

論文 Original Paper

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

大山 謙吾^{*1}・辻 慎一朗^{*2}・久保 哲也^{*3}・橋本 隆雄^{*4}

Study on friction properties of geogrids for reinforced stone walls

Kengo Oyama^{*1}, Shinichiro Tsuji^{*2}, Tetsuya Kubo^{*3} and Takao Hashimoto^{*4}

Abstract: Geogrid reinforcement is applied as reinforcement for castle stone walls in Japan, however it is not cleared the effect of the geogrids on the stone walls. In this study, the direct shear test on geogrid model with different mesh size and bending stiffness is carried out to confirm the friction property of geogrid and it is characterized the properties of geogrids suitable for reinforced stone walls.

Key words: castle wall, earthquake, soil reinforcement, direct shear test, mesh size, bending stiffness

1. はじめに

2011年3月の東北地方太平洋地震では、仙台城の石垣が面積約1,200m²の規模で被災したため、市道に接する一部区間において、図-1に示すポリエステル繊維とアラミド繊維を交織させたジオグリッド（引張強度80kN/m、目合い18×16mm）を石垣内の栗石層に設置する復旧工事が行われた¹⁾。本工事では、石垣背面の土圧を部分的に低減することを目的としており、図-2に示すように、ジオグリッドは敷設長1.2～1.9m、敷設層数2～3層敷設する簡易なものであった。しかし、2022年3月の福島県沖地震によって、無補強区画を含めて再び石垣が被災し、ジオグリッドによる補強区間の石垣には変形が生じたものの、崩壊には至らなかった。一方、2016年4月に発生した熊本地震では、熊本城の天守閣や櫓などに多大な被害をもたらし、石垣については約8,200m²が崩落して、膨らみや緩みを含め、約23,600m²（全体の29.9%）の復旧が必要になっている²⁾。この内、天守閣石垣の復旧工事では、ジオグリッドとステンレス鋼を組み合わせ、栗石の粒径に合わせて格子間隔を変化させることができる剛性の高い材料が用いられている³⁾。

道路土工構造物として適用されているジオテキスタイル補強土壁では、摩擦特性を土中引抜き試験等によって評価することとしているが、石垣を構成する栗石の粒径は一般的な盛土材に比べて大きく、その積層面は平滑で

はないため、ジオグリッドとの摩擦特性が不明確である。「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）」では土質材料とのインターロッキング効果に関する記載はあるものの、目合いに関する規定はない⁴⁾。また、鉄道基準では、土質材料とのインターロッキング効果が発揮できるよう、礫の最大粒径（鉄道では75mm程度）に対し、ジオグリッドの目合いは粒径の1/4以上となるのが良いとしている⁵⁾。一方で、目合いのないシートによる補強や、粒径の大きい硬岩ずりの使用も可能としている⁶⁾。このように、ジオグリッドと礫の粒径との関係性が明確でない上に、城郭石垣のような粒径や間隔が大きい栗石を使用する場合に、目合いや剛性が異なるジオグリッドにおいて、摩擦特性がどのように変化するかは十分に検証されていない。

そこで、本研究では、目合いと曲げ剛性を変えたジオグリッドと礫を用いて一面せん断試験を行い、岩石質材料に対する摩擦特性の変化を確認して、ジオグリッドによる石垣補強への適用性について明らかにする。

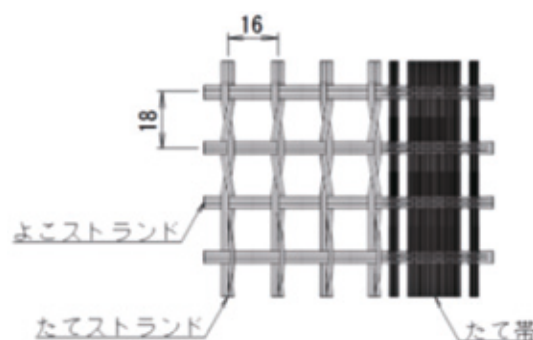


図-1 ジオグリッド（アダムFタイプ）

*1 前田工織株式会社 営業推進部主幹

*2 前田工織株式会社 補強土排水推進部担当課長

*3 前田工織株式会社 補強土排水推進部長

*4 国土館大学理工学部まちづくり学系 教授

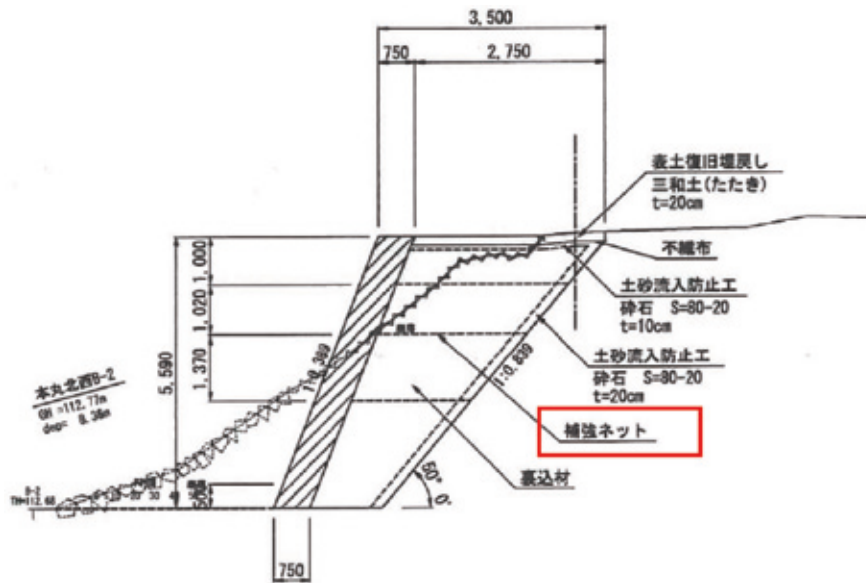


図-2 石垣復旧工断面図 (補強ネット=ジオグリッド)

2. ジョグリッドの目合いの影響

2.1 試験概要

石垣を構成する栗石と目合いの異なるジオグリッドとの摩擦特性を確認するために、実物の栗石（粒径200～300mm）とジオグリッド（目合い18～30mm程度）に対し、1/10スケールの土質材料と目合いの異なるジオグリッド模型を用いて一面せん断試験を行った。

一面せん断試験では、岩石質材料に単粒度砕石4号（粒径20～30mm）を乾燥密度 $\rho_d = 1.486 \text{ g/cm}^3$ 、相対密度 $D_r = 0.484$ （中位な状態）に調整して模型地盤を作成した。また、ジオグリッドにはポリエチレン製のトリカルネットのN-2（目合い $1.8 \times 1.8 \text{ mm}$ ）を使用し、交点を破断することにより、目合いを1～3倍まで変化させた（図-3参照）。また、引張試験より、ジオグリッドの模型の最大引張強度は $T_{\text{max}} = 1.29 \text{ kN/m}$ 、最大ひずみ $\epsilon_{\text{max}} = 4.1\%$ であった（写真-1および図-4参照）。

本試験における実験ケースを以下に示す。

- CASE-1：目合 $1.8 \times 1.8 \text{ mm}$ （アダムFタイプ相当）
- CASE-2：目合 $3.6 \times 3.6 \text{ mm}$ （一般的なジオグリッド）
- CASE-3：目合 $5.4 \times 5.4 \text{ mm}$ （極端に目合いが大きい材料）

2.2 一面せん断試験

一面せん断試験機と砕石の充填状況を写真-2および写真-3に示す。試験条件は、「土とジオシンセティックスの一面せん断試験の摩擦特性試験方法（地盤工学会基準：JGS0941）」に準拠して 1 mm/min の速度でせん断を行い、 50 mm までの変位とした。

垂直応力（拘束圧）は実際の荷重条件を想定し、 20 kPa

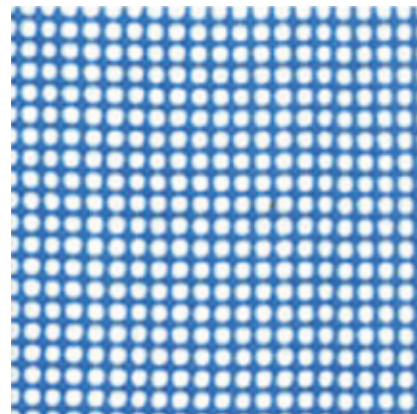


図-3 トリカルネットN-2

最小密度： $\rho_{d\text{min}} = 1.361 \text{ g/cm}^3$

最大密度： $\rho_{d\text{max}} = 1.647 \text{ g/cm}^3$

相対密度： $D_r = \rho_{d\text{max}}(\rho_d - \rho_{d\text{min}}) / \rho_d(\rho_{d\text{max}} - \rho_{d\text{min}}) = 0.484$



写真-1 引張試験状況

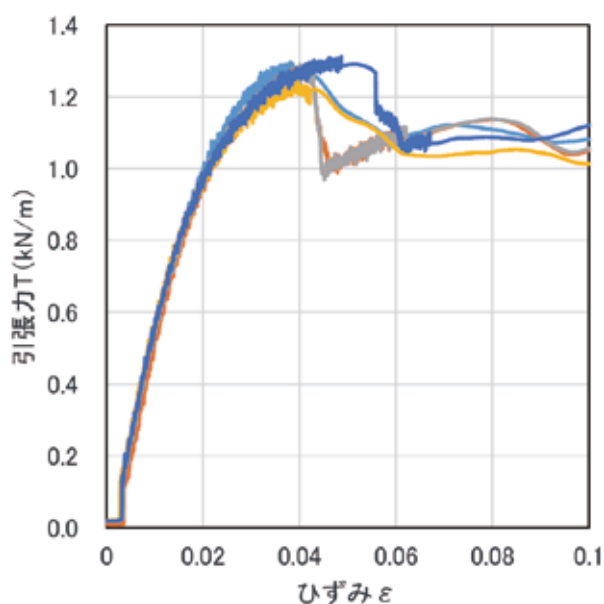


図-4 荷重-ひずみ曲線



写真-2 一面せん断試験機



写真-3 碎石充填状況

から80kPaまでの3段階 (20kPa, 50kPa, 80kPa) とした。試験片の寸法は、せん断箱の形状に合わせて、幅30cm×長さ50cmとした。

単粒度碎石単体での一面せん断試験の結果を図-5および図-6に示す。50mmひずみ時でのせん断応力は200kN/m²程度となり、ピーク値が得られず、写真-2の試験機を用いた試験ではせん断抵抗角が確認できなかったため、写真-4に示す簡易的な方法でせん断抵抗角を推定した。

単粒度碎石を充填した模型地盤上に、52.5cm×52.5cmの型枠を設置して単粒度碎石を充填し、模型地盤を傾斜させて型枠がすべり出すときの角度を測定した。その結果、単粒度碎石のせん断抵抗角は $\phi = 42^\circ$ と推定された(写真-4参照)。

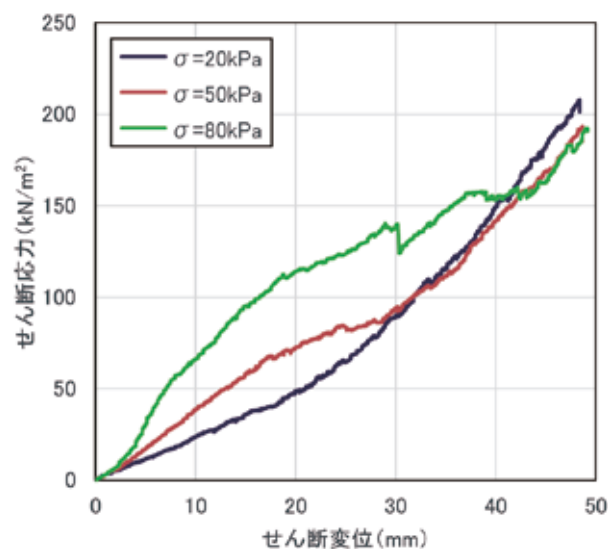


図-5 せん断応力-せん断変位曲線 (碎石単体)

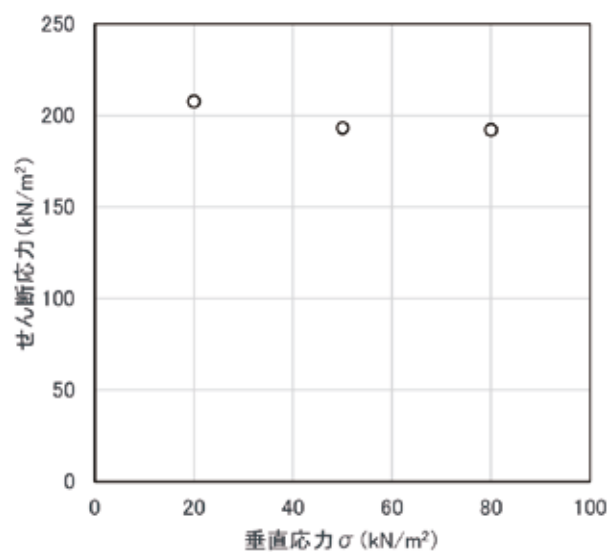


図-6 垂直応力-せん断応力関係 (碎石単体)

各CASEにおけるせん断応力とせん断変位の関係を図-8、図-10、図-12に、垂直応力とせん断変位の関係を図-9、図-11、図-13に示す。各CASEの試験結果（土質定数）を表-1に示す。各CASEにおける垂直応力とせん断応力の関係を図-14に示す。CASE-1とCASE-2は、簡易一面せん断試験による単粒度碎石自体のせん断

抵抗角（破線： $\phi = 42^\circ$ ）以上の摩擦角が確保されているが、CASE-3では単粒度碎石自体の摩擦角より低下している。

また、CASE-2に比べて、CASE-1の方が摩擦角は6°程度小さいが、粘着力は4倍以上大きい。これは、単粒度碎石との接触面積や格子交点の違いの影響が考えられる。ジオグリッドの目合いが岩石質材料における最大粒径の6～12%（粒径30mmに対し目合い1.8～3.6mm）までは、岩石質材料単体のせん断抵抗角以上の摩擦角が確保され、それ以上の目合いになると碎石同士のかみ合わせが卓越し、ジオグリッドの引張補強効果は発揮されなくなる傾向がある。目合いが最大粒径の6～12%の内、目合いが小さい方が粘着力自体は大きいため、土被りの小さい低拘束圧状態でも、引張補強効果を有効に働かせることができることが確認された。図-7および写真-5に、ジオグリッドの設置方法を示す。



写真-4 簡易一面せん断試験の状況（碎石単体）

表-1 土質定数

	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
CASE-1	30.3	46.3
CASE-2	7.2	52.6
CASE-3	55.4	31.7

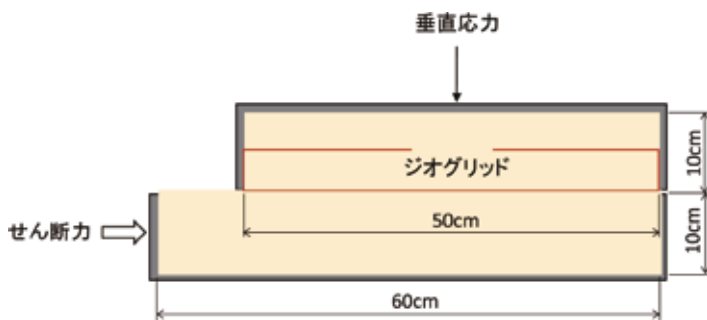


図-7 ジオグリッド模型と単粒度碎石の一面せん断試験の模式図



写真-5 ジオグリッド模型N-2設置状況（目合い1倍）

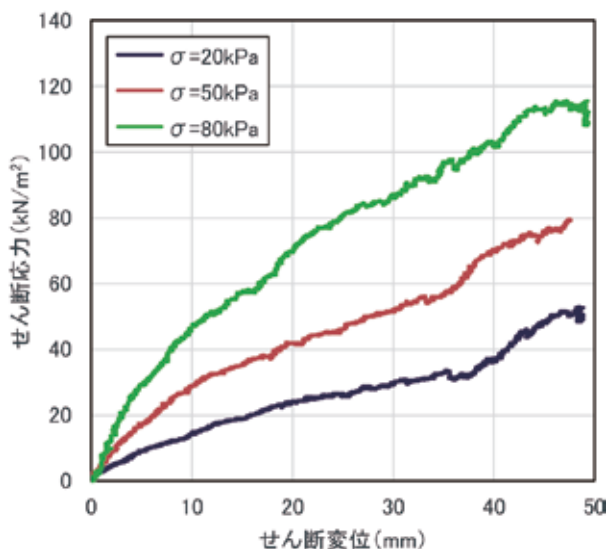


図-8 せん断応力-せん断変位曲線（CASE-1）

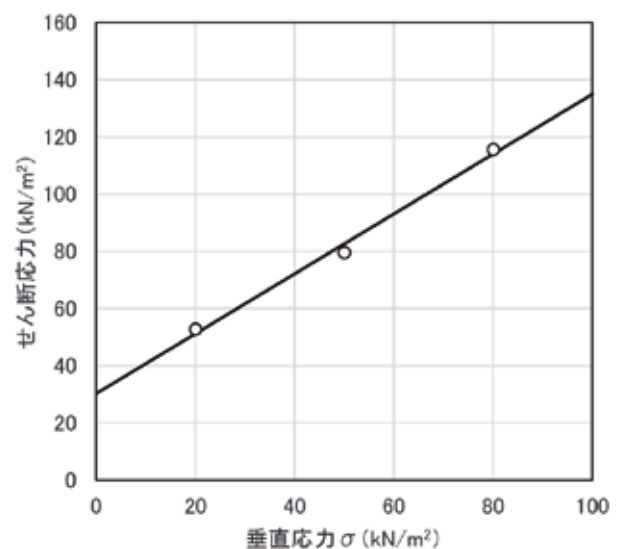


図-9 垂直応力-せん断応力関係（CASE-1）

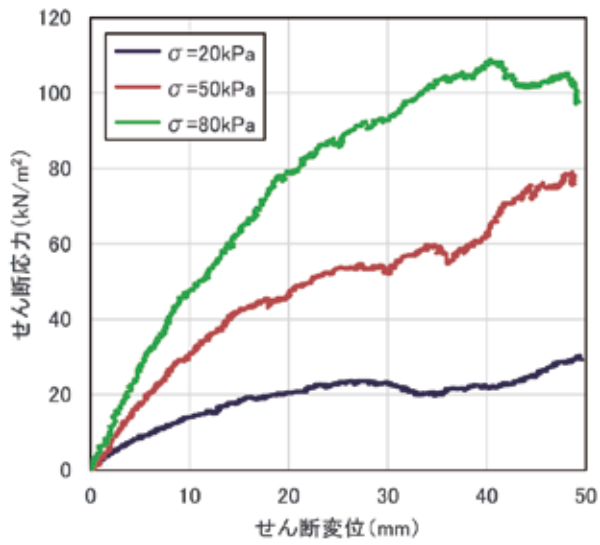


図-10 せん断応力-せん断変位曲線 (CASE-2)

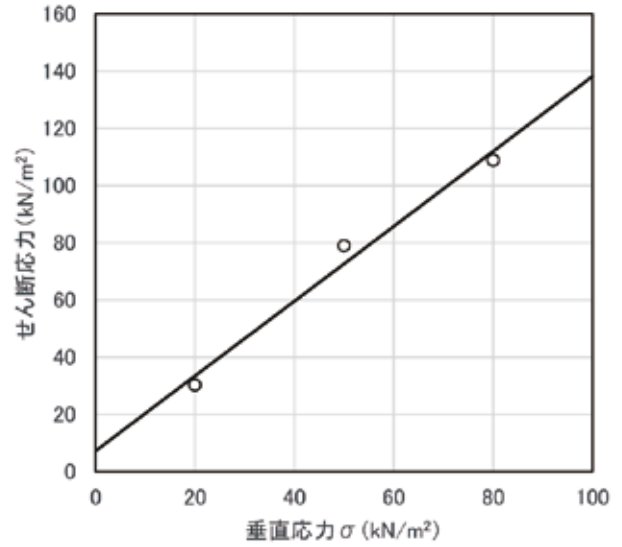


図-11 垂直応力-せん断応力関係 (CASE-2)

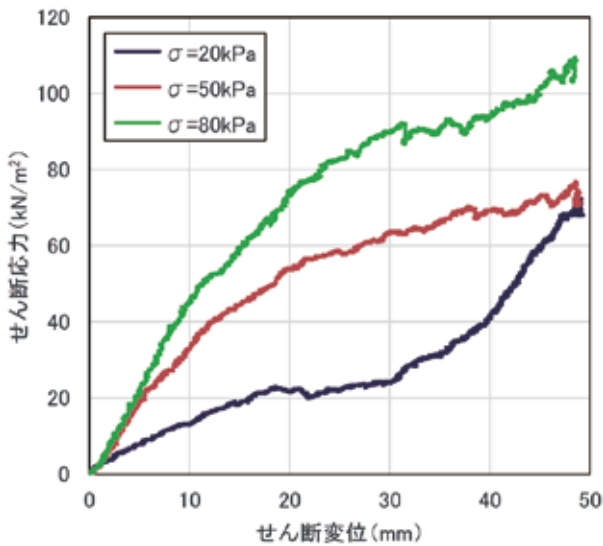


図-12 せん断応力-せん断変位曲線 (CASE-3)

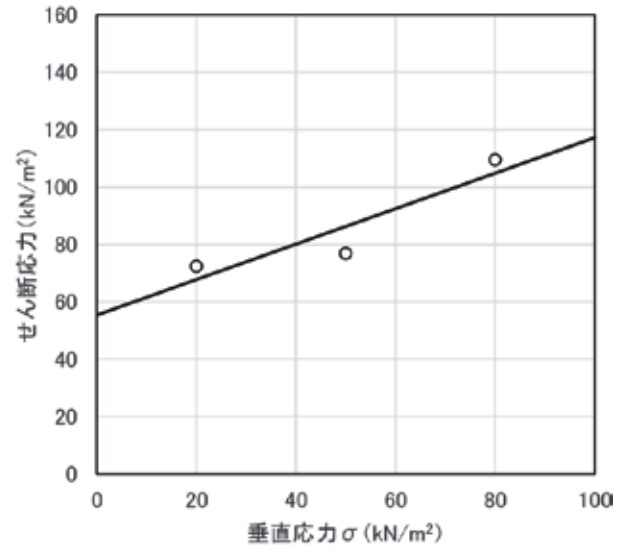


図-13 垂直応力-せん断応力関係 (CASE-3)

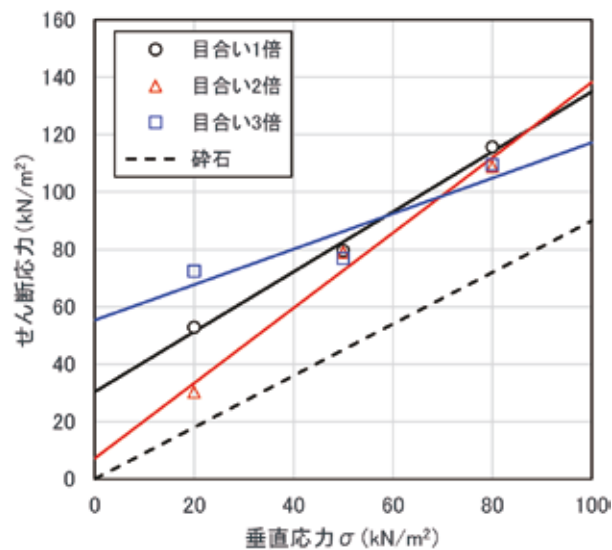


図-14 各目合いの垂直応力-せん断応力関係の比較

3. ジオグリッドの曲げ剛性の影響

3.1 試験内容

石垣の栗石層内部は空隙が多いため、曲げ剛性の高いジオグリッドを用いると、栗石の不陸とジオグリッドがなじまずに、大きな空隙が生じることが懸念される。

このため、曲げ剛性の異なるジオグリッド模型を用いて単粒度碎石との一面せん断試験を行い、摩擦抵抗に与える影響を検証した。

試験方法は、2章に示した目合いの実験と同様の条件とした。

3.2 使用材料

曲げ剛性の異なる3種類のジオグリッド模型を用いる(図-15～図-17参照)。トリカルネットN-2は前項の目合

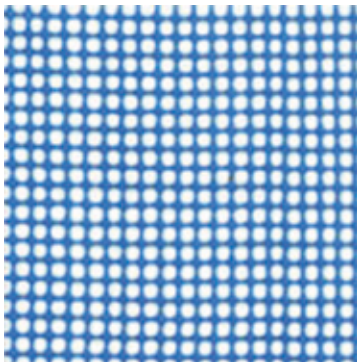


図-15 ①トリカルネットN-2 (目合い1.8×1.8m)

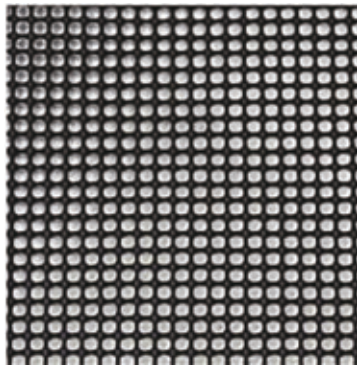


図-16 ②トリカルネットN-11 (目合い3.9×3.9mm)

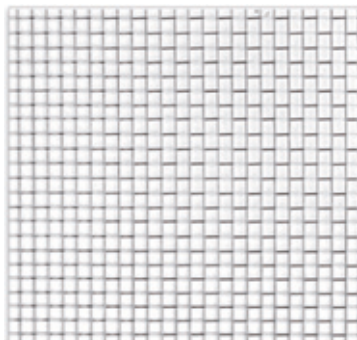


図-17 ③金網 (線形0.6mm, 目合い3.6×3.6mm)

い1倍と同じジオグリッドで、トリカルネットN-11はポリエチレン系の硬いジオグリッドを想定し、金網(ステンレス製ワイヤーメッシュ)は鋼製材料を使用したジオグリッドを想定した。

3.3 曲げ剛性の推定

ジオグリッドの曲げ剛性は、両端部を固定した各ジオグリッド模型の中央部に錘を載荷させ、荷重毎にジオグリッドの鉛直変位を読み取って、荷重-たわみ関係を整理する方法で推定した。ジオグリッドの曲げ剛性は、ばらつきが大きいものの、平均値を代表値とした(写真6~8, 図18~20参照)。

3.4 一面せん断試験

写真-2および図-7に示した一面せん断試験機に、曲げ剛性の異なるジオグリッド模型を敷設して模型地盤を作成し、一面せん断試験を行った。写真-9と写真-10にN-11と金網の設置状況を示す。

各CASEにおけるせん断応力とせん断変位の関係を

①N-2 (剛性1倍)

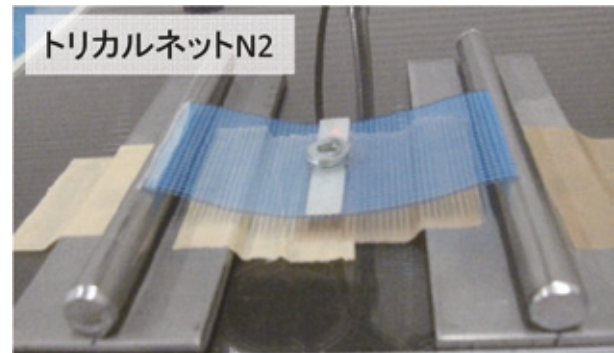


写真-6 N-2曲げ試験状況

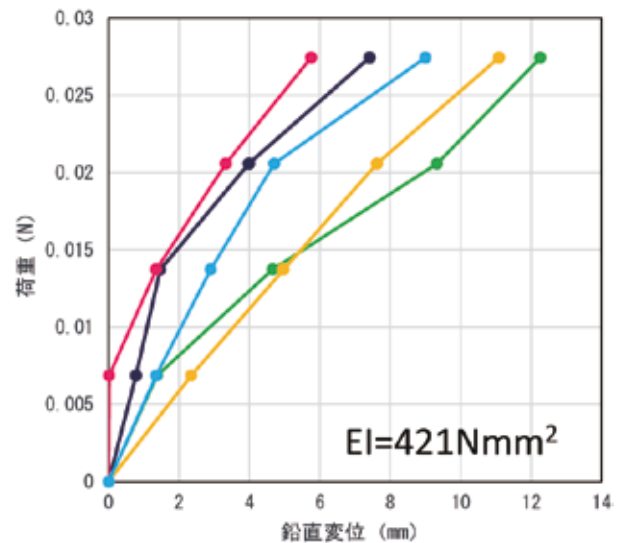


図-18 N-2荷重-変位曲線

②N-11 (剛性約2倍)

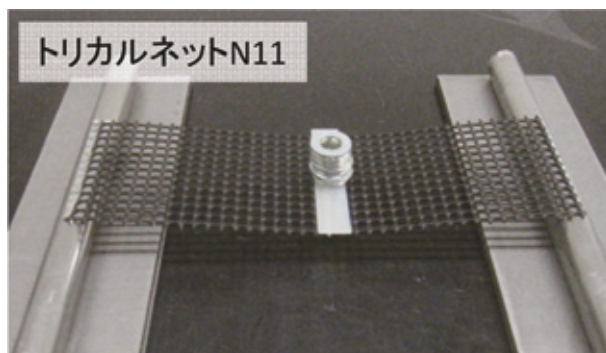


写真-7 N-11曲げ試験状況

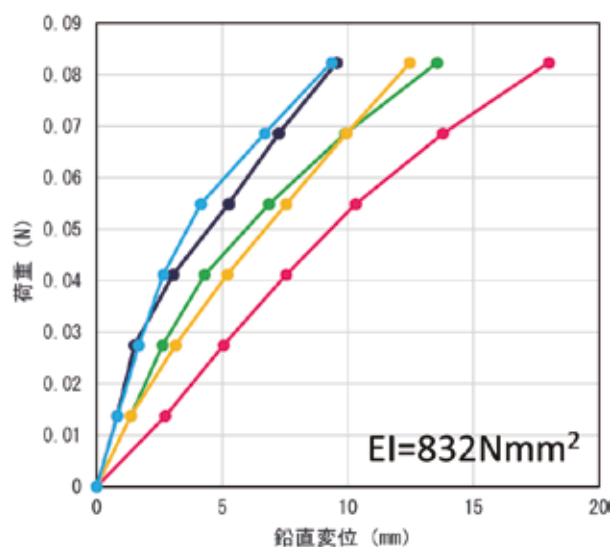


図-19 N-11 荷重-変位曲線

③金網 (剛性約39倍)

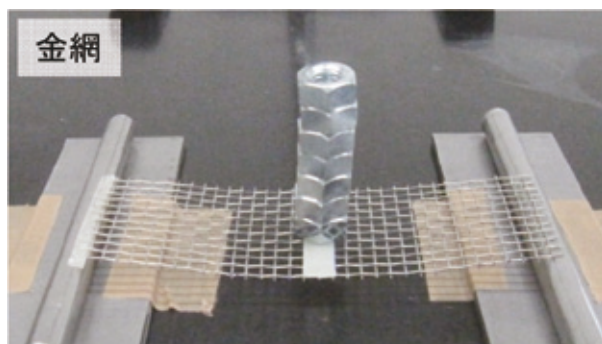


写真-8 金網曲げ試験状況

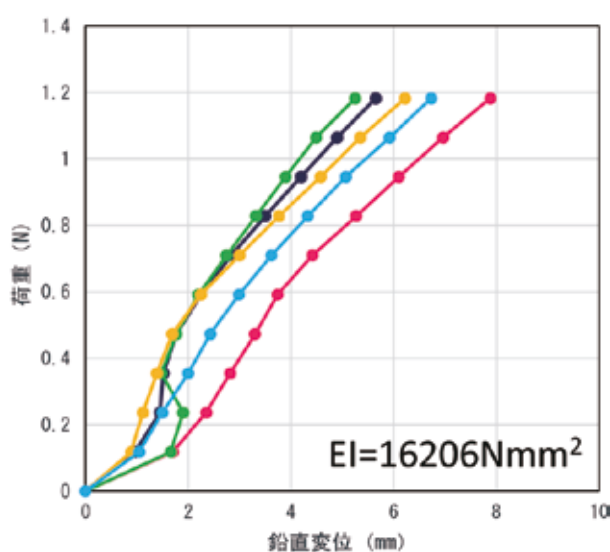


図-20 金網荷重-変位曲線



写真-9 N-11設置状況



写真-10 金網設置状況

図-21, 図-23, 図-25に, 垂直応力とせん断変位の関係を図-22, 図-24, 図-26に示す。各CASEの試験結果(土質定数)を表-2に示す。

N2(曲げ剛性1倍)のせん断応力とせん断変位の関係と垂直応力-せん断変位関係を図-21および図-22に示

す。試験結果より, 粘着力 $c=30.3 \text{ kN/m}^2$, せん断抵抗角 $\phi=46.3^\circ$ である。

各曲げ剛性における垂直応力-せん断応力関係の比較を図-27に示す。金網の摩擦角は, トリカルネットN2およびN11と比べて $3\sim4^\circ$ 程度大きいが, 拘束圧が低い

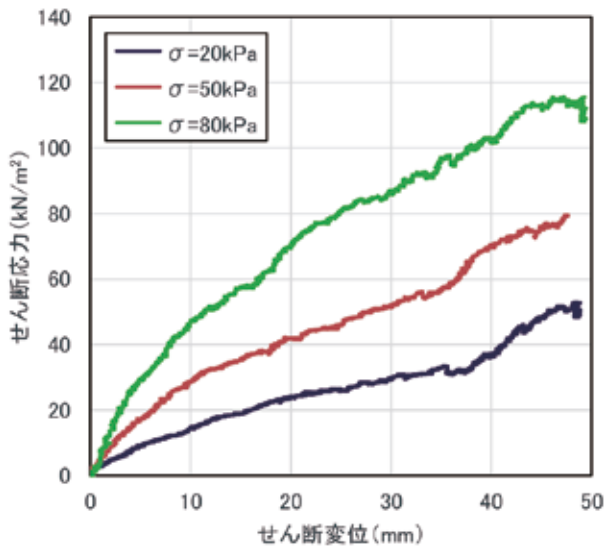


図-21 せん断応力-せん断変位曲線 (N-2)

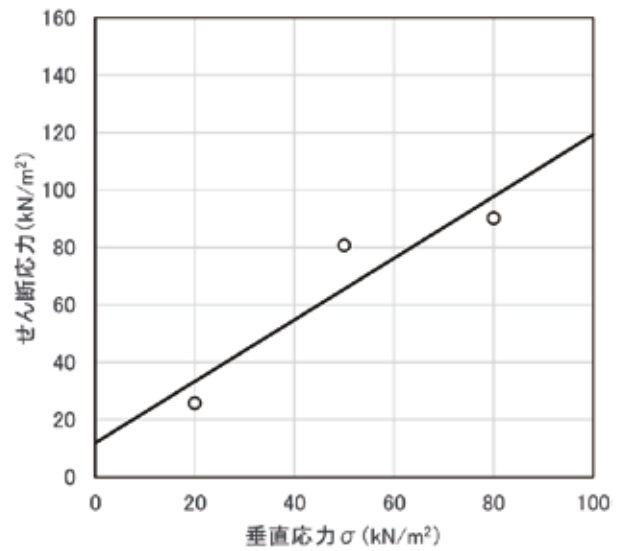


図-24 垂直応力-せん断応力関係 (N-11)

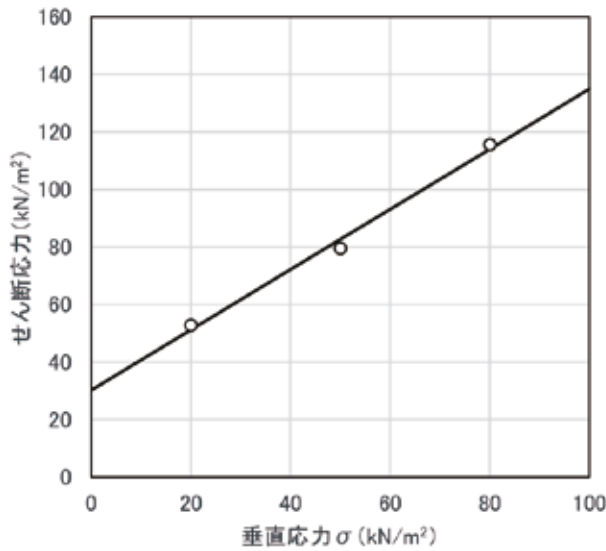


図-22 垂直応力-せん断応力関係 (N-2)

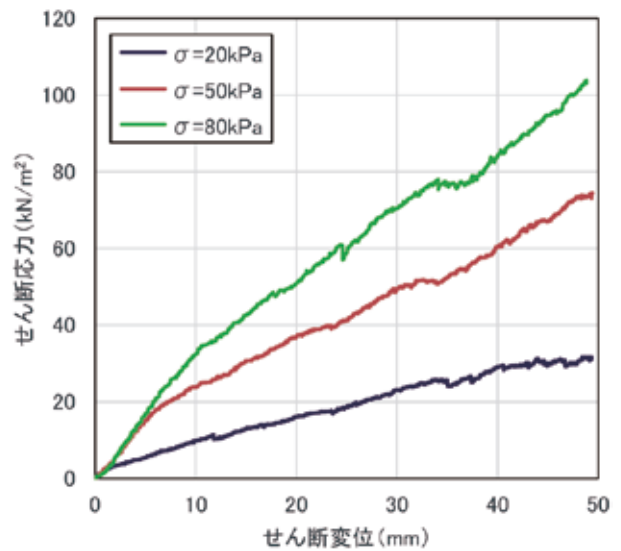


図-25 せん断応力-せん断変位曲線 (金網)

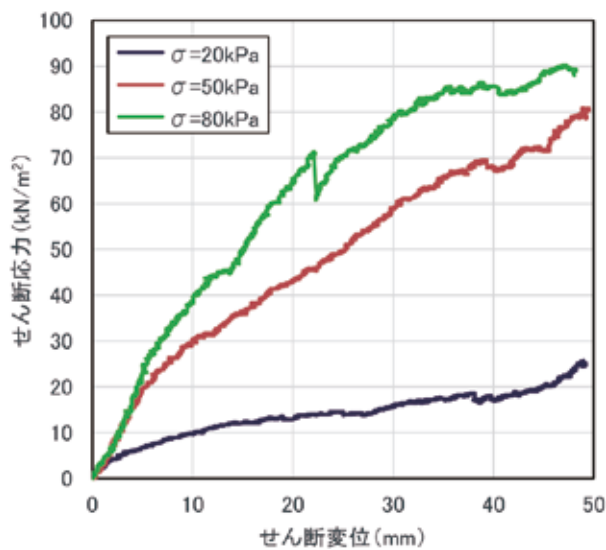


図-23 せん断応力-せん断変位曲線 (N-11)

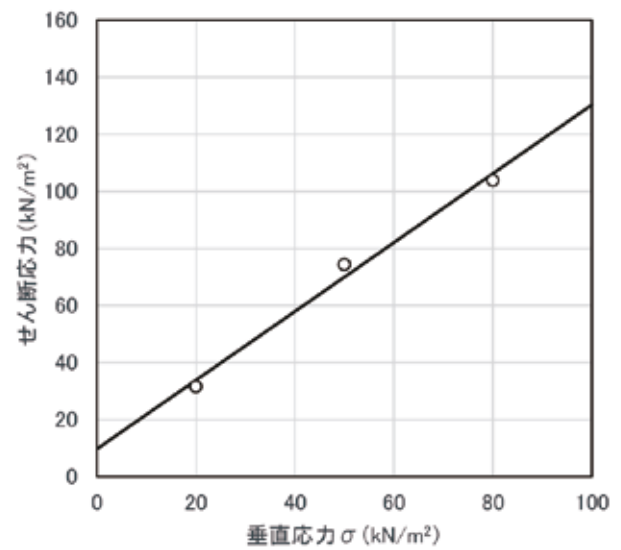


図-26 垂直応力-せん断応力関係 (金網)

表-2 土質定数

	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
N-2	30.3	46.3
N-11	11.8	47.1
金網	9.7	50.3

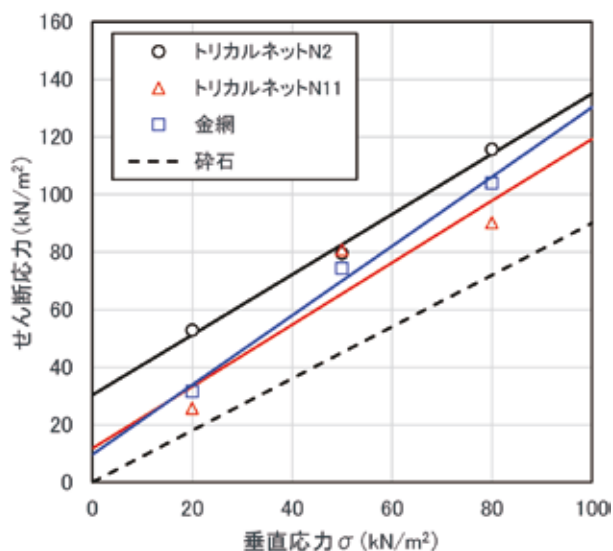


図-27 各曲げ剛性における垂直応力-せん断応力関係の比較図

状態では剛性の高い金網が碎石と噛み合っていないため、初期強度としての粘着力が最も小さい。また、曲げ剛性の最も低いN2において、せん断応力は最も大きく、粘着力もN11と金網に比べて3倍程度大きい。これは、曲げ剛性の低いジオグリッドモデルは単粒度碎石の不陸に追従して摩擦抵抗を得られやすいためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、目合いと曲げ剛性を変えたジオグリッドと礫を用いて一面せん断試験を行い、岩石質材料に対する摩擦特性に与える影響を検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

ジオグリッドの目合いが岩石質材料における最大粒径の6～12%までは、岩石質材料単体のせん断抵抗角以上の摩擦角が確保される。

単粒度碎石の不陸になじむことができる曲げ剛性の低いジオグリッドは、曲げ剛性の高いジオグリッドに比べて摩擦せん断応力が高い。

既往の研究で、アダムFタイプは実物大の石垣を用いた施工実験および振動台実験により、その高い耐震性、施工性、栗石に対する耐衝撃性、現場引抜き試験による実物の栗石との摩擦特性などが確認されている^{7) 8)}。本研究で岩石質材料を用いてジオグリッドの目合いと曲げ剛性が摩擦抵抗に与える影響を検討した結果、アダムFタイプは石垣補強への実用性が高いことを確認した。

参考文献

- 1) 仙台市教育委員会：仙台市文化財調査報告書第451集，仙台城跡東日本大震災復旧事業報告書，第1-2分冊，2016.9
- 2) 熊本市：熊本城復旧基本計画，2018
- 3) 地盤工学会誌：文化財的価値と地震時安全性を両立した熊本城天守閣石垣復旧工事，pp.62-63，2022.7
- 4) 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.405-442，2013.12
- 5) RRR 工法協会：RRR工法による補強盛土工法 材料マニュアル，pp.18，2017.10
- 6) RRR 工法協会：RRR-B（剛壁面盛土補強土擁壁工法）設計・施工マニュアル，pp.37，2019.6
- 7) 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
- 8) 学校法人 国士館 国士館大学：熊本城石垣施工実験及び振動実験業務報告書，pp.1-151，2019