

浚渫泥土と転炉系製鋼スラッグの攪乱混合土砂を用いた実海域試験施工-バッチ式混合投入施工

FIELD PERFORMANCE TESTS ON CONSTRUCTION UNDERWATER MOUNDS USING IMPROVED DREDGED CLAY MIXED WITH STEELMAKING SLUG

和田真郷¹・鶴ヶ崎和博²・赤野博³・中川雅夫⁴・辻井正人⁵・木曾英滋⁶
 Masato WADA, Kazuhiro TSURUGASAKI, Hiroshi AKANO, Masao NAKAGAWA, Masato TUJII, Eiji KISO

¹正会員 工修 東洋建設 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

²正会員 工修 東洋建設 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

³東洋建設 大阪本店 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4-1-1)

⁴正会員 工修 新日本製鉄 技術開発本部土木建築技術部 (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

⁵正会員 Ph.D 新日本製鉄 技術開発本部土木建築技術部 (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

⁶正会員 工修 新日本製鉄 技術開発本部土木建築技術部 (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

It is examined to be recycled by mixing the steel slag with dredged clay as base material of the tideland and the structure in shallow water. To confirm the possibility of application as a basic material of such a mixture material and the possibility of construction, the Field performance tests was executed. Dredged clay is mixed with steel slag and it is made to harden. Underwater mounds are made by using the one that the mixed soil that had become hard was disturbed. To do adequate construction, the indoor examination was executed. The best mixture proportion of dredged clay and steel slag was decided. The effect of controlling the pH and the increase of SS of the mixture material in the sea was verified.

Key Words : *dredged clay, steel slag, unconfined compressive strength, corn index, centrifuge, mixture proportion, field test, disturb*

1. はじめに

埋立て処分されている軟弱な浚渫泥土の有効利用する際、実構造物への適用に際しては、構造物として要求される品質(強度, 形状, 経時的安定性等)を満たす施工が可能であること, 施工時, pH 上昇や濁りの発生といった周辺環境に影響を及ぼさないことが必要となる。近年, 浚渫泥土に転炉系製鋼スラッグを混合し, 強度向上効果, 水質改善効果, そして pH の抑止効果が期待できるリサイクル材料技術が研究開発されており, 浅場築造用基盤や深堀跡地埋戻し等の海域における自然再生事業への適用が期待できる。本試験では, 浚渫泥土と転炉系製鋼スラッグを土運船にて混合・養生した後, 海中投入しマウンドを築造するバッチ式混合投入に係る試験施工を実海域で実施したものである。混合土砂の配合と強度の関係, 混合・養生した後, 海中へ投入する際の, 養生期間の選定, 攪乱が強度, pH や濁りに及ぼす影響について得られた結果・知見を報告する。

2. 試験施工に用いた材料

試験に用いた浚渫泥土は, 大阪湾の阪南4区の浚渫粘土で, 木片, 金属片および比較的大きな貝殻片などは 10mm の篩いを用いて取り除いたものである。転炉系製鋼スラッグは, 未処理の高 f-CaO タイプ(H)および安定処理された低 f-CaO タイプ(L)の2種類で, 0-25mm, 0-5mm の2種類の粒度のものを用いた。それぞれの試料の物理的特性を表-1 に, 粒径加積曲線を図-1 に示す。

表-1 浚渫泥土, 転炉系製鋼スラッグの物理的特性

		阪南4区 浚渫粘土	製鋼スラッグ (H:-25mm)	製鋼スラッグ (H:-5mm)	製鋼スラッグ (L:-25mm)
含水比(試験時) w	(%)	66.5	8.3		
土粒子の密度 ρ_s	(g/cm ³)	2.658	3.600		
粗 砂分	(%)	12.57	78.79	47.66	87.95
細 砂分	(%)	32.16	19.57	48.30	10.75
組 成	(%)	36.60			
粘土分	(%)	18.67	1.64	4.04	1.30
塑性指数 I_p		40.7	----		
液性限界 W_L	(%)	63.6	----		
塑性限界 P_L	(%)	22.9	----		
最大密度 ρ_{max}	(g/cm ³)	----	1.988	1.978	1.934
最小密度 ρ_{min}	(g/cm ³)	----	1.751	1.701	1.714
設定密度 ρ_s (Dr=60%)	(g/cm ³)	----	1.862		1.782

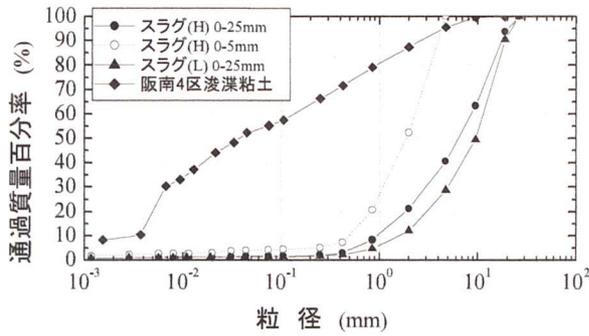


図-1 浚渫泥土，転炉系製鋼スラグの粒径加積曲線

転炉系製鋼スラグの pH は，高 f-CaO タイプ (H) で 12.1 低 f-CaO タイプ (L) で 10.7 であった。

3. 事前室内試験

(1) 室内配合試験

室内配合試験は，浚渫泥土と転炉系製鋼スラグの配合による強度発現特性を明らかにし，実海域試験における配合を決定するために，高 f-CaO の転炉系製鋼スラグの 0-5mm，0-25mm の 2 種類について，スラグの配合量をパラメータに試験を行った。配合は，体積比で転炉系製鋼スラグ：浚渫泥土=30%：70%，20%：80%，10%：90%とした。なお，浚渫粘性土の含水比については，実施工で浚渫した粘性土をそのまま使用することを考慮し，搬入時の含水比とし，作製した供試体は気中にて養生した。

a) 一軸圧縮強度とコーン貫入抵抗

一軸圧縮強度と材齢，コーン貫入抵抗と材齢の関係をそれぞれ図-2，図-3に示す。転炉系製鋼スラグの配合量が多いほど，材齢が進むほど一軸圧縮強度，コーン貫入抵抗は増加する傾向を示す。また，両図から，転炉系製鋼スラグの配合が30%の場合，一軸圧縮強度，コーン貫入抵抗は，混練初期(混練直後～材齢7日)で顕著な強度・貫入抵抗の増加，その後は緩やかな増加を示す。配合が20%，10%の場合では初期材齢が小さい場合，混練初期とそれ以降で強度・貫入抵抗の増加傾向は若干異なるようではあるが，ほぼ直線的な増加傾向を示している。混練初期における強度・貫入抵抗転炉系製鋼スラグの粒径(0-5mm，0-25mm)の違いに着目すると，一軸圧縮強度は，粒径が0-5mmの場合が，0-25mmの場合に比べて大きくなる結果となった。コーン貫入抵抗は，粒径が0-25mmの場合が，0-5mmの場合に比べ大きくなる結果となり，これは0-5mmの場合に比べ大きな粒子があるため，コーン貫入時，それら大きな粒子の押しつけにかかる仕事内在したためと思われる。

b) 攪乱試料の簡易水中投入試験による pH，SS

簡易水中投入試験は，図-4に示すアクリル性の円

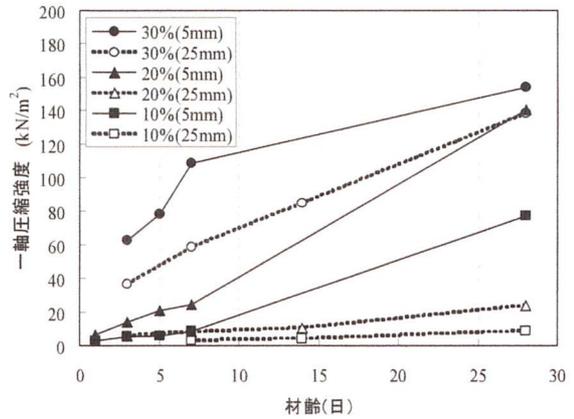


図-2 一軸圧縮強度の経時変化

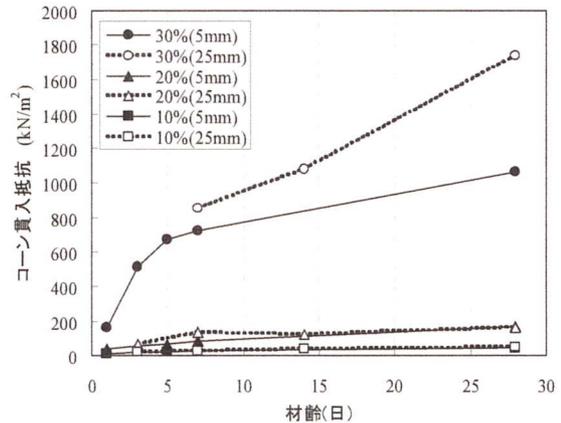


図-3 コーン貫入抵抗の経時変化

筒のシャッター板で仕切った上部に所定の材齢でほぐした試料を充填し，シャッター板を引き抜き下部の水槽へ投入し，そのときの材料の分離の程度による水槽の水(海水)の pH，SSの経時変化を測定するものである。簡易水中投入試験での測定は，投入直後，投入後，0.5H，1H，6Hとした。

図-5に材齢1，3，5，7，14日で攪乱した試料を用いた簡易水中投入試験結果を示す。

pHについては，どのケースにおいても概ね7.6～

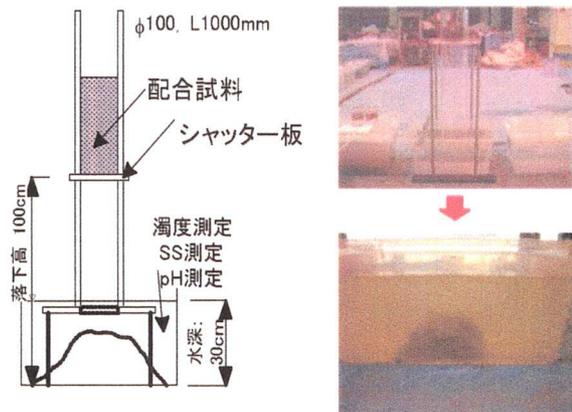


図-4 簡易水中投入試験概要図

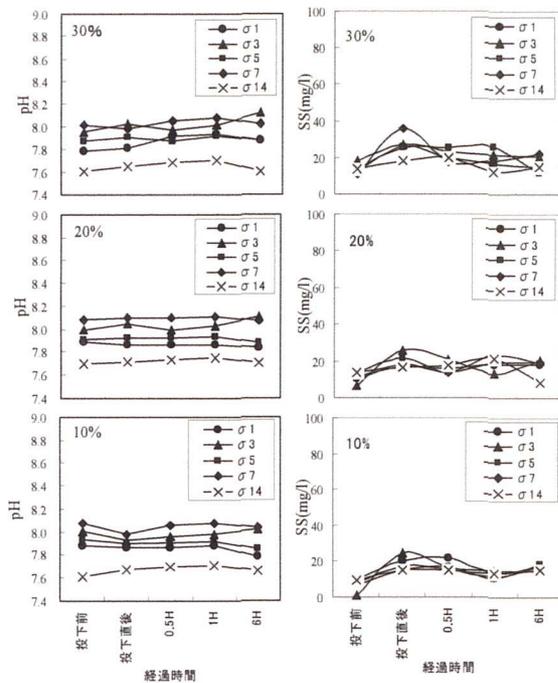


図-5 簡易水中投入試験結果

8.1の範囲であり投入による経時的な変化は見られなかった。転炉系製鋼スラグについては、海水成分による緩衝作用および浚渫泥土混合によってpHの上昇が抑制されていると推測される。

SSについては、転炉系製鋼スラグの配合が30%のケースにおいて、投入直後にSS値は上昇するケースが見られたが0.5H程度でSS値20(mg/L)前後に収束する。転炉系製鋼スラグの配合が20%、10%のケースにおいても投入後若干のSS値の上昇は見られるものの配合が30%の場合のような顕著な上昇は見られず0.5H以降は概ねSS値は20(mg/L)以下で安定するようであり、混合後養生することにより、浚渫泥土の含水比を下げることで、硬化による強度増加が、浚渫泥土の土粒子の分散や、浚渫泥土と転炉系製鋼スラグの分離を抑制しているといえる。

(2) 事前攪拌試験

事前攪拌試験は、浚渫泥土と転炉系製鋼スラグの混合について、実機（バックホウ0.14m³級）を用いて、実海域試験施工に近い条件での攪拌混合を行い、強度の発現及び水中投下時の状況について確認し、施工法及び管理目標（混合度合い等）設定の参考とするために行った。事前攪拌試験ケースを表-2に示す。混合による固化が期待できるケースとして転炉系製鋼スラグの配合が30%を選定した。また、Case.3は、覆砂材等の用途を考えた強度発現を期待しないケースである。なお、混合程度が多・中・少は、攪拌状況を目視で観察し、十分な混練の回数として40回を「多」と設定し、「中」を75%の30回、

表-2 事前攪拌試験ケース一覧

	スラグ種類	スラグ径	混合率	攪拌度
Case.1	未処理	0-5mm	30%	多
Case.2-1	未処理	0-25mm	30%	多
Case.2-2	未処理	0-25mm	30%	中
Case.2-3	未処理	0-25mm	30%	少
Case.3	安定処理	0-25mm	30%	多

表-3 事前攪拌試験における一軸圧縮試験結果

	スラグ種類	スラグ径	攪拌度	一軸圧縮強度:材齢28日 (kN/m ²)	
				事前攪拌	室内配合
Case.1	未処理	0-5mm	多	162.6	154.4
Case.2-1	未処理	0-25mm	多	183.3	138.5
Case.2-2	未処理	0-25mm	中	180.6	
Case.2-3	未処理	0-25mm	少	93.5	
Case.3	安定処理	0-25mm	多	26.4	

「少」を50%の20回と設定した。

攪拌は、貯泥層に仮置きした浚渫粘土を混合ピット(5m³ベッセル)に移し、所定の配合になるよう転炉系製鋼スラグを投入しバックホウで所定の攪拌回数まで攪拌する。なお、転炉系製鋼スラグの配合量の管理は、混合ピット(5m³ベッセル)にて、それぞれ所定の体積になるよう投入高さの管理にて行った。混合された土砂は各ケース毎に混合土仮置きピット(1.5^B×2.0^L×1.0^Hm)に移し養生を行った。このうちCase.1, 2-1, 2-3, 3について所定の養生期間の後バックホウで攪乱し、直径60cmのトレミー管模型にて海水を張った水槽に投入した。養生期間は、Case.1が5日、Case.2-1, 2-3, 3は1日である。

事前攪拌試験にて混合直後にサンプリングした試料の材齢28日の一軸圧縮試験結果を表-3に示す。比較のため同ケースの室内配合試験の一軸圧縮試験結果も合わせて示す。Case.1, Case2-1の一軸圧縮強度に着目すると、室内配合試験の一軸圧縮試験結果とほぼ同等の強度が得られており、所定の配合を事前攪拌試験で行えたことを確認した。また、混合度(攪拌回数の違い)に着目する(Case2シリーズ)と、攪拌回数が多いほど強度が大きくなっており、攪拌回数が規定の50%程度であるとその強度は約半分程度まで低下する。

事前攪拌試験では、主にコーン貫入試験を用いて、貫入抵抗の経時変化、攪拌度による貫入抵抗の違いを確認した。さらに所定の材齢で攪乱し水中投入した堆積土砂についても貫入抵抗を計測した。

養生後攪乱し水中投入を行った後の堆積形状の測定結果を図-6に示す。同図より堆積勾配は、概ね1:2であり、硬化をしていないCase.3は比較的緩やかである。

図-7に混合土仮置きピットで実施したCase.1, 2-1, 2-3, 3のコーン貫入抵抗の材齢毎の深度分布を示す。また、各々のケースで実施した水中打設後の堆積土砂でのコーン貫入抵抗の深度分布も合わせて示す。

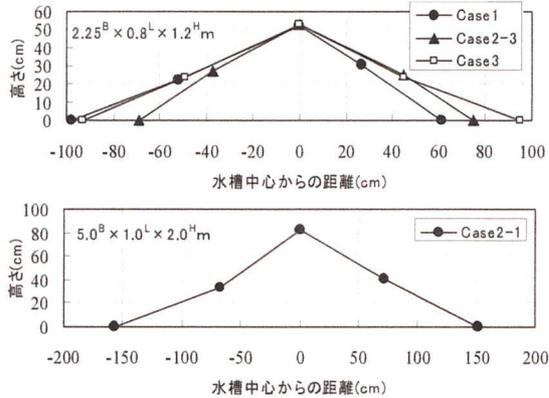


図-6 水中投入試験による堆積勾配

Case. 1, Case. 2の比較から転炉系製鋼スラグの粒径が大きいほど貫入抵抗が大きい結果となり、サンプリング試料における一軸圧縮試験の傾向と合わせ、室内配合試験と同様の傾向となった。図-8に室内配合試験、事前攪拌試験で得られたコーン貫入抵抗と一軸圧縮試験の関係を示すスラグの粒径別(0-5, 0-25mm)に整理したものである。この図から、一軸圧縮強度と貫入抵抗の関係は粒径毎に良好な直線関係が見られ、コーン貫入試験を現場での強度管理に適用できることがわかる。

各ケースの水中打設後の堆積土砂の貫入抵抗に着目する。試験材齢は、混練から概ね28日である。どのケースでも堆積土砂の貫入抵抗は、混練直後の貫入抵抗よりは大きい結果となった。

Case. 2-1, 2-3, 3については、材齢1日で攪乱・投入したものであり、材齢1日の仮置きピットでの貫入抵抗に比べ、増加はしているが、材齢14日の仮置きピットの貫入抵抗の約1/2程度である。また、Case. 1については、材齢5日で攪乱・投入したものであり、材齢5日の仮置きピットでの貫入抵抗より低下しておりセメント改良土と同様な攪乱・再構成による強度低下が見られた¹⁾。

攪乱・再構成をした場合、転炉系製鋼スラグの配合が30%である場合、室内配合試験結果から、混練後7日程度までの強度増加がそれ以降に比べ大きいと観察された。したがって攪乱・再構成を材齢1日で行った場合、混練初期の硬化をまだ期待できるが、材齢5日の場合、ほぼ混練初期の硬化が終了した後に硬化した構造を攪乱したものと考えられるため、攪乱・再構成をした場合の貫入抵抗の増加はあまり期待できないといえる。事前に混合し、養生をした後、攪乱して水中投入等を行って強度増加を期待する場合、初期の硬化の期間、用途による要求される強度を考慮して養生期間を決定する必要がある。

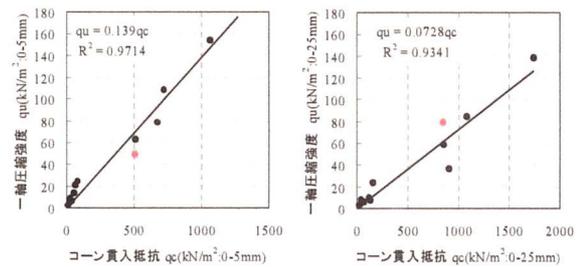


図-8 一軸圧縮強度とコーン貫入抵抗の関係

(3) 遠心模型による投入シミュレーション

遠心模型に投入シミュレーションは、実物規模の応力状態の下で、投入試験を実施し、堆積形状や施工時の原地盤の変形状況を視覚的に把握するために行った。原地盤模型として現地の詳細なデータの入手が出来なかったため、大阪湾地盤の代表例²⁾として、堺浜沖の浚渫粘性土を用いて正規圧密地盤を作成した。なお、遠心加速度は40G(模型縮尺1/40)で実施し、混合土砂は事前攪拌試験における Case. 2-

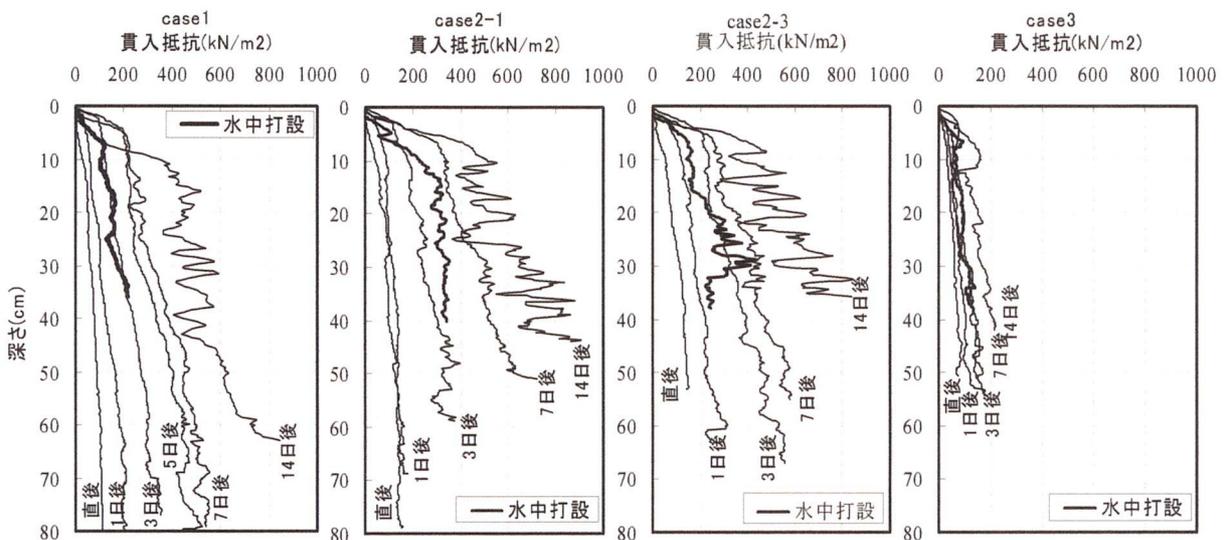


図-7 事前攪拌試料のコーン貫入抵抗の経時変化

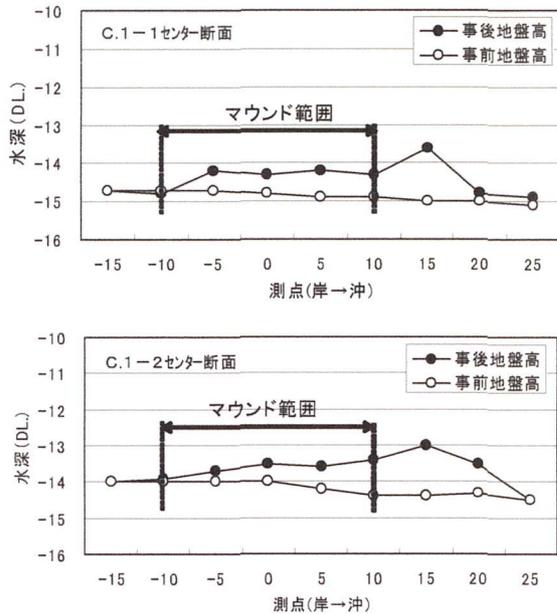


図-12 深浅測量結果(ケース1-1, 1-2)

図-13 に Case. 1-1, 1-2, 2-1 の施工中～施工後の SS, pH の計測結果を示す. 計測は, 各マウンド中央から 30m 離れた任意の 3 ヶ所で計測し, SS については, その最大値を, pH については最大・最小値を示したものである. 測定深度は, 海面下 1m(上層)および地盤表面上 1m(下層)である. SS について、バックグラウンド値と比較した場合は 0～10mg/L 以内であった. pH については 7.8～8.1 程度であり時間経過による変化は見られなかった.

表-15 に Case. 1-1, 1-2 マウンドで実施したベーンせん断試験結果を示す. 地表面付近のデータであるが材齢の増加に伴いベーンせん断強度は増加傾向にある. 表層 5cm は 15, 25cm に比べ強度が若干小さい. 界面ゆへの吸水等による強度の低下によるものと考えられる. またコア採取時の目視確認からマウンドは混合土砂が塊状で堆積しており, 極端な分離は認められなかった.

5. まとめ

実海域試験施工および事前室内試験より以下の知見が得られた.

- 1) 室内配合試験, 事前攪拌試験という手順で決定された配合を用いた実施工で, 出来型形状, 水質を満足するマウンドを作製することができた.
- 2) 今回用いた浚渫泥土(阪南4区浚渫粘土)では転炉系製鋼スラグの配合は体積比で30%で十分な強度が得られる. 材齢1日程度の攪乱再構成では, その後の強度の増

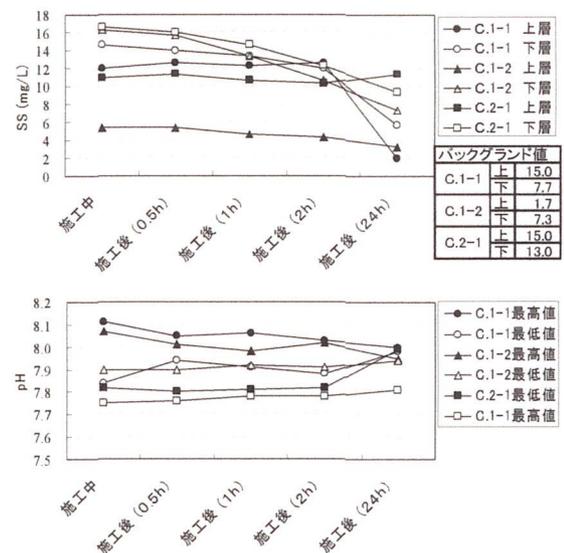


図-13 施工時, 施工後の水質計測結果

表-5 マウンド表面のベーンせん断試験結果

材齢	深さ (cm)	マウンドケース	
		C.1-1	C.1-2
1日	5	62.7	54.2
	15	80.4	88.5
	25	85.7	93.8
7日	5	50.2	60.2
	15	85.7	85.7
	25	93.8	88.5
14日	5	49.5	107.2
	15	70.2	117.9
	25	171.5	160.7

(kN/m²)

加も期待できるが, それ以降の強度の伸びは, 攪乱しない場合に比べ小さくなる. 強度発現については, 転炉系製鋼スラグの粒径が小さい方が大きい. 3) トレミー管でも投入では, 事前の検討(1G場, 遠心力場)から堆積勾配は1:3～1:2であることが予想され, 実施工では浮泥層や軟弱層へのめり込みにより1:5程度であった. 4) 混合後養生したものを海中投入することで, pH上昇の抑制効果, 分離抵抗性を高めSS値の上昇も抑制することが出来る. 5) 事前攪拌試験による混合度合いの把握等より現地での混合成果は良好であった. 地表面付近のデータではあるが強度が経時的に増加することを, 現地計測から得た.

参考文献

- 1) (社)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル 第3版, 2003.
- 2) 大阪湾地盤情報の研究協議会編: ベイエリアの地盤と建設 大阪湾を例として, 2002.