

CO₂ 排出量を削減する「環境配慮地盤固化技術」の開発

地中連続壁工法を対象とした室内配合検討とセメント安定処理工法を対象とした試験練り

松井 秀岳*¹・青木 智幸*²・大脇 英司*³・藤原 斉郁*¹・池上 浩樹*¹

Keywords : ground improvement, carbon neutrality, low carbon technology, blast furnace slag, diaphragm wall, soil cement stabilization
地盤改良, カーボンニュートラル, 低炭素技術, 高炉スラグ, 地中連続壁, セメント安定処理

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、建設業においても資機材や設計・施工・運用の各段階でCO₂排出量削減の取組みが進む中、コンクリート分野では既に広く普及する高炉セメントよりもさらに環境に配慮した結合材に関する検討・実用化が進められている。例えば、高炉スラグ微粉末の硬化を促進する刺激材を工夫し、ポルトランドセメントの使用量をゼロとした結合材でCO₂排出量を大幅に削減したコンクリート¹⁾が実用段階にあるほか、排気ガス等から回収したCO₂を固定化したカーボンリサイクル材料(CaCO₃等)を含む結合材で、製造過程のCO₂収支をゼロもしくはマイナスにするコンクリート^{1),2)}も開発されている。コンクリートと同じくセメントを主体とする固化材を使用してきた地盤改良分野においても、上記技術の応用によるCO₂排出量の削減が期待される。

著者らは、地盤改良で使用されるポルトランドセメントや高炉セメントB種等の「固化材」を上記の「結合材」と置換することを基本方針とする環境配慮地盤固化技術の開発を進めている。結合材の地盤改良への応用利用にあたっては、工法ごとに異なる強度・流動性などの要求性能への対応可否や、多様な土に対する強度発現性など、コンクリートでは検討されない地盤改良特有の各種課題に対する確認・検証を行い、適用可能性を見極める必要がある。本報では各種地盤改良工法への応用検討の一例として、地中連続壁工法を対象とした室内配合検討とセメント安定処理工法を対象とした試験練りの結果を示し、従来の固化材との比較を通して結合材の適用性を報告する。

2. 使用材料

2.1 結合材

本検討に使用した結合材は、いずれも高炉スラグ微粉末を主体とする粉体で、刺激材の工夫でセメントを不要とした「セメント・ゼロ型」、セメント・ゼロ型の構成材料の一部を高炉セメントに置換し、セメントを用いながら更にCO₂排出量を削減した「CO₂抑制型」、CO₂排出量が試算上ゼロとなる量のカーボンリサイクル材料^{注1)}をセメント・ゼロ型に混合した「カーボンリサイクル型」の3種類である。図-1に、高炉セメントB種の製造時CO₂排出量を100%とした場合のCO₂排出割合の試算結果を示す。普通セメント、高炉B、結合材の順に高炉スラグ量が増え、セメント・ゼロ型およびCO₂抑制型では高炉Bに対して7割程度CO₂排出量を削減できる。カーボンリサイクル型では、カーボンリサイクル材料の混合によって総CO₂排出量をゼロにできるほか、混合量をさらに増やすことでCO₂収支をマイナスとする配合も実現可能である。以降本報では、普通セメント・高炉セメントB種を総じて「固化材」、上記3種類の粉体を総じて「結合材」と称する。

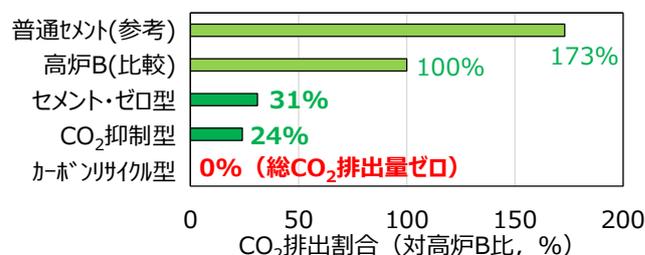


図-1 固化材・結合材製造時のCO₂排出量の比較
Fig.1 Comparison of CO₂ emissions in manufacturing of cement based solidifying materials and low carbon binders

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室
*2 技術センター 社会基盤技術研究部
*3 技術センター T-eConcrete実装プロジェクトチーム

2.2 改良対象土

多様な土に対する結合材の適用性確認が重要な課題であることは先に述べた通りであるが、本検討では固化材を結合材に置換した場合の改良土の性状変化や要求性能達成可否をまず確認することとし、使用する改良対象土は市販の珪砂5号(竹折鉱業所)とトチクレ(大竹工業)を乾燥質量比で4:1に混合^{注2)}した砂質土のみとした(図-2参照)。配合検討では、単位体積あたりの質量、即ち、乾燥密度と含水比を定める必要があるが、ここでは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(図-2に併記)から乾燥密度を1.624Mg/m³に定め、含水比には同条件の飽和含水比22.8%を採用した。

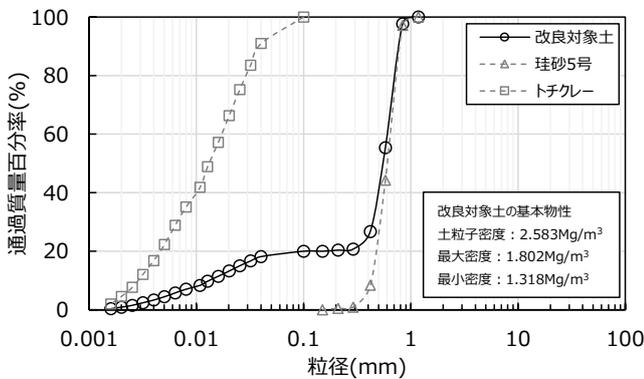


図-2 改良対象土の粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of artificially mixed soil used for laboratory mixing test

3. 地中連続壁工法の配合検討

3.1 概要

地中連続壁工法は、主に都市部等の狭隘な施工条件において地下構造物を構築する際の土留め構造に多用される汎用技術である。ここでは多数ある工法のなかからソイルセメント地中連続壁に分類されるSMW工法を選定し、結合材を用いた配合検討を通して同工法が定める要求性能の達成可否を検証した。

SMW工法では、固化材、ベントナイト、水(および混和剤)で構成される懸濁液と改良対象土を混合した「混合土」の物性が、使用目的に応じた強度等の要求性能と芯材挿入に必要な流動性等の施工性をともに満足する必要がある。ここでは同工法の一般的な要求性能³⁾として、表-1に示す評価項目と各目標値を定め、結合材の種類と懸濁液配合をパラメータとした配合検討を行い、混合土の物性を確認することによって結合材の適用性を検証した。

表-1 SMW工法を対象とした配合検討の評価項目

Table 1 Requirements of mixed soil properties in laboratory mixing test for soil mixing wall method

評価項目	試験規格*	目標値(測定タイミング)
テーブルフロー値	JIS R 5201:2015	> 150 mm (4時間)
ブリーディング率	JSCE-F 522-2018	< 3% (24時間)
一軸圧縮強さ	JIS A 1216:2020	< 200 kN/m ² (3日) > 1,000 kN/m ² (28日)

* 混合土の作製・養生・試験は、全て20℃環境で実施

表-2に本検討に用いた懸濁液配合の一覧を示す。配合検討ではまず、比較用の高炉セメントB種および3種の結合材について、それぞれ同表上段に示す配合の混合土を作製し、測定されたテーブルフロー値・ブリーディング率から、これら未固結性状の目標値を満足する単位水量の範囲を確認した。次に一軸圧縮試験の結果から目標強度の達成に必要な固化材・結合材の量を推測し、同表下段に示す各添加量を定めた。最後に、決定した固化材・結合材の添加量と許容単位水量の上限・中間・下限の水量で決まる3配合(表-2下段)で混合土を作製し、表-1に示す要求性能を全て満足する配合の存否を確認した。なお、孔壁の崩壊防止等の目的で配合されるベントナイトの種類や量については、検討の煩雑化を避けるために今回は検討パラメータとはせず、全ての配合で共通の製品(TB-250, 立花マテリアル)を添加量10kg/m³で使用した。

表-2 検討に用いた懸濁液配合の一覧(対象土1m³あたり)

Table 2 Mix proportion of suspensions mixed for 1 m³ soil

固化材・結合材	数量	固化材 C or 結合材 B (kg)	W/C or W/B (%)	ベントナイト (kg)
高炉 B	6	240,280,320	100,200	10 (共通)
(計9ケース)	3	100	120,175,230	
セメント・セロ	9	100,250,300	50,100,150	
(計12ケース)	3	70	70,190,335	
CO ₂ 抑制	9	100,250,300	50,100,150	
(計12ケース)	3	50	90,215,365	
カーボンリサイクル	9	100,250,300	50,100,150	
(計12ケース)	3	70	70,160,265	

3.2 配合検討結果

3.2.1 混合土の作製

写真-1に改良対象土、懸濁液、混合土の各作製状況を示す。作製には従来の配合検討で用いるテーブルミキサーを使用し、1) 砂質土に水を添加・混合して改良

対象土を作製する, 2)構成材料をプレミックスした結合材と水・ベントナイトを混合して懸濁液を作製する, 3)改良対象土と懸濁液を混合する, という手順で混合土を作製した。ここでは結合材特有の事象等は確認されず, 従来と同様の混合手順や攪拌時間で結合材を用いた均一な混合土を作製することができた。



(a) 改良対象土



(b) 懸濁液



(c) 混合土

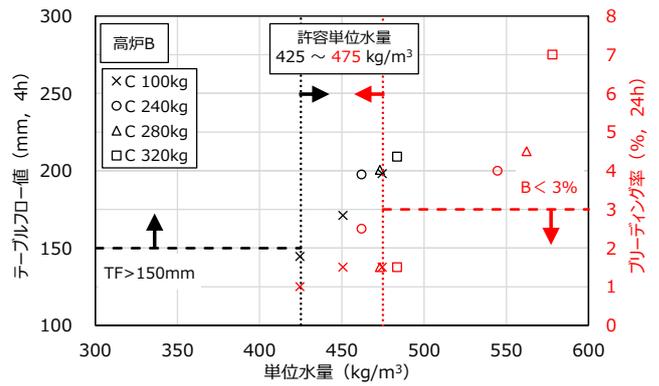
写真-1 混合土の作製過程

Photo.1 Manufacturing process of mixed soil

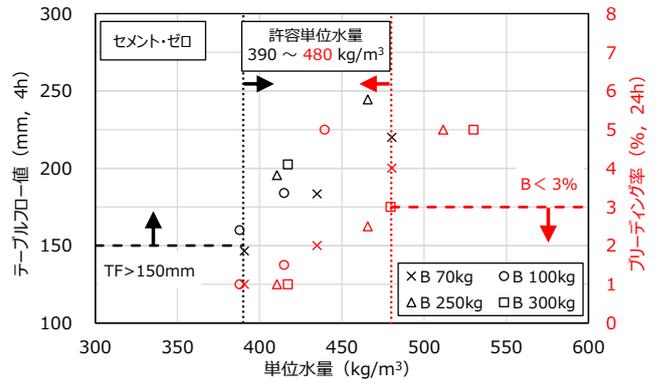
3.2.2 未固結性状

図-3 に未固結性状であるテーブルフロー値・ブリーディング率を混合土の単位水量で整理した結果を示す。両物性値は単位水量が多いほど増加する関係にあり, この傾向は固化材と各結合材で共通する結果であった。また, ここでは追って確認した表-2 下段の配合も含めて広範な固化材・結合材添加量の結果を図示しているが, テーブルフロー値・ブリーディング率と単位水量の関係はいずれの図においても添加量によらずほぼ同一の傾向線上に分布する結果となった。即ち, 固化材・結合材に共通して未固結性状はほぼ単位水量のみで決定されるため, 単位水量をテーブルフロー値から定まる下限値とブリーディング率から定まる上限値で特定される許容範囲内に収めることで, 目標の未固結

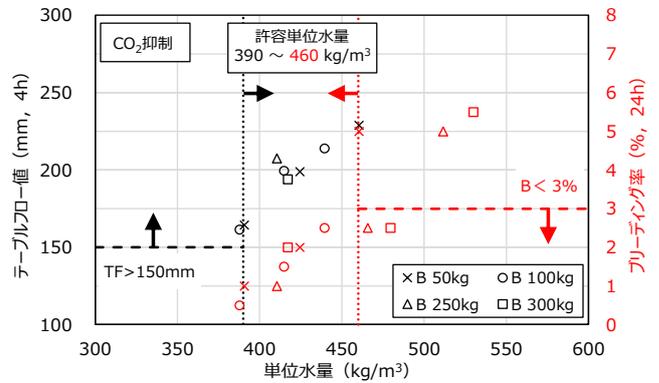
性状を満足できることがわかった。



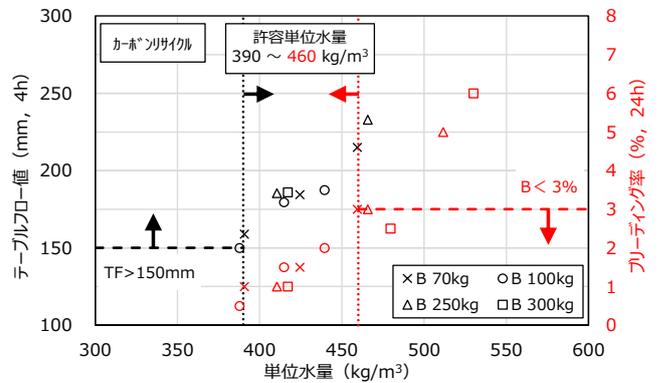
(a) 高炉セメント B 種 (比較対象)



(b) セメント・ゼロ



(c) CO₂ 抑制



(d) カーボンリサイクル

図-3 未固結性状と単位水量の関係

Fig.3 Relationship between uncured material properties of mixed soil and unit water content

3.2.3 強度発現性

図-4, 図-5 に材齢 3 日, 28 日の一軸圧縮試験の結果を示す。固化材・結合材に共通して添加量が多いほど強度が高くなる傾向にあり, 同一の添加量では単位水量が多くなるほど強度が低下する結果となった。また, 単位水量の増加による強度低下量は添加量が多いほど顕著であった。次に, 固化材・結合材の強度水準について, 例えば添加量 300 kg/m³・単位水量 475 kg/m³ という共通の条件で比較した場合 (図中の赤字×), いずれ

も結果の内挿による評価ではあるが, 材齢 3 日では顕著な差が無い一方, 材齢 28 日ではセメント・ゼロ型および CO₂ 抑制型で強度が高く, 次いでカーボンリサイクル型の順となっており, 比較対象の高炉セメント B 種を用いた配合よりも結合材ケースで高い強度が得られた。一般的に改良材に含まれる高炉スラグの量が増えるほど, 特に材齢初期の強度発現性が低下することが知られており, 今回高炉セメント B 種よりも多くの高炉スラグを含む各結合材で高い強度が確認された理

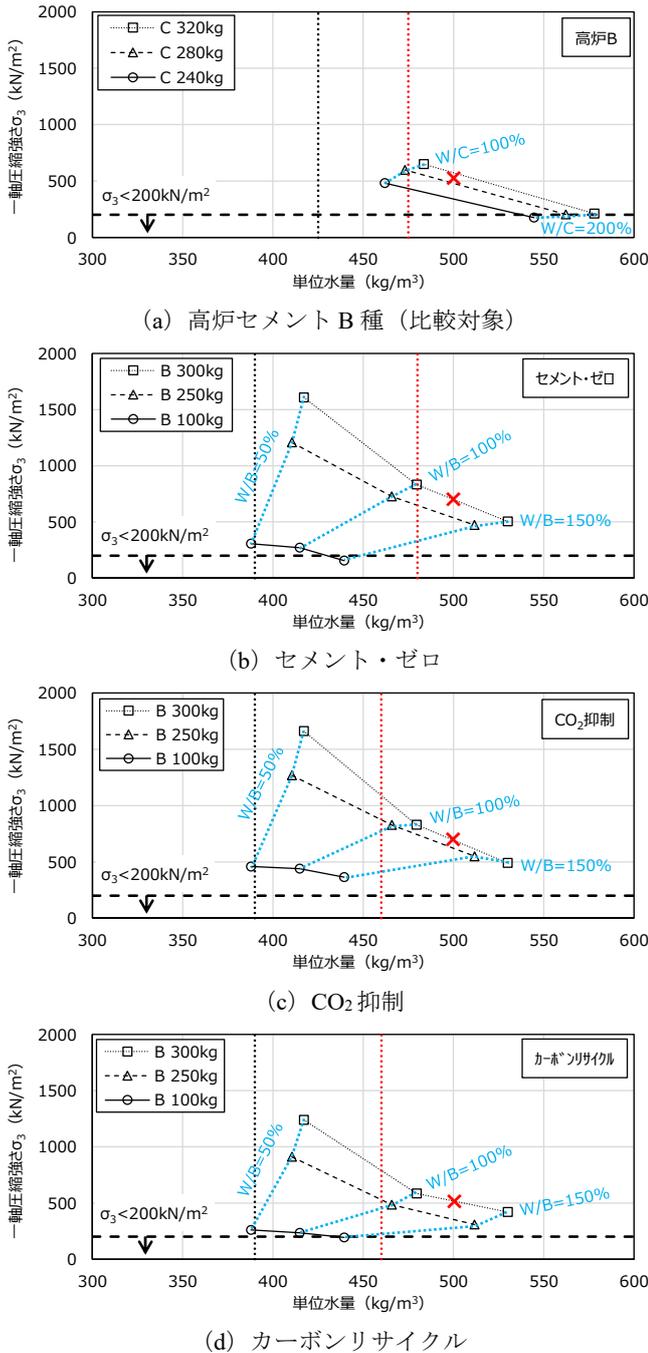


図-4 材齢 3 日の一軸圧縮強さと単位水量の関係
Fig.4 Relationship between unconfined compressive strength of mixed soil after 3 days of curing and unit water content

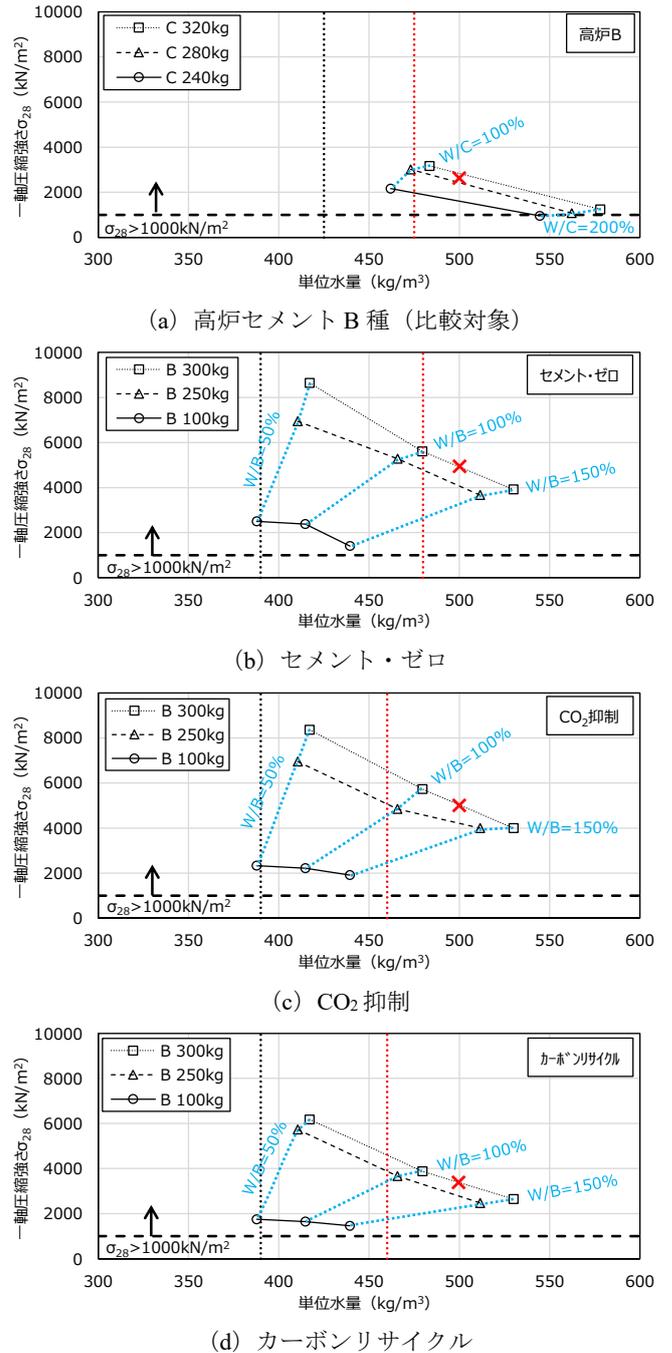


図-5 材齢 28 日の一軸圧縮強さと単位水量の関係
Fig.5 Relationship between unconfined compressive strength of mixed soil after 28 days of curing and unit water content

由の特定は今後の課題であるが、いずれにしても SMW 工法を想定した結合材配合において十分な強度発現性があることを確認することができた。

次に、図-4、図-5 において各材齢の目標強度を達成する固化材・結合材量を推測する。セメント・ゼロ型およびカーボンリサイクル型については、添加量 100 kg/m³ で材齢 28 日の目標強度（下限値）を満足している一方、材齢 3 日の目標強度（上限値）をわずかに超過する結果となったため、添加量を減らした 70 kg/m³ で強度を確認することとした。また CO₂ 抑制型については、材齢 3 日の強度がより高い水準であったため、さらに添加量を減らした 50 kg/m³ を強度確認配合に選定した。なお高炉セメント B 種については、未固結性状を満足する単位水量で得られた強度試験結果が少なく、また強度水準も高いために適切な添加量の推測が困難であったが、結合材配合に比べて強度が劣る点を考慮して、便宜的に添加量 100 kg/m³ を選定した。

3.2.4 要求性能を満足する配合の特定

上記のように選定した固化材・結合材添加量で、未固結性状を満足する単位水量の上限・中間・下限の水量で決まる 3 配合（表-2 下段）をそれぞれ決定し、再度混合土を作製して未固結性状および強度の目標性能達成可否を確認した。なおこれらのケースで確認された未固結性状は、先だって図-3 に併記した通りであり、ここでは目標強度の達成可否について考察する。

図-6 に上記の配合における材齢 3 日、28 日の一軸圧縮試験の結果を示す。同図に示す通り、セメント・ゼロ型およびカーボンリサイクル型では、選定した添加量 70 kg/m³ において、特定の単位水量範囲で材齢 3 日および 28 日の目標強度をとともに満足できることが確認された。CO₂ 抑制型および比較対象の高炉セメント B 種では、それぞれ選択した添加量において材齢 3 日の目標強度を満足した一方で、材齢 28 日の強度が目標値に届かず、今回の検討では要求性能を満足する配合を直接的に特定するには至らなかった。ただし、これらのケースでは引き続き添加量を調整することで要求性能を満足する配合が特定できる可能性を残すほか、本検討では使用を控えた遅延剤等の混和剤によって混合土性状を調整することで、要求性能を満足する配合を特定できるものと考えられる。いずれにしても今回の配合検討では結合材特有の課題は確認されず、従来の固化材と同様の手順で混合土が製造できること、単位水量・添加量の調整によって要求性能を満足する配合を特定できることが明らかとなり、SMW 工法に対する結合材の適用性を確認することができた。

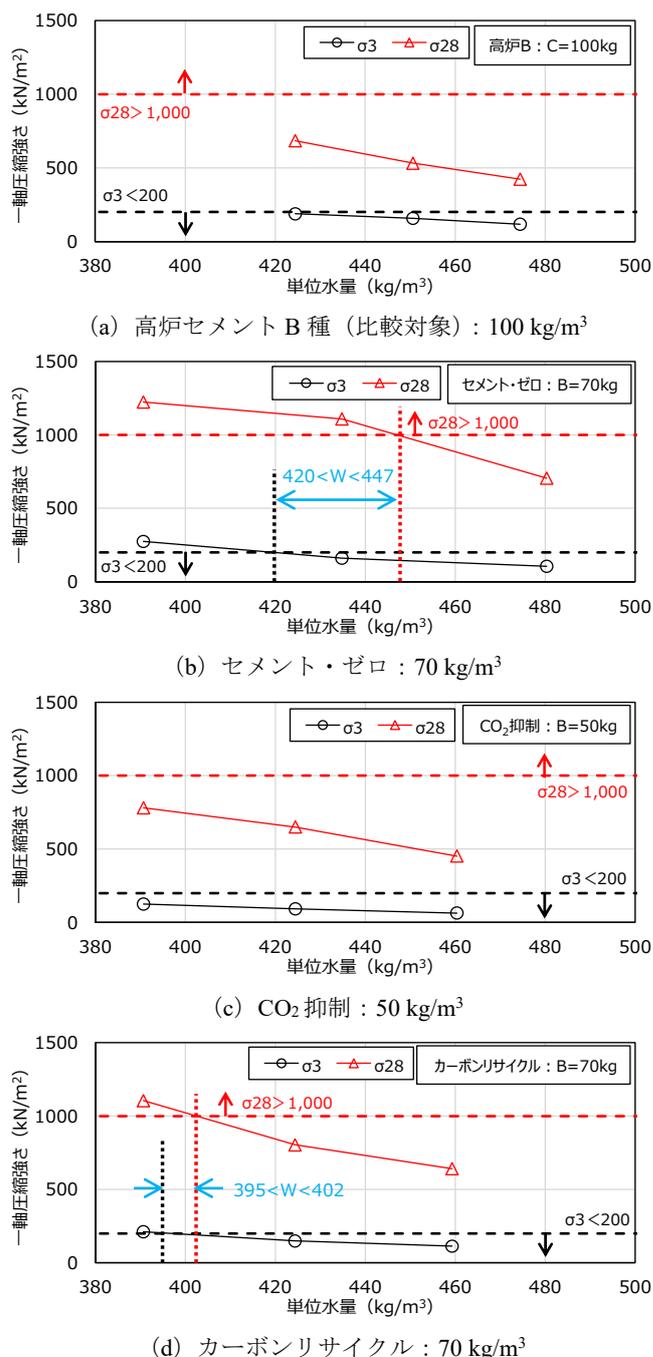


図-6 材齢 3 日・28 日の一軸圧縮強さと単位水量の関係
Fig.6 Relationship between unconfined compressive strength of mixed soil after 3 and 28 days of curing and unit water content

4. セメント安定処理工法の試験練り

4.1 概要

セメント安定処理工法は、土質材料に固化材を添加・混合したのち、締固めを行うことで強度を得る地盤改良工法であり、そのままでは締固めに適さない高含水土の改良や、未処理よりも高い強度を期待する埋戻しや盛土の造成等で多用される汎用技術である。

前述した地中連続壁工法等では、水と混合したグラ

ウトの状態に固化材を土質材料に添加・混合する一方、セメント安定処理工法では固化材を粉体のまま土質材料に添加・混合することが多く、結合材の知見が蓄積されているコンクリート等と比較しても相対的に混合物に含まれる水量が少ないといった相違点がある。そのため結合材の応用利用にあたっては、粉体のまま添加した場合に従来の固化材と同様の強度発現性が見込めるかといった、工法の成立性をまず確認する必要があると考えた。ここでは、固化材および各結合材の添加量を1水準に統一してセメント安定処理土を作製する試験練りを行い、処理土の作製状況や強度を確認することで、結合材を用いたセメント安定処理工法の成立性を検証した。

表-3に本検討の配合一覧を示す。試験練りには2.2節に示した砂質土を地中連続壁の配合検討と同様に乾燥密度 1.624 Mg/m³の設定で使用した。ただし、含水比については自然含水比を想定した 18.0%に調整して使用した。砂質土に対する固化材・結合材の添加率（乾燥質量比）は、 $100/1,624 \approx 6.16\%$ である。

表-3 検討配合の一覧（対象土 1 m³あたり）
Table 3 Addition amount mixed for 1 m³ soil

固化材・結合材	数量	固化材 C or 結合材 B (kg)
高炉 B	1	100 (共通)
セメント・セロ	1	
CO ₂ 抑制	1	
カーボンリサイクル	1	

4.2 処理土の作製

写真-2に処理土の作製状況を示す。処理土の作製には前記した配合検討と同様に従来の配合検討で用いるテーブルミキサーを使用し、砂質土に水を添加・混合して作製した改良対象土に、固化材もしくは構成材料をプレミックスした結合材を粉体のまま添加・混合する手順で処理土を作製した。ここでも結合材特有の事象等は確認されず、従来と同様の混合手順や攪拌時間で結合材を用いた処理土を作製することができた。

作製した処理土は、JGS 0811-2020「安定処理土の突固めによる供試体作製方法」を参照し、所定の密度となるように処理土質量を調整してφ50 mm×H100 mmの円筒モールドに突固めた。ここで供試体の密度は、安定処理土 1 m³に含まれる土試料の質量が、固化材・結合材混合後も変化しない（固化材・結合材の添加量 100 kg/m³が単純に加わる）条件として、乾燥密度 1.724 Mg/m³、湿潤密度 2.016 Mg/m³に統一した。



(a) 含水比調整後の土試料 (b) 安定処理土

写真-2 安定処理土の作製過程

Photo.2 Manufacturing process of stabilized soil

4.3 強度発現性

図-7に材齢7日、28日の一軸圧縮試験の結果を示す。いずれの材齢においても結合材配合で高い強度が得られた点は前述したSMW工法の配合検討で得られた結果と共通しており、結合材配合においても十分な強度発現性を確認することができた。また同図では各ケース・各材齢で得られた3供試体の強度を平均して図示しているが、3供試体間での強度や密度のばらつき程度についても固化材と各結合材で差異はなく、粉体添加の形態をとるセメント安定処理工法においても結合材を適用できる可能性が示されたものと考えられる。

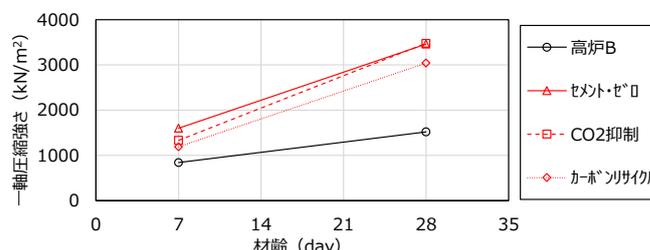


図-7 材齢7日・28日の安定処理土の一軸圧縮強度

Fig.7 Unconfined compressive strength of stabilized soil after 7 and 28 days of curing

5. まとめ

地盤改良工事におけるCO₂排出量の削減を念頭に、コンクリート分野で実用化が進む環境配慮型結合材の地盤改良工法への応用可能性を検証した。応用検討の一例として報告した地中連続壁工法を対象とした室内配合検討およびセメント安定処理工法を対象とした試験練りでは、固化材と同様の手順で結合材を用いた混合土・処理土が作製できることが確認でき、従来の固化材と同様の結合材の取り扱い性を確認することができた。また地中連続壁工法の配合検討では、混合土の未固結性状や強度についてSMW工法の一般的な要求性能を満足する結合材配合を特定することができ、地中

連続壁工法に対する結合材の適用性を確認することができた。さらに、セメント安定処理工法の試験練りにおいても従来の固化材と遜色ない強度発現性が確認され、粉体添加の形態をとる地盤改良工法に対しても結合材を適用できる見通しが得られた。

今後、両工法において実機を用いた現場試験施工を経て実工事への早期展開を目指すほか、多様な土に対する結合材の適用性や結合材を用いた改良土の耐久性等についても、並行して知見の蓄積を進める予定である。今回報告した両工法は数多くある地盤改良工法の一部に過ぎず、結合材の応用によって地盤改良工事における CO₂ 排出量を削減できる余地はさらに多くあるものと考えられる。引き続き各種地盤改良工法への結合材の応用検討を進め、カーボンニュートラル実現に貢献していきたい。

注

- 注1) 温室効果ガスの主要な成分である CO₂ を炭素資源として回収し、炭酸化合物として再利用した材料。
注2) 実務で頻繁に遭遇する砂質土を使用することとし、地中連続壁の工法資料³⁾に記載された砂質土の適用範囲「細粒分割合 20%以上」を参照して混合割合を決定した。

参考文献

- 1) 大脇英司：高炉スラグ微粉末を利用した環境配慮コンクリートの炭酸ガス排出抑制から炭素の有効利用への進化、コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.819-826, 2021.
- 2) 大脇英司, 荻野正貴：カーボンリサイクル材料を用いてカーボンネガティブを実現した T-eConcrete®/Carbon-Recycle の開発, セメント・コンクリート, No.900, pp.70-75, 2022.
- 3) 地盤工学会：地中連続壁工法, 地盤工学・実務シリーズ 20, p.302, 2004.