

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

秦吉弥¹・野津厚²・中村晋³・高橋良和⁴・後藤浩之⁵

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（独）港湾空港技術研究所 チームリーダー（〒160-0004 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

³正会員 工博 日本大学 教授 工学部土木工学科（〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1）

⁴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）

⁵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）

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1中曽根高架橋R7では、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甚大な損傷が発生した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、当該地点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、サイト特性置換手法²⁾を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)における第1中曽根高架橋R7地点(以後、被災地点とよぶ)での地震動を推定した。具体的には、まず、被災地点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、被災地点におけるサイト特性を評価した。次に、既存のサイト特性置換手法²⁾を拡張し、新たな手法の開発を行った。さらに、開発した手法を用いて被災地点周辺の強震観測点での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、拡張したサイト特性置換手法を用いて被災地点での地震動を推定した。

なお、本研究は、2011年東北地方太平洋沖地震6学協会東北支部学術合同調査委員会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. 強震観測記録の整理

図-1に被災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おらず、最も近い既存強震観測点はK-NET北上である。この図より、K-NET北上とJMA北上のように、比較的近傍の位置関係にあるにも関わらず地震動の大きさが異なっている場合がある。これは、各強震観測点におけるサイト特性が影響しているためと考えられ、K-NET北上と被災地点についても地震動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

まず、余震観測にあたり、被災地点と地盤震動特性が類似した地震計設置地点を選定するため、図-2に示す地点などにおいて常時微動計測を実施した。

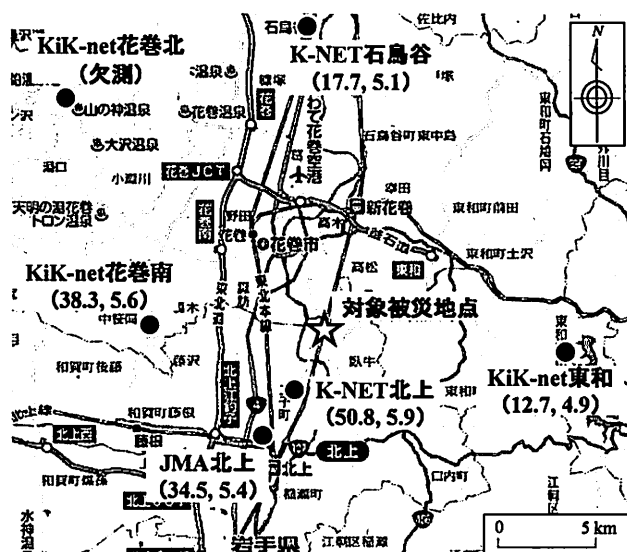


図-1 最大速度(3成分合成)と計測震度の分布

計測地点は、被災地点の側道(P-1～P-3)、後述する余震観測地点およびボーリング地点、K-NET北上である。計測時間は1計測点あたり11分間とし、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スペクトルの計算では、水平2成分の平均をとった。

図-3に各計測地点での常時微動H/Vスペクトルを示す。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³⁾を採用した。図-3に示すとおり、被災地点の側道、余震観測地点、ボーリング地点では、常時微動H/Vスペクトルがほぼ一致しており、これらの地点では、サイト特性が類似している可能性が極めて高いと考えられる。一方で、K-NET北上における常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数やスペクトル形状は、被災地点と大きく異なっていることから、K-NET北上と被災地点におけるサイト特性(地盤震動特性)が類似しているとは言い難い。

そこで、本研究では、被災地点極近傍の住家の庭先(写真-1および図-2参照)において2011年4月18日に地震計を設置し、7月14日まで約3ヶ月間の余震観測を実施した。地震計はボアホール型の加速度計であり、サンプリング周波数は100Hzとした。観測方向は、橋軸方向(LG-N15°E)、直角方向(TR-N105°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。

(2) サイト増幅特性

図-4に被災地点(=余震観測地点)におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)と、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性⁴⁾(地震基盤～工学的基盤)を示す。被災地点におけるサイト増幅特性は、まず、被災地点とK-NET北上で同時に得られた地震観測記録を対象に、図-5に示す幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率(被災地点/K-NET北上)を計算し、この比率をK-NET北上における既存のサイト増幅特性⁴⁾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。そして、得られたサイト増幅特性(地震基盤～地表)を、被災地点の極近傍において実施したボーリング・PS検層の結果に基づく地盤解析モデル(図-6参照)による伝達関数(工学的基盤～地表)で除することによって、被災地点におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を算定した。JMA北上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。ここで、せん断波速度 $V_s=300\text{m/sec}$ 以上(またはN値50以上)が連続している地盤を工学的基盤とした。なお、JMA北



図-2 常時微動計測位置

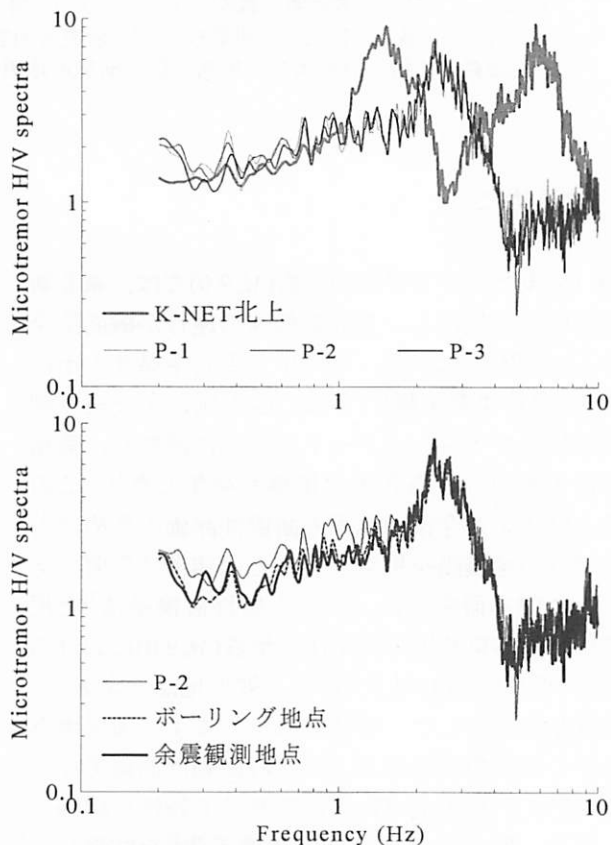


図-3 常時微動H/Vスペクトルの比較



写真-1 被災した第1中曽根高架橋R7と余震観測地点

上(北上消防署の敷地内)では、道路橋示方書(H14)による換算式を用いて、北上消防署でのN値の深度分布よりせん断波速度 V_s を推定した。図-4に示すとおり、被災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、

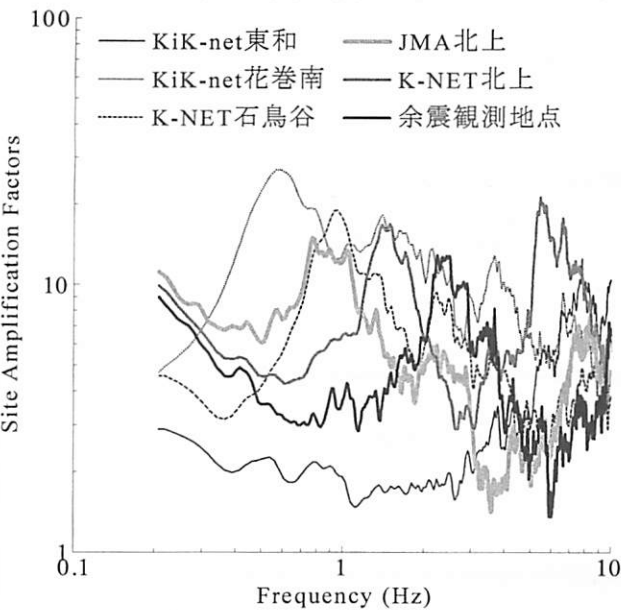


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)の評価

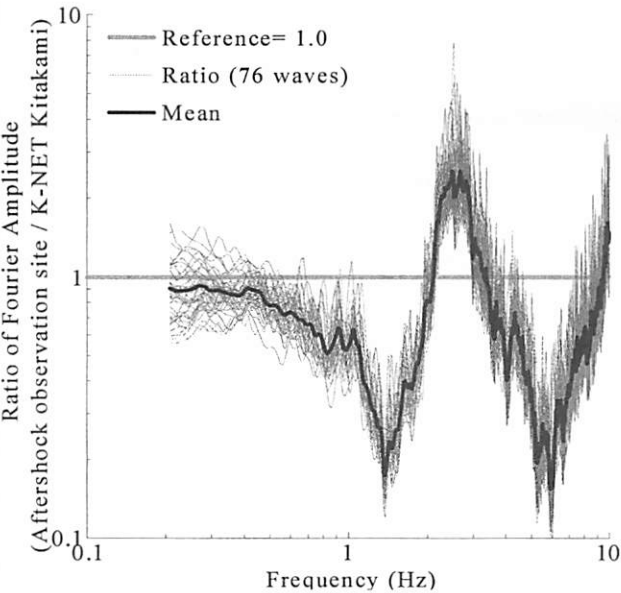


図-5 フーリエスペクトルの比率(被災地点/K-NET北上)

土層性状	層厚 (m)	深度 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
表土(粘土質)	1.5	1.5	1.91	120
砂礫	2.7	4.2	1.98	180
砂質シルト (礫混じり)	1.6	5.8	1.85	170
砂質土 (礫混じり)	2.2	8.0	2.04	210
凝灰岩 (工学的基盤)			2.12	320

図-6 第1中曽根高架橋R7近傍での表層地盤モデル

被災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、被災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。

4. サイト特性置換手法の拡張

(1) 概要

本研究では、サイト特性置換手法²⁾を用いて、被災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。この手法は、被災地点周辺における基準観測点(ここでは、JMA北上を採用)で得られた本震記録に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより推定点における本震時の地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、推定点における本震時の地震動のフーリエ位相は、推定点で観測された余震によるフーリエ位相で近似することにより、推定点における本震時の地震動を推定する手法である。ただし、本震時に被災地点周辺の観測点で得られた地震波形は大きく2つの山からなり(図-7にJMA北上での一例を示す)、それぞれ別のサブイベントに起因することは明らかである。すなわち、本震のフーリエ位相が1つの余震のフーリエ位相で近似できないことは明らかである。そこで、このような地震波形に対応するために、既存のサイト特性置換手法²⁾を拡張し、新たな手法の開発を行った。具体的には、基準観測点における地震動から波形の前半部分と後半部分を切り出し、各々に対して既存のサイト特性置換手法を適用して推定点における地震動を計算し、最後にそれらの地震動を重ね合わせるという方法である。

(2) 推定フロー

図-8および図-9に地震動推定の一連の流れを示す。基準観測点としてはJMA北上を選定した。これは、被災地点に最も近い観測点は、K-NET北上であるものの、K-NET北上の本震観測記録は、JMA北上よりも強い地盤非線形挙動を示しており、取り扱いが困難であることなどを勘案したためである。まず、JMA北上における地表の観測記録に対して地盤の非線形性⁵⁾を考慮した等価線形解析⁶⁾を適用して、工学的基盤相当の地震動(図-7参照)を計算した。そして、この工学的基盤相当波に対して、図-7に示すとおり70～90秒の範囲でテーパをかけることにより、前半部分(0～90sec)と後半部分(70sec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JMA北上と推定点の幾何減衰の差異による補正^{7),8)}を施し、さらにJMA北上と推定点のサイト増幅特性(図-4参照)の比を乗じることにより、推定点の工学的基盤におけるフーリエ振幅を推定した。その際、水平2成分(NSとEW成分もしくはLGとTR成分)それぞれについて同様の計算を行った。なお、幾何減衰の補正については、気象庁発表の震源

からの距離に基づいて実施した。本研究では、基準観測点と推定点が比較的近いため、距離の取り方に関する問題は比較的小さい。しかし今後、基準観測点と推定点がかなり離れているケースなどを対象とする場合、距離の取り扱い方法が重要な検討項目となる可能性がある(例えばアスペリティからの最短距離を用いる等の配慮が必要となる可能性がある)。

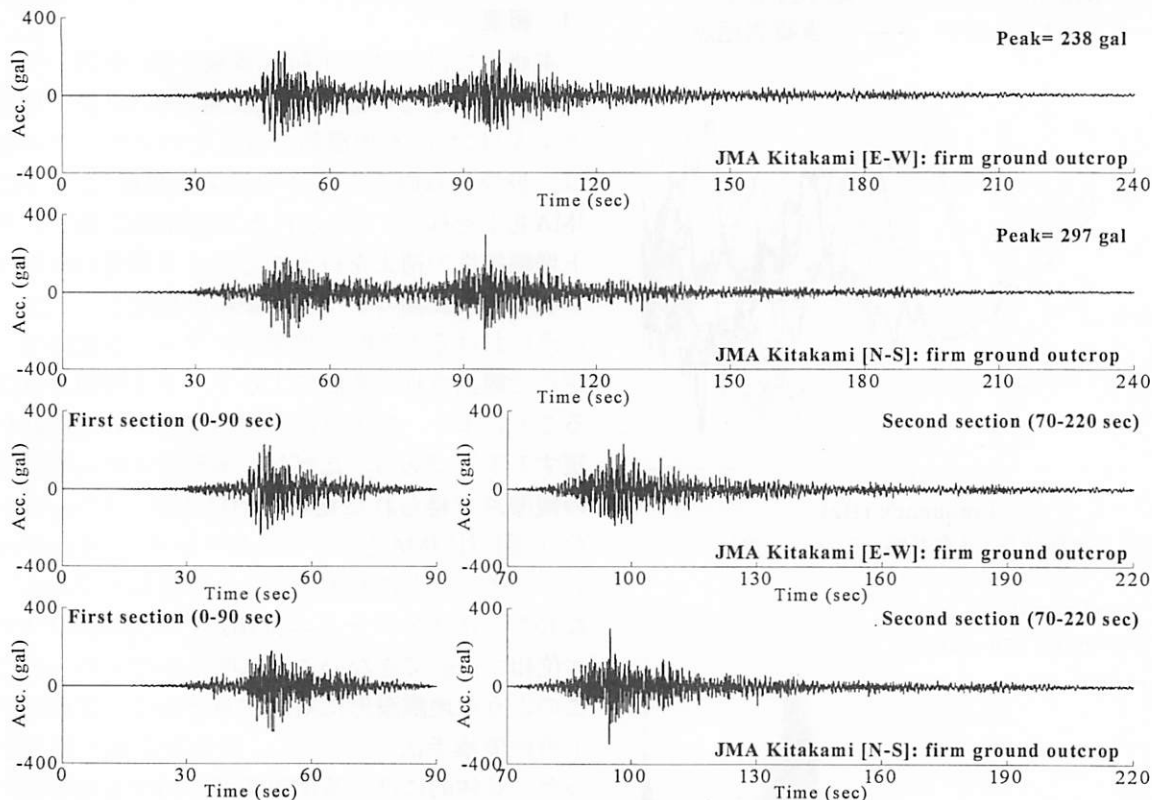


図-7 基準観測点における観測地震動(工学的基盤相当波)のテーパー分割

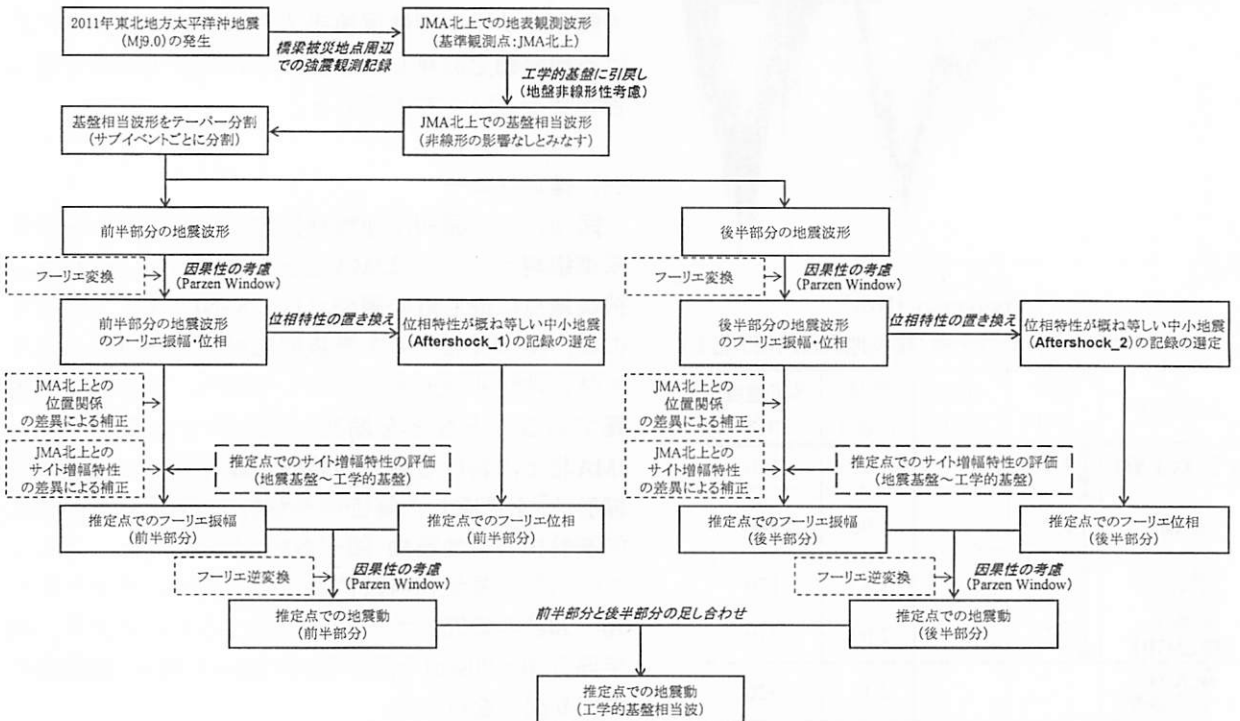


図-8 拡張型サイト特性置換手法のフローチャート

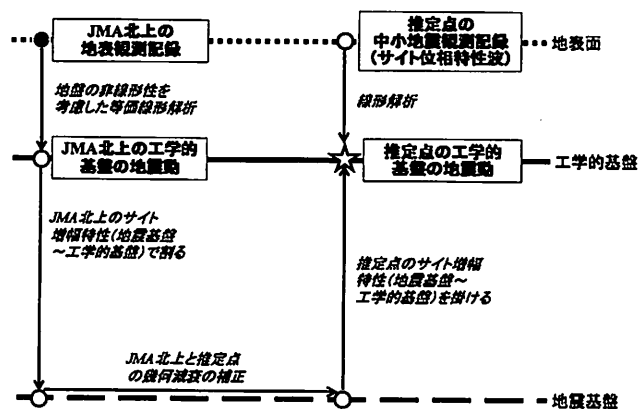


図-9 地震動推定の一連の流れ

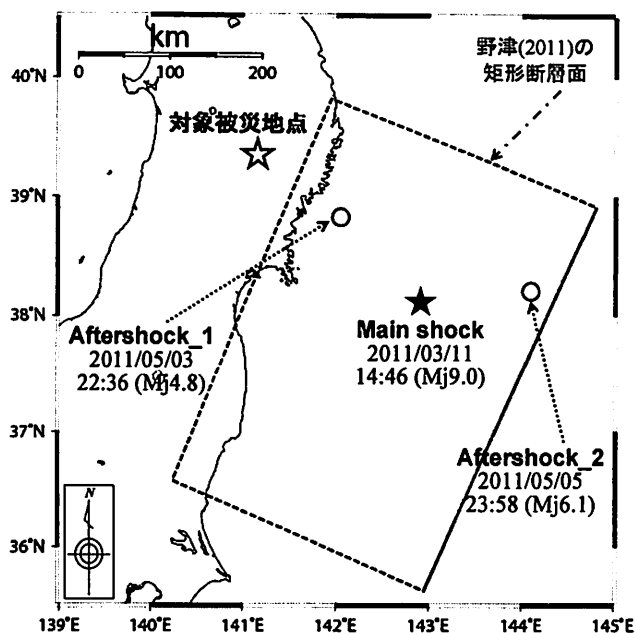


図-10 サイト位相特性の評価に用いた余震と矩形断面¹¹⁾

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⁹⁾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(工学的基盤相当波)を推定した。なお、このとき用いる余震記録としては、推定点(被災地点を除く)における本震記録のフーリエ位相と余震記録のフーリエ位相の類似性を検討¹⁰⁾した上で、図-10に示す Aftershock_1 による推定点での記録(工学的基盤相当に引戻した 2E 波)を採用した。

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(工学的基盤相当波)を推定した。このとき用いる余震記録としては、推定点(被災地点を除く)における本震観測記録のフーリエ位相と余震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討¹⁰⁾した上で、図-10に示す Aftershock_2 による推定点での記録(工学的基盤相当に引戻した 2E 波)を採用した。

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 JMA 北上での波形と同様となるように足し合わせを行った。

5. 地震動推定結果

(1) 既存強震観測点

図-11に被災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、被災地点でのサイト増幅特性が 2~3Hz に特徴的なピークを有している(図-4参照)ことや土木構造物に影響を及ぼす周波数帯域などを勘案して、0.2~3.0Hz 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(両地震動ともに工学的基盤相当波)について比較を行った。また、観測波については、地表面で得られている観測記録に対して等価線形解析⁶⁾を適用して、工学的基盤相当の地震波形(2E 波)を計算した。工学的基盤以浅の地盤には代表的な動的変形特性⁵⁾を採用した。

図-11に示すとおり、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、観測点間の振幅や波形形状の違いは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、上述した被災地点におけるサイト特性を入力として、拡張型サイト特性置換手法を適用すれば、本震時における被災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。

ただし、図-12では、K-NET 石鳥谷および KiK-net 花巻南において、周期 0.3 秒弱の成分が過大評価となっている点が注目される。この点については、基準観測点とした JMA 北上における本震時の地盤の非線形挙動が原因となっている可能性があり、今後さらに詳しく検討を進めていく予定である。また、被災地点における地震動の推定結果においても、周期 0.3 秒弱の成分が過大評価となっている可能性は現状では否定できないので注意が必要である。

(2) 被災地点(第1中曽根高架橋 R7)

図-13は、本震時の被災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-11と同様に 0.2~3.0Hz のバンドパスフィルタを施している。なお、推定地震波形による計測震度(水平 2 成分)は、5.6(震度 6 弱)となった(ただし、工学的基盤の露頭での値)。図-14は、図-13で示した推

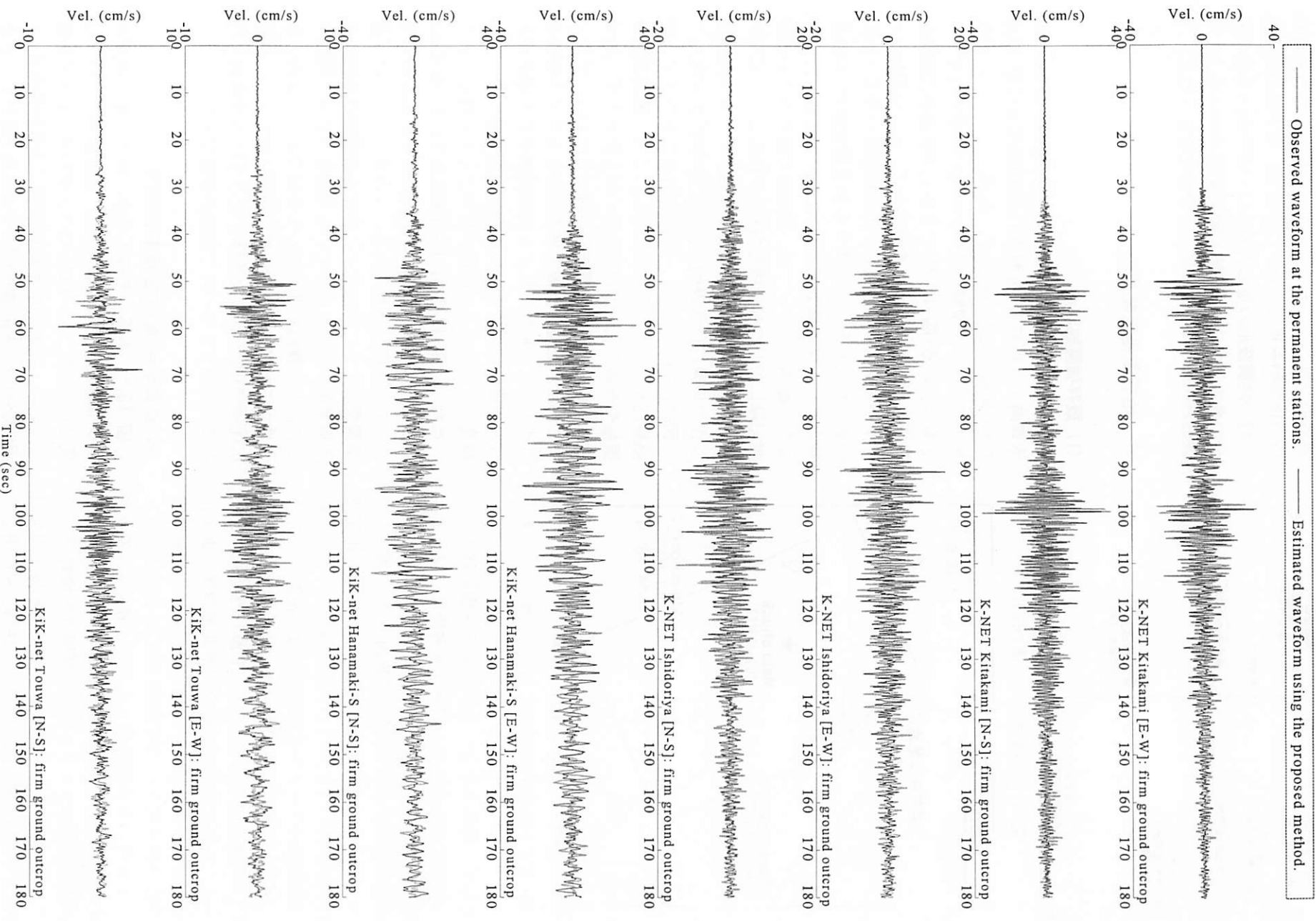


図-11 被災した第1中曽根高架橋R7周辺の既存強震観測点における地震動の再現(工学的基盤相当波)

定地震波形による加速度応答スペクトル(減衰5%)と鉄道構造物の設計標準スペクトル¹²⁾(海洋型地震を対象としたスペクトルI)などを比較したものであ

る。図-14に示すとおり、0.23~0.46秒付近の周期帯において、被災地点の加速度応答スペクトルが設計標準スペクトルを上回っているのが確認できる。さ

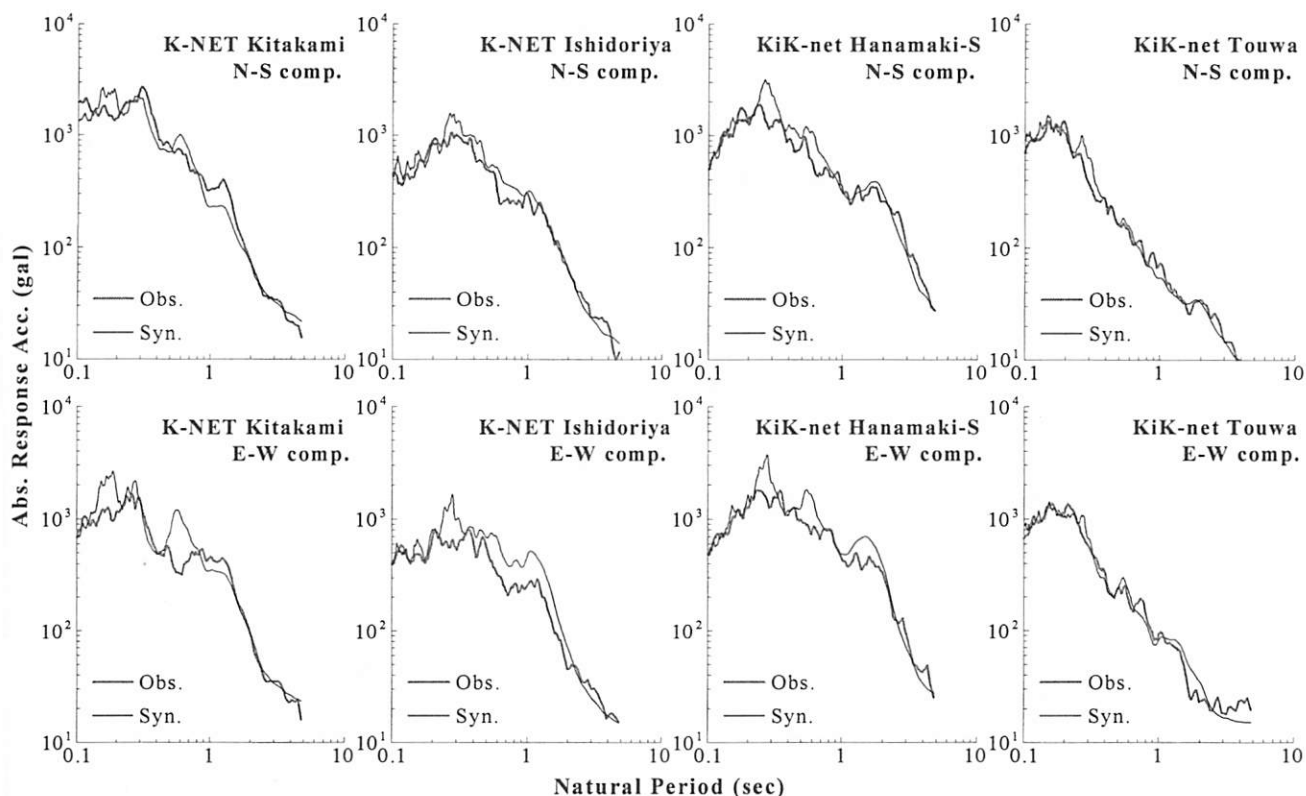


図-12 第1中曽根高架橋R7周辺の既存強震観測点における加速度応答スペクトル(減衰5%)の再現(工学的基盤相当波)

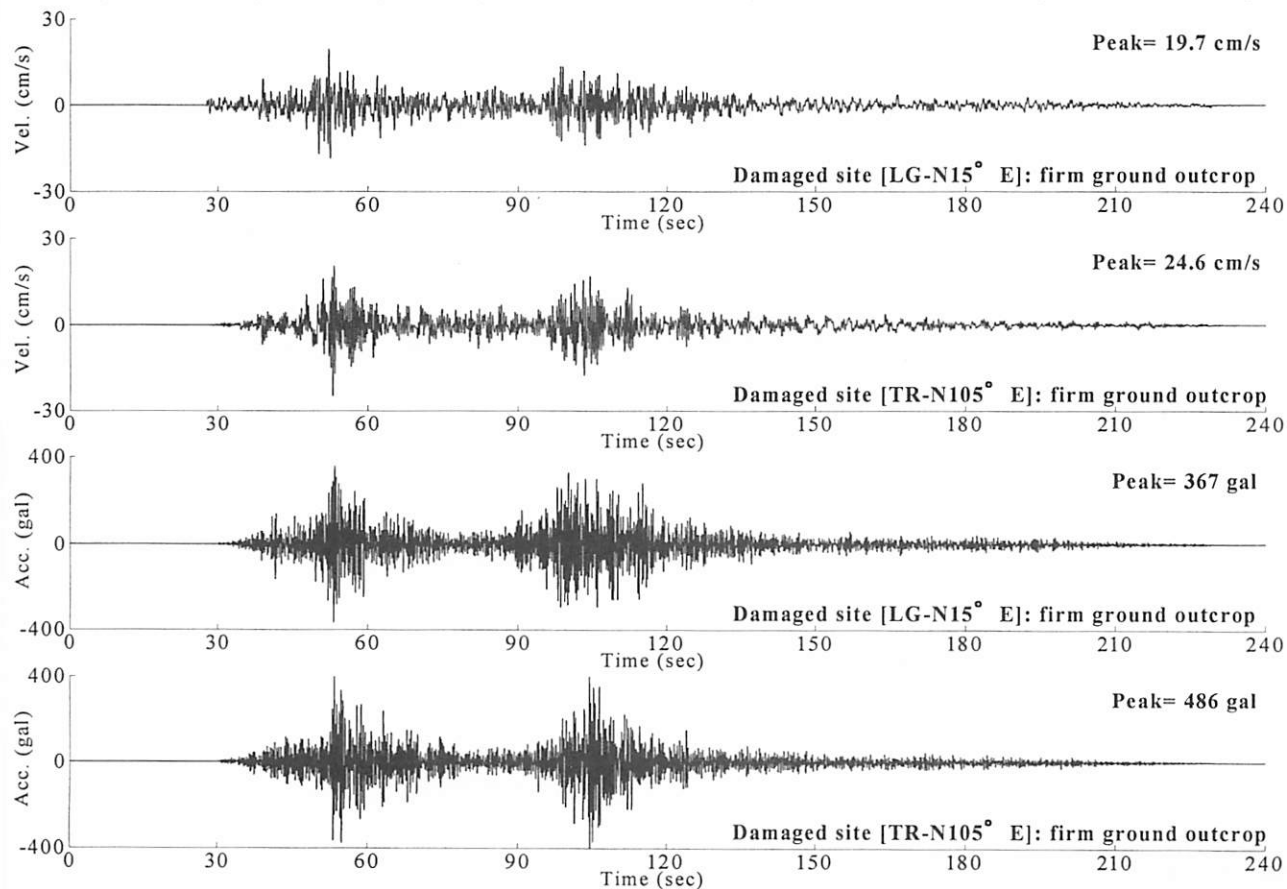


図-13 第1中曽根高架橋R7地点における工学的基盤相当での推定地震動(速度波形については0.2~3.0Hz)

らに、被災地点とK-NET北上(記録の基盤相当波)の比較では、両地点でのサイト特性の差異に起因して、加速度応答スペクトルの特性が大きく異なっている。

6. まとめ

本研究では、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(M_w 9.0)での東北新幹線橋梁の被災地点(第1中曽根高架橋R7)における地震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 第1中曽根高架橋R7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、第1中曽根高架橋R7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) 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での第1中曽根高架橋R7周辺の観測点における工学的基盤相当の強震波形を一定の精度で再現することが可能である。
- 3) 第1中曽根高架橋R7における推定地震動は、周辺の観測点での本震記録と大きく異なる特徴を有しており、鉄道構造物の設計標準スペクトル(スペクトルI)を0.23~0.46秒付近の周期帯において上回るのを確認した。

ただし、5.(1)でも述べたように、現状の推定結果は、周期0.3秒弱の成分が過大評価となっている可能性は否定できず、この点については基準観測点の選定方法などを含め検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究では、気象庁および(独)防災科学技術研究所K-NET/KiK-netによる地震観測記録を使用さ

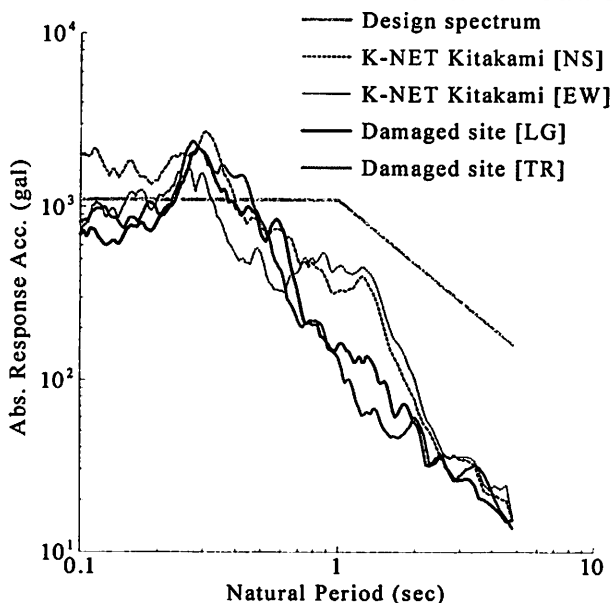


図-14 第1中曽根高架橋R7地点での応答スペクトル(減衰5%・工学的基盤)と設計標準スペクトル¹²⁾等との比較

せていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 2011.
- 2) 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.
- 3) Hata, Y., Nakamura, S., Nozu, A., Shibao, S., Murakami, Y. and Ichii, K.: Microtremor H/V spectrum ratio and site amplification factor in the seismic observation stations for 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Bulletin of the Graduate School of Engineering, Hiroshima University*, Vol.59, No.1, 2010.
- 4) 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.
- 5) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
- 6) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) たとえば, 野津厚: 2008年9月11日十勝沖の地震(M 7.1)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.
- 11) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル(暫定版)ーデジタルデータ付きー, 港湾空港技術研究所地震防災研究領域研究ノート, No.39, 2011.
http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn.html
- 12) (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, 467p., 1999.