

熊本城石垣の修復履歴からみる地盤工学的被災要因の検討

Study of Ground factor for Repair History of Kumamoto Castle's Stone walls

香川大学創造工学部 教授 山中 稔

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究目的

戦国時代から江戸時代初期にかけて全国各地に築造された近世城郭の多くは、自然地形を生かしつつも、一方でそれを大きく改変する造成により成立している。縄張りと呼ばれる城郭の建物・石垣・堀・門等は、攻撃と防御を考慮した上で威厳を持たせた城郭となるよう、自然地形を巧みに利用した配置となっている。本研究で対象とする熊本城石垣は、築造からこれまで400年以上が経過してきたが、この間に何度となく台風や地震の自然災害を受けている。共同研究者の木下による研究では、江戸期に熊本城の修復願いは寛永11年(1634年)から文政3年(1820年)までに江戸幕府に計29回提出され、このうち石垣の修復工事の願いは20回に及んでおり、うち計11回の修復工事において石垣修復箇所を描いた絵図の控があることが確認されている。研究代表者の山中は、これら石垣が度重なって被害を受ける箇所は、自然旧地形や地盤構造と密接な関係があるのではとの考えに至った。すなわち、自然旧地形が谷地形を呈し水が集まりやすい箇所であったり、軟弱地層が堆積し石垣の基礎地盤が支持力不足であったり、石垣背面の盛土が厚く石垣に過大な土圧が作用する箇所では、豪雨による変形の増進が考えられ、岩盤の上に盛土が堆積する箇所では地震動の増幅により、石垣が崩壊に至ることが考えられる。

本研究は、熊本城内の既存の地盤ボーリングデータや新規の地盤調査(常時微動探査)により熊本城三次元地盤図を作成するとともに、得られた城郭地盤図と石垣修復履歴箇所との対比から、石垣被災要因の地盤工学的説明を行なおうとするものである。

2. 研究方法

1) 常時微動探査の方法

図-1に、熊本城における三次元地盤図の作成に用いたボーリング地点と常時微動探査の実施地点を示す。測定は主にボーリングデータの少ない地点で実施した。常時微動探査は、微動計 McSEIS-AT を用いて行った。測定時間は1箇所あたり約20分～30分程度で行った。走行車両や歩行者による振動の発生が多発すると想定される地点、時間帯においては、長い測定時間を採用した。

2) Vs 深度分布図の解析

図-2に、熊本城跡における代表的な3地点にける解析を行った常時微動探査の測

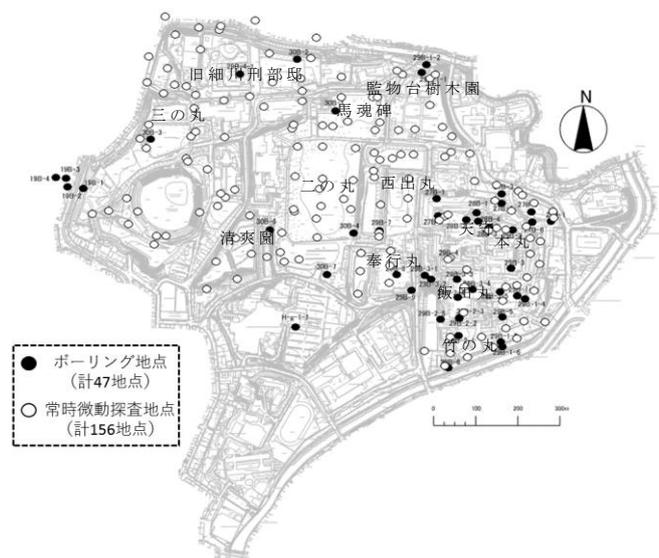


図-1 既存ボーリング箇所と常時微動探査

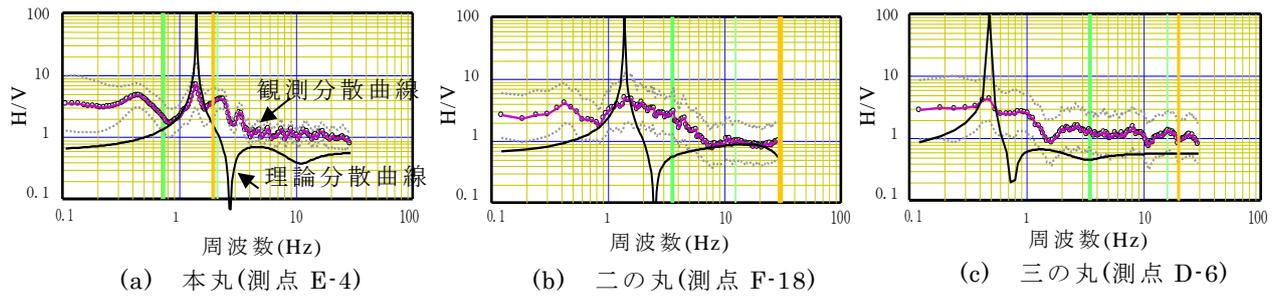


図-2 代表的な3地点のH/Vスペクトル図

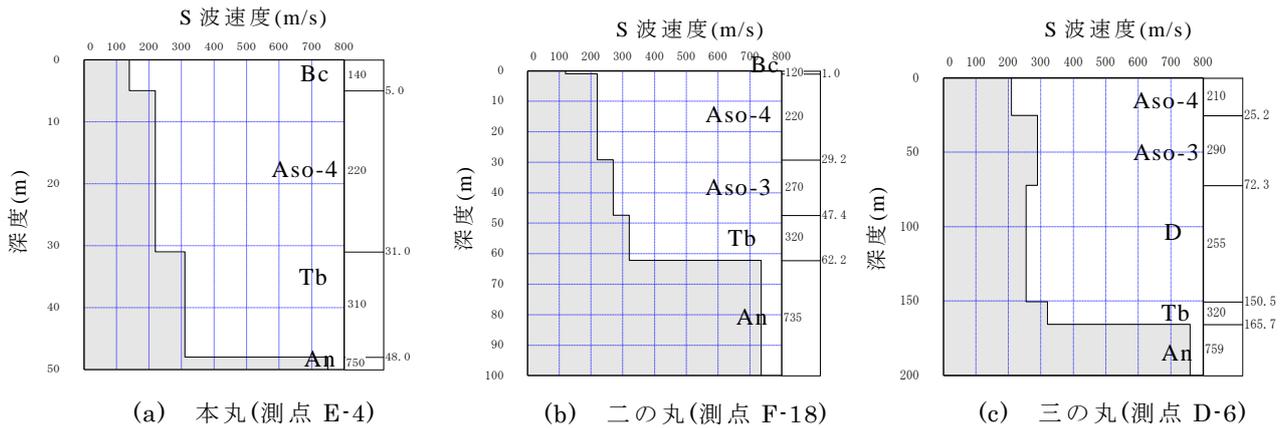


図-3 代表的な3地点のVs深度分布図

定データを示す。H/V スペクトルのピークは (a)図の本丸と、(b)図の二の丸で 1.2~1.3Hz にあり、(c)図の三の丸では 0.5Hz にあり、この違いはインピーダンス比の大きな基盤岩層上面の深度が異なる、もしくは基盤岩層の上部に堆積する緩い火山灰質堆積物の Vs の大きさに起因していると考えられる。

図-3 に、図-2 に対応する地点の Vs 深度分布図を示す。ピーク周波数がほぼ同じである(a)図の本丸(測点 E-4)と(b)図の二の丸(測点 F-18)を比較すると、(b)図の二の丸が基盤面深度が約 15m ほど深いことが分かる。これは、Aso-3 層の有無が大きく影響していると考えられる。一方、(c)図の三の丸(測点 D-6)では、基盤岩層の上部に洪積層(D 層)が厚く堆積しているため、他の 2 地点と比べると基盤面深度が深くなっている。

3) 常時微動探査による地層区分を組み込んだ三次元地盤図の作成

三次元地盤図の作成には三次元地質解析システム GEO-CRE を用いた。三次元地盤図の作成手順は、まずボーリング柱状図を基に土質区分や色調、ボーリングコアの観察記事等を入力し、ボーリングデータを三次元的に可視化し、常時微動探査により得られた地層区分を加えて地質対比を行なった

図-4 に、地質対比の作業画面を示す。地質対比とは、三次元化した地盤情報から地質モデルを構築するために同じカテゴリーの地質のつながりを追跡する作業のことである。表層・盛土 Bc、阿蘇-4 火砕流堆積物 Aso-4、阿蘇-3 火砕流堆積物 Aso-3、洪積層 D、金峰山古期火山噴出物の強風化部・風化部 Tb、安山岩部 An の計 6 層に区分するように、同一の地質境界面位置同士を三次元地質対比線で結んだ。

また、ボーリングデータや解析結果による地層区分だけでは表層地形の再現性が不明瞭な箇所や、地形モデルの外縁部を整えたい場合には補助線を加えることで補正を行った。

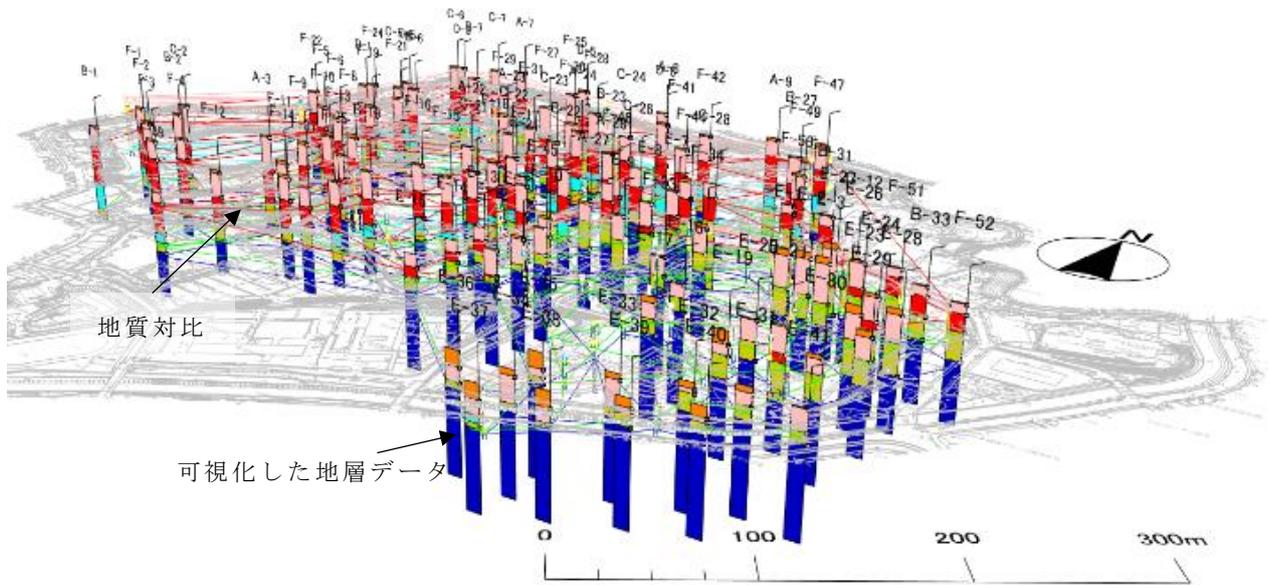


図-4 三次元地盤図作成のための地質対比

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. ボーリング不足地点の詳細な地質断面の作成

図-5 に、三次元地盤図から作成した A-A'断面における地層断面図を示す。解析結果による地層区分を組み込んでおり、ボーリング間の地層が深い位置まで推定をすることができていることが分かる。

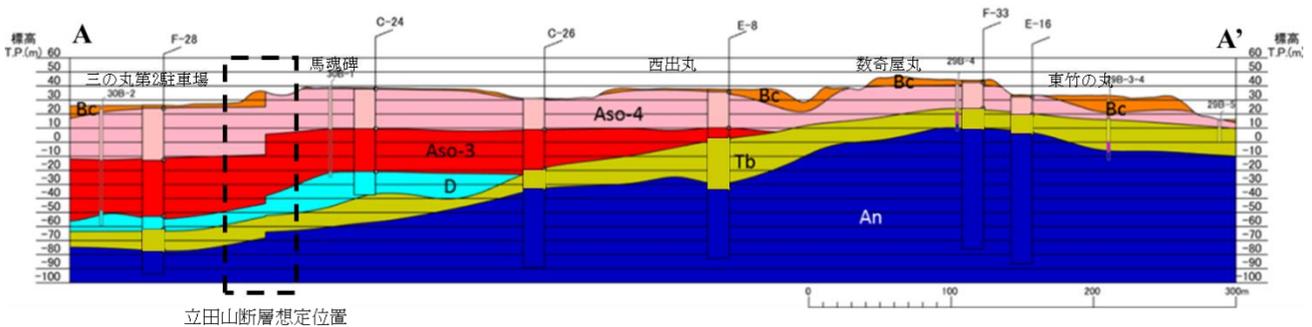
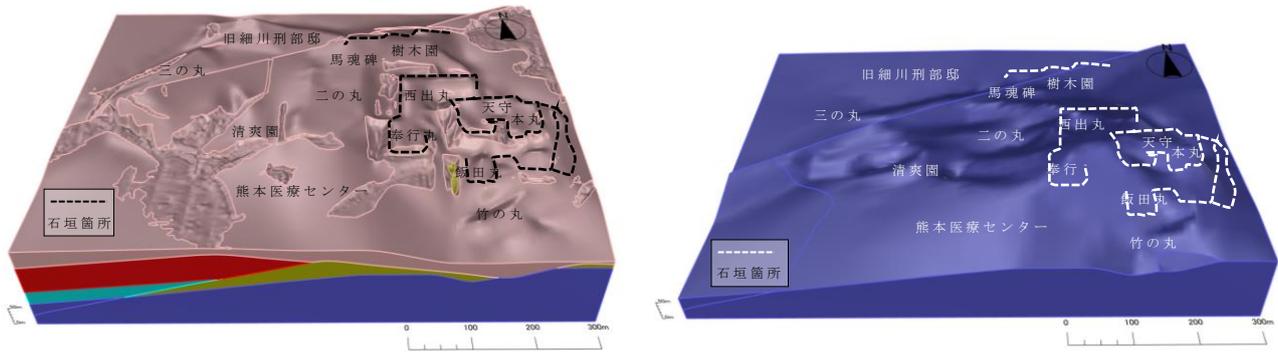


図-5 三次元地盤図より作成した二次元断面図 (A-A' 断面)

4. 構築した三次元地盤図より熊本城地盤の立体的特徴

図-6 に、構築した三次元地盤図を用いて表現した、Aso-4 層および An 層の上面深度の起伏をそれぞれ示す。なお三次元地盤図は起伏の変化を明瞭化するため鉛直方向の縮尺を 2 倍に拡大して示している。(a)図に示す Aso-4 層の上面深度は熊本城の主要な建造物や石垣が分布する本丸周辺で起伏に富んでいることが分かる。また、(b)図に示す基盤岩である An 層の上面深度においても本丸域で起伏が見られ、二の丸や三の丸域では上面深度が深くなっているのが特徴である。

また、図-6 には、平成 28 年熊本地震で被災した主要な石垣箇所を破線で示している。この石垣箇所と、地層との関連性においては、今後、詳細に検討していく必要があるものの、地層構造の急変部に位置していることが伺える。



(a) Aso-4層の上面深度の起伏

(b) An層の上面深度の起伏

図-6 三次元地盤図の表示

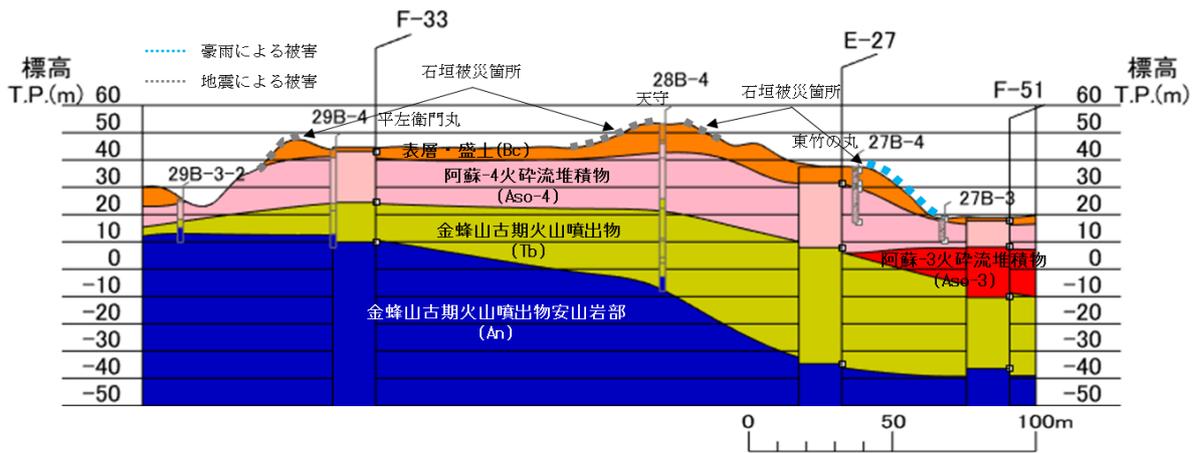


図-7 石垣被災箇所を表示した二次元断面図

5. 石垣修復履歴箇所との関係

図-7に、石垣修復履歴箇所を記載した地層断面図を示す。豪雨による被災箇所と、地震による被災箇所を分けて表示している。豪雨により被災した石垣箇所では、地表面とAso-4層の上面深度が大きく傾斜しており、集水地形となっていることが伺える。また、地震による被災箇所は、An層の基盤岩深度が浅くなり、上位の比較的緩い火山灰層(Aso-4, Tb)の層厚が薄くなっていることから、大きな地震加速度が作用する箇所にあることが推察される。

6. おわりに

今後は、現地で表面波探査等の地盤物理探査でより詳細な表層地盤情報を取得し、本研究の成果である熊本城三次元地盤図に表層土質物性を加えて解析を進め、熊本城石垣の修復履歴からみる地盤工学的被災要因のさらなる検討を実施して行く所存である

(発表論文)

- 1) 山中 稔, 荻野将樹: 常時微動探査による地層区分とボーリング柱状図を併用した熊本城三次元地盤図の作成, 地盤工学会第56回地盤工学研究発表会講演概要集, 2p, 2021.7 (投稿中)
- 2) 荻野将樹, 山中 稔: 常時微動探査による地層区分を利用した熊本城三次元地盤図の作成, 土木学会第41回土木史研究講演集, 7p, 2021.6 (投稿中)
- 3) 荻野将樹, 山中 稔: 熊本城三次元地盤図の作成に向けた微動アレイ探査の実施, 地盤工学会四国支部令和2年度技術研究発表会講演概要集, pp.43-44, 2020.11.