

特別史跡熊本城跡石垣のジオテキスタイル補強土工法による補強性能確認のための振動台実験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：特別史跡 熊本城跡

文化財種別 (指定年月日)：特別史跡 (昭和30年12月29日)

所在地：熊本市中央区本丸及び二の丸ほか

所有者 (管理団体)：国 (熊本市)

構造形式：石垣

事業名称：熊本城石門周辺石垣復旧設計業務委託

事業期間：令和5年5月～令和8年3月

工事種別：石垣復旧工事

事業者：熊本市 文化市民局 熊本城総合事務所

実験計画者：熊本市、株式会社フジヤマ、扇精光コンサルタンツ株式会社
金沢大学、前田工織株式会社

実験機関：国立大学法人 金沢大学 地震工学研究室

実験年月日：令和6年12月～令和7年2月

参考文献：香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則、土木学会論文報告集、
No.75,pp.69-77,1978.

●実験に至る経緯と目的

平成28年に発生した熊本地震では、M6.5の前震およびM7.3の本震により、熊本県を中心として多数の家屋倒壊や土砂災害などの被害が発生した。国指定特別史跡である熊本城においても建造物や石垣が被害を受け、特に石垣については城内の約3割で崩壊や膨らみ、緩みなどの変状が確認されている。

石垣の復旧にあたっては、「熊本城復旧基本計画」に基づき、伝統技法を基本としつつ、安全性の確保が困難な箇所についてはジオテキスタイル補強土工法 (以下ジオグリッド) などの現代工法を併用した補強が行われている。

本実験では、石垣の補強工法の有効性を評価することを目的として、無補強 (伝統的工法) およびジオグリッド敷設などの各ケースについて、縮小模型を用いた振動台加振実験を実施した。これにより、各補強工法の耐震補強効果について検証を行った。

●実験概要

1) 実験設備

・振動台実験機（写真 1）

・土槽寸法

幅 800 mm×高さ 1000 mm×奥行き 1200 mm

2) 実験方法

振動台に固定された土槽内に、相似則 1/10 の石垣模型を実験ケース毎に構築する。入力加速度 100gal から加振を開始し、積石もしくは栗石層（ジオグリッドによる補強体）が崩壊した段階まで加振する。

入力波は正弦波とし、振動数 5Hz、振動時間 5 秒間（25 波）の加振を行う。なお、振動時間については、実地震動の継続時間 30 秒（道示波のレベル 2 タイプ II 相当）とし、これに香川の相似則¹⁾を考慮する。

積石形状は、熊本城内の石垣において平均的な形状の高さ 7.85m、勾配 1:0.25 の布積みを対象とし、背面は総栗石を想定して 5～30mm の玉石とする。補強材としてジオグリッド（トリカルネット N-2）を使用する。

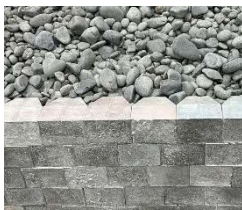


写真 2 積石・栗石（玉石）

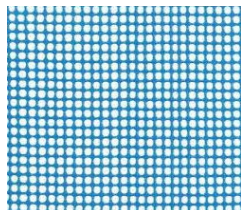


写真 3 トリカルネット N-2

3) 実験ケース

実験ケースは図 1 に示す 4 ケースを実施する。CASE1 は、積石と栗石層のみで構成された伝統工法（無補強）。CASE2 は、ジオグリッドと栗石層を相互に設置した水平敷設。CASE3 は、ジオグリッドで栗石層を包み込む巻込み構造（拘束土壁構造）。CASE4 は、ジオグリッドの積石側のみ栗石層を包み込む巻込み構造（補強土壁構造）とする。

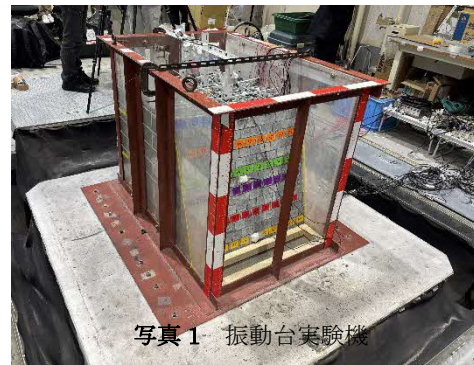


写真 1 振動台実験機

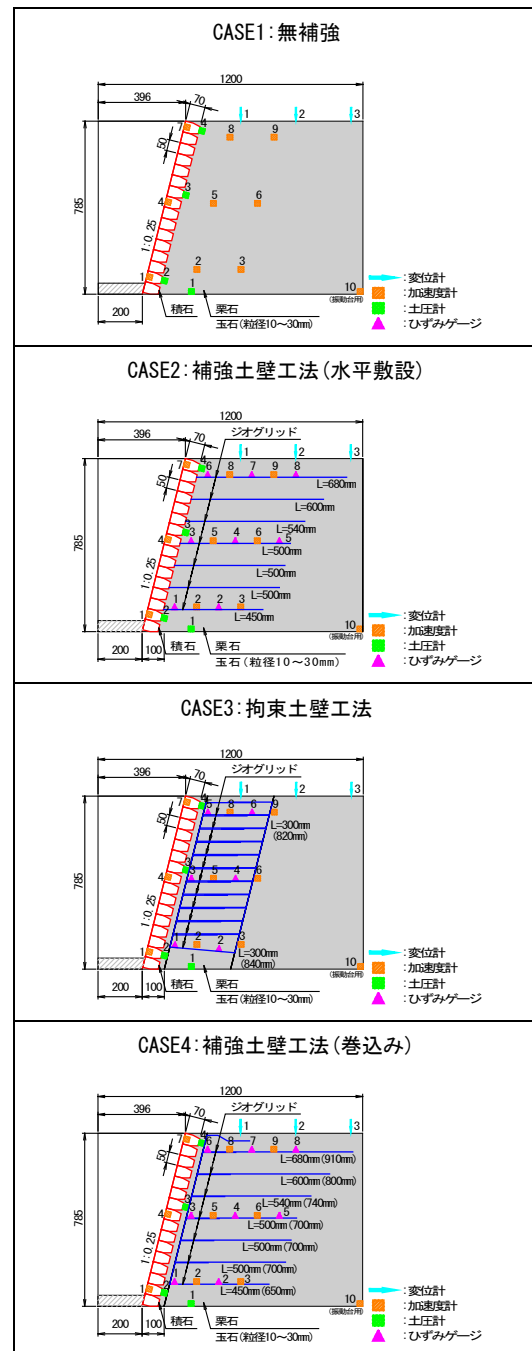


図 1 各実験ケースにおける標準断面図

●実験結果

1) 目標加速度

目標加速度と最大加速度は下表のとおりである。

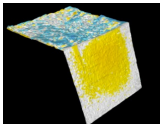
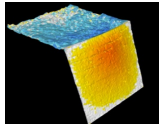
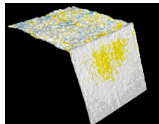
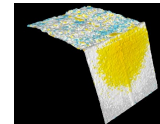
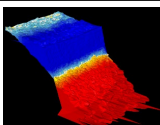
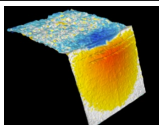
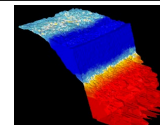
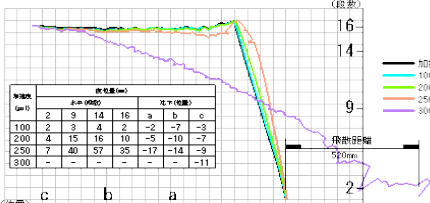
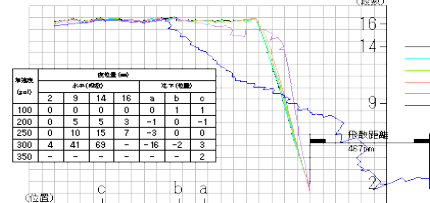
(単位：gal(cm/s²))

目標加速度	100	200	250	300	350	400	500	600	700
換算震度	5 弱	5 強	6 弱	6 弱	6 強	6 強	6 強	7	7
CASE1	93	182	224	299					
CASE2	93	180	224	269	329				
CASE3	95	180	228	277	315	226	469	578	717
CASE4	107	193	235	289	332	385	492	599	728

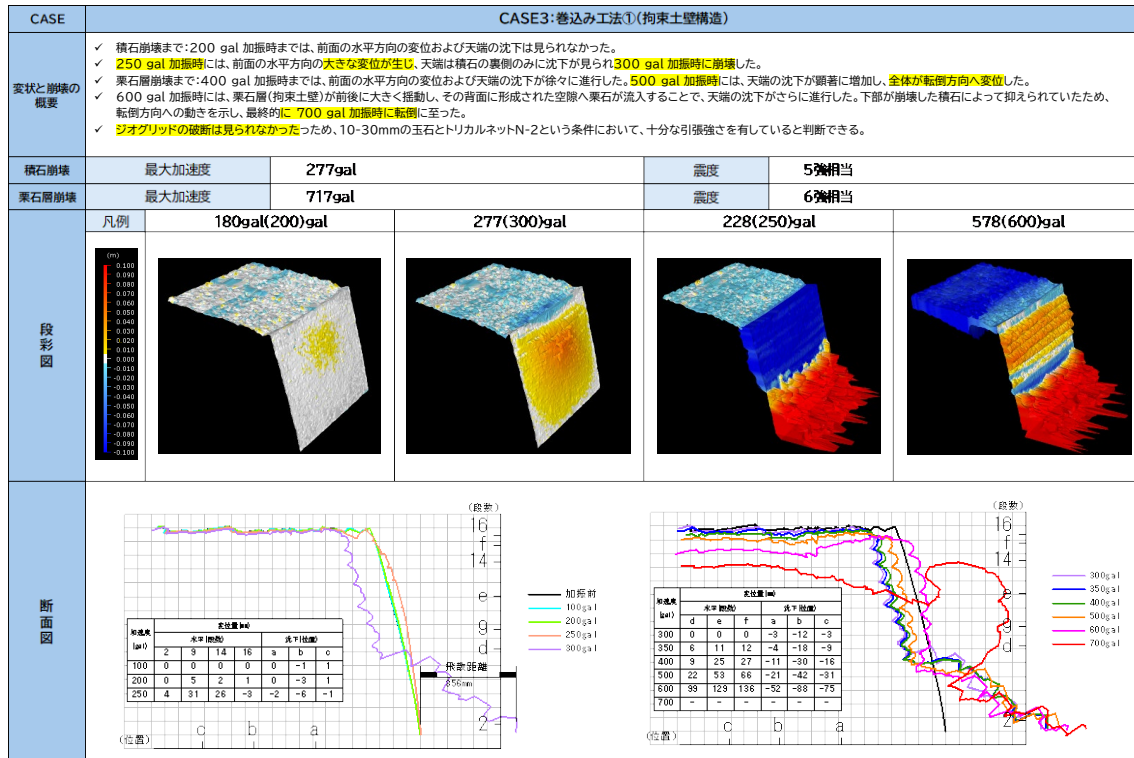
2) 変状と崩壊の概要

a) 各 CASE の変状と崩壊の概要

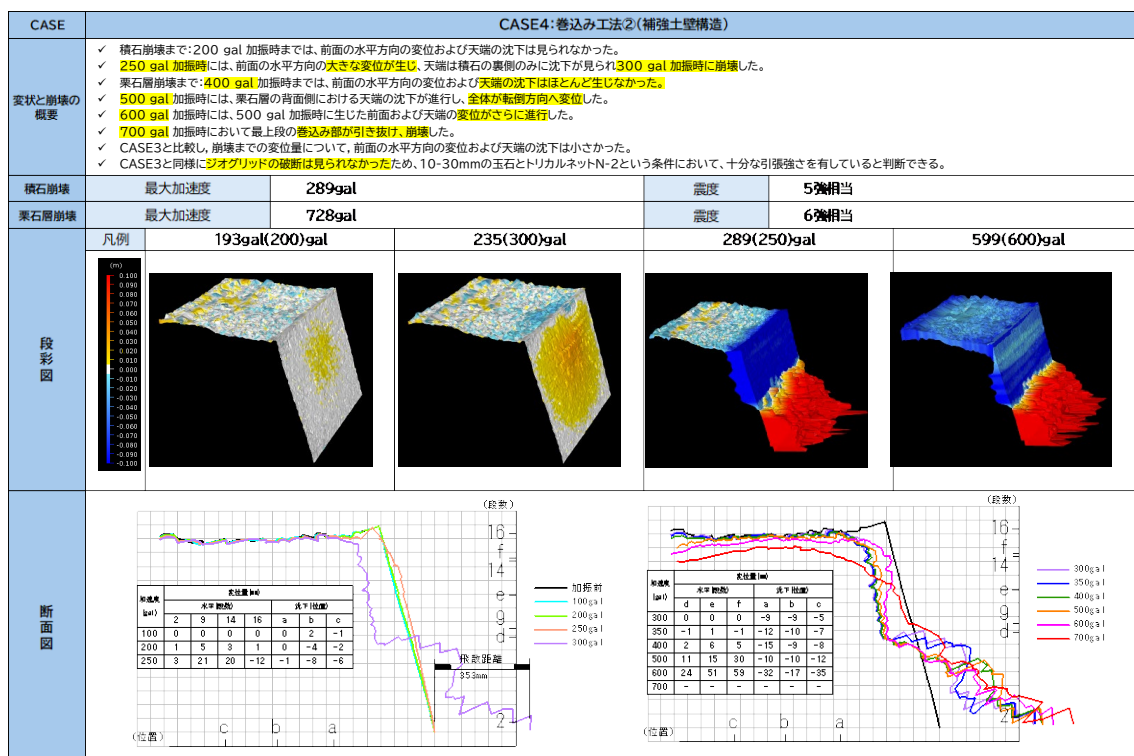
① CASE1・CASE2

CASE	CASE1:無補強				CASE2:水平敷設																																																																																																		
変状と崩壊の概要	✓ 200 gal 加振時に前面の水平方向のわずかな変位が生じたが、天端の沈下は見られなかった。 ✓ 250 gal 加振時に前面および天端の変位が顕著となり、300 gal 加振時に崩壊した。				✓ 250 gal 加振時に前面の水平方向のわずかな変位および天端のわずかな沈下が見られた。 ✓ 300 gal 加振時には、前面および天端の変位がさらに進行し、350 gal 加振時に崩壊した。																																																																																																		
横石崩壊	最大加速度	299gal	震度	5強相当	最大加速度	329gal	震度	5強相当																																																																																															
裏石崩壊	最大加速度	同上	震度	同上	最大加速度	同上	震度	同上																																																																																															
段彩図	凡例	182(200)gal		224(250)gal		凡例	180gal(200)gal		224(250)gal																																																																																														
																																																																																																							
																																																																																																							
断面図																																																																																																							
	<table><tr><th>加振時 (gal)</th><th colspan="4">位置 (mm)</th><th colspan="3">地下 (mm)</th></tr><tr><th></th><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>d</th><th>e</th><th>f</th><th>g</th></tr><tr><td>100</td><td>2</td><td>9</td><td>14</td><td>16</td><td>5</td><td>6</td><td>6</td></tr><tr><td>200</td><td>4</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td><td>-5</td><td>-10</td><td>-7</td></tr><tr><td>250</td><td>7</td><td>40</td><td>57</td><td>35</td><td>-17</td><td>-14</td><td>-3</td></tr><tr><td>300</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-11</td></tr></table>				加振時 (gal)	位置 (mm)				地下 (mm)				a	b	c	d	e	f	g	100	2	9	14	16	5	6	6	200	4	15	16	10	-5	-10	-7	250	7	40	57	35	-17	-14	-3	300	-	-	-	-	-	-	-11	<table><tr><th>加振時 (gal)</th><th colspan="4">位置 (mm)</th><th colspan="3">地下 (mm)</th></tr><tr><th></th><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>d</th><th>e</th><th>f</th><th>g</th></tr><tr><td>100</td><td>2</td><td>9</td><td>14</td><td>16</td><td>5</td><td>6</td><td>6</td></tr><tr><td>200</td><td>4</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td><td>-5</td><td>-10</td><td>-7</td></tr><tr><td>250</td><td>7</td><td>41</td><td>63</td><td>-</td><td>-16</td><td>-2</td><td>3</td></tr><tr><td>350</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>2</td></tr></table>				加振時 (gal)	位置 (mm)				地下 (mm)				a	b	c	d	e	f	g	100	2	9	14	16	5	6	6	200	4	15	16	10	-5	-10	-7	250	7	41	63	-	-16	-2	3	350	-	-	-	-	-	-
加振時 (gal)	位置 (mm)				地下 (mm)																																																																																																		
	a	b	c	d	e	f	g																																																																																																
100	2	9	14	16	5	6	6																																																																																																
200	4	15	16	10	-5	-10	-7																																																																																																
250	7	40	57	35	-17	-14	-3																																																																																																
300	-	-	-	-	-	-	-11																																																																																																
加振時 (gal)	位置 (mm)				地下 (mm)																																																																																																		
	a	b	c	d	e	f	g																																																																																																
100	2	9	14	16	5	6	6																																																																																																
200	4	15	16	10	-5	-10	-7																																																																																																
250	7	41	63	-	-16	-2	3																																																																																																
350	-	-	-	-	-	-	2																																																																																																

② CASE3



③ CASE4



3) 積石

a) 積石の変状範囲

加振前と比較したときの変位を下表に示す。青がマイナス、赤がプラス変位を表す。崩壊段階前の加振後では大きな差は確認できないが、比較的小さな加振段階では変状範囲はCASE1>2≧3≧4の順である。地震動による変位に伴う解体修理範囲はCASE2、3、4が狭くなることと推測される。

目標加速度		100	200	250	300	350	400	500	600	700	備考
換算震度		4相当	5弱	5弱	5強	5強	5強	6弱	6弱	6弱	
底影図及び最大加速度	CASE1	93	182	274	299	-	-	-	-	-	300で積石崩壊
	CASE2	93	180	224	249	329	-	-	-	-	350で積石崩壊
	CASE3	95	180	228	277	315	224	469	578	717	300で積石崩壊 700で崩壊体崩壊
	CASE4	107	193	236	280	332	385	482	599	728	300で積石崩壊 700で崩壊体崩壊

(単位: μm/mm/s²)

図 2 加振前と比較したときの変位

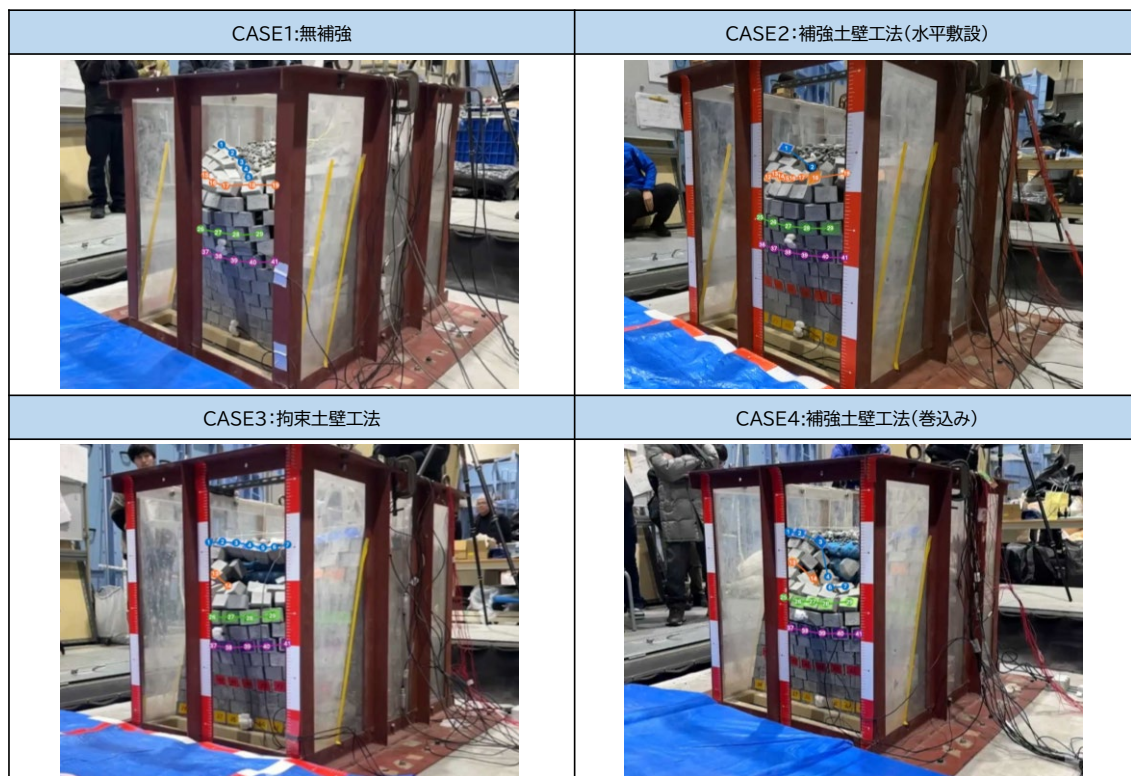


写真 2 崩壊瞬間の状況

b) 飛散距離

土層前面の柱の影響あるものの、飛散距離は CASE1>2>3≒4 の順である。これは CASE1、2 では積石と栗石層が同時に崩壊するのに対し、CASE3、4 では積石のみが崩壊するためである。

石垣の周辺環境によっては、築石の一部崩壊が許容される場合がある。このような条件下では、CASE3、4 のように栗石層を補強する構造を採用することで、飛散距離を小さくし、石垣からの離隔距離を最小限に抑える効果が期待できる。

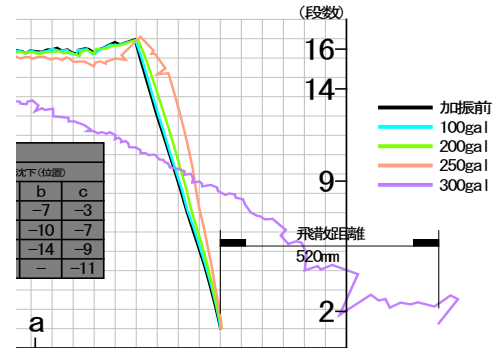


図3 断面図

c) 積石の水平変位

3D レーダー計測結果から、水平方向の変位量が最も小さい積石 2 段目を 1 とし、9、14、16 段目の水平方向変位量倍率を図 4 に示す。

CASE 1、2 は 1 4 段目を中心にくの字型にはらみ出し崩壊した。

断面図を確認すると、CASE1、2 ともに 200gal 加振時、天端の沈み込みより先に積石が変形していることが確認できる。(図 3)

CASE3、4 は 9 段目を中心にくの字型にはらみ出し崩壊した。

いずれのケースにおいても、熊本城内で発生した石垣中段からくの字型に変形し崩壊した事象と類似している。

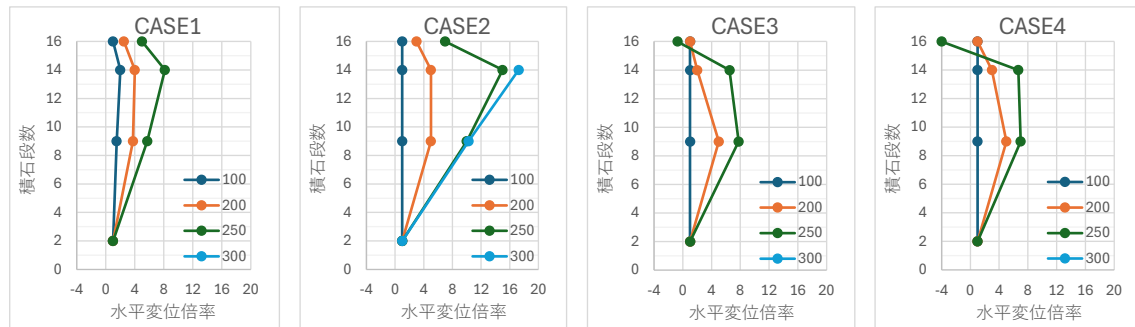


図4 各ケースにおける積石の水平方向変位量の応答倍率一覧

d) 地表面（天端）沈下量

最上段の積石前面から 200mm 離れた位置の栗石層表面の沈下量を図 5 に示す。

200gal 加震時において CASE1 の沈下量は 5mm、CASE2 は 1mm、CASE3、4 は沈

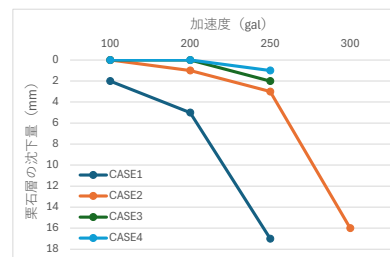


図5 加速度と栗石層表面の沈下量の関係

下がなかった (0mm)。このことから、ジオグリッドによる栗石層の沈下量の低減効果はあると判断できる。

4) 栗石層 (玉石)

a) 栗石移動量

積石に対して栗石層がどのような挙動をするのか、また補強方法によってその挙動に相違があるのかを確認するために、加振後の各段階で取得した側面オルソ画像を重ね、移動した栗石の移動量を計測。

側面に A~G 列、1~6 行を設定し、各グリッド内の任意の栗石の移動量と角度を計測する。グリッド内の移動量と角度を平均化し、図示する。移動量を見やすくするために 5 倍で矢印にて図示。

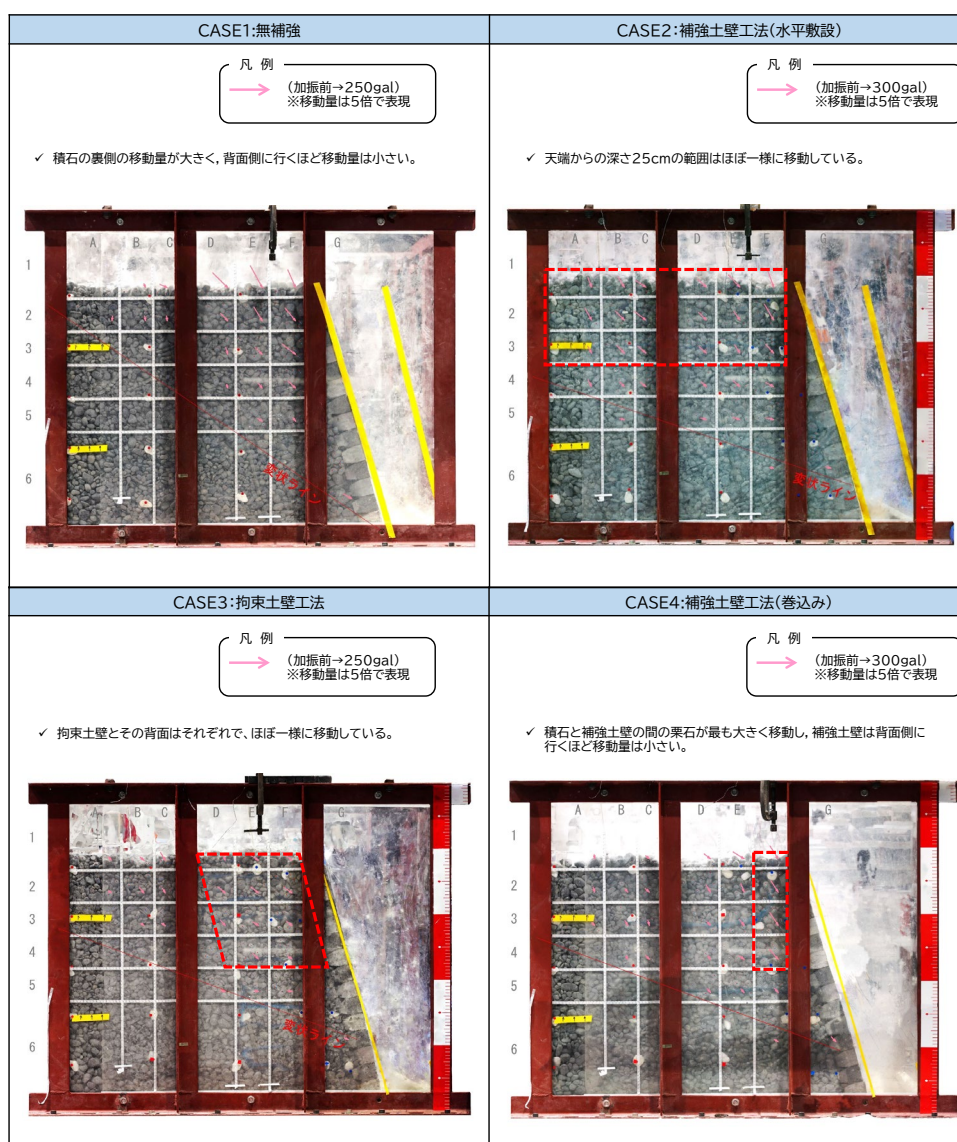


図 6 栗石移動量

変状の範囲は CASE1 が最も狭く、勾配も急であり、移動量も大きい。CASE2、3、4 は範囲および勾配が同程度である。全体として下部に行くほど移動量は小さい傾向である。このことから、ジオグリッドの敷設範囲については、栗石の移動量の低減効果はあると判断できる。

5) 応答加速度

a) 応答加速度の比較（積石と栗石）

崩壊 1 段階前の 250gal 加振時の積石に設置した加速度計の測点 4、7 と栗石層に設置した加速度計の測点 5、6、8、9 の応答加速度から、位相差を確認する。

加速度計 4、5（中段）では位相差は、1.0rad を下回るが、7、8（上段）では位相差が 0.3～1.3rad となっており、位相差が大きくなる。今回の計測値は誤差の範囲内と考えられるため、概ね同位相であると判断できる。

CASE1 の無補強と比較した際、CASE3 および 4 は中段においても上段においても最大値及び最小値が同様の傾向を示す。補強された栗石層と積石が異なる位相となり、積石がはじき出される可能性が懸念されていたが、内部補強が崩壊の要因となる挙動は確認できない結果となった。

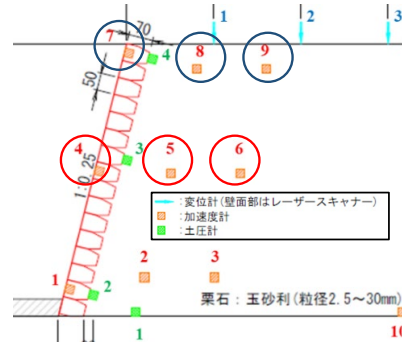


図 7 計測機器位置図

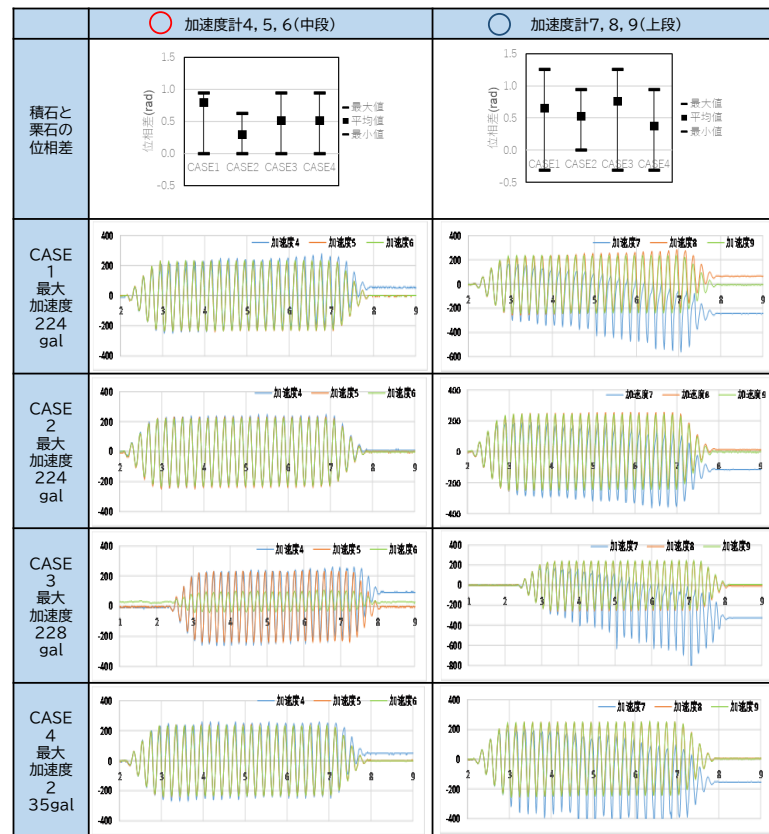


図 8 応答加速度重ね図一覧表（250gal 加震時）

b) 土圧と応答加速度の比較

積石 9 段目に設置した加速度計 4 とその背面に設置した土圧計 3 の時刻歴の推移を整理する。

全てのケースにおいて、先に応答加速度が正の方向にシフトし、その後、土圧が増加する傾向が見られる。ここで、応答加速度が正の方向にシフトするのは積石が前方へ傾斜しているためと考えられる。

積石の傾斜が土圧によって生じたのなら、土圧増加ののちに応答加速度が増加する関係性となるが、確認されなかった。

当実験においては、栗石層表面の沈下量の関係も踏まえると、積石の崩壊メカニズムは、栗石層の変位に伴い積石が押されたことによるものとは判断できず、積石自体の変位が先に生じ崩壊したと考察される。

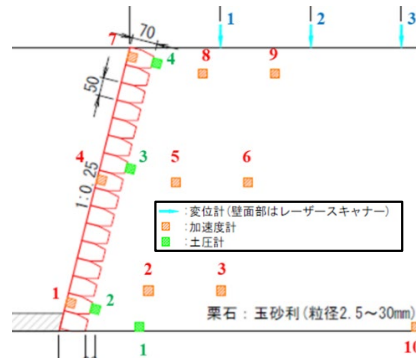


図 9 計測機器位置図

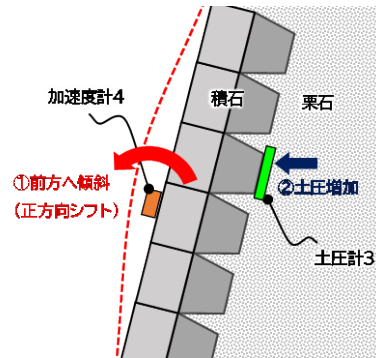


図 10 計測機器位置図

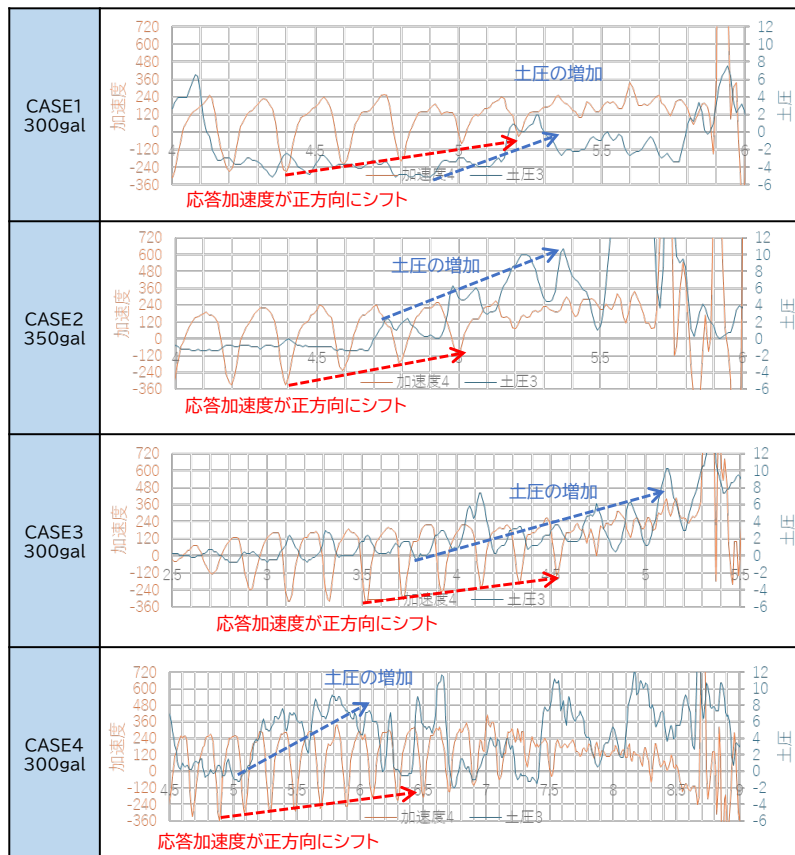


図 11 土圧と応答加速度の関係図一覧表 (崩壊時)

●まとめ

本実験により次の知見が得られた。

- ・ 上部ほど応答倍率が高いことから、積石が自由に移動しやすい状態にあることが示された。また、上部ほど積石と栗石の位相差が大きく、一体的な挙動を示さないことが確認された。
- ・ 加振段階が小さいうちは、積石の変位によって土圧の低減が確認された。一方、加振段階が大きくなると、上部からの拘束が弱まり、下部の積石が自由に移動し始める。その後、積石に大きな土圧が作用し、最終的に崩壊に至ることが確認された。これらの結果から、築石自体の慣性力が挙動に大きく影響していることが明らかとなった。
- ・ 上記の事象は補強の有無や補強方法の違いによって、耐震性に影響を及ぼすほどの顕著な差は確認できない。
- ・ ジオグリッドは栗石層の沈下抑制に有効であることが確認された。また、補強 CASE3 および CASE4 は、内部構造（栗石層）に対して一定の耐震性を有することが確認された。

今後は今回得られた知見を生かし、積石の動きを抑えること等の検討を進める予定である。