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

荻野將樹¹・山中 稔²

¹ 非会員 香川大学大学院工学研究科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20) E-mail: s21g402@kagawa-u.ac.jp

²正会員 香川大学創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20) E-mail: yamanaka.minoru@kagawa-u.ac.jp

2016年4月に発生した熊本地震により、熊本城では石垣に甚大な被害が生じた.石垣被災箇所の多くが 過去の石垣修復箇所と重なっており、熊本城における石垣被災箇所は表層地盤構造と密接な関係があると 考えられる.文化財保護の観点から破壊を伴うボーリング調査等は熊本城修復工事に必要な箇所に限定さ れており、熊本城跡地内の地盤構造は部分的にしか明らかになっていない.

本研究では、ボーリングデータの不足する地点において常時微動探査を実施し、新たに得られる地層区 分と既存のボーリングデータを併用することで、熊本城跡全域における旧地形等の立体表示の可能な三次 元地盤図を作成した. その結果、熊本城城郭石垣の多くが旧地形の地層深度の急変部に位置していること が判明した.

Key Words: Three-dimensional Ground Map, Microtremor Exploration, H/V Spectral

1. はじめに

熊本城は熊本市内の中心市街地に位置しており,かつ て茶臼山と呼ばれた丘陵地に加藤清正によって築城され た平山城である.茶臼山は阿蘇溶結凝灰岩を基盤とした 火山灰堆積物からなる京町台地の南端であり,東側に高 みが存在し西側に緩やかに下る丘陵である¹⁾.熊本城は これまでの度重なる自然災害により石垣被害が生じてい る.近年では平成 28 年熊本地震によって石垣に甚大な 被害が生じた.熊本地震により、熊本城では重要文化財 建造物 13棟及び再建・復元建造物 20棟の全てが被災し た.図-1 に平成 28 年熊本地震による熊本城内の石垣被 災箇所を示す.被災石垣は、全石垣面積の約3割に当た る約 23,600m²に崩壊や膨らみ・緩みなど修復を要する箇 所が見受けられた.被災石垣は本丸や二の丸などの比 較的標高の高い箇所に分布し、その多くが過去の石垣修 復箇所と重なっていることが言われている.

著者らは、熊本城における石垣被災箇所は表層地盤構 造と密接な関係があると考え、各種の地盤調査を実施し てきている²⁾⁻⁴.熊本城内では石垣復旧工事に伴う地質 調査により多くのボーリングデータが存在しているが、 文化財保護の観点からボーリング調査は修復工事に必要 な箇所に限定され、石垣被害箇所における地盤構造の影 響を解明するに資する熊本城内全域の地盤構造は明らか になっていない.

本研究は、熊本城石垣被害と地盤との関係性を検討す る基礎資料を提供するために、ボーリングデータの少な い地点で常時微動探査を実施し、探査結果より得られた 地層区分と既存のボーリングデータを用いた熊本城全域 における三次元地盤図の作成を目的としている.



図-1 平成28年熊本地震による石垣被災箇所

2. 地層区分への常時微動探査の適用について

地震被害と地盤の S 波速度構造 Vs は相関性が高いこ とが広く知られている.地盤を破壊しない物理探査によ る地盤の Vs を得る物理探査として常時微動探査がある. 常時微動探査は,調査地の地質構造が水平成層状態であ ると仮定できる場合に用いられることが多く,表層地盤 構造と基盤との物性値のコントラストがはっきりしてい る地盤で有効とされている⁹.

常時微動探査により得られるHVスペクトルから地盤 構造を推定しようとする研究はこれまでに多くなされて おり ^の7,基盤と表層地盤のインピーダンス比が大きく, 基盤と表層の2層化でモデルが可能であるような地盤で ある場合,微動のHVの卓越振動数から簡易的な式より, 基盤深さの推定が可能であることが示されている.

H/V スペクトルを用いた地層区分の逆解析手法では, 着目するピーク周波数の選定が非常に重要となる⁸⁾⁹. この時,着目するピーク周波数の選定には,対象とする 地層境界面の深度を参考にする必要があり,その際にボ ーリング柱状図などの既存データを用いることとなる.

熊本城跡における地盤構造は、基盤層の上部に火山質 堆積物や洪積層、一部に盛土層が分布する多層地盤構造 となっている。そのため本研究では基盤層と表層地盤の 2層構造で解析を行うのではなく、基盤層より上部の層 を多層地盤として、インピーダンス比が大きい境界面で 地層区分することで常時微動探査データの解析を試みた。

3. 調査方法

(1) 常時微動探査の方法

図-2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.また、 常時微動探査データの解析では、各層の Vs の値の範囲 を定める必要があったため、ボーリングデータとその近 傍で測定したデータを用いて対比を行うために、ボーリ ング地点の近傍でも測定を行った.

常時微動探査は、微動計McSEIS-ATを用いて行った. 測定を行う際、微動計は方位を合わせて地盤面に水平に 設置する.地盤面が軟弱な場合には、長さ5cm程度のス パイクを取り付け、スパイクを地盤面にしっかりと差し 込むことで微動計を地盤に密着させた.一方、舗装面の ように硬質な地点での設置においては、周辺の小石など を取り除いた後、微動計に平坦なベースを取り付けて測 定を行った.測定時間は1箇所あたり約20分~30分程 度で行った.走向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.



図-2 既存ボーリング箇所と常時微動探査実施地点

(2) H/V スペクトルからの Vs 深度分布図の解析

表-1に、三次元地盤図および常時微動探査における地 層区分を示す.地層区分は熊本市が定めている熊本城跡 における地質凡例を基に定めた.熊本市では詳細に地層 が分けられているが、HV スペクトルを用いた解析では 速度コントラストの鮮明な地層境界面で区切ることが望 ましかったため、N値と地質の類似した層はまとめて層 区分を行った.そのため本研究における地層区分は、上 位より、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 分し解析を行った.

図-3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定データを示す. HV 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.

HVスペクトルから深度方向のVs分布を解析するにあたり、近傍のボーリングデータから各層の層厚やN値

表-1	熊本城跡における三次元地盤図に
	採用した地層区分

地質年代		地層名		記号
	完新世	表層	Bc	
新生代第四紀		阿蘇-4火碩	杂流堆積物	Aso-4
	更新世	阿蘇-3火砕流堆積物		Aso-3
		洪積層		D
		金峰山	強風化部	Th
		古期火山 噴出物	風化部	10
			安山岩部	An



図-4 代表的な3地点のVs深度分布図

を参考にし、今井の式 ¹⁰を参考に求めた Vs を用いて得 られる理論分散曲線のピーク周波数と、測定結果の HV スペクトルを一致させる方法を用いた.なお、本研究で は、基盤岩面までの深度とその上部に堆積する層の層区 分を主としているため、基盤岩面を反映していると考え られるピーク周波数に着目した.ピーク周波数の値の定 め方は、測定データの近くに存在するボーリングデータ から基盤面深さを読み取り、基盤と表層の二層構造でモ デル化できるような地盤構造において適用される 1/4 波 長則より求められる卓越周波数を参考にして定めた.ま た、計算により求めた周波数帯に複数ピークが見られる ような場合は、増幅倍率の最も大きいピークを採用した.

また、近傍のボーリングデータがない、すなわちその 地点の地層区分が不明な場合における各層の Vs を定め る方法は、同様の地形を示す比較的近傍のボーリングデ ータを参考に、層厚の値を固定して、各層の Vs のみを 変化させることで Vs を定めた.

図-4に、図-3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 方が基盤面深度が約 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.

表-2に、測定全地点における各層のN値とVsの範囲

表-2 解析結果により得られた各層の Vs(m/s)

	ボーリングに上ろ値		解析結果に上ろ値	
	N値	平均N值	Vs (m/s)	<u>来による</u> 値 平均 <i>V</i> s (m/s)
Bc	1~54	7	105~190	132.2
Aso-4	$1 \sim 58$	16	190~270	216.2
Aso-3	3~167	35	240~290	273.3
D	9~94	28	210~267	239.0
Tb	5~1500	58	280~350	311.0
An	15~198	198	700~790	747.2

と平均値について示す.いずれの層ともにボーリングに よるN値が大きく変化していることから,解析結果であ るVsの変化も大きくなっている.そのVsの幅をN値に 換算するとBc層では約10程度,Aso-3層では約20程度, An層では約150程度の分布幅となる.このことから同一 の層であっても、場所や深度の違いでN値やVsが大き く異なることが判明した.

(3) 解析結果による はと №値の関係

図-5 に、常時微動探査データの解析結果の Vs と、ボ ーリングからのN値との関係について示す. 図中には、 今井の式を表す破線を合わせて記している. 解析結果の VsとN値の関係図の作成方法は、ボーリングデータとそ の近傍における解析結果を用いて各層ごとに Vs と N値 の対比を行うことで作成した. この際、ボーリングデー タの不足する地点における測定データは、近傍に対比可 能なボーリングデータが存在しないが、より多くのデ ータで傾向を見るために、対比する層の分布する深度が 概ね一致しており、距離が離れすぎていなければ、N値 に大きな差は生じないと考えて、測定地点の標高とボー リング地点の孔口標高が概ね一致しているデータ同士を 用いて対比を行うこととした.

常時微動探査での各層の Vs は今井の式を参考にして 定めたため,解析結果の Vs と N値の関係は既存の関係 式に類似した傾向を示した.このことから熊本城跡にお ける Vs を用いた N値の推定には既存の計算式を適用で きる可能性があると考えられる.また,安山岩層につい て,風化の進み具合の影響などから場所や深度の違いに よってN値のばらつきが大きかったことや基盤岩層であ るため層厚が不明であったことから,安山岩層の Vs に ついては,安山岩層を工学的基盤面であるとして Vs=750m/s 前後に設定をして解析を行ったため,既存の 関係式とは異なった傾向を示している.

(4) 解析結果とボーリングデータの層厚について

図-6に,近傍のボーリングデータより読み取った Bc 層, Aso-4, Aso-3 層, Tb 層の各層の層厚と,解析による地層



図-5 解析結果による Vs と N 値の関係 (m/s)

層厚の関係について示す.また、図中にはデータの原点 を通る近似線と、その際の決定係数の値を併せて示す. 各層において、相関が大きく異なる地点においては、地 層構造が急変している、もしくは、Vs の急激な変化を もたらさない地層構造をなしていることが推察される. 一方、(f)図に示す基盤岩深度の相関では、決定係数 R²は 0.81 と比較的高いものの、測定箇所によって最大で約 30mの差が生じる結果となっている.



図-6 ボーリング柱状図とHVスペクトルから求めた層厚との相関



図-7 地質対比

4. 解析結果を組み込んだ三次元地盤図の作成

(1) 三次元地盤図の作成方法

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 えて地質対比を行う.

図-7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.そして、この地質対比の結果 を基に地質境界面モデルの作成を行った. 地表面部分の 地質境界面モデルについては地質対比の結果を用いて作 成した境界面モデルでは、詳細な地形を再現するのは不 可能であったため、国土地理院より熊本城周辺の10mメ ッシュの点群データをダウンロードすることで, NURBS を使用して作成した.

図-8に、作成した熊本城跡における三次元地盤図の全体像を示す.三次元地盤図は各層毎に作成した地質境界面モデルを使って構成する.まず、作成する三次元地盤



図-8 三次元地盤図全体像

図の範囲に合わせて地層ソリッドと呼ばれる直方体モデ ルを作成する.そして,各層毎に地質境界面モデルを用 いて地層ソリッドより三次元表示区域を切り出し,それ らを組み合わせることで任意の視点から立体表示が可能 な三次元地盤図を作成した.

(2) 解析結果を組み込んだ二次元断面図の作成

既存のボーリングデータより作成されている想定二次 元地盤断面図を用いて,解析結果より得られた地層区分 と層厚を検討した.

図-9(a)に、A-A'断面(図-8参照)における想定二次元 地盤断面図を示す.ボーリング間隔の離れた断面上にあ る C-26 地点と E-8 地点において、Aso-4 層と Aso-3 層の地 層境界深度に約 5~10m 程度の差異が見受けられた.こ の差異を検討するために、三次元地盤図より様々な方向 から断面図を切り出して検討することとした.図-9(b) に、三次元地盤図から作成した同じ A-A'断面における



(b) 三次元地盤図より作成した二次元断面図(A-A'断面)





(b) 三次元地盤図より作成した二次元断面図(B-B'断面)

図-10 B-B'断面図

地層断面図を示す.解析結果による地層区分を組み込ん でおり図-9(a)よりも深い位置まで断面の推定をするこ とができていることが分かる.

図-10(a)に, B-B'断面(図-8参照)における想定二次 元地盤断面図を示す.ボーリング No.30B-2 および No.29B-1-1 間の距離が離れているため立田山断層の想定 分布範囲が広くなっているが,図-10(b)ではボーリング データ間を常時微動により得られた A-8 地点および A-9 地点の地層区分を補間することで、立田山断層の分布範 囲がより狭くなり、立田山断層想定位置では約 5~15m 程のずれを表現できている.しかし、両断面図において 地層区分深度にずれが生じている箇所が認められるため に、今後、三次元地盤図の作成においてさらなる地層区 分の検討修正を行う必要があると考えられる.



図-11 三次元地盤図の表示

(3) 構築した三次元地盤図

図-11(a),(b)に,構築した三次元地盤図を用いて表現した,Aso4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Aso4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.

図-11(a),(b)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.

5. まとめ

本研究により得られた成果を以下に示す

- 常時微動探査を実施し、N値を参考にVsの深度分布 を得ることで、ボーリングデータの不足する地点に おける新たな地層構造を得た.
- 2) 常時微動探査データの解析より得られた地層構造と ボーリングデータとを併用した熊本城跡における三 次元地盤図を作成することで、より詳細な地盤構造 の推定を行った。
- 3) 作成した三次元地盤図より推定される旧地形から, 地層深度の急変部に熊本城城郭石垣の多くが位置していることが判明し,石垣被災箇所と地盤構造との 関連性が示唆された.

謝辞:熊本城跡での調査実施に多大な便宜を図って頂いた熊本市熊本城調査研究センター嘉村哲也氏と、地盤図 作成において有益なアドバイスを頂いた八洲開発(株)中 田卓氏に感謝の意を表する次第である.

参考文献

- 1) 熊本城調査研究センター:特別史跡熊本城跡平成 28 年熊本地震被害調査報告書, 2018.
- 山中 稔,橋本凌太,杉本知史,勝田侑弥:熊本城 二様の石垣の振動特性の特徴について,地盤工学会四 国支部平成 29 年度技術研究発表会講演概要集,pp.69-70,2017.11.
- 3)勝田侑弥,杉本知史,山中 稔:熊本城の築石構造 物の被災状況調査と再現解析に関する基礎的研究,土 木史研究講演集,土木学会,Vol.38,pp.141-147,2018.6.
- 4) 山中 稔,杉本知史,福田直三,前田秀喜,吉村辰 朗:熊本城跡における物理探査による表層地盤構造の 把握,土木史研究講演集,Vol.39, pp.233-239, 2019.
- 5) 物理探査学会編:物理探査適用の手引き(とくに土木 分野への適用), pp.47-48, pp.272-273, 2000.
- 6) 萩本由訓,野畑有秀:単点常時微動観測を用いた基 盤深さ推定に関する研究,大林組技術研究所報, No.79, pp.1-6, 2015.
- 小嶋啓介,山中浩明:常時微動観測に基づく福井平 野の第四紀層構造の推定,土木学会論文集 No.754/1-66, pp.217-225, 2004.
- 8) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄 巧: 常時微動の水平動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.486/I-27, pp.251-260, 1994.
- 41野克昭,大町達夫:常時微動の水平/上下スペクト ル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適 用例,土木学会論文集,No.525/1-33, pp.247-259, 1995.
- Imai, T.: P- and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. of 9th ISSMFE, Tokyo, Vol.2, pp.257-260. 1977.

(2021.4.19受付)