

近世城郭石垣構造の力学解析

○ 中村石材工業（株） 正 北園和憲
 関西大学 正 西田一彦
 大阪産業大学 正 玉野富雄
 大阪産業大学 正 金岡正信
 大阪産業大学 正 B. Shrestha

1. はじめに

我が国における近世城郭石垣構造は、空石積み構造で2次元断面・3次元曲面として極めて優美な構造美を有している。これらの城郭石垣構造においては、築造後400年近くを経過し老朽化が進み、維持・補修・修築・再築の検討を必要とする場合が多くなってきている¹⁾。こうした検討作業を行うに際し、まず石垣構造の安定力学原理を知ることが重要となる。こうした観点から、本報告では、裏込め構造および3次元石垣構造が力学安定に及ぼす影響について、2次元・3次元有限要素法を用いて行ったパラメトリック解析結果をもとに、力学的構造の力学的傾向について考察する。

2. 解析結果と考察

(1) 石垣構造の変形と応力

城郭石垣構造は、算木積みと呼ばれる隅角部と隅角部と隅角部間の平石部に大別される。また、石垣内部構造は、一般的には、石垣石部、栗石の裏込め部、地山からなる。

解析に用いた2次元石垣構造は、図-1に示すように実測調査による大坂城石垣構造にもとづきモデル化した²⁾。その石垣断面形状は後藤家文書で示される形状と良く一致している³⁾。境界条件は、側面：水平固定・鉛直ローラ、底面：水平ローラ・鉛直固定である。石垣底面の水平方向を固定にすると石垣構造は安定側になるが、ここでは危険側の水平ローラの境界条件に対する解析を行う。また、解析に用いた諸定数を表-1に示す。各層の弾性係数は、砂・砂礫層はN値より、粘土層は一軸圧縮試験より求めた。また、石垣石は、花崗岩の圧縮試験事例、裏込めはロックフィルダム材料の実験事例から援用した。

2次元解析での石垣面変形と石垣石に生じた主応力分布を図-2に示す。石垣面での最大の水平変位（はらみ出し量）は底面で生じ4cmである。石垣石に発生する主応力は石垣石接面に直角に近い状態で、石垣石要素外側では引張応力、内側では圧縮応力が生じている。図-3に石垣石接面垂直方向の発生応力を石垣石の外側から裏込め側について、石垣高さ方向の分布を示す。石垣石がはらみ出すことで、石垣石外側の要素では、解析条件が連続体であることから引張応力が生じている。引張応力の発生は、実際の石垣構造では連続体でないことから、石垣石間

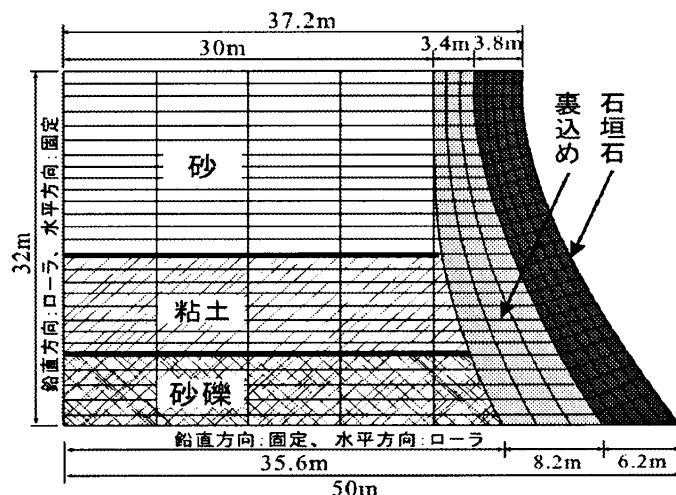


図-1 石垣解析に用いた2次元有限要素モデル

表-1 解析に用いた諸定数

要素の諸定数					
要素	石垣石	裏込め	砂	粘土	砂礫
要素特性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性
弾性係数E (kPa)	4.0×10^7	5.0×10^5	1.3×10^4	2.1×10^4	5.3×10^4
ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3	0.49	0.25
単位体積重量 (kN/m ³)	26	21	18	16	20
内部摩擦角 ϕ (°)	50	45	32	0	41

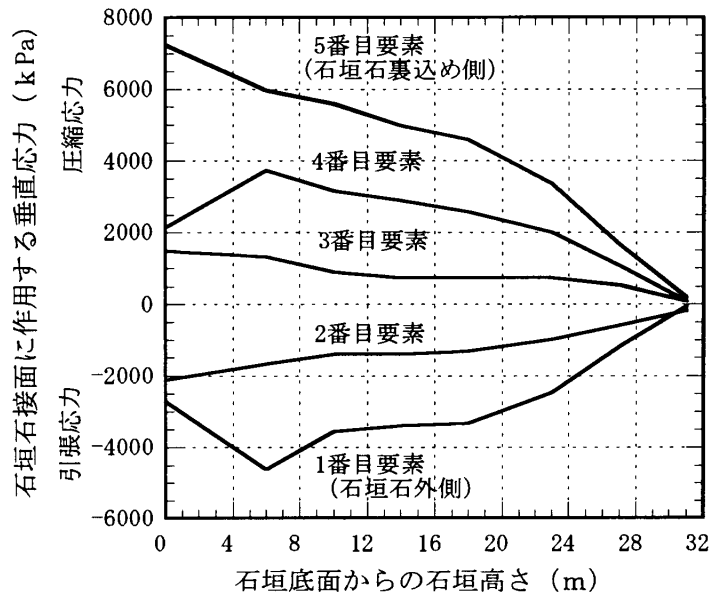


図-3 石垣石接面に作用する垂直応力の高さ方向の分布

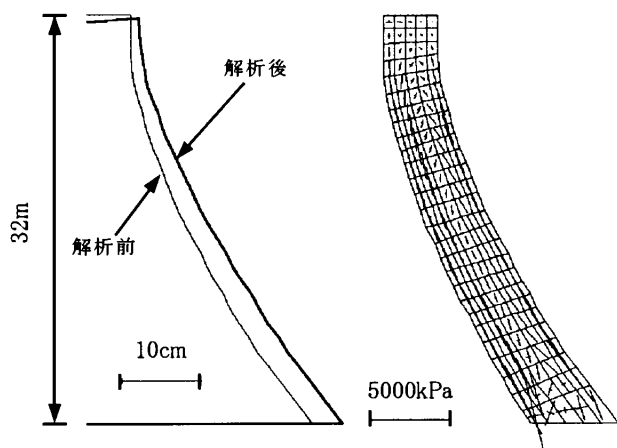


図-2 石垣面変形と主応力分布

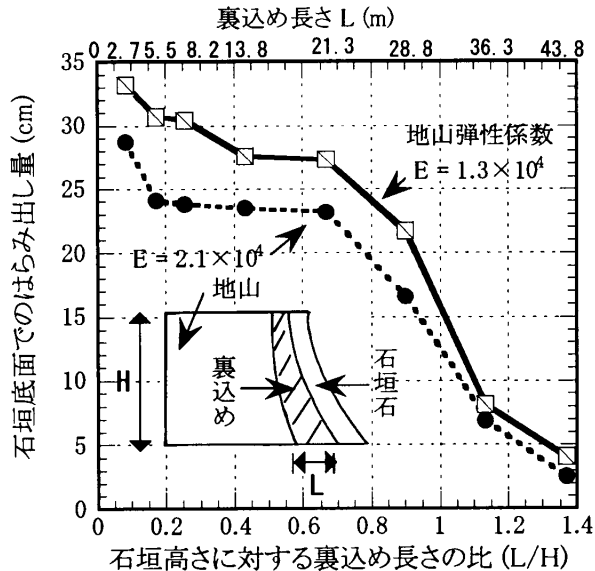


図-4 石垣高さに対する裏込めの長さの比 (L/H) と石垣底面でのはらみ出し量の関係

の目開きが大きくなることを意味し、圧縮領域が広いほど石垣構造はより安定な構造となる。

(2) 裏込め構造の力学効果

図-1に示した2次元石垣構造で、地山の弾性係数を砂と粘土の2種類に変化させ、また、裏込め領域Lを水平方向に平行移動させ、その力学効果を検討した。解析結果を図-4に示す。地山の弾性係数が小さくなると底面で生じるはらみ出し量が大きくなる。また、裏込め領域が大きくなるとはらみ出し量は減少し、石垣石には引張応力が生じなくなる。裏込めが石垣構造安定に大きく寄与することがわかる。

(3) 3次元構造の力学効果

算木積み隅角部は、石垣構造に3次元の力学効果を生じさせる²⁾。ここでは、図-5の説明図に示すような3次元構造を事例に、石垣幅(石垣面上端の長さ)Bを変化させ、石垣面中央断面の力学状態を2次元解析での解析結果と比較した。実際の大坂城など石垣面には平の透きと呼ばれている曲面³⁾があるが、ここでは石垣面は2次元と同一の断面形状とし単純化した。また、地盤・境界条件は2次元の場合と同じとした。図-6に石垣幅Bを50m～250mまで変化させた場合の石垣面中央断面底部でのはらみ出し量の解析結果を示す。2次元解析での最大はらみ出し量が4cmであり、石垣幅が250mになると2次元解析の場合と等しくなっている。石垣構造比(石垣幅/石垣高さ)²⁾が7程度になると3次元効果がなくなることがわかる。図-7に3次元解析での石垣変形を石垣幅100mの場合で例示する。この変形状態から3次元構造の力学効果を明確に見ることができる。2次元構造では高さ方向で全体的に前面にはらみ出しているのに対し、3次元構造では、石垣上部が地山側に変位し、下部がはらみ出す傾向にあることがわかる。

3. まとめ

単純化した石垣構造に対する有限要素法解析より石垣構造の力学安定を考察し、裏込め構造および3次元構造の力学効果が大きいものであることを示した。実際の石垣構造の力学安定には多くの要因が関係するが、安定の検討に際し本報告での力学傾向は参考となろう。

参考文献

- 1) 西田・玉野:歴史遺産としての城郭石垣構造の安定性評価手法に関する工学的提案、地盤に係わる維持・補修・管理技術に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.27-36,1998.5.
- 2) 天野・西田他:徳川期大坂城石垣構造の土木史的研究、土木学会論文集、No.660/IV-49、pp.101-110、2000.10.
- 3) 森本・西田他:城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法、土木学会論文集、No.666/III-53、pp.159-168、2000.12.

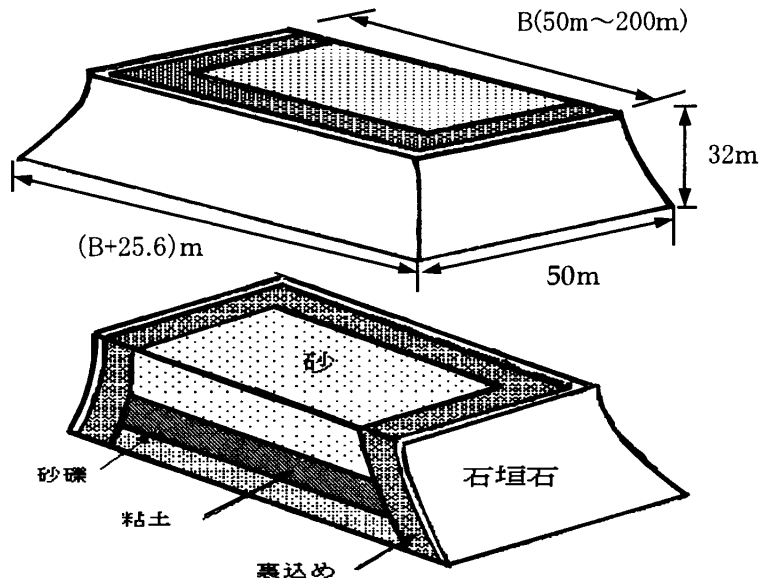


図-5 3次元解析に用いた石垣構造の説明図

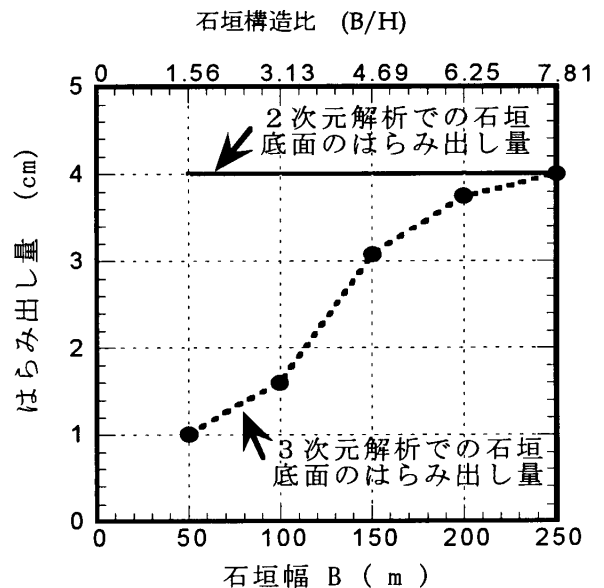


図-6 2次元・3次元解析での石垣底面のはらみ出し量の比較

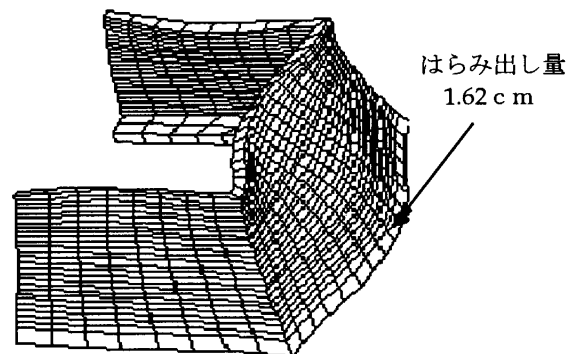


図-7 3次元解析での石垣変形 (石垣幅 B=100m)