

琉球大学学術リポジトリ

乾燥砂の繰り返し単純せん断特性に関する実験的研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-09-16 キーワード (Ja): キーワード (En): Dry Sand, Simple Shear Test, Repetitional Shearing, Experimental Study, Relative Density, Interparticle Friction Angle, Damping Factor, Shearing Modulus 作成者: 許, 光瑞, 加藤, 進, 大城, 林, Kyo, Kozui, Kato, Susumu, Oshiro, Hayashi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1987

乾燥砂の繰り返し単純せん断特性に関する実験的研究

許 光瑞* 加藤 進* 大城 林**

An Experimental study on the Characteristics
of Repetitional Simple Shear of Dry Sand

Kozui KYO* Susumu KATO* and Hayashi OSHIRO**

Summary

The characteristics of repetitional simple shear test of soils are studied mostly in the case of dynamic soil test, and hardly in the case of static soil test. While in practical case, sometimes it is necessary to obtain some soil data using the general type (static type) of simple shear test apparatus. The authors, in view of the latter case, conducted experimentally on the repetitional simple shear test in the range of large shearing strain $\gamma=1 \sim 5\%$ using the general type of simple shear test apparatus.

The experiment was conducted in three kind of relative densities (Loose state: $D_r = 40\%$, Medium state: $D_r = 60\%$, Dense state: $D_r = 80\%$), and air dry TOYOUR-A uniform sand was used. Two cases of shearing test were conducted, such as : 1) Singular direction shearing (Usual test), 2) Repetitional shearing under constant cycles.

The following results are obtained : 1) The interparticle friction angle of sand ϕ_{μ} is obtained in the range of $\phi_{\mu} = 18.5 \sim 25.4$ (°). The smaller value was obtained in the cases of increasing the normal stress applied in simple shear test σ_v , or decreasing the relative density D_r . 2) The equivalent hysteretic damping factor h is shown the range of $h = 20 \sim 29$ (%), the value h increases at larger repetitional shear strain γ_s , or at smaller normal stress applied in simple shear test σ_v . 3) The relationship between equivalent hysteretic damping h and shearing modulus G are approximately linear at nearly 10 cycles. 4) It could be considered that the change of the repetitional shearing characteristics are influenced not only by the change of rearrangement of particles due to loading but also by the change of interparticle friction angle ϕ_{μ} owing to particle crushing.

Key Words Dry Sand, Simple Shear Test, Repetitional Shearing,
Experimental Study, Relative Density, Interparticle
Friction Angle, Damping Factor, Shearing Modulus.

受付：1987年5月9日

- 琉球大学工学部建設工学科
- ** 琉球大学大学院工学研究科建設工学専攻
- *** 本論文の一部は日本建築学会昭和61年度大会にて発表したものである。

1. まえがき

砂の繰り返しせん断特性に関する研究は、ほとんど動的性質について行なわれている。静的性質と共通点のある大きなヒズミ領域($\gamma > 0.1\%$)での繰り返しせん断特性についても、多くの場合、速度効果と繰り返し効果の両方に注目して研究が行なわれ、繰り返し効果のみに注目した研究はあまり行なわれていない。実際の設計において、このような大きなヒズミ領域での静的な繰り返しせん断が問題になることは少ないが、砂のせん断特性を明らかにする上では、この面での研究も必要であると考えられる。本研究では $\gamma = 1 \sim 5\%$ の大きなヒズミ領域での砂の静的な繰り返しせん断特性を明らかにするとともに、砂の粒子間摩擦角 ϕ_0 を推定し、繰り返しせん断による砂粒子の変化についても考察した。

2. 実験概要

2.1 試験装置

本実験に用いた試験装置は、在来型の単純せん断試験装置である。供試体の上下端は函形板付きホラスストーンで拘束され、側方はワイヤー補強されたメンブレンにより拘束されている。水平及び鉛直載荷のガイドは、剛性の高いボールベアリング構造となっている。供試体の形状は高さ4 cm、直径6 cmの円柱形である。

2.2 供試体の作成方法

試料は表-1に示す豊浦標準砂を気流状態で用いた。供試体の作成はMiura & Toki¹⁾により提案された多重フルイ法により行なった。その方法では7段のフルイを用いているが、本実験では試験機の構造上4段のフルイとし、フルイ径は予備実験の結果により2.0mm、4.76mm、2.0mm、0.84mmの組み合わせとした(図-1参照)。

表-1 試料の一般性質

相 対 密 度 Dr (%)	DENSE	MEDIUM	LOOSE
		80	60
密度 γ_d (gf/cm ³)	1.568	1.503	1.444
土粒子比重 Gs	2.65		
最大密度 $\gamma_{d \max}$ (gf/cm ³)	1.638		
最小密度 $\gamma_{d \min}$ (gf/cm ³)	1.338		
有効粒径 D_{10} (mm)	0.13		
均等係数 Uc	1.3		

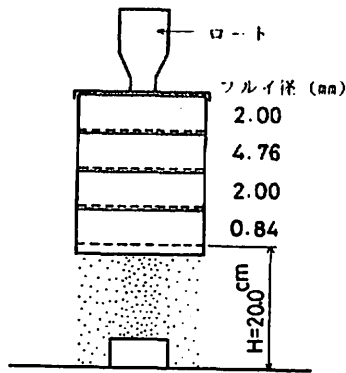


図-1 多重フルイ法

供試体密度は鉛直荷重 $\sigma_v = 0.1$ (kgf/cm²) を載荷した状態で、Dense (Dr=80%)、Medium (Dr=60%)、Loose (Dr=40%) の3段階に設定した。設定範囲は相対密度で $\pm 2\%$ 以内とした。各密度の設定は3章に示す予備実験結果を基に、ロート径を変えて行なった。

2.3 実験内容

実験はヒズミ制御方式により、表-2に示すように、一方向せん断試験のシリーズと繰り返しせん断試験のシリーズに分けて行なった。せん断速度は $V = 1.5\%/min$ とした。各実験シリーズは以下のとおりである。

表-2 実験シリーズ

試験名	セン断ヒズミ γ_a (%)	垂直荷重 σ_v (kgf/cm ²)	方 法
一方向セン断	-	0.25	セン断ヒズミ $\gamma = 15$ (%)まで一方向セン断を行う。
		0.5	
		1.0	
		1.5	
		2.0	
		2.5	
一定変位量の繰り返しセン断	± 1	0.5	セン断ヒズミ量 γ_a を一定にした正負10サイクルの繰り返しセン断後、セン断応力 τ が最大値を越るまで正の方向へセン断する。
		1.0	
		2.0	
	± 3	0.5	
		1.0	
		2.0	
	± 5	0.5	
		1.0	
		2.0	

(1) 一方向セン断試験

Dense, Medium, Loose の各密度ごとに、鉛直荷重を $\sigma_v = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5$ kgf/cm² の6段階に変えて、セン断ヒズミ $\gamma = 15\%$ まで一方向へセン断した。セン断ヒズミ γ に対応するセン断応力 τ と鉛直ヒズミ ϵ_v を測定した。

(2) 繰り返しセン断試験

繰り返しセン断ヒズミ量 γ_a を一定とした10サイクルの繰り返しセン断試験を、各密度ごとに、3段階の鉛直荷重 ($\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.0$ kgf/cm²) について行なった。繰り返しセン断ヒズミ量は $\gamma_a = \pm 1\%, \pm 3\%, \pm 5\%$ の3ケースとした。

繰り返しセン断後、さらに破壊に至るまでセン断試験を行なった。一方向セン断試験同様、セン断ヒズミ γ に対応するセン断応力 τ と鉛直ヒズミ ϵ_v を測定した。

3. 予備実験結果

Miura & Toki の提案した多重フルイ法は7段のフルイを用い、ロート径を変えることにより砂の落下量を変化させて、供試体密度を制御する方法である。前述したように、本研究に用いた試験機には構造上スペースに限界があったため、フルイは4段とした。フルイ4段の組み合わせは予備実験の結果、2.0, 4.76, 2.0, 0.84mmの順序が最も広範囲に密度

設定出来る組み合わせであった。

均一な密度及び所定の密度の供試体の作成のため、予備実験として、落下高さの影響及びロート径と密度の関係について調べた。

3.1 相対密度における落下高さの影響

供試体容器底面からフルイの最下段までの高さ H を、20cmから85cmまで変えて供試体密度の変化を調べた。図-2に相対密度 D_r と落下高さ H の関係を示す。全体的には高さによる変化は少ないが、ロート径が大きいと落下高さが高くなるにつれて相対密度 D_r が若干減少し、ロート径が小さいと落下高さの増加によって D_r が若干増加する傾向が見られる。この実験における堆積速度と落下高さ H の関係を図-3に示す。落下高さが高くなるにつれて堆積速度が増す傾向があり、その傾向はロート径が大きいほど顕著である。

図-2, 図-3より、ロート径が大きいケースでは、落下高さ H が高くなるに従い、落下する砂が中央に集中して堆積速度が速くなるために相対密度が減少すると考えられる。これに対してロート径が小さいケースでは、落下する砂の量が少ないために中央への砂の集中が発生せず、落下速度が増すことによって相対密度が増加すると考えられる。したがって、落下高さが高いほど落下高さの違いによる密度の変化は小さいと思われるが、反面、落下高さが増

すほど試料の分離を生じる可能性があると考えられる。落下高さ $H=20\text{cm}$ よりも低い落下高さでは密度の変化が大きくなるのが図-2より予想されるので、落下高さ $H=20\text{cm}$ で供試体の作成を行なった。

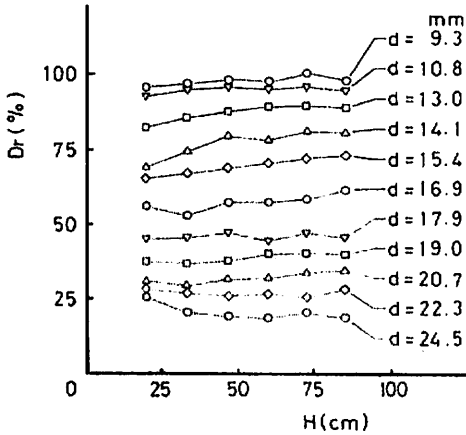


図-2 落下高さによる相対密度の変化

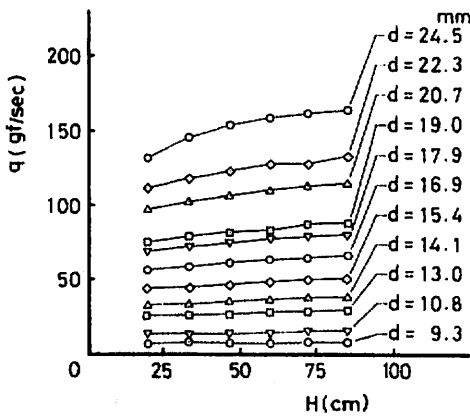


図-3 落下高さによる砂の堆積速度の変化

3.2 ロート径と相対密度の関係

供試体に鉛直荷重 $\sigma_v=0.1\text{kgf/cm}^2$ を載荷した状態での相対密度と、用いたロート径の関係を図-4に示す。相対密度 Dr が40~100%の範囲の供試体を作成出来た。また、相対密度 $Dr=53\sim 97\%$ の範囲では、相対密度とロート径の間に直線関係があること

が分った。この図より、各設定密度のロート径 d を Denseで14.1mm, Mediumで17.6mm, Looseで24.5mmと決定した。

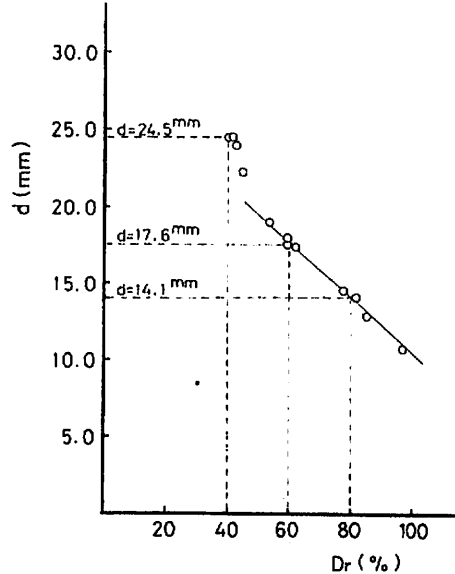


図-4 ロート径による相対密度の変化

4. 実験結果及び考察

4.1 一方向せん断試験

(1) セン断強度

せん断試験によって得られたせん断強さ τ_i と鉛直荷重 σ_v の関係を図-5に示す。Dense, Medium, Looseのせん断抵抗角 ϕ_{ao} は、それぞれ28.7°, 24.7°, 19.3°であった。また、 $C=0.05\sim 0.06\text{kgf/cm}^2$ の粘着力が算出された。せん断強さ τ_i と鉛直応力 σ_v の比より求めたせん断抵抗角 ϕ_{ao} ($\tan^{-1}(\tau_i/\sigma_v)$) と鉛直応力 σ_v との関係を図-6に示す。せん断抵抗角 ϕ_{ao} は鉛直荷重 σ_v が大きいほど小さな値となっている。その減少割合は鉛直荷重 σ_v が大きくなるに従って、小さくなるように思われる。このようなせん断抵抗角の拘束圧依存性は龍岡³⁾が指摘しているように、拘束圧が $\sigma_v=0.5\text{kgf/cm}^2$ 以上になると、せん断中に砂粒子の破砕が生じるためであると考えられる。本実験におけるような低い拘束圧下 ($\sigma_v=0.25\sim 2.5\text{kgf/cm}^2$) の場合、せん断抵抗角への砂粒子の破砕

の影響は拘束圧が大きくなるに従い、一定値に近づくように思われる。

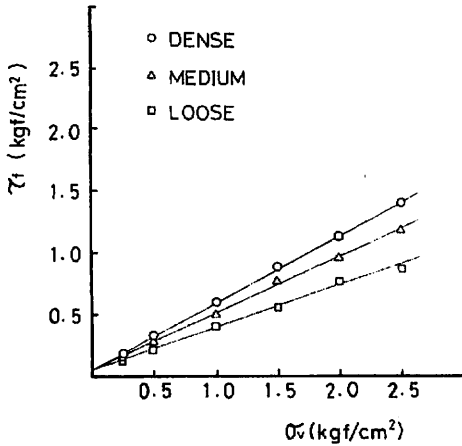


図-5 セン断強さ τ_t と鉛直荷重 σ_v の関係

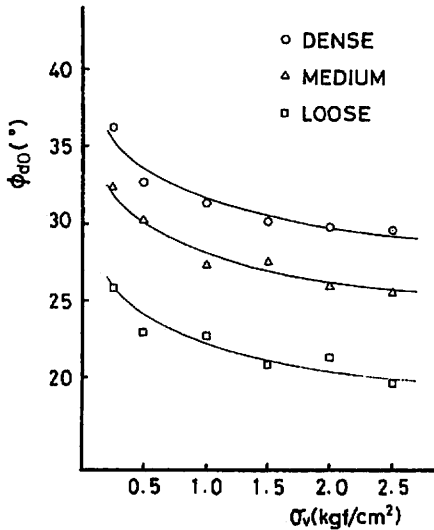


図-8 鉛直荷重とセン断抵抗角の関係

(2) 粒子間摩擦角 ϕ_μ の推定

Oda²⁾によれば単純セン断試験における応力比 (τ/σ_v) と主応力軸の回転角 ψ との間には、次式のような関係がある。また、主応力軸の回転角 ψ は限界間

隙比状態において、主ヒズミ増分軸の回転角 ξ と一致し、 $\xi = \psi = \pi/4$ となる。

$$\frac{\tau}{\sigma_v} = \kappa \cdot \tan \psi \tag{1}$$

ここで、 κ は材料固有の定数であり、粒子間摩擦角 ϕ_μ およびダイレイタンスー係数 (dv/dr) がゼロとなる点における応力比 $(\tau/\sigma_v)_0$ との間に、次式の関係がある。

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_v}\right)_0^2 = \kappa \cdot \left\{ (1-\kappa) \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \phi_\mu \right) - 1 \right\} \tag{2}$$

主ヒズミ増分軸の回転角が $\xi = \pi/4$ となる点における応力比より(1)式を用いて κ を推定し、さらに(2)式を用いて粒子間摩擦角 ϕ_μ を推定した結果を表-3に示す。なお、Looseのケースについては、限界間隙比状態およびダイレイタンスー係数がゼロとなる点がほとんどの場合計測されなかったため、 κ と ϕ_μ の推定は行なわなかった。

表-3 一方向での κ と ϕ_μ の値の推定

密度	鉛直荷重 σ_v (kgf/cm ²)	κ	$(\tau/\sigma_v)_0$	ϕ_μ (°)
DENSE	0.25	0.653	0.495	25.42
	0.5	0.563	0.450	21.18
	1.0	0.545	0.470	21.05
	1.5	0.522	0.462	20.21
	2.0	0.517	0.477	20.42
	2.5	0.512	0.485	20.47
MEDIUM	0.25	0.596	0.453	22.37
	0.5	0.548	0.481	21.38
	1.0	0.495	0.456	19.37
	1.5	0.500	0.456	19.49
	2.0	0.478	0.458	19.01
	2.5	0.472	0.448	18.63

推定された定数 κ の値は、Odaによれば一定値であるはずであるが、鉛直荷重が大きくなるに従い減少している。ダイレイタンスー係数がゼロとなる点における応力比 $(\tau/\sigma_v)_0$ の値は、0.448~0.495の間に、鉛直荷重に関係なく分布しているように思わ

れる。また、Denseに比較してMediumのほうが小さな値となっている。 $(\tau/\sigma_v)_0$ をOdaの報告しているように一定値であると考えるには、その分布範囲が若干広過ぎるように思われる。

粒子間摩擦角 ϕ_μ と鉛直荷重 σ_v の関係を図7に示す。図中の実線は、粒子間摩擦角 ϕ_μ と鉛直荷重の逆数 $1/\sigma_v$ との間に直線関係があると仮定し、最小2乗法により求めた結果である。粒子間摩擦角 ϕ_μ は鉛直荷重 σ_v が大きくなるに従い減少するが、 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を超えると、その減少割合は小さくなっている。

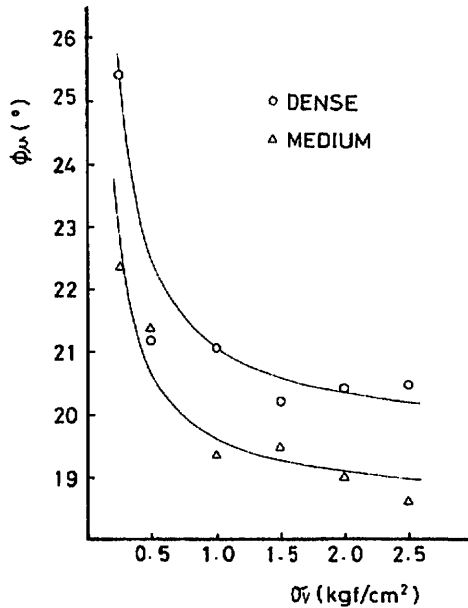


図7 一方向せん断での粒子間摩擦角 ϕ_μ の変化

前述したせん断抵抗角 ϕ_a の拘束圧依存性は、この粒子間摩擦角 ϕ_μ が拘束圧に依存するためであると考えられる。すなわち、せん断中の粒子破碎により、砂粒子間のすべりが真の粒子間摩擦角 ϕ_μ で決定されるよりも小さな応力で生じるため、拘束圧が増すに従って、せん断抵抗角が小さく計測されることになると考えられる。

4.2 繰り返しせん断試験

(1) 応力-ヒズミ曲線

繰り返しせん断試験で得られた応力-ヒズミ曲線

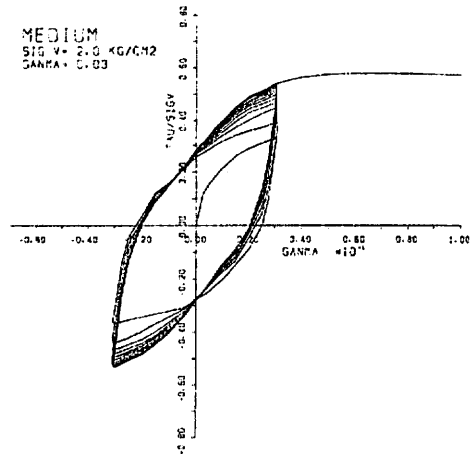


図8 応力-ヒズミ曲線

の代表的な例として、相対密度 $D_r = 60\%$ 、鉛直荷重 $\sigma_v = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、繰り返しせん断ヒズミ量 $\gamma_a = \pm 3\%$ の結果を図8に示した。縦軸にせん断応力比 τ/σ_v をとり、横軸にせん断ヒズミ γ をとっている。繰り返し回数 N に伴って、せん断ヒズミ γ_a に対応するせん断応力比の値が大きくなっている。ループ形状は繰り返しせん断ヒズミ量が $\gamma_a = \pm 3\%$ と大きいため、かなりふくらんだ形状となっており、1サイクルの間に失われるエネルギーが大きいことがわかる。

各サイクルのせん断応力の最大値 τ_m と繰り返し回数 N の関係を図9に示す。全体的にせん断応力の最大値 τ_m は繰り返し回数 N に伴って増加している。増加は繰り返しの初期に大きく、 N の増加に伴って小さくなっている。初期のせん断応力の増加はDenseの場合 γ_a が小さいほど、Looseの場合 γ_a が大きいほど大きくなっている。また、相対密度が低いほど N に伴った τ_m の変化は大きい傾向がある。

最大せん断応力 τ_m の $N=1$ の値と $N=10$ の値との差 $\Delta \tau_m$ を縦軸に、初期密度を横軸にとり、その結果を図10に示した。 $\gamma_a = \pm 1\%$ の場合には、初期密度が大きいほど、 $\Delta \tau_m$ は大きくなっている。 $\gamma_a = \pm 3, \pm 5\%$ の場合には、初期密度が小さいところでは $\gamma_a = \pm 1\%$ に比較して $\Delta \tau_m$ はかなり大きい。初期密度が大きくなるに従い小さくなり、Denseになると $\gamma_a = \pm 1\%$ の場合よりも小さくなっている。

図11は、10サイクルの繰り返しせん断による密

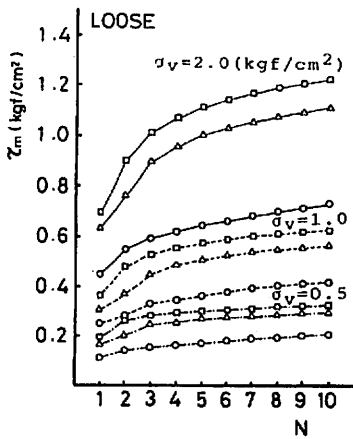
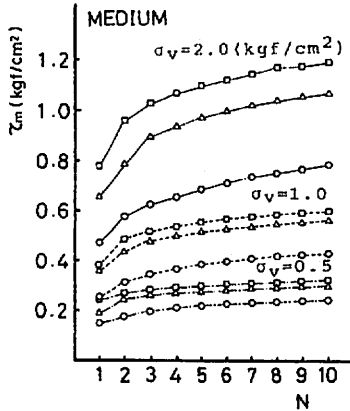
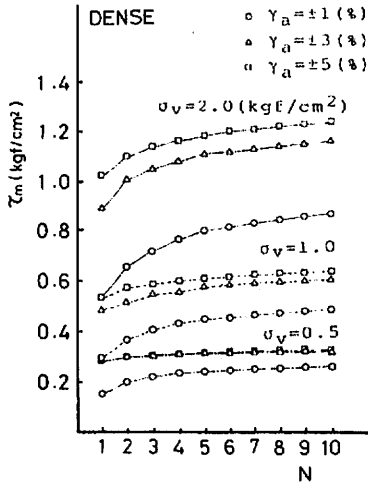


図-9 セン断応力と各サイクルの関係

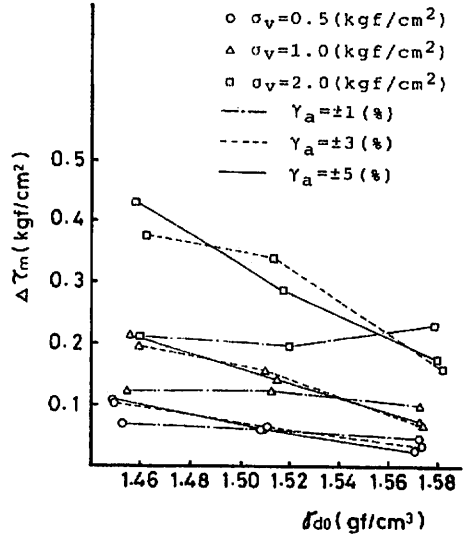


図-10 初期密度と最大せん断応力の増加

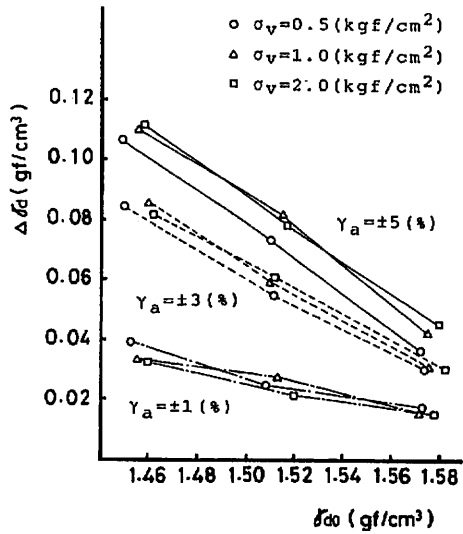


図-11 繰り返しせん断による密度増加量

密度増加量 $\Delta \rho_d$ を縦軸にとり、初期密度 ρ_{d0} を横軸にとっている。Looseの場合、 $\gamma_a = \pm 1\%$ に比較して $\gamma_a = \pm 3, \pm 5\%$ はかなり密度増加が大きいが、 ρ_{d0} が増すに従い、その差は小さくなっている。これは前述の $\Delta \tau_m$ の変化に関係があると思われる。すなわち、初期密度 ρ_{d0} が小さい場合、 $\gamma_a = \pm 1\%$

に比較して $r_0 = \pm 3, \pm 5\%$ はかなり密度増加が大きいので、 $\Delta \tau_m$ は $r_0 = \pm 1\%$ の繰り返しせん断のほうが他のケースよりも小さな値となっていると思われる。また、初期密度が大きくなると密度増加が小さくなり、その結果、 $N=1$ のせん断応力の値がすでにせん断強さ τ に近い値となっている $r_0 = \pm 3, \pm 5\%$ のほうが、 $r_0 = \pm 1\%$ に比較して小さな $\Delta \tau_m$ となると思われる。

(2) 等価減衰定数 h

繰り返し回数 N と、図-12に示す式より求めた等価減衰定数 h の関係を図-13に示す。図は各繰り返しせん断ヒズミ量 ($r_0 = \pm 1, \pm 3, \pm 5\%$)、各鉛直荷重 ($\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) ごとにプロットした。○印が Dense、△印が Medium、□印が Loose を示している。いくつかのケースにおいて、 $N=1$ における減衰定数 h が $N=2$ における減衰定数 h よりも小さくなっているが、全体的には等価減衰定数 h は繰り返し回数 N に伴って若干減少する傾向がある。繰り返しせん断ヒズミ量 r_0 が大きいほど、等価減衰定数 h の値は大きく、繰り返し回数 N に伴った減少も小さくなる。また、鉛直荷重 σ_v が大きいほど等価減衰定数 h は小さな値となっている。

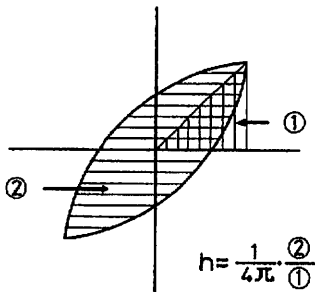


図12 等価減衰定数

$N=10$ における等価減衰定数 h とせん断弾性係数 (最大せん断応力 τ_m とその時のせん断ヒズミ γ の比 τ_m / γ) の関係を図-14に示した。図中、○印は Dense を、△印は Medium を、□印は Loose を示している。等価減衰定数 h とせん断弾性係数 G には、密度、拘束圧に関係なく直線関係があるように思われる。他の繰り返し回数においても、 $N=10$ の場合とほぼ等しい関係が見出されるが、繰り返し回数が多いほど相関係数 R はゼロに近い値 ($N=1$ のとき

$R=0.6$) であった。大きなヒズミ領域での等価減衰定数 h は繰り返し回数 N が少ない段階ではせん断ヒズミ、密度および拘束圧の影響を受けるが、 $N=10$ 前後になると、ほぼせん断弾性係数 G のみの関数として表わすことが出来ると思われる。

4.3 繰り返しせん断後の一方向せん断試験

(1) せん断強度

繰り返しせん断後継続して一方向へせん断し、測定されたせん断応力の最大値 τ よりせん断抵抗角 ϕ_d を求めたところ、図-15に示す結果となった。図中、縦軸はせん断抵抗角 ϕ_d であり、横軸は繰り返しせん断ヒズミ量 r_0 である。 r_0 の増加に伴い、せん断抵抗角 ϕ_d が増加しており、その増加割合は初期密度がゆるいほど大きくなっている。このことは図-11において、初期密度がゆるいほど繰り返しせん断による密度増加が大きいことと関係があると思われる。 $r_0 = \pm 3, \pm 5\%$ において、Loose のせん断抵抗角 ϕ_d が Medium の値に比較して大きな値となっているが、これは Loose の繰り返しせん断試験に用いた砂が、比較的せん断試験に供した回数が少ない試料であったためと思われる。

(2) 粒子間摩擦角 ϕ_μ の推定

一方向せん断試験の場合と同様な方法によって求められた定数 κ 、ダイレイタンス係数がゼロとなる点における応力比 $(\tau / \sigma_v)_0$ および粒子間摩擦角 ϕ_μ を表-4に示す。定数 κ の値は一方向せん断のケースと同様、鉛直荷重が大きいほど小さく、密度が密であるほど大きな値となっている。定数 κ の値は一方向せん断の値と比較すると、繰り返しせん断により密度が増すため κ の値も大きくなると予想されるが、Dense のデータには若干減少するケースもみられる。

ダイレイタンス係数がゼロとなる点における応力比 $(\tau / \sigma_v)_0$ の値は、鉛直荷重が大きいほど大きな値である。これは鉛直荷重が大きいほど、繰り返しせん断による密度の増加が大きく生じるためであると思われる。一方向せん断のケースと比較して、 $(\tau / \sigma_v)_0$ は繰り返しせん断により、全体的に小さな値となっている。

粒子間摩擦角 ϕ_μ と乾燥密度 ρ_d の関係を図-16に示す。図中、○印は一方向せん断試験、△、□、▽印はそれぞれ $r_0 = \pm 1, \pm 3, \pm 5\%$ の繰り返しせん断後の一方向せん断試験に対応している。なお、実線は鉛直荷重 $\sigma_v = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、破線は $\sigma_v = 1.0$

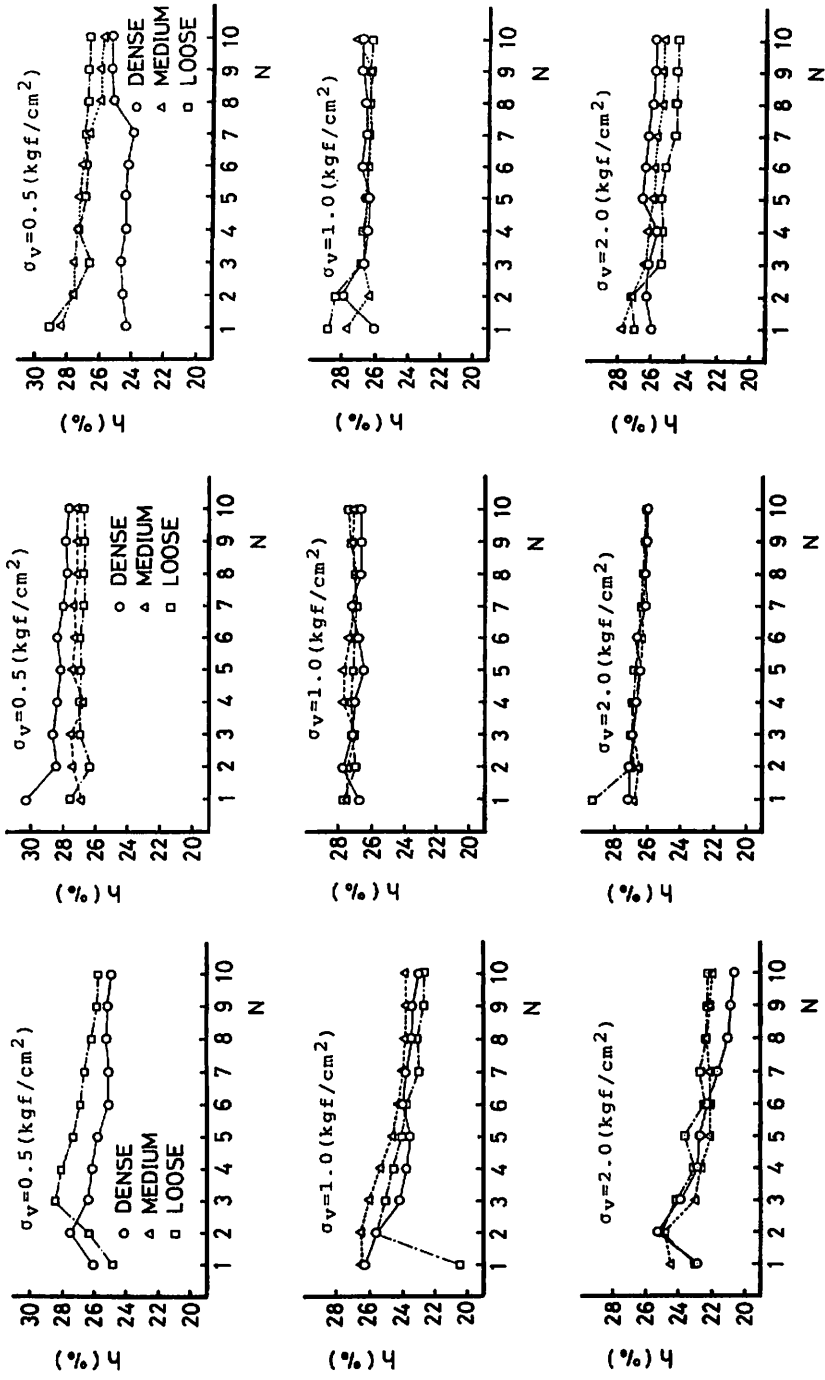


図-13 等面減衰定数の変化

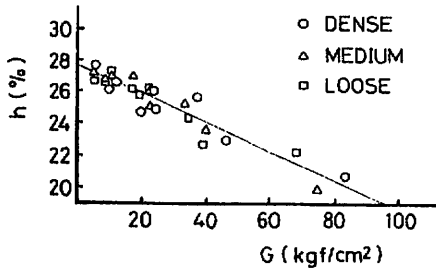


図-14 セン断弾性係数と等価減衰定数の関係

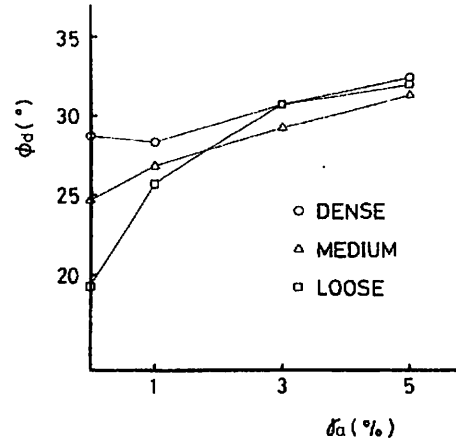


図-15 繰り返しせん断ヒズミ量とせん断抵抗角の関係

表-4 繰り返しせん断後の一方向せん断

せん断ヒズミ量 $r_a(\%)$	密度	鉛直荷重 $\sigma_v(\text{kgf/cm}^2)$	κ	$(\tau/\sigma_v)_0$	$\phi_\mu(^{\circ})$
± 1	DENSE	0.5	0.590	0.410	21.3
		1.0	0.540	0.440	20.25
		2.0	0.512	0.458	19.85
	MEDIUM	0.5	0.550	0.392	19.56
		1.0	0.495	0.400	18.08
		2.0	0.493	0.422	18.53
	LOOSE	0.5	0.528	0.408	19.20
		1.0	0.528	0.405	19.14
		2.0	0.495	0.427	18.70
± 3	DENSE	0.5	0.588	0.427	21.57
		1.0	0.545	0.441	20.42
		2.0	0.530	0.455	20.28
	MEDIUM	0.5	0.558	0.401	20.01
		1.0	0.523	0.413	19.16
		2.0	0.512	0.441	19.46
	LOOSE	0.5	0.560	0.402	20.10
		1.0	0.546	0.420	20.01
		2.0	0.535	0.439	20.07
± 5	DENSE	0.5	0.582	0.440	21.61
		1.0	0.555	0.425	20.40
		2.0	0.538	0.436	20.10
	MEDIUM	0.5	0.558	0.408	20.15
		1.0	0.535	0.405	19.35
		2.0	0.532	0.426	19.71
	LOOSE	0.5	0.573	0.397	20.44
		1.0	0.550	0.429	20.32
		2.0	0.545	0.442	20.44

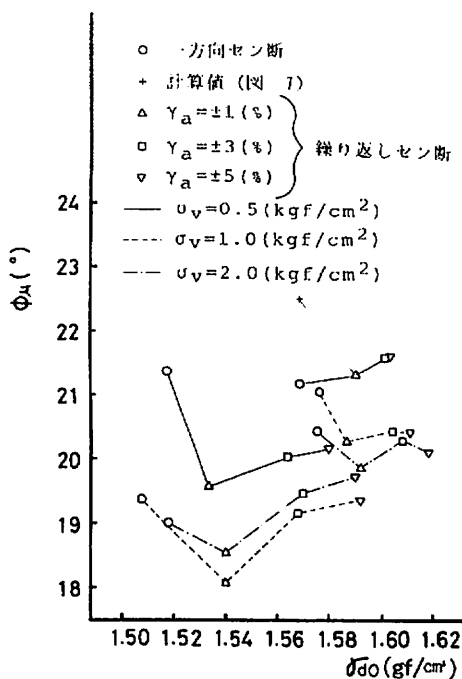


図-18 繰り返しせん断後の粒子間摩擦角 ϕ_{μ} の変化

kgf/cm², 一点鎖線は $\sigma_v = 2.0$ kgf/cm² を示している。Dense の $\sigma_v = 0.5$ kgf/cm² の一方向せん断試験の値は他のデータと異なった傾向を示しているため、図-7において最小2乗法で得られた曲線より推定した値 ($\phi_{\mu} = 22.50^{\circ}$) を、図中、+印でプロットした。以下の考察ではこの+印をより真の値に近いと考えることにする。繰り返しせん断試験の結果のプロットに用いた乾燥密度 γ_d は、 $N=10$ のサイクルが終了する直前にせん断応力がゼロとなった点の値である。繰り返しせん断試験の粒子間摩擦角 ϕ_{μ} の方が一方向せん断試験の値よりも大きい場合もあるが、 ϕ_{μ} が供試体密度によって増大することを考慮すると、繰り返しせん断によって、粒子間摩擦角が減少していると考えられる。鉛直荷重 $\sigma_v = 0.5$ kgf/cm² に比較して、 $\sigma_v = 1.0, 2.0$ kgf/cm² になると $0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 程度粒子間摩擦角 ϕ_{μ} は減少している。Medium の場合、 $\sigma_v = 2.0$ kgf/cm² より $\sigma_v = 1.0$ kgf/cm² のほうが小さな粒子間摩擦角となっていることは、鉛直荷重が $\sigma_v = 1.0$ kgf/cm² 以上になると、鉛直荷重によって粒子間摩擦角 ϕ_{μ} があまり変化しないことを意味していると思われる。

これまで繰り返しせん断によってせん断特性が変化することは、堆積構造が変化するためであると考えられて来たが、粒子間摩擦角 ϕ_{μ} も変化することを考えると、堆積構造の変化だけでなく、粒子破碎による粒子形状の変化もその原因であると考えられる。

5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようである。

- (1) 粒子間摩擦角 ϕ_{μ} は鉛直荷重 σ_v が増大するほど、供試体密度がゆるいほど小さな値となる。鉛直荷重の増大による粒子間摩擦角 ϕ_{μ} の減少の割合は、 $\sigma_v = 1.0$ kgf/cm² を越えると小さくなる。
- (2) 等価減衰定数 h は繰り返しせん断ヒズミ量 r_n が大きいほど、鉛直荷重 σ_v が小さいほど大きな値となっている。大きいヒズミ領域での等価減衰定数 h は $N=10$ 前後の繰り返しせん断を受けると、せん断弾性係数 G に対して直線関係を示す。
- (3) 繰り返しせん断によるせん断特性の変化は、堆積構造の変化だけでなく、粒子破碎による粒子間摩擦角 ϕ_{μ} の変化も一因になっていると考えられる。

なお、本研究を遂行するに当たり、井崎透君（現前田建設工業）、吉川充郎君（現村本建設）の助力を得たことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1), Miura, S. and Toki, S: A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand, soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 61~pp. 77, (1982-5).
- 2), Oda, M.: On the relation $\tau/\sigma_N = K \cdot \tan \phi$ in the simple shear test, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 35~pp. 41, (1975-12).
- 3), 龍岡 文夫氏: 「海洋 海岸工学と土質」3, 海底・海岸土層の工学的性質 3.2 海砂, 土と基礎, Vol. 35, No. 2, Ser. No. 349, pp. 81~pp. 87, (1987-2).