

III-483

非ダルシー流れが一次元圧密沈下速度に及ぼす影響

○ 東海大学大学院 学会員 村上聡彦
東海大学工学部 正会員 稲田倍穂
東海大学工学部 正会員 本間重雄

まえがき

Terzaghiの一次元圧密理論では、間隙水の流動則としてDarcy則(動水勾配 i と平均流速 V の線形性)を仮定している。しかし、難透水性の粘土においては、動水勾配 i と平均流速 V との関係が原点を通る直線から外れる場合のあること(非Darcy挙動)がかねてから指摘されている。^{1)~4)}

本研究では、一次元圧密過程における飽和粘土の透水特性を変水位透水試験により直接測定し、特に低動水勾配域における透水特性の変化と、それが圧密沈下速度に及ぼす影響について検討したので、その概要を報告する。

実験概要

実験に用いた試料は最大粒径 $425\mu\text{m}$ 、粘土分含有率45%、 $LL=76\%$ 、 $PL=45\%$ の粘土で、これを液性限界以上の含水比で十分練り返し、密封型鋼製タンクの中で $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ の空気圧で3週間予圧密を行った。その試料を標準圧密試験器にセットし、圧密圧力 $p=0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ から24時間ごとに荷重増分比1の割合で $3.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ まで段階荷荷を行った。各圧密圧力のもとで供試体を24時間圧密した後、荷重レバーを固定し、変位が進行しない状態で直ちに変水位透水試験を実施した。実験方法は、標準圧密試験器の下部排水コックに低動水勾配透水試験用の降水管(内径0.25, 0.15, 0.12cmのガラス管を用い、動水勾配 $i=0.2\sim 20$ について測定)、ならびに高動水勾配透水試験用の二重管ビュレット(作用空気圧 $0.05\sim 1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$:動水勾配 $i=30\sim 600$ について測定)を接続し、種々の動水勾配のもとで透水試験を行った。

図-1は、透水試験より得られた動水勾配 i と供試体中の平均流速 V の関係を示したもので、(b)の動水勾配の大きい領域ではいずれの圧密圧力についても V と i とは直線関係を示し、圧密圧力の増加につれて透水係数($V\sim i$ の勾配)は規則的に減少している。(a)は $i\leq 20$ の低動水勾配域を拡大したもので、圧密圧力ごとに異なった動水勾配のところで勾配が変化する状況がみられ、原点を通る直線(Darcy流れ)とはなっていない。ここで、直線の折れ曲がり点の動水勾配を限界動水勾配 i_c とすると、 i_c の大きさは圧密圧力の大きさに依存して変化している。

以上の圧密による試料の透水性の変化を、各荷重段階における24時間圧密後の供試体間隙比 e との関係で整理してみる。 i_c 以上の領域における透水係数 k_L と e との関係は図-2に示す通り、一般に言われている $e\sim \log k_L$ 上での直線関係が認められる。

i_c の大きさは、図-1からも見られるとおり圧密圧力の増加に伴う間隙比の減少につれて増大する

傾向にあり、両者の関係は図-3に示すとおりの $e\sim \log i_c$ 上ではほぼ直線関係が認められる。 i_c 以下の低動水勾配域における $V\sim i$ 関係については、指数関数による近似が種々提案されているが^{1)~3)}、ここでは一次元圧密解

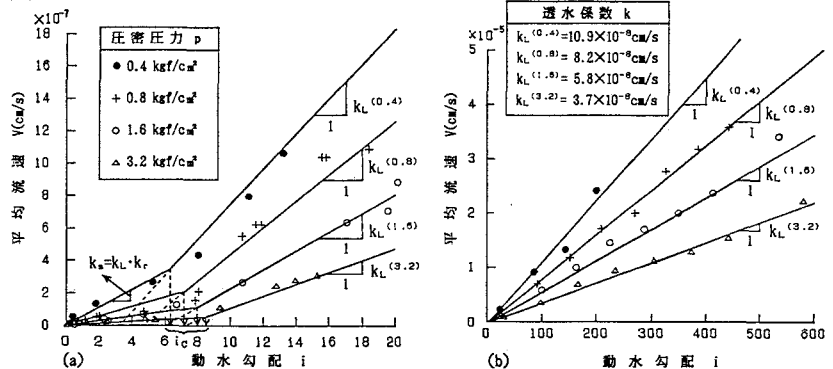


図-1 動水勾配 i と平均流速 V の関係

析全体に対する精度的なバランスを考え、以下の領域でも $v-i$ 関係を原点を通る直線で近似した。その直線の勾配 k_s と i_c 以上の透水係数 k_L との比 $k_r (=k_s/k_L)$ を求め、低動水勾配域における透水性の減少率を検討すると、図-3に示す $e \sim \log k_r$ 上での直線関係が認められる。

非ダルシー流れが圧密沈下速度に及ぼす影響

実験結果にもとづいて、非Darcy流れを考慮した一次元圧密沈下解析を行った。透水則としては図-2, 3中に示す実験結果を、骨格の変形特性としては $e \sim \log \sigma'_v$ の勾配 C_c を用いた(みかけの非線形弾性を仮定)。解析に用いた基礎方程式は、

$$\text{質量保存則} \quad \dot{e} = -(1 + e_0) \frac{\partial v}{\partial a} \quad (1)$$

透水則+力の釣合

$$i \geq i_c \text{ に対して} \quad v = \frac{k_L(e)}{\gamma_w} \left\{ \frac{1+e_0}{1+e} \left(\frac{\partial \sigma'_v}{\partial a} + \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e_0} \right) - (1-k_r(e)) \gamma_w i_c(e) \right\} \quad (2.a)$$

$$i < i_c \text{ に対して} \quad v = \frac{k_r(e)k_L(e)}{\gamma_w} \frac{1+e_0}{1+e} \left(\frac{\partial \sigma'_v}{\partial a} + \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e_0} \right) \quad (2.b)$$

骨格の構成式

$$\sigma'_v = \sigma'_0 \exp \left\{ \frac{2.3(e_0 - e)}{C_c} \right\} \quad (3)$$

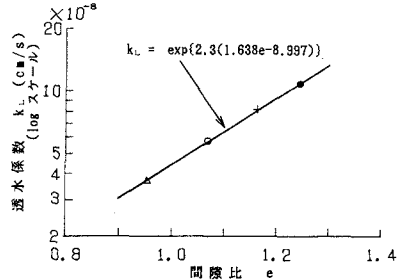


図-2 $e \sim \log k_L$ 関係

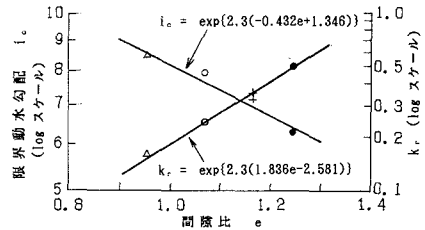


図-3 $e \sim \log i_c, e \sim \log k_r$ 関係

であり、線形透水則(Darcy流れ)の場合は、式(2.a)で $i_c(e)=0$ となる。式(1)~(3)をカップリング解法⁴⁾により数値計算し、粘土層厚を供試体の1, 2, 10, 100, 1000 倍とした場合について時間-圧密曲線を求めた。計算結果(図-4)によれば、層厚 2, 4cmでは粘土中の動水勾配が i_c 以下の状態となるのは圧密の終期であり、全体の圧密曲線はDarcy流れの場合とほとんど重なるが、層厚の増大につれて $i < i_c$ の発現時間は次第に早期化し、圧密沈下速度に及ぼす非Darcy流れの影響が顕在化する。図-5はある圧密度に達するまでの所要時間を非Darcy流れ(t^{ND})とDarcy流れ(t^D)の比(t^{ND}/t^D)をとって粘土層厚ごとに示したもので、層厚が非常に厚い場合(1000倍程度)では、圧密速度は i_c 以下の透水性の低下率を示す k_r のおおよそ逆数値の時間遅れを伴う。層厚が供試体の数10~数100倍の場合には、粘土中の動水勾配は $i \geq i_c$ から $i < i_c$ へと推移し、圧密沈下速度は圧密度の増加に伴い次第に低下する結果となる。なお、標準圧密試験結果から現場の長期圧密沈下を予測する場合には、非Darcy流れの影響と共に、粘土骨格のクリープの変形要素を考慮する必要があると思われる。

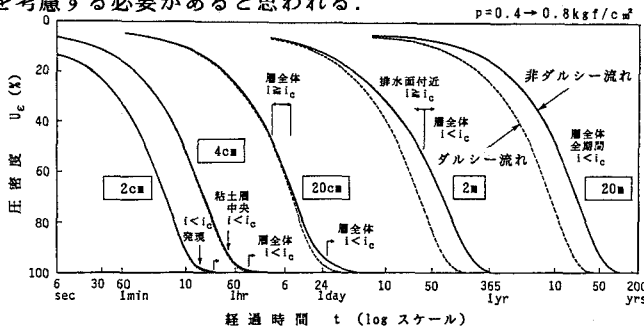


図-4 時間-圧密量(圧密度)曲線

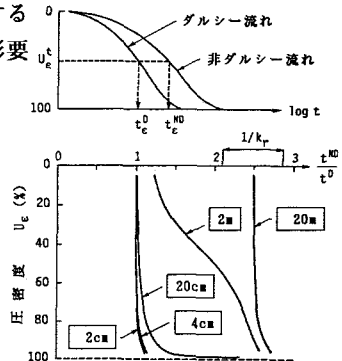


図-5 非Darcy流れが圧密速度に及ぼす影響

参考文献:1)Hansbo(1960):Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drain, Swedish Geotech. Inst. Proc. 2)Swartzendruber(1962):Non-Darcy flow behavior in liquid saturated porous media, J.Geophys. res. pp.5205-5213 3)吉国・桑重(1979):飽和粘土の低動水勾配域における透水特性, 第14回土質工学研究発表会講演概要集pp.213-217 4)今井(1992):飽和土の一次元圧密, わかり易い土質力学原論, 土質工学会