

III-180

鉛直円管内の静止粒状体圧に関する基礎的研究

東京都立大学 学生員 松本 元

東京都立大学 正 員 安川 浩

1. はじめに

粒状体の堆積及び流動挙動を把握する一連の研究目的で鉛直円管内での重力場を想定した。そこで本報ではまず流動挙動の把握に先立ち、緩く堆積した粒状体の応力状態の把握を試みた。

粒状体の応力状態を把握する一手法としては、木山・藤村(1982)⁽¹⁾による応力解析が挙げられる。この方法は次の場合に基づいている。①応力の釣合条件が満たされている。②流動化直前においてモール・クーロンの降伏状態にある。

今回の特徴はこのような解析を次の仮定の場合に適用したことである。緩く静止堆積した場合、流動化直前でなくても全領域において極めて降伏状態に近く近似的に降伏状態にあると考える。また粒状体上面は円錐面を呈するがこれをすべり面の一つと考える。

この場合、静止状態にあるため底面の存在が問題となるが、解析は自由表面と側面の境界条件により応力状態が一義的に決まるという性質を持つので底面の存在を考慮できない。

しかしながらもし側面と底面で測定された圧力とそれに相当する深度での解析値が一致すると見なせるならば、あたかも全領域において降伏状態にあり応力状態が決まると考えられる。他方もし測定値と解析値が一致しないならば、降伏状態にあると仮定できる領域がどこまでであるかが問題となる。

以上のような観点から側面及び底面で測定した圧力と解析値の比較を試みた。

2. 解析方法

Salencon(1974)⁽²⁾に従って軸対称三軸状態における応力の釣合条件と全領域においてモール・クーロンの破壊基準を用いると、平均主応力 $P = -(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ と θ (最大主応力 σ_1 と水平軸 r とのなす角) を従属変数とする次の双曲型偏微分方程式を得る。

$$(1 - \sin\phi \cos 2\theta) \frac{\partial P}{\partial r} - \sin\phi \sin 2\theta \frac{\partial P}{\partial z} + 2R \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} - 2R \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{R}{r} (\cos 2\theta + \varepsilon)$$

$$\sin\phi \sin 2\theta \frac{\partial P}{\partial r} - (1 + \sin\phi \cos 2\theta) \frac{\partial P}{\partial z} + 2R \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} + 2R \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\left(\gamma + \frac{R}{r} \sin 2\theta\right)$$

ただし $R = P \sin\phi$ (ϕ : 内部摩擦角)、 γ は単位体積重量、 ε は静止堆積圧を考えるため $\varepsilon = -1$ とした。上式より二つの特性方向は、 $\frac{dz}{dr} = \tan\left\{\theta \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)\right\}$ となる。

ここで二つの特性方向を α 方向、 β 方向とすると次の条件式が得られる。

$$\alpha \text{ 方向に沿う条件式: } dP - \frac{2R}{\cos\phi} d\theta - (1 - \varepsilon) \frac{R \sin A}{r \sin B} + \gamma \frac{\cos A}{\sin B \cos\phi} dz = 0$$

$$\beta \text{ 方向に沿う条件式: } dP + \frac{2R}{\cos\phi} d\theta + (1 - \varepsilon) \frac{R \sin B}{r \sin A} + \gamma \frac{\cos B}{\sin A \cos\phi} dz = 0$$

ただし $A = \theta - (\phi/2 + \pi/4)$, $B = \theta + (\phi/2 + \pi/4)$

次に円錐面での境界条件は、 $P=0$, $\theta = 3\phi/2 - \pi/4$ とした。ここで図1に示すように θ は円錐面の法線方向が β 方向であるとした。この理由は円錐面をすべり面と考えたことによる。また ϕ は実験から求められた安息角 36.3° を便宜的に用いた。この理由は一般的な ϕ が $34 \sim 45^\circ$ 程度にあり緩い状態に対応すると考えたことによる。

また、壁面での境界条件は $\theta = \frac{1}{2} \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_w}{\sin \phi} \right) - \phi_w \right]$ を用いた⁽¹⁾。ただし ϕ_w は壁面摩擦角である。以上

上の境界条件で解析を行った。

3. 実験装置及び方法

図2に装置図を示した。実験方法はオリフィス径10mmの上部タンクより砂を流入させ、砂高(h)が5cm上昇する毎に圧力測定した。ここで σ_r は側面圧、 σ_z は底面圧である。粒状体試料は24時間以上110°Cで炉乾燥させた豊浦標準砂を用いた。圧力測定終了後に測定した平均単位体積重量は $\gamma = 1.340 \sim 1.360 \text{ gf/cm}^3$ であった。

4. 実験値と解析値の比較

図3に代表的な測定結果を示した。これより砂高(h)が低い初期の段階から底面圧は中心から離れるほど増加する傾向にあることがわかる。この理由は現状では明確に説明できないが、底面のみがある場合あるいは側面のみがある場合には想定し難い結果なので、側面の境界条件と底面の境界条件とが影響しあう隅角部に生じる粒状体固有の性質である可能性がある。

次に底面圧とそれに相当する深度での解析値を比較する目的で実験値と解析値の側圧を合わせた。解析入力値を $\phi = 36.3^\circ$ 、 $\phi_w = 22.9^\circ$ とした場合、図4のように良好な一致が得られた。この解析入力値を用い深さ方向に側圧がほぼ一定となった $h/r_0 = 16$ で底面圧を比較したものが図5である。同図から全く逆の傾向が得られた。

これより隅角部の影響を推定しさらに円筒容器内においてどこまでが降伏状態にあると仮定できるかが今後の課題となった。

謝辞 終始適切な助言を頂いた湯浅欽史助教授と実験実施に際して尽力された安田等氏(当時学生)に対し深く謝意を表します。

参考文献(1)木山英郎・藤村尚:岩質粒状体の重力流動に関する基礎的研究 土木学会論文報告集第322号1982年6月pp101~110(2)J.Salencon:Applications of the theory of plasticity in soil mechanics 1974

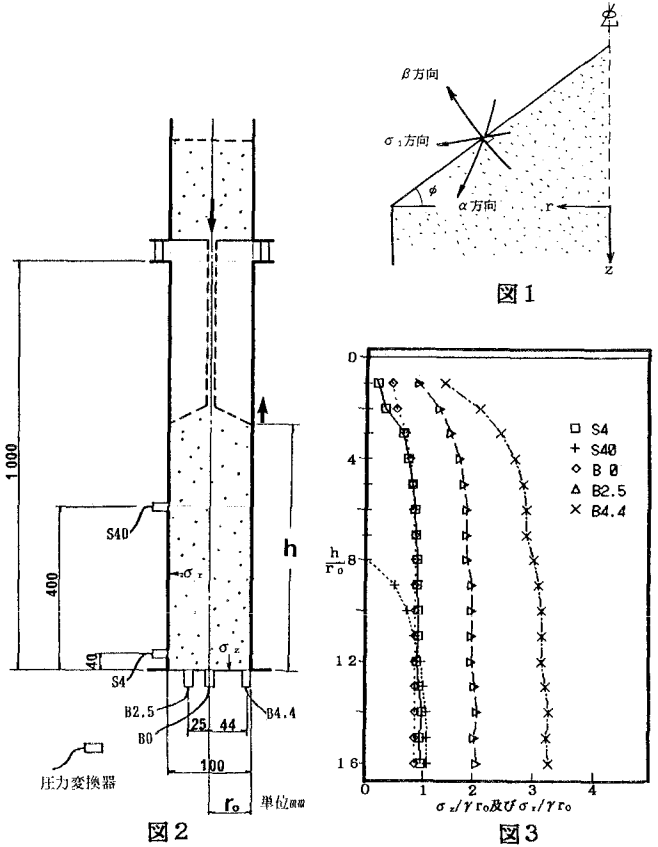


図2

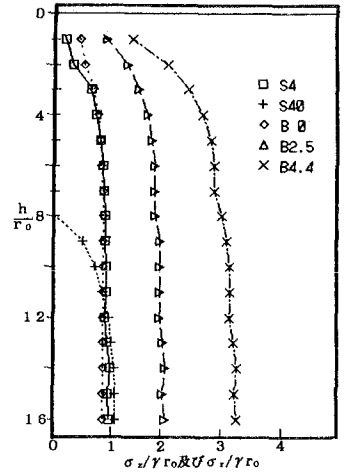


図3

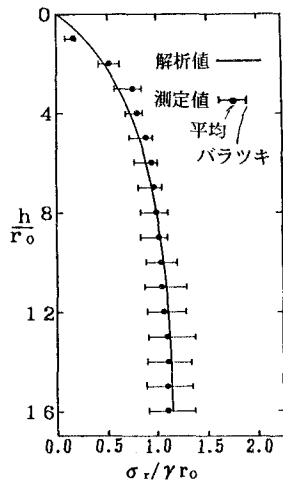


図4

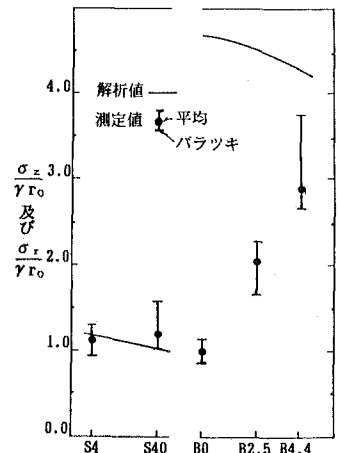


図5