

III-29 正規圧密粘土のクリープ挙動について

京都大学防災研究所 正員 村山 朔郎

Princeton University Ahmet Cakmak

京都大学大学院 学生員 関口 秀雄

1. はじめに

どのような粘弾性的挙動の研究においても、ある特別の変形形式および特別の荷重パターンに対して応力-ひずみ-時間のあいだの関係を求めることが問題になるが、材料の応答が線型であればこのことは線形系では弾性率、遅延系ではコンプライアンスの時間依存性を決定する問題に帰着する。

しかしながら、飽和粘土はその骨組構造がいわゆる吸着水膜によって被覆された鉱物粒子のランダムな三次元的集合体であり、動水学的時間遅れがない状況における力学的挙動の時間依存性を対象とする場合においてもダイレイタンスおよび塑性的特性が重要な位置を占め、一般に非線型の様相を呈するために、先述したような特性値の適用性は極めて制限されたものとなる。ところが現時点ではこの粘土の非線型挙動を特性づける特性関数を求めるための方法論が確立されてい^(まだ)ないようであるので、このような微小変形理論に基づく特性値の適用性および限界を明らかにしておくことは、来るべき一般非線型理論の樹立のために意義深い^{もの}と思われる。

当報告は、主として正規圧密粘土を対象とし、三軸圧縮試験装置による非排水および排水クリープ試験結果を基にして、含水比-時間等価性仮説⁽¹⁾の検証、 α_c による時間軸のシフト⁽²³⁾、および偏差応力による時間軸のシフト⁽⁴⁾、という概念の妥当性を明らかにすることを試みたものであり、おわりに modified superposition hypothesis⁽⁵⁾について若干の考察を加えている。

2. 試料、試験方法および試験結果

使用した試料は、繰返し後、 0.5 kg/cm^2 の圧力のもとで再圧密した藤森粘土であり、その物性は $LL=43\%$ 、 $PL=26.1\%$ 、 $G_s=2.68$ および 5μ 以下 $=39.0\%$ である。

試験装置は N.G.I. 型三軸試験装置であり、軸方向変位の測定には dial gauge、間げき水圧測定には、Dymisco 製の圧力変換器を使用した。試験中、恒温室の温度は 19°C に保たれていた。

その他試験方法の詳細は文献 4) に譲る。

表-1 に試験条件を示す。

表-1 試験条件

試料(A, B)は再圧密時のバッチが異なる。
圧密は等方応力のもとで、半径方向にのみ排水を許す状態で⁽⁴⁵⁾行なった。
バックアレイヤーは 3~6 時間させた。

	非排水クリープ		排水クリープ
	藤森粘土(A)	藤森粘土(B)	藤森粘土(A)
圧密応力(kg/cm^2)	2.0	1.0 2.0	1.0, 2.0
圧密時間	1 day	2 day	1 day
せん断方式	圧密等体積		圧密等 α_c
バックアレイヤー	1.0 (kg/cm^2)		—

まず偏差応力レベルによって正規圧密粘土のクリープ曲線のパターンが変化するかどう

かを検討する。図-1 に(A)試料の非排水クリープ試験の結果得られた軸方向偏差ひずみ ϵ_{11} の経時的变化を、図-2 に α_c の経時的变化を示す。(なお、ここでは圧密終了時の配位を規準配位としている。)

高応力側のクリープNo.13において、 $t > 1000'$ 以降の $\frac{d\epsilon_{11}}{dt}$ の値はやや減少しているが、全体的に対数クリープに近い傾向を示している。 $t < 1000'$ の σ_m' の変化の傾向は図-1の傾向とよく対応しているようであるが、 $t > 1000'$ 以降では $-\frac{d\sigma_m'}{d \log t}$ の値が急増している。このことの原因らしきものとして、leakageあるいは断に先立つ圧密が十分に完了していないおそれがあることなどが考えられる。

これらのことを更に確かめるために、(B)試料について、圧密時間を2日にして、非排水クリープを行なった。

図-3に平均有効主応力 σ_m' の経時的変化を示す。No.32とNo.36のものは $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の試験で、他のものの圧密応力は 2.0 kg/cm^2 である。No.38以外では長時間において $-\frac{d\sigma_m'}{d \log t}$ の値が増加する傾向はみられていない。

図-4は、次式で定義される normalized strain $\lambda(t)$ の経時的変化である。

$$\lambda(t) = \epsilon_{11}(t)/\epsilon_{11}^* \quad (1)$$

ここに、 ϵ_{11}^* は実質的にクリープが飽和したときの軸方向偏差ひずみの値である。

図-4から、クリープ曲線のパターンが偏差応力レベルに依存している可能性があることが認められる。

しかしながら、 σ_m' の変動の影響については、これだけのデータでは何ともいえない。

そこで、クリープ過程中に実質的に σ_m' が一定に保たれるような排水クリープ試験を行ない、非排水クリープ試験結果と比較検討すれば、ある程度 σ_m' の変動の影響を評価することができると思われるので、試料(A)についてこのことを試みた。

図-5に $\lambda(t) \sim \log t$ 関係を示す。

応力比 $S_u - S_{33} / \sigma_m'$ が0.6と等しいNo.12とNo.8-1は、ほとんど同じようなパターンを示しているが、応力比が0.3と小さいNo.11では長時間側にシフトされたようなパターンをとっている。No.8-2は、 $\frac{4(S_u - S_{33})}{\sigma_m'}$ は0.3であるが、second loadingであるために、応力履歴の影響を受けているようで、短時間側ではひずみが潜伏しており典型的なS字型のパターンを示している。

図-6にダイレイタンスの時間的推移を示す。ここに E_v は体積ひずみである。

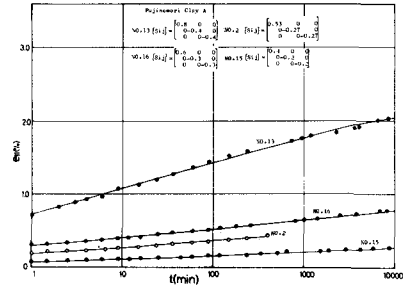


図-1 $\epsilon_{11} \sim \log t$ 関係 (試料A)

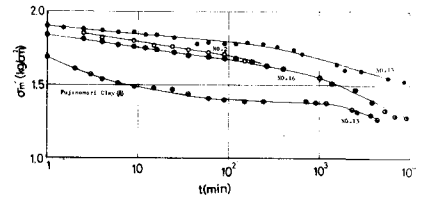


図-2 $\sigma'_m \sim \log t$ 関係 (試料A)

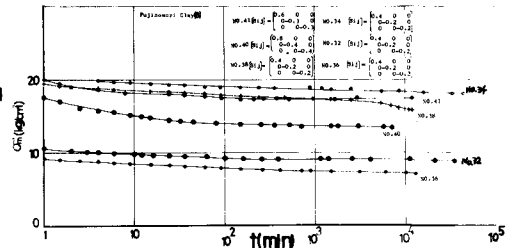


図-3 $\sigma'_m \sim \log t$ 関係 (試料B)

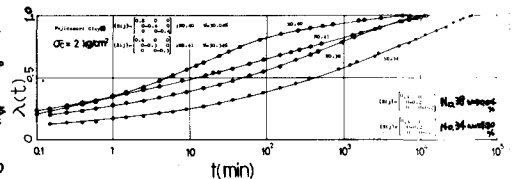


図-4 $\lambda(t) \sim \log t$ 関係 (試料B)

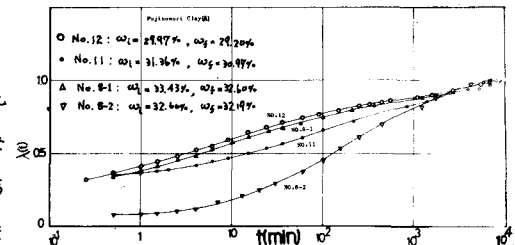


図-5 $\lambda(t) \sim \log t$ 関係 (排水クリープ, 試料A)

図から明らかなように、ダイレイタンシーの時間的变化は圧密曲線と類似したものであるが、応力履歴の影響はあまり顕著ではないようである。このことは尾崎粘土についての柴田の報告⁶⁾からもある程度推論される。

また、最終的平衡状態における ϵ_v と $\frac{\sigma_v - \sigma_{v0}}{\sigma_m}$ のあいだには、やはり直線関係が存在しダイレイタンシー係数 D の値は 2.0×10^{-2} であった。この値はかなり小さいようであるが、使用した試料の P.I. が 17.5% と小さい経返し粘土であるので、それほどおかしな値ではないと思われる。

以上に述べたのは、非排水クリープと排水クリープの特性であり排水条件の差違の力学的挙動に及ぼす影響についてはふれられていない。これは一つには排水クリープの場合にはバックプレッシャーを作用させていないので条件が完全には一致していないためであり、もう一つにはゲージの不足である。

今後更にゲージを集積し、定量的な議論を行ないたい。

3. 粘土の偏差応力カーヒズミ時間挙動の非線型性についての一考察

前節の叙述は、応答間数に対応する $\lambda(t)$ に関するものが多かった。一般的には、実質的にクリープが飽和するまで観測を継続することは研究者の忍耐に限度があるために非常に困難であるが、著者らがもちいた試料は限界応力レベル以下では、比較的早くクリープが飽和に近づく傾向を示したので、この状態の応力カーヒズミ関係を議論することができ、図-7 に応力カーヒズミ関係、図-8 に有効応力経路を示す。小さな応力増分を段階的に与えたときの ($0.14 \text{ kg/cm}^2/10 \text{ min}$)、各増分を負荷した瞬間から $\Delta t = 1'$ 、および $\Delta t = 10'$ 経過したときの応力カーヒズミ関係も図-7 に示してある。

図-8 には $\Delta t = 10'$ の有効応力経路を示してある。

かなりの大きさの範囲にわたる偏差応力増分を瞬間的に与える first loading creep の結果は、次式のような形で表現されることが多い⁷⁾といわれている。

$$\frac{d\epsilon}{dt} = A \exp(\alpha \sigma_1) \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_m}\right)^n \quad (2) \quad (\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3)$$

しかしながら、(2)式によって表現されるようなクリープ特性を有する粘土が、他の荷重パターンあるいは変形形式によるせん断を受けたとき、いかなる応力カーヒズミ挙動を示すかは未だ明らかにされていない。

Van Holde⁵⁾ は、Leaderman によって提案された修正重ね合わせ仮説(modified superposition hypothesis)を、Microcellulose に適用し、first loading creep の結果を基にして、一定荷重速度試験による応力カーヒズミ関係を予測し興味ある推論を展開している。彼が計算したのは次式のようなクリープ特性を有する材料の応答である。(2)式に得られた解を、図-9 に応力カーヒズミ関係を示す。

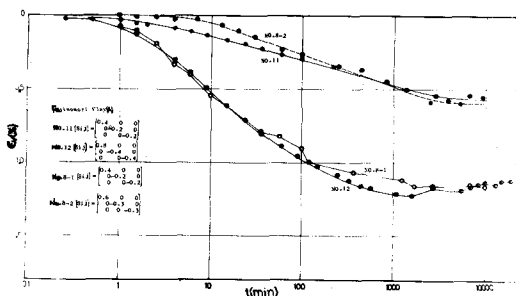


図-6 $\epsilon_v \sim \log t$ 関係 (排水クリープ、試料W)

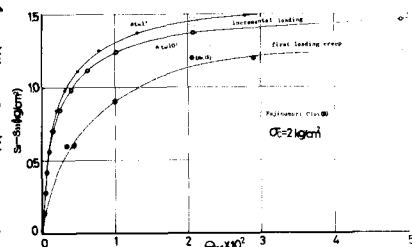


図-7 応力カーヒズミ関係

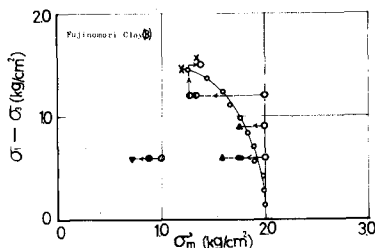


図-8 有効応力経路

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \rho \sinh \alpha S \cdot t^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\epsilon(t) = S(t) \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\alpha} \left(\frac{S(t)}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha \beta \cosh \alpha S(t) \right\} \quad (4)$$

(3)式が(2)式と同じ形であり、図-9が多くの正規圧密粘土の等体積せん断試験より得られる応力-ひずみ曲線と同じような特徴を有していることは興味深い。

修正重ね合わせ式は次式によって表現されるが、これについて少し考えてみた。

$$\epsilon(t) = \frac{S(t)}{\alpha} + \int_0^t \phi(\omega) \frac{d}{d\omega} f[S(t-\omega)] d\omega \quad (5)$$

$$= \frac{S(t)}{\alpha} + \int_0^t \phi(\omega) \cdot g(S(\omega)) \cdot \frac{\partial S(t-\omega)}{\partial \omega} d\omega \quad (6) \quad (\text{ここに } g(S(\omega)) = \frac{\partial f(S)}{\partial S} \text{ である。})$$

(5)式が成立すれば、次式が成立するが逆は必ずしもいえない。

$$\epsilon(t) = \frac{S(t)}{\alpha} + \phi(t)f(S) \quad (7)$$

(6)式は一次元的取扱であるから、これを三次元に拡張するためには、応力の偏時間微分を物質時間微分とみなすだけでは不十分で、客観性を満足させるために stress flux⁸⁾ $\hat{S}$ を導入しなければならない。また $g(S)$ はテンソル関数 $g(\hat{S})$ と解釈する必要があらう。このときには、結局偏差応力テンソル $\hat{S}$ と偏差応力ワックス $\hat{S}$ との coupling が考慮された理論ができることになる。

しかしながら(2)式および(5)式はダイレイタンスを考慮していないので、このような観点からのアプローチが土質材料の本質にせまりうるかどうかには問題がありそうである。

図-10に(B)試料の非排水クリープより得られた流動曲線を示す。時間をパラメーターにしたときには、ほぼ $\frac{d\epsilon}{dt}$ と $\exp(S_{11}-S_{33})$ の間には直線関係があるようである。図-11にO.C.R. 2の試料⁴⁾の流動曲線を示す。この場合にも図-10と同様の傾向が認められよう。これら両者の関係は(2)式よりも複雑な形になっているので、(5)式によって他の荷重パターンの予測は難しいが実行する価値はありそうである。もしこのことが可能になれば図-7の3曲線を定量的に比較検討できるわけである。

4. 謝辞

実験を行なうにあたり、御協力頂いた京都大学大学院学生上田貴夫氏に心から感謝の意を表するとともに図面作成に労を惜しまれなかつた地盤災害研究室の諸兄に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) A.S. Cakmak, R. Richards, Jr., and D.H. Cole., "Shift Functions for Hydrotheologically Simple Clays." *Proc. 5th. Int. Conf. Rheology* vol. 2 PP. 493-501.
- 2) 村山朗郎・森沢雅臣(1969), "粘土の「応力-変形」の挙動について." 土壌学会関西支部年次講演会報告集 III-10.1-4.
- 3) S. Murayama (1969), *Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E.* vol. 3 PP. 179-181.
- 4) 関口孝雄・村山朗郎(1971), "粘土のクリープ特性に関する実験的研究." 日本土質工学会発表会講演集 PM-152.
- 5) K.V. Holde (1957), "A Study of the Creep of Nitrocellulose." *J. Polymer Science* Vol. XXIV. PP. 417-427.
- 6) 柴田 徹(1963), "粘土のダイラタンスについて." 京都府研年報第6号 PP. 128-134.
- 7) Singh, A. and Mitchell, J.K. (1968) "General Stress-Strain-Time Function for Soils." *J.A.S.C.E.* vol. 94, No. 591, January, PP. 21-46.
- 8) A.C. Eringen (1962), "Nonlinear Theory of Continuous Media." McGraw-Hill. PP. 110-111.

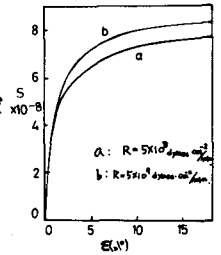


図-9 応力-ひずみ関係

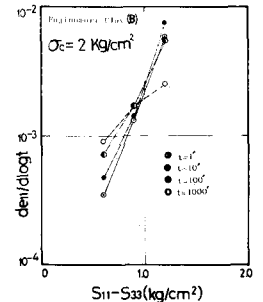


図-10 $\frac{d\epsilon}{dt} \sim S_{11}-S_{33}$ 関係

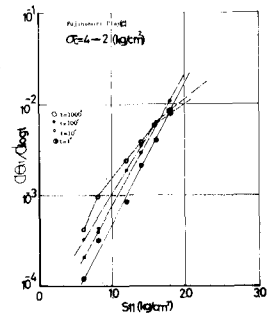


図-11 $\frac{d\epsilon}{dt} \sim S_{11}$ 関係