

2016年熊本地震によって誘発された地震による
大分自動車道斜面崩壊地点での強震波形の評価Seismic Waveform Estimation at the Slope Failure Site along Oita Expressway
during the Induced-Shock of the 2016 Kumamoto Earthquake based on Temporary Seismic Observation

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))
池田隆明	Takaaki IKEDA	(長岡技術科学大学大学院工学研究科)

2016年熊本地震の本震によって誘発された地震により、大分自動車道沿いの切土斜面において大規模な崩壊が発生した。この斜面崩壊は、大分県と熊本県間の交通ネットワークに深刻な被害を及ぼしており、今後の斜面防災の高度化のため、斜面崩壊地点に作用した誘発地震時の強震動を、地盤震動特性を考慮して精度良く推定することは非常に重要である。本稿では、斜面崩壊地点に作用した強震動をサイト増幅特性置換手法に基づいて推定した結果について報告する。その際、周辺の自治体震度観測点で得られた誘発地震記録を再現することで、地震動推定手法の適用性を確認した。

キーワード：臨時地震観測、誘発地震、サイト特性、高速道路、切土、大分県 (IGC : E08)

1. はじめに

2016年4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の大規模地震(以後、2016年熊本地震の前震と呼ぶ)および4月16日1時25分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の大規模地震(以後、2016年熊本地震の本震と呼ぶ)による強震動の作用による道路土工構造物の深刻な被害が報告^{1,2)}されている。この点に関して秦ほか^{1,2)}は、2016年熊本地震の前震によって被災した国道443号線の道路盛土、および2016年熊本地震の本震によって被災した九州自動車道の高速道路盛土に作用した地震動を、現地で行った臨時余震観測の記録に基づいて推定しているが、いずれも熊本県内の道路盛土を対象としている。

一方で、大分県内では、2016年熊本地震の本震によって誘発された地震(以後、誘発地震と呼ぶ)³⁾によって、大分自動車道由布岳PA周辺の切土斜面(図-1参照)において、写真-1に示すように大規模な崩壊が発生した(以後、斜面崩壊地点と呼ぶ)。斜面崩壊地点の近傍では、並柳橋の主桁の変形や支承の破壊などの被害が報告^{4,5)}されており、これらの地点では局所的に大きな地震動が誘発地震時に作用した可能性が高い。この点に関して秦ほか⁶⁾は、並柳橋と切土斜面崩壊の地点の中間付近において臨時地震観測を実施し(図-1参照)、得られた観測記録に対してスペクトルインバージョンを適用し、臨時地震観測点の位置相当におけるサイト増幅特性を評価している。

上述した背景を踏まえ本稿では、斜面崩壊地点周辺で得られた誘発地震記録と評価したサイト増幅特性に対して、サイト増幅特性置換手法⁷⁾を適用することによって、誘発地震時に斜面崩壊地点に作用した地震動を推定した結果について報告する。なお、本研究は、(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(委員長：常田賢一)および(公社)土木学会地震工学委員会2016年熊本地震による被害調査・分析小委員会(委員長：池田隆明)の活動の一環として実施したものである。



図-1 斜面崩壊地点とその近傍で発生した並柳橋の被災状況、および斜面崩壊地点周辺の強震観測点の分布(国土地理院電子国土Webによる地形図に一部加筆)

2. 誘発地震記録の整理

表-1 は、誘発地震時に斜面崩壊地点周辺の既存強震観測点で得られた最大加速度値 PGA 、最大速度値 PGV (ともに三成分合成)、気象庁計測震度⁹⁾の一覧を示す。表-1 に示すとおり、K-NET 湯布院と湯布院町川上は比較的近くの位置関係であるにもかかわらず、観測された誘発地震による地震動の特性が類似しているとは言い難い。この相違は、推定震源³⁾からの距離のほかにも、両観測点におけるサイト特性が大きく影響しているためと推察される。両観測点に対して斜面崩壊地点は、推定震源からの距離に有意な差異があるだけでなく、図-2 に示すように地質区分⁹⁾にも差異が生じている。これらは、誘発地震時に作用した地震動の特性が斜面崩壊地点と周辺の両観測点において大きく異なっていた可能性を示唆するものである。なお、本稿の第一著者による本震直後の現地踏査によれば、K-NET 湯布院および湯布院町川上周辺では、窓ガラスや屋根瓦の割れなどの軽微な被害は確認できたが、住家の倒壊などの深刻な被害が見受けられなかった。

3. 常時微動計測に基づく地盤震動特性

斜面崩壊地点付近での臨時地震観測地点の位置選定のため、斜面崩壊地点付近、並柳橋付近、臨時地震観測の候補地点の計三地点において常時微動計測(単点計測)を実施した。写真-2 に斜面崩壊地点付近での常時微動計測状況をそれぞれ示す。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¹⁰⁾を共通採用した。計測機器の詳細については文献¹⁰⁾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、後述する常時微動 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-3 に常時微動 H/V スペクトルの比較を示す。ここに、常時微動 H/V スペクトルの計算処理方法としては、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、雑振動が比較的小さい 163.84 秒の区間を十区間抽出し、フーリエ振幅スペクトルの計算を行い、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、十区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁰⁾などを考慮して 0.2~10Hz とした。

図-3 に示すとおり、斜面崩壊地点付近と臨時地震観測の候補地点の比較では、ピーク周波数やスペクトル形状などの常時微動 H/V スペクトルの特性が類似していることから、臨時地震観測の実施地点に関する適用性を確認でき

表-1 由布市街地で得られた誘発地震記録の一覧

	K-NET湯布院	湯布院町川上
最大加速度 PGA (Gal)	725	540
最大速度 PGV (cm/s)	82.9	62.6
気象庁計測震度	6.1	5.9



写真-1 切土斜面の崩壊状況 (西日本高速道路(株)提供)



写真-2 斜面崩壊地点付近での常時微動計測状況

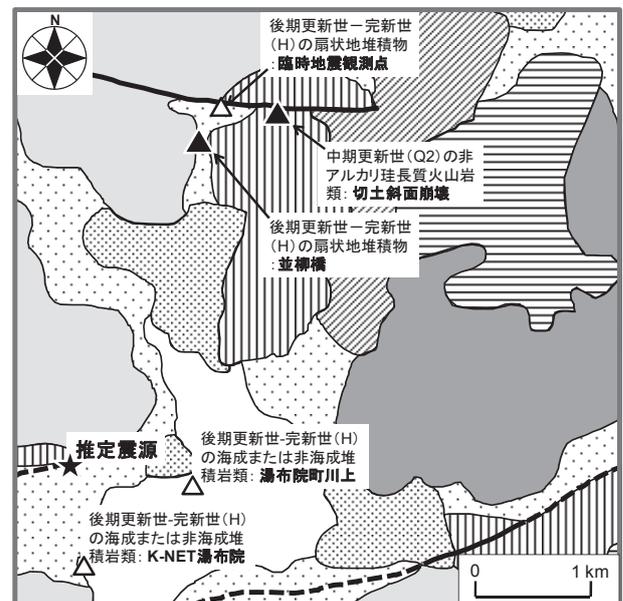


図-2 斜面崩壊地点周辺の地質区分(文献9)に一部加筆

る。さらに、斜面崩壊地点付近と並柳橋付近における H/V スペクトルの特性も同様に類似していることから、本稿による誘発地震における斜面崩壊地点での推定地震動(後述)を、誘発地震時に並柳橋に作用した地震動として工学的な援用が可能であることが示唆される。

4. 臨時地震観測に基づくサイト増幅特性

2.および3.で得られた知見を踏まえ、本研究では、斜面崩壊地点の近傍において2016年4月29日に地震計を臨時設置し、七日間の地震観測を実施した。その結果、2016年熊本地震とその誘発地震による余震記録を斜面崩壊地点の近傍(およびK-NET湯布院)において同時に得ることができた。なお、地震計は一体型微動探査兼地震計機器¹⁰⁾を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。観測方向は、N-S・E-W・U-D方向の計三成分である。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続する設定とした。

図-4は、スペクトルインバージョンに基づく臨時地震観測点(以後、斜面崩壊地点と一括表現する)、K-NET湯布院、湯布院町川上におけるサイト増幅特性(ともに地震基盤～地表)⁶⁾を比較したものである。図-4に示すとおり、斜面崩壊地点とその周辺の既存強震観測点での比較では、サイト増幅特性に明確な差異が確認できる。具体的には、斜面崩壊地点では、1~2Hz付近(地震被災に大きな影響を及ぼすやや短周期帯域^{11),12),13)}を含む周波数帯域)および3Hz以上の周波数帯域において明らかにサイト増幅特性が卓越していることが読み取れる。これらの知見は、斜面崩壊地点とその周辺の既存強震観測点(誘発地震記録有)では、誘発地震時に作用した地震動特性が大幅に異なっていたことを示しており、並柳橋におけるサイト特性(地盤震動特性)を十分に考慮して誘発地震時の地震動を推定する必要性が高いことをあらためて示唆するものである。

5. 地震動推定手法とその適用性

本研究では、斜面崩壊地点、および斜面崩壊地点から最も近い既存強震観測点である湯布院町川上(以後、二地点まとめて推定点と呼ぶ)における地震動の推定をサイト増幅特性置換手法⁷⁾に基づいて実施した。

図-5に地震動推定フローを示す。まず、基準観測点としてK-NET湯布院(斜面崩壊地点周辺に位置する推定点以外の既存強震観測点)を選定した。次に、基準観測点(K-NET湯布院)での誘発地震記録(図-6(a),(b)および図-7(a),(b)参照)によるフーリエ振幅を計算し、そのフーリ

エ振幅に対して基準観測点と推定点の距離の違い(推定震源³⁾から基準観測点・推定点までの距離の違い)による補正^{14),15)}を施し、さらに推定点と基準観測点のサイト増幅特性の比を乗じることにより、推定点での誘発地震時のフーリエ振幅を推定した。その際、水平二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、基準観測点での誘発地震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¹⁶⁾を行うことで、推定点における誘発地震時の地震動を推定した。

図-6(c),(d)および図-7(c),(d)に誘発地震時の加速度波形および速度波形について、観測波と推定波(強震動推定

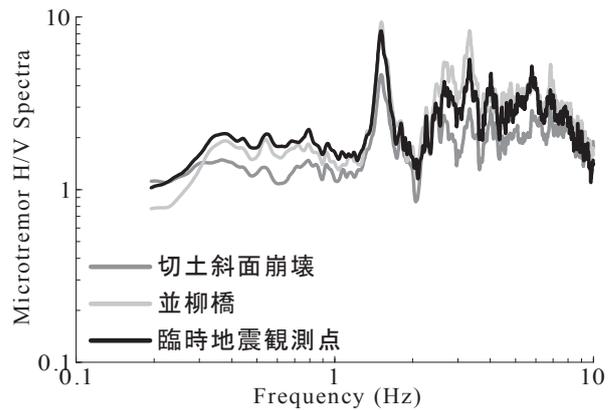


図-3 H/V スペクトルの比較(臨時地震観測点の設定)

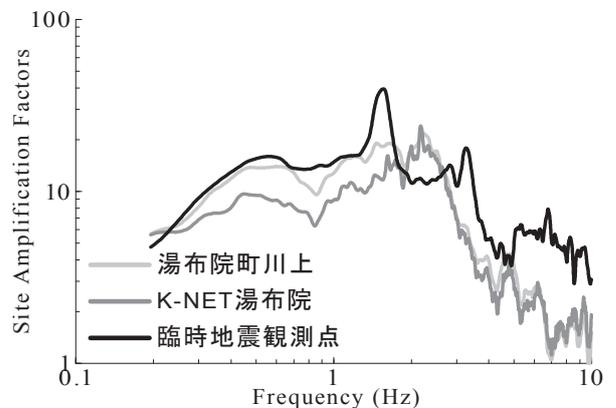


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)⁶⁾の比較

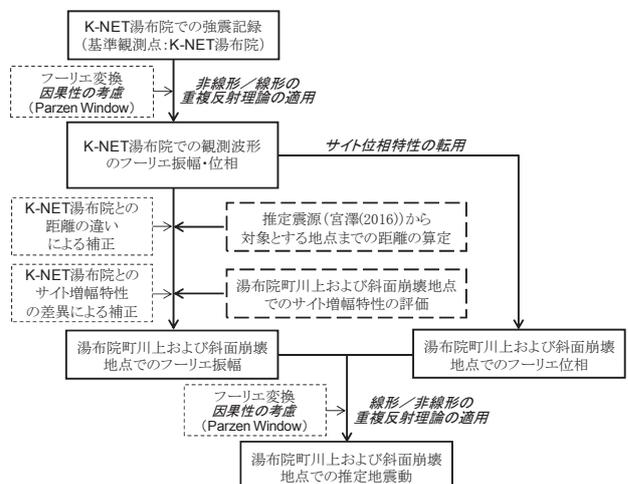


図-5 サイト増幅特性置換手法による地震動推定フロー

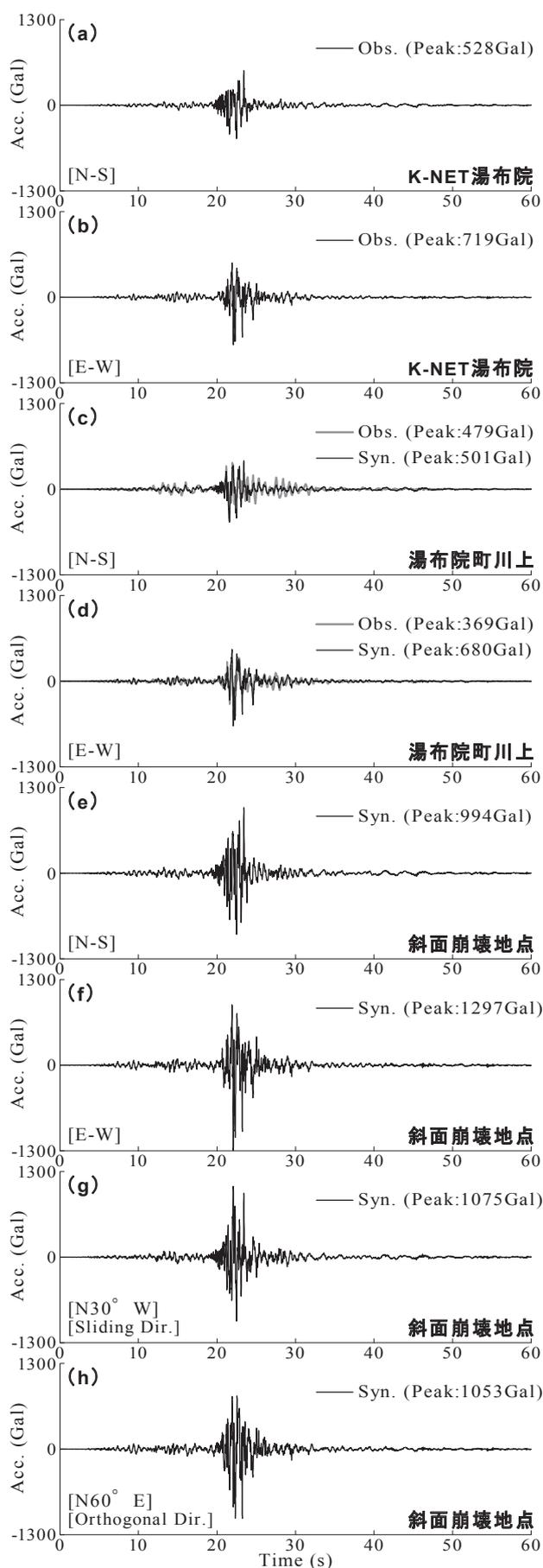


図-6 地震動推定手法の適用性の確認, および斜面崩壊地点での推定地震動 (時刻歴加速度波形)

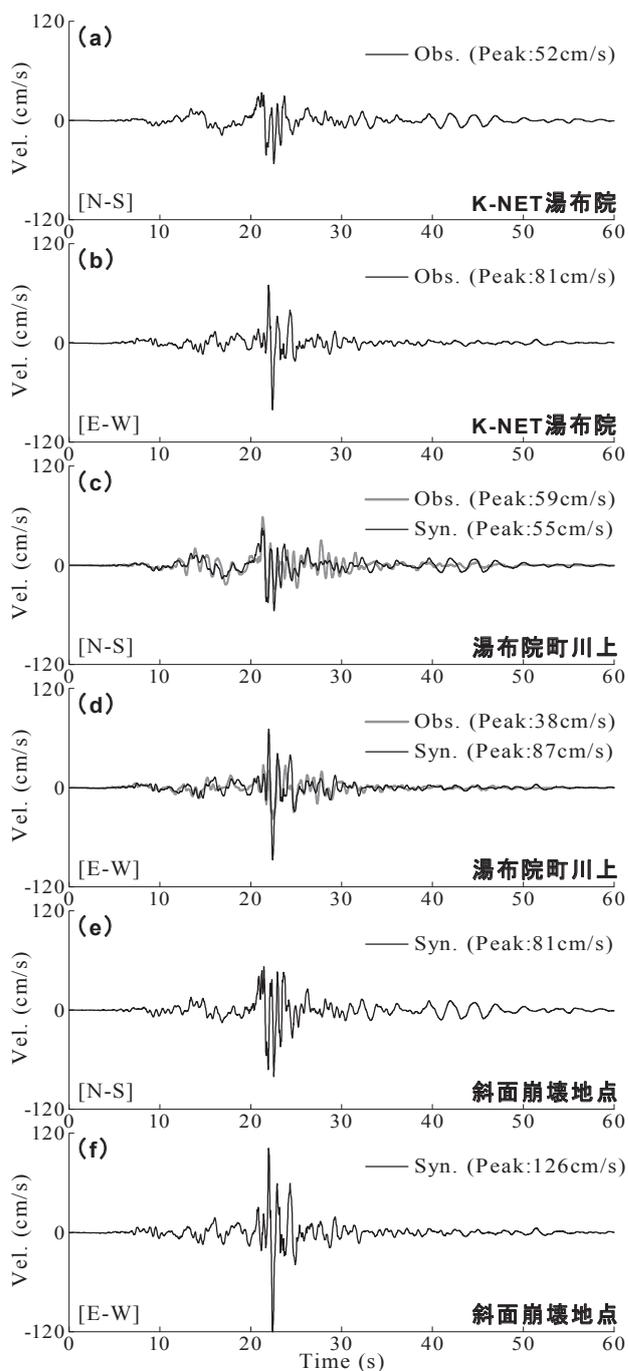


図-7 地震動推定手法の適用性の確認, および斜面崩壊地点での推定地震動 (時刻歴速度波形)

結果)で比較したものを示す. なお, ここでは, バンド・パスフィルタなどの波形処理は行っていない. 図-6(c), (d)および図-7(c), (d)に示すとおり, 観測波と推定波が比較的良い一致を示している. 図-8(a), (b)は, 絶対加速度応答スペクトル(全て減衰定数 5%)を観測波と推定波で比較したものである. 図-8(a), (b)に示すとおり, 若干過大に評価する傾向があるものの, 観測波と推定波による応答スペクトルが概ね類似していることが確認できる. すなわちこれは, 上述した斜面崩壊地点(臨時地震観測点)におけるサイト増幅特性を入力として, サイト増幅特性置換手法

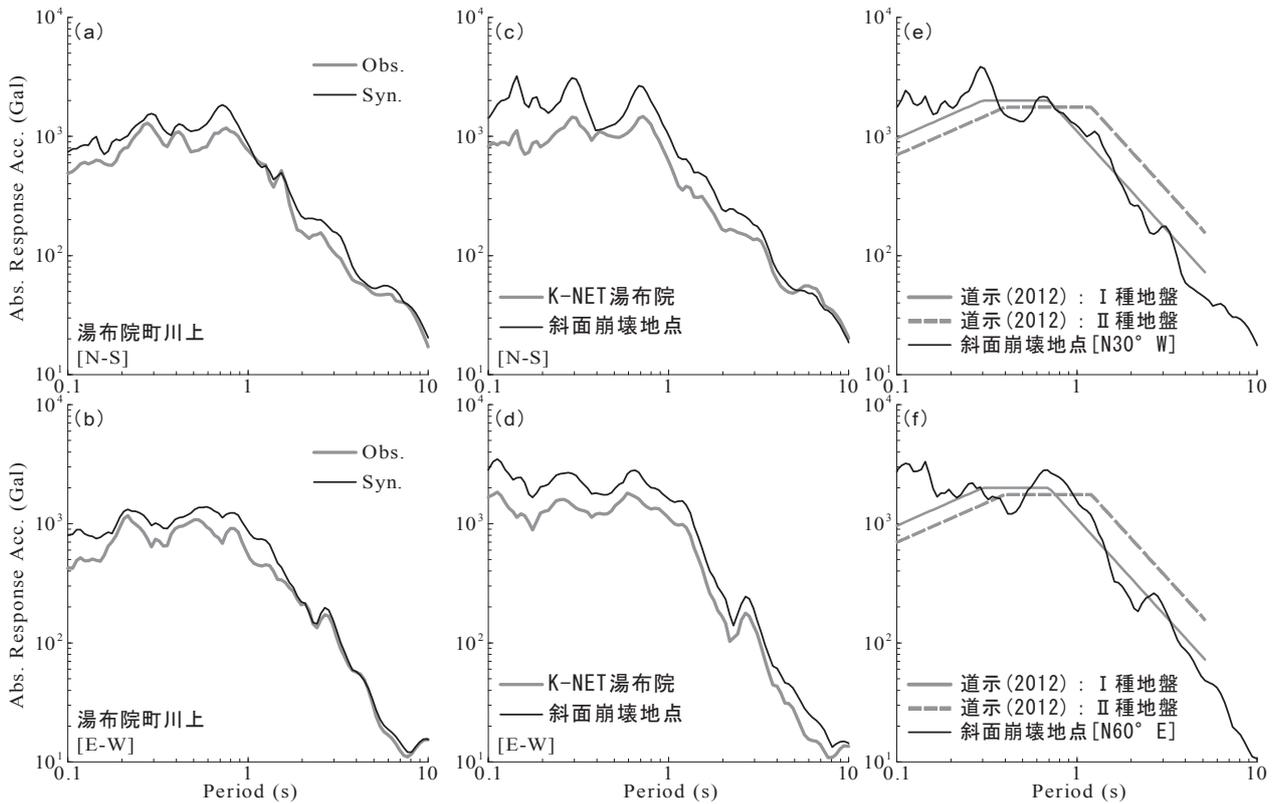


図-8 地震動推定手法の適用性の確認，および並柳橋での推定地震動（絶対加速度応答スペクトル）

を適用すれば，誘発地震時に斜面崩壊地点に作用した地震波形を一定の精度で推定できる可能性が高いことを示唆するものである。

6. 斜面崩壊地点における地震動の評価

図-6(e),(f)および図-7(e),(f)は，誘発地震時における斜面崩壊地点での推定加速度波形および推定速度波形である。図-8(c),(d)には，図-6(e),(f)で示した斜面崩壊地点における推定地震動を入力波とした絶対加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を示す。図-6(a),(b),(c),(d)と図-6(e),(f)による加速度波形の比較，図-7(a),(b),(c),(d)と図-7(e),(f)による速度波形の比較，および図-8(a),(b)と図-8(c),(d)に示す応答スペクトルの比較によれば，斜面崩壊地点では K-NET 湯布院や湯布院町川上よりも明らかに大きな地震動が誘発地震時に作用したことが読み取れる。さらに，斜面崩壊地点の推定地震動(図-6(e),(f)参照)による気象庁計測震度の値は 6.5 と算定され，周辺で観測された誘発地震記録(表-1 参照)を大きく上回る推定結果が得られた。ただし，図-8(a),(b)で示したとおり，推定波は観測波を若干大きく評価する傾向が湯布院町川上において見受けられることから，誘発地震時に斜面崩壊地点では比較的大きな地震動が作用した可能性は極めて

高いものの(図-8(c),(d)参照)，斜面崩壊地点における推定地震動も同様に若干大きく評価している可能性が残されていることに留意されたい。

図-6(g),(h)は，斜面崩壊地点の推定地震動(図-6(e),(f)参照)を滑動方向とその直交方向に座標変換したものであり，その絶対加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を図-8(e),(f)に示す。図-8(e),(f)には，道路橋示方書(2012)¹⁷⁾によるレベル2・タイプ2地震動の標準加速度応答スペクトル(I種およびII種地盤)についても同時に示している。図-8(e),(f)に示すとおり，斜面崩壊地点では，設計標準スペクトルと同等もしくは周期帯(やや短周期帯域^{11),12),13)}を含むによっては上回る地震加速度応答を示していることが読み取れる。

7. まとめ

本研究では，2016年熊本地震の本震による誘発地震によって崩壊した大分自動車道由布岳PA近くの切土斜面に作用した地震動を，サイト増幅特性置換手法に基づき評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 大分自動車道由布岳PA近くの斜面崩壊地点と周辺の既存強震観測点(K-NET湯布院および湯布院町川上)では，サイト増幅特性に有意な差異が確認でき，斜面崩壊地点での強震動評価において，K-NET湯布院およ

び湯布院町川上における誘発地震観測記録の転用が最適であるとは言い難い。

- (2) サイト増幅特性置換手法を利用すれば、2016年熊本地震の本震によって誘発された地震による湯布院町川で得られた観測地震動を比較的精度良く再現することが可能である。
- (3) 2016年熊本地震の本震によって誘発された地震時に大分自動車道由布岳PA近くの切土斜面に作用した推定地震動の応答スペクトルは、K-NET湯布院で得られた誘発地震記録による応答スペクトルを大きく上回るだけでなく、道路橋示方書(2012)¹⁷⁾によるレベル2・タイプ2地震動の設計標準スペクトル(I種およびII種地盤)に対してやや短周期帯域を含む周期帯域において連続的に上回る加速度応答を示す。

今後は、本稿において推定した切土での地震動と既存の盛土での推定地震動¹⁸⁾を比較することによって、その特徴に関して詳細な分析を行うだけでなく、本稿での推定地震動を入力波とした切土・盛土による斜面の動的解析などを実施していきたいと考えている。

謝辞

(国研)防災科学技術研究所 K-NET および大分県による地震観測波形データを使用しました。現地踏査や臨時地震観測の際には、現地住民の皆様などにご支援・ご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、秦吉弥、湊文博、門田浩一、常田賢一：臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の前震における国道443号線道路盛土崩壊地点での強震波形の評価、地盤と建設、Vol.34, No.1, pp.119-126, 2016.
- 2) 例えば、秦吉弥、田山聡、矢部正明、門田浩一、大川雄太郎、常田賢一：臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の前震による高速道路盛土の被災地点での強震動の評価、土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, 2017.[掲載決定]
- 3) Miyazawa, M.: An investigation into the remote triggering of the Oita earthquake by the 2016 Mw7.0 Kumamoto earthquake using full wave field simulation, *Earth Planets Space*, Springer, Vol.68: 205, 2016.
- 4) 松田泰治、山尾敏孝、葛西昭：平成28年熊本地震による道路橋の被害、日本地震工学会誌, No.29, pp.15-17, 2017.
- 5) 高橋良和：2016年熊本地震による橋梁の被害報告、橋梁と基礎, Vol.50, No.9, pp.32-37, 2016.

- 6) 秦吉弥、門田浩一、矢部正明、池田隆明：スペクトルインバージョンに基づくサイト増幅特性に関する評価—2016年熊本地震の誘発地震による大分県内の被災地を例として—、地盤工学会誌, Vol.65, No.10, 2017.[掲載決定]
- 7) 例えば、村岡七重、丸山喜久、山崎文雄：余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定、日本建築学会構造系論文集, No.603, pp.179-186, 2006.
- 8) 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, No.3, pp.75-78, 2004.
- 9) (国研)産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図 Navi)、地質調査総合センターホームページ, 2013.(最終閲覧日：2017年9月9日)
- 10) 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.
- 11) 川瀬博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—、第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
- 12) 秦吉弥、門田浩一、吉田武、常田賢一、一井康二、酒井久和：有効応力解析及び微動模擬解析に基づく造成宅地を対象とした被災に大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域と固有周波数の関係、地盤工学会誌, Vol.64, No.10, pp.10-13, 2016.
- 13) 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.
- 14) 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, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説—V 耐震設計編, 丸善出版, 318p., 2012.
- 18) 秦吉弥、野津厚：被害地震の揺れに迫る—地震波形デジタルデータ CD 付き—、大阪大学出版会, 2016.

(2017年6月10日 受付)