

中小地震観測記録に基づく東北新幹線 愛宕・稗田高架橋サイトにおける 地盤震動特性の評価

秦 吉弥¹・高橋 良和²・秋山 充良³・後藤 浩之⁴・野津 厚⁵

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

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

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

E-mail: yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³正会員 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akiyama617@waseda.jp

⁴正会員 京都大学防災研究所 地震災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 (独)港湾空港技術研究所 地震動研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

2003年三陸南地震(M_j7.1)では、東北新幹線のRCラーメン高架橋(愛宕高架橋など)が損傷するなど、深刻な被害が発生した。一方で、愛宕高架橋に隣接する稗田高架橋での被災は確認されていない。愛宕高架橋ならびに稗田高架橋における本震時の地震動を推定することは、被災機構の分析等を行う上で非常に重要である。そこで本研究では、当該高架橋沿いにおいて高密度の地震観測を実施し、得られた記録に基づいて、経験的サイト増幅・位相特性を評価した。そして、その評価結果に基づき、高架橋沿いのサイト特性に比較的大きな差異が見受けられること、及び当該高架橋に作用した本震時の推定地震動として、K-NET水沢で得られた本震記録の転用ができないことを示した。

Key Words : site effect, seismic observation, viaduct, the 2003 Southern Sanriku Earthquake

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)では、東北新幹線の橋梁が被災し¹⁾²⁾、東北新幹線の運行が機能不全に陥る一要因となった。新花巻駅～盛岡駅間にある愛宕高架橋のうち耐震補強未実施区間においては、小さな曲げひび割れの残留が確認されているだけで、2011年東北地方太平洋沖地震による被害は軽微なものであった³⁾。

愛宕高架橋は、2003年5月26日18時24分に発生した宮城県沖を震源とするマグニチュード7.1のスラブ内地震(以後、2003年三陸南地震と呼ぶ)の強震動の作用によって、写真-1に示すように、かぶりコンクリートの一部が剥落するほどの非常に大きな損傷を被っており、その後、損傷区間では鋼板巻き立てによる耐震補強が施されている⁴⁾。一方で、愛宕高架橋の北方に隣接する稗田高架橋は、2003年三陸南地震ならびに2011年東北地方太平洋沖地震においてともに無被災であり、現在のところ耐震補

強は実施されていない。

著者らはこれまで、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動によって深刻な被害を受けた橋梁地点での本震時の強震動を推定しているが⁵⁾¹²⁾、2011年東北地方太平洋沖



写真-1 2003年三陸南地震における愛宕高架橋の被災状況⁴⁾

地震以外の大規模な被害地震を対象とした強震動の評価を行っていくことは、橋梁の耐震性能照査の高度化などを今後図っていく上で非常に重要¹³⁾である。

そこで本稿では、地震動推定に関する基礎的検討として、愛宕高架橋・稗田高架橋(以後、対象高架橋と呼ぶ)沿いに高密度に地震計を設置することで、臨時地震観測を実施し、得られた記録に基づいて、対象高架橋沿いで経験的サイト増幅・位相特性の評価を行った。また、これら一連の手順を示すことにより、被災地点における地震観測の実施の重要性¹⁴⁾を示すことを試みた。

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)の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

図-1は、対象高架橋周辺の本震観測記録(3成分合成最大加速度 PGA 、SI値(E-W成分)¹⁵⁾、気象庁計測震度¹⁶⁾)の分布を示す。図-1に示すとおり、対象高架橋周辺には、4つの既存強震観測点(水沢IC、江刺支所、K-NET水沢¹⁷⁾、JMA水沢¹⁸⁾)が位置しており、対象高架橋に比較的近い強震観測点は、江刺支所およびK-NET水沢となっている(ただし、江刺支所では波形記録が残されていない)。このような場合、K-NET水沢での本震観測記録を対象高架橋の動的解析などに転用するという判断がなされがちであるが、近距離でもK-NET水沢とJMA水沢のように、本震時の地震動特性が異なる場合がある(図-1参照)。

図-2は、(独)産業技術総合研究所による対象高架橋周辺の地質図¹⁸⁾に既存強震観測点の分布(図-1参照)をプロットしたものであるが、対象高架橋とK-NET水沢では地質区分が異なっている。すなわち、対象高架橋ではサイ



図-1 愛宕・稗田高架橋周辺における本震観測記録の分布

ト特性などの影響で、K-NET水沢などとは異なる特性の地震動が本震時に作用していた可能性がある。

図-1および図-2から得られた知見に基づけば、本震時における地震動評価の際には、対象高架橋でのサイト特性の評価が必要不可欠であり、そのためには、現地での地震観測を行うことが有効であると考えられる。

図-3および図-4には、旧・国鉄による対象高架橋サイトでの地質縦断面図および地質平面図¹⁹⁾を示す。図-3およ



図-2 愛宕高架橋・稗田高架橋周辺における地質分布

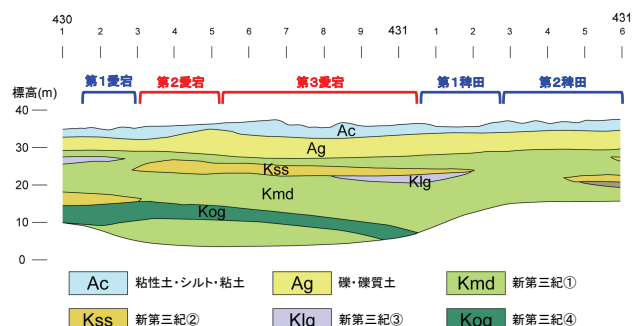


図-3 愛宕・稗田高架橋サイトにおける地質縦断面図

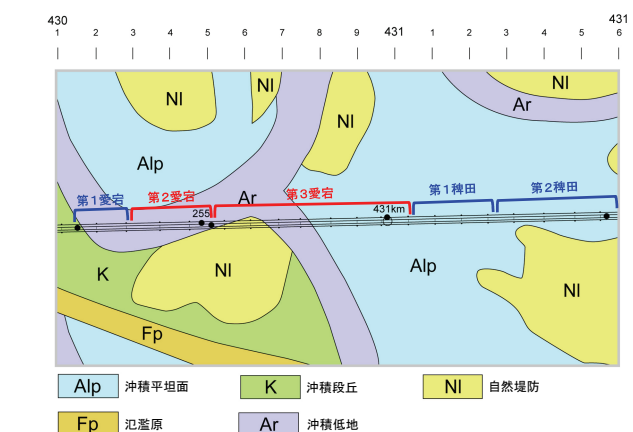


図-4 愛宕・稗田高架橋サイトにおける地質平面図

表-1 愛宕高架橋・稗田高架橋サイトで得られた地震観測記録の一覧

No.	Year/Month/Day	Hour : Min. (JST)	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)	Source region	JMA Mag.
EQ-01	2012/12/21	17:07	N38.642	E141.813	48	Off Miyagi Pref.	Mj5.2
EQ-02	2012/12/29	23:59	N38.717	E142.915	41	Off Miyagi Pref.	Mj5.5
EQ-03	2013/01/07	22:53	N37.862	E142.452	41	Off Miyagi Pref.	Mj4.9
EQ-04	2013/01/08	16:51	N40.118	E142.438	34	Off Iwate Pref.	Mj5.4
EQ-05	2013/01/10	21:48	N37.513	E141.472	48	Off Fukushima Pref.	Mj5.0
EQ-06	2013/01/13	12:17	N39.143	E142.312	48	Off Iwate Pref.	Mj4.8

び図-4に示すように、対象高架橋沿いの地質分布は一樣ではないことから、上述した対象高架橋～既存強震観測点のみならず、対象高架橋内(第1愛宕高架橋～第2稗田高架橋)においてもサイト特性が大幅に異なっている可能性が示唆される。

3. 高密度地震観測の実施

本検討では、図-5に示すように、第1愛宕高架橋から第2稗田高架橋までの約1.4kmの区間(以後、対象区間と呼ぶ)において概ね140mごとに計11か所の観測地点を設けることで、高密度の地震観測を実施した。

地震観測システム²⁰⁾としては、地震計のサンプリング周波数は100Hzとし、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を採用した(各観測点で共通)。地震計は東京測振(株)製のボアホール型加速度計SV-355、データロガーは白山工業(株)製LS-7000XTを使用した(いずれも各観測点で共通)。観測期間は、P-01, P-03(固定点), P-05, P-07, P-09(固定点), P-11では2012年12月20日～2013年1月8日の約18日間、P-02, P-03(固定点), P-04, P-06, P-08, P-09(固定点), P-10では2013年1月8日～2013年1月14日の約6日間である。表-1に得られた地震観測記録の一覧を示す。

4. サイト増幅特性の評価

図-6は、K-NET水沢のサイト増幅特性²¹⁾を補正して求めた場合の、江刺支所のサイト増幅特性²²⁾、および対象区間(P-01～P-11)のサイト増幅特性を比較したものである。なお、本稿でのサイト増幅特性は、いずれも地震基盤～地表相当である。対象区間におけるサイト増幅特性は、まず、対象区間とK-NET水沢で同時に得られた中小地震観測記録(表-1参照)を対象に、両地点の距離の違いによる補正²³⁾²⁴⁾を考慮した水平2成分合成のフーリエスペクトルの比率(対象区間/K-NET水沢)を計算し、この比



図-5 愛宕高架橋・稗田高架橋サイトでの地震観測地点

率をK-NET水沢における既存のサイト増幅特性²¹⁾に掛け合わせることで評価²⁵⁾²⁶⁾した。ここに、フーリエスペクトルの比率は、観測地震数(P-03およびP-09(固定点)では6地震、P-01, P-02, P-04～P-08, P-10, P-11では3地震)に応じたスペクトル比の平均となる。

図-6に示すように、周辺の観測点であるK-NET水沢や江刺支所のサイト増幅特性と、対象区間(P-01～P-11)のサイト増幅特性の間には、比較的大きな差異があり、対象地点に作用した本震時の地震動として、周辺の観測点で得られた本震記録(図-1参照)を直接転用することはできないことが示唆される。さらに、対象区間(P-01～P-11)内においてもサイト増幅特性に顕著な差異が生じており、2003年三陸南地震における被災区間(P-06～P-09付近)では、他区間(P-01～P-05およびP-10～P-11)と比較して、0.5～2Hz付近のスペクトルが卓越する傾向にあることが読み取れる。したがって、異なる高架橋間(愛

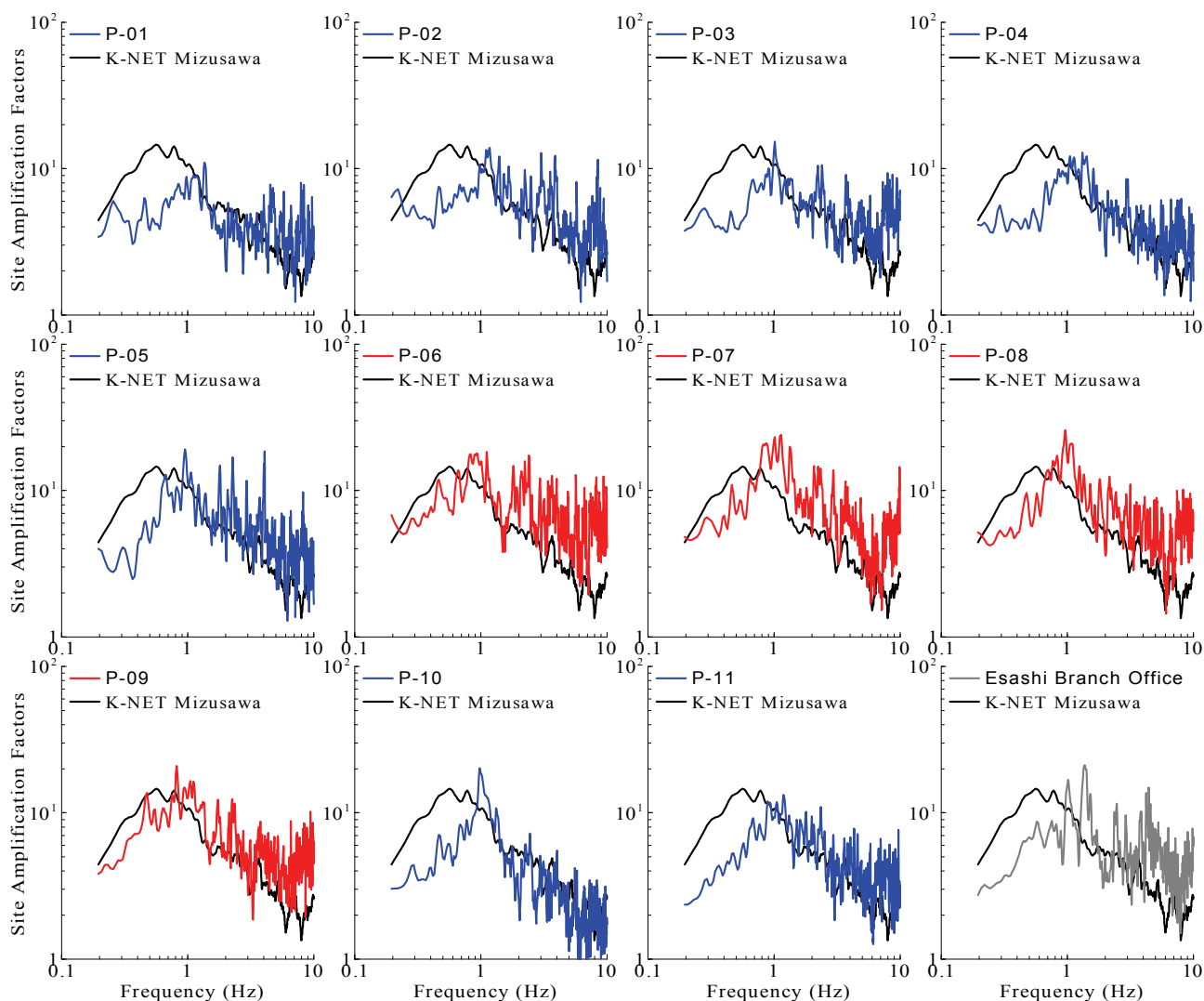


図-6 愛宕高架橋・稗田高架橋におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

宕高架橋～稗田高架橋)だけでなく、同じ高架橋内における地点間においても、2003年三陸南地震の際に作用した地震動の特性は、比較的大きく異なっていたものと推察される。

5. サイト位相特性の評価

対象とする大規模地震の地震動のフーリエ位相が、同じ地点における余震(中小地震)の地震動のフーリエ位相と類似していることが、断層モデルに基づく経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法²⁷⁾²⁸⁾やサイト特性置換手法²⁹⁾の基本となる考え方である。2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした場合において、著者ら³⁰⁾³¹⁾³²⁾は、宮城県沖³⁰⁾をはじめとして、福島県沖³¹⁾や茨城県沖³²⁾を震源とする余震のフーリエ位相が、本震波形のフーリエ位相に対して良い近似となっていることを確認している。ただし、観測記録の中で、どの中小地震の

フーリエ位相が解析に最も適しているかは、地域毎に確認を行っていく必要がある。そこでここでは、本研究で対象とする愛宕高架橋、稗田高架橋、及びその周辺地域を対象として、サイト位相特性の評価に用いるのに適した中小地震を選択するための基礎的検討³³⁾³⁴⁾を行った。

図-7はその検討結果である。すなわち、2003年三陸南地震におけるK-NET水沢での観測記録の速度波形(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EQ-02(表-1および図-8参照)の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。なお、図-7では、先行研究¹²⁾と同様に、0.2～3Hzのバンドパス・フィルタを施した速度波形を比較対象としている。図-7に示すとおり、観測波と置換波が非常に良い一致を示している。すなわちこれは、EQ-02のフーリエ位相が、2003年三陸南地震のフーリエ位相に対するより良い近似となっていることを意味していることから、EQ-02によって対象高架橋(P-01, P-03, P-05, P-07, P-09, P-11 : 図-5

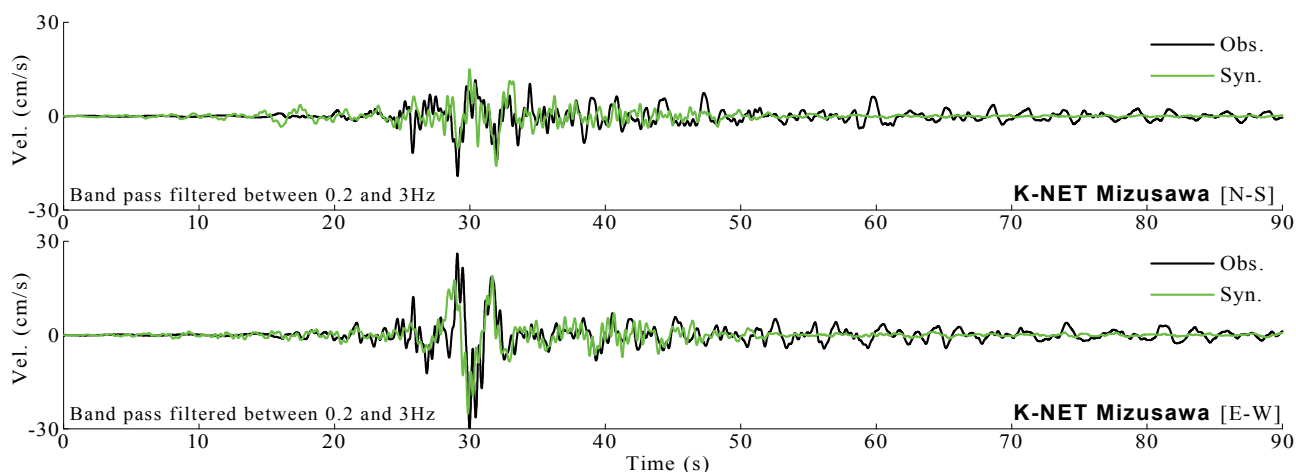


図-7 K-NET水沢での観測記録を利用した2003年三陸南地震によるサイト位相特性の評価

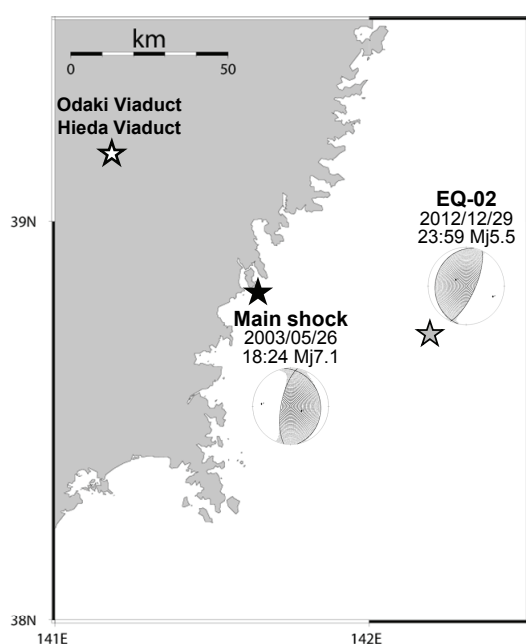


図-8 サイト位相特性の評価のための宮城県沖の中小地震

参照)で得られた観測波形をサイト位相特性として採用するのが望ましいと考えられる。

6. まとめ

本稿では、2003年三陸南地震における東北新幹線愛宕高架橋サイトならびに稗田高架橋サイトでの地震動を推定するための基礎的検討として、当該サイトにおいて高密度の地震観測を実施し、得られた記録に基づいて、サイト増幅・位相特性を評価した結果について述べた。

現時点で得られた知見の1つとして、本震時にK-NET水沢で得られた観測地震動を、愛宕高架橋ならびに稗田高架橋に作用した本震時の地震動と見なすことはできないことが明らかとなった。

今後は、本稿で評価したサイト増幅・位相特性に基づいて、2003年三陸南地震の特性化震源モデル³⁹⁾を用いた強震波形計算²⁸⁾を実施することによって、本震時における愛宕高架橋・稗田高架橋沿いでの地震動を推定していきたいと考えている。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NET、気象庁、NEXCO東日本、岩手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。地震観測実施の際には、岩手県奥州市江刺区の住民の皆様には大変お世話になりました。(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の委員の皆様には、本検討に際して貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kawashima, K.: Damage of bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.12, No.4, pp.319-338, 2012.
- 2) 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.
- 3) 秋山充良: 第2・3 愛宕高架橋, 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-15-II-18, 2012.
- 4) (社)土木学会: 2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析, コンクリート委員会三陸南地震被害分析小委員会, コンクリートライブラリー, No.114, 2004.
- 5) 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.

- 6) 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.49-52, 2012.
- 7) 秦吉弥, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における岩切線路橋での地震動の評価, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.383-395, 2013.
- 8) 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ゴム系支承の被災橋梁での地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.3, pp.30-56, 2013.
- 9) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震による南三陸町志津川での強震動の評価, 土木学会論文集 B3, Vol.69, No.2, pp.161-166, 2013.
- 10) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 一井康二: 2011 年東北地方太平洋沖地震による長町高架橋被災区間での地盤震動特性の評価, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, No.1-224, pp.447-448, 2013.
- 11) 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, 土木学会, pp.117-122, 2013.
- 12) 秦吉弥, 高橋良和, 秋山充良, 後藤浩之, 野津厚: SPGA モデルに基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における愛宕高架橋および稗田高架橋での強震動の推定, 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, 土木学会, pp.109-116, 2013.
- 13) たとえば, 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.
- 14) 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 A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 15) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
- 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) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 18) 鹿野和彦, 星住英夫, 巖谷敏光, 酒井彰, 山元孝広, 牧本博, 久保和也, 柳沢幸夫, 奥村公男: (資料・解説)地質図に用いる用語, 記号, 模様, 色及び凡例の表示に関する基準とその解説, 地質調査所月報, 第 51 巻, 第 12 号, pp.657-678, 2000.
- 19) 日本国有鉄道仙台新幹線工事局: 東北新幹線(桑折・有壁間)地質図, 東建地質調査株式会社編, 240p., 1981.
- 20) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 柴尾享, 山田雅行, 満下淳二, 小泉圭吾: アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 論文集, 地盤工学会, pp.21-26, 2010.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) (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.
- 26) 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.
- 27) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.97-104, 1998.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 秦吉弥, 釜井俊孝, 野津厚, 王功輝: 拡張型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仙台市緑ヶ丘団地での強震動の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.153-158, 2013.
- 31) 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—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—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.139-149, 2012.
- 32) 秦吉弥, 鍛田泰子, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋での地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.374-393, 2012.
- 33) 野津厚: 2008 年 9 月 11 日十勝沖の地震(M7.1)による地震動のフーリエ位相特性, 第 44 回地盤工学研究発

表会講演概要集, No.747, pp.1493-1494, 2009.

- 34) 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.

- 35) 長坂陽介 研究官および野津厚 地震動研究チームリーダー(ともに(独)港湾空港技術研究所地震防災研究領域)との私信, 2013.

(2013. 9. 19 受付)

EVALUATION OF SITE AMPLIFICATION AND PHASE EFFECTS
ALONG ODAKI AND HIEDA VIADUCTS OF TOHOKU SHINKANSEN
BASED ON SEISMIC OBSERVATION WITH HIGH DENSITY

Yoshiya HATA, Yoshikazu TAKAHASHI, Mitsuyoshi AKIYAMA,
Hiroyuki GOTO and Atsushi NOZU

A serious damage occurred at RC rigid frame viaduct sites of Tohoku Shinkansen in Esashi Ward, Oshu City, during the 2003 Southern Sanriku Earthquake (Mj7.1). In this study, to evaluate ground motions at the viaduct sites, temporary seismic observation with high density was conducted along the viaduct sites. The evaluated site amplification factors between the sites and K-NET Mizusawa (IWT011) are not very similar. It indicates that the observed ground motion at IWT011 during the 2003 main shock cannot be regarded as the ground motion at the sites of interest.