

前日本工業大学 正員 O 宇原一哉

九州大学 工学部 正員 山内豊聡

前日本工業大学 学生員 石丸謙次

1. まえがき 粘土の二次圧密は Terzaghi に以後の圧密論の主要な研究課題であった。理論的には, Taylor, Gibson, Schiffman, Barden らの一連の研究があるが、いずれも理論的興味に止まり、実際問題解決に役立っているとはいえない。また、実験的には室内実験で得られた二次圧密の性状を数式化して適用に役ぼうとする試みが Buisman, Kopperjan, Hansen および Bjerrum らにおいて行われている。この二次圧密時性状は、主として oedometer による圧密試験において検討されるが、これに影響する要因はきわめて複雑である。その理由は、物理現象的因子と機械的因子が互に複雑な要因となり得ないためであり、これらを総括して説明することは至難と思われる。概してこの要因のうちに膨潤の問題に若干触れられた物理現象的因子のみを考察し、実験結果との照合を行なったことがある。また oedometer における機械的な欠点を除去した三軸 K₀ 圧密試験結果と従来の標準圧密試験結果との比較も併せて示している。

2. 二次圧密の要因について 圧密状下曲線の後部部分は通常時間対数に關して直線性を示すことから二次圧密を $\epsilon_s = at + b \log t$ の形で示す。これから、二次圧密を $d\epsilon/d \log t = b$ なる定数として表わしその要因を考察する。2.1 初期性状依存性: Mesri⁽¹⁾によれば二次圧密速度は一次圧密同様初期含水量に依存するといふ。粘土の性状に關して確められている。このことは初期含水量に依存するであり、さらに初期粘土粒子濃度といふべき単位体積あたりに存在する粘土粒子数が多いほど b の値が大きくなる。そこで次の表示が可能になる。

$$d\epsilon/d \log t = k_1 c_1 e_0^{n_1} \quad (1)$$

ここで、 e_0 : 初期含水量比、 c_1 : 粘土構造に依存する係数、 k_1 : 速度定数である。(1)式は電気二重層をもち二粒子が接近しお隣の凝集速度 $-dN/dt = k_2 N^2$ (N : 粒子数/volume) に類似している。ここで、 K_0 は粒子間にエネルギー障壁があるとき、

$$k_2' = 4\pi D_0 a = \frac{2}{3} \cdot \frac{kT}{q} \quad (2)$$

で表わされる。一方、エネルギー障壁があるとき速度定数を k' とすると $k' < k_2'$ であり

$$k' = k_2' \exp(-V_{max}/kT) \quad (3)$$

で表わされる。ここで、 V_{max} はボルツマンエネルギーの最大値である。2.2 圧密荷重依存性: 応力や変形が過去に及ぼす履歴の影響⁽²⁾とすると、粘弾性学において知られるように次のような Boltzmann の重畳定理が成立する。

$$\epsilon(t) = p(t)/\gamma - \int_0^t g(t-\tau) p(\tau) d\tau \quad (== g(t-\tau) = \frac{\gamma}{\sigma_m} \exp(-\frac{t-\tau}{\sigma_m})) \quad (4)$$

粘土の圧密のようは一変応力を加えるときは、 $\epsilon(t) = J(t) p_0$ となることから、

$$d\epsilon/d \log t = dJ(t) \cdot p_0 / d \log t \quad (5)$$

となる。したがって二次圧密速度は圧密荷重に依存するといふことができる。

2.3. 有効応力比 (τ_d/σ_m) の影響: 二水⁽³⁾

の粘土の特性に関する研究によれば、せん断速度は (τ_d/σ_m) ($\tau_d = \sigma_1' - \sigma_3'$, $\sigma_m' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3')$) に比例して大きくなる。二次圧密においては K_0 値の小さなものは二次圧密速度は大きくなるという事実からは示されており、このことは逆に言えば (τ_d/σ_m) にもつて上記のとおり関係が認められる。これから、

$$d\epsilon/d \log t = C_k (\tau_d/\sigma_m)^{n_2} \quad (6)$$

と書ける。³⁾ 2.4 粘土構造の影響 (edge to face の接触面数): せん断は粘土粒子の sliding に依存するといふから、粒子の接触面の数に依存すると考えられる。このことは、粘土粒子の端面接触面積の繁複した粘土構造の特性が大きいことを示している。このことは (1) 式の C_1 が大きいといふことと一致する。そこで、粘土粒子数を N_0 、接触面数を N_c とすると、

$$C_1 = (N_c/N_0) \cdot \alpha \quad (\alpha: 係数) \quad (7)$$

と定数とすることができる。 C_1 が大きいものは edge to face が発達しているものとする。議論を簡単にするためにこれらの要因を加えて表わし、 $d\epsilon/d \log t$ 値に影響するといふ。以上より、変形履歴におけるエネルギー障壁が存在すると考えらる。粘土の圧密においては、

$$\begin{aligned} d\epsilon/d \log t &= k' c_1 e_0^{n_1} (\tau_d/\sigma_m)^{n_2} (N_0 - N_c) \cdot p_0 \\ &= k_2' \exp(-V_{max}/kT) \cdot e_0^{n_1} \cdot (\tau_d/\sigma_m)^{n_2} \cdot (N_c/N_0) \cdot \alpha \cdot p_0 \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{3} (kT/\eta) \exp(-T_{max}/kT) e^{N_1} \cdot (T/\eta_{max})^{1/2} \cdot (N_e/N_0) \cdot d \cdot p_0 \text{-----} (8)$$

が得られる。ただし、正規圧縮率では T_{max} なるエネルギー障壁が消失して $\exp(-T_{max}/kT) = 1$ とする。

3. 二次圧縮に関する若干の実験

以上の考察をもとに二次圧縮に及ぼす影響因子を室内実験の結果と検討する。3.1 液分の性状の影響：粘土の液分の性状に及ぼす要因のうち、陽イオンの種類やその濃度が重要である。カオリンは、液分条件を変えるため塩化ナトリウム、硫酸マグネシウム、ナトリウム硫酸を添加して作製した人工圧縮土の標準圧縮試験による地下曲線から得られた二次圧縮率の傾向を示している。全液相を占めると思われるナトリウム硫酸添加土の液分比は初期液分比から最も大きい値である。硫酸添加土については硫酸マグネシウム試料と比較的人い値を示している。

3.2 塩分濃度の影響：粘土中の塩分濃度が高くなると、粘土の膨張力が増え、膨張率が増える。したがって、膨張率が増える。膨張率が増えることは、二次圧縮率が増えることを示している。図2は、この傾向を示している。

3.3 圧縮率の影響：自然試料や人工試料の圧縮率が増えることは、二次圧縮率が増えることを示している。図3は、この傾向を示している。図3における蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。図3は、蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。図3は、蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。

3.4 圧縮率の影響：圧縮率が増えることは、二次圧縮率が増えることを示している。図3は、この傾向を示している。図3における蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。図3は、蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。図3は、蒸留水試料を除くのは、蒸留水試料の圧縮率が他の試料よりも低いからである。

4. まとめ (1) 粘土の二次圧縮は、凝集の構造が圧縮と同様に小さくなる。(2) 塩分濃度が十分高くなると二次圧縮率が増える。(3) 粘土の膨張率が十分高いと二次圧縮率が増える、十分低いと二次圧縮率が増える。

引用文献 (1) 廣伊知：界面現象の基礎、朝倉書店、(2) 岡：高分子の粘弾性、材料書房、(3) 安藤(1973)：三軸装置による粘土の圧縮試験結果、土木学会、(4) 山崎、山内重郎：土工学基礎、建設学会、(5) 浅川(1970)：土工学における粘土の構造の問題、表面 Vol. 8, No. 12, pp. 1784-1790、(6) Meiri, G. (1973)：Coefficient of Secondary Compression, Proc. ASCE, SM1, pp. 123-137。

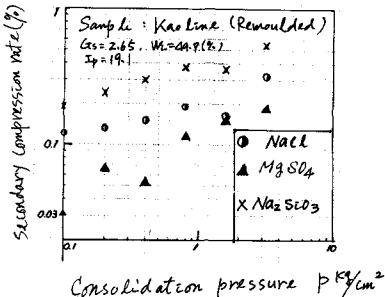


図-1 二次圧縮率に及ぼす液分の性状の影響

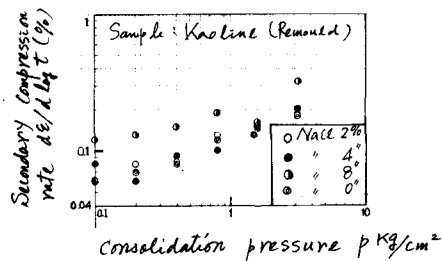


図-2 二次圧縮率に及ぼす塩分濃度の影響

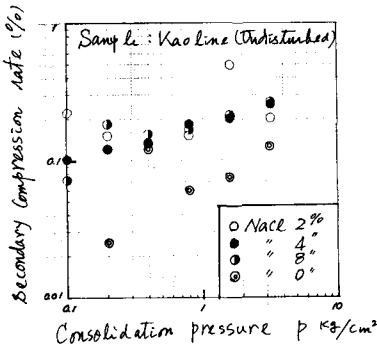


図-3 膨張率粘土の二次圧縮率

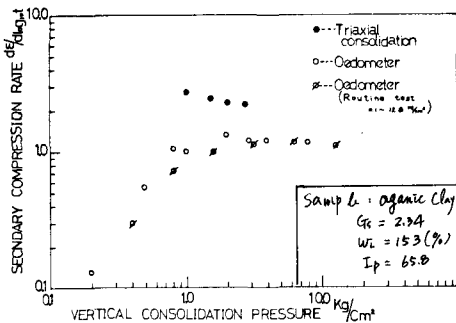


図-4 標準圧縮と三軸圧縮試験の二次圧縮率の比較