

1. はじめに 粘土の含水比を短時間で低下させることのできる真空蒸発法^{1)~3)}を圧密再構成粘性土に適用し, 含水比低下に伴う収縮特性として $w \sim e$, $w \sim V/V_0$ および $w \sim S_r$ の関係について検討した。

2. 真空蒸発法と試験概要 真空蒸発法^{1)~3)}は, 供試体を静置した真空デシケーター内を水の飽和蒸気圧 p_e (室温 $T=23^\circ\text{C}$ において $p_e=-98.5 \text{ kPa}$) 付近である真空圧 $p_v=-96 \text{ kPa}$ ($\approx 0.97p_e$) 程度に減圧することにより, 間隙水を蒸発させて, 短時間で含水比を低下(不飽和化)させる方法である。試料にはカオリン粘土(土粒子密度 $\rho_s=2.630 \text{ g/cm}^3$, 塑性指数 $I_p=37.2$, 液性限界 $w_L=72.6\%$, 塑性限界 $w_p=35.4\%$, 収縮限界 $w_s=35.2\%$, 粘土分含有率 $CF=79.7$)を用いた。純水を加えて練り返したスラリー試料を所定の圧密圧力 ($p_0=49 \sim 294 \text{ kPa}$) で一次元圧密した圧密再構成試料(初期含水比 $w_0=50.3 \sim 68.0\%$) から, 小型供試体(初期直径 $d_0 \approx 2.4 \text{ cm}$, 初期高さ $h_0 \approx 1.6 \text{ cm}$, 初期表面積 $A_{s0}=20 \sim 21 \text{ cm}^2$) および大型供試体($d_0=5.0 \sim 8.1 \text{ cm}$, $h_0=3.8 \sim 6.0 \text{ cm}$, $A_{s0}=113 \sim 205 \text{ cm}^2$) を作製した。真空蒸発法($p_v=-93.5 \sim -97.5 \text{ kPa}$) を適用した後, 所定時間ごとに供試体の質量, 直径および高さを測定し, 含水比 w , 体積 V , 間隙比 e および飽和度 S_r を算定した。

3. 試験結果および考察 図-1(a)~(c)に $w \sim V/V_0$, $w \sim e$ および $w \sim S_r$ の関係を示す。真空蒸発法を適用することにより, これらの連続的な関係を短時間で容易に求めることが出来る。図-1(a)に示すように, $w \sim V/V_0$ 関係は, 初期含水比 w_0 毎に異なる関係となり, w_0 が低いほど上方に移動する。いずれの w_0 においても, $w \sim V/V_0$ 関係は含水比の低下とともに直線的に減少し, 収縮限界(w_s) 付近以下では体積変化がほとんど生じない無収縮の状態となる。図-1(b)に示すように, $w \sim e$ 関係は $w \sim V/V_0$ 関係と同様に w_0 から直線的に減少し, w_s 付近以下では条件によらず一定値 $e_{\min}$ に収束する。図-1(c)に示すように, $w \sim S_r$ 関係は, w_0 毎に $S_r=100\%$ から $S_r \approx 90\%$ まで減少する直線となる。 $S_r < 90\%$ では条件によらず原点を通る1本の直線となる。

4. 含水比低下に伴う収縮特性のモデル化 図-1(a)~(c)の関係に基づいて, 圧密再構成粘土の含水比低下に伴う $w \sim e$, $w \sim V/V_0$ および $w \sim S_r$ の関係を図-2 に示すようにそれぞれ二本の直線によりモデル化する。図-2(a)に示すように, $w \sim e$ 関係を $S_r=S_r^*$ と $e_{\min}$ の交点で折れ曲がる二本の直線によりモデル化する。これまでの実験結果より S_r^* はおよそ 90% である。 S_r^* における含水比を w_s^* とすると, 両者の関係は式(1)で表される。

$$w_s^* = \frac{e_{\min} \cdot S_r^*}{G_s} \quad (1)$$

$w \geq w_s^*$ における $w \sim e$ 関係は, 含水比の低下に伴って e は初期含水比 w_0 から減少し, 式(2a)で評価する。 $w < w_s^*$ の範囲では $e_{\min}$ で一定となり, 式(2b)で評価する。

$$\frac{e - e_{\min}}{e_0 - e_{\min}} = \frac{w - w_s^*}{w_0 - w_s^*} \quad (w \geq w_s^*) \quad (2a)$$

$$e = e_{\min} \quad (w_s^* > w) \quad (2b)$$

図-2(b)に示すように, $w \sim V/V_0$ 関係も $w \sim e$ 関係と同様に二本の直線によりモデル化する。 $w \geq w_s^*$ の範囲では, 含水比の低下に伴って V/V_0 は初期含水比 w_0 から減少し, 式(3a)で評価する。 $w < w_s^*$ の範囲では $(V/V_0)_{\min}$ で一定となり, 式(3b)で評価する。

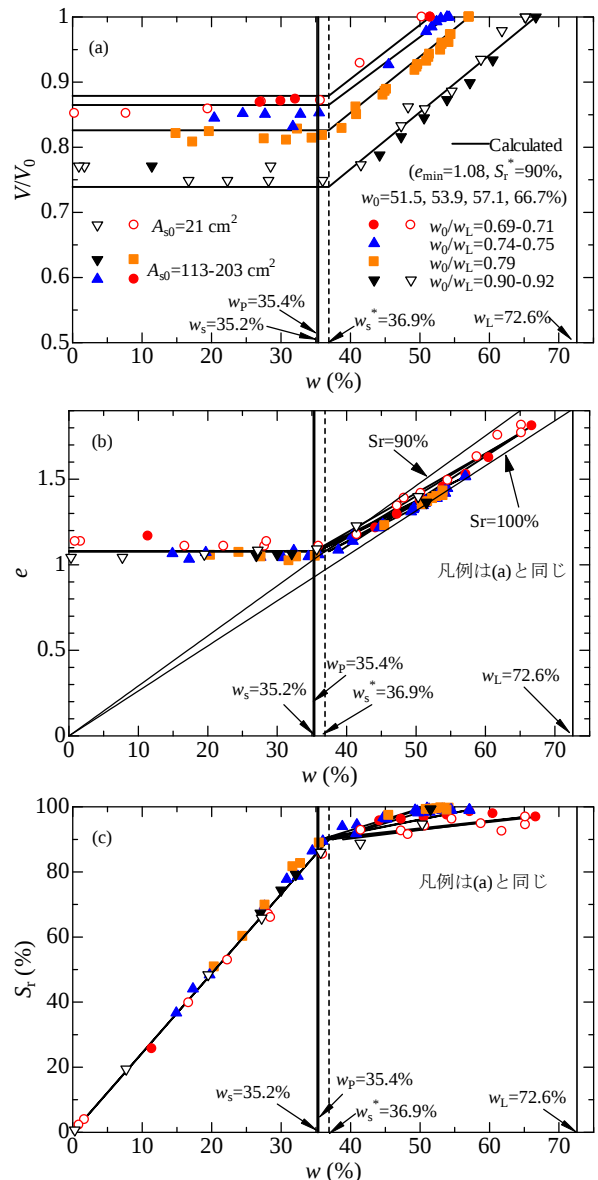


図-1 収縮特性 (カオリン粘土)

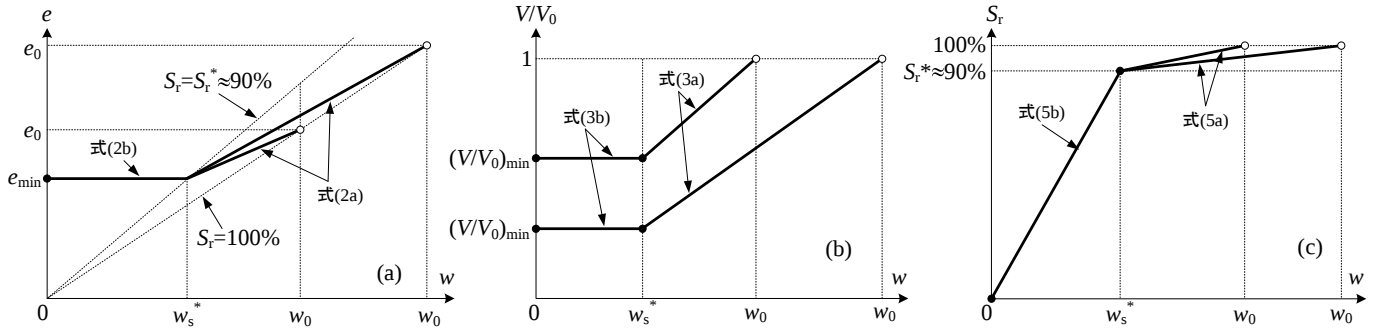


図-2 圧密再構成粘土の含水比低下に伴う収縮特性のモデル化

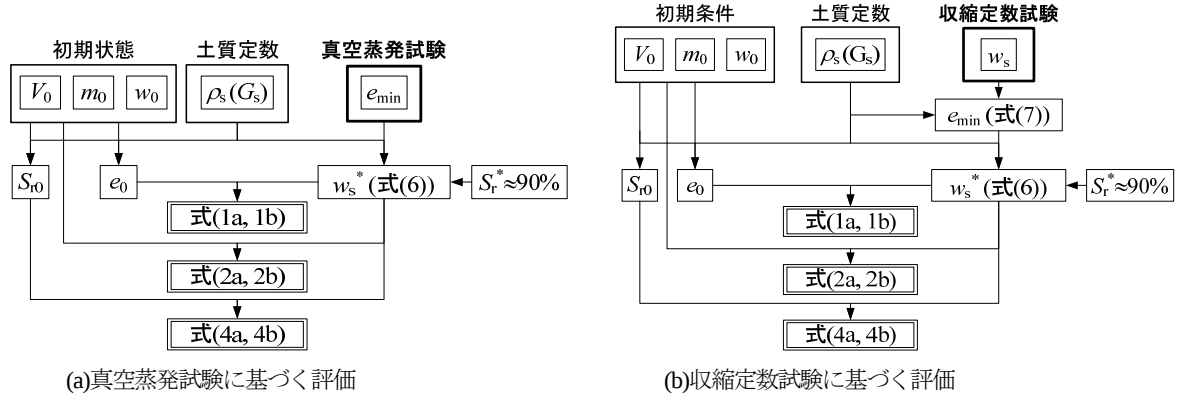


図-3 提案モデルを用いた収縮特性の評価方法

$$\frac{\frac{V}{V_0}}{1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)_{\min}} = \frac{w - w_0}{w_0 - w_s^*} \quad (w \geq w_s^*) \quad (3a)$$

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)_{\min} \quad (w_s^* > w) \quad (3b)$$

ここで、 $(V/V_0)_{\min}$ は $e_{\min}$ を用いて式(4)により算定される。

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\min} = \frac{V_{\min}}{V_0} = \frac{(1 + e_{\min})m_0}{\left(1 + \frac{w_0}{100}\right)\rho_s} \cdot \frac{1}{V_0} \quad (4)$$

図-2(c)に示すように、 $w \sim S_r$ 関係を点(w_s^* , $S_r^* \approx 90\%$)で折れ曲がる二本の直線でモデル化する。 $w \geq w_s^*$ の範囲では、含水比の低下に伴って S_r は初期含水比 w_0 から減少し、式(5a)で評価する。 $w < w_s^*$ の範囲では間隙比は S_r は直線的に減少して原点に至り、式(5b)で評価する。

$$\frac{S_{r0} - S_r}{S_{r0} - S_r^*} = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_s^*} \quad (w \geq w_s^*) \quad (5a)$$

$$S_r = \frac{G_s}{w} \quad (w_s^* > w) \quad (5b)$$

図-3 に提案モデルを用いた収縮特性の評価方法についてまとめる。真空蒸発試験を実施する場合は、図-3(a)に示すように収縮特性を評価できる。 V_0 , m_0 および w_0 は初期状態であり、 ρ_s と G_s は土質定数である。実験から求めるパラメータは $e_{\min}$ のみである。 $e_{\min}$ の値は真空蒸発法において含水比がほぼゼロとなったときの間隙比として求められる。 S_r^* は実験結果から推測される値であるが、これまでの実験結果からは $S_r^* \approx 90\%$ と仮定される。図-3(b)に示すように収縮定数試験を実施する場合は、実験から求めるパラメータ

は w_s^* のみである。これまでの実験結果から w_s^* は収縮限界 w_s を用いて式(6)で近似できることを明らかにしている^{1), 2)}。

$$w_s^* = \frac{e_{\min} \cdot S_r^*}{G_s} = \frac{\alpha e_s \cdot S_r^*}{G_s} = \frac{1.15 e_s \cdot 90}{G_s} \approx 1.04 w_s \quad (6)$$

同様に $e_{\min}$ は式(7)で表される^{1), 2)}。

$$e_{\min} = \alpha \cdot e_s \approx 1.15 e_s \quad (7)$$

物理特性として収縮限界 w_s が既知である場合には、試験を実施することなく収縮特性を概略求めることができる。

図-1(a)~(c)に、 $e_{\min}$ と S_r^* を用いた提案モデルに基づいて算定した結果を実線で示した。ここで、 $e_{\min}$ には真空蒸発法から得られた値を用い、折れ曲がり点の飽和度は $S_r^* = 90\%$ とした。計算結果は実験結果を概ね表しており、提案モデルの適合性は高い。

5. まとめ 真空蒸発法の結果に基づいて、圧密再構成粘土の含水比低下に伴う収縮特性について検討し、 $w \sim e$, $w \sim V/V_0$ および $w \sim S_r$ の関係をそれぞれ二本の直線で定式化した。提案モデルを用いて収縮特性を予測するために必要なパラメータは $e_{\min}$ または w_s のみであり、簡便なモデルであるが、実験結果との高い適合性が得られた。

【参考文献】1)Umezaki & Kawamura: Shrinkage and desaturation properties during desiccation of reconstituted cohesive clay, Soil and Foundations, 2013 (印刷中). 2)梅崎, 河村: 真空蒸発による軟弱地盤の含水比低下特性, 第4回地盤改良シンポジウム, pp.201-208, 2000. 3)梅崎, 河村, 黒田, Budiani, 豊田: 真空蒸発法による不飽和粘土供試体の作製法(その4), 第44回地盤工学研究発表会, pp.653-654, 2009.