

粘性土の温度変化時の圧縮特性評価における土粒子の熱膨張の影響

Effects of the thermal expansion of soil grains in assessing the deformation due to temperature change for cohesive soils

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学工学部)
田中 淳 Jun TANAKA (鳥取大学大学院工学研究科)

温度変化に伴う飽和土の体積変化量が間隙水と土粒子の熱膨張の影響を受けることを理論的に示した。土粒子の熱膨張率を土粒子密度試験に基づいて決定した。また、長さ測定が可能な金属材料を用いて、密度試験と長さ測定の両方法から熱膨張率を決定し、密度試験から熱膨張率を決定する方法の精度について考察した。その結果、土粒子密度試験から決定した広島湾海底粘土の土粒子の熱膨張率は $6\sim 9 \times 10^{-4} (\text{C}^{-1})$ となった、密度試験から熱膨張率を求めると10倍程度過大に評価される可能性がある、などの結果を得た。

キーワード：粘土，土粒子密度，温度，熱膨張，圧密，間隙比 (IGC : D08, D05)

1. 序論

化学的な地盤改良や放射性廃棄物の地中処理などによって地盤が高温環境に置かれることがある。また、粘土を加熱すると圧密が加速され、自然堆積粘土のもつ年代効果を短期間で実験室において再現できる可能性が示唆されている¹⁾²⁾³⁾。

飽和した土供試体の温度を上昇(低下)させると、土粒子と間隙水は熱膨張(圧縮)する。本研究の目的は、温度が変化するような状況で飽和土の変形特性を論じる上で、土粒子の熱膨張を考慮することの影響を評価することである。

本論文では、まず、温度変化に伴う飽和土の体積変化量が間隙水と土粒子の熱膨張の影響を受けることを理論的に示す。次に、土粒子の熱膨張率を土粒子密度試験に基づいて決定する方法と実験の結果を示す。最後に、長さ測定が可能な金属材料を用いて、密度試験と長さ測定の両方法から熱膨張率を決定し、密度試験から熱膨張率を決定する方法の精度について考察する。

2. 間隙比に対する熱膨張の影響

飽和土の温度を T から $T' (=T + \Delta T)$ に変化させた場合を考える。供試体全体の体積を V 、間隙水の体積を V_w 、土粒子の体積を V_s とおく。以下温度 T' における値に「'」を付けて、温度 T における値と区別する。

温度変化 ΔT によって、排水量 $\Delta V_{DR}'$ が生じたとする、間隙水および土粒子の質量保存則から、次の条件が満たされなければならない。

$$\rho_w'(\Delta V_{DR}' + V_w') = \rho_w V_w \quad (1)$$

$$\rho_s' V_s' = \rho_s V_s \quad (2)$$

ただし、排水量測定装置の温度と供試体内の温度が等しいと仮定した。構成式の熱的性質として次の関係を考慮する。

$$\rho_w' = \frac{\rho_w}{1 + \alpha_w \Delta T} \quad (3)$$

$$\rho_s' = \frac{\rho_s}{1 + \alpha_s \Delta T} \quad (4)$$

ここに α_w と α_s は間隙水と土粒子の熱膨張率である。式(1)と式(3)を、式(2)と式(4)をそれぞれ組み合わせることにより、次の式を導くことができる。

$$V_w' = -\Delta V_{DR}' + (1 + \alpha_w \Delta T) V_w \quad (5)$$

$$V_s' = (1 + \alpha_s \Delta T) V_s \quad (6)$$

したがって供試体体積変化量 $\Delta V = (V_s' + V_w') - (V_s + V_w)$

は、次式で与えられる。

$$\Delta V = (e\alpha_w + \alpha_s) \Delta T V_s - \Delta V_{DR}' \quad (7)$$

式(7)は、供試体が飽和していても、温度が変化すると供試体の体積変化量は排水量に等しくならないことを表わしている。

例えば、三軸圧縮試験では、測定するのは $\Delta V_{DR}'$ であるので、 ΔV の評価には α_s と α_w の値を知る必要がある。

一方、側方拘束の一次元圧縮試験では、圧密リング内径が熱によって変化することに起因する供試体高さの変化量は無視できるほど小さいので(付録参照)、測定される供試体高さの変化量から、式(7)によらず、すなわち α_s や α_w に関係なく、 ΔV を決定できる。ただし、測定された供試体高さの変化には、装置自体の鉛直方向の熱変形量を含んでいるので補正する必要がある。因みに、圧密リング内径の変化による供試体高さに対する影響は高々0.05mm程

度である(付録参照)が、装置自体の鉛直方向の熱変形量はその10倍の0.5mm程度である⁴⁾。

なお、式(7)はCampanella & Mitchell⁵⁾によって導かれた式と同じである。彼らは、式(5)と式(6)を直接与えて式(7)を導いた。

次に、式(5)、(6)、(7)に基づいて、間隙比の変化量 $\Delta e (=e'-e)$ を評価する。式(5)と式(6)より、

$$e' = \frac{V_w'}{V_s'} = \frac{1}{1 + \alpha_s \Delta T} \left\{ -\frac{\Delta V_{DR}'}{V_s} + (1 + \alpha_w \Delta T)e \right\} \quad (8)$$

よって、 $\Delta e (=e'-e)$ は

$$\Delta e = \frac{1}{1 + \alpha_s \Delta T} \left\{ \frac{\Delta V}{V_s} - (1 + e)\alpha_s \Delta T \right\} \quad (9)$$

ここに式(7)の関係を用いた。式(9)は、間隙比の変化を正しく評価するためには土粒子の熱膨張率 α_s を考慮する必要があることを示している。

土粒子の熱膨張率を考慮しない場合、即ち $\alpha_s = 0$ と仮定した場合に生じる間隙比変化量に含まれる誤差の程度を評価する⁶⁾。 $\alpha_s = 0$ と仮定したときの間隙比変化量を $\overline{\Delta e}$ 、誤差の割合を β とおくと、

$$\overline{\Delta e} = \Delta e_{\alpha_s = 0} = \frac{\Delta V}{V_s} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\overline{\Delta e} - \Delta e}{\Delta e} = \frac{\alpha_s \Delta T}{1 + \alpha_s \Delta T} \cdot \frac{1 + e + \overline{\Delta e}}{\Delta e} \quad (11)$$

例えば $\alpha_s = 5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $e = 1.0$ の供試体に $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ を与えたときに $\overline{\Delta e} = 0.010$ と測定されたとすると、式(10)より $\beta = 0.2$ となつて、間隙比変化量には20%の誤差が含まれることになる。

3. 土粒子の熱膨張率測定原理

(1)熱膨張率の定義

一般に熱膨張率は2通りの方法で定義することができる。一つは接線熱膨張率 α_s' で、現在の状態 $V_s(T)$ を基準として温度が dT だけ変化したときの膨張量を評価するものである。式で表すと

$$\frac{V_s(T+dT) - V_s(T)}{V_s(T)} = \alpha_s' dT \quad (12)$$

で定義される。 $dV_s = V_s(T+dT) - V_s(T)$ とおいて積分すると

$$\ln \frac{V_s(T)}{V_s(T_0)} = \alpha_s' (T - T_0) \quad (13)$$

ここに、 $V_s(T_0)$ は温度 T_0 のときの土粒子実質部分の体積。他は割線熱膨張率 α_s で、ある温度 T_0 における体積 $V(T_0)$ を基準として膨張量を評価するものである。式で表すと

$$\frac{V_s(T) - V_s(T_0)}{V_s(T_0)} = \alpha_s (T - T_0) \quad (14)$$

α_s や α_s' は一般に温度によって変化する。式(13)は α_s' を一定として積分したので、式(13)より α_s' を評価するためには、 T と T_0 の差が十分小さいことが必要である。一方、式(14)の定義においては α_s の温度依存性については何ら

制限を設けていないが、式(14)から α_s を決定する場合には T_0 と T を明らかにする必要がある。

(2)熱膨張による土粒子密度の変化

温度 $T=T_0$ における量に添え字'0'を付ける。

土粒子の質量保存法則から、

$$\rho_{s0} V_{s0} = \rho_s(T) V_s(T) \quad (15)$$

または

$$\frac{V_s(T)}{V_{s0}} = \frac{\rho_{s0}}{\rho_s(T)} \quad (16)$$

の関係がある。式(16)と式(14)より、

$$\frac{\rho_{s0}}{\rho_s(T)} - 1 = \alpha_s (T - T_0) \quad (17)$$

同様に式(16)と式(13)より

$$\ln \left\{ \frac{\rho_{s0}}{\rho_s(T)} \right\} = \alpha_s' (T - T_0) \quad (18)$$

の関係を導く。

式(17)および式(18)は、土粒子密度と温度の関係を測定することによって、接線または割線熱膨張率を決定できることを表している。

4. 試験方法

(1)土粒子密度試験方法

容量50mlのゲーリュサック形ピクノメーター、同容量のワードン形ピクノメーターおよび容量100mlの三角フラスコを用いて土粒子密度を測定した。

容量100mlのフラスコを用いたのは次の理由による。

- 容量の小さいピクノメーターを用いると、ピクノメーターおよび内容物の温度と外気温度の差の影響を受け易く、外気温より高い温度におけるピクノメーターおよび内容物の質量を正確に測定するのが困難であった。そこで、外気温度との差の影響を受け難くするために容量の大きな100mlフラスコを用いた。

- また、土粒子の熱膨張率は $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ のオーダーであることが予想されるので、式(17)より 100°C の温度変化に対して密度は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ のオーダーで変化する。したがって密度は高い精度で測定する必要がある。精度は土粒子の量が多いほど高くなると考えられるので、容量の大きいフラスコを用いた。

なお、ピクノメーターを用いる方法は「土粒子の密度試験方法(JIS A 1202)」に、フラスコを用いる方法は「細骨材の比重試験(JIS A 1109)」に準じた。

容器の種類によらず温度 T における土粒子の密度 $\rho_s(T)$ は次式で与えられる。

$$\rho_s(T) = \frac{M_s}{M_s + M_a(T) - M_b(T)} \times \rho_w(T) \quad (19)$$

ここに、 $M_a(T)$ は容器を水で満たしたときの容器と水の質量、 $M_b(T)$ は容器を水と土粒子で満たしたときの容器と内容物の質量である。いずれも温度 T の関数である。

同一温度で、 M_a と M_b を測定することは容易でない。そこで、本研究では、 M_a と T 、および M_b と T の関係を別々に測定しておき、その関係を数式で近似することによって、同一温度における M_a と M_b を決定した。

M_a と温度の関係を求める場合を例にして具体的な手順を述べる。

1. 容器に脱気水を入れ、それをある温度に設定した恒温炉内に入れる。このとき脱気水を入れたピーカーも恒温炉内に準備しておく。
2. 容器内の温度が一定になったとき、気泡が入らないように容器を同温度の水（ピーカーの水）で満たしてから、それを恒温炉から取り出し、即座に、 M_a および容器内の水の温度 T を計る。
3. 水で満たした容器を再び恒温炉内に入れ、設定温度を変える。
4. 上記2、3の作業を何回か繰り返し、 M_a と T の関係を求める。

M_b と温度の関係を求める場合は、上記手順において、脱気水を「脱気水+土粒子」に置き換えればよい。

M_b の測定においては内容物の脱気が重要である。煮沸のみによって脱気する方法と煮沸と真空脱気を併用する方法を採用した。ピクノメーターを用いたときは後者の方法で、フラスコを用いた場合は両方法で脱気した。

(2)土粒子密度試験の精度評価の方法

密度試験から熱膨張率を測定する方法の精度を評価するために、熱膨張率が既知の材料を用いて、密度試験を行うとともに長さ測定によって直接熱膨張率を測定した。

密度試験は土粒子密度試験法と同様の手順で行った。また、長さ測定にはマイクロメーターとレーザー変位計を用いた。材料はステンレス鋼円柱棒（直径 6mm；長さ約 74mm）である。

a マイクロメーターを用いる方法

20℃における軸方向の長さを基準長さとした。測定には4本のステンレス鋼を用いた。温度測定は熱電対を用いた。測定は次の手順で行った。

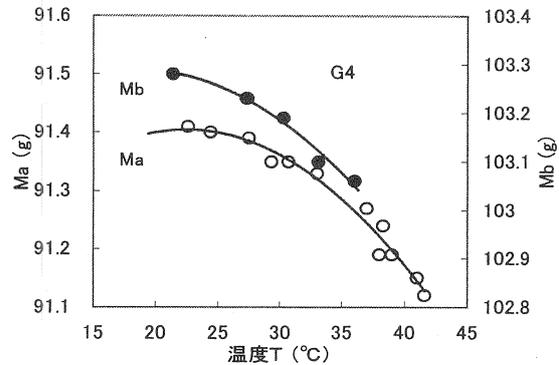
1. 水を満たした恒温容器の中に、ステンレス鋼（4本）を入れる。
2. 恒温容器の温度をある温度に設定し、水温がその温度になるまで待つ。
3. 温度が設定温度になったところで、ステンレス鋼の軸方向の長さをマイクロメーター（以下 M.M と略す；最小読み取り 1/100mm）で測定する。
4. 設定温度を変えて上記2と3を繰り返す。

測定はステンレス鋼を水中に入れたまま、マイクロメーターを用いて行った。

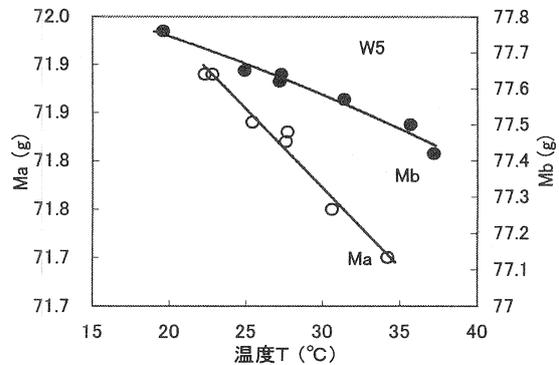
b レーザー変位計を用いた方法

測定は以下の手順で行った。

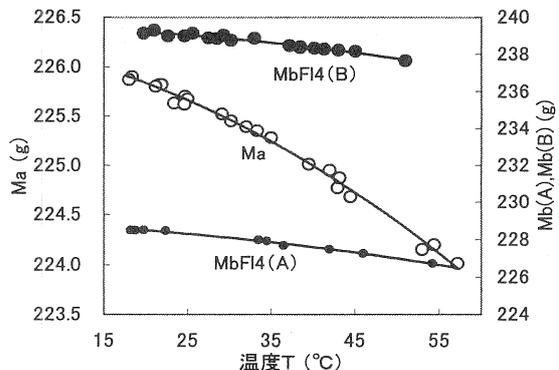
1. 水を入れないで恒温容器にステンレス鋼（一本）を容器底面と垂直になるように接着する。水を注ぎステンレス鋼の上部が水面からわずかに上に出るようにして、上面が濡れないようにした。これは、レーザー反射体が水に濡れているとレーザーが偏光し、測定結果に影響するためである。また、ステンレス鋼上面での温度が水温とほぼ等しくなるようにステンレス棒上端と水面の差はできるだけ小さくした。
2. 恒温容器の温度を 80℃程度に設定し、2時間程度放置して設定温度になったところで、電源を切り自然冷却させた。
3. 自然冷却の過程で、熱電対を用いてステンレス鋼から 1mm 程度離れた場所の温度を測定した。それと同時にレーザー変位計（分解能 1/1000mm）の読みを測定した。



(a)ゲーリュサック形ピクノメーター



(b)ワードン形ピクノメーター



(c)フラスコ(A:煮沸, B:煮沸+真空脱気)

図1 土粒子密度試験の結果

計測にはデータロガーを用いた。

温度とレーザー変位計の読みの関係から、温度と軸変位量の関係を求め、線熱膨張率を算定した。

5. 結果と考察

(1)土粒子密度試験の結果

広島湾で採取した海底粘土(広島湾泥)に対して行った結果を示す。図1(a), (b), (c)に M_a および M_b と T の関係を示す。(a)はゲーリュサック形ピクノメーター, (b)はワードン形ピクノメーター, (c)はフラスコを用いた場合の結果である。プロットは M_a および M_b の測定値を表し、曲線は2次関数による回帰曲線である。試験は、同じ種類の容量に対して複数個のサンプルに対して行ったが、ここでは代表的な結果のみを示した。(G4, W5, FI4 は測定装置の種類)

図2は、図1の結果を式(19)に代入して求めた土粒子の密度 ρ_s と温度 T の関係である。なお、 ρ_s と T の関係において温度上昇とともに密度が上昇するような物理的に不合理な試験結果も得られたが、そのような結果は除外し、温度上昇とともに密度が減少するもののみを結果として扱っている。

図3は式(17)を検定するために、 $\rho_{s0}/\rho_s - 1$ を温度変化量に対してプロットしたものである。また図4に式(18)を検定するために $\ln(\rho_{s0}/\rho_s)$ と温度変化量に対してプロットした。図3と図4において、各曲線の勾配が α_s と α'_s に相当するが、いずれも T によって変化している。実際、式(17)と式(18)より、 α_s と α'_s をそれぞれ計算し、温度に対して示すと図5と図6の結果を得た。図6においては、図4の $\ln(\rho_{s0}/\rho_s)$ と $(T-T_0)$ の関係が曲線であったため、温度 T_0 は固定した値を用いず、 T_0 を 1°C ずつ変えて、かつ温度変化量 1°C に対する α'_s を計算し T_0 に対してプロットしている。

土粒子密度試験による熱膨張率の範囲は、図5から割線熱膨張率 $\alpha_s = 2.980 \times 10^{-5} \sim 1.883 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (平均値 $5.990 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)、また図6から接線熱膨張率 $\alpha'_s = 2.980 \times 10^{-5} \sim 2.358 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (平均値 $9.260 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) となった。

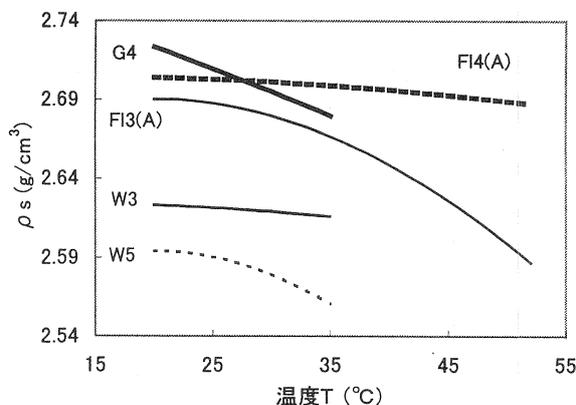


図2 土粒子密度 ρ_s と温度 T の関係

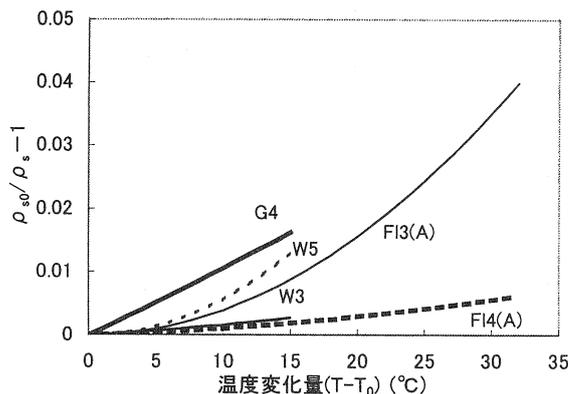


図3 $\rho_{s0}/\rho_s - 1$ と温度変化量 $T-T_0$ の関係 ($T_0=20^\circ\text{C}$)

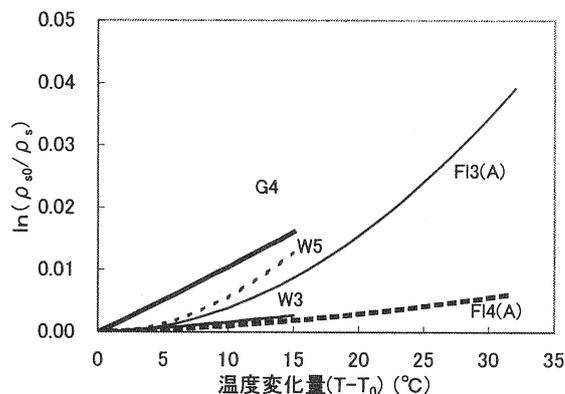


図4 $\ln(\rho_{s0}/\rho_s)$ と温度変化量 $T-T_0$ の関係 ($T_0=20^\circ\text{C}$)

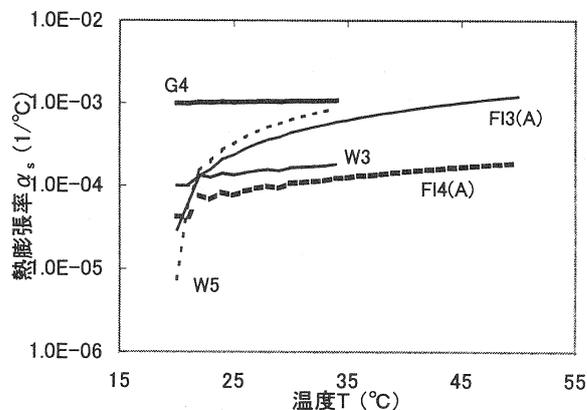


図5 割線熱膨張率 α_s と温度 T の関係(縦軸は対数目盛)

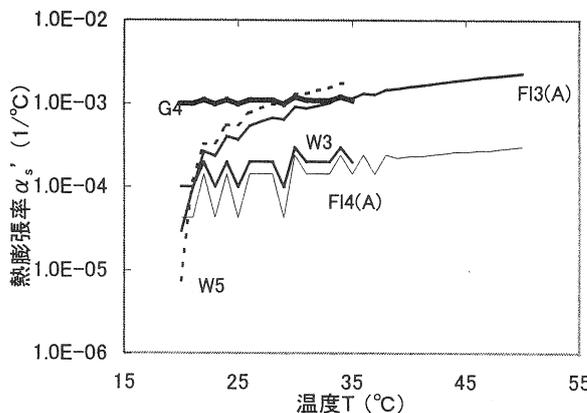


図6 接線熱膨張率 α'_s と温度 T の関係(縦軸は対数目盛)

(2) 土粒子密度試験結果に対する影響要因

図1の M_a および M_b と温度 T の関係から、温度が上昇すると、 M_a と M_b が減少することがわかる。逆に温度が低下すると M_a と M_b が増加する。これは、水および水+土粒子の熱膨張率が容器よりも大きいためである。

乾燥炉から取り出してすばやく質量と温度の測定を行ったが、外気温度との差の影響を避けることが出来ず、したがって M_a と M_b を過小評価している可能性がある。 M_a と M_b を測定する場合において、例として、簡単のため M_b だけ過小評価したとしてその影響を調べる。 $T=35^\circ\text{C}$ の測定値は $M_b=103.05\text{g}$ であった(図1(a))。それに基づいて $\rho_s=2.680\text{g/cm}^3$ 、 $\alpha_s=1.084\times 10^{-3}\text{C}^{-1}$ と決定された。 M_b を0.01 および0.1だけ過小評価していた場合を想定して、測定値を0.01 および0.1だけ増加させると、 ρ_s と α_s は表1に示したように変わる。表1より、 M_b を過小評価したことによって熱膨張率を過大評価することになる。

その他、質量測定器の感量や、質量測定時の容器外周の水のふき取り方などが影響すると考えられる。

表1 熱膨張率に及ぼす M_b 測定誤差の影響

$T=35^\circ\text{C}$	$M_b(\text{g})$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$\alpha_s(\text{C}^{-1})$
測定値 (図1(a))	103.05	2.680	1.084×10^{-3}
試算値	103.06	2.684	9.869×10^{-4}
	103.15	2.719	1.111×10^{-4}

文献⁷⁾によれば、種々の岩石の線熱膨張率は $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{C}^{-1}$ の範囲にある。一方、本研究の結果、土粒子の密度試験から求めた土粒子の熱膨張率(図5、図6)は、 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{C}^{-1}$ の範囲にあり、線膨張率に換算しても岩石の熱膨張率より概略10倍大きい。この差は、岩石と本研究で使用した粘土の鉱物組成が異なることや、上述の密度試験の精度の限界によると考えることが出来る。後者の影響について、ステンレス鋼を用いた試験結果から次節で述べる。

(3) 密度法による熱膨張率の測定精度(ステンレス鋼の熱膨張率)

a. 密度試験に基づく結果

ステンレス鋼の密度試験から得られた、 M_a および M_b と T の関係や、 $\rho_{s0}/\rho_s - 1$ および $\ln(\rho_{s0}/\rho_s)$ と温度変化量($T - T_0$)の関係は、土粒子密度試験から得られた関係と傾向が同じであるので省略する。後述の図9に密度試験より決定したステンレス鋼の割線熱膨張率を示している。 $\alpha = 4.600\sim 6.806\times 10^{-4}\text{C}^{-1}$ (平均値 $\alpha = 5.834\times 10^{-4}\text{C}^{-1}$) となった。

b. 長さ測定に基づく結果

マイクロメーターによるステンレス鋼の長さとの関係を図7に示す。ステンレス鋼の長さは温度とともに上

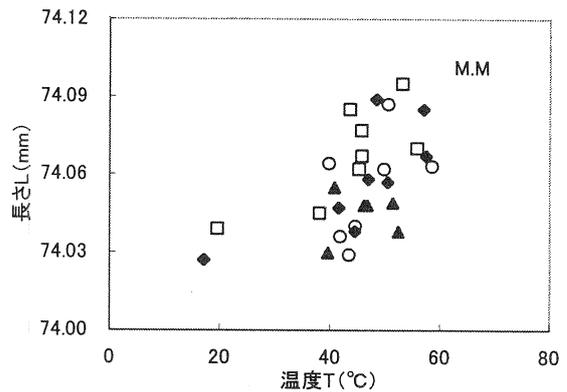


図7 ステンレス鋼の長さとの関係(マイクロメーター)

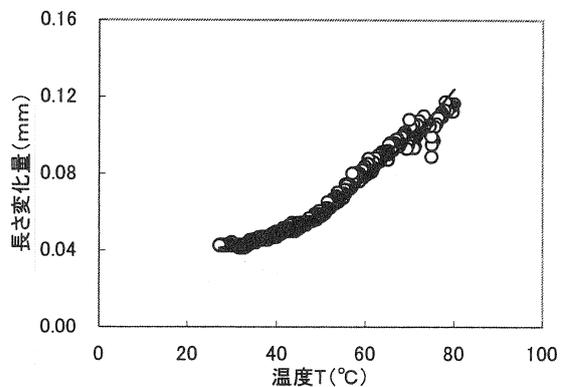


図8 ステンレス鋼の長さ変化量との関係(レーザー変位計)

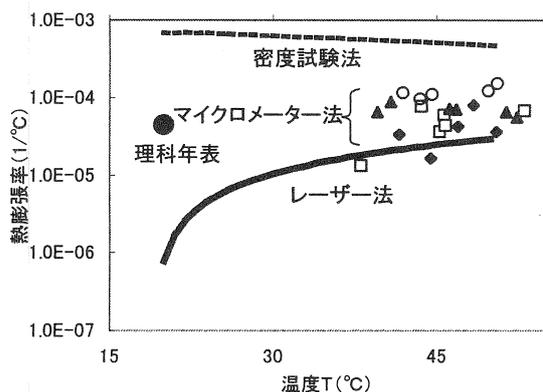


図9 ステンレス鋼の熱膨張率との関係(縦軸は対数目盛)

昇している。これからステンレス鋼が温度上昇とともに膨張していることが分かる。このデータから換算した熱膨張率(割線)を図9に示す。図9から $\alpha = 6.972\times 10^{-5}\sim 1.150\times 10^{-4}\text{C}^{-1}$ (平均値 $\alpha = 6.901\times 10^{-5}\text{C}^{-1}$) となった。レーザー

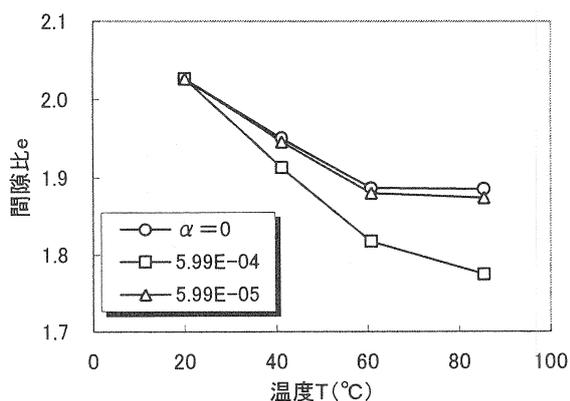


図 10 間隙比と温度の関係⁹⁾

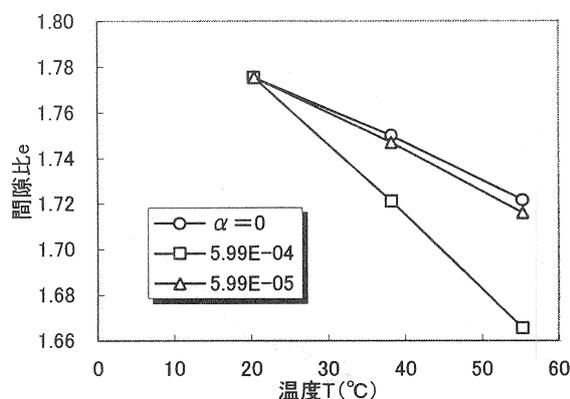


図 11 間隙比と温度の関係³⁾

変位計で計測した長さ変化量と温度の関係を図 8 に示す。温度上昇とともに長さ変化量が増加している。特に、40～70℃の範囲では直線とみなすことができる。このデータから熱膨張率(割線)を計算した結果を図 9 に示した。αの平均値は $1.498 \times 10^{-5} \text{°C}^{-1}$ となった。

図 9 において、マイクロメーターおよびレーザー変位計による長さ測定から決定した熱膨張率と密度試験から求めたものを比較している。図には理科年表に記された値も示している。密度試験から求めた熱膨張率のオーダーが 10^{-4}°C^{-1} であるのに対して、その他の方法で決定した値はほぼ 10^{-5}°C^{-1} のオーダーにあることが分かる。結局、密度試験から熱膨張率を推定すると最大で 10 倍ほど過大に評価するといえる。

(4) 間隙比と温度の関係

ある荷重のもとで温度を変化させるような圧密試験の結果に対して土粒子の熱膨張を考慮することの効果について示す。広島湾泥に対して行った 2 つの試験結果を例示する。

圧密試験は通常の圧密容器を温度調節可能な恒温容器内に設置して最終圧密圧力 $31.36 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ を載荷後 24 時間経過した後に、圧密圧力一定のまま温度を 20℃から 55℃または 80℃まで変化させたものである。設定温度は 20℃ずつ 24 時間ごとに変化させた。いずれの試験も片面排水

条件で行い、水浸には海水を用いた³⁾⁹⁾。

試験より求めた間隙比を土粒子の熱膨張率を考慮に入れて式(9)で補正した。図 10 と図 11 は、土粒子の熱膨張を無視した場合 ($\alpha_s = 0$)、土粒子密度試験の結果に基づいた場合 ($\alpha_s = 5.99 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$) および前節の考察結果を考慮して土粒子密度試験に基づく値を 10 分の 1 倍した場合 ($\alpha_s = 5.99 \times 10^{-5} \text{°C}^{-1}$) について、間隙比と温度の関係を表している。これらの図から、土粒子の熱膨張率を考慮することによって、考慮しない場合に比べて間隙比は小さくなる。言い換えると土粒子の熱膨張を考慮しない場合、間隙比を大きく見積もってしまうことが分かる。

6. 結論

粘土試料に対して土粒子密度と温度の関係を測定し、その結果に基づいて土粒子の熱膨張率を決定した。密度測定から熱膨張率を求める方法の精度を評価するために、熱膨張率が既知な材料(ステンレス)に対して密度試験および長さ測定を実施し、両方法に基づいた熱膨張率の値を比較した。

得られた主な結論は以下のようである

(1) 用いた粘土試料(広島湾海底粘土)の土粒子の熱膨張率は、20～50℃の範囲で、割線熱膨張率が $\alpha_s = 2.980 \times 10^{-5} \sim 1.883 \times 10^{-3} \text{°C}^{-1}$ (平均値 $5.990 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$) となった。また接線熱膨張率が $\alpha_s' = 2.980 \times 10^{-5} \sim 2.358 \times 10^{-3} \text{°C}^{-1}$ (平均値 $9.260 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$) となった。

(2) 密度-温度関係から求めた熱膨張率は長さ測定から求めたものに比べて 10 倍程度過大になる可能性がある。

(3) 実験によって得られた間隙比と温度の関係において、ある温度に対する間隙比は、土粒子の熱膨張を考慮すると考慮しない場合に比べて、小さくなる。従って熱膨張を考慮しないと、温度変化に対する間隙比減少率は過小に評価される。

謝辞

本研究は文部省科学研究費(基盤研究 C(2)10650485; 代表清水正喜)の補助を受けて行った。

参考文献

- 1) 地盤工学会:委員会報告, 高温環境と土-粘土の微視構造から廃棄物の地中処分問題まで-シンポジウム発表論文集, pp.1-56, 1997
- 2) 清水正喜・神戸砂織:「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 回年次学術講演会講演概要集第 3 部(A)pp.326~327, 1997
- 3) 清水正喜・藤原研也:高塑性海成粘土の圧密における温度効果の定量的評価, 土木学会中国支部第 50 回研究発表会発表概要集第 3 部 pp.289~290, 1998

- 4) 清水正喜, 岩成敬介, 土井崇嗣: 温度変化時の粘土の1次元変形挙動, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.354-355, 1996
- 5) Campanella, R. G. and Mitchell, J. K.: Influence of temperature variations on soil behavior, J. SMFE, Div., ASCE, Vol.94, No.3, pp.709-734, 1968
- 6) 清水正喜: 温度変化を伴う一次元圧密試験の技術的問題, 第32回地盤工学研究発表会 pp.375~376, 1997
- 7) 木下直人, 安部透, 奥野哲夫: 高温, 拘束圧下における火成岩の熱膨張特性, 土木学会論文集 No.511Ⅲ-30, pp.69-78, 1995
- 8) 木下直人, 安部透: 高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性, 土木学会論文集 No.517Ⅲ-31, pp.53-62, 1995
- 9) 清水正喜・田中淳: 粘土粒子の熱膨張率の測定とその精度評価, 土木学会中国支部研究発表会, pp.421-422, 1999

付録

温度変化による圧密リングの内容積変化を評価し, 次に内容積変化に起因する供試体高さの変化量を試算する.

圧密リングが拘束を受けずに熱変形し, 円周方向の変位が発生しないと仮定する. このとき, 円周方向のひずみ (ϵ_θ) は

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (A1)$$

で与えられる. ここに r はリング中心からの距離, u はその位置での半径方向の変位. 熱変形が等方的と仮定すると, 温度変化 ΔT による円周方向のひずみ ϵ_θ は

$$\epsilon_\theta = \alpha \Delta T \quad (A2)$$

となる. ここに α は圧密リング材質の線熱膨張率. よって $u = r\alpha\Delta T$.

$$(A3)$$

この式より圧密リング内径を R とすると, 圧密リング内径は, $\Delta R = R\alpha\Delta T$ だけ変化する. いま, $R=30\text{mm}$, $\Delta T=60^\circ\text{C}$ また, 圧密リング材質をステンレス鋼とし, その線膨張率を大きく見積もって $\alpha=2.0\times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ の場合について ΔR を試算すると, $\Delta R=0.036\text{mm}$ となる.

リング内径が変化すると供試体体積が変化しなくても供試体高さが変化する. 温度変化前と後の, 圧密リング内径を R , $R' (=R+\Delta R)$, 供試体高さをそれぞれ H , $H' (=H+\Delta H)$ とおくと, 供試体体積が一定の条件より

$$\Delta H = H' - H = H \frac{\xi}{1+\xi} \quad (A4)$$

ここに

$$\xi = \frac{2\Delta R}{R} + \frac{(\Delta R)^2}{R^2} \quad (A5)$$

式(20)は土の体積変化がなくても, 温度変化 ΔT により生じる供試体高さの変化量を表す. 先の条件に加えて $H=20\text{mm}$ として ΔH を試算すると $\Delta H=0.048\text{mm}$ となる.