

疑似点震源モデルに基づく1993年能登半島沖地震によって被災した市街地での地震動の推定

秦 吉弥¹・村田 晶²・山内 政輝³・宮島 昌克⁴

¹ 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp

³ 学生会員 大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: myamauchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

1993年能登半島沖地震による木ノ浦トンネルの崩落、須受八幡神社の鳥居の倒壊などが報告されており、これらの被災地点に作用した強震動を評価することは非常に重要である。しかしながら、1995年兵庫県南部地震以前に発生した大規模地震を対象とするため、サイト特性置換手法の採用や特性化震源モデルの構築などが困難であった。本稿では、疑似点震源モデルを用いて、1993年能登半島沖地震における木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社での地震動をそれぞれ評価した結果について報告する。その際、これらの被災地点とその周辺に位置する現在の強震観測点において常時微動計測を実施し、サイト特性を評価した。

Key Words : strong motion, microtremor measurement, ground shaking characteristics, tunnel, torii

1. はじめに

大規模地震による深刻な被害が発生した地点において当該地震時の強震動が観測されるケース¹⁾は、ごく稀である。そのため、対象とする被災地点において臨時の余震観測を行い、得られた記録などに基づいて強震動を事後推定する試み²⁾が行われている。その際、地震動推定手法として、断層モデルに基づく手法(特性化震源モデル³⁾と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法⁴⁾を組合せた手法等)もしくはサイト特性置換手法⁵⁾などが採用されている。しかしながら、これらの推定手法の採用条件の一つとして、対象とする地点の周辺において比較的多くの観測地震動が得られていることが挙げられる。

1993年能登半島沖地震(図-1参照)では、震源域において深刻な被害が報告⁶⁾されている。具体的には、木ノ浦トンネルの崩落⁷⁾、須受八幡神社の鳥居の倒壊⁸⁾などが代表的な被害として挙げられ(以後、これら二地点をまとめて、対象被災地点と呼ぶ)、本震時に対象被災地点に作用した地震動を推定することは非常に有意義である。既往の研究⁹⁻¹¹⁾として、震源域の珠洲市内において常時微動計測がこれまで高密度に実施されているが、本震時

における対象被災地点での強震動を詳細に評価するには至っていない。一方で、榎谷ほか¹²⁾は、断層モデルに基づく手法に基づき本震時にJMA輪島¹³⁾に作用した強震動を一定の精度で再現することに成功している。しかしながら、対象被災地点の周辺において本震記録が観測され

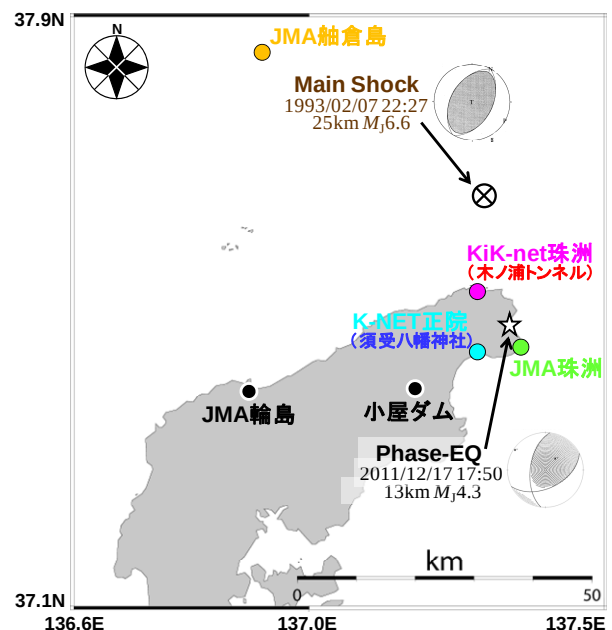


図-1 1993年能登半島沖地震の震源域における強震観測点

表-1 1993年能登半島沖地震の震源域における強震観測点で得られた記録一覧

		PGA (Gal)			JMA Seismic Intensity
		N-S ダム軸	E-W 上下流	U-D	
JMA輪島		131	116	38	5.1
小屋ダム	ダム左岸リムトンネル	121	66	72	—
	ダム天端中央	243	133	174	—
	ダム底監査廊内	60	95	65	—

ているのはJMA輪島と小屋ダムのみであるため(図-1および表-1参照(小屋ダムは本震時の最大加速度PGAの観測値のみ記録が残されている)), 対象被災地点における強震動評価においてサイト特性置換手法の採用は困難である。さらに、我が国の強震観測網¹⁴⁾が発展途上であった時代に発生した1993年能登半島沖地震は特性化震源モデルの構築に適しているとは言い難いため(榎谷ほか¹²⁾は津波波源モデルを強震動の評価に援用しているため)、断層モデルに基づく手法の採用も同様に困難である。

上述した課題を解決するための一つの方法として、疑似点震源モデルの採用¹⁵⁾が挙げられる。疑似点震源モデルの特徴の一つとして、強震動の生成に関わる各々のサブイベントに対し、その内部におけるすべりの時空間分布を詳細にはモデル化せず、各々のサブイベントが生成する震源スペクトルのみをモデル化するという点が挙げられる。疑似点震源モデルは野津¹⁶⁾によって提案・開発された地震動推定手法であり、海溝型地震¹⁶⁾・スラブ内地震¹⁷⁾・内陸地殻内地震¹⁸⁾²³⁾に適用され、断層モデルに基づく手法と同等もしくはそれ以上の精度で地震動の推定が可能であることが報告¹⁶⁾²³⁾されている。この点に関して、著者ほか¹⁵⁾は、1900年宮城県北部の地震時に鳴瀬川堤防に作用した強震動を疑似点震源モデルに基づいて推定している。しかしながら、100年以上昔に発生した歴史地震(我が国における強震観測網が未整備であった時代に発生した大規模地震)を対象としているために、地震動推定手法の適用性の確認が十分に行われていない。

上述した背景を踏まえ本稿では、疑似点震源モデルを用いて、1993年能登半島沖地震において対象被災地点(木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社)に作用した強震動を推定した結果について報告する。その際、JMA輪島で得られた本震観測記録の再現を試みることで、地震動推定手法の適用性の確認を行った。

2. 常時微動計測によるサイト増幅特性の評価

対象被災地点でのサイト増幅特性を評価するため、対象被災地点および周辺の既存強震観測点(図-1参照)において常時微動計測(いずれも単点計測)を実施した。ここに、図-2および図-3に示すように、木ノ浦トンネルと



図-2 木ノ浦トンネルとKiK-net珠洲の地理的位置関係

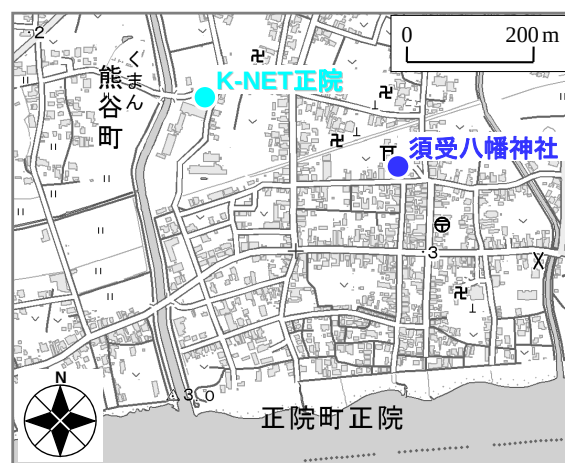


図-3 須受八幡神社とK-NET正院の地理的位置関係

KiK-net Tsuru²⁴⁾、須受八幡神社とK-NET Teraoka²⁴⁾は、それぞれ近距離に位置している。計測時間は、一計測点あたり30分間とし、サンプリング周波数は100Hzとした。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²⁵⁾を共通採用した。計測機器の詳細については文献²⁵⁾を参照されたい。計測方向は、水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述するH/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。

図-4および図-5に木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社を対象とした常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。H/Vスペクトルの計算処理方法は、先行研究²⁶⁾と同様である。具体的には、微動の加速度時刻歴に対して、0.1 Hzのハイ・パスフィルターを施し、雑振動が小さい

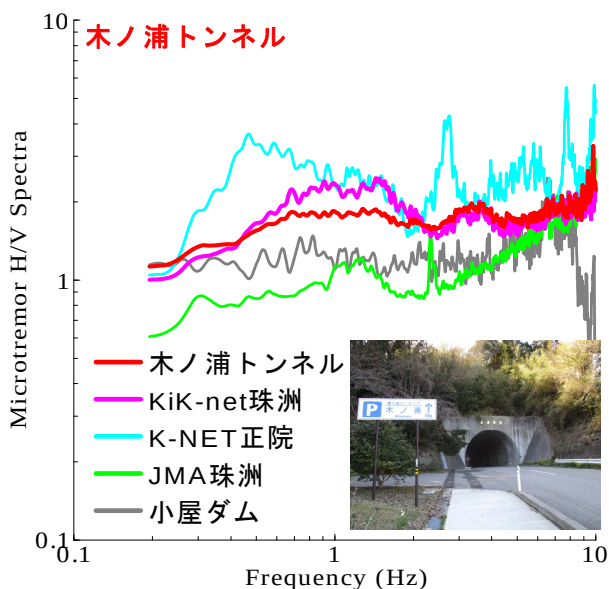


図-4 木ノ浦トンネルにおけるサイト増幅特性の評価

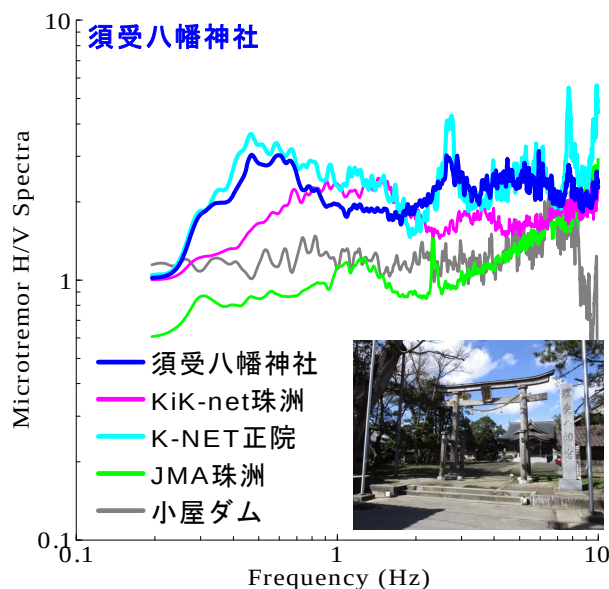


図-5 須受八幡神社におけるサイト増幅特性の評価

163.84秒の区間を五区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行った。そして、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、その平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能²⁵⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-4に示すとおり、木ノ浦トンネルとKik-net珠洲における常時微動H/Vスペクトルが類似していることが読み取れる。さらに、図-5に示すとおり、須受八幡神社とK-NET正院における常時微動H/Vスペクトルについても同様に類似していることが読み取れる。

上述した常時微動H/Vスペクトルの類似性(図-4、図-5参照)および位置関係の接近性(図-2、図-3参照)などを踏まえて、本検討では、Kik-net珠洲における既存のサイト増幅特性²⁷⁾を木ノ浦トンネルにおけるサイト増幅特性として、K-NET正院における既存のサイト増幅特性²⁷⁾を須受八幡神社におけるサイト増幅特性として、それぞれ採用することとした。

図-6にKik-net珠洲(木ノ浦トンネル)およびK-NET正院(須受八幡神社)におけるサイト増幅特性(ともに地震基盤～地表)を、周辺の気象庁(JMA)観測点¹³⁾のサイト増幅特性²⁸⁾²⁹⁾とともに示す。図-6に示すように、Kik-net珠洲(木ノ浦トンネル)およびK-NET正院(須受八幡神社)では、やや短周期帯域を含む周期1s(周波数1Hz)付近において大きく卓越するサイト増幅特性を有していることが読み取れる。また、JMA輪島と対象被災地点ではサイト増幅特性の特徴が大きく異なっていることなどから、JMA輪島における本震観測記録を、1993年能登半島沖地震時に木ノ浦トンネルならびに須受八幡神社に作用した地震動と見なすことはできない。

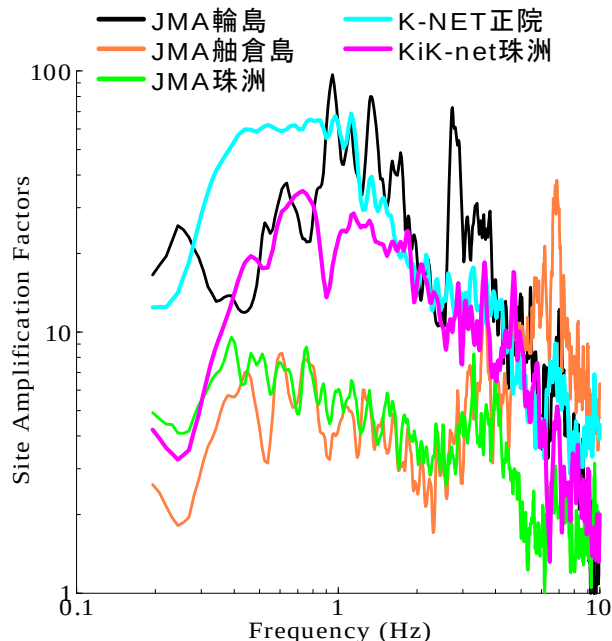


図-6 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較評価

3. 疑似点震源モデルの構築による強震動の推定

疑似点震源モデル¹⁹⁾²³⁾は、従来の特性化震源モデル³⁾よりも更に単純化された震源モデルであり、サブイベントの破壊に起因する震源スペクトルはオメガスクエアモデル³⁰⁾に従うと仮定する。これに伝播経路特性³¹⁾³²⁾とサイト増幅特性(図-6参照)を乗じることにより、対象被災地点およびJMA輪島での地震動のフーリエ振幅を評価した。評価したフーリエ振幅と、Kik-net珠洲、K-NET正院、JMA輪島で得られた小地震(Phase-EQ：図-1参照)による観測記録(図-7参照)のフーリエ位相をそれぞれ組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換³³⁾を実施するこ

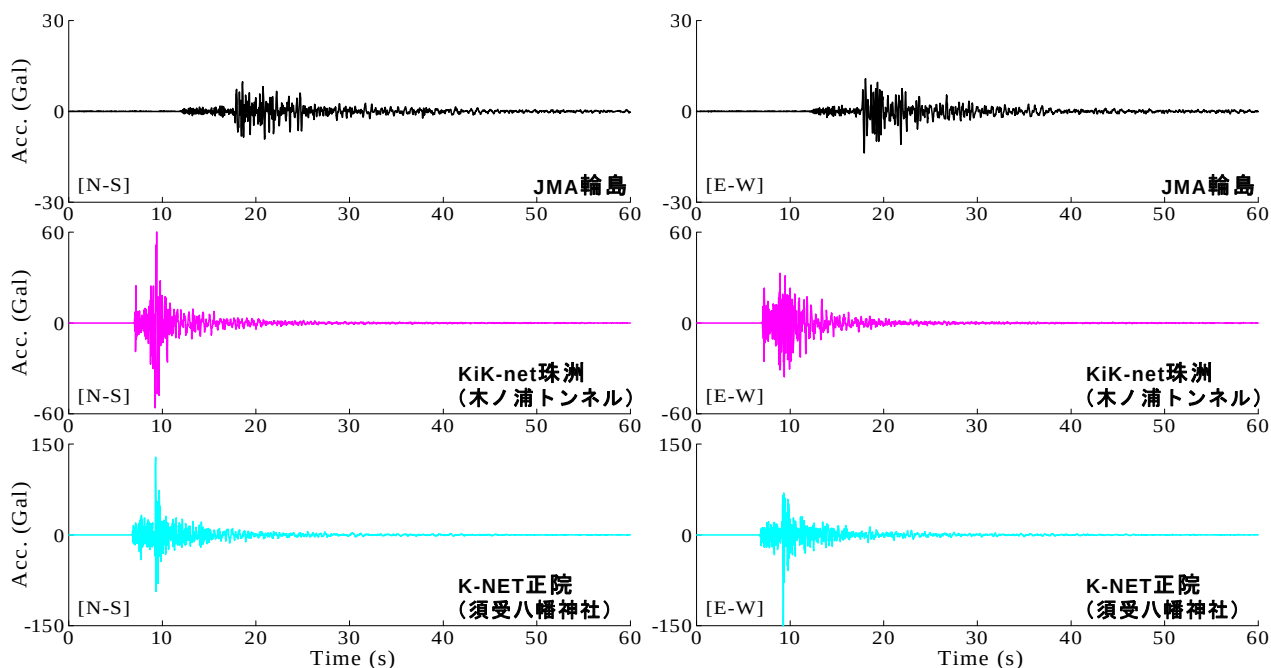


図-7 サイト位相特性の評価に利用した石川県能登地方を震源とする小地震(2011/12/17 $M_j 4.3$)による観測地震動の加速度時刻歴

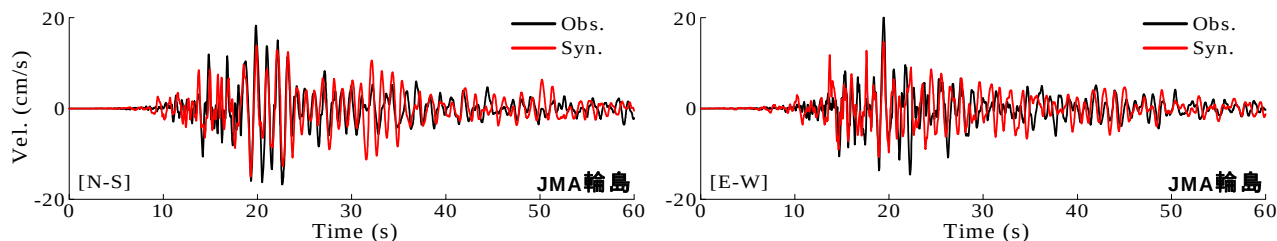


図-8 地震動推定手法の適用性確認 (JMA輪島における観測地震動と推定地震動の速度波形による比較)

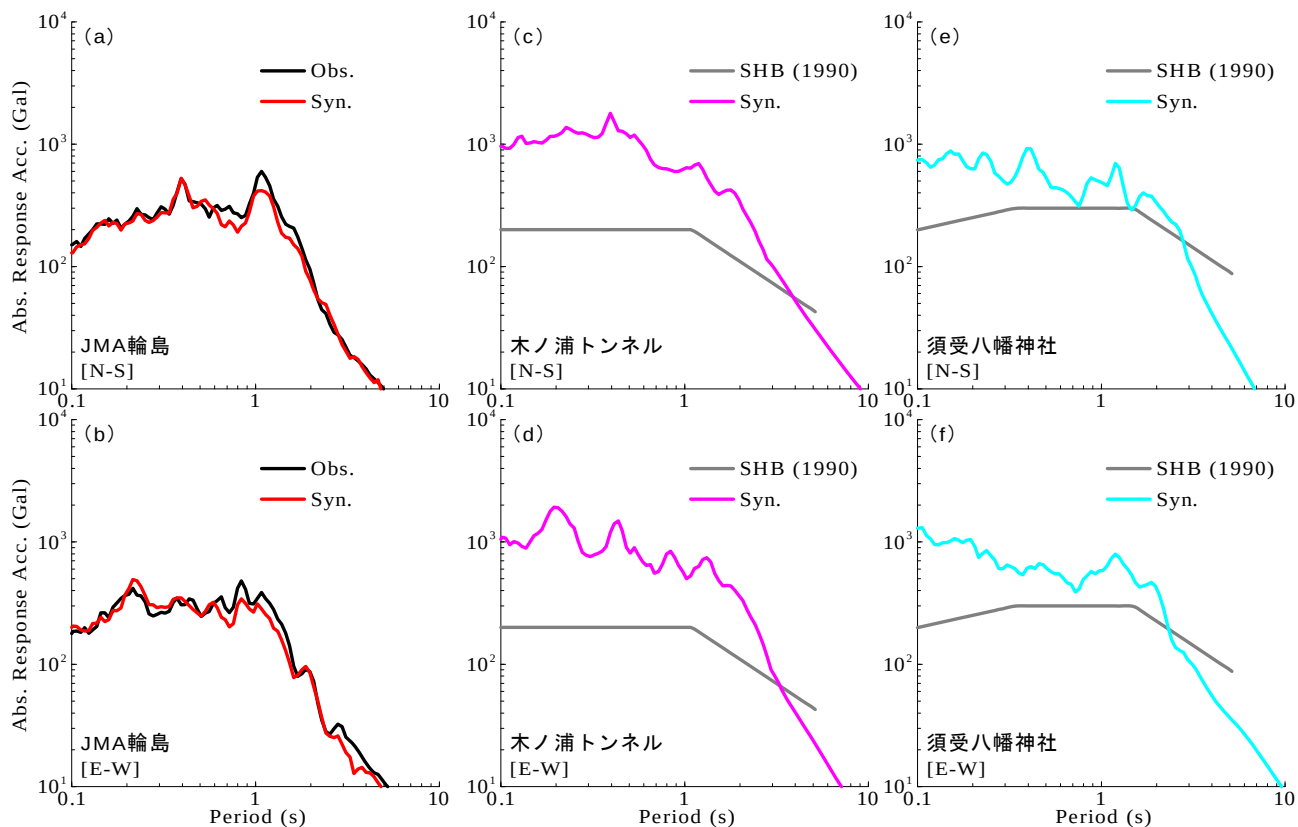


図-9 地震動推定手法の適用性確認 (JMA輪島における観測地震動と推定地震動の絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)による比較: 同図(a), (b) , および木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社における本震時の推定地震動の絶対加速度応答スペクトル

表-2 構築した疑似点震源モデルのパラメータの一覧

	Location			Seismic	Corner
	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)	Moment M_0 (Nm)	Frequency (Hz)
Subevent	37.657	137.299	25	0.7E+18	0.42

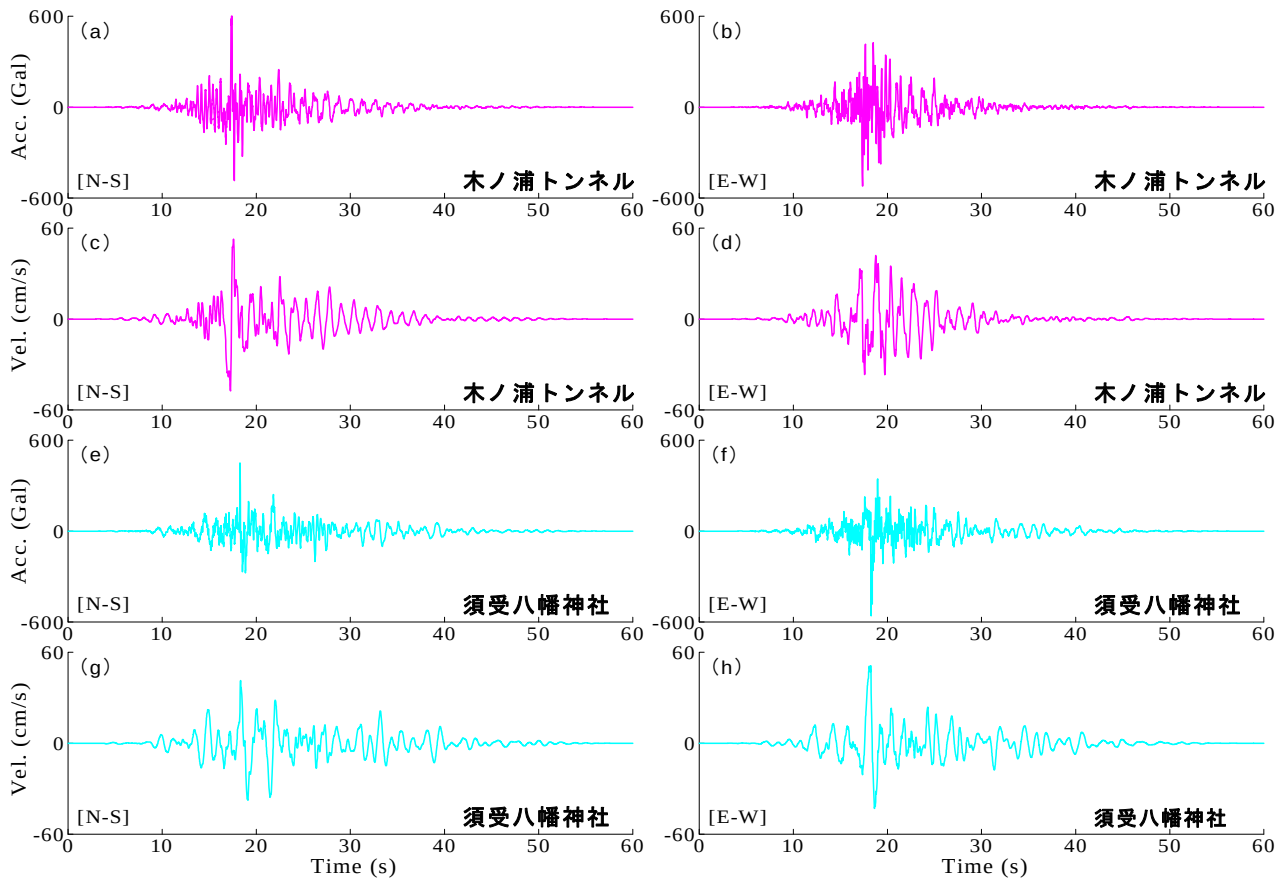


図-10 木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社における本震時の推定地震動の加速度時刻歴・速度時刻歴

とにより強震波形を計算した。

疑似点震源モデルにおける入力パラメータは、サブイベント一つあたり、位置情報(緯度・経度・深さ)、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c である。表-2に設定した入力パラメータの一覧を示す。本稿では、サブイベントの位置情報として、1993年能登半島沖地震の震源を採用した。サブイベントの地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c は、JMA輪島における本震観測記録(地震速度波形および絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%))に対する類似性を考慮して、試行錯誤により設定した。図-8および図-9(a),(b)に示すように、JMA輪島における観測地震動と推定地震動が比較的良好一致を示していることから、地震動推定手法の適用性が確認できる。

図-10に1993年能登半島沖地震による対象被災地点(木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社)における推定地震動の加速度波形・速度波形を水平二成分について示す。須受八幡神社における推定地震動の最大加速度PGAの値(図-10(e),(f)参照)は、距離減衰式などに基づく鶴来ほか⁹⁾による推定値(200Gal前後)よりも若干大きなものとなっている。速度波形(図-10(c),(d),(g),(h)参照)に着目

すると、木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社ともに明瞭な速度パルスが確認でき、両地点における地震被災の実績との関係性が示唆される。

図-9(c),(d),(e),(f)は、対象被災地点における推定地震動の加速度波形(図-10(a),(b),(e),(f)参照)に基づく絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)である。同図には、本震が発生した1993年2月時点の道路橋示方書(1990)³⁹⁾に基づく標準スペクトルを比較対象として示す。図-9(c),(d),(e),(f)に示すとおり、0.1~3sの周期帯域において、推定地震動による応答スペクトルは標準スペクトルに対して、同等もしくはそれ以上の地震加速度応答値を示しており、1993年2月当時に一般基準化されていた地震動よりも非常に大きな地震動が本震時に対象被災地点に作用した可能性が高いことが示唆される。

4. まとめ

本稿では、木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社(石川県珠洲市)とその周辺の既存強震観測点において常時微

動計測を実施し、得られた計測結果と疑似点震源モデルの組合せなどに基づいて、1993年能登半島沖地震時に木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社に作用した地震動を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 木ノ浦トンネルとその周辺の既存強震観測点であるKiK-net珠洲では、位置関係が近距離であるだけでなく、常時微動H/Vスペクトルの特徴が類似している。
- (2) 上記(1)の知見は、木ノ浦トンネルにおける本震時の地震動評価において、KiK-net珠洲でこれまでに得られた地震観測記録(KiK-net珠洲でのサイト増幅・位相特性)の援用の可能性を示唆するものである。
- (3) 須受八幡神社とその周辺の既存強震観測点であるK-NET正院では、位置関係が近距離であるだけでなく、常時微動H/Vスペクトルの特徴が類似している。
- (4) 上記(3)の知見は、須受八幡神社における本震時の地震動評価において、K-NET正院でこれまでに得られた地震観測記録(K-NET正院でのサイト増幅・位相特性)の援用の可能性を示唆するものである。
- (5) JMA輪島と対象被災地点(木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社)では、サイト増幅特性の特徴などが比較的大きく異なっていることから、JMA輪島で得られた本震観測記録を、1993年能登半島沖地震時に木ノ浦トンネルならびに須受八幡神社に作用した地震動と見なすことはできない。
- (6) 本稿において構築した1993年能登半島沖地震の疑似点震源モデルに基づく地震動推定手法を用いれば、JMA輪島で得られた本震観測記録(速度波形および絶対加速度応答スペクトル)を一定の精度で再現可能である。
- (7) 上記(2), (4), (6)で得られた知見を踏まえて、1993年能登半島沖地震による疑似点震源モデルと対象被災地点(木ノ浦トンネルおよび須受八幡神社)におけるサイト増幅・位相特性の組合せを適用した結果、0.1~3sの周期帯域において道路橋示方書(1990)と同等もしくは上回る応答を示す地震動が推定された。

今後は、本稿の推定地震動を用いて、木ノ浦トンネルを対象とした動的FEM解析や須受八幡神社の鳥居を対象とした動的DEM解析などを実施していく予定である。

謝辞：常時微動計測の実施にあたっては、現地の住民の皆様などに大変お世話になりました。本研究の遂行にあたって、科学研究費補助金・若手研究A「超高密度地震観測に基づく宅地造成斜面におけるダイナミック地すべり挙動の広域的評価(JP15H05532)」の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hata, Y., Goto, H. and Yoshimi, M.: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the main shock

of the 2016 Kumamoto Earthquake (M_w 7.0) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.

- 2) 秦吉弥, 野津厚: 被害地震の揺れに迫る—地震波形デジタルデータ CD 付き—, 大阪大学出版会, 2016.
- 3) 野津厚: 内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の再現に適した震源のモデル化手法, 港湾空港技術研究所報告, Vol.50, No.4, pp.133-195, 2011.
- 4) 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No. 1173, 28p., 2008.
- 5) 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.
- 6) 例えば, 土質工学会 1993 年地震災害調査委員会: 1993 年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書, 土質工学会, 404p., 1994.
- 7) 地震津波監視課, 地震予知情報課, 金沢地方気象台: 1993 年 2 月 7 日能登半島沖の地震調査報告, 駿震時報, 第 58 巻, pp.97-114, 1995.
- 8) 池本敏和, 北浦勝, 宮島昌克, 松川晃之, 鈴木有: 1993 年能登半島沖地震における地震動特性と被害, 平成 5 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, I-53, pp.105-106, 1994.
- 9) 鶴来雅人, 宮島昌克, 北浦勝: 地震動特性を考慮した能登半島沖地震による珠洲市の最大加速度に関する検討, 第 22 回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会, pp.379-382, 1993.
- 10) 紺野克昭, 年縄巧, 茂木秀則, 大町達夫: 珠洲市における常時微動特性—1993 年能登半島沖地震の被害と比較して—, 第 22 回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会, pp.383-386, 1993.
- 11) 茂木秀則, 年縄巧, 東畑郁生, 紺野克昭: 1993 年能登半島沖地震の珠洲市における地震動特性, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, I-173, pp.494-495, 1993.
- 12) 梶井健, 武村雅之, 釜田正毅: 半経験的手法による 1993 年能登半島沖地震の強震動評価, 地震, 第 2 輯, 第 47 巻, pp.375-382, 1994.
- 13) 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.
- 14) Higashi, S.: Activities of the headquarters for earthquake research promotion, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.31-37, 2004.
- 15) 秦吉弥, 常田賢一, 酒井久和, 一井康二, 静間俊郎, 丸山喜久: 疑似点震源モデルに基づく 1900 年宮城県北部の地震における鳴瀬川堤防サイトでの地震動の評価, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.187-192, 2015.
- 16) 野津厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み—疑似点震源モデルによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション, 地震, 第 2 輯, 第 65 巻, pp.45-67, 2012.
- 17) 若井淳, 長坂陽介, 野津厚: 疑似点震源モデルによる 2003 年 5 月 26 日宮城県沖のスラブ内地震の強震動シミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.70,

No.4, pp.I_818-829, 2014.

- 18) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地殻内地震による強震波形の評価—2005 年福岡県西方沖の地震への適用例—, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, I-245, pp.489-490, 2012.
- 19) 秦吉弥, 野津厚, 丸山喜久, 酒井久和: 疑似点震源モデルを用いた内陸地殻内地震による強震波形の評価—2007 年新潟県中越沖地震への適用例—, 日本地震工学会大会—2012 梗概集, pp.80-81, 2012.
- 20) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地殻内地震による強震波形の評価—2000 年鳥取県西部地震への適用例—, 日本地震工学会大会—2012 梗概集, pp.74-75, 2012.
- 21) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地殻内地震による強震波形の評価—2007 年能登半島地震への適用例—, 第 48 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1915-1916, 2013.
- 22) Hata, Y. and Nozu, A.: Pseudo point-source models for shallow crustal earthquakes in Japan, *Proc. of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.630, Istanbul, Turkey, 2014.
- 23) Hata, Y. and Nozu, A.: Simulation of strong ground motions for a shallow crustal earthquake in Japan based on the pseudo point-source model, *Proc. of 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand, Paper No.73, 2015.
- 24) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 25) 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 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 26) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 27) 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.
- 28) 秦吉弥, 村田晶, 湊文博, 宮島昌克: 1993 年能登半島沖地震の震源域における地盤震動特性の評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, I-151, pp.301-302, 2016.
- 29) 山内政輝, 秦吉弥, 村田晶, 鯨田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 宮島昌克, 常田賢一: サイト特性を考慮した津波避難困難区域の抽出—能登半島北方沖の想定地震による石川県輪島市舳倉島を例として—, 第 35 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2016. [in this issue]
- 30) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *Jour. of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説—V 耐震設計編, 丸善(株), 222p., 1990.

(2016. 9. 1 受付)

SEISMIC WAVEFORM ESTIMATION AT DAMEGE SITES OF KINOURA TUNNEL AND SUZU-HACHIMAN SHRINE, SUZU CITY, JAPAN, DURING THE 1993 OFF NOTO PENINSULA EARTHQUAKE BASED ON THE PSEUDO POINT-SOURCE MODEL

Yoshiya HATA, Akira MURATA, Masaki YAMAUCHI and Masakatsu MIYAJIMA

Serious failure of Kinoura Tunnel and collapse of Suzu-Hachiman Shrine was occurred in Suzu City, Japan, during the 1993 Off Noto Peninsula Earthquake. In this study, first, microtremor measurements were carried out in the damage sites of interest and the surrounding station sites. The pseudo point-source model for the 1993 main shock was then constructed based on the similarity between the observed and the synthetic ground motions at JMA Wajima. Finally, based on the results of the measurement and construction, ground motions at damage sites of interest during the 1993 main shock were estimated.