

土のクリープ変形について

下川悦郎
(砂防工学研究室)

Creep Deformation of Soils

Etsuro SHIMOKAWA
(Laboratory of Erosion Control)

はじめに

土は粒状土に限らず粘土を含めて個々の粒子の集合体である。土の変形は特別な状況下を除いて必然的にダイレイタンスーに起因する変形を伴い、これが非排水条件のもとでは間ゲキ水圧の発生による有効応力の変化、排水条件のもとでは体積変化、定体積試験のもとでは有効応力の変化を招く。このような有効応力、体積の変化はクリープ変形においても例外ではない。ゆえに土のクリープとは一般的には一定の全応力のもとでおこる変形現象をさす。Fig. 1はクリープ変形を有効応力経路と応力-ヒズミ曲線から模式的にみたものである。図によるとクリープ変形とは動的状態から静的応力経路、静的応力-ヒズミ曲線にいたる過程のことである。

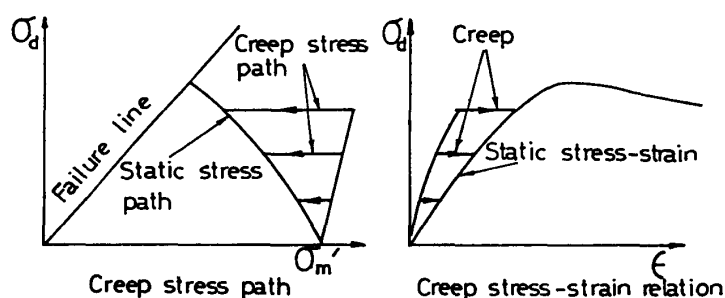


Fig. 1. Schematic representation of creep deformation.

土のクリープ変形を表現するために最もよく用いられるのはヒズミ-時間の関係図いわゆるクリープ曲線である。既往の研究はこのヒズミ-時間曲線を数式的に表現するために多くの努力がなされてきた。村山、柴田²⁾は速度過程理論と4要素レオロジーモデルにもとづいてヒズミ-時間関係は半対数座標(時間軸を対数)上で直線となることを理論的にもとめ実験結果から裏づけている。Singh, Mitchell^{4,5)}はクリープ試験の実験事実にもとづいてヒズミは時間の指数関数で表わされるとした。Christensen, Wu³⁾は速度過程理論と3要素レオロジーモデルによってヒズミ-時間の関係を双曲線関数で表わし、実験結果から裏づけている。

しかし近年の多種類の土のクリープに関するデータの豊富な蓄積によって既往の理論的成果だけでは説明できないような土のクリープ現象もあらわれている。例えば関口・村山⁸⁾は陽にダイレイタンスーが無視できる過圧密比2の試料土のクリープ試験を行い、土のクリープ変形の応力依存性、非線形性を指摘している。及川、岩崎、宮川⁹⁾は高有機質土のクリープ試験を行い、関口、村山と同様な現象を観察している。八木、西田、二木¹⁰⁾は同じ含水比をもった正規圧密粘土と繰り返し正規圧密粘土のクリープ試験を行い、後者のヒズミは前者とは違って時間に対し直線的に変化しないことを観察している。このように土のクリープ変形はその種類、構造、応力条件などによって複雑である。もともと既往のクリープ変形に関する理論は速度過程理論、レオロジーモデル、一定の範囲内で観察され

た実験事実にもとづいて構成されたものである。したがって土のクリープ変形に関する理論をさらに発展させるには既往の理論では説明不可能な現象を説明できる新しい視点に立った理論の展開が望まれる。そのためにはまず速度過程理論やレオロジーモデルにもとづいた理論によらず、土のクリープ試験結果をありのままに理解することも一つの方法であると考ええる。

そこで筆者は物理的、構造的性質の異なった数個の土についてさまざまな応力条件下でクリープ試験を行った。本文はクリープ試験結果にもとづいて土のクリープ変形に影響する要因について分析したものである。本研究の予察的結果^{6,7)}については先に公表した。

試料, 供試体および実験方法

試料は地すべり地など現地からブロック状に採取した乱さない試料, 乱した試料, 市販された試料および室内で配合調整した試料の14個からなる。試料の現場, 種類別内訳は地すべり地から採取した

Table 1. Physical properties of soils

	Specific gravity of grains	Liquid limit, %	Plastic limit, %	Plasticity index, %	Clay fractions, %
Yame clay	2.749	40.0	16.9	23.1	22.2
Kirishima clay	2.562	108.5	40.9	67.6	—
Tatara clay	2.645	76.9	50.4	26.5	25.6
Hirayama clay	2.59	89.8	42.4	47.4	44.8
Hayato clay	2.457	40.7	27.4	13.3	40.0
Kasuya clay	2.750	90.4	48.0	42.4	36.7
Kaolin-Shirasu 4060	2.561	27.0	25.3	1.7	25.9
Kokubu volcanic ash	2.666	191.0	142.2	48.8	—
Chuzan volcanic ash	2.673	137.8	97.9	39.9	31.2
Harara volcanic ash	2.692	78.4	51.0	27.4	35.0
Takakuma volcanic ash	2.693	61.4	40.4	21.0	41.0
Usuki clay	2.656	75.0	46.3	28.7	62.3
Toyoura sand	2.67	—	—	—	—
Glass powder	2.500	—	—	—	—

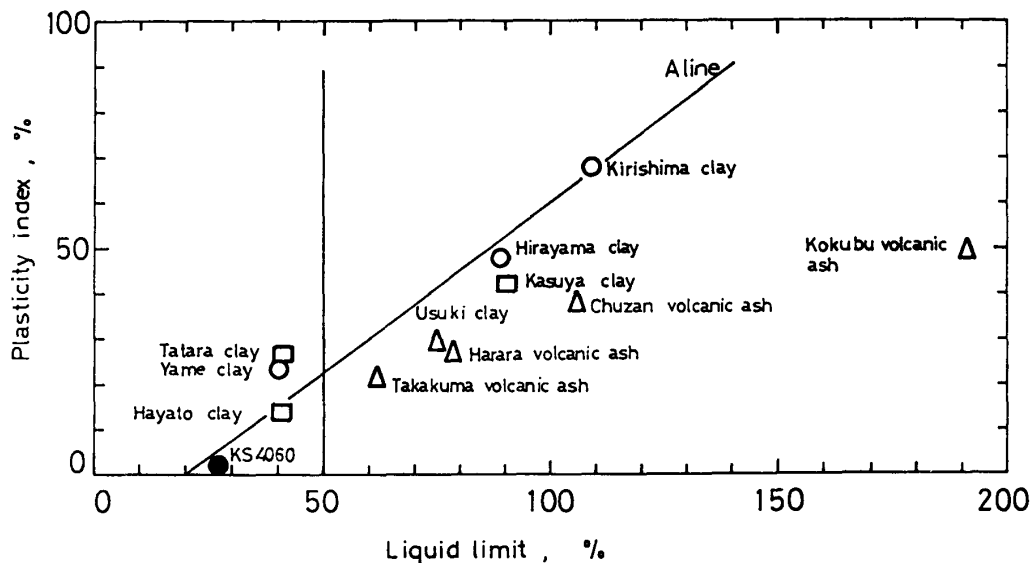


Fig. 2. Plasticity chart of soils.

八女粘土, 霧島粘土, 平山粘土の3個, 第三紀, 第四紀層から採取した多々良粘土, 粕屋粘土, 隼人粘土の3個, 火山灰土堆積地から採取した国分火山灰土, 原良火山灰土, 中山火山灰土, 高隈火山灰土, 宇宿粘土の5個および市販のカオリン粘土とシラスを重量比で4対6の割合で配合調整した試料KS4060, ガラスを粉砕したもの, 市販の豊浦標準砂のそれぞれ1個である。試料名は現地から採取したものは採取地点の地域名を付した。試料の物理的性質を Table 1, Fig. 2に示す。Fig. 2は粘性土試料の塑性図上の位置を表わしたものである。地すべり地の粘土, 第三紀, 第四紀層の粘土および調整試料はAラインに沿って位置するが, 火山灰土はAラインより下方に位置する。

実験に使用した粘性土の供試体の状態は乱さないもの, 採取時の含水比のまま2mmフルイを通過した部分を液性限界以上の含水比で練り返し圧密したもの, 採取した試料を空気乾燥させ団粒状の構造になるように試料に応じた含水比で調整し, それを飽和圧密したものの4種類である。乱さない試

Table 2. Physical properties of samples

Direct shear creep test		Water content %	Void ratio
Yame clay	Remolded	26.5	0.698
Kirishima clay	Undisturbed	61.5	1.449
	Remolded	93.7	2.518
	Aggregated	50.6	1.626
Tatara clay	Remolded	54.7	1.638
Hirayama clay	Undisturbed	31.8	0.876
	Remolded	68.6	1.743
Hayato clay	Remolded	36.6	0.928
Kasuya clay	Undisturbed	67.3	1.850
	Remolded	58.7	1.599
	Aggregated	50.9	1.889
Kaolin-Shirasu 4060	Remolded	26.0	0.685
Kokubu volcanic ash	Remolded	194.9	6.034
Chuzan volcanic ash	Undisturbed	158.5	4.237
	Remolded	151.2	3.869
	Aggregated	185.1	5.020
Harara volcanic ash	Undisturbed	88.9	2.392
	Remolded	75.4	2.030
	Aggregated	77.6	2.585
Takakuma volcanic ash	Undisturbed	99.2	2.672
	Remolded	80.2	2.189
	Aggregated	60.4	1.592
Usuki clay	Undisturbed	57.1	1.592
	Remolded	67.8	1.877
	Aggregated	52.4	1.614
Tri-axial shear creep test			
Kirishima clay	Remolded	78.1	1.941
Hirayama clay	Remolded	59.0	1.571
Yame clay	Remolded	24.2	0.664
Toyoura sand		26.7	0.696
Glass powder		34.1	1.334

料は一面セン断による排水クリープ試験を行うために直径 60mm, 高さ 20mm の円筒状の供試体加工した。乱した試料は一面セン断クリープ試験に供するものは小型圧密容器を用いて圧密荷重 $0.4\text{kg}/\text{cm}^2$, 三軸セン断クリープ試験に供するものは圧密荷重 $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ で圧密させた。乱した試料による供試体の寸法は一面セン断クリープ試験では直径 60mm, 高さ 20mm, 三軸セン断クリープ試験では直径 34mm, 高さ 80mm である。ガラス粉, 豊浦標準砂はいづれも 0.6% の含水比で調整したものを二割れモールドを用いて三軸セル室内で直接供試体を作成した。その供試体の寸法は直径 50mm, 高さ 125mm である。供試体の初期の物理的性質を Table 2, Fig. 3 に示す。Fig. 3 は塑性指数に対し

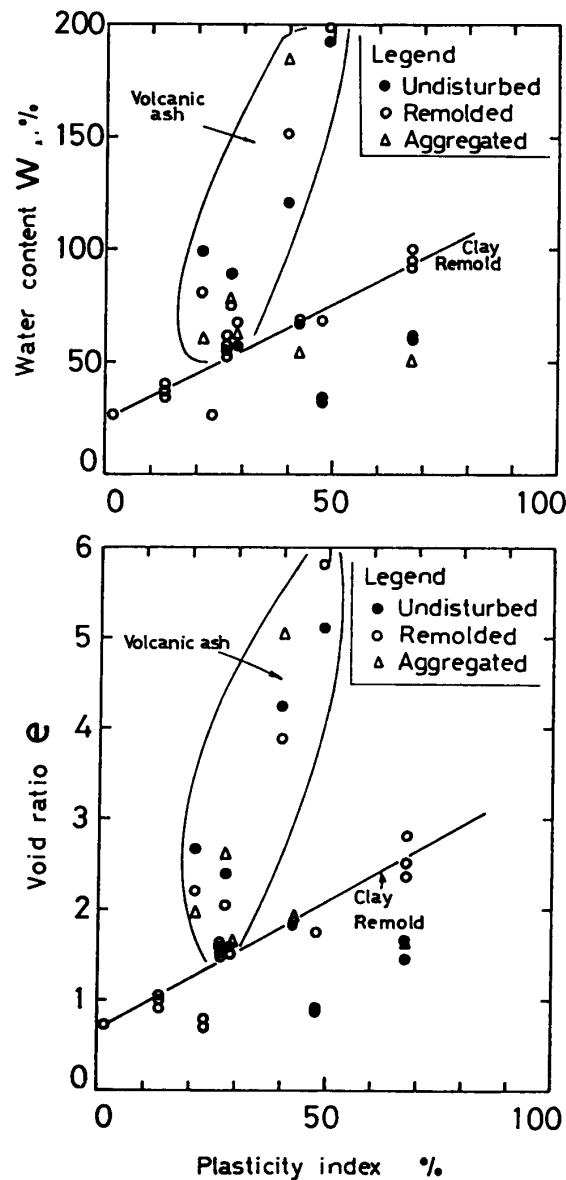


Fig. 3. Relationships between plasticity index and water content, void ratio.

て含水比, 間ゲキ比を示したものである。火山灰土はその他の供試体にくらべ大きな間ゲキ比, 含水比を示している。

試験はカロール型一面セン断試験機による排水クリープ試験と LS 型三軸圧縮試験機による非排水クリープ試験を行った。供試体はすべて飽和状態にある。乱さない供試体, 団粒状の供試体はすべ

て一面セン断クリープ試験だけを行った。三軸セン断クリープ試験には八女粘土、霧島粘土、平山粘土、ガラス粉および豊浦標準砂を用いた。試験方法は以下の通りである。一面セン断試験機では正規圧密から過圧密までの広範囲の応力条件下で垂直応力 σ_v 、一定クリープ試験と定体積クリープ試験を行った。一面セン断試験における供試体の圧密負荷、膨張時間はいずれも約半日である。三軸セン断クリープ試験はすべて正規圧密状態で行った。三軸室の供試体の設置においては供試体底面のマサツの影響をできるだけ少なくするために端面にはグリースを塗ったセルロイド板をおいた。粘土の供試体は三軸セル室で圧密圧力 σ_v 1.0, 2.0kg/cm² で約1.5日間圧密させ、その後バックプレッシャー1.0kg/cm² を約半日間作用させた。ガラス粉、豊浦標準砂は圧密圧力 0.5kg/cm² で数時間圧密させ、その後バックプレッシャー 0.5kg/cm² を数時間作用させた。試験中は経時的に一面セン断クリープ試験ではセン断変位、垂直変位の測定、垂直応力の調節を、三軸セン断クリープ試験では軸ヒズミ、間ゲキ水圧の測定、クリープ荷重の調節を行った。間ゲキ水圧は供試体の底面に取りつけたペーパードレインを通して供試体底面で測定した。試験中の室温は20度から29度の範囲内にある。

結 果

1. 一面セン断クリープ試験

一面セン断クリープ試験は乱さない供試体6個、練り返した供試体12個、団粒状の構造をもった供試体6個および先行荷重をうけた供試体7個について行った。その結果を代表的なセン断変位 D_s 、垂直変位 D_N 、垂直応力 σ_N と時間関係にもとづいて説明する。

Fig. 4, 5, 6, 7 は霧島粘土のクリープ試験結果を示す。霧島粘土は試料のうちでは塑性指数67.6%と最も大きな値をもつ。Fig. 4 は過圧密比2の乱さない供試体の定体積クリープ試験によるセン断変位一時間、垂直応力一時間の関係を示す。セン断変位は測定時間内ではクリープ応力の大きさにかわらず時間(対数)に対してほぼ直線的に高クリープ応力ほど大きく増加する。このセン断変位一時間の関係は、その他の過圧密、正規圧密応力条件のもとでも同じ傾向をもつ。定体積のもとでは一般的に試験中垂直応力の調節が必要であるが、過圧密比2の応力条件下では Fig. 4 に示すように垂直応力の変化は小さい。定体積状態では垂直応力の変化がダイレイタンスを表わす。Fig. 5 は過圧密比

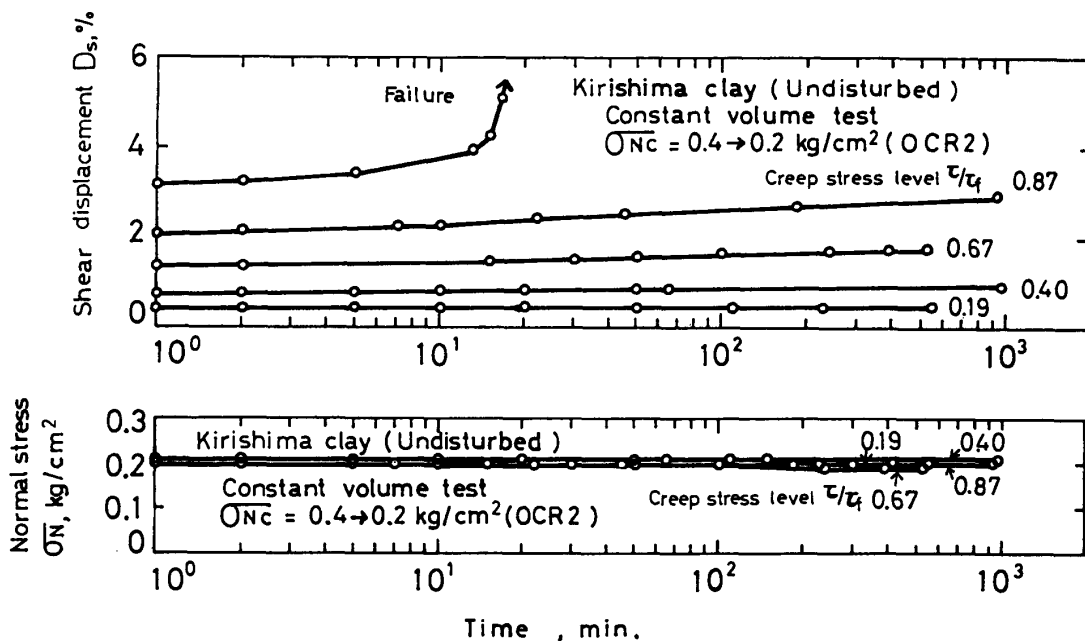


Fig. 4. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for undisturbed Kirishima clay.

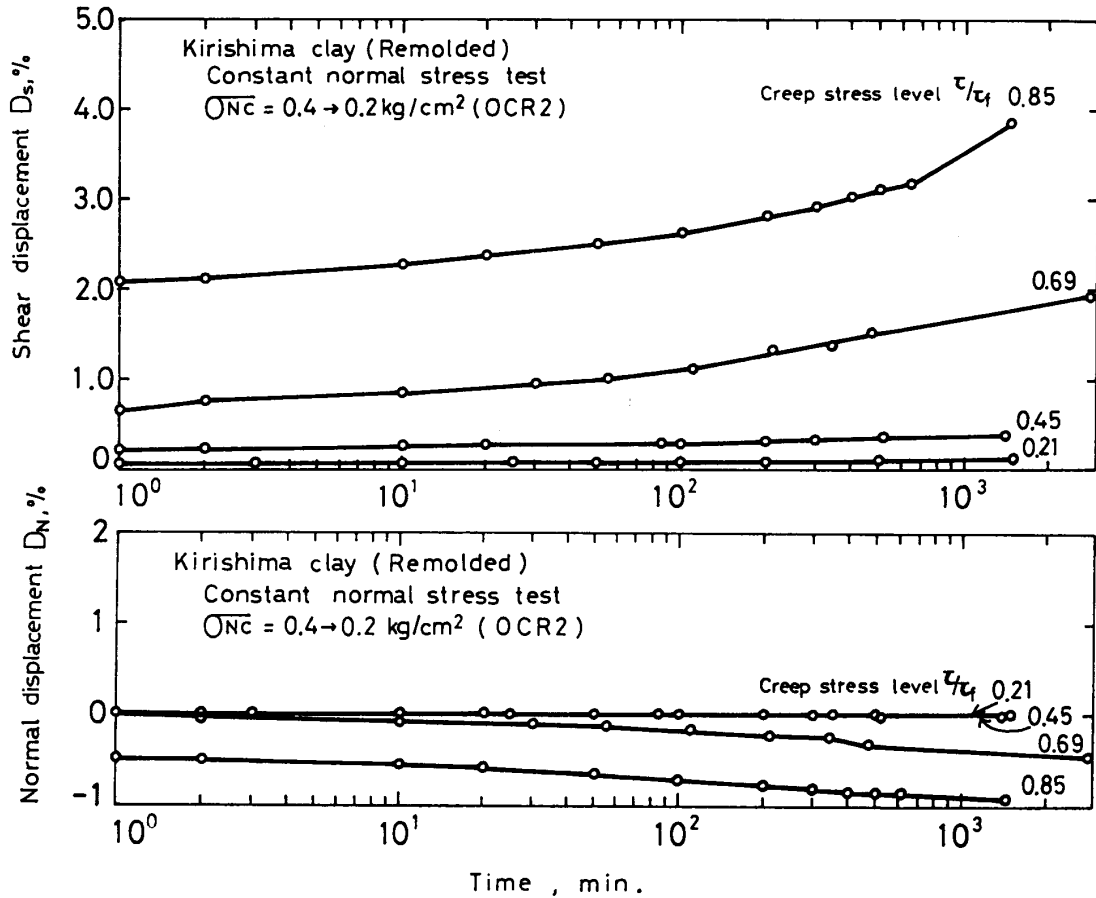


Fig. 5. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Kirishima clay.

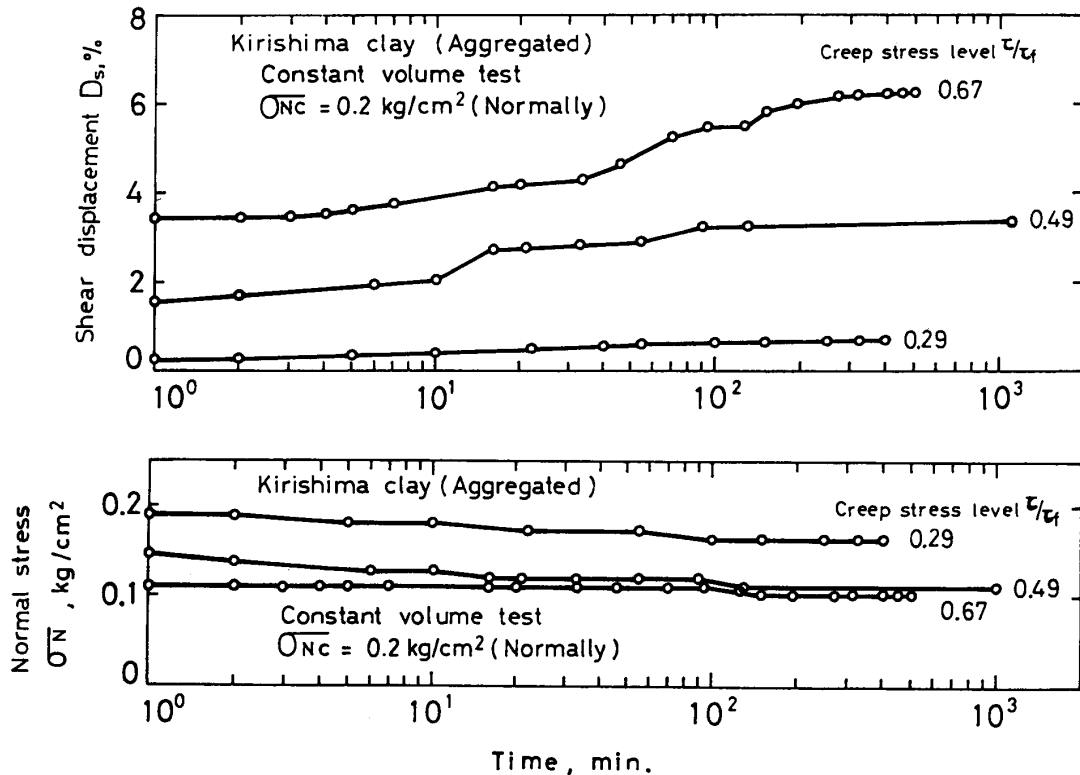


Fig. 6. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for aggregated structure Kirishima clay.

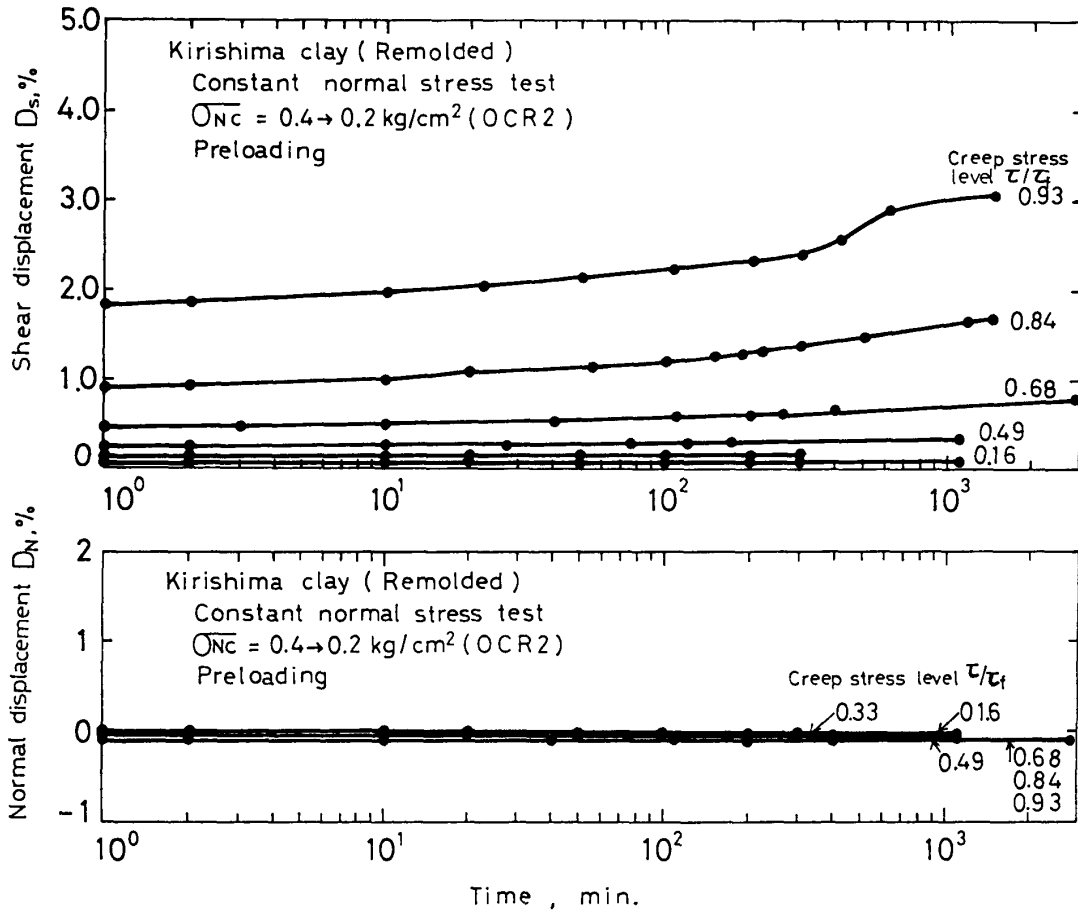


Fig. 7. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Kirishima clay (Preloading).

2 繰り返し供試体の定垂直応力クリープ試験によるせん断変位-時間，垂直変位-時間の関係を示す。せん断変位は時間に対し低クリープ応力では直線的に高クリープ応力では上に凹の曲線的に変化する。このパターンは他の過圧密，正規圧密条件下でも同じである。一般に定垂直応力下ではクリープの進行とともに垂直変位が生じる。この試験方法では垂直変位がダイレイタンスを表わす。過圧密比2の応力条件下では垂直変位は負（収縮）の小さな値をもち，その時間に対する関係はせん断変位-時間関係のパターンに類似する。Fig. 6 は正規圧密状態における団粒状の構造をもった供試体の定体積クリープ試験によるせん断変位-時間，垂直応力-時間の関係を示す。せん断変位の時間に対する関係は上に凸の曲線パターンとなる。また，過圧密比の増加によってせん断変位-時間関係のパターンは繰り返し土のパターンに近づいた。垂直応力，時間関係も同様な傾向をもつ。Fig. 7 は過圧密比2の繰り返し供試体を一度定ヒズミ速度状態で破壊させ除荷したもの（以下先行荷重を受けた供試体）の定垂直応力クリープ試験によるせん断変位-時間，垂直変位-時間の関係を示す。せん断変位は時間に対しほぼ直線的またはやや上に凹の曲線的に変化する。垂直変位はどのクリープ応力でも発生しなかった。この条件下では他の過圧密比，正規圧密状態でも同様な結果を得た。

Fig. 8, 9, 10 は平山粘土の定体積クリープ試験結果を示す。平山粘土の塑性指数は47.4%である。乱さない供試体は地すべり地の地下約 60m のスベリ面から採取したものである。現場でのスベリは一面セン断的に行われたものと考えられ，きれいなマサツ面が観察された。この土の先行圧密荷重は約 10kg/cm² である。Fig. 8 はスベリ面からはずれた乱さない供試体のクリープ試験によるせん断変位-時間，垂直応力-時間の関係である。Fig. 9 は現場のスベリ面が一面セン断クリープ試験のスベ

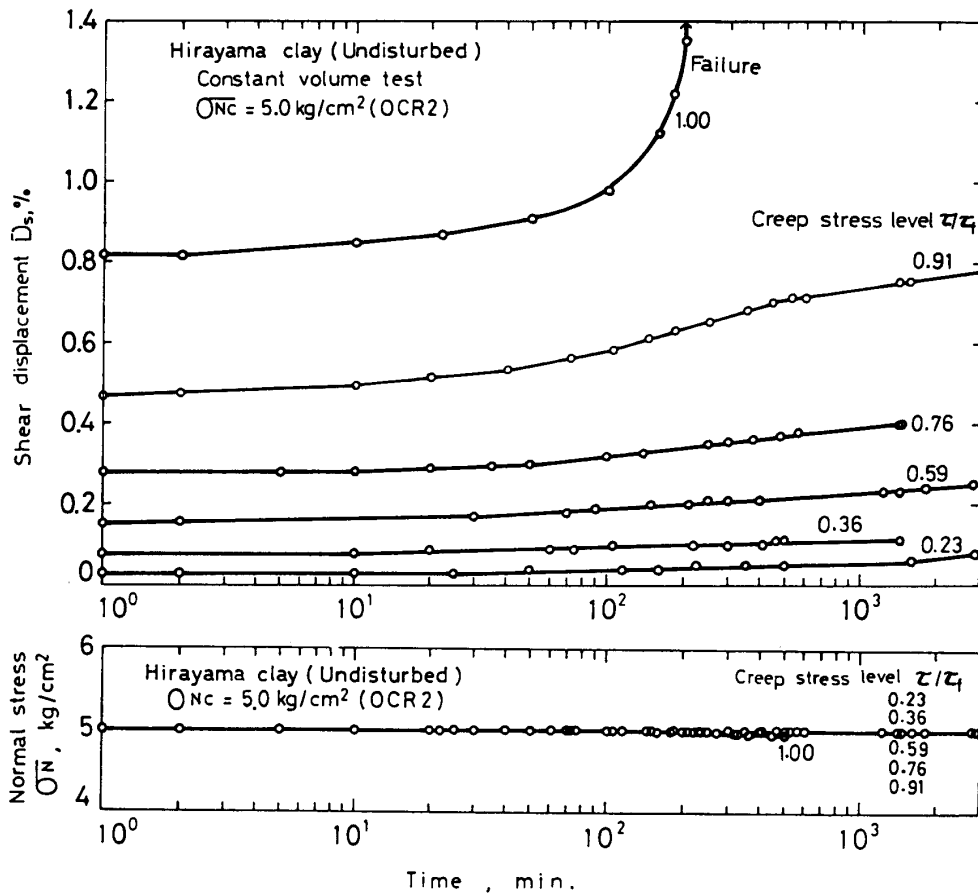


Fig. 8. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for undisturbed Hirayama Clay.

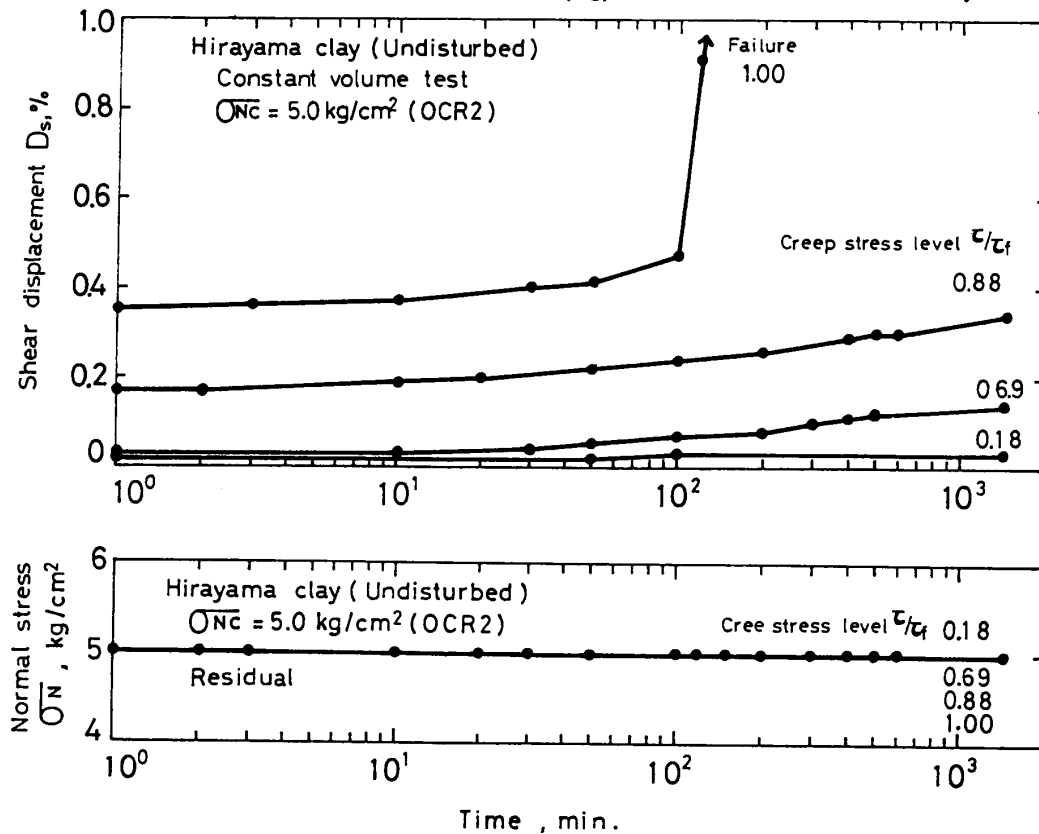


Fig. 9. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for undisturbed Hirayama clay (Residual).

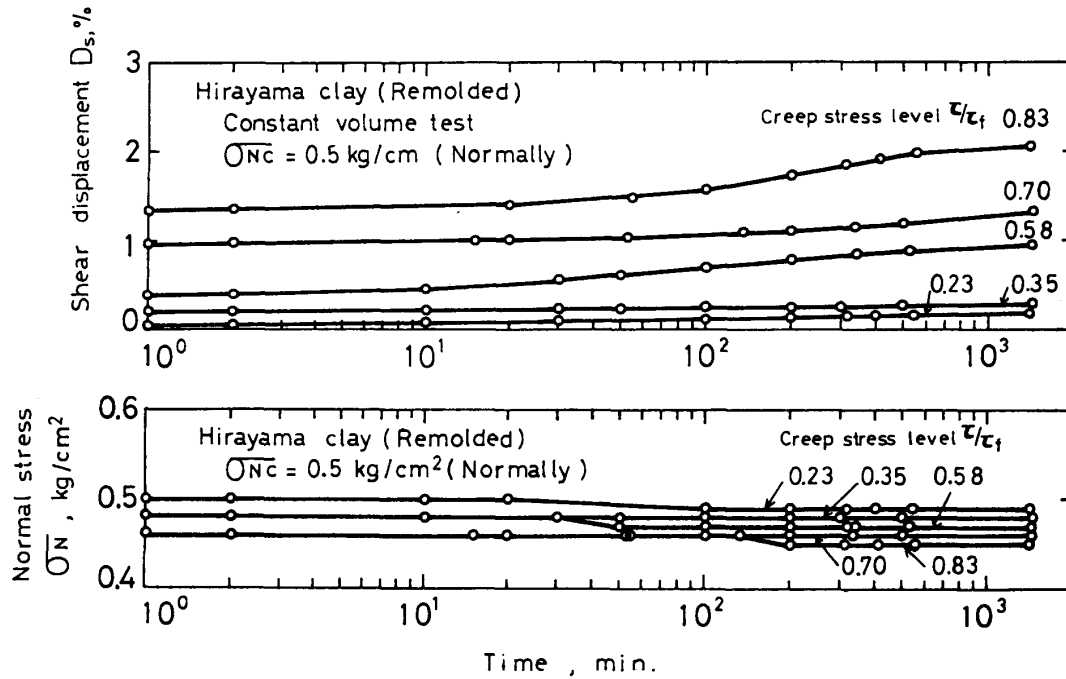


Fig. 10. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for remolded Hirayama clay.

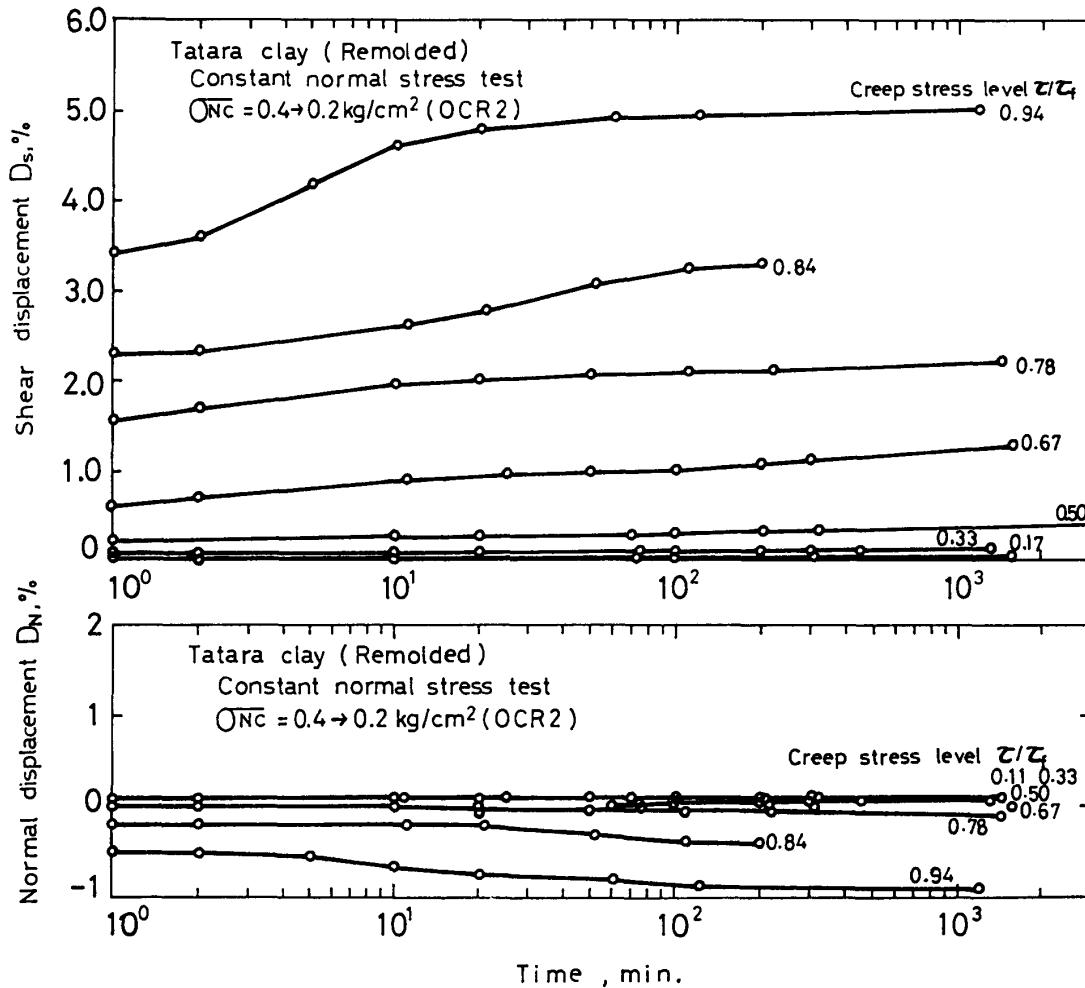


Fig. 11. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Tatara clay.

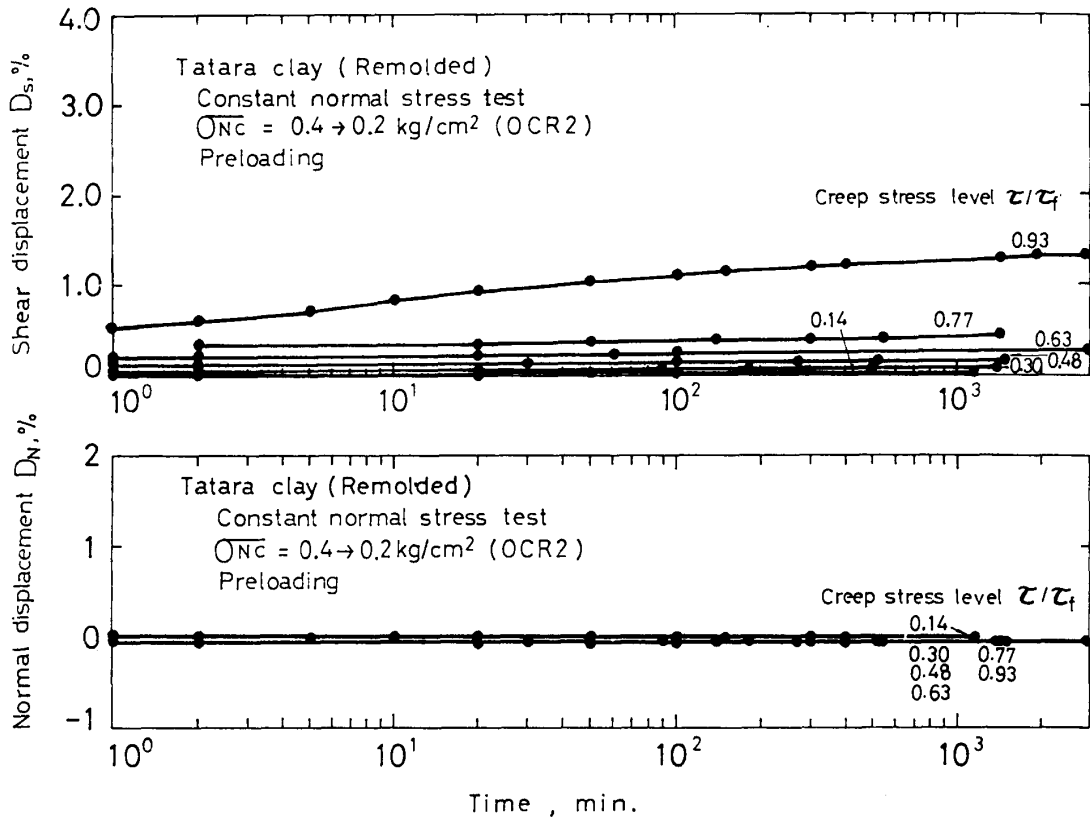


Fig. 12. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Tataro clay (Preloading).

リ面に一致するように調整した乱さない供試土のせん断変位一時間，垂直応力一時間の関係である。この状態は現場で残留状態にあったものを採取することによって荷重を解放し再度一面せん断箱内で圧密させクリープ応力を作用させたものである。Fig. 8, 9 はいずれも圧密圧力 $\sigma_N = 5 \text{ kg/cm}^2$ ，過圧密比2の条件のもとでのクリープ試験の結果である。せん断変位は高クリープ応力のもとでも1%以下と小さく，その時間に対する関係は直線またはやや上に凹の曲線パターンとなる。また，垂直応力はほとんど変化しない。Fig. 10 は繰り返し供試体の正規圧密状態におけるせん断変位一時間，垂直応力一時間関係である。せん断変位は時間に対し低クリープ応力では直線的に，高クリープ応力領域では変曲点を中心にして前半は上に凹，後半は上に凸のS字曲線パターンで変化する。この場合変曲点の時間的位置は100分から200分の間にある。変曲点を過ぎて約400分後はせん断変位の変化度はほぼ一定となる。

Fig. 11, 12 は多々良粘土の定垂直応力クリープ試験結果を示す。多々良粘土の塑性指数は26.5%である。Fig. 11 は過圧密比2の繰り返し供試体のせん断変位一時間，垂直変位一時間関係である。せん断変位の時間に対する変化度は低クリープ応力下ではほぼ一定，高クリープ応力下では約20分と小さい時間を境にして前半で変動し，後半では一定となる。垂直変位の時間に対する関係も同様なパターンを示す。Fig. 12 は先行荷重を受けた繰り返し供試土のせん断変位一時間関係，垂直変位一時間関係である。せん断変位はクリープ応力の大きさによらず時間に対してほぼ直線的に増加する。垂直変位はクリープ中ほとんど生じない。

隼人粘土のクリープ変形は多々良粘土のそれとよく類似している。隼人粘土の塑性指数は現場から採取したものでは最も小さく13.3%である。Fig. 13 は正規圧密状態の繰り返し供試土の定垂直応力クリープ試験によるせん断変位一時間，垂直変位一時間関係を示す。せん断変位の時間に対する変化

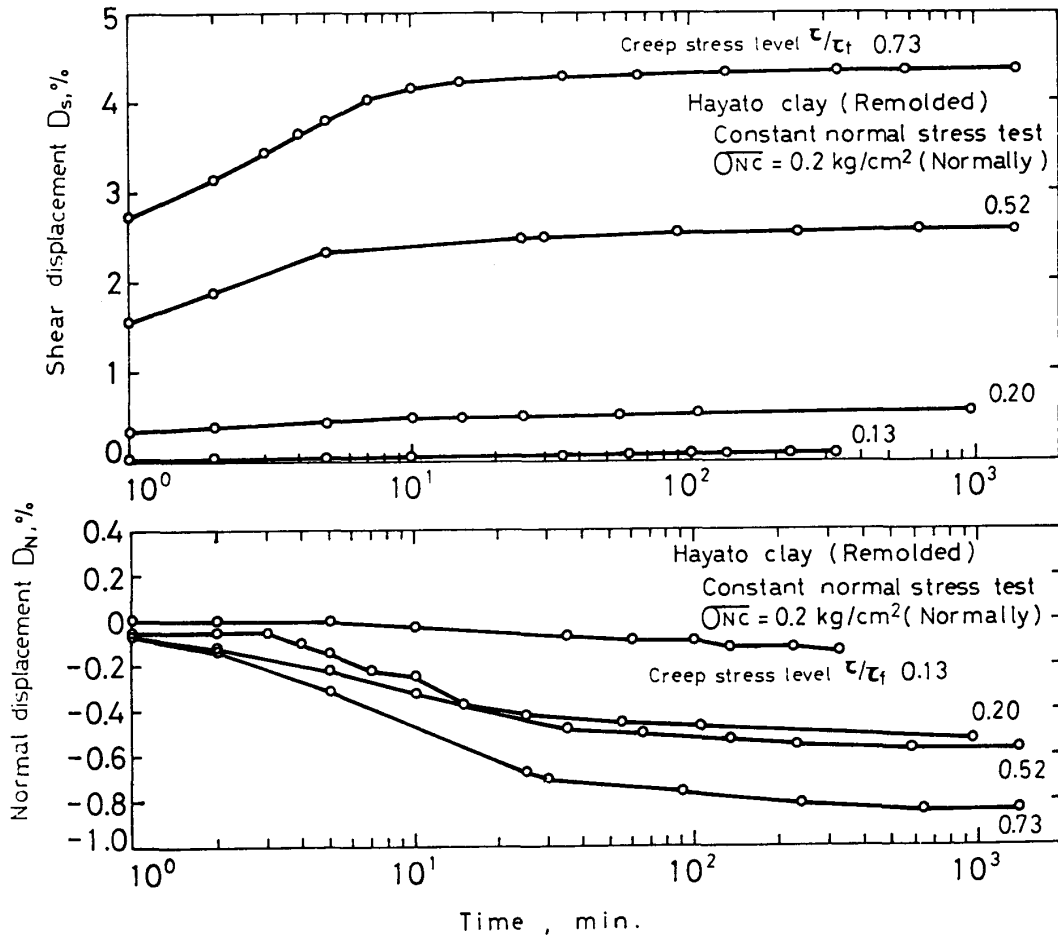


Fig. 13. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Hayato clay.

度は低クリープ応力下では一定，高クリープ応力下では多々良粘土よりもっと小さい時間10分を境にして前半で変動し，後半では一定となる。この傾向は過圧密状態でも同様である。垂直変位の時間に対する関係も同様な傾向を示す。先行荷重状態では Fig. 14 に示すようにセン断変位はクリープ応力にかかわらず時間に対して直線的に変化する。垂直変位はクリープ中ほとんど生じなかった。

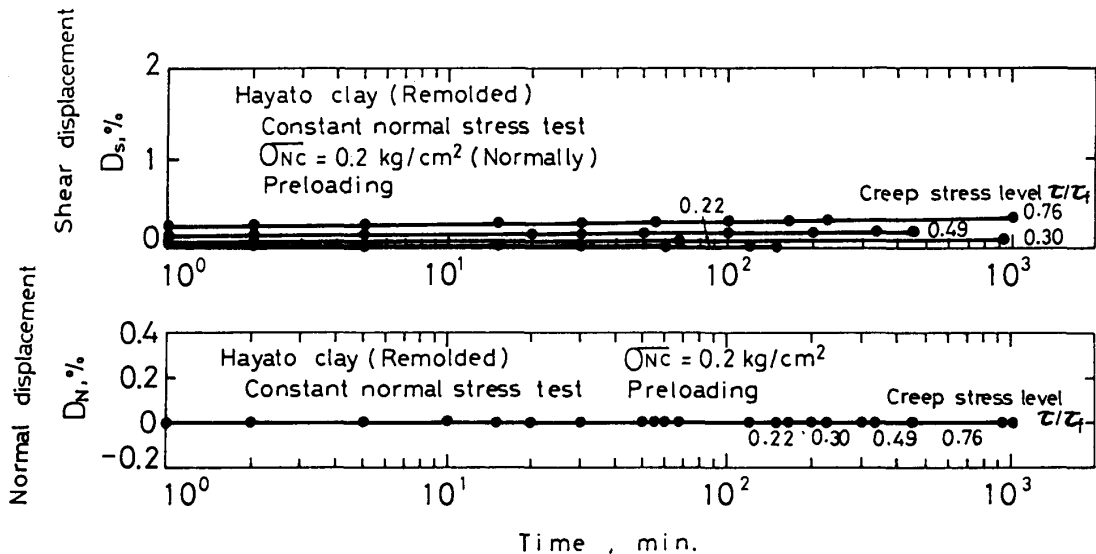


Fig. 14. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded Hayato clay (Preloading).

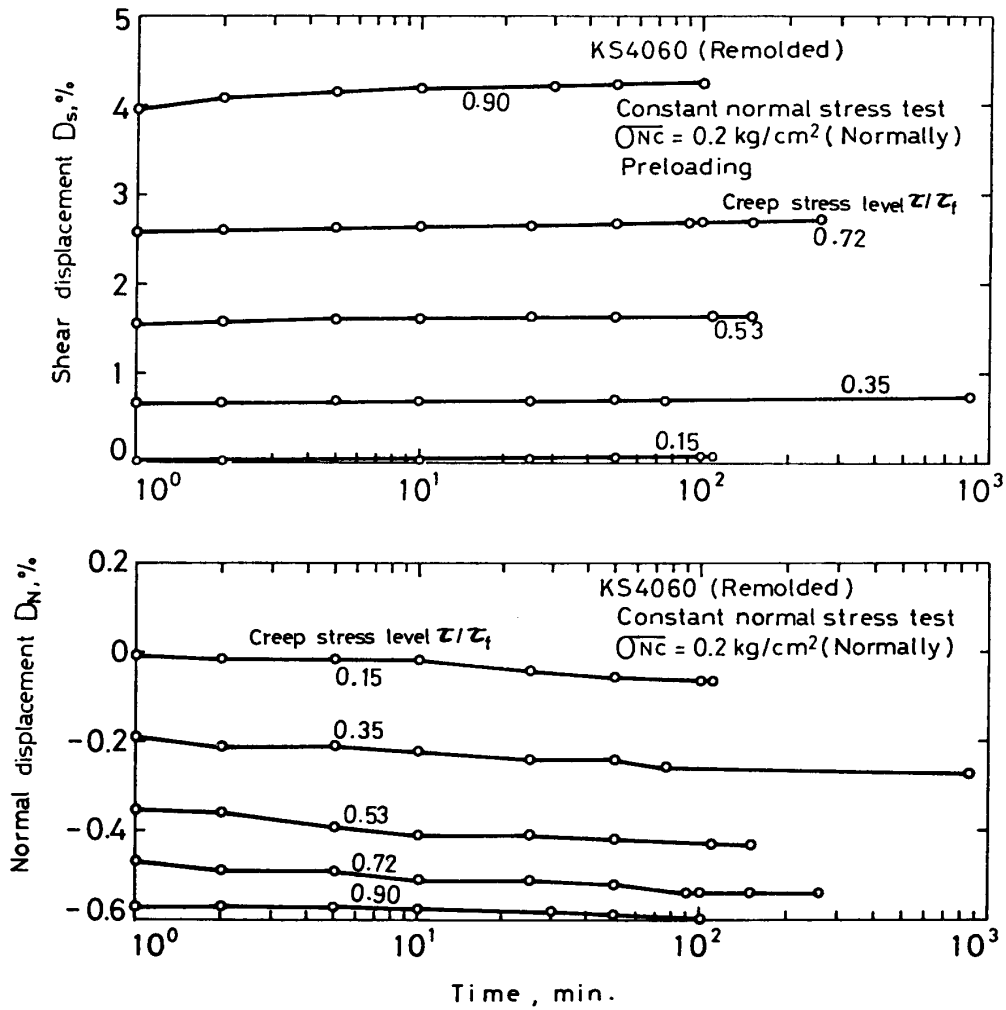


Fig. 15. Shear displacement, normal displacement-time (log) relations for remolded KS4060.

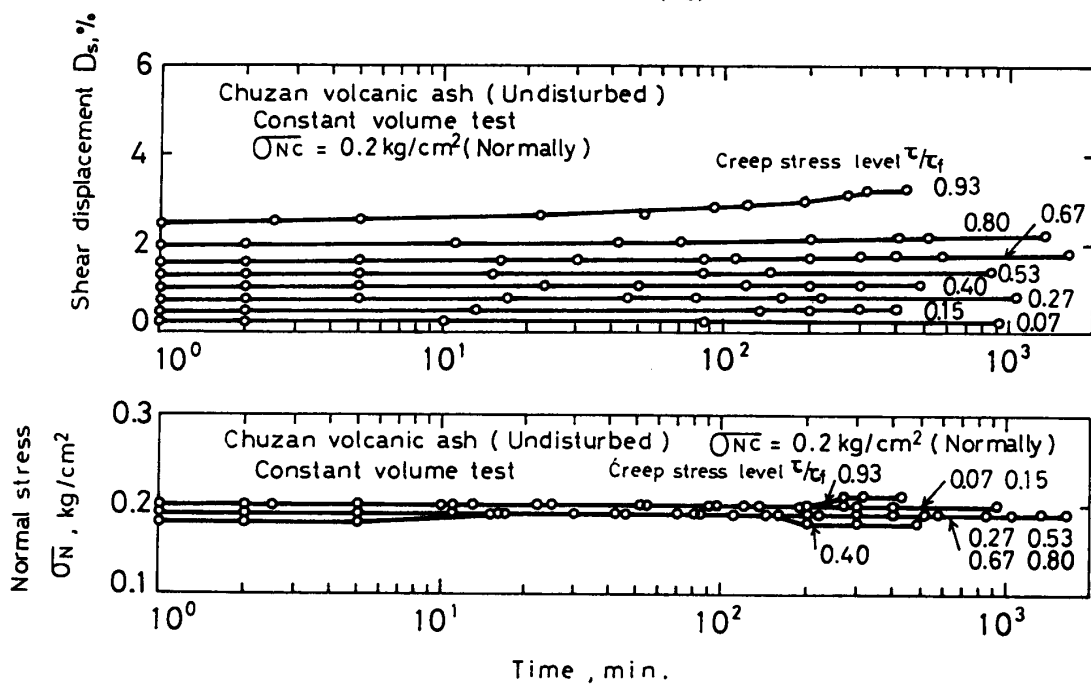


Fig. 16. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for undisturbed Chuzan volcanic ash.

KS4060 では高クリープ応力下では単相粘土よりさらに小さい時間でせん断変位—時間関係は変化する。この土の塑性指数は1.3%と最も小さい。Fig. 15 に表わした範囲ではせん断変位の時間に対する変化度はすでに前半の部分が終り、後半の一定領域だけが示されている。この傾向は過圧密状態でも同様に観察された。垂直変位の時間に対する関係も同様の傾向を示す。

火山灰土は塑性図上の位置、含水比、間ゲキ比などの物理的性質、団粒構造に富むことなどから前述した粘土とは性質を異にする。Fig. 16, 17, 18 は中山火山灰土の定体積クリープ試験結果を示す。中山火山灰土の塑性指数は39.9%である。正規圧密状態の乱さない供試土では Fig. 16 に示すようにせん断変位はその大部分が瞬時に現われ、その時間に対する変化度は小さく、またクリープ応力の大ききにかかわらず一定となる。垂直応力の時間に対する変化も同様な傾向をもっている。正規圧密状態の練り返し供試土においては Fig. 17 に示すようにせん断変位は時間に対して低クリープ応力下では直線的に、高クリープ応力下ではS字曲線パターンで変化する。S字曲線の変曲点は時間約20分と小さい。垂直応力の時間に対する変化パターンも同様である。Fig. 18 は過圧密比2の団粒状の構造をもった供試体のせん断変位—時間、垂直応力—時間関係である。せん断変位は時間に対して低ク

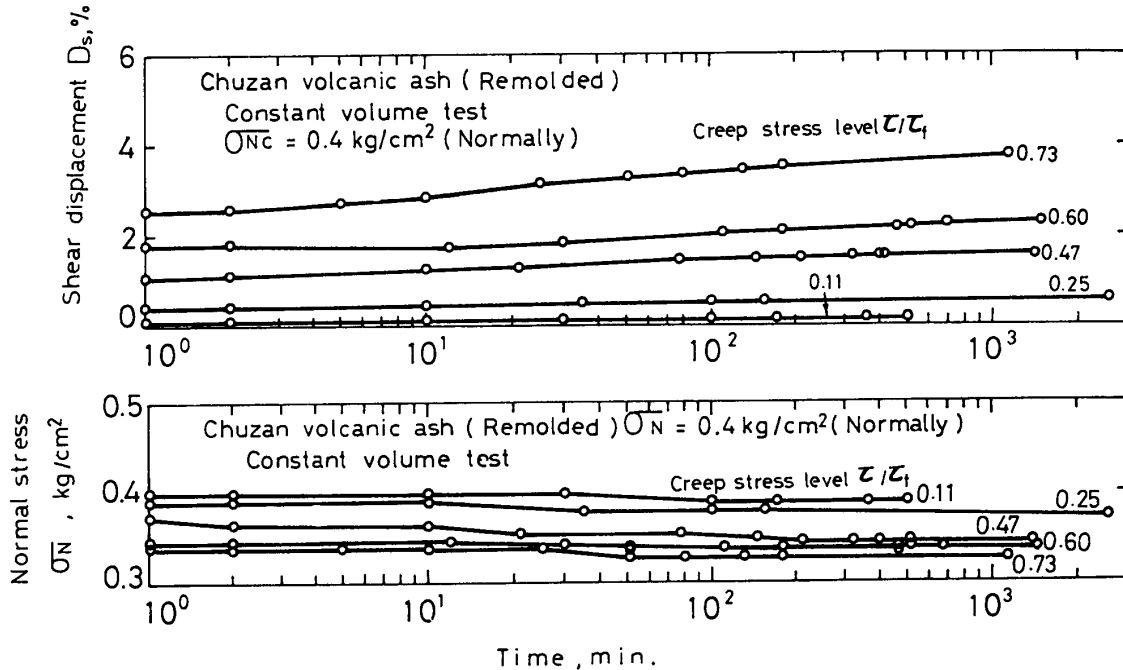


Fig. 17. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for remolded Chuzan volcanic ash.

リープ応力下では直線的に、高クリープ応力下では凹の曲線的に変化する。この変化パターンは Fig. 11 の多々良粘土のそれによく類似する。垂直応力の時間に対する変化パターンも同様である。

Fig. 19, 20, 21 は原良火山灰土の定体積クリープ試験結果を示す。この土の塑性指数は27.4%である。過圧密比5の乱さない供試土では Fig. 19 に示すようにせん断変位は時間に対して低クリープ応力下では直線的に、高クリープ応力下ではS字曲線パターンで変化する。垂直応力の時間に対する変化も同様なパターンを示す。練り返した供試体では Fig. 20 に示すようにせん断変位—時間、垂直応力—時間関係は乱さない供試体と同様なパターンによる変化がみられた。団粒状の構造をもった供試体では Fig. 21 に示すようにせん断変位の時間に対する変化度は低クリープ応力下では一定、高クリープ応力下では時間10分を境に前半と後半で異なった値をもつ。クリープ中の垂直応力の変化は小さい。国分火山灰土、高隈火山灰土、宇宿粘土においても大体中山、原良火山灰土と同様なクリープ変形のパターンが観察された。また、団粒状の構造をもった供試土では過圧密比が大きくなるほどセン

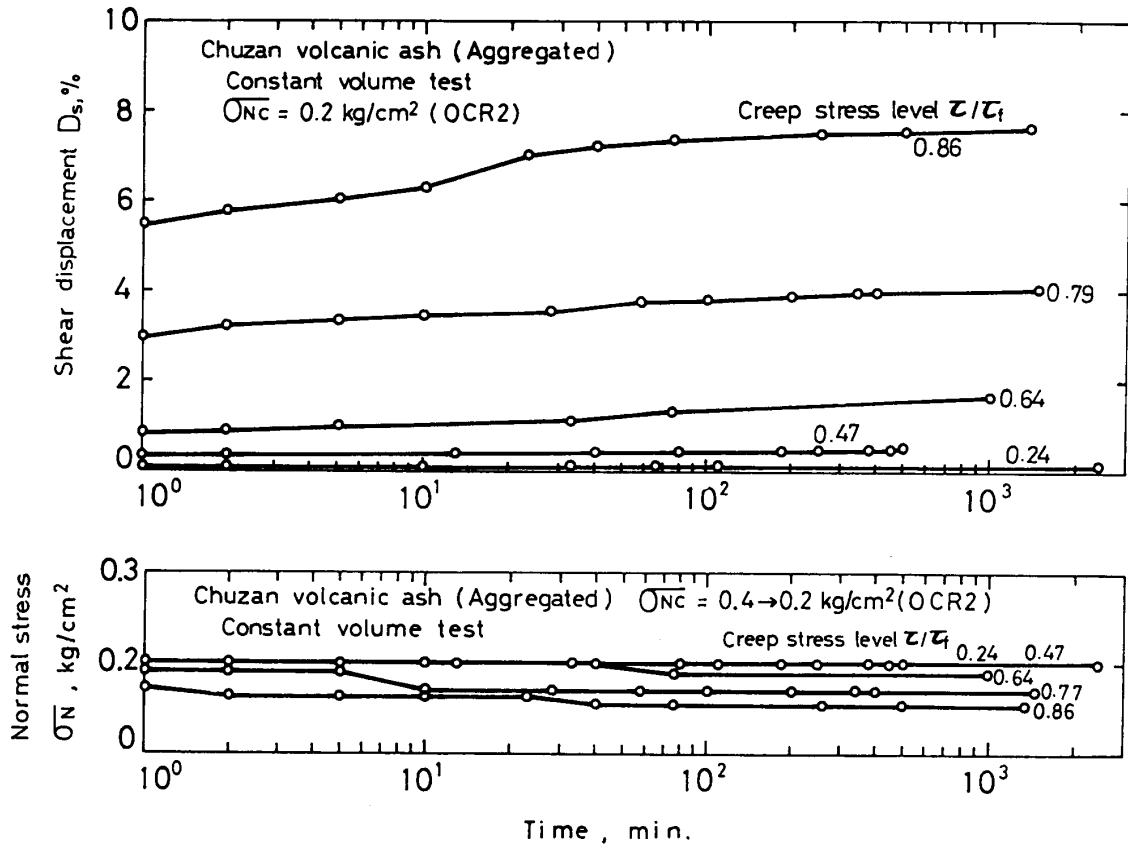


Fig. 18. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for aggregated structure Chuzan Volcanic ash.

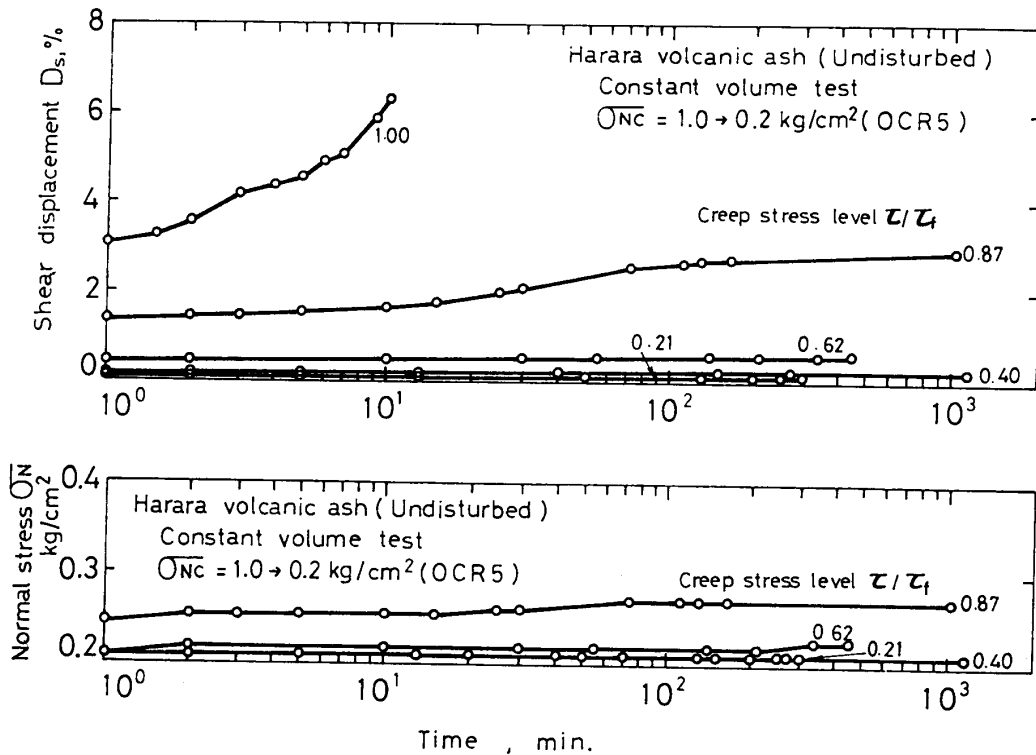


Fig. 19. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for undisturbed Harara volcanic ash.

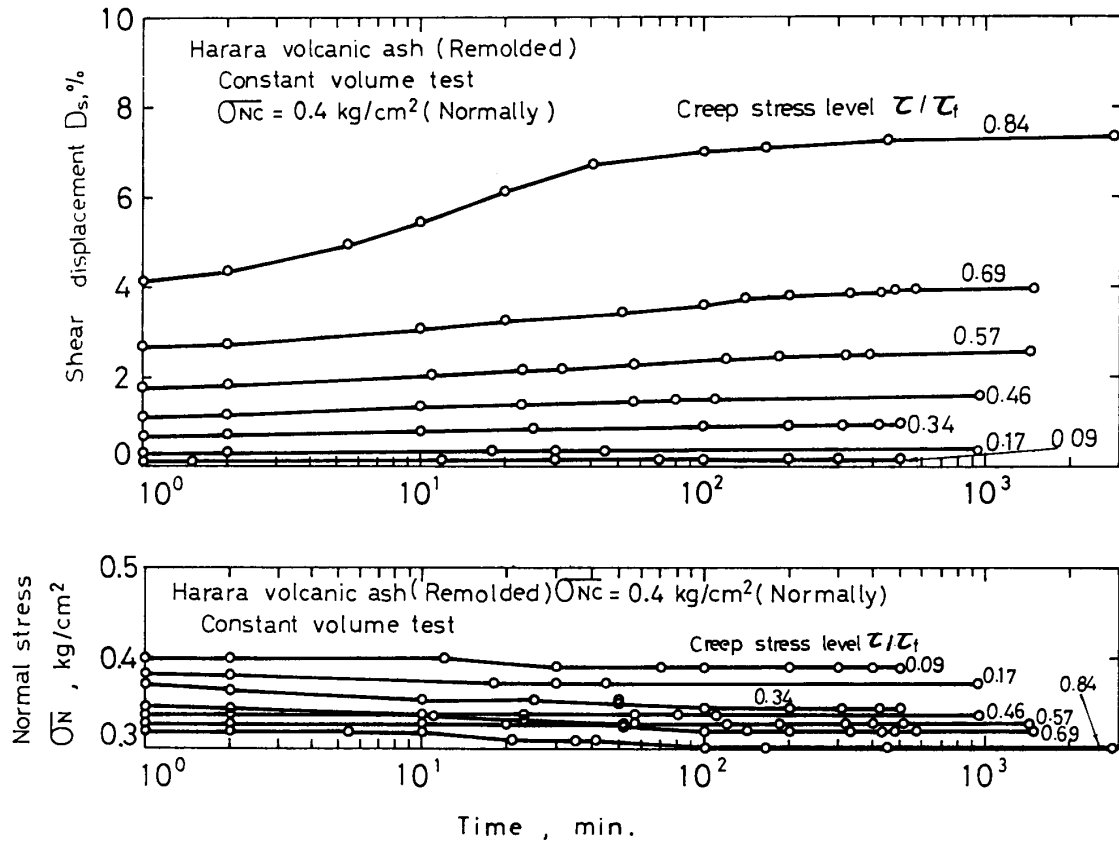


Fig. 20. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for remolded Harara volcanic ash.

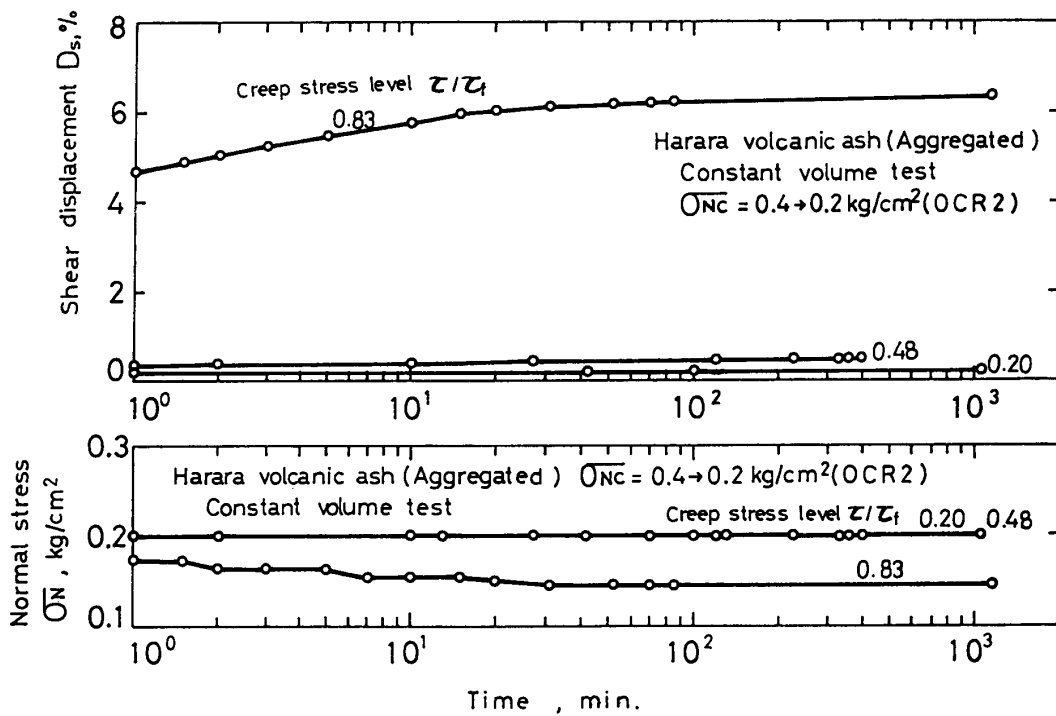


Fig. 21. Shear displacement, normal stress-time (log) relations for aggregated structure Harara volcanic ash.

断変位—時間関係のパターンは練り返し土のそれに類似した。

2. 三軸せん断クリープ試験

この試験は3個の正規圧密状態の練り返し供試土、豊浦標準砂とガラス粉について行われた。Fig. 22は霧島粘土の軸ヒズミ ϵ_1 —時間、間ゲキ水圧 u —時間関係を示す。一面せん断クリープ試験の結果と同様に軸ヒズミはクリープ応力の大きさにかかわらず時間に対して直線的に増加し、その時間に対する変化も大体一定のまま推移する。

平山粘土の三軸クリープ試験結果も一面せん断試験結果と同じ傾向をもつ。Fig. 23は平山粘土の軸ヒズミ—時間、間ゲキ水圧—時間関係を示す。軸ヒズミは時間に対して低クリープ応力下では直線的に、高クリープ応力下では典型的なS字曲線的に変化する。間ゲキ水圧も時間に対して同様なパターンで変化する。

Fig. 24, 25はそれぞれ豊浦標準砂、ガラス粉の三軸せん断クリープ試験結果である。これらの粒状土のクリープ試験は土のクリープ変形の要因を検討するために行ったものである。変形によって豊浦標準砂では負の、ガラス粉では正の間ゲキ水圧を生じた。豊浦標準砂では軸ヒズミはそのほとんどが瞬間に生じ、いわゆるクリープヒズミは観察されなかった。ガラス粉でも軸ヒズミの大部分は瞬間

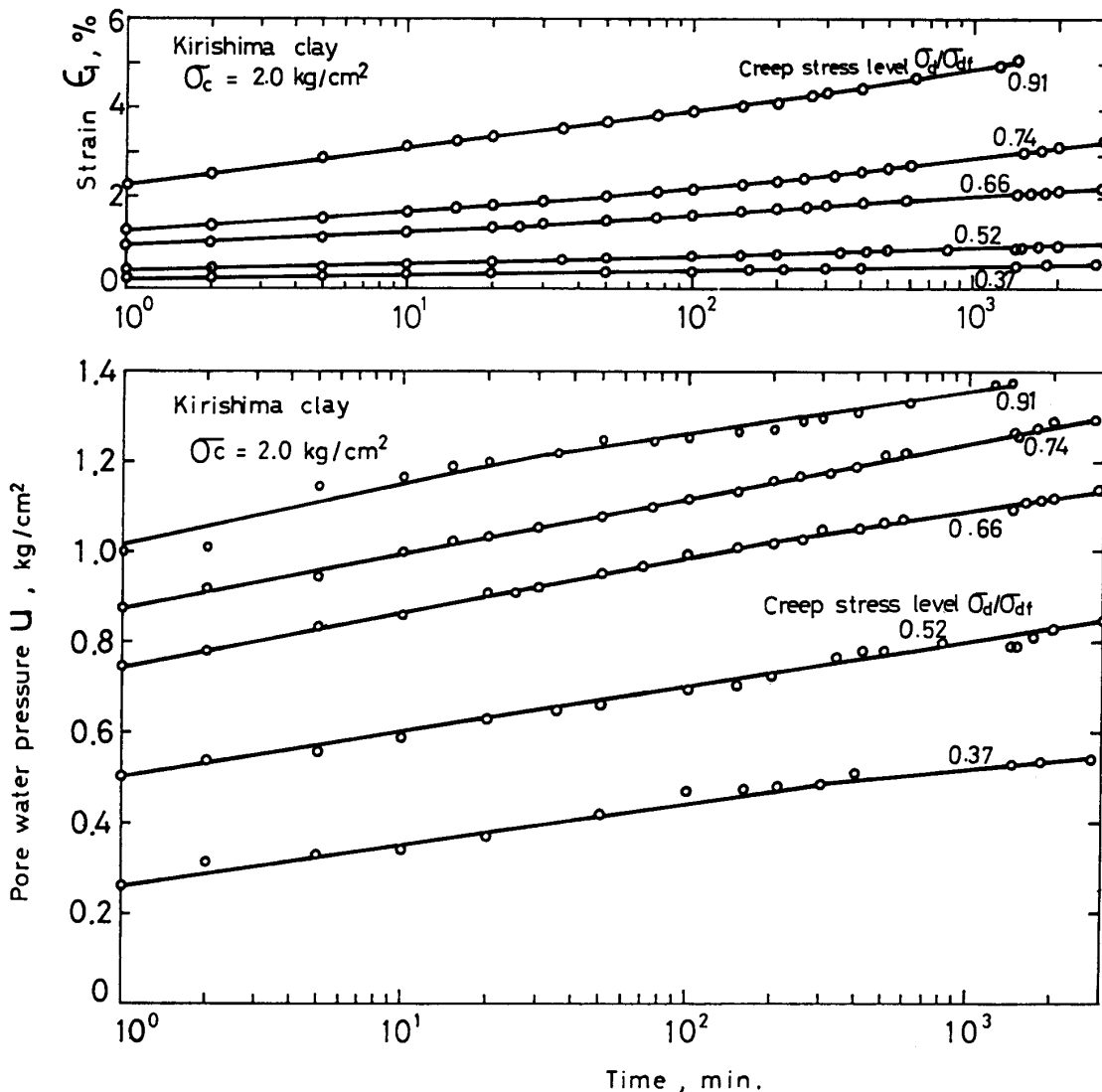


Fig. 22. Axial strain, pore water pressure-time (log) relations for remolded Kirishima clay.

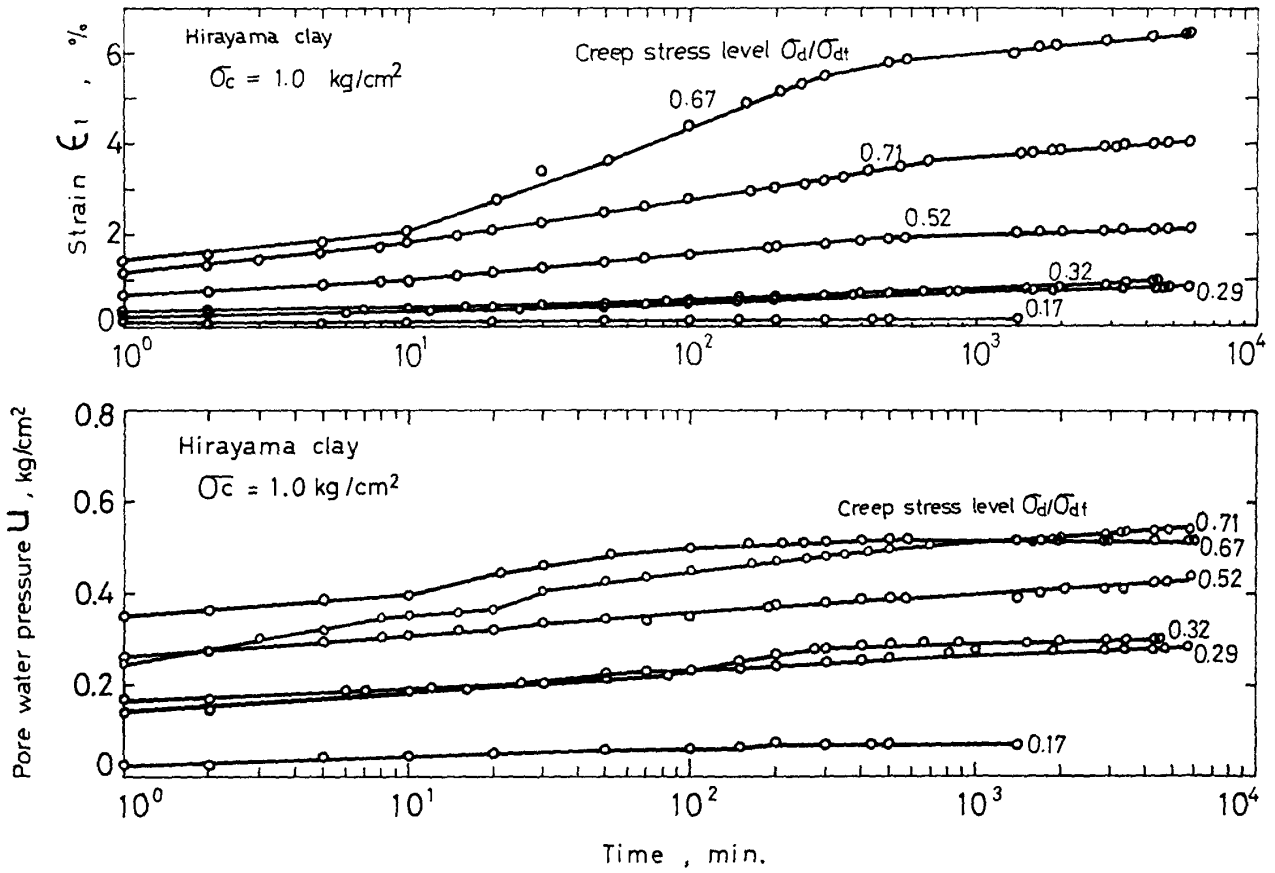


Fig. 23. Axial strain, pore water pressure-time (log) relations for remolded Hirayama clay.

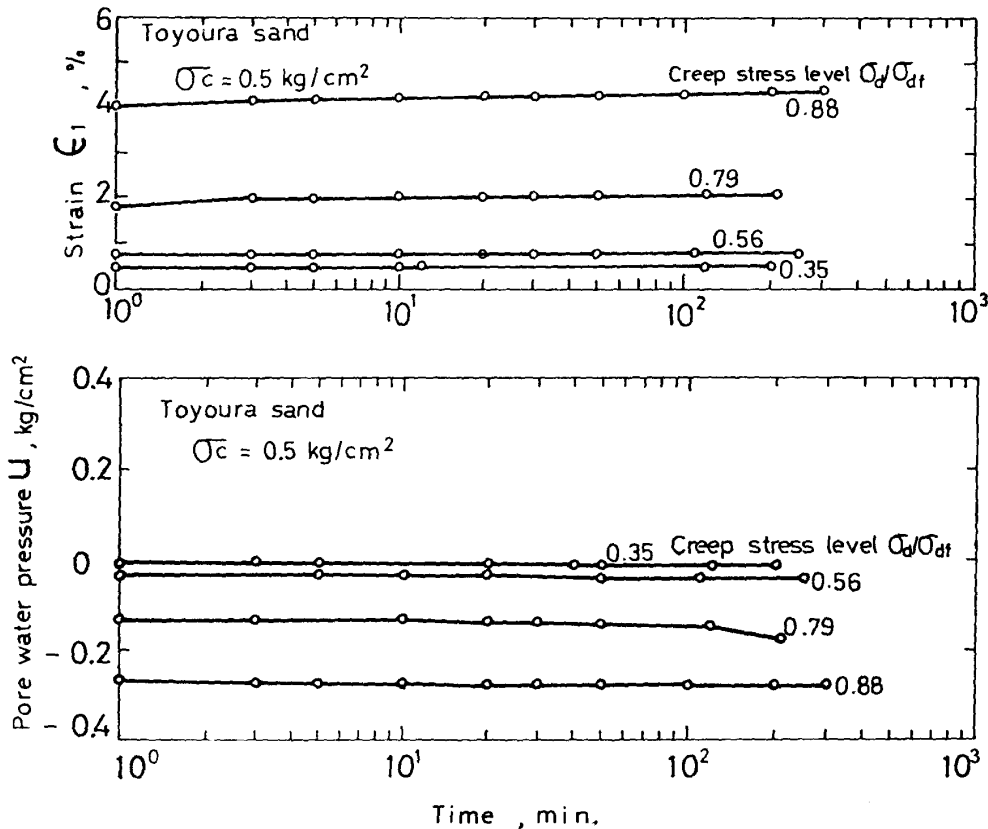


Fig. 24. Axial strain, pore water pressure-time (log) relations for Toyoura sand.

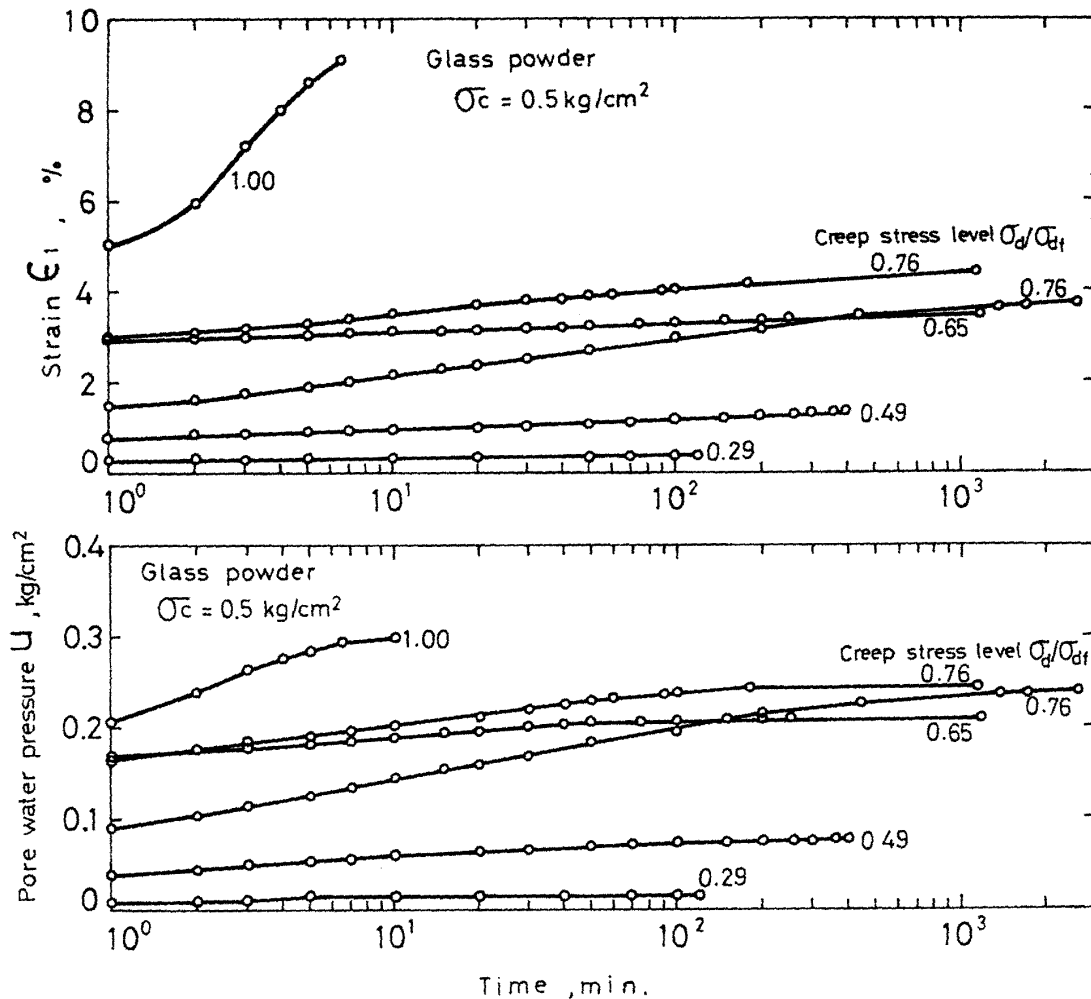


Fig. 25. Axial strain, pore water pressure-time (log) relations for glass powder.

に発生するが、比較的長い時間にわたって軸ヒズミの変化が観察された。間ゲキ水圧の挙動は軸ヒズミの時間に対する変化と同様である。

3. 結果の要約

以上の結果によると土のクリープ変形は土の種類、構造、応力条件によって多様に変化しているが、そのヒズミ-時間関係のタイプにもとづいて次のように分類することができる。

(1) セン断変位、軸ヒズミの時間に対する変化度がクリープ応力の大きさにかかわらず一定で、しかも大きいもの。霧島粘土の乱さない状態、練り返した状態の供試土はこのタイプに属する。

(2) セン断変位、軸ヒズミが時間に対して低クリープ応力下では直線、高クリープ応力下では変曲点を中心にして前半は上に凹の曲線、後半は上に凸の曲線を組み合わせたS字型曲線的に変化し、しかも変曲点の位置が時間的に大きいもの。練り返し状態の平山粘土はこのタイプに属する。

(3) 基本的にはタイプ(2)と同じであるが、タイプ(2)との違いは高クリープ応力下での変曲点の位置が小さい時間で現われるもの。塑性指数の小さな粘土および火山灰土の多くはこのタイプに属する。タイプ(1)、(2)、(3)の順序はそのまま塑性指数の大きさに関連する。

(4) セン断変位、軸ヒズミが瞬時にあらわれ、いわゆるクリープ的ヒズミがわずかにまたは全く生じないもの。KS4060、豊浦標準砂、ガラス粉はこのタイプに属する。

(5) セン断変位がクリープ応力に関係なく時間に対して直線的またはやや上に凹の曲線的に変化し、

また垂直応力，垂直変位はほとんど生じないもの。このタイプは先行荷重状態または残留状態の供試土に対して観察される。過圧密比2の応力条件のもとでは垂直応力の変化，垂直変位は小さいが，セソ断変位—時間関係はこのタイプには属さない。

考 察

多様なタイプのクリープ変形がおこる原因を説明するためにはこの変形に影響する要因の分析が必要である。要因の種類，性質，相互関連性，作用の仕方などがわかればそれらを組み合わせることによって逆に多様なタイプのクリープ変形をつくることができる。そのために Fig. 26 に示すような3つの要因を仮定する。弾性はクリープ载荷と同時に発生する瞬間弾性と時間の経過とともに発生する遅延弾性からなり，この2つは，それぞれ瞬間弾性ヒズミ，遅延弾性ヒズミ（回復可能なヒズミ）を発生させる要因である。弾性ヒズミの発生機構は土の骨格構造の弾性的な幾可学的変化によるもので

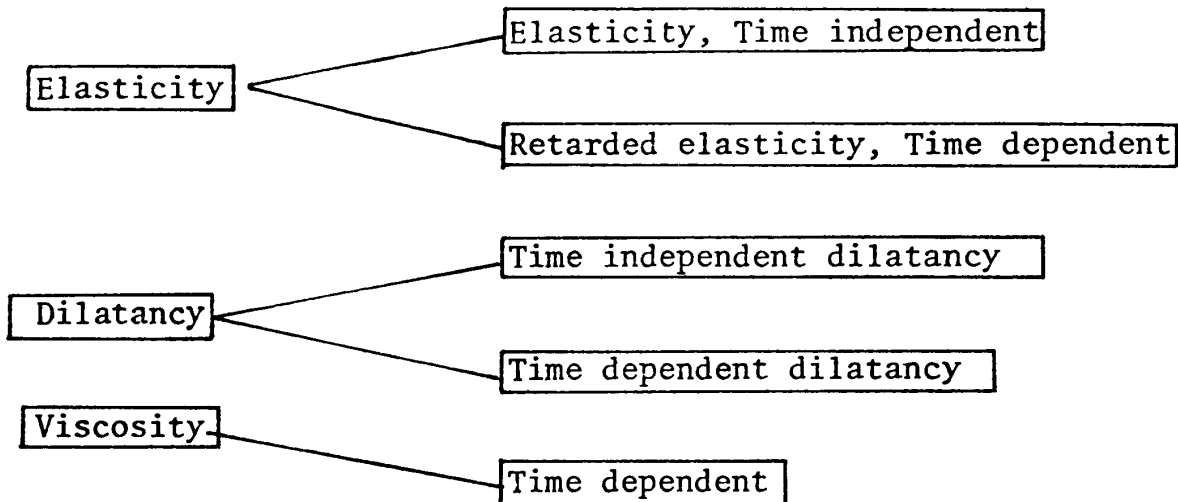


Fig. 26. Creep deformation factors

ある。ダイレイタンスーは土の骨格構造のいわゆる粘塑性的な幾可学的変化で非回復クリープヒズミの原因となる。この要因はさらに時間依存性のないものと時間依存性をもったものとに分けられる。粘性は土粒子のまわりの吸着水層に起因するもので，それ自身クリープヒズミの重要な要因となる。また，この要因はその一方で土粒子の骨格構造の粘弾塑性的変化すなわち遅延弾性，ダイレイタンスーに直接影響する。個々の要因が動員される時間的順序は瞬間弾性，時間依存性のないダイレイタンスーがまず発生し，ついで遅延弾性，時間依存性をもったダイレイタンスー，粘性がしだいにあらわれるものと考えられる。長時間の変形すなわちクリープ変形の原因となる要因は遅延弾性，時間依存性をもったダイレイタンスーおよび粘性成分である。これらの要因が個々にもっている潜在的能力とその能力が動員される程度は応力条件，土の種類，構造などによって異なるものと考えられる。

1. 要因と応力条件

土のクリープ変形に影響する応力条件はクリープ応力，圧密条件（過圧密比），応力履歴，拘束圧などがあげられる。タイプ(2)，(3)のクリープ変形においてはクリープ応力の大きさによってセソ断変位，軸ヒズミ—時間関係が異なる。この原因はクリープ応力の大きさによって要因の動員の程度の差異にもとづくものであろう。いま，三軸状態における土のクリープを想定し，一定荷重下でおこる主ヒズミを ϵ_1 ， ϵ_3 とすると体積ヒズミ v は

$$v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (1)$$

せん断ヒズミ γ は

$$\gamma = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (2)$$

で表わされる。(1)式を(2)式に代入すると

$$\epsilon_1 = \frac{1}{3}\nu + \gamma \quad (3)$$

または

$$\gamma = \epsilon_1 - \frac{1}{3}\nu$$

となる。(3)式を $\log_{10} t$ で微分すると

$$\frac{d\epsilon_1}{d\log_{10} t} = \frac{1}{3} \frac{d\nu}{d\log_{10} t} + \frac{d\gamma}{d\log_{10} t} \quad (4)$$

または

$$\frac{d\gamma}{d\log_{10} t} = \frac{d\epsilon_1}{d\log_{10} t} - \frac{1}{3} \frac{d\nu}{d\log_{10} t}$$

となる。(4)式によれば右辺第1項がダイレイタンスーの時間に対する変化度すなわちダイレイタンスー速度を表わしている。またこの項は対数せん断ヒズミ速度、軸ヒズミ速度に影響を与える。ダイレイタンスー速度は一面せん断試験では垂直変位、垂直応力、三軸せん断試験では間ゲキ水圧の時間的変化度に対応するものである。クリープ試験結果によれば、垂直変位、垂直応力、間ゲキ水圧の時間に対する変化のパターンはせん断変位、軸ヒズミ-時間関係のそれによく類似する。Fig. 27は平山粘土の三軸クリープ試験による間ゲキ水圧の時間(対数)に対する変化度とクリープ応力(軸差応力)の関係を時間をパラメーターにしてプロットしたものである。対数時間に対する間ゲキ水圧の変化度(以下対数間ゲキ水圧速度)の絶対値およびクリープ応力依存性は時間の経過とともに大きくなり約100分で最大値を示すが、その後は減少し約1,000分で一定となる。この推移を Fig. 23の軸ヒズミ-時間関係と対応させると、対数間ゲキ水圧速度の絶対値およびクリープ応力依存性が最大値

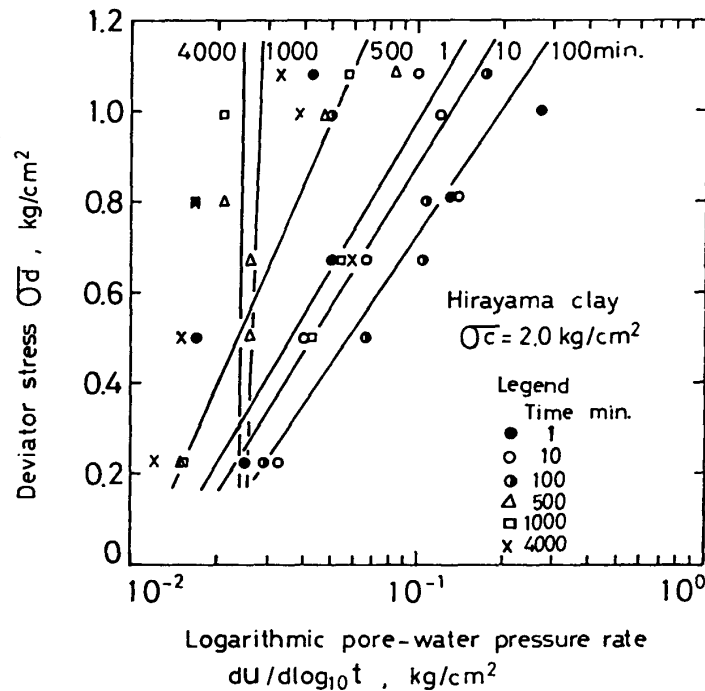


Fig. 27. Relationship between deviator stress and logarithmic pore water pressure rate for remolded Hirayama clay.

を示す時間および一定となる時間はそれぞれ軸ヒズミ-時間曲線の変曲点、後半の定ヒズミ速度域と一致する。このことは Walker⁹⁾ が二次クリープ領域においては有効応力に関係なく体積ヒズミ速度は一定となることを実験的に明らかにしていることと同じ意味をもつものである。ダイレイタンス速度の応力依存性の有無にもとづいてクリープ変形を1次クリープと2次クリープ領域に分けるとそれぞれ次式

$$\frac{dv}{d \log_{10} t} \propto \sigma_d / \sigma_m' \tag{5}$$

$$= k \frac{\sigma_d}{\sigma_m'} \tag{6}$$

$$\frac{dv}{d \log_{10} t} = \text{Const.} = C \tag{6}$$

が得られる。ここに σ_d は軸差応力、 σ_m' は平均主応力、 k は係数である。(5)式で表わされるダイレイタンス速度は1次クリープ領域で発生する時間依存性の小さな成分である。これに比べ(6)式で表わされるダイレイタンス速度は時間依存性の大きな成分である。(5)、(6)式を(4)式に代入するとそれぞれ

$$\frac{d\epsilon_1}{d \log_{10} t} = \frac{1}{3} k \frac{\sigma_d}{\sigma_m'} + \frac{d\gamma}{d \log_{10} t} \tag{7}$$

$$\frac{d\epsilon_1}{d \log_{10} t} = \frac{1}{3} c + \frac{d\gamma}{d \log_{10} t} \tag{8}$$

となる。1次クリープ領域においては(7)式によって高クリープ応力ほどクリープ変形はダイレイタンスの影響を大きく受けることになる。2次クリープ領域では(8)式によってダイレイタンスのクリープ変形に与える影響は一定となる。したがって、2次クリープ領域においてはクリープ変形は遅延弾性、時間依存性の大きなダイレイタンス成分および粘性成分の3つの要因の影響を受けていることになる。以上はダイレイタンスの経時変化が土のクリープ変形に及ぼす影響について述べたものである。

次に圧密応力条件について検討する。Fig. 28 は過圧密比をパラメーターにして2次クリープ領域における対数せん断変位速度とクリープ応力比の関係を示したものである。また、この図には先行荷

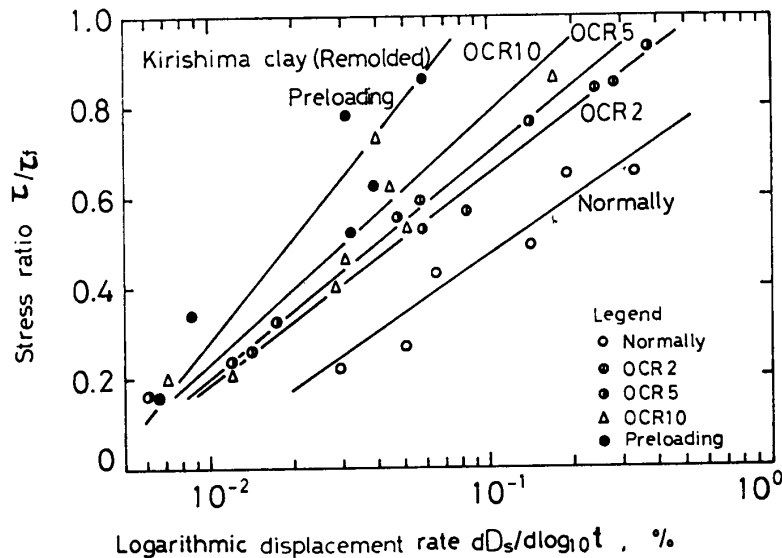


Fig. 28. Relationship between creep stress ratio and logarithmic shear displacement rate for remolded Kirishima clay.

重状態におけるクリープ試験結果も同時に示した。対数セン断変位速度とクリープ応力比の間に半対数座標上で直線近似が成立するとすると

$$\log_{10} \frac{dD_s}{d \log_{10} t} = \alpha + \beta \frac{\tau}{\tau_f} \quad (9)$$

を得る。ここに、 τ はセン断クリープ応力、 τ_f はセン断強さ、 α 、 β は定数である。過圧密比が大きくなると同じクリープ応力比に対して対数セン断変位速度は減少し、また近似した直線のこう配は小さくなる。この傾向は先行荷重状態においてさらに強くなる。この直線のこう配の大きさはクリープ変形の応力依存性を示すものでこう配が大きいかほど応力依存性は大きくなる。Fig. 29 は過圧密比がダイレイタンスーに及ぼす影響についての分析結果である。2次クリープ領域における対数垂直変位速度は正規圧密状態（過圧密比1）では負の値を示し、過圧密比が大きくなるにつれて正の値に移行し、さらに過圧密比が大きくなるとしだいに減少する。

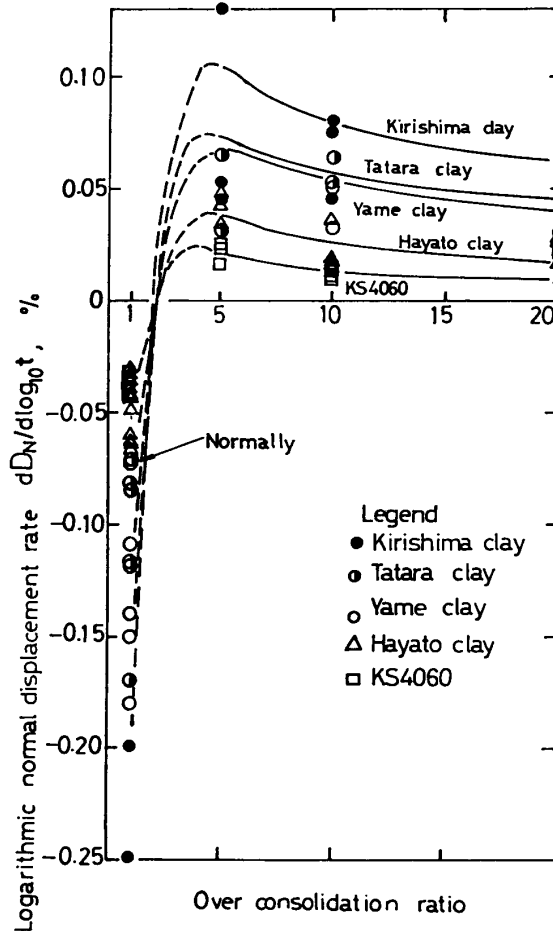


Fig. 29. Influence of over consolidation ratio on logarithmic normal displacement rate.

残留状態および先行荷重を受けた状態では土のクリープ変形はダイレイタンスーの影響をまったく受けない。ゆえに(4)式右辺の第1項は

$$\frac{1}{3} \frac{dv}{d \log_{10} t} = 0 \quad (10)$$

とおけるので(4)式は

$$\frac{d\epsilon_1}{d \log_{10} t} = \frac{d\gamma}{d \log_{10} t} \quad (11)$$

となり、軸対数ヒズミ速度はせん断対数ヒズミ速度に等しくなる。このような応力条件下ではクリープヒズミと時間の関係はクリープ応力の大きさにかかわらず線形を示す。クリープの全過程に作用する要因は瞬間弾性、遅延弾性および粘性の3種である。また、過圧密比2の応力条件下ではダイレイタンシーの変化は非常に小さいので現象的には残留および先行荷重状態と同様に(10)、(11)式を満足しなければならない。しかし、過圧密比2の応力条件下におけるせん断変位—時間関係は残留状態、先行荷重状態とは異なり、他の正規圧密、過圧密状態と同様なパターンを示す。この原因はダイレイタンシーの機構を考えることによって説明される。すなわち、ダイレイタンシーとは土のせん断変形による土粒子骨格構造の幾可学的変化にもとづくものであり、このような機構による変形は残留状態のようにせん断変形がすでに形成されたスベリ面を通しておこる場合を除いて圧密条件にかかわらず発生するものである。この結果、一般には土の体積は変化するが、過圧密比2の場合には体積変化は非常に小さい。

Fig. 30 は土のクリープ変形に及ぼす拘束圧の影響についての試験結果でクリープ応力比と2次クリープ領域における対数せん断変位速度の関係を垂直応力をパラメーターにしてプロットしたものである。対数せん断変位速度は垂直応力が大きくなると減少し、そのクリープ応力比依存性は一定である。

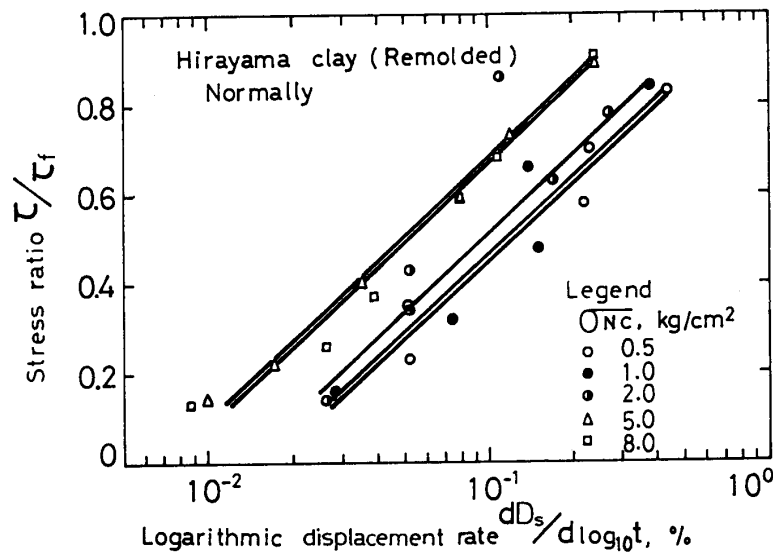


Fig. 30. Influence of normal stress on relationship between creep stress ratio and logarithmic shear displacement rate for remolded Hirayama clay.

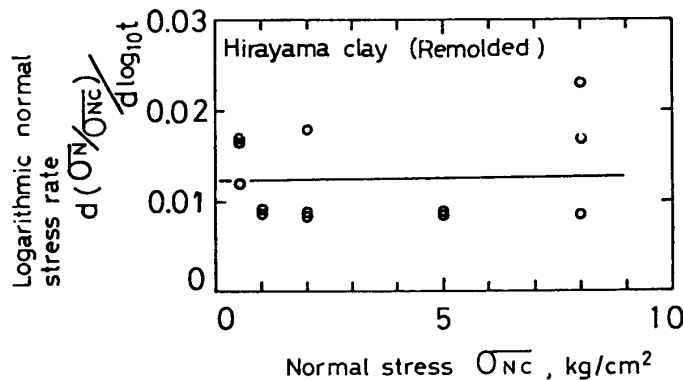


Fig. 31. Influence of normal stress on logarithmic normal stress rate for remolded Hirayama clay.

る。Fig. 31 は定体積クリープ試験による垂直応力の対数時間による変化度と拘束圧の関係を示したものである。垂直応力の時間に対する変化度はダイレイタンスの時間に対する変化度を表わす。図によると垂直応力の変化度は拘束圧にかかわらず一定値を示す。故にダイレイタンスは垂直応力による対数せん断変位速度の変化には影響しない。

2. 要因と物理的性質、構造

Fig. 32 は粘土の構造を模式的に示したもので、(a)は個々の粘土粒子がよく分散するように液状にしたものを圧密させた土、(b)は団粒あるいは団塊が集合した構造土のいずれも飽和した状態を想定している。粘土は飽和状態では粘土粒子とその表面をおおう吸着水層および間ゲキ水から構成される。いま、この2つの構造をもった土にクリープ応力が作用したとすると、クリープ変形の基本的単位は

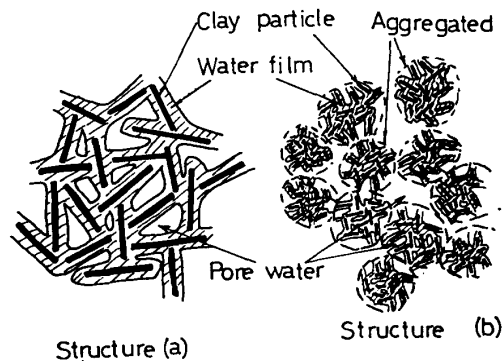


Fig. 32. Schematic representation of soil structure.

構造(a)においては個々の粘土粒子とその表面をおおう吸着水層に、構造(b)においては団粒（または団塊）とその団粒相互を結びつける層（団粒相互の接点が個々の粒子によって結びついているとすれば粘土粒子の表面をおおう吸着水層と同一のもの）にもとづく。したがって、粘土のクリープヒズミ速度の大きさは構造(a)では直接吸着水層の粘性によって、構造(b)では団粒相互間の粘性によって影響を受ける。

Fig. 33, 34, 35 は2次クリープ領域における対数せん断変位速度のクリープ応力比依存性と塑性指数の関係を示したものである。前者は Fig. 28, 30 の対数せん断変位速度（対数）とクリープ応力比の関係から得られた近似直線のこう配 β ((9)式による) によって表わされる。この値が大きいほど対数せん断変位速度がクリープ応力比に依存する度合は大きくなる。後者の塑性指数は液性限界と塑性限界の差によって与えられ、粘土の吸着水層による粘性に関係する。すなわち粘性が大きいほど塑性指数は大きい。Fig. 33 は種々の応力条件のもとでの繰り返し供試体のプロット結果である。繰り返し供試体は構造(a)に最も近い構造をもっている。この結果によると β は同じ供試体でも圧密条件、先行荷重条件によって違った値を示す。また β は塑性指数が大きくなると増加するが、この増加の程度（塑性指数依存性）は同図に正規圧密および低過圧密比状態において2本の線で表わしたように粘土に比べ火山灰土は非常に小さい。この原因は火山灰土の構造的性（繰り返し供試体でも構造(b)のように個々の粒子に分散せず団粒構造に富む）にもとづくものと考えられる。Fig. 34 は乱さない供試体のプロット結果である。乱さない供試体は霧島粘土、平山粘土、粕屋粘土は構造(a)に、火山灰土は構造(b)に近い構造をもつ。故に β の塑性指数に対する関係は繰り返し供試体に近い傾向をもつ。平山粘土は残留状態においては β は小さな値を示している。Fig. 35 は団粒構造をもった供試体のプロット結果である。団粒構造(b)に最も近い構造である。火山灰土はもともと団粒構造に富んでいるので、繰り返しおよび乱さない供試体と同様な傾向を示す。霧島粘土、粕屋粘土では β の塑性指数に対する変化度は繰り返しおよび乱さない供試体より小さくなる。

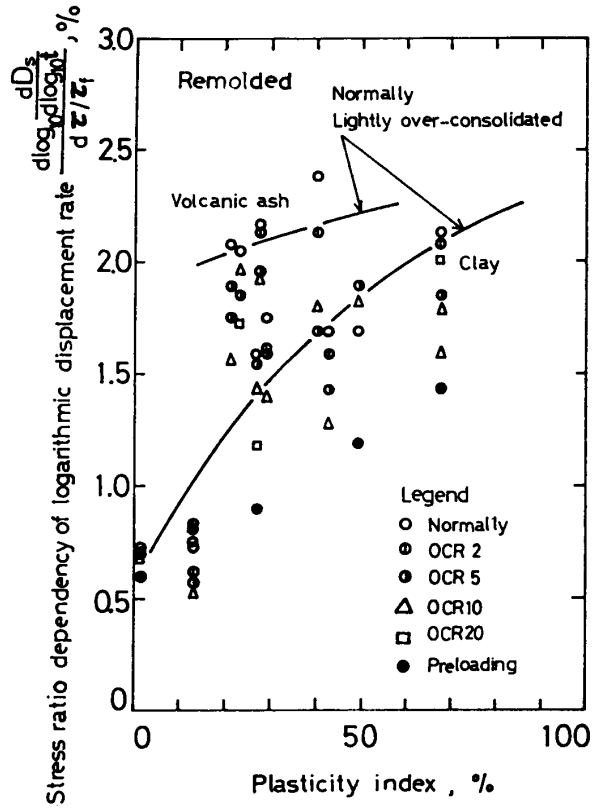


Fig. 33. Influence of plasticity index on creep stress ratio dependency of logarithmic shear displacement rate.

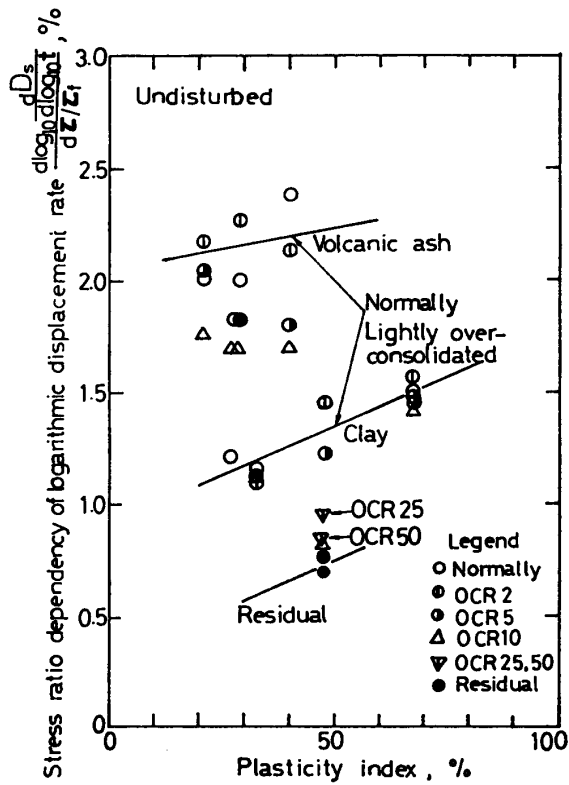


Fig. 34. Influence of plasticity index on creep stress ratio dependency of logarithmic shear displacement rate.

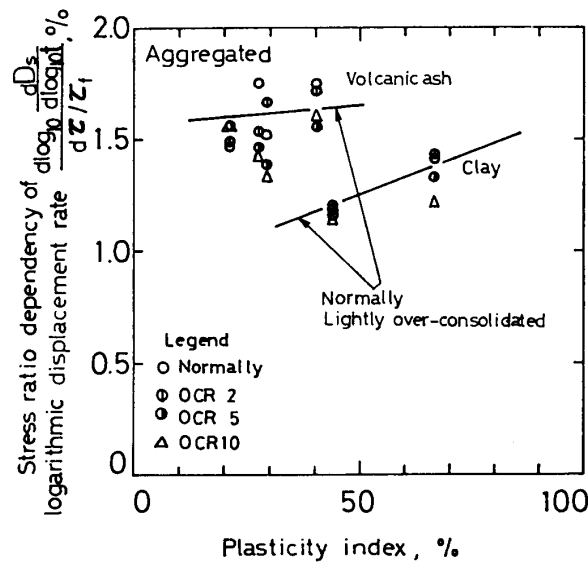


Fig. 35. Influence of plasticity index on creep stress ratio dependency of logarithmic shear displacement rate.

土の塑性指数がダイレイタンスに及ぼす影響は Fig. 29 に表わされた対数垂直変位速度の値をさまざまな土の塑性指数と対応させることによって説明することができる。その結果、正規圧密、過圧密状態を通して塑性指数が大きいほど対数垂直変位速度すなわちダイレイタンス速度は大きくなる。

要 約

土のクリープ変形に影響する要因を分析するために物理的、構造的性質の異なる土のさまざまな応力条件下でのクリープ試験を行った。クリープ試験は一面セン断排水クリープ試験と三軸セン断非排水クリープ試験による。また試験結果にもとづいて土のクリープ変形に影響する要因について考察した。その結果を要約すると以下の通りである。

1) 土の物理的性質、構造および応力履歴の違いによるセン断変位、軸ヒズミ—時間関係のパターンからクリープ変形は次の5つのタイプに分類される。(i)セン断変位、軸ヒズミが時間に対してクリープ応力に無関係で直線的に増加するもの、(ii)低クリープ応力下で直線的に、高クリープ応力下ではS字曲線的に変化するもの、(iii)(ii)と同様なパターンを示すが高クリープ応力下ではS字曲線の変曲点の位置が小さい時間でおこるもの、(iv)セン断変位、軸ヒズミが瞬時に生じ、いわゆるクリープ的ヒズミがほとんどあらわれないもの、(v)先行荷重、残留状態に対するクリープ変形でセン断変位が時間に対して直線的に変化するもの。この場合ダイレイタンスは生じない。

2) 土のクリープ変形に影響する要因は弾性、遅延弾性、時間依存性のないダイレイタンス、時間依存性をもったダイレイタンス成分および粘性からなる。この5つの要因は応力条件、土の性質、構造によって異なり、これがさまざまなタイプのクリープ変形をおこす原因となる。

3) クリープ中発生する間グキ水圧の対数時間に対する変化度(対数間グキ水圧速度)は1次クリープ領域ではクリープ応力の大きさとともに増加するが2次クリープ領域ではクリープ応力によらず一定となる。この結果セン断変位、軸ヒズミ—時間関係は高クリープ応力下ではS字曲線型の非線形を示す。低クリープ応力下ではダイレイタンスの影響が小さく、セン断変位—時間関係は線形を示す。2次クリープ領域におけるセン断変位、軸ヒズミは遅延弾性、時間依存性をもったダイレイタンス、粘性によって影響される。

- 4) 2次クリープ領域における対数垂直変位速度（ダイレイタンスー速度）は正規圧密，過圧密比によって異なる。また2次クリープ領域におけるダイレイタンスー速度は拘束圧によらず一定である。
- 5) 先行荷重，残留状態においてはダイレイタンスーは発生しない。この結果せん断変位—時間関係は線形を示す。
- 6) 2次クリープ領域における対数せん断変位速度のクリープ応力依存性は塑数指数とともに大きくなる。またその塑数指数に対する変化度は火山灰土とその他の土，同じ土でも構造の違いによって異なり，火山灰土，団粒状の構造をもった土は小さい。

謝 辞

本研究を進めることについて鹿児島大学工学部春山元寿助教授には土の変形の考え方，実験方法など多くの指導をいただいた。記して謝意を表する。

文 献

- 1) Christensen, R.W. and Wu, T.H.: Analysis of clay deformation as a rate process. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90 (SM6), 125—157 (1964)
- 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，40，1—31 (1956)
- 3) 及川洋・岩崎恒明・宮川勇：粘性土・高有機質土およびその混合物のクリープ挙動についての一考察。第8回土質工学研究発表会，247—250 (1973)
- 4) Singh, A. and Mitchell, J.K.: General stress-strain-time function for soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94 (SM1), 21—46 (1968)
- 5) Singh, A. and Mitchell, J.K.: Creep potential and creep rupture of soils. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol.1*, 379—384 (1969)
- 6) 下川悦郎：土のレオロジー的特性に及ぼすコンシステンシーおよび構造の影響。土木学会第20回年次学術講演会講演概要集第3部，106—107 (1974)
- 7) 下川悦郎：土のクリープ挙動。第10回土質工学研究発表会，257—260 (1975)
- 8) 関口秀雄・村山朔郎：粘土のクリープ特性に関する実験的研究。第6回土質工学研究発表会，149—152 (1971)
- 9) Walker, L.K.: Secondary compression in the shear of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 95 (SM1), 167—188 (1969)
- 10) 八木則男・西田義親・二木幹夫：練り返し粘土のクリープ特性。土木学会第29回年次学術講演会講演概要集第3部，75—76 (1974)

Summary

The creep tests of soils with various physical and structural properties were carried out, by which the creep deformation factors of their soils were analyzed. The creep tests were conducted by the direct and triaxial shear testing apparatus. The results are summarized as follows:

- 1) The creep deformation of their soils are to be grouped in to the next five types according to the pattern of the shear displacement, axial strain-time relations; the shear displacement, axial strain increase linearly versus logarithmic time (i) without creep stress level, (ii) with low creep stress level, but change such as sigmoid pattern with high creep stress level, (iii) exhibit in the same pattern as that of (ii), but the point of inflection of sigmoid occurs at small time, (iv) occur momentarily and (v) the shear displacement increases linearly versus logarithmic time in preloading

and residual conditions that the dilatancy deformation do not occur.

2) The creep deformation is to be influenced by the five factors of elasticity, retarded elasticity, time independent dilatancy, time dependent dilatancy and viscosity. The property and correlation of their factors vary with the stress conditions and soil properties, and that influence on the types of creep deformation.

3) The logarithmic pore-water pressure rate increases with creep stress in the first creep region, but it is constant without creep stress in the second creep region. Consequently, the shear displacement, axial strain versus logarithmic time exhibit non-linearity. But, the influence of the dilatancy deformation is such small with low creep stress level that the shear displacement, axial strain-time relations exhibit linearity. The shear displacement, axial strain in the second creep region has their origin in the retarded elasticity, time dependent dilatancy and viscosity.

4) The dilatancy rate changes by the over consolidation ratio, but is constant regardless of the confining pressure in the second creep region.

5) The dilatancy deformation do not occur in preloading and residual conditions. Consequently, the shear displacement-time relation exhibits linearity.

6) The creep stress dependency of logarithmic shear displacement rate in the second creep region increases with plasticity index of specimens.