

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	脱水固化処理による大型浚渫土ブロックの均質性および強度特性
Title(English)	UNIFORMITY AND STRENGTH PROPERTY OF LARGE DREDGED SOIL BLOCK BY CEMENT-MIXING AND MECHANICAL DEHYDRATION
著者(和文)	山下 祐佳, 善 功企, 陳 光斉, 笠間 清伸
Authors(English)	Yuka Yamashita, Kouki Zen, Guangqi Chen, Kiyonobu Kasama
出典(和文)	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_440-I_444
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 67, No. 2, pp. I_440-I_444
発行日 / Pub. date	2011, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2011 Japan Society of Civil Engineers.

脱水固化処理による大型浚渫土ブロックの 均質性および強度特性

UNIFORMITY AND STRENGTH PROPERTY OF LARGE DREDGED SOIL BLOCK BY CEMENT-MIXING AND MECHANICAL DEHYDRATION

山下祐佳¹・善功企²・陳光齊³・笠間清伸⁴

Yuka YAMASHITA, Koki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²フェロー 博(工) 九州大学教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 理博 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(工) 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

In order to recycle dredged clay as an useful material efficiently, our research group has developed a technique called the cement-mixing and mechanical dehydration method (called "CMD"). In the CMD procedure, soft clay mixed with cement is dehydrated with a high dehydration pressure for the purpose of increasing strength. In this paper, large dredged soil blocks were created by a large dehydration apparatus ($\phi 53.4\text{cm} \times H100\text{cm}$) in the CMD procedure, and the water content and unconfined compressive strength were measured in order to investigate the uniformity and strength property of the CMD blocks. The main conclusions obtained from this study are as follows: (1) Uniform and large-size blocks are able to be produced irrespective of cement content and soil type. (2) Since the unconfined compressive strength cured for 28 days, q_{u28} , exceeded 20MPa for more than cement content 40%, the high-strength blocks are able to be produced by controlling the cement content. (3) It is considered that there is close relationship between unconfined compressive strength and water-cement ratio.

Key Words : Soil stabilization, unconfined compressive strength, water content, dredged clay

1. はじめに

河川などから流入する軟弱土は、湖沼や港湾部などの閉鎖性水域に堆積し、船舶航行の支障や周辺環境の悪化を引き起こす原因となるため、定期的な浚渫工事による軟弱土の除去が行われている。この浚渫土は、ウォーターフロントにおける有効な埋立材料として用いられてきたが、近年では、臨海地域の埋立などの事業が飽和状態となるにつれ、土砂処分場の確保が切実な問題となっている。

このような背景から、浚渫土の効果的な減容化や再生リサイクルの方法が多数開発されている。例えば、Tayほか¹⁾は、浚渫土のコンクリート骨材としての有効利用法を示し、Netzbandほか²⁾は、浚渫土を処分場のシーリング材として有効利用する方法を報告した。他にも、ElkinsとThompson³⁾は、浚渫土から無害なセラミック顆粒を造る再生利用法を示した。したがって、浚渫土は、ブロックやレンガ、タイルといった建設材として、コンクリート材に匹敵する強度を有する構造物への再生利用が可能であることがわかる。

そこで、筆者らは、浚渫土を有用な材料へとリサイクルするために、「脱水固化処理」という技術の開発を行ってきた。脱水固化処理とは、軟弱な浚渫土の強度増加を目的として、浚渫土に固化材を添加した直後に高圧機械脱水を行う手法である。脱水固化処理の有効性を評価するために、笠間ほか⁴⁾や佐野ほか⁵⁾は、脱水固化処理による小型供試体 ($\phi 5\text{cm} \times H10\text{cm}$) を作製し、一軸圧縮試験および耐久試験を行うことにより、湿潤・水中条件で長期的に平均20MPaの一軸圧縮強さを有する供試体が得られている。

本論文では、浚渫土を根固めブロックや消波ブロックなどの大型構造物として利用することを目的とし、これまでの成果に基づいて開発した大型脱水固化装置を用いて、大型浚渫土ブロック ($\phi 53.4\text{cm} \times H$ 約50cm) を作製した。さらに、その大型浚渫土ブロックの脱水特性の把握および供試体の均質性と強度特性の評価を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料

使用材料の粒度分布および物理特性を図-1および表-1にそれぞれ示す。母材として、カオリン粘土と博多港で浚渫された土砂（以降、博多港土砂と呼ぶ）を使用し、固化材には高炉セメントB種を用いた。固化材添加率は、母材乾燥重量の20, 40, 60%とした。

(2) 供試体作製方法

母材を初期含水比 $1.5w_L$ に加水調整した後、所定添加率の固化材を加え、ハンドミキサーを用いて十分に攪拌混合を行った。攪拌混合した試料を図-2に示す大型脱水固化装置に振動を与えながら密実に充填した。この装置の内径は53.4cmで、高さは100cmであり、上下端のポーラスストーンには、目詰まりを防ぐためにろ紙を敷いた。ここで、ブロック上端はピストン側とする。充填した試料を脱水圧力2MPaで30分載荷した後、5MPaで載荷した。排水条件は上下端排水とし、5MPaでの脱水終了時間は、3t法により求めた。脱水終了後、作製した浚渫土ブロック（ $\phi 53.4\text{cm} \times H \text{約} 50\text{cm}$ ）から含水比試験（JIS A 1203）

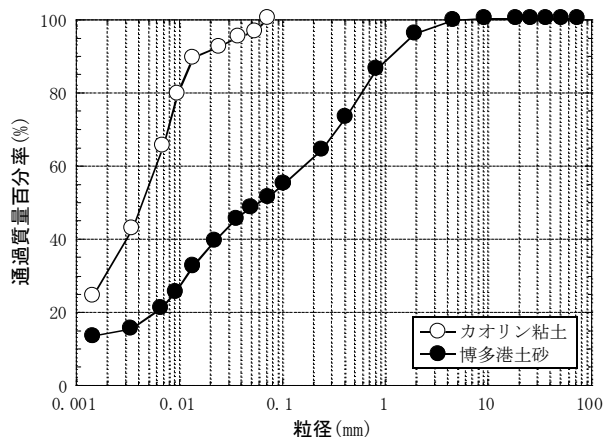


図-1 粒径加積曲線

表-1 物理特性

	カオリン粘土	博多港土砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.713	2.686
液性限界 w_L (%)	50.6	68.1
塑性限界 w_p (%)	29.4	35.6
塑性指数 I_p	21.2	32.5
粘土分含有率 P_c (%)	52.8	15.6

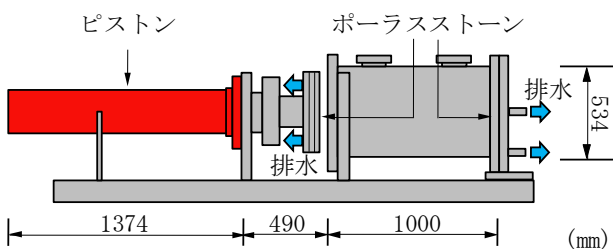


図-2 大型脱水固化装置概略図

と一軸圧縮試験（JIS A 1216）を行う供試体を上下端から計25本くり抜いた。含水比試験は、含水比試験用供試体（ $\phi 5\text{cm} \times H \text{約} 50\text{cm}$ ）1本を高さ方向に5cmずつに切分けて行った。一軸圧縮試験は、恒温湿潤条件（温度:20°C、湿度:90%以上）で7, 14, 28, 91日間養生した供試体（ $\phi 5\text{cm} \times H 10\text{cm}$ ）を用いて行った。実験条件を表-2に示す。

3. 脱水特性

図-3に脱水圧力5MPaにおけるカオリン粘土と博多港土砂の沈下曲線を示す。最終沈下量は、博多港土砂の方がカオリン粘土よりも大きく、同じ固化材添加率で、博多港土砂とカオリン粘土の最終沈下量を比較すると、博多港土砂がカオリン粘土の1.5倍であった。カオリン粘土では、脱水圧力5MPaにおける最終沈下量は、固化材添加率によらず、ほぼ同等の沈下量であった。

図-4に図-3から3t法を用いて求めた脱水終了時間と固化材添加率の関係を示す。脱水終了時間は、博多港土砂がカオリン粘土よりも大きく、同じ固化材添加率では、博多港土砂はカオリン粘土の約5.2倍の脱水終了時間であった。カオリン粘土では、固化材添加率の増加にしたがって、脱水終了時間は短縮された。これまでに、浚渫土砂に固化材を添加することで、固化材添加直後における浚渫土砂の透水性が増加すること^{6),7)}が明らかとなっており、本実験においても、カオリン粘土では、固化材の凝集効果によって透水性が改善され、固化材添加の増大に伴

表-2 実験条件

母材	カオリン粘土	博多港土砂
固化材	高炉セメントB種	高炉セメントB種
固化材添加率 (%)	20, 40, 60	60
初期含水比 (%)	$1.5w_L$ (75.9)	$1.5w_L$ (102.2)
荷重載荷方式	定圧載荷方式 (2MPa : 30min → 5MPa)	
排水条件	上下端排水	
養生方法	恒温湿潤養生 (温度:20°C, 湿度 > 90%)	
養生日数 (Days)	7, 14, 28, 91	

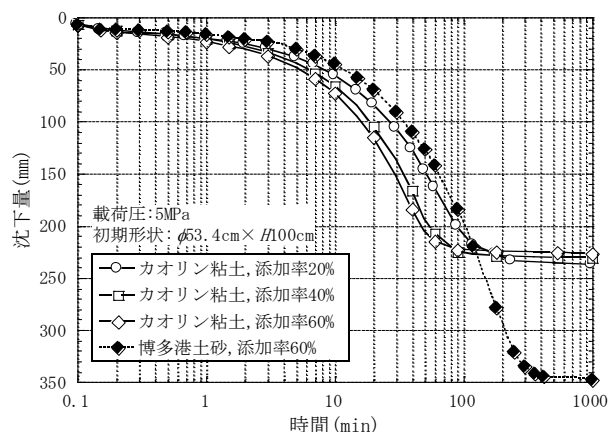


図-3 沈下曲線

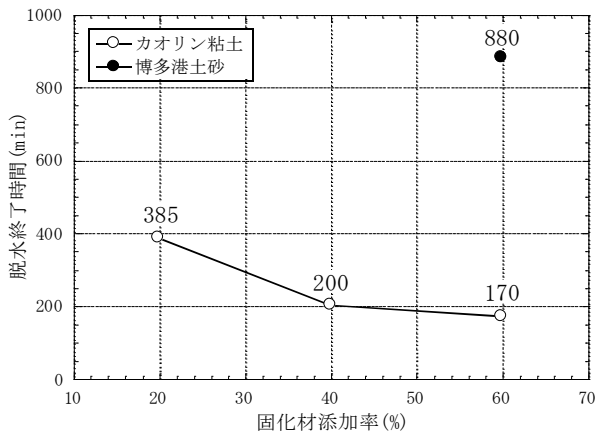


図-4 脱水終了時間

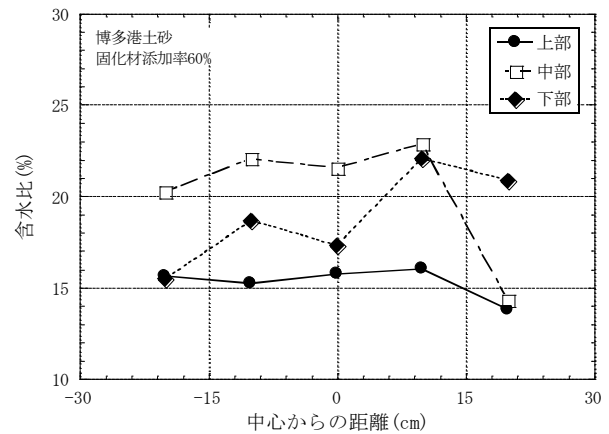


図-6 半径方向含水比分布

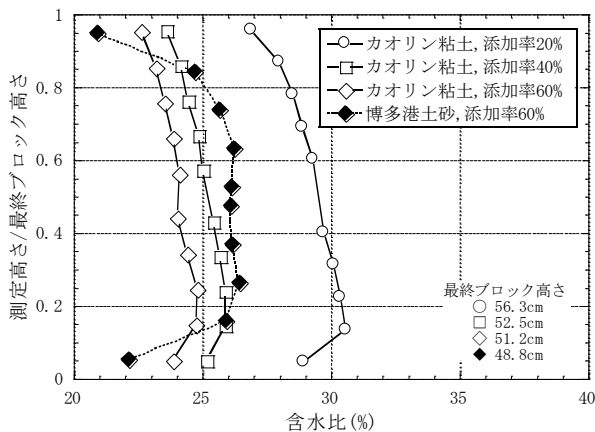


図-5 高さ方向含水比分布

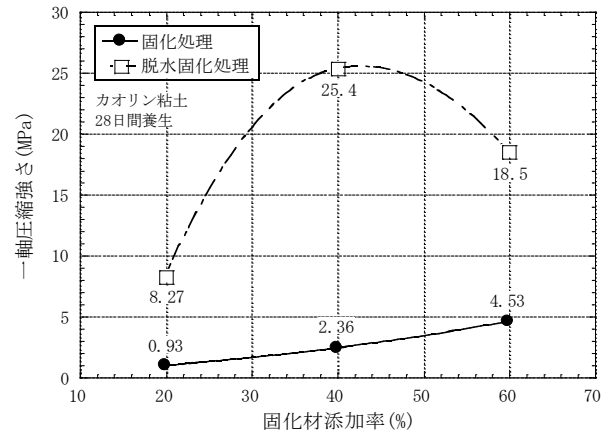


図-7 脱水固化処理と固化処理

う脱水終了時間の短縮が見られたと考えられる。しかし、固化材添加率を40%から60%に増加させても、固化材添加率を20%から40%に増加させた時ほどの脱水終了時間の短縮は見られず、固化材添加率を増加させることのみによる脱水終了時間短縮には限界があると考えられる。そのため、現在は、上下端排水に加え、ドレーン排水を併用した実験を行い、脱水終了時間の短縮を試みている。

4. 均質性

脱水固化処理により作製した大型浚渫土ブロックの均質性を評価するため、ブロック内の含水比分布を計測した。図-5に高さ方向の含水比分布を、図-6に博多港土砂の固化材添加率60%における半径方向の含水比分布を示す。ここで、図-5の縦軸は、含水比の測定高さを最終ブロック高さで除し、ブロック上端を1.0とする値を用いた。図-5より、カオリン粘土は、固化材添加率によらず、ブロック上端に近くなるほど含水比は小さくなった。平均含水比は、固化材添加率の増加に伴って減少し、固化材添加率20%と60%では、5.2%の差が生じた。含水比分布幅は、固化材添加率20%で3.7%、固化材添加率40%で2.3%、固化材添加率60%で2.2%と小さく、高さ方向に含水

比の均質な供試体を作製できた。博多港土砂の含水比分布幅は、高さ方向で5.5%、半径方向で8.5%であった。カオリン粘土と比較して、ブロック中央部の含水比が高くなったのは、カオリン粘土よりも脱水時間が長いため、固化材の固化反応による透水性低下が顕在化し、ブロック中央部の水が抜けにくくなったためと考えられる。固化反応による影響を最小限にするためには、脱水終了時間を固化材が凝結する時間よりも短くする必要がある。したがって、大型浚渫土ブロックをより均質にするためには、脱水終了時間を短縮し、固化材の固化反応による影響を小さくすることが有効と考えられる。

5. 強度特性

脱水固化処理による強度増加の有効性を評価するため、図-7にカオリン粘土を固化処理または脱水固化処理したブロックの28日間養生における一軸圧縮強さを示す。ここで、固化処理とは、初期含水比を調整した母材と固化材の混合試料をモールドに充填し、脱水せずにそのまま28日間養生したケースであり、脱水固化処理とは、大型脱水固化装置で高圧脱水し、ブロックを作製したケースのことである。脱水固化処理したブロックの一軸圧縮強さは、固化処

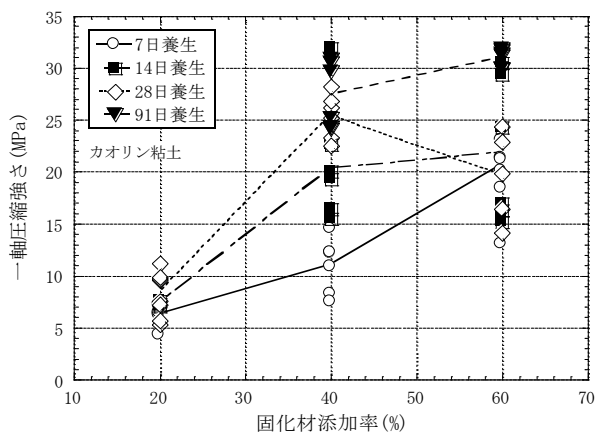


図-8 固化材添加率と一軸圧縮強さ

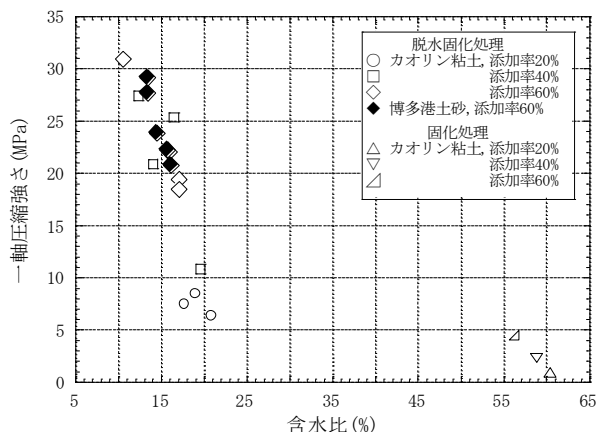


図-10 含水比と一軸圧縮強さ

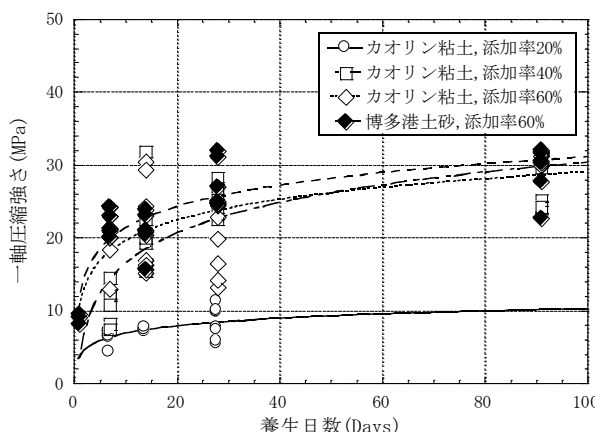


図-9 養生日数と一軸圧縮強さ

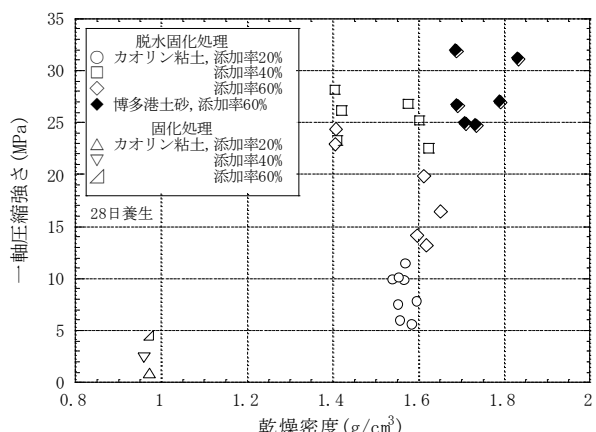


図-11 乾燥密度と一軸圧縮強さ

理したブロックの一軸圧縮強さと比較して、固化材添加率20%で8.9倍、固化材添加率40%で10.8倍、固化材添加率60%で4.1倍と、どの固化材添加率においても、固化材添加後に脱水を行うことにより、一軸圧縮強さの増大が顕著に見られた。したがって、固化材添加後に高圧機械脱水をすることにより、浚渫土砂の大幅な強度増加が期待できる。

図-8にカオリン粘土の固化材添加率と一軸圧縮強さの関係を示す。ここで、図中の線は、各養生日数での一軸圧縮強さの平均値を結んだ線である。養生日数が7、14および91日の平均一軸圧縮強さは、固化材添加率の増加に伴って増加した。養生日数が28日の平均一軸圧縮強さは、固化材添加率20%で8.3MPa、固化材添加率40%で25.4MPa、固化材添加率60%で18.5MPaとなり、固化材添加率40%で最大値をとった。これは、固化材添加後の試料混練時にハンドミキサーによる混練を行っているため、固化材添加率の増大に伴い、混練試料の不均一性が顕著となり、一軸圧縮強さのばらつきが大きくなったことが要因として挙げられる。このことから、現在は、攪拌機を導入し、混練試料をより均質にする試みを行っている。

図-9に養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の曲線は、各固化材添加率での一軸圧縮強さの回帰曲線である。カオリン粘土の固化材添加率60%のケースを除いた3つの実験ケースでは、養生日数の

経過に伴う一軸圧縮強さの増加が見られた。カオリン粘土の固化材添加率60%では、養生日数7、14、28および91日の平均一軸圧縮強さは、19.4MPa、22.1MPa、18.5MPa、30.8MPaとなり、養生日数28日において一軸圧縮強さの減少が見られた。これは、前述したように、試料の不均一性のためと考えられるが、養生期間が91日と長期になると一軸圧縮強さのばらつきは小さくなったことから、試料混練不足による混練試料の不均一性が長期的な一軸圧縮強度の増加に与える影響は小さいと推察できる。また、カオリン粘土の固化材添加率60%では7日養生で、固化材添加率40%では14日養生で20MPaの一軸圧縮強さを有するブロックの作製ができた。したがって、大型脱水固化装置を用いて作製したブロックは、固化材添加率を調整することにより、コンクリートに匹敵する強度を有する浚渫土ブロックの作製ができるといえる。

供試体内の水分量が、一軸圧縮強さに与える影響を評価するために、含水比と一軸圧縮強さの関係を図-10に示す。処理法の違いに着目すると、固化処理の方が脱水固化処理より含水比は高く、一軸圧縮強さは小さかった。高圧機械脱水を行うことにより、固化材添加率によらず40%程度の含水比低下が見られた。また、固化材添加率や処理法の違いに関わらず、含水比の増大に伴って、一軸圧縮強さは減少した。これは、含水比が大きいほど、供試体内に空隙

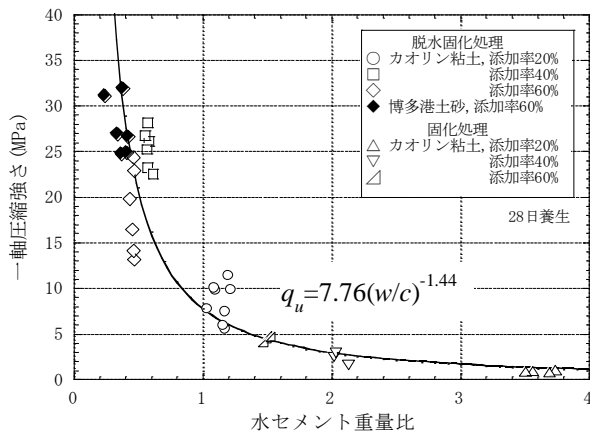


図-12 水セメント重量比と一軸圧縮強さ

として残る水分が多くなり、強度が低下したためと考えられる。

図-11に乾燥密度と28日養生における一軸圧縮強さの関係を示す。カオリン粘土において、処理法の違いに着目すると、乾燥密度および一軸圧縮強さは、固化処理したブロックの方が小さかった。また、脱水固化処理において、博多港土砂は、カオリン粘土より大きな乾燥密度および一軸圧縮強さとなった。カオリン粘土では、ほぼ同等の乾燥密度であっても、固化材添加率の違いにより、一軸圧縮強さに大きな差が見られた。このことから、一軸圧縮強さの増大には、機械脱水による密度増加だけではなく、セメントの固化反応が大きく関与すると考えられる。

そこで、セメントと強度の関係性を評価するため、水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係を図-12に示す。水セメント重量比とは、一軸圧縮試験後のブロックのセメントに対する水の重量比である。水セメント重量比は、硬化コンクリートの強度評価に用いられ、地盤工学においては、固化処理土の強度評価に用いられるパラメータである^{8),9)}。図-12より、水セメント重量比の減少に伴って、一軸圧縮強さが急激に増加し、一軸圧縮強さと水セメント重量比の間には、強い相関が見られた。したがって、一軸圧縮強さは、母材の種類や固化材添加率によらず、水セメント重量比に支配されると考えられ、固化処理土の高強度化は、水セメント重量比を小さくすることが重要といえる。また、図-12より得られた水セメント重量比と一軸圧縮強さの推定式を式(1)に示す。

$$q_u = 7.76(w/c)^{-1.44} \quad (1)$$

ここで、 q_u は28日養生における一軸圧縮強さ、 w/c は水セメント重量比である。式(1)の相関係数 R は、 $R=0.91$ と高いことから、大型浚渫土ブロッ

クの一軸圧縮強さは、式(1)を用いることにより、水セメント重量比を用いて推定できると考えられる。

6. おわりに

本論文では、大型脱水固化装置を用いて作製した大型浚渫土ブロック脱水特性の把握および均質性と強度特性の評価を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 大型浚渫土ブロックの均質性向上には、脱水終了時間の短縮が有効と考えられる。
- (2) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックは、固化材添加率を調整することにより、コンクリートに匹敵する強度を有する浚渫土ブロックが作製できる。
- (3) 脱水固化処理土は、乾燥密度が同等であっても、固化材添加率により一軸圧縮強さに大きな違いが見られた。一軸圧縮強さの増大には、セメントの固化反応が深く関係しており、その関係性は、水セメント重量比を用いた式(1)によりあらわすことができる。

参考文献

- 1) Tay, J.H, Show, K.Y. and Hong, S.Y.: Concrete aggregates made from sludge-marine clay mixes, *Journal of Materials*, 14(5), pp.392-398, 2002.
- 2) Netzband, A, Reincke, H. and Bergemann, M.: The river Elbe a case study for the ecological and economical chain of sediments, *Journals of Soils and Sediments*, 2(3), pp.112-116, 2002.
- 3) Elkins, B.V. and Thompson, T.K.: Recycle dredged materials for beneficial use, *Dredging and Management of Dredged Material, Geotechnical Special Publication 65*, pp.161-176, 1997.
- 4) 笠間清伸, 善功企, 陳光齊, 河野信貴: 高圧脱水固化処理土の強度特性, 材料, 57 巻, 第 1 号, pp.24-27, 2008.
- 5) 佐野将輝, 善功企, 陳光齊, 笠間清伸: 砂分混合した脱水固化処理土の一軸圧縮強度特性, 第 8 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.151-154, 2009.
- 6) Kasama, K, Zen, K. and Iwataki, K.: High-strengthening of cement-treated clay by mechanical dehydration, *Soils and Foundations*, 47(2), pp.171-184, 2007.
- 7) Imai, G, Mori, K. and Yamada, S.: Forced dewatering characteristics and disposal efficiency of fluid mud, *Soils and Foundations*, 18(3), pp.13-15, 1987.
- 8) Miura, N, Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S.: Engineering Behavior of Cement Stabilized Clay at High Water Content, *Soils and Foundations*, 41(5), pp.33-45, 2001.
- 9) Horpibulsuk, S, Wnchai, K, Wanchai, S. and Runglawan, R.: Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils, *Soils and Foundations*, 46(3), pp.351-366, 2006.