

四日本工業大学 正員 山内豊隆
九州大学工学部 正員 山内豊隆

1. まえがき

Terzaghi の圧密理論における多くの仮定を除去して、一般化させることによつて、より厳密性をもたせようとする試みが最近の圧密論の動向のようになっている。なかでも圧密過程時の応力～ヒズミに関する線型の仮定は、正規圧密粘土において実験的に得られる(1)式としばしば矛盾する。

$$e = e_0 - C_c (\log \sigma' - \log \sigma'_0) \quad (1)$$

これに基づいて Davis¹⁾らおよび Barden²⁾らは、Terzaghi 理論を修正して非線型圧密理論を導いている。また Janbu³⁾は別の見地から、応力～ヒズミの非線型式にもとづく圧密理論を導いた。

ところで、著者らは泥炭等の著しい圧縮性を示す土の $e \sim \sigma'$ の関係を調べた結果、多くの場合(1)式よりは次式で表わす方がより実験事実に近い便利であることがわかった。

$$e = e_0 - (1 + \alpha) \sigma'^m \quad (2)$$

こゝに、 m は定数である。(2)式にすれば応力 σ' とヒズミ ε との間には、

$$\varepsilon = \alpha \sigma'^m \quad (3)$$

なる関係があることを示しており、これに基づいて泥炭等の著しい圧縮性を示す土の一次元圧密理論式を導いた。理論式の数値計算は十分には得られてはいないが、Terzaghi 理論の結果と比較することによつて、泥炭等の圧縮性の著しい土の圧密について、二、三の興味ある事実がわかつたので報告する。なお本文では二次圧密の影響は考慮に入れていない。

2. 理論式について

修正理論式の誘導の詳細については省略する。用いた仮定は応力～ヒズミの線型性を除いては、Terzaghi 理論と同一であり、さらに一般性を与える意味で、圧密係数 C_c が圧密時に変化する実験事実を考慮に入れた場合についても検討を行ったが、その点については次報に譲ることとし、今回は $C_c = \text{constant}$ の場合に限って報告する。

得られた理論式は次の通りである。

$$\partial \sigma' / \partial t = C_c \left\{ \frac{1}{\sigma'} (m-1) \cdot (\partial \sigma' / \partial z)^2 + (\partial^2 \sigma' / \partial z^2) \right\} \quad (4-a)$$

あるいは、

$$\partial u / \partial t = -C_c \left\{ \frac{1}{\sigma'} (m-1) \cdot (\partial u / \partial z)^2 - (\partial^2 u / \partial z^2) \right\} \quad (4-b)$$

(4)式において、 $m=1$ と仮定すれば(おちち(3)式において $\varepsilon = \alpha \sigma'$ と仮定して Terzaghi 理論に対応する)、

$$\partial \sigma' / \partial t = C_c \partial^2 \sigma' / \partial z^2, \quad \partial u / \partial t = C_c \partial^2 u / \partial z^2 \quad (5-a, b)$$

となり、Terzaghi の理論式に同一となる。つまり(4)式からおちち、Terzaghi の理論式は(4)式の特殊な場合と考えることができる。

3. 理論式の解

(4)式は非線型であるが、次のように変数変換することによって解くことができる。

$$\lambda = (\sigma'/\sigma_f')^m \quad (6)$$

ここで、 σ_f' , σ' , u の間には図-1.のよう関係があり、記号の意味は次の通りである。 σ_f' : 最終状態における有効応力, σ_0' : $t=0$ における有効応力, σ' : 圧密中の任意時刻における有効応力, u_0 : $t=0$ における間隙水圧, u : 圧密中の任意時刻における間隙水圧である。(6)式によつて(4)式を変換すれば、

$$\partial \lambda / \partial t = c_v \partial^2 \lambda / \partial z^2 \quad (7)$$

となり u についての Terzaghi 理論式と同形になる。ただし、境界条件は次のように変化する(両面排水の場合)。

$$t=0, z \geq 0 \text{ において, } \lambda = \lambda_0 \quad (8-a)$$

$$z=0, t \geq 0 \text{ において, } \lambda = 1 \quad (8-b)$$

$$z=2H, t \geq 0 \text{ において, } \lambda = 1 \quad (8-c)$$

境界条件を簡単にするために、

$$\theta = (\lambda - 1) / (\lambda_0 - 1) \quad (9)$$

とすると、(7)式は、

$$\partial \theta / \partial t = c_v (\partial^2 \theta / \partial z^2) \quad (10)$$

となり、境界条件も

$$t=0, z \geq 0 \text{ において, } \theta = 1 \quad (11-a)$$

$$z=0, t \geq 0 \text{ において, } \theta = 0 \quad (11-b)$$

$$z=2H, t \geq 0 \text{ において, } \theta = 0 \quad (11-c)$$

のように変る。(11)式の境界条件のもとで(10)式は容易に解ける。

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} [1 - (-1)^n] \cdot \frac{2}{n\pi} \cdot [\exp(-c_v \frac{n^2 \pi^2}{4H^2} t)] \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (12)$$

(12)式は u についての Terzaghi 理論式の解と同形である。

4. 圧密度について

i) 深さ z 点における間隙水圧に関する圧密度 U_z は次のようにして求められる。(9)式より、 $\lambda = \theta(\lambda_0 - 1) + 1$

より $\lambda = (\sigma'/\sigma_f')^m$, $\lambda_0 = (\sigma_0'/\sigma_f')^m$ を代入し、間隙水圧について解けば、

$$u = \sigma_f' [1 - \{\theta(q^m - 1) + 1\}^{\frac{1}{m}}] \quad (13)$$

となる。よつて、 U_z は、

$$\begin{aligned} U_z &= 1 - u/u_0 \\ &= 1 - \frac{1}{(1 - q)} \cdot [1 - \{\theta(q^m - 1) + 1\}^{\frac{1}{m}}] \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここに、 $q = (\sigma_0'/\sigma_f')$ である。

ii) 深さ z 点におけるヒズミに関する圧密度 V_z は

$$\begin{aligned} V_z &= (e_0 - e) / (e_0 - e_f) \\ &= (\sigma_0'^m - \sigma'^m) / (\sigma_0'^m - \sigma_f'^m) = 1 - \theta \end{aligned} \quad (15)$$

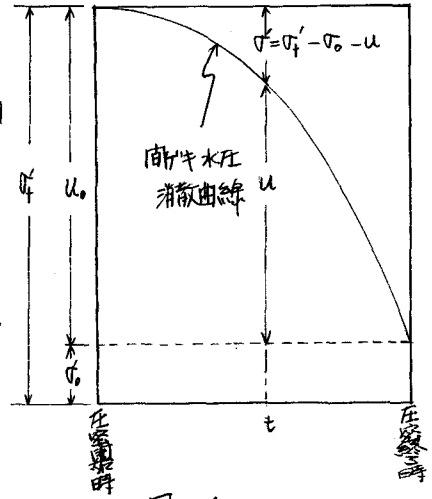


図-1.

となる。すなわち、ヒズミについての圧密度は Terzaghi 理論と同一となり、(1)式を仮定して Davisらの理論と同一の結論が得られる。

i), ii)より固相キ水圧に關する圧密度とヒズミに關する圧密度とは異なりとなり、従来の理論と考へ併せてみると、圧密現象と熱伝導と相似の現象であるとして、一般化を論ずる際は、固相キ水圧についての(5-b)式より、三要素理論によるヒズミについての、

$$\partial \varepsilon / \partial t = c_v \cdot (\partial^2 \varepsilon / \partial z^2) \quad (16)$$

で表わす方が適當であることとなる。

5. 数値計算結果と考察

固相キ水圧についての圧密度に關する詳細な数値計算は得られていないので、1例を報告するに止める。

(14)式において、

$$g = (v'_0 / v'_f) = v'_0 / (v'_0 + u_0) = 1 / (1 + u_0 / v'_0) = 1 + 1 / (1 + \Delta p / p) \quad (17)$$

であるから、 g は荷重増大比 $\Delta p / p$ によつてきまる。

例として $\Delta p / p = 0.5$ ($g = 0.667$), 2.0 ($g = 0.333$) の場合を取り上げる。また m は $\log e \sim \log \sigma'$ における直線部の傾きを表わすものであるが、著者らの実験結果および大平らの実験結果によれば、多くの場合 $m = 0.4 \sim 0.5$ 付近と見なすので、 $m = 0.5$ と仮定して、 $g = 0.667$ の場合の isocrone を図-2.に、 $g = 0.333$ の場合の isocrone を図-3.にそれぞれ示す。また夫々の場合についての平均圧密度 $\bar{v}$ と時間係数 T_v の関係を Terzaghi 理論と比較して図-4.に示す。

本論文の isocrone は、Terzaghi 理論によるものに比較してわずかに左側に現われ、固相キ水圧の有散を考慮することからわかる。すなわち、Terzaghi の理論式によつて求めらる圧密時の有効応力は、ヤレ断抵抗等を知らず際に危険側の値と見なすこととなる。

また少ない計算結果からはつきり結論はできないうが、 Δp が大きい方が、有散の考慮が著しいのであるがこの点についての詳細な検討は早急に行ないたいと考えてゐる。

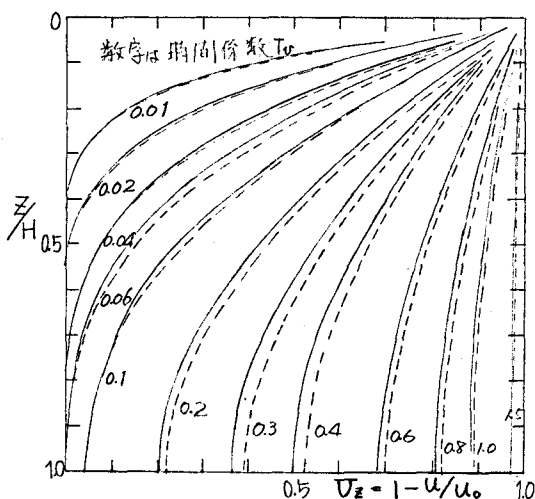


図-2. $m=0.5, g=0.667$ の場合の isocrone (実線は Terzaghi 理論によるもの)

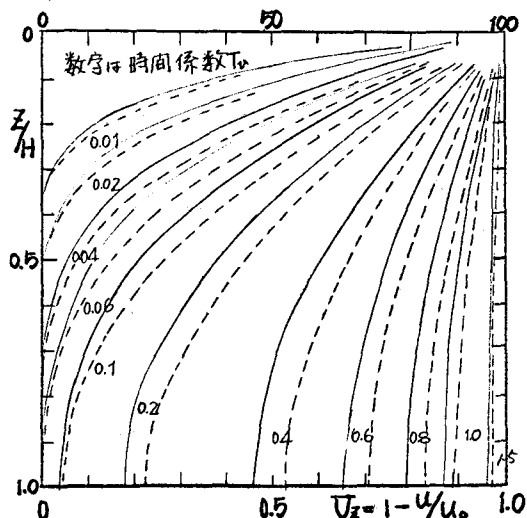


図-3. $m=0.5, g=0.333$ の場合の isocrone (実線は Terzaghi 理論によるもの)

6. あとがき

以上をまとめると次のようになる。

i) 本文では、応力-ひずミの非線型式に基いた一般化的圧密理論式が得られた。

ii) 熱伝導と相似の現象として、圧密現象の一般化を論ずるに当たっては、固相の水圧についてよりは、ヒズミに関する(16)式で表わす方が妥当である。

iii) 本理論によれば、泥炭等の著しい圧縮性を示す土の固相水圧の消散は、Terzaghi理論によるものよりかなり遅延し、これによってセリ断抵抗等を求める際には有効応力を危険値に見積ることになり注意を要する。

iv) 固相水圧の消散は(16)式の値が大きいほど遅延するようであるが、これについてはもっと詳細な検討を行いたい。

なお、i)他の非線型圧密理論との比較、ii) C_{α} の変化を考慮に入れた場合についての検討結果は次回に報告する予定である。

参考文献

- 1) Davis, E. H. and G. P. Raymond (1965): Non-linear Theory of Consolidation, Geotechnique, Vol. 15
- 2) Barden, L. and P. L. Barry (1965): Consolidation of Normally Consolidated Clay, Proc. Am. Soc. Civ. Engs., 91-SM-15
- 3) Janbu, N. (1965): Consolidation of Clay Layers Based on Non-linear Stress-Strain, Proc. 6th Int. Conf. S.M.F.E., 2-83
- 4) 大平至徳・小谷章 (1968): 軟弱土の固相水圧に圧力関係についての一考察, 第23回土木学会年次学術講演会講演概要

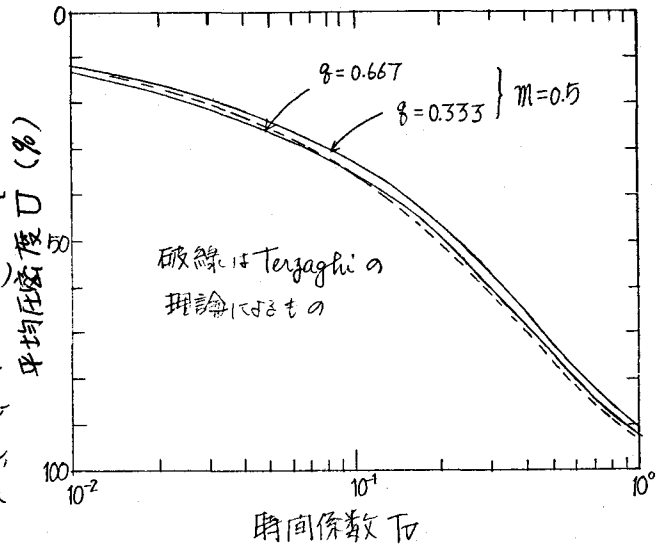


図-4. $m=0.5$ の場合の圧密度と時間係数の関係