

低速ひずみ速度域で観測される粘性土の圧縮曲線における温度依存性

北海道大学大学院 学生会員 ○堤彩人, 正会員 田中洋行, 非会員 嶋川直樹

1. はじめに

近年, 一次元圧密において, 粘性土の圧縮挙動はひずみ速度依存性を示すことが報告されており¹⁾, この原因は, 粘土骨格の粘性によるものと考えられている. したがって, 粘性土のひずみ速度依存性は圧密時の温度の影響を受けることが予想される. 本研究では, 粘性土の温度とひずみ速度が圧密特性に及ぼす影響について報告する.

2. 試料と試験方法

本研究では, 大阪湾粘土 ($w_L = 109\%$, $w_p = 43\%$) の再構成試料に対して 10°C , および 50°C の温度一定条件下で試験中にひずみ速度を変化させる CRS 試験 (JISA1227) を実施し, 粘性土の有効応力-ひずみ $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係の温度依存性とひずみ速度依存性を調べた. 供試体の寸法は, 直径 60mm 高さ 20mm で, 100kPa の背圧 u_b を負荷した. 試験条件は片面排水で, 供試体下部非排水面側の軸圧縮応力 σ と間隙水圧 u を計測し, 軸変位量は载荷装置に用いた高精度デジタルサーボモータの回転量より換算した. 供試体内の過剰間隙水圧は放物線分布していると仮定し, 有効応力 p' は式(1)より算出した.

$$p' = \sigma - u_b - \frac{2}{3}(u - u_b) \quad (1)$$

ここに, $u - u_b$ は過剰間隙水圧 Δu である. なお, 温度によって各種計測機器の零点がシフトすること, および圧密容器が熱膨張することを考慮し, あらかじめ圧密容器を設定温度で 10 時間以上放置し, 温度の影響を取り除いた.

図-1 に大阪湾粘土の $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係と過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma$ と p' の関係を示す. 実験中は, 基準のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ を $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ とし, 図に示すように, $\dot{\varepsilon}_0$ (a から b 区間), $\dot{\varepsilon}_0/100$ (b から c 区間), $\dot{\varepsilon}_0$ (c から d 区間) の順番にひずみ速度を変化させた.

3. 比較的速いひずみ速度における粘性土の圧密特性の温度依存性

一般的に, 圧密時の温度 T が高いほど粘性土の圧密降伏応力 p'_c は小さくなるが, 正規圧密領域の $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係の勾配 C_{cc} は T の影響をほとんど受けないため, T の異なる $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係はほぼ平行となることが知られており, Marques ら²⁾ によって p'_c と T の関係は式(2)のように定式化されている.

$$\frac{p'_c(T_1)}{p'_c(T_0)} = \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{0.15} \quad (2)$$

図-1 から読み取れる 10°C と 50°C の p'_c の比はおよそ 0.76 程度であり, (2)式の計算結果 0.79 とほぼ一致する. また, a から b 区間の正規圧密領域における 10°C と 50°C の $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係はほぼ平行 (わずかに 50°C の C_{cc} は小さくなる) であり, 比較的速いひずみ速度における大阪湾粘土の圧縮挙動 (a から b 区間) は既往の研究報告と矛盾しないことがわかる.

一方, 図-1 から任意の p' に対する $\Delta u/\sigma$ の値が 50°C よりも 10°C の時に明らかに大きくなることが確認できる. この影響は式(3)で定義される透水係数 k に直接反映されると考えられる.

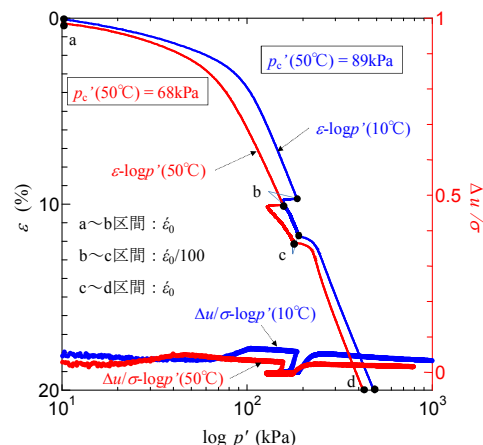


図-1 大阪湾粘土の $\varepsilon\text{-log}p'$ と $\Delta u/\sigma\text{-log}p'$ 関係

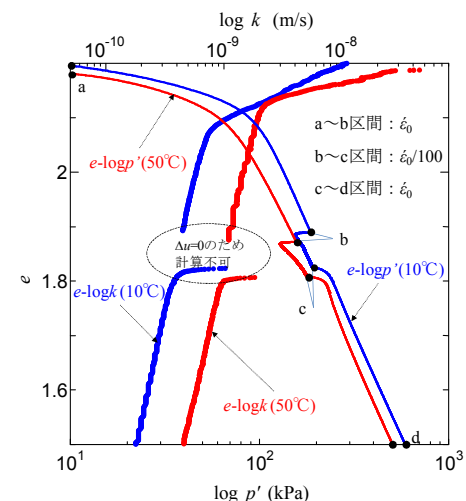


図-2 大阪湾粘土の $e\text{-log}p'$ と $e\text{-log}k$ 関係

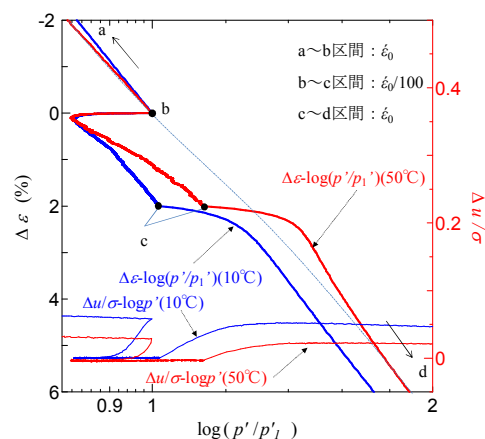


図-3 大阪湾粘土の $\varepsilon\text{-log}p'$ 関係の拡大図

一次元圧密 温度 ひずみ速度 CRS 試験

〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究科 地盤物性学研究室 TEL 011-706-6194

$$k = \frac{g_n \rho_w \dot{\epsilon} H_0 H_t}{2 \Delta u_t} \times \frac{1}{100 \times 100 \times 100 \times 60} \quad (3)$$

ここに、 g_n は重力加速度、 ρ_w は水の密度、 H_0 は供試体初期高さ、 H_t は時間 t における供試体高さ、 Δu_t は t における過剰間隙水圧である。特定の粘性土の k は間隙比 e によって一義的に決まるとされる。しかしながら、図-2 に示す e - $\log k$ 関係、および e - $\log p'$ 関係をみてみると、正規圧密領域における 50°C の透水係数 k_{50} は 10°C の透水係数 k_{10} より 2.3 から 2.5 倍程度大きくなる (b から c 区間においては、ひずみ速度が非常に遅いため Δu がほとんど発生せず、 k を計算することはできなかった)。式(3)において温度が影響する値は ρ_w のみであるが、 10°C と 50°C における ρ_w はそれぞれ、 0.99973g/cm^3 と 0.98807g/cm^3 であり、式(3)の計算結果に与える影響はほとんどない。したがって、 ρ_w の温度依存性だけでは k_{50} と k_{10} の違いを説明できない。ここで、水の粘性について考えてみる。理科年表によると、 10°C と 50°C における水の粘性係数 η の比 η_{10}/η_{50} は 2.38 である。すなわち、理論的には、水の粘性によって k_{50} は k_{10} より 2.38 倍大きくなり、この値は、実験結果とほぼ同じ値である。したがって、図-2 の e - $\log k$ 関係の違いは間隙水の粘性の温度依存性を考慮すると説明できるといえる。

4. 比較的遅いひずみ速度における粘性土の圧密特性の温度依存性

図-3 は、ひずみ速度急変時の ϵ - $\log p'$ 関係の拡大図である。 T の違いによるひずみ速度依存性の違いが比較しやすいように、横軸は ϵ を変化させた直前 b 点の有効応力 p'_1 で正規化した有効応力比 p'/p'_1 、縦軸は ϵ を変化させた時のひずみ増分 $\Delta\epsilon$ で整理している。 ϵ を ϵ_0 から $\epsilon_0/100$ へと急激に減少させた直後の p'/p'_1 の極小値は、いずれの温度においても 0.82 程度で温度の影響はみられない。しかしながら、 p'/p'_1 が極小値に達した後 c 点に向かう過程では、温度によってその挙動は明らかに異なる。すなわち、圧縮が進むにつれて 50°C の $\Delta\epsilon$ - $\log(p'/p'_1)$ 関係は 10°C の $\Delta\epsilon$ - $\log(p'/p'_1)$ 関係よりも右方向に推移していく。その結果、 ϵ を $\epsilon_0/100$ から ϵ_0 へと急激に増加させると、 50°C の $\Delta\epsilon$ - $\log(p'/p'_1)$ 関係は a から b 区間の延長線を大きく逸脱する。

Towhata ら³⁾は、高温環境において段階載荷による圧密試験を実施し、図-4 に示すような今回の試験と同様な結果を得ている。すなわち、高温の条件で圧密荷重が作用すると、標準の e - $\log p'$ 曲線より右に飛び出す現象が確認できる。このような現象が生じる理由として、高温による二次圧密促進³⁾やセメンテーションによる粒子結合の発達⁴⁾が提唱されている。本研究においても、おそらく、高温環境における遅いひずみ速度 $\epsilon_0/100$ による圧縮で、粘性土供試体が再構造化し、図-3 のような逸脱挙動が得られたと考えられる。したがって、粘性土の圧縮挙動に及ぼす高温環境の影響は、a から b 区間の比較的速いひずみ速度域においては構造軟化側に働くのに対して、b から c 区間の比較的遅いひずみ速度域においては構造硬化側に働くといえる。

5. まとめ

粘性土の圧密時の温度とひずみ速度が圧密特性に及ぼす影響について調べた。その結果、温度が高いほど粘性土の圧縮挙動は、速いひずみ速度域において構造軟化の傾向を示すのに対して、遅いひずみ速度域においては構造硬化の傾向を示すことが明らかになった。また、温度が高いほど間隙水の粘性が低下し、透水係数は小さくなる。

謝辞：本研究で用いた CRS 試験装置は、関西国際空港用地造成(株)・関西国際空港(株)からの受託研究により開発された。末筆ながら心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Leroueil, S. (2006): Suklje's Memorial Lecture – The isotache approach: Where are we fifty years after its development by Professor Suklje?, *Proc. European-Danube Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana, 1, 55-88.
- 2) Marques, M. E. S., Almeida, M. S. S. and Leroueil, S. (2004): Viscous behaviour of St-Roch-de-l'Achigan clay, Quebec, *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 25-38.
- 3) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I. and Ohishi, K. (1993): Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests, *Soils and Foundations*, 33(4), pp.170-183.
- 4) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J. (1991): Effect of ageing of marine clay and its duplication by high temperature consolidation, *Soils and Foundations*, 31(4), pp.133-147.

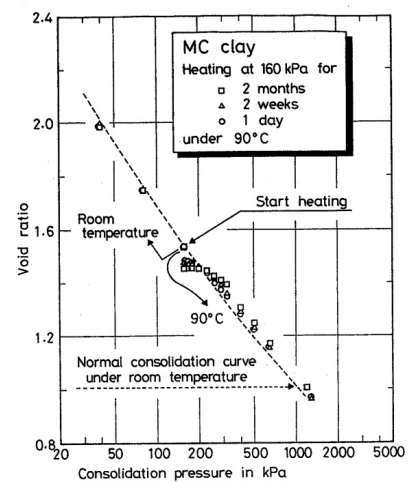


図-4 高温クリープの影響³⁾