

高炉スラグ高含有固化材の ソイルセメント壁への適用に向けた室内配合試験

富田 菜都美^{*1}・大塚 修平^{*1}・堀井 良浩^{*1}・渡邊 徹^{*1}・柴田 景太^{*2}・松井 秀岳^{*3}

Keywords : soil cement, blast furnace slag, fluidity, material segregation resistance, compressive strength, low permeability

ソイルセメント, 高炉スラグ, 流動性, 材料分離抵抗性, 圧縮強度, 止水性

1. はじめに

ソイルセメント壁は、水、固化材等で構成される懸濁液と原位置土を混合・攪拌して連続壁を築造する工法であり、芯材（H 形鋼）を挿入して主に山留め壁として適用される。固化材には一般的に高炉セメント B 種（以下、B 種と呼称）が使用されるが、ポルトランドセメント（以下、セメントと呼称）に対する高炉スラグの置換率を高炉セメント C 種（以下、C 種と呼称）相当や C 種の上限值以上とすることで、CO₂ 排出量の削減が期待できる。

当社では、脱炭素社会の実現に向けて、環境配慮コンクリート T-eCocrete[®]を開発しており、応用利用としてセメント系固化材を用いて土を固める地盤固化技術への適用を進めている^{1),2)}。既報¹⁾では、室内配合試験により各種地盤改良工法に対する適用可能性を確認した。本報では、C 種を含めた高炉スラグ高含有固化材をソイルセメント壁へ適用するため、流動性、材料分離抵抗性、強度発現性、止水性について B 種との比較検討を行った。強度についてはソイルセメントの品質管理方法構築を目的として長期的な強度発現性も確認した。また、杭基礎としての利用を想定し、別途実験を行う際にソイルセメントの配合設計で必要となるデータを得た。それらの検討結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 評価項目と目標値

ソイルセメント壁は強度や止水性ととも、芯材を

円滑に挿入するための流動性が求められる。一方で、懸濁液の水量を増やすことはブリーディングが生じる原因となるため、芯材挿入性を確保しながらブリーディングを小さく抑える配合を設定する必要がある。本検討では、一般的なソイルセメント壁として要求される性能として表-1 に示す評価項目と目標値を設定した。なお、地盤改良工法においては現場室内強度比（室内配合試験で得られる強度に対して現場で想定される強度の比）を考慮し、室内配合試験上の目標強度を設定することが多いが、本検討ではSMW協会における標準積算資料³⁾をもとに現場室内強度比を 1.0 と仮定して目標強度を設定した。

2.2 固化材

固化材は比較対象として B 種を、検討対象として C 種と、高炉スラグの分量を 80%程度まで高めた高炉スラグ超高含有タイプ¹⁾（以下、C 種超と呼称）を使用した。図-1 に各固化材の B 種に対する材料製造時の CO₂ 排出量の比率を示す。C 種、C 種超の CO₂ 排出量は B 種に対してそれぞれ 65%、24%となっている。なお、C

表-1 試験項目と目標値

Table 1 List of lab. tests and requirements

項目	試験方法	目標値
流動性	テーブルフロー試験 (JIS R 5201:2015に準拠)	TF \geq 150mm (2時間後)
材料分離抵抗性	ブリーディング試験 (JSCE-F 522-2018に準拠)	B率 $<$ 3% (24時間後)
圧縮強度	一軸圧縮試験 (JIS A 1216:2020に準拠)	$q_u \geq 0.5\text{N/mm}^2$ (材齢28日)
止水性	透水試験 (JIS A 1218:2020に準拠)	$k \leq 1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$ (材齢28日)

TF: テーブルフロー値, B率: ブリーディング率, q_u : 一軸圧縮強さ, k : 透水係数

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
*2 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室
*3 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

種超を用いたソイルセメントの強度特性等は既報¹⁾に示す通りであるが、同一条件での固化材種類の違いによる影響を検討するため再度試験を行った。

2.3 試料土

高炉スラグ高含有固化材をソイルセメント壁へ適用するためには、各種地盤における性能を確認することが求められるが、一連の実験を通じて条件を一定とするため、本検討では珪砂 5 号とトククレーをそれぞれ質量比 4 : 1 で混合した砂質土¹⁾を使用した。乾燥密度と含水比は、文献 4) をもとに N 値 30~50 の密な地盤を想定した相対密度 70%を仮定し、砂の最大・最小密度試験の結果から乾燥密度を 1.624 Mg/m³、含水比を 22.8%とした¹⁾。

2.4 配合条件

本検討で用いた懸濁液の配合を表-2 に示す。水は水道水を、添加材は削孔壁の安定等の目的で用いられるベントナイト(クニゲル VI)を使用した。懸濁液の配合は、地盤条件や施工条件に応じて室内配合試験により決定することが基本であるが、これによらない場合の配合例として、設計基準強度 0.5N/mm² を想定した標準的な配合(以下、標準配合と呼称)が各種指針

^{3),5),6)}で設定されている。本検討では、実施工で使用されることが多いSMW協会による砂質土に対する標準配合を用いた B-1、C-1、D-1 を設定した。その他は別途実験で使用する配合検討を目的として、既報¹⁾をもとに単位水量が所定の範囲内に収まり、かつ固化材水比に偏りがないよう、固化材量とセメント量を調整した。

2.5 ソイルセメント作製手順と養生条件

混練にはテーブルミキサーを使用した。ミキサー内で所定量の懸濁液を作製した上で試料土を投入し、ソイルセメントの混練を行った。供試体寸法は一軸圧縮試験で直径 50mm×高さ 100mm、透水試験で直径 50mm×高さ 50mm とし、養生条件は 20℃湿空養生とした。

3. 試験結果

3.1 流動性

テーブルフロー試験は、一部の配合で、試料がテーブル寸法(直径 300 mm)を越えて広がり、テーブルフロー値(以下、TF と呼称)が測定できない恐れがあったため、まず、「シリンダーフロー試験(NEXCO 試験法 313-1999)」を実施し、シリンダーフロー値(以下、CF と呼称)が 150mm 以下となった配合のみテーブルフロー試験を実施した。混練直後と混練 2 時間後における TF、CF を図-2 に示す。配合毎に固化材の種類や配合量が異なるが、その違いによる差は小さく、単位水量が多いほど、TF、CF が増加する結果となった。設定した目標値は芯材を自重で挿入可能な流動性の目安となる値であり^{3),6),7)}、芯材挿入のための作業時間を踏まえた混練 2 時間後においても、全ケースで目標値を満足す

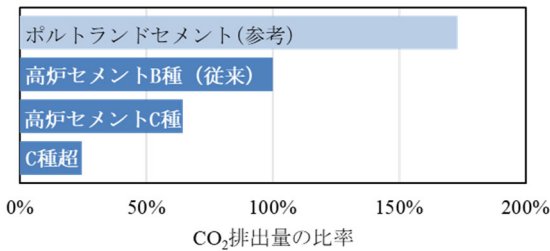


図-1 CO₂排出量の比較
Fig.1 Comparison of CO₂ emissions

表-2 使用した懸濁液の配合
Table 2 Mix proportion of suspensions

配合 No.	目的	固化材種類	試料土1m ³ 当たりの添加量			ソイルセメント1m ³ 当たり			注入率*2 [%]	試験時期			
			固化材 [kg]	水 [kg]	ベントナイト[kg]	固化材 [kg]	水*1 [kg]	固化材水比		フロー試験	ブリーディング試験	一軸圧縮試験	透水試験
B-1	固化材種類の違いによる影響検討	B種	280	560	10	169	562	0.30	65.6	混練直後, 30分, 1時間, 2時間	24時間	3日, 7日, 28日, 56日, 91日	28日
C-1		C種				169	561	0.30	65.8				
D-1		C種超				169	563	0.30	65.3				
B-2	要素試験のための配合検討	B種	210	210	10	164	453	0.36	28.3	混練直後, 2時間	24時間	7日, 28日	—
B-3			150	225	10	117	466	0.25	27.8				
B-4			120	240	10	94	476	0.20	28.3				
C-2		C種	200	200	10	157	449	0.35	27.1				
C-3			150	225	10	117	466	0.25	27.8				
C-4			100	200	10	81	461	0.18	23.8				
C-5			100	180	10	82	453	0.18	21.8				
D-2		C種超	100	120	10	87	425	0.20	15.6				
D-3			70	126	10	61	431	0.14	15.2				
D-4			50	90	10	45	415	0.11	11.0				

*1: 試料土由来の水量を含む, *2: 試料土に対する懸濁液の体積百分率

ることを確認した。なお、流動性が高く、テーブルフロー試験の実施が困難であった $CF \geq 150\text{mm}$ の配合も判定基準を満足するものと判断した。

B-1, C-1, D-1 は実施工で使用されることが多い SMW 協会の標準配合をもとに設定した配合であり、芯材挿入を円滑に行う目的で多量の懸濁液を注入することによりソイルセメントの単位水量を高めているため、B-1, C-1, D-1 は目標値を大きく上回る結果となった。

混練直後と混練 2 時間後の結果を比較すると、混練直後の TF, CF はそれぞれ、ほぼ同一の傾向線上に分布しているが、混練 2 時間後においては TF が 200mm 程度を示す配合の単位水量は B 種で約 470kg に対して、C 種超で約 430kg であり、C 種超はより少ない水量で B 種と同程度の流動性を保持している。B-1, C-1, D-1 について、CF の経時変化を図-3 に示す。置換率が高いほど CF は緩やかに減少し、混練 2 時間後の比較では B 種に対して流動性が向上していることから、C 種及び C 種超は B 種に対して芯材挿入性の面では有利であると想定される。ただし、置換率を高めるとソイルセメントの粘性が増す可能性があるため、掘削や攪拌に及ぼす影響について施工試験で確認する必要がある。

3.2 材料分離抵抗性

混練 24 時間後のブリーディング試験結果を図-4 に示す。いずれの固化材についても単位水量が多いほど、ブリーディング率（以下、B 率と呼称）が概ね増加する傾向を示した。標準配合を除くケースでは目標値（3%未満）を満足する結果となったが、B-1, C-1, D-1 は B 率が約 3%~8%以上となった。C 種超は他の 2 種と比較して B 率が大きく、D-1 は目標値を大きく超える結果となった。C 種超は高炉スラグを多量に含んでいるため、ソイルセメントが固化し始めるまでに時間を要したことが B 率増加の要因の 1 つであると考えられる。C 種超を用いたソイルセメントを実施適用する場合には、芯材挿入性を確保できる範囲内で、可能な限り懸濁液の水量を減らす等、留意が必要である。なお、B-1 についても目標値を超える B 率となっており、芯材とソイルセメント間の付着・支圧抵抗の影響が懸念される点については、今後、載荷試験にて検証を行う予定である。

3.3 圧縮強度

B-1, C-1, D-1 について、一軸圧縮強さ q_u と材齢の関係を図-5 に示す。材齢 28 日における q_u は固化材種類によらず目標値（ 0.5N/mm^2 ）以上であることを確認した。また、材齢 3 日では固化材種類の違いによる顕著な差は生じていないが、材齢 7 日以降では置換率が高

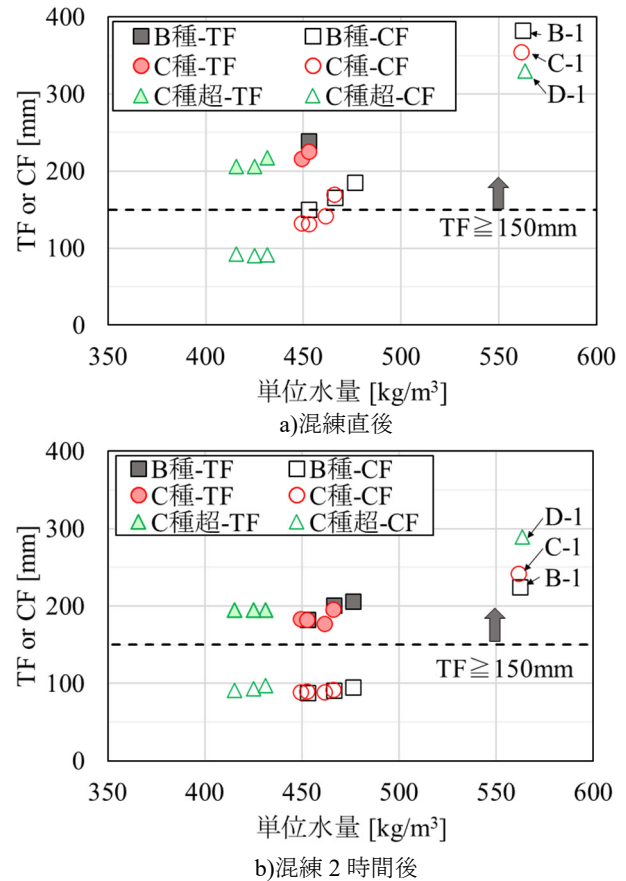


図-2 フロー値と単位水量の関係

Fig.2 Relationship between flow value and unit water content

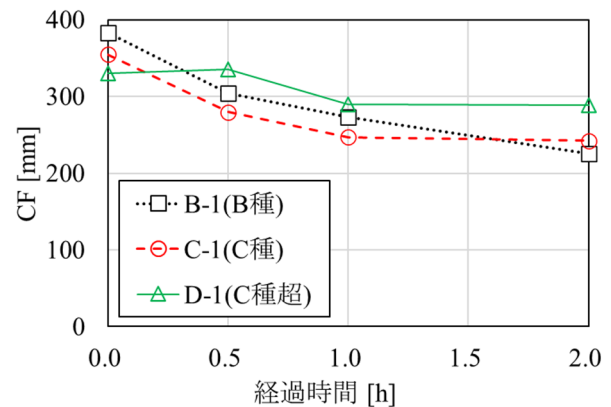


図-3 CF の経時変化

Fig.3 Temporal change of cylinder flow value "CF"

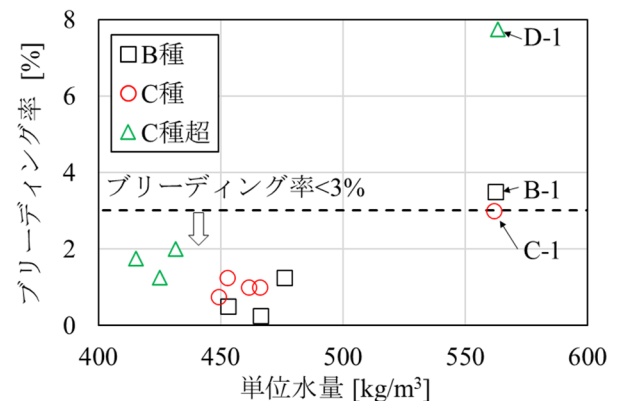


図-4 ブリーディング率と単位水量の関係

Fig.4 Relationship between bleeding rate and unit water

いほど、 q_u は大きな値となった。多量の高炉スラグをセメントの代替として用いた場合、一般的に初期強度低下が懸念されるが、本検討では C 種及び C 種超を用いたソイルセメントは、いずれの材齢においても B 種と同等以上の強度を示した。既報の配合試験⁹⁾や既往文献^{8),9)}においても、高炉スラグ高含有固化材を用いた場合に B 種と比較して強度が大きくなる傾向が示されており、本試験においても同様の結果となった。ただし、粘性土では強度が低下したケースも報告されており¹⁰⁾、試料土の粒度構成等の様々な要因が一軸圧縮強さと固化材水比や置換率との関係に対して複雑に影響を及ぼしていると考えられる。

図-5 に材齢 28 日に対する各材齢の強度比を併記する。置換率の増加により材齢 56 日以降の強度比は若干向上し、C 種及び C 種超の強度は材齢 91 日においても増加傾向が続いていることが確認できる。ソイルセメントの品質管理は材齢 28 日の一軸圧縮強さによる方法が一般的であるが、長期強度で判定を行うことで、高炉スラグ高含有固化材の特性を有効利用することができる。

別途実験で使用するソイルセメントの配合設計を行うため、標準配合を除くデータについて、材齢 7 日及び 28 日の一軸圧縮強さ q_u と固化材水比 C/W_T (ソイルセメント 1m^3 当たりの固化材・水量比、試料土由来の水量を含む) の関係を図-6 に整理する。 q_u と C/W_T の間には直線の相関性が認められ、図中に示す近似式より、水量（もしくは固化材量）が決まれば目標強度に応じて必要な固化材量（もしくは水量）を求めることができる。配合設計では、まず、材料分離を極力防ぐためフロー試験結果をもとに単位水量を最小とし、 q_u と C/W_T の関係から目標強度に応じた配合を設定することとした。なお、本検討では単位水量の範囲が限定的であり、その大小によっては異なる傾向を示す点に留意が必要である。

3.4 止水性

B-1, C-1, D-1 について、材齢 28 日における透水試験結果を表-3 に示す。置換率が高いほど、透水係数が小さく、止水性が向上している。山留め壁として使用する場合のソイルセメント壁の一般的な透水係数は、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度である⁹⁾。C 種及び C 種超を用いたソイルセメントは十分な止水性を有しているといえる。

4. まとめ

本研究で得られた高炉スラグ高含有固化材を用いたソイルセメントの特性を以下に示す。

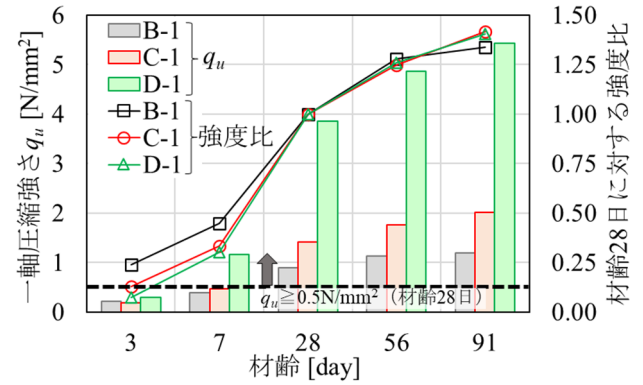
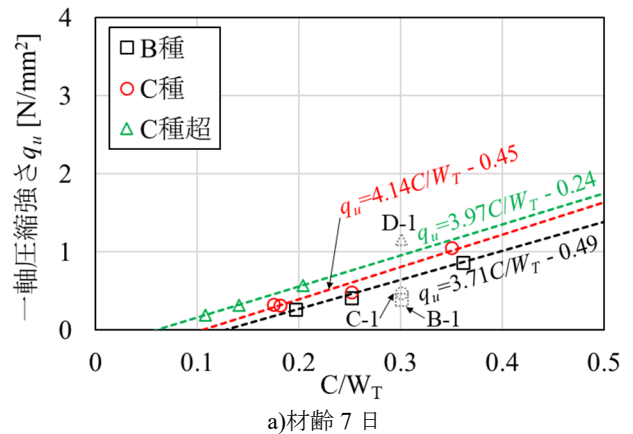
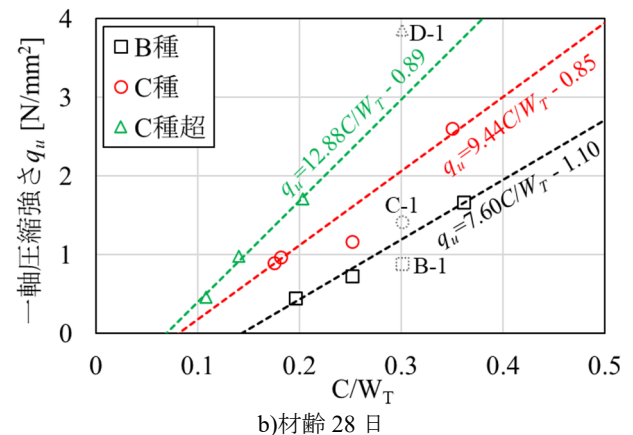


図-5 一軸圧縮強さと材齢の関係

Fig.5 Relationship between unconfined compressive strength and material age



a) 材齢 7 日



b) 材齢 28 日

図-6 一軸圧縮強さと C/W_T の関係

Fig.6 Relationship between unconfined compressive strength and C/W_T

表-3 透水試験結果

Table 3 Result of Permeability test

配合No.	固化材種類	透水係数(m/s)
B-1	B種	1.23×10^{-8}
C-1	C種	7.89×10^{-9}
D-1	C種超	1.30×10^{-11}

- 置換率が高いほど、経時変化による流動性の低下が緩やかであり、芯材挿入性が向上する。ただし、C 種超を用いたソイルセメントはブリーディングが生じやすく、B 種よりも懸濁液の水量を減らす

等の対応が必要である。

- 2) 砂質土での検討のみであるが、強度は B 種と比べて同等以上であった。
- 3) 透水係数は B 種よりも小さな値を示し、十分な止水性を有している。
- 4) B 種と同様に目標性能に応じた配合設計が可能である。
- 5) 材齢 91 日においても強度の増進が続いており、長期材齢の一軸圧縮強さで品質管理を行うことで、その特性を有効利用できる。

本検討結果をもとに要素試験で用いるソイルセメント配合を計画した。今後、模型実験、現場施工試験・載荷試験を実施し、多様な地盤への適用性やソイルセメント壁の施工性、支持性能を確認する予定である。

参考文献

- 1) 松井秀岳，青木智幸，大脇英司，藤原斉郁，池上浩樹：CO₂ 排出量を削減する「環境配慮地盤固化技術」の開発，大成建設技術センター報，第 55 号，No.8，2022.
- 2) 岩田暁洋，渡邊徹，濱健太郎，大塚修平，一色裕二：低炭素型固化材による改良地盤の品質調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，2024，投稿中.
- 3) SMW 協会：SMW 連続壁標準積算資料 [設計・施工・積算編]，2002.
- 4) 地盤工学会：N 値と $c \cdot \phi$ の活用法，p.129，1998.
- 5) 日本材料学会：ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版)，p.68，2002.
- 6) TRD 工法協会：TRD 工法技術・積算マニュアル鉛直壁用，2022.
- 7) 宮田勝利，竹内博幸，寺内康則，五十嵐治人，金澤勝治：ソイルセメント本設杭工法の開発 その 3 ソイルセメント品質—流動性・施工精度，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.675-676，2003.
- 8) 松長龍之介，實松俊明，依田和久：高炉スラグ高含有セメントを用いたソイルセメントの材料特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.379-380，2022.
- 9) 河野貴穂，上田昌弘，津川澄夫：高炉スラグ高含有セメントのソイルセメント壁への適用，基礎工，Vol.45，No.8，pp.54-56，2022.8.
- 10) 宮本勇貴，河野貴穂，津川澄夫，佐藤英二，米澤敏男，玉木伸二，木之下光男：高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性（その 5），第 46 回地盤工学研究発表会，pp.657-658，2011.