

平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態における ゆるい飽和砂の非排水せん断特性

UNDRAINED SHEARING CHARACTERISTICS OF LOOSE SATURATED SAND UNDER PLANE STRAIN AND AXIAL SYMMETRIC STRAIN CONDITION

市原 松 平*・松 沢 宏**・山 田 公 夫***
By Matsuhei Ichihara, Hiroshi Matsuzawa and Kimio Yamada

1. ま え が き

地震時において地盤ならびに構造物に損傷を与える変形は二次元的成分が大きく影響するといわれている。また、常時でも擁壁、帯状基礎、盛土の安定の検討は二次元問題に属する。すなわち、これらの変形は地盤の一方向、構造物の延長方向に変形が拘束されている。これらの問題を取り扱うために、平面ひずみ状態のもとにおける変形特性と強度を知ることが必要である。

一般に、砂の非排水試験は実用上の問題としては地震や爆破のように載荷速度が非常に速い場合ではきわめて重要であるが、日常の静的問題ではあまり重要な問題ではない。そのためもあって、砂の非排水せん断特性は粘土に比して研究例が少ない。

しかるに、動的のせん断特性は必ず静的の特性が基本になっていると筆者らは確信している。このために、まず静的の非排水試験を平面ひずみ状態で行なう必要があった。

筆者らの研究室ですでに乾燥砂の平面ひずみ三軸圧縮試験を行ない、中間主応力の強度におよぼす影響を明確にさせた。それによると、軸対称ひずみ状態と比較して、強度特性にまず大きな差があった。圧縮初期における体積の収縮は大きく、その後生じるダイレイタンスによる供試体の体積変化率は軸対称よりもかなり小であった。

このような両状態における差が非排水試験でどのような形であらわれるかを知ることが、この研究の大きな目的である。特に圧縮初期におけるひずみの小なる範囲における間げき水圧の増分量が平面ひずみ状態と軸対称ひ

ずみ状態とどのように異なるかを調べることは動的問題の研究に関連することになる。

間げき水圧、間げき圧係数、応力、ポアソン比、せん断抵抗角などの非排水せん断特性は供試体の軸ひずみ量で異なった値をとる。上述の特性を考えると、ここでは各ひずみの状態を代表して、間げき水圧の増分量 du が最大に達したときのひずみ、有効主応力比 (σ_1'/σ_3') が最大に達したときのひずみ、主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) が最大を示したときのひずみの 3 つの変形状態における特性を対象として論じている。

上述の非排水せん断特性は圧縮ひずみの速度によってある程度影響される可能性がある。この影響がいわゆるひずみ速度効果によるものか、あるいはまた供試体内で変化する間げき水圧の分布に起因する計測上の問題によるものかいまのところわからない。この報文は前半にひずみ速度がせん断特性におよぼす影響を平面ひずみと軸対称ひずみの両状態でのべている。後半にはひずみ速度が影響を与えないような速度で求めた非排水せん断特性を平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態のもとで比較している。

2. 平面ひずみ三軸圧縮試験機

平面ひずみ三軸圧縮試験機についてはその概略をすでに報告したが¹⁾、今回はこれに若干の改造を加えたものを使用した。写真—1 に改造した平面ひずみ三軸圧縮試験機を示す。この試験機は高さ 8.0 cm × 幅 4.0 cm × 長さ 32.0 cm の供試体の長手方向の変形を拘束した状態で、供試体に鉛直軸方向の変形を与えて圧縮破壊を起こさせる三軸圧縮試験機である。すなわち、図—1、写真—2 に示すように、圧力室内の供試体の長手方向の変形を、2 枚の拘束板と 4 本の連結棒で拘束し、さらに水圧による全周圧 (σ_3) を供試体に作用させた状態で圧縮変形を

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部附属土圧研究施設
** 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部附属土圧研究施設
*** 正会員 工修 中部工業大学講師 土木工学科

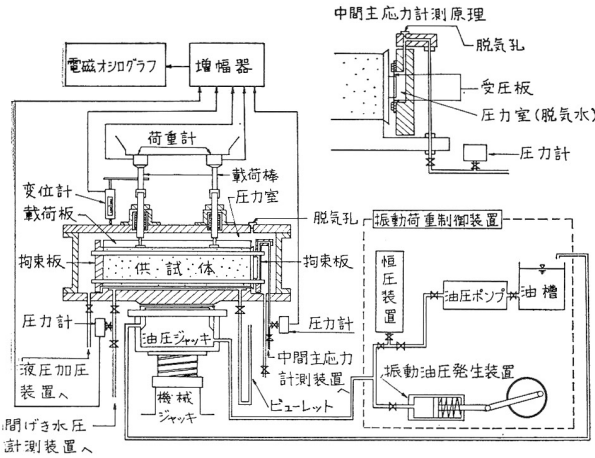


図-1 平面ひずみ三軸圧縮試験機の概略図

今回行なった本装置の改造点は、まず最初に、従来機械式載荷ジャッキのみであった載荷装置に、新たに油圧式載荷ジャッキを設置したことである。この油圧式載荷ジャッキを設置したことにより、本装置は供試体の鉛直軸方向に動的な荷重を作用させることが可能になり、静的試験に加えて、動的試験も行なうことができるようになった²⁾。また油圧式載荷ジャッキは供試体の鉛直軸方向に一定の圧力を与えることができ、供試体を異方圧密するためにも使用できる。次に、図-1に示す圧力室上部にある載荷棒の摩擦をより軽減するために、回転軸受けをボールプッシュにかえたことである。

3. 実験方法

(1) 実験に使用した砂

実験に使用した砂は飽和した豊浦標準砂である。実験はこの砂の初期間げき比（供試体成形時における間げき比） $e_{in}=0.788$ ($\gamma=1.482 \text{ g/cm}^3$) のものに対して行なった。試料は以下のようにして飽和させた。まず、気乾燥状態の豊浦標準砂を所定の重さに秤量し、水を加えたのち、30 分間以上煮沸して十分に脱気させた。

(2) 供試体の成形

平面ひずみ三軸圧縮試験における供試体の成形はまず、圧力室底板の供試体台上にポーラスメタルホルダーを置き、供試体台周囲に薄いゴムスリーブ（厚さ 0.1~0.2 mm）をかぶせてこれをゴムリングで台に定着させた。さらにそのまわりに、供試体成形用モールドを組立てゴムスリーブ上端をモールドの上縁で折りかえしておいた。次にこのモールド内に脱気水を満たし、試料をできる限り空気にさらさないようにしてモールド内に流し入れた。その後、載荷板を試料の上に水平にのせた。ついで、モールド上縁に折りかえしておいたゴムスリーブを載荷板の周囲にゴムリングで固定した。ビューレットの水位を下げて、供試体に $40 \text{ cm} \cdot \text{Aq}$ 程度の負圧を与えて、供試体を自立させたのち、モールドを取りはずし、供試体長手方向端部に拘束板を設置し、中間主応力を計測するための拘束板の圧力室内の脱気を行なった。次に、2 枚の拘束板をお互いに 4 本の連結棒で固定し、供試体と拘束板の接触をよくするために拘束板と連結棒で供試体を締めつけた。このとき、拘束板の受圧室の圧力は $2.0 \text{ cm} \cdot \text{Hg}$ 程度であった（写真-2 参照）。この状態で 10 分間程度放置して、供試体自立用のビューレットの水位を観察して、供試体の水もれがないこと、な

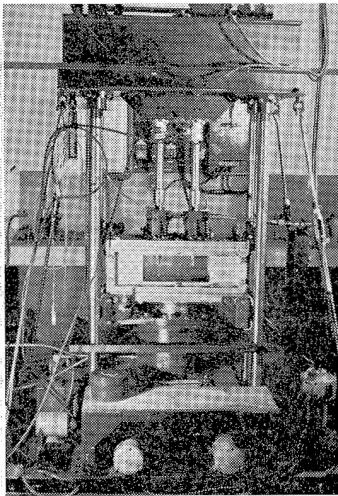


写真-1 平面ひずみ三軸圧縮試験機

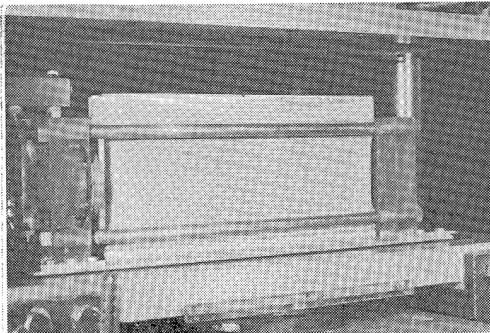


写真-2 平面ひずみ試験の供試体（拘束後）

与え、圧縮応力 (σ_1)、中間主応力 (σ_2)、圧縮ひずみ、間げき水圧（あるいは体積変化）を計測する装置である。

なお、上述した拘束板のうち 1 枚は圧縮中に供試体長手方向の変形を拘束するに要する圧力（中間主応力）を計測することができるようになっている。

らびに中間主応力計測用の圧力計のよみの変化がないことを確認したのち、圧力室を組立て圧力室内に水を満たした。

なお、供試体に作用する側壁摩擦ならびに供試体上下面に作用する摩擦による影響を軽減するために、載荷板ポラスメタルホルダー、および拘束板と供試体の間にはシリコングリースを塗ったゴム膜（厚さ 0.2 mm 程度）を挿入したことは前報¹⁾と同じである。

軸対称ひずみ三軸圧縮試験においても、上記と同様の方法で供試体を成形し、供試体上下面における摩擦の影響を軽減させた。

(3) 試料の圧密と圧縮

平面ひずみ三軸圧縮試験ならびに軸対称ひずみ三軸圧縮試験ともに $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c} = 2.0$ の有効主応力比で供試体を異方圧密した。初期有効拘束圧は $\sigma_{3c} = 0.8, 1.6, 2.4 \text{ kg/cm}^2$ の 3 種類とした。

実験室で異方圧密を行なうには次の 2 通りの方法が考えられる。すなわち (i) 等方圧密をしたのち軸力のみを増加させる方法、(ii) 軸力と側方圧力を同時に作用させる方法である。しかるに自然地盤では鉛直圧力と側方圧力が同時に作用して圧密が進行する。それゆえ、上述した (ii) の方法で供試体を異方圧密した。このために、平面ひずみ試験では供試体に与える水圧 (σ_3) に対して、軸力 (σ_1) を油圧式載荷ジャッキで制御しながら与えた。これは恒油圧装置にのせる分銅の重さによってかなり正しく制御できた。

このように供試体を圧密させたのち、排水用のバルブを閉じて供試体を非排水状態にしてから鉛直軸方向の変形を与えて供試体を圧縮した。なお、圧縮においてはひずみ速度が強度および間げき水圧におよぼす影響を調べるために、同一初期条件の供試体に対してひずみ速度を 4~5 個ずつ圧縮試験を行なった。装置の都合上、ひずみ速度は平面ひずみ三軸圧縮試験で $\dot{\epsilon}_1 = 10.0, 1.0, 0.1, 0.06 \%$ / 分の 4 段階に、また軸対称ひずみ三軸圧縮試験で $\dot{\epsilon}_1 = 3.0, 1.0, 0.5, 0.1 \%$ / 分の 4 段階に変化させた。

また、圧密終了後、平面ひずみ三軸圧縮試験では $u_i = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーを与えた。軸対称ひずみ三軸圧縮試験では $u_i = 2.0, 3.0, 6.0 \text{ kg/cm}^2$ の 3 段階のバックプレッシャーを加えて、バックプレッシャーがせん断特性におよぼす影響も調べた。なお、バックプレッシャーを与えたときに測定した間げき圧係数 B は両試験とも 0.90~0.95 であった。また、圧縮終了後における供試体の含水比より求めた飽和度は 100% をわずかにこえた値がえられた。測定精度を考えると、供試体はほぼ飽和していると考えられる。

圧密ならびに圧縮中に供試体に作用する鉛直軸方向の

荷重（以下、軸力と略記する）、中間主応力、間げき水圧および供試体の圧縮変形は電氣的に計測し、電磁オシログラフに記録した。なお、中間主応力ならびに間げき水圧の計測に用いた圧力計の Volume factor³⁾ は非常に小さいので、計測中における供試体の平面ひずみ状態の保持および非排水条件に対しては問題がないことが確認されている。

軸対称ひずみ三軸圧縮試験では「N.G.I. 型三軸圧縮試験機」を用いた。

以下に述べる実験結果と考察においては平面ひずみ三軸圧縮試験を平面ひずみ試験、軸対称ひずみ三軸圧縮試験を三軸試験と略記する。

4. 実験結果と考察

(1) 変形に応じる応力ならびに間げき水圧の変化

平面ひずみ試験からえた変形に応じる応力と間げき水圧の変化量の一例をひずみ速度が 0.1%/分のものについて示したのが図-2 である。異方圧密終了時 ($\epsilon_1 = 0 \%$) における主応力差 ($\sigma_2 - \sigma_3$) の値は 0.1 kg/cm^2 程度であった。主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と ($\sigma_2 - \sigma_3$) は軸ひずみの進行とともに増加し、軸ひずみが $\epsilon_1 = 5.7 \%$ 程度になるとほとんど同時に最大値に達した。その後の変形に対して ($\sigma_1 - \sigma_3$) はゆるやかに減少するが、($\sigma_2 - \sigma_3$) はごくわずかに減少したのち変化しなくなった。

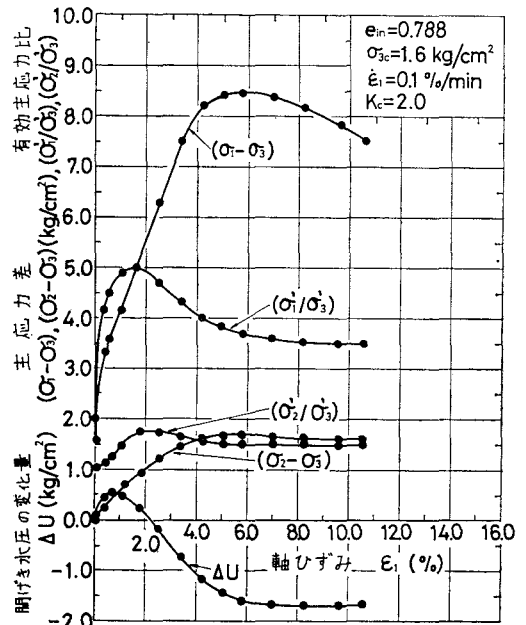


図-2 平面ひずみ試験における応力と軸ひずみ、ならびに間げき水圧の変化量と軸ひずみの関係

一方、有効主応力比 (σ_1'/σ_3') と (σ_2'/σ_3') は $\epsilon_1=1.8\%$ 程度で最大値を示し、その後の変形に対して、それぞれ減少し、 $\epsilon_1=8.0\sim 9.0\%$ をこえると両者の値は変化しなくなった。 (σ_1'/σ_3') と (σ_2'/σ_3') が最大になる軸ひずみは $(\sigma_1-\sigma_3)$ と $(\sigma_2-\sigma_3)$ が最大に達する軸ひずみの $1/3$ 程度であった。この報文では主応力差最大時を破壊と考える。

間げき水圧 Δu は軸ひずみの増大にともなって、まず上昇し、 $\epsilon_1=0.7\%$ 程度で最大値 0.5 kg/cm^2 を示した。さらに変形が加わると Δu はしだいに減少し、やはり $\epsilon_1=8.0\%$ 程度で変化しなくなった。このとき Δu は -1.7 kg/cm^2 に達していた。なお、同程度の初期間げき比を有する乾燥砂に対する圧密排水（気）試験の結果¹⁾によると、体積変化率 $(\Delta V/V)$ は軸ひずみが $\epsilon_1=8.0\sim 9.0\%$ で変化しなくなり、そのとき主応力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ と $(\sigma_2-\sigma_3)$ もまた変化しなくなった。このように非排水と排水の両試験において、間げき水圧と体積変化、ならびに主応力比が同じ程度の軸ひずみで変化しなくなった。このことはせん断中における間げき水圧の変化はダイレイタンス特性によって影響されることを裏づけると同時に、排水（気）試験と非排水試験のそれぞれにおいて破壊後に供試体の応力状態が定常的になる軸ひずみが同じ程度であることをあらわしている。

図-3 に平面ひずみ試験と同一初期間げき比を有する供試体に対して、バックプレッシャーが 6.0 kg/cm^2 のもとで行なった三軸試験結果の一例を示す。圧縮中において (σ_1'/σ_3') の値に最大値があらわれること、ならび

にまず正の過剰水圧があらわれ、その後過剰水圧が負になることは平面ひずみ試験でみられた特性と同様である。しかしながら、 $(\sigma_1-\sigma_3)$ は軸ひずみの増加に対して増加し続け、圧縮を行なった範囲内で最大値はあらわれなかった。これが平面ひずみ試験と異なる点である。なお、三軸試験では $(\sigma_1-\sigma_3)$ が 21.5 kg/cm^2 に達しても破壊しなかった。この主応力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ は平面ひずみ試験の破壊時の主応力差 (8.5 kg/cm^2) の約 2.5 倍である。このような差は両状態におけるダイレイタンス特性の差に基づいている。図-3 では $\epsilon_1=8.0\%$ 程度で $\Delta u=-6.0 \text{ kg/cm}^2 (= -u_i)$ となり、その後の計測ができなかった。これは Seed や Lee のいう $\sigma_{3crit}^{(4),(5)}$ に相当するバックプレッシャー以上には側圧をあげることができなかったためである。

(2) バックプレッシャーならびにひずみ速度が飽和砂の非排水せん断特性におよぼす影響

a) バックプレッシャーによる影響

前述したように、平面ひずみ試験では主応力差のピークは、 $u_i=2.0 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーを供試体に作用させることでえられた。一方、三軸試験では $u_i=6.0 \text{ kg/cm}^2$ の高いバックプレッシャーを作用させたにもかかわらず主応力差のピーク値をみることはできなかった。後述する平面ひずみ試験と三軸試験の結果では、平面ひずみ試験では $u_i=2.0 \text{ kg/cm}^2$ 、三軸試験では $u_i=6.0 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーのものについ

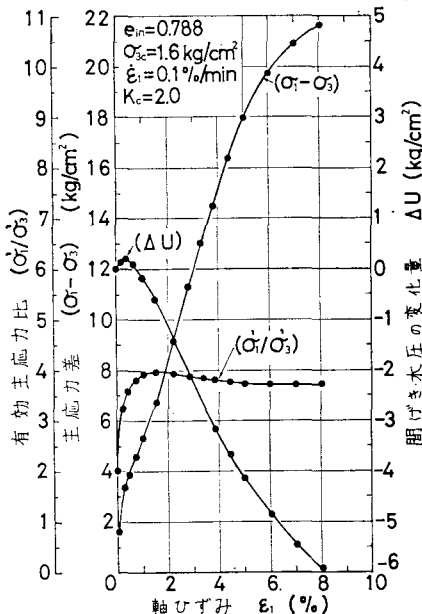


図-3 三軸試験における応力と軸ひずみ、ならびに間げき水圧の変化量と軸ひずみの関係

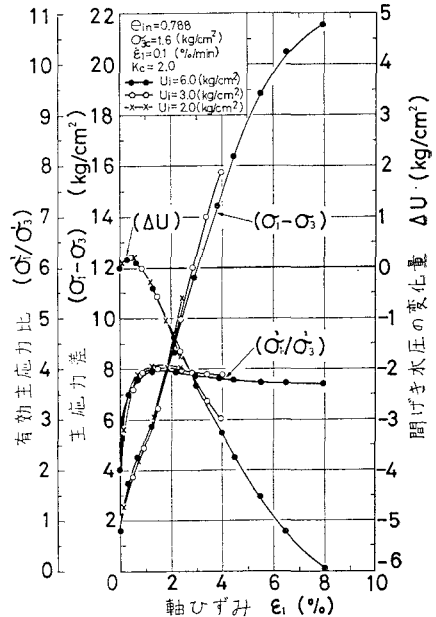


図-4 バックプレッシャーをかえたときの応力と軸ひずみ、ならびに間げき水圧の変化量と軸ひずみの関係（三軸試験）

て行なった。それゆえ、バックプレッシャーが異なることによって、飽和砂のせん断特性が影響されるかどうかの検討が必要である。

図-4 にバックプレッシャーをかえたときの応力と軸ひずみ、間げき水圧の変化量と軸ひずみの関係の一例を示す。ここで注目すべきことは軸ひずみに対する応力ならびに間げき水圧の変化はバックプレッシャーによらずほぼ同じ曲線に沿って変化することである。また図から明らかなように、バックプレッシャーが高くなるにつれて間げき水圧 ($u_i + \Delta u$) が負圧になるまでの軸ひずみは大きくなる。次に間げき水圧と応力の関係を考えてみる。いま、横軸に軸ひずみ ϵ_1 をとり、縦軸に間げき水圧の変化量 Δu を軸力の増分 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ で除した値、すなわち後述する A 値をとって示したのが図-5 である。間げき水圧の変化量と軸力の増分の比はバックプレッシャーの大きさに関係なく、一つの曲線上に沿って変化した。

したがって、飽和砂の非排水試験において、今回の実験の範囲内ではバックプレッシャーによってせん断特性は影響されないと考えられる。

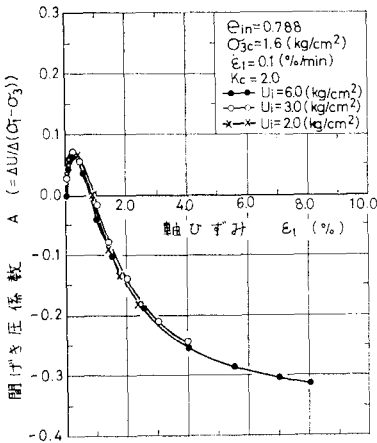


図-5 バックプレッシャーをかえたときの軸ひずみと間げき圧係数の関係 (三軸試験)

b) ひずみ速度による影響

① ひずみ速度が間げき水圧と間げき圧係数におよぼす影響：平面ひずみ試験における間げき水圧の変化量 Δu とひずみ速度の関係を図-6 に示す。図には間げき水圧の変化量最大時 (Δu_{max} 時)、有効主応力比最大時 ($(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時)、破壊時 ($(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 時) の3つの状態における間げき水圧の変化量 (各実測値の平均値) が示してある。また、表-1 にひずみ速度が0.1%/分から10.0%/分に増大したときの Δu の変化を上記3つの状態について示している。表-1 からわかるように、ひずみ量が $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時に達するまではひ

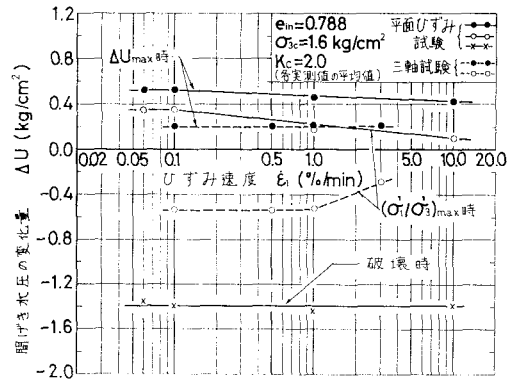


図-6 ひずみ速度と間げき水圧変化量の関係

表-1 平面ひずみ状態でひずみ速度が0.1%/分から10%/分に増大したときの ΔU と A_p の変化

変形時	ΔU と A_p	
	間げき水圧の変化量 ΔU	間げき圧係数の変化 A_p
ΔU_{max} 時	約 20% 減少する	約 30% 減少する
$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時	約 70% 減少する	約 70% 減少する
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 時	影響をうけない	約 5% 増加する

ずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ は Δu に影響をおよぼすが、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ のとき、すなわち破壊時には $\dot{\epsilon}_1$ が変化しても Δu に影響をおよぼさないことがわかる。このように圧縮初期の Δu が $\dot{\epsilon}_1$ の影響をうけるのは、 $\dot{\epsilon}_1$ が大きくなると圧縮初期では供試体内の間げき水圧の分布が様でないためと解される。 $\dot{\epsilon}_1$ が0.1%/分よりも小なる $\dot{\epsilon}_1 = 0.06\%/分$ では Δu はひずみ速度に影響されないことは図-6 から明瞭である。図-6 には三軸試験の結果も示した。三軸試験における間げき水圧の変化量 Δu は圧縮初期 (Δu_{max} 時) では計測誤差の範囲内でひずみ速度に影響されないようである。しかるに $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の Δu はひずみ速度によって若干の影響をうける。しかしながら、 $\dot{\epsilon}_1 = 0.5\%/分$ 以下の速さになると Δu はひずみ速度に対して一定であるということができよう。

次に、圧縮中の間げき水圧と応力の関係を考えると、これらは次式で与えられる⁹⁾。

軸対称ひずみ状態に対して

$$\Delta u = B_T [\Delta \sigma_3 + A_T (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \dots \dots \dots (1)$$

平面ひずみ状態に対して

$$\Delta u = B_P [\Delta \sigma_3 + A_P (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 A_T, A_P と B_T, B_P は間げき圧係数である。いま、供試体が十分に飽和しているとして、 $B_T = B_P = 1.0, \Delta \sigma_3 = 0$ 、ならびに Δu と $\Delta \sigma_1$ の実測値を代入して求めた A_T と A_P をひずみ速度に対して示したものが図-7 である。表-1 には平面ひずみ試験でひずみ速度が0.1%/分から10.0%/分に増大したときの A_p の変化が示してある。 A_p の値は圧縮初期では減少し、破壊時には幾分増加する。すなわち平面ひずみ試験の破壊

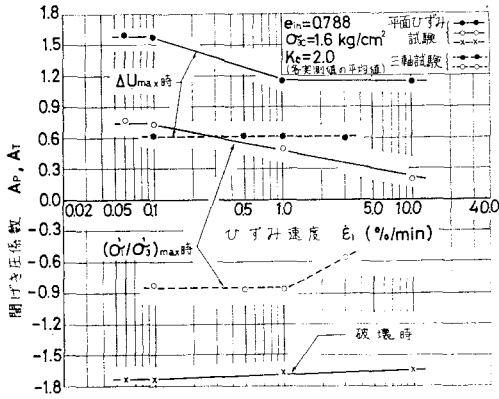


図-7 ひずみ速度と開げき圧係数の関係

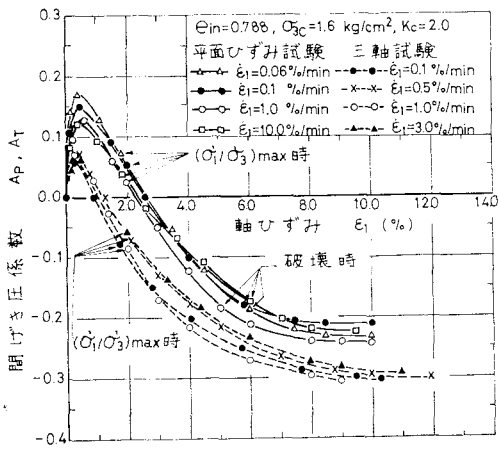


図-8 ひずみ速度をかえたときの軸ひずみに対する開げき圧係数の変化

時の A_P は $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ で -0.17 程度であるが、 $\dot{\epsilon}_1=10.0\%/分$ になると A_P の値は 5% 程度増加する。

以上要するに、各圧縮過程における開げき圧係数は平面ひずみ試験では $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ 以下、三軸試験では $\dot{\epsilon}_1=0.5\%/分$ 以下の速さになるとひずみ速度に影響されないといえる。なお、図-8 に軸ひずみに対する開げき圧係数 A_P, A_T の様相を示す。 A_P, A_T の $\dot{\epsilon}_1$ に対する変化の様相は似ている。また開げき圧係数は平面ひずみ試験の方が三軸試験のものより大である。

② ひずみ速度が主応力差と有効主応力比ならびに強度定数におよぼす影響：図-9 に主応力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ の関係を示し、またひずみ速度が $0.1\%/分$ から $10\%/分$ に増加したときの $(\sigma_1-\sigma_3)$ の変化を表-2 に一括してある。平面ひずみ試験において ΔU_{max} 時と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の $(\sigma_1-\sigma_3)$ の値はひずみ速度が速くなると幾分増加している。これに反して、破壊時の $(\sigma_1-\sigma_3)$ の値はひずみ速度が速くなるとわずかに減少するようである。しかるに三軸試験においては $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の $(\sigma_1-\sigma_3)$ の値はひずみ速度の増大につれて小さな値を示

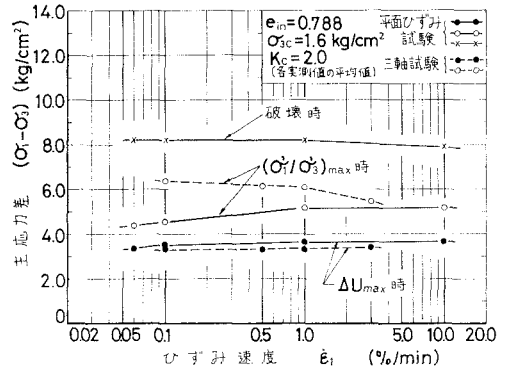


図-9 ひずみ速度と主応力差の関係

表-2 平面ひずみ状態でひずみ速度が $0.1\%/分$ から $10\%/分$ に増大したときの $(\sigma_1-\sigma_3)$ と (σ'_1/σ'_3) の変化

変形時	応力 $(\sigma_1-\sigma_3)$	(σ'_1/σ'_3)
ΔU_{max} 時	約 4% 増加する	約 4% 減少する
$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時	約 10% 増加する	約 3% 減少する
$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 時	わずかに(約 5%)減少する	影響されない

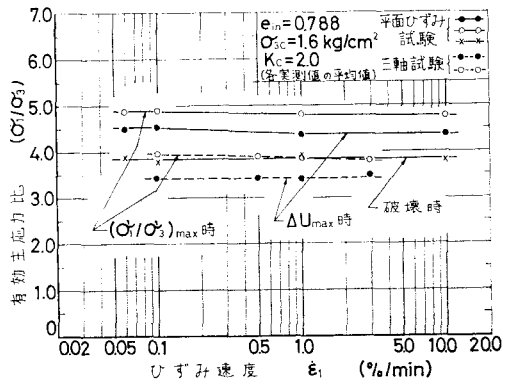


図-10 ひずみ速度と有効主応力比の関係

す。

図-10 に有効主応力比 (σ'_1/σ'_3) とひずみ速度の関係を示す。またひずみ速度が $0.1\%/分$ から $10.0\%/分$ に増加したときの (σ'_1/σ'_3) の変化を同じく表-2 に一括している。平面ひずみ試験において、 ΔU_{max} 時と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の (σ'_1/σ'_3) の値はひずみ速度が速くなるとわずかに減少する。しかしながら、破壊時の (σ'_1/σ'_3) の値はひずみ速度に影響されないようである。また三軸試験の $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時における (σ'_1/σ'_3) の値はひずみ速度の変化に対して平面ひずみ試験と同様の傾向を示している。

次に、横軸に $(\sigma'_1+\sigma'_3)/2.0$ をとり、縦軸に $(\sigma'_1-\sigma'_3)/2.0$ をとって、平面ひずみ試験を行なったすべてのひずみ速度に対して、有効主応力比最大時と破壊時におけるそれぞれの値を示したものが、図-11(a) である。三軸試験における有効主応力比最大時の $((\sigma'_1+\sigma'_3)/2.0, (\sigma'_1-\sigma'_3)/2.0)$ は図-11(b) に示されている。これらの

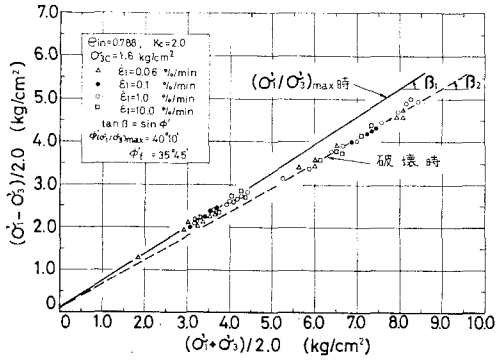


図-11(a) 平面ひずみ試験におけるひずみ速度とせん断抵抗角の比較

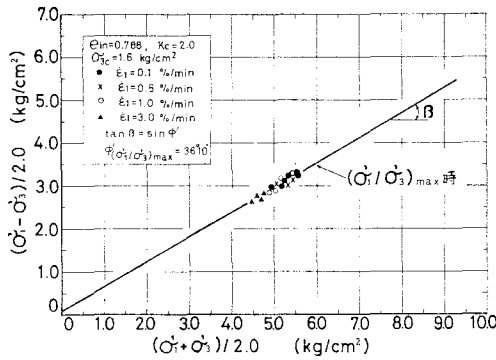


図-11(b) 三軸試験におけるひずみ速度とせん断抵抗角の比較

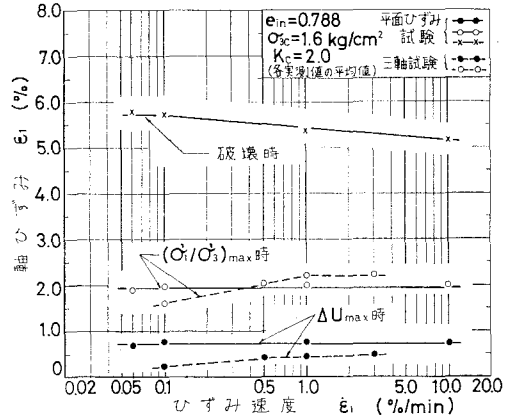


図-12 ひずみ速度と軸ひずみの関係

表-3 平面ひずみ状態でひずみ速度が0.1%/分から10%/分に増大したときのε1 : νの変化

変形時	軸ひずみε1	ポアソン比ν
無変形時		ν=0.31~0.34
ΔUmax時	影響をうけない	影響されない(ν=0.22)
(σ'1/σ'3)max時	影響をうけない	影響されない(ν=0.28)
(σ1-σ3)max時	わずかに減少する	影響されない(ν=0.31)
(σ1-σ3)max時のε1	3.0から2.5に減少する	
(σ'1/σ'3)max時のε1		

なり大きく、 $\dot{\epsilon}_1=10\%/分$ で2.5倍程度、 $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ 以下で3.0倍程度である。なお図-12に示したように、三軸試験においては ΔU_{max} 時と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の軸ひずみ ϵ_1 はひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ によって変化する。すなわち、ひずみ速度が遅いと ϵ_1 の値は幾分か小さくなる。

平面ひずみ状態における最大主応力 σ'_1 と中間主応力 σ'_2 および最小主応力 σ'_3 からポアソン比 ν は次式で表わされる。

$$\nu = \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \dots\dots\dots (4)$$

図は同一初期有効拘束圧のもとで、ひずみ速度をかえて行なったものである。これらの図によると、各応力状態における実測値はひずみ速度によらずそれぞれの応力状態に対応する1本の直線に沿って変化している。これらの直線の横軸からの傾斜角 β は

$$\tan \beta = \sin \phi' \dots\dots\dots (3)$$

の関係がある。これから判断すれば、上記の各応力状態において発揮された ϕ' の値はひずみ速度に影響されないようにみられる。しかしながら、図-6と図-9に示した各ひずみ速度に対する平均値から判断すると、図-11(a),(b)に示した β の値はひずみ速度の影響をわずかにうけるようである。

③ ひずみ速度が軸ひずみとポアソン比におよぼす影響：平面ひずみ試験における ΔU_{max} 時と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時ならびに破壊時の軸ひずみ ϵ_1 をひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ に対して示したものが図-12である。また表-3にひずみ速度が0.1%/分から10.0%/分に増大したときの軸ひずみの変化を上記3つの状態について示した。図-12から明らかなように、 ΔU_{max} 時と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の ϵ_1 はともに $\dot{\epsilon}_1$ に影響されなく、破壊時にはひずみ速度によりわずかに影響されるにすぎない。また同一ひずみ速度において破壊時の ϵ_1 は $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 時の ϵ_1 よりか

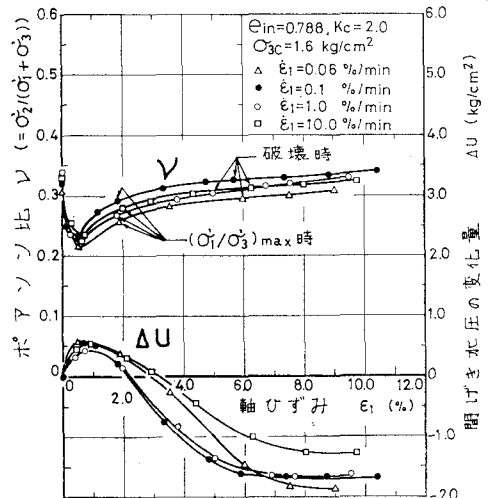
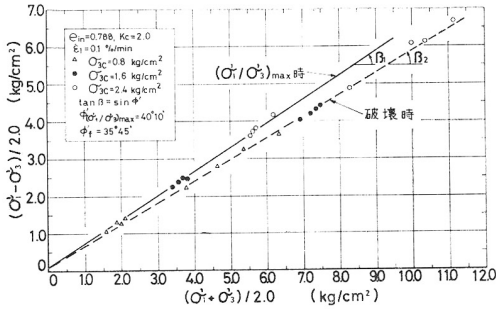
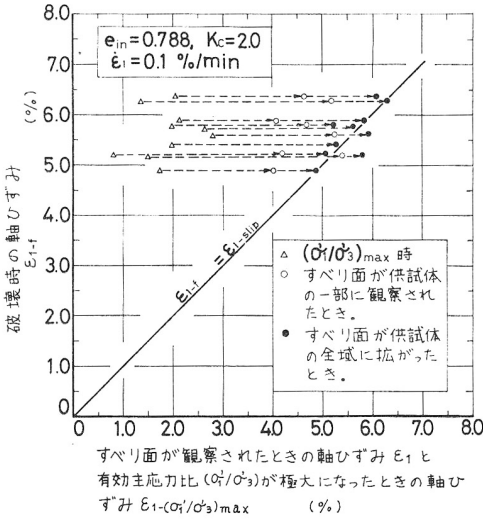


図-13 軸ひずみとポアソン比の関係(平面ひずみ試験)



図—17 平面ひずみ試験における破壊時、ならびに有効主応力比最大時の応力状態



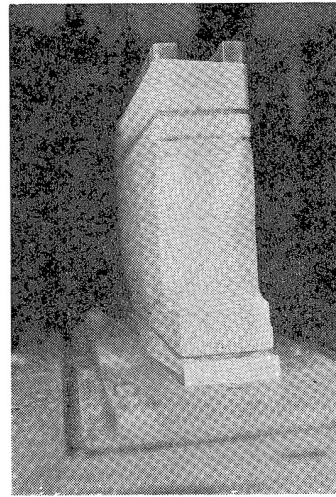
図—18 すべり面が観察されたときの軸ひずみならびに有効主応力比が最大になったときの軸ひずみと破壊時の軸ひずみの関係

は $35^{\circ}45'$ 程度であり、両者には 4° 程度の差がみられる。前述したように $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 時を破壊と考えると、破壊が生じる以前の $(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max}$ 時に φ' はすでに最大値を示してしまっている。土の破壊が内部摩擦最大時に発生するとすれば、すべりはおそらく φ' が最大に達した時点から始まるものと考えられる。

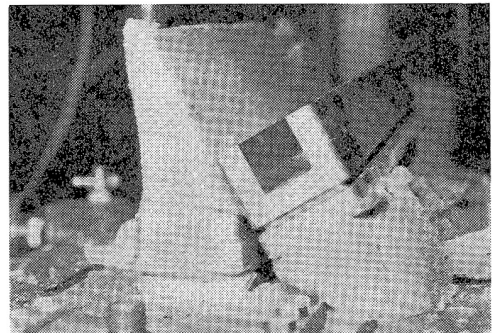
図—18 は横軸に $(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max}$ 時の軸ひずみと供試体に生じたすべり面が観察されたときの軸ひずみとをとり、縦軸に破壊時の軸ひずみをとって、ひずみ速度が $0.1\%/分$ における実測値を示したものである。図中、 Δ 印は有効主応力比が最大になったときであり、 \bullet 印において供試体全域にすべり面が広がったことを示す。なお、これらの変化は破線の矢印で示している。供試体にすべり面が観察されたとき、すなわち目にみえるすべり面が発生したのは図から明らかなように $(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max}$ 時よりかなりあとである。また図より、破壊時の軸ひずみとすべり面が供試体に広がったときの軸ひずみはほぼ合致している。上述したことから考えると、破壊はむしろ $(\sigma_1' /$

$\sigma_3')_{\max}$ 時におこるとみるべきであろう。しかしながら、すべりが発生したのちにおいて供試体はさらに大きな軸力に抵抗することができるのである。なお、すべり面は観察したところによると供試体の長手方向端部から発生し、軸ひずみの進行にともない徐々に広がっていった。しかるに、ひずみ速度が速い場合 ($\dot{\epsilon}_1 = 10.0\%/分$) にはすべり面は供試体の長手方向に沿って瞬間的に生じた。

平面ひずみ試験における試験終了後の供試体の状態を示したものが写真—3 である。写真から供試体に発生したすべり面がゴムスリプを通して明瞭にあらわれていることがわかる。また、供試体をつんでいるゴムスリプを切りとって供試体の内部の状態を写したものが写真—4 であり、すべりは供試体全体にわたって1つの平面に沿って生じたことがわかる。すべりは供試体の長手方向の軸を含み、水平面とある角度をなす面に沿って生じ、このすべり面をはさむ幅のせまい帯状の区間が破壊領域であると思われる。実測によるとこのすべり面と水平面とのなす角度は $62^{\circ} \sim 64^{\circ}$ であった。また、すべり面と最大主応力面（水平面）のなす角 α は次式で示される。



写真—3 平面ひずみ試験後の供試体の状況



写真—4 供試体内のすべり面の状況

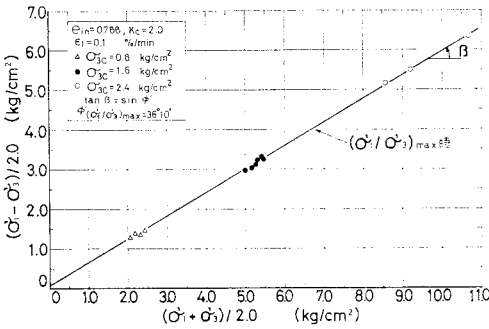


図-19 三軸試験における有効主応力比最大時の応力状態

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \dots\dots\dots (4)$$

実測した α を用いて上式より ϕ' を求めると、その平均値は $\phi' = 36^\circ$ 程度であった。この ϕ' の値は前述した破壊時における ϕ' にほぼ合致している。

三軸試験においては、すでに述べたように主応力差の最大値が生じないため破壊時の ϕ' は平面ひずみ試験のものと比較することはできない。図-19 に三軸試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' を示した。 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' は $36^\circ 10'$ 程度であり、平面ひずみ試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' が $40^\circ 10'$ 程度であったのに比べると、三軸試験のものの方が平面ひずみ試験のものより 10% 程度小さいことになる。また、平面ひずみ試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' は乾燥砂の $\phi_d (\phi_d = 37^\circ 30')$ と比較するとかなり大きい。一方、破壊時の ϕ' は乾燥砂の ϕ_d よりも小さい。これに対して、三軸試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' は乾燥砂の $\phi_d (\phi_d = 36^\circ 12')$ と合致している。

以上の結果をまとめて表-4 に示す。

表-4 同一初期間げき比 $e_{in} = 0.788$ の砂のせん断抵抗角の比較

応力状態	ϕ' ϕ_d		三軸試験	
	ϕ'	ϕ_d (乾燥砂)	ϕ'	ϕ_d (乾燥砂)
$(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時	$40^\circ 10'$	$(37^\circ 30')$	$36^\circ 10'$	$(36^\circ 12')$
破壊時 $((\sigma_1 - \sigma_3)_{\max})$ 時	$35^\circ 45'$	$37^\circ 30'$		$36^\circ 12'$

(4) 同一ひずみ速度における平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態におけるせん断特性の比較

a) 間げき水圧の変化量 Δu と平均有効主応力 σ_m' の比較

図-20 は初期有効拘束圧 σ_{3c} と Δu の関係を示す。平面ひずみと軸対称ひずみ状態で大きく異なる点は $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の Δu の正負にある。すなわち前者では σ_{3c} の値のいかんにかかわらず $\Delta U > 0$ であるのに反して後者では終始この値は負の値をとっている。このような比較をもっと詳細に行なうために、軸ひずみ ϵ_1 と初期

有効拘束圧 σ_{3c} をパラメーターとして、試料に作用する平均有効主応力 σ_m' と ΔU の関係を示すと、図-21 (平面ひずみ試験) と図-22 (三軸試験) であらわされ

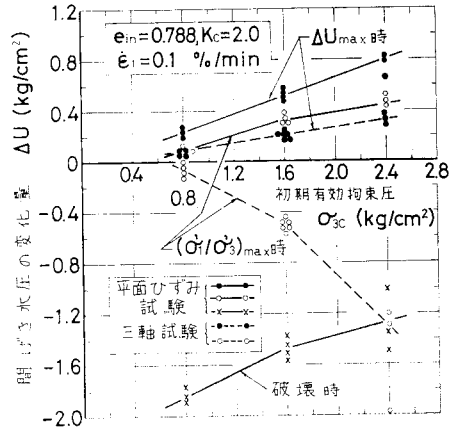


図-20 初期有効拘束圧と間げき水圧の変化量の関係

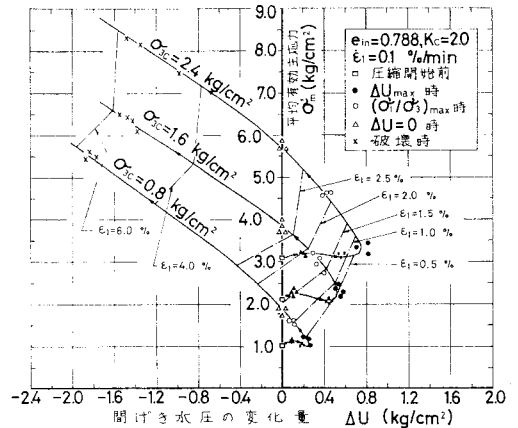


図-21 平面ひずみ試験における間げき水圧の変化量と平均有効主応力の関係

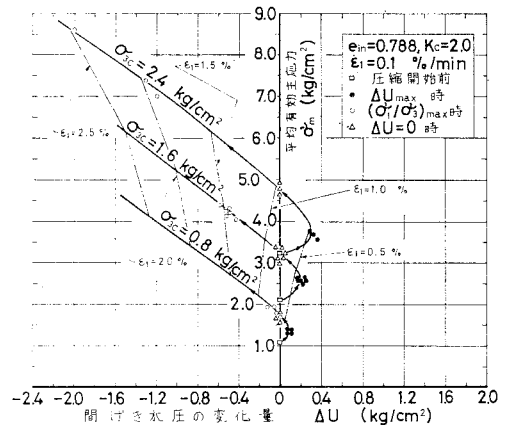


図-22 三軸試験における間げき水圧の変化量と平均有効主応力の関係

る。これらの図には Δu_{max} 時、 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時、 $\Delta u = 0$ 時、ならびに平面ひずみ試験では破壊時の実測値が図示され、試料の圧縮過程で ϵ_1 の変化中に Δu と σ_m' がどのような径路に沿って変化するかが一目でわかる。両者の差を要約すると次のようになる。

(i) 平面ひずみ状態の $\Delta u \sim \sigma_m'$ 曲線には極小値があるが、三軸試験の曲線にはそのようなことがない。

(ii) 平面ひずみ状態では σ_{3c} が大きいほど $\Delta u > 0$ において Δu の増加量は大きく、 $\Delta u < 0$ においては逆に Δu の減少量は小である。三軸試験では軸ひずみが 1.5% 以下ならばこのようなことはいうるが、それ以上の軸ひずみでは σ_{3c} が大きいほど Δu の減少量は大となる。

(iii) 同一 Δu と同一 σ_{3c} のもとにおける σ_m' は平面ひずみ状態の方が軸対称ひずみ状態よりも大である。

(iv) $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時における両状態の軸ひずみに着目すると、平面ひずみ試験では $\epsilon_1 = 1.0 \sim 2.5\%$ 、三軸試験では $\epsilon_1 = 0.8 \sim 2.0\%$ であって、三軸試験の方がわずかに小である。しかるに、この軸ひずみにおける Δu の値には大きな開きがある。これは三軸試験の方が平面ひずみ試験よりもダイレイタンスが大なるためであろう。したがって、図-20 に示した $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の Δu が両試験で全く逆の様相を示したのは変形の拘束条件の違いによるダイレイタンスの差に基づくと考えられる。

b) 間げき圧係数の比較

土を弾性体として間げき圧係数を求めると、平面ひずみ試験の間げき圧係数 A_P は三軸試験の間げき圧係数 A_T よりも大きくなる⁶⁾。実測値から両者の A 値を求め、これらを比較するために示したのが図-23 である。図には両試験の Δu_{max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の A_P, A_T ならびに平面ひずみ試験の破壊時の A_P が初期有効拘束圧 σ_{3c} に対して示されている。各圧縮過程の A_P, A_T とも σ_{3c} によって変化することがわかる。変形が小さいときの A 値は砂の液化化現象と密接な関係があると考え

られる。それゆえ、図からあきらかなように Δu_{max} 時において A_P が A_T よりも 2 倍程度大きい値を示したのは注目すべきことである。また $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時では A_P は正の値を示すのに対して、 A_T は負の値を示している。これは前述した $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の Δu から容易に理解できる。なお、破壊時においては A_P は $-0.17 \sim -0.24$ の範囲にある。

Bjerrum が細砂を用いて行なった非排水三軸試験の結果によると、 A_T 値は主応力差最大時において初期間げき比 $e_{in} = 0.85$ 程度で $A_T = 0.8$ 程度、 $e_{in} = 0.75$ 程度で $A_T = -0.2$ 程度であると報告している⁷⁾。しかしながら、われわれの用いた豊浦標準砂ではかなりゆるい状態でもダイレイタンスが生じ、三軸試験では間げき水圧 ($u_i + \Delta u$) は負圧になった。

c) 軸ひずみの比較

図-24 に初期有効拘束圧 σ_{3c} と軸ひずみ ϵ_1 の関係を示す。 σ_{3c} の増加にともなって平面ひずみ試験、三軸試験とも Δu_{max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の ϵ_1 、ならびに平面ひずみ試験の破壊時の ϵ_1 は大きくなる。両試験の結果を比較すると Δu_{max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の ϵ_1 はともに平面ひずみ試験の方が三軸試験のものより大である。たとえば $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時では平面ひずみ試験で $\epsilon_1 = 1.0 \sim 2.5\%$ 程度であるのに対して、三軸試験では $\epsilon_1 = 0.8 \sim 2.0\%$ 程度である。ここで注目すべきことは、平面ひずみ試験において破壊時の ϵ_1 は $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の ϵ_1 に比べてかなり大きいことである。すなわち、 $\sigma_{3c} = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ で $\epsilon_1 = 5.4\%$ 程度であり、これは $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の ϵ_1 の約 5.4 倍、また $\sigma_{3c} = 2.4 \text{ kg/cm}^2$ で $\epsilon_1 = 5.7\%$ 程度であり、これは $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 時の ϵ_1 の約 2.3 倍である。

(5) 初期有効拘束圧をかえたときのポアソン比

ここでは同一ひずみ速度で ($\dot{\epsilon}_1 = 0.1\%/分$) で初期有効拘束圧 σ_{3c} をかえたときのポアソン比 ν について述

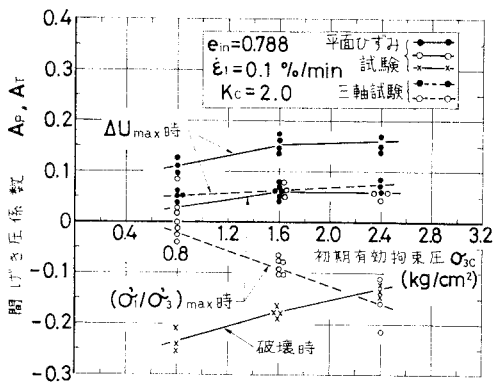


図-23 初期有効拘束圧と間げき圧係数の関係

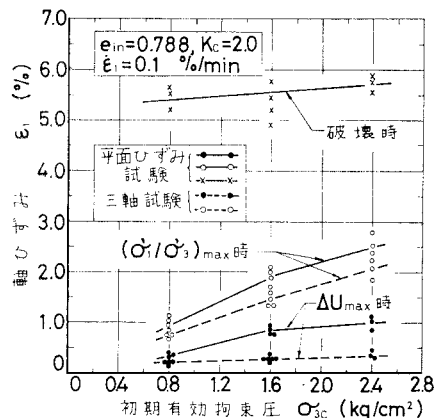


図-24 初期有効拘束圧と軸ひずみの関係

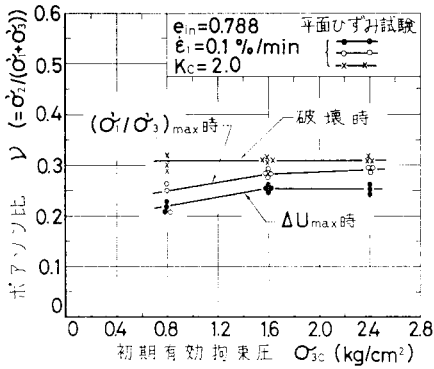


図-25 初期有効拘束圧とポアソン比の関：

べる。

応力から求めたポアソン比は三軸試験では求められないので、平面ひずみ試験によるもののみを σ_{sc} に対して示すと図-25 のようになる。図より Δu_{max} 時と $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 時の ν は σ_{sc} が高くなるにつれて大きくなるが、破壊時においては σ_{sc} に無関係に一定となり、そのとき ν は 0.31 程度である。

以上、述べてきた平面ひずみ状態における飽和砂の非排水せん断特性を乾燥砂を用いて行なった排水(気)試験の結果と比較してみると、ダイレイタンス特性、軸ひずみならびにポアソン比は乾燥砂のものとはほぼ一致している^{1),8)}。

5. 結 語

平面ひずみ三軸圧縮試験機に改造を加えて、試料に対する異方圧密を可能にし、 $K_c=2.0$ で、初期間げき比 $e_{in}=0.788$ の飽和したゆるい豊浦標準砂の非排水試験を、4つのひずみ速度と1つのバックプレッシャーのもとで行ない、非排水強度 q' を決定した。また、実験結果を同一初期間げき比の試料で行なった軸対称の三軸圧縮試験による値、ならびに乾燥砂を用いた平面ひずみ三軸圧縮試験による値¹⁾と比較した。なお、三軸圧縮試験では Seed らがいう σ_{scrit} までのバックプレッシャーを与えることができなかったため、圧縮中における主応力差の最大値が与えられなかった。平面ひずみ三軸圧縮試験で今回えられた非排水状態の特性と前回の乾燥砂のそれを比較して異なる点は非排水状態では $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 時と $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 時の両ひずみの位置で求められた q' が一致しないことである。また、特性が同じである点は非排水状態における圧縮初期の Δu ($\Delta u > 0$) は初期有効拘束圧 σ_{sc} が大であるほど大であり、一方乾燥砂では初期有効拘束圧が大であるほど圧縮初期の体積の収縮量 $\Delta V/V$ ($\Delta V/V < 0$) が大であるという点である。また平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態で非排水せ

ん断特性の異なる点は圧縮初期のひずみ量が小なる状態における Δu と A にある。これらの値はいずれも平面ひずみ状態の方が軸対称ひずみ状態の場合よりも大であった。なお平面ひずみ試験では q' とポアソン比はひずみ速度にほとんど影響されなかった。えられた結果の要旨を項目によって示すと次のようになる。

(1) 実験に用いた供試体にバックプレッシャーを与えたら、間げき圧係数 B は $B=0.90\sim 0.95$ であった。含水量から求めた飽和度は $102\sim 106\%$ であった。これから判断すると、試料は十分に飽和されていると考えられる。

(2) 平面ひずみ試験では有効主応力比と主応力差のそれぞれであらわした応力~ひずみ曲線は明確な最大値を示した。前者の値、すなわち有効主応力比は後者に比してきわめてわずかな軸ひずみ(2.0%程度)で最大値に達するが、主応力差では最大値に達するには5.5%程度の軸ひずみが必要であった。しかるに、三軸試験では主応力差の最大値はみられなかったが、有効主応力比は最大値を示した。これは前述したように、試料に十分なバックプレッシャーを与えることができなかったためである。

(3) 圧縮中における間げき水圧の変化量を平面ひずみと軸対称ひずみの両状態で $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ 以下のものについて比較すると、圧縮量が小さい間では、平面ひずみ状態における間げき水圧の増分 ($\Delta u > 0$) は軸対称におけるものの約3倍であった。圧縮が進むと平面ひずみにおける Δu はなだらかに減少し、 $\epsilon_1=8.0\sim 9.0\%$ で Δu は変化しなくなった。一方、三軸試験における Δu は急激に減少し、減少量は前者よりもはるかに大きく $\epsilon_1=8.0\%$ 程度に達してもなお間げき水圧は減少しつづけた。このような差の原因は変形の拘束条件の違いによるダイレイタンス特性の差によるものと考えられる。

(4) 平面ひずみ試験においては、圧縮中に試料端面からすべり面が発達してゆく様相が観察された。これによると試料全域に明瞭なすべり面が発生したときに主応力差は最大値をとった。試料内のすべりは1つの平面に沿っておきたことは試験後の観察から明瞭になった(写真-4)。

(5) 軸対称ひずみ状態でバックプレッシャーが応力~ひずみ曲線、間げき水圧~ひずみ曲線に与える影響を調べた。バックプレッシャーを 2.0 kg/cm^2 から 6.0 kg/cm^2 に変化させても上述の曲線に明瞭な差があらわれなかった。

(6) 圧縮中のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ を平面ひずみ試験では $0.06\%/分$ から $10.0\%/分$ に、三軸試験では $0.1\%/分$ から $3.0\%/分$ に変化させた。ひずみ速度が増加すると、平面ひずみ試験では圧縮初期における正の過剰水圧 Δu は減少する。すなわち Δu_{max} 時において $\dot{\epsilon}_1$ が $0.1\%/$

分から 10.0%/分 に増加すると du は 0.1%/分 における値の 20% も減少したが破壊時における du はひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ に影響されなかった。また、三軸試験では du_{\max} 時の過剰水圧は計測誤差の範囲内でひずみ速度に影響されなかった。

(7) 平面ひずみ状態における破壊時の間げき圧係数 A_p は $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ を基準にとると 10.0%/分 ではわずかに 5% 程度増加していた。これは破壊時の主応力差の値がひずみ速度の影響をうけるためである。ひずみ速度が 0.1%/分 における A_p の値は -0.17 程度であった。

(8) ひずみ速度が主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ にどのように影響するかをみると、上述の $\dot{\epsilon}_1$ の増加により平面ひずみ状態では $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の主応力差は 10% 程度増加し、破壊時の主応力差は 5% 程度減少した。しかるに三軸試験では $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の主応力差は上述のひずみ速度の増加によって 10% 程度減少した。

(9) ひずみ速度が有効主応力比 (σ_1'/σ_3') にどのように影響するかをみると、上述の $\dot{\epsilon}_1$ の変化により、平面ひずみ状態では $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時にはわずかに 3% 程度減少し、破壊時には $\dot{\epsilon}_1$ によってほとんど変化がなかった。また三軸試験では $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時に同じく 3% 程度減少した。上述の (8) と合わせて ϕ' はひずみ速度によってほとんど影響されない。

(10) 平面ひずみ状態でひずみ速度が上述のように増加したとき、 du_{\max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時における軸ひずみ ϵ_1 はひずみ速度に影響されなかったが破壊時の ϵ_1 は 10% 程度減少した。なお、 $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ 以下の速さになると破壊時の ϵ_1 はひずみ速度に影響されない。しかるに、三軸試験では du_{\max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϵ_1 は $\dot{\epsilon}_1$ によって影響され、 $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ の速さになっても一定な値におちつかなかった。

(11) 上述のひずみ速度の増加が $\sigma_2'/(\sigma_1' + \sigma_3')$ から求めたポアソン比にどのように影響するかを調べた。これはひずみ速度によってほとんど影響されなかった。この間げき比で有効主応力比が最大のとき $\nu=0.28$ 、破壊時で $\nu=0.31$ 程度であった。

(12) なお、上記 (6)~(11) に述べた平面ひずみ状態における諸特性はひずみ速度の基準値を $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ としているが、このときの諸特性はひずみ速度がもっと遅い 0.06%/分 のものとほとんど同じであった。このことからひずみ速度は平面ひずみ試験では $\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$ 以下で行なえばひずみ速度の影響をうけない。しかるに三軸試験ではひずみ速度に対してこのような明確な結論がえられなかったが、平面ひずみ試験と同じ程度の速度ならばひずみ速度の影響を受けないと考えられる。

(13) ひずみ速度が 0.1%/分 の平面ひずみ試験からえられた ϕ' は $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時で $40^\circ 10'$ 、破壊時で $35^\circ 45'$

であった。これら両者の値は同じ間げき比における平面ひずみ状態の乾燥砂の実験からえられた $\phi_d (=37^\circ 30')$ とは一致しなかった。また同じひずみ速度 0.1%/分 で行なった三軸試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' は $36^\circ 10'$ で、これは平面ひずみ試験の $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時の ϕ' よりも 10% 程度小であり、三軸試験の乾燥砂の $\phi_d (=36^\circ 12')$ とよく一致していた。

(14) 同一ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$) で平面ひずみ試験と三軸試験で与えられたせん断特性の大きな差の 1 つは $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時における du の正負にある。平面ひずみ試験では初期有効拘束圧のいかんにかかわらず、このときの過剰水圧は常に正であり、三軸試験ではつねに負であった。これは (3) に述べたように両者のダイレイタンシー特性の差による。

(15) 同一ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$) における du と平均有効主応力 σ_m' を初期有効拘束圧と軸ひずみをパラメーターとして示した。この図により、両状態のせん断中の du をある軸ひずみとある初期有効拘束圧のもとで比較できる。

(16) 同一ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$) で行なった平面ひずみ試験と三軸試験の圧縮初期の間げき圧係数を比較してみると、前者は後者の約 2 倍にも達していた。

(17) 同一ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_1=0.1\%/分$) において、ポアソン比 ν は du_{\max} 時と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 時では初期有効拘束圧が大になると ν は幾分か大きくなった。しかるに破壊時には初期有効拘束圧が変化しても同じ値を示した。

最後に、数多くの実験を一緒に行なった竹中千尋君(現、清水建設(株))の労に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 市原松平・松沢 宏：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，土木学会論文報告集 173 号，pp. 47~59, 1970.1.
- 2) 市原松平・松沢 宏・渡辺真吾・山田公夫：気乾の砂に対する動的平面ひずみ三軸圧縮試験，第 5 回土質工学研究発表会講演集，pp. 453~456, 1970.6.
- 3) 市原松平：間げき水圧計ならびに間げき水圧計測法，土質調査法，pp. 303~324, 土質工学会，昭和 39 年
- 4) Seed, H. Bolton and Lee, Kenneth, L.: Undrained Strength Characteristics of Cohesionless Soils, Proc. ASCE., Vol. 93, No. SM 6, pp. 333~360, November, 1967.
- 5) Lee, Kenneth, L.: Comparison of Plane Strain and Triaxial Tests on Sand, Proc. ASCE., Vol. 96, No. SM 3, pp. 901~923, May, 1970.
- 6) 最上武雄編著：土質力学，pp. 517~524, 技報堂，昭和 44 年
- 7) Bjerrum, L., Kringstad, S. and Kummeneje, O.: The Shear Strength of a Fine Sand, Proc. 5th Int. Conf. SMFE., Vol. 1, pp. 29~37, 1961.
- 8) 渡辺真吾：平面ひずみ状態における砂の静的および動的せん断特性，名古屋大学修士論文，No. 70116, 昭和 45 年 3 月