

新型ジオテキスタイルを用いた城郭石垣の耐震補強技術の開発

(株)大林組	正会員	○川本 卓人	(株)大林組	正会員	森田 晃司
(株)大林組	正会員	内藤 哲郎	(株)大林組	正会員	西村 俊亮
(株)大林組	正会員	粕谷 悠紀	(株)大林組	正会員	山田 祐樹
(株)大林組		岡渕 直樹			

1. はじめに

近年発生した大地震による城郭石垣の崩壊を機に、地震時の安定性確保を目的とし、ジオテキスタイル補強盛土工法が取り入れられている。城郭石垣は、文化財的価値の保全の観点から在来工法による復旧が求められる。石垣の背面を構成する栗石は、手詰めで噛み合わせ人力で転圧する。従来のジオテキスタイルは、最大でも 50mm 程度の目合いであるが、石垣の背面を構成する栗石の粒径は、200～300mm 程度と大きい。栗石間の噛み合わせが阻害されるため在来工法との共存が難しい。

また、目合いは、栗石との摩擦特性を評価するうえで重要な指標であり、栗石との噛み合いを効果的に引き起こし、ジオテキスタイルを挟む栗石間の連続性を損わない寸法であるべきである。そこで、栗石の粒径に応じて目合いの調整が可能な新型ジオテキスタイルを開発した。新型ジオテキスタイルを図-1 に示す。従来の高分子系繊維縦材を縦材、棒鋼を横材としたグリッド状の補強材である。交点部のワッシャーの取付位置を変えることで、目合いを調整できる。

新型ジオテキスタイルの引抜き試験により、栗石の粒径が大きい場合、従来のジオテキスタイルに対し、高い引抜き抵抗を発揮することが確認できた。さらに、新型ジオテキスタイルと壁面材を用いた補強土壁工法を石垣に適用することで、L2 クラスの地震動が作用した場合でも崩壊にいたらないことを模型振動台実験で確認した。

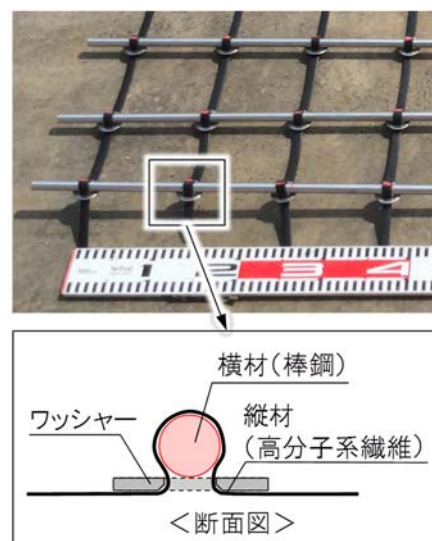


図-1 新型ジオテキスタイル

2. 引抜き試験

(1) 試験条件

a) 土試料

土試料は、粒径 50～150mm と粒径 150～200mm を重量比率 2:1 で混合した割栗石とし、密度 1.6t/m³ とした。

b) 補強材

使用した従来型ジオグリッドと新型ジオグリッドの仕様を表-1 に示す。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¹⁾。栗石の最大粒径を 200mm としたため、複合型の縦材の最小間隔は 50mm となる。予め求めた交点強度をもとに従来型と単位幅あたりの引張強度が同等となるよう縦材の配置間隔を 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 の中間値程度とし、120mm とした。

表-1 ジョグリッドの仕様

種 別	従来型	新型
写 真		
材 料	縦材:PET 繊維 横材:PET 繊維	縦材:PET 繊維 横材:丸鋼φ12
引張強度	63.1kN/m	63.2kN/m
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

キーワード ジョグリッド、石垣補強、引抜き特性、引抜き試験、振動台実験

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組 TEL03-5769-1302

c) 試験方法

図-2 に試験装置の概要を示す。

「ジオシンセティックスの土中引抜き試験方法

(JGS0941-2009)」²⁾を参考とし、土槽の寸法を幅 1.0m × 奥行 1.0m × 高さ 1.2m とした。引抜き速度を 1mm/min とし、上載荷重（拘束圧）は、10kN/m²、50kN/m²、100kN/m² の 3 段階とした。引抜き荷重、引抜き変位、土槽奥行方向中央における縦材のひずみ量とその分布を計測項目とした。

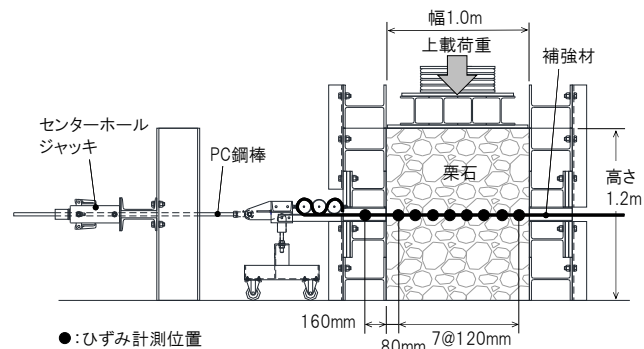


図-2 試験装置の概要（断面図）

表-2 試験結果一覧

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)
C1	従来型	10	31.8	15.9
C2		50	39.7	19.9
C3		100	50.1	25.1
C4	新 型	10	49.7	49.7
C5		50	47.2	47.2
C6		100	54.5	54.5

(2) 試験結果と考察

a) 荷重-変位関係

表-2 に試験結果、図-3 に荷重-変位関係を示す。

引抜き摩擦強さ τ は、 $\tau = F_{max} / 2LB$ により算出した。補強材幅 B を 1.0m とし、引抜き抵抗長 L は、従来型で 1.0m、複合型で 0.5m とした。この違いは、(2)b) で後述する。

従来型は、栗石と面的に接触することで、引抜き変位が小さい段階から引抜き抵抗を発揮するが、新型は、敷設時に丸鋼と栗石の接触点が少なく、抵抗力を発揮するまでに敷設長の 5% 程度の変位を要する。

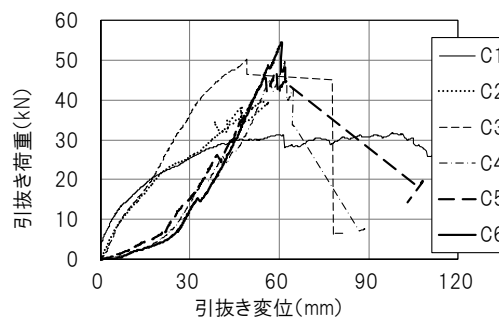


図-3 荷重 - 変位関係

b) ひずみ分布

図-4、5 に拘束圧 100kN/m² における引抜き荷重 10kN ごとのひずみ分布を示す。従来型ジオグリッドでは、引抜き口から土槽背面にわたる 1.0m の範囲全体で引抜きに抵抗する。新型ジオグリッドでは、引抜き口から 50cm 程度の範囲までが引抜きに抵抗する。新型は、従来型以上に最大引抜き荷重が大きいことから、短い敷設長で高い引抜き抵抗を発揮できる補強材と言える。拘束圧が 10kN/m²、50kN/m² においても同様の傾向を示した。

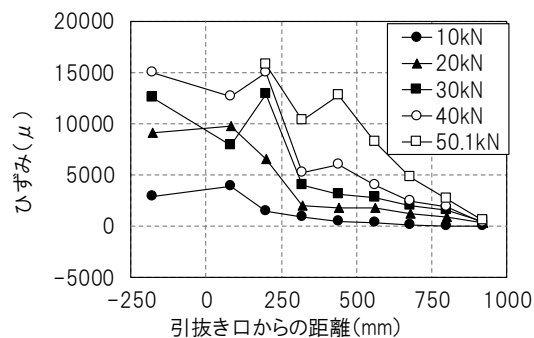


図-4 ひずみ分布（従来型）

c) $\sigma - \tau$ 関係

図-6 に $\sigma - \tau$ 関係と近似曲線の傾き ϕ と切片 c

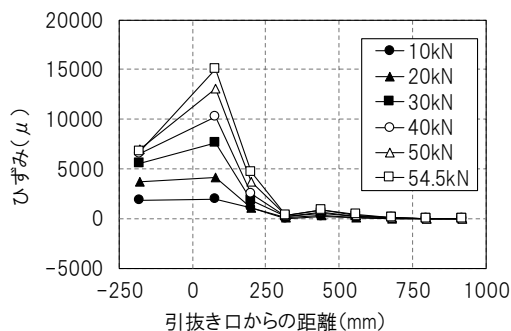


図-5 ひずみ分布（新型）

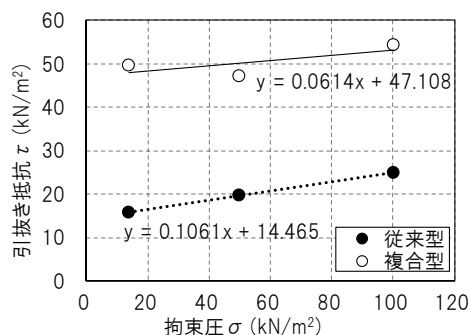


図-6 ひずみ分布（新型）

を示す。従来型に対し、新型は、高い引抜き摩擦性能を有している。新型では、低い拘束圧においても引抜き抵抗を確保できる。

3. 振動台実験

(1) 実験ケース

実験ケースは、Case1：無補強，Case2：新型ジオグリッドによる栗石層内限定の補強，Case3：壁面材と新型ジオグリッドを用いた補強土壁構造による補強の3ケースとした。概略図を図-7に示す。

(2) 実験条件

1G場の相似則（相似率1/5）を考慮し、実験に用いる各材料の物性値を以下のように設定した。

a) 模型石垣

積み方式を布積、勾配は1:0.3とした。

b) 築石

実物の築石同様、密度を 2.7g/cm^3 とし1/5スケールとなるようにコンクリートで作製した。

c) 栗石

実物の栗石の粒度を参考に相似則を考慮し、粒径5～60mmの玉砂利を用いた。地盤作製時は、密度 1.764g/cm^3 ($D_r=50\%$, $\rho_{dmin}=1.668\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.872\text{g/cm}^3$)となるように密度管理を行った。

d) 新型ジオグリッド模型

縦材を幅3.5mm、厚さ75 μm 、引張強度52NのPETタイとし、横材を $\phi 5\text{mm}$ 、密度 2.7g/cm^3 、ヤング率70GPaのアルミ棒とした。交点の接続は、内径 $\phi 3.1\text{mm}$ のシールワッシャーとし、目合いは35mm $\times$ 35mmとした。

e) ネット・連結材

素線径 $\phi 0.8\text{mm}$ 、網目寸法20.4mm $\times$ 34mm、鉄線ネットを使用した。また連結材は $\phi 4\text{mm}$ のステンレスフックボルトとし、ジオグリッド側のアルミ棒にフックを引掛け、壁面側のネットをワッシャーとナットで20箇所固定した。

f) 基礎構造

基礎は、堅固な地盤に固定された状態を想定し、振動台に剛結した。

(3) 実験方法

実験模型の全景を写真-1に示す。実験には、幅1m、高さ1.2m、奥行き2.4mの鋼製土槽を用いた。加振に伴う石垣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。加振は、入力波として5Hzのsin波を用い、加速度振幅を50galずつ増加させる段階载荷により実施した。1段階あたりの入力波数は、20波とした。計測項目は、石垣前面と栗石天端の変位、築石背面に作用する土圧、ジオグリッドのひずみである。

(4) 実験結果と考察

段階载荷の結果、Case1は、400gal加振時に崩壊し、Case2は、500gal加振時に崩壊した。Case3は、900gal

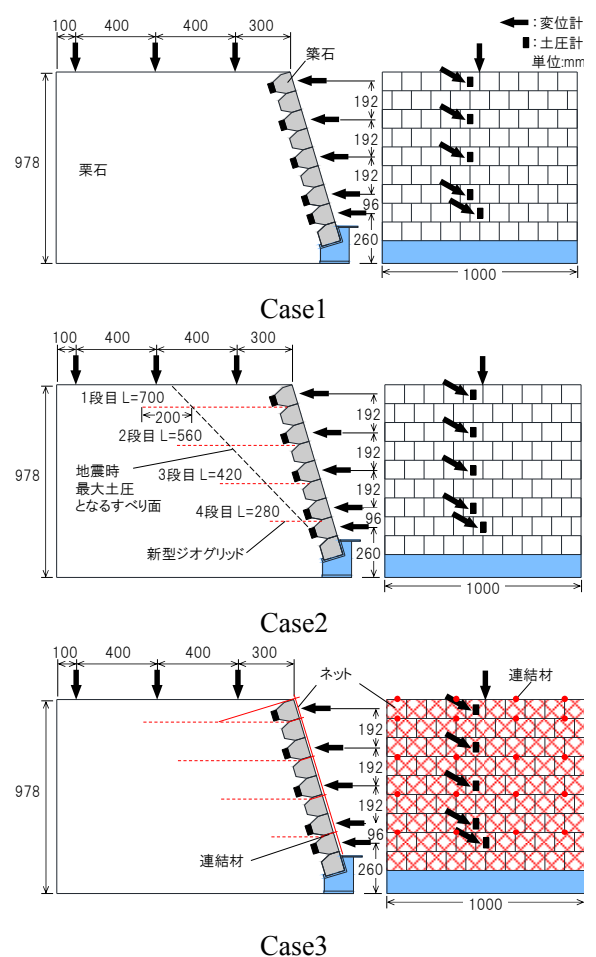


図-7 ひずみ分布（新型）

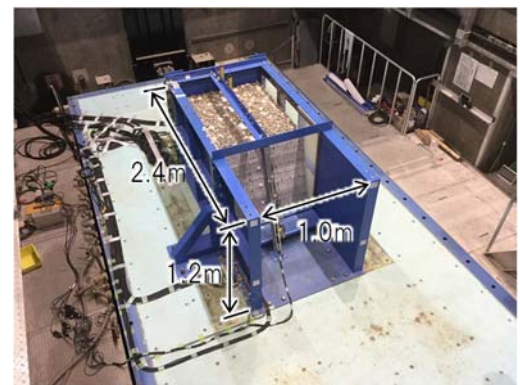


写真-1 模型全景

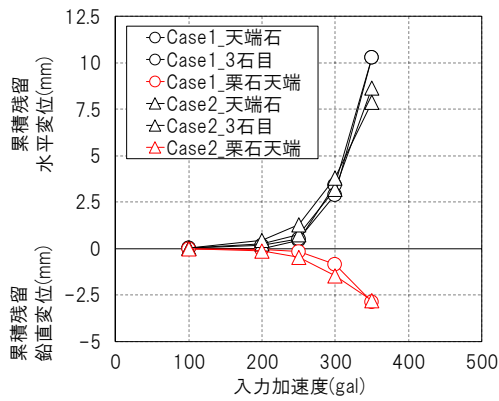


図-8 入力加速度と累積残留変位の関係

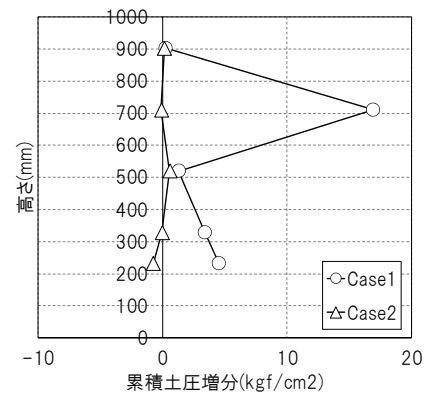


図-9 累積土圧増分の比較

加振を経ても崩壊に至らなかった。

図-8 に入力加速度と累積残留変位との関係を示す。栗石の沈下と築石の水平変位が同時に発現し始め、変形量が増加している。このように、石垣は、慣性力による築石の移動と栗石の流動を繰り返し、変位が蓄積され、崩壊に至る。Case1 と 2 では、水平変位、鉛直変位ともに同等の値を示しているが、Case2 の耐震性が勝った。

図-9 に 350gal 加振後の累積土圧増分の分布を示す。また、写真-2 に Case1, 2 の崩壊後の写真を示す。築石に土圧が作用していないことと崩壊規模が小さいことから、Case2 では、新型ジオグリッドが栗石の流動を拘束することで耐震性が向上したと言える。一方で、500gal 加振で崩壊にいたっていることから L2 クラスの地震動に対し、崩壊を防止するためには、栗石層の補強だけでは不十分であることも明らかとなった。

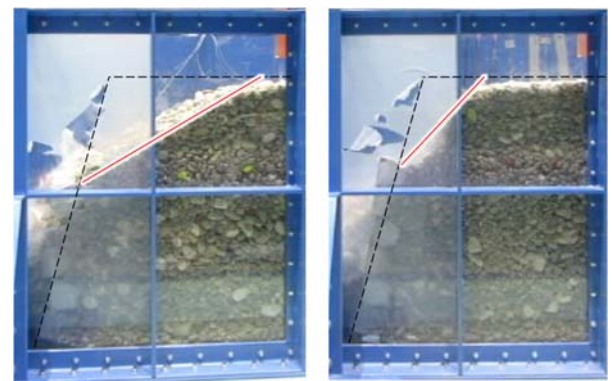
図-10 に 350gal 加振後のジオグリッドのひずみ分布を示す。Case2 のジオグリッドのひずみのピーク位置は、築石背面から 125~250mm 程度である。このピーク位置よりも前側（築石側）が主働側であり、栗石の流動範囲である。これに対し、Case3 のピーク位置は、築石背面近傍であり、流動範囲は Case2 よりも小さい。壁面材（ネット）を用いた補強土壁構造を適用することで、拘束効果がより高まり、L2 クラスの地震動に対し、崩壊を防止できるものと考えられる。

4. おわりに

引抜き試験から、新型ジオグリッドは、従来型ジオグリッドよりも高い引抜き抵抗を有することが確認できた。振動台実験から、新型ジオグリッドが、栗石拘束効果を発揮することで耐震性を高められることが確認できた。しかし、L2 クラスの地震動に対しては、栗石を拘束するだけでは、築石の崩壊を防止できないため、築石前面に壁面材を配置した補強土壁構造の適用が求められる。

参考文献

- 1) RRR 工法協会, RRR-B (盛土補強土壁) 工法材料マニュアル, pp. 18, 平成 29 年 10 月
- 2) 社団法人地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説, pp. 1058~1066, 平成 21 年 11 月



Case1

Case2

写真-2 崩壊規模の比較

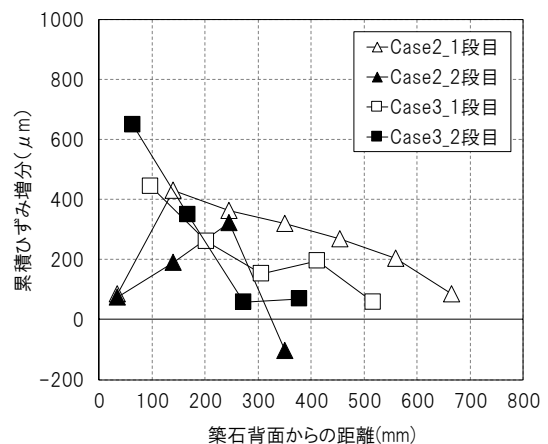


図-10 350gal 加振後のひずみ分布の比較