

福山本航路浚渫土を用いた人工石の配合の検討

国土交通省 中国地方整備局 広島港湾・空港整備事務所	出路 康夫
J F E スチール(株) スラグ事業推進部	正会員 谷敷 多穂
J F E スチール(株) スチール研究所	正会員 ○高橋 克則
J F E スチール(株) スチール研究所	正会員 本田 秀樹

1. はじめに

港湾施設は海洋国である日本の経済動脈の一翼を担っており、近年では東アジア経済の興隆、企業活動の国際化も進展していることから、港湾の機能維持・整備と高度化の必要性が一層高まっている。さらに内港などでは底質の富栄養化などの問題があり、漁業の生産力低下などの課題がある。これらへの対応策として継続的に浚渫事業が実施されており、副産物として多量の浚渫土が発生している。発生する浚渫土は土木、建設用材料として良質であるとは限らず、軟弱な粘性土の場合には強度等の特性が不足するため、海面埋め立て等で処分されるものも多い。この対策として、管中混合固化処理に代表される改良技術が実用化されており¹⁾、土石材料としての利用拡大が進められつつあるが、今後の発生量などを考えた場合、さらに広範囲での有効利用が求められている。

一方、漁業の生産性や生物多様性の維持の観点から、浅場・藻場造成といった環境改善・修復が望まれている。この場合、良質な砂礫状の材料が必要となるが、そのために新規に山を切り崩すなどの開発は環境保全の観点から難しくなりつつある。この対応材料の1つとして、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材が実用化されている²⁾。骨材に鉄鋼生産の工程で発生してくる製鋼スラグを使用し、結合材に高炉スラグ微粉末等を用いて、これらを練り混ぜて水和固化させたのちに粗破碎して製造され、準硬石相当の特性が得られている。本技術は混練プロセスによって製造されるため配合の柔軟性が比較的高いこと、鉄鋼スラグを使用して比較的重いために軽量の浚渫土を入れても石材としての比重を確保できる可能性があることから、浚渫土を多量に混合した人工石材を製造することが出来れば、浚渫土を砂礫状材料の用途へも有効利用できる可能性がある。

本報では、浚渫土を高い比率で混合した人工石材の可能性を検討するため、福山本航路の浚渫土を用いた様々な配合実験を実施し、得られる固化体の強度等を評価した結果について報告する。また、代表的な配合を用いて初期の環境適合性やスレーキング等の評価もあわせて報告する。

2. 実験方法

実験に使用した浚渫土は、福山本航路から浚渫、仮設して水切りした材料を用いた。浚渫土の土質特性を表1に示す。0.075 μ m以下の細粒分が多く、液性限界も100%以上と比較的高いため、水分を添加して混練時の流動性を確保した材料を実験に供することとした。ただし、水量が多くなることによって強度低下、耐久性低下などが想定されるため、混練が可能な範囲での最低添加量をターゲットとした。

骨材は、地産原料としてJ F E スチール西日本製鉄所で発生する製鋼スラグ(0-25mm)を用いた。骨材品質は、鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルに基づき、粒度分布、80℃温水粉化率 $\leq$ 2.5%、MgO含有率 $\leq$ 8.5%を満足することを確認して適用した。結合材は高炉スラグ微粉末(JIS A 6206)を主材として使用し、結合助材としてフライアッシュ(JIS A 6201 適合品)、普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)を使用した。

表 1 使用した浚渫土の土質特性

含水比	w	%	133.6
湿潤密度	ρ_t	g/cm ³	1.369
乾燥密度	ρ_d	g/cm ³	0.586
土粒子密度	ρ_s	g/cm ³	2.70
液性限界	w _L	%	108.6
塑性限界	w _p	%	37.5
塑性指数	I _p	%	71.1
液性指数	(w-w _p)/(w _L -w _p)		1.35
75 μ m以下の比率		%	94.9
有機炭素含有量		%	1.32
強熱減量		%	9.8

キーワード 浚渫土、鉄鋼スラグ、人工石材、配合

連絡先 〒260-0835 千葉県千葉市中央区川崎町1 J F E スチール(株)スチール研究所 Tel. 043-262-2890

代表的な配合例を表 2に示す。配合は、鉄鋼スラグ水和固化体の技術マニュアルをベースとして非結合材中に占める製鋼スラグ比率を 50%，結合材へのフライアッシュの一部使用を行いつつ、浚渫土の容積率が 40%以上となるように検討した。加水は混練前に浚渫土に添加し、含水比を調整する方法で添加した。混練は、浚渫土、製鋼スラグ、結合材を所定量混合して 5 分間の混合とした。フレッシュ材物性として、単位容積質量、スランプを測定し、標準養生 7 日、28 日で一軸圧縮強度を測定した。これらの結果をもとに適用の可能性が高い配合条件を用いて、石材としての各種物性および人工海水浸漬時の pH を評価した。

表 2 浚渫土配合人工石材の試験配合例

製鋼スラグ	福山浚渫土	配合の設定条件			単位容積(1m ³)当りの混合土質量配合						
		浚渫土容積率	元浚渫土換算容積	強度指数 (BP+2NP+0.35FA)/w	水 w (kg)	結合材			製鋼スラグ 0-25 (kg)	原浚渫土 (W=190) (kg)	計算単位容積質量
表乾密度 DS (g/cm ³)	含水比 w (%)					高炉スラグ微粉末 BP (kg)	普通セメント NP (kg)	フライアッシュ FA (kg)			
3.11	220	50.0	44.2	1.30	58	390	65	97	935	562	2108
	220	50.0	44.2	1.40	58	420	70	105	888	562	2103
	220	50.0	44.2	1.50	58	450	75	112	840	562	2097
	220	55.0	48.6	1.20	64	396	66	99	770	618	2013
	220	55.0	48.6	1.30	64	429	72	107	718	618	2008
	220	55.0	48.6	1.40	64	462	77	115	666	618	2002
	190	50.0	50.0	1.40	0	410	69	103	903	636	2120
	200	50.0	47.9	1.30	21	384	64	96	944	609	2119

3. 結果及び考察

図 1に鉄鋼スラグ水和固化体の強度解析で使用されている強度指数（重み付けした結合材量と水の比）を 1.4 で一定としたときの浚渫土の含水比とスランプおよび圧縮強度の関係を示す。福山本航路の浚渫土は、引き上げ時の含水比が 190%程度であったのでこれをテストしたところ、0 スランプに近い結果となった。これを 220%まで加水したところ、浚渫土配合比 42%で 3cm、50%で 5cm を越えるスランプが確保できた。この際の強度は、強度指数を一定にすれば大きな変動がないことを確認できた。これ以上に水量を増加させても、強度指数を一定とすれば強度が維持できる可能性が高いが、固化物の重量や安定性、浚渫土の使用量の最大化を考慮し、含水比は 220%を標準とすることとした。また、浚渫土容積率は高いほうが流動性は確保しやすいことが分かった。

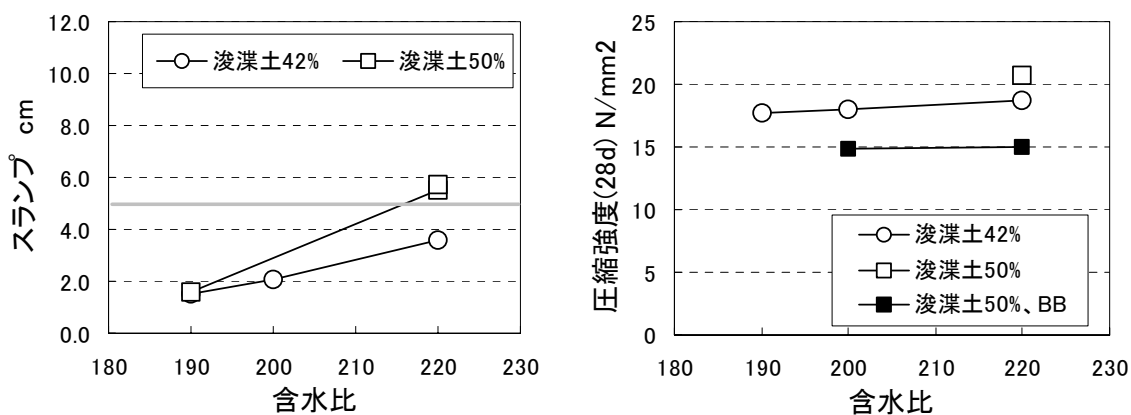


図 1 浚渫土の含水比と混練物のスランプ、圧縮強度の関係

浚渫土含水比を 220%で一定として強度指数を変えたときのフレッシュ材の特性を図 2に示す。スランプは強度指数が高いほどやや小さくなる傾向が見られ、強度指数が 1.5 を超える条件では混練は難しかった。混合材中の粉分の比率が高くなることで流動性が低下したものと考えられ、強度指数 1.4 をわずかに超える程度までが施工の安定性の観点での上限に近いと考えられる。単位容積質量に対する強度指数の影響はあまり大きくなく、浚渫土使用量が増加するほど軽量側となるが、鉄鋼スラグを骨材として使用することによって準硬石の比重目安（2.0～2.5）の範囲が確保できることが確認された。

28 日養生後の一軸圧縮強度および 7 日強度との関係を図 3に示す。浚渫土の配合比によらず強度指数が大きくなるほど 28 日強度が大きくなる傾向が認められた。強度指数が 1.2 で 15N/mm²、1.4 で 18N/mm² レベルの強度が得られており、JIS で規定される準硬石の強度 9.8N/mm² 以上を満足するレベルの強度特性が得られた。また 1 週強度と 4 週強度を比較すると、順調に強度増進が進んでいることが確認され、福山本航路の浚渫土を多量に配合しても安定した水和反応の進行が期待できる。

以上より浚渫土を多量に使用した鉄鋼スラグ水和固化体においても準硬石相当の圧縮強度特性が得られることが確認され、強度指数を管理すれば一定レベルの強度水準を確保できることがわかった。実際に人工石材として大量製造する場合には、プラントに起因する変動に加えて浚渫土の土質や製鋼スラグの品質に依存する変動が起こる可能性がある。浚渫土を多量配合した人工石材の品質確保を図るためには、実プラントレベルでの試験で変動挙動を評価し、設計強度を設定することが今後の課題である。

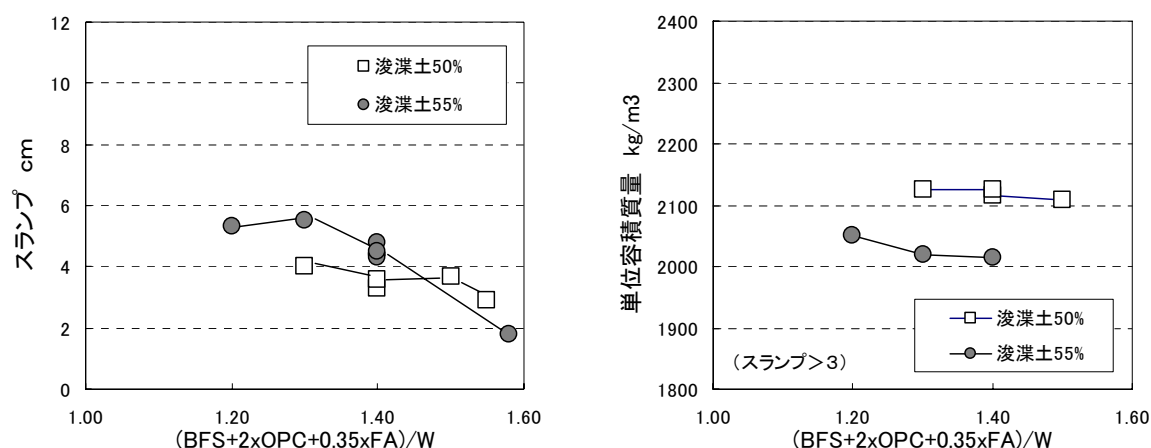


図 2 強度指数を変えた混合材のフレッシュ時の特性

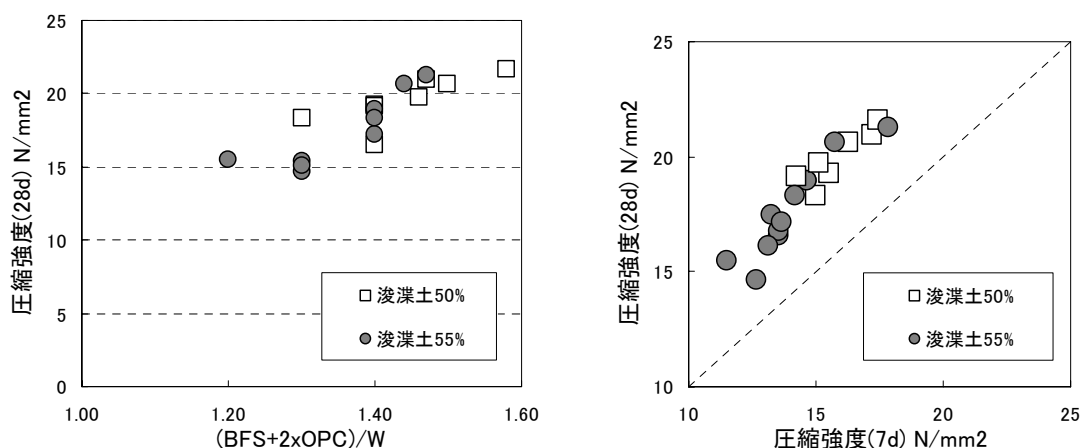


図 3 強度指数と 28 日養生強度の関係 および 7 日強度と 28 日強度の関係

浚渫土 55%, 強度指数 1.4 の固化体を用いて, スレーキング試験, 膨張安定性試験, pH 試験, 溶出試験を実施した(表 3)．ラボで試作した浚渫土使用人工石および鉄鋼スラグ水和固化体のスレーキング率は, 前者が 10%程度であったのに対し, 後者は 1%未満であり, 浚渫土を入れることによってやや低下する傾向が見られた．既存の研究では, 花崗岩

に代表される硬岩のスレーキング率は 1%前後³⁾, 準硬石相当の砂岩ずりは 13%程度⁴⁾の報告例があり, 浚渫土使用人工石のスレーキング率は比較的大きな領域にある．一方, 膨張安定性については, 製鋼スラグの製造ロットごとに 20 条件評価したが, いずれも有害なひび割れがないことを確認した．これらの室内試験結果より, 浚渫土使用人工石材は概ね準硬石程度の性能を持ち合わせているものと判断できるが, 実海域における耐久性については不明であり, 継続的なモニタリング調査による観察が重要である．

図 4に浚渫土使用人工石材の海水浸漬時の pH 変化を示す．pH は人工石材の実使用条件を想定して, 1ヶ月間水中養生したのちに 53mm アンダーに破碎し, 大気中で 2週間, 4週間曝露したのちに測定した．3時間の浸漬時間の間, ほとんど pH 上昇は見られなかった．溶出試験は, 水底土砂基準で規定される 33 項目すべてについて実施した結果, いずれも基準値以下であり, これらの結果から高い環境適合性を持っていることが確認された．以上より, 福山本航路の浚渫土を多量に配合した固化体は, 適切な配合設計をすることによって, 石材代替として使用するための強度, 初期の環境適合性のいずれも満足することが可能である．

表 3 浚渫土を多量使用した固化体の品質試験

試験項目	評価方法	品質範囲
スレーキング率(%)	JHS 110-2001	準硬石の天然石材と同等以下
固化体の膨張安定性	80℃×10日 (鉄鋼スラグ水和固化体マニュアル法)	有害なひび割れ無し
固化体のpH	JGS 0211修正法(海水溶媒)	9.0以下
有害物質の溶出	水底土砂基準(環告14号)	基準値以下

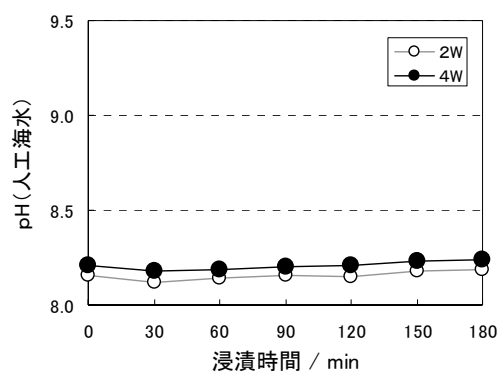


図 4 浚渫土入り人工石の海水浸漬時 pH

4. 結論

浚渫土の有効利用用途を拡大するために, 浚渫土を多量使用した人工石材化の可能性に着眼し, 福山本航路の浚渫土と製鋼スラグを用いた固化体の配合検討および特性評価を実施し, 以下の結果を得た．

- (1) 福山浚渫土を底泥時含水比ベースで 40%以上含有しつつ, 28 日養生強度が 15N/mm²以上を確保する固化体の製造が可能である．
- (2) 浚渫土を配合した固化体の強度は準硬石程度であり, 鉄鋼スラグ水和固化体と同様に強度指数との相関が認められる．
- (3) 浚渫土を配合した人工石のスレーキング率 10%程度となることから, 実海域における耐久性について継続的に観察し, 適切な使用条件を確認する必要がある．
- (4) 固化体の人工海水投入時の pH および溶出特性は基準値を満足しており, 初期の環境適合性も確認された．

参考文献

- 1) 「管中混合固化処理工法技術マニュアル(改訂版)」(財)沿岸技術研究センター(2008)
- 2) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書「鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材」(財)沿岸技術研究センター(2007)
- 3) 村上幸利: 岩石材料の物理的性質とスレーキング性の関係および既存のスレーキング試験の有用性, 土と基礎, 48, pp. 5-8 (2000)
- 4) 池野ら: 岩ブリの埋立材としての適用性に関する実験, 地盤工学研究発表会発表講演集, 40th, pp. 539-540 (2005)