

温度変化が軟弱粘性土の変形特性に及ぼす影響

－コンシステンシーの変化と圧密の関係－

Effects of Temperature on the Consolidation and Consistency of Clayey Soil

- Consideration of Elemental Experiments Using Various Clayey Soil -

小河篤史* 大塚義一** 白石祐彰***

要 旨

本研究では、再生可能エネルギーを活用した軟弱粘土地盤の改良工法を開発するため、地盤温度の変化が粘土の圧密特性とコンシステンシーに与える影響に着目した。地盤温度の上昇によって粘性土の圧密が促進されることはすでに知られているが、温度効果の程度は粘土種類によって異なり、一般化には至っていない。そこで、本研究では、2種類の工業粘土と港湾で浚渫された3種類の天然粘土を使用し、温度条件を変化させて室内実験を行い、圧密現象の温度依存性を追究した。1次元圧密試験の結果、いずれの粘土においても温度上昇とともに圧密係数が増加することが確認され、その要因は温度上昇にともなう間隙水の粘性低下が支配的であることが示唆された。また、土壌の液性限界試験および塑性限界試験の結果、温度変化が土壌のコンシステンシーに与える影響は粘土の種類によって異なるものの、そこから求められる活性度と圧密試験で得られる圧密係数の間には高い相関関係が示された。

キーワード：圧密、コンシステンシー、温度効果、圧密促進工法、軟弱粘性土

1. まえがき

近年、地球温暖化の影響、地下構造物からの熱の排出、地下ヒートポンプシステムの導入により、都市部の地温が上昇していることが指摘されている。これまでわが国では、地下10m以深の地盤温度は、年間を通して15～20℃程度で安定しているとされていた。このため、地盤や地下水の温度変化によって生じる物理的、化学的、生物学的な影響については、それほど多くの研究がなされていない。しかし近年、脱炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの積極的な利用が求められていることから、地中熱ヒートポンプシステムをはじめとする地中熱利用が促進されることによって、地盤の温度変化がさらに顕著になることが予想される。そのため、温度変化によって生じる地盤の様々な挙動を追究することの重要性が高まっている。

地盤の物理的、化学的、生物学的特性が温度変化の影響を受けることは古くから知られている。なかでも、粘土の圧密においては、土粒子と間隙水の体積、間隙水の粘性、土壌粒子表面と間隙水の界面作用が温度変化の影響を受けることで、圧密沈下量や圧密速度も変化するこ

とが報告されている¹⁾⁴⁾。また、このような温度効果を利用して軟弱粘土地盤の圧密を促進する地盤改良法も提案されているが⁵⁾⁶⁾、地盤の加熱は大量のエネルギーを必要とするため加熱設備等の整備が高コストになるといった課題があり、いまだ実用化には至っていない。しかし、太陽熱などの再生可能エネルギーを利用することで、商用電源を利用するよりも経済的に地盤の温度を高められる可能性もあることから、本研究では、未利用熱を活用した新たな圧密促進工法の実現可能性を検討した。温度効果を利用した圧密促進法を開発するためには、粘性土の圧密現象における温度依存性を評価する必要があるが、既往の研究では、加熱による影響の度合いは粘土の種類によって異なるとされており、一般化されていない。圧密現象の温度依存性を一般化することができれば、圧密促進工法の開発だけでなく、地中熱ヒートポンプ導入時や地中蓄熱における地盤変形シミュレーションにも利用できる等、地中熱利用促進に大きく寄与することができる。本研究では、様々な種類の粘土を用いて温度条件を変化させて実験室実験を行うことにより、土壌のコンシステンシーと圧密の温度依存性を確認し、両者の関係を評価した。

*土木本部環境技術室 **営業本部 ***技術研究所環境研究グループ

表－1 使用材料の基本物性

	工業粘土		自然粘土 (港湾浚渫土)		
	カオリン粘土	笠岡粘土	大阪湾粘土	門司港粘土	徳山港粘土
土粒子密度 (g/cm ³)	2.601	2.675	2.621	2.641	2.580
塑性限界 (PL) (%)	30.2	24.6	39.2	32.4	37.0
液性限界 (LL) (%)	77.0	58.5	101.2	120.9	120.8
塑性指数 (PI)	46.8	33.9	63.0	88.5	83.8
2 μm 以下の粒子の割合 (%)	92.4	43.1	57.0	54.5	50.3
活性度	0.51	0.79	1.11	1.62	1.67
強熱減量 (%)	12.1	2.7	8.2	—	8.6
スメクタイト含有量 (%)	<3.0	36.0	9.4	—	15.0
主要鉱物	SiO ₂ 46.6 %	SiO ₂ 66.2 %	SiO ₂ 58.2 %		SiO ₂ 58.5 %
	Al ₂ O ₃ 38.3 %	Al ₂ O ₃ 19.3 %	Al ₂ O ₃ 14.5 %		Al ₂ O ₃ 16.3 %
	Fe ₂ O ₃ 0.85 %	Fe ₂ O ₃ 5.9 %	Fe ₂ O ₃ 6.7 %		Fe ₂ O ₃ 6.1 %
	CaO 0.05 %	CaO 1.2 %	CaO 4.3 %		CaO 2.5 %
	K ₂ O 0.24 %	K ₂ O 3.0 %	K ₂ O 2.1 %	—	K ₂ O 2.5 %
	MgO — %	MgO 0.51 %	MgO 2.1 %		MgO 2.4 %
	SO ₃ 0.16 %	SO ₃ 0.08 %	SO ₃ 1.9 %		SO ₃ 1.0 %
	Others 13.8 %	Others 3.81 %	Others 10.2 %		Others 10.7 %

2. 使用材料と実験方法

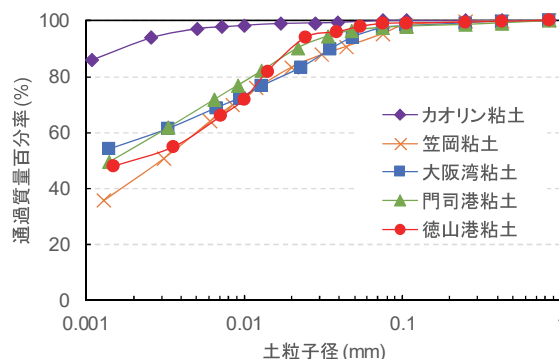
2.1 使用材料

本研究で使用した試料は、市販の工業粘土であるカオリン粘土 (ASP200、BASF Corporation)、笠岡粘土 (橋マテリアル株式会社)、および港湾浚渫粘土である大阪湾粘土、門司港粘土、徳山港粘土である。表－1に、各粘土の基本物性を示す。門司港粘土は、試料の量が限られていたため、強熱減量試験、スメクタイト含有量測定および鉱物組成試験を実施していない。

今回使用した材料は、室温条件におけるコンシステンシー特性が大きく異なった。液性限界は最も低い笠岡粘土で 58.5 %、最も高い門司港粘土で 120.9 %であった。同じ工業粘土でもカオリン粘土と笠岡粘土では液性限界が 20 ポイント程度、浚渫粘土でも大阪湾粘土とそれ以外の浚渫粘土では同じく液性限界が 20 ポイント程度異なった。一方、塑性限界試験の結果は、液性限界と比べると相対的に狭い範囲に収まっており、結果的に試料毎に塑性指数が異なった。

本研究では、粘土の界面作用の大小が圧密現象に及ぼす可能性が考えられることから、使用材料のスメクタイト含有量を確認した。スメクタイト系鉱物の代表的なものとしてモンモリロナイトがよく知られている。モンモリロナイトを多く含むベントナイトは一般的に比表面積が大きいため、粒子と間隙水の界面作用も大きく水と接して膨潤し、透水係数を大きく低下させることから遮水材等として利用されている。スメクタイト含有量測定の結果、笠岡粘土、大阪湾粘土、徳山港粘土には膨潤性スメクタイトが含まれることが確認され、なかでも笠岡粘土はスメクタイト含有量が 36 %と最も高く水和による膨潤の可能性が考えられる。一方、カオリン粘土のスメクタイト含有量は、定量下限値よりも低かった。

図－1に使用材料の粒度分布を示す。カオリン粘土は



図－1 使用材料の粒度分布

粒径 2 μm 以下のコロイド分を最も多く含んでいるが、塑性指数が低く不活性粘土であることがわかる。カオリン粘土以外の粘土は同様の粒度分布を示しており、それらの活性度はカオリン粘土と比べると笠岡粘土で 1.5 倍程度、大阪湾粘土で 2.0 倍程度、門司港粘土および徳山港粘土では 3.0 倍程度となり、自然粘土のほうが工業粘土よりも活性が高かった。

鉱物組成分析の結果、いずれの粘土も SiO₂ と Al₂O₃ が主であることに変わりはないが、カオリン粘土以外では、Fe₂O₃、CaO、K₂O が数%程度含まれることが確認されており、自然粘土は工業粘土と比較すると SiO₂ と Al₂O₃ 以外の割合が高かった。

2.2 実験方法

a. 液性限界試験と塑性限界試験

液性限界試験と塑性限界試験は、所定温度 (10°C、23°C、35°C、50°C) の恒温室内で JIS A 1205:2009 に準拠して実施した。このとき、試験に供する材料や試験装置は試験温度に調整された恒温室内で 12 時間以上静置した。また、試験開始時および試験中には粘土の温度を測定し、予め定めた温度になっていることを確認した後

b. 圧密試験

圧密試験は、図－2に示す装置を用い JIS A 1217:2009

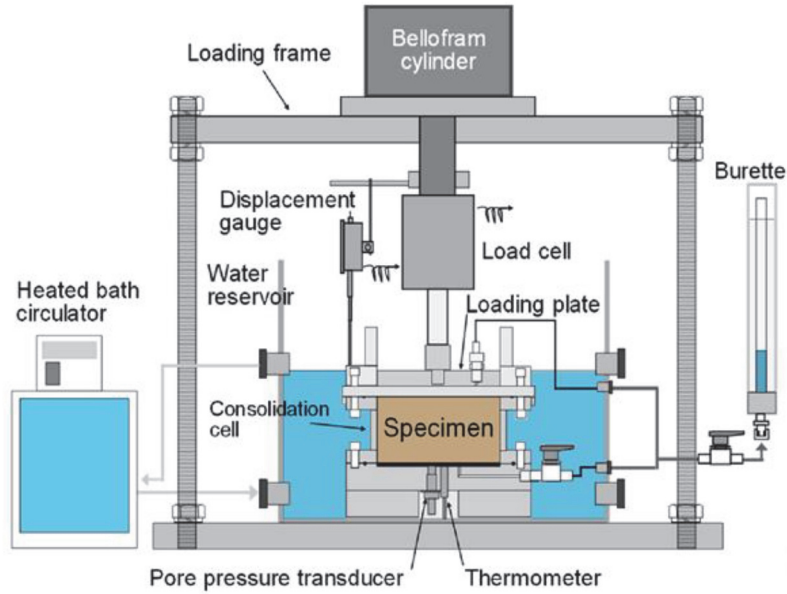


図-2 加温圧密装置

表-2 圧密供試体の初期条件

	湿潤密度 (g/cm ³)	飽和度 (%)	初期間隙比
カオリン粘土	1.44	94.4	2.38
笠岡粘土	1.55	94.2	1.86
大阪湾粘土	1.39	99.1	3.10
門司港粘土	1.35	99.6	3.64
徳山港粘土	1.35	99.7	3.51

に準拠して実施した。わが国の浚渫粘土の含水比は、液性指数が 1.0 以上になることも多いことが示されているため、各試料の初期含水比を液性限界の 1.1 倍に調整した。含水比を調整した後の試料を直径 10 cm、高さ 5 cm の円筒型セルに充填し、側方からハンマーで軽く打撃を与えて密実度を高めて供試体とした。試験開始時の供試体の湿潤密度、飽和度、初期間隙比を表-2 に示す。载荷はペロフラムシリンダーによって行い、圧密圧力は増加率 2 で 4.9~628 kPa とした。試験中の供試体温度は、円筒型セルを浸漬した浴槽内の水温によって制御し、各粘土とも 17℃、23℃、35℃、50℃、65℃ の一定温度で試験を行った。

3. 温度変化がコンシステンシーに及ぼす影響

図-3 に液性限界、塑性限界と温度の関係を示す。浚渫粘土である徳山港粘土と大阪湾粘土では、温度の上昇とともに液性限界に低下傾向がみられた。一方、工業用粘土のカオリン粘土と笠岡粘土では、液性限界は温度の影響を受けず、10~50℃ の範囲で概ね一定であった。塑性限界は、いずれの粘土においても温度変化によって大きな変化は確認できなかった。Jefferson ら⁸⁾ は、工業粘

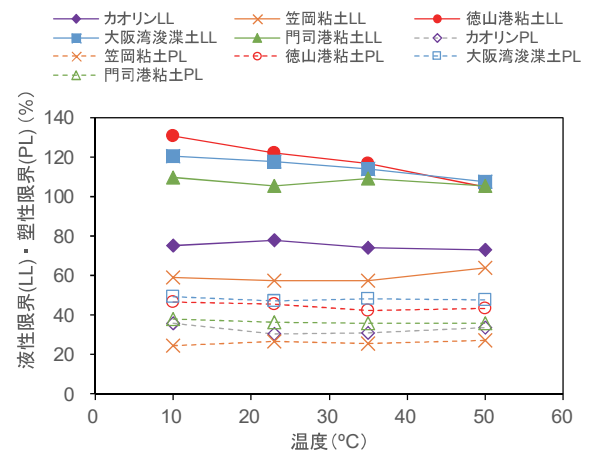


図-3 温度とコンシステンシーの関係

土であるカオリン粘土と Na 型ベントナイトを用いて 10~80℃ の範囲でフォールコーン試験法を用いて液性限界の変化を調べた結果、カオリン粘土は温度によって液性限界は変化しないが、Na 型ベントナイトは温度上昇にともなって液性限界が上昇することを報告しており、カオリン粘土の結果においては本研究と一致した。

本試験では、徳山港粘土と大阪湾粘土の液性限界のみが温度変化の影響を受ける結果となった。このとき、温度上昇に起因する間隙水の粘性低下に起因して粘土の液性限界が低下するのであれば、全ての粘土で温度上昇にともなって液性限界が低下するはずである。また、温度変化にともなう土粒子や間隙水の体積変化には差がないと考えられるため、徳山港粘土と大阪湾粘土のみで温度変化によって液性限界が変化した原因としては、温度変化によって間隙水と土粒子の界面作用に変化が生じ

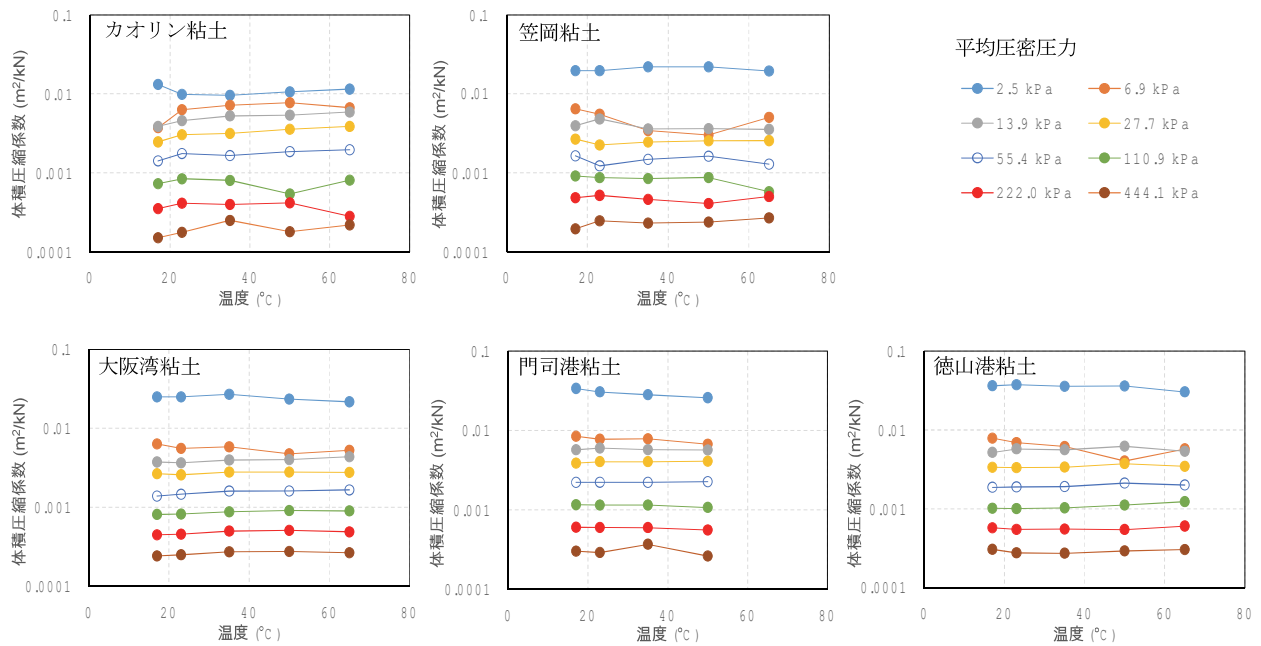


図-4 温度と体積圧縮係数の関係

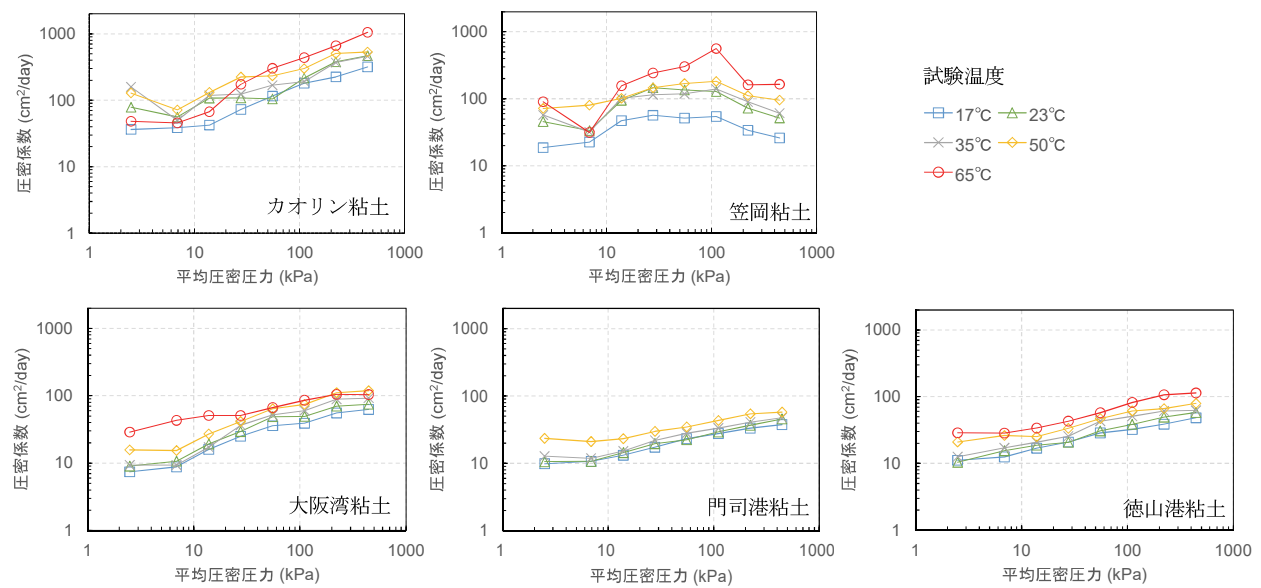


図-5 圧密圧力と圧密係数の関係

たことや、間隙水中への物質の溶解（例えば、陽イオンであるマグネシウムイオンやカリウムイオン）、海水由来の間隙水溶存成分の析出（例えば、炭酸カルシウム）等が考えられる。このように考えれば、そもそも間隙水量が少ない塑性限界試験において、塑性限界に温度依存性が確認できないことも説明できる。

4. 温度変化が圧密特性に及ぼす影響

4.1 圧縮特性と温度

図-4 に温度と体積圧縮係数の関係を示す。いずれの

粘土においても温度変化と体積圧縮係数には明確な関係性は見いだせなかった。工業粘土では温度の違いにより若干のばらつきが確認されたもののその変化に規則性はみられず、浚渫粘土では温度変化によらず概ね一定値であった。一方、圧密圧力と体積圧縮係数には各粘土に共通の傾向が確認され、圧密圧力が大きいほど体積圧縮係数は小さくなり、平均圧密圧力が 13.9 kPa 以上になると粘土の種類によらず体積圧縮係数はほぼ同様の値となった。したがって、粘性土の体積圧縮係数は、粘土の種類や温度変化の影響を受けず、圧密圧力に依存してその値が変化するといえる。

4.2 圧密速度と温度

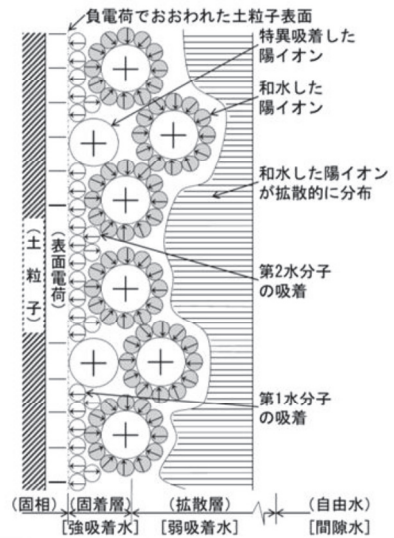
図一五に各粘土の圧密圧力と圧密係数の関係を示す。圧密係数は、笠岡粘土以外では2段階目の载荷以降、圧密圧力の増加とともに増加傾向を示した。これは、载荷圧力が増加すると土粒子の構造が密になろうとするが、その空隙は間隙水で満たされているため、透水性の低い粘性土では载荷初期の荷重を間隙水が受け持つため間隙水圧が高くなり、結果として動水勾配が大きくなって排水が促進されたものと考えられる。笠岡粘土では、平均圧密圧力 111 kPa までは他の粘土と同様の傾向を示したが、それよりも圧力が大きくなると圧密係数が低下した。これは、笠岡粘土に多く含まれる膨潤性のスメクタイト鉱物の影響が考えられる。土粒子は、その表面電荷によって水分子を吸着し、この吸着水の層は拡散電気二重層と呼ばれ通常は移動しないため、この部分は間隙水の排水には寄与しない(図一六)。スメクタイト鉱物は、他の粘土鉱物と比べると比表面積が大きく表面電荷が高いため、拡散電気二重層が厚く形成されるという特徴を有する。したがって、圧密圧力が小さいうちは、土粒子間の隙間も大きく過剰間隙水圧の上昇により排水が促進されるが、圧密圧力が大きくなり土粒子同士の距離が一定以上に近づくと、単純に土粒子によって空隙が狭まるだけでなく、土粒子周囲の拡散電気二重層の影響で透水に寄与する有効間隙が減少することで排水速度が低下し、圧密係数も低下したと推察される。大阪湾粘土や徳山港粘土もスメクタイトを含有するが、これらの浚渫粘土は既に海水中の陽イオンに長期間曝露されることによって電気的平衡状態にあり、試験中の温度変化によって拡散電気二重層の層厚が変化するほどの影響を受けず、工業粘土である笠岡粘土とは挙動が異なったものとする。

図一七に圧密係数と温度の関係を示す。縦軸は、各温度の各载荷段階(4.9~628 kPaの8段階)で得られた圧密係数の平均値と17°Cのときの圧密係数の平均値の比である。任意温度における圧密係数は式(1)によって計算できる。このとき、体積圧縮係数は4.1節で示したように温度依存性がないことから計算上は無視できる。したがって、任意温度の圧密係数と17°Cの圧密係数の比(c_{vt}/c_{v17})は式(2)のように表される。

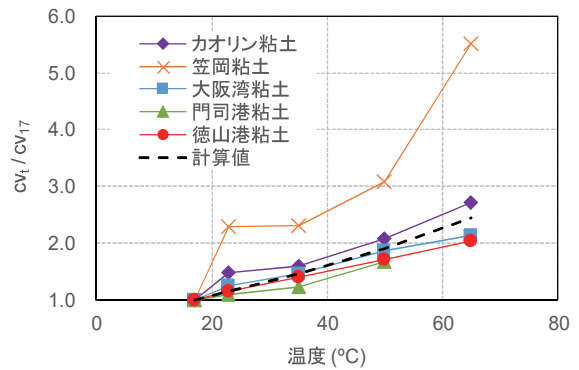
$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (1)$$

$$\frac{c_{vt}}{c_{v17}} = \frac{k_T/k_{17}}{\gamma_{wT}/\gamma_{w17}} \quad (2)$$

ここで、 C_v : 圧密係数、 C_{vt} : T°Cにおける圧密係数、 C_{v17} : 17°Cにおける圧密係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ_{wT} : T°Cにおける水の単位体積重量、 γ_{w17} : 17°Cにおける水の単位体積重量、 k : 透水係数、 k_T : T°Cにおける透水係数、 k_{17} : 17°Cにおける透水係数、 m_v : 体積圧縮係数である。17°Cの透水係数は、式(3)のように求めら



図一六 土粒子・水界面のイオン・水分子吸着水の模式図⁹⁾



図一七 圧密係数の温度依存性の度合い

れ、これを式(2)に代入して得られる式(4)で c_{vt}/c_{v17} が計算できる。

$$k_{17} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{17}} \quad (3)$$

$$\frac{c_{vt}}{c_{v17}} = \frac{\eta_{17}/\eta_T}{\gamma_{wT}/\gamma_{w17}} \quad (4)$$

ここで、 η_T : T°Cにおける水の粘性係数、 η_{17} : 17°Cにおける水の粘性係数である。任意の温度T°Cにおける水の粘性係数は、Hillelの提案する式(5)¹⁰⁾で求められる。

$$\eta_T = -0.00046575 \cdot \ln T + 0.00239138 \quad (5)$$

計算から得られた圧密係数比は、23°C、35°C、50°C、65°Cのとき、それぞれ1.15、1.46、1.90、2.44となり、笠岡粘土以外では23~65°Cの範囲で実験値とよく一致した。温度変化にともなう水の密度変化は粘性係数の変化と比較して相対的に小さいことから、圧密係数が温度によって受ける影響は、間隙水の粘性係数の変化が支配的であることが確認できた。

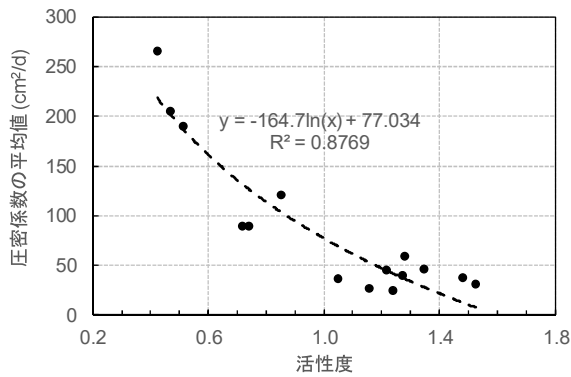


図-8 活性度と圧密係数の関係

図-8に活性度と圧密係数の関係を示す。活性度は、土粒子表面における物理的吸着や化学的結合の傾向の強さを表すもので、式(6)¹¹⁾によって計算できる。

$$A = \frac{I_p}{F_{2\mu m}} \quad (6)$$

ここで、 A ：土の活性度、 I_p ：塑性指数、 $F_{2\mu m}$ ：2 μm 以下の土粒子の割合(w%)である。なお、図-8では、コンシステンシー試験と圧密試験の温度条件が一致する23°C、35°C、50°Cの結果をプロットしている。図より、活性度と圧密係数には強い相関が示された。圧密係数は活性度が増加するにつれて低下し、活性度が小さいほど圧密係数の減少量は大きく、活性度が1.0以上になると粘土の種類によらず同程度に収束した。高活性の粘土は、一般的にその表面電荷が高く拡散電気二重層が比較的厚く形成されるため、有効間隙が小さくなり排水性が低下し、圧密係数が低下するものと考えられる。

5. あとがき

本研究では、市販の工業粘土および港湾浚渫土に対し、17°C~65°Cまでの異なる温度条件下で土のコンシステンシー試験および一次元圧密試験を実施し、粘土の圧密特性に及ぼす温度の影響を評価した。本研究の主な成果は以下のとおりである。

- i. 体積圧縮係数は、粘土の種類によらず温度変化の影響が小さく、圧密圧力に依存してその値が変化することを確認した
- ii. 圧密係数は、粘土の種類によらず温度上昇を受けて増大し、その上昇の割合は水の粘性係数の変化の影響を大きく受ける
- iii. 地盤温度を17°Cから35°Cまで加熱すると、圧密速度は約1.5倍になることから、加熱圧密工法の有効性が示された
- iv. 活性度と圧密係数平均値との間に高い相関関係が確認できたことから、圧密速度は簡易な物理試験により推測し得ることが示された

今後は、温度変化による間隙水の性状変化が界面作用

に及ぼす影響等を調べ、加温圧密メカニズムをさらに詳細に追求する。また、それらの知見から加温圧密工法の実サイトへの適用性を検討したい。

【参考文献】

- 1) Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A., and Ramana, G.V., "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", *Canadian Geotechnical Journal*, 44(8), 942-956, 2007
- 2) Mon, E.E., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T., Moldrup, P., "Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer", *GSTF Int. J. Geol. Sci.*, 1(1), 1-10, 2013
- 3) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I., Ohishi, K., "Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests", *Soils Found.*, 33(4), 170-183, 1993
- 4) Towhata, I., Kuntiwattanaul, P., and Kobayashi, H., "A preliminary study on heating of clays to examine possible effects of temperature on soilmechanic properties", *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 184-190, 1993
- 5) K. Adachi, M. Murakami, "Consolidation Mechanism of Clayey Ground Under Heated-Drain Consolidation", *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, 596, pp.39-48, 1998
- 6) Pothiraksanon, C.P., Bergado, D. T., Abuel-Naga, H. M., "Full-scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains", *Soils Found.*, 50(5), 599-608, 2010
- 7) 水野健太、土田 孝、近井玲子、松永康司、「杭間粘土の応力履歴を考慮した低置換率 SCP 改良地盤の有限要素解析」、土木学会論文集 C、Vol.64、No.3、pp.550-564、2008
- 8) Jefferson, I., and Rogers, C. D. F., "Liquid limit and the temperature sensitivity of clays", *Engineering Geology*, Vol. 49, No. 2, pp. 95-109, 1998
- 9) 嘉門雅史、浅川美利、「土木学会編・新体系土工学 16 土の力学 (I) ~土の分類・物理化学的性質~」、技法堂出版、p. 62、1988
- 10) Hillel, D., "Fundamentals of Soil Physics, Academic Press", New York, 1980
- 11) Skempton, A.W., "The colloidal activity of clay", *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. I, pp. 57-61, 1953