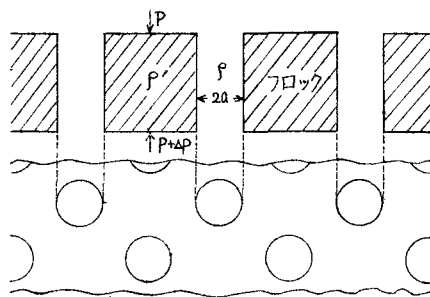


九州大学工学部 正 員 栗谷陽一
九州大学工学部 学生員 楠田哲也
九州大学工学部 学生員 中司泰雄
九州大学工学部 学生員 江副敦介

I 緒言 乱れ場でフロックが成長する際、フロックが互に合体すれば再び分離しないというものではなく、一方で必ず分離を起こしながらこの合体と分離が平衡に達したところでフロック自体の大きさが決められるものと考えられる。粘土スラリーがビンガム流体であることからフロック懸濁液もこれに近い性質を示すことが考えられるので、フロックの破壊現象においてビンガム流体としての降伏値が重要な役割を演ずるであろう。フロックはまたキセトロピー性を示すのでこの降伏値は動的条件下と静的条件下とではかなりの差がありえるがフロックの破壊現象を知る第一段階として本報では静的条件下におけるフロックあるいはフロック群の降伏値を求めることを目的とした。この値を求める方法として (1) ポアズイユの流れになったパイプ中をフロックを転がしその成長限度と剪断応力の関係を求める、(2) 回転二重円筒中にフロックを入れその破壊開始と剪断応力の関係を求める、(3) パイプ中にスラリー状のフロックを流し剪断強度を求める、(4) 鉛直に立てたパイプ中にフロックブランケットを作りブランケット中で乱れも発生しない圧密にもならない中間の適当な上昇流速を与え剪断強度を求める、等が考えられる。本報では(1)と(4)について述べる。(4)の実験では実際目に見えるようなチャンネルも生じているがこの部分以外を浸透する流量が意外に大きいので浸透の方から剪断強度を求めることにした。

II 理論 (a)低流速時のブランケット中の水流理論 低流速時には構造を持った粘土粒子間を縫って水が上昇していくことが観察される。この状態を安定したブランケットの単位高さについて図-1のようにモデル化する。ブランケット内を上昇する水は単位面積当り $n\pi$ 本のポアズイユの流れとなっており、その為流れの通り路の壁面での剪断応力によりフロックブランケットの全重量が支えられており、壁面での剪断に耐えられずに破壊したフロックは水と共に上昇していく。更に壁面からフロックが剥れることによって通路の径が変化した時はブランケットの流動性により補給がなされ通路の径は壁面での剪断力との平衡により一定に保たれているとする。



P: 単位面積当りの圧力 P' : フロックの密度
 ρ : 水の密度 a : 水の通り路の平均半径

図 - 1

このブランケットの単位面積当りの応力の釣合式は

$$P + \rho'g(1 - n\pi a^2) + \rho g n\pi a^2 - (P + \Delta P) = 0. \quad (1)$$

ここで単位断面積当りの水の通路の断面積の和を S_a とすると

$$n\pi a^2 = S_a. \quad (2)$$

(1) と (2) から

$$\Delta P = \rho'g(1 - S_a) + \rho g S_a. \quad (3)$$

通路内での応力の釣合式は τ_w を壁面での剪断応力として

$$\pi a^2(P + \rho g) - 2\pi a \tau_w - \pi a^2(P + \Delta P) = 0.$$

したがって

$$\tau_w = -\frac{\rho}{2}(Pg - \Delta P) = \frac{\rho}{2}G. \quad (4)$$

ただし

$$G = \Delta P - \rho g. \quad (5)$$

壁面に作用する剪断力はフロック群内の水の通路に関する対称面上では 0 となりフロック群内においてこの剪断力分布は単調に増加して壁面に至るので壁面での剪断力が最大となりフロックの破壊は常に表面から生ずる。

フロックブランケットの単位面積当りの流量 q は

$$q = \frac{\pi a^2}{8\mu} \pi G = \frac{S_a}{8\mu} a^2 G. \quad (6)$$

通路内の平均流速 (v) は

$$v = L/t. \quad (7)$$

ここで、 L はパイプの側壁に設けた電極間距離、 t はパイプ下端から注入した塩水の全量 $q/2$ が、各電極間を通過するに要した時間である。このようにして v が求まると、

$$q = v \cdot S_a. \quad (8)$$

ある時刻におけるフロックブランケットから通路部分の容積を除いた容積を V 、ブランケットの高さを h 、パイプ半径を R とすると

$$V = (1 - S_a) \cdot h \cdot \pi R^2. \quad (9)$$

粘土の密度を ρ_{dry} 、フロックの乾燥質量を W とすると

$$\rho' = \rho + \frac{W}{V} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{dry}}\right). \quad (10)$$

したがって (8) から

$$S_a = q/v. \quad (11)$$

(3) と (5) から

$$G = (\rho' - \rho) g (1 - S_a). \quad (12)$$

(6) と (11) と (12) から

$$a = \left\{ \frac{8\mu g}{S_a G} \right\}^{1/2}. \quad (13)$$

(2) と (8) から

$$n = S_a / \pi a^2 = \frac{q}{v \pi a^2}. \quad (14)$$

(4), (12), (13) から

$$\tau_w = \left\{ \frac{2\mu g}{S_a G} \right\}^{1/2} \cdot G. \quad (15)$$

(b) パイプ中をフロックが転がすときの理論 パイプ中をフロックは他の微フロックを吸着しながら成長して転がっていく。パイプ中をフロックが転がる状態を厳密に解くことは困難である。したがって重力および壁面の影響を無視し、パイプ中をフロックが転がるときにフロックが受ける剪断力は一様な剪断流の中にフロックが存在し外力によるトルクの合力が 0 になるように回転するときに受ける剪断力にほぼ等しいものとする。円筒座標を用いる。まず図-2 の場合の流れ函数を求め全体に回転を与えることにより図-3 のような剪断流においてフロックに作用する圧力と剪断力を求める。

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \omega = -\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\right) \psi \quad (16)$$

とおくと、 $\nabla = (u, v, 0)$, $\text{rot } \nabla = \nabla \times \nabla = (0, 0, \omega)$

となる。ストークスの近似を用い円筒回りの流れを求める。したがって

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \mu \Delta \nabla, \quad \text{div } \nabla = 0 \quad (17)$$

上式から圧力の項を消去すると

$$-\text{rot } \text{rot } \nabla = 0 \quad (18)$$

(16), (18) から

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \psi = 0 \quad (19)$$

無限遠方で, $\psi = \frac{\alpha}{2} r^2 \sin 2\theta$, $r=a$ で, $v_\theta = v_r = 0$ とおく。更に θ 方向に Ω なる回転を加え, $\alpha = \Omega$ とおき, その後座標軸を $-\frac{\pi}{4}$ 回転すると,

$$v = -\Omega(r - \frac{a^2}{r}) \cos 2\theta + \Omega r \quad (20)$$

$$u = -\Omega(r - \frac{2a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3}) \sin 2\theta \quad (21)$$

したがって

$$\tau_{r\theta}(r=a) = -4\Omega\mu \cos 2\theta \quad (22)$$

また(17)から

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\mu \operatorname{rot} \omega \quad (23)$$

(23)を解くと,

$$p_{(r=a)} = -\sigma_r(r=a) = p_0 + 4\Omega\mu' \sin 2\theta \quad (24)$$

したがって(22), (24)が回転するフロックに与えられる応力の境界条件となる。

フロック内部の応力分布を求めるために応力函数 $F(r, \theta)$ を用いる。

$$\Delta^2 F = 0 \quad (25)$$

(25)を満足する一般解は既に与えられており, この F を用いると,

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \quad (26)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \quad (27)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} \right) \quad (28)$$

(22), (24)の境界条件と $r=0$ で応力が有限であることを満足する解をとると,

$$F = b_0 r^2 + (c_2 r^2 + d_2 r^4) \sin 2\theta \quad (29)$$

(26), (29)から

$$\sigma_r = 2b_0 - 2c_2 \sin 2\theta \quad (30)$$

(28), (29)から

$$\tau_{r\theta} = -2(c_2 + 3d_2 r^2) \cos 2\theta \quad (31)$$

(30), (31)において $r=a$ とおき(22), (24)を考慮すると,

$$\sigma_r = -p_0 - 4\Omega\mu \sin 2\theta \quad (32)$$

$$\sigma_\theta = -p_0 + 4\Omega\mu \sin 2\theta \quad (33)$$

$$\tau_{r\theta} = -4\Omega\mu \cos 2\theta \quad (34)$$

したがって

$$\tau_{max} = \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2} = 4\Omega\mu \quad (35)$$

Ⅲ 実験装置と方法 使用フロックは学内水道水(アルカリ度70.3°)と指宿カオリン(-74μ) 5.0g/l を混和した原水にバンド($Al_2(SO_4)_3$)と(7) 20mg/l を注入後水平攪拌式ジャーテストにて300rpmで30秒間攪拌し, さらにセパラン2610を3mg/l 注入し, 300rpmで10分, 60rpmで20分攪拌して作った。

(a) (4)の実験装置と方法 長さ4m, 内径58.2mmのアクリルパイプの下端にJIS規格G1のガラスフィルターを取りつけたものを使用した。このフィルターは管断面のいたるところで一樣な上昇流をえ, またフロックの逆流を防ぐためのものである。さらにパイプにはフィルター面から25cm毎に電気伝導度測定用の電極を4対とりつけてある。ヘッドタンクからの水は流量計, ニードル弁を通過後, フィルターを通り管内を上昇し, オーバーフローする。この管の上端から下端まで移動可能な台に豆球の光源とフォトランジスタと, この移動可能な台のレベルを示すための接点が取付けられている。光源とフォトランジスタの中心角は90°でフォトランジスタはフロックブランケットによる反射光を受光するようになっている。したがってブランケットの高さが機械的に検出できる。電気伝導度を測定する時はフィルター上面にて塩水を注入した。

(b) (1)の実験装置と方法 長さ10m、内径12mmの水平に置かれたアクリルパイプの上流端にヘッドタンク、下流端に流量を変えることのできるサクションパイプを垂直に取付けたものを使用した。ヘッドタンクにフロック懸濁水を投入し、パイプ中でフロックを成長させ成長限度に達したフロックを写真にとりその径を測定した。さらにフロックの移動速度を測った。

Ⅳ 実験結果 (4)の実験結果を表-1に、(1)の実験結果を表-2に示す。なお単位はすべてC.G.S系である。

表-1

回数	流量 Q cm^3/sec	電極間 距離 L cm	塩分量 濃度 C g/cm^3	通路中の 流速 V cm/sec	通路の面 積比 S_0	ブランケット の高さ H cm	フロック群 の濃度 N g/cm^3	フロック群 の体積 V_f cm^3	フロック群 の密度 ρ_f g/cm^3	圧力勾配 G g/cm^2	通路の 平均半径 r cm	単位面積 の通路数 n	剪断強度 τ g/cm^2
1	0.0326	25.0	681.3	0.0367	0.888	77.8	326.0	231.3	1.867	95.11	0.0056	9000	0.27
2	0.0349	25.0	625.1	0.0400	0.873	80.7	326.0	272.0	1.738	91.70	0.0059	7780	0.27
3	0.0413	25.0	560.5	0.0446	0.926	87.0	326.0	170.9	2.1730	85.10	0.0065	6780	0.28
4	0.0492	25.0	478.0	0.0523	0.941	94.2	326.0	147.5	2.3570	78.59	0.0072	5780	0.28
5	0.0556	25.0	428.8	0.0583	0.954	99.6	326.0	121.6	2.6490	74.23	0.0079	4870	0.29

表-2

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
フロック 直径 d cm	0.12	0.13	0.083	0.068	0.087	0.082	0.071	0.062	0.060	0.042	0.033	0.033	0.029
移動 速度 V cm/sec	2.80	3.17	3.67	4.06	4.37	4.88	5.30	5.67	6.15	6.44	6.88	7.01	7.30
剪断強 度 τ g/cm^2	12.4	10.6	21.0	26.6	23.0	26.0	31.0	25.6	32.8	41.6	56.8	58.8	70.2
剪断強 度 τ g/cm^2	0.476	0.424	0.840	1.064	0.920	1.040	1.240	1.020	1.318	1.664	2.292	2.352	2.808

表-1すなわち(4)の実験においては流量が増加するにつれて圧力勾配、フロック群の体積、通路数が減少し、通路の面積比、ブランケット構成粒子の密度、通路の平均半径、剪断強度が増加している。なお流量を $0.0612 \text{ cm}^3/\text{sec}$ に上げたときにはブランケットの高さが103.6cmとなり、ブランケットの下端から30~60cmのところではスケールとしてパイプ直径を持つ渦を発生しはじめた。そしてこの渦が上下に波及するにおよんだ。この時ブランケット構成粒子の密度が粘土自身の密度 $2.60 \text{ g}/\text{cm}^3$ とよく一致している。

表-2すなわち(1)の実験において第9回~第12回ではパイプ中を転がるフロックが跳躍に近い挙動を示し、13回では完全なリップルを示した。したがって剪断強度は大きくでている。

Ⅴ 考察 (4)の実験において流速を上げていくとブランケットに渦が発生するのは、流速が増すにつれて粘土粒子の付着水が減少し、ほゞ無くなったところで構造が破壊されてしまうためと考えられる。このことから $\rho = 2.6$ に対応する剪断強度 $0.29 \text{ g}/\text{cm}^2$ は、粘土の剪断強度を示すものと考えられる。なお、この結果は他のデータから算定したものとかなり一致する。

(1)の実験によって得られた剪断強度は前述の理由により $0.4 \sim 1.0 \text{ g}/\text{cm}^2$ と考えられるが、フロックが転がることによって押さえつけられるため全般的に剪断強度が大きくでている。

Ⅵ 結語 (4)の実験において肉眼で認められるチャンネルが現象の本質を左右するものでないかもしれないが、今後浸透流と肉眼で認められるチャンネルの効果を分離して測定したいと考えている。また(2)(3)の実験についても行ないたい。

また本研究は、文部省科学研究費による研究であることを記し、関係各位に深く謝意を表します。