

秋田工専 正会員 ○伊藤 駿
長岡技術科学大学(学) 櫻田良治
電々公社 工藤 厚

1. 概要

結晶水をもつ粘土鉱物を介在する岩盤は、複雑な膨潤挙動を示すことが知られている。この膨潤挙動は主にモンモリロナイトに依るものと考えられ、吸水・膨潤・脱水過程で、砂質土と異なり、結晶構造が変化すると考えられている。これが岩盤破砕帯、軟岩に多く含まれるため、トンネルの変状とか地スベリ、軟弱地盤等の種々の地盤災害と密接な関係をもっていた。しかしこの膨潤の工学的性質は余り知られておらず、その現象説明は従来より強く要請されていた。本研究では岩盤の容積変化の一つである膨潤(Swelling)と、水とある種の粘土鉱物の界面活性による現象と考え、高膨潤性Na-モンモリロナイト(クニピア-F)を取り挙げ、試作装置により、一連の研究を行なってきた。その結果 Fig.1 に示されるような膨潤曲線を得、膨潤に関する構成方程式が導かれた。ここではさらにモンモリロナイト 50% を含む試料(M50)の膨潤挙動による力学的パラメータ間の関係と量的に把握すると共に、二平行板モデルに基く Van't Hoff 理論による膨潤圧の検討も行なった。

2. 考察

試料の初期含水比(Wi)と色々変え膨潤圧(Ps)の変化をみると、Fig.1 のようにWi が小さければ最終膨潤圧(Psf)が大きくなり、Wi が増加すればPs の増勢は緩慢でPsf は小さくなる。各試料共Psf に達するまでに長大な時間(t)を要するが、その関係は概ねS 字型成長曲線を描いた。この関係を導くと例えば、Fig.2 の中に示すモデル式となる。式中a, k は共にWi 等に支配される材料定数である。Fig.2 はこの式に基づいて計算した各Psf の予測曲線である。これと実験結果(Fig.1)を比較すると両者共非常に良く合致した(相関係数=0.99)。従ってこの式が膨潤現象を説明するのに十分なモデルであることがわかる。膨潤の成長曲線は最終的に頭打ちになっている。これは膨潤は外力と釣り合うまでの一種の収束クリープ現象であることを示すものである。モンモリロナイトを含むものかこのような膨潤圧を示すのは鉱物が結晶格子を拡大して孔隙に水を取り入れていくからであると考えられている。これは粒子間の反発力が増大し間ゲキ比が増加していく現象であると解釈して、膨潤に対応する間ゲキ比の変化(e_i =初期間ゲキ比, e_f =最終間ゲキ比)よりこれらの関係を図示するとFig.3 のようになる。これは土粒子間の間ゲキ比増加幅がPsf の大きいものほど大きいことを意味し、本実験では概略次のように整理された。

$$P_{sf} = 8.063 - 4.675 \log_{10} \left(\frac{e_f}{e_f - e_i} \right)$$

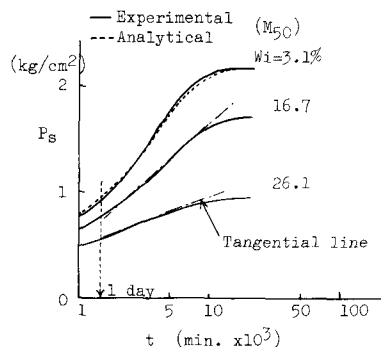


Fig.1 膨潤圧の比較図

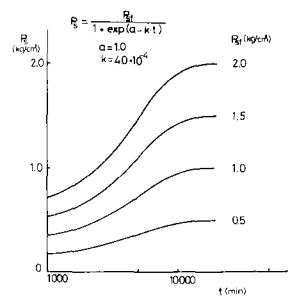


Fig.2 膨潤圧の予測図

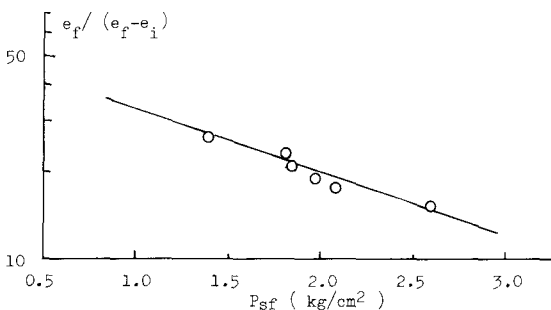


Fig.3 膨潤圧と間ゲキ比の関係

また、この間ゲキ比に基づき、Lambe らの定義している Swell index, C_s を $e \sim \log P_s$ カーブの直線部分より定め、これと Proctor の定義による締固めエネルギー (E_c : kg·cm/cm³) 及び両者の間の関係を調べると Fig.4 のような関係が見い出された。

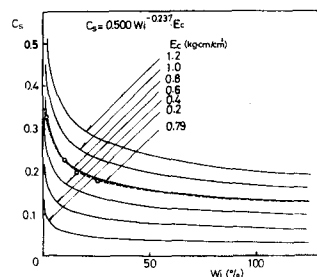
$$C_s = 0.500 \cdot W^{-0.237} \cdot E_c$$


Fig. 4 E_c による $C_s \sim W_i$ 図

図には本実験の $E_c = 0.79$ を実線で、主な実験結果を○印で記入した。この図により、膨潤の度合いを表わす C_s は W_i に逆比例し、また E_c に比例して影響を受け、岩盤の固結度や初期含水比の状態により、膨潤の変動幅が推測できることがわかった。

次に膨潤現象は Fig.1 で見たように、初期に緩慢、次に急速に増加する。この増勢領域で各 W_i による特徴が明瞭であり、また 1日以降解析結果との適合が良いことから、この部分の勾配を取り (Fig.1 の Tangential line), それを膨潤速度 $V_s (= \Delta P_s / \Delta t$, kg/cm²/sec) と定めれば、これと W_i との間には Fig.5 のような関係が認められる。この関係と上式を考慮すると、結局次のような関係式が導かれる。

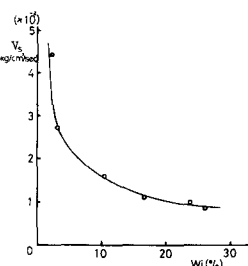


Fig. 5 $V_s \sim W_i$ 図

これを図示すると Fig.6 の如くとなる。図中には主な実験結果を丸印で記入した。この図によれば、 E_c , W_i は予め実験で判っているから、膨潤曲線の途中の V_s を測定することにより、最終的 P_{sf} などの値になるかが推定できる。

さて膨潤は、粘土粒子の表面の性質に起因するとし、これら粒子間の反発力であると考えられているが、体積増加等の外部にあらわれる膨潤は、イオンや塩類濃度に支配される浸透圧として、これに関する van't Hoff 式が適用される場合が多い。そこでこの式が成り立つものとし、

$$P_s = RT C_0 (C_0 / C_e + C_0 / C_c - 2), \quad C_c = \pi^2 / z^2 \cdot B \cdot (d + x_0)^2 \cdot 10^{-16}$$

により計算上の膨潤圧を求めてみる。ここで R =気体定数, T =絶対温度, C_0 =間ゲキ水の塩類濃度, C_c =2枚の粘土板の中間における陽イオン濃度, z =交換性陽イオンの価数, d =2枚の粘土板の距離の半, x_0 =補正係数。本実験では M_{50} ので試料の比表面積 (1750 m²/g) は半減する。また粒子は団粒塊バケット構造を成していてバケットフロウの中に 10³ の粒子が存在すると仮定する。そして d を含水比と比表面積より求め P_{sf} を計算したところ Fig.7 のようになった。図によれば W_i が小さい場合、 P_{sf} は極端に大きく $W_i < 10\%$ で実験結果との差が著しい。しかし $W_i > 10\%$ では両者は良く合っている。これは Na モンモリロナイトの収縮限界が約 10% であることとも何か関係がありそうである。しかし、この式は比表面積の定め方や E_c による影響の取り扱い方が難しいこと、及び砂が入って膨潤圧の作用しない砂間ゲキを収縮限界とした場合、これ以下の W_i では計算困難である。なお検討を要する課題である。

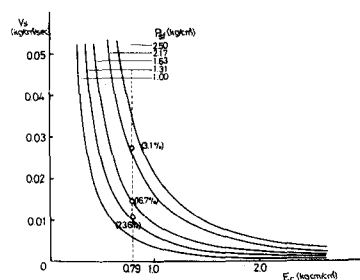


Fig. 6 P_{sf} による $V_s \sim E_c$ 図

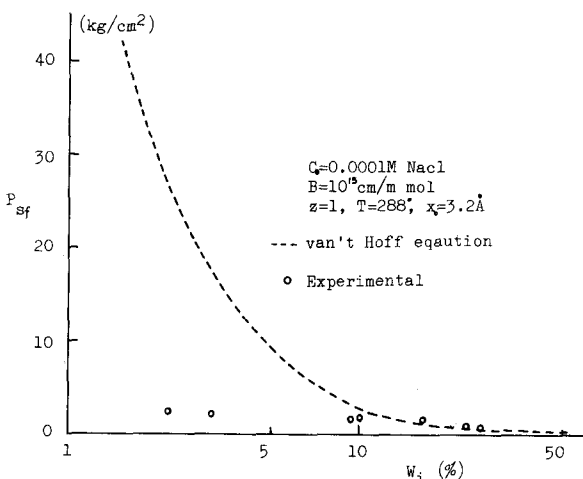


Fig. 7 van't Hoff 理論による P_{sf} と実験値