

臨時余震観測に基づく2011年東北地方太平洋沖地震
による亀田大橋での強震動の評価

秦吉弥¹・矢部正明²・土屋智史³・中村晋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)長大 副技師長 構造事業本部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)
³正会員 博士(工学) (株)コムスエンジニアリング 代表取締役 (〒113-0023 東京都文京区向丘1-1-17 6F)
⁴正会員 工学博士 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)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)では、津波だけでなく地震動による橋梁の被災が数多く報告¹⁾されている。特に、亀田大橋(福島県郡山市の国道4号あさか野バイパスが国道49号を跨ぐ箇所に架かる跨道橋)では、T型RC橋脚の横梁付け根部での損傷を伴う地震動による被害が発生している^{9),10),11)}。

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、被災地点で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、亀田大橋(跨道橋サイト)において臨時の余震観測を実施し、その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亀田大橋での地震動を推定した。具体的には、周辺の既存強震観測点とのサイト増幅特性の類似性を踏まえて、本震観測記録の転用¹²⁾の可能性について検討を行った。

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. 強震観測記録の整理

図-1に亀田大橋周辺の既存強震観測点の分布、および表-1に2011年東北地方太平洋沖地震(以後、本震と呼ぶ)における強震観測点で得られた記録の地震動指標値の一覧をそれぞれ示す。なお、亀田大橋では、本震時に強震観測が実施されていない。図-1および表-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¹³⁾がある。具体的には、JMA郡山¹⁴⁾とK-NET郡山¹⁵⁾は700m程度離れているが、本震

表-1 亀田大橋周辺の観測地震動の指標値の比較

地震動指標		JMA郡山	K-NET郡山	郡山IC
PGA	N-S	502	746	581
	E-W	662	1,070	523
	3成分合成	721	1,111	628
PGV	N-S	49.7	52.2	62.0
	E-W	44.0	40.6	45.1
	3成分合成	51.0	52.8	63.7
気象庁計測震度		5.86	5.90	6.10
SI値	N-S	52.7	57.0	70.6
	E-W	56.5	56.5	61.5
速度PSI値	N-S	80.9	70.1	98.7
	E-W	69.4	78.5	87.4

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影響しているためと考えられ、亀田大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を示唆するものである。すなわち、JMA郡山～K-NET郡山間の0.7kmに対して、亀田大橋～JMA郡山間の2.0kmおよび亀田大橋～K-NET郡山間の2.6kmは、それぞれ3～4倍程度の距離を有しており、既往研究で採用されている周辺観測点(K-NET郡山)で得られた記録を本震時に亀田大橋に作用した地震動と見なすという判断¹¹⁾ができない可能性が示唆される。

図-2、図-3、図-4には、亀田大橋周辺の地質図^{16),17)}、表層地質図¹⁸⁾、地形分類図¹⁸⁾を図-1と対応させるかたちでそれぞれ示す。図-2、図-3、図-4に示すように、開成公園内(旧・沼地)に設置されているK-NET郡山は、亀田大橋サイトとの対応が十分でないことが読み取れる。また、郡山ICと亀田大橋サイトでは、地形・地質の分類が全て同種となっていない

い。一方で、JMA郡山と亀田大橋サイトでは、地形・地質の分類がともに同種となっており、両地点でのサイト特性の類似性が示唆される。

3. 余震観測による地震動の評価

2. で得られた知見を踏まえ、本研究では、亀田大橋サイトにおいて2012年4月24日に地震計を設置し、7日間の余震観測を実施した。その結果、亀田大橋サイト、JMA郡山、K-NET郡山において、以下に示す中小地震観測記録を同時に得ることができた。

- ・EQ_1 : 2012/04/25 05:22 千葉県北東部 43km $M_j5.5$
- ・EQ_2 : 2012/04/26 05:45 福島県沖 63km $M_j4.5$

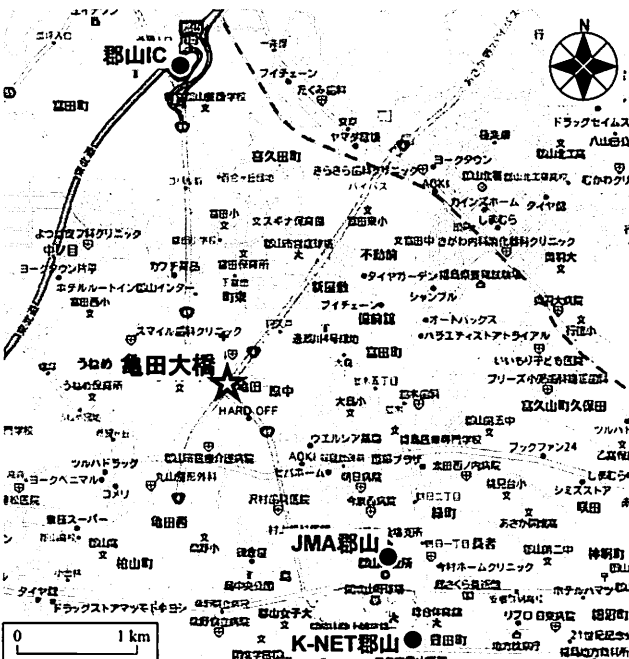


図-1 亀田大橋周辺の既存強震観測点の分布

・EQ_3 : 2012/04/29 19:28 千葉県北東部 48km $M_j5.8$
 ・EQ_4 : 2012/04/29 21:16 福島県沖 48km $M_j4.5$
 ここに、地震計は一体型微動探査兼地震計機器¹⁹⁾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²⁰⁾とした。

図-5および図-6は、①本震(Main Shock)、②2011年4月7日23時32分に発生した宮城県沖を震源とする地震($M_j7.1$:以後、Aftershock_1と呼ぶ)、③2011年4月11日17時16分に発生した福島県浜通りを震源とする地震($M_j7.0$:以後、Aftershock_2と呼ぶ)による観測地震動のフーリエ振幅スペクトルの比率(K-NE

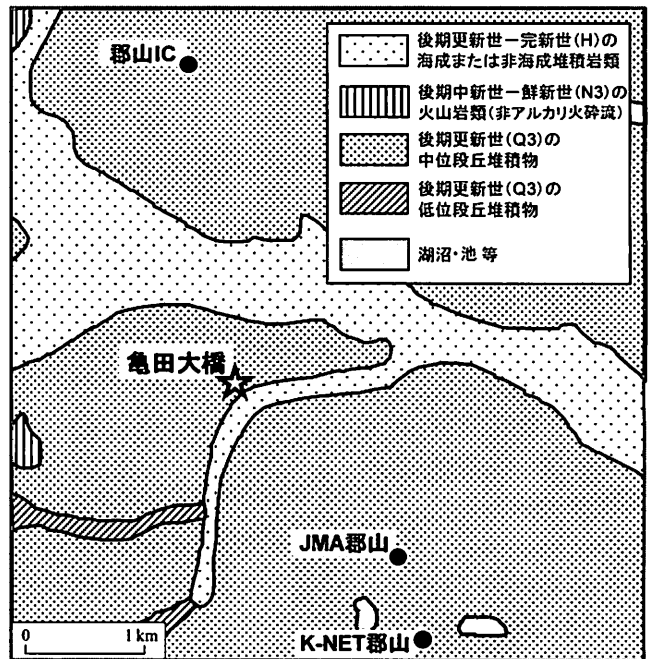


図-2 亀田大橋とその周辺観測点での地質状況^{16),17)}

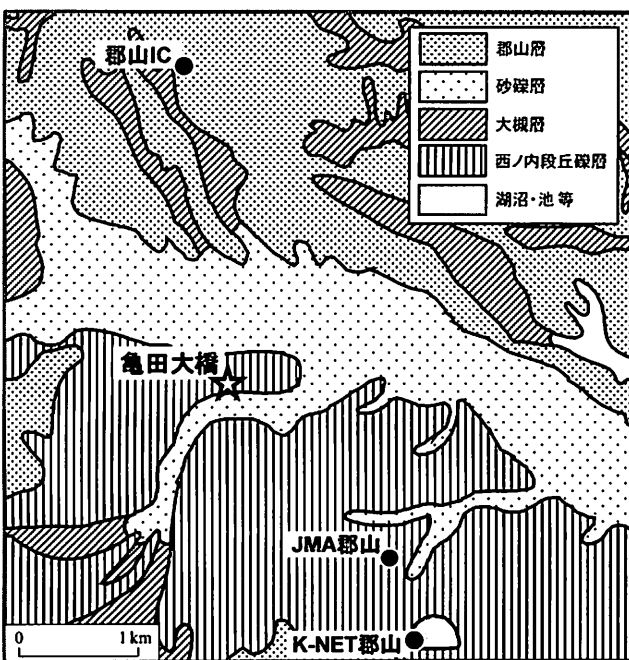


図-3 亀田大橋とその周辺観測点での表層地質状況¹⁸⁾

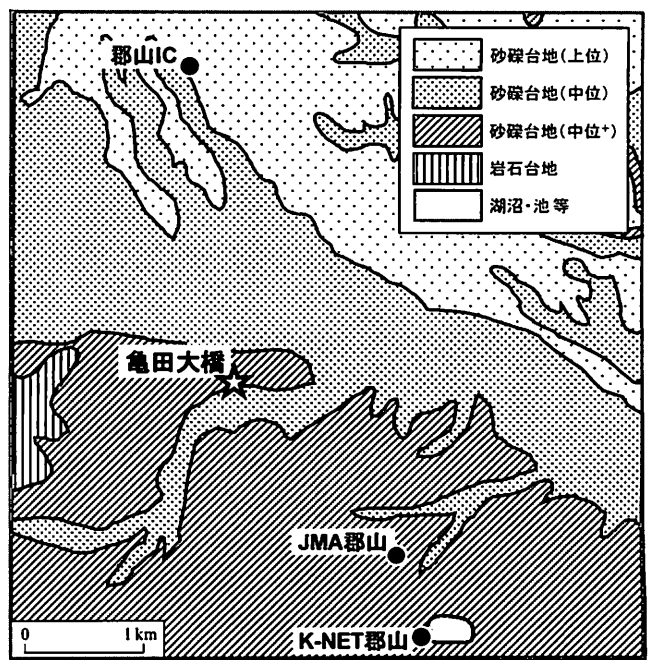


図-4 亀田大橋とその周辺観測点での地形分類状況¹⁸⁾

T郡山/JMA郡山：図-5参照，郡山IC/JMA郡山：図-6参照）である．ここに，フーリエ振幅スペクトルの計算にあたっては，0.05HzのParzen Windowを考慮しているものの，距離の違いによる補正^{21),22)}は実施していない．図-5および図-6に示すように，JMA郡山における観測地震動に対して，K-NET郡山および郡山ICでのスペクトル比が基準比率の1.0を周波数帯域によって大幅に上回りもしくは下回っていること，また図-5と図-6の比較においてスペクトル比の形状が両観測点間で異なっていること，さらに図-5ならびに図-6においてMain Shockによるスペクトル比の特性に対してAftershock_1・Aftershock_2によるスペクトル比の特性が類似していること，などを踏まえると，3観測点での本震による地震動指標値の差異(表-1参照)は，各強震観測点におけるサイト特性に主に起因していると言える．

図-7にEQ_1, EQ_2, EQ_3, EQ_4による観測地

震動のフーリエ振幅スペクトルの比率(K-NET郡山/JMA郡山)を示す．図-7と図-5を比較すると，スペクトル比の形状が概ね類似していることから，中小地震と大規模地震において地盤震動特性の差異は，比較的小さいことが示唆される．

図-8は，図-7と同様に，EQ_1, EQ_2, EQ_3, EQ_4による観測地震動のフーリエ振幅スペクトルの比率(亀田大橋/JMA郡山)を計算したものである．図-8に示すとおり，0.2～1Hzにおいてスペクトル比はほぼ1.0を示していること，また1Hz以上においてもスペクトル比が概ね1.0を基準に推移していることを踏まえると，亀田大橋とJMA郡山での地盤震動特性(サイト増幅特性)が類似していることが示唆される．さらに，両地点への影響が大きかったと考えられる宮城県沖ならびに福島県沖のサブイベント²³⁾から両地点への距離も概ね同等であることを考慮すると，JMA郡山(写真-1参照)で観測されている本震

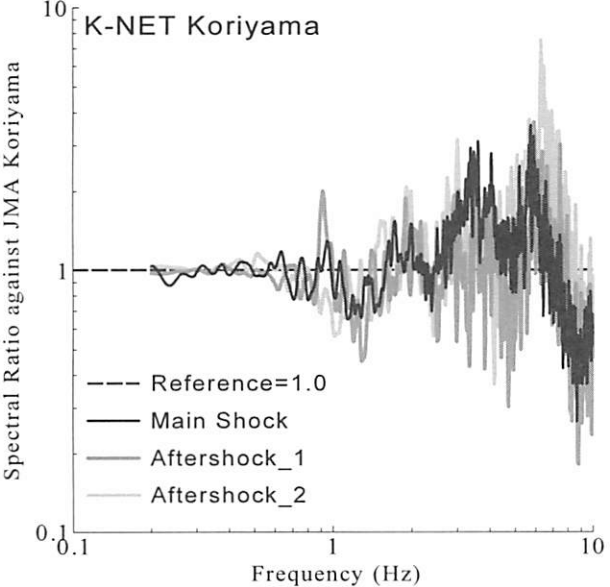


図-5 大規模地震によるスペクトル比(K-NET郡山/JMA郡山)

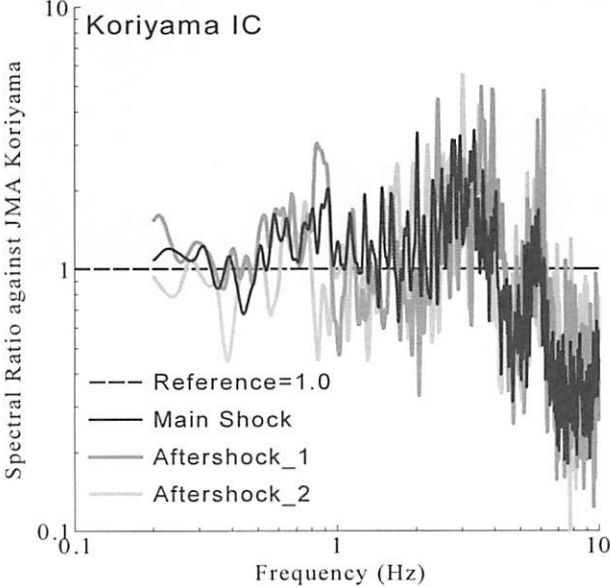


図-6 大規模地震によるスペクトル比(郡山IC/JMA郡山)

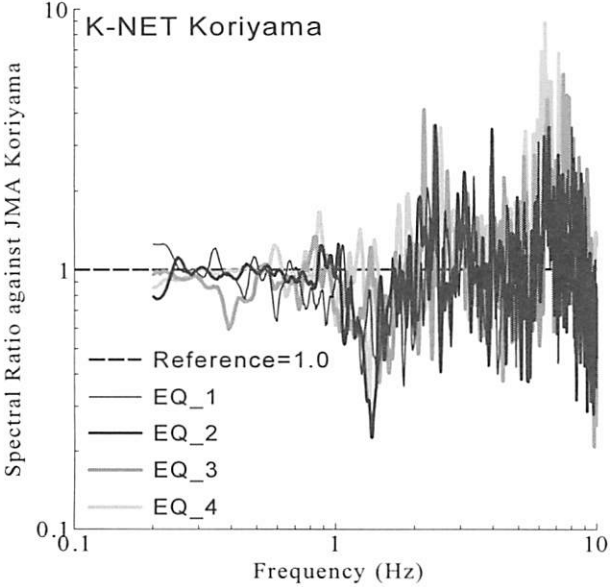


図-7 中小地震によるスペクトル比(K-NET郡山/JMA郡山)

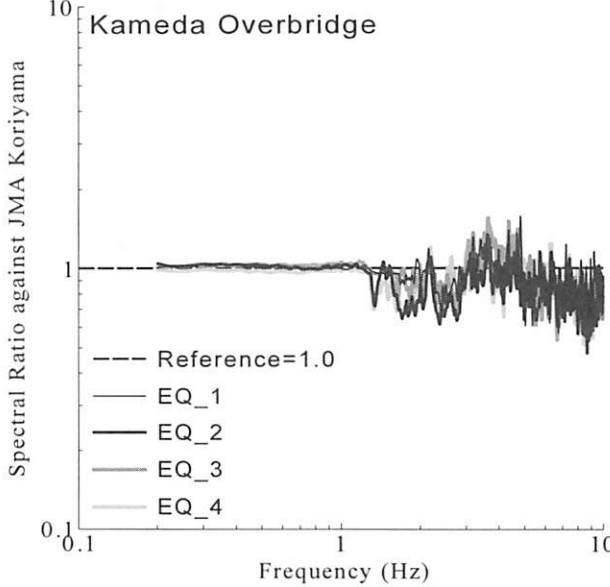


図-8 中小地震によるスペクトル比(亀田大橋/JMA郡山)

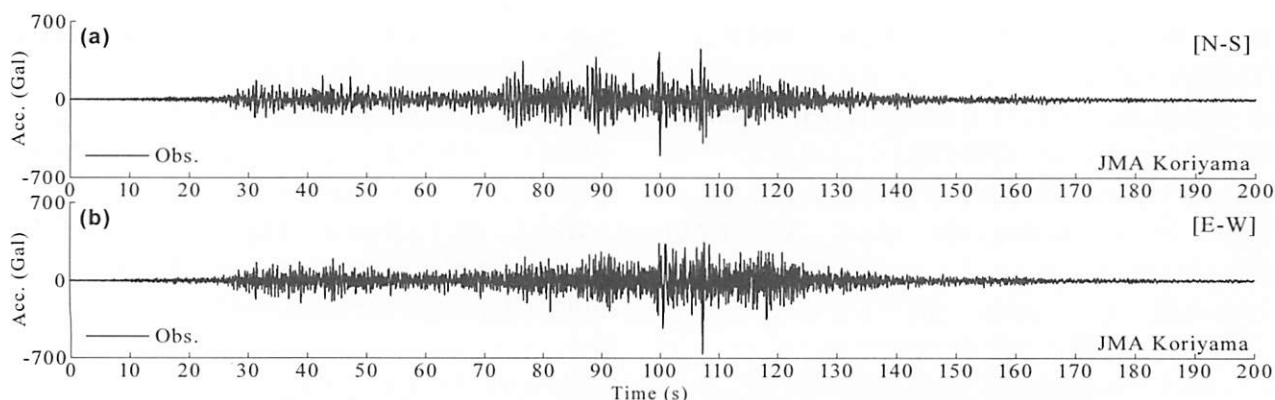


図-9 亀田大橋での推定地震動の加速度時刻歴 (JMA郡山での本震観測記録の転用)

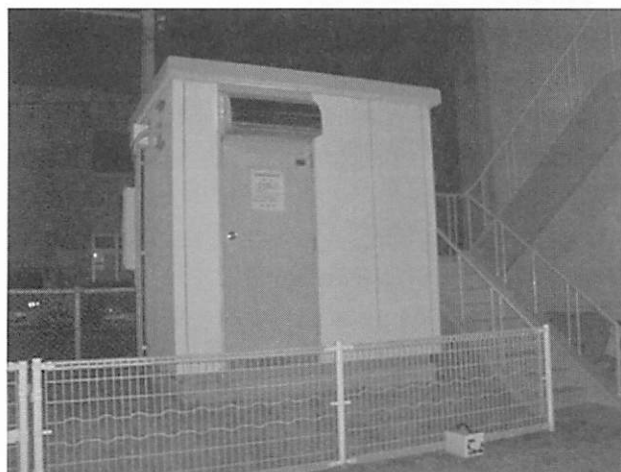


写真-1 JMA郡山の概観(常時微動計測状況)

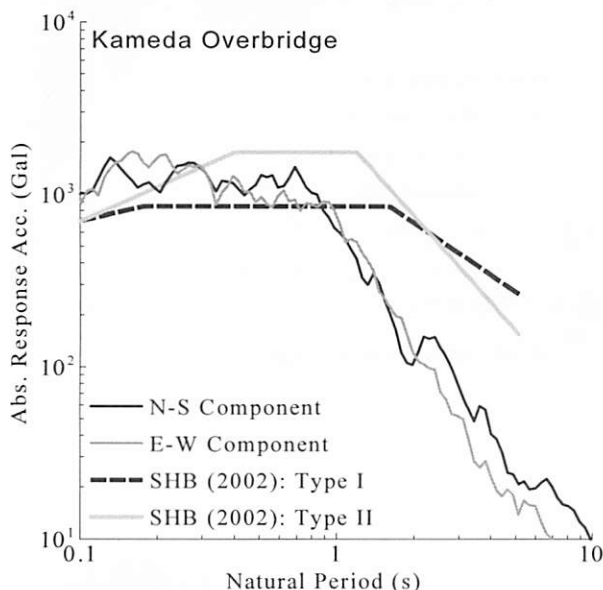


図-10 加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較

時の地震動(図-9参照)を亀田大橋に作用した本震時の地震動と見なすことが可能であると考えられる。一般に、対象地点とその周辺の観測記録が得られている地点の間でサイト特性が類似していない場合²⁴⁾³⁶⁾、サイト特性を補正して地震動を推定する方法(例えば、サイト特性置換手法³⁷⁾や拡張型サイト特性置換手法³⁸⁾や断層モデルに基づく方法³⁹⁾なども提

案されているが、地震動推定手法に内在する推定誤差⁴⁰⁾と比較して亀田大橋とJMA郡山のサイト特性の差(図-8参照)は十分に小さいと判断される。また、当該判断は、著者ら⁴¹⁾⁴²⁾による郡山市内での余震観測やアンケート震度の結果とも調和的であるといえる。ただし、本稿ではサイト増幅特性の類似性に着目して議論を行っているが、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性⁴³⁾を踏まえたサイト位相特性の類似性について検討の余地が残されていることを付記しておく。

図-10に亀田大橋での推定加速度波形(すなわち、JMA郡山での本震時の観測地震動：図-9参照)による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。図-10には、道路橋示方書・同解説(H14)⁴⁴⁾によるレベル2地震動(タイプIならびにタイプII地震)の標準スペクトル(II種地盤⁴⁵⁾)についても同時に示している。図-10に示すとおり、亀田大橋での推定地震動は、タイプI地震動に対して0.1～1s付近、およびタイプII地震動に対して0.1～0.3s付近において標準スペクトルをそれぞれ上回る加速度応答を示している。

4. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)での亀田大橋における強震波形を、当該橋梁サイトでの臨時余震観測記録に基づいて推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 亀田大橋では、2.0kmほど南東方向にあるJMA郡山で得られた本震観測記録を橋梁に作用した地震動と見なすことが可能である。
- (2) 亀田大橋における推定地震動(JMA郡山での観測地震動)の応答スペクトルは、道路橋示方書(H14)の設計標準スペクトルに対して、0.1～1s付近(タイプI地震動)および0.1～0.3s付近(タイプII地震動)において標準スペクトル(II種地盤)をそれぞれ上回る加速度応答を示している。

今後は、推定した強震動を用いた動的FEM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、国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET、気象庁JMA、NEXCO東日本による地震観測波形データを利用させていただきました。現地での余震観測・常時微動計測の実施の際には、住民の皆様などに大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震，土木施設災害調査速報，国総研資料第646号／土研資料第4202号，2011。
- 2) 星隈順一，玉越隆史：東北地方太平洋沖地震による道路橋の被災状況調査速報，橋梁と基礎，Vol.45，pp.32-35，2011。
- 3) 星隈順一，張広鋒：東北地方太平洋沖地震における耐震補強がなされていた道路橋の概況について，日本地震工学会大会—2011梗概集，pp.4-5，2011。
- 4) 星隈順一，張広鋒，堺淳一：橋梁の耐震性の向上に向けて—東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動—，土木技術資料，Vol.54，No.1，pp.8-11，2012。
- 5) Hoshikuma, J., Zhang, G.F. and Sakai, J.: Seismic behavior of retrofitted bridges during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.1323-1332, Tokyo, Japan, 2012。
- 6) 星隈順一：東日本大震災による道路橋の被災から見た今後の課題，基礎工，Vol.40，No.4，pp.2-6，2012。
- 7) 星隈順一：東日本大震災による道路橋の被災と今後の研究，建設の企画施工，No.748，pp.20-24，2012。
- 8) 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。
- 9) 星隈順一，張広鋒：亀田大橋，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，(公社)土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁の耐震設計法に関する研究小委員会，pp.11-26-29，2012。
- 10) 星隈順一，堺淳一，張広鋒：補修・補強効果の長期持続性・耐久性に関する研究，基盤研究(一般研究)成果報告書，土木研究所橋梁構造研究グループ，9p.，2013。
- 11) 篠原聖二，張広鋒，星隈順一：柱躯体部が耐震補強されたT形RC橋脚における横梁の地震時損傷メカニズム，構造工学論文集，土木学会，Vol.60A，pp.316-325，2014。
- 12) 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.21-24，2012。
- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) 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。
- 16) 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: 2015/06/16)
- 17) 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。
- 18) 国土交通省国土政策局：5万分の1都道府県土地分類基本調査(郡山)，国土政策局国土情報課ホームページ，2003。(last accessed: 2015/06/16)。
- 19) 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。
- 20) 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。
- 21) 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, pp.1865-1894, 1983。
- 22) 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。
- 23) 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。
- 24) 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

- るシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.227-234，2011.
- 25) 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東部高架橋および利府高架橋での地震動の評価，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講演論文集，土木学会，pp.291-298，2012.
 - 26) 秦吉弥，高橋良和，後藤浩之，野津厚：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おける新那珂川大橋および旭高架橋での地震動の評価，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講演論文集，土木学会，pp.299-306，2012.
 - 27) 秦吉弥，秋田泰子，野津厚：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那珂川水管橋での地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.12，No.4，pp.374-393，2012.
 - 28) 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，土木学会，Vol.59A，pp.383-395，2013
 - 29) 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.
 - 30) 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.
 - 31) 秦吉弥，高橋良和，秋山充良，後藤浩之，野津厚：中小地震観測記録に基づく東北新幹線愛宕・稗田高架橋サイトにおける地盤震動特性の評価，第33回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No. 1-451，2013.
 - 32) 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.
 - 33) 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urve の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.60A，pp.214-227，2014.
 - 34) 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，pp.1560-1577，2014.
 - 35) 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，高橋良和，秋山充良，後藤浩之，野津厚，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.169-176，2014.
 - 36) Hata, Y., Nakamura, S. and Nozu, A.: Strong motion evaluation at the Maturube Bridge damaged by the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake considering the local site effects, *Jour. of Structural Engineering*, JSCE, Vol.60A, pp.228-241, 2014.
 - 37) 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.
 - 38) 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.
 - 39) 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.
 - 40) 秦吉弥，中村晋，野津厚：本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—，土木学会論文集A1，Vol.69，No.2，pp.186-205，2013.
 - 41) 中村晋：2011年東北地方太平洋沖地震による福島県郡山市・須賀川市のアンケート震度，日本地震工学会第10回年次大会梗概集，pp.215-216，2013.
 - 42) 堀勇斗，中村晋：比較的地震基盤の浅い地域における地震動の増幅特性に関する基礎的検討，東北地域災害科学研究，第50巻，pp.37-40，2014.
 - 43) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 915-920，1998.
 - 44) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説—V耐震設計編，丸善出版(株)，2002.
 - 45) 大井昌弘，藤原広行：地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—，地盤工学会誌，Vol.61，No.6，pp. 8-11，2013.