

一次養生後に攪乱・再養生した製鋼スラグ混合土の強度発現特性

Strength Development of Dredged Marine Soil Stabilized by Steelmaking Slag under Disturbance and Re-Curing

Arlyn Aristo CIKMIT	(広島大学大学院工学研究科)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA	(広島大学防災・減災研究センター)
白神拓也 Takuya SHIRAGA	(広島大学大学院工学研究科)
橋本涼太 Ryota HASHIMOTO	(広島大学大学院工学研究科)
嘉屋健二 Kenji KAYA	(中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所)
水谷享二 Kyoji MIZUTANI	(中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所)

製鋼スラグ混合土の初期強度を調整する方法として、混合後一次養生して強度を発現させ、その後攪拌して打設する方法が考えられる。この場合の強度発現特性を調べるため、室内試験により製鋼スラグ混合土を一次養生し、その後攪拌・モールド充填を行った試料を用いて強度発現特性を調べた。一次養生して攪乱・充填すると、攪乱が無い場合と比べて充填後の強度は低下する。強度低下は一次養生時間が長いほど大きい。充填後約1日経過すると強度は時間とともに急速に回復する。一次養生時間が7時間の場合は、28日強度と90日強度で攪乱の影響はほとんどなかった。一次養生時間が1日、2日、3日の場合は、混合から経過時間28日の強度は攪乱なしの強度の26～83%、経過時間90日の強度は攪乱なしの強度の52%～70%であった。

キーワード：製鋼スラグ，固化処理土，リサイクル，港湾，潜堤 (IGC : D-06)

1. はじめに

製鋼スラグは製鋼過程において銑鉄から鋼へ変換する際の副産物である¹⁾²⁾。鉄鋼スラグは高炉スラグと製鋼スラグの二種類に大別され、高炉スラグは道路用路盤材、高炉セメント、肥料成分、被覆ブロックなどに使用されてきた¹⁾³⁾⁵⁾。一方、転炉系スラグと電気炉系スラグである製鋼スラグは高炉スラグに比べて建設現場での利用が進んでいないが、近年、製鋼スラグを再利用することを目的とした多くの研究が行われてきた。製鋼スラグの化学的、力学的性質を中心に、道路建設における骨材⁴⁾、コンクリート中の骨材⁵⁾、セメント中のセメント質材料¹⁾、および肥料、また、製鋼スラグを用いて安定化した軟弱地盤改良⁶⁾などの製鋼スラグの様々な用途について研究がなされてきた。

製鋼スラグの主成分は、石灰とシリカであるが、精錬時間が長く石灰含有量が高いため、石灰の一部が遊離石灰として残り、普通ポルトランドセメントと類似した化学組成を持つ⁷⁾⁸⁾。これによって粘土と混合することにより強度が発現する特性があり、港湾や航路の浚渫によって大量に発生する浚渫粘土のリサイクルを目的として、製鋼スラグと浚渫土の混合処理土(カルシア改質土とも呼ばれている)の利用に関する研究が活発に実施されてきた⁹⁾¹⁵⁾。

港湾事業における製鋼スラグ混合土の利用として、環境創造のために造成されている人工干潟の潜堤としての利用が検討されている。山田ら¹⁵⁾は、長さ3.0m、奥行き0.6m

の土層を用いて軟弱な粘土地盤上に体積混合率30%の製鋼スラグ混合土を直接打設し、混合土のめり込み形状や仕上がり勾配を調べている。これによると高さ約30cmまで打設したときの潜堤の法面勾配は1:3～1:2.5となっている。一般に潜堤ののり勾配は1:2～1:2.5程度で設計されることが多いので、山田らの結果は混合直後に打設した場合には所要の勾配にするための補助工が必要になるといえる。

筆者らは、製鋼スラグ混合土の打設直後からの強度発現特性を報告しているが、製鋼スラグ混合土は混合直後に約5時間の強度発現準備期があり、その後強度が急速に増加する前期強度発現期に移行する⁵⁾⁶⁾。この強度発現特性を考慮すると、混合後に一定時間放置して強度増加を待ち、その後に運搬・打設するという施工方法が考えられる。竹山ら¹⁶⁾は製鋼スラグ混合土で海水中に潜堤を構築することを目的として、混合した土をミキシングバケット内に1日および2日タンク内で養生し、その後、グラブを水底に降下して開放する方法とグラブを水面下で開放して水底まで自由落下させる方法で潜堤を構築する実験を行っている。この場合、製鋼スラグ混合土は、混合→放置による固化→ほぐしと打設→施工後の時間経過(養生)、という過程で強度が発現することになる。本論文では最初の放置期間を「一次養生」、ほぐしと打設を「攪乱」、施工後の時間経過を「二次養生」と呼ぶことにする。

本研究では、室内で作成した製鋼スラグ混合土に上記の過程を模擬的に与えることによって、二次養生後の強度発現過程を調べ、一次養生時間が二次養生後の強度発現に及

ばす影響を調べた。その結果、一次養生時間が強度発現が緩やかに起きる強度発現準備期内である場合は、攪乱がその後の強度発現に大きな影響を与えないこと、一次養生時間が前期強度発現期に達すると攪乱によって強度は大きく低下するが、一次養生時間が3日以内であれば、二次養生後の強度は最終的に攪乱を与えない場合と同等になるまで回復することがわかった。

2. 製鋼スラグ混合土の強度の経時的発現特性

製鋼スラグ混合土の強度発現過程は、3つの領域に分けることができることが明らかになっている。これは、混合直後の強度がほとんど増加しない強度発現準備期、強度と養生時間が両対数グラフ上でほぼ直線となる前期強度発現期、強度増加が小さくなる後期強度発現期の3つである。図-1は筆者らが2017年に報告した製鋼スラグ混合土の混合後の経過時間と強度の関係である^{5),6)}。(製鋼スラグのF-CaO 4.25%, 最大粒径は5 mm) 製鋼スラグ混合土の強度は、スラグの体積混合率 R_{SS} と粘土の含水比 w_0 によっておおよそ決まってくる。体積混合率 R_{SS} の定義は次式の通りであり、通常は20%か30%とする場合が多い。

$$R_{SS} = \frac{V_{SS}}{V_{soil} + V_{water} + V_{SS}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで V_{SS} は製鋼スラグの固形分体積、 V_{soil} と V_{water} は粘土の土粒子体積と水の体積。

図-1は R_{SS} と w_0 のさまざまな条件において強度の経時的な発現過程が、強度発現準備期(約5時間)、前期強度発現期(混合後5時間後～3日後)、後期強度発現期(混合後3日以降)の3つに分けることができることを示している。強度発現準備期では強度は配合によって1~10kPaの値となっていて大きな変化はなく、前期強度発現期では時間の対数と強度の対数がほぼ直線関係になる。さらに後期強度発現期では時間の対数に対して強度がほぼ直線的に増加している。

浚渫土を用いた製鋼スラグ混合土を水中に打設したときに法面勾配を支配するのは強度発現準備期の強度である。したがって、法面勾配を制御するために前期強度発現期まで待って強度が発現した後に打設することが考えられる。本研究では、製鋼スラグを液性限界の1.5倍の含水比に調整した海成粘土と混合し、混合後に一定時間静置(一次養生)した後に攪拌してモールドに充填し、その後水中養生して(二次養生)強度発現過程を調べた。

3. 用いた製鋼スラグ、粘土と試験方法

本研究では、粘土と製鋼スラグを混合後に一次養生した後に、モールドに充填するために練り返し(ほぐし)を行うことを攪乱と定義している。一次養生時間は実際の施工

において、混合後に強度発現を待って海水中に投入し、潜堤の構築や埋め立てを行うまでの時間である。一次養生が施工後の製鋼スラグ混合土の強度発現にどのような影響を及ぼすかを調べるため、室内ベーンせん断試験(LSV)と一軸圧縮試験(UC)によって時間とともに強度が発現する過程を調べた。混合から攪乱およびモールド充填までの一次養生時間は、2, 5, 7時間および1, 2, 3日とした。

3.1 粘土および製鋼スラグの土質工学的特性

本研究では山口県徳山港の海底から浚渫された粘土を用いた。無臭で濃い緑色をしており、液性限界119.9%、塑性限界45.6%、塑性指数74.3%であり、統一土質分類法

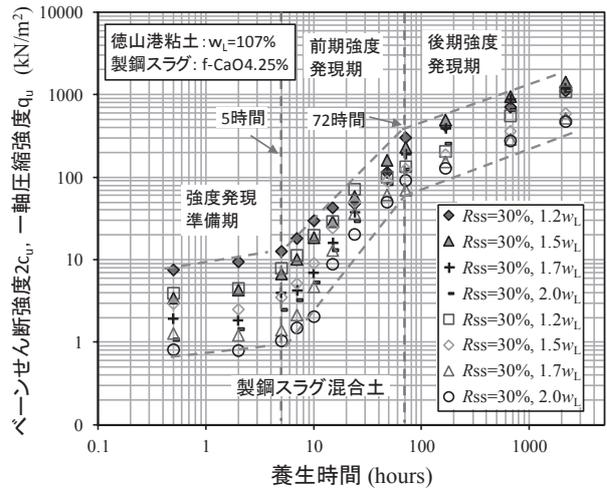


図-1 異なる初期含水比と製鋼スラグ添加率における製鋼スラグ処理土の強度発現⁵⁾

表-1 徳山港粘土の土質特性

項目	
液性限界, w_L (%)	119.9
塑性限界, w_P (%)	45.6
塑性指数, I_p	74.3
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.68
粗粒分 (%)	9.98
細粒分 (%)	90.02
統一土質分類法による分類(USCS)	CH
pH	7.2
強熱減量, LOI (%)	8.17
塩分濃度(%)	3.48

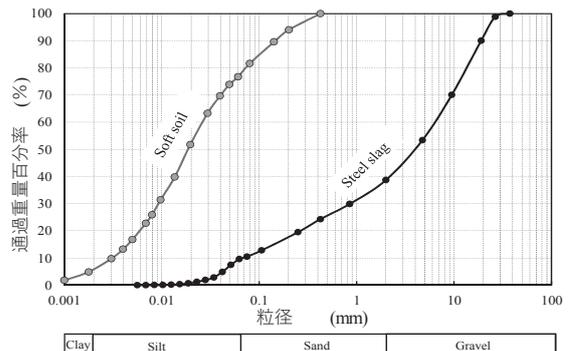


図-2 用いた試料の粒度分布加積曲線

から高塑性粘土に分類される。土粒子密度は 2.68g/cm^3 であり、表-1 に徳山港粘土の基本的な物理的性質をまとめた。

製鋼スラグは福山市の JFE スチール (株) 西日本製鉄所で製造されたものである。最大直径は 37.5mm で、 0.5% の細粒分含有量を有する。徳山港粘土と製鋼スラグの元の粒径分布を図-2 に示す。製鋼スラグの表面乾燥状態での平均土粒子密度は 3.15g/cm^3 、絶対乾燥状態での平均土粒子密度は 3.02g/cm^3 であり、エチレングリコール法を用いて得られた製鋼スラグの遊離石灰含有量は 8.49% であった。表-2 は製鋼スラグの基本的な物理的性質をまとめたものである。X 線回折分析から製鋼スラグはポルトランドイト ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、バテライト (CaCO_3)、ウスタイト (FeO)、スレボドルスカイト ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$)、カルサイト (CaCO_3)、ラルナイト (Ca_2SiO_4)、石灰 (CaO) ライト (Fe_2O_4)、マグネタイト (FeFe_2O_4) のような鉱物を示した。蛍光 X 線試験より得られた結晶構造は主に CaO 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 、 Al_2O_3 、 MgO であった。

3.2 供試体の配合と作成方法

供試体の配合条件と製鋼スラグ添加率を表-3 に示す。製鋼スラグ添加量 (体積混合率) は既往の研究^{13)・16)}でよく用いられている 20% と 30% であり、養生時間は 0.5 時間～ 90 日までである。

試料作製の前に、材料を以下のように調製した。

- (1) 浚渫粘土に含まれる礫や貝殻などの不純物を除去するために 2mm のふるいを用いて濾過した。濾過後は乾燥を防ぐために、密閉容器内で保管した。
- (2) 製鋼スラグを表面乾燥状態とするため室内で 24 時間自然乾燥させた。乾燥後の製鋼スラグの含水量は平均

表-2 用いた製鋼スラグの基本的特性

特 性	製鋼スラグ
表面乾燥状態の土粒子密度 (g/cm^3)	3.15
絶対乾燥状態の土粒子密度 (g/cm^3)	3.02
吸水率 (%)	4.6
最大粒径 (mm)	37.5
粗粒分 (%)	89.5
細粒分 (%)	10.5
遊離石灰, f-CaO (%)	8.49

表-3 製鋼スラグ混合土の混合条件と養生時間

粘土の初期含水比 (%)	製鋼スラグ添加率 R_{ss} (%)	養生時間
178.5% ($1.5w_L$)	20, 30	0.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15 (hours) 1, 2, 3, 7, 28, 90 (days)

3.6% であった。製鋼スラグをふるい分け、最大粒径が 4.75mm になるように調整した。

- (3) 試料の含水比の加水調整には塩分濃度を 3.5% に調整した市販の人工海水を用いた。

徳山港粘土の含水比は人工海水を加水して液性限界の 1.5 倍に調整した。その後、ハンドミキサーを用いて製鋼スラグと粘土を 5 分間混合した。

試料調製から強度試験までの流れを図-3 に示す。混合した直後に試料を密閉容器に入れて一次養生を行った。その後、所定の一次養生時間が経過した後に、密閉容器の試料を攪乱した。1日、2日、3日の一次養生によって一軸圧縮強度はそれぞれ $20, 70, 150\text{kN/m}^2$ 程度まで発現した。一次養生後の「攪乱」は、これらの試料を小型のスコップでほぐして練返しを行う方法で与えた。ほぐしと練返しを行った後に、試料を直径 5cm 高さ 10cm の一軸圧縮供試体

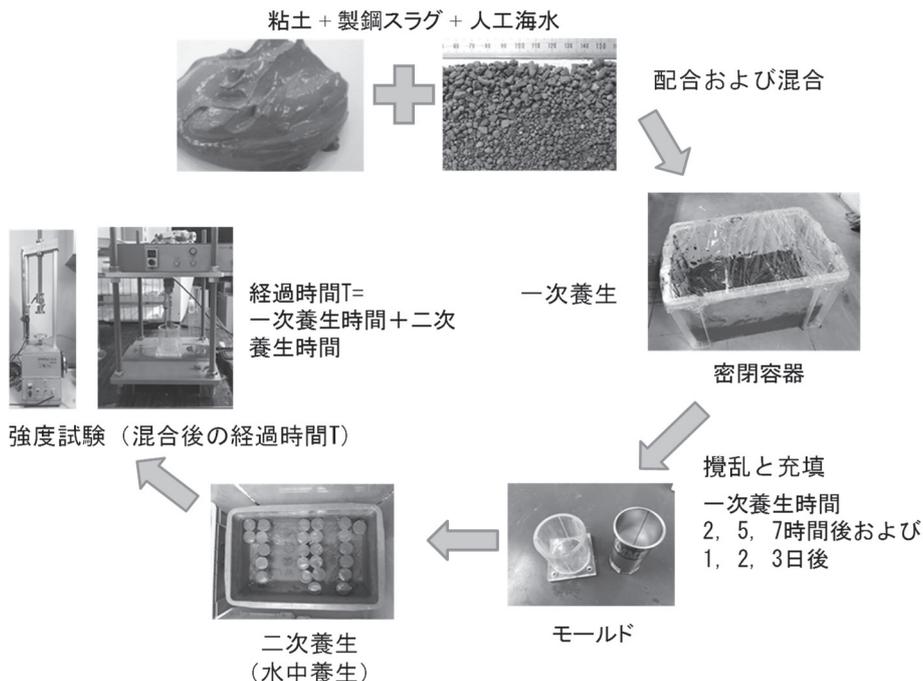


図-3 試料調製から強度試験までの流れ

用のモールドに充填した。充填は3層に分けて行い、各層ごとに空隙を除去するため直径2cmの棒を手で押し込む方法で突き固めを行った。攪乱とモールドへの充填に要する時間は一次養生時間が7時間以下の場合には約15分であったが、一次養生時間が1日、2日、3日の試料では固化した塊を細粒化するため最大約60分を要した。

混合から攪乱・充填までの一次養生時間は、2時間、5時間、7時間、1、2、3日とした。モールドに充填した試料は水中養生（二次養生）の後に強度を測定した。以下の試験結果では、混合から強度試験までの時間を経過時間とし、経過時間と一次養生時間によって整理している。経過時間は一次養生時間と二次養生時間の和であり、攪乱と充填に要した時間は含めていない。

3.3 強度試験

二次養生後の試料の強度は2種類の強度試験を用いて測定した。低強度の供試体（二次養生時間0.5時間～15時間まで）の測定はベーンせん断試験（地盤工学会基準、JGS 1441-2012）を用いた。ベーンの回転速度は6°/minとし、羽根の高さと直径はいずれも20mmとした。

二次養生時間が1日以上（試料）は一軸圧縮試験により強度を測定した（JGS 0511-2014）。

4. 試験結果と考察

4.1 攪乱が無いときの製鋼スラグ混合土の強度発現特性

図-4は一次養生と攪乱・充填がなく混合後直ちにモールドに充填し水中養生した試料の、養生時間と強度の関係を示している。図のように今回用いた製鋼スラグにおいても、強度発現過程は図-1と同様に強度発現準備期（混合後5時間）、前期強度発現期（5時間後～3日まで）、後期強度発現期（3日以降）に分けることができた。製鋼スラグの体積混合率20%と30%の試料の強度を比較すると、養生時間7日まではほとんど差がみられず、養生時間28日以降において、体積混合率30%の試料の強度が大きくなった。

4.2 一次養生後に攪乱・充填した試料の強度発現特性

図-5は $R_{SS}=20\%$ における一次養生時間が2時間、5時間、7時間のときの経過時間と強度の関係である。図のように、攪乱直後の強度は 1.5kN/m^2 程度で一次養生による強度増加はほとんど見られず、攪乱後の経過時間と強度の関係にも影響がほとんど見られなかった。図-4に示すように強度発現準備期は経過時間5時間までであり、経過時間7時間でも強度発現は小さい。強度発現準備期に攪乱をあたえても強度に及ぼす効果、影響は小さいといえる。

図-6は、製鋼スラグと徳山港粘土を混合後、所定の一次養生期間を経て攪乱・モールド充填した後の試料の強度発現特性（ $R_{SS}=30\%$ ）であり、横軸には混合後の経過時間（＝一次養生時間＋二次養生時間）を対数で、縦軸は強度を対数目盛でプロットしている。図-7は、同じグラフを強度を

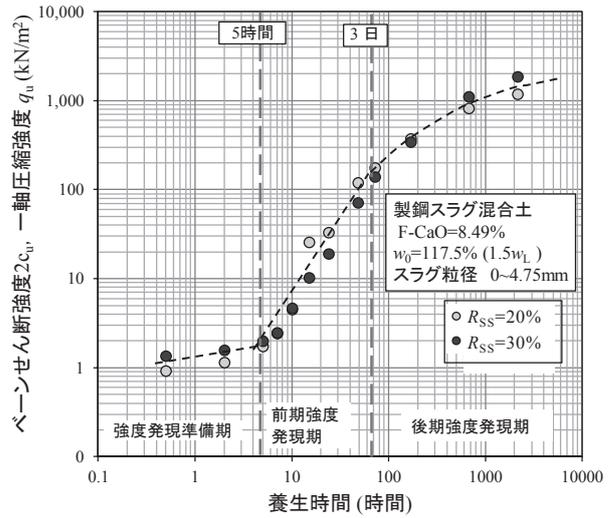


図-4 製鋼スラグ添加率における製鋼スラグ処理土の強度発現

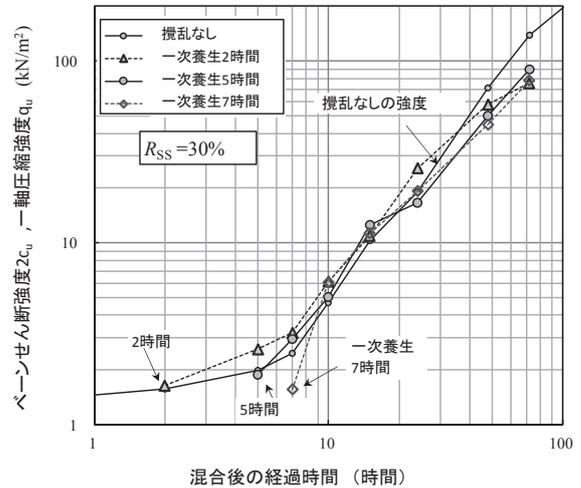


図-5 $R_{SS}=20\%$ における一次養生時間が2時間、5時間、7時間のときの経過時間と強度の関係

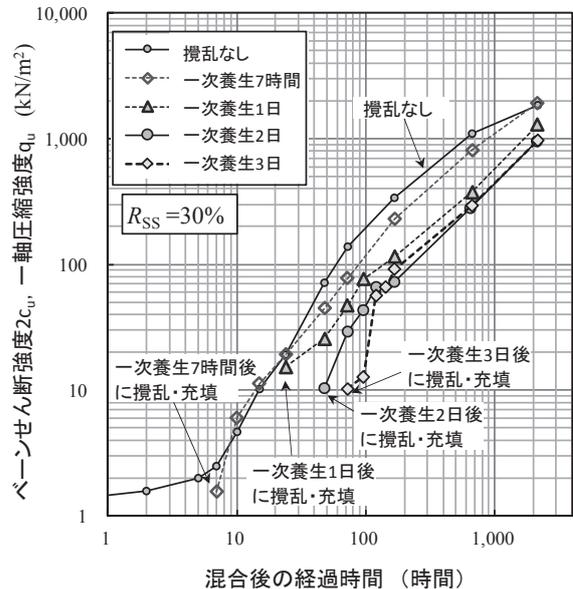


図-6 一次養生期間を経て攪乱・モールド充填した後の試料の強度発現特性（ $R_{SS}=30\%$ 、強度は対数）

普通目盛として示している。

図をみるとまず一次養生を行うことで攪乱後の強度は10kN/m²以上となり、混合直後の強度発現準備期の強度(1~3kN/m²)よりも増加する。したがって、打設時の初期強度の増加のために一次養生を行うことは有効であるといえる。

次に、充填後の試料の強度発現に着目すると、図のように、一次養生期間を強度発現準備期より少し長い7時間として攪乱・充填した試料の強度は、攪乱の影響によって攪乱なしの強度よりも小さくなるが、混合後28日、90日経過した強度は攪乱なしの強度に対してそれぞれ74%、105%であった。すなわち、混合後90日経過すると攪乱に

よる強度低下は完全に回復した。

一次養生時間を1日とした試料では攪乱直後の強度は15.4kN/m²であり、攪乱なしの強度19.1kN/m²より小さくなった。その後1日の二次養生で強度は27.5kN/m²まで増加したがこの値は攪乱なしの同じ経過時間の試料に比べ大幅に小さい。しかし、経過時間3日~28日の間には図-6の両対数グラフ上でほぼ直線的に強度は増加し、混合後28日(二次養生期間27日)、90日(二次養生期間89日)の強度は攪乱なしの強度に対してそれぞれ35%、70%まで回復した。

一次養生時間を2日、3日とした場合、攪乱後の強度はそれぞれ10.4kN/m²、10.2kN/m²であり、一次養生時間1日の場合よりも低下した。一次養生時間2日で攪乱した試料も、二次養生時間1日後(経過時間3日)から一次養生時間1日の試料と同様の勾配でほぼ直線的に強度は増加し、混合後28日(二次養生期間26日)、90日(二次養生期間88日)の強度は攪乱なしの強度のそれぞれ26%、52%であった。一次養生時間3日の試料は、二次養生期間の強度増加により、混合後28日(二次養生期間25日)、90日(二次養生期間87日)の強度は攪乱なしの強度のそれぞれ27%、53%であった。

図-8と図-9は、体積混合率が20%の試料の結果を図-6、図-7と同様に整理したものである。体積混合率30%の試料と比べて攪乱が無い場合に対する攪乱後の強度はやや大きくなっている。また、一次養生時間を3日としたときの強度は2日の場合よりも明らかに小さく、混合後の一次養生時間が長いほどその後の攪乱による影響で二次養生後の強度発現が小さい傾向がはっきりと表れている。

このように、製鋼スラグ混合土は少なくとも混合から3日間までは攪乱して打設した後も、攪乱が無い場合と同様に強度が発現する。強度発現と攪乱の関係は以下のようにまとめることができる。

(1)一次養生期間7時間以下では攪乱直後の強度は

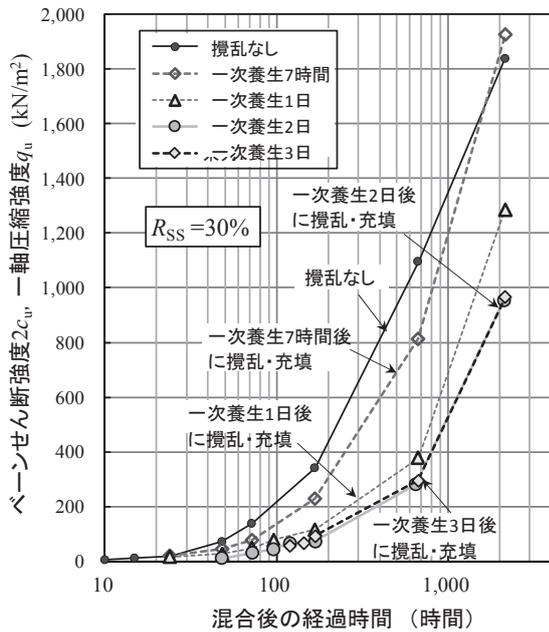


図-7 一次養生時間を経て攪乱・モールド充填した後の試料の強度発現特性 ($R_{ss}=30\%$,強度は普通目盛)

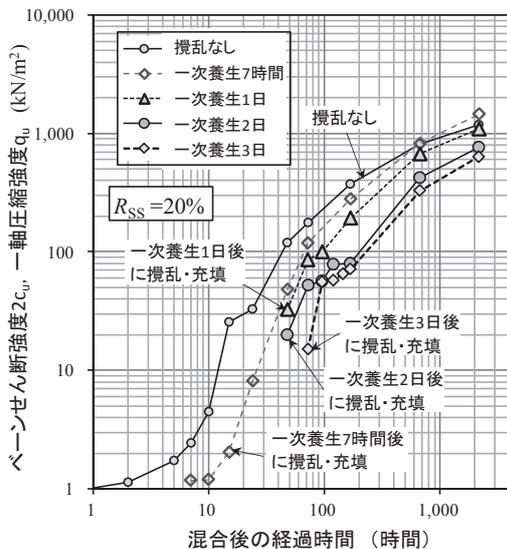


図-8 一次養生時間を経て攪乱・モールド充填した後の試料の強度発現特性 ($R_{ss}=20\%$,強度は対数)

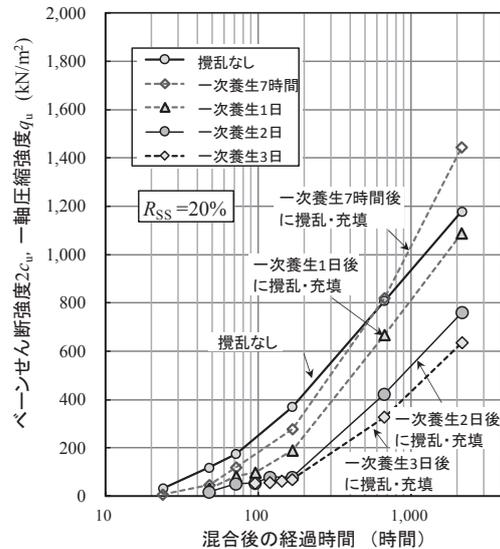


図-9 一次養生後攪乱・モールド充填した試料の強度発現特性 ($R_{ss}=20\%$,強度は普通目盛)

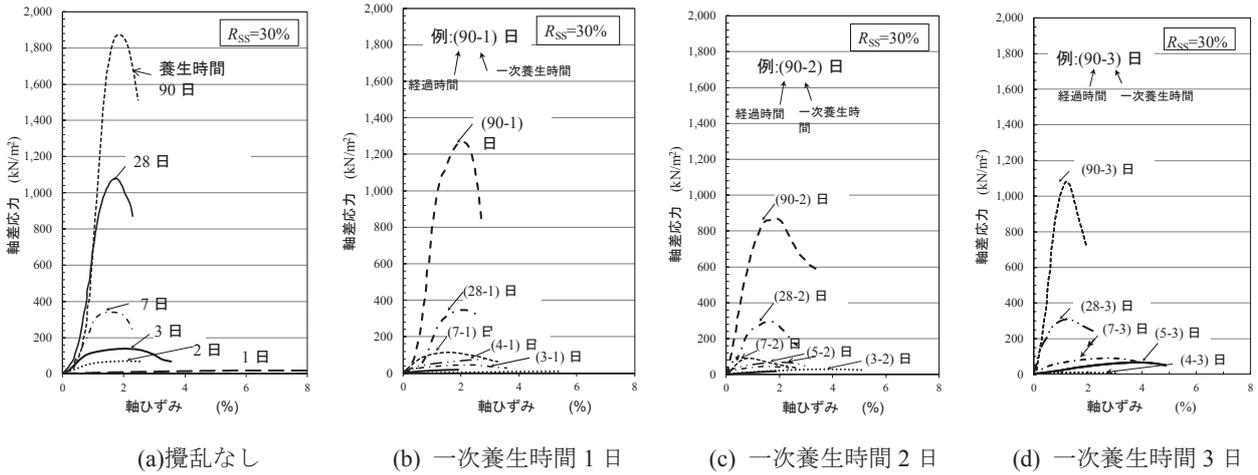


図-10 一次養生時間 0～3 日の混合後の経過時間と応力ひずみ曲線の関係

1.5kN/m² 程度で一次養生による強度増加はほとんど見られなかった。また、二次養生後の強度においても攪乱を与えた影響はほとんどみられなかった。

- (2) 一次養生期間が 1 日～3 日の場合、一次養生を行って攪乱した後の一軸圧縮強度は 10～20kN/m² となり、混合直後の製鋼スラグの強度発現準備期の強度 (1～3kN/m²) より大きくなる。打設時の初期強度の増加のために一次養生を行うことは有効であるといえる。二次養生過程では、攪乱後 1 日程度は強度発現が停滞し、その後強度は急速に回復した。攪乱までの一次養生時間が長いほど強度低下は大きい、混合から経過時間 28 日の強度は攪乱なしの強度の 26～83%、経過時間 90 日の強度は 52%～70%であった。

4.3 攪乱による応力-ひずみ関係の変化

図-10(a),(b),(c),(d)はそれぞれ製鋼スラグの体積混合率 30%の試料における攪乱なし、一次養生時間 1 日、2 日および 3 日の供試体の養生後 (攪乱なし)、二次養生後 (攪乱あり) の応力ひずみ曲線である。図のように、攪乱なしの試料では養生期間 7 日後から軸ひずみ 2.0%前後でピーク強度を示している。これに対して一次養生後に攪乱を加えた試料では、攪乱後時間に破壊ひずみ大きい応力ひずみ曲線となるが、28 日経過後は攪乱がない場合の応力ひずみ曲線と同様に軸ひずみ 2%前後で明瞭なピーク強度を示している。このように一次養生期間が 3 日以内では、攪乱後の二次養生による強度の回復とともに応力ひずみ関係も攪乱がない場合と類似した形状に回復した。

4.4 混合後の経過時間 7 日の強度と 28 日の強度、90 日の強度との関係

図-11 は、一連の試験における混合後経過時間 7 日の一軸圧縮強度 q_{u7} と混合後経過時間 28 日の強度 q_{u28} の関係である。図中には各点の一次養生時間を示している。図中には製鋼スラグの体積混合率 20%と 30%の試料を一緒に整理しており、両者の関係は製鋼スラグの体積混合率によ

らず次式によってよく表すことができた。

$$q_{u28} = 2.62q_{u7} + 128 \quad (2)$$

製鋼スラグ混合土では通常 7 日強度と 28 日強度の比はほぼ一定となるが、図-11 をみると q_{u7} は一次養生期間が長いほど攪乱の効果により低下するが、28 日経過した q_{u28} の低下は q_{u7} ほどではなく、攪乱が大きいほど二次養生によ

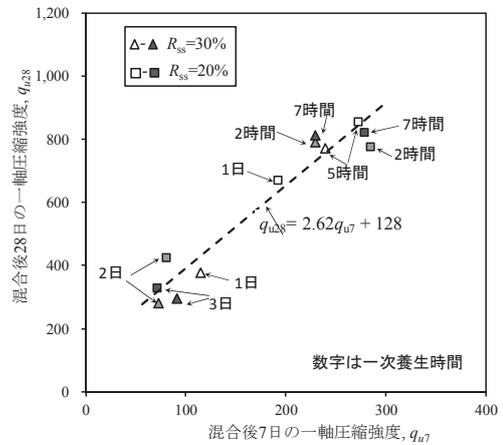


図-11 混合後 7 日の強度 q_{u7} と 28 日の強度 q_{u28} の関係

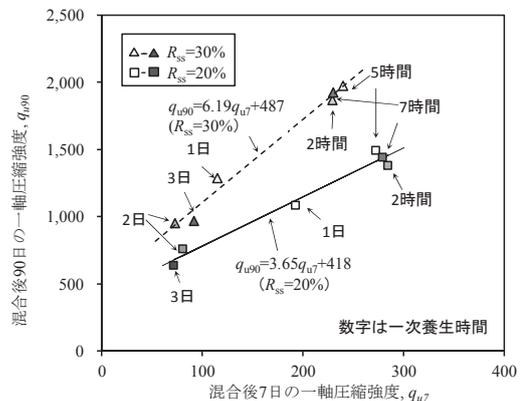


図-12 混合後 7 日の強度 q_{u7} と 90 日の強度 q_{u90} の関係

る強度回復の比率（攪乱後の強度に対する）は大きいことがわかる。

図-12は経過時間7日の強度 q_{u7} と経過時間90日の強度 q_{u90} の比較である。図のように両者の関係は製鋼スラグ添加率 R_{ss} によって異なっており、それぞれ次式で表すことができた。

$$q_{u90} = 6.19q_{u28} + 487 \quad (R_{ss}=30\%) \quad (3)$$

$$q_{u(90d)} = 3.65q_{u28} + 416 \quad (R_{ss}=20\%) \quad (4)$$

このように今回用いた試料では製鋼スラグの体積混合率の差が90日経過後の強度発現に大きく影響し、体積混合率30%の試料の方が強度増加が顕著であった。また、式(3),(4)は、式(2)と同様に一次養生期間が長く攪乱による強度低下が大きいほど、90日経過後の強度増加比率（7日経過強度に対する）が高いことを示している。図-11および図-12に示すように式(3)と式(4)の相関は良好であり、一次養生後に攪乱して打設する施工を行う場合、室内試験によって図-11、図-12のように攪乱により低下した強度と28日強度、90日強度との相関を求めておけば、施工後7日強度から28日強度、さらには90日後の強度発現を予測することができると考えられる。

5. まとめ

製鋼スラグ混合土の初期強度を調整する方法として、混合後一次養生して強度を発現させ、その後攪拌して打設する方法が考えられる。この場合の強度発現特性を調べるため、室内試験により製鋼スラグ混合土を一次養生し、その後攪拌・モールド充填を行った試料を用いて強度発現特性を調べた。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 一次養生を行って攪乱すると強度は10~20kN/m²程度になり、混合直後の製鋼スラグの強度発現準備期の強度（1~3kN/m²）より大きくなる。打設時の初期強度の増加のために一次養生を行うことは有効であるといえる。
- (2) 一次養生して攪乱・充填すると、攪乱が無い場合と比べて充填後の強度は低下する。強度低下は一次養生時間が長いほど大きいですが、その後強度は時間とともに回復する。一次養生時間が7時間の場合は、28日強度と90日強度において攪乱の影響はほとんどなかった。
- (3) 一次養生時間1日、2日、3日の場合は、攪乱直後に攪乱なしに比べて強度が減少して10~20kN/m²となり強度発現が停滞した。しかし、その後強度は急速に回復した。一次養生時間が大きいほど強度低下は大きいですが、混合から経過時間28日の強度は攪乱なしの強度の26~83%、経過時間90日の強度は52%~70%であった。
- (4) 一次養生と攪乱を与えた試料の7日強度と28日強度、90日強度は、良好な相関を示した。この関係より、7日強度に対する28日強度の比は攪乱によって7日強度が低下した場合に大きくなっている。28日強度と90

日強度の関係においても体積混合率30%の試料については同様の関係がみられた。

以上の結果から、製鋼スラグ混合土は一次養生時間が3日以内では攪乱後も高い強度回復特性を有するといえる。また、攪乱後の強度間の良好な相関性は、一次養生を行って施工時の初期強度を調整する場合の施工管理において利用できると考えられる。

参考文献

- 1) Shi, C. : Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.16, pp. 230-236, 2004.
- 2) Yildirim, I.Z., and Prezzi, M. : Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag, Vol.2011, Article ID 463638, pp.1-13, 2011.
- 3) Ahmedzade, P., and Sengoz, B.: Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete, Journal of Hazardous Materials, Vol.165, pp. 300-305, 2009.
- 4) Qasrawi, H., Shalabi, F., and Asi, I. : Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate, Construction and Building Materials, Vol.23, pp.1118-1125, 2009.
- 5) Cikmit A. A., 土田孝, 姜庚吾, 嘉数浩靖, 本田秀樹, 湯怡新: 製鋼スラグを用いて固化処理した浚渫海成粘土の強度発現特性, 地盤と建設, Vol.35, No.1, pp. 93-100, 2017.
- 6) Kang, G., Cikmit, A.A., Tsuchida, T., Honda, H., and Kim, Y.: Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag, Construction and Building Materials, Vol.203, pp.501-513, 2019.
- 7) Poh H. Y., Ghataora G. S., and Ghazireh N.: Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.18, pp. 229-240, 2006.
- 8) 佐藤令菜, 西村聡, 戸田賀奈子, 佐藤努, 新井悠: カルシア改質浚渫土の早期強度・剛性発現特性とその解釈, 地盤工学会 北海道支部技術報告集, Vol.56, pp.15-20, 2016.
- 9) Deng, Y.F., Zhang, T.W., Zhao, Y., Liu, Q.W., L. and Wang, Q. : Mechanical behaviour and microstructure of steel slag-based composite and its application for soft clay stabilisation, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.18, pp.1-16, 2017.
- 10) 木曾英滋, 辻井正人, 伊藤公夫, 中川雅夫, 五明美智男, 永留健: 転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.327-332, 2008.
- 11) 土田孝, 鶴ヶ崎和博, Cikmit, A. A. : 岸壁・護岸の設計における高重量地盤材料の活用に関する研究, 土

- 木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I_444-I_449, 2019.
- 12) 田中裕一, 山田耕一, 大久保泰宏, 渋谷貴志, 中川雅夫, 赤司有三, 一村政弘, 山越陽介: カルシア改質土を用いた海岸埋立と地盤の評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_486-I_491, 2012.
- 13) 山越陽介, 赤司有三, 中川雅夫, 菅野浩樹, 田中裕一, 辻匠, 今村正, 渋谷貴志: カルシア改質土の管中混合工法による海面埋立, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_952-I_957, 2013.
- 14) 田中裕一, 高将真, 今村正, 渋谷貴志, 山越陽介, 赤司有三, 北野吉幸, 菅野浩樹: カルシア改質土による海面埋立, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I_888-I_893, 2014.
- 15) 山田耕一, 辻匠, 渡部要一, 水谷崇亮, 森川嘉之, 鵜飼亮行: 軟弱地盤上のカルシア改質土を用いた干潟潜堤に関する実験と考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_1048-I_1053, 2013.
- 16) 竹山佳奈, 泉水めぐみ, 西田 浩太, 峯松麻成, 田中裕一, 江口信也, 野口孝俊: カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証~強度・形状特性の把握, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, No.2, pp. I_899-I_904, 2019.

(2019年6月24日 受付)