

大阪工業大学土木工学教室 正会員 工博 川 島 普

## 1. 緒言

汚泥の機械的濃縮、脱水方式には真空ろ過法、フィルタープレス法、遠心濃縮法、遠心脱水法、振動スクリーン・フィルター法、ロールプレス法などがあるが、ここではコンプレッション・フィルターの一種としてのロールプレス法について基本的考察を行った。このロールプレス法は、例えば特殊な形のロールを用いて2段ロール脱水を行うよう設計されたロートプラグコンセントレーターとよばれるものは、現在下水汚泥の脱水に用いられている。ここで取扱ったのは円形断面の同大2ヶの回転ロールの接触弧間における汚泥の脱水機構の解析である。

図-1のように上部ロールは加圧用とし、固定軸をもった下部ロールは透水性の表面をもっている2ヶの同大円形ロールの接触弧間に汚泥調節後のかなり濃厚な汚泥(含水率で90%程度)が挿入され脱水する過程を取扱った。まず汚泥とロール表面の摩擦力を考慮してロール間隙への汚泥の嚙込条件を求めた上で、この場合の垂直圧力の分布を算出した。連続減少荷重と受ける汚泥のノ軸の圧密理論の基礎式を誘導し、嚙込後の汚泥がロール周速度と等速でこの間隙へ送り込まれるなどの仮定の下で、上部不透水、下部透水性の境界条件と嚙込時の垂直圧力を初期条件とにおいてこの基礎式を解いた。嚙込角からロール出口までの範囲の脱水過程について、汚泥内の過剰圧力、平均過剰圧力ならびに圧密度の算定式をえた。これを用いて、汚泥の平均有効応力、荷重係数と定義して脱水に伴う汚泥のひずみ式と求めた。汚泥の圧密係数、初期汚泥厚、嚙込角、ロールの回転角速度などの諸常数值と与えておいて無次元数としての圧密度と時間係数の関係と数値計算した。加圧用おもりと添加した場合の半径方向圧力と嚙込角の関係や荷重係数の値と計算し、これらの値を用いて汚泥の平均有効応力、ロール出口の含水率、ひずみの値と計算して脱水効率の考察を行った。さらに、荷重速度と荷重係数の関係や荷重速度と嚙込角の関係、単位体積当りのひずみエネルギー算定式とその計算例を示し、ロールプレスにおける妥当な操作法について検討した。

## 2. ロールプレスにおける汚泥の嚙込条件と垂直圧力

強固なスタンドと軸受に支えられて回転する2ヶのロールの間に挿入された材料が金属の塑性加工として圧延されるためには、材料とロール表面との間の摩擦力が働いて材料をロール間隙に引込み、最小間隙まで連続的に圧縮されねばならない。こうした金属材料については圧延理論があつて圧延圧力の算定式が導かれている。上述のように透水面をもったロールによる汚泥の圧縮脱水においては、汚泥は圧縮中に脱水分だけ体積を減ずるので金属の場合のような先直、後直といった体積不変の現象とは趣と異にする。ただし、汚泥のロール弧間への嚙込条件については金属材料の場合と同様の取扱いにより次のように考えることができる。図-1参照。  $P_r$  = 半径方向圧力 ( $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ )、  $P_t$  = 半径方向圧縮力 ( $\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$ ) =  $P_r r d\theta$ 、  $r$  = ロール半径 (cm)、  $F$  = 圧縮力による摩擦力 =  $\mu P_t$  ( $\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$ )、  $\mu$  = 汚泥とロール弧との間の平均摩擦係数、  $P_e$  = 汚泥とロール弧間に引込む水平力 ( $\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$ )、  $X$  = 嚙込角、  $\alpha_0$  = 嚙込角 (rad. または度) とおくと、  $X$  角において水平に引込む力は  $P_e = F \cos \alpha_0 - P_t \sin \alpha_0$ 、  $P_e = 0$

の場合は自力で喰込まないから、この条件により  $F/R_r = \tan \alpha_0$ ,  $\rho =$  摩擦角とすると,  $\tan \rho = \mu = F/R_r \therefore \rho \geq \alpha_0$  (1)

$$\text{垂直圧力は } P_v = R_r \cos \theta + F \sin \theta = R_r (\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (2)$$

ロール弧上の任意点 Y における垂直圧力は、単位奥行をとって

$$p_\theta = P_v / (r d\theta) = R_r (\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (3)$$

式(3)は次のように表わされる。  $\omega =$  回転角速度 (rad/sec),  $t =$  時間 (sec),

$$p_\theta = R_r \{ \cos(\alpha_0 - \omega t) + \mu \sin(\alpha_0 - \omega t) \} = p_\theta(t) \quad (4)$$

式(1)の喰込条件を用いて,  $\mu = 0.1, \dots, 1.0$  の範囲について式(3)により  $p_\theta$  を計算すると図-2 のようになる。縦軸に  $R_r$  と乗ずると  $\sigma_\theta$  となる。

### 3. ロールプレスにおける汚泥の脱水残量の圧力理論による解析と弾性学的考察

#### (a) 圧力解析

圧力理論による解析にあたって次の仮定をおく。

- 1) 汚泥はロール周速度と等しい速度でロール弧間に入り脱水される。
- すなわち、微小な汚泥柱状体がロール周速度で移動するものとした。
- 2) 汚泥はロールによる圧縮を受けても幅方向の伸びはない。
- 3) 汚泥はロールによる垂直圧力のために脱水性構造をもった下部ロール内部へ脱水される。
- 4) 脱水された汚泥はその濃分だけ体積を減少する。

喰込角 X における初期汚泥厚と  $l$ , 柱状体の上端より下方へ  $x$  軸をとり,  $C_v =$  圧縮係数,  $U =$  過剰圧力として連続減少荷重を受ける場合の  $x$  軸圧力の基礎式と次の境界条件, 初期条件のもとに解くこととする。

$$\text{基礎式: } \frac{\partial U}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + R(t) \quad (5)$$

$$\text{境界条件: } \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = 0, \quad (U)_{x=l} = 0 \quad (6)$$

$$\text{初期条件: } (U)_{t=0} = R_r (\cos \alpha_0 + \mu \sin \alpha_0) = P_{v0} = \text{Constant} \quad (7)$$

ただし,  $R(t) = \partial P_v / \partial t = R_r \omega \{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \mu \cos(\alpha_0 - \omega t) \} =$  荷重速度 (rate of loading),

$R(t)$  は連続減少荷重であるので負号である。式(6), (7)の条件で式(5)を解くと

$$\begin{aligned} U(x, t) = & \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \int_0^t R(\tau) \exp \left\{ -\frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2 (t-\tau)}{4l^2} \right\} d\tau + \frac{4 P_{v0}}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \exp \left\{ -\frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \\ & \times \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} = \frac{4 R_r \omega}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \left( \frac{1}{\omega^2 + \frac{C_v (2n+1)^2 \pi^4}{16l^2}} \right) \left\{ \left( \omega - \mu \frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right) \cos(\alpha_0 - \omega t) \right. \\ & \left. - \exp \left\{ -\frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \cos \alpha_0 \right\} + \left( \frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} + \mu \omega \right) \left\{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \exp \left\{ -\frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \sin \alpha_0 \right\} \\ & + \frac{4 R_r}{\pi} (\cos \alpha_0 + \mu \sin \alpha_0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \exp \left\{ -\frac{C_v (2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \quad (8) \end{aligned}$$

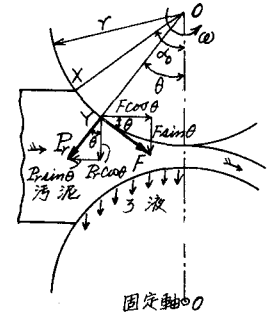


図-1

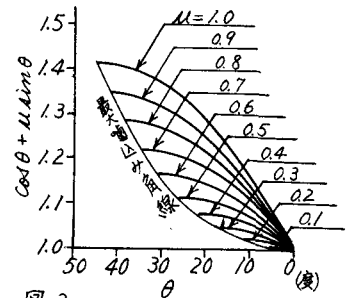


図-2

平均過剰圧力  $\bar{u}$  は

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} u(x, t) dx = \frac{8Pr\omega}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \left( \frac{1}{\omega^2 + \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{16\ell^2}} \right) \left\{ \left( \omega - \mu \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4\ell^2} \right) \left\{ \cos(\alpha_0 - \omega t) - \exp\left[-\frac{C_v(2j+1)^2\pi^2 t}{4\ell^2}\right] \cos \alpha_0 \right\} + \left( \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4\ell^2} + \mu \omega \right) \left\{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \exp\left[-\frac{C_v(2j+1)^2\pi^2 t}{4\ell^2}\right] \sin \alpha_0 \right\} \right\} + \frac{8Pr}{\pi^2} (\cos \alpha_0 + \mu \sin \alpha_0) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left[-\frac{C_v(2j+1)^2\pi^2 t}{4\ell^2}\right] \quad (9)$$

(b) 圧密度の算定:

$\bar{F}_w$  = 過剰圧力の占める荷重面の時間  $t$  までの平均面積 =  $\frac{1}{\ell} \int_0^t \int_0^{\ell} u(x, t) dx dt = \frac{\ell}{t} \int_0^t \bar{u}(t) dt$ ,

$\bar{F}_{ot}$  = 荷重面の占める時間  $t$  までの平均面積 =  $\frac{\ell}{t} \int_0^t P_o(t) dt$  において、圧密度  $U$  は

$$U = 1 - \frac{\bar{F}_w}{\bar{F}_{ot}} = 1 - \frac{\int_0^t \bar{u}(t) dt}{\int_0^t P_o(t) dt} \quad (10)$$

$$U = 1 - \frac{\frac{8}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \left( \frac{\omega}{\omega^2 + \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{16\ell^2}} \right) \left\{ \left( \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4} + \mu \omega \right) \left\{ \cos(\alpha_0 - \frac{\omega t}{\lambda}) - \cos \alpha_0 \right\} - \left( \omega - \mu \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4} \right) \left\{ \sin(\alpha_0 - \frac{\omega t}{\lambda}) - \sin \alpha_0 \right\} \right\} + \frac{4\omega}{(2j+1)^2\pi^2\lambda} \left\{ \exp\left[-\frac{C_v(2j+1)^2\pi^2 t}{4} \right] - 1 \right\} \left\{ \left( \omega - \mu \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4} \right) \cos \alpha_0 + \left( \frac{C_v(2j+1)^2\pi^2}{4} + \mu \omega \right) \sin \alpha_0 \right\} \right\} - \frac{32\omega}{\pi^2\lambda} (\cos \alpha_0 + \mu \sin \alpha_0) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \left\{ \exp\left[-\frac{C_v(2j+1)^2\pi^2 t}{4} \right] - 1 \right\}}{\mu \left\{ \cos(\alpha_0 - \frac{\omega t}{\lambda}) - \cos \alpha_0 \right\} - \left\{ \sin(\alpha_0 - \frac{\omega t}{\lambda}) - \sin \alpha_0 \right\}} \quad (11)$$

ただし、 $\lambda = C_v/\ell^2$  (1/sec)  
時間係数  $T = \lambda t$

(c) 平均有効応力  $\bar{\sigma}_s$  及びひずみ  $\epsilon_t$  の算定:

時間  $t$  において、有効応力  $\sigma_s = P_o(t) - u$  である。この場合、時間平均をとって

$$\bar{\sigma}_s = \frac{1}{\ell} \int_0^t \left( \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \sigma_s dx \right) dt = \frac{1}{\ell} \int_0^t \left( \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} P_o(t) dx \right) dt - \frac{1}{\ell} \int_0^t \left( \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} u dx \right) dt \quad (12)$$

$$\text{1方, } \bar{\sigma}_s = \frac{1}{\ell} (\bar{F}_{ot}) - \frac{1}{\ell} (\bar{F}_w) \quad (13) \quad \text{式(10)より}$$

$$\therefore \bar{\sigma}_s = (\bar{F}_{ot}/\ell) U = \frac{P_o}{t\omega} \left\{ \mu \left\{ \cos(\alpha_0 - \omega t) - \cos \alpha_0 \right\} - \left\{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \sin \alpha_0 \right\} \right\} U \quad (14)$$

式(14)の  $(P_o/t\omega) \left\{ \mu \left\{ \cos(\alpha_0 - \omega t) - \cos \alpha_0 \right\} - \left\{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \sin \alpha_0 \right\} \right\}$  = 荷重係数 (15) である。比例  
 常数  $E_s$  とおくと、汚泥のひずみ  $\epsilon_t = \bar{\sigma}_s / E_s = (1/E_s) (P_o/t\omega) \left\{ \mu \left\{ \cos(\alpha_0 - \omega t) - \cos \alpha_0 \right\} - \left\{ \sin(\alpha_0 - \omega t) - \sin \alpha_0 \right\} \right\} U$  (16) で表わされ、この関係は縦軸に  $\epsilon_t$ 、横軸に  $\bar{\sigma}_s$  とすると勾配 =  $\tan(1/E_s)$  の直線となる。図-4参照。

(d) 圧密度の計算例:

式(11)において、 $C_v = 0.01$  (cm<sup>2</sup>/sec),  $r = 7.5$  (cm), ロール最小間隙 = 0.5 (cm), 初期汚泥厚  $\ell = 5.38$  (cm),  $\alpha_0 = 45^\circ$  ( $\mu = 1.0$  に相当),  $\omega = 0.159$  (rad/sec) (1/6 REM に相当) とおくと、ロール出口で  $T = 0.0156$ ,  $U$  を数値計算して  $U = 0.0694$  となる。 $\alpha_0 = 26^\circ 30'$  ( $\mu = 0.5$  に相当),  $\ell = 2.56$  (cm) の場合は  $T = 0.0402$  で  $U = 0.505$  となる。

(e) 荷重係数の計算例:

長さ 75 (cm),  $r = 12$  (cm) のロールの材質の単位重量 = 7.8 (kg/1000 cm<sup>3</sup>), おもり 50 (kg)  $\times$  4 (ヶ) の場合の荷重がロール接触弧面の汚泥に均等に作用しているものとし、半径方向圧力  $P_r$  と  $\alpha_0$  の関係を計算すると次表のようになり、 $\alpha_0$  の小さい程  $P_r$  の値は大きくなる。

| $\alpha_0$  | 45    | 40    | 35    | 30    | 25    | 20    | 15    | 10    | 5     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R$ (kg/cm) | 0.670 | 0.754 | 0.861 | 1.000 | 1.206 | 1.507 | 2.010 | 3.015 | 6.031 |

この値を用いて式(15)に示した荷重係数を計算すると図-3となり、 $\alpha_0$  すなわち  $\mu$  の小さい程この値は大きくなる。

(f) ロール出口の平均有効応力  $\bar{\sigma}_s$ 、含水率  $R$ 、ひずみ  $e_0$  の計算例:

上記の計算例による  $\Pi$ - $A$  関係、半径方向圧力  $R$  及び荷重係数値によつて、ロール出口の汚泥ケーキの  $\bar{\sigma}_s$ 、 $R$ 、 $e_0$  と次のように計算することができる。(i)  $\mu=1.0$  の場合:  $\bar{\sigma}_s = 0.855 \times 0.0694 = 0.059$  (kg/cm<sup>2</sup>);  $R$  = 初期含水率(%),  $\phi$  = 径限収縮率とし、 $\Pi = (R - R_0) / (R_0(100 - R_0))$  より  $R = 90$ (%),  $\phi = 0.80$  として  $R$ (%) を求めると、 $R = 89.4$ (%),  $e_0 = 0.0894 \times 0.80 = 0.055$  となる。(ii)  $\mu=0.5$  の場合:  $\bar{\sigma}_s = 1.243 \times 0.505 = 0.627$  (kg/cm<sup>2</sup>),  $R = 83.2$ (%),  $e_0 = 0.505 \times 0.80 = 0.404$  となる。ここで、 $R = 83.2$ (%),  $\phi = 0.66$  とおいて二段ロールを行えば  $R = 74.7$ (%) となることが注目される。 $e_0$  と  $\bar{\sigma}_s$  の計算例を図-4に示す。 $\alpha_0$  すなわち  $\mu$  の小さいほど  $R$  は小さくなり  $e_0$  は大きくなることがわかる。このことから汚泥試料は薄板にして供給すればよいといえる。

(g) 荷重速度と荷重係数の関係:

$$\text{荷重速度 } R = \partial P / \partial t = -R_0 \{ \mu \cos(\alpha_0 - \omega t) - \sin(\alpha_0 - \omega t) \}$$

で、荷重係数は式(16)であるので両者の関係を求めると

$$\text{荷重係数} = \{ -R - R_0 \omega (\mu \cos \alpha_0 - \sin \alpha_0) \} / (\omega^2 t) \quad (17)$$

$$\text{荷重速度 } R = -\omega \{ \omega t (\text{荷重係数}) + R_0 (\mu \cos \alpha_0 - \sin \alpha_0) \} \quad (18)$$

の関係がえられる。表に示した  $R_0$  値を用いて  $\theta$  と  $R$  の関係を計算すると図-5のようになる。式(8)の右辺第1項は  $R$  が支配している。 $R$  は連続減小荷重の場合は負値であるがその値が大きいということは荷重/定の場合の解としての式(8)の右辺第2項の値からその負値だけ  $\mu$  が減少することと意味しており、 $\alpha_0$  の小さいほど  $R$  の値は小さいことを図-5は示している。

(h) 単位体積当りのひずみエネルギー:

$$W/V = (\bar{\sigma}_s e_0) / 2 = \bar{\sigma}_s^2 / (2 E_s) \quad (19)$$

の関係があることはすでに示した。上記(f)の(i), (ii)の計算例による  $\bar{\sigma}_s$ 、 $e_0$  の値を用いて式(19)を計算すると次のようである。

(i)  $\mu=1.0$  の場合:

$$W/V = 0.00162 \text{ (kg cm/cm}^3\text{)}$$

(ii)  $\mu=0.5$  の場合:

$$W/V = 0.1266 \text{ (kg cm/cm}^3\text{)}$$

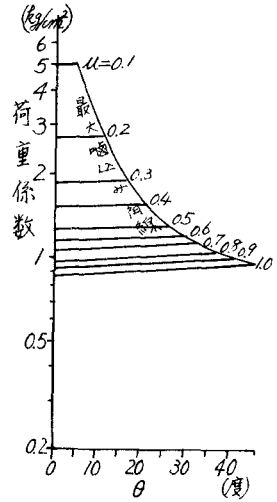


図-3

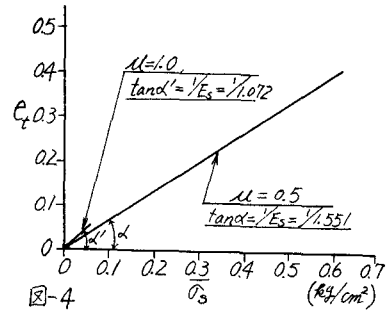


図-4

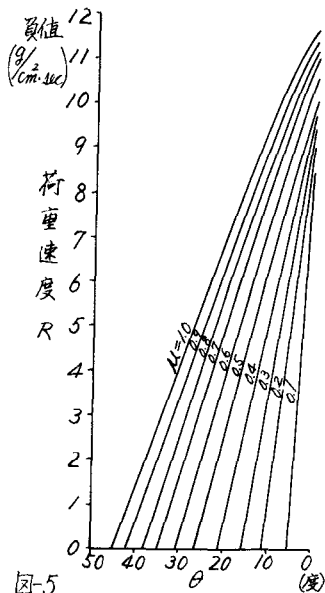


図-5