

土粒子の熱膨張率を考慮した飽和粘性土の加熱による圧密の評価

鳥取大学工学部 正会員 清水正喜
奥村組土木興業(株) 正会員 大西崇史

1. はじめに

飽和粘性土を正規圧密状態で加熱すると圧縮する。その性質から二次圧密によって生じる間隙比の減少を温度を上げることによって生じさせることができる。加熱による二次圧密促進効果を基準温度 T_0 の下で Δt_c 時間の二次圧密によって生じる圧縮量を温度変化 ΔT によって生じさせる時の ΔT と Δt_c の関係として導いている¹⁾。また、温度が変化するような状況で粘性土の変形特性を論じるためには、温度変化による間隙比の変化を土粒子の熱膨張を考慮して求める必要がある²⁾。熱膨張率は、粘土鉱物の組成によって影響を受けると考えられる。本研究では、熱膨張率を測定した試料に対して、X線回折により粘土鉱物の定性的同定を行った。

2. 試料

各試料のコンシステンシー限界、X線回折により同定した粘土鉱物の組成を表1に、粒度分布を図1に示す。過去の研究²⁾に用いられた試料についてもここに示す。

表 1 各試料の性質

試料	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	主要な含有鉱物
カオリン	41.2	32.9	カオリナイト
ベントナイト	568	125	モンモリロナイト、 クリストバライト
宍道湖泥 ²⁾	51.2	20.1	石英、長石
東京湾泥 ²⁾	115	46.1	石英、長石、緑泥石

3. 熱膨張率の測定

既提案の方法²⁾により、温度 T と土粒子の密度 $\rho_s(T)$ の関係を求め、それに基づいて熱膨張率を計算した。20℃における密度 ρ_s と割線熱膨張率 α_s を表2に示す。20℃における割線熱膨張率 α_s を使用して圧密試験の結果を整理した。

試料の組成はX線回折の結果から土粒子の熱膨張率に対する鉱物組成の影響について考察する。物質が熱膨張するということは分子間力が弱まることで起こると考えられる。カオリンの主要粘土鉱物であるカオリナイトは電氣的に安定しているため熱膨張率は低く、ベントナイトに含まれているモンモリロナイトは結晶粒子間の結合が弱いために熱膨張率が高いと考えた。宍道湖泥と東京湾泥を比較すると、東京湾泥には石英、長石の他に緑泥石が含まれている。熱膨張率は東京湾泥の方が宍道湖泥より比較的高い。このことから、東京湾泥が緑泥石を含んでいるため、緑泥石に含まれる鉄分の影響により熱膨張率が高いと考えられる。

4. 圧密試験

カオリン(ASP400P)を含水比81.4%で十分に練り返した後、最大荷重49.1 kPaで一次元圧密容器により予圧密した。予圧密後、各試験に用いる供試体を高さ2 cm、直径6 cmに成形した。

試験は次の4つの方法で行った：①初期段階において温度を上昇させ、高温のまま載荷していく圧密試験(以下 Tvf 試験と呼ぶ)②正規圧密状態において温度変化を繰り返し与えた圧密試験(Tvr 試験)

③、④Tvf、Tvr 試験とそれぞれ同じ時間・載荷履歴を与えた室温での圧密試験(Tcf、Tcr 試験)。まず、どの試験も成形時の乱れの影響を消すために、供試体に最大圧力78.5 kPaまで圧密、9.8 kPaまで除荷するという圧密履歴を与えた。

Tvf 試験は、圧密初期段階($p=9.8$ kPa)に温度を上昇させ($T=20 \rightarrow 60^\circ\text{C}$)、荷重増分比 $\Delta p/p=1$ で、圧密圧力を段階的に増加させた。各荷重段階で24時間圧密した。Tvr 試験は、荷重増分比 $\Delta p/p=1$ で p を段階的に78.5 kPaまで載荷した。各荷重段階において24時間圧密した。その後、 $p=157$ kPaを載荷し、圧密圧力一定のまま温度変化のサイク

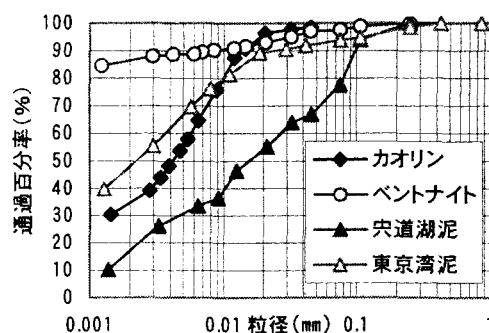


図 1 粒径加積曲線

表 2 20℃での密度 ρ_s と熱膨張率 α_s

試料	密度 ρ_s (g/cm ³)	割線熱膨張率 α_s (°C ⁻¹)
カオリン	2.619	1.553×10^{-4}
ベントナイト	2.639	21.12×10^{-4}
宍道湖泥 ²⁾	2.741	2.705×10^{-4}
東京湾泥 ²⁾	2.691	3.119×10^{-4}

ル($T=20 \rightarrow 60 \rightarrow 20(^{\circ}\text{C})$)を3回与えた。設定温度は24時間ごとに変更した。ただし最初の温度上昇時は二次圧密挙動を調べるため122時間圧密した。

Tcf, Tvf 試験から 20°C と 60°C での間隙比変化量を比較した。図2に圧密履歴を与えた後の間隙比変化量と圧密圧力の関係を示す。比較のため、 $p=19.6\text{ kPa}$ 載荷直前の値を基準とした間隙比変化量を縦軸にとった。図2より、高温で試験すると圧縮性が大きくなることが分かる。圧縮指数および圧密降伏応力は、Tcf 試験では $C_c=0.295$, $p_c=87\text{ kPa}$, Tvf 試験では $C_c=0.394$, $p_c=115\text{ kPa}$ となった。どちらの値も Tvf 試験の方が大きい。図3に圧密圧力と二次圧縮速度の関係を示す。どの荷重段階においても高い温度で試験すると二次圧縮速度は大きくなる。因みに正規圧密状態において、 60°C の二次圧縮速度は 20°C での値より約2倍大きい。

下式¹⁾により加熱による二次圧密の促進を定量的に評価した。

$$\Delta T = \frac{1}{C_{\Delta T}} \left[C_{\alpha 0} \log \left(\frac{t_0 + \Delta t_c}{t_0} \right) + C_{\alpha'} \log \left(\frac{t_0 + \Delta t_{\Delta T}}{t_0} \right) \right]$$

ここに、 $C_{\Delta T}$: 温度変化による間隙比の減少率, $C_{\alpha 0}$: 基準温度 T_0 での二次圧縮速度, $C_{\alpha'}$: 温度 $T_0 + \Delta T$ での二次圧縮速度, t_0 : 基準温度 T_0 での圧密時間, $\Delta t_{\Delta T}$: 加熱後の圧密時間, Δt_c : 二次圧密時間。

図4に示すTvr試験における初期の温度上昇による間隙比減少量と温度の関係から間隙比減少率 $C_{\Delta T}$ を、この間に要した時間から $\Delta t_{\Delta T}$ を求めた。本研究に用いた試料(カオリン)は二次圧縮速度が温度に依存する傾向にあった(図3)。したがって、 $C_{\alpha 0}$ を Tvr 試験における $p=157\text{ kPa}$ 載荷時(温度変化前)の間隙比と経過時間の関係から、 60°C での $C_{\alpha'}$ を初期温度上昇時の間隙比と経過時間の関係からそれぞれ求めた。温度上昇に対する二次圧縮速度の変化率から傾きを求め、温度と二次圧縮速度 $C_{\alpha'}$ の関係を求めた。しかし、本研究において、温度は 20°C と 60°C しか与えていないため、この仮定の妥当性は評価できない。二次圧縮速度の温度依存性については、今後解明していく必要がある。

図5に温度変化量 ΔT と二次圧密時間 Δt_c の関係を示す。過去の研究²⁾の結果も示した。例えば、カオリンでは温度を 20°C 上昇させて122時間圧密した時の間隙比変化量は、室温で150年間に生じる二次圧密量に相当する。この図の関係は試料の性質だけでなく、高温で圧密した時間 $\Delta t_{\Delta T}$ 等の試験条件に依存する。本研究の試験条件、即ち $\Delta T=39.4^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{\Delta T}=122$ 時間に限定すると、対応する Δt_c は 8.46×10^6 年である。

5. 結論

ベントナイトの熱膨張率はカオリンの熱膨張率より十倍以上高い。この違いは含まれている粘土鉱物の性質の違いであると考えられる。カオリンの二次圧縮速度は温度に依存して増加する傾向にある。正規圧密状態における二次圧縮速度は、 60°C の方が約2倍大きい。 20°C で150年間に生じる間隙比減少量を、温度を 20°C 上昇させて約5日間圧密することによって実現できると推定した。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費(14550503, 代表 柴田徹)の補助を受けて遂行した。

参考文献 1)清水・神戸：加熱による粘性土の二次圧密促進の定量的評価，土木学会第52回年次学術講演会ⅢA, pp.326-327, 1997. 2)清水・田中：粘性土の一次元圧縮挙動における温度・時間効果の定量的評価，第36回地盤工学会研究発表会, pp.985-986, 2001.

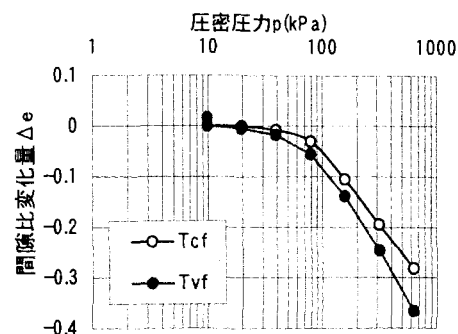


図2 間隙比変化量の比較

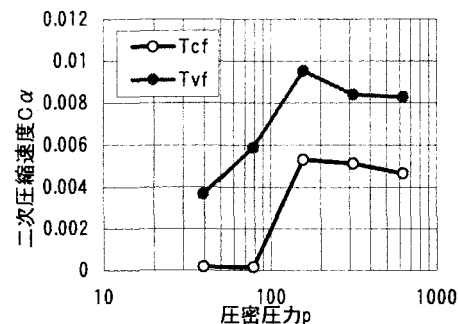


図3 圧密圧力と二次圧縮速度の関係

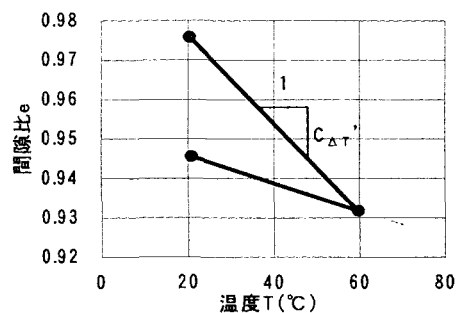


図4 間隙比減少量と温度の関係

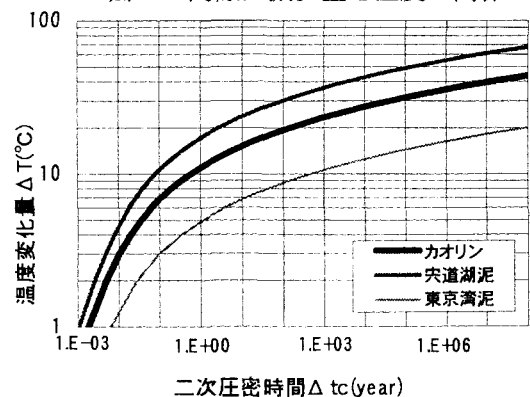


図5 温度変化量 ΔT と二次圧密時間 Δt_c の関係