

石垣断面の FEM3D による数値実験解析

木更津工業高等専門学校 環境建設工学科 専攻科 学生会員 ○木村 真也 谷 優作
教授 正会員 博(工学) 田中 邦熙
(株)小林石材工業 小林 善勝

1. まえがき

石垣の安定性を評価するに当たり、安定に関与する要因個々及び相互作用などの効果や影響傾向などを検討することが必要である。本研究は石垣の動的挙動を検討するに当たり、形状寸法を標準規模の一定にし、構成要素のうち、積み石S・裏込めB・地盤Gおよび間詰めMの4要因を取り上げて検討した。これらの物性値は夫々3水準に変化させて、実験計画法 L_9 に組み込んでFEM3Dを用いて数値実験し、結果を統計的手法により処理して、夫々の要因が石垣の常時および地震時の安定にどのように関与しているかを検討した。

2. 研究方法

(1) 石垣断面のモデル化と解析ソフト

石垣断面を構成する要素は数多くあり、かつ積み石の個々は独立して、間詰め材を介して積み上げられていることから、全体を連続体として扱うことは疑問があり、そのモデル化は非常に難しい。ここで個別要素法はその理論的根拠を考えたとき、石垣解析には適していない。そこでFEMを石垣解析に適用できるように、仮想間詰め材を想定して、全体を連続体として扱えるように工夫した¹⁾。本研究はこの手法により、市販FEMソフト SAS-3DとRISAを用いて実施した。

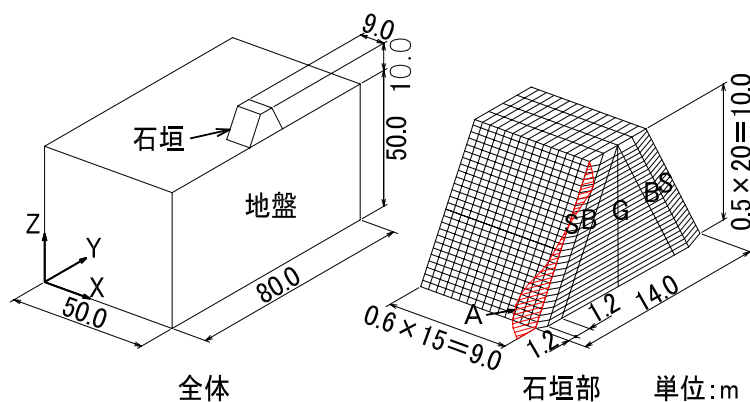


図 - 1 石垣 FEM 解析要素分割図

表 - 1 数値実験の要因と水準 $L_9(3^4)$
(要素 1 ~ 4 に対し、弾性係数 $E_1 \sim E_3$ を表のように変化)($E : \text{kgf/cm}^2$)

実験 No.	要素							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	積み石S	裏込めB	地盤G	間詰めM				
1	1	1,000	1	100	1	200	1	300
2	1	1,000	2	1,000	2	2,000	2	1,500
3	1	1,000	3	10,000	3	20,000	3	7,500
4	2	10,000	1	100	2	2,000	3	7,500
5	2	10,000	2	1,000	3	20,000	1	300
6	2	10,000	3	10,000	1	200	2	1,500
7	3	100,000	1	100	3	20,000	2	1,500
8	3	100,000	2	1,000	1	200	3	7,500
9	3	100,000	3	10,000	2	2,000	1	300

(2) 解析断面と数値実験

本研究は石垣構成要素の物性値変化と安定性との関係を検討することを主眼とした。そこで、形状寸法は標準規模の高さ $H = 10.0\text{m}$ 角度 $\theta = 70^\circ$ 、積み石勾配 $\alpha 20^\circ$ 、積み石石面寸法 $60.0\text{cm} \times 50.0\text{cm}$ の一定とし、S,B,G,M の 4 要因を表-1 のように 3 水準に変化させた。また、数値実験は実験効率を高め、得られた結果を統計処理してより有効な情報が得られるよう、実験計画法に組み込んで実施した。

(3) 物性値

今回とり上げた 4 要因の物性値は表-2 に示すように設定した。

(4) 石垣安定の評価基準

石垣の安定性は腹み出し量で判定できる場合が多いことから、今回は水平 Y 方向変位量の石垣の中央断面における最下段から最上段までの積分値 A (cm^2) を用いることとした。

(5) 地震力

表-1,2 の条件に対し、図-1 の地盤最下面から、X,Y,Z 3 方向独立に、加速度 $\alpha = 0$ (常時)、100,300,500gal の正弦波を 10 秒ずつ入力した。周期 $T = 0.5\text{sec}$ と一定のときの振幅 a、は次のとおりである。

100gal $a = 0.63\text{cm}$ 、300gal $a = 1.9\text{cm}$ 、500gal $a = 3.2\text{cm}$

Keyword: 石垣安定 FEM3D 数値解析

連絡先: 〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1 木更津工業高等専門学校 TEL & FAX 0438-30-4155

表 - 2 FEM 解析に用いた物性値

記号	名称	要素区分 水準 単位	積み石 S (線形)			裏込め B (非線形)			地盤 G (非線形)			間詰め M (非線形)		
			S ₁	S ₂	S ₃	B ₁	B ₂	B ₃	G ₁	G ₂	G ₃	M ₁	M ₂	M ₃
E	弾性係数	kgf/cm ²	1,000	10,000	10,000	100	1,000	10,000	200	2,000	20,000	300	1,500	7,500
		Pa (N/m ²)	1.00×10^8	1.00×10^9	1.00×10^{10}	1.00×10^7	1.00×10^8	1.00×10^9	2.00×10^7	2.00×10^8	2.00×10^9	3.00×10^7	1.50×10^8	7.50×10^8
v	ポアソン比		0.32	0.30	0.28	0.45	0.40	0.35	0.48	0.44	0.40	0.48	0.36	0.29
ρ	単位重量	tf/m ³	2.30	2.50	2.70	2.00	2.10	2.20	1.80	2.00	2.20	1.60	2.23	2.60
	単位質量	N/m ³	2.30×10^3	2.50×10^3	2.70×10^3	2.00×10^3	2.10×10^3	2.20×10^3	1.80×10^3	2.00×10^3	2.20×10^3	1.60×10^3	2.23×10^3	7.50×10^8
G	せん断弾性係数 $= \frac{E}{2(1+\nu)}$	Pa (N/m ²)	-	-	-	3.45×10^6	3.57×10^7	3.70×10^8	6.76×10^6	6.94×10^7	7.14×10^8	1.01×10^7	5.51×10^7	2.91×10^8
K	体積弾性係数 $= \frac{E}{3(1-2\nu)}$	Pa (N/m ²)	-	-	-	3.33×10^7	1.67×10^8	1.11×10^9	1.67×10^8	5.56×10^8	3.33×10^9	2.50×10^8	1.79×10^8	5.95×10^8
e	間隙比		-	-	-	0.30	0.20	0.10	0.40	0.30	0.20	0.55	0.24	0.08
n	間隙率 $= \frac{e}{1+e}$		-	-	-	0.23	0.17	0.09	0.29	0.23	0.17	0.35	0.19	0.07
τ	せん断強度	kgf/cm ²	-	-	-	0.20	0.40	0.60	10.0	20.0	30.0	0.80	5.80	8.40
		Pa (N/m ²)	-	-	-	2.00×10^5	4.00×10^5	6.00×10^5	1.00×10^6	2.00×10^6	3.00×10^6	2.00×10^5	4.00×10^5	6.00×10^5

3. 数値実験結果と考察

(1) 腹み出し量 A

各計算ケースに対し、石垣中央断面における積み石の石垣最下部から最上部まで、入力波の1/16secごとに水平Y方向変位分布を求め、この積分値のうち最大値をAとした。なお最大変位量は500gal時に30cmを越えることが示された。

(2) 統計手法による解析

常時および地震時 α = 100、300、500gal の4ケースについて、実験計画法に基づいた分散分析を行ない、各要因の水準変化による石垣安定性（今回はA）への影響傾向、度合いなどを検討した結果を図-2に示す。

常時およびαが小さい時には4要因とも水準変化しても安定性に影響を与えないが、300, 500galと大きくなると、図-2に示すような2次曲線で、SはS₂時にAが最大（安定性が最小）、GはG₁時に最大、MはM₃時に最大、BはB₁→B₂→B₃と安定性が増大することなどが分る。ただし、SとMとの水準変動によるAの変動幅はBとGに比べて小さい（統計上有意差が認められない＝影響が小さい）ことを示していて、石垣の地震時安定に支配的な要因はBとGであることが分る。これは寄与率でも示された。以上の検討結果は表-1に示した各要因の水準幅に影響されるが、設定に当たり一般的に取りうる最大値と最小値を与えているので、大局的な傾向は変わらないと考えられる。

4. あとがき

今後は石垣の形状寸法に関する検討等を行い、今回の結果や別途実施した石垣模型の振動実験結果²⁾等も合わせて総合的に検討していく所存である。本研究は14年度科学研究費および13年度鹿児島県研究助成を得て実施した成果の一部であることを記し、関係各位に謝意を示します。

参考文献

- 1) 田中・新谷・山田; 城郭石垣の三次元形態の発生起源に関してFEMを適用する手法と解析事例, 土木学会論文集No. 631, -48, pp383~396, 1999.9
- 2) 綾部・浅利他; 石垣模型の振動実験, 平成14年度第30回土木学会関東支部技術研究発表会, 2003.3

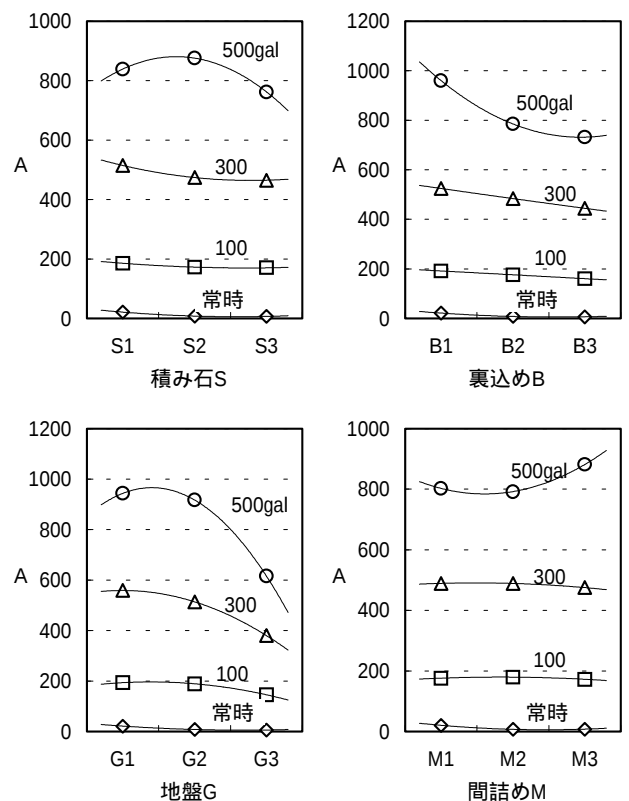


図-2 要素ごとの物性値と腹み出し量との関係