

土木学会 地震工学委員会 城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会
城壁の耐震診断・補強に関するシンポジウム

ジオテキスタイルによる城郭石垣への適用

○前田工織株式会社 大山謙吾
国士館大学 橋本隆雄
静岡理科大学 中澤博志

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

内容

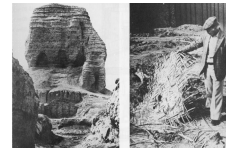
1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ
2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性
3. 城郭石垣補強への適用化
 - ①施工実験
 - ②大型振動台実験
4. まとめ

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

①-1古代：草木類を用いた補強土構造物（諸外国）

天然繊維・樹木による補強材 (natural geotextile)

(1) 神殿（敷網工法）



神殿の基礎地盤とレンガ壁の補強に用いられた草のマット

(3) 土塁・城壁（敷葉・敷粗朶工法）



漢代長城の補強に用いられた葦とタマリスクの小枝によるマット（砂礫との互層）

(2) 寺院（木造建築物の補強部材）



韓国・風停寺の壁と屋根に用いられた泥土+稲藁

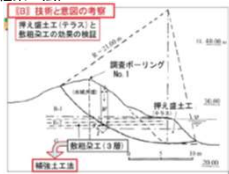
(1) Martin Ziegler: Application of geogrid reinforced constructions: history, recent and future developmentsより引用
(2) Jin Yang: Cultural Heritage of Ancient China: The Engineering of the Great Wall of China, the Jinshanling Sectionより引用
(3) E. C. Shin: Korean Practice of Earth Reinforcement in Combination with Other Methodsより引用

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

①-2古代：草木類を用いた補強土構造物（日本）

天然繊維・樹木による補強材 (natural geotextile)

(1) 防塁 (水城の敷葉・敷粗朶工法)



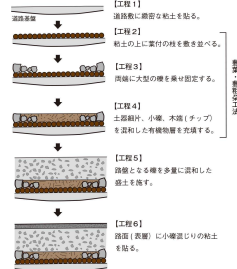
(2) 池堤 (狭山池の版築工法+敷葉・敷粗朶工法)



排水性の高い粗朶層による盛土の排水・圧密促進効果

林重徳：特別史跡「水城」に1,350年前の先端技術を読む、大阪府、大野城市、鳥取県資料より引用

(3) 道 (古代山陰道の敷葉・敷粗朶工法)



新14年度事業 補強

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

③-1近世：石材を用いた補強土構造物（城壁）

石材による壁面材・補強材

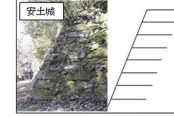


日本では、城郭石垣が穴太衆により構築される。

特に算木積みでは、築石の設置方向を変えることにより石垣断面としては長尺と短尺の組合せとなる。一井桁組擁壁の構造に近似

さらに、時代が進むにつれて、築石の設置角度が、壁面の勾配に対し直角に近い状態になっていく。
→地山補強土（鉄筋挿入工）の理論に近似

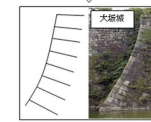
「算木積み」石垣構造技術の進歩



天正5年(1577)頃



天正13年(1585)頃



元和6~寛永6年(1620~1629)頃

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

②中世：草木類を用いた補強土構造物

天然繊維による補強材



Photo 1: Matsumoto Castle (1504) and rope inside mud wall of Matsumoto Castle

松本城：土壁の中に縄を張って崩落を防いでいる

PWR1:The battle with earth - A history of retaining walls -より引用

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

④-2近世：石材を用いた補強土構造物（加藤清正の土木技術）

石材・天然繊維等による補強材

(1) 荻生徂徠『鈴録』

「愚按するに、石垣は加藤清正の一流あり。清正の石垣は石の中にトタン（鍛鍍？塗炭？）を入れて石をつなぐと云へり」→特殊な材料を用いた石垣補強工

(2) 後藤彦三郎『文禄年中以来等之旧記』「江戸御城之事」

「此辺殊に沼成れば、武蔵野辺の萱を芟りよせ、沼に踏込、段々土台をかけ、小兒を集め拍子を取、おどらせ日をおくる」→萱による表層改良、締固め、緩速載荷施工による軟弱地盤対策工

(3) 山鹿素行『武教全書』「江戸御城之事」

「ねば土を練って石の根に込めて、墨石も塗り固める。このごとくする時は、石垣は一枚石のごとく崩ることなし」→石垣の一体化に漆喰技術を用いた可能性（石灰、糊、糞等の補強材）

(4) 『土木史 加藤清正の土木と治水』

「(白石垣の) 堰体は表面は花崗岩までは凝灰岩の切り石で、その下は二和土か三和土で固められている」

「(瀬ノ瀬堰は) 10人もち以上の巨石を敷きこみ、敷石間には手頃な石、または二和土か三和土が埋めてあり」

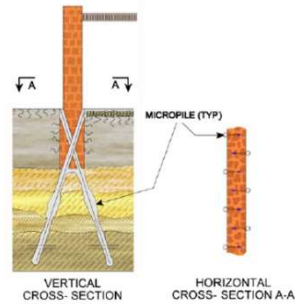
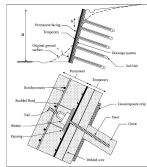
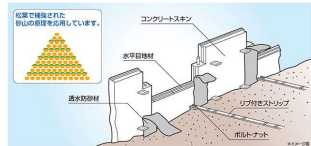
→密度増大工法、漆喰技術を用いた可能性



1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

⑤-1近代・現代：鉄を用いた補強土構造物

主要部材が鉄である補強材（テールアルメ、鉄筋挿入工、ルートパイル）



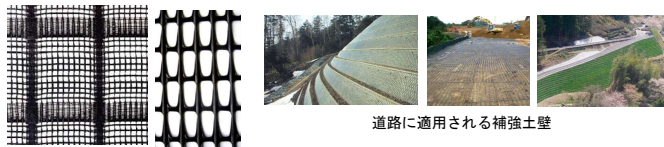
日本テールアルメ協会資料、https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_nailing, FHWA SA-97-20, Bruce (2008), and Bennett (2010) より引用

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

1. 古代の補強土構造物から現代の補強土構造物へ

⑤-2近代・現代：高分子材料を用いた補強土構造物

合成繊維・樹脂による補強材 (geotextile, geosynthetics)



道路に適用される補強土壁

時代が進むにつれて、社会が発展し、活用できる材料・施工方法の範囲が広がった。

しかし、補強土の原理や技術そのものは、古代から現代に至るまで、技術者たちによって、連続と継承されてきたことが分かる。

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

①城壁

目的：【近世】石垣を高く急勾配にして敵方の進入を防ぎ、櫓を立てる。
【現代】歴史的文化遗产の継承、文化財の保護

部材：築石、栗石等の石材（文化財）

施工方法：【現代】重機による運搬・石工による手積み・締固め

②補強土

目的：土構造物を安定化して、土地の有効利用や、災害を予防する。
補強土壁では、急勾配かつ高壁高の盛土が構築できる。

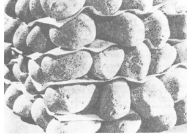
部材：補強材（ジオテキスタイル等）、壁面材（コンクリートパネル・鋼製枠）、盛土材（土質材料・岩石材料等）

補強土の技術を城壁に適用するには？

- 栗石となじみやすく、高い引抜き抵抗力を確保できる材料の選定
- 栗石施工時の耐衝撃性と、超長期的な耐久性を確保できる材料の選定
- 間隙が大きく、地震時に動き出す栗石層を安定させる構造
- 築石と一体化できる構造と施工性の確保

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

① 栗石とのなじみやすさと高い引抜き抵抗力



左は補強土の原理（土粒子はマスとして挙動し、補強材との摩擦抵抗力により自立性を高めている）を説明した写真であるが、ジオテキスタイルで栗石を挟み込んで全体を一体化していると言える。

ジオテキスタイル	繊維系(Fタイプ)	樹脂系(HGタイプ)
特長	<ul style="list-style-type: none"> アラミド繊維とポリエステル繊維を交織させ、塩化ビニル樹脂でコーティング。 軟弱地盤対策に適用が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 高密度ポリエチレン樹脂を押し出してアラミド繊維を挿入し、格子状に成形。 補強土壁での実績が多い。
形状		
評価	繊維系のため栗石になじみやすく、二軸方向が同一強度であるため、地震時の挙動に追従して強度を発揮しやすい。ストランドの本数が多く、万が一の破断も全体に広がらず、致命的にならない。	被覆材が硬いため、栗石になじみにくい。縦横の連結部が一体化した構造であるが、横軸方向は強度が小さい。

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

③ 安定した栗石層が構築できる構造



ソルバック工法の模型実験



マットレス工法の模型実験



逆勾配補強盛土の施工実験

地震時の栗石のゆすり込み沈下等の作用にも対応し、石垣に大きな地震動が作用した場合でも、栗石層の崩壊等による致命的な破壊は発生させないフェールセーフ構造が必要である。特に被災した城壁は、部分的な修復が多いため、十分な定着長が確保できない可能性がある。→巻込み工法、拘束土工法等の活用

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

② 高い耐衝撃性と耐久性



施工時および供用時のあらゆる状況でも耐える必要がある。たとえば、敷設したジオテキの上に築石が載ったり、栗石の投入時や締め固め時にも衝撃力が作用する。
→施工実験および振動実験で確認する

2. 城郭石垣に要求されるジオテキスタイルの特性

④ 築石と一体化できる構造と施工性の確保

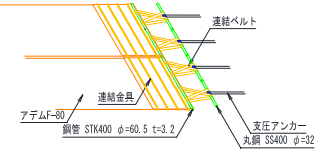


大きな地震動を受けた際に、築石が壁面から飛び出さないためには、築石とジオテキを連結する構造が必要である。ただし、景観への影響は最小限にする必要がある。また、部材を追加しても、築石および栗石設置時の施工性に大きな影響は与えないような工夫が必要である。
→巻込んだジオテキと築石をいかに連結するか

3. 城郭石垣補強への適用化

①施工実験: 構造的・施工性

ジオテキ・アンカー連結部概要図



当初の構造として、巻込みは背面側のみ行い、前面側は鋼管を用いてジオテキを折り返し、ベルトによりジオテキと支圧アンカーとの連結構造を検討した。しかし、築石層の不陸に長い鋼管はなじまず、またベルトとの連結構造にもやや無理があり（ベルトが破断すると築石背面部の補強効果が小さくなるという弱点の存在）、施工性の改善も必要であった。→**連結構造の見直し**

①施工実験: 概要

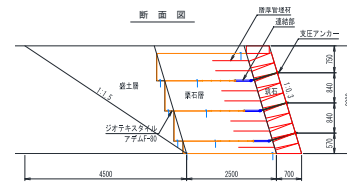
場所：岡部（株）総合実験センター（茨城県下妻市半谷1045-1）



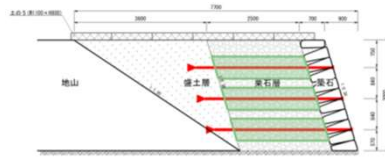
施工前状況



完成状況（ネットに覆っている側がジオテキ）

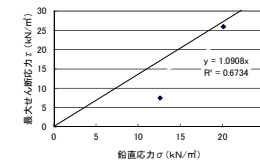


ジオテキスタイル巻込みモデル（当初）



筒状固結アンカー（ジオテキと同時施工）

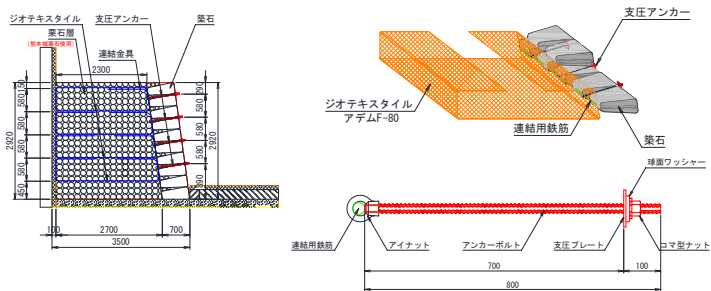
①施工実験: 現場引抜き試験



引抜き試験を実施したところ、ベルトの破断や試験箇所の不具合等は発生したが、背面巻込みモデルとしては、見かけのせん断抵抗角 $\phi=47.5^\circ$ の結果が得られた。→**高い引抜き抵抗力の確認**

②大型振動台実験：概要

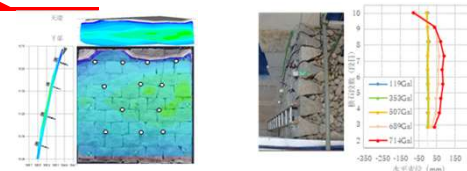
場所：国立研究開発法人 防災科学技術研究所（茨城県つくば市天王台3-1）



ベルトをなくし、築石

→連結構造の合理化を実施

②大型振動台実験：耐震性（変形抑制効果）の確認



ジオテキスタイル巻込みモデルは、他のモデルに比べると変形が小さく抑えられて、最終の最大変位量が90mm（ただし、筒状固結アンカーの変位量が最も小さい）。

加振時の挙動は、アンカーとジオテキスタイルにより、築石と栗石が一体化している。

ジオテキスタイルの巻込みは、栗石の沈下や側方移動への変形拘束を期待し、築石表面の受圧版とアンカーで連結することで、築石と栗石との一体化を図ることができる。

→石垣の沈下や水平変位の抑制効果

橋本隆雄・中澤博志・池本敏和・宮島昌克：大型振動実験による石垣補強技術の耐震性評価より引用

②大型振動台実験：施工状況



支圧アンカーの設置



ジオテキの巻返し



築石の設置



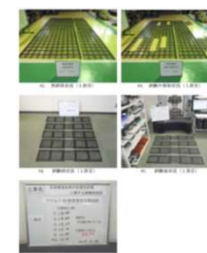
支圧プレート類の締結

→施工性の改善を確認

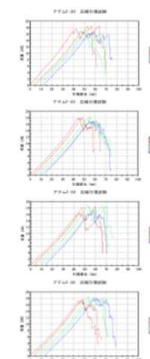
②大型振動台実験：室内引張試験（耐衝撃性の確認）

実験土槽内から試験体を取り出し、室内引張試験を実施し、栗石に対する耐衝撃性を確認。
各段×試験片5点は、各々の最大引張強さの平均値を幅1m当たりの強さに換算。試験結果としては、アデムF-80の製品基準強度（ $T=75\text{kN/m}$ ）に対し、すべての試験体において、引張強さが上回る結果となった。このため、施工中の損傷を考慮した材料安全率 $F_c=1.0$ となる。

試験状況



荷重-変位曲線

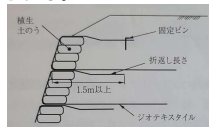


→高い耐衝撃性の確認

4. まとめ

4. まとめ

- ・ジオテキスタイル（アダムFタイプ）は、城壁への適用（施工性・耐震性等）に対し、その補強効果が有効に発揮されることが分かった。
- ・ジオテキスタイル巻き込みモデルは、筒状固結アンカーの次に、変形抑制効果がある。
- ・変形抑制効果をさらに向上させるには、前面側の巻き込みは、植生土のう巻き込み形式（土研センター ジオテキマニュアル記載）に準じた形状で行うのが望ましいと考えられる。



- ・現地の複雑な設計・施工条件にも、たとえば、栗石層外の盛土への定着だけでなく、石垣背面の限定された掘削領域で定着長が取れない場合の、地山補強土工等との連結も、十分に対応可能である。