

粘性土の動的強度に関する研究

奥村 哲夫・大根 義男

Study on Dynamic Shear Strength of Cohesive Soils

Tetsuo OKUMURA and Yoshio OHNE

近年、大規模な盛土構造物が各所で盛んに計画され、建設されているが、その耐震性を検討する場合、まず構築材料の動的性質を明らかにしておく必要がある。この報告は、当研究室で試作した動的一面せん断試験機を用い、特に粘性土について実験を行なった結果に関するものである。そして、実験結果に基づいて粘性土の動的強度特性に対して支配的であると考えられる速度効果、くり返し効果および初期負荷せん断応力の影響などについて議論したものである。

1. はじめに

盛土構造物の地震時の安定性を検討する場合にはその構造物を形成している土の動的性質を把握する必要がある。

最近、フィルダムのような大規模な土質構造物が盛んに建設されるようになった。このような建設計画と相まって動態時の土の動的性質とか実構造物の振動特性の調査等耐震工学に関する研究が各研究機関で盛んに行なわれるようになった。

土の動的性質のなかで強度特性に関する研究は以前から行なわれており、今日までに幾多の問題が解明されている。例えば、飽和砂質地盤の地震時の挙動については動的試験機を使った室内試験によって液状化現象の基本的な性質が解明された。一方、粘性土においてもその動的強度はせん断速度によって異なった値を示すというような、いわゆる速度効果の影響などが明らかにされている。

しかし、粘性土の動的強度特性については砂質土に関するほどその特性が解明されていない。これは静的な強度特性においてもうかがわれるように微細な粘土粒子そのものが強度に対して複雑に影響を及ぼしていること、さらに、载荷中に発生する間げき水圧を十分な精度で測定することが困難であること、また、土の動的強度を測定する場合、対象となる土構造物の形状や初期応力状態が異なること、振動中の外力が種々変化することなどにより実験の方法が画一的でないことなどによるものと考えられる。

本研究は粘性土の動的強度特性を調べることを目的と

して動的一面せん断試験を実施しその結果について考察したもので、特に粘性土の動的強度特性に影響を及ぼすと考えられる諸要因、すなわち、速度効果、くり返し効果および初期負荷せん断応力について調べ論議し、さらに3種類の载荷方式で実験を行ないこの相違による影響を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本実験に用いた一面せん断試験装置の概略を図1に示す。この装置は鉛直および水平方向の応力または変位を制御して地震時の土の動的性質を調べる目的で当研究室で昭和42年に試作したものである。

せん断箱(図中④および⑤)は通常の静的せん断試験に用いられているものと同種であり、リングせん断とかSeed H.B.他によって開発された装置とはその機構を異にしている。また、上下せん断箱の間には0.5mm程度のすき間があり、さらにせん断時に移動する下部せん断箱はボールベアリングの上に置かれ、また上部せん断箱もローラーで支持されていることからせん断箱の摩擦は殆んど無視できる機構となっている。

载荷方式は油圧発生装置から送られた油圧をサーボ弁を介し電氣的に制御して供試体に一定の荷重または変位を与えることのできる油圧サーボ方式である。従って、任意波形の応力制御、ひずみ制御が可能である。また、ポテンシオメーターと発振器を併用することにより、一定ひずみ速度の静的载荷に発振器から出力された振動波形を組み合わせた方式による実験も可能である。

(2) 実験方法

図2は今回行なった実験の載荷方式の種類を模式的に示したものである。各々の実験方法および実験条件を以下に示す。

(a) 実験A (静的載荷とくり返し載荷の組合せ)

この実験は鉛直応力一定の条件でひずみ速度を1.0%/minに保つ通常の変位制御方式の静的載荷に正弦波形による一定のくり返しせん断応力振幅を組合わせて供試体に動的応力を与えるものである。

鉛直応力 σ_v は1.0, 2.0および3.0kg/cm²、振動数 f は0.5, 2.0および5.0Hz、くり返しせん断応力振幅(両振幅) $\Delta\tau_d$ は静的試験の破壊強度 τ_{sf} の10, 20および30%として行なった。

(b) 実験B (静的せん断—静的載荷とくり返し載荷の組合せ)

盛土斜面付近の土は常時せん断応力(初期負荷せん断応力)を受けている。この応力状態をシミュレートしたのがこの実験である。

実験はまず、初期負荷せん断応力 τ_{si} を静的破壊強度 τ_{sf} の50%の値まで静的試験と同一の条件で供試体を与える。つぎに実験Aと同様にひずみ速度1.0%/minの静的載荷に振動振幅一定のくり返しせん断応力を組み合わせた荷重を供試体を与える。

くり返し応力の振動数は2.0Hzの1種類である。また鉛直応力およびくり返し応力振幅の大きさは実験Aと同じである。

(c) 実験C (静的せん断—くり返し載荷)

実験の方法は、まず実験Bと同じ方法で初期負荷せん

断応力 τ_{si} を供試体に与える。この後、図2・3に示すごとく任意の大きさのくり返し応力振幅 $\Delta\tau_d$ を100回与える。

初期負荷せん断応力 τ_{si} は静的破壊強度の $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ および $\frac{2}{3}$ の3種類、振動数 f は $\sigma_v=1.0$ kg/cm²の場合2.0Hz、 $\sigma_v=2.0$ kg/cm²の場合0.5, 2.0および5.0Hz、 $\sigma_v=3.0$ kg/cm²の場合2.0Hzとした。

3種類の載荷方式による実験条件を表1にまとめて示した。

供試体の形状は直径50mm、高さ40mmであり、非圧密状態で行なった。

実験時のせん断応力およびせん断ひずみは全て電磁オシログラフに記録して行なった。

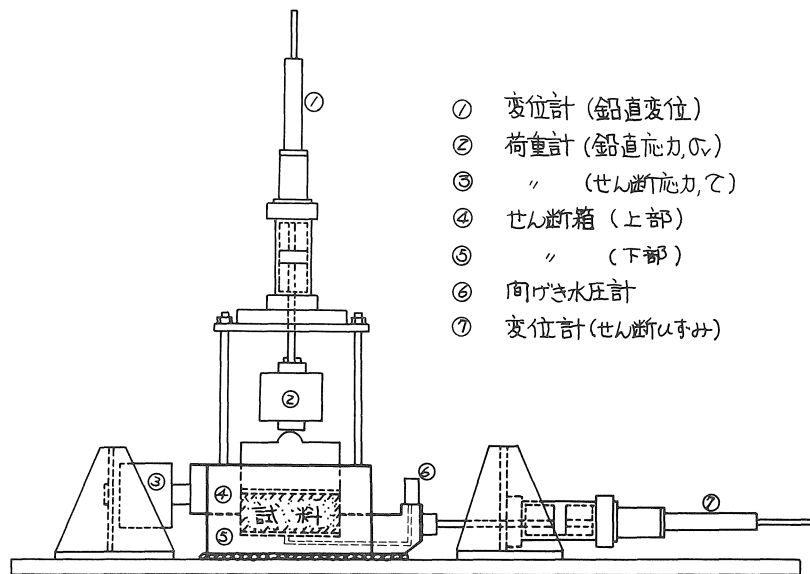
3. 試料

実験に用いた試料は現在築堤中の宮川ダム(三重県)から採取した築堤材料である。粒度分布は図3に、他の物理的性質および締固め試験の結果を表2に示した。

供試体は最大粒径を4.76mmに粒度調整し(三角座標分類では粘土質ロームに属する)含水比 $w=20.5\%$ 、乾燥密度 $\gamma_d=1.608$ g/cm³(JIS締固めエネルギーに対する締固め密度、D一値95%)、飽和度 $S_r=81.5\%$ となるよう供試体を作成した。なお、供試体の密度などの不均一性を除くため圧縮装置を用いてせん断箱内へ3層に分けた試料の表面を加圧することにより行なった。

4. 結果と考察

(1) 静的強度について



- ① 変位計(鉛直変位)
- ② 荷重計(鉛直応力 σ_v)
- ③ " (せん断応力 τ)
- ④ せん断箱(上部)
- ⑤ " (下部)
- ⑥ 向げき水圧計
- ⑦ 変位計(せん断ひずみ)

図1 動的一面せん断試験機

表1 実験条件

(τ_{sf} : 静的破壊強度)

	垂直応力, σ_v (kg/cm ²)	振動数, f (Hz)	応力振幅, $\Delta\tau_d$ (kg/cm ²)	初期せん断応力, τ_{si} (kg/cm ²)	載荷回数, N (回)
実験 A	1.0, 2.0, 3.0	0.5, 2.0, 5.0	$0.1\tau_{sf}$, $0.2\tau_{sf}$ $0.3\tau_{sf}$	0	破壊まで
実験 B	1.0, 2.0, 3.0	2.0	$0.1\tau_{sf}$, $0.2\tau_{sf}$ $0.3\tau_{sf}$	$\frac{1}{2}\tau_{sf}$	破壊まで
実験 C	1.0	2.0	任意に変化	$\frac{1}{3}\tau_{sf}$, $\frac{1}{2}\tau_{sf}$ $\frac{2}{3}\tau_{sf}$	100回
	2.0	0.5, 2.0, 5.0			
	3.0	2.0			

表2 試料の性質

比重	Gs	2.70
有効径	D ₁₀	0.006mm
均等係数	Uc	1115
液性限界	ω_L	28.7%
塑性限界	ω_P	16.1%
塑性指数	I _P	12.6
最大乾燥密度	γ_{dmax}	1.69g/cm ³
最適含水比	ω_{opt}	16.5%

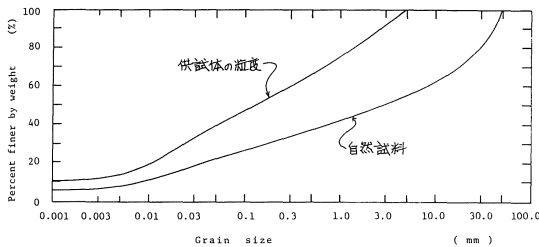


図3 粒径分布

2-(1)で述べたように、動的試験を行なうためには静的強度特性を知る必要がある。従って、動的試験に先立って静的な一面せん断試験を実施した。使用した試験機は動的試験と同じ試験機である。

図4は得られた静的試験の結果であり、せん断応力とひずみの関係を示したものである。この結果からクーロンの破壊線を求めると図5に実線で示した直線となり、強度定数は粘着力C=3.5kg/cm²、内部マサツ角 $\phi = 29.5$ 度である。

(2) 動的強度について

土の動的強度に影響を及ぼす主な因子は、振動数、くり返し載荷回数、くり返しせん断応力の大きさおよび初期負荷せん断応力である。また、これ以外に拘束圧や密度なども重要な要因であることは静的強度特性からも知られる。

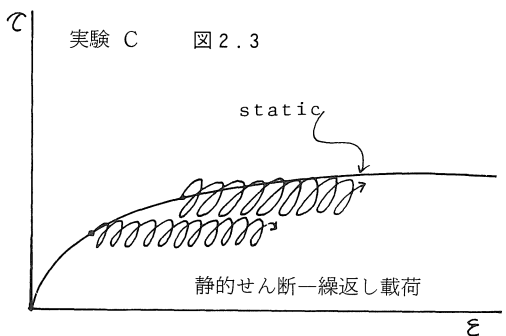
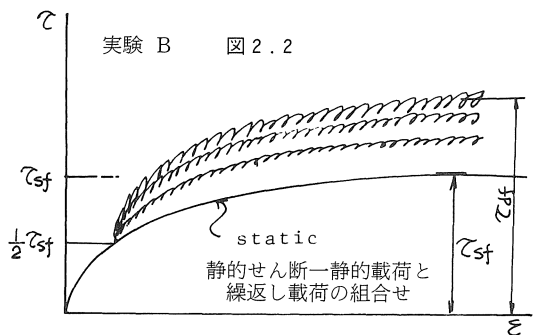
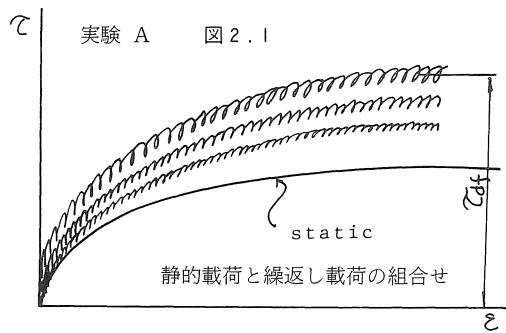


図2 載荷方式と破壊の定義

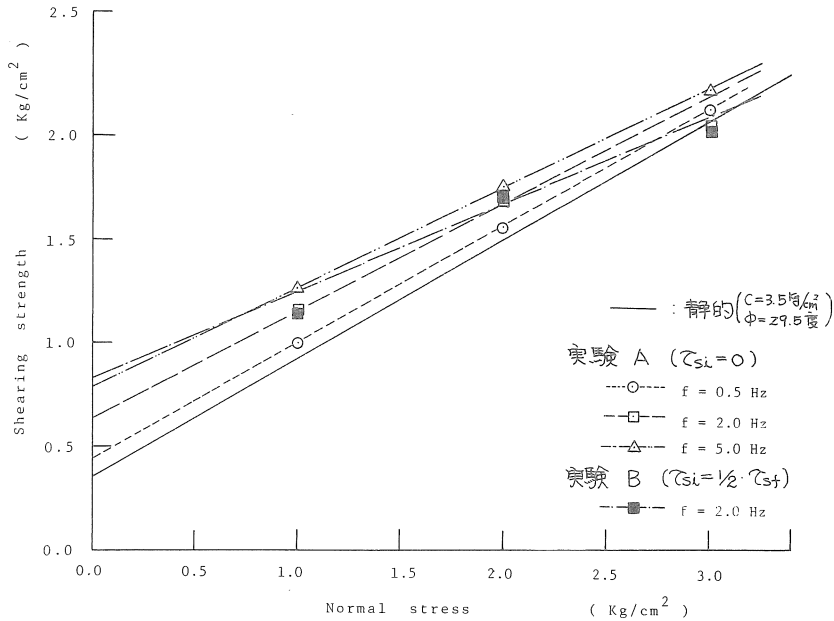


図5 せん断強度と鉛直応力の関係

本実験から得られたデータをもとに上記の諸因子が粘性土の動的せん断強度に対しどのように影響を及ぼすかを調べた。

動的強度 τ_{df} の定義は実験Aおよび実験Bの場合、記録紙より読み取ったデータを基に応力～ひずみ関係を求め、応力の最大値すなわち破壊状態におけるくり返しせん断応力の中心の値とした(図2参照)。一方、実験Cの場合、表1に示した载荷条件に従ってくり返しせん断応力 $\Delta\tau_d$ の振幅を数種類変化させて実験を行なうと、この結果は図6に示した模式図のように、振幅 $\Delta\tau_d$ が小さい場合ひずみは図中のA点まで進行するが、これよりさらに大きな $\Delta\tau_d$ を供試体に与えると同じくり返し载荷回数に対して、ひずみ量も増大し、図中のB点、C点となることが想定される。従ってこのA、B、Cの各点を結んで得られた曲線を与えられた初期負荷せん断応力 τ_{si} および、ある载荷回数Nに対する動的な応力～ひずみ曲線と定義した。また動的破壊強度 τ_{df} は静的試験から得られた破壊ひずみ ϵ_{sf} に対するせん断応力の値とした。この理由は上記の方法によって得られた動的な応力～ひずみ関係において明確な破壊点が得られなかったことによる。以下に動的試験の結果と考察を述べる。

(a) 実験Aおよび実験Bについて

図7は実験Aによって得られた代表的な応力～ひずみ関係を示したものである。同様に図8は実験Bの結果である。図中の破線は、くり返しせん断応力振幅 $\Delta\tau_d$ の上限および下限の値を、また実線はその中心の値を示している。両図より、鉛直応力の大きさの違いによって破壊

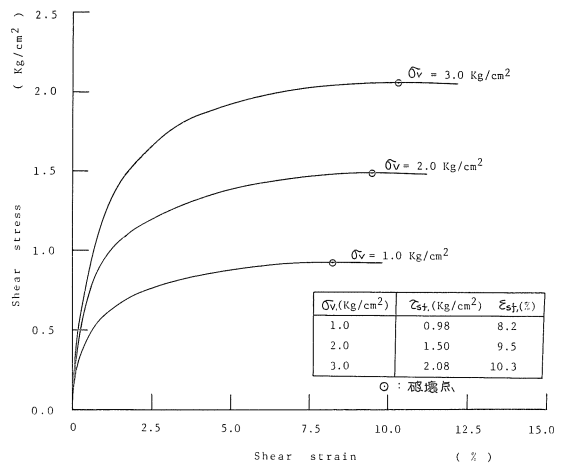


図4 静的試験の応力とひずみの関係

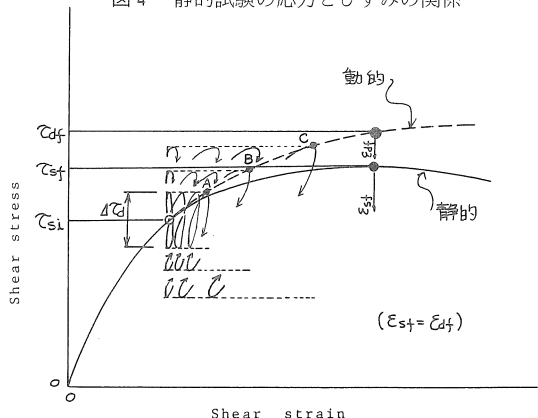


図6 実験Cの模式図

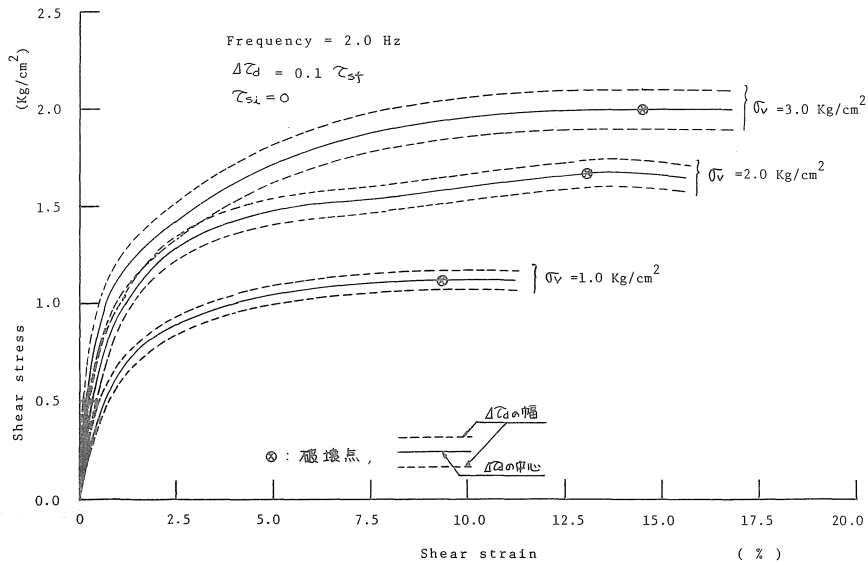


図7 代表的な応力～ひずみ関係 (実験A)

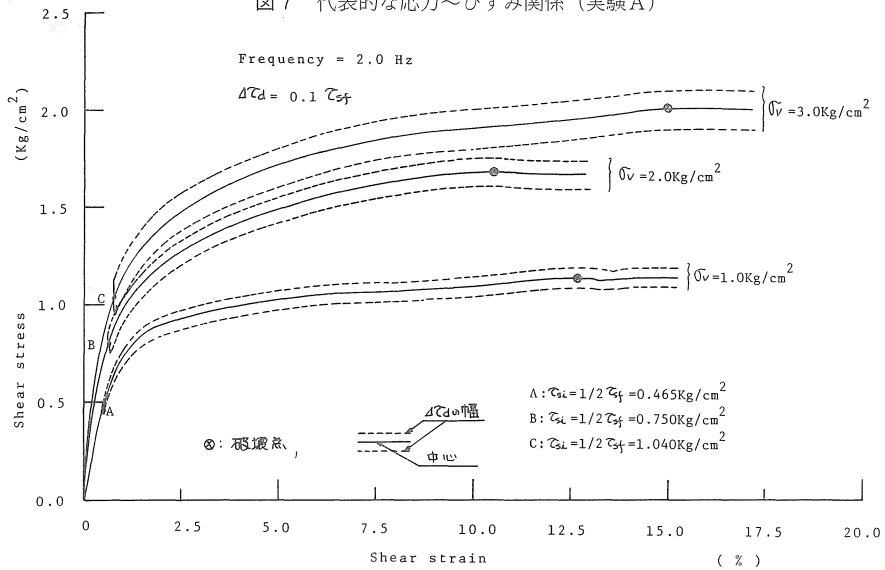


図8 代表的な応力～ひずみ関係 (実験B)

強度が異なり、またこの種の実験方式によって得られる応力～ひずみ関係は静的試験の場合と似かよった傾向を示していることが知られる。

実験Aおよび実験Bの応力～ひずみ関係からせん断強度と鉛直応力の関係は図5に示した□印(実験A, $f = 2.0 \text{ Hz}$)および■印(実験B)となった。なお、同図に示した他の記号は、実験Aより得られた振動数 $f = 0.5$ および 5.0 Hz の結果である。図より、実験Aおよび実験Bの方式によって得られるせん断強度 τ_{af} の値は静的なせん断強度(図中の実線)より大きいことが知られる。また、動的試験においてもせん断強度と鉛直応力はほぼ比例関係にありクーロンの破壊基準が成立するものと考

えられる。このことは、くり返しせん断応力振幅 $\Delta \tau_d$ の値が異なった場合にも認められている。

図5に示した直線の切片およびコウ配の値を動的な粘着力 C_d および内部マサツ角 ϕ_d と定義し、この値と静的試験から得られた粘着力 C_s および内部マサツ角 ϕ_s との比、 C_d/C_s の値と振動数 f に対して求め図9に示した。図より、粘着力の比 C_d/C_s の値は振動数の増加と共に増大し、振動数 $f = 5.0 \text{ Hz}$ では C_d の値は C_s の2～2.5倍となっている。一方内部マサツ角の比 $\tan \phi_d / \tan \phi_s$ の値は振動数の増加に伴って幾分減少し、 C_d/C_s とは逆の傾向となっている。このことから粘性土の動的強度は主に土の粘着成分の増加によってその値が大きくなり、さ

らにこの傾向は振動数が高くなるほど顕著に現われることが知られる。そして、この振動数の相違による影響はいわゆる速度効果によるものと考えられる。一方 $\tan\phi_d/\tan\phi_s$ の値が振動数の増加に伴って減少する傾向となるのはダイレイタンスの影響、すなわち動的試験の場合には振動によって土粒子の動きが容易となり粒子間のかみ合わせ抵抗が減少していずれの振動数においても、 $(\tan\phi_d/\tan\phi_s) < 1.0$ となり、さらに振動数の増加とともに $\tan\phi_d/\tan\phi_s$ の値が小さくなったものと考えられる。

図10は実験Aおよび実験Bによって得られた動的強度の増加割合、すなわち τ_{df}/τ_{sf} の値 (以後強度比と呼ぶ) と静的強度に対するくり返しせん断応力振幅 $\Delta\tau_d$ の比、 $\Delta\tau_d/\tau_{sf}$ の関係を示したものである。図より、強度比は両実験ともにくり返しせん断応力振幅の影響を受け、 $\Delta\tau_d/\tau_{sf}$ の値が大きくなると強度比 (動的強度) も大きくなる傾向がみられる。しかし、実験Aと実験Bの相違、すなわち動的強度に対する初期負せん断応力の影響は得られた実験データのバラツキ等を考えると明らかでない。

図11は動的強度に対する負荷せん断応力の影響を調べた結果である。図より負荷せん断応力の増加に伴ない強度が増加していることがわかる。また、鉛直応力が小さな場合ほど動的強度の増加が著しいことが知られる。

(b) 実験Cについて

図12は実験Cの結果を前述の方法によって整理して得られたくり返し載荷回数Nが10回目ときの応力~ひずみ曲線の1例を示したものである。図から、いずれの鉛直応力においても動的強度が静的強度に比して大きいことがわかる。このことを一層明確に表わした結果が図13である。この図は鉛直応力 $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の場合の強度比 τ_{df}/τ_{sf} と静的強度 τ_{sf} に対する初期負せん断応力の比、 τ_{si}/τ_{sf} の関係を示したものである。なお図中の破線は各々の動的強度に対する初期負せん断応力とくり返しせん断応力振幅の割合を意味している。この図から、 τ_{si}/τ_{sf} が増加すると強度比も大きくなって $\tau_{si}/\tau_{sf} = 0.7$ 付近で最大値を示し、これ以上では強度比が減少する傾向にあることがわかる。このことは τ_{si}/τ_{sf} の値が大きくなるとせん断応力の方向が逆転するような応力状態が供試体内のせん断面上に作用したことによるものと考えられる。また、載荷回数の増大に伴って強度比、すなわち動的強度が減少することが知られる。

図14は τ_{si}/τ_{sf} をパラメーターとして強度比と破壊までのくり返し載荷回数 N_f の関係を示したものである。図からくり返しせん断応力振幅が大きいほど少ない回数で破壊に至り、さらにくり返し載荷に伴って動的強度が減少することが知られる。

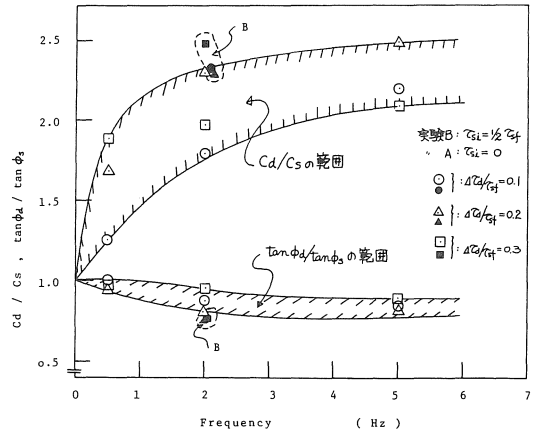


図9 Cd/Cs, $\tan\phi_d/\tan\phi_s$ と振動数の関係 (実験A)

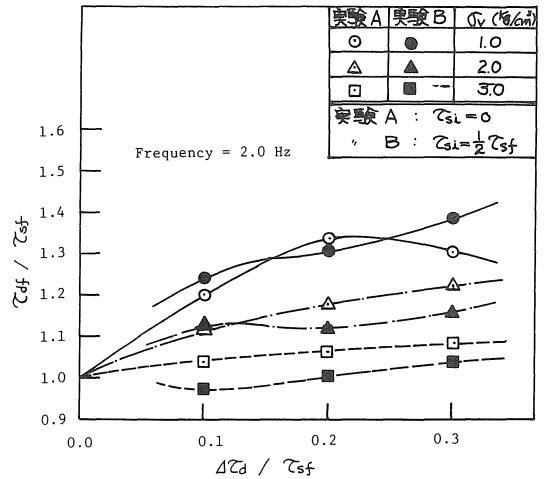


図10 τ_{df}/τ_{sf} と $\Delta\tau_d/\tau_{sf}$ の関係 (実験A, B)

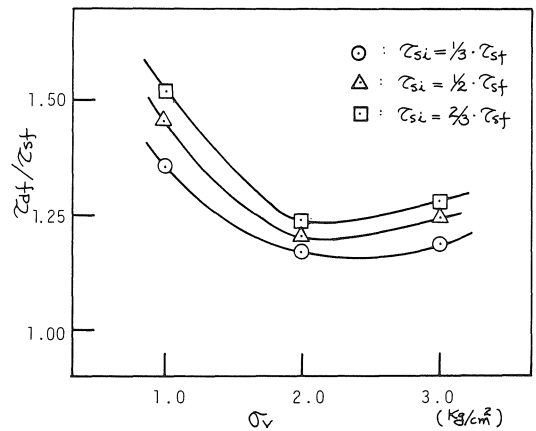


図11 τ_{df}/τ_{sf} と σ_v の関係

図15は動的強度に対する振動数の影響を調べた結果である。図より振動数が高いほど強度比も大きくなることが知られる。この傾向は図16に示した実験Aの結果でも

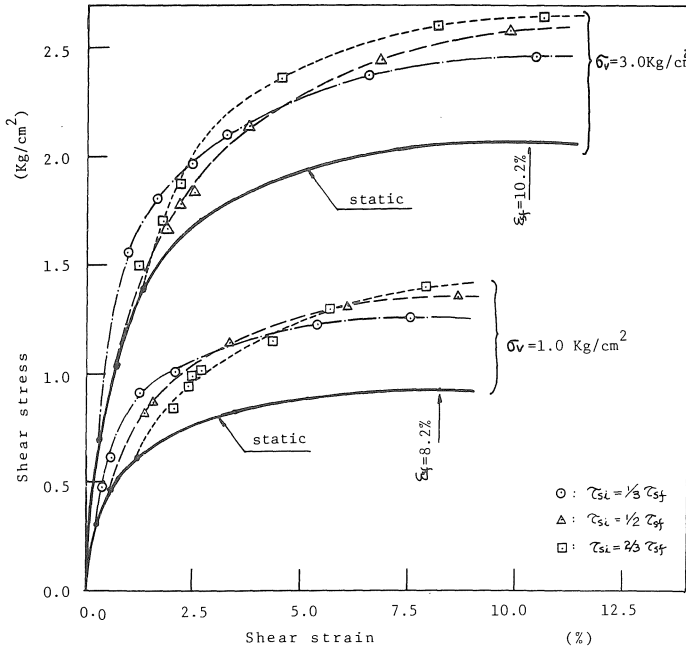


図12 代表的な応力～ひずみ関係 (実験C, $f = 2.0\text{Hz}$, $N = 10$)

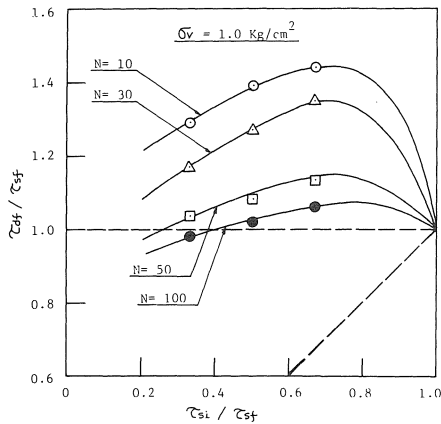


図13 τ_{df}/τ_{sf} と τ_{st}/τ_{sf} の関係 (実験C, $f = 2.0\text{Hz}$)

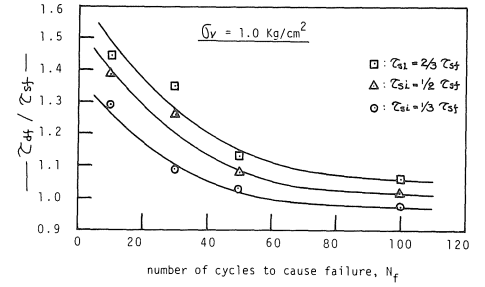


図14 τ_{df}/τ_{sf} と 載荷回数 N_f の関係

(実験C, $f = 2.0\text{Hz}$)

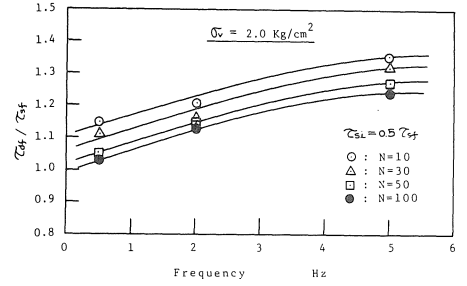


図15 τ_{df}/τ_{sf} と 振動数の関係

(実験C, $\sigma_v = 2.0\text{kg/cm}^2$)

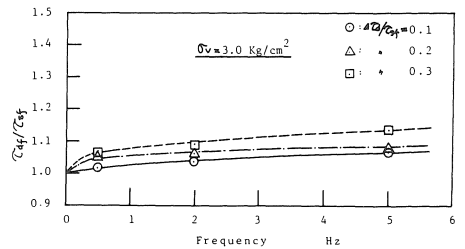
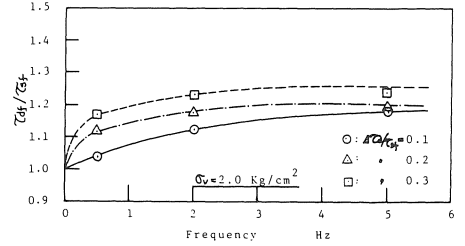
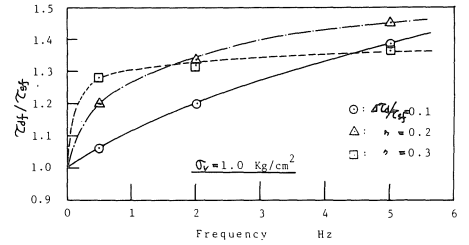


図16 τ_{df}/τ_{sf} と 振動数の関係 (実験A)

認められ、動的強度に及ぼす振動数の影響は実験方法に関係しないことがわかる。

5. まとめ

一面せん断試験機を用いて不飽和粘性土の動的強度特性を調べた。得られた結果より次のことが明らかとなった。

- (1) 静的載荷にくり返しせん断応力を組合わせた方法の実験（実験Aおよび実験B）ではその動的強度は静的強度より大きい。そして、この強度増加は土の粘着成分の増加に支配される。また、動的強度はくり返し応力振幅 ($\Delta\tau_d$) の影響を受け大きな $\Delta\tau_d$ を供試体に与えるほど動的強度は大きくなる。
- (2) いずれの載荷方法においても動的強度は振動数すなわち速度効果による影響を受け振動数が高いほど動的強度は大きくなる。
- (3) 静的一くり返し載荷方式（実験C）においては動的強度はくり返し効果による影響を受け載荷回数が増大に伴って動的強度は減少する。また、 $\tau_{sl} < 0.7\tau_{sr}$ の範囲において、供試体に与える初期負荷せん断応力が大きいほど動的強度が増加することが明らかとなった。
- (4) 動的強度は静的強度と同様拘束圧によって異なるが拘束圧が低いほど動的強度の増加は著しい。

以上、主として動的強度に影響を及ぼす要因、試験方法の相違について議論したが、その内容は基本的な結果を得るにとどまった。今後はこの種の研究をより詳細に進める必要があると考えている。

参考文献

- (1) 最上, 山口, 中瀬: 土の動的性質に就いて(第1報), 東京大学理工学研究所報告, 第8巻第1号, 1954.
- (2) 奥村, 西掘, 大根: 土の動的せん断試験について, 愛知工業大学研究報告, No.7, 235-240, 1972.
- (3) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- (4) 大原, 松田: 飽和粘土の動的強度について, 土木学会論文報告集, 第274号, 69-78, 1978,
- (5) HARA.A., OHTA.T., NIWA.M., TANAKA.S. and BANNO.T.; Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils, Soil and Foundations, Vol.14, No.3,1-12, 1974.