

土木研究所資料

砂粒土の動的せん断特性試験報告

昭和53年 3 月

建設省土木研究所

動土質研究室

目 次

概 要	1
1. 試 験 目 的	2
2. 試 験 計 画	3
2-1 試 験 材 料	3
2-2 荷 重 条 件	5
2-3 単純せん断試験及び三軸圧縮試験における応力条件の考え方及び予備試験	6
2-4 供試体の含水、応力条件	11
2-5 試験条件のまとめ	12
3. 試 験 方 法	13
3-1 試 料 調 製	13
3-2 予備圧密と供試体作成	13
3-3 動的せん断試験機	13
3-3-1 繰返し三軸圧縮試験機	13
3-3-2 動的単純せん断試験機	14
3-4 動的せん断試験の方法	14
3-4-1 繰返し三軸圧縮試験	14
3-4-2 動的単純せん断試験	14
4. 試験結果及びその考察	15
4-1 試料の性質	15
4-2 静的せん断試験の結果	15
4-3 動的せん断試験の結果	18
4-3-1 繰返し三軸圧縮試験	18
4-3-2 動的単純せん断試験	25
4-3-3 試験供試体の間げき比及び間げき圧係数	28
4-3-4 繰返し三軸圧縮試験と動的単純せん断試験の比較	30
5. 結 論	32
6. 参 考 文 献	33

概 要

細粒分の含有率を変えた砂粒土3種について、繰返し三軸圧縮試験及び動的単純せん断試験を実施した結果をとりまとめたものである。考慮した影響因子は、細粒分含有率、過圧密化、初期せん断応力等である。この結果、細粒分含有率の増加、過圧密比、初期せん断応力の増大に伴い、動的強度が増加する事を明らかにした。又、三軸圧縮試験と単純せん断試験の関係について、静的試験を媒介とした評価法についても考察をしている。

昭和53年3月

動土質研究室

室 長

沢 田 健 吉

古 賀 泰 之

舟 見 清 巳

北陸技術事務所

間 三 男

1. 試験目的

本試験は、フィルダムのコア材のように、粒度分布のよい粗粒土の動的せん断特性を調べる事を目的としている。具体的には、フィルダムのコア材として用いられた事のある材料の粒度分布を考慮して定めた3種の異なった粒度分布の砂粒土について、繰返し三軸圧縮試験機及び動的単純せん断試験機により、いくつかの動的応力状態における材料の変形特性を調べ、コア材の地震時における安定性に対する基礎資料を得る事が目的である。

2. 試験計画

1で述べたような試験目的のために、試験材料の選定、現場における荷重条件の設定、繰返し三軸試験及び動的単純せん断試験の応力条件の設定等を以下のように行なった。

2-1 試験材料

フィルダムのコア材は、不透水材料である事が要求され粒度配合は良く、粗粒材からローム質の細粒分までを広い範囲に含んでいる。例えば、フィルダム研究室は我国のフィルダムのコア材の実態について図-2.1のようにまとめている。¹⁾この図によると、コア材の粒度組成の内、粗粒分(74 μ 以上)

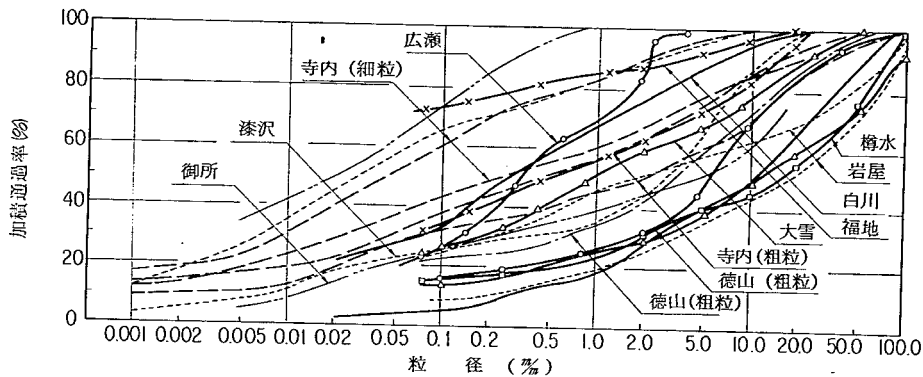


図-2.1 コア材料の粒度分布の範囲¹⁾

は全体の80~90%を占め、又、粗粒分の内、レキ分(2.0mm以上)は10~60%を占めるため、レキ粒土又は砂粒土に分類されるが、又、一方細粒分(74 μ 以下)も10~20%含んでおり、均等係数等から見ても、粒度のよいレキ、シルトまじりレキ、シルト質レキ、粒度のよい砂、シルトまじり砂、シルト質砂等々に分類されるものである。これらの材料の特徴を、粗粒土中に占める相対的な細粒分の含有率又は粒度配合の影響と見て材料の粒度分布を定め、それぞれの土の動的せん断特性を調べた。

まず、本試験では、せん断試験機の供試体が小さいため粒径2mm以上のレキ分は除き、細粒分(74 μ 以下)含有率を変えた試験を作り、繰返し三軸圧縮試験及び動的単純せん断試験を行なった。具体的な粒度分布は後に示すが、図-2.1との対応で言えば、広瀬ダムの場合のパリエーションと見なす事ができる。又、広瀬ダムの例は必ずしも全体を代表する傾向とは言えず、全体的な傾向と比較するならば、上限を2mmにおさえて粒度分布を細粒側にずらした試料と見る事も可能であろう。本試験に用いた粒度分布の試料は、自然土として入取する事ができなかったため、砂、細砂、シルトの3者を

適当な割合で重量配合して調整した。これらの原材料は、ダムという条件を考慮すると、風化残留土、崖錐堆積物、風化岩等から得る事が望ましいと思われるが、入手の容易さから山砂、しゅんせつ土等を使用した。今回使用した原材料は浅間山砂、稲毛産砂、幕張シルトで予備試験の段階では稲毛産砂の代りに袖ヶ浦産砂を使用した。これらの原材料の粒度分布を図-2.2に示す。動的試験試料の予定粒度分布は図2.3のものを想定した。この各試料について原材料（浅間山砂、稲毛産砂、幕張シルト）

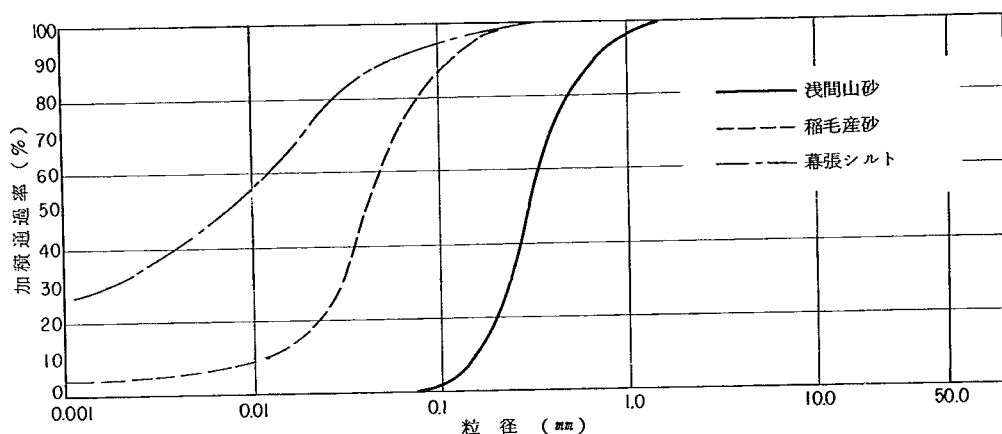


図-2.2 動的せん断試験原材料の粒度分布

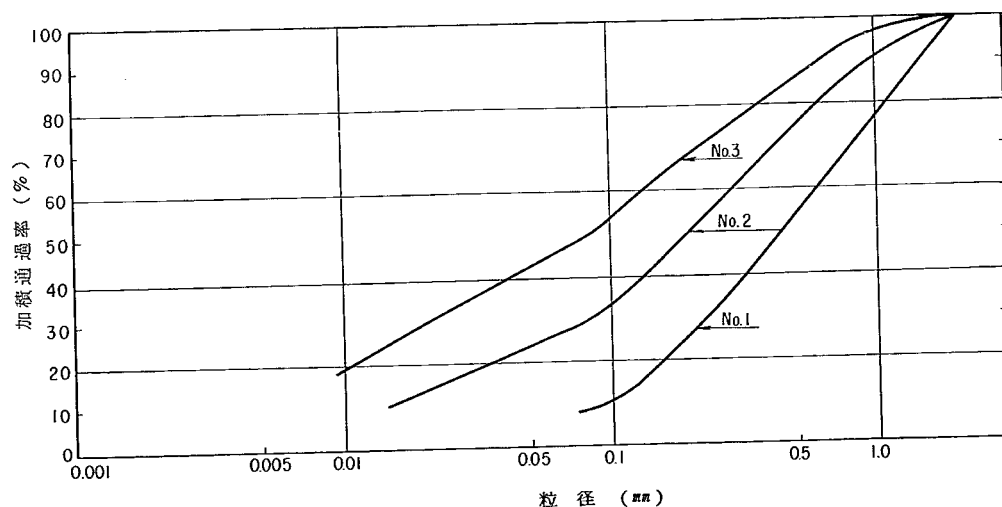


図-2.3 動的せん断試験材料の予定粒度分布

表-2.1 動的せん断試験試料配合比

数値 %

	浅間山砂	稲毛産細砂	幕張粘土(シルト)
№ 1	8 8.3	9.1	2.6
№ 2	6 7.8	1 0.7	2 1.5
№ 3	3 7.3	4 6.2	1 6.5

の配合比は表-2.1のようである。この表の値は乾燥重量比であるが、実際には浅間山砂を除いて含水比の測定を行ない湿潤状態で混合した。

2-2 荷重条件

コア材のおかれる静的・動的荷重条件は、ダム型式・規模・材料、地震動の特性等により様々であるので、今回のような目的の試験のためには、これらをできるだけ割切って試験条件を単純化する必要があり、次のように条件を定めた。

ダムとしては中心コア式で堤高50m程度のものを対象とする。フィルダムを図-2.4のようにモデル化

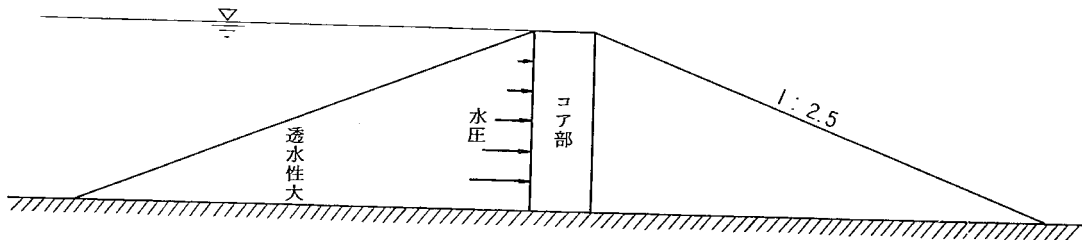


図-2.4 フィルダムのモデル化

デル化してコア部に生ずる初期せん断応力を概算した。堤体上流部の透水性は大きく、また下流部の勾配は2割5分とした。直接的にはコア部に作用する水圧は、コア部と下流部によって受けもたれ、両者は近似的には等しいひずみ量をもったせん断変形をなすであろう(図-2.5)。このせん断変形量は、コア部と下流部の剛性の大きさ及び両者の比によって定まる。コア部の剛性は下流部の剛性よりも一般に小さいと考えられるが、ここでは次の2ケースを想定した。

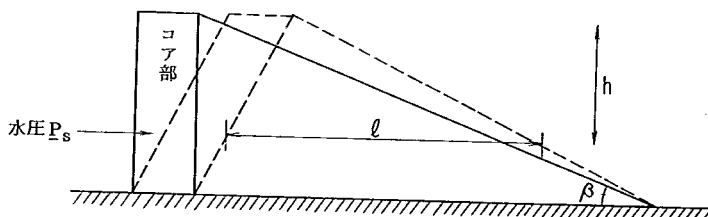


図-2.5 コア部の変形のモデル化

- (1) コア部の剛性が下流部の剛性と等しいと考えると、コア部と下流部に作用するせん断応力は等しくなるはずである。天端から $h(m)$ の深さより上部のコア部に作用する水圧の合力 $P_s(t/m)$ は、単位奥行あたり

$$P_s = \frac{1}{2} r_w h^2 \quad \text{となる。}$$

$$\text{又 } \ell = h / \tan \beta \quad \text{であるから}$$

したがってこの深さで生ずるせん断応力 τ_s は

$$\tau_s = \frac{P_s}{\ell} = \frac{r_w h}{2} \tan \beta, \quad \text{となる。}$$

$$\tan \beta = 1 / 2.5 = 0.4, \quad r_w = 1.0 (t/m^3) \quad \text{により}$$

$$\tau_s = 0.2 h$$

一方、コア部が飽和していて浮力が生じていると考えると、コア部の水中重量を $r' (\div 1.0 (t/m^3))$ とする) として

$$\sigma'_v = r' h \div h \quad \text{となる。}$$

以上から、この場合には

$$\tau_s / \sigma'_v = 0.2 \quad \text{となる。}$$

- (2) コア部の剛性が下流部の剛性に比べ非常に小さいとすると、コア部に作用する水圧はすべて下流部によって受けもたれる。いいかえれば、コア部には初期せん断力は作用しない。したがって、この場合には

$$\tau_s / \sigma'_v = 0 \quad \text{となる。}$$

地震時応力については、堤体全体が一体となって剛体的に振動するものとする。水平震度を k として

$$\tau_d = \frac{k \cdot 2W}{2\ell}$$

ここに $2W$ は梁さ h より上部の堤体の重量で断面積を $2A$ とすると

$$2W = r t \cdot 2A \quad A = \frac{1}{2} h \ell$$

$$\tau_d = \frac{1}{2} k r t h$$

ここで $r t \div 2.0 (t/m^3)$ とすると

$$\tau_d = k h \quad \text{となる。}$$

したがって

$$\tau_d / \sigma'_v = k \quad \text{となる。}$$

2-3 単純せん断試験及び三軸圧縮試験における応力条件の考え方及び予備試験

2-2 で述べたような考え方により、コア材の想定深さ $h = 2.0 m$ に対して、動的単純せん断試験の応力条件をまず表-2.2 のように決定した。

一方、上のような動的単純せん断試験条件と等価な繰返し三軸試験条件については、未だ確立され

表-2.2 コア材の想定応力条件(単純せん断状態)

上 載 圧 σ'_v (kg/cm^2)	2.0
初期せん断応力 τ_s (kg/cm^2)	0.0, 0.4
動的せん断応力 τ_d (kg/cm^2)	0.3, 0.4, 0.5

た見地はないようであるので以下のような予備試験及び考察の下に両者の相互関係をつける事にした。

基本的な前提として、三軸試験及び単純せん断試験において求まる強度定数や間げき圧係数は等しいものとする。間げき圧係数は、応力の大きさにも依存するものであるから、次のような特性を示すものとする。まず、排水条件(排水又は非排水)を同じにして、単純せん断試験と三軸試験を行なうものとする。両者の結果は通常図-2.6(a)(b)のように表わされる。この応力及びひずみをそれぞれ破壊

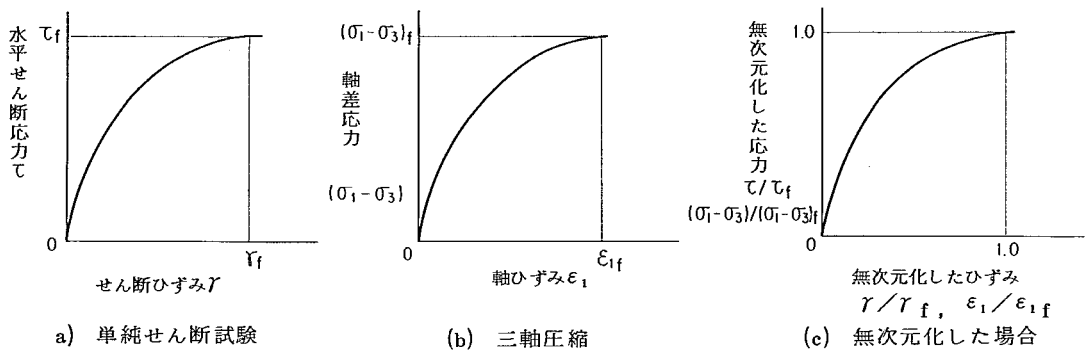


図-2.6 三軸圧縮試験及び単純せん断試験のモデル化

時の値で無次元化した場合、図-2.6(c)のように一致するものとする。応力～ひずみ関係は間げき水圧の発生特性により変化するが、このような一致が見られるように、間げき水圧が発生すると考えるのである。

このような前提の下にいくつかの考察を進める。単純せん断試験は上載圧 $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の圧密を、三軸圧縮試験は側圧 $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の圧密を行なうものとする。単純せん断試験及び三軸圧縮試験として圧密排水試験(CD)試験を行ない圧密排水強度 τ_{fCD} ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{fCD} を求める。単純せん断試験条件の内、初期せん断応力 $0.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の τ_{fCD} に対する割合を α とする。すなわち、

$$\alpha = \frac{0.4}{\tau_{fCD}} \quad (2.1)$$

となる。このような α 、すなわち初期せん断応力(これは排水状態で作用すると考えられる)と圧密排水強度との比を単純せん断試験と三軸試験で共通な値を考へて、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fCD}$ に α をかけた値を繰返し三軸試験における初期軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ とする。すなわち

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_s = \alpha (\sigma_1 - \sigma_3)_{fCD} \quad (2.2)$$

次に単純せん断試験と三軸圧縮試験における動的応力の等価性であるが、これも初期せん断応力の

場合と同様の考えによった。このために次のような試験を実施した。初期せん断応力がない場合を想定して、単純せん断試験と三軸圧縮試験とを圧密非排水条件で行なった。このようにして求められた両者の強度を τ_{fcu} 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fcu}$ とする。次に、初期せん断応力がある場合を想定して、単純せん断試験で 0.4 kg/cm^2 のせん断応力で排水せん断、又三軸圧縮試験で $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ の軸差応力で排水せん断した後、非排水条件でそれぞれせん断をする。このようにして求めた強度を τ_{fcdU} 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fcdU}$ とする。このようにして、単純せん断試験の動的応力 $0.3, 0.4, 0.5 \text{ kg/cm}^2$ と関連づけて表-2.3のように係数 β_i ($i=1\sim6$)を定める。三軸圧縮試験の場合についても、同様

表-2.3 応力比を決める係数 β の定義

	$\tau_s = 0$ の場合	$\tau_s = 0.4$ の場合
β_1	$\frac{0.3}{\tau_{fcu}}$	
β_2	$\frac{0.4}{\tau_{fcu}}$	
β_3	$\frac{0.5}{\tau_{fcu}}$	
β_4		$\frac{0.3}{\tau_{fcdU} - 0.4}$
β_5		$\frac{0.4}{\tau_{fcdU} - 0.4}$
β_6		$\frac{0.5}{\tau_{fcdU} - 0.4}$

の係数を定義する事ができ、この β_i が両者に共通なものとして、両試験の動的応力の当初の対応をつけた。CD強度、CU強度、CDU強度は試料によって異なり、したがって α と β の値も違ってくるが、以下に述べる予備試験で求めた α の値から求めた初期せん断応力の値を各動的せん断試験用の初期せん断応力とした。なお、予備試験用の試料の粒度分布は図-2.7に示すように各せん断試験用

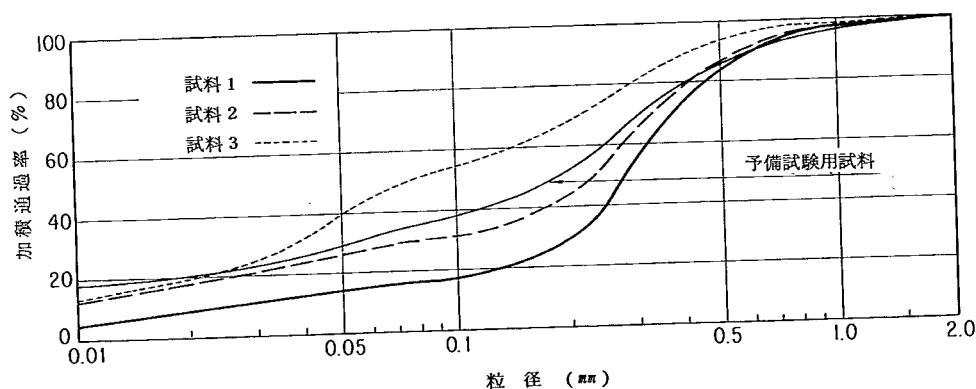


図-2.7 予備試験用試料と動的せん断用試料の粒度分布

の3種の試料の平均的な粒度分布をもつ。この予備試験用試料に対する試験結果は、表-2.4のよう

表-2.4 予備試験結果のまとめ

	単純せん断試験			三軸圧縮試験		
	記号	せん断強度 (kg/cm^2)	平均 (kg/cm^2)	記号	せん断強度 (kg/cm^2)	平均 (kg/cm^2)
圧密排水せん断 CD	τ_{fCD}	1.252	1.252	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{fCD}$	6.42	6.45
		1.252			6.47	
		1.267			6.26	
圧密非排水 せん断 CU	τ_{fCU}	1.179	1.177	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{fCU}$	3.573	4.092
		1.174			3.962	
					4.740	
圧密排水 非排水せん断 CDU	τ_{fCDU}	1.059	1.072	* $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fCDU}$	4.87	4.567
		1.084			4.60	
					4.23	

* 注 (2.1)式により $\alpha = 0.4 / 1.252 = 0.319$

(2.2)式により $(\sigma_1 - \sigma_3)_s = 0.319 \times 6.45 = 2.06 \text{ kg}/\text{cm}^2$

この軸差応力が排水載荷されている。

にまとめられる。この結果から、上に定義した α 、 β を求め、単純せん断試験条件を三軸圧縮試験条件に換算したものを表-2.5に示す。これは、図-2.8のように表わす事もできる(図-2.8, 実線)。

表-2.5 単純せん断試験及び三軸圧縮試験の応力条件

初期条件	β		単純せん断 $\tau_d (\text{kg}/\text{cm}^2)$	三軸圧縮 $\sigma_d (\text{kg}/\text{cm}^2)$
初せん断 期し	β_1	0.255	0.3	1.043
	β_2	0.340	0.4	1.391
	β_3	0.425	0.5	1.739
初せん断 あり	β_4	0.446	0.3	1.118
	β_5	0.595	0.4	1.492
	β_6	0.744	0.5	1.865

このような値を一つの目安にした。なお、図-2.8は静的な非排水せん断試験における間げき水圧の発生特性から、三軸圧縮と単純せん断における動的応力 τ_d と σ_d の等価関係を推測したものであるが、飽和砂において初期せん断がないときには、液状化特性として両試験法の相互比較がなされており、その結果、次のような事が言われている。

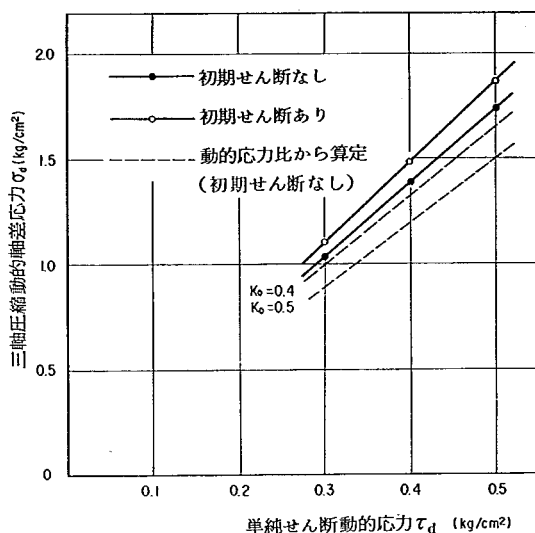


図 - 2.8 単純せん断試験及び三軸圧縮試験の応力条件

三軸圧縮と単純せん断による液状化強度は、最大動的せん断応力 τ_d と初期平均有効主応力 σ'_{m0} 比によって一義的に与えられる。すなわち、ある液状化回数に対する動的応力比 τ_d / σ'_{m0} は三軸と単純せん断で等しい。

三軸の場合

$$\tau_d = \sigma_d / 2, \sigma'_{m0} = \sigma'_{30}$$

単純せん断の場合

$$\tau_d = \tau_d, \sigma'_{m0} = (1 + 2K_0) \sigma'_{v0} / 3$$

$$\therefore \frac{\sigma_d}{2\sigma'_{30}} = \frac{3}{1+2K_0} \cdot \frac{\tau_d}{\sigma'_{v0}} \quad (2.3)$$

今 $\sigma'_{30} = \sigma'_{v0} (= 2.0 \text{ kg/cm}^2)$ であるから

$$\sigma_d = \frac{6}{1+2K_0} \tau_d \quad (2.4)$$

$K_0 = 0.4, 0.5$ と値を変えて (2.4) 式を計算してみたものを図 - 2.8 に記入して (図 - 2.8 破線) 静的試験結果から推測しこ関係と比較すると、静的試験結果からの推定式は若干三軸の動的応力を大きく与える。いずれにしても、これは実験的に検証すべきものである。

2-4 供試体の含水、応力条件

2-2 荷重条件の項で述べたようにコア部は水で飽和していると考えて初期せん断応力を想定した。実際にフィルダムを施工する場合には、重機による締固めが行われた後に貯水からの浸透があるわけでコア部は不飽和な過圧密状態にあると考えられる。しかし、本試験の結果を細粒分の少ない砂・レキの動的特性と比較する事を考えた場合、飽和度と過圧密比が異なると影響因子が多くなり比較が困難である。しかし、実際に締固め試験により最適含水比及び最大乾燥密度を求め(図-2.9)、締固め度で95%まで締固めた後に 2 kg/cm^2 で圧密したものと、正規圧密状態で 2 kg/cm^2 で圧密したものとは、圧密後の乾燥密度に余り差はない事が分った。この事から、このような締固めによって得られる試料は 2 kg/cm^2 の圧密圧に対して必ずしも過圧密になっていない事になる。したがって、結局、密度・応力条件等を次のように定めた。

飽和度 供試体作成後給水を行ない、できるだけ飽和度を高める。

応力条件 正規圧密、過圧密($\text{OCR}=1.5$)
過圧密試料の製作は次の通りである。予備圧密容器の中で(p.13参照) 2 kg/cm^2 で圧密した試料を上載圧又は側圧を 3 kg/cm^2 で圧密した後に、 2 kg/cm^2 に圧力を下げてリバウンドさせる方法をとった。

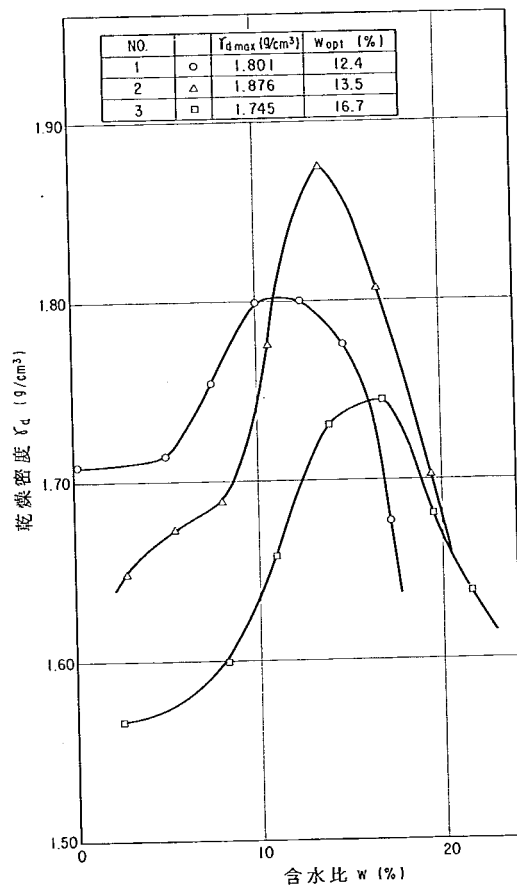


図-2.9 試料の締固め試験

3. 試験方法

本章では具体的な試料調製，予備圧密，供試体作成法，動的せん断試験機の機構，動的せん断試験の方法について述べる。

3-1 試料調製

既に2-1で述べたように，3種の異なった粒度の原材料を表-2.1に示すような乾燥重量配合比になるように水を加えて練り板の上で十分均一になるように混ぜ合わせた。

3-2 予備圧密と供試体作成

供試体作成にあたっては，上記のようにスラリー状にした試料を圧密させ成形可能なようにするために，図-3.1に示すような圧密槽の中で予備圧密を行ない，不攪乱試料として成形，セットを行

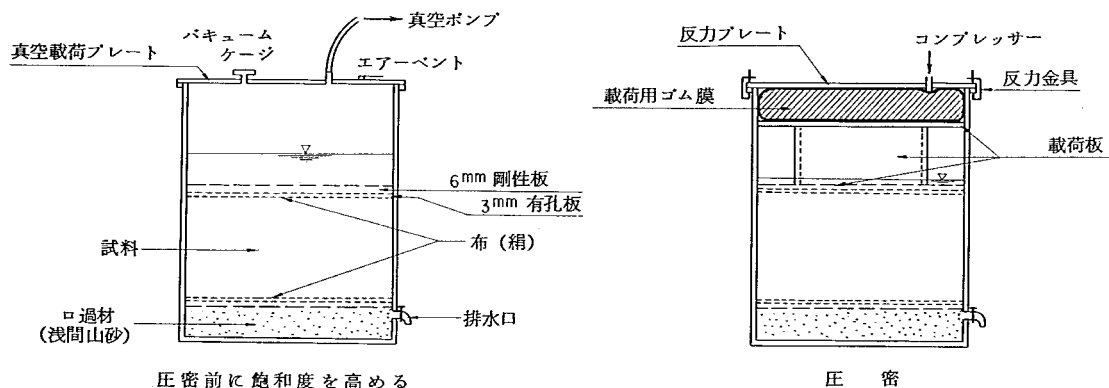


図-3.1 予備圧密槽の構造

なうという方法をとった。予備圧密は2日間程ではば終了した。試料は，三軸試験及び単純せん断試験用のコアに切り出し，ロウ付けを行って保存した。

3-3 動的せん断試験機

繰返し三軸圧縮試験機及び動的単純せん断試験機とも既に報告した資料²⁾にその仕様を述べてるので詳細は省略し，概要のみを述べる。

3-3-1 繰返し三軸圧縮試験機

繰返し三軸圧縮試験機は，直径50mm，高さ125mmの供試体を対象としたもので軸荷重載荷シリンドラの径が供試体径に等しく軸荷重と側圧を油圧サーボにより各々独立に載荷させる事が可能なものであり，正弦波波形等の動的載荷を行なう事ができる。今回の実験では軸荷重のみを正弦波

で繰返し載荷を行ない側圧は一定とした。等方圧密は軸荷重及び側圧のバランスをとりながら徐々に増加させる事によって行なう。

3-3-2 動的単純せん断試験機

動的単純せん断試験機は、直径70mm、高さ27mmの供試体を対象としたもので、その側方を0.2mmのピアノ線を0.5mmピッチで巻いて補強した厚さ0.5mmのゴムスリーブでおおわれるようにしてあるノルウェー型の静的単純せん断試験機を繰返し載荷用に改造したものである。側方変位がこのように拘束されているための上載荷重に対してK。圧密ができるとされている。実際には、供試体の過剰間げき水圧が増加するとゴムスリーブの端部のワイヤーで補強されていない部分とOリングの間が内外の圧力差によって膨脹し、供試体と非排水条件に保たないので、通常の使用法では圧力室の中で軸圧と等しい側圧で拘束する。

3-4 動的せん断試験の方法

3-4-1 繰返し三軸圧縮試験

砂供試体についての繰返し三軸圧縮試験の方法、特に供試体作製法は別の資料²⁾に述べたが、今回の試験の場合、既に述べたように予備圧密によって自立する供試体、いわば不攪乱土のせん断試験であり、供試体の作製法は全く異なる。供試体の成形以後の試験手順は以下のとおりである。

- (1) 供試体の成形、三軸室内へのセット
- (2) 非排水状態で側圧及び軸圧を等方状態を保つように徐々に上げていき、等方圧で 2 kg/cm^2 を作用させる。このとき、間げき水圧の増加量から、圧密前の間げき圧係数 B 値 B_0 を測定する。
- (3) 排水状態にする。
- (4) 初期せん断応力を加える場合は、30分間等方圧密をした後に排水状態で軸差応力を加える。これは、排水量から見て、この程度の時間で90～95%の圧密が終了する事と、さらに圧密・せん断に対する排水時間を相対的に短くするためである。両者を含めて、排水時間は24時間を原則とした。
- (5) 圧密終了後、非排水状態で等方圧を 0.5 kg/cm^2 に加え、圧密後の間げき圧係数 B_0 を測定する。
- (6) 等方圧を 2 kg/cm^2 にもどした後に、排水径路から 1 kg/cm^2 のバックプレッシャーを作用させる。
- (7) 非排水状態で動的な軸荷重を荷重制御、1Hzの正弦波形で作用させる。
- (8) 軸荷重、軸ひずみ、間げき水圧を測定し、データレコーダ、ペンレコーダーに記録する。
- (9) 過圧密試料の場合には、三軸室内で 3 kg/cm^2 で圧密した後、圧密圧を 2 kg/cm^2 に下げ、リバウンドさせてから上記の手順に従って試験を行なった。

3-4-2 動的単純せん断試験

動的単純せん断試験の手順は、三軸試験の場合とはほぼ同様であり、詳細は省略する。

4. 試験結果及びその考察

4-1 試料の性質

試験に用いる試料の粒度分布は、図-2.3のようなものを予定し、図-2.2に示した原材料を表-2.1の配合比に従って混合したが、実際に得られた試料の粒度分布は若干異なったものとなった。この結果を図-4.1に示す。

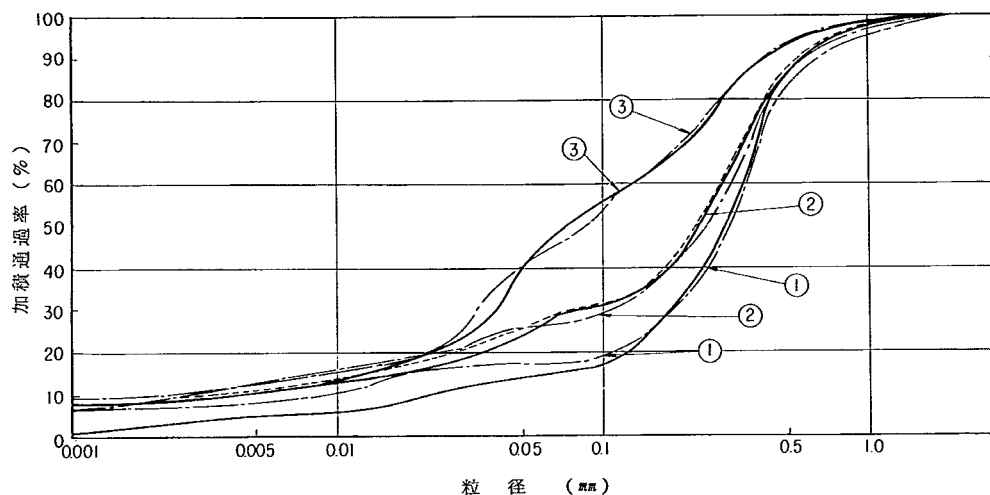


図-4.1 試料の粒径加積曲線

4-2 静的せん断試験の結果

3種の調製した試料について、静的な三軸圧縮試験及び単純せん断試験の結果を、表-4.1、図-4.2、4.3に示す。但し、三軸圧縮試験はひずみ制御で、単純せん断試験は応力制御で行なった。又、

表-4.1 静的試験の結果

	三 軸 圧 縮				単 純 せん 断			
	試 料	№ 1	№ 2	№ 3	試 料	№ 1	№ 2	№ 3
CU	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FCU}$ (kg/cm ²)	6.84	4.02	4.65	τ_{FCU} (kg/cm ²)	1.28	1.19	1.17
	$\phi' (^\circ)$	37.4	38.0	37.8	$\phi' (^\circ)$	32.2	31.0	27.5
CDU	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FCU}$ (kg/cm ²)	7.22	5.00	5.47	τ_{FCU} (kg/cm ²)	1.63	1.23	1.26
	$\phi' (^\circ)$	38.0	37.4	37.5	$\phi' (^\circ)$	34.2	31.0	32.2

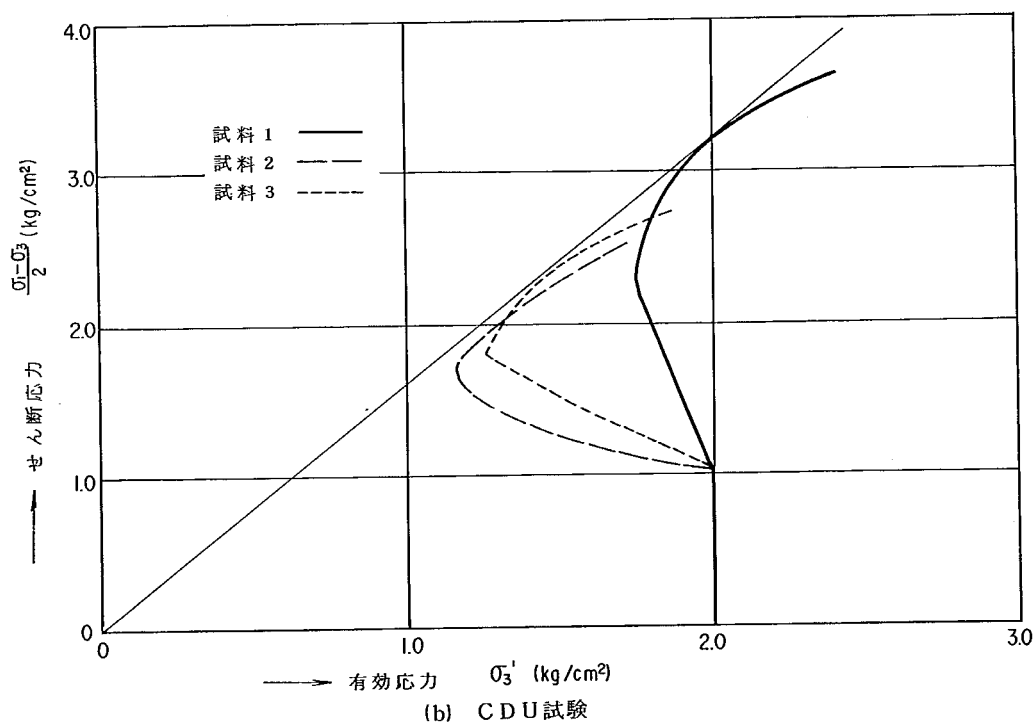
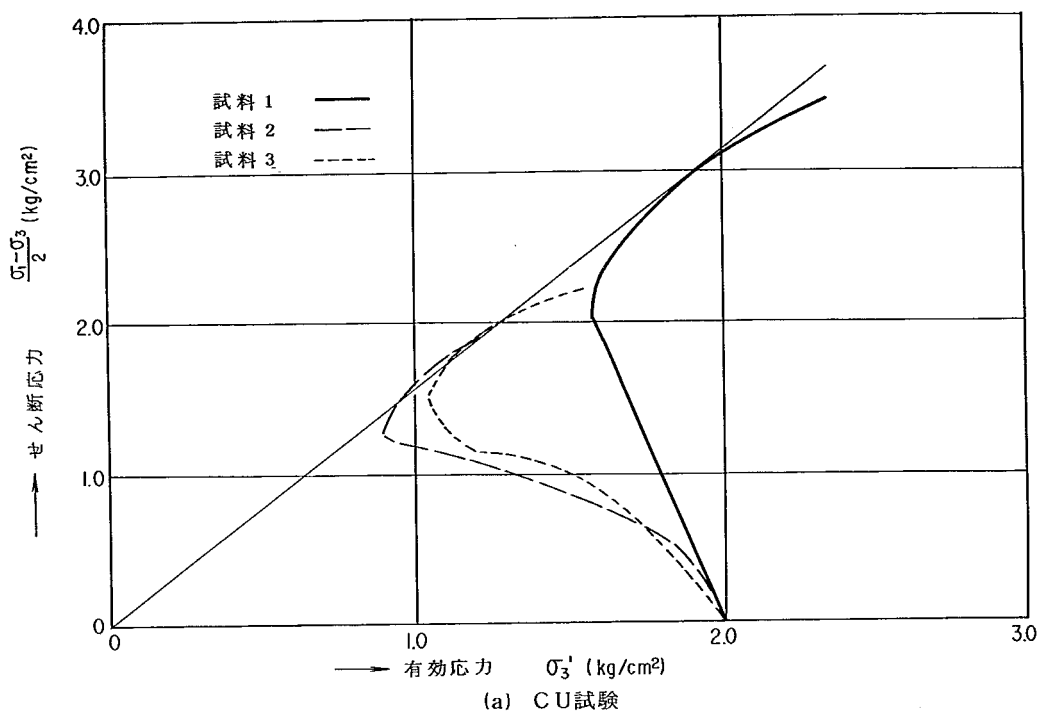


図-4.2 三軸圧縮試験

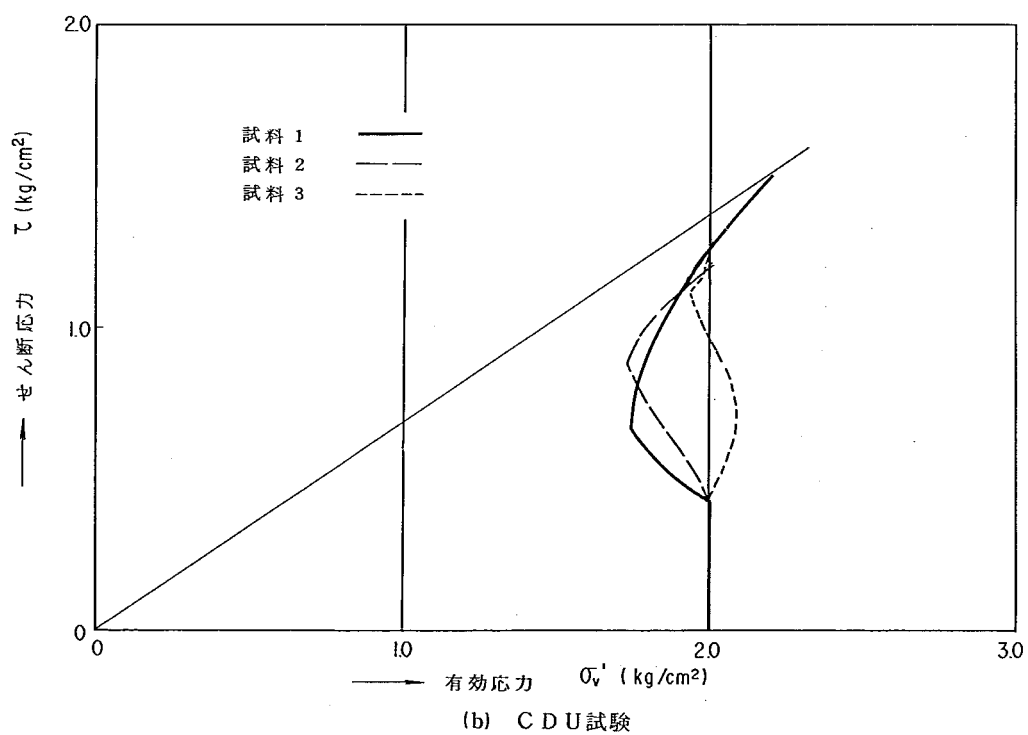
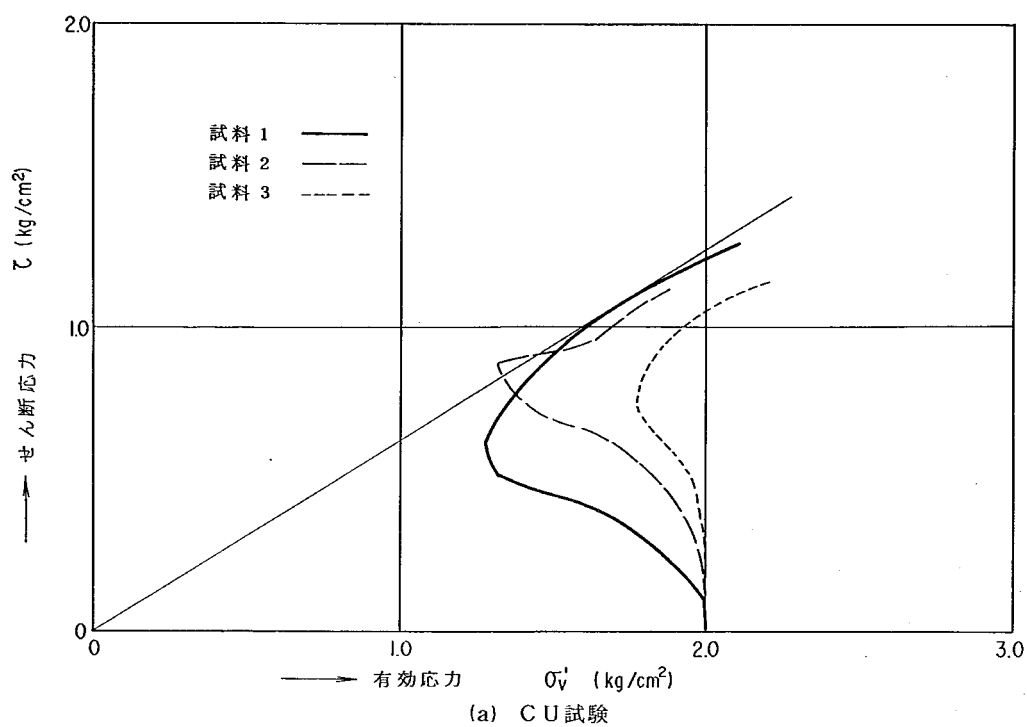


図-4.3 単純せん断試験

これらの静的試験では 1 kg/cm^2 のバックプレッシャーを加えている。図には示さなかったが、応力制御によった単純せん断試験の場合、応力・ひずみ関係も滑らかなものとはいえず、ひずみ制御で行なった三軸試験結果と比べる事は余り意味がないと思われるが、一応内部摩擦角は次式により求めた。

三軸圧縮の場合

$$\phi' = \sin^{-1} \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \quad (4.1)$$

単純せん断の場合

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{\tau}{\sigma_v'} \quad (4.2)$$

(応力はそれぞれ破壊時の値)

このように整理した値を表-4.1 からみると、三軸圧試験の場合、試料 1 の強度は C U 及び CDU とも試料 2 や 3 よりもかなり大きい、有効応力で表わした内部摩擦角はほとんど一定で、結局非排水せん断時の間げき水圧の発生特性の差に帰着する。三軸圧縮と単純せん断の ϕ' を比べると単純せん断の方が小さいが、(4.2) 式で求める ϕ' がモール円を描いて求める (4.1) 式の ϕ' と同等であるかどうかはまだ明確ではないと思われる。単純せん断の場合にモール円を描き強度定数等を求める考えには、Duncan³⁾ 小田等^{4),5)} の提案があり、このように静的な挙動についても、三軸圧縮と単純せん断の間の相互関係は明確なものとなっていない現状のようである。

4-3 動的せん断試験の結果

動的せん断試験の実験系列は表-2.6 に既に示した。

4-3-1 繰返し三軸圧縮試験

繰返し三軸圧縮試験では細粒分の影響、過圧密の影響、初期せん断の影響を調べた事になるが、まず初期せん断のない場合の結果を述べ、次いで初期せん断のある場合の結果を述べる。

(1) 初期せん断応力がない場合

初期せん断応力がない場合における測定結果の典型的例を図-4.4 に示す。このように、繰返し載荷とともに過剰間げき水圧がある振幅をもちながら、平均的には累積してゆき、これがある値以上になると、軸ひずみ振幅が急増する。又、これよりも若干回数遅れて荷重制御でありながら、荷重振幅が低下し所定の値を保てなくなる。その後の載荷により、過剰間げき水圧はさらに徐々に増加し、過剰間げき水圧の平均値は、初期有効側圧にはほぼ等しくなる。この性状は、いわゆる砂の液状化現象に相当するものである。但し、この場合に軸ひずみ振幅の増大現象は砂の場合に比べて顕著でない。以上のような性状は、正現圧密・過圧密とも同じである。この過程における応力・ひずみ関係を XY レコーダで描かせた結果例を図-4.5 に示す。このように、繰返し載荷とともに全体としては軟化傾向を示している。ただし、応力の大きいところでは逆に硬化傾向をも示している。このような特性は、1 周期中せん断に伴う間げき水圧発生特性によるものと

三軸試験 実験No.2の4. 過圧密比1.0 初期せん断無

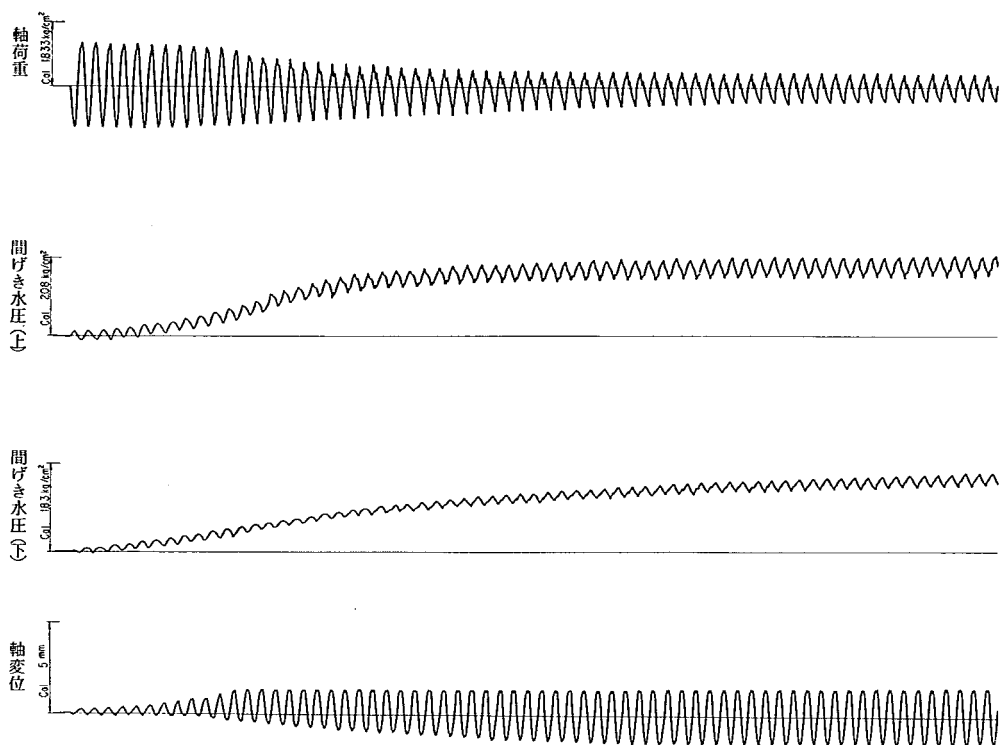


図-4.4 繰返し三軸圧縮試験の結果例（初期せん断無）

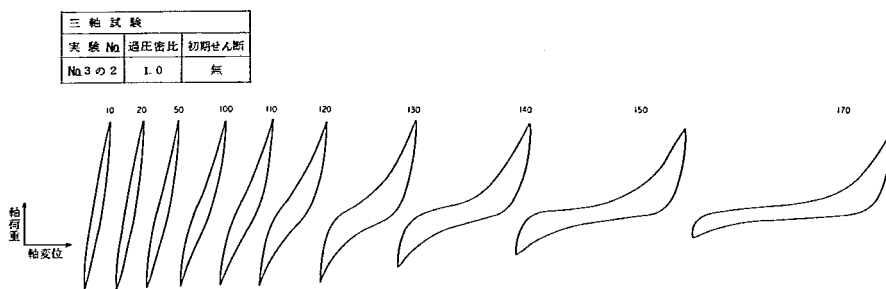


図-4.5 繰返し三軸圧縮試験の結果例（応力・ひずみ関係，初期せん断無）

思われるが、今後徹視的に見ていく必要があると思われる。結局、この場合には軸ひずみ振幅の振幅が急増する点でもって初期液状化と見なし、結果を整理した。この結果は図-4.6のように

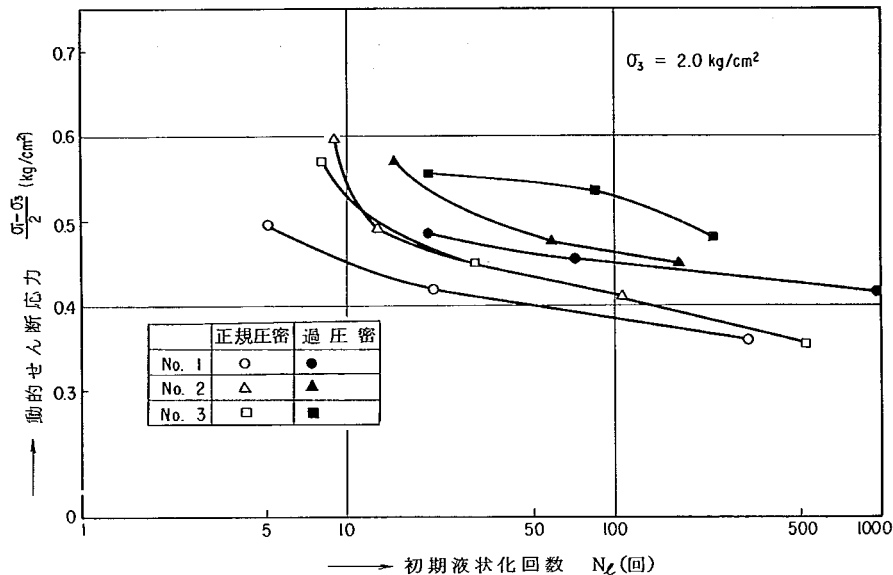


図-4.6 動的せん断応力と初期液状化回数(繰返し三軸試験)

まとめられる。この図から、同じ拘束圧を受けた正規圧密の状態では、細粒分含有率の高い試料ほど液状化強度は高い事が分る。又、過圧密土の方が強度は高い。この場合に注意しておきたいのは、この強度の比較は、同一の間げき比や相対密度によってなされたものではないという点であり、同一の調整法、加圧によって作られた試料供試体の比較をしているという点である。この結果を、初期液状化回数20回の時の動的応力と細粒分含有率との関係で見たものを図4.7, 表-4.2に示す。細粒分の最も少ない試料No.1(細粒分含有率16%)の初期液状化回数20回における動的強度を1とすると、正規圧密状態で試料No.2(細粒分含有率30%)では1.11, 試料No.3(細粒分含有率50%)では1.12となり、過圧密状態では過圧密の試料No.1に対して、試料No.2では1.10, 試料No.3では1.14となり、いずれも10%程度の強度増加となった。試料2と3の間ではほとんど差が認められず、細粒分含有率30%以下の範囲で顕著である事になる。ここで、各試料の静的非排水せん断特性から見た場合、試料No.1はNo.2, 3に比べて間げき水圧が発生しにくく、試料No.2, 3はその特性の差は少ない(図-4.2(a)参照)。ここに得られた動的特性は、逆に静的には間げき水圧が発生しにくい細粒分の少ない試料No.1が、繰返し载荷に対しては間げき水圧が累積しやすい事を示している事になる。このような静的非排水せん断特性と動的な非排水せん断特性との関係については、もう少し実験データの集積が必要である。したがって、図-2.8に見られるような静的せん断特性を媒介した三軸状態と単純せん断状態の動的応

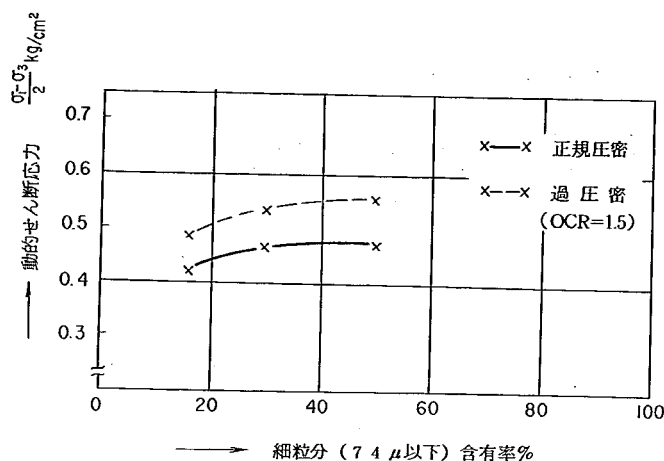


図-4.7 初期液状化回数 $N_L = 20$ 回の時の動的せん断応力
(繰返し三軸圧縮試験)

表-4.2 細粒分含有率と液状化強度

(a) 正規圧密

	細粒分含有率%	※ kg/cm ² 正規圧密試料強さ	強さの比較
№ 1	16	0.42	1
№ 2	30	0.465	1.11
№ 3	50	0.47	1.12

(b) 過圧密

	細粒分含有率%	※ 過圧密試料強さ	強さの比較
№ 1	16	0.49	1
№ 2	30	1.54	1.10
№ 3	50	0.56	1.14

※(a)(b)とも、繰返し回数20回の時の動的せん断応力 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ (kg/cm²)

力の等価性の評価法は、異なった試料については適用しがたく、せいぜい同一試料について異なった試験法間へ適用すべきものという事になる。次に過圧密試料(過圧密比1.5)は、正規圧密により強度が大きい、両者の強度の比較は、図-4.6又は表-4.3によってなす事ができる。表-4.3によると、№1~3の試料について、過圧密による強度は1.17~1.19倍に増加した。

三軸試験 実験No.1の7過圧密比1.0 初期せん断有

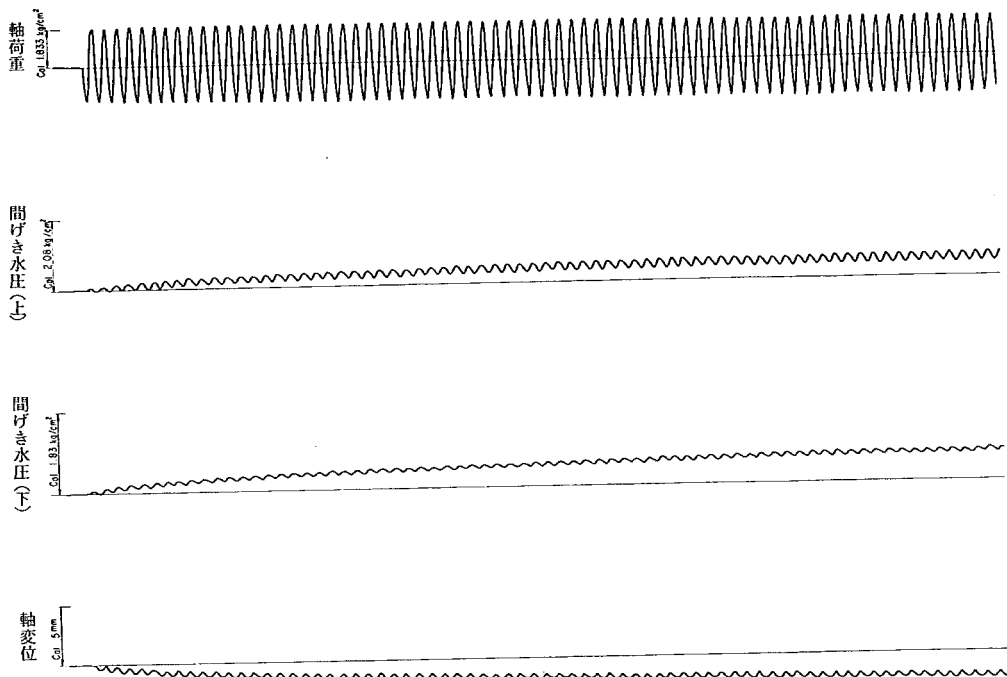


図-4.8 繰返し三軸圧縮試験の結課例(初期せん断有)

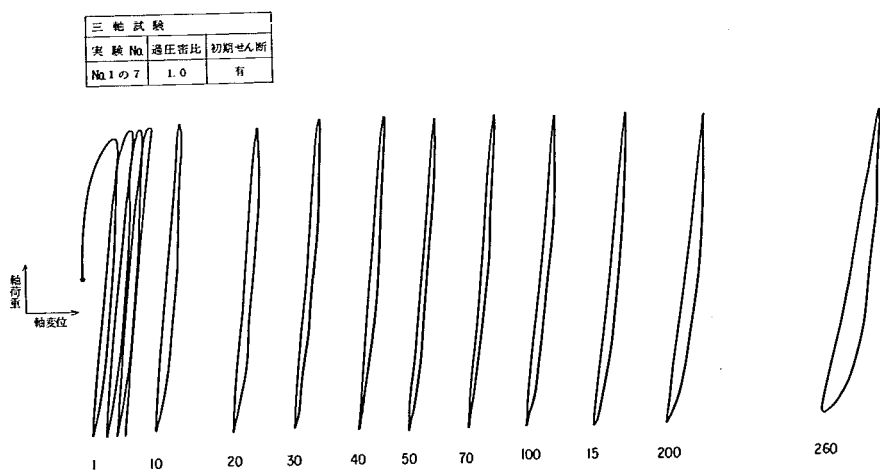


図-4.9 繰返し三軸圧縮試験の結果例(応力・ひずみ関係, 初期せん断有)

表- 4. 3 過圧密の液状化強さにおよぼす影響

	細 粒 分 含有率%	正規圧密試料 強さ (kg/cm ²)	過 圧 密 試 料 強 さ (kg/cm ²)	正規圧密試料の強度を 1とした時の過圧密強さ (kg/cm ²)
№ 1	1 6	0. 4 2	0. 4 9	1. 1 7
№ 2	3 0	0. 4 6 5	0. 5 4	1. 1 6
№ 3	5 0	0. 4 7	0. 5 6	1. 1 9

但し、強度は初期液状化回数 2 0 回における動的せん断応力 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ (kg/cm²)

(2) 初期せん断応力がある場合

3-4-1に述べたように、排水状態で初期せん断応力（軸差応力）を载荷した供試体に動的軸荷重を与えた試験の測定結果の典型的例を図-4.8に示す。この図に見られるように、初期せん断応力が作用した状態では、繰返し载荷とともに過剰間げき水圧は徐々に累積してゆき、又、軸ひずみも又圧縮側に累積してゆく。この場合、軸ひずみ振幅は余り変化せず、過剰間げき水圧の増加現象もある限度以上は進行しない。この過程に応力～ひずみ関係をXYレコーダで描かせた結果例を図-4.9に示す。このように、この場合には繰返し荷重を加えても軟化傾向を示さない。このように、初期せん断応力がある場合には、軸ひずみの塑性的な累積量でもって、破壊基準とする事ができると思われるが、本試験に実施した応力条件では、軸ひずみは比較的小さく、比較基準として0.5%をとって整理した。この結果は図-4.10のようである。この結果から見ると、強度は試料№1, 3, 2の順になった。

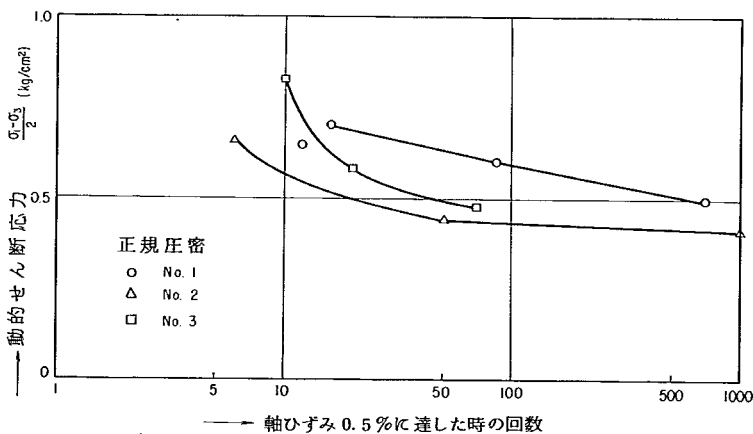


図- 4. 1 0 動的せん断応力と塑性ひずみ 0. 5 %に達する回数
(繰返し三軸圧縮試験)

単純せん断試験 実験No 1 の 1 過圧密比 1.0 初期せん断無

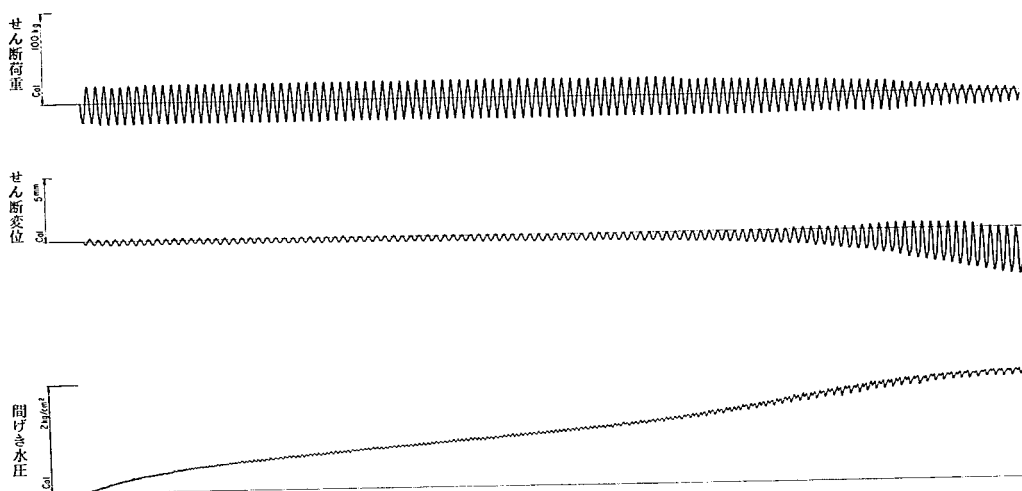


図 - 4.1 1 動的単純せん断試験の結果例（初期せん断無）

単純せん断試験		
実験 No.	過圧密比	初期せん断
No 3 の 1	1.0	無

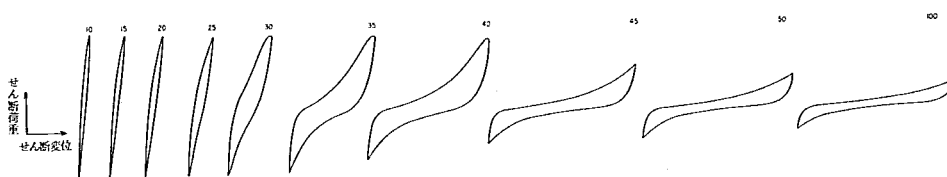


図 - 4.1 2 動的単純せん断試験の結果例（応力・ひずみ関係，初期せん断無）

4-3-2 動的単純せん断試験

(1) 初期せん断応力がない場合

この場合の測定結果の例は図-4.1.1, 4.1.2に示すようなものである。この現象の特徴は、繰返し三軸圧縮試験の初期せん断応力がない場合(4-3-1(1))について述べた事と同様であり、いわゆる液状化現象に至る。液状化強度と載荷回数の関係を図-4.1.3に示す。又、初期液状化回数

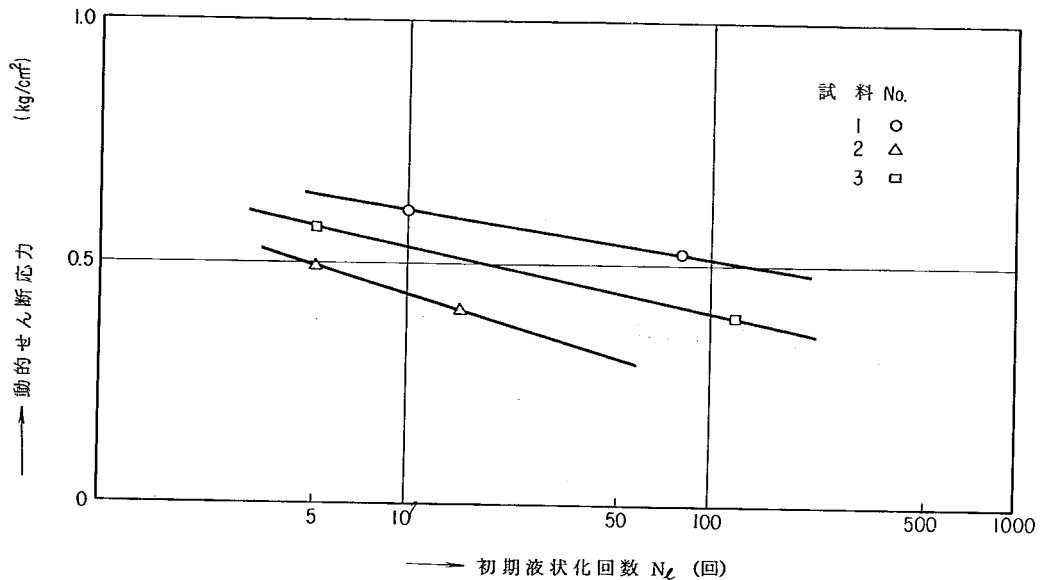


図-4.1.3 動的せん断応力と初期液状化回数
(動的単純せん断試験)

20回の液状化強度と細粒分含有率の関係を図-4.1.4に示す。これらの図から、細粒分含有率が最も少ない試料No.1の強度が最も高いという結果になり、繰返し三軸圧縮試験の結果とは異なる

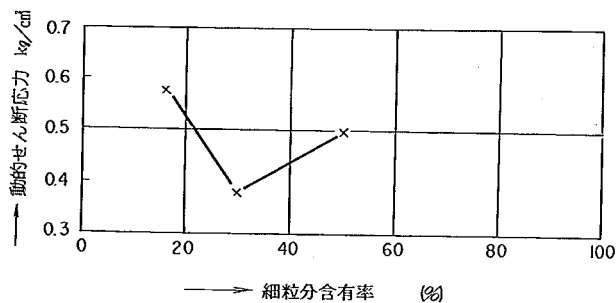


図-4.1.4 初期液状化回数 $N_L=20$ 回の時の動的せん断応力
(動的単純せん断試験)

単純せん断試験 実験No 3 の 4. 過圧密比 1.0 初期せん断有

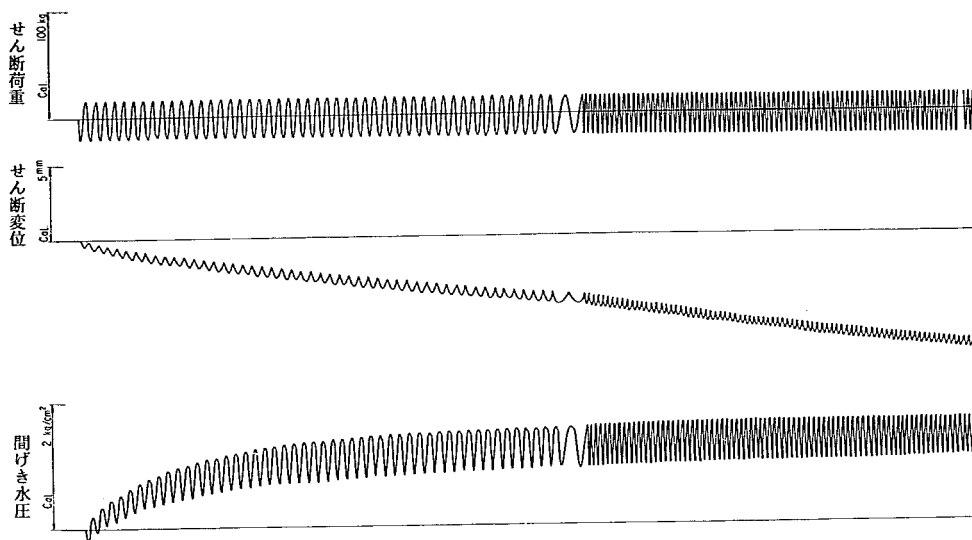


図 - 4.15 動的単純せん断試験の結果例（初期せん断有）

単純せん断試験		
実 験 No	過圧密比	初期せん断
No 2 の 3	1.0	有

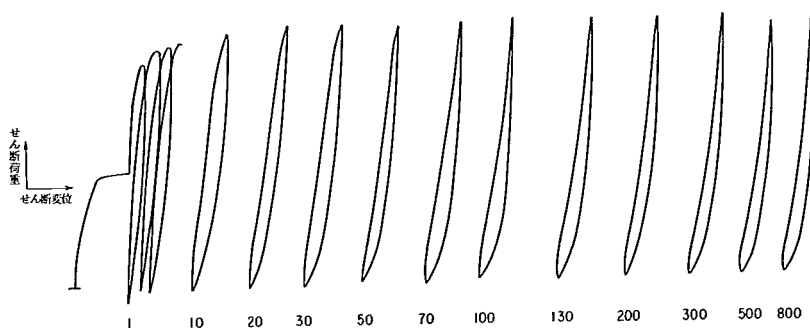


図 - 4.16 動的単純せん断試験の結果例（応力・ひずみ関係，初期せん断有）

った結果を示している。この原因としては、この3-3-2で述べた動的単純せん断試験機の構造の影響が考えられる。すなわち、この動的単純せん断試験機では、そのゴムスリーブのワイヤによって補強されていない部分は供試体内部の過剰間げき水圧が増加した場合に、内外の圧力差により膨脹し試験供試体について非排水状態が保持しえない。そのため、その影響を軽減するため、3-3-2で述べたように供試体を原理的には不要であるはずの圧力室に入れ、上載圧に等しい側圧を作用させるようにしている。しかし、このような影響は、程度の差はあれ、ゴムスリーブ内外の圧力差に基き生ずるものと思われる。このような供試体の体積一定条件が保たれない結果として、供試体内部の間げき水圧低下現象が生じ、ひいては強度増加が生ずる影響度は、供試体の透水性に依存するであろう。したがって、今回の試料については、細粒分が最も少ない透水性の大きい試料No.1の強度が相対的に大きく出たものと推定される。この他に、供試体の寸法差に基く間げき比の違いの影響等も考えられたが、後述するようにその影響は小さいと思われる。

(2) 初期せん断がある場合

この場合の測定結果の例は図-4.15, 16に示すようなものであり、過剰間げき水圧の増大現象がある限界で止り、塑性せん断ひずみの累積が生ずる事は、繰返し三軸圧縮試験の初期せん断応力がある場合(4-3-1(2))において述べた事と同様である。三軸圧縮試験の場合に採用した軸ひずみの基準値0.5%は、せん断ひずみ0.75%に相当すると考え、この値に対して動的強度を整理したものが図-4.17である。

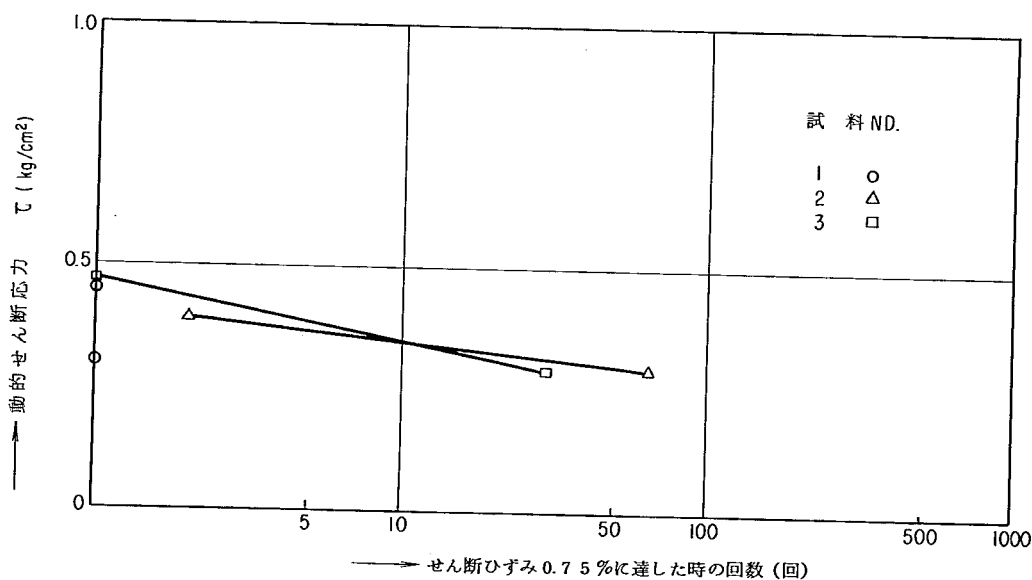


図-4.17 動的せん断応力とせん断ひずみ 0.75% に達する回数
(動的単純せん断試験)

4-3-3 試験供試体の間げき比及び間げき圧係数

以上は、各試料の実験条件（供試体作成方法、実験手順）が同一であることから細粒分含有率の異なる試料の動的強度を比較したものであるが、試料の間げき比にはかなりのばらつきがある。表-4.4は各実験の間げき比、間げき圧係数をまとめたものである。この中で圧密前の間げき比 e_o 。

表-4.4 試験供試体の間げき比及び間げき圧係数

(a) 初期せん断応力がない場合

(b) 初期せん断応力がある場合

(三軸圧縮試験) $\sigma_1 - \sigma_3 = 2.06 \text{ kg/cm}^2$

(単純せん断試験) $\tau = 0.4 \text{ kg/cm}^2$

		試 料 実 験		e _o	e _c	B _o	B _c
繰返し三軸圧縮試験	正 規 圧 密	No. 1	1	0.571	0.478	1.0	0.1
			4	0.573	0.471	0.6	0.13
			5	0.579	0.505	0.87	0.06
		No. 2	4	0.655	0.544	1.0	0.1
			5	0.641	0.502	1.0	0.47
			6	0.638	0.484	1.0	0.28
		No. 3	1	0.703	0.596	1.0	0.15
			2	0.711	0.564	1.0	0.15
			3	0.775	0.524	1.0	0.15
	過 圧 密	No. 1	1	0.560	0.468	1.0	0.13
			2	0.594	0.516	1.0	0.05
			3	0.586	0.510	1.0	0.07
		No. 2	1	0.598	0.470	1.0	0.18
			2	0.626	0.479	1.0	0.14
			3	0.616	0.470	1.0	0.07
		No. 3	1	0.736	0.637	1.0	0.15
			2	0.737	0.603	1.0	0.15
			3	0.720	0.583	1.0	0.10
動的単純せん断試験	正 規 圧 密	No. 1	1	0.587	0.431	0.98	0.10
			2	0.560	0.460	1.0	0.22
		No. 2	1	0.617	0.521	0.93	0.34
			2	0.583	0.463	1.0	0.44
		No. 3	1	0.684	0.595	0.75	0.24
			2	0.682	0.578	0.90	0.27

		試料実験		e _o	e _c	B _o	B _c
繰返し三軸圧縮試験	正規圧密	No. 1	8	0.500	0.478	1.0	0.11
			9	0.497	0.456	0.94	0.06
			10	0.537	0.453	1.0	0.08
		No. 2	7	0.633	0.454	1.0	0.13
			8	0.611	0.488	1.0	0.13
			10	0.624	0.500	1.0	0.26
		No. 3	5	0.706	0.565	1.0	0.15
			6	0.729	0.662	0.92	0.15
			7	0.723	0.577	1.0	0.25
動的単純せん断試験	正規	No. 1	3	0.607	0.553	1.0	0.12
			4	0.455	0.303	1.0	0.12
	圧	No. 2	3	0.723	0.602	1.0	0.28
			4	0.625	0.451	1.0	0.22
	密	No. 3	3	0.669	0.534	1.0	0.24
			4	0.686	0.555	1.0	0.38

e_o, e_c 圧密前後の間げき比

B_o, B_c 圧密前後の間げき水圧係数

及び圧密後の間げき e_c を各試料について平均し、細粒分含有率で比較したものを図-4.18に示した。図-4.18から平均間げき比 e_o は試料1で、 $e_o = 0.58$ 、試料2で $e_o = 0.62$ 、試料

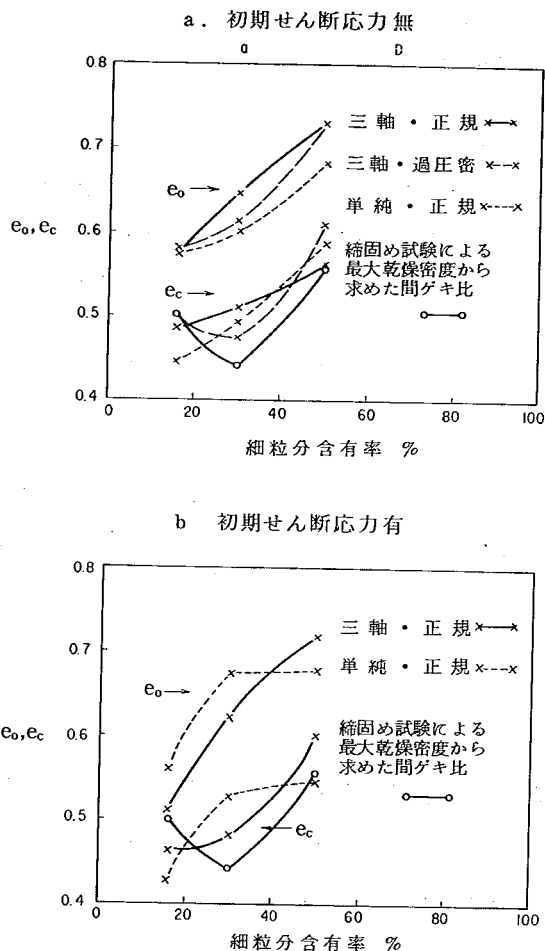


図-4.18 圧密前後の間ゲキ e_o, e_c と細粒分含有率

3で $e_o = 0.72$ となり細粒分含有率が高い程、間げき比が大きくなっていることがわかった。三軸圧縮試験の場合と単純せん断試験の場合の圧密前間げき比を比較した場合、若干差があるものが見られるが、同じ三軸圧縮試験の場合のみをとってもばらつきが見られ、両試験法の供試体の間げき比の間に有意な差があったことは言えない。

次に、間げき水圧係数 B 値について考察を加える。圧密前の B_o にはほぼ1であるが、圧密後の B_c は、かなり低くまたバラツキがある。三軸試験ではほとんどが $B_c = 0.1$ 前後であった。また、三軸試験の B_o 値より単純せん断試験の B_c 値が高いが、これはバックプレッシャー 1 kg/cm^2 を作用

させた後にB値の測定を行なったためであろう。単純せん断試験の B_c 値にもバラツキがみられるが、およそ $B_c = 0.3$ 前後で三軸試験でも同程度のB値が達成されているはずである。このうち三軸圧縮試験で初期せん断応力を載荷した場合の試料1の B_c 値が試料2及び試料3に較べて少し低い、これはこの条件において試料1の強度が高くなった原因の1つであろう(図-4.6参照)。

4-3-4 繰返し三軸圧縮試験と動的単純せん断試験の比較

本試験の計画段階においては、現場とのシミュレーションの度合いがよい単純せん断試験と繰返し三軸圧縮試験の間の等価な応力条件について考察を行ない、等価な初期せん断応力の関係や、等価な動的応力を与える関係(端的には、図-2.8)を得た。実際の試験においては、動的な応力は必ずしも厳密な対応をつけて与えたものではないが、ここで両試験の結果から逆に等価と思われる動的応力条件の関係を求めてみよう。具体的には、図-4.5と図-4.10において、等しい初期液状化回数に対応する動的応力を求めて、図-2.8のように比べてみるのである。この結果は図-4.19のようになったが、図-2.8と比較してははるかに小さい三軸応力を与える。言い換えれば、

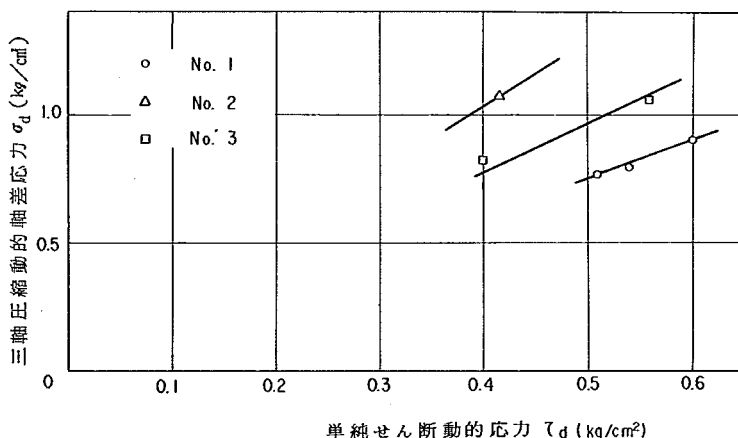


図-4.19 単純せん断試験及び三軸圧縮試験の応力比較

図-2.8において K_0 をより大きくした傾向に近い。この事は、単純せん断試験において補強ゴムスリーブの外側から作用させる側圧により、供試体の応力条件が等方に近くなっている事を示すものかもしれない。このような事は、図-4.5, 4.10をまとめた図-4.20によっても推察される。通常はこのような整理によった場合には、三軸試験結果と単純せん断試験結果は前者が約1.5倍ほど大きい液状化強度を与えるといわれているが、本試験の結果はそうとはならなかった。今後、このようなノルウェー式の単純せん断試験機において側圧を作用させる事の物理的意味を明確にする必要があると考える。

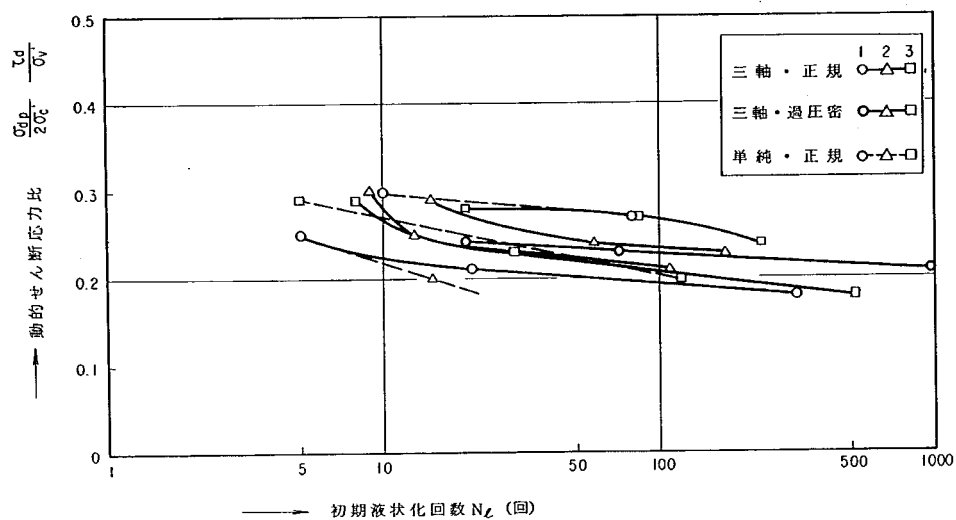


図-4.20 繰返し三軸圧縮試験及び動的単純せん断試験
初期せん断応力無

5. 結 論

本試験はフィルダムのコア材として想定される粒度を考慮して定めた3種の粒度分布を持つ砂粒土の動的せん断試験である。試料は、供試体の径から最大粒径を2mmに抑えて細粒分が相対的に多い粒度分布であった。この結果として砂粒土の動的せん断特性に細粒分(74 μ 以下)の影響を調べたことになる。本試験の結果得られた事は以下のとおりである。

- (1) 細粒分の増大(16~51%)によって、動的強度は10%程度増加した。
- (2) 過圧密比1.5によって、動的強度は平均17%増加した。
- (3) 貯水によってコア部に生ずるであろう初期せん断により動的強度はかなり増加する。初期せん断応力が相対的に大きいときには、液状化破壊は生じない。
- (4) 静的非排水せん断の試験から推定した単純せん断試験と三軸圧縮試験の等価関係は、砂について従来言われている関係と近い関係を与える。
- (5) しかし、実際に得られた単純せん断試験の結果と三軸試験の関係とは、(4)の関係によっては説明できなかった。むしろ、単純せん断試験機内部の応力状態がK₀応力状態ではなく等方応力状態に近いものであろう事を推定させる。
- (6) 結論的に言えば、このような動的せん断特性を求める上で、現在のところ単純せん断試験機より三軸圧縮試験機の方が優れているように思われる。又、コア材の動的強度を考える上で、初期応力状態を正確に把握する事は重要である。

6. 参考文献

- 1) 建設省河川局開発課, 建設省土木研究所, フィルダムの設計と施工に関する研究, 第28回建設省技術研究会
- 2) 沢田, 古賀他 : 砂の繰返しせん断特性試験報告, 土木研究所資料1218号
- 3) Duncan, J.M., etc : Behavior of Soils in Simple Shear Tests, 第7回 ICSMFE, 1969
- 4) 小田, 小西 : 粒状体のせん断における主応力軸の方向について, 第9回土質工学研究発表会
- 5) 落合 : 直接せん断試験における砂の挙動, 土質工学会論文報告集, Vol. 15, №4, 1975