

大阪市立大学工学部

三笠正人

○高田直俊

大阪市下水道局

東田 淳

まえがき 層状地盤の一次元圧密に関わるこれまでの研究は、層の境界での応力と透水量の連続性を考慮して熱伝導型の方程式を各層ごとに適用するという手法によっていた¹⁾²⁾。筆者らの不均等地盤の圧密理論は、異なる圧密特性を有する地盤の圧密の程度を相対密度に類する共通な量相対体積比、相対ヒズミ等で表われ、任意の不均等地盤を一体として取扱おうとするものである。先の報告³⁾で圧密特性($f - \log P$ 関係および C_v)が粘土層の深さ方向に連続的に変化する場合と層状となして変化する場合の圧密計算例を示した。ところで層状地盤の圧密に対しては各層の C_v の深さ方向の変化が大きいときは層の境界での C_v の扱い方、および、それに起因する数値計算の安定性に前報告の手法のままだと問題があることが、その後の計算によって明らかになった。今回は圧密による粘土層の層厚の変化をとり入れた圧密方程式を新たに導き、さらに上記の点を考えて改良した層状地盤の圧密計算手法を示し、それによって3シリーズの層状地盤について数値計算を行ない、主として C_v や層厚の組み合わせが圧密過程にどのように影響するかを調べた。

不均等地盤の圧密方程式

まず不均等地盤の圧密方程式について簡単に説明する。いま図-

1の $f - \log P$ 直線上の適当に選んだ2つの圧力 P_1, P_2 ($P_1 < P_2$) における体積比 f_1, f_2 を用いて、任意の圧力 P における相対体積比 F_r を式(1)のように定義すると、 F_r は任意の $f - \log P$ 関係に対して共通な P のみの関数となる。

$$\text{相対体積比 } F_r = \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} \quad (1)$$

F_r を用いて次の諸量を定義する。

$$\text{相対ヒズミ } \epsilon_r = \int d\epsilon_r = \int \frac{-dF_r}{F_r} \quad (2)$$

$$\text{相対体積圧縮係数 } m_{vr} = \frac{d\epsilon_r}{dP} \quad (3)$$

$$\text{相対圧密係数 } C_{vr} = \frac{k}{m_{vr} \gamma_w} \quad (4)$$

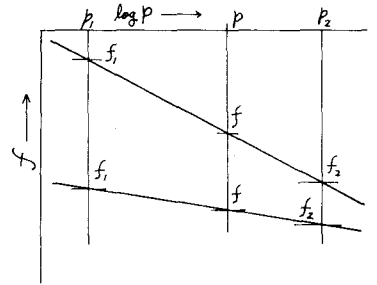


図-1

F_r, ϵ_r, m_{vr} は異なった $f - \log P$ 関係に対して P だけの関数となる。これらを用いて不均等地盤の圧密に関する一般式は

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_{vr} \left\{ \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z^2} - \frac{d}{d\epsilon_r} (m_{vr} \gamma') \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z} \right\} + \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z} \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial z} - m_{vr} \gamma' \right) \quad (5)$$

となる。右辺 $\{ \}$ 内の第2項は自重の影響を示す項で γ' は粘土の水の中単位体積重量である。右辺第2項は C_{vr} の変化の影響を示す項である。

式(5)は圧密中の層厚の変化を考慮していない。層厚の変化を考慮した方程式は式(5)から次のように導かれる。

粘土が最初一様に圧密圧力 P_0 の状態であるとし、そのときのそれぞれの粘土の f の値を f_0 とする(このとき f_r は当然 z に対して一定である。)このときの深さの座標を原始座標 z_0 とする。圧密によって粘土の体積が減少すると、当然それぞれの粘土の z 座標は変化する。この変座標 z と原始座標 z_0 との関係は

$$dz = -\frac{f}{f_0} dz_0 \quad (6)$$

となり圧密の進行(f の減少)とともに dz は減少していく。この関係を用いて変座標 z に関する方程式(5)を、原始座標 z_0 に関する方程式に変換すると次式を得る。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = C_{vr} \left[\left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \left\{ \frac{\partial^2 \epsilon_r}{\partial z_0^2} + \frac{f-f_2}{f} \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_0} \right)^2 \right\} - \left(\frac{f_0}{f} \right) \frac{d}{dz_0} (m_{vr} f') \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_0} \right] + \left(\frac{f_0}{f} \right) \frac{\partial C_{vr}}{\partial z_0} \left\{ \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_0} \left(\frac{f_0}{f} \right) - m_{vr} f' \right\} \quad (7)$$

自重の影響を含まない場合には式(7)で $f' = 0$ とおいて次式を得る。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = C_{vr} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \left[\frac{\partial^2 \epsilon_r}{\partial z_0^2} + \frac{f-f_2}{f} \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_0} \right)^2 \right] + \frac{\partial C_{vr}}{\partial z_0} \cdot \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_0} \quad (8)$$

この式を差分式に直して初期状態から順次計算していくわけである。

モデル地盤の設定

モデル地盤として図-2の3種類を設定した。粘土は $C_c = 0.8$ の高圧縮性で $C_{vr} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{day}$ の粘土I、および $C_c = 0.4$ のシルト的な粘土IIの2種を選んだ。粘土IIの C_{vr} は $1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{day}$ に変化させるものとした。これは m_{vr} が $f - \log p$ 関係から決まっているので f を変えたことになる。 C_v の値は $C_v = C_c \cdot (f - f_0)/f$ から図-3のように変化する。

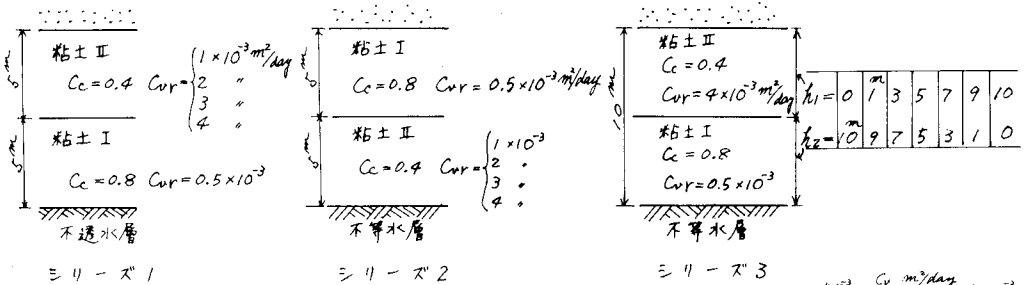


図-2 モデル地盤

シリーズ1は $f - \log p$ 関係の異なる2種の粘土が層厚5mずつ計10mの片面排水条件にあり、上層の C_{vr} の値を下層の2、4、6、8倍に変えた場合である。シリーズ2はシリーズ1の上下層を逆にしたものである。

シリーズ3は上層、下層の層厚を全層厚10mの片面排水条件で図のように7通りに変化した場合である。

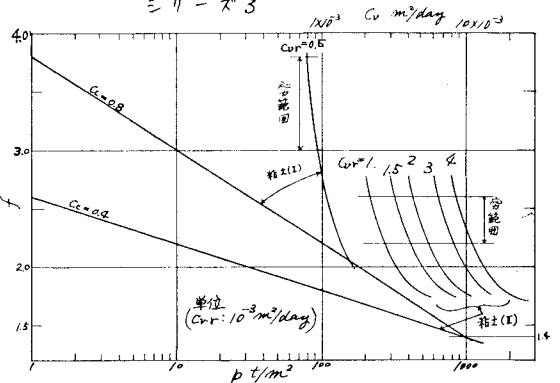


図-3 土の圧密特性

圧密荷重条件は粘土層の自重を考慮せず、初期状態として $P_0 = 1 \text{ t/m}^2$ 、最終圧力として $P_f = 10 \text{ t/m}^2$ とした。

数値計算上の問題点と対策

数値計算を行なう際に式(8)の $2C_{vr}/2z_0$ は今回のモデルでは C_{vr} が圧密中一定であるから dC_{vr}/dz_0 となる。 C_{vr} は層の変わり目で不連続であるから本来微分不可能であるが、差分によって平均的に近似させて計算を行なう。ところが、図-4を参照して、点④の dC_{vr}/dz_0 を単純に

$$\frac{dC_{vr}}{dz_0} = \frac{C_{vrII} - C_{vrI}}{2\Delta z_0}$$

とし、式(8)右辺左端の C_{vr} の値を C_{vrI} として計算すると I 層の C_{vr} が II 層の 6 倍以上の場合には点④の E_r が最終値を越えてしまい、また II 層の C_{vr} が I 層の 6 倍以上の場合には膨張してしまう。

そこでこの場合の差分の意味から、同図点④が点①～点③までの 2 区間の平均的な土質を代表するものとする、点④の C_{vr} として用いるべき値は

$$\text{点④} : \tilde{C}_{vr④} = \frac{3}{4} C_{vrI} + \frac{1}{4} C_{vrII}$$

同様に点①に対しては

$$\text{点①} : \tilde{C}_{vr①} = \frac{1}{4} C_{vrI} + \frac{3}{4} C_{vrII}$$

となる。 dC_{vr}/dz_0 の値はこれらを用いて

$$\text{点④} : (\tilde{C}_{vr④} - C_{vrI}) / 2\Delta z_0$$

$$\text{点①} : (C_{vrII} - \tilde{C}_{vr①}) / 2\Delta z_0$$

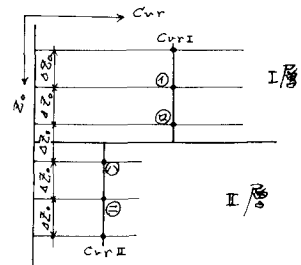


図-4

とした。点①、②は境界から独立しているものと考え、 $dC_{vr}/dz_0 = 0$ として計算を行った。

計算結果

図-5、6はそれぞれシリーズ1、2の計算結果を時間-圧密度曲線で表わしたものである。これらの図には上層あるいは下層の粘土が層厚10mの均一地盤であるとき、および上層の C_{vr} が無限大(右が無限大)の場合(シリーズ1、図-5)の沈下曲線をもあわせて示した。

シリーズ1 (図-5) では上層の C_{vr} が大きくなると圧密時間は短くなり、 C_{vr} 無限大では上層の沈下は瞬間的に終わり、下層の圧密時間のみにかかる。圧密は上層から下層に及ぶわけであるから、シリーズ2、(図-6) では $t = 400$ 日までは、下層の影響は受けず1本の沈下曲線をたどり、それ以後下層の C_{vr} の差の影響を受けて別れてくる。しかしこの場合はシリーズ1に比較して C_{vr} のちがいはよる圧密時間の差は小さく、結局排水面に近い部分の透水性の変化がより大きく圧密速度に影響を与えていることがわかる。

図-7、8はそれぞれシリーズ1、2の圧縮ヒズミの等時線図をまとめて描

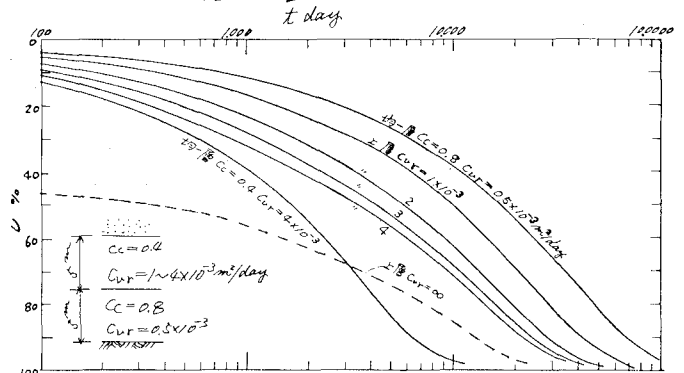


図-5 シリーズ1の t-U 曲線

いたものである。上層の $C_{\alpha r}$ が下層に比べて大きい場合には(シリーズ1)上層の $C_{\alpha r}$ が大きいほど(右が大きいほど)等時線は直線に近くなる。また下層の $C_{\alpha r}$ が上層より大きい場合には(シリーズ2)下層の $C_{\alpha r}$ が大きいほど等時線は鉛直に近づく。

図-9はシリーズ3の時間-圧密曲線である。圧縮性が低く $C_{\alpha r}$ の大きい上層の割合が大きくなるほど圧密時間が短くなり、沈下曲線が規則的に左方へ移動していく。 $C_{\alpha r}$ の大きい上層が厚くなっていくと、圧密初期の沈下速度が速くなる。さらに上層が厚くなっていくと後半の圧密速度も速くなっていき、次第に均一層の場合に近づく。

このシリーズでは上層の $C_{\alpha r}$ が下層の5倍と大きいので、上層が1mと薄いときには上層は瞬間的に沈下するものと見なして9mの下層のみの圧密時間で考えこも(破線)誤差は少ない。しかし上層が厚くなっていくと(3mの場合など)上層の影響は無視できなくなり、不均等地盤として計算する必要がある。

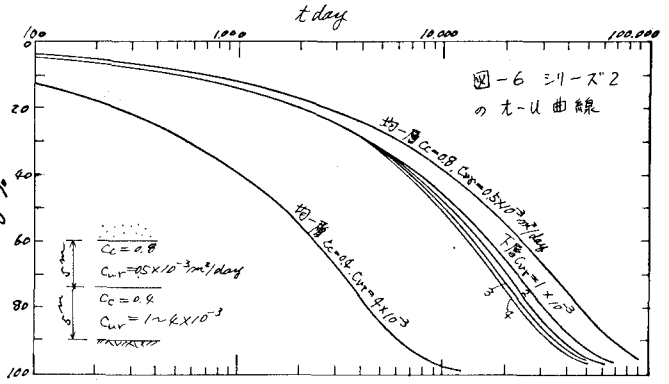


図-6 シリーズ2のU-t曲線

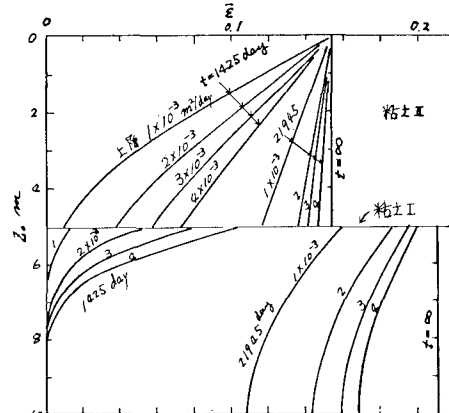


図-7 シリーズ1の等時線

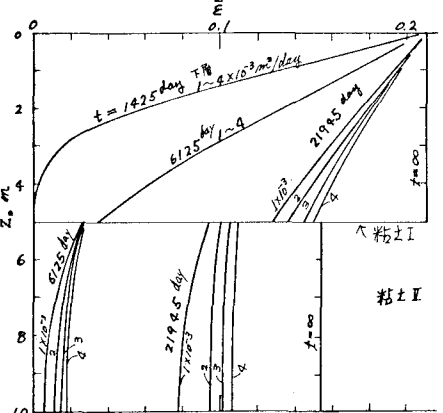


図-8 シリーズ2の等時線

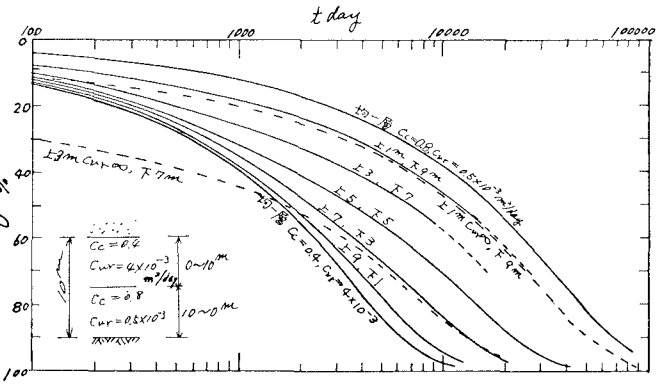


図-9 シリーズ3のU-t曲線

参考文献 1) M.B Abbott, One-dimensional consolidation of multi-layered soils, Geotechnique, 1960
 2) Gray, H. Simultaneous consolidation of contiguous layers of unlike compressible soils. A.S.C.E 1945
 3) 三笠, 高田, 東田, 不均等地盤の圧密計算例, 第26回土木学会講演会講演概要 1971
 4) 三笠, 高田, 磯野, 深さ方向に圧縮性の異なった地盤の圧密計算, 第20回土木学会講演概要 1965