

周期載荷をうける飽和砂の破壊*

FAILURE OF SATURATED SANDS UNDER CYCLIC LOADING

谷本喜一**・植村隆晴***

By Kiichi Tanimoto and Takaharu Uemura

1. ま え が き

土の強度はせん断中の有効応力値に依存するので、せん断過程における間げき水圧変化を支配する排水条件に影響されるところが大きい。したがって、実験室におけるせん断試験が、現地におけるせん断破壊のプロセスに対応して、非排水せん断 (UU) 試験法、圧密非排水せん断 (CU) 試験法、排水せん断 (CD) 試験法のいずれかによって実施されることは周知のとおりである。試料が飽和砂である場合には、一般に透水性が大きいので、実用的見地から排水せん断特性の追求が主眼となっている。しかしながら、飽和砂に対しても、地震力その他の動荷重のように、急速に増減する荷重が作用する場合には、非排水せん断過程を生じるものと考えられる。この場合、砂の透水性と荷重の変化速度との相対的關係によって、排水状態に差異があるのは当然であるが、基本的問題として圧密非排水せん断特性を究明する必要性は認めなければならないであろう。

非排水せん断においては、せん断抵抗は破壊時の間げき水圧に影響されることはいうまでもないが、動的な繰返し荷重によるせん断破壊を考察するとき、動的せん断抵抗は間げき水圧のみに影響されるものであろうか。本論文はこの点を追求する目的で出発したものである。

土は一般に、土粒子、水、空気から構成された不連続物質であるから、その力学的性質は複雑であり、動荷重に対する性質は他の材料とかなり異なっている。すなわち、普通の連続物質では、動荷重に対する強度や変形的性質は静荷重に対するそれらとあまり違いはないが、不連続物質である土については、動的性質と静的性質との違いは無視できないのが普通である。とくに、砂のような単粒構造をもつ摩擦性の材料ではその傾向が著しい。

動荷重に対する摩擦性材料の強度、すなわち動的強度

* 昭和 45 年 6 月 4 日 第 5 回土質工学研究発表会において一部発表

** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 大阪府土木部技師

を考えるにあたって、静荷重状態におけるモール・クーロンの破壊準則と同一形式の次式が成り立つものとする。

$$\tau_{Df} = (\sigma_D - u_D) \tan \phi_D' = \sigma_D' \tan \phi_D'$$

ここに、

τ_{Df} : 動荷重に対するせん断強さ

σ_D : 動荷重作用時におけるせん断面垂直全応力

u_D : 動荷重作用時における間げき水圧

ϕ_D' : 有効応力による動的せん断抵抗角

σ_D' : せん断面垂直有効応力 ($=\sigma_D - u_D$)

飽和砂に動荷重が繰返して作用するとき、荷重の 1 サイクルによって間げき水圧の増加と減少とを伴うが、一般に初めの値に復元せず、残留間げき水圧が認められる^{1),2)}。したがって、繰返し載荷回数の増加とともに、残留間げき水圧は蓄積されながらきわめて大きい値を示すようになる。その結果として、砂の初期状態と載荷条件に関係するけれども、いわゆる液状化現象を生じることがある。このような間げき水圧の影響は、上式において、 τ_{Df} が u_D の関数であることによって説明することができる。

さらに、上式には ϕ_D' が含まれているが、乾燥砂の動態時における強度低下と同様に、飽和砂の強度低下特性を究明することは重要であると思われる。本文はこの観点から、飽和砂の動的強度に関する実験的研究について述べたものである。

2. 実験方法

土の動力学的性質は、外力として与えられる動荷重の種類や作用方法などによって変化するであろう。したがって、動的試験法には種々のものが考えられるが、対象とする荷重の特性を完全に把握することが先決である。問題を耐震設計に限ってみると、土の破壊に関するものと土の応答に関するものがある。いずれの場合も、基盤に到達する地震波による基盤とその上方の地盤の振動が入力となる。地盤の振動は上下・水平両成分を

もっているが、構造物の耐震設計の面から考えると水平方向の振動が重要である。また構造物が破壊する以前に地盤が破壊する場合もあるが、この場合も Seed らが示した基盤から上方に伝達されるせん断波による振動を考えればよいであろう³⁾。

Seed らは地盤中を伝わるせん断波によって、土中の要素に図-1のような水平交番せん断応力が作用するものとした。実

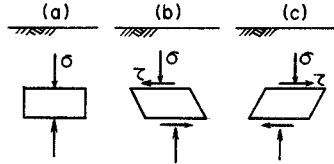


図-1 土中の要素に作用する仮想応力状態

験室において、土の供試体に対してそのような応力を与えるには、繰返し単純せん断試験法^{4),5)}を採用しなければならないが、一様なせん断応力を生じながら、供試体と側板との摩擦を起こさず、しかも動的に繰返し作用するような試験機の製作はきわめて困難である。

本研究では三軸試験法により、主応力差が矩形的に変化するように、軸荷重を繰返し増減(圧縮・伸張)させる方法を採用した。この場合には、Seed らが示したように、供試体中の45°面応力状態は図-2のようになる。図-2(a), (b)は45°面に交番せん断応力を生じる主応力とモール応力図である。一方、本研究で用いた応力状態は(c)であるから、この状態に対して(d)に示す補正応力を重ね合わさなければならない。この重ね合わせを実行に移すことは容易ではないが、実行しなくても、得られる結果を推定することは可能である。すなわち、主応力差 $\sigma_{dp} (= \sigma_a - \sigma_r)$ 、ただし、 σ_a は軸応力、 σ_r は拘束圧)の1/2の補正応力、 $-\sigma_{dp}/2 (\sigma_{dp} > 0)$ または $|\sigma_{dp}|/2 (\sigma_{dp} < 0)$ を加えることは、飽和砂の場合、単に間きき水圧値をそれだけ増加し、有効応力に影響しないから、応力状態(c)による試験結果のうち、間きき水圧のみを補正して(c)+(d)すなわち(a)の結果とみな

所要応力状態(a) モール応力図(b) 試験応力状態(c) 補正応力状態(d)

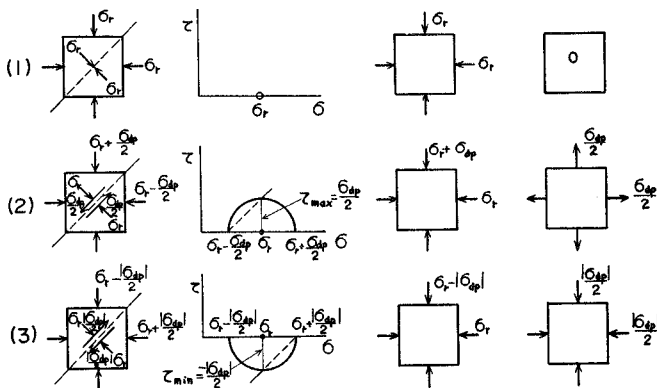


図-2 三軸供試体の応力状態

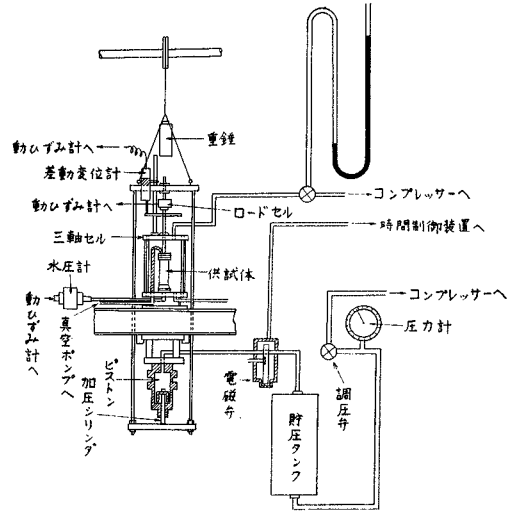


図-3 繰返し三軸試験機

表-1 試料の比重と均等係数

種類	土粒子比重	D_{10}	D_{60}	D_{60}/D_{10}
川砂	2.64	0.25	0.42	1.68
真砂土	2.64	0.22	1.40	6.36

すことができる。

用いた装置は、すでに発表した空気式周期載荷三軸圧縮試験機で、その概要は図-3に示すとおりである。載荷方法として、まず静荷重によって伸張状態にしておき、つぎに、時間制御装置によって適宜に周期を調整される二方口電磁弁を通して貯圧タンクからの圧縮空気が加圧シリンダーへ送入送出され、それに伴うピストンの断続的な圧縮と開放とを生じるが、開放に際しては静荷重による伸張が起こる。この圧縮と伸張における最大主応力差の絶対値は、記録結果からみると、ほぼ等しくなっている。なお、今回の実験では、載荷時間は圧縮・伸張それぞれ0.25秒、周期は0.5秒とした。

実験に使用した試料は、徳島県吉野川の砂と神戸市鶴甲台地の真砂土である。これらの粒径加積曲線は図-4に、物理的性質は表-1に与えられる。表中の最大間きき比は炉乾燥状態で、また最小間きき比は水

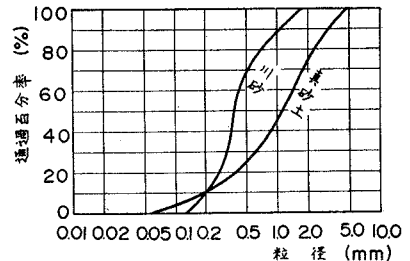


図-4 粒径加積曲線

中振動締め状態で求めたものである。

供試体の作製にあたっては、水を加えた試料をビンに入れ、真空吸引しながら、約3時間煮沸して空気を完全に排除し、つぎに、この飽和試料を空中にさらすことなく、水中で直径5cm、高さ12cmの供試体成形用モールドに移し、所定の間げき比をもつように締固めて成形した。

供試体は初めに一定の全周圧力（繰返しせん断中の拘束圧に等しい）で圧密され、圧密完了の状態から非排水状態で繰返し主応力差 $\pm\sigma_{dp}$ を与える。本研究における拘束圧、繰返し主応力差、供試体の初期間げき比は、表-2 に示す範囲内において3種の値をとることを目標とした。繰返し載荷中における主応力差、供試体の軸ひずみ、および供試体の間げき水圧変化を測定するために、それぞれロードセル、差動変位計および水圧計を用いたが、いずれも増幅器を通してビジュグラフに記録した。

表-2 実験条件

拘束圧 σ_r	0.5~1.0 kg/cm ²
最大主応力差 σ_{dp}	$\pm 0.2\sim 0.8$ kg/cm ²
川砂の初期間げき比 e_i (相対密度 D_r)	0.60~0.80 23~90%
真砂土の初期間げき比 e_i (相対密度 D_r)	0.49~0.67 40~80%

3. 液状化現象

図-5 は真砂土試料の実験から得られた繰返し主応力差 (σ_{dp})、間げき水圧変化 (u) および軸ひずみ (ϵ) の記録の一例である。この実験は、初期間げき比 $e_i=0.67$ (相対密度 $D_r=40\%$) の供試体を全周圧力 $\sigma_r=0.75$ kg/cm² で圧密したのち、拘束圧を変えずに、非排水状態で最大繰返し主応力差 $\sigma_{dp}=\pm 0.35$ kg/cm² を与えたものである。この記録によれば、測定量はそれぞれ矩形波的变化しているが、このうち ϵ と u のピーク値のみを連ねると図-6 (a), (b) のようになる。図-6 (c) はすでに述べたように、 u の値に対して、圧縮時・伸張時に応じてそれぞれ $-\sigma_{dp}/2$, $|\sigma_{dp}|/2$ を加える修正を行なったものである。この修正された間げき水圧は測定間げき水圧と逆の位相を示している。

図-5, 6 によれば、軸ひずみは初めの11サイクルまでは小さいが、間げき水圧は段階的に上昇し、第12サイクルにおいて急激に増加している。ほぼ同時に、軸ひずみの急激な増加も認められる。一方、最大主応力差はこのあたりから減少し始め、第14サイクルにおいては極端に小さくなっている。また、記録波形の乱れからも推定されるように、供試体は液状化して加える荷重を支えることができないと思われる。すなわち、破壊現象

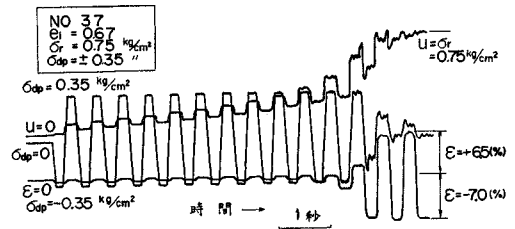


図-5 ゆるい真砂土の実測記録

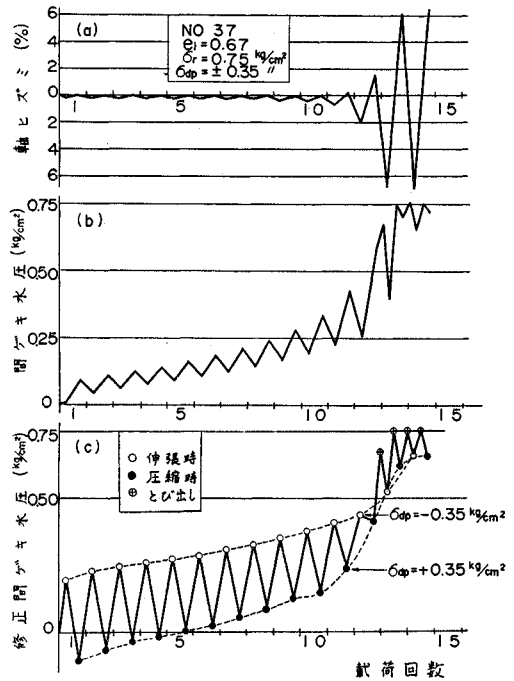


図-6 ゆるい真砂土の間げき水圧と軸ひずみの変化

象が起こっているものと判断される。

ここで、図-6 (b), (c) の間げき水圧について注目すると、第12サイクルの圧縮状態から伸張状態へ移行する途中において、間げき水圧の異常増加が認められる。さらに、以後の載荷においても、最大圧縮と最大伸張との途中段階において、同様の現象が起こっている。このような間げき水圧の異常上昇現象はすでに報告されたことがあるが^{(6),(7)}、これを“とび出し現象”と呼ぶことにする。とび出し現象が起こると、とび出し時の間げき水圧は拘束圧に近づき、最大圧縮時と最大伸張時の間げき水圧は極小値をとることが認められる。

とび出し現象を生じる時点について、Seed らは圧縮・伸張状態の分岐点、すなわち $\sigma_{dp}=0$ のときであると述べている。今回の一連の測定記録を詳細に調べてみると、かならずしも $\sigma_{dp}=0$ においてとび出しているとは考えられないが、動的現象に対する測定記録の追従性の問題もあるので断定は困難である。それゆえ、著者らは

2,3 の静的繰返し載荷試験によってこの点を検討した。その結果、とび出し時の σ_{dp} は間げき水圧値によって変化し、とび出し時の間げき水圧が拘束圧に近づくにつれて、対応する σ_{dp} は零に近づくが、初めてとび出し現象が起こるときは、一般に間げき水圧は拘束圧よりも若干小さいので $\sigma_{dp} \neq 0$ である。また圧縮から伸張へ、伸張から圧縮への過程におけるとび出し現象は、それぞれ $\sigma_{dp} < 0$, $\sigma_{dp} > 0$ を満たすある値においてみられる。これらの特性については、各種実験条件に対して今後の研究が必要であろう。

図-6(c)によれば、とび出し時の間げき水圧は、第2回目および以後のとび出しにおいて拘束圧に等しくなっているので $\sigma_{dp} = 0$ に対応するものと考えられる。また第1回目のとび出しにおいては、間げき水圧は拘束圧に達していないが、かなり接近しているので $\sigma_{dp} \neq 0$ とみてよいであろう。

図-7 はゆるい川砂(初期間げき比 $e_i = 0.80$, 相対密度 $D_r = 23\%$) に対して、 $\sigma_r = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{dp} = \pm 0.35 \text{ kg/cm}^2$ (最大値) の条件で試験した結果である。この場合には、第9サイクルにおいてとび出し現象を生じ、そのときの間げき水圧は一挙に拘束圧に達している。間げき水圧と軸ひずみの変化特性は、上述のゆるい真砂土の場合と傾向的に類似している。

図-8 は中密度の川砂 ($e_i = 0.70$, $D_r = 57\%$) に対し

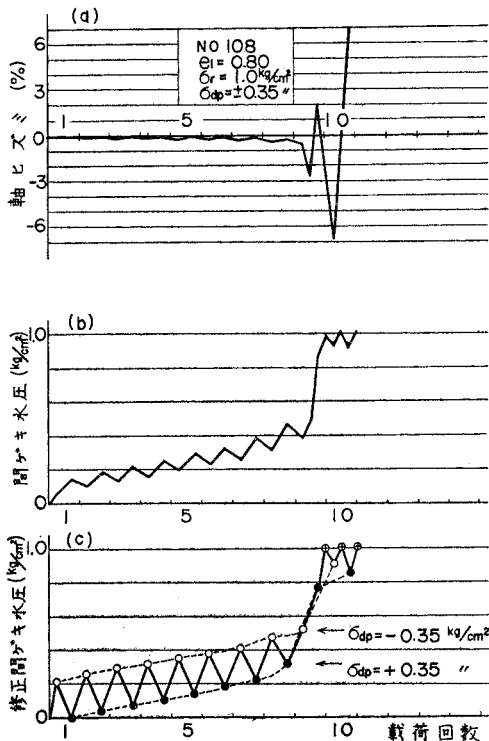


図-7 ゆるい川砂の間げき水圧と軸ひずみの変化

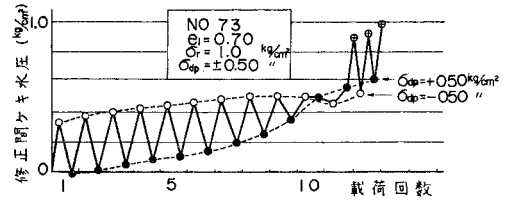


図-8 中密度の川砂の間げき水圧の変化

て、 $\sigma_r = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{dp} = \pm 0.50 \text{ kg/cm}^2$ (最大値) の条件で試験した結果である。この場合には、第11サイクルの圧縮後にとび出し現象を生じているが、とび出し時の間げき水圧はすぐに拘束圧に等しくはなっていない。したがって、とび出し時においても $\sigma_{dp} \neq 0$ であり、完全液状化には達していないが、軸ひずみの変化および主応力差の記録などから破壊を生じたものと判断される。

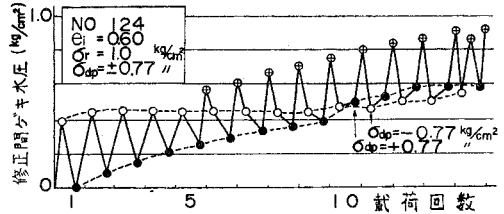


図-9 密な川砂の間げき水圧の変化

図-9 は密な川砂 ($e_i = 0.60$, $D_r = 90\%$) に対して、 $\sigma_r = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{dp} = \pm 0.77 \text{ kg/cm}^2$ (最大値) の条件で試験した結果である。この場合には、とび出し現象は第6サイクルの圧縮から伸張への過程において初めて現われ、以後の載荷サイクルにおいても同様の現象がみられる。伸張から圧縮への過程においては、とび出し現象は生じにくく、第14サイクルにおいて初めて起こることが認められる。上に述べたように、密度のあまり高くない試料については、とび出し現象は圧縮から伸張、伸張から圧縮への両過程においてほぼ同じサイクルで生じているのに対比して、密な試料ではかなりの遅れがあり、同様の傾向は真砂土に関する実験においても認められている。さらに、図-9によれば、密な試料のとび出し時の間げき水圧は初めはかなり小さい値を示し、次第に増加する傾向にはあるが、拘束圧に等しくなるまでにはかなり多くの繰返し載荷を必要とするようである。すなわち、とび出し現象を生じて部分的な液状化を示すけれども、完全液状化状態に達するのは容易でないと思われる。

4. 液状化過程におけるせん断強さ

前節 3. で述べた測定例から知られるように、各載荷サイクルにおいて、過剰水圧は完全に復元することな

く、残留過剰水圧は、繰返し回数の増加とともに、次第に増大している。したがって、有効応力は次第に減少していることは明らかである⁹⁾。

密度の小さい川砂について実験した結果の一例から、有効応力径路を描くと図-10 のようである。図-10 において、数字は載荷回数を表わし、応力点は45°面応力を示している。この実験では、第2回目のとび出しにおいて完全に液状化しているが、第1回目のとび出しの直前において最大主応力差は減少しており、すでに部分的に液状化しているものと思われる。応力径路の移動とともに、モビライズされた内部摩擦角は次第に増大しているが、ある載荷サイクルにおいて極大値に到達する。

図-11 は中密度の川砂について実験した結果から、同様の整理を行なったものである。この場合でも、最初のとび出し現象が起こる直前において最大主応力差の減少がみられ、その載荷サイクルの近傍において、モビライズされた内部摩擦角は極大値に達していることが認められる。

一般に、繰返し動荷重による土の破壊限界を判定することは容易ではない。今回の一連の実験において、測定記録を分析してみると、破壊を判定する規準としてつぎのようなものが考えられる。

表-3 破壊規準項目の発生順序

試料	川 砂				真 砂 土			
	$e_i=0.80$	$e_i=0.70$	$e_i=0.60$		$e_i=0.67$	$e_i=0.57$	$e_i=0.49$	
			圧縮	伸張			圧縮	伸張
項目								
1	t	t	t_c	t_e	t	t	t_c	t_d
2	t'	t'	?	?	t'	t'	?	?
3	t'	t'	?	?	t'	t'	?	?
4	t'	t'	t_c'	t_e'	t'	t'	t_c'	t_e'
5	t'	t'	t_d	t'	t'	t'	t_d	
6	t'	t'	t_c'	t_e'	t'	t'	t_c'	t_e'
7	t'	T	?	?	t'	T	?	?
備考	$t \approx t'$	$t \approx t' < T$	$t_e < t_d < t_c$		$t \approx t'$	$t = t' < T$	$t_e < t_d < t_c$	

(注) t : 中密度および低密度試料における項目(1)の発生時刻
 t_c : 高密度試料の圧縮過程における項目(1)の発生時刻
 t_e : 高密度試料の伸張過程における項目(1)の発生時刻
 t' : t とほぼ同時刻 $t' \approx t$ (ただし、載荷1サイクル時間の誤差を含む)
 t_c' : $t_c' \approx t_c$ (同上)
 t_e' : $t_e' \approx t_e$ (同上)
 t_d : 高密度試料における項目(5)の発生時刻
 T : 中密度試料における項目(7)の発生時刻

- 1) 有効応力径路に沿って変化するモビライズされた内部摩擦角が極大となる時点
- 2) 軸ひずみが急増する時点
- 3) 主応力差が減少しはじめる時点
- 4) 主応力差記録波形に乱れを生じる時点
- 5) 最大圧縮状態と最大伸張状態における修正間げき水圧が一致する時点
- 6) とび出し現象が初めて発生する時点
- 7) 間げき水圧(測定および修正)が拘束圧に一致する時点(完全液状化)

これら各項目が実験中に観測される順序を、試料別、密度別に総括すると表-3 に示すようである。表-3 によれば、密度の低い試料については、川砂と真砂土の別なく、上記の判定規準項目はほとんど同時に観測されている。すなわち、部分的な液状化を生じると、ひきつづいて完全液状化が起こることが認められる。中密度の試料については、項目1)~6) はほとんど同時に観測されるが、項目7) は若干遅れている。項目1)~6) の現象がほぼ同時に起こる状態においては、部分的破壊が進行しつつあるものと判断してよいであろう。以上の考察から、低密度ないし中密度の試料に対しては、項目1), すなわち有効応力径路に沿

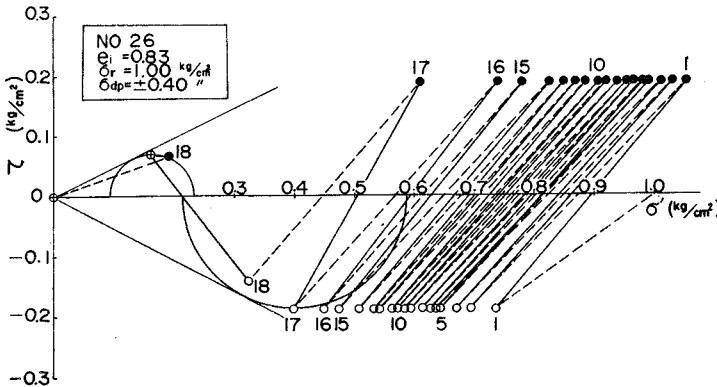


図-10 ゆるい川砂の有効応力径路

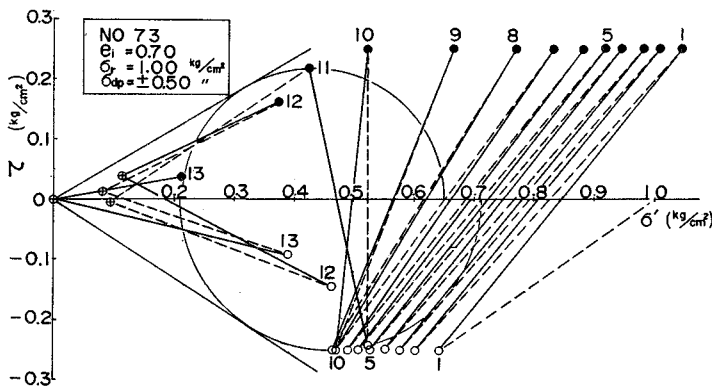


図-11 中密度の川砂の有効応力径路

て変化するモビライズされた内部摩擦角の極大値をもって動的強さを表わすものとする。

高密度の試料は、土粒子のかみ合せが強いので、一般に液状化されにくく、したがって完全液状化に至るまでの破壊過程を究明するのは容易でない。この場合は、密度のより小さい場合にくらべて種々の点で違いがあるようである。まず、表-3 にみるように、圧縮過程と伸張過程において特性に差がみられる。また、実験範囲内において、上記の判定規準に関する若干の項目については確認することができなかった。したがって、高密度試料の破壊について断定することはできないが、項目 1), 4), 6) が認められていることから、部分的な液状化を生じていることは疑いない。そこで、低密度の場合との対応を考慮して、それらの場合と同様に、項目 1) の時点で動的強さを求めることとした。

以上の考察に基づいて、同一の試料、初期間げき比、拘束圧に対して、異なる最大主応力差を与えたいくつかの実験から、それぞれの場合の限界モール円（モビライズされた内部摩擦角の極大値を与えるもの）を描いて、それらの共通接線を求める⁹⁾。これを例示した 図-12, 13, 14 は、初期間げき比 $e_i=0.80$ の川砂において、拘

束圧を、それぞれ $\sigma_r=0.50, 0.75, 1.00 \text{ kg/cm}^2$ としたもの、図-15, 16, 17 は初期間げき比 $e_i=0.70$ の川砂において、拘束圧を、それぞれ $\sigma_r=0.50, 0.75, 1.00 \text{ kg/cm}^2$ としたもの、図-18 は初期間げき比 $e_i=0.57$ の真砂土において、拘束圧 $\sigma_r=1.00 \text{ kg/cm}^2$ としたものである。図-12~18 およびここに示されていない同様の図において、モール円群の共通接線の勾配はつぎのようにして求めた。

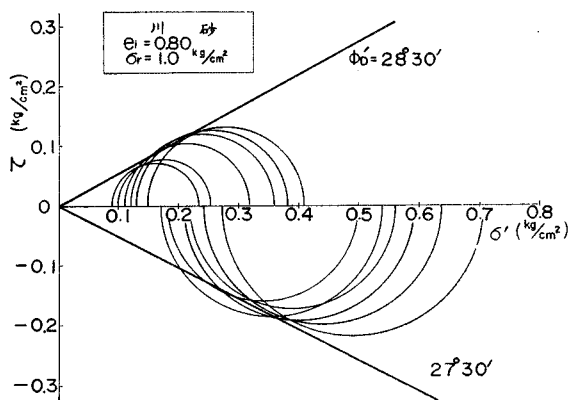


図-14 動的破壊包絡線（川砂， $e_i=0.80$ ， $\sigma_r=1.00 \text{ kg/cm}^2$ ）

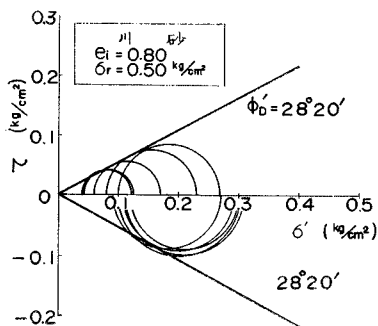


図-12 動的破壊包絡線
（川砂， $e_i=0.80$ ， $\sigma_r=0.50 \text{ kg/cm}^2$ ）

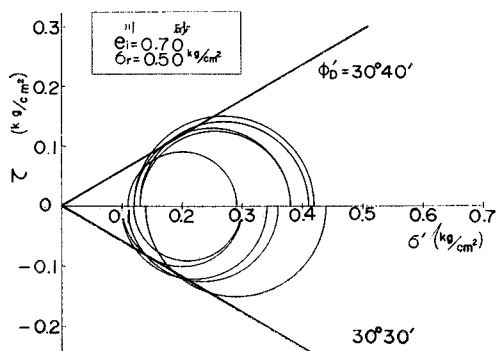


図-15 動的破壊包絡線（川砂， $e_i=0.70$ ， $\sigma_r=0.50 \text{ kg/cm}^2$ ）

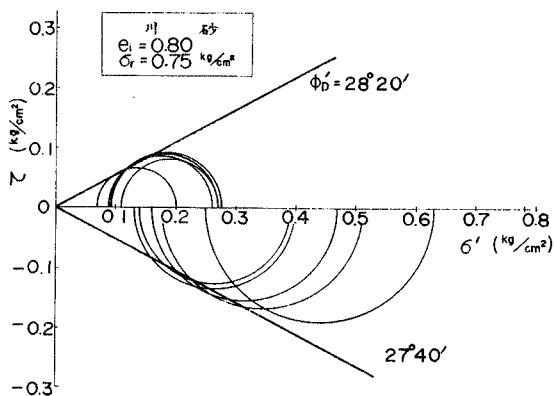


図-13 動的破壊包絡線（川砂， $e_i=0.80$ ， $\sigma_r=0.75 \text{ kg/cm}^2$ ）

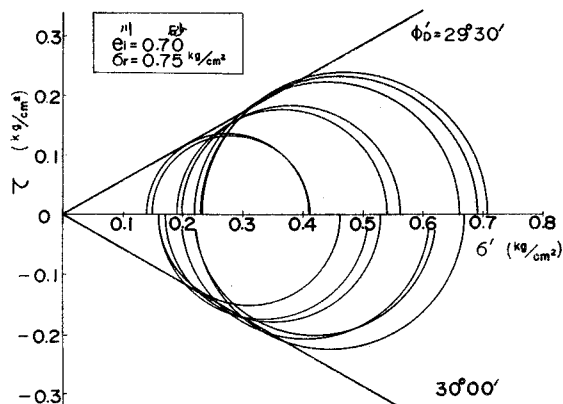


図-16 動的破壊包絡線（川砂， $e_i=0.70$ ， $\sigma_r=0.75 \text{ kg/cm}^2$ ）

圧縮側では、最小主応力（拘束圧）を $(\sigma_r')_f$ 、主応力差を $(\sigma_{dp})_f$ 、接線傾斜角を ϕ とすれば、

$$(\sigma_{dp})_f = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} (\sigma_r')_f$$

ここで、

$$m = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

あるいは

$$\sin \phi = \frac{m}{2+m}$$

とおくと、

$$\tan \phi = \frac{m}{2\sqrt{1+m}}$$

伸張側では、最小主応力は軸応力となるから、上記の $(\sigma_r')_f$ のかわりに $(\sigma_a')_f$ を用いる。

以上により、 m を求めれば、 ϕ は決定される。 m は $(\sigma_{dp})_f \sim (\sigma_r')_f$ 図（圧縮側）、 $(\sigma_{dp})_f \sim (\sigma_a')_f$ 図（伸張側）における勾配であるから、各モール円に対応する点の平均的傾きを最小自乗法によって求めた。

このようにして決定された ϕ を $\phi_{D'}$ と記し、静的圧縮せん断試験による ϕ' と比較すると表-4 のようになる。表-4 から、 $\phi_{D'}$ の拘束圧による変化を図示すると図-19 のようになり、 $\phi_{D'}$ は拘束圧に無関係であるといえる。したがって、同一密度の試料について異なる拘束圧に対する $\phi_{D'}$ の平均値を求め、それらの値を相対密度に対して図示すると図-20 が得られる。図-20 には ϕ' の値をあわせて示してあり、これから、 $\phi_{D'}$ は ϕ' より小さいこと、

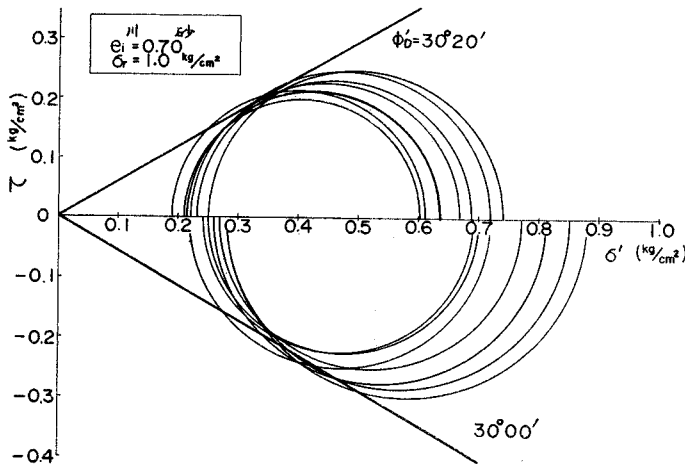


図-17 動的破壊包絡線（川砂， $e_s=0.7$ ， $\sigma_r=1.0 \text{ kg/cm}^2$ ）

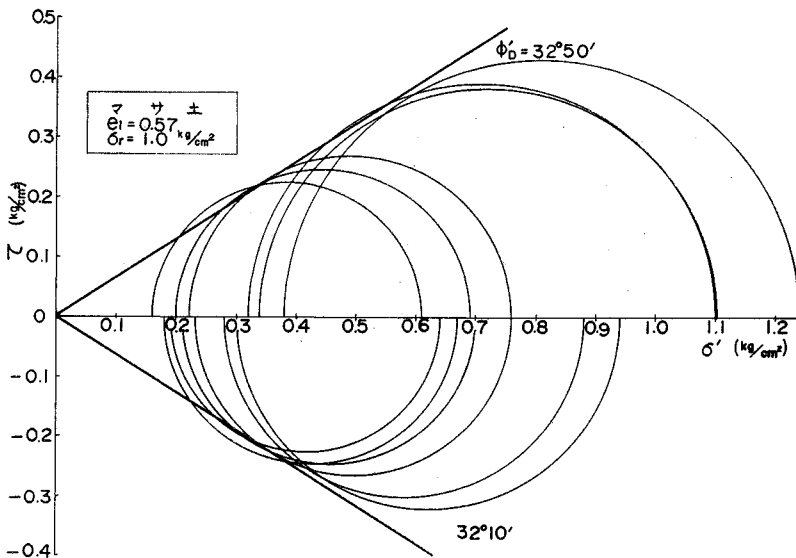


図-18 動的破壊包絡線（真砂土， $e_s=0.57$ ， $\sigma_r=1.0 \text{ kg/cm}^2$ ）

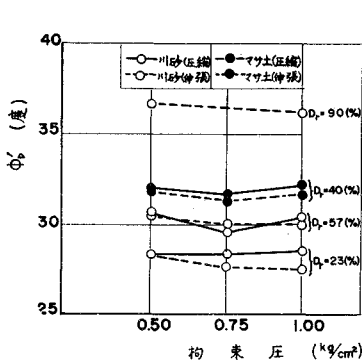


図-19 $\phi_{D'}$ の拘束圧による変化

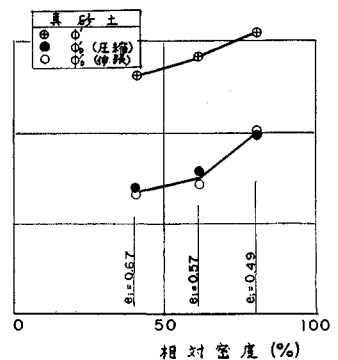
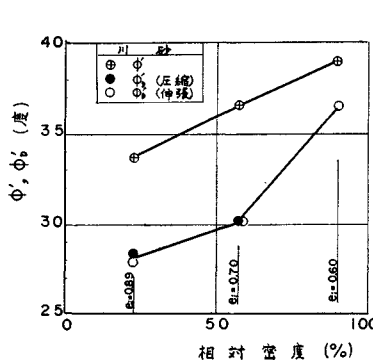
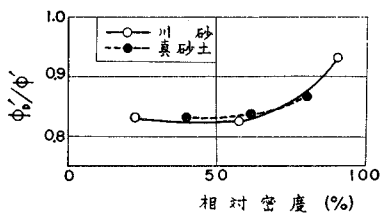


図-20 $\phi_{D'}$ および ϕ' の相対密度による変化

表-4 ϕ_D' と ϕ' との比較

(a) 川 砂							
e_i	D_r (%)	σ_r (kg/cm ²)	ϕ_D'			ϕ'	ϕ_D'/ϕ'
			圧縮過程	伸張過程	平均値		
0.80	23	1.0	28°30'	27°30'		33°40'	0.84
		0.75	28°20'	27°40'			
		0.5	28°20'	28°20'			
			平均 28°23'	平均 27°50'			
		0.70	57	1.0			
0.75	29°30'			30°00'			
0.5	30°40'			30°30'			
	平均 30°10'			平均 30°10'			
0.60	90			1.0	十分にモ ビライズ されない ので不用	36°10'	36°25'
		0.5	36°40'	平均 36°25'			
(b) 真 砂 土							
e_i	D_r (%)	σ_r (kg/cm ²)	ϕ_D'			ϕ'	ϕ_D'/ϕ'
			圧縮過程	伸張過程	平均値		
0.67	40	1.0	32°10'	31°40'	31°47'	38°10'	0.83
		0.75	31°40'	31°20'			
		0.5	32°00'	31°50'			
			平均 31°57'	平均 31°37'			
		0.57	61	1.0			
0.49	80	0.5	34°50'	35°00'	34°55'	40°20'	0.87

図-21 比 ϕ_D'/ϕ' の相対密度による変化

および圧縮過程と伸張過程における ϕ_D' は互いにほぼ等しいことが認められる。ただし、密な川砂は圧縮過程においてせん断強さが十分にモビライズされないうちに、伸張過程において液状化を起こしたので、圧縮過程の ϕ_D' は決定していない。

最後に、 ϕ' に対する ϕ_D' (圧縮・伸張の平均値) の比を求め、相対密度に対して図示すると 図-21 が得られる。図-21 によれば、 ϕ_D'/ϕ' の値は、川砂と真砂土の別に関係せず、相対密度の低い範囲ではほぼ一定であるが、相対密度がきわめて大きくなれば増加する傾向にあるといえる。

5. 結 論

本文は周期的動荷重の作用をうける飽和砂の力学的挙動について基礎実験を行ない、液状化現象の機構を説明するとともに、動的強度の決定に関する提案を行なった

ものである。飽和砂に対して急速に作用する荷重を加えることにより主応力差を生じるとき、非排水せん断過程における間げき水圧の変化と、せん断パラメータの変化とに基づく破壊を生じる。一般に、動的な破壊を判定することは困難で、従来、判定規準として確立されたものはないように思われる。この観点から、本文では、一つの提案を行なうとともに、これに基づいて実験データを整理し、考察を加えた。実験方法、実験条件などについて今後改善を要する点はあるが、一応、今回の研究成果を要約すればつぎのようである。

部分液状化から完全液状化に至る破壊過程について、

1) くり返し載荷回数増加とともに、間げき水圧は段階的に増加し、ある時点において間げき水圧の異常上昇(とび出し)現象を生じる。

2) 密度の小さい試料においては、とび出し現象の発生とほぼ同時に、主応力差の減少、軸ひずみの急増などの現象がみられ、その直後に、とび出し時の間げき水圧は拘束圧に等しくなって完全液状化する。

3) 密度が中程度の試料においては、完全液状化現象は最初のとび出し現象が発生したのち若干のサイクルを経て発生する。しかし、最初のとび出し現象の発生とほぼ同時に主応力差の減少、軸ひずみの急増などの現象が起こり、その時点ですでに破壊が進行する。

4) 密度の大きい試料においては、圧縮過程と伸張過程により特性が異なり、最初のとび出し現象は伸張過程において生じ、圧縮過程のとび出し現象はかなり遅れて発生する。とび出し時の間げき水圧は拘束圧よりかなり小さく、それが拘束圧に等しくなって完全液状化に達するまでには多数のくり返し載荷回数を必要とする。しかし、とび出し現象の発生とともに、主応力差記録に乱れを生じ、部分的に液状化する。

液状化過程における動的強度について、

1) くり返し載荷回数増加とともに間げき水圧は次第に増加するので、それに伴って有効応力は減少する。したがって、有効応力径路は段階的に移動するとともに、モビライズされた内部摩擦角は増加する。

2) 密度の小さい試料においては、モビライズされた内部摩擦角はある載荷サイクルにおいて極大となり、それと同時に最初のとび出し現象が起こり、上記のように主応力差の減少、軸ひずみの急増などの現象がみられ、ひきつづいて完全液状化を呈して破壊する。

3) 密度が中程度の試料においては、完全液状化の若干の遅れを除けば、密度の小さい試料とほぼ同様の現象が起こる。したがって、モビライズされた内部摩擦角が極大となる載荷サイクルでは部分的液状化による破壊が進行しているものと考えられる。

4) 密度の大きい試料は、一般に液状化しにくい

で、破壊過程を論じるまでには至っていないが、とび出し現象を生じる時点において、モビライズされた内部摩擦角は極大となる。

5) 以上の観点から、モビライズされた内部摩擦角 ϕ_D' をもって有効応力表示による動的強さを示すものとし、川砂と真砂土について、初期間げき比、拘束圧、圧縮・伸張過程別などによる ϕ_D' の変化を求め、つぎの諸特性があることが認められた。

- i) ϕ_D' は拘束圧に関係しない。
- ii) ϕ_D' は圧縮過程と伸張過程とにおいてほぼ等しい値をもつ。
- iii) 動的せん断定数 ϕ_D' は静的せん断定数 ϕ' より小さい。
- iv) 比 ϕ_D'/ϕ' は、本研究で用いた川砂と真砂土の別には関係しない。
- v) ϕ_D'/ϕ' は密度のきわめて大きい場合を除けばほぼ一定であるが、密度がきわめて大きくなれば増加する傾向がある。

終りに、本研究実施に当り、実験、整理、図表作成などについて、菅 好徳、大浦 智、坂元 稔、青木重太、西 勝の諸氏の協力を得たことを記し、厚く謝意を表わしたい。

記 号

- D_r : (初期) 相対密度
- e_i : 初期間げき比
- m : せん断定数の関数
- u : 間げき水圧変化
- u_D : 動荷重作用時の間げき水圧
- ε : 軸ひずみ
- σ_a : 軸応力
- $(\sigma_a')_f$: 動的強さ算定時の軸方向有効応力

- σ_D : 動荷重作用時のせん断面垂直全応力
- σ_D' : 動荷重作用時のせん断面垂直有効応力
- σ_{dp} : 主応力差または軸差応力 ($=\sigma_a - \sigma_r$)
- $(\sigma_{dp})_f$: 動的強さ算定時の主応力差
- σ_r : 圧密時の全周圧力、せん断時の拘束圧力
- $(\sigma_r')_f$: 動的強さ算定時の拘束圧力
- τ_{Df} : 動荷重に対するせん断強さ
- ϕ' : 有効応力表示による静的内部摩擦角
- ϕ_D' : 有効応力表示による動的内部摩擦角

参 考 文 献

- 1) 谷本喜一・西 勝: 砂の流動化における繰返し応力、側圧および間げき比の影響について、土と基礎、17-4 (1969), pp. 19-24
- 2) 小泉安則・伊藤幸彦: 砂地盤の液状化について、第4回土質工学研究発表会講演集 (1969), pp. 67-72
- 3) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading, Journal Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 92, No. SM 6, Proc. Paper 4972 (1966), pp. 105-134
- 4) Peacock, W.H. and Seed, H.B.: Sand Liquefaction Under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Journal Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 94, No. SM 3, Proc. Paper 5957 (1968), pp. 689-708
- 5) 石井武則・吉見吉昭: 動的純粋せん断による飽和砂の液状化に関する実験的研究、第3回土質工学研究発表会講演集 (1968), pp. 45-49
- 6) 上記 3)
- 7) 小川正二・柳沢栄司・長池政彦: 振動応力を受ける飽和砂の液状化機構について、第4回土質工学研究発表会講演集 (1969), pp. 79-82
- 8) 谷本喜一・植村隆晴: 飽和砂の流動化について、土木学会第24回年次学術講演会講演集、第3部 (1969), pp. 141-142
- 9) 谷本喜一・植村隆晴・菅 好徳・大浦 智: 繰返し荷重による飽和砂の破壊について、第5回土質工学研究発表会講演集 (1970), pp. 105-108

(1970.6.17・受付)