熊本城石垣曲線と静的・動的安定性

福田 光治

正会員 大成ジオテック (〒830-0038 福岡県久留米市西町 1174-10) fuku564b@xug.biglobe.ne.jp

熊本城石垣が 2016 年熊本地震で多くの場所で崩壊した. 熊本城石垣の構築時代は多様で,時代を考慮 して復元しなければならない.本論文は石垣構築時代や,地震前までに続けられたきた修復石垣と 2016 年熊本地震崩壊箇所の関係を示す.復元するためには静的・動的安定性を検討しなければならない.その 検討方法として薄膜骨格モデルを示す.動的解析は背面裏込め等のモデルの地震変位を調和振動関数で表 現し,ばね係数で個々の石垣重心に作用させるモデルである.既存のマニュアルと比較して,その妥当性 を示す.石垣変状は地震前にも発生している.そのレベルを「石垣秘伝之書」の石垣曲線を基準に変状レ ベルとして評価し,変状レベルと 2016 年石垣崩壊の関係を検討する.

Key Words: stone wall, surface curve, static, dya\namic, stability,

1. はじめに

崩壊したり、変状した熊本城の石垣はオーセンティシ ティに準拠するように復元されなければならない. 熊本 城石垣の特徴は、①高石垣、②反り、③複雑な曲輪で代 表することができる. この3要素が熊本城を訪れる人々 に感動を与える. 復元理念として2つの方向がある. 視 覚的に3要素を復元する景観保存と、石垣構築時代を含 めて復元するオーセンティシイティの理念である. 地盤 工学の発展形として分化しつつある地盤遺跡工学では、 後者の時代も復元するオーセンティシティが本流と考え る.

オーセンティシティの復元思想として, 熊本城の石垣 構築時代を確認する作業が求められる.また地震による 崩壊や変状した石垣では,残された石垣から石垣構築時 代の石垣曲線を決めなければならない.

本論文では熊本城石垣の時代区分,1966年以降熊本 市が延々と続け、復元した石垣の地震による崩壊との関 係を明らかにする.

石垣曲線は石垣の安定性を計算する場合重要なパラメ ータになる.このため石垣曲線とともに、安定性評価モ デルが構築されなければならない.本論文では著者が一 貫して進めてきた薄膜骨格モデル ¹⁾を示し、また動的解 析法として調和振動関数とばね係数を組み合わせたモデ ル³を提案する.

既存の城郭石垣では仙台城北壁石垣の復元プロジェク トで用いられた擁壁モデル³が基本になっている.類似 した考え方が箱型擁壁マニュアル⁴の方法でも示されて いる.本論文では既存マニュアルと薄膜骨格モデルの関 係を示す.

また熊本城の石垣曲線は「石垣秘伝乃書」⁵で解釈で きる.構築時の石垣曲線を「石垣秘伝之書」による近似 曲線とするが、変状レベルも評価できる.変状レベルと 熊本地震による影響を整理し、静的・動的安全率を含め た評価を試みた.

2. 熊本城石垣時代区分と熊本地震被災個所

オーセンティシティによる復元の第一歩は復元する石 垣の時代を特定することである. 熊本城の石垣構築時代 は富田紘一が詳細な時代区分や重なりを提案 ®している. 冨田は石垣の形状,加工度合,築石部や出隅の石垣積み 方法から時代を特定している. これほど詳細な研究成果 は見当たらないので,熊本城石垣における時代区分の基 本となるのは表-1に示す冨田提案時代区分である.

冨田は現在の位置で熊本城が構築された時代以降を 6 区分している.加藤清正は富田第V期の 1611 年に死亡 してるが、熊本城石垣第V期は加藤清正の息子加藤忠廣 の時代であると富田は指摘している.加藤家は 1632 年 に改易となり、第VI期は細川家の時代になる.右欄の石 垣例は著者が追加したものである.

図-1 は富田が作成した石垣の時代区分であり、それに 著者が 2016 年熊本地震で崩壊した箇所を●で示した. 概略的な被害箇所数を整理したのが表-2 で、第 I 期から 第VI期のいずれの時代の石垣も被災していることを示している.従って加藤清正の時代の石垣は強かったという素朴な願望で整理することは不可能である.

| | 富田時代区分 | | 7-15 | | | |
|----|------------|-----------|----------|--|--|--|
| 時代 | 和暦 | 西暦 | | | | |
| | | | 小広間台南面 | | | |
| т | 慶長4年 | 1500 | 月見櫓台 | | | |
| 1 | | 1099 | 東三階櫓台 | | | |
| | | | 大天守台南面 | | | |
| I | 慶長5年 | 1600 | | | | |
| II | 慶長6年前半 | 1601 | | | | |
| | 慶長6年~12年 | 1601-1607 | 田子櫓台 | | | |
| | | | 七間櫓台 | | | |
| | | | 十四間櫓台 | | | |
| N | | | 源之進櫓台 | | | |
| | | | 東十八間櫓台東面 | | | |
| | | | 長局櫓台 | | | |
| | | | 西出丸未申櫓台 | | | |
| V | 慶長12年以降 | 1607- | 飯田丸五階櫓台 | | | |
| VI | 寛永10年 文政3年 | 1633-1820 | 二様の石垣西面 | | | |

表-1 富田の熊本城石垣時代区分 6に追記

1960年以降熊本城石垣復元と熊本地震被災個 所

熊本市は熊本城の石垣を延々と補修・復元⁷してきた. 1959 年天守閣の竣工以降の修復を中心に整理したのが表-3 である. 明治以降の熊本城は破却や西南の役で消失するという人災を受けた. 熊本城復元工事の推移を示したのが図-2 である. 図中には飯田丸五階櫓,南大手門,戌亥櫓プロジェクトを例として掲載しているが,いずれも 2016 年熊本地震で崩壊している. 熊本市が手掛けた復元箇所と 2016 年熊本地震による被災個所を整理すると図-3 及び表-3 になる. 図-3 の〇で囲んだ番号が文献で示された復元プロジェクトである. この図に2016 年熊本地震で崩壊した箇所を×で示した. 〇が1966 年以降の復元個所である. 〇と×が重なった箇所が多く,×だけは 3 箇所に過ぎない. 1966 年以降の復元個所である. 1966 年以降の復元個所である. 1966 年以降の復元個所である. 1966 年以降の復元個所である. 1966 年以降の復元個所である. ○と×が重なった箇所



図-1 富田熊本城石垣時代区分 % 這記

表-2石垣時代と被害箇所数と

| 時代 | 崩壊箇所数 |
|-----|-------|
| I 期 | 1 |
| Ⅱ期 | 3 |
| Ⅲ期 | |
| Ⅳ期 | 21 |
| V期 | 5 |
| VI期 | 1 |



図-2 熊本城復元・修復プロジェクト費



図-3 熊本市修復石垣と2016年熊本地震による崩壊箇所

| 熊本城 | 大小天守閣, | 櫓49,櫓 | 門18, 城門 |]29 | | | | |
|------------|--------|-------|---------|------|------|------|----|--|
| 構造物名前 | 1877 | 1889 | 復元計画 | 復元開始 | 復元竣工 | 2016 | | |
| | 五古巡会 | 熊本地震 | | | | 熊本地震 | | |
| | 四角虹子 | | | | | 櫓 | 石垣 | |
| 大天守閣 | 炎上 | | | 1959 | 1960 | | | |
| 小天守閣 | 炎上 | | | 1959 | 1960 | | 崩壊 | |
| 本丸御殿大広間 | 炎上 | | | 1999 | 2008 | | | |
| 南大手櫓門 | | | 1 | 1998 | 2002 | | 崩壊 | |
| 戌亥櫓 | | | 1 | 1998 | 2003 | | 崩壊 | |
| 未申櫓 | | | I | 1998 | 2003 | | 崩壊 | |
| 元太鼓櫓 | | | I | 1998 | 2003 | | | |
| 西大手櫓門 | | | | 2000 | 2003 | | 崩壊 | |
| 飯田丸五階櫓 | | 石垣崩壊 | 1 | 1998 | 2005 | | 崩壊 | |
| 馬具櫓及び続塀 | | | II | 2011 | 2014 | | 崩壊 | |
| 平左衛門丸の塀 | | | П | | | | 崩壊 | |
| 西櫓御門及び百間櫓 | | | II | | | | | |
| 竹之丸五階櫓 | | | F | | | | | |
| 数寄屋丸五階櫓 | | | F | | | | | |
| 数寄屋丸 | | | | | | | | |
| 御裏五階櫓二階御広間 | | | F | | 1989 | | 崩壊 | |
| 櫨方三階櫓 | | | F | | | | | |
| 北大手門 | | | F | | | | | |
| 百間石垣 | | 石垣崩壊 | | | | | 崩壊 | |
| 闇ガリ石垣 | | 石垣崩壊 | | 1999 | 2007 | | | |
| 西出丸 | | 石垣崩壊 | | | | | | |
| 東十八間櫓 | | | | | | 倒壊 | 崩壊 | |
| 北十八間櫓 | | | | | | 倒壊 | 崩壊 | |
| 五間櫓 | | | | | | | | |
| 本丸東三階櫓 | 焼失 | | | | | | | |
| 月見櫓 | 焼失 | | | | | | | |
| 小広間櫓 | 焼失 | | | | | | | |
| 小広間西三階櫓 | 焼失 | | | | | | | |
| 長局櫓 | 焼失 | | | | | | | |
| 耕作櫓門 | 焼失 | | | | | | | |
| 三之櫓門 | 焼失 | | | | | | | |
| 東櫓門 | 焼失 | | | | | | | |
| 西竹之丸脇五階櫓 | 戦争後破却 | | | | | | | |
| 飯田丸三階櫓 | 戦争後破却 | | | | | | | |
| 札櫓門 | 戦争後破却 | | | | | | | |
| 六間櫓 | 戦争後破却 | | | | | | | |
| 書物櫓 | 戦争後破却 | | | | | | | |
| 堀預り櫓 | 戦争後破却 | | | | | | | |

表-2 明治以降の熊本城の被災と復元 ^{が整理}

| 表-3 | 復元個所番号と崩壊 | |
|------|------------|---|
| 1 | 午砲台・平御櫓前 | |
| 2 | 馬具櫓 | × |
| 2 | 数寄屋丸櫓門 | × |
| 3 | 小天守下門 | × |
| 5 | 西出丸から | × |
| | 戌亥櫓 | × |
| 8 | 西大手門まで | × |
| 9 | 竹の丸五階櫓台 | × |
| (10) | 二の丸御門 | × |
| (1) | 不開門坂道 | × |
| (13) | 棒安坂 | |
| (15) | 宇土櫓西側 | |
| (16) | 棒安坂 | |
| 18 | 二の丸美術館南側 | |
| (21) | 奉行所跡東側 | × |
| (24) | 西出丸北側 | × |
| 25 | 東竹之丸 | |
| 26 | 南大手門西側 | × |
| 27) | 奉行所跡西側 | × |
| 30 | 二の丸御門跡 | × |
| (31) | 南大手門櫓台及び南坂 | × |

4. 「石垣秘伝之書」と熊本城石垣曲線

熊本城城郭石垣曲線は「石垣秘伝之書」から作成される石垣曲線で近似化できる[®].この研究成果に依拠すれば熊本城の石垣の変状あるいは 2016 年熊本地震により崩壊した石垣の,崩壊前の状態を概略的に推定することが可能になる.本研究ではオーセンティシティによる復元は時代を含まなければならないということを述べた.城郭石垣曲線は熊本城は「石垣秘伝之書」,金沢城は



図4 秘伝化された石垣曲線の類似性

「後藤家文書」で説明されている⁹.いずれも式の表現 は異なっているが、日本で古くから伝わる破風曲線の曲 線形状に一致する¹⁰.「石垣秘伝之書」では高さ方向に 10 等分し、最下段から一定の割合でそらしながら立ち 上がる技術指針が示されている.「石垣秘伝之書」によ る技術指針を解釈すると、最下段の石垣勾配が反りを始 める矩勾配となる.石垣天端と根元を結ぶ勾配を打出勾 配と定義する.そして打出勾配と矩勾配の差を反り量 (単位角度)で表すことにする.

図-4 は熊本城四間櫓台石垣曲線を対象に「石垣秘伝 之書」,「後藤家文書」,そして破風曲線を併記したも のであるが,いずれの曲線も類似した曲線で近似化でき る.表現方法は異なるが,「石垣秘伝乃書」,「後藤家



図-5 熊本城石垣曲線と時代

文書」の曲線は破風曲線に一致していることを示している.

著者は地震前の石垣測定データ ¹¹に対して「石垣秘 伝之書」による近似化を試みた.この結果を整理したの が図-5 である.石垣構築時代は富田の区分に準じた. ただし,富田の時代区分にゼロ期を加え,さらに石垣曲 線の形態から第IV期をa,bに2区分に分割して示した. 富田の時代に即して石垣曲線を解釈すると,第 I 期から 第IV期までの反り量は概略一定で 9~10°に分布してお り,鉛直高さが時代とともに高くなる.第IV期は反り量 が9~12°になり,反り量がやや増加するが,鉛直高さ は低くなる.第V期は 9~12°で,第VI期は、反り量は 前の時代に類似した範囲にあるが,第V期に比べ鉛直高 さがやや増加する.

加藤清正は 1588 年肥後国に入国し,現在の熊本城か ら南西方向にある古城と呼ばれる箇所に居を構えた.古 城の石垣曲線は図-5 に示すように富田の時代区分の第 I期の特徴に連続的につながる傾向を示している.反り 量は 7~10°に分布しているので,第I期の反り量に比 べたやや小さな反りになる.反り量はいわゆる武者返し に発展する概念である.従った古城の反りは小さく,印 象的には直線的になるが,「石垣秘伝之書」による石垣 曲線で近似化可能な曲線になっており,わずかではある が反りの存在を確認することができる.

さらに文禄・慶長の役で朝鮮半島に構築した古城時 代に対応する西生浦倭城の石垣は、小さい反り量から古 城の反り量に連続的につながる傾向を示している.石垣 高さが増加すると反りが比例的に少しづつ増加する傾向 がみられる.そして古城の高さ約 7m 付近になると、古 城のデータに収斂する傾向がみられる.反りの発展期と して、西生浦から古城への連続的な変化の研究は今後の 課題であるが、富田時代第 I 期の前に第 0 期を設定する と石垣曲線形態と時代の関係がより明瞭になり、第 0 期 を設定する意義を見出すことができる.

また石垣曲線の特徴から考えると,第IV期を a とb に2分割すると石垣曲線の時代の流れに準じて変遷する ことが強調されるように考えられる.図には加藤清正が 担当した名古屋城天守閣石垣,加藤忠廣が担当した江戸 時代大阪城天守閣石垣の石垣曲線は熊本城の石垣曲線と 時代の関係に対応している.しかし仙台城北壁石垣の石 垣曲線の反り量は小さく,熊本城の石垣時代区分では補 間できない位置にプロットされる.つまり石垣曲線の変 遷は富田の時代区分に対応しているが,日本の城郭石垣 技術として一般的な時代の座標とすることは現時点では 困難であり,熊本城石垣に限定された時間座標である.

図-6 は熊本城の石垣勾配と 2016 年熊本地震で崩壊 した石垣を明示したものである. 熊本地震で崩壊した石 垣は必ずしも急勾配あるいは高石垣であるとする理由は



図-6 石垣勾配と熊本地震崩壊石垣



写真-1 地震崩壊百間石垣

見いだせない.崩壊は石垣形態の広い範囲にわたっている.富田の石垣時代区分は石垣曲線の形態にも概略影響しているが、2016年熊本地震崩壊箇所が広い時代に関係していることは明らかである.従って地震による石垣崩壊の原因を急勾配,高石垣だけに求めることは困難である.

「石垣秘伝之書」の石垣曲線を基準にして,基準曲 線からの乖離を視覚的に判断して,石垣変状レベルを図 -7 のように3 段階で評価した.近似方法は根元と石垣 天端付近に焦点をあてた近似Aと,根元部分の石垣曲線 に着目した近似Bの2つの形態に着目した.石垣の安定 性を考えると,石垣根元部分の近似Bで変状レベルを評 価する視点の有効性を確認することができる.2016 年 熊本地震による石垣崩壊箇所では,根元部分の石垣曲線 に着目することによって,崩壊後の石垣から崩壊前の石 垣曲線を近似的に推定する手法になると考える.図-8 は熊本地震による崩壊前後の写真-1の百間石垣曲線の 測定データを「石垣秘伝之書」で解釈したものである. 基準とした「石垣秘伝之書」の石垣曲線に対し,地震前 のデータは頭部で前面に孕んでいる.一方 2016 年熊本



図-7 熊本城石垣変状レベル

地震で崩壊し、しかし根元部分が残置している個所の石 垣曲線は、「石垣秘伝乃書」で解釈できる近似レベルで ある.この結果から百間石垣は 1889 年熊本地震で変状 したが、修復されずに現在まで維持されたことが予想さ れる.そして 2016 年熊本地震後残置している根元部分 はオリジナルに近い石垣曲線が確保されていることが予 想される.地震による石垣崩壊は、石垣全面にわたる崩 壊ではなく、局部的な崩壊にとどまっている個所が多い. 局部的には崩壊を免れた個所があり、崩壊部と非崩壊部 を同時に測定し、比較検討が可能であるならば、地震前 の石垣曲線の推定精度が向上することが期待される.

このような評価は、北十八間櫓台石垣でも確認する ことができる.

以上の比較を踏まえると、根元部分の近似度に着目 する近似 B が、2016 年熊本地震による石垣変状の評価 に有効な情報を与えると期待される.

5. 薄膜骨格モデルと調和振動関数

同じ台形状の要素で石垣表面をモデル化した薄膜骨 格モデルを提案した¹⁾.石垣骨格による自重,背面から Coulomb 土圧を作用させ,石垣の個々の底面でのせん断 と回転の安全率を計算するモデルである.石垣の孕みを 石垣の回転で表現できるように台形要素を選択した.

仙台城北壁石垣の復元では擁壁工の設計法が使用された.類似した設計法に箱型擁壁のマニュアル⁴がある. 箱型擁壁はいわば直方体の積層体であるから,孕みはせりだしで表現しなければならない.くさび型試行で土圧 を求めなければならないが,対象とする安全率はせん断と回転である.



図-8 熊本地震前後の百間石垣曲線





図-10 箱型擁壁⁴⁾





動的安全率は擁壁マニュアルでは震度法が用いられ るが、薄膜骨格モデルでは調和振動関数¹⁰による鉛直方 向の変位分布を求め、各々の石垣の重心に変位に比例す るばね力を介して地震を薄膜骨格モデルに作用させる方 法を提案している.石垣に対応するように裏込めを分割 し、各層における変位を式(1)のように表現する.

$$\xi_i(z_i, t) = \left(A_i e^{ip_i z_i} + B_i e^{-ip_i z_i}\right) e^{i\,\omega t} \qquad (1)$$

境界条件を考慮すると式(2)のように展開され, この比を層厚一定とすると基盤変位に対する各石 材高さでの増幅量が式(2)で計算できる.

$$\frac{A_i + B_i}{A_N + B_N} = \frac{\cos\{p(i-1)H\}}{\cos\{p(N-1)H\}}$$
(2)

ここに pは伝播定数で式(3)が定義式である.

$$p = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{T} \frac{1}{V_c} \tag{3}$$

ここにω:角速度, *c*:波速, *T*:卓越周期, *V_s*:層内せん断波速度である.基盤から入力した 地震変位波形は図-11 に示すように伝播定数によ り上方伝播モードは異なる.仙台城北壁石垣で検討され た擁壁マニュアルでは図-12 の変位モードが与えられて



-1-1109-8-7-6-5-4-3-2-10 1 2 3 4 5 6 7 8 91011 gain

図-11 伝播定数と変位モード



図-13 箱型擁壁変位モード4)



いる.また箱型擁壁では図-13,14 が与えられており, 薄膜骨格モデルでも参考にし,基盤変位に対する石垣頭 部の増幅比を約4倍とし,1次モードと2次モードで計

| 卓越周期 | Т | 0.41 | S |
|------|----|----------|-----|
| S波速度 | Vs | 200 | m/s |
| 仁埰侅粉 | p0 | 0.076585 | |
| 山田下女 | р | 0.1 | |
| 石垣厚さ | Н | 0.45 | m |
| 段数 | N | 33 | |

表-4 伝播定数の決め方



図-15 地震動の作用位置とスプリング

算した.1次モードでは石垣前面方向へのばね力が作用 し、2次モードでは石垣上方では前面方向に、下方では 背面方向に作用する.

伝播定数 p は表-4 を参考に決める. 層内の卓越周期, S 波速度により参考値 poが自動的に決まる. そして石垣 方向の増幅形態を求め, 頭部の増幅量が基盤入力変位の 約4倍になるように, 図を見ながら1次モード, 2次モ ードを考慮し, 解析に用いる伝播定数 p を決める. 図-15のように石垣重心にスプリング力を作用させる.

6. 低石垣崩壊と控え

2016 年熊本地震で崩壊した熊本城石垣は急傾斜・高 石垣に限定されず,写真-2 のように低石垣の崩壊も目 立つ.低石垣はほぼ直線の積層体であるから,石垣形状



写真-2 低石垣の崩壊



図-16 熊本城石垣の控え



図-17 低石垣静的・動的安全率の深度方向分布

の影響が検討できる.薄膜骨格モデルでは石垣の鉛直長 さと控えにあたる奥行きがパラメータになる.

熊本城西出丸修復プロジェクトでは解体した石材の 長さが測定されている⁷. 図-16 が縦長さは 20~60 cm, 控えは縦長さに対して 1.2~2.2 倍の長さである. 安定 解析では対象とする石垣の縦長さは,手が届く根元で 10 ケ測定し,その平均値を使用している. この平均値 を基準に 1.5 倍を控えとした.

図-17 の太い実線は静的せん断安全率,一点鎖線は 基準変位1cmを調和振動関数を用いて作用させた動的安 全率である.一方,太い鎖線は静的回転安全率で,石垣 上方向に向かって安全率は増加している.動的回転安全 率は急激に減少している.

図-18 は図-17 の条件のもとに控えをパラメータとし て解析した回転安全率を示している.控えは 0.65m から 0.3m まで暫時低減して計算した.解析結果では根元部 分で安全率が低く,控えが 0.5m 以下になると根元部分 から回転安全率1以下の領域が上方に向かって広がる.



図-17 回転安全率に影響する控え



「石垣秘伝之書」で石垣の根元付近の近似に着目した近似 B を適用し,鉛直高さとの関係を求めた.図-18 にその結果を示す.鉛直高さ 15~20m 付近の石垣は鉛直高さが減少するに従い近似 B 角度(矩勾配)は増加する.逆に矩勾配を増加させると鉛直高さは低くなる.一方鉛直高さ 10~15m の範囲のデータは矩勾配 40~60°と変化しているが,鉛直高さは概略的に変化しない.図中の〇は変状レベルを3と評価した石垣である.矩勾配が増加すると変状レベルの出現が如実になり,変状レベル3は角度 55~65°付近に集中している.図中の×は 2016 年熊本地震で崩壊した百間石垣の近似結果であり,データの中では相対的に大きな近似角度にある.

変状レベルと安定解析結果を表-5 に示す. これを図で



図-18 鉛直高さと変状レベル



図-19 石垣高さと回転安全率



図-20 動的安全率と2016年熊本地震崩壊箇所

表現したのが図-19,20である. 〇は2016年熊本地震で 崩壊した石垣である.図-19では鉛直高さが低くなると 回転安全率は増加する傾向を示しおり,期待した結果で あるが,控えは縦長さの15倍として計算しているので, 実際の控えを測定することにより,解析の精度は向上す ると期待される.表-5では静的安定解析で1以下になっ ている第I期の小広間台,月見台櫓台,第IV期の七間櫓 台,四間櫓台,源之進櫓台東十八間櫓台,長局櫓台,第 VI期の百間櫓台のうち東十八間櫓台,百間石垣を除けば, 熊本地震では非崩壊にとどまった.小広間台では中段上 方に大きな陥没箇所が存在しているが,熊本地震では非 崩壊である.従って静的安全率1以下の石垣に関しては, まず控えを確認する必要がある.静的安定解析の安全率 は1以上であるが,動的解析で安全率が1以下になった

| | 富田時代区分 | | | 石垣形状 | | | - | p=0.3 | p≠0.3 | p≠0.3 |
|------|------------------|-------------|-------------------|--------|----------|-----|-------|--------|--------|---------------------|
| 時代 | 和暦 | 西暦 | 白垣 | 高さ(m) | 打出勾配 | 女主挙 | 靜的 | u0=1cm | u0=1cm | u0=5cm |
| I 慶長 | | | 小広間台南面 | 12.595 | 58.640 | せん断 | 0.875 | 0.875 | 0.750 | 0.442 |
| | | | | | | 回転 | 2.490 | 2.236 | 2.236 | 1.024 |
| | | 1599 | | 11 330 | 56.058 | せん断 | 0.985 | 0.985 | 0.606 | 0.124 |
| | ■ 唐巨1年 | | 月見僧日 | 11.332 | | 回転 | 2.503 | 2.378 | 1.559 | 0.318 |
| | /変攻4平 | | 市三陸機台 | 11 457 | 58.679 - | せん断 | 1.187 | 1.141 | 1.135 | 0.743 |
| | | | | 11.101 | | 回転 | 2.515 | 2.415 | 2.152 | 1.302 |
| | | | 大天守台南面 | 11.455 | 56 202 | せん断 | 1.015 | 1.015 | 0.864 | 0.513 |
| | | | | 11.400 | 00.202 | 回転 | 2.718 | 2.580 | 2.426 | 0.929 |
| II | 慶長5年 | 1600 | | | | | | | | |
| III | 慶長6年前半 | 1601 | | | | | | | | |
| | | | 田子櫓台 | 13,263 | 63.777 | せん断 | 1.006 | 0.988 | 0.921 | 0.625 |
| | | | | 10.200 | | 回転 | 2.454 | 1.804 | 2.135 | 1.075 |
| | | | 十間機台 | 12.931 | 63.327 | せん断 | 0.956 | 0.900 | 0.856 | 0.247 |
| | | | | | | 回転 | 2.434 | 2.173 | 1.760 | 0.533 |
| | | 2 1601-1607 | 四間機会 | 13.400 | 60.284 | せん断 | 0.770 | 0.592 | 0.705 | 0.508 |
| | | | | 15.490 | | 回転 | 2.427 | 2.060 | 2.301 | 1.904 |
| | 慶長6年~12 年 | | 源之進櫓台 | 12.592 | 58.920 | せん断 | 0.876 | 0.876 | 0.697 | 0.320 |
| | | | | | | 回転 | 2.532 | 2.210 | 2.199 | 0.975 |
| | | | 東十八間櫓台東 | 17 783 | 60 563 | せん断 | 0.918 | 0.909 | 0.828 | 0.433 |
| TZ | | | | 11.100 | 00.000 | 回転 | 1.645 | 1.613 | 1.513 | 0.756 |
| 14 | | | 北十八間櫓台北 | 18 582 | 62.998 | せん断 | 1.022 | 1.011 | 0.858 | 0.187 |
| | | | | 10.002 | | 回転 | 1.591 | 1.555 | 1.223 | 0.423 |
| | | | 長局櫓台 | 12.496 | 62.763 | せん断 | 0.891 | 0.891 | 0.690 | 0.295 |
| | | | | | | 回転 | 2.702 | 2.380 | 1.768 | 0.421 |
| | | | 宇土櫓台西面 | 19.602 | 57.573 | せん断 | 1.044 | 1.021 | 0.951 | 0.483 |
| | | | | | | 回転 | 1.479 | 1.443 | 1.376 | 1.059 |
| | | | 宇土櫓台北面 | 18.764 | 57.01491 | せん断 | 1.101 | 1.082 | 1.041 | <mark>0.64</mark> 7 |
| | | | | | | 回転 | 1.534 | 1.505 | 1.447 | 1.179 |
| | | | 一 一 元 出 力 未 由 槵 台 | 13 339 | 60 254 | せん断 | 1.536 | 1.172 | 1.329 | 0.762 |
| | | | | 10.009 | 00.254 | 回転 | 2.696 | 2.214 | 2.406 | 0.961 |
| V | 慶長19年12年 | 1607- | 飯田丸五階櫓台 | 15.151 | 74 780 | せん断 | 2.440 | 1.260 | | 0.429 |
| v | 12 X 12 + - X 14 | | | | 74.780 | 回転 | 2.370 | 0.805 | | 0.167 |
| | 寛永10年 文政3年 | 1633-1820 | 櫨方三階櫓台 | 20.558 | 64 496 | せん断 | 1.068 | 1.052 | 0.920 | 0.332 |
| | | | | | 64.496 | 回転 | 1.585 | 1.543 | 1.369 | 0.572 |
| τ | | | 二様の石垣西面 | 17.951 | 60 350 | せん断 | 4.002 | 3.838 | 3.429 | 1.652 |
| ΥY | | | | | 00.300 | 回転 | 3.917 | 3.800 | 3.497 | 1.768 |
| | | | 百間石垣 | 18.582 | 72.68803 | せん断 | 0.697 | 0.691 | 0.680 | 0.618 |
| | | | | | | 回転 | 0.625 | 0.622 | 0.591 | 0.481 |

表-5 伝播定数と安定計算結果

石垣は第 I 期の大天守台南面, 第IV期の田子櫓台, 北十 八間櫓台, 宇土櫓台西面, 第V期の飯田丸五階櫓台, 第 VI期の櫨方三階櫓台である. このうち大天守台南面は地 震前でも根元部分が孕んでいたが, 熊本地震では非崩壊 にとどまっている. 北十八間櫓台は本震で崩壊している. 宇土櫓台西面は非崩壊にとどまったが, 大きな孕みが目 につく. 飯田丸五階櫓台は前震で崩壊し, 本震で崩壊箇 所がさらに拡大した. 長局櫓台は非崩壊にとどまったが, 根元のハバキが浮き上がっている.また北面は崩壊した. 田子櫓台,櫨方三階櫓台は非崩壊にとどまった.地震後 の変状測定は実施していないので,安定解析結果の分析 は不十分であるが,熊本城東側で南北に連なる第IV期の 田子櫓台,七間櫓台,四間櫓台,源之進櫓台も控えなど 詳細な計測が求められる.ただこの一連の連なりに東十 人間櫓台,北十八間櫓台が位置しており,崩壊・非崩壊 条件の分析が課題になる.

表-6 熊本城石垣変状レベルと熊本地震時崩壊

| 万垣夕 | | 高さ | 変状レ | 静的せん断 | 静的回転 | 動的せん | 動的回転 | 控え | 品体 |
|---------|-----------|--------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| 口坦名 | | (m) | ベル | 安全率 | 安全率 | 断安全率 | 安全率 | (m) | 而小校 |
| 鉄砲蔵台 | E1 | 11.977 | 1 | | | | | | 0 |
| 飯田丸五階櫓台 | E2 | 14.54 | 3 | 3.455 | 1.918 | 1.366 | 0.454 | 0.6 | × |
| 鉄砲蔵台 | 福田飯田丸東 | 9.644 | 1 | 1.228 | 3.935 | 0.888 | 0.837 | 0.68 | 0 |
| 長櫓台 | D1 | 10.602 | 1 | | | | | | 0 |
| 五階櫓台 | D2 | 11.672 | 1 | 1.452 | 1.901 | 1.052 | 1.062 | 0.65 | × |
| 二階広間台 | D3 | 12.408 | 3 | 1.528 | 2.691 | 0.93 | 0.964 | | × |
| 宇土櫓台W | C1 | 20.807 | 2 | 1.16 | 1.138 | 0.909 | 0.84 | 0.68 | \triangle |
| 宇土櫓台N | C2 | 18.824 | 1 | 1.216 | 1.181 | 0.966 | 0.891 | 0.68 | 0 |
| 大天守閣台S | Z1 | 11.817 | 1 | | | | | | 0 |
| 大天守閣台W | Z2 | 11.302 | 1 | | | | | | 0 |
| 長局櫓台E | A1 | 12.842 | 1 | | | | | | \triangle |
| 長局櫓台N | A2 | 13.042 | 3 | 1.627 | 2.237 | 0.957 | 1.173 | 0.65 | × |
| 裏五階櫓台N | A3 | 13.042 | 1 | 2.093 | 1.608 | 1.396 | 1.067 | 0.65 | × |
| 二様石垣W | B1 | 16.189 | 1 | | | | | | 0 |
| 二様石垣W | B2 | 15.561 | 1 | | | | | | 0 |
| 東三階櫓台E | B3 | 11.57 | 1 | | | | | 0.65 | 0 |
| 東三階櫓台E | | 11.329 | 1 | | | | | | 0 |
| 小広間台 | B4 | 12.87 | 1 | | | | | | 0 |
| 大天守閣台S | 福田大天守台南面 | 11.441 | 1 | 1.434 | 2.13 | 0.898 | 1.29 | 0.65 | 0 |
| 大天守閣台W | 福田大天守台西面 | 11.217 | 1 | 2.002 | 2.47 | 1.148 | 1.469 | 0.68 | 0 |
| 大天守閣台W2 | 福田大天守台西面 | 11.217 | 1 | | | | | | 0 |
| 小天守閣台W | 福田小天守台西面 | 11.132 | 2 | | | | | | 0 |
| 二様石垣S | 福田二様石垣南面 | 16.439 | 1 | | | | | | 0 |
| 二様石垣W | 福田二様石垣西面 | 16.134 | 1 | 5.526 | 3.187 | 3.218 | 1.883 | 0.68 | 0 |
| 小広間台SA | 福田小広間台 | 12.384 | 1 | 1.27 | 1.95 | 0.79 | 1.207 | 0.65 | 0 |
| 小広間台SB | 福田小広間台 | 12.459 | 1 | | | | | | 0 |
| 月見櫓台S | 福田月見櫓 | 11.19 | 1 | 1.396 | 1.953 | 0.884 | 1.18 | 0.65 | 0 |
| 長局櫓台E | 福田長局櫓 | 12.459 | 1 | 1.258 | 2.136 | 0.8 | 0.904 | 0.65 | 0 |
| 元硫黄櫓台 | F1 | 18.997 | 1 | | | | | | 0 |
| 田子櫓台 | F2 | 12.977 | 1 | | | | | | 0 |
| 四間櫓台 | F3 | 13.504 | 1 | 1.099 | 1.908 | 0.7 | 1.222 | | 0 |
| 元硫黄櫓台 | 福田元硫黄櫓 | 18.997 | 1 | 1.281 | 1.145 | 0.993 | 0.834 | | 0 |
| 田子櫓台 | 福田田子櫓 | 12.959 | 1 | 1.384 | 1.973 | 0.927 | 1.101 | 0.65 | 0 |
| 七間櫓台 | 福田七間櫓 | 12.797 | 1 | 1.258 | 1.922 | 0.905 | 1.06 | 0.65 | 0 |
| 十四間櫓台 | 福田十四間櫓 | 13.337 | 1 | | | | | | 0 |
| 四間櫓台 | 福田四間櫓 | 13.406 | 1 | 1.099 | 1.908 | 0.7 | 1.222 | 0.65 | 0 |
| 源之進櫓台 | 福田源之進櫓 | 9.693 | 1 | 1.25 | 1.99 | 0.77 | 1.247 | 0.65 | 0 |
| 平櫓台E | G1 | 17.074 | 1 | | | | | | 0 |
| 平櫓台N | G2 | 17.937 | 1 | | | | | | 0 |
| 東十八間櫓台E | 福田東十八間櫓台E | 17.427 | 3 | 1.092 | 1.281 | 0.854 | 0.892 | | × |
| 東十八間櫓台S | 福田東十八間櫓台S | 9.693 | 3 | | | | | | × |
| 北十八間櫓台A | 福田北十八間櫓台A | 18.287 | 3 | | | | | | × |
| 北十八間櫓台B | 福田北十八間櫓台B | 17.529 | 3 | 1.022 | 1.591 | 0.774 | 0.897 | 0.65 | × |
| 北十八間櫓台C | 福田北十八間櫓台C | 18.196 | 3 | | | | | | × |
| 櫨方三階櫓台 | H1 | 19.887 | 1 | 1.294 | 1.248 | 0.993 | 0.863 | 0.68 | 0 |
| 平櫓台 | 11 | 12.024 | 1 | | | | | | 0 |
| | 福田奉行所C1 | 10.358 | 3 | | | | | | × |
| 奉行所W | 福田奉行所C2 | 9.903 | 3 | 5.534 | 2.207 | 1.996 | 0.946 | 0.6 | × |
| | 福田奉行所D | 8.85 | 1 | | | | | 0.6 | × |
| 未申櫓台W | 福田E未申櫓 | 11.224 | 1 | | | | | 0.62 | 0 |
| 未申櫓台S | 福田F未申櫓 | 12.702 | 1 | 2.173 | 2.049 | 1.218 | 1.052 | 0.63 | 0 |
| 百間石垣 | 桑原データ | 10.398 | 3 | 1.886 | 3.305 | 1.003 | 0.959 | 0.68 | × |

表-6 の測定データは文献 11)のデータと著者の測 定データを使用し,変状レベル評価,安定解析結 果を整理している.変状レベル3として評価した 石垣は11か所で,すべてが崩壊している.変状レ ベル1と評価した石垣のうち五階櫓台,奉行所 (D)が崩壊している.動的安定解析では五階櫓台 は1に近い.奉行所(D)は奉行所(C2)の横の断 面であり,変状レベル評価を見直しする必要があ る.しかし変状レベルを評価する方法は安定状態 を推定する有効な手法になると考えられる.

8. おわりに

控え長さを縦長さの 1.5 倍とする一律とした安定解 析を行った. この解析結果を交えて熊本城石垣と 2016 年熊本地震の相関を分析した. 石垣曲線には富田の熊本 城石垣構築時代を基準にすると,時代が刻印されている ことを示した. しかしこの時刻歴と対応する形態は全国 的で普遍的な座標とする可能性は少ないことを示した. オーセンティシティによる熊本城の復元は時代を考慮し て実施しなければならないことを明らかにした.

今後控えなど石材の形状データに基づて安定解析を 行い,地震時条件を考えていく必要がある.このような 基礎的な解析が復元に生かされていく.

参考文献

- 福田光治:秘伝化された石垣勾配とその安定性,地盤工 学会関東支部,土木史跡の地盤工学的分析・評価に関す るシンポジウム,2014.
- 福田光治:熊本地震で崩壊した熊本城石垣の復興と必要 最小限補強オーセンティシティ,土木学会土木史研究講 演集, Vol. 37, pp. 163–170, 2017.

- 仙台市建設局:青葉山公園仙台城石垣修復工事(仙台城 跡本丸北壁石垣)工事報告書,2006.
- 土木研究センター:「箱型擁壁」耐震性技術検討委員会 報告書, pp. 4–13, 2003.
- 5) 北垣総一郎:アーチ石橋,通潤橋の鞘石垣について,勝 部明生先生喜寿記念論文集刊行会,勝部明生先生喜寿記 念論文集,平成23年2月20日
- 富田紘一:熊本城 歴史と魅力,熊本城顕彰会, pp.44-62,2008.本間仁,安芸皓一:物部水理学, pp.430-463,岩波書店,1962.
- 7) 熊本市教育委員会:特別史跡熊本城跡西出丸・二の丸御 門跡・南大手門跡・南坂 石垣保存修理工事・発掘調査 報告書、pp. 10-21、1999.
- 8) 福田光治:「石垣秘伝之書」石垣曲線を基準にした 熊本城城郭石垣変状の特徴,(未発表)
- 北垣聡一郎:石垣研究の歩みと現在,石川県金沢城調査 研究所「金沢城史料叢書 16 城郭石垣の技術と組 織」,pp.7-24,2012.
- 10) 北尾嘉弘:日本建築における軒反り, 真陽社, pp. 1-15, 2015.
- 11) 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配に関する研究,日本工業大学,1983.
- 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版
 会, pp. 175-195, 2008.
- 13) 熊本市教育委員会:熊本市:特別史跡熊本城跡 西出丸 一帯復元整備工事報告書、熊本市境教育委員会、p.7、 p.53、pp.70-82、2005.

CHARACTERISTIC OF CURVE OF STONE WALL AND ITS STATIC AND DYNAMIC STABILITY OF KUMAMOTO CASTLE

Mitsuharu FUKUDA

This paper shows the relationship between curve profile of stone wall and stability of Kumamoto castle. Stability analysis is conducted on static and dynamic condition. It expresses the dynamic response by the collabolation of harmonic ocilation function and spring. Curve properties of stone wall of Kumamoto castle changs depending on the construction age. Therefore the relationship between the charcterristic figure of stone wall defined by the vertical height and specific warp and stability should be set as an important subject. This paper emphasizes on the depth of stone as a governing fctor affecting staility. There are many high vertical stone walls specified the landscape of Kumamoto castle. On the contrary, stability analysis porves the role of depth of stone as important parameter governing stability through the process of low vertical stone wall analysis. This paper shows that collapsed stone walls are classified into the many stages of construction age.