上載荷重と塩規定度の変化による膨潤性土質の体積変化と膨潤圧に関する考察

伊藤　驍・金沢徳雄

A Consideration on Stress-Volumetric Strain Behavior of Swelling Soils by Changing the Surcharge Loads and Solutions of NaCl

Takeshi ITO, Norio KANAZAWA

（昭和55年10月31日受理）

Procedures for the recognition, classification, and prediction of effects of swelling soil and rock materials do not seem to be well established in the practice of foundation engineering.

In this study, swelling tests were performed on swelling soils mixed with bentonite and standard sand to make clear basis characteristics of swelling phenomena in the oedometer. The uniaxial volumetric deformation behavior is analyzed in terms of elastic theory and dilatant rule. Through the laboratory testings connected with the theory, the effects of surcharge loads and solutions of NaCl to the swelling soils are discussed.

1. はじめに

土や岩盤内に特定の粘土鉱物（モンモリロナイトやクロライト等）を含むものは，拘束圧が解かれると水を吸って体積を増加する。この体積変化は，荷重レベルが低下すると時間的遅れを伴ない乍ら非常に緩慢に進行していく。これはベントナイト質の土質や岩盤に多い現象である。このようにある種の親水性粘土鉱物を含む土や岩盤がベトついた土質に変って体積を増大させていく現象を膨潤と呼んでいるが，この体積変化は内部力即ち膨潤圧によるものと考えられている。この膨潤現象は色々の要因[1]に支配されているものであるが，その性質については未だ解明されていない点が数多い。ここでは次のような場合について実験的に考察する。

(1)応力レベルを変化させた場合

(2)水溶液の塩規定度を変化させた場合

この研究では，ベントナイト50%を含有する土質を用い，上記(1)，(2)の条件による変形挙動の特性を把握することがねらいであるが，膨潤はクリープ性の挙動を示すため，まずこれを考慮した簡単な理論的考察を行なう。基本的には弾性則とクリープ挙動の組合せによってこの現象を説明する。これには体積変化パラメータを考慮するが，このパラメータは圧力やヒズミによって，正負の変化がわかり，膨潤挙動の度合いを示す力学的指標でもある。本文では実測結果からこれらパラメータ間にどのような関係があるか，二，三の知見を得たのでその概要を報告する。

2. 試料と試験法

この実験に用いた試料はベントナイト（クニミネ砿業KK製，クニゲル3V，N_a系モンモリロナイト含有率70～80%）と全く膨潤性を示さない豊浦標準砂を重量比で1：1に混合したものである。この試料を湿潤箱で一週間養生した後，Proctor の締固め相当エネルギー（$E_c = 5.625\,\mathrm{kgf\cdot cm/cm^3}$）を与えて$\phi = 60\,\mathrm{mm}$，$h = 20\,\mathrm{mm}$に成形し固結させる。これを通常のエドメータにセットし，上載荷重（以下σ_1と略記）0.1，0.2，0.4 $\mathrm{kgf/cm^2}$の3通りをかける。計測等については，JIS A 1217－60に従って行なった。また水溶液は膨潤抑制効果を調べる目的でNaCl溶液を用い，それの規定度（N）を0.01 N～1.0 Nの範囲内で幾つかの段階に変化させた。そして各σ_1に対応する体積変化を観測した。さらに拘束条件における膨潤圧も観測した。

3. 基礎的理論

土の体積変化を説明するには概ね塑性ヒズミ論に基づくが，この変化は変形の初期条件を考慮して弾性則にクリープ挙動（塑性変形）を組合せたダイレ

タンシー係数を考慮することによっても説明可能である。化学的アクションを伴なう膨潤挙動がダイレタンシーであるかどうか，また通常の有効応力の概念で説明できるかどうかは今のところ学会でも確定的ではないが，ここでは試論として検討を試みた。

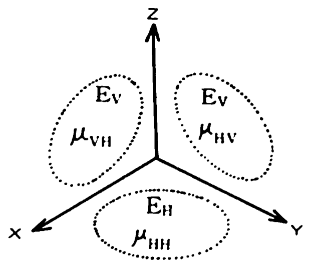

図１　座標系による E, μ

先ず Hooke 弾性則による直交異方性体の応力（σ）～ヒズミ（ε）の関係式は，一般に図—１のように三軸方向を定め，さらにXY面を面内等方弾性体に変換して表示する。この場合，吸水による膨潤ヒズミ～応力の関係はサフィックス，V＝垂直，H＝水平として圧縮を正値にとると，

$$-(\Delta V/V) = -(\varepsilon_X+\varepsilon_Y+\varepsilon_Z) = \varepsilon^e_{swell} = (1-2\mu_{HV})\,\sigma'_X/E_V + 2(1-\mu_{HV}-\mu_{HH})\,\sigma'_Y/E_H \quad (1)$$

ここで $\Delta V/V$ は弾性的体積ヒズミ（$=\varepsilon^e_{swell}$）で μ はポアソン比，Eはヤング率である。また σ' は有効応力である。膨潤は力学的には一つのクリープ現象と考えられるが，これには Henkel ら[2] が示している間ゲキ水圧とダイレタンシーの考え方を引用する。即ちここでは粒子間間ゲキ内部の空気圧や間ゲキ水圧，化学的アクションによる圧力増加を一括して膨潤圧（Swelling Pressure＝P_s）として取り扱う。この場合試料を等方等質とし，体積変化 ΔV は正八面体応力 σ'_{oct}，τ_{oct} の変化によって生ずるとし，$\mu_{HV}=\mu_{HH}=\mu$，$\sigma'_X=\sigma'_Y$，$E_H=E_V=E$ とおく。そうすると(1)式は，

$$\varepsilon^e_{swell} = \frac{3(1-2\mu)}{E}\sigma'_x \quad (2)$$

$$\sigma'_X = \frac{1}{3}(\sigma'_X+\sigma'_Y+\sigma'_Z) = \sigma'_{oct} \quad (3)$$

$$\therefore \varepsilon^e_{swell} = \frac{3(1-2\mu)}{E}\sigma'_{oct} = C_s\cdot\sigma'_{oct} \quad (4)$$

ここで C_s は圧縮率でこれは圧密試験における圧縮指数（C_c）に相当する。膨潤試験の場合，C_s は圧縮指数に対応する膨潤指数である。これに塑性変形を考慮したダイレタンシー係数（D）を加える。そうするとヒズミは弾性変化，塑性変化の総和であるから，

$$\varepsilon^e_{swell} = C_s\cdot\sigma'_{oct} + D\cdot\tau_{oct} \quad (5)$$

ここで $\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_X-\sigma_Y)^2+(\sigma_Y-\sigma_Z)^2+(\sigma_Z-\sigma_X)^2}$

以上のような考え方は変形の異方性に基づくことを示したものである。この異方性を考えた変形係数は三軸的に求められる間ゲキ圧係数などと密接な関係があるが，ここで示すダイレタンシー係数Dが異方性変形挙動を十分満足に説明している訳ではない。[3] しかしここでは(5)式が成りたつものと仮定して，弾塑性論的考え方から，(5)式に示される内容について検討する。

そこで試験条件に応じた方法で膨潤圧（P_s）の推定を次に試みる。

（a）完全拘束の場合

〔境界条件〕：$\sigma_X=\sigma_Y=\sigma_Z\neq 0$，$\varepsilon_X=\varepsilon_Y=\varepsilon_Z=0$.

$$\sigma'_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_X-Ps+\sigma_Y-Ps+\sigma_Z-Ps) = \sigma_X - Ps$$

$$\tau_{oct}=0,\qquad \varepsilon^e_{swell}=0$$

$$\therefore \sigma_X = Ps \quad (6)$$

これは通常，膨潤圧を定義する際に用いられているが，これを計測するには技術的に非常に困難を伴なう。

（b）試料を oedometer に詰め，軸方向を拘束しない場合

〔境界条件〕：$\sigma_X=0$，$\sigma_Y=\sigma_Z\neq 0$，$\varepsilon_X\neq 0$

$\varepsilon_Y=\varepsilon_Z=0$，

$$\left.\begin{aligned} \sigma'_{oct} &= \frac{2}{3}\sigma_Y - Ps \\ \tau_{oct} &= \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_Y \\ Ps &= \frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)}\sigma_Y \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

（c）側方拘束し軸方向に σ_1 を載せた場合

〔境界条件〕：$\sigma_X=\sigma_1\neq 0$，$\sigma_Y=\sigma_Z$，$\varepsilon_X\neq 0$，

$\varepsilon_Y=\varepsilon_Z=0$，

$$\left.\begin{aligned} \sigma'_{oct} &= (\sigma_Y-\sigma_1)\frac{(1+\mu)}{E} = \frac{(1-2\mu)(Ps-\sigma_1)}{(1-\mu)}\cdot\frac{(1+\mu)}{E} \\ \tau_{oct} &= -(\sigma_Y-\sigma_1)\frac{\sqrt{2}\cdot D}{3} = \frac{(1-2\mu)(\sigma_1-Ps)}{(1-\mu)}\cdot\frac{\sqrt{2}}{3}\cdot D \\ Ps &= \sigma_1 + \frac{(1-\mu)(\sigma_Y-\sigma_1)}{(1-2\mu)} \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

この条件ではヒズミの測定は簡単なので，ダイレタンシー係数Dの推定も可能である。

（d）三軸試験による場合，

〔境界条件〕：$\varepsilon_X=0$，$\varepsilon_Y=\varepsilon_Z\neq 0$，$\sigma_X\neq 0$，

$\sigma_Y=\sigma_Z=\sigma_1$

$$\left.\begin{aligned} \sigma'_{oct} &= \frac{1}{3}(\sigma_X+2\sigma_Y) - Ps \\ \tau_{oct} &= \frac{\sqrt{2}}{9}(\sigma_X-\sigma_1) \\ Ps &= \sigma_1 + \frac{\sigma_X-\sigma_1}{1-2\mu} \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

三軸では側方へ膨潤する。これを条件式より求めると，

$$\varepsilon_Y = \varepsilon_Z = (1-2\mu)(Ps-\sigma_1)\left\{\frac{(1+\mu)}{E} - \frac{\sqrt{2}}{6}D\right\} \quad (10)$$

非排水条件では先の(5)式において $\Delta V=0$ なる条件を考える。計算上，$\sigma'_{oct}=\sigma_{oct}-Ps$ となるから，

$$Cs(\sigma_{oct}-Ps) + D\cdot\tau_{oct} = 0 \quad (11)$$

$$\left.\begin{aligned} &\therefore\ Ps = \sigma_{oct} + \frac{D}{Cs}\tau_{oct} \\ &\text{or}\ \sigma'_{oct} = -\frac{D}{Cs}\cdot\tau_{oct} \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

となり膨潤圧と正八面体有効応力の変化及びダイレタンシー係数の関係が表示できる。

4. P_s の構成方程式

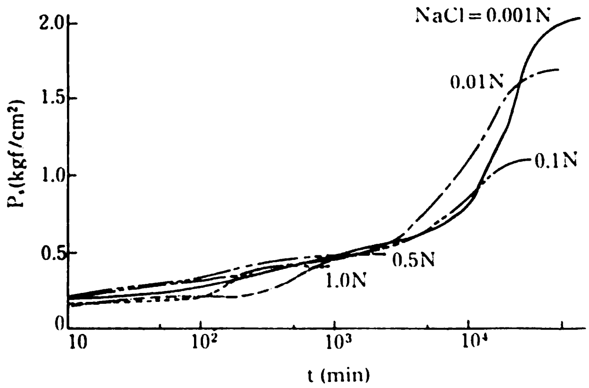

図2　塩規定度と膨潤圧の変化

いま膨潤圧の変化を塩規定度（N）をパラメータとして取った場合[4]について調べてみると，図—2のようになる。この図から明らかに規定度が大きくなるものほど膨潤圧が抑制されていることがわかる。特に膨潤圧はN＜0.5では時間的遅れを伴いながら緩慢に成長し，やがて平衡状態に到達するまで増大している。この時間的遅れは，Nが小さいものほど著しい。しかもこれらに共通していることは，時間を対数グラフで表示するといずれもS字型成長曲線を描いて収束していることである。即ち膨潤圧はある値以上には増大しない。このような性質を示す構成方程式を導くと[5]次のようになる。

$$Ps = \frac{Ps_f}{1 + \exp(a - k\cdot t)} \qquad (13)$$

これは試験条件（a）による値で膨潤圧の真実値になると考えられる。ここでPs_fはPsの最大値，a，kは材料の性質によって定まる値でtは時間（min）である。このようにして求められた時間依存性の挙動を前章のPsにあてはめると応力レベルによるダイレタンシー係数やそれの塩規定度による変化などが推定できる。

5. 実験結果とその考察

通常のoedometerでσ_1を加えて条件（c）による実験を行なうと，例えば図—3のようになる。同一上載荷重でも規定度Nが小さいと膨潤挙動には余り影響がない。図—2では各Nによる最終のPs即ちPs_fが求められているから，図—3のようにNが小さくヒズミが著大でも時間をかければPs_f相当量に達するまで長時間変化を続けるだろう。図—2の0.001Nにおいてはこの挙動が1ヶ月以上に及んだ。図—3（a）はσ_1＝0.1kgf/cm²の場合であるが，ここでは1.0Nの溶液によって膨潤は抑えられε_vは1％未満となっている。しかし図—3（b）ではこれが完全に抑えられこの計測時間内では圧力は発生していない。これは上載拘束荷重による膨潤抑制効果によるものである。σ_1が0.4のものについても測定したが，0.5N，1.0Nの水溶液では全く膨潤を示さなかったことから，この規定度におけるPsはPs＜0.4であることが推定される。いずれの試験においても，最初は圧縮変形を示しやがて膨潤が観測され，上載荷重が大きくNも大きくなると膨潤挙動を示さなくなることが判明した。特にNが大きくなって膨潤が抑制された理由の一つは，液体のNaイオンがベントナイト粒子表面のカチオン（Na^+）の交換をおさえ粒子界面の不活性化現象を起こして粒子間ゲキの反発力がにぶったためであると考えられる。

このように徐々にσ_1の値を大きくとっていくと，Nの大きなものほど先に抑制されていく。既に図—

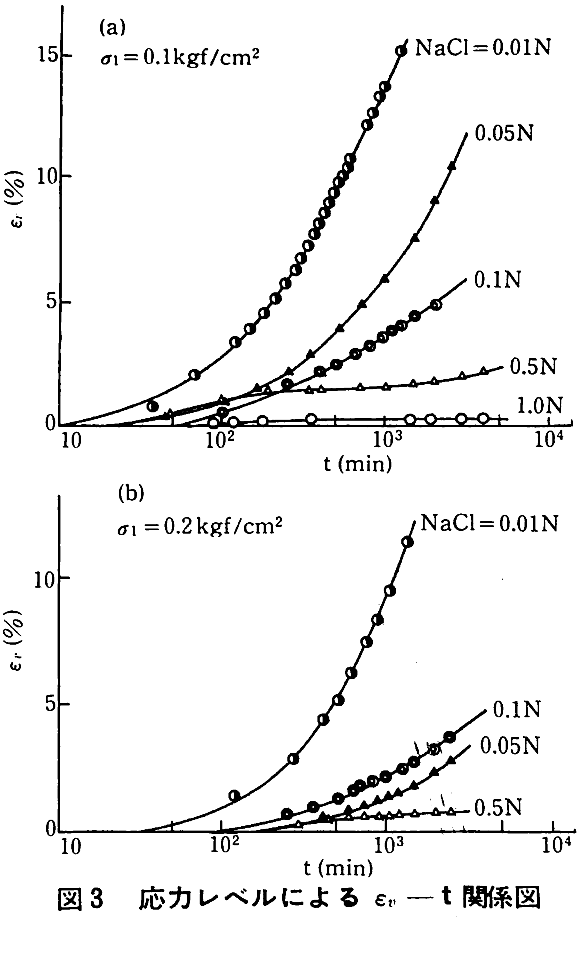

図3　応力レベルによる ε_v — t 関係図

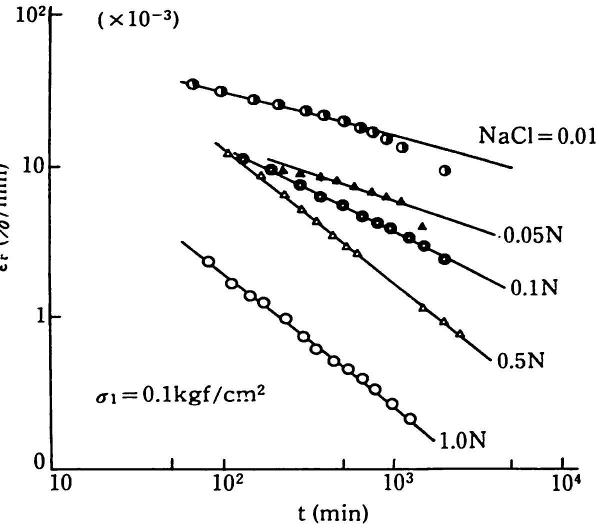

図４　Ｎによる $\dot{\varepsilon}_r$ —t 関係図

２で示したようにＮの膨潤圧抑制効果が知られたがこの σ_1 も大きな抑制効果をもつことから，これらの影響による膨潤の速度勾配にも当然その影響が表われてくるものと思われる。これを調べてみたのが図—４である。これは σ_1 ＝0.1における各Ｎのヒズミ速度（ $\dot{\varepsilon}_V$ ）である。これは概ね次のように整理される。

$$t = a \cdot \dot{\varepsilon}_V{}^b \tag{14}$$

ａ，ｂは材料定数である。

ここで σ_1 による比較を示さなかったが，σ_1 が大きくなるにつれて一般にａの値が小さくなる。またＮが大きくなるとヒズミ速度は小さく勾配は急になる。即ちｂの値が小さくなる。このような現象を境界条件（ｃ）に基づいて力学的パラメータで表示する。この場合(8)式の八面体セン断応力より

$$D = \frac{3}{\sqrt{2}}\left\{\frac{1+\mu}{E} - \frac{(1-\mu)\,\varepsilon_V}{(1-2\mu)(P_s-\sigma_1)}\right\} \tag{15}$$

右辺第二項の正負により圧縮か膨潤が定まる。膨潤現象が起こる条件は $P_s \geqq \sigma_1$ である。即ち $D<0$ となる。ここで $E = E_{50} = 100\mathrm{kgf/cm^2}$，$\mu = 0.45$ とおき，各Ｎにおける ε_V の経時変化に伴う P_s の経時変化を算出し，Ｄとｔ，及び（ $P_s \sim \sigma_1$ ）の関係を表示すると図—５（ａ），（ｂ）のようになる。（ａ），（ｂ）は規定度Ｎによる違いの例を示したものである。これらの図を見ると，Ｎが小さいもの（５—（ａ））.はＮが大きいもの（５—（ｂ））に比べ経過時間が少なくてもＤが大きく，同一時間に対してもＤが大きい。また，Ｎが大きいものは，Ｄの発生初期におけるその増加率は極めて小さいこともわかる。さらにこれらに共通していることは，（ $P_s - \sigma_1$ ）の値が小さいものはＮの大小に拘らず，Ｄの発生増加率が小さいことである。このように体積変化は弾性変形及びダ

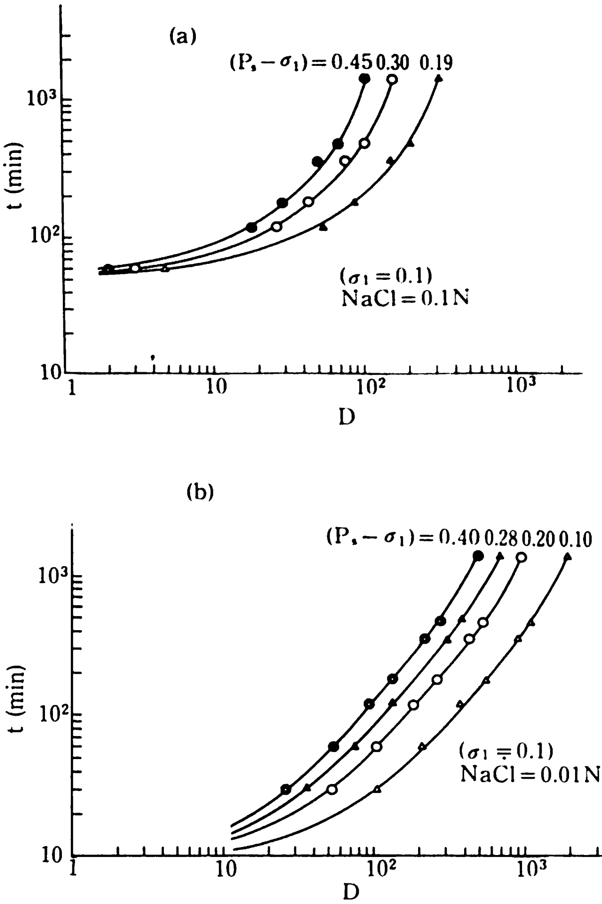

図５　膨潤圧を考慮したｔ—Ｄ関係

イレタンシーによって説明づけられ，本方法による結果が土の膨潤挙動を示す一つの方法として有用なものであることが確認される。しかし膨潤挙動は，水分吸収に伴なう現象であるから，μ やＥ等は常に一定なものではない。従って水分拡散に伴なう時間依存性の膨潤挙動を今後厳密にはどのように表示するかさらに追究すべき課題であると考えている。

６．物理的及び力学的性質

さて図—２に示した塩規定度の差異による膨潤現象を土質力学のパラメータで表示し，その内容構成について検討する。膨潤圧 P_s を構成する要素[6]は多数に亘るがそのうち比較的容易に物理試験の可能なパラメータを選択して，これによって P_s を説明することを試みる。

膨潤性土質は通常の土質で考えられないほど著しく液性限界（ W_L ）が高くまた塑性指数（ I_p ）も大きい。これらパラメータを使って表示される塑性比(P_r)は，W_L/I_p によって定義され，この値が小さいと一般に膨潤性が著しい。図—２を基にして得られた P_{sf}

とこの P_r との関係を近似的に式示すると[7] 次のようになる。

$$P_{sf} = \exp\left\{\frac{1}{\alpha} 2.303(\beta - P_r)\right\} \quad (16)$$

ここで α, β は定数で, $\alpha=0.179$, $\beta=1.275$ である。

この式に基づけば, P_{sf} は結局 I_p の遷移過程に基づく関数である。P_{sf} に関与する I_p はベントナイト量の差異に支配される量であるが, 一方 NaCl の N によっても変動する。NaCl の N による P_{sf} は図―2を整理して

$$P_{sf} = 0.488 - 0.585 \log N \quad (17)$$

と求められている。N によって I_p も変化するから I_p は P_{sf} を構成する一つの要因とみなすことができる。N と I_p は本来根源を異にした独立な物性であり, しかも互いに P_{sf} に何らかの影響をもつ関係がある。従って, (16), (17)式の一般形を考慮するならば, これら2要因を構造とした関係が成立するだろう。そこで統計的に次のようなことを考察する。一つの構造(y)を説明するいくつかの多変量の説明要因(x_1, x_2, x_3, x_4……x_n)があればこれらがyの情報を形成するとして次のように表示する。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \cdots\cdots + a_nx_n + e \quad (18)$$

これは累加形式であるが, a_0は定数, a_1,…a_nは偏回帰係数と呼ばれ, 統計的手法によって求められる。e は変動誤差である。N と I_p の2変数で構成される y (= P_{sf}) の構造式を求めると,

$$P_{sf} = 0.2652 + 0.0013(I_p) - 0.4180(\log N) \quad (19)$$

となった。これらの重相関係数(γ_{ss})は $\gamma_{ss}=0.996$ となり高い奇与率をもつことがわかった。

以上の関係をグラフに描いて再現すれば図―6のようになる。外力を考慮し, 間ゲキ比や初期含水比あるいは乾燥密度などをパラメータにした表示法なども発表されているが[8] P_{sf} を説明するさらに多くの変数を考慮することによりなお合理的な構造式が

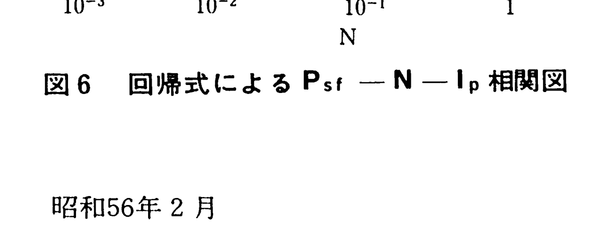

図6 回帰式による P_{sf} — N — I_p 相関図

求められるだろう。本文では2つの説明変数に留めたが, これら変数間の関係を P_{sf} の実測結果(図中○印)と比較してみるとほぼ計算値に近似した値となっているので(19)式は妥当なモデル式であると考えられる。

7. まとめ

以上応力レベルや水溶液(NaCl)の規定度を変えながらベントナイトを含む土質の膨潤現象について理論的な考察を行なった。さらに実験結果を分析して幾つかの新しい事実も見い出されたが, それらを要約すると次のようである。

1) Henkel らの式による正八面体応力説に基づくクリープ現象を膨潤に適用できるものとして各試験条件が整理できた。それに依ると, 上載荷重(σ_1)を載荷した場合の膨潤変形を Henkel らのダイレタンシー係数(D)で表現できるとすれば, 塩規定度Nが小さいものはNの大きいものより短時間で大きなDを示すこと, これは小さなNでは, Na イオンの交換を抑制する効果が少なく本来膨潤はイオン交換に支配された現象であると言える。

2) 膨潤圧(P_s)を考慮すれば($P_s - \sigma_1$)の小さいものはNの値に拘らずDの発生増加率が大きいこと。

3) P_s の最大値 P_{sf} の構造は N と塑性指数 Ip で多変量線形回帰式で式示できた。この式の関係は実験結果からみても妥当である。

参考文献

1) 伊藤驍:土と基礎(土質工学会誌), Vol.28, No. 2, 31−38, (1980)

2) Henkel, D.J. and Wade, N.H.: Proc. ASCE, 92, SM 6, 67−80, (1966)

3) Yoshida, S: Soil and Foundations, Vol.20, No. 1, 1−11, (1980)

4) 伊藤驍:第14回土質工学研究発表会, 149−152, (1979)

5) 伊藤驍:第12回岩盤力学に関するシンポジウム, 46−50, (1979)

6) 前掲 1)

7) 〃 4)

8) Komornik, A.and David, D.: Proc. ASCE, 95, SM 1, 222, (1969)