粉粒体層の静的崩壊現象に関する研究

Study on Static Yield phenomena of Powder Layer

鈴木 道隆*
Michitaka SUZUKI

1. 研究を始めた動機

粉粒体層の圧密、引張り、剪断といった静的崩壊現象は各種粉粒体プロセスの設計、操作等に関係して重要であり、これまでも種々の角度から多くの研究が行なわれてきているが、次のような問題が残されていたと考えられる。

③ 粉粒体層崩壊時の応力状態を表わす粉体崩壊曲線(P. Y. L.)と圧密崩壊曲線(C. Y. L.)が応力平面(垂直応力 σ -剪断応力 τ 平面)内で満たすべき形状が充分明らかになっていない。

④ 圧密、引張り、剪断に関する研究がそれぞれ独立して行なわれ、これらを包括してP. Y. L. とC. Y. L. の両方を同時に取り扱う理論あるいはモデルが見あたらない。

⑤ 粉粒体層を構成する個々の粒子の特性と層全体のそれとを結び付ける立場での研究が充分ではなく、特に一般の粉粒体層で見られるランダム充てんを考慮したものは少ない。

以上の点を考慮し、粉粒体層の静的崩壊現象を新しい角度から検討して見ようと考えたのが本研究を始めた動機である。

2. 研究の進め方ならびに主な成果

前述の問題③④⑤を解決するためには、次のような点を検討すれば良いと思われる。

① P. Y. L. とC. Y. L. との関係ならびに両者の基本的性質を明らかにする。

② 個々の粒子間の力学的相互作用を簡潔に表現する。

③ ランダム充てんの粒子配列状態を簡潔に表現する。

④ 粉粒体層の崩壊条件を検討する。

以上のうち、①についてはMohrの応力円の性質よりP. Y. L. は引張り側で垂直応力軸から垂直に立ち上がり

C. Y. L. とは滑らかに接続すること、ならびにC. Y. L. はP. Y. L. の終点と予圧密圧を表わす垂直応力軸上の点とを通る最大崩壊応力円の円弧の一部となることを示した。

②③④については従来あまり検討されておらず、これらをいかにモデル化し、簡潔に表現するのが難しい点であった。本論文では、粉粒体層中の近接2粒子を平均粒子間距離 r よりも接近させれば反発力が、引き離そうとすれば吸引力が生じることを考慮し、②の粒子間の力学的相互作用を次式のようなLennard-Jones型弾性変形保存エネルギー分布で近似表現した。

$$\phi(r) = \phi_n \left\{ A \left(\frac{D_p}{r} \right)^m - B \left(\frac{D_p}{r} \right)^n \right\} \quad \dots\dots(1)$$

式中の $\phi(r)$ は弾性変形保存エネルギーで粒子間距離 r で偏微分することにより粒子間作用力 F_p が得られる。 ϕ_m , A , B は空間率 ϵ , m , n , によって決まる定数, m , n は粉粒体によって決まるパラメータであり実験的に求める。

③については、崩壊面上の全粒子に着目し、その周囲に存在する第1層粒子の位置を重ね合わせる統計的な方法により表現した。これによって層に剪断を加えた場合

Fig.1 粉粒体層崩壊モデル

昭和56年4月28日受付

*姫路工業大学産業機械工学教室

〒671-22 姫路市書写2167番地 TEL 0792-66-1661 (内) 249

を表わせば Fig.1 のようになる。図中の原点 O は剪断前、 $X-Y$ 平面上の点 D は剪断後の着目粒子の位置、周囲の半球殻は平均粒子間距離 r の所に集中化した第1層粒子である。この時、第1層粒子と着目粒子との間に動く力 F_p の総和 F が層全体に加わる応力 (X 方向が剪断応力 τ , Y 方向が垂直応力 σ) と釣り合う。このモデルでは着目粒子を Y 軸の正方向 (上方) へ移動させれば圧密が、負の方向 (下方) へ移動させれば引張りが表現できる。これに④の崩壊条件すなわちどのような条件下で層が崩壊するのかという条件を加えれば崩壊時の応力状態すなわち P.Y.L. と C.Y.L. が得られる。本論文では、すでに①で明らかにした妥当な形状の P.Y.L. と C.Y.L. が得られる条件として、Fig.1 中に破線で示した $X-Y$ 平面上の円周上まで着目粒子が移動したら崩壊するという定移動距離崩壊条件を提案し、実験的に検証した。この円の中心と原点 O との距離 s と半径 $d/2$ も粉粒体によって決まるパラメータであり実験的に決定する。

ここでは一例として Fig.2 に示した炭酸カルシウム P30 (粉体工学会物性グループ会共通試料, 真密度, $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 重量平均径 $5.6 \mu\text{m}$) の圧密特性 (圧密強度 σ_c と空間率 ϵ との関係) と引張り特性 (引張り強度 σ_t と空間率 ϵ との関係) の実測値にモデルによる計算線が最適近似するように4つのパラメータ ($m, n,$

Fig.2A 引張り特性(炭酸カルシウム P30)

Fig.2B 圧密特性(炭酸カルシウム P30)

$s, d/2$) を探索決定した。これらのパラメータを用いれば、この粉体の任意の空間率における P.Y.L. と C.Y.L. をモデルにより計算することができる。たとえば、空間率 ϵ が 0.665 と 0.675 における P.Y.L. と C.Y.L. を算出し、その間の空間率における実測値 (Fig.3 のときリングセル型剪断試験装置にて測定) と比較したところ、Fig.4 のように両者は良好な一致を示した。

さらに本論文では、前述の重ね合わせ手法によって表現したランダム充填層中の着目粒子周囲に存在する第1層粒子の分布を近似表現するモデル式を提案した。そしてこのモデル式を用い、粒子1個あたりの平均接触点数すなわち平均配位数と空間率との関係を示すモデル式も導出し、その妥当性を電算機シミュレーション実験ならびに従来の主な実測値により検証した。

3. 研究を終えて考えていることおよびその応用分野

以上述べてきた粉粒体層崩壊モデルにより、各構成粒子と層全体の性質ならびに圧密、引張り、剪断各特性間の結び付けが可能となった。また本モデルの具体的応用例として、比較的測定の容易な圧密、引張り両特性から任意の空間率における粉体崩壊曲線 (P.Y.L.) と圧密崩

Fig. 3 リングセル型剪断試験装置

Fig. 4 算出した P. Y. L., C. Y. L. と実測値との比較
(炭酸カルシウム P 30)

壊曲線 (C. Y. L.) を推定できることを示した。今後は本モデルをより使い易い形に整理し、多くの粉粒体について本法を適用してその有用性を示してゆきたい。また、均一径球形粒子ばかりでなく、粒度分布や粒子形状なども考慮して平均配位数や第 1 層粒子分布を検討してゆきたい。なお、本崩壊モデルではいくつかの仮定や近似を用いており今後より厳密なモデルの検討も必要であろう。

(学位授与は1980年 9 月 京都大学)