

宮崎大学工学部、正員、○藤本 慶、同学生員、柴田 隆、

同学生員、鶴城一郎、同、長野良次、同、西山知治

よえがら。

不飽和土が、いわゆる三相系よりなるために、その力学的挙動が飽和土に比べて複雑であることは周知の通りである。著者(藤本)はこれまでに、締固めた不飽和粘性土の応力緩和特性<sup>1)</sup>、三軸圧縮試験によるせん断時の体積変化性状と有効応力表示の問題<sup>2)</sup>、およびせん断強度におよぼす変形速度の影響<sup>3)</sup>などについて理論的、実験的に検討してきたが、それらの研究を通じて、未だ数然としないものに有効応力表示の問題がある。しかしながら、それはともかくとして、不飽和粘性土のレオロジー的性質に関する研究は飽和土のそれと比較して依然として少なく、特に、レオジカルな現象と強度特性との一貫した相関性を追究したものとすると殆んど見当らないのが現状である。一方、実際問題としても、不飽和粘性土のレオロジー的性質と強度特性との相関性は、今日のように大型化した宅造地などの盛土の安定性や擁壁に作用する土圧などに直接関係するものであるから、その解明はもうろん急を要する問題でもある。本文では、以上の観点から、締固めた不飽和粘土の基礎的な応力-変形-時間関係ならびにその強度特性との相関性と主としてクリープ現象の面から実験的に検討し、線型レオロジーと非線型レオロジーの両理論の持点に立って考察した結果を報告する。

## 1. 基礎理論

上のクリープ現象に関しては、対象と不飽和土と限定しなければ、これまでに多数の研究成果が発表されている。たとえば、最近では、村山・柴田<sup>4)</sup>、小田・木村<sup>5)</sup>、A. Singh & J.K. Mitchell<sup>6)</sup>、J. Volque<sup>7)</sup> あるいは S.S. Vialov<sup>8)</sup> などが掲げられる。しかしながら、それらの研究では、いわゆるクリープのみを対象として殆んどが線型か非線型かの何れかの理論体系の下で考察されており、上述のような強度特性との相関性を検討するとする若干無理があるようである。したがって、本文では、実験方法の特殊性を考慮したうえで以下のような理論体系を基礎とすることにした。

すなわち、いま、三軸圧縮条件下における供試体について、軸方向のひずみ $(\epsilon_1)$ と軸差応力 $(P_2 = \sigma_1 - \sigma_3)$ がゼロの状態から変形あるいは応力が増加してある応力段階 $(P_0 = \sigma_1 - \sigma_3)$ に達してクリープを起し、クリープが終局状態に達したときに除荷、再載荷の経路を経て破壊強度と求めるという応力-変形-時間関係に対しては、一般に粘弾性体の記憶現象に関する重畳法則が成立するとして次の Boltzmann の基礎方程式が適用される<sup>9)</sup>。

$$P(t) = E_d \epsilon(t) - \int_0^t f(t-\tau) \epsilon(\tau) d\tau \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $E_d$  は見かけの弾性率、 $f(t-\tau)$  は時刻  $t$  から  $d\tau$  だけひずみ  $\epsilon(\tau)$  が与えられたとき、その後時刻  $t$  (この時刻におけるひずみを  $\epsilon(t)$  とする) における応力  $P(t)$  に関する記憶関数である。いま、 $f(t-\tau)$  を  $(t-\tau)$  の単調減少関数と仮定して

$$f(t-\tau) = \frac{E_d}{\tau_m} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_m}\right) \quad \text{----- (2)}$$

とすると次式が得られる。但し、上式で  $\tau_m$  は緩和時間である。

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= E_d \dot{\epsilon} - \frac{E_d}{\tau_m} \epsilon(t) + \frac{1}{\tau_m} \int_0^t f(t-\tau) \epsilon(\tau) d\tau = E_d \dot{\epsilon} - \frac{P(t)}{\tau_m} \\ \therefore \frac{d\epsilon(t)}{dt} &= \frac{1}{E_d} \frac{dP(t)}{dt} + \frac{P(t)}{\tau} \quad \text{----- (3)} \end{aligned}$$

ここで、 $\tau$  は  $\tau = E_d \tau_m$  で表される粘土の見かけの構造粘性率である。この  $\tau$  に著者(藤本)が誘導した式<sup>1)</sup>

$$\gamma = \frac{P_d(t)}{2B_0 \{ P_d(t=0) - P_{d0} \} \sin k \{ B(P_d(t) - P_{d0}) / N \}} \quad (4)$$

を代入すると、次の一連の微分方程式が求められる。上式で  $B_0$  と  $B$  は定数、 $N$  は活性化された単位変形機構の数、 $P_{d0}$  は下限降伏値であり、ダッシュ記号は有効応力表示を意味する。

$$\text{初期弾性に対しては全応力 } P_d(t) \text{ が対応するとして、} \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E_{d1}} \frac{dP_d}{dt} \quad (5)$$

粘塑性変形に対しては有効応力が対応するとして、

$$\frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E_{d2}} \frac{dP_{d0}}{dt} + 2B_0 \{ P_d(t=0) - P_{d0} \} \sin k \left( \frac{B}{N} (P_d(t) - P_{d0}) \right) \quad (6)$$

式(5)と式(6)をフリーフープについて解くには、 $P_{d0}' > P_d'(t=0) = P_d(t) = P_{d0} = \text{const.} > P_{d0}$ 、 $(P_{d0}' \text{ は上限降伏値})$ とすれば、式(6)は、 $\frac{d\epsilon(t)}{dt} = 2B_0 (P_{d0}' - P_{d0}) \exp \left( \frac{B}{N} (P_{d0}' - P_{d0}) \right) \quad (7)$  なるので、式(7)を一定のひずみ範囲の条件で積分すればよい。かくして、求められたフリーフープひずみの式は次式で示す通りである。

$$\epsilon(t) = B_1 \left( \frac{P_{d0}'}{E_{d1}} + \frac{P_{d0} - P_{d0}'}{E_{d2}} \right) + \ln(B_2 (P_{d0}' - P_{d0}) t) \quad (8)$$

ここに、 $B_1 = B/N$ 、 $B_2 = 2B_0 E_{d2}/N$ 、で、いずれも微分方程式の定数である。なお、この場合におけるフリーフープ終局時のひずみは、 $\epsilon(t \rightarrow \infty) = \left( \frac{P_{d0}'}{E_{d1}} + \frac{P_{d0} - P_{d0}'}{E_{d2}} \right) B_1 \quad (9)$  で与えられる。

上限降伏値以上のフリーフープ応力  $P_{d0}'$  の下におけるフリーフープ破壊については、反応速度過程論を拡張した村山柴田の理論を参考にすると、次式でフリーフープ破壊時間  $t_{cf}$  が求められる。

$$t_{cf} = B_3 \exp(-B_4 P_{d0}') / B_4 P_{d0}' \quad (10)$$

上式で  $B_3$  と  $B_4$  は定数である。

なお、式(8)によって表わされるフリーフープ曲線の特性は粘土の物性に依じたレオロジー定数  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $E_{d1}$ 、 $E_{d2}$  および  $P_{d0}$  を実験的に求めて初めて定量的に表現できるものである。ただし、この場合、粘性土の工学的な指数特性とフリーフープ曲線の特性との相関性を検討するだけでなく、選定スペクトルを利用すれば便利である。この選定スペクトルは、フリーフープコンプライアンス  $J_d(t) = \epsilon(t)/P_{d0}$  と時間対数軸  $\log_{10} t$  に対してプロットしたフリーフープ曲線の勾配  $dJ_d(t)/d\log_{10} t$  で簡単に求められる。

## 2. 実験方法

試料には粘土分 (<5μ) 97%、粒子比重  $G_s = 2.64$ 、 $L.L. = 62.5\%$ 、 $P.L. = 32.3\%$  の関白カオリンを使用した。そのJIS規定による締固めの曲線を図1に示す。供試体は、乾燥密度の標準値と  $\rho_s = 1.360 \text{ g/cm}^3$  とし、飽和度が  $S_r = 80\%$  と  $90\%$  の2種に、予じめ計算した量の蒸留水で混合し、静的に締固めて作った。その供試体は48時間潤滑器中に静置した後、高さ70mm、径33.4mmに整形して実験に使用した。

実験は、予備実験として、先ず非排水条件下でひずみ速度が  $\dot{\epsilon} = 0.6\%/分 (0.46 \text{ mm/分})$  の三軸圧縮試験を行ない、全応力表示による変形係数 ( $E_{d1}$ )、破壊時の軸方向ひずみ ( $\epsilon_f$ )、破壊時の軸差応力 ( $R_f = \alpha_{1f} - \alpha_3$ ) および残留強度 ( $R_r = \alpha_{1r} - \alpha_3$ ) を求めた。試験に採用したセル圧は  $\alpha_3 = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ kg/cm}^2$  の3種である。次に予備実験と同じ実験条件でフリーフープ応力を  $P_{d0} = 0.25 R_f, 0.5 R_f, 0.75 R_f$  および  $0.90 R_f$  の4段階とし、各段階毎に同一物性の新しい供試体に応力制御方式 ( $100\%/10 \text{ 秒}$ ) で軸差応力を増していき、所定の  $P_{d0}$  に達した

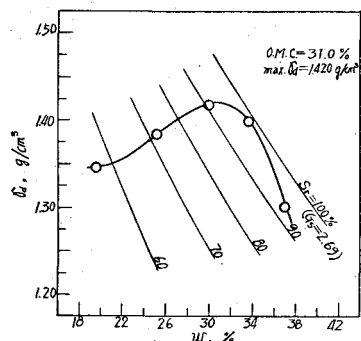


図1. 試料(カオリン)の締固め曲線。

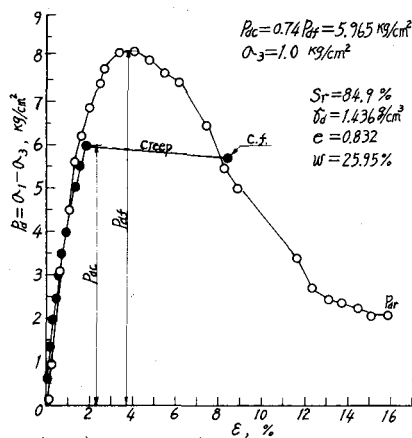


図2. 応力-ひずみ曲線

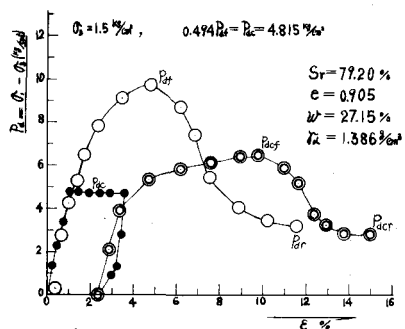


図3. 応力-ひずみ曲線

クリープの測定に入った。この間の変形は20秒毎に記録した。Sr=80%の供試体では、クリープが終局状態に達した時変で一旦降荷し、ひずみの回復をもって、その後ひずみ制御方式( $\dot{\epsilon}=0.6\%/分$ )で再圧縮して応力-ひずみの履歴曲線を求めたうえで破壊時の軸差応力( $P_{cf}$ )とひずみ( $\epsilon_{cf}$ )ならびに残留強度( $P_{cr}$ )を求めた。Sr=90%の供試体については、クリープ開始後 全で降荷し、上記の方法で $P_{cf}$ 、 $\epsilon_{cf}$ ならびに $P_{cr}$ を求めた。クリープ破壊した供試体については、その破壊時のひずみ( $\epsilon_{cf}$ )を記録した。

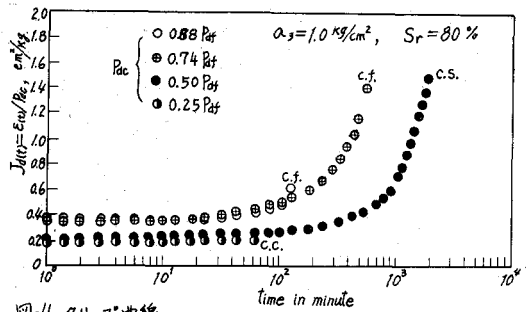


図4. クリープ曲線

### 3. 実験結果と考察

(1). クリープ特性: 図2と図3に応力-ひずみ曲線の一例を示す。

図中、白丸は予備試験によるもので、黒丸と二重白丸がクリープ実験によるものである。図4はクリープコンプライアンスでプロットしたクリープ曲線の一例で、図中に記入したC.C.は破壊を、C.S.はクリープ途中で降荷時点を、C.C.はクリープが終局に達した時点をそれぞれ示す。これにより、クリープの定常状態に対する理論式(8)の適用性が確認される。

図5と図6は、遅延スベトル( $dJ_{\text{creep}}/d\log t$ )とクリープ荷重( $P_c$ )との相関性を示したもので、前者がクリープが終局に至るまでの実験によるもの(Sr=80%)、後者がクリープ途中で降荷した場合のもの(Sr=90%)である。これより、両者共に、ほぼ遅延スベトルは $P_c$ に比例的に増大するものであることが判る。なお、前者では $\alpha_3$ の影響が認められるが、クリープ途中で降荷した場合には $\alpha_3$ の影響は殆んど認められない。これは、クリープ中の内部応力によるものと考えられる。

図7は、Sr=80%の供試体の $P_c$ とクリープ経過後降荷・再圧縮した場合の破壊時におけるひずみ( $\epsilon_{cf}$ )との関係を示したものである。これより、デューゲタのないので断言はできないが、クリープ履歴を有する供試体の再圧縮による破壊ひずみ( $\epsilon_{cf}$ )は $P_c$ に逆比例的で、さらに $\alpha_3$ が大きくなる程増大する傾向がうかがわれ、一般、Boltzmannの基礎方程式(1)に適合するようである。

図8は、クリープ破壊した供試体のクリープ破壊ひずみ( $\epsilon_{cf}$ )と遅延スベトルとの関係を示したもので、これより、両者の間には双曲線的な相関関係、つまり、

$$\bar{\epsilon}_{cf} = \alpha / dJ_{\text{creep}} / d\log t \quad (\alpha \text{ は実験係数}) \quad (10)$$

で表わされる関係のあることが認められる。この関係と図5とも考慮すれば、結局、 $\bar{\epsilon}_{cf}$ と $P_c$ との間にも式(10)と類似な関係式が求められるようである。すなわち、

$$\bar{\epsilon}_{cf} = \beta / P_c, \quad (\beta \text{ は実験係数}) \quad (11)$$

さらに、これらの関係とクリープ破壊時間( $t_{cf}$ )を求める理論式(10)との実験的、理論的相関性を今後検討の必要があるようである。

### (2). 強度特性に対するクリープ履歴の影響

この実験で、クリープ破壊を起した供試体の $P_c$ は殆んど0.75  $P_{cf}$ 以上であったが、たゞ、一例だけ、

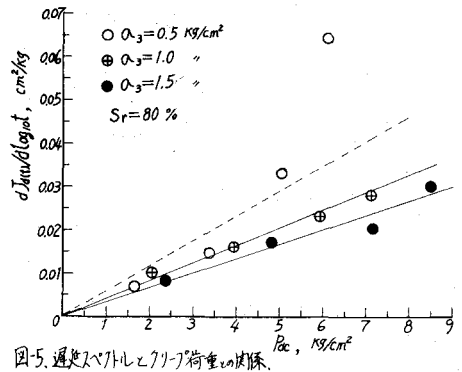


図5. 遅延スベトルとクリープ荷重の関係

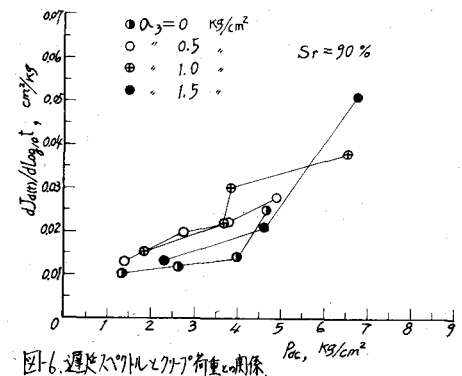


図6. 遅延スベトルとクリープ荷重の関係

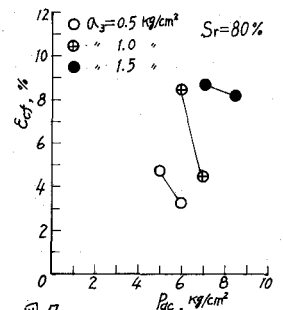


図7. クリープ履歴を有する供試体の破壊ひずみとクリープ荷重の関係

$P_{0c} = 0.53 P_{af}$  ( $\alpha_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) でクリープ破壊を起したものがあつた。それで、各 $\alpha_3$ の下における上限降伏値と変形速度法<sup>11)</sup>において求めると図-9のようになる。 $\alpha_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ のものについては紙面都合で図示しなかつたが、 $P_{0uy} = 5.0 \text{ kg/cm}^2$ であつた。これより、この実験に限って、上限降伏値に対する $\alpha_3$ の影響は顕著でないが、場合によっては $\alpha_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ については実験ミスがあつたかもしれない。



写真-1. クリープ破壊した供試体 ( $S_r = 80\%$ )

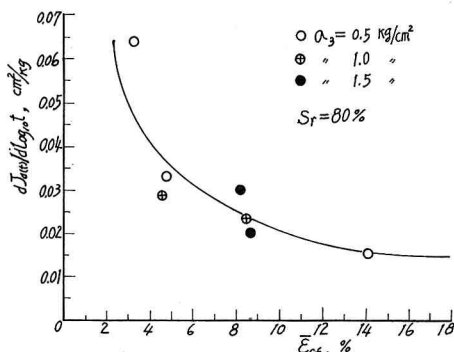


図-8. 遅延スベリとクリープ破壊の時間関係

この点に関しては今後データーの補充を兼ねて再検討する必要がある。

上限降伏値について村山・柴田の研究<sup>10)</sup>によると飽和沖積層粘土では  $P_{0uy} = 0.71 P_{af}$  であるとされている。これに対して、若者らの実験では、 $\alpha_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  で  $P_{0uy} = 0.78 P_{af}$ 、 $\alpha_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  で  $P_{0uy} = 0.53 P_{af}$ 、 $\alpha_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  で  $P_{0uy} = 0.68 P_{af}$  という値が一応求められた。したがって、いずれにしても、これらの点については再検討が必要であろう。

図-10は、 $S_r = 90\%$  の供試体について、破壊強度と残留強度に対するクリープ履歴の影響を調べたものである。従来、この種の関係については、A. Casagrande<sup>12)</sup> や R. Haefeli<sup>13)</sup> ほか村山・柴田の研究<sup>10)</sup> があるが、未だ明確な結論は与えられていないようである。しかしながら、これらの研究結果を総合してみると、(a) 上限降伏値以下のクリープ履歴を有する供試体、履歴のない供試体に比べて強度が増加し、しかも、クリープ時間が長いもの程その傾向が強まるようである。しかし、(b) 上限降伏値に近い  $P_{0c}$ 、あるいは上限降伏値以上のクリープ履歴を有する供試体については、クリープ時間が長くなる程（クリープ量が大なる程）強度は逆に低下する傾向があるのではないかと推測される。図-10の結果は、クリープ時間が一定で、しかもクリープ途中で除荷後再圧縮したものであるから、前記 Haefeli の場合に相対し (a) の傾向を示している。これに対して、紙面都合で図示しなかつたが、クリープ終局後に除荷し再圧縮した  $S_r = 80\%$  の供試体の実験結果では、上記 (b) の傾向を明確に示すデーターが得られている。この場合、(b) の傾向の極端な場合がクリープ破壊とも考えられる。(図-3、参照)

むすび

この研究により、(1) 不飽和粘土のクリープも村山・柴田あるいは若者らの提案した微分方程式で充分に説明できる。

(2) 遅延スベリはクリープ荷重に比例して増大する。(3) クリープ破壊はクリープ荷重または遅延スベリと逆比例の関係を示す。(4) 上限降伏値以下のクリープ履歴をもつ試料は再圧縮後の強度は増加し、上限降伏値以上のクリープ履歴をもつ粘土では、クリープ量が大なる程強度低下率が大い。等々が確かめられた。しかしながら、上限降伏値のものに若干検討の余地があり、残留強度、せん断抵抗成分<sup>14)</sup> 等は今後実験的に解明する問題との多分に存在することも確かめられた。本研究の経費の一部は文部省科学研究費(災害科学一地区)予算

によつた。付記して謝意を表する。参考文献 1) H. Fujimoto: Studies on the Stress Relaxation of Compacted Cohesive Soils and Its Application to Eng. Practice. 昭和45年工学研紀要No. 6, 1949. 2) 藤本慶: 第3回土木学会年次学術講演会講演要録集(四), 543号(明). 3) 藤本慶: 第4回土木学会研究発表会論文集, 544号(6). 4) S. Murayama & T. Shibata: Rheology and Soil Mechanics, I.U.T.A.M., 1966. 5) 小田・木村: 土木学会年次学術講演会(第25回)(B), 5-25号(11月). 6) A. Singh & J.K. Mitchell: Proc. ASCE, Vol. 79, No. SM1, 1968. 7) J. Volque: Proc. 5th ICSM (FE), 1961. 8) S.S. Vialov: Proc. 6th ICSM (FE), 1965. 9) 中川・山崎: レソノロジー(433号) 5-7号(5月). 10) 村山・柴田: 土木学会論文集No. 40, 5-31号(12月). 11) 柴田は軟弱土の試験法における最近の問題点(土工学会第107期)で説明した。12) A. Casagrande: Harvard S.M. Series No. 1, 1926. 13) R. Haefeli: Proc. 3rd ICSM (FE), 1953.

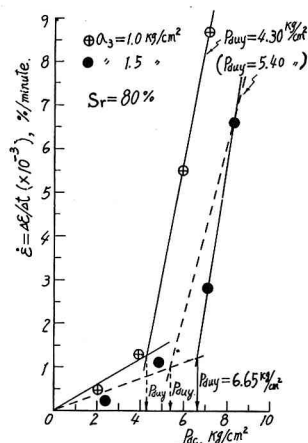


図-9. 変形速度法による上限降伏値

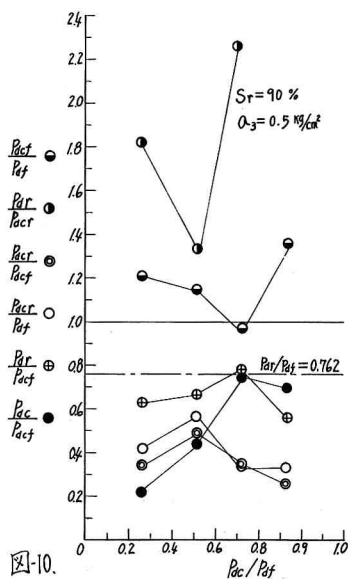


図-10.