

# 琉球大学学術リポジトリ

## 飽和砂の繰り返し一面せん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): Saturated 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	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/1988">http://hdl.handle.net/20.500.12000/1988</a>

飽和砂の繰り返し一面せん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 Saturated Sand**

Kozui KYO and Susumu KATO

**Summary**

The usual type of direct shear test apparatus was improved to be sheared repetitively in order to obtain the approximate characteristics of repetitional shear of soils. The authors have reported formerly some results of dry sand using the above apparatus. Herein, some experimental results on saturated sand are shown using the same apparatus.

The experiment was conducted in three kind of relative densities (Loose state:  $D_r=25\%$ , Medium state:  $D_r=54\%$ , and Dense state:  $D_r=78\%$ ), and Toyoura uniform sand was used. The shearing test are conducted in two cases, such as: 1) Single direction shearing, 2) Repetitional shearing under a given displacement.

The following results are obtained: 1) The shearing resistance  $\tau_m$  increases as the repetitional cycles  $N$  increases during the displacement of repetition of cycles  $D_H$  ( $\times 10^{-2}$  mm) smaller than  $\pm 150$  in dense state,  $\pm 200$  in medium state, and  $\pm 300$  in loose state. 2) The hysterical damping factor  $h$  obtained here was in the range of  $h=26.0\sim 31.5\%$ . 3). The angle of shearing resistance  $\phi$  obtained after repetitional shear test show a slight increase comparing with the single direction shearing when the repetitional displacement was conducted under  $D_H=\pm 50\sim \pm 100$ . The increasing of  $\phi$  could be consider as the density increasing caused by the repetitional shearing.

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

受付：1985年10月31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60年度大会（1985・10）に発表したものである。

## 1. まえがき

取扱いの容易な一面セン断試験機で、砂の繰り返しセン断特性を調べることが出来ないだろうかと考え、著者らは正負両方向への繰り返しセン断の可能な繰り返し一面セン断試験機を試作し、気乾砂（豊浦標準砂）での実験結果を前報告<sup>1)</sup>で示した。本報告はこれまでに発表してきた飽和砂での実験結果<sup>2),3)</sup>と、補足して行った乾燥砂での実験結果とをあわせて報告するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験装置及び供試体の作成方法

本実験に使用した試験装置は前報告で示した繰り返し一面セン断試験機である。なお、前報告における気乾砂での実験においては、供試体の上面へセン断力を伝達する板に黄銅製の歯形板を用いたが、今回は水を注水する必要性から、ポーラストーンの板を用いた。

供試体は表-1に示す豊浦標準砂を、気乾状態でセン断箱内に空中落下させて所定の密度状態に詰め、供試体に垂直荷重を賦荷した後、せん断箱内に水を注水し、作成した。なお、実験中はセン断箱を水浸させた状態とした。各密度（Dense, Medium, Loose）の詰め方はフルイの網目、砂の落下高さおよび単位時間当りの落下量を変えた一連の予備実験により、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 $D_r$ (%)	DENSE	MEDIUM	LOOSE
密度 $\gamma$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1.562	1.486	1.403
土粒子比重 $G_s$	2.65		
最大密度 $\gamma_{max}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1.638		
最小密度 $\gamma_{min}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	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0.84 mmのフルイを通し ポート径5.85 mmを使い高さ21 cm から落下
MEDIUM	網目0.84 mmのフルイを通し ポート径9.32 mmを使い高さ16 cm から落下
LOOSE	ポート径9.32 mmを使い高さ29 cmから落下

表-3 実験シリーズ

試験名	垂直荷重 $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	方 法
一方向セン断	0.3 0.6 1.1 1.6 2.1	セン断応力 $\tau$ 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	$D_H = \pm 50 (\times 10^{-2} \text{mm})$ $\left. \begin{array}{l} \pm 100 \\ \pm 150 \\ \pm 200 \\ \pm 300 \end{array} \right\} \text{LOOSE}$ のみ } 6サイクルの 繰り返しセン 断後、セン断 応力 $\tau$ が最大 値を越えるま でセン断する。

2.2 実験内容

実験はヒズミ制御方式により,  $V=0.5 \text{ mm/min}$  のセン断速度にて, 一方向セン断試験のシリーズと繰り返しセン断試験のシリーズに分け, 表-3 に示すケースについて実験を行った。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 ( $\sigma_v=0.3, 0.6, 1.1, 1.6, 2.1 \text{ kgf/cm}^2$ ) に変えて一方向セン断試験を行った。水平変位  $D_H$  (上下セン断箱間の相対変位) に対応するセン断応力  $\tau$  と鉛直変位を測定した。なお, 同様な条件 (供試体端面の押えにポーラスストーンを使用) で, 乾燥砂についても実験を行った。

(2) 繰り返しセン断試験

繰り返し変位量を一定とした6サイクルの繰り返しセン断試験を, 各密度ごと, 3段階の垂直荷重 ( $\sigma_v=0.3, 0.6, 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ ) について行った。繰り返し変位量は  $D_H=\pm 50 (\times 10^{-2} \text{ mm})$ , 以下単位省略),  $\pm 100, \pm 150, \pm 200$  の4ケースとした。なお, 試料の密度が Loose の場合については  $\pm 300$  のケースを追加した。一方向セン断試験同様, 水平変位  $D_H$  に対応するセン断応力  $\tau$  と鉛直変位  $D_v$  を側定した。なお, 垂直荷重  $\sigma_v=1.1 \text{ kgf/cm}^2$  の時の  $D_H=\pm 50$  と  $\pm 150$  の2ケースについて, 一方向セン断試験の場合と同様, 飽和砂と同じ条件で乾燥砂についても実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 一方向セン断試験

セン断試験によって得られた各垂直荷重  $\sigma_v$  におけるセン断強さ  $\tau$  の値を表-4 に示す。これらの結果より求められた飽和砂の Dense, Medium, Loose のセン断抵抗角  $\phi$  は, それぞれ  $37.0^\circ, 34.4^\circ, 32.2^\circ$  である。同様に乾燥砂のセン断抵抗角は, それぞれ  $38.8^\circ, 34.2^\circ, 32.7^\circ$  である。セン断抵抗角  $\phi$  と試料の密度との関係を図-1 に示す。図中, ●印は飽和砂を○印は乾燥砂を表わしている。なお, 図中の△印は供試体端面の押え板として歯形板を用いた前報告 (乾燥砂) での結果を表わしている。なお, 横軸の相対密度  $D_r$  は  $\sigma_v=0.1 \text{ kgf/cm}^2$  の荷重を載荷した時点での供試体内の平均密度である。Loose および Medium

表-4 一方向セン断試験結果

密度	垂直荷重 $\sigma_v: (\text{kgf/cm}^2)$	セン断強さ $\tau (\text{kgf/cm}^2)$	
		飽和砂	乾燥砂
DENSE	0.3	0.326	0.325
	0.6	0.523	0.545
	1.1	0.870	0.914
	1.6	1.272	1.343
	2.1	1.679	1.762
MEDIUM	0.3	0.308	0.280
	0.6	0.472	0.478
	1.1	0.827	0.852
	1.6	1.198	1.203
	2.1	1.496	1.483
LOOSE	0.3	0.256	0.256
	0.6	0.459	0.462
	1.1	0.751	0.774
	1.6	1.157	1.066
	2.1	1.396	1.430

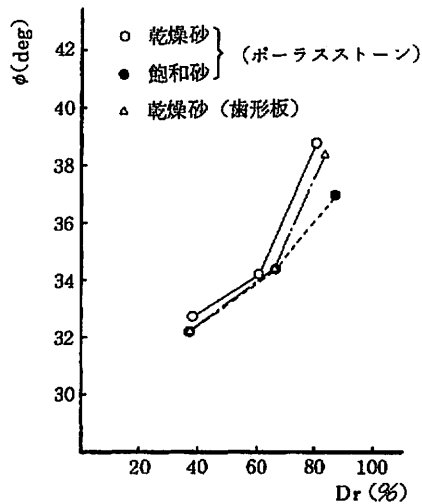


図-1 セン断抵抗角と相対密度

の場合は乾燥砂と飽和砂でほとんど差がないが、Denseになると2度近い差となって表われてくる。これより、乾燥砂に比較して、飽和砂はインターロッキングによる強度増加が小さいと考えられる。

### 3.2 繰り返しせん断試験

#### (1) 荷重—変位曲線

繰り返しせん断における荷重—変位 ( $\tau$ - $D_H$ ) 曲線の代表的な例として、図-2に試料密度 Medium, 垂直荷重  $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ , 繰り返し変位量  $D_H = \pm 50$  の結果を示した。縦軸にせん断応力  $\tau$  をとり、横軸に水平変位  $D_H$  をとっている。横軸上側の目盛  $\epsilon$  は水平変位  $D_H$  を供試体の直径 ( $D=6 \text{ cm}$ ) で割った値、すなわちヒズミである。繰り返し回数  $N$  に伴って、 $D_H$  に対応するせん断応力  $\tau$  の値が大きくなっている。繰り返し変位量  $D_H$  が大きい他のケースの場合、1サイクル目を除いてその差は小さくなる。全ケースとも、ループの形状は乾燥砂について得られた前報告のもの

似た形状となっている。

各サイクルのせん断力の最大値  $\tau_m$  と繰り返し回数  $N$  の関係を図-3に示す。各密度とも繰り返し変位量が小さい時は繰り返し回数  $N$  に伴って  $\tau_m$  は増加するが、 $D_H$  が大きくなると次第に増加の割合が小さくなり、Denseにおいては  $D_H = \pm 150$  から、Mediumにおいては  $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$  以外は  $D_H = \pm 200$  から、Looseにおいては  $D_H = \pm 300$  から  $N$  に伴って  $\tau_m$  は減少する傾向がみられる。各垂直荷重  $\sigma_v$  における  $\tau_m$  の変化を比較すると、垂直荷重  $\sigma_v$  が大きいほど  $\tau_m$  の値だけでなく、繰り返し回数  $N$  に伴った  $\tau_m$  の変化も大きくなる。これらの傾向は前報告とはほぼ同じ傾向である。

#### (2) 繰り返しせん断による密度変化

繰り返しせん断の直前における供試体密度と、垂直荷重の関係を図-4に示す。図中、各設定密度を破線で、垂直変位より推定した密度を○印で示した。供試体の密度は試料を詰めた時よりも、その後の垂直荷重の載荷及び注水により増加して

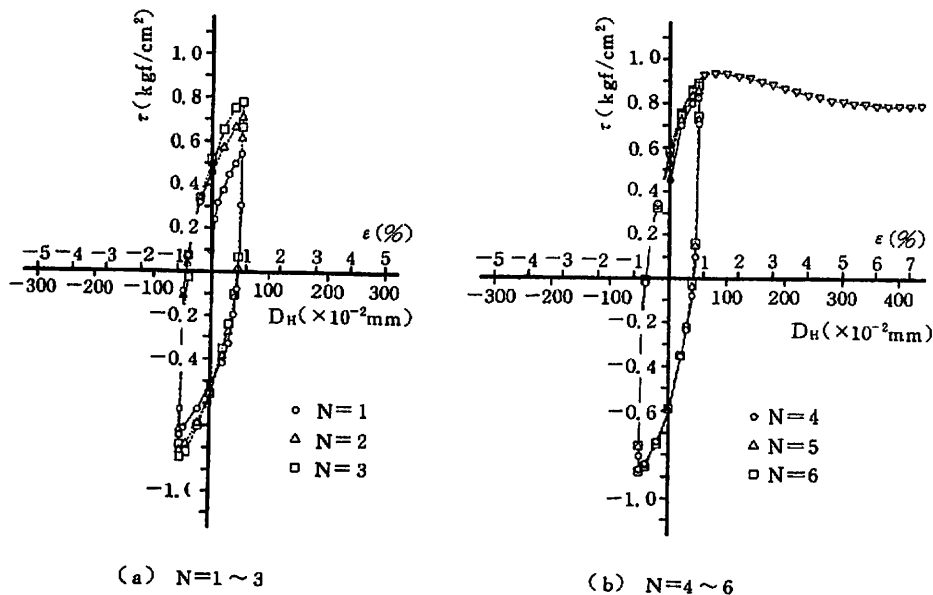


図-2 荷重—変位曲線 (繰り返し変位量一定)  
 $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $D_H = \pm 50 (\times 10^{-2} \text{ mm})$

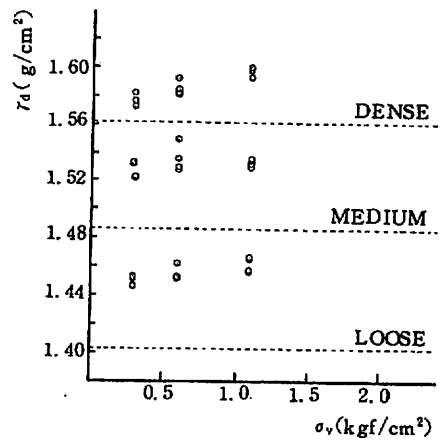
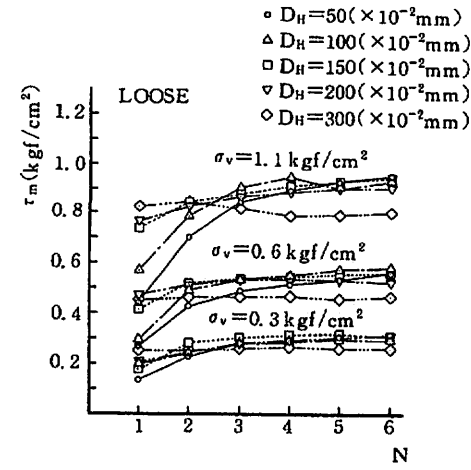


図-4 供試体密度と垂直荷重

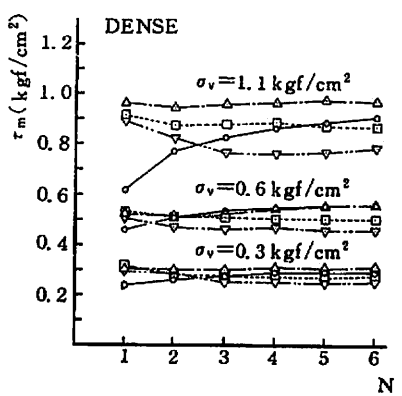
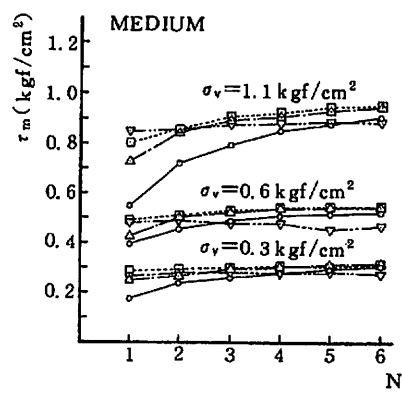


図-3 セン断応力  $\tau_m$  の変化

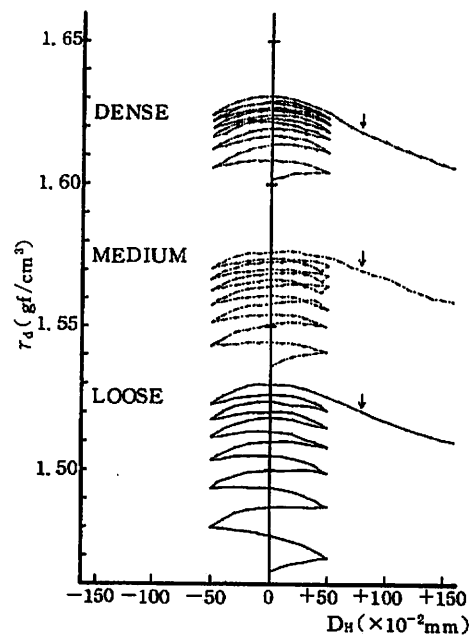


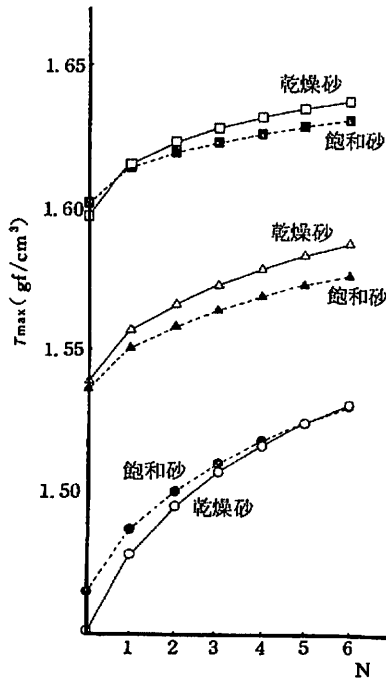
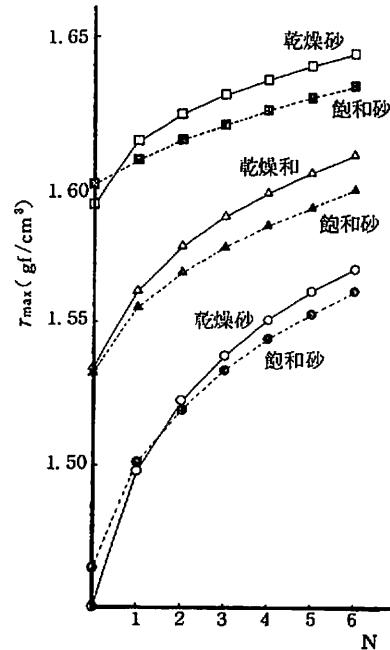
図-5 繰り返しセン断中の密度変化

いる。密度は垂直荷重 $\sigma_v$ が大きいほど密になるが密度増加の割合は垂直荷重 $\sigma_v$ が大きくなるに従い徐々に小さくなるようである。各密度の密度増加を比較すると、ゆるい砂ほど密度増加が大きく生じている。

繰り返しセン断中の密度変化の一例として、図-5に垂直荷重 $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、繰り返し変位量 $D_H = \pm 50$ の結果を示した。横軸に水平変位量 $D_H$ をとり、縦軸に垂直変位より求めた供試体の平均密度 $r_d$ をとっている。各密度とも、1サイクル目が最も密度増加が大きく、2サイクル目以後、順次密度増加が減少している。また、Looseの場合、最も大きな密度増加を生じている。図中の矢印は6サイクル繰り返しセン断後、継続して一方向へセン断した時、セン断応力 $r$ が最大となった点を示している。

各サイクルにおける密度の最大値 $r_{max}$ と繰り返し回数 $N$ の関係を図-6に示す。図は $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $D_H = \pm 50$ および $D_H = \pm 150$ のケースである。図中、黒印は飽和砂、白印は乾燥砂を表わしている。飽和砂、乾燥砂ともに供試体端面の押え板としてポーラスストーンを用いた場合の結果であり、密度に関係なく、乾燥砂のほうが密度増加が大きいことがわかる。

繰り返しセン断後の乾燥密度 $r_d$ と繰り返し変位量 $D_H$ の関係を図-7に示す。各密度とも、 $D_H$ が大きいほど密度が増加する傾向がある。Denseの場合 $D_H = \pm 50$ 、Mediumの場合 $D_H = \pm 100$ 、Looseの場合 $D_H = \pm 150$ 以上になると、密度の増加量にあまり差がみられなくなる。

(a)  $D_H = 50 (\times 10^{-2} \text{ mm})$ (b)  $D_H = 150 (\times 10^{-2} \text{ mm})$ 図-6 供試体密度  $r_{max}$  と繰り返し回数  $N$  の関係,  $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$

(3) セン断抵抗角の変化

繰り返しセン断後、継続して一方向へセン断し測定されたセン断応力の最大値  $r_t$  よりセン断抵抗角  $\phi$  を求めたところ、図-8に示す結果となった。図中、横軸は繰返し変位量  $D_H$  であり、縦軸はセン断抵抗角である。繰り返しセン断を受ける前のセン断抵抗角は、Dense の場合  $\phi = 37.0^\circ$ 、Medium の場合  $\phi = 34.4^\circ$ 、Loose の場合  $\phi = 32.2^\circ$  であり、図中矢印で示されている。

測定した範囲内では、 $D_H = \pm 50 \sim \pm 100$  の繰り返しセン断によって各密度ともセン断抵抗角が増大するが、Loose の場合最も大きく、履歴を受けない場合に比べて  $8 \sim 9^\circ$  の増加となった。Dense は  $D_H = \pm 100$ 、Medium と Loose は  $D_H = \pm 150$  以上の繰り返しセン断を受けるとそれよりも小さな  $D_H$  の繰り返しセン断を受ける場合に比較して、セン断抵抗角は急激に減少し始める。また、密な試料は  $D_H = \pm 150$  以上の繰り返しセン断を受けると、履歴を受ける前よりセン断抵抗角が小さくなっている。

(4) 履歴減衰定数

繰り返し回数  $N$  と履歴減衰定数  $h$  の関係を図-9に示す。垂直荷重が大きくなると、減衰定数は若干小さくなる傾向がある。その差は Dense の場合に最も大きく現われており、 $\sigma_v = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$  と  $1.1 \text{ kgf/cm}^2$  とを  $D_H = \pm 50$ 、 $N = 6$  サイクルの値で比較すると、1.5%近い差となっている。Medium、Loose となるに従い、 $\sigma_v$  による差は小さくなる。

次に密度による影響を比較すると、 $D_H = \pm 50$  において密な試料ほど  $h$  は小さな値であり、 $D_H$  が大きくなるに従い、その差は小さくなるようである。そして、 $D_H = \pm 200$  になると、逆に密な試料の方が  $N = 2$  サイクル以後において若干大きな  $h$  となっている。

繰り返し回数  $N$  に伴った  $h$  の変化は、 $D_H = \pm 100$  までは減少する傾向がある。しかし、 $D_H = \pm 150$  以上になると  $N$  による差はほとんどなくなる。

繰り返し変位量  $D_H$  が大きくなるに従い、密度、垂直荷重に関係なく  $h$  は徐々に大きくなり、 $h = 30.5 \sim 31.5\%$  の範囲の値となる。

飽和砂と乾燥砂を比較するため、垂直荷重  $\sigma_v = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $D_H = \pm 50$  および  $D_H = \pm 150$  のケースについて、乾燥砂を用いた実験を行った。

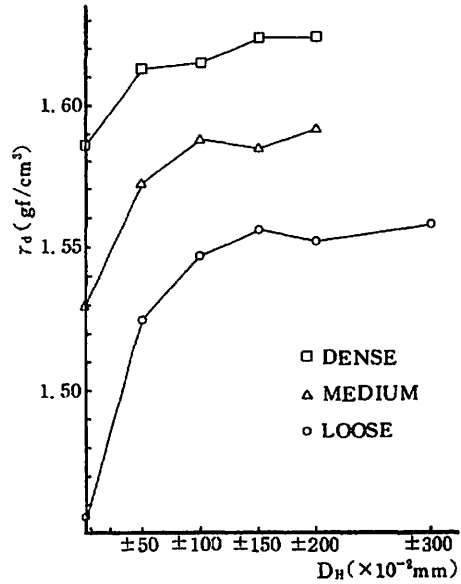


図-7 繰り返しセン断による密度変化

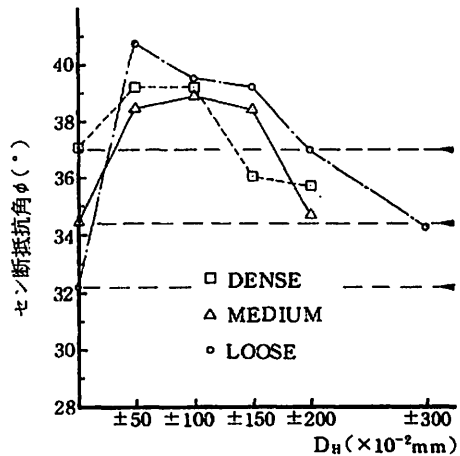
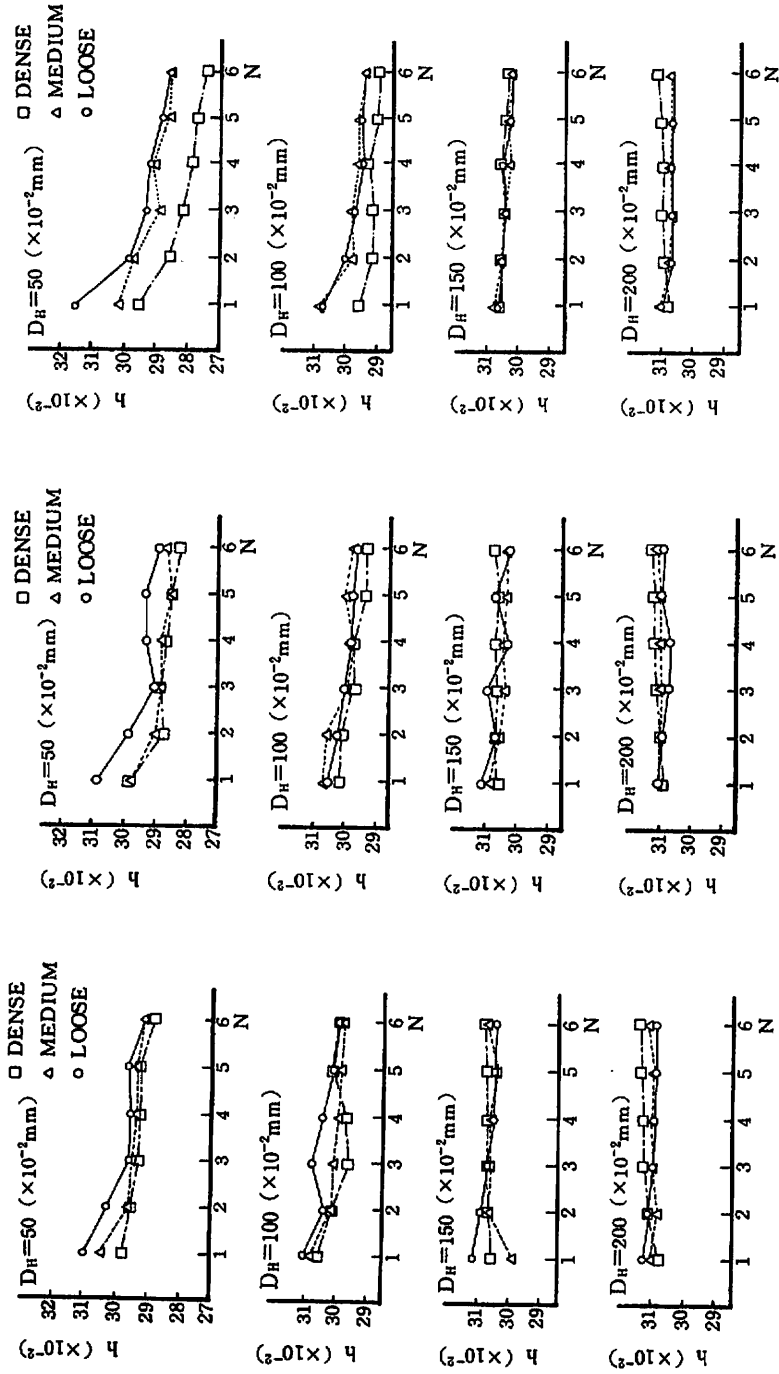


図-8 セン断抵抗角  $\phi$  の変化





図一9 履歴減衰定数

例として、 $D_H = \pm 50$ の結果を図-10に示す。減衰定数 $h$ はどの密度においても、乾燥砂のほうが小さな値となっている。その差はLooseの1サイクル目において0.5%とほとんど差がないが、それ以外の場合0.5~2.0%の差となっている。 $D_H = \pm 150$ のケースでも同様な結果である。

本実験において求めた飽和砂の履歴減衰定数は $h = 27.5 \sim 31.5\%$ 、乾燥砂の履歴減衰定数は $h = 26.0 \sim 31.0\%$ の範囲に分布している。これらは前報告の結果( $h = 29.0 \sim 31.5\%$ )に比較して若干小さな値となっている。これは、押え板として利用したポーラストーンが、なめらかな歯形板に比較して、砂粒子の移動を押え、より大きな剛性を持つためと考えられる。

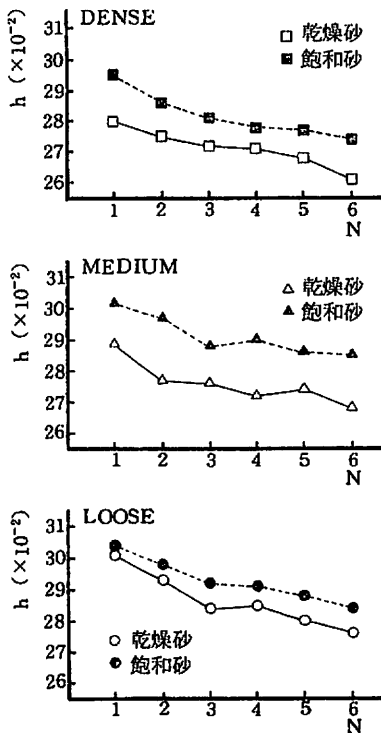


図-10 乾燥砂と飽和砂の履歴減衰定数

#### 4. まとめ

以上の結果をまとめると次のようである。

(1) 繰り返し回数  $N$  に伴うせん断抵抗  $\tau_m$  の増加傾向は、Denseの場合  $D_H = \pm 150 (\times 10^{-2} \text{mm})$  Mediumの場合  $D_H = \pm 200 (\times 10^{-2} \text{mm})$  Looseの場合  $D_H = \pm 300 (\times 10^{-2} \text{mm})$  で減少傾向へ変わる。

(2) 履歴減衰定数  $h$  は 26.0~31.5% の範囲にあり、飽和砂に比較して乾燥砂のほうが 0.5~2.0% 小さな値である。

(4) 繰り返しせん断後のせん断抵抗角は、 $D_H = \pm 50 (\times 10^{-2} \text{mm}) \sim \pm 100 (\times 10^{-2} \text{mm})$  の繰り返しせん断によって増大する傾向がある。また、この強度増加は繰り返しせん断による密度増加によると考えられる。

なお、本研究を遂行するに当たり、翁長一明君(現松井建設)、松崎浩君(現日産建設)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：乾燥砂の繰返し一面せん断試験に関する実験的研究，琉球大学工学部紀要，30号，1985年9月
- 2) 許光瑞・加藤進：砂の繰返し一面せん断試験に関する実験的研究(その4：飽和砂の実験概要)，日本建築学会学術講演梗概集，1985年10月
- 3) 許光瑞・加藤進：砂の繰返し一面せん断試験に関する実験的研究(その5：飽和砂の実験結果・考察)，日本建築学会学術講演梗概集，1985年10月
- 4) 田治見宏：建築振動学，1965年，コロナ社