

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－連続式混合投入施工

FIELD EXPERIMENTS ON DREDGED SOIL IMPROVEMENT
BY CONTINUOUSLY MIXING WITH CONVERTER STEEL-MAKING SLAG

武田将英¹・五明美智男²・永留健³・辻井正人⁴・木曾英滋⁵・中川雅夫⁶

Masahide TAKEDA, Michio GOMYO, Takeshi NAGATOME,
Masato TSUJII, Eiji KISO and Masao NAKAGAWA

¹正会員 東亜建設工業(株)技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

²フェロー 博(工) 東亜建設工業(株)エンジニアリング事業部(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

³正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

⁴正会員 ph. D. 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

⁵正会員 工修 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

⁶正会員 工修 新日本製鐵(株)スラグ・セメント事業推進部(〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

This paper describes a study on design, management and construction method for dredged soil improvement with converter steel-making slag. After a continuously mixing and damping system was introduced, several tests in laboratory and field experiments were executed. It is found that the density measurement of mixture is available for quality control to keep mixture ratio and a uniform mixture was supplied by the introduced method. In addition, the effectiveness of mixture, decrease of suspended solids under construction, increase of the strength of mixture in situ and little increase of pH just above the constructed mixture mound were confirmed.

Key Words : *Dredged material, converter steel-making slag, continuously mixing, damping*

1. はじめに

天然砂の保護による省資源化, 赤潮・青潮の抑制などの海域環境改善や干潟・浅場造成などの環境再生において, 種々のリサイクル材を海域に利用する研究が進められている。例えば, 鉄鋼生産過程で発生する粒状の副産物である鉄鋼スラグにはいくつかの種類があるが, 転炉等で精錬される転炉系製鋼スラグ(以下, 転炉系スラグ)の干潟材料への適用に関する生物生態面からの基礎的な検討¹⁾や施工性の低い軟弱な浚渫土の固化改良技術²⁾に関する報告がある。特に, 後者では転炉系スラグによるリンの吸着効果と同時に, 強度改善や転炉系スラグによるpH上昇が浚渫土の混合によって緩衝される効果などについて言及されている。

一方, こうした材料の利用にあたっては環境影響や安全性の確認が最優先されることは言うまでもない。しかしながら, 実海域での適用にあたっては, 副産物の利用という資源節約とコスト面でのメリットを活かすために, 効率的かつ環境影響の少ない施工方法を開発し, その検証を進めることも大変重要な課題となる。

本研究では, 浚渫土と転炉系スラグの混合により生じる改質効果(浚渫土の改良, 混合土の強度発現, 海底でのリンの吸着など)を利用するために, 両者を連続的に混合し固化改良して海域に投入する技術について, 実海域試験ならびにその事前検討の成果を報告する。

2. 実海域試験の考え方

(1) 適用システム

今回の混合固化改良の施工技術開発にあたっては, ①2つの材料を定量かつ効率的に混合した上で連続的に海域に投入できること, ②2つの材料の混合および投入の施工・品質管理方法を確立すること, ③施工時の環境影響を低減することを目標とした。そのため, 図-1に示すように, 2系統の揚土機能を有するリクレーマ船を用いるとともに混合攪拌のための連続ミキサーを利用し, 海域への投入に際しては汚濁防止のための汚濁防止枠と鉛直管(以後, トレミー管)を組み合わせた工法を用いることとした。

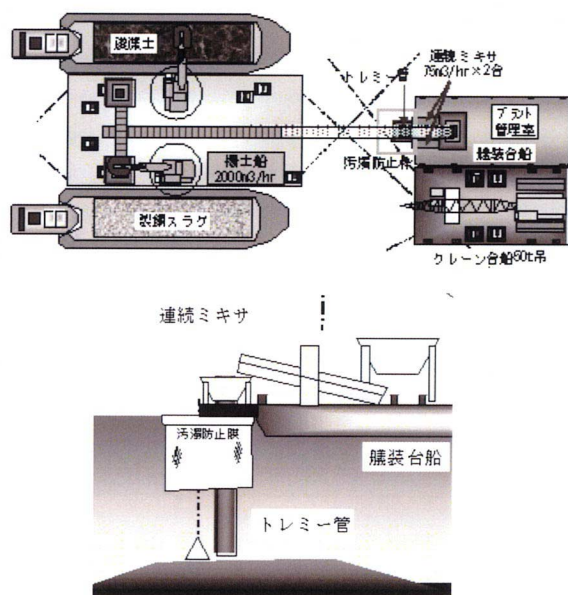


図-1 施工システム

(2) 対象構造物と使用材料

トレミー管を用いる場合、施工位置の海底が平坦で流れの影響が少ない場合には、管直下を中心とした円形あるいは円錐形の堆積形状を示すことが知られている。そこで、後述するように、円形、円錐形の形状を一方向に順次連続あるいは重ねあわせることにより、マウンドを造成することとした。

また、浚渫土としては大阪湾内で発生したものを、転炉系スラグは名古屋産のものを使用した。

3. 混合材料特性の事前検討

実海域試験に先立ち、施工管理および品質に関連する混合材料の基本的な特性について検討した。

(1) 強度特性および配合検討

混合材料の力学特性については、浚渫土起源の Si および転炉系スラグ起源の f-CaO（フリーライム）の水和固化によって強度改良が生じ、転炉系スラグ混合率が高いほど、浚渫土の含水比が小さいほど、強度の発現率が高くなることが、木曾ほか²⁾によって報告されている。そこで、こうした強度発現特性をふまえて使用材料を用いた配合試験を行い、品質管理のための密度と強度発現を確認し現場配合を決定することとした。

試料は、浚渫土に所定の転炉系スラグを加えソイルミキサーで5分間練り混ぜ、浚渫土と転炉系スラグの見かけの容積比が8:2、7:3、6:4となるように作製した。このとき、転炉系スラグは直径10cm、高さ20cmのプラスチックモールドに落下高さ10cmで気中落下させたときのかさ体積 ($\rho_d=1.935\text{g/cm}^3$, $Dr=62\%$) によって配合を決定した。浚渫土と転炉系

スラグの混合土 1m^3 あたりの配合を表-1に示す。

図-2は、時間経過に伴う湿潤密度の変化の測定結果を示したものであり、図中には点線で配合密度（配合表通りに配合されたときの混合土湿潤密度）も示している。養生初期に配合密度を上回る供試体が見られるものの、ほとんどの供試体で配合密度よりも 0.1g/cm^3 程度低い密度が計測された。こうした相違の原因として、試料混練り中の空气の混入、強度発現時の水分蒸発などが考えられる。そこで、実海域試験時には、配合密度を補正して混合直後の品質管理に用いることとした。

また、作製された混合材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係は、木曾らの報告と同様の傾向を示していた。すなわち、強度増加量は、各ケースとも養生初期に大きく時間の経過とともに小さくなる。表-2は、養生7日目から養生28日目までの混合材料の一軸圧縮強さの増加率 (q_{u28}/q_{u7}) を示したものであり、転炉系スラグの体積混合割合が増えるほど増加率が大きくなり、28日強度も大きくなることがわかる。

表-1 混合材料の標準配合

浚渫土	見かけ容積比 浚渫土：スラグ	調整泥土		転炉系スラグ	
		kg	L	kg	L
$\rho_t=1.558\text{g/cm}^3$	8：2	1382	887	422	113
	7：3	1276	819	677	181
	6：4	1158	743	958	257

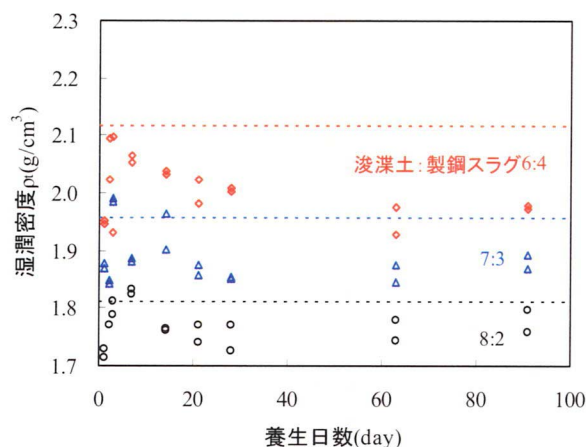


図-2 混合材料の湿潤密度と経過日数の関係

表-2 配合比と強度増加率、28日強度の関係

見かけの容積比 (浚渫土：転炉系スラグ)	q_{u28}/q_{u7}	q_{u28} (kN/m^2)
8:2	1.1	40~50
7:3	1.5	110~120
6:4	2.0	180~200

(2) 流動性

連続ミキサーでの混練直後にトレミー管内に混合材料を投入するため、堆積形状や管内での分離特性などは混合材料の初期強度に大きく依存するものと考えられる。武田ほか³⁾は、混合直後の混合材料で

は一軸試験が困難なことから、混合材料のフロー値に着目し、トレミー管内の落下形態、堆積形状、pHの変化、発生濁度が異なることを実験的に示している。ここでも流動性の指標として、武田らと同様のシリンダーフロー試験 (JHS A 313) およびモルタルフロー試験 (JIS R 5201) を行った。

図-3に、試料作製直後のモルタルフロー試験結果を示す。図中には白抜きで湿潤状態の転炉系スラグを用いた場合についてもデータを記入している。図をみると、転炉系スラグ混合量が多くなるほどモルタルフロー値も低下している。また、モルタルフロー値は転炉系スラグの状態（乾燥、湿潤）によっても大きく異なっており、乾燥した転炉系スラグを用いた方がモルタルフローも低かった。このようになった理由として、混合直後に転炉系スラグが浚渫土の水を吸水したことによって流動性が低下したことが考えられる。

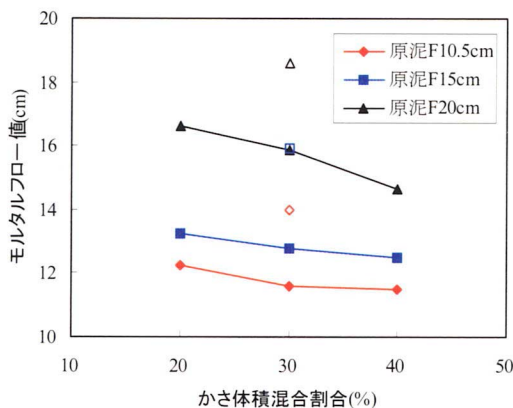


図-3 モルタルフローと配合比の関係

図-4に、試料作製直後のシリンダーフロー試験結果を示す。図中には白抜きで湿潤状態の転炉系スラグを用いた場合についても示している。

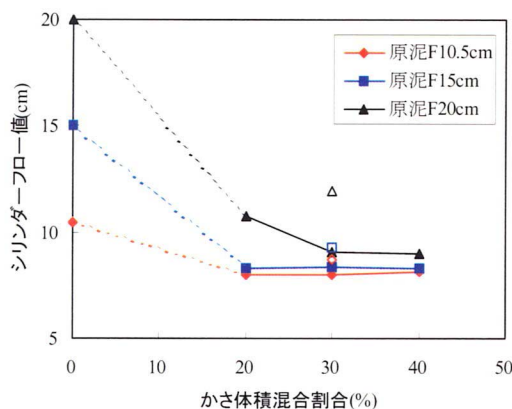


図-4 シリンダーフローと配合費の関係

転炉系スラグを混合することによって大きく流動性が低下し、また転炉系スラグの状態によっても大きく値が異なるなど、モルタルフロー試験結果と同じ傾向が認められた。しかしながら、これらのシリ

ンダーフロー試験結果のほとんどはシリンダーフロー値が8~9cm程度であり、各配合での明確な差がでていない。このように浚渫土の流動性が特に低い場合については、簡便なシリンダーフロー試験よりもモルタルフロー試験を適用するなど、使い分けが必要となる。

4. マウンド設計

混合材料によるマウンド造成にあたり、マウンド載荷時の海底地盤の圧密沈下および安定検討を実施した。

(1) 実海域試験予定地の海底地盤調査

マウンド造成予定海域の地盤特性を把握するために、海底面から-3mまで、潜水土によりエアアンマーを用いてのコアサンプリングを行った。

今回採取した海底地盤は、表層から浮泥層、上部粘土層、下部粘土層に分けられ、各層の厚さはそれぞれ0.3m, 0.9m, 1.8m程度、物理特性は表-3のようにまとめられる。近傍のボーリングデータから下部粘土層は、海底-7.7m付近まで存在していると推測されたことから、下部粘土層の厚さを6.5mとしてマウンドの設計を行うこととした。

表-3 実海域試験予定地の海底地盤の特性

浮泥層 (0~0.3m)									
土粒子密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	間隙比	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒状組成 (%)			
						礫	砂	シルト	粘土
2.548	1.143	398.9	10.124	194.4	52.1	0	5	65	30
上部粘土層 (0.9~1.2m)									
土粒子密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	間隙比	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒状組成 (%)			
						礫	砂	シルト	粘土
2.655	1.266	78.3	2.741	98.8	30.1	4	9	59	28
下部粘土層 (1.8~2.1m)									
土粒子密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	間隙比	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒状組成 (%)			
						礫	砂	シルト	粘土
2.664	1.760	38.7	1.100	42.7	19.9	0	23	50	27
下部粘土層 (2.4~2.7m)									
土粒子密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	間隙比	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒状組成 (%)			
						礫	砂	シルト	粘土
2.666	1.786	43.6	1.143	50.0	19.3	0	12	53	35

(2) マウンド設置による圧密沈下量の推定

サンプリング調査により得られた各層の液性限界 w_L から、我が国の海成粘土で用いられている一般的な経験式である (1) 式を用いて圧縮指数 C_c を推定し、図-5に示すようなモデルにより一次元圧密理論による沈下計算を行った。

$$C_c = 0.015 \times (w_L - 19) \quad (1)$$

同図に示すように、混合材料については法勾配1:5、

高さ2.5mの円錐型のマウンド形状を仮定し、載荷応力を算出した（オスターバーク影響値 $K=0.375$ ）。

マウンド構築による各層の圧密沈下量は、浮泥層、上部粘土層、下部粘土層でそれぞれ、15cm、36cm、17cmとなり、3層の圧密沈下量の合計は約68cmであった。これらの結果より、混合材料投入時の側方流動などを除いた静的な条件では、浮泥の存在および沈下を考慮しても海底面に対して1.5m程度の高さが確保されることとなる。

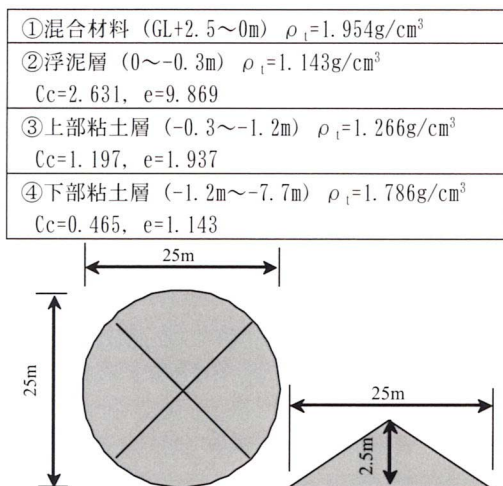


図-5 圧密検討モデルとマウンド形状

5. 実海域試験の概要

実海域試験は、2007年10月、大阪湾堺浜（堺北泊地）の水深15～18mの地点で実施した。今回採用した施工方法では、連続ミキサー（75m³/hを2基）による混合攪拌状況が施工後の品質に大きく影響することから、実験ケースとしては配合比として浚渫土：転炉系スラグ＝7：3、混合程度として標準混合・混合少・混合なしの3ケースとし、表-4に示すような3つのマウンド造成（底面積はいずれも75m×25m）を試みた。写真-1に現場の施工状況を示す。

表-4 実海域試験ケース

実験ケース	混練時間	時間あたり投入量 (m³)	混合材料体積 (m³)
マウンド a	標準	71～90	1200
マウンド b	小	77～171	1200
マウンド c	なし	265～413	1200

施工時には出来形計測として事前事後の深浅測量、品質管理としてトレミー管投入前の混合材料の密度・フロー値、一軸試験用の試料採取を実施するとともに、環境計測として周辺の pH、濁度の鉛直分布を計測した。また、施工後には、造成直後のマウンド上での pH 連続観測、施工3ヵ月後のマウンド形状と強度の計測を行った。



写真-1 施工状況

6. 実海域試験の結果

(1) 材料管理

1500m³ 積の土運船を用い、浚渫土は3隻で2800m³、転炉系スラグは2隻で1200m³を試験場所に搬入した。土質試験の結果、それぞれの物性は表-5に示すように、若干スラグの物性に違いが見られるものの、バラツキの少ない材料が供給された。

表-5 実海域試験に使用した材料の基本的特性

浚渫土									
湿潤密度 (g/cm³)	土粒子密度 (g/cm³)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)	pH	粒度組成 (%)		
							礫	砂	シルト・粘土
1.492	2.686	84.0	73.5	22.3	7.4	8.3	4	29	34
1.491	2.678	86.7	76.9	24.1	7.7	8.5	2	22	40
1.518	2.675	83.4	71.8	21.4	7.7	8.3	9	29	34
転炉系スラグ									
土粒子密度 (g/cm³)	自然含水比 (%)	最大乾燥密度 ρ _{max} (g/cm³)	最小乾燥密度 ρ _{min} (g/cm³)	pH	粒度組成 (%)				
					礫	砂	シルト	粘土	備考
3.726	6.2	2.092	1.681	12.0	75	22	3		土通線4
3.566	1.9	1.943	1.603	11.6	94	6	0		土通線5

(2) 品質管理

上記材料特性から配合比により計算される配合密度を補正することにより、浚渫土と転炉系スラグの配合比 7:3、8:2 に相当する湿潤密度として、1.88、1.73g/cm³ が得られた。現場での品質は、この数値により管理することとした。

2つの配合密度に対し、混合材料の湿潤密度を経時的に計測したすべての結果を図-6に示す。こうした密度計測により、転炉系スラグの設計体積配合比30%に対し平均26%で投入されていることが確認された。

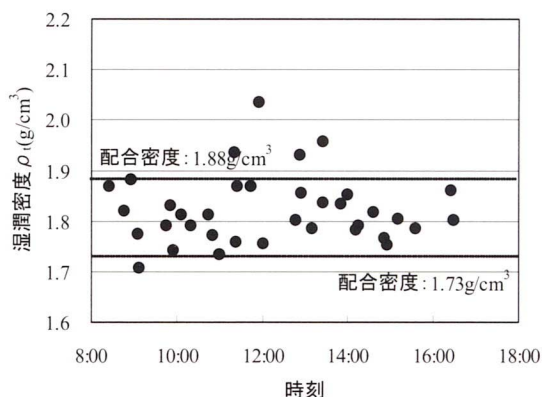


図-6 混合材料の湿潤密度

また、浚渫土のフロー値が 10cm 弱と小さかったことから、モルタルフロー試験を用いて流動性を把握した。その結果、図-7 に示すように 10~13cm の範囲の混合材料が投入されたことが確認できた。武田ほか³⁾の室内試験結果によれば、フロー値によってトレミー管内を落下する混合材料の分離状況が異なることが報告されているが、今回の試験の場合にはトレミー管体積に対して土砂投入量が小さかった影響が顕著であり、連続ミキサーを通過した混合材料は小さな塊状で落下したものと推測される。

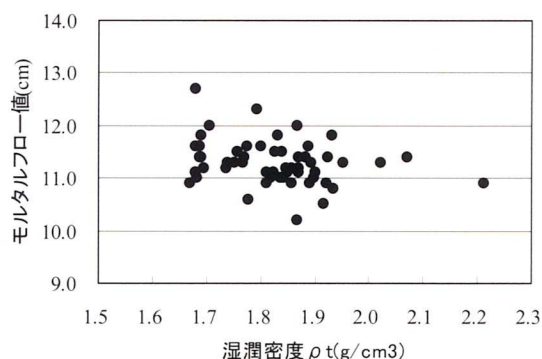


図-7 モルタルフローと湿潤密度の関係

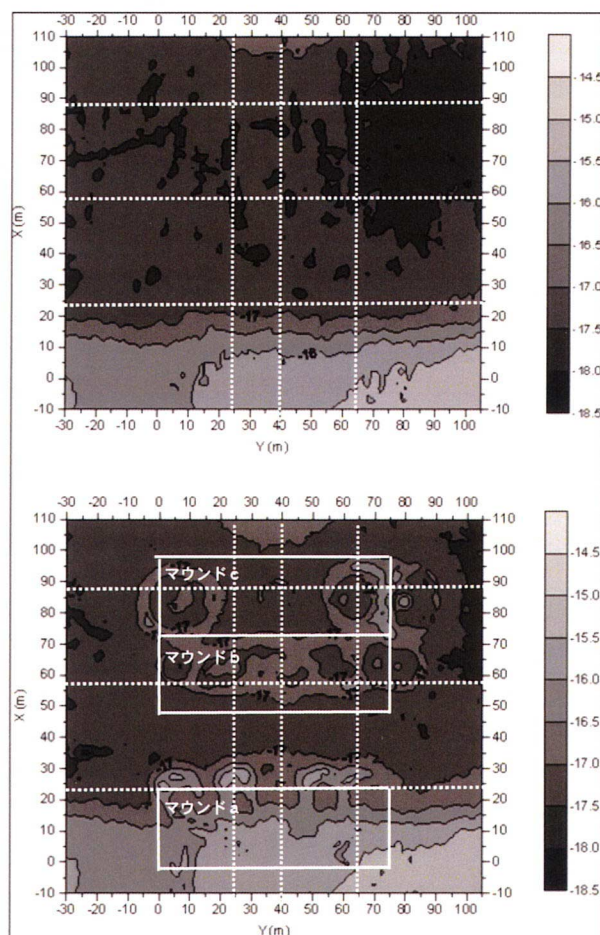


図-8 施工前後の海底地形とマウンド造成位置

(3) マウンド形状

実際の施工では、トレミー管内を落下する際の運動量による着底後の運動なども考慮し、1m のマウンド厚さを確保できるように適宜施工を進めることとした。

図-8 は、施工前の海底前後の海底地形を示したものであり、下段は施工後地形には各マウンドの施工位置もあわせて示した。標準混練されたマウンド a のケースでは、海底勾配 1:10~1:15 の斜面部への施工を試みた。モルタルフロー 11~12cm 程度の流動性の混合材料では、深部方向に流動し投入地点から 15m 程度離れた場所にクレータ状のマウンドが形成された。一方、平坦部に施工した混練小のマウンド b および混練なしのマウンド c では、トレミー管直下にクレータ状のマウンドが出来た。

図-9 は、図-8 に点線で示した側線から典型的な断面を示したものである。多少の不陸が見られるものの高さ 0.5~1m 程度のマウンドが造成されていることがわかる。

また、2008 年 1 月に実施した深浅測量の結果によれば、2007 年 10 月との高低差は±0.1m 程度であり沈下などの影響はほとんど見られなかった。

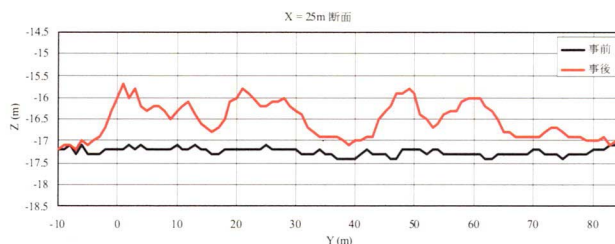


図-9 X=25m (マウンド a) の海底地形断面

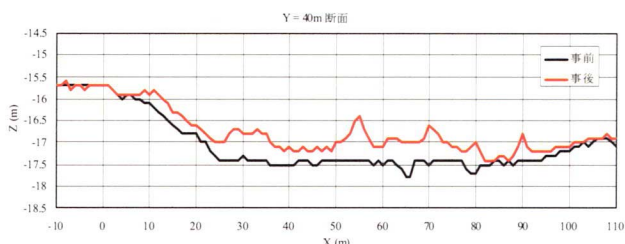


図-10 Y=40m での海底地形断面

(4) マウンドの強度特性

トレミー管投入前に採取した試料を用い、7日、14日、28日後の一軸圧縮強度を計測した結果を図-11 に示す。混合攪拌のないマウンド c で強度が小さいものの連続ミキサーで混合攪拌したマウンド a、b では 200kN/m² 以上の強度が発現していることが確認された。

一方、施工後約 3 ヶ月に相当する 2008 年 1 月末には、潜水土により直径 10cm、高さ 20cm 程度のアクリルパイプでマウンド試料を採取し、コーン貫入試験を実施した。混合をしていないマウンド c では、浚渫土と転炉系スラグの不均一部分が見られ、場所

によって強度はゼロであった。また、マウンド a, b では、表-6 に示すような結果が得られており、混練の程度による各マウンドの違いは顕著である。一軸圧縮強さがコーン指数の 1/5 程度とされる一般的な関係を用い、マウンド a, b の深さ 5~10cm の平均的な一軸圧縮強さを推定した結果、それぞれ 207, 130kN/m² が得られ、28 日強度に対する発現率は 69%, 57%と計算される。これらより、均一にかつより強度を発現させるためには、材料の十分な混合攪拌が不可欠であることが示唆された。

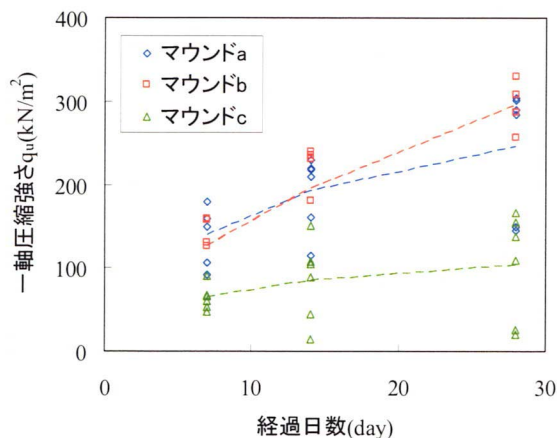


図-11 実海域試験の混合材料の一軸圧縮強度

表-6 マウンド a, b のコーン指数

マウンド	貫入深さ (cm)	コーン指数 (kN/m ²)	5cm 以深の平均値 (kN/m ²)
a	2.5	154	1034
	5.0	580	
	7.5	1080	
	10.0	1441	
b	2.5	46	649
	5.0	423	
	7.5	676	
	10.0	849	

(5) 施工時の環境影響

施工区域の北西側は浅くなっており、実験場所は小規模な窪地となっている。そのため、施工期間中には、-12m 付近に水温の躍層が見られ、工事期間中も安定した状態で存在した。トレミー管の下端海底付近で発生した濁りは、躍層内に留まり上方へ広がることはなかった。

図-12は、各マウンド上0.1m, 1.0mの地点で、施工後にpHの連続観測を実施した結果である。施工量と材料の混合程度の2つの要因に影響されるが、施工直後のpHは、標準的な混合をしたマウンドaではほとんど変化していないことがわかる。また、混合をしていないマウンドcでも、pHが9弱まで上昇した時期は施工後6時間程度までであり、浚渫土による転炉系スラグ起源のpHの緩衝効果が確認された。

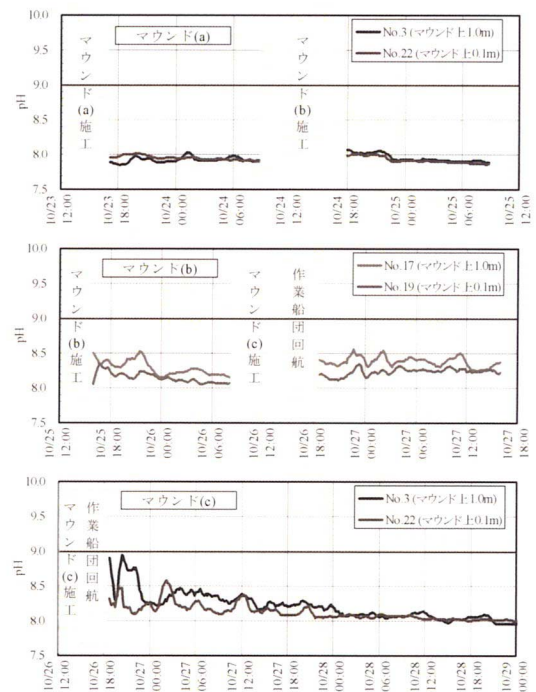


図-12 マウンド上のpHの経時変化

7. おわりに

浚渫土と転炉系スラグの混合固化改良の実海域試験とそのための様々な試験について報告した。採用した工法や密度測定による品質管理の有効性、浚渫土の改質効果、混合材料の強度発現やpH緩衝効果などについて明らかにした。

謝辞：本報に関する調査研究は、経済産業省補助事業「スラグ利用に係わる研究開発」として補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鶴谷広一、中川雅夫、木曾英滋、古川恵太；鉄鋼スラグの干潟材料への適用性に関する水槽実験、海岸工学論文集、第 52 巻, pp. 986-990, 2005.
- 2) 木曾英滋、辻井正人、伊東公夫、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、第 24 巻, 2008 (投稿中)。
- 3) 武田将英、五明美智男、永留健、辻井正人、木曾英滋、中川雅夫；混合材料の鉛直管内落下特性－粘性土と転炉系製鋼スラグを例として－、海洋開発論文集、第 24 巻, 2008 (投稿中)。