

浚渫土と鉄鋼スラグの混合土の工学的特性と混合の施工方法

Strength Properties and Processing of Dredged Soil and Iron-Steel Slug Mixture

湯 怡新 Yi Xin TANG (関門港湾建設 (株))

浚渫土砂の受入処分場が不足するなか、その減量化ならびに有効利用技術に対するニーズは高まっている。一方、製鉄所の銑鉄と製鋼過程で発生する高炉スラグと製鋼スラグの大部分はセメント等に利用されながらも、最終的な土木分野への応用も大きく期待されている。

本文は、高炉スラグと製鋼スラグの生成過程および物性を踏まえ、土木分野における単独利用の問題点を提起した。浚渫土と混合することにより、浚渫土の軟弱性状を改善するとともに、鉄鋼スラグの諸課題が解消可能であることを示した。また、1年におよぶ実験より強度発現はセメント混合処理土に類似することが分かった。最後に混合土の強度設計と混合の実施方法を検討した。

キーワード：浚渫土，スラグ，混合処理，一軸圧縮強度，施工 (IGC : D10, H11, K04)

1. はじめに

港湾施設の拡張やその機能を維持するために、毎年大量の浚渫土砂が発生し続ける。浚渫土砂の処分場が確保できない場合、浚渫事業が実施または継続されないことがある。浚渫の余掘りを抑えた浚渫土の減量化、人工干潟造成の埋立て材としての活用、土捨て後に再度高圧プレスによる脱水処理¹⁾など様々な取り組みが行われている。浚渫粘土についてはセメントや石灰による混合処理工法が多く用いられている^{2), 3), 4), 5)}。さらに浚渫粘土にセメントと軽量化材料(気泡または発泡ビーズ)を混合した軽量混合処

理土工法(SGM)⁶⁾や、浚渫粘土にベントナイトを混合して海面廃棄物処分場の遮水層に使うクレーガード工法⁷⁾も実用されている。

一方、鉄鋼スラグは製鉄と製鋼過程から生成する副産物であり、高炉スラグと製鋼スラグがある⁸⁾。図-1からわかるように、銑鉄過程から排出される高炉スラグは、冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグとに分かれる。水砕スラグは高炉セメントの原料に有効利用されるほか、砂粒子の形状を有するため土木工事においても従来の天然土砂の代わりに利用される。天然土砂に比べて単位体積重量が小さく内部摩擦角が大きいなど、優れた力学特性がある

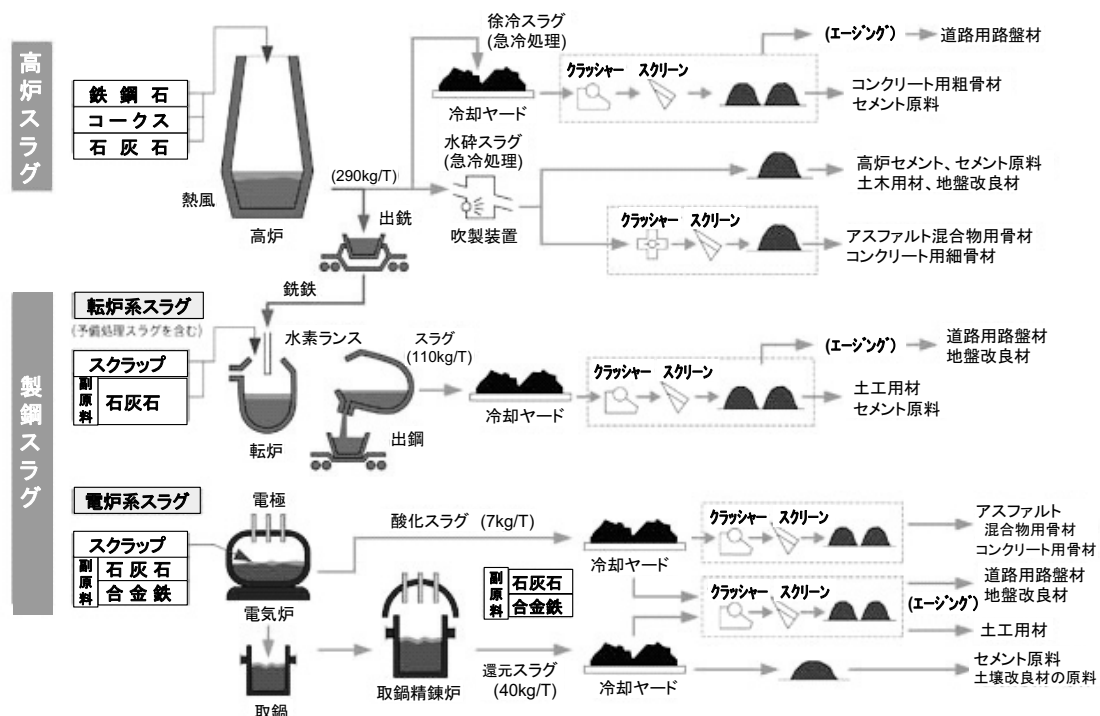


図-1 高炉スラグと製鋼スラグの種類と生成フロー⁸⁾

9), 10) と同時に、自硬性に起因する過度な硬化、pHが高いといった二次的な問題点も指摘されている^{11), 12)}。製鋼過程から発生する製鋼スラグは鉄やマンガンの成分が取り込まれているため、単位体積重量は天然土砂よりも大きい。製鋼スラグは冷却後大きな塊となるので、更にクラッシャーで粉砕し粒度調整を行っている。また、副原料の生石灰の一部が未消化のまま遊離石灰(f-CaO)として残るため水と接すると膨張性質を示すものがある。スラグの吸水膨張を抑制するために破砕後水蒸気によるエージング処理を行う場合もある¹²⁾。製鋼スラグの品質や粒度により異なる製品に分類されるが、写真-1に示すようなCS-20に分類されるものは普通の山土と同様な性状を示すため、土木工事への応用が期待される。



写真-1 製鋼スラグの性状 (CS-20)

2. 浚渫土と鉄鋼スラグの混合

2.1 浚渫土の工学的特性の改善

浚渫土に鉄鋼スラグを混合することによって、混合土は次のような諸特性を有する。

- (1) スラグ混合により含水比が相対的に低下しせん断強度が向上する。スラグの自硬性により混合後の浚渫土は時間経過につれ強度が増加する。
- (2) 浚渫土に比べ粒子の均等係数が大きくなり、土質工学的特性が改善される。
- (3) 単位体積重量は、浚渫土の性状やスラグの種類と混合量によるが、もとの浚渫土より大きくなる。

2.2 スラグの問題点の解消

- (1) スラグは自硬性を有し、単独で使った場合過度に硬化することがある¹¹⁾。しかし、浚渫土と混合して利用すれば間隙に浚渫土が入り込むために必要以上に固まることはなくなる。
- (2) スラグ単独で海中に埋め立てた場合、CaO等が水和反応し海水のpH値を上昇させ、白濁の発生につながる¹²⁾。浚渫土を混合した状態では間隙水の移動が拘束されアルカリイオンの生成と拡散が抑制される。
- (3) 製鋼スラグをケーソン中詰め材に使うと、スラグの吸水膨張によりケーソン構造物に予想外の伸張応力が発生する恐れがある。浚渫土とスラグを混合して使う場

合、スラグの吸水は浚渫土間隙から供給されるので、中詰め材全体としての体積変化は伴わない。

2.3 室内配合試験

名古屋港の浚渫粘土($w_L=94.4\%$, $w_p=38.8\%$, $G_s=2.774$, 強熱減量=14.5%)を用い、製鋼スラグCS-20(粒径25mm以下, $G_s=3.0$, $w=9.7\%$)との配合試験を実施した。

製鋼スラグの粒径は最大20mmを超えるものもあるため、供試体の作製にはH200mm×φ100mmの大きいモールドを使った。図-2(a)に真体積比で3:1の配合試験の結果を示す。養生日数7日~28日間の強度増加率は大きいものの、一軸圧縮強度は全般的に小さい。また、浚渫土とスラグの配合比が一定でも、原泥のフロー値が大きいほど(つまり含水比が高いほど)一軸圧縮強度が低下する傾向が確認できる。

図-2(b)に浚渫土とスラグとの配合比を変えた場合の一軸圧縮強度を示す。スラグの配合量が多いほど一軸圧縮強度が増加することが分かる。

永留ら¹³⁾は、大阪湾で浚渫された粘土($w_L=61.3\%$, $w_p=20.6\%$, $G_s=2.698$, 強熱減量=6.0%)と粒径5mm以下に調整した製鋼スラグを使った配合試験を実施した。スラグの硬化を促進するために、アルカリ刺激剤として高炉セメントB種、または水砕スラグの微粉末を混合土重量の1%、3%

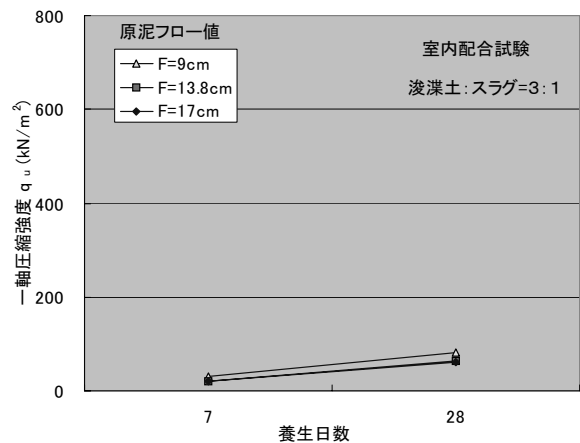


図-2(a) 製鋼スラグ混合土の強度発現(フロー値の影響)

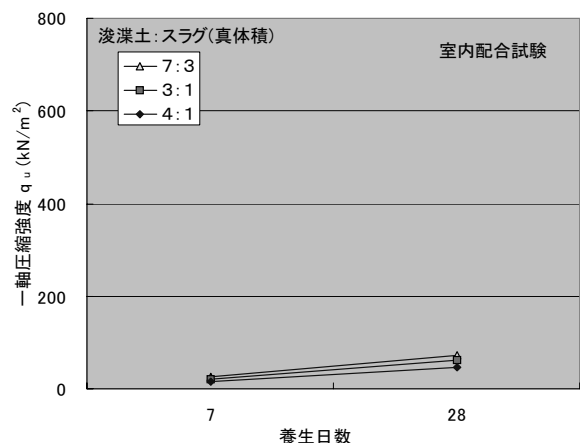


図-2(b) 製鋼スラグ混合土の強度発現(配合比の影響)

添加した。

図-3(a)の一軸圧縮強さの増加をみると、図-2(a), (b)と同じような傾向が見られる。ただ、スラグの粒径が5mm以下と小さいため、図-2(a), (b)の結果よりも強度発現は早く大きくなっている。図-3(b)にアルカリ刺激材の効果を示されており、水砕スラグ微粉末は高炉セメントB種よりも刺激効果が大きい。

筆者は高炉スラグの水砕スラグと製鋼スラグの転炉スラグそれぞれに対して生石灰のアルカリ刺激効果を実験的に調べた。図-4は水砕スラグ(生石灰添加量1.3%, 4%)及び製鋼スラグ(生石灰添加量1%, 3%)をそれぞれ浚渫粘土と混合したものの一軸圧縮強度である。スラグの粒径(5mm以下)はセメントの粒径(90 μ m以下)と比べ大きいことから、その長期的な強度特性を把握してみた。

図-4のように、製鋼スラグの混合土は生石灰添加による強度発現への影響は認められない。これは製鋼スラグにf-CaO成分が豊富にあるためだと考えられる。粒度の違いによる強度発現への影響については、より基礎的な研究が必要である。一方、水砕スラグは浚渫粘土と混合後3ヶ月の間に生石灰による刺激効果があることが確認できる。しかし、1年経過した時点でその効果がなくなったようにみえる。浚渫土と水砕スラグとの混合土の特性について今後の更なる検討が待たれる。

図-5は水砕スラグ微粉末の刺激効果について調べたものである。図中、養生期間は3日~1年と幅広く示しているが、3日という短期間は施工面の重機作業にとっては一つの目安となる。国土交通省の発生土利用基準¹⁹⁾によれば、第3種及び第4種の建設発生土はそれぞれコーン指数400kN/m²以上及び200kN/m²以上と定まっている。コーン指数と一軸圧縮強度の関係 $q_c=5q_u$ から換算すると²⁰⁾、一軸圧縮強度50~100kN/m²を確保できれば重機土工やダンブ運搬が可能と判断される。

図-4, 5の結果からわかるよう、含水比150%程度の浚渫粘土でも鉄鋼スラグを適量に混合し数日間仮置きすることによって施工上取り扱いやすい性状に変わる。また、早期に一軸圧縮強度を必要とする場合は、水砕スラグ混合土については少量の生石灰を、製鋼スラグ混合土については少量の水砕スラグ微粉末をアルカリ刺激材として添加する方法は有効である。

図-6に一軸圧縮強度と破壊ひずみの関係を示す。両者はほぼ反比例の関係となっている。養生日数の増加によって一軸圧縮強度が増加し、小さい圧縮ひずみで破壊をむかえるようになる。養生日数7日の破壊ひずみは5~10%であるが、養生日数28日となると破壊ひずみは2~3%と1/2~1/3に低下している。

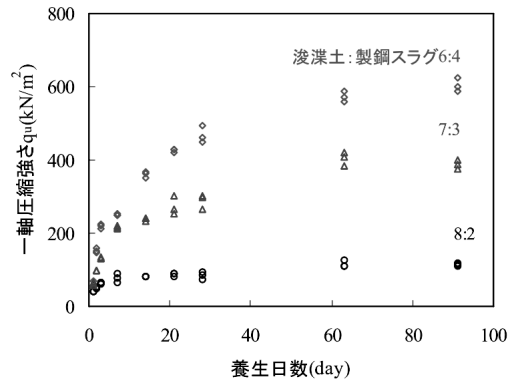


図-3(a) 養生日数と一軸圧縮強さの関係(永留ら¹³⁾)

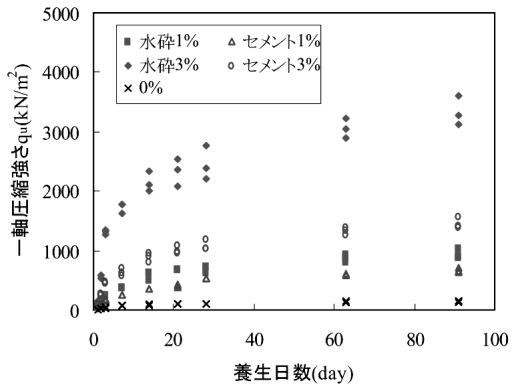


図-3(b) アルカリ刺激剤添加の効果(永留ら¹³⁾)

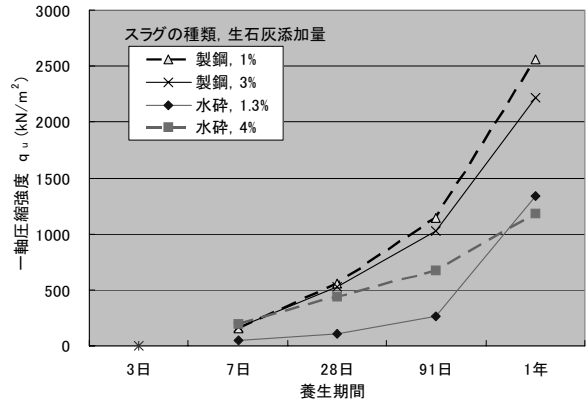


図-4 生石灰によるスラグ混合土の刺激効果
(長府粘土 w=140%, 浚渫土とスラグの体積比 2:1)

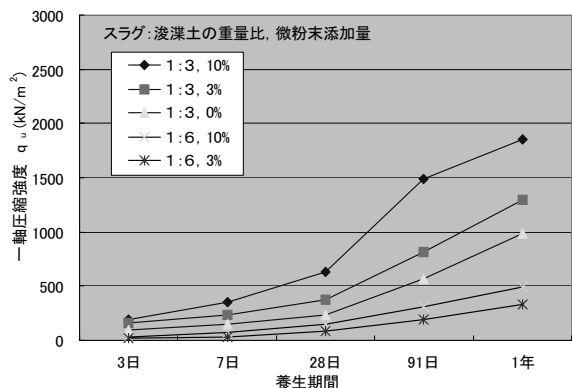


図-5 水砕スラグ微粉末による製鋼スラグ混合土の刺激効果(新門司航路粘土, w=160%)

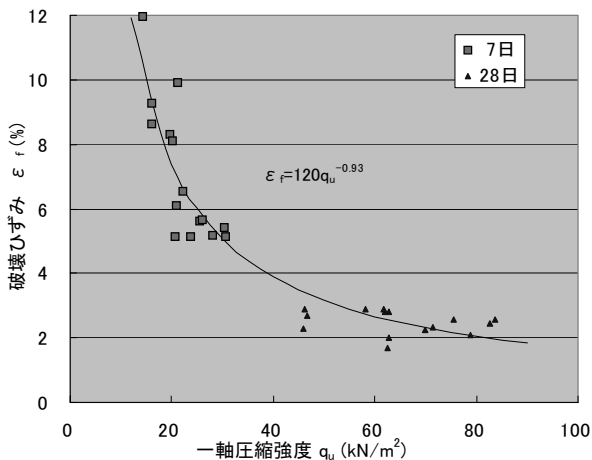


図-6 一軸圧縮強度と破壊ひずみの関係

3. 強度設計について

浚渫土とスラグを混合した混合土は、その用途によって求められる性能が様々である。海水中、水際線沿いあるいは陸上部など、混合土の使用条件に応じて必要とする設計強度は変わってくる。

海水中の場合は、人工干潟の埋立てや海底窪地の埋め戻し、また海底マウンド造成や潜堤の構築材料として利用できる。前者は埋立て材として安定すればよく混合土に100kN/m²の一軸圧縮強度があれば十分である¹⁴⁾。後者は構造物として海底で機能するので、海流の洗掘や側方の耐圧の必要性から、より圧縮強度の高いものが必要となる。

水際線沿いにおいては、繰り返し乾湿及び浪打を受けるという過酷な条件であるため、一般的に混合土は適さない。浚渫土と製鋼スラグに水砕スラグ微粉末を大量に配合した人工石の製造が試みられている。この場合は一軸圧縮強度の目標値をコンクリート並みに設定する^{12), 15)}。

陸上においては今までスラグを単独で使用するケースが多かった。たとえば、道路の路盤材料、荷重盛土（製鋼スラグ）や軽量盛土（水砕スラグ）の実績は多い。また、

軟弱地盤での仮設道路の置き換え、中仕切り堤への適用もみられる。これから浚渫土と混合して一緒に有効利用を検討する場合、転圧等による締め固めが可能なことから^{16), 17)}、混合土を内部摩擦角を有するφ材又は粘着力を有するc材に分けて設計することができる。φ材としての設計にあたり、浚渫土の含水比やスラグとの配合率、養生日数、転圧条件など地盤強度に影響を及ぼす要因が考えられる。転圧を行わない場合、φを無視しc材として一軸圧縮強度を基に検討は行える。また三軸試験等を実施したうえで強度パラメーターφとcの設定も可能である。

4. 現場での施工方法

室内配合試験を通じて、浚渫土の含水比やスラグの配合条件によって混合土の強度特性を人為的に調節することが可能であることが明らかになった。ただ、セメント混合処理土と比べ配合量のはるかに多いのに拘らず強度発現は比較的遅い。強度発現を速めるために少量のアルカリ刺激材の添加が有効である。

現場での実施工となると、工事としては浚渫土とスラグの供給と計量と混合工程および混合土の移送と打設工程からなる。浚渫土の供給は一般に浚渫工事に付随するものとなり、土運船によって持ち込まれてくることが多い。スラグの供給はガット船などによって施工現場に提供される¹⁸⁾。

筆者はある浚渫土埋め立て工事における製鋼スラグの混合利用の施工方法を検討し、その結果を表-1に示した。工事条件によって浚渫土とスラグとの混合は、専用の混合設備を使用する場合と使用しない場合がある。混合設備を使用すれば混合性能が高くなるが、設備の償却費等で施工コストも高くなる。また、施工能力面において、海上浚渫工事から発生する浚渫土の量（通常毎日4000～5000m³程度）とマッチングしない。そのため、複数基の混合設備を台船上に設置しなければならない。

表-1 浚渫土と鉄鋼スラグの混合施工方法の比較検討

	混合方式	混合性能	施工能力	施工コスト (揚土・運搬費含む)	海上浚渫工事との マッチング
混合設備 使用する	(a)バッチ式	高い	50～100m ³ /hr	1200～2000円/m ³	複数基で対応可
	(b)連続式	高い	50～140m ³ /hr	1000～1800円/m ³	複数基で対応可
混合設備 使用しない	(a)土運船内で混合	低い	大型バックホウ2台 ×1～2時間/1隻	800～1300円/m ³	対応する
	(b)ローターバックホウ	限定的良好	300m ³ /hr程度	1000～1500円/m ³	対応する
	(c)空気圧送で管中混合	良好	300～400m ³ /hr	1000～1500円/m ³	対応する
	(d)ベルトコンベア	良好	400～500m ³ /hr	700～1000円/m ³	対応する

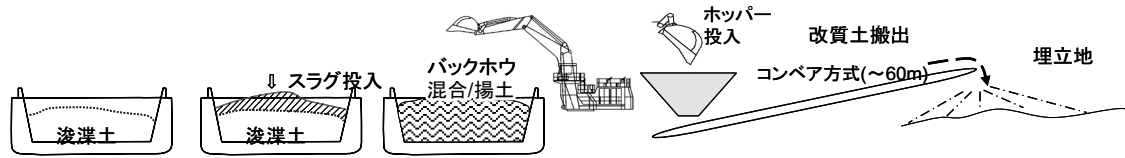


図-7(a) 土運船内での揚土バックホウ混合

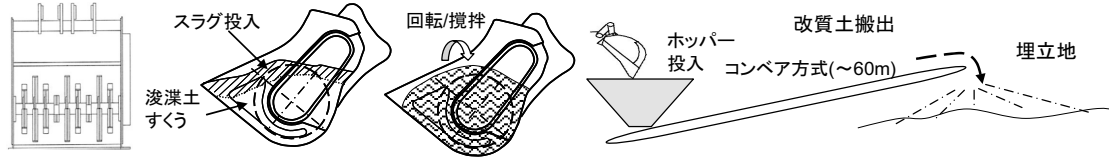


図-7(b) ローター付の揚土バックホウ混合

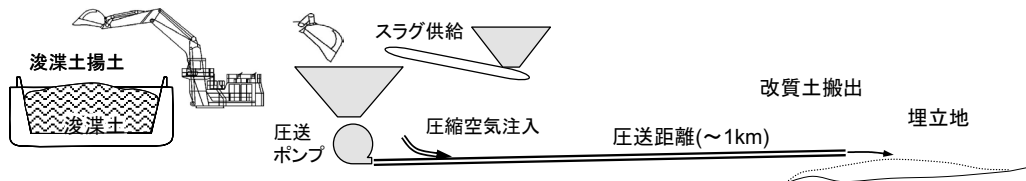


図-7(c) 空気圧送時の排砂管内混合（管中混合）

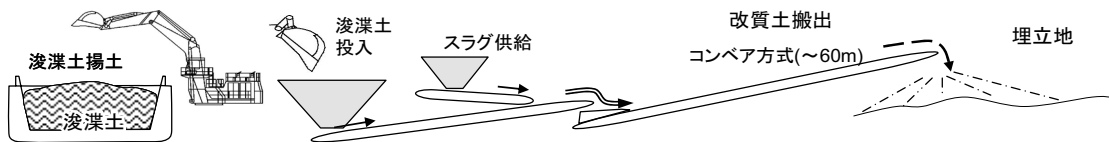


図-7(d) ベルトコンベア上でスラグ添加、乗り継ぎ部による混合

混合設備を使用しない各々の施工方法を図-7 に、混合性能、施工能力、施工コストを表-1 に示した。

(a)土運船内での揚土バックホウ混合

土運船に浚渫土を少なめに積み込み、それを計量し別箇所にてガット船等によって設計配合したスラグを均等に散布する。土運船を揚土船に横付けし、揚土船のバックホウで土運船内において混合しながら、揚土作業を行う。

特別な対応しなくても実施可能であるが、混合土の均一性に不安がある。

(b)ローター付きのバックホウ混合

通常、揚土船上に搭載されているバックホウは、掘削と揚土の繰り返し作業のみを行うものである。バックホウバケットをローター付きの構造に改造し、バックホウの油圧動力を利用し油圧モータによってローターを回転させる。この構造のバックホウバケットは浚渫土の大型土塊の解泥作業に用いられた実績も多く、攪拌効果が認められている。バケット内での各回の混合性能が高いといえるが、土運船全体の均一性は担保されない。また、大型の特殊バケットに付き単一工事内での償却費が大きい。

(c)空気圧送時の管中混合

空気圧送を利用した管中混合は、受入ホッパーに浚渫土

を投入すると同時に、スラグを一定の割合で投入する。このように配合した浚渫土とスラグは強力な圧縮空気の力で排砂管内を移送されながら混合される。空気圧送の作業効率を維持するために浚渫土をあらかじめ解泥し流動性を持たせることが必要である¹⁴⁾。20万^{m³}近い施工実績から良好な混合性能が確認されている。排砂管内の流速が速いため管壁の磨耗が激しいことに注意を要する。

(d)ベルトコンベアの乗り継ぎによる混合

揚土船は本来、海上空港や港湾施設の埋立に良質な土砂を運搬・撒き出しに用いられるベルトコンベア設備である。浚渫土を埋立地に投入する際にも浚渫土に対応した揚土船を使うようになっている。揚土船において、ベルトコンベアに載って通過する浚渫土の上に設定した配合量のスラグを散布する。乗り継ぎ部での勢いにより衝突や落下で土砂のせん断変形が著しく混合効果が大きい。15万^{m³}近い施工実績から良好な混合性能が確認されている。

5. 結論

高炉スラグ、製鋼スラグはともに鉄鋼産業の副産物であり、セメントの原料をはじめ幅広く有効利用されている。

土木工事においても従来鉄鋼スラグを単独に埋立てや盛土の用材として用いられることが多かったが、浚渫土のような低品質の建設発生土と混合利用することによって双方の特性を互いに補うことができることが明らかになった。

スラグを混合して浚渫土の性質改善を図る場合、汎用のセメントや生石灰の場合と比べスラグの配合割合ははるかに多いのが特徴といえる。スラグ混合による土質改善を高めるためには、水砕スラグ混合土については少量の生石灰を、製鋼スラグ混合土については少量の水砕スラグ微粉末をアルカリ刺激材として添加する方法は有効である。混合土の強度パラメーターの設定にあたり、浚渫土の含水比、スラグの配合量、また施工条件の制約等を考慮し、 c 材料か ϕ 材料、あるいは粘着力 c と内部摩擦角 ϕ 両方を考慮した検討ができる。

現場での施工方法について、専用の混合設備を使用する場合と使用しない場合が考えられる。混合設備を通すことによって混合土の品質が確保されるが、作業能力と施工コストに制約が出る場合がある。一方、専用の混合設備専用を使わないで、土運船内でのバックホウ混合、ローター付きのバックホウ混合、空気圧送による管中混合、揚土船のベルトコンベア乗り継ぎ部と落下時の混合工法がある。管中混合工法と揚土船のベルトコンベアの混合工法は、ある浚渫土埋め立て工事に採用され、良好な混合性能が認められた。

参考文献

- 1) 中道正人, 矢野米生, 右田宏文, 山本修司, 佐藤哲也, 片桐正明: 脱水処理土の護岸裏埋め材性能を求めための現地試験施工, 海洋開発論文集, No.24, pp.357-362, 2008.
- 2) 宮崎良彦, 湯怡新, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖, 土田孝: セメント混合処理作業船を用いた浚渫土の有効利用, 土木学会論文集 No.750/III-65, pp.193-204, 2003.
- 3) 宮崎良彦, 湯怡新, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖: セメント固化処理した浚渫土の一軸圧縮強度とセメント含有量及び含水比の相関関係, 九州大学工学集報, Vol.74, No.1, pp.1-7, 2001.
- 4) 湯怡新, 宮崎良彦: セメント混合浚渫土の固化強度と均一性評価, 土と基礎, Vol.49, No.5, pp.4-6, 2001.
- 5) 土田孝, 湯怡新, 嶋川奈津美, 安部太紀: 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, 8 (1), pp.53-70, 2013.

- 6) (財)沿岸開発技術研究センター: 港湾空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリーNo.3, 1999.
- 7) 山田 他: 変形追従性遮水材料を用いた管理型海面廃棄物最終処分場の新しい遮水護岸構造の提案, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.77-82, 2002.
- 8) 鉄鋼スラグ協会ホームページ, <http://www.slg.jp/slag/process.html>, 5月30日, 2013.
- 9) 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫: 高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.85-99, 2004.
- 10) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫: 高炉水砕スラグの効果特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.
- 11) 菊池喜昭, 高橋邦夫: 水砕スラグの力学特性の経年変化, 運輸省港湾技術研究所港湾技術資料, No.915, p.26, 1998.
- 12) 経済産業省製造産業局製鉄企画室, (社)日本鉄鋼連盟, 芙蓉海洋開発(株), 新日本製鐵(株): スラグ利用に係る研究開発評価用資料, p.79, 2009.
- 13) 永留 健, 五明美智雄, 野崎郁郎, 武田将英, 木曾英滋, 土井正人: 浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを混合することによる強度向上効果, 第43回地盤工学研究発表会, pp.539-540, 2008.
- 14) (財)沿岸開発技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリーNo.11, p.127, 1999.
- 15) 新日本製鐵(株): 鉄鋼スラグによる海域環境再生, 海の森づくり第9回シンポジウム講演資料, p.28, 2012.
- 16) 花房, 岡田, 久木: 水砕スラグを用いた建設発生土改良の試験盛土について(その1), 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.875-876, 2001.
- 17) 岡田, 花房, 谷口: 水砕スラグを用いた建設発生土改良の試験盛土について(その2), 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.877-878, 2001.
- 18) (社)日本鉄鋼連盟: 「転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き」別冊, 「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法」技術資料, p.78, 2008.
- 19) 国土交通省: 発生土利用基準について, 2006.
- 20) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説, pp.293, 2004.

(2013年6月5日 受付)