

経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 線状構造物における地震動の推定とその応用 —2007年能登半島地震での道路被災を例に—

秦 吉弥¹・一井 康二²・村田 晶³・野津 厚⁴・宮島 昌克⁵

¹正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)
E-mail: hata-ys@n-koei.jp

²正会員 広島大学大学院 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: murata@t.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: nozu@pari.go.jp

⁵正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

地震被災事例の分析では、当該地点の地震動を推定することが非常に重要である。そこで、線状構造物を対象に、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した地震動の推定手法を提案し、2007年能登半島地震において被災した能登有料道路に適用した。具体的には、常時微動計測結果に基づき能登有料道路を4つのゾーンに分割して各ゾーンの地震動を推定した。さらに、個別地点の常時微動計測結果を利用することで、線状構造物の個々の地点での地震動を推定した。最後に、推定地震動の応用例としてフラジリティカーブの検討例を示した。

Key Words : earthquake motion, seismic observation, site effects, microtremor, fragility curve

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(写真-1参照)、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⁾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¹⁰⁾¹¹⁾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。さらに、推定地震動に対するフラジリティカーブの検討を行い、被災分析への応用イメージを示した。



写真-1 能登有料道路における盛土の被災⁴⁾ (縦-38での例)

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¹²⁾をNozuによる震源断層モデル¹³⁾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, 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^{14,15)}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¹⁶⁾. 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.

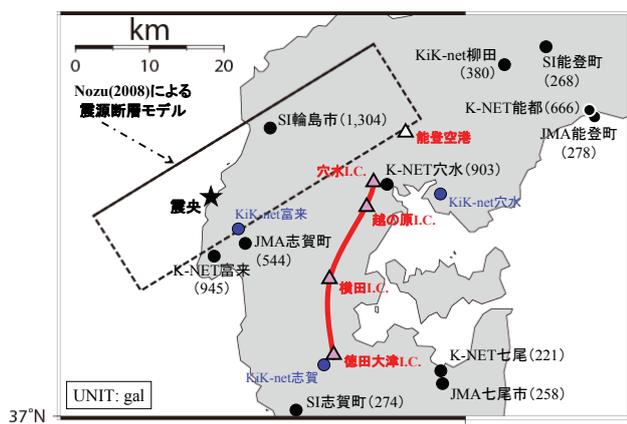


図-1 能登有料道路周辺における最大加速度の分布^{12,13)}

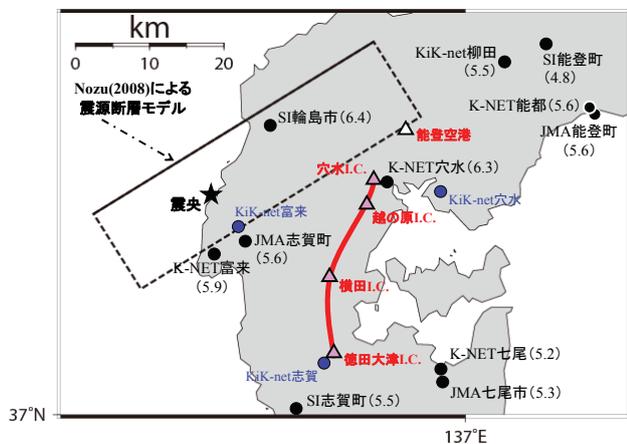


図-2 能登有料道路周辺における計測震度の分布^{12,13)}

3. サイト特性の評価

(1) 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. 写真-2に縦-21での法尻位置における常時微動計測状況を示す. 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¹¹⁾などを考慮して0.2~10Hzとした.

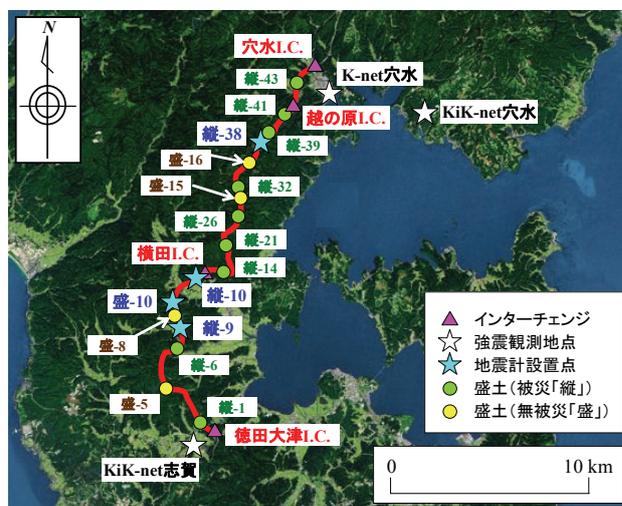


図-3 盛土崩落地点とその周辺における常時微動の計測位置



写真-2 盛土法尻での常時微動計測状況(縦-21での例)

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スペクトルによる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。

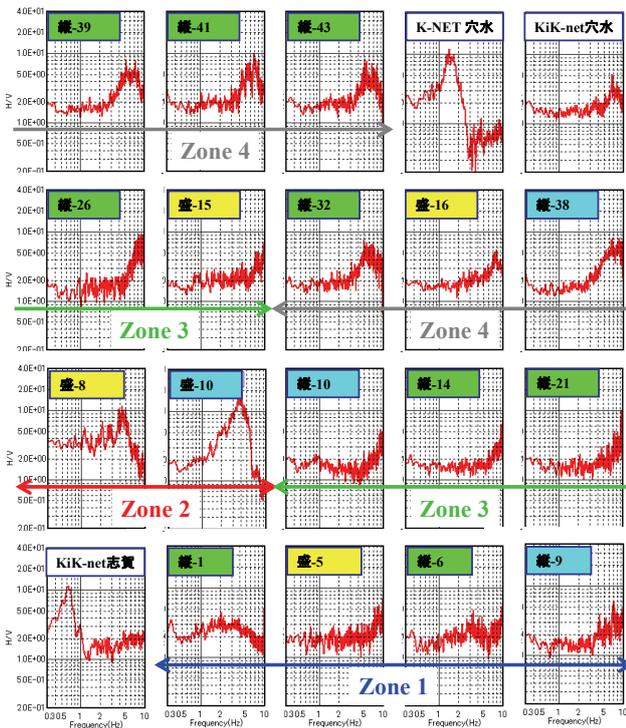


図4 各計測地点におけるH/Vスペクトル

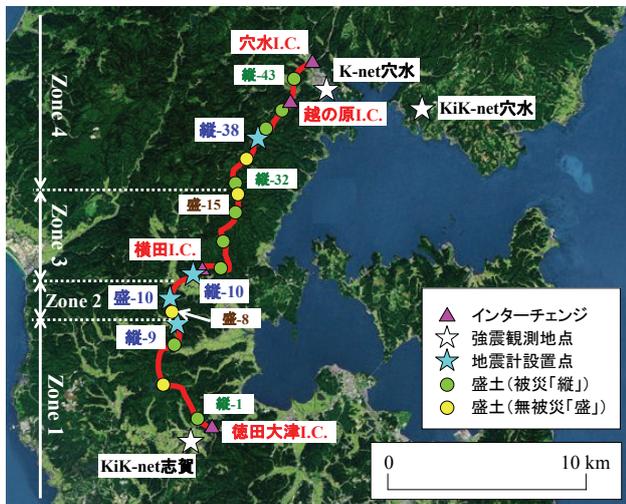


図5 本研究で考慮した地震動特性に基づくゾーニング

(2) 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(写真-3参照)。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。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



写真-3 地震観測状況(盛-10での例)

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利用した地震
- サイト位相特性の設定に利用した地震

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。

(3) 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¹⁷⁾についても示す。水平方向の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¹⁸⁾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¹⁷⁾に掛け合わせることで設定した。また、鉛直方向のサイト増幅特性は、中小地震観測記録によるフーリエスペクトルの比率(鉛直/水平)を水平方向のサイト増幅特性(図-6(a))に掛け合わせることで設定した。鉛直方向のサイト増幅特性をこのように設定した場合、推定地震動のフーリエ振幅比(鉛直/水平)は、中小地震観測記録におけるそれを反映したものとなる。このことの妥当性を確認するため、図-7では、2009年8月9日の東

海道南方沖の地震(Zone1およびZone4に対応:表-1参照)および2009年8月11日の駿河湾の地震(Zone2およびZone3に対応:表-1参照)によるK-NET穴水およびK-NET七尾でのフーリエ振幅比(鉛直/水平)と、2007年能登半島地震の本震のフーリエ振幅比(鉛直/水平)との比較を行っている。図-7より、本震と中小地震のフーリエ振幅比(鉛直/水平)は概ね一致しているため、先に述べた方法で鉛直方向のサイト増幅特性を評価することは妥当であると考えられる。なお、ここで用いたK-NET穴水の本震記録のうち水平動成分は、観測記録そのものではなく、表層地盤の非線形の影響を除去したものである。その具体的方法については後述する。

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付近および盛-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。

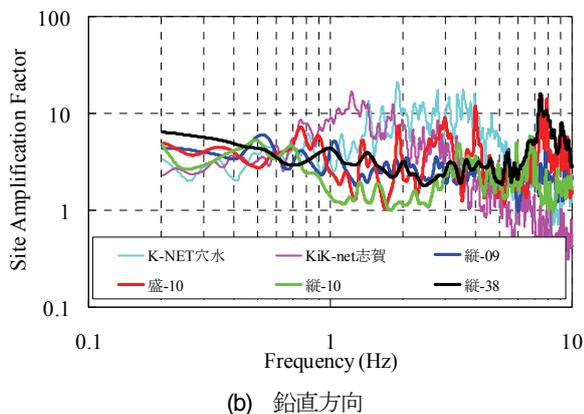
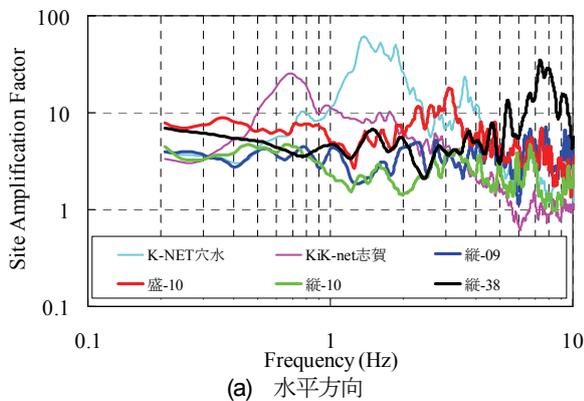


図-6 サイト増幅特性の比較 (地震基盤～地表)

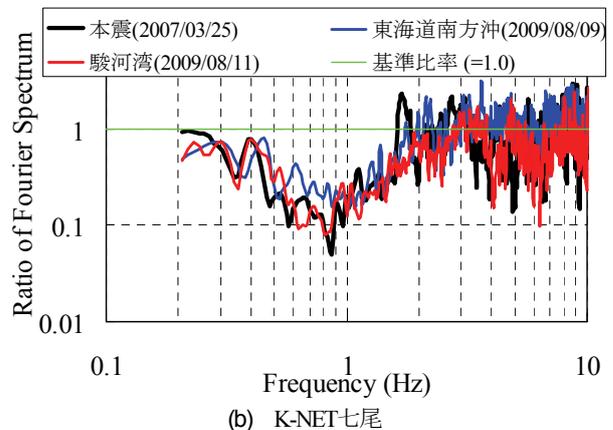
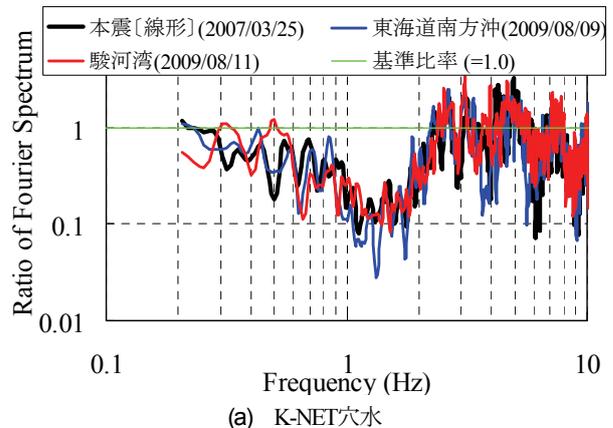


図-7 本震と中小地震によるスペクトルの比率 (上下/水平)

(4) 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-8 : 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-8 : 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-8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-9および図-10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¹⁹⁾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-9および図-10の観測波とした。ただし鉛直成分については非線形の影響を取り除く作業は行っていない。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

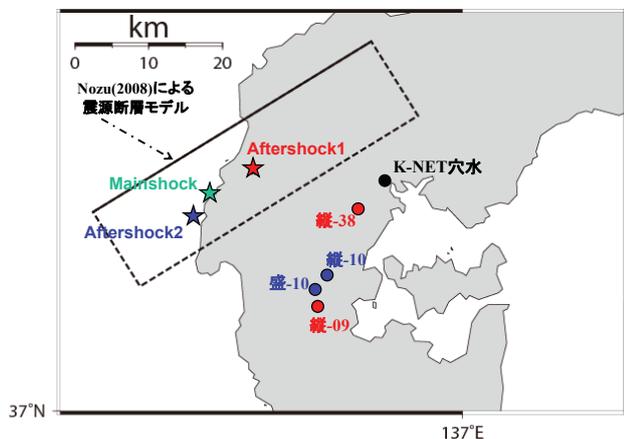


図-8 サイト位相特性として採用した地震イベント

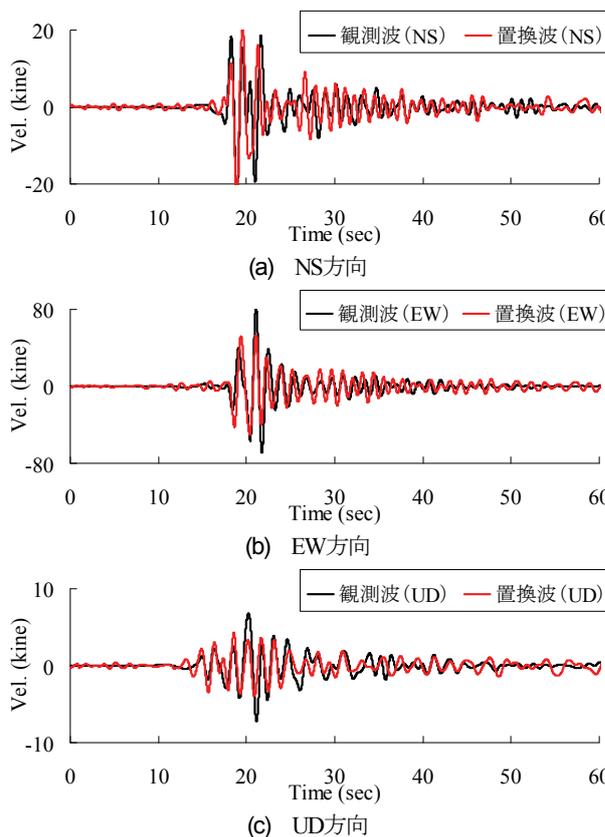


図-9 サイト位相特性の評価の妥当性確認(K-NET穴水) 【2009年4月16日の地震：縦-09・縦-38】

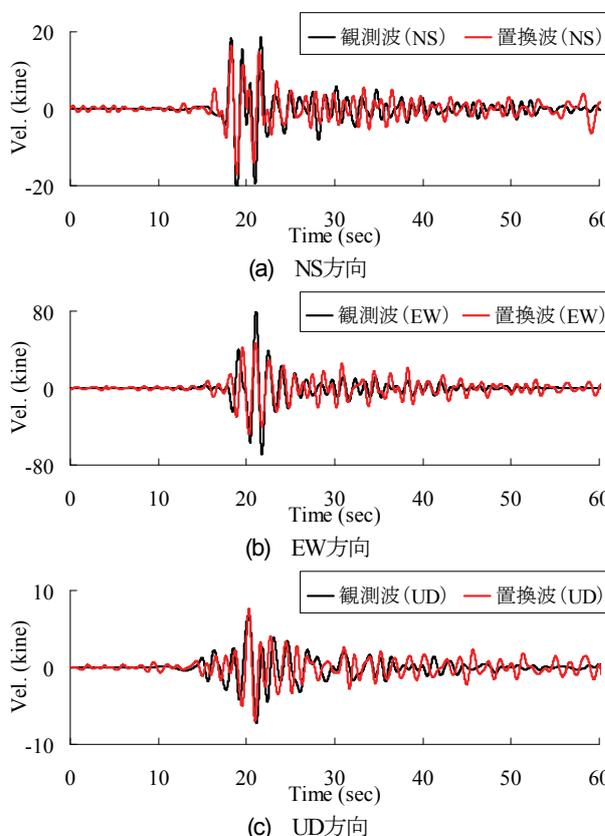


図-10 サイト位相特性の評価の妥当性確認(K-NET穴水) 【2009年12月22日の地震：盛-10・縦-10】

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。

4. 地震観測地点における地震動の推定

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^{10,11)}の断層モデルにおいて、野津による特性化震源モデル^{13,20)}を採用し、能登有料道路での地震観測実施地点における地震動を推定した結果を示す。

すなわち、本章では、上述したH/Vスペクトルの形状やピーク周波数に関するゾーニングを実施した結果に基づいて、各ゾーン内でのサイト特性が一樣であると仮定した場合の推定地震動を各ゾーンについて示す。

(1) 計算手法

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。

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

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²¹⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²¹⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-6参照)で実数、 $\alpha(f)$ は対象地点での中小地震(Aftershock1もしくはAftershock2；図-8参照)による記録のフーリエ変換で複素数、 $|\alpha(f)_p|$ 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²²⁾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¹¹⁾。

(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-8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。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すると、図-12に示すように、観測結果を一定の精度で再現できることを確認している²⁰⁾。

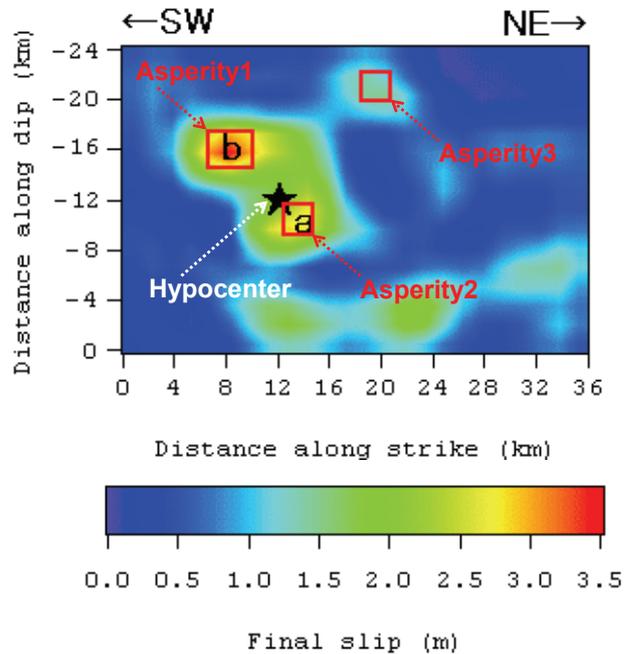


図-11 特性化震源モデル^{13,20)}

表-2 特性化震源モデルの断層パラメータ^{13,20)}

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		

なお、これらの計算では多重非線形効果を考慮した計算を行っている。しかし、後述する能登有料道路における地震動の推定では、多重非線形効果のあらわれやすい

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。

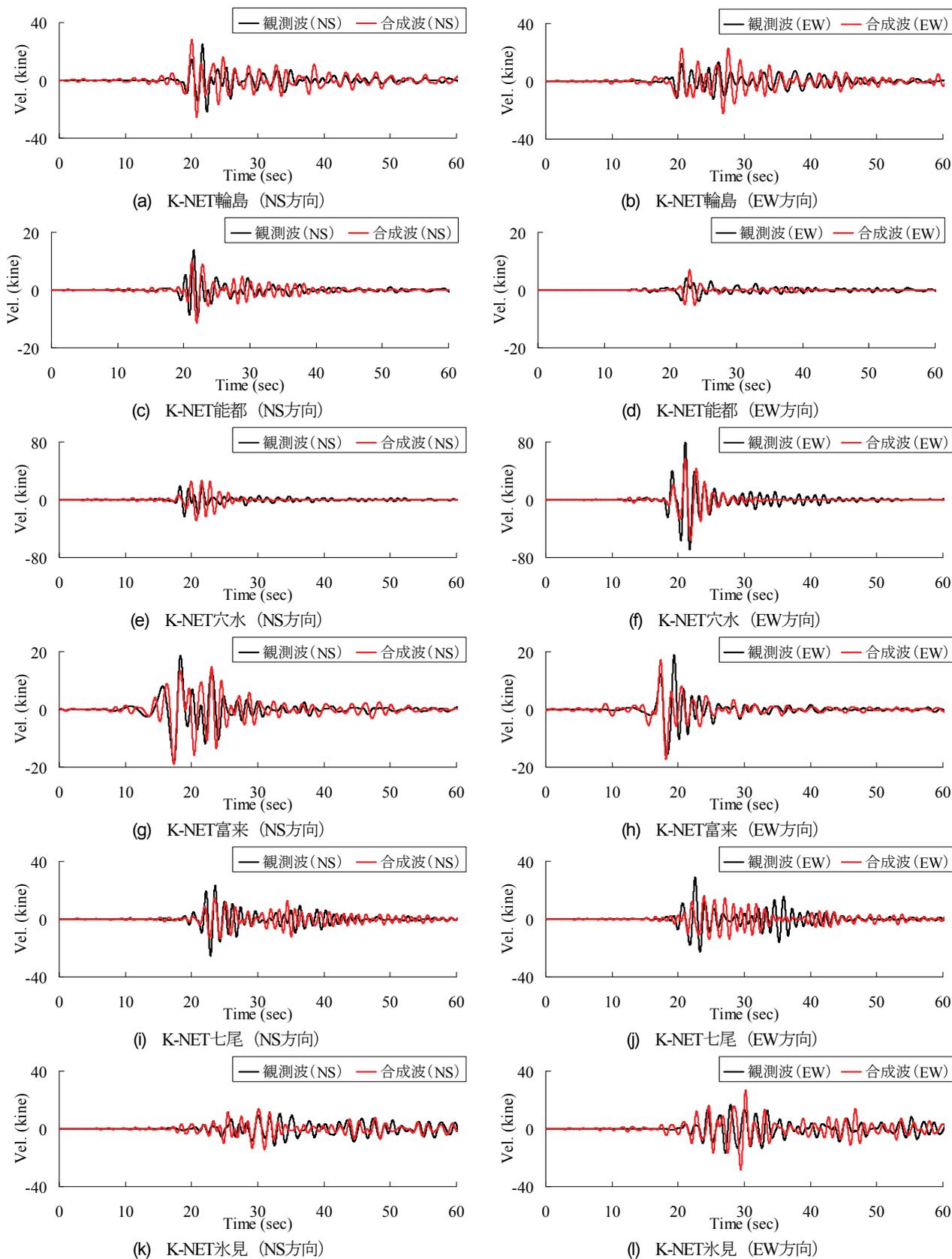


図-12 特性化震源モデルによるK-NET観測点での本震時の速度波形(0.2-1.0Hz)の再現状況²⁰⁾

(3) 推定地震動

a) 時刻歴加速度波形

図-13, 図-14, 図-15, 図-16に能登有料道路における推定地震動の加速度波形を示す. 同図のように推定地震動は, 盛土断面方向, 道路延長方向, 鉛直方向の3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. これらの図からわかるように, 能登有料道路内でも各ゾーンごとに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加速度振幅値や波形形状などの地震動特性が大きく異なる傾向にある. 特に, 縦-09(Zone1), 盛-10(Zone2), 縦-10(Zone3)では, 比較的位置関係が近いにも関わらず, その違いがより顕著に表われている.

表-3には, 推定地震動の特性値の一覧を示す. 周辺の強震観測点での記録(図-1および図-2参照)と比較すると, 推定地震動の大きさは, 概ね同等もしくは若干小さくなっていることがわかる.

b) 応答スペクトル

図-17, 図-18, 図-19に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, 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)²⁹⁾を採用した. どの地震動においても, 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, 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.

c) 被災実績との関係

図-20は, 徳田大津I.C.~穴水I.C.の地震観測実施地点に対する推定地震動の最大加速度および計測震度をそれぞれプロットしたものである. さらに同図には, SI志賀町およびK-NET穴水の本震記録を単に線形補間した結果についても掲載している. 図-20より, 線形補間結果と推定地震動に比較的大きな差異が見受けられるゾーンもあり, 特にZone3では両者の差異が顕著に表われている. また, 線形補間結果では北端の穴水I.C.に向かって様な増加傾向を示すのに対し, 推定地震動では同様の傾向を示していない. これは, サイト特性によるゾーニングの必要性を示唆しているものと考えられる.

表-3 能登有料道路における推定地震動の特性値

能登有料道路	最大加速度(gal) (3成分合成)	計測震度
縦-09 (Zone1)	321	4.9
盛-10 (Zone2)	491	5.3
縦-10 (Zone3)	186	4.6
縦-38 (Zone4)	515	5.3

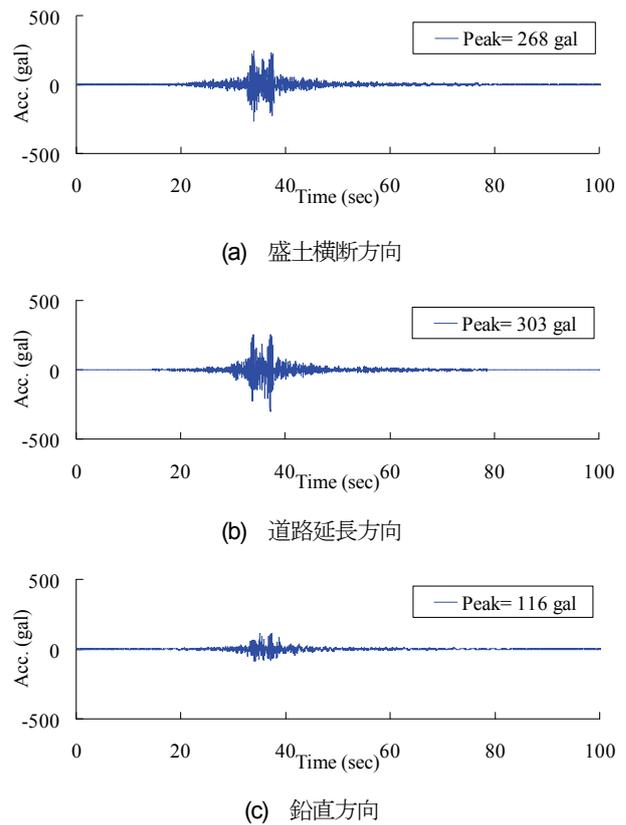


図-13 能登有料道路における推定地震動(1)
【縦-09 : Zone1】

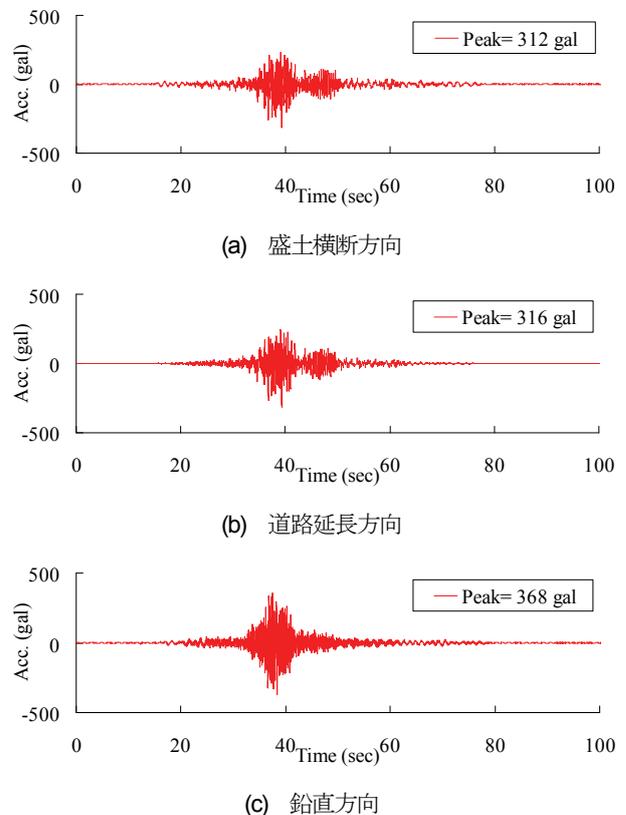


図-14 能登有料道路における推定地震動(2)
【盛-10 : Zone2】

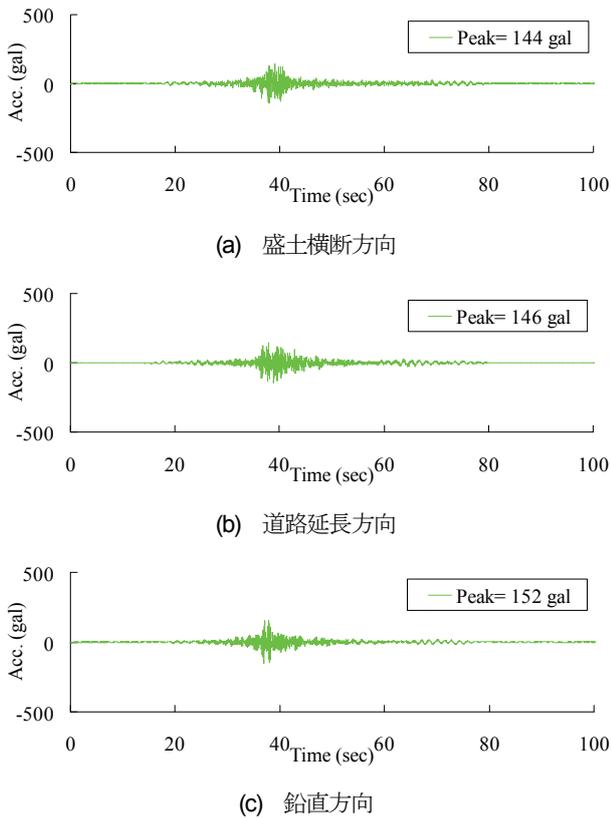


図-15 能登有料道路における推定地震動(3)
【縦-10 : Zone3】

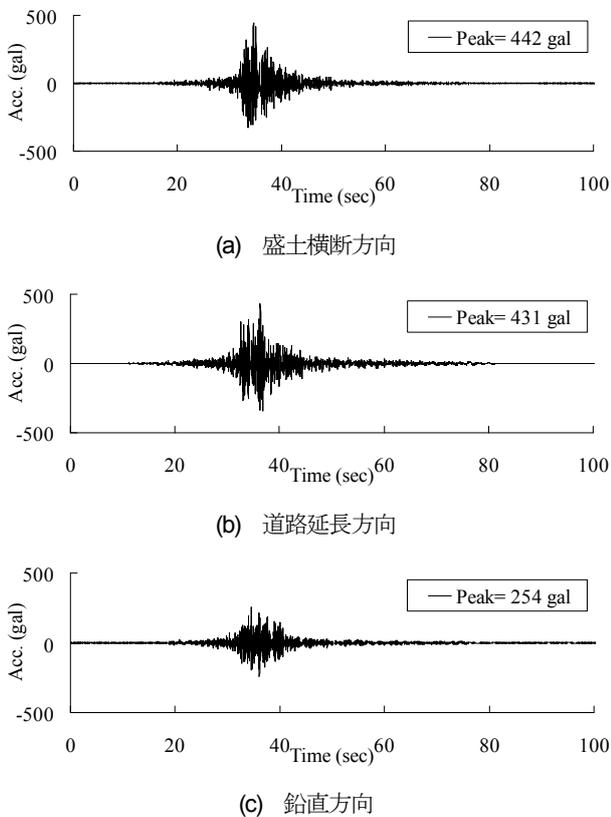


図-16 能登有料道路における推定地震動(4)
【縦-38 : Zone4】

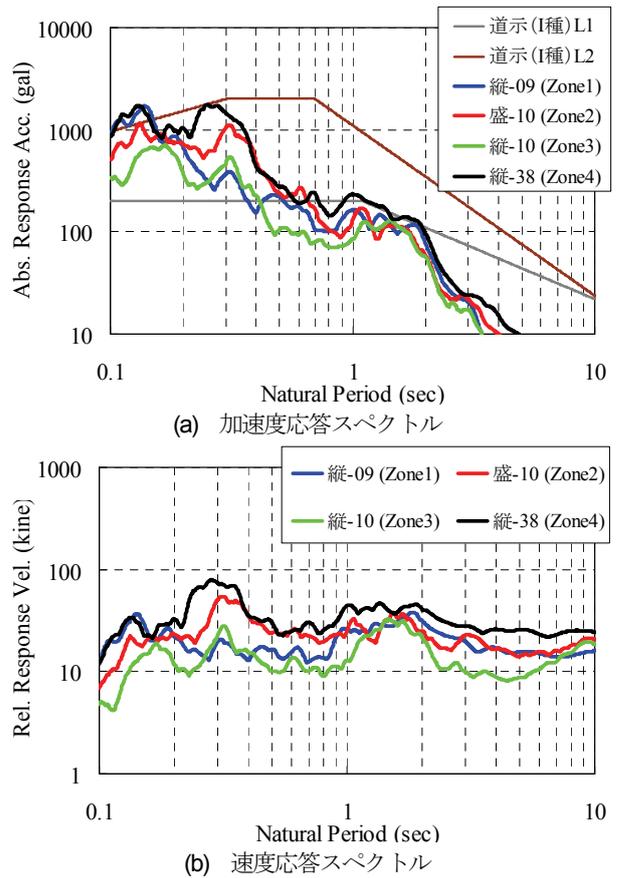


図-17 応答スペクトルの比較(1) (盛土横断方向)

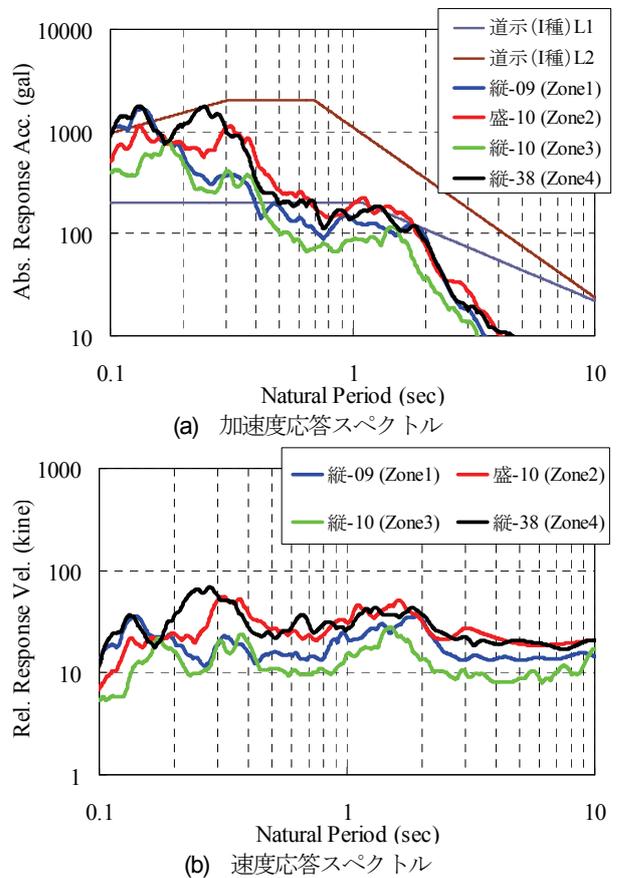


図-18 応答スペクトルの比較(2) (道路延長方向)

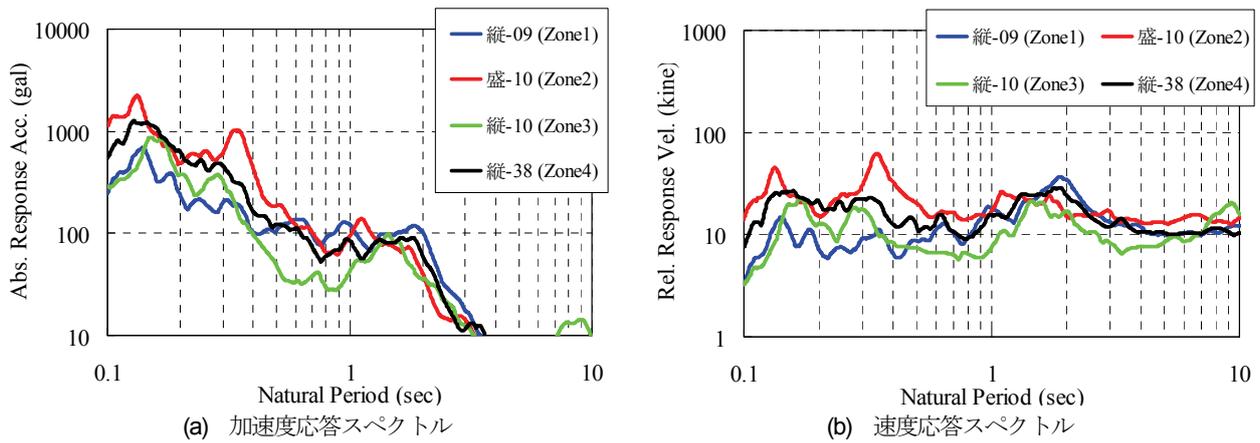
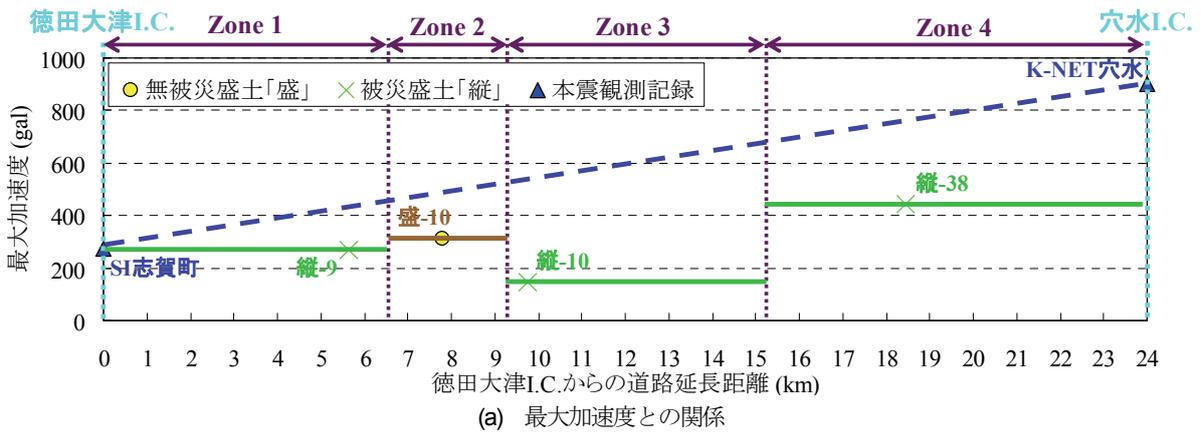
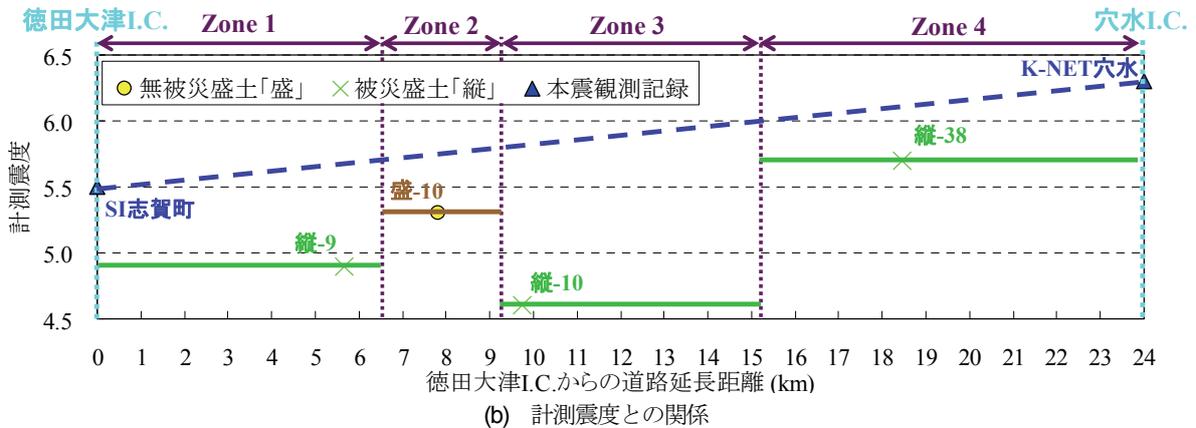


図-19 応答スペクトルの比較(3) (鉛直方向)



(a) 最大加速度との関係



(b) 計測震度との関係

図-20 道路盛土の被災実績と推定地震動の関係(1)

5. 被災および無被災地点での地震動の評価

(1) 概要

前章では、能登有料道路の地震観測実施地点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)における地震動を推定した。しかし、各ゾーン内でのサイト特性は一樣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HV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樣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、サイト増幅・位相特性を補正(微修正)し、能登有料道路での常時微動計測地点(図-3参照)における水平動を評価することによって、能登有料道路全域にわたる地震動を推定した結果について述べる。

(2) 評価方法

地震動の評価は、サイト増幅特性の評価、サイト位相特性の評価、強震波形計算の実施の3つのプロセスから

成る。まず、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)での水平方向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²⁴⁾に基づいて評価した。図-21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(a)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²⁵⁾。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²⁴⁾。
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(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)に対応する微動計測地点ごとに実施する。

次に、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²⁶⁾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-8参照)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いて周波数軸上における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²⁷⁾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-21参照)。

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²⁷⁾を行い、微動計測地点でのサイト位相特性を評価する。

最後に、上記で評価した微動計測地点のサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算を実施し、本震時における微動計測地点での地震動を評価した。地震動推定位置としては、盛土法尻部で実施した微動計測位置とした。用いた震源モデルと計算方法は、基準地震観測点(縦-9, 盛-10, 縦-10, 縦-38)の場合(4章)と同様である。

(3) 評価結果

図-22および図-23に能登有料道路全域(徳田大津IC.~穴水IC.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増幅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-24, 図-25, 図-26, 図-27には、各ゾーンにおけるそれぞれの地点の加速度応答スペクトルを盛土横断方向および道路延長方向について示す。各ゾーンともに、盛土断面方向と道路延長方向のスペクトル特性に大きな差異は確認できない。各ゾーン内における個々の地点の応答スペクトルを比較すると、Zone1, Zone3, Zone4では図-17, 図-18, 図-19のようなゾーン間の差異ほどの顕著な差異は確認できない。しかしながらZone2では、盛-08と盛-10におけるH/Vスペクトルの差異が比較的大きい(図-4参照)ことなどに起因して、地震動の応答スペクトルにも比較的大きな差異が生じている。

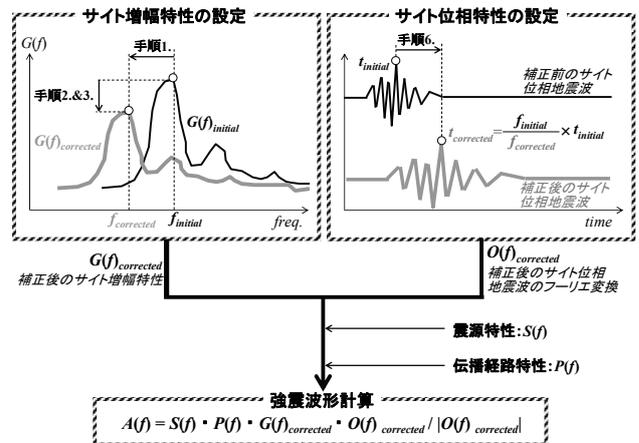


図-21 常時微動H/Vスペクトルを用いた補正方法のイメージ

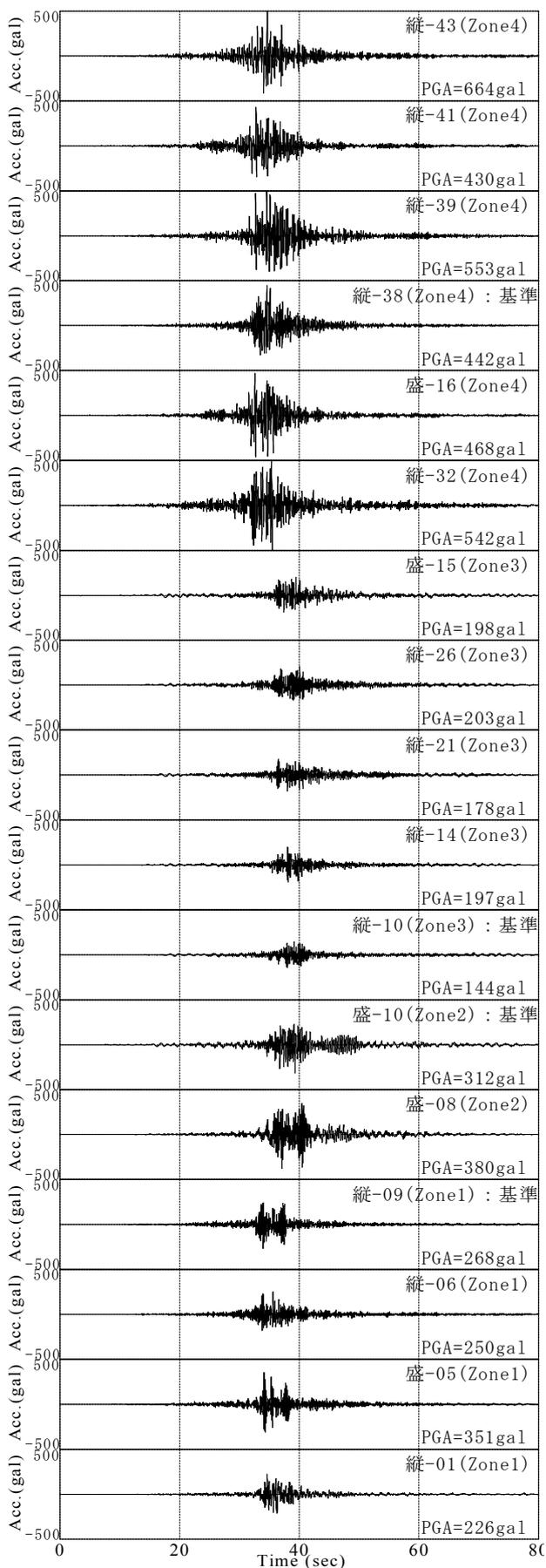


図-22 能登有料道路全域にわたる地震動の評価(1)

【盛土横断方向】

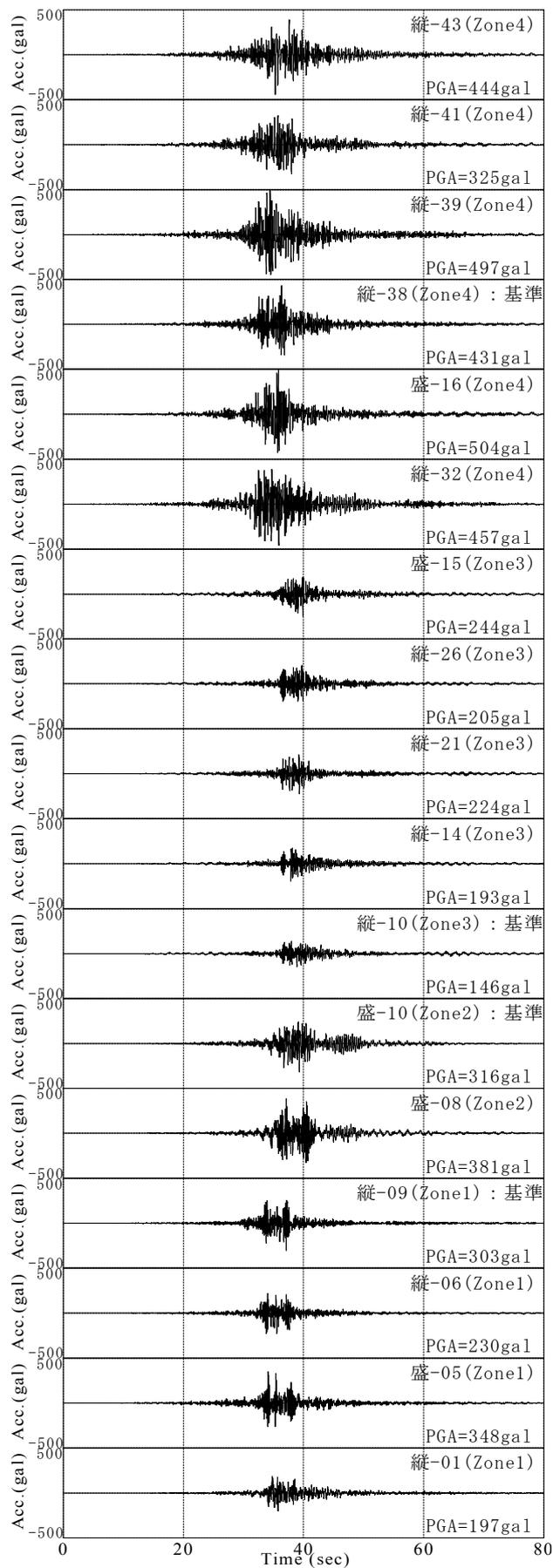
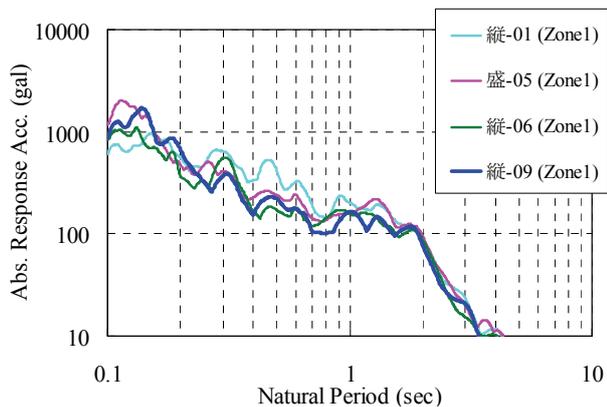
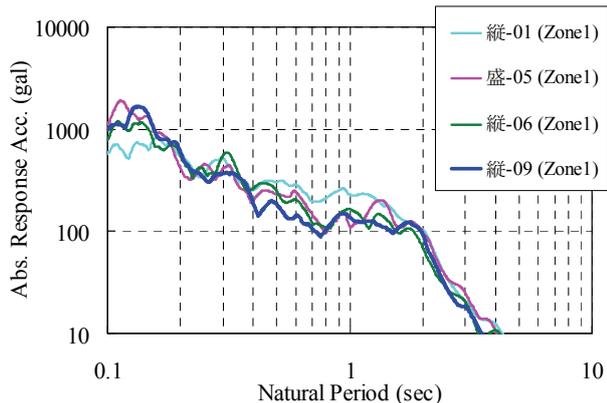


図-23 能登有料道路全域にわたる地震動の評価(2)

【道路延長方向】

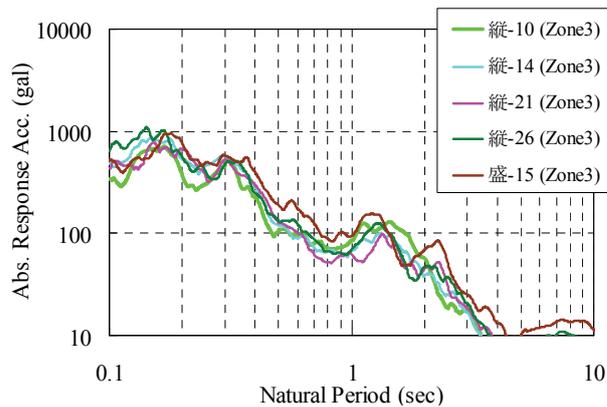


(a) 盛土横断方向

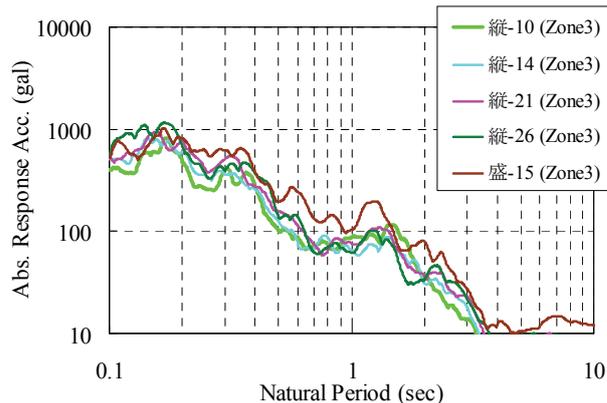


(b) 道路延長方向

図-24 加速度応答スペクトルの比較(1)【Zone1】

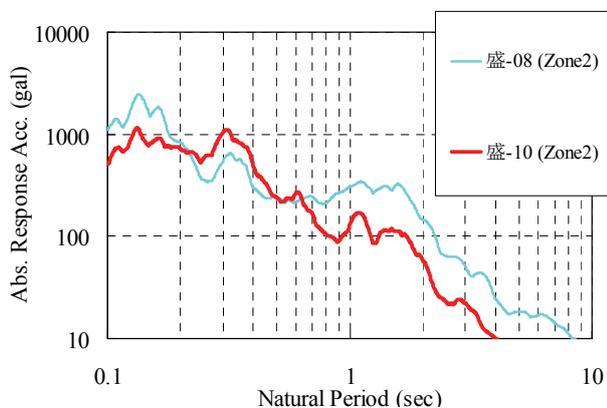


(a) 盛土横断方向

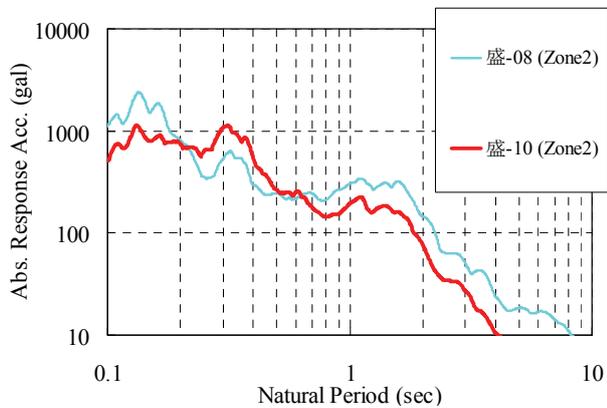


(b) 道路延長方向

図-26 加速度応答スペクトルの比較(3)【Zone3】

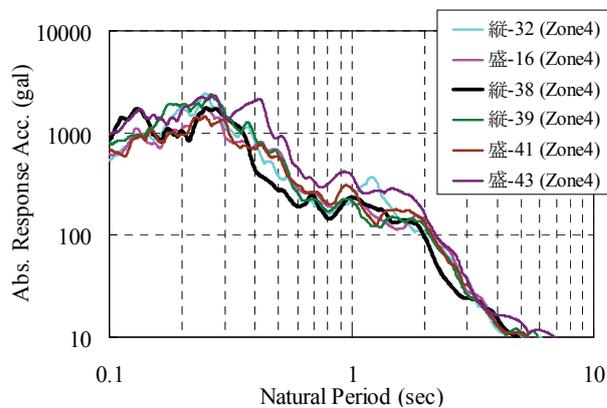


(a) 盛土横断方向

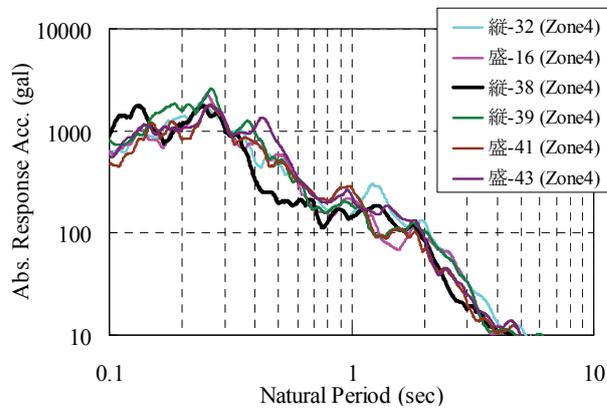


(b) 道路延長方向

図-25 加速度応答スペクトルの比較(2)【Zone2】



(a) 盛土横断方向



(b) 道路延長方向

図-27 加速度応答スペクトルの比較(4)【Zone4】

(4) 被災実績との関係

図-28は、徳田大津I.C.～穴水I.C.の地震観測実施地点および常時微動計測地点に対する推定地震動の最大加速度および計測震度をそれぞれプロットしたものである。さらに同図には、図-20で示した各ゾーン内のサイト特性が同様であると仮定した場合の各ゾーンにおける地震観測実施地点での推定地震動についても掲載している。

図-28より、同じゾーン内においても推定地震動の最大加速度や計測震度が異なり、一様でない。つまり、同じゾーン内で同一の地震動波形を想定する場合と比較して、ゾーン内でのサイト特性の差異を主要因とした推定地震動の違いを評価できていると考えられる。しかし、最大加速度が大きい地点の盛土が必ずしも被災しているわけではなく、縦-38と盛-16のように距離が近く地震動の大きさが同様でありながら被災と無被災が混在している例もある。これは、断面形状や土質の違いだと思われる。

6. 推定地震動によるフラジリティカーブの検討

地震動の大きさに応じた被災確率を評価する方法として、フラジリティカーブが用いられることが多い。本研

究で示したアプローチは、詳細なフラジリティカーブの検討に用いることができる。以下に、例として検討プロセスを示す。2007年能登半島地震における能登有料道路での盛土の被災実績に対し、最尤法を適用してフラジリティカーブを求めた²⁸⁾。具体的には、地震動指標 I における被災確率 $F(I)$ は、次式で表されると仮定する。

$$F(I) = \Phi[\ln(I/C)/\zeta] \tag{2}$$

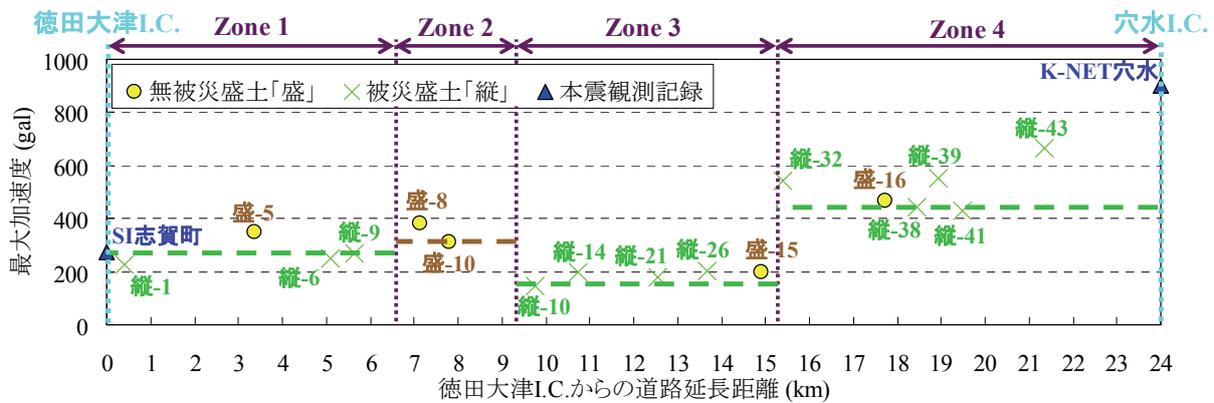
ここに、 Φ は累積確率密度関数、 C は地震動指標の中央値、 ζ は地震動指標と被災確率を合わせた複合偏差である。よって、尤度関数 L は N 個の被災盛土「縦」および無被災盛土「盛」(図-3参照)に対して次式で表される。

$$L = \prod_{i=1}^N [F(I_i)]^{x_i} [1 - F(I_i)]^{1-x_i} \tag{3}$$

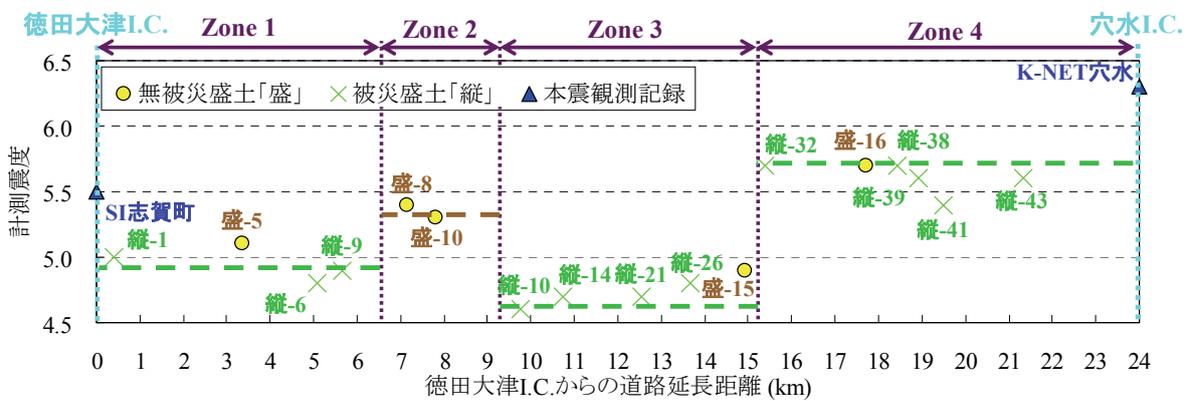
ここに、被災盛土に対しては $x_i=1$ 、無被災盛土に対しては $x_i=0$ である。したがって、パラメーター C および ζ は、次式を満足するように算定した。

$$\frac{d \ln L}{dC} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \tag{4}$$

表-4に得られた回帰パラメーターの一覧を示す。図-29には、能登有料道路での盛土の被災実績(図-3参照)に対しフラジリティカーブを算定した結果を示す。



(a) 最大加速度との関係



(b) 計測震度との関係

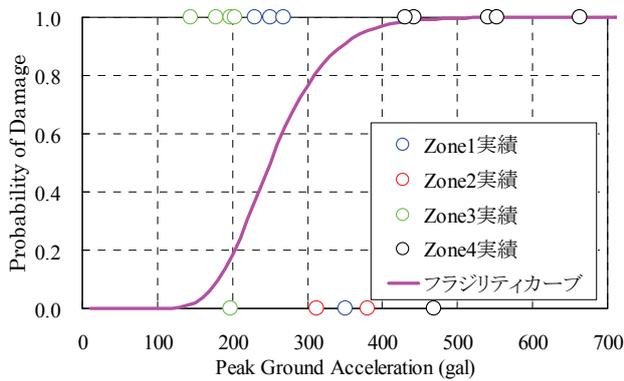
図-28 道路盛土の被災実績と推定地震動の関係(2)

ここで、フラジリティカーブの算定においては、地震動指標として何が適切かが議論となる。本研究のプロセスでは、時刻歴波形が推定できており、種々の検討が可能である点が本論文で提案したプロセスの強みである。例えば、ここでは、最大加速度値、計測震度値、最大速度値、速度PSI値²⁹⁾、滑動残留変形量を検討した。ここに、速度PSI値は、速度の自乗の時間積分の平方根として定義される量で、ケーソン式岸壁の被災程度と良い相関があると報告されている²⁹⁾。また、滑動残留変形量とは、降伏加速度を100galおよび200galと設定した場合にNewmark法³⁰⁾によって得られる結果である。

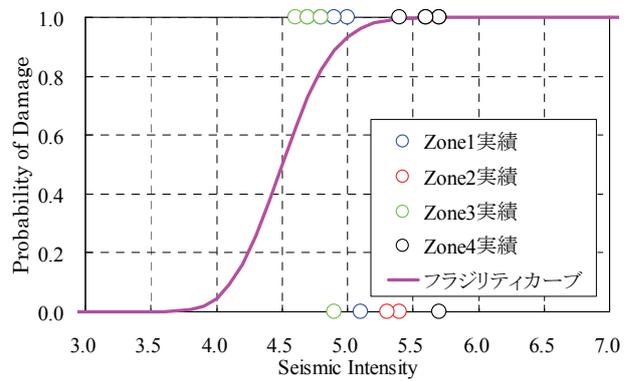
表-4より計測震度に対する尤度(適合度)が比較的大き

表-4 フラジリティカーブの回帰パラメーター

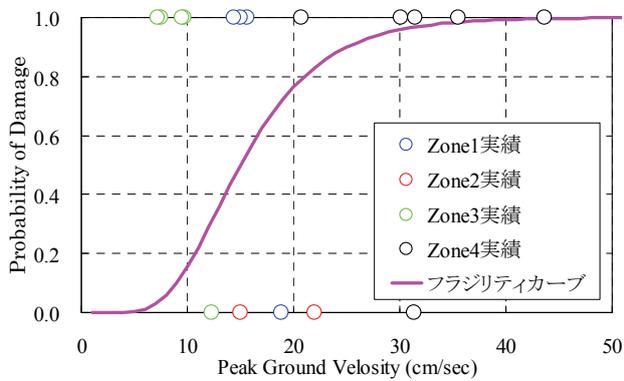
地震動指標	パラメーターC	パラメーター ζ	尤度L (適合度)
最大加速度 PGA (gal)	252	0.26	8.1
計測震度	4.6	0.07	10.7
最大速度 PGV (kine)	16	0.39	8.2
速度PSI値 (cm/sec ^{1/2})	23	0.18	7.9
滑動残留変形量 (cm) [降伏加速度100gal]	1.8	0.41	7.8
滑動残留変形量 (cm) [降伏加速度200gal]	1.1	0.40	8.4



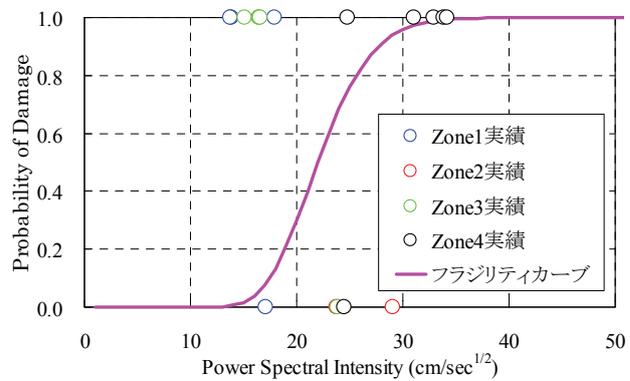
(a) 最大加速度



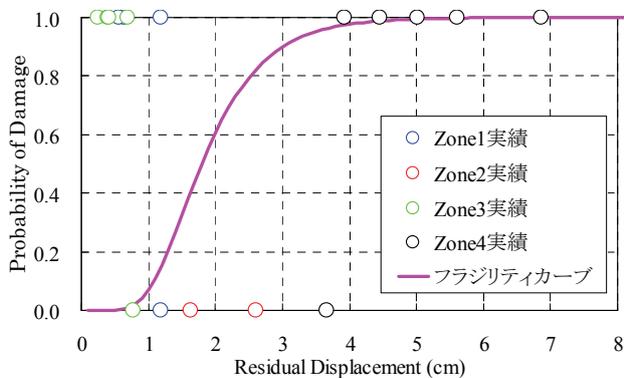
(b) 計測震度



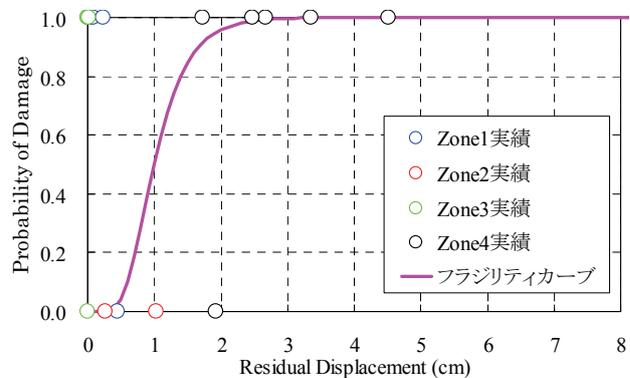
(c) 最大速度



(d) 速度PSI値



(e) 残留変形量(降伏加速度100gal)



(f) 残留変形量(降伏加速度200gal)

図-29 各種地震動指標によるフラジリティカーブ

くなっているが、その他の地震動指標に対しては、尤度に大きな差異は確認できない。さらに、最も適合度の高い計測震度をみても(図-29(b)参照)、震度5未満で5/6が無被災、震度5以上で3/7が無被災であり、不自然な結果である。すなわち、能登有料道路の盛土の被災の有無は、地震動強さのみで説明されるものではなく、盛土の形状・寸法、集水地形の有無やその面積、地盤物性など、その他の要因が大きく影響している可能性が高いことを示唆している。ただし、(a)図-12で示したとおり特性化震源モデルを用いた強震波形計算による推定精度にも限界があること、(b)波形全体の再現性に着目しているため最大速度や最大加速度などの指標により推定精度が異なること、(c)地震観測実施地点(縦-09、盛-10、縦-10、縦-38)と未実施地点では地震動の推定精度が異なると考えられること、などに留意する必要がある。

本論文は、盛土のフラジリティカーブそのものを検討対象としているわけではないため、これ以上の検討は今後の課題である。ただし、2003年宮城県北部地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震による高速道路盛土の被害関数^{31),32),33),34)}と本研究におけるフラジリティカーブを単純に比較すれば、被害が発生し始める最大速度や計測震度の値が、2007年能登半島地震における能登有料道路では極めて小さかったことが推察される。この理由は、地下水位の状況などが考えられるが、本論文の検討対象ではなく、今後の課題である。

7. まとめ

本研究では、常時微動計測と地震観測を組合せ、複数の地点の個々の時刻歴波形を推定する方法を提案した。そして、2007年能登半島地震で被災した能登有料道路に適用した。さらに、本研究で得られる推定結果は、フラジリティカーブの検討などの被災分析にも応用できることを示した。本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 20km程度の線状構造物の検討対象区間であっても、サイト特性が対象区間で大きく異なり、1つのサイト特性で代表させることができないことがあることを能登有料道路の例で示した。
- (2) 線状構造物の各区間の地震観測結果からサイト増幅・位相特性を評価し、各区間の本震時の地震動を推定した例として能登有料道路の結果を示した。
- (3) さらに、常時微動計測結果に基づいて、サイト増幅・位相特性を補間・評価することで、線状構造物の対象区間内の全域にわたる水平動を推定できることを能登有料道路の事例で示した。
- (4) 上記のプロセスでは、広域にわたり推定地震動を時

刻歴波形で示すことができる。従って、フラジリティカーブの検討などにおいて、多くの地震動指標を採用することができ、様々な観点からの線状構造物の被災分析が可能となる。

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、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。能登有料道路における常時微動計測では、金沢大学の学生の皆様(唐沢格氏、北川輝氏、北爪慎氏、山道康平氏)および広島大学の学生の皆様(栗原園実氏、柴尾享氏、田森賢太郎氏)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) 池村太伸, 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) 古和田明, 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.

- 11)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.
- 12)(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.
- 13)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.
- 14)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.
- 15)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.
- 16)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.
- 17)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.
- 18)(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.
- 19)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.
- 20)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.
- 21)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.
- 22)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.
- 23)(社)日本道路協会: 道路橋示方書, V 耐震設計編, pp.10-29, 丸善, 2002.
- 24)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.
- 25)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.
- 26)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.
- 27)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.
- 28)Shinozuka, M.: Statistical analysis of fragility curves, *Proc. of Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*, Taipei, Taiwan, R.O.C., 1999.
- 29)野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
- 30)Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankin Lecture, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 31)丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 32)水野菊, 丸山喜久, 山崎文雄, 土屋良之, 用害比呂之: 近年の地震被害データに基づく高速道路盛土被害と地震動強さの関係, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 1-257, pp.513-514, 2008.
- 33)久世益充, 杉戸真太, 八嶋厚, 三山敬, 櫛田末治, 近藤功規: 2004年新潟県中越地震の被害事例に基づいた高速道路盛土の被害関数の検討, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 3-370, pp.735-736, 2006.
- 34)常田賢一, 小田和広, 鍋島康之, 江川祐輔: 新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.9, 2005.

(2010.5.6 受付)

**STRONG MOTION ESTIMATION ALONG THE LINE STRUCTURE
BASED ON EMPIRICAL SITE AMPLIFICATION AND PHASE EFFECTS
AND ITS APPLICATIONS — THE CASE OF THE NOTO TOLLROAD
FOR THE 2007 NOTO HANTO EARTHQUAKE —**

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Akira MURATA,
Atsushi NOZU and Masakatsu MIYAJIMA

The evaluation of strong seismic motions in high resolution is very important to clarify the mechanism of earthquake damage. In this study, seismic waveform evaluation process at numerous sites along line structure based on empirical site amplification and phase effects was proposed. The proposed method was applied to the slope failure sites of the Noto Tollroad in the 2007 Noto Hanto Earthquake. And, as an application of the proposed method, fragility curves were generated based on the estimated waveforms. Thus, the proposed method is useful in the detailed study of earthquake damages.