

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

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 神奈川県横浜市長瀬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。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¹⁾。

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である。そこで本研究では、東部高架橋および利府高架橋（以後、対象地点と呼ぶ）の極近傍において余震観測を実施し、その観測結果に基づいて、2011年東北地方太平洋沖地震における対象地点での地震動を推定した。具体的には、東部高架橋サイトについては、周辺の既存強震観測点とのサイト特性の類似性を踏まえて、本震観測記録の転用²⁾の可能性について検討を行った。一方で、利府高架橋サイトについては、拡張型サイト特性置換手法³⁾を用いて、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上で、本震時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、新那珂川大橋および旭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⁴⁾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⁵⁾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、東部高架橋サイトでは、近傍にある既往のボーリング地点および余震観測地点でのH/Vスペクトルの特性が非常に類似している。しかしながら、N値換算⁶⁾に基づく表層地盤(工学的基盤深度28m)の推定固有周波数(1.9Hz：II種地盤)と常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数はそれほど良い整合を示していない。これは、東部高架橋サイト周辺では工学的基盤上面が必ずしも地震基盤～地表の範囲で最もインピーダンスコントラストの高い地層境界となっていないためであると推察される。一方で、図-6に示すとおり、利府高架橋サイトでは、余震観測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おり、N値換算⁶⁾に基づく表層地盤(工学的基盤深度21m)の固有周波数(2.4 Hz：II種地盤)と常時微動

H/Vスペクトルのピーク周波数は比較的良好一致を示している。しかしながら、利府町役場と余震観測地点での比較では、H/Vスペクトルの形状などに差異が生じており、利府高架橋サイトと利府町役場ではサイト特性が異なっていることを示唆している。

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14日に地震計を設置し、25日間(東部高架橋：常時電源)および5日間(利府高架橋：バッテリー)の余震観測をそれぞれ実施した。地震計は、ボアホール型加速度計(東部高



図-1 東部高架橋周辺の強震観測点の分布



図-2 利府高架橋周辺の強震観測点の分布



図-3 東部高架橋周辺でのボーリング地点と微動計測点



図-4 利府高架橋周辺でのボーリング地点と微動計測点

架橋)、一体型微動探査兼地震計機器⁷⁾(利府高架橋)をそれぞれ採用し、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、常時観測を継続するシステムとした。

(2) サイト増幅特性

図-7および図-8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、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性⁸⁾(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仙台もしくはK-NET塩竈)で同時に得られた中小地震観測記録を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{9),10)}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(K-NET仙台⁸⁾もしくはK-NET塩竈)におけるサイト増幅特性に掛け合わせることで評価した。仙台東I.C., 仙

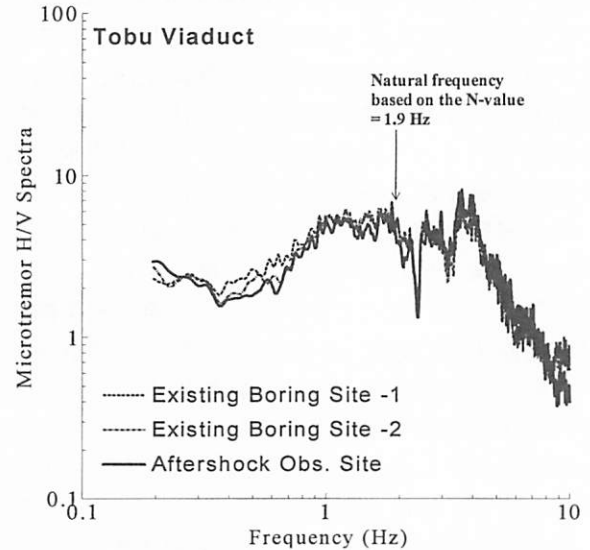


図-5 常時微動H/Vスペクトルの比較[東部高架橋]

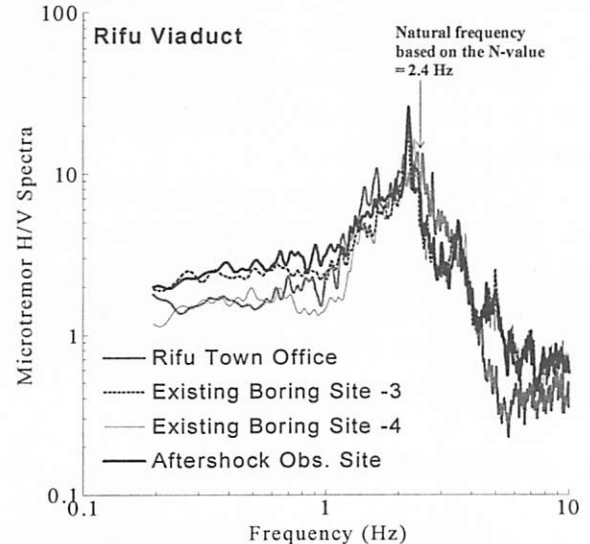


図-6 常時微動H/Vスペクトルの比較[利府高架橋]

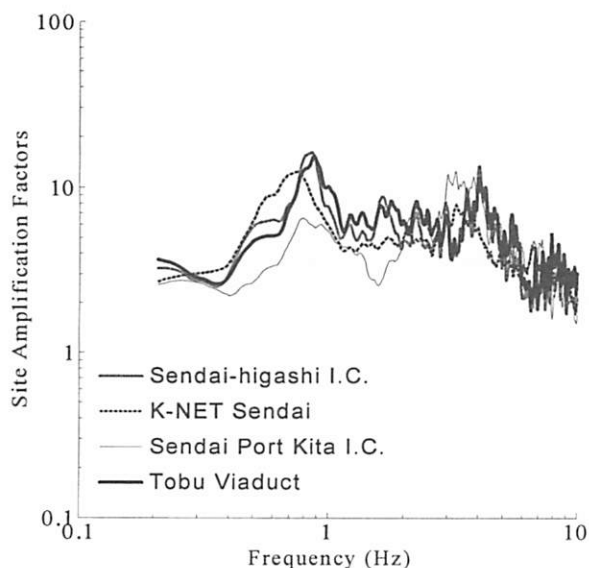


図-7 サイト増幅特性の比較[東部高架橋]

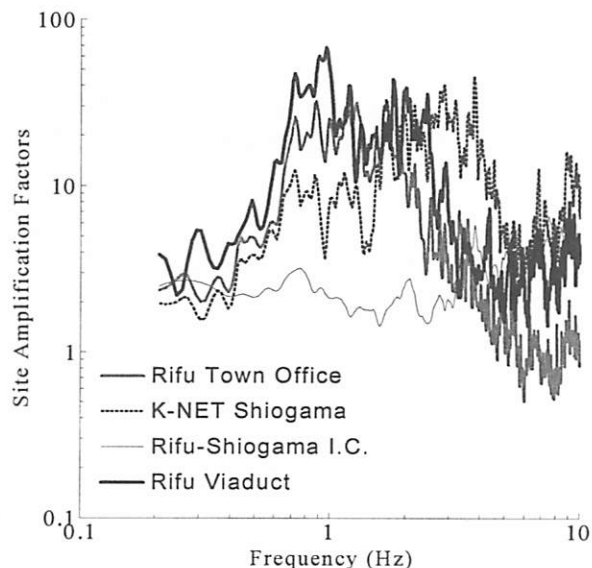


図-8 サイト増幅特性の比較[利府高架橋]

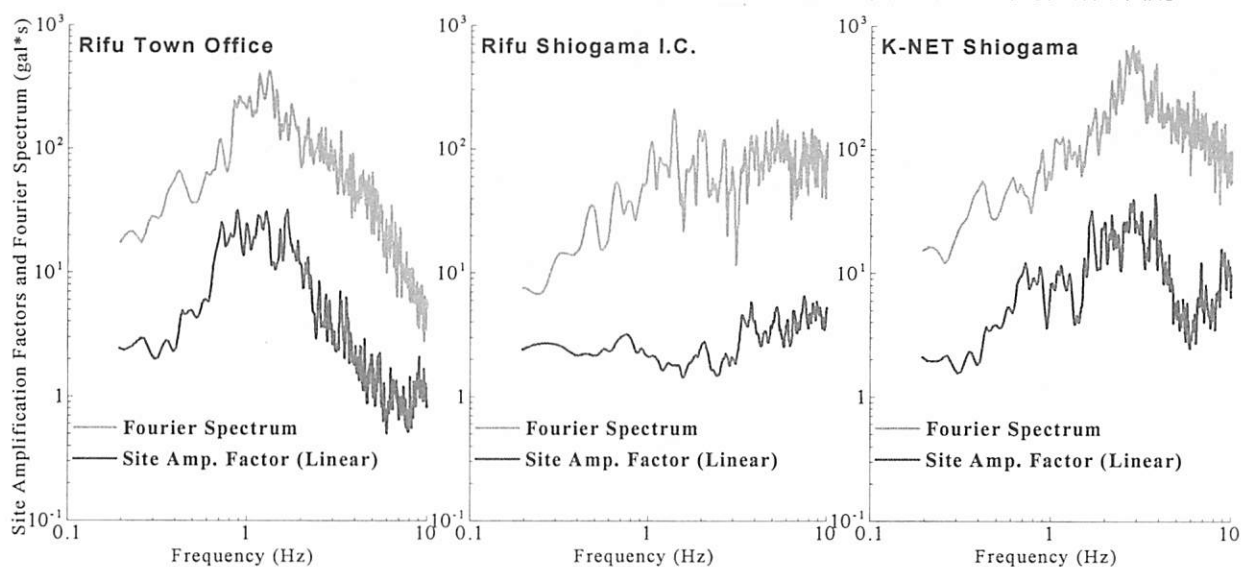


図-9 本震観測地震動のフーリエスペクトルに対するサイト増幅特性の比較[利府高架橋]

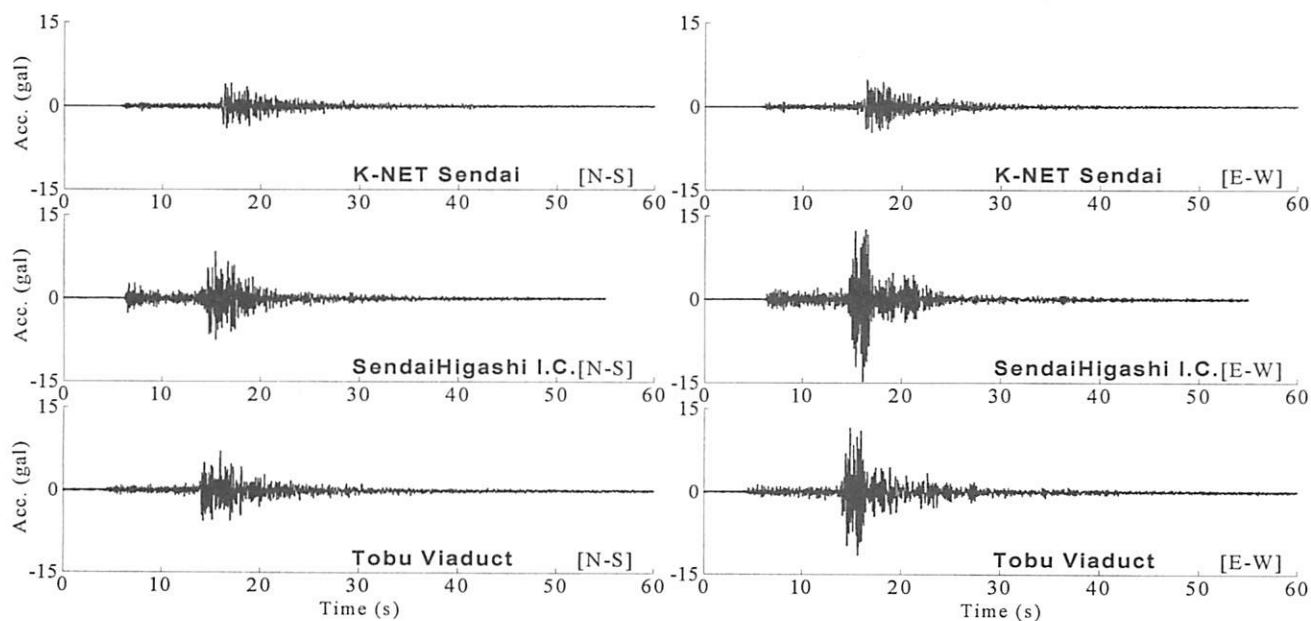


図-10 サイト位相特性の評価に用いた余震(EQ-04 ; 2012/03/15 23:21 $M_j4.3$)による観測波形 (2012/03/15 23:21:57~)

台港北I.C., K-NET塩竈(2004年1月に移設されているため既往文献8)においてサイト増幅特性が未評価), 利府町役場, 利府塩釜I.C.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-7に示すとおり, 東部高架橋サイトでは, 余震観測地点と仙台東I.C.のサイト増幅特性が非常に良い一致を示しているのが読み取れる。これは, 仙台東I.C.で得られた本震観測記録が東部高架橋サイトにおける本震時の推定地震動として直接転用できる可能性が高いことを示唆している。

一方で, 図-8に示すとおり, 利府高架橋サイトとその周辺の強震観測点の比較では, サイト増幅特性に明確な差異が確認できる。これは, 利府高架橋サ

イトと周辺の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, 利府高架橋サイト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。なお, 図-9は, 利府高架橋サイト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-8参照)を比較したものであるが, 観測地震動とサイト増幅特性のピーク周波数が比較的良い一致を示しているため, 利府高架橋サイト周辺における本震時の多重非線形効果の影響は, 非常に小さかったものと推察される。

4. 地震動の推定

(1) 東部高架橋

本節では, 3.(2)で述べた仙台東I.C.で得られた本震観測記録の転用の可能性についてより詳細な検討を行う。図-10は, 宮城県沖の余震(EQ-04; 2012/03/15 23:21 $M_j4.3$: 図-11参照)による観測波形の時刻歴を比較したものであるが, 仙台東I.C.と東部高架橋サイトでは, 波形形状が非常に類似しているのが確認できる。図-12は, 仙台東I.C.での本震記録の速度波形(観測波)と, 観測波のフーリエ振幅特性を用いて, フーリエ位相特性のみ宮城県沖の余震(EQ-04)のフーリエ位相特性に置き換えた合成速度波形(置換波)を水平2成分について比較したものである。一方, 図-12には, 同じ宮城県沖の地震による東部高架橋サイトでのフーリエ位相特性を利用し

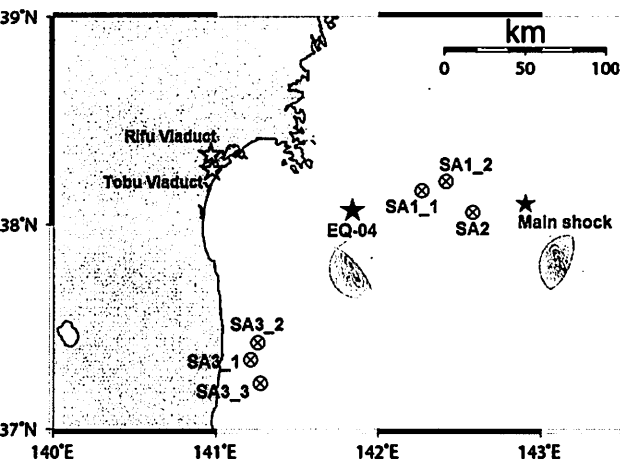


図-11 サイト位相特性の評価に用いた宮城県沖の余震
【同図中の⊗はスーパーアスペリティ¹¹⁾の位置】

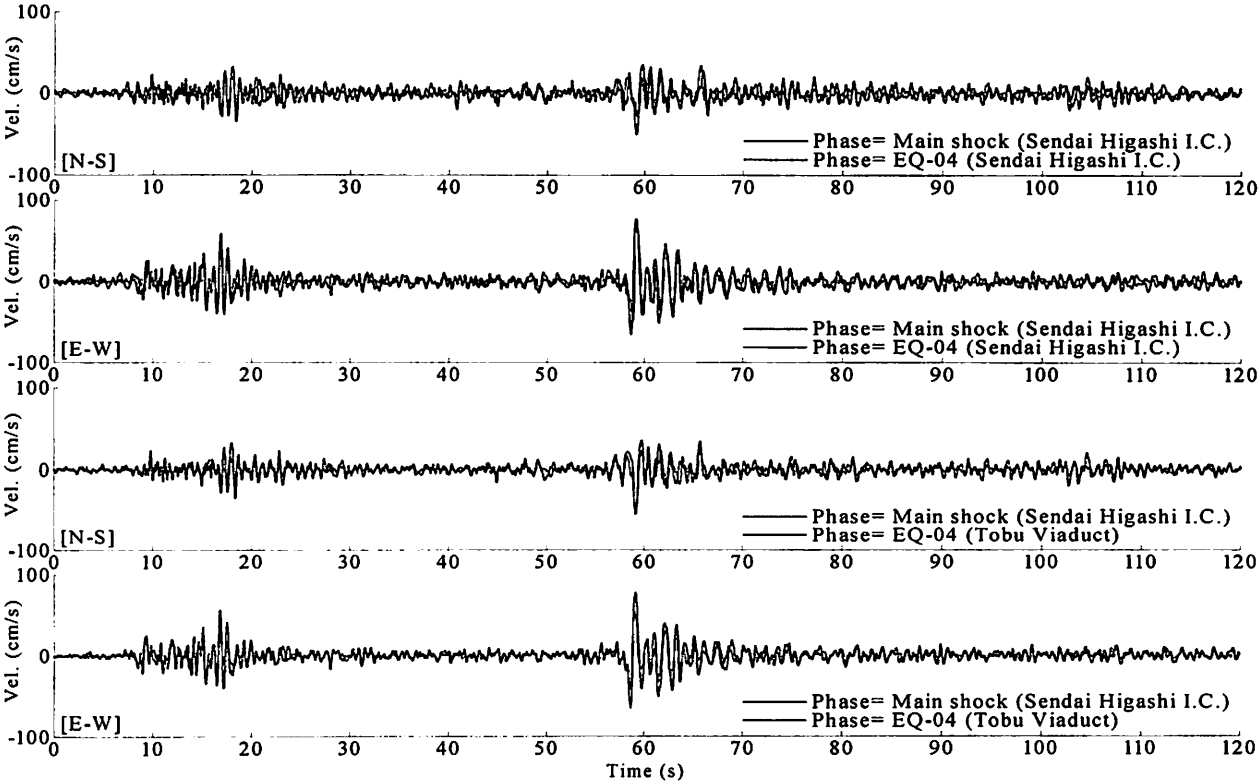


図-12 東部高架橋と仙台東I.C.におけるサイト位相特性の類似性の評価

た合成速度波形(置換波)も同時に示している。ただし、仙台東I.C.での観測波は概ね2つの山からなり(図-12参照)、本震のフーリエ位相が1つの宮城県沖の余震(EQ-04)のフーリエ位相で近似できないことは明らかである。そのため、観測波の前半部分と後半部分をテーパ分割し、各々に対して置換波を合成(前半部分と後半部分で同じ余震記録(EQ-04)のフーリエ位相)を採用¹²⁾することによって、最後に前半部分と後半部分の置換波を重ね合わせた。

図-12に示すとおり、観測波と2種類の置換波がともに良い一致を示している。このように、サイト増幅特性のみならずサイト位相特性の観点からも、東部高架橋と仙台東I.C.のサイト特性には共通性が確認できる。さらに、両地点への影響が大きかったと考えられる宮城県沖のサブイベント(SA-1およびSA-2¹¹⁾: 図-11参照)から両地点への距離も概ね同等であることを考慮すると、仙台東I.C.で観測されている本震時の地震動を東部高架橋サイトにおける本震時の地震動と見なすことが可能であると考えられる。一般に、対象地点とその周辺の観測記録が得られている地点の間でサイト特性が類似していない場合(本稿での利府高架橋のケースなど)、サイト特性を補正して地震動を推定する方法(例えば、拡張型サイト特性置換手法³⁾)も提案されているが、地震動推定手法に内在する推定誤差³⁾と比較して、東部高架橋と仙台東I.C.のサイト増幅・位相特性の差(図-7および図-12参照)は十分に小さいと判断される。

(2) 利府高架橋

a) 地震動推定手法

図-13は、拡張型サイト特性置換手法³⁾に基づく地震動推定の一連の流れである。

まず、利府町役場(基準観測点)における本震観測記録に対して、20秒間の範囲でテーパをかけることにより、前半部分(0~50秒)と後半部分(30秒以降)の地震波形の切り出しを行った。

次に、切り出された前半部分のフーリエ振幅を計算し、これに利府町役場と推定点(K-NET塩竈、利府塩釜I.C., 利府高架橋)の距離の違いによる補正^{9),10)}を施し、さらに利府町役場と推定点におけるサイト増幅特性(図-8参照)の比(推定点/利府町役場)を乗じることにより、推定点における本震時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。そして、得られたフーリエ振幅と余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¹³⁾を行うことにより、推定点における本震時の地震動の前半部分を推定した。また、これと同様の手順を地震波形の後半部分に対しても行うことにより、推定点における本震時の地震動の後半部分を推定した。なお、フーリエ逆変換の際に用いる余震記録(フーリエ位相)としては、宮城県沖の余震(EQ-04; 2012/03/15 23:21 M_j4.3: 図-11参照)による推定点での観測記録を採用した。また、前半部分と後半部分で同じ余震記録(フーリエ位相)を採用¹²⁾した。

最後に、推定点における前半部分と後半部分の地震波形を足し合わせることで、推定点における本震時の地震動を推定した。このとき、前半部分と後半部分の地震波形の足し合わせは、前半部分と後半部分の各々に対応するS波初動の間隔が利府町役場での波形と同様となるように足し合わせを行った。

b) 推定手法の適用性確認

図-14にK-NET塩竈および利府塩釜I.C.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-15に示す。

図-14および図-15に示すとおり、利府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・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、観測点ごとに比較的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

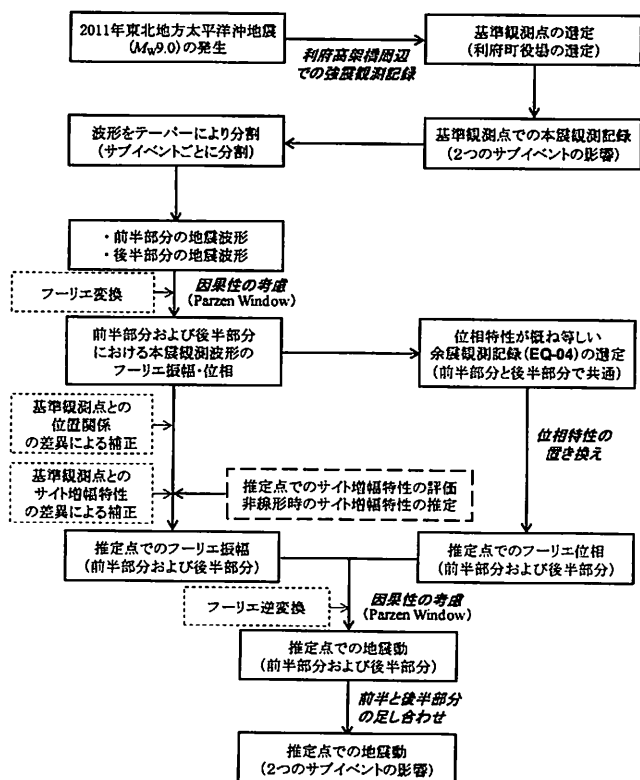


図-13 拡張型サイト特性置換手法³⁾による推定フロー

る。すなわちこれは、上述した利府高架橋サイトに
対して、拡張型サイト特性置換手法を適用すれば、

本震時の利府高架橋サイト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。

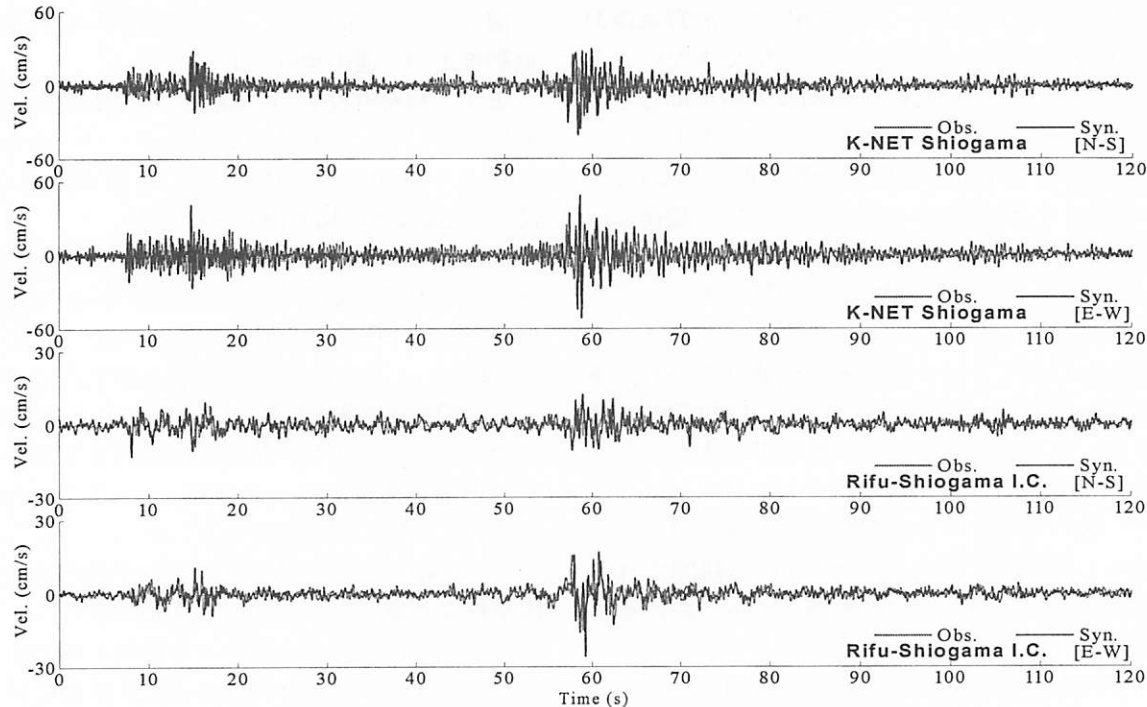


図-14 地震動推定手法の妥当性確認（速度波形：0.2～4.0Hz）〔利府高架橋〕

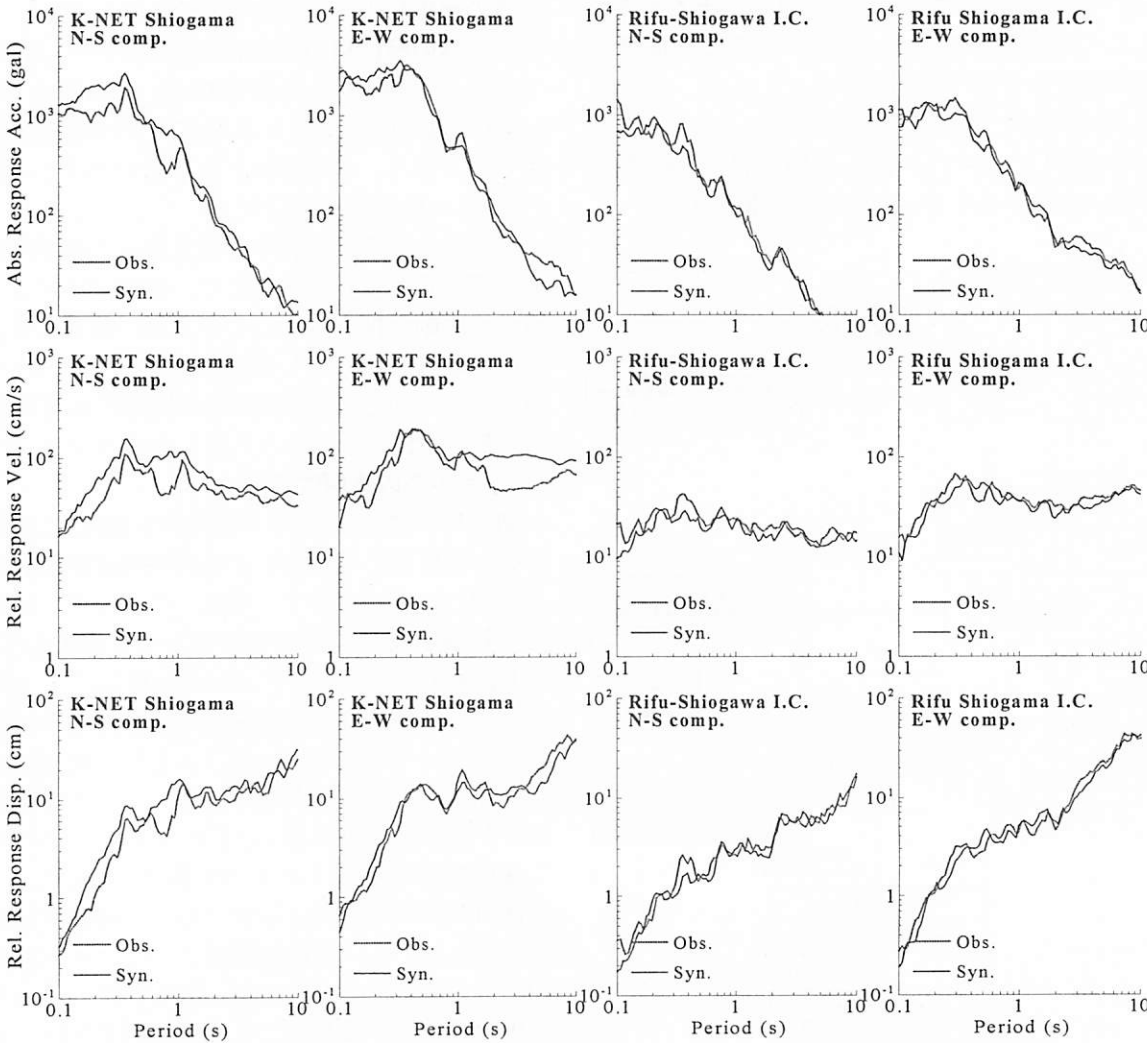


図-15 地震動推定手法の妥当性確認（加速度・速度・変位応答スペクトル：減衰定数5%）〔利府高架橋〕

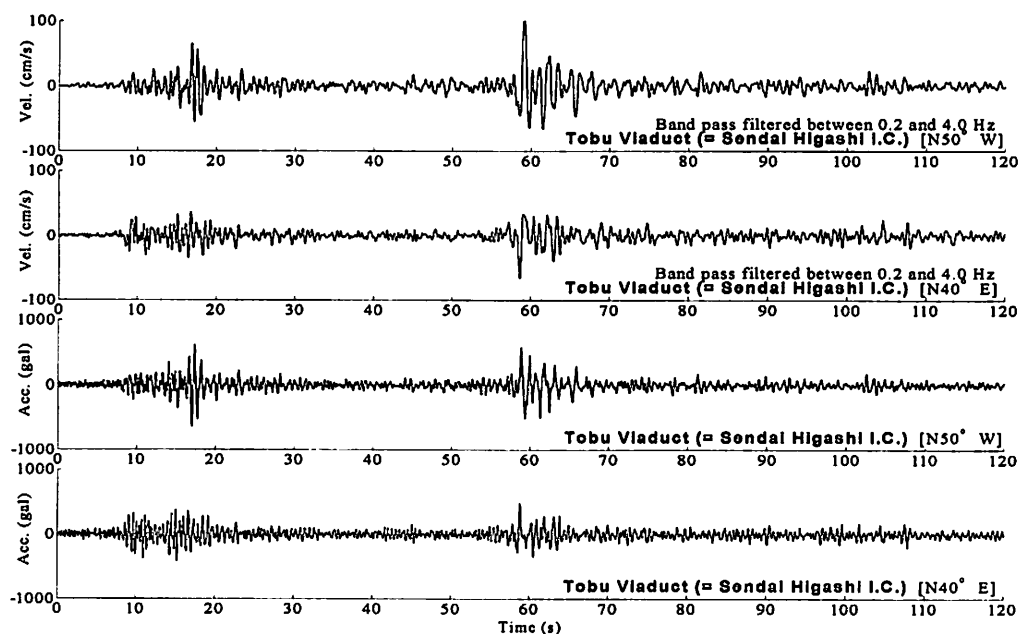


図-16 東部高架橋における地盤地表面での推定地震動（速度波形については0.2～4.0Hz）

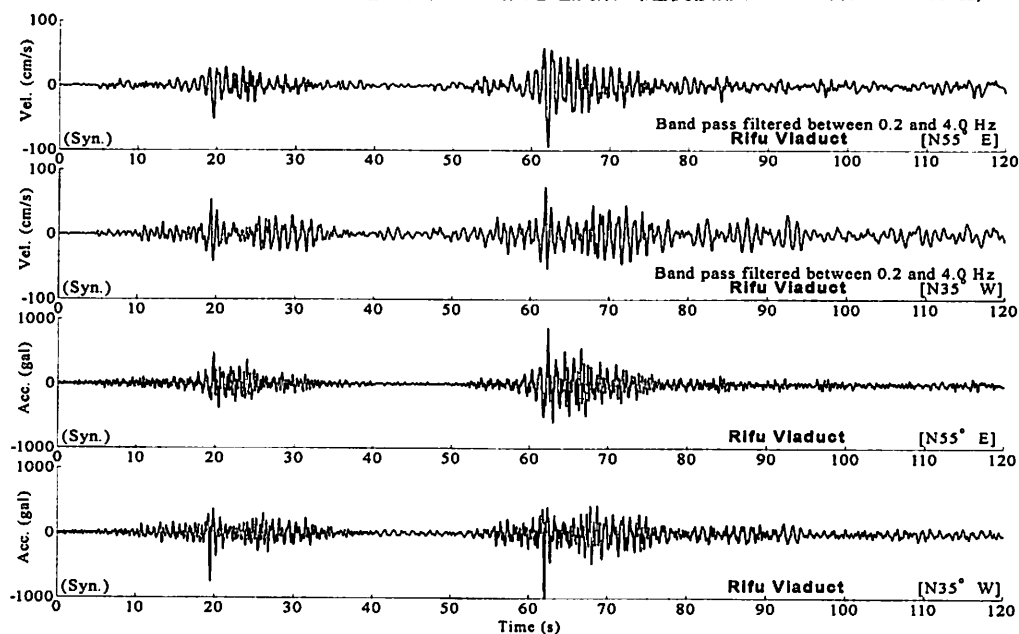


図-17 利府高架橋における地盤地表面での推定地震動（速度波形については0.2～4.0Hz）

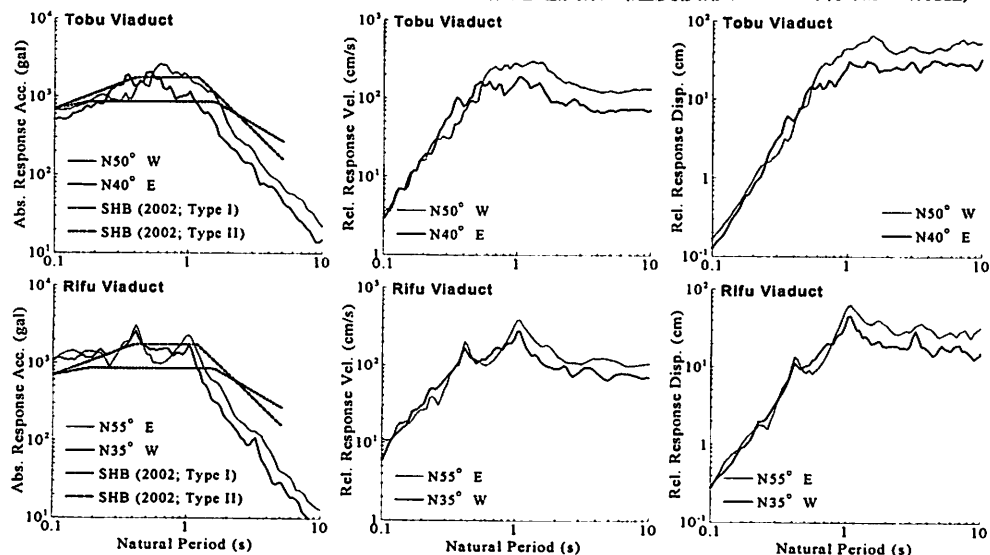


図-18 東部高架橋および利府高架橋における推定地震動の加速度・速度・変位応答スペクトル（減衰定数5%）

5. 対象地点における地震動の評価

図-16および図-17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。すなわち、仙台東I.C.での本震観測記録を東部高架橋での橋軸直角方向と橋軸方向に座標変換した波形(図-16参照)、および利府町役場での本震観測記録をベースに拡張型サイト特性置換手法を用いて推定した利府高架橋での地震波形(図-17参照)である。図-18には、推定加速度波形(図-16、図-17参照)による応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。図-18には、道路橋示方書・同解説(H14)⁶⁾によるレベル2地震動(タイプIならびにタイプII地震)の標準スペクトル(II種地盤)についても同時に示している。図-18に示すとおり、タイプI地震動に対しては、0.2~1.5秒付近(東部高架橋)もしくは0.1~1.2秒付近(利府高架橋)の周期帯において対象地点の加速度応答スペクトルが上回っており、タイプII地震動に対しては、対象2地点ともに同等程度の加速度応答スペクトルを示している。

6. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)での東部高架橋および利府高架橋(対象地点)における強震波形を、対象地点の極近傍での余震観測記録に基づいて推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 東部高架橋サイトでは、2.8kmほど南西にある仙台東I.C.で得られた本震観測記録を橋梁に作用した地震動と見なすことが可能である。
- 2) 拡張型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利府高架橋サイト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の応答スペクトルは、道路橋示方書(H14)の設計標準スペクトルに対して、周期帯によっては超過(タイプI地震動)、もしくは同等程度(タイプII地震動)の加速度応答をそれぞれ示しているのを確認した。

今後は、推定した強震動を用いた振動台実験や動的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、K-NET、NEXCO東日本、宮城県、東北工業大学Small-Titanによる観測波形データ、(独)防災科研Geo-Stationのボーリングデータを利用させていただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 秦吉弥, 野津厚, 中村晋, 一井康二, 酒井久和, 丸山喜久: 2011年東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁での余震観測と地震動の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.3, pp.21-24, 2012.
- 3) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.
- 4) 秦吉弥, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚: 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, 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)
- 5) 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.
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書, V耐震設計編, 2002.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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, Vol.556, pp.15-24, 2002.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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一因果性を満足する地震波の生成一, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.