

粘土の破壊に関する二三の実験について

村山 朔郎・石井 義明・村山 弘治

SOME EXPERIMENTS ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CLAY

By Sakuro MURAYAMA, Yoshihaur ISHII and Koji MURAYAMA

Synopsis

In order to investigate the effect of creep-history on the compressive strength of clay, unconfined compression tests were performed on the clay samples which had various creep histories.

Main results obtained are as follows.

The compressive strength of clay which crept a certain duration under a constant stress higher than the upper yield value decreases with the stress intensity applied. The compressive strength of clay which had the residual creep strain caused by the stress lower than the upper yield value increases with the magnitude of the residual strain independent of creep-history prior to the compression test.

1 ま え が き

地盤を構成する土の力学性を解明するには変形、応力以外に時間的要素が加わり、またその力学的諸現象は応力履歴、温度、含水比、飽和度等の因子の影響を受けるので、その破壊機構の力学的解明については、以前から多くの人々により努力が加え続けられているが、未だ体系づけられた解決は得られていない。こゝでは載荷速度や、応力履歴、ヒズミ履歴が破壊強度にいかなる影響を及ぼすかにつき、三種の圧縮試験によりその力学性の解明を実験的に試みると同時に、その理論の発展についても努力した。

2 実験装置、試料

実験ⅠおよびⅡの圧縮試験には N.G.I. 型のものを使用し、実験Ⅰの場合は荷重台を一部改造し、等速で滴下する水銀を受ける載荷装置を取付けた。実験Ⅲの緩和特性測定にはレオメーターを使い、実験Ⅰ、Ⅱは実験中の温度変化による影響を避けるため恒温室で行なった。試料は実験項目によりその作成方法、先行圧縮荷重等は一定していないが実験Ⅰ、Ⅲでは粘土を一旦水に溶解せしめて泥状にし、これを 0.25 mm フルイを通過せしめて大型圧密機により 0.5 kg/cm^2 の圧力で再圧密したものを使用した。

液性限界は78%塑性限界は32%で分類はシルト質粘土ロームであった。実験Ⅱの試料は粘土（大阪湾より採取した沖積粘土）を 0.25 mm フルイを通過せしめ土中の貝がら小石等を分離した後、土粒子の分離を促すために過酸化水素を少量加え2日後大型圧密機により 2.0 kg/cm^2 の圧力で再圧密し使用した。この試料は液性限界56%塑性限界25%でシルト質粘土ロームであった。実験ⅠⅡで使用した供試体の上限降伏値は定荷重式の試験から得られた応力-ヒズミ曲線を両対数紙上にプロットしその直線の第一折点を上限降伏値とした。得られた値は 0.3 kg/cm^2 であった。実験Ⅱの試料についても同様の方法で上限降伏値を求めた値は 0.8 kg/cm^2 であった。

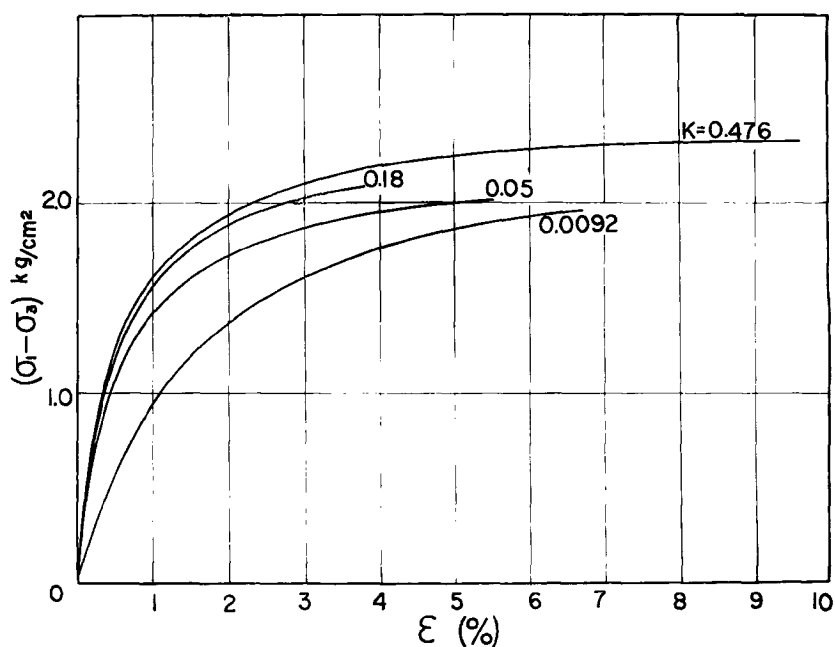


Fig. 1. Relation between stress and strain under constant rate of loading test.
(K : rate of stress increment, kg/cm²/min)

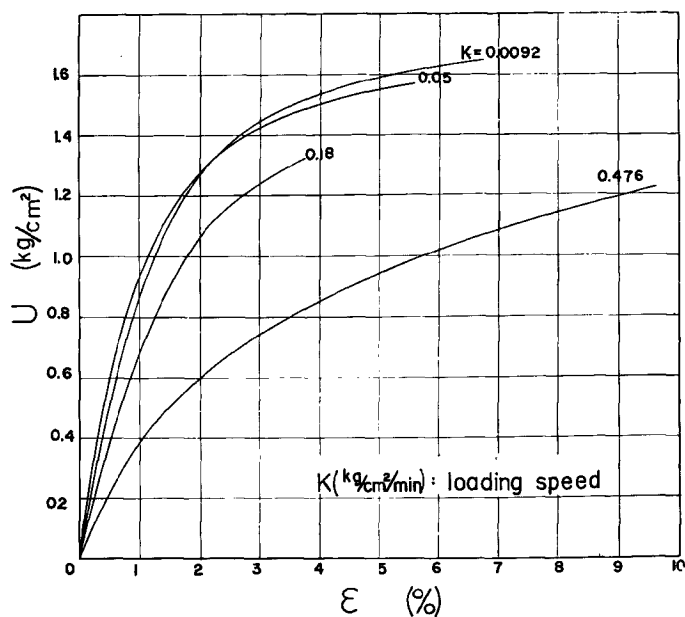


Fig. 2. Relation between pore water pressure and strain.

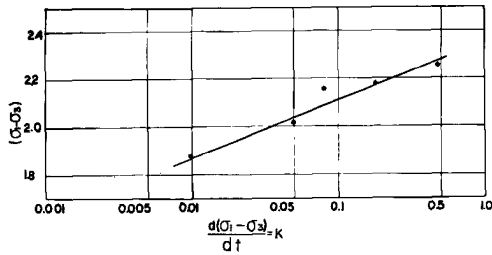


Fig. 3. Deviator stress at axial strain 5% v.s. loading speed.

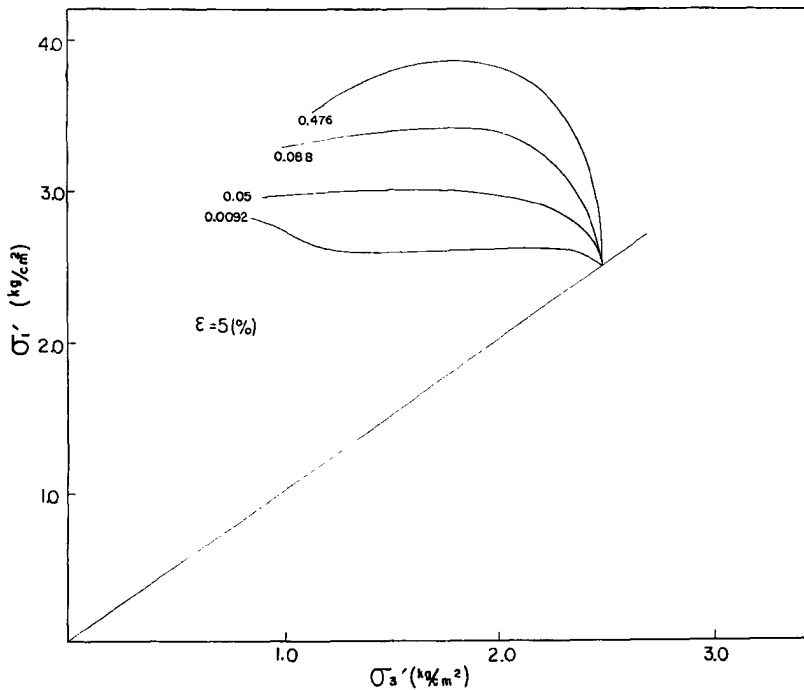


Fig. 4. effective path in the Rendulic diagram. Parameter is loading speed.

3 等速載荷による圧縮試験

試料を高さ 8 cm 断面積 10 cm² の円等形に成形した後、2.5 kg/cm² の圧力により等方圧密を行なった。これは粘土を正規状態にして過去の応力履歴の影響を除くためである。圧密の完了後水銀を等速で滴下させることにより、主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を時間に比例して増加させることのできる水銀式載荷装置により圧縮試験を行なった。この実験の目的は重ね合せの法則との関連にたってクリープ特性を圧縮変形量に結びつけようとするもので主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 間ゲキ圧 (u) とヒズミ (ϵ) の関係を知るためのものであり、得られたそれらの関係はそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。ただし図中のパラメータ K は載荷速度 (kg/cm²/min) を示している。Fig. 1 の主応力差とヒズミとの関係では載荷速度の大なるものほど曲線が上方に位置している傾向がある。この傾向を載荷速度 K (kg/cm²/min) について整理すると Fig. 3 となる。ここでたて軸はヒズミが 5% のときの主応力差をとった。この図から明らかなように応力と載荷速度との間には片対数で直線の性質がある。これは Nadai²⁾ の指摘している固体にみられる傾向と一致する。一方間ゲキ

圧 μ についても Fig. 2 のように載荷速度 K との間に一定の傾向がみられる。なおこの間ゲキ圧の測定は試料の底面で non-flow の状態で行った。以上の結果を有効応力の軌跡として Rendulic の有効応力座標をプロットすると Fig. 4 となる。この図においては有効応力の軌跡があたかも一点において会するとき挙動を示しているのは注目すべきである。しかし載荷速度の大なるものにおいては間ゲキ圧の測定にやゝ時間的な遅れが生じていると考えられるため、実際の有効応力軌跡はもっとも原点方向に近づくと思される。

4 圧縮強度特性におよぼすクリープ履歴の影響

供試体は3の実験と同じ方法で作成し、上限降伏値の70%すなわち 0.56 kg/cm^2 の荷重で任意時間クリープを行なった後、荷重を取除きただちにヒズミ制御による一軸圧縮試験を行ない、先行のクリープ時間、圧

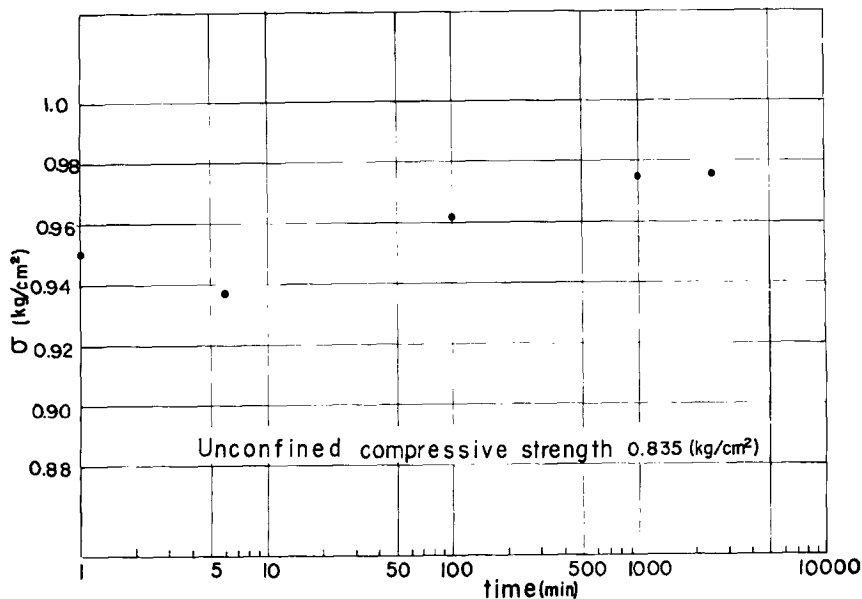


Fig. 5. Compressive strength v.s. pre-creep duration. Creep load is $0.6 \sigma_u$.

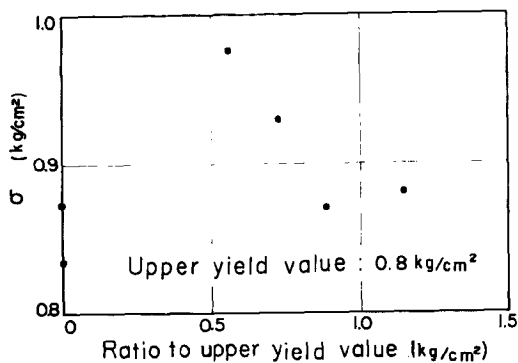


Fig. 6. Compressive strength v.s pre-creep load.

縮試験開始時の残留ヒズミ量が圧縮強度および圧縮ヒズミにおよぼす影響、応力ヒズミ曲線の最初の立上り部の勾配、最小半径部の変化等について調べた。

実験より得られた圧縮強度をたて軸にとり、その供試体の先行クリープ時間を横軸に対数目盛でプロットしたものが Fig. 5 である。図から明らかなように、先行クリープ時間の長さに対応してその圧縮強度は増加する傾向にある³⁾。また圧縮強度と残留クリープヒズミの関係をもプロットしてみたが、残留クリープヒズミ量の増加に対応して圧縮強度が増大する傾向にあった。しかしこの場合は圧縮強度と先行クリープ時間の関係の図ほど明らかな傾向がみられず結果にバラツキがあった。一方応力～ヒズミ曲線に注目すると、先行クリープ時間、残留クリープヒズミ量の増大にともない曲線の最初の立上り部の勾配が大きくなる傾向にあり、最小半径部の曲り方の半径が小さくなる傾向がみられた。以上より上限降伏値以下の荷重によって残留ヒズミを有する粘土はそれが無い粘土に比較して圧縮強度が増大することがわかり、曲線の勾配、最小半径部の曲り方等からみて、みかけの弾性が増加するものと思われる。これらは乱雑に配列していた粒子がクリープによって粒子の整列化が進み⁴⁾ マサツの増大することが考えられるが、現段階ではなお断定する資料に乏しく今後の研究にまちたい。つぎに前記同様の条件でクリープを行なった後、除荷後ただちに圧縮試験を行なわずクリープ回復を行ない、残留ヒズミ量の大きさによりその圧縮強度はいかに変化するかについて調べた。得られた結果は先行したクリープのヒズミ量が同じであっても一軸圧縮試験開始時の残留ヒズミ量の大きな供試体ほどその圧縮強度は大きくなり、残留ヒズミ量がゼロに近づくにつれ強度はクリープ履歴を受けない供試体の一軸圧縮強度に近くなるのがみられた。ゆえにクリープ回復を行なった場合は、上限降伏値の70%のクリープ応力を与えたことは強度に関係しなくなる。そして残留ヒズミの残っている間の圧縮強度は残留ヒズミ量に依存する。つぎにクリープ時間、クリープ回復時間を一定にして荷重のみを上限降伏値の70%, 90%, 110%, 130%と変えてクリープを行なった4個の供試体をクリープ回復後一軸圧縮試験を行なった場合の圧縮強度、圧縮ヒズミの影響と破壊流動の進行の影響を調べた。得られた結果は Fig. 6 でありこれはたて軸に圧縮強度、横軸にクリープ荷重の大きさをとり、クリープ時間9分回復時間を10分として得られたものである。図からも明らかなごとく上限降伏値以下の荷重によってクリープを受けた粘土の圧縮強度はクリープを受けない粘土の一軸圧縮強度より高く出ている。一方上限降伏値以上の荷重でクリープを

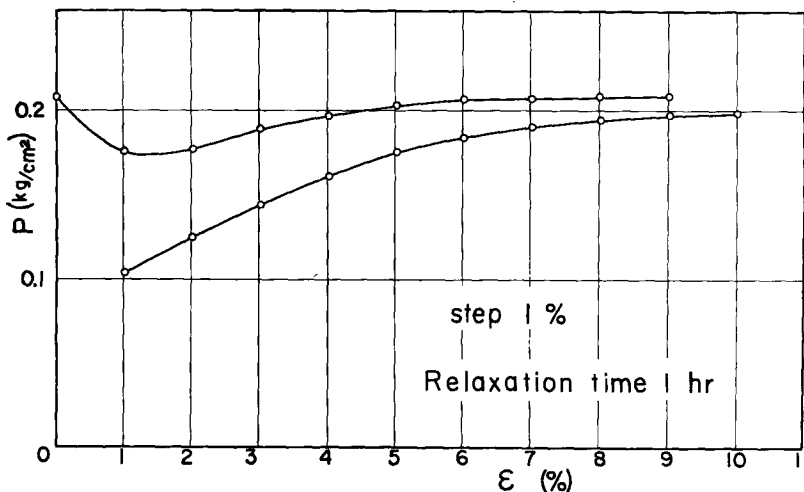


Fig. 7. Instantaneous stress increment (above line) and amount of stress-relaxation (lower curve) on each strain step.

させた粘土は破壊流動を生じ強度が減少したと思われ、その強度はクリープ履歴を受けない場合より低くなるような傾向にあった。この実験は今後クリープ時間を変えることにより、またクリープ回復を完全に行なうかまたは全く行わずに圧縮試験を行なうことにより、応力～ヒズミ曲線の性質におよぼすクリープ履歴の影響をみるつもりである。

5 ヒズミ量に着目した応力緩和特性

この実験においては供試体に時間に対して段階的にヒズミを与えその時の応力緩和現象を観察した。与えたヒズミは各段階につき0.25%, 0.5%, 1%の三種とし、また各段階の応力緩和時間についても30分, 1時間, 2時間とした。これらはいずれもヒズミを一方向的に増加させるものであるが、さらにヒズミを一旦解放し、残留ヒズミ量を与えてから再び応力緩和を行なうという試験も若干行なった。段階的応力緩和試験においては、その特性として瞬間的なヒズミを与えた時の応力の変化、および各段階の応力の緩和量に着目した。ただし瞬間的にヒズミを与えることは事実上不可能であるので、これを5%/minなる速さでヒズミを与

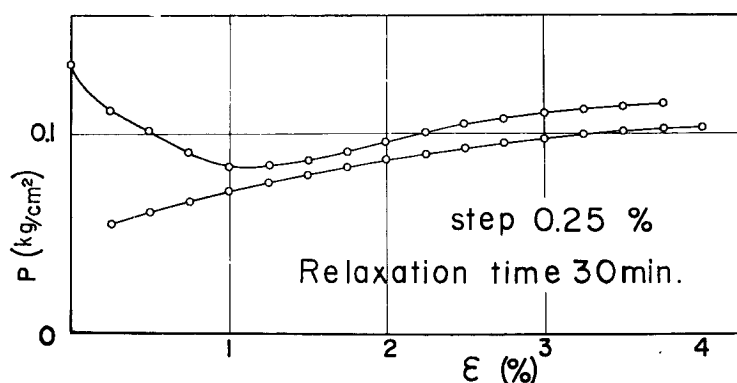


Fig. 8. Instantaneous stress increment (above curve) and amount of stress-relaxation (lower curve) on each strain step.

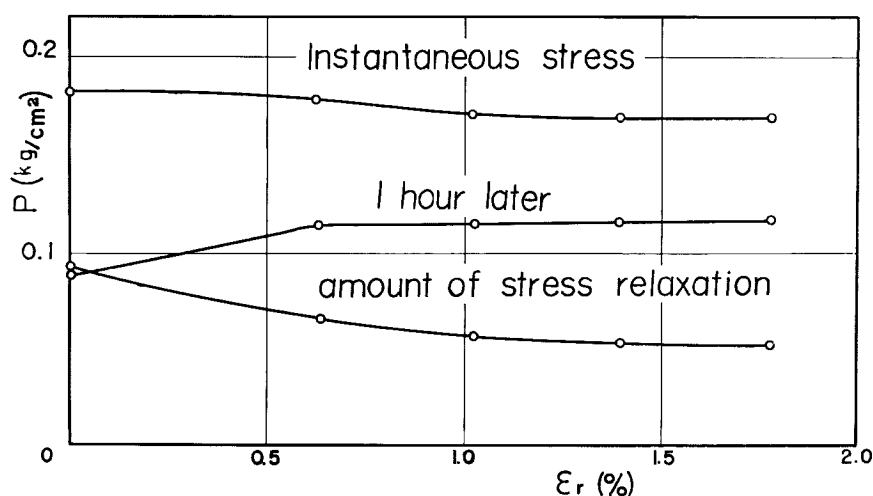


Fig. 9. Trend on step relation test in terms of the residual strain.

えた。これにより各段階の瞬間的な応力の変化量を比較することが可能となった。**Fig. 7**はこの試験における一つの結果である。この場合はヒズミの段階を1%, 各段階の応力緩和時間を1時間としたものである。

この場合は応力緩和量はヒズミの段階が進むにつれて増大しているが、一方瞬間的弾性変化はヒズミ量1%附近に到るまでは急激な減少を示し、その後徐々に回復してある一定値におちついている。これをさらにヒズミ段階を小さくして0.25%とし、緩和時間を30分としたものは**Fig. 8**に示される。この結果からも同様な傾向がつかむことができる。このことから瞬間変化量の示す挙動はヒズミ量に依存する性質のものであることが明白となった。

一方応力緩和を行なった後一旦ヒズミを解放し、残留ヒズミを記録してから再び応力緩和を行なうという試験も実施した。この結果が**Fig. 9**である。これを前述の試験の結果と比較すると、残留ヒズミを与えた時の弾性は残留ヒズミの進行とともに低下する傾向があるが、瞬間力と応力緩和量との差が強度を支配するものと考えられるのでこれをさらに追求する必要がある。

6 結 語

本報告は粘土の圧縮強度に及ぼす载荷速度の影響およびクリープ履歴の影響を求めるための圧縮試験ならびに粘土の変形にともなう弾性係数の変化をみるために行なった応力緩和試験についての報告である。

それらのうち特に粘土のクリープ履歴の圧縮強度に及ぼす影響を述べると次のようになる。

(1) 粘土の上限降伏値以上の一定応力で一定時間クリープをさせた粘土の圧縮強度は新鮮な粘土の圧縮強度より減少し、その減少量はクリープ応力が大きいほど大きい。

(2) 粘土の上限降伏値以下の応力でクリープさせた粘土の圧縮強度は、圧縮試験開始時にその試料に存在する残留ヒズミ量の量とともに増加し、载荷以前に受けたクリープ応力の履歴には無関係である。

上記の傾向についてのさらにくわしい定量的な関係については今後研究する予定である。

参 考 文 献

- 1) 村山朔郎, 柴田徹, 粘土の力学, 土質工学会講習会, 1962, pp. 8~10.
- 2) A. Nadai: Theory of Flow and Fracture of Solids, 1950, pp.21~24.
- 3) 村山朔郎, 石井義明, 村山弘治, 粘土の破壊に関する二、三の実験と考察, 土木学会関西支部講演会, 1964, pp. 118.
- 4) 井本立也, レオロジー入門, 1963, pp. 114~117.