

カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための 潜堤施工手法の検証～強度・形状特性の把握～

竹山 佳奈¹・泉水 めぐみ²・西田 浩太³・峯松 麻成⁴・
田中 裕一²・江口 信也²・野口 孝俊⁵

¹正会員 五洋建設(株) 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: kana.a.takeyama@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設(株) 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³正会員 東亜建設工業(株) エンジニアリング事業部 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

⁴東洋建設(株) 土木技術部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 1-105)

⁵正会員 国土交通省関東地方整備局 (〒231-8436 横浜市中区北仲通 5-57)

浚渫土と転炉系製鋼スラグを有効活用したカルシア改質浚渫土を用いて、汚濁低減に配慮した土質性状や投入方法で築堤した潜堤の強度・形状特性について報告する。試験は注排水可能な京浜港ドックで実施し、水中打設で潜堤を築堤後、干出した堤体の形状測定および強度試験用の供試体採取をおこなった。その結果、投入した改質土の土質性状によって強度が異なり、汚濁低減効果の低いスランプ値<1 cmの改質土の強度は、汚濁低減効果の高いスランプ値スランプ値 1-7 cmの改質土の約 1/2 となった。同一の改質土を水中投入あるいは水面落下投入方法で投入した場合、堤体の強度差は小さかった。一方で、法面勾配は水面落下投入の方が緩やかとなった。

Key Words: *Steelmaking slag, dredged soil, soil improvement, submerged breakwater, strength development, prevention of pollution*

1. はじめに

近年、航路浚渫等で大量に発生する浚渫土の処分場確保が課題となっており、浚渫土に産業系リサイクル材を添加した改質土の活用のための技術開発がおこなわれている¹⁾²⁾。転炉系製鋼スラグを粒度調整および成分管理したカルシア改質材(以下、改質材とする)もその一つである。浚渫土に改質材を添加したカルシア改質浚渫土(以下、改質土とする)は、強度の増進効果、粘性増大に伴う発濁抑制効果、底質浄化効果を有し³⁾、新たな材料として期待されている。改質土は、埋立や浅場・干潟造成等の基盤材等として利用されることが多いが³⁾、流動性を調整することで潜堤等の法面勾配が重要な構造物での利用が可能となる。

改質土の海域投入について、グラブ投入、バージ直接投入、法肩流下およびトレミー打設等での施工がおこなわれている。法面勾配については、管中混合方式での水中打設では1:2.1程度、また、1:3程度の勾配にはグラブ投入工法が適していること等が報告されているが³⁾⁴⁾、土質性状や投入方法が強度や勾配に与える影響は明らかとな

っていない。一方、潜堤や護岸の腹付土等、1:3よりも急勾配が期待される場合も生じている。

そこで、室内試験で配合試験を実施後、実施工で想定されるグラブ降下投入あるいはバージ直接投入を模した投入方法で現地試験を実施した。また、改質土は粒径が大きく、硬い改質材が含まれているため、通常のボーリングでは、採取試料の乱れや強度の低下が生じる。水中打設した堤体では試料採取がさらに困難となるが、注排水可能な施設で試験を実施することで、干出した状態で試料採取および堤体計測することができた。本論文では、水中打設した潜堤強度・形状特性について報告する。

なお、本論文は、国土交通省関東地方整備局との共同研究(海洋・港湾技術の早期実用化に向けた実証実験)の成果として報告するものである。

2. 試験概要

(1) 試験材料

浚渫土は東京湾内で採取した海底土を使用した。改質

表-1 試験材料の基本物性

項目		改質材	浚渫土
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.69	2.709
湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)	-	1.66
含水比	%	3.7	55
粒度	礫(2 mm以上)	%	67.00
	砂(75 μ m~2 mm)	%	27.44
	シルト(5 μ m~75 μ m)	%	5.56
	粘土(5 μ m未満)	%	
最大粒径	mm	37.5	4.75
液性限界	w _L (%)	-	53
塑性限界	w _p (%)	-	30.3
塑性指数	I _p	-	22.7
絶乾密度	g/cm ³	2.95	1.055
表乾密度	g/cm ³	3.08	-
吸水率	%	4.6	-

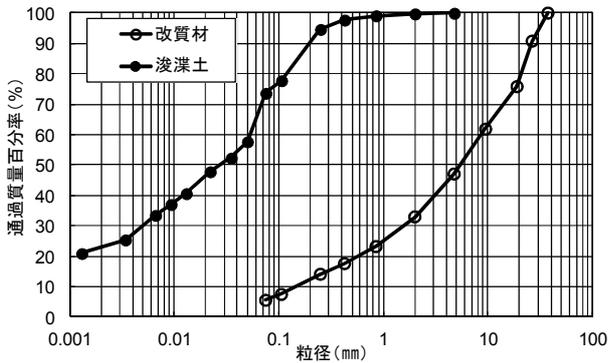


図-1 試験材料の粒径加積曲線

材は、JFEスチール(株)東日本製鉄所千葉地区の製鋼スラグ(最大粒径37.5 mm)を使用した。浚渫土および改質材の物性を表-1に、粒度分布を図-1に示す。浚渫土を海水で加水し、液性限界の1.5倍の含水比(1.5 w_L%)に調泥した。改質土は、浚渫土:改質材=70:30の容積比で混合して作成した。

スランプ値が1-7 cmの改質土(以下、好適スランプ範囲内の改質土)は、スランプ値が1 cm未満の固化が進んだ改質土(以下、好適スランプ範囲未満の改質土)と比べて汚濁低減効果が高いことが報告されている⁵⁾。そこで、現地試験では、好適スランプ範囲内および比較対照として範囲未満の改質土を投入試料とした。また、スランプ値は養生時間と相関があり、養生温度20°Cでは、約24時間で好適スランプ範囲内、約48時間で好適スランプ範囲未満の改質土となる⁵⁾ことから、養生時間を基にスランプ値を調整した。

3. 室内試験

室内試験では、好適スランプ範囲内および範囲未満の改質土について、一軸圧縮試験を実施した。実際の施工において、グラブ等を用いて改質土を水中投入する際に

改質材30%添加20°C養生

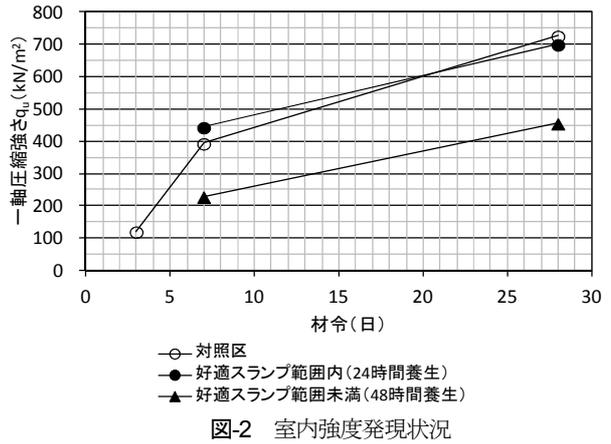


図-2 室内強度発現状況

は、試料の乱れ(攪乱)が生じることになる。そこで、投入時の試料の攪乱を再現した強度発現を把握するために、各条件のスランプ値が得られるまで養生後、試料をスコップで攪乱し、モールドに充填して一軸圧縮試験を実施した。

試験結果を図-2に示す。また、混合直後にモールドに充填した試料を比較対照とした。24時間養生の好適スランプ範囲内のケースは、対照区と比べて材令7日および材令28日の強度に大きな差はみられなかった。一方、48時間養生の好適スランプ範囲未満のケースは、対照区ケースと比べて約1/2の強度となった。

以上の結果より、好適スランプ範囲内の改質土は、試料攪乱による強度発現への影響が小さいが、好適スランプ範囲未満の改質土は、投入時の試料採取による攪乱が強度発現が低下することが示された。

4. 現地試験

(1) 試験場所

現地試験は国土交通省関東地方整備局所有の土木遺構の京浜港ドック(神奈川県横浜市)にて実施した。試験配置状況を図-3に示す。ドック内は水中ポンプで海水の注排水が可能な施設である。そこで、注水後に築堤し、排水後に干出した堤体の測定、試料採取を実施した。

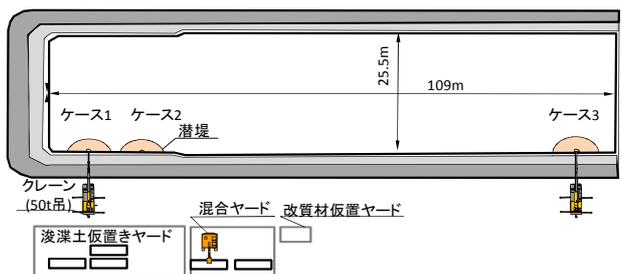


図-3 現地試験施設の概要

(2) 試験ケース

試験ケースを表-2に示す。汚濁低減効果の高い好適スランプ範囲内の改質土と好適スランプ範囲未満の改質土とした。試験期間中の平均気温は、室内試験と同様に20℃(11月)であったため、各ケースの養生時間は、室内試験の養生時間を参考に設定した。投入土量は30m³とし、鋼製水槽(30m³)を2基使用して改質土を15m³ずつ投入してミキシングバケットで120分間混合した。混合後、各スランプ値が得られるまで水槽内で養生し投入した。

投入方法は、汚濁低減に配慮するためにグラブ降下投入(グラブを水底降下し開放),およびバージ直接投入(グラブを水面下で開放)を設定した。潜堤形状は、法面勾配1:3とし、高さ1.5m,堤体幅5.5mを想定した。また、投入は0.8m³バケットを使用して連続投入した。

表-2 試験ケース

ケース	汚濁低減のための好適スランプ	養生時間(時)	スランプ値(cm)	投入方法
1	範囲未満	48	0.0	グラブ降下投入
2	範囲内	24	2.7	グラブ降下投入
3	範囲内	24	2.0	バージ直接投入



(a) 改質土混合状況 (b) 改質土投入状況(直接投入)
写真-1 改質土混合・投入状況



(a) 好適スランプ範囲未満 (b) 好適スランプ範囲内
写真-2 試験試料のスランプ試験状況

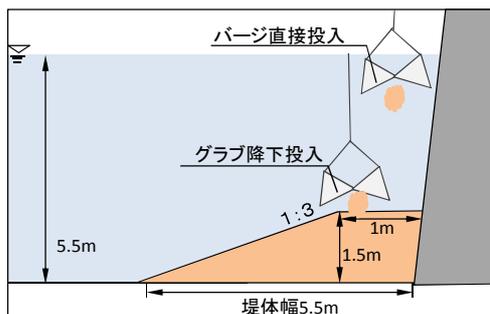


図-4 投入方法模式図

改質土混合および投入状況を写真-1, 試験材料を写真-2および投入方法の模式図を図-4に示す。

(3) 試験方法

a) 形状特性

ドック内排水後の堤体について、3Dレーザースキャナ(3D Laser Scanner GLS-2000, TOPCON社製)を用いて、測量をおこなった。勾配は、天端から放射状に9側線の勾配を計測した。側線を3分割して、それぞれの範囲内の勾配を計算し1側線の平均値を求めた。

b) 堆積状況の画像診断

大型供試体(φ300mm×h600mm)を用いて堤体内部の材料分布状況を画像診断した。試料を検査可能なサイズ(h200mm)に切断し、産業用CTスキャナー(XTH320, Nikon社製)を用いてX線検査を実施した。

c) 強度特性

潜堤の強度特性を把握するために、表-3に示す試験項目を実施した。打設3日~5日後に、干出した堤体に供試体採取のための鋼管(φ100mm×h1000mm)をバックホウで圧入した。また、打設後10日~17日後に、堤体を崩しながら鋼管を掘り出した。鋼管は図-5に示す20地点で採取した。一軸圧縮試験用の供試体(φ100mm×h200mm)は、表層から10cm~30cm(上層), 35cm~55cm(中層), 60cm~80cm(下層)の各層から切り出して採取した。強度のばらつきおよび平均強度は、上記の鋼管試料のうち中層の試料より求めた。深度方向の強度特性は、各ケース3箇所の鋼管試料の上層, 中層, 下層の深度別強度を測定して評価した。

また、築造した堤体から大型供試体(φ300mm×h600mm)を採取して強度試験をおこなった。大型供試体は、底面を塞いだ大型の塩ビ管をドック内の投入位置を事前に設置し、打設後に堤体を掘削して採取し、脱型後に整形して各種大型試験用の供試体とした。大型試料採取位置を図-5に示す。

表-3 強度試験項目

試験項目	寸法(mm)	表記
一軸圧縮試験	φ100×h200	供試体
大型一軸圧縮試験 CT	φ300×h600	大型供試体

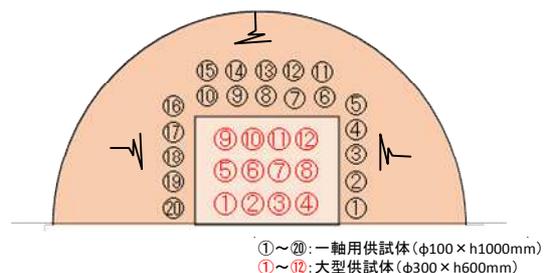


図-5 供試体採取位置

表-4 堤体形状およびCT画像

ケース	堤体形状			CT画像	
	3Dレーザスキャナ	写真	勾配	上層	下層
1			1:2.1		
2			1:2.4		
3			1:2.9		

5. 試験結果

(1) 堤体形状

各ケースの堤体形状測定およびCT画像の結果を表-4に示す。好適スランプ範囲未満のケース1の法面勾配は1:2.1と最も大きい勾配となった。一方で、好適スランプ範囲内の試験ケースでは、グラブ降下投入で1:2.4、バージ直接投入で1:2.9の勾配となり、バージ直接投入の方が緩勾配となった。表面は、ケース2ではグラブの形状が乱されずに土塊状に固化していた。一方、ケース3の表層はこうした塊が無かった。

CT画像撮影で撮影した大型供試体内部の状況を比較すると、ケース1は試料内の空隙が目立ち、試料の充填が不十分であった可能性が示唆された。一方、ケース2およびケース3は空隙がほとんどなかった。

(2) 堤体強度特性

a) 堤体強度のばらつき

ケースごとに鋼管試料の中層の一軸圧縮試験(材令28日)を実施した。その結果、図-6に示す20試料の平均強度は、ケース1は124 kN/m²、ケース2は255 kN/m²、ケース3は219 kN/m²となった。48時間養生後に投入したケース1は、ケース2およびケース3と比べて約1/2の強度となった。この要因として、投入時に固化が進行した状態で攪乱されたため、室内試験と同様に強度が低下したと考えられる。

ばらつきを示す強度の変動係数は、ケース1が0.36、ケース2が0.54、ケース3が0.26であり、ケース2が最も大きい結果となった。ケース2は粘着力を保った試料でグラブ降下投入のため落下時の衝撃が少なく、グラブ開放時の形状のまま乱されることなく固化が進んだ部分と、打継目の部分で強度差が生じ強度のばらつきが大きくなったと推測された。

また、平均湿潤密度は、図-7に示す通りケース1では1.91 g/cm³、ケース2では1.99 g/cm³、ケース3では1.88

g/cm³となり、バージ直接投入のケース3が最も低い値となった。室内試験では、ケース1の条件の改質土の平均湿潤密度は1.95 g/cm³、ケース2およびケース3の条件の改質土は2.01 g/cm³であった。このため、ケース3では、グラブ降下投入と比べてと比べて水の巻き込みの影響が大きいと推測された。なお、一軸圧縮強さと湿潤密度の関係は、図-8に示す通り、ケース1では相関係数が非常に小さく、傾きもほとんど無いことから、固化の進行による解砕の影響で、湿潤密度が増加しても強度が発現していないことが示された。

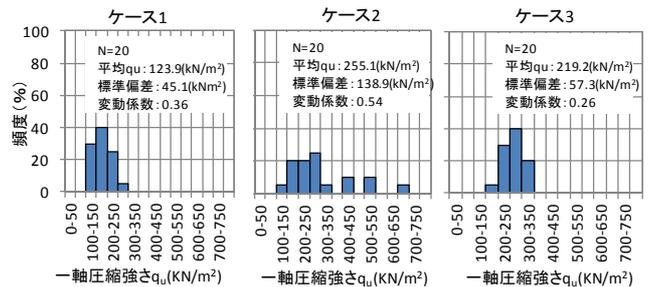


図-6 一軸圧縮試験

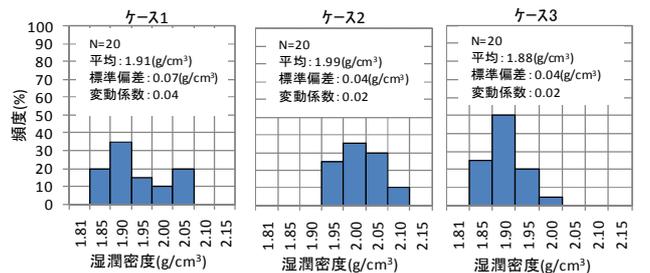


図-7 湿潤密度

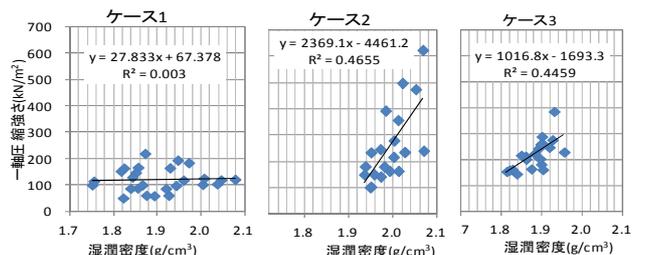


図-8 一軸圧縮強さと湿潤密度の関係

b) 採取深度別の強度

材令 28 日における採取深度別の一軸圧縮強さおよび湿潤密度の平均値を図-9, 図-10 に示す. 試料採取した 10~80 cm の範囲の試料の一軸圧縮強さは, どのケースも深度による特定の傾向はなかった.

c) 供試体サイズ

φ100 mm×h200 mm (材令 100 日) と φ300 mm×h600 mm (材令 120 日) の平均強度について比較した結果を図-11 に示す. 投入方法による強度を比較した結果, φ100 の供試体では, ケース 2 と 3 では強度差が小さかった. 一方, 改質土のスランプ値ごとに平均強度を比較した結果, φ100 の供試体では, 好適スランプ範囲未満のケース 1 は, 範囲内のケース 2 およびケース 3 と比べると約 1/2 の強度となった. なお, φ300 の供試体では, ケース 3 はケース 2 の約 3/4 の強度, ケース 1 はケース 2 や 3 の約 1/6~1/7 の強度となった.

以上の結果より, 好適スランプ範囲内の改質土では, 投入方法によって強度に差が生じたが, その差は小さかった. ただし, 今回の投入条件は水深が 5.5m と浅いため, 水の巻き込みの影響が小さく強度に影響を与える程ではなかったためと推測される. また, 好適スランプ範囲未満の改質土は範囲内と比べて強度が小さく, 改質土のスランプ値が強度に与える影響は大きかった.

供試体のサイズによる強度を比較した結果, φ300 の供試体は φ100 の供試体と比べて強度が小さくケース 1 では 1/4 程度となった. 供試体サイズによる強度差を比較するとケース 1 で 185 kN/m², ケース 3 で 131 kN/m² となった. 一方, ケース 2 では供試体サイズによる差は小さかった. なお, ケース 1 の φ300 の平均湿潤密度は図

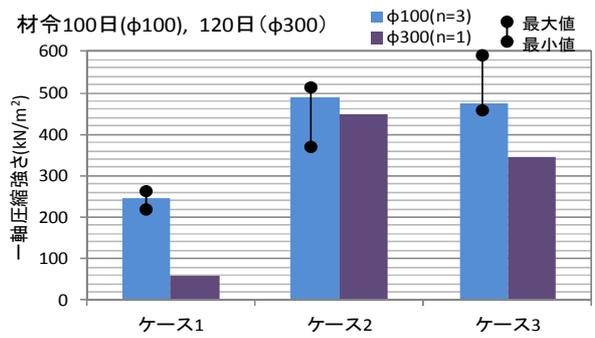


図-11 供試体サイズと一軸試験結果

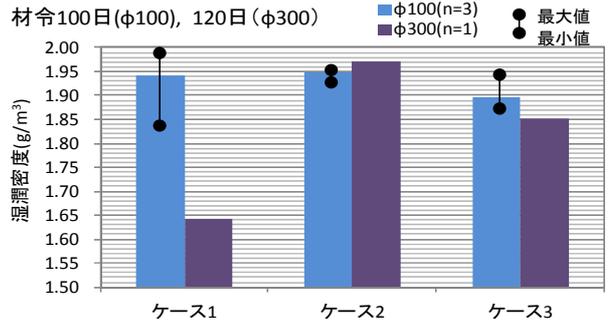


図-12 供試体サイズと湿潤密度

-12 に示す通り φ100 と比べて著しく小さい値だった. このため, ケース 1 の φ300 の供試体試料の結果は参考値として扱う.

e) 室内現場強度比

室内試験試料 (室内配合), 投入前の現場混合試料 (現場混合) および水中打設試料 (堤体) について, 材令 28 日の一軸圧縮強さを比較した. その結果, 図-13 に示す通りケース 2 と 3 は室内配合と現場配合の一軸圧縮強さは同程度の値であった. なお, ケース 1 は現場配合の強度データが欠測したが他ケースの傾向から室内配合と同程度の値であると推定される.

ケース 2 およびケース 3 の堤体/室内配合強度比は, ケース 2 で 0.34, ケース 3 で 0.32 となった. また, ケース 1 の堤体/室内配合強度比は 0.27 となった. ケース 1 は, 室内配合も攪乱の影響を受け強度が小さいが, 更に水中投入時の水の巻き込みにより, 強度が低下したと推測された.

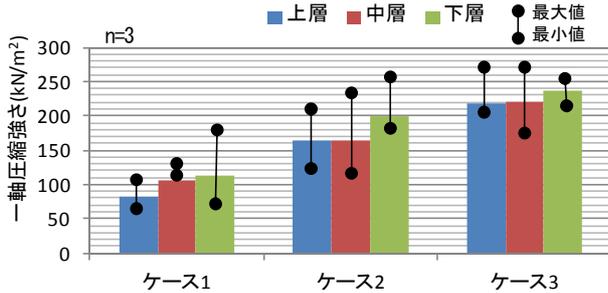


図-9 深度別の一軸圧縮強さ

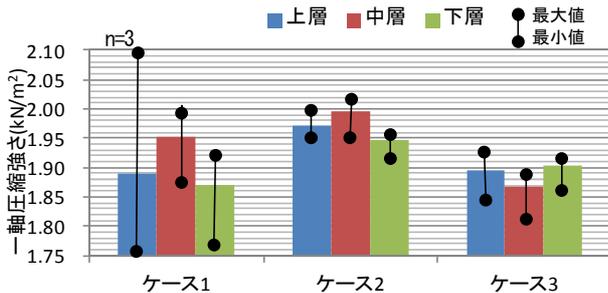


図-10 深度別の湿潤密度

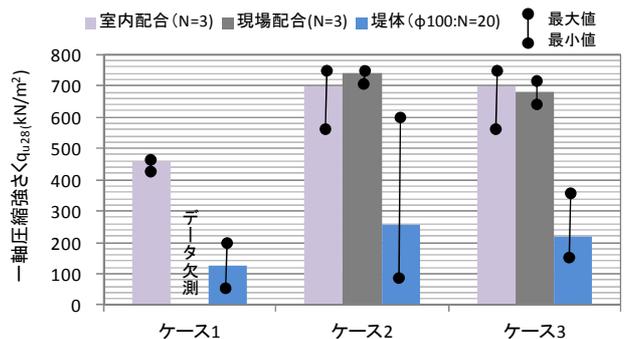


図-13 室内現場強度の比較(一軸圧縮強さ:材令 28 日)

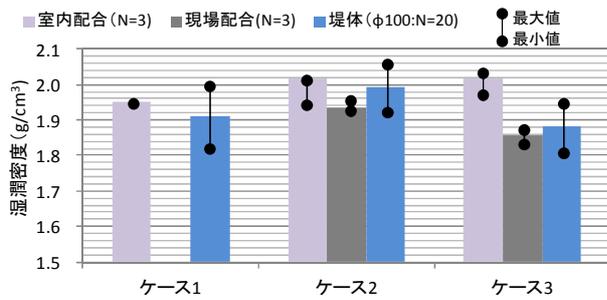


図-14 室内現場強度の比較(湿潤密度:材令 28 日)

なお、湿潤密度は、図-14 に示す通り全ケースで室内配合に比べて堤体の方が低下しており、投入時の水の巻き込みの影響が考えられた。また、ケース2と3を比較すると、ケース3の湿潤密度の方が約0.1 g/cm³低い結果となっており、バージ直接投入のケースは、グラブ降下投入のケースよりも投入時の水の巻き込みの影響を大きく受けたと推定された。

6. まとめ

汚濁低減に配慮した築堤方法について、改質土の土質性状と投入方法による潜堤特性を表-5に示す。

①投入土砂の土質性状による比較をおこなった結果、好適スランプ範囲未満(<1 cm)の改質土は、好適スランプ範囲内(1-7 cm)と比べて強度が材令28日強度で約1/2となった。また、この結果は室内試験の投入時の試料攪乱に対する強度低下割合と整合していた。一方、法面勾配は好適スランプ範囲未満の改質土の方が急であった。

②投入方法による比較をおこなった結果、今回の試験条件(水深5.5 m)では、グラブ降下投入とバージ直接投入で大きな強度差は生じなかった。一方で、湿潤密度はバージ直接投入の方が小さく、水を巻き込んだ状態で投入されたと推測された。また、法面勾配はバージ直

接投入の方が緩やかであった。

③好適スランプ範囲未満の改質土は、勾配が確保できるため、強度より急勾配が必要とされる施工に適している。

④好適スランプ範囲内の改質土(グラブ降下投入)は、強度のばらつきはあるものの平均強度は大きいため、高強度が求められる施工に適している。

⑤好適スランプ範囲内の改質土(バージ直接投入)は、汚濁拡散しやすいが強度のバラツキは小さく平均強度も大きいため、強度の要求が高く、施工性を重視する施工に適している。ただし、汚濁拡散対策が必要となる。

表-5 試験結果のまとめ

ケース	ケース1	ケース2	ケース3
好適スランプ範囲(1-7cm)	範囲未満	範囲内	
投入方法	グラブ		バージ
勾配	1:2.1	1:2.4	1:2.9
強度	123.9	255.1	219.2
強度比	0.27	0.34	0.32

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, Vol. 52, pp. I_986-I_990, 2005.
- 2) 竹山佳奈, 浜谷信介, 加島史浩, 和栗成樹, 山内裕元, 岩本裕之, 鶴飼亮行: PS 灰系改質材および浚渫土を活用した改質土による環境改善技術の提案, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No.2, pp.I_947-I_952, 2017.
- 3) (財)沿岸技術研究センター: 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土マニュアル, pp.1-4, 2007.
- 4) 田中裕一, 山田耕一, 大久保泰宏, 渋谷貴志, 中川雅夫, 赤司有三, 一村政弘, 山越陽介: カルシア改質土を用いた海面埋立て地盤の評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No.2, pp.I_486-I_491, 2012.
- 5) 泉水めぐみ, 竹山佳奈, 田中裕一, 江口信也, 峯松麻成, 西田浩太, 野口孝俊: カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証~発濁特性の把握~, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 75 (投稿中).

(2019.2.7 受付)

(2019.4.24 受理)

VERIFICATION OF SUBMERGED BREAKWATER CONSTRUCTION METHOD TO REDUCE TURBIDITY BE USING IMPROVED DREDGED SOIL BY THE STEELMAKING SLAG - CHARACTERISTICS OF STRENGTH AND SHAPE-

Kana TAKEYAMA, Megumi SENSUI, Kota Nishida, Manari MINEMATSU, Yuichi TANAKA, Shinya EGUCHI and Takatoshi NOGUCHI

To clarify a submerged breakwater construction method in consideration of pollution reduction using improved dredged soil by the steelmaking slag, embankment experiments were conducted at a large experimental facility. This experimental facility is implemented at a facility where irrigation and drainage are possible. In this study, after constructing the submerged breakwater by underwater construction, it was possible to carry out the measurement of the shape of the levee which is drained and dried out and the strength test. As a result of the test, the strength of the levee constructed of modified soil with slump value <1cm was half the strength of slump value 1-7cm. On the other hand, the slope was steep at slump values <1cm.