

石垣補強に用いるジオグリッドの補強効果に関する検討

大山 謙 吾*¹・橋本 隆 雄*²

Study on reinforcing effects of geogrids for reinforced stone walls

Kengo Oyama*¹ and Takao Hashimoto*²

Abstract: Geogrid reinforcement is applied in Japan as reinforcement for castle stone walls, which are important cultural assets. However, when design calculations are performed using conventional methods, the geogrids are so long that the ground behind the stone wall must be excavated, which has a significant impact on the environment surrounding the stone wall. In this case, since the conventional methods only considers the effect of tensile reinforcement of geogrid, the previous findings by researchers were analyzed and reevaluated. Then it was confirmed that the soilbag (solpak) is highly effective in reinforcing stone wall and a reasonable cross-sectional shape could be achieved by incorporating the method of the geotextile-confined soil wall which is a practical application of the soilbag theory.

Key words: castle wall, soil reinforcement, soilbag, geotextile-confined soil wall

1. はじめに

2011年東北地方太平洋地震による仙台城の石垣崩壊を始め、熊本城や丸亀城等の石垣において、地震や豪雨による同様の変状が発生しており、補強対策が必要となっている。近年、城郭石垣の補強工法のひとつとして、ジオテキスタイルを用いた補強土工法が採用されているが、城郭石垣では文化財保護の観点から、補強材（ジオグリッド）の敷設長を短くする等、合理的な設計手法が求められている。

一般的に、補強土工法は、道路改良工事において、前面の用地を有効利用するための急勾配の壁面を持つ補強土壁あるいは補強盛土として適用されている。従来の設計手法では、図-1に示すように、最大必要引張力および最小安全率となる円弧すべり計算を行って、ジオグリッドが所定の引張力を発揮できるよう、すべり面外に定着長を確保している。ジオグリッドの敷設長が背面地盤に干渉する場合、掘削によって処理するが、背後の現道等への影響が大きい場合を除いては、掘削自体は特に問題にはならない。

一方、城郭石垣の場合、基本的には、変状後の調査時における石垣解体に伴う範囲程度しか掘削が認められない等、掘削領域が限定されることが多いため、現行の設

計法では対応できないケースがある。この課題に対し、たとえば、東北地方太平洋地震後の仙台城の石垣復旧工事では、図-2に示す擁壁土圧低減工法における部分補強の考え方が適用されることになり、極端に敷設長が短く層数が少ないジオグリッドが石垣背面に設置された。

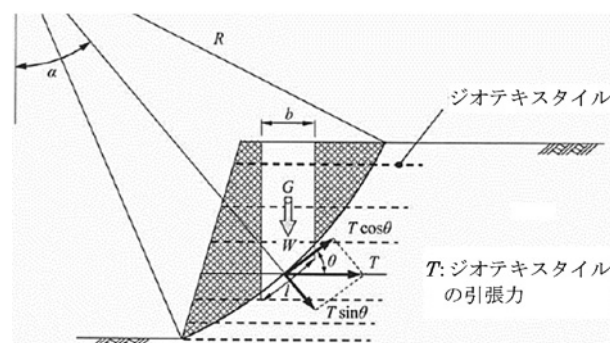


図-1 ジオテキスタイルによる補強効果¹⁾

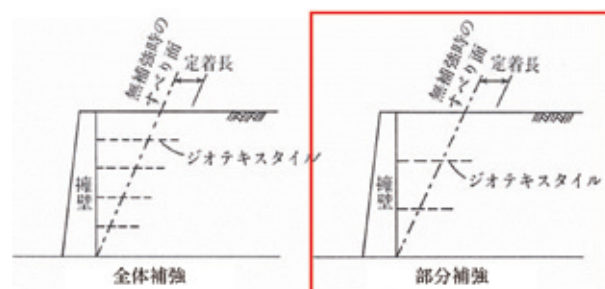


図-2 擁壁土圧低減工法における敷設パターン (文献²⁾に加筆)

*¹前田工織株式会社 営業推進部主幹

*²国土館大学 理工学部まちづくり学系 特任教授

しかし、2022年の福島県沖地震時に、崩壊こそ免れたものの変形が発生している。このため、擁壁土圧軽減工法は、この変形事例に加えて、引抜き抵抗力が発揮されるにはある程度の壁面の変形を要する点³⁾等を考慮すると、石垣補強には妥当な設計手法ではない。

また、図-3に示すように、ジオグリッドと鉄筋挿入工の併用工法による対策工があるが、地盤の削孔による文化財周辺の環境影響に加えて、設計計算が複雑になる等、技術的な課題がある。

そこで、これまでに学術団体や研究者等により提案された補強効果や設計手法に関する比較検討を行い、石垣補強の合理的な補強効果および設計手法として、拘束土壁工法の考え方を巻込み式ジオグリッドに適用することについての検討を行った。

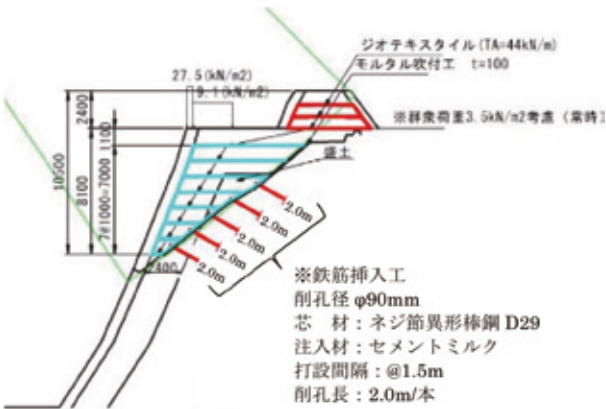


図-3 ジオグリッド+鉄筋挿入併用工計画断面図⁴⁾に加筆

2. ジオテキスタイルによる補強効果

2.1 現行の設計手法による引張補強効果

ジオテキスタイルによる補強効果は、図-1に示したように、すべり土塊の滑動モーメントと、土のせん断力にジオテキスタイルの引張力 T を加えたせん断抵抗モーメントが釣り合うように求めるが、内的安定で算出するジオテキスタイルの必要引張力 ΣT_{req} は、図-4に示すように、ジオテキスタイルに発生する引張力が深さ方向に三角形分布荷重を成して、円弧すべりに抵抗するものとしている。全体安定では、設計引張強度が引抜き抵抗力の小さい方を設計引張力として考慮しているが、すべりに対する基本的な考え方は同じである。

従来の設計手法は、ジオグリッドの引張補強効果のみで評価しており、ジオグリッドの目合いや厚さといった形状やストランド交点構造、敷設方法の相違による土の拘束効果の変化等を考慮していない。これにより、内的安定および全体安定とも合理的な設計にはなっていない。このため、引張補強効果以外の、ジオグリッドによる土のせん断補強効果について、より合理的となりうる考え方を次の2.2に整理し再評価を行った。

2.2 ジオグリッドによる土のせん断強度効果

i. Schlosserによる見かけの粘着力

補強土壁の全体安定を照査する際、補強領域に配置した補強材による補強効果を考慮する場合、2012年の補強土壁(テールアルメ)工法 設計・施工マニュアル改訂以前は、見かけのせん断強度増分として、Schlosser式⁵⁾により見かけの粘着力を式(1)で表していた。

$$c' = \frac{T_r \sqrt{K_p}}{\Delta H} \cdot \dots (1)$$

ここに、 c' : 見かけの粘着力 (kN/m^2)、 T_r : 補強材の引張強さ (kN/m)、 ΔH : 補強材の敷設間隔 (m)、 K_p : 受動土圧係数 $= (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ 、 ϕ : 土のせん断抵抗角 ($^\circ$) である。

一方、ジオテキスタイル補強土工法では、補強材を用いた三軸圧縮試験結果によって、見かけの粘着力による一体化効果といった考え方が採用されていなかったが⁶⁾、図-5に示すように、西本らがSchlosser式の前題となる土質試験条件に関する整理を行い、伸びの小さい補強材のピーク強度発揮といった適用限界を設定することにより、ジオテキスタイル補強土に適用可能としていた⁷⁾。

しかし、従来の設計・施工マニュアルでは、性能規定として変形を考慮することに限界があるという理由により、補強材が発揮可能な引張力のみによる抵抗力をすべり面に作用させる照査法を採用している⁸⁾。

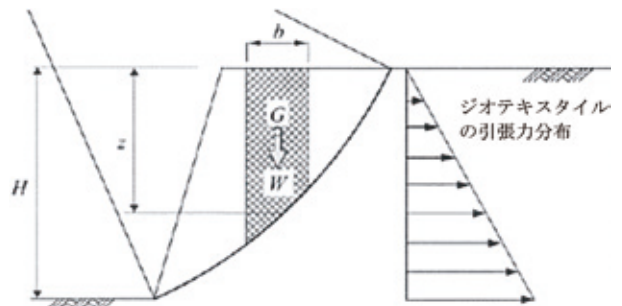


図-4 ジオテキスタイルによる補強効果¹⁾

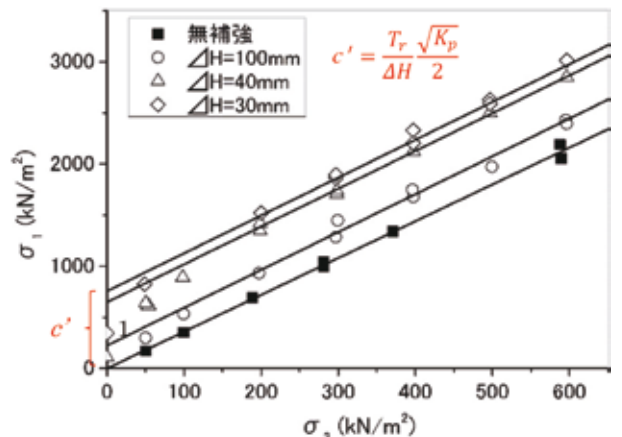


図-5 Schlosserによる三軸圧縮試験結果 (文献⁷⁾に加筆)

ここで、Schlosser式をジオテキスタイル補強土に適用する場合、円弧すべり計算を実施する必要があるとともに、ジオグリッドは水平敷設を前提としているため、敷設長は内的安定で決定される。

なお、(1)式では、 $T_r=22\text{kN/m}$ 、 $\Delta H=1.0\text{m}$ 、盛土材の $\phi=35^\circ$ とすると、 $c'=21\text{kN/m}^2$ となる。

ii. 九州大学による拘束効果の提案

九州大学では、引張補強以外の補強効果として、拘束効果を以下の(1)および(2)のようにまとめている。

(1) ジオグリッドの形状による必要引張力の軽減効果

ジオグリッドを用いたすべり面設定型のせん断試験により、図-6に示すように、目合いの小さいジオグリッドの拘束効果によるせん断強度増加（見かけの摩擦係数・粘着力の増加）を確認し評価しており、ジオグリッドによる拘束効果として提案している。

ただし、補強材を壁面端部に固定して、ジオグリッドが壁面材や土とともに一体となって挙動する状態を想定しており、ジオグリッドの水平敷設のみで得られる効果ではないことに留意する必要がある。

また、補強効果としては、円弧滑り計算による必要引張力が15%程度低減でき、せん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ に対し $\phi=42^\circ$ 程度までの向上が期待できるが、定着長としては1m程度しか短くできないため、設計手法としての効果は小さい。

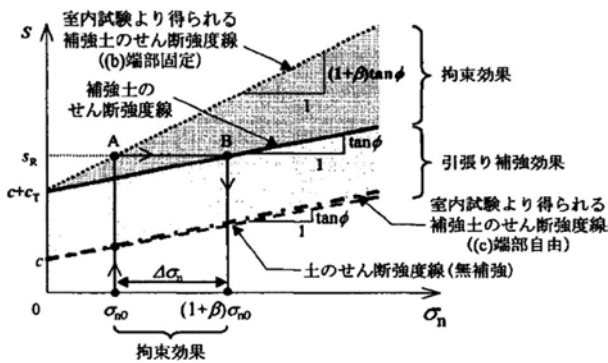


図-6 拘束効果を考慮した補強土のせん断強度の評価⁹⁾

(2) 見かけの粘着力を考慮した修正Jewell式

補強効果を見かけの摩擦係数として表現するのではなく、実務上、補強土の破壊規準は見かけの粘着力増加として、Jewell & Worthがジオグリッド補強土の引張力に起因するせん断強度増加分とした C_T について、ランキンの主動土圧に基づいて修正した式を提案している¹⁰⁾。

この式は、現行の設計法で示している引張力の鉛直方向の増加係数 K_G に対し、主動土圧係数を考慮することによりJewell式よりもさらに見かけの粘着力を増加させている。

しかし、(1)のSchlosser式に比べて、粘着力としては6割程度しか考慮できず、ジオグリッドが壁面に固定されていない状態を想定した理論式であり、ジオグリッドの補強効果そのものとしては小さい。

また、(1)と同様、すべり計算を前提としているが、内的安定時の土圧計算では、安全側に粘着力を考慮しないため、設計での効果はないものと見なされる。

iii. 松岡によるソルパック理論

(1) ソルパックの考え方

松岡は、補強土工法のように、補強材の引抜き抵抗により土の移動を阻止しようとするのではなく、土のうで土を確実に拘束するソルパックの理論を確立している。このソルパックは、土のうの強度特性について着目し、図-7および式(2)に示すように、土のう袋の張力 T を中詰め材に作用する拘束応力 $\sigma_{01}=2T/B$ と $\sigma_{03}=2T/H$ に置き換えて表現されている。

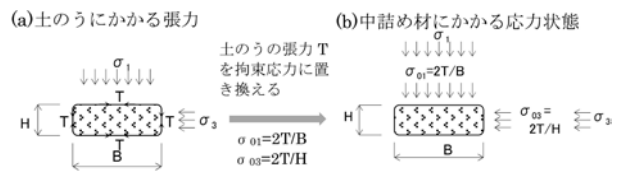


図-7 土のうおよび中詰め材にかかる応力状態¹¹⁾に加筆・修正

$$\sigma_1 + \frac{2T}{B\sqrt{K_P}} = K_P \left(\sigma_3 \frac{2T}{H} \right) \dots (2)$$

ここに、 $T (=T_r)$: 土のうに生じる張力 (=補強材の引張強さ) (kN/m)、 B : 土のう (=補強材) の底面幅、 K_P : 受動土圧係数 $= (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ 、 ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$)、 $H (= \Delta H)$: 土のうの高さ (=補強材の敷設間隔) (m) である。

また、 c 、 ϕ 材料の破壊時における主応力間の関係より、図-8～図-9および式(3)に示すように、土のうによる補強効果を見かけの粘着力 $c (=c')$ により表している。

$$c' = \frac{T_r}{B\sqrt{K_P}} \left(\frac{B}{H} K_P - 1 \right) \dots (3)$$

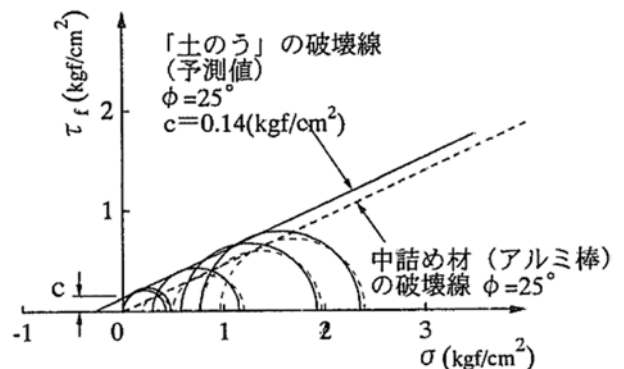


図-8 土のう模型による2軸圧縮試験結果¹¹⁾

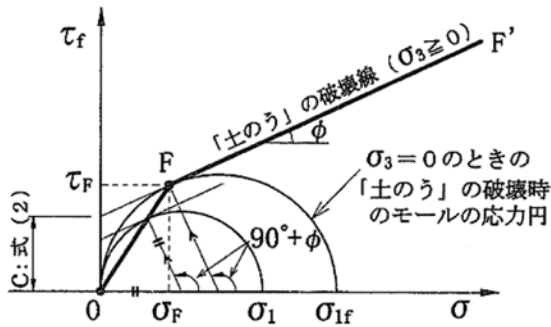


図-9 設計のための土のうの破壊線の考え方¹¹⁾

(2) 拘束土壁工法の石垣補強への応用

ソルパック理論は、土のう積層工法としてだけでなく、図-10に示すように、土のうのようにジオグリッドを配置することによって土質材料を拘束した拘束土壁工法として活用されている¹²⁾。

ここで、石垣に使用する栗石は、粘着力のない岩石質材料であるが、栗石をジオグリッドで巻込んで補強することで、安定性を高めた石垣を構築することが可能になり、実物大振動実験により石垣とジオグリッドが一体となった挙動と高い耐震性を確認している¹³⁾。

また、図-11に示すように、砕石内に巻込んだジオグリッド模型を使った一面せん断試験では、目合いが大きくなく、剛性の小さいジオグリッドであれば、無補強の砕石のせん断抵抗角 $\phi = 42^\circ$ が $\phi = 46.3^\circ$ まで増加することを確認している¹⁴⁾。さらに、実物大の現場引抜き試験においても $\phi = 47.5^\circ$ を確認している¹⁵⁾。

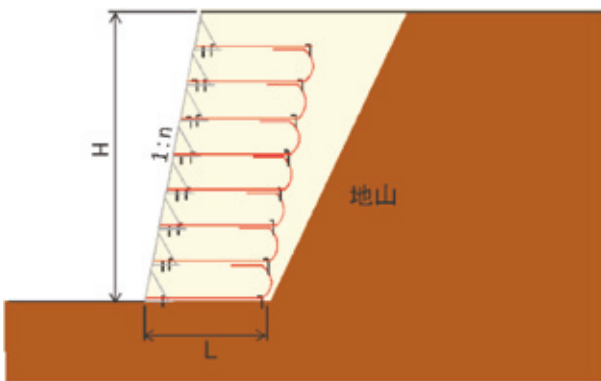


図-10 拘束土壁の構造

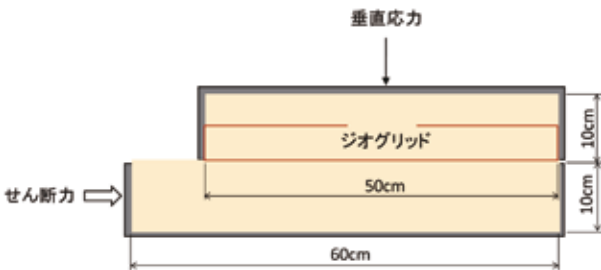


図-11 ジオグリッド模型と単粒度砕石の一面せん断試験の模式図

このため、図-12に示す、巻込み式ジオテキスタイルにおいて、ソルパック理論をベースに、敷設間隔を50～60cm程度と狭くして栗石の地震時における動きを抑えるとともに、敷設長を短くした拘束土壁工法として適用することで、より合理的な設計を行うことが可能になると考えられる。

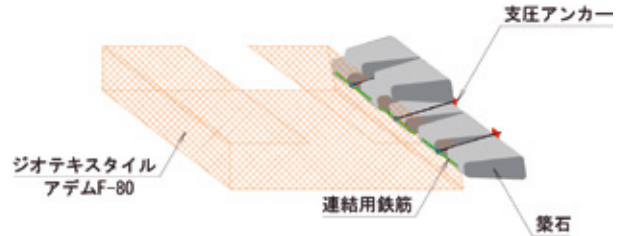


図-12 巻込み式ジオグリッド石垣補強工の概要図

3. 設計手法の比較検討

ここでは、従来の設計手法と拘束土工法について、設計計算によって断面を設定し、比較検討を行う。設計条件および計算断面は、図-13に示すように、壁高 $H = 7.5\text{m}$ 、壁面勾配 1:0.2 とし、上載荷重 $q = 3.5\text{kN/m}^2$ (群衆荷重相当)、設計土質定数は盛土材・基礎地盤とも単位体積重量 $\gamma = 16\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c = 0\text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi = 35^\circ$ 、設計水平震度 $kh = 0.2$ とした。

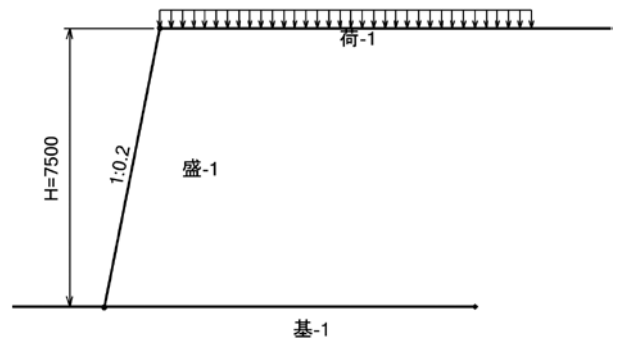


図-13 計算断面

3.1 設計計算による断面形状の比較

i. 従来の設計手法による断面形状

(1) 設計の考え方

従来の設計手法¹⁾は、まず内的安定として、円弧すべりを仮定することにより、各段のジオテキスタイルに作用する必要引張力を算出する。次に設計引張強度が下回らないように敷設間隔と品番を選定し、ジオテキスタイルが引抜けのない抵抗領域に定着長を設定して、内的安定上の敷設長を決定する。さらに、仮想擁壁としての外的安定や、補強領域の内外を通過するすべりの安全率を照査する全体安定に関する検討を行って、補強材配置が最終的に決定される。

(2) 断面形状

従来の設計手法による断面形状は、図-14のとおりである。ジオグリッドの敷設間隔 $\Delta H=1.0\text{m}$ とした。敷設長は内的安定で決定されるが、外的安定および全体安定とも設計安全率を満足する。

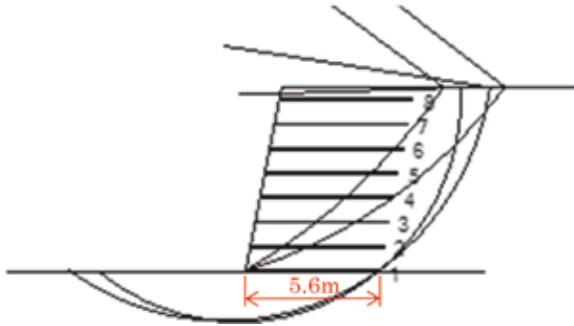


図-14 従来の設計手法による断面形状（全体安定検討時）

ii. 拘束土壁工法による計算断面

(1) 設計の考え方

拘束土壁工法では、土のう積層体による擁壁として、以下の2項目の照査を行うことにより、構造体の安定性を確保している。

内的安定：ジオグリッドの引張強度の決定

外的安定：仮想擁壁としての滑動・転倒・支持に対する安定の照査

なお、拘束土壁工法では、補強土工法のように、引抜けに対する照査は不要である。また、円弧すべり計算は基本的に実施しないが、全体安定を行う必要がある場合、見かけの粘着力は、式(3)により、 $Tr=22\text{kN/m}$ 、 $\Delta H=0.5\text{m}$ とすると、 $c'=80.71\text{kN/m}^2$ となり、2.2(1)で示したSchlosser式による見かけの粘着力の3.8倍であり、補強効果が高い。

(2) 断面形状

拘束土壁工法による断面形状は、図-15のとおりである。ジオグリッドの敷設間隔 $\Delta H=0.5\text{m}$ とした。敷設長は外

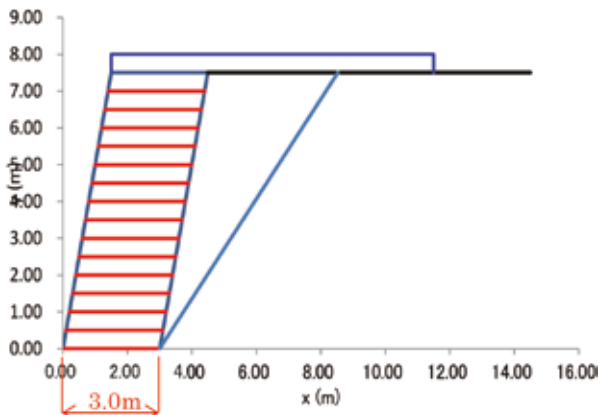


図-15 拘束土壁工法による断面形状（外的安定時）

的安定で決定し、内的安定でジオグリッドの破断について照査している。なお、各段での計算は省略しているが、断面形状がもたれ擁壁と同様であり、各段のジオグリッド底面とその下の中詰め材との摩擦抵抗も十分にあるため、最大壁高部で検討すれば、各段においても外的安定を満足することになる。

従来の設計手法による断面形状と比較して、補強材の配置間隔は1/2となるが、敷設長は54%程度であり、石垣に適用する断面としては、過大な掘削等が不要な形状である。

4. おわりに

本研究では、石垣補強におけるジオグリッド補強土の設計手法として、各種の補強効果および設計手法を整理して再評価し、ソルバック理論を用いた拘束土壁工法の手法を適用することについて検討した。巻込み式拘束土壁工法は、設計計算では合理的な断面形状となり、文化財周辺の環境への影響が小さくなる。留意点としては、実現場への適用事例が少ないため、当面の間、地震の影響が大きい、補強範囲が8mを超える高さは適用しない、背面地盤が安定した場合のみ適用する等の制限が必要である。今後の課題としては、石垣の景観を変えない、支圧アンカー以外の築石との連結構造を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 一般社団法人 土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル（第二回改訂版），pp.201-301, 2013.12
- 2) 一般社団法人 土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル，pp.275-280, 1993.1
- 3) 福田直三，三浦哲彦，山内豊聡：延伸プラスチックグリッドによる擁壁土圧の低減効果，土と基礎，Vol.32, No.6, pp.21-26, 1984.6
- 4) 熊本市文化市民局熊本城総合事務所熊本城調査研究センター：令和4年度 第3回熊本城文化財修復検討委員会 資料3 本丸御殿下石垣復旧措置（案）について https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=189&flid=337151（参照2023.9.25）
- 5) Schlosser, F. and Long, N.T.: Etude du comportement du materiau Terre Armee, Annales de L' Institut Technique de Batiment et des Travaux Public, Supplement No.304, serie Materianx No.45, 1973.
- 6) 建設省土木研究所：ジオテキスタイルを用いた補強土の合理的な設計法に関する共同研究報告書（その2）-ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル-建設省土木研究所共同研究報告書，第72号，pp.83-91, 1992.3
- 7) 西本俊晴，竜田尚希，王宗建，筒井弘之，太田秀樹：三軸圧縮試験に基づく補強土の見かけの粘着力の評価，ジオシンセティックス論文集 第26巻，pp.27-34, 2011.12
- 8) 中根淳：補強土工法の設計・施工マニュアルの改訂概要（その1），土木技術資料，第55巻，第12号，pp.58～61, 2013
- 9) 河村隆，梅崎健夫：ジオグリッド補強土における拘束効果

- パラメータの決定法に関する一考察, ジオシンセティックス論文集 第19巻, pp.21-28, 2004.12
- 10) 河村隆, 梅崎健夫: ジオグリッド補強土の拘束効果を導入した破壊規準とその妥当性の検討, ジオシンセティックス論文集 第16巻, pp.91-96, 2001.12
 - 11) 松岡元, 劉斯宏, 長谷川智久, 島尾陸: 土のう積層体の変形・強度特性と設計法, 土木学会論文集No.764/Ⅲ-67, pp.169-181, 2004.6
 - 12) 辻慎一郎, 伊藤修一, 花見元嗣, 高橋啓太, 小笠原耕一: ジオテキスタイルを用いた拘束土壁工法の設計と適用例, ジオシンセティックス論文集 第28巻, pp.277-280, 2013.12
 - 13) 橋本隆雄, 中澤博志, 池本敏和, 宮島昌克: 大型振動台実験による石垣補強技術の耐震性評価, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) 77 (3), pp.405-417, 2021
 - 14) 大山謙吾, 辻慎一郎, 久保哲也, 橋本隆雄: 石垣補強に用いるジオグリッドの摩擦特性に関する検討, 国士館大学理工学部紀要 (16), pp.67-75, 2023.3
 - 15) 大山謙吾, 辻慎一郎, 久保哲也, 橋本隆雄: 石垣補強に用いるジオグリッドの摩擦特性に関する検討, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, 第Ⅲ部門補強土, 2023.9