

サイト増幅特性の差異に着目した2011年東北地方太平洋沖地震 における第一宮中架道橋での地震動の評価

秦吉弥¹・矢部正明²

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) (株)長大 副技師長 構造事業本部 耐震技術部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)では、津波の作用だけでなく地震動の作用による橋梁の被災が数多く報告¹⁾されている。特に、JR鹿島線鹿島神宮駅構内の起点方において国道18号線と交差する架道橋(以後、第一宮中架道橋と呼ぶ：図-1参照)では、2011年東北地方太平洋沖地震による地震動の作用により、角桁の回転を伴う深刻な被災が報告²⁾されている。第一宮中架道橋は、国道18号線と約60度の角度を持って交差する斜角桁を有しており、この被災経験を踏まえた同種橋梁(斜角を有する橋梁)を対象とした耐震性評価³⁾を今後向上させていくためにも、本震時に第一宮中架道橋に作用した強震波形を推定することは非常に重要である。

そこで本研究では、第一宮中架道橋において臨時地震観測を実施し、得られた観測結果に基づいて、2011年東北地方太平洋沖地震における第一宮中架道橋での地震動を推定した。具体的には、まず、第一宮中架道橋およびその周辺の既存強震観測点^{4),5),6)}において常時微動計測を実施し、得られた計測結果に基づいて、第一宮中架道橋に対する本震観測記録の転用の可能性について検討を行った。次に、第一宮中架道橋の極近傍において臨時地震観測を実施し、得られた観測結果に基づいて、サイト増幅特性を評価した。最後に、サイト増幅特性の差異に着目した地震動推定手法(以後、丸山の方法^{7),8),9),10)}と呼ぶ)を用いて、第一宮中架道橋周辺の強震観測点での本震記録の再現解析を行うとともに(地震動推定手法の適用性を確認した上で)、第一宮中架道橋に作用した本震時の地震動についても同様に評価した。

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-2は、本震時に第一宮中架道橋周辺の既存強震観測点^{4),5),6)}で得られた最大加速度値PGA、最大速度値PGV(ともに3成分合成)、気象庁計測震度⁶⁾の分布を示す。なお、第一宮中架道橋では、本震時に強震観測が実施されていない。

図-2に示すとおり、比較的近く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¹¹⁾がある。具体的には、第一宮中架道橋からの既存強震観測点までの直線距離は、約900m(K-NET鹿嶋)、約1800m(JMA鹿嶋)、約2500m(MLIT神宮橋)となっているのに対して、本震観測記録による地震動指標値には有意な差異が確認できる。これは、各強震観測点でのサイト特性が大きく影響しているためと考えられ、第一宮中架道橋とその周辺の観測点においても同様に地震動の特性が異なっている可能性を示唆するものである。一方で、図-2には、第一宮中架道橋とその周辺の既存強震観

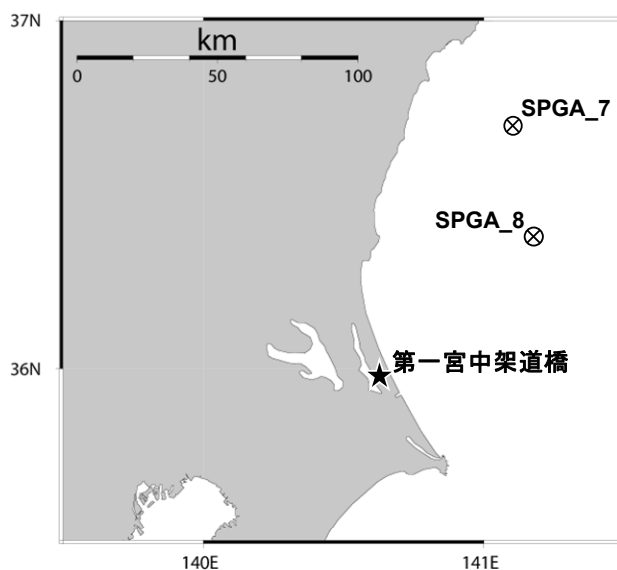


図-1 第一宮中架道橋と茨城県沖に位置するSPGA

測点における標高値についても同時に示しており、標高が比較的高いK-NET鹿嶋およびJMA鹿嶋における最大加速度PGAが比較的大きな値を示していることから、地形効果の影響¹²⁾も考えられる。

図-3に深部地下構造(工学的基盤以深の地盤)に主に着目した第一宮中架道橋とその周辺における地質図^{13),14)}を示す。図-3に示すとおり、第一宮中架道橋は、後期更新世—完新世(H)の海成又は非海成堆積岩類と中期更新世(Q2)の海成又は非海成堆積岩類の境界付近に位置していることが読み取れる。一方で、K-NET鹿嶋およびJMA鹿嶋は、後期更新世(Q3)の中世段丘堆積物上に位置している。すなわちこれは、本震時に(工学的基盤相当に)作用した地震動の特性が第一宮中架道橋とK-NET鹿嶋・JMA鹿嶋では大きく異なっていた可能性を示唆するものである。

3. 常時微動H/Vスペクトルの評価

第一宮中架道橋における本震時の推定地震動として、周辺の強震観測点(図-2参照)で得られた本震記録の転用の工学的可能性について判断するため、第一宮中架道橋とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測(単点計測)を実施した。写真-1に既存強震観測点での常時微動計測状況を示す。

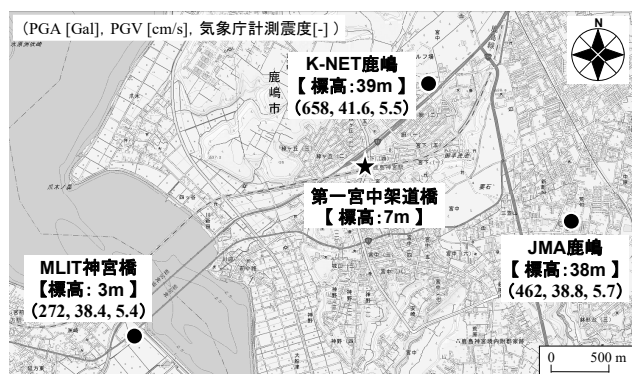


図-2 第一宮中架道橋周辺で得られた本震観測記録の分布

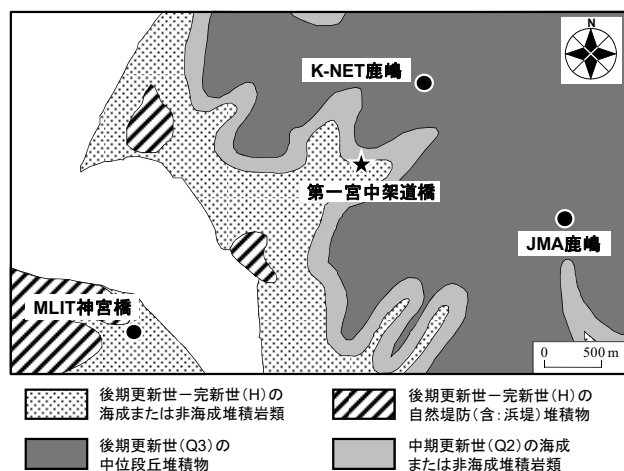


図-3 第一宮中架道橋周辺の地質図(文献13)に基づき作成)

計測機器は、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁵⁾を共通採用した。計測機器の詳細については文献15)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-4に常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。ここに、常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法と



(a) MLIT神宮橋



(b) K-NET鹿嶋



(c) JMA鹿嶋

写真-1 既存強震観測点での常時微動計測状況

しては、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、雑振動が比較的小さいクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen 163.84秒の区間を10区間抽出し、フーリエ振幅スペWindowで平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、10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¹⁵⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-4に示すとおり、第一宮中架道橋とその周辺の既存強震観測点の比較では、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、第一宮中架道橋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(図-2参照)を転用することが困難であること、ならびに、第一宮中架道橋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。

4. 臨時地震観測の実施

2. および3. で得られた知見を踏まえ、本研究では、第一宮中架道橋サイトの極近傍において2015年6月6日に地震計を臨時設置し、32日間の地震観測を実施した。なお、地震計設置地点と第一宮中架道橋サイトでは、常時微動H/Vスペクトルの特性が非常に類似しており、地震計設置位置の妥当性を確認している。その結果、図-5に示す中小地震による観測記録を第一宮中架道橋サイト(ならびにK-NET鹿嶋)において得ることができた。なお、地震計は一体型微動探査兼地震計機器¹⁵⁾を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。観測方向は、N-S, E-W, U-D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¹⁶⁾とした。

5. サイト増幅特性の評価

図-6に第一宮中架道橋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(図-2参照)におけるサイト増幅特性(地震基盤~地表)¹⁷⁾を示す。第一宮中架道橋におけるサイト増幅特性は、まず、第一宮中架道橋とK-NET鹿嶋で同時に得られた中小地震観測記録(図-5参照)を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{18),19)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(第一宮中架道橋/K-NET鹿嶋)を計算し、この比率をK-NET鹿嶋における既存のサイト増幅特性¹⁷⁾に掛け合わせることによって、地震基盤~地表相当のサイト増幅特性を評価した。

図-6に示すとおり、第一宮中架道橋とその周辺の既存強震観測点での比較では、サイト増幅特性に明

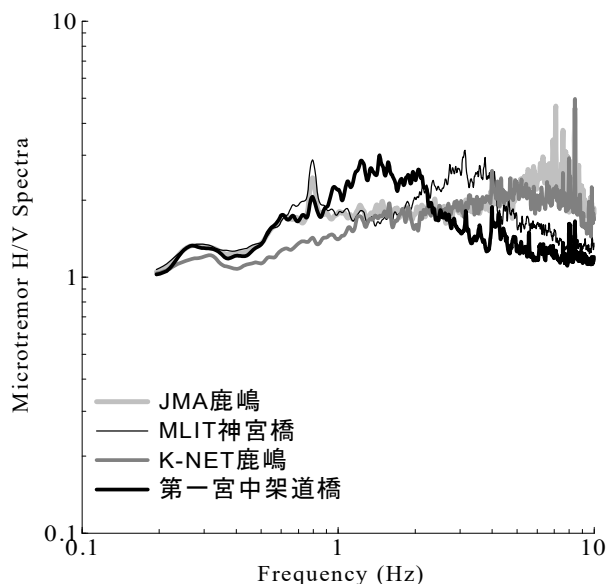


図-4 常時微動H/Vスペクトルの比較

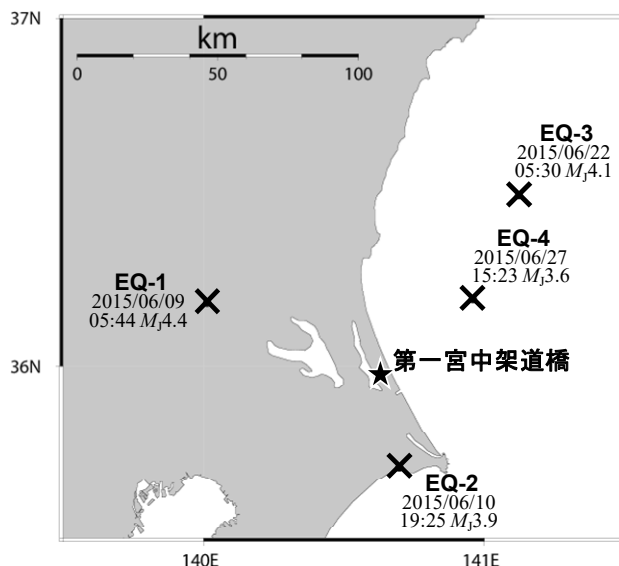


図-5 第一宮中架道橋で得られた中小地震観測記録の震央

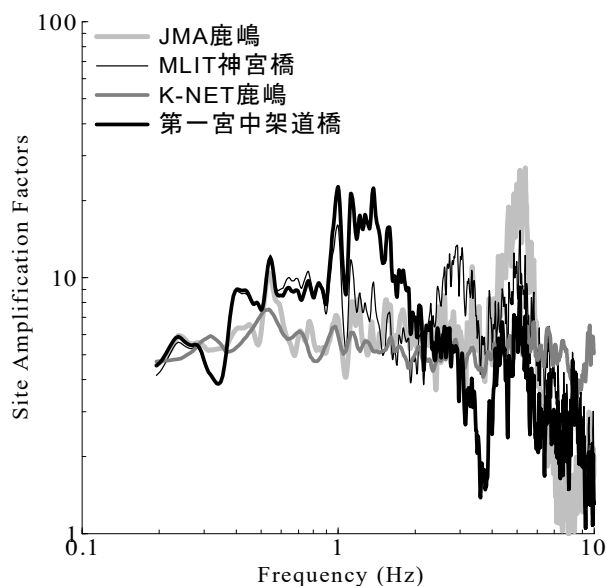


図-6 サイト増幅特性(地震基盤~地表)の比較

確な差異が確認できる。さらに、第一宮中架道橋では、1～2Hz付近(地震被災に大きな影響を及ぼすやや短周期帯域²⁰⁾を含む周波数帯域)において明らかにサイト増幅特性が卓越していることが読み取れる。これらの知見は、第一宮中架道橋と周辺の既存強震観測点(本震記録有)では、本震時に作用した地震動特性が大幅に異なっていたことを示しており、第一宮中架道橋における地盤震動特性を十分に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あらためて示唆するものである。

6. 地震動推定手法とその適用性

本研究では、丸山の手法^{7),8),9),10)}を用いて、第一宮中架道橋およびその周辺の強震観測点であるK-NET鹿嶋・JMA鹿嶋(以後、三地点まとめて推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。

図-7に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、第一宮中架道橋に対して、標高値や地質区分が比較的類似していること、およびサイト増幅特性(地震基盤～地表)が概ね類似していること、などを踏まえて基準観測点としてMLIT神宮橋を選定した。

次に、基準観測点(MLIT神宮橋)での本震観測記録(図-8(a),(b)および図-9(a),(b)参照)によるフーリエ振幅を計算し、そのフーリエ振幅に対して基準観測点と推定点の距離(SPGA_7ならびにSPGA_8(図-1参照)^{21),22)}から基準観測点・推定点までの等価震源距離)の違いによる補正^{18),19)}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、推定点での本震時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、基準観測点での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²³⁾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、後述するように、既存強震観測点(MLIT神宮橋・K-NET鹿嶋・JMA鹿嶋)における本震記録のフーリエ位相特性にそれほど大きな差異が見受けられないことなどを考慮して、本稿ではサイト位相特性の置換^{24),25)}の実施を見送った。

図-8(c),(d),(e),(f)および図-9(c),(d),(e),(f)に本震時の加速度波形および速度波形について、観測波と推定波(強震動推定結果)で比較したものを示す。なお、ここでは、バンド・パスフィルタなどの波形処理は行っていない。図-8(c),(d),(e),(f)および図-9(c),(d),(e),(f)に示すとおり、観測波と推定波が比較的良い一致を示している。図-10(a),(b),(c),(d)は、絶対加速度応答スペクトル(全て減衰定数

5%)を観測波と推定波で比較したものである。図-10(a),(b),(c),(d)に示すとおり、特定の短周期帯域(0.1～0.4s付近)において推定精度が低下しているものの、観測波と推定波による応答スペクトルが概ね類似していることが確認できる。すなわちこれは、上述した第一宮中架道橋におけるサイト増幅特性を入力として、丸山の手法を適用すれば、本震時における第一宮中架道橋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。

7. 第一宮中架道橋における地震動の評価

図-8(g),(h)および図-9(g),(h)は、本震時における第一宮中架道橋での推定加速度および推定速度波形である。図-10(e),(f)には、図-8(g),(h)で示した第一宮中架道橋における推定地震動を入力波とした絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。さらに、図-10(e),(f)には、本震前(1999年10月)および本震後(2012年9月)における鉄道構造物等設計標準・同解説^{26),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-8(a),(b),(c),(d),(e),(f)および図-9(a),(b),(c),(d),(e),(f)に対して図-8(g),(h)および図-9(g),(h)をそれぞれ比較すると、第一宮中架道橋では、最大加速度PGAの差異がそれほど顕著ではないのに対して、最大速度PGVについては周辺の観測点よりも明らかに大きな値を示していることが読み取れる。さらに、図-10(e),(f)に示すとおり、第一宮中架道橋では、0.5～0.8秒付近で鉄道構造物における標準スペクトル(本震前(1999)の基準)を連続的に上回る加速度応答を示している。一方で、本震後(2012)の基準に対する比較では、標準スペクトルが推定地震動による応答スペクトルを概ね包絡していることが読み取れる。

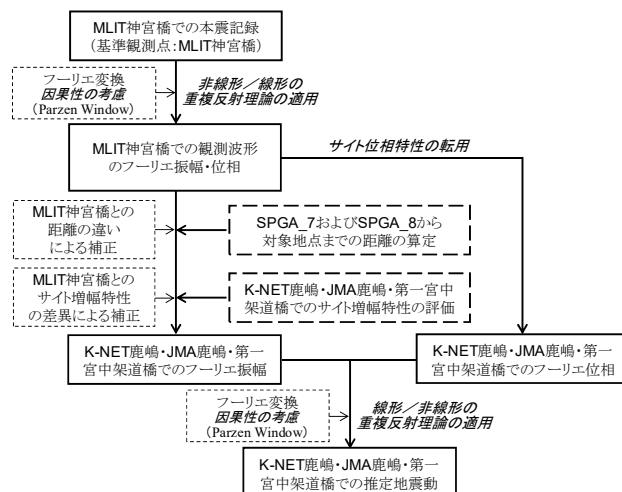


図-7 丸山の方法に基づく地震動推定フロー

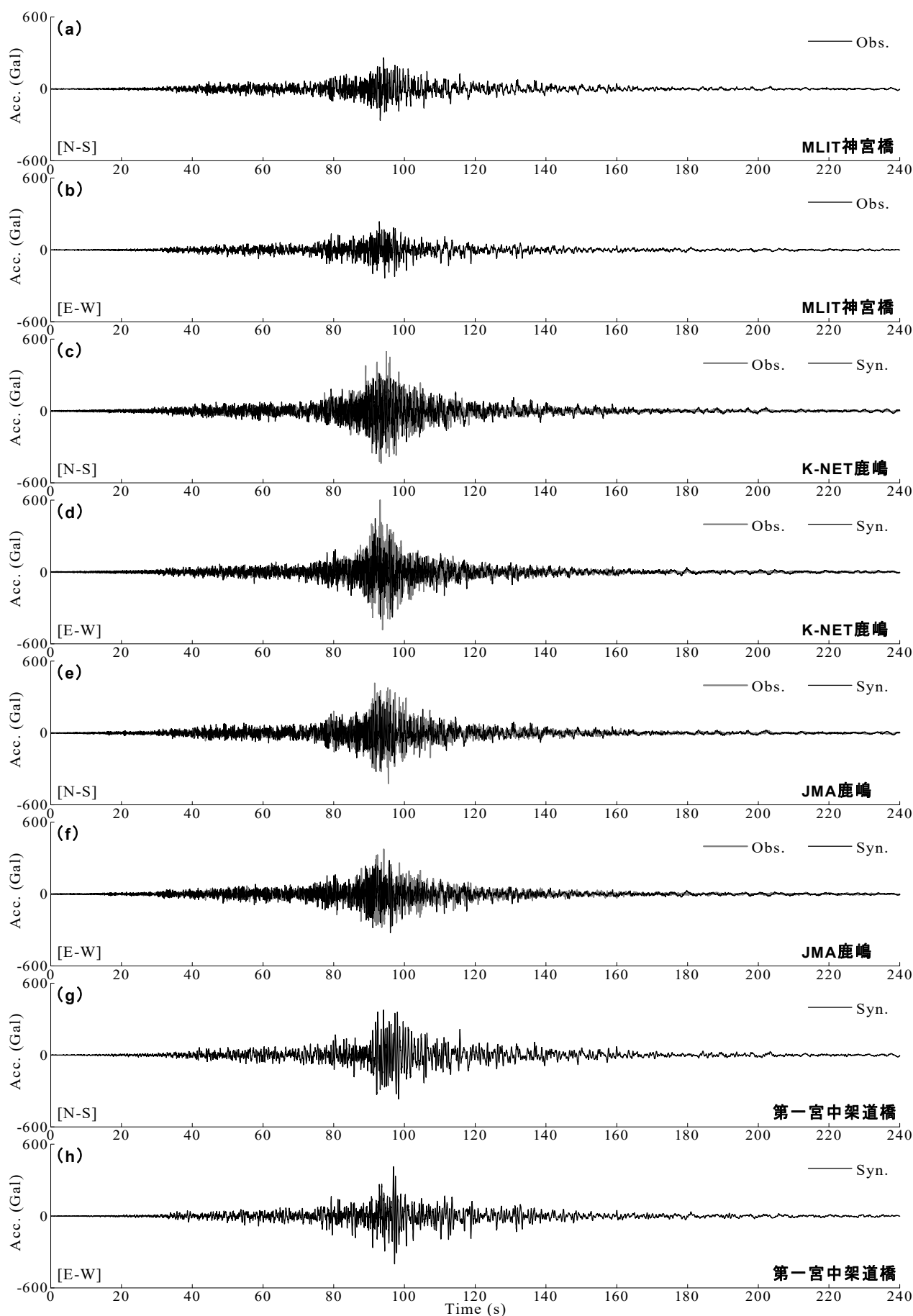


図-8 地震動推定手法の適用性の確認，および第一宮中架道橋での推定地震動（時刻歴加速度波形）

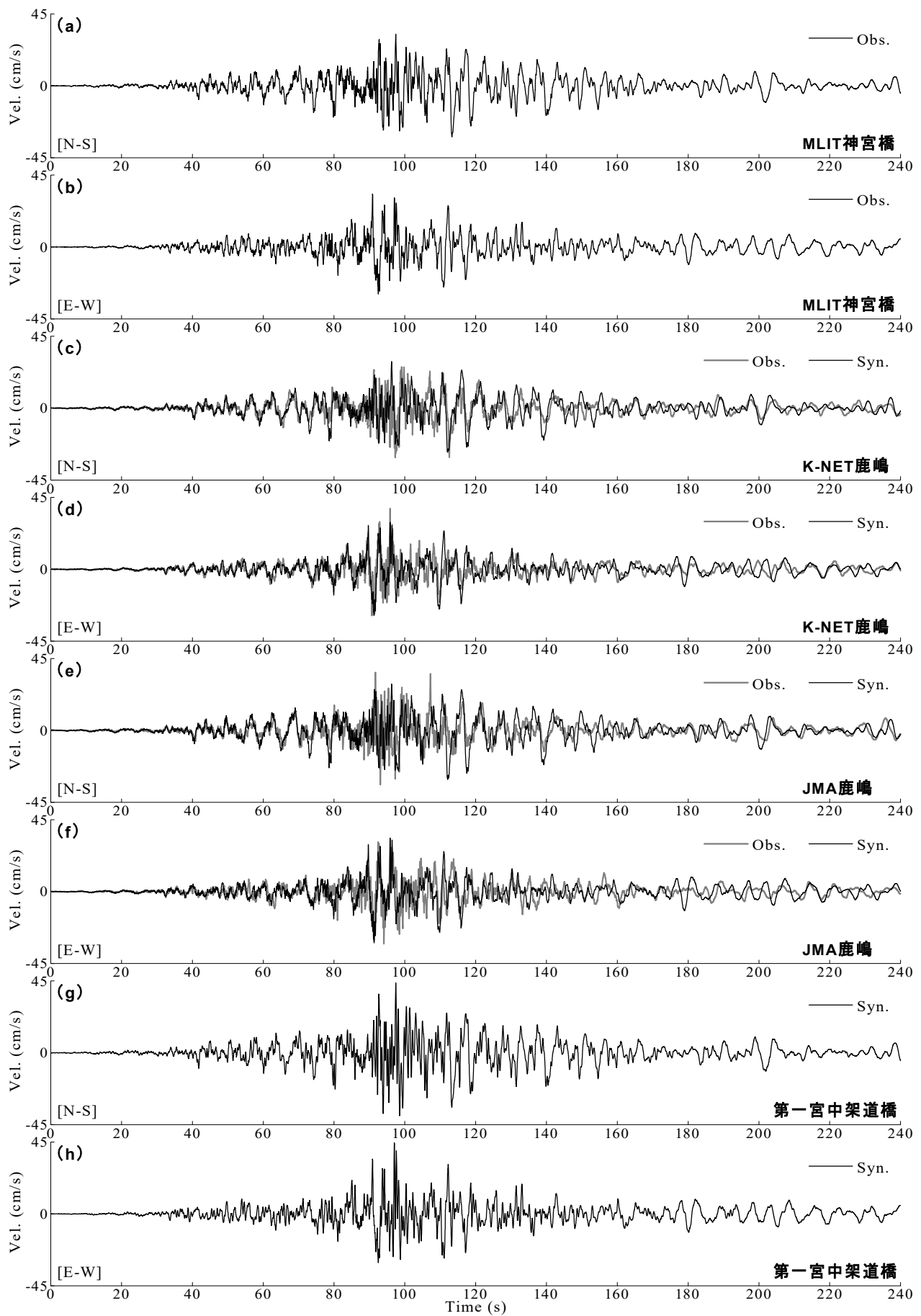


図-9 地震動推定手法の適用性の確認，および第一宮中架道橋での推定地震動（時刻歴速度波形）

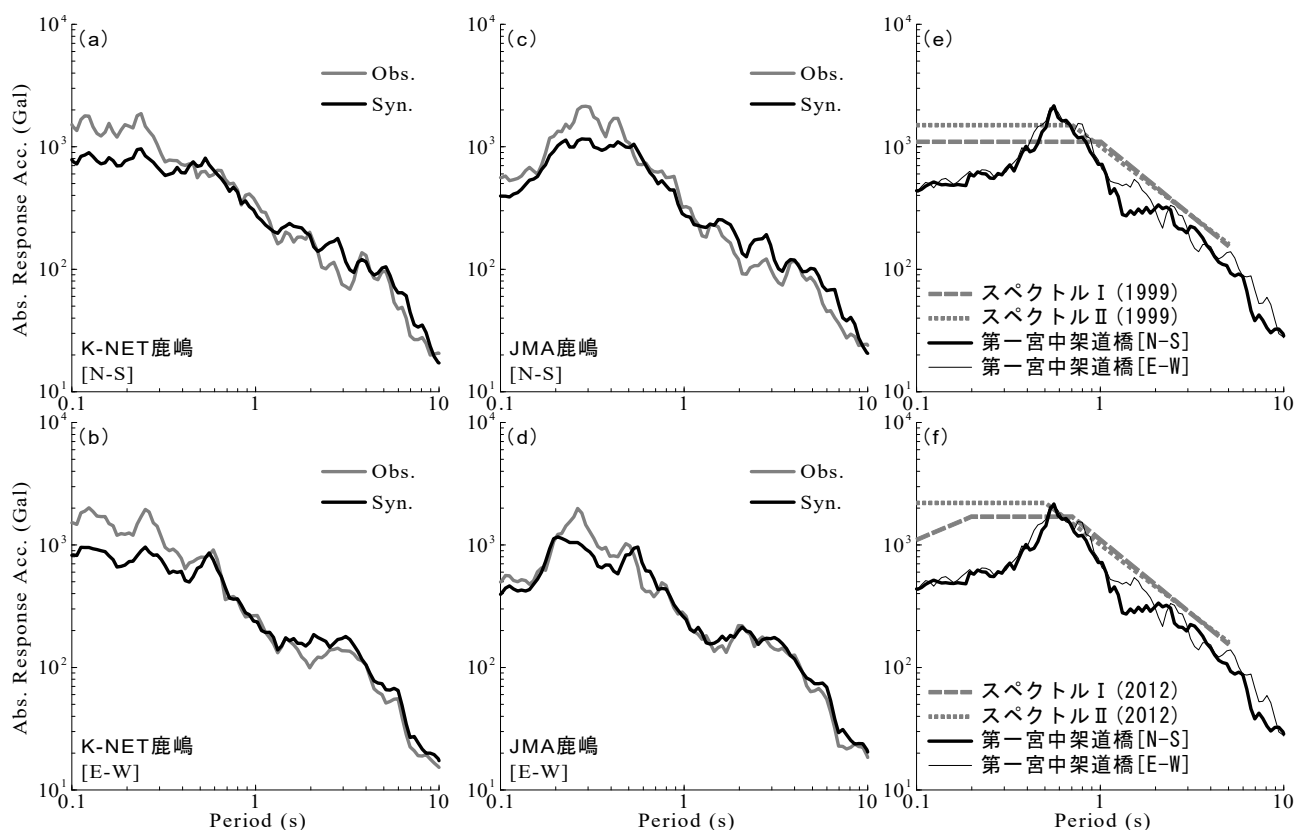


図-10 地震動推定手法の適用性の確認，および第一宮中架道橋での推定地震動（絶対加速度応答スペクトル）

8. まとめ

本研究では，臨時地震観測記録に基づき，2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)において第一宮中架道橋に作用した強震波形を推定した．以下に，得られた知見を示す．

- 1) 第一宮中架道橋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，常時微動計測や臨時地震観測などを実施し，第一宮中架道橋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) サイト増幅特性の差異に着目した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いて第一宮中架道橋周辺の観測点で得られた地震動を一定の精度で再現することが可能である．
- 3) 第一宮中架道橋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，0.5～0.8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，第一宮中架道橋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．

謝辞：本研究では，国土交通省MLIT，(国研)防災科学技術研究所K-NET，気象庁JMAによる地震波形データを利用させていただきました．現地調査の際には，住民の皆様にご協力いただきました．ここに記して御礼申し上げます．

参考文献

- 1) 例えば，Kawashima, K.: Damage of bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.12, No.4, pp.319-338, 2012.
- 2) 黒田智也，加藤格，安田武道，山田正人，金子達哉，今井勉：2011年東北地方太平洋沖地震における第一宮中架道橋の被害と斜角を有する鋼鉄道橋の回転防止対策，*Structural Engineering Data*, No.43, pp.30-37, 2014.
- 3) 矢部正明，武村浩志，川島一彦：直橋および斜橋の桁．間衝突とその影響，*構造工学論文集*，Vol.43A, pp.781-791, 1997.
- 4) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infra-

- structure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) Maruyama, Y., Yamazaki, F. and Hamada, T.: Micro-tremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways, *Proc. of the 6th international conference on seismic zonation*, pp.1361-1366, 2000.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 秦吉弥, 常田賢一, 嶋川純平: サイト増幅特性の差異に着目した2011年東北地方太平洋沖地震における波板海岸駅～吉里吉里駅付近での地震動の評価, 第17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.155-160, 2014.
 - 11) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
 - 12) 秦吉弥, 王功輝, 釜井俊孝, 一井康二: 2011年東北地方太平洋沖地震におけるK-NET茂木での強震観測記録に関する一考察, 地盤と建設, Vol.30, No.1, pp. 95-108, 2012.
 - 13) (国研)産業技術総合研究所: 地質図表示システム(地質図Navi), 地質調査総合センターホームページ, 2013. (last accessed: 2016/06/19)
 - 14) 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, Vol. 51, No.12, pp.657-678, 2000.
 - 15) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第115回物理解査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) 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リング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
 - 23) 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.
 - 24) 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*, Vol.101, No.2, pp. 688-700, 2011.
 - 25) 秦吉弥, 山田雅行, 森伸一郎, 矢部正明: 2013年淡路島地震で被災した洲浜橋での余震観測と地震動の推定, 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.63-70, 2013.
 - 26) (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.
 - 27) (公財)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, 丸善出版, 418p., 2012.