

鳥取大学 正会員 ○木山英郎  
鳥取大学 学会員 小西正郎  
鳥取大学 正会員 勝見雅

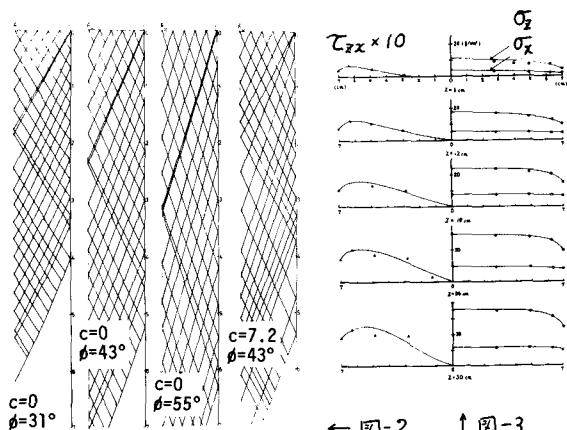
**1 緒言** 近年、粒状体や粉体を取扱う分野が多様化するとともに、重力流動が合理的かつ積極的に利用されるようになつた。それとともに、土質力学的観点から粒状体の応力～変形速度特性を十分に考慮した流動解析法の出現が望まれている。ところで、土の塑性力学的解析においては、土が全般せん断破壊状態にあるとして応力場や速度場を求める極限解析の手法が用いられる。もし、この応力場や速度場が、流動開始時のみならず定常流動状態に対しても適用できるとすれば、応力状態は流動開始時(塑性屈伏時)も定常流動中も同じということになる。さらに流動中も normality の原理が満足されるとすれば、試料は流路に沿って応力を増しつつ、膨張しつづけることとなる。本研究は岩質粒状体の重力流動を探り上げ、模型実験によって流動の概観を得るとともに、流動時の砂中の応力状態の特徴を検討したものである。

**2 実験概要** 実験装置の概略を図-1に示す。流動管にはアクリル円管(内径 13.94, 外径 14.98 高さ 200 cm)を使用し、排出口は傾斜角 60° のノズル形状(ノズル径 1.0, 1.6, 2.2, 2.8 cm の4種類)とした。粒状体が円管壁面に作用する水平およびせん断応力は外壁面に貼付したひずみゲージから求め、粒状体中の鉛直および水平応力は試料とともに流動させた小型土圧計(共和電業 BE-2KD, -2KC)から求めた。

試料は鳥取市賀露産の海砂の 2 mm フルイ通過分を気乾状態で使用した。表-1 にその物性を示す。実験方法は、静止状態として、砂をホッパーから自由落下により自然充填した状態と、充填後ノズルを開いて排出流動させた後の静止状態の 2 つを実験した。流動実験は、ノズル径に応じて上部ホッパーの開閉弁を調節し、試料高さ(ヘッド H = 200, 180, 160 cm の 3 水準)を一定として行なった。

**3 結果と考察** 静止時堆積圧: 全般塑性屈伏状態に対する理論解析の結果は、図-2(すべり線網)、図-3(半径方向応力分布)のようである。ここに  $\sigma_z$  は鉛直応力、 $\sigma_x$  は水平応力、 $\tau_{zx}$  はせん断応力である。

一方、実験結果は、図-4 にひずみゲージから求めた管内壁面に作用する



← 図-2 ↑ 図-3

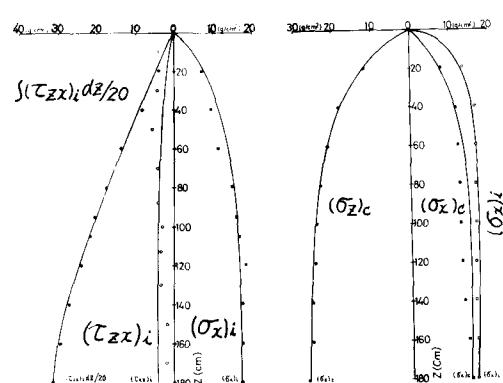


図-4

表-1 試料

試料名	砂
比重	2.60
単位体積重量(%)	1.616 (g/cm³)
単位体積重量(%)	1.670 (g/cm³)
内部摩擦角	38°
壁面摩擦角(%)	10°
含水比	0.277 (%)

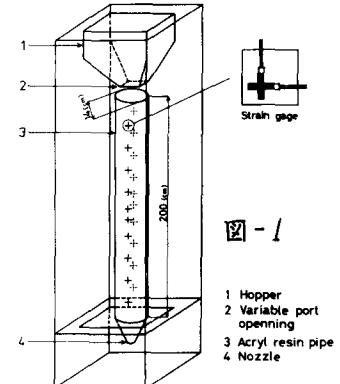


図-1

- 1 Hopper
- 2 Variable port opening
- 3 Acryl resin pipe
- 4 Nozzle

水平応力  $(\sigma_x)_i$ 、せん断応力  $(\tau_{zx})_i$  の分布を示し、図-5 に土圧計によって計測された中心軸上の鉛直応力  $(\sigma_z)_c$ 、水平応力  $(\sigma_x)_c$  および管壁近傍の水平応力  $(\sigma_x)_i$  を示す。これらの結果から、(i) 壁面での応力分布は管直径の 3~4 倍の深さではほぼ一定値に達し、 $(\tau_{zx})_i / (\sigma_x)_i$  の比は壁面摩擦角の値  $\phi_w = 10^\circ$  から得た  $\tan \phi_w = 0.176$  に近い値を示す。(ii) 管中心軸上の応力分布は壁面より少し遅れて定常に達し、この地盤での鉛直応力と土被り圧  $\gamma z$  の比率は 0.67 (ただし、 $z = 40 \text{ cm}$ ) であり、この比率は深さとともに減少する。また、 $(\sigma_x)_c$  と  $(\sigma_z)_c$  の比で示される静止土圧係数は 0.29 であり、試料の  $\phi = 38^\circ$  としたランキンの主働土圧係数 0.24 に近い。(iii) これらの実験は厳密に流動開始時の応力状態を求めたものではないが、全般塑性降伏状態とした理論解析結果とよく一致し、この域には極限解析の手法が適用できる。

円管内重力流動の概観：半円径に 2 分割できる円管と着色砂を用いた流動実験により求めた流動にともなう着色砂層の形状変化、つまり流速分布の変化を示したのが図-6 である。(i) 試料表面からある深さ ( $z \approx 55 \text{ cm}$ ) における速度分布が定常に達すること、およびこの定常域において速度分布は半径方向に一様でなく、壁面近傍に大きな速度勾配を有する塑性流体の栓流に似た形状を呈すことがわかった。一方、流動時の壁面流速、平均流速、単位体積重量の測定結果から、(ii) 壁面流速と平均流速とはほぼ等しく、管断面上の流速分布は中央栓部が大方を占め速度勾配を生じている領域が極めて狭いこと、(iii) 流速がノズル径の約 2 倍、つまり断面積に比例し、ヘッドによる差は明瞭でないこと、(iv) 単位体積重量に流速による差が認められないこと、などが明らかになった。

流動時の応力状態：結果の一例として、図-7 はひずみゲージから求めた壁面上の応力分布、図-8 は土圧計で測定した管中心軸上の応力分布を示す。これらの結果から、(i) 応力分布がほぼ一定に達するのは管直径の 3~5 倍 ( $40 \sim 80 \text{ cm}$ ) の深さであり、前述の流速分布の定常域に対応している。この定常域における壁面水平応力  $(\sigma_x)_c$ 、せん断応力  $(\tau_{zx})_c$  をノズル径  $D_N$  に対して描いたのが図-9 である。(ii)  $(\sigma_x)_c$  がノズル径、したがって流速の増加にあまり影響されないのでに対し、 $(\tau_{zx})_c$  は流速の増加に伴ない増加する。したがって両者の比は一定ではなく、流速とともに  $\tau / \sigma = 0.13 \sim 0.45$  まで増大し、静的壁面摩擦条件  $\tau / \sigma = \tan \phi = 0.176$  では律しきれないことがわかる。

一方、中心軸上の  $(\sigma_x)_c$ 、 $(\sigma_x)_c$  と  $D_N$  の関係を示したのが図-10 である。(iii) 静止時の土圧係数 (0.29) に対する流動時の (水平応力)/(鉛直応力) の値は 0.4~0.9 の間にあり。堆積砂の静止土圧係数が 0.4~0.5 であり、層ごとに締め固めた砂では約 0.8 まで増加し得るといわれるが、流動時の砂がこのような密な構造をとるとは考えられない。したがって上述の結果は、流動時の砂が主働状態や自然堆積状態におけるよりも、鉛直成層に比し、水平成分の卓越した流体的な応力状態にあることを示すものと解釈される。この点からも塑性流動基準の確立が望まれる。

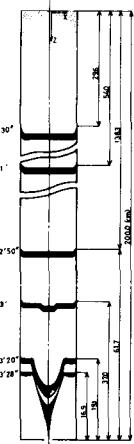


図-6

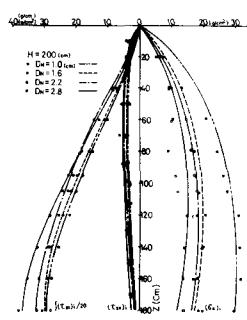


図-7

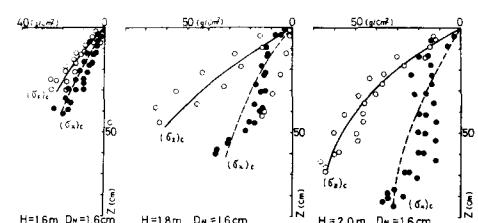


図-8

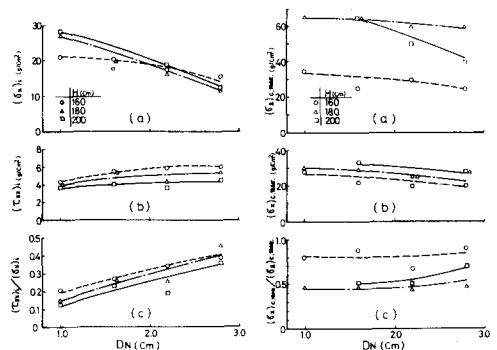


図-9

図-10