

城郭石垣の崩落を防止する補強材「グリグリッド®」の開発

粕谷 悠紀

川本 卓人

森田 晃司

(本社土木本部)

(本社土木本部)

西村 俊亮

内藤 哲郎

ルイス ベンジャミン

(本社土木本部)

(本社土木本部)

(本社土木本部)

Development of Reinforcement Material for Preventing Collapse of Castle Wall

Yuki Kasuya

Takuto Kawamoto

Kouji Morita

Shunsuke Nishimura

Tetsuro Naito

Lewis Benjamin

Abstract

Owing to the collapse of castle walls due to large earthquakes, reinforcement measures are necessitated to ensure the stability of castle walls. A reinforcement method involving geogrids has been adopted. However, the maximum mesh size of the conventional geogrid is 50 mm for 100 to 300 mm rubble stones; therefore, the trapping of rubble stones is hindered. Hence, we develop a new guri-grid that can adjust the mesh spacing and does not hinder rubble stone trapping. The results of pullout test using full-scale rubble stones and the pullout friction of the guri-grid indicate values that are more than twice larger than those of conventional geogrids. The results of shaking table test for a level-2 earthquake motion indicate that the earthquake resistance of the combination of the guri-grid and an anchored grid is more than twice larger than that of an unreinforced case.

概要

大地震による城郭石垣の崩壊を機に、地震時の崩落防止を目的とした石垣の補強対策が求められている。この補強対策として、ジオグリッド補強盛土工法が採用されている。しかし、従来のジオグリッドの目合いは最大で50mm程度であり、築石の背面を構成する栗石の粒径(100~300mm程度)に対して小さいので、栗石間の噛み合わせが阻害される。そこで、栗石の粒径に応じて目合いを調整でき、栗石間の噛み合わせを阻害しない補強材「グリグリッド®」を開発した。実物大の栗石を用いた引抜き実験結果より、グリグリッドの引抜き摩擦強さは、いずれの拘束圧でも従来型ジオグリッドの2倍以上の値を示した。また、L2クラスの地震動を作用させて補強効果を検証した振動台実験では、グリグリッドの敷設とアンカーを複合した補強により、無補強の石垣と比較して耐震性が2倍以上に向上することがわかった。

1. はじめに

大規模地震の影響により、過大な変形や崩壊が発生した城郭石垣は、一旦解体し、積み直すことで復旧される。その際、文化財としての価値を保全するために、構築当時と同じ材料と手法を用いて復元されてきた。石垣前面に積まれる築石は元の位置に戻し、背面に積まれる栗石は、伝統的手法と同様に人力で噛み合わせながら復元する。

最近では、石垣の前を人が通行する箇所を中心に地震時の崩落防止を目的とした、ジオグリッド補強盛土工法が採用されている。築石の背面を構成する栗石の粒径(100~300mm程度)に対し、従来のジオグリッド(以下、従来型ジオグリッド)の目合いは、最大でも50mm×50mm程度と小さいので、栗石間の噛み合わせが阻害され、伝統的手法を適用できなくなることがあった。

そこで、栗石の粒径に応じて目合いを調整でき、栗石間の噛み合わせを阻害しない新型ジオグリッド「グリグリッド®」を開発した(Fig. 1)。グリグリッドは、従来型ジオグリッドと同じ帯材とステンレス鋼およびワッシャーを用いて格子状に接合したシート材であり、城郭石垣の崩落

防止を目的として敷設する補強材である。

本報告では、グリグリッドの特長を述べた後、引抜き摩擦強さを確認するために実施した実物大の引抜き実験結果について述べる。さらに、L2クラスの地震動を作用させた場合の補強効果を把握するために実施した1/5スケールの振動台実験結果について述べる。

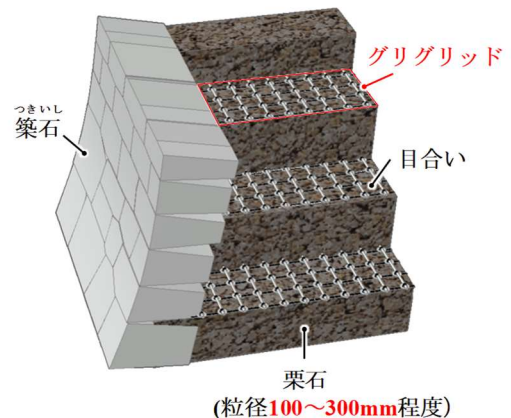


Fig. 1 グリグリッドによる城郭石垣の補強
Reinforcement of Castle Wall by “Guri-Grid”

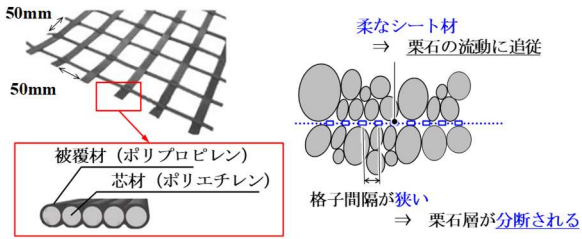


Fig. 2 従来型ジオグリッドと補強イメージ
Conventional Geo-Grid and Reinforcement Image

2. グリグリッドの特長

Fig.2に従来型ジオグリッドの概要を示す。従来型ジオグリッドは、ポリエチレン製の芯材をポリプロピレンで被覆したPET繊維を格子状に配置し、格子交点部を熱溶着で固定したもので、その目合いは最大で50mm程度である。従来型ジオグリッドの主な課題として、剛性が小さい材料で構成されており地震時の栗石層の流動を拘束できずに変形してしまうこと、築石の背面を構成する栗石の粒径(100~300mm程度)に対して目合いが小さく栗石間の噛み合わせが阻害されること、が挙げられる。

グリグリッド(Fig.3)は、栗石の流動に対し直交する向きに剛性の高いステンレス鋼を配置することで栗石の流動を拘束し、崩落を防ぐことが可能な工法である。また、格子交点部にワッシャーを用いることで目合いを容易に調整でき、栗石の噛み合わせを重要視する伝統的手法の利点を生かしつつ、栗石層を補強することができる。

3. 実物大ジオグリッドの引抜き実験

3.1 実験概要

Fig.4に引抜き実験装置の概要を示す。土槽はH形鋼を組み立てた構造とし、その内寸法は幅1.0m、奥行き1.0m、高さ1.2mとした。栗石は、実物の石垣の粒度を参考に粒径50-150mmと150-200mmを重量比率2:1で配合したものを使用し、目標乾燥密度を1.6g/cm³として土槽内に設置した。ジオグリッドの敷設高さは、底面から0.6mとした。ジオグリッドは、引抜き治具およびナット付きのPC鋼棒と一体化し、センターホールジャッキを用いて引抜き作業を行った。ジオグリッドの引抜き高さを一定に保つため、反力桁との間にキャスター付きの水平台車を設けた。

ジオグリッドの引抜き速度は、「ジオシンセティックスの土中引抜き実験方法(JGS0942-2009)¹⁾」を参考とし、1mm/minとした。計測項目は、引抜き荷重、引抜き変位、土槽奥行き方向中央におけるジオグリッドの縦材の軸ひずみとした。拘束圧は実際に想定される荷重条件を包括するように14kN/m²、50kN/m²、100kN/m²の3段階とした。

Table 1に使用した従来型ジオグリッドとグリグリッドの仕様を示す。ジオグリッドの目合いは、使用する土の最大粒径に対し1/4以上とするのが良いとされている²⁾。栗石の最大粒径を200mmとしたため、グリグリッドの縦

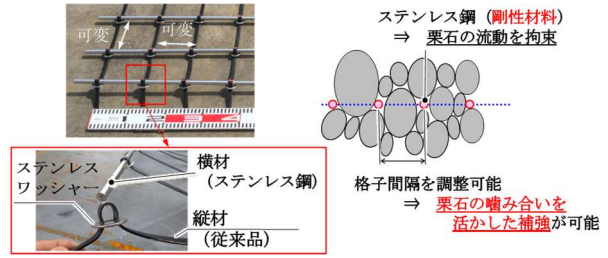


Fig. 3 グリグリッドの構造と補強イメージ
Structure of “Guri-Grid” and Reinforcement Image

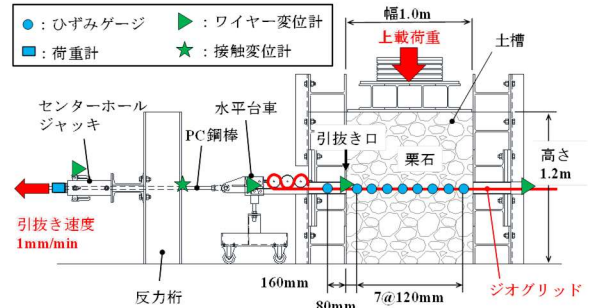


Fig. 4 引抜き実験装置
Pullout Test Equipment

Table 1 引抜き実験におけるジオグリッドの仕様
Specification of Geo-Grid of Pullout Test

種 別	従来型ジオグリッド		グリグリッド	
写 真				
材 料	縦材	繊維EX-60	縦材	繊維EX-200
	横材	繊維EX-60	横材	丸鋼φ12
引張強度	63.1kN/m(縦材)		63.2kN/m(縦材)	
目 合 い	縦40mm×横40mm		縦80mm×横120mm	
交点の 接続方法	熱溶着		座金M16	
交点強度	0.32kN/箇所		4.86kN/箇所	

材の最小間隔は50mmとなる。従来型ジオグリッドは、既存の製品で目合いが最大となるEX-60(目合い40mm)を選定した。グリグリッドの縦材間隔は、EX-60よりも引張強度が高いEX200の引張試験結果をもとに、単位幅あたりの引張強度が従来型ジオグリッドと同等となるように80mmとした。横材間隔は、目合いの最小間隔50mmと栗石の最大粒径200mmの中間程度の120mmとした。

グリグリッドの交点強度を把握するため、縦材1本のEX-200に1組の高強度ワッシャーおよび横材の丸鋼φ12mmを用いて引張実験を実施した。その結果、グリグリッドの交点強度は、従来型ジオグリッドの交点強度0.32kN/箇所に対し、15倍程度となる4.86kN/箇所を有することを確認している。

Table 2 引抜き実験ケースおよび実験結果一覧

Case of Pullout Test and Test Results						
ケース	種別	拘束圧 σ (kN/m ²)	最大荷重 F_{max} (kN/m)	引抜き摩擦強 さ τ (kN/m ²)	剥離箇所ま たは破断本数	破壊モード
Case1-1	従来型	14	31.8	15.9	多数	交点剥離が主, 破断, 折れ曲がり
Case1-2	ジオグ リッド	50	39.7	19.9	多数	交点剥離が主, 破断, 折れ曲がり
Case1-3		100	50.1	25.1	多数	破断が主, 交点剥離
Case2-1	グリグ リッド	14	49.7	49.7	6本	引抜き口付近で破断
Case2-2		50	47.2	47.2	4本	引抜き口付近で破断
Case2-3		100	54.5	54.5	3本	引抜き口付近で破断

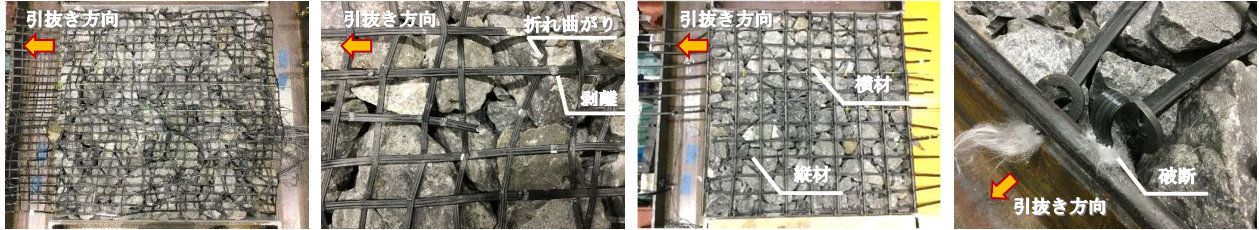


Photo 1 破断状況(Case1-1:従来型ジオグリッド)
Broken Situation of Conventional Geo-Grid

Photo 2 破断状況(Case2-1:グリグリッド)
Broken Situation of “Guri-Grid”

3.2 実験結果

3.2.1 実験後におけるジオグリッドの状況 Table 2に引抜き実験ケースおよび実験結果一覧を示す。Photo 1に従来型のCase1-1におけるジオグリッドの破断状況を示す。拘束圧が50kN/m²以下までは、敷設範囲全体にわたって交点の剥離箇所を多数確認し、破断や折れ曲がりなども一部確認した。

Photo 2にCase2-1におけるグリグリッドの破断状況をいずれの拘束圧においても引抜き口付近で破断していることを確認した。また、横材の丸鋼および縦材のPET繊維の塑性変形も引抜き口付近で確認され、土槽内の交点では破断や塑性変形は認められなかった。

3.2.2 引抜き荷重－引抜き変位関係 Fig. 5に引抜き荷重－引抜き変位関係を示す。引抜き変位は、ジャッキ付近で計測した変位から引抜き口付近で計測した変位(ジオグリッドの気中平均移動量)を差引いた値である。いずれの拘束圧もグリグリッドの最大引抜き荷重は、従来型ジオグリッドのそれを上回る結果を得た。

グリグリッドの荷重変位曲線は、拘束圧の大小に依らず概ね類似した挙動を示した。これは、縦材および横材の目合いが大きくなり、栗石とジオグリッドが噛み合っていること、縦材と横材の交点部分が破断せず大きな抑止力を発揮しているためと推察される。一方、従来型ジオグリッドは栗石間の噛み合せが障害され、剥離または破断を繰り返しながら徐々に引き抜ける結果であった。

3.2.3 ひずみ分布 Fig. 6に拘束圧50kN/m²における引抜き荷重10kNごとの縦材の軸ひずみ分布を示す。従来型ジオグリッドは引抜き口から土槽背面にわたる1,000mmの範囲全体で引抜きに抵抗しているのに対し、グリグリッドは引抜き口から500mm程度の範囲で引抜きに抵抗し、500mm以降はひずみが概ね500 μ 以下であ

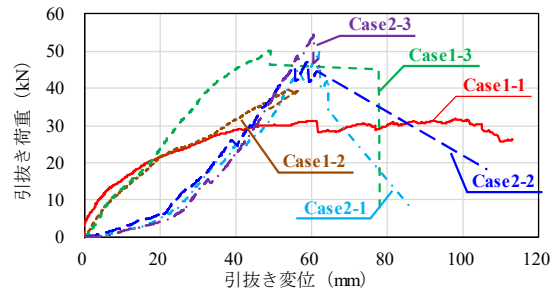


Fig. 5 引抜き荷重－引抜き変位関係
Pullout Load - Pullout displacement

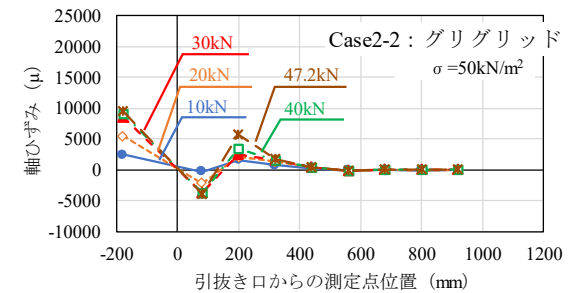
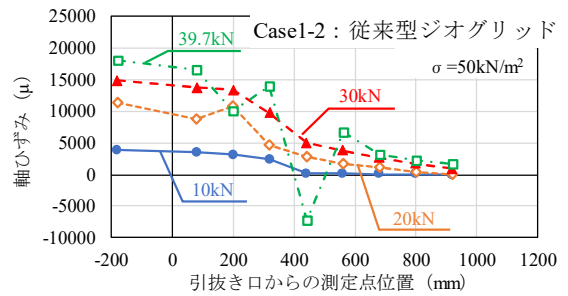


Fig. 6 縦材の軸ひずみ分布
(上：従来型ジオグリッド, 下：グリグリッド)
Distribution of Axial Strain of Vertical Grid (Upper Stand: Conventional Geo-Grid, Lower Stand: “Guri-Grid”)

る。これより、500mm以降にはほとんど力が作用していないと推察できる。以上の結果より、グリグリッドは、従来型ジオグリッドと比較して、1/2の敷設長で大きな引抜き抵抗を期待できる可能性が示唆された。

3.2.4 引抜き摩擦強さ τ - 拘束圧 σ 関係 Fig. 7に引抜き摩擦強さ τ - 拘束圧 σ 関係を示す。引抜き摩擦強さ τ は、「ジオシンセティックスの土中引抜き実験方法(JGS0942-2009)¹⁾」を参考とし、式(1)より算出した。

$$\tau = \frac{F_{max}}{2LB} \quad (1)$$

ここで、 F_{max} : 最大引抜き抵抗力(kN), B : ジオグリッド幅(=1.0m)とし、引抜き抵抗長 L は縦材の軸ひずみ分布の結果より従来型ジオグリッドで1.0m, グリグリッドで0.5mとした。

グリグリッドの引抜き摩擦強さ τ は、いずれの拘束圧 σ においても従来型ジオグリッドのその2倍以上であった。なお、実験後もジオグリッドはほとんど引抜けておらず引抜き口付近で破断して実験が終了している。この結果より、いずれのジオグリッドも引抜き摩擦強さは、実験値から得られた近似曲線以上であると推察される。

4. 模型グリグリッドの振動台実験

4.1 実験概要

Photo 3に振動台実験模型の全景を示す。実験には、内寸法で幅1.0m, 高さ1.2m, 奥行き2.4mの鋼製土槽を用いた。実験模型の変状を観察できるように、側面はアクリル製とした。実験は、高さ6m程度の石垣を対象とし、相似則は1/5とした。石垣の積み方式は布積とし、石垣の勾配は1:0.3とした。石垣の基礎は、堅固な地盤に拘束された状態を想定し、上から9段目の築石(以降、築石1段目と上から順に呼ぶ)は鋼製土槽の受け治具にはめ込む構造とした。築石は10cm角で背面はテーパ形状とし、密度は2.7g/cm³となるように重量コンクリートを打設して作製した。栗石は、実物の粒度と相似則を考慮し、粒径5~60mm(5~25mm : 44%, 20~40mm : 48%, 40~60mm :

8%)の玉砂利を用いた。栗石は、相対密度50%の1.764g/cm³($\rho_{dmin}=1.668g/cm^3$, $\rho_{dmax}=1.872g/cm^3$)となるように管理しながら作製した。

Photo 4にグリグリッドの振動台実験模型を、Table 3に

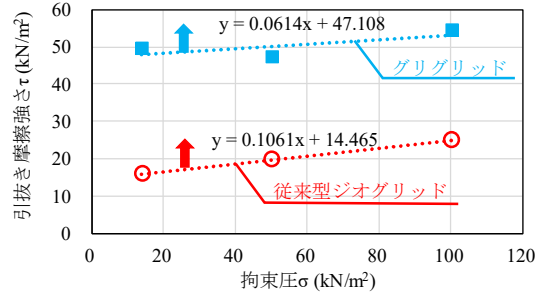


Fig. 7 引抜き摩擦強さ τ - 拘束圧 σ 関係
Pullout Friction - Confined Pressure

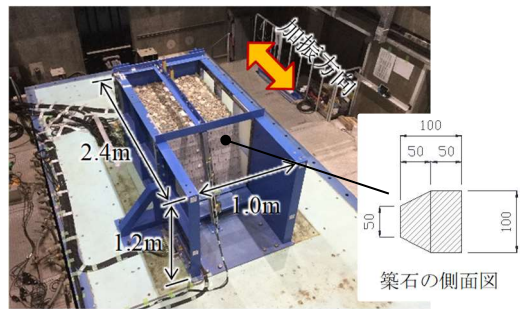


Photo 3 振動台実験模型の全景
Panoramic View of Shaking Table Test Model

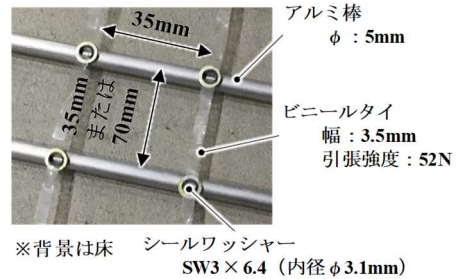
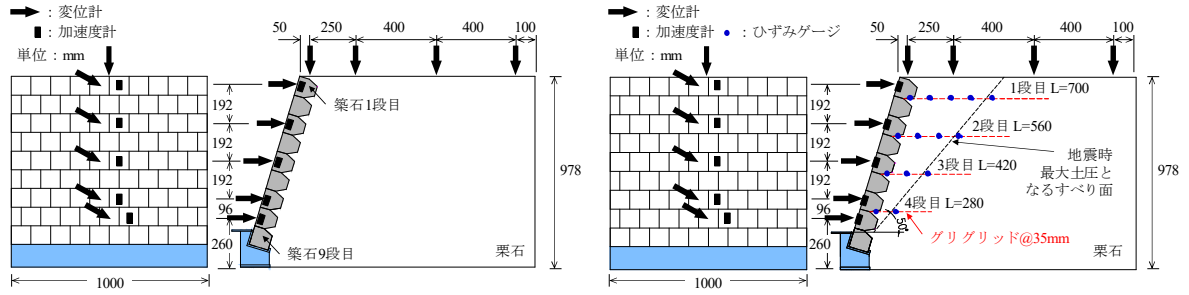


Photo 4 グリグリッドの振動台実験模型
Shaking Table Test Model of "Guri-Grid"

Table 3 振動台実験ケースおよび実験結果一覧

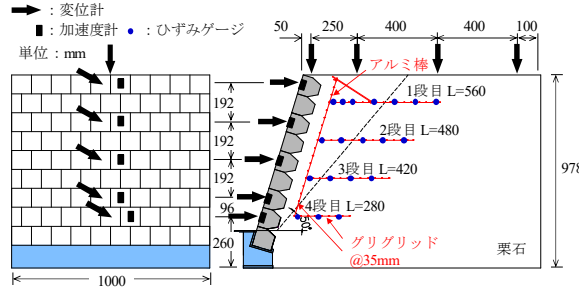
Case of Shaking Table Test and Test Results

ケース	種別	ジオグリッドの目合い	敷設以外の追加補強方法	石垣の対象	補強方法のコンセプト	崩壊の有無・規模	崩壊 or 最終加速度(gal)
Case1	無補強	—	—	指定なし	—	大崩壊	401
Case2	グリグリッド	縦35mm×横35mm	—	文化財(加工不可)	耐震性と景観のバランス	大崩壊	458
Case3-1			背面部巻込み(横筋)			中崩壊	457
Case3-2			背面部巻込み(縦筋)			中崩壊	448
Case4-1			高強度ネット+アンカー			崩壊せず	984
Case4-2			+受圧板			崩壊せず	959
Case5-1			壁面材			中崩壊	425
Case5-2		縦35mm×横70mm	壁面材+アンカー+受圧板	落石1個	909		
Case6-1			築石と連結したフックボルトのピッチ	100mm	落石1個	898	
Case6-2				200mm	落石3個	918	
Case6-3				300mm	落石1個	824	
				購入材(加工可能)	景観重視型		

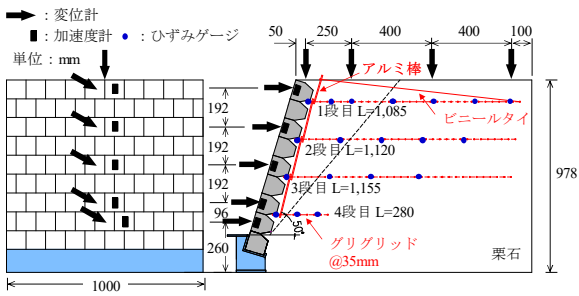


(a) Case1(無補強)

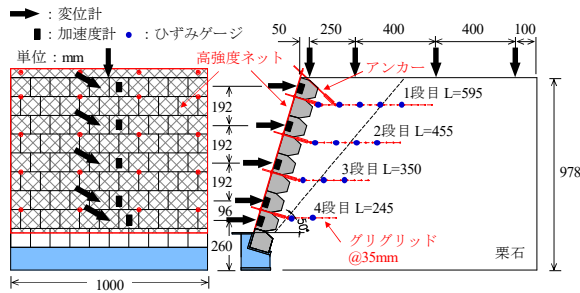
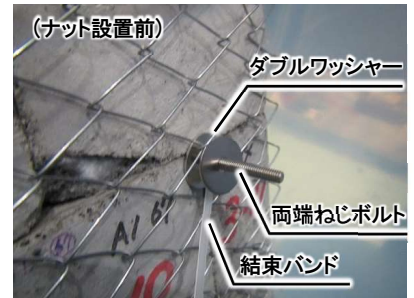
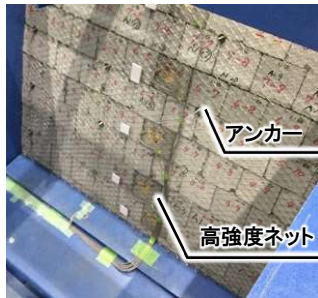
(b) Case2(グリグリッド敷設のみ)



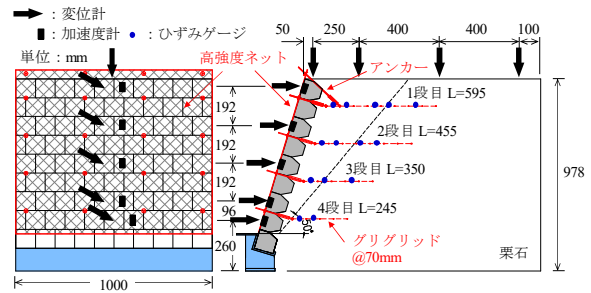
(c) Case3-1(グリグリッド+背面部巻込み(横筋))



(d) Case3-2(グリグリッド+背面部巻込み(縦筋))



(e) Case4-1(グリグリッド+高強度ネット+アンカー)



(f) Case4-2(グリグリッド+高強度ネット+アンカー)

Fig. 8 振動台実験模式図(その1)
Image of Shaking Table Test

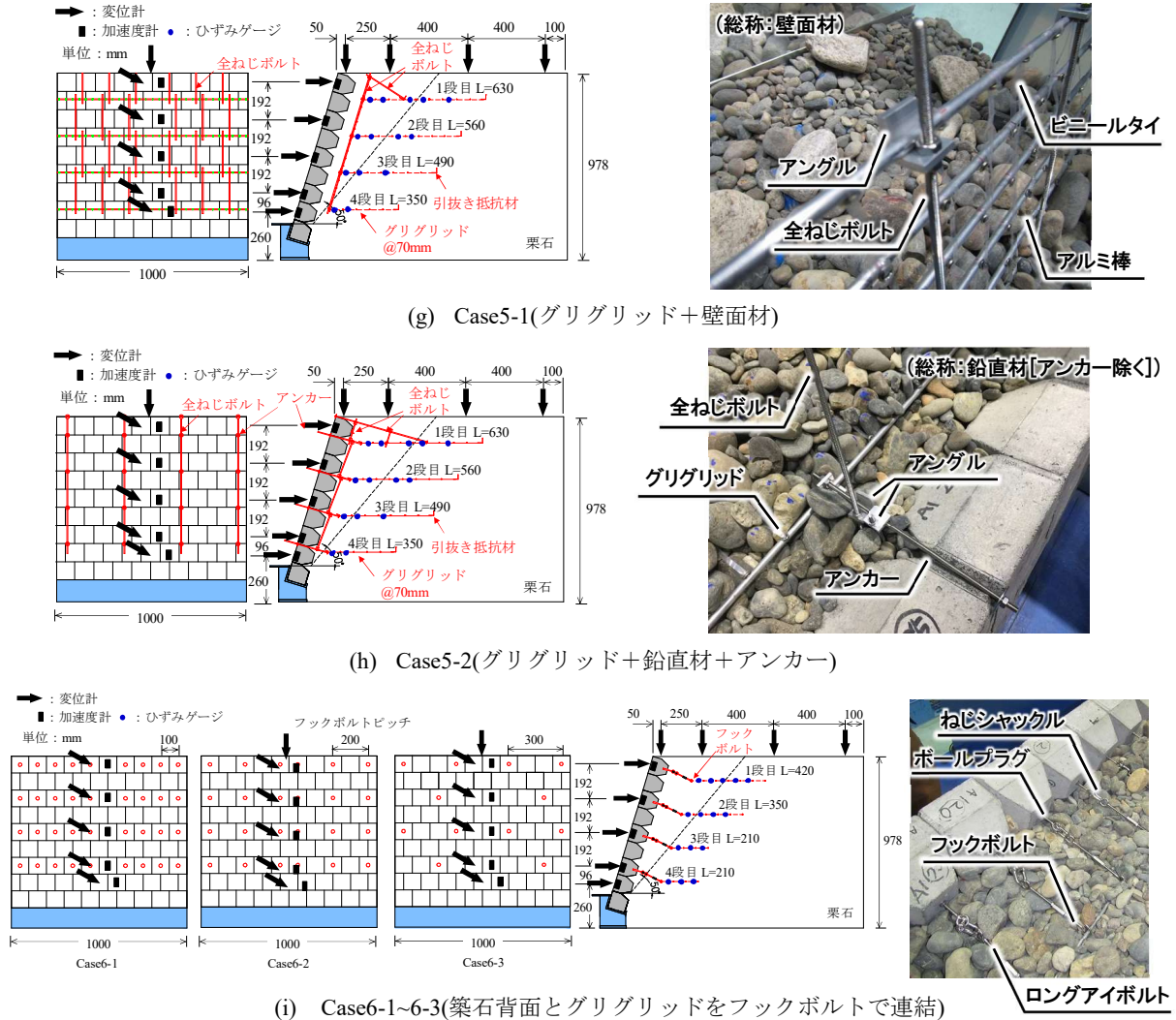


Fig. 8 振動台実験模式図(その2)

Image of Shaking Table Test

振動台実験ケースを、Fig.8に振動台実験模式図を示す。Case1は、無補強の石垣を模擬したケースである。Case2～Case6は、グリグリッドで補強した石垣を模擬し、目合いの寸法や追加の補強方法を実験パラメータとして比較したケースである。追加の補強方法は、対象とする石垣が加工可能か否か、補強のコンセプトに応じて設定した。Case4シリーズは、築石の落下も防止する耐震性重視型のケースである。Case6シリーズは、築石の前面からは補強していることが見えない景観重視型のケースである。Case3とCase5シリーズは、耐震性と景観のバランス(以降、バランス型という)を考慮したケースである。

グリグリッドありのケースは、栗石内に等間隔に4段敷設した。Case2以降のグリグリッドの実験モデルは、縦材を幅3.5mm、厚さ75 μ m、引張強度52Nのビニールタイとし、横材を ϕ 5mm、密度2.7g/cm³、ヤング率70GPaのアルミ棒とした。交点の接続は、内径 ϕ 3.1mmのシールワッシャーとした。栗石の最大粒径60mmより、その1/4の15mm以上を目合いの目安とし、縦材の目合いは60mmと15mmの間として35mmとし、縦35mm \times 横35mmと縦

35mm \times 横70mmの2種類とした。なお、Photo 4に示すグリグリッド模型で横ピッチを35mm、70mmおよび105mmとした場合の模型引抜き実験を別途実施しており、横ピッチが小さく、拘束圧が大きいくほど、引抜き摩擦強さが大きくなる傾向を示すことを確認している。

Case3-1およびCase3-2は、築石とグリグリッドは連結せず、各段に敷設したグリグリッド同士を築石背面にてビニールタイまたはアルミ棒で連結する構造である。

Case4-1およびCase4-2は高強度ネット+アンカー+受圧板の組合せ構造とした。高強度ネットは、素線径 ϕ 0.8mm、網目寸法20.4mm \times 34mmの鉄線ネットを使用した。アンカーは、 ϕ 4mmのステンレスフックボルトとし、グリグリッド側のアルミ棒にフックを引掛け、築石前面を覆った高強度ネットをワッシャーとナットで20箇所固定した。Case4-1およびCase4-2は、グリグリッドの横ピッチが異なる。

Case5-1はCase3-2の改良版であり、グリグリッドの末端には25mm \times 25mmの引抜き抵抗材(アルミ製アングル材)を設けた。Case5-2は、Case5-1の改良版であり、アン

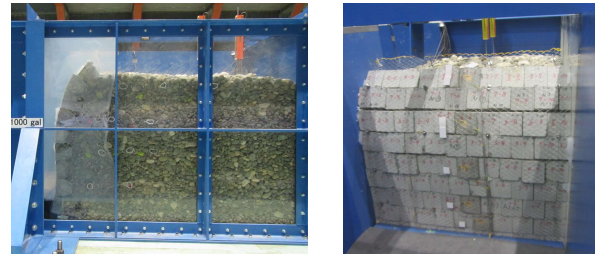


(a) Case1(無補強) : 大崩壊

(b) Case2(グリグリッドのみ) : 大崩壊



(c) Case3-2(背面部巻込み(縦筋)) : 中崩壊



(d) Case4-2(高強度ネット+アンカー) : 崩壊せず



(e) Case5-2(壁面材+アンカー) : 落石1個



(f) Case6-1(築石とグリグリッドを連結) : 落石1個

Photo 5 振動台実験後の状況

Situation After Shaking Table Test

カー+受圧版により築石を拘束する構造とした。

Case6-1~Case6-3は、フックボルトにより築石背面とグリグリッドを直接連結し、築石を拘束する構造とした。Case6-1~Case6-3はフックボルトのピッチを変化させた。

加振の入力波は5Hzのsin波を用い、1回あたりの入力波数は20波とした。加振方法は段階载荷とし、加速度振幅は、50gal, 100gal, 200gal, 200gal以降は50galずつ増加させた。実験終了基準は石垣が崩落するまたは振動台の最大加振能力(1,000gal)に到達した段階とした。計測項目は、築石に作用する加速度、築石前面の水平変位、築石天端の鉛直変位、およびグリグリッドのひずみである。

4.2 実験結果

4.2.1 実験後の状況 Table 3に振動台実験結果一覧を、Photo 5に振動台実験後の状況を示す。表中に示す加速度は、振動台に設置した加速度計の値である。

無補強のCase1では、401galで築石ごと変形する大崩壊が生じた。グリグリッド敷設のみのCase2は、450gal程度で大崩壊した。この結果より、グリグリッドの敷設のみでは築石のはらみ出しを防止できず、L2クラスの地震動より小さい加振力で崩落することがわかった。

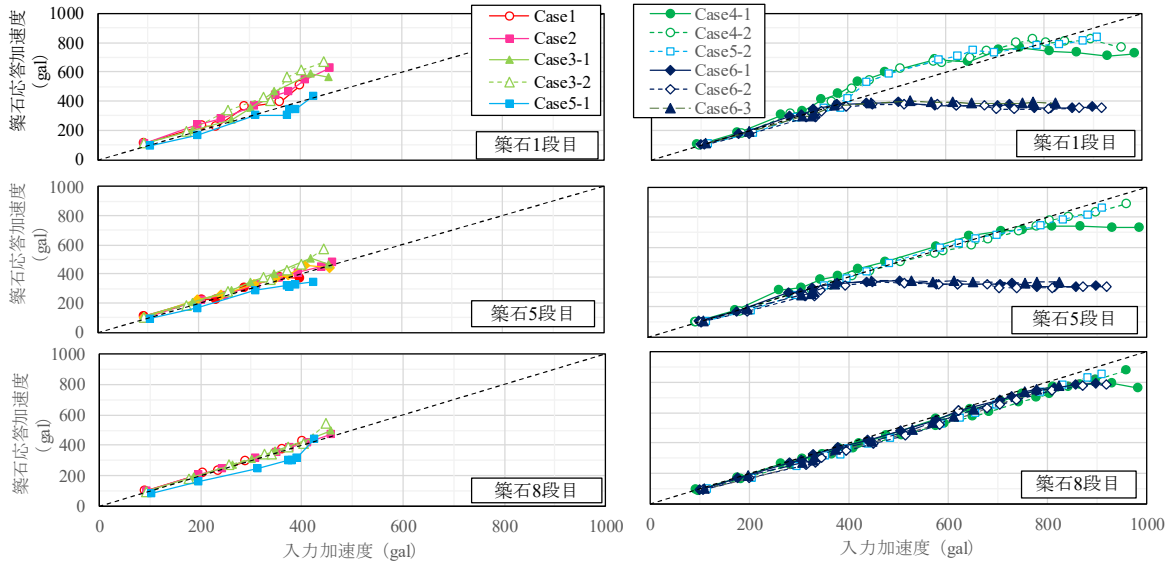
耐震性重視型で、高強度ネット+アンカーのCase4-1, Case4-2は、築石と栗石が前面に転倒するものの、950gal

以上でも崩壊に至らなかった。これは、高強度ネットによる面的な抜き出し防止と、グリグリッドと連結されたアンカーの引抜きに対する抑止力が効果的に発揮されたため、L2クラスの地震動が複数回作用しても崩壊しなかったといえる。

バランス型で、グリグリッド同士を連結し背面部を巻込んだCase3-1, Case3-2は、450gal程度で中崩壊が生じた。ここで、中崩壊とは、ほとんどの築石が落下するものの、栗石はほとんど変形しない崩壊形態をさす。築石に作用する側圧を低減すれば耐震性は向上すると考えていたが、築石のはらみ出しまで抑制できない結果となった。

Case3-2を改良したCase5-1は、425galで中崩壊が生じた。この結果より、築石背面に剛な壁面材を配置しても築石の崩落は防止できないことがわかった。Case5-1にアンカー構造を追加したCase5-2は、築石がばたつき前面に転倒するものの、909galで築石が1個落下したのみであった。これにより、高強度ネットなしでもグリグリッドとアンカーを連結することで、L2クラスの地震動が複数回作用しても崩壊しないことを確認した。

景観重視型で、Case6-1, Case6-2は900gal程度で築石が数個落下したのみであった。Case6-3は上記のケースと比較して築石とグリグリッドを連結する個数が少ないものの、800galで築石が1個落下したのみであった。この結果



(a) アンカーまたはフックボルトなしのケース (b) アンカーまたはフックボルトありのケース

Fig. 9 築石の応答加速度－入力加速度

Response Acceleration of Castle Stone – Input Acceleration

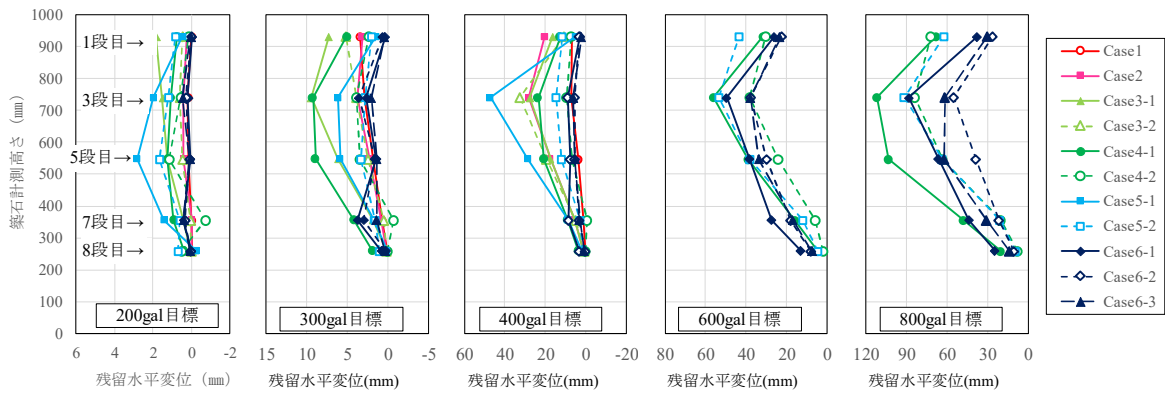


Fig. 10 各ステップ後の築石の残留水平変位分布

Distribution of Residual Lateral Displacement of Castle Stone After Each Shaking Step

より、フックボルトのピッチが300mmでも築石との連結による抑止力が効果的に発揮されるため、L2クラスの地震動が複数回作用しても崩落しないことを確認できた。

4.2.2 築石の応答加速度 Fig. 9(a), (b)に築石の応答加速度－入力加速度の関係を示す。入力加速度とは土槽外の振動台底版に設置した加速度計の実測値である。グラフは、Fig. 9(a)に無補強の石垣、グリグリッドの敷設のみ、築石背面の壁面構造による補強の結果を、Fig. 9(b)にアンカーまたはフックボルトを有する補強の結果を示す。また、上図に築石1段目の結果を、中図に築石5段目の結果を、下図に築石8段目の結果を示す。

Fig. 9(a)の最下図をみると、入力加速度の増大に伴い築石の応答加速度も概ね比例して増大していることがわかる。一方、Fig. 9(a)の中図および最上図をみると、入力加速度を上回る築石の応答加速度が生じており、最大1.5倍であった。以上の結果より、石垣の上部ほど築石の応答加速度が大きくなることを確認した。

Fig. 9(b)の最下図をみると、入力加速度の増大に伴い築石の応答加速度も概ね比例して増大しており、いずれも800gal程度で頭打ちとなっている。Fig. 9(b)の中図および最上図をみると、入力加速度の増大に伴いCase4シリーズにおける築石の応答加速度は概ね比例して増大し、800gal程度で頭打ちとなっているのに対し、Case6シリーズにおけるそれは400gal程度で頭打ちとなっている。以上の結果より、Case6シリーズで石垣の上部になると、築石の応答加速度は入力加速度よりも小さくなり、L2地震動クラスの大きな加振に耐えていることがわかる。

4.2.3 築石の残留水平変位分布 Fig. 10に各ステップ後の築石の残留水平変位分布を示す。グラフは、入力加速度における目標値のうち、200gal, 300gal, 400gal, 600gal, 800galを示して比較した。入力加速度の増大に伴い、石垣の上部は水平変位が増大するものの、築石8段目における築石の増分は極めて小さいことから、築石全体の崩壊形態は転倒モードと推察される。また、築石の残

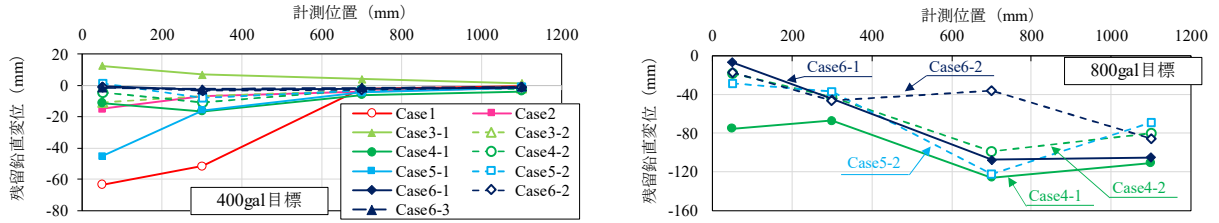


Fig. 11 各ステップ後の栗石天端の残留鉛直変位分布

Distribution of Residual Vertical Displacement at the Top of Rubble Stone After Each Shaking Step

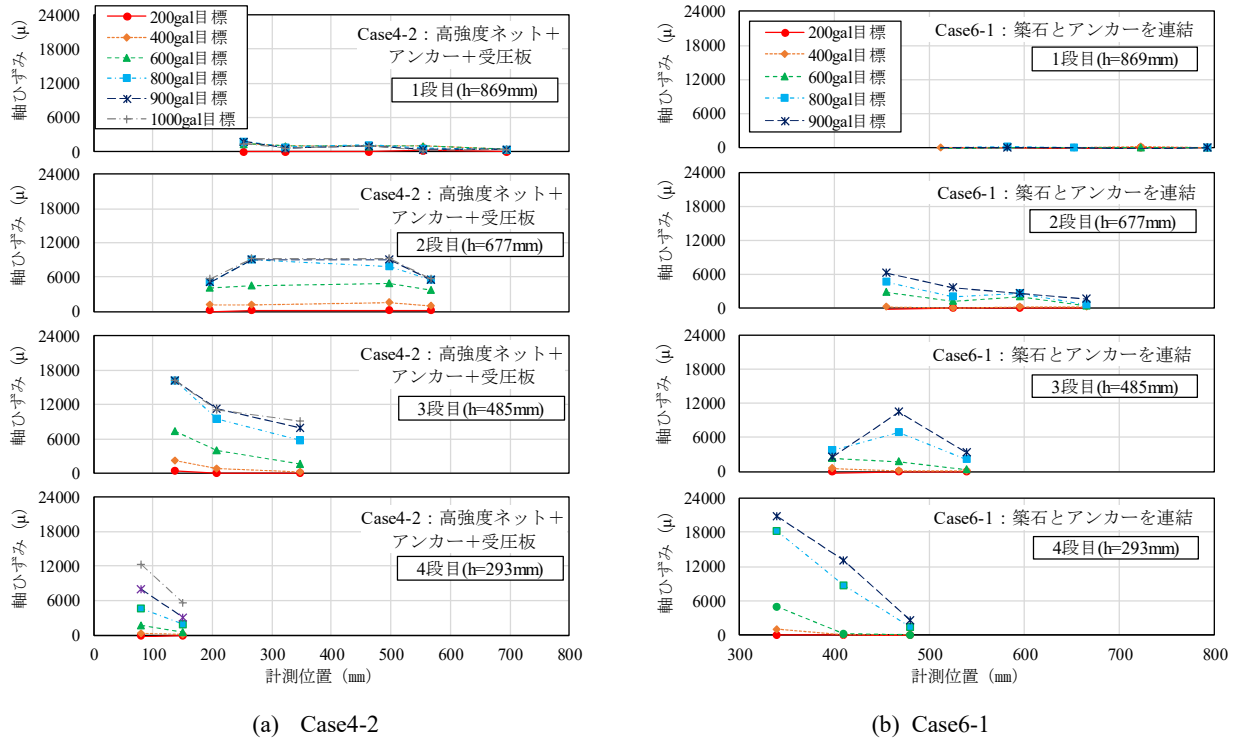


Fig. 12 グリグリッド縦材の軸ひずみ分布
Distribution of Axial Strain of "Guri-Grid"

留水平変位が最大となるのは、築石3段目のケースがほとんどであり、中段よりやや上方の築石がはらみ出しやすい傾向であった。Case6シリーズにおける各ステップ後の築石の残留水平変位は、入力加速度が400gal以下では他よりも小さくなることがわかった。

4.2.4 栗石天端の残留鉛直変位分布 Fig. 11に各ステップ後の栗石天端の残留鉛直変位分布を示す。計測位置は、築石1段目の前面からの距離を表している。グラフは、入力加速度における目標値のうち、400gal, 800galを示して比較した。

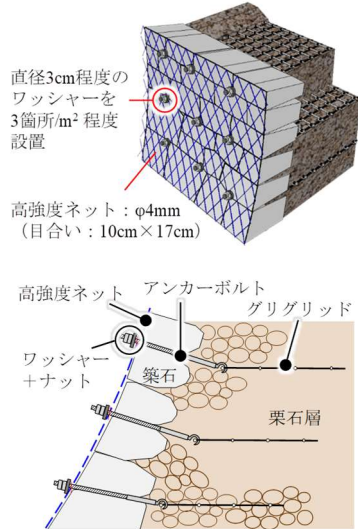
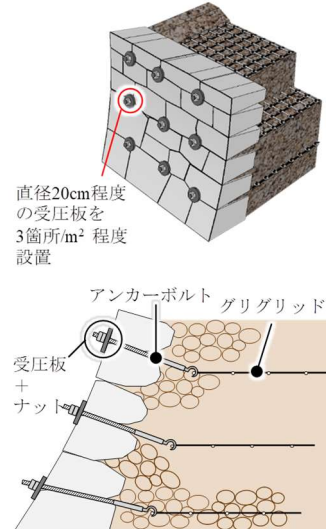
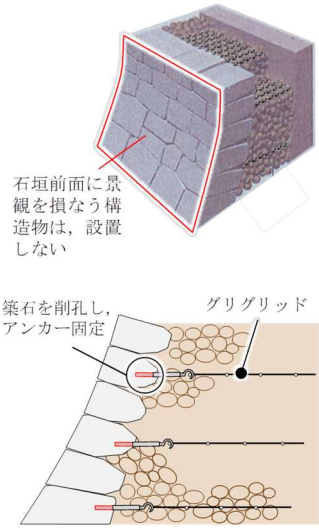
400gal加振後の残留鉛直変位は、大崩壊した無補強のケースでは最大で60mm程度生じており、築石に近いほど沈下していることがわかる。800gal加振後をみると、アンカーまたはフックボルトを有する補強構造では築石より遠いほど沈下しており、最大120mm程度生じている。以上の結果より、アンカーまたはフックボルトを有する補強構造は、グリグリッドと栗石が噛み合っ

ておらず、高い耐震性を有することがわかった。

4.2.5 グリグリッド縦材の軸ひずみ分布 Fig. 12にグリグリッド縦材の軸ひずみ分布を示す。計測位置は、4段目のグリグリッドを配置した築石前面からの距離である。一例として、Case4-2とCase6-1の計測結果を示した。入力加速度における目標値のうち、200gal, 400gal, 600gal, 800gal, 900galを比較して示し、Case4-2については1,000galについても示した。

Case4-2はグリグリッドの2段目～4段目が概ね均等に加振力に抵抗しているのに対し、Case6-1は下段のジオグリッドほど大きく抵抗していることがわかる。また、いずれのケースもグリグリッド1段目は、生じた軸ひずみが比較的小さいため、栗石と一体となって滑動していると推察される。ただし、築石の落下防止として機能しているため、地表面付近にグリグリッドを敷設することも重要であると考えられる。

Table 4 グリグリッドを用いた補強形式の比較表
Comparison of Reinforcement Type of “Guri-Grid”

項目	耐震性重視型	バランス型	景観重視型
略 図			
景 観	・ 石垣前面がネットで覆われる △	・ 石垣前面が部分的に受圧板で覆われる ○	・ 石垣前を覆うものはない ◎
文化財的価値の保全	・ 築石、栗石に損傷を与えない ○	・ 栗石、築石に損傷を与えない ○	・ 築石背面を削孔する必要あり △
耐震性	1/5 スケールの振動台実験で、sin 波 5Hz(20 波), L2 クラスの地震動以上を目標		
	・ 950gal まで崩壊しない ◎	・ 850gal まで崩壊しない ○	・ 750gal まで崩壊しない ○

5. グリグリッドを用いた補強形式

模型グリグリッドの振動台実験結果を踏まえ、補強形式を3タイプに分類した。Table 4に補強形式の比較表を示す。耐震性重視型は、グリグリッドと築石前面に設置した高強度ネットをアンカーボルトで連結した構造である。石垣前面がネットで覆われるものの、耐震性は最も高く950galまで崩壊しなかった。バランス型は、グリグリッドと築石前面に設置した受圧板をアンカーボルトで連結した構造である。石垣前面が部分的に受圧板で覆われるが、栗石や築石に損傷は与えない構造であり、850galまで崩壊しなかった。景観重視型は、グリグリッドと築石自体をアンカー材で連結した構造である。石垣前を覆うものではなく、750galまで崩壊しなかった。

6. おわりに

栗石の粒径に応じて目合いを調整でき、城郭石垣の崩落を防止する補強材「グリグリッド」を開発した。本報では、引抜き摩擦特性とL2クラスの地震動を模擬した加振に対する補強効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 実物大引抜き実験より、グリグリッドの引抜き摩擦強さは、いずれの拘束圧 σ においても従来型ジオグリッドのそれの2倍以上であった。
- 2) 振動台実験の結果、グリグリッドの敷設とアンカーを複合した補強により、無補強の石垣と比較して耐震性が2倍以上に向上することがわかった。
- 3) 振動台実験の結果、グリグリッドと築石前面に設置した高強度ネットをアンカーボルトで連結した耐震性重視型は、950galまで崩壊しなかった。グリグリッドと築石前面に設置した受圧板をアンカーボルトで連結したバランス型は、850galまで崩壊しなかった。グリグリッドと築石自体をアンカー材で連結した景観重視型は、750galまで崩壊しなかった。いずれの補強形式においても、L2クラスの地震動以上の耐震性能を有することを確認した。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説, pp. 1058～1066, 2009.11
- 2) RRR 工法協会：RRR-B (盛土補強土壁) 工法材料マニュアル, pp. 18, 2017.10