

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 2007年能登半島地震での能登有料道路全域にわたる地震動の推定

秦 吉弥¹, 一井康二², 村田 晶³, 宮島昌克³, 野津 厚⁴, 柴尾 享⁵, 常田賢一⁶

Yoshiya HATA¹, Koji ICHII², Akira MURATA³, Masakatsu MIYAJIMA³,
Atsushi NOZU⁴, Susumu SHIBAO⁵ and Ken-ichi TOKIDA⁶

- ¹ 日本工営(株) 中央研究所 地盤耐震グループ
- ² 広島大学 大学院工学研究院 社会環境空間部門
- ³ 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系
- ⁴ (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
- ⁵ 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻
- ⁶ 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻

2007年能登半島地震では、能登有料道路の盛土が多数被災し、通行機能の不全が生じた。近年、能登有料道路の被災盛土を対象にした研究が盛んに行われているが、当該地点における地震動は明らかになっていない。今後の道路盛土の耐震性評価のためにも、被災盛土ならびに無被災盛土の各地点における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、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いて、2007年能登半島地震における能登有料道路全域にわたる盛土地点での地震動を推定した。

キーワード：地震動，地震観測，サイト特性，常時微動計測

1. はじめに

大地震による被災事例をもとに、その原因を評価する上で、当該地点の地震動を精度良く推定することは非常に重要である。例えば、道路のような線状構造物では、被災・無被災箇所が混在する事例が多く、各地点における地震動の評価が重要である。しかしながら線状構造物では、地盤震動の特性(サイト特性)や地震危険度の特性(対象位置と活断層の位置関係)がそれぞれ地点ごとに異なってくる。そのため、地点ごとにこれらの特性を考慮した地震動を推定する手法が検討されている^{1),2)}。2007年能登半島地震では、能登有料道路の盛土が多数被災し、通行機能の不全が生じた^{3),4)}。近年、能登有料道路の被災盛土を対象にした研究^{5),6),7),8),9),10),11)}が盛んに行われているが、当該地点における地震動は明らかになっていない。今後の道路盛土の耐震性評価のためにも、被災盛土ならびに無被災盛土の各地点における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、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法^{12),13)}を用いて、2007年能登半島地震における能登有料道路での地震動を推定した。

2. 強震観測記録の整理

図-1 および図-2 に能登有料道路(徳田大津 I.C.～穴水 I.C.)周辺における強震観測点での最大加速度値(3成分合成)および計測震度の分布¹⁴⁾を Nozu による震源断層モデル¹⁵⁾と共に示す。この図より、能登有料道路周辺には、南端の徳田大津 I.C.近傍では KiK-net 志賀、北端の穴水 I.C.

近傍では K-NET 穴水が位置している。しかしながら、KiK-net 志賀では本震時の記録が欠測しており、K-NET 穴水では浅い地盤構造が局所的に変化していることが指摘^{16),17)}されている。こういったことから、能登有料道路とその周辺の地震動として、近隣の観測記録をそのまま利用することは問題がある。また、各観測点における最大加速度値や計測震度は、距離減衰による一様な低下傾向とはなっておらず、K-NET 富来と JMA 志賀町、K-NET 能都と JMA 能登町のように近傍の位置関係にある場合でも地震動レベル(最大加速度等)が異なっている。ここで、近接した2地点の地震動特性が異なる理由としてサイト特性の違いが指摘されている¹⁸⁾。つまり、能登有料道路の被災・無被災の各地点における地震動の評価のためには、当該地点のサイト特性を適切に評価する必要がある。



図-1 能登有料道路周辺における最大加速度の分布^{14),15)}

3. 常時微動計測の実施

本検討では、能登有料道路での地盤震動特性を把握することなどを目的として、図-3 に示すように能登有料道路の被災盛土「縦」ならびに無被災盛土「盛」の法尻付近、さらに周辺の強震観測地点において常時微動計測を実施した。計測日時は2009年7月13～15日の6～18時であり、計測機器は物探サービス(株)製 GEO-NET1-2S3D である。計測方向は、水平2成分と鉛直成分の計3成分であり、H/V スペクトルの計算では、水平2成分の平均をとった。計測時間は、1計測点あたり11分間とし、サンプリング周波数は100Hzとした。雑振動が大きい場合には、時間帯や実施日を変えて再度計測を行った。

図-4 に常時微動計測結果(H/V スペクトル)を示す。H/V スペクトルの計算処理方法としては、微動の速度時刻歴に対して、まず0.1Hzのハイパスフィルターを施し、163.84秒の区間を3区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05Hzのパーセンウィンドウで平滑化したのちに、H/V スペクトルを算出し、平均をとった。評価振動数範囲としては、使用した微動計測器の性能、強震波形計算の再現性¹³⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。

図-4 より H/V スペクトルの形状やピーク周波数を比較すると、計測地点ごとの差異が比較的小さい区間と大きい区間が見受けられる。また、4Hz付近に明瞭なピーク周波数を有する盛-8 および盛-10 は、谷部に築造された盛土であり、法尻部においても堆積層厚の影響が顕著に表われているものと考えられる。しかし、概ねどの地点においても高い振動数の固有振動数を有する地盤震動特性であり、近傍の強震観測点(KiK-net志賀およびK-NET穴水)でのH/V スペクトルの特性と大きく異なっている。

ここでは、図-5 に示すように H/V スペクトルに基づく地盤震動特性により、能登有料道路を4つのゾーンに分割して、それぞれの地震動を推定する必要があると考えた。

4. 地震観測地点でのサイト特性の評価

(1) 中小地震観測の実施

本検討では、地盤震動特性(常時微動特性)が比較的類似していると考えられる各ゾーンごとに地震計を1つずつ設置し、中小地震の観測を実施した。具体的には、縦-9、盛-10、縦-10、縦-38の盛土法尻付近にて地震観測を行った。地震計の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を採用した。地震計は東京測振(株)製 AS-3250A、データロガーは白山工業(株)製 LS-7000XTを使用した。観測



図-2 能登有料道路周辺における計測震度の分布^{14),15)}

期間は、縦-9(Zone1)および縦-38(Zone4)では2009年3月20日～8月9日までの約4か月半、盛-10(Zone2)および縦-10(Zone3)では2009年8月11日～2010年2月7日までの約6か月である。

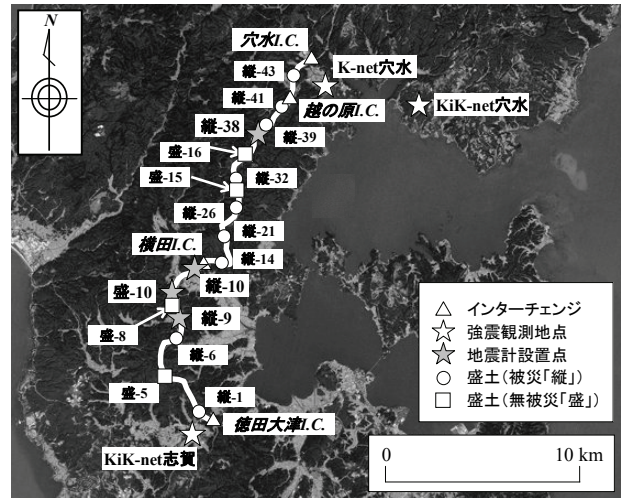


図-3 盛土崩落地点とその周辺での常時微動の計測位置

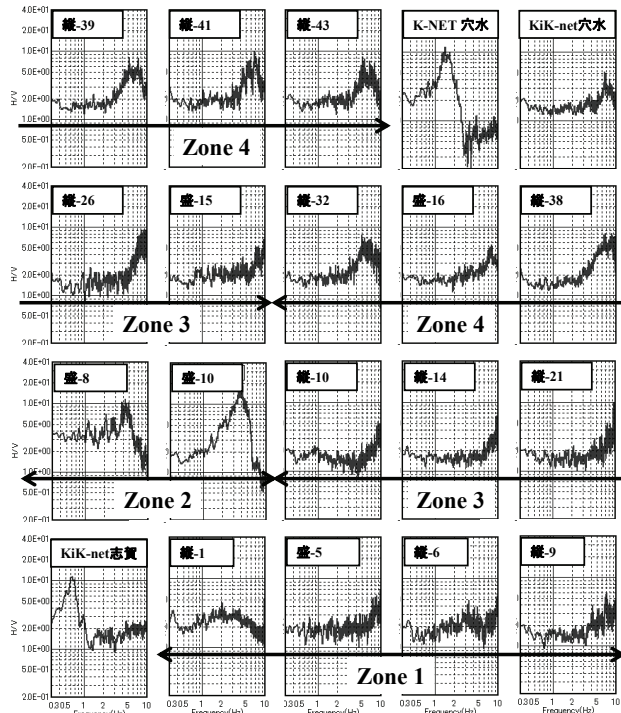


図-4 各計測地点における H/V スペクトル

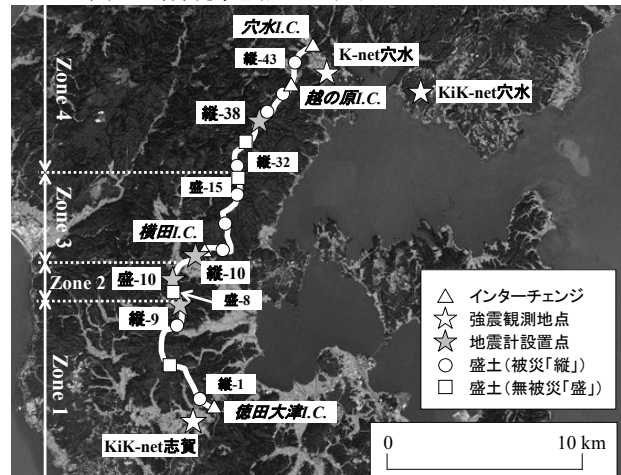


図-5 本研究で考慮した地震動特性に基づくゾーニング

表-1 に観測された主要な地震の一覧を示す。フーリエスペクトルの低周波側の形状に着目し、0.2Hz 以上で精度の確保できている地震観測記録をサイト増幅特性の評価に、後述する本震のアスペリティ領域の近傍で発生した地震観測記録をサイト位相特性の評価にそれぞれ使用した。ただし、表-1 に示すように、サイト位相特性の設定に用いた中小地震をサイト増幅特性の設定には用いていない。

(2) サイト増幅特性の評価

図-6 に能登有料道路の地震観測地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)におけるサイト増幅特性の推定結果を示す。同図には、比較対象として周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性¹⁹⁾についても示す。サイト増幅特性の評価では、表-1 で示した地震観測記録を利用し、既存強震観測点とのスペクトル比に基づいて設定²⁰⁾した。具体的には、縦-9 と KiK-net 志賀、盛-10、縦-10、縦-38 と K-NET 穴水で同時に得られた中小地震の観測記録を対象に、幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率を計算し、この比率を既存強震観測点におけるサイト増幅特性¹⁹⁾に掛け合わせることで設定した。

図-6 に示すように、能登有料道路でのサイト増幅特性は、周辺の K-NET 穴水および KiK-net 志賀のものの特徴が大きく異なっている。さらに、能登有料道路内でもサイト増幅特性の特徴が異なっている。例えば、縦-38 では 7Hz 付近、盛-10 では 3Hz 付近にピークを有しているが、縦-9 および縦-10 では明確なピーク周波数を有しておらず、全体的にフラットな形状となっている。すなわち、常時微動の H/V スペクトルの差異から推論された通り、能登有料道路内でも地震動は 1 つに代表させるのが極めて困難であることが確認できる。

(3) サイト位相特性の評価

本研究では、強震動計算手法として経験的サイト増幅・位相特性を考慮する方法を採用した。そこで、サイト位相特性の設定が必要になる。そこで、本震のフーリエ位相特性と近いフーリエ位相特性を有する中小地震を、能登有料道路の地震観測地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)の記録の中から抽出した。具体的には、縦-9 および縦-38 では、2009 年 4 月 16 日 11:30 に発生した石川県能登の地震(M3.4)(図-7: Aftershock1)を選定した。一方で、盛-10 および縦-10 では、観測期間が異なるため、2009 年 12 月 22 日 22:49 に発生した能登半島沖の地震(M2.7)(図-7: Aftershock2)を選定した。サイト位相特性として採用するこれらの地震は、地震規模は比較的小さいものの、図-7 に示すように 2007 年能登半島地震の本震の震源近傍で発生したものであり、さらに後述する震源断層モデル内のアスペリティ領域の比較的近くに震源を有する中小地震となっている。

図-8 および図-9 に、K-NET 穴水での地震観測記録を利用してサイト位相特性の評価に用いた地震の妥当性を検討した結果を示す。同図中の観測波とは、K-NET 穴水での本震の観測記録を元に、線形/非線形の重複反射理論を適用して、工学的基盤以浅の表層地盤の非線形の影響が含まれていない地表面相当の地震動を計算したものである。具体的には、深度 17m の位置(せん断波速度 V_s 290m/sec)に工学的基盤を設定し、工学的基盤以浅の地盤に一般的な動的変形特性²¹⁾を採用した非線形計算を行い、工学的基盤相当波を算定した。そして算定した工学的基盤相当波を入力した線形計算を行い、地表面相当波を算定したものを図-8 および図-9 の観測波とした。一方で、置換波とは、観測波のフーリエ振幅特性を用いて、フーリエ位相特性のみ Aftershock1 および Aftershock2 のフーリエ位相特性に

置き換えた合成速度波形である。これらの図より全 3 成分について観測波と置換波の波形が非常に類似していることがわかる。そして、位相特性が波形の形状に大きく影響することを考えると、波形が類似しているということは、位相特性も類似していると推論できる。このことから、選定した地震(Aftershock1 および Aftershock2)の位相特性は、本震の位相特性に比較的近いと推論できる。

表-1 観測された主要な中小地震の一覧

(a) 縦-9(Zone1)および縦-38(Zone4)

発生年月日	発生時間	発生地域	気象庁マグニチュード M_J
2009/04/16	11:30	石川県能登	M3.4
2009/05/12	19:40	新潟県上越	M4.6
2009/05/23	05:15	石川県西方沖	M3.7
2009/08/09	19:55	東海道南方沖	M6.8

(b) 盛-10(Zone2)および縦-10(Zone3)

発生年月日	発生時間	発生地域	気象庁マグニチュード M_J
2009/08/11	05:07	駿河湾	M6.5
2009/11/21	15:39	福島県会津	M4.5
2009/12/22	22:49	能登半島沖	M2.7
2010/02/07	19:33	石川県能登	M4.0

■ サイト増幅特性の設定にのみ利用した地震
 ■ サイト位相特性の設定にのみ利用した地震

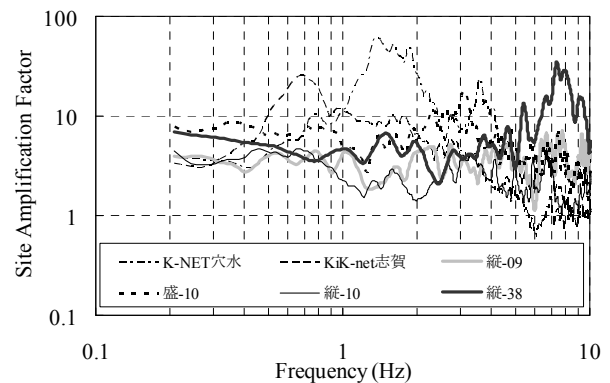


図-6 サイト増幅特性の比較 (地震基盤～地表)

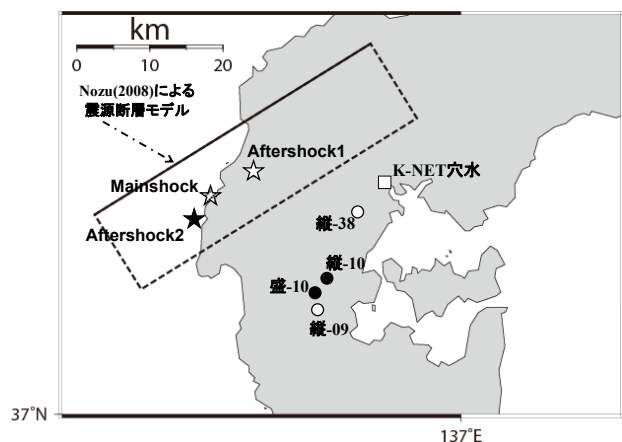


図-7 サイト位相特性として採用した地震イベント

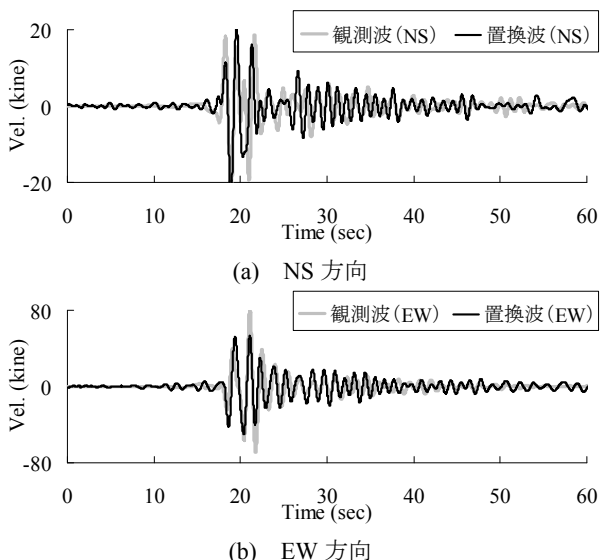


図-8 サイト位相特性の評価の妥当性確認(K-NET 穴水)
【2009年4月16日の地震：縦-09・縦-38】

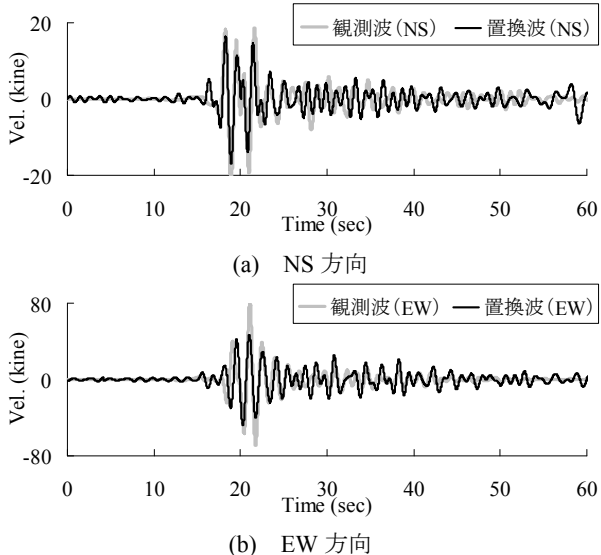


図-9 サイト位相特性の評価の妥当性確認(K-NET 穴水)
【2009年12月22日の地震：盛-10・縦-10】

5. 能登有料道路全域でのサイト特性の評価

(1) 概要

前章では、能登有料道路の地震観測地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)におけるサイト増幅・位相特性を評価した。しかし、各ゾーン内でのサイト特性は一律であると仮定しているものの、常時微動計測結果(図-4 参照)によれば、同じゾーン内においても H/V スペクトルの特性には若干の差異が見受けられることから、同じゾーン内でもサイト特性が完全に一律であるとは言い難い。一方で、線状構造物である能登有料道路に対して、主要な盛土地点の全てにおいて地震計を設置し、地震観測記録に基づいて、本震時の地震動を評価するのは現実的ではない。そこで本章では、図-4 に示した常時微動計測結果(H/V スペクトル)に基づき、地震観測地点でのサイト増幅特性(図-6 参照)を補正(微修正)し、能登有料道路での常時微動計測地点(図-3 参照)におけるサイト増幅・位相特性を評価することによって、能登有料道路全域にわたるサイト増幅・位相特性を評価した結果について述べる。

(2) サイト増幅特性の評価

微動計測地点(ただし、地震観測地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)を除く)でのサイト増幅特性を、常時微動 H/V スペクトルを用いた経験的補正方法²²⁾に基づいて評価した。図-10 に補正方法のイメージを示す。具体的には、以下に示す補正方法を採用した。

1. サイト増幅特性が既知である地震観測地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)でのサイト増幅特性(図-6 参照)を、微動計測地点での H/V スペクトルとピーク周波数が一致するように対数軸上で平行移動する²³⁾。ここに、サイト増幅特性のピーク周波数と H/V スペクトルのピーク周波数には相関があり、両者は概ね一致することが知られている²²⁾。
2. 地震観測地点と微動計測地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振幅の違いが、地震観測地点と微動計測地点のサイト増幅特性の1次のピーク振幅の違いを反映している可能性が高いことから、上記1.で平行移動した微動計測地点のサイト増幅特性の振幅に対して、常時微動 H/V スペクトルのピーク振幅の比率(常時微動計測地点/地震観測地点)を乗じる。
3. 上記2.の処理を実施すると、低周波レベルが地震観測地点と微動計測地点で大きく異なってしまうことから、低周波レベルに対しては、常時微動 H/V スペクトルのピーク振幅の比率ではなく、常時微動 H/V スペクトルそのものの比率(微動計測地点/地震観測地点)を乗じる。ここに、2.と3.のインターフェイス周波数は、ピーク周波数よりも高周波の領域において2.による値が3.による値をはじめて上回る周波数とする。
4. 上記1.~3.の工程を、各ゾーン(Zone1, Zone2, Zone3, Zone4)の基準地震観測点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)に対応する常時微動計測地点ごとに実施する。

(3) サイト位相特性の評価

常時微動計測地点におけるサイト位相特性を基準地震観測点におけるサイト位相特性を補正することで評価した。具体的には、以下に示す補正方法を採用した。

5. 震源距離や震源からの方位が同様な場合、両地点のサイト増幅特性が類似していれば、両地点のサイト位相特性も類似している可能性が高い²⁴⁾と考え、各ゾーン(Zone1, Zone2, Zone3, Zone4)の基準地震観測点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)におけるサイト位相特性(図-7 参照)を、各ゾーンに対応する微動計測地点でのサイト位相特性の補正対象として選定した。
6. 各微動計測地点において選定されたサイト位相特性を、上記1.のサイト増幅特性の補正における周波数軸上での平行移動の大きさに応じて、サイト位相地震波の時間軸を伸縮補正²⁵⁾する。具体的には、周波数軸においてサイト増幅特性のピーク $f_{initial}$ を H/V スペクトルのピーク $f_{corrected}$ に一致させた時、サイト位相特性の時間軸は0を起点として $f_{initial} / f_{corrected}$ 倍する(図-10 参照)。
7. 基準地震観測点と微動計測地点での盛土横断方向・道路延長方向の差異に応じて座標変換補正²⁵⁾を行い、微動計測地点でのサイト位相特性を評価する。

よって、前章で評価した地震観測地点のサイト増幅・位相特性に対して、本章で評価した常時微動計測地点のサイト増幅・位相特性を加味することによって、能登有料道路全域にわたる被災盛土ならびに無被災盛土の各地点でのサイト増幅・位相特性を評価することができた。

6. 地震動推定手法

ここでは、経験的サイト増幅・位相特性を用いた強震動評価手法^{12),13)}において、野津による特性化震源モデル^{15),26)}を採用し、能登有料道路全域にわたる、すなわち能登有料道路での地震観測地点ならびに常時微動計測地点における地震動推定手法を示す。

(1) 計算方法

本研究では、断層モデルに基づく手法として、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を適用した。この方法では、まず、式[1]により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad [1]$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は中小地震の震源特性²⁷⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁷⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-6参照)で実数、 $O(f)$ は対象地点での中小地震(Aftershock1もしくはAftershock2; 図-7参照)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のパーセンウィンドウを適用したものである(添え字 p はパーセンウィンドウを表す)。

この式からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる。式[1]をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ²⁸⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、パーセン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¹³⁾。

なお、地震動推定位置(緯度・経度)としては、盛土法尻部で実施した地震観測位置もしくは常時微動計測位置をそれぞれ採用した。

(2) 特性化震源モデル

本研究では、2007年能登半島地震の波形インバージョン結果に基づく特性化震源モデルを使用した。具体的には、図-11に示す波形インバージョンによる最終すべり量分布において、特にすべり量の大きい領域に矩形のアスペリティを3つ配した特性化震源モデルである。なお、図-1、図-2、図-7において断層モデルとして示した矩形領域は、図-11に示した断層面を地表面に垂直に投影したものである。

表-2に特性化震源モデルの断層パラメータの一覧を示す。具体的には、野津による特性化震源モデルパラメータ^{15),26)}を採用しており、この断層モデルは気象庁による気象庁の震源(破壊開始点位置・深さ)を含むように断層面が設定されている。 Q 値については、佐藤・巽による東日本の内陸部に対する推定値²⁹⁾を利用している。

特性化震源モデルを用いて、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より、能登有料道路周辺の複数のK-NET観測点での本震時の速度波形を計算した結果を図-12に示す。図-12に示すように、能登有料道路の北端周辺のK-NET穴水、南端周辺のK-NET七尾を含むK-NETにおける観測記録を一定の精度で再現できることを確認している²⁶⁾。このとき、K-NET穴水およびK-NET七尾については、多重非線形効果を考慮するための非線形パラメータ³⁰⁾を用いて計算を行っている。しかしながら、後述する能登有料道路(地震観測地点ならびに常時微動計測地点)における地震動の推定では、多重非線形効果の表

われやすい堆積盆地内に位置する地点とは考えられないため、多重非線形効果の考慮は行っていない。

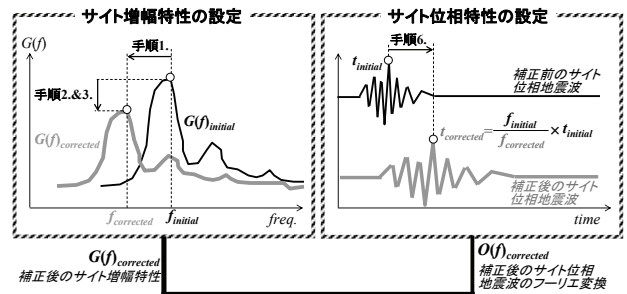


図-10 H/Vスペクトルを用いた補正方法のイメージ

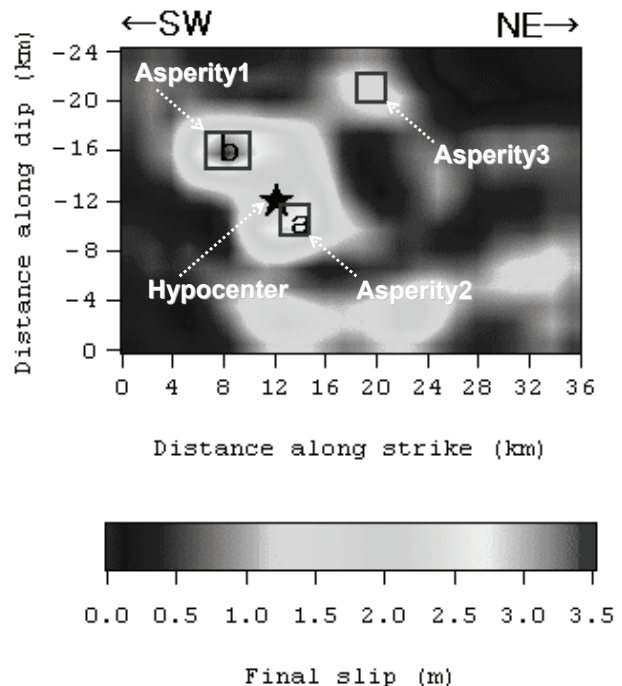


図-11 特性化震源モデル^{15),26)}

表-2 特性化震源モデルの断層パラメータ^{15),26)}

断層パラメータ	Asperity1	Asperity2	Asperity3
断層長 (km)	36		
断層幅 (km)	24		
走向 (deg.)	58		
傾斜 (deg.)	66		
地震モーメント(Nm)	0.55×10^{19}	0.40×10^{19}	0.30×10^{19}
アスペリティ長 (km)	4.0	2.5	2.5
アスペリティ幅 (km)	3.0	2.5	2.5
ライズタイム (sec)	0.22	0.18	0.18
分割数	5×5×5	5×5×5	5×5×5
破壊開始点位置/深さ	N37.220, E136.685 / 11km		
破壊伝播様式	破壊開始点より放射状		
短周期レベル (Nm/s ²)	1.94×10^{19}		
Q 値	$Q = 166 f^{0.76}$		
密度 (kg/m ³)	2.7×10^3		
せん断波速度 (km/sec)	3.5		
破壊伝播速度 (km/sec)	3.4		

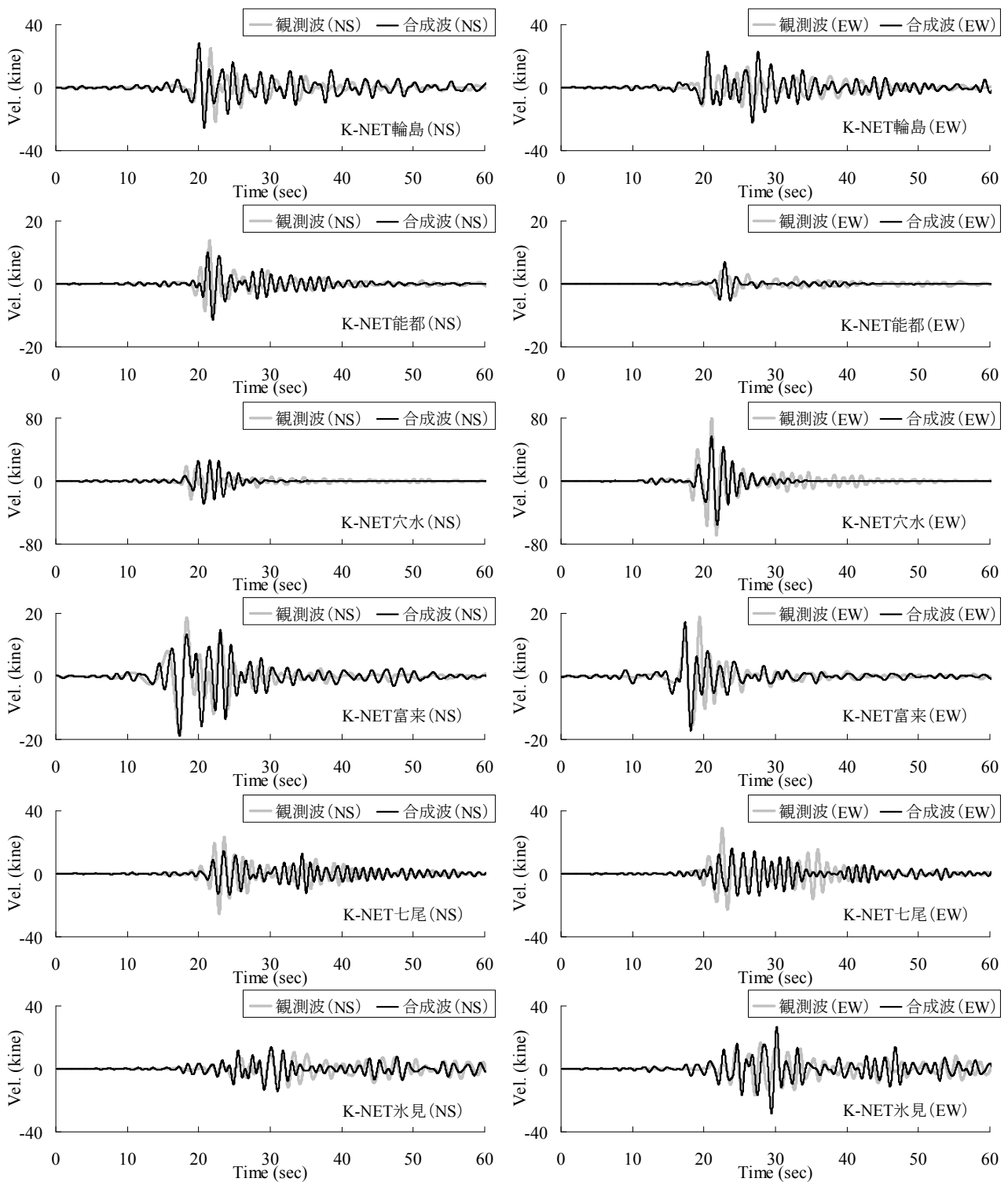


図-12 特性化震源モデルによる K-NET 観測点での本震時の速度波形(0.2-1.0Hz)の再現状況²⁶⁾

7. 推定結果

図-13 および図-14 に能登有料道路全域(徳田大津 I.C.～穴水 I.C.の主要盛土地点)における推定地震動の加速度波形を盛土横断方向および道路延長方向について示す。当該波形は、盛土法尻位置(地震観測地点もしくは常時微動計測地点)における地表面相当波である。これらの図より、それぞれの同じゾーン内においてもサイト特性の差異や震源断層からの距離などに起因して地震波形の特性に差異が生じていることがわかる。

図-15 に加速度応答スペクトルについて比較したものを示す。比較対象の地震動としては、各ゾーンでの地震観測地点(縦-9、盛-10、縦-10、縦-38)における盛土横断方向の推定地震動、道路橋示方書における I 種地盤のレベル 1 およびレベル 2 地震動(地域別補正係数 1.0)³¹⁾を採用した。周期 0.1 秒付近において道示によるレベル 2 地震動を若干上回るケース(縦-9 および縦-38)があるものの、対象周期全体では、基準スペクトルを大きく下回っている。一方で、道示によるレベル 1 地震動のスペクトルに対しては、推定波形によっては概ね周期 0.1～2.0 秒の領域において超過することがある。

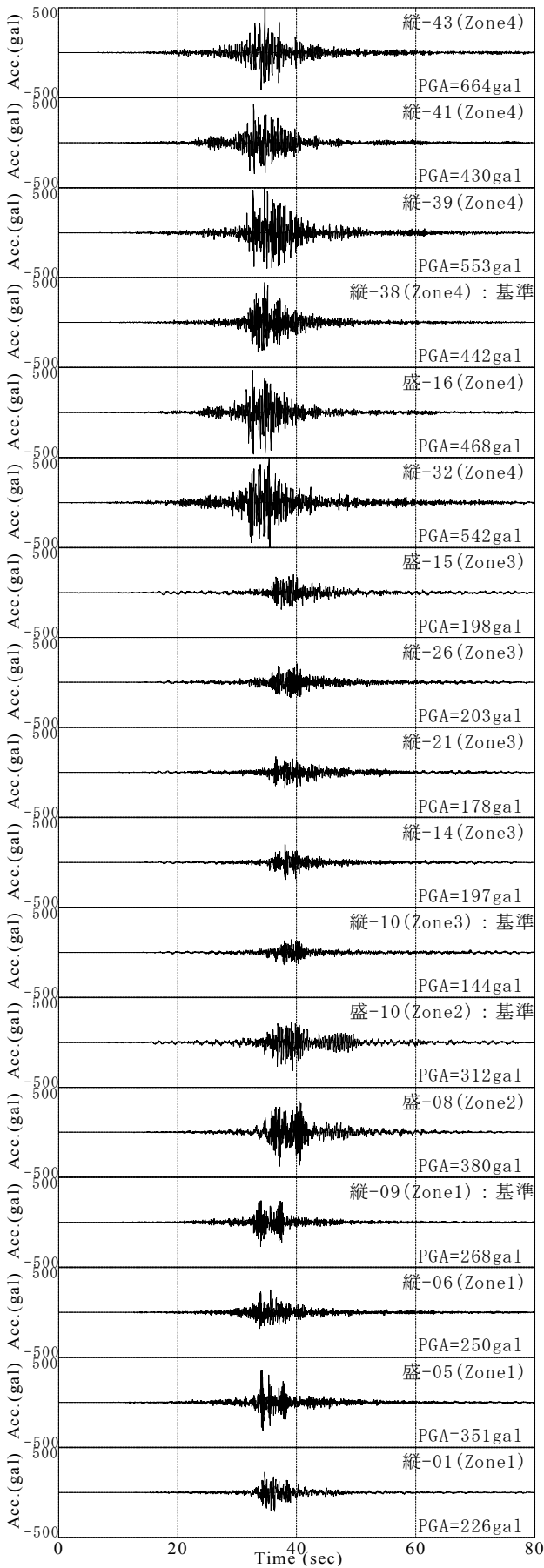


図-13 能登有料道路全域にわたる地震動の評価(1)
【盛土横断方向】

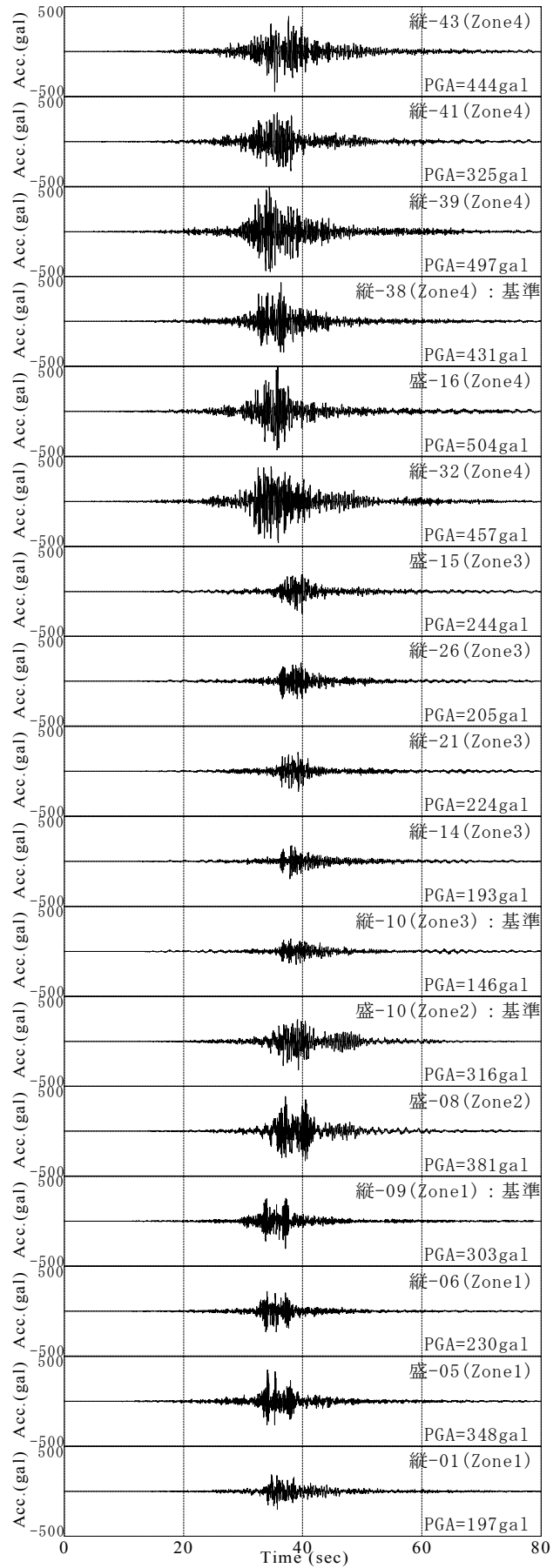


図-14 能登有料道路全域にわたる地震動の評価(2)
【道路延長方向】

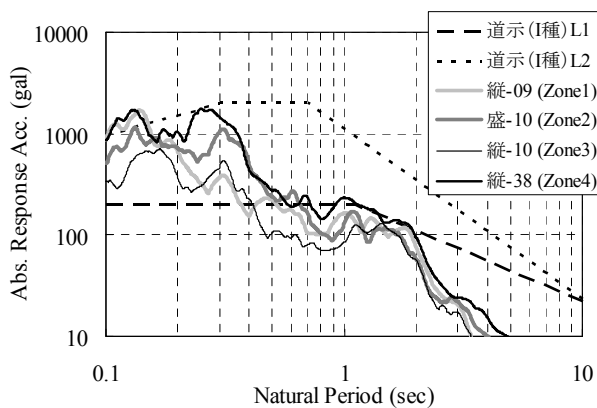


図-15 加速度応答スペクトルの比較（盛土横断方向）

8. まとめ

本研究では、常時微動計測と地震観測を組み合わせ、複数の地点の個々の地震波形を推定する方法を提案し、2007年能登半島地震で被災した能登有料道路に適用した。今後は、得られた推定地震動と被災の有無との関係などについて分析を進めていく予定である。

謝辞

石川県道路公社には、能登有料道路での地震観測ならびに常時微動計測の実施にご協力いただきました。(独)防災科学技術研究所 K-NET および KiK-net の地震観測記録を使用させていただきました。(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。能登有料道路での地震観測では、大角恒雄教授（徳島大学）にご協力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 今村孝志: 盛土の耐震診断に基づく高速道路の通行機能の耐震性評価, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.50-58, 2009.
- 2) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.529-541, 2009.
- 3) たとえば, (社)地盤工学会: 2007年能登半島地震道路災害データ集, 74p., 2007.
- 4) たとえば, 清田直紀, 中村二三雄, 大角恒雄, 辻宏之, 渡辺裕之, 横田耕治: 最新鋭飛行船を活用した「能登半島地震」被害調査報告, 平成19年度建設コンサルタント業務・研究発表会講演概要集, No.2-2, 2007.
- 5) 浅岡顕, 中野正樹, 野田利弘, 酒井崇之, 黒田進司, 稲垣太浩: 傾斜および水平地盤上道路盛土の地震時変形・破壊形状に及ぼす入力地震波の影響, 第44回地盤工学研究発表会講演概要集, No.763, pp.1525-1526, 2009.
- 6) 池村大伸, 西木佑輔, 下南貴史, 松本樹典, 河井勇人: 2007年能登半島地震における能登有料道路盛土挙動の解析, 第44回地盤工学研究発表会講演概要集, No.767, pp.1533-1534, 2009.
- 7) 荒井克彦, 王宗建: 地下水位を考慮した盛土斜面の地震時安定解析, 降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.327-332, 2009.
- 8) 為重誠, 川村國夫, 駒田秀一, 宮村雅之, 埴原強, 室井辰盛: 能登半島地震による能登有料道路の被災と復旧-盛土の被害と対策工事について-, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.4, pp.289-305, 2009.

- 9) 橋本隆雄: 2007年能登半島地震による能登有料道路の大規模盛土斜面崩壊原因の分析, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, pp.850-863, 2009.
- 10) 下南貴史, 西木佑輔, 中野裕也, 松本樹典, 小林俊一, 河井勇人: 盛土構造物の耐震安定性評価に関する一考察-その1: 安定解析と動的解析による被災形態に基づく盛土内地下水位の推定-, 第45回地盤工学研究発表会講演概要集, No.810, pp.1619-1620, 2010.
- 11) 中野正樹, 野田利弘, 浅岡顕, 酒井崇之, 津本翔太: 地震による盛土遅れ破壊の発生メカニズムに関する骨格構造概念に基づく解釈, 第45回地盤工学研究発表会講演概要集, No.752, pp.1503-1504, 2010.
- 12) 吉和天明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.512, pp.97-104, 1998.
- 13) 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.
- 14) (社)土木学会, (社)地盤工学会: 2007年能登半島地震被害調査報告書, 301p., 2007.
- 15) Nozu, A.: Rupture process of the 2007 Noto Hanto earthquake: waveform inversion using empirical Green's function, *Earth Planets and Space*, Vol.60, pp.1029-1034, 2008.
- 16) Iwata, T., Asano, K., Kuriyama, M. and Iwaki, A.: Nonlinear site response characteristics of K-NET ISK005 station and relation to the earthquake disaster during the 2007 Noto-Hanto Earthquake, Central Japan, *Proc. of 14th WCEE*, No.01-1026, 2008.
- 17) 後藤浩之, 澤田純男, 小林望, 山田浩二: K-NET 穴水観測点周辺地盤の地震動応答特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, pp.1-5, 2009.
- 18) 福島康宏, 末富岩雄, 磯山龍二: 2007年能登半島地震における地震動のサイト特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.168-177, 2007.
- 19) 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, 日本地震工学学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 20) (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.
- 21) 今津将紀, 福武毅芳: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.509-512, 1986.
- 22) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 23) 長尾毅, 平松和也, 平井俊之, 野津厚: 高松港における被害地震の震度再現に関する研究, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.22, p.505-510, 2006.
- 24) 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, C4-11, pp.915-920, 1998.
- 25) 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箕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.
- 26) 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よる2007年能登半島地震の強震動シミュレーション, 第43回地盤工学研究発表会講演概要集, No.958, pp.1915-1916, 2008.
- 27) 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.
- 28) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 29) 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, 第566号, pp.15-24, 2002.
- 30) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, 第2輯, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 31) (社)日本道路協会: 道路橋示方書, V 耐震設計編, 丸善, pp.10-29, 2002.