

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

Seismic Waveform Estimation at the Slope Failure Sites along Japan National Route 443
during the Foreshock 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)
湊 文博 Fumihito MINATO (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)

2016年熊本地震の前震による強震動の作用により、震源域である熊本県益城町内の国道443号線の道路盛土において斜面崩壊が発生した。この斜面崩壊を伴う道路盛土の被災は、熊本県内の道路交通ネットワークに深刻な被害を及ぼしており、被災地点に作用した前震時の強震動を、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、道路盛土の被災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前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：余震観測，前震，サイト特性，熊本県益城町，斜面崩壊 (IGC : E-8)

1. はじめに

2016年4月14日21時26分頃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の地震(以後、2016年熊本地震の前震、あるいは前震と呼ぶ)による強震動の作用により、写真-1および写真-2に示すように、国道443号線沿いの道路盛土(2地点：いずれも益城町寺迫交差点近く)において斜面崩壊を伴う深刻な被害が発生¹⁾²⁾した。この前震による被害、ならびに前震の約28時間後に発生した本震による強震動の作用に起因した被害の拡大によって、国道443号線をおおよそ130時間途絶させ、熊本県内の交通ネットワークに大きな被害を及ぼした。

この斜面崩壊を伴う道路盛土の被災メカニズムを評価することは重要であり、そのためには前震時に当該地点に作用した地震動を推定する必要がある。大規模地震時に道路盛土の被災地点に作用した地震動の推定に関して、これまで著者らは、1975年大分県中部地震によるやまなみハイウェイ³⁾、2004年新潟県中越地震による関越自動車道など⁴⁾⁵⁾、2007年能登半島地震による能登有料道路⁶⁾、2009年駿河湾の地震による東名自動車道⁷⁾、2011年東北地方太平洋沖地震による国道6号線・常磐自動車道⁸⁾⁹⁾に作用した地震動をそれぞれ推定しているが、道路盛土の被災メカニズムの更なる解明などのためにも被災地点における地盤震動特性や強震動の評価は非常に重要であり、今後これらの知見を積み重ねていく必要¹⁰⁾がある。

そこで本稿では、上述した国道443号線沿いの被災盛土

の近傍において臨時地震観測等を実施し、得られた記録に基づいてサイト特性(地盤震動特性)を評価した。そして、サイト増幅特性置換手法¹¹⁾を用いて、本震時に国道443号線沿いの被災盛土に作用した強震波形を推定した。



写真-1 道路盛土の被災状況(益城町寺迫交差点北側)¹⁾



写真-2 道路盛土の被災状況(益城町寺迫交差点南側)¹⁾

2. 地盤震動特性の評価

2.1 前震観測記録の整理

図-1 および図-2 に本稿で対象とする国道 443 号線沿いの被災盛土(以後、被災盛土と呼ぶ)周辺における既存強震観測点(KiK-net 益城¹²⁾, 益城町役場, 西原村役場)の分布状況を示す. 図-1 には, 2016 年熊本地震の前震において被災盛土周辺の観測点で得られた記録(最大加速度値 PGA, 最大速度値 PGV(ともに 3 成分合成), 気象庁計測震度¹³⁾)の分布についても同時に示す. 図-1 に示すとおり, KiK-net 益城と益城町役場では, 比較的近い位置関係にあるにも関わらず, 前震観測記録の地震動指標値に有意な差異が見られ, 各強震観測点におけるサイト特性や地震計設置環境の影響などが示唆される. さらに, 図-2(左)に示すとおり, KiK-net 益城と益城町役場の間の距離に対して KiK-net 益城と被災盛土の間の距離はほぼ同程度であること, 益城町役場の震度計は建物内に設置されており観測記録には入力損失の影響等が指摘¹⁴⁾されていることなどを考慮すると, KiK-net 益城と被災盛土の間において前震による地震動の特性に差異が生じていた可能性は否定できない. よって, 2016 年熊本地震の前震によって被災盛土に作用した強震動は, 当該地点における地盤震動特性を評価した上で推定することが肝要である.

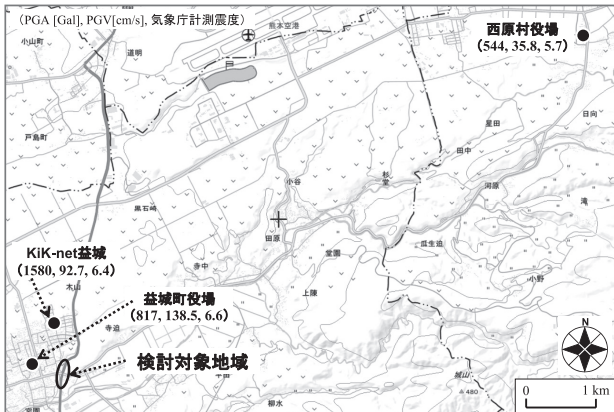


図-1 被災盛土周辺で得られた前震観測記録の分布



図-2 強震観測点と既存ボーリング地点の位置関係

2.2 常時微動計測の実施

本研究では, ①被災盛土(北)(写真-1 参照), ②被災盛土(南)(写真-2 参照), ③臨時地震観測点(の候補地), ④既存のボーリング地点[益城]¹⁵⁾の 4 地点(位置関係については図-2(左)参照), ⑤西原村役場震度計の設置地点および⑥既存のボーリング地点[西原]¹⁵⁾の 2 地点(位置関係については図-2(右)参照)において常時微動計測を実施した. 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. 計測方向は, N-S と E-W の水平 2 成分と鉛直成分の計 3 成分であり, 一体型微動探査兼地震計機器(白山工業(株)製 JU210)¹⁶⁾を採用した. ここに, 常時微動の計測状況は, 後述する臨時地震観測の実施状況¹⁷⁾と全く同じである(すなわち採用機器とその設置位置は同じであり, ゲイン等の計測・観測設定条件のみ異なる).

図-3 および図-4 に常時微動計測結果(常時微動 H/V スペクトルの比較)を益城地区および西原地区について示す.

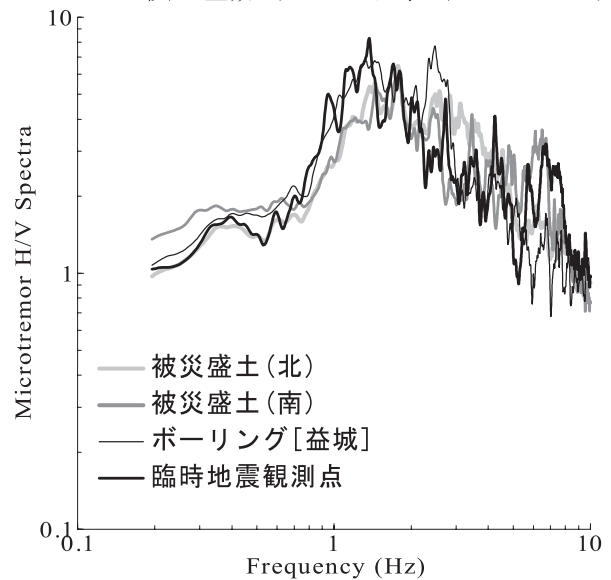


図-3 常時微動 H/V スペクトルの比較(益城町内)

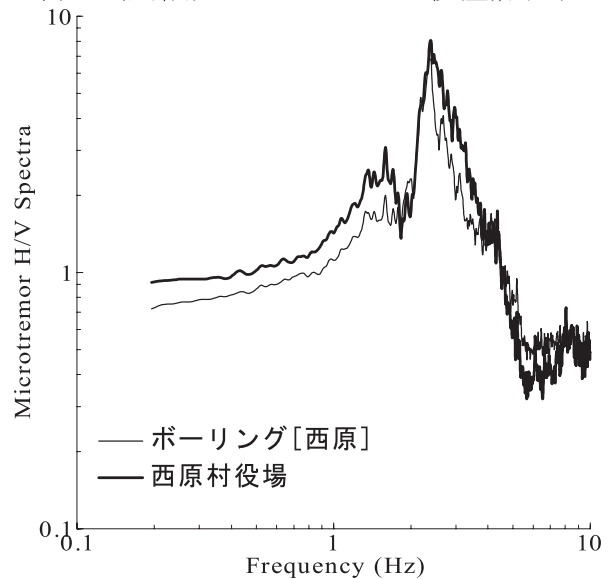


図-4 常時微動 H/V スペクトルの比較(西原村内)

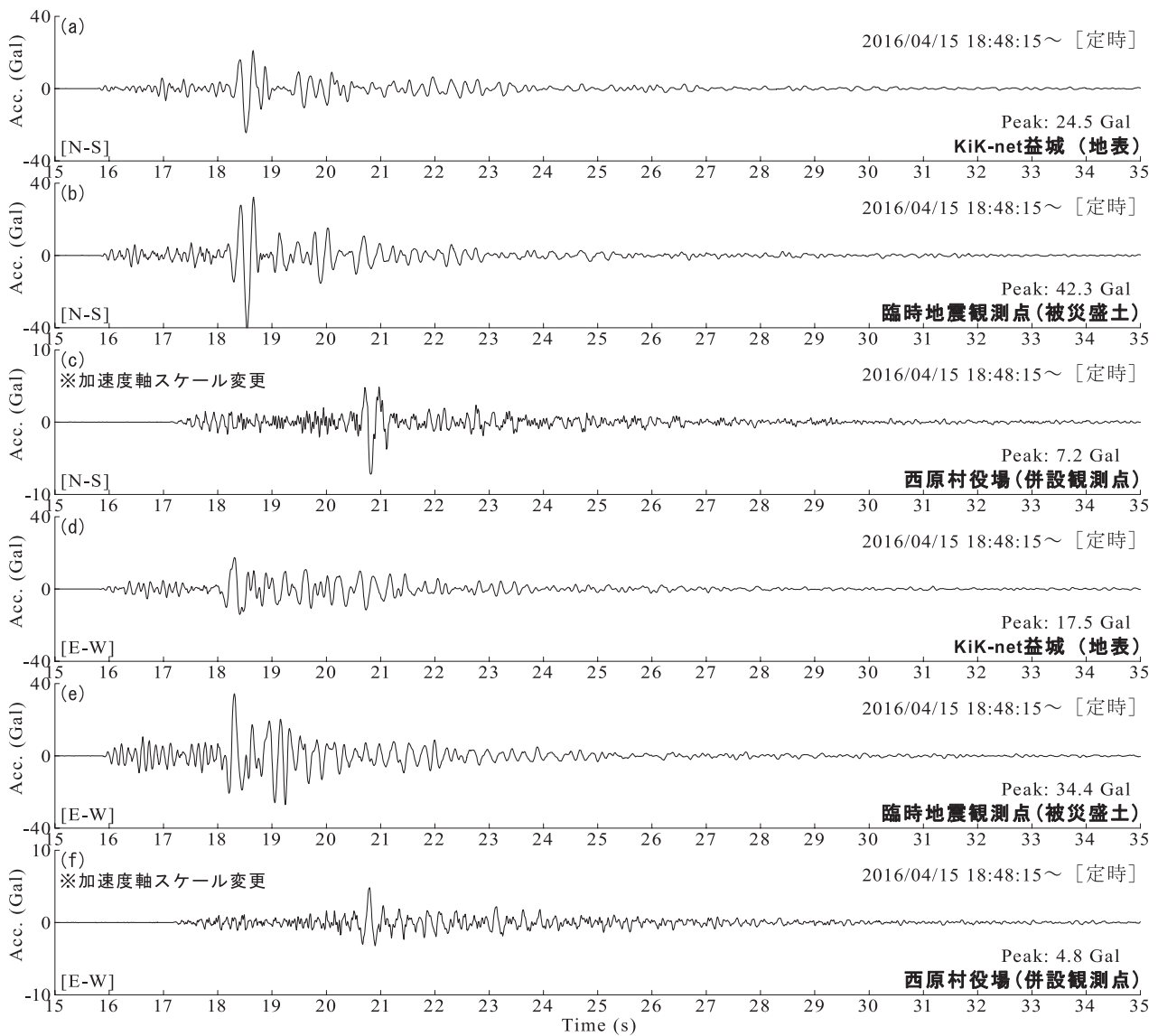


図-5 熊本県熊本地方を震源とする中小地震(2016/04/15 18:48 13 km M 3.9)による観測記録の加速度波形

常時微動 H/V スペクトルの計算処理方法としては、既往の方法¹⁸⁾を採用した。具体的には、まず、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、163.84 秒の区間(雑振動(望ましくないノイズ等)が小さい 163.84 秒間)を 7 区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い(水平動は二成分合成)、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、7 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¹⁶⁾などを考慮して 0.2~10Hz とした。

図-3 に示すとおり、臨時地震観測点(の候補地)とその他の計測地点(被災盛土(北および南))における常時微動 H/V スペクトルの特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が良い一致を示していることから、これらの地点における地盤震動特性は概ね類似しているものと推察できる。したがって、地震計の臨時設置地点としての妥当性を確認できることから、以降の記載では、臨時地震観測点で得ら

れた記録に基づいて被災盛土のサイト特性(地盤震動特性)を評価する(臨時地震観測点を被災盛土と読み換える)。また、被災盛土(北および南)とボーリング[益城]における常時微動 H/V スペクトルの特徴についても良い一致を示していることから、被災盛土の基礎地盤として被災盛土近くの既存のボーリング調査結果(工学的基盤以浅)¹⁵⁾を援用できる可能性が示唆される。さらに、図-4 に示すとおり、西原村役場の震度計位置とその周辺におけるボーリング地点[西原]¹⁵⁾における H/V スペクトルの特徴が比較的良い一致を示しており、役場敷地内にある震度計の基礎地盤として周辺のボーリング調査結果(工学的基盤以浅)¹⁵⁾を援用できる可能性が示唆される。

2.3 臨時地震観測の実施

そこで本研究では、被災盛土近傍における地盤震動特性の類似性(図-3 参照)などを考慮して、図-2(左)に示すよ

うに被災盛土の近傍において地震計を臨時設置し、地震観測を実施した。地震計は一体型微動探査兼地震計機器(白山工業(株)製 JU210)¹⁶⁾を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。トリガーレベルは設定せず、常時観測を継続するシステムとした。観測期間は、2016年4月15日17時～4月16日6時の約13時間であり、サンプリング周波数は100Hz、観測方向はN-S・E-W・U-Dの計3成分である。ここに、地震計の設置などを含む臨時地震観測の実施状況の詳細については、原著論文¹⁷⁾を参照されたい。

その結果、2016年熊本地震の本震による記録¹⁵⁾や以下に示す熊本県熊本地方を震源とする中小地震(本震前に発生した前震の余震)などによる記録を得ることができた。

- ・EQ-1：2016/04/15 17:39 12km 熊本県熊本地方(M_J3.6)
- ・EQ-2：2016/04/15 18:48 13km 熊本県熊本地方(M_J3.9)
- ・EQ-3：2016/04/15 20:15 12km 熊本県熊本地方(M_J3.8)

上記のうちEQ-2は、2016年熊本地震の前震の震源の比較的近い位置で発生したものであり、前震によるサイト位相特性の評価に適している可能性が高い。

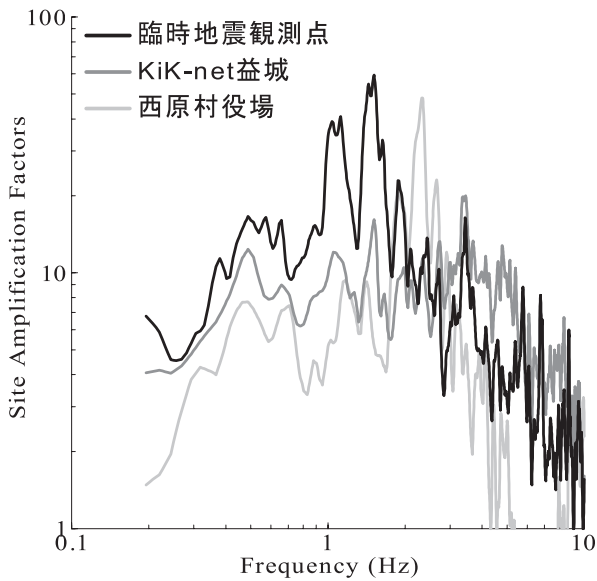


図-6 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

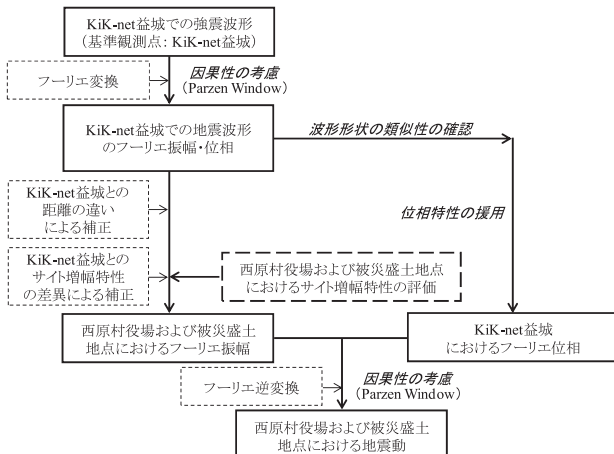


図-7 サイト増幅特性置換手法による地震動推定フロー

2.4 サイト増幅特性の評価

図-6に臨時地震観測点におけるサイト増幅特性¹⁹⁾、KiK-net 益城におけるサイト増幅特性²⁰⁾、西原村役場におけるサイト増幅特性²¹⁾を示す。臨時地震観測点におけるサイト増幅特性は、臨時地震観測点とKiK-net 益城(地表)で同時に得られた中小地震観測記録(EQ-1, EQ-2, EQ-3)を対象に、伝播経路特性^{22),23)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(臨時地震観測点/KiK-net 益城)を計算し、この比率をKiK-net 益城における既存のサイト増幅特性²⁰⁾に掛け合わせることで地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を設定¹⁹⁾した。なお、距離の違いによる補正としては、気象庁発表の震源からの距離に基づく幾何減衰に関する補正と非弾性減衰²²⁾に関する補正を行い、非弾性減衰を表す Q 値は、先行研究²⁴⁾による成果を参考に、加藤による主に九州地方を対象とした Q 値²³⁾を適用した。また、フーリエスペクトルの平滑化にあたっては、0.05HzのParzen Windowを採用した。

図-6に示すとおり、被災盛土とKiK-net 益城におけるサイト増幅特性を比較すると、被災盛土におけるサイト増幅特性は概ね1～2Hz付近において顕著な卓越傾向が確認できるものの、KiK-net 益城ではその傾向が見受けられないことから、前震時に被災盛土に作用した強震動について、当該地点におけるサイト増幅特性を考慮して適切に推定する必要性が示唆される。

2.5 サイト位相特性の評価

図-5は、2.3で紹介したEQ-2(熊本県熊本地方を震源とする中小地震(2016/04/15 18:48 13 km M_J3.9))によって、KiK-net 益城(地表)、臨時地震観測点、西原村役場において同時に得られた加速度波形をN-SおよびE-W成分について比較したものである。図-5に示すように、各観測点の位置関係(図-1参照)やサイト増幅特性の差異(図-6参照)などに起因して、加速度振幅の値には比較的大きな違いが見受けられる。しかしながら一方で、主要動を示す時間断面付近(KiK-net 益城・被災盛土：18～20s、西原村役場：20～22s)の波形状(熊本県熊本地方を震源とする地震による位相特性)に主に注目すると、各観測点間の差異は比較的小さく、類似性が比較的高いことが読み取れる。

この類似性に基づき本稿では、KiK-net 益城(地表)で得られた前震観測記録のフーリエ位相特性(波形状)を、臨時地震観測点(被災盛土)ならびに西原村役場における前震時における推定地震動のフーリエ位相特性(波形状)として転用することとした。すなわち、本稿における地震動推定手法として、サイト増幅・位相特性置換手法²⁵⁾ではなく、サイト増幅特性置換手法¹¹⁾を採用することとした。

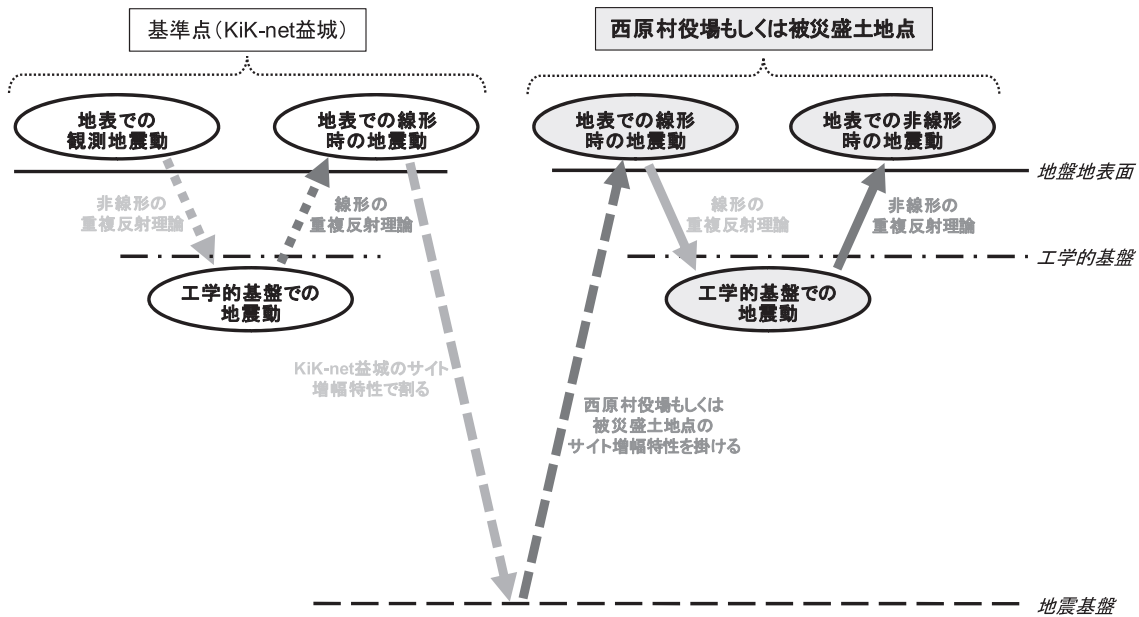


図-8 サイト増幅特性置換手法に基づく地震動推定に関するコンセプト

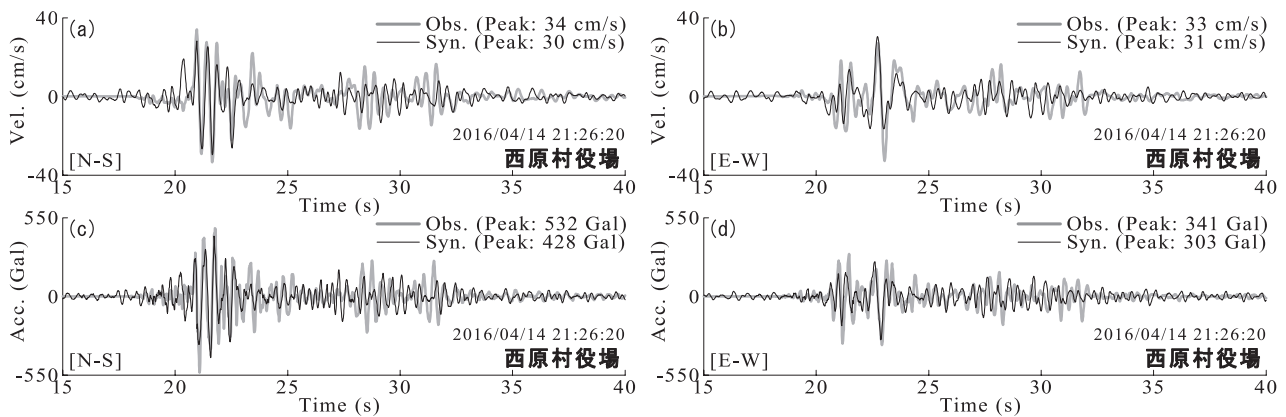


図-9 地震動推定手法の適用性確認 (観測波と推定波による速度波形・加速度波形の比較)

3. 地震動の推定

3.1 推定手法の流れ

2. で得られた知見を踏まえ、本研究では、サイト増幅特性置換手法¹¹⁾を用いて、臨時地震観測点(被災盛土)および西原村役場(以後、推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。この手法は、被災盛土周辺における基準点(KiK-net 益城(地表)を採用)で得られた前震観測記録に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより推定点における地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、推定点における地震動のフーリエ位相は、基準点で得られた前震観測記録によるフーリエ位相を転用することにより、2016 年熊本地震の前震における推定点での地震動を推定する手法である。

図-7 および図-8 に地震動推定に関するフローおよび概念をそれぞれ示す。具体的には、まず、基準点の地表で得られた前震観測記録に対して非線形/線形の重複反射理論^{26),27)}を適用²⁸⁾し、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表面相当の地震動を評価した。その

際、最大せん断ひずみの値は目安となる 1%²⁸⁾を下回っていたことを付記しておく。

次に、この地表面地震動のフーリエ振幅に対して、基準点と推定点の距離の違いによる補正^{22),23)}を施し、さらに推定点～基準点間におけるサイト増幅特性の比(推定点/基準点)を乗じることにより、推定点におけるフーリエ振幅を計算した。その際、N-S 成分ならびに E-W 成分それぞれについて同様の計算を行った。

最後に、得られた推定点におけるフーリエ振幅と基準点で得られた前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²⁹⁾を行うことで、推定点における前震時の地震動を計算した。なお、2.2 で述べた推定点とその周辺の既存ボーリング地点(図-2 参照)における常時微動 H/V スペクトルの類似性(図-3 および図-4 参照)に基づいて、この地震動に対して線形/非線形の重複反射理論^{26),27)}を適用²⁸⁾し、工学的基盤～地表の地盤非線形の影響を考慮した推定点での地震動(地表)を評価した。

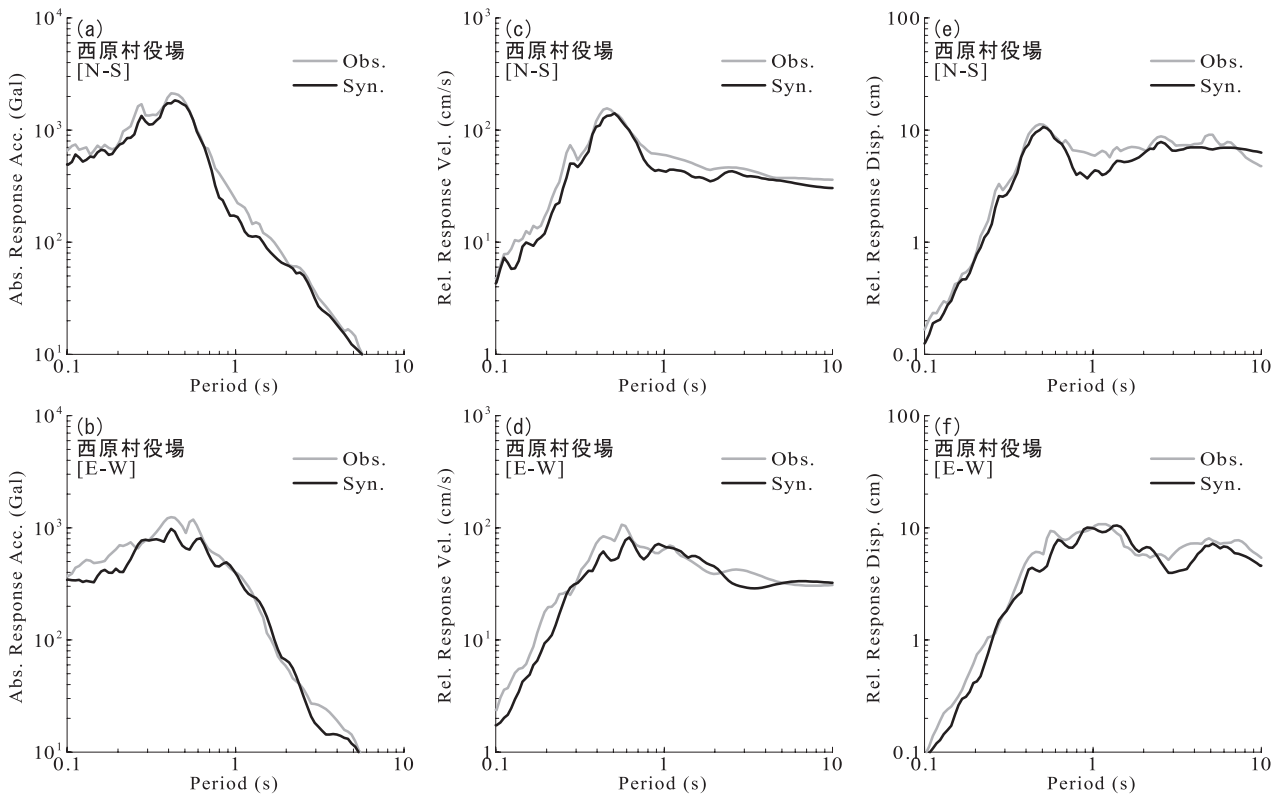


図-10 地震動推定手法の適用性確認（観測波と推定波による応答スペクトルの比較）

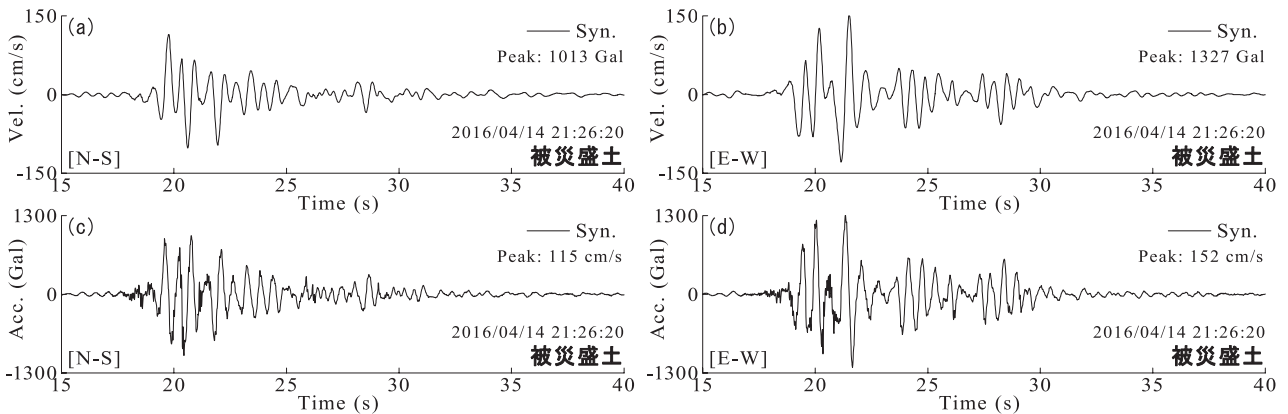


図-11 2016年熊本地震の前震による被災盛土地点での推定地震動（速度波形・加速度波形）

3.2 推定手法の適用性

図-9 に 2016 年熊本地震の前震における西原村役場での観測記録(観測波)と地震動推定結果(推定波)を、速度波形および加速度波形について比較したものを示す。図-9 に示すとおり、推定波は比較的良好に観測波を再現できている。さらに、図-10 には、観測波と推定波による絶対加速度応答スペクトル、相対速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトル(全て減衰定数 5%)の比較を示す。図-10 に示すとおり、観測波と推定波による応答スペクトルが比較的良い一致を示している。

図-9 および図-10 における比較によって得られた知見を踏まえれば(観測波と推定波の類似性を踏まえれば)、2016 年熊本地震の前震に対するサイト増幅特性置換手法

の適用性が、少なくとも KiK-net 益城～西原村役場の間の比較的長距離(図-1 参照)に対して検証されたと考えられるので、次章ではサイト増幅特性置換手法を、比較的短距離である KiK-net 益城～臨時地震観測点(被災盛土)の間に適用することによって、被災盛土に作用した前震時の地震動を推定する。

4. 国道 443 号線沿いの盛土における強震動の推定

図-11 に被災盛土に作用した前震時の推定地震動を、速度波形および加速度波形についてそれぞれ示す。図-11 に示すとおり、推定地震動は、PGV が 100cm/s および PGA が 980Gal を超過する非常に大きな強震動となっている。

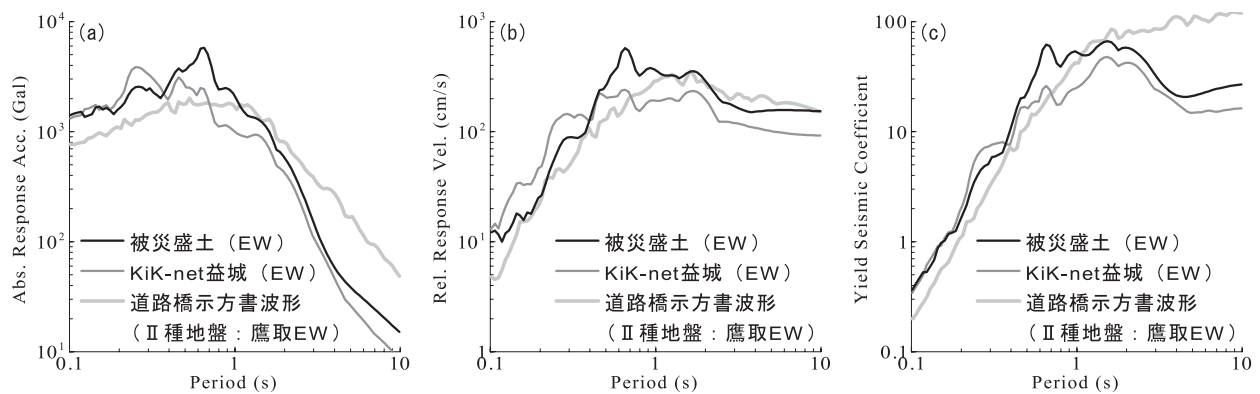


図-12 2016 年熊本地震の前震による被災盛土地点での推定地震動（横断面方向(E-W 成分)における応答スペクトル)

図-12 は、被災盛土における推定地震動による絶対加速度応答スペクトル、相対速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトル(全て減衰定数 5%)を計算したものである。

ここに、被災盛土(北側ならびに南側：図-2(左)参照)の横断面方向に概ね相当する E-W 成分の応答スペクトルについて示している。なお、図-12 には、被災盛土周辺に位置する KiK-net 益城(地表)で得られた前震観測記録の応答スペクトル(E-W 成分)、被災盛土周辺に位置する KiK-net 益城(地表)で得られた前震観測記録の応答スペクトル(E-W 成分)を同時に示している。図-12 に示すとおり、被災盛土と KiK-net 益城の応答スペクトルを比較すると、被災盛土の応答スペクトルは 0.5~2s の周期帯域において上回っている。この周波数帯域は、盛土の地震被災に比較的大きな影響を及ぼす周期帯域³⁰⁾と概ね一致する結果となった。

一方で、レベル 2 クラスの強震動に対する道路盛土の性能評価³¹⁾の手法として、盛土工指針(H22)³²⁾に基づきニューマーク法³³⁾などの地震時残留変形解析手法を採用する場合、現行の設計実務などでは道路橋示方書(H24)³⁴⁾に例示されているレベル 2 地震動を採用するのが一般的³⁵⁾である。そこで図-12 には、道示波(被災盛土での固有周期などの現況を考慮して II 種地盤/JR 鷹取/EW 成分を採用)による応答スペクトルについても同時に示している。図-12 に示すとおり、被災盛土と道示波の応答スペクトルを比較すると、被災盛土の応答スペクトルは道示波のものを概ね 0.1~1s の周期帯域において上回っている。

5. まとめ

本研究では、2016 年熊本地震の前震時に国道 443 号線沿いの道路盛土地点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) 国道443号線沿いの被災盛土と周辺の既存強震観測点(KiK-net益城および西原村役場)では、サイト増幅特性に有意な差異が確認でき、被災盛土地点での強震動評価において、KiK-net益城および西原村役場にお

ける前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年熊本地震の前震による西原村役場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年熊本地震の前震時に国道443号線沿いの被災盛土に作用した推定地震動の応答スペクトルは、KiK-net益城(地表)で得られた前震観測記録による応答スペクトルに対して0.5~2sの周期帯域、および道示波(II種/JR鷹取/EW成分)による応答スペクトルに対して0.1~1sの周期帯域、において上回る地震応答を示す。今後は、推定した強震波形を入力地震動とした道路盛土の動的解析などを実施していきたいと考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、熊本県震度情報ネットワークシステムおよび(国研)防災科学技術研究所による地震波形データを使用させていただきました。常時微動計測および臨時地震観測などの現地踏査の実施にあたっては、益城町の住民・関係者の皆様などにご支援いただきました。(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、有意義なご意見をいただきました。本研究の遂行にあたって、科学研究費補助金・若手研究 A (JP 15H05532)の一部を使用しました。

参考文献

- 1) 秦吉弥：平成 28 年(2016 年)熊本地震被害調査速報，土木学会平成 28 年熊本地震先遣隊情報，地震工学委員会地震被害調査小委員会 HP，2016。(last accessed: 2016/09/16)
- 2) 丸山喜久，山崎文雄，庄司学：2016 年熊本地震 0416 先遣隊調査，土木学会平成 28 年熊本地震先遣隊情報，地震工学委員会地震被害調査小委員会 HP，2016。(last accessed: 2016/09/16)
- 3) 秦吉弥，門田浩一，常田賢一，一井康二：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，地盤と建設，地盤と建設，Vol.34, No.1, 2016.
- 4) 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，地盤と建設，Vol.34, No.1, 2016.

- 5) 秦吉弥, 一井康二, 丸山喜久, 福島康宏, 酒井久和, 中村晋: 位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用—2004年新潟県中越地震における検討—, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 6) 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—, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 例えば, 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 14) 秦吉弥: 地震動・地盤震動, 平成28年(2016年)熊本地震 地震被害調査結果速報会講演資料, 土木学会地震工学委員会 HP, 2016. (last accessed: 2016/09/16)
- 15) 全国地質調査業協会連合会: 平成28年(2016年)熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開 HP, 2016. (last accessed: 2016/09/16)
- 16) 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.
- 17) Hata, Y., Goto, H. and Yoshimi, M.: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake ($M_w7.0$) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
- 18) 例えば, 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.
- 19) 秦吉弥: 地盤震動(1)~被災地点等での臨時地震観測~, 土木学会地震工学委員会平成28年度第1回研究会講演資料, 土木学会地震工学委員会 HP, 2016. (last accessed: 2016/09/16)
- 20) 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.
- 21) 秦吉弥, 一井康二, 釜井俊孝, 王功輝: 臨時地震観測に基づく南阿蘇村造成宅地におけるサイト増幅特性の評価, 第55回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.254-255, 2016.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 例えば, 秦吉弥, 一井康二, 酒井久和: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動推定手法に基づく2005年福岡県西方沖の地震における玄界漁港での地震動の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.2, pp.242-247, 2012.
- 25) 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.
- 26) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002.
- 27) 安田進, 山口勇: 種々の不撓乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演概要集, pp.539-542, 1985.
- 28) 秦吉弥, 片岡正次郎, 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震による観測記録を用いた他地点での地震動推定に関する精度評価, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No.4, pp.195-214, 2016.
- 29) 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.
- 30) 例えば, 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, 地盤工学会, Vol.9, No.4, pp.747-759, 2014.
- 31) 災害科学研究所: 盛土の性能評価と強化・補強の実務, 盛土の性能向上技術普及研究会, 228p., 2014.
- 32) 日本道路協会: 道路土工—盛土工指針(平成22年度版), 丸善, 310p., 2010.
- 33) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己: 盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998.
- 34) 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.
- 35) 例えば, 三好忠和, 常田賢一: 盛土の地震時残留変位に及ぼす地震動の影響に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I_1018-1031, 2014.

(2016年6月7日 受付)