

東北大学 学生員 ○永見 健二
東北大学 工学部 飛田 善雄

1. はじめに

砂の様な粒状体の変形、破壊挙動の微視的メカニズムについては、近年数々の実験、考察が試みられている。小西は初期異方性を有する粒状体の二次元圧縮試験を行い、粒子挙動の様子を写真に収めた。本文はその写真をもとに、粒子間力を伝える粒子接点の分布を調べ、初期異方性の変形、破壊挙動に及ぼす影響について考察したものである。

2. 模型実験の概要及び調査内容

解析した実験は小西ら(1983)により行われた実験である。(詳細は文献(1))実験は積円柱形の粒子を長軸が一定方向を向く様に堆積させかつ比較的密に配列したものを圧縮セン断し、適時光弾性写真をとったものである。座標軸は最小主応力方向に σ_1 軸、最大主応力方向に σ_2 軸をとる。堆積面の法線方向と σ_2 軸のなす角 θ (図-1)が 0° , 30° , 60° , 90° の4つの場合について実験が行われた。以下、それぞれの供試体を 0° , 30° , 60° , 90° で表わすことにする。図-1はこの4種の供試体の応力比 σ_2/σ_1 , ひずみ ϵ_2 の関係である。これを見ると、強度は 0° が最も大きく以下 30° , 90° , 60° の順であり、必ずしも θ が大きくなるにつれて低下し続けないことが興味深い。

解析 写真中、中央部の円領域について解析を行ない、接点角分布の確率密度関数 $E(n)$ 及び有効接点数 N を数え、次式に基づいてコンタクトテンソルを定義した。

$$C_{ij} = 2 \sum_{n=1}^N E(n) n_i n_j d\Omega \quad (1)$$

ここに、 $\sum_{n=1}^N E(n) d\Omega = 1$, n_i は接触面の法線ベクトル, $N = 18$ として10°間隔で求めた。(1)式で定義されるコンタクトテンソルより、その主値 C_{max} , C_{min} および主方向が基準座標軸となす角 θ を求めた。

となる法線ベクトルを有する任意の面上に投影された接触面積ベクトル(但し、 $n_i > 0$ について考える)を $S_i^{(n)}$ とするとその成分は

$$S_i^{(n)} = \frac{1}{2} C_{ij} l_j \quad (2)$$

と表現できる。本研究では、載荷段階で最も応力比の高い最大傾度面上の接触面積ベクトルの変化を調べた。又、この最大傾度面上の平均的接触面積に作用する(実際の)応力比 Σ_s/Σ_n は、

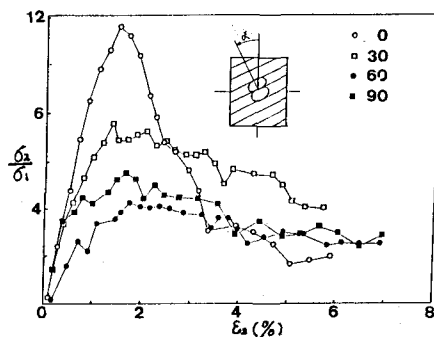


図-1. 主応力比と歪の関係

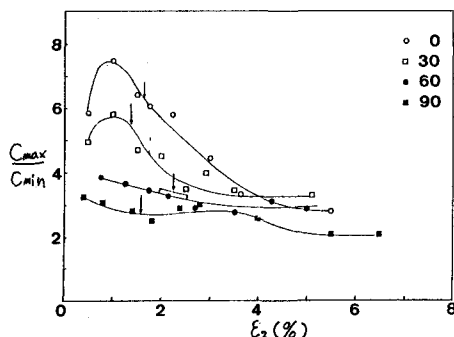


図-2. 接触面の異方性と歪の関係

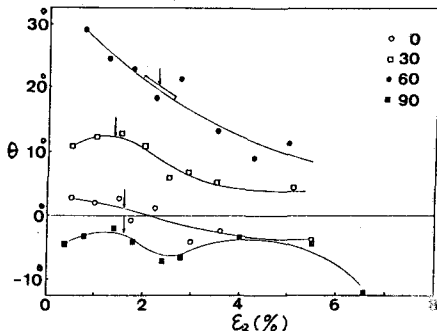


図-3. 接触面法線の主軸と主応力軸のなす角と歪

$$\frac{\Sigma_s}{\Sigma_n} = \tan(\phi - \delta) \quad \text{ここに } \tan \phi = \frac{\tau}{\sigma_n}, \quad \delta = \cos^{-1} \frac{S_1 l_1 + S_2 l_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \quad (3)$$

で与えられるので、この応力比を“すべりやすさの指標”として用いた。この解析の中で、有効な接点の数は変形過程で増減するので、接触面積等の大きさに関しては次式のコンタクトテンソルにより求めた。

$$C_{ij}^* = \frac{N}{N_0} C_{ij} \quad N: \text{現在の有効接点数}, \quad N_0 = 300 \quad (4)$$

3. 結果と考察

図-2は各変形段階での接触面の異方性を表わす。各供試体ともピークにいたるまで異方性は増し、ピーク以後異方性は減少する様である。強度の大きい0, 30は著しい構造変化を示し、強度の小さいものは構造変化が小さい様である。

図3は加えられた応力の増加に伴って接触面が最大主軸方向に近くなる現象をコンタクトテンソルの主軸と主応力軸のなす角θで表わしたものである。ピーク後その傾向はなくなる。図-4は最大傾度面における接触面積の増減を示す。90を除いて減少しており、その減少は強度が弱いほど大きい。接触面積が大きいほど安定な構造であると考えれば、接触面積の減少は破壊がおこりやすい状況をつくるものと思われる。また、初期状態でまちまちだったSも破壊後必ず軟化が進むにつれて限られた範囲の値に集まる様である。図-5, 図-6はΣs/Σnの増減の様子を示したものである。明らかにΣs/Σnはピークに向かうにしたがって増加しピーク以後減少している。また90を除いて強度が小さいほどΣs/Σnは大きく、すべり易い状態となっている事が解る。しかしΣs/Σnは実験に用いた粒子の物理摩擦角φs = 52と比較すれば小さく、本研究で調査した接触面の分布のみでは粒状体の変形破壊挙動を表現できない事が示唆される。

粒子形状が特定の軸方向をもたない場合（即ち円や球粒子の場合）、ピーク時までは接触面が最大主応力方向を向くことにより異方性が増し、破壊に抵抗しようとする一方、粒子間に作用する平均応力比Σs/Σnが増大することにより、すべり易い状態になる。この2つのメカニズムにおいてすべりのメカニズムが卓越したときに破壊が起こると考えられる。しかし、本研究で用いた様な構内形状の場合すべり運動に与える影響として粒子形状及びその長軸の堆積方向の影響の方が、接触面の異方的分布の影響よりも大きいと考えられる。この事は最大主応力軸に関して等価な2つの最大傾度面上の運動が、Σs/Σnの値は相対的に低いにも関わらず粒子の長軸とほぼ平行な最大傾度面上に卓越している事より解る。

今後、粒子の形状の影響を取り入れた解析を行う必要がある。

4. 謝辞 本研究は小田、山西、Nemat Nasserにより行われた実験結果に基づいて解析を行ったものである。資料を提供頂いた先生方に厚く御礼申し上げます。参考文献(1)小田、山西、Nemat Nasser: INDUCED ANISOTROPY IN ASSEMBLIES OF OVAL CROSS-SECTIONAL RODS IN BIAXIAL COMPRESSION

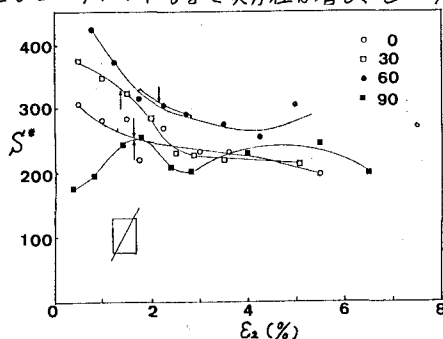


図-4. 最大傾度面の接触面積と歪

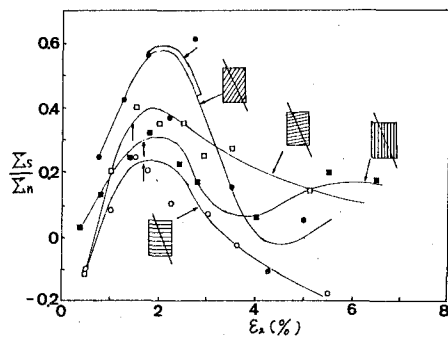


図-5. 最大傾度面の応力比と歪の関係

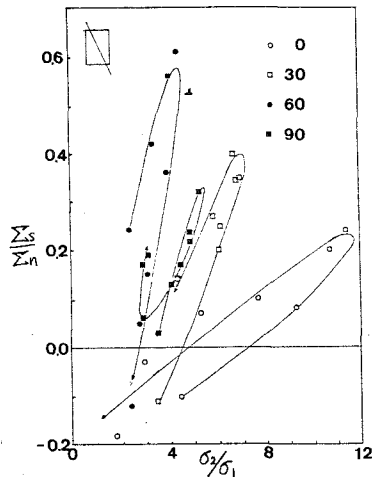


図-6. 最大傾度面の応力比と全体の応力比