

サイト増幅特性置換手法に基づく2016年熊本地震における熊本城での強震動の評価

秦 吉弥¹・村田 晶²・池本 敏和³・橋本 隆雄⁴・宮島 昌克⁵

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 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp

³ 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴ 正会員 (株)千代田コンサルタント 復興・防災本部防災対策室 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5)

E-mail: t-hashii@chiyoda-ec.co.jp

⁵ 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

2016年熊本地震の地震動の作用により、熊本城内では、石垣の崩壊や櫓の損壊などの甚大な被害が数多く発生した。本稿では、2016年熊本地震の前震時ならびに本震時に、熊本城内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、熊本城内および周辺の強震観測点において常時微動計測を実施し、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、熊本城周辺で観測された前震記録・本震記録を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、前震時および本震時における熊本城内での地震動を推定した。

Key Words : *strong motion, microtremor measurement, site amplification factor, stone masonry*

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、熊本城(図-1参照)では、石垣の崩壊などの甚大な被害が数多く発生¹⁾した。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)による被災状況を踏まえ、それ以後、熊本城内への立ち入りについて原則禁止の状態が続いている(2016年8月現在)。また、前震から約28時間後の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の地震(以後、本震と呼ぶ)では、その強震動の作用により、石垣の崩壊・はらみ出し、櫓・長塀の損壊などの甚大な被害が熊本城内のほぼ全域で広範囲にわたって発生した。これらの被災メカニズムを明らかにし、熊本城内における施設の修復・復興計画などを今後策定していく上で、2016年熊本地震の前震時ならびに本震時に熊本城内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ならびに本震時に、熊本城内に作用した地震動を城内での常時微動計測に基

づいて推定した結果について報告する。具体的には、まず、熊本城内および周辺の強震観測点において常時微動計測を実施し、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得られた前震記録・本震記録をサイト増幅特性置換手法³⁾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サイト増幅特性置換手法に基づいて、前震時および本震時における熊本城内での地震動を推定した。

なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会石積擁壁の耐震補強対策に関する研究小委員会(委員長:橋本隆雄((株)千代田コンサルタント))の委員会活動の一環として実施したものである。すなわち、上記の熊本城内における常時微動計測などの現地調査は、熊本城調査研究センターの承諾・同行のもとで実施したものであり、現地調査結果に基づいて得られた本稿における研究成果については、熊本市に還元することで、熊本城内の石垣等の施設が今後より良くなるよう修復・復興計画の策定等に役立てていくことを主目的としている旨、ここに付記しておく。

2. 熊本城内の地形・地質的な特徴

図-2は、熊本城周辺の既存強震観測点で得られた前震観測記録および本震観測記録を位置情報とともに示したものである。なお、旧・JMA熊本⁴⁾は、2011年5月12日に現・JMA熊本⁴⁾に移設されているため、前震・本震観測記録は存在しない。図-2に示すように、熊本城の比較的近くには、旧・JMA熊本、現・JMA熊本、熊本市消防局の三つの強震観測点があり、熊本市消防局と現・JMA熊

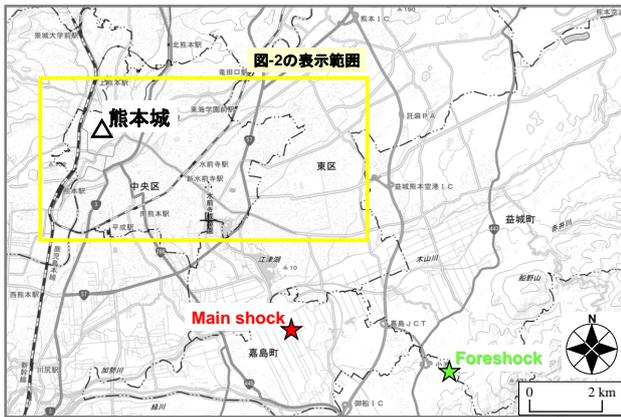


図-1 2016年熊本地震の前震・本震の震央と熊本城の位置関係

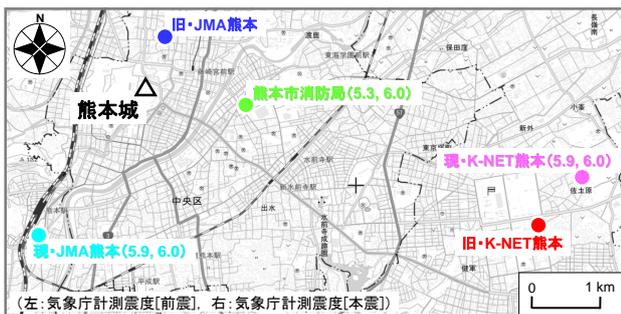


図-2 熊本城周辺で得られた前震と本震による気象庁計測震度

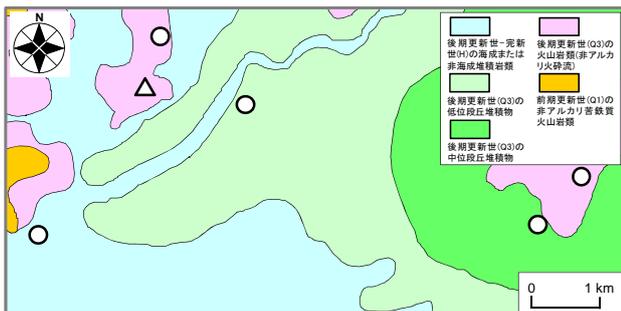


図-3 産総研地質図⁹⁾による熊本城周辺の地質

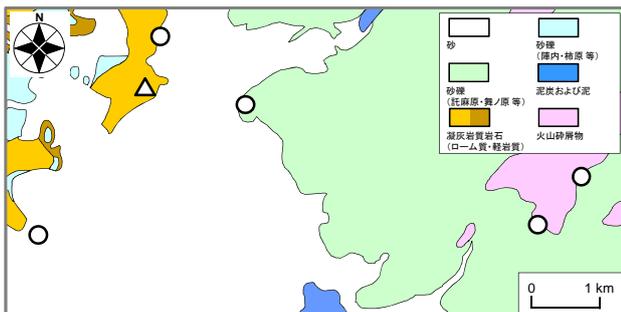


図-4 国土省国土政策局⁹⁾による熊本城周辺の表層地質

本において前震時および本震時に記録された気象庁計測震度⁴⁾の値に有意な差異が確認でき、地盤震動特性の差異が示唆される。よって、既存観測点においてこれまでに得られた地震記録を、熊本城での地震動推定に活用できるかについては慎重な検討が必要である。

図-3に(国研)産業技術総合研究所による地質図⁹⁾、図-4・図-5・図-6に国土交通省国土政策局による表層地質図・地形分類図・土壌図⁹⁾、図-7に(一社)熊本県地質調査業協会による熊本市周辺地盤図⁷⁾、図-8に防災科研J-SHIS⁸⁾に基づく微地形区分を、図-2の図郭に合わせて示す。図-3～図-8に示すように、各々の図において着目する指標や区分はそれぞれ異なるものの、熊本城と旧・

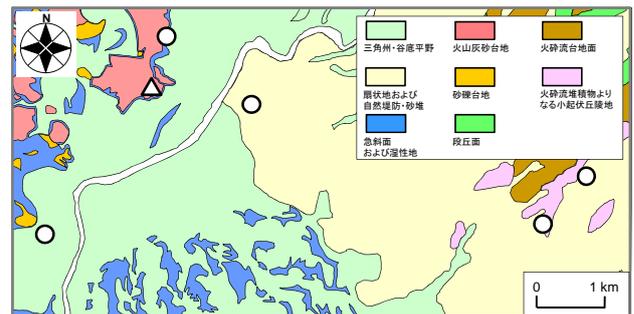


図-5 国土省国土政策局⁹⁾による熊本城周辺の地形分類

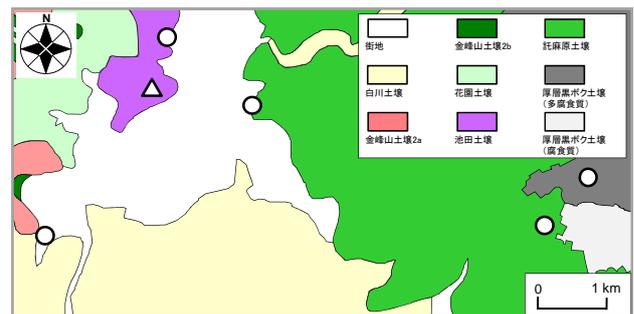


図-6 国土省国土政策局⁹⁾による熊本城周辺の土壌

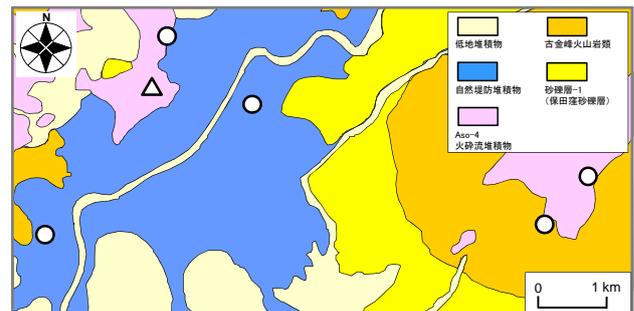


図-7 熊本市周辺地盤図⁷⁾による熊本城周辺の地盤特性

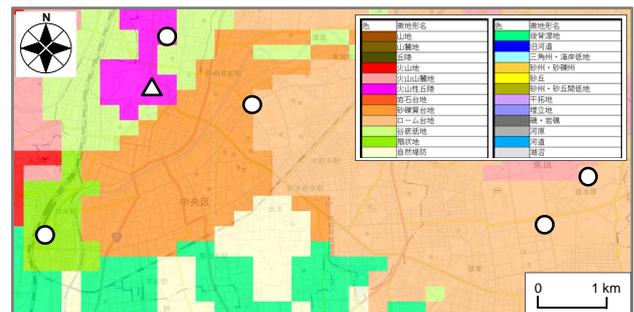


図-8 地震ハザードステーション⁸⁾による微地形区分

JMA熊本(熊本城に最も近い強震観測点)では、地形・地質の特徴が類似していることが確認できる。一方で、熊本市消防局および現・JMA熊本は、熊本城と地形・地質の特徴が明らかに異なっていることが読み取れる。

すなわちこれらは、熊本市消防局および現・JMA熊本における前震・本震観測記録を前震時および本震時に熊本城に作用した地震動と見なすことが困難である可能性が高いこと、熊本城での地震動推定において旧・JMA熊本でこれまでに得られている地震観測記録を利活用できる可能性が高いことを示唆するものである。これらの可能性を確認するために、熊本城内とその周辺の強震観測点で常時微動計測を実施した結果を次章で述べる。

3. 常時微動計測の実施

常時微動計測は、図-9に示すように、熊本城内のほぼ全域(熊本城調査研究センターの職員同行のもとで立入りが可能な区域)の45地点において実施した。また、熊本城近くの既存強震観測点(旧・JMA熊本、現・JMA熊本、熊本市消防局)においても常時微動計測を実施した。写真-1に熊本城内での常時微動計測状況の一例を示す。計測日は、2016年7月27日である。計測は昼間に実施し、同型の七台の微動計(七台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器⁹⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献9)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。計測時間は、一計測点あたり約30分間の単点計測とした。

常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法¹⁰⁾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秒の区間を七区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化した後に、H/Vスペクトルを算出し、七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⁹⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-10は、熊本城内(計45地点)の常時微動H/Vスペクトル(図-11参照)のピーク周波数をプロットしたものである。図-10に示すとおり、熊本城内における地盤震動特性は概ね一様であり、H/Vスペクトルのピーク周波数は、1.5~4Hz付近に多く分布しているのが読み取れる。

図-11は、熊本城内(計45地点)の常時微動H/Vスペクトルに対して、熊本城近くの既存強震観測点(旧・JMA熊本、現・JMA熊本、熊本市消防局)での常時微動H/Vスペクトルを比較したものである。図-11に示すとおり、同じ熊本城内においても、ピーク周波数やスペクトル形状などの常時微動H/Vスペクトルの一般的特徴に一定



写真-1 熊本城内における常時微動計測の実施状況の一例



図-9 熊本城内における常時微動計測地点の分布

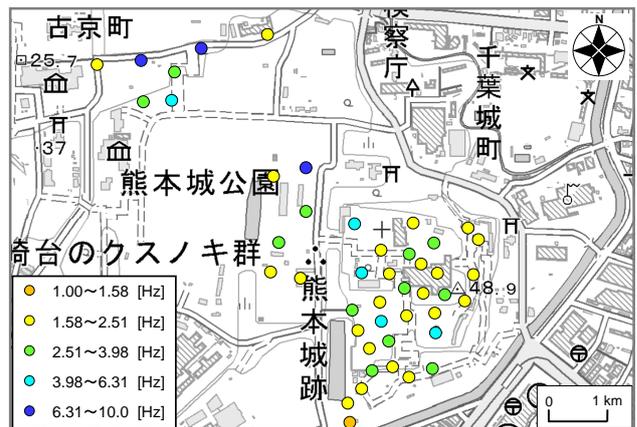


図-10 熊本城内におけるH/Vスペクトルのピーク周波数の分布

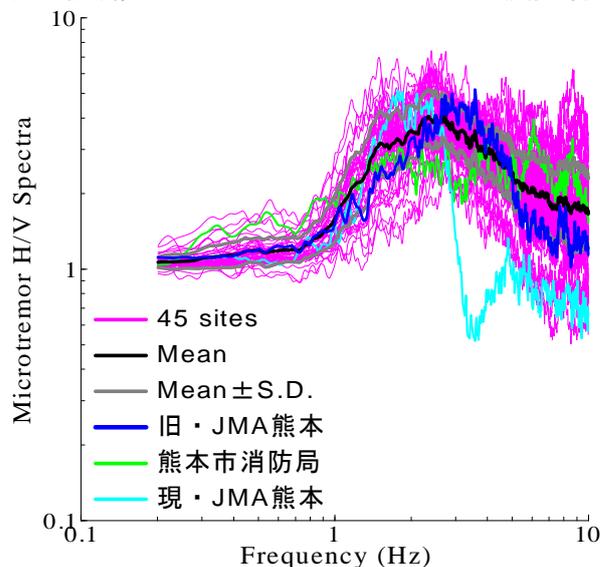


図-11 熊本城内における常時微動H/Vスペクトルの比較

のバラツキが確認できる。一方で、熊本城全体のH/Vスペクトル(周波数ごとの平均値およびその標準偏差の分布)と旧・JMA熊本でのH/Vスペクトルに着目すると、両者の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が比較的良い一致を示している。一方で、熊本城全体のH/Vスペクトルに対する現・JMA熊本および熊本市消防局でのH/Vスペクトルの比較では、両者の特徴が類似しているとは言い難い。すなわちこれらは、熊本市消防局および現・JMA熊本における前震・本震観測記録を前震時および本震時に熊本城に作用した地震動と見なすことができないこと、熊本城での地震動推定において旧・JMA熊本でこれまでに得られている地震観測記録の利活用が可能であることを示唆するものである。

4. サイト増幅特性の評価

図-12は、熊本城近くの既存強震観測点(①旧・JMA熊本、②現・JMA熊本、③熊本市消防局)でのサイト増幅特性¹¹⁾を比較したものである。旧・JMA熊本、現・JMA熊本、熊本市消防局におけるサイト増幅特性は、①旧・JMA熊本と旧・K-NET熊本(図-2参照)¹²⁾、②現・JMA熊本と旧・K-NET熊本¹²⁾、③熊本市消防局と旧・K-NET熊本¹²⁾でそれぞれ同時に得られた中小地震観測記録(いずれも前震前の記録)を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{13,14)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(①旧・JMA熊本/旧・K-NET熊本、②現・JMA熊本/旧・K-NET熊本、③熊本市消防局/旧・K-NET熊本)をそれぞれ計算し、この比率を旧・K-NET熊本における既存のサイト増幅特性¹⁵⁾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評価した。

3.で述べた熊本城と旧・JMA熊本の常時微動H/Vスペクトルの類似性を踏まえて旧・JMA熊本を熊本城と置き換えると、図-12に示すとおり、熊本城(旧・JMA熊本)とその周辺の既存強震観測点(現・JMA熊本および熊本市消防局)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。さらに、熊本城(旧・JMA熊本)では、対象周波数帯域である0.2～10Hzにおいて他者を概ね包絡していることから、前震時および本震時に熊本城に作用した地震動は、現・JMA熊本および熊本市消防局における観測地震動よりも大きかったものと推察できる。

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³⁾を用いて、熊本城(旧・JMA熊本)および現・JMA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。図-13に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、前震・本震記録が得られている観測点の中で熊本城に対

して最も近いことなどを踏まえて基準観測点として熊本市消防局を選定した。次に、基準観測点(熊本市消防局)での前震および本震観測記録(図-14参照)によるフーリエ振幅をそれぞれ計算し、そのフーリエ振幅に対して基準観測点と推定点の距離(ここでは前震および本震ともに震源距離を採用)の違いによる補正^{13,14)}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、推定点での前震時および本震時のフーリエ振幅をそれぞれ推定した。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、得られたフーリエ振幅と、基準観測点での前震記録もしくは本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、推定点における前震時および本震時の地震動を推定した。なお、後述するように、現・JMA熊本および熊本市消防局における前震記録ならびに本震記録のフーリエ位相特性にそれほど大きな差異が見受けられないことなどを考慮して、本稿ではサイト位相特性の置換¹⁷⁾の実施を見送った。

図-15に前震時および本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。

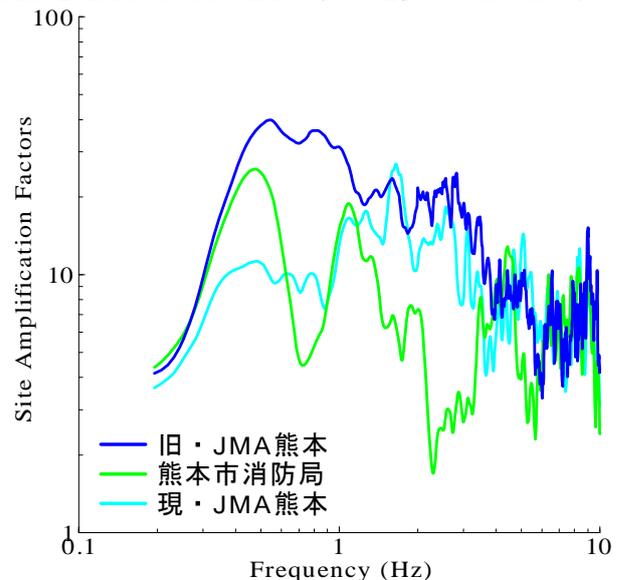


図-12 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

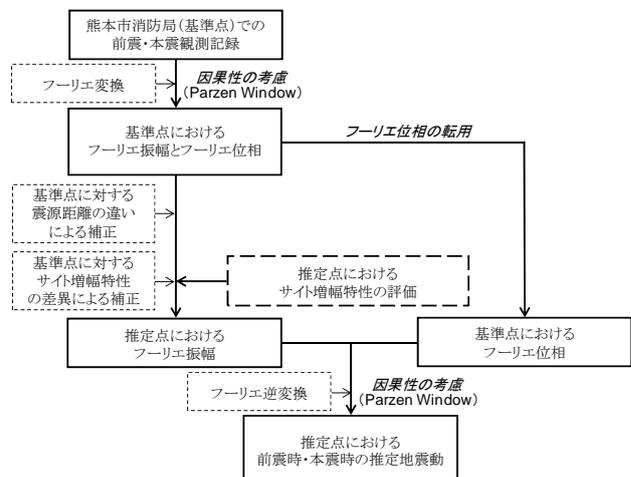


図-13 サイト増幅特性置換手法に基づく地震動推定フロー

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-15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-16および図-17は、

前震時および本震時におけ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(いずれも減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したもので

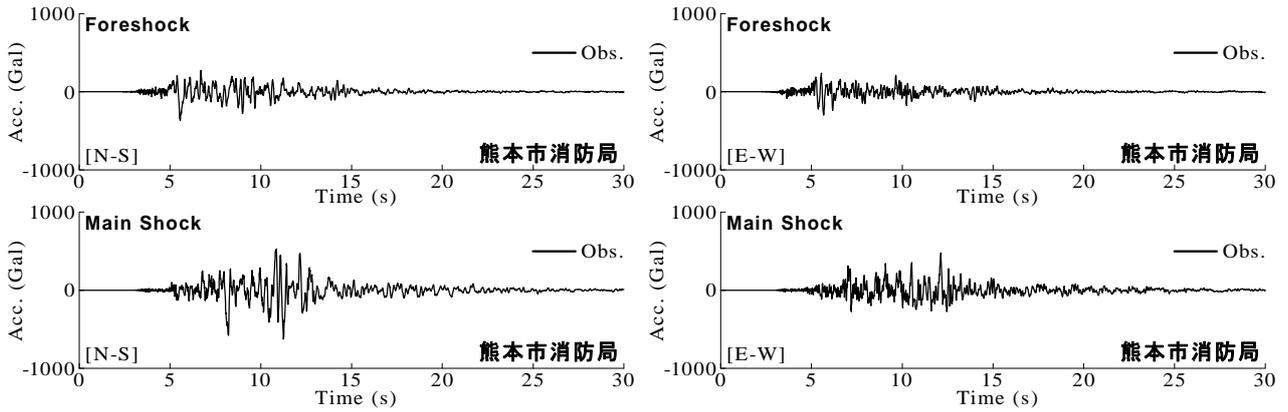


図-14 熊本市消防局(基準観測点)における前震・本震観測記録の加速度時刻歴

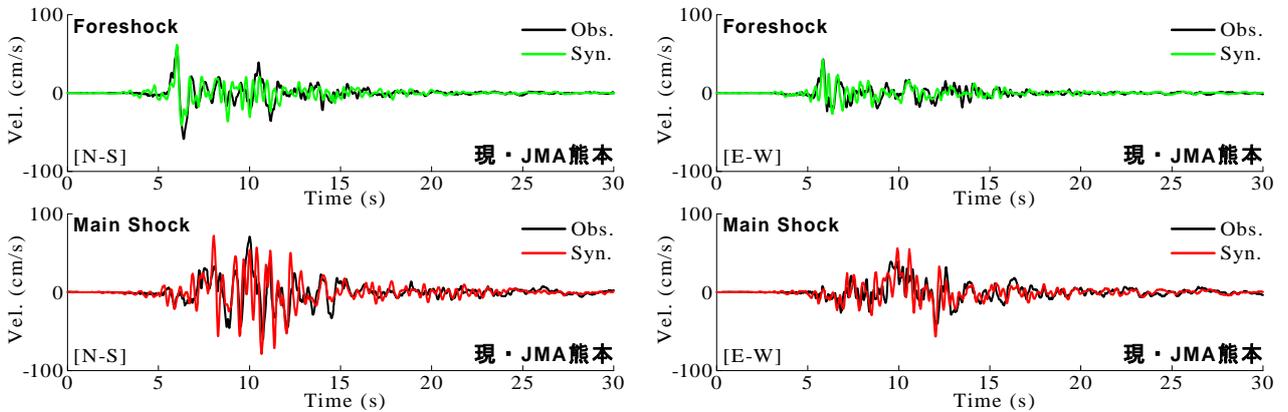


図-15 地震動推定手法の適用性確認(現・JMA熊本(推定点)における前震時・本震時の速度波形の比較)

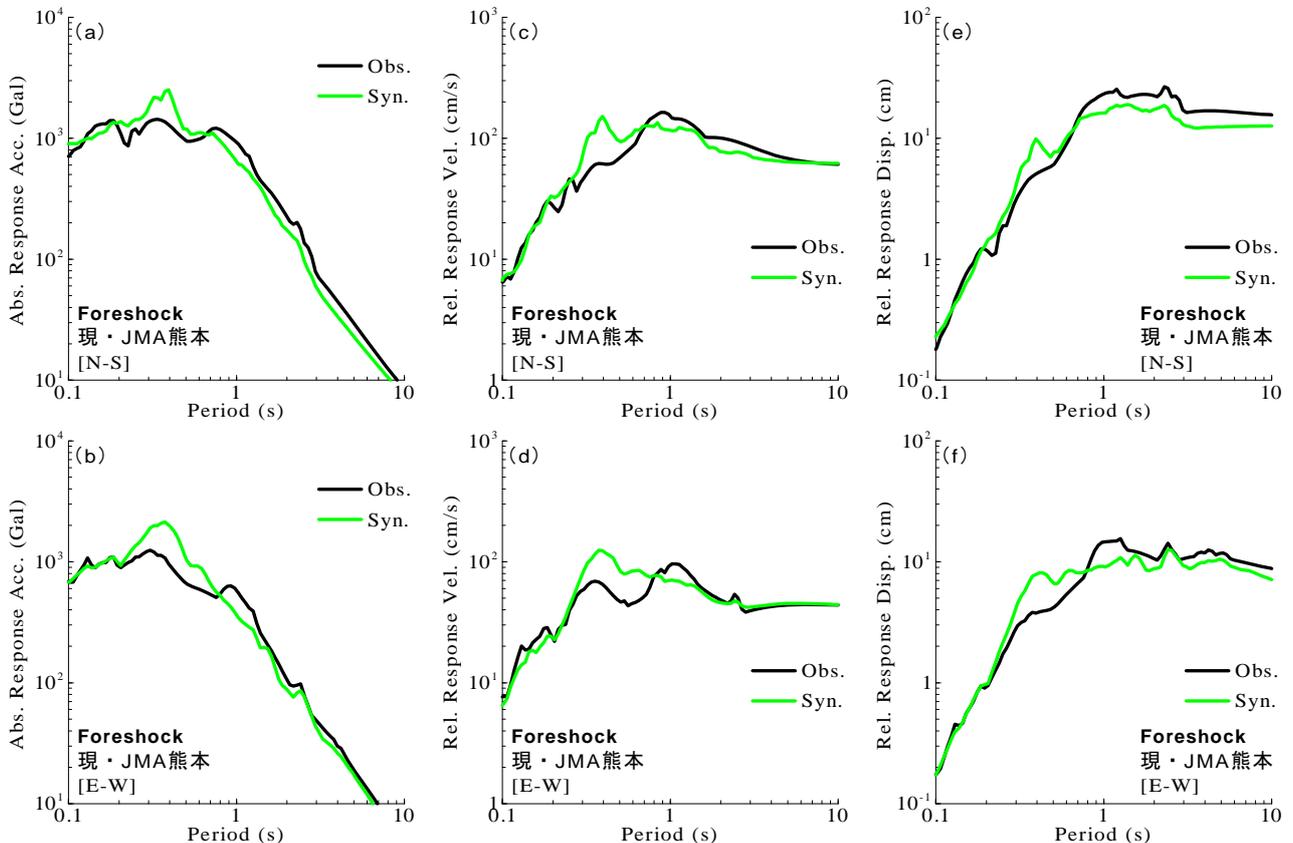


図-16 地震動推定手法の適用性確認(現・JMA熊本(推定点)における前震時の応答スペクトルの比較)

ある。図-16および図-17に示すとおり、特定の短周期帯域(0.3~0.8s付近)において推定精度が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-15、図-16、図-17における観測波と推定波の類似性は、上述した熊本

城(旧・JMA熊本)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を適用すれば、前震時ならびに本震時における熊本城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。

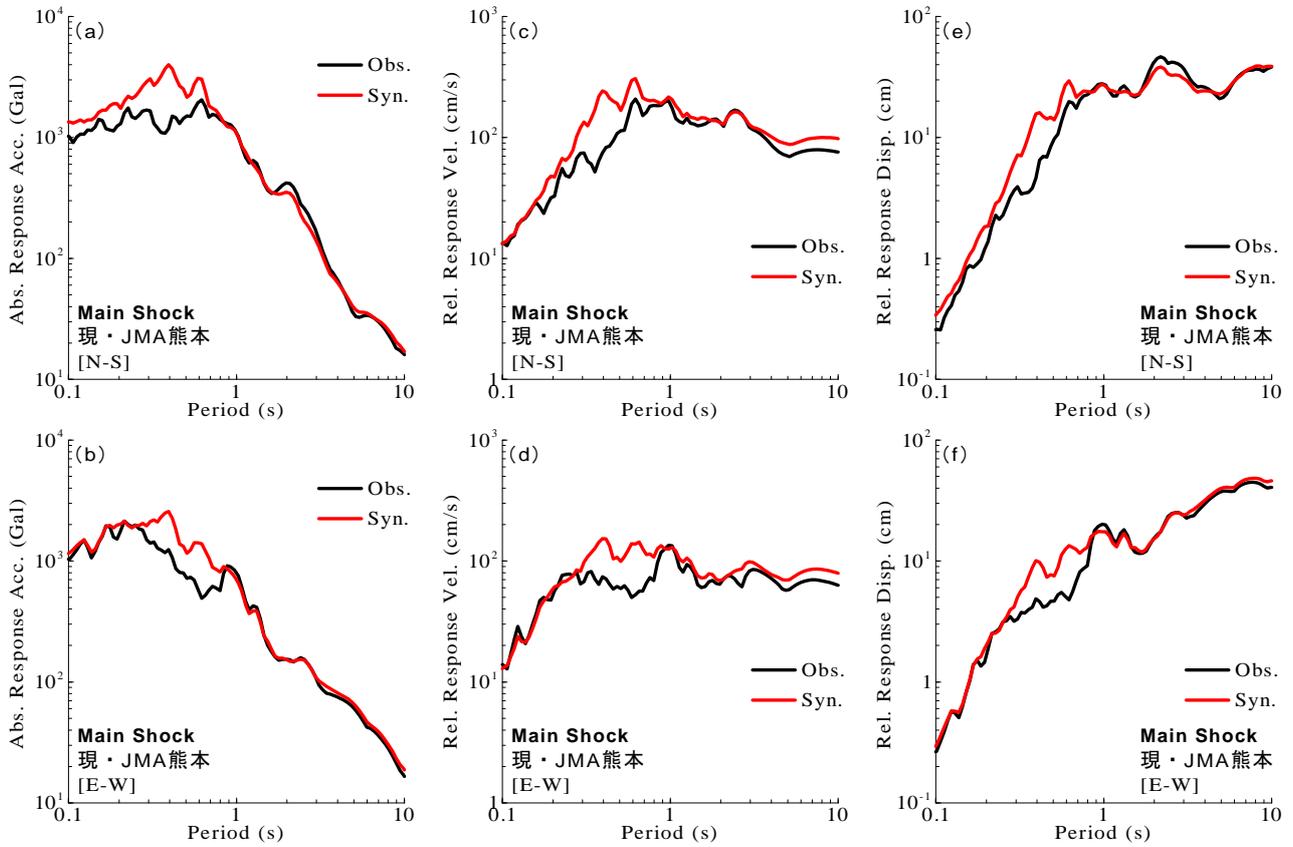


図-17 地震動推定手法の適用性確認 (現・JMA熊本(推定点)における本震時の応答スペクトルの比較)

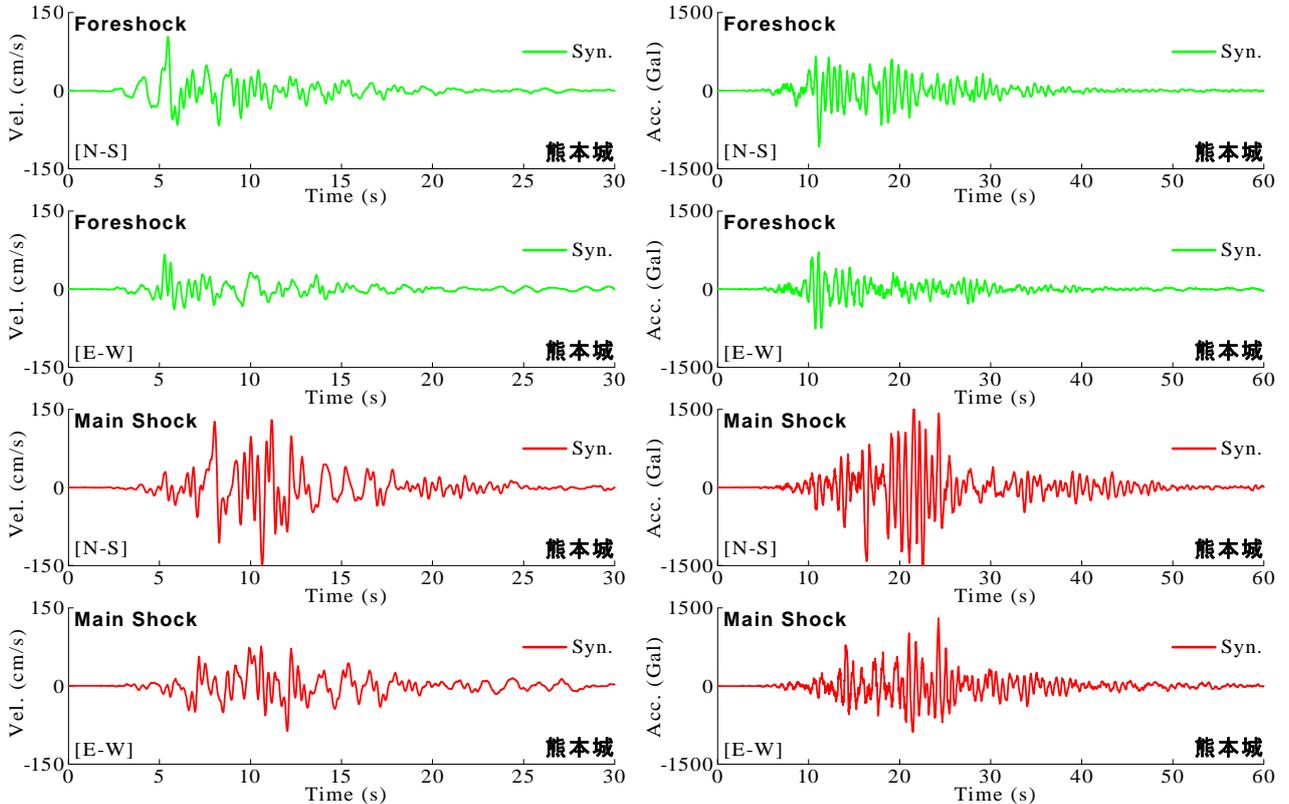


図-18 2016年熊本地震の前震・本震による熊本城での推定地震動(速度波形および加速度波形)

6. 熊本城における地震動の評価

図-18は、前震時および本震時における熊本城での推定速度および推定加速度波形である。図-18に対して図-14および図-15を比較すると、熊本城では、最大加速度PGAや最大速度PGVの値が周辺の観測記録よりも明らかに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¹⁸⁾ことを考慮)は、熊本城において6.2(前震)および6.7(本震)と算定され、周辺の観測記録(図-2参照)よりも非常に大きな値が得られる結果となった。

図-19には、熊本城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、相対速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトル(いずれも減衰定数5%)を示す。さらに、図-19には、石積み擁壁を対象とした動的解析や振動台実験において入力地震動としての採用実績¹⁹⁾が多い1995年兵庫県南部地震におけるJMA神戸での観測地震動(N-S成分)による応答スペクトルについても同時に示している。図-19に示すとおり、まず、前震と本震の比較では、N-SおよびE-W成分ともに本震時のスペクトルが前震時のスペクトルを包絡している。次に、N-S成分とE-W成分の比較では、前震時および本震時ともにN-S成分のスペクトルはE-W成分のスペクトルと同等もしくはそれ以上の地震応答を示している。最後に、JMA神戸での観測地震動との比較では、JMA神戸のスペクトルに対して、前震時のN-S成分ならびに本震時のE-W成分のスペクトルが概ね類似しているのが読み取れる。

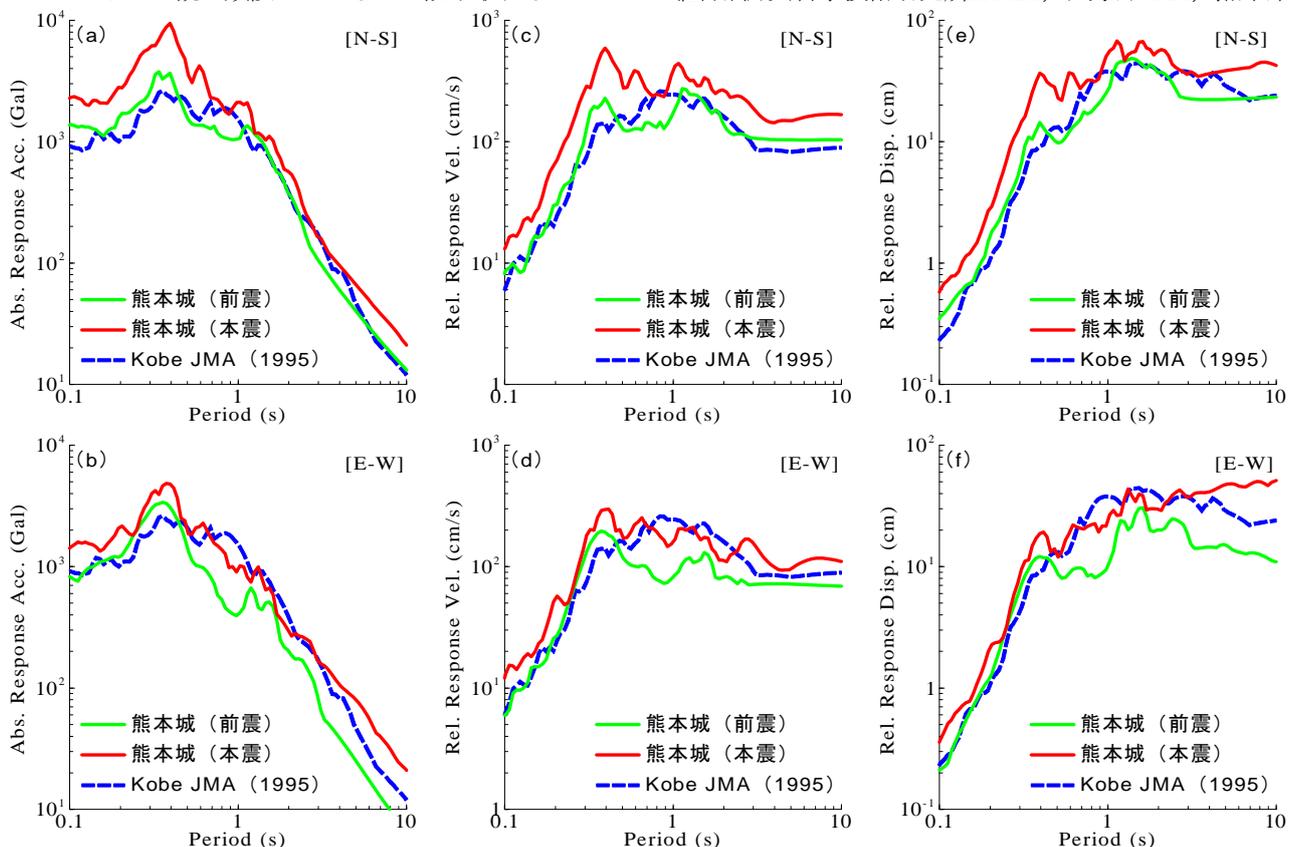


図-19 2016年熊本地震の前震・本震による熊本城での推定地震動(応答スペクトルの特徴)

7. まとめ

本研究では、熊本城内での高密度常時微動計測に基づき、2016年熊本地震の前震および本震において熊本城に作用した強震波形を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) 地形・地質の状況および常時微動H/Vスペクトルの類似性を踏まえれば、熊本城を対象とした地震動推定において旧・JMA熊本での地盤震動特性(サイト増幅特性)が援用可能である一方で、熊本市消防局および現・JMA熊本における前震・本震観測記録を前震時ならびに本震時に熊本城に作用した地震動と見なすことはできない。
- (2) サイト増幅特性置換手法を利用すれば、2016年熊本地震の前震時・本震時に現・JMA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。
- (3) 熊本城における推定地震動は、熊本市消防局および現・JMA熊本で得られた前震・本震記録よりも非常に大きな地震動指標値を示し、既往のJMA神戸での観測地震動(1995年兵庫県南部地震)の応答スペクトルと同等程度もしくはそれ以上の地震応答を示す。

今後は、推定強震動を入力波とした振動台実験や動的解析²⁰⁾などを実施していきたいと考えている。

謝辞：熊本城内での常時微動計測にあたっては、熊本城調査研究センターの職員の皆様にご同行いただきました。(国研)防災科学技術研究所K-NET, 気象庁JMA, 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それぞれ利用させていただきました。常時微動計測の実施では、中西一仁氏(金沢大学学生)および湊文博氏・山内政輝氏(大阪大学学生)の支援を仰いだ。本研究の遂行にあたり、(公社)土木学会地震工学委員会石積擁壁の耐震補強対策に関する研究小委員会(委員長:橋本隆雄((株)千代田コンサルタント))の委員の皆様には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, 山尾敏孝: 熊本城および石橋の被害, 土木学会西部支部「2016年熊本地震」地震被害調査報告会講演資料, (公社)土木学会地震工学委員会ホームページ, 2016. (last accessed: 2016/09/01)
- 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) 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.
- 4) 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.
- 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) 国土交通省国土政策局: 5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査[熊本・御船], 国土政策局国土情報課ホームページ, 2003. (last accessed: 2016/09/01)
- 7) 熊本県地質調査業協会: 熊本市周辺地盤図, 地盤図編纂委員会編, 267p., 2003.
- 8) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション(J-SHIS), 防災科学技術研究所ホームページ, 2016. (last accessed: 2016/09/01)
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 秦吉弥, 村田晶, 宮島昌克: 2016 年熊本地震時に熊本城に作用した強震動の推定に向けた基礎的検討〜過去および現在の地震観測点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.252-253, 2016.
- 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) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 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) 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) 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.
- 19) 例えば, 依田照彦, 志賀弘明, 小玉及理子, 小宮一仁: 歴史的石積み橋脚の耐震安定性に関する一考察, 土木史研究, 土木学会, 第 19 号, pp.243-248, 1999.
- 20) 例えば, 橋本隆雄, 宮島昌克, 池本敏和, 酒井久和: 石積擁壁の耐震性の実験及び解析に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.L991-1003, 2014. (2016.9.1 受付)

EVALUATION OF STRONG GROUND MOTION IN KUMAMOTO CASTLE DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE SEQUENCE FOCUSED ON DIFFERENCE OF SITE AMPLIFICATION FACTORS

Yoshiya HATA, Akira MURATA, Toshikazu IKEMOTO,
Takao HASHIMOTO and Masakatsu MIYAJIMA

Serious failure of masonry retaining wall was occurred in Kumamoto Castle during the 2016 Kumamoto earthquake sequence. Therefore, to clarify the failure mechanism, it is necessary to estimate strong motions in the castle with sufficient accuracy, taking into account local site effects. In this study, seismic waveform in the castle was estimated based on the site-effect substitution method. The site effects in the castle were evaluated based on microtremor measurement with high dense spatial location. Difference of the site effects between the castle area and the present observation stations was also indicated.