

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 における浪板海岸駅～吉里吉里駅付近での地震動の評価

秦吉弥¹・常田賢一²・嶋川純平³

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フェロー会員 博士(工学) 大阪大学 教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³学生会員 大阪大学 博士課程前期 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)では、津波だけでなく地震動の作用による被災についても数多く報告^{1),2)}されている。岩手県上閉伊郡大槌町にある浪板海岸駅～吉里吉里駅付近(以後、対象エリアと呼ぶ：図-1参照)では、巨大津波の来襲により、海岸付近の土木施設などに甚大な被害が生じ、多数の死者・行方不明者を出した。一方で、対象エリアにおける河川堤防、鉄道盛土、道路盛土などの土構造物の被災は比較的軽微であったことが、著者らの現地調査などによって明らかになっており、現在、堤体(盛土構造物)の耐津波特性に着目した様々な検討³⁾⁻⁸⁾が行われている。

しかしながら、対象エリアが震源域に比較的近いことなどを勘案すると、津波の来襲前の強震動により、河川堤防、鉄道盛土、道路盛土などの土構造物が既に一定の損傷を受けていた可能性も考えられる。すなわち、津波による被害は軽微であったものの、津波来襲前の地震動による損傷がどの程度であったのかについては明らかにされておらず、地震動と津波の作用による複合評価(ハイブリッド評価)⁹⁾⁻¹²⁾の必要性が示唆される。したがって、対象エリアに作用した本震時の強震動を推定することは、土構造物の被災機構に関する理解をさらに深め、耐震ならびに耐津波に関する検討の高度化などを今後図っていく上で非常に重要^{13),14),15)}である。

そこで本研究では、対象エリアと周辺の強震観測地点における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^{16),17),18)}と呼ぶ)を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震において対象エリアに作用した地震動を評価した。具体的には、まず、対象エリアならびにその近傍に位置するMLIT折笠高架橋¹⁹⁾において常時微動計測を行い、MLIT折笠

高架橋の対象エリアへの適用性について確認した。そして、丸山の方法を用いて対象エリア周辺の強震観測点^{20),21)}での本震記録の再現解析を行うとともに、対象エリアに作用した地震動についても同様に評価した。

2. 強震観測記録の整理

図-2に対象エリア周辺の既存強震観測点での最大加速度値PGA, 最大速度値PGV(ともに3成分合成)、計測震度²¹⁾の分布を示す。図-1および図-2に示すとおり、対象エリアおよびその近傍に位置するMLIT折笠高架橋では、本震観測記録が残されていない。また、図-2に示すとおり、山田町街地および釜石市街地では比較的高密度に強震観測点が設けられてお



図-1 対象エリア(浪板海岸駅～吉里吉里駅付近)、周辺の強震観測点(MLIT折笠高架橋)、ポーリングサイトの分布

り、比較的距離に近い観測点同士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がある。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、対象エリア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に深部地下構造(工学的基盤以深の地盤)に着目した対象エリアとその周辺における地質図²²⁾を示す。図-3に示すとおり、波板海岸駅周辺では地質構造が異なっているものの、波板海岸駅～吉里吉里駅付近の大部分ならびにMLIT折笠高架橋では、同じ地質構造を有していることから、本震時に工学的基盤相当に作用した地震動は工学的に同等であったと判断した。さらに、図-4に示すとおり、MLIT折笠高架橋近傍(図-1参照)における既存のボーリング調査結果²³⁾によれば、MLIT折笠高架橋でのサイト増幅特性のピーク周波数(4Hz付近：図-5参照)は、工学的基盤～地表の地盤特性(N値分布)に主に依存していることが読み取れる。すなわち、MLIT折笠高架橋で得られた地震観測記録の対象エリアへの適用性が確認でき、本震時におけるMLIT折笠高架橋での地震動を推定する必要性が示唆される。

3. サイト増幅特性の評価

図-5にMLIT折笠高架橋(対象エリア)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におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)²⁴⁾を示す。MLIT折笠高架橋(対象エリア)におけるサイト増幅特性は、まず、MLIT折笠高架橋と旧・K-NET山田で同時に得られた本震前の地震観測記録を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{25),26)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(MLIT折笠高架橋/旧・K-NET山田)を計算し、この比率を旧・K-NET山田における既存のサイト増幅特性²⁴⁾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-5に示すとおり、MLIT折笠高架橋と旧・K-NET山田の比較では、サイト増幅特性が比較的類似しているものの、巨大津波来襲の影響により旧・K-NET山田では本震記録が残されていない(図-1参照)。一方で、MLIT折笠高架橋とKiK-net山田、MLIT折笠高架橋とKiK-net釜石の比較では、サイト増幅特性に明確な差異が確認できる。このことは、対象エリアと周辺の既存強震観測点(本震記録有)では、本震時の地震動特性が大幅に異なっていたことを示しており、対象エリア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示唆している。

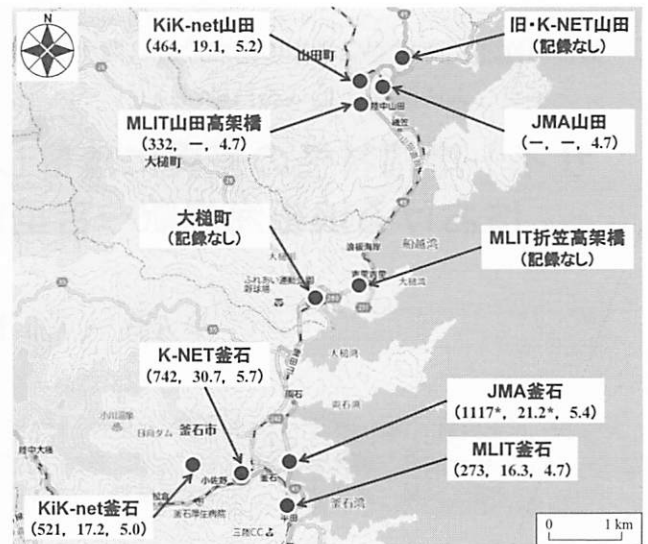


図-2 対象エリア周辺における本震観測の状況

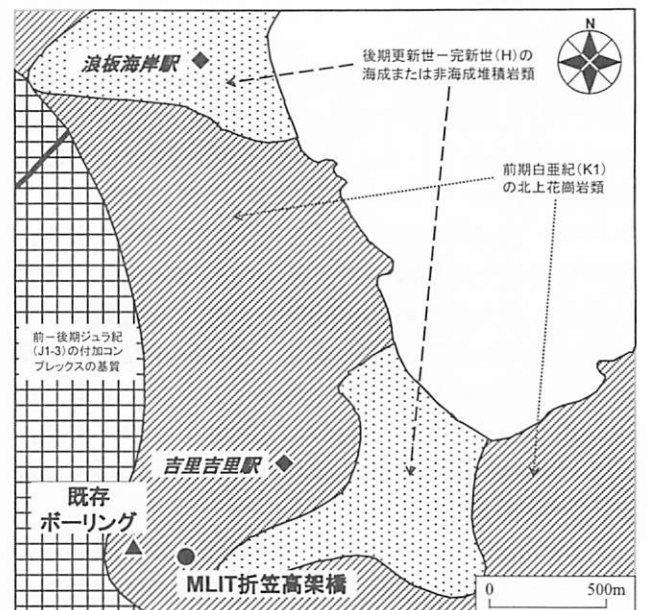


図-3 対象エリア周辺における深部地下構造の地質分布

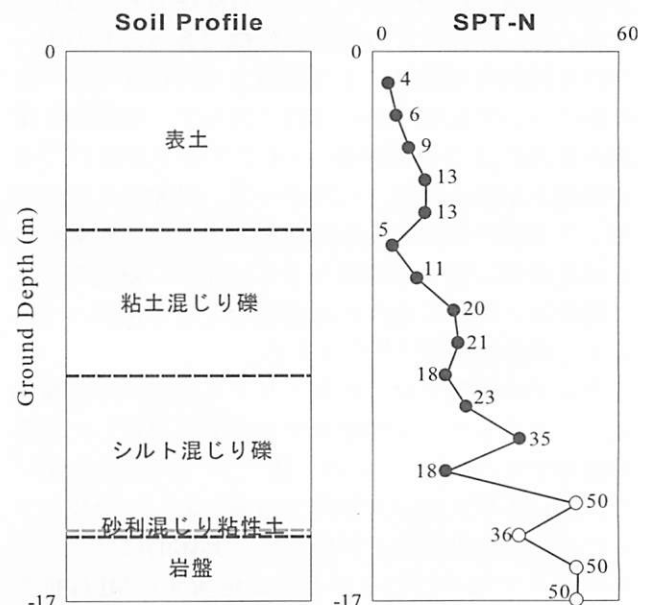


図-4 MLIT折笠高架橋近傍でのボーリング調査結果²³⁾

4. 地震動推定手法とその適用性

本研究では、丸山の手法^{16),17),18)}を用いて、対象エリア (MLIT折笠高架橋) およびその周辺の強震観測点であるKiK-net釜石(以後、二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-6に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、MLIT折笠高架橋とサイト増幅特性が類似している旧・K-NET山田では本震記録が残されていないため(図-1および図-5参照)、基準観測点としてKiK-net山田を選定した。

次に、基準観測点 (KiK-net山田) での本震観測記録(図-7(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の違いによる補正^{25),26)}(補正方法は3.と同様)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²⁷⁾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、MLIT折笠高架橋の観測記録の中に宮城県沖を震源とする適当な中小地震によるものが含まれていないため、本稿ではサイト位相特性の置換^{28),29)}の実施を見送った。

図-7(c),(d),(e),(f)にKiK-net釜石における本震時の加速度・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、バンド・パスフィルタなどの波形処理は行っていない。さらに、絶対加速度・相対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を図-8に示す。図-7(c),(d),(e),(f)および図-8に示すとおり、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、上述した対象エリアにおけるサイト増幅特性を入力として、丸山の手法^{16),17),18)}を適用すれば、本震時における対象エリア (MLIT折笠高架橋) 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。

5. 対象エリアにおける地震動の評価

図-7(g),(h),(i),(j)は、本震時における対象エリア (MLIT折笠高架橋) での推定加速度および推定速度波形である。図-9には、図-7(g),(h)で示した推定加速度波形による絶対加速度・相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を示す。さらに、図-9(a),(b)には、道路橋示方書・同解説(H14)³⁰⁾によるレベル2地震動(タイプI地震動)の標準スペクトル(II

種地盤：図-4参照)、および鉄道構造物等設計標準・同解説(H11)³¹⁾に基づく設計標準スペクトル(スペクトルI)についても同時に示している。図-9(a),(b)に示すとおり、対象エリア (MLIT折笠高架橋) では、0.1~0.4秒付近で道路橋ならびに鉄道構造物における標準スペクトル(ともに本震前の基準)を連続的に上回る加速度応答を示している。

6. まとめ

本研究では、丸山の手法を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)での浪板海岸駅~吉里吉里駅付近における強震波形を推定した。その際、浪板海岸駅~吉里吉里駅付近と、既存強震観測点であるMLIT折笠高架橋(ただし本震記録が得られていない)との深部地下構造(工学的基盤以深)における地質が同種であることから、MLIT折笠高架橋での推定地震動を浪板海岸駅~吉里吉里駅付近に作用した地震動と見なした。以下に、得られた知見を示す。

1) 浪板海岸駅~吉里吉里駅付近とMLIT折笠高架橋

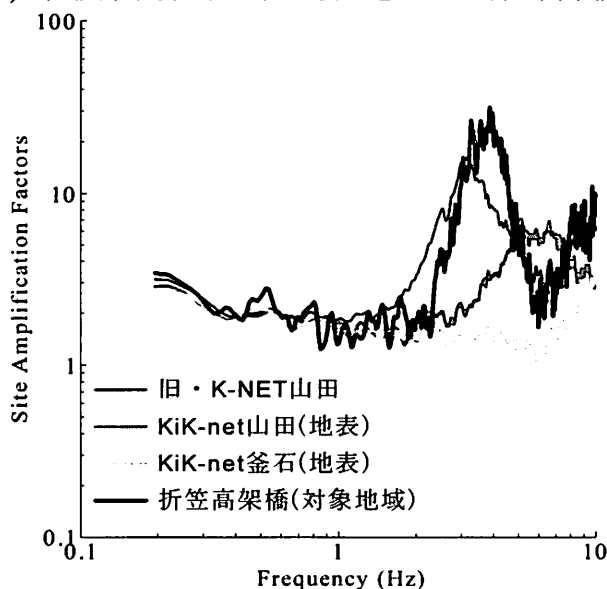


図-5 サイト増幅特性(地震基盤~地表)の比較

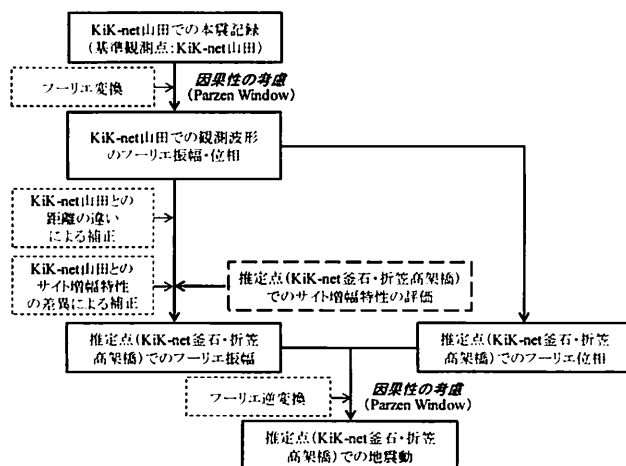


図-6 丸山の方法^{16),17),18)}による地震動推定フロー

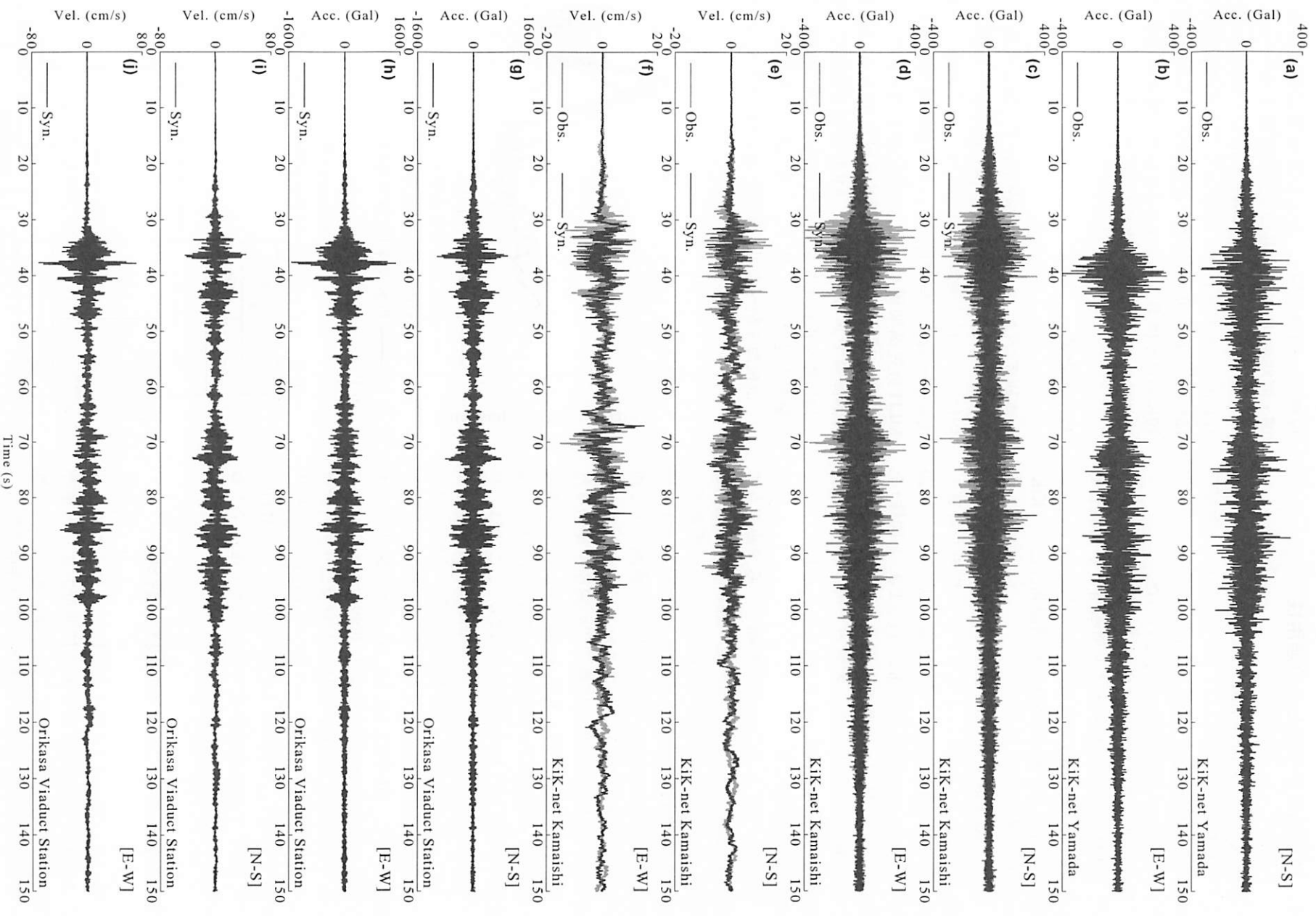


図-7 本震観測記録(同図(a), (b) 参照)を利用した地震動推定手法の適用性確認(同図(c), (d), (e), (f) 参照)と、対象エリア (MLIT 折笠高架橋) での本震時の推定地震動(同図(g), (h), (i), (j) 参照)

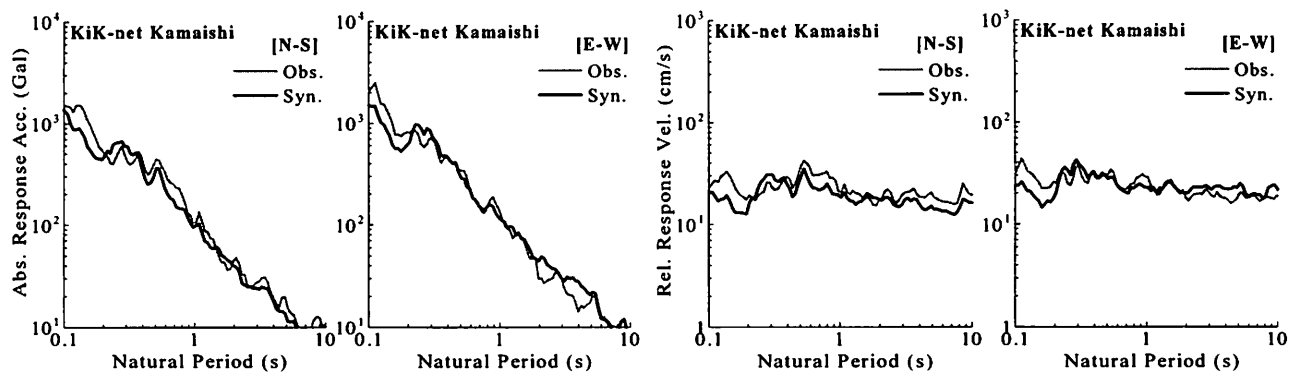


図-8 絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトルの比較による地震動推定手法の適用性確認

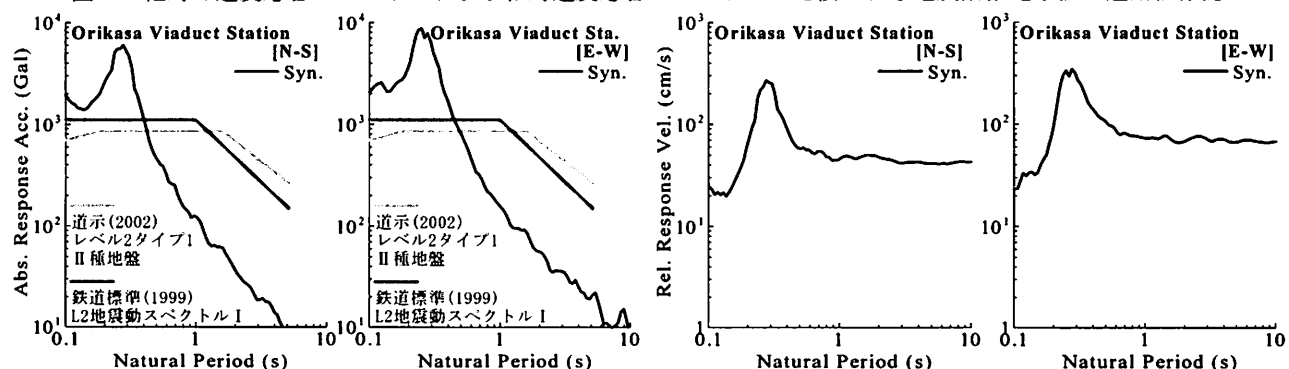


図-9 対象エリアにおける推定地震動による絶対加速度応答・相対速度応答スペクトルによる破壊能の基礎的評価

を除く周辺の強震観測点では、地盤震動特性が大きく異なっており、浪板海岸駅～吉里吉里駅付近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) 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ける浪板海岸駅～吉里吉里駅周辺の観測点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) 浪板海岸駅～吉里吉里駅付近における推定地震動は、周辺の観測点で得られた本震記録と大きく異なる特徴を有しており、0.1～0.4秒付近の周期帯において、道路橋示方書(H14)の標準スペクトル(タイプI地震動)および鉄道構造物等設計標準・同解説(H11)の設計標準スペクトル(スペクトルI)をともに上回る加速度応答を示す。

今後は、推定した強震動に基づく浪板海岸駅～吉里吉里駅付近の土構造物等を対象とした動的解析などを実施していきたい。その際、MLIT折笠高架橋近傍のボーリング調査結果(図-4参照)を参考に、推定地震動を工学的基盤相当まで引き戻した上でこれを入力地震動とするのが望ましい。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NET/KiK-netによる地震波形データ、(独)防災科学技術研究所Geo-Stationのボーリング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。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 川島一彦，西岡勉，高橋良和，秋山充良，渡邊学歩，古賀裕久，松崎裕：橋梁の被害調査，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第9章，pp.1-42，2011。
- 2) (公社)土木学会地震工学委員会：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，性能に基づく橋梁の耐震設計法に関する研究小委員会，2012。
- 3) 常田賢一，谷本隆介：津波被害からの知見とハード対策の方向性の考察(その4)，地盤工学会誌，Vol.59，No.11，pp.26-32，2011。
- 4) 常田賢一，谷本隆介：2011年東北地方太平洋沖地震における土盛構造物の耐津波特性および落堀の形成特性，土木学会論文集A1，Vol.68，No.4，pp.I_1091-1112，2012。
- 5) 谷本隆介，常田賢一，北川秀彦，荒木進歩：津波に対する盛土の耐侵食性および落堀構造物の減勢特性の検証，土木学会論文集B2，Vol.68，No.2，pp.I_316-320，2012。
- 6) 常田賢一，谷本隆介：2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性，土木学会論文集B2，Vol.68，No.2，pp.I_1406-1410，2012。
- 7) 常田賢一，竜田尚希，鈴木啓祐，谷本隆介：津波防

- 潮堤の評価および防潮盛土の耐侵食性の確保・向上, 土木学会論文集B2, Vol.69, No.2, pp.I_1016-1020, 2013.
- 8) 嶋川純平, 谷本隆介, 常田賢一, 秦吉弥: 津波越流時における盛土の浸潤特性に関する実験的検証, 平成26年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, Paper No.0313, 2014.
 - 9) 秦吉弥, 谷本隆介, 常田賢一, 舘川逸朗: 河川堤防における強震動および津波の複合影響に関するハイブリッド解析, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.4, 2014 [in press].
 - 10) 秦吉弥, 常田賢一, 谷本隆介: 2011年東北地方太平洋沖地震における宮城県井土浦での強震動および地盤沈下量の推定, 地盤と建設, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.63-71, 2013.
 - 11) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏, 運上茂樹: 上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.4, pp.I_932-941, 2013.
 - 12) 片岡正次郎, 金子正洋, 長屋和宏: 津波が越流した被害が軽微な道路橋の地震・津波応答再現解析, 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.7-12, 2013.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 野津厚: 地震動研究とのコラボレーションが地盤耐震工学の一層の発展をもたらす, 地盤工学会誌, Vol.62, No.2, pp.22-23, 2014.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.8-9, 2013.
 - 24) 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.
 - 25) 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.
 - 26) 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.
 - 27) 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.
 - 28) 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.
 - 29) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏: 道路橋の地震・津波複合応答解析, 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.9-16, 2012.
 - 30) (社)日本道路協会: 道路橋示方書, V耐震設計編, 丸善株式会社, 406p., 2002.
 - 31) (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.