

III-31 高拘束圧下における砂のせん断特性について

九州工業技術試験所 正員 ○三浦哲彦
九州大学 工学部 正員 山内豊聡
同 大学院 学生員 中村 総

1. まえがき 高圧下の材料特性に関する研究においては、材料の違いや目的に応じて興味の対象となる圧力範囲は当然異なる。土質力学と共通な面を有する構造地質学においては、岩石を対象にして拘束圧の範囲を $500 \sim 3000 \text{ kg/cm}^2$ にとることが多いようである。¹⁾土質工学の立場からは、特殊な場合を除いて、試験室における実験拘束圧は 500 kg/cm^2 程度を上限としてよいのではないかと考える。これまでに、Vesic & Clough²⁾そのほかによって、砂は拘束圧数 10 kg/cm^2 でのせん断によってかなり破砕されさらに高い拘束圧のもとでは、初期間ゲキ比の影響およびタイラタンシー効果が消失し、塑性的挙動を示すことが明らかにされている。しかし、高拘束圧下における土の挙動についてのデータはまだ十分に蓄積されたとはいえず、明らかにすべき点も多いように思われる。筆者らは、土のような材料の高拘束圧下における諸性質を調べていこうとするものであるが、本報は、鋭利砂のせん断試験結果(試料豊浦標準砂、条件圧密排水、 $\sigma_3 = \text{一定}$)について報告するものである。

2. 試験装置の概要 基本的には低圧用三軸圧縮試験機と変わらない。a) 三軸室：内径 80 mm 、肉厚 40 mm 、材質 S45C、供試体寸法 $50 \text{ mm}^{\phi} \times 125 \text{ mm}^H$ 。b) ピストンおよび上下加圧板： 50 mm^{ϕ} 、材質 SC M-21。c) 高圧シール：すべて Oリング。d) メンブレン：厚さ $1.9 \sim 2.1 \text{ mm}$ 生ゴムスリーブ。側圧 500 kg/cm^2 における試料への液もれは $0.08 \text{ cm}^3/\text{hr}$ 以下。e) 側液：約 20% のグリセリン溶液、動粘度 $= 1.8 \sim 2.2 \text{ cp}$ 。f) 高圧発生法：増圧比 $1:100$ のエアハイドロポンプによる。最大 500 kg/cm^2 。圧密中はポンプの圧力変動 $\pm 0.8\%$ を許したが、せん断中は一次圧調節器の補助操作で $\pm 0.3\%$ 以下に抑えた。g) ピストン摩擦力：ピストンが供試体に接触するまでの貫入抵抗を基準値にとり、接触後の荷重増加=軸差力としてピストン摩擦力を計算から除いた。

3. 試験方法 a) 供試体作製：密な供試体は16層 $\times 10$ 回で突固め、真空中で供試体内空気を除いたのち脱気水を供給、ゆるぎめは従来の方法に準じた。ともに自立のため 0.07 kg/cm^2 の負圧をかけた。 $e_{\text{dense}} = 0.63 \sim 0.65$ 、 $e_{\text{loose}} = 0.78 \sim 0.80$ 。b) 載荷速度：すべて $0.5\%/min$ とした。予備試験によれば、載荷速度が $2\%/min$ を越えると、軸差応力は $1\%/min$ 以下の場合に比べて低下する。c) 軸ヒズミ： $\varepsilon = 45 \sim 48\%$ まで与えた。一部の供試体は $\varepsilon = 20, 30\%$ で止め、供試体形状等の観察にあてた。

4. データの整理 a) 口紙厚さの変化：供試体端面に用いた合計6枚の口紙厚さは、圧力によって図-1のように変化するを考慮した。b) 断面補正：軸ヒズミが30%以下のときは供試体形状はほぼシリンダ状と考えてよい(写真-1)。軸ヒズミがそれを越えると急速にタル状に変形していくが、本報のデータはすべて供試体形状はシリンダ状と考えて断面補正を行なった。

5. 実験結果 (1) 圧密段階 a) 100% 圧密に要する時間(図-2)：従来使われている意味での圧密と異なり、100% 圧密に要する時間は圧密

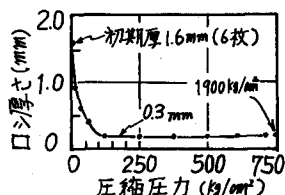
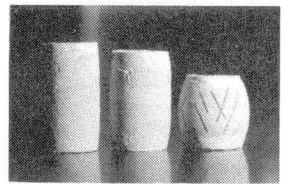


図-1 口紙の厚さ変化

圧力に支配される。図からつぎのことが読みとれる。圧密圧が 100 kg/cm^2 以下では、粒子は幾何学的に安定な配列を選択しつつ、主として粒子接触部における局部的破碎を受ける。 100 kg/cm^2 から 200 kg/cm^2 の間の圧力で粒子内部に及び破碎を受けるようになり、新しい粒度構成に応じた安定な配列を求めようとする。その過程で副次的破碎をとまなうものと考えられる。圧力が高いほど圧密終了までの時間が長くなる傾向にあることは、粒子破碎-再配列が繰返されながら順次進行して所定圧力に応じた配列に落ち着くことを示唆するものと思う。b) 圧密圧力と体積ヒズミの関係(図-3)：図-2と同様に、圧密圧力が 100 kg/cm^2 と 200 kg/cm^2 の間に変曲点が認められる。この変曲点は、Vesic²⁾らのデータには見出せないが、それが豊浦標準砂のような均等な砂に特有なものかどうかは今後の検討に待たねばならない。なお、圧密中に試料中へ漏れた側液の量は、 300 kg/cm^2 以上のとき $0.3 \sim 0.8 \text{ cc}$ 、 100 kg/cm^2 以下で 0 であり、個々のデータからその量を差引いた。

(2) セン断段階 a) 軸ヒズミと軸差応力および体積ヒズミの関係(図-4)：図は初期間ゲキ比が密な場合を示すものであるが、低圧におけるセン断特性と比較するとき、つぎのような点で大きな違いのあることがわかる。i) 最大軸差応力に達する軸ヒズミはきわめて大きい。その値は、 $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$ で最も大きく、拘束圧がそれより高くなっても低くなっても減少する傾向にある。ii) 最大軸差応力付近の曲線の形は、 $\sigma_3 = 50 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で拘束圧が高いほど鋭い。iii) 曲線のたち上りは、 $\sigma_3 = 50 \text{ kg/cm}^2$ を除いて、四者($\sigma_3 = 100, 200, 300$ および 500 kg/cm^2) はほぼ同じ勾配を有して軸差応力 $80 \sim 110 \text{ kg/cm}^2$ に達し、そののち拘束圧に応じた勾配をとる。これが何に起因するものであるか明らかでないが、高拘束圧下における岩石あるいは金属³⁾についても同じような例が見られる。iv) 体積ヒズミはほぼ正(または 0)で膨張する傾向はまったくない。v) 体積ヒズミは $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$ で最も大きく、拘束圧が高くなるとかえって減少する。しかし、セン断後の最終期間ゲキ比は $\sigma_3 = 200, 300$ および 500 kg/cm^2 でそれぞれ

0.32, 0.26 および 0.24 であった。vi) $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$ 以上では、ある軸ヒズミに達したあと体積変化はなくなる。等体積セン断に入ったときの軸ヒズミは最大軸差応力に達したときのヒズミに関連性はないようである。 $\sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2$ 以下では、セン断を止めたところでおお体積を減少させている。



(1) $e = 20\%$ (2) 30% (3) 45%
写真-1 供試体形状変化
($\sigma_3 = 300 \text{ kg/cm}^2$)。③の斜線はスリップラインを示す。

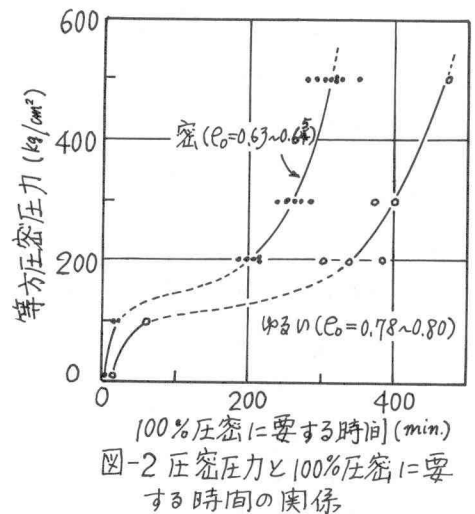


図-2 圧密圧力と100%圧密に要する時間の関係

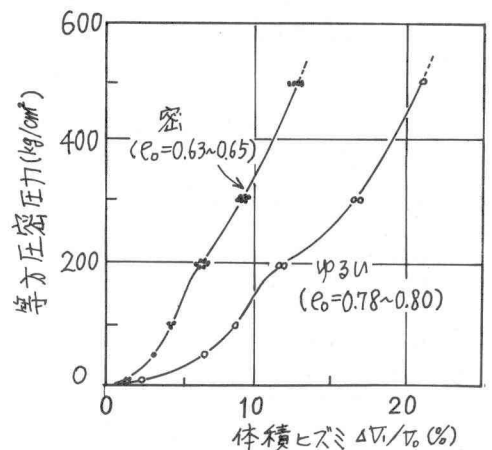


図-3 圧密圧力と体積ヒズミの関係

vi)前記iv), v)の観察からつぎのようにいえよう。すなわち、ある拘束圧のもとで軸ヒズミを十分に与えるとお互の間ゲキ比に達しその後は体積を減じない。この最終間ゲキ比は、 $\sigma_3=200\sim500\text{ kg/cm}^2$ の範囲で、拘束圧が高いほど小さい。 $\sigma_3=100\text{ kg/cm}^2$ 以下については今後検討したい。図-4に関して述べた以上の諸量は、 σ_3 を除いて、Vesic²²⁾の実験結果と傾向を同じくするものである。

㊦モールの応力図(図-5): 拘束圧が $10\sim100\text{ kg/cm}^2$ のときのデータが十分でないので正確なところはわからないが、すでに多くの人が報告しているように、拘束圧が大きくなると破壊包絡線の傾きは小さくなるようである。傾きが減少するのは粒子の破碎によるものと一般に考えられている。

㊧試験後供試体についての調査 ㊦の圧密およびせん断による

粒度変化(図-6): 圧密による粒子破碎は、せん断時に比べてかなり少ない。^(写真-2)圧密圧力が 100 kg/cm^2 以下では原粒度との粒度の差はほとんどない。5(1)項でもみてきたように、圧密圧力が 100 kg/cm^2 を超えたときにはじめて粒子内部におよぶ破碎が生じるものと考えられる。破碎量が急に変わる圧力は、粒子の堅さや初期粒度によって当然異なるであろう。つぎに、図-6中の軸ヒズミを与えたのちの粒度は供試体全体の平均的粒度を示すものであるが、高い拘束圧でより多く粒子破碎が生じているのがわかる。 $\sigma_3=100\text{ kg/cm}^2$ のときの平均主応力はおおよそ 200 kg/cm^2 であるが、これを 500 kg/cm^2 の圧密圧力のみによるものと比較しても粒子破碎量はかなり多い。このことから、高拘束圧下でのせん断における粒子破碎は、せん断変形にともなう粒子相互の摩擦に大きく支配されると考えることができよう。

㊨せん断供試体のスリッパラインについて: $\sigma_3=100\text{ kg/cm}^2$ 以上の拘束圧のもとで45%以上軸ヒズミを与えた供試体は、側面に

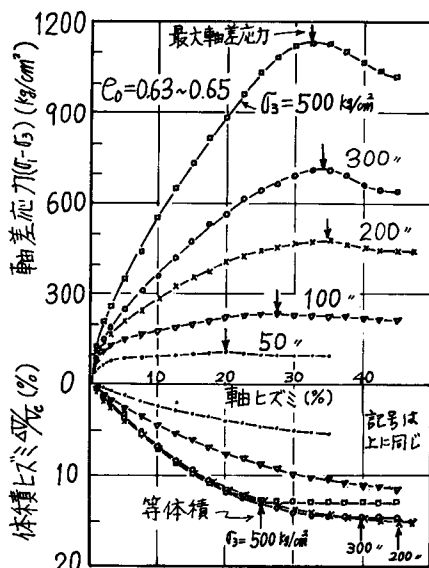


図-4 軸ヒズミと軸差応力および体積ヒズミの関係(圧密排水)

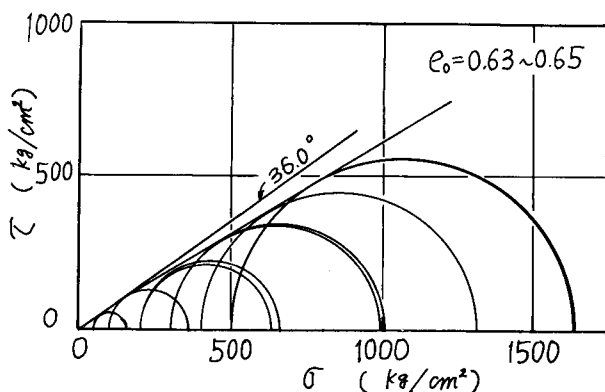


図-5 モールの応力図

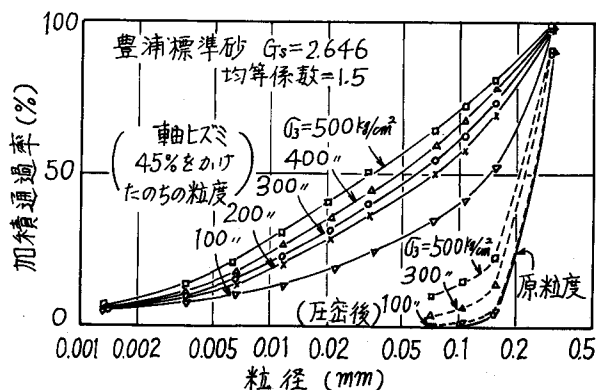


図-6 圧密およびせん断による粒度変化

互いに交わる二方向のスリッパライン群が観察される。このスリッパラインはゴムスリーブ内面に明瞭な傷として残っている。図-7はその一部を写しとったものである。その傾きは、多くは 68° 〜 72° の間にあり、拘束圧の影響はほとんど認められない。

6. 実験結果のまとめ 実験結果を要約するとつぎのようになる。

a) 100 kg/cm^2 以下の等方圧密圧力のもとでは粒子破碎はきわめて小さく、圧密特性は低圧におけるそれに近い。 100 kg/cm^2 と 200 kg/cm^2 の間に標準砂の破碎を急に増す圧密圧力が存在する。b) 100%圧密に要する時間は圧密圧力に支配される。それは破碎による粒子再配列が接近し行なわれながら最終の配列に到達するためと思われる。

c) 高拘束圧下におけるせん断特性はつぎの点で低圧におけるそれと異なる。最大軸差応力に達する軸ヒズミはきわめて大きく、拘束圧によって差がある。せん断中の体積変化は買(膨張)にならない。軸ヒズミを十分に与えると拘束圧力に応じた最終間ゲキ比に達する。

この間ゲキ比は拘束圧が高いほど小さく、 $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$ の場合、 $e = 0.24$ で砂岩の空ゲキ率の範囲に入る。d) せん断による粒子破碎は著しく、拘束圧が高いほどその量は多い。これはせん断変形にともなう粒子相互の摩擦作用によるものと考えられる。e) $\sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2$ 以上でせん断による多数のスリッパラインが観察されるが、その傾きは拘束圧($100 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$)の大きさに無関係のようである。

7. あとがき 筆者らの実験は緒についたばかりで、本報では、Vesicéらの行なった実験の一部を標準砂について検証したにとどまった。また、高压であるために生じる実験技術上の問題も少なくない。その解決をはかりながら、高拘束圧下における土の諸性質について検討を続ける予定である。

謝辞 高压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氏の多大な指導を仰いだ。また、試験機製作関係者の積極的協力を得た。記して深く謝意を表する次第である。

文献

- 1) Griggs, D. & Handin, J.: Rock Deformation, The Geological Society of America Memoir 79, 1960
- 2) Vesicé, A.S. & Clough, G.W.: Behavior of Granular Materials under High Stresses, Proc. ASCE, SM3, 1968, pp.661~698
- 3) 中井ほか: 高压下での材料の機械的性質について, 高压力, Vol.7, No.2, 1969, pp.1547~1552

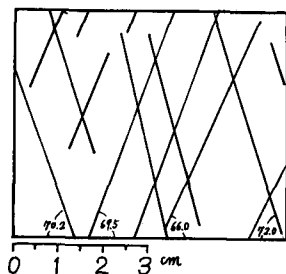
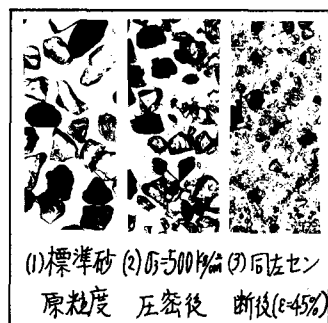


図-7 ゴムスリーブ内面のキズ
(スリッパラインを示す、 $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$)



(1)標準砂 (2) $\sigma_3 = 500 \text{ kg/cm}^2$ (3)同左せん断後($e = 45\%$)
原粒度 圧密後

写真-2 試料の顕微鏡写真