

第 部門 城郭石垣の形状と変形挙動に関する研究

関西大学工学部 学生員 駿河 輝行
 関西大学工学部 正会員 西形 達明
 関西大学大学院 学生員 引場 啓太

1. はじめに

我が国に現存する城郭石垣は、その規模の大きさや、構造様式など、日本独自の高度な土木技術を駆使して構築されている。しかしその構築技術は必ずしも明らかにされていない。したがって、現況の石垣形状からその安定性を明らかにすることは、土木史的に意義が大きいだけでなく、老朽化が著しくみられるこれら重要な石垣構造の修復必要性の判断や修復方法の確立、さらには現代における構造物の設計手法にも寄与することになるものと考えられる。そこで本研究では規模において国内で最高位に位置づけられる徳川期大坂城東内堀の石垣構造の安定性について遠心力載荷実験とFEM解析によって評価を行う。

2. 遠心力載荷実験

本実験に用いた遠心載荷実験装置の主な仕様を表-1に示す。

形式	スイング式
回転有効半径	1.5m
最大加速度	200G
搭載モデル容器寸法	500mm(横幅) × 300mm(高さ) × 200mm(奥行き)

2.1 石垣の形状

本研究では大坂城東内堀をモデルとし、その断面形状は後藤家文書の設計手法による形状(図-1)と仮定した。また、これと比較するために、一定の直線勾配をもつ直線形状石垣(図-2)と石垣の崩壊前を模した孕み出し形状(図-3)を断面形状とした。

2.2 実験手順

図-1～3に示した断面形状を有する石垣モデルの石垣石にはアルミ材(21×7×50mm)を使用し、栗石には3号珪砂、裏込め土には豊浦標準砂を用い1/143のサイズで作製した。曲線部分の石垣には形状の調節のために「介石」が設置されるが、これにはアルミ箔を詰めることで対処した。根石の上段に荷重計を設置し、石垣の安定性を検討する上で重要な地盤反力を測定する。さらに、各積み石に標点を設置し

画像処理により変位を測定する。例として後藤家文書曲線形状モデルを図-4に示す。また、石垣の変形モードをより詳細に知るためにモデル上面に10・30・50(tf/m²)のおもりを順に載荷した。

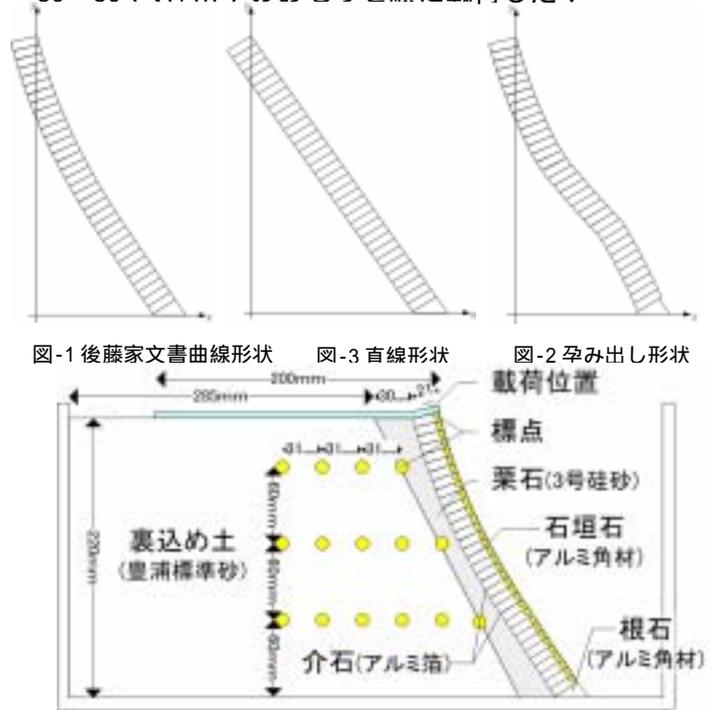


図-4 後藤家文書曲線形状モデル

3. 二次元有限要素解析

3.1 解析手順

図1～3に示した形状の石垣モデルについて、FEM解析を行った。例として図-5に後藤家文書曲線形状モデルのメッシュ図を示す。本解析に用いた各物性値を表-2に示す。また、石垣石間および石垣石と栗石間に設けたJoint要素の入力値を表-3に示す。なお、根石は固定とした。

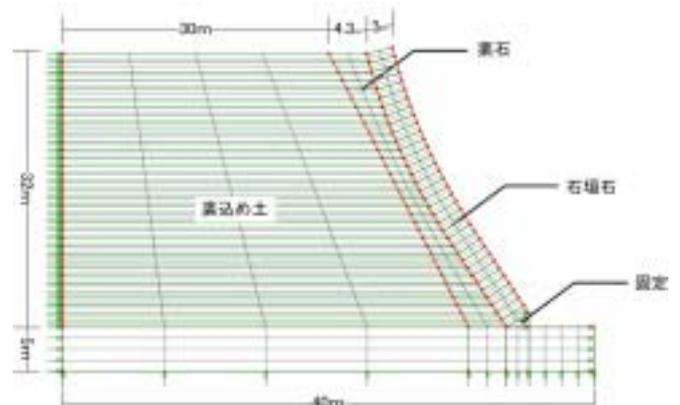


図-5 解析モデルメッシュ図(後藤家文書曲線形状)

表-2 石垣石, 栗石, 裏込め土の材料物性値

材料	石垣石	栗石	裏込め土
E 弾性係数 (kN/m ²)	4.0×10^7	5.0×10^5	1.3×10^4
ポアソン比	0.15	0.2	0.3
単位体積重量 (kN/m ³)	26	21	18

表-3 Joint 要素入力値

	石垣石間		石垣と栗石間	
	K _s (kN/m ²)	K _n (kN/m ²)	K _s (kN/m ²)	K _n (kN/m ²)
入力値	1.74×10^5	4.22×10^7	8.44×10^6	2.25×10^7

4. 実験結果と解析結果

4.1 水平変位量

図-6に実験結果と解析結果より得た各石垣モデルの石垣の水平変位量と石垣高さの関係を示す。実験値・解析値ともに後藤家文書曲線形状の変位が最も小さくなっている。さらに、後藤家文書曲線形状の解析値は全体的に受働方向への変位となっている。直線形状, 孕み出し形状では解析値・実験値とも上部で受働方向, 中～下部で主動方向への変位となっている。

次に図-7に介石の有無による石垣の変形挙動の違いを示す。図より, 介石が有る場合には, 石垣下部の主動方向への変位が大きく抑制されることがわかる。よって, 介石に劣化が生じると石垣崩壊の一因となることが予測され, 今後, 石垣の修復の際は介石のチェックが重要な役割を果たすものと考えられる。

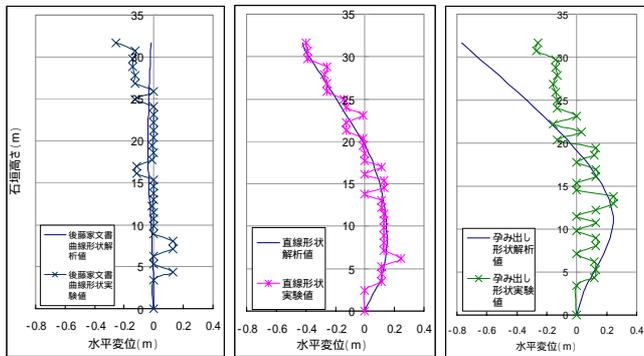


図-6 実験値と解析値の比較

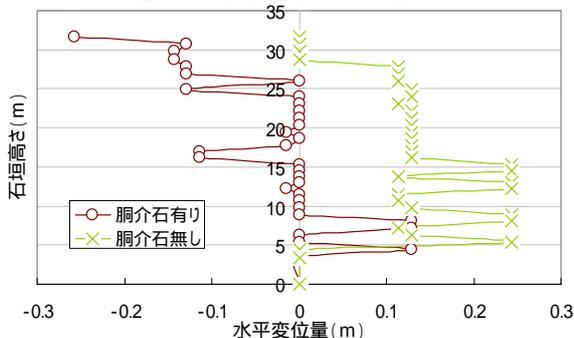


図-7 介石の有無による水平変位量の違い

4.2 地盤反力

まず, 図-9に実験より得た各石垣モデルの地盤反力と上載荷重の関係を示す。図-6と比較すると, 水

平変位量が大いモデルほど地盤反力も大きくなることがわかる。後藤家文書曲線形状のように受働的な変形を生じる場合には背面の栗石や裏込め土全体で安定性を保っているものと考えられ, これによって地盤反力値が小さくなってと思われる。直線形状や孕み出し形状石垣のように主動変形を生じると石垣石土圧が集中するために, 反力が大きくなるものと考えられる。

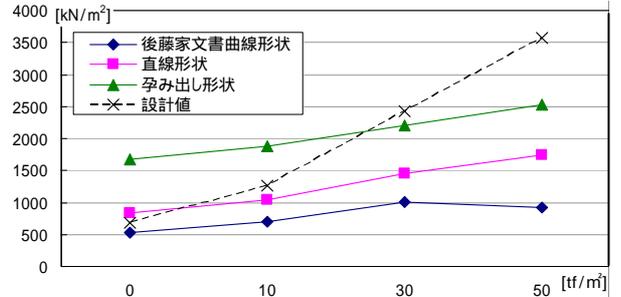


図-9 地盤反力と上載荷重の関係

4.3 背面土中の土圧分布

図-10に解析結果より得た各石垣モデルの変形モードと裏込め土中の土圧の分布の関係を示す。各モデルの静止土圧から, 直線形状および孕み出し形状では石垣上部で受働的土圧が中～下部においては主動的土圧が働いている。後藤家文書曲線形状では, 変形モードから受働的な土圧が作用していると予測されたが, 中～下部において主動的な土圧が作用している結果となった。しかし, 実験の結果からも石垣構造には受働的な土圧が作用し, 主動的な土圧は微小なものであると考えられる。

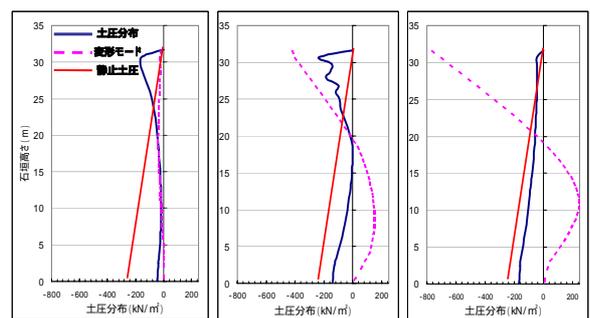


図-10 各モデルの地盤内応力

5. まとめ

- ・後藤家文書曲線形状の石垣は, 石垣構造全体で受働的に力もち変位を抑制している。
- ・直線形状・孕み出し形状の石垣はもたれ擁壁と同様な挙動を示し, 中～下部にかけ孕み出しを生じる。
- ・実験から介石には石垣の変形を抑制する働きがある。