

サイト特性置換手法に基づく2009年駿河湾の地震(Mj6.5)の余震における 東名高速道路盛土崩落地点での地震波形の評価

Waveform Estimation at the Damaged Embankment of the Tomei Expressway
for the Aftershocks of the 2009 Suruga Bay Earthquake (Mj6.5)
based on the Substitution Method of Site Amplification and Phase Effects

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(日本工営(株)中央研究所)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
野津 厚	Atsushi NOZU	((独)港湾空港技術研究所)
古川愛子	Aiko FURUKAWA	(京都大学大学院工学研究科)
常田賢一	Ken-ichi TOKIDA	(大阪大学大学院工学研究科)

2009年駿河湾の地震(Mj6.5)により、東名高速道路牧之原 SA 付近における盛土法面が崩落し、通行機能の不全につながった。盛土法面の崩落メカニズムとして、本震によって盛土下部が崩落し、本震後に盛土上部が崩落し車両通行帯まで法面崩壊が進行したことが報告されている。この崩落メカニズムには余震が関わっていることも想定される。今後の高速道路盛土の耐震性評価のためにも、当該地点の地震動を本震だけでなく、余震についても推定することは重要である。そこで本稿では、サイト特性置換手法を用いて、当該地点での余震による地震波形を推定した結果について報告する。

キーワード：余震，盛土，サイト特性，地震観測，常時微動計測 (IGC : D07, E08)

1. はじめに

2009年駿河湾の地震(Mj6.5)により、東名高速道路牧之原 SA 付近における盛土法面が崩落し、通行機能の不全につながった(写真-1 参照)。中日本高速道路(株)による地震災害検討委員会によれば、盛土法面の崩落メカニズムとして、まず、本震によって盛土下部(中腹小段～法尻)が崩落し、次に、盛土下部が失われたことで盛土上部(法肩～中腹小段)が不安定化し、最後に、盛土上部が崩落し車両通行帯まで斜面崩壊が進行したと報告されている¹⁾。この崩落メカニズムには余震が関わっていることも想定される。そのため高速道路盛土の耐震性評価を今後実施していくためにも、当該地点における本震時の地震動だけでなく、余震時の地震動についても推定することは重要である。すでに著者らは、駿河湾の地震の本震について盛土崩落地点における地震動の推定を行っている²⁾。そこで本研究では、サイト特性置換手法^{3,4)}を用いて、駿河湾の地震の余震における盛土崩落地点での地震動を推定した。具体的には、まず、盛土崩落地点周辺における本震ならびに余震の観測状況について整理を行った。次に、サイト特性置換手法を用いて盛土崩落地点周辺の地震観測点での余震記録の再現解析を行い、手法の適用性を確認した。最後に、適用性を確認したサイト特性置換手法を用いて、盛土崩落地点での余震による地震波形を推定した。



写真-1 東名高速道路における盛土の崩落状況
(撮影：国際航業(株)/(株)パスコ) [写真上側が南]

2. 地震観測記録の整理

表-1 および図-1 に盛土崩落地点周辺における地震観測点の分布と一覧を示す。静岡県は比較的地震観測点の多い地域であるが、これらの図表より盛土崩落地点近傍には、地震観測点が存在していないことがわかる。

図-2 に2009年駿河湾の地震(Mj6.5)の断層モデル⁵⁾と本震および主要な余震の震央分布を示す。さらに表-2 には、本震および主要な余震の諸元の一覧を示す。本研究において地震波形推定の対象とする余震イベントは、応急復旧工

事の着手日時が 2009 年 8 月 11 日 14 時頃である⁶⁾ことを考慮して、同日 6 時 13 分の余震(Mj4.0)(Aftershock1)および同日 6 時 27 分の余震(Mj4.4)(Aftershock2)の 2 つとした。

表-3 および表-4 には、盛土崩落地点周辺における計測震度の算定結果および最大加速度値(3成分合成)の一覧⁷⁾を示す。これらの表に示すように、当該地点周辺の計測震度や最大加速度値は、距離減衰による一様な低下傾向とはなっていない。また、相良庁舎と JMA 牧之原などのように近傍の位置関係にあるにも関わらず地震動の大きさが大きく異なっている場合がある。これは、各強震観測点のサイト特性がそれぞれ顕著に表れているためであると考えられる。従って、本震にせよ余震にせよ、盛土崩落地点における推定地震動として単純に最寄りの観測点における記録を採用するだけでは信頼性に乏しく、盛土の応答解析を精度良く実施できないことになる。盛土崩落地点における地震動の評価を行う際には、当該地点におけるサイト特性を適切に考慮する必要がある。

3. 中小地震観測の実施

本検討では、崩落地点近傍の朝生公民館(図-3 参照)において地震計を設置し、中小地震の観測を実施した²⁾。なお、崩落地点(法尻)と朝生公民館では、常時微動計測を実施し、図-4 に示すように両地点の H/V スペクトルの特性が類似していることを確認している⁸⁾。地震計は、加速度計を採用し、サンプリング周波数は 100Hz とした。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。観測期間は、2009 年 9 月 4 日～12 月 18 日までの約 3 か月半である。表-5 に主要な観測地震の一覧を示す。この表に示すように、朝生公民館において観測された地震の中で、駿河湾を震源とするものは、2009 年 10 月 13 日 4 時 22 分の余震(Mj2.6)(Aftershock6)のみである。なお、当該余震による記録は朝生公民館と K-NET 榛原(KNT)でのみ観測されている(観測波形を図-5 および図-6 に示す)。

表-1 盛土崩落地点周辺の地震観測点の諸元

観測点名	略称	地震計設置機関	崩落地点からの直線距離(km)
榛原庁舎	HBR	静岡県	3.58
K-NET榛原	KNT	(独)防災科学技術研究所	3.69
静岡空港	SAP	静岡県	4.02
吉田町役場	YSD	静岡県	5.81
相良庁舎	SGR	静岡県	7.70
JMA牧之原	MKN	気象庁	8.70
JMA島田	SMD	気象庁	9.10
菊川I.C.	KGI	中日本高速道路(株)	9.58
菊川市役所	KGC	静岡県	9.77
大井川庁舎	OIG	静岡県	9.97
金谷庁舎	KNY	静岡県	10.54
小笠支所	OGS	静岡県	11.37



図-1 盛土崩落地点周辺の地震観測点の分布

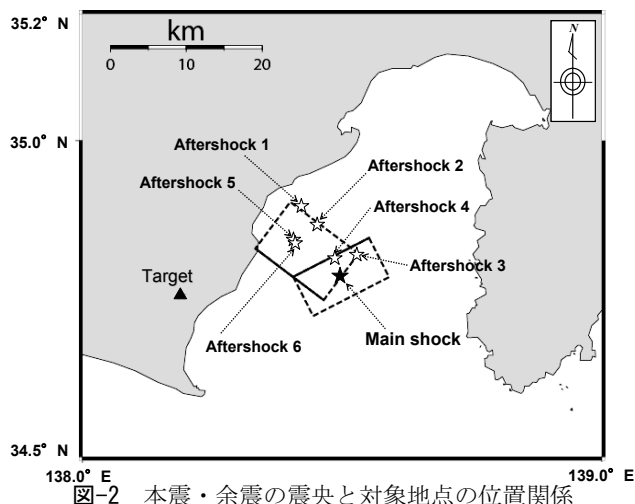


図-2 本震・余震の震央と対象地点の位置関係

表-2 本震と主要余震の諸元 (*: 気象庁, **: (独)防災科学技術研究所広帯域地震観測システム F-net)

Date	Time (hour/min.)	Latitude* (deg.)	Longitude* (deg.)	Depth* (km)	Mj*	M ₀ ** (Nm)	(strike, dip, rake)** (deg.)
Mainshock	2009/08/11 05:07	N 34.785	E 138.498	23	6.5	2.25E+18	(307, 47, 119)
Aftershock 1	2009/08/11 06:13	N 34.897	E 138.423	23	4.0	-	-
Aftershock 2	2009/08/11 06:27	N 34.868	E 138.452	24	4.4	-	-
Aftershock 3	2009/08/11 18:09	N 34.818	E 138.530	20	4.4	2.08E+15	(252, 29, 59)
Aftershock 4	2009/08/13 12:42	N 34.813	E 138.487	19	4.3	6.72E+14	(308, 80, 176)
Aftershock 5	2009/08/13 18:11	N 34.840	E 138.408	23	4.5	3.90E+15	(296, 29, 110)
Aftershock 6	2009/10/13 04:22	N 34.837	E 138.410	19	2.6	-	-

表-3 本震と主要余震による計測震度の一覧

気象庁計測震度	Main shock	Aftershock 1	Aftershock 2	Aftershock 3	Aftershock 4	Aftershock 5	Aftershock 6
榛原庁舎	5.5	1.5	1.5	1.5	1.9	2.5	-
K-NET榛原	5.4	1.4	1.3	1.8	1.7	2.5	1.0
静岡空港	4.9	-	0.9	-	1.5	-	-
吉田町役場	4.9	0.9	0.9	0.9	0.9	2.1	-
相良庁舎	5.9	0.9	1.5	2.3	2.8	2.3	-
JMA牧之原	5.0	-	-	-	1.6	1.6	-
JMA島田	4.8	-	-	-	2.2	1.8	-
菊川I.C.	5.9	-	-	-	2.5	3.0	-
菊川市役所	5.1	-	0.9	0.9	1.5	1.9	-
大井川庁舎	5.6	1.5	1.5	1.5	2.6	2.6	-
金谷庁舎	4.8	0.9	0.9	-	1.5	1.5	-
小笠支所	5.3	0.9	0.9	1.5	1.5	2.1	-

表-4 本震と主要余震による最大加速度(3成分合成)(gal)の一覧

3成分合成最大加速度(gal)	Main shock	Aftershock 1	Aftershock 2	Aftershock 3	Aftershock 4	Aftershock 5	Aftershock 6
榛原庁舎	417	7.6	6.0	10.4	10.5	19.9	-
K-NET榛原	424	9.5	8.2	11.1	13.9	20.9	1.7
静岡空港	232	-	7.1	-	17.1	-	-
吉田町役場	185	3.8	4.2	3.7	10.1	17.8	-
相良庁舎	564	4.2	6.3	37.8	36.4	17.9	-
JMA牧之原	166	-	-	-	6.2	8.7	-
JMA島田	399	-	-	-	30.9	17.8	-
菊川I.C.	495	-	-	-	20.2	40.5	-
菊川市役所	461	-	10.1	4.9	13.4	22.0	-
大井川庁舎	517	7.8	7.9	8.9	61.2	29.2	-
金谷庁舎	208	8.9	8.1	-	13.6	7.8	-
小笠支所	236	6.4	2.7	5.2	5.7	12.3	-

表-5 朝生公民館で観測された主要な中小地震の一覧

発生年月日	発生時間	発生地域	気象庁マグニチュードMj
2009/10/10	04:14	静岡県西部	M3.6
2009/10/13	04:22	駿河湾 (Aftershock6)	M2.6
2009/11/17	14:48	静岡県中部	M3.3
2009/12/10	00:35	静岡県西部	M3.1
2009/12/10	05:55	静岡県西部	M3.8
2009/12/10	06:00	静岡県西部	M3.3
2009/12/17	23:45	伊豆半島東方沖	M5.3
2009/12/18	08:46	伊豆半島東方沖	M5.3



図-3 盛土崩落地点と朝生公民館の位置関係

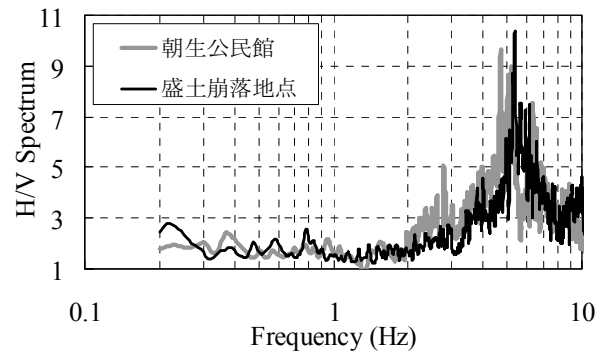


図-4 崩落地点と朝生公民館の H/V スペクトルの比較

4. 地震波形評価手法の適用性の確認

4.1 サイト特性置換手法

図-7は、サイト特性置換手法³⁾における地震波形推定のフローである。まず、基準地震観測点としては、盛土崩落地点に最も近い榛原庁舎(HBR)を選定した。基準観測点における余震(Aftershock1およびAftershock2)の観測記録から計算したフーリエ振幅に対して、基準強震観測点(HBR)と検討対象地点の震源からの距離の差異に基づく幾何減

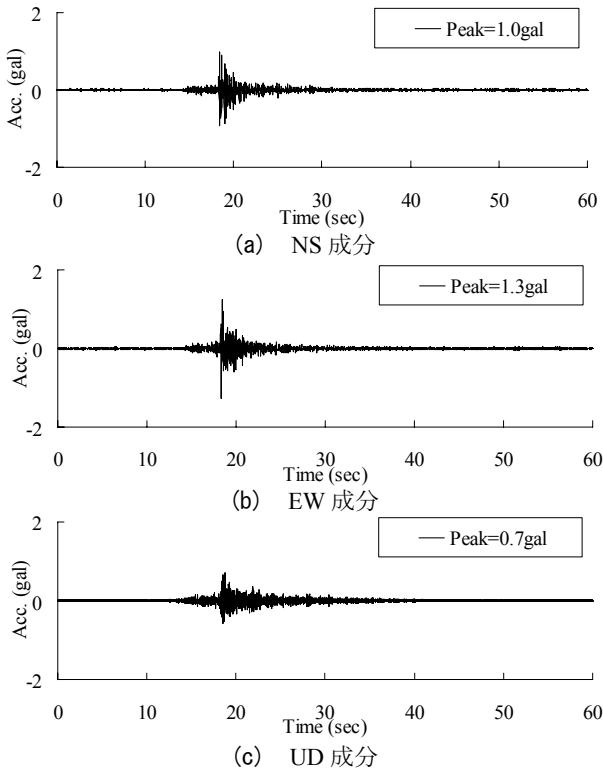


図-5 朝生公民館での観測記録 (Aftershock6)

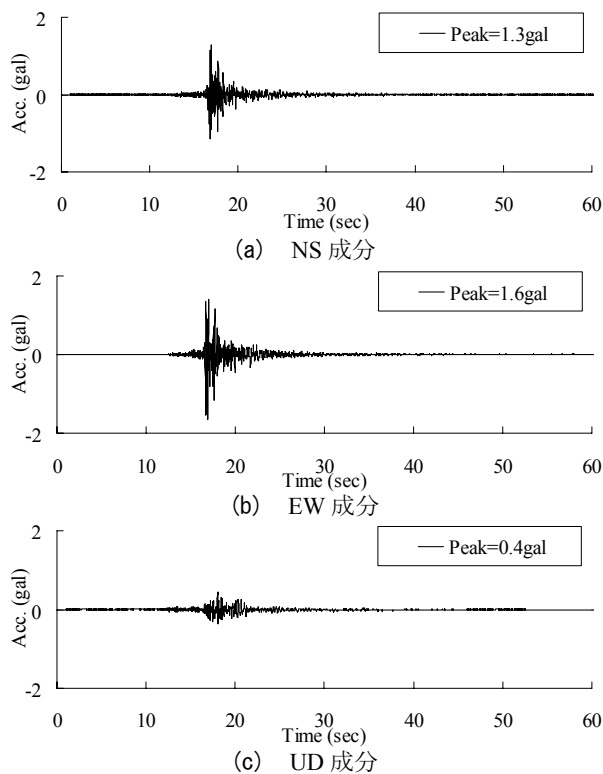


図-6 K-NET 榛原 (KNT) での観測記録 (Aftershock6)

衰による補正を施し、さらにサイト増幅特性(図-8参照)^{2),9),10)}の比率(検討対象地点/基準強震観測点(HBR))を掛け合わせることによって、対象余震時の検討対象地点における地震動のフーリエ振幅を推定する。なお、サイト増幅特性は、スペクトルインバージョン⁹⁾(K-NET榛原)もしくはフーリエスペクトル比に基づく方法^{2),10),11)}(K-NET榛原以

外の強震観測点)を用いて算定されたものである。そして式(1)により検討対象地点における対象余震時の地震動のフーリエ変換を評価し、これをフーリエ逆変換することにより検討対象地点における対象余震時の地震動を求める。

$$F(f) = A(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

ここに、 $A(f)$ は検討対象地点における対象余震時の地震動のフーリエ振幅で実数、 $O(f)$ は対象地点で得られた中小地震(Aftershock5もしくはAftershock6;次節参照)による記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したものである。式(1)をフーリエ逆変換することで、検討対象地点における対象余震時の地震動が求まる。なお、ここでParzenウィンドウは因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている¹²⁾。

4.2 適用性の確認

Aftershock6はK-NET榛原でのみ観測されているが、Aftershock5は複数地点で観測されているため、2段階の妥当性確認を行った。図-9および図-10に、サイト特性置換手法に基づく推定地震波形と盛土崩落地点周辺の地震観測点で得られた観測地震波形を水平2成分(NSおよびEW成分)についてそれぞれ比較したものを示す。ここで検討対象とした地点は、地震動推定対象余震(Aftershock1, Aftershock2)ならびにAftershock5による余震観測記録が得られている7地点とし、サイト位相特性としてAftershock5を採用した。ここに、サイト特性置換手法は上下動についても推定可能な手法であるが、観測波において余震による上下動の振幅が小さいため、精度が不十分であると判断し、上下動については比較検討対象から除外した。なお、図-9および図-10では土構造物の変形などに比

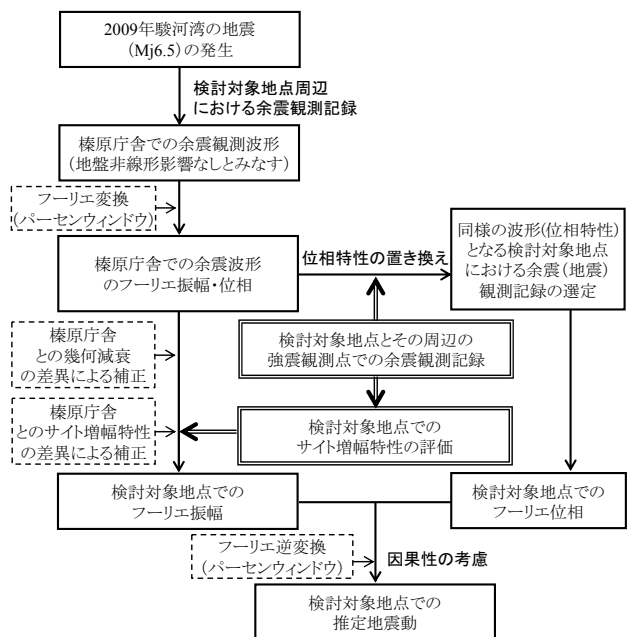


図-7 サイト特性置換手法による地震動推定のフロー

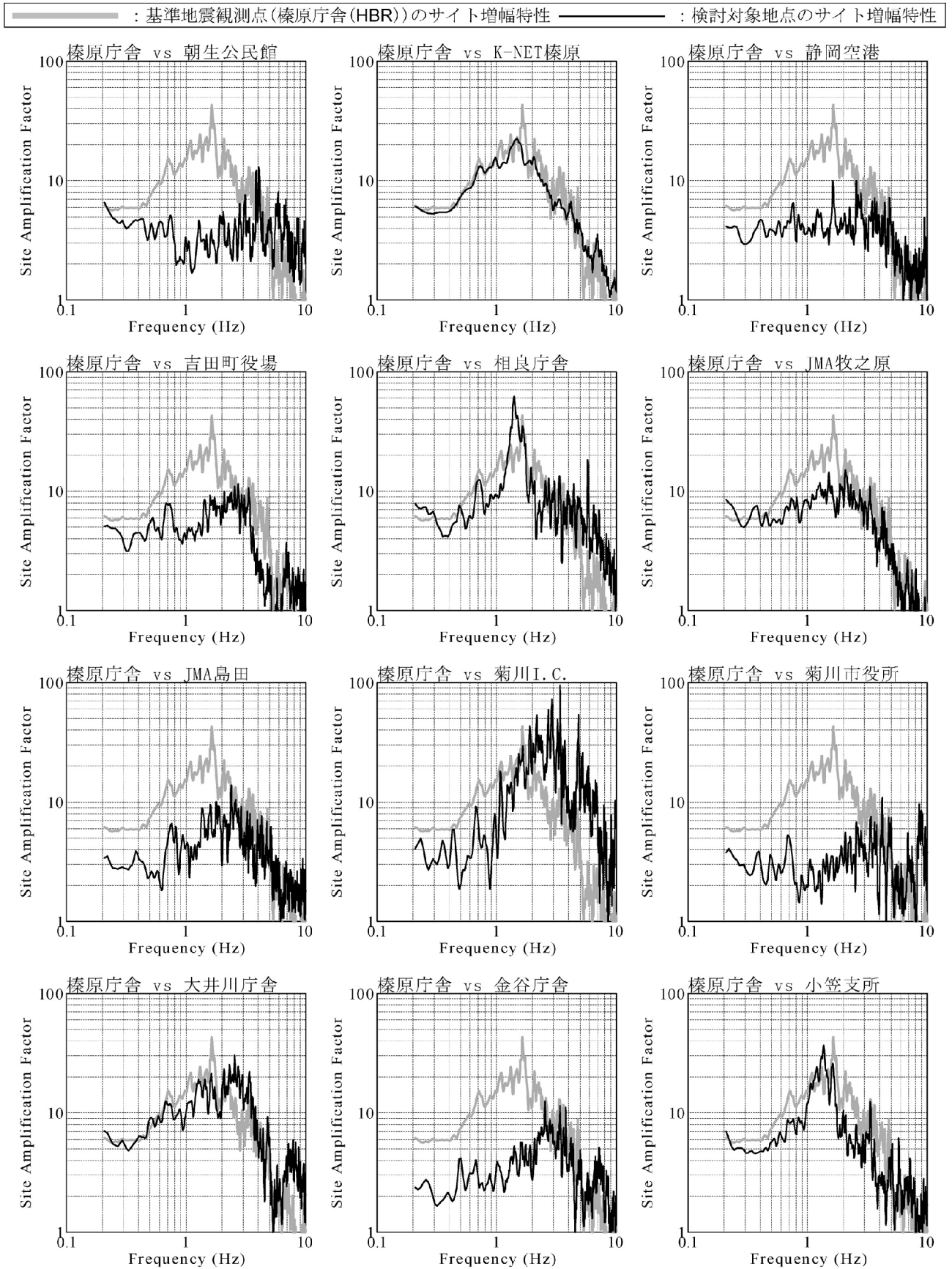


図-8 基準地震観測点とのサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較【水平方向】

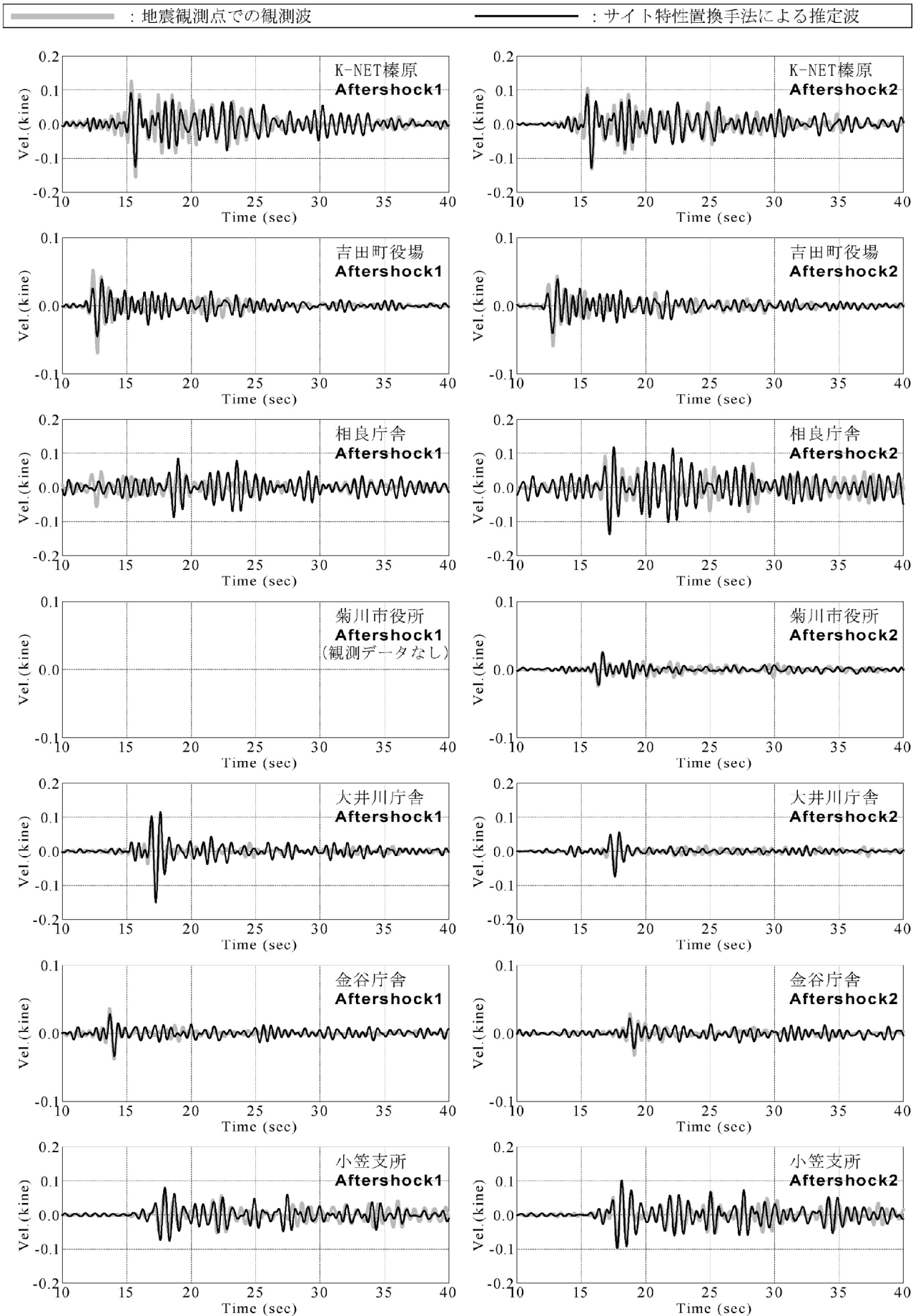


図-9 地震波形評価手法の適用性の確認 (NS成分) 【位相特性：Aftershock5】
 (左図：Aftershock1 ・ 右図：Aftershock2)

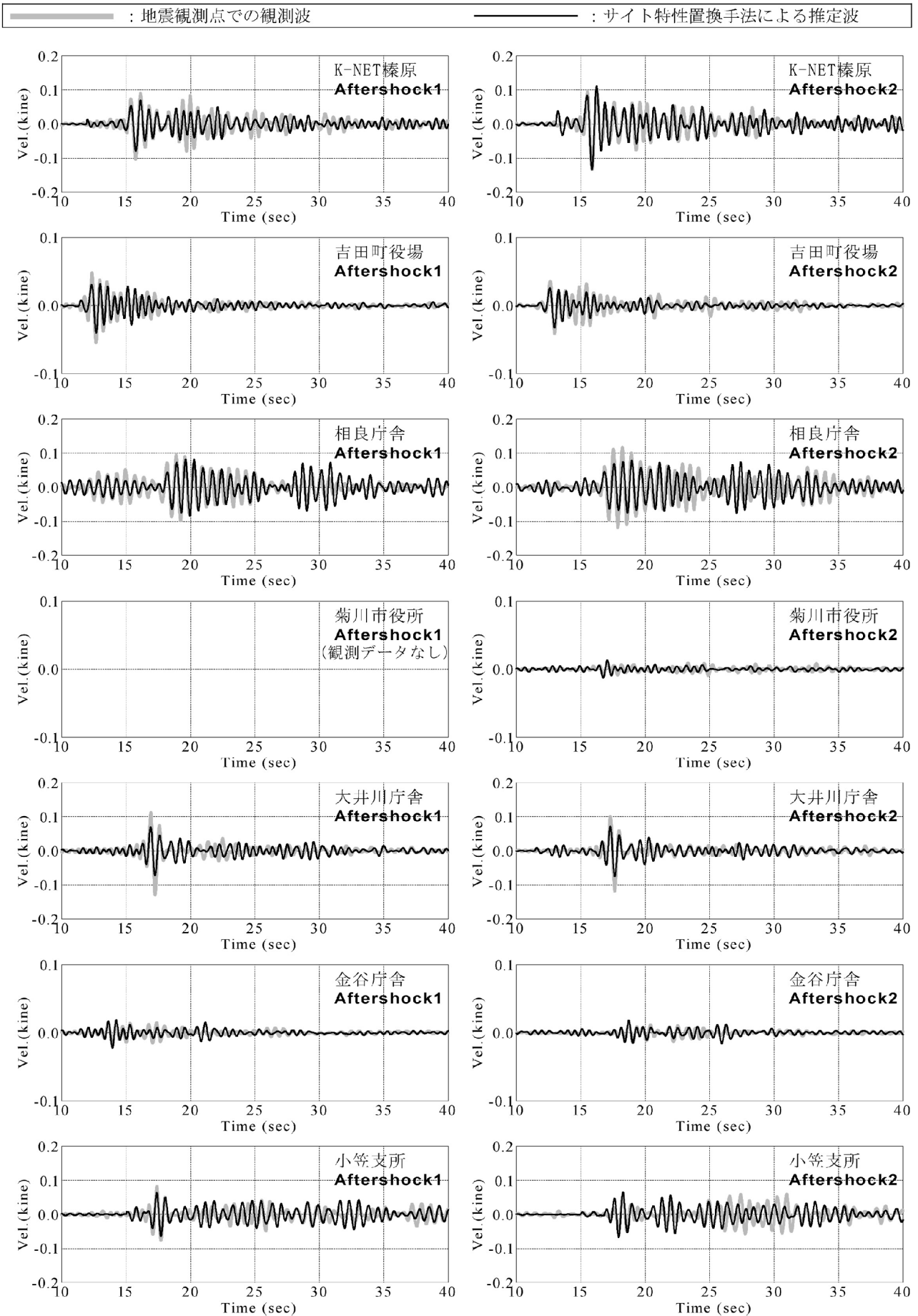
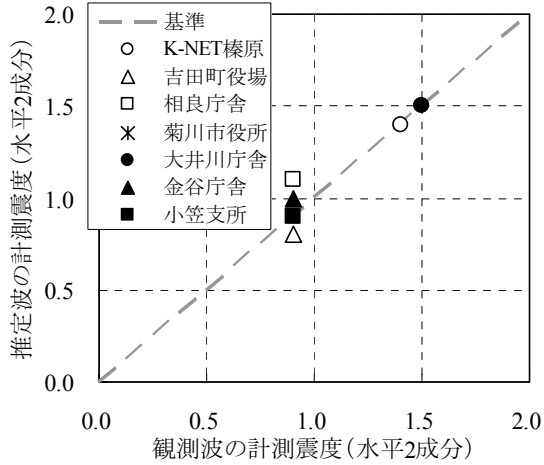
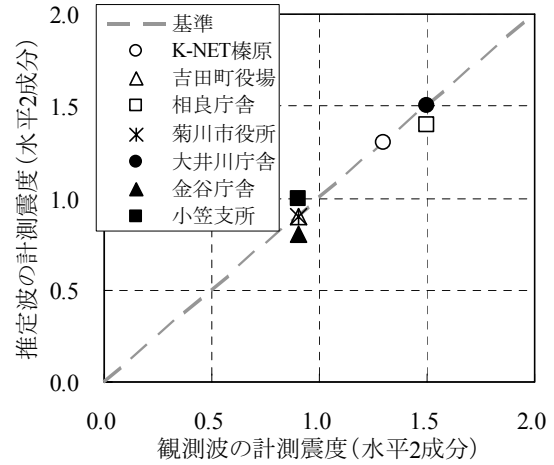


図-10 地震波形評価手法の適用性の確認 (EW 成分) 【位相特性 : Aftershock5】
 (左図 : Aftershock1 ・ 右図 : Aftershock2)

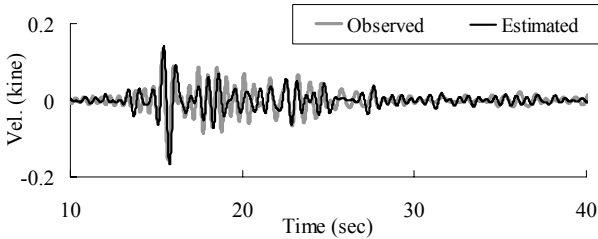


(a) Aftershock1

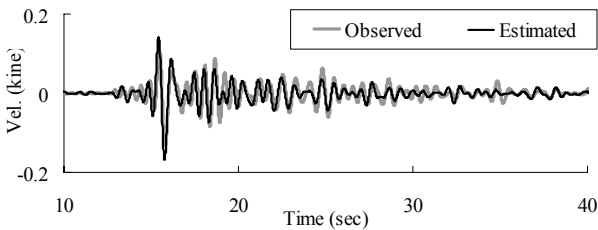


(b) Aftershock2

図-11 観測波と推定波の計測震度の比較

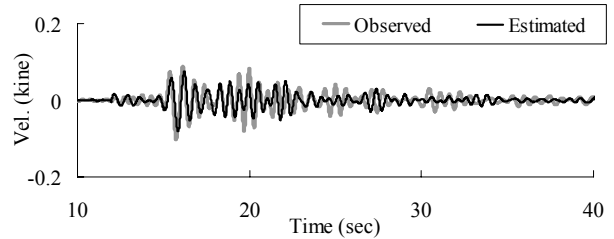


(a) Aftershock1 【位相特性：Aftershock6】

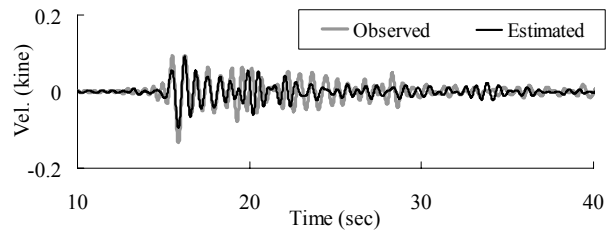


(b) Aftershock2 【位相特性：Aftershock6】

図-12 サイト位相特性の妥当性(K-NET 榛原：NS 成分)



(a) Aftershock1 【位相特性：Aftershock6】



(b) Aftershock2 【位相特性：Aftershock6】

図-13 サイト位相特性の妥当性(K-NET 榛原：EW 成分)

較的影響を及ぼす 2Hz 以下の周波数帯¹³⁾に着目するために 2Hz 以上のハイカットフィルタを施した。図-9 および図-10 より盛土崩落地点周辺の地震観測点での観測波を、特に主要動部分において比較的良好に再現できている。さらに、強震観測点での観測波による計測震度(水平 2 成分)と、サイト特性置換手法による推定波の計測震度(水平 2 成分)を Aftershock1 および Aftershock2 について比較したものを図-11 に示す。ここに、推定波は上下動を評価していないため、水平 2 成分の計測震度を計算している。なお、観測波において、上述したとおり観測波の余震による上下動の振幅が比較的小さいため、算定した水平 2 成分の計測震度と 3 成分の計測震度¹⁴⁾に大きな違いは表れないことを確認している。図-11 より、観測波と推定波の計測震度がほぼ一致しているのが確認できる。

以上の図-9～図-11 によれば、サイト特性置換手法の妥当性を確認できる。すなわち、検討対象地点でのサイト特性を適切に評価すれば、本研究で紹介したサイト特性置換手

法を用いて、対象余震(Aftershock1 および Aftershock2)による地震波形や計測震度を比較的精度良く推定することが可能である。

図-12 および図-13 は、同様に K-NET 榛原(KNT)での観測波とサイト特性置換手法に基づく推定波を比較したものである。ただし、ここではサイト位相特性として、Aftershock6 を採用している。これらの図より、特に主要動部分において観測波と推定波が概ね一致していることが確認できる。以上の図-12 および図-13 によれば、朝生公民館で唯一観測された駿河湾を震源とする地震(Aftershock6)による観測記録の位相をサイト位相特性として採用することの妥当性も確認できる。

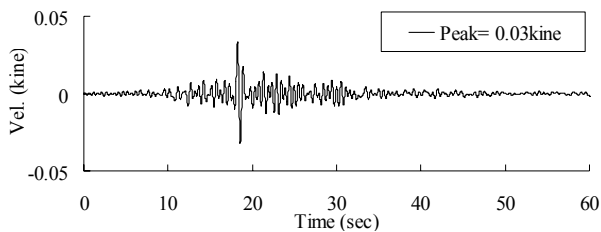
したがって、朝生公民館での地震観測記録からサイト特性置換手法を用いて、対象余震(Aftershock1 および Aftershock2)時における盛土崩落地点(法尻)での地震波形を比較的良好に推定できる可能性が高いと考えられる。

5. 盛土崩落地点での地震波形の推定

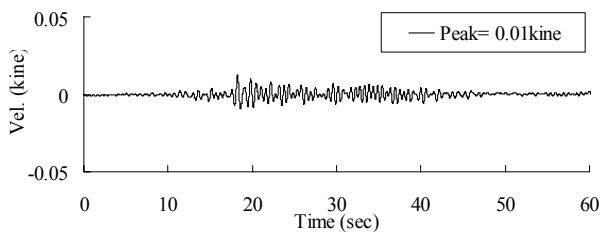
図-14～図-17 に盛土崩落地点における推定地震動の速度および加速度波形を示す。これらの図における推定地震動は、盛土断面方向(N11°W)と盛土延長方向(N79°E)の水平2成分について示しており、盛土法尻位置における地表面相当波である。なお、盛土崩落地点(法尻)と朝生公民館のH/Vスペクトルの類似性を考慮して、朝生公民館での地震観測記録に基づくサイト増幅・位相特性を盛土崩落地点(法尻)にも適用できると考えた。ただし、地震波形評価の際に(すなわち、幾何減衰の補正の際に)必要となる位置情報(緯度・経度)については、盛土崩落地点(法尻)のものを採用した。つまり、本論文で推定した地震動は、上記の仮定の上で法尻部の地表面において推定される波形に相当する。これらの図より、Aftershock1 および Aftershock2

ともに、盛土断面方向のほうが道路延長方向よりも最大加速度値がやや卓越していることが読み取れる。この推定地震動の計測震度は、Aftershock1 および Aftershock2 ともに 1.0 である。また、最大加速度(水平2成分)は、8.4gal (Aftershock1)および 5.9gal (Aftershock2)であり、盛土崩落地点周辺の地震観測点での地震動記録(表-3および表-4)と概ね調和的である。

図-18 は、盛土崩落地点の推定波と崩落地点に最も近い榛原庁舎での観測波の加速度応答スペクトルを比較したものである。この図より、周期 0.1~0.2 秒の短周期領域では崩落地点のスペクトルのほうが若干卓越しているが、全体としては榛原庁舎の観測スペクトルの方が大きい。両地点はそれほど離れていないにも関わらず(表-1および図-1参照)、両地点のサイト特性の差異に起因して(図-8参照)、応答スペクトルの特性にも違いが表れている。

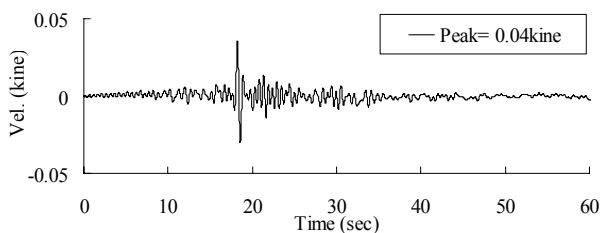


(a) 盛土断面方向(N11°W)

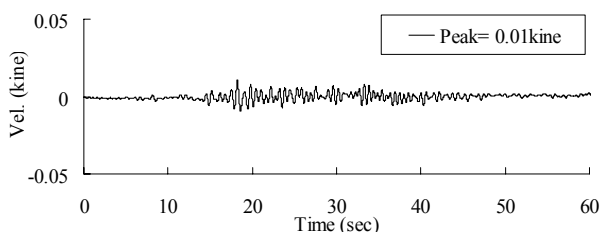


(b) 道路延長方向(N79°E)

図-14 盛土崩落地点での推定速度波形(Aftershock1)

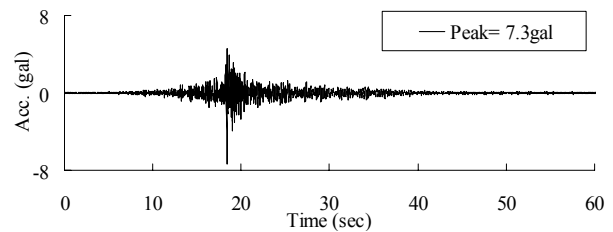


(a) 盛土断面方向(N11°W)

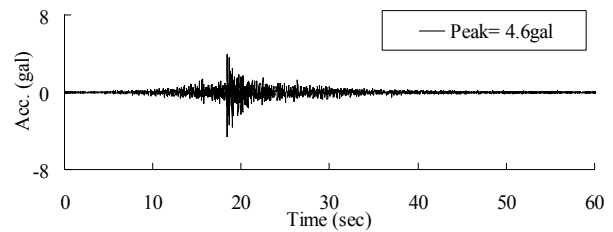


(b) 道路延長方向(N79°E)

図-15 盛土崩落地点での推定速度波形(Aftershock2)

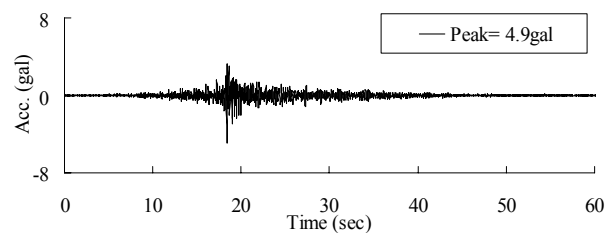


(a) 盛土断面方向(N11°W)

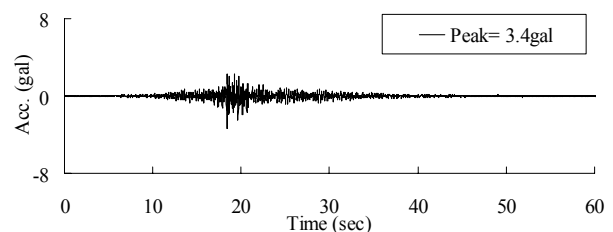


(b) 道路延長方向(N79°E)

図-16 盛土崩落地点での推定加速度波形(Aftershock1)



(a) 盛土断面方向(N11°W)



(b) 道路延長方向(N79°E)

図-17 盛土崩落地点での推定加速度波形(Aftershock2)

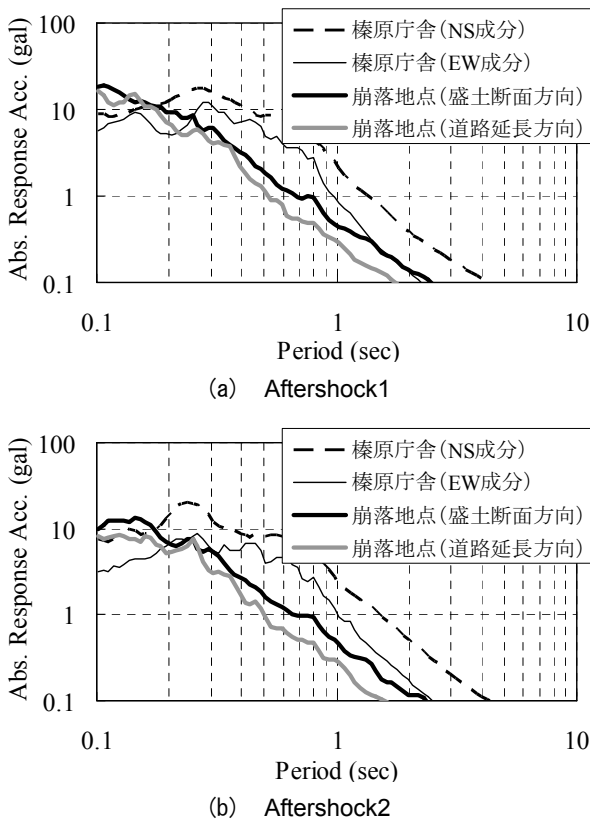


図-18 加速度応答スペクトルの比較

6. まとめ

本稿では、検討対象地点とその周辺の地震観測点のサイト増幅・位相特性の差異を利用した地震波形の推定方法(サイト特性置換手法)の大地震後の余震への適用性について検討を行った。具体的には、2009年駿河湾の地震(Mj6.5)の余震による東名高速道路盛土崩落地点での地震波形を推定した事例を紹介し、本震だけでなく余震による地震波形の評価においてもサイト特性置換手法が有効であることを示した。

今後は、推定した地震波形を入力した対象盛土の動的解析などを実施し、盛土の被災における余震の影響について検討を行っていく予定である。

謝辞

(独)防災科学技術研究所のK-NETおよび気象庁の地震観測記録を使用させていただいた。また、NEXCO中日本および静岡県危機管理局には本震および余震の観測波形をご提供いただきました。余震観測の実施では、牧之原市民の皆様大変お世話になりました。常時微動計測の実施にあたっては、柴尾享氏(広島大学大学院工学研究科)および田森賢太郎氏、栗原園実氏、湯浅香織氏(元広島大学工学部)に協力を仰いだ。(社)土木学会地震工学委員会性能を考慮した道路盛土の耐震設計・耐震補強に関する研究小

委員会の委員の皆様には、貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中日本高速道路(株)：東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会、委員会資料、2009。
- 2) 秦吉弥，一井康二，野津厚，古川愛子，常田賢一：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2009年駿河湾の地震における東名高速道路盛土崩落地点での地震動の推定，第45回地盤工学研究発表会，No.749，pp.1497-1498，2010。
- 3) 秦吉弥，一井康二，野津厚：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した八戸市簗子渡における強震動の推定，地盤と建設，Vol.27，No.1，pp.23-31，2009。
- 4) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A method of the estimation of seismic waveform at a site based on the earthquake records at neighborhood sites, Proc. of 14th European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1480, Ohrid, Macedonia, 2010。
- 5) 野津厚：2009年8月11日駿河湾の地震(Mj6.5)の特性化震源モデルの作成，第45回地盤工学研究発表会，No.838，pp.1675-1676，2010。
- 6) 奥野慶四郎：東名盛り土復旧の舞台裏—緊急時に生きた「顔見知り」のチームワーカー，日経コンストラクション，No.485，pp.60-69，2009。
- 7) 秦吉弥，一井康二，野津厚，古川愛子，常田賢一：サイト特性置換手法に基づく2009年駿河湾地震(Mj6.5)の余震における東名高速道路盛土崩落地点での地震動の推定，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，I-345，pp.689-690，2010。
- 8) 柴尾享，一井康二，秦吉弥，田森賢太郎，栗原園実，湯浅香織：2009年駿河湾の地震における東名高速道路崩落地点の地盤震動特性評価の試み，広島大学大学院工学研究科研究報告，Vol.58，No.1，2009。
- 9) 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。
- 10) 秦吉弥，一井康二，野津厚，常田賢一，大角恒雄，柴尾享：東名高速道路盛土崩落地点とその周辺におけるサイト特性の推定，第6回地盤工学会関東支部発表会発表講演集，Vol.6，No.124，pp.413-416，2009。
- 11) (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。
- 12) 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。
- 13) たとえば，野津厚，井合進，一井康二，沼田淳紀：ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分，レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.311-318，2000。
- 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, pp.75-78, 2004。

(2010年5月29日 受付)