

土の力学的性質と間隙圧の影響

星 埜 和・榎 本 歳 勝

さきに著者らは三軸試験機を試作し研究の結果、新しい独自の理論体系を組み立て発表した。¹⁾²⁾

それまでに行った三軸試験は緩速試験 (Slow test) または圧密排水型の試験 (Consolidated-drained test) と呼ぶべきもので、液圧を加える過程および軸圧を加える過程において土の間隙に含まれる水と空気は自由に排出され、間隙圧の影響はほとんどないと考えた。その後いわゆる急速試験 (Quick test) または非圧密非排水型の試験 (Unconsolidated-undrained test) の結果に基づいて間隙圧の影響を入れた力学理論を組み立てた。

(1) 急速三軸試験 土の円柱状試験体 (径 3.5 cm, 高さ 8.0 cm) を圧縮室に入れて液圧を加え、さらに一定の液圧において軸圧を加えて変形と破壊を測定する。試験体はゴムスリーブで包み両端は透水板を通じて間隙圧の測定装置に連結される。液圧および軸圧を加える過程において試験体は体積の変化 (収縮あるいは膨脹) を伴い間隙圧を発生する。体積変化量は圧縮室に出入する液量にはほぼ等しいが、圧縮室の液圧による体積変化の補正、ピストン部からの液の漏れ防止、気泡の完全な追出し、軸圧過程におけるピストン貫入量の補正、気温気圧の変化の影響などの問題があり、体積変化量と間隙圧の間には後に述べるような関係があるので、照査できる。間隙圧の測定には試験体の間隙にある水と空気が流出しないように圧力を加えておき、この釣合った圧力をもって間隙圧とする。

実験結果から次のような結論を引き出した。

- a) 間隙圧の発生によって体積の収縮量は減少し、剪断変形量はまし、極限の強度は減少する。
- b) 加えた液圧から間隙圧を差引いて有効圧とすれば、変形と破壊の法則は緩速試験の場合と同様である。
- c) 試験中温度は一定と考えれば、試験体の体積変化はその間隙中にふくまれる空気の体積変化に等しく、したがって間隙圧はボイルの法則によって計算される。
- d) 軸圧を加え剪断応力を生ぜしめたとき、砂質土と粘土質土では体積変化の傾向が異なり、したがって間隙圧の発生状況も異なる。

(2) 間隙圧を考慮した理論 実験結果に基づいて間隙圧を考慮した土の力学の基本理論を導くことができる。

土塊は土粒子の固体部分と水の液体部分と空気の気体部分からなる。単位体積あたりの土粒子体積を n_s 、水の体積を n_w 、空気の体積を n_a とすれば

$$n_s + n_w + n_a = 1$$

外力による応力をうけたとき、土粒子と水は非圧縮性と考えてよいため、生ずる体積変化 Δe は水と空気の排出量 $\Delta 0$ と空気の圧縮量 Δn_a の和に等しい。すなわち

$$\Delta e = \Delta 0 + \Delta n_a \quad (1)$$

緩速試験においては $\Delta n_a = 0$ であるから

$$\Delta e = \Delta 0 \quad (2)$$

急速試験においては $\Delta 0 = 0$ であるから

$$\Delta e = \Delta n_a \quad (3)$$

しかして生ずる間隙圧 p はボイルの法則から

$$n_a p_0 = (n_a - \Delta n_a) (p_0 + p)$$

$$p = \frac{\Delta n_a}{n_a - \Delta n_a} p_0 \text{ または } \Delta n_a = \frac{p}{p_0 + p} n_a \quad (4)$$

ここに p_0 は当初の間隙空気圧で普通大気圧に等しいとみなしてよい。

a) 純粋圧縮過程における間隙圧

液圧を σ 、対応する間隙圧を p とすれば、有効応力 σ_m は

$$\sigma_m = \sigma_0 + \sigma - p$$

よって体積変化度 Δe は著者の基本理論から

$$\Delta e = \frac{\sigma_0}{V_0} \log_e \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0} - \frac{p}{\sigma_0} \right)$$

これを式 (4) の Δn_a に等しいとにおいて

$$\sigma = p - \sigma_0 \left[1 - \exp \left(\frac{n_a V_0}{\sigma_0} \frac{p}{p_0 + p} \right) \right]$$

$$\left. \begin{aligned} \text{または } \frac{p}{\sigma_0} &= \frac{b}{b+m} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \\ &+ \frac{1}{2} \frac{bm(2-m)}{(b+m)^3} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 + \dots \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに $b = \frac{p_0}{\sigma_0}$, $m = \frac{n_a V_0}{\sigma_0}$

b) 軸圧縮過程における間隙圧

液圧を σ_L 、対応する間隙圧を p_L 、軸圧を σ_v 、対応する間隙圧を p_v とすれば、

$$\sigma_m = \sigma_0 + \sigma_L - p_L + \frac{\sigma_v}{3} - p_v$$

$$\tau_m = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_v$$

であるから、基本理論によって

$$d\Delta e = \left(\frac{\sigma_0}{V_0} + \frac{\sigma_0}{U_0} \tan^2 \psi \right) \frac{\frac{1}{3} d\sigma_v - dp_v}{\sigma_0 + \sigma_L - p_L + \frac{\sigma_v}{3} - p_v} - \frac{\delta_0 \tan^3 \psi}{U_0} \frac{\frac{1}{3} d\sigma_v - dp_v}{\sqrt{\tan^2 \psi \left(\sigma_0 + \sigma_L - p_L + \frac{\sigma_v}{3} - p_v \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_v \right)^2}}$$

研究速報

ボイルの法則により式(4)において $p = p_L + p_v$ として

$$d\Delta n_a = \frac{(n_a - \Delta n_{aL})(p_0 + p_L)}{(p_0 + p_L + p_v)^2} dp_v$$

ここに $\Delta n_{aL} (= \Delta e_L)$ は液圧 σ_L における空気圧縮量 $d\Delta e = d\Delta n_a$ において間隙圧 p_v を与える式を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_v}{\sigma_0 + \sigma_L - p_L} &= \frac{b_v}{b_v + m_v} \left\{ \frac{\sigma_v}{3(\sigma_0 + \sigma_L - p_L)} \right\} \\ &+ \frac{b_v m_v (2 - m_v)}{2(b_v + m_v)^3} \left\{ \frac{\sigma_v}{3(\sigma_0 + \sigma_L - p_L)} \right\}^2 + \dots \end{aligned} \right\} (6)$$

ここに $b_v = \frac{p_0 + p_L}{\sigma_0 + \sigma_L - p_L}$, $m_v = \frac{(n_a - \Delta n_{aL}) V_0}{\sigma_0}$

(3) 体積変化と間隙圧の実用計算

急速試験条件においては次のように計算すればよい。

a) 純粋圧縮過程

まず $p = \frac{b}{b+m} \sigma$ と仮定して

$$\xi = \frac{\sigma - p}{\sigma_0} = \frac{m}{b+m} \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (7)$$

とすれば

$$\left. \begin{aligned} \text{体積変化 } \Delta e &= \frac{\sigma_0}{V_0} E(\xi) \\ \text{間隙圧 } p &= \frac{E(\xi)}{m - E(\xi)} p_0 \end{aligned} \right\} (8)$$

ここに $E(\xi) = \log_e (1 + \xi)$

b) 軸圧縮過程

まず $p_v = \frac{b_v}{b_v + m_v} \frac{\sigma_v}{3}$ と仮定して

$$\xi_v = \frac{\frac{\sigma_v}{3} - p_v}{\sigma_0 + \sigma_L - p_L} = \frac{m_v}{b_v + m_v} \frac{\sigma_v}{3(\sigma_0 + \sigma_L - p_L)} \quad (9)$$

とおけば

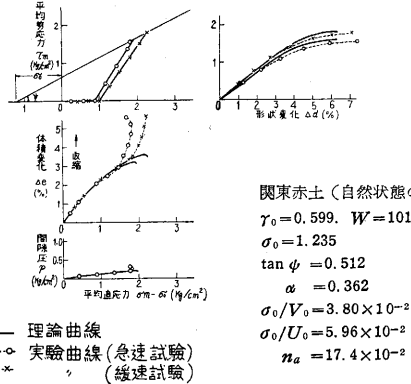
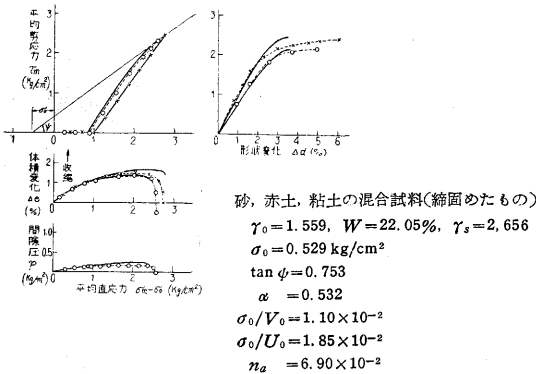
$$\left. \begin{aligned} \text{体積変化 } \Delta e &= \frac{\sigma_0}{V_0} \left\{ E(\xi_L) + E(\xi_v) \right\} \\ &+ \frac{\sigma_0}{U_0} \tan^2 \psi \left\{ E(\xi_v) - \frac{1}{\sqrt{2}} D(\xi_v) \right\} \\ \text{形状変化 } \Delta d &= \frac{\sigma_0}{U_0} \frac{\alpha}{\alpha_v} D(\xi_v) \\ \text{間隙圧 } p &= \frac{\Delta e}{n_a - \Delta e} p_0 \\ \text{ここに } \alpha_v &= \frac{m_v}{b_v + m_v} \alpha \\ E(\xi_v) &= \log_e (1 + \xi_v) \\ D(\xi_v) &= \frac{\sqrt{2} \alpha_v}{\sqrt{1 - \alpha_v^2}} \left\{ \sin^{-1} \alpha_v \right. \\ &\left. - \sin^{-1} \left(\alpha_v - \frac{1 - \alpha_v^2}{\alpha_v} \xi_v \right) \right\} \end{aligned} \right\} (10)$$

なお $E(\xi_L)$ は液圧 σ_L に対応する $E(\xi)$ の値である。

破壊の極限において $\xi_{vf} = \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v}$ をうるから

$$\left. \begin{aligned} E(\xi_{vf}) &= \log_e \left(\frac{1}{1 - \alpha_v} \right) \\ D(\xi_{vf}) &= \frac{\sqrt{2} \alpha_v}{\sqrt{1 - \alpha_v^2}} \left\{ \sin^{-1} \alpha_v + \frac{\pi}{2} \right\} \\ \Delta e_{vf} &= \frac{\sigma_0}{V_0} \left\{ E(\xi_L) + E(\xi_{vf}) \right\} \\ &+ \frac{\sigma_0}{U_0} \tan^2 \psi \left\{ E(\xi_{vf}) - \frac{1}{\sqrt{2}} D(\xi_{vf}) \right\} \\ p_f &= \frac{\Delta e_f}{n_a - \Delta e_f} p_0 \\ \sigma_{vf} &= \frac{3\alpha}{1 - \alpha} (\sigma_0 + \sigma_L - P_f) \end{aligned} \right\} (11)$$

図は実験と理論の比較の例である。(1956. 3. 7)



文
 (1) 星 埜 和：土の力学における塑性の基本理論と三軸試験への適用, 土木学会論文集第 21 号, 1954-12.

献
 (2) 星 埜 和：土の三軸試験と塑性力学, 生産研究 Vol. 6, No. 8 1954-8.