

# ソイルセメントを用いた三層緩衝構造の長期耐久性向上法に関する実証実験

Demonstration experiments about the long-term durable improvement method of TLAS using soil-cement.

(株) 構研エンジニアリング ○ 正会員 鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)  
 (株) 構研エンジニアリング 正会員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)  
 室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)  
 釧路工業高等専門学校 正会員 三森 敏司 (Toshiji Mimori)  
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 1. はじめに

近年、異常気象や凍結融解などに伴う斜面の経年劣化によって、落石の規模拡大が懸念されており、特に急崖斜面に近接した落石災害危険箇所の道路では、落石防護構造物の耐荷性能の向上が求められている。この種の問題に対し、本研究グループでは擁壁背面に設置する新しいタイプの三層緩衝構造（表層材：ソイルセメント、芯材：ジオグリッド、裏層材：発砲スチロールブロック（以後、EPS））を提案（**図-1** 参照）し、既往の研究から様々な緩衝性能が明らかとなっている<sup>1)-2)</sup>。しかしながら、本緩衝システムを構成する主材料であるソイルセメントは、**写真-1**に示すように貧配合コンクリートと同様に凍結融解抵抗性に乏しく、寒冷地における凍害劣化が懸念される。

以上の背景より、本研究では、前述の懸案事項への一つの対策法としてソイルセメントにウレタン被覆を施す手法を提案し、凍結融解試験を実施した。さらに、長期耐久性向上策であるウレタン被覆が三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす影響を把握することを目的に、室内における要素実験として重錘落下衝撃実験を実施した。

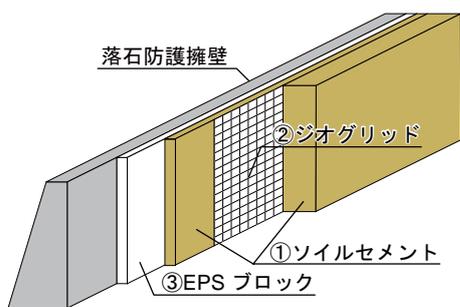


図-1 提案の三層緩衝構造



曝露開始  
(2012/09/14)



424日目  
(2013/01/11)

写真-1 曝露試験例（セメント添加量 50 kg/m<sup>3</sup>）

## 2. 寒冷地における長期耐久性の確認

### 2.1 試験概要

本緩衝システムの寒冷地における長期耐久性の確認を目的として、ソイルセメントに関する凍結融解試験を実施した。**表-1**には、試験ケース一覧を示しており、表には一軸圧縮強度、試験開始時の平均質量も併せて示している。試験ケースは、ソイルセメントの土質材料、一軸圧縮強度および表面保護工の有無をパラメータとし、第1項目は土質材料（C：粘性土、S：砂）に結合材添加量（kg/m<sup>3</sup>）を組み合わせて示し、第2項目は表面保護工の有無を示している。試験体数はS100-Uを除き各2体、S100-Uが1体の計7体である。なお、試験体の製作方法はいずれも室内要素実験と同様の手法を採用しており、粘性土の場合には一般軟弱土用セメント系固化材を、砂の場合には早強ポルトランドセメントを用いている<sup>2)</sup>。なお、凍結融解試験は釧路工業高等専門学校にて実施した。

凍結融解試験の方法はJIS A 1148<sup>3)</sup>に準拠し、本緩衝システムが設置される環境により近いと考えられる気中凍結水中融解試験方法（B法）を採用した。ただし、本規格は各サイクルにおける供試体の一次共鳴振動数を測定し、動弾性係数を算出して相対的に比較する試験であるが、ソイルセメントの場合には一次共鳴振動数を適切に測定することが困難であったため、相対動弾性係数を評価指標とせず、質量減少率および外観によって評価することとした。

### 2.2 試験方法

凍結融解試験の試験体寸法は、別途実施した室内要素実験を参考に、一辺の長さを25 cmの立方体とした。また、計測時における人為的な損壊を防止するため、試験体は合成パネルによる架台に吊り治具を取り付け、一体として質量を計測した。なお、いずれのケースもあらかじめ48時間程度浸漬してから試験を開始している。

試験の凍結融解温度は $-20^{\circ}\text{C} \sim +7^{\circ}\text{C}$  ( $-18 \pm 2^{\circ}\text{C} \sim +5 \pm 2^{\circ}\text{C}$ )とし、1サイクルの所要時間は4時間（凍結：2.5時間、融解：1.5時間）とした。計測サイクルは、30サイクルまでは6サイクル毎、それ以降は30サイクル毎と

表-1 凍結融解試験ケース一覧

ケース名	土質材料	添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	表面保護	質量 (kg)
C50-N	粘性土	50	0.8	無	26.4
S100-N	砂	100	0.8		31.3
S150-N		150	2.1		37.5
S100-U		100	0.8	ウレタン	36.7



写真-2 凍結融解試験後の状況写真

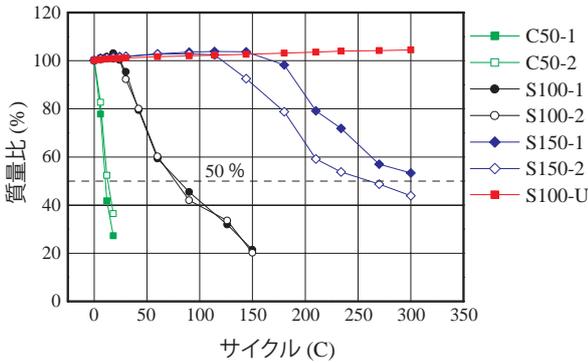


図-2 質量比とサイクル数の関係

表-2 ウレタン規格値

硬さ (JISA)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	引裂強さ (N/mm)	硬化物 比重	摩耗試験* (mg) H-22/CS-17
8.5	16.2	400	63.7	1.0	203 / 1.2

\* テーパー型摩耗試験

1000 g, 1000 回転の条件で摩耗した重量を測定

し、質量減少率が 50% を下回った場合を試験終了の目安とした。表-2 には、試験に用いたウレタンの規格値を示している。

### 2.3 試験結果

写真-2 には、試験終了時点における試験体の外観写真を示している。写真より、ウレタン被覆した S100-U の場合を除き、いずれも (a) 試験開始時に比べてソイルセメントが削れ落ちていることが分かる。これより、表面保護を行わない場合には一般的なコンクリートに比べて凍結融解抵抗性に劣り、長期耐久性が確保されないものと推察される。一方、ウレタン被覆を施した場合には、試験開始時と同様の外観を示している。

図-2 には、各サイクルの質量を初期値で除した質量比を示している。図より、土質材料に粘性分が多く含まれている C50-N の場合は 20 サイクル到達前に、一軸圧縮強度が 1 MPa 程度の S100-N の場合は 100 サイクル到達前に質量減少率が 50% を下回っていることが分かる。また、一軸圧縮強度が大きい S150-N の場合は 300 サイクルまで試験を行ったものの、質量減少率は 50% 程度となっている。一方、ウレタン被覆した S100-U の場合は 300 サイクル到達時点においても質量減少率の低下は見受けられない。なお、質量比が 100% を超過するのは架台を含む試験体への吸水により試験開始時に比べて質量が増加しているためと考えられる。

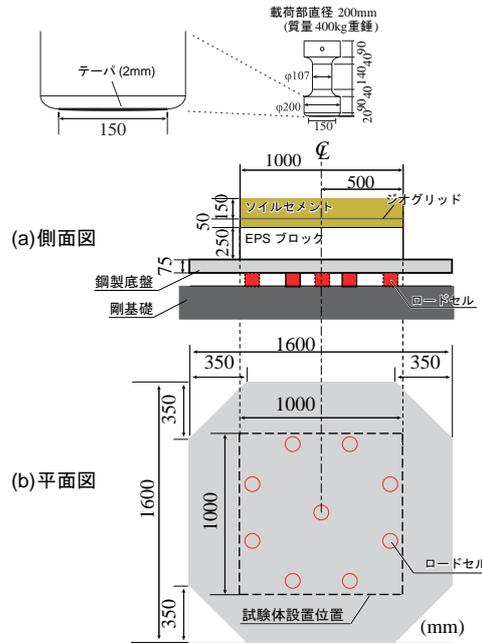


図-3 実験装置概要図

本凍結融解試験により、ウレタン被覆を施すことで一般的なコンクリートの目標値である 300 サイクルを実施した後でも外観上の変状も認められず質量の変化も生じないことが明らかとなった。以上のことから、本緩衝システムはウレタン被覆を施すことで寒冷地における長期耐久性が確保可能であるものと判断される。

### 3. 重錘落下衝撃実験

#### 3.1 実験概要

本緩衝システムの寒冷地における長期耐久性向上策としてウレタン被覆を施した場合の緩衝効果を把握するため、図-3 に示す室内要素実験を実施した。試験体は、ソイルセメントを前述の凍結融解試験における S100-N および S100-U を対象とし、図に示す緩衝システム構成 (ソイルセメント厚 20 cm, ジオグリッド 1 枚, EPS 厚 25 cm) にて各 1 体、計 2 ケース実施した。なお、ウレタン被覆は、実際の落石衝突状況を想定し、写真-3 に示すように試験体の上面および 1 つの側面のみに施すこととした。

本実験装置は、鋼製底盤 (1.6 m 四方, 厚さ 75 mm) と底盤を支持する 9 個の伝達衝撃力計測用のロードセルから構成されている。実験は、本装置を剛基礎上に設置し、試験体を所定の位置に配置し、重錘を衝突速度  $V = 7.0 \text{ m/s}$  となるように底盤中央部に落下させる形で行った。なお、重錘

表-3 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 <sup>3</sup> )	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

目合 (mm)	品質管理強度 (kN/m)	製品基準強度 (kN/m)	材質
28 × 33	34.0 × 43.0	27.0 × 37.0	ポリプロピレン

(c) EPS

密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

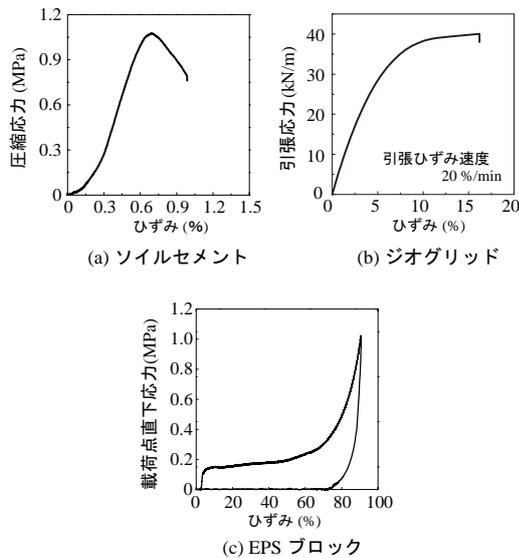


図-4 各材料の応力-ひずみ関係



写真-3 実験状況 (S100-U)

質量は 400 kg, 先端部直径は  $\phi 200$  mm であり, その底部には片当たり防止のために 2 mm のテーパが設けられている。

表-3 には, 実験に使用した各材料の物性値を一覧にして示している。実験時のソイルセメントの平均圧縮強度は 1.1 MPa であった。また, 図-4 には, 本実験で用いた各材料の応力-ひずみ関係を示している。

本実験の測定項目は, 重錘衝撃力, 伝達衝撃力および重錘貫入量である。なお, 写真-3 に示している通り, 重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセルにて, 伝達衝撃力は底盤を支持している 9 個のロードセルの合算値として,

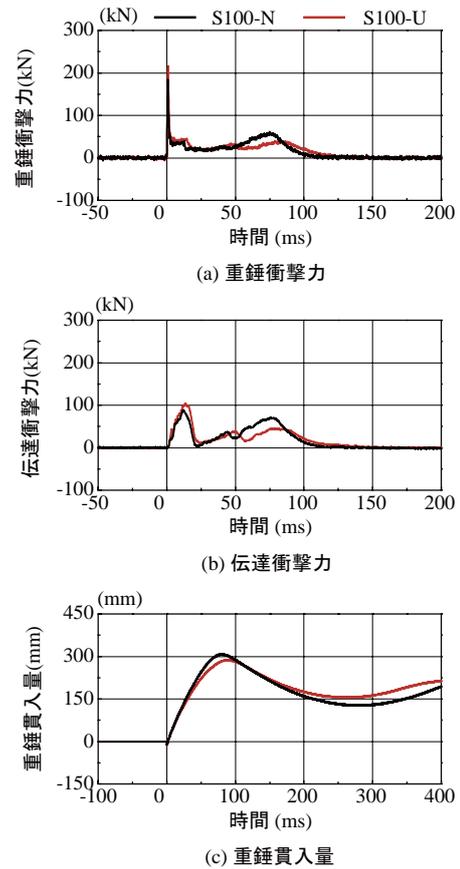


図-5 各種時刻歴応答波形

重錘貫入量はレーザ式変位計を用いて測定することとした。

### 3.2 実験結果

#### (1) 各種応答波形

図-5 には, 重錘衝撃力, 伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。

(a) 図より, 重錘衝撃力波形は, 両者ともに振幅が大きく継続時間の短い第 1 波と, 振幅が小さく継続時間が 100 ms 程度の台形状の第 2 波から構成されていることが分かる。第 1 波目の最大重錘衝撃力はウレタンを施した S100-U の場合が S100-N の場合よりも若干大きな値を示すのに対し, 第 2 波目のピーク値は S100-U の場合の方が小さな値を示していることが分かる。(b) 図より, 伝達衝撃力波形は, 両者ともに継続時間が 20 ~ 25 ms 程度の正弦半波状の第 1 波と, それに続く継続時間の長い第 2 波から構成されていることが分かる。伝達衝撃力も重錘衝撃力と同様に S100-U の場合が第 1 波目のピークは大きな値を示すのに対し, 第 2 波目のピークは S100-U の場合が小さな値を示している。

重錘衝撃力および伝達衝撃力の第 1 ピークがウレタン被覆により増加した理由は, ウレタン被覆の拘束効果によりソイルセメントが割裂し難くなることから, 見かけの接触面強度が大きくなったことによるものと推察される。一方, 第 2 ピーク値が小さくなったのは, この拘束効果によりソイルセメントの押抜きせん断破壊等のために消費するエネルギーが増加し, 重錘貫入量が減少するため, EPS へ伝達する衝撃力が減少したことによるものと推察される。

(c) 図の重錘貫入量波形は, 重錘衝突とともに正弦半波状の第 1 波が励起し, その後残留変形を伴った振動状態に至っ

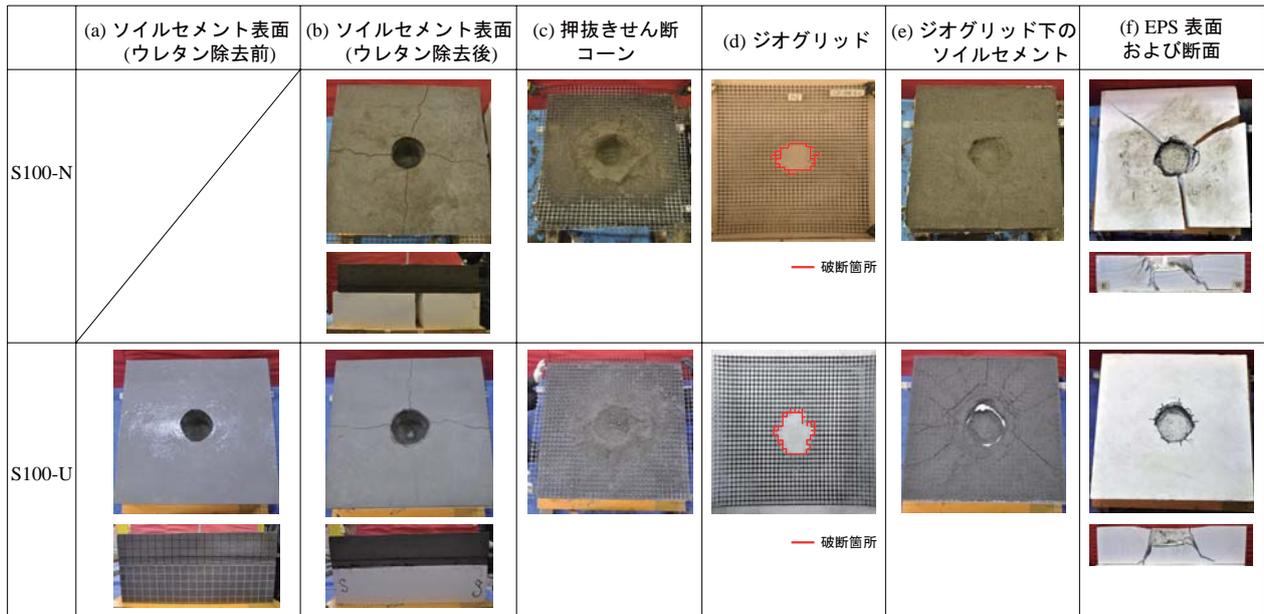


図-6 実験終了後における各種破壊性状

ている。これはソイルセメントが損壊し、重錘が大きく貫入していることを示している。最大貫入量は、前述に示したとおりウレタン被覆の拘束効果により抑制され、S100-Nの場合よりS100-Uの場合が小さな値を示している。

(2) 破壊性状

図-6には、実験後における各種破壊性状を示している。

図(a), (b)より、両者ともにソイルセメント表面中央部が重錘形状と同様の円形状に陥没し、その周辺には放射状のひび割れが発生し開口していることが分かる。また、ウレタンを施したS100-Uの場合はウレタンを施していないS100-Nの場合よりもひび割れ幅が小さく、ウレタン被覆の拘束効果が生じているものと考えられる。図(c)(d)より、両者ともにソイルセメント内部に押抜きせん断コーンが形成され、かつ、ジオグリッドがリング状に破断していることが分かる。図(e)より、S100-Uの場合に下層のEPSが視認できるものの、両者ともにジオグリッド下側のソイルセメントにおいて重錘衝突位置を中心に円形状のひび割れが発生し、かつ、その周りには放射状のひび割れが発生していることが分かる。図(f)より、EPS表面には円形状のひび割れが発生し、S100-Uの場合よりS100-Nの場合がEPSが割裂破壊し、かつ、貫入量大きい傾向を示している。これは、前述したとおりS100-Uの場合には、ウレタン被覆の拘束効果によりソイルセメントの押抜きせん断破壊等のために消費するエネルギーが増加し、重錘貫入量が減少するため、EPSへ伝達する衝撃力が減少したことによるものと推察される。

以上より、本緩衝システムにウレタン被覆することでソイルセメントの割裂と重錘貫入量が抑制されることから緩衝システムの限界荷重が向上し、ウレタン被覆しない場合と同等以上の緩衝効果が得られるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、寒冷地におけるソイルセメントの凍害劣化に対する一つの対策法として緩衝構造にウレタン被覆をする手法を提案し、曝露実験および凍結融解試験を実施した。さらに、長期耐久性向上策として提案したウレタン被覆が、

提案の三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす影響を把握することを目的に重錘落下衝撃実験を実施した。

本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) ウレタン被覆をすることで、提案の三層緩衝構造の耐凍害性能が飛躍的に向上し十分な長期耐久性が確保できる。
- 2) 本緩衝システムにウレタン被覆を施しても本緩衝システムの緩衝効果への影響は小さく、ウレタン被覆しない場合と同等以上の緩衝効果が期待できる。
- 3) ウレタン被覆の拘束効果により、ソイルセメントの崩落・飛散や、ひび割れの開口が抑制可能となる。また、この拘束効果により重錘の貫入量も抑制されEPSへ伝達する力も減少するため、緩衝システムの限界荷重が向上するものと推察される。

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。また、本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院博士前期課程建築社会基盤専攻土木工学コース構造力学研究室の大学院生および学部生に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 菅原慶太, 牛渡裕二, 小室雅人, 岸徳光: 表層材ソイルセメント強度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.35, No.2, 2013, pp.763-767
- 2) 保木和弘, 牛渡裕二, 小室雅人, 岸徳光: 異なる母材を用いたソイルセメントの緩衝性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013, pp.739-743
- 3) 土木学会編, 日本規格協会発行: 2010年制定 コンクリート標準示方書 [基準編] JIS 規格集, 2010