



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	繰り返し応力を受ける乾燥砂の変形特性におよぼす応力履歴の影響
Author(s)	土岐, 祥介; Toki, Shosuke; 北郷, 繁 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 68(2), 269-283
Issue Date	1973-09-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41160">https://hdl.handle.net/2115/41160</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	68(2)_269-284.pdf



# 繰り返し応力を受ける乾燥砂の変形特性に およぼす応力履歴の影響

土岐祥介\* 北郷 繁\*\* 鈴木輝之\*\*\*

(昭和48年3月17日受理)

## Effect of Stress History on Deformation Characteristics of Dry Sand Subjected to Cyclic Loading

Shosuke TOKI Shigeru KITAGŌ Teruyuki SUZUKI

### Abstract

The importance of investigating the dynamic properties of earth materials for geotechnical design of foundation and earth structures, subjected to vibratory or impulsive forces, has increasingly been recognized. Since the new branch of soil mechanics, i.e., soil dynamics, was brought about into our field in the early 1930's, more than four decades have elapsed. During these years, a large number of theoretical, experimental, and field studies have been carried out in many countries, and outstanding contributions have been made in recent years.

Reliable and comprehensive knowledges on soil properties under dynamic stress conditions are increasingly in demand not only because of academic interest, but also because large electronic computer assemblies have been coming into use for design purposes.

In the present paper an investigation on the influence of the magnitude of dynamic stress and the number of stress applications on deformation behavior of dry sand is reported. The repeating load is applied to test specimen in such a way as to simulate the stress condition on the horizontal surface in subgrade during earthquake.

It is shown that the deformation of test specimen subjected to repeating load, in advance to subsequent cyclic loading, decreases considerably, compared to specimens with the same initial void ratio, but not subjected to dynamic stress in advance. This is considered to be primarily due to the decrease of the volumetric component of axial strain. This obviously indicates that the effect of stress history on deformation behavior under dynamic stress conditions is dominant in the volumetric component of axial strain and is little in its shear component.

It is also shown that in a type of test in which test specimen is subjected to a different total number of cyclic loading, for instance, 500, 5,000 and 10,000, rate of increase of the volumetric component of axial strain depends on the number of dynamic stress applications, and the dynamic shear modulus of deformation increases with increasing

---

\* 土木工学科 交通線路工学講座 助教授

\*\* 土木工学科 土質工学講座 教授

\*\*\* 北見工業大学 土木工学科 講師

number of stress applications.

These deformation characteristics of dry sand subjected to cyclic loading in advance, can not be attributed to the decrease of void ratio, because the amount of void ratio decrease by these stress application is too small to give rise to corresponding change in axial strain or shear modulus. In order to clarify these inconsistencies, changes in soil structure or particle orientation and also changes in surface conditions of sand particles must be taken into consideration.

This can be demonstrated by the test results, which show irregular relationships between shear modulus, void ratio, and confining pressure in a static compression test on test specimens subjected to repeating load in advance, and this irregularity disappears if the values of shear modulus are replotted against the terminal state of shear strain at which time the specimen is conjectured to assume a particular type of particle orientation.

It can be concluded from above mentioned findings that in addition to the important roles of initial void ratio or relative density in the mechanical properties of sand, particle orientation and its surface condition play also significant parts in deformation, especially in volumetric deformation behavior.

Consequently, further investigations on the effects of soil structure should be made with special reference to stress or strain history, void ratio change, and grain disintegration.

## 1. 概 説

土の動的性質の研究が、振動あるいは衝撃的外力を受ける基礎および土構造物の設計に重要であることが次第に明らかになりつつある。1930年代の初頭、土質工学の中に新しく Soil Dynamics の分野が開かれてから40年、多くの研究者によって理論的、実験的研究が積み重ねられてきた<sup>1)</sup>。特に近年大型計算機の普及にとともにフィルダムなどの重要構造物の動的設計が一般的となり、これまで以上に土の動的性質の研究の意義がみとめられるにいたった。また、新潟(1964)、アラスカ(1964)、サンフェルナンド(1971)地震などで発生した大規模な地盤の液状化、あるいは震動にとまらう砂層の沈下による被害は、土の動的性質の研究の興味をこの問題に集中させた。

地盤は地震時に、周期的に方向のかわる動的せん断力を受け、また衝撃や回転をとまらう重機械の基礎は、長期にわたる動的な荷重を受ける。この結果、ゆるい飽和砂では液状化が生じ、乾燥砂では間ゲキ比が減少するとともに、粒子配列構造あるいは粒子の表面状態が変り、砂全体の力学的性質が変る。これらの現象の機構を解明し、支配的要因が何であるかを研究することは、液状化の予測あるいは土の動的性質をとり入れた設計を行なううえで重要なことであって、研究の努力が最も多く注がれているところである。土の液状化問題などでは、最近ある程度までは定量的に実際の解析にとり入れられるにいたったと考えられるが、動的繰り返し応力を受ける砂の性質についての基礎的研究は、今後ともさらに一層推進されるべきものようである。

この実験の目的は、動的繰り返し応力を受ける砂の力学的性質が、以前に受けた応力の大きさ、あるいは載荷回数によりどのような影響を受けるかをみたものである。繰り返し応力を受けた砂は、以後の繰り返し応力による変形、特に体積変化による軸ヒズミに対し大きな抵抗を示すようになる。また、多数回の動的応力の載荷を受けたものは、同じ大きさの応力を小数回しか受けなかったものに比べ、変形に対し大きな抵抗を示した。繰り返し応力による砂の力学的性質

このような変化は、繰り返し载荷により生じた間ゲキ比の変化により説明することのできない大きさで、繰り返し応力による構造の変化が、大きな影響をもたらしているものと思われる。

## 2. 実験方法および実験装置

### 2.1 想定した動的応力状態と载荷方法

地震時にセン断波が地盤より地表面に伝播するとき、土要素は、鉛直応力一定のもとで、方向が周期的に変るセン断応力を受ける。また、ランマーのようなもので締め固められる地盤は、水平および鉛直応力が、ほぼ一定の割合で同時に増減するような繰り返し応力を受けるとみることができる。実際問題のどのような状態を考えるかにより、供試体の载荷法は異なったものとなるが、今回の実験では前者の場合を想定し、このような応力が繰り返し加えられた乾燥砂の性質をしらべる。

飽和砂にこの応力状態を再現させた実験は、すでに Seed<sup>4)</sup>らによって行なわれているが、乾燥砂では次のような载荷法により、振動三軸圧縮試験の供試体内に近似的に再現させることができる。すなわち Fig. 1(a) に示すように、まず供試体に静的等方応力  $\sigma_{3s}$  を加え、軸および半径方向に同じ大きさの動荷重  $\sigma_D$  ( $\sigma_{1D} = \sigma_{3D} = \sigma_D$ ) を  $180^\circ$  の位相差で载荷する。供試体内の主応力面は、Fig. 1(b) に示すように、軸方向あるいは半径方向応力が最大主応力となるたびに間欠的に  $90^\circ$  回転

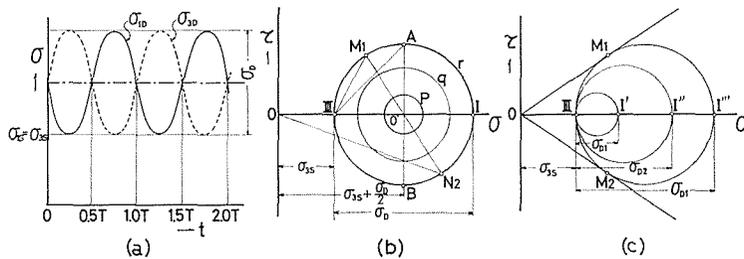


Fig. 1. Stress state within test specimen during dynamic test.

するので、Fig. 1(b) の  $\overline{AIII}$  面に平行な、供試体の  $45^\circ$  面上では、鉛直応力一定のもとでセン断応力が  $\overline{AB}$  間を往復し、この面では、想定した地盤内水平面上の応力が再現されている。しかし、 $\overline{M_1III}$  に平行な面のような、 $45^\circ$  面以外の面上の応力は、応力円が周期的に円  $p \cdot q \cdot r$  のように変化するとともに、 $\overline{M_1N_2}$  のような線上を往復するので、その面上の鉛直応力は一定でなく、最初の仮定とやや異なっている。

$\sigma_D$  を所定回数载荷後、Fig. 1(c) に示すように  $\sigma_D$  を  $\sigma_{m1}$  から次の  $\sigma_{m2}$  に増し、同様の操作を繰り返して、7~12 の荷重段階で降伏荷重  $\sigma_{Df}$  まで荷重を増加した。

また、砂では载荷速度、あるいは载荷振動数によって、力学的性質はほとんど変わらないとされているので、今回の実験では、動荷重は全て  $2H_e$  で载荷した。

### 2.2 実験方法

乾燥砂の変形特性におよぼす応力履歴の影響をしらべるために行なった、動的繰り返し応力および静的応力の载荷方法は次のようになる。簡単のため、以下標記のような略称を用いる。

1. S-試験： 静的試験の略称であって、 $\sigma_D = 0$  のもとで振動三軸圧縮試験装置の軸荷重を段階的に増加させ、いわゆる応力制御法により供試体を破壊させる。
2. D-試験： 2.1 で説明した载荷法により、供試体に降伏が生ずるまで段階的に  $\sigma_D$  を増加さ

せる試験である。 $\sigma_D$  一段階の荷重回数 (この回数を  $N$  で表わす) は 500 回である。

3. N-試験:  $N$  の影響をみるためのもので,  $N$  を 100 回から 30,000 回まで 7 種類に変えたことを除けば, 動的応力の荷重方法は, D-試験と全く同じである。N-試験の特殊なものとして,  $\sigma_D$  が 0 から  $\sigma_{Df}$  にいたるまでの総荷重回数が, 約 500 回となるような割合で,  $\sigma_D$  の大きさを一回の荷重ごとに増加したケースがある。N-試験と試験の目的は同じであるが, N-試験では同じ大きさの  $\sigma_D$  を  $N$  回荷重後, 次の荷重に上げたのに対し,  $\sigma_D$  を連続的に増加した点が違い, C-試験と称する。
4. H-試験: 動的繰り返し応力による変形に, 以前に受けた繰り返し応力の影響がどのように現われるかをしらべる試験である。この試験の前半は, 供試体に各種の応力履歴をあたえる過程で, 初期間ゲキ比 (以下  $e_0$  で表わす) 0.879, 0.815 の供試体に, D-試験の荷重法により繰り返し応力を加え, 間ゲキ比が 0.720 に低下するまで  $\sigma_D$  を増加する。この締固めの過程において,  $\sigma_{3S}$  は 1.0 および 3.0 kg/cm<sup>2</sup>,  $N$  は 500 と 10,000 回とした。前半の締固め過程を受けない  $e_0=0.72$  の供試体を加えると, 間ゲキ比が等しく応力履歴の異なる 9 種の供試体が用意される。後半のセン断過程は, 全て  $\sigma_{3S}=2.0$  kg/cm<sup>2</sup>,  $N=1,000$  回の D-試験で破壊させた。
5. DS-試験; H-試験が, 動的繰り返し応力荷重時の力学的性質におよぼす応力履歴の影響をみるものであるのに対し, DS-試験は, 動的繰り返し応力を受けた乾燥砂が, 静的荷重時に示す特性をしらべるものである。まず D-試験法により,  $\sigma_{Df}$  より小さい各種の大きさの  $\sigma_D$  を供試体に加える。動荷重の最大値  $\sigma_{DC}$  までの荷重増加は全て 6 段階とし,  $N$  は 500 とした。その後, 供試体を S-試験で破壊させ, 静的応力に対する変形特性におよぼす繰り返し荷重の影響をしらべた。この報告では, 粒子構造の影響についてのべてある。

### 2.3 実験装置の概要

Fig. 2 は, 本実験に使用した振動三軸圧縮試験機の概要である。静的周圧  $\sigma_{3S}$  は, 圧縮空気圧により所定の圧力に保たれた油圧が水圧に変換され (J), 三軸圧縮室内にかけられる。静的軸荷重は, ベロフラムシリンダー (C) に, あらかじめ検定された油圧を 0.05 kg/cm<sup>2</sup> 読みの精密ブルドン管により加えることによりかける。動荷重の付加は, パルセーター (P) により発生した正弦

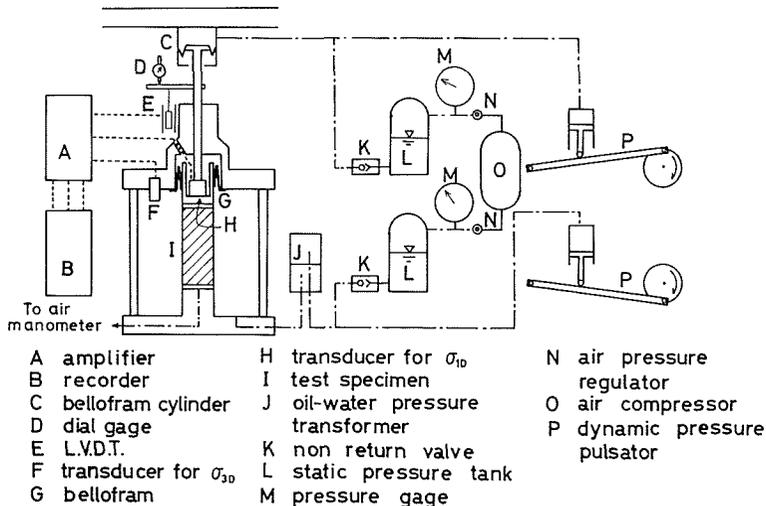


Fig. 2. Schematic diagram of the vibratory triaxial compression test equipment.

的に変化する動圧を静的油圧に上のせして行ない、動圧の静圧タンク (L) への逆流は、逆止弁 (K) により防がれている。2つのパルセーターはクラッチを介して連結されているので、動圧の位相差は  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  に切り換えられ、二台のモーターの駆動により、独立して別の振動数で運転することも可能である。振動数は  $0.5 \sim 5.0 H_c$  のあいだで連続的に変化させられる。動的側圧は抵抗線ヒズミゲージ型圧力計 (F) で、動的軸圧は供試体キャップにとりつけた圧電素子型荷重計 (H) でそれぞれ検出し、オシログラフに記録した。キャップの寸法は供試体とほぼ同じ直径で、三軸室の上盤にベロフラム (G) で取り付けられ、かつ荷重計がピストン下端にあるので、液圧より低い軸圧の载荷、およびピストン摩擦の影響除去の面で都合のよい設計となっている。供試体の軸ヒズミはダイヤルゲージと差動トランスで測定し、空気マノメーター<sup>2)</sup>による体積変化の測定を行なった。任意の荷重段階において、供試体の高さ方向の3点で各3ヶ所、計9回直径を測定して求めた供試体の平均直径は、軸ヒズミと空気マノメーターのよみより計算される供試体の平均直径と3%以下の誤差の範囲にあり、エアマノメーターは断面変化による荷重補正、および体積変化の測定に使用可能とした。

#### 2.4 供試体および試料

供試体寸法は直径 50 mm、高さ 120 mm で、供試体端面摩擦の軽減をはかるため、キャップとペディスタルには、シリコングリースを塗ったメンブレンを敷いた。

供試体間ゲキ比は、試料砂をモールドに注入するさいの突き固め回数を変え、0.879~0.656 (相対密度にして 24~96%) のあいだで4種に変えた。

試料は、0.074 mm フルイ通過分を水洗いした後、約  $60^\circ\text{C}$  の熱風で乾燥させた豊浦標準砂を使用した。豊浦砂の物理的性質は、比重 2.65、10% および 60% 径 0.177 mm, 0.205 mm, 均等係数 1.2, 最大および最小間ゲキ比 0.953, 0.645 で、石英質のやや角ばった粒形をもつ粒子からなっている。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 本実験における応力~ヒズミの一般的傾向

##### (1) D-試験

Fig. 3(a) は、 $i$  番目の動荷重  $\sigma_{Di}$  が、 $\sigma_{3S}$  一定のもとで  $N$  回载荷されたさいの、供試体軸ヒズミ  $\varepsilon_Z$  と、载荷数 (以下  $n$  で表わす) との一般的関係を示したものである。D-試験で生ずるヒズミは、動的軸方向および半径方向応力の振動にともない増減する複元性のセン断ヒズミ成分 (以下  $\varepsilon_{ZD}$  で表わす) と、供試体の間ゲキ比減少による塑性的軸ヒズミ成分 (以下  $\varepsilon_{ZP}$  で表わす) からなっていると考える。図中の  $\overline{OB}$  は、 $(i-1)$  段階までの繰り返し载荷により生じた  $\varepsilon_{ZP}$  を示し、 $i$  段階における  $N$  回の载荷中に生ずる  $\varepsilon_{ZD}$  の増加は、 $\varepsilon_{ZD}$  の振幅の中央を結ぶ線  $\overline{AB}$  によって表わされる。

Fig. 3(b) は、 $\sigma_D$  と、 $\sigma_D$  を  $N$  回载荷後の  $\varepsilon_{ZD}$  および  $\varepsilon_{ZP}$  の関係を示す一例である。 $\varepsilon_{ZD}$  は、 $\sigma_D$  の増加とともに、最初直線的に増加しているが、この直線関係は途中で失われ、 $\varepsilon_{ZD}$  が急増する。この点で供試体に降伏が生じたと考えられることができるが、このときの  $\varepsilon_{ZD}$  は大よそ 0.5% 付近にあり、通常の三軸圧縮試験における破壊ヒズミよりはるかに小さい。また図に示すように、 $\varepsilon_{ZP}$  も初期の部分では、 $\sigma_D$  の増加とともに直線的に増加している。

D-試験の载荷法は、軸方向および半径方向に同じ大きさの荷重を交互に加えるものであるので、供試体の体積変化もほとんど等方的に起き、したがって、 $\varepsilon_{ZP}$  は等方的体積ヒズミの軸方向成分とみることができる。

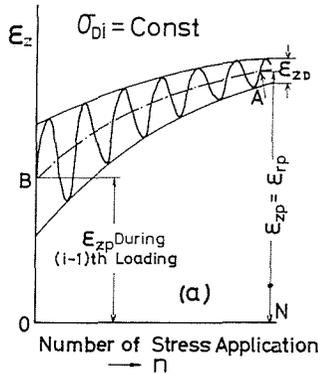


Fig. 3(a)

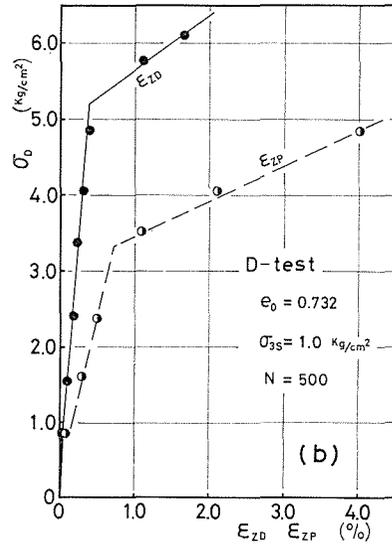


Fig. 3(b)

Fig. 3. Dynamic stress-strain behavior in general (a) schematic representation of strain under cyclic stress application; (b) stress-strain behavior.

(2) DS-試験

Fig. 4に、DS-試験における  $\sigma_D \sim \varepsilon_{ZP}$  の関係を示す。黒丸のプロットは、前半のD-試験の载荷法による締め固め時に生じた  $\varepsilon_{ZP}$  を示したもので、所定の大きさの  $\sigma_D$  (以下  $\sigma_{DC}$  で表わす) を载荷後、S-試験で破壊させる。S-試験の応力とヒズミ (以上  $(\sigma_{1S} - \sigma_{3S})$ ,  $\varepsilon_{ZS}$  で表わす) の関係は、図中の白丸で示され、荷重増加とともに  $\varepsilon_{ZS}$  は直線的に増加し、静的応力により生じた軸ヒズミが、非常に小さなところで破壊している。S-試験の  $(\sigma_{1S} - \sigma_{3S}) \sim \varepsilon_{ZP}$  の勾配は、供試体の静的応力増加に対する変形係数 (以下  $E'_{ps}$  で表わす) に相当するものであるが、3・3(2)で述べるように、粒子配列構造の影響と思われる興味ある特性を示した。

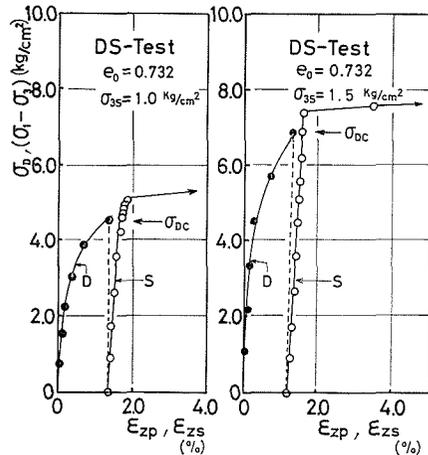


Fig. 4. Method of load application in DS-test.

3・2 乾燥砂の変形におよぼす応力载荷回数の影響 (N-試験)

(1) 動的応力の载荷回数 N と軸ヒズミの関係

Fig.5は、一段階あたりの動荷重の载荷回数 N を、100回から10,000回までのあいだに変え、各荷重段階ごとに、N回载荷後の  $\varepsilon_{ZP}$  をプロットしたものである。比較のため  $\sigma_D$  を連続的に増加したC-試験の結果も併記した。 $\sigma_D \sim \varepsilon_{ZP}$  のあいだには、最初直線関係がみられ、さきのにべたように、 $\varepsilon_{ZP}$  を等方的体積変化の軸方向成分とすると、繰り返し応力による乾燥砂の間ゲキ比の減少は、最初は  $\sigma_D$  の大きさに比例することがわかる。

$\varepsilon_{ZP}$  の大きさは、Nが10,000回の場合をのぞくと、Nが250回以上では、Nによってほとんど変わっていない。N=10,000回の  $\varepsilon_{ZP}$  が、この図ではやや大きいですが、他のケースではこれほどの

ひらきはなかった。すなわち、Fig. 5でみるかぎり、 $N$ の $\varepsilon_{zp}$ におよぼす影響は、 $N$ の250~10,000回のあいだでほとんど無視できる程度である。

しかし、H-試験によると、 $N$ を500回と10,000回に変えた場合、同じ大きさの $\sigma_D$ の繰り返し応力による間ゲキ比の変化は、 $N=10,000$ 回としたものの方が約15%大きく、 $N$ の影響がみとめられた。先にも述べたように、 $\varepsilon_{zp}$ は体積ヒズミと一次の関係にあるのだから、H-試験では $N=10,000$ 回の $\varepsilon_{zp}$ が $N=500$ 回より15%大きかったことになる。そこで $N$ を500および10,000回としたときの間ゲキ比の違いを概算してみると次のようになる。いま、 $e_0=0.800$ の供試体に、 $N=500$ 回で繰り返し応力を行ない、降伏荷重付近まで $\sigma_D$ を増加すると、間ゲキ比はおよそ0.1~0.13減少する。 $N$ を10,000回に増すことにより、間ゲキ比は0.1~0.13の15%だけけいに減少することになるが、これを計算すると、 $N$ を500回とした場合との差は、間ゲキ比にして約0.02の違いにすぎず、実用上無視してもよい。

乾燥砂に繰り返し応力を加えたさい生ずる軸ヒズミは、載荷回数を250~10,000回のあいだに変えても大きな違いはみられなかった。10,000回載荷のものの方がわずかに大きな変形を示すようであったが、その違いは、実用上無視できるもので、乾燥砂は、比較的小数回の繰り返し応力により変形の主たる部分が終了すると考えられる。

## (2) 動的応力の載荷数 $n$ と軸ヒズミの関係

同一 $\sigma_D$ のもとで $N$ 回載荷するとき、その途中の載荷数 $n$ とともに、軸ヒズミがどのように増加するかを示したものがFig. 6である。Fig. 6(a)(b)には、 $N=10,000$ 回のケースについて、各荷重段階における $\varepsilon_{zp}$ が $n$ の算術および対数目盛に対し、Fig. 6(c)には、 $N=30,000$ 回のケースが算術目盛に対してプロットされている。これらの図より、 $\sigma_D$ が降伏荷重にあまり近くないところで、 $\varepsilon_{zp}$ は、ある載荷数 $n_i$ までは $n$ の増加に対し対数的に増加し、それ以後は、 $n$ にほぼ比例して増加するとみることができる。Fig. 6(a)(b)(c)より $N=10,000$ 回に対し $n_i$ はおおよそ3,000回、 $N=30,000$ 回に対し10,000回と推定され、図は示していないが、 $N=3,000$ 回の $n_i$ は1,000回であった。これらの $n_i$ は、それぞれの $N$ の1/3にあたる。

繰り返し載荷の初期において、間ゲキ比の変化が $n$ の対数と比例関係にあることは先に報告<sup>5)</sup>したが、対数紙上での直線性の失なわれる載荷数 $n_i$ は、これまでの資料からはまだ確定的ではない。 $e_0$ 、 $\sigma_D/\sigma_{3S}$ 、 $N$ などによって変わるようであるが、今回の実験においては、 $\sigma_D$ の大きなもの、 $N$ の小さなものほど $n_i$ は $n$ に近づき、 $N=500$ 回では算術比例部分がみとめられない。

繰り返し載荷による初期の変形急増部では、 $\varepsilon_{zp}$ は $n$ の対数と直線関係にあり、 $N$ の比較的大きい場合は $N$ のおおよそ1/3の載荷数により、軸ヒズミ(体積変化)の主たる部分が終了し、

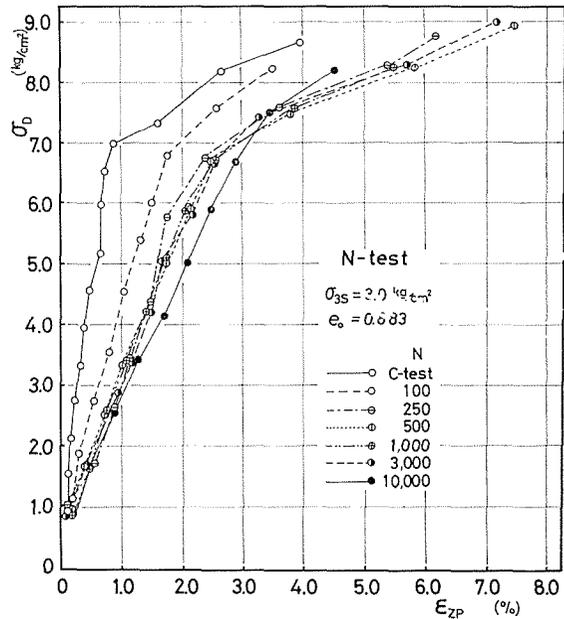


Fig. 5. Relationship between dynamic stress  $\sigma_D$  and axial strain  $\varepsilon_{zp}$  under different total number of cyclic stress application for each loading stage in N-test.

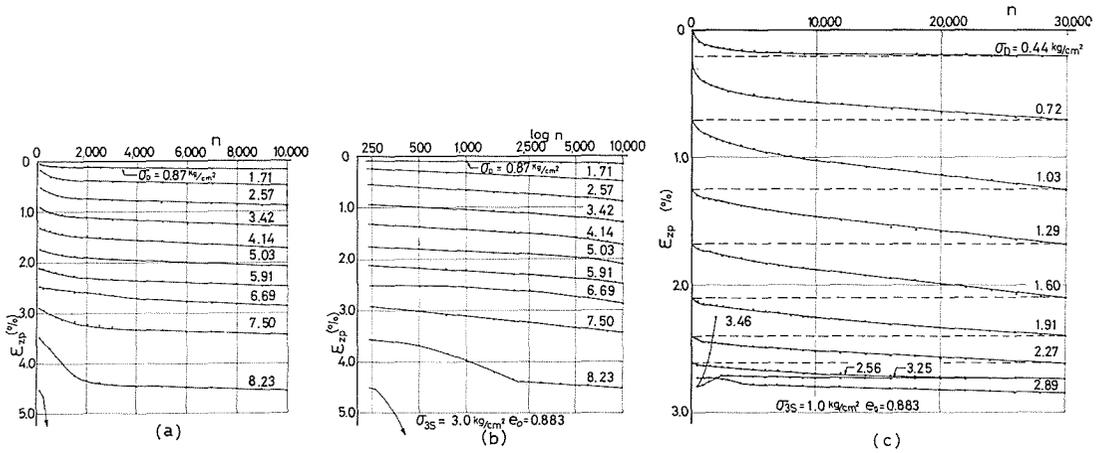


Fig. 6. Axial strain  $\varepsilon_{ZP}$  versus number of loading cycles under (a) 10,000 cycles of cyclic stress application in each stage, plotted in arithmetic, (b) in semi logarithmic scale; and (c) under 30,000 cycles in arithmetic scale.

その後の変形は、 $n$  に対しおおよそ直線的に進行するとみることができる。これに対し  $N$  の小さい場合は、後半の軸ヒズミが  $n$  に対して比例的に増加する部分がみとめられなかった。

(3) 以前に受けた繰り返し応力の载荷回数  $N$  と軸ヒズミの関係

3.2(2) で述べたように、繰り返し载荷により生ずる  $\varepsilon_{ZP}$  が、载荷の初期において载荷数の対数と直線関係にあるとすると、 $\varepsilon_{ZP}$  と  $n$  との関係は、 $A, B$  を定数として(1)式であらわされる。

$$\varepsilon_{ZP} = A \log_{10} n + B \tag{1}$$

$A$  は、Fig. 6(b) の半対数紙上、1 サイクルの载荷数増加により生ずる  $\varepsilon_{ZP}$  の変化に相当する。 $A$  の値は、Fig. 7 に示すように、 $N$  の大きなものほど小さいが、これは、以下のようなことを示している。すなわち、 $N$  の大きなケースほど一段階前の载荷段階で多数回の载荷を受けてい

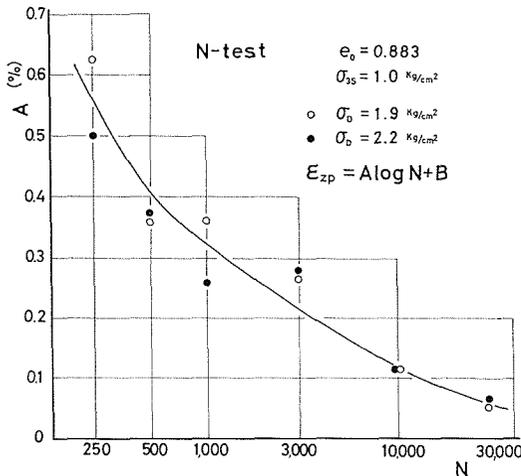


Fig. 7. Dependency of rate of increase of axial strain  $\varepsilon_{ZP}$ ,  $A$  on total number of cyclic stress application in N-test.

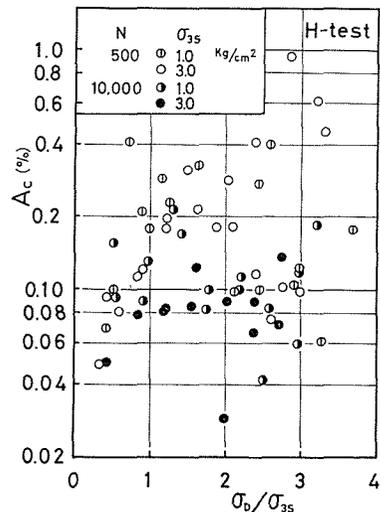


Fig. 8. Value of rate of increase of axial strain  $\varepsilon_{ZP}$ ,  $A_c$  for various loading conditions in compaction stage in H-test.

るので、そのような供試体では、繰り返し载荷の初期に一定の载荷回数により生ずる軸ヒズミが、以前に小数回の载荷しか受けなかったものより小さいということである。

これと同じ傾向は、H試験においても見られた。Fig. 8 は、H試験において、 $e_0=0.879$ の供試体に  $N, \sigma_{3S}$  を変えて繰り返し载荷を行ない、 $\sigma_D$ の各段階ごとに  $\epsilon_{zp}$  と  $\log n$  の関係から (1) 式の  $A(A_e)$  を求め、それを  $\sigma_D/\sigma_{3S}$  に対しプロットしたものである。 $A_e$  はかなりばらついているが、 $N=500$  および 10,000 回载荷を受けたものの  $A_e$  の平均値は、それぞれ 0.25 および 0.1% で、やはり  $N$  の大きなものほど小さな値を示している。 $e_0=0.815$  の供試体について行なった H-試験においても、同様の結果を得た。

$A$  は、繰り返し载荷初期の  $\epsilon_{zp} \sim n$  関係の特性を示す値で、 $N$  と関係のあることがわかったが、繰り返し後期の、 $\epsilon_{zp}$  が  $n$  と直線関係にある部分においても、 $N$  の影響がみられた。 $e_0=0.883, \sigma_{3S}=1.0 \text{ kg/cm}^2$  の条件で行なった一連の  $N$  試験の、 $\sigma_D=1.29 \text{ kg/cm}^2$  の応力段階において、後半の  $\epsilon_{zp}$  と  $n$  が比例関係にある部分で、一回の  $\sigma_D$  の载荷により生ずる  $\epsilon_{zp}$  は Table 1 に示すようであった。繰り返し载荷の後半部にも、以前に受けた応力の载荷回数の影響がみとめられる。

Table 1. Rate of  $\epsilon_{zp}$  increase for linear part

Total Number of Stress Repetition	Rate of $\epsilon_{zp}$ Increase per Unit Stress Cycle in %
3,000	$6.0 \times 10^{-5}$
10,000	$2.4 \times 10^{-5}$
30,000	$1.1 \times 10^{-5}$

$\sigma_D=1.29 \text{ kg/sq. cm} \quad \sigma_{3S}=1.0 \text{ kg/sq. cm}$

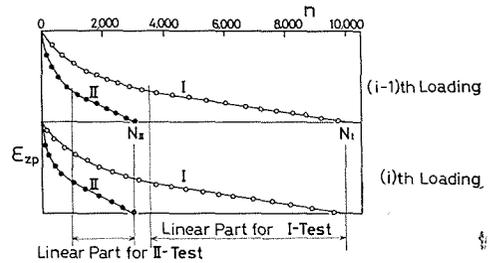


Fig. 9. Effect of stress history on axial strain  $\epsilon_{zp}$  for different total number of cyclic stress application.

Fig. 7 および 8 に示す  $\epsilon_{zp} \sim n$  の関係におよぼす  $N$  の影響、さらに 3・2(1) でのべた  $N$  回の载荷により生ずる  $\epsilon_{zp}$  は、 $N$  が 250 回以上では  $N$  の影響をほとんど受けないという事実より繰り返し応力の载荷回数  $N$  が、以後の繰り返し载荷における  $\epsilon_{zp} \sim n$  の関係におよぼす影響は、Fig. 9 のようであると考えられる。すなわち、同じ間ゲキ比の供試体に、ある大きさの  $\sigma_D$  を  $N_I$  および  $N_{II}$  回载荷後、 $\sigma_D$  を増加してふたたびそれぞれ同じ回数の载荷を行なった場合、両者の  $\epsilon_{zp}$  と  $n$  の関係は、 $\epsilon_{zp}$  と  $n$  が対数的関係、および、算術比例関係にある部分の両方において、以前に大きな  $N$  の载荷を受けたものの方が  $\epsilon_{zp}$  の増加が小さいような別の径路を通る。

以前に受けた  $N$  により、このような違いの生ずる理由として、 $N$  回载荷後の間ゲキ比の違いがまず考えられる。しかし、3・2(1) で述べたように、 $N$  を 500 と 10,000 回に変えた場合の間ゲキ比の差は実質上無視できる程度のもので、初期間ゲキ比を変えて変形特性の変化をしらべた一連の実験より推定したこの間ゲキ比の違いによる影響は小さく、Fig. 7 の  $N$  による  $A$  の違いを間ゲキ比の減少より説明することは全くできない。繰り返し载荷数の違いがもたらす変形特性の相違は、 $N$  の違いにより生じた粒子構造の相違によると考えられる。そして、この構造の相違は、比較的小数回の繰り返し载荷により容易に生ずる間ゲキ比変化に起因するのではなく、その後の载荷により生ずるわずかな間ゲキ比の変化、あるいは粒子破砕などにより生じたものと考えられる。

(4) 以前に受けた繰返し応力の载荷回数  $N$  と動的変形係数の関係

これまで、同じ回数の繰返し载荷により生ずる  $\varepsilon_{zD}$  が、以前に受けた応力の载荷回数  $N$  の影響を受けることを示したが、せん断ヒズミ成分  $\varepsilon_{zD}$  にも、同じく  $N$  の影響がみられた。ただし、ここでは  $\varepsilon_{zD}$  のかわりに、 $\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$  の関係より求めた動的変形係数  $E'_D$  と  $N$  の関係について考察を行なう。Fig. 3(b) に示すように、D-試験では、 $N$  回载荷後の  $\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$  のあいだに、降伏荷重以前では直線関係がみとめられる。したがって、この直線の勾配から  $\sigma_D$  を  $N$  回づつ载荷させたときの変形係数を、(2) 式のように定義する。

$$E'_D = \sigma_D / \varepsilon_{zD} \tag{2}$$

ただし、Fig. 1 に示す载荷法から明らかなように、(2) 式の  $\varepsilon_{zD}$  には、供試体半径方向に载荷される動的応力の影響が含まれるので、供試体のポアソン比を  $\nu$  とすると、(2) 式に示される  $E'_D$  を通常用いられる  $E$  と比較するには、 $(1+2\nu)$  倍しなければならない。しかし、 $\nu$  の値はわからないので、以後 (2) 式の  $E'_D$  について考察を進める。

$N$  の値を、2.2 で説明したように 100 から 10,000 回のあいだに変えて試験を行ない、そのおのこのケースについて、(2) 式で示される  $E'_D$  を求めた。 $N$  が小さい場合、 $\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$  の関係は、Fig. 3(b) に示すように降伏荷重まで比較的良い直線関係にあるが、 $N$  が大きくなるにつれ、 $\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$  の関係は、途中でやや下に凸となり、全体を一本の直線で表わすことがむずかしくなる。それで、 $\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$  を、 $\sigma_D$  の大きな部分と小さな部分の 2 つに分けて 2 本の直線で表わし、直線区間の長い、 $\sigma_D$  の大きな部分について求めた  $E'_D$  を  $\log N$  に対しプロットしたのが Fig. 10 である。

Fig. 10 から明らかなように、 $\sigma_{3S}$ 、 $e_0$  の区別なく、 $N$  が 250~500 回より大きなところで、 $E'_D$  は  $\log N$  に対し、ほとんど直線的に増加している。 $N$  が 500 から 10,000 回に増加することにより、 $E'_D$  は、 $\sigma_{3S}$  が  $3.0 \text{ kg/cm}^2$  のもので約  $1,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{3S}$  が  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  のもので約  $800 \text{ kg/cm}^2$  増加している。この増加をもたらした原因として、多数回载荷により生ずる供試体の間ゲキ比の減少と、それにとともなう粒子配列構造の変化があげられる。構造の変化による影響を量的に示すことはむずかしいので、まず、 $N$  が増加することにより生じた間ゲキ比の変化が、 $E'_D$  の増加にどれだけの影響をあたえているかをしらべてみる。

$e_0$ 、 $\sigma_{3S}$  を変えて行なった一連の D-試験において ( $N=500$  回)、 $E'_D$  と  $e_0$  の間に (3) 式のような関係があった。

$$E'_D = (3,100 - 2,500 e_0) \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{\sigma_{3S}}{\sigma_0} \right)^{0.57} \tag{3}$$

ここで  $\sigma_0$  は  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  に等しく、式のディメンジョンを整えるために導入した定数である。

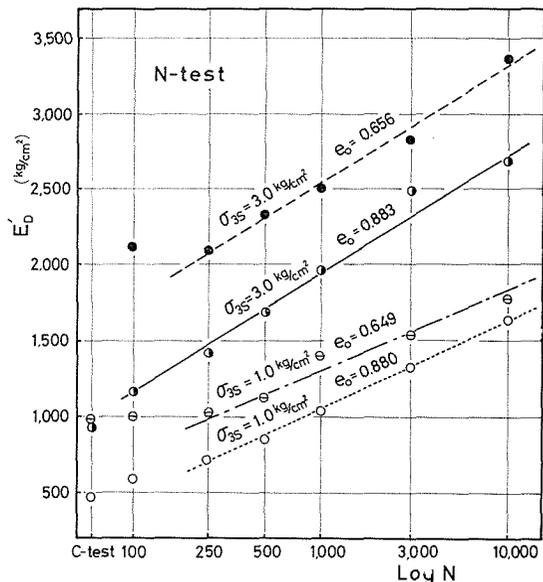


Fig. 10. Dependency of dynamic shear modulus  $E'_D$  on total number of cyclic stress application for each loading stage in N-test.

いま、 $\sigma_{3S}=1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合について考えることにする。 $E_b$  を求めるため行なった実験では、供試体の  $e_0$  が最も大きなものと小さなものあいだに 0.23 の  $e_0$  の差があり、この場合の  $E_b$  のちがいは、約  $580 \text{ kg/cm}^2$  ( $2,500 \times 0.23$ ) であった。しかし  $E_b$  を計算した  $\sigma_D$  付近での間ゲキ比の差をしらべてみると、それは初期状態の 0.23 にくらべてはるかに小さく、0.08 程度であったと推定される事実がある。したがって、前述した  $e_0$  の大きなものと小さなもの  $E_b$  の差、 $580 \text{ kg/cm}^2$  は、供試体の初期間ゲキ比の 0.23 の差によるものではなく、0.08 の違いによって生じたものと考えざるを得ない。すなわち、実際に繰り返し応力が加えられている状態での供試体の間ゲキ比を考えると、間ゲキ比の 0.08 の違いが  $E_b$  に  $560 \text{ kg/cm}^2$  の変化をもたらしたことになる。

一方、供試体に、 $N=500$  あるいは 10,000 回で繰り返し载荷した場合に生ずる間ゲキ比の差は、3.2(1) に述べたように 0.02 前後と推定されるが、前述の推論からすると、この間ゲキ比の差からは、 $\sigma_{3S}=1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合、 $N$  を 500 から 10,000 回に変えることにより生ずる  $800 \text{ kg/cm}^2$  の  $E_b$  の増加を説明することができない。

以上のべてきたことから、繰り返し载荷を受ける乾燥砂の変形特性を支配する要素は、間ゲキ比の変化よりも、むしろ間ゲキ比には現われない構造上の変化ではないかと推論される。ただ、この構造上の変化を量的に表現できないので、断定的にはいえないので、推論することにとどめ、今後の研究にまつものである。

### 3.3 乾燥砂の変形におよぼす応力履歴の影響

#### (1) 以前に受けた応力が軸ヒズミにおよぼす影響 (H-試験)

前節で述べたことは、以前に受けた応力より、わずか (一段階分) 大きな繰り返し応力を受けたさいの変形に関するものであった。それに対し、以下にのべる H-試験 (2.2 参照) のセン断過程は、全て  $\sigma_{3S}=2.0 \text{ kg/cm}^2$  の条件で行なったので、間ゲキ比を 0.72 まで減少させる前半の締め固め過程が、 $\sigma_{3S}=3.0 \text{ kg/cm}^2$ 、もしくは  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  のいずれで行なうかにより、締め固め過程とそれに引きつづくセン断過程における载荷応力の最大値の大小関係が変わる。これは、同じ  $e_0$  の供試体を、所定の  $e$  まで締め固めるに要する  $\sigma_D$  の大きさが、 $\sigma_{3S}$  にほぼ比例して増加することによる。今回の実験においては、締め固め過程における最大荷重と、セン断過程における降伏荷重の大きさの割合は、締め固め過程の  $\sigma_{3S}$  が、 $1.0 \text{ kg/cm}^2$  および  $3.0 \text{ kg/cm}^2$  に対しそれぞれ 40 および 115% であった。このような条件のもとで以前に受けた応力が  $\varepsilon_{ZP}$  に与える影響をしらべてみる。

Fig. 11 は、繰り返し応力により、 $e_0=0.879$  の供試体の間ゲキ比を 0.720 (以後締め固め後の間ゲキ比を  $e_0$  で表わす) まで減少させ、その後行なったセン断過程における、 $\varepsilon_{ZP}$  と  $\log n$  の関係から求めた (1) 式の  $A_s$  の値 ( $A_s$ ) を示したものである。斜線をほどこした部分は、 $N$  が 500, 10,000 回、 $\sigma_{3S}$  が  $1.0, 3.0 \text{ kg/cm}^2$  の条件で締め固めを行なった供試体についての  $A_s$  の範囲を示したもので、締め固め過程における  $N, \sigma_{3S}$  の違いによる区別ははっきりしない。図中の白丸は、 $e_0$  を 0.72 とし、事前に繰り返し载荷を受けていないものの  $A_s$  を示している。セン断過程開始時の  $e$  が等しいにもかかわらず、 $\varepsilon_{ZP}$  の増加割合  $A_s$  には大きな違いが

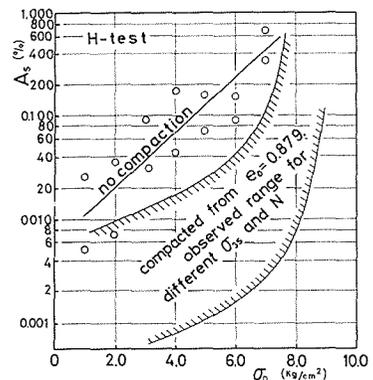


Fig. 11. Comparison of rate of increase of axial strain  $\varepsilon_{ZP}$ ,  $A_s$  for test specimen not compacted in advance and for compacted test specimen in shear stage in H-test.

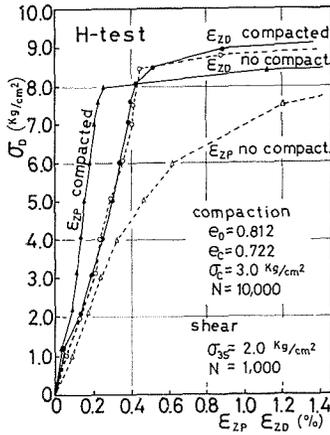


Fig. 12. Effect of compaction in advance to subsequent shear stage on dynamic stress-strain relationship.

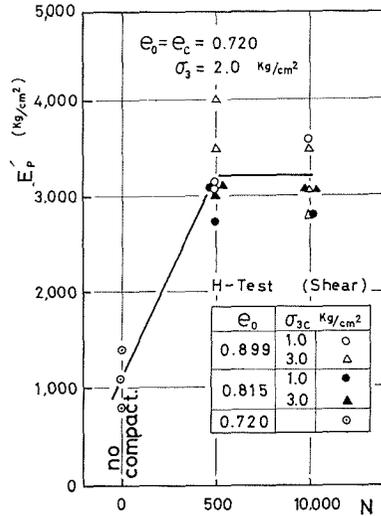


Fig. 13. Increase of dynamic shear modulus of deformation  $E'_p$  in compacted test specimen with same void ratio at the start of shear stage.

みられる。同じ  $e$  の供試体に繰り返し応力を加えると、Fig. 11 に明らかなように、以前に応力を受けていないものは、そうでないものに比べて  $A_s$  が大きく、 $\epsilon_{ZP}$  すなわち  $e$  の減少が大きいから、ある大きさの  $\sigma_D$  における  $e$  は、前者のほうが小さい。それにもかかわらず、同じ回数の载荷による  $\epsilon_{ZP}$  は、以前に応力を受けていないものが数倍ないし 10 倍も大きく、以前に受けた繰り返し応力の影響が非常に大きいことがわかる。

Fig. 12 は、繰り返し応力により、 $e_c=0.72$  まで締め固めたものと、はじめから  $e_0=0.72$  とした供試体の、せん断過程における  $\epsilon_{ZD}$  (Fig. 3 参照)、および  $\sigma_{ZP}$  と、 $\sigma_D$  の関係を比較したものである。 $\sigma_D$  と  $\epsilon_{ZD}$  の関係は、以前に応力を受けたものと受けないものでほとんど差がみられず、降伏強度も変わらない。これに対し、 $\epsilon_{ZP}$  の傾向には大きな違いがみられる。その一つは、応力～ヒズミの関係で、以前に応力を受けたものでは、 $\epsilon_{ZP}$  が急増して降伏が生じたと思われる点の  $\epsilon_{ZP}$  は、いずれも 0.2～0.5% という小さな範囲にあり、降伏点も明確で脆性破壊的である。もう一つの点は、以前に応力を受けていない供試体では、 $\epsilon_{ZP}$  が  $\epsilon_{ZD}$  よりかなり大きい、繰り返し応力を受けたものの  $\epsilon_{ZP}$  は、 $\epsilon_{ZD}$  より小さく、 $\epsilon_{ZD}$  のおおよそ半分の大きさとなっている。3・1(1) で述べたように、 $\epsilon_{ZP}$  は全ヒズミ中の体積変化による成分、また  $\epsilon_{ZD}$  はせん断ヒズミ成分と考えられるが、繰り返し载荷は特に体積変化によるヒズミの成分に大きく影響している。

$\sigma_D$  と  $\epsilon_{ZP}$  のあいだに直線関係があるとし、この勾配  $E'_p$  を比較したのが Fig. 13 である。塑性変形係数ともいうべき  $E'_p$  は、以前に応力を受けたものが、受けないものに比べて 2～3 倍の大きさになっており、繰り返し载荷による体積変化に起因する変形に対し、非常に大きな抵抗を示すことがわかる。

Fig. 13 に示す  $E'_p$  の値には、Fig. 11 同様、以前に加えられた応力の大きさ (締め固め時の  $\sigma_{3S}$  の大きさにより変る)、载荷数 (500, 10,000 回) などの载荷条件による違いが、はっきりと現われていない。この理由として、一つにはデータのバラツキが、条件の相違による影響に比べて大きかったことも考えられる。しかし、締め固め過程で生じた最大の  $\epsilon_{ZD}$  が、 $\sigma_{3S}$  の大小にかかわらず、あまり違わなかったという事実からすれば、以前に受けた応力が、以後の砂の挙動に与

える影響は、その応力の大きさに支配されるのではなくて、むしろ、粒子構造の変化をおこす、載荷時に生じたヒズミの大きさに依存すると考えるのが妥当のように思われる。そうすると、前半の締め固め過程に受けた応力が、後半のセン断過程に加えた応力より大きなものと小さなものあいだに特定の関係がみられなかったことも納得される。つまり、砂の変形特性におよぼす応力履歴の影響は、応力の大きさではなく、粒子構造の変化をもたらすヒズミの大きさに依存すると考えられる。

## (2) 静的載荷時の変形係数におよぼす粒子構造の影響 (DS-試験)

これまで、N および H-試験について、砂の変形特性におよぼす繰り返し載荷の影響は、繰り返し載荷により生じた  $e$  の変化だけでは説明することができず、構造の変化によるところが大きいであろうことを論じてきた。しかし、砂粒子の配列構造による影響を、具体的に実証することは困難なので、間ゲキ比以外の、数的にあつかうことのできない因子による影響を、全て構造の影響におしつけてしまったところがある。DS-試験では、静的変形特性に、粒子構造の影響とみられる特性が比較的はっきりとみられたので、以下にそれを示す。

Fig. 14 は、Fig. 4 と同じ一連の図より、繰り返し載荷後の S-試験における変形係数  $E'_{ps}$  を求め、 $e_0$  に対しプロットしたものである。一般に、乾燥砂の変形係数は、 $\sigma_{3S}$  の大よそ 1/2 乗に比例し、 $e_0$  の小さなものほど大きいが、図に示す  $E'_{ps}$  は、 $\sigma_{3S}$  および  $e_0$  と規則的な関係にない。これは、次のような理由によると考えられる。

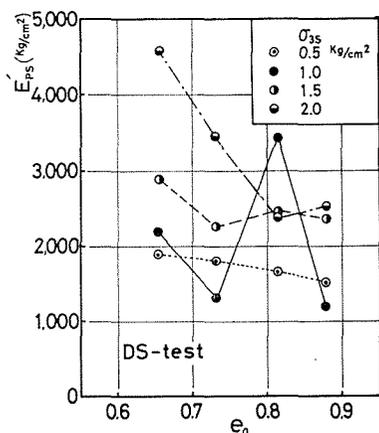


Fig. 14. Irregular relationship between static shear modulus  $E'_{ps}$  and initial void ratio in DS-test.

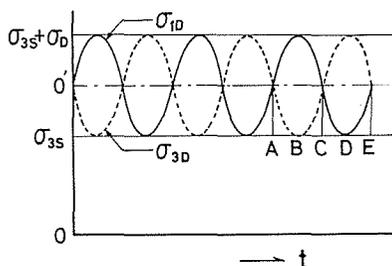


Fig. 15. Terminating stress conditions of compaction stage in DS-test.

Fig. 15 は、動的繰り返し応力による締め固め段階の最後の応力状態を示したものである。この図において、載荷が、図中の AC あるいは E 点 (等方応力状態)、または B あるいは D 点 (圧縮あるいは伸張) で終了した場合で、粒子配列構造は相互に異なると考えてよいであろう。B 点のような、軸方向応力が最大主応力の状態で載荷が終了したさいには圧縮に対し強い構造が、また反対に D 点で終了したさいは、伸張に対しては強いが、圧縮に弱い構造となっているはずである。応力状態により粒子配列構造が変化することは、小田<sup>3)</sup> ほかいくつかの研究からも容易に想像されることである。

$E'_{ps}$  を、このような考えに従って整理しなおすには、

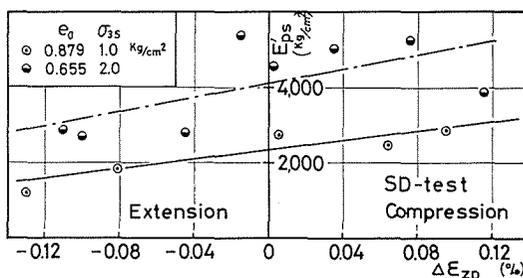


Fig. 16. Strain history dependency of static shear modulus  $E'_{ps}$  in DS-test for test specimen with same void ratio conditions.

载荷の最終の応力状態を知る必要があるが、動荷重载荷装置の駆動を停止する時期により、応力状態は、Fig. 15 の A~E のあいだのどの位置でも終了する。この応力状態を正確に決めることがむずかしかったので、载荷停止時と、A 点での供試体軸ヒズミの差  $\Delta\varepsilon_{zp}$  (圧縮を正) を構造の状態を示すめやすとした。最終応力状態が、Fig. 15 の B 点に近いほど、 $\Delta\varepsilon_{zp}$  は正方向に大きく、反対に D 点に近いほど負の大きな値をとるはずである。

Fig. 16 は、2 ケースについて、 $\Delta\varepsilon_{zp}$  と  $E'_{ps}$  の関係を示したもので、両者のあいだに相関がみられ、以前に加えられた応力 (言いかえればヒズミ) により作られた構造が、砂の変形特性に大きな影響をあたえていることが認められる。図中に示される 2 ケースについての  $E'_{ps}$  は、それぞれ  $e_0$ ,  $\sigma_{DC}$ ,  $\sigma_{3S}$ ,  $e_c$  の等しい条件で求めたものであるが、図に示す範囲で、 $E'_{ps}$  は、最大と最小で約 100% の違いがみられる。これまで、主として間ゲキ比、あるいは相対密度により整理されてきた砂の力学的性質は、応力履歴、あるいは砂粒子の配列構造の面からも、考察を加えるべきものと思われる。

#### 4. 結 論

以上述べたことを要約すると、次のようになる。

(1) 乾燥砂に繰り返し応力を加えたさいに生ずる軸ヒズミは、载荷回数を 250~10,000 回のあいだに変えても大きな違いはなかった。比較的小数回の载荷により、変形の主たる部分が終了する。

(2) 繰り返し载荷による軸ヒズミは、初期の急増部では载荷数の対数に比例し、後半部では载荷数に比例して増加するとみることができる。初期の軸ヒズミ急増部を軸ヒズミが载荷数の対数に比例する区間とすれば、これは一段階あたりの载荷数の約 1/3 より小さな载荷数の部分にあたる。

(3) 以前に多数回の応力载荷をうけた供試体は、小数回の繰り返し応力しか受けていないものより、繰り返し応力による変形に大きな抵抗を示す。この繰り返し応力に対する変形特性の相違は、载荷数の違いにより生じたわずかな間ゲキ比の相違から説明することのできない大きさで、多数回载荷により生じた構造および粒子性状の変化によるところが大きいと推定される。

(4) 砂の変形におよぼす応力履歴の影響は、応力の大きさではなく、構造の変化をもたらすヒズミの大きさに依存すると考えられる。

(5) 以前に受けた応力の変形特性に与える影響は、繰り返し载荷に対するセン断ヒズミよりも、体積変化によるヒズミ成分に大きくあらわれる。

(6) 同じ条件でセン断した供試体の示す変形係数の違いを、砂粒子の配列構造の面から説明することが出来た。砂の力学的性質は間ゲキ比、相対密度のような因子のほか、応力履歴の違いにより生ずる、構造の面からも考察されるべきであろう。

#### 謝 辞

この研究は、昭和 44 年度より行なわれている一連の乾燥砂の振動三軸圧縮試験に関する研究の一部をまとめたものである。実験、資料のとりまとめ、ならびに図面の作製には、当研究室片岡 博技官、本学 47 年度修士課程終了 百瀬 治君、同じ学士卒業生 千葉政俊君の助力におうところが大きい。記して謝意を表するものである。

## 参 考 文 献

- 1) Barkan, D. D. (1967): "Developments in soil dynamics" Proceedings International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Univ. of New Mexico Press, pp. 599-606.
- 2) Bishop, A. W. and Henkel, D. J. (1964): The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, E. J. Arnord and Son, Ltd.
- 3) 小田匡寛 (1971): 砂の変形にともなう構造の変化に関する研究, 土木学会第 26 回年次学術講演会講演集, III-14.
- 4) Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966): "Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading" Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, Proc, Paper 4972, pp. 105-134.
- 5) 土岐祥介, 北郷 繁, 斎藤和彦 (1971): 振動三軸圧縮試験による乾燥砂の応力と変形について (第 2 報), 第 6 回土質工学研究発表会講演集, pp. 249-252.