

石垣模型肩部の静的載荷実験*

Statical Loading Experiments on Model Masonry Wall's Shoulder

○小林善勝** 新谷洋二*** 田中邦熙**** 谷優作*****

By Yoshikatsu KOBAYASHI, Yoji NIITANI, Kunihiro TANAKA, Yusaku TANI

要旨：現存する城郭石垣は老朽化が著しく、重要な文化遺産として修復復元する必要性が高いものも多い。このためにはその石垣の安定性がどれ位か定量的に判定することが必要である。しかし石垣の安定性は形状寸法および構成要素の状態・物性値など多くの要因が複雑にからみ合っていて、合理的な手法は開発されていない。本研究は石垣の安定メカニズムを検討する一手法として、石垣模型の肩部に静荷重を加えたときの石垣面の孕み出し状況(=安定性)などを測定し考察したものである。今回の実験では①石垣肩部の載荷位置の差による孕み出しへの影響②石垣高さ・勾配・積み石密度および石積み技法の4要素の水準値を変えたときの孕み出しへの影響③積み石9ヶに1ヶ程度控え長が大きい積み石を用いたときや反りを加えたときの石垣安定性を増加させる効果の検討を行った。これらの実験検討結果は次のように要約される。①石垣肩部の載荷重は積み石控え長内に収めることが望ましい。②上述4要因中では石垣安定に対する寄与率は勾配が70%で勾配が支配的である。③積み石9ヶに1ヶでも控え長の大きい積み石を用いること、反りを加えることは石垣安定に有利に作用する。

1. はじめに

石垣の安定性は多くの要因が複雑にからみ合っていて、その安定メカニズムを理論的に研究し表すことは非常に困難であり、一方実験的手法により研究することも難しい。筆者らはこの困難な課題に対して、ごく単純化した理論的あるいは実験的手法により研究を続けてきた^{1~4)}。本報告も、筆者らが続けてきた基礎的な研究を積み重ねていくことが、この困難な課題究明に近づく有力な方法の一つであると考えて実施した、室内実験結果をとりまとめたものである。

今回の実験は、前面が透明アクリル板となっている鋼製土槽内に模型石垣を積み上げ、肩部に載荷して石垣面の変状を測定し、その安定性を検討したものである。

2. 研究目的

今回の実験目的は、①石垣肩から載荷板までの距離 d

*Keyword: 石垣安定, 相似率, 実験計画法, 静的載荷

** (株)小林石材工業 代表取締役

(〒106-0045 東京都港区麻布十番 3-7-12)

***名誉会員 工博 日本開発構想研究所 理事長

(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-16-4 アーバン虎ノ門ビル)

****正会員 博(工学) 木更津高専 環境都市工学科教授

(〒292-0041 千葉県木更津清見台東 2-11-1)

*****学生会員 木更津高専 専攻科2年

の石垣安定への影響検討②石垣諸元のうち、高さ H ・勾配 θ ・石積み材質 γ および石積み技法 T の4要因の水準を変化させたときの石垣安定への影響検討③石垣積み石控え長および反りの安定への影響検討の3種類に区分される。これらを究明するために室内模型実験を実施した。なお、②実験において積み石材質 γ は鉛・鉄・大谷石と変化させたが、これは今回の実験では幾何相似率を1/10に設定したので、重力相似率を考慮する必要が生じたためである。

3. 実験方法

(1)実験装置

写真-1に示すように、高さ840mm、幅1,400mm、奥行

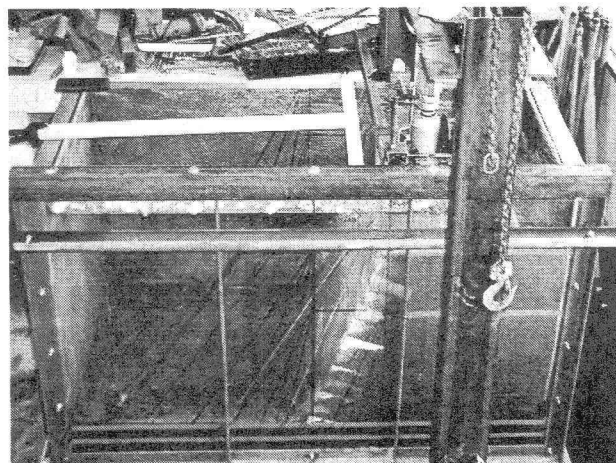


写真-1 実験装置

き 700 mmの前面が透明アクリル板となっている鋼製土槽内に、所定の高さ H ・勾配 θ ・積み石材質 γ および積み石技法 T などを変化させた模型石垣を構築した。そして石垣天端肩部に載荷鉄板・油圧ジャッキおよびロードセルを介して反力梁から段階的に載荷したときの石垣面の孕み出し面積 A (=石垣の安定性を評価する指標) を測定計算し、載荷重と孕み出し量との関係を整理して、石垣の安定性を評価した。

(2) 実験機器

今回の実験に用いた機器は表-1に示すとおりである。なお、模型積み石は石面 $40\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、控え長 120mm のテーパー付であり、幾何相似率 $1/10$ を想定した。

(3) 実験方法

今回実施した実験は表-2に示したように、予備実験 P 4回、本実験 T_p 9回、追加実験 Ad 3回の計 16回である。今回の実験では $H \cdot \theta \cdot \gamma \cdot T$ の4要因の影響検討を主眼においてあり、地山部・裏込め部および間詰部は房総山砂 ($\omega_s = 3\%$, $U_c = 0.56/0.33 = 1.7$) を用い、突固め試験 $JIS A 1210$ の90%程度となるように締固めて実験した。また載荷重 Δp は $1.0, 2.0, 3.0\text{tf}$ の3ステップとした。

P 実験は $H=80\text{cm}$, $\theta=70^\circ$, $\gamma=2.6$ (御影石), T =煉瓦積みの一定条件下、 d を $4, 0, -4, -8\text{cm}$ と変化させたときの A の変化を求めた。

T_p 実験は $H \cdot \theta \cdot \gamma \cdot T$ の4要因を各々3水準に変化させて、実験計画法⁵⁾ L_9 に組み込んで実験し、各要因の A への影響傾向を求めた。また、載荷位置は P 実験結果から $d=-40\text{mm}$ として載荷板を積み石控え長 ℓ 内に収めた。

Ad 実験では、 $Ad-1$ は、 $H=80\text{cm}$, $\theta=70^\circ$, $\gamma=2.6$ (御影石), T =煉瓦積み、積み石控え長 $\ell=12\text{cm}$ とし、 $Ad-2$ は $Ad-1$ に対し積み石9ヶ当り1ヶを $\ell=18\text{cm}$ として、積み石控え長の効果検討、 $Ad-3$ は $Ad-1$ に対し、石垣傾斜の上部に反りを加えたときの効果検討を行った3種類である。

4. 実験結果

(1) 予備実験 P

石垣肩から載荷板までの距離 d を変化させたときの石垣中央断面図の孕み出し状況を図-1に示す。 $d=+40\text{mm}$

表-1 実験機器一覧表

名称	仕様	数量
鋼製土槽	840×700×1,400 前面透明アクリル板	1式
反力梁	H200×200	1式
載荷板	PL300×200×25	1ヶ
油圧ジャッキ	10.0tf	1台
ロードセル	10.0tf (+ブレーピングリングPR)	1台
変位計	デジタル式 ストローク 50mm	14ヶ
データロガー	TDS-302 + パソコン (スイッチボックス 50ch 含む)	1式
模型積み石	石面 40×50 控え長 120mm テーパー加工 大谷石 御影石 鉄鉛	各100ヶ
不動梁	L30×30 を用いて組み立て	1式

表-2 実験条件と実験結果一覧

		積石密度 γ (tf/m ³)		石垣高さ H (cm)		石垣角度 θ (°)		積石技法 T	載荷位置 d (cm)	積石控え長 ℓ (cm)	実験結果 A (cm ²) 石垣孕み出し断面積			
		$\Delta P1$ 1.0tf	$\Delta P2$ 2.0tf	$\Delta P3$ 3.0tf										
予備実験 P		御影石												
	P-1	2.6		80		70		煉瓦積み	4	12	33.5	40.4	49.3	
	P-2	2.6		80		70		煉瓦積み	0	12	48.7	61.2	74.5	
	P-3	2.6		80		70		煉瓦積み	-4	12	65.2	81.0	112.3	
	P-4	2.6		80		70		煉瓦積み	-8	12	95.6	128.4	162.0	
本実験 T_p	要因	1		2		3		4	-	-	-	-	-	
	Level	水準	値	水準	値	水準	値	水準	値					
	T-1	1	1.3	1	40	1	60	1	芋積	4	12	23.7	27.1	32.7
	T-2	1	1.3	2	60	2	70	2	煉瓦	4	12	33.0	37.2	48.6
	T-3	1	1.3	3	80	3	80	3	落積	4	12	48.6	57.4	70.1
	T-4	2	7.8	1	40	2	70	3	落積	4	12	20.5	25.9	33.3
	T-5	2	7.8	2	60	3	80	1	芋積	4	12	36.7	44.9	57.0
	T-6	2	7.8	3	80	1	60	2	煉瓦	4	12	21.9	28.1	36.8
	T-7	3	13.6	1	40	3	80	2	煉瓦	4	12	31.7	39.2	47.6
	T-8	3	13.6	2	60	1	60	3	落積	4	12	14.3	19.4	24.8
T-9	3	13.6	3	80	2	70	1	芋積	4	12	32.1	37.2	46.2	
追加実験 Ad		御影石												
	A-1	2.6		80		70		煉瓦積み	4	12	33.2	39.5	49.3	
	A-2	2.6		80		70		煉瓦積み	4	12+1/9×18	32.2	37.8	45.2	
	A-3	2.6		80		70		煉瓦積み	4	12+反り	31.7	37.0	44.6	

は載荷重が石垣控ええ長上にある場合であり、 $d=0, -40, -80\text{mm}$ と後方になるほど孕み範囲の下端が次第に下りかつ孕み出し変化断面積 A が漸増していることが分かる。これは今回の実験では裏込め層を設けなかったが、裏込め層が十分な強度を有していないと、 $d=-40, -80\text{mm}$ の図で分るように、載荷板の沈下量が漸増しかつ傾斜して、 d の後方への移動に比例して裏込め部にせん断面を有する円弧すべり層が拡大したためである。

次に載荷重 ΔP ごとに d と A との関係を整理した結果を図-2に示す。 d および P の増加につれて、 A が漸増し、石垣の安定性が急激に失われていることを示している。

これらの結果から石垣肩部の載荷重は積み石控ええ長 l 以内に収まることが望ましいことが理解できる。なお今回の実験では積み石相互間の間詰め部などは実験要因に組み入れてないが、間詰め状態がゆるかったり、容易に破碎したりすると、裏込め部と同様に積み石控ええ長内でも沈下変形が大きく、石垣が不安定となることが推察される。

以上のことは、石垣断面の安定性を検討する一手法とし

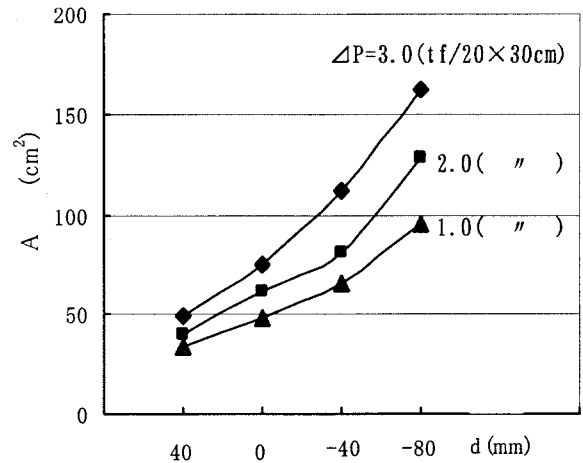


図-2 A-d関係図

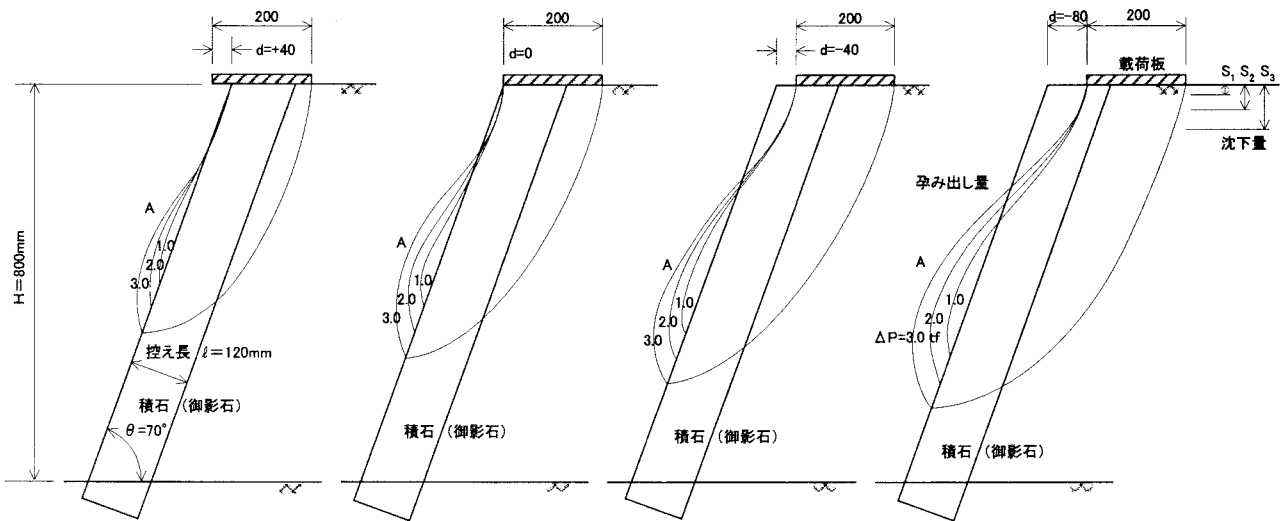


図-1 載荷位置の差による孕み出し状況変化図

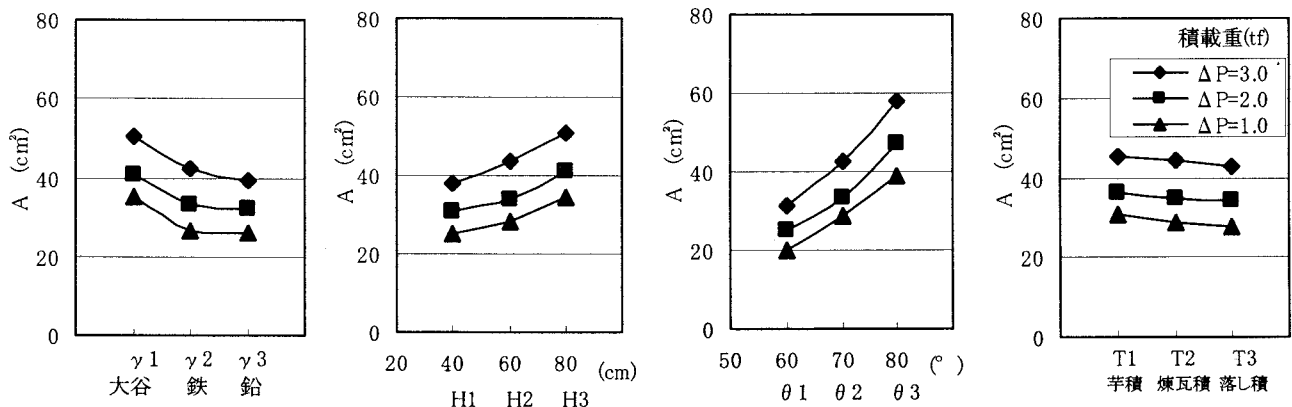


図-3 各要因水準ごとのAに関する主効果図

での示力線法において、積み石重量と背面土圧との合力(=示力線)が積み石断面内に収まることを要求することと合致している。

(2)本実験Tp

表-2に示した载荷重 ΔP ごとの孕み出し面積Aを用いて、統計・分散分析した結果を図-3に示す。Hおよび θ は水準値が大きい程Aが急激に増大し、石垣断面の安定性が急激に失われる、積み石密度 γ が大きいほどAは小さくなり安定性は大きくなること、石積み技法の差による石垣断面の安定性への影響は小さいことが分かる。ここで各要因の寄与率 ρ は、 $\theta \approx 63.0 \sim 70.7\%$ 、 $H \approx 13.1 \sim 16.2\%$ 、 $\gamma \approx 11.8 \sim 17.1\%$ であり、石垣の安定は θ に大きく支配されることが示された。

なお、 γ は、大谷石 ≈ 1.30 ・御影石 ≈ 2.60 ・鉄 ≈ 7.80 ・鉛 ≈ 13.6 (tf/m³)である。一般の石垣積み石は御影石の2.60程度であるので、実験材料として鉛を用いても単位重量比 $\approx 13.2/2.60=5.2$ であるから、今回の幾何相似率1/10に対して重力相似率10の場合を外推的に推定しても、図-3左端図より、 γ の増大につれてAが収束する傾向にあることから、実大規模石垣においては積み石密度差は石垣安定にさほど大きな影響力を示さないことが分かる。

(3)追加実験Ad

表-2に示した追加実験Ad-1~Ad-3におけるAを図示すると図-4のようになる。AはAd-1からAd-2・Ad-3と漸減していき、積み石控え長を長くしたり、石垣断面に反りを加えると、石垣断面の安定性が増加する傾向があることが示された。

5. 考察

石垣の安定に関与する要因は数多くありそれらが複雑に絡み合っていて、実験的に石垣安定に関して一般性のある解を得ることは至難のことである。

今回の報告のように実験計画法を適用して実験効率を上げ、結果を統計的手法により解析検討するにしても、背面地盤・裏込めおよび間詰めなどその材質・密度・含水状態なども変えたり、反りの形・位置を変化させる条件などを組み込んで実験しようとするとならざる多大な実験が必要となる。そして室内実験の場合相似則を考慮に入れる必要があり、またその石垣の安定性を今回の孕み出し面積Aで表示してよいかという問題もある。

以上のようなことを考えると、今回の石垣実験は問題点も多いものであり、得られた結果も批判の多いものと考えられる。

しかし、冒頭で述べたように、筆者らが続けてきた基礎的な研究を積み重ねていくことが石垣安定という困難な課題究明に近づく有効な手法であると信じている。

先輩諸兄のご指導をお願いいたします。

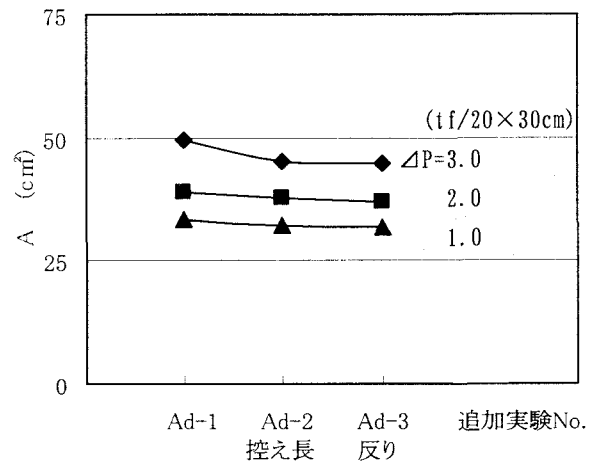


図-4 追加実験1~3に対するA変化図

6. まとめ

今回の石垣模型室内実験から得られた結果は次のようにとりまとめることができる。

- ① 肩部の载荷重は積み石控え長内に収めることが望ましい。
- ② 石垣高さH・勾配 θ ・積み石密度 γ および石積み技法Tの4要因の水準を変えて石垣面の孕み出し量A(=石垣の安定性)を求めて解析したところ、その寄与率は $\rho_{\theta} \approx 70\%$ で、石垣勾配が石垣の安定性に対し支配的であることが示された。
- ③ 積み石中に控え長の長い積み石を用いること、反りを加えることは石垣安定に有効に作用する。

7. 謝辞

本研究はH14~16年度科研費およびH14~15年度鹿島学術振興財団助成金を得て実施した成果の一部であることを記し、関係各位に謝意を表します。

また、本実験の実施に当たり、木更津高専本科5年堀越直記、上野翔、長谷川陸、渡邊重徳の諸君に協力いただいたことを記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中邦熙・山田清臣：石積み擁壁の安定性評価法，土木学会論文集 No.541/Ⅲ-35, pp9~20, 1996, 6
- 2) 田中邦熙・新谷洋二・山田清臣：城郭石垣の三次元形態の発生源に関してFEMを適用する手法と解析事例，土木学会論文集 No.631/Ⅲ-48, pp.383~396, 1999, 9
- 3) 田中邦熙・新谷洋二・小林善勝 他：石垣断面のFEM-3Dによる数値解析実験-構成要素の物性値の影響-，第23回土木史研究 pp.401~408, 2003, 6
- 4) 小林善勝・新谷洋二・田中邦熙：石垣模型の振動実験-石垣安定における形状寸法の影響-，第23回土木史研究 pp.395~400, 2003, 6
- 5) 田口玄一：「実験計画法」上下巻，丸善(株)，1968, 10