

FEM-3D(L₂₇)による石垣の動的挙動の数値解析実験*

Numerical Analysis Experiment of Dynamic Behaviour of Masonry Walls using FEM-3D(L₂₇)

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

By Kunihiro TANAKA, Yoji NITANI, Yoshikatsu KOBAYASHI, Yusaku TANI, Shinya KIMURA

要旨: 本研究は筆者らが提案してきた「石垣積み石間に仮想間詰め材を挿入することにより、石垣を連続体として扱う手法」を用いて、石垣断面の形状寸法および構成要素の物性値を変化させたときの石垣の振動性状および石垣安定に対する影響傾向を把握しようと試みた数値解析実験結果についてとりまとめ考察したものである。解析は市販FEMソフトを用いて、実験計画法L₂₇に組み込んで実施した。

今回取り上げた要因は石垣高さH、勾配θおよび積み石S、仮想間詰め材M、裏込めB、原地盤Gの弾性係数の6ヶであり、基盤から石垣面直角x方向および地盤上下z方向に加速度を入力したときの個々の積み石に生じる変位および加速度、石垣面孕み出し量A(=石垣安定性)に対する考察および石垣断面の固有周期解析などを行った。得られた結果は次のように要約される。

- ①GL-50mでα=300galの加速度入力を行ったところ、石垣最下段で水平変位δ=±100mm、α=100galであったが、石垣高さが高くなる程増幅し、H=21.0mではδ=±200mm、α=150galとなった。
- ②石垣構成要素の物性値(=材料種類・締固め程度など)が石垣断面の固有周期に与える影響は6要因とも寄与率ρ=10~20%程度で、その周期数は1次で3~7Hzとなった。
- ③石垣断面が地震時に孕み出し(=安定性)を生じる要因はH、θの形状寸法が主で、物性値はさほど大きな影響力はない。

1. まえがき

現存する重要な文化遺産である城郭石垣は老朽化が著しく、特に地震時における崩壊の危険性が高い。従って石垣の動的挙動の研究が重要であるが、実験による方法は種々の面から困難でありまた、理論的研究もそのモデル化・インプット定数・境界条件の設定およびその妥当性の検証など非常に難しい。筆者らはこの困難な課題に対して、単純化した実験や理論的手法により研究を続けてきた。本報告も、筆者らが続けてきたような研究を積み重ねていく事が、この困難な課題の究明に近づく有力な方法であるとの立場から研究とりまとめたものである。

石垣の安定に関与する要因は数多く、かつ複雑に絡み合っていて、これらの効果や影響傾向などを評価することは非常に難しい¹⁾。本研究はFEM-3Dソフトを用いて石垣の静的・動的挙動を数値解析実験した結果をとりまとめたものである。

本報告は100m×80m×深さ50mの地盤上に、高さH・勾配θおよび積み石S・仮想間詰め材M・裏込めB・原地盤Gの物性値を種々に変化させた石垣を構築し、GL-50mから地震波を

入力したときの石垣断面の振動特性・固有周期及び石垣の孕み出し量A(=安定性)に対する6要因の影響傾向度合いなどを検討した結果をとりまとめたものである。

2. 研究方法

(1) 石垣断面のモデル化と解析ソフト

石垣の断面解析に当り、石垣は独立した石塊が間詰め材を介しながら積み上げられているため、石垣全体を連続体として扱うことには疑問もある。そこで積み石が個々に独立しているという意味において、個別要素法の適用も考えられる。しかし「摩擦のない平面上の所定の境界内に確率的に詰め込まれた種々の直径を持つ多数の粒子(弾性円盤)が移動したときに発生する粒子間圧力・摩擦力・弾性反発力などを、Newtonの運動方程式を基礎に解析する」²⁾ 個別要素法の原理を考えたとき、本手法は石垣断面解析には適していない。

そこで石垣断面解析には、多くの分野で実績のあるFEMを適用することを前提に、石垣断面が連続体として扱えるように工夫することも有効と考え、次のような仮定条件を想定した³⁾。

仮定1 積み石上下・左右には、図-1に示すような薄層の(仮想)間詰め材が介在している。

間詰め材は積み石間に挿入して石垣の安定性を高めるものであるが、積み石の形状寸法や積み石技法などに対応して複数の大小様々な石材が用いられ、かつこれらの接触・拘束状況は千差万別である。

そこで、石垣断面の数値解析を実施するに当り、積み石周辺は、空隙の大きさ(または高さ)・密度(または強度)および空

* Keyword: 石垣安定, FEM-3D, 数値解析, 実験計画法

** 正会員 博(工学) 木更津高専 教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)

*** 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)

**** (株)小林石材工業 代表取締役

***** 学生会員 木更津高専専攻科生

***** 学生会員 日本大学生産工学部大学院生

隙外表の接触状況の3者により規定される仮想の間詰め部材を介して、全体は連続体として扱うことができると想定した。

この仮想間詰め部材は非線形材料とし、その物性値や形状寸法を変えることにより、図-1に示すように石積み技法や間詰め状態の良否などを定量的に表示できると考えた。

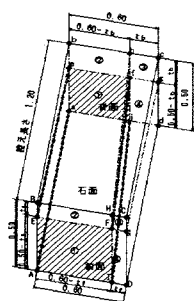
仮定2 石垣断面を FEM 解析するに当たってのメッシュ割りは、積み石および間詰め部材は図-1に示したように独立した8面体要素を基本とし、裏込め部および原地盤部も8面体の連続体として扱う。

今回数値解析実験した石垣-地盤系全体のメッシュ割り図例を図-2に例示する。上記の仮定条件を設定しておけば、市販 FEM-3D ソフトを適用することが可能であり、今回は FEM 3D-SAS および RISA を用いた。

(2) 石垣-地盤系解析断面の形状寸法

本研究は図-2に示すように $x=100.0\text{m}$, $y=80.0\text{m}$, 深さ $z=50.0\text{m}$ の地盤上 (今回は x 方向で $1/2$ に切断) に、図-3のように要素分割される $H=7.0, 14.0, 21.0\text{m}$, $\theta=60.0, 70.0, 80.0^\circ$ の全組み合わせ (9通り) 条件となる石垣が存在する条件を設定して、振動解析を行った。

なお積み石は図-1に示すように、石面 $60.0\text{cm} \times 50.0\text{cm}$, 控え長 1.20m でテーパ加工されている形状寸法とした。ここで既存の積み石は一般に野面積・打込石・切込石に区分され、大小様々な寸法のもの組み合わせられて積み上げられている。これらをモデル化して数値解析するためには、積み石の形状寸法は基本的に変えずに、図-1に示す間詰め部材要素の大きさと物性値を変えることにより石積み技法や間詰め状態の良否などを簡略化して表現できると考えた。



	前面	背面
t1 野面積	t _f 0.05	t _b 0.15
t2 打込み接ぎ	0.03	0.10
t3 切込み接ぎ	0.01	0.05

積み石要素	接点No	AEFJaeFi
間詰め部材要素	EBHFebhf	FGGfghg
	IFGDifgd	

(単位 m)

図-1 積み石と間詰め部材構成モデル (作成:田中)

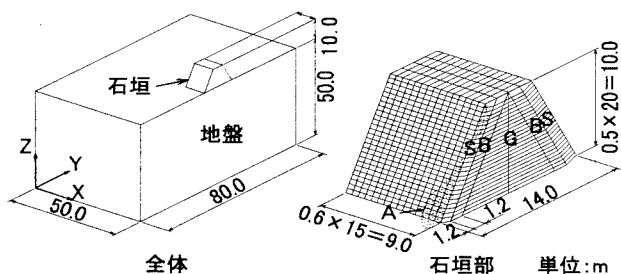


図-2 石垣 FEM 解析メッシュ割り図 (作成:田中)

(3) 実験計画法⁴⁾ の適用

本研究では石垣構成要素のうち、 $H \cdot \theta$ と $S \cdot B \cdot G \cdot M$ の計6要因を取り上げて、これらの値を夫々3水準に変化させたときの石垣安定への影響傾向などを検討することを主眼とした。6要因3水準の検討を全ケース行なうと729回の計算が必要である。この研究のように数値解析により実験を行なうことは、一般の実験のように、各種誤差を含んだバラツキを有する結果が得られる場合は異なり、ある条件で何回計算を行なっても結果は同一となる。そこで実験回数を大幅に減じかつ得られた解を統計処理してより有効な情報が得られる手段として、実験計画法を適用して数値実験を行なうこととした。

今回適用した手法は $L_{27}(3^6)$ 型で、6要因各3水準の実験を27回の数値実験で行なう手法である。27回の実験に対する要因と水準の組み合わせを表-1に示す。

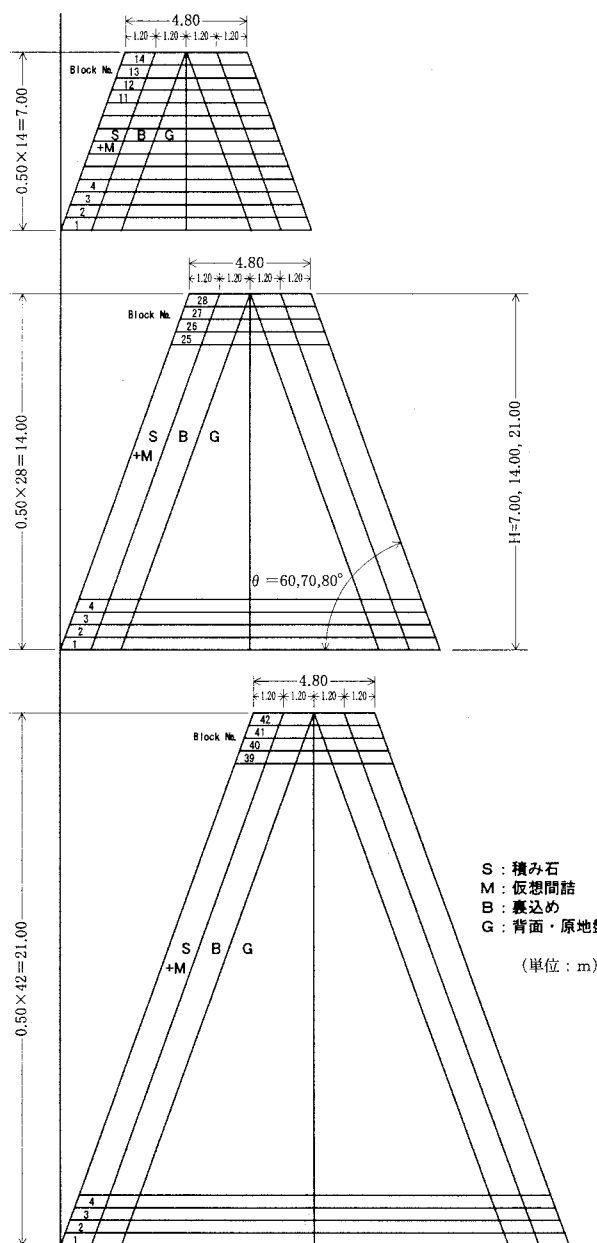


図-3 石垣断面形状寸法とメッシュ割り図

表-1 L₂₇実験要因・水準組み合わせ表

No.	要素													解析条件								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Static	Dynamic						固有周期	
	H	θ	H・θ		M	H・M		θ・H	S	B		G			x方向加速度 (gal)			z方向加速度 (gal)				
	高さ	傾斜		e1	間詰		e2		積み石	裏込め	e3	地盤	e4		100	200	300	100	200	300		
1	1	1			1				1	1			1	1	(解 析)	2	3	4	5	6	7	8
2	1	1			2				2	2			2									
3	1	1			3				3	3			3									
4	1	2			1				2	2			3									
5	1	2			2				3	3			1									
6	1	2			3				1	1			2									
7	1	3			1				3	3			2									
8	1	3			2				1	1			3									
9	1	3			3				2	2			1									
10	2	1			1				2	3			2									
11	2	1			2				3	1			3									
12	2	1			3				1	2			1									
13	2	2			1				3	1			1									
14	2	2			2				1	2			2									
15	2	2			3				2	3			3									
16	2	3			1				1	2			3									
17	2	3			2				2	3			1									
18	2	3			3				3	1			2									
19	3	1			1				3	2			3									
20	3	1			2				1	3			1									
21	3	1			3				2	1			2									
22	3	2			1				1	3			2									
23	3	2			2				2	1			3									
24	3	2			3				3	2			1									
25	3	3			1				2	1			1									
26	3	3			2				3	2			2									
27	3	3			3				1	3			3									

表-2 数値実験の物性値に関する要因と弾性係数の水準値 (E : kgf/cm²=9.8×10 kPa)

要因	記号	水準		
		1	2	3
積み石	S	1,000	10,000	100,000
		・亀裂の多い風化著しい岩 ・軟岩	・風化中程度の岩 ・中硬岩	・新鮮な風化少ない岩 ・硬岩
裏込め	B	100	1,000	10,000
		・空隙多ルーズ ・強度小さい材料がゆる締め	・空隙中程度でやや締固め	・空隙少なくよく締固められている ・新鮮な良質材が十分締固め
地盤	G	200	2,000	20,000
		・粘性土やゆるい砂質土の強度小さい地山	・強度中程度の地山	・砂質土～砂礫のよく締まった強度大きい地山
間詰め	M	300	1,500	7,500
		・間詰めが少なくゆるく空隙大(河原丸石)	・間詰め中程度で空隙中程度	・間詰め密でよく締まっています空隙小(砂礫コップ)

(4) 石垣構成要素の物性値

今回取り上げた4要素の材料物性値は、夫々の1～3の水準変化が土木工学ハンドブック等を参考に、一般的に考えられる範囲の最小～最大値となる弾性係数 E の値となる表-2のように設定し、この E に対応するようにポアソン比ν・せん断弾性係数 G・体積弾性係数 Kなどを想定した。今回の解析に用いた物性値を一覧表として表-3に示す。水準1が最小で、3を最大とした。

なお、各要素の応力-歪関係は、積み石は線型モデル、裏込め・原地盤および間詰めは非線型モデルで表わされるとした。

また間詰め部材は仮想材料であるので、その物性値の設定は

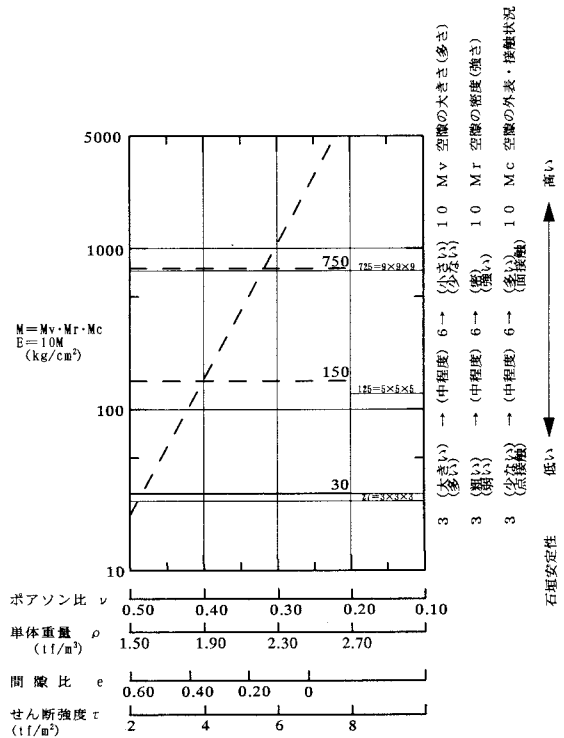


図-4 間詰め材の物性値推定図

表-3 FEM解析に用いた物性値

記号	名称	単位	要区区分			積み石S (線形)			嵩込みE (非線形)			地盤G(非線形)			間詰めM (非線形)		
			水準	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	100,000	100	1,000	10,000	200	2,000	20,000	300	1,500	7,500			
		Pa(N/m ²) × 10 ⁷	10.00	100.00	1000.00	1.00	10.00	100.00	2.00	20.00	200.00	3.00	15.00	75.00			
ν	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			
		N/m ³ × 10 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			
G	せん断弾性係数	Pa(N/m ²) × 10 ⁶ =E/2·(1+ν)	-	-	-	3.45	35.70	370.00	6.76	69.40	714.00	10.10	55.10	291.00			
K	体積弾性係数	Pa(N/m ²) × 10 ⁷ =E/3·(1-2ν)	-	-	-	3.33	16.70	111.00	16.70	55.60	333.00	25.00	17.90	59.50			
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	=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	10.00	20.00	30.00	0.20	0.40	0.60			
		Pa(N/m ²) × 10 ⁶	-	-	-	2.00	4.00	6.00	10.00	20.00	30.00	2.00	4.00	6.00			

現実問題として実験的にも求めることは非常に困難であるので、今回新たに想定した図-4を用いて行なった。その手順は次に示すとおりである。

手順1 間詰め部の特性は空隙の大きさ(多さ)Mv・密度(強さ)Mrおよび外表接触状況Mcの3者で表示できると考えられ、夫々が石垣安定に対し最も好ましくない状態を3、最も良好な状態を10と評価して、3者の相乗値をMとする。

手順2 間詰め部の弾性係数はE_M=10・M(kgf/cm²)で求める。

手順3 ポアソン比ν・単体重量ρ・間隙比eおよびせん断強度τはE_MまたはEとの相関が図-4に示す傾向があると想定してこの図を用いて求め、またせん断弾性係数Gと体積弾性係数Kは表-3に示したようにEとνとから計算して求める。

ここで手順1で求めたMは大きさMv、密度Mrおよび外表接触条件Mcで想定される仮想間詰め部の物性値のうちの仮想弾性係数Eを推定する手法として想像したものである。すなわち、Mv、Mr、Mcのそれぞれが10に近い程仮想材の材質的強度は大きくなるので弾性係数Eは大きくなり、さらに3者の相乗値(=M)を10倍した値が仮想弾性係数となると想定した。一方この仮想間詰め部材のν、ρ、eそれぞれの推定値は上で求めたMまたはEと図中の破線で示される相関関係があると想定した。すなわち①Mの最小値27の時のEは270(kgf/cm²)であり、この状態の仮想間詰め部材は飽和粘性土のように強度は小さいがポアソン比νは0.49程度である。一方Mの最大値1,000のときのEは10,000(kgf/cm²)であり、この状態はよく締め固まった砂質土～砂礫のように強度はかなり大きい、νは0.30程度となる。また最小～最大間はMを対数目盛、νは算術目盛としたとき直線関係がある。②M=27のときの単体重量ρは飽和粘性土の1.60(tf/m³)程度、M=1,000のときのρはよく締め固まった砂質土～砂礫のようにγ_t=2.30程度となる。また両者間には対数関係がある。③M=27のときの間隙比eは粘性土の0.55程度、M=1,000のときのeは砂質土の0.10程度となる。また両者間には対数関係がある。④M=27のときのせん断強度τは粘性土程度の2.5(tf/m²)、M=1,000のときのτは6.0

(kgf/cm²)となる。また両者間には対数関係がある。

(5) 石垣安定の評価基準

石垣断面の安定性は、例えば円弧すべり法のような手法によりその断面の安全率Fsなどが求められれば、その計算結果をそのまま使用して、本研究の目的である石垣仕様や石垣構成要素の物性値の石垣安定に対する影響評価に用いることができる。しかし現在その手法は開発されていないので、本研究はFEM手法により石垣断面構成要素の応力・変位等を求めてこれらを検討して安定性評価を行うものである。各座標方向の変位等を検討した結果および石垣の安定性は一般には腹み出し量で判断できる場合が多いことを考慮に入れて、本研究でも石垣表面の初期状態からの水平(石垣面鉛直)方向変位量の積分値(=面積A)を用いることとした。

(6) 地震力

石垣-地盤系に地震力を加えるに当たり、伝達してくる加速度の大きさにより石垣に生じる変位の大きさがどのように異なるかおよび石垣断面の固有周期はどの程度であるかなどを知ることがを主眼とした。そこで、表-1～3に示した計算条件に対して、図-2に示した地盤最下部におけるx,z方向からそれぞれ最大加速度α=100, 200, 300galの正弦波を夫々10秒ずつ入力し、加速度レベルごとに石垣面の水平(石垣面鉛直)方向変位量を求めた。

なお各加速度レベルにおける振幅a、周期Tは次のように設定した。

100 gal	T=0.5 sec	a=0.63 cm
200 gal	T=0.5 sec	a=1.26 cm
300 gal	T=0.5 sec	a=1.90 cm

3. 数値実験結果と考察

(1) 概要

地盤振動による石垣面の振動は積み石ごとに時々刻々と変化するが、今回は1/16秒ごとに積み石全てのx方向加速度・変位量を計算し、それを整理図式して振動モードを検討したり、元の石垣断面からの変位面積Aが最大となる時刻(実験No.1～

No.27 において異なる) のAをその実験条件の解として、要因効果の検討などを行った。今回計算した解は表-1右に示すように、常時1ケースとx、z方向加速度が100、200、300galの6ケースおよび固有周期解析1ケースの計8通りである。

(2) 積み石の変位・加速度波形

図-5は石垣高さ増に伴う最下段から最上段積み石の水平変位 δ (mm) および加速度 α (gal) の時間変化例として、実験No.5 (H=7.0m, $\theta=70^\circ$), No.13 (H=14.0m, $\theta=70^\circ$), No.24 (H=21.0m, $\theta=70^\circ$) の地盤最下面GL-50mからx方向の加速度300galを入力したときの様子を示したものである。

積み石の最大変位量は、H=7.0mでは最下段では+100~-80mm、最上段で+100~-80mm、H=14.0mでは最下段で+105~-80mm、最上段で+110~-80mm、H=21.0mでは最下段で+200~-190mm、最上段で+280~-200mmであり、Hが低い場合は上下ほぼ同程度の変位であるが、Hが21.0mと高くなると、最下段の値はHが低い場合より大きくかつ下から上

へ増幅されていることが分る。

一方H=21.0mの加速度分布は最下段で+50~-100gal、最上段で140~-150galで下から上へ大きく増幅された。

一般的傾向として、石垣内では変位・加速度とも下から上へ増幅され、最上段の積み石が不安定になり易いことが示された。

(3) x方向加速度を入力したときの石垣面孕み出し

x方向加速度 $\alpha=100, 200, 300$ galを図-2に示す石垣底面下50.0mの地盤から入力したときの石垣面変位面積Aを、6要因別に図示すると図-6のようになる。

各要因の水準変化に対して、Aの変動幅が大きいのはHと θ の形状寸法に関する要因で、水準変化とともにAが急激に増加し、寄与率 ρ は100、200、300galの3ステップに関し、Hで63~71%、 θ で10~17%となった。一方M・S・B・Gの物性値に関する要因は水準変化に対するAの変動幅は小さく、その寄与率 ρ は全般に数%以下で、統計的有意差はない。また α が100~200~300galと増加すると、当然の結果であるが、A

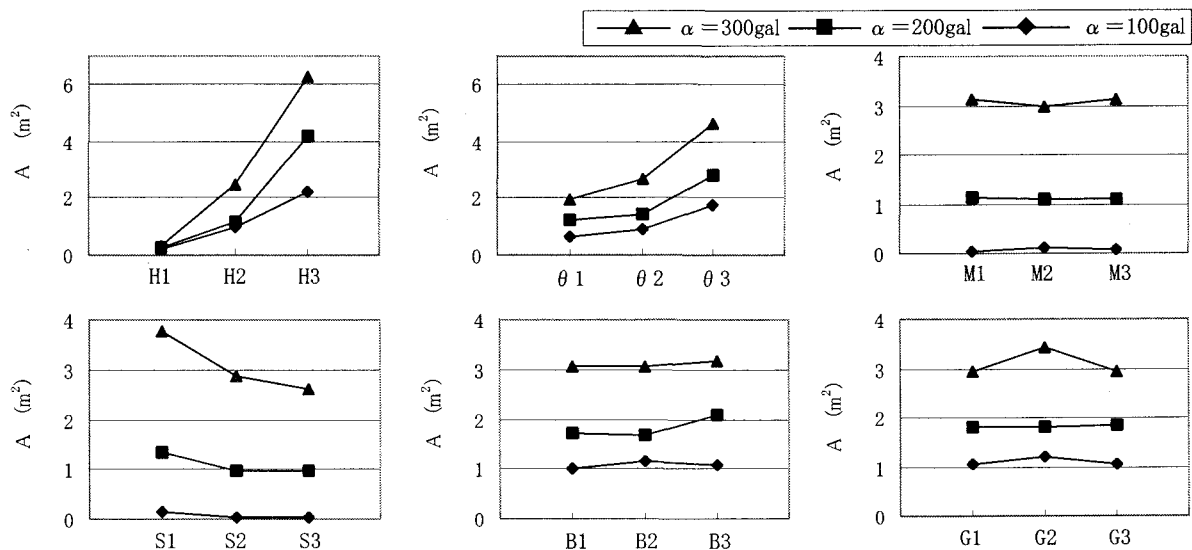


図-6 x方向加速度を入れたときの要因・水準別の石垣面孕み出し主効果図

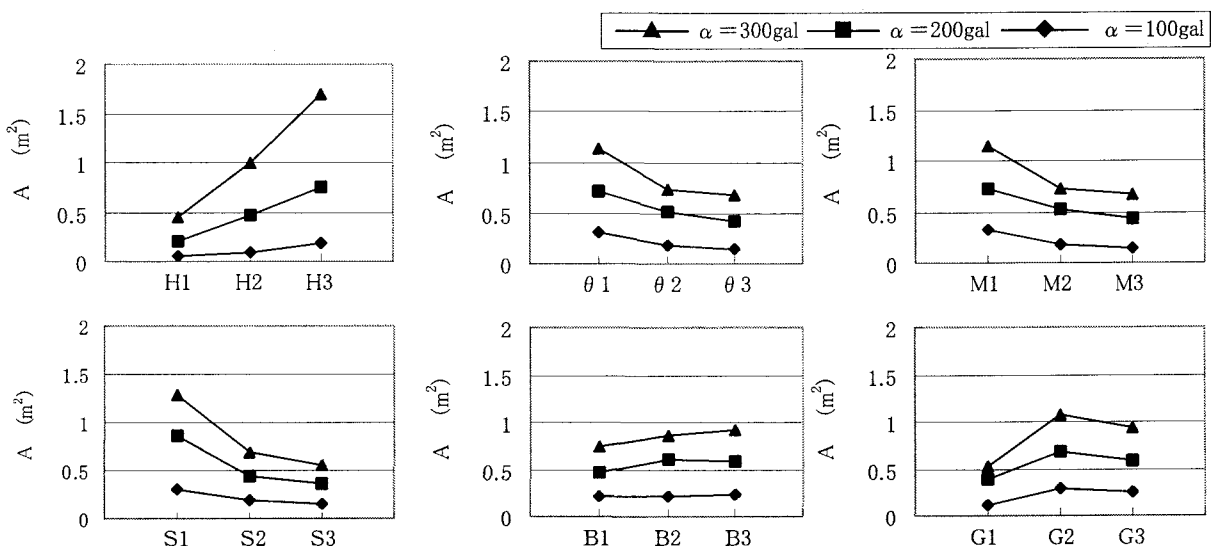


図-7 z方向加速度を入れたときの要因・水準別の石垣面孕み出し主効果図

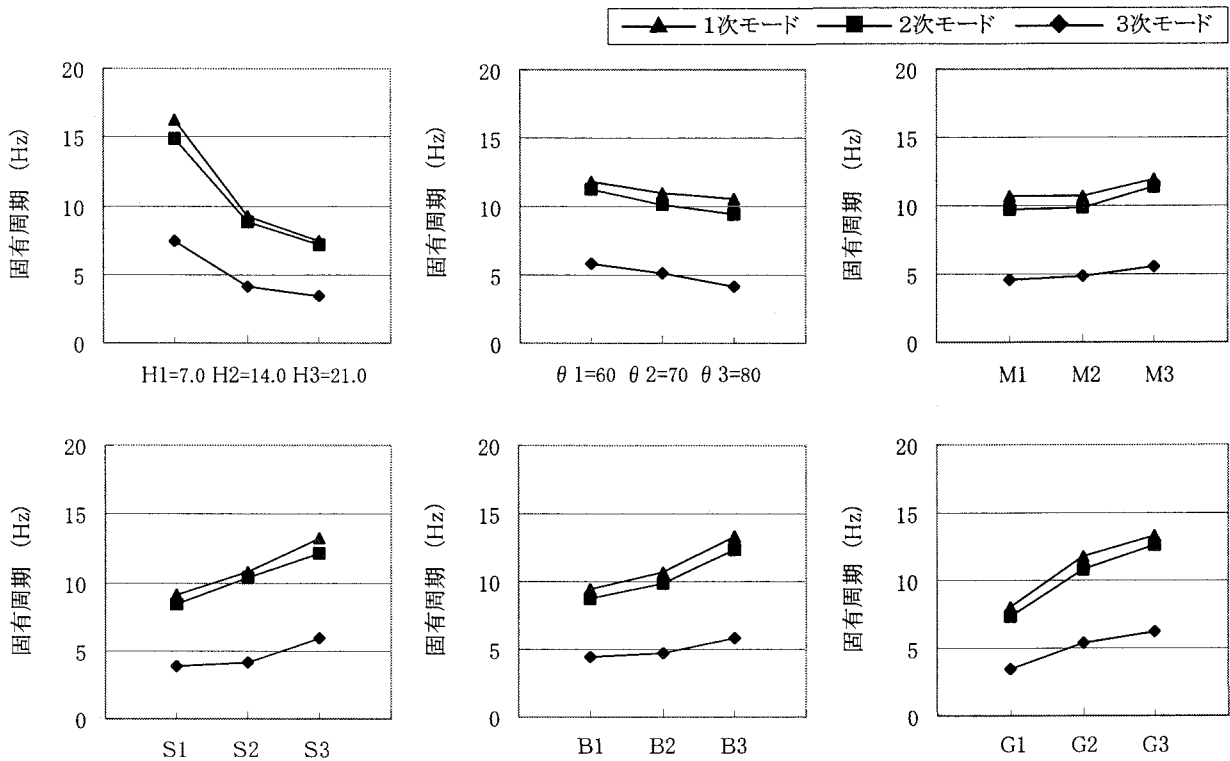


図-8 要因・水準ごとの石垣断面の固有周期変化図

は増加している。

したがって、今回取り上げた6要因中では、石垣安定に大きな影響を与えるのはH、 θ であり、石垣構成要素はさほど大きな影響を与えないことが示された。ただし文献5)に示す2003.6に発表した論文では、H、 θ とM・S・B・Gとは同時に扱わないで、M・S・B・Gの4物性値の水準変化のみを数値実験した結果を報告したが、4要因中ではAの変化はBとGが支配的であり、Gの寄与率 ρ が68~78%、Bの ρ は14~22%であることが示された。

一方文献6)に示した積み石単体重量 γ ・石垣勾配 θ ・高さHおよび石積み技法Tの4要因を取り上げた石垣模型による振動実験では、 θ の ρ $\theta=60\%$ 、Hの ρ $H=30\%$ であることが示された。今回の数値解析実験におけるHの ρ $H=65\%$ 、 θ の ρ $\theta=15\%$ と逆の結果であるが、形状寸法が石垣構成要素の物性値より石垣安定に支配的影響力を有している事は確かなようである。

これは、石垣構成要素はそれらの物性値に非常に大きな差があっても、極端に悪い条件でない限り石垣は積み上げる事ができる事を考えると、勾配とか高さの形状寸法の方が地震時の石垣安定に大きな影響力をもつ事を示していると考えられる。

(4) z方向加速度を入力したときの石垣面孕み出し

z方向加速度 $\alpha=100, 200, 300\text{gal}$ を図-2に示す石垣底面下50.0mの地盤から入力したときの石垣面変位面積Aを、6要因別に図示すると、図-7のようになる。

各要因の水準変化に対してAの大きさはx方向加振時の1/2ほどでまた、Aの変動幅が大きいのはHとSであり、Hは水準増とともに急激に増大し、石垣安定は小さくなるが、Sは水準

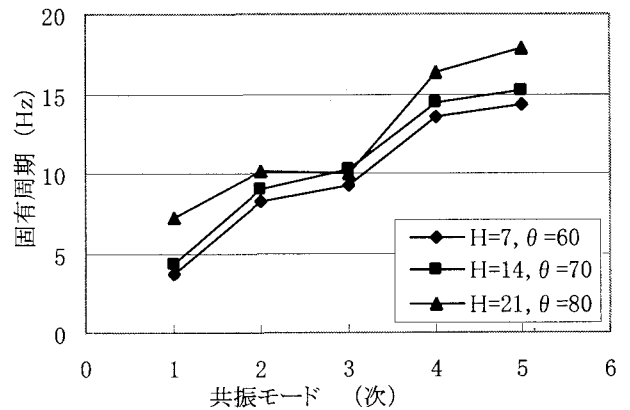


図-9 H、 θ と固有周期との関係

増とともに急激に減少し、安定性は増大することが示された。また $\rho_H=33\sim45\%$ 、 $\rho_S=7\sim10\%$ であった。残りの θ ・M・B・Gの水準変化に対するAの変動は小さく、その寄与率は数%以下で、統計上の有意差はない。

上述の結果は地震時の上下動(直下型)に対する6要因の影響力を検討したものであり、(3)の水平動では θ が石垣安定に大きな影響を示したが、(4)の上下動では小さかった。すなわち石垣は上下に震動しても孕み出しは水平振動時ほどは大きくないので、石垣の安定性は水平動ほどは失われない事を示していると考えられる。

(5) 固有周期解析

表-1, 2に示した条件の石垣の固有周期に関する解析結果を図-8, 9に示す。

図-8は6要因別に入力加速度を変えたときの水準増に対す

る1～3次モードの周波数を示してある。寄与率 ρ の大きいものはHで42～48%、Sで2～10%、Bで2～8%、Gで10～21%で、 θ とMとは数%以下であった。1次モード周波数は、Hは水準が増えると7.4Hzから3.5Hzに減少、Sは3.9Hzから6.0Hzに、Bは4.5Hzから5.9Hzに、Gは3.5Hzから6.2Hzに増加する事が示された。

これらを全般的に考えた場合、石垣の固有周期は、図-2に示したような隔壁型石垣であれば、その形状寸法・物性値にかかわらず4～7Hzであるので、一般の地震に共振し易い固有周期であり、石垣は地震に弱いことを示していると考えられる。

次に図-8は石垣高さH及び勾配 θ と固有周期の関係を示したものであり、1～5のどのモードでもH、 θ ともに大きい程固有周期が大きくなることを示している。すなわちいろいろな周波数の地震に対して必ず共振する周波数があり、この図からも石垣は地震に対して弱いことを読み取る事ができる。

4. 考察

本研究は石垣断面をFEMにより解析するために、連続体として扱う事ができるように、筆者らが提案してきた「積み石間に仮想間詰め材を介入させる」手法を用いた。そしてその ν 、 ρ 、 e 、 τ などの物性値は積み石間の空隙の大きさ・密度・接触条件の3条件から推定できるように、図-4を想定した。以上のような石垣モデルや物性値想定法が石垣の断面解析法として妥当性があるかどうかなどは検証されていない。

石垣断面とその挙動は非常に複雑であり、この難題を一挙に解決して解析できる手法を確立する事は至難なことである。FEMを適用するにしても接点での回転やすべり変位などを表現するモデルを導入することも必要であろう。

本研究は多くの仮定想定に立脚している。しかしこれらは工学的な経験則や一般的傾向は十分考慮に入れて想定したもので、大きな方向性は正しいと確信している。さらに本論文等で示したように、筆者らの手法によりかなり実際的な傾向を導きかつ多くの有用な情報を得ることが示された。

我々の想定した石垣モデルと解析手法および物性値推定法が石垣研究に適しているか否かを証明することは、理論的にも実験的にも非常に困難である。とすれば、実際の石垣に適用して、動態観測データと対比したりしながら、現実の現象を表現できているかどうか検討したりして、その妥当性を評価したりし、問題点を明らかにしたりして改良していくことが望まれる。今後はこのような立場・方針で研究をつづけていく所存である。

5. まとめ

- ①地盤から伝播してきた地震波は石垣内では変位・加速度とも下から上へ増幅され、最上部の積み石は不安定になり易い。
- ②x方向(石垣面鉛直)加速度をGL-50mで入力したとき、石垣面孕み出し量A(=石垣安定性)は、今回取り上げたH・ θ ・S・M・B・Gの6要因では、それぞれの値は一般にとりうる値の最小値から最大値となるよう水準値を設定して数値実験したが、石垣の形状寸法に関するHの寄与率 $\rho_H=63\sim71\%$ 、 θ の寄与率 $\rho_\theta=10\sim17\%$ で、他の物性値に関する要因は影響力は小さいことが示された。
- ③z方向(地盤上下)加速度を入力したときのAはx方向加振時の1/2ほどで、 $\rho_H=33\sim45\%$ 、 $\rho_S=7\sim10\%$ 、他は数%以下であった。石垣は上下動よりも水平動の方が危険性は大きいことが示された。
- ④石垣の固有周期は形状寸法・物性値にかかわらずほぼ4～7Hzであり、一般の地震時に共振し易い固有周期を有していて、地震に弱いことが示された。
- ⑤今後は実在石垣の動態観測データなどと対比して、本論文手法を改良し、有用性を高めていくことが望まれる。

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。

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) 村山朔郎：「土の力学挙動の理論」，技法堂出版(株)1990.10
- 3) 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
- 4) 田口玄一：「実験計画法」上下巻，丸善(株)，1968.10
- 5) 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
- 6) 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