

三次元動的弾塑性 FEM を用いた石垣の地震時挙動の把握

群馬大学 学生会員 ○須藤 皓介

(株) 地震工学研究所 正会員 渡邊 泰介

群馬大学 正会員 若井 明彦

国土舘大学理工学部 正会員 橋本 隆雄

ライフライン防災総研 正会員 宮島 昌克

金沢大学 正会員 池本 敏和

1. 目的

平成 28 年熊本地震により熊本城の石垣、そして令和 4 年福島県沖地震により仙台城跡の石垣が被害を受けた。石垣の歴史的価値を可能な限り損なわない耐震補強工法や、石垣の崩壊メカニズムの解明が必要とされている。そこで、本研究では石垣の振動台実験を三次元動的弾塑性 FEM で再現することで、石垣の地震時挙動を把握することを試みる。

2. 振動台実験

熊本城で崩壊した石垣材料やそれに類似する形状の材料を用いて、様々な耐震補強工法の効果を確認するための振動台実験が行われた。本研究では、耐震補強工法を施していない基本的なモデルを解析対象とした（図 1）。表 1 に示す水平方向の入力地震波が、目標加速度が小さいものから順に加振された。実験モデルには、変位計や加速度計が設置され、地震時の挙動が観測された。

全地震波加振後の中央断面における残留変形図を図 2-(a)に示す。栗石層では上部が約 190mm 沈下し、築石の上から 3 段目で約 200mm の変位が生じ、築石表面ではらみ出しが確認された。石垣は崩壊しなかったものの、地震波 No. 6,7 を加振中に急激に変位量が増加したことが実験から分かっている。図 1 の築石表面（緑：上段、赤：中段、青：下段）において、地震波 No.4 加振中に観測された応答加速度の時刻歴を図 2-(b)に示す。上段にいくにつれて加速度が増幅する傾向があり、高さごとで位相差が確認された。

3. 解析手法

解析では弾完全塑性体を仮定した三次元動的弾塑性 FEM を用いた。降伏基準に Mohr-Coulomb 式、塑性ポテンシャルに Drucker-Prager 式を採用し、非関連流れ則を適用した MC-DP モデルである。計算時間短縮のために、実験のモデルを加振直行方向に対して 3 分割した中央部分の有限要素分割図を作成した（図 3）。栗石の拘束圧依存性を考慮するために、材料を深さ方向に 5 分割し剛性を変化させた。また、岩石同士の接触面で摩擦特性を考慮するために築石・築石間、築石・栗石間にジョイント要素を模擬した厚さ 1mm の要

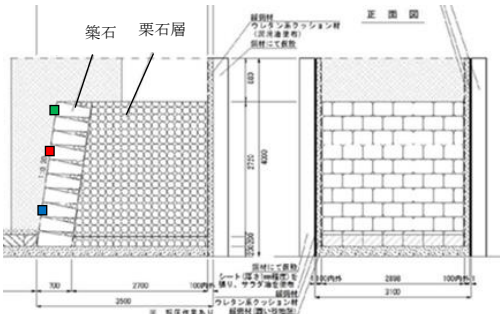
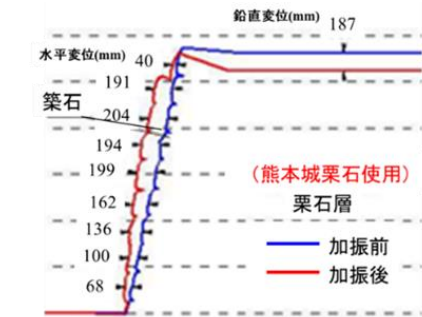


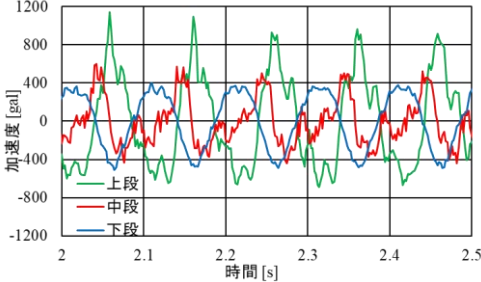
図 1 解析対象の実験モデル

表 1 入力地震波

| No. | 加振波形     | 目標加速度 (gal) | 最大加速度 (gal) |       |
|-----|----------|-------------|-------------|-------|
|     |          |             | プラス側        | マイナス側 |
| 1   | 正弦波 10Hz | 50          | 35          | 35    |
| 2   | 正弦波 10Hz | 100         | 113         | 109   |
| 3   | 正弦波 10Hz | 200         | 205         | 209   |
| 4   | 正弦波 10Hz | 300         | 296         | 313   |
| 5   | 正弦波 10Hz | 450         | 439         | 473   |
| 6   | 正弦波 3Hz  | 650         | 675         | 635   |
| 7   | 正弦波 3Hz  | 650         | 650         | 637   |



(a) 残留変形図



(b) 応答加速度時刻歴

図 2 実験結果

キーワード 有限要素法，石垣，地震応答解析，振動台実験，弾塑性体，擁壁

連絡先 須藤皓介，群馬大学地盤工学研究室（〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1，0277-30-1622）

素を設置した。入力地震波は振動台実験時にテーブル部で観測された水平加速度を用いた。解析に用いた材料定数を表 2 に示す。実験結果では大きな加速度の地震波を加振すると栗石強度が低下し急激に変位量が増加したのに対し、本解析では材料の強度低下を表現することができない。そこで、栗石層の粘着力、内部摩擦角、ダイレイタンシー角に着目し、実験結果と同程度の変位量が得られるように調整した（表 2 赤字）。

#### 4. 解析結果と考察

解析結果を図 4 に示す。図 4-(a)より、実験結果と同程度の変位量を確認することができ、築石表面のはらみ出しや、栗石層の沈下の変形特徴を捉えることができた。図 4-(b)は、図 4-(a)の残留変形図に示す築石・栗石間の要素におけるせん断応力-せん断ひずみ関係である。はらみ出す位置を境に傾向が異なることが確認された。図 4-(c)は築石表面における応答加速度時刻歴である。実験結果と比較して下段から上段にかけての加速度の増幅が小さく、高さごとの位相差も小さい結果となった。図 4-(d)では築石背後にかかる水平応力を土圧と見立てた地震時土圧を物部岡部式と比較した。物部岡部式では土圧が深さ方向に対して比例関係にあるのに対し、解析結果では中段で最大となる傾向が確認され、はらみ出しに影響を及ぼす可能性が推測された。

#### 5. まとめ

振動台実験を三次元動的弾塑性 FEM で再現し、解析結果の地震時挙動の把握を試みた。今後は、さらに解析結果の分析を進めるとともに、補強工法を施した実験ケースの再現を行っていく。

#### 6. 参考文献

- 1) 学校法人 国士館 国士館大学：熊本城石垣施工実験及び振動実験業務報告書, pp. 1~151, 2019

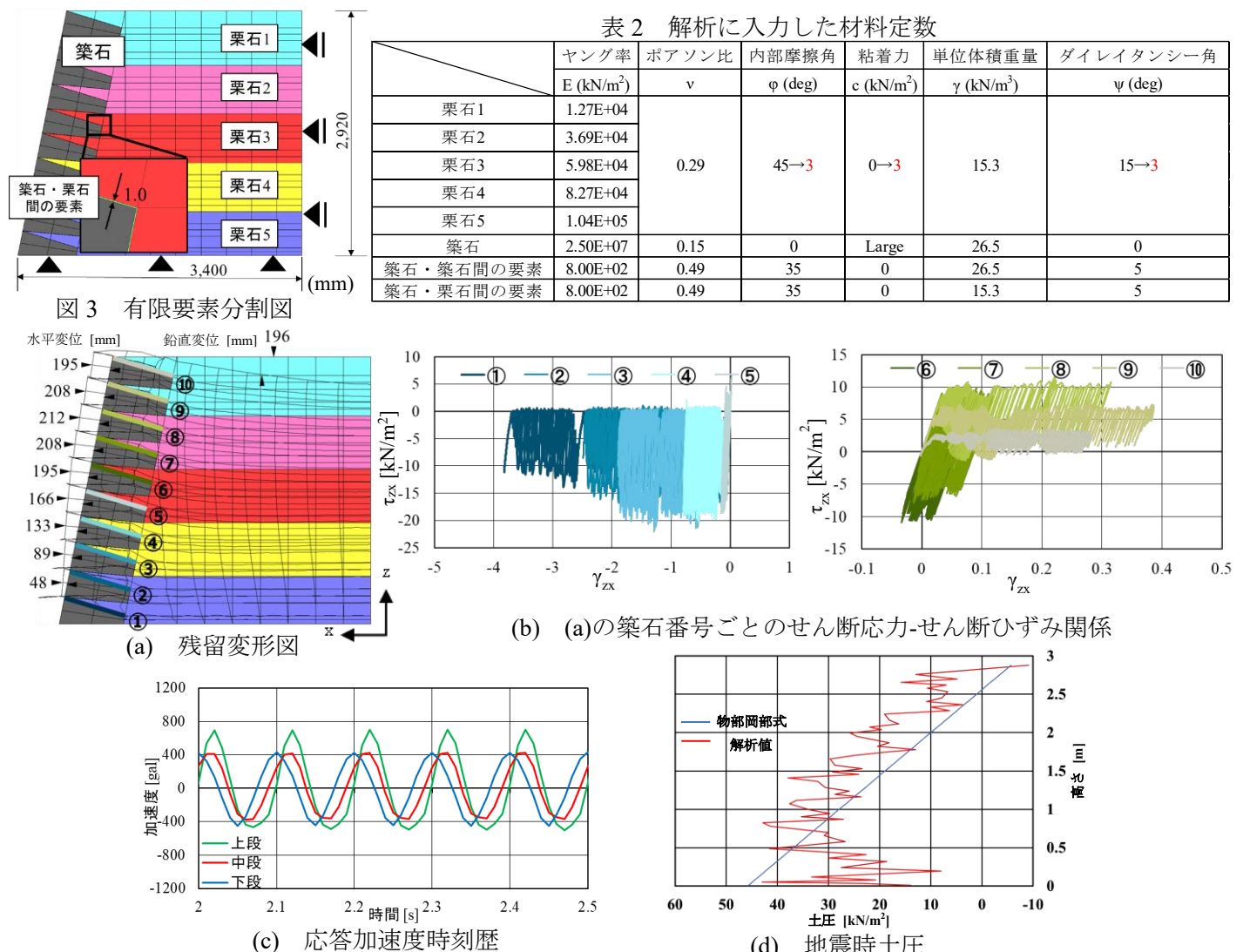


図 4 解析結果