

城壁の地震時の安定性に関する基礎的研究

山城 義隆^{1*}・藍檀 オメル²・渡嘉敷 直彦³・富山 潤⁴

- ¹ (元) 琉球大学工学部 社会基盤デザインコース (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)
² 琉球大学工学部 社会基盤デザインコース (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)
³ 琉球大学島嶼防災研究センター 研究開発室 (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)
⁴ 琉球大学工学部 社会基盤デザインコース (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)
*E-mail: arsenaltwic@outlook.jp

2016年の熊本地震により崩壊した熊本城の調査がAydan¹⁾らによって実施された。報告によると、城壁の崩壊は、裏込め材に丸い川石を使用した点が主な原因であることを推測している。川石の形状により、裏込め材間の摩擦抵抗が低下し、地震時の土圧が増加していたと結論づけている。この調査報告から城壁に使用する裏込め材の摩擦抵抗が、地震時の土圧に影響を与えると推測される。

本研究では、摩擦抵抗の相異が城壁の崩壊に与える影響を検討するため、3種類の裏込め材を用いせん断試験実施し、それぞれを使用した城壁模型振動実験を実施した。その結果、使用した裏込め材の摩擦角の増加に伴い、城壁模型を破壊させる加速度が増加することが実験的に明らかになった。

Key Words : earthquake, castle retaining wall, back fill material, seismic stability, shaking table test

1. はじめに

沖縄県には中城城跡、勝連城跡などの文化財としての石積城壁が複数存在している。これらの石積城壁は長期間様々な外的要因にさらされ、石積構造の力学的安定性が低下しており、地震など災害による損傷が懸念されている。これら災害による崩壊事例は多数報告されており、2010年と2016年には地震により勝連城跡と熊本城の石積城壁が一部崩壊した。地震による損傷を防ぐため、城壁の補修などが求められているが、地震に対する城壁の安定性については不明な部分も多く、修繕方法の検討を困難にしている。

その中で今回、地震被害にあった石積城壁の調査報告から地震動と城壁の安定性の関係について検討した。

地震時の城壁の安定性に関して、2016年に崩壊した熊本城の石積城壁を調査したAydan¹⁾は次の点を指摘している。石積城壁で裏込め材として使用されている丸い川石の幾何学形状により摩擦抵抗が低下し地震時、城壁に作用する土圧が増加したとしている。指摘から地震時、城壁に使用されている裏込め材の摩擦抵抗の変化が城壁の安定性に影響を与えると推測される。

石積城壁に使用されている裏込め材は、写真-1のような川石だけでなく、勝連城跡では角礫状の裏込め材が使用されている。(写真-2)崩壊した熊本城の裏込め



写真-1 熊本城崩壊の様子 (熊本城 三間櫓跡)



写真-2 勝連城跡崩壊の様子 (城壁北東部)

材が角礫状であった場合、地震時の安定性が変化していたことが予想される。

そこで本研究では、石積城壁が使用している裏込め材によって地震時の城壁の安定性が変化するか検討するため、裏込め材のせん断試験と城壁模型を使用した振動載荷実験を実施した。同時に裏込め材の摩擦抵抗をパラメーターとして解析的手法により、振動載荷により城壁模型に生じる変位応答の予測が可能か検討した。

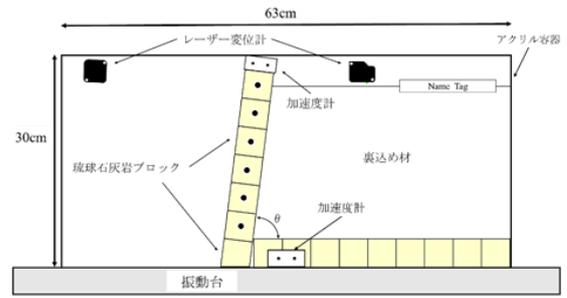


図-1 城壁模型及び計測機器の設置状況

2. 城壁模型振動実験

(1) 実験概要

城壁に使用されている裏込め材の相異により、城壁の地震動に対する挙動が変化するか検討するため、城壁模型を用いて振動載荷実験を実施した。城壁のような石積み構造物が変形破壊を起こす条件として、水平抵抗力と外力の関係に左右されることが知られている³⁾。そこで、本実験では一方向の振動載荷によって、城壁模型の水平方向の挙動が裏込め材ごとに異なるか検討するため、図-1のような城壁模型を実験に使用した。城壁模型は、アクリル水槽側面と城壁模型の接触を防ぐため1mm程度の間隙を設け、傾斜角を70°と固定し、琉球石灰岩ブロックを積み上げ、背後に裏込め材を充填した。

城壁模型の振動中の挙動を把握するため、振動台の入力加速度及び城壁模型天端における水平方向の加速度応答と変位応答を計測した。振動条件は周波数3Hz一定とし、図-2に示すように入力加速度を1分間で50galから400galまで上昇させた。また、400galに達しても城壁模型が崩壊至らない場合、400galで30秒間振動を継続した。

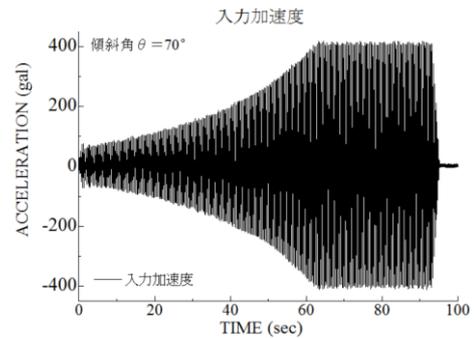


図-2 城壁模型に与えた入力加速度

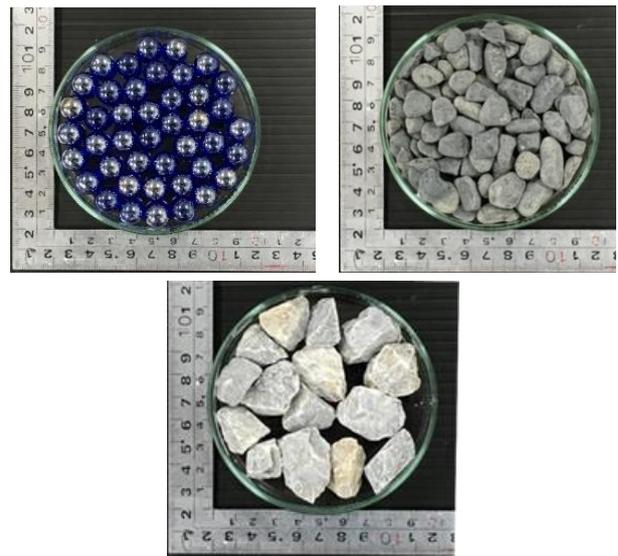


写真-3 ガラス玉 (上)、川石 (中央)、本部石灰岩 (下)

(2) 裏込め材の摩擦特性

城壁模型の背後に充填する裏込め材は、熊本城、勝連城跡、中城城跡を参考に写真-3に示す、丸い川石 (以下丸石とする) と角礫状の本部石灰岩 (以下本部石灰岩とする) の2つを用意した。さらに比較のため、材質が均質な直径10mmのガラス玉も用意し計3種類とした。

3種類の裏込め材の摩擦特性を把握するために、せん断試験を行い、裏込め材の摩擦角の測定を実施した。試験には、上下分割され下部にローラーが設置された金属製せん断箱を使用した。金属製のせん断箱に垂直荷重を載荷し一定速度で下部を滑動させ、滑動中の水平反力を荷重計で計測した。4段階の垂直荷重を載荷し計測を行い、図-3に示すクーロンの破壊規準を作成した。

せん断試験から求めた、図-3の各裏込め材のクーロンの破壊規準を見ると、各裏込め材の摩擦角は約53°、約46°、約22°となり、本部石灰岩が川石より摩擦角が大きく、表面の均一なガラス玉が最も低いことが分かる。

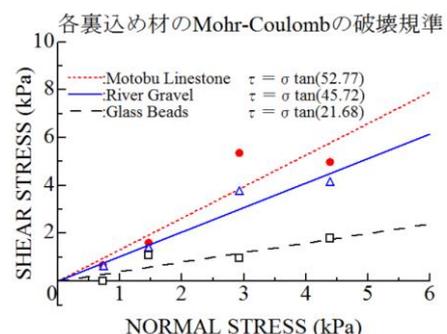


図-3 裏込め材のMohr-Coulombの破壊規準

3. 城壁模型振動載荷実験結果

振動載荷前及び振動載荷後の城壁模型を図-4～図-9に示す。3種類の城壁模型の内、ガラス玉及び川石を使用した城壁模型は、振動載荷により崩壊した。今回実施した振動載荷による城壁模型の崩壊過程について、城壁模型の裏込め材にガラス玉を使用した場合について述べる。ガラス玉を使用した場合、振動開始後しばらくして裏込め材に沈下が生じた。その後、入力加速度が約246galに達すると、図-5に示すように琉球石灰岩ブロックが一体となり転倒を伴い崩

壊した。また、川石を使用した場合でも崩壊に至る入力加速度が約383galと異なっていたが、同様に転倒を伴い崩壊した。(図-7)

一方で、本部石灰岩を使用した場合、設定した振動載荷量の上限(入力加速度400gal)に到達し30秒振動を継続しても図-9に示すように城壁模型は崩壊しなかった。このように、裏込め材の相異によって崩壊に必要な入力加速度が変化している。また、ガラス玉と川石の摩擦角と共に比較すると、ガラス玉より摩擦角の大きい川石のほうが、崩壊に必要な入力加速度が増加していることが分かる。



図-4 城壁模型：ガラス玉



図-5 崩壊状況(入力加速度約246gal)

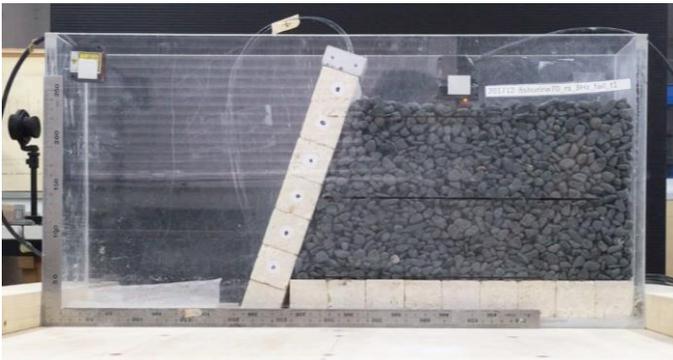


図-6 城壁模型：川石



図-7 崩壊状況(入力加速度約383gal)



図-8 城壁模型：本部石灰岩



図-9 振動載荷終了後

次に振動载荷中に計測された変位応答について述べる。実験概要にて示した入力加速度(図-2)を城壁模型に入力した際、計測された城壁模型天端の変位応答を図-10に示す。また、計測結果の一例として、裏込め材にガラス玉を使用した城壁模型の加速度応答を図-11に示す。なお、入力加速度(図-2)と変位応答(図-10)及び加速度応答(図-11)の時間軸は一致している。図-11に示す城壁模型の裏込め材にガラス玉を使用した場合の変位応答を見ると、振動開始から約46秒後に変位応答が急激に低下しており、城壁模型が崩壊していることが推測できる。同時点の入力加速度は図-2より約246galとなり、X軸方向の加速度応答は図-12より約351galとなり応答倍率は約1.4倍となった。同様に川石を使用した場合に注目すると入力加速度約383galで城壁模型が崩壊に至った。同時点におけるX軸方向の加速度応答は約549galとなり、応答倍率は約1.4倍となった。本部石灰岩を使用した場合には、城壁模型は崩壊に至らなかったため図-10に示すように変位応答の急激な低下は記録されていない。そのため、城壁模型の崩壊には400gal以上の入力加速度が必要であることが推測される。上記から、城壁模型が崩壊に至る入力加速度は、使用した裏込め材ごとに相異があることが分かる。また、これらを昇順に整理すると表-1のようになり、裏込め材の摩擦角が増加すると共に城壁模型が崩壊に至る入力加速度が増加していることが分かった。

4. 解析的手法による変位応答の予測

城壁模型に生じる変位応答について、計測された裏込め材の摩擦角をパラメーターとして予測可能か検討するため、解析的に算出した城壁模型の変位応答と振動载荷実験により計測された変位応答を比較した。

今回、解析の対象とした城壁模型は傾斜角を83°とし裏込め材に川石を使用している。この城壁模型については、他と同じ条件で事前に振動载荷実験を実

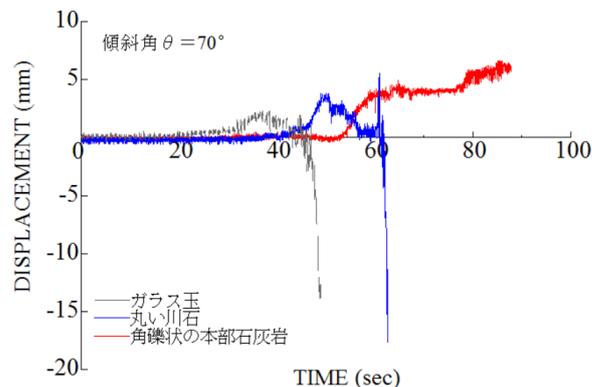


図-10 振動中に計測された城壁模型天端の変位応答

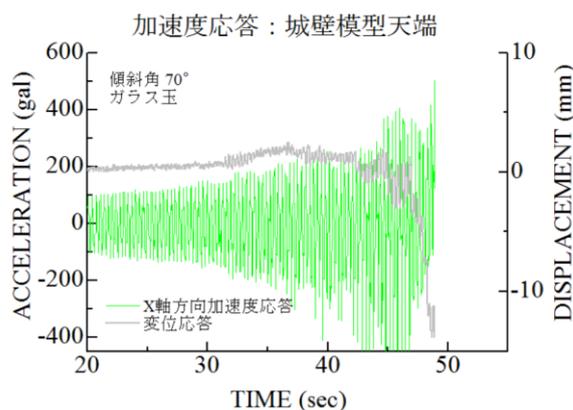


図-11 振動中に計測された城壁模型天端の加速度応答(裏込め材:ガラス玉)

施し城壁模型が崩壊に至るまでの変位応答を計測した。城壁模型の振動開始後の挙動については、入力加速度約227galに到達した時点で転倒を伴い崩壊している。また、崩壊時の加速度応答は約253galとなり、応答倍率は約1.1倍となった。

石積城壁に生じる変位の解析については、渡嘉敷⁴⁾(2011)から、城壁に作用する動的な力の釣り合いから運動方程式を導出し、それを数値解析的に解くことで城壁の変位応答を算出する動的極限解析手法が提案されている。上記の提案では主に擁壁を対象としているが、今回使用した石積城壁の模型と提案された擁壁の解析モデルの構造がほぼ一致しているた

<城壁模型 $\theta=70^\circ$ >		ガラス玉	川石	本部石灰岩
裏込め材の摩擦角 Φ (°)		24	46	53
城壁模型が崩壊に至る入力加速度 (gal)		246	383	崩壊に至らず (400gal)
城壁模型が崩壊に至る加速度応答 (gal)		351	549	崩壊に至らず (400gal)

表-1 各裏込め材に使用時における城壁模型変位発生時の入力加速度

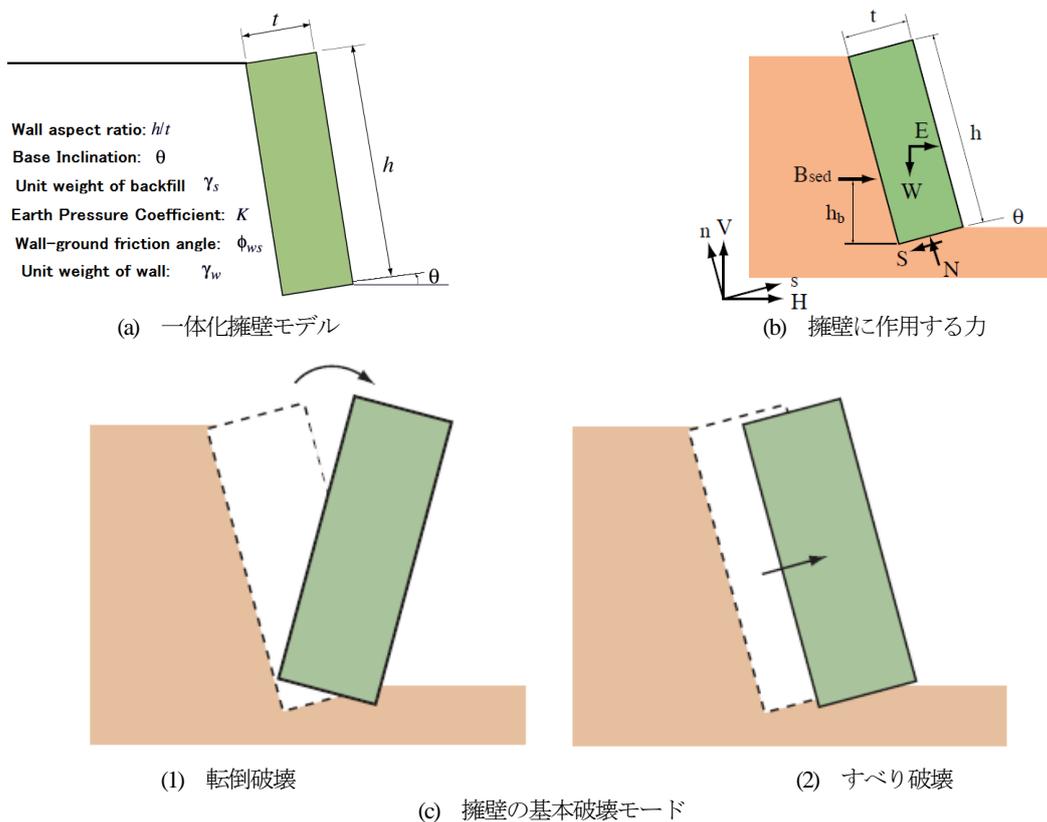


図-12 石積城壁の解析モデル 渡嘉敷 (2011) ⁴⁾ より

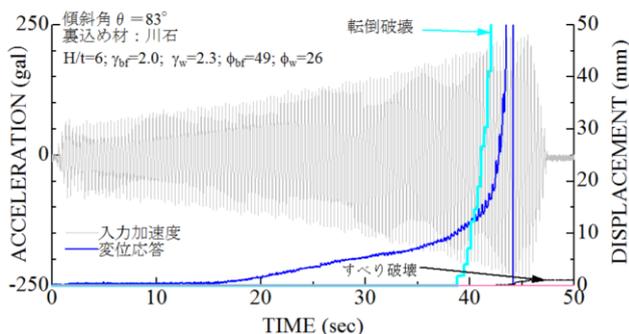


図-13 解析によって得られた変位応答

め、提案された解析手法を適用している。提案された極限解析手法は図-12 に示すようになっており、擁壁の振動載荷時の挙動から転倒破壊とすべり破壊の2つの解析モデル設定しそれぞれ異なる変位応答として算出している。

極限解析手法によって得られた変位応答を図-13に示す。図-13において転倒破壊の力学モデルに基づき算出された変位応答を薄い青色で、すべり破壊の力学モデルに基づき算出された変位応答を黒色で示し、振動載荷実験の際の入力加速度と計測された変位応答も同時に記入している。また、解析に使用した各物性値は図-13の右上に記入している。

解析結果を見ると、転倒破壊により算出された変位応答は振動載荷実験により計測された変位応答が、振動開始後、ほぼ同様なタイミングで急激に増加していることが分かる。

次に2つの解析モデルごとに算出された変位応答を見ると、すべり破壊による変位応答は少量算出されたが、転倒破壊による変位応答は多大に算出されており、城壁模型の崩壊に転倒破壊が大きく作用していることが示されている。実験結果からも城壁模型は転倒を伴い崩壊しており、今回の解析で正しい崩壊形態を極限解析手法により示せることが分かる。

上記の2点から、裏込め材の摩擦角をパラメータとして使用した極限解析手法に城壁模型崩壊の形態を予測できると推察される。

5. まとめ

今回の研究では城壁に使用されている裏込め材と城壁の地震時の安定性の関係を検討するため、裏込め材のせん断試験と城壁模型を使用した振動載荷実験を実施した。その結果、せん断試験と城壁模型実験から城壁模型の崩壊に至る入力加速度が裏込め材によって異なることが明らかになり、城壁模型に使用した裏込め材の摩擦角が増加すると、城壁模型が崩壊に至る入力加速度が増加することが示された。同時に、城壁模型の変位応答を、裏込め材の摩擦角をパラメータの1つとした動的極限解析手法により、予想することが可能と判断できる。

これにより、既存の城壁や修復を要する城壁の動的安定性の向上を図るため、城壁背後に充填する裏込め材の摩擦角の増大を図ることが有効であると思われる。

参考文献

- 1) Aydan, Ö. , Tomiyama, J., Matsubara, H., Tokashiki, N., Iwata, N. (2017): The characteristics of damage to rock engineering structures induced by the 2016 Kumamoto earthquake. Procs. of the 14th J R M S, Paper 0040, 6p (on CD).
- 2) Tokashiki, N., Aydan, Ö. (2010). A reconnaissance report on The Off-Okinawa Island Earthquake of February 27, 2010. JSCE Earthquake Engineering Disaster Investigation Committee, 21 pages.
- 3) 渡嘉敷 直彦, アイダン オメル, 清水 泰弘 (2002): 石積み構造物の力学的安定性を考える, -石積み構造モデルの解析と模型実験の実施, 建設雑誌「しまたてい」, No.32, pp.32-37
- 4) 渡嘉敷 直彦(2011): 琉球石灰岩の工学的特性と琉球石灰岩盤および石積み構造物の安定性評価に関する研究, 博士論文, pp.211-212

A FUNDAMENTAL STUDY ON DYNAMIC STABILITY OF CASTLE WALLS DURING EARTHQUAKE

Yoshitaka YAMASHIRO, Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI, Jun TOMIYAMA

The 2016 Kumamoto earthquake damaged the Kumamoto Castle, especially, the retaining-walls. Site investigations showed that river gravels were used as backfilling materials at collapsed castle walls. The effect of three backfilling materials on the seismic stability of the model castle walls was investigated through shaking table model tests. Furthermore, the frictional strength between the backfilling material and castle walls is measured. The shaking table experiments showed that the type of backfilling material has a great effect on the seismic stability of the walls and the castle walls utilizing rounded river gravels are quite vulnerable to fail during great earthquakes.