

浚渫土砂脱水固化処理中の透水係数及び圧密係数の推定

古川, 全太郎
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

笠間, 清伸
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

杉村, 佳寿
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

林, 和司
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/2324/7217549>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering). 78 (2), pp.I_619-I_624, 2022. Japan Society of Civil Engineers
バージョン :
権利関係 : © 2022 Japan Society of Civil Engineers



浚渫土砂脱水固化処理中の透水係数及び 圧密係数の推定

古川 全太郎¹・笠間 清伸¹・杉村 佳寿²・林 和司³・
西野 智之³・春日井 康夫⁴・片桐 雅明⁵・高田 義人⁶

¹ 正会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 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 福岡県福岡市西
区元岡 744)

³ 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 福岡県北九州市門司区西海
岸 1-4-40)

⁴ 正会員 (一財) 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 20 号)

⁵ 正会員 (株) 日建設計シビル (〒112-0004 東京都文京区後楽 1 丁目 4 番 27 号)

⁶ 学生会員 九州大学大学院工学府 土木工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

著者らは放射状排水機構を有する高压脱水固化処理装置を開発し、高強度な構造体ブロックを作成する技術の開発に取り組んでいる。本論文では、新門司沖で採取した粘土に固化材として高炉スラグセメント B 種を混合した固化材混合土の定ひずみ速度圧密試験から圧密圧力 p と圧密係数 c_v ・透水係数 k の関係を求めた。加えて、圧密試験前後のイオン交換容量から k を推定した。また、放射状排水理論を用いて時間と沈下量に関するパラメトリックスタディを行い、ブロック作成中の c_v を推定した。その結果、(1) イオン交換容量を用いて k を推定する場合、間隙構造と固化による比表面積の経時変化を考慮する必要があることが示唆された。(2) 圧密試験の結果からブロックの c_v を推定するためには、1 MPa より大きい作用圧力のときの c_v を用いるとよいことが示唆された。

Key Words : dredged clay, dehydration, consolidation, permeability, coefficient of consolidation

1. はじめに

港湾の機能や周辺環境の維持のため、定期的に海底粘土の浚渫工事が行なわれる。浚渫された粘土の有効利用法の一つとして脱水固化処理が挙げられるが、浚渫粘土が高含水比であること、透水係数が非常に小さいこと、圧縮性が高いことなどが原因で脱水に長時間を要するため、効率的な固化処理を行う上で問題である。著者らは、浚渫土砂に固化材を混合し、高压を作用させ脱水固化し、高強度な構造体ブロックを作成できる、放射状排水機構を有する高压脱水固化処理工法を開発した¹⁾。本工法の実用化・効率化に向け、ブロック作成に要する脱水時間の推定が課題である。

これまでに、高含水比の粘土に様々な凝集剤やセメント系固化材混合による透水性の改善を目的とした多くの研究がなされてきた。これらの研究から、高含水固化材混合土の透水性改善のメカニズムとして、固化材を混合することで粘土粒子がブロックを形成し、透水性が高まる構造に変化することが示唆されている²⁾⁵⁾。また、粘土

粒子に電氣的に吸着する陽イオンの拡散電気二重層の厚さはイオン交換容量に依存し、間隙を移動できる自由水の動き、すなわち粘土の透水性に影響を及ぼすことが知られている⁶⁾⁷⁾。著者らは、海成粘土にセメント系固化材を40%混合することにより、 Ca^{2+} の交換容量が増加し、それに伴い透水係数が増加することを明らかにした⁸⁾。さらに、粘土を母材とした圧密後の安定処理土は、圧密圧力の大きさに関わらず0.5-1 μm 程度の微細な間隙の割合が増えることが明らかとなっている⁹⁾。以上より、固化材混合による粘土の透水性改善メカニズムとして、1. 固化・凝集に伴う間隙比の増大、2. 固化材混合により主要イオンの中でも特に結晶層間距離の大きい Ca^{2+} イオン交換容量が増加することによる結晶層間距離の増加に伴う自由水の増加が挙げられる。本研究が対象とする海成粘土は間隙水及び粘土粒子間に多量の陽イオンを含むため、透水性や圧密特性は Ca^{2+} や Mg^{2+} 等のイオン交換容量に影響すると推測できる。本論文では、上記2つの要因を考慮した海成粘土の透水性改善効果の定量化およびブロックの脱水時間の推定を目的として、海成粘土に固化材を混

合した直後に定ひずみ速度圧密試験を行い、圧密圧力と圧密係数・透水係数の関係を求めた。また、圧密試験前後の供試体のイオン交換容量を測定し、Komineら¹⁰⁾が提案したイオン交換容量による粘土の透水係数推定手法を基に算出した透水係数と実測値との比較を行った。さらに、脱水ドレーンを有する固化材混合土の加圧脱水中の圧密係数を推定するため、放射状排水理論¹¹⁾を用いて時間と沈下量に関するパラメトリックスタディを行った。

2. 実験概要・実験条件

(1) 実験材料

定ひずみ速度圧密試験及びブロック作成実験で用いた試料は、福岡県北九州市の北九州空港付近の新門司沖土砂処分場(2期)から浚渫された粘土(以降、新門司粘土、Shin-Moji clayとする)である。固化材は高炉スラグセメントB種(以降、BBとする)を用いた。試料の物理特性を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。なお、新門司粘土の粒径加積曲線はJIS A 1204¹²⁾に従い、BBの粒径加積曲線は文献¹³⁾を参考にした。JGS-0051の工学的分類では、粒径加積曲線と液性限界、塑性指数から、新門司粘土はCH(粘土、高液性限界)に分類される¹²⁾。

(2) 定ひずみ速度圧密試験

定ひずみ速度圧密試験の実験条件を表-2中央部に示す。高炉スラグセメントB種を混合した条件(以降、固化材混合土とする)、及び混合しない条件(以降、未混合土とする)を用いて試験を行った。高炉スラグセメントB種は、既往の研究¹⁾を踏まえ、固化材混合による脱水時間改善の影響を顕著に捉えるために、粘土母材の乾燥重量比で50%および60%混合した。また、粘土単体(0%)においても実験を行った。粘土および固化材混合土は初期含水比を200%に調整後、粘土と固化材を3分程度十分に混合した後、5分以内に内径60mm、高さ20mmの圧密リングに充填し、圧密試験機に設置した。その後、15-30分程度で圧密容器内を脱気水で満たし、圧密試験を開始した。用いた高炉セメントB種の凝結の始発時間は140-170分、終結時間は235-255分であり、試験中に凝結は終了していると考えられる。試験方法は、JIS A 1227に従った¹²⁾。試験では、背圧を100kPa作用させ、軸圧縮圧力が5MPaになるまでの経過時間 t における軸圧縮力 p 、圧密変位量 Δ および供試体底面の間隙水圧 u を測定した。本試験では固化材混合直後の圧密特性を把握するために、圧密載荷速度 r はなるべく大きくすることとし、試験中の圧密圧力に対する過剰間隙水圧の比が30以下¹²⁾となる $r = 0.06\%/min$ 程度とした。いずれの条件も試験終了時の圧密圧力5MPaに到達するまでの時間は、混合率50%で1470分、60%

表-1 新門司粘土と固化材の物理特性

Name	Soil particle density ρ_s (g/cm ³)	Liquid limit w_L (%)	Plastic index I_p	Ignition loss L_i (%)	Activity	Classification by plasticity chart
Shin-Moji clay	2.794	89.2	58.4	8.76	1.39	CH (Clay, High liquid limit)
Blast furnace slag cement Type-B	3.04	-	-	1.40	-	-

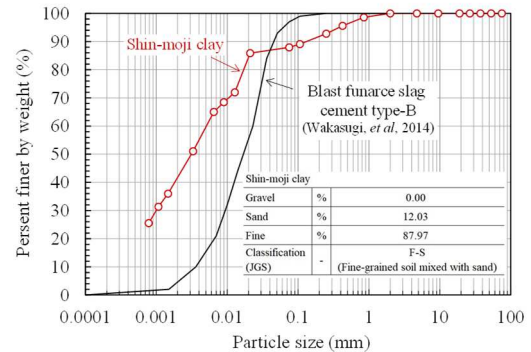


図-1 粘土および固化材の粒径加積曲線

表-2 定ひずみ圧密試験及びブロック作成試験の条件

Tests	Constant strain rate consolidation tests	Block dehydration tests
Base material	Shin-Moji clay	
Solidifying material (cement)	Blast furnace slag cement Type-B (BB)	
Mixing ratio of solidifying material	0 %, 50 %, 60 %	50 %, 60 %
Initial water content	200 %	
Specimen size	ϕ 60 mm, h 20 mm	ϕ 540 mm, h 940 mm (Dehydration rod: ϕ 25 mm, h 940 mm, $n = 19$)
Loading speed	0.03 ~ 0.04 %/min	-
Maximum consolidation pressure	5 MPa	1MPa (10 min) →2 MPa (10 min) →5 MPa

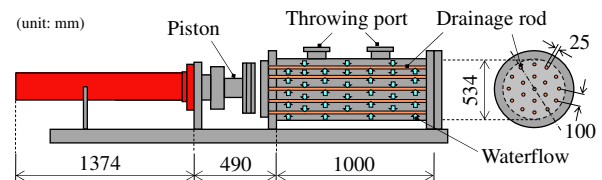


図-2 ブロック作成装置

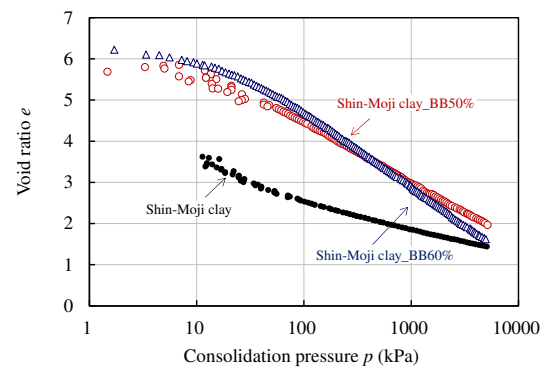


図-3 e -log p 曲線

で1640分、未混合土で1630分であった。また、透水係数推定のため、圧密開始直前と終了後(5MPa作用後)に4種(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+})のイオン交換容量をフレーム原子吸光法により測定した。文献¹⁰⁾¹⁴⁾に従い、試料と1N酢酸アンモニウム水溶液を乾燥質量比1:20の割合で混合

後, 200回/分で1時間振とうした懸濁液を $0.22\mu\text{m}$ ポアフィルターで吸引濾過した濾液を用いた。

(3) ブロック作成実験

表-1 右側に示す条件により, ブロック作成試験を実施した。(1) に示す材料を用いて, 初期含水比を200%に調整しながら攪拌・混合を充分に行った後, 図-2 に示す脱水固化装置に固化材混合土を投入した。固化材混合から実験開始までの所要時間は40-50分程度であった。脱水固化処理装置は, 加圧時の脱水促進のための脱水棒を設置した。脱水棒は直径25mmであり, 100mm間隔で正三角形形状に19本配置した。脱水棒には直径2mm程度の穴を30mm間隔で4方向に空け, 圧密中の排水を可能とした。装置に固化材混合土を投入後, 急速な高圧作用による試料の噴出を防ぐため, 作用圧力は1MPaを10分間, 2MPaを10分間, 5MPaを2t法により圧密度100%と判定されるまで脱水を行った。圧密終了時間は, 固化材混合率50%で220分, 60%で208分であった。

3. 定ひずみ速度圧密試験の結果

図-3 に $e\text{-}\log p$ 曲線を示す。未混合土に関しては, 圧密圧力約50kPa以降の間隙比は直線的に減少した。固化材混合土は, 混合率50%の間隙比は圧密圧力約100kPa以降, 60%は圧密圧力約70kPa以降, 直線的に減少した。固化材を混合した場合, 圧密圧力が小さい段階から緩やかに間隙比が減少するが, 未混合土は圧密初期段階で急激に間隙比が減少し, その後は緩やかに減少した。

図-4に圧密圧力 p と体積圧縮係数 m_v の関係, 図-5に p と圧密係数 c_v の関係, 図-6に圧密試験中の間隙比 e と透水係数 k の関係を示す。試験結果にばらつきがみられたため, c_v , m_v , k の圧密圧力ごとの平均値を表-3に示す。

図-4の体積圧縮係数 m_v は, 固化材混合の有無に関わらずばらつきがあるが, 3種の試料は圧密圧力100kPa以降は減少傾向を示し, 100kPaから5MPaまでで, $10^{-3}\text{ m}^2/\text{kN}$ から $10^{-5}\text{ m}^2/\text{kN}$ 程度に減少した。固化材混合土の m_v は, 圧密圧力が増加すると未混合土より大きくなる傾向にあり, 4-5MPaの段階では固化材混合率50%, 60%それぞれで未混合土の2.50倍, 3.37倍であった。これは, 固化材混合土が圧密進行中に固化したことにより, 図-3からもわかるように同一圧力において未混合土よりも間隙比が大きく, すなわち体積ひずみが小さくなったことに起因すると考えられる。図-5の圧密係数 c_v に関しては, m_v よりもばらついているが, 固化材混合土の c_v は圧密圧力の増加と共に減少する傾向を示した。また, 固化材混合土の c_v は未混合土と比較して高い傾向にあり, 固化材混合率50%, 60%で, 4-5MPa時の c_v は, 未混合土と比較して

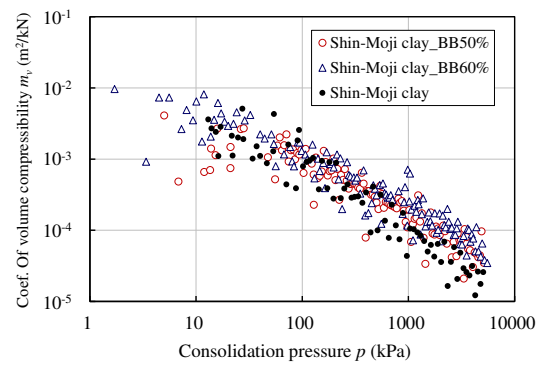


図-4 圧密圧力 p_t と体積圧縮係数 m_v の関係

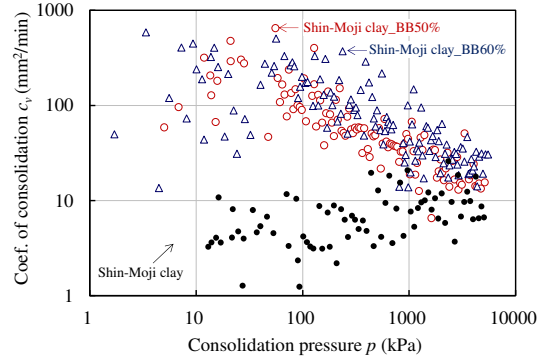


図-5 圧密圧力 p_t と圧密係数 c_v の関係

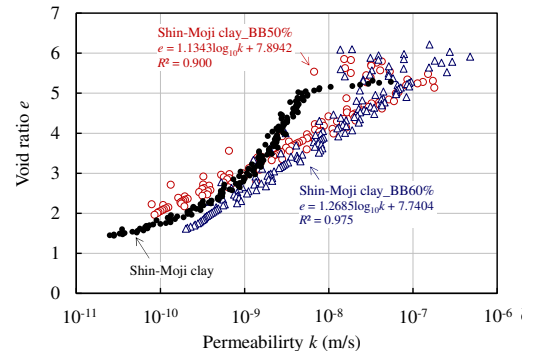


図-6 間隙比 e と透水係数 k の関係

表-3 定ひずみ圧密試験結果の概要

p_t on the test /BB content	c_v (mm^2/min)			m_v ($10^{-5}\text{ m}^2/\text{kN}$)			k (10^{-11} m/s)		
	0%	50%	60%	0%	50%	60%	0%	50%	60%
Mean btw. 0-5 MPa	7.57	82.59	109.36	74.34	56.47	113.76	60.93	1679.25	2397.50
Mean btw. 0-1 MPa	6.46	107.63	152.90	105.81	78.84	173.63	79.37	2362.03	4240.45
Mean btw. 1-2 MPa	9.16	29.61	46.92	6.75	12.92	19.02	9.69	54.10	114.24
Mean btw. 2-3 MPa	12.73	20.92	29.98	4.01	8.17	7.74	5.77	24.99	52.79
Mean btw. 3-4 MPa	9.02	23.26	28.50	3.17	6.55	11.80	3.99	14.75	34.23
Mean btw. 4-5 MPa	9.92	16.21	24.24	2.05	5.14	6.91	2.81	10.32	24.56
Mean btw. 2-5 MPa	10.69	22.91	28.42	3.18	9.11	9.35	4.55	31.25	40.01

それぞれ約1.63倍, 3.07倍大きくなった。また, 図-6の透水係数 k に関しては, 固化材混合土でも未混合土でも, 間隙比の減少と共に減少する傾向を示し, 圧密圧力5MPaのときの k は, 未混合土, 固化材50%, 60%混合土それぞれで 2.24×10^{-11} , 9.34×10^{-11} , $2.01 \times 10^{-10}\text{ m/s}$ であり, 固化材を混合すると大きくなる傾向を示した。固化材混合土の k は, 圧密開始から圧密圧力1MPa程度までは混合率50%, 60%それぞれ6.74倍, 12.09倍となり, 圧密と固化が進行していない初期の k が特に高くなった。圧密圧力5MPa時の固化材混合土の圧密終了時の k は, 未混合土と比

較してそれぞれ約3.68倍, 8.75倍であった。

4. イオン交換容量による透水係数の推定

(1) 透水係数の推定

図-7に固化材混合土の圧密試験前後の交換性陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}) のイオン交換容量及びこれらイオン交換容量の合計値である陽イオン交換容量 (Cation Exchange Capacity, CEC) を示す。なお、図-7には未混合土の圧密試験前のデータも示している。図-7より、圧密終了後には、セメントに含まれるそれぞれのイオン交換容量が減少した。これは、セメントの水和進行により陽イオンが固相に変化したこと、または固化せずに間隙水中に存在した各種陽イオンが加圧脱水中に排出されたことが原因だと考えられる。粘土及びセメント粒子に吸着、固化して残留した各種イオン交換容量は、固化材混合率50%と60%それぞれで42-85%, 5.7-83%低下し、CECは圧密後にそれぞれ19.33%, 49.9%低下した。

この結果を用いて、Komineら¹⁰⁾の透水係数理論式を非膨潤性粘土で適用できるように修正した式(1)-(4)を用い、固化材混合によるイオン交換容量の変化を考慮した透水係数の改善効果を推定した。

$$k = \frac{1}{CEC} \sum_{i=\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}} [\text{EXC}_i k_i] \quad (1)$$

ここに、 k : 透水係数 (m/s), EXC_i : 交換性陽イオン i の交換容量 (meq/g), (i は Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}), CEC : 陽イオン交換容量 (meq/g), k_i : 各陽イオンの透水係数寄与分 (m/s), k_i は式(2)で表される。

$$k_i = \frac{\gamma_{aw}}{12\mu_{aw}} (2d_i)^2 \quad (2)$$

ここに、 γ_{aw} : 粘土粒子層間の水の単位体積重量, (Pa/m), μ_{aw} : 粘土粒子層間の水の粘性係数 (Pa・s), k : 透水係数 (m/s), d_i は、粘土粒子の平行平板配列モデル¹⁰⁾で表した。

$$d_i = \frac{e \times 10^{-8}}{G_s \gamma_{aw} / g \times S} \quad (3)$$

ここに、 e : 任意の圧密圧力のときの試料の間隙比, G_s : 土粒子比重 もしくは混合土の比重, g : 重力加速度 (= 9.81 m/s²), S : 粒子端部を無視した比表面積 (m²/g)。また、 S は文献¹⁸⁾の膨潤性粘土を含まない場合の比表面積と液性限界の関係を基に、式(4)から算出した。

$$S = (0.83 w_L - 11.58) \times 100 / (100 + \alpha) + S_c \times \alpha / (100 + \alpha) \quad (4)$$

ここに、 w_L : 試料の液性限界 (%), α : セメント混合率, S_c : 高炉セメントB種の比表面積 (0.375 m²/g)。

(2) 透水係数の実測値と推定値の比較

図-8に圧密試験前に測定したイオン交換容量を用いて算出した透水係数 k の理論値と実測値の比較を示す。図

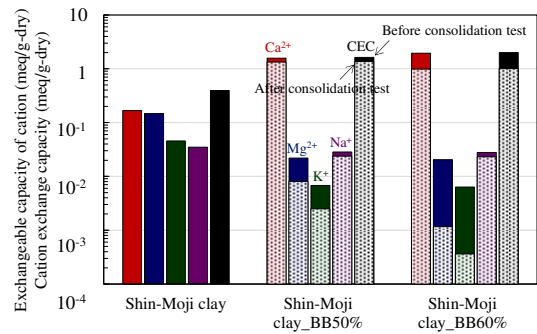


図-7 圧密試験前後のイオン交換容量

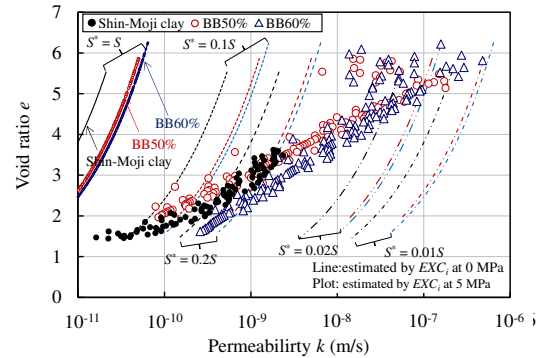


図-8 透水係数の実測値と推定値の比較

図-8 左部の線が 0MPa 時のイオン交換容量を用いて、プロットが 5MPa 時のイオン交換容量を用いて計算した推定値である。圧密試験前後でイオン交換容量及び陽イオン交換容量は変化した。式(2)(3)の結晶層間距離 d_i は 10^{-10} m 程度であり、イオン交換容量と比較して非常に小さいため、透水係数の推定値はほとんど変化がないことが明らかとなった。また、推定値と実測値を比較すると、推定値は実測値よりも $10^{-1} - 10^{-3}$ 倍程度小さく推定された。この原因として、試験中の粘土粒子の配向の変化による透水特性の変化を考慮していないこと、式(4)の比表面積 S において、イオン交換容量や実験中の固化等による変化を考慮していないことが考えられる。そこで、圧密試験前のイオン交換容量を用いて、 S の値を S^* としてパラメトリックに変化させた k の推定値をそれぞれ示す。間隙比の大小、固化材の有無により k が一致する S の値は変化するが、式(4)で計算される S の 0.2-0.02 倍の範囲であった。圧密圧力が増加すると、推定値と実測値の比が増加する傾向にあることが明らかとなった。従って、イオン交換容量を用いて k を推定する場合は、圧密試験中の間隙構造の変化、固化とイオン交換容量の変化による比表面積の経時変化を考慮する必要がある。

5. ブロック作成実験結果と放射状排水理論

(1) ブロックの圧密-沈下量関係

図-9、図-10の黒丸(●)に固化材混合率50%, 60%のブロックの時間-圧密量関係を示す。図中の実測値は、圧密圧力1MPaを10分間、2MPaを10分間、5MPaを

2t 法により圧密度 100 %と判定されるまで作用させた沈下量を示している。2t 法により判定した最終圧密沈下量は、50 %、60 %それぞれで 557.2 mm、582.0 mm であった。圧密終了時の間隙比は 50 %で 1.465、60 %で 1.497 と同程度であった。表-4 に、定ひずみ速度圧密試験の結果を用いて算出した圧密係数 c_v 、およびブロックの時間 - 圧密量関係から $\sqrt{t}$ 法により算出した c_v を示す。 $\sqrt{t}$ 法で計算した最終圧密沈下量 d_{100} と実測の沈下量を比較すると、いずれの混合率でも誤差が 1 mm 程度、4 mm 程度となったため、 $\sqrt{t}$ 法を用いることは妥当と判断し、 $\sqrt{t}$ 法で求めた t_{90} から $c_v = (0.848 \times (H'/2)^2)/t_{90}$ (H' : 平均供試体高さ) により c_v を計算した。定ひずみ速度圧密試験中の間隙比 e は透水係数の常用対数 $\log_{10} k$ に比例する¹⁸⁾と仮定し、図-6 に示す定ひずみ速度圧密試験の $\log_{10} k - e$ 関係を用いてブロック製造中の透水係数 k を推定した。ブロックの体積ひずみと作用圧力から体積圧縮係数 m_v を計算し、 k と m_v から c_v を算出した。表中の* 印の値は、各脱水圧力における c_v の平均値を示している。表-4 より、ブロックの実測値から $\sqrt{t}$ 法で算出した c_v は 1 MPa、2 MPa 作用時の脱水の影響を大きく受け、定ひずみ速度圧密試験の $\log_{10} k - e$ 関係を用いた方法の 1 MPa、2 MPa の中間の値を取った。圧密圧力が増加すると加圧脱水による間隙比の減少及び固化の影響により c_v が小さくなった。固化材混合率 60 %のブロックの 5 MPa 時の c_v の平均値は、50 %のブロックの 4 倍程度高い値となった。

(2) 放射状排水理論

バーチカルドレーン工法の圧密解析を行う際に用いられる放射状排水理論¹¹⁾をブロック脱水時の圧密解析に適用した。脱水棒を図-2 に示すような正三角形形状に配置し、鉛直方向の脱水を無視した場合の過剰間隙水圧 u は Barron¹¹⁾によって式 (5) のように解かれた。

$$u = \frac{4\bar{u}}{d_e^2 F(n)} \left\{ r_e^2 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right\} \quad (5)$$

ここに、 r_w : ドレーン半径、 r_e : ドレーン有効排水半径、 $n = d_e/d_w$ であり、 u の変化はドレーンの直径 d_e およびドレーンの有効排水径 d_w を用いて算出可能となる。放射状排水における平均圧密度 U_h は式 (6) によって表される。

$$U_h = 1 - \exp \left\{ \frac{-8T_h}{F(n)+L} \right\} \quad (6)$$

L : ウェルレジスタンス係数 ($= 32/\pi^2 \times (k_c/k_w) \times (H/r_w)^2$)、 k_c/k_w : ドレーンと粘土の透水係数の比、 T_h : 時間係数 ($= c_v t/d_e^2$)。本論文の解析では、脱水中の c_v は一定とし、ウェルレジスタンスは考慮せずに解析した。

図-9、図-10 に表-4 の値を基に圧密係数を変化させて解析した時間-沈下曲線を示す。図-9、図-10 より、いずれの固化材混合率においても、圧密係数の実測値と最も一致する c_v は 30 mm²/min 程度であった。この値は、固化

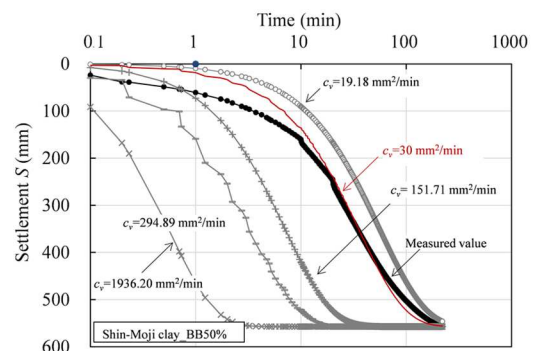


図-9 時間と沈下量の関係 (固化材添加率 50 %)

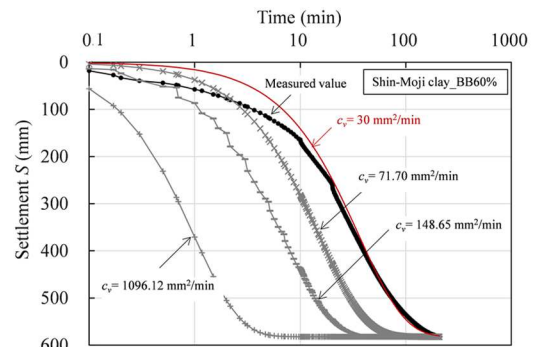


図-10 時間と沈下量の関係 (固化材添加率 60 %)

表-4 高圧脱水固化処理ブロックの圧密係数 c_v 推定値

Content of BB >		50%	60%
Root t method		976.56	1434.90
Mean betw. 1-5 MPa *	mm ² /min	151.71	717.48
Mean betw. 1 MPa *		1936.20	8534.34
Mean betw. 2 MPa *		294.89	1096.12
Mean betw. 5 MPa *		19.18	71.70
Mean betw. 1-2 MPa *		1104.59	4756.19
Mean betw. 2-5 MPa *		37.97	148.65

*Relationships between k and e used in the process of calculating c_v are based on constant strain rate consolidation tests.

材混合率 50 %の場合では定ひずみ速度圧密試験の圧密圧力 1 - 2 MPa の c_v の平均値に、60 %の場合では圧密圧力 2 - 5 MPa の c_v の平均値程度に相当する。このことから、定ひずみ速度圧密試験の結果から固化処理ブロックの c_v を推定するためには、1 MPa より大きい作用圧力における c_v を用いるとよいことが示唆された。

6. まとめ

本論文では、高含水比の粘土を脱水固化処理する際の圧密時間の推定を目的として、定ひずみ速度圧密試験、フレーム原子吸光試験および放射状排水理論を用いた脱水解析を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 新門司沖で採取した粘土に固化材として高炉スラグセメント B 種を混合した材料の定ひずみ速度圧密試験では、圧密圧力が増加すると圧密係数 c_v が減少する傾向にあり、固化材混合率 50 %、60 %で、固化材混合土の圧密試験終了 (5 MPa) 時の c_v は未混合土と比較してそれぞれ約 1.63 倍、3.07 倍大きくなった。

- (2) イオン交換容量を用いて推定した圧密試験中の透水係数 k は、圧密圧力が増加すると、推定値と実測値の比が増加する傾向にあった。イオン交換容量と結晶層間距離を用いて k を推定する場合は、圧密・固化進行による間隙構造・粒子の配向度の経時変化を XRD 及び SEM 画像の経時変化を測定し、および固化による比表面積の経時変化を測定し、式 (1)-(3) に適用することで推定精度が向上する可能性がある。
- (3) 定ひずみ速度圧密試験の結果からブロックの c_v を推定するためには、1 MPa より大きい作用圧力における c_v を用いるとよいことが示唆された。

謝辞：本研究は、日建設シビル共同研究、ならび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) 上野和敬, 杉村佳寿, 笠間清伸, 春日井康夫, 片桐雅明, 瀬賀康浩, 西野智之, 高嶋紀子, 湊土砂を用いた中型固化処理ブロックの圧密特性と強度推定, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 77 (2), pp. I-487-I-492, 2021.
- 2) Imai, G., Mori, K. and Yamada, S.: Forced dewatering characteristics and disposal efficiency of fluid mud, *Soils and Foundations*, 18 (3), 13-25, 1978.
- 3) 勝又正治, 滝口健一, 清水英樹, 安田昭彦, 大林成行: 高含水建設搬出土の改良システムの開発, 土木学会論文集, No. 560/VI-34, 117-129, 1997.
- 4) Kasama, K., Zen, K. and Iwataki, K.: High-strengthening of cement-treated clay by mechanical dehydration, *Soils and Foundations*, 47 (2), 171-184, 2007.
- 5) 田尻隼也, 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 陳光齊: ひずみ速度に着目したスラグ混合浚渫土の圧密特性, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 501-504, 2012.
- 6) Olphen, V.: An Introduction to Clay Colloid Chemistry, *John Wiley & Sons, N.Y.*, 1963.
- 7) 大坪政美, 大原広宣, 東孝寛, 金山素平, 中野晶子: 塩類溶脱が有明粘土の圧密特性に及ぼす影響, 粘土科学, 47 (2), 76-81, 2008.
- 8) 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一: 間隙水及び粘度の陽イオンに着目した透水性改善効果, 土木学会論文集 C (地圏工学), 76 (3), 277-284, 2020.
- 9) 藤野秀利, 鈴木素之, 山本哲朗, 岡林茂生, 河原陽子, 平岡真樹: 上載圧下で養生した固化材安定処理土の微細構造, 第 39 回地盤工学研究発表会講演概要集, 797-798, 2004.
- 10) Komine, H. and Ogata, N.: Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (4), 497-508, 2008.
- 11) Barron, R.A., Consolidation of fine-graded soils by drain wells, *Trans ASCE*, 113, 718-742, 1948.
- 12) 地盤工学会編: 地盤材料試験の方法と解説, 1, 310-320, 500-517, 丸善, 2009.
- 13) 若杉伸一, 金沢智彦, 小倉東, 佐川孝広: 日鉄住金セメント(株)における高炉スラグを活用した高機能建設製品, 新日鉄住金技報, 39, 121-126, 2014.
- 14) 土壌養分測定法委員会編: 土壌養分分析法, pp. 34-38, 295-296, 404-407, 415-417, 養賢堂, 2002.
- 15) 水熱科学ハンドブック編集委員会: 水熱科学ハンドブック, 技報堂出版, 1997.
- 16) Bolt, G. H.: Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays, *Géotechnique*, 6 (2), 86-93, 1956.
- 17) 葛上久, 尾崎勲司, 中谷三男: 比表面と液性限界の関係, 農業土木学会論文集, 37, 61-67, 1971.
- 18) Tavenas, F., Leblond, P., LeBihan, J.-P and Leroueil, S.: The permeability of natural soft clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (4), 629-660, 1983.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 5, 2022)

ESTIMATION ON COEFFICIENT OF CONSOLIDATION AND PERMEABILITY DURING DEHYDRATION OF DREDGED CLAY

Zentaro FURUKAWA, Kiyonobu KASAMA, Yoshihisa SUGIMURA, Kazushi HAYASHI, Tomoyuki NISHINO, Yasuo KASUGAI, Masaaki KATAGIRI and Yoshito TAKATA

Authors have been developing a technique to make high-strength soil concrete block using high-pressure dehydration apparatus with a radial drainage system. Constant strain rate consolidation tests were conducted for solidified treated soil mixed with dredged clay and blast furnace slag cement class B (BB) for clarifying the relationships between consolidation pressure p and coefficient of consolidation c_v / permeability k . In addition, permeability k of the materials were estimated from exchangeable capacity of cations measured before and after the consolidation tests. Coefficient of consolidation c_v during block manufacturing tests were estimated by parametrically calculating time and settlement curves using radial drainage theory. Following results were obtained from this study. (1) when estimating k using ion exchange capacity, it was found necessary to take into account changes over time in specific surface area due to pore structure and solidification. (2) it was suggested that a c_v greater than 1 MPa of working pressure in the constant-strain consolidation test should be used to estimate the c_v of the block.