

城郭石垣構成要素の物性値が石垣安定に与える影響*

Effects to Stability of Masonry-Walls by Material-Value of M.W. Component

田中邦熙**新谷洋二***

By Kunihiro TANAKA, Yoji NIITANI

要旨：石垣の安定性を定量的に評価することは非常に難しい。石垣の安定性はその形状寸法および構成要素の物性値の二者により決定される。しかし我々が過去に発表してきたように、高さ H と勾配 θ とが支配的に大きな影響力を有している。ここで現存する石垣は形状寸法は定まっているから、構成要素の積み石 S ・間詰め M ・裏込め B および地盤 G の物性値の状態が安定にどのように影響するかを検討することが重要となる。本発表は石垣断面を FEM 解析するに当たり、積み石相互間の回転やすべりのような不連続変位をジョイント要素 (J) を考慮することにより実際に表示しうるかどうか、および構成要素の物性値のうち、弾性係数 E ・単位体積質量 ρ ・ポアソン比 ν およびせん断強度 τ が石垣安定にどのような影響を与えるかに関して検討したものである。今回の研究成果は次のように要約できる。

- ① FEM 解析に J を考慮して、積み石間の回転やすべりのような離散型変位を表示することは、地盤水平振動に対しては J の有無は関係しないが、鉛直振動に対しては入力加速度が大きいときは、その解析結果に疑問がある結果となることもある。
- ② 石垣安定性は積み石・間詰め・裏込めおよび背面地盤の弾性係数により大きく影響される。

1. まえがき

石垣断面の安定性を定量的に評価することは多くの要因が複雑に絡み合っているために非常に困難である。我々は石垣の安定性は石垣断面の高さ H と勾配 θ とが支配的に大きな影響力を有していて、物性値はさほど大きくないと判断できることを述べてきた。^{1)~6)}

本発表はこのような結果をさらに詳細に検討するために、FEM 解析にジョイント要素 J を考慮した解析結果および積み石 S ・仮想間詰め M ・裏込め B および地盤 G の E ・ ρ ・ ν ・ τ を変化させたときの石垣面変状 (= 安定性) に及ぼす影響度合いに関する解析結果について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

石垣断面解析に 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、積み石上下間に薄層の「仮想間詰め部材」を想定した。^{2)~3)}

また今回数値解析した石垣-地盤系のメッシュ割りは図-1 に示すように、水平 x 方向 100.0m、鉛直深さ z 方向 50.0m の 2 次元地盤の中央部に、高さ 14.0m、勾配 70° の隔壁状石垣断面が存在する形状を設定した。また積み石は石面で高さ 0.45m、控え長 1.20m、石尻高さ 0.40m のテーパ付きとし、仮想間詰め部の厚さは石面で 0.05m、石尻で 0.10m と設定した。また今回使用した解析ソフトは市販の FEM-SAS および図化ソフト RISA である。

(2) 物性値

S ・ M ・ B ・ G の 4 要素の材料物性値は、まず弾性係数 E を常識的に妥当と考えられる範囲の最小~最大値を設定し、最小値を水準 1、最大値を水準 3、その中間値を水準 2 として、表-1 のように設定する。

次に S ・ B ・ G に関する ρ ・ ν ・ e 等は経験的に E から推定し、 M に関する ρ ・ ν ・ e および τ は想定から設定した図-2 を用いて求めた。^{2)~3)} さらにせん断弾性係数 G ・体積弾性係数 K 等は表-2 中に示した換算式を用いて E と ν とから計算した。なお 4 要素の応力-ひずみ関係は、 S は線型モデル、 M ・ B ・ G は非線型モデルで表わせると考えた。

(3) ジョイント要素

FEM では通常、要素の回転やすべり等を考慮した解析

*Keyword：石垣安定, FEM, ジョイント要素, 実験計画法

**フェロー 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)

を行なうことは出来ないが、Jを考慮に入れば、石垣の実際の挙動に、より近い解析が出来ると考えて、Jを考慮に加えることとした。今回は図-1に示すように、積み石と仮想間詰め材の接触面にJを考慮した。

Jを考慮に入れた解析を行うには、表-3に示すような8種類の定数を設定しなければならない。しかしそれらの値を実測等で求めることは事実上不可能であり、次のように想定して設定した。

石積み技法の時代変遷における初期の野面積みは、川原石のような自然石を用いていて、後の打込み接ぎ、切込み接ぎに比べて積み石相互間の接触部分は点状で接触長は短い。したがって図-3で示すように、Jの水平せん断特性は、最も小さいせん断応力 τ により最も小さい水平変位Uではずれ、また鉛直特性は、最も小さい圧縮応力 σ により最も大きい閉合量 V_{mc} が生じると想定される。ここでせん断剛性率 K_s および重直剛性率 K_n 等は、接触2材料のうち強度の小さい方の値に決定されると考えられるので、その小さい方すなわち仮想間詰め材の値

を用いることとした。

また積み石と仮想間詰め部材との表面接触状況は凹凸が大きいので、せん断抵抗力は材料強度のEの10倍大きいと考え、 $K_s=10E$ と想定した。一方接触面の凹凸が大きい場合その接触面積は小さくなり、鉛直応力 σ が作用したときその接触点は容易にはずれると考えると $K_n=0.1E$ と想定した。これらの値を表-3に示す。

(4) 石垣安定の評価基準

石垣断面の安定性は、円弧すべり法のような手法により安全率 F_s が求められれば、その結果を用いて種々の検討を行うことができる。現実には石垣断面に対するそのような手法は開発されていない。本研究では石垣表面の水平方向変位量の積分値(=面積A)を用いることとする。

(5) 地震力

図-1に示した地盤・石垣系の地盤最下層のxまたはz方向からそれぞれ最大加速度 $\alpha=300, 600\text{gal}$ の正弦波を

表-1 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=9.8×10kPa)

要因	記号	水準		
		1	2	3
積み石	S	1.000 ・亀裂の多い風化著しい岩 ・軟岩	10.000 ・風化中程度の岩 ・中硬岩	100.000 ・新鮮な風化少ない岩 ・硬岩
		100 ・空隙多くレーズ ・強度小さい材料がゆる締め	1.000 ・空隙中でやや締め固め	10.000 ・空隙少なくよく締め固められている ・新鮮な良質材が十分締め固め
裏込め	B	200 ・粘性土やゆるい砂質土の 強度小さい地山	2.000 ・強度中程度の地山	20.000 ・砂質土～砂礫のよく締まった強度 大きい地山
		300 ・間詰め少なく空隙大 (河原丸石)	1.500 ・間詰め中程度で 空隙中程度	7.500 ・間詰め密でよく締まっていて空隙小 (砂礫コッパ)

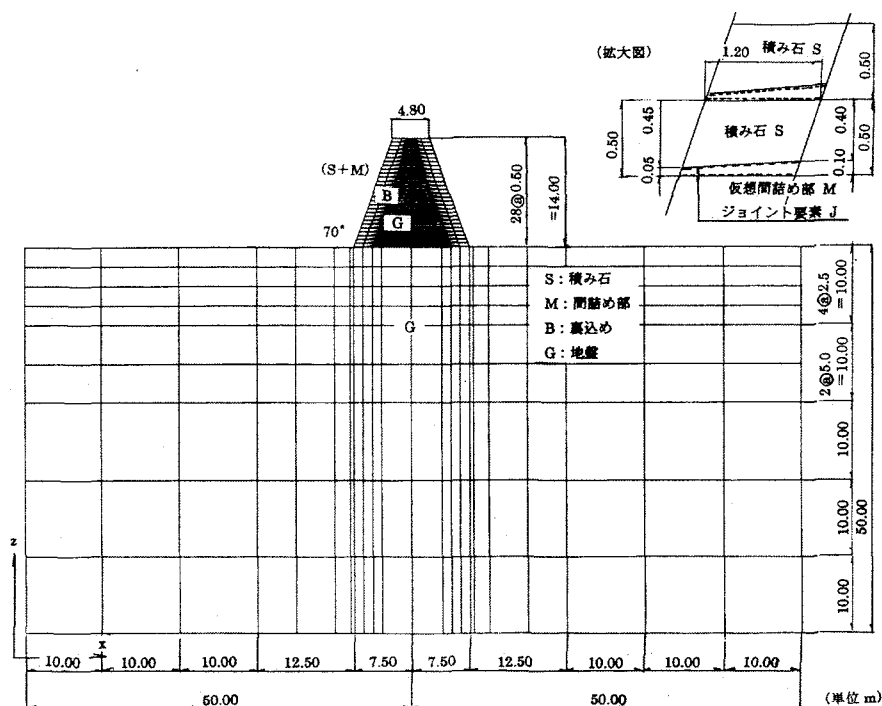


図-1 解析断面メッシュ割り図

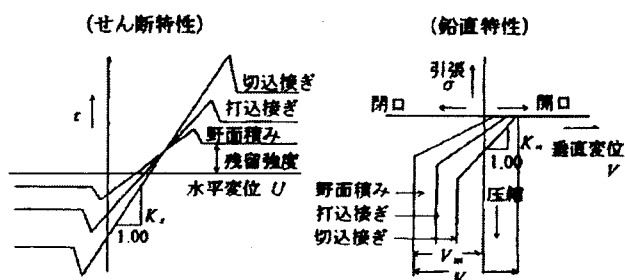


表-4 J有無に対する計算ケース

○は計算可 ?は計算結果に疑問あり

表-2 FEM解析に用いた物性値

要素区分 水準			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)		
記号	名称	単位	S1	S2	S3	B1	B2	B3	G1	G2	G3	M1	M2	M3
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
	単位質量	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	5.00	10.00	15.00	0.10	0.20	0.30
		Pa (N/m ²)×10 ⁵	—	—	—	2.00	4.00	6.00	50.00	100.00	150.00	1.00	2.00	3.00

そこで数値実験の効率化とデータの統計的処理による有用情報の抽出を目的に、実験計画法⁷⁾を適用することとした。なお採用した直交表は $L_{27}(3^{13})$ である。27 回の実験ごとの要因・水準割り当てを表-5 に示す。

接触材料 石垣石の積み方			積石-仮想間詰め部材		
物性項目	記号	単位	野面	打込み	切込み
1.表面一軸強度	q_{ui}	(tf/m ²)	40.0	70.0	80.0
2.凹凸により生じる せん断強度(粘着力)	C_i	(tf/m ²)	20.0	35.0	40.0
3.せん断剛性率 (≒材料特性10Eと想定)	K_s	(tf/m ²)	5.0×10^4	2.5×10^5	5.0×10^5
4.最大強度に対する 残留強度の比	A_i		0.30	0.40	0.50
5.Jが閉合できる最大量	V_{mc}	(m)	0.03	0.02	0.01
6.垂直剛性率 (≒材料特性0.1Eと想定)	K_n	(tf/m ²)	5.0×10^2	2.5×10^3	5.0×10^3
7.摩擦角	ϕ	(°)	32.0	36.0	38.0
8.ダイレタンシー 角	lo	(°)	6.0	4.0	2.0

3. 実験結果と検討

(1) 概要

地震動による石垣面の変動は積み石ごとに時々刻々変化するが、今回は J の有無による石垣面変位面積 A の計算結果の考察を行った後、主として表-4 の②ケース、J 無の $\alpha=300\text{gal}$ を用いて、1/16 秒ごとに石垣面の水平 x 方向の加速度と変位を計算して図化し、A が最大となる時刻 (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物性値の石垣安定に対する影響傾向の考察を行った。

(2) J の効果

表-4 に示した計 10 ケースの計算を行い、ケース②~⑤、⑦~⑩の計算結果を図-4 に示す。静的解析では J の有無は全く関係なく同一の結果となった。一方地盤水平方向 x 方向振動に対しては、入力加速度 $\alpha=300\text{gal}$ のとき、J 無のときの周期 T は 4 秒②であるのに、J 有では 0.5 秒⑦と 8 倍の差が生じたが、石垣面変位の大きさ A にはほとんど差がない。そして $\alpha=600\text{gal}$ と大きいときには、J の有無の差は T にも A にも生じなかった③⑧。一方地盤鉛直 z 方向振動に対しては、J 無のとき $\alpha=300\text{gal}$ ④、600gal ⑤ともに A は非常に小さいが、J 有のとき A は非常に大きかった⑨⑩。FEM 解析に J を考慮して、積み石間の回転やすべりのような離散型変位を表示することは、水平振動に対しては J の有無は A に影響しないが、鉛直振動に対しては、入力加速度が大きいときの解析結果に疑問があると結論できる。

(3) 積み石の加速度波形

図-5 は解析断面中央部の地盤~石垣中の接点 No. 730, 219, 81, 35, 12 の加速度波形を示したもので、No. 12~219 は地盤中、No. 219 は石垣最下層、No. 730 は最上層である。表-5 に示した 27 の計算ケースを波形や α の大きさ等で分類したもので、次のように 4 グループに分類されることを示している。

グループ I $\alpha_{\text{max}}=2.0\text{m/sec}^2$ T=1.0 秒

計算ケース (1, 2, 3) (22, 23, 24)

グループ II $\alpha_{\text{max}}=12.0\text{m/sec}^2$ T=0.5 秒

計算ケース (4, 5, 6) (10, 11, 12) (25, 26, 27)

グループ III $\alpha_{\text{max}}=45.0\text{m/sec}^2$ T=0.5 秒

計算ケース (7, 8, 9) (13, 14, 15) (19, 20, 21)

グループ IV $\alpha_{\text{max}}=30.0\text{m/sec}^2$ T=0.25 秒

計算ケース (16, 17, 18)

No. 12 の波形は入力波であり、地盤中で I グループは 300gal から 100gal に減衰し、石垣中で 200gal に増幅、II グループは 300gal から 400gal に微増後、石垣中で 400gal から 1200gal に大きく増幅、III グループは 300gal から 2000gal に激増後、石垣中でも 2000gal から 4500gal に増幅している。そして IV グループは II グループに似ている。

グループ I, II の計算結果は妥当性があるように思われるが、III は石垣天端で $\alpha_{\text{max}}=45.0\text{m/sec}^2$ となり、時間とと

もに更に増幅していて、石垣が原型をとどめているとは考えられない。IV は II の変形のようなものであるが、石垣頂部で著しく増幅されている。なお 4 グループとも地盤底面の接点 No. 12 の入力波形は、I の No. 12 と同一の $\alpha=3.0\text{m/sec}^2$, T=0.5 秒の周期的な波形であり、これが 4 つのグループに変化することは表-1 の地盤 G の物性値の差に基づくことは容易に推察できる。そこで表-4 に示したインプットデータの組み合わせを検討すると、グループ I, II, III に対して S・M・B・G の弾性係数 E の水準の組み合わせが次に示すようになっていることが分る。

列 No.	5	9	13	3
	S_E	M_E	B_E	G_E

グループ I 水準 (1, 2, 3) (1, 2, 3) (1, 2, 3) (1, 1, 1)

グループ II 水準 (1, 2, 3) (2, 3, 1) (3, 1, 2) (2, 2, 2)

グループ III 水準 (1, 2, 3) (3, 1, 2) (2, 3, 1) (3, 3, 3)

すなわちグループ I ~ III が生じた原因は、E の組み合わせが同じときに所属グループが決定されることが理解できる。そして、 $S_E \cdot M_E \cdot B_E$ の水準組み合わせは、(1, 2, 3) の順序が異なるが、グループ内では必ず 1~3 のデータが均等に配分されているのに対し、 G_E は I, II, III に対して水準も (1, 2, 3) と変化している。このことは、波形がグループ I, II, III と区分された原因は、 G_E の水準が (1, 2, 3) と変化したことによることを示していて、地盤弾性係数 G_E が波形決定に支配的影響力を持っていることを示している。

すなわち今回の解析結果は基盤 50m の地層中で、石垣部の加速度波形が決定されていることが分る。

(4) 積み石の変位波形

図-6 は石垣断面中央部の地盤~石垣中の節点 No. 730, 219, 81, 35, 12 の水平動波形を示したもので、No. 12~219 は地盤中、No. 219 は石垣最下層、No. 730 は最上層である。図-6 では No. 12 (=地盤底面) の水平動 1.9cm をキャンセルして 0 として図示してある。表-5 に示した 27 計算ケースを波形や水平変位量 U_x 等で分類したもので、次のように 3 グループに分類されることを示している。

グループ I T=4.0 秒 計算ケース

(1, 2, 3) (16, 17, 18) (22, 23, 24) 石垣天端 $U_x 0.40\text{m}$

グループ II T=1.5 秒 計算ケース

(4, 5, 6) (10, 11, 12) (25, 26, 27) 石垣天端 $U_x 0.15\text{m}$

グループ III T=0.5 秒 計算ケース

(7, 8, 9) (13, 14, 15) (19, 20, 21) 石垣天端 $U_x 0.25\text{m}$

I グループでは地盤底面での入力振幅 $a=1.9\text{cm}$, 周期 T=0.5 秒を維持しながら、振幅 $a=\pm 2.0\text{cm}$, 周期 T=5.0 秒に増幅されながら上層し、石垣中で更に $a=\pm 4.0\text{cm}$ に増幅している。II グループでは地盤中で $\pm 10\text{cm}$ に増幅し、石垣中で $\pm 15\text{cm}$ に微増している。III グループでは地盤~石垣両方で 0.5 秒の周期のまま上昇し、振幅は地盤中で $\pm 10\text{cm}$ に増幅した後、石垣中でさらに $\pm 25\text{cm}$ に増幅している。

表-5 実験条件組み合わせ表 L₂₇ (3¹³)

実験 No.	要因割付列													A(m)
	M _v	M _ρ	GE	G _τ	SE	G _v	B _v	G _ρ	ME	M _τ	B _ρ	B _τ	BE	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.29
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.90
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.84
4	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	0.38
5	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	0.31
6	1	2	2	2	3	3	1	1	1	1	2	2	2	0.36
7	1	3	3	3	1	1	3	3	3	3	2	2	2	0.78
8	1	3	3	3	2	2	1	1	1	1	3	3	3	0.55
9	1	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1.29
10	2	1	2	3	1	2	1	2	3	3	2	1	3	0.63
11	2	1	2	3	2	3	2	3	1	1	3	2	1	0.43
12	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	1	3	2	0.66
13	2	2	3	1	1	2	3	3	1	1	1	3	2	0.76
14	2	2	3	1	2	3	3	1	2	2	2	1	3	0.54
15	2	2	3	1	3	1	1	2	3	3	3	2	1	0.85
16	2	3	1	2	1	2	3	1	2	2	3	2	1	1.40
17	2	3	1	2	2	3	1	2	3	3	1	3	2	0.78
18	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	2	1	3	0.85
19	3	1	3	2	1	3	1	3	2	2	3	1	2	0.41
20	3	1	3	2	2	1	2	1	3	3	1	2	3	0.62
21	3	1	3	2	3	2	3	2	1	1	2	3	1	0.92
22	3	2	1	3	1	3	2	1	3	3	2	3	1	1.27
23	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1	3	1	2	0.64
24	3	2	1	3	3	2	1	3	2	2	1	2	3	0.59
25	3	3	2	1	1	3	3	2	1	1	1	2	3	0.33
26	3	3	2	1	2	1	1	3	2	2	2	3	1	0.40
27	3	3	2	1	3	2	2	1	3	3	3	1	2	0.43
Σ														19.21

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.48	1.6E+03	2.0E+07	5.0E+06	1.0E+08	0.48	0.45	1.8E+03	3.0E+07	1.0E+05	2.0E+03	2.0E+05	1.0E+07
2	0.36	2.2E+03	2.0E+08	1.0E+07	1.0E+09	0.44	4.00	2.0E+03	1.5E+08	2.0E+05	2.1E+03	4.0E+05	1.0E+08
3	0.29	2.6E+03	2.0E+09	1.5E+07	1.0E+10	0.40	0.35	2.2E+03	7.5E+08	3.0E+05	2.2E+03	6.0E+05	1.0E+09

要因割付け線点図

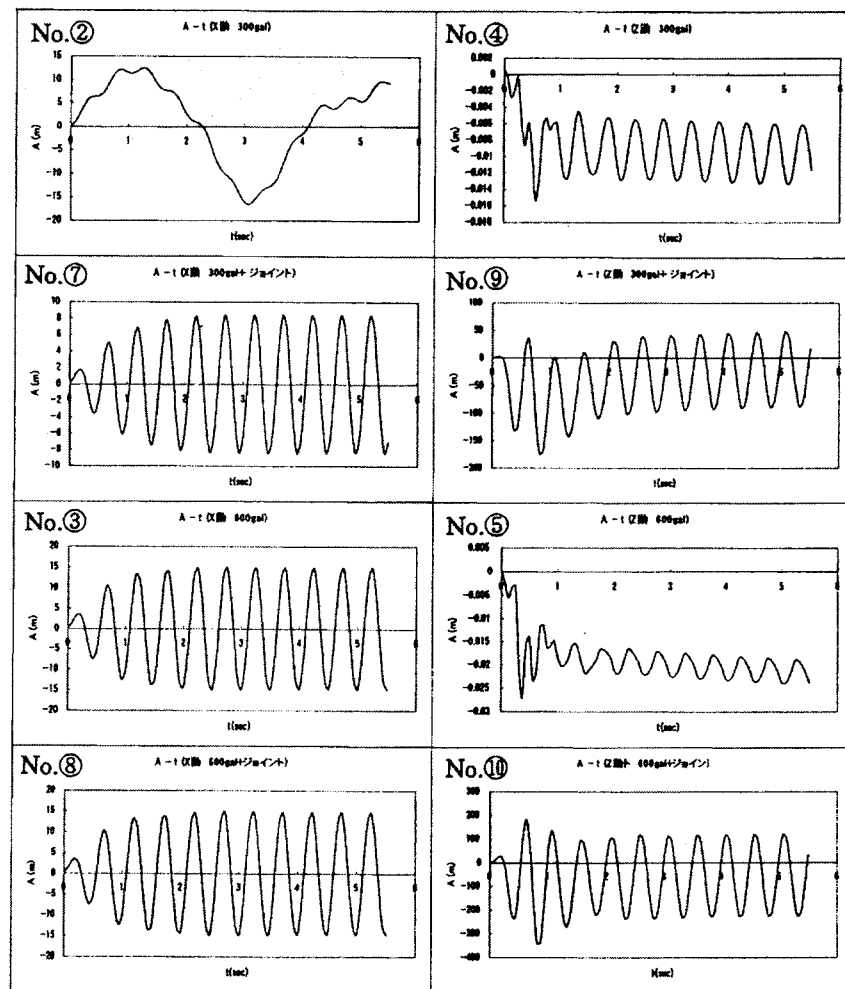
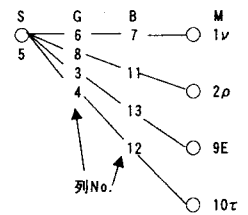


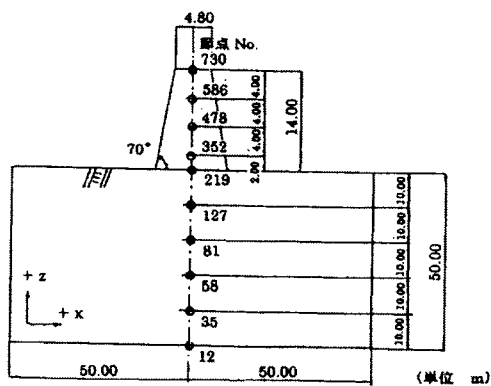
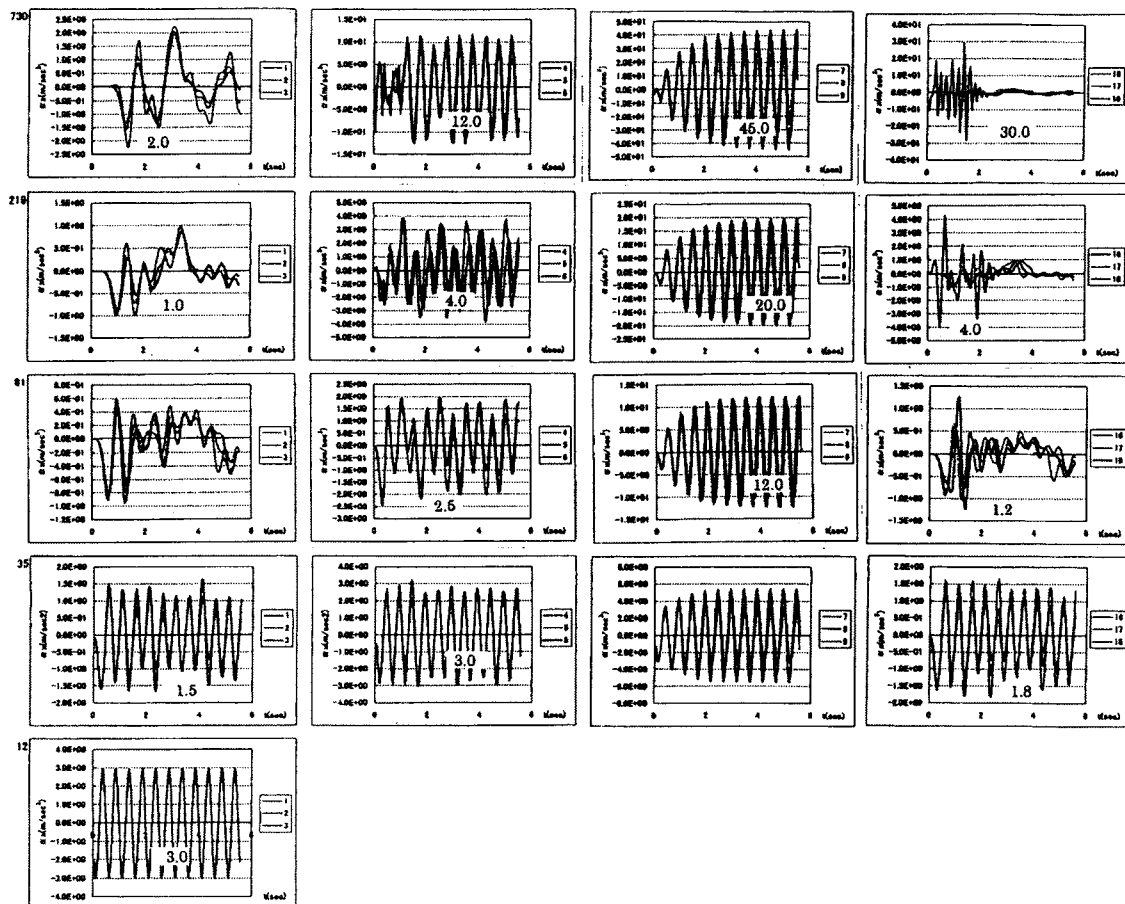
図-4 J有無による石垣面変位面積計算結果

I グループ
計算 No.1, 2, 3
22, 23, 24

II グループ
No.4, 5, 6
10, 11, 12
25, 26, 27

III グループ
No.7, 8, 9
13, 14, 15
19, 20, 21

IV グループ
No.16, 17, 18



図—5 石垣断面中央部 節点の加速度—時間曲線

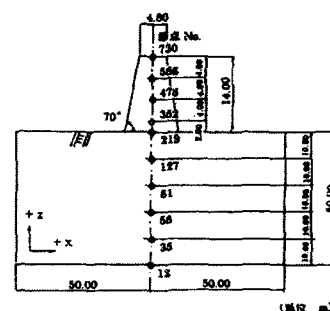
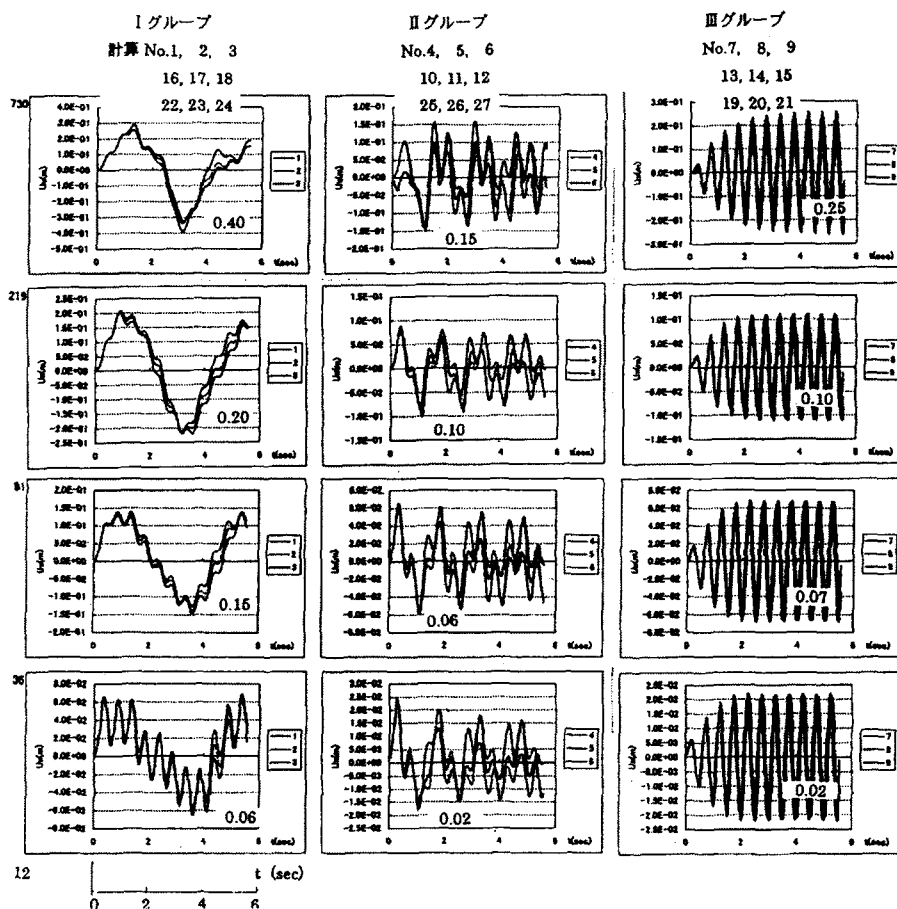


図-6 石垣断面中央部節点の変位-時間曲線

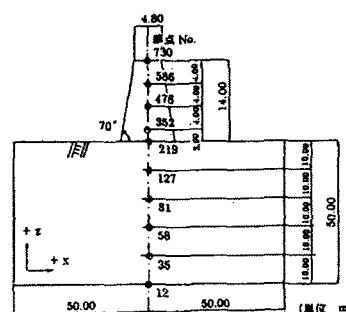
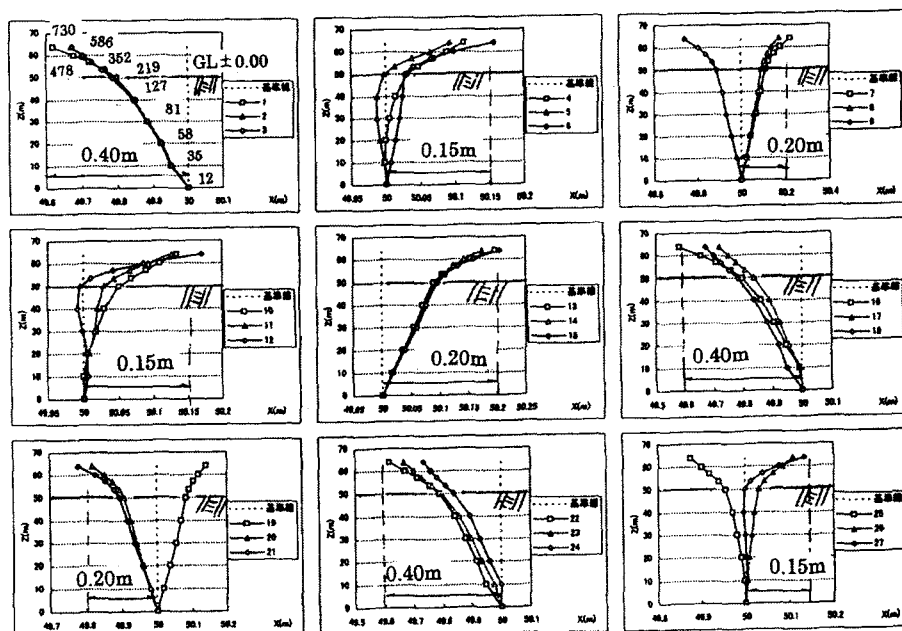


図-7 石垣水平変位分布図 (計算ケース No.ごと)

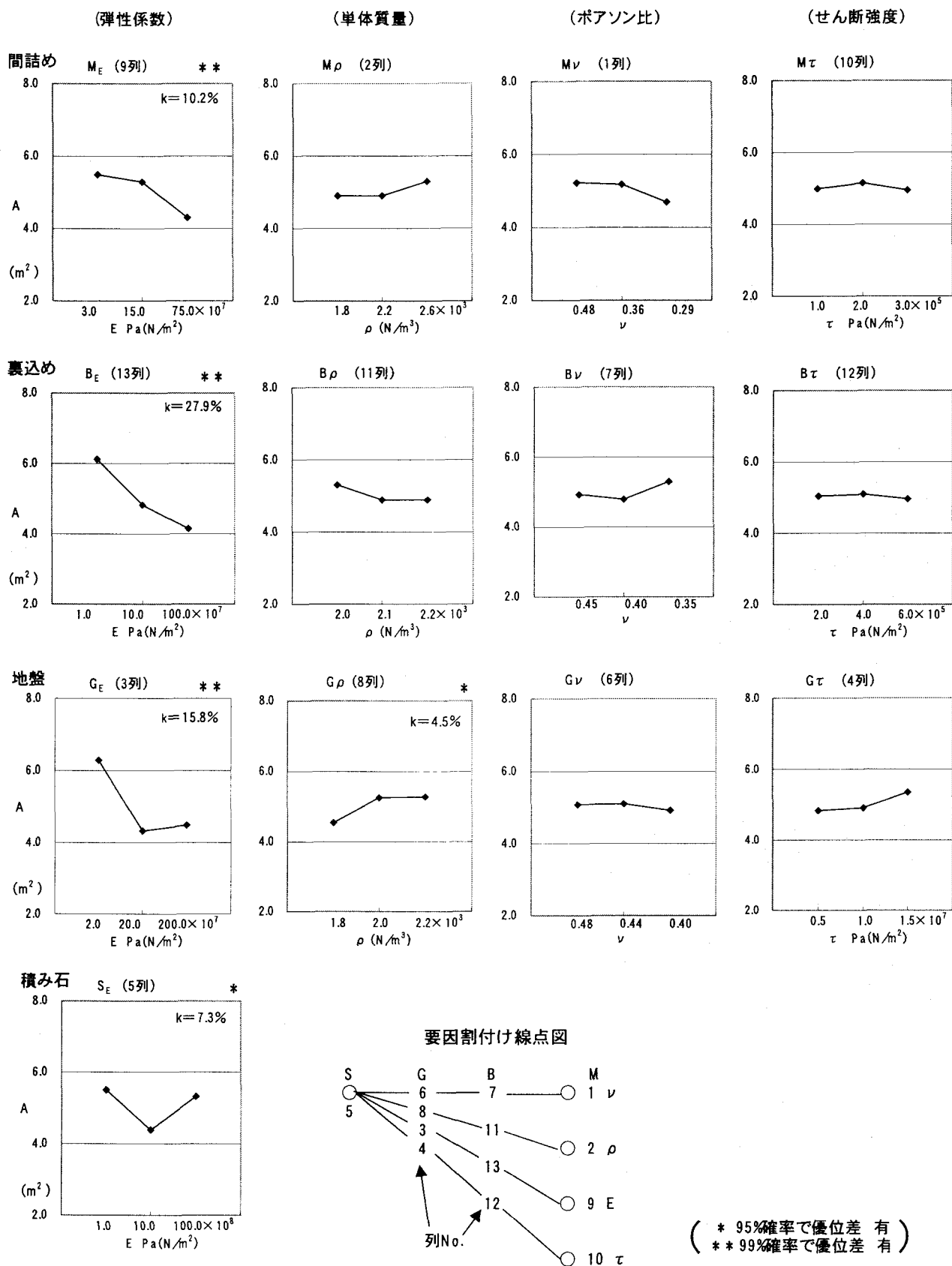


図-8 要因別主効果グラフ (水準変化, S 変化図)

加速度波形では納得できないような計算結果も得られたが、図-5の加速度波形を2階微分した変位波形は、図-6に示したように妥当性のある結果が得られていると思われる。(この原因については検討中)

次に加速度波形の考察で示したように、表-5に示したインプットデータの組み合わせを検討すると、上述(3)の結果と全く同じことが言えることが分る。すなわち、変位波形がグループⅠ、Ⅱ、Ⅲと区分された原因は G_E の水準が(1, 2, 3)と変化したことによることを示していて、地盤弾性係数 G_E が支配的影響力を持っていることを示している。

(5) 石垣面変位分布

図-7は、表-5に示した実験No.ごとに石垣面の水平変位分布を示したものであり、地盤底盤を0としたとき、地盤から石垣中の高さが上に行くほど変位が増加し、上の(3)、(4)で示した同様に、グループⅠ、Ⅱ、Ⅲに分類されることが分る。

(6) 13要因ごとの主効果グラフ

図-7に示した水平変位分布図から、実験ケースNo.ごとに石垣原形からの変化面積 A を求め、この A の値がその計算条件における石垣の安定性を示す解と考えて、13要因ごとに要因分析し、主効果グラフとして図示すると図-8が得られた。

これらの図は横軸に水準値、縦軸に A をとってあり、要因ごとに水準変化に伴う A への影響傾向を読み取ることができる。 E の水準変化が A の変化に非常に大きな影響力を有していることを示していて、寄与率 k で示すと、 M_E で10.2%、 B_E で27.9%、 G_E で15.8%、 S_E で7.3%とこの E による合計値は61.3%となり、他の要因は全て寄与率 $k=5.0\%$ 以下で、統計上の有意差(A に対する効果)は無いことが示された。この検討結果は、上述(3)、(4)、(5)の結果と同様である。

4. 考察

今回の実験検討結果から、石垣の安定性(地震時に生じる石垣面の変動量)は、構成要素の積み石・仮想間詰め部・裏込めおよび背面地盤の地盤定数 $E \cdot \rho \cdot \nu \cdot \tau$ を種々に変化させたとき、地盤-石垣系要素の4要素の弾性係数のみが大きな影響力を示し、他は統計上の有意差は無いことが示された。ここで一般に弾性係数 E は密度 ρ ・ポアソン比 ν およびせん断強度 τ に対して比例的関係があることを考えれば、 E が大きな影響力を示すことは当然と考えられる。表-1に示したように、地盤 G の E の水準範囲の比率が $20,000/300 \approx 67$ 、 S_E が $100,000/1000 \approx 100$ 、 M_E が

$7500/300 = 25$ 、 B_E が $10,000/100 = 100$ と4者ともほぼ同程度であり、4者の E が大きな影響力を示した。これは、図-1で分るように、 G 部分の占める面積割合が最も大きいことも一因と考えられる。しかし寄与率 k が計61.3%と大きくなった理由は、面積割合のみでは説明できず、石垣安定性は背面地盤や裏込め・間詰め・積み石4者全ての E が大きな影響力を有していると考えerことは無理がないように思われる。

なお一般常識的には、間詰め部の状態が石垣安定に大きな影響を持つように考えられるが、今回の解析では仮想間詰め部材の面積割合が小さいこと、水準間比率が25と他より小さいことが影響していると考えられる。以上のような考察結果はさらに検証することが必要と考えられる。

5. まとめ

①Jの有無は、石垣断面の静的解析結果に全く差を生じない。地盤水平振動に対しては、入力加速度 $\alpha=300\text{gal}$ のとき、J有のときはJ無に比べて石垣の振動周期が $1/8$ と高周期になったが、石垣面変位の大きさにはほとんど差が生じなかった。しかし $\alpha=600\text{gal}$ と大きい場合には、J有無の差は生じなかった。一方、地盤鉛直振動に対しては、J無のとき $\alpha=300, 600\text{gal}$ ともに石垣面水平変位は非常に小さかったが、J有では $\alpha=300, 600\text{gal}$ ともに非常に大きな変位を生じた。石垣断面解析にジョイント要素を考慮に入れたFEM解析を行うとき、静的解析結果はJの有無に関係なく全く同様である。動的解析では、水平振動ではJの有無はさほど大きな差を生じないが、鉛直振動解析時には疑問のある結果となることもあるので、注意を要する。Jにより積み石相互間の回転やすべりを表すためには、更に検討が必要である。

②J無で $\alpha=300\text{gal}$ の水平振動を加えたときの石垣面変位は、地盤-石垣系の構成要素 $S \cdot M \cdot B \cdot G$ の4者の E の寄与率合計が61.3%で、 E が大きな影響を有し、他の要因は小さいことが示された。石垣の変位は構成要素の弾性係数に大きく影響され、他の要素の物性値は統計上その影響力は無視できるほど小さい。

謝辞

本研究は、H14~16年度科研費およびH14~15年度鹿児島学術振興財団助成金を得て実施した研究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。

また日本大学生産工学部大学院2年生木村真也君には、膨大な数値計算等の協力をいただきました。ここに謝意を示します。

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/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 回土木史研究講演集 pp.401～408, 2003.5
- 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 回土木史研究講演集 pp.395～400, 2003.5
- 5) 小林善勝・新谷洋二・田中邦熙・谷優作：石垣模型肩部の静的載荷実験，第 24 回土木史研究講演集 pp.251～254, 2004.6
- 6) 田中邦熙・新谷洋二他：FEM-3D(L27)による石垣の動的挙動の数値解析実験，第 24 回土木史研究講演集 pp.261～268, 2004.6
- 7) 田口玄一：「実験計画法」上下巻，丸善（株），1968.10