

# 溶融スラグとバイオ炭を用いた脱炭素型地盤改良工法の開発

西田 茉佑子・長澤 正明・衣川 剛央

建設工事で広く行われている地盤改良工事では、固化材として多くのセメントを使用するが、セメントはその製造過程において多量の二酸化炭素を排出する。そこで、脱炭素社会を目指すカーボンニュートラルの取組みとして、溶融スラグとバイオ炭を用いた脱炭素型地盤改良工法を開発した。すなわち、セメント混合前の改良対象土に溶融スラグを混合することで土性を改善し、混合するセメント量を低減するものであり、さらにバイオ炭を混合することで、使用するセメント量の二酸化炭素排出量に相当する炭素成分を固定化し、カーボンニュートラルを実現する工法である。本稿では、その効果を検証するために行った室内試験と現場試験について報告する。

キーワード：地盤改良，浅層混合処理工法，セメント，溶融スラグ，バイオ炭，カーボンニュートラル

## 1. はじめに

現在、地球温暖化対策としてカーボンニュートラル社会の実現に向けた取組みが全世界的に推進されている。一方で、様々な建設工事において実施される地盤改良工事では、製造過程において多くのCO<sub>2</sub>を排出するセメントやセメント系固化材が使用されている。そこで、廃棄物を高温で加熱・溶融後、冷却して固化させた溶融スラグ（写真—1）と、オガ粉から生成されるバイオ炭（写真—2）を改良対象土に混合してCO<sub>2</sub>排出量を実質ゼロにする脱炭素型地盤改良工法を開発した。溶融スラグを混合することで土性を改善し、固化材の添加量を低減してCO<sub>2</sub>排出量を削減するとともに、バイオ炭を混合することで、固化材のCO<sub>2</sub>排出量に相当する炭素成分を固定化し、カーボンニュートラルを実現することとなる。開発にあたり、まず室内試験によって溶融スラグとバイオ炭を混合することによる効果を検証し、その後、室内試験で得られた効果を現場試験による原位攪拌により検証した。ここでは、その結果を報告する。



写真—1 溶融スラグ



写真—2 バイオ炭 (粉状)

## 2. 使用材料

室内試験と現場試験で使用した材料を表—1に、母材の粘性土および副材の溶融スラグの土質試験結果

表—1 使用材料一覧

| 試料名 | 種別           | 産地・製造元                      |
|-----|--------------|-----------------------------|
| 母材  | 粘性土          | 埼玉県深谷市，赤土                   |
| 副材  | 溶融スラグ        | 日鉄エンジ(株)，エコスラグ              |
| 固化材 | 高炉セメント       | 宇部三菱セメント(株)<br>高炉B種         |
|     | セメント系<br>固化材 | 太平洋セメント(株)<br>特殊土用，ジオセット200 |
| 添加材 | バイオ炭         | 奈良炭化工業(株) プラス-1<br>(粒状・粉状)  |

表—2 母材および副材の土質試験結果

| 土質名                               | 俗称      | 赤土                 | エコスラグ        |
|-----------------------------------|---------|--------------------|--------------|
|                                   | 工学的分類名  | 火山灰質粘性土<br>(低液性限界) | 人工材料<br>・廃棄物 |
|                                   | 工学的分類記号 | (VL)               | (Wa)         |
| 自然含水比 $w_n$ %                     |         | 52.7               | 1.4          |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ Mg/m <sup>3</sup> |         | 2.729              | 2.822        |
| 粒度                                | 礫分 %    | 5.6                | 1.7          |
|                                   | 砂分 %    | 29.6               | 88.3         |
|                                   | シルト分 %  | 53.8               | 2.1          |
|                                   | 粘土分 %   | 11.0               | 7.9          |
|                                   | 最大粒径 mm | 26.5               | 4.75         |
| 単位体積重量 kN/m <sup>3</sup>          |         | 14.1               | 17.0         |

を表一2に示す。粘性土は火山灰質粘性土(赤土)を、固化材は高炉セメントおよびセメント系固化材(以下、固化材)を用いた。バイオ炭は、含水比が約14%の粒状タイプ(粒径2.5 mm)と粉状タイプ(粒径1 mm以下)の2種類を用いた。

### 3. 試験概要

#### (1) 室内試験

室内試験では、粘性土単体および粘性土と溶融スラグの混合土のそれぞれに対して固化材およびバイオ炭を添加し、一軸圧縮強さをはじめとする性状の違いについて検証した。表一3に室内試験のケースを示す。粘性土と溶融スラグの体積比は100:0, 75:25, 50:50の3ケースとし、固化材添加量は50 kg/m<sup>3</sup>, 100 kg/m<sup>3</sup> および 150 kg/m<sup>3</sup>とした。ケース S-4~S-6はバイオ炭を添加し、その添加量は、固化材のそれぞれの添加量(50 kg/m<sup>3</sup>~150 kg/m<sup>3</sup>)に対してカーボンニュートラル(CN)相当となる量(9.3 kg/m<sup>3</sup>~27.8 kg/m<sup>3</sup>)とした。なお、バイオ炭の添加量は文献<sup>1), 2)</sup>より算出した。文献<sup>1)</sup>によれば普通セメント1 kg製造時のCO<sub>2</sub>排出量は757.9 g, 高炉スラグは24.1 gである。高炉セメントB種の内訳をセメント60%, スラグ40%とした場合、高炉セメントB種1 kgあたりのCO<sub>2</sub>排出量は757.9 g×60%+24.1 g×40%=464.38 gとなる。なお、セメント系固化材も高炉セメントB種と同様の配合と仮定した。一方、バイオ炭は1 kgあたり2.51 kgの炭素が固定化されている<sup>2)</sup>。したがって、固化材1 kgをカーボンニュートラル(CN)にするために必要なバイオ炭の量は464.38 g/2,510 g×1 kg=0.185 kgとなる。

試験体の作製はセメント協会のJCAS L-01, 一軸圧縮試験はJIS A 1216に準じて実施した。また、土質試験は、土の含水比試験(JIS A 1203), 土粒子の密度試験(JIS A 1202), 土の粒度試験(JIS A 1204)を実施した。

表一3 室内試験ケース

| ケース | 母材と副材の割合(体積比) |       | 固化材(高炉セメント, セメント系固化材)添加量   | 添加材(バイオ炭)添加量           | 養生日数            |
|-----|---------------|-------|--|------------------------|-----------------|
|     | 粘性土           | 溶融スラグ |  |                        |                 |
| S-1 | 100           | 0     | 50 kg/m <sup>3</sup> ,<br>100 kg/m <sup>3</sup> ,<br>150 kg/m <sup>3</sup> | 0 kg/m <sup>3</sup>    | 3日<br>7日<br>28日 |
| S-2 | 75            | 25    |  | 0 kg/m <sup>3</sup>    |                 |
| S-3 | 50            | 50    |  | 0 kg/m <sup>3</sup>    |                 |
| S-4 | 100           | 0     |  | 9.3 kg/m <sup>3</sup>  |                 |
| S-5 | 75            | 25    |  | 18.5 kg/m <sup>3</sup> |                 |
| S-6 | 50            | 50    |  | 27.8 kg/m <sup>3</sup> |                 |

#### (2) 現場試験

現場試験では、実際の施工状況を模擬し、室内攪拌と原位置攪拌による一軸圧縮強さの関係および盛土材としての使用の可否を検証した。現場試験の材料として、表一1のうち固化材はセメント系固化材を、添加材は粉状のバイオ炭を選択した。主要機械を表一4に示す。現場試験における混合はスタビライザ, 転圧は振動ローラにより行った。表一5に現場試験ケースを示す。粘性土と溶融スラグの体積比は75:25と設定し、固化材添加量を100 kg/m<sup>3</sup>および150 kg/m<sup>3</sup>とした。ケース G-3はバイオ炭を添加し、その添加量は室内試験と同様に固化材のそれぞれの添加量に対してカーボンニュートラル(CN)相当となる量とした。

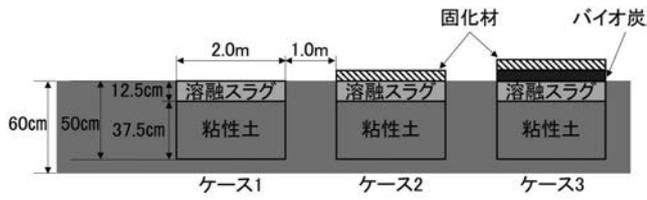
表一4 主要機械一覧

| 工程 | 使用機械・仕様 |                         | 台数 |
|----|---------|-------------------------|----|
| 混合 | スタビライザ  | 最大混合深さ0.6 m<br>混合幅1.8 m | 1  |
| 転圧 | 振動ローラ   | 搭乗・コンバインド式<br>運転質量4 t   | 1  |

表一5 現場試験ケース

| ケース | 母材と副材の割合(体積比) |       | 固化材(セメント系固化材)添加量                                 | 添加材(バイオ炭)添加量                                       |
|-----|---------------|-------|--|--|
|     | 粘性土           | 溶融スラグ |  |  |
| G-1 | 75            | 25    | 0 kg/m <sup>3</sup>                              | 0 kg/m <sup>3</sup>                                |
| G-2 | 75            | 25    | 100 kg/m <sup>3</sup> ,<br>150 kg/m <sup>3</sup> | 0 kg/m <sup>3</sup>                                |
| G-3 | 75            | 25    |  | 18.5 kg/m <sup>3</sup> ,<br>27.8 kg/m <sup>3</sup> |

図一1に改良レーンの断面を示す。試験ヤードは粘性土を1層30 cmの厚さで2層盛り立て、振動ローラで締め固めた。改良レーンは幅2.0 m, 深さ50 cm, 延長20 mとし、粘性土の表層12.5 cmを掘削して溶融スラグを敷き均すことで粘性土と溶融スラグの体積比が75:25となるようにした。その後、バイオ炭および固化材を散布し、スタビライザで混合した。施工状況を写真一3~6に示す。混合完了後、採取した試料を用いて現地においてセメント協会基準JCAS L-01に準拠して試験体を作製し、所定日数の養生後、一軸圧縮強度試験(JIS A 1216)を実施した。また、ケース2では、混合攪拌後のレーンにおいて転圧回数が0回, 4回, 6回, 8回となるように振動ローラで締め固めた後、ポータブルコーン貫入試験(単管式)(JGS 1431)と砂置換法による現場密度試験(JIS A 1214)を実施した。



図一 改良レーン断面



写真一 3 溶融スラグ敷均し状況



写真一 4 バイオ炭敷均し状況



写真一 5 固化材敷均し状況



写真一 6 混合攪拌状況

であったのに対し、溶融スラグを体積比で 25% 混合した混合土 (ケース S-2) は 76.6% に、50% 混合した混合土 (ケース S-3) は 83.2% に増加した。図一 3 に固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を、図一 4 に含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの結果から、溶融スラグの混合比率が高いほど含水比が低く、一軸圧縮強さが高いことがわかる。また、高炉セメントに比べてセメント系固化材を用いた方が一軸圧縮強さが高くなっている。ここで、改良目標強度を 250 kN/m<sup>2</sup> とした場合のセメント系固化材の添加量は、溶融スラグを混合しない場合は 129 kg/m<sup>3</sup>、25% 混合した場合は 76 kg/m<sup>3</sup>、50% 混合した場合は 53 kg/m<sup>3</sup> である。したがって、固化材添加量の低減量は、溶融スラグを 25% 混合した場合は 41%、溶融スラグを 50% 混合した場合は 59% となる。

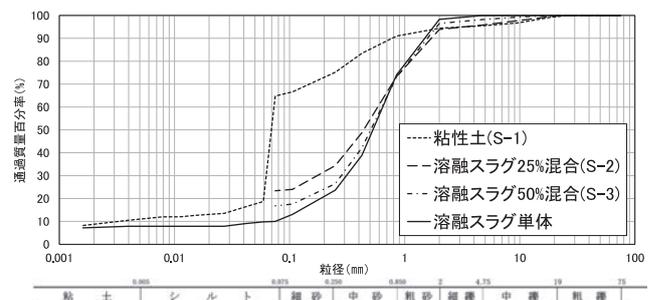
表一 6 土質試験結果

| ケース   | 自然含水比 $w_n$ (%) | 均等係数 $U_c$ | 粗粒分 (%) |
|-------|-----------------|------------|---------|
| S-1   | 52.7            | 24.3       | 35.2    |
| S-2   | 32.1            | -          | 76.6    |
| S-3   | 19.4            | -          | 83.2    |
| 溶融スラグ | 1.4             | 8.6        | 90.0    |

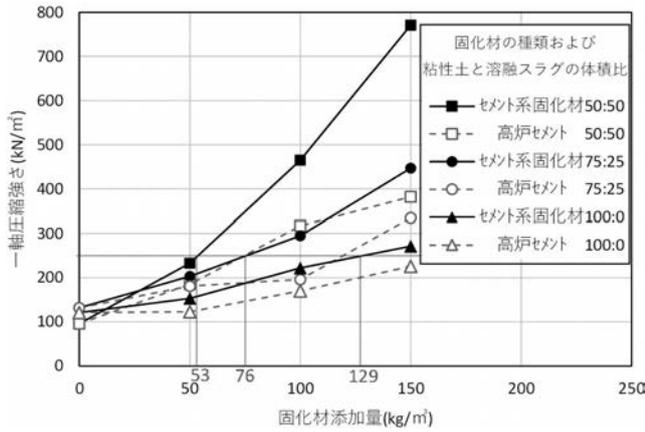
#### 4. 試験結果

##### (1) 溶融スラグの混合効果～室内試験より

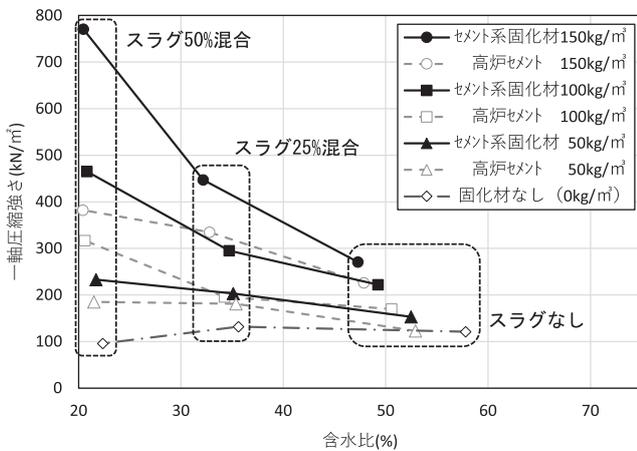
表一 6 に室内試験の土質試験結果を、図一 2 に粒径加積曲線を示す。粒度試験より、粒径 0.075 mm 以上の粗粒分の割合は、粘性土 (ケース S-1) が 35.2%



図一 2 粒径加積曲線



図一三 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係 (材齢 7 日)



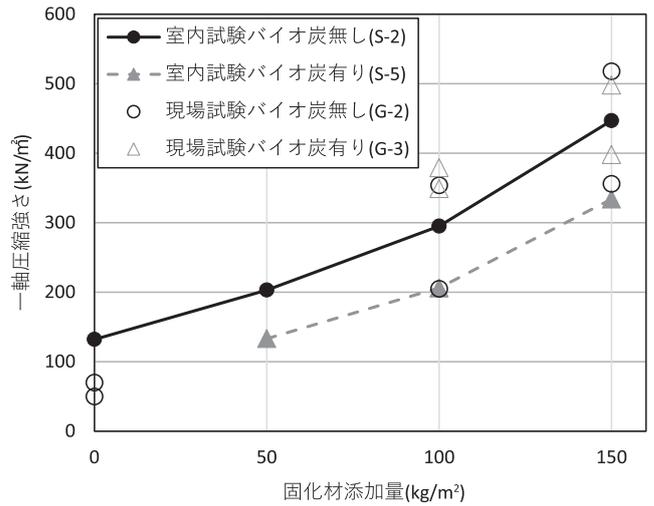
図一四 含水比と一軸圧縮強さの関係 (材齢 7 日)

(2) バイオ炭の混合の影響～室内試験と現場試験より

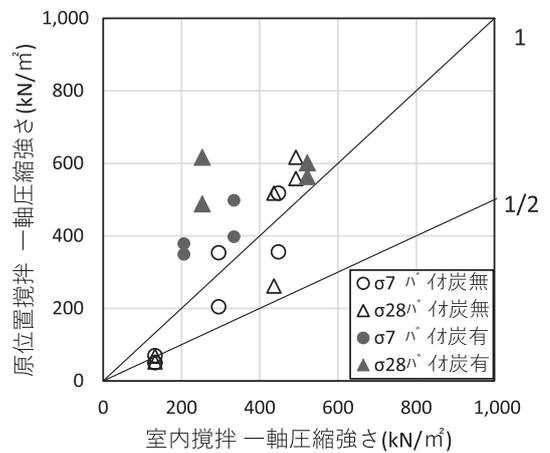
バイオ炭を混合した場合 (ケース S-5・G-3) の一軸圧縮強さを, バイオ炭を添加しない場合 (ケース S-2・G-2) の結果と併せて図一五に示す。室内試験ではバイオ炭を添加することによって一軸圧縮強さは低くなったが, 現場試験ではバイオ炭の有無による一軸圧縮強さへの影響は明確には認められなかった。これは, 今回使用したバイオ炭が住宅用床下調湿材としても使用されており, 木炭の持つ吸放湿特性が含水比に影響を与えた可能性があると考えられるが, 明確な理由の解明については今後の課題である。

(3) 室内攪拌と原位置攪拌による一軸圧縮強さの関係～室内試験と現場試験より

図一六に原位置攪拌と室内攪拌の一軸圧縮強さの比較を示す。原位置攪拌と室内攪拌の比率は概ね 1/2～1 の間かそれ以上であり, 既往の文献<sup>3)</sup>と同等の結果となった。



図一五 含水比と一軸圧縮強さの関係 (粘性土: 溶融スラグ = 75 : 25, セメント系固化材, 材齢 7 日)



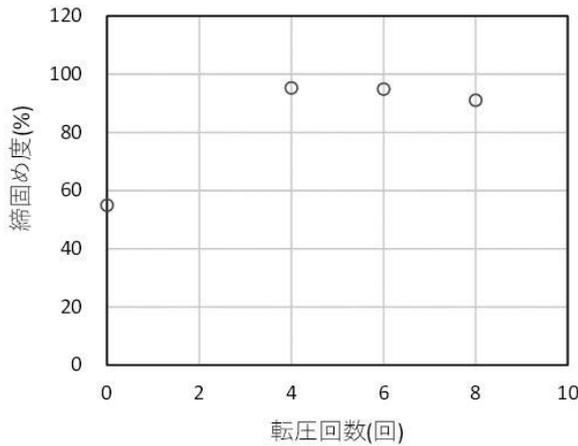
図一六 室内攪拌と原位置攪拌の一軸圧縮強さの関係

(4) 盛土材としての使用の可否～現場試験より

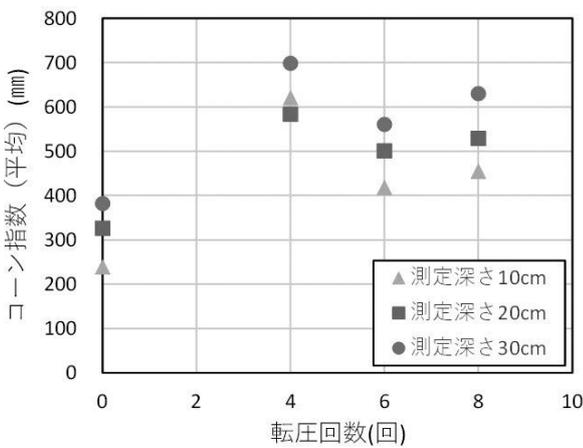
図一七に転圧回数と締固め度の関係を, 図一八に転圧回数とコーン指数の関係を示す。締固め度は 4 回転圧において最大となり, 締固め後のコーン指数は各転圧回数とも第三種建設発生土相当の 400 kN/m<sup>2</sup> 以上であった。これらの結果から, 今回の現場試験では 6 回以上の転圧は過転圧の傾向にあり, 転圧回数 4 回で盛土材料としての使用が可能であると考えられる。

5. おわりに

室内試験により, 粘性土に溶融スラグを混合することで, 同一強度を得るために必要な固化材量を低減でき, CO<sub>2</sub> 排出量の削減に効果があることを確認した。また, 現場試験により, 粘性土と溶融スラグの体積比を 75 : 25 として固化材およびバイオ炭を散布し, スタビライザを用いて混合攪拌する工法について検証した。その結果, 溶融スラグおよびバイオ炭の敷均し工



図一七 転圧回数と締固め度の関係



図一八 転圧回数とカーボン指数の関係

程が増えること以外は、従来の表層混合方式による品質や施工方法と比べて特段変わりがないことが実証された。

一方、カーボンニュートラルとするためにはバイオ

炭の混合が必要であるが、バイオ炭を混合することで一軸圧縮強さが低下するケースもあり、バイオ炭が強度に及ぼす影響について今後検討する余地がある。

今後、本工法を実施工に適用することで、カーボンニュートラル社会の実現に貢献できれば幸いである。

JCM A

《参考文献》

- 1) 溝渕麻子他, 混和材を高含有したコンクリートのCO<sub>2</sub>削減効果, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, p.119, 2014.
- 2) 農林水産省・環境政策室, バイオ炭の農地施用を対象とした方法論について, J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用にかかる方法論に関する説明資料, pp.13~14, 令和2年11月9日
- 3) 助土木研究センター, 陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル 改訂版, p.38, 平成16年3月

[筆者紹介]



西田 茉佑子 (にしだ まゆこ)  
清水建設株式会社  
土木総本部 土木技術本部 基盤技術部  
基礎グループ



長澤 正明 (ながさわ まさあき)  
清水建設株式会社  
土木総本部 土木技術本部 基盤技術部  
基礎グループ  
グループ長



衣川 剛央 (きぬがわ よしてる)  
株式会社東洋スタヂオ  
執行役員 統括所長