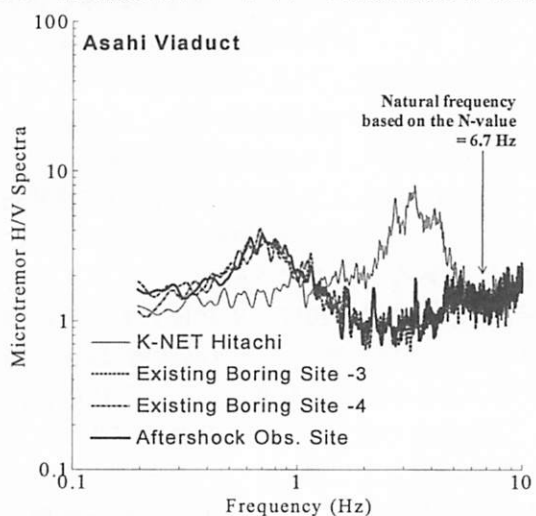


図-6 常時微動H/Vスペクトルの比較[旭高架橋]

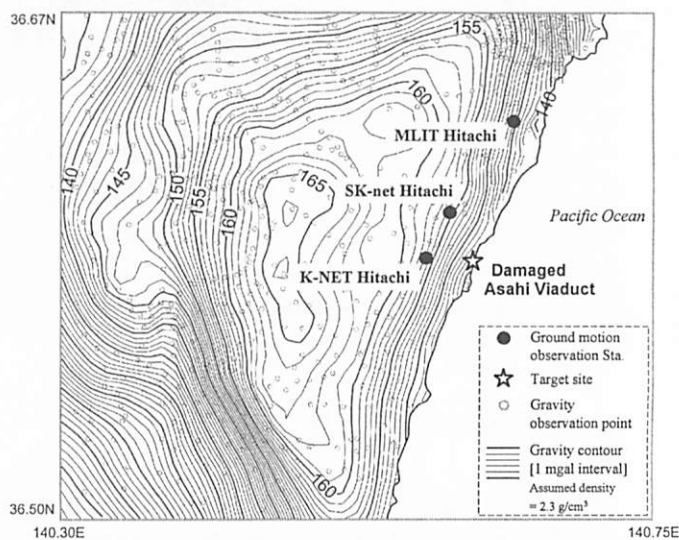


図-7 旭高架橋周辺の重力分布図(ブーグ異常図)

【既往の重力図⁸⁾に一部加筆】

強震観測点におけるサイト増幅特性¹⁰⁾(地震基盤～地表)を示す。対象地点におけるサイト増幅特性は、

まず、対象地点と標準観測点(K-NET那珂湊もしくはK-NET日立)で同時に得られた中小地震観測記録

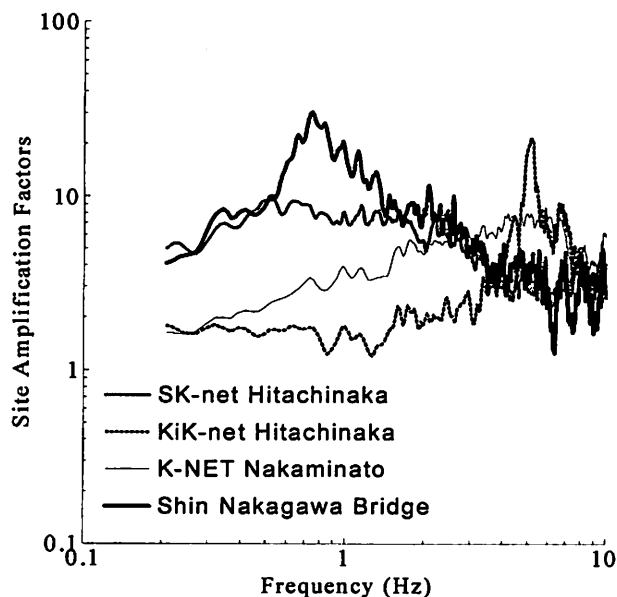


図-8 サイト増幅特性の比較[新那珂川大橋]

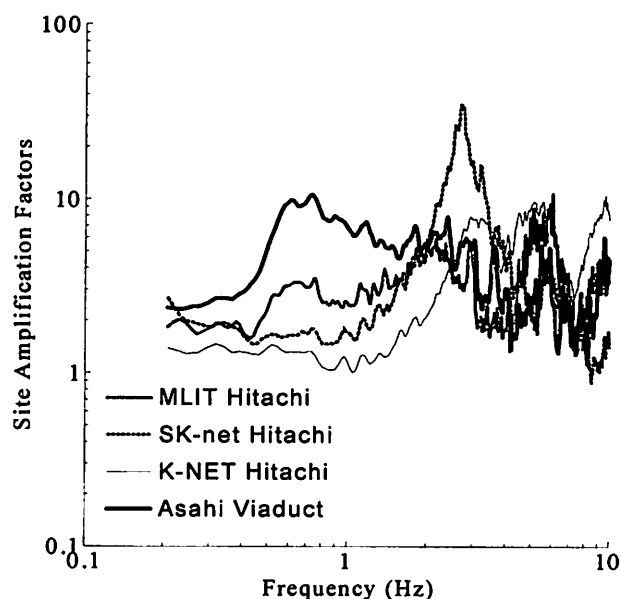


図-9 サイト増幅特性の比較[旭高架橋]

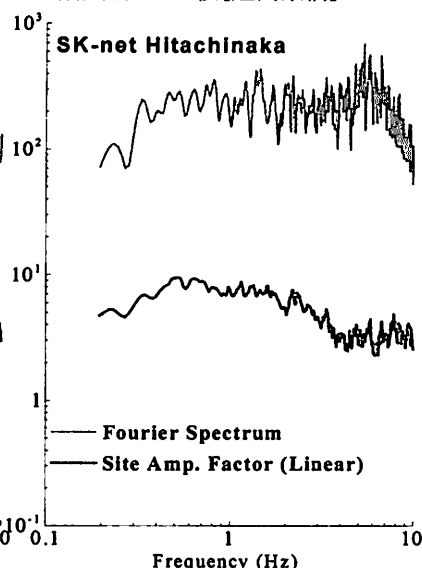
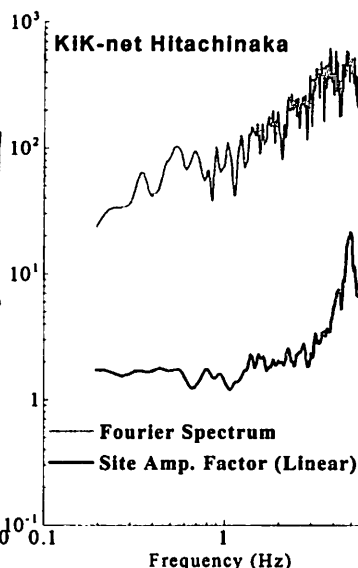
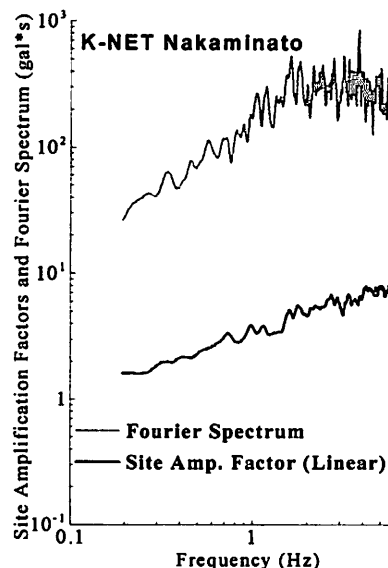


図-10 本震観測地震動のフーリエスペクトルに対するサイト増幅特性の比較[新那珂川大橋]

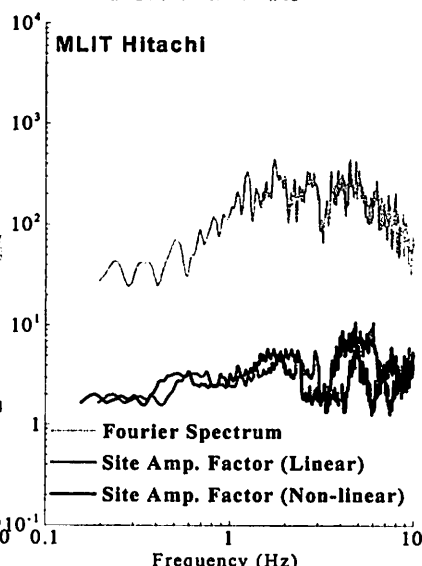
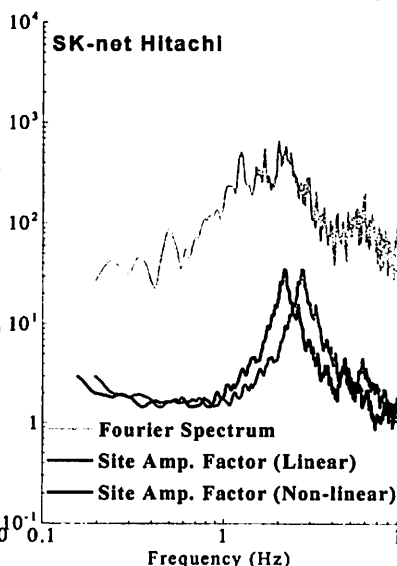
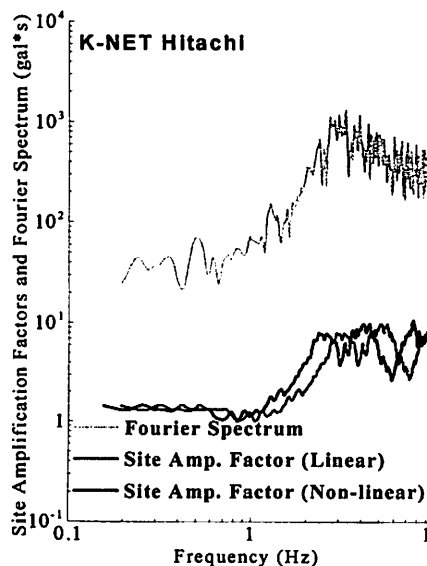


図-11 本震観測地震動のフーリエスペクトルに対するサイト増幅特性の比較(多重非線形効果の影響)[旭高架橋]

を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{11),12)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(対象地点/標準観測点)を計算し、この比率を標準観測点における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾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評価した。SK-netひたちなか、SK-net日立、MLIT日立のサイト増幅特性についても、本震前の中小地震観測記録に基づき同様の方法を用いて評価した。

図-8および図-9に示すとおり、対象地点とその周辺の強震観測点では、サイト増幅特性に明確な差異が確認できる。このことは、対象地点と周辺の既存強震観測点では本震時の地震動が大幅に異なっていたことを示しており、対象地点におけるサイト特性を考慮して本震時の地震動を推定する必要性が高いことを示唆している。

(3) 本震時のサイト増幅特性

図-10および図-11は、対象地点周辺の強震観測点における本震観測記録のフーリエスペクトル(水平2成分合成)と線形時のサイト増幅特性(図-8および図-9参照)を比較したものである。図-10に示すように、新那珂川大橋サイト周辺では、観測地震動とサイト増幅特性(線形)のピーク周波数が良い一致を示している。一方で、図-11に示すように、旭高架橋サイト周辺では、観測地震動のピーク周波数は、サイト増幅特性(線形)のピーク周波数と比較して、いずれの観測点においても低周波側に移動しており、多重非線形効果¹³⁾の影響が示唆される。なお、K-NET日立、SK-net日立、MLIT日立、およびKiK-net十王における本震観測記録(地表)に対して非線形/線形の重複反射理論を適用したところ、KiK-net十王では地震動とサイト増幅特性のピーク周波数が概ね一致するものの、日立の他3観測点ではピーク周波数の一致が確認できないため、震源特性や伝播経路特性の影響は比較的軽微であったものと推察される。

図-11(旭高架橋周辺)では、線形時と本震時のピーク周波数の倍率はいずれの観測点においても約0.8倍となっていることから、地震基盤と地表の間に存在する堆積層における平均的なせん断波速度の低下率は約0.8倍であったと推定される。そのため、旭高架橋サイト(余震観測地点)とその周辺の強震観測点における線形時のサイト増幅特性(図-9参照)に対し、多重非線形効果の影響に対応した補正¹⁴⁾を加えることにより、図-11に示すように非線形時(本震時)に対応したサイト増幅特性を概略的に求めた。

4. 地震動推定手法

本研究では、サイト特性置換手法⁴⁾を用いて、対

象地点およびその周辺の強震観測点(以後、推定点とよぶ)における地震動の推定を行った。

図-12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、対象地点とのサイト増幅の類似性(図-8および図-9参照)を考慮してSK-netひたちなか(新那珂川大橋)およびMLIT日立(旭高架橋)を選定した。次に、基準観測点で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による補正^{11),12)}(補正方法は3.(2)と同様)を施し、さらに推定点と基準観測点のサイト増幅特性(新那珂川大橋周辺：線形時、旭高架橋周辺：非線形時)の比を乗じることにより、推定点でのフーリエ振幅を推定した。その際、水平2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中小地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¹⁵⁾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。なお、この

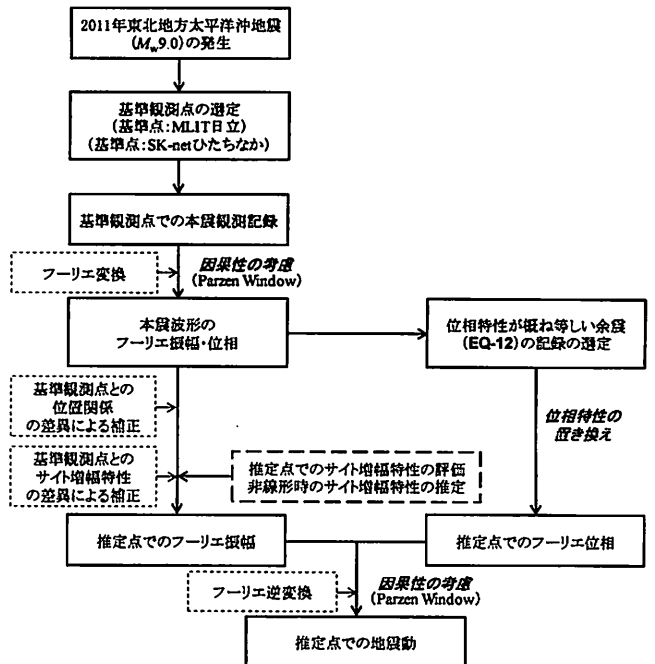


図-12 サイト特性置換手法⁴⁾に基づく地震動推定フロー

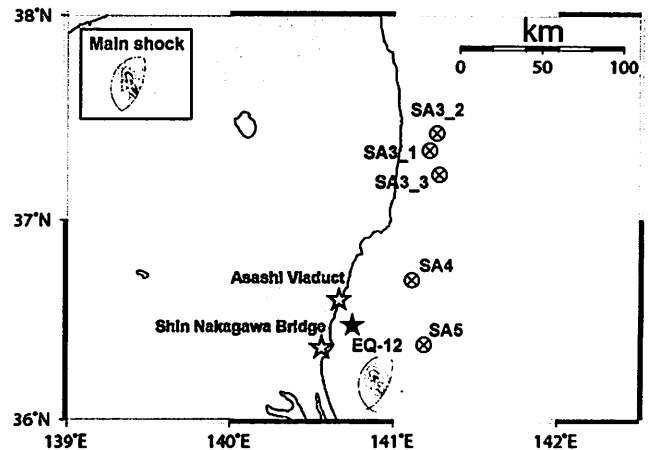


図-13 サイト位相特性の評価に用いた茨城沖の余震
【同図中の⊗はスーパーアスペリティ¹⁷⁾の位置】

とき用いる中小地震観測記録としては、推定点(対象地点を除く)における本震観測記録のフーリエ位相と中小地震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討¹⁶⁾した上で、図-13に示す茨城県沖を震源とする地震(EQ-12; 2012/04/14 04:00/M_j3.8)における推定点での観測記録を採用した。

5. 推定手法の適用性確認

図-14および図-15に対象地点周辺の既存強震観測点における本震時の速度波形(観測波)と強震動推定結果(推定波)を比較したものを示す。なお、ここでは、土木構造物に影響を及ぼす周波数帯域などを勘案して、0.2~4.0Hzのバンドパスフィルタを施し、土木構造物の被災と比較的高い相関を有すると考えられる速度波形について比較を行った。さらに、絶対加速度・相対速度・相対変位応答スペクトル(全て減衰定数5%)を観測波と推定波(いずれもフィルタ処理無の加速度波形)で比較したものを図-16および図-17に示す。

図-14~図-17に示すとおり、新那珂川大橋サイト周辺ならびに旭高架橋サイト周辺において、強震観測点ごとのサイト増幅特性やサイト位相特性の違いにより、振幅、波形形状、スペクトル特性の違いは、観測点ごとにそれぞれ大きいにも関わらず、推定波は比較的良好に観測波を再現できている。すなわち

これは、上述した対象地点におけるサイト特性を入力として、サイト特性置換手法を適用すれば、本震時における対象地点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している。

6. 対象地点における地震動の評価

図-18および図-19は、本震時の対象地点における推定速度および加速度波形である。なお、速度波形については、図-14および図-15と同様に0.2~4.0Hzのバンドパスフィルタを施している。図-20には、図-18および図-19で示した推定加速度波形による応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。さらに、図-20には、道路橋示方書・同解説(H14)⁷⁾によるレベル2地震動(タイプIならびにタイプII地震動)の標準スペクトル(III種地盤(新那珂川大橋)もしくはI種地盤(旭高架橋))についても同時に示している。図-20に示すとおり、新那珂川大橋では、0.1~0.4秒付近で標準スペクトルを上回っている。一方で、旭高架橋では、タイプI地震動を超過しているものの、タイプII地震動とほぼ同等の加速度応答を示している。

7. まとめ

本研究では、サイト特性置換手法を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)での新那珂川大橋お

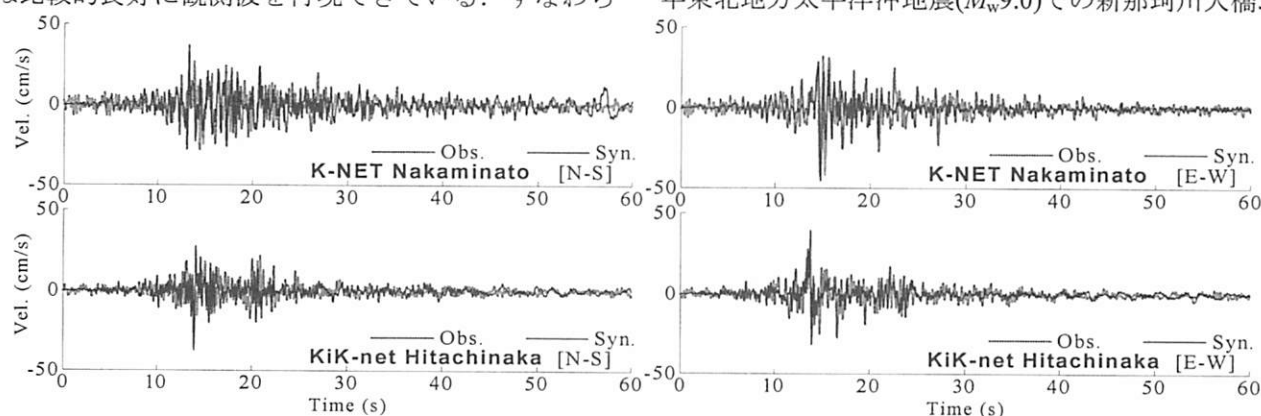


図-14 地震動推定手法の妥当性確認 (速度波形: 0.2~4.0Hz) [新那珂川大橋]

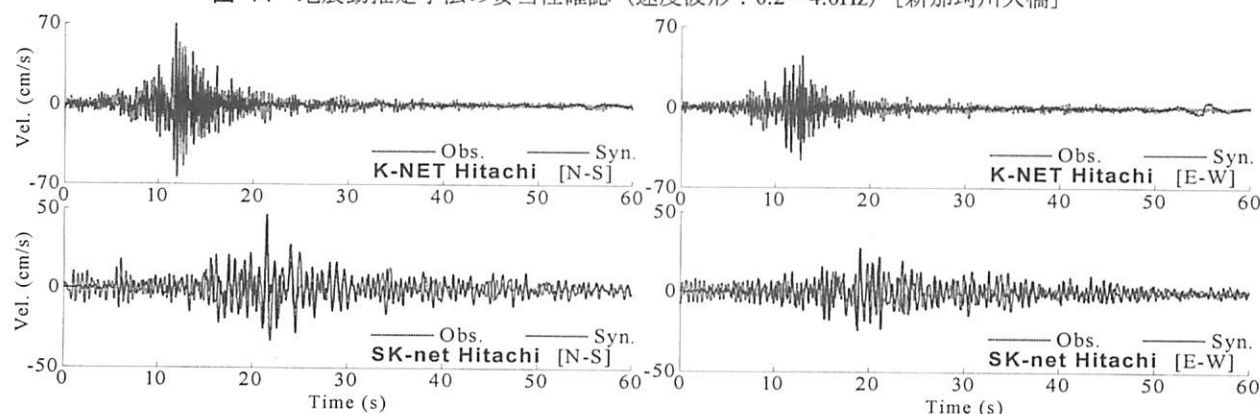


図-15 地震動推定手法の妥当性確認 (速度波形: 0.2~4.0Hz) [旭高架橋]

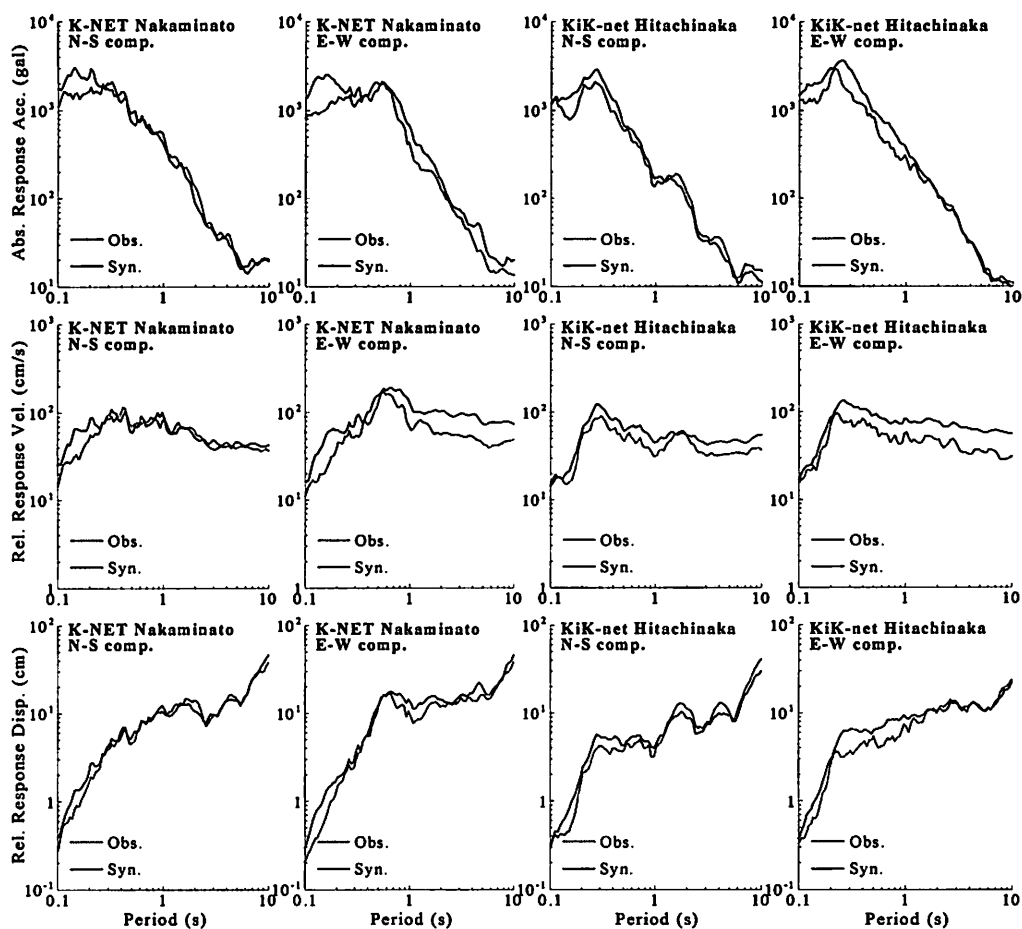


図-16 地震動推定手法の妥当性確認（加速度・速度・変位応答スペクトル：減衰定数5%）〔新那珂川大橋〕

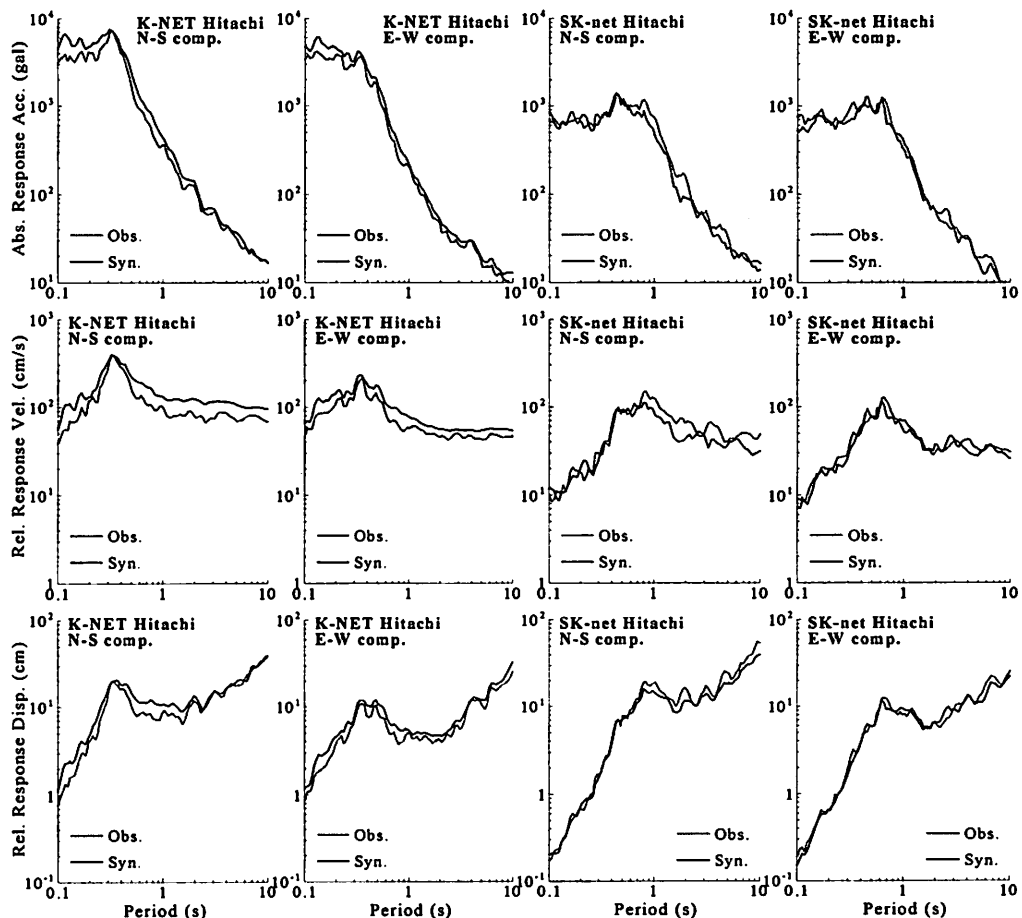


図-17 地震動推定手法の妥当性確認（加速度・速度・変位応答スペクトル：減衰定数5%）〔旭高架橋〕

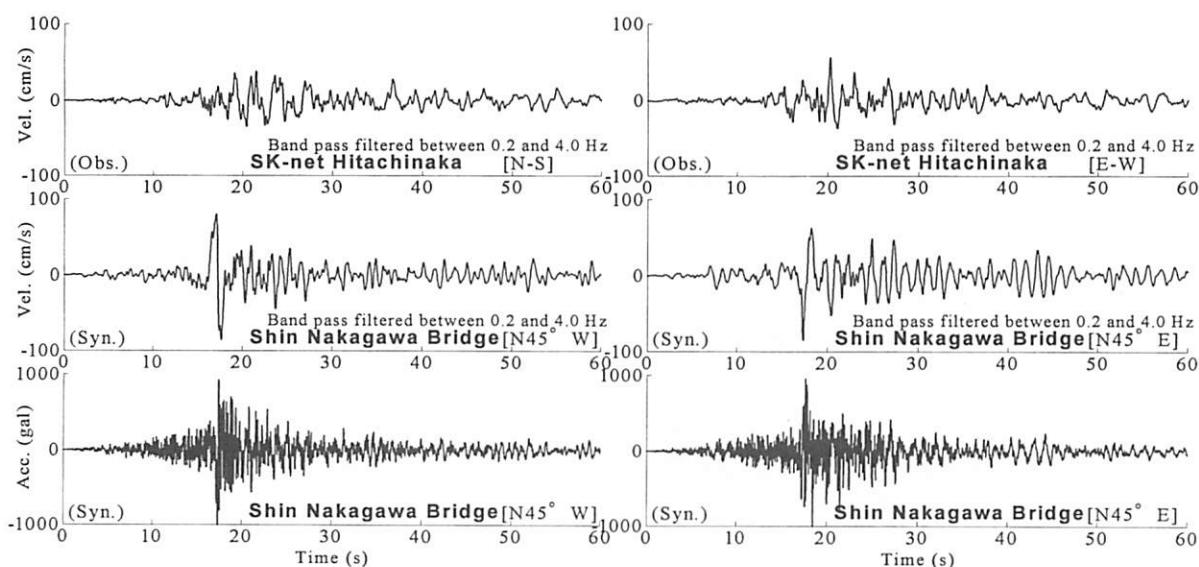


図-18 新那珂川大橋における地盤地表面での推定地震動（速度波形については0.2～4.0Hz）

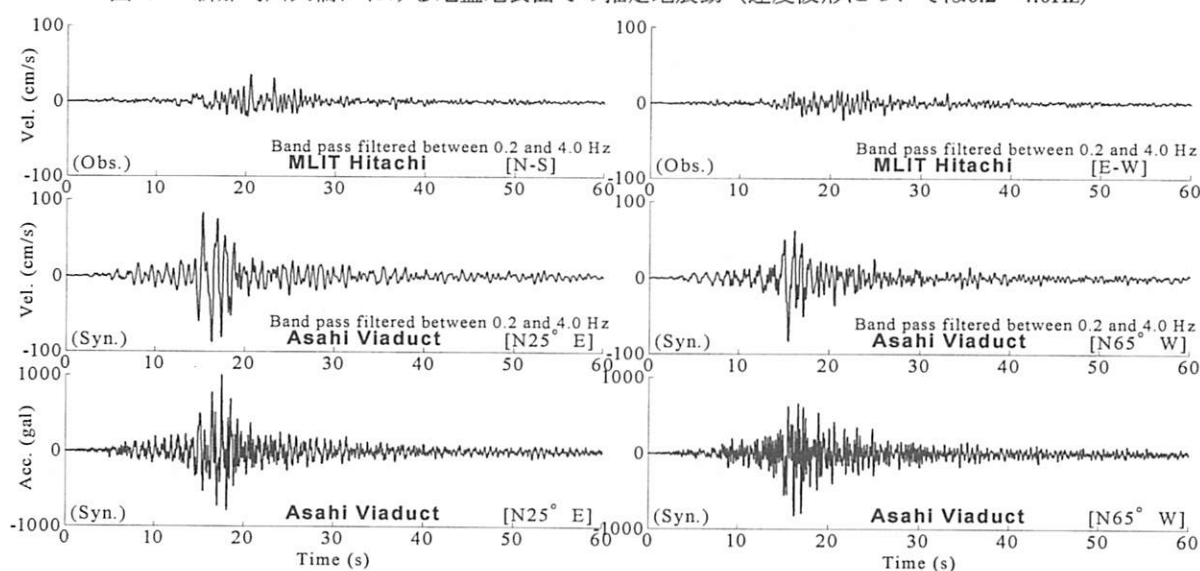


図-19 旭高架橋における地盤地表面での推定地震動（速度波形については0.2～4.0Hz）

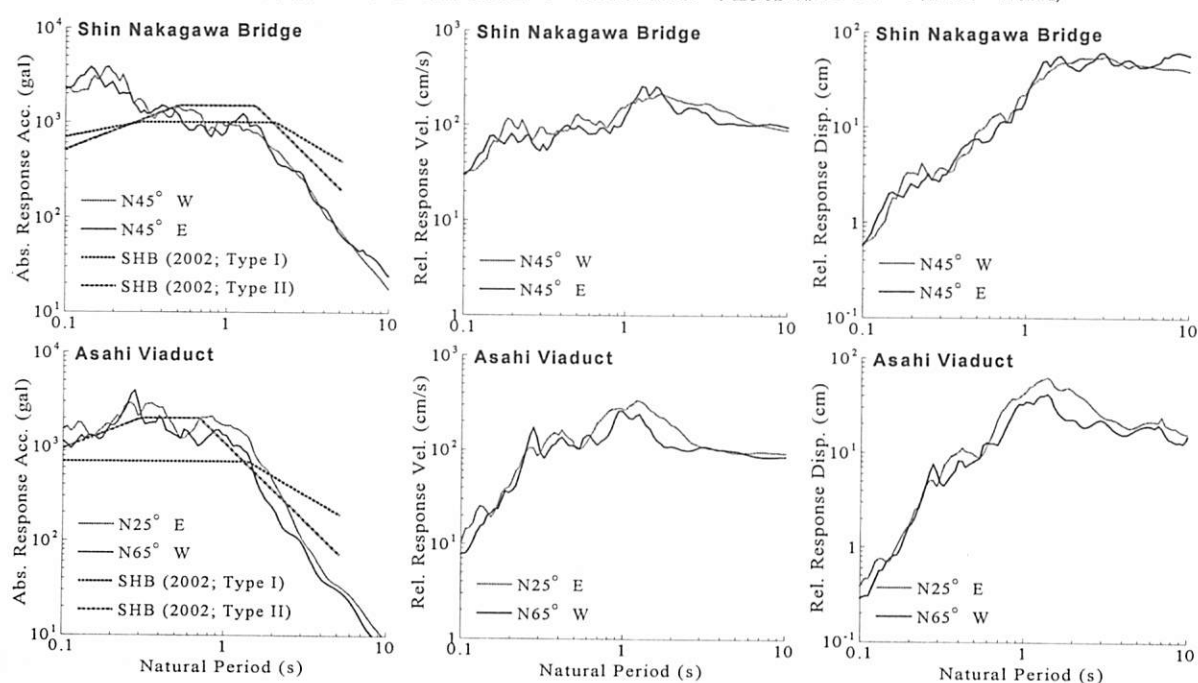


図-20 新那珂川大橋および旭高架橋における推定地震動の加速度・速度・変位応答スペクトル（減衰定数5%）

よび旭高架橋(対象地点)における強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 対象地点と周辺の強震観測点では、サイト特性が大きく異なっており、余震観測を実施し、対象地点でのサイト特性を考慮して本震時の地震動を推定する必要性が高いことが示唆される。
- 2) サイト特性置換手法を利用すれば、2011年東北地方太平洋沖地震における対象地点周辺の観測点で得られた強震波形を一定の精度で再現することが可能である。
- 3) 対象地点における推定地震動は、周辺の観測点で得られている本震記録と大きく異なる特徴を有しており、0.1~0.7秒付近(新那珂川大橋)もしくは0.1~1.8秒付近(旭高架橋)の周期帯において、道路橋示方書(H14)の設計標準スペクトル(タイプI地震動)を上回る加速度応答を示す。

今後は、推定した強震動を用いた振動台実験や動的解析¹⁸⁾などを実施していきたいと考えている。

謝辞：本研究では、(独)防災科研K-NET/KiK-netおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-net、国土交通省MLITによる地震観測波形データ、(独)防災科研Geo-Stationのボーリングデータをそれぞれ利用させていただきました。記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 川島一彦，西岡勉，高橋良和，秋山充良，渡邊学歩，古賀裕久，松崎裕：橋梁の被害調査，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第9章，pp.1-42，2011。
- 2) Takahashi, Y.: Damage of rubber bearings and dampers of bridges in 2011 Great East Japan Earthquake, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.1333-1342, Tokyo, Japan, 2012.
- 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，pp.3073-3080，2010。
- 4) 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 (BSSA)*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 5) 秦吉弥，高橋良和，後藤浩之，野津厚：余震観測記録に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における東部高架橋および利府高架橋での地震動の評価，第15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，2012. (this issue)
- 6) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: Preliminary study on the difference of indexes of seismic motions observed at adjacent sites, *Proc. of 2nd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.42-50, Taormina, Italy, 2012.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書，V耐震設計編，丸善，2002。
- 8) 牧野雅彦，村田泰章，広島俊男，駒澤正夫，小笠原正継，中塚正，鍋谷祐夫，井上純，田中和夫，丸山孝彦，三品正明：阿武隈地域重力図(ブーゲー異常)，重力図No.6，地質調査所，1995。
- 9) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，藤原広行：微動探査観測システムの開発，地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM)，S111-P002，2006。
- 10) 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。
- 11) 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 (BSSA)*, Vol.73, pp.1865-1894，1983。
- 12) 佐藤智美，巽蒼樹：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，Vol.556, pp.15-24，2002。
- 13) たとえば，野津厚，盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震，第2輯，Vol.55, pp.361-374，2003。
- 14) 秦吉弥，中村晋，野津厚：地盤非線形応答時のサイト増幅特性の評価ー2011年東北地方太平洋沖地震による福島市の造成盛土崩壊地点での地震動の推定ー，地盤工学ジャーナル，Vol.7, No.1, pp.139-149，2012。
- 15) 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ー因果性を満足する地震波の生成ー，土木学会論文集A，Vol.65, No.3, pp.808-813，2009。
- 16) たとえば，野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震による震源付近の地震動の特徴，第66回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-484, pp.967-968，2011。
- 17) 野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.2, pp.21-40，2012。
- 18) たとえば，渡邊学歩，北原武嗣，花本雅洋：ゴム支承で支持された橋梁構造物の被害メカニズムに関する一考察，強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム講演論文集，pp.23-26，2012。