Ⅲ—18　粘土の繰返し圧密について

京都大学工学部　正員　○松尾　稔
京都大学防災研究所　正員　八木　則男

1　はじめに：繰返し圧力による粘土層の圧密沈下問題を量的に解析するための初歩的実験として，三軸圧縮試験機を用いて繰返し等方圧密試験を行なっているが，得られたデータの一部はすでに今年の第19回年次学術講演会において発表した。ここでは実験値の理論的解析のための近似計算法について簡単に述べる。

2．第1回目の圧密の過程：水で飽和された厚さ h の粘土層が透水層（上面），不透水層（下面）の間に存在し，これに上部透水層をとおして等分布荷重 p が載荷される場合で，かつ間ゲキ水が鉛直方向にのみ流れるときの任意位置，任意時間における間ゲキ水圧分布が近似的につぎのように表わされることは周知のとおりである。

$0 \le t \le h^2/12C_v$，　$0 \le z \le 2\sqrt{3C_vt}$　のとき　$u(z,t) = u_0 - u_0(2\sqrt{3C_vt} - z)^2/12C_vt$　(1-a)

$0 \le t \le h^2/12C_v$，　$2\sqrt{3C_vt} \le z \le h$　のとき　$u(z,t) = u_0$　(1-b)

$h^2/12C_v \le t \le \infty$，　$0 \le z \le h$　のとき　$u(z,t) = u_0 e^{-(3C_vt/h^2 - 1/4)}\{1 - (h-z)^2/h^2\}$　(1-c)

ここに C_v は圧密係数，u_0 は初期間ゲキ水圧であり，初期荷重面は矩形である。

ところで種々の圧密問題の解は基本的に圧密度 U で表わされ，そして圧密度は任意時間における間ゲキ水圧の全厚さに対する平均値に依存するから，実際の解析にあたる場合，この平均的な間ゲキ水圧 u_m および平均的な有効応力 σ_m'（3主応力の平均の意味ではない）を用いるのが便利でありまた妥当である。まず u_m を求め $\sigma_m' = p - u_m$ より σ_m' を計算すると，

$0 \le t \le h^2/12C_v$　のとき　$\sigma_m' = (p - u_0) + 2u_0\sqrt{3C_vt}/3h$　(2-a)

$h^2/12C_v \le t \le \infty$　のとき　$\sigma_m' = p - \frac{2}{3}u_0 e^{-(3C_vt/h^2 - 1/4)}$　(2-b)

さてわれわれが通常測定するたとえば体積変化の割合 $\Delta V/V$ は粘土層全体に対する平均的なものであることはいうまでもないから，$\Delta V/V$ が U，いいかえると有効応力 σ_m' と一義的に対応すると考えてよいであろう。いま粘土が過去に先行荷重 σ_0' をうけているものとすると，外圧 p による有効応力が σ_0' に達するまでは過圧密，σ_0' をこえると正規圧密の状態となる。任意時間における粘土層各深度の有効応力は当然異なるから，厳密ではないがいま近似的に $\sigma_m' \le \sigma_0'$ において過圧密，$\sigma_m' \ge \sigma_0'$ において正規圧密の状態であると考える。$\Delta V/V$ と σ_m' との間には一般に $e \sim \log p$ 曲線と類似の関係が成立するから，$\Delta V/V \sim \sigma_m'$ 関係を

$\sigma_m' \le \sigma_0'$　のとき　$\Delta V/V = a\sigma_m'^{\,b}$　(3-a)　　$\sigma_m' \ge \sigma_0'$　のとき　$\Delta V/V = c\log d\sigma_m'$　(3-b)

のように表示してよいであろう。ここに a, b, c, d は実験的に求めうる常数である。$\sigma_m' = \sigma_0'$ になるときの時間を t_c とすると，t_c は(2)式から求められ，各場合に応じて(2)式を(3)式に代入することにより，$\Delta V/V \sim t$ 関係が以下のように求められる。

$0 \le t \le t_c \le h^2/12C_v$ or $0 \le t \le h^2/12C_v \le t_c$　のとき　$\Delta V/V = a\{2u_0\sqrt{3C_vt}/3h\}^b$　(4-a)

$0 \le t_c \le t \le h^2/12C_v$　のとき　$\Delta V/V = c\log d\{2u_0\sqrt{3C_vt}/3h\}$　(4-b)

$t_c \le h^2/12C_v \le t$ or $h^2/12C_v \le t_c \le t$　のとき　$\Delta V/V = c\log d\{p - \frac{2}{3}u_0 e^{-(3C_vt/h^2 - 1/4)}\}$　(4-c)

$h^2/12C_v \le t \le t_c$　のとき　$\Delta V/V = a\{p-\frac{2}{3}u_0 e^{-(3C_v t/h^2-1/4)}\}^b$ (4-d)

3. 第1回目の膨潤の過程：外圧pによる圧密の進行途上において$t=t_0$のときに瞬間的にpをとり除くと，粘土層は吸水膨張を開始する。この場合膨張係数C_sの大きさが問題であるが，ここでは簡単のため$C_v=C_s=C$と仮定する。この仮定は既存の資料や今回の実験結果からみてそれほど不当なものではないと考えている。さて膨潤過程の間ゲキ水圧分布曲線を求めるためには，外圧pによる分布曲線をそのまま継続させながら，同時に$t=t_0$において外圧$-p$をかけた場合の分布曲線を求め，この両者を組合せればよい。ここで大切なことは$t=t_c$時において$p=u_{tc}+\sigma'_{tc}$の状態にあったものがpをゼロにしたとき，はたして一般に$u_{tc}=-S\sigma'_{tc}$で$S=1$となるかどうかということであるが，これは土の物性に関する重要な問題であり，軽々しく結論めいたことを述べるべきではないので，今回はともかく$S=1$として間ゲキ水圧を決定し，膨潤過程におけるσ'_mを求めるとつぎのようになる。

$0<t_0\le t\le h^2/12C$　のとき　$\sigma'_m=\{2u_0\sqrt{3C}/3h\}\{\sqrt{t}-\sqrt{(t-t_0)}\}$ (5-a)

$t_0\le h^2/12C\le t\le (h^2+12Ct_0)/12C$ or $h^2/12C\le t_0\le t\le (h^2+12Ct_0)/12C$ のとき $\sigma'_m=\frac{2u_0}{3}\{\frac{3}{2}-e^{-(3Ct/h^2-1/4)}-\sqrt{3C(t-t_0)}/h\}$ (5-b)

$(h^2+12Ct_0)/12C\le t$　のとき　$\sigma'_m=\frac{2u_0}{3}e^{-(3Ct/h^2-1/4)}\{e^{3Ct_0/h^2}-1\}$ (5-c)

ところで$\Delta V/V\sim\sigma'_m$関係はやはり(3-a)式と同形としてよいから（a,bが圧密の場合とは異なった値になることはいうまでもなく，この場合は膨潤曲線を用いて決定する），各場合に応じて(5)式と組合せることにより$\Delta V/V\sim t$関係を求めることができる。

4. 第2回目以後の圧密および膨潤の過程：紙面に制限があるので詳しくは講演時に発表するが，ともかく第2回目以後の過程は第1回目の場合の手法を繰返してゆけば求められる。すなわち第1回目の圧密を開始した後時間t_0の間の有効応力の増加をAu_0，そして$t=t_0$時に開始した第1回目の膨潤を$t=2t_0$時に中止したとき，圧密開始時$(t=0)$からの有効応力の増加が結局Bu_0であったとする。ここで各段階における圧密，膨潤時間をt_0（一定）とし，繰返しを継続しても粘土の均一性は保持され，かつh，C等の変化は無視できる程度と仮定し，さらに各回の圧密は前回の膨潤中止時の間ゲキ水圧が等分布した後に開始されるものとする。そうすると第2回目の圧密が開始されるときの初期間ゲキ水圧は$u_{02}=(1-B)u_0$であり，時間t_0の間にはやはり$(1-B)Au_0$だけ有効応力が増加する。そして第2回目の膨潤中止時，すなわち第2回目のcycleにおける有効応力の増分は結局$B(1-B)u_0$となる。以下同様に考えを進めてゆくとn回目の圧密過程における$\sigma'_m\sim t$関係はつぎのようになる。

$0\le t^{(n)}\le h^2/12C$　のとき　$\sigma'_m=(p-u_{0n})+2u_{0n}\sqrt{3Ct^{(n)}}/3h$ (6-a)

$h^2/12C\le t^{(n)}\le 2t_0$　のとき　$\sigma'_m=p-\frac{2}{3}u_{0n}e^{-(3Ct^{(n)}/h^2-1/4)}$ (6-b)

ここに$t^{(n)}$はn回目の圧密を開始したときをゼロとして測った時間，u_{0n}はn回目の圧密開始時の初期間ゲキ水圧であって，つぎのように表示される。

$u_{0n}=(1-B)^{n-1}u_0$ (7)

ただしBは$0<t_0\le h^2/24C$，$h^2/24C\le t_0\le h^2/12C$，$h^2/12C\le t_0$の各場合により，それぞれつぎのようになる。$B=2(\sqrt{2}-1)\sqrt{3Ct_0}/3h$，　$B=1-\frac{2}{3}e^{-(6Ct_0/h^2-1/4)}-2\sqrt{3Ct_0}/3h$，　$B=\frac{2}{3}e^{-(3Ct_0/h^2-1/4)}\{1-e^{-3Ct_0/h^2}\}$

なおこの場合の先行荷重σ'_{0n}は$(n-1)$回目の圧密中止時の有効応力をとればよい。

n回目の膨潤の過程も同じようにして決定することができる。