

研究概要・成果の要旨

研究テーマ：北海道の厳寒期での緊急減災施設施工を可能とする寒冷地用砂防ソイルセメント工法の開発

研究代表者：氏 名（所属） 山田孝（北海道大学農学研究院）

【研究概要】（200 文字程度。この部分の記述は、中間評価・事後評価を公表する際に、評価コメントと併せてホームページで公開します）〔1 行 40 文字です。5 行程度を目安に記載してください。〕

樽前山直轄砂防事業の現場において、現地発生土砂を活用した厳寒期用ソイルセメント工法の開発が求められている。ソイルセメント配合時のワーカビリティを確保でき、相応の強度が得られること、従来のブロック積よりも短い工期で施工できることなどがポイントとなる。そこで、厳寒期用ソイルセメント中詰めトンパック製作手法を開発し、それを活用した緊急堤やセルダム開口部緊急閉塞工を提案する。

【研究成果の要旨】

北海道の融雪泥流緊急減災時に施工できる導流堤工やセルダム開口部緊急閉塞工の開発に資するために、現地発生土砂を用いた流動タイプのソイルセメントをトンパックに中詰めすることを検討している。ただし、融雪泥流の発生前や発生後の出来るだけ早い時期に施工する必要があるために、低温期での施工が基本となる。本研究では、そのための基礎実験として、樽前山直轄砂防事業区域内覚生川流域内の現地発生土砂を用いた、流動タイプソイルセメントの特性を現地施工により明らかにした。そして、現場を管轄する北海道開発局苫小牧砂防海岸事務所と連携してソイルセメント中詰めトンパックを現地で低温期に施工し、ソイルセメントの施工性、水和反応、物理的性質、強度、及び緊急時の活用方法について検討した。施工性について、セメント量が 100kg の場合、スランプ値は砂の多い土砂で 0.7～2.2cm、細粒分の多い土砂で 1.3～1.8cm であった。250kg では砂の多い土砂で 2.0～6cm、細粒分の多い土砂で 1.8～13cm と大きく、含水比の増加によりスランプ値も増加する傾向が見られた。2023・2024 年度の配合条件下では流動タイプのソイルセメントとして十分に活用可能であることが確認された。水和反応については、セメント量 100kg でピーク温度は約 8～9℃、250kg で約 11～12℃を記録した。100kg の場合、水温はピーク後 40 時間で 5℃に低下するが、250kg ではピーク後 60 時間にわたり温度が維持され、その後低下する。250kg では発熱量・水和速度ともに高く、特に累積発熱量の維持時間が長い点が特徴である。単位体積重量は、250kg で砂の多い土砂を用いた場合、7 日・28 日材齢ともに約 18kN/m³となり、「密なもの」、他条件では「ゆるいもの」に分類される。強度面では、砂の多い土砂・250kg の配合で、7 日強度が 1～2 N/mm²、28 日で 2～3 N/mm²。細粒分が多い場合はやや低い、いずれも含水比が高くなっても強度に大きな差はなかった。また、トンパックに詰めた方が土嚢袋よりも強度が高く、これは温度・断熱養生の効果によると考えられる。特に 2024 年度の現地土砂使用時には、設計管理強度（2.0 N/mm²）に近く、自立性と耐流出性のある材料となっている。緊急減災用途として、低温環境（外気温 5℃以下）下でも、7 日・28 日で必要な強度の中詰めトンパックを短時間（最大約 20 分）で製作可能である。複数製作時にはさらなる効率化も期待できる。これにより、緊急堤やセルダムの閉塞工、崩壊土砂・落石の捕捉、河岸侵食の軽減といった用途での活用が見込まれる。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏 名 （ふりがな）	所 属	役 職
	山田孝(やまだ たかし)	北海道大学農学研究院	特任教授
②研究テーマ	名称	一般型【テーマ名】北海道の厳寒期での緊急減災施設施工を可能とする寒冷地用砂防ソイルセメント工法の開発	
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。	令和4 年度	令和5 年度	令和6 年度
	243万円	100万円	150万円
総 合 計		493万円	
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名, 所属・役職を記入下さい。なお, 記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏 名	所属機関・役職（※令和 年3月31日現在）		
笠井美青	北海道大学農学研究院・准教授		
厚井高志	北海道大学広域複合災害研究センター・特任准教授		
⑤技術研究開発の目的・目標 （様式地砂-1, 地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 【FS型の場合は,FS研究と一般研究を別立てで記入してください】 【目的】 樽前山直轄砂防事業の冬期現場において、低温と火山灰質土砂の細粒分や砂の含有による影響に着目して製作したソイルセメント中詰めトンパックの施工性や強度をどの程度、確保できるかを実物大試験施工実験によって明らかにする。その結果をもとに、緊急減災時のソイルセメント中詰めトンパック製作方法と活用方法を提案する 【目標】 ・厳寒期の野外現場において製作でき,28日強度で現場に活用できる。 ・ブロックを積むよりも工期を短縮できる。 ・火砕流・火砕サージの熱や融雪型火山泥流の衝撃,摩耗などによって,トンパック袋が破損しても,中詰めのソイルセメント本体は自立して流出しない。 ソイルセメントは、ワーカビリティ-を重視した「流動タイプ」である。強度はトンパック中詰めソイルセメントが自立し、泥流などの衝撃により細かくバラバラになって流出しなければ良しとするが、現行の砂防ソイルセメントの設計管理強度(砂防ソイルセメント施工便覧(2016))で規定される「最小管理強度(2.0N/mm ²) 水和反応により土砂が硬化していることが保証できる強度」近傍値(土質改良的な強度特性とコンクリート的な強度特性との境界付近)を目指す。緊急対策として施工するため、現地発生土砂が粘性土であっても、改良剤(クラッシャーランや製鋼スラグ等)の添加による粒度調整効果、有機成分の改質効果、高性能減水剤の添加を目的とした配合設計を行う手間がないのが望ましい。			

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

【FS型の場合は,FS研究と一般研究を別立てで記入してください】

1.はじめに

樽前山での緊急砂防減災では,融雪型火山泥流ならびにその後の降雨による土砂流出への対応が必要である。発表者らは,現地発生土砂を用いた流動タイプのソイルセメントをトンパックに中詰めし,それを用いて緊急導流堤の施工やセルダム開口部緊急閉塞を行うことを検討している。ただし,融雪泥流の発生前や発生後の出来るだけ早い時期かつ短期間に施工する必要があるために,低温期施工が前提となる。緊急導流堤の施工やセルダム開口部緊急閉塞に際し,ブロックを積む方法では,比較的長期の時間を要する。さらに,トンパックに土砂を中詰めしただけでは,融雪泥流の衝撃力や摩擦,火砕流・火砕サージなどにより,袋が破れるとその土砂が流出し,導流堤の機能低下あるいは機能損失につながるリスクがある。

2023 年度の研究では,樽前山直轄砂防事業区域内覚生川流域内での現地発生土砂(粘土・シルトの多い火山灰質土砂)を用いて,12 月の現場において,流動タイプのソイルセメントのワーカビリティ,トンパックに中詰め養生した時の強度,施工時のサイクルタイム等を明らかにした。2024 年度は,砂成分の多い火山灰質土を用いて 12 月に現場施工し,2023 年度結果(土嚢袋中詰めも含む)との比較を行った。そうした実物大試験施工成果をもとに,低温期でのソイルセメント中詰めトンパックの製作方法と活用方法を提案した。

2.本研究開発の対象となる「ソイルセメント中詰めトンパック」による導流堤工,セルダム緊急閉塞工の緊急減災での位置づけ

- ・導流堤工(融雪型火山泥流の氾濫防止軽減)

計画規模の融雪型火山泥流が発生した場合,セルダムで堰上げが生じながらも,その隙間から融雪型火山泥流の一部が流出する。それがセルダム下流の溪流区間を流下するときに氾濫の危険のある個所に緊急的に施工する。施工時期は,積雪が始まる直前の 11 月を想定する。

- ・セルダム緊急閉塞工(融雪泥流発生後の降雨による土砂流出捕捉)

融雪型火山泥流発生後にセルダム上流域に残存する移動可能土砂が降雨時にセルダムの隙間から流出するのを防止・軽減するために,隙間を閉塞させる。閉塞部の強度増強のためには,ブロックとのハイブリット使用も想定する。施工時期は,積雪が終了し,降雨シーズンが始まる前の 4~5 月を想定する。

3.本研究開発で目指すソイルセメント中詰めトンパックの製作と施工の特徴、要求性能

- ・厳寒期の野外現場において製作でき,28 日強度で現場に活用できる。

- ・ブロックを積むよりも工期を短縮できる。

- ・火砕流・火砕サージの熱や融雪型火山泥流の衝撃,摩耗などによって,トンパック袋が破損しても,中詰めのソイルセメント本体は自立して流出しない。

ソイルセメントは,ワーカビリティを重視した「流動タイプ」

強度はトンパック中詰めソイルセメントが自立し,泥流などの衝撃により細かくバラバラになって流出しなければ良しとするが,現行の砂防ソイルセメントの設計管理強度(砂防ソイルセメント施工便覧(2016))で規定される「最小管理強度(2.0N/mm²) 水和反応により土砂が硬化していることが保証できる強度」近傍値(土質改良的な強度特性とコンクリートの境界付近)を目指す。

緊急対策として施工するため,現地発生土砂が粘性土であっても,改良剤(クラッシャーランや製鋼スラグ等)の添加による粒度調整効果、有機成分の改質効果、高性能減水剤の添加を目的とした配合設計を行う手間がないのが望ましい。

4.本研究開発の新規性

2018 年胆振東部地震を契機にダブルウォール構造の砂防堰堤の中詰をソイルセメントにする場合の構造の合理性や施工性、現地発生土の全量有効利用方法についての研究は、長野ら(2023)によって報告されている。2018 年胆振東部地震のよる崩壊が多発した北海道厚真町では、災害関連緊急砂防事業として、砂防ソイルセメント(現地発生土砂を活用)を用いた SB ウォールの砂防堰堤が施工された。

ソイルセメントの冬季施工に関わる影響因子(各種温度、養生方法等)を供試体レベルでの曝露試験によって長期間確認するとともに、対策とその効果について混練物の温度推移や強度発現傾向等が検討されている(酒巻ら、2023)。

これらの先行研究に加え、(一財)砂防・地すべり技術センター(2016)：砂防ソイルセメント施工便覧の内容と比較した場合の本研究開発の新規性は以下の3点である。

- ・ソイルセメントを緊急対策施設(砂防ソイルセメント工法流動タイプ)、例えば本研究開発のように、ソイルセメントを中詰めしたトンパックを活用する方法についての研究開発事例は報告されていない。
- ・本研究開発の現場のように低温期(5℃以下)での施工方法についての研究開発事例はほとんど報告されていない。砂防ソイルセメント施工便覧では、寒中施工の留意事項として記載されているのは以下の事項のみである。「初期に凍結しないよう十分に保護し、特に風を防ぐ必要があり、0℃以下にさらされる場合などは、混練水の加熱、保温などの対策を講じる必要がある」
- ・本研究開発の現地発生土砂のように、細粒土(粘土+シルト)が約30%~60%含まれる粘性質で自然含水比が約60%と非常に高い特性のものをソイルセメントとして活用した事例は報告されていない。

5.本研究開発の目的

樽前山直轄砂防事業の冬期現場において、低温と火山灰質土砂の細粒分や砂の含有による影響に着目して製作したソイルセメント中詰めトンパックの施工性や強度をどの程度、確保できるかを実物大試験施工実験によって明らかにする。その結果をもとに、緊急減災時のソイルセメント中詰めトンパック製作方法と活用方法を提案する

6.方法

表-1 に、現地発生土砂の材料特性を示す。また、表-2 にソイルセメント中詰めトンパック1個当たりの材料を示す。2023 年度、2024 年度の現地発生土砂の細粒分の値は、砂防ソイルセメント施工便覧(2016)の砂防ソイルセメント工法流動タイプで規定される領域(20%より大)に相当する。2023 年度は、粘土・シルトが34.1%と多く、砂は29.2%である。2024 年度は、粘土・シルトは、21.6%に対して、砂が47.8%と多いのが特徴である。土粒子密度、自然含水比(平均値)には大きな違いはない。また、2023 年度、2024 年度の現地発生土砂の自然含水比は約60%と非常に高く、粗骨材の締固め試験による最適含水比を大きく上回っている。

表-1 現地発生土砂(樽前山覚生川流域)の材料特性

	2023年度試験に使用した現地発生土砂	2024年度試験に使用した現地発生土砂
粒度試験	シルト+粘土：34.1% 砂：29.2% 礫：36.7% 最大粒径：75mm	シルト+粘土：21.6% 砂：47.8% 礫：30.6% 最大粒径：53mm
土粒子密度試験	2.653g/cm3(平均値)	2.519g/cm3(平均値)
含水比試験(自然含水比)	61.1%(平均値)	59.0%(平均値)
細骨材の密度及び吸水率試験	絶乾密度 2.45 g/cm3(平均値) 吸水率 2.94 %(平均値)	絶乾密度 2.37 g/cm3(平均値) 吸水率 5.96 %(平均値)
粗骨材の密度及び吸水率試験	絶乾密度 2.25 g/cm3(平均値) 吸水率 6.40 %(平均値)	絶乾密度 1.79 g/cm3(平均値) 吸水率 18.65 %(平均値)
粗骨材の突固めによる土の締固め試験	試験方法 E-b 最大乾燥密度 1.341g/cm3 最適含水比 24.2%	試験方法 E-b 最大乾燥密度 1.083g/cm3 最適含水比 40.4%
細骨材の有機不純物試験	暗赤褐色⇒良いコンクリートに使用できない	濃黄色⇒使用できる

表-2 2024年度トンパック1個当たりの材料

図-1 に、2023 年度、2024 年度のソイルセメント中詰めトンパックの製作試験条件を示す。また、表-2 にソイルセメント中詰めトンパック1個当たりの材料を示す。

トンパック1個当たりの材料	100kg-50%-7日養生	100kg-50%-28日養生	100kg-70%-7日養生	100kg-70%-28日養生	250kg-50%-7日養生	250kg-50%-28日養生	50kg-70%-7日養生	250kg-70%-28日
現地発生土砂の体積(m3) ※土量確認箱(1.715m×1.72m×0.34m⇒1.00)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
現地発生土砂の質量(kg) ※空隙率：0.5 土粒子密度：2520kg/1m3	1260.0	1260.0	1260.0	1260.0	1260.0	1260.0	1260.0	1260.0
ポルトランドセメント(kg) ※1袋25kg	100	100	100	100	250	250	250	250
水(kg)	47.5	47.5	66.5	66.5	118.75	118.75	166.25	166.25
計(kg)	1407.50	1407.50	1426.50	1426.50	1628.75	1628.75	1676.25	1676.25

2024 年度については、2024 年 12 月 12 日、13 日に現地発生土砂を用いてソイルセメントを現地で配合し、スランプ値などを計測し、中詰めトンパックを 8 個、施工した。単位セメント量(普通ポルトランドセメント)は 100kg、250kg の 2 ケース、試験含水比は 50%、70% の 2 ケースであり(配合時の加水のみの含水率)、外気温は 5℃以下、練り混ぜ水の温度は 5～10℃である。ソイルセメント内の水和反応を把握するために、トンパック 1 個当たり 5 箇所、計 40 箇所に自記温度計を設置し、1 分間隔で計測した。また、7 日養生強度、28 日養生強度を測定するための供試体コアをトンパック 1 個当たり 5 個(上面：2 個、側面：3 個(上部、中部、下部)、計 40 個採取した(図-2、写真-1)。その後、実験室にて圧縮強度を測定した。

7. ソイルセメントのスランプ値と試験含水比、セメント混入量との関係、水和反応の実態

図-3 に試験含水比とスランプ値との関係を示す。全体的に見て、試験含水比が大きくなると、ス

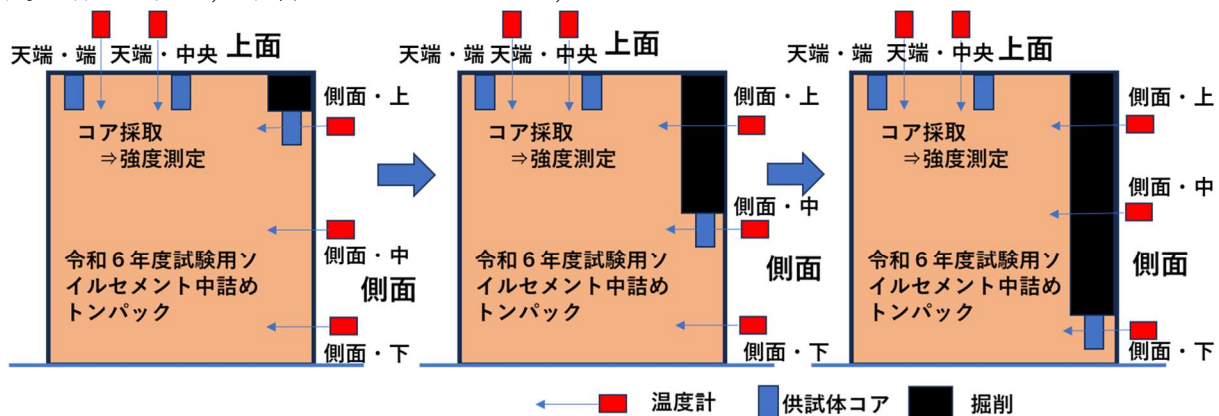


図-2 ソイルセメント中詰めトンパックの温度・強度測定(2024年度)
温度計測：苫小牧砂防海岸事務所 強度計測：北海道土砂資源化研究所

ランプ値も大きい傾向がある。試験含水比 50%近傍では、トンパック(2023、2024 年度)のスランプ値は、土嚢袋中詰め用のソイルセメント(2023 年度実験室にて製作)のそれらに近似している。試験含水比が 60%～70%では、平均値近傍の値となっている。トンパックのみに限ると、100kg では、砂の多い土砂、粘土・シルトの多い土砂のスランプ

値は、各々、0.7～2.2cm、1.3～1.8cm であり、両者の違いは明確ではない。250kg では、砂の多い土砂、粘土・シルトの多い土砂のスランプ値は、各々、2.0～6cm、1.8～13cm であり、後者の方が大きい。試験含水比が 50%の時は、両者の違いはほとんどない。

2024年度ソイルセメント中詰めトンパック製作試験条件

実施時期：2024年12月12日、13日

○製作・養生条件

- ・セメント(1ケース)：普通ポルトランドセメント
- ・単位セメント量(2ケース)：100kg、250kg
- ・含水比(2ケース)：50、70%
- ・練混ぜ水温度：5～10℃
- ・養生温度：～5℃
- ・養生日数(2ケース)：水和反応終了日 7日、28日

※トンパック8個製作

○ソイルセメント内温度計測(1個あたり5箇所×8個=40箇所)

○コア採取(トンパック1個当たり5個) ※コア 計40個採取

○コアの圧縮強度の測定(水和反応終了日 7日、28日)

※コア40個の強度測定

2023年度ソイルセメント中詰めトンパック製作試験条件

実施時期：2023年12月12、13日

○製作・養生条件

- ・セメント(1ケース)：普通ポルトランドセメント
- ・単位セメント量(2ケース)：100kg、250kg
- ・含水比(3ケース)：50、60、70%
- ・練混ぜ水温度：5.3～8.2℃
- ・養生温度：ほぼ0℃
- ・養生日数(2ケース)：水和反応終了日 7日、28日

※トンパック12個製作

○ソイルセメント内温度計測⇒計測できず。

○コア採取(トンパック1個当たり3個) ※コア 計27個採取

○コアの圧縮強度の測定(水和反応終了日 7日、28日)

※コア27個の強度測定

図-1 ソイルセメント中詰めトンパックの制作試験条件
(2023年度、2024年度)



写真-1 供試体コア採取状況

砂防ソイルセメント施工便覧(2016)では、砂防ソイルセメント工法流動タイプのスランプは、5～20cm と記載されている。本研究では、100kg の場合は、この領域よりかなりスランプ値は小さめとなるが、250kg では、試験含水比 70% の場合は、この領域に含まれる。2023,2024 年度のソイルセメント配合条件では、スランプ値から判断すると、流動タイプのソイルセメントとして活用することが十分可能である。

図-4 にソイルセメント内部の水和温度の時間変化を示す。温度データは、1つのトンパックに設置した5つの温度計のデータ平均値である。ピーク温度は、100kg の場合は、8～9℃程度、250kg の場合は、11～12℃程度である。100kg,250kg とともに、ソイルセメント中詰め直後から温度が上昇する。100kg では、水温ピーク後は、温度が減少し続け、約 40 時間後には 5℃に到達する。250kg では、水温ピーク後は、約 60 時間は大きくは変化せず、養生温度として 11～12℃程度の状態が続いている。それ以降は、温度が低下し、約 60 時間後には 5℃近傍に到達する。温度は、外気温の変動と連動せずに減少しているため、ソイルセメント内部から外部への放熱状態が継続していたと想定される。

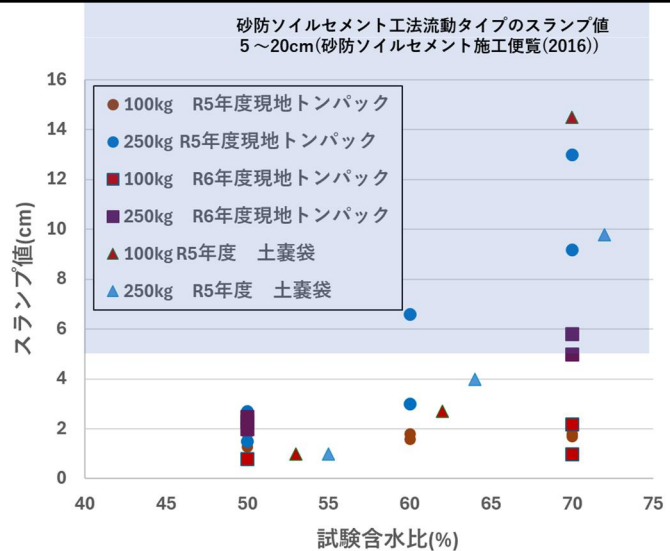


図-3 試験含水比とスランプ値

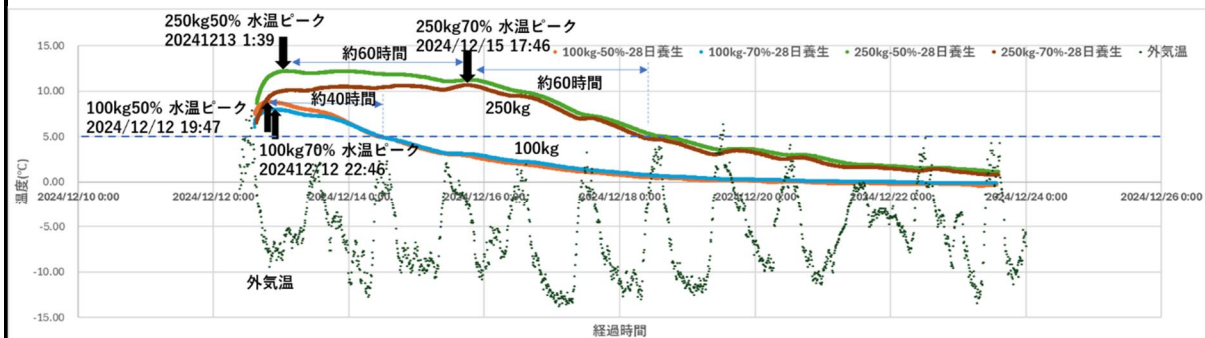


図-4 水和温度の時間変化 (温度データは、1つのソイルセメント中詰めトンパックに設置した5つの温度計のデータ平均値)

次いで、発熱量、水和速度、累積発熱量をコンクリート質量、ソイルセメントの比熱、温度変化、セメントの水和熱などから計算した。計算プロセスは以下のとおりである。

・水和反応による発熱量： $Q(t)$

$$Q(t) = m \cdot c_p' \cdot \Delta T \quad \dots (1)$$

$Q(t)$ ：時間 t における発熱量 (kJ) m ：コンクリートの質量 (kg)

c_p' ：土砂を混ぜたときの比熱 (kJ/kg・K)

・水和速度： $R(t)$

$$R(t) = dQ/dt \cdot 1/\Delta H' \quad \dots (2)$$

ここで、 $dQ/dt = m \cdot c_p' \cdot dT/dt$

数値微分(差分)すると、 $dT/dt \approx (T(t+\Delta t) - T(t)) / \Delta t$

$R(t)$ ：水和速度 (kg セメント / 時間)

dQ/dt ：発熱速度 (J/h)

$\Delta H'$ ：土砂を混ぜたときのセメントの水和熱 (kJ/kg)

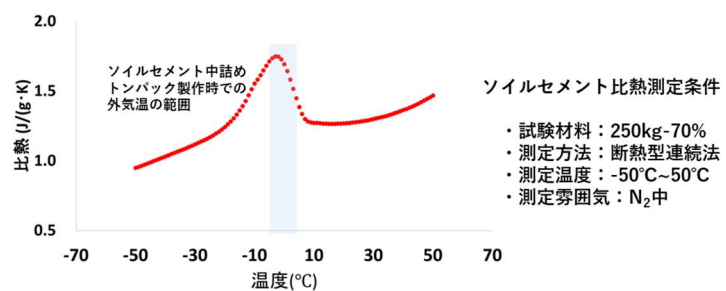


図-5 ソイルセメント比熱測定結果

・累積発熱量： Q_{total}

$$Q_{\text{total}}(t) = \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt \quad \dots \quad (3)$$

土砂を混ぜたときのセメントの水和熱(ΔH)については、セメント 250kg 試験含水比 50%の圧縮試験後のコア(側部上部から採取)を用いて、真空理工製比熱測定装置 SH-3000 型による比熱測定試験を実施した。測定方法は、断熱型連続法、測定温度は-50℃～50℃、測定雰囲気は N2 中である。その結果を図-5 に示す。今回の試験現場での外気温の変動温度(-5～5℃)域を踏まえ、ピーク値である 1.7kJ/kg・K を計算条件として使用した。その他の計算条件は、セメント質量が 100kg, 250kg, セメント水和熱は 400kJ/kg, 刻み時間 Δt は、1 時間である。計算結果を図-6 に示す。250kg の場合は、100kg の場合よりも、発熱量、水和速度(温度がピーク近傍に達するまでの間)は大きく、特に、累積発熱量ではその違いが顕著となった。250kg では、温度がピークに達してから累積発熱量が約 60 時間、維持され、100kg の場合は、温度がピークに達してからすぐに累積発熱量は減少しており、放熱状態に移行する結果となった。発熱量が大きく長い時間継続することが圧縮強度の増加に関与していると考えられる。

8. ソイルセメントの単位体積重量

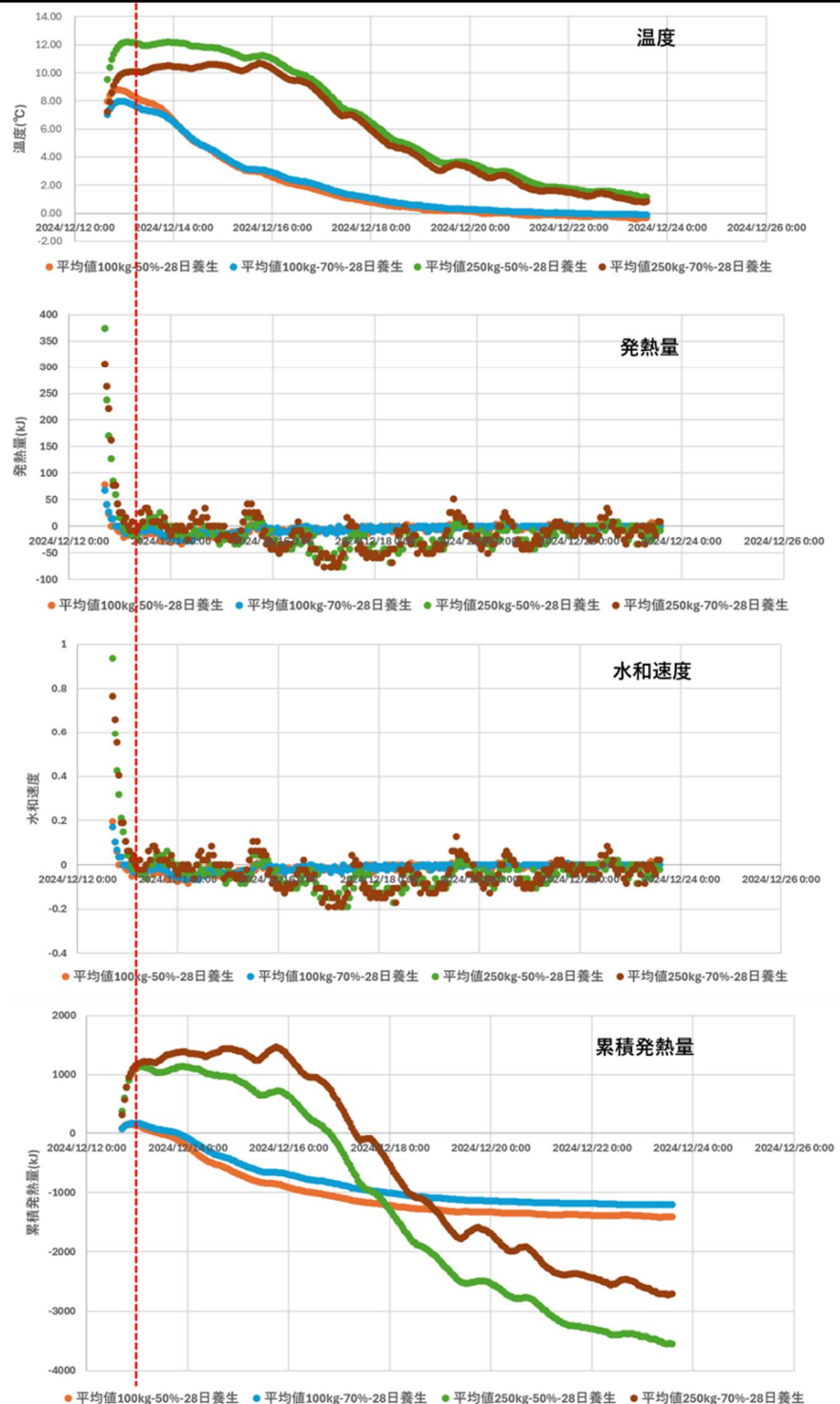


図-6 発熱量、水和温度、累積発熱量の計算結果

図-7に、2023年度、2024年度のソイルセメント中詰めトンパックから採取したコアの単位体積重量を示す。2024年度土砂の250kgの場合は、7日、28日材齢いずれも約 18kN/m^3 となり、道路土工擁壁工編で規定される「密なもの」に相当する。それ以外の材齢28日の場合は、「ゆるいもの」に相当する。

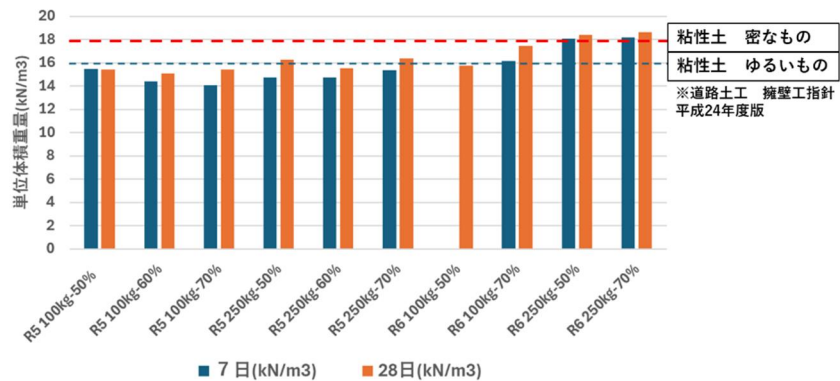


図-7 単位体積重量の比較

9. ソイルセメントの圧縮強度

図-8に、2024年度コアの採取場所による圧縮強度の比較を示す。コアの採取場所が異なっても強度はあまり変わらない。図-9に、7日強度と28日強度の比較を示す。セメント質量、試験含水比、採取場所によらず、28日強度は7日強度よりも若干、大きいケースがほとんどである。

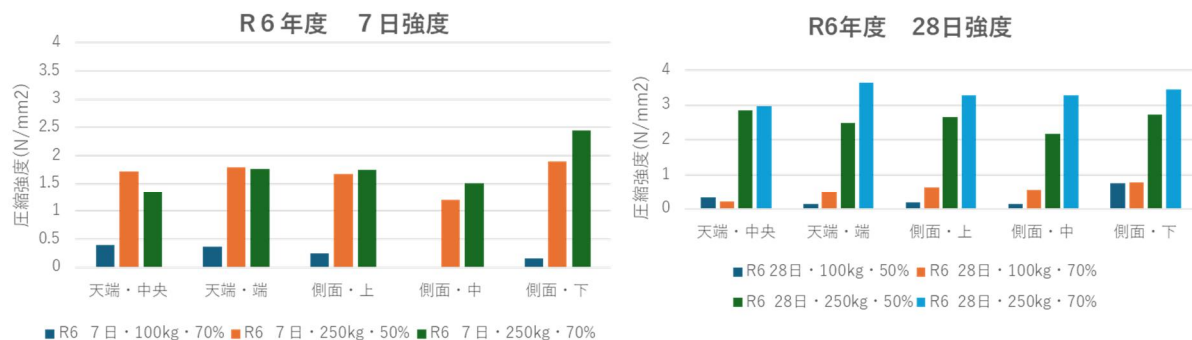


図-8 2024年度供試体コアの採取場所による圧縮強度の比較

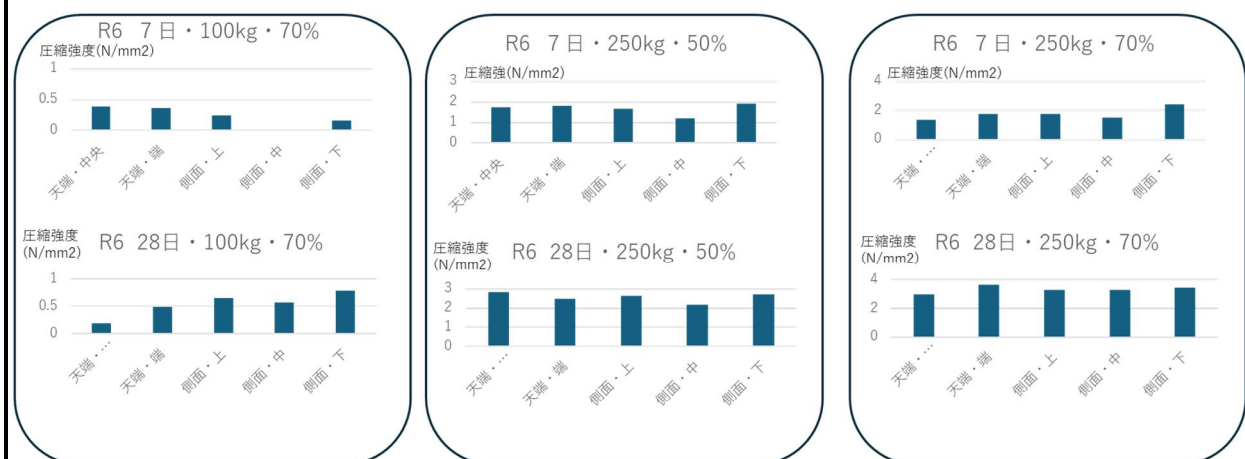


図-9 2024年度供試体コアの7日強度と28日強度との比較

図-10に、セメント質量、試験含水比が同じものについて、7日強度と28日強度との関係を示す。100kgでは、両者の関係は不明であるが、250kgでは、両者には、正の関係があるようにみえる。

図-11に材齢、セメント質量、試験含水比が同じものについて、試験含水比による圧縮強度の比較を示す。2024年度の試験条件では、試験含水比が増えても(50%→70%),強度はあまり変わらない。

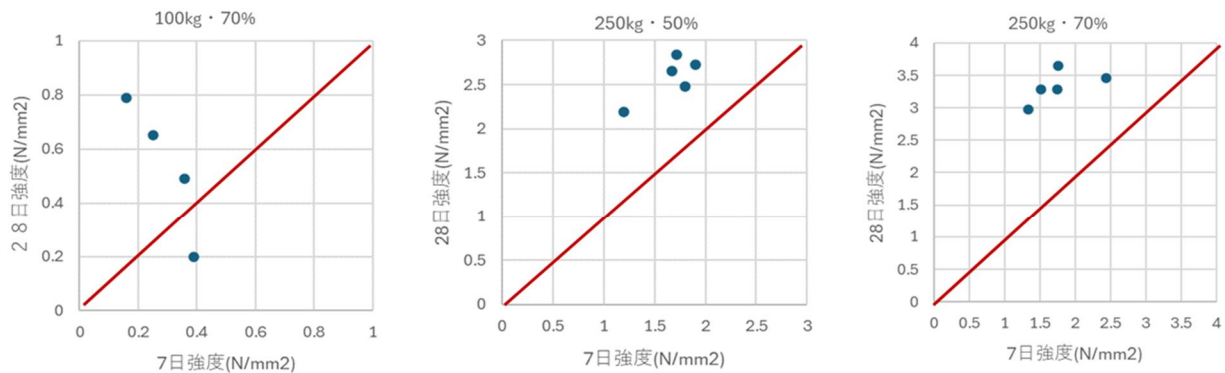


図-10 2024年度供試体コアの7日強度と28日強度との関係

図-12 に, 7 日強度と 28 日強度との関係を示す。砂が多い土砂を使用した 250kg の場合は, 7 日強度でも, 最小管理強度の目安となる 2N/mm^2 に近く, 28 日強度では, この値を超過している。砂が多い場合は, ソイルセメン骨格が強化されやすいこと, 粘土・シルトが多い場合は, 高いサクシションのため水の一部が吸引され, 水和反応に有効な水が減少したことが考えられる。写真-2 に, 材齢 28 日, 試験含水比 70%, セメント量 100kg, 250kg の時のコアスライス断面写真を示す。100kg の場合は, コア内部のテクスチャは比較的粗いのに対し, 250kg では, 緻密な状態で固結していることがわかる。

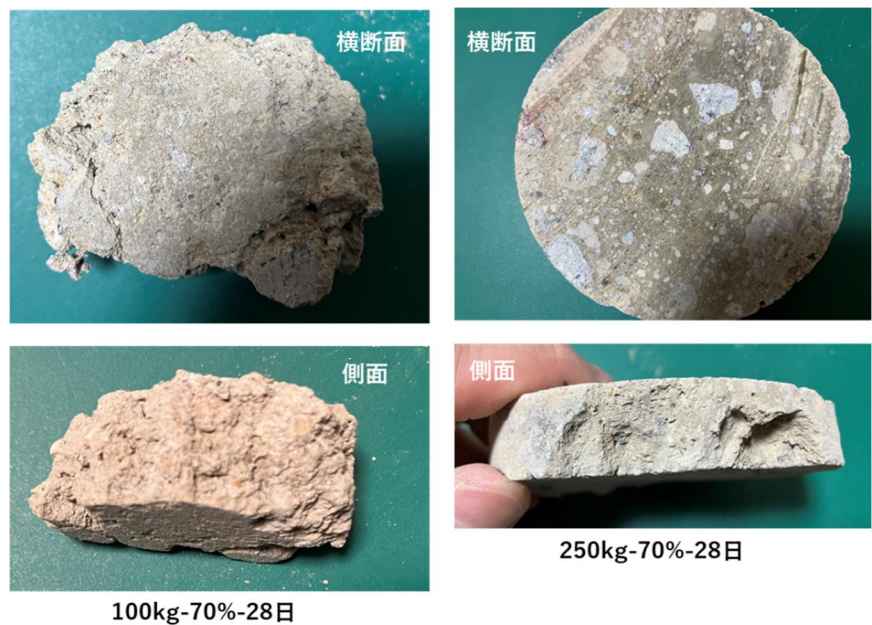


写真-2 供試体コアスライス断面
(スライス時のコア材齢: 103日, 中詰め日: 2024/12/12, スライス日: 2025/03/2)

今回の現地発生土砂(砂の多い土砂), 施工条件で製作されたソイルセメントの強度は, 現行の砂防ソイルセメントの設計管理強度(砂防ソイルセメント施工便覧)で規定される「最小管理強度(2.0N/mm^2)」

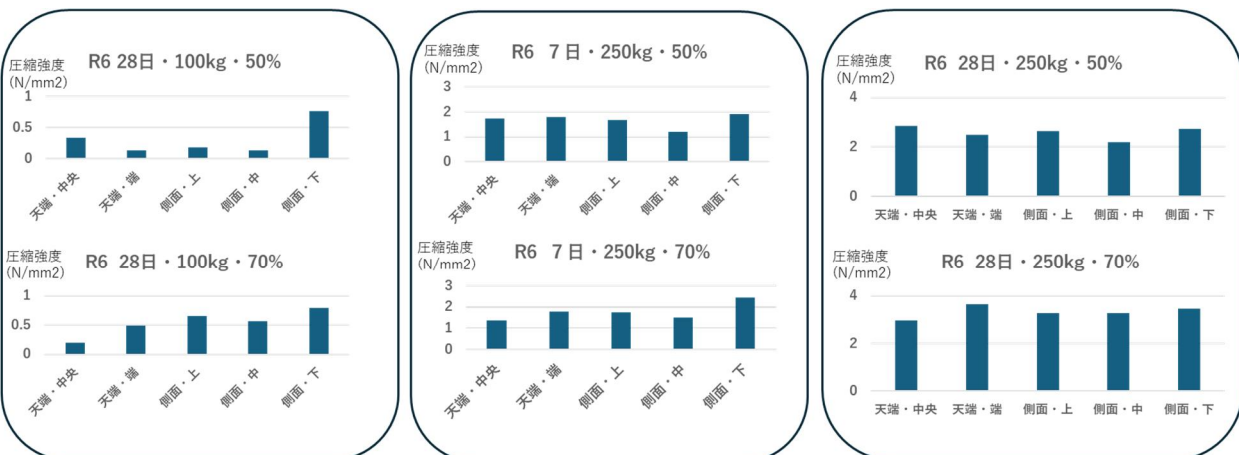


図-11 試験含水比による圧縮強度の比較

に近い性能を有している。ソイルセメント本体は自立でき、トンパックが破損したとしても中詰め材は容易には流出しにくいと想定される。セメント量が 250kg の場合は、トンパックの方が土嚢袋よりもかなり強度が大きい。その主な要因としては以下の二つの事項が考えられる。

① 温度養生効果

トンパック中詰めの場合は、ソイルセメント内部の温度がピークを迎えた後も 60 時間程度維持されるため、温度が比較的高い環境で長時間養生される。土嚢袋中詰めの場合は、熱が外部に逃げやすく、ピーク後すぐに温度が下がってしまうため、水和反応が十分に進みにくい。

② 断熱効果

トンパック中詰めの場合は、外部との熱交換が少ないため、内部の温度が高く維持されやすく水和反応が進みやすい。土嚢袋の場合は、空気との接触面積が大きく、熱が逃げやすいため、温度上昇が限定され、強度発現が遅くなる。

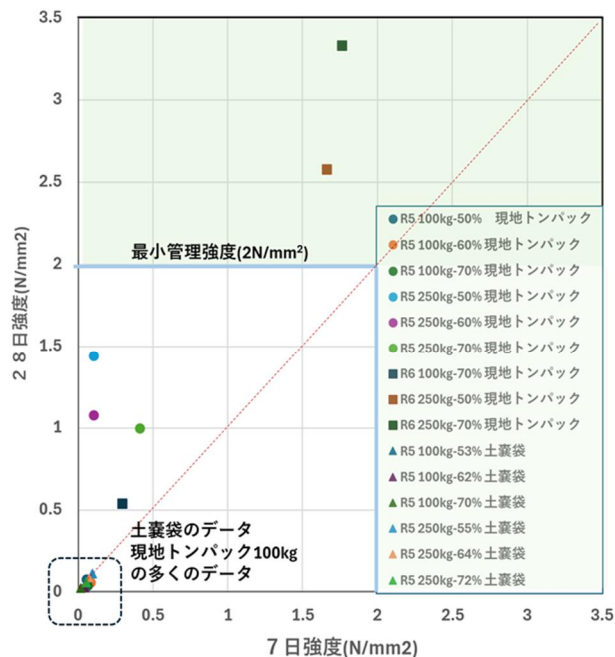


図-12 7日強度と28日強度との関係

10. ソイルセメント中詰めトンパック製作方法及び活用方法

図-13 に、昨年度までの成果も踏まえたソイルセメント中詰めトンパック製作方法を示す。外気温 5℃ 以下の低温下の現場において、7 日強度、28 日強度で対応の強度をもつソイルセメント中詰めトンパックを短時間に製作することができる。ソイルセメント中詰めトンパックを 1 つ製作するのに必要な時間は、最大約 20 分である(2023 年度成果)。同一施工条件(単位セメント量、含水比、養生日数等)で複数個製作する場合は、作業効率化が可能となるため、対応に時間短縮ができる。

図-14 にその活用方法を示す。ソイルセメント中詰めトンパック型枠一体型緊急堤、セルダム開口部緊急閉塞工、さらには、その他、例えば崩壊土砂や落石などの捕捉、河岸侵食軽減などに活用できることが期待される。

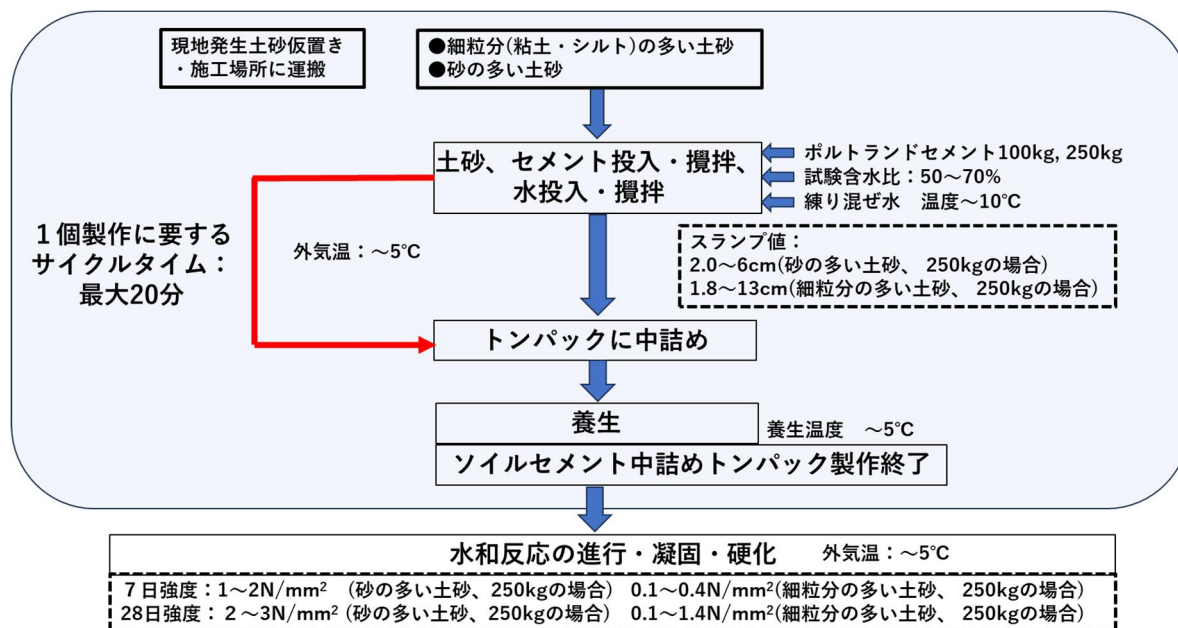


図-13 ソイルセメント中詰めトンパック製作方法

11. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

1. ソイルセメントの施工性(ワーカビリティ)について

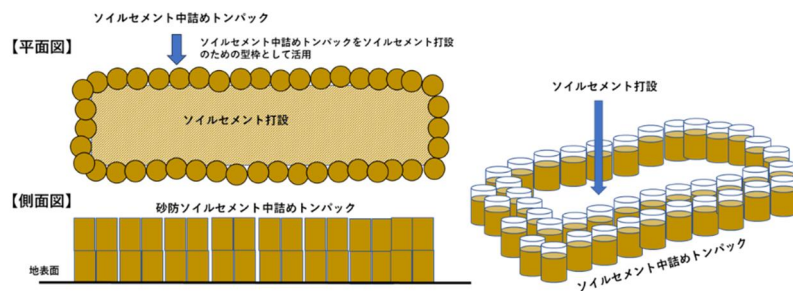
- ・100kg では、砂の多い土砂のスランプ値は 0.7～2.2cm, 細粒分の多い土砂は、1.3～1.8cm

- ・250kg では、砂の多い土砂のスランプ値は 2.0～6cm, 細粒分の多い土砂は、1.8～13cm

- ・全体的に、試験含水比が大きくなると、スランプ値も大きい傾向がある。

- ・2023,2024 年度のソイルセメント配合条件では、スランプ値から判断すると、流動タイプのソイルセメントとして活用することが十分可能である。

①ソイルセメント中詰めトンパック型枠一体型緊急堤



②セルダム開口部緊急閉塞



ソイルセメント中詰めトンパックを、ブロックとともにその補完として積み上げることも可能と思われる

図-14 ソイルセメント中詰めトンパック活用方法(案)

2. ソイルセメントの水和反応の実態

- ・ピーク温度は、100kg の場合は、8℃～9℃程度、250kg の場合は、11℃～12℃程度である。
- ・100kg では、水温ピーク後は、温度が減少し続け、約 40 時間後には 5℃に到達する。
- ・250kg では、水温ピーク後は、約 60 時間ほどの間は大きくは変化せず、養生温度として 11～12℃程度の状態が続いている。それ以降は、温度が低下し、約 60 時間後には 5℃に到達する。
- ・250kg の場合は、100kg の場合よりも、発熱量、水和速度(温度がピーク近傍に達するまでの間)は大きく、特に、累積発熱量ではその違いが顕著である。
- ・250kg では、温度がピークに達してから累積発熱量の値は約 60 時間、維持されている。100kg の場合は、温度がピークに達してからすぐに累積発熱量は減少しており、放熱状態に移行している。

3. ソイルセメントの単位体積重量

- ・250kg で砂の多い土砂の場合は、7 日、28 日材齢いずれも、約 18kN/m³ であり、道路土工擁壁工編で規定される「密なもの」に相当する。
- ・それ以外の材齢 28 日の場合は、「ゆるいもの」に相当する

4. ソイルセメントの強度

- ・7 日強度：1～2 N/mm² (砂の多い土砂,250kg の場合) 0.1～0.4 N/mm²(細粒分の多い土砂,250kg の場合)
- ・28 日強度：2～3 N/mm²(砂の多い土砂,250kg の場合) 0.1～1.4 N/mm²(細粒分の多い土砂,250kg の場合)
- ・試験含水比が増えても(50%→70%),強度はあまり変わらない。
- ・セメント量が 250kg の場合は、トンパックに中詰めした時のほうが、土嚢袋に中詰めした時よりもかなり強度が大きくなっている。その主な理由としては、温度養生効果、断熱効果の違いによるものと思われる。

- ・2024 年度の現地発生土砂(砂の多い土砂),施工条件で製作されたソイルセメントの強度は、現行の砂防ソイルセメントの設計管理強度(砂防ソイルセメント施工便覧)で規定される「最小管理強度(2.0N/mm²)」に近い性能を有している。ソイルセメント本体は自立でき、トンパックが破損したとしても中詰め材は容易には流出しにくいと想定される。

5. 緊急減災時のソイルセメント中詰めトンパック製作方法と活用方法

- ・外気温 5℃以下の低温下の現場において、7 日強度,28 日強度で相応の強度をもつソイルセメント中

詰めトンパックを短時間に製作することができる。ソイルセメント中詰めトンパックを1つ製作するのに必要な時間は、最大約 20 分である。同一施工条件(単位セメント量,含水比,養生日数等)で複数個製作する場合は,作業効率化が可能となるため,相応に時間短縮ができる。

・ソイルセメント中詰めトンパック型枠一体型緊急堤,セルダム開口部緊急閉塞工,さらには,その他,例えば崩壊土砂や落石などの捕捉,河岸侵食軽減などに活用できることが期待される。

12.今後の課題

- ・ソイルセメント中詰めトンパックの実物スケールでの耐衝撃力試験(鉄錘の衝突試験)
- ・弾塑性解析による強度特性の把握(鉄錘の衝撃やトンパックを高さ方向に多段に積んだ時の中詰めソイルセメント内部の応力の分布等)
- ・セルダム開口部の閉塞や緊急導流堤の現地試験施工
- ・ソイルセメント中詰めトンパック制作と緊急減災施設施工のためのマニュアル作成

【参考文献】

一般財団法人砂防・地すべり技術センター(2016): 砂防ソイルセメント施工便覧 平成 28 年度版(改定 2 版)

長野恒平,高橋亜矢子,水山高久(2023): 寒冷地におけるソイルセメント堰堤構造のあり方, 令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集

酒巻克之,秋山祥克,松村和樹,山田孝, 厚井高志,宮木康二(2023): 砂防ソイルセメントの寒冷地冬季施工の検討, 令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について, 論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・ これまでに発表した代表的な論文
- ・ 著書(教科書, 学会妙録, 講演要旨は除く)
- ・ 国際会議, 学会等における発表状況
- ・ 主要雑誌・新聞等への研究成果発表
- ・ 学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・ 研究成果としての事業化, 製品化などの普及状況
- ・ 企業とのタイアップ状況
- ・ 特許など, 知的財産権の取得状況
- ・ 研究成果による受賞, 表彰等

○山田孝、竹原隆博、本間雄介、宮木康二、秋山祥克、武笠秀和(2023): 低温期での泥流などの対策に資するソイルセメント中詰めトンパック開発基礎実験、令和5年度(公社)砂防学会研究発表会概要集

○山田孝、厚井高志、笠井美青、竹原隆博、岩田清徳、本間雄介、宮崎亮直、宮木康二、大岡辰弥、秋山祥克(2024): 低温期での泥流などの対策に資するソイルセメント中詰めトンパック開発基礎実験(Ⅱ)、令和6年度(公社)砂防学会研究発表会概要集

○山田孝、厚井高志、笠井美青、松本 洋光、岩田清徳、本田 浩貴、上原 玲音、宮木康二、大岡辰弥(2025): 低温期での泥流などの対策に資するソイルセメント中詰めトンパック開発基礎実験(Ⅲ)、令和7年度(公社)砂防学会研究発表会概要集

令和4～6年度の研究成果は、2025年夏ごろに砂防学会誌に北海道開発局苫小牧砂防海岸事務所、北海道土砂資源化研究所と連名で原稿を投稿する予定である。

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ, マスメディア, 公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL, 新聞掲載は新聞名, 掲載日等, 公開イベントは実施日, テーマ, 参加者数等を記入下さい。)

⑨表彰, 受賞歴

(単なる研究成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞, 学会等の技術開発賞, 優秀賞等を記入下さい。)

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ, 技術研究開発の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた, 研技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

実務的には、本研究により具体的なソイルセメント配合方法や養生方法などが明らかにされ、また、ソイルセメントの水和反応の定量的な評価についても相応のレベルまで到達できたと考えている。

今後は、ソイルセメント中詰めトンパックがどの程度、泥流に含まれる石礫や流木の衝撃力に耐えることができるのかを明らかにするための実物大野外実験と数値解析による衝撃力解析、ならびに流水に対する侵食抵抗力を明らかにするための解析を進め、それらの外力に対する耐力を見込んだ改良型ソイルセメント中詰めトンパックの製作、施工方法の開発に発展させていきたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等, 砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

3年間の研究ならびに、苫小牧砂防海岸事務所との協議も踏まえ、今後は、ソイルセメント中詰めとパックを活用した樽前山の融雪型火山泥流に対する効果的な緊急堤施工方法、セルダム開口部等の緊急閉塞工法の試験施工につなげられることが重要と考える。その結果をもとに、全国の積雪寒冷地での厳寒期における砂防ソイルセメント施工方法の開発、特に導流堤、護岸工、遊砂地等の緊急減災施設の施工方法の構築に発展させていきたい。