

石垣模型の振動実験*—石垣安定における形状寸法の影響—

Vibration Experiment of Model Masonry Walls

—Effects to Stability by Figure and Size of Masonry Walls—

○小林善勝**新谷洋二***田中邦熙****木村真也*****谷 優作*****

By Yoshikatu KOBAYASHI, Yoji NIITANI, Kunihiko TANAKA, Shinya KIMURA, Yusaku TANI

要旨：石垣の安定性に関する研究は、安定に関与する要因の効果及びそれらの相互作用が複雑にからみあっている非常に難しい¹⁾。数値解析するに当たっても、そのモデル化・境界条件・定数決定などが困難である²⁾。地震時挙動研究はさらに難しい。本研究は、石垣の動的挙動を究明するために、振動台上に模型石垣を構築して加振し、変形崩壊状況などを検討解析した結果をとりまとめたものである。

今回の研究では、模型実験の相似則を考慮して石材を大谷石、花崗岩、鉄および鉛と変化させる一方、石垣高さ、石垣角度及び石積技法の、石垣安定に関与する形状寸法3項目を加えた計4要因を取り上げた。そして実験計画法L9³⁾に組み込んで実験して変形崩壊状況を測定し、それを統計処理して、要因それぞれの石垣安定に関与する影響度合などを評価した。

1. はじめに

現存城郭石垣は老朽化が著しく、腹み出しなどの変形が進んで崩落の危険性が高い箇所も多い。これらを修復復元するためにも、石垣の安定性を定量的に評価する手法の開発が求められている。しかし石垣の研究は石垣構成が複雑なこともあり、非常に難しい。そして石垣崩壊は歴史的に見ても地震時が多く、動的研究が求められているが、動的挙動の研究はさらに難しい。

本研究は、振動台上に模型石垣を構築して加振し、変形崩壊状況などを測定した結果をとりまとめた。

2. 研究方法

(1) 実験装置と実験方法

表—1に示す実験材料を写真—1および図—1に示すようにセットして、振動台上に構築した石垣模型に加振した。加振方向は石垣面に鉛直な水平方向とし、加速度は順次Step1,2,3,4と増加させた。(加速度 α の大きさは動変位計の値から算出した。)各ステップの振動時間は20秒とし、ステップごとに石垣中央断面の鉛直・水平変位を土槽上にセットする基準フレームからコンバックスルール等で測定した。

また石垣表面の上中下3カ所には加速度計ピックアップを固定し、加振時の加速度分布状況を計測するとともに、振動台には動変位計をセットして変位量・周期などを測定した。

(2) 石垣模型

石垣模型は図—2に示したように、コンクリート床に固定した振動台上に積載した木製土槽上に、加振方向が石垣面鉛直方向となるように構築した。すなわち土槽表面に房総山砂($U_c=D_{60}/D_{10}=0.56\text{mm}/0.33\text{mm}=1.7$, $\omega_N=3\%$)を5cm敷き均した後、石垣角度や石積み技法などに合わせて形状寸法などを加工した根石代わりの木片を設置し、その上に所定積み石を所定の技法、角度、高さに合わせて一段ずつ、背面に山砂を充填締め固めながら積み上げて作成した。

また今回用いた振動台は幅49.0cmで土槽幅は64.0cmであるため、模型石垣側面と背面は図—2に示すように、 $t=12\text{mm}$ の合板で幅30cmの枠(幅が変化しないようボルト・ナットで拘束)を設け、その側壁間に石積みする形とした。

なお今回実験に用いた積み石は図—3に示すように石面寸法5.0cm×6.0cm、控え長12.0cmの間知石状とし、石積み技法は図—4に示すように芋積み、煉瓦積みおよび落し積みの3様式とした。

(3) 実験条件

今回の振動実験では、石垣安定要因を形状寸法に関するものと構成要素の物性値に関するものに区分したとき、主として形状寸法を取り上げ、石垣高さH・石垣角度 θ 、石積み技法Tおよび積み石材質S(単体重量の差)の4要因を取り上げた。

これら4要因を各3水準ずつの全組合わせで実験しよう

*keyword: 石垣 石垣安定 振動実験 実験計画法

** (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 木更津市清見台東 2-11-1)

*****学生会員 木更津高専 専攻科生

表一 1 石垣振動実験機材一覧表

名称	諸元・仕様
1.振動台	490×730×高さ290mm 最大積載重量 100kg 振動方向 水平1方向 振幅±30mm 周期0.8～0.4sec
2.木製土槽	寸法 内容 640×830×深さ85mm
3.模型積み石	石面 5.0×6.0cm 控え長 12.0cm 背面3.0×4.0cm
	大谷石 御影石 鉄 鉛 各250個
	(単重) 1.30 2.60 7.80 13.60 (tf)
	(比率) N=0.50 1.0 3.0 5.2 g
	(重量) 435g 689g 1880g 2844g (g/個)
4.変位測定フレーム	L 50×50mm チャンネル型
5.測定機器	
①データロガー	TDS-302 +パソコン(データ処理ソフト込み) 1台
②スイッチボックス	50ch 1台
③動歪測定器	4ch 1台
④加速度計	最大 1.0g (980gal) 3個
⑤動変位計	ストローク ± 50mm 1個
⑥コンベックスルー	1個
⑦水準器	1個
⑧ストップウォッチ	1個

とすると、計 81 回の実験が必要となる。ここで実験効率を高めかつ得られた結果を統計的手法により処理して、より有用な情報を得るために、実験計画法 L9 を適用して、9 回の実験を計画した。要因と水準の組合わせを表一2 に示す。H、 θ はそれぞれ H=30,40,50cm、 θ =60,70,80° となっている。なお No10,11 は No2 に対して、形状寸法を同一としておき、積み石材料を石、鉄、鉛と変化したときの変状状態の差を直接的に比較するための補充実験である。

(4) 模型実験における相似則について

本実験は実在石垣の標準的寸法が高さ H=10.0m 積み石寸法石面 50.0cm×60.0cm と想定し、縮小比 1/10(幾何相似率 1/10)のモデルでの実験を計画した。従って積み石模型は図一3 に示したように石面で 5.0cm×6.0cm の寸法とした。

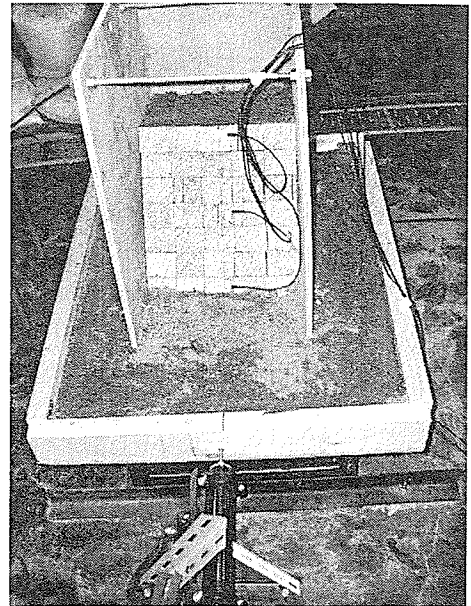
このとき、実物 (P) とモデル (m) とは幾何学的に相似であるので、 P, m はそれぞれの座標面上での相似の位置に存在する。

各座標の長さが基準長さに対して $1P, 1m$ で $1P=N \cdot 1m$ (縮尺が $1/N=1/10$) とすると、相似のための必要条件是 $r_m=N \cdot r_p$ 、 $(fx, y)_p = (fx, y)_m$ である。すなわち、今回の縮小モデル実験では、積み石の単位体積重量 r_m が $N \cdot r_p = 10 \times 2.6 = 26.0$ (tf/m³) であれば重力相似条件も満足することになり、実験で得られる変位や応力の大きさはそのままの実大規模の値とし評価しうる。しかし石材として鉛を用いても $N=5.2$ であり、現実には $N=10$ を満足する材料を用いることは出来ない。そこで今回は、相似率を考慮した結果が得られるように $N=10$ のときの状況を外挿的に推定するために、積み石単体重量を花崗岩・鉄・鉛の3段階に変えた材料を用いる実験を組み込むことにした。(表一1 に示した大谷石を用いた実験は参考とした。)

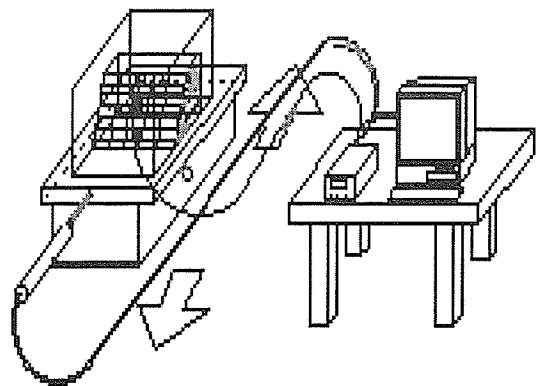
3. 実験結果と解析

(1) 石垣表面の変状

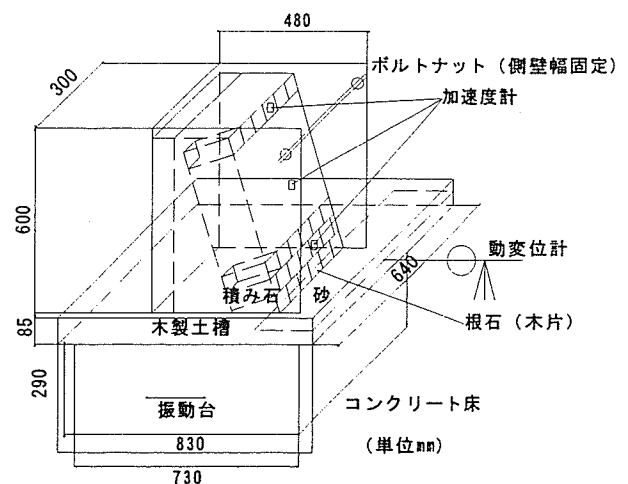
今回の 11 回の実験結果の石垣表面変位状況は振動ステップ 1～4 ごとに図一5 に示す事例のようにとりまとめ、沈下面積(+A)と腹み出し面積(-A)とに分けて表一3 に



写真一 1 石垣振動実験 (撮影: 田中, 2002)



図一 1 実験系統図 (作成: 田中)



図一 2 石垣模型振動実験概念図 (作成: 田中)

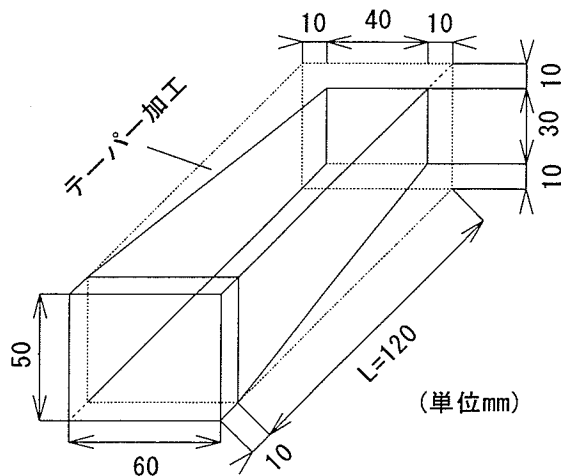


図-3 積み石模型寸法 (作成：田中)

示す。図-5 において細線が太線より左にある場合は腹み出し現象が生じたこと、右にある場合は沈下が生じたことを示している。そして A の値が-の場合は腹み出し断面積、+の場合は沈下断面積を示す。この図から次のようなことが読み取れる。

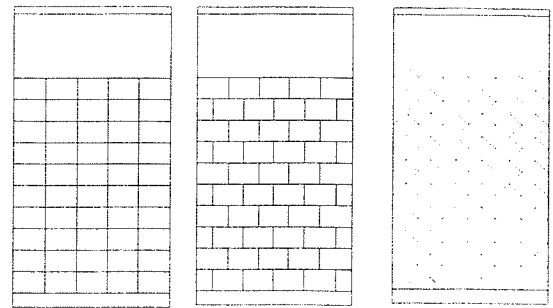
- ①一般に振動ステップ 1~2 までは 4 要素の条件にかかわらず沈下が卓越し、腹み出しが生じることは少ない。
- ②振動ステップ 3~4 になると、どの実験条件でも腹み出し現象により事実上崩落状態となった。
- ③実験 No2,10,11 は、 $H=40\text{cm}$ 、 $\theta=70^\circ$ 、 $T=\text{煉瓦積み}$ の 3 要因を同一とし、積み石材料を石、鉄、鉛と変化した実験条件となっている。A の変化をみると、ステップ 1,2 の沈下、3,4 の腹み出し量は図-6 のように整理され、A は積み石材料密度が石から鉄、鉛と大きくなるほど大きくなることが示された。また、ステップ 4 レベルの振動により、相似率 $N=10$ のときの $H=4.0\text{m}$ 程度の実大石垣では、腹み出し最大水平変位量は $6.1\text{cm} \times 10=61.0\text{cm}$ 程度と推定されることが示された。

(2) 動測定結果

加速度および動変位測定結果例を図-7 に示す。この場合の動変位測定例では、振動台の最大加速度は振幅 $a=\pm 3.2\text{cm}$ 、周期 $T=1.0$ 秒だから、加速度 $\alpha=-\omega^2 x$
 $=-(2\pi/T)^2 \cdot a \cdot \sin(2\pi/T \cdot t + \phi)$
 $\therefore \alpha_{\max}=-(2\pi/1.0)^2 \times 3.6=142\text{gal}$

一方石垣面の加速度実測最大値は、上、中、下でそれぞれ 400,300,300gal 程度で石垣断面内で大幅に増幅され、石垣上部ほど大きいことが分かる。次に $H=50\text{cm}$ の実験 No3,6,9 のステップ 1~4 における加速度実測値と設置高さ h との関係を図示すると図-8 のようになる。加速度計設置高さが高いほど(=石垣高さが高いほど)加速度 α が大きくなる傾向が明瞭に認められる。

ここで現存する明石城石垣における、震災後の調査によると、天端石が水平方向に数 m 離れた位置に飛ばされていたが、これは拘束の無い天端石が大きな水平方向加



芋積み 煉瓦積み 落し積み

図-4 石積み技法説明図 (作成：田中)

表-2 石垣振動実験の要素と水準 $L_9(3^4)$

実験No	要素	1	要素	2	要素	3	要素	4
		積み石材料S		高さH(cm)		角度 $\theta(^{\circ})$		石積み技法T
1	1	石	1	30	1	60	1	芋積み
2	1	石	2	40	2	70	2	煉瓦積み
3	1	石	3	50	3	80	3	落し積み
4	2	鉄	1	30	2	70	3	落し積み
5	2	鉄	2	40	3	80	1	芋積み
6	2	鉄	3	50	1	60	2	煉瓦積み
7	3	鉛	1	30	3	80	2	煉瓦積み
8	3	鉛	2	40	1	60	3	落し積み
9	3	鉛	3	50	2	70	1	芋積み
追加10	2	鉄	2	40	2	70	2	煉瓦積み
11	3	鉛	2	40	2	70	2	煉瓦積み

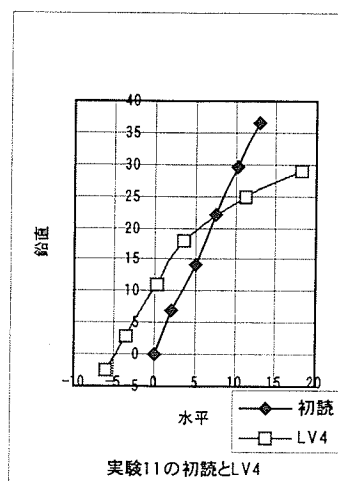
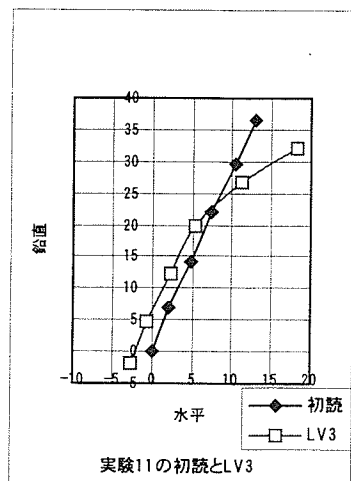
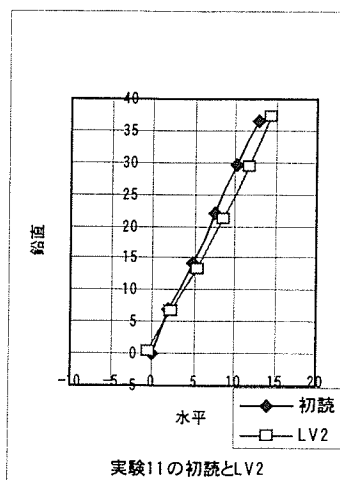
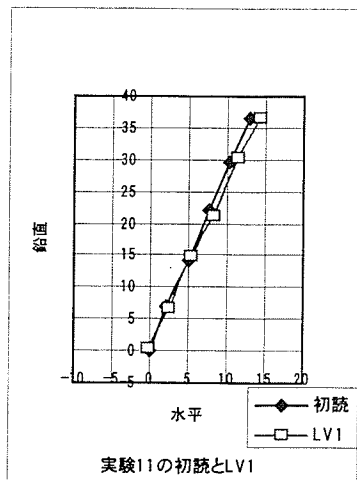
速度を受けた結果であり、実験結果と合致する。

(3) 要因分析

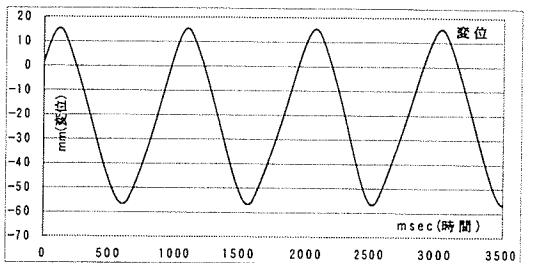
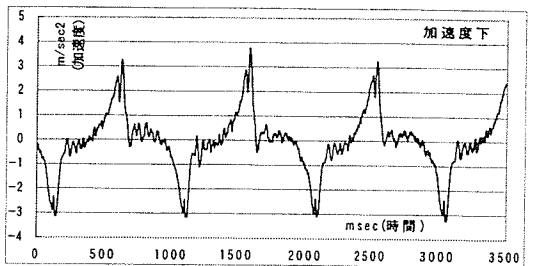
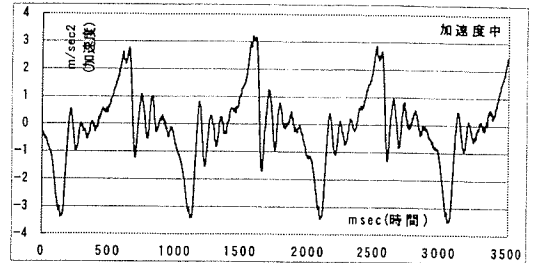
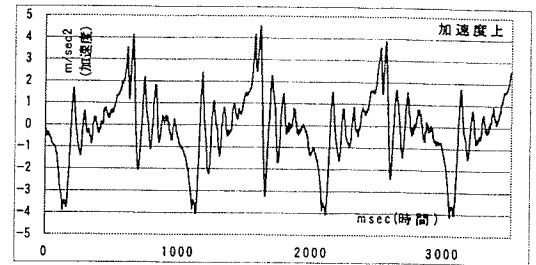
表-3 に示した A の値の大小は、その実験条件に対応した石垣の安定性を示す指標と考えられる。以下にステップ 4 のデータを用いて要因分析した手順を示す。

なお実験 No. 3,6,9 における積み石はそれぞれ石、鉄、鉛である。石垣模型全重量が 80kg 程度の No. 3 実験ではステップ 1 から 4 へ加速度を順次増加させて加振させることができたが、No. 6,9 実験では 120kg、180kg にもなり、振動台の性能から、No3 実験のステップ 1,2 のようにゆっくりした小さな加速度を加えることは出来なかった。しかし全実験ともステップ 4 ではほぼ同程度の加速度状態での実験を行うことができた。

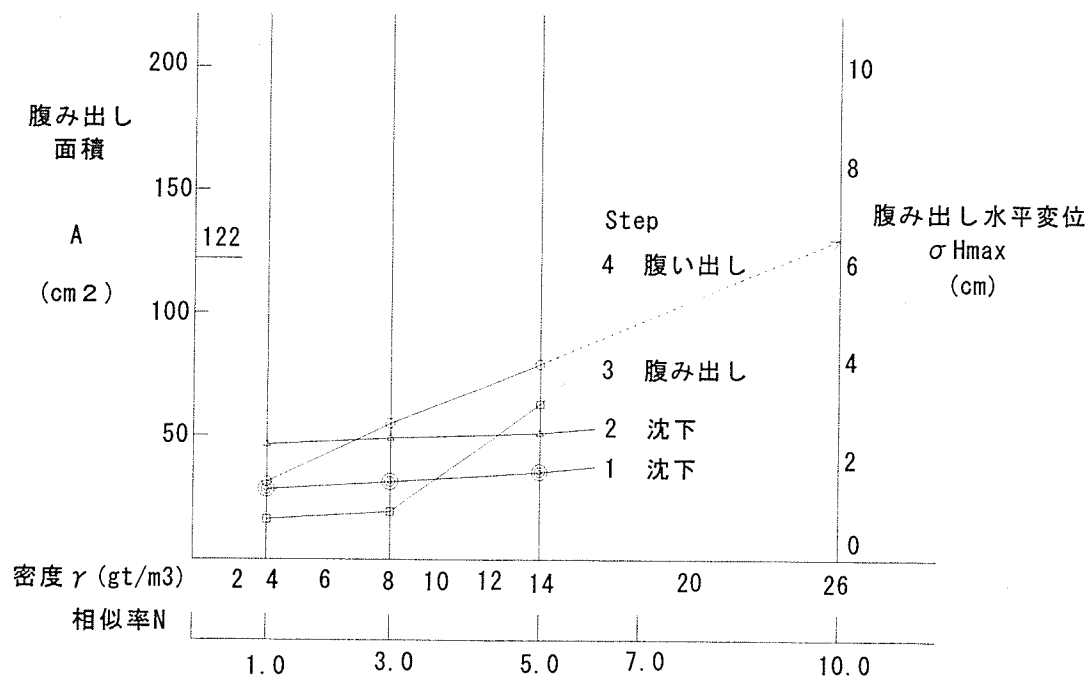
したがって特にステップ 1~2 のデータは実験 No により加えた加速度がかなり異なることとなった。石垣安定検討はステップ 4 の腹み出しが顕著となった状態のデータを用いた解析結果を重視すればよいと考えられる。しかし本論ではステップ 1~3 のデータによる解析結果も重要な参考資料になると考え、データ解析は同等に行った。



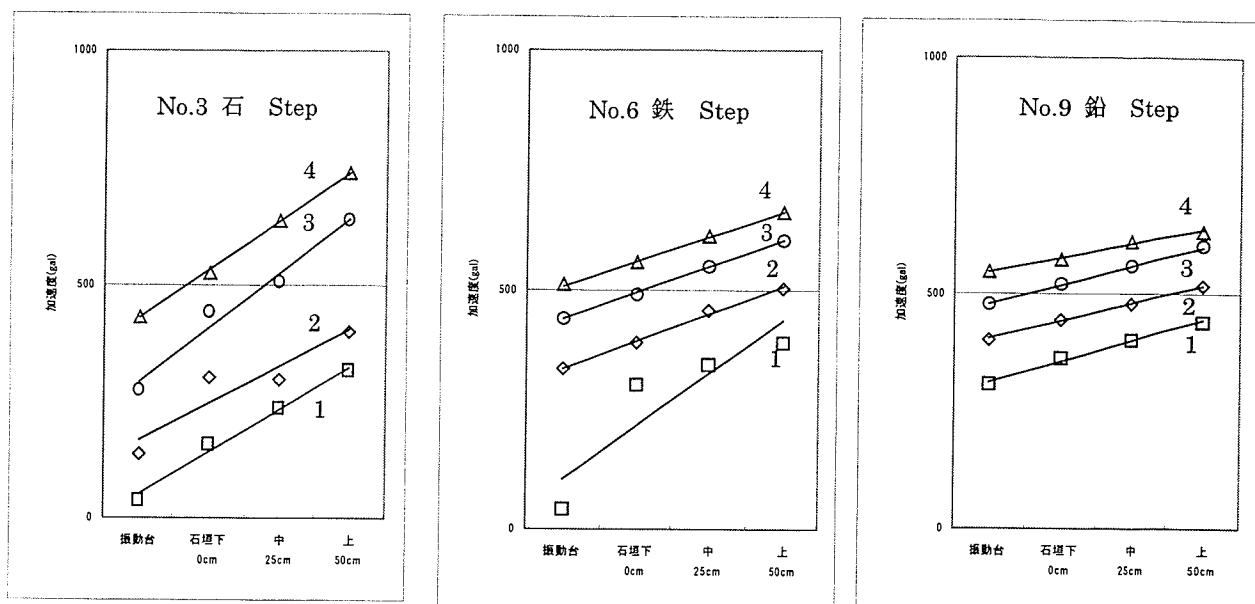
図一5 石垣表面変形状況 (実験 No11) (作成：田中)



図一7 動的測定結果例(NO3LV2) (作成：田中)



図一6 相似率を考慮した N=10 時の A, σ 推定図 (作成：田中)



図—8 加速度分布図 (作成：田中)

表—3 石垣模型振動実験一覧表
(A:変形面積 cm^2) (+A:沈下, -A:腹み出し)

		実験No	条件	実験No	条件	実験No	条件
		A+	A-	A+	A-	A+	A-
		No.1石30cm60° 芋		No.4鉄30cm70° 落		No.7鉛30cm80° レンガ	
step1	step3	20.1	2.3	22.9	4.4	26.4	42.9
step2	step4	35.3	12.7	38.0	20.5	40.3	50.8
		No.8鉛40cm60° 落		No.2石40cm70° レンガ		No.5鉄40cm80° 芋	
step1	step3	23.6	3.1	25.4	15.6	27.8	57.6
step2	step4	39.0	14.5	42.7	28.8	43.6	60.7
		No.6鉄50cm60° レンガ		No.9鉛50cm70° 芋		No.3石50cm80° 落	
step1	step3	27.4	4.3	30.4	17.6	32.7	60.9
step2	step4	46.3	18.7	51.6	31.3	62.6	72.6
		No.10鉄40cm70° レンガ		No.11鉛40cm70° レンガ			
step1	step3	27.7	18.0	29.5	55.3		
step2	step4	44.1	50.6	46.4	72.0		

表—4 分散分析表 (Step4)

要因	自由度	ss	ms	ms/e	寄与率 ρ (%)
S	2	57.6	28.8	3.8	1.1
H	2	248.4	124.2	16.3	6.2
θ	2	3446.1	1723.0	226.7	91.1
T	2	15.1	7.6=e		

ΣA_1	114.1	84.0	45.9	104.7
ΣA_2	99.9	104.0	80.4	98.3
ΣA_3	96.9	122.6	184.1	107.6
Σ			310.6/9=34.5(=m)	
A_1^2	13018.8	7056.0	2106.8	10962.1
A_2^2	9980.8	10816.0	6496.4	9662.9
A_3^2	9331.6	15030.8	33892.8	11577.8
Σ	32330.4	32902.8	42496.0	32202.8
$CF=(\Sigma A_i)^2/9=10719.2$				
$ST=\Sigma (A_i)^2-CF=3767.4$				
$S=(S_1^2+S_2^2+S_3^2)/3-CF=57.6$				

$$H = 248.4$$

$$\theta = 3446.1$$

$$T = 15.1$$

ここで分散分析表としてまとめると表—4 のようになる。
次に主効果を求めると次のようになる。

$$S_1=m+A_1/3=72.5$$

$$S_2=m+A_2/3=67.8$$

$$S_3=m+A_3/3=66.7$$

同様に

$$H_1=62.5 \quad \theta_1=49.8 \quad T_1=69.4$$

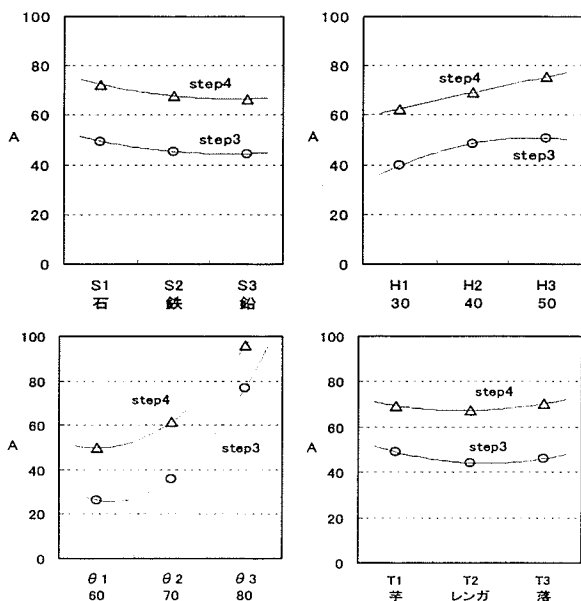
$$H_2=69.2 \quad \theta_2=61.4 \quad T_2=67.3$$

$$H_3=75.4 \quad \theta_3=95.9 \quad T_3=70.4$$

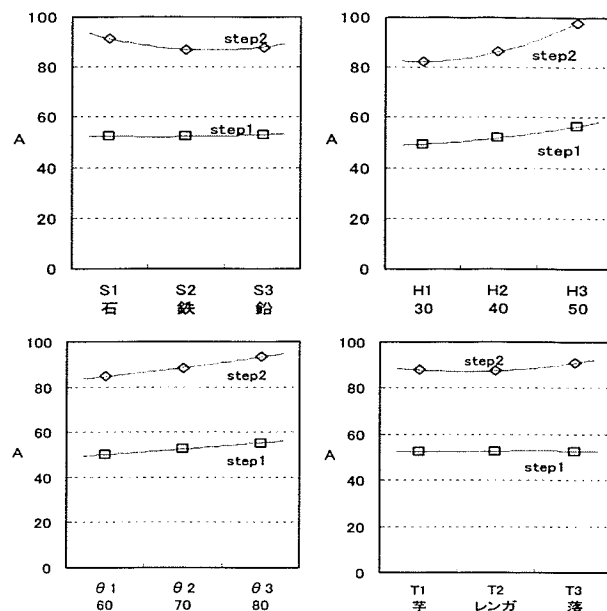
上述と同様の計算をステップ 3,2,1 についても行い、
腹み出しが生じたステップ 4,3 および沈下が生じたステップ 2,1 に分けて、主効果グラフとして図示すると、図—9,10 のようになる。これらから以下のようなことが読み取れる。

①石垣面腹み出しに対する4つの要因の影響度合は水準1から3に至る間のAの変化の大きさを評価され、振動レベルが高い step4,3 の図—9 より石垣角度 θ が他のS,H,T よりも非常に大きい影響力を有していることが分かる。このことは、表—4 に示した寄与率 ρ が θ で 91.1% と圧倒的に大きいことから理解される。すなわち石垣の地震時安定性(抵抗力)は、積み石材単体重量、高さ、石積み技法および石垣角度の4要因を考えたとき、石垣角度が支配的であることが示された。

②石垣面沈下に対する4つの要因の影響度合は水準1から3に至る間のAの変化の大きさを評価され、振動レベル 2,1 の図—10 より、H が θ 、S、T よりも大きい影響力を有しているが、支配的に大きな影響力を有してはいないことが分かる。



図—9 腹み出し量 (Step4,3) 主効果グラフ (作成: 田中)



図—10 沈下量(Step2,1) 主効果グラフ (作成: 田中)

4. 考察

今回の実験は 4 要因 3 水準の実験を繰り返し実験を行わない $L_9(3^4)$ に組み込んで実施した。したがって、表—4 で説明すると、要因として誤差項の e が分離できないことになり、 ms の最小値を示す T が e に統合できると考え、 $T=e$ として F 検定した。その結果 ms/e の値が大きくなり、検定精度が低下した。もし 9 回の実験を各 2 回ずつ実施したり、又は $L_{27}(3^{13})$ のように誤差項を要因に割当てるとような実験計画を行えば、 e の自由度 ϕ が大きくなりしたがって e の ms が非常に小さくなって ms/e の値が大きくなって検定精度が格段に上昇することは考えられる。しかし今回のような研究に対して実験的研究を行う場合、一般には実験計画法を適用せず、ある要因の影響などを検討する場合には、本実験における補充実験 No. 10, 11 のように、他の要因を固定して目的とする要因のみ変化させるような手法が用いられている。このような実験では図—6 のように、ある条件での積み石単体重量と A との関係図のような結果が得られるが、他の条件ではどうなるかは不明である。

従って、今回は L_9 という最小の実験数であったが、今後は繰り返しを行ったりして誤差項 e を分離できる実験計画に組み込めばより一般性のある実験研究を行うことができると考えられる。

なお今回の実験では、振動台の能力から石垣高さ等に制限があり、幾何相似比 $N=10$ であっても実高は $H_{max}=10 \times 50.0\text{cm}=5.00\text{m}$ 程度であった。従って相似率 N を 20 程度とし、模型実験高さを 70cm とすれば実高 $H=14.00\text{m}$ となるが、模型石垣寸法は、 $3.00\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ と、今回の $1/8$ に縮小するとともに、重力相似も $2.60(\text{tf}/\text{m}^3) \times 20=52.0(\text{tf}/\text{m}^3)$ という材料を用いる必要がある。このような場合には遠心力載荷装置のような実験設備を用いる必要があるが、現時点では困難である。従って、本研究とは別途進めている FEM による数値解析

実験のような手法による研究成果等と比較検討していく所存である。

5. まとめ

今回の石垣模型振動実験から石垣の振動時挙動として次のような傾向が把握された。

①石垣安定要因のうち、積み石単体重量、角度、高さおよび石積み技法の 4 要因をとり上げそれぞれを 3 水準として、実験計画法 L_9 に従って実験した。石垣の腹み出しに対しては、石垣角度が支配的であり、地震時抵抗力は θ により大きく影響されることが示された。

②重力相似を考慮して $\alpha=400\text{gal}$ 、 $H=4.0\text{m}$ 時の腹み出し量を外挿時に推定すると、 6.1cm と推定された。石垣下部から伝播された地震波は、上部ほど大きな加速度を受けるので天端石が容易に崩落する。

あとがき

本研究は、H14 年度科研費および H13 年(株)鹿島学術振興財団研究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・データ整理などは木更津高専環境都市工学科、浅利智哉、綾部裕一君たちの協力を得たことを記し、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、pp.9~20、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) 田口玄一；『実験計画法』上下、丸善(株)、1968.10
- 4) 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、2003.6