

## 変状した石積み壁およびモルタル吹付工の補強工法

防災技術研究部 地盤防災研究室  
副主任研究員 高柳 剛

### 1. はじめに

鉄道沿線の切土のり面には、表層の風化防止を目的とした石積み壁やモルタル吹付工などのり面工が施工されていることがある。このようなり面工に経年劣化によって変状が生じている事例が近年、多数確認されている。そこで変状した石積み壁の安定度を簡易に評価する手法と、変状した石積み壁および吹付工の経済的な対策工法について紹介する。

### 2. 変状石積み壁の評価手法および対策工

#### (1) 概要

石積み壁は土圧などの外力を受けることで、はらみ出しなどの変状が発生する場合がある。鉄道事業者はこのような石積み壁の変状を一般的に目視で検査しているが、対策の必要性を判断できる定量的かつ簡易な基準はこれまで示されてこなかった。その一方で城郭の石垣の安定度評価の分野では、石垣の高さとはらみ出し変位の関係から求められる「はらみ出し指数」(式1, 図1)を基準にした評価法が提案されている<sup>1)</sup>。

$$\text{はらみ出し指数 } \delta = \frac{\text{最大はらみ出し変位 } dx \text{ (m)}}{\text{変状石積み壁高さ } H \text{ (m)}} \times 100 \quad \dots \text{式 (1)}$$

この評価手法ははらみ出し指数が一定のしきい値を超えた場合に対策が必要と判断するものである。今回は石積み壁の模型を用いた静的載荷実験によって、間知石で構築された石積み壁に対する同評価手法の適用性について検証した。

また変状した石積み壁に適用する対策工の一つとして、地山補強土工法によるり面補強と格子砕工による壁面の変形抑制を組み合わせる方法が一般的に考えられる。この工法では石積み壁の存在は無視されるため過剰な設計になっている可能性があり施工コストも高い。そこで今回は変状石積み壁に適用するより簡易な対策工として腹起し材と地山補強土工法(1.5mピッチで打設)とを組み合わせる方法(図2)を考案し、この対策工による効果を静的載荷実験(図3)により確認した。

#### (2) 実験方法について

実験では石積み壁のり面にジャッキによる鉛直荷重を載荷させることで石積み壁に土圧を作用させた(図3)。石積み壁はコンクリートブロックの間知石を布積みにして構築した。この石積み壁の背面にぐり石層(材料:玉砂利)と地盤(材料:稲城砂)を構築した。その上で、石積み壁のり面に載荷板を設置し、最大  $P_v=200\text{kN}$  の鉛直載荷を行った。なお鉛直載荷は載荷と除荷を繰り返しながら

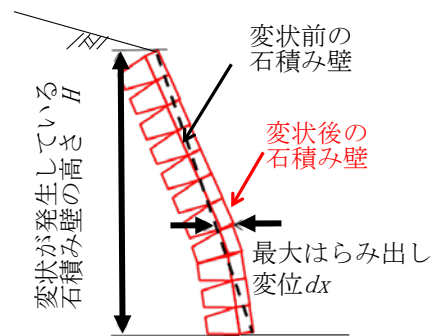


図1 はらみ出し指数の定義  
土圧 (=地盤反力)

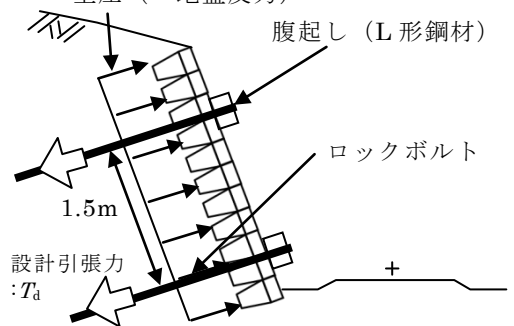


図2 変状石積み壁の簡易対策工

段階的に実施した。実験ケースを表1に示す。Case1～Case3は無補強の石積みの実験ケースである。Case4では簡易対策工の効果の検証を目的に、ロックボルトと腹起し材（L型鋼材）で石積み壁の壁面の一部を固定した状況を模擬した上で載荷した。

(3) 実験結果について

無補強の石積み壁のケース（Case1～Case3）について、石積み壁の壁面全体に作用した土圧の合力  $P_h$  と石積み壁のはらみ出し指数  $\delta$  の関係を図4に整理して示す。土圧の合力  $P_h$  の増加に応じてはらみ出し指数  $\delta$  が増加し、一定のはらみ出し指数  $\delta$  に達した所で土圧はピーク値を示し、その後は変位が大きく進行する傾向がみられる。図4の結果から、無補強の石積み壁でははらみ出し指数が  $\delta=3\sim5$  程度で石積み壁の耐力のピークが現れると捉えることができる。耐力のピークを越える外力を受けて変形した石積み壁は特に豪雨や地震などのさらなる外力の負荷に対する安定度が低いと考えられる。したがって、本実験結果を参考に緊急的な対策工を必要とする石積み壁のはらみ出し指数  $\delta$  のしきい値として  $\delta=3\sim5$  の中央値である  $\delta=4$  が妥当であると考えられる。

次に簡易対策工により補強した石積み壁（Case4）と無補強の石積み壁（Case2）について、のり肩への載荷重  $P_v$  とはらみ出し指数  $\delta$  の関係を整理した結果を図5に示す。無対策の石積み壁（Case2）は載荷重に対して大きく塑性変形が進行しているが、簡易対策工により補強したケース（Case4）では変形が大きく抑制され、ジャッキの最大載荷重 200kN に対してもはらみ出し指数は  $\delta < 4$  に留まっていることが分かる。一般的に格子砕工を用いた変状石積み壁の対策工では、は石積み壁の存在を考慮せずに、土圧（＝地盤反力）に対して十分な強度を有する剛な砕部材を設計する必要がある。その一方で今回の実験より、腹起し材のような簡易な部材で石積み壁の一部を固定する方法によっても土圧を受ける石積み壁の変形は抑制されて破壊に至らないことを確認した。なお今回の実験では壁面に最大で等分布荷重  $p=25.0\text{kN/m}^2$  に相当する土圧を作用させており、この土圧以下の条件であれば今回検討した石積みの簡易な補強方法が適用できると考える。以上の結果をふまえ、このような対策工の具体的な設計手法は地山補強土工法に準ずるものを今後提案する予定である。

表1 載荷実験ケースまとめ

実験ケース	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 $w$ (%)	地盤水位 $W_L$ (m)	対策工
Case1	1.55	19.95	0	なし
Case2	1.55	18.23	0	なし
Case3	1.50	17.60	1.2	なし
Case4	1.48	18.92	0	あり

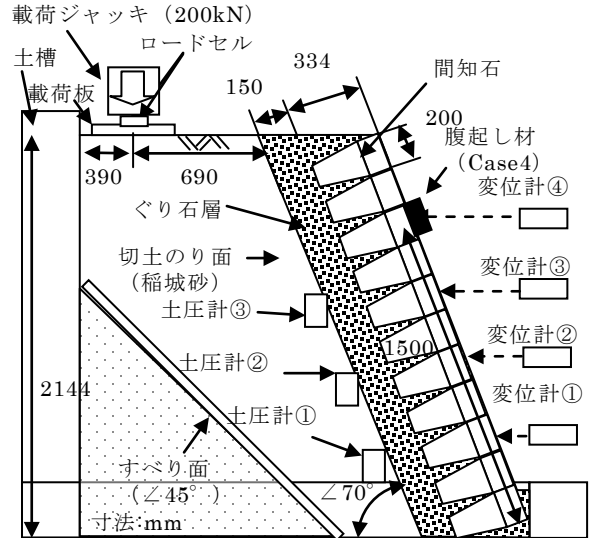


図3 石積み壁への載荷実験装置

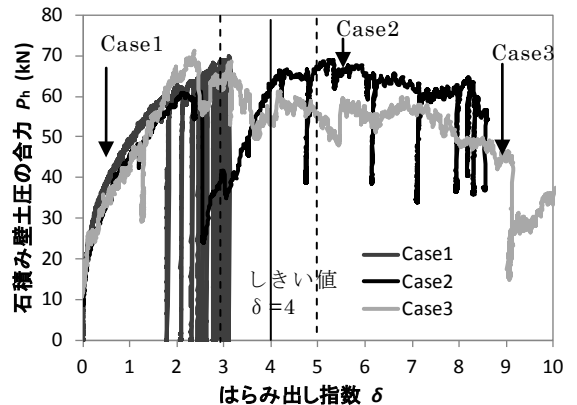


図4 土圧の合力とはらみ出し指数の関係 (Case1～Case3)

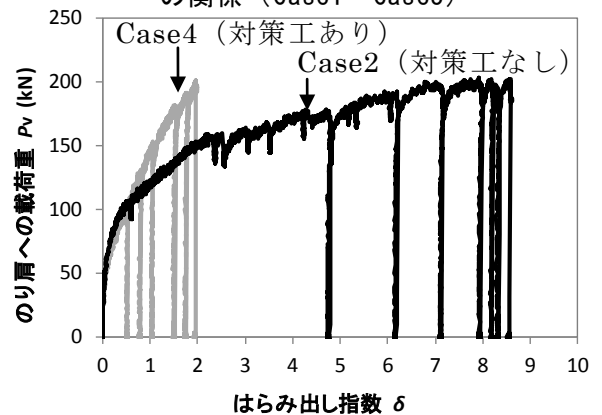


図5 対策工による石積み壁の変形抑制効果

### 3. 変状した吹付工の対策工

#### (1) 概要

経年劣化によって変状した吹付工の補修方法として、既設吹付工の上から新たに短繊維を混合させたモルタルを増し吹きする方法が提案されているが、背面地山が不安定な場合には吹付工による補修にロックボルトなどによる地山補強を組み合わせる必要がある(図6)。地山補強工法の斜面安定効果はのり面工の種類に大きく影響を受ける。この影響はのり面工低減係数 $\mu$ として評価されるが、のり面工に吹付工を使う場合はのり面工低減係数 $\mu$ がのり枠工に比べて小さい( $\mu=0.2\sim0.6$ )。このため十分な斜面安定効果が得られないことがあり、必要に応じて独立受圧板を併用してのり面工低減係数 $\mu$ をのり枠工と同等( $\mu=0.7\sim1.0$ )に向上させる場合がある(図6)。しかし独立受圧板の部材費は大きなコスト要因の一つとなる。そこで変状した吹付工に適用する低コストかつ補強効果の高い補修対策工法について紹介する。

#### (2) 吹付受圧板について

本対策工法は、変状した吹付工に対してモルタル吹付工と地山補強工法を組み合わせる際に、ロックボルト周辺に鉄筋補強部材を予め配置することで、簡易なRC構造の受圧板(以下、吹付受圧板と呼ぶ)を部分的に形成するものである。この受圧板にはロックボルトと一体となって移動土塊を引き止める機能が求められる。特に受圧板ののり面工低減係数が $\mu=1.0$ 相当であることを期待するためには、ロックボルトの設計引張力 $T_d$ ( $\approx$ 最大引張力 $T_{max}$ )と同等の荷重 $T_0$ に対して受圧板が十分耐えうる強度を有することを確認する必要がある<sup>2)</sup>。そこで今回は、移動土塊厚さが2.0m程度の時にロックボルトに求められると試算された設計引張力 $T_d=50\text{kN}$ 以下の条件に適用することを想定し、吹付受圧板がロックボルトの荷重 $T_0=50\text{kN}$ に対して十分に耐える強度を有しているかを載荷実験により確認した。吹付受圧板の面積は $A=1000\text{mm}\times 1000\text{mm}$ とし、吹付厚さは $t=100\text{mm}$ とした。モルタルは設計圧縮強度 $\sigma_c=18\text{N/mm}^2$ を目標に配合を決定した。なお短繊維にはポリプロピレン製のファイバーを1vol%で混入した。吹付受圧板の内部に配置する鉄筋補強材については設計計算より必要鉄筋量を決定した(図7)。この吹付受圧板の供試体を28日以上現場養生の後、グラウンドアンカー受圧板設計・試験マニュアル<sup>3)</sup>を参考にして、受圧板が補強材から

③吹付工の内部に鉄筋補強材を配置して吹付受圧板を形成する方法(新しく検討した工法)

②吹付工の表面に独立受圧板を配置する方法

①吹付工の表面に小規模なプレートを設置する方法(一般的)

吹付工に作用する荷重  $T_0 = \mu \cdot T_d$

設計引張力  $T_d$   
( $=0.7 \times$ 許容引張力  $T_a$ )

ロックボルト

図6 吹付工の補修・補強方法の概念

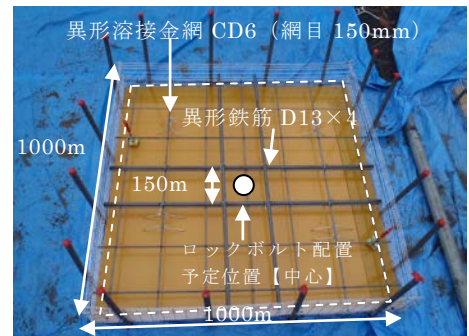


図7 吹付受圧板内部の鉄筋補強材

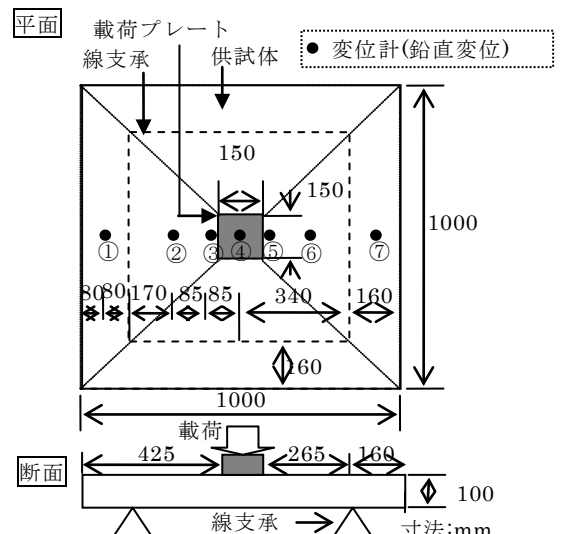


図8 吹付受圧板の載荷試験方法

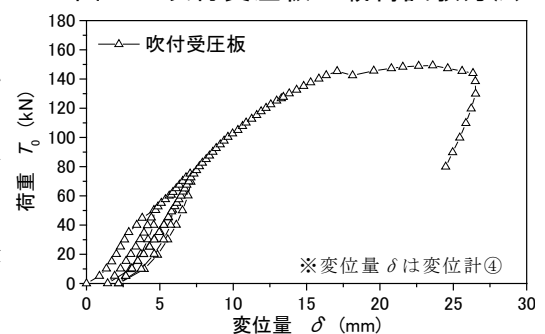


図9 吹付受圧板の載荷実験結果

荷重を受ける状態を模擬した載荷実験を実施した(図8)。実験の結果から、吹付受圧板は目標荷重である  $T_0=50kN$  を超える強度を有することを確認できた(図9)。この結果より、上述した仕様で作成した吹付受圧板のり面工低減係数は  $\mu = T_{0max}/Td \geq 1.0$  となるため  $\mu=1.0$  相当を期待できることが分かった。

### (3) 補強材の打設密度について

前節では吹付受圧板により経済的に地山補強土工の補強効果を高めることが出来ることを示したが、さらに地山補強土の経済性を高めるには棒状補強材の打設本数の最適化が重要である。しかし地山補強材の打設本数を少なくして補強材間隔を広げすぎると、設計計算上は十分な斜面安全率  $Fs$  が得られた場合でも、のり面表層の部分崩壊が発生する懸念がある。このため設計基準<sup>4)</sup>では斜面安全率  $Fs$  の大小に関わらず打設間隔  $a$  を通常の場合で最大 1.5m に制限している。その一方で地山補強材に今回検討しているような受圧板を設置する場合、表層の拘束効果により部分崩壊に対する安定性が向上すると考えられる。そこで切土表層を模擬した遠心模型実験を実施することにより、受圧板の有無が地山補強材の最大打設間隔に及ぼす効果を検証した(図10)。なお表層地盤は江戸崎砂を用いて乾燥密度  $\rho_a=1.45(g/cm^3)$ 、含水比  $w=13\%$  の緩い不飽和地盤として構築した。遠心模型実験

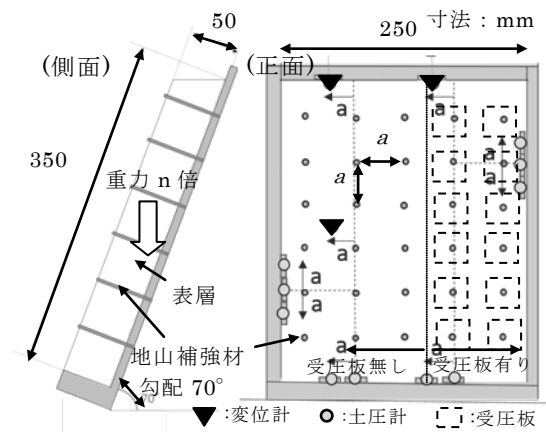


図10 切土表層を模擬した遠心模型実験

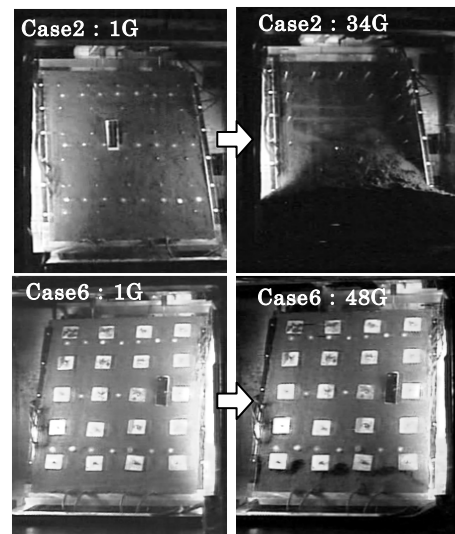


図11 模型実験における表層崩壊

の実験ケースの条件と結果を表2に示す。これらの実験結果から受圧板が無い実験ケース (Case2~Case4) では遠心加速度増加に伴い、補強材間隔が実物大で 1.5~1.8m 相当となった所で表層崩壊が発生した。一方で、受圧板があるケース (Case5~Case7) では補強材間隔が実物大で 2.2~3.0m 相当で表層崩壊が発生している(表2, 図11)。これらの結果から、本実験で想定したのり面規模(高さ10m, 風化厚さ1.5m程度)の切土のり面に吹付受圧板を用いて補修・補強を行う場合、補強材の打設間隔は最大で2.0mまで拡大できると考えられる。

表2 遠心模型実験ケースまとめ

実験 Case	1	2	3	4	5	6	7	
実験条件	補強材間隔 $a \cdot 1G$ 場 (mm)	無補強	50.0	62.5	83.3	50.0	62.5	83.3
	補強材間隔 $a_{30G} \cdot 30G$ 場 (m)		1.5	1.9	2.5	1.5	1.9	2.5
	補強材の材料		ｱｸﾘﾙ	ｱｸﾘﾙ	ｱｸﾘﾙ	ｱｸﾘﾙ	鋼線	ｱｸﾘﾙ
	受圧板		無	無	無	有	有	有
結果	崩壊遠心加速度 $\alpha_f$ (G)	5	34	25	22	44	48	26
	補強材間隔・崩壊時 $a_f$ (m)	-	1.7	1.5	1.8	2.2	3.0	2.2
	破壊モード	崩壊	崩壊	崩壊	崩壊	破断	崩壊	破断

## 4. まとめ

今回は変状した石積み壁の安定度を簡易に評価する手法とともに、変状した石積み壁および吹付工の経済的な対策工法について紹介した。今後、具体的な設計方法等についても提案する予定である。

### 参考文献

- 1) 天野光三, 西田一彦他:徳川期大阪城城郭石垣構造の土木史的研究, 土木学会論文集, No.666/IV-49,2000
- 2) 鈴木清他:FRP製格子状パネルのり面工への適用に関する検討, 土木学会第57回年次学術講演会, 2002
- 3) グランドアンカー受圧板設計・試験マニュアル作成委員会:グランドアンカー受圧板設計・試験マニュアル, (財)土木研究センター, pp.54~64,2004
- 4) (公社)地盤工学会:地山補強土工法設計・施工マニュアル, 丸善出版, 2011