

熊本城の被災地盤構造物の調査報告

杉本 知史*, 山中 稔**

* 長崎大学大学院, ** 香川大学

要 旨

平成28年熊本地震により、震源や断層付近を中心に盛土や河川堤防などの多くの土構造物に被害をもたらした。熊本城においても、空積の石垣やその背後の地盤が多数崩壊し、今なお復旧のめどが立っていない状況にある。著者らは、熊本城に主眼を置いた歴史遺産の被災状況を地盤工学的観点で調査し、今後の復旧工事における管理者への情報提供ならびに技術的助言を行うことを目的とした活動に取り組んできた。本報では、これまで調査活動に関する内容を報告する。

1. 調査活動の概要

先般の平成28年熊本地震においては、熊本城や多数の石橋群にも多大な被害が生じ、これまであまり注目することのなかったこれら歴史的な土構造物や築石構造物についても、地盤工学的観点から調査を行う必要があると考え、地盤工学会調査団に「歴史遺産関連班」が設けられた。当班は、大規模地震に伴う被災状況の確認、特徴の抽出、被災メカニズムの解明、復旧工事に向けた工学的な助言を目的として、これまで調査活動に取り組んできた。

調査団が結成されて以降、地盤調査を中心とした調査活動に取り組んできたが、当初は調査対象がすべて名所旧跡といった自治体の管理下にあるものということもあり、調査自体がままならない状況にあったため、他班と比べ活動の進捗は芳しくなかった。しかしながら、管理者との地道なやり取りの末、調査活動に理解を賜うことができたことから、平成28年6月以降に本格的に調査が進められた。これまで、熊本城については城内全体の被災状況の調査、調査結果を踏まえた石垣周辺の安定性評価のためのサウンディング試験の実施、城内敷地直下の地質構造の解明のための表面波探査の実施、城内地表面の振動特性の解明のための常時微動計測の実施、応急的な変状監視のための簡易器具の設置と管理者への方法解説などを行ってきた。

以下、熊本城に関する調査活動のこれまでの成果について述べる。

2. 熊本城周辺の地盤環境

熊本城は、加藤清正により慶長12年（1607年）に築城された。それまでは、茶臼山と呼ばれる植木台地の先端が熊本平野に突出した丘陵であり、その東端は海拔50m、西に向かって次第に低くなる地形を有する。地質は溶結凝灰岩で崩壊しやすく、雨による浸食が進み急崖が多く形成されており、周辺には浸食谷が点在している。図-1ならびに図-2は、熊本城内における過去のボーリング調査により得られた深度方向の地質構成ならびに想定断面図を表す¹⁾。城内では、昭和33年ならびに平成27年にのみ調査が行われているにすぎず、天守閣北側の限られた範囲で計12本のデータに留まる。地表面より深さ10m程度までは、N値が10前後の造成時の埋土や火山灰質砂・シルトで構成されている。深さ50mまでにおいては、N値が10～20程度の火山灰質砂や風化が進行していると思われる凝灰角礫岩の層が存在する。さらに50m以深には、N値50超の安山岩の基盤層が存在することが確認されている。

図-2より、平左衛門丸内の約50mの区間にAso4や基盤層の急激な落ち込みが確認できることから、平成27年のボーリング調査の報告書¹⁾において熊本城北側に存在するとされている立田川断層に起因する地質的不連続面の存在が指摘されている。これらのことから、城内敷地直下約20mの範囲に存在するAso4主体の地質は比較的N値が低く、石垣などの重量構造物や表層付近の基礎地盤は地震に対する抵抗性も低いものと考えられるとともに、造成時の切盛境や基盤岩の凹凸の存在が推定されることから、地盤工学的、地質学的に検討を要すると考えられる。

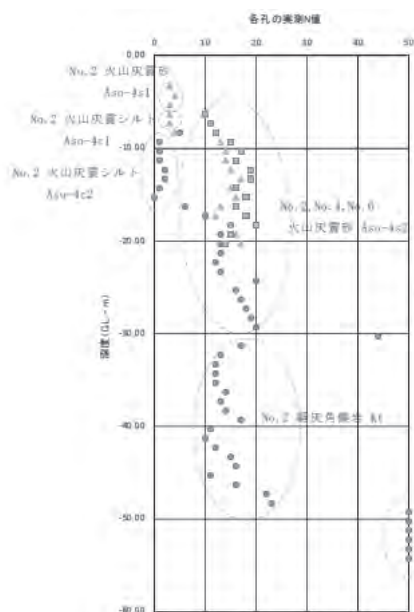


図-1 城内の深度と N 値の関係

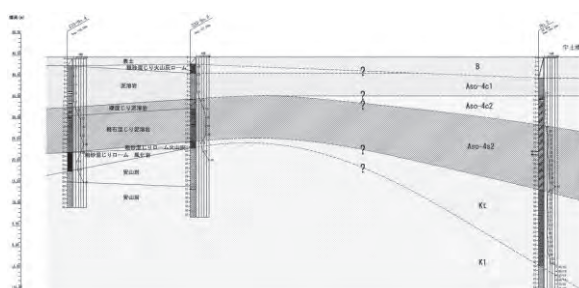


図-2 天守閣と宇土櫓間に位置する平左衛門丸内の地質構成の想定断面図

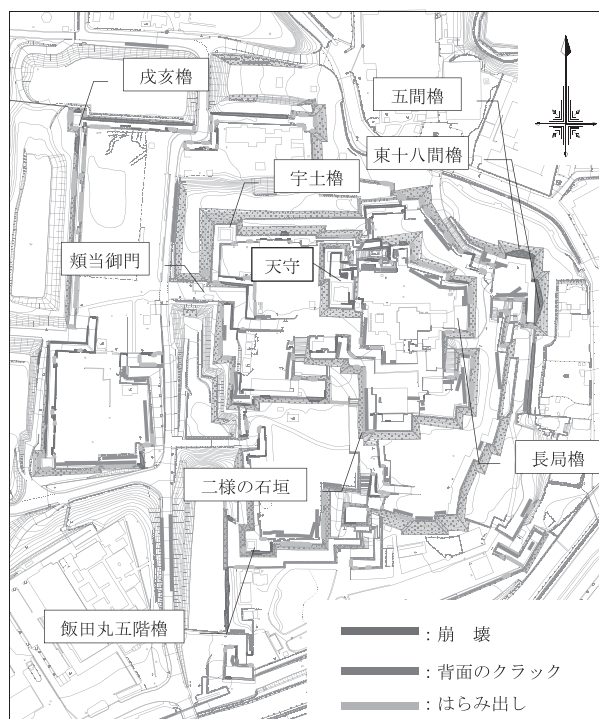


図-3 本丸周辺での石垣被災箇所
(熊本城調査研究センター提供資料より作成)

3. 石垣石ならびに基礎地盤の被災状況

熊本城は、平成28年4月14日の前震および16日の本震により、国指定重要文化財建造物である東十八間櫓等の倒壊の他、石垣の崩壊・はらみ出し、石垣背面のクラック等が発生した。本丸周辺での石垣の被災位置を図-3に、被災状況を写真-1に示す。石垣は、崩壊に至らなかった箇所でも、はらみ出し等の変状が数多く見られるため、比高が高い長局櫓北側石垣、二様の石垣および宇土櫓西側石垣の3箇所で、3Dレーザースキャナーによる石垣前面の測量を実施した。図-4に二様の石垣での測量成果を示す。測量成果は、地震発生前の石垣断面と比較することで、地震動による石垣の変状を定量的に把握する一資料となるものと考えられる。

熊本城内においては、図-5に示すように敷地全体にわたり石垣の崩落・孕み出し、石垣背面の基礎地盤の崩壊・亀裂発生・沈下、建屋の倒壊・一部損壊が発生した。中でも石垣ならびにその裏込めの基礎地盤の崩落は、石垣高さや勾配、延長に抛らず各所で発生しており、今後の復旧において熊本城を形成している地盤の調査に基づいた崩落発生メカニズムを明らかにしていくことが重要と考えられる。

特に、立田山断層に伴う地質的弱線の存在が城内全体に影響を及ぼしていることが予想されることから、本丸周辺の石垣の被災状況について、UAV等により撮影された画像ならびにCAD平面図に基づき、石垣石の射出方向と最大飛距離、石垣高さとの関係を調べた。

図-6に射出方向と最大飛距離との関係を示す。東西方向の石垣石の射出に対して、南北方向の方が、件数が多いうえ最大飛距離が10mを超えるものが多数存在することが確認できる。石垣石の射出方向および飛距離は、石垣面の方角・延長・石垣高さにも依存し、一概には断定できないが、城内敷地を構成する石垣は概ね東西南北に面しており、石垣の崩れやすい方向、ひいては敷地直下の地盤の振動特性を反映している結果とも考えられる。

図-7に、石垣高さと最大飛距離の関係を示す。東西方向に比べ南北方向の崩落件数が明確に読み取れるとともに、全体的な傾向として石垣高さと最大飛距離は概ね線形関係にあることが伺える。しかしながら、南北方向と比べ、東向きの石垣は石垣高さが高くとも石垣石の最大飛距離が小さい傾向にあることも確認できる。このことから、石垣の形状よりも崩壊に起因する原因が考えられ、石垣の基礎部地盤や背後の裏込めの状況について、十分な検討を要するものと考えられる。



(a)天守北側石垣

(b)頬当御門石垣

(c)長局櫓北側の地表亀裂

写真-1 天守北側石垣の崩壊とクラック発生状況

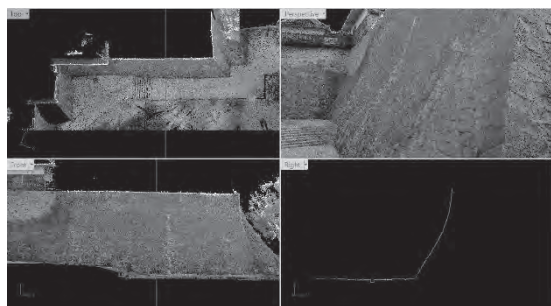


図-4 3D レーザースキャナー測量成果

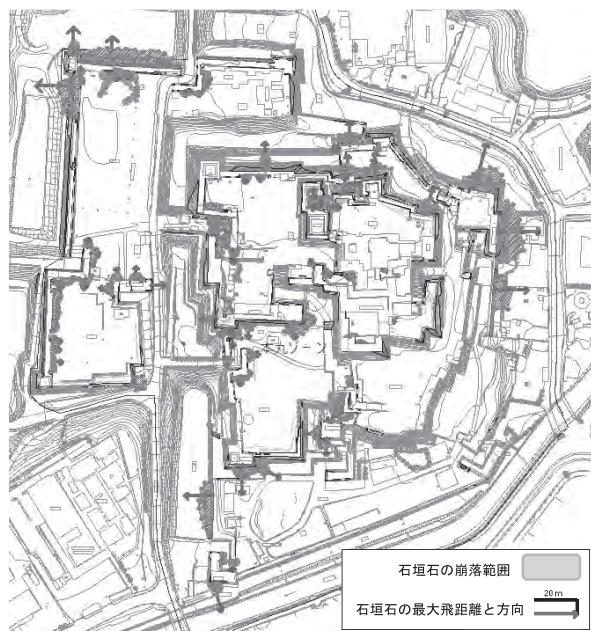


図-5 本丸周辺の石垣石の崩落状況

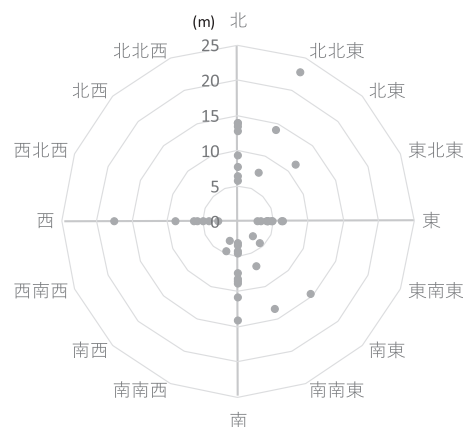


図-6 射出方向と最大飛距離の関係

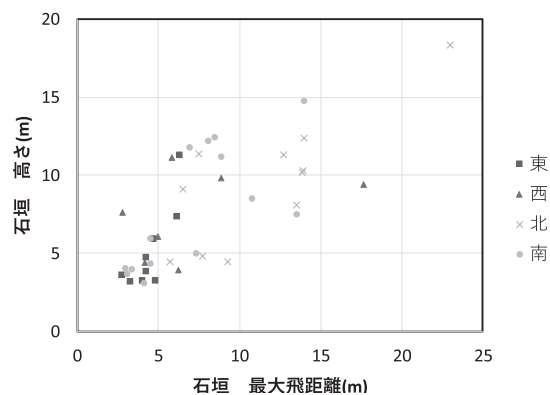


図-7 石垣高さと最大飛距離の関係

4. 動的コーン貫入試験による被災箇所の評価

熊本城の石垣の変状により地表面にクラックが発生した箇所の地盤強度の推定及びすべり面深さを推定するために、長局櫓周辺のクラックが発生している箇所です簡易動的コーン貫入試験を実施した。

図-8に測定位置と測定結果を示す。クラックの影響がないとみられる場所については、 N_d が50となる1.6m

の深さまでコーン貫入を行った。また、クラックの近く（外側）については2mの深さまで、クラック内については3mの深さまでコーン貫入を行った。簡易動的コーン貫入試験から得られた N_d については、対象地盤が砂質土と見なし、換算 N 値³⁾を求めた。

図-8(a)のクラックの影響外の地盤の表層については、深さ0.3mまでは、換算 N 値が15以上を示し、比較的良好に締め固まった状態にある。影響外の場所において

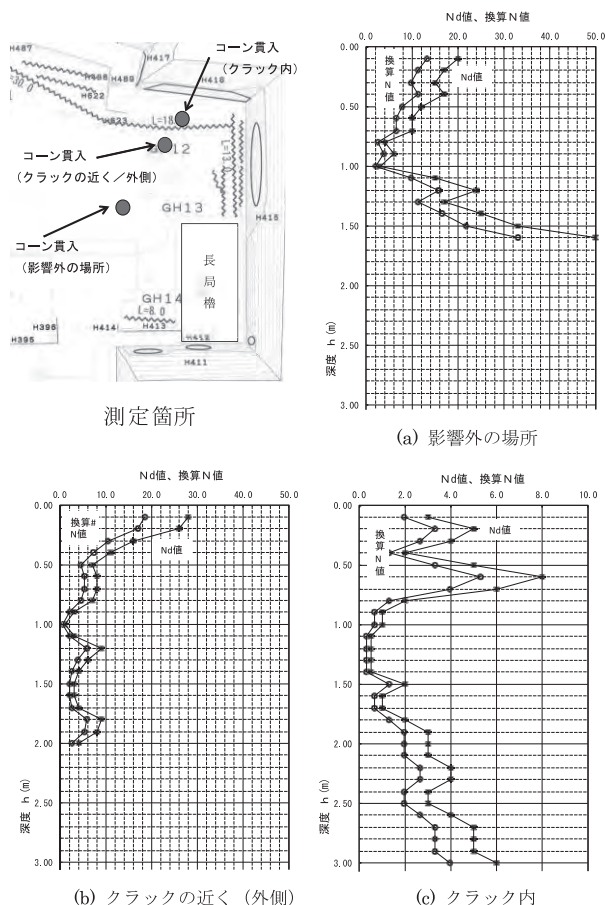


図-8 簡易動的コーン貫入試験の結果

も、深さ1m程度に非常に弱い層が見られる。それより深くなると1.5mで換算N値が30を越える硬い層が見られる。

図-8 (b)のクラックの近くの外側の位置では、表層に硬い層が見られるが、深さ0.5m以下では、換算N値が10以下で、2mの深さでも軟らかい状態にあることがわかる。表層は硬い状態でもクラック周辺では軟らかい層が深くまで続いているため注意が必要である。

図-8 (c)のクラック内では、表層付近も換算N値が4程度で、非常に軟らかい状態になっている。深さ1.0～1.5m付近は換算N値がゼロに近く、すべりが発生しているのではないかと考えられる。また、深さ3.0m付近の位置でも換算N値が6以下であり、軟らかい層が深くまで続いていることが分かる。内部で拘束圧が働かず、非常に不安定な状態であると考えられる。クラックが発生している箇所では、地盤の緩みが発生していることが把握できた。このような場所では、崩壊の危険性が高く、今後早急に修復対策を行う必要があると考えられる。場内で多くの箇所でクラックが発生しているため、崩壊に至っていない場所や健全な場所での試験を含めて、さらにデータを取得する必要がある。

5. 表層地質構造推定のための表面波探査の実施

熊本城内の石垣や建造物の地震被害の要因として表層地盤の影響が考えられるために、表層地盤(深度10～20m程度)の硬軟の検出が可能な表面波探査を実施した。

1) 平左衛門丸での表面波探査の実施

表面波探査は、図-9に示す平左衛門丸で格子状に6測線(測線1～6)実施した。その他、本丸で5測線、城内敷地で6測線の、計17測線で実施した。写真-2に、測線6での実施状況を示す。地震により落下した瓦が散乱したなかで探査を行った。

今回の調査において表面波探査は、地震計24個を2m間隔で設置し(1測線46m)、カケヤによる起振の間隔2mでのランドストリーマ形式で実施した。解析深度は23mとなる。

図-10に、測線4でのS波速度構造断面図を示す。深度8m付近まで $V_s=240\text{m/s}$ 以下を示す盛土およびAso-4c層が緩く堆積しており、その下位に $V_s=240\sim300\text{m/s}$ 程度の比較的締まったAso-4s層が、あまり明瞭ではないが起伏を伴って堆積している。このAso-4s層の下位には安山岩が分布しており、これらの層の起伏が地表面の石垣等の被害に大きな影響を与えたと考えられる。

2) 本丸での表面波探査の実施

図-11に、天守台のある本丸における表面波探査の測線を示す。本丸では、測線7～測線11の4測線で表面波探査を実施した。写真-3に、長局櫓から大天守に向かう測線7での表面波探査の実施状況を示す。

図-12に、測線7および測線9における表面波探査により得られたS波速度の解析断面を示す。いずれの測線ともに、深度6～8mにおいて $V_s=200\text{m/s}$ 以下、深



図-9 平左衛門丸での表面波探査の測線配置

写真-2 表面波探査の実施状況(測線6)

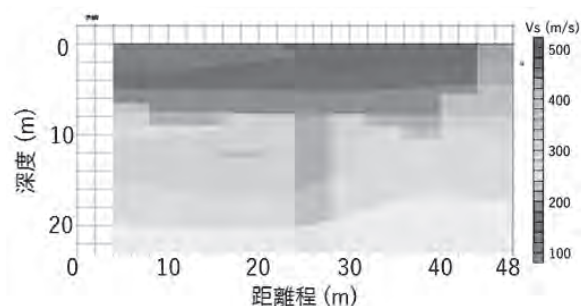


図-10 S波速度構造断面(平左衛門丸、測線4)



図-11 本丸における測線図



写真-3 表面波探査の実施状況（本丸，測線7）

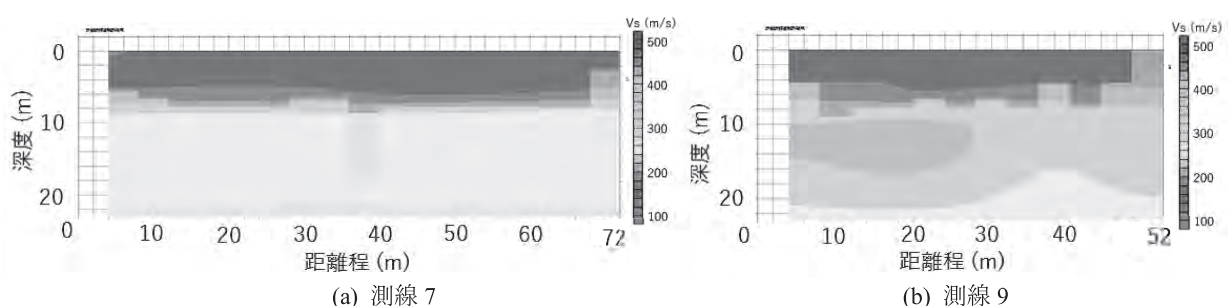


図-12 S波速度 V_s の解析断面（本丸）

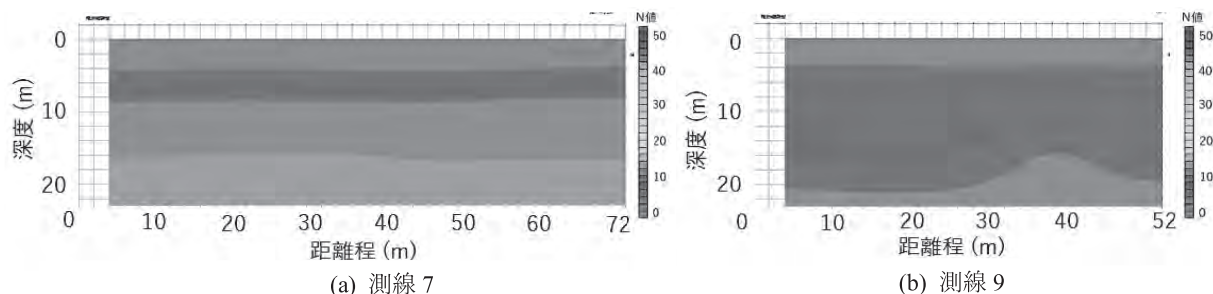


図-13 V_s から N 値への変換断面（本丸）

度 8～9m 以深では $V_s=250\text{m/s}$ 前後の均質な土層が分布していることが分かる。

図-13 に、同じ測線 7 および測線 9 での V_s を次式⁴⁾によって N 値に換算した断面を示す。

$$N=(V_s/97)^{0.314}$$

ここで、 N ：標準貫入試験における N 値

V_s ：表面波探査による S 波速度 (m/s)

いずれの測線ともに、深度 8m までは N 値が 10 以下と緩く、深度 8m 以深では N 値が 10～16 程度と若干上昇している。

6. 基盤深度推定のための常時微動測定の実施

熊本城内の本丸や平左衛門丸等において、基盤深度推定のための常時微動測定を行った。本発表においては、測定結果の一部を紹介するものとする。

図-14に、本丸（地点5-2, 5-4, 6-4）および平左衛門丸（地点8-1, 8-3, 7-3）における常時微動観測位置を示す。

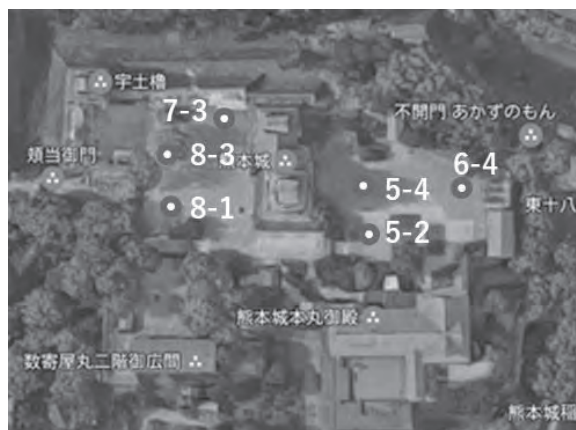


図-14 常時微動観測位置

各観測位置において常時微動計 (McSEIS-MT NEO) を用い、平坦部に方位を一致させ設置した後、一地点概ね1時間の計測時間とした。常時微動測定では、水平2方向と上下方向Vの3成分について、サンプリング周波

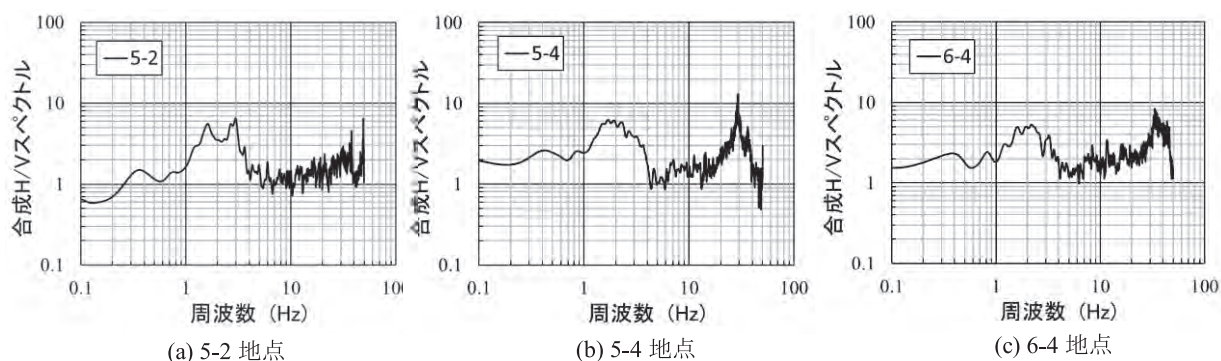


図-15 本丸における常時微動観測結果

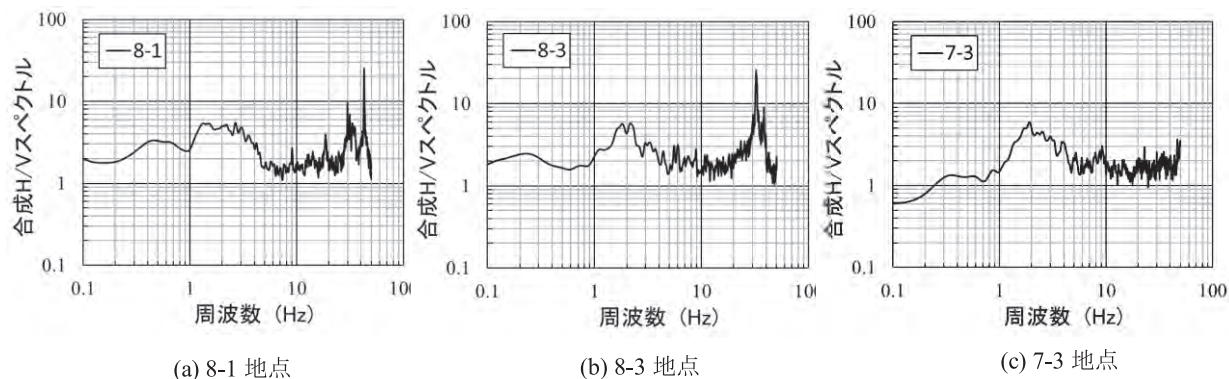


図-16 平左衛門丸における常時微動観測結果

数100Hzとし、加速度波形からノイズの少ない40.96秒間のデータでフーリエスペクトルを求めた後、各方向のスペクトル比を算出した。なお、スペクトルはバンド幅0.24HzのParzenウィンドウにより平滑化した。

図-15に、本丸における常時微動の水平合成方向のH/Vスペクトルを示す。周波数1～3Hz付近にピークが見られるが、このピーク時の周波数は基盤面までに堆積する火山灰質土層の厚さに影響を受けていると考えられるが、図-15に示す近接する3地点での基盤面の急変は無いようである。本丸では、震災後に基盤層確認のためのボーリング調査が実施されており、そのボーリング柱状図をもとに、本丸における基盤層の深度を確認する予定である。

図-16には平左衛門丸での常時微動の水平合成方向のH/Vスペクトルを示すが、本丸と比べて地盤高の低い平左衛門丸におけるピーク時の周波数に大きな違いは見られない。また、前述の図-2において示唆された平左衛門丸内の基盤岩深度の急変は常時微動の結果からは判断できない。今後のボーリング調査等の結果を用いて検証する必要があると考えている。

7. おわりに

文化財としての側面から、これまで調査ボーリング等の実施が最低限にとどめられていたことから、熊本城に関する地盤・地質に関する情報は非常に限られて

いる中、調査活動を進めることとなった。特に、貫入試験などの削孔を伴う調査は当初難しいとされたことから、既往の地盤調査結果の分析と、表面波探査などの地表面から地質構成や地盤特性を推定する手法を組み合わせて行った。その結果、安山岩の基盤層上に凝灰角礫岩や比較的N値の低いAso-4を主体とする火山灰層が堆積している地盤上に熊本城が築造されていることが明らかとなった。

地震動に伴う局所的な影響が、敷地上の建屋や石垣に被害を与える原因となったことが推察される。特に今後の復旧工事を見据えた際に、崩壊部の石垣ならびに裏込め地盤の崩壊に関するメカニズムや未崩落部の石垣面の変状進行の有無、崩落部と未崩落部の特徴の抽出が重要と考えられ、そのためには基礎地盤に関する情報取得が不可欠と考えられる。

謝 辞

本研究は、熊本市観光文化交流局熊本城調査研究センターの協力によって、地盤工学会平成28年熊本地震地盤災害調査団の調査研究の一環として実施したものである。本調査においては、長崎大学大学院の大嶺聖教授ほか、調査団員の方々のご尽力によるものであることを申し添える。また、本調査経費の一部は、京都大学防災研究所自然災害研究協議会より補助を頂いたことを付記し、関係各位に深く謝意を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 戸塚誠司(1999)：熊本県下における近代橋梁の発展史に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文，p.90.
- 2) 熊本市観光文化交流局熊本城調査研究センター(2016)：平成27年度熊本城宇土櫓他2棟耐震基礎診断に伴う地質調査業務委託報告書.
- 3) 地盤工学会(2004)：地盤調査の方法と解説，pp.274-279.
- 4) Imai, T. and Tonouchi, K.(1982)：Correlation of N-value with S-wave Velocity and Shear Modulus, Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, pp.67-72.