

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推定

秦 吉弥¹・田山 聡²・矢部 正明³・門田 浩一⁴・大川 雄太郎⁵・常田 賢一⁶

¹正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 西日本高速道路(株) 技術本部 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島1-6-20)

E-mail: s.tayama.aa@w-nexco.co.jp

³正会員 (株)長大 構造事業本部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)

E-mail: yabe-m@chodai.co.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 地盤技術部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

E-mail: hirokazu.kadota@os.pacific.co.jp

⁵学生会員 大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yokawa@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁶フェロー会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2016年熊本地震の前震による地震動の作用に伴い、九州自動車道の益城熊本空港IC～御船IC間にある秋津川橋の橋台の盛土が崩壊した。本稿では、2016年熊本地震の前震時に、当該盛土に作用した地震動を推定した結果について報告する。具体的には、まず、当該盛土地点において臨時地震観測を実施し、得られた記録に基づいてサイト増幅特性を評価した。次に、当該盛土周辺(現在のK-NET熊本)で観測された前震記録を拡張型サイト増幅特性置換手法を用いて再現することで、地震動推定手法の適用性を確認した。最後に、適用性が確認された手法に基づいて、前震時における当該盛土地点での地震動を推定した。

Key Words : strong motion, seismic observation, site amplification factor, expressway embankment

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の地震活動による強震動の作用によって、震源域では土構造物の被害が顕在化している。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の地震(以後、前震と呼ぶ)による強震動の作用によって、九州自動車道の益城熊本空港IC～御船IC間にある秋津川橋の橋台部の盛土(以後、被災盛土と呼ぶ)が崩壊¹⁾した(写真-1参照)。この崩壊のメカニズムを明らかにしていく上で、2016年熊本地震の前震時に被災盛土に作用した地震動を推定することは非常に重要²⁾である。

本稿では、2016年熊本地震の前震時に、被災盛土に作用した地震動を当該地点において臨時実施した地震観測の結果に基づいて推定した結果について報告する。具体的には、まず、被災盛土地点において臨時地震観測を実施し、得られた記録に基づいて熊本城内におけるサイト増幅特性を評価した。次に、熊本城周辺の強震観測点で

ある現・K-NET熊本で得られた前震記録を、拡張型サイト増幅特性置換手法を用いて再現することによって、地震動推定手法の適用性を確認した。最後に、適用性が確認された拡張型サイト増幅特性置換手法に基づいて、前震時における被災盛土地点での地震動を推定した。



写真-1 秋津川橋の橋台部の高速道路盛土の被災状況



写真-2 前震の翌日(4月15日)に撮影された被災盛土の上空写真

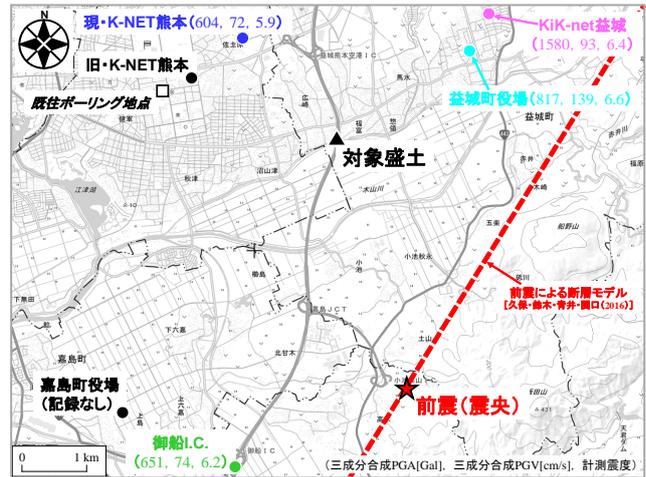


図-1 被災盛土周辺の既存観測点で得られた前震記録

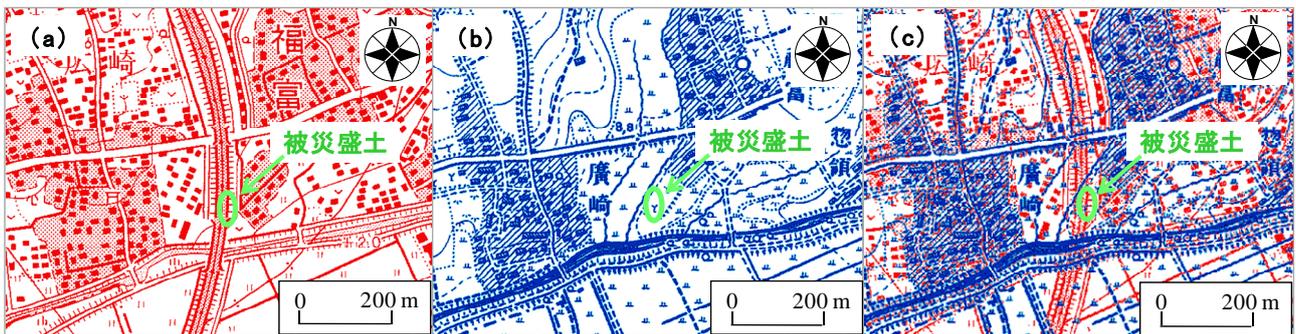


図-2 被災盛土地点の地形状況 (2016年: 同図(a), 1901年: 同図(b), 2016年と1901年: 同図(c))の比較

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(大阪大学))ならびに(公社)土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会(委員長: 矢部正明(株)長大)の活動の一環として実施したものである。

2. 被災状況の分析・整理

写真-2は、前震の翌日(4月15日)に撮影された被災盛土とその周辺の上空写真である。被災盛土は、九州自動車道の益城熊本空港ICから南方向に1.2km付近(図-1参照)のところにある秋津川橋の北側橋台部であり、前震による強震動的作用によって、盛土法面が長さ30mにわたって崩壊し、路面には陥没やひび割れが多数発生した。この被災による復旧作業のため、片方向一車線による対面通行規制や速度規制などの通行制限が終日実施されており、現在も継続中である(2016年8月現在)。

図-2は、被災盛土とその周辺における現在(2016年: 同図(a)参照)および過去(1901年: 同図(b)参照)の地形図を重ね合せたもの(同図(c)参照)である。図-2(a)に示すように、被災盛土の区間では、現在、盛土の東側を沿うように小川が北から南方向に向かって流れており、小

川は被災区間のすぐ南側で西側へ向けて流れをほぼ直角に転換し、九州自動車道秋津川橋の下をくぐり、その先において秋津川に合流している。一方で、図-2(b)に示すように、被災区間の開通(1976年)以前にあたる1901年の地形図(国土地理院で保管されている最古のもの)によると、上記の小川は、北東から南西方向に向かってほぼ真っすぐに流れて秋津川に合流していることが読み取れる。この小川の西側と秋津川の南側は氾濫平野で、ピート層を主体とする軟弱地盤である。小川と秋津川に挟まれた三角形の部分には火山灰質土による自然堤防とされており、盛土の崩壊はこの自然堤防部で発生した。

3. 前震観測記録の整理

図-1は、被災盛土周辺の既存強震観測点で得られた前震観測記録(三成分合成最大加速度, 三成分合成最大速度, 気象庁計測震度³⁾)を位置情報とともに示したものである。なお、旧・K-NET熊本⁴⁾は、2015年3月13日に現・K-NET熊本⁴⁾に移設されているため、前震観測記録は存在しない。図-1に示すように、観測記録が前震の震央から一様な距離減衰を示していないこと、比較的接近している二地点間(例えば、KIK-net益城と益城町役場)で観測された地震動指標の値に有意な差異が見受けられること

から、地盤震動特性の影響が示唆される。

図-3に(国研)産業技術総合研究所による地質図⁹⁾を、図-1の図郭に合わせて示す。図-3に示すように、被災盛土とその周辺の強震観測点では、地質の特徴が類似しているとはいえない。すなわち、既存観測点において得られた前震記録を被災盛土に作用した地震動を見なせるかについては、慎重な検討が必要であることが示唆される。

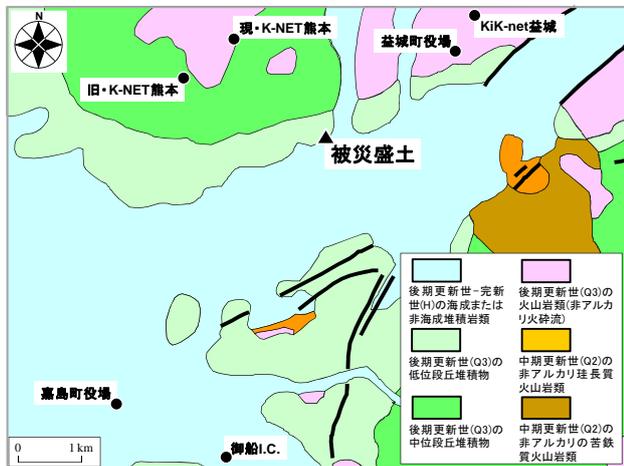


図-3 産総研地質図⁹⁾による熊本城周辺の地質

図-4は、断層面上のすべり方向と変位量⁹⁾の分布に被災盛土とその周辺の観測点(図-1参照)の位置関係を追記したものである。図-4に示すように、星印で表された破壊開始点(震源)の極近傍とKiK-net益城の直下にすべり変位が比較的大きくなっているエリア(いわゆる強震動生成域⁷⁾)が確認できる。図-5(a)~(f)は、前震時に観測された水平動の速度波形を比較したものである。図-5(a)~(f)に示すように、上述した二つの強震動生成域の影

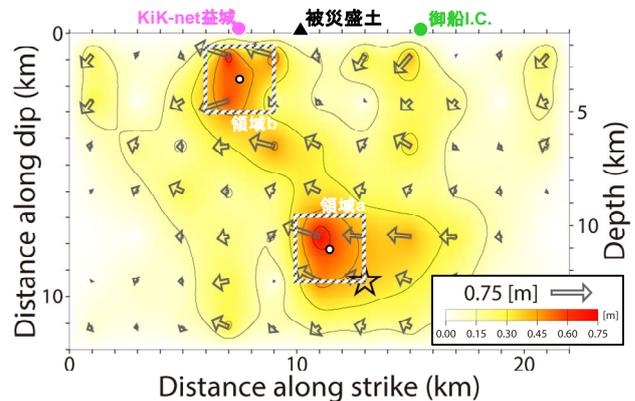


図-4 強震動生成域(サブイベント)の評価(文献6)に一部加筆)

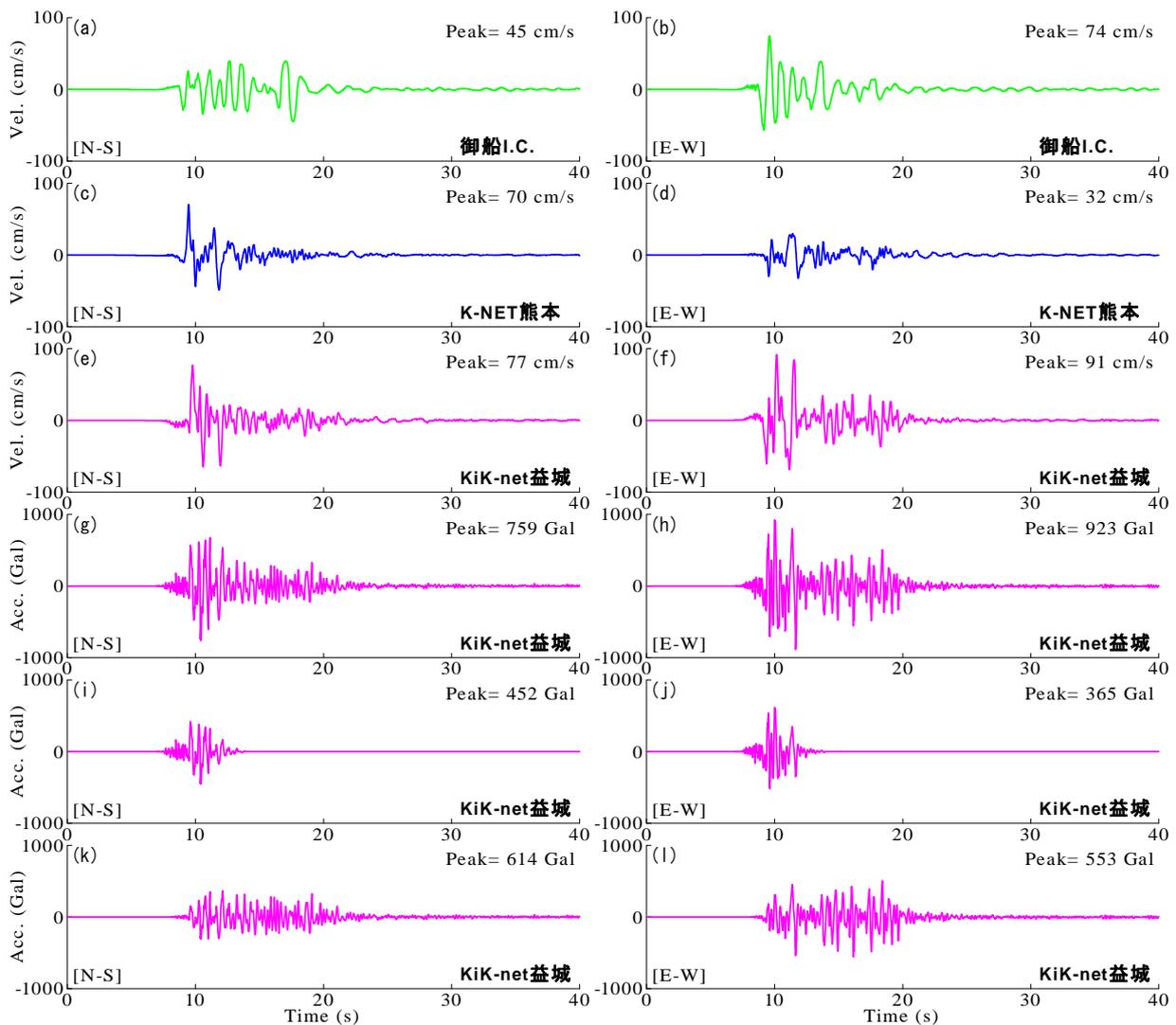


図-5 既存観測点で得られた前震観測記録の速度波形(同図(a)~(f))および基準点での観測地震動のテーパ分割(同図(g)~(l))

響により、震源(震央)よりも北側に位置するK-NET熊本およびKiK-net益城では明瞭な速度パルスが二つ確認できることから、被災盛土地点においても同様の特徴を有する地震動が前震時に作用した可能性が示唆される。

よって、被災盛土地点における地震動を推定するにあたっては、地盤震動特性(サイト特性)の影響(図-1および図-3参照)や震源断層の破壊特性の影響(図-4参照)などを適切に考慮する必要性が示唆される。

4. 臨時余震観測に基づくサイト増幅特性の評価

地震観測は、一体型微動探査兼地震計機器⁷⁾を被災盛土極近傍の位置の地表に設置することで実施した。観測期間は、2016年4月17, 18, 24, 25日, 5月7, 8, 15, 16, 21, 22日, 6月18, 19日である。観測条件として、サンプリング周波数は100Hz, および観測方向はNS, EW, UDの3成分とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムとした。その結果、以下に示すような余震観測記録が、被災盛土地点とその周辺の既存観測点(K-NET熊本, KiK-net益城, 御船I.C.)で同時に得ることができた。

- EQ-01 : 2016/04/17 00:56 9km 熊本県熊本地方 (M_j 3.9)
- EQ-02 : 2016/04/17 04:46 10km 熊本県熊本地方 (M_j 4.5)
- EQ-03 : 2016/04/17 10:59 08km 熊本県熊本地方 (M_j 4.1)
- EQ-04 : 2016/04/17 12:27 17km 熊本県熊本地方 (M_j 4.0)
- EQ-05 : 2016/04/17 19:23 11km 熊本県熊本地方 (M_j 4.4)
- EQ-06 : 2016/04/18 04:44 11km 熊本県熊本地方 (M_j 3.7)
- EQ-07 : 2016/04/25 00:44 11km 熊本県熊本地方 (M_j 4.5)
- EQ-08 : 2016/05/15 18:09 14km 熊本県熊本地方 (M_j 3.9)

- EQ-09 : 2016/05/21 03:56 12km 熊本県熊本地方 (M_j 3.9)
- EQ-10 : 2016/06/18 20:46 10km 熊本県熊本地方 (M_j 4.6)

なお、上記のEQ-01~10のうち、前震の震源断層内(図-1および図-4参照)で発生した中小地震(余震)を結果的には得ることができなかったため、サイト位相特性の評価は困難であるといえる。

図-6は、被災盛土地点におけるサイト増幅特性、御船I.C.におけるサイト増幅特性、KiK-net益城におけるサイト増幅特性⁸⁾、現・K-NET熊本におけるサイト増幅特性⁹⁾を重ね合せたものである。なお、本稿では全て地震基盤~地表相当のサイト増幅特性となっている。被災盛土地点(臨時観測点)におけるサイト増幅特性の評価手順は以下のとおりである。まず、現・K-NET熊本と臨時観測点

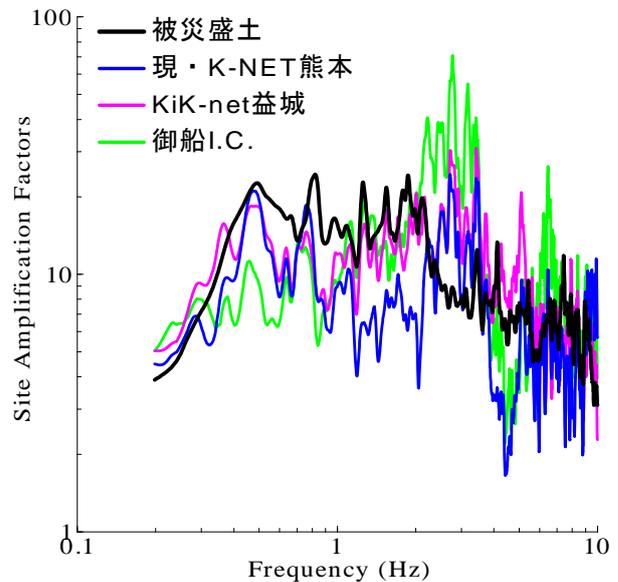


図-6 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

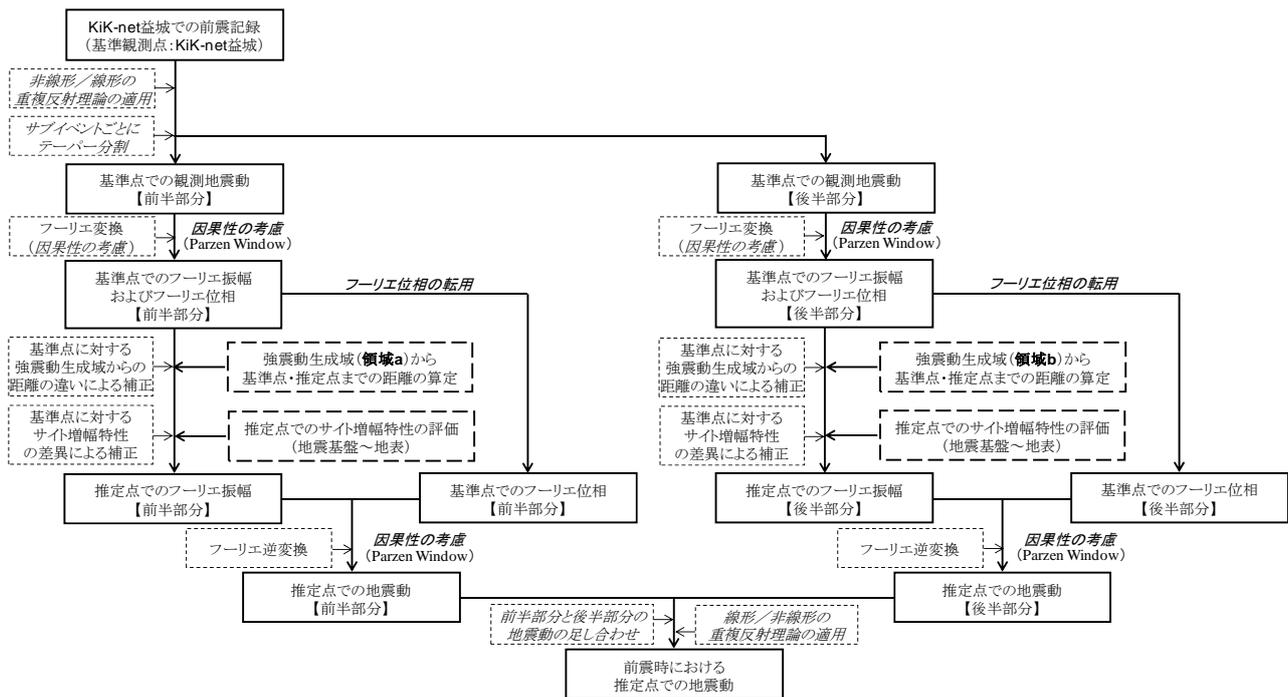


図-7 拡張型サイト増幅特性置換手法に基づく地震動推定フロー

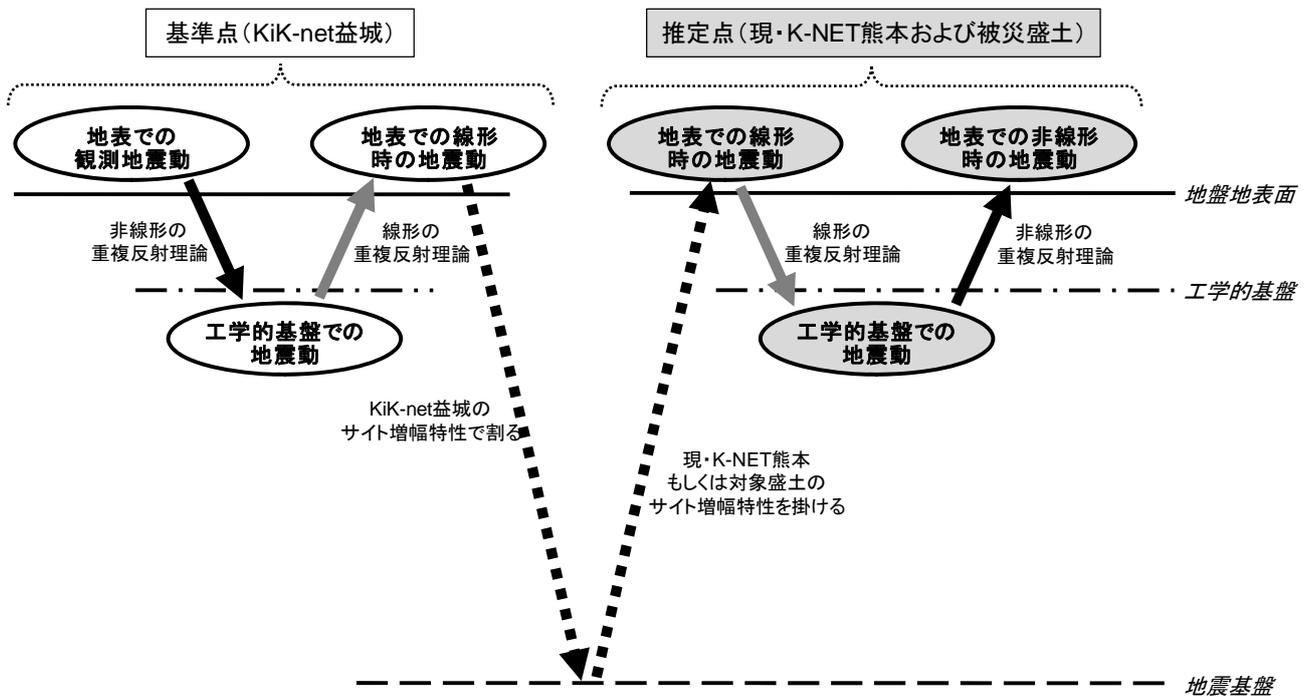


図-8 拡張型サイト増幅特性置換手法に基づく地震動推定に関するコンセプト

で同時に得られた地震観測記録(EQ-01~10)を対象に、両地点の震源からの距離の違いによる補正^{9,10}を考慮したフーリエスペクトルの比率(臨時観測点/現・K-NET熊本)を計算した。次に、この比率を現・K-NET熊本における既存のサイト増幅特性⁹に掛け合わせることで、被災盛土地点(臨時観測点)におけるサイト増幅特性を評価¹¹した。御船ICにおけるサイト増幅特性についても上記と同様の手法に基づいて評価した。

図-6に示すように、被災盛土地点とその周辺の既存強震観測点では、サイト増幅特性の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)に比較的大きな差異が確認でき、現・K-NET熊本、KiK-net益城、御船ICで得られた前震記録を、前震時に被災盛土に作用した地震動として転用するのが困難であることがわかる。一方で、図-6に示すとおり、被災盛土地点におけるサイト増幅特性は他地点でのサイト増幅特性と比較して、0.5~2Hz付近の周波数帯域においてほぼ同等もしくは連続的に上回っていることが読み取れる。この周波数帯域は、盛土構造物の地震被災に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域¹²とほぼ一致しており、当該地点において高速道路盛土が被災したことと矛盾していない。

5. 地震動推定手法とその適用性

本研究では、サイト増幅特性置換手法¹³を拡張することによって、被災盛土地点および現・K-NET熊本(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行った。4.で述べたとおり、臨時地震観測によって得られた記録の中に、前震の震源断層内(図-1および図-4参

照)で発生した中小地震(余震)が含まれていないことから、サイト(増幅・位相)特性置換手法¹⁴の採用はできない。一方で、3.で述べたとおり、前震時の観測地震動には二つの強震動生成域(サブイベント)の影響が主に確認できるだけでなく、各々の強震動生成域(サブイベント)からの距離が対象とする地点ごとに大きく異なっているため(図-1および図-4参照)、既存のサイト増幅特性置換手法¹³の直接的な採用はできない。そこで、このような地震波形に対応するために、拡張型サイト(増幅・位相)特性置換手法^{15,16}の概念を参考に、既存のサイト増幅特性置換手法¹³を拡張し、新たな手法(以後、拡張型サイト増幅特性置換手法と呼ぶ)の開発を行った。

図-7および図-8に、拡張型サイト増幅特性置換手法の地震動推定フローおよびコンセプトをそれぞれ示す。具体的には、まず、前震記録が地盤地表面で得られている観測点(現・K-NET熊本とKiK-net益城)の中で、盛土構造物の地震被災に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域¹²においてサイト増幅特性の類似度が比較的高いこと、前震の震源断層面からの距離が互いに近いことなどを踏まえて基準点としてKiK-net益城を選定した。

次に、基準点(KiK-net益城)における地表の前震観測記録(図-5(g),(h)参照)に対して非線形/線形の重複反射理論^{17,18}を適用¹⁹し、工学的基盤で浅の地盤の非線形挙動の影響を取り除いた地盤地表面相当の地震動を算定した。そして、この地震動に対して8~14sの時間断面の範囲でテーパーをかけることによって、前半部分と後半部分の地震動の分割を行った(図-5(i),(j),(k),(l)参照)。

ここで、テーパー分割を行った基準点(KiK-net益城)における地震動のフーリエ振幅を前半部分および後半部分についてそれぞれ計算し、各々のフーリエ振幅に対して

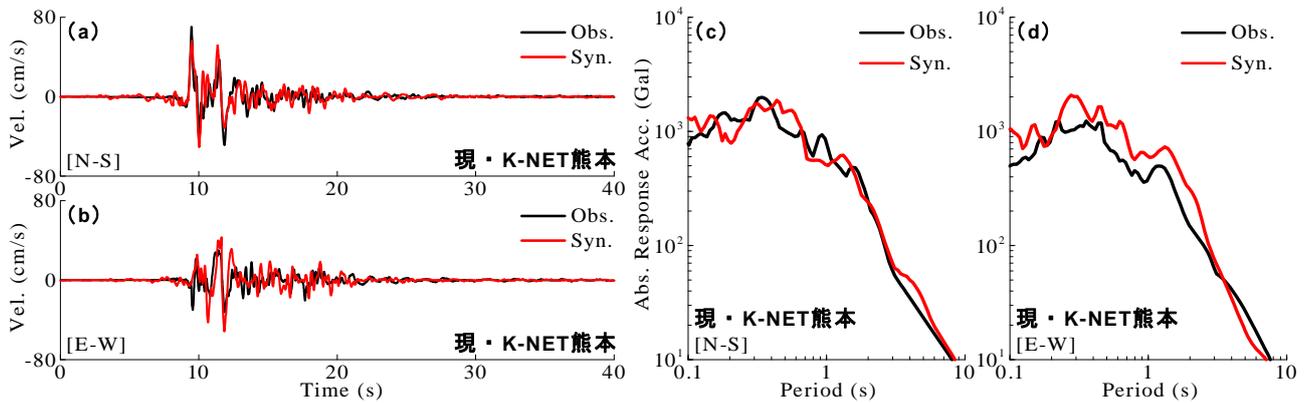


図-9 地震動推定手法の適用性確認（現・K-NET熊本における前震観測記録の再現）

基準点と推定点の距離（領域aの重心（図-4参照：前半部分）もしくは領域bの重心（図-4参照：後半部分）から基準点と推定点までの距離）の違いによる補正^{9),10)}を施し、さらに推定点と基準点のサイト増幅特性（図-6参照）の比を乗じることにより、推定点での前震時のフーリエ振幅を前半部分および後半部分についてそれぞれ推定した。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、得られた推定点でのフーリエ振幅（前半・後半部分）と、基準点での前震記録のフーリエ位相（前半・後半部分）をそれぞれ組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換²⁰⁾を行うことで、推定点における前震時の地震動を前半部分および後半部分について推定した。そして、前半部分と後半部分の地震波形を足し合わせることで、推定点における前震時の地震動を時間断面全体にわたって推定した。このとき、前半部分と後半部分の地震波形の足し合わせは、前半部分と後半部分の各々に対応するS波初動と各ピークの間隔が、現・K-NET熊本およびKiK-net益城で得られた前震観測記録による実績に対して整合性がとれるように足し合わせを行った。

なお、この推定地震動には、工学的基盤以浅の地盤の非線形挙動の影響が含まれていないことから、線形/非線形の重複反射理論^{17),21),22)}を適用¹⁹⁾し、工学的基盤以浅の地盤の非線形挙動の影響を考慮した地盤地表面相当の地震動を算定した。ここに、現・K-NET熊本では20m以深（工学的基盤に至るまで）のボーリングデータが存在しない⁴⁾ため、現・K-NET熊本と旧・K-NET熊本が比較的近い距離関係にあることや、両地点でのサイト増幅特性が比較的類似⁸⁾していることなどを考慮して、旧・K-NET熊本近傍に位置する既存のボーリング地点（図-1参照）でのデータ²³⁾を現・K-NET熊本における20m以深のボーリングデータとして援用した。

6. 地震動推定結果

図-9(a),(b)に前震時の速度波形について観測波と推定波（強震動推定結果）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-9(a),(b)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-9(c),(d)は、前震時における絶対加速度応答スペクトル（減衰定数5%）を観測波と推定波で比較したものである。図-9(c),(d)に示すとおり、E-W成分において推定精度が若干低下しているものの、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、図-9における観測波と推定波の類似性は、上述した被災盛土地点におけるサイト増幅特性を入力として、本稿で新たに開発した拡張型サイト増幅特性置換手法を適用すれば、前震時における被災盛土地点での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。

図-10(a),(b)および図-11(a),(b)は、前震時における被災盛土地点での推定加速度および推定速度波形である。

図-10(a),(b)および図-11(a),(b)に対して図-1および図-5を比較すると、被災盛土地点における最大加速度PGA (1151Gal) および最大速度PGV (114cm/s) の値が周辺の観測記録に対して比較的大きな値を示している。水平二成分による気象庁計測震度（上下動が計測震度の値に及ぼす影響が比較的小さい²⁴⁾ことを考慮）は、被災盛土地点において6.6（震度7）と算定され、非常に大きな地震動が前震時に被災盛土に作用したと推察できる。

図-10(c),(d)および図-11(c),(d)には、被災盛土地点における推定地震動（図-11(a),(b)参照）を入力波とした絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル（いずれも減衰定数5%）を示す。さらに、図-10(c),(d)および図-11(c),(d)には、道路盛土の耐震性評価では道路橋示方書（H24）²⁵⁾に例示されているレベル2地震動の採用が一般的²⁶⁾であることから、Ⅲ種地盤（被災盛土地点における地盤種別）に相当する地震動（Ⅱ-Ⅲ-1：東神戸大橋）を入力波とした絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル（いずれも減衰定数5%）についても同時に示す。図-10(c),(d)および図-11(c),(d)に示すとおり、0.1~0.7s付近の比較的短周期帯域において被災盛土地点での推定地震動の応答スペクトルが道路橋示方書によるスペクトルを連続的に上回っていることが読み取れる。

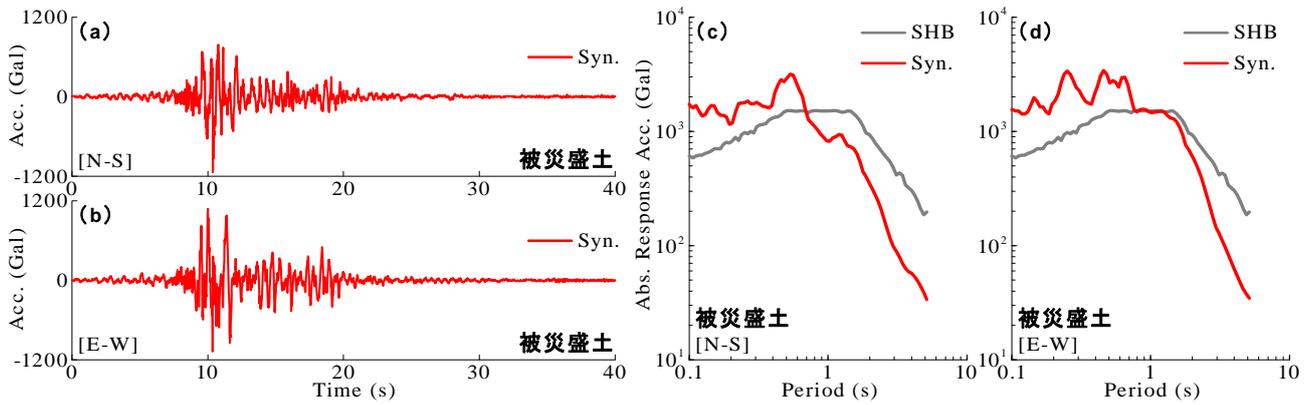


図-10 前震時における被災盛土地点での推定地震動（加速度波形および絶対加速度応答スペクトル（減衰定数5%））

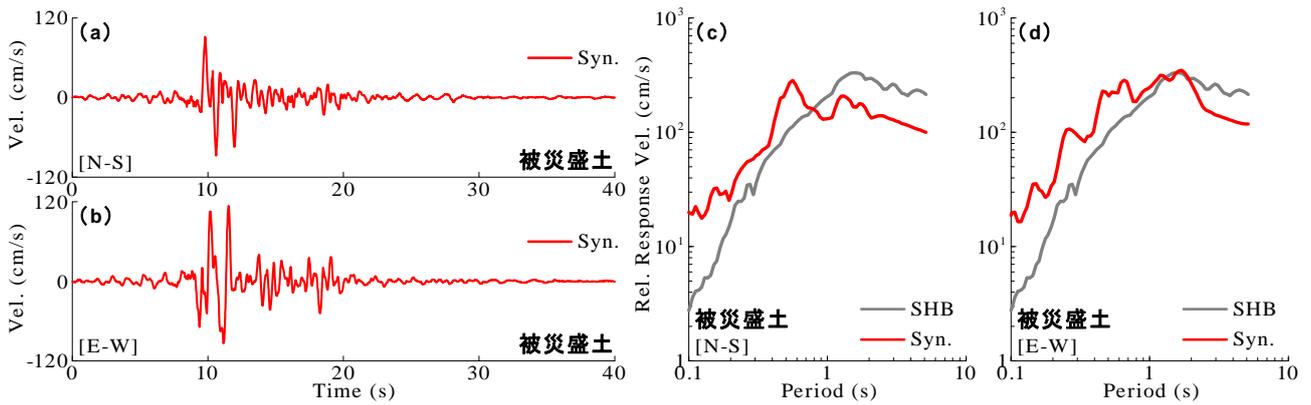


図-11 前震時における被災盛土地点での推定地震動（速度波形および相対速度応答スペクトル（減衰定数5%））

7. まとめ

本研究では、2016年熊本地震の前震によって被害が発生した九州自動車道の益城熊本空港IC～御船IC間にある盛土を対象に、前震時に作用した地震波形を拡張型サイト増幅特性置換手法を用いて推定した。以下に、得られた知見を示す。

- (1) 臨時地震観測によって得られた記録に基づき評価したサイト増幅特性の比較によれば、被災盛土周辺の現・K-NET熊本、KiK-net益城、御船ICでの前震観測記録を前震時に被災盛土に作用した地震動と見なすことはできない。
- (2) 被災盛土でのサイト増幅特性は、周辺観測点でのサイト増幅特性と比較して、0.5～2Hz付近の周波数帯域において同等もしくは連続的に上回る特徴を有し、この周波数帯域は盛土構造物に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域と概ね一致する。
- (3) 拡張型サイト増幅特性置換手法を利用すれば、2016年熊本地震の前震時に現・K-NET熊本で得られた観測地震動を一定の精度で再現することが可能である。
- (4) 被災盛土地点における推定地震動は、周辺観測点で得られた前震記録よりも比較的大きな地震動指標値を示し、気象庁計測震度（水平二成分合成）の値は6.6と推定され、前震時に被災盛土には震度7相当の非常に大きな地震動が作用したものと考えられる。

今後は、推定地震動を入力波とした動的解析などを実施することによって、対象とした高速道路盛土の被災メカニズムを明らかに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/KiK-netおよび熊本県震度情報ネットワークシステムによる地震観測波形データを利用させていただきました。臨時地震観測の実施では、湊文博氏および山内政輝氏（ともに大阪大学学生）の支援を仰いだ。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（委員長：常田賢一（大阪大学））ならびに（公社）土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会（委員長：矢部正明（株）長大）の委員の皆様には、有意義なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、常田賢一：平成 28 年熊本地震の現地調査による被害の特徴と今後の対応に関する考察，一般財団法人災害科学研究所平成 28 年度災害等緊急調査報告書—平成 28 年 4 月熊本地震による被害調査—，47p., 2016.
- 2) 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.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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。(last accessed: 2016/09/01)
- 6) 久保久彦，鈴木亘，青井真，関口春子：近地強震記録を用いた平成28年(2016年)熊本地震(4月14日21時26分，M6.5)の震源インバージョン解析(2016/8/9再改訂版)，防災科学技術研究所強震観測網(K-NET, KiK-net)ホームページ，2016。(last accessed: 2016/09/01)
- 7) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.6, pp.2531-2545, 2003.
- 8) 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.
- 9) 長坂陽介，野津厚：K-NET熊本(KMM006)とKiK-net益城(KMMH16)のサイト増幅特性の再評価—デジタルデータ付き—，(国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ，2016。(last accessed: 2016/09/01)
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 村岡七重，丸山喜久，山崎文雄：余震および常時微動のフリー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.
- 14) 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.
- 15) 野津厚，若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性，港湾空港技術研究所資料，No.1244, 2011.
- 16) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, pp.418-429, 2012.
- 17) 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.
- 18) 安田進，山口勇：種々の不攪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.
- 19) 例えば，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.
- 20) 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.
- 21) 國生剛治，大川武巳，大島俊明，加藤匡一，中島博：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性(その1)—火山灰粘性土の物理・力学特性—，第38回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.217-218, 2003.
- 22) 國生剛治，大川武巳，大島俊明，加藤匡一，中島博：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性(その2)—地震後の非排水せん断強度についての三軸試験—，第38回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.219-220, 2003.
- 23) (一社)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サイト，全国地質調査業協会連合会・地質情報整備活用機構ホームページ，2016。(last accessed: 2016/09/01)
- 24) 例えば，中村豊：合理的な地震動強度指標値の検討—DI値を中心にした地震動指標値間の関係—，土木学会地震工学論文集[報告](CD-ROM)，Vol.27, Paper No.290, 2003.
- 25) (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.
- 26) 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.

(2016.9.1受付)

EVALUATION OF GROUND MOTION AT AKITSU RIVER BRIDGE ALONG
KYUSHU EXPRESSWAY DURING THE FORESHOCK OF THE 2016 KUMAMOTO
EARTHQUAKE BASED ON TEMPORARY AFTERSHOCK OBSERVATION

Yoshiya HATA, Satoshi TAYAMA, Masaaki YABE,
Hirokazu KADOTA, Yutaro OKAWA and Ken-ichi TOKIDA

Slope failure of expressway embankment was occurred in the abutment site for Akitsu River Bridge during the foreshock of the 2016 Kuamoto Earthquake. Therefore, to clarify the failure mechanism, it is necessary to estimate ground motions in the damage site with sufficient accuracy, taking into account local site effects. In this study, seismic waveforms in the damage site were estimated based on the extended site-effect substitution method considering the strong motion generation areas. The site effects in the damage site were evaluated based on the temporary aftershock observation.