

モンモリロナイトを含む岩盤の膨潤挙動に関する基礎的研究

秋田工専 正会員 ○伊 藤 駿
東北大学工学部 堀 部 富 男

1. まえがき

土や岩盤は、間ゲキや割れ目に水を取り込むと、見かけの容積を増大して、周知のように、土木工事施工上障害となっている場合が多い。岩盤がその容積変化を起こす場合は膨張 (Expansion) と膨潤 (Swelling) の二通りが考えられるが、これには次に示すような事柄が挙げられる。

- (1) 水の吸着による機械的膨張
- (2) 層間に水が入るための容積変化
- (3) 層間以外の構造への加水による変化
- (4) 熱や圧力による結晶構造の変化
- (5) 地山応力の解放に伴う変形
- (6) 造構運動の際の潜在応力の解放
- (7) 岩か水の凍結

これらの容積変化は諸種の地盤災害の要因と密接な関係をもっているが、このうち膨潤は主として(2)の作用によることが多い。本研究では膨潤についてのみ取り挙げることにした。

さて膨潤挙動は水に関する現象であって、以下の諸因子

- (a) 含有粘土鉱物の種類及び量
- (b) 初期含水比 (c) 固結度
- (d) 土粒子の配列・骨組構造
- (e) 周圧の大きさ
- (f) 間ゲキ水の種類と濃度 (g) 温度

等によって支配されている。隧道掘きくにおける膨潤現象は例えばモンモリロナイトを含む風化した岩石類に多くみられ、かつこの膨潤の度合はこのモンモリロナイトの多寡によるところが極めて大きいと考えられる。しかし上記支配因子それぞれを種々に変えて実験を行なうことは実技上困難なため、未だ不明な点が数多い。しかも膨潤測定用実験装置として普遍的に使われている定格のものがなく、かつ温度条件を厳密にし長期間測定した類例も余り知見しない。そこで本研究では岩盤試料に見合う基礎資料を得るために、一定温度、モンモリロナイト一定含有率のもとで初期含水比を変えた試料について長期間に亘り、一軸的膨潤実験を行なった。その結果、膨潤現象予測に関する基礎的モデル式が導かれ、かつ又この現象には、確率統計論的な考え方も導入できることを見出した。

2. 実験装置・試料及び実験方法

実験装置は Fig.1 に示す通りで、実験に用いたモンモリロナイト (M100) は山形県国峯礦化工業 (株) 製の高純度ソジウムモンモリロナイト (クニビア F) である。これの X 線粉末回折の結果を Fig.2 (a) に示すが (001) 面にこの鉱物特有の鮮明な回折ピークが現われ、他に不純物がほとんどないことが判明した。この粉末に、塩酸処理を施し蒸留水で洗浄後炉乾したガラスビーズ (-325 mesh) を重量比で 1:1 に

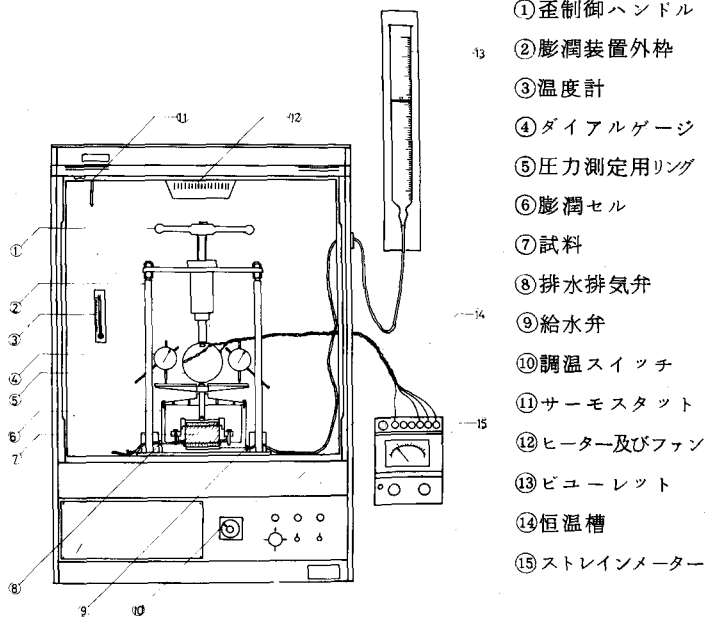


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

混合しこれを試料M50とした。そのX線回折の結果はFig. 2 (b)に示されている。これは(a)よりも全体的にモンモリロナイト(M)のピークが抑制され、さらに石英(Q)の存在が認められる。図中の 2θ はBragg angleを示している。この試料を目皿の下に水を入れたデシケータ中で日数を調整しながら養生し、初期含水比を変化させた。次にこれに一定の締固めエネルギーを与えて $\phi = 5\text{ cm}$, $h = 2\text{ cm}$ の容器につめ、Fig.1の⑥にセットした。この⑥は従来に比し、ステンレス製であるため錆が出ず、また試料と容器壁面及び底面の密着性が良好で、浸水時における岩石孔隙中の空気の放出が容易なことが特徴である。Fig.1の⑭は $0\sim 50^\circ\text{C}$ に調節可能な装置でこの中に②が密閉固定される。本実験ではこの温度を 15°C 一定とした。水は蒸留水とし⑬より下し⑨を通して⑦の下部に供給する。この時気泡が試料底面に残らないように⑧よりエア抜きを行なう。膨潤ヒズミ(E_s)は④により測定し、膨潤圧(P_s)はストレインゲージを貼付した⑤を介し、⑬で読み取って換算した。 P_s は、膨潤進行中①を調節して $E_s = 0$ に還元した時の値を以て表現することがあるが、この場合は調節が難しく原点の測定に精確を欠く恨みがあるので、ここではヒズミ制御を行なわない一軸的な膨潤を観察した。そして④の読みの進行速度がほぼ $0.01\text{ mm}/24\text{ hr}$ 以内に留まるところで実験を打ち切った。

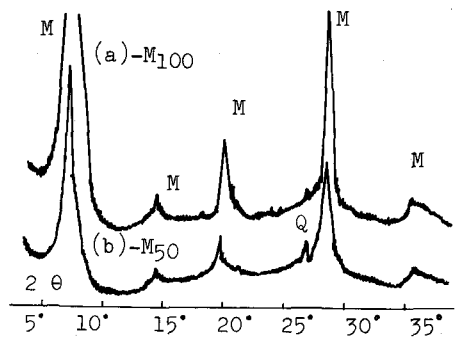


Fig. 2 X-ray diffraction analysis

3. 結果及び考察

P_s と E_s の最終値を各々 P_{sf} , E_{sf} とし、これと各時間における P_s , E_s の比を取りこれの各含水比(W_i)による変化を調べてみたのがFig.3である。図をみると各 W_i によって曲線の現われ方に差異があり、時間(t)を対数にとれば、これらは概ねS字型曲線を描いていることが読みとれる。即ち W_i の小さなものほど顕著なS字型を示し、圧力・ヒズミの関係は共に良く対応して変化し最終的に増加率が頭打ちになっていく様子がわかる。これは膨潤が経時変化に伴ない吸水による成長現象であることを示すに他ならない。このように最終値と各時における値との間には W_i による特徴があり規則性が認められるので、いま $P_s' = P_s / (P_{sf} - P_s)$ 、 $E_s' = E_s / (E_{sf} - E_s)$ とおきこれらの常用対数と時間との関係をとるとFig.4のようになる。図から明らかなようにこれらは直線近似でき P_s' 、 E_s' についてその関係式を求めると次式が得られる。

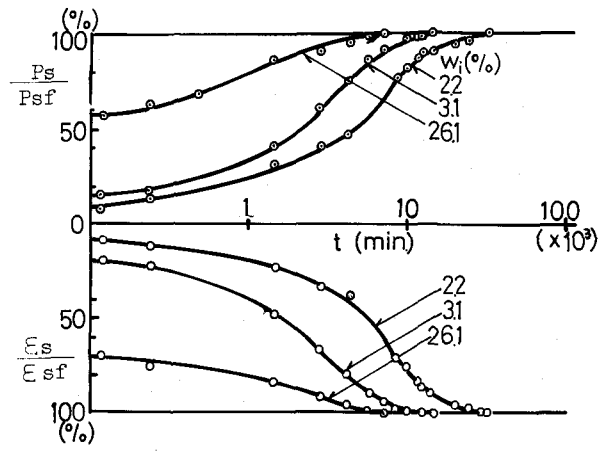


Fig. 3 Progressive variations of swelling phenomena

$$\log P_s' = k_1 \cdot t \dots \dots \dots (1)$$

$$\log E_s' = k_1' \cdot t$$

k_1 、 k_1' は共に膨潤係数である。(1)式を例えば P_s について展開すると、

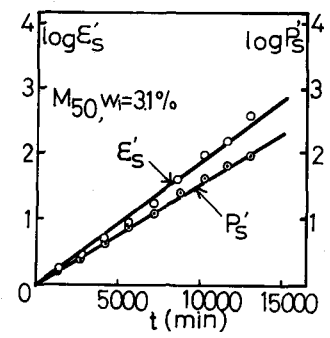


Fig. 4 Graphical determination of k

$$P_s = P_{sf} (1 - 10^{-k_1 \cdot t}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

または $P_s = P_{sf} (1 - e^{-2.30 k_1 \cdot t})$
 を得、この式が Voigt 体の変形に類似した形であることから膨潤がレオロジ-的挙動を示す基礎的性質をもっていることがわかる。

一方、 $(P_{sf} - P_s) / P_s$ の自然対数と時間との関係は、上と同様にして求めると次に示すような負の相関関係がある。

$$\ln(P_{sf} / P_s - 1) = a - k_2 \cdot t \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中 a は定数で、 k_2 は膨潤係数である。これを展開すると次式の如くとなる。

$$P_s = P_{sf} / \{ 1 + e^{(a - k_2 \cdot t)} \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式は logistic curve を意味し、成長過程を説明するのに適用され、(2)、(4)の理論は共に統計上の予測式である。これら(2)、(4)の予測式と実験結果を比較して示すと Fig. 5 のようになる。これより予測式と実験結果は良く合っており、共に膨潤現象を説明するのに十分妥当なモデル式であることがわかる。

また膨潤の極限圧を推定する方法として(2)、(4)より次の指数関係が導かれる。

$$t = - \frac{1}{2.30 k_1} \log(1 - \frac{P_s}{P_{sf}}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$t = \frac{1}{k_2} \{ a - \log(\frac{P_{sf}}{P_s} - 1) \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに実験の k と Wi との関係は Fig. 6 のようにこの実験の範囲内で直線関係にあり、k は Wi に依存する値であることがわかった。その関係は概略、

$$k = 0.1 W_i + 5.0 (\times 10^{-4}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。この k と理論的 k_1 や k_2 との一致度により、式の精度や実験精度が評価されるが、(4)式の方が(2)式より若干相関係数が高かった。

しかし膨潤には、試料の固結度即ち実験的には締固めエネルギー (E_c) も関係していると思われる。Fig.

7はこの E_c の影響を考慮し、 W_i と P_s との関係を示したものであるが図示のように本実験の範囲内では直線関係にあった。この傾向が $W_i = 1$ まで続くものと仮定すれば、 E_c を Proctor の締固め試験の原理により定めて

$$P_{sf} = 365 W_i^{-0.222} \cdot E_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

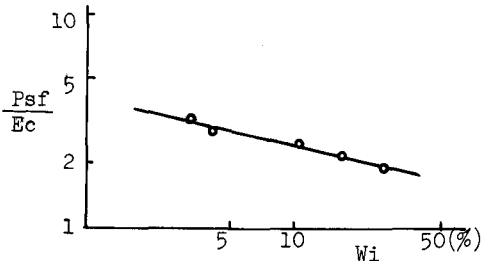


Fig. 7 Relationship between P_{sf}/E_c and W_i

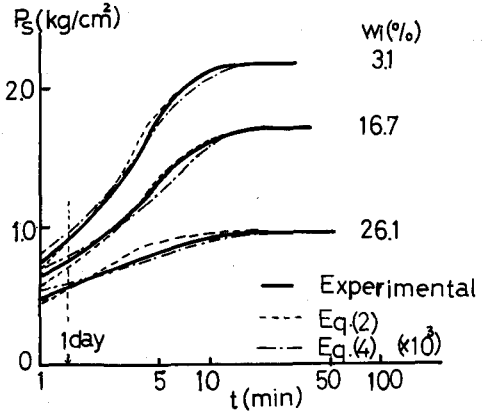


Fig. 5 Analytical and experimental results of P_{sf}

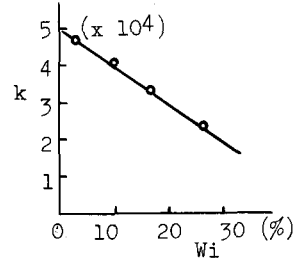


Fig. 6 Relationship between k and W_i

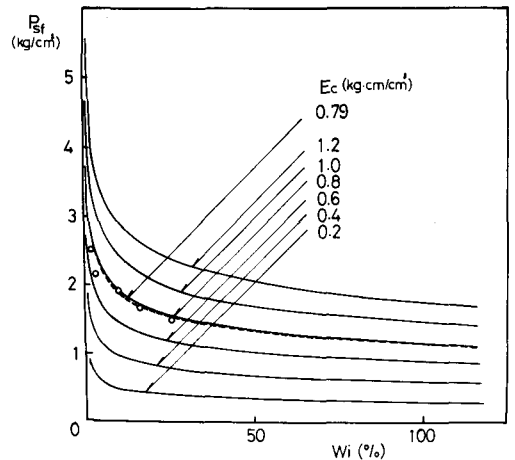


Fig. 8 Relationship between P_{sf} and W_i by E_c

を得る。Fig. 8に計算結果と実測値(○印と点線)を示した。この図よりWi が同じでも、Ec が大きいものほどPs が大きくなる事が認められる。よってこの関係をWi について整理すると

$$Wi = \left(\frac{Psf}{365 Ec} \right)^{-\frac{1}{0.222}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

次にFig. 5からも知られるように、Wiの大きなものは最終的にPs が小さく、Wi が小さければ大きなPs が生じている。しかもWi の小さいものほどPs の平衡状態に到達するまでの時間が長い。そしていずれの試料でも圧力の増勢期が過ぎるとやがて減衰期に入り、最後に平衡状態(teq)に到達している。これをWi の差異によって調べてみるとFig 9のようになる。この場合も Fig. 7と同様、直線関係が拡張されるものと考えれば、次式が成立する。

$$teq = -2791(\times 10^2)Wi + 1560(\times 10^4) \dots\dots\dots (10)$$

このことより(9)式を(10)式に代入すると、

$$teq = -1.013(\times 10^6) \left(\frac{Psf}{Ec} \right)^{-4.504} + 1560(\times 10^4) \dots\dots\dots (11)$$

となる。

Fig. 10は上式の関係を描いたものである。この図では、Ec が小さければ早く平衡状態に達し早く膨潤も終了することが示される。点線は既述のEc=0.79を示し、また実測直を○印で記入した。これをみると計算結果はほぼ実験結果に合っていることがわかる。

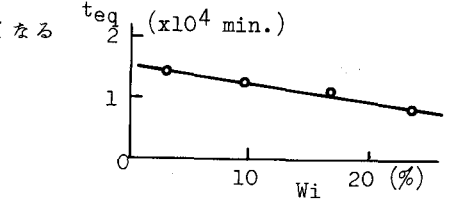


Fig. 9 Relationship between teq and Wi

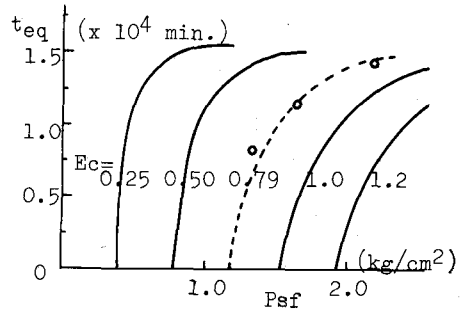


Fig. 10 Relationship between teq and Psf by Ec

次に膨潤圧は Fig. 5 で見たように上側有限の S 字型成長曲線を描くので、正規確率紙の横軸にPs の変量を取り、縦軸に超過確率 F(u) を取ってプロットすると Fig. 11 の如くとなる。その確率分布関数は、

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-u^2/2} du \dots\dots\dots (12)$$

$$u = (Ps - m) / \sigma$$

となる。この図より、各Wi における標準偏差(σ) が直ちに読み取れ、また50%分位点が計算による平均値(m)とも良く一致し分布が正規形であることが確かめられる。

4. 結 び

以上、15°Cにおけるモンモリロナイト50%を含む試料について改良された装置により膨潤実験を行なった結果、膨潤はS字型成長現象を示し、Psの増加はWiやEc、teqにより概ね推測できることが実証された。またその予測式が膨潤現象によく適合することを確認したが、このような膨潤現象を詳細に検討するため、今後さらにデータを積み重ねて、違う温度やM50以外のものについても適用可能なモデルを考案し、統計的関数と土や岩盤の相関について追究を深めたいと考えている。

なお本研究は、文部省科学研究費の補助を受けた。

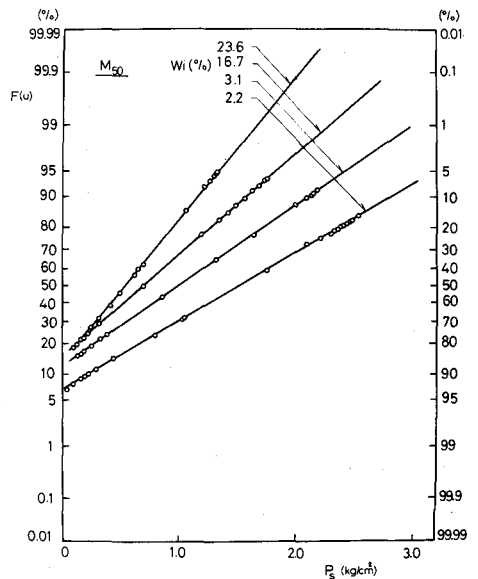


Fig. 11 Normal distributions

A Basic Study on Swelling Rock Mass Behavior with Montmorillonite

Takeshi ITO, Akita Technical College

Tomio HORIBE, Tohoku University

The most common material of swelling rock mass has been considered as a clay mineral such as montmorillonite. Some of the geotechnical troubles in design and construction are attributed mainly to swelling phenomena. However, there are only a few systematic investigations because of the swelling is complicated due to the number of unknown and obscure factors involved and the apparatus for swelling isn't still standardized.

In this paper, available predicting explanations for swelling are proposed through the laboratory tests by a newly developed swelling apparatus as shown in Fig.1.

Samples used in this study are the powder of high contented sodium montmorillonite mixed with glass beads(-325 mesh) of 50%. For all test series, every specimen is applied a constant compaction energy(E_c) and tested at different initial water content (W_i). The temperature in the incubator is fixed at 15°C and swelling behavior, although extending over a long time until equilibrium state(t_{eq}), is measured uniaxially.

From experimental results, it is noted that swelling phenomena shows an upper limited equilibrium relationship like S type letter as shown in Fig.3. Evaluating the process of equilibrium condition, the following two expressions are conducted:

$$P_s = P_{sf} (1 - e^{-2.30 k_1 \cdot t}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$P_s = P_{sf} / \{ 1 + e (a - k_2 \cdot t) \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

where P_s and P_{sf} are swelling pressure and its final value respectively. k_1 and k_2 are the coefficients of swelling, and a is a parameter of determined by material properties. As can be seen in Fig.5, these two analytical values show very close agreement between observed values. It is found that eq.(2) is analogous to Voigt model and eq.(4) is a logistic curve. These are the predicting equations based on statistics, and are reasonable enough to constitute the swelling mode although eq.(4) is superior to eq.(2) a little in the point of correlation coefficient.

In conjunction with the above, the following approximated relations are derived : P_s depends on the coefficient of swelling which is highly influenced by W_i of the specimen, and t_{eq} is predicted since the fact that P_{sf} is affected by E_c and W_i .

On the one hand, it is proved that the swelling phenomena is also the function of probability density. Thus the above descriptions are particularly referred to the fundamental physicochemical and engineering properties of swelling rock mass behavior.