

機械的攪乱を与えた製鋼スラグ混合土の強度発現特性

Strength Development of Marine Clay Stabilized by Steelmaking Slag After Mechanical Disturbance

白神拓也	Takuya SHIRAGA	(広島大学大学院工学研究科)
Arlyn Aristo	CIKMIT	(前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)
橋本涼太	Ryota HASHIMOTO	(広島大学大学院先進理工系科学研究科)
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)
栗津進吾	Shingo AWAZU	(JFE スチール株式会社)

製鋼スラグ混合土の攪乱後の強度回復特性について実験により検討を行った。製鋼スラグと港湾の浚渫粘土を混合して養生（一次養生）した後に、固化した混合土を練返してモールドに充填する攪乱タイプ A、固化した供試体を三軸圧縮破壊する攪乱タイプ B の操作を行い、再養生（二次養生）後に製鋼スラグ混合土の強度がどのように回復するかを調べた。攪乱タイプ A を与えた時の強度推定式を提案した。攪乱タイプ B の実験では、打設後 7 日、28 日、60 日経過し十分に強度が発現した状態で圧縮破壊を加えた場合でも、その後の養生により強度が回復することを明らかにした。

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

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¹⁾³⁾。製鋼スラグの主成分は、石灰とシリカであるが、石灰の一部が遊離石灰として残るため普通ポルトランドセメントと類似した化学組成を持っており粘土と混合すると強度が発現する。この特性を活か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）の研究が活発に実施されてきた⁴⁾¹⁰⁾。この一環として、図-1(a)のように人工干潟の法留潜堤を構築する材料としての利用が検討されている。

山田ら¹¹⁾は、土槽に軟弱な粘土地盤に見立てた土層を設け、その上にトレミー管打設を模擬した方法で製鋼スラグ混合土を打設する実験を行い、土層に対するめり込み量や潜堤形状を調べた。一般的に潜堤は法面勾配 1 : 2 ~ 1 : 2.5 となるよう設計されるが、山田らの実験では製鋼スラグ混合土の強度不足のため、高さ 30 cm の条件でも 1 : 2.5 ~ 1 : 3 の勾配が限界であった。実施工では 1 回の打設高さとして 1 ~ 1.5 m が必要となるので 1 : 2.5 の勾配を達成するためには何らかの補助工が必要となる。

Cikmit ら、Kang らは、製鋼スラグ混合土の混合直後からの強度発現特性を報告しているが⁴⁾⁵⁾、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。この強度発現特性を考慮し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。Cikmit らはこの条件を想定した室内実験を行い、強度回復について検討している⁶⁾。竹山ら¹²⁾は製鋼スラグ

混合土を混合したのち、ミキシングバケット内で放置し、1 日および 2 日後にグラブを用いて二種類の方法で海中に投入し潜堤を構築する実験を行った。この時、製鋼スラグ混合土は一時的に養生される時間、打設による攪乱、施工後の時間経過という過程を経るが、所定の強度を得るためには施工後の製鋼スラグの強度発現について調査する必要がある。

攪乱を受けた製鋼スラグ混合土地盤における強度回復が問題となる場合として、図-1(b)は製鋼スラグ混合土の埋立が行われ長時間経過した地盤において栈橋用の杭を打設する場合を示している。この場合、杭周辺は攪乱され製鋼スラグ混合土の強度が低下してしまうが、製鋼スラグ混合土の固化反応により、強度を回復することができる可

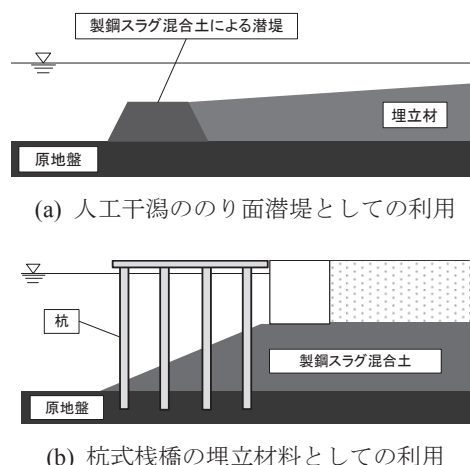


図-1 港湾における製鋼スラグ混合土の利用検討例

能性がある。

本研究では、製鋼スラグ混合土の攪乱後の強度回復特性について実験により検討を行った。実験では、製鋼スラグと港湾の浚渫粘土を混合して養生（一次養生）した後に、固化した混合土を練返してモールドに充填する攪乱タイプ A、固化した供試体を三軸圧縮破壊する攪乱タイプ B の操作を行った。攪乱を与えた試料を再養生し（二次養生）、攪乱により低下した製鋼スラグ混合土の強度が二次養生によってどのように回復するかを調べた。

2. 実験の材料と方法

2.1 実験に用いた材料

本試験で用いたのは徳山港粘土、JFE スチールから提供された製鋼スラグ 3 種である。表-1 と表-2 に各試料の材料特性を示す。徳山港粘土は山口県徳山に位置する浚渫粘土処分場で採取した海成粘土である。今回用いた 3 種類の製鋼スラグ（スラグ 1, 2, 3）の粒径加積曲線を図-2 に示すが、各スラグに含まれる遊離石灰 f-CaO（質量%）はそれぞれ 4.3%、11.0%、2.6%であった。いずれのスラグも 4.75mm でふるい分けたものを用いた。

供試体を作成する際の添加量は母材とする海成粘土の土粒子体積を基準とした割合である。以下の式(1)で定義する体積混合率を用い、これを 30%とした。

$$R_{SS} = \frac{V_{slag}}{V_{slag} + V_{clay} + V_{water}} \quad (1)$$

ここで、 R_{SS} ：製鋼スラグの体積混合率(%), V_{slag} ：添加した製鋼スラグの体積, V_{clay} ：浚渫土の土粒子体積, V_{water} ：水の体積である。本研究で行ったのは製鋼スラグ添加率 30%のケースのみである。

2.2 本実験における 2 つの攪乱方法

表-3 に実験条件の一覧を示した。想定する攪乱としては短期養生後の攪乱と長期養生後の攪乱の 2 つを考えた。短期養生後の攪乱は、製鋼スラグ混合土を混合後に 1 日~3 日養生し、その後ほぐして水中に打設する場合を想定した。これは混合後短期間養生してほぐすことによって混合直後の強度発現不足を補い、水中に埋め立てたときの混合土の必要勾配を確保する目的で与えられる攪乱である。短期養生後の攪乱は図-1 (b) のように埋立後の地盤に杭を打設して地盤が大きく攪乱される場合を想定した攪乱である。混合してから攪乱を与えるまでの養生時間を一次養生時間、攪乱を与えてモールド内に充填した後の養生時間を二次養生時間と呼ぶことにする。

短期養生後の攪乱の実験では、混合後に一次養生時間 7 時間、1 日、2 日、3 日の条件を設定し、攪乱は一次養生によって固化した試料をスコップによって十分に練り返しを行う方法で与えた。長期養生後の攪乱の実験では、一次養生時間を 7 日、28 日、60 日とし、攪乱は三軸試験機で圧縮破壊する方法で与えた。以下では短期、長期の攪乱方

表-1 徳山港粘土の物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/m ³)	2.67
液性限界 (%)	137.8
塑性限界 (%)	42.0
粗粒分 (%)	9.98
細粒分 (%)	90.02
統一土質分類法による分類	CH

表-2 製鋼スラグの物理特性

項目	スラグ 1	スラグ 2	スラグ 3
土粒子密度 ρ_s (g/m ³)	3.10	3.41	3.52
f-CaO (%)	4.3	11.0	2.6
粗粒分 (%)	51.04	27.34	24.15
細粒分 (%)	48.96	72.66	75.85
最大粒径 (mm)	4.75	4.75	4.75

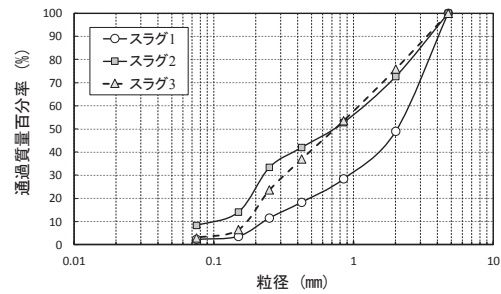


図-2 製鋼スラグの粒径加積曲線

表-3 実験条件一覧

想定する攪乱	攪乱の方法	製鋼スラグの種類	一次養生時間	二次養生時間
なし	なし	スラグ 1	なし	0.5, 2, 5, 7, 10, 15 時間
短期養生後の攪乱	スコップによる練返し (攪乱タイプ A)	スラグ 1	7 時間, 1 日, 2 日, 3 日	1, 2, 3, 7, 28, 90 日
		スラグ 2		
		スラグ 3		
長期養生後の攪乱	三軸試験機による圧縮破壊 (攪乱タイプ B)	スラグ 1	7, 28, 60 日	1, 2, 7, 14, 28, 90 日
			7, 28 日	

*いずれの実験でも徳山港粘土の初期含水比は 1.5w_L、スラグの体積混合率は 30%

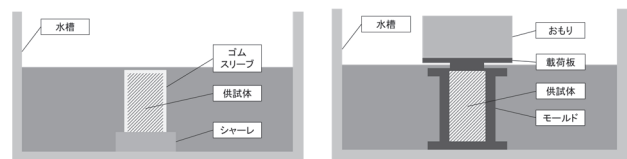


図-3 攪乱タイプ B (pre-shearing) における二次養生時の状態 (左：拘束圧なし、右：拘束圧あり)

法をそれぞれ攪乱タイプ A (remolding), 攪乱タイプ B (pre-shearing) と称する。

攪乱タイプ B (pre-shearing) の実験ケースでは、二次養生時に拘束圧なしと拘束圧有りの 2 つの条件で行った。図-3 にこの時の二次養生時の状態を示す。拘束圧は埋立時に水中で 5m の埋立による上載圧に相当するが拘束圧を加えた。

攪乱を与えた後の二次養生時間は、攪乱タイプ A (remolding) のケースで、0.5, 2, 5, 7, 10, 15 時間, 1, 2, 3, 7, 28, 90 日、攪乱タイプ B (pre-shearing) のケースでは、1, 2, 7, 14, 28, 90 日として、二次養生後の強度を測定した。

2.3 供試体の作成と強度測定までの手順

実験における供試体作成と強度測定までの手順は以下の通りである。

母材となる徳山港粘土に対し液性限界の1.5倍となるように塩分濃度3.5%の人工海水で含水比を調整した。浚渫粘土および人工海水は、混合時の製鋼スラグとの化学反応を抑え混合後から主たる反応を開始させるため、事前に冷蔵庫に入れ3°Cで冷却した。

攪乱なしの供試体では所定の量の製鋼スラグを添加し、ハンドミキサーを用いて5分間混合した。混合後はベーンせん断試験に用いるモールド(径60mm, 高さ60mm)と一軸試験に用いるサミットモールド(径50mm, 高さ100mm)に充填した。いずれも3層に分けて各層30回のタッピングを行い充填した。充填後蒸留水で満たした水槽(水温20±2°C)に入れ水中養生を行った。

攪乱タイプA (remolding)の供試体は、混合直後に密閉容器に入れて所定の一次養生時間で養生を行った。一次養生後、スコップ、ハンマー、へらを用いて一次養生で固化した混合土を十分にほぐした。大きな塊となった混合土はスコップとハンマーで細かく粉砕した。ほぐし・粉砕後の試料をサミットモールドに3層に分けて詰め、各層30回ステンレススチール製の棒(先端の径20mm)で軽く突き固めを行って充填した。充填後に密度を測定して所定の密度の範囲(1.86±0.02g/cm³)に入っているかを確認し、不十分な場合は充填をやり直した。充填後は攪乱なしの供試体と同様に水中養生を行った。以上の手順を図-4に示す。

攪乱タイプB (pre-shearing)の供試体は、混合後サミットモールドに3層に分けて、各層30回タッピングを行い充填し、水中養生を行った。所定の一次養生時間に達した後に三軸試験機を用い、セル圧200kPa、非圧密非排水の条件で供試体を圧縮し破壊させた。このとき軸差応力がピークに達して破壊した後も、圧縮ひずみが15%になるまで圧縮を行った。三軸試験機から取り出した後は前述した図-3に示す方法で二次養生した。この際に、拘束なしの場合は、三軸試験後の供試体をゴムスリーブに入った状態で取り出し供試体の高さを100mmになるように形状を修復して、ゴムスリーブ内に入れたまま水槽に静置して養生した。以上の修復の過程で圧縮された試料をほぼ元の高さまで伸張している。したがって、本試験において供試体を与えた攪乱は圧縮破壊による軸ひずみ15%と拘束圧を解除した後の伸張である。拘束圧有りの場合は、三軸圧縮後の供試体を取り出した後に高さが100mmになるように形状を修復した後にゴムスリーブを切り開き、供試体をモールドに詰め替えて水槽に入れ、5.68kgの鉛製のおもりと載荷板を用いて供試体に28kPaの上載圧を与えて二次養生を行った。以上の手順を図-5に示した。

3. 攪乱タイプA (remolding)の実験結果と考察

3.1 短期養生後に練り返した時の強度

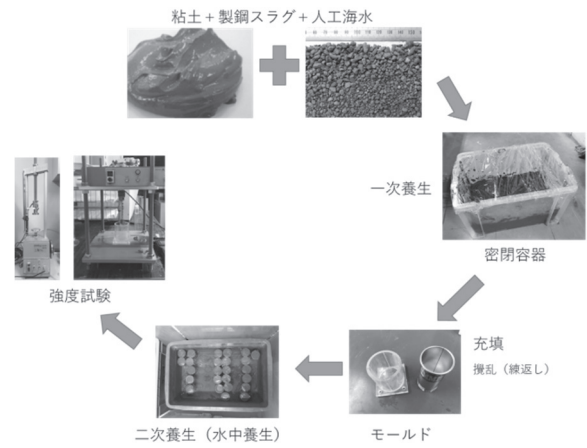


図-4 供試体作成から強度測定までの流れ(攪乱タイプA: remolding)

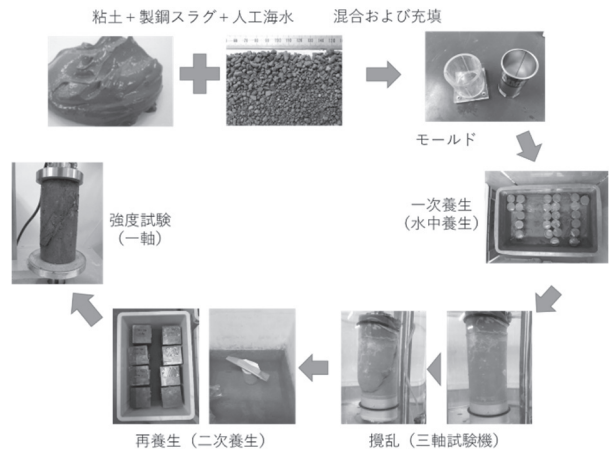


図-5 供試体作成から強度測定までの流れ(攪乱タイプB: pre-shearing)

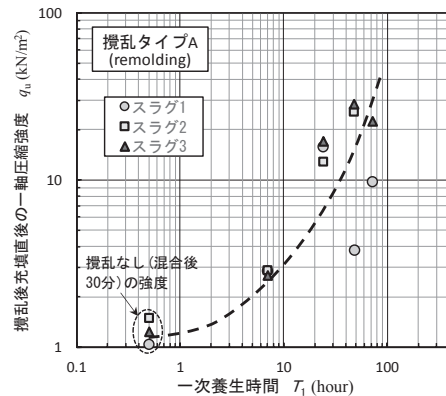


図-6 短期養生後に練り返しによる攪乱を与えた試料の一軸圧縮強度と一次養生時間の関係

以下の実験結果は、各供試体ごとの結果をプロットしている。図-6は、攪乱タイプA (remolding)の試料を攪乱し充填した直後に測定した一軸圧縮強度と一次養生時間の関係である。強度10kPa未満のデータはベーンせん断試験による強度を2倍して一軸圧縮強度に換算している。図のように、充填時のタッピングによって加えられた力の違いやモールドから取り出す際にかかる力の違いと考えられる原因で強度にばらつきがみられるが、一次養生時間が長くなるほど攪乱後の強度が大きくなっている。攪乱を与え

ない供試体の強度は混合後 30 分に測定されているが f_{CaO} によらずいずれも約 1kN/m^2 となっている。一次養生 7 時間後に攪乱し充填した供試体の強度は 3kN/m^2 程度であるが、一次養生時間が 1 日を超えるとそれまでの製鋼スラグの水和反応による固化によって攪乱直後でも 10kN/m^2 以上の強度が得られている。以上の結果は、施工時に所定の勾配で法面形成が必要となる場合に、打設時の強度を増加させる目的で 1 日～3 日の一次養生時間を設けることは有効であることを示している。

3.2 二次養生による強度発現

図-7 は、スラグ 1 ($f_{CaO}=4.3\%$) を用いた混合土について攪乱タイプ A (remolding) における二次養生時間と一軸圧縮強度の関係を両対数グラフ上で示したものである。図のように、攪乱が無い場合、混合 30 分後の強度は約 1kN/m^2 であり、強度はゆっくりと増加して 5～7 時間経過後に本格的な強度増加が始まる。一次養生と攪乱を加えた試料では混合 30 分後の強度は $4\sim 16\text{kN/m}^2$ と増加するとともに、二次養生後の強度発現特性が一次養生時間によって大きく異なっている。一次養生時間 T_1 が 7 時間の試料は、攪乱直後の強度は 3kN/m^2 でその後急速に強度が増加し数時間で攪乱なしの試料と同等の強度に達し、その後も同様の強度発現を示した。よって一次養生時間が 7 時間程度までは、一次養生と攪乱はその後の強度発現にほとんど影響がないといえる。しかし、 T_1 が 1 日、2 日、3 日の場合を見ると、養生初期に両対数グラフ上で強度と時間の関係が緩やかな勾配の直線となり、一定時間経過してから急こう配の直線に変化している。この勾配変化点を本格的に強度増加が始まる点と考えると、 T_1 が大きいほど勾配変化点までの二次養生時間が長い。

図-7 をみると攪乱なしでは養生時間 1 日、2 日、3 日で一軸圧縮強度はそれぞれ 48kN/m^2 、 172kN/m^2 、 230kN/m^2 である。 $T_1=1$ 日、2 日、3 日ではそれぞれの強度発現の後に攪乱しているのもので、 T_1 が長いほど大きな外力によるほぐしと練返しを行っており、このため二次養生後も影響が大きいことが考えられる。また、 T_1 が短いほど水和反応に使われていない遊離石灰が多く残存するため、これが攪乱後の強度回復に寄与したことも考えられる。

図-8 は図-7 と同じデータを強度を普通目盛として表示したものである。二次養生時間 28 日 (672 時間) の強度を攪乱なしの試料の強度と比べると一次養生 1 日、2 日、3 日でそれぞれ 0.40 倍、0.16 倍、0.07 倍であり、二次養生時間が 90 日になるとそれぞれ 0.47 倍、0.20 倍、0.14 倍となった。いずれの試料も二次養生日数が長くなるほど攪乱なしの試料の強度に対する比率は上がっており、1 日から 3 日の一次養生時間の差による強度差が時間とともに縮小する傾向がみられる。

以上のように、一次養生して攪乱した製鋼スラグ混合土の二次養生後の強度増加は一次養生時間によって大きな影響を受け、一次養生時間が短いほうがその後の強度発現 (攪乱後の強度回復) の観点からは望ましい。

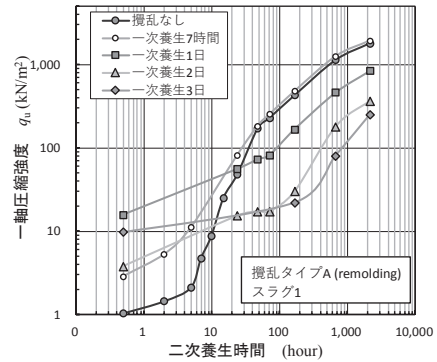


図-7 二次養生後の時間と一軸圧縮強度の関係 (スラグ 1 の混合土, 両対数グラフ)

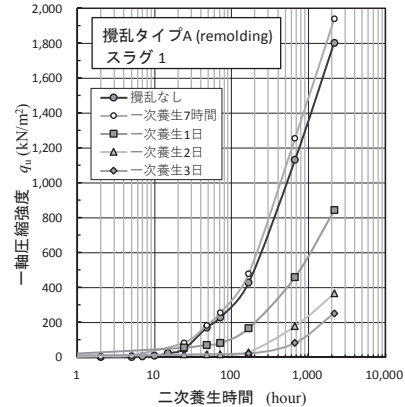


図-8 二次養生時間と一軸圧縮強度の関係 (スラグ 1, 図-7 のデータを片対数で表示)

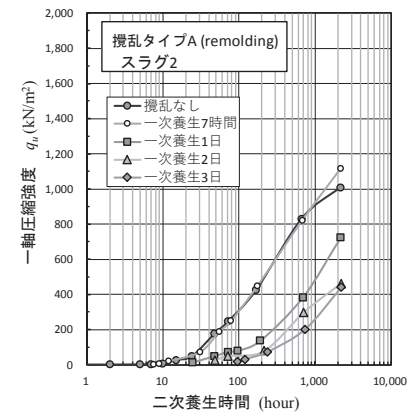


図-9 スラグ 2 を用いた製鋼スラグ混合土の二次養生時間と強度の関係

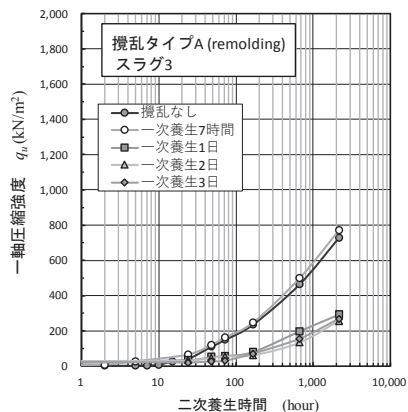


図-10 スラグ 3 を用いた製鋼スラグ混合土の二次養生時間と強度の関係

3.3 スラグの種類（遊離石灰含有量）と強度発現

次に、遊離石灰が異なるスラグを混合した試料の結果と比較する。図-9は遊離石灰が多いスラグ2 (f-CaO=11.0%)を用いた製鋼スラグ混合土の二次養生時間と強度、図-10は遊離石灰が少ないスラグ3 (f-CaO=2.6%)を用いた製鋼スラグ混合土の二次養生時間と強度の関係である。当初の予想では f-CaO が多いスラグを用いたほうが強度が大きくなると予想したが、スラグ2の混合土は図-9に示すように攪乱なしの試料でも28日強度がスラグ1の試料の約65%となり、スラグ1とスラグ2のf-CaOの差が強度に反映されなかった。この理由を十分明らかにできなかったが、f-CaO以外の強度に影響する要因があったと考えられる¹³⁾。この点を明らかにすることは今後の課題である。

遊離石灰と強度が対応しない点を除けば、一次養生時間と強度発現との関係はスラグ1を用いたケースと同様で、スラグ2の混合土は図-9に示すように一次養生時間が小さいほど強度増加が大きかった。また、図-10に示すスラグ3では一次養生2日と3日の強度に有意な差がみられなかったが、そのほかは同様の傾向を示した。

3.4 二次養生後の強度回復の定式化

図-11はスラグ1を用いた試料について、二次養生時間3日、7日、28日、90日における一軸圧縮強度の対数と、製鋼スラグ混合土の固化が本格的に始まる養生時間である7時間を基準とした一次養生時間の対数との関係である。図のように、各二次養生時間において両者はほぼ直線の関係が得られた。そこで一次養生時間が7時間から3日までの攪乱による強度低下と二次養生による強度回復を次式で近似した。

$$q_u = K_1 \left(\frac{T_1}{7}\right)^{-K_2} \quad (7 \leq T_1) \quad (2)$$

ここで q_u : 一軸圧縮強度, T_1 : 一次養生時間 (hour), K_1 : 攪乱が無いときの二次養生時間 T_2 (hour)における混合土の強度, K_2 は二次養生時間 T_2 における強度の低下を表すパラメータで $(T_1/7)^{-K_2}$ が一次養生後の攪乱による強度低下の割合を表している。 K_1 と K_2 は二次養生時間 T_2 の関数である。また、7(時間)は製鋼スラグ混合土の固化が本格的に開始する時間である。

式(2)の両辺の対数をとると次式が得られる。

$$\log(q_u) = \log K_1 - K_2 \cdot \log\left(\frac{T_1}{7}\right) \quad (3)$$

図-11において二次養生時間ごとに $\log(q_u)$ と $\log(T_1/7)$ を直線近似し $\log K_1$ と K_2 を決定することができる。図-11と同様の手順により、スラグ2、スラグ3の試料についてもパラメータ K_1 と K_2 を求めた。

図-12は K_1 と二次養生時間 T_2 との関係である。攪乱が無いときの製鋼スラグ混合土の強度を示す K_1 は時間の対数に対して直線的に増加する。図-13は K_2 と二次養生時間 T_2 との関係である。 K_2 は攪乱がないときの強度に対する低下の度合いを示し K_2 が大きいほど強度は小さくなる。図-13のようにいずれの試料でも K_2 は二次養生時間の対

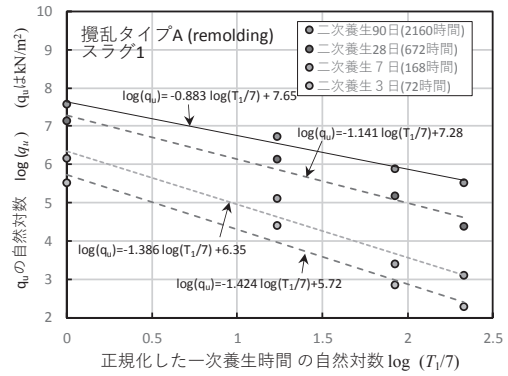


図-11 7時間で正規化した一次養生時間の対数と発現強度の対数の関係

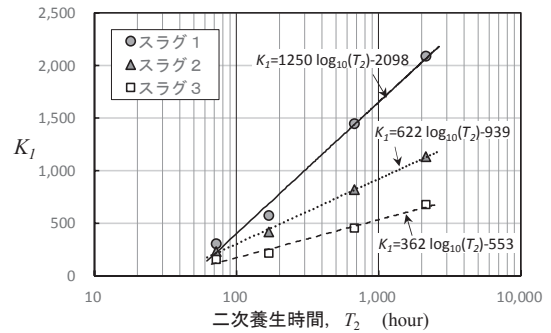


図-12 二次養生時間 T_2 と K_1 の関係

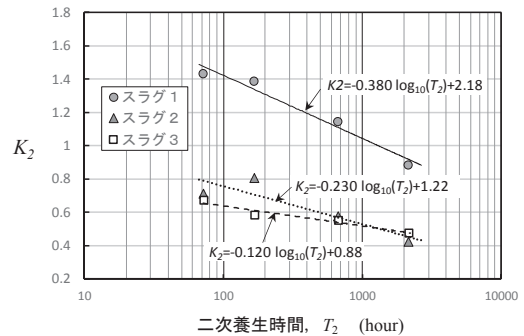


図-13 二次養生時間 T_2 と K_2 の関係

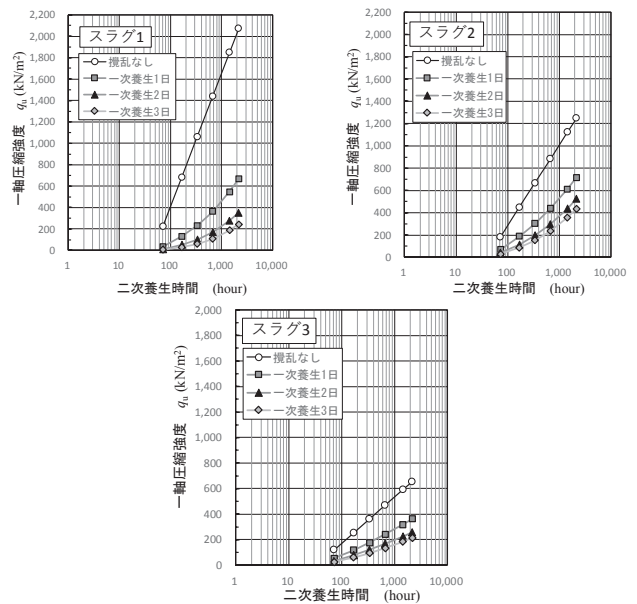


図-14 式(2)を用いて計算した二次養生時間 T_2 のと一軸圧縮強度の関係

数に対して直線的に減少しているが、このことは二次養生によって攪乱の影響がしだいに減少し、攪乱が無いときの強度 K_1 に対する強度比は増加していることを意味する。

図-12, 13 から求めた K_1 , K_2 と T_2 の関係を式(2)に代入して求めたスラグ 1, 2, 3 を用いた混合土の二次養生後の強度は、それぞれ式(4), (5), (6)のようになった。

$$q_u = \{(1250 \log_{10}(T_2) - 2098) \cdot (\frac{T_1}{7})^{0.38 \log_{10}(T_2) - 2.18}\} \quad (4)$$

$$q_u = \{(622 \log_{10}(T_2) - 939) \cdot (\frac{T_1}{7})^{0.23 \log_{10}(T_2) - 1.22}\} \quad (5)$$

$$q_u = \{(362 \log_{10}(T_2) - 553) \cdot (\frac{T_1}{7})^{0.12 \log_{10}(T_2) - 0.88}\} \quad (6)$$

図-14 に式(4)~(6)から計算した強度を示した。計算結果はほぼ図-8~図-10 の結果を表現できているといえる。

4. 攪乱タイプ B (pre-shearing) の実験結果と考察

4.1 二次養生後の一軸圧縮試験における破壊パターンと応力ひずみ曲線

本実験では、一次養生後に三軸試験で圧縮破壊した試料を三軸試験のゴムスリーブに入れた状態かモールドに詰めて上載圧を加えるという方法で二次養生した後、一軸圧縮試験で圧縮強度を求めた。一軸圧縮試験では、三軸試験による圧縮破壊時の破壊モードと関連して、以下の3つのパターンの破壊が観察された。

樽型破壊: 三軸試験機による圧縮破壊の時に広い範囲が攪乱された供試体や、斜めに亀裂が入るのではなく縦方向に亀裂が入り攪乱された供試体では、写真-1 (a) の樽型破壊が多くみられた。

非攪乱部の破壊: 写真-1 (b) に示す非攪乱部の破壊は、三軸試験で破壊したときに破壊面以外が乱されていない場合で滑落破壊しない場合に多くみられた。一軸圧縮試験では、最初に攪乱時に生じた破壊面でずれがみられるが、二次養生中の強度回復によりずれが拡大しない場合に、三軸圧縮時に破壊面の影響を受けなかった部分がすべり面となって破壊するパターンである。

滑落破壊: 滑落破壊は一軸圧縮試験で圧縮ひずみを与えたときに上端部が滑落する破壊である。三軸試験機で圧縮破壊した時に破壊面以外はあまり攪乱されずせん断破壊面の角度が水平から $65^\circ \sim 70^\circ$ であった供試体の一部で写真-1 (c) の滑落破壊が見られた。二次養生中の破壊面におけるせん断強度の回復が不十分であり、一軸圧縮試験で同じ面が破壊面となった時に生じた。

これらの破壊形態のうち、一軸圧縮強度は写真-1 (a) の樽型破壊や写真-1 (c) の滑落で小さく求められ、写真-1 (b) の非攪乱部の破壊の場合は大きく求められた。

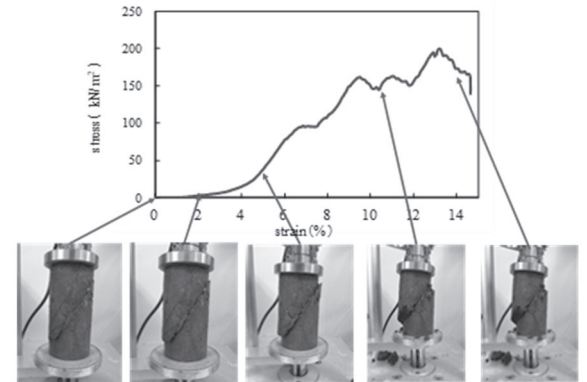
図-15 に非攪乱部の破壊が生じたときの一軸圧縮試験における供試体の状態を、応力ひずみ曲線と関連付けて示した。供試体は圧縮が始まるとまず一次養生後の三軸圧縮試験で発生した破壊面付近でずれが生じる(図-15 (b)~(c))。

破壊面付近の強度が二次養生により回復していると軸差応力とずれの進行とともに発揮されるせん断力が増加し、次に三軸試験による圧縮破壊時に攪乱されなかった非攪乱部が破壊し軸差応力がピークに達した(図-15 (d)~(e))。

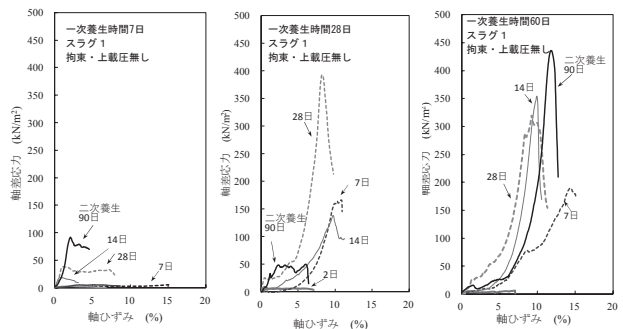
一次養生時間と二次養生後の強度の関係を応力ひずみ関係からみるため、図-16 (a), (b), (c) にそれぞれ一次養生 7 日, 28 日, 60 日で圧縮破壊を与え上載圧なしで二次養生を行った試料の応力ひずみ曲線を示した。図のように、各一次養生時間において強度のばらつきがあるが、全体として(a), (b), (c)と、一次養生時間が長い順に大きな強度が得られた。これは、一次養生で固化が進行してから攪乱された方が二次養生後の強度が大きいうことであり、攪乱タイプ A (remolding) の場合とは逆の傾向である。一次



(a)樽型破壊 (b) 非攪乱部の破壊 (c) 滑落
写真-1 一軸試験後の供試体の様子



(a) 軸ひずみ0% (b) 2% (c) 5% (d) 11% (e) 14%
図-15 非攪乱部の破壊が生じたときの一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線と供試体の状態



(a)一次養生 7日 (b)一次養生 28日 (c)一次養生 60日

図-16 攪乱タイプ B (pre-shearing) を与えて無拘束で二次養生した試料の一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線

養生 7 日では軸ひずみが 2%程度で軸差応力がピークを示すが、このときの破壊は写真-1 (a) の樽型破壊が多かった。これは一次養生後の攪乱により試料全体が圧縮破壊したと考えられる。一方、一次養生 28 日、90 日のケースは軸差応力は軸ひずみとともに緩やかに軸差応力が上昇してピーク強度に達し、軸差応力のピーク時に写真-1 (c) に示した非攪乱部での破壊が起こっていた。これらの試料では一次養生後の攪乱によって生じた圧縮破壊面の強度が回復して、二次養生後の圧縮において非攪乱部が破壊時のせん断断面となったと考えられる。

4.2 攪乱後の二次養生時間と強度の関係

図-17 に攪乱タイプ B の試料の二次養生時間と強度の関係を示す。一次養生 7 日の供試体は、上載圧なしで養生した試料では強度の増加がわずかであったが、一次養生 28 日、60 日の試料は、二次養生 7 日後以降に急激に強度が回復した。前述したように、一次養生 28 日、60 日の供試体では三軸圧縮時に破壊がせん断面付近に集中しせん断面付近の破壊領域以外は大きく攪乱されなかった。二次養生後の一軸圧縮試験の破壊面は、破壊領域以外の非攪乱部で生じており、一次養生時間が長い試料の強度が大きかった原因と考えられる。

図-17 には、一次養生時間 7 日と 28 日の試料について、二次養生時の地盤内での状況を想定して拘束・上載圧を与えて養生した供試体と与えない供試体の強度を示している。これをみると、強度にばらつきがみられるものの、全体として拘束して上載圧を与えた供試体は無拘束の供試体よりも高い強度が得られた。攪乱直後といてよい二次養生 1 日の強度をみると、拘束なしの供試体で 5.8kN/m² に対し、拘束・上載圧を与えた供試体は 40.3 kN/m² と約 7 倍であった。攪乱された直後でも上載圧が作用する地盤内部では一軸圧縮強度で 40 kN/m² 程度の強度が発揮されていると考えられる。

二次養生時間 7 日、28 日の条件では、拘束・上載圧を加えた試料が拘束無しの試料よりも高い強度になった。一次養生 28 日の試料よりも一次養生 7 日の試料のほうが養生中の上載圧による違いが明瞭であり、拘束圧を加えることで発現する強度は 10 倍程度まで増加した。なお、二次養生 14 日の供試体では拘束・上載圧を加えた試料の強度が小さかったが、これは拘束用のモールドから供試体を取り出す手順中に試料の一部が分裂した影響と思われる。

図-18 に攪乱タイプ B (pre-shearing) 拘束・上載圧ありで養生したときの一軸圧縮試験の応力ひずみ曲線を示す。図-16 (a) と比べると一次養生 7 日の試料(図-18 (a))の二次養生 1 日、2 日、7 日においてひずみ 1~2%付近でいったん軸差応力がピークを示した後に再び軸差応力が増加し、2 回目のピークを示している。前述したように一次養生 7 日の供試体は三軸圧縮ひずみ 15%を与えた時の破壊形態が樽型破壊であり供試体全般に破壊の影響が表れたが、図より二次養生時の上載圧は 2 回目の強度の発現に寄与したと思われる。これに対して、一次養生 28 日後に攪乱を

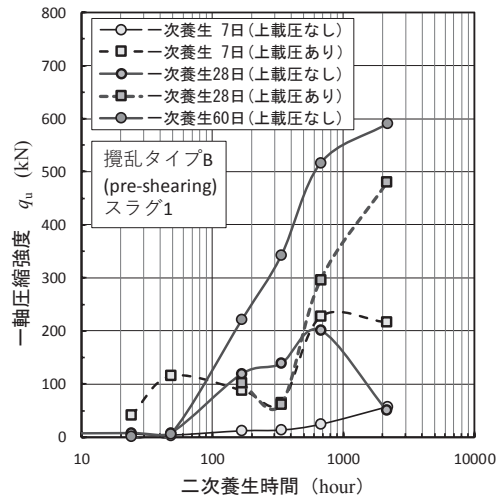


図-17 攪乱タイプ B を与えた製鋼スラグ混合土の二次養生時間と強度の関係

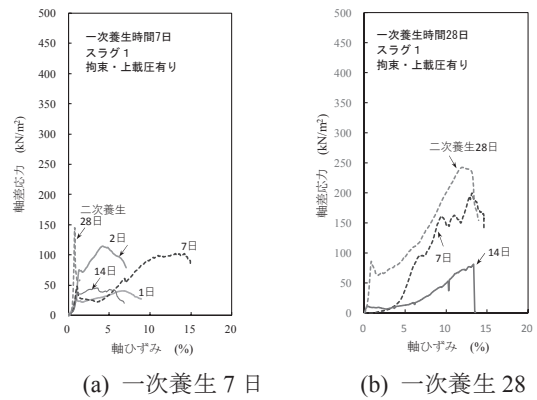


図-18 攪乱タイプ B (pre-shearing) を与え拘束・上載圧ありで二次養生した試料の一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線

えた試料では二次養生時間 3 日以降で拘束圧が強度に及ぼす影響が明瞭に見られなかった。一次養生 28 日の供試体の二次養生後の強度は非攪乱部がすべり面となっており、この場合は二次養生における上載圧の有無が強度に影響しなかったと考えられる。

以上のように、製鋼スラグ混合土は、打設後 7 日、28 日、60 日経過し、十分に強度が発現した状態で圧縮破壊した場合においても、その後の養生により強度が回復する特性があること、今回実施した三軸圧縮試験と一軸圧縮試験により測定した結果では、打設後短時間で圧縮破壊の履歴を受けるよりも、長い一次養生時間の後に圧縮履歴を受けた試料の方が、攪乱後の養生による強度発現は大きいことがわかった。今後せん断面を固定した試験によって、破壊履歴をうけたせん断面での強度回復特性について検討する必要があると考えられる。

5. 結論

製鋼スラグ混合土の攪乱後の強度回復特性について実験により検討を行った。実験では、製鋼スラグと港湾の浚

渾濁粘土を混合して養生（一次養生）した後に、固化した混合土を練返してモールドに充填する攪乱タイプ A, 固化が十分進行した供試体を三軸圧縮破壊する攪乱タイプ B の操作を行った。攪乱を与えた試料を再養生し（二次養生）、攪乱により低下した製鋼スラグ混合土の強度が二次養生によってどのように回復するかを調べた。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 一次養生時間 T_1 を 7 時間, 1 日, 2 日, 3 日として攪乱タイプ A (remolding) を与えた場合, T_1 が 7 時間の時は攪乱による影響はほとんど見られなかった。 T_1 が 1 日～3 日の場合, 攪乱直後の強度は概ね $10\sim 20\text{kN/m}^2$ となり, 攪乱が無いときの強度約 1kN/m^2 の 10 倍以上の強度が得られる。一方, 攪乱後の強度回復は T_1 が大きいほど小さい。盛土施工時の強度増加を目的として一次養生を行う場合, 強度回復特性と T_1 の関係に留意する必要がある。

- (2) 攪乱タイプ A (remolding) を与えた試料の二次養生後の一軸圧縮強度推定式として次式を提案した。

$$q_u = K_1 \left(\frac{T_1}{7}\right)^{-K_2} \quad (7 \leq T_1) \quad (2)$$

ここで q_u : 一軸圧縮強度, T_1 : 一次養生時間 (hour), K_1 : 攪乱が無いときの二次養生時間 T_2 (hour) における製鋼スラグ混合土の強度, K_2 は二次養生時間 T_2 における強度の低下を表すパラメータである。 K_1 とは K_2 は T_2 の関数で, T_2 の増加とともに K_1 は増加し K_2 は減少する。また式中の 7 (時間) は製鋼スラグ混合土の固化が本格的に開始する時間である。

- (3) 攪乱タイプ B (pre-shearing) を与える試験では, 一次養生時間 7 日, 28 日, 60 日の試料に対して三軸圧縮試験により 15% の圧縮ひずみを与え, 二次養生後の強度を調べた。すべての条件で強度は二次養生により増加し, 二次養生 90 日で $60\sim 400\text{kN/m}^2$ の強度が発現した。二次養生後の強度回復は一次養生時間が長くより固化が進んでから圧縮を与えた試料の方が大きく, この結果は攪乱タイプ A とは逆であった。これは, 一次養生後の三軸圧縮試験による破壊が, 供試体全体で発生したか (一次養生時間 7 日の供試体), 特定のすべり面に集中したか (一次養生時間 28 日, 60 日の供試体) の違いによると考えられる。

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) 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 0, pp. 1-16, 2017.

- 4) Cikmit, A.A., 土田孝, Kang G.O., 嘉数浩靖, 本田秀樹, Tang Y.X. : 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, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol. 35, No. 1, pp.93-100, 2017.
- 5) 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 203, pp. 501-513, 2019.
- 6) Cikmit, A. Aristo., 土田孝, 白神拓也, 嘉屋健二, 水谷享二: 混合して時間が経過した後に攪乱を与えた製鋼スラグ混合土の強度発現特性, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.123-130, 2019.
- 7) Cikmit, A., A., Tsuchida, T., Kang, G., Hashimoto, R. and Honda, H.: Particle Size Effect of Basic Oxygen Furnace Steel Slag in Stabilization of Dredged Marine Clay, Soils and Foundations, 59, 5, 1385-1398, 2019.
- 8) 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, 24 巻, pp. 327-332, 2008.
- 9) 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: カルシア製鋼スラグ混合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.
- 10) 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: カルシア製鋼スラグ混合土による海面埋立, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I_888-I_893, 2014.
- 11) 山田耕一, 辻匠, 渡部要一, 水谷崇亮, 森川嘉之, 鶴飼亮行: 軟弱地盤上のカルシア製鋼スラグ混合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.
- 12) 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.
- 13) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター: 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル, 2017.

(2020年6月25日 受付)