

## 疑似点震源モデルに基づく 1975 年大分県中部地震における やまなみハイウェイ被災盛土地点での地震動の評価

Seismic Waveform Estimation at Damage Sites along Yamanami Highway  
during the 1975 Mid Oita Prefecture Earthquake based on the Pseudo Point-Source Model

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
門田浩一	Hirokazu KADOTA	(パシフィックコンサルタンツ(株))
常田賢一	Ken-ichi TOKIDA	(大阪大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)

近年、大規模地震による道路盛土の被災が相次いでいるが、我が国における高規格の道路盛土の深刻な被害が最初に発生したのは、1975 年大分県中部地震によるやまなみハイウェイの傾斜基盤上の盛土である。本稿では、疑似点震源モデルを用いて、1975 年大分県中部地震においてハイウェイ沿いの被災盛土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、港湾地域強震観測網大分-S 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。

キーワード：強震波形，常時微動計測，臨時地震観測，サイト増幅・位相特性 (IGC : E-8)

### 1. はじめに

2004 年新潟県中越地震による道路盛土の被災<sup>1)</sup>は、その後頻発した道路盛土の深刻な被災状況(2007 年能登半島地震による能登有料道路<sup>2)</sup>、2007 年新潟県中越沖地震による北陸自動車道<sup>3)</sup>、2009 年駿河湾の地震による東名高速道路<sup>4)</sup>、2011 年東北地方太平洋沖地震による常磐自動車道<sup>5)</sup>や国道 6 号線<sup>6)</sup>などを踏まえて、我が国で最初に発生した道路盛土の深刻な被害であるとの一部認識もあると思われる。しかしながら、1975 年大分県中部地震( $M$ 6.4)の強震動の作用によるやまなみハイウェイ(以後、 $YH$  と呼ぶ)沿いの傾斜基盤上にあった道路盛土(以後、 $YH$  盛土と呼ぶ)の大規模な法面の崩壊を伴う深刻な被害が上記以前に報告<sup>7,8,9)</sup>されており、本震時に当該盛土に作用した地震動を推定することは非常に重要である。

これまで著者ほかは、被災した道路盛土に作用した強震

動の推定として、2004 年新潟県中越地震による関越自動車道<sup>10)</sup>、2007 年能登半島地震による能登有料道路<sup>11)</sup>、2009 年駿河湾の地震による東名高速道路<sup>12)</sup>、2011 年東北地方太平洋沖地震による常磐自動車道<sup>13)</sup>・国道 6 号線<sup>14)</sup>を対象にした一連の検討を行っている。その際、断層モデルに基づく手法(特性化震源モデル<sup>15)</sup>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<sup>16)</sup>を組合せた手法)もしくはサイト特性置換手法<sup>17)</sup>を地震動推定手法として採用している。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。1975 年大分県中部地震を対象とした強震動の推定を行う場合、 $YH$  周辺で得られた本震観測記録は港湾地域強震観測網大分-S<sup>18)</sup>(図-1 参照)においてのみ存在しており、断層モデルに基づく手法やサイト特性置換手法の採用は困難である。

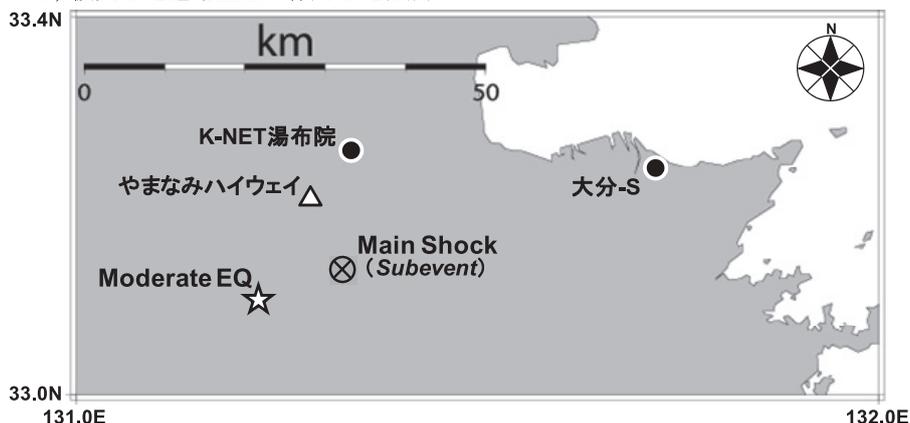


図-1 1975 年大分県中部地震を対象とした疑似点震源モデルと地震動推定地点等の分布

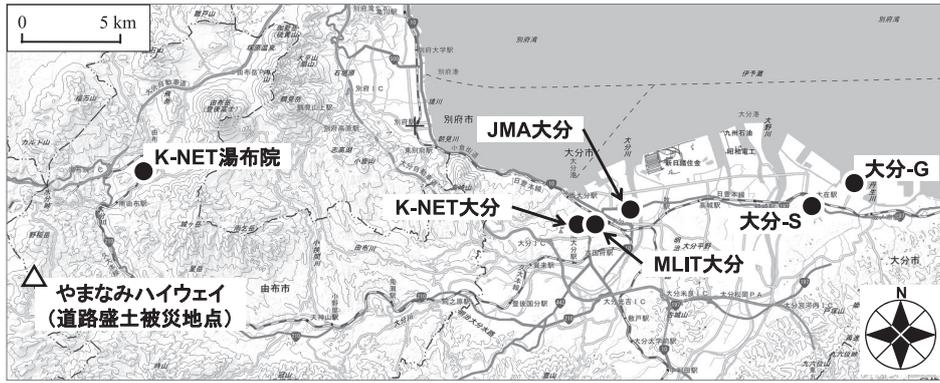


図-2 やまなみハイウェイ周辺の既存強震観測点の分布

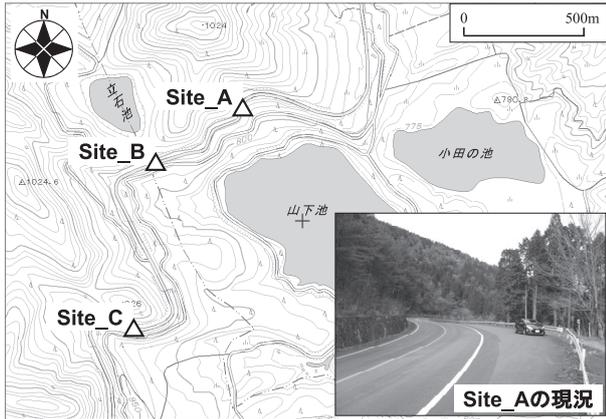


図-3 やまなみハイウェイ沿いの道路盛土の被災3地点

兵動ほか<sup>19)</sup>は、大分-Sで得られた本震観測記録(加速度波形)を振幅調整することによって、YH盛土に作用した本震時の地震動の評価を試みている。しかしながら、図-1に示すように、YH盛土と大分-Sの間には比較的長い距離があり両地点間における地盤震動特性(サイト増幅特性)が同様であるとは考え難いこと、震央(震源)からの方向が両地点では大きく異なっており両地点間における伝播経路特性やサイト位相特性が同様であるとは考え難いこと、などを踏まえれば、大分-Sでの観測地震動に基づく振幅調整波をYH盛土に作用した推定地震動と見なすのは必ずしも適当であるとはいえない。

上述した問題点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<sup>20)</sup>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<sup>21)</sup>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<sup>21)</sup>・スラブ内地震<sup>22)</sup>・内陸地殻内地震<sup>23)~28)</sup>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<sup>21)~28)</sup>されている。この点に関して、著者ほか<sup>20)</sup>は、1900年宮城県北部の地震時に鳴瀬川堤防に作用

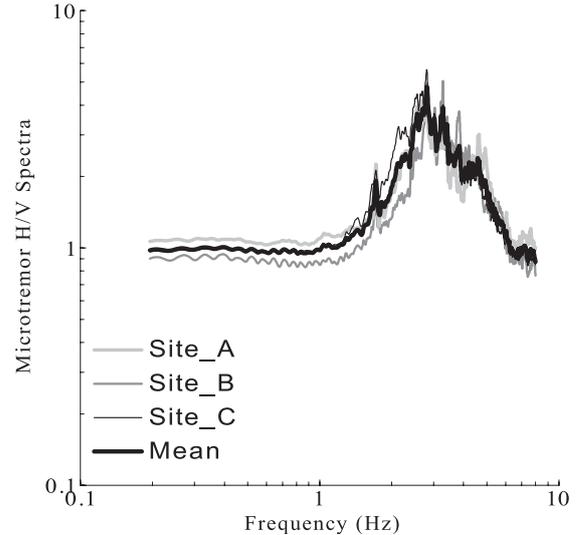


図-4 YH盛土での常時微動H/Vスペクトルの比較

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、1975年大分県中部地震においてYH盛土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、YH盛土周辺の大分-S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

YH盛土地点でのサイト増幅特性を評価するため、図-2および図-3に示すように、特に深刻な被害が報告<sup>7)</sup>されているYH盛土沿いの3地点(Site\_A, Site\_B, Site\_C)、およびYH盛土周辺の既存強震観測点(計6地点)において常時微動計測(単点計測)を実施した。計測時間は、1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。

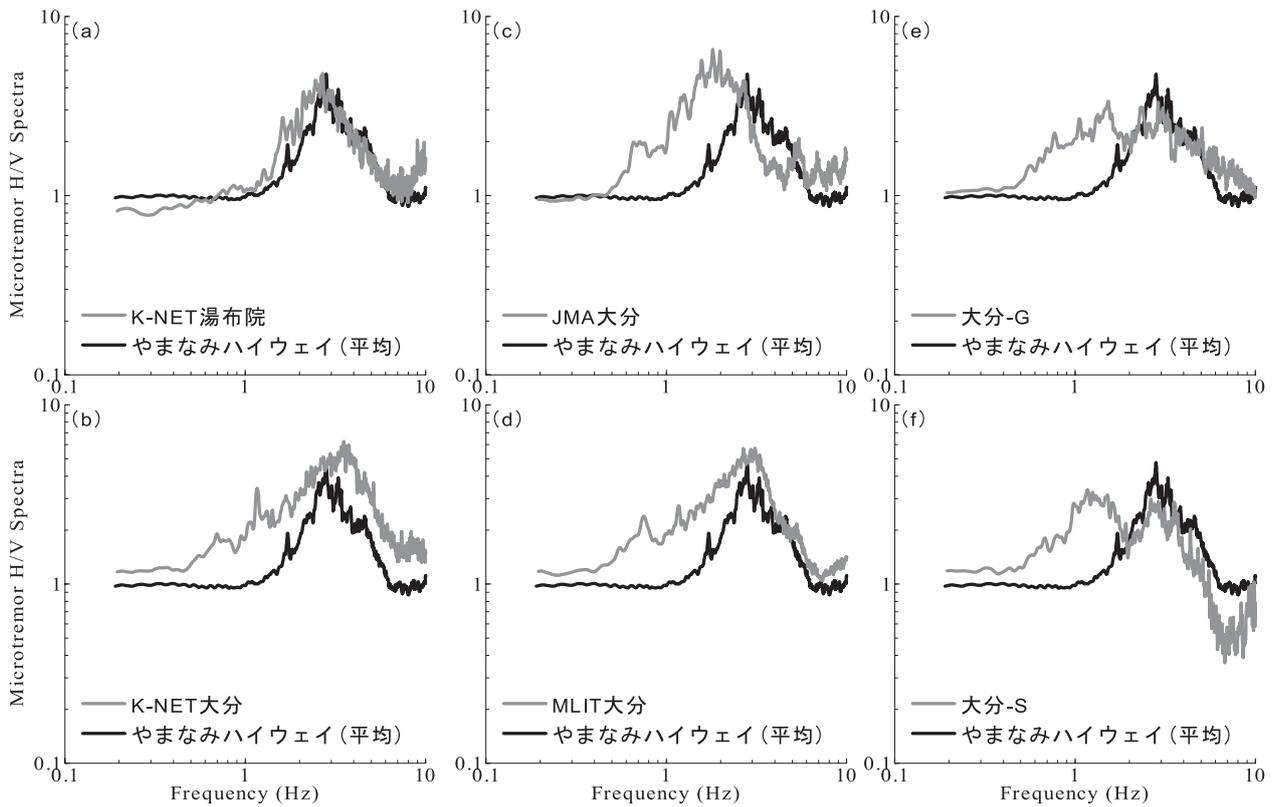


図-5 やまなみハイウェイとその周辺の既存強震観測点における常時微動 H/V スペクトルの比較評価

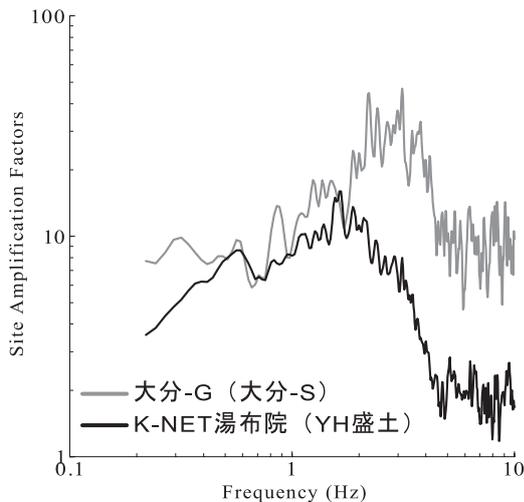


図-6 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

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<sup>29)</sup>を共通採用した。計測機器の詳細については文献<sup>29)</sup>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<sup>30)</sup>と同様である。具体的には、微動の加速度時刻歴に対して、0.1Hz のハイ・パスフィルターを施し、雑振動が小さい 163.84 秒の区間を 5 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<sup>29)</sup>などを考慮して 0.2~10Hz とした。

図-4 に示すとおり、YH 盛土の Site\_A, Site\_B, Site\_C における H/V スペクトルを比較すると、3 地点における H/V スペクトルがほぼ一致しており、本震時に作用した地震動の特性が当該 3 地点において類似していた可能性が高いことが示唆される。一方で、図-4 (a) に示すとおり、K-NET 湯布院<sup>31)</sup>と YH 盛土 3 地点における H/V スペクトルが類似しているのがわかる。さらに、図-4 (e) と図-4 (f) の比較に基づくと、大分-G<sup>18)</sup>と大分-S<sup>18)</sup>における H/V スペクトルが比較的類似しているのも読み取れる。

上述した H/V スペクトルの類似性と地形や地質区分がそれぞれ同種であることなどを踏まえて、本検討では、K-NET 湯布院における既存のサイト増幅特性<sup>32)</sup>を YH 盛土 (3 地点共通)でのサイト増幅特性として、スペクトルインバージョンに基づく大分-G のサイト増幅特性<sup>32)</sup>を大分-S でのサイト増幅特性として、それぞれ援用することとした。

図-6 に K-NET 湯布院 (YH 盛土) および大分-G (大分-S) におけるサイト増幅特性 (ともに地震基盤～地表) の比較を示す。図-4 (f) および図-6 に示すように、YH 盛土と大分-S では、地盤震動特性 (常時微動 H/V スペクトルの特徴およびサイト増幅特性) が大きく異なっていることから、大分-S における本震観測記録を、1975 年大分県中部地震時に YH 盛土に作用した地震動と見なすことはできない。

表-1 設定した疑似点震源モデルのパラメータの一覧

	Location			Seismic Moment $M_0$ (Nm)	Corner Frequency (Hz)
	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)		
<b>Subevent</b>	33.133	131.333	20	0.8E+18	0.47

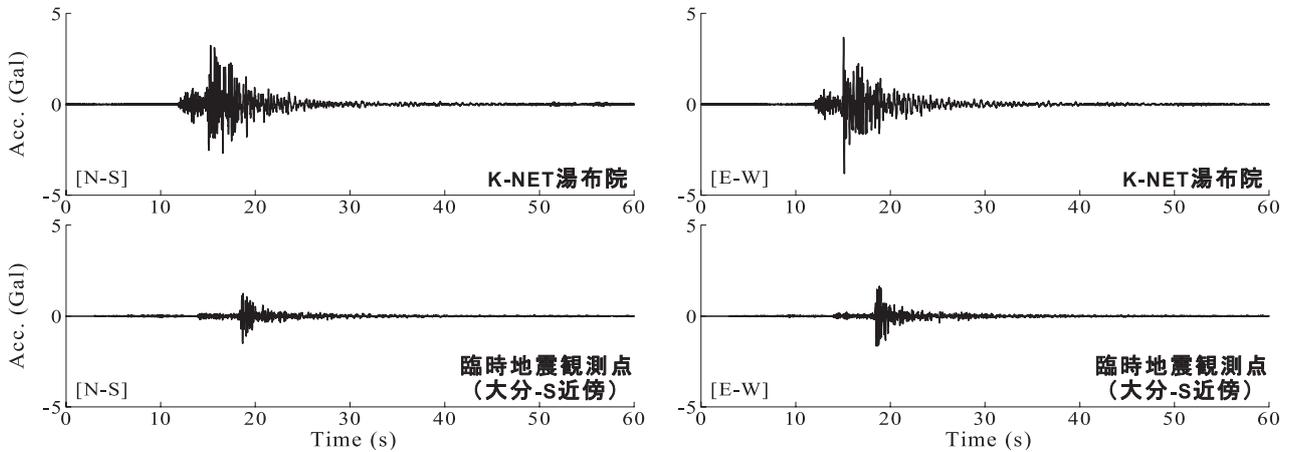


図-7 大分県中部を震源とする小地震(2012/11/19 15:46  $M_j3.3$  (Moderate EQ))による観測地震動の波形形状の比較

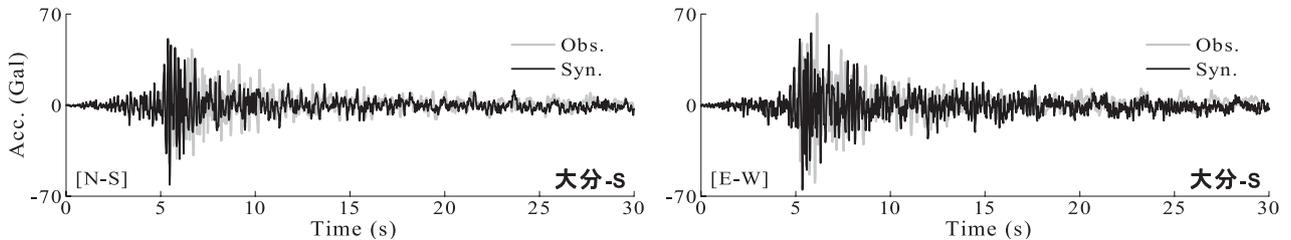


図-8 地震動推定手法の適用性の確認 (加速度波形の比較)

### 3. 臨時地震観測によるサイト位相特性の評価

2. では、YH 盛土と K-NET 湯布院、大分-S と大分-G における地盤震動特性(サイト増幅特性)の類似性について述べた。ここに、K-NET 湯布院では、1975 年大分県中部地震の震源域で近年発生した中小地震による観測地震動が得られており、サイト位相特性(地震波形形状)の評価が可能である。しかしながら一方で、大分-S(および大分-G)では当該地震による観測地震動は得られていないことから、サイト位相特性の評価が困難であった。

本研究では、大分-S の跡地の極近傍において地震計を臨時設置し、地震観測を実施した。地震計は、加速度計(一体型微動探査兼地震計機器<sup>29)</sup>)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、2012 年 11 月 2 日～27 日までの約一か月間である。その結果、1975 年大分県中部地震の震源域において近年発生した小地震(2012/11/19 15:46  $M_j3.3$ ; 図-1 (Moderate EQ) 参照)による記録を臨時地震観測点(大分-S 近傍)と K-NET 湯布院において同時に得ることができた。図-7 に K-NET 湯布院

および臨時地震観測点(大分-S 近傍)で得られた観測地震動の加速度時刻歴の比較を水平二成分について示す。

### 4. 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<sup>23)-28)</sup>は、従来の特性化震源モデル<sup>15)</sup>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<sup>33)</sup>に従うと仮定する。これに伝播経路特性<sup>34),35)</sup>とサイト増幅特性(図-6 参照)を乗じることにより、YH 盛土および大分-S 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、K-NET 湯布院および臨時地震観測点(大分-S 近傍)で得られた Moderate EQ(図-1 参照)による観測記録(図-7 参照)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<sup>36)</sup>を実施することにより強震動波形を計算した。

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-1 に設定した入

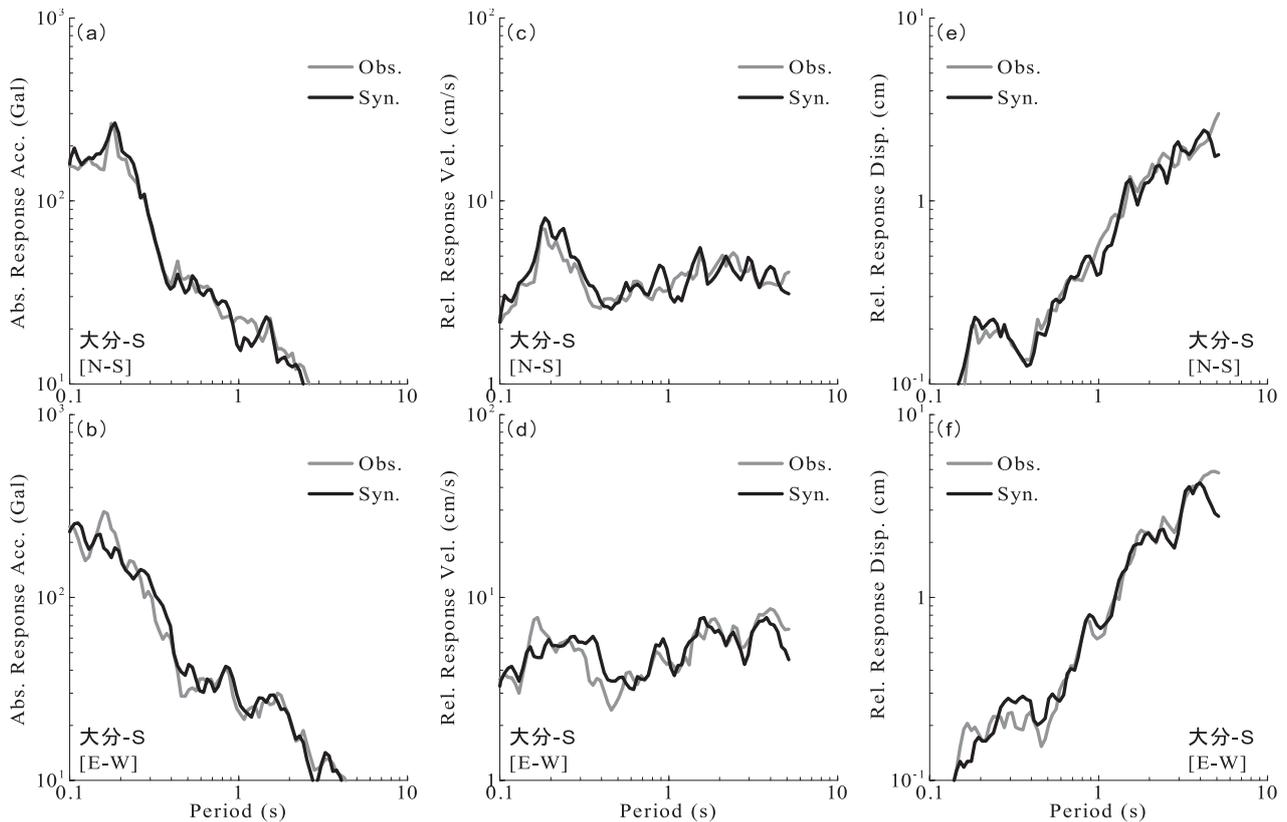


図-9 地震動推定手法の適用性の確認 (応答スペクトルの比較)

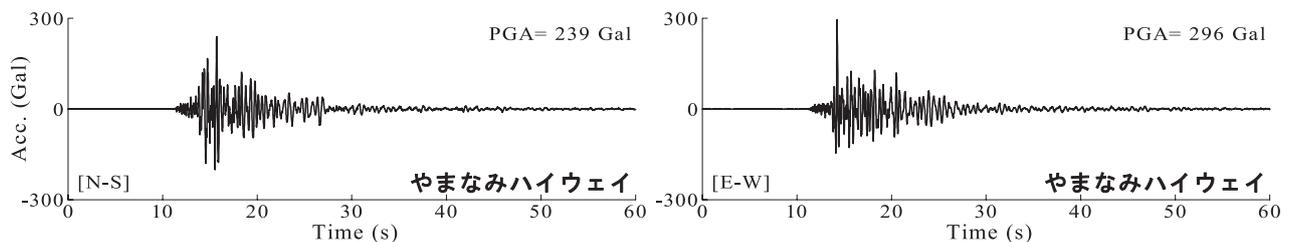


図-10 1975 年大分県中部地震におけるやまなみハイウェイ沿いの被災道路盛土地点での推定地震動

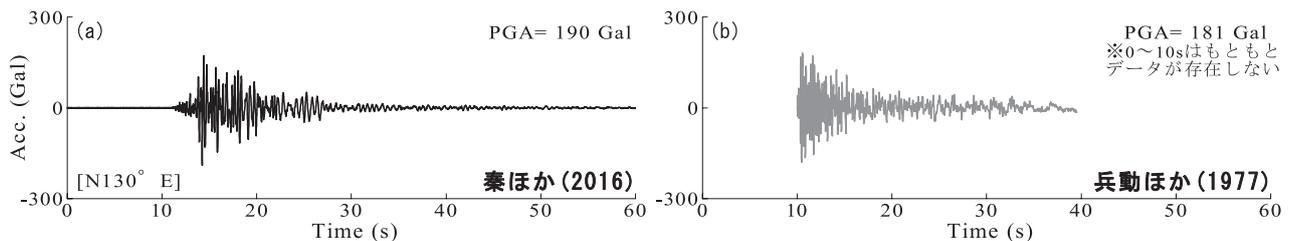


図-11 本研究(秦ほか(2016))と既往研究(兵動ほか(1977))による推定地震動 (加速度波形の比較)

カ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、1975 年大分県中部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、図-8 および図-9 に示すように、大分-S における本震観測記録(地震加速度波形ならびに絶対加速度・相対速度・相対変位応答スペクトル(ともに減衰定数 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-10 に 1975 年大分県中部地震による YH 盛土(Site\_B : 図-2 参照)を対象にした推定地震動の加速度波形を水

平二成分について示す。図-11(a)は、YH 盛土での推定地震動(図-10 参照)を、道路盛土の横断面方向(N130°E)<sup>7)</sup>に対して座標変換したものである。一方で、図-11(b)は、兵動ほか<sup>19)</sup>による YH 盛土での推定地震動の加速度波形である。図-11(a)と図-11(b)を比較すると、最大加速度 PGA は同等程度であるものの、波形形状が明らかに異なっている。図-12 は、両手法による推定地震動(図-11 参照)による絶対加速度・相対速度・相対変位応答スペクトル(ともに減衰定数 5%)を比較したものである。図-12 に示すと

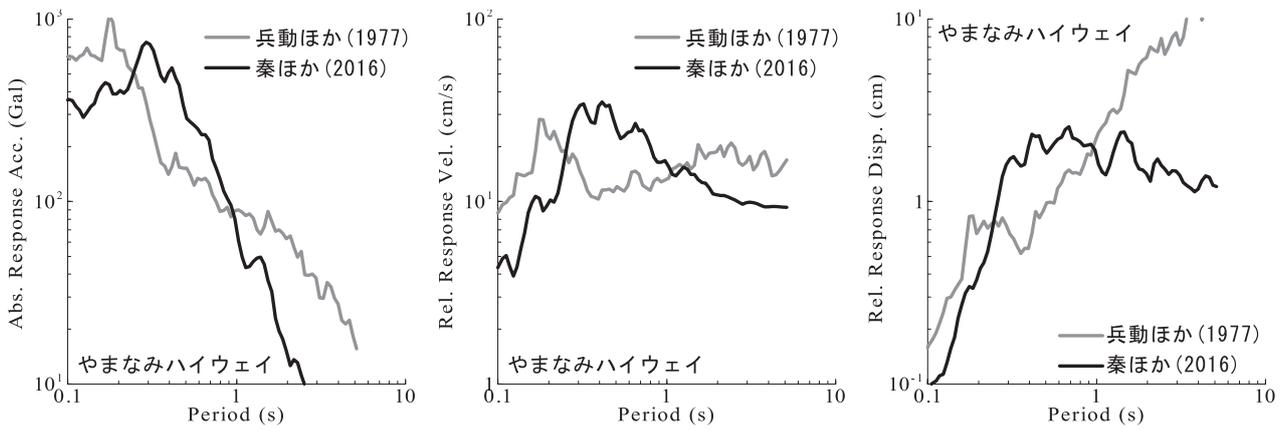


図-12 本研究(秦ほか(2016))と既往研究(兵動ほか(1977))による推定地震動(応答スペクトルの比較)

り、兵動ほか<sup>19)</sup>による推定地震動に対して、本稿における推定地震動は、0.3~1sの周期帯域において卓越する地震応答を示している。さらに、この卓越周期帯域は、盛土の被災(残留変形)に比較的大きな影響を及ぼす地震動の周期帯域(0.5~2s)<sup>37)</sup>が一部含まれていることも読み取れる。

## 5. まとめ

本稿では、やまなみハイウェイ沿いの道路盛土とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測を、大分-S(やまなみハイウェイ周辺の既存強震観測点)の跡地において臨時地震観測をそれぞれ実施し、得られた計測・観測結果と疑似点震源モデルの組合せなどに基づいて、1975年大分県中部地震時にやまなみハイウェイ道路盛土に作用した強震動を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) やまなみハイウェイの道路盛土において特に深刻な被害が発生した3地点では、常時微動H/Vスペクトルの特徴が類似している。
- (2) やまなみハイウェイ道路盛土地点(3地点)とその周辺の既存強震観測点であるK-NET湯布院では、常時微動H/Vスペクトルの特徴が類似している。
- (3) やまなみハイウェイ道路盛土地点(3地点)とその周辺の既存強震観測点である大分-Sでは、常時微動H/Vスペクトルの特徴などが大きく異なっていることから、大分-Sで得られた本震観測記録を、1975年大分県中部地震時にやまなみハイウェイ道路盛土に作用した地震動と見なすことはできない。
- (4) 上記(1)および(3)の知見は、やまなみハイウェイ道路盛土地点(3地点)におけるサイト増幅・位相特性として、K-NET湯布院で得られた中小地震観測記録に基づいて評価されたサイト増幅・位相特性の工学的な援用の可能性を示唆するものである。
- (5) 本稿において構築した1975年大分県中部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、大

分-Sで得られた本震観測記録(加速度波形ならびに応答スペクトル)を一定の精度で再現可能である。

- (6) 上記(4)および(5)で得られた知見を踏まえて、1975年大分県中部地震による疑似点震源モデルとやまなみハイウェイ道路盛土におけるサイト増幅・位相特性の組合せを適用した結果、0.3~1sの周期帯域において卓越する地震応答を示す地震動が推定された。

今後は、本研究と兵動ほかによる二種類の推定地震動をそれぞれ入力波とし、やまなみハイウェイ道路盛土を対象とした動的FEM解析を行うことで、推定地震動の適用性についてより詳細な検討を行っていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、港湾地域強震観測および(国研)防災科学技術研究所 K-NET による地震観測記録を使用しました。常時微動計測の実施にあたっては、現地の住民の皆様等にご協力・ご支援をいただきました。本研究の遂行にあたり、(一財)災害科学研究所 土工構造物の性能向上技術普及研究会の委員の皆様には、大変有意義なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、(公社)地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，pp.187-203, 2007.
- 2) 例えば、(公社)地盤工学会：2007年能登半島地震道路災害データ集，74p., 2007.
- 3) 例えば、(公社)地盤工学会：2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書，5.4節，pp.46-54, 2009.
- 4) 例えば、齊藤康博：駿河湾を震源とする地震による東名高速道路被災箇所の応急復旧一東名の崩落箇所を115時間で復旧一，土木学会誌，Vol.94, No.11, pp.10-11, 2009.
- 5) 例えば、矢崎敏之：東日本大震災におけるNEXCO東日本の対応，高速道路の被害と復旧状況，土木学会誌，Vol.96, No.7, pp.20-21, 2011.
- 6) 例えば、国土交通省仙台河川国道事務所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震一被災状況(道路)，14p., 2011.
- 7) 伯野元彦，南忠夫，石田勝彦，松井芳彦，井上涼介：1975年大分県中部地震被害調査報告，地震研究所集

- 報, Vol.50, pp.343-358, 1975.
- 8) 土木研究所振動研究室：大分県中部地震調査概報，土木研究所資料，第 1053 号，25p, 1975.
  - 9) 福岡管区気象台：1975(昭和 50)年 4 月 21 日大分県中部地震の調査報告，験震時報，Vol.40, pp.81-103, 1976.
  - 10) 秦吉弥，門田浩一，湊文博，常田賢一：常時微動計測および臨時地震観測に基づく 2004 年新潟県中越地震における関越自動車道竜光地区での地震動の推定，地盤と建設，Vol.34, No.1, 2017. [in this issue]
  - 11) 秦吉弥，一井康二，村田晶，野津厚，宮島昌克：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一，土木学会論文集 A，Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
  - 12) 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.
  - 13) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，野津厚，横田聖哉，金田和男：サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定，土木学会論文集 A1，Vol.68, No.4, pp.I\_315-330, 2012.
  - 14) 秦吉弥，野津厚，常田賢一：2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した盛土での余震観測と地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.13, No.3, pp.56-59, 2013.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) Nozu, A.: Current status of strong-motion earthquake observation in Japanese ports, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp. 79-83, 2004.
  - 19) 兵動正幸，山内豊聡，後藤恵之輔：1975 年大分県中部地震によるやまなみハイウェイ道路地盤の応答解析，第 21 回土木学会西部支部研究発表会講演集，pp. 71-72, 1977.
  - 20) 秦吉弥，常田賢一，酒井久和，一井康二，静岡俊郎，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.
  - 21) 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.
  - 22) 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.
  - 23) 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.
  - 24) 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.
  - 25) 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.
  - 26) 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.
  - 27) 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.
  - 28) 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.
  - 29) 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.
  - 30) 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.
  - 31) 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.
  - 32) 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.
  - 33) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
  - 34) 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, pp.1865-1894, 1983.
  - 35) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価，日本建築学会構造系論文集，No.543, pp.61-68, 2001.
  - 36) 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.
  - 37) 秦吉弥，一井康二，野津厚，酒井久和：高盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域に関する基礎的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.9, No.4, pp. 747-759, 2014.

(2016 年 6 月 7 日 受付)

