

# 平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態における 乾燥砂のせん断特性

## EXPERIMENTS ON SHEARING CHARACTERISTICS OF DRY SAND UNDER PLANE STRAIN CONDITION AND AXIAL SYMMETRIC STRAIN CONDITION

市原松平\*・松沢宏\*\*

By Matsuhei Ichihara and Hiroshi Matsuzawa

### 1. ま え が き

筆者らの研究室では精巧な装置を用いて、壁体に作用する土圧の計測を行ない、塑性平衡状態の土圧を満足させる内部摩擦角を求めている。しかしながら、この内部摩擦角の値は同一砂に対する普通の三軸圧縮試験から求めた値よりも大きい値を与えている。

擁壁に作用する土圧では、裏込め砂は壁体の延長方向の変形が拘束され、3つの主応力はそれぞれ異なった値を有し、中間主応力は変形が拘束された軸方向に作用している。一般に密な砂の場合、試料の変形の拘束条件が異なると、そのせん断強度は異なってくるといわれている<sup>1),2),3),4),5)</sup>。したがって、上述のような内部摩擦角の差の原因は土圧の場合と普通の三軸圧縮試験において砂が受ける変形の拘束の差によるものと考えられる。これを解明させるために、筆者らの研究室では英国のインペリアル大学のせん断試験機<sup>6)</sup>を参考にして、より合理的な、すなわち、取扱いやすく、かつ、計測部はすべて安定な電気計測を採用した平面ひずみ三軸圧縮試験機を試作した。さらに、この試験機の計測誤差をより少なくするために、載荷機構ならびに中間主応力計測装置に数多くの改良を加え、計測値にかなり信頼度をもてるようにした。

ここで述べる研究は上述の平面ひずみ三軸圧縮試験機を用いて、気乾燥状態の豊浦標準砂について試験した結果をノルウェー製の三軸圧縮試験機による普通の三軸圧縮試験結果と比較しながら砂のせん断特性を調べたものである。

この平面ひずみ三軸圧縮試験機は直方体の試料の長手方向の変形が拘束された平面ひずみ状態の土の試料に液

圧による拘束圧を作用させて、試料に鉛直軸方向の変形を与えて試料に圧縮破壊をおこさせるものである。ここで、試料に作用する主応力のうち、最大主応力  $\sigma_1$  は試料の鉛直軸方向に作用し、最小主応力  $\sigma_3$  は液圧によって作用させる。残りの中間主応力  $\sigma_2$  は試料長手方向の変形を拘束するために要する応力に相当しており、試料長手方向端末の拘束板が受ける圧力を計測するようになっている。

今日、土木建築における二次元問題の安定解析においても、土のせん断抵抗値は依然として普通の三軸圧縮試験で求めた値を採用している。また、このような構造物の設計は極限設計で行なわれるために、われわれは安全率を用いて構造物の安全を期している。しかしながら、密な砂に関するかぎり、せん断抵抗値を普通の三軸圧縮試験で求めた値を使用することにより、構造物はさらに安全度を増すことになる。もし、われわれがより厳密なせん断抵抗値を設計に適用すれば、これは道路の盛土のようなばく大な土工量において巨額の工事費の節減に結びつくことになる。このように考えると、平面ひずみ状態の土のせん断特性を正しく見積ることがいかに重要であるかということになる。

以上は土に関する応用研究、実用研究の面から考えたことになるが、最大主応力と最小主応力との間に存在する中間主応力がせん断特性におよぼす影響に関する基本的研究もまた、きわめて重要である。第6回国際土質力学基礎工学会議（モントリオール、1965）の席上でせん断に関して B. Hansen が平面ひずみ状態におけるせん断試験の重要性を力説したのもうべなるかなである。

さて、この研究では上述したように平面ひずみ三軸圧縮試験と普通の三軸圧縮試験の結果の比較に重点をおいているが、応用研究ならびに実用面に役立つ重要な問題もこれからとり出している。以下においては平面ひずみ三軸圧縮試験を単に平面ひずみ試験、普通の三軸圧縮試験

\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

\*\* 学生員 工修 名大大学院工学研究科 博士課程在学

験を単に三軸試験と略称し、また、三軸試験における変形状態、すなわち軸対称ひずみ状態を単に軸対称状態と表現した。以下に本文で用いた記号を説明する。

- $\epsilon_1$  : 試料の鉛直軸方向のひずみ (最大主ひずみ)
- $\epsilon_{1-f}$  : 破壊時における軸ひずみ
- $\epsilon_{1-f-P}$  : 平面ひずみ試験における破壊時の軸ひずみ
- $\epsilon_{1-f-T}$  : 三軸試験における破壊時の軸ひずみ
- $\epsilon_{1-Dmax}$  :  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  が最大となるときの軸ひずみ
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 最大主応力, 中間主応力, 最小主応力
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  : 破壊時における主応力差
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  : 破壊後に変形がさらに増加して、体積変化が停止し、かつ応力が一定となったときの主応力差 (残留抵抗)
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  : 変形の初期に試料がもっとも収縮したとき (最大密度状態) における主応力差 (すべり抵抗)
- $\phi_f$  : 内部摩擦角
- $\phi_{f-P}$  : 平面ひずみ試験から求めた内部摩擦角
- $\phi_{f-T}$  : 三軸試験から求めた内部摩擦角
- $\phi_r$  : 残留抵抗角, すべり抵抗角

## 2. 試作した試験機

この試験機は概略を写真-1, 図-1 に示すように、本体、液圧加圧装置ならびに中間主応力計測装置から構成されている。

圧力室は内部に幅×長さ×高さが  $4 \times 8 \times 32$  cm の直方体の試料を格納し、この試料に水圧による等方圧を作用させるためのアルミニウム製の容器であって、内のは幅 12 cm × 長さ 50 cm × 高さ 20 cm である。なお、上記の試料形状は Cornforth<sup>2)</sup> を参考にした。この圧力室の上蓋と 4 枚の側板とはボルトで緊結されて一体とな

っていて、この部分と底板とは 8 本のボルトで分離、結合することができる。

この圧力室は架台下部の中央に固定された 7 t 用のスクリー ジャッキ上に設置されている。このスクリー ジャッキは 1/4 H.P. の三相交流モーターで駆動される。また圧力室の変位が円滑になされるように、圧力室の各隅部には溝型車輪が架台の 4 本の支柱に接するように取付けてあって、圧力室はこれらの支柱を案内棒として変位するようになっている。圧力室の底板をのぞく他の部分は架台上方に設置されている圧力室昇降装置で、上方に約 20 cm 吊り上げることができる。

試料の鉛直軸方向の変形は試料上面に設置された剛な加圧板を介して、圧力室の外から上蓋に固定された回転式軸受を経て圧力室内にそう入されている 2 本の載荷棒で与えている。上記の 2 本の載荷棒は試料に均等な応力が生ずるように、着地点が試料長手方向端部からはかって試料長の 1/4 の距離に位置するように取付けてある。これらの載荷棒の反力は、写真-1 に示すように荷重計を介して架台上方からとっている。

圧力室内には、試料にその長手方向の変形が拘束された平面ひずみ状態を發揮させるために、写真-2 に示す拘束装置を設置することができる。拘束装置は 2 枚のアクリル樹脂製の拘束板と 4 本の連結棒からできている。2 枚の拘束板のうち、1 枚は試料の長手方向の変形を拘束するために要する圧力が計測できるようになっている。すなわち、この拘束板は中央部に厚さが 0.2 mm のリン青銅板の受圧板を有する中間主応力計測用の圧力室が設けてあり、この圧力室内は脱気水で満たされている。また、上記の受圧板には試料からの圧力を直接受ける剛な金属板のアタッチメントが固定してあり、このア

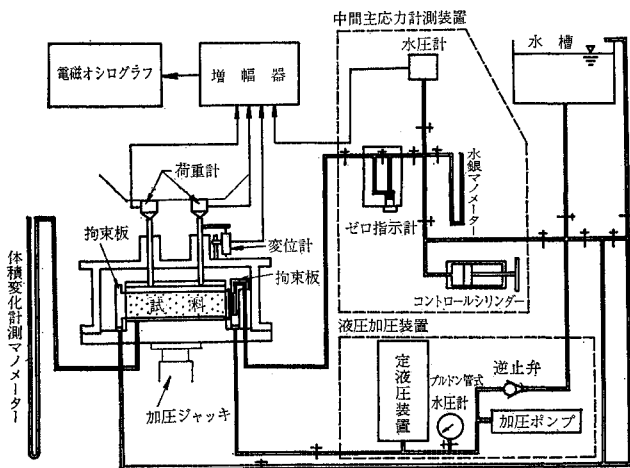


図-1 平面ひずみ三軸圧縮試験機の計測系の説明図

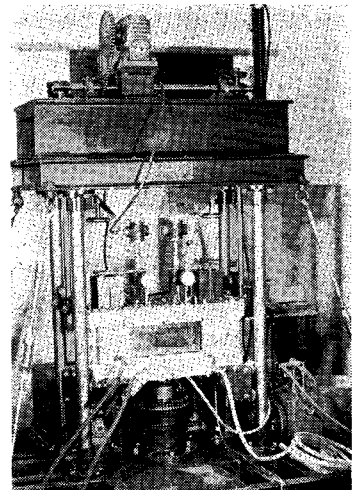


写真-1 平面ひずみ三軸圧縮試験機の本体

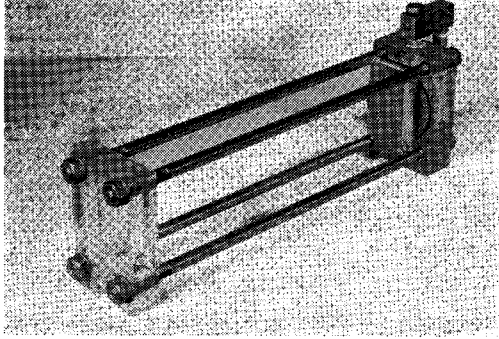


写真-2 拘束装置

タッチメントは試料の変形を拘束すると同時に、受圧板に試料から受ける圧力を伝達している。したがって、試験中に試料に生じている中間主応力は上記の中間主応力計測用圧力室内の水圧の大きさから算定できる。この水圧は受圧板とそれに固定してあるアタッチメントに変位をおこさせないように、三軸試験機の間げき水圧計に用いられているゼロ指示計を使用して、上記の圧力室内の容積が変化しない状態で計測するようになっている。

試料に作用させる液圧はノルウェー型の定液圧装置を改良したものをを用いて一定の圧力を保たせた。

試験中の試料の軸方向の変形は変位計を用いて圧力室と載荷棒との相対変位を計測するようになっている。

### 3. 試験に使用した砂と試験方法

#### (1) 試験に使用した砂

使用した砂は洗浄した気乾の豊浦標準砂である。この砂の  $G_s$  は 2.65、有効径は  $D_{10}=0.16$  mm、均等係数は  $U_c=1.41$  である。また、この砂の気乾状態における最大間げき比は 0.969 ( $r_d=1.346$  g/cm<sup>3</sup>) であり、最小間げき比は 0.609 ( $r_d=1.647$  g/cm<sup>3</sup>) である。最大間げき比は、「JIS A 1214 現場における砂置換法による土の単位体積重量試験」に基づいて求めた。最小間げき比は「JIS A 1211 CBR 試験法」に規定された締め用モールド内に砂を数層に分けて流し込み、各層ごとに箱型バイブレーターで締め固めて求めた。

圧縮試験は上記の砂に対して、初期間げき比（マイターボックスに詰めたときの間げき比）0.663, 0.735, 0.807, 0.880 の4段階を主として行なった。なお、この間げき比は相対密度でそれぞれ 85%, 65%, 45%, 25% に相当している。

#### (2) 試料の成形と試験方法

平面ひずみ試験用の試料は、以下のようにして成形した。まず圧力室底板の供試体台に厚さが 0.1~0.2 mm

のゴムスリーブを取付けて、さらにその外方からマイターボックスを固定して、このマイターボックスの上縁でゴムスリーブを折り返しておいた。つぎにあらかじめ所定の初期間げき比が得られるように計量した砂を一層あるいは数層に分けてマイターボックス内に流し込み、各層ごとにマイターボックスの側壁を木づちで軽くたたいて締め固めた。試料を詰め終わってから、試料の表面を水平にならして加圧板を静かに乗せて、加圧板が水平に設置されていることを確認した。その後、マイターボックス上縁に折り返しておいたゴムスリーブを加圧板周縁に固定してから試料に負圧をかけて自立させ、マイターボックスを静かにとりはずした。この状態における試料の寸法は計測しておいた。

前述したように、試料の形状は直方体である。しかしながら、砂を理想的な直方体に成形することはきわめて困難であって、試料の隅部はやや丸味を帯びてしまう。このために、試料の間げき比の評価に若干の誤差が含まれるが、この丸味による間げき比の誤差は試料体積のわずか1%にも達しないことがわかったので無視した。

試料を自立させたのちに、試料長手方向端部に拘束板を設置してから、中間主応力計測装置の脱気を完全に行なった。試料と拘束板との接触をよくするために、試料の長手方向に 2.0 cmHg 程度の初期圧力が作用するまで、拘束装置の4本のロッドで、拘束板と試料とを締めつけた。この状態でしばらく放置して、拘束板内の圧力室の圧力が下がらないことを確認してから、圧力室を組立てて、圧力室内に水を注入した。試料に作用させる液圧は 0.5, 1.0, 2.0 kg/cm<sup>2</sup> の3段階とした。また、試料の鉛直方向の変形は、1 mm/分の速さで与え、軸ひずみが 10% に達するまで圧縮した。

試験中に、試料に作用している鉛直荷重と中間主応力（拘束板内圧力室内の内圧）と鉛直方向の変形量は電氣的に計測し、電磁オシログラフに記録した。また、試料の体積変化量は試料の間げきへの空気の流出入量を大気圧のもとで計測しうる特殊なマンメーターを作って、このマンメーターで計測した。

なお、三軸試験においても、試料は上記の方法で成形し、上記と同一の条件で軸ひずみが 15% に達するまで圧縮した。

また、得られた記録は軸ひずみと体積変化を考慮して試料の各ひずみにおける断面積を補正して整理した。なお、変形は液圧加圧終了時を原点とした。

#### (3) 試料の境界面における摩擦が強度や変形におよぼす影響

前述したように、平面ひずみ試験における試料の形状は一般の圧縮試験に使用されるものとはまったく異なっ

た特殊な形状である。しかも、この試料の上下の境界面と長手方向端部において、摩擦力が発生することが当然考えられる。円柱形の試料の上下の境界面における拘束が砂の強度におよぼす影響に関する研究<sup>4),6)</sup>はあるが、直方体の試料を上記のようにして用いる場合の研究例は何もない。そのために、以下に示す試験を行なって、試料の境界面における摩擦力が砂の強度や変形にどのように影響するかを調べた。

試験はまず、拘束板による側壁摩擦の影響を調べるための試験として、試料に拘束装置を取付けた状態における試験、すなわち平面ひずみ試験と、拘束装置を用いないで、試料長手方向の変形を許した状態のもとでの試験を行なった。つぎに、試料の上下の境界面における摩擦による影響を調べる試験として、試料と加圧板ならびに供試体台との間にシリコングリスを塗布したゴムスリーブ(厚さ 0.1 mm)を挿入して摩擦を軽減させた状態のもとにおける平面ひずみ試験を行なって、上記の平面ひずみ試験結果と比較した。なお、上述の試験で、拘束装置を使用する場合、試料を包むゴムスリーブと拘束板との間にはシリコングリスを塗布して側壁摩擦の軽減を計った。

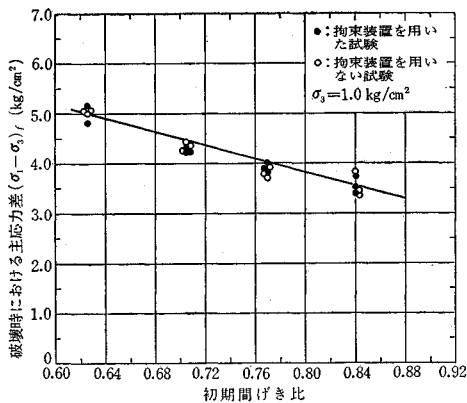


図-2 拘束装置を使用した場合と使用しない場合の破壊時における主応力差の比較

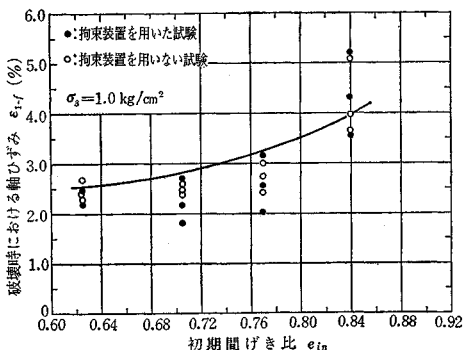


図-3 拘束装置を使用した場合と使用しない場合の破壊時の軸ひずみの比較

得られた結果のうち、まず拘束板による側壁摩擦の影響について述べる。いま、破壊時に注目し、このときの主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_x$  と軸ひずみ  $\epsilon_{1-x}$  について、両者に差があるか否かを調べた。これは 図-2、図-3 に示すように、初期間げき比が変化しても、両者において顕著な差は認められない。また、図には示さなかったが、破壊時における体積ひずみも拘束板の有無による差は認められなかった。

つぎに、試料上下の摩擦を軽減した試験結果について述べる。いま破壊時の主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_x$  を各初期間げき比に対して図示すると、図-4 のようになる。摩擦の軽減を計った場合と計らない場合との間に顕著な差は認められない。また破壊時における軸ひずみ  $\epsilon_{1-x}$  を両場合について比較すると、これも試料上下の境界面における摩擦の影響と思われる傾向は見られない。この様相は、図-5 に与えられている。しかしながら、破壊時の体積ひずみ量は摩擦を軽減した方がやや大きく現われた。以上、この一連の試験結果から見ると、平面ひずみ試験に使用する試料が拘束板から受ける側壁摩擦の影響は無視できる。また、試料上下の境界面における摩擦は試

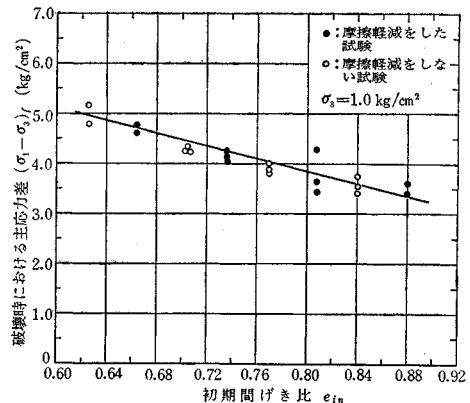


図-4 摩擦軽減をした場合としない場合の破壊時における主応力差の比較

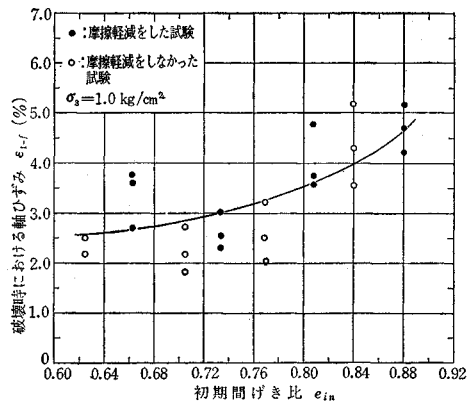


図-5 摩擦軽減をした場合としない場合の破壊時における軸ひずみの比較

料の（高さ/幅）の値が（2/1）であれば、強度や破壊ひずみにあまり影響しないといえる。しかしながら、試料上下の境界面における摩擦の軽減は中間主応力の計測値を増加させる効果があるということが確かめられた。以下に示す平面ひずみ試験結果は拘束板による側壁摩擦ならびに試料の上下面における摩擦を軽減して行なった試験についてである。

ここで、試料と加圧板ならびに供試体台との間に挿入したゴムスリーブの変形による軸方向変形量の測定誤差にふれておく。このゴムスリーブの厚さは0.1mmである。したがって、試験中にこのゴムスリーブが圧縮されて、仮に厚さがゼロとなっても、試料の破壊に要する変形量の測定誤差は0.2mm程度である。しかるに、後述するように、破壊時における試料の軸方向変形量は1.6mm以上であった。しかもこの変形量のばらつきはゴムスリーブの厚さ以上であった。したがって、ゴムスリーブそう入により、変形量はいくぶん大き目に計測するかもしれないが、これによる誤差はあまり重要視するまでもないと考えられる。

#### 4. 結果と考察

##### (1) 試験後の供試体形状

平面ひずみ試験で  $\epsilon_1=10\%$  の軸ひずみを与えたときの試料形状の代表例を写真-3に、三軸試験で  $\epsilon_1=15\%$  を与えたときの試験形状の代表例を写真-4に示す。これらの写真を比較すると、平面ひずみ試験では側方の変形は試料の高さ方向にかなり均等に生じたが、三軸試験においては、側方変位は試料の上下端に近い部分はあまりおこらず、中央部でかなり大きい。

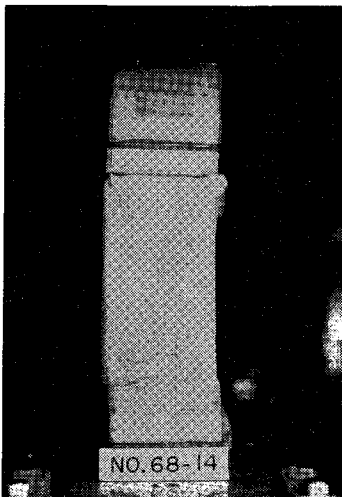


写真-3 平面ひずみ試験で  $\epsilon_1=10\%$  を与えたときの試料形状

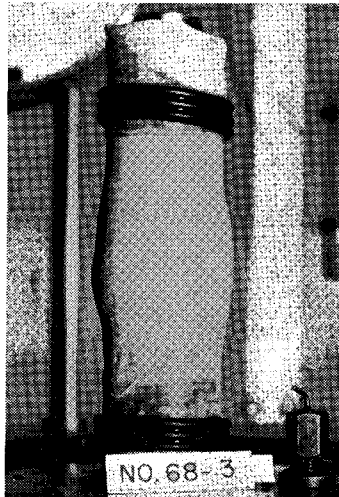


写真-4 三軸試験で  $\epsilon_1=15\%$  を与えたときの試料形状

また、平面ひずみ試験におけるすべりは試料長手方向の軸（中間主応力軸）を含み、水平面とある角度をなす面に沿っており、このすべり面をはさむわずが数ミリメートルの区間が破壊したと思われる。すなわち、この破壊領域は上述した三軸試験におけるそれよりもかなり小さいことがわかる。

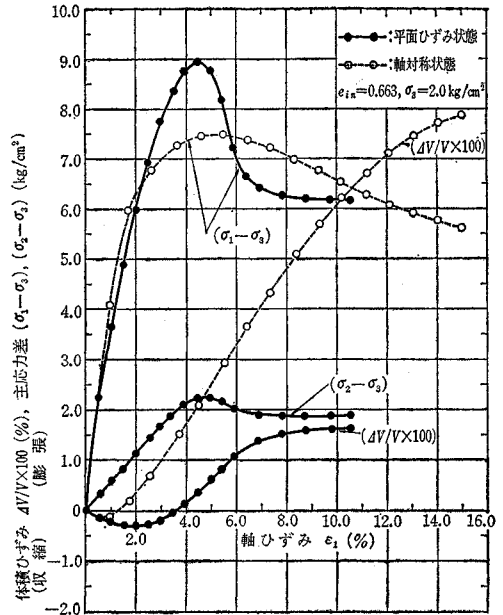


図-6 主応力差、体積ひずみの軸ひずみに対する変化

##### (2) 変形に応ずる応力と体積ひずみの様相

平面ひずみ試験と三軸試験から得られた応力-ひずみ、体積ひずみ-ひずみ曲線の一例を密な砂の場合 ( $\epsilon_{in}=0.663$ ) について示したものが図-6である。

平面ひずみ試験では試料に軸方向の変形を与えると同時に主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  と  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  は増加しはじめて、ほとんど同一のひずみ量で両者は最大となる。このときが試料の破壊である。さらに変形が進むと、両主応力差は減少しはじめて、破壊時の軸ひずみの1.5~2倍程度の変形が生ずると両者は変化しなくなる。とくに、この状態における主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  は破壊時における主応力差の70%程度まで減少している。

試料の体積ひずみは、軸方向の変形を与えると同時に、まず負の値（体積の減少）となる。変形がさらに進むと、試料はダイレイタンスを開始して、体積ひずみは正の値となって増加しつづける。軸ひずみが破壊時のその1.5~2倍程

度になると体積ひずみは変化しなくなる。

三軸試験においても、試料に軸方向の変形を与えはじめると同時に、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は増加しはじめ、破壊は平面ひずみ試験におけるよりもやや大き目のひずみで生じた。しかしながら、このときの主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は平面ひずみ試験におけるそれよりもピークは顕著ではない。また、三軸試験における破壊時の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を平面ひずみ試験における $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と比較すると、後者の方が前者よりも15~20%程度大きい。三軸試験で、この状態よりも変形がさらに増加すると、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は減少しはじめるが、かなり大きな変形が生じて $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は減少しつづけた。

また、試料の体積は平面ひずみ試験と同様に軸方向の変形を与えると同時にまず収縮し、その後ダイレイタンスーを開始する。このダイレイタンスーはかなりの長期間にわたって生じ、また、体積ひずみ量は平面ひずみ試験におけるものよりもはるかに大きい。

(3) 破壊時における応力、ひずみ、強度定数

a) 破壊時の応力

液圧が等しい場合、破壊時の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は平面ひずみ、軸対称の両状態ともに試料の初期間げき比が小さいほど大きくなるが、この様相を液圧が $2.0 \text{ kg/cm}^2$ の場合を例にとって示すと、図-7 のようになる。この図において、両状態の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を比較すると前者のほうが後者よりも大きく、両者の差は初期間げき比が小さいほど大きい。すなわち、初期間げき比 $e_{in}=0.663$ において、平面ひずみ状態における $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は軸対称状態よりも15%程度大きく、 $e_{in}=0.880$ で8%程度大きい。

つぎに、破壊時における3つの主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の関係を調べるために、横軸に初期間げき比をとり、縦軸に

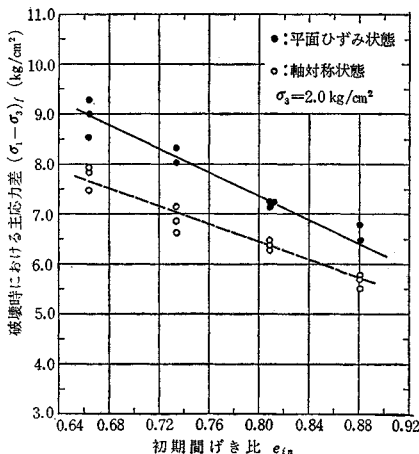


図-7 破壊時における主応力差と初期間げき比の関係

$\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3)$ をとって、両試験結果を図示すると図-8 が得られる。平面ひずみ状態の場合、中間主応力軸方向のひずみ $\epsilon_2$ は $\epsilon_2=0$ であるから、 $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3)$ は試料の破壊時における割線弾性係数を考えた場合のポアソン比に相当している。しかしながら、軸対称状態の場合、図の縦軸の値は上記のポアソン比を与えるものではない。この図において、平面ひずみ状態では、縦軸の値は初期面げき比の変化に対して、ほぼ一定であって、 $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3) = 0.28$ 程度である。一方、軸対称状態の場合、この値は初期間げき比が増加すると増加して、初期間げき比 $e_{in}=0.663$ で $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3) = 0.18$ 程度、 $e_{in}=0.880$ で $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3) = 0.25$ 程度である。

b) 破壊時における軸ひずみ

平面ひずみ状態と軸対称状態のそれぞれにおける破壊時の軸ひずみ $\epsilon_{1-f}$ の間に特筆すべき関係があることを発見した。以下、このことについて述べる。

平面ひずみ状態ならびに軸対称状態ともに破壊時の軸ひずみ $\epsilon_{1-f}$ はかなりばらついた。しかしながら、両状態ともに、図-9、図-10の曲線で示されるように、液圧が高いほど、また、初期間げき比が大きいほど破壊時の軸ひずみは増加する傾向がある。これら両図を比較

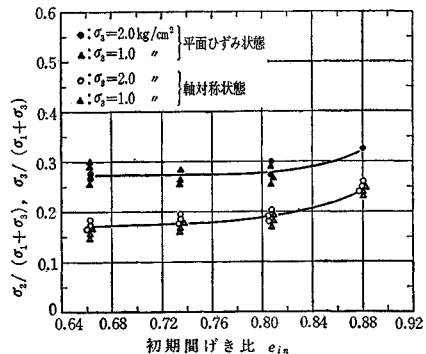


図-8 破壊時における $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3)$ の初期間げき比に対する変化

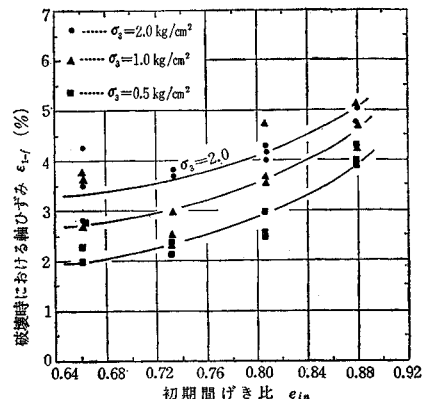


図-9 平面ひずみ状態における破壊時の軸ひずみと初期間げき比との関係

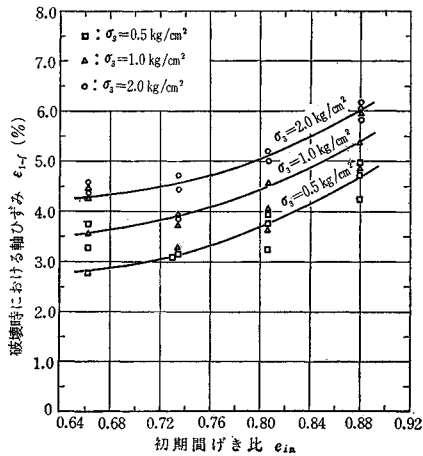


図-10 軸対称状態における破壊時の軸ひずみと初期間げき比との関係

すると、同一液圧のもとで、かつ、同一初期間げき比の砂の破壊時の軸ひずみは平面ひずみ状態の方が軸対称状態における場合よりもいくぶん小さ目であることがうかがわれる。

ここで両状態における破壊時の軸ひずみが互いに関係があるか否かを調べることは興味のあることである。いま横軸に軸対称状態における破壊時の軸ひずみ  $\epsilon_{1-f-T}$  をとり、縦軸に平面ひずみ状態における破壊時の軸ひずみ  $\epsilon_{1-f-P}$  をとって考える。この面上に、同一液圧のもとで、同一初期間げき比の砂の両拘束状態における破壊時の軸ひずみを図示すると、図-11 が得られる。この図から、両状態における破壊時の軸ひずみ量の間には次式で表わされる注目すべき関係があることがわかる。すなわち、

$$\epsilon_{1-f-P} = 0.9 \cdot \epsilon_{1-f-T} - 0.45 \quad (\%) \dots \dots (1)$$

ただし、上記の式(1)は同一液圧、かつ、同一初期間げき比の砂についてのみ成立することに注意を要する。

● 強度定数

われわれにとって最も興味のある問題は平面ひずみ状態における砂の内部摩擦角と軸対称状態におけるそれとの関係であるが、これについても特殊な関係があることを発見した。

図-12 は平面ひずみ状態と軸対称状態の砂の初期間げき比に対応する内部摩擦角  $\phi_f$  を示している。両状態ともに内部摩擦角は初期間げき比が小さいほど大きい。この内部摩擦角を両状態について比較すると、 $e_{in} = 0.663$  の密な砂で平面ひずみ状態では  $\phi_f = 41^\circ 40'$  であって、これは軸対称状態における  $\phi_f = 39^\circ$  よりも8%程度大きい。初期間げき比が増加するにつれて、両状態の内部摩擦角の値は接近するが、 $e_{in} = 0.880$  のゆるい砂では平面ひずみ状態で  $\phi_f = 35^\circ 50'$  であって、軸対称状態の  $\phi_f = 34^\circ 40'$  よりも3%程度大きい。

ここで、平面ひずみ状態における砂の内部摩擦角を  $\phi_{f-P}$ 、軸対称状態における砂のそれを  $\phi_{f-T}$  であらわすと、両内部摩擦角には図-13 に示されるように直線関係がある。この関係は次式で表わされる。すなわち、

$$\phi_{f-P} = 1.27 \cdot \phi_{f-T} - 8.13 \quad (\text{度}) \dots \dots (2)$$

上式は式(1)と同様に、平面ひずみ状態における砂の内部摩擦角を普通の三軸圧縮試験から求めた内部摩擦から推定するためにきわめて有効な式であることを強調す

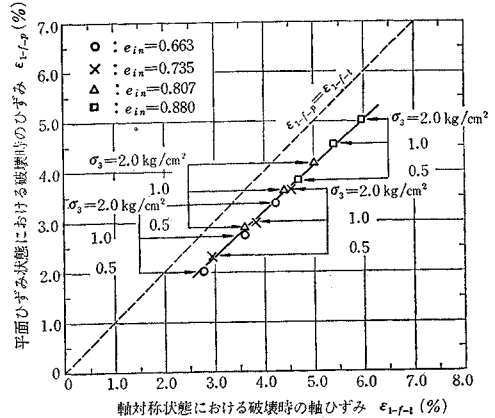


図-11 平面ひずみ状態と軸対称状態の破壊時における軸ひずみの関係

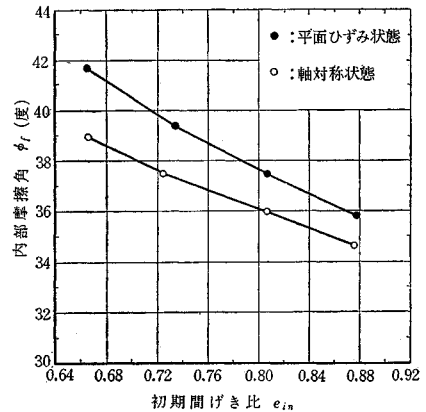


図-12 内部摩擦角と初期間げき比との関係

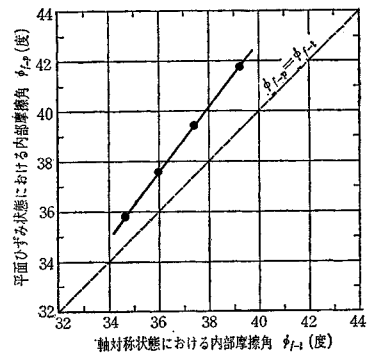


図-13 平面ひずみ状態と軸対称状態の内部摩擦角の関係

る。

最後に、Mohr-Coulomb の砂壊包絡線の  $\tau$  軸切片の大きさについて簡単にふれておく。一般に、この  $\tau$  軸切片量は気乾状態の砂の見掛の粘着力として取り扱われがちであるが、試験機の載荷棒とそれを支持する軸受との間に生ずる摩擦力も含まれていることに留意せねばならない。いま、横軸に初期間げき比をとって、縦軸に上記の  $\tau$  軸切片量をとって、平面ひずみならびに三軸の両試験から得られた結果を図示したものを示すと、図-14 のようになる。すなわち、 $\tau$  軸切片量は両試験結果とも  $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$  程度である。

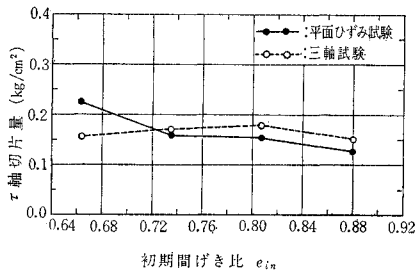


図-14 両試験における  $\tau$  軸切片量の比較

(4) せん断中における体積ひずみの様相とそれに基づく応力

a) 破壊時における体積ひずみの性状

せん断中における砂の体積ひずみは砂のせん断特性においてかなり重要な位置を占めている。この体積ひずみの様相を 図-6 に示した体積ひずみ-ひずみ曲線の接線勾配 ( $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$ ) で表現すると、ダイレイタンシーが砂のせん断強度にどのような姿で影響しているかが明確になる。このために、まず軸ひずみの増加に応ずる  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  の変化の性状をみると、その一例は、図-15 のようになる。平面ひずみ状態、軸対称状態ともに、変形の初期において  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  の値は負(収縮)である。変形がすすむにつれて、この値は次第に増加して  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1=0$  になる。このときが試料が最も収縮した状態、すなわち最大密度状態である。この状態に相当する軸ひずみ量は平面ひずみ状態の場合、軸対称状態の場合の2倍程度が生じている。さらに変形が増進すると、 $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  は増加して最大値となる。このときが砂のダイレイタンシーが最も著しくおきているときである。この状態に相当する軸ひずみ量は、上記とは相反して軸対称状態の方がわずかに大きい。その後には継続しておこる変形に対して、 $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  の値は減少するが、平面ひずみ状態では  $\epsilon_1=10\%$  程度になると  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1=0$  となり、変化しなくなる。しかしながら、軸対称状態ではさらに大きな変形を与えなければ  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  はゼロにはならないようである。以上述

べたことからみると、平面ひずみ状態の砂のダイレイタンシーは同一液圧、同一間げき比で、軸対称状態のもとにおけるダイレイタンシーよりも遅く開始し、はやく終了するといえる。これは両状態の砂のせん断特性の差の一つとして注目すべきことである。

ここで、せん断中における試料の破壊と、上記の  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  が最大となるときとの関係を調べるために、横軸に試料の破壊時の軸ひずみ  $\epsilon_{1-f}$  をとり、縦軸に  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  が最大となるときの軸ひずみ  $\epsilon_{1-Dmax}$  をとり、各試験結果を図示すると、これは 図-16 のようになる。これによると、平面ひずみ、軸対称の両状態ともに、ダイレイタンシーが最も著しくおきているときと破壊とは点の散乱の範囲内で一致するといえる。すなわち、砂がせん断破壊をおこすとき、砂粒子の乗り越え運動は最高潮となっている。

つぎに、破壊時における  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  が初期間げき比によって、どのように変化するかを、液圧が 0.5

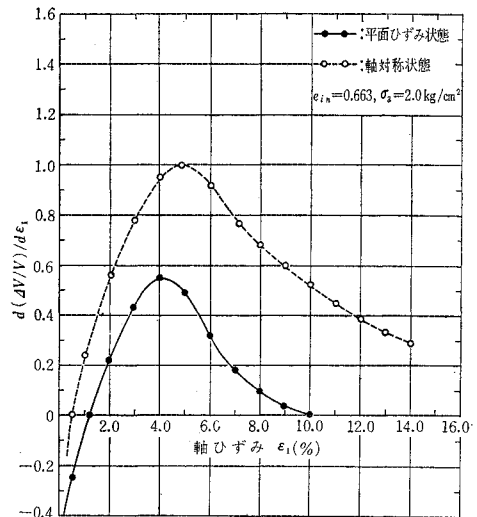


図-15  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  と軸ひずみ  $\epsilon_1$  との関係

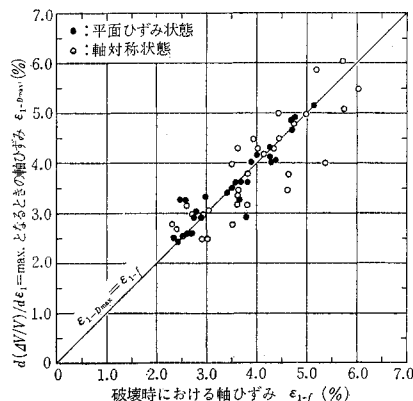


図-16  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  が最大値となるときの軸ひずみと破壊時における軸ひずみとの関係



kg/cm<sup>2</sup> を例にとって示すと 図-17 のようになる。平面ひずみ状態、軸対称状態ともに初期間げき比が小さいほど破壊時の  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  は大きい。また、両状態について破壊時の  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  を比較すると、平面ひずみ状態の方が小さく、両者の差は初期間げき比が小さいほど大きくなっている。

破壊時における体積ひずみが、初期間げき比や液圧によってどのように影響されるかはつぎの図からわかる。図-18 は横軸に初期間げき比をとり、縦軸に破壊時における体積ひずみをとって、液圧が 0.5 kg/cm<sup>2</sup> の場合を示した図である。図-19 は、横軸に液圧をとり、縦軸に破壊時の体積ひずみをとって、初期間げき比  $e_{1n} =$

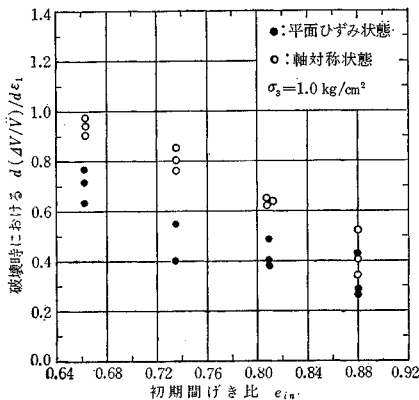


図-17 破壊時における  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1$  と初期間げき比との関係

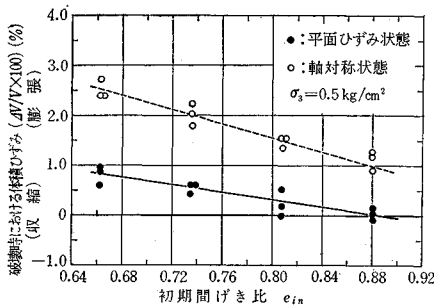


図-18 破壊時における体積ひずみと初期間げき比との関係

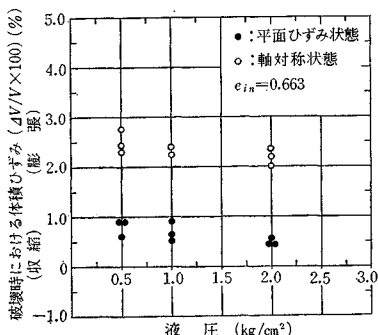


図-19 破壊時における体積ひずみと液圧との関係

0.663 の場合を示した図である。これら両図から、平面ひずみ状態、軸対称状態ともに初期間げき比が小さいほど、かつ液圧が低いほど破壊時の体積膨張量は大きいことがわかる。また、破壊時における体積ひずみは、液圧 0.5 kg/cm<sup>2</sup>、初期間げき比  $e_{1n} = 0.663$  においても、平面ひずみ状態では 1%にも満たないわずかな量であったのに対し、軸対称状態では 2.5%程度が生じている。

以上述べたことから、試料の膨張に関しては平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも顕著ではないような傾向がみられる。このような差は平面ひずみ状態の試料の破壊領域は、わずか数ミリメートルの幅で生じたのに対して、軸対称状態においては試料全体積に対する破壊領域の体積が占める割合がかなり大きいためであると考えられる。このように、破壊領域が試料全体に対して占める割合の差異が、試料の形状の差によるためであるか、あるいは試料の変形の拘束条件の差に起因するものであるかを検討してみた。写真-5 は正方形断面を有する粘土の試料の一軸圧縮試験後の形状であるが、これは断面積ならびに高さが等しい円柱形の同一粘土試料とまったく同じように破壊している。さらに(幅/長さ)の値を種々にかえた長方形断面を有する粘土試料について、同じく一軸圧縮試験を行なったところ、試料の(幅/長さ)の値が小さくなるにつれて、破壊時における試料長手方向のひずみは生じにくくなり、平面ひずみ状態における破壊様式に近づいた。したがって、上述した破壊領域が試料全体に対して占める割合の差異は変形の拘束条件の差によるものであると考えるべきであろう。



写真-5 正方形断面を有する粘土試料の破壊後の形状

b) ダイレイタンスーと応力との相関性

平面ひずみ試験では  $\epsilon_1 = 10\%$  程度の軸ひずみが生ずるとダイレイタンスーは終了した。すなわち  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1 = 0$  となった。しかも、破壊後に  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1 = 0$

となると、変形がさらに増加しても主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  は変化しなかった。したがって、この状態において、試料には変形に対する抵抗としてはダイレイタンスを伴わない抵抗のみが生じている。このときの抵抗が試料の残留抵抗  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  である。いま、変形の全過程について、 $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1 = 0$  となる状態を調べると、このような状態は上記のほかに瞬間的ではあるが変形の初期においても存在することが図-15 からわかる。すなわち、この状態は変形の初期において試料が最も収縮した状態(最大密度状態)に相当している。この最大密度状態における主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  と上述の残留抵抗  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  との関係は平面ひずみ状態について調べてみると、両者は初期間げき比にほとんど関係なく等しいとみなせる。この様相を 図-20 に示す。この図の縦軸は残留抵抗をすべり抵抗で除した値である。図-20 に示した結果からみると 図-21 に示すように平面ひずみ状態の砂がせん断形を受けて  $d(\Delta V/V)/d\epsilon_1 = 0$  になるときの抵抗  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  はおたがいに等しい。したがって、図-21 のハッチングをした部分、すなわち上記の  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  を超過した主応力差は試料の最大密度状態からダイレイタンスをおこすために要する応力であると考えられ

る。以下において、上記の  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  をすべり抵抗あるいは残留抵抗と称し、またこのすべり抵抗からの主応力差の増分量をダイレイタンス抵抗ということにする。なお、三軸試験においては破壊後の残留抵抗が計測できないので、図-20 に相当する結果は得られなかった。しかしながら、軸対称状態においても、最大密度状態における抵抗  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  をすべり抵抗あるいは残留抵抗として取扱う。

上記のように考えると、砂はせん断変形を受けると、すべり抵抗が発揮されるまで体積の収縮をきたす。引き続いて砂が受けるせん断変形により、粒子の乗り越し運動が開始される。このときからダイレイタンスを伴うせん断変形がおり、この乗り越し運動が次第に強まって最も著しくなるときが破壊である。砂がさらにせん断変形を受けると、乗り越し運動は次第に弱まってついには終了する。そのときでも継続しているせん断変形に対して砂は残留抵抗のみによって抵抗するのである。

c) 変形の拘束条件が砂のせん断抵抗におよぼす影響  
 上述したように砂のせん断抵抗がすべり抵抗とダイレイタンス抵抗とに分離しうることがわかった。したがって、平面ひずみ状態とか軸対称状態といった変形の拘束条件が両抵抗のいずれに 影響しているかが問題となる。

まず、せん断抵抗のうち、すべり抵抗にて注目し、横軸に初期間げき比をとり、縦軸にすべり抵抗をとって、液圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合を図示すると、これは 図-22 のようになる。ここで注目すべきことは、同一液圧の場合、平面ひずみ状態、軸対称状態ともすべり抵抗は初期間げき比には無関係に一定であるということである。このすべり抵抗の大きさを両状態で比較すると前者の方が後者よりも 25% 程度大きい。両状態におけるすべり抵抗のこのような差は変形の拘束条件の差に起因すると考えられる。図-22 から、同一砂の場合、液圧が等しければ、砂のすべり抵抗はその砂が受ける変形の拘束条件によって決定されるのであって、砂の間げき比には無

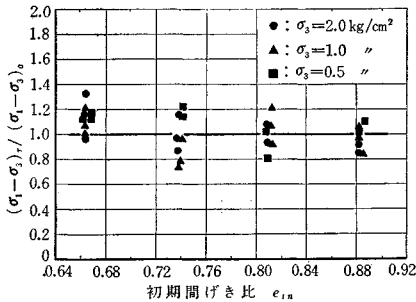


図-20 平面ひずみ状態における  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_0$  と初期間げき比との関係

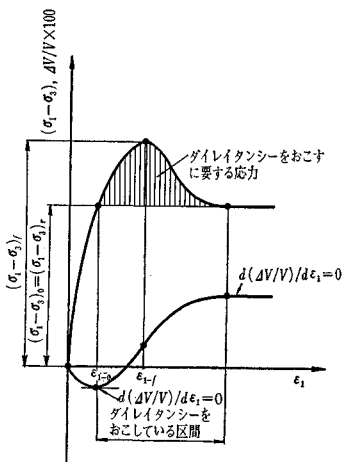


図-21 砂の残留抵抗、すべり抵抗、ダイレイタンス抵抗の説明図

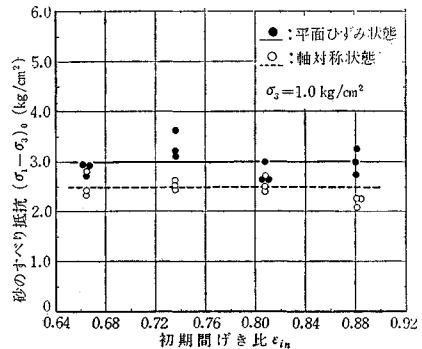


図-22 砂のすべり抵抗  $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$  と初期間げき比との関係

関係であるということがわかる。

上記のすべり抵抗がどの程度の摩擦抵抗角, すなわちすべり抵抗角または残留抵抗角  $\phi_r$  に相当するかを調べたところ, 平面ひずみ状態では  $\phi_r=28\sim 29^\circ$ , 軸対称状態については  $\phi_r=26\sim 27^\circ$  程度であった。

平面ひずみ状態, 軸対称状態ともに同一液圧において破壊時の主応力差  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  は初期間げき比が小さいほど大きかった。しかしながら, 液圧が等しければ, すべり抵抗は初期間げき比によらず一定である。したがって破壊時の主応力差が初期間げき比によって変化する原因は砂のダイレイタンシーの現象によると考えざるをえない。そこで上記と同じく液圧が  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合について, 破壊時におけるダイレイタンシー抵抗と初期間げき比との関係を見ると, これは 図-23 に示すようにきわめて興味ある事実がわかる。すなわち, 両状態とも, ダイレイタンシー抵抗は初期間げき比が小さいほど大きい。さらに, 両状態におけるダイレイタンシー抵抗を比較すると, 密な砂 ( $e_{in}=0.663$ ) においては両者ともにほぼ等しい。しかしながら, 初期間げき比が  $e_{in}=0.880$  になると, 平面ひずみ状態におけるダイレイタンシー抵抗は軸対称状態のわずか 50% 程度しか発揮されなかったことがわかる。また, 両状態におけるダイレイタンシー抵抗の大小関係が前述のすべり抵抗における大小関係とまったく逆の傾向にあることは特筆すべきことである。

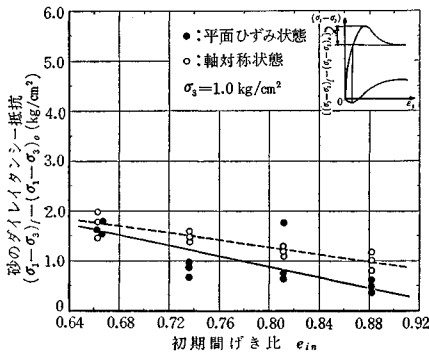


図-23 砂のダイレイタンシー抵抗の初期間げき比に対する変化

以上のことから, 変形の拘束条件が砂のせん断強度におよぼす影響は, ゆるい砂ではあまり顕著ではないようにみられるが, 砂のせん断抵抗をすべり抵抗とダイレイタンシー抵抗にわけて考えると, 拘束条件の差による影響は両抵抗に明白にあらわれている。すなわち, すべり抵抗については平面ひずみ状態の方が大きくなるが, ダイレイタンシー抵抗については軸対称状態の方が大きくなっている。しかも, ゆるい砂におけるダイレイタンシー抵抗は軸対称状態の方がかなり大きな抵抗を発揮している。したがって, ゆるい砂におけるせん断強度(すべり抵抗+ダイレイタンシー抵抗)についてみると, 両抵

抗におよぼす変形の拘束条件の影響が相殺されているということになる。

(5) 平面ひずみ状態の砂の破壊までの変形量に関する考察

ダイレイタンシー抵抗と, これに対応するダイレイタンシー量との関係をまず考えよう。ここではダイレイタンシー抵抗を液圧  $\sigma_3$  で除した無次元の値を採用する。いま, 横軸に砂がダイレイタンシーを開始してから, 破壊するまでの膨張量を試料の初期体積で除した値, すなわち,  $(\Delta V/V)_f - (\Delta V/V)_0$  を百分率であらわした値をとり, 縦軸にダイレイタンシー抵抗の比をとって示すと 図-24 のようになる。この図によると, 上述のダイレイタンシー抵抗比とそれに対応する膨張量との関係は, 原点を通る直線で与えられることが明白である。また, この図によるとゆるい砂では膨張量は小さく, かつそれに対応するダイレイタンシー抵抗比も小さい。密な砂では膨張量は大きく, かつそれに対応するダイレイタンシー抵抗比も大きいことがわかる。

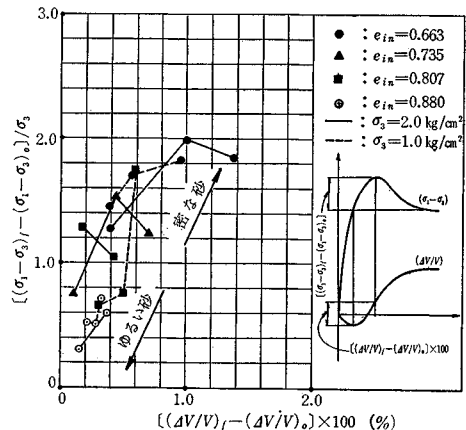


図-24 最大密度時から破壊までのせん断抵抗(ただし, 無次元量ダイレイタンシー抵抗比)とそれに対応する体積変化率との関係

このように, 膨張量とそれに伴うダイレイタンシー抵抗との間に一定の関係があることから, せん断中の膨張量を 図-24 の縦軸の抵抗比で表現することができる。いま, この膨張量の程度をあらわすダイレイタンシー抵抗比を縦軸にとり, ダイレイタンシー開始時から破壊までの変形量の試料の初期長に対する割合をとると 図-25 のようになる。実測値は 図-24 と同様に原点を通る曲線で表現されることがわかる。この曲線上でゆるい砂による実測値は密な砂による実測値よりも原点に近いところに位置することになる。すなわち, ゆるい砂は破壊までに密な砂の場合よりも, 膨張量が少ないことになる。これは 4.(4) a) の 図-18 に関連して述べたことと一致する。上述の変形量はダイレイタンシ

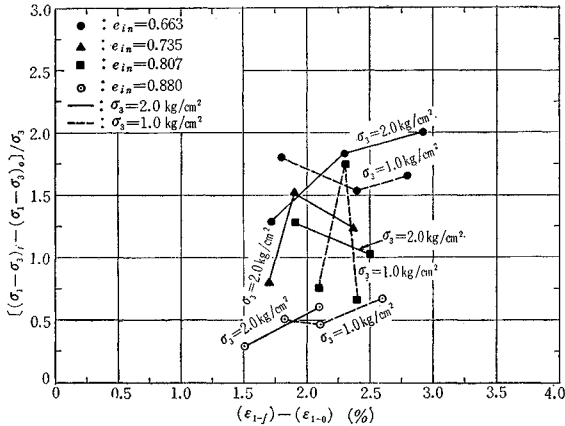


図-25 ダイレイタンスー抵抗比とダイレイタンスー開始後から破壊までの変形量

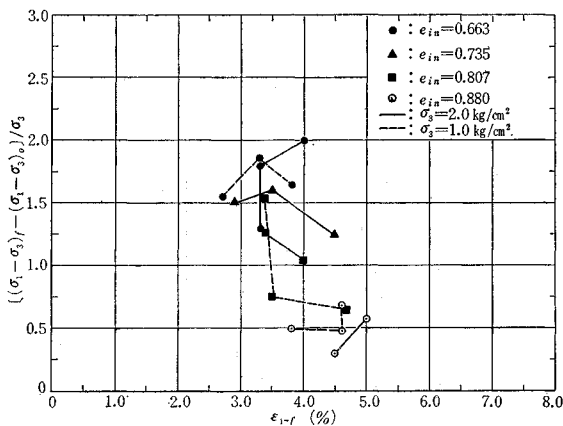


図-26 ダイレイタンスー抵抗比と液圧終了時から破壊までの変形量の関係

一開始時から破壊までの変形量であるが、いま変形量を液圧加圧終了時から破壊までにとって、同じくダイレイタンスー抵抗比を考えると、これは 図-26 に示すようになる。この場合も図示された点の群は1つの曲線を形成し、密な砂は 図-25 と同様に曲線の上部に位置することになる。ここで、図-25 と 図-26 に示した点が形成する曲線の形状を比較することはきわめて興味ある問題である。図-26 の場合にはこの曲線は横軸の  $\epsilon_{1-r}$  が增大するほど縦軸の値が減少している。一方、図-25 の場合には、上記とは逆の傾向を有することがわかる。このことは、破壊に要する試料の変形量は液圧加圧終了時を原点とするとゆるい砂の方が密な砂よりも大きい。しかるに、ダイレイタンスー開始時から破壊までの変形量に注目すると、この変形量は密な砂の方がゆるい砂よりも大きいということである。また、このことは試料がせん断変形を受けて最大密度状態になるまでに要する変形量はゆるい砂の方が密な砂よりも大きいということになる。

## 5. 結 語

平面ひずみ三軸圧縮試験機という特殊な三軸圧縮試験機を作り、気乾状態の豊浦標準砂に対する圧縮試験を行ない、その結果をノルウェー製の三軸圧縮試験機による普通の三軸圧縮試験結果と比較した。その結果平面ひずみ三軸圧縮試験機による試験結果は装置の欠陥による計測誤差は少なく、普通の三軸圧縮試験の結果と比較しうることが判明した。

両試験の結果からは破壊時の軸ひずみ  $\epsilon_{1-r}$  ならびに内部摩擦角  $\phi_f$  のそれぞれについて、両変形状態の間に興味深い関係があることがわかった。

また、砂のせん断抵抗はダイレイタンスーを伴わないすべり抵抗とダイレイタンスー抵抗に明確に分離され、前者は間げき比には関係しなく、砂の間げき比によるせん断強度の差は後者によるものであることを実証した。せん断抵抗を上記のように分離することによって、変形の拘束条件はすべり抵抗とダイレイタンスー抵抗のそれぞれに影響を与えるが、ゆるい砂では両抵抗に対する影響が相殺されてしまうために、せん断強度としては影響がないようにみられるという特筆すべきことがわかった。

さらに、平面ひずみ状態の砂がダイレイタンスーを開始してから破壊するまでに要する試料の変形量は密な砂の方がゆるい砂よりも大きい。これは液圧加圧終了時を原点とした場合の破壊に要する変形量が密な砂の方がゆるい砂よりも小さいことと逆の傾向にあるという注目すべきことを発見した。

以下、この一連の試験から得られた結果を要約する。

(1) 試料が軸方向の変形を受けて破壊する場合、軸対称状態の方が平面ひずみ状態よりもより大きな割合の領域が破壊される。後者の場合、厚さが数ミリメートル程度の傾斜した領域が破壊することが試験後の試料の観察によりわかった。また、このような破壊領域の大きさの差は試料の変形の拘束条件の差によるものであることが判明した。

(2) ひずみに対して試料に生じている応力を図示した場合、ピーク時の応力は平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも顕著である。また、平面ひずみ状態では破壊後に変形がさらに増進して、破壊時の1.5~2倍程度の軸ひずみが生ずると、応力は変化しなくなる。しかるに軸対称状態ではかなり大きな軸ひずみを与えても応力は減少しつづける。

(3) 破壊時における主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  は両状態とも初期間げき比が小さいほど、また液圧が高いほど大きい。両状態における  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  を比較すると、平面ひず

み状態の方が密な砂で 15% 程度、ゆるい砂で 8% 程度軸対称状態よりも大きい。

(4) 破壊時において、平面ひずみ状態の試料に生じている 3 つの応力から  $\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_3)$  の値を求めると、この値は初期間げき比によってあまり影響されなくて 0.28 程度である。

(5) 破壊時の軸ひずみ量  $\epsilon_{1-f}$  は両状態ともに液圧が高いほど、初期間げき比が大きいくほど大きくなる。同一液圧、同一初期間げき比の破壊時の軸ひずみを両状態で比較すると、平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりもやや小さく、両者の間には式 (1) で与えられる関係があることをみいだした。この式によると、普通の三軸圧縮試験の結果から、同一液圧のもとで同一初期間げき比を有する砂の平面ひずみ状態における破壊ひずみを推定することができる。

(6) 内部摩擦角  $\phi_f$  は両状態ともに初期間げき比が小さいほど大きい。同一初期間げき比における内部摩擦角は平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも大きい。すなわち、初期間げき比  $e_{in} = 0.663$  で前者は  $\phi_f = 41^\circ 40'$  であり、後者の  $\phi_f = 39^\circ$  よりも 8% 程度大きく、 $e_{in} = 0.880$  で、前者は  $\phi_f = 35^\circ 50'$  であって、後者の  $\phi_f = 34^\circ 40'$  よりも 3% 程度大きい。

また、両状態における内部摩擦角の間には式 (2) で与えられる関係を見いだした。これは (5) と同様に、普通の三軸圧縮試験から求めた内部摩擦角をもとにして平面ひずみ状態の同一初期間げき比の砂の内部摩擦角を推定するためにきわめて好都合である。

(7) Mohr-Coulomb の破壊包絡線の  $\tau$  軸切片量は両試験結果ともに等しく、この値は  $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$  程度である。この  $\tau$  軸切片量には砂の見掛の粘着力と試験機の載荷棒とその軸受との間におこる摩擦抵抗が含まれるが、試作した試験機とノルウェー製の試験機から得られた値が一致したことは注目すべきである。

(8) 両状態ともに変形を与えると、試料はまず収縮して最大密度状態となる。さらに変形を与えると、試料はダイレイタンスーを開始して破壊する。破壊後に加わる変形に対し、ダイレイタンスーは次第に弱まりついには終了する。上記の最大密度状態となるとき軸ひずみは平面ひずみ状態では軸対称状態の約 2 倍程度である。ダイレイタンスーが終了するときの軸ひずみ量は、平面ひずみ状態では破壊時の軸ひずみの 1.5~2 倍程度であるが、軸対称状態では、かなり大きな軸ひずみ量である。

(9) 破壊時における体積膨張量は両状態ともに初期間げき比が小さいほど、また液圧が低いほど大きい。両状態での破壊時の体積ひずみを比較すると、平面ひずみ状態における砂の方が軸対称状態における砂よりも小

さい。この理由は (1) に述べたことによると考えられる。

(10) 軸ひずみの増加に応ずる体積ひずみの変化の割合  $(d(\Delta V/V)/d\epsilon_1)$  は両状態ともに、きわめて似た傾向を有し、この値は破壊時に最大となる。

(11) 平面ひずみ三軸圧縮試験を行なうことにより、砂のせん断抵抗はダイレイタンスーを伴わないすべり抵抗とダイレイタンスー抵抗に分離できるという確証が得られた。これら 2 つの抵抗のうち、前者は変形の拘束条件と液圧によって決定され、間げき比にはよらないことがわかった。このすべり抵抗は平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも 25% 程度大きく、またすべり抵抗角であらわすと、平面ひずみ状態で  $\phi_r = 28 \sim 29^\circ$ 、軸対称状態で  $\phi_r = 26 \sim 27^\circ$  程度である。一方、ダイレイタンスー抵抗は変形の拘束条件と液圧によることはもちろんのこと、間げき比によって変化し、とくに間げき比が小さいほどダイレイタンスー抵抗は大きい。

(12) 変形の拘束条件が砂のせん断強度におよぼす影響は密な砂に顕著であり、ゆるい砂ではあまり顕著ではないようにみられる。しかしながら、せん断抵抗を上記の 2 つの成分にわけて考えると、ゆるい砂においてもそれぞれの成分には変形の拘束条件による影響が明白にあらわれる。ただし、ゆるい砂ではこの影響が互いに相殺されて、せん断強度としては影響が顕著でないようにみえるにすぎないという特筆すべきことがわかった。

(13) 平面ひずみ状態の砂がせん断変形をうけて、ダイレイタンスーが開始されてから破壊するまでに要する変形量は密な砂の方がゆるい砂よりも大きい。このことは (5) で述べたこととはまったく逆の傾向である。

最後に、この研究は昭和 42, 43 年度の文部省科学研究費 (特定研究) により行なわれた。数多くの三軸ならびに平面ひずみの両試験を一緒に行なった大学院生の渡辺真吾、(株) 国土開発の平野英夫の両君の労に感謝する。

#### 考 参 文 献

- 1) Kirkpatrick, W.M. : The Condition of failure for Sands, Proc. Fourth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1957, pp. 172-178
- 2) Cornforth, D.H. : Some Experiments on the Influence of Strain Conditions on the Strength of sand, Géotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 143-167
- 3) Brom, B.B. and A.K. Jamal : Analysis of the Tri-axial Test-Cohesionless Soils, Proc. of Sixth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1965, pp. 184-188
- 4) Bishop, A.W. : The Strength of Soils as Engineering Materials, Sixth Rankine Lecture, Géotechnique, Vol. 16, No. 2, 1966, pp. 89-128
- 5) Harr, M.E. : Foundations of Theoretical Soil Mechanics, 1966, p. 182
- 6) Bishop, A.W. and G.E. Green : The Influence of End Restraint on the Compression Strength of a Cohesionless soil, Géotechnique, Vol. 15, No. 3, 1965, pp. 243-266