

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

Strength Development of Stabilized Dredged Marine Soil using Steelmaking Slag

Arlyn Aristo CIKMIT	(広島大学大学院工学研究科)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)
姜 庚吾 Gyeong O KANG	(広島大学大学院工学研究院)
嘉敷浩靖 Hiroyasu KASUU	(広島大学大学院工学研究科)
本田秀樹 Hideki HONDA	(JFE スチール(株))
湯 怡新 Yi Xin TANG	(関門港湾建設(株))

製鋼スラグを海成粘土に添加した供試体を作製し、ベーンせん断試験と一軸圧縮試験により強度発現を検討した。また混合直後の試料の強度はフロー試験から調べ、フロー値と強度の関係式を導いた。強度試験結果から、強度発現を養生時間によって、養生初期の強度増加の小さい強度発現準備期（混合から約5時間まで）、養生時間とともに強度が大きく増加する前期強度発現期（混合から約72時間まで）、強度が緩やかに増加する後期強度発現期の3つの段階に分けることができた。セメント固化処理土と比較すると長い強度発現準備期を有することが製鋼スラグ混合土の特徴であるといえる。

キーワード：製鋼スラグ，海成粘土，浚渫粘土 (IGC : D10, K06)

1. はじめに

日本では、鉄鋼製造工程において4000トンのスラグが毎年発生している¹⁾。図-1に鉄鋼スラグの製造フローと利活用の状況を示すが²⁾、鉄鋼製造工程で発生する副産物である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る。この数十年の間、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),4),5)}。転炉系スラグと電気炉系スラグである製鋼ス

ラグは工学的性質や長期的な環境への影響について明らかになっていなかったため使用用途に制限があり、高炉スラグに比べて建設現場での利用が進んでいないといえる。

一方、沿岸部において、港湾整備や航路確保のための浚渫工事により大量の浚渫土が発生していることは、国内および海外で重要な問題となっている⁴⁾。沿岸部では、各種の埋め立て工事や港湾工事において地盤材料の需要は高く、山砂や海砂などの自然由来の原材料が材料の枯渇や環境問題への配慮から使用が制限されているため、浚渫土が

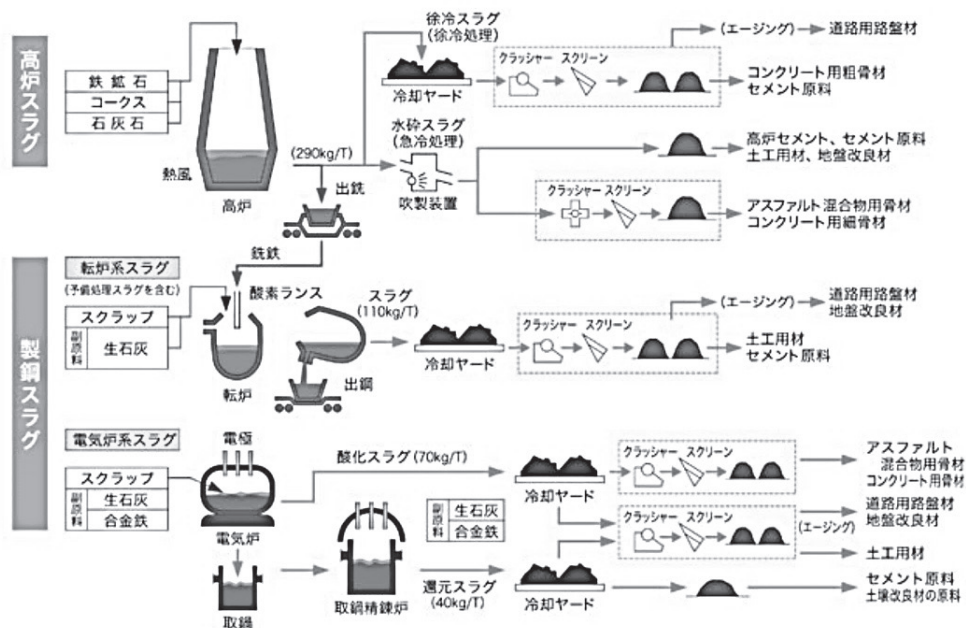


図-1 鉄鋼スラグ製品の製造フロー²⁾

セメントや高炉セメント、フライアッシュなどの改良材によって固化処理することで、地盤材料として使用されてきた⁶⁾。

製鋼スラグは、鉄鋼製造工程の副産物であり、冷却ヤードで放冷や散水されたのち礫ほどの大きさに産出される。製鋼スラグの主成分は、石灰とシリカであり、金属元素が酸化物の形で取り込まれているが、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る場合があり、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、混合固化した土（カルシア改質土と呼ばれている）の利用に関する研究が活発に実施されてきた^{9,10,11,12)}。しかし、浚渫土を混合したときの強度発現が時間とともにどのように進むかについてはほとんど研究されていない。本研究は、製鋼スラグを港湾の浚渫粘土と混合した土の混合直後からの強度発現特性を明らかにすることを目的として実施した。

2. 実験方法

2.1 試料の物理的性質

本研究では、製鋼スラグとして広島県内で生産された転炉スラグを使用した。図-2は今回使用した転炉スラグで、最大粒径5mm、自然含水比は6.48%であり、その他の物理的性質を表-1に示した。浚渫粘土と製鋼スラグを混合した時の強度に及ぼす要因のひとつとして製鋼スラグに含まれる遊離石灰 f-CaO の含有率があるが^{7,8)}、今回用いた試料は4.27%であった。製鋼スラグは高炉水砕スラグなどと比較して、製造場所や工程による組成の違いが大きい⁷⁾、混合土の強度発現には最大粒径と f-CaO の含有率の影響が大きいとされている。したがって、本研究の成果を適用する上では、最大粒径5mm、f-CaO含有率4.27%の製鋼スラグであることに留意する必要がある。

徳山港粘土は、固化処理土の研究において使用されており、混合後の養生時間と強度発現特性の関係が詳しく報告されている^{13,14,15)}。ただし、今回使用した徳山港粘土は2016年10月に新たに浚渫された粘土である。徳山港粘土は液性限界の0.9~1.0倍の含水比で海底に存在するが、グラブ浚渫によって含水比は自然状態から20~30%増加した状態となっている。実験に用いた試料は、2mmのふるいを通さず貝殻の破片などを除去して作製した。表-2に今回使用した徳山港粘土の物理的性質を示すが、9.98%の砂を含んでおり、液性限界は107.15%でこれまでセメント固化処理土の研究に用いた徳山港粘土とほぼ同様であった。

製鋼スラグを利用した改良土の工学的性質を調べるために表-1に示した配合設計で室内試験を実施した。初期含水比 w_n はスラグ混合前の粘土の含水比であり、徳山港粘土の液性限界の1.2倍から2.0倍に調整した。ここで、製鋼スラグ添加率 R_{SMS} は、製鋼スラグと粘土を混合した

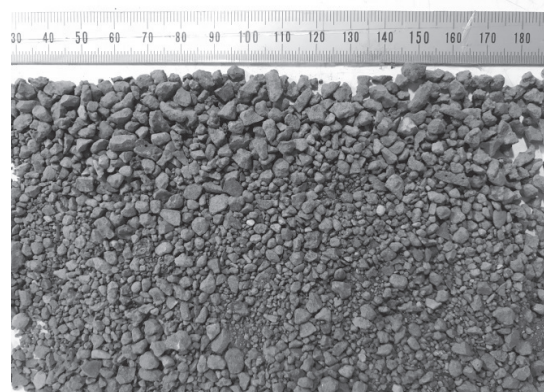


図-2 実験に用いた製鋼スラグ（転炉スラグ）

表-1 実験に用いた製鋼スラグの物理的性質

性質	製鋼スラグ
表乾密度 (gr/cm ³)	3.15
絶乾密度 (gr/cm ³)	3.02
吸水率 (%)	4.18
粒径 (mm)	5mm 以下
粗粒分 (%)	99.50
細粒分 (%)	0.50
遊離石灰, f-CaO (%)	4.27

表-2 徳山港粘土の物理的性質

性質	徳山港粘土
液性限界, LL (%)	107.15
塑性限界, PL (%)	38.64
液性指数, PI (%)	68.50
土粒子密度, Gs (g/cm ³)	2.647
細粒分 (%)	9.98
粗粒分 (%)	90.02
統一土質分類法による分類 (USCS)	CH-OH
pH	7.2
強熱減量, LOI (%)	8.17
塩分濃度 (%)	3.48

時の全体積に対する製鋼スラグ粒子の体積の比であり、次式で計算した。

$$R_{SMS} = \frac{\text{製鋼スラグ粒子の体積}}{\text{全体積(粘土と製鋼スラグ粒子の体積)}} \quad (1)$$

製鋼スラグの体積は重量と表乾密度で計算している。セメント固化処理土の場合、添加率は粘土の乾燥重量に対する質量比を用いる場合が多いが、製鋼スラグを混合した粘土では式(1)に示す体積の比によつて添加率を表す場合が多く⁷⁾、既往の事例では添加率20%、30%がよく採用されている。以上の理由で本研究では製鋼スラグ添加率20%と30%で配合を行った。

本研究で作製した製鋼スラグ混合土試料の配合を表-3に示した。製鋼スラグは土粒子の表乾密度3.15と土粒子よりも大きいいため混合土の密度は1.63~1.91g/cm³となっている。表-4は、本研究で行った製鋼スラグ混合土と筆者

表-3 製鋼スラグ混合土の配合表

	製鋼スラグ添加率	項目	徳山港粘土					製鋼スラグ	混合土全体	混合土の密度 (g/cm ³)	徳山港粘土の w ₀ /w _L
			土粒子	粘土内の水	加えた水	全水量	粘土全体				
			密度 (g/cm ³)	2.646	1.03	1.03	1.03				
Case 1	20%	質量(g)	2,372	2,541	509	3,050	5,422	3,038	8,459	1.75	1.2
		体積(ml)	896	2,467	494	2,961	3,857	964	4,822		
Case 2	20%	質量(g)	2,042	2,560	722	3,282	5,323	3,117	8,440	1.69	1.5
		体積(ml)	772	2,485	701	3,186	3,958	989	4,947		
Case 3	20%	質量(g)	1,907	2,394	1,080	3,474	5,382	3,224	8,606	1.66	1.7
		体積(ml)	721	2,325	1,049	3,373	4,094	1,023	5,117		
Case 4	20%	質量(g)	1,725	2,239	1,458	3,697	5,422	3,340	8,761	1.63	2
		体積(ml)	652	2,173	1,416	3,589	4,241	1,060	5,301		
Case 5	30%	質量(g)	1,939	2,310	183	2,493	4,433	4,257	8,690	1.91	1.2
		体積(ml)	733	2,243	178	2,421	3,154	1,352	4,505		
Case 6	30%	質量(g)	1,701	2,114	620	2,734	4,435	4,451	8,886	1.88	1.5
		体積(ml)	643	2,052	602	2,654	3,297	1,413	4,710		
Case 7	30%	質量(g)	1,565	2,051	799	2,850	4,415	4,534	8,949	1.87	1.7
		体積(ml)	591	1,991	776	2,767	3,359	1,439	4,798		
Case 8	30%	質量(g)	1,413	1,869	1,159	3,028	4,441	4,690	9,131	1.85	2
		体積(ml)	534	1,815	1,125	2,940	3,474	1,489	4,963		

らが過去に実施した徳山港粘土のセメント固化処理土における固化材の添加量の比較である。粘土の乾燥重量100gとし、セメント固化処理土については乾燥質量比による添加率を20%と30%としたときの固化材添加量を計算した。表-4に示すように、製鋼スラグ混合土の添加量はセメント固化処理土に比べ質量比と体積比でいずれも約4.5倍となっており、添加する固化材の量が大きいことが製鋼スラグ混合土の特徴である。

表-4 処理土1m³におけるセメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の改良材の添加量の比較

固化材		製鋼スラグ混合土**	セメント固化処理土*
固化材添加率 (20%)	質量(gr)	122.12	25.00
	体積(cm ³)	38.77	7.94
固化材添加率 (30%)	質量(gr)	183.18	42.86
	体積(cm ³)	58.15	13.61

*添加率は粘土の乾燥重量に対する質量比

**添加率は式(1)による体積の比

2.2 供試体作製方法

製鋼スラグは表面乾燥状態にするために20℃の部屋で24時間乾燥させた。乾燥後の含水比は1.12%であった。その後、遊離石灰(f-CaO)が空気と反応しないようにラップした袋に入れて保存した⁷⁾⁸⁾。製鋼スラグを乾燥させる際、乾燥装置を使用しなかったのは、現場の条件に合わせるためである。図-3に製鋼スラグと徳山港粘土の粒度分布を示す。製鋼スラグの平均粒径は1.7mmであった。

徳山港粘土は、調整後の含水比が液性限界の1.3倍程度であったため、初期含水比1.2w_Lの場合は、あらかじめ天日干しすることで含水比を低下させた。所定の配合条件で準備した粘土と製鋼スラグをハンドミキサーで5分間混合した。この時、初期含水比を調整するために用いた水は、市販の人工海水(塩分濃度3.5%)を用いた。混合後は、一軸圧縮試験用モールド(径50mm,高さ100mm)とベーンせん断試験用モールド(φ60mmx60mm)に試料を充填した。

一軸圧縮試験用モールドとベーンせん断試験用モールドは20±2℃に保たれた室温の部屋で養生した。ベーンせん断試験用のモールドは試験開始までの養生時間が短いので気中養生とし、養生期間が長い一軸圧縮試験用モールドは蒸留水で満たした箱の中で水中養生を行った。

2.3 測定方法

混合後、養生90日までの強度発現特性を調べるために

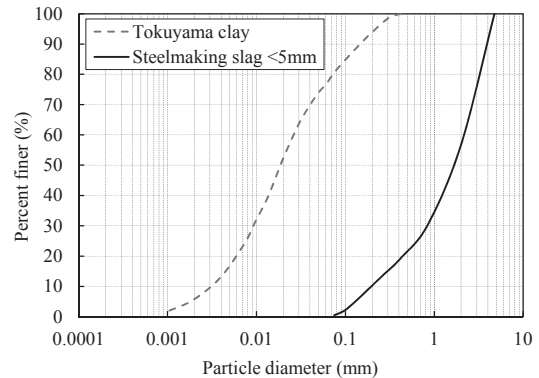


図-3 粒径加積曲線

ベーンせん断試験と一軸圧縮強度試験を行った。

養生時間が30分から15時間までの比較的やわらかい試料の強度をベーンせん断試験によって求めた。図-4はベーンせん断試験機である。図-5にベーンの形状と試験時の状況を示すが、製鋼スラグ混合土の試料を直径6cm,高さ6cmの亚克力製容器に詰めて台に固定し、ベーンを試料の中心に貫入した後6°/minの速度で回転させ以下の式(2)により、ベーンせん断強度 S_{u(vane)}を求めた。

$$S_{u(VANE)} = \frac{M}{\pi\{(D^3/6) + (HD^2/2) - (d^3/12) + (d^2La/2)\}} \quad (2)$$

ここで、Mは測定された最大トルク(N・m)、dはベーンシ

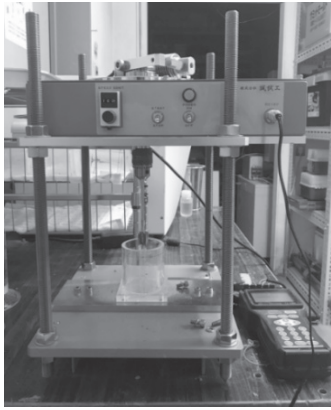


図-4 ベーンせん断試験機

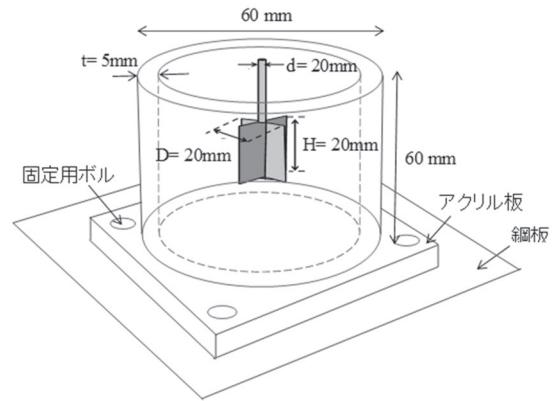


図-5 ベーンせん断試験シャフトの形状

シャフトの直径(m), L はベーンシャフトと供試体の接触部の長さ(m), a は表面摩擦係数, D はベーンシャフトの直径(m), H はベーンシャフトの高さ(m)である。

養生 15 時間から 90 日までの供試体においては一軸圧縮試験機によって測定した。試験実施直前, 供試体の表面が平坦でない場合は, 応力集中によって過少評価された値が測定されないようにスパチュラを用いて表面が平らになるように整形した。ひずみ速度は 1%/min で行い, 得られた応力ひずみ曲線から, 割線係数 E_{50} を求めた。

混合直後の混合土の施工性を評価するために, フロー値がよく用いられている。製鋼スラグ混合土のフロー試験を JHS-313 に基づいて実施した。図-6 に試験の様子を示すが, 直径 80mm, 高さ 80mm のアクリル製のモールドを使用してフロー値を求めた。

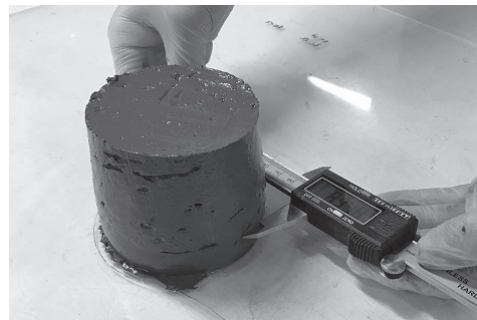


図-6 フロー試験

3. 試験結果と考察

3.1 単位体積重量とフロー値

今回の配合による製鋼スラグ混合土の単位体積重量と混合前の徳山港粘土の正規化含水比 w_0/w_L の関係を図-7 に示した。混合前の徳山港粘土の単位体積重量は正規化含水比の増加とともに減少している。製鋼スラグを式(1)で定義した体積比による添加率 20%, 30% で混合すると, 単位体積重量はそれぞれ約 16.5~17.0kN/m³, 18.5~19.5 kN/m³ に増加しており, 砂質土と同様の高い単位体積重量を有している。この高い単位体積重量は設計上カウンターウェイトが必要な箇所や, 受働土圧の発現が求められる箇所に使用する場合に有利となる性質である。

図-8 は混合前の徳山港粘土の正規化含水比 w_0/w_L と, 混合直後のフロー値の関係である。図のように, フロー値は正規化含水比の増加とともに増加し, 製鋼スラグ添加率が大きくなると減少した。これは製鋼スラグ添加率が大きいほど混合後の改良土の初期含水比が低下するためである。

図-9 は, 製鋼スラグ混合土および既往の研究¹⁶⁾で実施されている浚渫土にベントナイト, セメントを添加した土のフロー値 F を 80mm で除した正規化フロー値 $F/80$ とベ

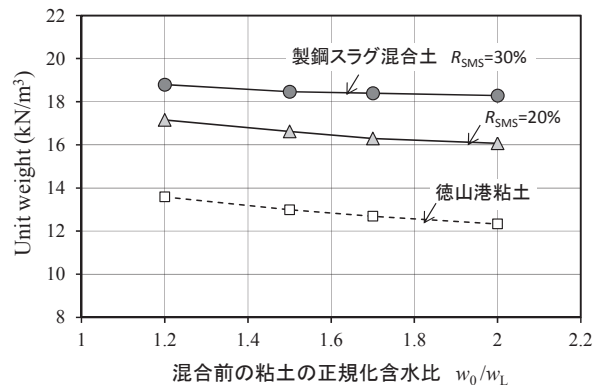


図-7 製鋼スラグ混合土の単位体積重量

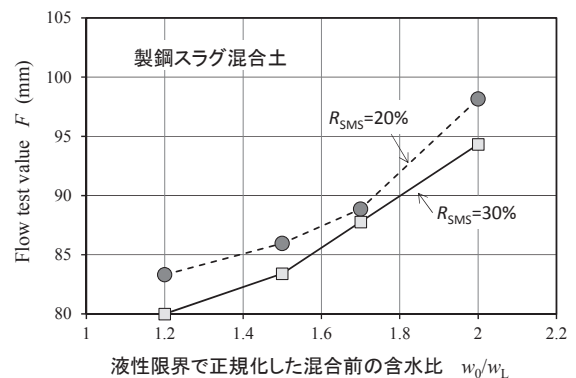


図-8 製鋼スラグ混合土のフロー値と液性限界で正規化した混合前の粘土の含水比の関係

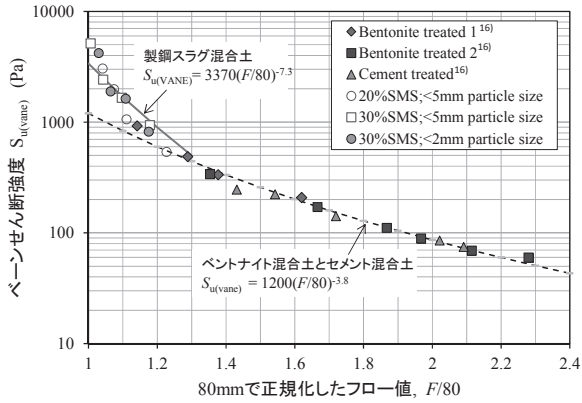


図-9 正規化フロー値とベーンせん断強度の関係

ベーンせん断強度 $S_{u(vane)}$ の関係を表している。両者は比較的良好な相関があり、 $S_{u(vane)}$ と $F/80$ の関係を求めると、ベントナイトあるいはセメント添加の粘土については以下の式になった。

$$S_{u(VANE)} = 1200(F/80)^{-3.8} \quad (\text{Pa}) \quad (3)$$

これに対して、製鋼スラグ混合土では $F/80$ が 1.3 以下の範囲で次式の関係が得られた。

$$S_{u(VANE)} = 3370(F/80)^{-7.3} \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

上記の関係は、製鋼スラグ混合土の混合直後の強度の評価および混合直後の法勾配の推定において有用と考えられる。図-9のように、同一のフロー値に対する製鋼スラグ混合土のせん断強度は、ベントナイトやセメントを混合した土の強度に比べ、正規化フロー値が 1.3 以下の範囲で大きかった。

3.2 応力-ひずみ曲線

製鋼スラグ添加率 30%、初期含水比 1.5w_L の試料の一軸圧縮試験から得られた養生 15 時間から 90 日までの応力-ひずみ曲線を図-10 に示す。図のように、養生時間の経過とともに応力-ひずみ曲線の形状は大きく変化しており、養生 30 分から 15 時間までの曲線は、破壊ひずみが 2%程度かそれ以上であって、一般的な軟弱粘土の強度特性と類似している。養生 7 日以降の応力-ひずみ曲線では破壊時の軸ひずみが減少して 2%以下となり、もっとも長い養生期間 90 日の試料における破壊時のひずみは 0.8%であった。これらの値は、セメント固化処理土とほぼ同程度である。

3.3 養生時間と強度発現の関係

ベーンせん断試験と一軸圧縮試験によって得られた製鋼スラグ混合土の強度と養生時間の関係を図-11, 12 に示す。図-11 は製鋼スラグ添加率 20%で初期含水比が 1.2~2.0 w_L のもの、図-12 は製鋼スラグ添加率 30%で初期含水比が

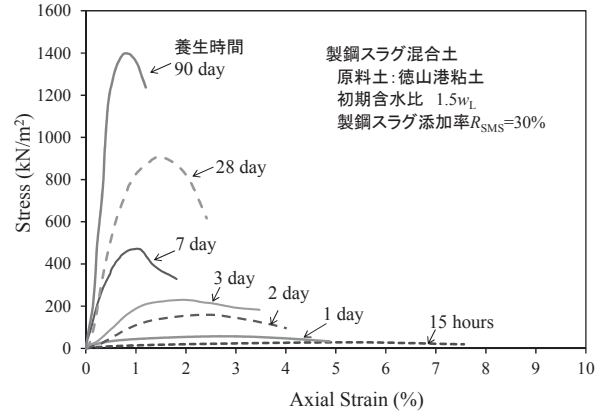


図-10 製鋼スラグ混合土の応力ひずみ関係と養生時間 (製鋼スラグ添加率 30%, 初期含水比 1.5w_L)

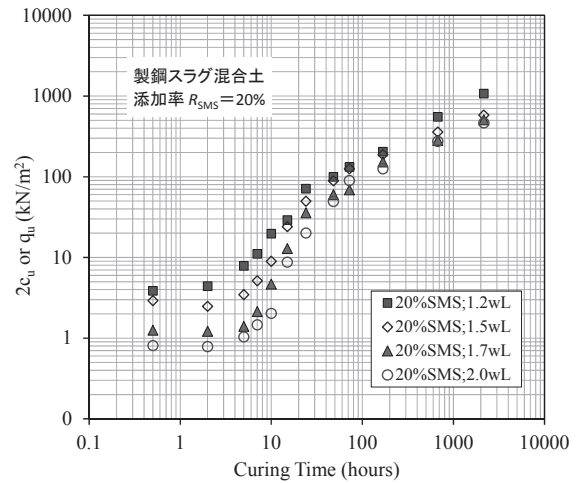


図-11 製鋼スラグ添加率 20%の一軸圧縮強度と養生時間の関係

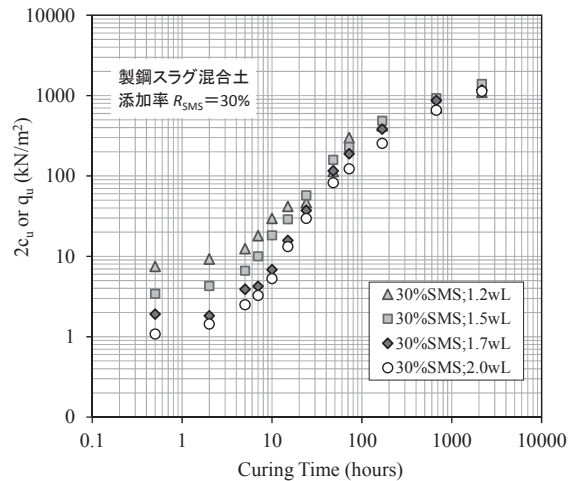


図-12 製鋼スラグ添加率 30%の一軸圧縮強度と養生時間の関係

1.2~2.0 w_L のものである。

図-11, 図-12 のように、養生時間とともに製鋼スラグ混合土の強度が増加することが確認できる。初期含水比の影響をみると、いずれの養生時間においても初期含水比

1.2wL, 1.5wL, 1.7wL, 2.0wLの順番に強度が大きくなっており、初期含水比が小さいほど強度発現は大きい。これはセメント固化処理土の場合と同様である。

図-13 に製鋼スラグ添加率 20%と 30%のデータをまとめて示したが、図を見ると製鋼スラグ混合土の強度発現過程は3つのグループに分けることができると考えられる。養生5時間までは、顕著な強度増加はみられず、この期間は強度発現準備期であると考えられる。次に養生5時間から72時間までにおいては、養生時間とともに強度が大きく増加する期間であり、強度と養生時間の関係は両対数グラフ上で直線の関係になっている。この期間を前期強度増加期と呼ぶことにする。養生72時間以降は強度増加傾向はやや緩やかになっており、この期間を後期強度発現期と呼ぶことにする。

図-14 は Kang によって実施されたセメント固化処理土の強度試験の結果であり¹⁴⁾、セメント添加率が乾燥重量比で10%から20%の範囲で調べられている。図を見ると、セメント固化処理土の場合、養生時間30分の段階から養生時間72時間まで強度と養生時間の関係は両対数グラフ上で直線の関係となっており、混合直後から図-13における前期強度発現期に入っていると考えられる。したがって、製鋼スラグ混合土において、顕著な強度発現が無い強度発現準備期が存在することは、セメント固化処理土と異なる特徴であると考えられる。

図-15 に、セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の時間と強度発現の関係を模式的に示した。すでに述べたように製鋼スラグ混合土は強度発現準備期、前期強度発現期、後期強度発現期の3つに分けることができるが、セメント固化処理土には強度発現準備期がみられない。製鋼スラグ混合土において強度が発現するメカニズムとしては、製鋼スラグの即時的な吸水による強度改善（物理的改善）と経時的な水和反応による強度改善（化学的改善）の2つがあると考えられている⁷⁾。前者は、混合した製鋼スラグが粘土の水分を吸収する（含水比が低下する）ことにより、混合時に粘土の強度が増加する効果によるものである。後者は、製鋼スラグから溶出するカルシウムと粘土から溶出するシリカやアルミナが、カルシウムシリケート系水和物(C-S-H)やカルシウムアルミネート系水和物(AFM)を形成することによる強度増加である。図-15をみると製鋼スラグ混合土では混合の直後から0.6~5kPaの強度が発現しており、これはセメント固化処理土に比べ数倍の固化材を混合している効果（上記の物理的改善）による強度と考えられる。混合直後から化学的な反応による強度発現も進行しているが、物理的改善による強度を上回るまでに時間を要し、これが強度発現が顕著にみられない強度発現準備期となっていることが考えられる。しかし、この推定には化学的な裏付けがないので、今後さらに検討する必要がある。

3.4 変形係数

図-16 は製鋼スラグ混合土の変形係数 E_{50} と養生時間の関係である。図のように変形係数も強度と同様に養生時間

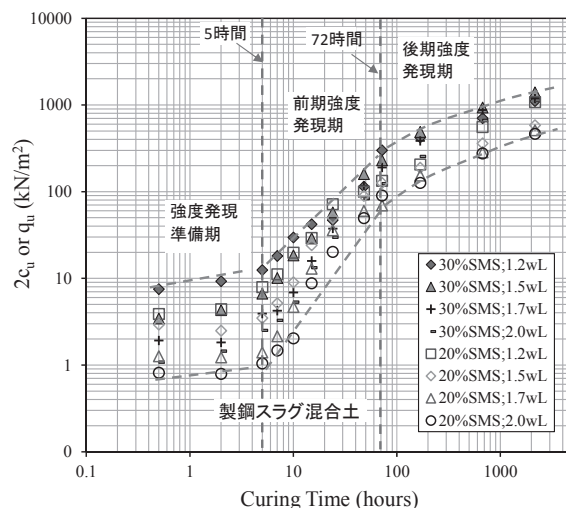


図-13 製鋼スラグ混合土の強度と養生時間の関係

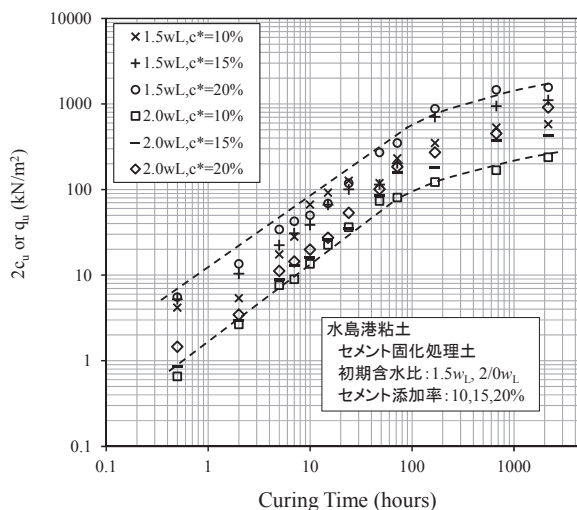


図-14 セメント固化処理土の土の強度と養生時間の関係

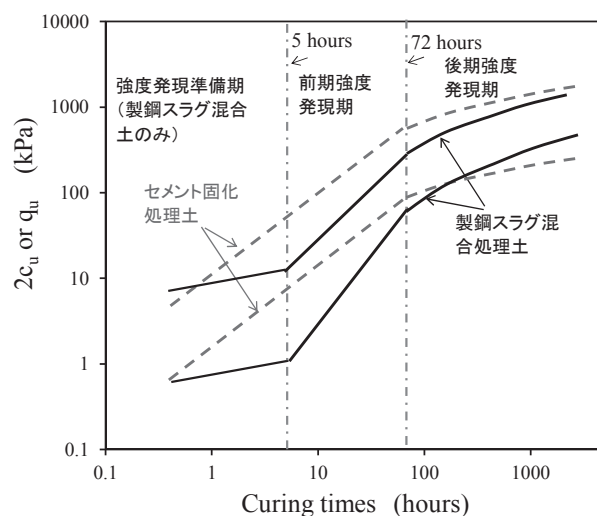


図-15 セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の強度発現傾向の比較

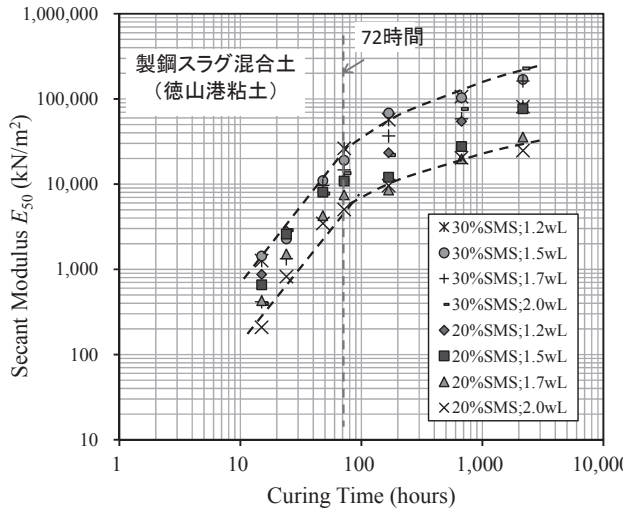


図-16 製鋼スラグ混合土の変形係数と養生時間の関係

とともに増加しており、前期強度発現期と後期強度発現期の境界である養生時間 72 時間付近で増加傾向が変化していることがわかる。

図-17(a), (b)に、セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の強度と変形係数の関係を比較して示した。図のように、いずれも強度と変形係数には良好な関係があり、次式の関係が得られた。

$$\text{製鋼スラグ混合土} \quad E_{50} = 19.1 q_u^{1.25} \quad (5)$$

$$\text{セメント固化処理土} \quad E_{50} = 35.3 q_u^{1.13} \quad (6)$$

ここで E_{50} は変形係数、 q_u は一軸圧縮試験から求められた一軸圧縮強度である。図-17(b)には比較のため式(5)を示しているが、図のように変形係数と強度の関係については、製鋼スラグ混合土とセメント固化処理土の差は小さく、初期含水比や固化材添加率にも大きく影響されないといえる。図-17(a), (b)の二つのデータを合わせたものを図-18に示した。これらの関係から以下の式(7)を求めた。

$$E_{50} = 17.3 q_u^{1.27} \quad (7)$$

式(7)は、初期含水比や固化材の種類、養生時間に関係なく適用できると考えられる。

4. 結論

製鋼スラグを固化材として軟弱な浚渫土に混合して改良する製鋼スラグ混合土の研究開発が進められているが、混合直後からの強度発現特性に関する知見は少ない。本研究では、浚渫された海成粘土に製鋼スラグを混合し、供試体を作製し、強度試験やフロー試験から製鋼スラグ混合土の養生期間中の強度発現特性を検討した。以下に本研究で得られた製鋼スラグ混合土に関する結論を示す。

(1) 製鋼スラグ混合土の正規化フロー値（フロー値を 80mm で除したもの）とバーンセン断強度の関係を求

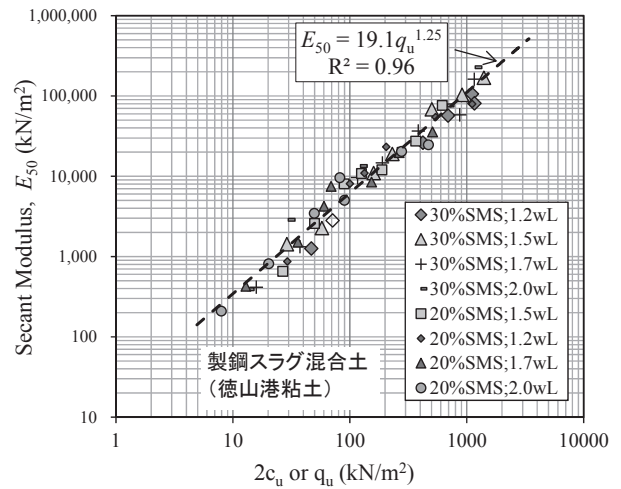


図-17(a) 変形係数と強度の関係（製鋼スラグ混合土）

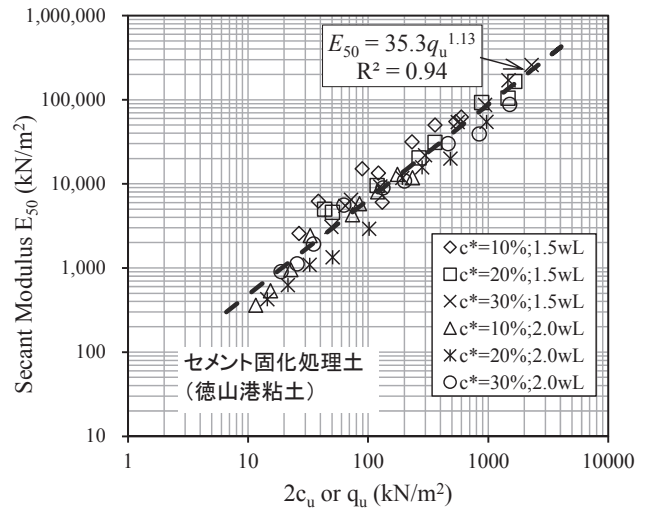


図-17(b) 変形係数と強度の関係（セメント固化処理土）

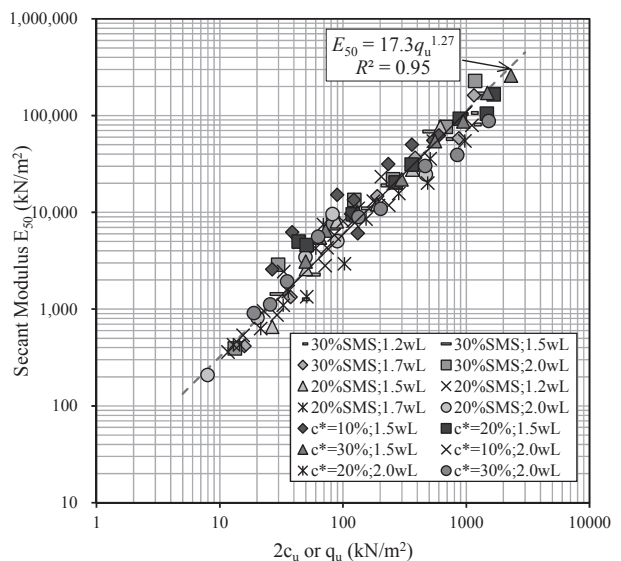


図-18 セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の変形係数と強度の関係

めた。同一のフロー値に対する製鋼スラグ混合土のせん断強度は、同ベントナイトやセメントを混合した土に比べ、正規化フロー値が 1.3 以下の範囲で大きかった。

- (2) 製鋼スラグ混合土の強度試験結果から、製鋼スラグを固化材として用いた製鋼スラグ混合土の強度が養生の進行と共に増加することが確認された。強度試験結果から、製鋼スラグ混合土の強度発現を 3 つの段階に分けることができた。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である。
- (3) セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土の強度増加傾向を比較すると、セメント固化処理土は強度発現準備期がなく、混合直後から前期強度発現期になっている。製鋼スラグ混合土では混合の直後から 0.6~5kPa の強度が発現しており、これはセメント固化処理土に比べ数倍の固化材を混合している効果（上記の物理的改善による強度）と考えられる。混合直後から化学的な反応による強度発現も進行しているが、物理的改善による強度を上回るまでに時間を要し、これが強度発現が顕著にみられない強度発現準備期となっていることが考えられる。しかし、この推定には化学的な裏付けがないので、今後さらに検討する必要がある。
- (4) 強度試験結果から得られた変形係数(E_{50})と一軸圧縮強度の関係から、変形係数が初期含水比や改良材の種類、養生の進行によらず強度増加に関係しており、一軸圧縮強度と変形係数の関係を表す式を提案した。

参考文献

- 1) Horii, K., Tsutsumi, N., Kitano, Y. and Kato, T.: Processing and Reusing Technologies for Steelmaking Slag, *Nippon Steel Technical Report*, No.104, pp.123-129, 2013.
- 2) 日本スラグ協会: 鉄鋼スラグについて, <http://www.slg.jp/slag/index.html> (2017年9月26日確認)
- 3) Motz, H., and Geiseler, J.: Products of Steel slag an opportunity to save natural resources, *Waste Management* Vol.21, pp.285-293, 2001.
- 4) Mahieux, P.-Y., Aubert, J.-E., and Escadeillas, G.: Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.742-747, 2009.
- 5) Poh, H.Y., Ghataora, G. S., and Ghazireh, N.: Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.18, No. 2, pp.229-240, 2006.
- 6) 国土交通省港湾局: 浚渫土砂の海洋投入及び有効利用に関する技術指針, 2006, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/11/110619/01.pdf> (2017年9月26日確認)
- 7) 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, pp.2_2-2_5, 2017.
- 8) Yildirim, I.Z., and Prezzi, M.: Geotechnical Properties of Fresh and Aged Basic Oxygen Furnace Steel Slag, *Journal Material in Civil Engineering*, Vol.27, Issue 12, pp.04015046(1-11), ASCE, 2015.
- 9) 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*, pp.327-332, 2008.
- 10) 武田将英, 五明美智男, 永留健, 辻井正人, 木曾英滋, 中川雅夫: 浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合固化改良の実海域試験一連続式混合投入施工, *海洋開発論文集* 第24巻, pp.351-356, 2008.
- 11) 平井壮, 水谷崇亮, 菊池善昭, 川端雄一郎: 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力学特性に与える影響について, *港湾空港技術研究所報告* 第51巻第3号, pp.77-107, 2012.
- 12) 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, *土木学会論文集 B3(海洋開発)*, Vol.70, No.2, pp.888-893, 2014.
- 13) 土田孝, 嶋川奈津美, 安部太紀, 湯怡新: 高含水比の海成粘土を原料土とするセメント固化処理土の強度発現過程に関する研究, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8, No.1, pp.53-70, 2013.
- 14) Kang, G., Tuchida, T., and Athapaththu, A.M.R.G.: Estimation of Strength Mobilization on Cement-Treated Dredged Clay in Early Stages of Curing, *Soils and Foundations*, Vol.55, Issue 2, pp.375-392, 2015.
- 15) Kang, G., 脇岡宏行, 土田孝: ベンダーエレメント試験で測定した養生初期のセメント処理土の弾性係数と発現した強度の関係について, *地盤と建設*, Vol.33, No.1, pp.97-104, 2015.
- 16) Kang, G., Tuchida, T., Tang, T.X., and Kalima, T.P.: Liquid limit of cement treated marine clays with various sand and cement contents, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.5, 2017.(印刷中)

(2017年6月19日 受付)