

非石塁構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験

国士舘大学	正会員	○橋本 隆雄
防災科学技術研究所	正会員	中澤 博志
金沢大学	正会員	池本 敏和
金沢大学	正会員	宮島 昌克

1. 研究の目的

2016年熊本地震は $M_j6.5$ の前震及び $M_j7.3$ の本震により熊本県全域に大きな被害をもたらした。特に、熊本県のシンボルである熊本城では、石垣全体の30%が崩壊や孕みの被害が生じた。特に、宇土櫓石垣等の大きく孕みを生じた箇所については、現段階で解体後積み直ししか無いため、その補強対策が求められている。筆者らはその対策を考案したが、その効果はまだ明らかとなっていない。そこで、写真-1に示す茨城県つくば市にある国立防災科学技術研究所の大型振動実験施設を用いて2019年8月5日～10月14日の期間で3回の実験を行った。本論文では、非石塁の石垣補強対策の実験結果からその耐震性評価の検証を目的としている。

2. 試験体と実験ケース

この非石塁の実験は、図-1に示すように振動台のサイズは $14.5\text{m} \times 15.0\text{m}$ で、大型せん断土槽の内寸法は長さ $11.6\text{m} \times$ 幅 $3.1\text{m} \times$ 高さ 4.5m で鉄筋挿入アンカー工法、筒状固結アンカー工法の2種類の異なるモデルの石垣を作成して振動実験を行った。地震動波形は、各石垣の孕み変状や裏栗石の沈下挙動を明確にするために図-2に示すように前後にテーパーを付けた正弦波である。加振は 10Hz の正弦波を加振時間10秒で 100gal から 300gal 、 450gal と徐々に大きくし、その後、 3Hz 、 650gal で2回加振した。その他に正弦波 10Hz 、正弦波 3Hz の加振前後に、試験体の固有振動数を確認するためにホワイトノイズ波の加振を行った。

3. 実験結果

図-3は各モデルの 650gal の地震動を2度受けた場合の石垣前面からの写真と水位変位量のコンター図を重ねたものである。(a)鉄筋挿入アンカー工法はある程度孕みを抑える効果があるが、アンカーが抜き出ることにより拘束効果が薄れて孕みになることが明らかとなった。(b)筒状固結アンカー工法は変状が非常に少なく効果的であることが明らかとなった。石垣の上部が後方に大きく沈下した影響を受けているのは、石垣の栗石の背面にある土層を土嚢の中に砂を入れたものが地震動により沈下したためである。

図-4は加速度を段階的に増加させたときの各加速度で加振した後の残留変位量である。グラフの縦は積み石の段数で、横が加速度毎の水平変位を表している。 115gal 、 328gal 、 491gal までは両モデルとも水平変位がみられないが、 650gal の1回目で大きくなった。 650gal の2回目の累積変位量は、(a)が前面に 80mm 、背面に 280mm と大きな変位をしているのに対して、(b)が前面に 2mm 、背面に 50mm と非常に小さな変位になっている。このことから非石塁の(b)の対策は変位を抑制し、非常に効果的であることが分かる。図-5は 650gal (2回目)で加振した後における心材の残留ひずみ(μ)の状況である。(a)ではアンカー機能が働いていないため栗石が沈下を生じ、上段と中段に下側にそりが生じている。一方、(b)はアンカー機能が働き石垣を拘束しているため上側にひずみが生じていることが分かった。

4. まとめ

- (1) 非石塁の実験では、筒状固結アンカー工法の変状が非常に少なく効果的である。
- (2) 加振した後における心材の残留ひずみ(μ)の状況から筒状固結アンカー工法ではアンカーが有効に働き、石垣を拘束し裏栗石の沈下を抑えていることが明らかとなった。

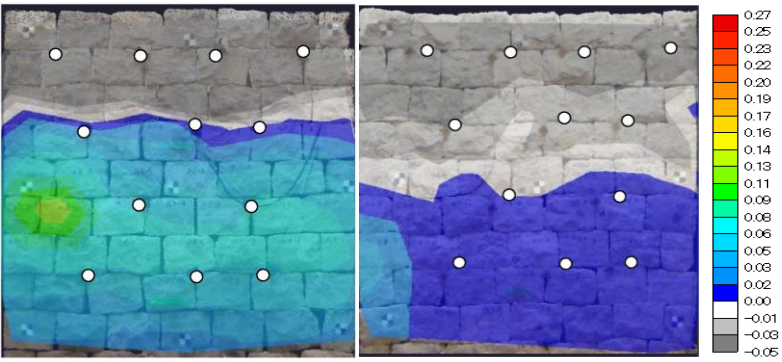
謝辞: 本実験の資金は、熊本市経済観光局熊本城総合事務所から(公財)文化財建造物保存技術協会が受託し、国士舘大学が再受託して防災科学技術研究所の共同研究として行った。厚く御礼を申し上げ感謝する次第です。

キーワード 石垣, 補強, 実験, 補強対策, 振動台実験

連絡先 〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1 国士舘大学理工学部 TEL 03-5481-3253

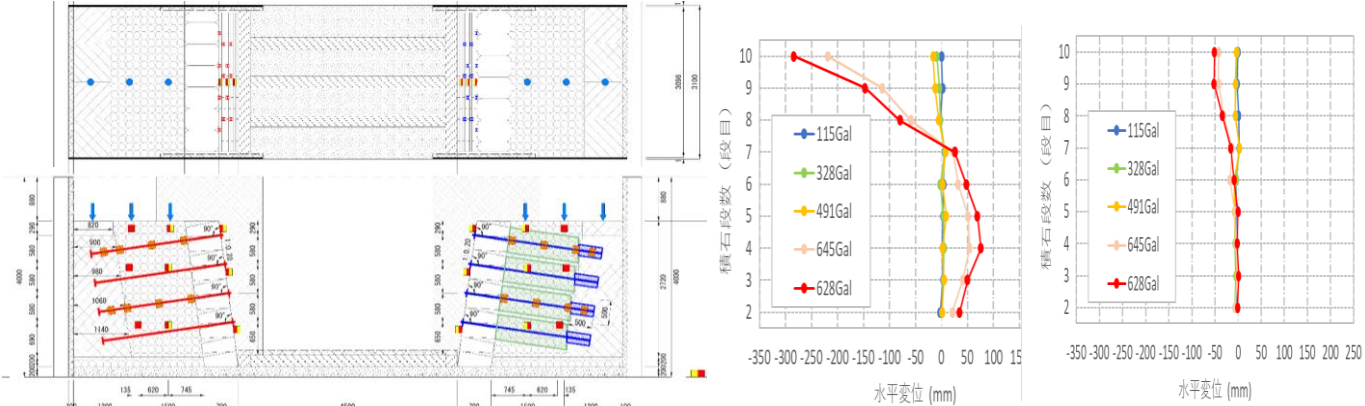


写真-1 実験に用いたせん断土槽



(a) 鉄筋挿入アンカー工法 (b) 筒状固結アンカー工法

図-3 650gal (2回目) 加速度時の築石変動コンター



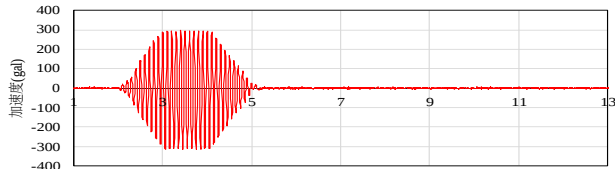
(a) 鉄筋挿入アンカー工法 (b) 筒状固結アンカー工法

図-4 各加速度時の累積変位量

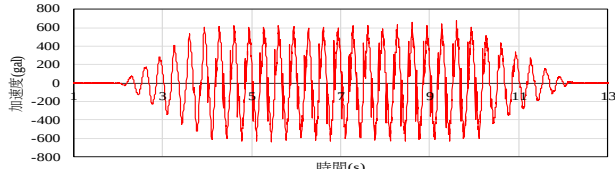
記号	内 容
	接触式変位計
	加速度計 (水平)
	加速度計 (鉛直)
	ひずみゲージ

(a) 鉄筋挿入アンカー工法 (b) 筒状固結アンカー工法

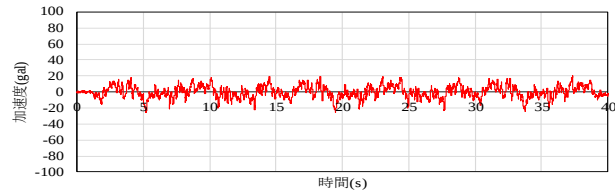
図-1 試験体と計器配置 (非石塁の実験モデル)



(a) 正弦波 10Hz

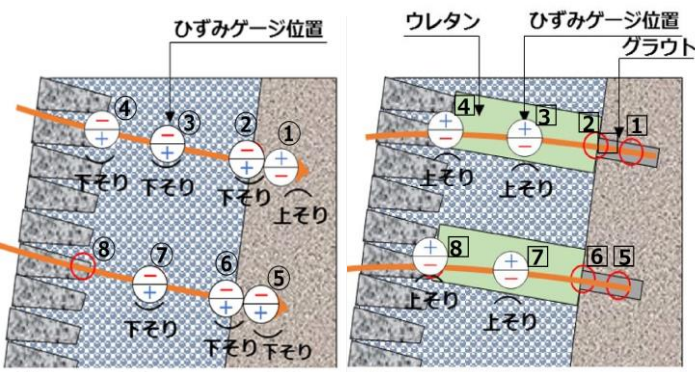


(b) 正弦波 3Hz



(c) ホワイトノイズ波

図-2 振動台実験における入力地震動



(a) 鉄筋挿入アンカー工法 (b) 筒状固結アンカー工法

位 置	種 別	ゲージ 番号	ゲージ位置		評 価
			下	上	
上段	鉄筋挿入 アンカー	①	-92.24	85.47	若干上そり
		②	647.79	-629.98	下そり
		③	1197.88	-1228.14	下そり
		④	1015.35	-989.15	下そり
	筒状固結体 アンカー	①	52.61	-58.49	そり無し
		②	NG	-60.25	そり無し
		③	-358.56	1179.01	上そり
		④	-36.39	200.07	上そり
中段	鉄筋挿入 アンカー	⑤	168.40	28.18	下そり
		⑥	339.58	-297.68	下そり
		⑦	841.28	-858.21	下そり
		⑧	8.77	-29.11	そり無し
	筒状固結体 アンカー	⑤	20.71	16.12	そり無し
		⑥	-58.04	82.88	そり無し
		⑦	-805.38	415.85	上そり
		⑧	-75.36	209.90	上そり

図-5 650gal (2回目) における芯材の残留ひずみ (μ)