琉球大学学術リポジトリ

乾燥砂の繰り返し一面セン断試験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, Direct Shear Test, Repetitional Shearing, Experimental Study, Relative Density, Angle of Shearing Resistance, Damping Factor 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/20.500.12000/1989

乾燥砂の繰り返し一面セン断試験に関する実験的研究

許　光瑞 *　　加藤　進 *

An Experimental Study on Repetitional Direct Shear Test of Dry Sand

Kozui KYO, Susumu KATO

SUMMARY

In case of supposing repetitional shear of soils, it is not so satisfactory to apply the usual type of direct shear test apparatus. The authors, in order to settle the above problems, improved the usual type of test apparatus to be sheared repetitionally. Herein, some experimental results were shown using the improved test apparatus.

The experiment was conducted in three kind of relative densities (Loose state: $D_r=25\%$, Medium state: $D_r=54\%$, and Dense state: $D_r=79\%$), and air dry TOYOURA uniform sand was used. The loading method of shear test are included three cases, such as: 1) Single direction shearing (Usual Type), 2) Repetitional shearing under the same displacement cycles (Constant cycles), 3) Repetitional shearing under the different displacement cycles (Increasing cycles).

The following results are obtained: 1) The shearing resistance τ_m increases as the repetitional cycles N increases, when the repetitional displacement was smaller than the maximum shearing displacement. 2) The angle of shearing resistance ϕ was influenced distinctly by repetitional shear test. The angle ϕ show a slight increase in comparison with the single direction shearing when the repetitional displacement was smaller than the failure displacement. 3) The hystorical damping factor h was shown in the range of $h=29\sim32\%$.

Key Words: Dry Sand, Direct Shear Test, Repetitional Shearing, Experimental Study, Relative Density, Angle of Shearing Resistance, Damping Factor.

受付：1985年4月30日

* 琉球大学工学部建設工学科

** 本論文の一部は日本建築学会昭和59年度大会（1984・10）にて発表したものである。

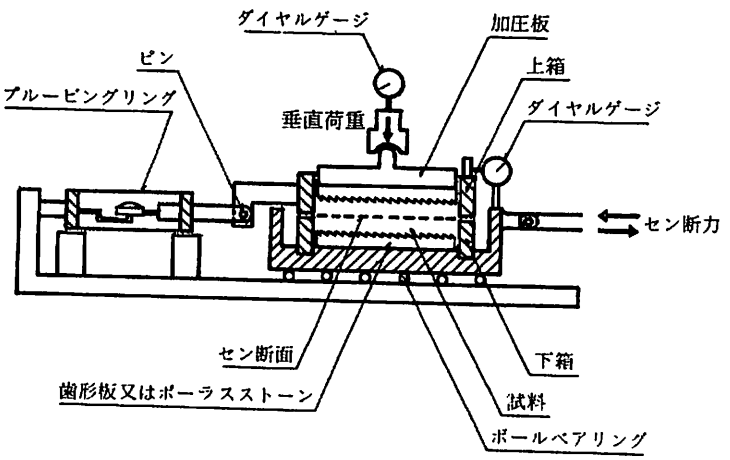
1．まえがき

砂の繰り返しセン断特性に関する研究は、その実験方法に関する研究も含め、多くの研究成果が発表されている。砂の繰り返しセン断特性がしだいに明らかにされるのに伴い、研究目的に応じた精度の高い試験機の開発がなされてきたことは既に知られているところである。しかし、要素試験で得られた結果を、砂箱での模型実験や実際の地盤における計測の解析等に用いる時、あるいは解析結果の妥当性を判断する時に、その目的によっては、かならずしも、精度の高いデータを必要としているわけではない。従来用いられてきた試験装置の中で、一面セン断試験装置はその構造上種々の問題があるが、取扱いはきわめて容易である。そこで、著者らは一面セン断試験機を改良し、正負両方向への繰り返しセン断が可能な繰り返し一面セン断試験機を試作した。前報告[1][2][3]に引き続き、本報告はこの試験機を用いた標準砂での実験結果を示すものである。

一面セン断試験機による砂のセン断抵抗の測定結果は三軸試験装置の結果と異なるばかりでなく、セン断箱の可動方式によっても著しくちがうことが井上[4]や山田[5]によって報告されている。また、井上[6]は上部可動型の一面セン断試験機と三軸試験機の差はおもに体積変化によるものであり、一面セン断試験機によって得られたセン断抵抗角 ϕ は2次元セン断の結果として妥当な値であるとも報告している。これより著者らは一面セン断試験機にはいくつかの問題点はあるが、繰り返しセン断特性の近似的な値を求めることは可能であろうと考えている。繰り返し一面セン断試験の結果の妥当性については今後の課題とし、今回は気乾砂の試験結果を報告する。

2．実験概要

2－1　実験装置



図－1　実 験 装 置

本実験装置は従来の在来型（B型）一面セン断試験機を、繰り返しセン断の可能な試験機に改良したものである。図－1にその概略図を示す。セン断箱は上箱と下箱からなり、下箱は水浸箱上に固定されている。

垂直荷重は加圧板の中心にある半球状の突起の上から載荷枠によって加えられ、この枠に垂直変位用ダイヤルゲージの足が接している。セン断力の作用線は供試体のセン断面上にある。上箱はやはりセン断面上に軸

を有する力計とつながっている。垂直荷重の作用点を移動させないでセン断力を加えるため、下箱を移動させてセン断する型式となっている。主な改良点は次の通りである。

1）セン断箱と力計（プルービングリング）、セン断箱と加力水平軸との接合はピン結合となっている。したがって、正負両方向のセン断力は正負両方向の軸力として伝達される。

2）セン断箱の水平移動量に正負2cmのクリアランスを設けて、繰り返し変位を可能とした。

2－2　供試体の作成方法

供試体は全て豊浦標準砂を気乾状態で用い、所定の網目のフルイを通してセン断箱内に試料を落下させて作成した。試料の一般性質を表－1に示す。試料の密度は Dense(D_r＝79%)、Medium(D_r＝54%)、Loose(D_r＝25%) の3段階に調整した。各密度ごとの試料の詰め方は、フルイの網目および落下高さを変えた一連の予備試験により、表－2に示す方法を採用した。

表－1　試料の一般性質

相対密度 Dr (%)	DENSE	MEDIUM	LOOSE
	79	54	25
密度 γ(gf/cm³)	1.564	1.486	1.403
土粒子比重 G_s	2.65		
最大密度 γ_{max} (gf/cm³)	1.638		
最小密度 γ_{min} (gf/cm³)	1.338		
有効粒径 D_{10}(mm)	0.13		
均等係数 U_c	1.3		

表－2　試料の詰め方

相対密度	詰め方
DENSE	網目 0.6mmのフルイを通し 高さ10cmからの落下
MEDIUM	網目 0.85mmのフルイを二重にし 高さ25cmからの落下
LOOSE	網目1.68mmのフルイを通し 高さ35cmからの落下

2－3　実験内容

実験はヒズミ制御方式により、V＝0.5mm/minのセン断速度にて、次の3シリーズに分けて、表－3に示すケースについて行なった。

1) 一方向セン断試験

2) 繰り返し変位量を一定とした繰り返しセン断試験

3) 繰り返し変位量を順次増大させた繰り返しセン断試験

なお、試料の密度は前記の3種類 (Dense、Medium、Loose) である。

各実験シリーズについて以下説明する。

(1)　一方向セン断試験

各密度ごとに垂直荷重を5段階 (σ_v＝0.3、0.6、0.8、

表－3　実験シリーズ

試験名	垂直荷重 σ_v(kgf/cm²)	方法
一方向セン断	0.3 0.6 0.8 1.1 1.3	セン断応力τが最大値を越えるまで、一方向へセン断する。
一定変位量の繰り返しセン断	0.3 0.6 1.1	D_H＝± 50(×10⁻²mm) ±100 ±150 ±200 ±250 } LOOSE のみ ±300 } LOOSE のみ } 6サイクルの繰り返しセン断後、セン断応力τが最大値を越えるまでセン断する。
変位量順次増大の繰り返しセン断	0.3 0.6 1.1	±50→±100→±150→±200と繰り返しセン断後、セン断応力τが最大値を越えるまでセン断する。

表－4　一方向セン断試験結果

密度	垂直荷重 σ_v(kgf/cm²)	セン断強さ τ_f(kgf/cm²)	セン断力ピーク時の水平変位D_H(×10⁻²mm)
DENSE	0.3	0.34	120
	0.6	0.58	120
	0.8	0.75	100
	1.1	0.98	140
	1.3	1.11	120
MEDIUM	0.3	0.30	120
	0.6	0.51	120
	0.8	0.66	120
	1.1	0.87	120
	1.3	1.00	120
LOOSE	0.3	0.27	360
	0.6	0.44	420
	0.8	0.57	520
	1.1	0.78	400
	1.3	0.89	480

1.1、1.3 kg f/cm²)に変えて、一方向セン断試験を行なった。セン断応力 τ と水平変位 D_H の関係を求め、セン断応力の最大値 τ_f とその時の水平変位 D_f を求めた。

(2) 繰り返し変位量を一定とした繰り返しセン断試験

各密度ごとに σ_v=0.3、0.6、1.1 kg f/cm²の垂直荷重を載荷し、繰り返しセン断試験を行なった。6サイクルの繰り返しセン断後、さらに破壊に至るまでセン断試験を行なった。なお、繰り返し変位量は $D_H=\pm50$(×10⁻²mm、以下単位省略)、±100、±150、±200の4ケースとした。試料の密度が Loose の場合については、他の密度に比較して、表－4に示すように一方向セン断における破壊時の水平変位 D_f が大きいので、$D_H=\pm250$、±300の2ケースを追加した。

(3) 繰り返し変位量を順次増大させた繰り返しセン断試験

繰り返し変位量を一定とした場合の実験と同様な密度及び荷重条件にて、繰り返し変位量を各サイクルごとに50(×10⁻²mm)ずつ増大させて、4サイクルの繰り返しセン断試験を行なった。一例を上げると、次のとおりである。

$$D_H=0\rightarrow+50\rightarrow-50\rightarrow+100\rightarrow-100\rightarrow+150\rightarrow-150\rightarrow+200\rightarrow-200\rightarrow0\rightarrow破壊$$

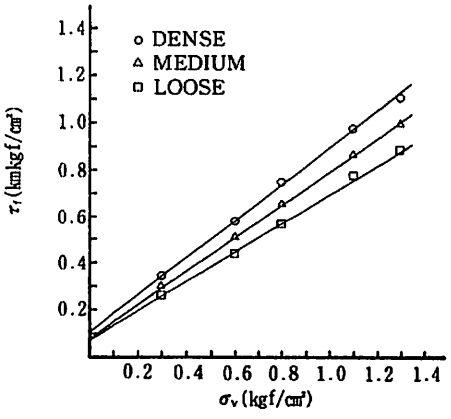
4サイクルの繰り返しセン断後、さらに破壊までセン断試験を行なった。

3．実験結果および考察

3－1　実験結果および考察

一方向セン断試験によって得られたセン断強さ τ_f とその時の水平変位 D_f の値を表－4に示す。D_f の値は、Dense の場合 D_f=100(×10⁻²mm)～140、Medium の場合 D_f=120、Loose の場合 D_f=360～480であった。D_f の大きさは試料の密度によって変わり、各実験における垂直荷重 σ_v とはまったく関係ないと考えられる。

図－2はセン断強さ τ_f と垂直荷重 σ_v の関係を示している。図より求められる Dense、Medium、Loose のセン断抵抗角 ϕ は、それぞれ38.5°、35.5°、32.0°である。



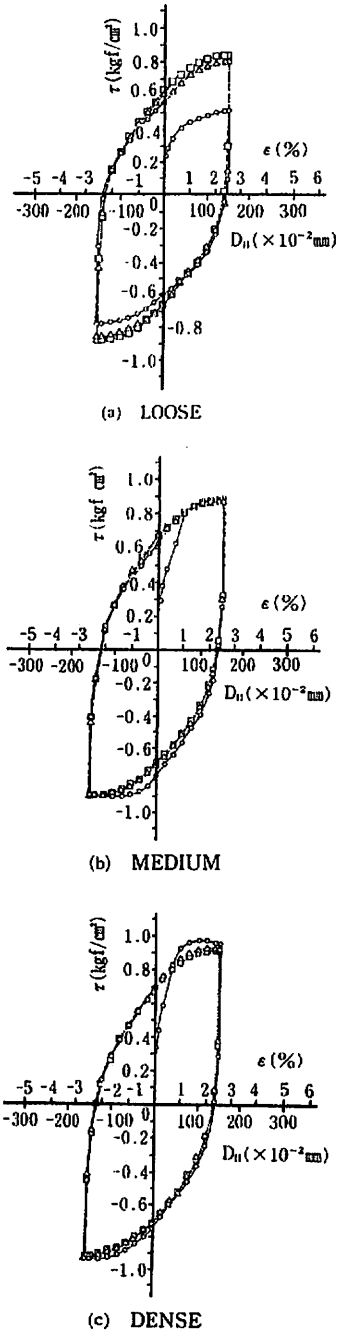
図－2　セン断強さ τ_f と垂直荷重 σ_v の関係

3－2　繰り返しセン断試験結果

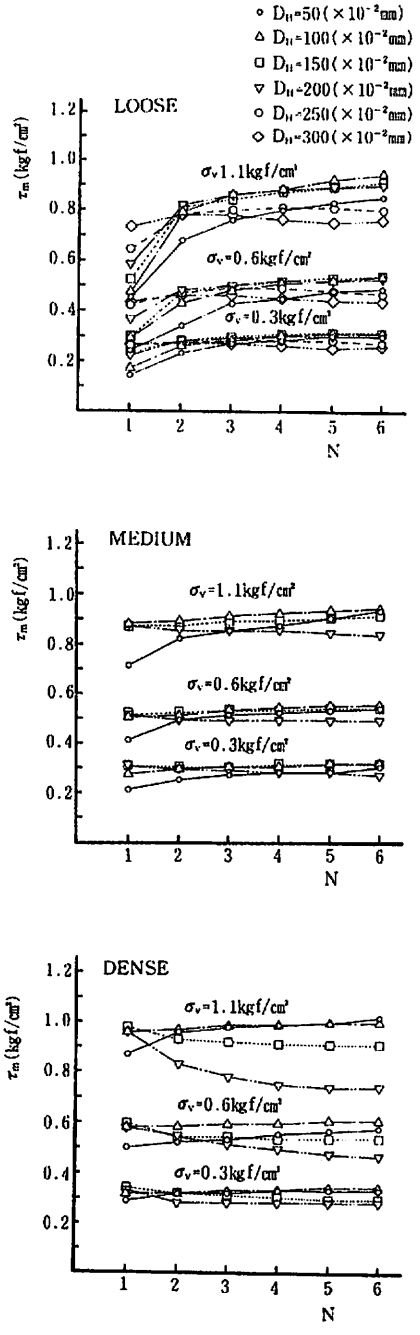
(1) 荷重－変位曲線（$\tau-D_H$ 曲線）

繰り返し変位量を一定とした繰り返しセン断における荷重－変位曲線の代表的な例として、図－3に垂直荷重 σ_v=1.1kg f/cm²、繰り返し変位量 $D_H=\pm150$の結果を示した。縦軸にセン断応力 τ をとり、横軸に水平変位量 D_H をとっている。横軸上側の目盛 ε は水平変位量 D_H を供試体の直径（D＝6cm）で割った値、すなわちヒズミである。ループの面積の大きさは、Dense、Medium、Loose の順である。また、図の1サイクル目は2～6サイクル目と異なった形を示している。これは2サイクル目以後、1サイクル目と異なりセン断履歴のある状態で繰り返しセン断を受けるためである。

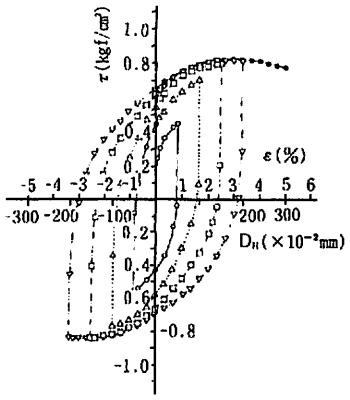
各サイクルのセン断応力の最大値 τ_m と繰り返し回数 N の関係を図－4に示す。垂直荷重 σ_v=1.1 kg f/cm²の荷重条件において、繰り返し変位量 D_H が小さい時は繰り返し回数 N に伴って τ_m は増加するが、D_H が大きくなると Dense においては D_H=150から、Medium においては D_H=200から減少傾向に変わる。また、Loose においても同様な傾向を示す。繰り返し回数 N に伴っての τ_m の増加は Loose においてもっとも顕著に現われる。これは繰り返しセン断を受けることによって、密度が大幅に増加するためであると考えられる。各垂直荷重 σ_v における τ_m の変化を比較すると、垂直荷重が大きいほど τ_m の値だけでなく、繰り返し回数 N に伴った τ_m の変化も大きくなる。しかし、垂直荷重 σ_v を



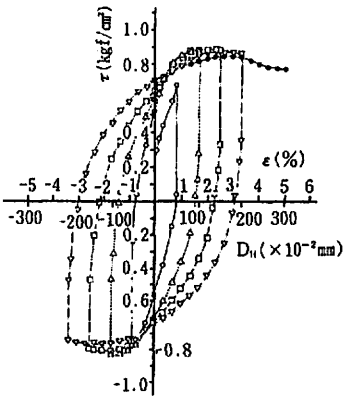
図－3　荷重－変位曲線（繰り返し変位量一定）
σ_v=1.1kgf/cm²、N=1～3サイクル



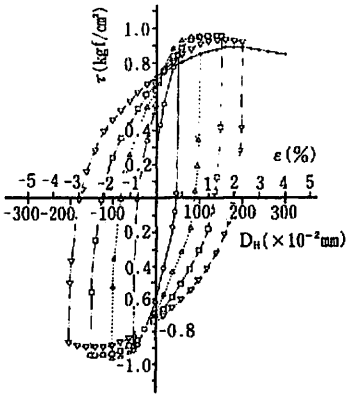
図－4　セン断応力τ_mの変化



(a) LOOSE



(b) MEDIUM



(c) DENSE

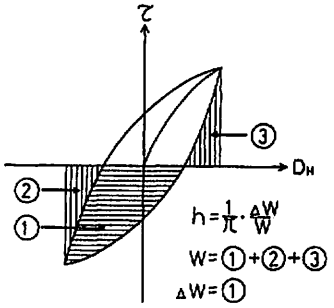
図－5　荷重－変位曲線σ_v=1.1kgf/cm²（繰返し変位量順次増大）

変えても各 D_H ごとの繰り返し回数 N に伴なった変化は、前述した σ_v＝1.1 kg f/cm²の場合と同じ傾向を示している。

繰り返し変位量を順次増大した場合の代表例として、垂直荷重 σ_v＝1.1 kg f/cm²の結果を図－5 に示す。図－3 と同様、縦軸にセン断応力 τ、横軸に水平変位 D_H をとっている。Dense の場合は 3 サイクル (D_H＝150) 以後に順次 τ_m の減少が見られる。これは繰り返し変位が既に破壊ヒズミを越えたことによるものと考えられる。Medium の場合は 3 サイクルまで増加を続け、4 サイクル目で減少している。Loose の場合は、各サイクルごとに τ_m は増加し続けた。

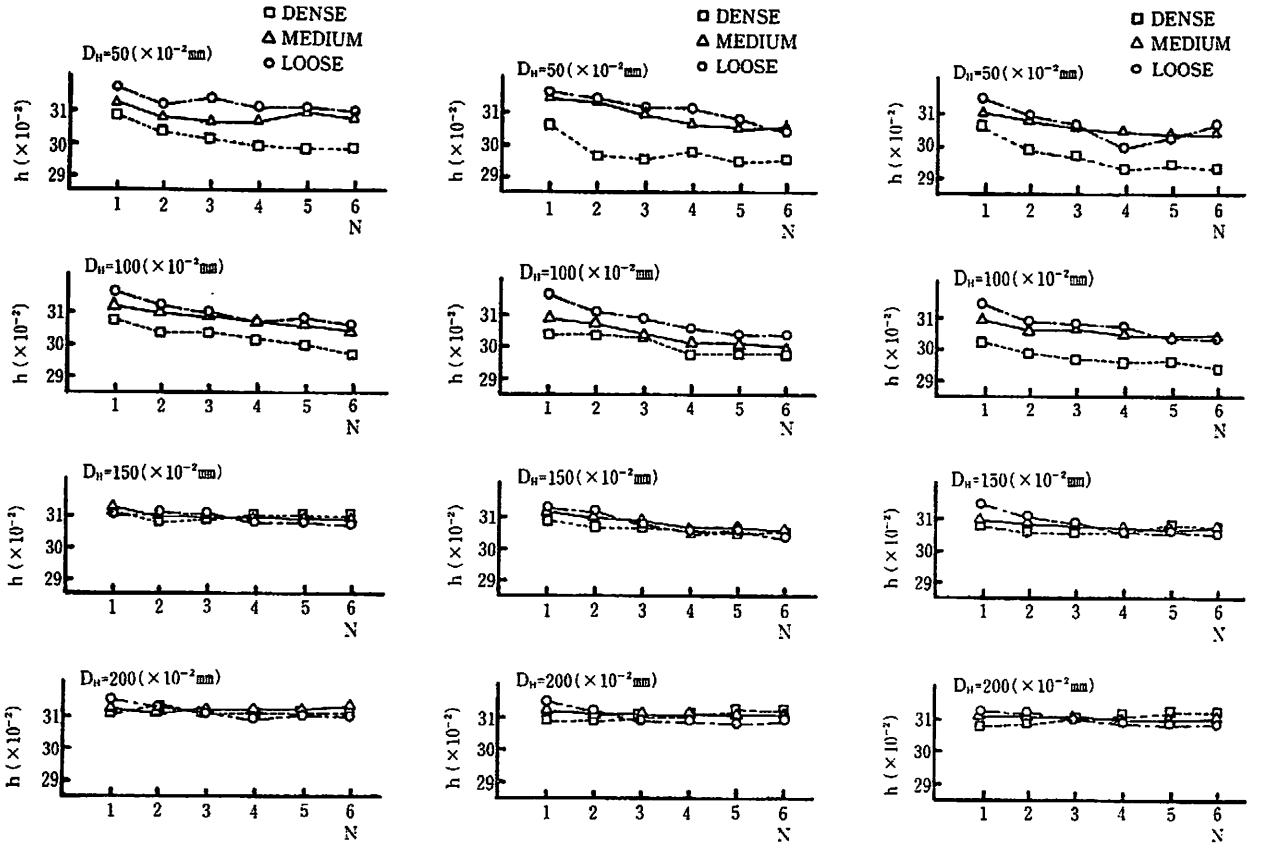
(2)　履歴減衰定数

履歴減衰定数 h を図－6に示すように定義[7]し、以下の解析に用いた。



図－6　履歴減衰定数の算定法

繰り返し変位量を一定とした場合、図－3 の荷重－変位曲線を用いて算出し、図－7 に示した。各垂直荷重 (σ_v＝0.3、0.6、1.1 kg f/cm²) と各繰り返し変位量 (D_H＝±50、100、150、200) ごとに、縦軸に減衰定数 h を横軸に繰り返し回数 N をとって結果をプロットした。図より、D_H＝100 まで減衰定数 h は Loose、Medium、Dense の順に大きく、繰り返し回数を増加すると次第に小さくなることがわかる。D_H＝150 の減衰定数は 4 サイクル以後ほぼ一定した値を示している。D_H＝200 の場合は試料の密度によって減衰定数にあまり大きな差は見られないが、繰り返し回数の増加に伴って Loose は小さくなり、Dense は大きくなる傾向が若干あるよ



(a) σ_v=0.3kgf/cm²　(b) σ_v=0.6kgf/cm²　(c) σ_v=1.1kgf/cm²

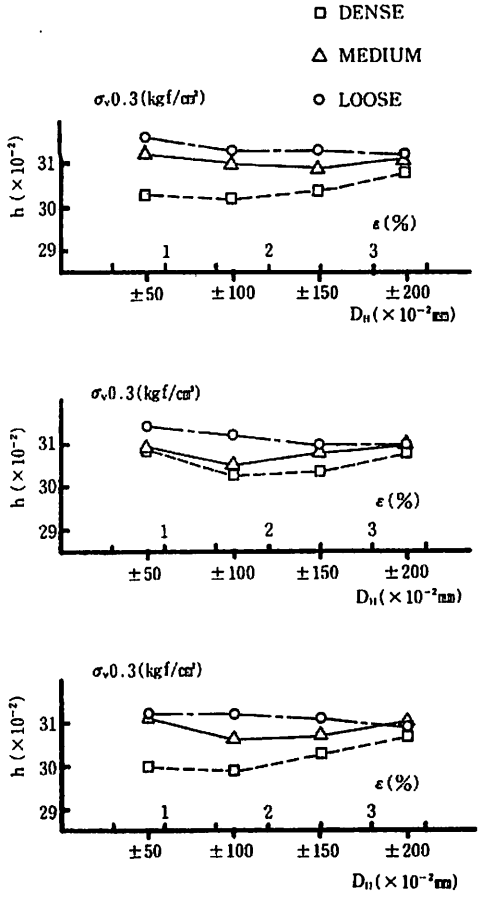
図－7　履歴減衰定数hの変化（繰り返し変位量一定）

うである。同じ密度に対しては繰り返し変位量 D_H が大きいほど減衰定数も大きくなっている。垂直荷重 σ_v の大きさによる差はほとんどないようである。減衰定数の分布範囲はほぼ 29～32% である。

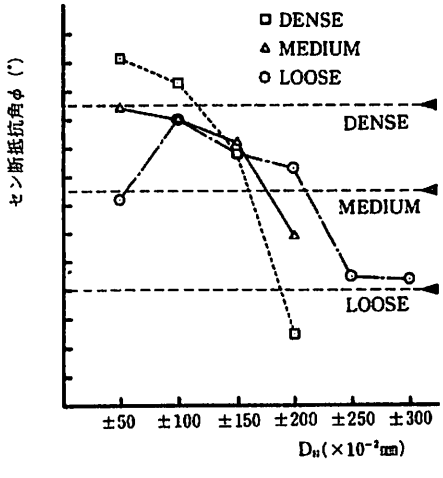
繰り返し変位量を順次増大した場合の履歴減衰定数 h は図－8のようになる。各垂直荷重（σ_v＝0.3、0.6、1.1kg f/cm²）ごとに、縦軸に減衰定数 h を、横軸に水平変位 D_H をとって結果をプロットした。Loose の場合は水平変位 D_H が大きくなるに従い減衰定数 h はやや小さくなる。他の密度の場合、D_H＝±100までは減衰定数 h が小さくなるが、D_H＝±150以上になると大きくなるようである。全体的に見た場合、密度が大きいほど減衰定数 h は小さいようである。垂直荷重による相異はあまりみられず、ほぼ h＝30.0～31.5%の範囲に分布している。

(3)　セン断抵抗角の変化

各一定変位量 D_H で繰り返しセン断後、継続してセン断応力 τ が最大値を越えるまで試験を行ない、セン断抵抗角 ϕ を求めた所図－9に示す結果となった。縦軸にセン断抵抗角 ϕ をとり、横軸に繰り返し変位量 D_H をとった。繰り返しセン断を受ける前のセン断抵抗角は、Dense の場合 ϕ＝38.5°、Medium の場合 ϕ＝35.5°、Loose の場合 ϕ＝32.0° であり、図中、矢印で示されている。どの密度においても繰り返し変位量が大きいほど、セン断抵抗角 ϕ は小さくなる傾向を示し、その低下の割合は密なほど大きい。D_H＝±50、±100 では密な試料の方が大きいセン断抵抗角 ϕ を示すが、D_H＝±150 で 3 者が一致し、D_H＝±200 ではゆるい試料の方が大きいセン断抵抗角 ϕ を示す。Loose の場合は全ての繰り返し変位量に於いて履歴前のセン断抵抗角より大きいが、Dense の場合は D_H＝150 から、Medium の場合は D_H＝200 から履歴前のセン断抵抗角よりも小さくなる。これは繰り返し回数 N に伴なって最大セン断応力 τ_m が減少する水平変位 D_H と一致している。



図－8　履歴減衰定数
（繰り返し変位量順次増大）



図－9　セン断抵抗角ϕの変化

繰り返し変位量を順次増大した場合についても、繰り返しセン断試験後、継続してセン断抵抗 τ が最大値を越えるまで試験を行なった。繰り返しセン断を受けた場合のセン断強さ τ'_f と、繰り返しセン断を受けない場合のセン断強さ τ_f との比を表−5に示す。表によると、密度がゆるいほどその比 τ'_f/τ_f は大きくなっている。

表−5　各試験におけるセン断強さの比

密　度 D_r(%)	垂直荷重 σ_v(kgf/cm²)	セン断強さの比 τ'_f/τ_f
79	0.3	0.82
	0.6	0.84
	1.1	0.91
54	0.3	0.97
	0.6	0.98
	1.1	0.98
25	0.3	1.08
	0.6	1.14
	1.1	1.06

4．むすび

以上、気乾砂の繰り返し一面セン断試験について述べてきた。その主な結果をまとめると次のようである。

(1) 繰り返し回数Nに伴う各サイクルのセン断応力の最大値 τ_m の増加傾向は、Dense(D_r=79%)の場合繰り返し変位量 $D_H=\pm150\times10^{-2}$mm(ε=2.5%)、Medium(D_r=54%)の場合 $D_H=\pm200\times10^{-2}$mm(ε=3.3%)、Loose(D_r=25%)の場合 $D_H=\pm300\times10^{-2}$mm(ε=5.0%)から減少傾向へ変わる。

(2) セン断履歴を受けた後のセン断抵抗角 ϕ は破壊ヒズミを越える繰り返し変位量では履歴前より小さくなり、越えない場合は大きくなる。

(3) 履歴減衰定数hは約29〜32%の範囲にある。

なお、本研究を遂行するに当たり、島幸雄君（現那覇市役所）、仲本浩明君（現クニ建築設計事務所）、宮平尚君（現沖縄県庁）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：砂の繰り返し一面セン断試験に関する実験的研究（その1：中間密度の乾燥砂）、日本建築学会学術講演梗概集、1983年9月
2) 許光瑞・加藤進：砂の繰り返し一面セン断試験に関する実験的研究（その2：繰り返し変位量を順次順大した場合）、日本建築学会学術講演梗概集、1984年10月
3) 許光瑞・加藤進：砂の繰り返し一面セン断試験に関する実験的研究（その3：繰り返し変位量が一定の場合）、日本建築学会学術講演梗概集、1984年10月
4) 井上広胤：砂の直接セン断について、土と基礎、1964年7月
5) 山田清臣：砂のセン断に関する一斉試験、土と基礎、1965年2月
6) 井上広胤：砂の直接セン断に関する研究、土木学会論文集第108号、1964年8月
7) 田治見宏：建築振動学、1965年、コロナ社