

論文 三層緩衝構造におけるソイルセメントの長期耐久性向上策に関する実験的検討

鈴木 健太郎^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・川瀬 良司^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：本研究では、落石防護擁壁に用いる三層緩衝構造の表層材ソイルセメントの凍害劣化への対策法として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、提案の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重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) ウレタン被覆を施すことで、提案の三層緩衝構造の凍結融解抵抗性が向上し十分な長期耐久性が確保できること、2) 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こと、などが明らかになった。

キーワード：三層緩衝構造、ソイルセメント、長期耐久性、凍結融解試験、ウレタン被覆、重錘落下衝撃実験

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、落石規模の拡大が懸念されている。そのため、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て、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：発泡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^{1)~2)}。しかしながら、本緩衝システムを構成するソイルセメントは、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、前述の懸念事項への一つの対策法としてソイルセメント表面にウレタン被覆を施す手法を提案し、曝露試験および凍結融解試験を実施した。さらに、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。

には一軸圧縮強度および試験開始時の平均質量も併せて示している。試験ケースのパラメータおよび名称は曝露試験と同様としている。

本研究で使用されるソイルセメントについては、既往の研究²⁾を参考に、C 試験体の場合には粘土粉末と砂の質量比を6:4に調整した粘性土に一般軟弱土用セメント系固化材を、S 試験体の場合には砂に早強ポルトランドセメントをそれぞれ練り混ぜ、これを型枠に敷き詰めて、突き棒による突固めによって製作した。なお、含水比はC 試験体で24%、S 試験体で15%に調整している。その後、ビニールで覆うことにより室内で7日間養生を行い、各試験を開始した。

表面保護工は、積雪寒冷地における凍結融解による劣化を防止する目的で表面含浸剤およびウレタン被覆の2種類とした。表面含浸剤には、ソイルセメントの空隙を緻密化させ、吸水を抑制する効果を有する無機質系建材表層強化剤を用い、ソイルセメントの養生後に刷毛により塗布した。また、ウレタン被覆には、床や階段の防水に使用される材料（表-3 参照）を用いており、ソイル

2. 寒冷地における長期耐久性の確認

2.1 試験概要

表-1 には、曝露試験ケース一覧を示している。試験ケースは、ソイルセメントの土質材料、結合材添加量および表面保護工をパラメータとし、名称の第1項目は土質材料（C：粘性土、S：砂）に結合材添加量（kg/m³）を組み合わせて示し、第2項目は表面保護工（N：表面保護工無、S：表面含浸剤、U：ウレタン被覆）を示している。

表-2 には、凍結融解試験ケース一覧を示しており、表

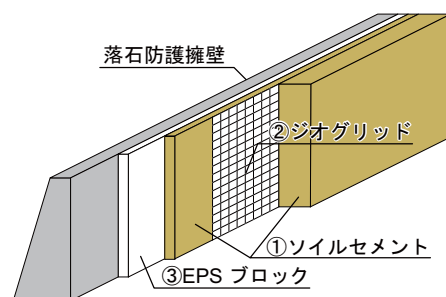


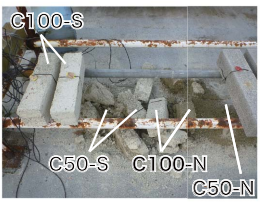
図-1 提案の三層緩衝構造

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部（正会員）

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工)（正会員）

*3 (株) 構研エンジニアリング 常務取締役（正会員）

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博（正会員）

試験体	C50/100-N/S	S50/100/150-N	S50-N	S100-N	S150-N	S100/150-U
写真						
試験体寸法	B100×H100×L400	B100×H100×L500	B100×H100×L500		B100×H100×L500	
試験開始日	2012年11月20日	2012年11月22日	2012年9月14日		2013年2月5日	
撮影日	2013年4月10日	2013年12月11日	2013年11月11日		2013年11月11日	
経過日数	142日目	385日目	424日目		280日目	
試験場所	釧路工業高等専門学校	釧路工業高等専門学校	室蘭工業大学		室蘭工業大学	

写真－１ 曝露試験の状況写真

表－１ 曝露試験ケース一覧

ケース名	土質材料	添加量 (kg/m ³)	表面保護	試験場所
C50-N	粘性土	50	無	釧路工業 高等専門学校
C100-N		100		
C50-S		50	表面含浸剤	
C100-S		100		
S50-N	砂	50	無	釧路工業 高等専門学校 / 室蘭工業大学
S100-N		100		
S150-N		150		
S100-U		100	ウレタン	
S150-U		150		

表－２ 凍結融解試験ケース一覧

ケース名	土質材料	添加量 (kg/m ³)	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

セメント養生後にプライマーを塗布後、ウレタン（厚さ 2 mm）を吹き付けた。

なお、曝露試験は、寒冷地である北海道においても比較的温暖で積雪量が多い室蘭（室蘭工業大学校内）および低温で積雪量が少ない釧路（釧路工業高等専門学校屋上）にて実施した。また、凍結融解試験は釧路工業高等専門学校の試験装置にて実施した。

2.2 曝露試験

(1) 試験方法

曝露試験は、室蘭工業大学においては、単管パイプで架台を作成したうえで実施工を想定して地盤上に立てかけて設置した。また、釧路工業高等専門学校においては単管パイプ架台上に設置した。なお、試験体制作の都合上、C 試験体は釧路工業高等専門学校のみにて実施している。

曝露試験の試験体は、後述の凍結融解試験 JIS A 1148³⁾を参考に、断面寸法を 100 × 100 mm、長さを 400 あるい

表－３ ウレタン規格値

硬さ (JISA)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	引裂強さ *1 (N/mm)	硬化物比重	摩耗試験 *2 (mg) H-22 / CS-17
8.5	16.2	400	63.7	1.0	203 / 1.2

*1 JIS A 6021

*2 テーパー型摩耗試験

1000 g, 1000 回転の条件で摩耗した質量を測定

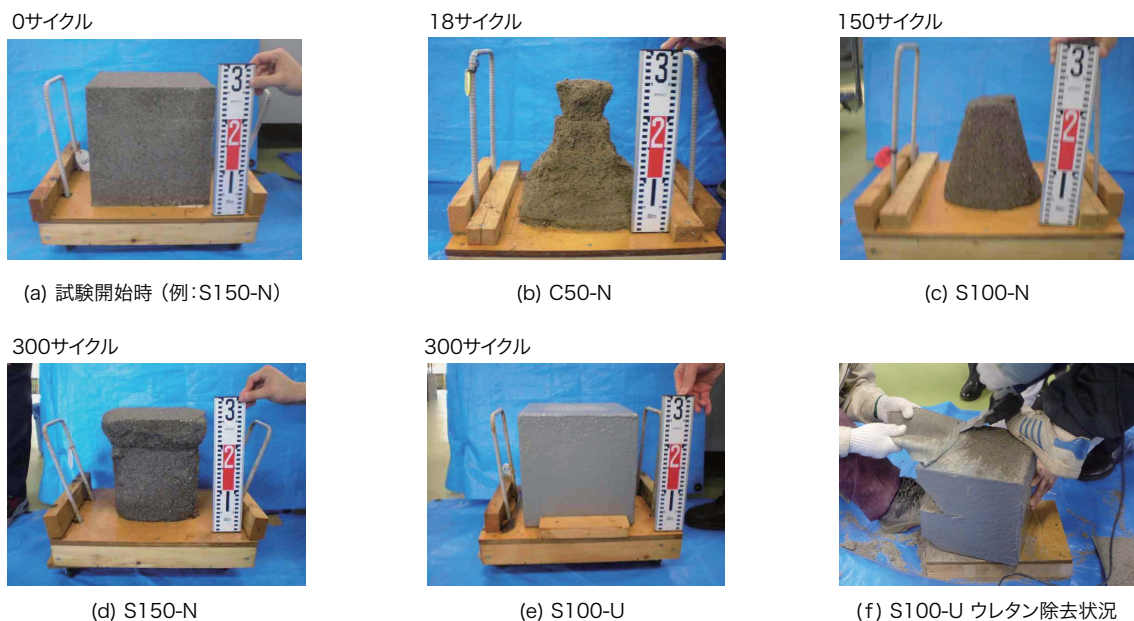
は 500 mm とし、各ケースで 2 ～ 3 個ずつ製作した。

(2) 試験結果

写真－１には、試験開始から 142 ～ 424 日目における試験体の外観写真の一部を示している。写真より、粘性土を用いた C 試験体は、試験開始から 142 日しか経過していないにもかかわらず、C100-S を除きいずれも崩壊していることが分かる。これは、凍結融解作用により試験体表面に発生したスケーリングが徐々に進行して断面が減少し、それに伴い曲げ剛性も低下して自重により試験体中央部近傍で曲げ破壊したものと推定される。一方、結合材添加量が多く表面含浸剤を施した C100-S は原型を留めているものの、385 日目には他の C 試験体と同様に崩壊したことを確認している。これは、C100-S は他の C 試験体と比較して結合材添加量が多く表層の空隙が緻密化して耐久性が向上したものの、含浸剤による緻密化深度が数 mm ～ 数 cm 程度と浅く、その含浸部が欠損することにより保護効果が喪失し、表面保護工が無い場合と同様の状態になってしまうためと考えられる。

一軸圧縮強度を変化させた試験体については、経過日数が釧路と室蘭でそれぞれ 385 日、424 日時点で S50-N のみが断面減少して崩壊していた。他の S100-N、S150-N は釧路および室蘭ともに表面にスケーリングが生じた程度の劣化状況であった。一方、ウレタン被覆を施した S100-U および S150-U はいずれの場合も試験開始時と同様の外観を示している。

本曝露試験結果より、粘性分がない S 試験体よりも粘性分がある C 試験体ほど、また結合材添加量が少ないほど長期耐久性に劣ることが明らかとなった。一方、表面



写真－2 凍結融解試験後の状況写真

含浸剤による保護工を施す場合には、含浸部が欠損することにより保護効果が喪失することが分かった。ウレタン被覆を施す場合には、280 日程度の試験日数の結果ではあるが、外観上の変状はほとんど見受けられなかった。以上より、本緩衝システムのソイルセメントはウレタン被覆を施すことで長期耐久性が向上する可能性が示された。

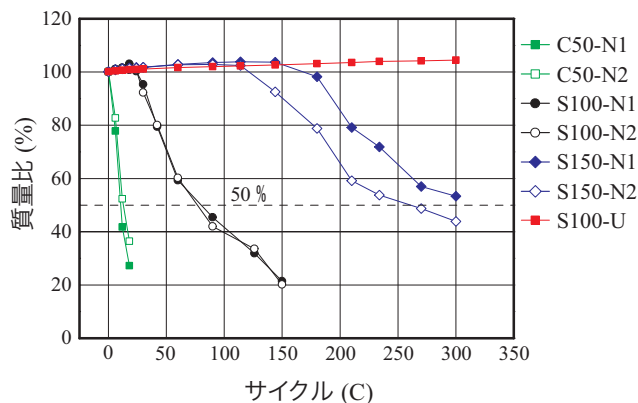
2.3 凍結融解試験

(1) 試験方法

凍結融解試験方法はコンクリートに用いられる JIS A 1148 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。本試験法は、各サイクルにおける試験体の一次共鳴振動数を測定して動弾性係数を算出し、相対的に比較するものである。しかしながら、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はせず、質量および外観によって評価することとした。

凍結融解試験の試験体寸法は、実施工および曝露試験結果を踏まえ、JIS A 1148 に準拠せず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。これは、実施工で用いられるソイルセメント寸法は 1 × 4 × 10 m 程度とマッシュプであること、同試験方法の試験体寸法で予備試験を行った場合には早期に断面減少が生じて試験槽内で崩れ落ちたこと、人力作業が可能な形状とすること等を考慮して設定した。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 時間程度浸漬した後試験を開始している。

試験の凍結融解温度は $-20^{\circ}\text{C} \sim +7^{\circ}\text{C}$ ($-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$

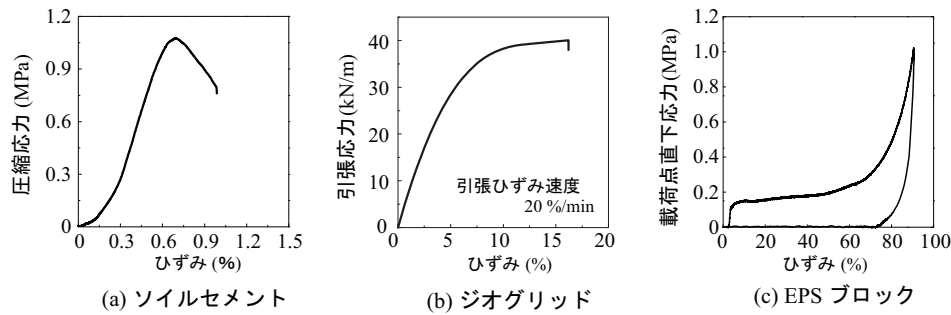


図－2 質量比とサイクル数の関係

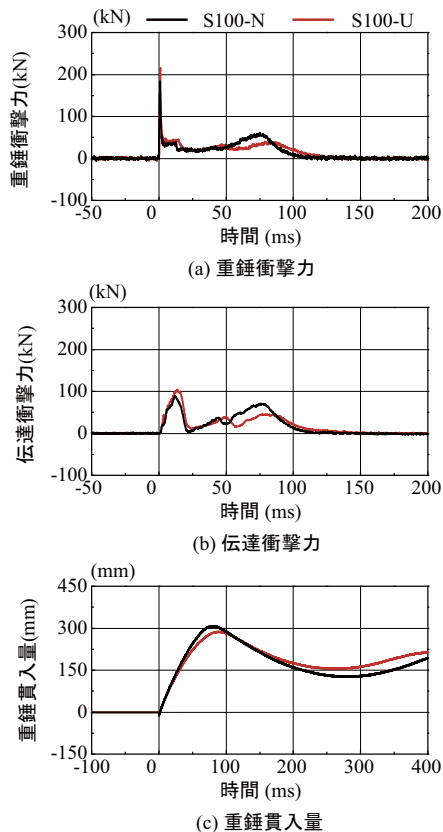
$\sim +5 \pm 2^{\circ}\text{C}$) とし、1 サイクルの所要時間は 4 時間 (凍結: 2.5 時間, 融解: 1.5 時間) とした。計測サイクルは、30 サイクルまでは 6 サイクル毎、それ以降は 30 サイクル毎とし、質量比が 50 % を下回った場合を試験終了の目安とした。

(2) 試験結果

写真－2 には、試験開始時および各ケースの試験終了時点における試験体の外観写真を示している。写真には、S100-U のウレタン除去状況も併せて示している。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崩れ落ちていることが分かる。紙面の都合上、途中経過の写真を示すことができないが、ウレタン被覆した場合を除き、まず隅角部から崩壊が始まり、表層が剥がれ落ち、その範囲が拡大するという劣化過程が確認された。一方、ウレタン被覆を施した場合には、300 サイクル経過後においても試験開始時と同様の外観を示している。また、(f) の 300 サイクル経過後におけるウレタン被覆の除去状況より、ソイルセメントとウレタンの接着状況は良好で、ソイルセ



図－４ 各材料の応力-ひずみ関係



図－５ 各種時刻歴応答波形

錘貫入量である。なお、重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセルにて、また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、さらに重錘貫入量は非接触型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 の場合には第１波目のピーク値が大きいのに対し、第２波目のピーク値は S100-U の場合が小さい値を示している。

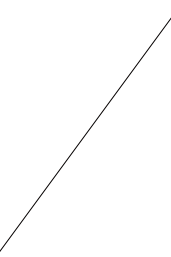
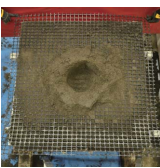
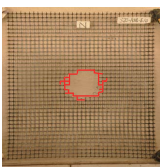
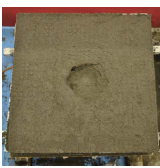
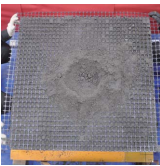
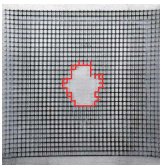
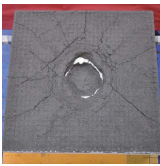
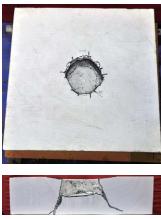
重錘衝撃力および伝達衝撃力の第１ピークがウレタン被覆により増加した理由は、ウレタン被覆の拘束効果によってソイルセメントの割裂が抑制されることから、見かけの接触面強度が大きくなったことによるものと推察される。一方、これまでの研究⁴⁾により、EPS に生じる応力が降伏強度 $\sigma_{ey} = 0.2$ MPa 程度を超過する重錘衝突速度の場合において、EPS 内のひび割れが底面近傍まで進行し、重錘衝撃力および伝達衝撃力に第２ピークが明瞭に生じることが明らかとなっている。これより、ウレタン被覆を施すことによりソイルセメントの割裂破壊および EPS 内のひび割れが抑制され、重錘衝突部に応力が集中せず、各衝撃力の第２ピークが減少したものと考えられる。

(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。また、そのピーク値は S100-N の場合よりも S100-U の場合が小さい。これは、ウレタン被覆の拘束効果によるソイルセメントの割裂抑制効果、EPS 内のひび割れ抑制効果により重錘貫入が抑制されることによるものと推察される。

(2) 破壊性状

写真－４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 の場合に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示され、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

試験体名	(a) ソイルセメント表面 (ウレタン除去前)	(b) ソイルセメント表面 (ウレタン除去後)	(c) 押抜きせん断 コーン	(d) ジオグリッド	(e) ジオグリッド下の ソイルセメント	(f) EPS表面 および断面
S100-N				 — 破断箇所		
S100-U				 — 破断箇所		

写真－４ 実験終了後における各種破壊性状

状に破断していることが分かる。

図 (e) より、S100-U の場合には下層の 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は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ていることが分かる。また、S100-N の場合には EPS が割裂破壊しているのに対して、S100-U の場合には割裂破壊が見られない。これは、前述したとおり、ウレタン被覆を施すことにより EPS 内のひび割れが抑制され、重錘衝突部に応力が集中しない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、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ことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、落石防護擁壁に設置する緩衝システムにおいて、寒冷地における凍害劣化に対する対策法としてシステムの要素であるソイルセメント層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、ウレタン被覆が緩衝システムの緩衝性能に及ぼす影響を把握することを目的に室内での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、以下のとおりである。

- 1) ソイルセメントをウレタン被覆することにより、提案の三層緩衝構造の凍結融解抵抗性が向上し十分な長期耐久性が確保できる。
- 2) 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・飛散のほか、ひび割れの開口、EPS 内のひび割れが抑制される。

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系専攻構造力学研究室の学生や、釧路工業高等学校建築学科の三森敏司教授および研究室の学生に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

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，pp.763-767，2013
- 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，pp.739-743，2013
- 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
- 4) 牛渡裕二，栗橋祐介，鈴木健太郎，川瀬良司，岸徳光：ソイルセメントを用いた三層緩衝構造の限界状態および荷重分散領域に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.60A，pp.963-972，2014