

鹿島建設技術研究所 正会員 鈴木音彦

同 上 正会員。田中登弘

北海道大学農学部大学院 長谷川周一

まえがき

クリープ履歴が土の強度におよぼす影響を調べることは、盛土斜面などの安定性を考える上で、きわめて重要なことである。

クリープ進行にともなう粘土の強度低下および強度増加は、相反する現象ではない。すなわち、強度低下は、クリープ破壊までの時間を記録する定荷重のクリープ実験から明らかにできるし、強度増加は、クリープ後の強度を比較することにより明らかに出来るからである。

筆者らは、同一強度をもつ秩父産の洪積粘土を用いて、大きい荷重(上限降伏値付近)によるクリープ試験を行い、クリープ破壊を起さなかった供試体の強度を比較することにより、強度増加を調べた。

この結果、上限降伏値以上の荷重によるクリープ後の供試体であつては、強度増加は期待できさうである。

試料と実験方法

秩父産の洪積粘土は、秩父古生層上に滞積したカオリン系のよく締った重粘土であり、筆者らは、以前から、乱されない供試体のクリープ実験に利用してきた。しかし、自然滞積の粘土であるため、バラツキも少なくないので、実験にあたっては、同一強度をもつ供試体を得るため調整した。まず、加水しながら粘土を0.42mmフルイに通過させた細粒土をソイルミキサーで十分練り返し、 $7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm} \times 16.0\text{cm}$ で区分けたダンボールを組合せた圧密箱中に入れ、粘土の滞積深さから算定した圧密荷重で圧密した。圧密終了後区分けたダンボールから粘土を切り出し、 $\phi=50\text{mm}$ 、 $h=12.5\text{cm}$ の供試体に成型した。なお、試料の圧密条件は3種類に分けた。試料No.1は圧密応力を 0.167kg/cm^2 で1ヶ月間、No.2は 0.33kg/cm^2 で1ヶ月間、およびNo.3は 0.5kg/cm^2 で7日間圧密した。また、粘土の土性は $G_s=2.69$ 、 $LL=58.0\%$ 、 $PL=21.9\%$ 、コロイド分36%、粘土分26%、シルト分30%、砂分8%である。

実験はまず、圧密終了後の供試体について、三軸圧縮室でひずみ制御方式による急速セン断試験を行い、セン断強度(P_f)とひずみ(ϵ_f)を求めた。次に、それと同一強度をもつ供試体について、 P_f 以下の荷重条件でクリープ試験を実施した。クリープ試験のうち、クリープ破壊を起さなかった供試体について、Fig-1に示す装置内で、クリープ荷重を除去し、クリープ回復をまたずにただちに急速セン断試験を行い、クリープ履歴をもつ粘土のセン断強度(P_{cf})とひずみ(ϵ_{cf})を求めた。なお、セン断試験における側圧(σ_3)は、圧密荷重と同じにした。また、急速セン断試験においては、その強度が側圧の影響を

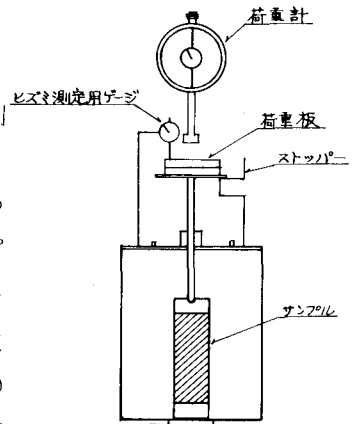


Fig-1 APPARATUS

うけないものと考えて、 $\sigma_3 = 0$ の試験も行った。

実験結果

急速せん断試験；破壊強度を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ で定義して、各試料の破壊時の強度と含水比の関係をFig-2に示した。この図の中にはクリープ履歴をもつもの、またないもの、および試料の圧密効果を見るために繰り返した試料の結果等をも示した。

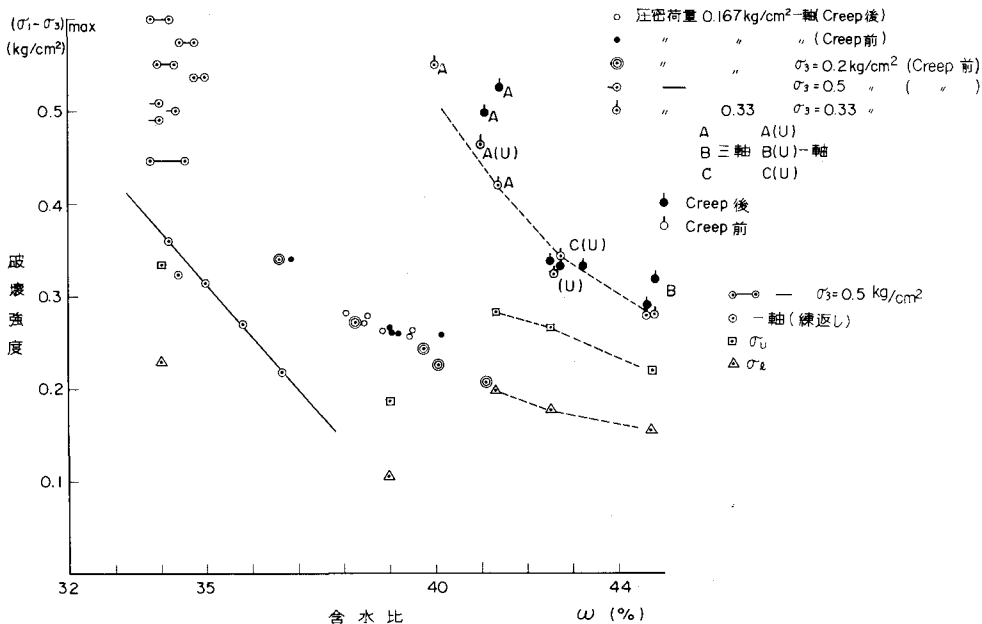


Fig-2 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ VS. ω

クリープ試験；同一条件で圧密した粘土について、破壊強度以下の荷重でクリープ試験を行いFig-3に示すような粘土のクリープ特性曲線を求めた。この図の中の○印はクリープ挙動を表現するためA・SinghとJ・K・Michell¹⁾の理論を用いて、解析した理論値である。またFig-4は羽山、柴田西教授²⁾の理論を使って、粘土のクリープ特性曲線から求めた $\frac{de}{dt}$ と σ_c 関係図すなわち流動曲線の一例を示す。なお、このような図から求めた粘土の上限降伏値(σ_u)および下限降伏値(σ_e)はFig-2の中に示してある。

実験結果の検討

実験方法；クリープ履歴を持つ粘土の強度増加および強度減少を調べる方法はいろいろ考えられているが、標準になるような方法は出されていないようである。クリープ履歴の影響について最初に研究を始めたのは、A・Casag-

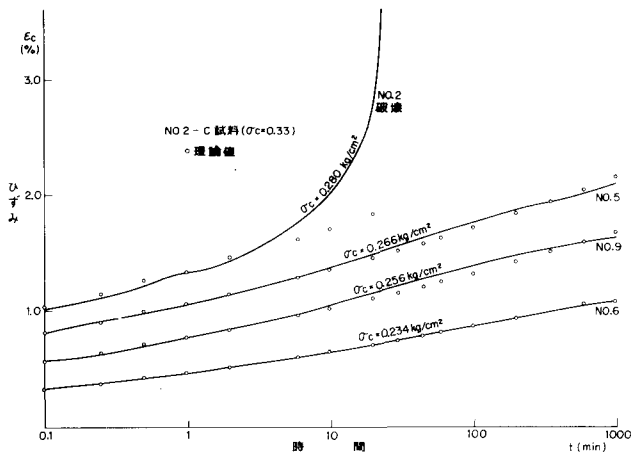


Fig-3

randeとWilson³⁾であろう。彼等は同一試料を用いてクリープ実験し、荷重速度を段階的に変えた圧縮試験からクリープ履歴が強度特性におよぼす影響が大きいことを示した。その後、多くの非排水クリープ実験からはクリープ破壊強度が荷重時間の増加にしたがい低下することからして、クリープ履歴をもち粘土は強度低下をすると判断されてきたようである。だが一方で強度増加に対する実験結果についても報告された。Vyalov⁴⁾らはクリープ条件のもとで、同一強度を持つカオリン系の供試体と、すでにクリープ変形を受けた供試体を用いて、クリープ実験を実施して、破壊時間、ひずみ速度などを比較することにより、あらかじめクリープ変形を受けた供試体のほうが大きい抵抗を示すことを報告した。また、このように再度のクリープ試験結果を対比することとは別に、クリープ変形を受ける前後のせん断強度を比較することにより、

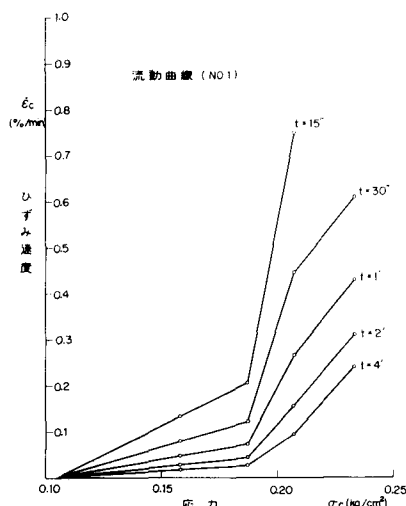


Fig-4

より、クリープ履歴の影響を調べる方法はR・Haefeli⁵⁾、村山、柴田両教授、および藤本教授によりなされた。R・Haefeliはクリープ応力 0.5 kg/cm^2 でクリープを2週間行ったあとで非排水三軸試験の強度を比較して20~30%の強度増加が認められると報告している。村山、柴田両教授は、一連の飽和粘土より上限降伏値を求め、クリープを生じせしめるせん断応力がこの上限降伏値を越れば強度が低下すると予想し、荷重を一定(上限降伏値以下)にして荷重時間を変化させたものについてクリープ後の単軸圧縮強度を調べた。その結果、荷重が上限降伏値以下であれば、数日で約10%(実験結果によると1日で8%)の強度が期待できるとしている。藤本教授は締固めた不飽和粘土を用いて、短時間クリープ実験(変形速度法)後の強度を調べて次のような傾向を指摘した。クリープ荷重が上限降伏値以下であれば、クリープ履歴をもちた供試体ではクリープ量が大なるほどその強度の低下率が大きくなると報告した。筆者らの実験方法は同一強度をもちた供試体をひずみ速度 $1/\text{min}$ でせん断してその強度を基準値とし、クリープは1日程度と短いが、終了後ただちに三軸圧縮強度を求めて比較したのでR・Haefeliの方法に類似しているものと思われる。

せん断強度；強度を比較する上で、求めたせん断強度の特性について、Fig-2の結果に対して検討してみる。含水比の増加にともない強度が指数的に減少していくという一般的な傾向は示されている。しかし、練り返した試料の応力-ひずみ曲線にはピーク値がないため、ひずみ15%の強度で示したためか、算術目盛のグラフ上ではほぼ直線関係を示している。試料によってせん断強度が異なるのは、圧密によるものと考えて圧密効果を推定した。含水比が高く、圧密荷重 0.33 kg/cm^2 のNO.2の強度は、圧密荷重 0.167 kg/cm^2 のNO.1ならびに練り返した粘土の強度に比較して大きいことから考えて圧密効果は期待出来たと思う。ただし、圧密荷重 0.5 kg/cm^2 のNO.3は圧密荷重は大きい、圧密時間は1週間と短かいのでNO.1と同じ程度の圧密効果しか得られなかったものと思われる。

クリープ現象；クリープ特性を調べるためにクリープ現象を村山、柴田両教授のレオロジカルモ

デルによる理論で解析したが、荷重が大きいためか、理論にある $\epsilon - \log t$ について直線関係が得られなかった。A. SinghとJ. K. Mitchellの理論による数値解析をした。(この理論は $\log \epsilon - \log t$ の直線性から数式化したものである。) Fig-3に示されるように理論値と実験値は破壊を起さないクリープ特性曲線において比較的よい一致をみた。Fig-4の流動曲線から求めた上限降伏値はFig-5に示されるように破壊強度のほぼ0.67~0.79の範囲にある。ちなみに、

村山、柴田両教授の結果(0.71)および藤本教授の結果(0.53~0.79)と比較しても値は妥当のように思われる。また、下限降伏値はFig-6でわかるようになりに大きい。このため村山、柴田両教授の論文で(Pf, 13の式(8-1)) $\epsilon_0 = \sigma_0 / E \approx 0$ とにおいて理論を進めているが、この種の粘土の解析にはあてはまらない。

まとめ

上限降伏値付近の荷重によるクリープ前後の強度を比較した結果をFig-6に示す。結果は試料別に算術平均したものであり、補正増分

$(P_{cf} - P_f) / P_f$ はクリープ中のひずみを考慮して断面積を補正したものである。クリープ応力と強度の関係をFig-7に示す。上限降伏値以上の荷重によるクリープ後の強度増加は期待できないと予想されてきたが、今回の実験からはクリープひずみが小さい間は強度増加が期待できそうである。また、R. Haefeliの実験結果(Fig-8)からはクリープ応力の大きいものは強度増加がみられるが、本実験では荷重時間が短いことやクリープ応力が破壊荷重に比較して大きいことによるためか明らかではない。

引用文献

- 1) A. Singh and J. K. Mitchell: "General Stress-Strain-Time Function for Soil", ASCE 1968
- 2) 村山 朔郎, 柴田 徹: "粘土のレオロジー的特性について", 土木学会論文集 40号 1956
- 3) A. Casagrande and S. D. Wilson: "Effect of Rate of Loading on the Strength of Clays and Shales at Constant Water Content Geotechnique 1951
- 4) S. S. Vyslov and N. K. Pekarskaya: "Long-Term Strength of Soils", Osnovaniya Fund. Mekhen. Gruntov 1968
- 5) R. Haefeli: "Creep Problems in Soils, Snow and Ice", Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mech. and Found. 1953
- 6) 藤本 広: "補正した不飽和粘性土のクリープと強度特性との関係について", 第6回土質工学会講演概要 1971

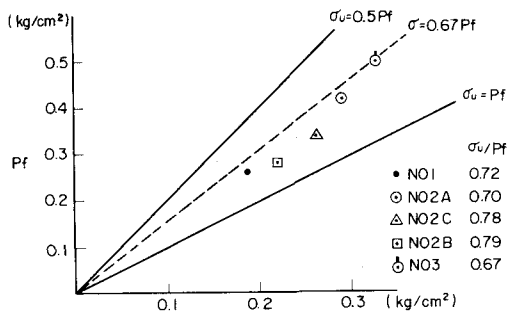


Fig-5 Pf VS. σ_u

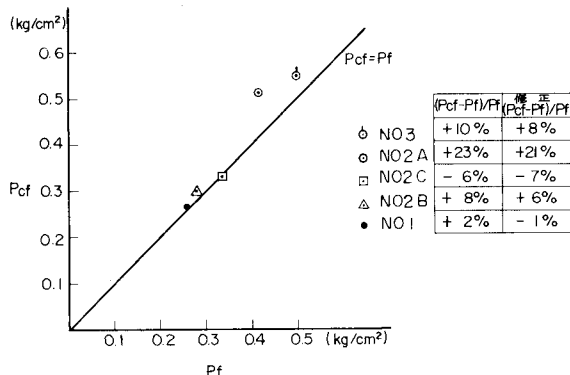


Fig-6 Pcf VS. Pf

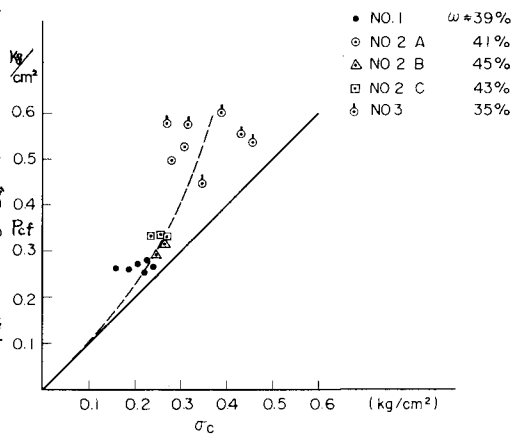


Fig-7 Pcf VS. σ_c

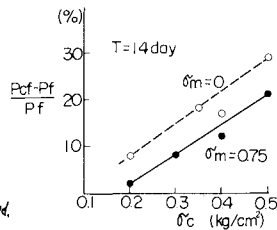


Fig-8