

論文 ソイルセメント・ジオグリッド・EPS から成る三層構造の静的耐荷挙動

西 弘明^{*1}・牛渡 裕二^{*2}・川瀬 良司^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、セメント添加量、ジオグリッド引張耐力およびソイルセメント使用材料を変化させた三層構造の静載荷実験を行った。その結果、1) 最大荷重および最大荷重時変位はセメント添加量が多いものほど大きくなる傾向にあること、2) ジオグリッド引張耐力およびソイルセメント使用材料が耐荷挙動に及ぼす影響は小さいこと、3) 圧縮強度が1 MPa程度の場合には、ソイルセメントの押抜きせん断耐力算定式は実測値を35～89%程度の安全余裕度を持って評価可能であること、などが明らかになった。

キーワード: ソイルセメント, ジオグリッド, EPS, 三層構造, 押抜きせん断耐力

1. はじめに

我が国では急峻な地形に幹線道路や多くの社会資本が整備され、これらの安全性を確保することは極めて重要なことである。しかしながら、近年の異常気象や地盤の経年劣化などにより、落石の規模が大きくなるケースも少なくない。そのため、既設落石防護構造物の耐衝撃性能の向上が求められている。落石防護擁壁を対象とした耐衝撃性向上法の一つとして、既設擁壁背面への緩衝工の設置があげられる。

著者らは、既設落石防護構造物の耐衝撃性向上法の一つとして、発泡スチロール(以後、EPS)ブロックの上に芯材としてジオグリッドを埋め込んだソイルセメントを積層する三層構造を用いた緩衝工を提案している。これま

での研究では、提案工法の緩衝効果の検討を目的に、平面寸法1,000 mm × 1,000 mmの緩衝構造模型を用いた要素実験および1/2スケールの落石防護擁壁を対象とした緩衝効果検証実験を行った^{1)~3)}。その結果、提案の三層構造は、ジオグリッドを配置したソイルセメントの押抜きせん断破壊による衝撃荷重の緩衝および分散効果、およびEPSブロックの変形による衝撃エネルギー吸収効果が相乗的に作用し、優れた緩衝性能を有していることが明らかになった。また、擁壁模型に適用する場合においても同様の緩衝性能を発揮し、本三層構造を設置することにより、既設落石防護擁壁の耐衝撃性能が少なくとも4倍以上向上することを明らかにした。提案の三層構造の緩衝材としての設計手法を確立するためには、三層構造の耐荷挙動を把握するとともに、静的耐力の評価手法を検討することが極めて重要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、セメント添加量、ジオグリッド引張耐力(以後、ジオグリッド耐力)およびソイルセメント使用材料を変化させた三層構造の静載荷実験を行い、各パラメータが静的耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、セメント添加量、ジオグリッド耐力およびソイルセメント使用材料を変化させた全8体である。表中、試験体名の第1項目Cに付随する数値はセメント添加量(kg/m³)を、第2項目Gに付随する数値は、C100-G1.0試験体のジオグリッド耐力(34.0×43.0 kN/m)を基準とした時の強度の比率を示している。ただし、強化方向が1方

表-1 試験体の一覧

試験体名	セメント添加量 (kg/m ³)	ジオグリッド品質管理強度 (kN/m)	ソイルセメント使用材料
C50-G1.0	50	34.0×43.0 1枚	早強セメント + 砂
C100-G1.0	100		
C150-G1.0	150		
C100-G0.5	100	12.0×22.0 1枚	
C100-G2.0	100	34.0×43.0 2枚	
C100-S	100	200 1枚	
C100-G1.0-N	100	34.0×43.0 1枚	普通セメント + 砂
C50-G1.0-C	50	34.0×43.0 1枚	一般軟弱土用 セメント系固化材 + 粘性土

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 博(工)(正会員)

*2 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 (正会員)

*3 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 常務取締役 博(工)(正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

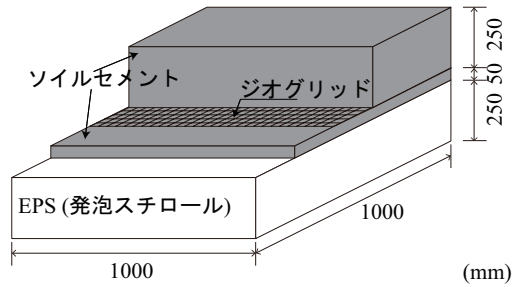


図-1 試験体の形状寸法

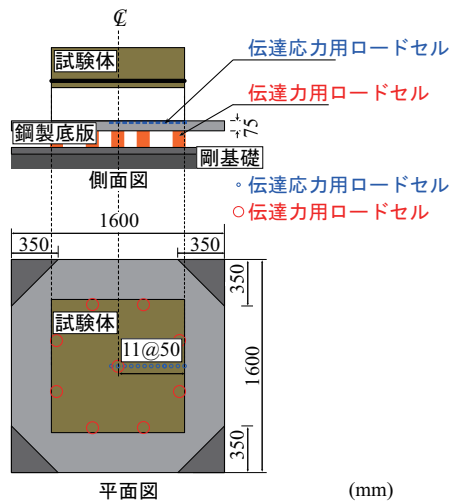


図-2 実験装置

向のジオグリッドを用いている場合には、英文字の S と表記した。第三項目にはソイルセメント使用材料(無:早強セメント+砂, N:普通セメント+砂, C:セメント系固化材+粘性土)を示している。

図-1には、各試験体の形状寸法を示している。試験体は、平面寸法 1,000 × 1,000 mm、高さ 250 mm の EPS ブロックの上に、厚さ 300 mm のソイルセメントを打設することにより製作したものである。試験体の製作手順は以下のとおりである。すなわち、1) 最適含水比 (15%) 程度に調整した砂に所定の種類および量のセメントを加え十分に練り混ぜてソイルセメントを製造し、2) 予め EPS ブロックの上に配置した型枠に敷き詰めた後、所定のジオグリッド(表-1 参照)を EPS ブロック上面から高さ 50 mm の位置に配置し、敷き詰めたソイルセメントを足踏みにて締め固め、3) その後 7 日間程度以上ブルーシートで覆う形で養生する、である。また、セメント系固化材と粘性土を用いる場合には上記の 1) の過程で、粉末粘土と含水比 24% 程度の砂を 3:2 の割合で配合し、セメント系固化材を 50 kg/m³ 加え十分に練り混ぜてソイルセメントを製造した。実験時における各種ソイルセメントの圧縮強度は、早強セメントを用いる場合で 0.22 ~ 2.07 MPa、普通セメントを用いる場合で 1.20 MPa であった。また、セメント

表-2 各材料の物性値一覧

(a) 砂

産地	種類	均等係数	土粒子密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	最適含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	2.46	16

(b) ジオグリッド

種類	目合 (mm)	品質管理強度 (kN/m)	製品基準強度 (kN/m)
G0.5	28 × 40	12.0 × 22.0	10.0 × 20.0
G1.0/2.0	28 × 33	34.0 × 43.0	27.0 × 37.0
S	一方向	200	160

(c) EPS

密度 (kg/m ³)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

系固化材と粘性土を用いる場合は 0.37 MPa であった。

2.2 実験方法

図-2には、本実験で用いた実験装置の概要を示している。本実験装置は、伝達応力測定用のロードセル(以後、応力計)が設置された鋼製底盤(1.6 m 四方、厚さ 75 mm)と鋼製底盤を支持する 9 個の伝達力測定用のロードセル(以後、反力計)から構成されている。応力計は、底盤中央部および左側 50 mm の位置に 1 個ずつ、および底盤中央部から右側端部まで 50 mm 間隔で 11 個の計 13 個が設置されており、その受圧面は底盤上面と面一となっている。

実験は、鋼製底盤中央に設置した試験体中央部に、後述する荷重治具を配置し、油圧ジャッキを用いて荷重する形で実施した。なお、荷重治具には、別途実施した衝撃荷重荷重実験の場合と同様の直径 $D_a = 200$ mm の鋼製重錘を用いた。また、実験は、最大荷重到達後、変位の増加に伴う変状が見られなくなった時点で終了した。ただし、C50-G1.0-C 試験体の場合には、荷重装置の不具合により変位 200 mm 程度で荷重を終了している。

測定項目は、荷重荷重 P と荷重点変位 δ 、および前述の実験装置に組み込まれた応力計および反力計による、伝達応力および伝達力である。なお、荷重点変位 δ は、油圧ジャッキの伸び量として評価した。測定にはワイヤースト変位計を用いた。実験終了後には、ソイルセメント、ジオグリッドおよび EPS ブロックの破壊性状を詳細に観察した。

2.3 使用材料の概要

表-2には、本実験に用いた材料の力学的特性値の一覧を示している。また、図-3には、ソイルセメントの圧縮応力-ひずみ関係に関する実験結果の一例を示している。実験は、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体の圧縮試験により行った。また、図-4には、EPS の圧

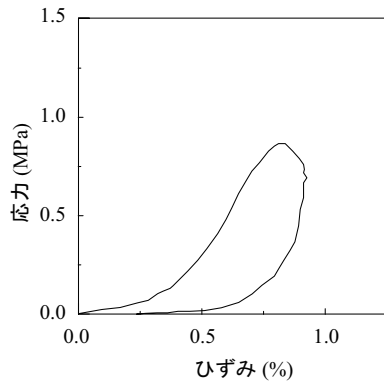


図-3 ソイルセメントの圧縮試験結果

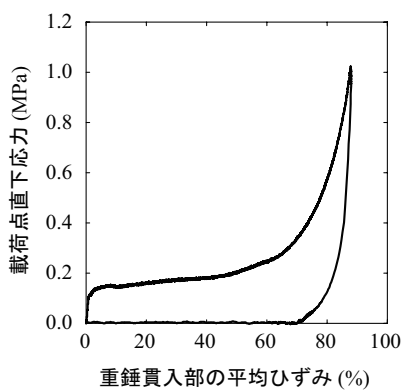


図-4 EPS ブロックの圧縮試験結果

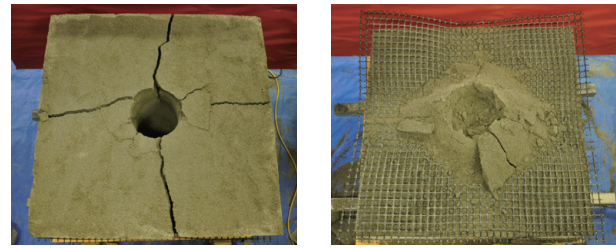
縮応力-ひずみ関係を示している。実験は、平面寸法 1 m 四方、厚さ 250 mm の EPS ブロックの中央部に直径 $D_a = 200$ mm の鋼製重錘を設置し、油圧ジャッキを用いて載荷したものである。

3. 実験結果

3.1 載荷荷重-載荷点変位関係

図-5には、各試験体の載荷荷重 P - 載荷点変位 δ 関係 (以後、単に荷重-変位関係) を示す。なお、初期勾配に着目し変位 $\delta = 50$ mm までについて示した拡大図も示している。また、EPS の応力-ひずみ関係から得られる EPS ブロック単体が全体変形する場合の初期勾配も併せて示している。この直線は、土木学会「ロックシェットの耐衝撃設計」⁴⁾ を参考にして EPS の降伏応力およびひずみをそれぞれ 0.11 MPa、5% と仮定し、降伏点まで弾性挙動するものとして、EPS の形状寸法を考慮して算出した。

図-5(a) よりセメント添加量を変化させた場合の結果について着目すると、最大荷重、最大荷重時変位ともに C50-G1.0 試験体が最も小さく、C150-G1.0 試験体が最も大きな値を示している。また、いずれの試験体も変位 $\delta = 10$ mm 程度まではほぼ線形に荷重が増大し、その後変位 $\delta = 30 \sim 40$ mm において荷重が急激に低下していること



(a) ソイルセメント上面 (b) 押抜きせん断コーン

写真-1 ソイルセメントの破壊性状

が分かる。また、EPS ブロック単体の初期勾配と比較すると、いずれの試験体も変位 $\delta = 4 \sim 10$ mm までは、ほぼ対応していることが分かる。従って、本実験に用いた三層構造の破壊のプロセスは、後述の破壊性状も加味すると、以下のようなものであるものと考えられる。

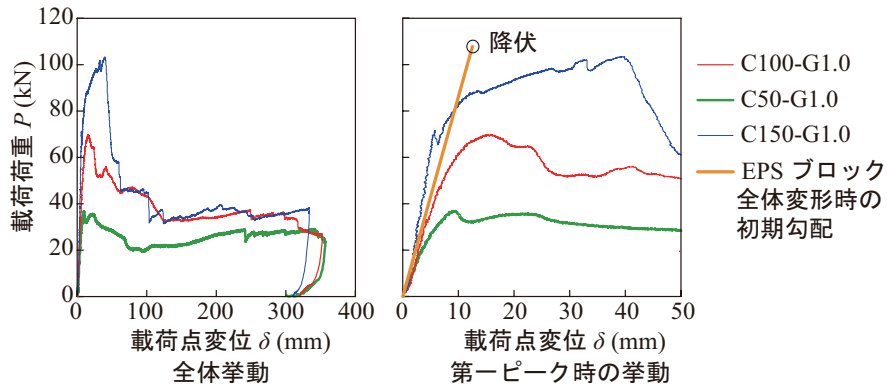
すなわち、1) 載荷荷重の増大に伴って EPS ブロックが全体変形する、2) 変位 $\delta = 10$ mm 程度以降において、載荷点直下におけるソイルセメントの圧縮変形やソイルセメント下面における曲げひび割れの発生などにより、三層構造の剛性勾配が著しく低下する、3) 変位 $\delta = 30$ mm 程度以降において、ソイルセメント部分の押抜きせん断ひび割れが発生し、三層構造の耐力が大きく低下する、4) その後、押抜きせん断コーン形成領域の EPS ブロックが変形する、である。

図-5(b) よりジオグリッド耐力を変化させた場合の結果について着目すると、図-5(a) と同様に変位 $\delta = 10$ mm 程度までは、いずれの試験体も EPS ブロックと同様の耐荷性状を示している。その後、剛性勾配が低下し、変位 $\delta = 30$ mm 程度で荷重が急激に低下している。このような性状はジオグリッドの種類によらずほぼ同様である。従ってジオグリッド耐力や強化方向が三層構造の押抜きせん断耐力に及ぼす影響は極めて小さいものと考えられる。これは、ジオグリッドとソイルセメントが早期に付着切れしたことによるものと推察される。

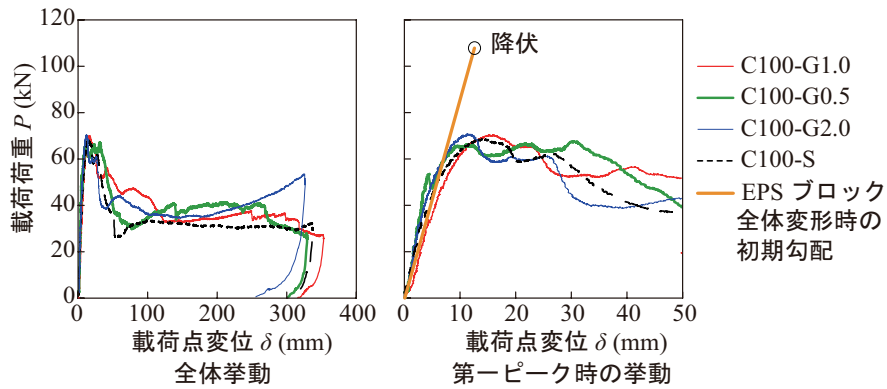
図-5(c) よりソイルセメント使用材料を変化させた場合の結果について着目すると、C100-G1.0 試験体と C100-G1.0-N 試験体はほぼ同様の耐荷性状を示し、C50-G1.0-C 試験体は上述の試験体よりも最大荷重が小さい。これは C50-G1.0-C 試験体におけるソイルセメントの圧縮強度が小さいことによるものと考えられる。

3.2 破壊性状

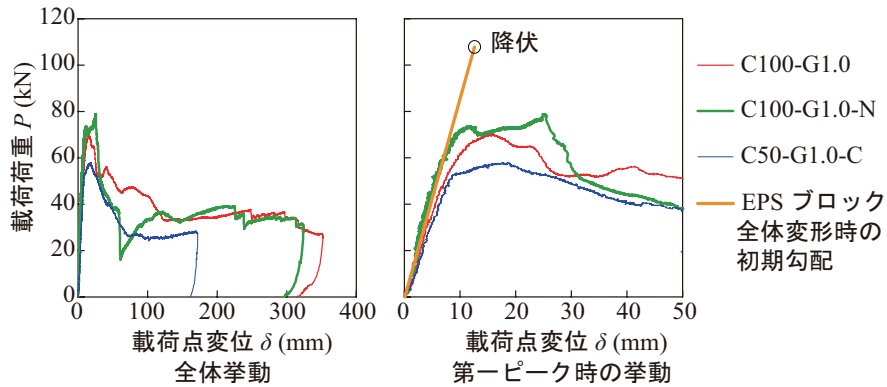
写真-1には、(a) 実験終了後におけるソイルセメント上部の破壊性状および (b) ソイルセメント内部に形成された押抜きせん断コーンの例として C100-G1.0 試験体の結果を示している。ここで、写真-1(b) は、写真-1(a) に示すように、実験終了後放射状にひび割れが開口して分離した押抜きせん断コーン部分を除くソイルセメント上部の塊を除去した後に撮影したものである。



(a) セメント添加量の比較



(b) ジオグリッド耐力の比較



(c) ソイルセメント使用材料の比較

図-5 各試験体の載荷荷重-載荷点変位関係

写真-1(b)より、ソイルセメント内部には押抜きせん断コーンが形成されており、その中央部(載荷部)は大きく陥没していることが分かる。なお、陥没した部分のソイルセメントは全て砂状化していることを確認している。また、コーンの角度は試験体によって異なるが概ね $39\sim 57^\circ$ であった。

図-6には、各試験体のEPSブロック上面のひび割れ性状を示している。図-6(a)よりセメント添加量を変化させた場合の結果について着目すると、セメント添加量が多いものほど載荷点近傍の陥没の直径が大きく、ひび

割れが多く発生する傾向にある。これは、C50-G1.0試験体の場合には、ソイルセメントの圧縮強度が 0.2 MPa 程度であり、EPSブロックの降伏圧縮強度と同程度であることからソイルセメントの圧縮変形が卓越し、載荷治具と同様の形状($D_a = 200\text{ mm}$)で貫入したことによるものと推定される。また、C100-G1.0試験体の場合には、ソイルセメント部に押抜きせん断コーンが形成された状態でEPSブロックに載荷荷重が伝達されるため、C50-G1.0試験体よりも陥没の直径が大きいものと考えられる。C150-G1.0試験体の場合には、載荷点近傍の陥没の他、この部分で

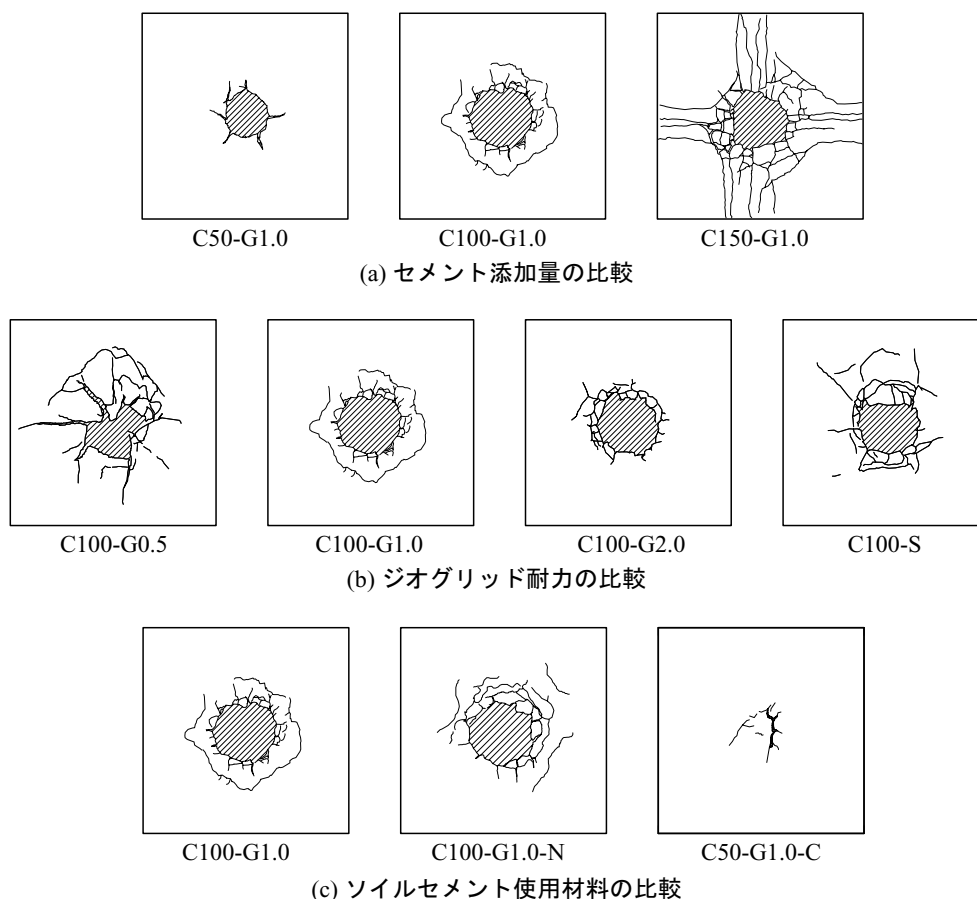


図-6 EPSブロックの破壊性状

直交するひび割れも見られる。これは、ソイルセメント強度が2.0 MPa程度と大きいため押抜きせん断耐力も向上し、押抜きせん断破壊に至る前にソイルセメントの曲げ変形が卓越したことによるものと推察される。

図-6(b), (c)より、EPSブロックの損傷状況に及ぼすジオグリッド耐力やソイルセメント使用材料の影響は小さいものと考えられる。なお、C50-G1.0-C試験体の場合には、EPSブロックの損傷がほとんど見られない。これは、前述のように実験装置の不具合により他よりも小さな変位レベルで载荷を中止したことによるものである。

4. ソイルセメント部の押抜きせん断耐力の評価

ここでは、前章の実験結果で明らかになった三層構造の静的耐荷性状や破壊性状に基づき、静的耐力算定法の確立に向けた検討を行う。前述の各試験体の荷重-変位関係より、三層構造の耐力はソイルセメントの押抜きせん断破壊により急激に低下することが明らかになっている。従って、三層構造の耐力は、ソイルセメント部の押抜きせん断耐力に等しいものと考えられる。

前述の通り、実験終了後のソイルセメント内部には、押抜きせん断コーンが形成されており、そのコーンの角度は試験体によって異なるが概ね39~57°であることが明らか

になっている。従って、ここでは、上記の破壊性状をモデル化してソイルセメントの押抜きせん断耐力の算定を試みる。

図-7には、ソイルセメントの押抜きせん断耐力算定のためのモデル図を示している。ここでは、押抜きせん断コーンを図の網掛け部に円筒形にモデル化して、押抜きせん断耐力算定式を提案することとする。具体的には、円筒側面の面積にソイルセメントのせん断強度 τ_s を乗じる形で下式により算出する。

$$S_s = u_p \cdot t_s \cdot \tau_s \quad (1)$$

$$u_p = 2\pi \left(r_a + \frac{t_s}{2 \tan \theta} \right) \quad (2)$$

ここに、 S_s : 三層構造の押抜きせん断耐力、 u_p : 設計断面の周長、 t_s : ソイルセメントの厚さ、 τ_s : ソイルセメントのせん断強度、 r_a : 載荷面の半径、 θ : 押抜きせん断コーンの角度、である。

なお、ソイルセメントのせん断強度には、便宜的に圧縮強度の1/10を適用した。また、式(1)ではジオグリッドのせん断耐力寄与分は考慮していない。これは、1)ジオグリッドはソイルセメント内部に配置されているものの、2)ソイルセメント強度はジオグリッドの完全付着状

表-3 実測および計算耐力一覧

試験体名	ソイルセメント厚 t_s (mm)	圧縮強度 (MPa)	せん断強度 τ_s (MPa)	押抜きせん断コーンの角度 θ (°)	実測押抜きせん断耐力 (kN) (1)	計算押抜きせん断耐力 S_s (kN) (2)	耐力比 (1)/(2)
C50-G1.0	300	0.22	0.022	45	37.0	10.4	3.57
C100-G1.0	300	0.82	0.082	45	70.0	38.6	1.81
C150-G1.0	300	2.07	0.207	45	103.6	97.6	1.06
C100-G0.5	300	0.97	0.097	45	67.2	45.71	1.47
C100-G2.0	300	0.97	0.097	39	70.5	52.2	1.35
C100-S	300	0.97	0.097	57	68.3	36.1	1.89
C100-G1.0-N	300	1.20	0.120	45	78.8	56.6	1.39
C50-G1.0-C	300	0.37	0.037	45	58.0	17.4	3.33

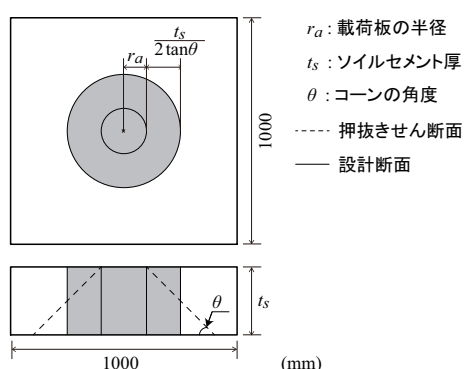


図-7 押抜きせん断耐力算定のためのモデル図

態を確保できるほど大きくないため、3)せん断力に対するジオグリッドの抵抗性を適切に評価することが困難なためである。

表-3には、各試験体に関する実験および計算結果の一覧を示している。表より、押抜きせん断コーンの角度は、C100-G2.0試験体では39°、C100-S試験体では57°であるが、おおむね45°である。

耐力比は、圧縮強度が極端に異なるC50-G1.0試験体、C50-G1.0-C試験体およびC150-G1.0試験体を除き、ほぼ1.35～1.89となっており、提案の算定式は適度な安全余裕度を持って実験結果を評価していることが分かる。なお、圧縮強度が0.5 MPa以下の場合には実測値が計算値の3倍程度、2.0 MPa以上の場合には実測値が計算値とほぼ同程度の値を示しており、計算値に対する実測値の割合が他の試験体と異なっている。今後はソイルセメント単体のせん断強度 τ_s と圧縮強度の関係を検討し、種々の条件下で適用可能な設計式を提案する必要がある。

5. まとめ

本研究では、提案の三層構造の合理的設計手法確立のための基礎資料の収集を目的に、セメント添加量、ジオグリッド耐力およびソイルセメント使用材料を変化させ

た三層構造模型の静載荷実験を行った。本研究により得られた結果を整理すると以下のとおりである。

- (1) 最大荷重および最大荷重時変位はセメント添加量が多いものほど大きくなる傾向にある。
- (2) ジオグリッド耐力およびソイルセメント使用材料が耐荷挙動に及ぼす影響は小さい。
- (3) 圧縮強度が1 MPa程度の場合には、提案のソイルセメントの押抜きせん断耐力算定式は実測値を35～89%程度の安全余裕度を持って評価可能である。

今後は、ソイルセメント単体のせん断強度 τ_s を検討するために一面せん断試験などを実施し、より汎用性の高い設計式を提案したいと考えている。

謝辞:

本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成制度における政策課題解決型技術開発(中小企業タイプ)の援助により行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木健太郎, 牛渡裕二, 岸 徳光, 栗橋祐介: 落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼすソイルセメント中の芯材ジオグリッド位置の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.709-714, 2012
- 2) 菅原慶太, 岸 徳光, 牛渡裕二, 小室雅人: 表層材ソイルセメント厚を変化させた落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.715-720, 2012
- 3) 牛渡裕二, 岸 徳光, 保木和弘, 前田健一: ソイルセメントを有する三層緩衝構造を設置した1/2スケール落石防護擁壁模型に関する重錘衝突実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.727-732, 2012
- 4) 土木学会: ロックシェッドの耐衝撃設計, 1999