

膨潤性地盤のヒズミ軟化に関する基礎的研究

伊 藤 驍・金 澤 徳 雄

Strain Softening of Swelling Soils

Takeshi ITO and Norio KANAZAWA

(昭和58年10月31日受理)

Triaxial tests on several blends of Toyoura standard sand, Kaolinite and Kunimine montmorillonite clay at varying proportions by weight were carried out to evaluate their strain hardening and softening characteristics. The study showed that the behavior during loading to swell soils were fitted with the theory presented by Richard-Abbott. The relationships between engineering properties were investigated with the connection of their physical properties, and the strengths were found to be significantly correlated with the montmorillonite content by regression analyses. An analytical equation derived from test data was proposed and verified as a function of strength and a water content of the soil.

1. 緒 言

地盤の中には非常に多種類の粘土鉱物 (clay minerals) が存在する。その中には全く吸水性を示さないもの (Kaolinite) や著しく吸水性を示すもの (Montmorillonite) 及びこの中間的性格のもの等多様である。土質工学では粘土を単に粒子径でのみ定義づけ実際の性格については余り論議しないが、しかし土の挙動は含有粘土鉱物によって著しく異なるのであるから、本研究ではこの問題を取りあげる。即ち多様な性格をもつ粘土鉱物が地盤に混沌として存在するため地盤は含水状態によって複雑な挙動を示すが、特にベントナイト化した土質は膨潤挙動を示し土木工事施工上、極めて扱いにくいものになっている。地盤のうち、砂は圧密沈下や膨潤挙動を余り示さないが、モンモリロナイト、セリサイト、クロライト等の粘土鉱物を含む地盤は、水を吸って膨らみ体積を増加させ、力学的には破壊後も大きな残留強度をもって著しいヒズミ軟化の現象を示す。このような地盤の膨潤挙動やヒズミ軟化は、トンネル¹⁾や地すべり²⁾に多くみられ、その現象解明が重要視されているのであるが、基礎的な研究は余りない。筆者は既に膨潤現象の構成方程式を提案した³⁾が、本研究ではさらにベントナイトを用い、標準砂及びカオリナイトを混入した供試体を作製し、標準締固め試験による最適含水比状態の試料の膨潤試験及び三軸圧縮試験を行なって、応力~ヒズミ関係におけ

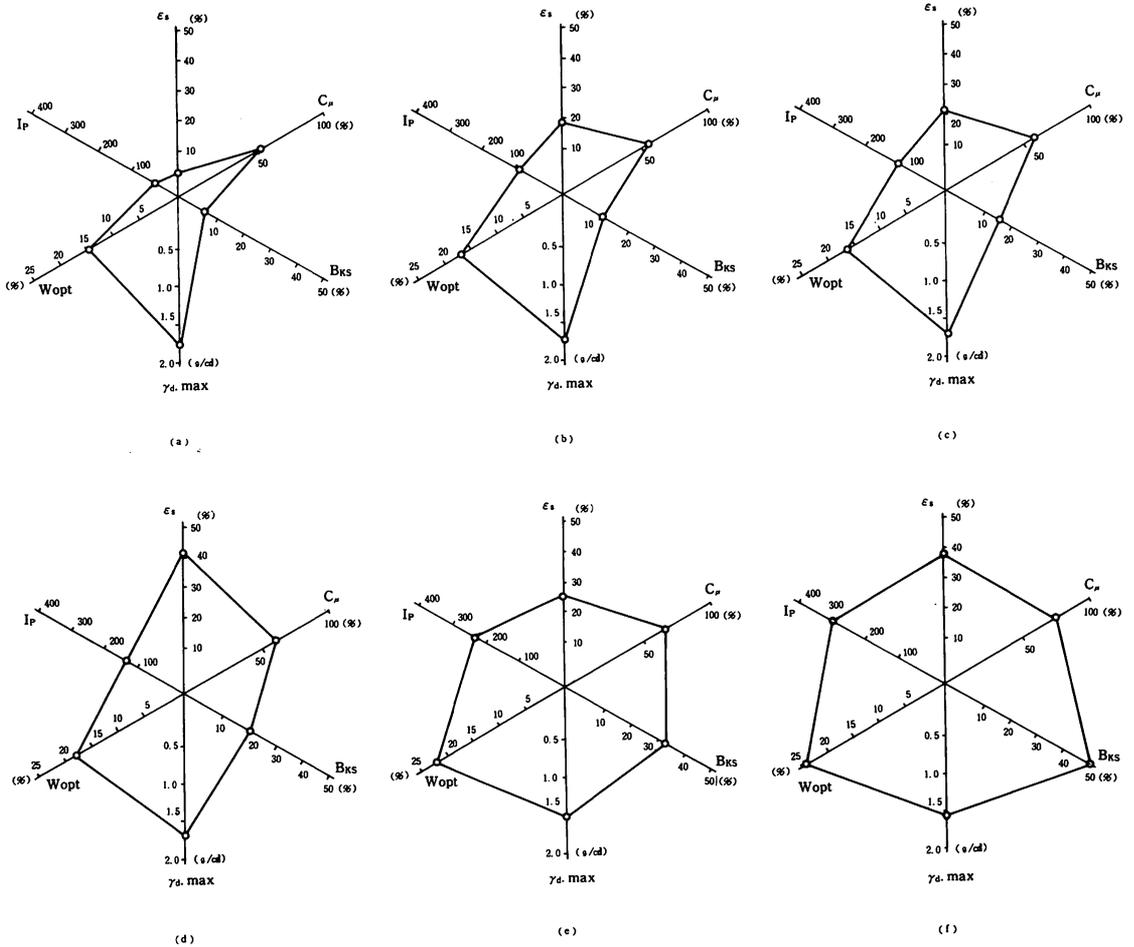
る非線形性について検討した。特にモンモリロナイトの含有率の相違、拘束圧の相違によって発生する軟化現象について考察し、Richard-Abbott理論との適合性について検討を行なった。その結果、本試料のヒズミ軟化現象はこの理論によってかなりうまく説明できるものであることを検証した。また異種の試験操作で得られた強度間の関係を規定する構成方程式も導いたので以下に主な内容について述べる。

2. 試料と実験方法

試料には次の2つの系統のものを使った。ここでは膨潤性粘土鉱物を多量に含むベントナイト (クニゲル3V, N_a 系モンモリロナイトを70~80%含む) を用い、これに(1)豊浦標準砂を重量比で混入し、ベントナイト含有率10, 20, 30, 40, 50%によって試料名を $B_{S10}, B_{S20}, B_{S30}, B_{S40}, B_{S50}$ とする。

(2)豊浦標準砂及びカオリナイトを混入し、前と同様ベントナイト含有率によって、 $B_{KS5}, B_{KS10}, B_{KS15}, B_{KS20}, B_{KS33}, B_{KS50}$ とする。

次に各含有率の試料について締固め試験を行ない最適含水比 (w_{opt}) 状態の試料を作製し、三軸圧縮試験を行なう。この場合、試料は容易に吸排水を行なわないので、UU-testを実施した。また試料(1)については一面セン断試験も行なった。なお、試料は作製後24時間デシケータに静置し、実験時の三軸チャ



図一 B_{KS} 試料のベントナイト含有量による諸物性のヘキサダイアグラム

ンバーの水溫は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に調整した。

まず試験に用いた B_{KS} 試料について試料の種類 (ベントナイト含有率) による諸物性をヘキサダイアグラムを使って表わすと図-1(a)~(f) のようである。

図中の記号は

B_{KS} : ベントナイト含有率 (重量比)

C_μ : 2μ 以下の粘土分

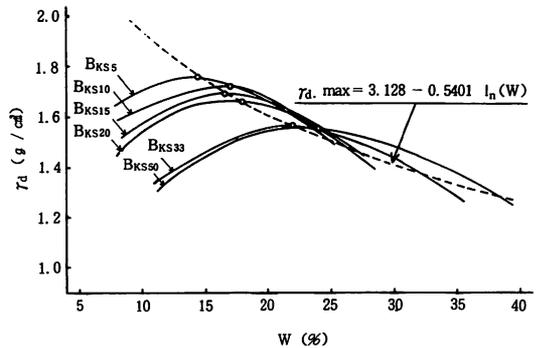
ϵ_s : 先行圧密荷重 3.2 kgf/cm^2 による除荷荷重 1.6 から 0.1 kgf/cm^2 まで (96 時間) の膨潤ヒズミ

I_P : 塑性指数

W_{opt} : 最適含水比

γ_{d-max} : 最大乾燥密度

これらの図をみると、 B_{KS} の大きさによって物理的な性質が除々に変化しており膨潤能力はベントナイト含有率の大きさで変化している様子がわかる。



図二 B_{KS} 試料による $\gamma_d - W$ 曲線

このような変化のうち、系統性のある 2, 3 の特性関係を整理すると次のようである。

$$\gamma_{d,max} = 1.802 \exp(-4.005 \times 10^{-3} \times B_{KS}) \quad (1)$$

$$I_P = 16.14 + 5.881(B_{KS}) \quad (2)$$

こうした試料について力学試験を行なうため、試料が最適含水比状態にあるものを使う。即ち各含有率 (B_{KS}) における 5~7 個の試料のうち、図-2 に示す丸印部分にあたる試料をさらに数個作製し、三軸圧縮試験や一面セン断試験を行なうこととした。

3. Strain Softening に関する検討

(1) 解析方法

ここで用いた供試体は軟岩を想定したものである。軟岩はヒズミ硬化現象の他に最大強度に達したあとも軟化現象を著しく示すが、このような現象を表示する方法は色々試みられてきた。例えばヒズミ硬化の表現形式として Kondner の双曲線法

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (3)$$

ここで、 a, b : 定数

σ_1, σ_3 : 主応力

が広く用いられている。しかしこれはヒズミ硬化から塑性流動、さらにヒズミ軟化に至る一連の地盤材料の挙動を表現し得ないという欠点がある。これに対して Ramberg-Osgood モデルはこの表現が可能である。しかしさらにこれを改良した次の Richard-Abbott 法⁵⁾は最大強度到達後、ヒズミ軟化のみられる部分を、ヒズミ曲線の接線勾配の値を導入することによって可能にした。即ちこれを次式で表わした。

$$\sigma = \frac{E_o \cdot \epsilon}{\{1 + (E_o \cdot \epsilon / \sigma_o)^m\}^{1/m}} + E_p \cdot \epsilon \quad (4)$$

ここで各定数は図-3 を参照して次のようになる。

$$E_o = E_i - E_p \quad (5)$$

E_i は初期弾性係数、 E_p は塑性係数、なお σ_o は E_p 決定時の応力であり、 m は $\sigma \sim \epsilon$ 曲線の形状によるパラメータである。次に $E_p = 0$ の時は、

$$\sigma = \frac{E_o \cdot \epsilon}{\{1 + (E_o \cdot \epsilon / \sigma_o)^m\}^{1/m}} \quad (6)$$

となり、弾完全塑性 (elastic-perfectly plastic)

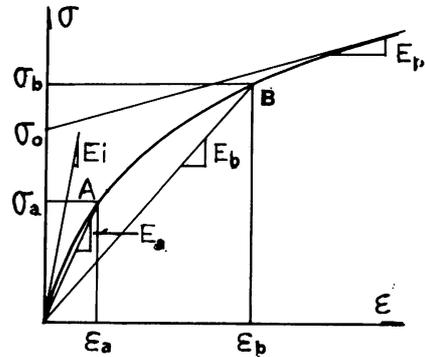


図-3 解析例で使うパラメータの取り方

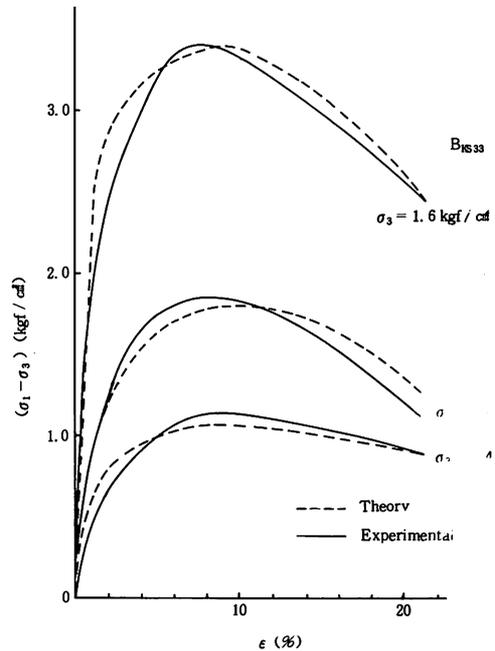


図-4 B_{KS} による三軸試験 (UU-Test) 一例

の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線を表わす。上式で $m = 1, E_o = \frac{1}{a}, \sigma_o = \frac{1}{b}$ とすると(3)式と同一になる。

ヒズミ軟化現象は $\epsilon \sim \sigma$ 曲線ピーク後の曲線の接線勾配 E_p の値を導入することによって表現する。即ち、 $\sigma \sim \epsilon$ 関係の適当な 2 点 A, B を選び m や各係数を次のように定める。例えば、 $\epsilon_a = \frac{1}{2} \epsilon_b$ とすると、

$$A^m - 1 - \frac{1}{2^m} (B^m - 1) = 0 \quad (7)$$

ここで、

$$A = E_o / (E_a - E_p), B = E_o / (E_b - E_p) \quad (8)$$

$$E_a = \sigma_a / \epsilon_a, E_b = \sigma_b / \epsilon_b$$

これより形状パラメータ m は上式(7)を満足するようにして決める。 m が求めれば σ_o も次のようにして決定する。

$$\sigma_o = E_o \cdot \epsilon / (A^m - 1)^{1/m} \quad (9)$$

(2) 試料 B_{KS} による実測の解析例

実験結果の主な $\sigma \sim \epsilon$ 曲線を示すと図-4 のようである。この実験結果は B_{KS33} の同一試料 ($w_{opt} = 21.8\%$, $\gamma_{a-max} = 1.56 \text{ g/cm}^3$) による σ_3 を変化させた場合を示す。図からわかるように、拘束圧 σ_3 が小さいと破壊強度が小さく、軟化現象が著しい。この関係はかなり系統的に表現されている。そこで、この挙動に対する上記理論の適用を試みると、図中の点線の如くとなる。ピークの位置に若干ズレはあるが理論はこの実験結果をよく説明しているように思われる。三種の材料による混合試料であるため、試料作製技術や実験操作方法など精度上考慮すべき点はみられたが、それらが改善されればかなり良く合う結果が期待できると思われる。そこでベントナイトと標準砂の二種の混合による試料の実験も多数行ったので以下に解析例を示す。

(3) 試料 B_s による実測と解析例

この試料の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線の一例を図-5 に示す。図には試料の種類による関係が表示されている。前図同様いずれも最大強度に達するまでにヒズミ硬化がみられピーク後、ヒズミ軟化の現象がみられる。ところでこれはベントナイト含有率が大きくなるほど顕著である。Kondner 法ではヒズミ硬化現象は表現できるが、軟化の挙動については表示できない。図-5 に示されているように、この試料はピーク後かなり塑性流動し、その現象は上記理論によってよく説明されている。またこの試料では残留応力がかなり持続しているがこの理論にかなりの範囲まで適合していることが認められる。なお、ヒズミが非常に大きくなる場合、残留強度はこれによって決定できない。以上より膨潤性粘土を含むこの種の試料の挙動がかなりの範囲まで Richard-Abbott のモデルでよく説明できることを検証した。

5. セン断強度の関係式

同一試料 (B_s) について三軸圧縮試験の他に一面

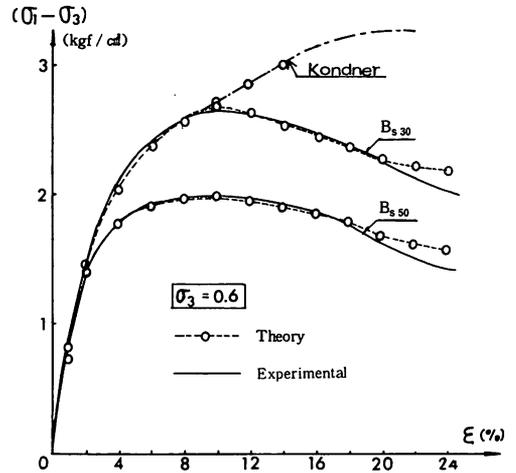


図-5 Kondner と Richard-Abbott の方法による解析と試験結果

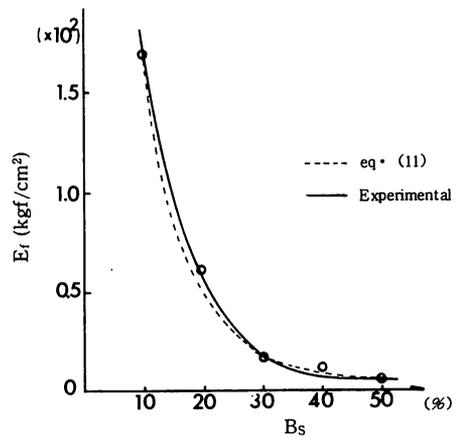


図-6 膨潤土の含有率と E_f の関係

せん断試験も行ない、それらの結果から両者の関係を示す構成式を導くことを説明する。

まず三軸試験における各試料の最大強度 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f とその時のヒズミ ϵ_f の比をとって次式のように定めたパラメータを考慮する。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \epsilon_f = E_f \quad (10)$$

これとベントナイト含有率による関係を調べると、 B_s が小さいほど強度が大きくなっていくが、それを式示すと、

膨潤性地盤のヒズミ軟化に関する基礎的研究

$$E_f = 1.688 \times 10^4 \times \left(\frac{1}{B_s}\right)^2 \quad (11)$$

となることが判明した。これは図-6 のようである。これによると、(11)式はベントナイト含有率が増加するにつれ、割線ヤング率 (E_f) は連続的に減衰し、これが二次関数で規定されることが示されている。

一方、同一種類の試料について一面せん断試験を行って次の結果を得た。今、含水比 W の試料について最大せん断強度 τ_f を求め、 τ_f/W をパラメータにした時のベントナイト含有率 $B_s(\%)$ との関係を導くと、

$$\tau_f/W = 0.0281 \times B_s^{1.703} \quad (12)$$

と得られる (図省略)。(11)式より

$$B_s = 129.9 \frac{1}{\sqrt{E_f}} \quad (13)$$

となるからこれを(10)式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} \tau_f/W &= 111.4 \times E_f^{-0.8515} \\ \text{または} \\ \tau_f &= 111.4 \times \left\{ \frac{1}{\varepsilon_f} (\sigma_1 - \sigma_3) \right\}^{-0.8515} \times W \end{aligned} \right\} (14)$$

となる。(14)式を図示すると図-7 のようになる。この図は W をパラメータにとっているが、一面せん断試験で得られた $W = 20\%$ 付近の τ_f を各 $B_s(\%)$ について調べると、図中の○印のようになる。図からわかるように三軸試験と一面せん断試験の結果は極めて良好な対応関係がみられ、両者の関係は(14)式で整理できた。それが実験結果とよく合うことから、本研究で提示されたものは、膨潤性地盤の強度特性を含水比の観点から規定できた場合で、その規準に基づけば、一面せん断試験の結果より、三軸試験の結果を推定し得る構成式の一つであると考えられる。

6. 結 語

以上、 N_a 系モンモリロナイトを多量に含むクニゲル3Vを使って、これと全く膨潤を示さない標準砂、カオリナイトを混合させた試料のせん断試験を行なった。その結果次のような事柄が判明した。

(1)本研究で用いた B_{KS} 試料の物理試験、力学試験の結果をヘキサダイグラムで示すと、ベントナイトの含有率による諸物性変化の連続性が明瞭になるが、後の三軸試験によるとこのベントナイトの含有

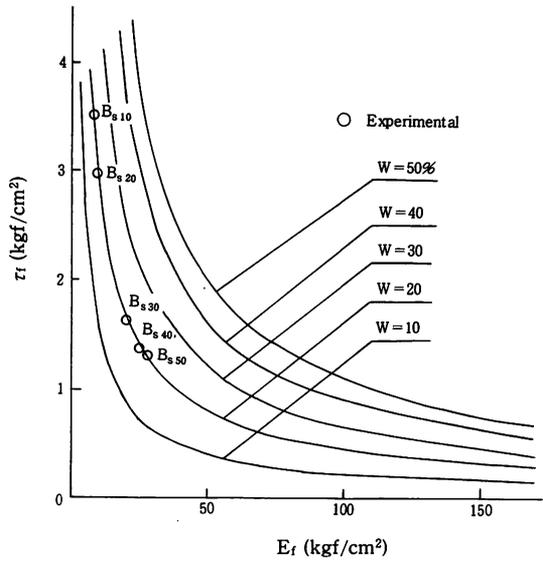


図-7 提案式による $\tau_f - E_f$ 関係図

率が小さいものほど大きい強度を示すことがわかった。

(2)ヒズミ軟化現象はベントナイト含有量が多いもの及び σ_3 が小さいもので顕著であった。これについて Richard-Abbott 法を適用すると本研究の試料の軟化挙動はかなりうまく説明されることが明らかにされた。

(3)異った操作法で求めた強度の関係を示す構成式を導いた。これは実験結果とよく合い再現性のあることを検証した。

なお、膨潤挙動と軟化現象の関わりについては目下検討中である。

文 献

- 1) 佐武, 伊藤: 自然災害科学資料解析研究, 第8巻, 111-122, 1981.
- 2) 伊藤: 秋田高専研究紀要, 第17号, 39-44, 1982.
- 3) 伊藤: 土と基礎, 第28巻, 第2号, 1980.
- 4) M. A. Sheril, I. Ishibashi & B. W. Medhin: ASCE, GT1, 33-45, 1982.
- 5) R. M. Richard & B. J. Abbott: ASCE, EM4, 511-515, 1975.