

本震観測記録を利用した地震動推定手法の比較検討 —2009年駿河湾を震源とする地震($M_j6.5$)を例として—

秦吉弥¹・片岡正次郎²・野津厚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正会員 博士(工学) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³正会員 博士(工学) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 領域長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

1. はじめに

近年、我が国では大規模地震が頻発しており、強震動の作用による橋梁の被災が数多く報告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、被災(ならびに無被災)地点における地震動を事後評価していくことは非常に重要である。この点に関して、既に著者ら^{2)~9)}は、既往の大規模地震において主に被災橋梁サイトに作用した強震動を数多く推定している。

その際、採用している地震動推定手法は、断層モデルに基づく方法¹⁰⁾と対象サイト周辺の本震観測記録に対して補正を施す方法^{10),11),12)}に大別することができる。このうち、後者の方法は、工学的基盤～地表の地盤震動特性の差異に着目することで周辺の観測記録に対してSHAKEなどの重複反射理論を適用する方法(以後、等価線形解析手法と呼ぶ)¹¹⁾と、地震基盤～地表の地盤震動特性の差異に着目することで周辺の観測記録に対してサイト増幅・位相特性を置き換える方法(以後、サイト特性置換手法と呼ぶ)¹²⁾に更に分けることができる。しかしながら、地震動推定手法として、対象サイト周辺の本震観測記録に対して補正を施す方法を採用した場合に、採用手法のバリエーションが推定結果に及ぼす影響については、これまで十分な検討が行われていない。この点に関して著者ら¹³⁾は、橋梁近傍の自由地盤上の強震観測点(MLIT観測点¹⁴⁾)とその周辺の強震観測点(K-NET観測点¹⁵⁾)の組合せを対象に、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録に対して補正を施す方法として、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法の二種類の手法を採用して強震動を推定し、観測地震動に対して両手法に基づく推定地震動の比較検討を行っている。一方で、海溝型地震以外の地

震を対象として同様の検討は行われていない。

そこで本稿では、国土交通省国土技術政策総合研究所が現在管理する駿河湾沿いの高密度強震観測点(NILIM観測点¹⁶⁾)とその周辺の防災科学技術研究所による強震観測点(K-NET観測点¹⁵⁾)の組合せを対象に、スラブ内地震である2009年駿河湾を震源とする地震($M_j6.5$) (以後、2009年駿河湾地震と呼ぶ)による観測記録に対して補正を施す方法として、等価線形解析手法ならびにサイト特性置換手法を採用して強震動を推定し、観測地震動に対して両手法による推定地震動を比較することで、推定精度に関する基礎的な検討を行った結果について報告する。

表-1 基準点と推定点の組合せ一覧

	基準点 (NILIM観測点)	推定点 (K-NET観測点)
Couple_A	NILIM相良	K-NET榛原
Couple_B	NILIM焼津	K-NET焼津
Couple_C	NILIM沼津	K-NET沼津
Couple_D	NILIM松崎	K-NET松崎

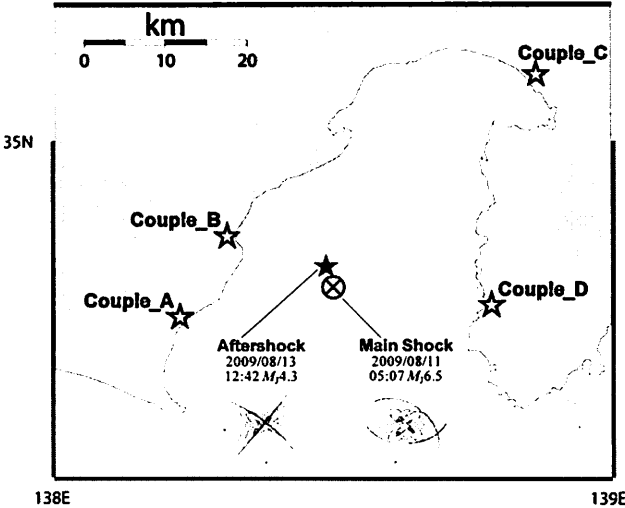


図-1 強震観測点の組合せ、および駿河湾の中小地震

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. 対象サイト

図-1および表-1に本稿で対象としたサイトおよび強震観測点の組合せを示す。強震観測点の選定には、①橋梁近傍の強震観測点(NILIM観測点)の概ね5km以内にK-NET観測点が存在すること、②NILIM観測点およびK-NET観測点ともにPS検層による工学的基

盤～地表の速度構造^{16),17)}が既知であること(図-2参照)、③NILIM観測点およびK-NET観測点において2009年駿河湾地震による観測記録が得られていること、の上記三条件を満足した組合せを選定した。図-3、図-4、図-5、図-6に本稿で選定した組合せ(Couple_A, Couple_B, Couple_C, Couple_D)によるNILIM観測点とK-NET観測点の位置関係を示す。また、NILIM相良・K-NET榛原・NILIM沼津・K-NET沼津・NILIM松崎はいずれもII種地盤となっているのに対し(図-2(a),(b),(e),(f),(g)参照)、NILIM焼津・K-NET焼津・K-NET松崎はいずれもIII種地盤となっている(図-2(c),(d),(h)参照)。

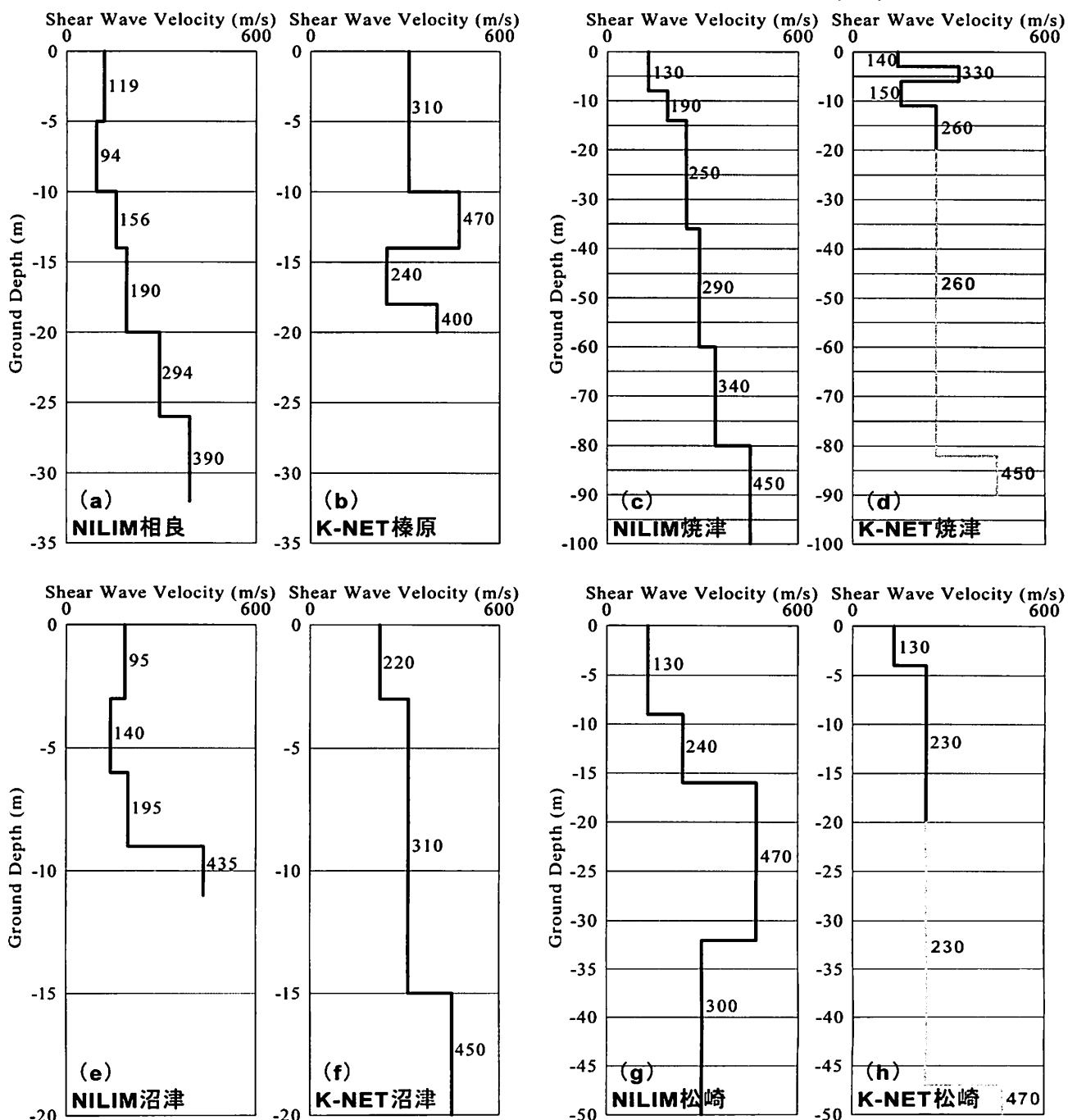


図-2 選定した強震観測点(基準点および推定点)での工学的基盤以浅の表層地盤におけるせん断波速度構造

3. 地震動推定手法

表-1に示すとおり、NILIM観測点で得られた本震観測記録に対して補正を施すことで、K-NET観測点での地震動を推定した。ここに、地震動推定手法としては、図-7および図-8に示す等価線形解析手法¹¹⁾およびサイト特性置換手法¹²⁾を採用した。図-7および図-8に示すように、両手法の大きな違いは、等価線形解析手法ではMLIT観測点とK-NET観測点に作用した工学的基盤相当の地震動が同等であると仮定しているのに対し、サイト特性置換手法ではMLIT観測点とK-NET観測点に作用した地震基盤相当の地震動が同等であると仮定している点にある。



図-3 NILIM相良とK-NET榑原の位置関係 (Couple_A)



図-4 NILIM焼津とK-NET焼津の位置関係 (Couple_B)

図-7に示すとおり、等価線形解析手法では、まず、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(a),(c),(e),(g)参照)に基づき、地盤地表面におけるNILIM観測点での観測記録に対して、非線形の(土木研究所¹¹⁾の実験式に基づく動的変形特性を考慮した)重複反射理論を適用し、工学的基盤相当の地震動を評価した(その際、Couple_BおよびCouple_Dでは最大せん断ひずみが1%を上回っていたことを付記しておく)。そして、評価した工学的基盤相当の地震動に対して、K-NET観測点における工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f),(h)参照)に基づく非線形の重複反射理論を適用することで、K-NET観測点での地震動を最終的に推定した。



図-5 NILIM沼津とK-NET沼津の位置関係 (Couple_C)



図-6 NILIM松崎とK-NET松崎の位置関係 (Couple_D)

一方で、図-8に示すとおり、サイト特性置換手法では、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(a),(c),(e),(g)参照)に基づき、地盤地表面におけるNILIM観測点での観測記録に対して、非線形の(土木研究所¹⁸⁾の実験式に基づく動的変形特性を考

慮した)重複反射理論を適用し、工学的基盤相当の地震動を評価した(この過程は上述した等価線形解析手法¹⁸⁾と同様である)。そして、評価したNILIM観測点での工学的基盤相当の地震動に対して、線形の重複反射理論を適用することで、NILIM観測点で

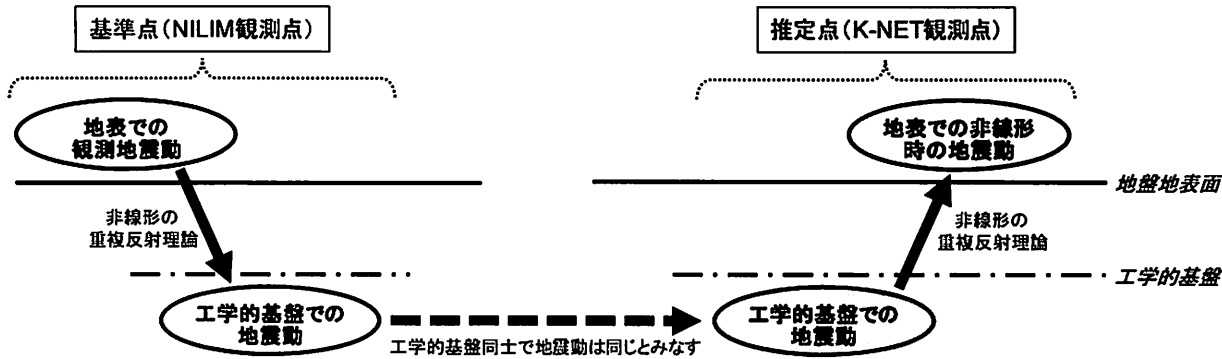


図-7 等価線形解析手法に基づく地震動推定のフレームワーク

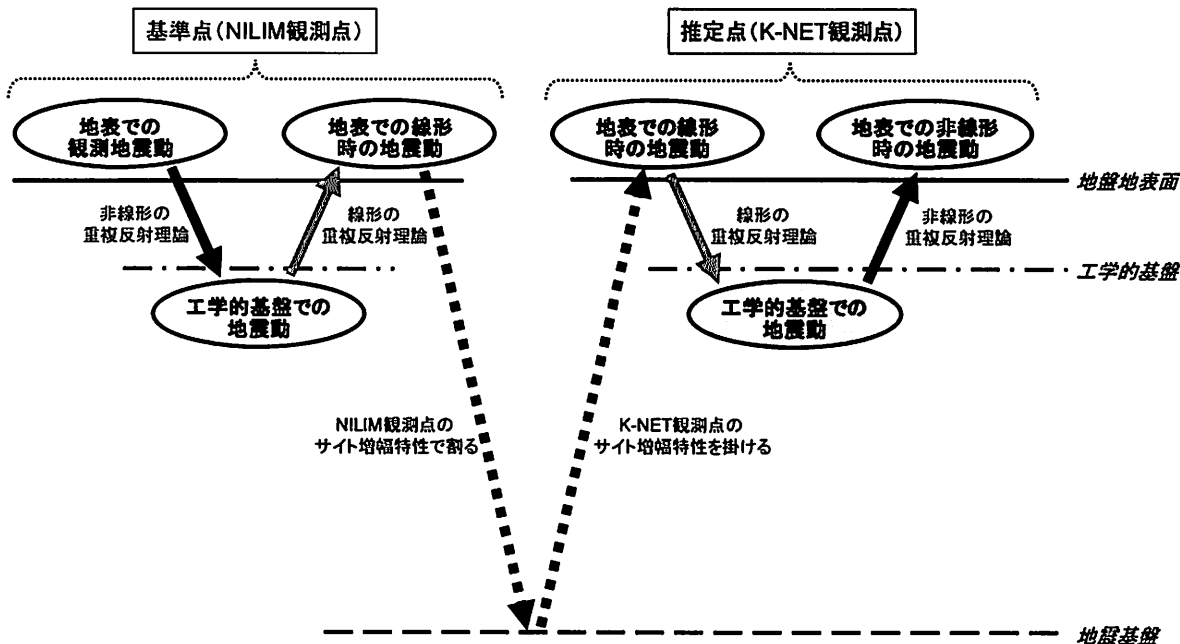


図-8 サイト特性置換手法に基づく地震動推定のフレームワーク

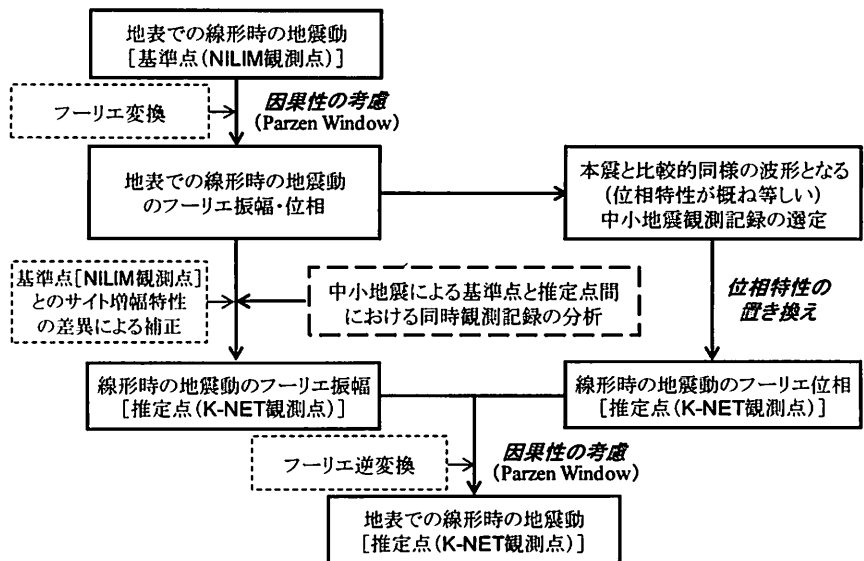


図-9 サイト増幅・位相特性の置き換えフロー

の地盤地表面における工学的基盤～地表の地盤非線形の影響が含まれていない地震動を評価した。さらに、評価した地盤地表面における地震動に対して、NILIM観測点～K-NET観測点間におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)およびサイト位相特性の置き換えを行うことで、K-NET観測点での地盤地表面における線形時の地震動を評価した。

サイト増幅・位相特性の具体的な置き換え方法は、図-9に示すとおりである。まず、評価したNILIM観測点での地盤地表面における線形時の地震動に対してフーリエ変換を施し、フーリエ振幅を計算する。

次に、得られたフーリエ振幅に対して、中小地震観測記録によるフーリエ振幅の比率(K-NET観測点／NILIM観測点：図-10参照)を乗じることにより、K-NET観測点でのフーリエ振幅を評価した。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中小地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¹⁸⁾を行うことで、K-NET観測点における本震時の線形時の地震動を推定した。なお、このとき用いる中小地震観測記録としては、駿河湾を震源とする地震(2009/08/13 12:42 $M_j4.3$ ：図-1参照)によるK-NET観測点での記録を採用¹⁹⁾した。

評価したK-NET観測点での地盤地表面における線形時の地震動に対して、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f),(h)参照)に基づく線形の重複反射理論を適用することで、K-NET観測点での工学的基盤における地震動を評価した。そして、評価した工学的基盤相当の地震動に対して、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f),(h)参照)に基づく非線形の重複反射理論を適用し、K-NET観測点での本震時の地震動を最終的に推定した。

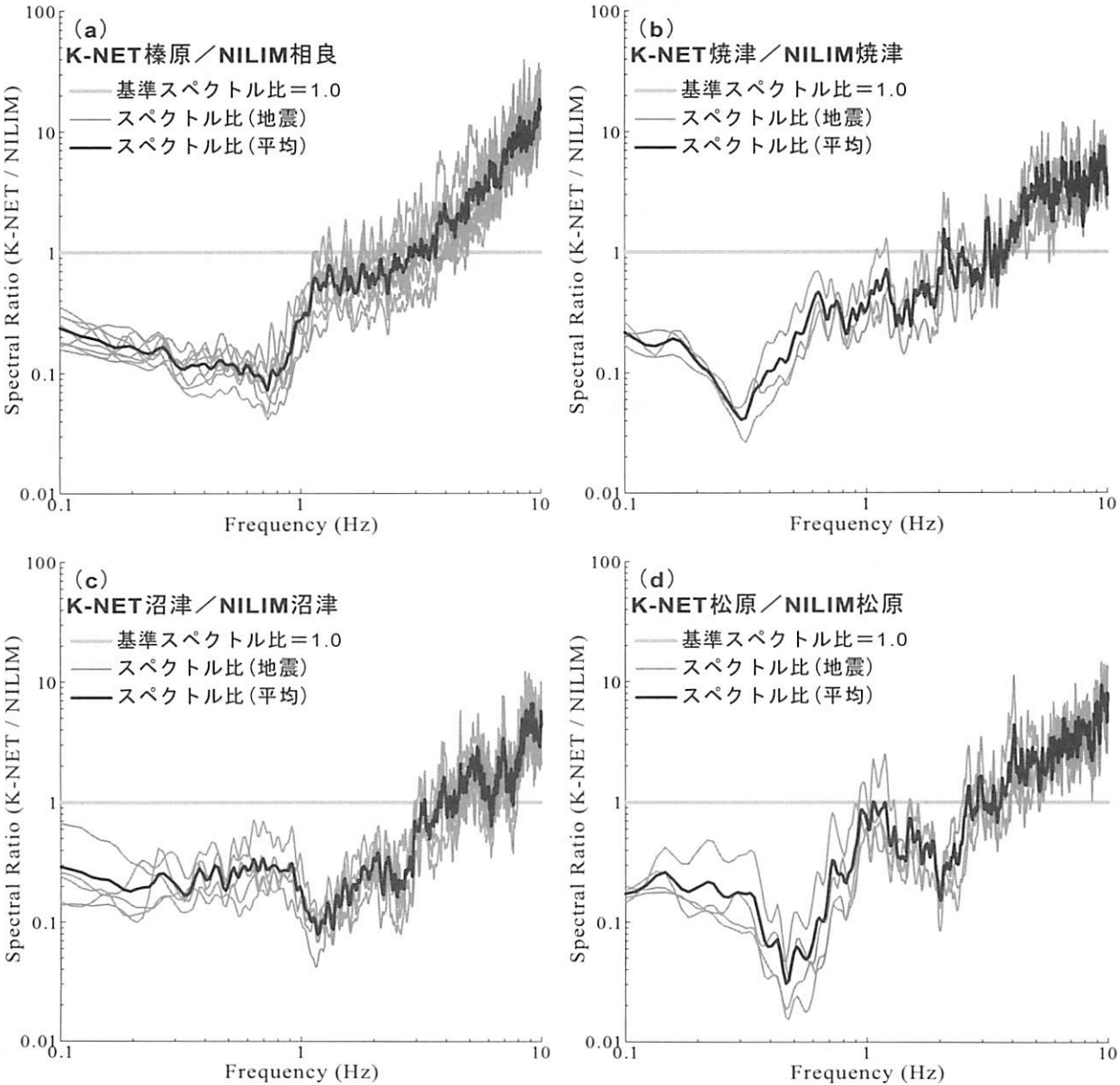


図-10 選定した強震観測点間における中小地震観測記録に基づくスペクトル比(推定点／基準点)

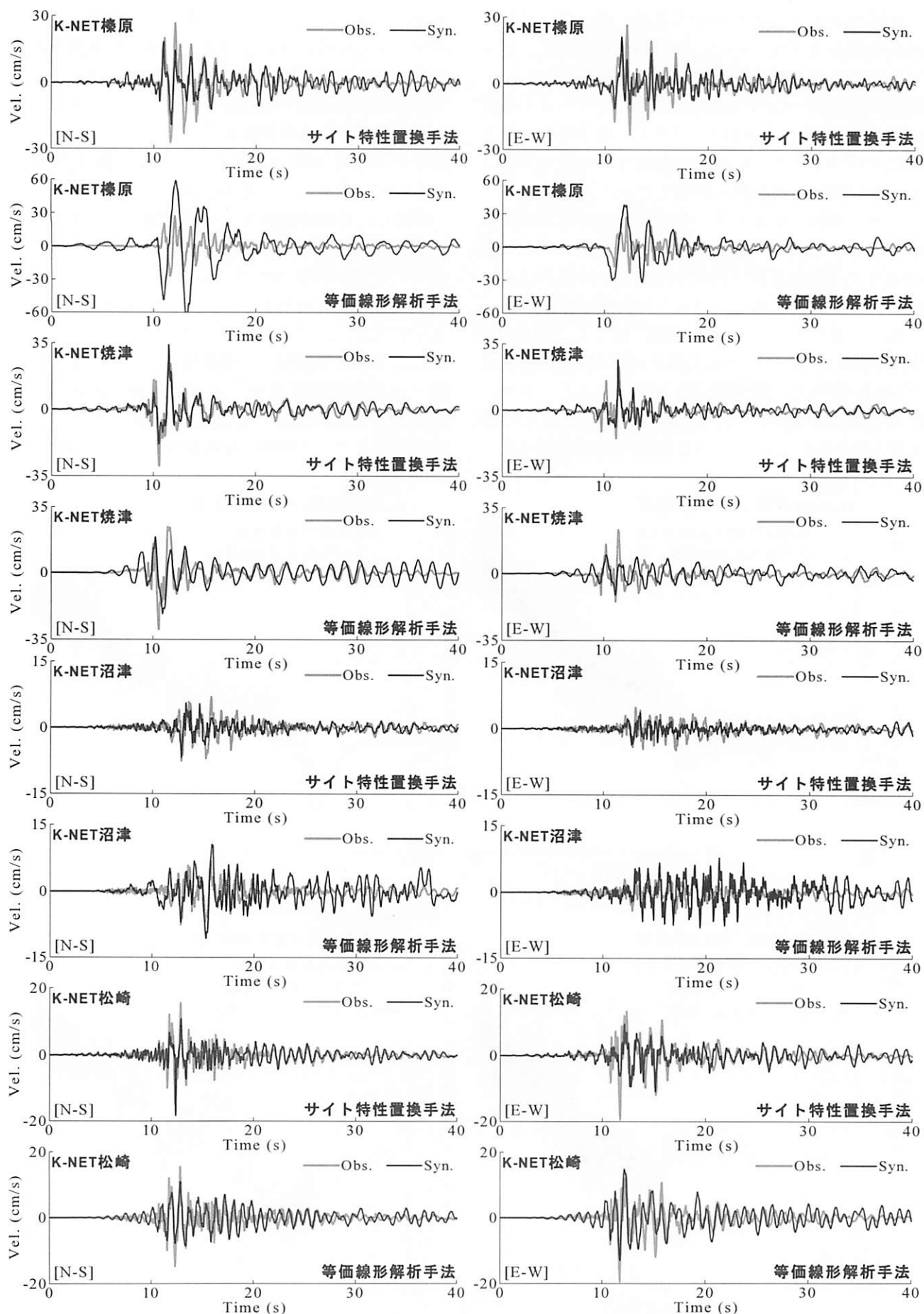


図-11 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動(速度波形)の推定

4. 地震動推定結果

図-11に推定点であるK-NET榛原, K-NET焼津, K-NET沼津, K-NET松崎における本震時の速度波形(観測波)と, 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動推定結果(推定波)を比較したものを示す。図-11に示すとおり, 速度波形による比較では, 本稿で設定した組合せの違い(Couple_A, B, C, D)に関わらず, サイト特性置換手法のほうが等価線形解析手法よりも推定精度が高い傾向が読み取れる。またこの傾向は, K-NET榛原での推定結果(Couple_A)においてより顕著に表れている。

図-12に絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したものを示す。図-12に示すとおり, 本稿で設定した組合せの違い(Couple_A, B, C, D)に関わらず, 等価線形解析手法を採用したケースでは長周期帯域において観測波を過大評価しており, 工学的基盤に作用した地震動が基準点～推定点間において大きく異なっていることが示唆される。この過大評価の要因としては, 図-10に示すとおり, 中小地震観測記録によるフーリエ振幅の比率(推定点/基準点: 図-10参照)が低周波帯域において1.0に漸近していないことが挙げられる。すなわち, 図-7に示すとおり等価線形解析手法では, 工学的基盤に作用した地震動が基準点と推定点間におい

て一様であると仮定している(フーリエ振幅の比率(推定点/基準点)が低周波帯域において概ね1.0であると仮定している)のに対し, 実際には, 本稿で設定した組合せの違い(Couple_A, B, C, D)に関わらず, 基準点は推定点と比較して, 低周波帯域(長周期帯域)における地震動の大きさが大幅に小さくなっている(図-10参照)のが原因であると考えられる。

したがって, これらの再現性が低下している長周期帯域は, 中小地震観測記録によるフーリエ振幅の比率(推定点/基準点: 図-10参照)が1.0から大きく乖離している周波数帯域と概ね一致していることから, 工学的基盤～地表のみならず地震基盤～工学的基盤における基準点～推定点間の地盤震動特性の差異が比較的大きい場合, 等価線形解析手法に基づく工学的基盤～地表の地盤震動特性の置き換えだけでは, 推定点に作用した地震動を十分な精度で評価できない可能性を示唆している。

5. まとめ

本研究では, 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法を用いて, 2009年駿河湾地震($M_j6.5$)でのNILIM相良, NILIM焼津, NILIM沼津, NILIM松崎(基準点)での観測記録に補正を施すことによって, K-NET榛原, K-NET焼津, K-NET沼津, K-NET松崎

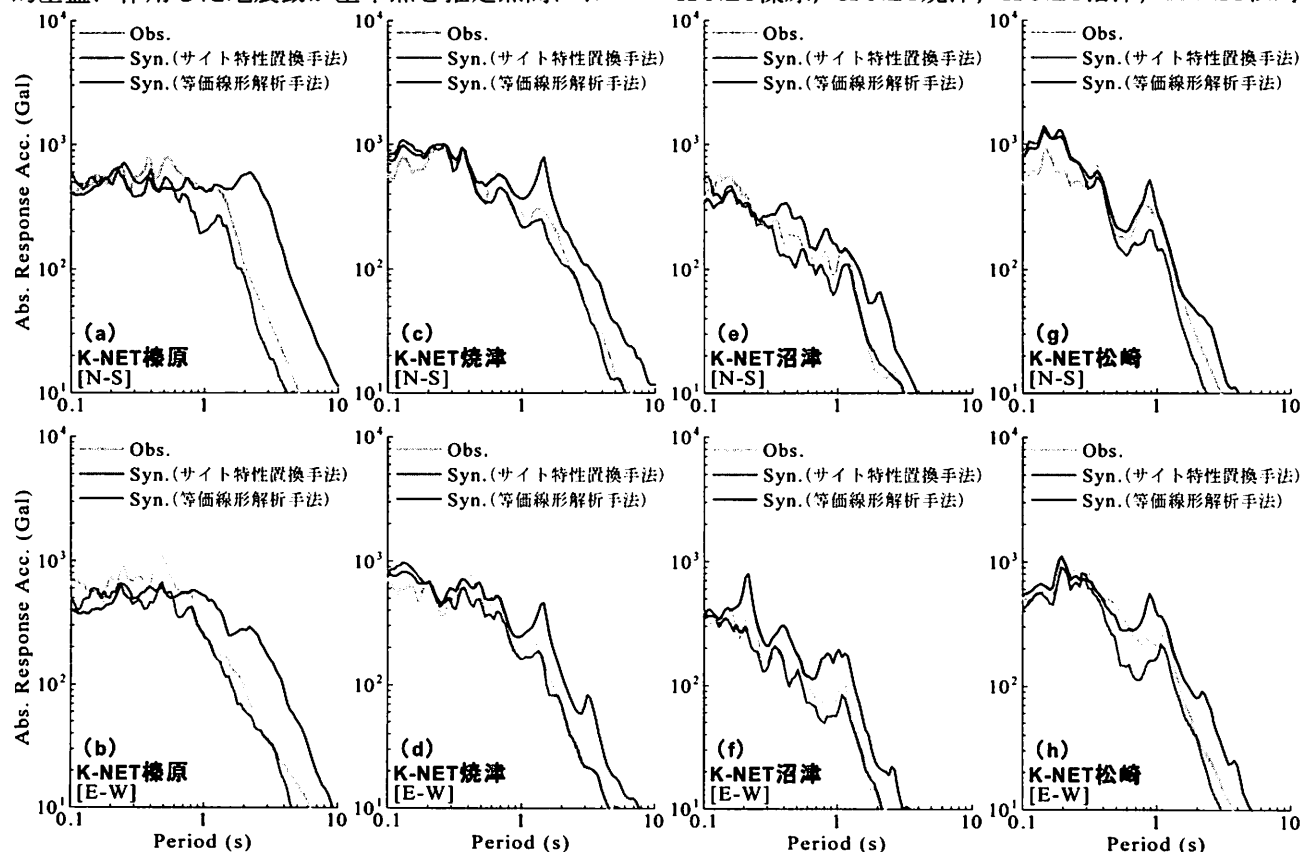


図-10 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動(絶対加速度応答スペクトル)の推定

(推定点)における強震波形を推定し、観測波との比較検討を行い、採用手法の違いが地震動推定結果に及ぼす影響に関して基礎的な検討を行った。

その結果、基準点～推定点間の地盤震動特性の差異が比較的大きい場合には、等価線形解析手法の適用、すなわち工学的基盤～地表の地盤震動特性の置き換えだけでは十分な推定精度を得られない可能性が高いことがわかった。

上記の結論は、本稿で設定した限られたケースの中で得られた一つの知見であり、今後は、適用ケースを増やしていくことで更に詳細な検討を行っていき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による地震観測データを利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 片岡正次郎, 金子正洋, 長屋和宏：津波越流後に交通機能が保持された道路橋の地震・津波応答再現解析, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.4, pp.I_1043-1051, 2014.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.49-52, 2012.
- 8) 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.I_560-577, 2014.
- 9) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 野津厚：本震観測記録を利用した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地震動の推定, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.61A, pp.174-187, 2015.
- 10) 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, 土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.673-690, 2010.
- 11) 荒川直士, 常田賢一, 木全俊雄, 近藤益央, 高松重則：地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE : DESRA—, 土木研究所資料, 第1778号, 136p., 1982.
- 12) 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.
- 13) 秦吉弥, 片岡正次郎, 野津厚：本震観測記録を利用した地震動推定手法の比較検討事例, 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.161-168, 2014.
- 14) 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.
- 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) 横山功一, 田村敬一, 本田利器, 千葉光, 杉田秀樹：土木研究所における新しい高密度地震観測施設, 土木研究所資料, 第3567号, 1998.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 野津厚：2009年8月11日駿河湾の地震(M6.5)の震源モデル(第二版)—2枚の断層面を考慮した場合—, 港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ, 研究ノートNo.36, 2009. (last accessed: 2015/06/16)