

琉球大学学術リポジトリ

一定荷重および不規則荷重による乾燥砂の繰り返し単純せん断特性

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, Kyo, Kozui, Kato, Susumu メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1986

一定荷重および不規則荷重による 乾燥砂の繰り返し単純せん断特性

許 光 瑞・ 加 藤 進

The Characteristics of Repetitional Simple Shear of Dry Sand under Given Uniform Load and Non-Uniform Load

Kozui KYO and Susumu KATO

Summary

The authors have reported formerly some results of the repetitional simple shear test in the range of large shearing strain $\gamma_n > 1\%$. It was conducted under some given strains. Herein, some experimental results conducted under given uniform load and non-uniform load are shown.

The experiment was conducted in three kind of relative densities (Loose state: $D_r = 60\%$, Dense state: $D_r = 80\%$), and the air dry TOYOURA uniform sand was used. The shearing test are consist of three cases, such as : 1) Single direction shearing, 2) Repetitional shearing under the uniform load, 3) Repetitional shearing under the non-uniform load. The load are in the range of 50 ~ 90 % of the maximum shear stress.

The following results are obtained : 1) The shearing strength after repetitional test was affected by the change of density during test, and also affected by the confining pressures. 2) Internal friction angle ϕ is determined by the void ratio e and the interparticle friction angle ϕ_μ . 3) the relationship between equivalent hysteretic damping h and shearing modulus G are approximately linear. The relationships have respect to the interparticle friction angle of sand.

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

1. まえがき

大きなせん断ヒズミ ($\gamma_n > 1\%$) 領域での砂の繰り返しせん断特性を明らかにするため, 一定のせん断ヒズミ ($\gamma_n = \pm 1, \pm 3, \pm 5\%$) による繰り返しせん断試験を行ない, 前報告¹⁾に示した。

本研究では一定荷重を繰り返し載荷し, せん断ヒ

ズミの振幅が次第に減少するケースについて実験を行なった。また, あわせて不規則荷重を繰り返し載荷するケースについても実験を行なった。

これまでの研究により, 同一の砂をせん断試験に繰り返し用いると, そのせん断強度が低下することが予想された。そこで, 実験にはせん断試験に一度も供したことのない砂を使用した。

*琉球大学工学部建設工学科 Dept. of Architectural Engineering, Fac. of Eng.

**本論文の一部は日本建築学会昭和63年度大会にて発表したものである。

2. 実験概要

2-1. 試験装置および供試体の作成方法

本実験に用いた試験装置は、前報告に示した簡易型の単純せん断試験装置である。供試体の形状は高さ4cm、直径6cmの円柱形で、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。

試料は前述したように、せん断試験に用いたことのない豊浦標準砂を用いた。74 μ m以下を水で洗い流し、気乾状態で用いた。一般性質は表-1に示すとおりである。

表-1 試料の一般性質

相対密度 (D_r %)	DENSE	MEDIUM	LOOSE
D_r (%)	80	60	40
乾体密度 ρ_d (g/cm ³)	1.576	1.507	1.444
上粒子比重 G_s	2.65		
最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	1.651		
最小乾燥密度 $\rho_{d \min}$ (g/cm ³)	1.333		
有効粒径 D_{10} (mm)	0.145		
均等係数 U_c	1.40		

供試体密度は鉛直荷重 $\sigma_v = 0.1$ (kgf/cm²) において、表-1に示す密度に多重フルイ法により設定した。設定範囲は、所定の相対密度に対して $\pm 3\%$ 以内とした。なお、設定密度は緩詰め ($D_r = 40\%$)、中間密度 ($D_r = 60\%$) および密詰め ($D_r = 80\%$) の3段階 (以下、Loose, Medium, Dense と呼ぶ。)とした。

2-2. 実験内容

実験シリーズは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からなる。

繰り返しせん断試験のシリーズを表-2に示す。繰り返しせん断試験では一定荷重による繰り返しせん断試験 (以下ケース①と呼ぶ。) と、不規則荷重による繰り返しせん断試験 (以下ケース②と呼ぶ。) とを行なった。ケース①は所定の応力比 τ/σ_v に達したときにせん断方向を反転させる正負10サイクルの繰り返しせん断試験である。ケース②は所定の応力比 τ/σ_v を繰り返しサイクルごとに変化させた繰り返しせん断試験である。この所定の応力比の変化パターンは、図-1に示す衝撃型(S)と振動型(V)の2種類²⁾である。また、各ケースにおける応力比

は表-3に示す値を用いた

実験は全て、せん断ヒズミ速度 $\dot{\gamma} = 2.0\%$ /min で行なった。

表-2 実験シリーズ

密度	鉛直荷重 σ_v (kgf/cm ²)	ケース1	ケース2
		応力比 τ/σ_v	荷重パターン
LOOSE	0.50	0.20	
		0.30	
		0.35	
	1.00	0.20	衝撃 (S)
		0.30	
		0.35	振動 (V)
2.00	0.20		
	0.30		
	0.35		
MEDIUM	0.50	0.30	
		0.40	
		0.46	
	1.00	0.30	衝撃 (S)
		0.40	
		0.46	振動 (V)
	2.00	0.30	
		0.40	
		0.46	
DENSE	0.50	0.30	
		0.40	
		0.50	
	1.00	0.30	衝撃 (S)
		0.40	
		0.50	振動 (V)
	2.00	0.30	
		0.40	
		0.50	
		0.54	

表-3 不規則荷重の荷重パターン

	荷重パターン	応力比 τ_1/σ_v			
		a_1	a_2	a_3	a_4
DENSE	S	0.30	0.58	0.54	0.43
	V	0.30	0.43	0.54	0.58
MEDIUM	S	0.30	0.46	0.40	0.30
	V	0.30	0.30	0.40	0.46
LOOSE	S	0.20	0.35	0.30	0.20
	V	0.20	0.20	0.30	0.35

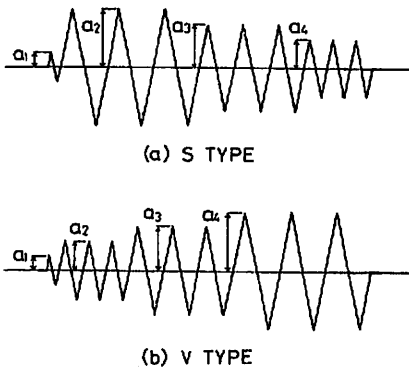


図-1. 不規則荷重の変化パターン

3. 実験結果及び考察

3-1. 一方向セン断試験

(1) セン断強度

セン断強さと鉛直荷重の比 τ_1/σ_v と鉛直荷重 σ_v の関係を図-2に示す。図中の白印は表-1に

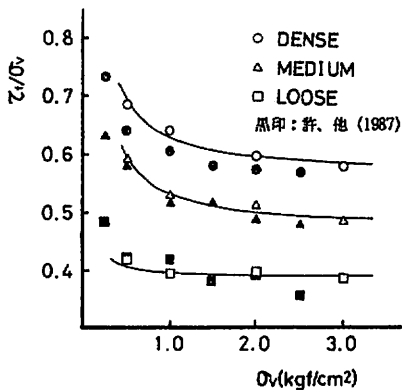


図-2. セン断強さと鉛直荷重の関係

示す試料による実験結果であり、黒印はセン断試験に繰り返し用いた試料による前報告の実験結果である。 τ_1/σ_v の値は σ_v の増加に伴って減少する拘束圧依存性を示している。 σ_v による τ_1/σ_v の減少は、 $\sigma_v > 1.0$ kgf/cm²において小さくなっている。白印と黒印とを比較した場合、白印の方が若干大きく、密度が小さくなるに従いその差は小さくなっている。また、白印の方がばらつきが小さいように思われる。

(2) 粒子間摩擦角

粒子間摩擦角を直接求める方法が無いため、既往の研究において示された主応力軸の回転に関する式を用い、粒子間摩擦角を推定した。以下、既往の研究、粒子間摩擦角の推定方法および推定された粒子間摩擦角について述べる。

1) 単純セン断特性に関する既往の研究

Odaら³⁾は2次元の粒状材料モデルについて単純セン断試験を行ない、主応力軸の回転角 ϕ に関して次式を求めた。

$$\tau/\sigma_v = \kappa \cdot \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 ϕ は鉛直軸に対する最大主応力軸の傾き角であり、 κ は材料固有の定数である。

落合⁴⁾は、直接セン断型の砂のセン断試験におけるCritical Stateでの砂の挙動は近似的に最大セン断応力説によって支配されると考え、(1)式の係数 κ を次式のように表した。

$$\kappa = (\tau/\sigma_v) \sin \phi_m, \beta=0 = \sin \phi_{cv} \quad (2)$$

ここで、 $\beta = 45^\circ - \psi$ 、 $\phi_m, \beta=0$ は最大セン断応力面と水平面が一致する時の応力の最大傾角、 ϕ_{cv} はCritical Stateにおいて発揮されている摩擦角。Oda⁵⁾は別の考察から(2)式と同様の関係を得た。さらに落合は、水平方向の変位を拘束し、鉛直応力のみを作用させた状態(静止土圧状態)において発揮されている摩擦角 $\phi_m, \beta=0$ は粒子間摩擦角に等しいと考え、次式を得た。

$$\sin \phi_m = \kappa / (2 - \kappa) \quad (3)$$

2) 粒子間摩擦角 ϕ_m の推定

粒子間摩擦角を求めるにあたり、次の4つの仮定を行なった。

- ① 本研究に用いたNGI型の単純セン断試験機においても、(1)式および(3)式が適用できる。
- ② κ はセン断中にモーライズされた ϕ_m によって決まる。
- ③ 主応力軸の回転角 ψ と主ヒズミ増分軸の回転

角 ξ は、せん断応力のピーク付近で一致し、Critical Void Ratio の状態において $\phi = \xi = \pi/4$ となる。

- ④ (3)式はせん断初期だけでなく、せん断中においても適用できる。

上記の仮定のもとに、まず(1)式を用いてせん断応力のピーク時の κ を推定し、(3)式を用いて粒子間摩擦角 ϕ_μ を求めた。

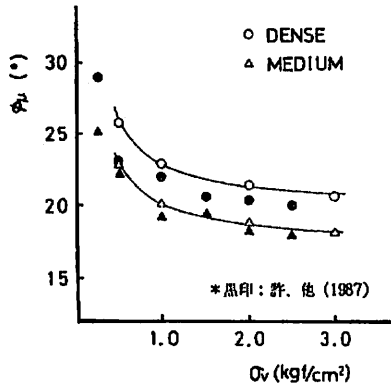


図-3. 粒子間摩擦角と鉛直荷重の関係

推定された ϕ_μ と鉛直荷重 σ_v の関係を図-3に示す。LOOSE のケースにおいては、 $\xi < \pi/4$ であったため、 ϕ_μ の推定は行なわなかった。図-2と同様、図中の白印は表-1の試料による結果であり、黒印はせん断試験に繰り返し用いた試料の結果である。せん断強度と同様、供試体密度が高いほど ϕ_μ は大きく、鉛直荷重が大きいほど小さくなっている。白印と黒印とを比較した場合、白印の方が若干大きく、ばらつきも小さいように思われる。せん断試験に繰り返し用いた砂は、粒子の角が磨耗し、粒子間摩擦角が小さくなったと考えられる。また、ばらつきの大きいのは、供試体ごとに粒子の磨耗の程度が異なっていたのではないかとと思われる。

3. 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-ヒズミ曲線の一例として、LOOSE の鉛直荷重 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、応力比 $\tau/\sigma_v = 0.3$ を図-4に示す。ループ形状は全体的に紡錘形であり、繰り返し回数が進むにつれて徐々に小さくなっている。鉛直ヒズミも初めの1~2サイクルにおいては大きいのが、徐々に小さくなる。

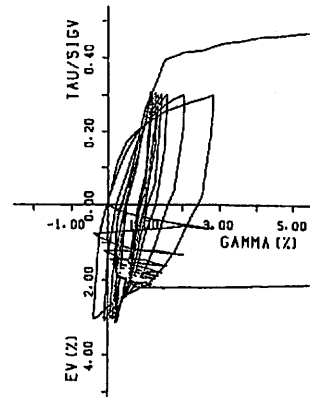


図-4. 応力-ヒズミ曲線

各サイクルにおける正負の最大せん断ヒズミ γ をプロットした一例を図-5に示す。応力比 $\tau/\sigma_v = 0.46$ の MEDIUM の例である。繰り返し前半にせん

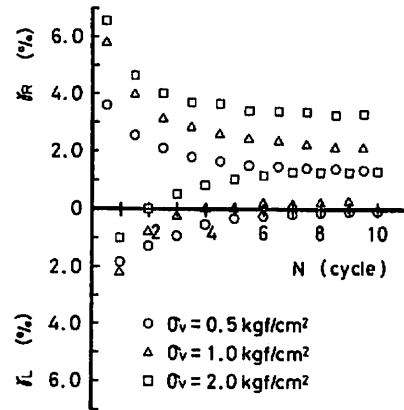


図-5. 繰り返しせん断に伴うせん断ヒズミの変化

断ヒズミ γ の減少が大きく、後半には次第に一定してくる。また、鉛直荷重 σ_v が大きくなるに従い、せん断ヒズミ γ は初期せん断方向にずれる傾向がある。他のケースでも同様の傾向が見られ、鉛直荷重が小さいケースでは、初期せん断方向と逆の方向にずれる傾向も見られた。

(2) 繰り返しせん断による密度増加

初期間隙比と繰り返しせん断による空隙比の変化量を、図-6に示す。鉛直荷重 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の

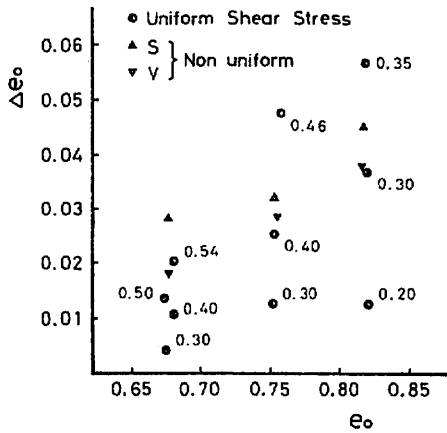


図-6. 初期間隙比と繰り返しせん断による間隙比の変化 ($\sigma_v=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

例である。図中、○印は一定荷重による繰り返しせん断試験の結果であり、△印と▽印はそれぞれ振動型と衝撃型の不規則荷重による繰り返しせん断試験の結果である。各印ごとに付けられた数字は応力比 τ/σ_v を示す。間隙比が大きい程、応力比が大きい程、間隙比の増加も大きく生じた。不規則荷重による繰り返しせん断の場合、一定荷重による場合の中間の主応力比のケースより間隙比の増加は大きかった。また、衝撃型と振動型では衝撃型の方が間隙比の増加が大きい。この二点より、せん断強さに近い荷重であるほど間隙比の増加が大きく、初めの3-4サイクルの影響が大きいことが予想される。

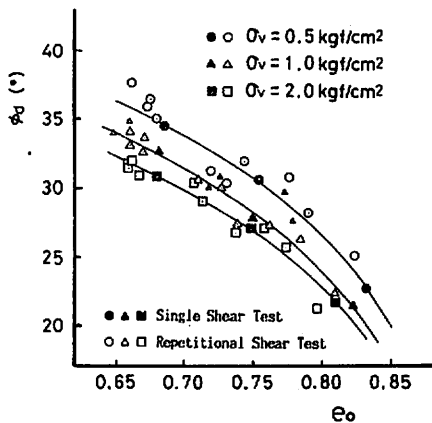


図-7. セン断抵抗角と間隙比の関係

3) 繰り返しせん断後のせん断強度

せん断抵抗角と間隙比の関係を図-7に示す。せん断抵抗角は $\phi_d = \tan^{-1}(\tau_t/\sigma_v)$ である。図中、黒印が一方せん断試験、白印が繰り返しせん断後の一方せん断試験を示している。○印、△印、□印はそれぞれ鉛直荷重 $\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ である。なお、小さな△印は不規則荷重による繰り返しせん断 ($\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) の場合を示している。鉛直荷重 $\sigma_v = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ のときには、密度増加に伴ったせん断抵抗角の増加以上に、せん断抵抗角が増加するケースが多い。しかし、鉛直荷重が大きくなると、密度の増加に伴ったせん断抵抗角の増加を示さないケースが増えてくる。繰り返しせん断による粒子の堆積構造の変化は拘束圧によってはあまり変化しないが、粒子そのものの変化は拘束圧が大きいと大きくなると考えられる。一定荷重によるケースと不規則荷重によるケースとを比較すると、不規則荷重の方が強度増加は大きいのではないかと思われる。衝撃型の不規則荷重の場合、LOOSEのケースを除いて、密度増加に伴った程度の強度増加であるが、振動型の場合には密度増加による以上にせん断抵抗角は増加している。LOOSEのケースの衝撃型は他の密度のケースに比較して、かなり大きなせん断抵抗角の増加を示している。

(4) 繰り返しせん断による粒子間摩擦角 ϕ_μ の変化

粒子間摩擦角 ϕ_μ と密度 ρ_d の関係を図-8に示す。図中、○印が一方せん断試験の結果であり、

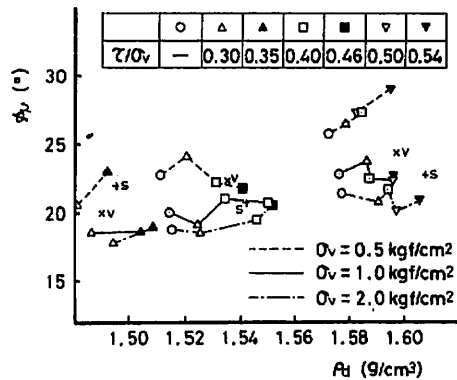


図-8. 粒子間摩擦角と乾燥密度の関係

他の印は繰り返しせん断後の一方せん断試験の結果である。粒子間摩擦角は増加するケースと減少するケースが見られる。一方せん断試験の結果から、密度が増加すると粒子間摩擦角は大きくなると考えられる。また、繰り返しせん断を受けると粒子の角の摩耗等により粒子間摩擦角が減少することも考えられる。しか、前節の傾向から、繰り返しせん断により粒子の堆積構造が変化し、粒子間摩擦角が増加することもあると考えられる。

(5) 内部摩擦角 ϕ と粒子間摩擦角 ϕ_m の関係

単純せん断における水平面の応力 (τ, σ_v) と主応力 (σ_1, σ_3) の関係のモールの応力円を、図-9のように定義する。図より、以下の関係⁴⁾が導かれる。

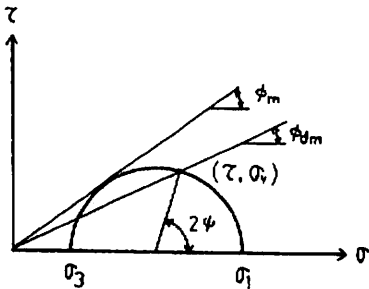


図-9. モールの応力円

$$\sigma_1 = (\tau^2 + \kappa \cdot \sigma_v^2) / (\kappa \cdot \sigma_v) \quad (4)$$

$$\sigma_3 = (1 - \kappa) \cdot \sigma_v \quad (5)$$

$$\sin \phi_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \\ = ((\tau / \sigma_v)^2 + \kappa^2) / ((\tau / \sigma_v)^2 + \kappa \cdot (2 - \kappa)) \quad (6)$$

ここで、 ϕ_m はせん断中にモービライズされた内

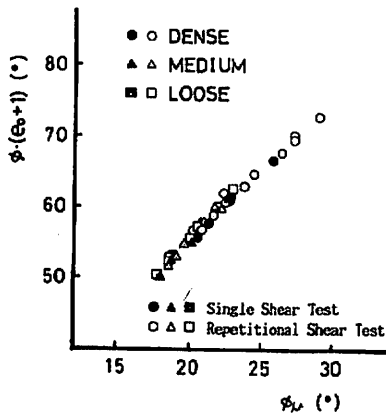


図-10. 内部摩擦角と粒子間摩擦角の関係

部摩擦角である

水平面上の最大せん断応力比 τ_1 / σ_v を用いて(6)式により求められた内部摩擦角 ϕ と、粒子間摩擦角 ϕ_m の関係を図-10に示す。縦軸は $\phi \cdot (e_0 + 1)$ 、横軸は ϕ_m である。 e_0 は一方せん断試験開始直前の間隙比である。なお、繰り返しせん断試験の場合は、せん断応力 τ がゼロとなった時点の間隙比を用いた。図中、○印、△印、□印はそれぞれ Dense, Medium, Loose を表しており、黒印は一方せん断試験、白印は繰り返しせん断後の一方せん断試験を表している。供試体の密度、拘束圧に関係なく、 $\phi(e_0 + 1)$ と ϕ_m の間には直線関係があるように思われる。一方せん断の場合と繰り返しせん断の場合を比較すると、両者に大きな差はないが、 $\phi_m < 25^\circ$ の範囲においては、繰り返しせん断のケースの方が若干上側にあるように思われる。繰り返しせん断により密度が増加する過程で、中間主応力 σ_2 の最小主応力 σ_3 に対する割合が変化していると予想される。

(6) 繰り返しせん断に伴ったせん断剛性 G と等価減衰定数 h の変化

図-11に応力比 $\tau / \sigma_v = 0.3$ のケースを示した。

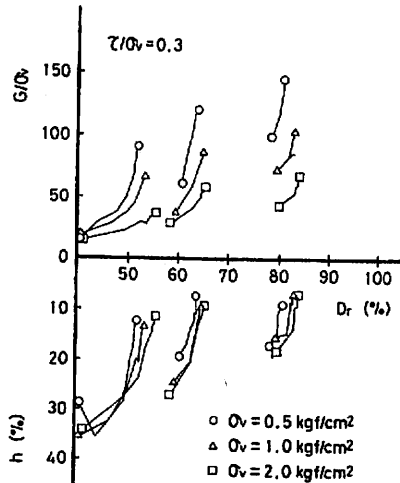


図-11. 繰り返しせん断に伴ったせん断剛性と等価減衰定数の変化

せん断剛性と鉛直荷重の比 G / σ_v と等価減衰定数 h を縦軸に、相対密度 D_r を横軸にとり、各サイクルの結果をプロットし、直線で結んだ。図中の○、△、□印は、それぞれ鉛直荷重 $\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

のケースであり、1サイクル目と10サイクル目に付けた。

G/σ_v の繰り返しセン断に伴った変化は、繰り返しセン断の初期には密度増加に釣り合った増加を示すが、繰り返し回数に伴って G/σ_v の密度に対する増加割合が増している。この傾向は鉛直荷重が低いほど、密度が高いほど顕著である。

h の大きさおよび繰り返しセン断に伴った h の変化は、初期密度に関係し、鉛直荷重とはあまり関係がないように思われる。1~10サイクルの間の h の変化量 Δh は、Loose のケースで約35%、Mediumで15~20%、Denseで約10%程度である。10サイクル目の h の値は密度による差は小さく、10%前後の値となっている。

(7) セン断剛性 G と等価減衰定数 h の関係

一定荷重による繰り返しセン断における等価減衰定数 h と、セン断剛性と鉛直荷重の比 G/σ_v との関係を示す。図-12(a)~(c)に示す。各ケースごとに1~

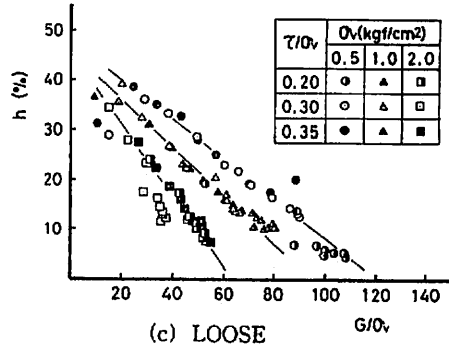
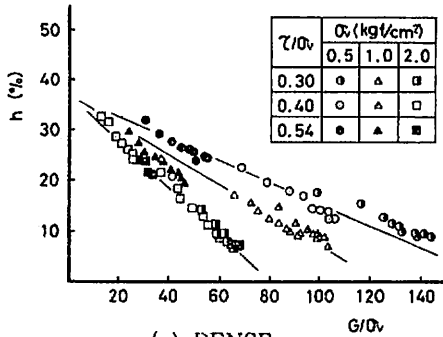


図-12. 等価減衰定数とセン断剛性の関係 (ケース①)

10サイクルの値をプロットしている。 h と G/σ_v の間には、応力比によって若干ズレがあるけれども、直線関係があるように思われる。図中の実線は各鉛直荷重ごとに、データを代表していると思われる直線を目視によって引いたものである。その直線の傾



(a) DENSE

図-12. 等価減衰定数とセン断剛性の関係 (ケース①)

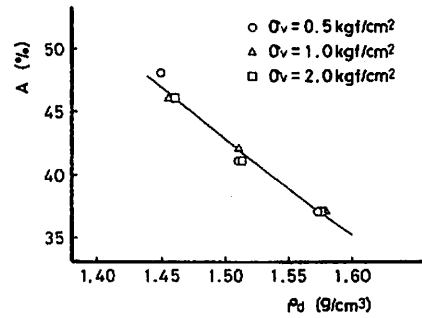
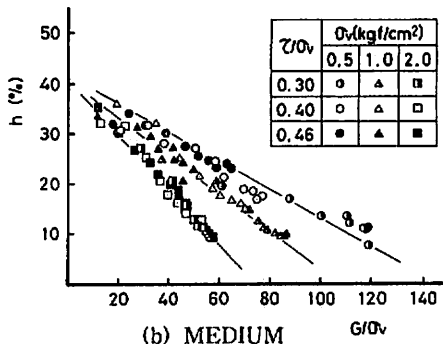


図-13. 直線の切片Aと乾燥密度の関係



(b) MEDIUM

図-12. 等価減衰定数とセン断剛性の関係 (ケース①)

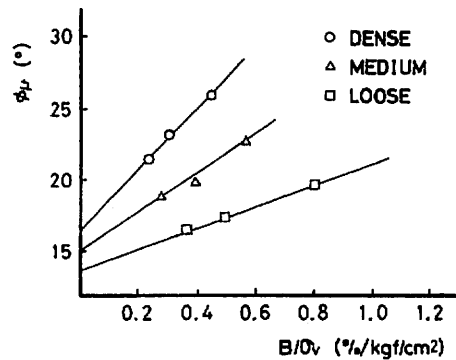


図-14. 直線の傾きBと粒子間摩擦角の関係

きは鉛直荷重が低い程、緩くなっている。得られた直線の切片Aと乾燥密度の関係を図-13に、直線の傾きと鉛直荷重の比 B/σ_v と粒子間摩擦角 ϕ_μ の関係を図-14に示す。図-13より、繰り返しせん断初期の等価減衰定数は密度が緩い程大きいことが分かる。 $h \sim G/\sigma_v$ 関係の直線の傾きは、密度、拘束圧及び粒子間摩擦角に関係しており、粒子間摩擦角が大きい程小さく、密度が緩い程大きくなることから、図中の実線は最小二乗法により求めたものであり、以下のような関係式で表されている。

$$A = 181.68/\rho_d - 78.37 \quad (7)$$

$$B = \frac{\phi_\mu \cdot \sigma_v - \sigma_v \cdot (22.43 \cdot \rho_d - 18.91)}{115.78 \cdot (\rho_d - 1.392)} \quad (8)$$

切片Aは乾燥密度だけでなく、他のパラメータも考慮する必要があるように思われる。また、傾きの係数Bの分母は $(\rho_d - 1.392)$ となっており、緩い密度のケースには適用出来ない。以上、2点の問題点があるが、 h および G の繰り返しせん断に伴った変

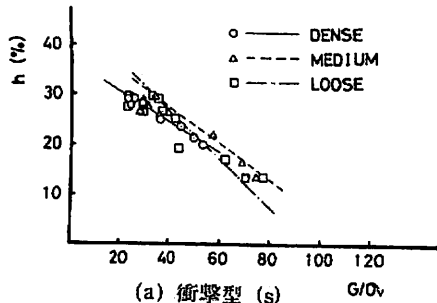


図-15. 等価減衰定数とせん断剛性の関係 (ケース②)

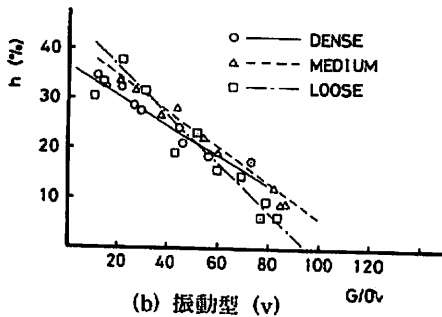


図-15. 等価減衰定数とせん断剛性の関係 (ケース②)

化を粒子間摩擦角で予想することができると考えられる。

不規則荷重による繰り返しせん断における h と G/σ_v の関係を図-15(a)-(b)に示す。図中の実線、破線、および一点鎖線はそれぞれ Dense, Medium, Loose のケースについて、(7)と(8)式より得られた直線を表している。かなりのばらつきが見られるが、各ケースとも、 h と G/σ_v の関係をかなり良く表していると思われる。

4. まとめ

- (1) 繰り返しせん断後のせん断強度は、密度増加による強度増加以上に増加するケースと、それ以下の増加にとどまるケースがある。拘束圧が増すに従い、密度増加に対応した値以上に増加するケースは減少するようになると思われる。
- (2) 内部摩擦角 ϕ は供試体の間隙比 e と粒子間摩擦角 ϕ_μ によって決定される。その関係は応力履歴、拘束圧に関係なく、一定の関係である。
- (3) 繰り返しせん断により等価減衰定数 h は減少し、せん断剛性 G は増加する。この時、両者の間には直線的な関係がある。この関係は供試体密度と粒子間摩擦角によって決定されると思われる。

なお、本研究を遂行するに当たり、大城林君（現東京工業大学）、金城隆雄君（現浦添市役所）、町田宗直君（現国場組）の助力を得たことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 許光瑞・加藤進・大城林：乾燥砂の繰り返し単純せん断特性に関する実験的研究，琉球大学工学部紀要，1987年10月
- (2) 石原研而：土質力学の基礎，1976年，鹿島出版会
- (3) Oda, M. and Konishi, J. : ROTATION OF PRINCIPAL STRESSES IN GRANULAR MATERIAL DURING SIMPLE SHEAR, SOILS AND FOUNDATIONS, VOL. 14, No. 4, Dec. 1974, pp.39 ~ 53

- 14) 落合英俊：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, No.4, Dec, 1975, pp.93 ~ 100
- 15) Oda, M. : ON THE RELATION $\tau / \sigma_v = \kappa \cdot \tan \phi$ IN THE SIMPLE SHEAR TEST, SOILS AND FOUNDATIONS, VOL. 15, No. 4, Dec, 1975, pp.35 ~ 41