

III-104

軟弱粘土の圧密曲線と圧縮曲線に対する解釈(Ⅱ)

広島大学工学部 正員 吉國 洋

1. まえがき

粘性土の圧密に関する幾つかの情報は弾塑性固体というよりむしろ弾粘性液体である事を示している¹⁾。確かに、粘性土の破壊・強度研究においては弾塑性固体としての取り扱いが定着しており、そのことに異論をはさむ余地はない。しかし、前者と後者の現象における変形速度には極めて大きな隔りがあるので、極めて小さな変形速度で生じる圧密現象では液体と見做し、比較的大きな変形速度で生じる破壊現象においては固体と見做すことに大きな矛盾はない。ここでは、弾粘性液体と見做したときの圧密過程について考察を加えたい。

2. 圧密理論の構築

圧密理論を構築するにあたり次の条件と仮定を置く。

条件：間隙は水で飽和しており、変形と透水は一次元的に生じ、かつ変形は微小。

仮定：土粒子と間隙水は非圧縮性で、土の骨組みは(4)式で示される弾粘性液体として挙動。

圧密理論を構成するに必要な条件式は次のようである。

$$\text{Darcy の法則: } v = -(k/\gamma_w) \partial u / \partial z \quad (1)$$

$$\text{連続の条件式: } \partial \varepsilon / \partial t = \partial v / \partial z \quad (2)$$

$$= -\partial \{ (k/\gamma_w) \partial u / \partial z \} / \partial z \quad (3)$$

$$\text{レオロジー式: } -de/dt = a_v \partial \sigma' / \partial t + \sigma' / \lambda \quad (4)$$

$$\text{釣り合い式: } \partial \sigma / \partial t = \gamma' \quad (5)$$

$$\sigma = \gamma' z + p \quad (\text{上式を積分して}) \quad (6)$$

$$\text{応力分担式: } \sigma = \sigma' + u \quad (7)$$

$$\sigma' = \gamma' z + p - u \quad \{ (6) \text{ と } (7) \text{ より} \} \quad (8)$$

(4) - (8) の関係より

$$(1+e_0) \partial \varepsilon / \partial t = a_v \partial (p-u) / \partial t + (\gamma' z + p - u) / \lambda \quad (9)$$

$$\text{ただし } \partial (\gamma' z) / \partial t = 0 \quad (10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_v = \varepsilon_z = -\Delta e / (1+e_0) \quad (11)$$

$$k = k(e), \quad a_v = a_v(e, p), \quad \lambda = \lambda(e, p) \quad (12)$$

(3) と (9) を等置すれば、

$$\{ a_v \partial (p-u) / \partial t + (\gamma' z + p - u) / \lambda \} / (1+e_0) = -\partial \{ (k/\gamma_w) \partial u / \partial z \} / \partial z \quad (13)$$

整理して圧密方程式は、

$$\begin{aligned} \partial u / \partial t = C_v \cdot \partial^2 u / \partial z^2 + \partial k / \partial z \cdot \partial u / \partial z / (m_v \cdot \gamma_w) \\ + dp/dt + (\gamma' z + p - u) / (m_v \cdot \eta) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{ここに } m_v = a_v / (1+e_0) \quad (15)$$

$$C_v = k / (m_v \cdot \gamma_w) \quad (16)$$

$$\eta = (1+e_0) \lambda \quad (17)$$

3. 考察

圧密方程式(14)はつぎのように書き直すことができる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_D + \left(\frac{du}{dt} \right)_L + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_R \quad (18)$$

$(\partial u / \partial t)_D$ は(14)式右辺第1項と第2項で、単位時間における排水に伴う間隙水圧の減少分であ

る。 $(du/dt)_L$ は(14)式右辺第3項で、圧密荷重すなわち全応力の増加に伴う間隙水圧の増加分である。 $(\partial u/\partial t)_R$ は右辺第4項で、有効応力の緩和に伴う間隙水圧の増分である。この項が存在しなければ弾性圧密理論に帰着する。

非排水すなわち、 $(\partial u/\partial t)_D = 0$ でかつ定荷重 $dp/dt = 0$ すなわち $(du/dt)_L = 0$ の場合にも有効応力の緩和は停止することがないので、 $(\partial u/\partial t)_R > 0$ で、間隙水圧は時間とともに上昇することになる。この現象はすでに観測されている²⁾。したがって定荷重($dp/dt = 0$)の圧密過程においても圧密過程に緩和による間隙水圧が accrue に発生しており、弾性圧密理論のような間隙水圧の単純消散過程でないことが分かる。そして弾粘性液体における定荷重の圧密過程

$$\partial u/\partial t = (\partial u/\partial t)_D + (\partial u/\partial t)_R \quad (19)$$

は、弾性固体における漸増荷重の圧密過程

$$\partial u/\partial t = (\partial u/\partial t)_D + (du/dt)_L \quad (20)$$

と相似であることが分かる。つまり、弾粘性液体における有効応力の緩和項 $(\partial u/\partial t)_R$ は弾性固体における全応力増分項 $(du/dt)_L$ に対応している。したがって弾粘性液体における $(\partial u/\partial t)_R$ の項の圧密過程への影響は弾性固体における $(du/dt)_L = dp/dt$ の項の影響を調べればよい。

今、弾性固体に対する載荷を

$$p = \Delta p_0 + (dp/dt) dt \quad (21)$$

とする。ここに Δp_0 は $t = 0$ における瞬時載荷重である。この場合の圧密曲線の形は Δp_0 と dp/dt の比によって決まり、 Δp_0 に対し dp/dt が小さいと周知のTerzaghi型の圧密曲線になり、 Δp_0 に対し dp/dt が大きいとだんだんしたいわゆる二次圧密型の圧密曲線になる。これを定荷重の弾粘性液体の問題に置き直すと、圧密曲線の形は Δp_0 と $(\partial u/\partial t)_R = \sigma'/\eta \cdot m_v$ の比

$$\frac{\Delta p_0}{\sigma'/m_v \eta} = \frac{m_v \eta \cdot \Delta p_0}{\sigma'_z + p_0 + \Delta p_0 - u} \quad (22)$$

によって決まることになる。これは荷重増加率の問題であって、荷重増加率 $\Delta p_0/p_0$ の大きい時、圧密曲線はTerzaghi型になり、荷重増加率の小さい時、いわゆる二次圧密の卓越した圧密曲線になる。これは圧密研究において周知の事実である。

上述の考察からすると、瞬時載荷 Δp_0 に伴う間隙水圧 u_0 の消散が卓越する過程を一次圧密過程と呼び、有効応力の緩和に伴い徐々に発生する間隙水圧が卓越する過程を二次圧密過程と呼べるかも知れない。

定荷重($dp/dt = 0$)の場合二次圧密過程に入ると、 $\partial u/\partial t \equiv 0$ と考えるので、(18)は

$$(\partial u/\partial t)_D + (\partial u/\partial t)_R = 0 \quad (23)$$

となり、有効応力の緩和による間隙水圧の発生 $(\partial u/\partial t)_R$ と排水による間隙水圧の消散 $(\partial u/\partial t)_D$ が平衡した状態になる。もちろん、その間に次の関係に従い、クリープ(二次圧密)が進行する。

$$\partial \varepsilon/\partial t = -m_v \cdot (\partial u/\partial t)_D \quad (24)$$

4. あとがき

軟弱粘性土を弾粘性液体と考えたときの圧密過程について考察をまとめると次のようである。

- (1) 全応力の増加と有効応力の緩和現象の機構によって間隙水圧が発生し、圧縮の可能性が生まれる。
- (2) 荷重増加率によって圧密曲線の形が変わる機構は全応力の瞬時増加に伴う間隙水圧の大きさと有効応力の緩和に伴う間隙水圧の発生速度との相対問題であると理解することができる。
- (3) 圧密過程の終期いわゆる二次圧密過程において $\partial u/\partial t \equiv 0$ と考えられるが、 $u = 0$ ではない。

5. 参考文献

- 1) 吉國 洋(1990):「軟弱粘土の圧密曲線と圧縮曲線に対する解釈(Ⅰ)」、第25回土質工学研究発表会、平成2年度発表講演集
- 2) T. L. Holzer, K. Hoeg, K. Arulanandan(1973): Excess Pore Pressures During Undrained Clay Creep. CAN. GEOTECH. J., vol. 10, pp. 12-24