

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	文化遺産・城郭石垣の損傷崩壊の被害低減の修復法及び城内外の経済効果を考慮した街づくりに関する研究
研究者名※	池本 敏和
所属組織※	金沢大学 理工研究域・地球社会基盤学系 講師
研究種別	研究助成
研究分野	都市建築史、都市と文化
助成金額	126 万円
概要	2016 年に発生した熊本地震で大被害を受けた熊本城郭では、過去に修復した石垣の 8 割以上が再び崩壊したことから、新たな修復対策工法が求められている。本助成研究では、①ジオテキスタイルを用いた石垣の対策法についての模型実験を行うことで、まだ確立されていない石垣補強工法の有効性を示す。②全国の城郭石垣の現状把握として城郭石垣カルテのための予備的な調査を行う。③熊本城の崩壊は、国内外の観光客が九州地域に集客できないため、九州全域の経済にも大きなダメージを与えている。城郭の復興期間が長引けば、城郭を核とした城下町の経済的な復興も遅れる。そこで、城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算を行うことによって今後何年間の安全・安心をいくらで担保するものかを考慮し、将来の安定したまちづくりへの活用について検討する。
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

助成番号	
受領日：	年 月 日

*財団記入欄

公益財団法人 大林財団
理事長 大林剛郎 殿

西暦2021年 4月 2日

所属機関名 金沢大学・地球社会基盤学系

申請者氏名 池本敏和



大林財団2019年度助成

研究助成実施報告書

2019年度奨励研究助成実施について下記の通りご報告申し上げます。

記

研究課題：	文化遺産・城郭石垣の損傷崩壊の被害低減の修復法及び城内外の経済効果を考慮した街づくりに関する研究
(概要)	2016年に発生した熊本地震で大被害を受けた熊本城郭では、過去に修復した石垣の8割以上が再び崩壊したことから、新たな修復対策工法が求められている。本助成研究では、①ジオテキスタイルを用いた石垣の対策法についての模型実験を行うことで、まだ確立されていない石垣補強工法の有効性を示す。②全国の城郭石垣の現状把握として城郭石垣カルテのための予備的な調査を行う。③熊本城の崩壊は、国内外の観光客が九州地域に集客できないため、九州全域の経済にも大きなダメージを与えている。城郭の復興期間が長引けば、城郭を核とした城下町の経済的な復興も遅れる。そこで、城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算を行うことによって今後何年間の安全・安心をいくらかで担保するものかを考慮し、将来の安定したまちづくりへの活用について検討する。

1. 研究の目的

従来の城郭石垣における復旧作業は現状（原型）復旧が原則であり、災害に対する対策が築城・修復当時の技術のまま止まっていることが問題となっている。しかし、2016年に発生した熊本地震で大被害を受けた熊本城郭では、過去に修復した石垣の8割以上が再び崩壊したことから、新たな修復対策工法が求められていた。したがって、ジオテキスタイルを用いた②石垣の新しい施工法についての城郭石垣実験を行うことによって、まだ確立されていない新規性・発展性のある新たな安全な石垣補強工法の開発を目的とする。

また、全国における国宝・重要文化財の重要文化財では直下地震や東海地震、東南海地震による大被害が危惧されており、その例として挙げられる松江城、彦根城、松本城、名古屋城、弘前城などでは近年頻発する地震や豪雨により孕み出しや崩落の危険性がある。そういった、全国の城郭石垣の現状把握は上記の新石垣補強工法の開発が進むにつれて需要が高まる。したがって、主要な城郭石垣状況をカルテ化し、データディクショナリとしてデータ管理を行うことを目的として①城郭石垣カルテの充実のために城郭に関する調査を行う。

さらに、前述のように地震や豪雨によって城郭石垣が被災した場合、城郭を核とした地域づくり、街づくりには大きなダメージを与える。例えば熊本城の崩壊は、熊本市のみならず、国内外の観光客が九州地域に集客できないため、九州全体の経済にも大きなダメージを与えている。城郭や温泉は観光における質の高い資源であり、それらを核とした観光プランが主要な収入となっているところも多い。城郭の復興期間が長引けば、城郭を核とした城下町の経済的な復興も遅れる。全体の収入が数年間も激減すると街そのものが消滅を迎える可能性が懸念される。そこで、④城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算を行うことによって前述の①～③までの研究の必要性をさらに裏付ける他、今後何年間の安全・安心をいくらかで担保するものかを考慮し将来の安定したまちづくりへの活用について検討する。

2. 研究の経過

① 城郭石垣カルテの充実

全国の城郭石垣に関するデータディクショナリ作成の第一歩として熊本城郭、熊本地震に関する文献調査、情報抽出を行った。具体的な情報抽出方法として、熊本地震発生当時の詳細な被害状況やその復興計画や方針などカルテを充実させる情報をまとめるために、様々な文献の調査を行った後に地理情報システム QGIS にて情報の整理・図化を行った。本来であれば用いる城内図は熊本城が所有している詳細な城内図が好ましいが、昨今の情勢もあり入手できなかったため、Open Street Map を用いて作成している。熊本城郭内には、重要文化財建造物、再現・復元建造物、石垣等の構造物があるが、どの建造物が被害に遭っているのか、またその被害内容はどのようになっているのかを色や模様で差別化し、一目で把握しやすくしている。

また、本項目はデータディクショナリを作成することを目的としており、そのデータディクショナリの汎用性があるのかどうかの検証も必要になる。したがって、本項目では上記の内容に加えて、熊本城郭以外の城郭に熊本地震と同等の地震が発生し熊本地震と同様の被害を受けたと仮定して、熊本城郭・熊本地震における復旧計画パターンが他の城郭に当てはまるのかの検討も行った。本検討における着目点は、熊本城郭との類似点である。その項目は城郭の格、天守閣の構造（RC、木造）、城郭の配置（城郭内建造物や石垣の配置）、天守閣の高さとする。国宝であるか否か、RC構造か現存木造かによって、復旧に取り掛かるまでのスピードや復旧方法が異なるため、城郭の格や天守閣の構造は重要であると考えられる。また、全国には、国宝や重要文化財建造物などを含め、数多くの城郭が存在する。したがって、検討の第一歩として今回は大阪城、名古屋城、岡山城、姫路城、松本城、松江城、犬山城、彦根城の計8城を検討対象として検討を行った。その結果は、成果として次章に記す。

② 石垣の新しい施工法についての城郭石垣模型実験

図-1に石垣模型の設計図を、写真-1に使用する土槽を示す。熊本城郭石垣の宇土櫓石垣を対象とし、上段14段の勾配1:0.2として模型を作成する。このとき実物の積石寸法と模型用積石の寸法を考慮して1/7.5スケールとする。積石は、寸法を縦56mm×横98mm×控え長さ100mmとし、表面にビシャン仕上げを施す。裏栗石は規格5分（直径約15~20mm）の玉砂利を用い、内部摩擦角は31°である。栗石層の間隙比0.70を目安に同一条件となるように模型を作成する。背面土として、加速度振幅の大きさが低減されないように厚さ100mmのクッション材と、表面に木板を用いる。また、側壁と裏栗石間には、厚さ50 μ mのテフロンシートを貼り付け、摩擦抵抗を極力低減させた。

また、図2に「ジオテキスタイル巻き込みモデル（アンカーあり・手積みモデル）」の設計図を示す。本工法は、近代工法となるジオテキスタイルを巻き込み、積石からアンカーにより一体化な補強を図るものである。ジオテキスタイルを蛇籠のように巻き込むことで裏栗石を一体化し、裏栗石の沈下抑制効果を期待する。さらに、積石表面からアンカーを配置し、ジオテキスタイルを定着すると共に、積石自体の壁面外への変形拘束を期待する。ジオテキスタイルの巻き込みは積石背面側、栗石層背面側、両側面側に行う。巻き込み層厚は積石2段分高さ（パラメータ）である。上下のジオテキスタイル接地面で固定ピンを用いて結束し、上下の巻き込み部分を安定させる。また胴下げ石垣の控長を伸ばし、それらの石垣の配置計画と耐震安全性に関する実験も行っているが、紙幅の都合上、本報告では省略する。

入力地震動は、波形の前後に約3秒のテーパを施した正弦波を用いる。本研究では1/7.5スケール縮小模型のため、内陸部の地震波を参考に作成した2Hz,15秒の正弦波を、香川の相似則¹⁾を考慮して振動数を4.5倍、すなわち9Hz、3.5秒加振とした。石垣の崩壊挙動を見るために、正弦波の最大加速度を、300galから700galに100galずつ増加させ、石垣模型が崩壊するまで加振を行った。

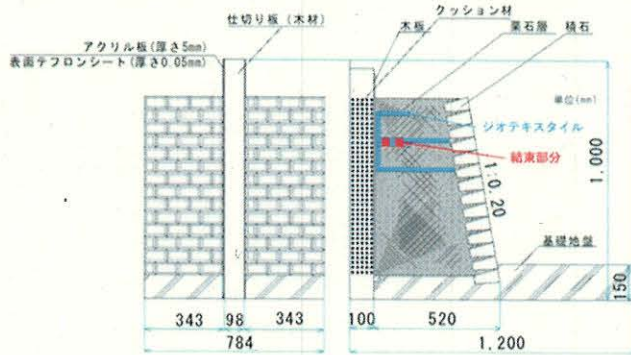


図-1 石垣模型設計及びジオテキスタイル配置図

(単位：mm)

写真-1 使用する土槽

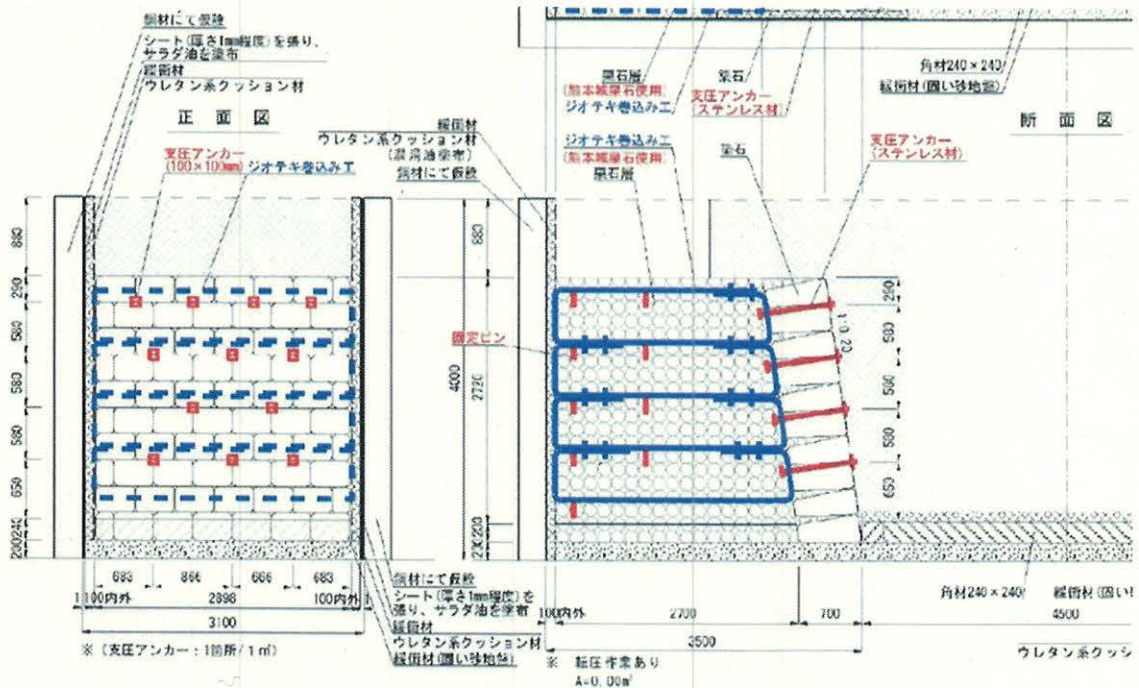


図-2 ジオテキスタイル巻き込みモデル（アンカーあり・手積みモデル）

③ 城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算

損傷・崩壊によって損傷した城郭の取り得る選択肢は大きく2つに分類される。1択は、被災前の状態に復旧すること、もう1択は復旧せずに城跡とすることである。熊本城郭では前者の選択を取り、現在は復旧しつつ熊本城特別公開も行っている。熊本城特別公開とは、熊本地震によって被災した熊本城が復旧する過程を一般公開した催しである。本項目では、①において抽出した情報をもとに熊本城特別公開における費用便益分析を行った。今回の費用便益分析では費用便益比(CBR)を用いた。CBRとは、便益(B)の総現在価値と費用(C)の総現在価値の比の値を1と比較することで評価を行う方法であり、CBRの数値が大きいほど高評価であるといえる。

また、熊本城ではこの熊本城特別公開を行うまでの3年半は一般の入場を受け付けておらず、その影響が熊本市内の観光にどれほど出ているのかを調査するため、熊本地震前後の熊本市における観光客数の推移や観光消費金額の調査・考察も行った。

3. 研究の成果

① 城郭石垣カルテの充実及び地震動強さの推定

本項目の成果として、2点が挙げられる。

(ア) 既出情報の図化 (ビジュアル化)

熊本市や熊本城のデータや文献を調査しそれらを図化した。図化によって被害状況や復旧状況をクロス的、面的に捉えることが容易になった。今回、QGISで地図上に示した情報は被害に遭った重要文化財建造物、再建・復元建造物、石垣の位置、またそれらの被害の詳細、経過④でも述べた熊本城特別公開のルート、復旧工事における工区、復旧工事用車両用の導線などである。例として、図-3、図-4を掲載する。

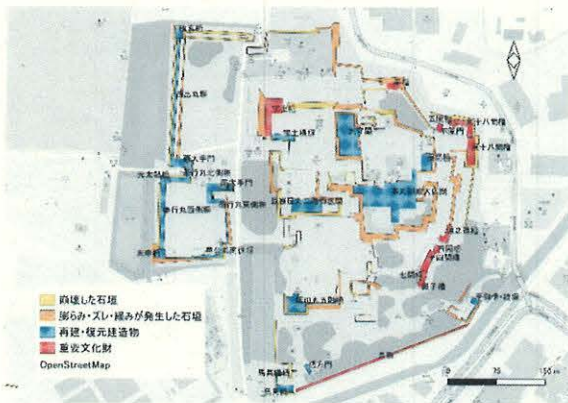


図-3 熊本地震による熊本城郭の被害

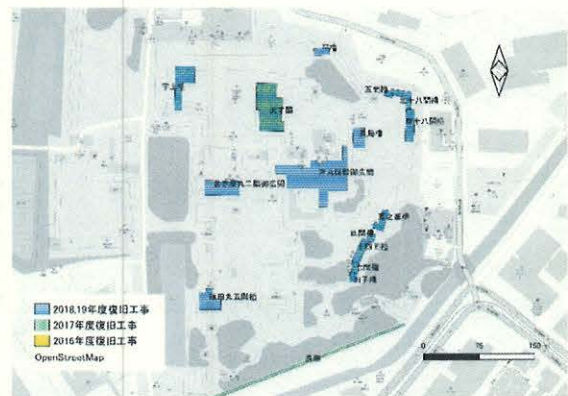


図-4 熊本城における復旧工事着手順

(イ) 熊本城郭復旧計画の応用可能性の検討

続いて、熊本城郭における復旧計画が他城にどの程度使用できるかについての検討を行った。その検討結果を表-1に記す。

表-1に記載している評価項目は、左から優先順位が高いと考えられる順に並べている。今回調査した8城の内、熊本城郭と同じ格、また同様の天守閣構造になっているのは名古屋城、大阪城、岡山城の3城であった。その3城の中で、城郭の配置が最もよく似ていたのが岡山城であったことから岡山城郭では熊本城郭復旧計画の応用可能性が高いと言える。天守閣の高さに関しては、検討当初は天守閣における規模の指標として必要な検討項目であると考えていたが、検討を正には直接関係しないと考えを改めたため、城郭の配置までで判断した。一方で、城郭の配置のみに着目すると、熊本城郭と最もよく類似していたのは松江城であった。松江城は現存する木造なので天守閣については復旧方法が異なるものの、城郭の配置がよく似ているため、熊本城郭と同様に工事車両用導線を確保するなどの計画面では応用が効くと予想される。したがって、岡山城、松江城において熊本城復興計画の応用が可能であると言える。

表-1 熊本城郭復旧計画の応用可能性の検討

城名	城郭の格	天守閣の構造	城郭の配置	天守閣の高さ
大阪城	重要文化財	RC(再建)	△	41.5m
名古屋城	重要文化財	RC(再建)	△	36.1m
熊本城	重要文化財	RC(再建)	—	30.3m
岡山城	重要文化財	RC(再建)	○	20.5m
姫路城	国宝	木造(現存)	△	31.5m
松本城	国宝	木造(現存)	×	29.4m
松江城	国宝	木造(現存)	◎	22.4m
犬山城	国宝	木造(現存)	×	18.0m
彦根城	国宝	木造(現存)	△	15.5m

② 石垣の新しい施工法についての城郭石垣模型実験

本研究では、無対策石垣模型と図-1の耐震対策を施した石垣模型を加振し、石垣崩壊に大きな影響を及ぼす積石の水平変位量と裏栗石の沈下量を用いて石垣の耐震安定性を評価する。図-5に無対策、図-6にジオテキスタイル対策石垣の積石の水平変位量を示す。なお、無対策は700gal加振時に上部から倒れるように崩壊したため、600galまでの結果を示す。

積石の水平変位について考察する。無対策、ジオテキスタイル対策ともに最大加速度が増大するにつれて積石の上部や中腹部付近が孕みだしており、水平変位量に顕著な差がみられる。無対策石垣は、石垣全体が前方に倒れるような挙動かつ中腹部から上部が孕みだす挙動を示し、極めて崩壊の危険性が高いと考えられる。700gal加振時には、上部の積石から前方に崩壊した。一方、ジオテキスタイル対策の積石の最大水平変位量は、600gal加振後の無対策の積石のその約1/5となっていえることから、対策は積石中腹部の孕みだしを大きく抑制していることが分かる。また、積石上部は積石後方に変位している。この現象は、裏栗石の沈下により積石上部における裏栗石からの水平力が働かなくなったためと考えられ、前方崩壊に至らなかった。

次に、裏栗石の沈下量について考察する。図-7に加速度ごとの裏栗石の累積鉛直沈下量を示す。同図-7より、500gal加振後の沈下量において、ジオテキスタイル対策は無対策の約1/3の沈下量となっており、裏栗石の沈下抑制効果があると考えられる。

一般的な石垣の破壊メカニズムとして、裏栗石が沈下して石垣中腹部の水平土圧が上昇することで中腹部の積石が孕みだし、崩壊に至ることが知られている。よって裏栗石の沈下を抑制し積石の孕みだしを抑制するジオテキスタイルの敷設工法は石垣の耐震対策として有効であると考えられる。

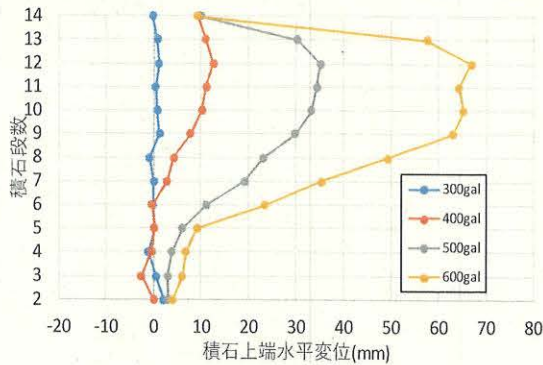


図-5 無対策石垣模型の積石上端水平変位

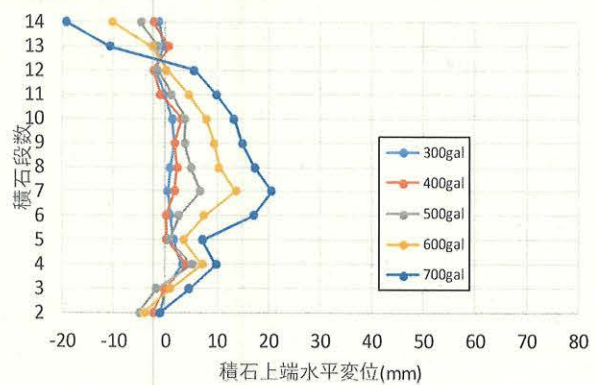


図-6 ジオテキスタイル対策石垣模型の積石上端水平変位

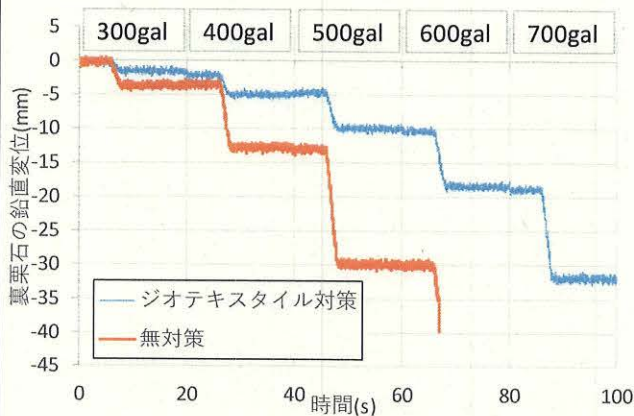


図-7 加速度ごとの裏栗石の累積鉛直変位（沈下）量

③ 城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算

まず、便益と費用をそれぞれ求める。特別公開による便益を熊本城特別公開が始まってから1年あたりの熊本城に訪れた観光客による入場料の総計と定義する。2020年の観光統計は公開されていないため、2019年の観光統計に記載されている同年10月から12月までの3か月間のデータを4倍にすることで1年間の便益とする。便益は次の式で算出される。

$$\begin{aligned}
 B_Y &= F \times N_3 \times 4 \\
 &= 500(\text{円}) \times 119,997(\text{人}) \times 4 \\
 &= 2.4(\text{億円})
 \end{aligned}$$

ここで、

B_Y :1年あたりの入場料金の総計
 F :大人1人あたりの入場料金
 N_3 :2019年10月から12月までの入場者数

また、熊本城特別公開にかかった費用は、2020年12月11日の熊本日日新聞によれば、「市熊本城総合事務所によると、年間の城内の維持管理に必要な人件費や施設経費として、計約12億円を算出.」とあるため、約12億円とする。

したがって、費用便益比は以下の式で算出される。

$$\begin{aligned} B/C &= B_Y \div C_Y \\ &= 2.4(\text{億円}) \div 12(\text{億円}) \\ &= 0.2 \end{aligned}$$

ここで、

B/C : 費用便益比
 B_Y :1年あたりの入場料金の総計
 C_Y :1年あたりの熊本城特別公開にかかった費用

費用便益比が1を大きく下回った。

4. 今後の課題

今後の課題を以下に列記する。

① 城郭石垣カルテの充実

- ・熊本城郭以外の事例を整理し、まとめることが重要である。
- ・熊本城郭パターンを全国の多くの城郭と比較、検証する必要がある。

② 石垣の新しい施工法についての城郭石垣模型実験

- ・ジオテキスタイル対策、控長の延長及び配置計画のような工法だけではなく、新たな現在のアンカー工法、固結工法による石垣の耐震性能の向上を検討したい。

③ 城郭の損傷・崩壊による費用便益分析の試算

- ・さらに細分化した資料を入手し、詳細なデータに基づいた費用対効果を試算することで、災害時の城郭収益をあり方を考えていきたい。