浚渫土人工石の材料特性と製造技術

辻 匠¹・田中 裕一²・中川 雅夫³・野中 宗一郎⁴・長尾 喬平⁵・
赤司 有三⁶・木曾 英滋⁷・田崎 智晶⁸

¹ 正会員 五洋建設(株) 土木部門土木本部環境事業部(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: takumi.tsuji@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: yuichi.tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設(株) 土木部門(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: masao.nakagawa@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 五洋建設(株) 土木部門土木 2 0 2 0 事業部(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: souichirou.nonaka@mail.penta-ocean.co.jp

⁵ 五洋建設(株) 土木部門土木本部船舶機械部(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kyouhei.nagao@mail.penta-ocean.co.jp

⁶ 正会員 新日鐵住金(株) 設備・保全技術センター(〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)
E-mail: akashi.n9t.yuzoh@jp.nssmc.com

⁷ 正会員 新日鐵住金(株) スラグ・セメント事業推進部(〒110-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)
E-mail: kiso.664.eiji@jp.nssmc.com

⁸ 新日鐵住金(株) 名古屋製鐵所(〒476-8686 愛知県東海市東海町 5-3)
E-mail: tasaki.pr5.tomoaki@jp.nssmc.com

浚渫土人工石は、港湾より発生する浚渫土と鉄鋼生産の副産物である転炉系製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末等を混合して強度を増進し、固化後に破碎して作成した石材代替品である。海域での利用を推進することを目的として、藻場造成材等に使用する標準的な浚渫土人工石と、裏込材等に使用する軽量化のためフライアッシュを多く用いた浚渫土人工石について、配合の検討を行うとともに、実規模の製造実験を行った。配合試験では、製造実験の配合を選定するとともに目標強度や目標スランプを得る配合を推定することができる関係式を決定した。製造実験では、用途が異なる2種類の浚渫土人工石の製造可能なスランプや混合時間、発現強度や密度等の特性を確認した。

Key Words : dredged soil, converter slag, fly ash, artificial stone

1. はじめに

港湾の水域施設の増深や水深確保を目的として浚渫工事が行われているが、浚渫土の処分場所確保が課題となっている。一方、鉄鋼生産の副産物である転炉系製鋼スラグは、土木資材等への活用が期待されている。こうした中、シルト・粘土系浚渫土砂と製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施した材料(カルシア改質材)を容積比で7:3程度の割合で混合したカルシア改質土¹⁾は、大規模埋立の実績があり50~200 kN/m²の強度が得られ²⁾、浅場造成などでの活用も試みられている。

一方で、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末等を混合し、固化した後に破碎して製造される鉄鋼スラグ水和固化体製の人工石は18~32 N/mm²の強度が得られ護岸補強の捨石や藻場等に使用されている³⁾。

浚渫土人工石は、これらの技術を用いたものであり、容積比で40~50%の浚渫土と膨張を防ぐためエージン

グを施した製鋼スラグに高炉スラグ微粉末等を混合し、固化後に破碎して作成した石材代替品である。準硬石相当の9.8 N/mm²以上の強度が得られ、博多港においては、漁礁・藻礁石として利用されている⁴⁾。

今回は漁礁・藻礁の造成材や干潟の潜堤材および捨石のマウンド材の使用を目的とした標準的なAタイプと、これに加え護岸の裏込材の使用を目的として軽量化を図るBタイプの2種について配合の検討を行うとともに、実規模の製造実験を行った。

2. 浚渫土人工石の概要

(1) 使用材料

使用材料は、名古屋港で採取し保管していた浚渫土、新日鐵住金(株)名古屋製鐵所の製鋼スラグと高炉スラグ微粉末、同製鐵所内の石炭火力発電から発生するフライア

ッシュ, および市販の高炉セメントB種とした。

浚渫土と製鋼スラグの物性を表-1に, 製鋼スラグとその他材料の規格を表-2に示す。

(2) 用途と特徴

AタイプとBタイプの用途と特徴を図-1, 2 および表-3に示す。

Aタイプは, 海域の漁礁・藻礁造成材等に使用することを目的とするため, 波浪等で流失しないよう重量確保

表-1 浚渫土と製鋼スラグの物性値

項目	単位	浚渫土	製鋼スラグ
土粒子の密度	s g/cm ³	2.668	-
自然含水比	wn %	65.1	-
粒度	礫分	0.31	74.2
	砂分	22.70	19.4
	シルト分	37.99	6.4
	粘土分	39.00	-
	最大粒径	mm	9.5 26.5
コンシステンシー	液性限界	wL %	84.3
	塑性限界	wP %	24.4
	塑性指数	IP	59.9

表-2 使用材料の規格

使用材料	規格
製鋼スラグ	JIS A 5015 CS-20(路盤材) 最大粒径25mm エージング材
高炉スラグ微粉末	JIS A 6202 規格品
高炉セメントB種	JIS R 5211 規格品
フライアッシュ	JIS A 6201 種相当規格外品 熱熱減量6.5～8.5% (種規格値8.0%以下)

図-1 Aタイプ使用例

図-2 Bタイプ使用例

表-3 タイプ別用途と特徴

		Aタイプ	Bタイプ
用途	漁礁・藻礁造成材	漁礁・藻礁造成材	護岸の裏込材 (堤内利用)
	捨石マウンド材 (海域利用)	捨石マウンド材 (海域利用)	
目標性能	強度	準硬石最低基準 9.8N/mm ² 程度	準硬石相当 9.8N/mm ² 以上
	密度	2.1g/cm ³ 以上	2.1g/cm ³ 以下
石材の大きさ		300kg/個	0～30kg/個
材料	主材料	浚渫土 製鋼スラグ	浚渫土 製鋼スラグ
	結合材	高炉スラグ微粉末	高炉セメント フライアッシュ

に留意し石材の大きさを 300 kg/個を基本とした。結合材は高炉スラグ微粉末のみを用いた。

Bタイプは, 護岸の裏込石に使用することを目的とするため, 準硬石相当の 9.8 N/mm² 以上の強度と 2.1 g/cm³ 以下の密度を目標とした。結合材は軽量化を図るためにフライアッシュを, 強度増進のために高炉セメントを用いた。

なお, 表-3の用途は目安であり, 配合条件や石材の大きさの設定により, Aタイプ, Bタイプともに両タイプの使用が可能である。

3. 配合試験

(1) 強度の検討

a) 強度指数

鉄鋼スラグ水和固化体の技術マニュアルでは, 材令 28 日強度の指標として強度指数が配合条件の設定に使用されている⁵⁾。強度指数は, コンクリートにおけるセメント水比と同様に, 粉体と水の重量比で表わされる。粉体にかかる係数は, 高炉スラグ微粉末 (BP) は 1.0, 普通ポルトランドセメント (NP) は 2.0, フライアッシュ (FA) は 0.35 と示され, 高炉セメント B 種 (BB) については含有する BP と NP の分量より求めるとされる⁵⁾。今回の BB は BP の最大含有量が重量比で 45 % であることから, BB の係数は, $1.0 \times BB$ 中の BP 重量比 + $2.0 \times BB$ 中の NP 重量比 = $1 \times 0.45 + 2 \times 0.55 = 1.55$ となる。よって, 今回の浚渫土人工石では強度指数は式(1)を使用した。

$$\text{強度指数} = \frac{BP + 1.55BB + 0.35FA}{W} \quad (1)$$

ここに, BP: 高炉スラグ微粉末の重量, BB: 高炉セメント B 種の重量, FA: フライアッシュの重量, W: 浚渫土中の水分量の重量。

b) 配合条件および強度発現状況

浚渫土は, 今回はすべて 50 vol% とし含水比を変化させることにより土粒子の量を調整した。含水比は, 維持浚渫や薄層浚渫で想定される 200 % を基準に配合試験のケースを設定した。

Aタイプは, 密度が大きい製鋼スラグの混合量を多くすることを目標とした。Bタイプは, 軽量化のため製鋼スラグの混合量を減らし, 密度が小さいフライアッシュの混合量を多くすることを目標とした。

そこで, 配合試験のケースは, 浚渫土の含水比を 200 % にして強度指数を変化させた場合, 強度指数を 1.00 にして浚渫土の含水比を変化させた場合, また B タイプではフライアッシュ量を変化させた場合について設定した。今回実施した配合試験の条件を表-4 にまとめ, 各材料の密度を記載した。なお表中には, 混合直後のスランプ,

表-4 配合条件と試験結果

ケース	設定条件				配合 (1m ³ あたり)						試験結果			
	浚渫土 混合率	浚渫土 含水比	強度指数 (BP+1.55BB +0.35FA)/W	流動指数 W/(S+BP+BB +FA+0.1SS) (容積比)	浚渫土 2.67g/cm ³ (kg)	高炉スラグ 微粉末 BP 2.89g/cm ³ (kg)	高炉セメント BB 3.04g/cm ³ (kg)	フライアッシュ FA 2.27g/cm ³ (kg)	製鋼スラグ SS 3.22g/cm ³ (kg)	合計 (kg)	スランブ (cm)	材令28日		
												圧縮強度	密度	
(vol%)	(%)											(N/mm ²)	(g/cm ³)	
A-1	50	200	0.75	1.81	648	324	0	0	1249	2,221	19.8	8.2	2.17	
A-2	50	200	1.00	1.58	648	432	0	0	1129	2,208	16.5	11.2	2.15	
A-3	50	200	1.25	1.40	648	540	0	0	1009	2,196	11.4	12.4	2.16	
A-4	50	200	1.50	1.26	648	648	0	0	889	2,184	7.5	16.4	2.13	
A-5	50	200	1.75	1.14	648	755	0	0	768	2,171	6.0	18.8	2.13	
A-6	50	225	1.00	1.64	635	440	0	0	1120	2,195	14.5	12.6	2.20	
A-7	50	175	1.00	1.51	663	422	0	0	1140	2,225	8.5	12.0	2.17	
A-8	50	150	1.00	1.42	683	410	0	0	1154	2,246	1.0	12.7	2.15	
A-9	50	125	1.00	1.31	708	393	0	0	1172	2,273	0.3	10.6	2.20	
B-1	50	200	1.00	1.11	648	0	166	500	725	2,038	1.0	9.4	1.95	
B-2	50	200	1.25	1.05	648	0	235	500	652	2,034	0.2	11.5	1.92	
B-3	50	200	1.50	1.00	648	0	305	500	578	2,030	1.2	21.1	1.91	
B-4	50	200	1.00	1.21	648	0	188	400	843	2,079	5.9	10.5	1.91	
B-5	50	200	1.00	1.34	648	0	211	300	961	2,119	8.5	10.7	1.96	
B-6	50	175	1.00	1.06	663	0	159	500	732	2,054	0.5	4.6	1.90	
B-7	50	175	1.00	1.16	663	0	182	400	850	2,095	1.6	9.0	1.98

図-3 強度発現状況 (配合試験)

図-5 流動指数-スランブ (配合試験)

図-4 強度指数-圧縮強度 (配合試験)

材令 28 日の圧縮強度と密度の試験結果を合わせて示す。

圧縮強度は材令 3 日, 7 日, 28 日, 91 日で実施した。A タイプ, B タイプともに材令とともに強度が増加する状況が確認された。含水比 200 % のケースについて強度の発現状況を図-3 に例示する。

c) 強度指数と圧縮強度の関係

含水比 200 % のケースについて強度指数との圧縮強度の関係を図-4 に示す。水分量が一定の場合, 高炉スラグ微粉末や高炉セメントを増量することにより, 圧縮強度が増加することが確認された。コンクリートにおけるセメント水比と同様に, 強度指数を変化させた場合, 圧縮強度との間に正の相関がみられ, 強度指数から圧縮強度が推定可能であることが示された。

(2) ワーカビリティの検討

ワーカビリティに関係するスランブを推定するための指標として流動指数がある。流動指数は, 混合される水とすべての固体の容積比で表わすことができる。製鋼スラグは粗粒分が中心であるが添加量が多いので, 10 % 程度の細粒分を考慮することとし, 流動指数は式(2)を使用した。

$$\text{流動指数} = \frac{W}{S + BP + BB + FA + 0.1SS} \quad (2)$$

ここに, W : 浚渫土中の水分量の容積, S : 浚渫土中の土粒子の容積, BP : 高炉スラグ微粉末の容積, BB : 高炉セメントの容積, FA : フライアッシュの容積, SS : 製鋼スラグの容積。

流動指数とスランブの関係を図-5 に示す。流動指数を変化させた場合, スランブとの間に正の相関がみられ, 流動指数からスランブが推定可能であることが示された。

(3) その他の確認

海域で使用する石材としてのせん断抵抗角を確認するために, 配合 A-2 の最大粒径 28 mm, 均等係数 7.2 の試料に対して大型三軸圧縮試験 (CD) を実施した。その結果は, 拘束圧 400 kPa まではせん断抵抗角が 35 ° 以上

であり、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石と同等⁶⁾であることを確認した。

耐久性について、配合 A-2 の浚渫土人工石でスレーキング率試験を実施した結果は 0.6 % であり、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石の報告 0.2 %、0.4 %⁷⁾と同様に小さい値となった。

さらに、配合 A-2 と B-2 の浚渫土人工石を粉砕して、重金属等の溶出試験を実施した結果、ともに海洋汚濁防止法の水底土砂基準以下であった。また、人工海水（初期 pH 8.2）を使用した pH 試験（固液比 1:10）⁸⁾を実施した結果、ともに pH 9.0 未満であった。

なお、密度については、製造実験において評価する。

4. 製造実験

(1) 製造実験の概要

a) 配合条件の決定

過去の事例での目標スランプ 5 ~ 10 cm⁴⁾を参考として、配合試験の結果をもとに、A タイプはスランプ 5 cm 以上、かつ密度が大きく浚渫土含水比が小さい条件より、A-7 を製造実験の基本配合として選定した。B タイプは 9.8 N/mm² 以上の強度が得られ、スランプ 5 cm 以上となる条件から、B-4 を選定した。また、スランプの条件として 5 cm 以上としたが、より低スランプでの製造が可能であれば、加水量を減らし密度を増やすことや製鋼スラグや結合材の増量による強度増加が期待できるため、低含

水比・低スランプの条件として A タイプは A-8 と A-9、B タイプは B-7 の製造実験も行った。

b) 製造の方法

浚渫土人工石の作成手順を図-6 に示す。使用材料の混合は、1 回の混合量が 0.5 m³ のバッチ式ミキサを用いる方法と、3.0 m³ のベッセル内に 1.5 m³ 分の材料を投入後に 0.25 m³ のバックホウを用いる方法で行った（写真-1、2）。混合材は型枠内に打設し、固化状況を確認した後にブレーカーにより破砕し人工石を作成した（写真-3、4）。基本サイズに近い大きさに破砕するため、打設後の混合材に誘発目地様の筋をメッシュ状に入れた。A タイプは基本サイズ 300 kg/個で 50 cm メッシュ、B タイプは 30 kg/個で 25 cm メッシュとした。目地の深さは、基本サイズの 1 ~ 3 割の範囲で設定した。

混合時間は目視と湿潤密度の変動を基に決定した。バッチ式ミキサの場合は、混合開始から 30 秒間隔で混合状態を確認し、結合材の塊が見られなくなった場合に混合物から均等に 20 試料を採取し、湿潤密度の変動係数の変化が小さくなった時間を必要混合時間とした。バックホウ混合の場合は、2 分 30 秒間隔で同様に実施した。

(2) 実験結果

表-5 に配合と混合時間、スランプ、28 日強度等、混合方法別の主な結果をまとめた。

a) 発現強度と密度

混合直後に採取した試料から供試体（100 mm × h200 mm）を作成し、材令 3 日、7 日、28 日、91 日を基本に圧縮試験を実施した。タイプ別に強度発現状況を図-7 に示す。

B タイプはすべて材令 28 日で目標強度 9.8 N/mm² を発現した。A タイプもこれに近い強度を発現した。混合方法による差異は、バックホウ混合がミキサ混合よりも発現強度が小さい傾向が見られた。

図-6 人工石作成フロー

写真-1 ミキサ混合

写真-2 型枠内打設

写真-3 破砕(Aタイプ)

写真-4 浚渫土人工石(Bタイプ)

表-5 配合・混合方法別実験結果

(1)ミキサ混合

項目	単位	A-7	A-8	A-9	B-4	B-7
浚渫土含水比	%	175	150	125	200	175
混合時間	min	0.5	1.5	1.5	1.0	2.0
スランプ	cm	17.7	10.4	2.4	5.1	2.1
28日強度	N/mm ²	9.9	9.6	14.9	12.8	14.5
28日強度/7日強度		1.20	1.08	1.14	1.63	1.34
密度	g/cm ³	2.11	2.11	2.23	1.98	2.01
同一バッチ28日強度の変動係数 (下段の()内は密度の変動係数)		0.038 (0.012)	0.157 (0.014)	0.037 (0.005)	0.043 (0.009)	0.030 (0.007)

(2)バックホウ混合

項目	単位	A-7	A-8	A-9	B-4	B-7
浚渫土含水比	%	175	150	125	200	175
混合時間	min	7.5		20.0	12.5	
スランプ	cm	13.2		5.6	5.3	
28日強度	N/mm ²	9.6		11.4	10.3	
28日強度/7日強度		1.05		1.21	1.54	
密度	g/cm ³	2.10		2.15	1.94	
同一バッチ28日強度の変動係数 (下段の()内は密度の変動係数)		0.043 (0.011)		0.099 (0.013)	0.065 (0.007)

図-7 強度発現状況（製造実験）

材令 28 日と 7 日の強度比は、Aタイプは 1.1～1.2 となった。Bタイプは、B-4 で 1.5～1.6、B-7 で 1.3 となった。

配合試験の結果と材令 28 日の強度発現状況が違っているが、後述する密度と強度の関係によると考えられる。

密度は、Aタイプが 2.1～2.2 g/cm³、Bタイプが 2.0 g/cm³ 程度となった。Bタイプは軽量化することができたが、Aタイプも軽量といえる範囲である。自然石に比べて軽いので、漁礁等に使用する場合は波浪等の条件を十分考慮し、流失しない重量を確保できる人工石の大きさを検討する必要がある。

同一バッチにおける混合直後の混合材から 20 供試体を作成し、圧縮強度の均一性を確認した。ミキサ混合とバックホウ混合を実施した A-7、A-9、B-4 について圧縮強度の分布と密度の分布を図-8 に示す。

ミキサ混合とバックホウ混合による圧縮強度を比較すると、Aタイプの標準配合 A-7 は、変動係数を含め混合方法による大きな差は見られなかった。Aタイプの低含水比・低スランプ配合 A-9 と Bタイプの標準配合 B-4 は、ともにバックホウ混合がミキサ混合よりも圧縮強度が小さく変動係数が大きくなった。

密度については、変動係数の変化が小さくなった時間を必要混合時間として設定したこともあり、すべてのケースで平均値、変動係数ともに混合方法による差は小さかった。

A-9 と B-4 は、混合方法による密度の差は小さいが、

図-8 施工方法別発現強度・密度分布

バックホウ混合の圧縮強度が小さくなっている。密度の計測により、製鋼スラグの均一性をもとに混合時間を設定したが、高炉スラグ微粉末や高炉セメントの均一性を確保するためには、バックホウ混合においてはより長時間の混合が必要であったと考えられる。

b) 密度と強度の関係

実施したすべての配合ケースのミキサ混合について密度と圧縮強度の関係を図-9 に示す。

密度と圧縮強度の相関が認められ、施工時の密度管理により圧縮強度の管理が可能であると考えられる。密度と強度の相関が得られたのは、水分量が減った場合、または製鋼スラグや結合材の高炉スラグ微粉末や高炉セメントが多く混合された場合に、密度、強度ともに増加す

るためだと考えられる。

c) ワークビリティの確認

低含水比・低スランプ配合のA-9とB-7は、ミキサ混合ではともにスランプ2 cm程度であった。また、A-9と粉体のフライアッシュ添加量が多いB-4は、バックホウ混合ではともにスランプ5 cm程度であった。いずれの場合も強度と密度が目標値を満足し、Aタイプ、Bタイプともに、ミキサ混合はスランプ2 cm、バックホウ混合はスランプ5 cm程度までは、混合時間が長くなるものの製造が可能であることが確認できた。

(3) 施工性

標準配合のA-7は圧縮強度が7.9 N/mm²発現していた材令4日、B-4は4.9 N/mm²発現していた材令3日、また目地の深さがともに基本サイズの3割程度の場合に、基本サイズに近い大きさに破碎することができた。

また、A-7は9.5 N/mm²、B-4は8.4 N/mm²発現していた材令5日に、人工石を3 mの高さから敷鉄板上に落下させた場合、角が欠けるなどの小さな破損が生じる程度であり、十分運搬等が可能であると考えられる。

5. まとめ

2種類の浚渫土人工石について、配合の検討を行い、実規模の製造実験を行った。その結果、以下を確認することができた。

浚渫土人工石においても適切な強度指数を設定することにより、水和固化体と同様に発現強度の推測が可能であった。また、スランプの指標となる流動指数の設定と合わせて配合条件の設定を効率的に行うことができることを確認した。フライアッシュの添加量が多いBタイプは自然石と比べ軽量化することができ、材令28日で準硬石相当の強度9.8 N/mm²が得られた。

製鋼スラグの添加量が多いAタイプはBタイプよりも密度が大きくなった。しかし自然石に比べ小さく、重量を確保できる人工石の大きさにすることが必要である。

ミキサ混合はスランプ2 cm程度までは製造が可能であり、水分量を減らすことより高密度の人工石を製造することができた。また、製鋼スラグや結合材を増量することにより強度の増加を図ることができると考えられる。

バックホウ混合はスランプ5 cm程度の場合、密度は均一であっても強度不足が発生するおそれがあり、十分な混合時間を確保するなどの配慮が必要である。

今後、作成した浚渫土人工石を実海域で使用し、長期耐久性や生物付着性などの確認を実施する予定である。

また、今回得られた知見は名古屋港浚渫土に対するものであり、性状が異なる浚渫土については未確認のため、一般知見化するには更なる研究が必要である。

参考文献

- 1) カルシア改質土研究会：カルシア改質土設計・施工マニュアル，192p.，2014.
- 2) 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.888-893，2014.
- 3) 沿岸技術研究センター：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，43p.，2007（2012更新）.
- 4) 田中裕一，山田耕一，佐々木勝則，永守学，赤司有三，藤井郁夫：浚渫土固化体の製造と海域投入，土木学会第67回年次学術講演会，pp.649-650，2012.
- 5) 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル（改訂版），pp.5-6，2008.
- 6) 文献3），pp.26-27.
- 7) 文献3），p.30.
- 8) 文献1），pp.7-8 - 7-10.

MATERIALS PROPERTIES AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL STONE USING THE DREDGED SOIL

Takumi TSUJI, Yuichi TANAKA, Masao NAKAGAWA, Souichirou NONAKA, Kyouhei NAGAO, Yuzo AKASHI, Eiji KISO and Tomoaki TASAKI

The artificial stone is produced by dredged soil mixing with steel by-products such as converter slag and ground granulated blast-furnace slag. We examined the ideal compounding ratio and performed some production tests for common artificial stone and light weighted artificial stone. In the combination test, we determine a relational expression which enable estimation of the target strength and slump, and we confirm some characteristics for two different types of artificial stone in the production test.