

III-188

粒子構造に基づいた粒状体の降伏現象の解釈

名古屋工業大学	学生会員	○ 赤司 有三
〃	正 会 員	松岡 元
鹿 島 建 設	〃	竹内 章博
日本道路公団		内堀 利哉

従来、土の降伏については、応力やひずみなどの土要素の巨視的諸量から考えられているが、本来降伏現象は土要素内の粒子構造の変化に基づいて生じるものと考えられる。そこで、ここでは粒状体の内部構造の変化に着目して、粒状体の降伏について統一的に考察することを試みる。

1. 粒子構造を評価する指標としての粒子接点角分布

過去に受けた圧密やせん断などの応力履歴の影響を統一的に評価するため、粒状体の内部構造を表現する1つの指標として粒子接点角分布に着目した。粒子接点角分布とは、粒子接点の方向の分布状況を放射状にヒストグラムにして表したものである。粒子接点1個あたりに働く粒子間力が等しいと仮定すると、粒子接点角分布の形は図-1に示す任意面上の垂直応力 σ_N の分布に相似になると考えられる。

$$\sigma_N = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + \{(\sigma_1 - \sigma_3)/2\} \times \cos 2\alpha \quad (1)$$

粒子接点角分布の最大の輪郭線に着目し、新たに接点角分布が最大の輪郭線より突出した場合に、塑性的な構造変化を起こし、降伏すると考える。逆に、新たに突出しない場合は、弾性的な挙動を示すと考えた。つまり、粒子接点角分布の過去に受けた最大の輪郭線を、それまでに受けた応力履歴を表すものと考え、最大の輪郭線から突出するかどうかを、粒状体の挙動が弾性的であるか、弾塑性的であるかの判定の基準と考えた。

2. 粒子構造に基づいた降伏現象の解釈

図-2は、等方圧密载荷によって粒子接点数がどのように増加するかを示すため、平均主応力 p を基準平均主応力 p_0 で割った値と粒子接点数 $N(\alpha)$ を p_0 のもとの粒子接点数 $N_0(\alpha)$ で割った値の関係を示したものである¹⁾。図中の(◆)は光弾性材料丸棒の等方圧密試験より得られた p/p_0 と $N(\alpha)/N_0(\alpha)$ の関係を示している($p_0=0.52\text{kgf/cm}^2$)。また、(▼)と(△)は個別要素法(DEM)による2次元粒状体モデル($\phi 5\text{mm}$, $\phi 9\text{mm}$, 混合重量比3:2)の等方圧密時の解析結果の同様の整理である(▼は $p_0=0.5\text{kgf/cm}^2$, △は $p_0=0.1\text{kgf/cm}^2$ の場合)。さらに、(□)はアルミ丸棒積層体($\phi 5\text{mm}$, $\phi 9\text{mm}$, 混合重量比3:2, 長さ50mm)を試料とした二軸圧縮試験によって、等方過圧密後のせん断時の塑性ひずみ発生点の応力をおさえ、式(1)がせん断時の $N(\alpha)$ の分布に対応するものとして、図-3に示す考え方から $N(0)=N_s(\alpha)=N(\alpha)$ と推定してプロットしたものである。以上のプロットが全てほぼ同じ曲線上に整理されることより、次の指数関係を仮定した(図-2中の点線)¹⁾。

$$N(\alpha)/N_0(\alpha) = (p/p_0)^m \quad (m=0.2) \quad (2)$$

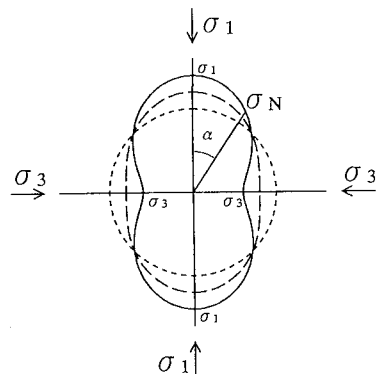


図-1 任意面上の垂直応力 σ_N の分布図

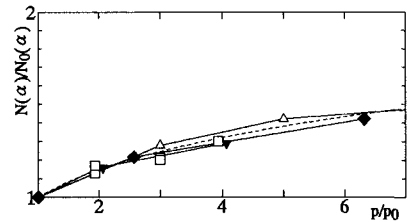


図-2 等方圧密の平均主応力 p と粒子接点数 $N(\alpha)$ の関係

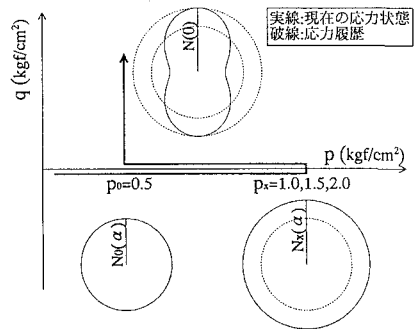


図-3 等方過圧密後のせん断時の降伏を考える粒子接点角分布の概念図

次に、等方圧密時におけるせん断履歴のひずみへの影響を検討するために、図-4(a),(b)に示すような2種類の応力経路で実験を行った。試料として、アルミ丸棒積層体(φ5mm, φ9mm, 混合重量比3:2, 長さ50mm)を用いた。経路(a)では、 $p=0.5(\text{kgf/cm}^2)$ の等方圧密状態から、 $\sigma_1=0.67(\text{kgf/cm}^2)$, $\sigma_3=0.33(\text{kgf/cm}^2)$, $\sigma_1/\sigma_3=2.00$ の状態までせん断載荷・除荷を行った後、続いて等方圧密を行った。経路(b)では、 $p=0.5(\text{kgf/cm}^2)$ の等方圧密状態から、 $\sigma_1=0.58(\text{kgf/cm}^2)$, $\sigma_3=0.42(\text{kgf/cm}^2)$, $\sigma_1/\sigma_3=1.38$ の状態までせん断載荷・除荷を行った後、続いて等方圧密を行った。ここでは、せん断除荷後の等方圧密時の挙動について検討

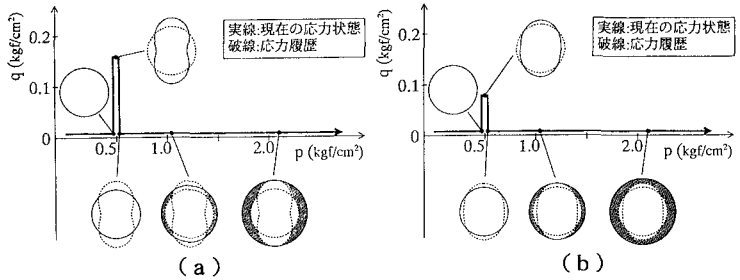


図-4 せん断後の等方圧密時の降伏を考える粒子接点角分布の概念図と応力経路

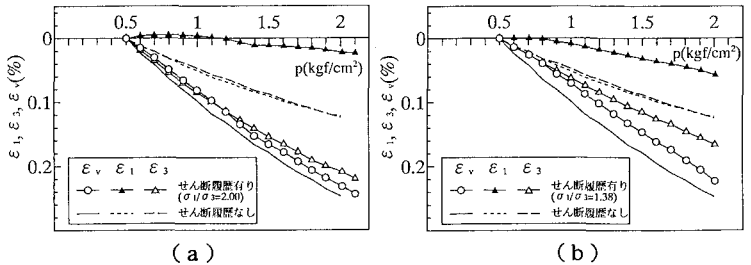


図-5 図-4の経路(a),(b)での等方圧密圧力(p)～ひずみ($\varepsilon_1, \varepsilon_3, \varepsilon_v$)関係の実測値(プロット)

を行う。これを粒子接点角分布の概念より考えると、経路(a)では、等方圧密初期(例えば、 $p=1.05(\text{kgf/cm}^2)$)においては、せん断載荷による履歴の影響により、新たに突出する粒子接点角分布は図中の斜線部分で、せん断時の σ_3 方向にかたよっているのがわかる。式(2)より、 $p=2.1(\text{kgf/cm}^2)$ を越えると、粒子接点角分布は σ_1 方向のせん断履歴を越え、全ての方向に均等に膨らみ、等方的なひずみが発生すると考えられる。経路(b)では、式(2)より $p=1.05(\text{kgf/cm}^2)$ まではせん断載荷による履歴の影響があるが、それを越えると等方的なひずみが発生すると考えられる。図-5(a),(b)は両経路での等方圧密圧力(p)～ひずみ($\varepsilon_1, \varepsilon_3, \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_3$)関係の実測値(プロット)を示している。また、比較のためにせん断履歴のない等方圧密試験の実測値(曲線)も示している。経路(a),(b)ともに、せん断履歴のない場合に比べて ε_1 が発生しにくくなっているのがわかる。また、せん断履歴の影響が消え、等方的なひずみが発生し始める応力点が、粒子接点角分布の変化特性により求めた応力点とほぼ一致するのがわかる。さらに、

図-6中の矢印の経路で示すように、等方圧密後にせん断載荷を行うと、等方硬化理論では図-6に示すような降伏曲面が描ける。これを粒子接点角分布で表現すれば、図-7(a)の実線で示すような降伏曲面となる。しかし、上述したように、実際にはせん断時には図-7(b)で示すようなピーナツ形の降伏曲面となる。つまり、等方硬化理論による降伏曲面は、図-7中の黒丸で示す2点のみの履歴を表現した降伏曲面であるといえよう。このように、粒子接点角分布に基づけば、「圧密は等方硬化的(粒子接点角分布:円形)、せん断は移動硬化的(粒子接点角分布:ピーナツ形)な現象である」ことを含めて、多くの現象を容易に理解できる。

謝辞 図-2中のDEMの計算結果は 大林組 山本 修一氏によるものである。記して謝意を表する。

参考文献 1)松岡・竹内・赤司・内堀(1994):第29回土質工学研究発表会講演集(掲載予定)

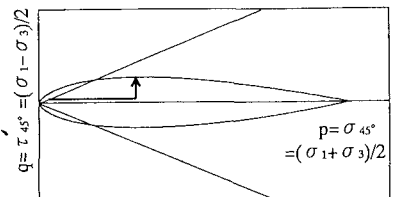


図-6 等方硬化理論によるせん断時の降伏曲面

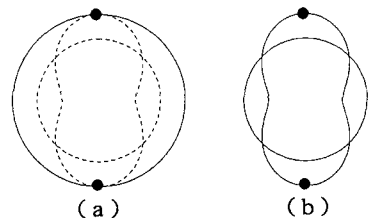


図-7 図-6における粒子接点角分布の概念図