

# 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について

DRAINED SHEAR CHARACTERISTICS OF STANDARD SAND  
UNDER HIGH CONFINING PRESSURES

三浦 哲彦\*・山内 豊聰\*\*

By Norihiko Miura and Toyotoshi Yamanouchi

## 1. まえがき

土が高い圧力を受けたときに示す圧縮特性やせん断特性は、古くから注目されてきたところである。最近特に、アースダムやロックフィルダムの大型化、杭の支持力あるいは地中深部の掘削などに関連して、その研究の重要性が改めて認識されるようになった。

高压三軸圧縮試験機を用いた岩石のせん断特性に関する研究は、構造地質学の分野ではすでにかなり詳しく行なわれており、たとえば、大気圧の下でぜい性な岩石が数百から数千  $\text{kg}/\text{cm}^2$  の拘束圧の下では塑性を示す、ということはよく知られている。このような非常に高い圧力で拘束されたとき、土は堆積岩によく似た力学的挙動を示すことは容易に想像できる。

しかしながら、土木工学の分野で考慮すべき拘束圧の上限は、実際的見地から数百  $\text{kg}/\text{cm}^2$  程度でよいと考えられよう。これまでの研究によって、数十から数百  $\text{kg}/\text{cm}^2$  の拘束圧の下で、土やれきは岩石とはかなり違った力学的特性を示すことはほぼ明らかである。またそれらは、土やれきが低い拘束圧下で示す性質の延長上にないことも確かである。上述のようなある高い拘束圧の範囲で見られる土やれきの特異な現象は、圧縮およびせん断過程における粒子の著しい破碎、およびそれに伴う体積減少に起因していると考えられている。しかし、まだ明らかでない部分も多く、データの蓄積も十分ではないと思われる。

筆者らは、高压三軸圧縮試験機を用いて、土の高拘束圧下における力学特性を調べていこうとするものであるが、本文は、飽和した豊浦標準砂の排水せん断試験で得たいくつかの知見について述べる。

なお、高压というのはあくまで相対的な表現であり、

取扱う試料によって当然その圧力範囲も変わる。土を対象とするときは、一般に、せん断中に大きな粒子破碎を生じないような拘束圧力、 $10 \text{ kg}/\text{cm}^2$  程度以下を低圧とし、それ以上を高压と呼ぶことが多い。Vesić ら<sup>1)</sup>は、 $10\sim100 \text{ kg}/\text{cm}^2$  を中圧、 $100\sim1000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  を高压、 $1000\sim10000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  を超高压と称しているが、これは便宜的な分け方にすぎない。ここでは、拘束圧  $10 \text{ kg}/\text{cm}^2$  以上を高压と呼ぶことにする。

## 2. 従来の研究

1911 年 von Karman<sup>2)</sup> は、石灰岩および砂岩について拘束圧約  $3000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  までの三軸圧縮試験を行ない、モールの破壊規準を検証するとともに、高拘束圧下で岩石が塑性的挙動を示すことを明らかにした。Bridgeman<sup>3)</sup> は、1918 年石英砂を  $30000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の圧力で圧縮し、間げき率を約 2% にまで減らした。1936 年に Griggs<sup>4)</sup> は、いくつかの岩石について拘束圧  $12000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  までのせん断試験を行ない、リューダースライン (Lüder's line) やひずみ硬化の現象を観察し、それが大気圧下の軟質金属の性質と似ていることを指摘した。構造地質学の分野では、Griggs の研究を Handin ら<sup>5), 6)</sup> が発展させ、1960 年に刊行された Rock Deformation の書<sup>7)</sup>にはそれまでの成果が収められている。

土木工学の分野では、高い圧力を受けたとき砂が高压縮性を示すことは、古くから注目されてきたところであるが、土やれきの高拘束圧下におけるせん断特性が研究されるようになったのは最近のことである。1948 年 Terzaghi と Peck<sup>8)</sup> は砂および砂と雲母の混合試料について圧力  $1000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  までの圧縮試験を行なった。そして、ゆるづめの砂を、静的な圧力によって同じ砂の密づめの間げき比まで締固めるのには非常に大きな圧力を要すること、また、雲母の混入率が高くなると砂の圧縮性は、著しく増大することを指摘した。Roberts と

\* 正会員 工業技術院九州工業技術試験所 資源開発部

\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

Souza<sup>9)</sup> も同様な実験を行ない、ある高い圧力範囲では石英砂の圧縮指数は粘土のそれより高いこと、粒子破碎による破壊圧（breakdown pressure）は初期間げき比によって変化する、などの興味ある事実を示した（1958）。高压三軸圧縮試験によって、土やれきの力学的性質が多く研究されるようになったのは1963年以降の事である。HallとGordon<sup>10)</sup>は、ダム材料について  $\sigma_3 = 46 \text{ kg/cm}^2$  までの大型高压三軸圧縮試験を行ない、砂質土は  $\sigma_3$  の増加に伴ってせん断抵抗角が減少することを示した。HirschfeldとPoulos<sup>11)</sup>は、低い拘束圧の下で体積膨張する砂が、高拘束圧下ではせん断中に体積を減じることを示し、モールの包絡線がカーブするのはせん断中の体積変化に關係があるとした。De Beer<sup>12)</sup>は杭の支持力設計法に関連して粒子破碎が貫入抵抗に及ぼす影響を調べた。そしてせん断ひずみを伴う場合は単に等方的圧力を加えたときより大きな粒子破碎を生じることを示し、貫入抵抗は、理論値より小さくなることを示唆した。Bishopおよびその協力者<sup>13), 14)</sup>は、砂および粘土について種々の条件で高压三軸圧縮試験を行ない、モールの包絡線がカーブするのはダイレイタンシーレイトと密接な關係があることを指摘し、また、Skempton<sup>15)</sup>が導いた高压下における有効応力式の検証を試みている。1967年、LeeとSeed<sup>16)</sup>は、2種の砂について排水せん断試験を行ない、破壊時の体積変化がちょうど0になる条件を図上で求め、これから高拘束圧下における砂のせん断抵抗中の粒子破碎による寄与量を求めようとした。この方法については、後にRoweら<sup>17)</sup>がくわしい批判を加えている。また、LeeとFarhoomand<sup>18)</sup>は、異方性圧力のもとでの砂質土の圧縮性および破碎性を検討した。Vesićら<sup>19), 20)</sup>は、高压八面体せん断試験を行ない、実験に用いた砂では平均垂直応力が、200～1200  $\text{kg/cm}^2$  の範囲でせん断応力による体積変化量は変わらないことを示した。また、砂の初期間げき比の影響がすべて消失するときの応力を breakdown stress と定義し、この応力を境にして粒子破碎量、変形係数、強度定数などが明確に変化することを示した。Bardenら<sup>20)</sup>は最近、高压での平面ひずみ試験を行なっている。

これまでに行なわれた研究のおもなものは上述のようであり、これらによって高拘束下における土、特に砂の力学的性質のアウトラインは明らかにされたように見える。しかしながら、最も多く検討されている砂についてさえ不明な点が多い。たとえば、Bishop<sup>14)</sup>、LeeとSeed<sup>16)</sup>およびVesićとClough<sup>21)</sup>はいざれも、高い圧力域で砂の初期間げき比の影響は消失するようである、としながら、著者らの示しているデータは必ずしもそうではない。そこで筆者らは、まず、砂の初期間げき比の影響がどのような過程で失われていくのかについて検

討した。

### 3. 実験方法

#### （1）実験装置

試作した高压三軸圧縮試験装置の概要は写真-1に示すとおりである。装置は、基本的には低圧用三軸圧縮試験機と変わらないが、高压であるために設計段階で気づかなかつた不備な点も少なくなかった<sup>21)</sup>。部分的な改良を重ねた結果、次のような方法でほぼ満足なデータが得られることがわかった。

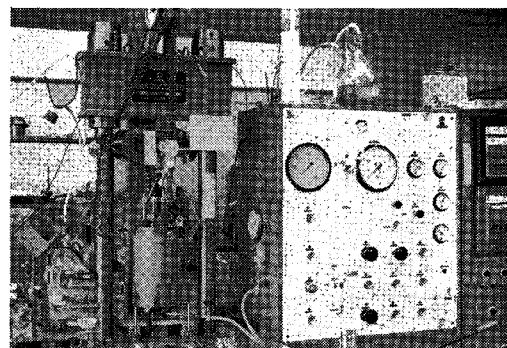


写真-1 高压三軸圧縮試験装置

#### a) 高圧シール

装置の随所にOリングを用いた。ピストンおよびアクチュエーターなどの可動部分には、特に摩擦の少ないOリングを用いる必要がある。

#### b) メンブレン

生ゴム、硬質ゴムおよびビニールチューブなどについて検討した結果、厚さ約1mmの生ゴム（アメゴム）が種々の点で好ましい。特に角ばった試料を高い側圧で試験するときは、厚さ1.5mm程度の硬質ゴムを使用するのが良い。試料中への側液のわずかな洩れ<sup>21)</sup>は、メンブレンを針金でペデスタルに締付けることにより完全になくなかった<sup>22)</sup>。

#### c) 側 液

高压三軸試験機では、シールを完全にするために、灯油、グリセリン溶液、ヒマシ油などを用いることが多い。しかし、本装置では ( $\sigma_{3\max} = 550 \text{ kg/cm}^2$ )、脱気水を用いても洩れはまったく認められない。しかし、装置の大部分は鉄製であるから、防錆剤を適量入れておく必要がある。

#### d) 高圧発生法

増圧比1対100のエアハイドロポンプによった。圧密およびせん断中の側圧は、アクチュエーターを用いて保持し、圧力変動は±0.3%以下に抑えた。アクチュエーターは、非排水試験の際に体積変化測定装置として利用

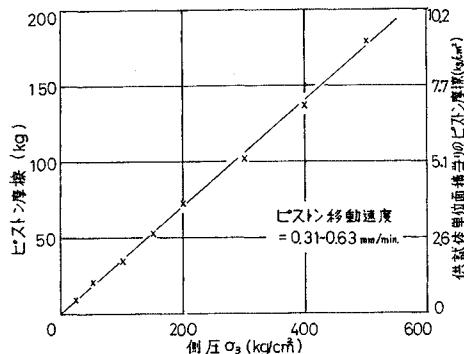


図-1 側圧とピストン摩擦の関係

できる。また、ピストン貫入による圧力変動は補償ピストン<sup>4)</sup>により完全になくすことができた。

#### e) ピストン摩擦

高圧三軸試験機では、ピストン摩擦の影響をどのようにして取除くかが大きな問題となる。ある側圧の下で、ピストンが三軸室に入るときと出るときに同じ抵抗が働くとして求めた本装置のピストン摩擦力は、図-1に示すとおりであった。ピストン移動速度は、供試体高さに対して 0.25%/min および 0.5%/min の二段階について検討したが、移動速度の影響は認められなかった。供試体の単位面積当たりに換算して、本装置のピストン摩擦抵抗は側圧の 1.8%，供試体最大軸差応力に対して約 0.8% に相当する。この摩擦抵抗は、ピストンが供試体に接触するまでの貫入抵抗を記録紙上で基準値にとり、接触後の荷重増加を供試体軸差応力とすることによって取除いた。なおここでは、軸荷重の増加に伴うピストン摩擦の増加は無いものと考えた。その検出が困難なことのほかに、装置の偏心はきわめて小さい、ピストンは 0 リングで支持されている、供試体の変形は破壊後もなお軸対称である、などの理由からである。

#### (2) 試料ならびに供試体作製方法

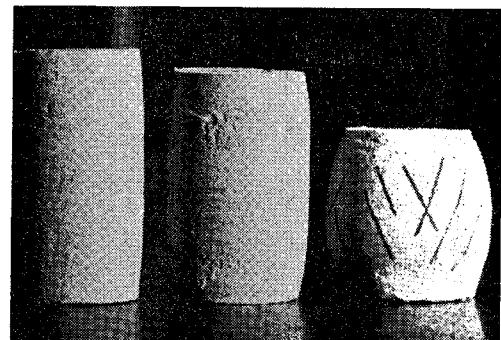
実験に用いた豊浦標準砂の物理的性質は次のとおりである。土粒子の比重=2.646, 均等係数=1.5, 最大間げき比=0.91, 最小間げき比=0.58。試料の粒度曲線および顕微鏡写真を図-7 および写真-3 に示す。

供試体寸法は、高さ 125 mm, 直径 50 mm で、次の方法により作製した。密づめ供試体は、乾燥試料を 16 層に分けてゴムチップをつけたタンパで、各層 30 回ずつ軽く突固めた。上部ペデスタイルから真空吸引して試料内の空気を十分に除いた後、下部から脱気水を供給した。ゆるづめ供試体はゴムスリーブに脱気水を満たし、水浸試料を静かに注ぎこんだ。ゴムスリーブをゴムバンドおよび針金でペデスタイルに締付けた後、0.04 kg/cm<sup>2</sup> の負圧をかけて供試体を自立させた。供試体寸法を測ってから側液供給する直前までの作業中に生じる体積変化（ゆ

るづめの場合で 0.5~0.9 cm<sup>3</sup>）は初期体積から差し引いた。上述の方法で得られる供試体の初期間げき比は、密づめで 0.60~0.62, ゆるづめで 0.82~0.84 の範囲に入るものが多い。

#### (3) 試験方法

側圧一定の圧密排水せん断試験を行なった。圧密には長時間をかけて、ほぼ 100% 圧密したことを確かめてからせん断にはいった（この段階で高圧を受けた砂が見せる現象は圧密というより圧縮と呼ぶにふさわしい。本文では、以後圧縮と呼ぶことにする）。載荷速度は、側圧  $\sigma_3$  が 250 kg/cm<sup>2</sup> 未満の場合はすべて 0.5%/min とし、それ以上の圧力では軸ひずみ 15% までを 0.5%/min, それ以後は 0.25%/min 以下とした。載荷速度の決定にあたっては数個の予備試験を行ない、軸差応力の低下をきたさない載荷速度を決定し、安全のためその半分の載荷速度を採用したものである。軸ひずみは最大 40% 程度まで与えた。写真-2 に見られるように、軸ひずみが 30% までは供試体形状はほぼシリンダー状と考えてよい。そこで、軸差応力を計算するときの断面補正の方法は、一般に用いられている方法<sup>23)</sup>に従った。試験中の測定変量はすべて電気検出して記録計で記録させ、同時に、記録計の読みをループ、ダイヤルゲージ、ビューレットおよびブルドン管でチェックした。試験精度を上げるために、記録計の指示を常にチェックしておく必要がある。また、荷重をループで直読する際は単位目盛当たりの荷重が大きいので（筆者らが使用している 50 トンループは 1 目盛 121 kg），温度補正<sup>27)</sup>がぜひ必要である。



左から軸ひずみ 20%, 30% および 45% をかけた場合を示す ( $\sigma_3=300 \text{ kg/cm}^2$ ,  $e_0=0.62$ )。右端の斜線は、スリップラインをマジックインキでなぞったものである。

写真-2 供試体の形状変化

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) 圧縮特性

粒子破碎を伴う砂の圧縮特性は、粘土の二次圧密に類

似していることが知られている<sup>1), 18)</sup>。本実験に用いた標準砂についても同様の傾向が見られ、数百 kg/cm<sup>2</sup> の等方圧力で圧縮した場合、体積変化がほぼ完全に止まるまでに数十時間要することがわかった。このため本実験においては、1時間当たりの体積変化量が 0.1 cm<sup>3</sup> 以下になるまで圧縮を続け、その後せん断に入った。そして、体積変化が約 0.1 cm<sup>3</sup>/hr に達したときを 100% 圧縮と呼ぶことにした。

前述の定義による 100% 圧縮に要する時間と、その 98% に達したときの時間を比較したものが表-1 である。前者は後者の 3~5 倍の時間を要することがわかる。また、等方圧縮圧力と 100% 圧縮に要する時間の関係を示した図-2 から次のことが読みとれる。i) 100% 圧縮に要する時間は圧縮圧力に支配され、ii) 圧力が 300 kg/cm<sup>2</sup> 以下では初期間げき比の大きい方が多くの時間を要する。しかし表-1 から、iii) 98% 圧縮に要する時間は逆に初期間げき比の小さい方が長い。

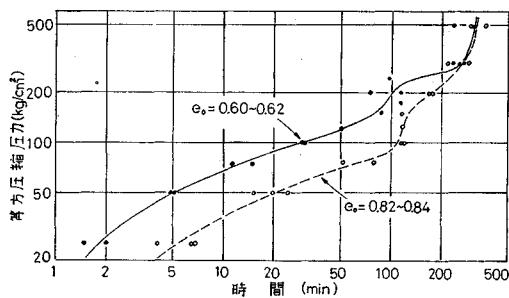


図-2 圧縮圧力と 100% 圧縮に要する時間の関係

表-1 98% および 100% 圧縮に要する時間

等方圧縮圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	$e_0=0.60 \sim 0.62$		$e_0=0.82 \sim 0.84$	
	98%	100%	98%	100%
500	約 60 分	約 240 分	約 50 分	約 300 分
300	〃 140 〃	〃 300 〃	〃 90 〃	〃 300 〃
200	〃 45 〃	〃 120 〃	〃 40 〃	〃 180 〃

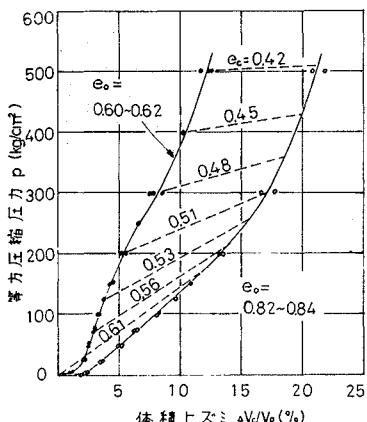


図-3 等方圧縮圧力と体積ひずみの関係

次に、等方圧縮圧力  $p$  と体積ひずみ  $\Delta V_c/V_0$  の関係は図-3 に示すようであった。ここに、 $\Delta V_c$  は等方圧縮圧力によって圧縮された体積(=排水量)、 $V_0$  は圧縮前の初期体積を表わす。初期密度の異なる 2 本の  $p$ ~ $\Delta V_c/V_0$  曲線は、 $p=250 \text{ kg/cm}^2$  までは曲線の形を異にするが、それ以上の圧力に対してはほぼ平行に変化している。2 本の曲線を結ぶ破線は圧縮後の間げき比  $e_c$  を示すもので、これから次のことがいえよう。初期間げき比  $e_0=0.82 \sim 0.84$  の供試体(以下初期ゆるづめ供試体と呼ぶ)を、初めから密につめた状態  $e_0=0.60 \sim 0.62$  (以下初期密づめ供試体と呼ぶ)まで等方的に締固めるには、 $180 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力を必要とする。また、 $400 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力で圧縮した場合でも、初期間げき比の影響は消えていない<sup>8), 9)</sup>。上述のように、初期間げき比の大きな標準砂は、非常に大きな圧力を受けたあとでさえ、小さい間げき比から出発したものより高位の構造<sup>24)</sup>を保っている。

粒子集合体の圧縮は、粒子破碎を生じない圧力範囲では粒子間の相対的移動(すべり)によって生じる。しかし、さらに高い等方圧力を受けると、粒子集合体の圧縮は次のような過程で進むものと考えられる。まず、ある圧力に達すると、粒子接触数の少ない初期ゆるづめ試料では粒子破碎を生じ、新しい粒度に応じた安定な粒子配列を選択しつつ平衡状態に達する。この圧力範囲では、初期密づめ試料の粒子破碎は初期ゆるづめのそれに比べて少なく、むしろ粒子の弾性ひずみとしてエネルギーは貯えられている。そして、より高い圧力を受けたとき、初期密づめの砂の破碎はそれまでに比べて急速に進む。図-3 の曲線の  $p=250 \text{ kg/cm}^2$  付近の変化は前述のことと示していると思われる。 $p=500 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を十分な時間受けた後では、初期密度の大小にかかわらず試料の間げき比はほぼ同一の値になる。しかし、このときの試料粒度は必ずしも同じではないはずである。なぜなら、先述のような過程で圧縮が進むとき、個々の粒子が破碎および摩滅作用を受けながら移動する距離は、初期ゆるづめの方が初期密づめより長いからである。このことを確かめるために、 $p=500 \text{ kg/cm}^2$  で圧縮した試料の粒度を調べた。その結果、図-8 中のせん断前粒度曲線で示されるように、初期ゆるづめ試料の方がより多くの粒子破碎を受けていることが明らかになった。また、圧縮後の試料を顕微鏡で観察したところ、初期ゆるづめ試料は、密づめのそれに比べて丸味を帯びた粒子が多いことがわかった(写真-3)。これらの実験事実は先述の説明を裏付けるものと考える。

上に述べたことは、標準砂のように粒子形状が角ばらずしかも硬い試料についていえることであり、粒子形状、粒子破碎強度、粒度などが変われば違った現象が観

察されよう<sup>1), 16), 18), 26)</sup>。

## (2) 軸差応力、軸ひずみおよび体積ひずみの関係

拘束圧  $\sigma_3$  を変えた場合の軸差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )、軸ひずみ  $\epsilon$  および体積ひずみ  $\Delta V_s/V_c$  の関係を図-4, 5 および 6 に示す。ここに、 $\Delta V_s$  はせん断中の体積変化量、 $V_c$  は等方圧力で圧縮された後の供試体体積を表わす。また、表-2 は各条件で行なった試験結果をまとめたものである。

拘束圧  $\sigma_3 = 25 \sim 125 \text{ kg/cm}^2$  の場合 (図-5) について見ると次のことがわかる。まず、 $\sigma_3 = 25 \text{ kg/cm}^2$  の初期密づめ供試体では、拘束圧が  $5 \text{ kg/cm}^2$  以下の場合 (図-4) と同様に、せん断中に供試体体積は膨張する。軸差応力、軸ひずみおよび体積ひずみの関係曲線の形も低圧域のそれとあまり変わらない。しかし、最大軸差応力を示すときの軸ひずみ  $\epsilon_f$  に関しては、低圧域では  $\sigma_3$  の増大に伴って小さくなる傾向にあったものが、 $\sigma_3 = 25 \text{ kg/cm}^2$  以上では  $\epsilon_f$  は次第に大きくなる傾向にある。

拘束圧が  $50 \text{ kg/cm}^2$  になると、軸差応力～軸ひずみ曲線の形は  $\sigma_3 = 25 \text{ kg/cm}^2$  の場合とよく似ているが、初期ゆるづめ供試体の最大軸差応力は初期密づめのそれに近い値をとるようになる。そして、初期密づめ供試体の体積ひずみ～軸ひずみ曲線は特徴的な変化を見せていている。すなわち、 $\epsilon = 10\%$  付近ではむしろ体積膨張の傾向をみていたものが、さらに軸ひずみが進むにつれて急速に体積を減少していく。したがって、Lee と Seed<sup>16)</sup> が求めて

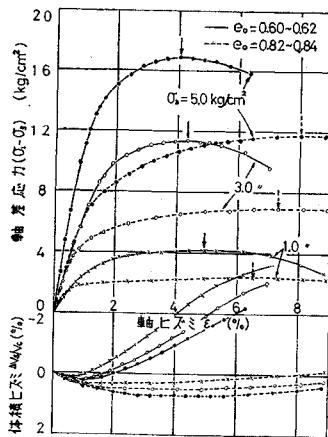


図-4

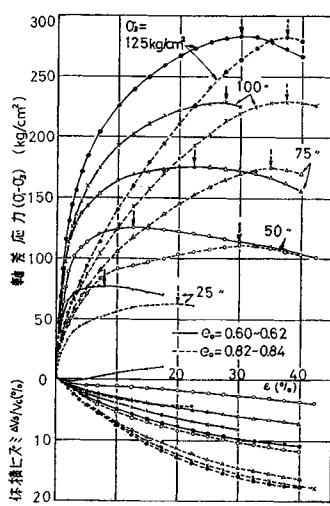


図-5

いる限界拘束圧  $\sigma_{3c}$  は、本試料においては  $\sigma_3 = 25 \text{ kg/cm}^2$  と  $50 \text{ kg/cm}^2$  の間に存在することは明らかである。

拘束圧が  $75 \sim 125 \text{ kg/cm}^2$  のとき、標準砂の最大軸差応力に関して図-5 および表-2 に示すような興味ある結果が得られた。この拘束圧の範囲では、供試

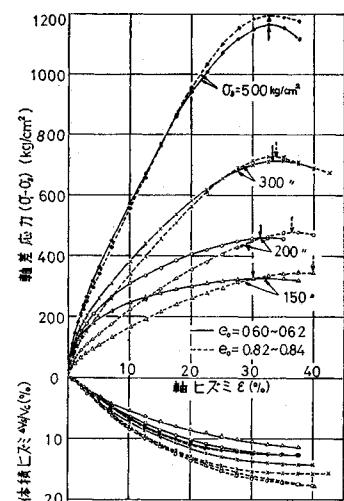


図-6

体初期密度の大小にかかわらず最大軸差応力は同一の値を示す。しかしながら、軸差応力～軸ひずみ曲線の形については、 $\sigma_3 = 50 \text{ kg/cm}^2$  以下の場合と同様に、初期密度の影響は明確に表われている。このような曲線の形の違いは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$  の点と原点を結ぶ直線の勾配、すなわち変形係数  $E_{so}$  で表わすことができる (表-2)。さて、拘束圧が  $75$  から  $125 \text{ kg/cm}^2$  の間にあるときに見られる特異な現象を調べるために、おのおのの供試体について、せん断前および最大軸差応力時の間げき比  $e_c$  および  $e_f$  (表-2) を比較すると次のことがわかる。すなわち、せん断前 (=圧縮後) の間げき比は、いずれも初期密づめ供試体の方が小さいにもかかわらず、 $e_f$  値は逆に初期ゆるづめ供試体の方が小さくなっている。これは、後者がせん断中に受ける体積変化 (減少) は前者のそれよりかなり大きいことを示すものである。初期ゆるづめ供試体においては、上述のようにせん断中に体積を大きく減少させながら、なお初期密づめ供試体と同じ最大軸差応力を示すが、この現象は、低拘束圧の場合に用いられるストレス～ダイレイタンシーの関係のみでは説明できない。Lee と Seed<sup>16)</sup> が示したように、ダイレイタンシー効果のほかに、粒子破碎および粒子再配列に使われるエネルギーを考慮しなければならない。Lee と Seed は次の式を提案している。

$$\begin{aligned} \text{測定されるせん断強度 } \tau &= (\text{すべり摩擦による強度 } \tau_s) \\ &+ (\text{ダイレイタンシー効果 } \tau_d) \\ &+ (\text{粒子破碎と再配列効果 } \tau_e) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

式(1)の中のダイレイタンシー効果は、体積膨張のとき (+)、収縮のとき (-) である。式(1)を本実験結果の最大軸差応力時に適用すると次のようになる。ただし、サフィックス  $D$  および  $L$  は、それぞれ初期密づめおよび初期ゆるづめを表わす。

$\sigma_3 = 75 \text{ kg/cm}^2$  の場合について考えると以下のようになる。表-2 から  $\tau_{\max D75} = \tau_{\max L75}$ 。すべり摩擦によるせん断抵抗は、他の条件に影響されないとすれば<sup>1), 16)</sup>、 $\tau_{sD75} = \tau_{sL75}$ 。最大軸差応力時の体積減少割合は、図-5 に見られるように、初期ゆるづめの方が大きいので、 $-\tau_{dD75} > -\tau_{dL75}$ 。これらの条件を式(2)および(3)が満足するためには

表-2 三軸圧縮試験結果

試験番号	側圧 $\sigma_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	初期間げき比 $e_0$	圧縮後間げき比 $e_c$	圧縮による体積ひずみ $\Delta V_c/V_0$ (%)	圧縮による軸ひずみ $\epsilon_c$ (%)	最大軸差応力を示したときの諸値					$1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 変形係数 $\sigma_1/\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	最終軸ひずみ $\epsilon_f$ (%)	試験後含水比(%)	
						軸差応力 $\sigma_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	軸ひずみ $\epsilon_f$ (%)	体積ひずみ $\Delta V_f/V_c$ (%)	間けき比 $e_f$	平均主応力 $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )				
HD-42	500	0.622	0.423	12.32	4.68	1 104	34.5	12.7	0.242	868	3.21	5 220	40.0	—
HD-92	"	0.606	0.420	11.56	4.67	1 166	32.5	13.3	0.231	889	3.33	5 710	39.5	9.7
HL-47	"	0.790	0.426	20.35	6.69	1 190	31.0	12.4	0.249	897	3.38	6 180	42.5	—
HL-93	"	0.832	0.429	22.00	7.93	1 197	32.5	13.8	0.232	899	3.39	5 460	37.0	10.3
HD-24	300	0.640	0.492	9.08	2.45	682	32.5	13.4	0.291	527	3.27	3 580	47.0	—
HD-90	"	0.602	0.479	7.62	2.36	713	34.0	14.0	0.272	538	3.38	4 060	40.5	11.3
HL-46	"	0.799	0.504	16.33	4.66	749	33.5	15.8	0.267	550	3.50	3 370	42.5	—
HL-48	"	0.804	0.507	16.46	5.31	729	33.0	15.6	0.272	550	3.50	3 280	44.0	—
HL-91	"	0.819	0.497	17.68	5.65	762	35.0	15.8	0.259	554	3.54	3 170	40.0	11.0
HD-83	250	0.592	0.493	6.22	1.83	580	32.5	13.2	0.296	443	3.32	4 140	42.0	11.9
HD-80	200	0.596	0.509	5.41	1.69	460	31.3	12.6	0.319	353	3.30	4 690	32.5	13.0
HD-79	"	0.587	0.507	5.06	1.17	460	32.5	12.6	0.317	353	3.30	4 380	39.0	12.6
HL-51	"	0.804	0.580	12.46	2.96	471	36.0	17.0	0.311	357	3.36	2 210	50.0	—
HL-81	"	0.820	0.577	13.39	3.69	470	37.5	17.4	0.303	357	3.35	2 140	40.0	12.8
HL-82	"	0.814	0.577	13.07	3.58	477	37.5	17.5	0.300	359	3.39	2 150	41.0	12.9
HD-78	175	0.593	0.520	4.61	1.55	393	33.8	12.1	0.335	306	3.25	4 160	41.0	13.1
HD-76	150	0.594	0.528	4.17	1.32	330	32.0	10.8	0.363	260	3.20	5 500	37.5	14.1
HL-77	"	0.843	0.643	10.80	2.71	347	38.8	17.7	0.353	266	3.31	1 650	40.0	13.7
HD-75	125	0.598	0.538	3.70	1.16	283	30.0	9.8	0.388	219	3.26	5 890	40.0	—
HL-74	"	0.846	0.672	9.60	2.38	283	37.0	17.4	0.379	219	3.26	1 380	40.0	14.8
HD-72	100	0.601	0.549	3.18	0.46	230.5	27.5	7.8	0.429	176.8	3.31	6 070	40.0	15.9
HD-73	"	0.609	0.556	3.22	0.62	228.0	26.5	7.6	0.438	176.0	3.28	5 430	31.0	16.7
HL-70	"	0.825	0.678	8.01	1.93	225.3	37.5	16.9	0.394	175.1	3.25	1 450	41.0	15.9
HL-71	"	0.832	0.686	7.96	1.54	228.2	37.5	17.0	0.399	176.1	3.28	1 360	45.0	15.4
HD-68	75	0.597	0.550	2.90	0.86	176.0	22.5	5.0	0.472	134.6	3.38	7 180	40.0	17.3
HD-69	"	0.603	0.556	2.89	0.69	176.4	21.5	4.8	0.482	133.8	3.35	7 350	30.0	17.9
HL-65	"	0.824	0.713	6.08	1.16	169.8	34.5	15.1	0.454	131.6	3.26	1 420	40.0	—
HL-67	"	0.845	0.725	6.47	1.32	173.0	35.0	15.5	0.457	132.7	3.31	1 260	40.0	—
HD-63	50	0.609	0.569	2.45	0.54	124.5	12.5	1.4	0.547	91.5	3.49	5 280	42.5	19.9
HD-64	"	0.605	0.565	2.46	0.54	126.1	11.1	1.3	0.546	92.0	3.52	6 130	40.0	19.9
HL-61	"	0.819	0.723	5.28	0.77	109.0	30.0	10.3	0.545	86.3	3.18	1 890	40.0	20.6
HL-62	"	0.824	0.735	4.85	0.54	104.2	26.0	10.4	0.555	84.7	3.08	1 610	40.0	20.7
HD-55	25	0.611	0.578	2.10	0.31	77.1	8.5	-0.65	0.588	50.7	4.08	4 950	17.0	—
HD-56	"	0.618	0.583	2.26	0.39	76.1	8.0	-0.68	0.593	50.4	4.04	5 370	17.5	23.0
HL-58	"	0.795	0.735	3.35	—	62.3	19.5	4.40	0.659	45.8	3.49	1 620	22.0	25.7
HL-59	"	0.826	0.764	3.37	0.54	62.6	21.0	5.53	0.667	45.9	3.50	1 920	25.0	24.9
LD-16	5.0	0.627	0.616	0.75	0.35	17.6	3.9	-1.0	0.631	10.9	4.52	1 260	7.9	—
LD-21	"	0.616	0.605	0.77	0.39	16.9	4.0	-1.0	0.620	10.6	4.38	1 210	9.5	—
LL-43	"	0.830	0.784	2.52	1.18	11.8	8.0	0.5	0.775	8.93	3.36	670	9.6	—
LL-44	"	0.831	0.796	1.88	0.65	11.8	8.3	0.5	0.787	8.93	3.36	590	10.7	—
LD-10	3.0	0.622	0.613	0.57	0.16	11.4	4.3	-1.4	0.636	6.80	4.80	710	10.1	—
LD-11	"	0.624	0.608	1.03	0.15	11.3	4.6	-1.5	0.631	6.77	4.77	590	13.1	—
LL-45	"	0.817	0.793	1.35	0.57	6.99	6.1	0	0.793	5.33	3.33	640	11.0	—
LL-46	"	0.816	0.785	1.71	0.65	7.00	7.3	0.3	0.779	5.33	3.33	640	10.6	—
LD-2	1.0	0.604	0.600	0.25	—	4.01	3.2	-1.6	0.625	2.33	5.00	630	12.5	—
LD-4	"	0.609	0.604	0.27	—	4.21	4.9	-1.9	0.634	2.40	5.20	280	12.3	—
LL-48	"	0.839	0.821	1.01	0.32	2.40	4.0	0.2	0.816	1.80	3.40	300	10.4	—
LL-49	"	0.832	0.812	1.08	0.32	2.41	4.9	0.2	0.809	1.80	3.40	400	11.3	—

または

でなければならない。式(5)は、定性的には、最大軸差応力を示したときの試料粒度で検証することができよう。すなわち、 $\tau_{cL75}$  が  $\tau_{cD75}$  より大きいとすれば、初期ゆるづめ試料の粒度は、最大軸差応力時に、初期密づめ試料のそれより細くなっていると考えるのが妥当である。図-7 は、 $\sigma_3 = 75 \text{ kg/cm}^2$  および  $100 \text{ kg/cm}^2$  の場合について調べたせん断試験後の試料粒度である。図中表に示したように供試体に与えたせん断軸ひずみ  $\epsilon_t$

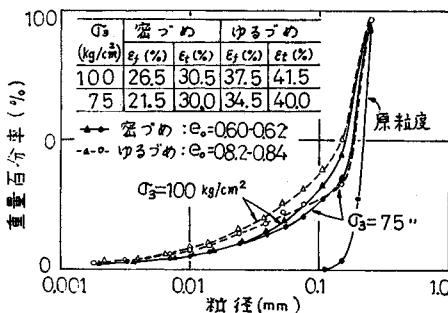


図-7 せん断試験後の試料粒度

は、その供試体の最大軸差応力時のひずみ  $\epsilon_f$  より数%ずつ多い。したがって図-7 の粒度は式(5)に関連して知りたい粒度そのものではない。しかしながら、この図から、初期ゆるづめ試料の最大軸差応力時の粒度は初期密づめのそれより細かいことはほぼ明らかである。また、別のデータによって、初期密づめ試料はせん断によって比較的粗く破碎され、初期ゆるづめのそれは細粒分が多くなるような破碎を受けていることが確かめられている。このことは、せん断過程における両者の破碎のされ方の違い<sup>25)</sup>を示しているものと思われる。

次に、拘束圧  $\sigma_3$  が  $150 \text{ kg/cm}^2$  以上  $500 \text{ kg/cm}^2$  までの軸差応力～軸ひずみ～体積ひずみの関係を図-6 に示す。拘束圧が高くなるに伴い、初期密づめと初期ゆるづめの  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon \sim V_s/V_c$  関係曲線の形は次第に類似のものとなる。この拘束圧の範囲で最も注目すべきことは、初期ゆるづめ供試体の最大軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  が初期密づめのそれを上まわることである。両者の間には、また、次の関係も認められる。すなわち、軸ひずみが小さい間は、初期密づめ供試体の方が大きな軸差応力を示すが、軸ひずみがある値を越えると逆に初期ゆるづめ供試体の軸差応力が高くなる。 $\sigma_3 = 125 \text{ kg/cm}^2$  以下においても同様な傾向は見られるが、初期密づめ供試体の軸差応力が最大値に達する前に両者の関係が逆転するものが  $\sigma_3 = 150 \text{ kg/cm}^2$  以上の場合の特徴といえる。これは、各ひずみ段階においてモビライズされるせん断抵抗が、初期密度が異なることによって差のあることを意味している。現象的には、両者の関係は、低拘束圧において、ダイレクトする密づめ砂とダイレクトしないゆるづめ砂の関係に似ている。しかし、高拘束圧下ではせん断中に供試体体積は減少する一方であるから、前述の両者の差異は、やはりせん断過程における粒子の破碎のされ方（もしくは破碎量）の違いにその説明を求めるのが妥当と思われる。 $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$  の場合について式(2)および(3)を適用すると、 $\tau_{\max D_{500}} < \tau_{\max L_{500}}$  であるから、

$$\tau_{dD_{500}} + \tau_{cD_{500}} < \tau_{dL_{500}} + \tau_{cL_{500}} \dots \dots \dots (6)$$

また、図-6 に示されるように、 $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$  の場

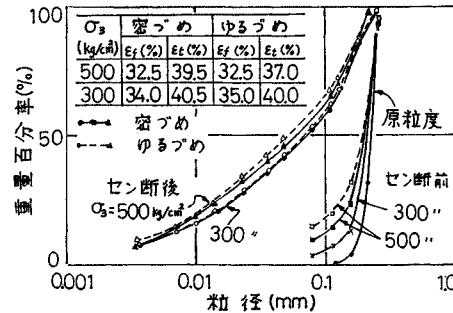


図-8 せん断試験前後の試料粒度

合の  $\epsilon \sim 4 V_s/V_c$  曲線は初期密度の大小にかかわらず同じ軌跡をたどるから  $\tau_{dD_{500}} = \tau_{dL_{500}}$  であり、したがって、

$$\tau_{cD_{500}} < \tau_{cL_{500}} \dots \dots \dots (7)$$

となって式(5)と同じ結果が得られる。 $\sigma_3 = 300 \text{ kg/cm}^2$  および  $500 \text{ kg/cm}^2$  の場合について、図-7 と同様にせん断による粒度変化を調べた結果を図-8 に示す。わずかではあるが、初期ゆるづめ供試体の粒子破碎量が多いことがわかる。図中表に示されるように、最大軸差応力を過ぎて余分にかけられた軸ひずみは、初期密づめ供試体において多い。もし最大軸差応力を示すときの試料粒度で比較するならば、図-8 に示される初期密づめとゆるづめの粒度曲線の開きはさらに大きくなると思われる。

式(4)と式(6)から次のようにいえよう。 $\sigma_3 = 75 \text{ kg/cm}^2$ においては、初期密づめと初期ゆるづめ供試体の負のダイレイタンシー効果の差を、粒子破碎および粒子再配列効果の差でちょうど補って最大軸差応力が一致している。 $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$ においては、ダイレイタンシー効果の差がなくなり、粒子破碎および粒子再配列効果の分だけ、初期ゆるづめ供試体の最大軸差応力が大きくなっている。拘束圧が  $75 \text{ kg/cm}^2$  と  $500 \text{ kg/cm}^2$  の間にあるときは、ダイレイタンシー効果と粒子破碎および再配列効果の関係は、上述の中間的なものと考えられる。また、 $500 \text{ kg/cm}^2$  を越える高い拘束圧の下では、初期間げき比の影響は消失するであろう。しかし、すべての点において初期間げき比の影響を消失せしめる拘束圧とは、圧縮段階において、間げき比のみならず粒度をも同一にさせるような圧力でなければならない。平均主応力が  $900 \text{ kg/cm}^2$  に近い値に達した場合 ( $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$  の場合、表-2) でさえ、なお粒度および最大軸差応力に初期間げき比の影響が表われていることからみて、標準砂のような砂の初期間げき比の影響を完全に消失せしめる圧力は、おそらく  $1000 \text{ kg/cm}^2$  を上回るものであると考えられる。

### (3) モールの応力円

モールの応力円は図-9 に示すとおりである。図-9

(a) は、拘束圧が  $5 \text{ kg/cm}^2$  以下の場合を中心に描いたものである。密づめおよびゆるづめの両者とも、低圧域の包絡線は原点を通る直線となり、おのおのの勾配は  $40.6^\circ$  および  $33.0^\circ$  であった。密づめ供試体の包絡線は、垂直応力  $\sigma$  が  $10 \text{ kg/cm}^2$  に達する前にすでに初期勾配を離れるが、Bishop ら<sup>13)</sup>およびLee ら<sup>14)</sup>のデータでも同様な傾向が見られる。垂直応力の増大に伴って密づめ砂の破壊包絡線が低下するのは、すでに多くの文献で指摘されているように、正のダイレイタンシー効果が消失していく過程である。次に、初期密づめ供試体についての試験拘束圧全体にわたる破壊包絡線を図-9(b)に示す。Vesić ら<sup>15)</sup>も示したように、高拘束圧域におけるせん断抵抗角は、ゆるづめ試料が低拘束圧域で示す角度  $33.0^\circ$  にきわめて近い。しかし、少しくわしく見ると、この包絡線は非常になめらかに変動していることがわかる。原点通り勾配  $33.0^\circ$  の直線をかりに基準線と呼ぶことにすると、包絡線と基準線は A 点で交差し、B 点で最も離れ、C 点で接する。C 点を越えると包絡線は基準

線を離れて低下していく傾向にある。一方、初期ゆるづめ供試体の広範な圧力域での包絡線を図-9(c)で見ると、勾配  $33.0^\circ$  の基準線を近接していることは前述の場合と同様であるが、次のような変動をみせている。包絡線は、原点～D 点間では基準線と重なり、D～F 間で低下し、F～H 間では逆に基準線を上まわる。G 点を過ぎると初期密づめの場合と同様に包絡線は再び低下はじめる。上述のように、高い垂直応力の下においても、初期間げき比の影響は消えていない。すなわち、初期ゆるづめ供試体の包絡線の方が基準線から低下する圧力範囲、および低下量が少なく(A～C に対して D～F)，しかもさらに高い圧力範囲では基準線を上まわる(F～H)。これらの現象は、今後せん断過程におけるダイレイタンシー効果および粒子破碎と粒子再配列効果を定量的に検討することにより説明できるものと考える。C 点および G 点を境にして両包絡線は低下していくが、両線がそのまま Skempton<sup>15)</sup> のいう鉱物の固体としての内部せん断抵抗角  $\phi$  (angle of intrinsic shearing resistance  $\phi=3\sim10^\circ$ ) につながるかどうかも今後の検討にまたねばならない。

高拘束圧を受ける砂の破壊包絡線に関しては、まだ明らかにすべき点も多い。にもかかわらず、筆者らの実験結果および Vesić ら<sup>15)</sup>のそれから、次のことがいえそうである。標準砂のような砂の高拘束圧下におけるせん断抵抗角は、非常にゆるい状態の同試料について、低拘束圧下で求めたせん断抵抗角とほぼ同じである。言葉を変えれば、非常にゆるい状態の砂について低拘束圧でせん断抵抗角を求めれば、同じ試料の高圧下(標準砂については  $\sigma=100\sim600 \text{ kg/cm}^2$ )におけるせん断抵抗角を推定することができる。

#### (4) 試験試料の顕微鏡観察

圧縮およびせん断による粒子破碎状況を顕微鏡によって観察した。細粒分を含めた試料全体の写真は、たとえば写真-3(f)に見られるように非常に複雑である。そこで比較を容易にするため、ここでは粒子破碎の様子がよく現われている 2 つの粒度区分(粒径  $D > 177 \mu$  および  $177 \mu > D > 105 \mu$ 、試料の中から水ブルイによって取り出した)の試料についてのみ検討する。なお、ここにあげた写真は、それぞれ、同一試料について写した 5 枚の写真の中で、最も平均的と思われるものである。まず、 $500 \text{ kg/cm}^2$  の等方圧力で圧縮された試料について見ると、初期密づめ試料(c)には角ばった粒子が多く形状も原粒度(a)よりもやや複雑である。一方、初期ゆるづめ試料(b)では丸味を帯びたものが目立つ。後者は、前者に比べて粒子接触数が少ないので破碎され易い部分は破碎され、また、圧縮過程における粒子移動距離が前

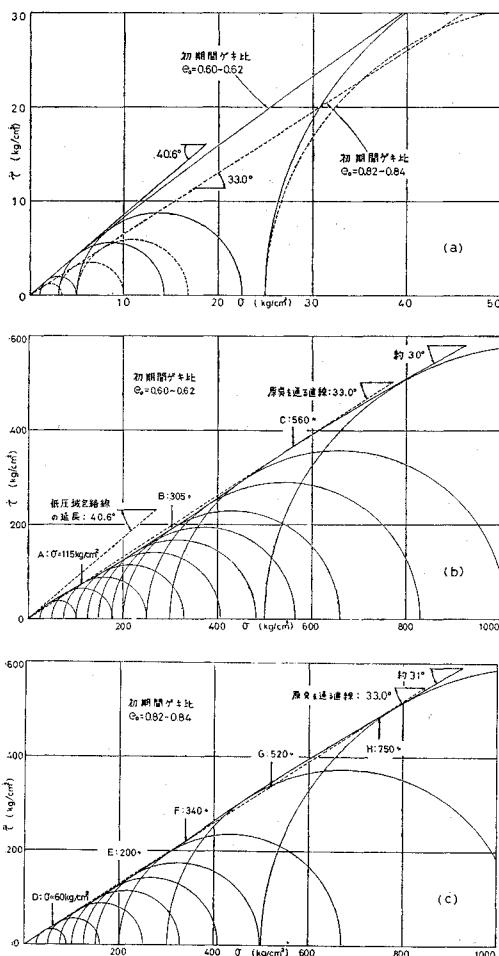


図-9 モールの応力円

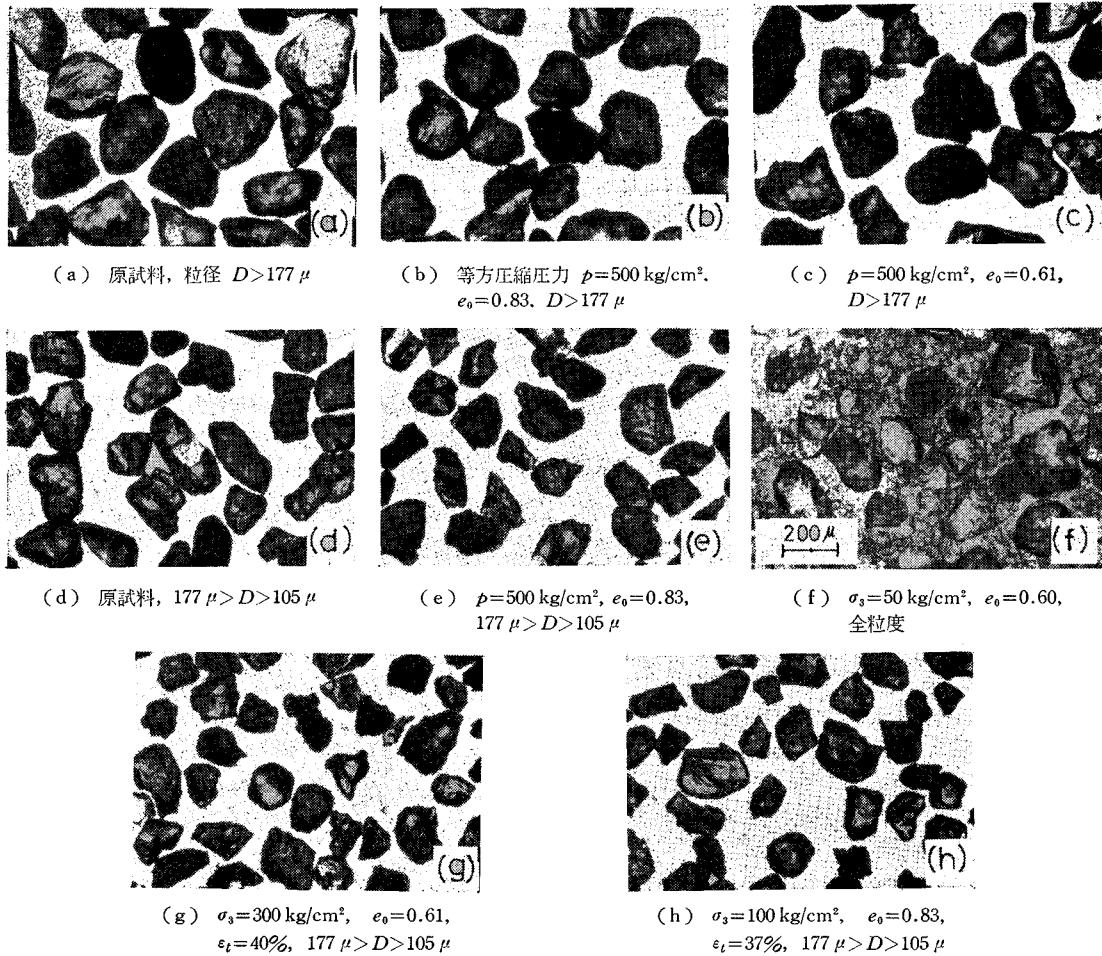


写真-3 実験試料の顕微鏡写真

者より長いので摩滅作用も多く受けたものと思われる。177  $\mu$  以下 105  $\mu$  以上の試料では、原試料 (d) に比べて鋭い角をもち、複雑な形状の粒子が多い (e)。 $p = 300 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力を受けた試料は、初期密度の大小にかかわりなく (e) とよく似た形状をしている。しかし、 $p = 100 \text{ kg/cm}^2$  以下の場合の試料では原試料 (d) と区別がつかない。(g) および (h) はおのおのの条件でせん断されたものである。単に等方圧力  $p = 500 \text{ kg/cm}^2$  を受けたもの (e) に比べて、突出した部分が少なく円形に近い形の粒子が多いように見受けられる。

## 5. まとめ

これまでに述べた実験結果ならびにその考察から、飽和した豊浦標準砂の高拘束圧下における圧縮特性ならびに排水せん断特性について次のことが明らかにされた。

(1) 500  $\text{kg/cm}^2$  までの高い等方圧縮力を受けた標準砂は、粘土の二次圧密に似た圧縮特性を示し、しかも、

その特性は圧縮圧力および初期間げき比に支配される。初期間げき比の大小にかかわりなく、圧縮後の間げき比を同一にするためには、500  $\text{kg/cm}^2$  以上の等方圧縮圧力を必要とする。すなわち、500  $\text{kg/cm}^2$  以下の等方圧力のもとでは、初期間げき比の大きな供試体は、初期間げき比の小さいものに比べて高位の構造を保っている。また両者が同一の間げき比に達したとき、初期間げき比の大きなものはより多くの粒子破碎を受けている。これらの現象は、圧縮過程における粒子の移動距離の違い、および粒子が移動する際に受ける破碎のされ方の差異で説明される。さらに、等方圧によって、初期間げき比の異なる同一試料を間げき比のみならず粒度をも同一にせしめるには、少なくとも 1000  $\text{kg/cm}^2$  以上の非常に高い圧力が必要であると考えられる。

(2) 拘束圧 25  $\text{kg/cm}^2$  における軸差応力、軸ひずみおよび体積ひずみの関係を示す曲線の形は、低拘束圧におけるそれと類似で、初期密め供試体はせん断中に体積を膨張する。しかし、拘束圧が 50  $\text{kg/cm}^2$  になる

と、初期密づめ供試体のせん断中の体積変化は収縮する一方である。したがって、標準砂の限界拘束圧  $\sigma_{3c}$ <sup>16)</sup> は 25 kg/cm<sup>2</sup> と 50 kg/cm<sup>2</sup> の間に存在する。

(3) 拘束圧が 75 kg/cm<sup>2</sup> から 125 kg/cm<sup>2</sup> の範囲では、初期密づめ供試体と初期ゆるづめ供試体とで同じ最大軸差応力を示す。特に拘束圧 75 kg/cm<sup>2</sup> の場合についてみると、式(1)が成立つとすれば、式(4),(5)が成立する。すなわち、初期間げき比の違いによる負のダイレイタンシー効果の差は、粒子破碎および粒子再配列効果の差でちょうど補われている。せん断試験後の試料程度を調べたところ、初期ゆるづめ供試体の方がより多く細粒化されており前述のことを裏付けていると考えられる。

(4) 拘束圧が 150 kg/cm<sup>2</sup> 以上 500 kg/cm<sup>2</sup> 以下の圧力範囲においては、初期ゆるづめ供試体の最大軸差応力は、初期密づめ供試体のそれを上まわる。特に  $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$  の場合は、式(2),(3)のダイレイタンシー効果の項は、初期密づめ供試体と初期ゆるづめ供試体と同じである。したがって、上述の最大軸差応力に関する両者の差は、せん断過程における粒子破碎および粒子再配列効果の差を表わすものと考えられる。試験後試料の粒度試験の結果は、上記のことを裏付けている。拘束圧が 75 kg/cm<sup>2</sup> と 500 kg/cm<sup>2</sup> の間にあるときは、ダイレイタンシー効果と粒子破碎および粒子再配列効果の関係は、両者の中間的なものと考えられる。

(5) 最大軸差応力を示すときの軸ひずみ  $\epsilon_f$  は、図-4~6 に見られるように、拘束圧の増大に伴って変動し、しかも初期間げき比が異なると変動の仕方も変わる。すなわち、初期密づめの場合、拘束圧が 5 kg/cm<sup>2</sup> と 25 kg/cm<sup>2</sup> の間で  $\epsilon_f$  は最小となり、あとは拘束圧  $\sigma_3$  の増加に伴って大きくなる。一方、初期ゆるづめ供試体では、拘束圧  $\sigma_3 = 150 \text{ kg/cm}^2$  までは  $\sigma_3$  とともに  $\epsilon_f$  は大きくなるが、 $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$  以上においては逆に次第に小さくなって、初期密づめ供試体の  $\epsilon_f$  に接近していく。最大軸差応力時の軸ひずみの大きさは、軸差応力～軸ひずみ曲線の形と関連するものであり、先述のような  $\epsilon_f$  値の変動は、せん断過程におけるせん断抵抗のモビライズのされ方が、初期間げき比および拘束圧の大きさによって変わるものであることを示しているといえよう。

(6) 広範な圧力範囲に及ぶモールの破壊包絡線を示し、初期間げき比の違いが高い垂直応力にいたるまで微妙な影響を及ぼすことを明らかにした。しかし、垂直応力が 100 kg/cm<sup>2</sup> から 600 kg/cm<sup>2</sup> の範囲においては、モールの破壊包絡線は、初期間げき比の大小にかかわらず、低圧域におけるゆるづめ供試体の包絡線（直線）に沿って変動することがわかった。このことから、標準砂

のような砂の高圧域におけるせん断抵抗角は、非常にやるい状態の同一試料が低圧域で示すせん断抵抗角から推定することができるといえよう。

## 6. あとがき

本文においては、標準砂の高拘束圧下における圧縮特性および排水せん断特性に及ぼす初期間げき比の影響を明らかにすることを試みた。その結果、標準砂のように硬くてしかもあまり角ばっていない砂においては、500 kg/cm<sup>2</sup> というかなり高い拘束圧の下でも、なお初期間げき比の影響があることを明らかにした。そして、初期間げき比の大きな供試体の方が、高拘束圧の下ではむしろ高い最大軸差応力を示すのは、圧縮過程およびせん断過程における粒子の破碎のされ方の違いに起因していることを定性的に説明できたものと考える。すでに行なわれたいいくつかの研究と、今回筆者らが行なった研究から、高拘束圧下における砂の力学的性質を大きく支配するのは、粒子の破碎特性であることは明らかである。したがって、粒子の破碎特性に及ぼす諸要因、粒子破碎強度、形状、粒度、粒径その他が変われば、力学的性質も当然異なるであろう。今後これらの諸要因が砂の圧縮特性および高拘束圧下におけるせん断特性におよぼす影響を逐次検討していきたい。

本研究の実験の一部を九州大学工学部大学院 中村稔君（現在新日本製鉄（株））に手伝っていただいた。また、実験に用いた高圧三軸圧縮試験機を製作するにあたり、工業技術院地質調査所星野一男博士から有益なご助言を賜わった。さらに、試験機の試作・改良に際して（株）円井製作所技術部の積極的な協力を得た。ここに記して深く謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) Vesić, A.S. and Clough, G.W.: Behavior of Granular Materials under High Stresses, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM 3, 1968.
- 2) Karman, Th. von : Festigkeitsversuche unter Allseitigem Druck, Ziet. Vereines Deutsch. Ing., Band 55, Nr. 42, 1911.
- 3) Bridgman, P.W. : The Failure of Cavities in Crystals and Rocks under Pressure, Am. Jour. of Sci., Vol. 45, 1918.
- 4) Griggs, D.T. : Deformation of Rocks under High Confining Pressures, The Jour. of Geology, Vol. XLIV, 1936.
- 5) Handin, J. : An Application of High Pressure in Geophysics-Experimental Rock Deformation, Trans. ASME, Vol. 75, 1953.
- 6) Handin, J., and Harger, R.V. : Experimental Deformation of Sedimentary Rocks under Confining Pressure-Tests at Room Temperature on Dry Samples, Bull. Am. Assoc. Pet. Geologists, Vol. 41, 1957.

- 7) Rock Deformation, Memoir 79, Geological Society of America, 1960.
- 8) Terzaghi, K., and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, 1948.
- 9) Roberts, J.E., and de Souza, J.M.: The Compressibility of Sand, Proc. ASTM, Vol. 58, 1958.
- 10) Hall, E.B., and Gordon, B.B.: Triaxial Testing with Large-Scale High Pressure Equipment, Laboratory Shear Testing of Soils, STP No. 361, ASTM, 1963.
- 11) Hirschfeld, R.C., and Poulos, S.J.: High Pressure Triaxial Tests on a Compacted Sand and an Undisturbed Silt, Laboratory Shear Testing of Soils, STP No. 361, ASTM, 1963.
- 12) De Beer, E.E.: The Scale Effect in the Transposition of the Results of Deep Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundations, Geotechnique, Vol. 13, No. 1, 1963.
- 13) Bishop, A.W., Webb, D.L., and Skinner, A.E.: Triaxial Tests on Soil at Elevated Cell Pressure, Proc. 6 th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 1, 1965.
- 14) Bishop, A.W.: The Strength of Soils as Engineering Materials, Geotechnique, Vol. 16, 1966.
- 15) Skempton, A.W.: Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks, Proc. Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworth, London, 1960.
- 16) Lee, K.L., and Seed, H.B.: Drained Strength Characteristics of Sands, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM 6, 1967.
- 17) Rowe, P.W., and Barden, L.: Discussion on Drained Strength Characteristics of Sands, Proc. ASCE, Vol. 95, No. SM 1, 1969.
- 18) Lee, K.L., and Farhoomand, I.: Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression, Canadian Geotechnical Jour. Vol. IV, No. 1, 1967.
- 19) Vesić, A.S., and Barksdale, R.D.: On Shear Strength of Sand at Very High Pressures, Proc. Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils, STP No. 361, ASTM, 1963.
- 20) Barden, L., Ismail, H., and Tong, P.: Plane Strain Deformation of Granular Materials at Low and High Pressures, Geotechnique, Vol. 19, No. 4, 1969.
- 21) 三浦・山内・中村: 高拘束圧下における砂のせん断特性について, 第25回土木学会年次学術講演会講演集, III-31, 昭45。
- 22) Rowe, P.W., and Barden, L.: Importance of Free Ends in Triaxial Testing, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM 1, 1964.
- 23) 土質試験法改訂編集委員会: 土質試験法(第1回改訂版), 土質工学会, 昭44。
- 24) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, 土の圧縮と圧密, 技報堂, 昭41。
- 25) 三浦・山内: 標準砂の高拘束圧下におけるせん断特性, 土木学会西部支部昭和45年度研究発表会論文集, 昭46-2。
- 26) King, R.F., and Tabor, D.: The Strength Properties and Frictional Behaviour of Brittle Solids, Proc. Roy. Soc. A-223, 1954.
- 27) 土のせん断試験の基礎的研究編集委員会: 土のせん断試験法に関する基礎的研究, 土質工学会, 昭43。

(1971.3.8・受付)