

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

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 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 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 チームリーダー (〒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¹⁾、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(耐震補強未実施区間)では、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の強震動による被害は軽微なものであった²⁾。愛宕高架橋は、2003年に発生した宮城県沖を震源とする地震(2003/05/26 18:24 72km M_j 7.1)(以後、2003年三陸南地震と呼ぶ)の強震動によって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²⁾。

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未実施である。

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^{3)~8)}、被災地点だけでなく無被災地点における強震動についても評価を行うことで、橋梁の耐震性能照査の高度化などを今後図っていくことは非常に重要⁹⁾である。

そこで本稿では、愛宕高架橋および稗田高架橋(以後、対象地点と呼ぶ：図-1参照)における2011年東北地方太平洋沖地震による強震波形を推定した結果について述べる。具体的には、まず、稗田高架橋～愛宕高架橋の約1.4kmの区間にわたり超高密度の中小地震観測を行い(図-2参照)、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。次に、Strong-motion Pulse Generation Area(以後、SPGA

モデルと呼ぶ)に基づく強震波形計算を行うことで、K-NET水沢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、経験的サイト増幅・位相特性を考慮したSPGAモデル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

図-1に対象地点周辺の既存強震観測点で得られた本震記録(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。図-1に示すとおり、対象地点に比較的近いK-NET水沢と江刺支所では、地震動の特性が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観測点だけでなく、対象地点内(愛宕高架橋～稗田高架橋間)においても本震時に作用した地震動の特性が異なっている可能性がある。

3. 高密度地震観測の実施

本検討では、図-2に示すように、稗田高架橋から愛宕高架橋までの約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、高密度にわたる地震観測を実施した。観測システムとしては、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



図-1 愛宕高架橋・稗田高架橋周辺の強震観測点の分布

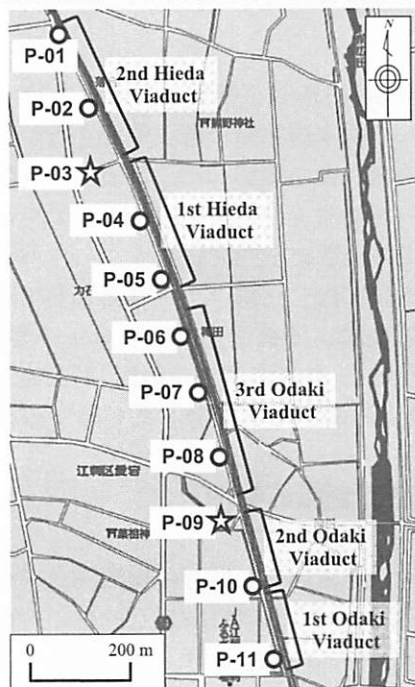


図-2 愛宕高架橋・稗田高架橋での臨時地震観測点

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(いずれも各観測地点で共通)。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-3にK-NET水沢のサイト増幅特性¹⁰⁾を基準とした場合の, 江刺支所のサイト増幅特性¹¹⁾, 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^{12),13)}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, この比率をK-NET水沢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評価^{14),15)}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である。

図-3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, 1～2Hz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, 高架橋サイトの違い(愛宕高架橋と稗田高架橋の違い)だけでなく, 同じ高架橋内における地点の違いにおいても, 2003年三陸南地震や2011年東北地方太平洋沖地震などの既往の大規模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。

本稿では, 紙面制約の都合上, 以後, 対象区間内における固定点(P-03およびP-09)相当での本震時の強震波形の推定結果について述べる。

5. 地震動推定手法

(1) 特性化震源モデル

野津^{16),17)}によるSPGAモデルを採用した。図-4に宮城県沖のサブイベント(SA1_1, SA1_2, SA1_3, SA2)と対象地点の位置関係, 表-2にモデルパラメータの一覧をそれぞれ示す。この震源モデルは, 太平洋沿岸沿いの既存強震観測点で得られた本震観測記録を一定の精度で評価可能なモデル^{16),17)}である。ただし, 対象地点に比較的近いK-NET水沢で得られた本震観測記録(図-5参照)に対する適用性については十分に確認できていないため, 本研究において追加検討を行った。詳細については, 5.(3)で述べる。

表-1 高密度地震観測によって得られた記録の一覧

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

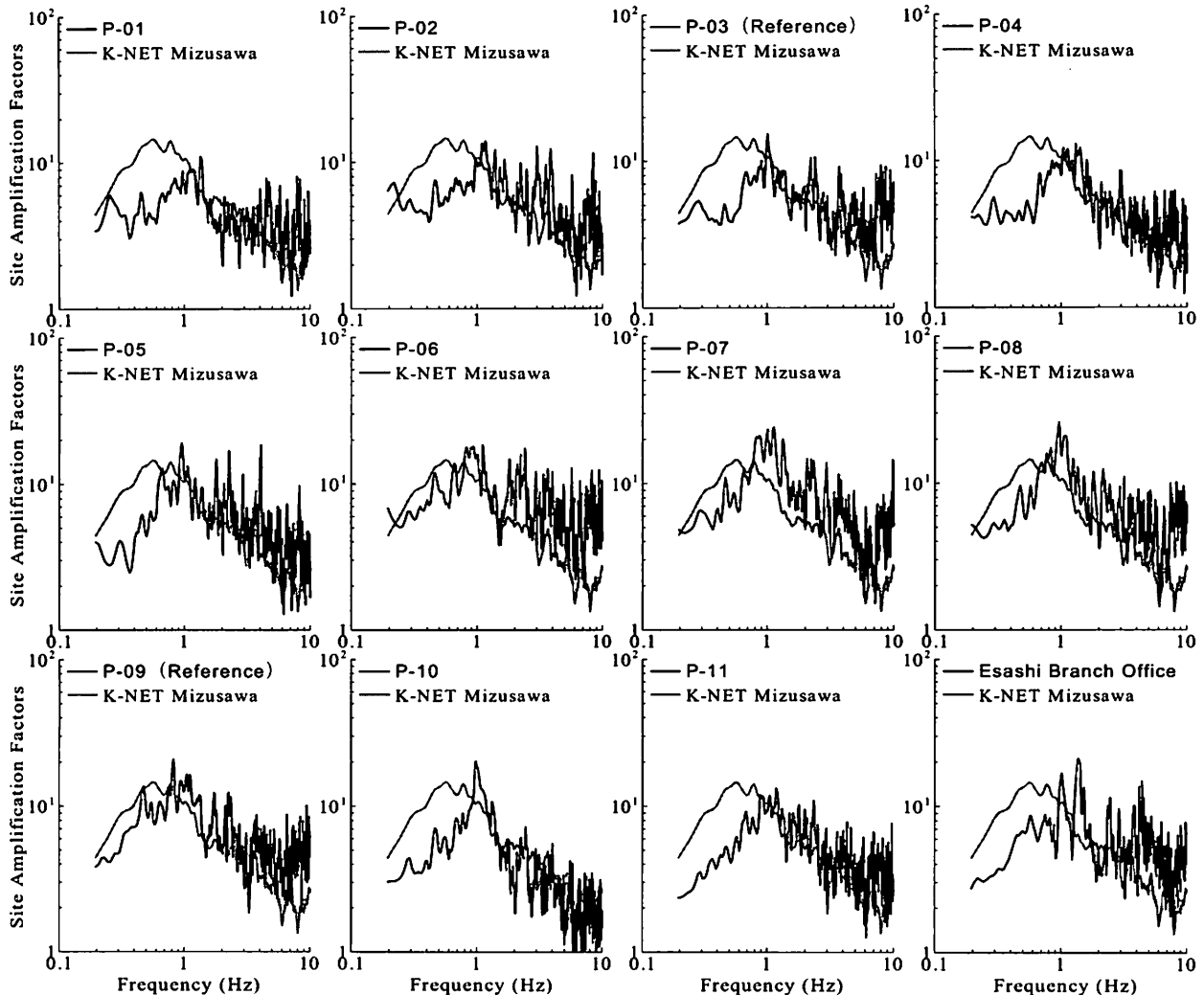


図-3 愛宕高架橋・稗田高架橋におけるサイト増幅特性（地震基盤～地表）の特徴

また、この震源モデルでは、気象庁による破壊開始点を含む走向203deg.および傾斜10deg.の断層面を仮定し、破壊伝播速度を3.0km/sとしている。地震調査研究推進本部の提案値¹⁸⁾に基づいて基盤のS波速度は3.9km/sおよび密度は3.1t/m³である。Q値については、佐藤・巽による東日本の海溝型地震での推定値¹³⁾を採用している。

(2) 強震波形計算手法

本研究では、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^{19),20)}を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は中小地震の震源特性¹²⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性¹²⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(4. 参照)で実数、 $O(f)$ は現地で得られた中小地震観測記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen

Windowを適用したものである。

式(1)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる。式(1)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ²¹⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(添字 p で表示)は因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている²⁰⁾。

なお、対象地点周辺では、本震時に地盤の非線形応答が生じていた可能性があり、表層地盤の非線形応答の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法²²⁾の採用も考えられる。しかしながら、図-6に示すように、K-NET水沢における本震観測記録(図-5参照)のフーリエスペクトル(水平2成分合成)と線形のサイト増幅特性(図-3参照)に基づいたピーク周波数やスペクトル形状が比較的類似しているため、本稿における強震波形計算において多重非線形効果²³⁾を考慮していない。

(3) サイト位相特性の評価

フーリエ位相特性(中小地震観測記録のフーリエ

表-2 SPGAモデルパラメーターの一覧^{16),17)}

断層パラメーター	SA1_1	SA1_2	SA1_3	SA2
破壊開始時刻(h:m:s)	14:46:43.5	14:46:46.9	14:47:33.4	14:47:26.3
発震時刻からの遅れ時間(m:s)	00:25.4	00:28.8	01:15.3	01:08.2
地震モーメント(Nm)	8.0×10^{18}	8.0×10^{18}	4.0×10^{18}	2.1×10^{19}
長さ(km)	3.0	4.0	4.0	3.5
幅(km)	2.0	3.0	2.0	3.0
面積(km ²)	6.0	12.0	8.0	10.5
ライズタイム(sec)	0.2	0.3	0.2	0.3

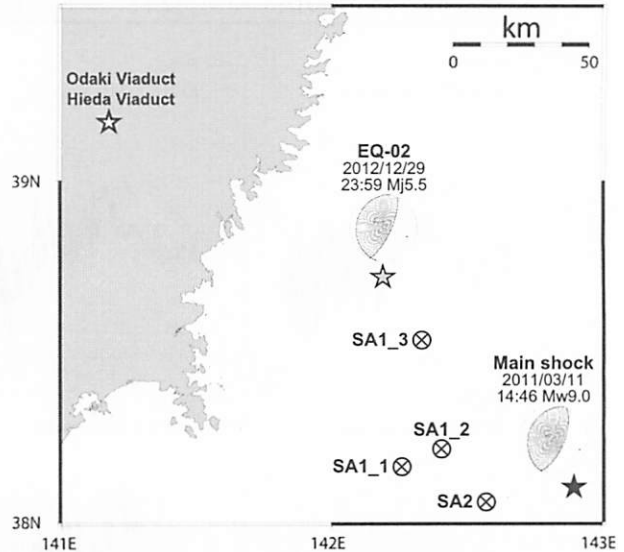


図-4 SPGAモデル^{16),17)}とサイト位相特性の評価地震

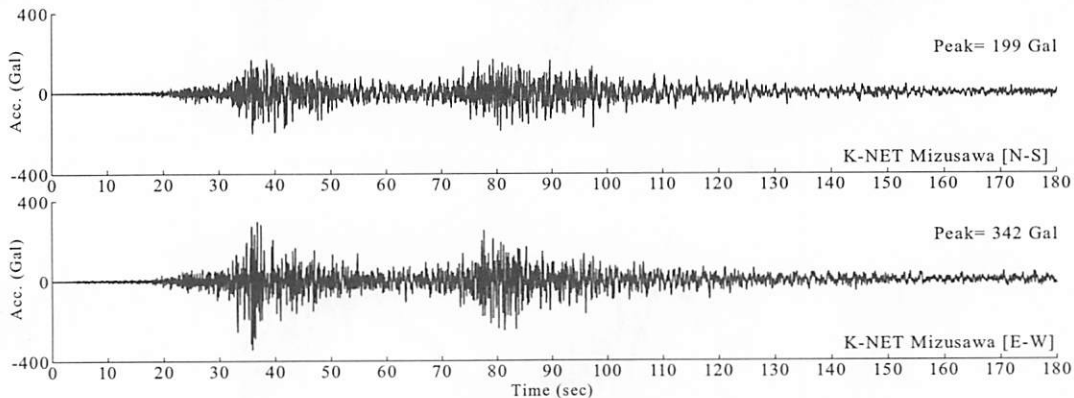


図-5 本震時におけるK-NET水沢での観測地震動の加速度時刻歴(2011/03/11 14:46:50~)

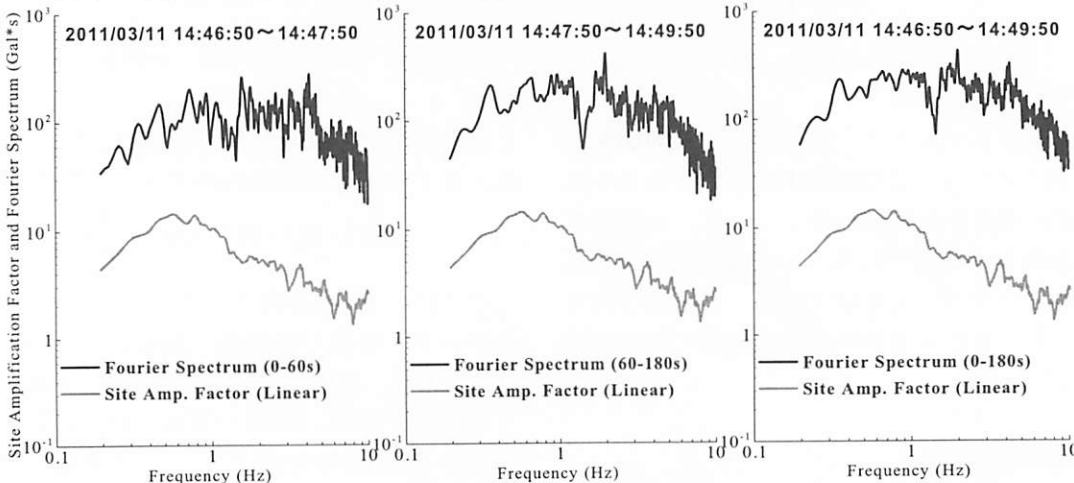


図-6 本震時のフーリエスペクトルと線形のサイト増幅特性の比較による多重非線形効果の影響評価

変換 $O(f)$ ：式(1)参照)の取り扱いについては、現地(固定点(P-03およびP-09)およびK-NET水沢)で同時に得られた記録(表-1参照)の中から、入射角およびback azimuthが宮城県沖のサブイベントとできるだけ共通となるように(堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように)評価²⁴⁾した。具体的には、図-4に示すように、宮城県沖のサブイベント(SA1_1, SA1_2, SA1_3, SA2)の近傍で発生した中小地震であり、さらに震源メカニズム²⁵⁾が2011年東北地方太平洋沖地震と類似しているEQ-02(表-1参照)を採用した。図-7には、EQ-02によって得られた固定点(P-03およびP-09)およびK-NET水沢での時刻歴加速度波形を示す。

(4) 適用性の確認

図-7は、本震時にK-NET水沢で得られた速度波形(観測波)に対して、強震動推定結果(推定波)を比較したものである。なお、高架橋の固有周期(0.5s程

度)²⁾および構造物の地震被災に大きな影響を及ぼすやや短周期帯域²⁶⁾などを考慮して、0.2–3Hzのバンド・パスフィルタを施した速度波形について比較を行った。さらに、絶対加速度応答スペクトル、相対速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトル(いずれも減衰定数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-8に示す。

図-7および図-8に示すとおり、K-NET水沢において、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、野津^{16),17)}によるSPGA(5.(1)参照)、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法^{19),20)}(5.(2)参照)、宮城県沖のサブイベントに対応させたサイト位相特性(5.(3)参照)の組み合わせは、対象地点近くのK-NET水沢における地震動再現にも有効であったことを示唆するものであり、対象地点における地震動推定においても一定の精度で推定できる可能性が高い。

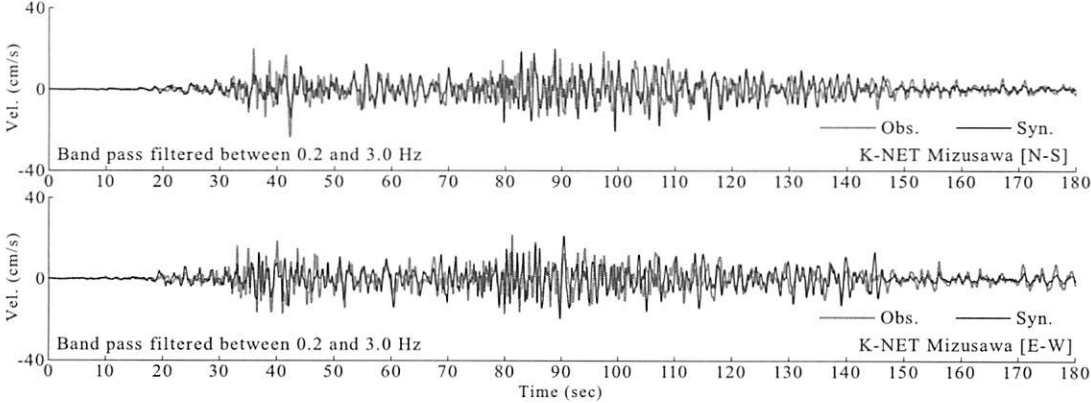


図-7 地震動推定手法の適用性確認(1) (観測地震動と推定地震動による速度波形の比較)

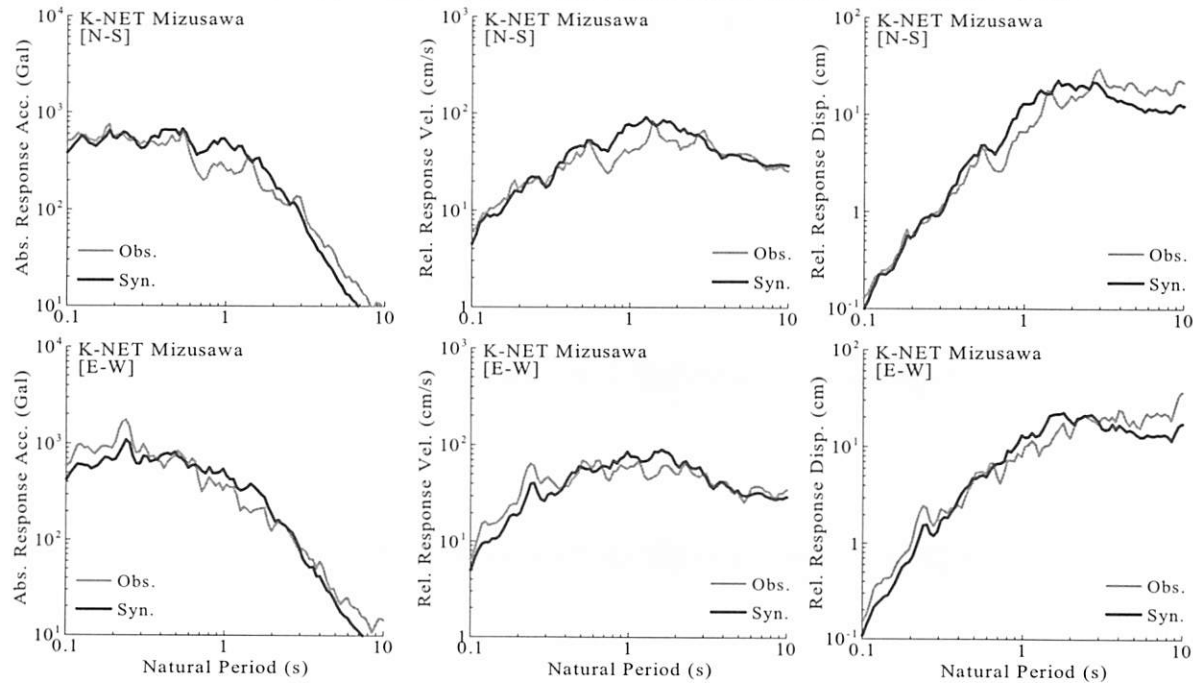


図-8 地震動推定手法の適用性確認(2) (観測地震動と推定地震動による応答スペクトルの比較)

6. 地震動推定結果

図-9および図-10は、対象地点(P-03およびP-09)における本震時の推定強震波形である。なお、速度波形には、図-7と同様に0.2-3Hzのバンド・パスフィルタを施している。また図-11には、推定加速度波形(図-9および図-10参照)による絶対加速度応答スペクトル、相対速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトル(いずれも減衰定数5%)を示す。さらに図-11には、本震前(1999年10月)における鉄道構造物等設計標準・同解説²⁷⁾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-9・図-10と図-7・図-5を比較すると、対象地点における推定地震動は、K-NET水沢での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るのが読み取れる。また図-9と図-10を比較すると、稗田高架橋(P-03)よりも愛宕高架橋(P-09)のほうが本震時に大きな地震動が作用しており、計測震度(水平2成分合成)はそれぞれ5.5(P-03)および5.7(P-09)となった。さらに図-11に示すとおり、本震前の設計標準スペクトル(1999)²⁷⁾は、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対象周期帯域(0.1-5s)においてほぼ包絡しており、対象地点が本震時に無被災であった実績と矛盾していないことが確認できる。

7. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)において愛宕高架橋および稗田高架橋の代表的地点に作用した強震波形を、現地で得られた高密度の中小地震観測記録に基づいて評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 愛宕高架橋および稗田高架橋では、本震時に作用した地震動の特性は大きく異なっており、周辺の観測点で得られた本震記録を推定地震動として直接転用することはできない。
- 2) SPGAモデルおよび経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を利用すれば、本震時におけるK-NET水沢での観測地震動を一定の精度で再現することが可能である。
- 3) 推定地震動の計測震度は、稗田高架橋において5.5および愛宕高架橋において5.7であり、本震時に作用した地震動は、稗田高架橋よりも愛宕高架橋のほうが大きい。
- 4) 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およびスペクトルII)は、愛宕高架橋および稗田高架橋における推定地震動の応答スペクトルを概ね包絡し、本震時に無被災であった実績と矛盾していない。

今後は、評価したサイト増幅特性などを利用して、2003年三陸南地震の際に、愛宕高架橋および稗田高架橋に作用した強震動を推定していく予定である。

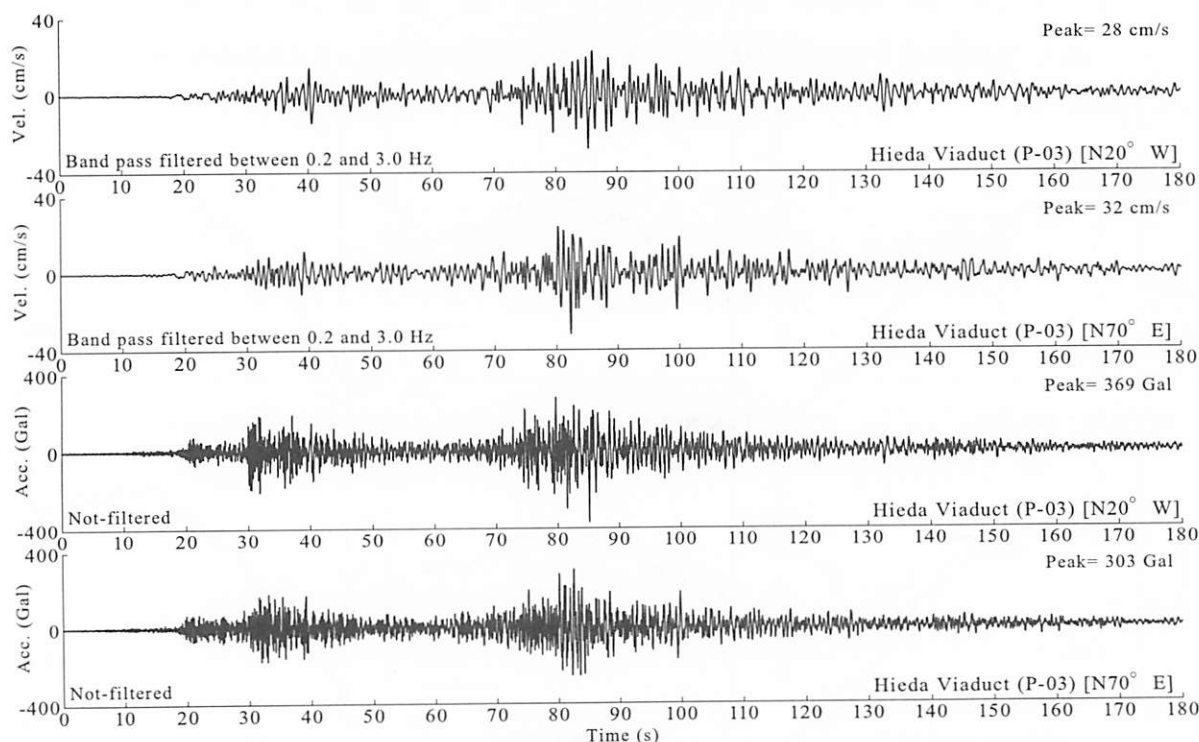


図-9 本震時における稗田高架橋サイト(P-03)での推定強震波形

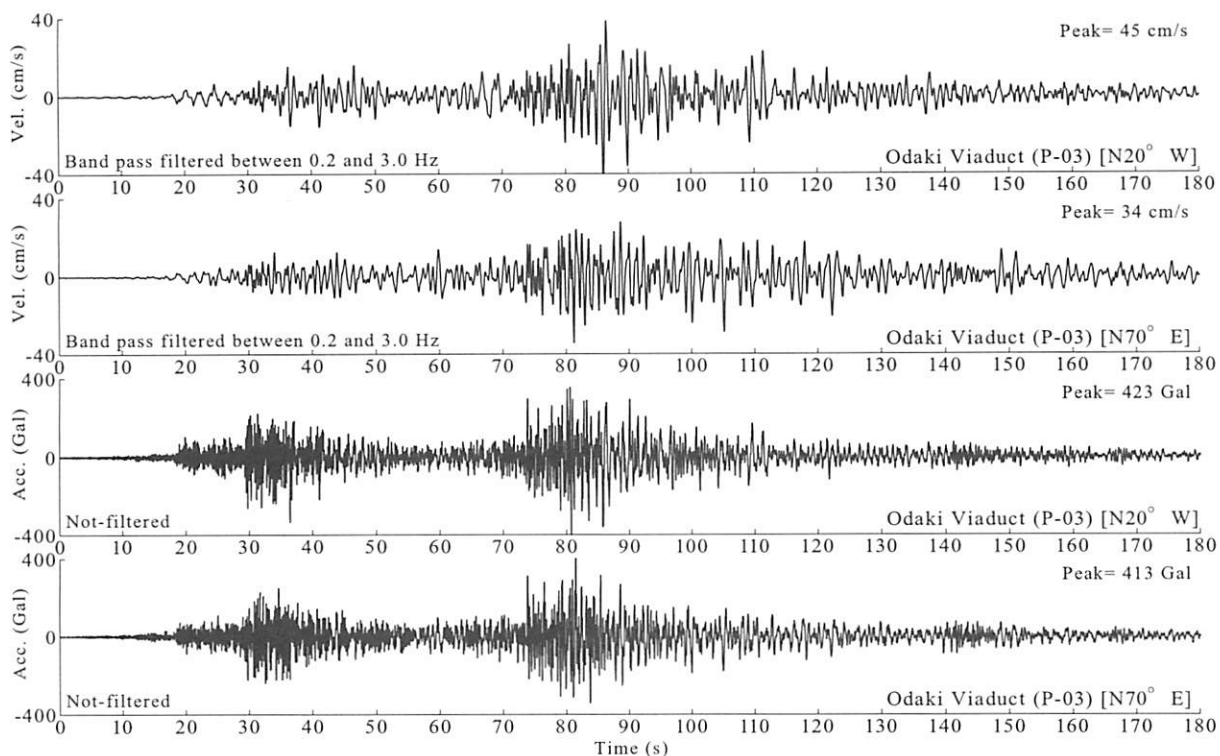


図-10 本震時における愛宕高架橋サイト(P-09)での推定強震波形

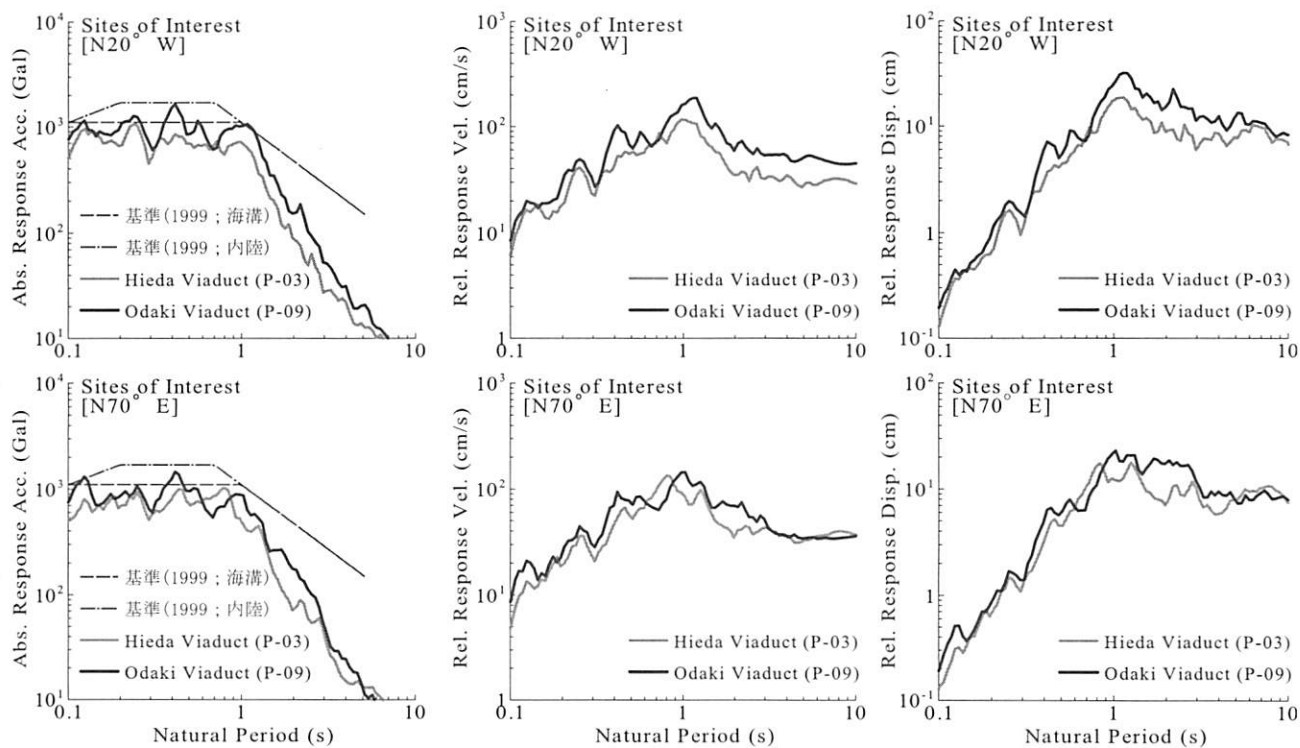


図-11 本震時における稗田高架橋および愛宕高架橋での推定地震動に基づく応答スペクトル

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大変お世話になりました。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) 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.
- 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, 2012.
 - 4) 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.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 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, 2013. (accepted)
 - 8) 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, 2013. (this issue)
 - 9) 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.
 - 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) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) (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.
 - 15) 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*, Taormina, Italy, pp.42-50, 2012.
 - 16) 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.
 - 17) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅, 入倉孝次郎: 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケールリング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
 - 18) 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)について, 2005.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 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.
 - 25) (独)防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet> (last accessed 2013/06/29).
 - 26) 川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
 - 27) (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.