

有効応力からみた粘性土のクリープ現象

軽 部 大 蔵

CREEP TESTS ON REMOLDED CLAY

By Daizo KARUBE

Synopsis

Two series of drained creep tests on saturated remolded clay, a series on the normally consolidated state ($\sigma_e = 2 \text{ kg/cm}^2$) and other series on the over-consolidated state (O.C.R=5.6), were performed. The water content of both series after consolidation was controlled to be equal. And possible change of water content during creep duration to be minimum, creep stress condition of each specimen was to come a point on the vector curve which was obtained from undrained strain controlled triaxial compression test of another specimen subjected to corresponding consolidation. Creep stress was applied about one week under 20°C of room temperature.

Test results are as follows:

- i) Linear relationship between creep-strain, ε , and loading time in logalistic scale, $\log t$ was not obtained.
- ii) Rate of creep, $(\Delta\varepsilon/\Delta\log t)$, which is measured between 100 minutes and 5000 minutes of loading time is not influenced by $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ when $(\sigma_1 - \sigma_3) \leq 0.7 \text{ kg/cm}^2$ (about 40% of $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$),
- iii) but it is controlled by $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ when $(\sigma_1 - \sigma_3) > 0.7 \text{ kg/cm}^2$.

1. ま え が き

土に作用する応力と、それによってひきおこされるひずみや破壊の関係、すなわちせん断特性をできるだけ一般的な形で記述しようという試みは土質力学の基本的な分野の一つとして古くからとりくまれてきた。

与えられた土のせん断特性を支配するおもな要素としては、含水比、応力履歴、現在の応力条件、温度などがあげられているが、これらのうちの応力履歴の影響についてはあまりよく整理されていないようである。

この報告は現在おこなっているクリープ試験の中間的な結果から、クリープと有効応力の関係に及ぼす過圧密応力履歴の影響をしらべたものである。

2. 試料と実験方法

試料土は大阪ちゅう積層粘土の練り返し再圧密粘性土であって、LL.65%, PL.30%, 三角座標による分類は粘土である。等方圧力による圧密圧力と含水比の関係は Fig. 1 のようである。以下に述べる実験は 20°C の室内に備えられた NGI 型三軸試験装置で行なわれ、供試体の寸法は直径 3.57cm, 高さ約 8 cm の円柱である。

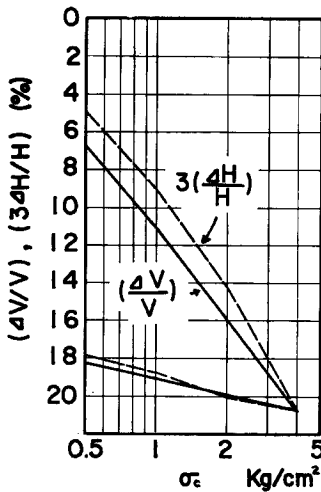


Fig. 1 Relationship between consolidation pressure σ_c and volumetric strain $(\Delta V/V)$ or vertical strain $(\Delta H/H)$.

与えられた粘性土のクリープ特性を支配する多くの要素のうちから過圧密履歴に関する要素だけをしらべるために、試験は相等しい含水比をもった正規圧密および過圧密の2つのグループについて行なわれた。正規圧密試料は 2kg/cm^2 の等方圧力を受けており、過圧密試料は先行圧力 2.8kg/cm^2 を受けたのち 0.5kg/cm^2 のもとで膨潤させたものである。また供試体の含水比や有効応力がクリープ試験中に変化すると結果の解析が困難となるので、これらの変化を最小限にとどめるためにクリープ荷重はあらかじめ求められたひずみ制御式非排水三軸圧縮試験による有効応力径路上の一点となるように定められ、しかもクリープ中は排水できる状態を保った。Fig. 2 の丸印は試験の行なわれた応力条件とそれらの試験番号をあらわしており、これらはまた Table 1 に一括表示されている。なお丸印が乗っている曲線は対応する圧密履歴を受けた試料の非排水三軸圧縮試験による有効応力径路である。クリープ荷重は約1週間(10000分)作用させ、その間の排水量はビューレットからの蒸発(ほとんどおこらないことがわかった)を補正しながら測定した。

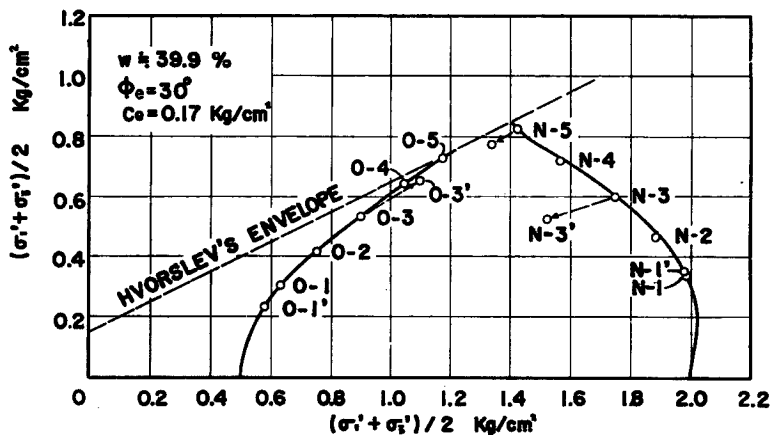


Fig. 2 Strees condition of creep tests (plots) and vector curves on 45° -plane of undrained compression test.

Table 1 Stress condition of creep tests

Test No.	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	Consoli- dation	Water content before creep test (%)	Water content after creep test (%)
N-1	0.676	1.645	$\sigma_c =$ 2kg/cm ²	40.05	39.55
N-1'	0.70	1.61		39.89	39.34
N-2	0.93	1.42		40.10	39.48
N-3	1.20	1.15		40.09	39.44
N-3'	1.19→1.05	1.15→1.00		39.52	39.34
N-4	1.44	0.85		39.94	39.22
N-5	1.65→1.55	0.60→0.564	2.8kg/cm ² ↓ 0.5kg/cm ²	40.18	39.82
O-1'	0.46	0.36		—	—
O-1	0.604	0.33		39.64	39.79
O-2	0.831	0.337		39.55	39.71
O-3	1.07	0.365		40.32	40.41
O-3'	1.07→1.308	0.365→0.446		39.65	39.45
O-4	1.283	0.407		40.20	39.97
O-5	1.42	0.44		40.06	40.21

3. 試験結果と考察

クリープ試験直前の含水比は正規圧密試料の平均値が 39.96%，過圧密試料の平均値が 38.89% であった。クリープ試験中の試料の長軸方向の圧縮量および排水状況は Fig. 3 の例に示すようである。ただし、図中の破線は、排水にともなう体積変化は等方的におけると仮定して、それによる長軸方向の圧縮量を全圧縮量からさし引いた値を示しており、以下の整理はこの値を用いて進めている。クリープ中に含水比がわずかながら変化するために、試験終了時の含水比は正規圧密試料の平均値が 39.45%，過圧密試料の平均

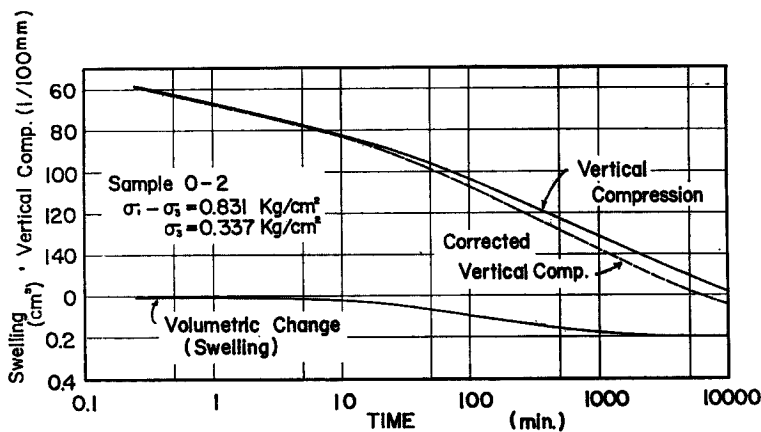


Fig. 3 Example of creep displacement.

値が 39.92% となった。

従来の多くの研究¹⁾によれば、一定荷重をうける粘性土の非排水クリープ量は載荷時間の対数に比例するといわれている。すなわちクリープひずみを ϵ ，載荷時間を t とすれば、

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f(\sigma) \dots\dots\dots (1)$$

ここに σ は全応力表示の荷重である。しかし今回の試験では Fig.3 に代表されるようにすべてのクリープ曲線は直線性を示さなかった。この現象が本質的なものか、あるいはクリープ初期に予想される間げき圧の発生、またはわずかに起こる含水比の変化によるものかは今後の検討に待たねばならない。Fig. 4(a), 4(b) は載荷時間100分以後の長軸方向 ひずみの進行状況を示している。図中、N-3' および O-3' の試験は Fig. 2 からわかるようにそれぞれ N-3 および O-3 と同じ応力条件でクリープさせ、200分経過後 $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1' + \sigma_3') = \text{一定}$ 、という応力条件を満たしつつ少し応力を変化させたものである。

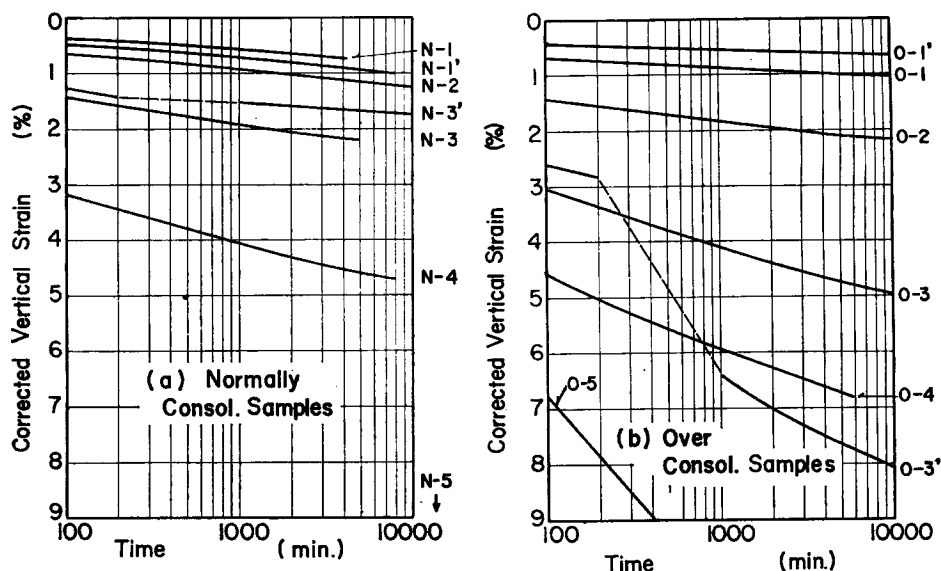


Fig. 4(a), 4(b) Relationship between loading time and corrected vertical strain.

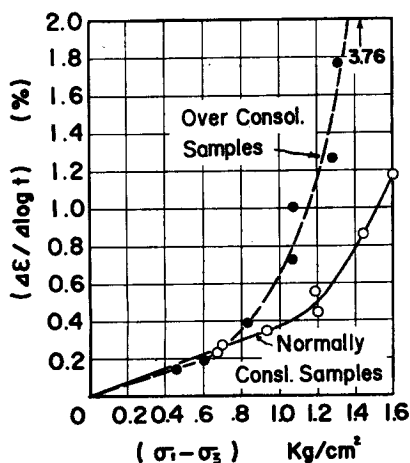


Fig. 5 Relationship between shearing stress and creep rate.

この報告の目的は過圧密履歴がクリープ特性に及ぼす影響をしらべることであった。このためには、まずクリープ特性を代表する指標を選ぶ必要がある。その指標として、ここでは経過時間100分から5000分までの $(\Delta \varepsilon / \Delta \log t)$ の平均値を用いることにする。この区間を選んだ理由は Fig. 4(a), 4(b) からわかるように、クリープ曲線が比較的直線性を示すからである。Fig. 5 は $(\Delta \varepsilon / \Delta \log t)$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の関係を示しており、また Fig. 6 は Fig. 5 を用いて Fig. 2 の応力面上に等クリープ速さ線を描いたものである。これらの図から、 $(\sigma_1 - \sigma_3) \leq 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の範囲ではクリープ速さ $(\Delta \varepsilon / \Delta \log t)$ は $(\sigma_1 - \sigma_3)$ のみに支配されること、そして $(\sigma_1 - \sigma_3) > 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の範囲では、 $(\Delta \varepsilon / \Delta \log t)$ は $(\sigma_1' + \sigma_3')$ にも影響されることがわかる。なお Fig. 6 から含水比 $w = 39.9\%$ における応力条件とクリープ速さの一般的な関係式を導くことが可能であろう。

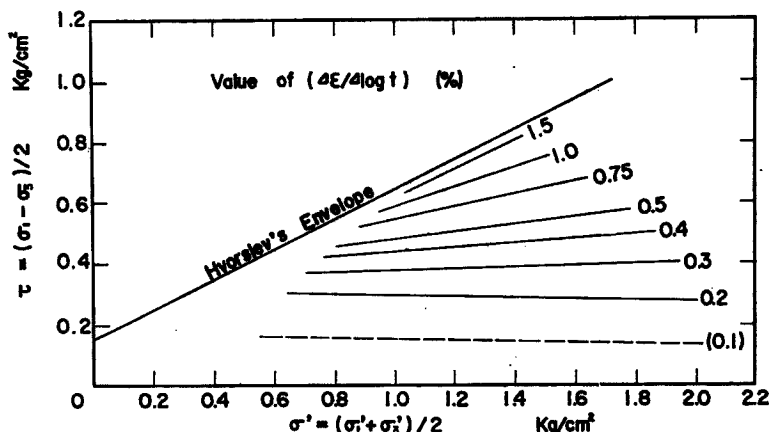


Fig. 6 Constant creep rate lines on constant water content plane.

さて、一般に与えられた土が、ある応力条件のもとである含水比を示している場合のクリープ速さはどのようにして与えられるかを考えてみよう。ただし、この土は等方応力履歴のみを受けているものとする。まず、いろいろな圧密圧力のもとにある正規圧密粘土のせん断試験から得られる等含水比線（または非排水有効応力ベクトルカーブ）は Fig. 7 のように相似形となることから従来の多くの研究²⁾からわかっており、また、これらのせん断試験から得られる応力とひずみの関係が、応力軸を圧密圧力で割るとほとんど重なりあうことなどからみて、正規圧密粘土の等クリープ速さ線は原点を通る直線となると思われる。すなわち

$$\left(\frac{\Delta \epsilon}{\Delta \log t} \right)_{t=t_0} = f \left(\frac{\tau}{\sigma'} \right)_{45^\circ} = f \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1' + \sigma_3'} \right) \dots \dots \dots (2)$$

つぎに、Fig. 8 に示すように、たて軸が $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 、横軸が $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ 、もう一つの手前からのびる横軸が等価圧密圧力 σ_e' であるような 3 次元空間を考える。ただし、 σ_e' は試料の含水比を、その含水比に対応する正規圧密圧力であらわしたものである。したがって、 $\sigma_e' = 2 \text{ kg/cm}^2$ なる平面は Fig. 2 および 6 の応力面に一致している。また Fig. 7 の等方圧力軸 OA は Fig. 8 の OA となる。Fig. 6 の等含水比応力面に描かれた $(\Delta \epsilon / \Delta \log t) = \epsilon_1$ なる直線と、Fig. 7 の正規圧密面に描かれた $(\Delta \epsilon / \Delta \log t) = \epsilon_1$ なる直線を Fig. 8 の 3 次元空間に描けば、これら 2 直線が一つの平面を形成することがわかる。いいかえれば、Fig. 6 および Fig. 7 の等クリープ速さ線は Fig. 8 の等クリープ速さ面と、考えている面の交線として与えられる。したがって

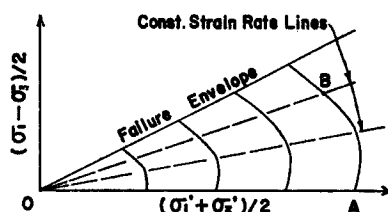


Fig. 7 Idealized constant water content curves of normally consolidated clay and constant creep rate lines.

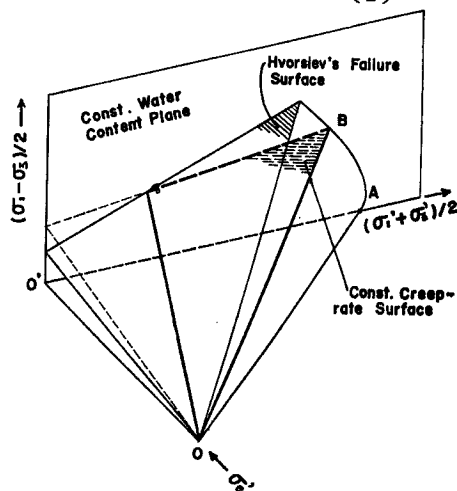


Fig. 8 View of constant creep rate surface in three dimensional space.

て、任意の $\sigma_e =$ 一定の平面上と正規圧密状態でそれぞれ等クリープ速さ線求めておけば、与えられた粘土の含水比と応力条件からそのクリープ速さを計算できることになる。

4. 結 論

Fig. 5 および 6 からわかるように、 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が小さい範囲ではクリープ速さが有効垂直成分 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ に影響されない。しかし、正規圧密試料ばかりを比べると、クリープ速さは $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が小さいところでも $(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ に影響を受けるものと推測される。これら二つの現象から、クリープの速さは本質的に $(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ の影響を受け、Fig. 2 の関係が成立しており、ただ過圧密粘土においては試料外からは測定できない粒子間力が働いていて見かけ上 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ が影響しないような結果を与えるのではないかという推測がなされる。この測定できない粒子間力は、

$$\Delta\sigma' = \sigma'_e - \sigma' \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるもので、せん断の進行にともない消滅していくものである。ここに σ'_e は等価圧密圧力、 σ' は現在の有効垂直応力である。

この報告では、過圧密比を変化させた場合、および先行せん断履歴についての検討がなされていない。これらについては現在試験を続行中であり、稿を改めて報告したいと思う。

最後に、御指導いただいている村山朔郎博士および柴田徹博士に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、村山朔郎、柴田徹“粘土のレオロジー特性について”土木学会論文集，40号，1956，pp.1—18.
- 2) たとえば、Henkel, D.J., “The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays”, ASCE. Research Conf. of Shear Strength of Cohesive Soils, 1960, pp.533—554.