Ⅲ－２０　一軸圧密試験における側面摩擦の影響について

広島大学　正員　門田博知

軟弱地盤の圧密沈下の推定にはJIS A 1217の圧密試験法によって求められる体積圧縮係数および圧密係数が用いられている。この試験結果の解析には一次元圧密理論の基礎方程式がそのまゝ適用されている。圧密試験機の機構上，載荷重と試料底部の載荷重によって生じる反力との間に差がある。このことはTaylorを始めとしてH. Muhs and M. Kany, S. Hansbo, 石井，倉田，柴田，中瀬等も実測して研究を行っている。しかしいずれも圧密基礎方程式の誘導まで至っていないため，最終沈下量については何とか補正できるが，その時間経過については何等の明解な結論を之ていない。著者は側面摩擦の性質について基本的な実験を行い，その結果を基にして，荷重増加率，側面摩擦を考慮した圧密基礎方程式を誘導し，圧密最終状態，時間経過について，側面摩擦および荷重増荷率の影響について興味ある結論を得たので以下順次説明する。先ず側面摩擦の性質について次の結論を之た

1). 側面摩擦抵抗力は有効応力に比例する。

2). 側面摩擦抵抗力は試料の先行荷重に大きく影響されるが，先行荷重に相当する側面摩擦抵抗力が試料セット直後から働くと考えて式を導けば，非常によく実験値と一致する。

$$\bar{p}_z/p = \left(1+\frac{p_c}{p}\right)e^{-2A\frac{z}{H}} - \frac{p_c}{p} \qquad \cdots\cdots (1)$$

こゝに　$\bar{p}_z$：圧密終了時試料の載荷面から z/H の所に働く圧密荷重（圧密最終時有効応力）

p_c：試料の先行荷重，　f：側面摩擦係数（載荷重に対しての係数）

R：試料の半径，　H：試料厚さ，　$A=\frac{f'H}{R}$

3). (1)式によって求められる側面摩擦係数は真鍮平板と試料の摩擦係数の凡そ½となっている。このことは面に垂直な力が½と考えることが出来る。（特殊三軸圧密試験では $\Delta\sigma_3'/\Delta\sigma_1' \fallingdotseq 0.45$）

4). 一般に土と面との摩擦抵抗力はそれらの相対移動量によって変化し，0.20～0.25mmの移動量までは，移動量に比例して増大し，最大値に達した後は漸時減少して，最大値の0.8～0.9になって一定値となる。

5). 側面摩擦係数は土の塑性指数と密接な関係にあり，塑性指数の増大と共に大きくなり，その増加率はほゞ一定である。

次にこの結論を基にして，圧密試験時の側面摩擦抵抗を考慮した圧密基礎方程式の誘導を行う。誘導に当って $\varepsilon-\log p$，$e-\log k$ がそれぞれ直線関係にあることを条件として追加した。三笠氏の表示にならって，試料載荷面からその深さにある厚さ dz に働く体積力は(2)式で示される。Taylorと同じ考え方で側面摩擦抵抗力を試料載荷面積当りに換算する。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = \gamma - \frac{\partial f''}{\partial z}, \quad f'' = \frac{2f}{R}\int_0^z \bar{p}\,dz, \qquad \therefore \quad i = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{1}{\gamma_w}\left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + 2\frac{A}{H}\bar{p}\right] \quad \cdots\cdots (2) \cdots\cdots (3)$$

更に先行荷重を考慮して(3)式は(4)式となる。即ち試料をセットして水浸すると膨張圧が側面に作用するので（側方拘束のため発生）

$$i = \frac{1}{\gamma_w}\left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + 2\frac{A}{H}(\bar{p}+p_c)\right] \qquad (4)$$

(4)式に(1)式の関係を入れて，p_0を新らしい荷重が載荷される前の荷重，p_cを試料の先行荷重，ϕを新

らしく載荷する荷重とし、$n=\Delta p/p_0$，$n_0=\frac{p_0}{p_c}$，$u=\frac{\Delta\bar{p}_z}{\Delta p}$　$\alpha=\frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\varepsilon_f-\varepsilon_0}$　とすると(5),(6)(7)式がえられる。

$$\bar{p}_0=p_0\left[\left(1+\frac{1}{n_0}\right)e^{-2A\frac{z}{H}}-\frac{1}{n_0}\right] \qquad \text{------ (5)}$$

$$\bar{p}=\bar{p}_0+\Delta\bar{p}_z \quad \text{or} \quad \bar{p}=\bar{p}_0+\Delta p u=p_0\left[\left(1+\frac{1}{n_0}\right)e^{-2A\frac{z}{H}}-\frac{1}{n_0}+nu\right] \qquad \text{------ (6)}$$

$$\bar{p}+p_c=p_0\left[\left(1+\frac{1}{n_0}\right)e^{-2A\frac{z}{H}}+nu\right] \qquad \text{------ (7)}$$

$\ln p=a+b\varepsilon$　の関係から，uとαの間には　$nu=(1+n)^\alpha-1$　が導かれる。(5),(6),(7)式を(4)式に代入して，

$$i=\frac{p_0}{\gamma_w}\left[\ln(1+n)(1+n)^\alpha\frac{\partial\alpha}{\partial z}+2\frac{A}{H}\left\{(1+n)^\alpha-1\right\}\right] \qquad \text{------ (8)}$$

又 $\ln k=a'+b'\varepsilon$　の関係より　$k=k_0(1-n')^\alpha$　が導かれる，ここに　$n'=\frac{\Delta k_f}{k_0}$　である。

$v=ki$　から　$$v=\frac{p_0k_0}{\gamma_w}\left\{\frac{\partial\alpha}{\partial z}\cdot\ln(1+n)(1+n)^\alpha+2\frac{A}{H}\left\{(1+n)^\alpha-1\right\}\right\}(1-n')^\alpha \qquad \text{---- (9)}$$

$\ln p=a+b\varepsilon$，$\ln k=a'+b'\varepsilon$ を満足し，C_vが一定の條件は $B_n=(1+n)(1-n')=1.0$ であるから

$$\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{p_0k_0}{\gamma}\left[\frac{\partial^2\alpha}{\partial z^2}+2\frac{A}{H}\frac{1}{(1+n)^\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right] \qquad \text{------ (10)}$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}=\frac{1}{\varepsilon_f-\varepsilon_0}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} \quad \text{or} \quad \frac{\partial\varepsilon}{\partial t}=(\varepsilon_f-\varepsilon_0)\frac{\partial\alpha}{\partial t} \qquad \text{------ (11)}$$

ここに　$\varepsilon_f-\varepsilon_0=\frac{1}{b}\ln(1+n)$，$\frac{\partial\varepsilon}{\partial p}=\frac{1}{pb}\ (=m_v)$　であるから　　------ (12)

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}=\frac{k_0p_0b}{\gamma_w}\left[\frac{\partial^2\alpha}{\partial z^2}+2\frac{A}{H}\frac{1}{(1+n)^\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right] \qquad \text{------ (13)}$$

$$=\frac{k_0}{\gamma_w m_{v_0}}\left[\frac{\partial^2\alpha}{\partial z^2}+2\frac{A}{H}\frac{1}{(1+n)^\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right] \qquad \text{------ (14)}$$

$$\therefore\ \frac{\partial\alpha}{\partial t}=C_{v_0}\left[\frac{\partial^2\alpha}{\partial z^2}+2\frac{A}{H}\frac{1}{(1+n)^\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right] \qquad \text{------ (15)}$$

(15)式は側面摩擦の働く一軸圧密試験結果の解析に用いられるべき圧密基礎方程式である。荷重増加率を式に入れ，歪の表示によるものである。

圧密最終状態(一次圧密終了)は(9)式において $v=0$ の條件より，応力分布は(16)式で示される，

$$u=e^{-2A\frac{z}{H}} \qquad \text{(16)}$$

ここで，実応力の絶対値の式は

$$\bar{p}=p_0\left[\left(1+\frac{1}{n_0}\right)e^{-2A\frac{z}{H}}-\frac{1}{n_0}+ne^{-2A\frac{z}{H}}\right] \qquad \text{------ (17)}$$

$$\text{or} \quad \bar{p}=p_f\left[\left(1+\frac{p_c}{p_f}\right)e^{-2A\frac{z}{H}}-\frac{p_c}{p_f}\right] \quad \text{ここに } p_f=p_0+\Delta p \qquad \text{------ (18)}$$

歪の分布は(6)式と(8)式より

$$\alpha=\frac{\ln\left[1+ne^{-2A\frac{z}{H}}\right]}{\ln(1+n)} \qquad \text{------ (19)}$$

Routine testで求められたm_vを摩擦(および荷重増加率)の影響を除くための修正係数は $\Delta\bar{p}_{mean}/\Delta p$ より

$$m_{vc}/m_v=1\Big/\left\{\frac{1}{2A}\left(1-e^{-2A}\right)-\left[1-\frac{1}{2A}\left(1-e^{-2A}\right)\right]\left(1+\frac{1}{n_0}\right)\frac{1}{n}\right\} \qquad \text{------ (20)}$$

$n=1.0$　として Routineでは

$$m_{vc}/m_v=1\Big/\left\{\frac{1}{2A}\left(1-e^{-2A}\right)-\left[1-\frac{1}{2A}\left(1-e^{-2A}\right)\right]\left(1+\frac{1}{n_0}\right)\right\} \qquad \text{------ (21)}$$

$$p_{cor}/p=\left[\left(1+\frac{1}{2n_0}\right)\frac{1}{2A}\left(1-e^{-2A}\right)-\frac{1}{2n_0}\right] \qquad \text{------ (22)}$$

式(21)および(22)でみられるように試料の先行荷重の大きさが大きく影響するから，現場のm_vの決定には先行荷重を大きく超過して，$\frac{1}{n_0}\to 0$ と考えられる荷重について $\log m_{vc}-\log p_c$ を修正して用いるべきである。先行荷重近くではm_vは1.3～1.5倍位に又 $\frac{1}{n_0}\to 0$ では1.10～1.05倍位になるのが普通である。

C_vについては(15)式でわかるように，荷重増加率および側面摩擦の大きさが大きく影響するが，先行荷重には全く影響されないことが判る。　Routine testでは $n=1.0$ であるから(15)式は次のようになる。

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}=C_{v_0}\left[\frac{\partial^2\alpha}{\partial z^2}+2\frac{A}{H}\frac{1}{2^\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right]$$

以上のように側面摩擦を考慮した圧密基礎方程式がおめられ，側面摩擦係数がきまれば圧密係数，体積圧縮係数が側面摩擦の影響を除いておめることが出来る。又慣行試験結果から補正係数を乗じてこれ等を求めることも出来る。これ等の式から次のことが云える。

1) 慣行解析法による零点補正量は側面摩擦の大きさに影響され，側面摩擦が大きい程補正量は大きくなる。

2) 側面摩擦が大きい程圧密沈下曲線(時間)はTerzaghi型からずれて，遅れてくるが，最終沈下量も少くなるため見掛けの速度は速くなり T_{50} は小さくなる。

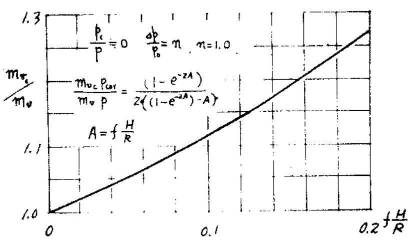
3) 側面摩擦の影響は荷重増加率が大きくなる程小さくなる。

4) 圧密最終状態(1次圧密終了)の試料の平均歪は側面摩擦が大きい程小さく，荷重増加率が大きい程側面摩擦のない状態に近づく。

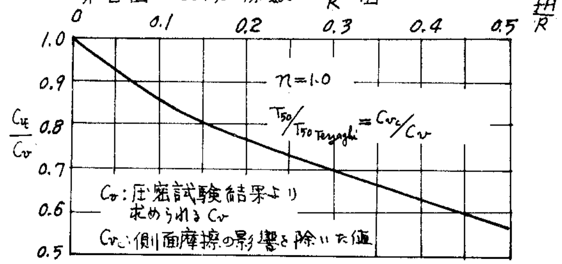
5) 側面摩擦の影響を除いた体積圧縮係数をおめるには先行荷重の影響を考慮すべきである。

以上5項目については今迄種々実験結果から云はれていることであるが，それ等が何故かと云うことがはっきりした。例へば零点補正量がTaylorの云う空気，水の圧縮だけではないこと，荷重増加率を大きくするとTerzaghi曲線に近づくことの理由がかなり明瞭になってきた。補正を行うと体積圧縮係数は大きくなるが，圧密係数は小さくなる。現場観測では C_v は大きい例が多い，これは地盤の体積圧縮係数が深度とともに小さくなっていて，圧密初期〜中期では沈下量は主に上層，中層の体積圧縮係数によってきまるので見掛け上どうしても平均圧縮係数で計算するよりも圧密速度は大きくなる筈である。これらのことについては今後も更に研究を続けていく予定である。

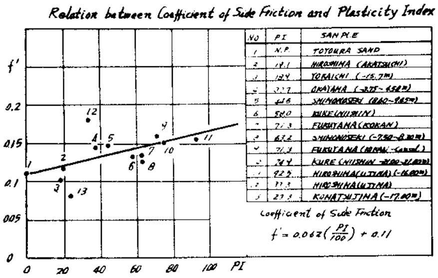
第1図 m_v修正係数−$f\frac{H}{R}$図



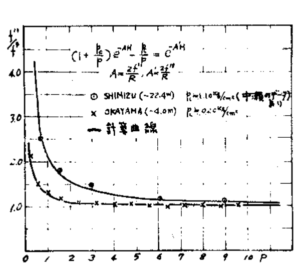
第2図 C_v修正係数−$\frac{fH}{R}$図



Relation between Coefficient of Side Friction and Plasticity Index



Relation between Side Friction and Pre-Load



第1図及び第2図は側面摩擦の影響を除くための修正係数を示している。第3図は塑性指数と側面摩擦係数との関係をプロットしたものである。この関係から側面摩擦係数を簡単に推定出来る。先行荷重が大きく p_c/p が充分小さくない時は m_v および p はそれぞれ(21)式，(22)式によって計算することが必要である。p_c/p の値をパラメーターとした修正図も現在作製中である。しかし一般に正規圧密粘土での先行荷重は推定できるが過圧密については困難であるし，Virgine slope以前の荷重については上記の考え方に疑問があることは基礎方程式の誘導の條件から明らかである。