

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

秦吉弥¹・秋山充良²・高橋良和³・後藤浩之⁴

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) 早稲田大学 教授 創造理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 博士(工学) 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)

⁴正会員 博士(工学) 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)

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⁾。仙台市地下鉄(南北線)の八乙女駅～泉中央駅間の高架橋では、パラペット部・桁受け梁部・ラーメン柱などの損傷を伴う地震動による深刻な被害が確認されている^{1),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、被災地点における地震動を推定することは非常に重要³⁾である。

本稿では、八乙女駅～泉中央駅間の高架橋で2011年東北地方太平洋沖地震による損傷が集中している地点(以後、対象地点と呼ぶ：図-1参照)での強震波形を評価した結果について紹介する。具体的には、まず、対象地点とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測を行い、対象地点と観測点による常時微動H/Vスペクトルの比較に基づいて、対象地点におけるサイト増幅特性を評価した。次に、観測点(基準観測点)で得られた本震記録に対して、サイト増幅特性の差異(基準観測点～推定点(対象地点と八乙女駅)間)による補正を施すことで推定点における地震動を評価する手法(以後、丸山の方法^{4),5)}と呼ぶ)を用いて、八乙女駅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、丸山の方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。

2. 本震観測記録の整理

本震記録(最大加速度値PGA(3成分合成)、SI値、計測震度)の分布を示す。なお、対象地点では、本震時に強震観測が実施されていない。また、八乙女駅の観測点は震度計が設置されており、本震時の強震波形データは残されていない。図-1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3観測点ごとに大きく異なっており、サイト特性の影響が示唆される。よって、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) 常時微動計測の実施

対象地点における本震時の推定地震動として、観



図-1 仙台市地下鉄高架橋被災地点周辺の観測点の分布

図-1に対象地点周辺の既存強震観測点で得られた

測点で得られた本震記録の転用の可能性について判断するため、対象地点とその周辺の既存強震観測点（泉消防署（以後、泉区将監と呼ぶ：図-1参照）、Small-Titan七北田中学校⁶⁾、八乙女駅）において同時に常時微動計測を実施した。

計測期間は、2012年7月28日19時頃から2012年7月29日7時頃までの約12時間であり、計測機器は、4計測点ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器⁷⁾を採用することで、4点間での微動アレー計測を実施した。計測機器の詳細については文献⁸⁾を参照されたい。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3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2成分の平均をとった。

図-2は、対象地点を基準とした場合の各観測点における常時微動H/Vスペクトルの比較である。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、163.84秒の区間（同時刻において全4計測点での雑振動がともに小さい163.84秒間）を100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、100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^{7,8)}などを考慮して0.2～10Hzとした。

図-2に示すとおり、対象地点とその周辺の既存強震観測点（泉区将監、Small-Titan七北田中学校、八乙女駅）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スペクトルの特性が異なっている。これは、対象地点に作用した本震時の地震動を評価する際には、周辺の強震観測点で得られた本震記録を転用することができないこと、ならびに、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するものである。

(2) 線形のサイト増幅特性

図-3（左側および中央）に泉区将監およびSmall-Titan七北田中学校における線形のサイト増幅特性（地震基盤～地表）⁹⁾を示す。一方で、対象地点では、本震前後を通じて地震観測が行われていないため、常時微動H/Vスペクトルに基づいて対象地点におけるサイト増幅特性（地震基盤～地表）を評価した。具体的には、泉区将監における線形のサイト増幅特性（地震基盤～地表：図-3（左側）参照）に対して両地点（対象地点と泉区将監）の常時微動H/Vスペクトルの

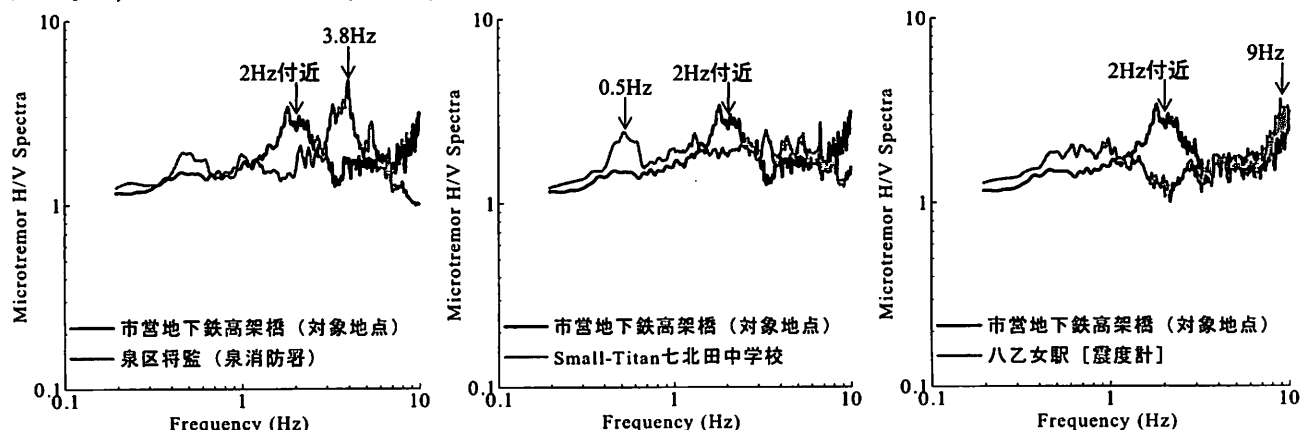


図-2 仙台市地下鉄高架橋被災地点を基準とした常時微動H/Vスペクトルの比較

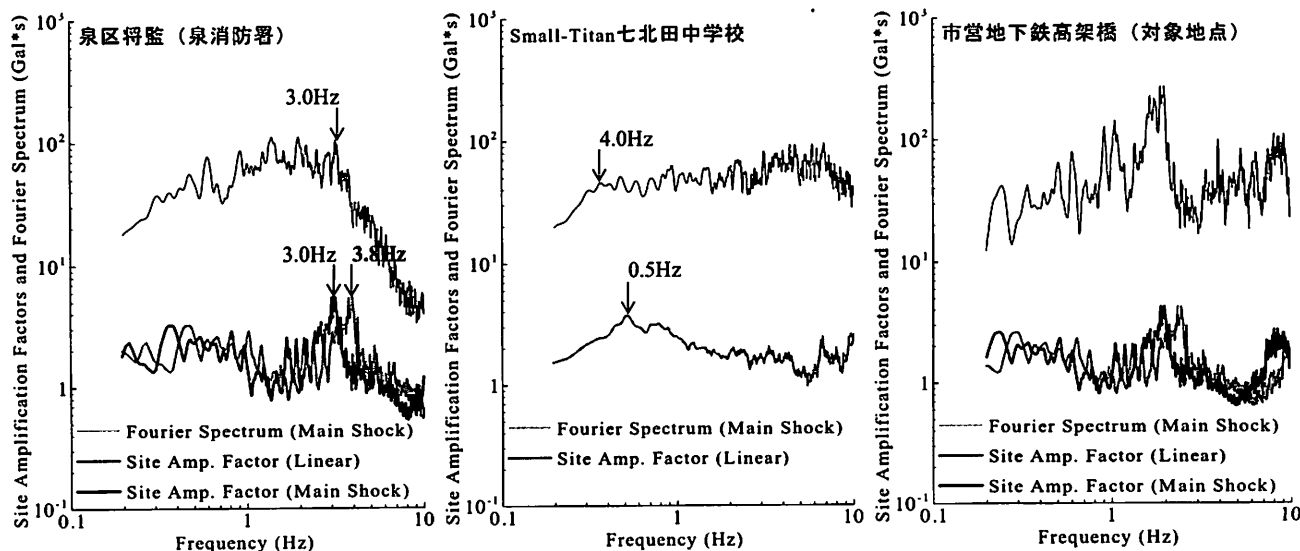


図-3 サイト増幅特性（地震基盤～地表）と本震時のフーリエ振幅スペクトルの比較

差異(図-2参照)に基づく経験的補正¹⁰⁾を施すことにより、対象地点における線形のサイト増幅特性(地震基盤～地表：図-3(右側)参照)を評価した。そして、地震波形データが残されていない八乙女駅についても同様の経験的補正¹⁰⁾を施すことで、線形のサイト増幅特性(地震基盤～地表)を同時に評価した。なお、補正の際に基準観測点として泉区将監を採用したのは、図-2に示すとおり、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数が、対象地点では2Hz付近、泉区将監では4Hz付近、Small-Titan七北田中学校では0.5Hz付近、八乙女駅では9Hz付近にあり、対象地点ならびに八乙女駅に対して、泉区将監のほうがSmall-Titan七北田中学校よりもピーク周波数が近い値を示しているためである。また、両観測点間(泉区将監とSmall-Titan七北田中学校)における常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の差異が非常に大きいため、Small-Titan七北田中学校に対しては、経験的補正方法¹⁰⁾に基づいたサイト増幅特性の評価は行わず、地震動推定手法(丸山の方法^{4),5)}の適用性確認のための地震波形の試算(後述するサイト位相特性の評価を除く)についても実施していない。

(3) 本震時のサイト増幅特性

図-3(左側および中央)は、泉区将監およびSmall-Titan七北田中学校における線形のサイト増幅特性⁹⁾に対して、本震時の観測地震動のフーリエ振幅スペクトル(水平2成分合成)を重ね合わせたものである。

図-3に示すとおり、泉区将監およびSmall-Titan七北田中学校では、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、いずれも低周波側に移動しており、地盤の非線形挙動(多重非線形効果¹¹⁾)の影響が示唆される。具体的には、線形時と本震時のピーク周波数の倍率は約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倍であったと推察される。このことを踏まえ、泉区将監、対象地点、八乙女駅における線形

時のサイト増幅特性(3.(2)参照)に対し、著者らによって提案されている多重非線形効果の影響に対応した補正¹²⁾を施すことで、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。図-3(左側および右側)に泉区将監および対象地点における非線形時(本震時)のサイト増幅特性の算定結果を示す。

4. 地震動推定手法

本研究では、丸山の方法^{4),5)}を用いて、対象地点および八乙女駅(以後、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3.(2)と同様に、対象地点に対するサイト増幅特性のピーク周波数の類似性(図-3参照)を考慮して泉区将監を選定した。

次に、基準観測点で得られた本震観測記録(図-5参照)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^{13),14)}を施し、さらに推定点～基準観測点間における非線形時(本震時)のサイト増幅特性の比(推定点/基準観測点)を乗じること

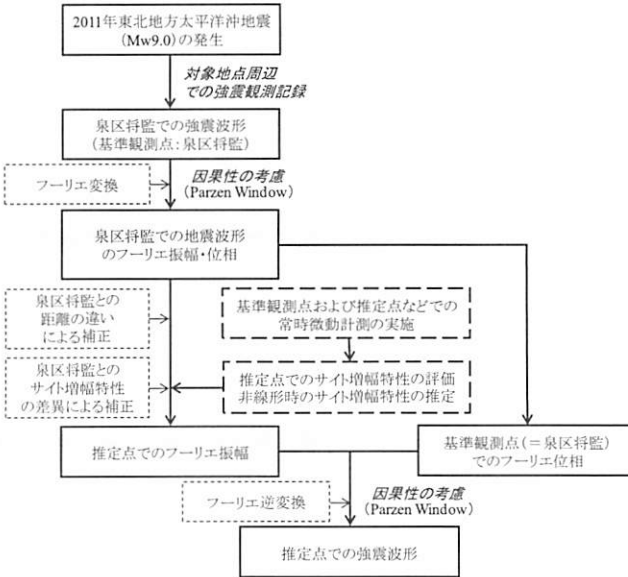


図-4 丸山の方法^{4),5)}に基づく地震動推定フロー

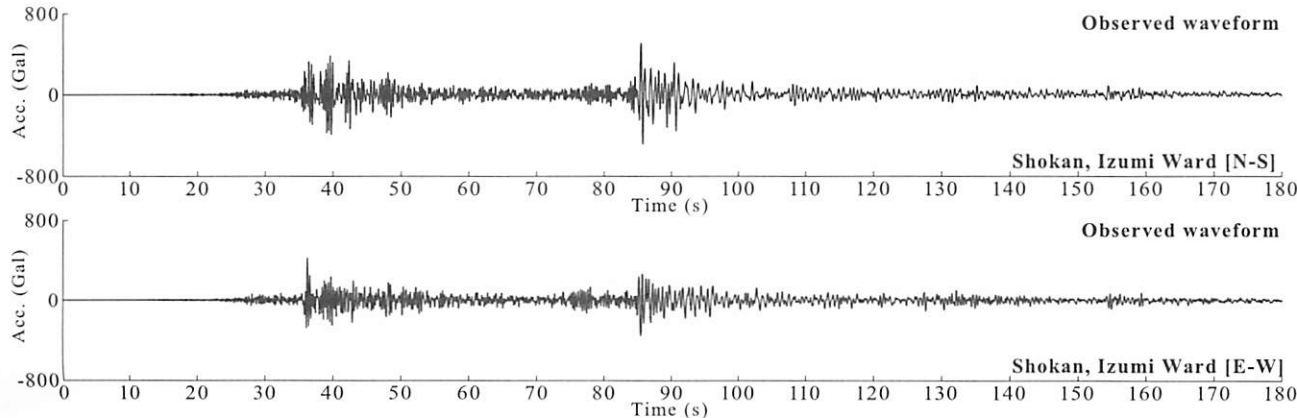


図-5 泉区将監(泉消防署)における本震観測記録の加速度時刻歴

により、推定点における本震時の非線形性を考慮した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。図-3(右側)に対象地点における本震時のフーリエ振幅の推定結果(水平2成分合成)を示す。

最後に、得られた推定点におけるフーリエ振幅と基準観測点(泉区将監)で得られた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¹⁵⁾を行うことで、推定点における本震時の地震波形を評価した。

なお、このとき用いるフーリエ位相として、著者らが提案するサイト特性置換手法¹⁶⁾では推定点で得られた中小地震観測記録を使用しているが、今回の検討ケースでは、推定点である対象地点ならびに八乙女駅ともに地震波形が得られていないため、丸山の方法^{4),5)}に基づき基準観測点(泉区将監)で得られた本震時の強震波形のフーリエ位相を採用した。

図-6は、Small-Titan七北田中学校における本震観測記録の速度波形(観測波)と、Small-Titan七北田中学校での本震時のフーリエ振幅特性を用いてフーリエ位相特性のみ基準観測点(泉区将監)における本震観測記録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。図-6に示すとおり、観測波と置換波には非常

に良い一致が見られることから、基準観測点(泉区将監)における本震記録のフーリエ位相特性を推定点における本震時の強震波形のフーリエ位相特性として採用しても、すなわち丸山の方法^{4),5)}を転用しても、地震波形の推定精度が著しく低下することはないと推察される。

5. 地震動推定結果

図-7に八乙女駅における推定地震動の加速度時刻歴を示す。推定地震動の計測震度は5.8(水平2成分合成)およびSI値は67cm/sとなっており、八乙女駅での観測記録(計測震度=5.8, SI値=75cm/s: 図-1参照)と比較的良好一致を示す結果となった。すなわちこれは、上述した対象地点における非線形時(本震時)のサイト増幅特性(図-3(右側)参照)を入力として、丸山の手法^{4),5)}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するものである。

図-8は、対象地点における本震時の推定加速度波形である。また、図-9ならびに図-10には、図-8で示した推定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%)を示す。さらに、図-9および図-10には、本震前(1999年10月)および本震後(2012年9

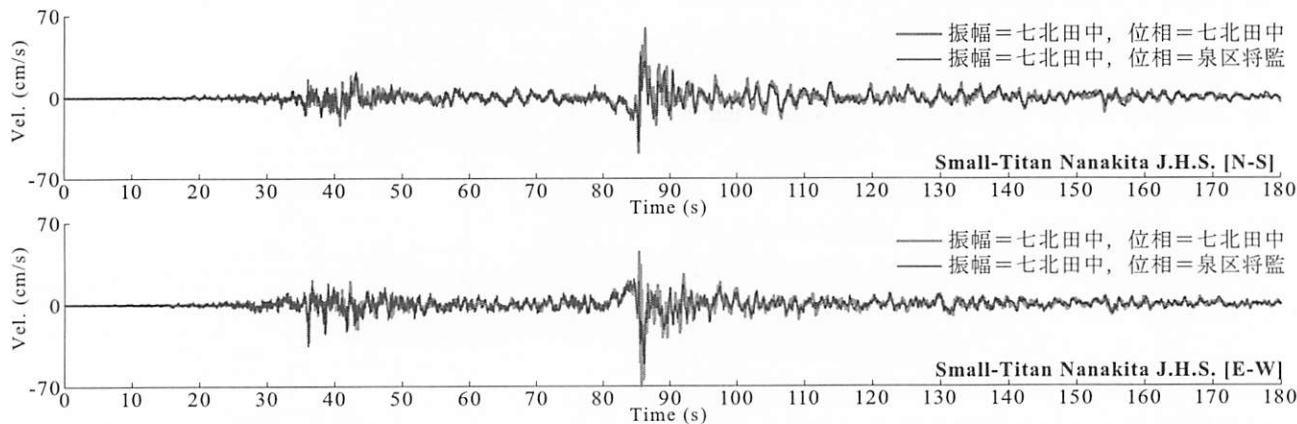


図-6 サイト位相特性の評価 (泉区将監(泉消防署)における本震観測記録のフーリエ位相の適用性に関する検討)

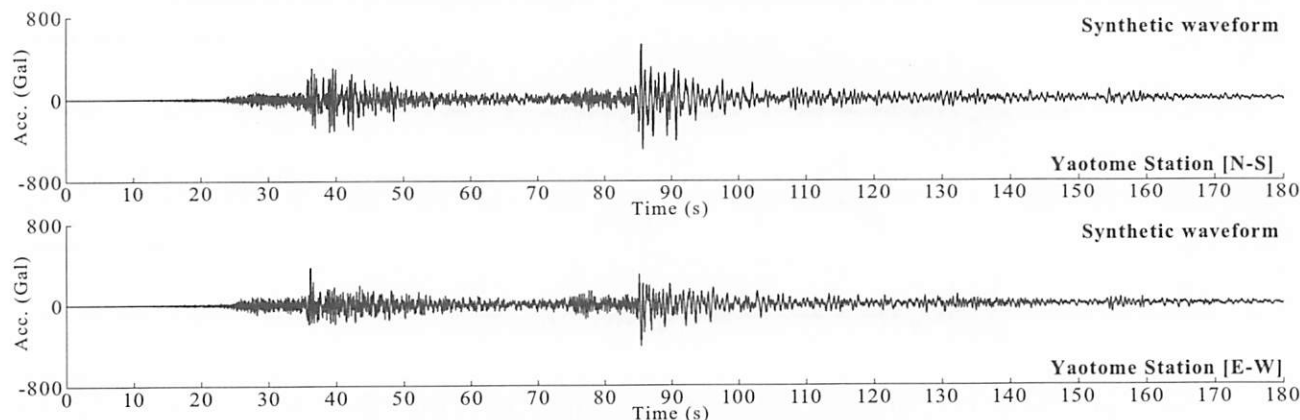


図-7 八乙女駅における推定地震動の加速度時刻歴

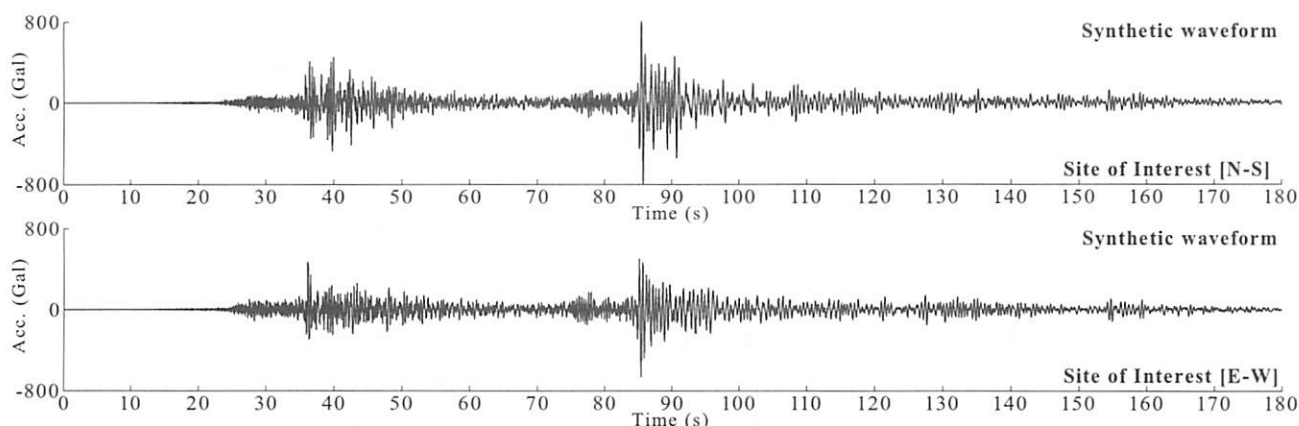


図-8 仙台市地下鉄高架橋被災地点における推定地震動の加速度時刻歴

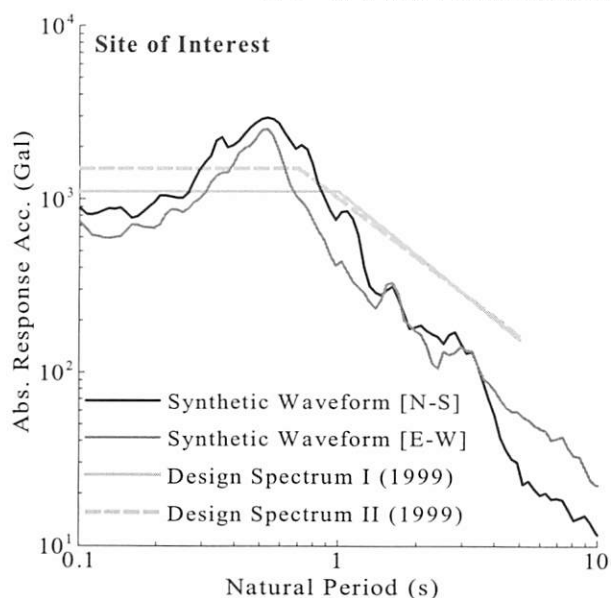


図-9 本震前の基準(1999)に対する応答スペクトルの比較

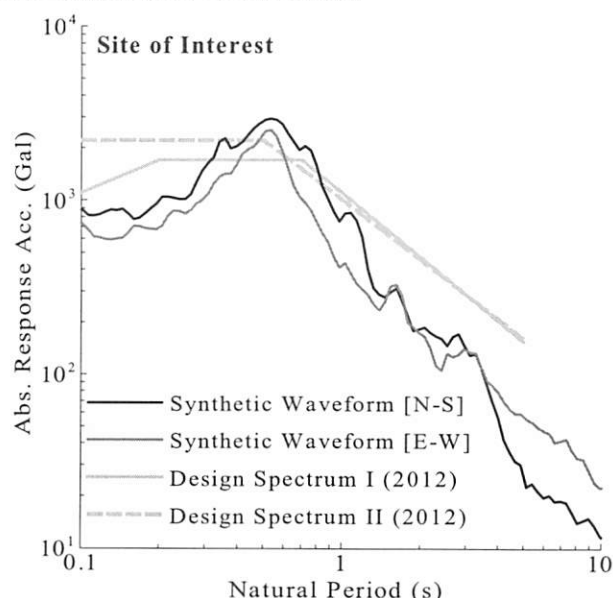


図-10 本震後の基準(2012)に対する応答スペクトルの比較

月)における鉄道構造物等設計標準・同解説^{17),18)}に基づく設計標準スペクトル(スペクトルI(海洋型地震)およびスペクトルII(内陸型地震))についても同時に示している。

図-8に示すとおり、対象地点における推定地震動は、泉区将監での観測地震動(図-5参照)ならびに八乙女駅における推定地震動(図-7参照)に対して、加速度振幅が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、対象地点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)¹⁷⁾を0.3~0.9sの周期帯で大きく上回っている。一方で、図-10に示すとおり、対象地点における推定地震動の応答スペクトルは本震後の設計標準スペクトルを0.4~0.8sの周期帯で若干上回っているものの、本震後の設計標準スペクトル(2012)¹⁸⁾は対象地点での推定地震動の応答スペクトルを全周期帯(0.1~5s)にわたってほぼ包絡している。

6. まとめ

本研究では、丸山の手法を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)における仙台市地下鉄高架橋被災地点(対象地点)での強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 対象地点と周辺の既存強震観測点では、地盤震動特性が大きく異なっており、常時微動計測などを実施し、対象地点でのサイト増幅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) 丸山の手法を利用すれば、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地震動とその指標値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、0.3~0.9秒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IならびにスペクトルII)を上回る加速度応答を示す。

- 4) 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IおよびスペクトルII)は、一部の周期帯(0.4~0.8秒付近)を除いて、対象地点における推定地震動の絶対加速度応答スペクトルを概ね包絡する。

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。なお、推定地震動は、常時微動計測によるサイト増幅特性に基づいているため、余震観測によるサイト増幅特性に基づく推定地震動と比較して、地震動の推定精度が低下している可能性¹⁹⁾があることは否定できず、この点については常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の新たな評価方法の開発⁸⁾などを含めた検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究では、仙台市地下鉄、東北工業大学 Small-Titan、宮城県による地震観測データをそれぞれ利用させていただきました。(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)の委員の皆様には、本研究の遂行に際して有益なご意見をいただきました。記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 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.
- 秋山充良：仙台市市営地下鉄(八乙女駅~泉中央駅間)の高架橋，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東日本大震災による橋梁等の被害分析WG報告書，pp.II-29-II-23, 2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- 神山眞，荘司雄一，松川忠司，浅田秋江，中居尚彦：オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察，土木学会論文集，No.688，pp.283-298, 2001.
- 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.
- 秦吉弥，常田賢一，林健二：常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み，地盤と建設，Vol.31, No.1, 2013. (Submitted)
- 秦吉弥，一井康二：2011年東北地方太平洋沖地震による被災地点周辺の既存強震観測点におけるサイト増幅特性の評価，広島大学大学院工学研究科研究報告，Vol.61, No.1, 2013.
- 長尾毅，山田雅行，野津厚：常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.56A，pp.324-333, 2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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，No.556，pp.15-24, 2002.
- 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.
- 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.
- (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説ー耐震設計，丸善株式会社，467p., 1999.
- (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説ー耐震設計，丸善出版，418p., 2012.
- 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ー2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象としてー，土木学会論文集，Vol.69，No.2，pp.186-205, 2013.