浚渫土砂を用いて作製した 大型高強度固化処理ブロックの長期強度特性

上野 和敬¹・笠間 清伸²・中川 康之³・瀬賀 康浩⁴・
南 正治⁴・末次 広児⁴・春日井 康夫⁵・片桐 雅明⁶

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)

E-mail: eup.vn.kaz2010@gmail.com

² 正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 M1-10)

E-mail: kasama.k.ab@m.titech.ac.jp

³ 正会員 九州大学大学院 工学研究院 海域港湾環境防災共同研究部門

(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁴ 国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所

(〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)

⁵ 正会員 一般財団 法人沿岸技術研究センター (〒105-0003 東京都港区西新橋 1 丁目 14 番 2 号)

⁶ 正会員 株式会社 日建設計シビル (〒112-0004 東京都文京区後楽 1 丁目 4 番 27 号)

著者らは、高圧脱水固化処理装置を用いて、高含水比の浚渫土砂をブロックとして利用する技術開発を行っている。本論文では、2 種類の浚渫土砂を用いて夏期と冬期の異なる時期に作製し、異なる条件で養生した浚渫土砂ブロックの長期強度について調査した。得られた結論をまとめると以下のようになる。(1) 固化処理土ブロックの含水比は、養生日数の経過に伴い養生 2 年経過で約 10 %減少した。(2) 高圧脱水固化処理土ブロックは、ブロック内で含水比と強度にばらつきがみられた。ブロックの両端で含水比は 25~30 %、一軸圧縮強さは 10 MPa 以上の差が生じた。(3) 固化処理土ブロックは、水中養生することで強度増加がみられ、養生 2 年で 10 MPa 程度まで増加した。(4) 固化処理土ブロックの水セメント重量比が小さいほど一軸圧縮強さが増加し、水中養生したブロックでより高い相関がみられた。

Key Words : marine clay, cement mixing, unconfined compression test, water cement rate

1. はじめに

港湾では常に河川からの流入や潮流の影響によって、高含水比で軟弱な粘土が堆積し、堆積した粘土は放置すると船舶の航行の妨げとなる。また、近年の船舶の大型化により、航路の維持や水深の確保を目的とした浚渫事業が行われる。これに伴い浚渫土砂が発生するが、浚渫土砂の受け入れ先である埋立造成地や土砂処分場の受け入れ容量は限られており、慢性的に不足している状況にある。このような背景から次々に発生する浚渫土砂の有効活用を目的とした研究が進められている。新倉らは浚渫土砂に固化材を添加し、10 MPa 以上の高強度固化処理土ブロックを製造することを検討した¹⁾。名古屋港粘土を対象とした配合試験の結果、含水比が 60~100 % の条件で水固化材比を 1.2 に設定すると、10 MPa 以上の強さをもつブロックの製造が可能となった。

著者らは、埋立処分される浚渫土砂を根固めブロックや消波ブロックなどの高強度構造材料として利用することを目的とし、浚渫土砂にセメントなどの固化材を混合し高圧で脱水をすることで、高強度な浚渫土砂ブロック(高さ 1 m × 幅 1 m × 長さ約 1 m) の作製に成功している²⁾。これまでに 3 種類の浚渫土砂を対象として、高圧脱水固化処理装置を用いてブロックを作製し、ブロック作製時の脱水特性、及び一軸圧縮試験による強度特性の評価を行った。さらに、試験の結果から水セメント重量比や固化材の水和反応率³⁾、弾性波速度に着目した強度推定を行っている。

本論文では、新門司沖土砂処分場(2 期)において浚渫された粘土(以降、新門司沖粘土とよぶ)と宇部港で浚渫された粘土(以降、宇部粘土とよぶ)の 2 種類の浚渫土砂を用いて製造環境(夏期、冬期)を変えた条件で作製したブロックの長期強度特性について調査した。

表-1 宇部粘土と新門司沖粘土の物理特性

試料名	新門司沖粘土	宇部粘土
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.634	2.614
液性限界 w_L (%)	100.5	97.3
塑性限界 I_p	57.9	58.5
強熱減量 L_i (%)	8.76	8.31

表-2 実験条件

土質試料	新門司沖粘土	宇部粘土
固化材名	高炉スラグセメントB種	
固化材添加率	40%	
脱水圧力	5MPa	
初期含水比	200%	
脱水棒本数	49本	16本, 49本
作製時期	冬期(2月, 12月)	夏期(8月)
水中養生日数	7, 28 日, 実験日まで	実験日まで
養生日数	7, 28 日, 6ヶ月, 1年, 2年	28, 91日, 1年

(a) 側面図

(b) 脱水棒挿入面からの断面図

図-1 大型脱水固化処理装置

2. 実験概要

(1) 使用材料

母材には、宇部粘土と新門司沖粘土を用いた。それぞれの物理特性を表-1に示す。固化材には高炉スラグセメントB種を用いた。

(2) 実験条件

母材に乾燥重量に対して40%の固化材を添加し、含

写真-1 気中養生ブロック(新門司沖粘土)

写真-2 水中養生ブロック(新門司沖粘土)

水比が200%となるように調整した試料を攪拌後、図-1の大型高圧脱水固化処理装置を用いて5MPaの圧力をかけ約1m³のブロックを作製した。大型高圧脱水固化処理装置は、最大5MPaでの載荷が可能である。容積2m³の試料を5MPaで載荷することで脱水後容積が1m³となり、約50%の減容化を実現している。また、加圧時に試料の脱水を促す目的でドレーン棒(以降、脱水棒と呼ぶ)を図-1(b)に示すように等間隔に設置しており、本数を変更することで脱水の程度を変えることができる。

この固化処理装置は水圧ポンプを用いたピストン稼働による載荷システムを採用しており、図-1(a)の左側の脱水棒を固定した状態で右側のフリーピストンを押し込むことで高圧脱水する仕組みとなっている。圧密中は時間と変位を測定し、3t法により圧密時間を決定した。

実験条件を表-2に示す。ブロックは、脱水をする際に用いる脱水棒の本数(49本, 16本)を2条件設定した。作製時期として宇部粘土を用いたブロックは夏期(8月・約27℃)に作製し、新門司沖粘土を用いたブロックは冬期(2月・約7℃/12月・約8℃)に作製する3条件を設定した。ブロックの養生条件は、宇部粘土を用いて作製したブロックは常に水中とし、新門司沖粘土を用いて作製したブロックは、7日間水中養生のち気中養生、28日水中養生のち気中養生、常に水中養生をする3種類の条件を設定した。写真-1に気中養生、写真-2に水

図-2 養生日数と含水比 (宇部粘土, 夏期作製)

図-3 養生日数と含水比
(新門司沖粘土, 冬期(2月)作製)

中養生したブロックを示す。作製したブロックは、脱水棒を引き抜き、装置から取り出したのち、気中養生は屋外で外気に触れる状態で、水中養生は屋外に設置した水槽内で養生した。養生日数は新門司沖粘土ブロックでは7日、28日、6ヶ月、1年および2年とし、宇部粘土ブロックは28、91日、および1年とした。

所定期間養生後、コンクリート用の直径5cmの湿式ダイヤモンドコア抜きドリルを垂直に設置して、鉛直下向きに15～20cmの試料をくり抜いた。コアリングの位置は、ブロックの含水比及び強度分布が測定できるように、写真-2に示すように脱水棒が設置されていた穴に被らないようブロック上面において約10cm間隔で行った。それぞれの養生日数において6個の供試体を対象に一軸圧縮試験(JIS A1216)と含水比試験(JIS A 1203)を行った。一軸圧縮試験はひび割れが少なく、高さが直径の1.8～2.5倍確保できた供試体のみを使用した。

3. 含水比の経時変化

図-2に宇部粘土を用いて夏期に作製し、水中養生したブロックの養生日数と含水比の関係を示す。含水比は、脱水棒の本数によらず養生日数の経過に伴い養生1年

図-4 ブロック内の含水比分布
(新門司沖粘土 冬期(12月)作製) 図-5 ブロック内の一軸圧縮強さ分布
(新門司沖粘土, 冬期(12月)作製)

で15%程度減少した。養生日数の経過に伴いブロック内のセメントの水和反応が進行し、水が反応に使われたことで含水比が低下したと考えられる。また、脱水棒本数の違いにより含水比に50～70%の差が生じた。

図-3に新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックと宇部粘土を用いて夏期に作製したブロックの含水比と養生日数の関係を示す。7日までは全条件で水中養生であり、そのすべての養生条件で養生7日の含水比は、約75%でほぼ同じだった。その後養生条件の違いによって含水比のばらつきが大きくなり、養生期間2年で10%程度減少した。

水中養生7日のち気中養生したブロックは、養生28日で45%まで低下し、90%まで増加したのち養生2年で60%まで増加した。水中養生28日のち気中養生したブロックは養生半年で約60%まで減少した後養生2年で70%となった。気中養生したブロックは、写真-1に示すようにブロックの表面に乾燥や収縮によりひび割れや隙間が生じた。この隙間にブロックから供試体をコアリングし成形をする際の水や雨が浸入することで、含水比が本来の値より大きい値になったと考えられる。

一方、常に水中養生したブロックの含水比は、比較的安定した値をとり、養生2年の経過で70%から60%まで減少した。水中養生したブロックは、乾燥による劣化

図-6 養生日数と一軸圧縮強さ
(宇部粘土, 夏期作製)

図-7 養生日数と一軸圧縮強さ
(新門司沖粘土, 冬期(2月)作製)

がなく、ブロック内の水が保たれることで、養生日数の経過に伴うセメントの水和反応が進行し、含水比が減少した。このことより、石灰で改良された処理土⁴⁾と同様に固化処理土ブロックの含水比は、養生日数の経過に伴い減少する。また、長期間の養生で初期から10%程度含水比が減少したことより、セメント添加率などによって含水比の減少量には限界があり、養生28日付近でその減少は止まる。

4. ブロック内の含水比・強度分布

図-4に新門司沖粘土を用いて冬期(12月)に作製し、水中養生したブロックのブロック内の含水比分布を、図-5に一軸圧縮強さの分布を示す。横軸は、図-1に示す大型脱水固化処理装置の蓋側からの距離とした。ブロック内含水比は蓋に近い方がより低くなり、ブロックの両端で25~30%の差が発生した。一軸圧縮強さは、蓋に近い方が高い値となり、ブロック両端で10 MPa以上の差が生じた。この結果は、ブロックの場所により脱水の程度が異なり含水比に違いが生じたことで、ブロック内の密度が変化し一軸圧縮強さに差が発生したことを示す。より脱水が進んだ蓋側では、一軸圧縮強さが高い値となった。含水比試験の結果において同じ養生日数のなかで生

図-8 養生日数と一軸圧縮強さ
(新門司沖粘土, 冬期(12月)作製)

じたばらつきは、乾燥によるブロックの劣化と共にブロック内の脱水の程度の違いが原因であると考えられる。

5. 一軸圧縮強さの経時変化

図-6に常に水中養生したブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。宇部粘土を用いて夏期に脱水棒16本で作製したブロックは養生28日で2.5 MPa、脱水棒49本ブロックは約10 MPaまで増加した。脱水棒16本で作製したブロックは、十分な脱水が行うことができず、脱水棒49本で作製したブロックの25%程度の強度にとどまった。その後一軸圧縮強さは、養生28日から養生1年まで増加はみられなかった。

一方で、新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックは養生初期の強度発現は小さく、養生7日の2.5 MPaから養生2年で約10 MPaまで増加した。固化処理土ブロックは作製環境によって初期強度に違いが発生するが、低温環境で作製したブロックは半年以上水中養生することで、高温環境で作製したブロックと同程度の強度を示すことがわかった。

図-7に新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックと宇部粘土を用いて夏期に作製したブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックは、水中養生期間が長いブロックほど一軸圧縮強さが増加した。水中養生7日のち気中養生したブロックは、養生28日で3 MPaまで増加した後、養生2年まで強度増加はほとんどみられない。一方で、養生28日目まで水中養生した2条件のブロックはともに5 MPa程度まで増加した、その後、気中養生に変更したブロックの強度増加は止まり、水中養生を続けたブロックは養生2年で約10 MPaまで増加した。気中養生したブロックの強度増加が止まる原因は、含水比試験結果と同様に表面の乾燥によってブロック内の水が失われたことである。セメント硬化体において、

図-9 水セメント重量比と一軸圧縮強さ
(新門司沖粘土 冬期(2月)作製)

養生初期に乾燥による水分の逸脱が水和の停止と強度低下につながる事が明らかとなっている⁵⁾。本実験でも同様の現象が発生し、セメントの固化反応に必要な水分の供給がないため、強度が頭打ちになったと考えられる。

図-8に新門司沖粘土を用いて冬期(12月)に作製したブロックの1年経過時までの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。養生条件による強度発現の違いは2月に作製したブロックと同様に、気中養生ブロックの強度増加が止まり、水中養生したブロックの強度増加が進行する結果となった。常に水中養生したブロックは、養生28日で8.3 MPa、養生半年で10 MPaまで増加し、2月作製ブロックの同時期の値よりわずかに高い数値を示した。また、同じ養生日数における供試体ごとのばらつきは、養生日数が経過し強度が増加するほど大きくなった。

6. 強度推定式の経時変化

図-9に新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックの一軸圧縮強さと水セメント重量比の関係を示す。本文では、固化処理土ブロックの強度に強い相関性がある簡便な指標として、供試体内の水と固化材の重量比である水セメント重量比を用いた。供試体内の固化材重量は、初期の固化材添加率(浚渫土の乾燥重量に対する比率)をもとに計算でき、供試体内の水分は、供試体の含水比(浚渫土の乾燥重量に対する比率)から計算が可能である。具体的には、供試体の含水比を固化材添加率で除することで水セメント重量比を定義した。図中の水セメント重量比は、コアリングした供試体ごとの値であり、浚渫土砂ブロックの平均的な含水比ではなく、それぞれの供試体で測定された含水比を用いて水セメント重量比を計算することで、ブロック内の一軸圧縮強度のばらつきを含水比の分布に応じて評価できると考えた。

固化処理土ブロックの一軸圧縮強さは水セメント重量

図-10 養生日数と α

図-11 養生日数と β

比が小さいほどが増加する傾向がみられた。水セメント重量比の定義より、水セメント重量比が小さい供試体は含水比が小さい供試体であることから、水セメント重量比が小さい供試体はブロック内の水がセメントの水和反応に使用され、固化が進むことで一軸圧縮強さが増加したと考える。また、同じ水セメント重量比で比較すると、常に水中養生したブロックの強度が最も大きくなり、水セメント重量比1.5以下のブロックの多くが一軸圧縮強さ7 MPa以上の高い強度となった。ここで、水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係から求めた回帰式を式(1)に示す。 α は水セメント重量比が1.0のときの一軸圧縮強さを、 β は強度増加率を表す。

$$q_u = \alpha \times (W/C)^\beta \quad (1)$$

式(2)~(4)に新門司沖粘土を用いて冬期(2月)に作製したブロックの養生2年経過した供試体の関係式を示す。

$$\text{水中7日のち気中 } q_u = 2.781 \times (W/C)^{-0.742} \quad R=0.042 \quad (2)$$

$$\text{水中28日のち気中 } q_u = 7.084 \times (W/C)^{-0.887} \quad R=0.453 \quad (3)$$

$$\text{常に水中 } q_u = 14.608 \times (W/C)^{-1.592} \quad R=0.926 \quad (4)$$

常に水中養生したブロックの相関係数は0.926となり、強い相関関係を示した。一方で、水中養生のち気中養生したブロックは、養生中のブロックの乾燥などの影響により含水比と一軸圧縮強さにばらつきが生じたため、相関係数が低くなった。

図-10、図-11に α と β の養生日数との関係を示す。宇部粘土を用いて夏期に作製したブロック、新門司沖粘土を

用いて冬期(2月)に作製したブロック, および笠間らの研究より博多港粘土を用いて作製し海中で養生したブロックの値を比較した。 α の値は, 気中養生したブロックのばらつきが大きくなったが, 養生日数の経過に伴って上昇した。水中で養生したブロックは使用した粘土や作製時期に関わらず, 全て同じような変化を示した。強度増加率を示す β の値は, ほとんどの条件で養生28日以降に大きな変化はみられなかった。水中養生したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強さの相関は強く, 長期養生後の α と β の値は安定したことから, 水セメント重量比を用いた強度推定は可能であるといえる。

7. おわりに

宇部港及び新門司沖で浚渫された2種類の土砂を対象として, 高圧脱水固化処理装置を用いてブロックを製造し, 最大2年間のブロックの長期強度特性について調査した。その結果から得られた結論を以下に示す。

- (1) 新門司沖粘土を用いて冬期に作製した固化処理土ブロックの含水比は, 養生日数の経過に伴い養生2年経過で約10%減少した。
- (2) 高圧脱水固化処理土ブロックは, ブロック内で含水比と強度にばらつきがみられた。ブロックの両端で含水比は25~30%, 一軸圧縮強さは10MPa以上の差がみられた。
- (3) 新門司沖粘土を用いて固化処理土ブロックは, 水中養生することで強度増加がみられ, 養生2年で10MPa程度まで増加した。
- (4) 固化処理土ブロックの水セメント重量比が小さい

ほど一軸圧縮強さが増加した。新門司沖粘土を用いて冬期に作製し, 2年間水中で養生したブロックには $q_u=14.608 \times (W/C)^{-1.592}$ の関係が成り立つ。

謝辞: 本研究は, 国土交通省交通運輸技術開発推進制度: 研究課題「コンテナ船の大型化に向けた高圧脱水固化処理工法の開発」(研究代表者: 笠間清伸) ならびに一般財団法人港湾空港総合技術センター研究開発助成に九州地方整備局発注業務の成果を加えてまとめたものである。記して, 関係者各位には深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 新舎博, 松本歩, 長尾喬平, 小森裕: 浚渫粘土を原料とした高強度固化処理土ブロックの製造実験, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.75, No.1, pp.62-75, 2019.
- 2) 笠間清伸, 堂本佳世, 平澤充成, 善功企, 古川全太郎: 脱水固化処理して作製した浚渫土砂ブロックの長期強度特性と海洋環境適応性, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.73, No.2, pp.186-194, 2017.
- 3) 上野和敬, 笠間清伸, 中川康之, 根本貴史, 南正治, 善功企, 春日井康夫, 片桐雅明: 水和反応率に着目した高圧脱水固化処理土の一軸圧縮強度特性, 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.413-416, 2019.
- 4) 北詰 昌樹, 高橋 英紀: 現地石灰安定処理土の長期特性調査, 土木学会論文集C, Vol.64, No. 1, pp. 144-156, 2008.
- 5) 伊代田 岳史, 魚本 健人: 若材齢時の水分履歴がセメント硬化体の内部組織構造形成と物理特性に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, 15 巻 (2004) 2 号, p.25-34, 2004.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

LONG TERM STRENGTH CHARACTERISTIC OF CEMENT-TREATED AND HIGH-PRESSURE-DEHYDRATED SOIL BLOCK

Kazutaka UENO, Kiyonobu KASAMA, Yasuyuki NAKAGAWA, Yasuhiro SEGA, Masaharu MINAMI, Koji SUETSUGU, Yasuo KASUGAI and Masaaki KATAGIRI,

Authors have developed a technique called the cement-treated and mechanical dehydration method (CMD) as one of recycling techniques for dredged soil. Cement-treated soils have been developed in the field geotechnical engineering, and cement-mixing has been widely utilized as a recycling technique. The CMD technique is able to manufacture high-strength soil block. This paper examines the long-term strength of the CMD soil block, which are set different preparing, and curing conditions such as summer/winter season and underwater/air environment. The results obtained from this study are summarized below.

- (1) The water content of CMD soil block decreases about 10 % in 2 years with increasing curing periods.
- (2) Unconfined compressive strength of CMD soil block cured in underwater increases to about 10MPa in 2years.
- (3) CMD soil block with low water-cement ratio shows high unconfined compressive strength. The block cured in underwater, and manufactured in winter season have the following relationship. $q_u=14.608 \times (W/C)^{-1.592}$.