

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

秦吉弥¹・山田雅行²・森伸一郎³・矢部正明⁴

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)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20)

³正会員 博士(工学) 愛媛大学 准教授 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

⁴正会員 博士(工学) (株)長大 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

2013年4月13日5時33分に発生した淡路島付近を震源とするマグニチュード6.3の地震(以後、2013年淡路島地震と呼ぶ)の強震動の作用により、兵庫県洲本市の洲本川河口部に架かる全長149mの斜張橋である市道洲浜橋(以後、洲浜橋と呼ぶ：図-1参照)において、兩岸の橋台および移動制限装置が側方にはらみ出すようにせん断破壊するという深刻な被害が報告¹⁾されている。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、洲浜橋に作用した本震時の地震動を推定することは非常に重要²⁾である。

そこで本研究では、サイト特性置換手法³⁾を用いて、2013年淡路島地震における洲浜橋での地震動を推定した。具体的には、まず、洲浜橋近傍での常時微動計測結果^{4),5)}を踏まえ、洲浜橋の左岸側ならびに右岸側に地震計を設置することで、臨時の余震観測を行い、得られた記録に基づいて洲浜橋(左岸側ならびに右岸側)におけるサイト特性を評価した。次に、サイト特性置換手法を用いて洲浜橋周辺にあるK-NET洲本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、サイト特性置換手法を用いて洲浜橋(左岸側ならびに右岸側)での地震波形を推定した。

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

(1) 強震観測記録の分布

図-2に洲浜橋周辺の既存強震観測点で得られた本震時の最大加速度値PGA(3成分合成(ただし、洲本I.C.では水平2成分合成))および気象庁計測震度の分

布を示す。なお、洲浜橋では、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、洲浜橋の近傍には、MLIT洲本⁶⁾が位置しており、他地点で得られた記録よりも地震動指標が大きな値を示している。また、K-NET洲本⁷⁾とJMA洲本⁸⁾のように比較的近傍で得られた観測記録であるにも関わらず、本震時の地震動特性が大きく異なっている場合がある。これは、各観測点でのサイト特性が影響しているためと考えられ、洲浜橋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。

図-3および図-4は、K-NET洲本、MLIT洲本、洲本ガス、JMA洲本で得られた本震観測記録(加速度波形および速度波形)を比較したものである。図-3および図-4に示すように、波形の特徴(振幅や波形形状など)が観測点毎にまちまちとなっており、サイト増幅・位相特性の影響が示唆される。

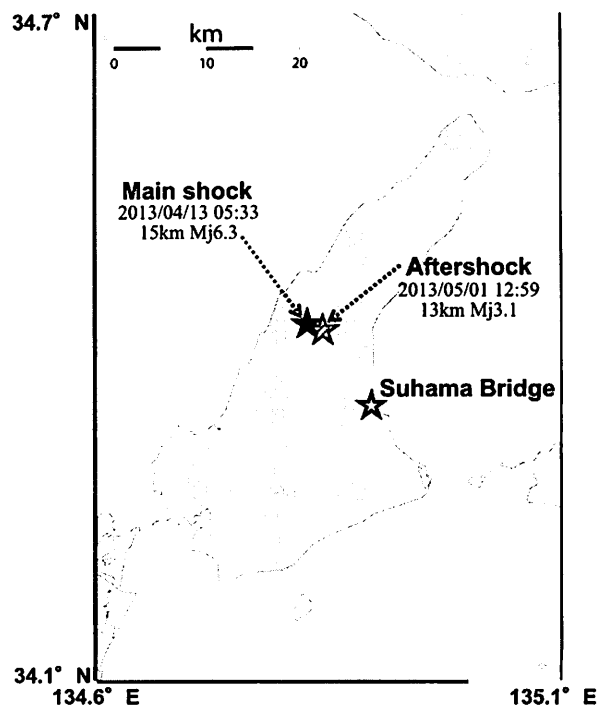


図-1 2013年淡路島地震と洲浜橋の位置関係

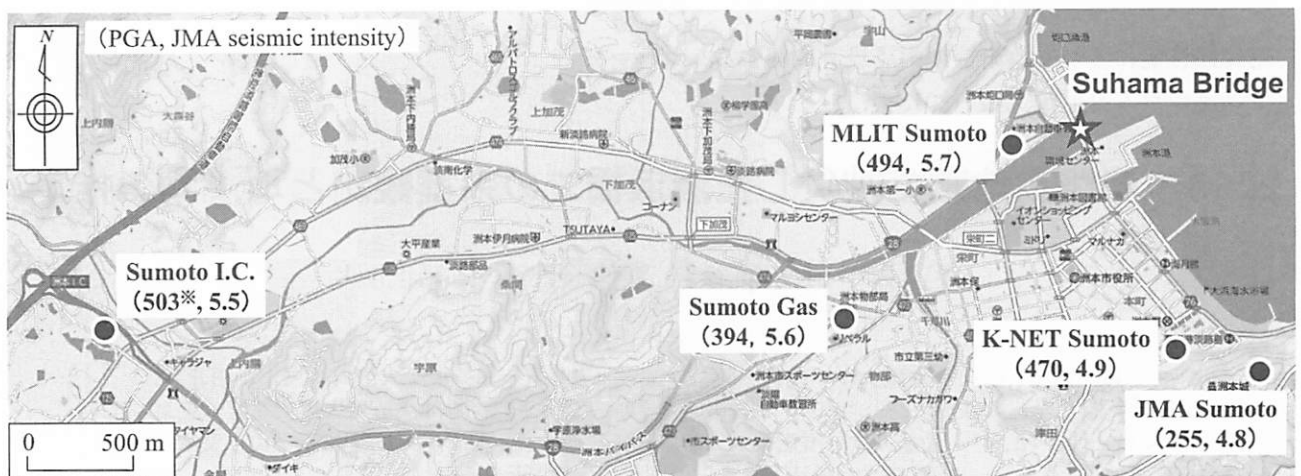


図-2 洲浜橋周辺の既存強震観測点で得られた本震記録の分布

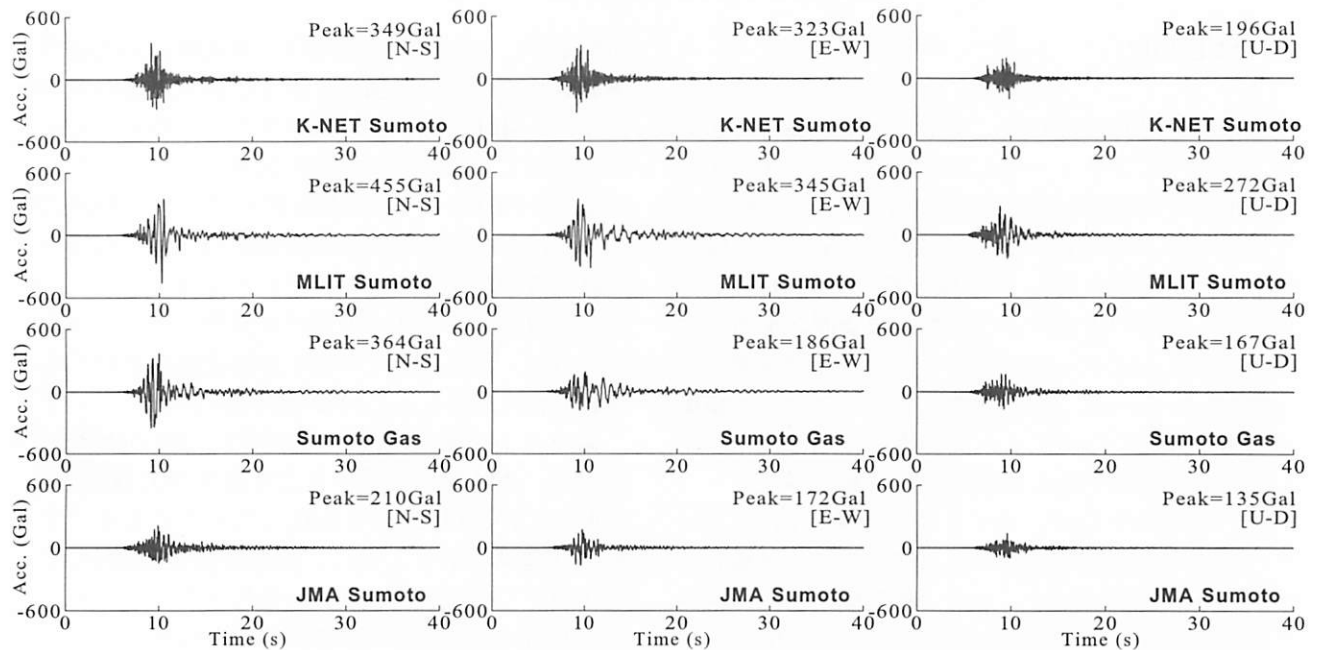


図-3 本震時における観測地震動の加速度時刻歴（2013/04/13 05:33:15から40秒間）

(2) サイト増幅特性の比較

図-5および図-6は、洲浜橋周辺の既存強震観測点における水平方向および鉛直方向のサイト増幅特性（地震基盤～地表）をそれぞれ比較したものである。水平方向のサイト増幅特性（K-NET洲本を除く）は、まず、対象観測点とK-NET洲本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^{9),10)}を考慮したフーリエスペクトルの比率（対象観測点／K-NET洲本）を計算し、この比率をK-NET洲本における既存のサイト増幅特性¹¹⁾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^{12),13)}した。一方で、鉛直方向のサイト増幅特性は、中小地震観測記録による水平方向と鉛直方向のフーリエスペクトルの比率（鉛直方向／水平方向）を、水平方向のサイト増幅特性（図-5参照）に掛け合わせることで評価^{14),15)}した。

図-5および図-6に示すとおり、MLIT洲本にお

るサイト増幅特性は、評価周波数帯域（0.2～10Hz）において水平方向ならびに鉛直方向ともに、他の観測点（K-NET洲本およびJMA洲本）におけるサイト増幅特性をほぼ包絡しているのが読み取れる。MLIT洲本と洲浜橋サイトにおける常時微動計測結果の類似性^{4),5)}を勘案すれば、本震時に洲浜橋サイトに作用した地震動は、MLIT洲本での観測地震動と同等程度の比較的大きな地震動であったと推察される。

3. 余震観測の実施

本研究では、図-7に示すように、洲浜橋の左岸側（柳学園高校艇庫）ならびに右岸側（すいせん苑書庫）において地震計を設置し、4月23日～5月21日の約1か月間の余震観測を実施した。なお、地震計設置地点と洲浜橋サイトでは、常時微動計測結果が類似しており^{4),5)}、地震計設置位置の妥当性を確認してい

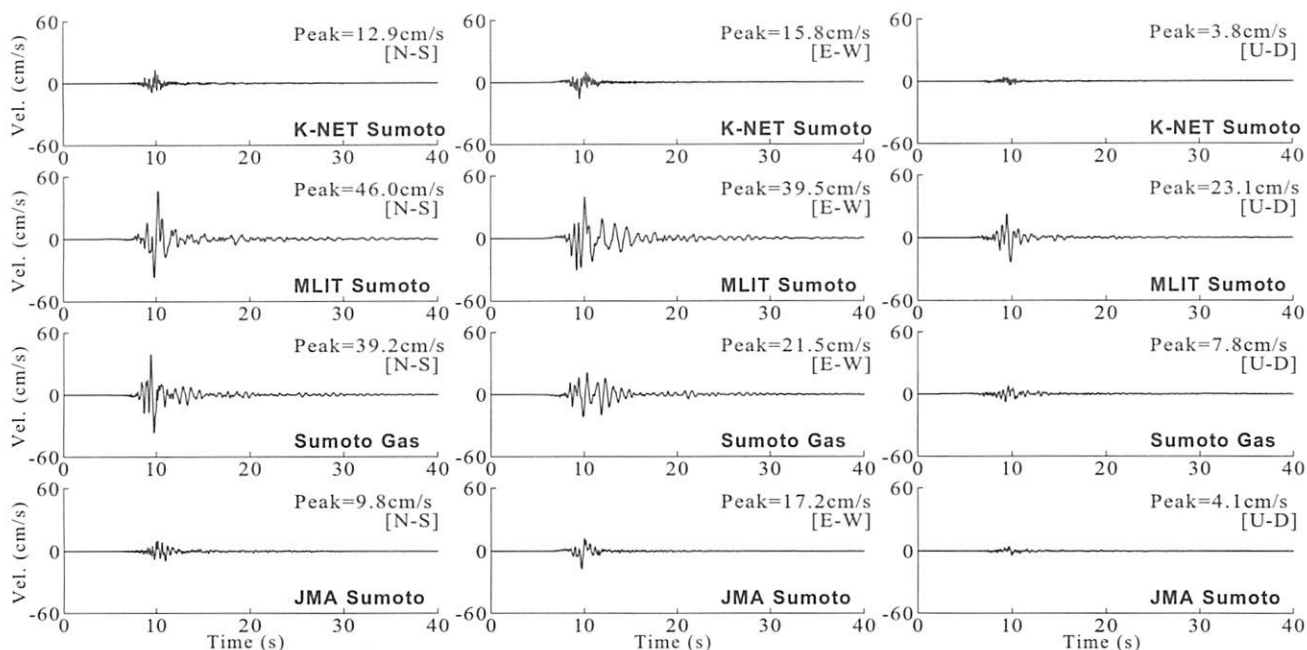


図-4 本震時における観測地震動の速度時刻歴 (2013/04/13 05:33:15から40秒間)

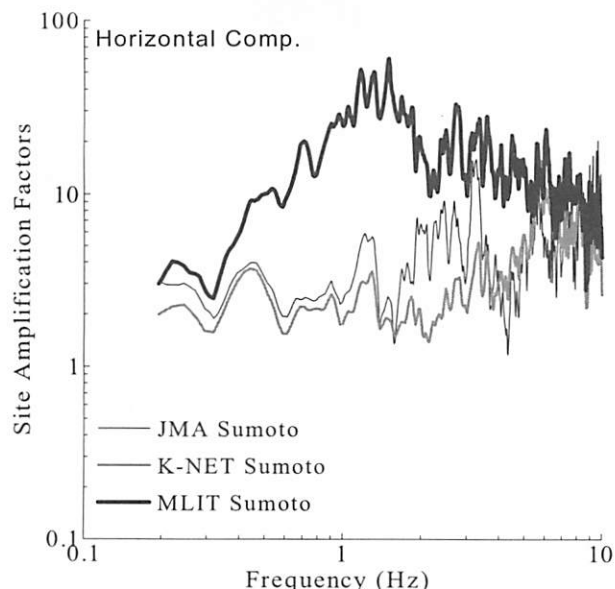


図-5 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較(水平方向)

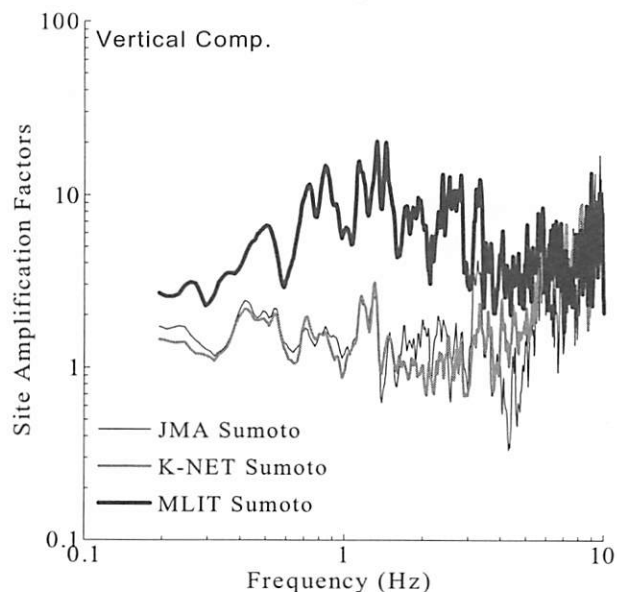


図-6 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較(鉛直方向)

る。地震計は加速度計(一体型微動探査兼地震計機器¹⁶⁾)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方向、E-W方向、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とした。

得られた主要な余震観測記録(中小地震観測記録)としては、①播磨灘を震源とする地震(2013/04/27 08:06 17km Mj3.5:以後、4/27地震と呼ぶ)および②淡路島付近を震源とする地震(2013/05/01 12:59 13km Mj3.1:以後、5/1地震と呼ぶ)の2地震である。特に、5/1地震は、図-1に示すとおり本震時の震源近くで発生した余震(ただし、震源メカニズムは不明)であり、さらに、MLIT洲本・K-NET洲本・洲浜橋サイ

ト(左岸側ならびに右岸側)の4観測点で同時に観測された唯一の地震である。

4. 地震動推定手法

本研究では、サイト特性置換手法³⁾を用いて、洲浜橋(左岸側ならびに右岸側)とK-NET洲本(以後、推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。

図-8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、洲浜橋サイトとMLIT洲本での常時微動計測による地盤震動特性の類似性を考慮してMLIT洲本を選定した。

次に、基準観測点における本震観測記録のフーリ

エ振幅(0.05HzのParzen Windowを考慮)に対して基準観測点と推定点の距離の違いによる補正^{9),10)}(補正方法は2.(2)と同様)を施し、さらに、5/1地震によって推定点と基準観測点で同時に得られた観測地震動のフーリエ振幅(0.05HzのParzen Windowを考慮)の比率(推定点/基準観測点:図-9参照)を乗じることにより、推定点におけるフーリエ振幅を推定した。その際、N-S, E-W, U-Dの各成分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余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¹⁷⁾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、このとき用いる余震観測記録としては、5/1地震における推定点での観測記録を採用した。

サイト特性置換手法では、フーリエ位相の評価に用いる余震記録として、入射角およびbackazimuthという点でできるだけ対象地震と類似した余震記録を選ぶことが重要であるが、採用した5/1地震は、図-1に示すとおり、2013年淡路島地震の震源域で発生した地震である。図-10は、5/1地震によるK-NET洲本、MLIT洲本、洲浜橋サイト(左岸側および右岸側)での観測地震動の加速度時刻歴を比較したものであるが、観測点毎に位相特性(波形形状)が異なっているのが読み取れる。

図-11は、MLIT洲本での本震観測記録の速度波形(観測波)と、観測波のフーリエ振幅を利用してフーリエ位相のみ5/1地震のフーリエ位相に置き換えた

合成速度波形(置換波)を比較したものである。図-11に示すとおり、観測波と置換波は非常に良い一致を示している。このことは、5/1地震のフーリエ位相が本震のフーリエ位相に対する良い近似となっていること、洲浜橋サイト(左岸側および右岸側)での地震動の推定に、5/1地震のフーリエ位相が適していることを示している。

5. 地震動の推定

(1) 推定手法の適用性確認

図-12は、K-NET洲本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)を比較したものの

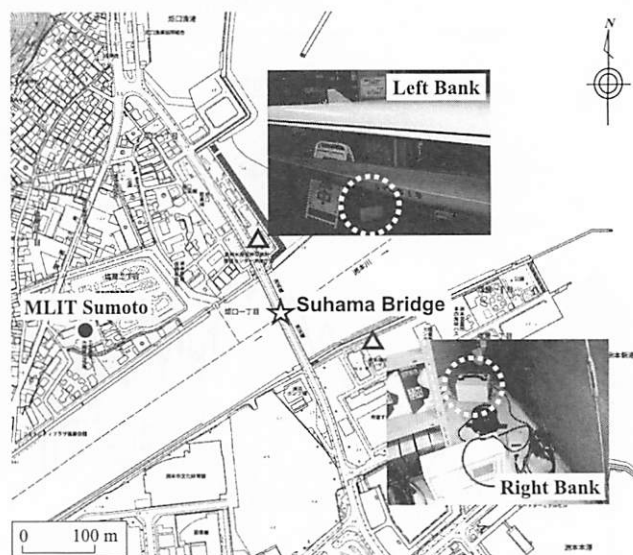


図-7 洲浜橋左岸側および右岸側での余震観測の実施

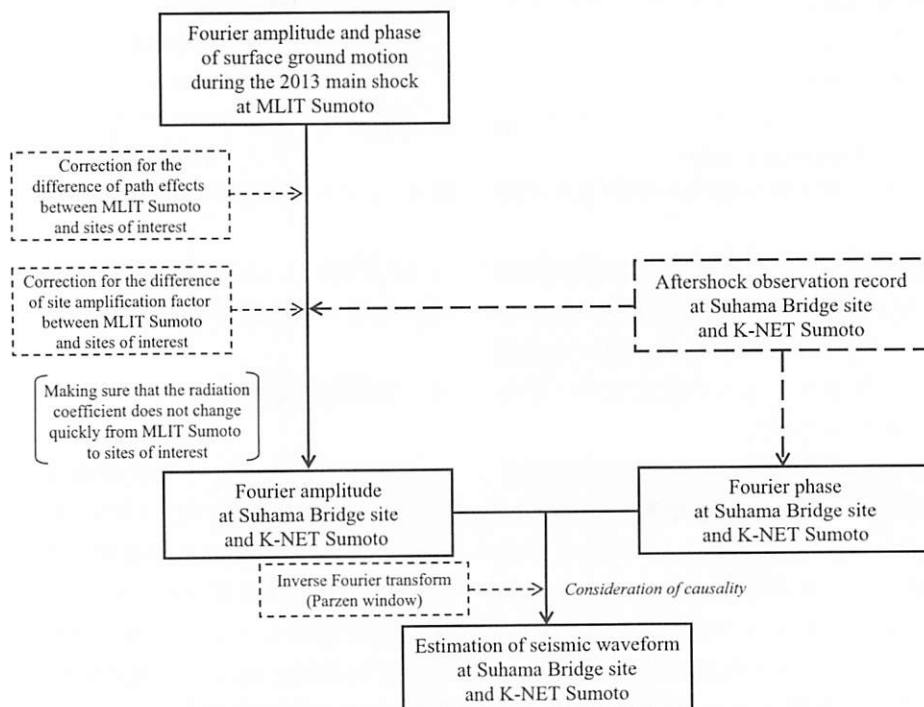


図-8 MLIT洲本での観測地震動に基づくサイト特性置換手法³⁾を用いた地震動推定フロー

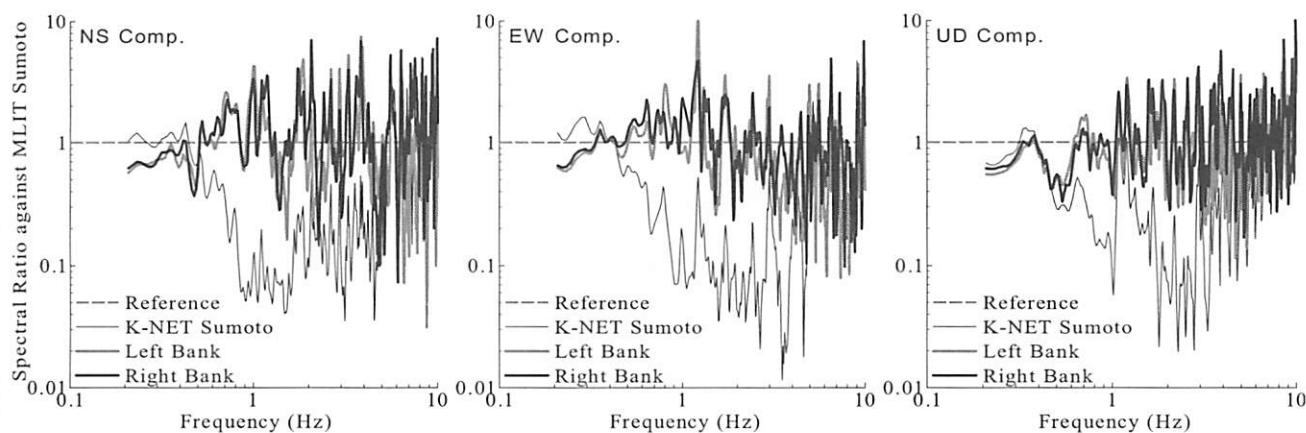


図-9 5/1地震による観測地震動のフーリエスペクトル(0.05HzのParzen Windowを考慮)の比率(推定点/MLIT洲本)

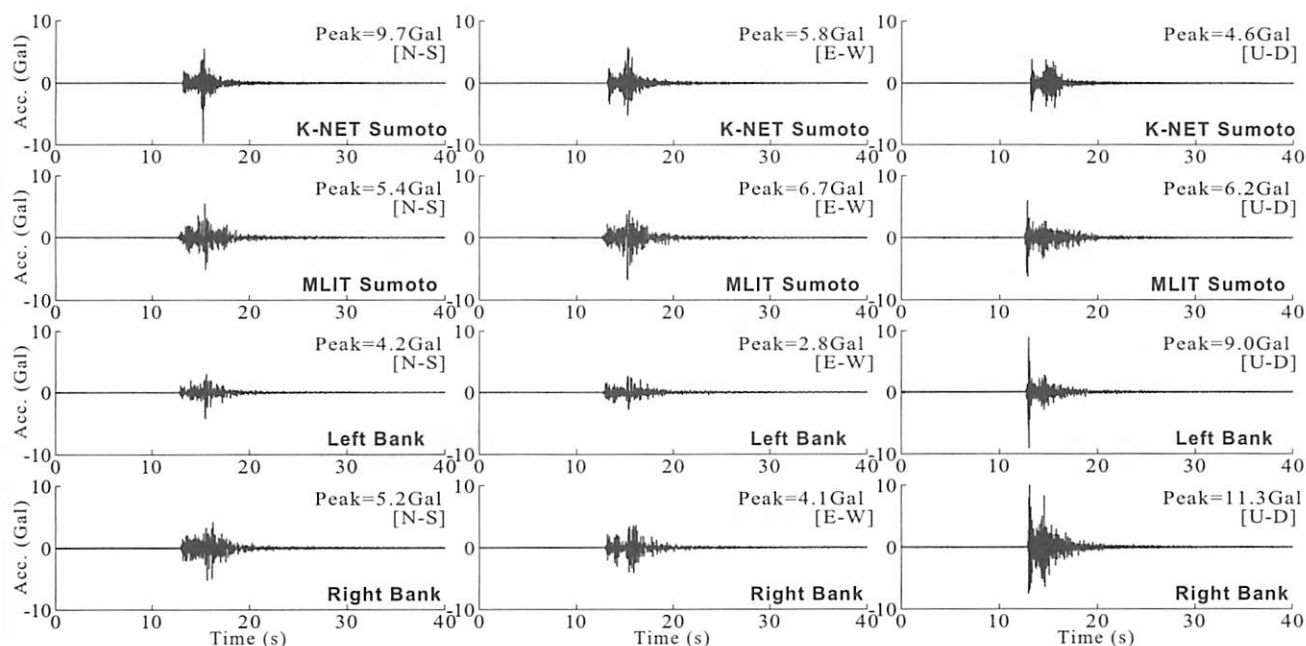


図-10 5/1地震による観測地震動の加速度時刻歴(2013/05/01 12:59:09から40秒間)

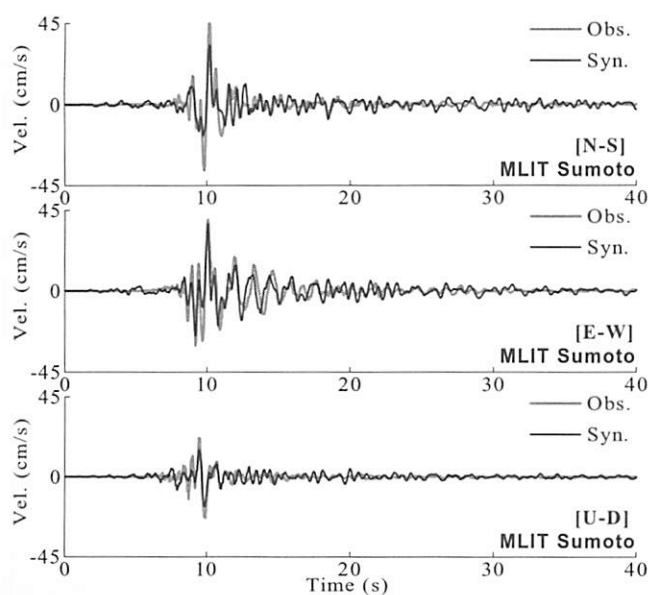


図-11 サイト位相特性の適用性の確認

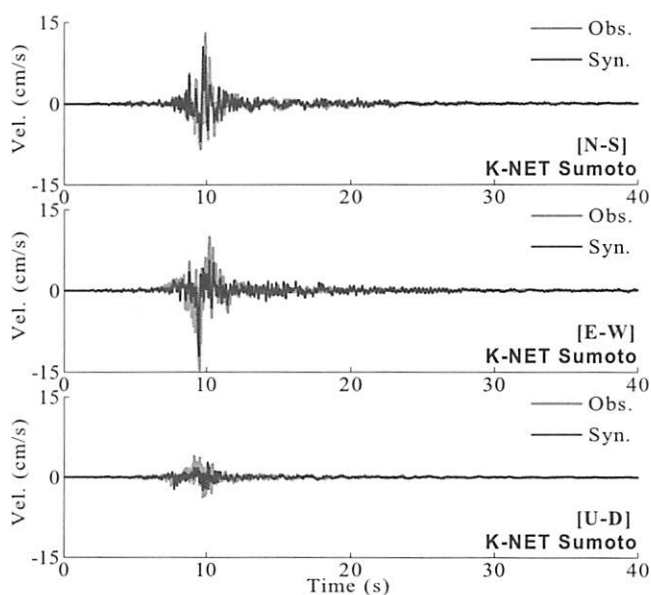


図-12 地震動推定手法の適用性の確認(速度波形)

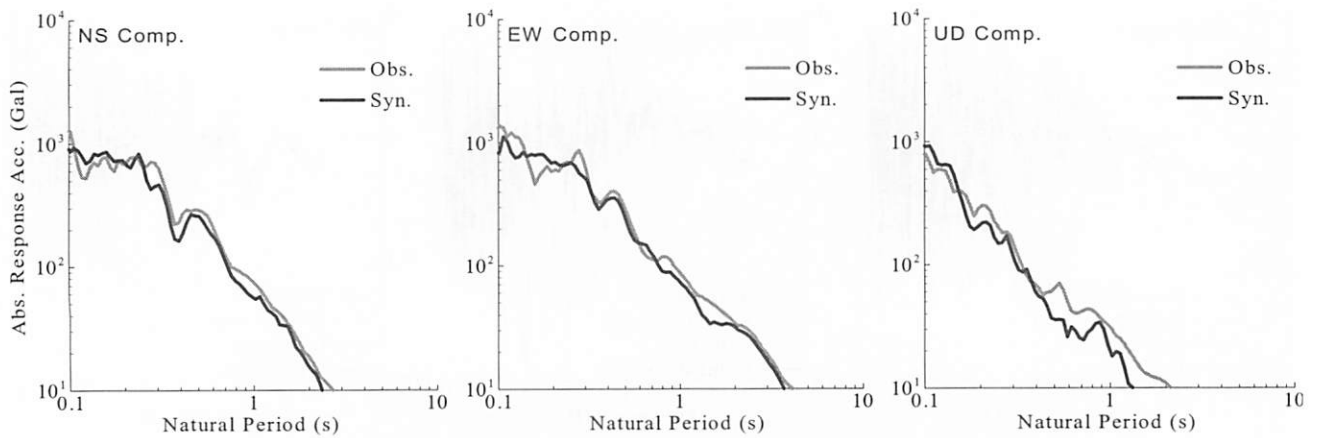


図-13 地震動推定手法の適用性の確認(絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%))

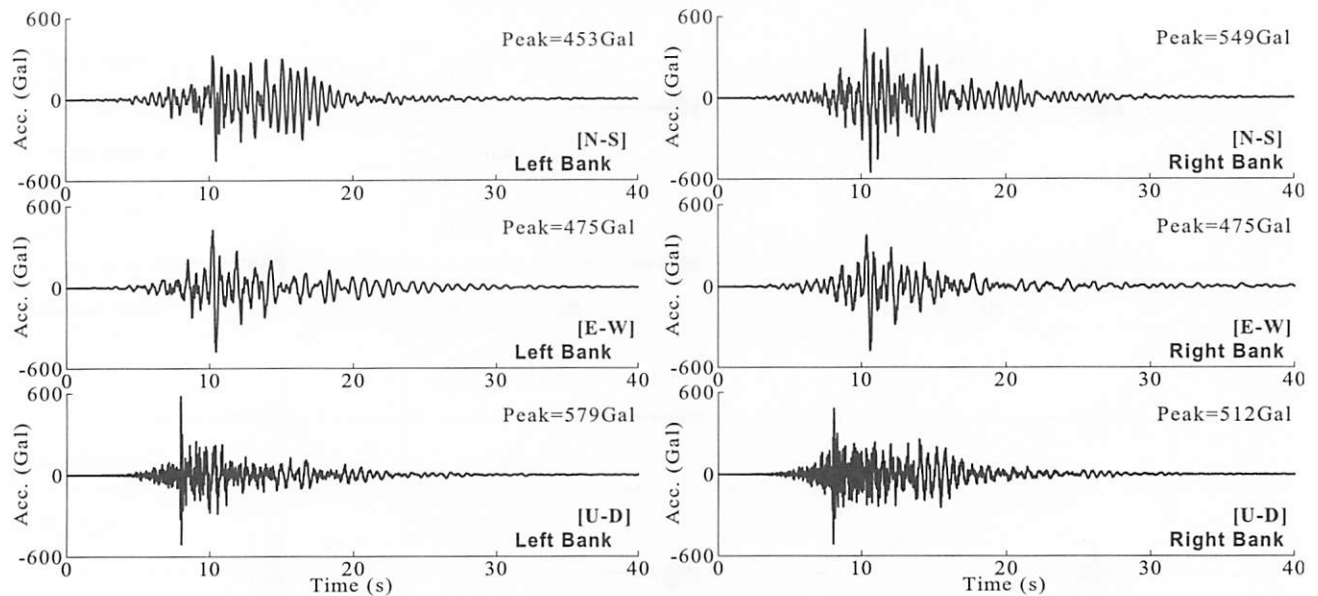


図-14 本震時における洲浜橋サイトでの推定地震動の加速度時刻歴

を示す。さらに、絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を観測波と推定波(いずれも加速度波形)で比較したものを図-13に示す。

図-12および図-13に示すとおり、MLIT洲本とK-NET洲本ではサイト増幅特性やサイト位相特性の差異が比較的大きいにも関わらず(図-5、図-6、図-10参照)、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、洲浜橋(左岸側および右岸側)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、本震時における洲浜橋(左岸側および右岸側)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。

(2) 洲浜橋における地震動の評価

図-14および図-15は、本震時の洲浜橋サイト(左岸側および右岸側)における推定加速度および推定速度波形である。図-14と図-3および図-15と図-4をそれぞれ比較すると、洲浜橋サイトにおける推定地

震動の加速度・速度振幅が周辺で得られた観測地震動よりも大きくなっており、波形形状についても洲浜橋サイトと周辺観測点で比較的大きな差異が確認できる。特に、波形形状の差異は、図-14および図-15に示すように、洲浜橋サイト内の左岸側と右岸側においても確認でき、N-S成分では特にその差異がより顕著に表れている。

図-16には、図-14で示した推定加速度波形による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。さらに、図-16には、洲浜橋の設計水平震度 $k_H=0.3$ (橋軸方向・橋軸直角方向で共通)に相当する294Galも同時に示している。図-16に示すとおり、洲浜橋サイトにおける推定地震動の応答スペクトルは、MLIT洲本における観測地震動の応答スペクトルを上回る固有周期帯が多くなっていることが読み取れる。さらに、洲浜橋の1次固有周期0.98s(橋軸方向・橋軸直角方向で共通)に着目すると、洲浜橋サイトでの推定地震動の加速度応答は、MLIT洲本での観

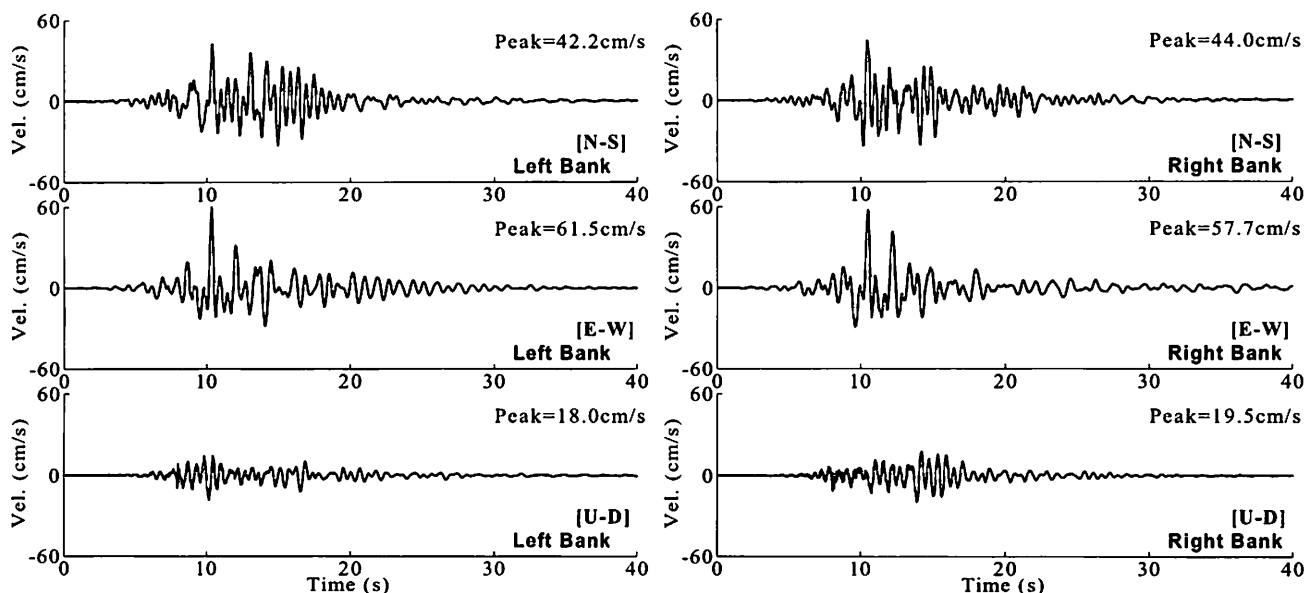


図-15 本震時における洲浜橋サイトでの推定地震動の速度時刻歴

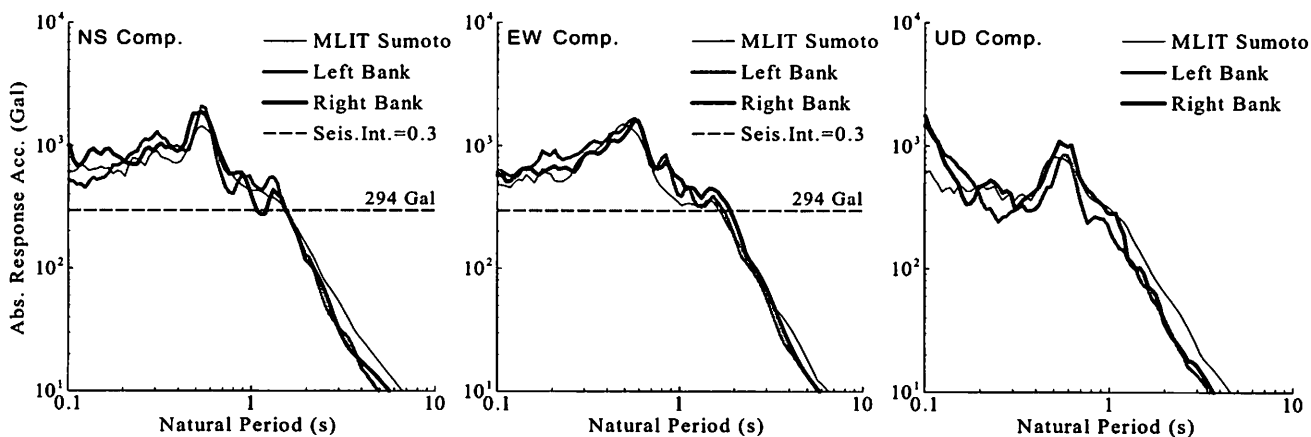


図-16 本震時における洲浜橋サイトでの推定地震動の絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)

測地震動による加速度応答および耐震設計値である294Galをそれぞれ上回っていることも読み取れる。

7. まとめ

本研究では、サイト特性置換手法を用いて、2013年淡路島地震によって洲浜橋サイトに作用した強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 洲浜橋と周辺の強震観測点では、サイト増幅・位相特性が異なっており、現地で余震観測を実施し、洲浜橋でのサイト増幅・位相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、2013年淡路島地震におけるK-NET洲本で得られた強震波形を一定の精度で再現することが可能である。
- 3) 洲浜橋サイト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異なる特徴を有

しており、洲浜橋の1次固有周期帯域(0.98s)では、洲浜橋の近傍にあるMLIT洲本での観測地震動や洲浜橋の設計水平震度相当の294Galをとものに上回る加速度応答を示す。

本稿での推定地震動を入力波とした洲浜橋の動的解析については、別稿¹⁸⁾を参照されたい。

謝辞：

本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NETおよび気象庁JMAによる地震観測公開データを使用させていただきました。

MLIT洲本の地震観測データの提供では、国土技術政策総合研究所地震防災研究室ならびに国土交通省近畿地方整備局兵庫国道事務所から多くのご支援をいただきました。

洲本ガスでの地震観測データについては洲本瓦斯(株)より、洲本I.C.での本震観測記録については本州四国連絡高速道路(株)よりそれぞれご提供いた

きました。

洲浜橋での余震観測の実施にあたっては、洲本市都市整備部および柳学園高等学校から多大なるご協力をいただきました。

(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(委員長：幸左賢二九州工業大学教授)の委員の皆様には、本研究の遂行に際して有意義なご意見をいただきました。

現地調査では、谷本隆介氏、駒井尚子氏、吉川登代子氏(ともに大阪大学)にお世話になりました。

ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森伸一郎：2013年淡路島地震における洲浜橋(斜張橋)の地震被害と被害メカニズム，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，2013. (this issue)
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 山田雅行，伊藤佳洋，秦吉弥，森伸一郎，Twayana, R.P.：2011年淡路島地震で被災した洲浜橋周辺における地盤振動特性評価とS波速度構造の推定，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，2013. (this issue)
- 5) Twayana, R.P., 森伸一郎，秦吉弥，山田雅行：2013年淡路島地震における被害分布と洲本平野の地盤振動特性，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，2013. (this issue)
- 6) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 7) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 8) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 9) 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.
- 10) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.93, No.4, pp.1498-1515, 2003.
- 11) 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.
- 12) (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.
- 13) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: A study on variation of seismic motion indices within very small distance, *Proc. of 11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 2013)*, Vol.11, Paper No. EQ11, New York, U.S.A., 2013.
- 14) 秦吉弥，一井康二，村田晶，野津厚，宮島昌克：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に一，土木学会論文集A，Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 15) 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)
- 16) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，藤原広行：微動探査観測システムの開発，地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM)，S111-P002, 2006.
- 17) 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.
- 18) 矢部正明，森伸一郎：洲浜橋(斜張橋)の動的解析と2013年淡路島地震における応答評価，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，2013. (this issue)