

サイト特性置換手法に基づく2003年三陸南地震における 猪鼻高架橋および中曽根高架橋での強震動の推定

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 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C1-2)

³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)

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)

⁵正会員 博士(工学) (独)港湾空港技術研究所 領域長 (〒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、東北新幹線の橋梁が被災し、東北新幹線の運行が機能不全に陥る一要因となった。その中でも岩手県北上市にある第一中曽根高架橋(以後、中曽根高架橋と呼ぶ)では、強震動の作用により、起点側および終点側の端部柱のコアコンクリートが完全に破壊し、荷重支持能力を喪失する深刻な損傷が報告されている¹⁾。この経験を踏まえた今後の高架橋の耐震性評価のためにも、当該地点の地震動を推定することは非常に重要である。この点に関して、著者ら^{2),3)}は、拡張型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における第一中曽根高架橋での強震動を推定している。一方で、2003年に発生した宮城県沖を震源とするスラブ内地震(2003/05/26 18:24 M 7.1)(以後、2003年三陸南地震と呼ぶ)による強震動の作用によって、岩手県花巻市にある東北新幹線の第五猪鼻高架橋(以後、猪鼻高架橋と呼ぶ)は、かぶりコンクリートの一部が剥落する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。なお、猪鼻高架橋近くに位置する第一中曽根高架橋では、2003年三陸南地震による被災は報告されていない。

2003年三陸南地震後に行われた猪鼻高架橋の被害分析⁴⁾では、その数値解析に際し、猪鼻高架橋との距離、および地盤条件の類似性などから、周辺の既存強震観測点であるK-NET石鳥谷で得られた記録を入力地震動とした動的解析などが行われ、RC柱がせん断で損傷することを再現している。しかしながら、被害の生じた近くに位置する同種のRCラーメン高架橋(本稿では、中曽根高架橋)に関して同じ入

力地震動を用いて動的解析を行うと、実際には地震被害の生じていなかった中曽根高架橋に、計算上、せん断による損傷が発生することになる。すなわち、ほぼ同種の構造が類似の地盤条件にあり、しかも比較的近い距離に存在しているにも関わらず、損傷の有無が生じていることを説明できない。

この点を参考に、著者ら⁵⁾は、2003年三陸南地震における愛宕高架橋(被災)および稗田高架橋(無被災)での強震動を推定している。さらに著者らは、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これまで推定しているが(例えば^{2),3),6)}、2011年東北地方太平洋沖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事例⁵⁾は少なく、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⁷⁾である。

そこで本稿では、2003年三陸南地震による猪鼻高架橋および中曽根高架橋(以後、対象地点と呼ぶ：図-1参照)での強震波形を推定した結果について述

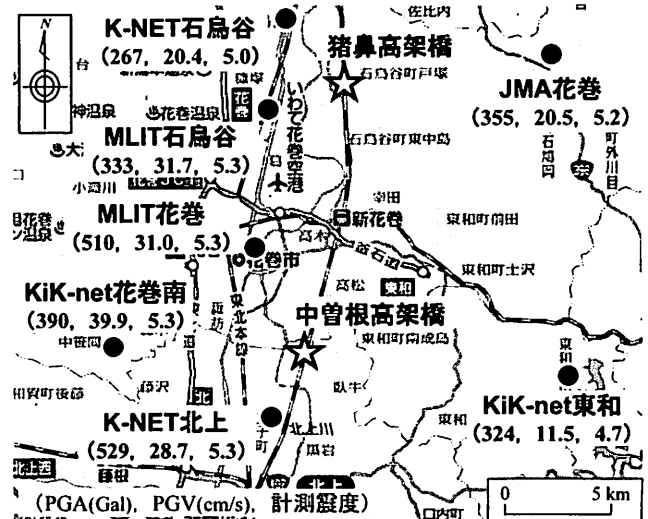


図-1 猪鼻高架橋・中曽根高架橋周辺の強震観測点の分布

べる。具体的には、まず、対象地点の極近傍で実施した余震観測により得られた結果に基づいて、対象地点におけるサイト増幅・位相特性を評価した。次に、サイト特性置換手法⁸⁾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、地震動推定手法の対象地点へ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性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会(委員長：矢部正明 (株)長大)の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に対象地点周辺の既存強震観測点で得られた2003年三陸南地震による記録(左から、最大加速度

値PGA(3成分合成)、最大加速度値PGV(3成分合成)、気象庁計測震度)の分布を示す。なお、対象地点では、2003年三陸南地震時に強震観測が実施されていない。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(地盤震動特性)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. 臨時地震観測

著者ら^{2),3)}は、中曽根高架橋の極近傍において2011年4月18日～7月14日の約3ヶ月間にわたって地震観測を行っている。具体的には、地震計としてボアホール型の加速度計を採用し、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は橋軸方向(LG-N15°E)・橋軸

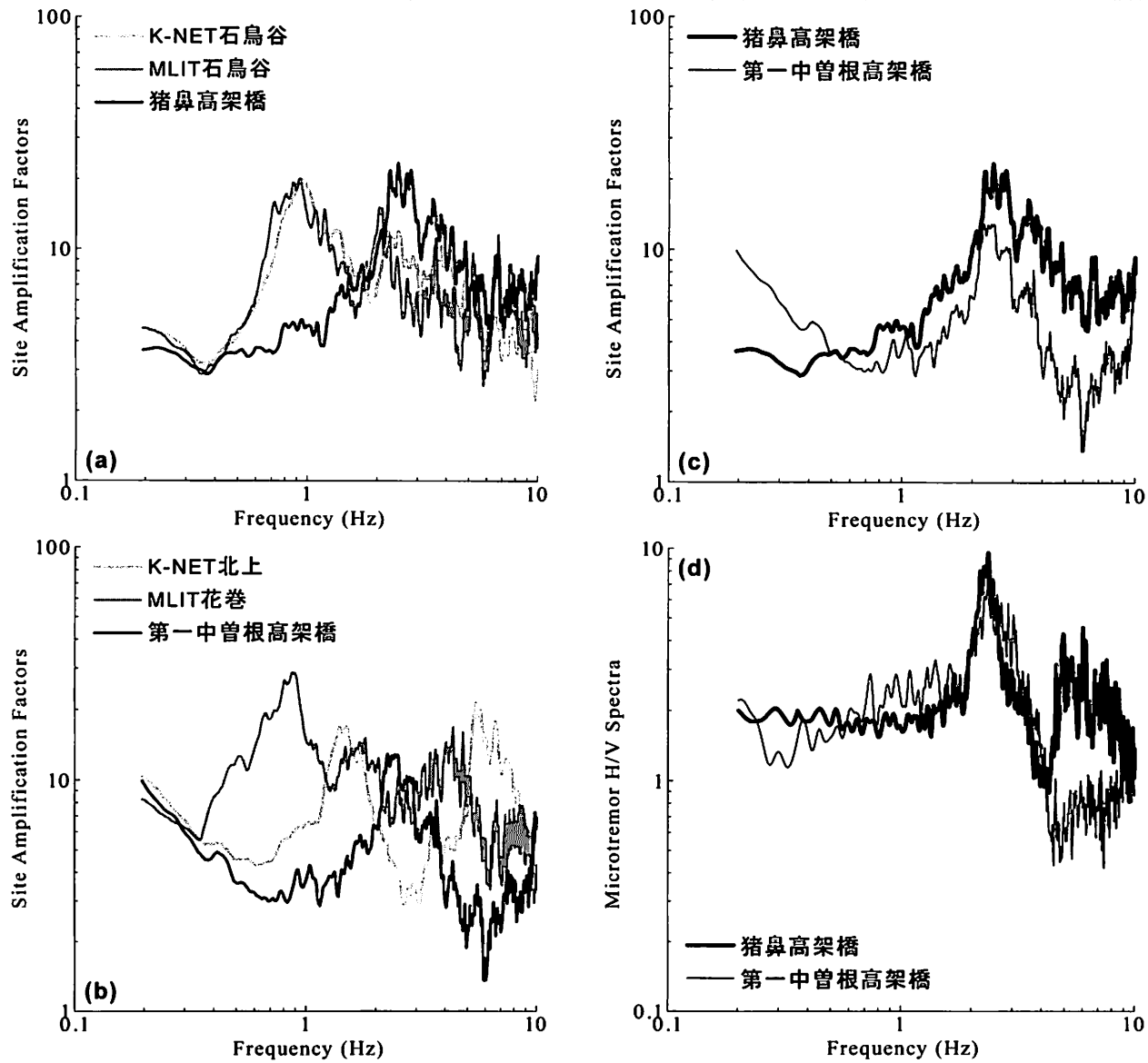


図-2 対象地点とその周辺観測点におけるサイト増幅特性(同図(a)～(c))と、常時微動H/Vスペクトル(同図(d))の分布

直角方向 (TR-N105°E)・鉛直方向の計3成分である。

本研究では、中曽根高架橋サイトでの地震観測と同様に、猪鼻高架橋サイトにおいても地震観測を実施した。観測期間は2011年4月18日～5月24日の約1ヶ月間である。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、橋軸方向 (LG-N5°W)・橋軸直角方向 (TR-N85°E)・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。

4. 地盤震動特性の評価

図-2(a)に猪鼻高架橋(地震観測地点)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(地震基盤～地表)¹⁰⁾を示す。猪鼻高架橋におけるサイト増幅特性は、ま

ず、対象地点とK-NET石鳥谷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^{11),12)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(猪鼻高架橋/K-NET石鳥谷)を計算し、この比率をK-NET石鳥谷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。MLIT石鳥谷のサイト増幅特性についても、2011年東北地方太平洋沖地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-2(b)には、先行研究^{2),3)}に基づく、中曽根高架橋(地震観測地点)でのサイト増幅特性(地震基盤～地表)に対する周辺観測点のサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較についても示す。

図-2(a)および図-2(b)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、2003年三陸南地震時の地震

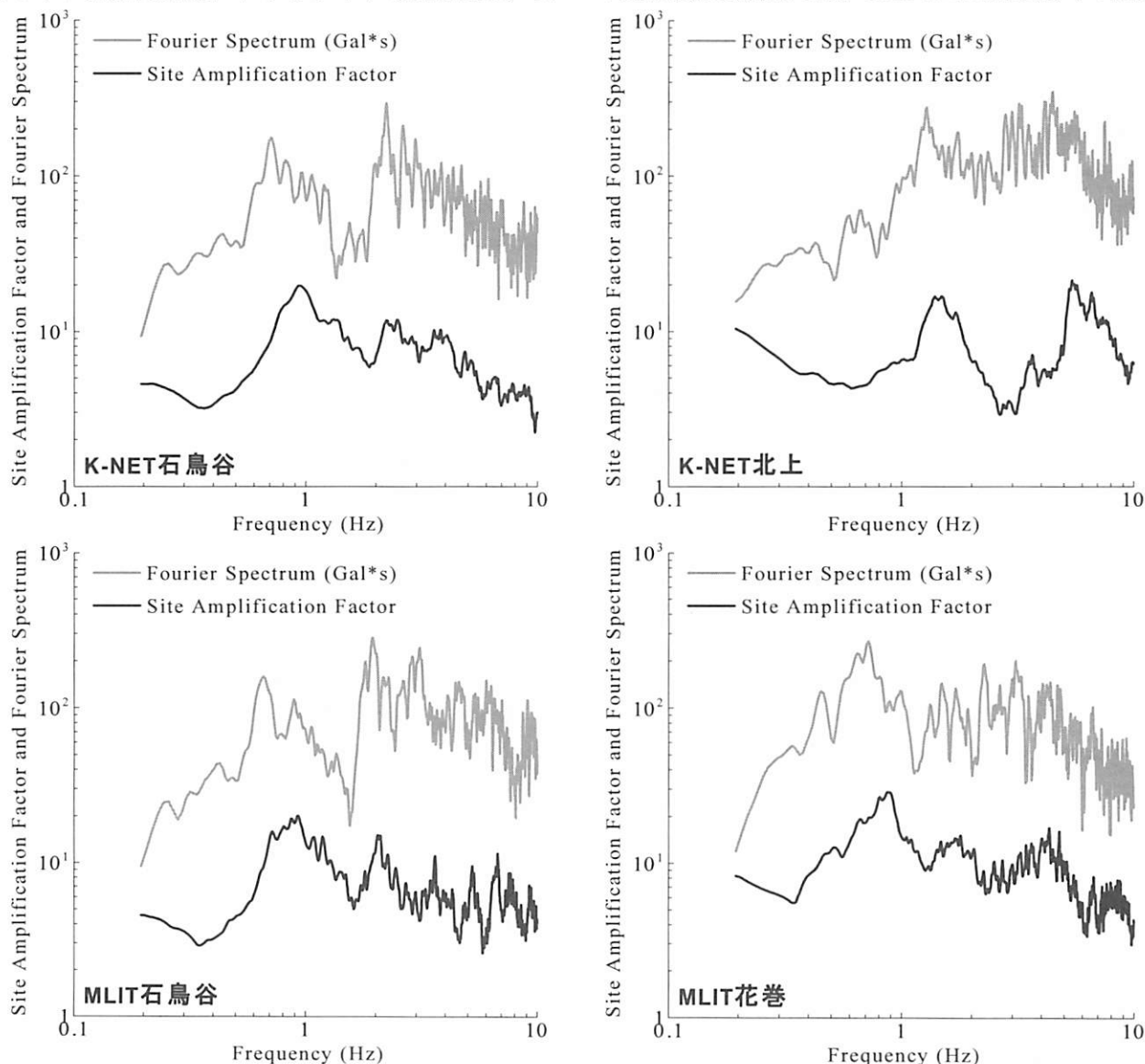


図-3 対象地点周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性(線形)と、観測地震動のフーリエ振幅スペクトルの分布

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が高いことを示唆している。

図-2(c)は、猪鼻高架橋のサイト増幅特性(図-2(a)参照)に対して、中曽根高架橋のサイト増幅特性(図-2(b)参照)^{2),3)}を重ね合せたものである。図-2(c)に示すように、猪鼻高架橋および中曽根高架橋ともに2~3Hzにかけて顕著なピーク周波数を有しており、0.5Hzよりも高周波数帯域において猪鼻高架橋のサイト増幅特性が中曽根高架橋のサイト増幅特性を連続的に上回っている。

図-2(d)は、既存の中曽根高架橋での常時微動H/Vスペクトル²⁾に対して、猪鼻高架橋における常時微動H/Vスペクトルを比較したものである。猪鼻高架橋サイトでの常時微動計測は、臨時地震観測地点(3.参照)において実施し、計測時間は1計測点あたり11分間、サンプリング周波数は100Hzとした。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3成分であり、常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、既往の方法¹³⁾を採用した。図-2(d)に示すとおり、猪鼻高架橋サイトならびに中曽根高架橋サイトともに2~3Hzにかけて明瞭なピーク周波数が確認できる。なお、猪鼻高架橋サイトにおける2~3Hzのピーク周波数の存在は、目黒ほか¹⁴⁾による報告においても確認されており本稿においても同様の結果が得られた。

図-3は、対象地点周辺の強震観測点における2003年三陸南地震による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-2参照)を比較したものである。図-3に示すように、猪鼻高架橋サイトならびに中曽根高架橋サイト周辺では、観測地震動とサイト増幅特性(線形)のピーク周波数がいずれも良い一致を示しており、多重非線形効果^{例えは15)}の影響が比較的小さいことが示唆される。よって、後述する2003年三陸南地震時の強震動の推定では、中小地震観測記録に基づく線形のサイト増幅特性(図-2参照)を直接利用することとした。

5. 地震動推定手法

本研究では、サイト特性置換手法⁸⁾を用いて、対象地点およびその周辺の強震観測点(以後、推定点とまとめて呼ぶ)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、MLIT石鳥谷(猪鼻高架橋)およびMLIT花巻(中曽根高架橋)をそれぞれ選定した。次に、基準観測点での地震動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4.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¹⁶⁾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、このとき用いる中小地震観測記録としては、図-5に示すように、2003年三陸南地震の特性化震源モデル¹⁷⁾および疑似点震源モデル¹⁸⁾の構築に利用されている中小地震EQ-1に対する震源の位置関係、

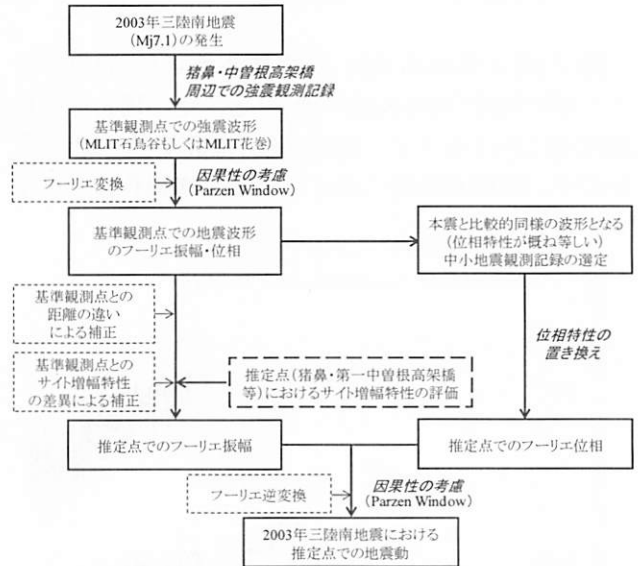


図-4 サイト特性置換手法⁸⁾に基づく地震動推定フロー

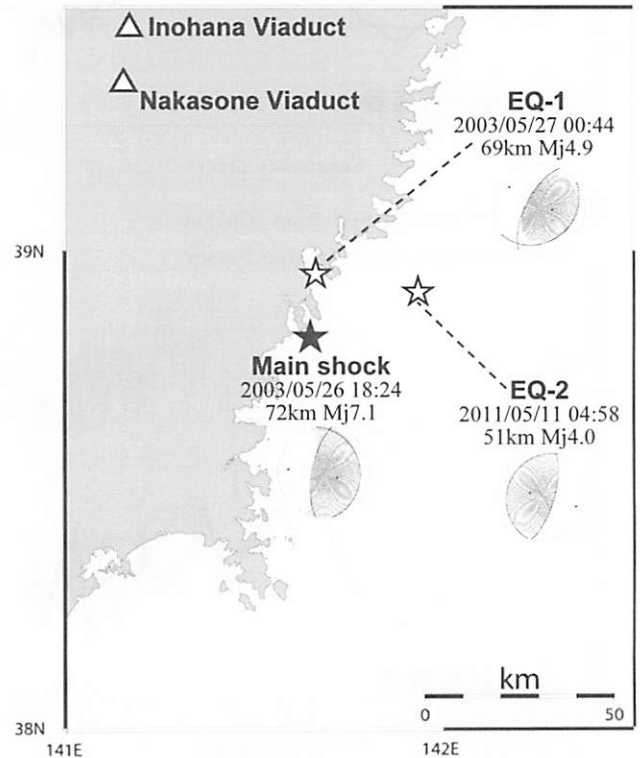


図-5 サイト位相特性の評価に利用した中小地震

および推定点(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に関する検討^{例え19)}の結果を踏まえた上で、宮城県沖を震源とする地震(EQ-2; 2011/05/11 04:58 $M_{4.0}$)による推定点での観測記録を採用した。

6. 推定手法の適用性確認

図-6(e)～(h)に対象地点周辺のK-NET石鳥谷およびK-NET北上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。さらに、絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したものを図-7(a)～(h)に示す。

図-6(e)～(h)および図-7(a)～(h)に示すとおり、

猪鼻高架橋サイト周辺ならびに中曽根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、2003年三陸南地震時における対象地点での強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。

7. 地震動推定結果

図-8は、対象地点(猪鼻高架橋サイトおよび中曽根高架橋サイト)における2003年三陸南地震時の推

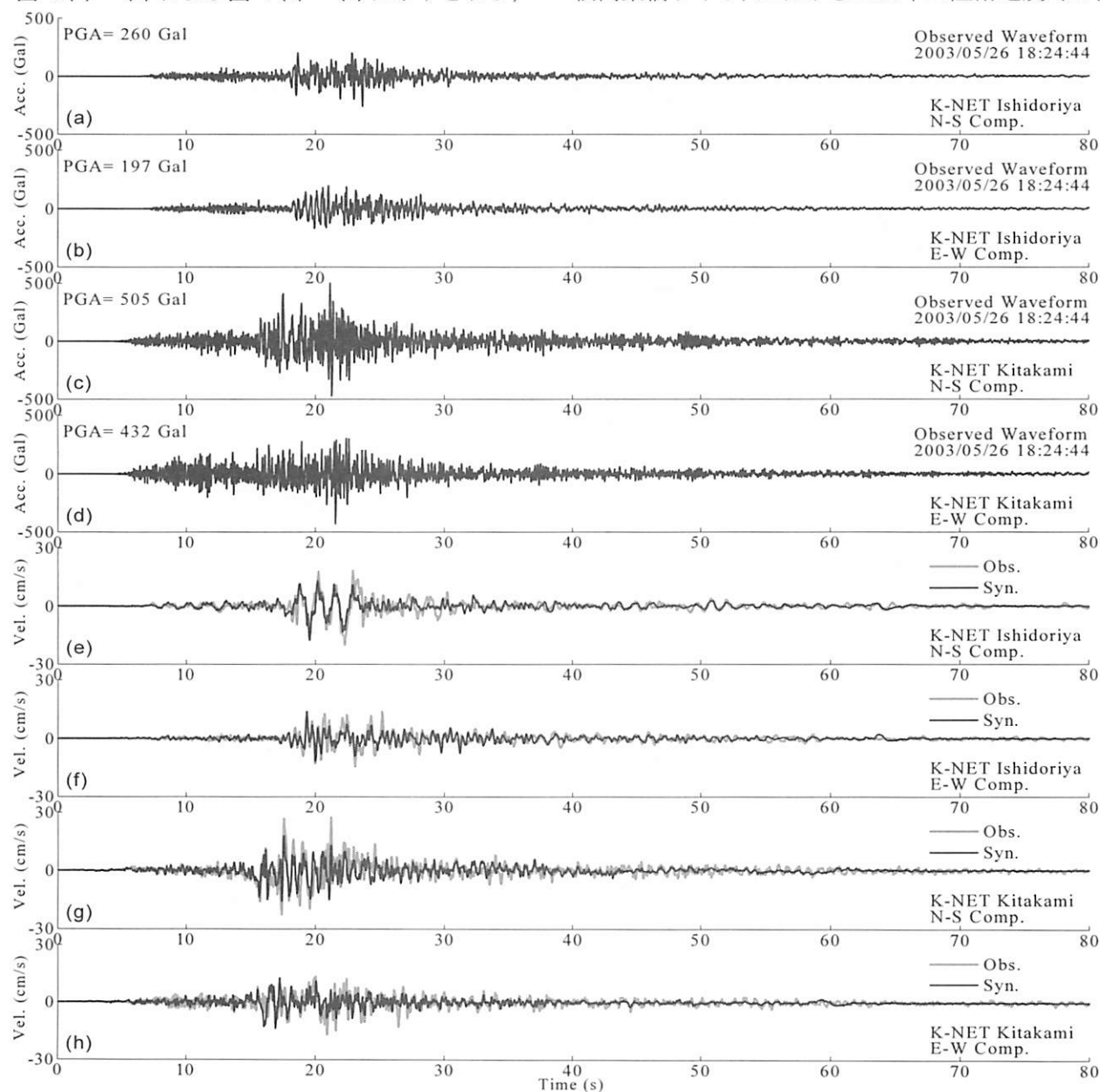


図-6 K-NET観測点における本震観測記録の加速度時刻歴(同図(a)～(d))と地震動推定手法の適用性確認(同図(e)～(h))

定強震波形である。また図-7(i)~(l)には、推定加速度波形(図-8(a)~(d)参照)による絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を示す。さらに、絶対加速度応答スペクトルを表す図-7(i)および図-7(k)には、2003年三陸南地震以前(1999年10月)の鉄道構造物等設計標準・同解説²⁰⁾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-6と図-8を比較すると、対象地点(猪鼻高架橋サイトおよび中曽根高架橋サイト)における推定地震動は、周辺の既存強震観測点(K-NET石鳥谷およびK-NET北上)で得られた観測地震動に対して、振幅や波形形状などの地震動特性が大きく異なってい

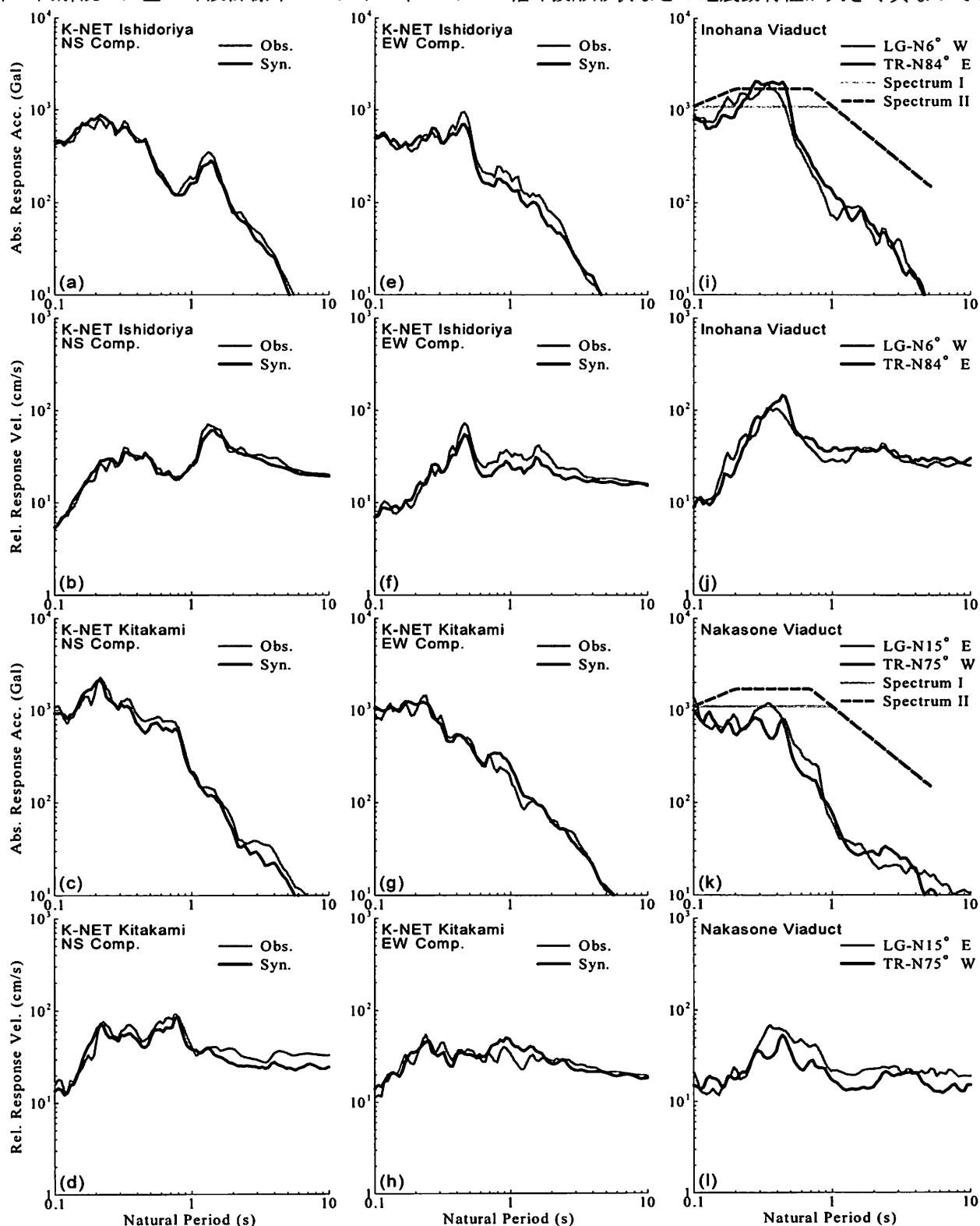


図-7 応答スペクトルによる推定手法の適用性確認(同図(a)~(h))と、推定地震動の応答スペクトル(同図(i)~(l))

るのが読み取れる。また、加速度波形(図-8(a),(b)と図-8(c),(d))ならびに速度波形(図-8(e),(f)と図-8(g),(h))について比較すると、中曽根高架橋サイトよりも猪鼻高架橋サイトのほうが2003年三陸南地震時に大きな地震動が作用しており、被災の有無と調和的な結果を示している。

さらに、図-7(i),(k)に示すとおり、本震前の設計標準スペクトル(1999)²⁰⁾は、中曽根高架橋サイトにおける推定地震動の絶対加速度応答スペクトルを対象周期帯域(0.1-5s)においてほぼ包絡している。一方で、猪鼻高架橋サイトにおける推定地震動の絶対加速度応答スペクトルは、0.2~0.5s付近の固有周期帯域において設計標準スペクトル(1999)を上回っている。これらの応答スペクトルの比較結果は、2003年三陸南地震において猪鼻高架橋では被災、および

中曽根高架橋では無被災であった実績(1. 参照)と矛盾していないことが確認できる。

8. まとめ

本研究では、サイト特性置換手法を用いて、2003年三陸南地震($M_7.1$)での第五猪鼻高架橋および第一中曽根高架橋(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、地震観測を実施し、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、2003年三陸南地震による対象地点周辺の観測点で得られた

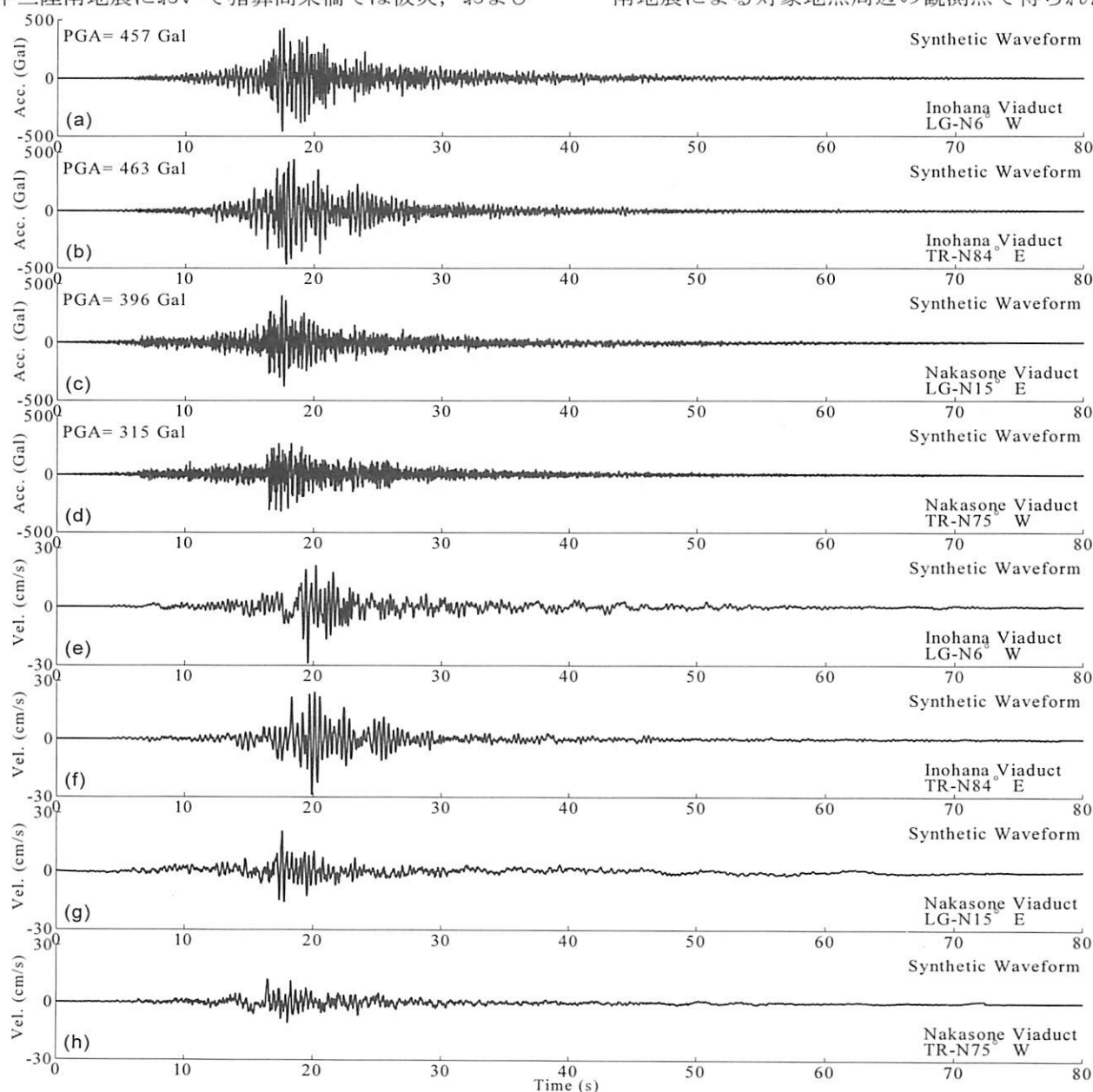


図-8 対象地点における推定地震動の加速度時刻歴(同図(a)~(d))および速度時刻歴(同図(e)~(h))

強震波形を一定の精度で再現することができる。

- 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、猪鼻高架橋では、0.2～0.5秒付近の周期帯において、鉄道構造物の設計標準スペクトル(1999)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)防災科学技術研究所K-NET/KiK-net、気象庁、国土交通省MLIT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。現地での地震観測実施の際には、岩手県花巻市・北上市の住民の皆様にご多大のお世話になりました。

参考文献

- 1) 高橋良和、後藤浩之：2011年東北地方太平洋沖地震による第1中曽根高架橋の被害、第14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.465-472, 2011.
- 2) 秦吉弥、野津厚、中村晋、高橋良和、後藤浩之：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よる新幹線橋梁被災地点での地震動の推定、第14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.227-234, 2011.
- 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) (公社)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) 秦吉弥、秋山充良、高橋良和、後藤浩之、野津厚：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく2003年三陸南地震における東北新幹線愛宕・稗田高架橋での強震動の推定、土木学会論文集A1, Vol.70, No.4, 2014 [in press].
- 6) 秦吉弥、秋山充良、高橋良和、後藤浩之、野津厚、一井康二：SPGA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長町高架橋での地震動と fragilityカーブの評価、構造工学論文集、土木学会、Vol.60A, pp.214-227, 2014.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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、地盤工学会、Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.
- 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、No.556, pp.15-24, 2002.
- 13) 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.
- 14) 目黒公郎、高島正典、吉村美保、黒田武大、菅野有美：2003年5月26日三陸南地震における東北新幹線高架橋橋脚の損傷と局所的な地盤震動特性の関係、生産研究、Vol.55, No.4, pp.396-398, 2003.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 長坂陽介、若井淳、野津厚：2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の震源モデル、日本地震工学会第10回年次大会梗概集、pp.357-358, 2013.
- 18) 若井淳、長坂陽介、野津厚：2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の疑似点震源モデル、日本地震工学会第10回年次大会梗概集、pp.359-360, 2013.
- 19) 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.
- 20) (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.