

高圧脱水固化処理装置で作製した浚渫土砂ブロック の長期強度

上野, 和敬
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

笠間, 清伸
東京工業大学環境・社会理工学院土木・環境工学系

中川, 康之
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

根木, 貴史
国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所

他

<https://hdl.handle.net/2324/7217568>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering). 75 (2), pp.I_845-I_850, 2019. 土木学会

バージョン :

権利関係 : © 2019 Japan Society of Civil Engineers



高圧脱水固化処理装置で作製した 浚渫土砂ブロックの長期強度

上野 和敬¹・笠間 清伸²・中川 康之³・根木 貴史⁴・
南 正治⁴・善 功企⁵・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)

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)

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 非会員 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製造し、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)浚渫土砂ブロックの含水比は、夏期および冬期の作製時期および脱水棒の本数にもよらず、養生日数の経過に伴い養生1年経過で約15%程度減少する。(2)夏期に作製した宇部粘土ブロックの一軸圧縮強さは、養生日数の経過によらず10 MN/m²からほとんど変化しないが、冬期に作製した新門司沖粘土ブロックの一軸圧縮強さは養生日数の経過に伴い養生200日に9 MN/m²まで増加し、その後ほぼ一定値となる。(3)浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強さと水セメント重量比には、水セメント重量比が小さくなると一軸圧縮強さが急増するような関係性があり、その関係性は水中養生した浚渫土砂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, ground improvement

1. はじめに

港湾では継続的な河川からの土砂の流入や近年の船舶の大型化により、航路維持や増深が行われている。それに伴い高含水比の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は慢性的に不足している現状がある。そのため、次々に発生する浚渫土砂を処分せずに有効利用する方法の開発が求められている。このような背景から、例えば、新舎ら¹⁾は浚渫粘土に固化材を混合して、10 MN/m²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。配合試験の結果によると、名古屋港粘土の場合は水固化材比を1.2、含水比を60%~100%に設定すると、10 MN/m²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、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1m×幅1m×長さ約1m)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に高圧脱水固化処理

装置を用いて高強度ブロックを作製し、浚渫土砂の脱水特性、および一軸圧縮試験による強度特性の評価を行い、水セメント重量比を用いた強度推定を行っている。これに対し本論文では、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について検討した。さらに、ブロックの強度を簡易的に推定する手法として、超音波速度に着目し、ブロックの一軸圧縮強度と超音波速度の関係を調査した。

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

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 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	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	夏期
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	28, 91日, 1年

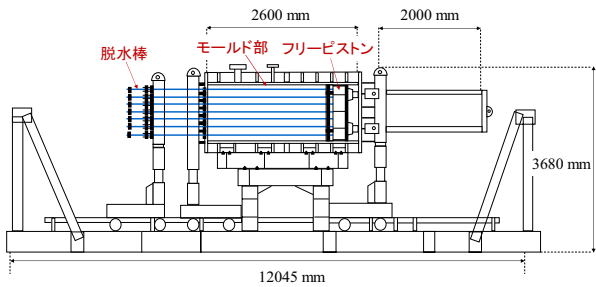


図-1(a) 大型脱水固化処理装置側面図

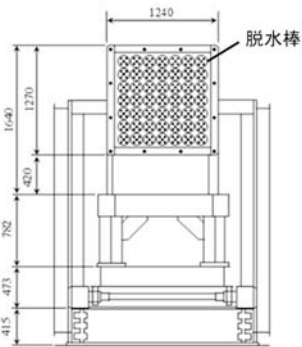


図-1(b) 大型脱水固化処理装置 脱水棒挿入面からの断面図
メントB種を用いた。

(2) 実験条件

母材に添加率40%で固化材を加え含水比が200%となるように調整した試料を攪拌後、図-1の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。高圧脱水固化処理装置は、水圧ポンプを用いたピストン稼働による载荷システム、最大5MPaでの载荷が可能、脱水を促すドレーン材（以降、脱水棒とよぶ）は図-1(b)に示すように等間隔に設置でき本数を変



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)

更可能、初期の浚渫土砂の容積が2m³で脱水後のブロックの容積が約1m³と減容率が約50%などの特徴がある。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高圧の水圧ポンプで押し込むことで高圧脱水する仕組みになっている。圧密中は時間と変位を測定し、3t法により圧密終了時間を決定した。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）と作製時期（夏期、冬期）の条件を変えて作製した。また、新門司沖粘土を使用して作製したブロックの養生条件を7日間水中養生したのち気中養生、28日間水中養生したのち気中養生、つねに水中養生する3種類を設定した。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。写真-1に気中養生、写真-2に水中養生したブロックを示す。養生日数は新門司沖粘土ブロックでは7日、28日、6ヶ月および1年とし、宇部粘土ブロックは28、91日、および1年とした。所定期間養生したブロックに、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15cm～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

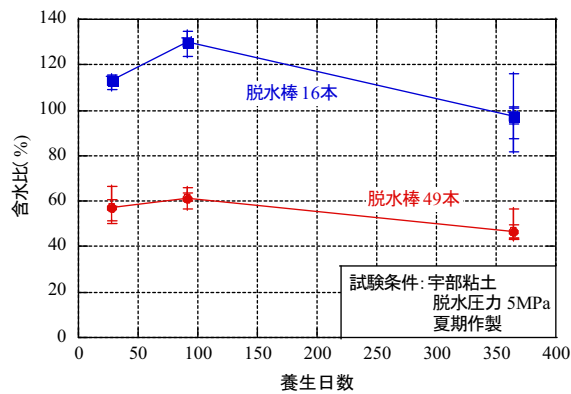


図-2 養生日数と含水比 (宇部粘土, 夏期作製)

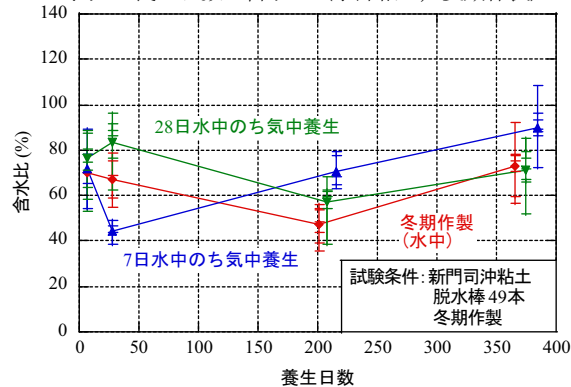


図-3 養生日数と含水比 (新潟司沖粘土, 冬期作製)

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採用し行った。

3. 含水比試験結果

図-2 に宇部粘土ブロックの含水比と養生日数の関係を示す。作製条件は、脱水棒の本数を変化させて夏期(8月)に作製し、作製後は水中養生したものである。水中養生したブロックの含水比は、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固化反応が進行し、水が反応に使われることで含水比が減少したと考えられる。また、脱水棒本数の違いにより含水比に50~70%の差があるが、含水比の変動の割合に大きな違いはみられないことから、初期含水比に関わらず固化反応に使用される水は変わらないことがわかる。

図-3 に脱水棒49本で冬期(2月)に作製した新潟司沖粘土ブロックの含水比と養生日数の関係を示す。全てのブロックで水中養生していた養生7日では含水比は70~80%で違いはみられなかった。その後、水中養生から気中養生に変更したブロックは、水中養生7日と水中養生28日のブロックともに20%程度減少したのち養生1年

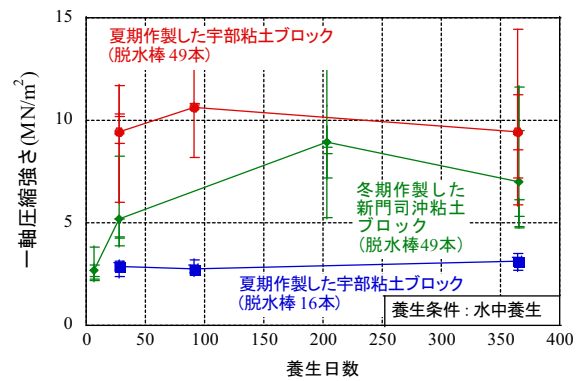


図-4 養生日数と一軸圧縮強さ (水中養生)

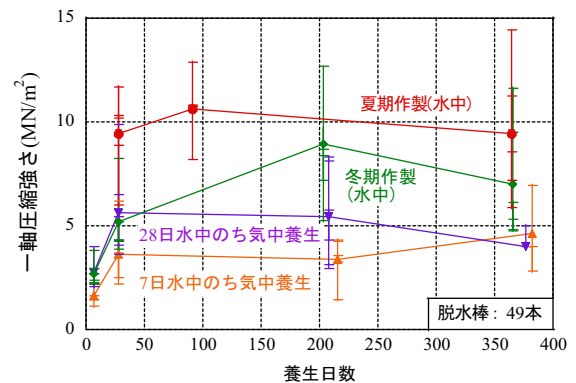


図-5 養生日数と一軸圧縮強さ (冬期作製)

まで上昇した。つねに水中養生したブロックは、養生200日までに20%減少し、養生1年で元の70%程度まで上昇した。ブロックは養生条件を水中から気中に変更することで含水比の変動にばらつきがみられた。これは写真-1に示すように気中養生中において、ブロック表面の乾燥・収縮に起因してひび割れや隙間が生じており、コアリングや供試体成形中に使用した水が供試体に吸収されるため、測定した含水比にばらつきがみられており正確ではない可能性がある。また、夏期作製ブロックの含水比は、養生日数の経過に伴い60%から約45%まで減少し、冬期作製ブロックも養生200日までに約20%減少した。このことより、石灰で改良された処理土³⁾と同様に浚渫土砂ブロックの含水比は、作製時期や養生条件によらず、養生日数に伴って減少していくことがわかった。

4. 一軸圧縮強度特性

図-4 につねに水中養生をした浚渫土砂ブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。夏期に作製した宇部粘土ブロックの一軸圧縮強さの平均値は、養生日数の経過によらず脱水棒49本ブロックは10 MN/m²、脱水棒16本で作製したブロックは3 MN/m²からほぼ変化しない。冬期に脱水棒49本で作製した新潟司沖粘土ブロックは養生200日まで3 MN/m²から9 MN/m²まで上昇し、

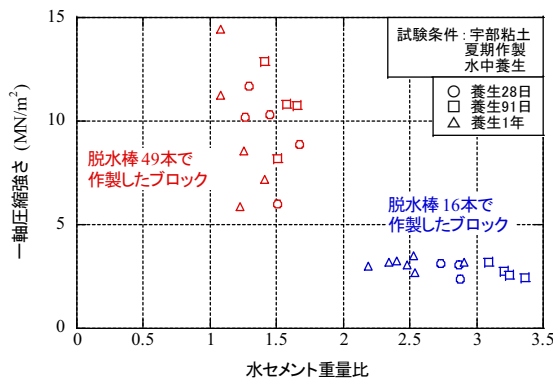


図-6 水セメント重量比と一軸圧縮強さ(宇部粘土, 夏期作製)

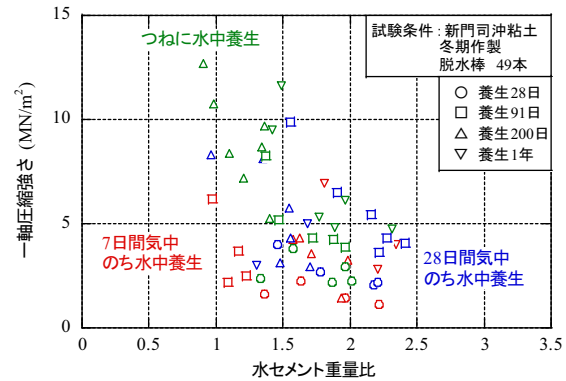


図-7 水セメント重量比と一軸圧縮強さ(新門司沖粘土, 冬期作製)

その後養生1年で 7MN/m^2 となった。冬期作製した新門司沖粘土ブロックは養生28日の夏期作製した宇部粘土ブロックの約半分の強度から、養生日数の経過に伴い養生200日までにほぼ同じ強度まで上昇した。夏期作製ブロックは養生初期から高い強度の発現がみられるが、冬期作製ブロックは強度発現に日数を要し、養生日数の経過によって作製時期による一軸圧縮強さの差はほとんどなくなるといえる。

図-5に脱水棒49本で冬期に作製した新門司沖粘土ブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。冬期作製したブロックは水中養生している間は強度増加するが、気中養生に変更したブロックから強度増加が止まった。常に水中養生を続けたブロックは養生200日まで強度増加し夏期作製ブロックと同程度まで増加した。ブロックが水中で養生されている間はブロック中の水が保存され、養生日数の経過に伴いセメントの固化反応が進み強度増加がみられる。一方でブロックを気中に移すと、ブロックは表面から乾燥していきセメントの水和反応に使用されるはずであったブロック内部の水が失われることで固化反応がほとんど進まなくなる。コンクリート供試体においても、養生の初期段階で乾燥過程を受けることで、水和に必要な水分を逸散することとなり、水分不足に陥り水和反応が阻害され強度増加が停止することが明らかとなっている⁴⁾。気中養生したブロックが養生28日以降に強度増加しないのはこのことが原因であると考えられる。ブロックの強度増加や維持のためには、常に水中で養生することが必要である。

5. 強度推定

図-6に宇部粘土を用いて夏期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した。本文では、浚渫土砂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

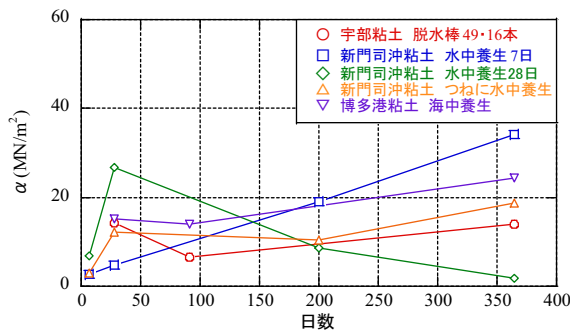
化材添加率(浚渫土の乾燥重量に対する比率)をもとに計算でき、供試体内の水分は、供試体の含水比(同じく浚渫土の乾燥重量に対する比率)から計算が可能であることから、具体的には供試体の含水比と固化材添加率の比を計算することで水セメント重量比を計算できる。図中の水セメント重量比は、コアリングした供試体ごとの含水比をブロックの固化材添加率で割ることで算出し、浚渫土砂ブロックの平均的な含水比ではなく、それぞれの供試体で測定された含水比を用いて水セメント重量比を計算することで、ブロック内の一軸圧縮強度のばらつきを含水比の分布に応じて評価できると考えた。水セメント重量比は、脱水棒16本で作製したブロックは2~3.5と大きく、脱水棒49本で作製したブロックは2以下の値をとる。水セメント重量比が小さいほど一軸圧縮強さは大きくなる傾向がある。また、養生1年で最も水セメント重量比は小さくなり、一軸圧縮強さも大きくなった。脱水棒16本で作製したブロックでは、脱水時間に時間がかかるため、脱水中に発達する固化材の固結力により荷重応力に抵抗するため、図-2に示すように高い含水比のままで脱水が停止した。このことが脱水棒16本で作製したブロックで、より大きな水セメント重量比を示し、さらに小さな一軸圧縮強さとなった理由と考えられる。脱水棒49本で作製したブロックでは、固化材の固結力が発現する前に、短時間で脱水が終了しているため、含水比が小さい水セメント重量比が小さな状態で脱水が行われており、より大きな強度が発現したものと考えられる。

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。ここで、 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)に宇部粘土を用いて夏期作製したブロックの養生日数ごとの関係式を示す。

$$\text{水中養生 28 日目 } q_u = 16.748 \times (W/C)^{-1.7019} \quad R = 0.9344 \quad (2)$$

図-8 養生日数と α

水中養生 91 日目 $q_u=22.815 \times (W/C)^{-1.8154}$ $R=0.9606$ (3)

水中養生 1 年 $q_u=11.677 \times (W/C)^{-1.4499}$ $R=0.9256$ (4)

宇部粘土を用いて作製したブロックはすべての養生日数で水セメント重量比と一軸圧縮強さに高い相関がみられた。また、養生日数が経過するほどグラフ上では左下にシフトしていき、水セメント重量比が減少し強度が増加する傾向がみられた。この結果からも水中養生したブロックは養生日数の経過につれてセメントによる固化反応が進むことがわかる。

図-7 に新門司沖粘土を用いて冬期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した。冬期に作製し、7 日水中養生したのち気中養生したブロックは、水セメント重量比は低くなり、一軸圧縮強さはほとんど 5 MN/m^2 以下の値になった。つねに水中養生したブロックの水セメント重量比は $1 \sim 2.5$ の値をとり一軸圧縮強さは最大で約 12 MN/m^2 の高い値をとる。3 条件の結果より、水セメント重量比が大きいほど一軸圧縮強さは大きくなる傾向がみられる。

式(5)～(8)に新門司沖粘土を用いて脱水棒 49 本で冬期作製し 7 日水中養生したのち気中養生したブロックの養生日数ごとの関係式を示す。

養生 7 日目 $q_u=2.6095 \times (W/C)^{-0.8973}$ $R=0.5798$ (5)

養生 28 日目 $q_u=4.6213 \times (W/C)^{-3.1070}$ $R=0.8077$ (6)

養生 216 日目 $q_u=18.905 \times (W/C)^{-3.1784}$ $R=0.8046$ (7)

養生 1 年 $q_u=34.042 \times (W/C)^{-2.7783}$ $R=0.9098$ (8)

式(9)～(12)に新門司沖粘土を用いて脱水棒 49 本で冬期作製し、28 日水中養生したのち気中養生したブロックの養生日数ごとの関係式を示す。

養生 7 日目 $q_u=6.7946 \times (W/C)^{-1.4984}$ $R=0.9811$ (9)

養生 28 日目 $q_u=26.681 \times (W/C)^{-2.2222}$ $R=0.975$ (10)

養生 208 日目 $q_u=8.7752 \times (W/C)^{-1.6414}$ $R=0.7375$ (11)

養生 1 年 $q_u=1.7956 \times (W/C)^{1.9817}$ $R=1$ (12)

式(13)～(16)に新門司沖粘土を用いて脱水棒 49 本で冬期

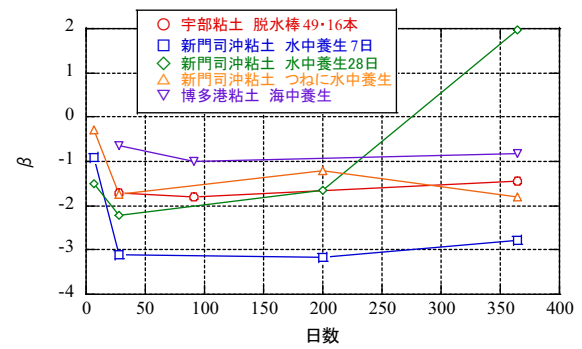
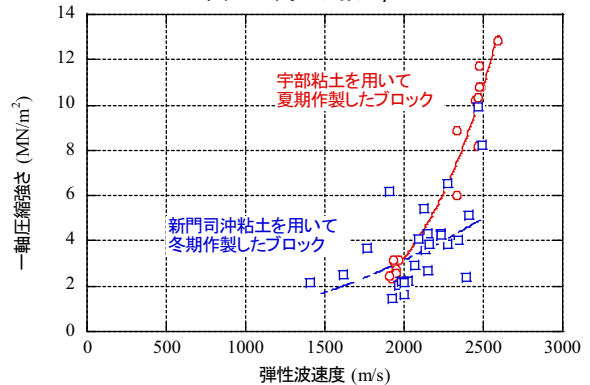
図-9 養生日数と β 

図-10 超音波速度と一軸圧縮強さ

作製しつねに水中養生したブロックの養生日数ごとの関係式を示す。

養生 7 日目 $q_u=3.1122 \times (W/C)^{-0.2928}$ $R=0.2076$ (13)

養生 28 日目 $q_u=12.108 \times (W/C)^{-1.7503}$ $R=0.8894$ (14)

養生 201 日目 $q_u=10.45 \times (W/C)^{-1.2103}$ $R=0.7821$ (15)

養生 1 年 $q_u=18.602 \times (W/C)^{-1.7935}$ $R=0.8709$ (16)

冬期作製したブロックは水中養生の期間が長いほど相関が高くなり、 α は大きく、 β は小さくなった。養生条件の異なるブロックの中では常に水中養生したブロックが最も高い強度増加率をみせた。気中養生期間のブロックの乾燥により固化反応に使用される水が失われることが原因である。夏期作製したブロックは脱水棒 16 本で作製したブロックの α と β の値が高くなった。

図-8、図-9 に α と β の養生日数との関係を示す。ばらつきはみられるが α は養生日数が経過すると水中で養生したブロックは増加する傾向のものが多く、また、笠間らの研究より博多港土砂を用いて作製し、海中で養生したブロックと比較すると、宇部粘土を用いて脱水棒 49 本で作製したブロックや新門司沖粘土を用いて冬期に作製し水中で養生したブロックと同程度の値となった。

浚渫土砂ブロックの強度評価を簡便に行うことも目的として⁵⁾、図-10 に宇部粘土を用いて夏期作製したブロックと新門司沖粘土を用いて冬期作製したブロックの一軸圧縮強さと超音波速度の関係を示す。超音波速度の増

加に伴い一軸圧縮強さは増加した。超音波は供試体の密度が大きいとより速く伝わり、また固化材の固化や結合が進行することでも増加すると考えられる。式(17)と(18)に回帰式を示す。

$$\text{夏期作製} \quad q_u = 5.459 \times 10^{-18} V_S^{-5.3852} \quad R=0.9759 \quad (17)$$

$$\text{冬期作製} \quad q_u = 4.0578 \times 10^{-7} V_S^{-2.0873} \quad R=0.6039 \quad (18)$$

ともに超音波速度が速いほど強度増加する傾向があり、夏期作製ブロックの相関および強度増加率がより高く、超音波速度を用いた強度推定が可能であることがわかる。

6. おわりに

宇部港および新門司沖で浚渫された2種類の土砂を対象に、高圧脱水固化処理装置を用いてブロックを製造し、1年間にわたって、ブロックの含水比、一軸圧縮強さおよび超音波速度を計測した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 浚渫土砂ブロックの含水比は、夏期および冬の作製時期および脱水棒の本数にもよらず、養生日数の経過に伴い養生1年経過で約15%程度減少した。
- (2) 夏期に作製した宇部粘土ブロックの一軸圧縮強さは、10 MN/m²からあまり変化しないが、冬期に作製した新門司沖粘土ブロックの一軸圧縮強さは養生日数の経過に伴い養生200日まで増加し、その後はほぼ同じ値となった。
- (3) 浚渫土砂ブロックの水セメント重量比が小さい方が一軸圧縮強さは増加し、水中養生した浚渫土砂ブロックでより高い相関がみられた。

- (4) 浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強さは、ブロック内の超音波速度が速いほど増加し、宇部粘土を用いて夏期作製したブロックでより高い相関がみられた。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: 弾性波試験による安定処理土の強度推定, 大林組技術研究所報, (25), pp.90-94.

(2019.2.7 受付)

(2019.4.24 受理)

LONG TERM UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT-TREATED SOIL

Kazutaka UENO, Kiyonobu KASAMA, Yasuyuki NAKAGAWA, Takashi NEGI
Masaharu MINAMI, Kouki ZEN, Yasuo KASUGAI and Masaaki KATAGIRI

Cement-treated soils have been developed in the field geotechnical engineering, and cement-mixing has been widely utilized as a recycling technique. Authors have developed a technique called the cement-mixing and mechanical dehydration method (CMD) as one of recycling techniques for soft clay slurry and investigated the strength properties and the dehydration properties of CMD soil block. This study investigates long-term strength of CMD soil block in terms of the difference of the manufacture season and curing condition. The results obtained from this study are summarized below.

- (1) The water content of CMD soil block decreases about 15 % decrease with increasing curing days irrespective of the season of manufacture season.
- (2) Unconfined compressive strength of CMD soil block produced in summer seasons does not change from 10 MN/m². Unconfined compressive strength of those produced in winter season increases about 9 MN/m² with increasing curing days.
- (3) CMD soil block with low water-cement ratio shows high unconfined compressive strength. There is the following relationship. $q_u = 14.566 \times (W/C)^{-1.5316}$ summer season, $q_u = 6.8697 \times (W/C)^{-1.0089}$ for winter season.