乾燥砂の変形特性に及ぼす動的繰返し応力の影響

(Effects of Repeated Loading on Deformation
Behavior of Dry Sand)

土 岐 祥 介* (Shosuke Toki)
北 郷 繁** (Shigeru Kitago)

キーワード：繰返し荷重／三軸圧縮試験／砂／
土の構造／動的／変形／履歴
IGC： D 6/D 7

1. ま え が き

近時動的繰返し応力を受ける土の性質に関心がもたれ、多くの研究が積み重ねられて次第にその特性が明らかにされてきた。地震力、あるいは交通荷重のような動的応力を受けた場合、地盤や構造物の基礎がどのような応答を示すか、また、繰返し応力を受けることにより、土の力学的性質がどのように変化するかは、設計上重要な問題であって、飽和砂の液化現象とともに、もっとも重要な研究対象となっている。

動的繰返し応力を受ける土の変形特性が静的条件におけるそれと異なるのは、ヒズミ速度効果^{1),2)}、ヒズミ速度によるダイレイタンスー特性の変化³⁾、繰返し荷重による間ゲキ比の減少とそれに伴う粒子配列構造の変化、あるいは粒子接点における水分の移動⁴⁾などに起因すると考えられているが明らかでない点が多く、今後の研究がまたれるところである。

この報告は、乾燥砂の振動三軸圧縮試験を行ない、動的応力の大きさ、載荷回数と変形の関係を調べたものである。砂においても応力履歴の影響はみられ、以前に大きな応力を多数回受けたものほど変形に対し大きな抵抗を示すことが認められ、砂のこのような力学的性質の変化は、主として繰返し荷重により作られた粒子構造に起因することを論証する。

2. 実 験 方 法

2.1 応力の載荷方法

動態時の土の性質を調べるための載荷方法は、どのような動的応力状態を想定するかによって決まる。今回の実

験は、地震時における地盤内の応力状態を考えたもので、そのような応力が繰返し加えられたさいの変形特性、および繰返し荷重を受けることにより生じる力学的性質の変化を調べようとしたものである。採用した動的応力の載荷方法をごく簡単に説明すると以下のようである。

図-1(a)に示すように、まず供試体に静的等方応力 σ_{ss} を加え、軸および半径方向に同じ大きさの動荷重 σ_D ($\sigma_{1D} = \sigma_{3D} = \sigma_D$) を 180° の位相差で載荷する。したがって、供試体内の主応力面は、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° 回転するので、図-1(b)の $\overline{AIII}$ 面に平行な、供試体の 45° 面上のせん断応力は、鉛直応力 $(\sigma_{ss} + \sigma_D/2)$ 一定の条件下で $\overline{AB}$ 上を往復し、想定した地震時の地盤内の応力状態がこの面上に再現されている。供試体の 45° 面以外の面、たとえば $\overline{MIII}$ に平行な面上の応力は $\overline{MN}$ 上を往復するので鉛直応力の大きさが変わり、想定した応力状態とやや異なっているが、せん断応力の方向は交番している。

このような載荷法により、ある大きさの σ_D を所定回数載荷後、 σ_D を σ_{D1} からつぎの荷重強さ σ_{D2} に上げ、ふたたび同じ回数の繰返し載荷を行なう。同様の操作を繰返ししながら、供試体に降伏が生じるか、あるいはあらかじめ設定した大きさに達するまで σ_D を増加させた。なお、動荷重はすべて 2Hz で載荷した。

2.2 実験方法

動的および静的応力の載荷方法は以下に述べるようである。簡単のため載荷法に略称をつける。

図-1 載荷法と供試体の応力状態

* 北海道大学工学部土木工学科 助教授 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

** " " 教授 (" ")

・この論文に対するディスカッションは昭和 50 年 1 月 1 日までにご投稿下さい。

1) S-試験： 静的試験の略称である。使用した振動三軸圧縮試験機の機構上、いわゆる応力制御法によった。

2) D-試験： 2.1で説明した載荷法により、供試体に降伏が生じるまで段階的に σ_D を増加させる実験である。ある大きさの σ_D の載荷回数（この回数を以下 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試験で、 N を100回から30,000回のあいだで7種に変えたことを除けば、応力の載荷方法はD-試験とまったく同じである。 N -試験の特殊なものとして、 σ_D の大きさを一回の載荷ごとに増加したケースがある。試験の目的はN-試験と同じであるが、N-試験あるいはD-試験では、同じ大きさの σ_D を N 回載荷後つぎの荷重に上げたのに対し、 σ_D を連続的に増加した点が違い、C-試験と略称する。

4) H-試験： 動的繰返し応力による変形が、以前に受けた繰返し応力によってどのように影響されるかを調べる試験である。この試験は二つの過程に分かれ、その前半は、供試体に各種の応力履歴を与える過程である。初期間ゲキ比（以下 e_0 で表わす）を2種（0.879, 0.815）、 σ_{3S} を2種（1.0, 3.0 kg/cm²）、 N を2種（500, 10,000回）にかえてD-試験の載荷法で、一定の間ゲキ比（0.720）になるまで締固める。これが前半の過程である。この締固め過程を受けない $e_0=0.720$ 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種の供試体ができることになる。後半は、応力履歴の影響をみるためのセン断過程で、すべて、 $\sigma_{3S}=2.0$ kg/cm²、 $N=1,000$ 回としたD-試験法である。

5) DS-試験： この試験は、乾燥砂が以前に動的繰返し応力を受けると、以後の静的載荷による変形特性がどのような影響を受けるかを調べるためのものである。まずD-試験の載荷法により供試体の動的降伏荷重（以下 σ_{Df} で表わす）以下のいくつかの大きさの σ_D を載荷する。このさい、 σ_D の最大値 σ_{DC} までの荷重増加はすべて6段階、 $N=500$ 回とした。しかるのち、S-試験で破壊させる。

このほかに、乾燥砂の動的変形係数を求めるために2種類の動的実験を行ない、振動三軸圧縮試験より求めた変形係数と比較したので、その試験法を簡単に説明する。

1) 砂柱の自由振動実験⁵⁾： 豊浦砂ほか4種の砂について、応力とヒズミの関係がケルビン・フォークトモデルで表わせると考え、砂の弾性係数と粘性係数を、直径5cm、高さ16cmの砂柱の自由振動数と時間減衰係数を測定することより求めたものである。

2) 砂中の圧縮波伝パ速度に関する実験⁶⁾： 豊浦砂ほか1種の砂について間ゲキ比、拘束圧、振り子により与える打撃エネルギーの種々の条件について、圧縮波の

伝パ速度から弾性係数を求めた実験で、供試体寸法は直径13cm、長さ300cmであった。

2.3 試料および実験装置

試料は、0.074mm フレイ通過分を水洗いして除いた後、気乾した豊浦標準砂を用い、供試体寸法は、直径50mm、高さ120mmである。

実験に使用した振動三軸圧縮試験機は、軸および半径方向に、それぞれ独立した径路より静圧と動圧を加えることのできるもので、供試体体積変化は、主として空気マノメーターにより測定したが、一部の試験では直接ノギスで寸法を測定して求めた。詳細は前報⁷⁾を参照されたい。

3. 実験結果と考察

3.1 本実験における応力-ヒズミの関係

3.1.1 D-試験

2.1で述べた載荷法により生じるヒズミは、 ε_{ZD} と ε_{ZP} で表わされる⁷⁾。 ε_{ZD} は、 σ_D が軸あるいは半径方向で最

図-2 σ_D と ε_{ZD} の関係

図-3 N の σ_D と ε_{ZP} の関係に及ぼす影響

大値をとるとき供試体長の差を供試体長で割ったもので、 σ_D によるヒズミのせん断成分に相当する。それに對し、 ϵ_{ZP} は繰返し载荷により生じる体積変化の軸方向成分で、応力が供試体の降伏強さにあまり近くないところでは、 ϵ_{ZP} の3倍がおおよそ体積ヒズミ ϵ_v に等しいと考えることができる。

σ_D と ϵ_{ZD} の関係は、図-2 に示すように降伏荷重まではほぼ直線関係にあり、比較的容易にこのコウ配を求めることができる。また σ_D と ϵ_{ZP} のあいだにも、図-3 のように最初は直線関係が認められる。

3.1.2 DS-試験

図-4 に、DS-試験における $\sigma_D \sim \epsilon_{ZP}$ の関係を示す。

黒丸のプロットは、前半の締固め過程を示したもので、所定の大きさの σ_D (以下 σ_{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 (以下 $(\sigma_{1S} - \sigma_{3S})$, ϵ_{ZS} で表わす) の関係は図中の白丸で示され、 $(\sigma_{1S} - \sigma_{3S})$ の増加とともに ϵ_{ZS} は直線的に増加し、通常の S-試験に比べ非常に小さな ϵ_{ZS} で破壊している。

図-4 DS-試験の応力とヒズミの関係

3.2 乾燥砂の変形に及ぼす载荷回数の影響

3.2.1 動的応力の载荷回数 N と軸ヒズミの関係

図-3 は、一段階当りの動荷重の载荷回数 N を、100回から 10,000 回までの間に変え、各荷重段階ごとに N 回载荷後の ϵ_{ZP} をプロットしたものである。比較のため、 σ_D を連続的に増加した C-試験の結果も併記した。 σ_D と ϵ_{ZP} のあいだには、最初直線関係がみられ、 ϵ_{ZP} は等方的体積変化の軸方向成分であるから、繰返し応力による乾燥砂の間ゲキ比の減少は、最初は σ_D に比例することがわかる。

ϵ_{ZP} の大きさは、 N が 10,000 回の場合を除くと 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 ϵ_{ZP} がこの図ではやや大きい、他のケースではこれほどのひらきはなく、 N の ϵ_{ZP} に及ぼす影響は、 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。

これに對し、 N を 500 と 10,000 回に変えた H-試験においては、繰返し载荷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 の影響が認められた。先にも述べたように、 ϵ_{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 ϵ_{ZP} が $N = 500$ 回より 15% 大きかったことになる。 N および H-試験で、 N と ϵ_{ZP} の関係が違っているが、

実用上 N の 500 と 10,000 回に對する ϵ_{ZP} には大きな差がないとみてよいであろう。

N を 500 および 10,000 回としたときの間ゲキ比の違いは、つぎのように概算される。いま $e_0 = 0.80$ の供試体を考えると、 $N = 500$ 回で繰返し载荷を行ない、降伏荷重 σ_{Df} 付近まで σ_D を増加すれば間ゲキ比はおおよそ 0.10~0.13 減少する。 N を 10,000 回に増加させることにより、間ゲキ比は 0.10~0.13 の 15% だけよけいに減じると H-試験より推定され、これを計算すると $N = 500$ 回とした場合との間ゲキ比の差は、降伏荷重付近で約 0.02 の違いにすぎない。

繰返し载荷による変形は、少数回の载荷で主たる部分が終了し、多数回の载荷は間ゲキ比減少の面では効果が小さい。

3.2.2 载荷数 n と軸ヒズミの関係

同一 σ_D のもとで N 回载荷するとき、その途中の载荷数 (以下 n で表わす) 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図-5 である。図-5(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 ϵ_{ZP} が、 n の算術および対数目盛に對してプロットされている。図より、 σ_D が降伏荷重にあまり近くないところで、 ϵ_{ZP} はある n_t までは n の増加に對し対数的に増加し、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。 n_t は、 $N = 10,000$ 回に對しおおよそ 3,000 回と推定され、図には示していないが $N = 30,000$ 回、および 3,000 回の n_t はそれぞれ 10,000 回、および 1,000 回であった。これらの n_t は、それぞれ N の 1/3 に相当する。これに對し、 N が小さい場合は後半の n に比例し

図-5 n と ϵ_{ZP} の関係 ((a) $N = 10,000$ を算術目盛に、(b) $n = 10,000$ 回を対数目盛にプロット)

て増加する部分が認められなかった。

繰返し载荷の初期において、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も報告⁹⁾したが、この部分が初期の変形急増部であると考え、 N の比較的大きな場合、 N のおおよそ $1/3$ の载荷数までの間に変形の主たる部分が生じ、その後の変形は n に大よそ比例して進行するとみることができる。

3.2.3 载荷回数 N の軸ヒズミに及ぼす影響

3.2.2 で述べたように、繰返し载荷により生じる ε_{zp} が、最初 n の対数と直線関係にあるとすると、 $n < n_t$ の载荷数で、 ε_{zp} と n の関係は A, B を定数として(1)式で表わされる。

$$\varepsilon_{zp} = A \log_{10} n + B \quad (1)$$

A は、図-5(b)の半対数紙上1サイクルの载荷数増加により生じる ε_{zp} の変化に相当し、図-6に示すように、 N の大きなものほど小さい。すなわち、一段階前の载荷段階で多数回の载荷を受けた供試体は、少数回の载荷しか受けなかったものに比べ、一定回数の繰返し载荷によ

図-6 A に及ぼす N の影響

図-7 締固め条件による A_c の変化

り生じる軸ヒズミが小さい。

同様の傾向は H -試験にもみられた。図-7は、 H -試験の前半の締固め過程において、 ε_{zp} と $\log n$ の関係から(1)式の $A(A_c)$ を各荷重段階ごとに求め、 σ_D/σ_{3s} に対しプロットしたものである。 A_c はかなりばらついて σ_{3s} による違いははっきりしていないが、 $N=500$ および $10,000$ 回の载荷に対する A_c の平均値は、それぞれ 0.25 および 0.1% で、図-6に示される傾向と同じく、以前に大きな N の繰返し载荷を受けたものの A_c が小さい。図には示していないが、 $e_0=0.815$ の供試体においても、 $N=500$ および $10,000$ 回に対する A_c の平均値は、それぞれ 0.15 および 0.074% で N の大きなものの A_c が小さいという傾向を同じく示している。

繰返し载荷初期の $\varepsilon_{zp} \sim n$ の関係の特性を示す A は、 N と関係のあることがわかったが、繰返し载荷後期の、 ε_{zp} が n と直線関係にある部分にも 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 N -試験において、後半の ε_{zp} が n と比例関係にある部分で一回の σ_D の载荷により生じる ε_{zp} は、 $\sigma_D=1.29 \text{ kg/cm}^2$ に対し表-1に示すようであって、 N の大きなものほど小さい。

図-6, 7および表-1に示す $\varepsilon_{zp} \sim n$ の关系到及ぼす N の影響と、3.2.1で述べた N 回の载荷により生じる ε_{zp} は、 N が250回以上では N によってほとんど変わらないという事実より、 N がつぎの载荷段階における $\varepsilon_{zp} \sim n$ の关系到及ぼす影響は、 N が比較的大きい場合図-8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 σ_D を N_I および N_{II} 回载荷後 σ_D を増加してふたたびそれぞれ N_I および N_{II} 回の载荷を行なった場合、両者の ε_{zp} と n の关系到は、 ε_{zp} と n が対数関係、および算術比例関係にある部分の両方におい

表-1 ε_{zp} が n に比例する部分における N の影響

動的応力の载荷回数 N (回)	動的応力一回载荷に対する ε_{zp} (%)
3,000	6.0×10^{-5}
10,000	2.4×10^{-5}
30,000	1.0×10^{-5}

($\sigma_{3s}=1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_D=1.29 \text{ kg/cm}^2$, $e_0=0.883$)

図-8 n と ε_{zp} の关系到及ぼす N の影響

図-9 e_0 と E_p' の関係

て、以前に大きな N の载荷を受けたものの方が ϵ_{zp} の増加率が小さい別の径路を通り、 N_I , N_{II} 回载荷後両者はおおよそ等しい ϵ_{zp} に達する。

以前に受けた N によりこのような違いの生じる理由として、 N 回载荷後の間ゲキ比の違いがまず考えられるので、間ゲキ比が繰返し载荷による変形 ϵ_{zp} に及ぼす影響を調べてみよう。図-9は、 D -試験において σ_D と ϵ_{zp} の関係が直線で近似できる(図-3参照)として、そのコウ配 E_p' を e_0 に対しプロットしたものである。塑性変形係数ともいふべき E_p' の値は、 e_0 の小さなものほど大きく、実験を行なった e_0 の範囲において、 e_0 の減少 0.1 に対し E_p' はおおよそ 3 倍に増加するとみることができる。 E_p' と A は、それぞれ変形に関する別な特性を表わす定数であって直接比べることはできないが、間ゲキ比の変化に対し、 A の値も E_p' と同じような傾向で変化するとひとまず考えて、 N および H -試験における A の変化を検討してみる。

3.2.1 で述べたように、ある大きさの σ_D を繰返し加えた後の供試体間ゲキ比には、 N が 250 回以上では N を増しても大きな違いはなく、 N を 500 と 10,000 回に変えても間ゲキ比の差は $e_0=0.8$ の供試体でわずか 0.02 と推定された。この間ゲキ比の変化に対応する E_p' の変化は、図-9 によればわずか 25% 程度にすぎず (e_0 の変化 0.1 に対し E_p' は 3 倍に増加として)、図-6 および図-7 において、 N の 500 と 10,000 回に対する A の値に 2.5~3.5 倍の違いがあるのと、まったく異なった傾向にある。すなわち、多数回の载荷を受けた供試体の変形特性の変化は、間ゲキ比の減少より説明することはできない。

载荷数の違いがもたらす変形特性の変化は、粒子構造の相違によると考えざるを得ない。そして、この相違は、比較的少数回の繰返し载荷により容易に生じる間ゲキ比変化に起因するのではなく、その後の多数回载荷により生じるわずかな間ゲキ比の変化、あるいは粒子破碎などに付随して起こると考えられる。

3.2.4 载荷回数 N と動的変形係数の関係

これまで繰返し载荷により生じる ϵ_{zp} 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述べたが、せん断とズミ成分 ϵ_{zd} にも同じく N の影響がみられる。図-10 に示すようにある大きさの σ_D を N 回载荷後の ϵ_{zd} は、 $N=1$ に相当する C -試験の値がもっとも大きく、 N の大きなものほど小さい。

$\sigma_D \sim \epsilon_{zd}$ の関係を直線で近似し、このコウ配から N の影響を調べることができるが、 N の大きなものでは $\sigma_D \sim \epsilon_{zd}$ の関係は下に凸となり全体を一本の直線で表わすことには無理がある。それで、図-2 のように、降伏点以前の $\sigma_D \sim \epsilon_{zd}$ の関係を 2 本の折線で表わし、 σ_D の大きな部分でのコウ配 E_D' と N の関係を示したのが図-11 である。 E_D' は N の大きなものほど大きく、 N が 250 回より大きなところでは、 N の対数とほぼ直線関係にあっ

図-10 σ_D と ϵ_{zd} の関係に及ぼす N の影響 図-11 E_D' の N による変化

図-12 E_V の増加に占める間ゲキ比変化による増分の割合

て、 N が500から10,000回に増加することにより、 E_D' は、 $\sigma_{3S}=3.0\text{ kg/cm}^2$ に対し約 $1,000\text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{3S}=1.0\text{ kg/cm}^2$ に対し約 800 kg/cm^2 増加している。

この増加をもたらす原因として、多数回载荷により生じる供試体間ゲキ比の減少と、粒子配列構造の変化があげられる。しかし、さきにも述べたように、 N を500回から10,000回に変えても、供試体の間ゲキ比の違いはわずか0.02程度にすぎず、 e_0 を変えて行なった一連の試験から、間ゲキ比の差0.02がもたらすであろう E_D' の変化は約 150 kg/cm^2 と推定され、 N の違いが E_D' に及ぼす影響は、間ゲキ比の変化以外の要素によるところが大きいと考えられる。

繰返し载荷による変形係数の増加のうち、間ゲキ比変化の影響の占める割合を σ_{3S} 一定とした静的繰返し载荷による三軸圧縮試験より求めたのが図-12である。この図において、 E_i 、 E_V は、それぞれ第1载荷サイクルにおける応力～ヒズミ曲線の初期接線係数および第5载荷サイクルの変形係数を表わし、 E_i' は、 $e_0 \sim E_i$ の関係より求めた、第5载荷サイクルの間ゲキ比に対する E_i を示す。したがって、 $E_V - E_i$ は、5回の繰返し载荷により生じた変形係数の増加を、 $E_i' - E_i$ は、そのうちの間ゲキ比変化による変形係数の増加分を表わしている。 $(E_i' - E_i) / (E_V - E_i)$ の値は図に示すように小さく、間ゲキ比の変化に表われない要素、つまり粒子再配列、あるいは粒子自体の性状変化による成分の影響の大きなことがわかる。

ただ、この構造上の変化を量的に表現できないので、推論するにとどめ、今後の研究にまつものである。

3.3 変形に及ぼす応力履歴の影響

3.3.1 以前に受けた繰返し応力の ϵ_{ZP} に及ぼす影響
前節では、以前に受けた応力よりも、わずかに（一段階分）大きな応力の繰返し载荷により生じる変形をみつかった。それに対し、以下に述べるH-試験（2.2参照）のセン断過程は、前半の締固め過程に加えた応力よりも大きな、あるいは小さな応力で降伏が生じるような応力の载荷法をとった。すなわち、ある e_0 の供試体を所定の間ゲキ比まで締固めるのに要する σ_D の大きさは σ_{3S} にほぼ比例して増加するので、セン断過程における σ_{3S} より大きな σ_{3S} のもとで締固めを行なえば、降伏荷重

図-13 以前に受けた応力の A_s に及ぼす影響

σ_{Df} より大きな応力をあらかじめ供試体に载荷することができ、反対に小さな σ_{3S} のもとで締固めを行なえば、以前に受けた応力よりも大きな応力で供試体を降伏させることができる。このような条件のもとで、以前に受けた応力が ϵ_{ZP} に与える影響を調べる。

図-13は、繰返し応力により、 $e_0=0.879$ 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（1）式の A の値（ A_s ）を示したものである。斜線を施した部分は、 N が500, 10,000回、 σ_{3S} が1.0, 3.0 kg/cm^2 についての A_s の範囲を示したもので、締固め過程における N 、 σ_{3S} の違いによる区別ははっきりしていない。

図中の白丸は、 e_0 を0.720とし、締固め過程を受けていない供試体の A_s を示したもので、セン断過程開始時の間ゲキ比は両者で等しいのに、 ϵ_{ZP} の増加割合 A_s には大きな違いが認められる。また、この図からも明らかのように、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（すなわち e の減少が大きい）、ある大きさの σ_D における供試体の間ゲキ比は、前者の方がむしろ小さいはずである。それにもかかわら

図-14 ϵ_{ZP} 、 ϵ_{ZD} に及ぼす以前に受けた応力の影響

ず、同じ回数 of 載荷による $\varepsilon_{ZP}(A_S)$ は、以前に応力を受けていないものの方が数倍ないし 10 倍も大きく、以前に受けた応力の影響が非常に大きいことがわかる。

図-14 は、繰返し応力により $e_c=0.72$ まで締固めたものと、はじめから $e_0=0.72$ とした供試体のセン断過程における $\varepsilon_{ZD}, \varepsilon_{ZP}$ と、 σ_D の関係を比較したものである。 σ_D と ε_{ZD} の関係には、以前に応力を受けたものと受けないもののあいだであまり差がみられないのに対し、 ε_{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 $0.2 \sim 0.5\%$ という小さなヒズミで ε_{ZP} が急増し、明確な降伏点が認められるのに対し、以前に応力を受けないものでは ε_{ZP} の急増点がやや不明確で、そのときの ε_{ZP} も大きい。もう一つの点は、以前に応力を受けていない場合、 ε_{ZP} は ε_{ZD} よりかなり大きい、応力を受けたものの ε_{ZP} は ε_{ZD} より小さく、そのおおよそ半分の大きさとなっている。3.1 で述べたように、 ε_{ZP} は全ヒズミ中の体積変化による成分、また ε_{ZD} はセン断ヒズミ成分と考えられるが、繰返し載荷はとくに体積変化に起因するヒズミ成分に大きく影響している。

以前に受けた繰返し載荷が、セン断過程における ε_{ZP} に及ぼす影響を示すために、 σ_D と ε_{ZP} のあいだに直線関係があるとし、このコウ配 $E_{P'}$ を比較したのが図-15 である。以前に応力を受けたものの $E_{P'}$ は ($N=500$ 回、10,000 回)、受けないものに比べて 2～3 倍の大きさで、繰返し載荷による変形に対し、同じ間ゲキ比でありながら非常に大きな抵抗を示すことがわかる。

このことは、工学上の問題に一つの示唆を与えるものである。 D -試験のように、以前に応力を加えることなしに繰返し載荷を行なった場合、 e_0 が大きく、 σ_{3S} の小さな条件では ε_{ZD} の 10 倍以上の ε_{ZP} が生じるので、ゆるい砂地盤の繰返し載荷による変形は、大部分が塑性的体積変化によるものであると考えることができる。そし

図-15 以前に受けた応力による $E_{P'}$ の変化

て、このように繰返し載荷による変形に大きな割合を占める ε_{ZP} の成分は、図-13～15 に示すように以前に加えられた応力により著しく小さくなり、振動的な力による締固めは、地震のような外力による地盤の沈下、あるいは液状化に対し、非常に有効と考えられる。これは、パイロコンポーザーや、パイロプロットなどの振動を利用した工法により改良された地盤が、まだ応力を受けたことのない同じ間ゲキ比の地盤より安定であることを示唆しているとともに、間ゲキ比だけしかわからない地盤の性質を、室内実験より推定することのむずかしさを示している。

図-15 にみられるいま一つの特徴的な点は、 $E_{P'}$ の値には以前に加えられた動的応力の大きさ（締固め時の σ_{3S} の大きさにより変わる）による違いがはっきりと表われていないことである。この理由の一つとして、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とも考えられる。しかし、締固め過程で生じた最大の ε_{ZD} が σ_{3S} の大小によりあまり変わら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、構造の変化を起こす、載荷時に生じたヒズミの大きさに依存すると思えるのが妥当のように思われる。

3.3.2 静的載荷時の変形に及ぼす粒子構造の影響

これまで、 N および H -試験について、砂の変形特性に及ぼす繰返し載荷の影響は、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。 DS -試験の静的変形に、粒子構造の影響とみられる特性が比較的はっきり認められたので、以下にそれを示す。

図-16 は、繰返し載荷後の S -試験における変形係数 $E_{PS'}$ を、図-4 と同じ一連の図より求め、静的セン断開始時の間ゲキ比 e_c 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、 σ_{3S} のおおよそ 1/2 乗に比例し、間ゲキ比の小さなものほど大きい、図に示す $E_{PS'}$ は、 σ_{3S}, e_c と規則的な関係にない。これはつぎのような理由によるものと考えられる。

図-16 $E_{PS'}$ と e_c, σ_{3S} の不規則な関係

図-17 締固め過程の最終応力状態

図-17 は、締固め载荷サイクルの最後の部分を示したもので、载荷が図中の A, C, E 点 (等方応力状態), または B, D 点 (圧縮あるいは伸張) で終了した場合で、粒子の配列構造は相互に異なると考えて良いであろう。B 点のような、軸方向応力が最大主応力の状態で载荷が終了したさいには圧縮に対し強い構造が、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し、力学的性質もそれに伴って変化することは、小田⁹⁾ 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。

このような考えにしたがって E_{PS}' を考察するには、繰返し载荷の最終の応力状態を知る必要がある。しかし、動荷重装置の駆動を停止する時期により、応力状態は図-17 の A~E 間のどこでも終了し、その位置を正確に測定することはむずかしいので、軸および半径方向応力の等しい A 点と、動的载荷終了時における軸ヒズミの差 $\Delta \epsilon_{zp}$ (圧縮を正) を構造の状態を示す目安とした。 $\Delta \epsilon_{zp}$ は、最終応力状態が B 点に近いほど正の大きな値をとり、D 点で負の最大値となる。

図-18 は、2 ケースについて、 $\Delta \epsilon_{zp}$ を種々に変えて試験を行ない、 $\Delta \epsilon_{zp}$ と E_{PS}' の関係を示したものである。両者のあいだには相関がみられ、以前に加えられた応力 (あるいはヒズミ) により作られた構造の相違が、砂の変形特性に大きな影響を与えていることが認められる。 $e_0, \sigma_{3S}, \sigma_{DC}$ の等しい (すなわち e_0 も等しい) 条件のもとで、 E_{PS}' の値は、図に示す範囲で最大約 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られるべきも

図-18 同じ締固め条件における E_{PS}' の $\Delta \epsilon_{zp}$ による変化

のと思われる。

3.4 他の試験より求めた動的変形係数との比較

実験的に求めた土の変形係数が、载荷速度、ヒズミの大きさ、応力履歴、あるいは排水条件などにより異なることは良く知られているところで、著者らがこれまでにこなってきた 3 種の試験法で求めた動的変形係数を比較してみる。

試験法の概要は 2.2 に示したようで、変形係数は (2) 式で表わすことができた。

$$E = (C - De_0) (\sigma_{3S}/\sigma_0)^m \quad (2)$$

ここで、 $e_0, \sigma_{3S}, \sigma_0$ は初期間ゲキ比、拘束圧、 1 kg/cm^2 を表わし、 C, D, m は定数である。(2) 式の $(\sigma_{3S}/\sigma_0)^m$ の項は、拘束圧と変形係数の関係を示すもので、ここでは扱わないこととし、 $(C - De_0)$ の比較を行なう。

図-19 は、 $(C - De_0)$ を K とおき、圧縮波の伝ぱ速度、曲げ自由振動、および振動三軸圧縮試験より求めた、種々の間ゲキ比に対する $K_C, K_{DV},$ および K_D を示したものである。ただし、振動三軸圧縮試験では、繰返し载荷により、供試体間ゲキ比の大幅な減少が生じるので、 E_D' を求めた応力の範囲の平均の間ゲキ比として、 e_0 と降伏荷重における間ゲキ比の平均値に対してプロットした。また、 D -試験のような载荷法より計算した変形係数を、 σ_{3S} 一定の試験より求めた変形係数と比較するため、 K_D は $(1+2\nu)$ 倍¹⁰⁾ (ν はポアソン比で 0.3 とした) して補正を行なった。 K_{SR} は、 σ_{3S} 一定の静的繰返し载荷試験の第 5 サイクルの変形係数に対するものである。

第 1 節で触れたように、変形係数は一般にヒズミレベルの小さなもの、ヒズミ速度の大きなものほど大きいことが認められている。したがって、表-2 の試験条件からみて、 K の大きさは $K_C > K_{DV} > K_D$ の順となりそう

図-19 動的試験および静的繰返し試験の K の比較

表-2 動的試験の実験条件

試験の種類	直 ヒ ズ ミ	振 動 数 (Hz)
K_C	$5 \sim 100 \times 10^{-6}$	150 ~ 1,600
K_{DV}	$1 \sim 4 \times 10^{-4}$	40 ~ 140
K_D	$2 \sim 5 \times 10^{-3}$	2

であるが、三種の試験より求めた係数の間には顕著な違いはみられない。大まかにみて、三つの K は一本の曲線で表わすことも可能で、表-2に示すような条件のもとでは、乾燥砂の動的変形係数は、静的繰返し载荷試験による値よりおおそ50%大きいといえることができる。

4. 結 論

以上の実験結果とその考察より、繰返し応力を受ける乾燥砂の変形特性に関し、つぎの事項が明らかになった。

- (1) 繰返し载荷による軸ヒズミ ε_{zp} (間ゲキ比の変化)は、载荷数を250~10,000回のあいだに変えても大きな違いはなく、比較的少数回の载荷で変形の主たる部分が終了する。
- (2) 繰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、以後载荷数に比例して増加する。対数比例の終わるのは、 N の大きな場合、その約1/3のときである。
- (3) 以前に多数回の载荷を受けた供試体は、少数回の载荷しか受けなかったものに比べ繰返し応力による変形に大きな抵抗を示す。この特性の相違は、間ゲキ比のわずかな違いからは説明のできない大きさで、繰返し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) 以前に受けた応力の変形特性に及ぼす影響は、繰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表われる。
- (5) 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。
- (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、砂粒子配列構造の面から説明する一例を示すことができた。砂の力学的性質は、間ゲキ比、粒形のような因子のほかに、応力履歴の違いにより生じた構造の面からも考察されるべきである。
- (7) 比較を行なった3種の動的試験による変形係数は、試験法の区別なくほぼ同一の値を示し、静的繰返し試験の第5载荷サイクルの変形係数の1.5倍の大きさであった。

5. 謝 辞

この報告は、前報⁷⁾の続報として、変形特性に及ぼす以前に受けた繰返し応力の影響についてまとめたものである。これまで実験ならびに資料の整理にあたった本学卒業生、野田節男、石倉大幹、竹中久、鈴木輝之、斎藤和彦、村良平、百瀬治、後藤五一、原克久、千葉政俊の

諸氏、ならびに本学片岡博技官に深じんの謝意を表するものである。

なお、この研究は昭和45、46年度文部省科学研究費の補助を受けて行なったものである。

記 号 説 明

A =定数、半対数紙上1サイクルの载荷数に対する ε_{zp}
 $A_c, A_s=H$ -試験の締固めおよびセン断過程の A

$E_D'=\sigma_D \sim \varepsilon_{zD}$ を直線で表わしそのコウ配より求めた変形係数(E)

$E_P'=\sigma_D \sim \varepsilon_{zp}$ を直線で表わしそのコウ配より求めた E

$E_{PS}'=DS$ -試験の静的セン断過程の E

$E_i, E_v=S$ -試験の第1, 第5サイクルの E

$E_i'=e_0 \sim E_i$ の関係より内そう(挿)して求めた第5サイクルの間ゲキ比に対する E_i

e_0, e_c =初期間ゲキ比, 締固め後の間ゲキ比

$K=E=(C-De_0)(\sigma_{3S}/\sigma_0)^m$ で表わすときの $(C-De_0)$

$N=D, N$ -試験の荷重一段階の総载荷回数

n =荷重の载荷数

$n_i=\varepsilon_{zp}$ が n に比例して増加しはじめる点の n

$\varepsilon_z, \varepsilon_{zS}$ =軸方向ヒズミ, S -試験の ε_z

$\varepsilon_{zD}, \varepsilon_{zp}$ =繰返し载荷による ε_z のセン断成分および塑性的体積変化成分

σ_D =動的応力

σ_{DC} =締固め過程の最大の σ_D

σ_{1S}, σ_{3S} =軸および半径方向の静的応力

参 考 文 献

- 1) Cassagrande, A. and Shannon, W. L. (1949): "Strength of soils under dynamic loads," Transactions, ASCE, Vol. 114, pp. 755-772.
- 2) Lee, K. L., Seed, H. B. and Dunlop, P. (1969): "Effect of transient loading on the strength of sand," Proc. of 7th ICSMFE, Mexico, Vol. 1, pp. 239-247.
- 3) Whitman, R. and Healy, K. A. (1962): "Shear strength of sands during rapid loadings," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 127, No. SM2, Proc. Paper 3102, pp. 99-132.
- 4) Seed, H. B., McNeill, R. L. and Guenin, J. (1958): "Increased resistance to deformation of clay caused by repeated loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM 2, Proc. Paper 1645, pp. 1-28.
- 5) 土岐祥介・石倉大幹 (1968): 砂の動的弾性係数に関する実験的研究, 「土木学会第23回年次学術講演会講演概要」, III, pp. 5-8.
- 6) 土岐祥介・野田節男 (1968): 砂の2, 3の動的性質に関する実験, 「土質工学会北海道支部技術報告資料」, 第8号, pp. 1-11.
- 7) 土岐祥介・北郷繁 (1973): 繰返し応力を受ける乾燥砂の間ゲキ比変化と変形, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 13, No. 3, pp. 77-86.
- 8) 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強度と変形について(第二報), 「第6回土質工学研究発表会講演集」, pp. 249-252.
- 9) 例えば, 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」, pp. 45-48.
- 10) 土岐祥介・鈴木輝之・北郷繁 (1971): 振動三軸圧縮試験による乾燥砂の動的強度について, 「土質工学会北海道支部技術報告資料」, 第11号, pp. 31-39.

(原稿受付, 1973. 7. 19)