

## 均質多孔媒体におけるグラウト注入液の流動機構に関する基礎的研究

(Fundamental Study on Intrusion of Grouting)  
Liquids in Saturated Porous Media佐 藤 邦 明\* (Kuniaki Sato)  
加 藤 幸 男\*\* (Yukio Kato)キーワード：地盤／浸透／注入  
(IGC : E7 / K 2)

## はじめに

地下諸工事に係わるグラウト注入技術は近年目覚しく進展し、グラウト注入工法は土木施工の中で重要な工法の一つであるといえよう。しかし、グラウト注入による遮水・止水効果の量的評価や注入量の適正施工量の算定といったことになると、技術的にみて基礎的な研究が乏しいのが現状である。力学的にみれば、地盤や岩盤中へグラウト液のような粘性の高い流体を注入する現象は、多孔媒体中の固液二相流ということになる。実際にはグラウト液自体にいろいろな種類があり、多孔媒体中を流動する過程で流体自体の物性が時間と共に変わることもあって、単純な固液二相流であるとは言い難い<sup>1),2),3)</sup>。

従来、地盤や岩盤の遮水や地盤改良に用いられてきたグラウト液は、流体力学的な観点からすると、大別して、セメント液のように凝固時間の比較的長いもの、LW液のように凝固時間の早いもの、更には単なる増粘剤の役割に注目したものに分けられよう。いずれの場合においても、技術上必要なことは、一つはあるグラウト液を地盤・岩盤に注入しようとした際、どの種のものをどの程度の圧力で注入したら、どこまでどれだけ注入され得るか、といった流動プロセスにおける情報であり、他は注入完了後、その水理学上および力学上の効果がどうであったかの、この二点であろうと考える。

本論はこのようなことを勘案して、セメント液とLW液に限定して実験と理論の両面より流動機構と二・三の解析を進めた。具体的には次の場合である。

- ① ニュートン流動と非ニュートン流動の一様流の実験と解析
- ② ニュートン流動と非ニュートン流動の放射流の解析

\* 埼玉大学工学部 助教授 (浦和市下大久保 255)

\*\* 前田建設(株)  
(1984.4.14 原稿受付・討議期限 1986.4.1, 要請があれば1か月の期限延長可能)

セメント液にしても LW液にしても配合によってこれらの物性も流動特性も変わるので、通常現場で用いられる程度の配合で実験を進めた。本論の結果が必ずしも直接実際の現場に適用できるとは限らないが、基礎的な流動、挙動は類似、共通しているものと考えられ、基本的な物理量や取扱い方法はかなり類似したものとなり、今後の研究の足掛りにもなる。そういったことで工学的に役立つと思われたので、ここにまとめて報告するものである。

## 1. 多孔媒体中のグラウト流動モデルと基礎理論

## 1.1 ニュートン流動の一様流および放射一次元流の解析

低濃度のセメント液・水ガラスのように比較的凝固時間が長い液体を水で飽和された地盤や岩盤中に注入、圧入するような場合は流体の粘性は若干高くてもニュートン流動することが実験的にも認められる。そこで、多孔媒体中のグラウト流動の解析の第一歩として、ここで基礎理論を展開しておくこととし、ビンガム流動を含む非

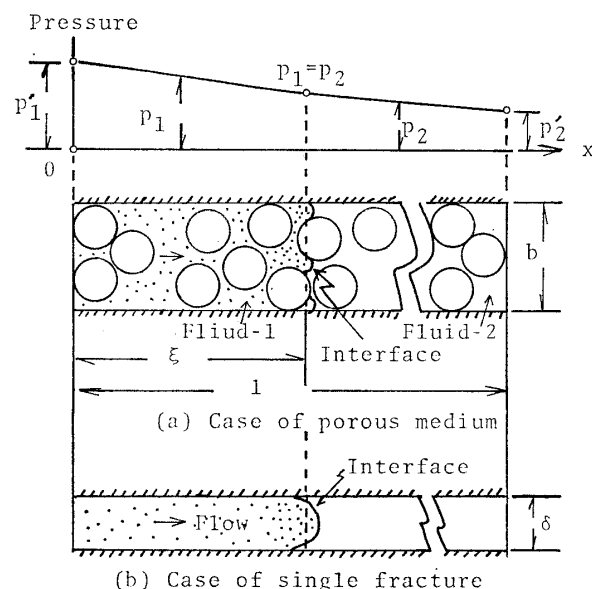


図-1 グラウト液の侵入モデル

ニュートン流動による解析への足掛りとする。

いま、多孔媒体中を高粘性ニュートン流体が流れる場合の最も簡単で、かつ基本的な流動モデルとして、図-1 (a), (b) のような流れを考える。まず、図-1 (a) の上図は幅  $b$  (あるいは断面積  $A$ ) の水平な流体 2 で飽和された多孔媒体中に左側から流体 1 が境界圧力差によって侵入する場合のモデルである。同様に、下図は幅  $\delta$  の水平間隙中に流体 1 が流体 2 を排除して侵入する場合である。両者共に流動としては同じような取扱いが可能である。

(1) ニュートン流動の一般流

(a) 基礎式

境界面の位置が原点から  $\xi(t)$  にあるとすれば、界面の式は

$$F(x, t) = x - \xi(t) = 0 \quad (1)$$

と書け、 $DF/Dt = 0$  より、

$$S\lambda \frac{\partial \xi}{\partial t} - q_x = 0 \quad (2)$$

である。ここに、 $x$ : 座標、 $t$ : 時間、 $\lambda$ : 空隙率、 $q_x$ :  $x$  方向流速、 $S$ : グラウト液の飽和度である。

連続式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} &= 0, & 0 < x < \xi \\ \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} &= 0, & \xi < x < l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

がそれぞれの領域で成立つ。ここに、 $l$ : 浸透層の長さ、 $\phi = (p/w + z)$ : ピエゾメーター水頭、 $w$ : 流体の単位重量である。

運動の式はダルシー則から

$$q_x = -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (4)$$

となる。ここで、 $k_1, k_2$ : 各々流体 1, 2 の固有浸透係数 [次元:  $L^2$ ]、 $\mu_1, \mu_2$ : 各々流体 1, 2 の粘性係数である。

境界条件は、両端境界および内部界面で

$$\left. \begin{aligned} x=0, & \phi_1 = \phi_1' \\ x=\xi, & \phi_1 = \phi_2 \\ x=l, & \phi_2 = \phi_2' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。ここで  $\phi_1', \phi_2'$ : 境界のピエゾ水頭値である。

図-1 に示したように、流れが水平流であるとする、式 (3) から

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= C_1 x + C_1' \\ p_2 &= C_2 x + C_2' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となって、浸透層中の圧力分布は  $x$  方向に直線的に変化することになる。ここに、 $C_1, C_1', C_2, C_2'$ : 定数、 $p_1, p_2$ : 各々流体 1, 2 の圧力とする。

式 (6) における定数  $C_1', C_2'$  は式 (5) によって、境界圧力  $p_1', p_2'$  を用いて、 $C_1' = p_1', C_2' = p_2' - C_2 l$  とな

る。よって、式 (6) は、

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= C_1 x + p_1' \\ p_2 &= -C_2(l-x) + p_2' \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

とかける。

次に、式 (4) へ式 (6) を代入すると、 $C_1 k_1 / \mu_1 = C_2 k_2 / \mu_2$  となる。一方、式 (5) へ式 (6) を代入すると、 $C_1 \xi + p_1' = -C_2(l-\xi) + p_2'$  となって、定数  $C_1, C_2$  は、

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{k_2 \mu_1 (p_1' - p_2')}{\{(k_1 \mu_2 - k_2 \mu_1) \xi - k_1 \mu_2 l\}} \\ C_2 &= \frac{k_1 \mu_2 (p_1' - p_2')}{\{(k_1 \mu_2 - k_2 \mu_1) \xi - k_1 \mu_2 l\}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と決まる。

従って、式 (7) へ式 (8) を代入し、式 (4) は

$$q_x = \frac{k_1 k_2 (p_1' - p_2')}{\{k_1 \mu_2 l - (k_1 \mu_2 - k_2 \mu_1) \xi\}} \quad (9)$$

と書ける。

結局、式 (2) は、式 (9) を代入して、

$$\lambda S \frac{d\xi}{dt} - \frac{k_1 k_2 (p_1' - p_2')}{\{k_1 \mu_2 l - (k_1 \mu_2 - k_2 \mu_1) \xi\}} = 0 \quad (10)$$

となる。

そこで、圧力差を水頭換算するために  $(p_1' - p_2') = \rho_2 g h$  ( $\rho_2$ : 水の密度) とおいて、無次元量

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\xi}{l}, & T &= \frac{t}{t_0}, & N &= \frac{1}{\lambda S}, & I &= \frac{h}{l} \\ K &= \frac{k_2}{k_1}, & \alpha &= \frac{\mu_1}{\mu_2}, & D &= \frac{k_2 \rho_2 g t_0}{\mu_2 l} \end{aligned} \right\}$$

を導入する。ここで、 $h$ : 換算水頭、 $t_0$ : 基準時間とする。式 (10) は、

$$\frac{dL}{dT} - \frac{NDI}{\{1 - (1-K\alpha)L\}} = 0 \quad (10)'$$

と書ける。

式 (10)' は、水平多孔体が初め  $\rho_2, \mu_2$  の流体 2 で飽和されている状態のところへ、流体 1,  $\rho_1, \mu_1$  が侵入する際の基礎式となる。ここで、 $M = 1/\alpha K$  (つまり、 $M = (k_1/\mu_1)/(k_2/\mu_2)$  を稼動比 (Mobility ratio)) と呼んで、流れの特性を支配するパラメーターとなる。もし、 $M = 1$  なら、 $dL/dT = \text{const.}$  となって、理論上グラウト液の侵入は時間と共に変わらないことになる。

(b) 解

(i) 硬化時間が長い場合

式 (10)' は  $\alpha$  が時間と共に変わらない (つまり、 $\alpha = \mu_1/\mu_2 = \text{const.}$ ) 場合は、条件  $T = 0$  ( $t = 0$ ) で  $L = 0$  ( $\xi = 0$ ) の条件下で積分して、

$$L = \frac{[\{1 + 2NDI \cdot \{K\alpha - 1\} T\}^{1/2} - 1]}{K\alpha - 1} \quad (11)$$

$$L = \frac{[\{1 + 2NDI \cdot (1/M - 1) T\}^{1/2} - 1]}{(1/M - 1)} \quad (11)'$$

と書ける。

したがって、上述したように、 $M < 1$  の場合（水で飽和された多孔媒体中にグラウト液のように粘性が大きい液体が侵入するような場合、 $M = k_1 \mu_2 / k_2 \mu_1 < 1$ ）、 $L$  は時間と共に減速される。一般にグラウト注入のように、水で飽和された地盤中へ粘性の高い液体が侵入するような場合は  $M < 1$  となって流れとしては安定な流れということになる。

式 (11) で与えられる解は薄いセメント液や水ガラスが水平地層中に侵入するような場合の解を与え、侵入量は

$$Q = \lambda S A \xi \quad (12)$$

で与えられる。ここに、 $A$  : 断面積である。

式 (11)、(11)' はあくまでグラウト液がニュートン流動をするような場合の解であるが、多孔媒体の構成空隙が小さくなり、硬化時間も長くなると、グラウト液の固液分離によって目づまり (clogging) を生み、グラウト液の侵入は著しく阻害される。こういった目づまり現象は浄水場のろ過に应用されているが、その現象の解明は非常に難解であり、グラウト注入論にそれをまともに持ち込むことは実用上必ずしも至当とは言えないように感じられる。そこで、ここでは目づまり現象において従来はっきりと認識されている成果を単純化して应用することとする。

飽和浸透層中にある懸濁液が侵入する場合、空隙中に拘束される固体抑留量  $\sigma$  と浸透係数  $k$  の関係は一般に、 $k/k_0 = e^{-\beta\sigma}$  の形をとることが知られている<sup>4)</sup>。ここに、 $k_0$  : 初期浸透係数、 $\beta$  : 定数である。そこで、この関係から、抑留量  $\sigma$  が時間  $t$  に比例すると仮定し、式 (10)' において、

$$\alpha K \propto \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{k_2}{k_{10} e^{-\beta t}} \quad (13)$$

とおく。ここに、 $k_{10} : k_1$  の初期固有浸透係数とする。

このように考えれば、式 (13) を式 (10)' へ代入して、グラウト液が多孔媒体中に抑留されつつ侵入する場合を近似的ではあるが、取り扱うことが可能となる。

(ii) 硬化時間が短い場合

LW 液のように、硬化時間が数分ということになると、式 (11) は成立しない。その理由は硬化しながら、グラウト液が流れるため、侵入流体の粘性係数が時間と共に大きくなるからである。もし、式 (10)' で得られたように流れとしてはニュートン流動となるが、粘性のみが時間と共に増大する流れを考えるなら、予めグラウト液の粘性の経時変化のみ測っておくことで流れを簡便に解くことができる。問題は粘性係数の経時変化の関係がどうなるかであるが、次式のように仮定する（その理由は後述する）。

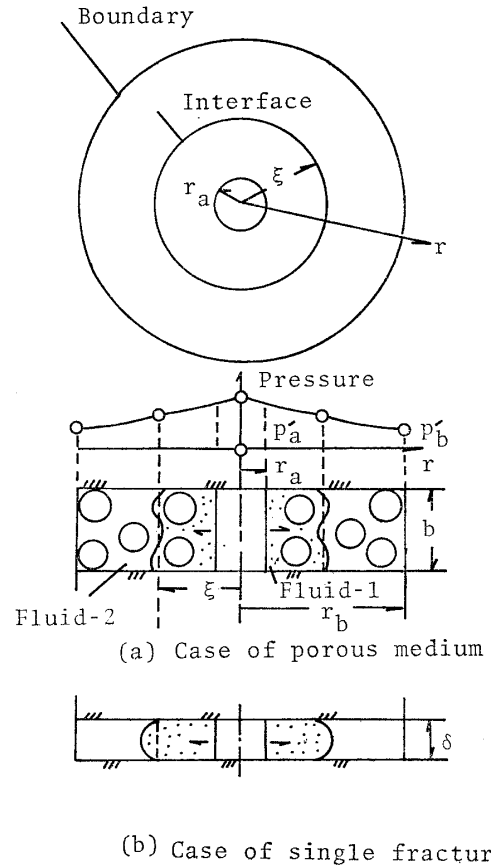


図-2 グラウト液の放射侵入モデル

$$\alpha(T) = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \exp \left\{ \frac{a}{1-T^n} + b \right\} \quad (14)$$

ここに、 $n$  : 指数、 $a, b$  : 定数であり、 $T \leq 1$ 、 $a, b, n$  共にグラウトの種類や温度によって変化するものとする。

この場合は、初等的に解析解を得ることはできないので、式 (10)' と式 (14) から、数値解を求めざるを得ない。そこで、差分式によって  $L_{i+1}$  は

$$L_{i+1} = \frac{[1 + (K\alpha^j - 1) \{2NDIAT + (K\alpha^j - 1)L_i^2 + 2L_i\}^{1/2} - 1]}{K\alpha^j - 1} \quad (15)$$

$$(i=0, 1, 2, 3, \dots, j=0, 1, 2, 3, \dots)$$

となる。ここに、 $T = j\Delta T$  ( $\Delta T$  : 時間差分) であり、

$$\alpha^j = \exp \left[ \frac{a}{1 - \{(2j+1)\Delta T / (2 + T_D)\}^n + b} \right] \quad (16)$$

である。ここに、 $T_D$  : 注入開始までに要する時間（この場合は実験上の値）とする。

(2) ニュートン流動の放射流

(a) 基礎式

図-2 のように、水平一様多孔媒体中へ中心孔からグラウト液を注入する場合、界面の式は式 (2) に対応して、

$$\lambda S \frac{d\xi}{dt} - q_r = 0 \quad (17)$$

となる。ここで、 $q_r$  : 放射方向流速である。

連続の関係は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \right) &= 0, & r_a < r < \xi \\ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \right) &= 0, & \xi < r < r_b \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

となる。ここで、 $r$ ：放射座標、 $r_a, r_b$ ：各々内外境界半径である。

運動の式は Darcy 則から、

$$q_r = -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial r} = -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \quad (19)$$

となる。

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} r=r_a, & \phi_1=\phi_a' \\ r=\xi, & \phi_1=\phi_2 \\ r=r_b, & \phi_2=\phi_b' \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

となる。

流れが水平流であるから、式 (18) から、

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= C_1 \log r + C_1' \\ p_2 &= C_2 \log r + C_2' \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

となって、一様流の場合と違って流体中の圧力分布は直線的ではない。ここに、 $C_1, C_2, C_1', C_2'$ ：定数である。

式 (19), (20) を用いると  $C_1', C_2'$  が決まり、

$$C_1 \log \frac{\xi}{r_a} + p_a' = C_2 \log \frac{\xi}{r_b} + p_b' \quad (22)$$

となる。ここで、 $p_a', p_b'$ ：各々  $r=r_a, r_b$  での境界圧力である。

更に、式 (19) を用いて、定数  $C_1, C_2$  は各々、

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{k_2 \mu_1 (p_a' - p_b')}{k_1 \mu_2 \log \xi / r_b - k_2 \mu_1 \log \xi / r_a} \\ C_2 &= \frac{k_1 \mu_2 (p_a' - p_b')}{k_1 \mu_2 \log \xi / r_b - k_2 \mu_1 \log \xi / r_a} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

と決まる。

よって、式 (19), (21), (22), (23) を用いて、式 (17) は

$$\lambda S \frac{d\xi}{dt} - \frac{k_1 k_2 (p_a' - p_b')}{(k_2 \mu_1 \log \xi / r_b - k_1 \mu_2 \log \xi / r_a) \xi} = 0 \quad (24)$$

となる。

式 (24) が放射流の場合の基礎式となるから、無次元量、

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\xi}{r_b}, & T &= \frac{t}{t_0}, & N &= \frac{1}{\lambda S} \\ I &= \frac{h}{r_b}, & K &= \frac{k_2}{k_1}, & \alpha &= \frac{\mu_1}{\mu_2}, & R' &= \frac{r_a}{r_b} \\ D &= \frac{k_2 \rho_2 g}{\mu_2} \frac{t_0}{r_b} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

を用いると、

$$\frac{dR}{dT} - \frac{NDI}{\{(K\alpha - 1) \log R - K\alpha \log R'\} R} = 0 \quad (26)$$

となる。

式 (26) を  $R$  について解けば、注入半径  $R$  と時間  $T$  の

関係を求めることができる。

(b) 解

(i) 硬化時間が長い場合

式 (26) は  $\alpha K$  が時間と共に変わらないとすれば、条件  $T=0, R=(r_a/r_b) \doteq 0 (r_a \ll r_b)$  とおくと、

$$t = \frac{(K\alpha - 1)(\log R - 1/2)R^2 - K\alpha \log R' R^2}{2NDI} \quad (27)$$

となる。ここで、もし  $R'=(r_a/r_b) \doteq 0$  とすれば、式がもう少し複雑となる。

式 (27) は  $R$  に関して陰形になっているので、

$$\log R = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{(R-1)^n}{n} \quad (28)$$

とおいて、 $n$  を第三項までとると、 $R \doteq 1$  近傍であれば精度よく計算できる。

そうすると、式 (27) は

$$9(1-K\alpha)R^3 - \{7(1-K\alpha) + 3(K\alpha \log R')\}R^2 + 6NDIt = 0 \quad (29)$$

となって、 $R$  の三次式の解となるので、 $R(t)$  を求めることもできる。

注入量  $Q$  は、

$$Q = \lambda S b \pi \xi^2 \quad (30)$$

による。ここに、 $b$ ：多孔媒体の層厚さである。

(ii) 硬化時間が短い場合

硬化時間が短いと、一様流の場合と同様に式 (26) と式 (14) を用いて、数値計算し得る。差分式は式 (26) から、

$$R_{i+1} = \left[ R_i^2 + \frac{2NDI\Delta T}{(K\alpha^j - 1) \log R_i - K\alpha^j \log R'} \right]^{1/2} \quad (31)$$

となる。ここに、 $T_D$ ：実験上の遅れ時間である（後述の実験の場合は 120 秒ととる）。

また、粘性係数の経時変化は式 (16) と同じである。

## 1.2 ビンガム流動の一様流および放射一次元流の解析

ビンガム流動は流体中に働くせん断力が変形速度に単純に比例しないから<sup>5),6)</sup>、運動の式がダルシー則の代わりに、円管内のビンガム流動に関する栓流の式を拡張して Buckingham-Reiner の式、

$$q_x = -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{dp}{dx} \left[ 1 - a' \frac{dp_0/dx}{dp_1/dx} + b' \left( \frac{dp_0/dx}{dp_1/dx} \right)^4 \right] \quad (32)$$

を用いるここで、 $a', b'$ ：定数、 $p_0$ ：始動圧力である。

いま、式 (32) に注目すると、グラウト液の圧力勾配  $dp/dx$  は侵入初期に  $dp/dx$  が大きく、 $a' \gg b'$  であるから、第三項は無視できる。したがって、基礎式は  $P = p_1 - a' p_0, P_2 = p_2$  とおけば、界面の式、運動・連続の式および境界条件が式 (1)~(5) と同じとなる。

一様流の場合、式 (10)' を導びいた時と同様にして、基礎式は、

$$\frac{dL}{dT} - \frac{ND(I-I_0L)}{1+(\alpha K-1)L} = 0 \quad (33)$$

となる。ここに、 $I_0 = h_0 a' / l$ ,  $h_0 : p_0 / \rho_2 g$  である。

更に、式 (10)' と同じ記号によって式 (11) を得た場合と同様の条件、 $T=0$ ,  $L=0$  を用いると、式 (33) の解は、

$$T = \frac{(1-\alpha K)}{NDI_0} L - \frac{1}{NDI_0} \left\{ \frac{I(\alpha K-1)}{I_0} + 1 \right\} \cdot \log \left( 1 - \frac{I_0}{I} L \right) \quad (34)$$

となる。

ここで、式(33)において  $[dL/dT]_{L=L_0} = 0$  とおくと、 $L_c = I/I_0$  となって、 $\xi_c/l = h/ah_0$  となる。つまり、多孔媒体の長さ  $l$  に作用する圧力水頭  $h$  によって限界侵入距離  $\xi_c$  は一義的に決まってしまうことになる。

上述したように、式 (13) で与えたグラウト液の侵入に伴って、目づまりが生じる場合も式 (33) と組み合わせて取り扱うことができる。

更に、一次元放射流の場合も式 (17)~(20) を用い上述と同様にして、基礎式は式 (25) と同じ記号を用いて、

$$\frac{dR}{dT} - \frac{NDI\{1-(I_0/I)R \log R/R'\}}{(K\alpha \log R/R' - \log R)R} = 0 \quad (35)$$

となる。

式 (36) は初等的に解が得にくいので、式 (31) と同様に差分化して解け、目づまりがある場合は式 (13) と組み合わせて解くことになる。式 (36) の差分式は、

$$R_{i+1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{ND\Delta T I_0 (\log R'_i/R'_i)}{(\alpha K-1) \log R_i - \alpha K \log R'} + \left\{ \left( \frac{ND\Delta T I_0 (\log R_i/R'_i)}{(\alpha K-1) \log R_i - \alpha K \log R'} \right)^2 + 4 \left( R_i^2 + \frac{ND\Delta T (2I - I_0 (\log R_i/R'_i) R_i)}{(\alpha K-1) \log R_i - \alpha K \log R'} \right) \right\}^{1/2} \right] \quad (36)$$

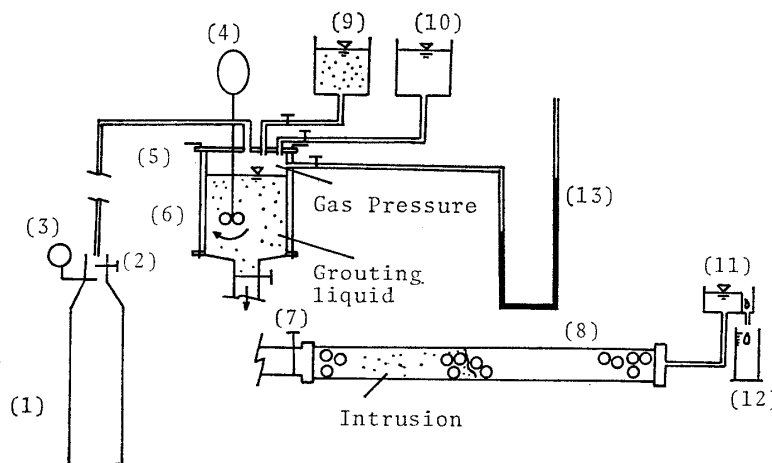


図-3 実験装置とそのシステム

となる。

## 2. 実験装置および実験方法・条件

今回の実験は大別して次の二つの事柄に注目して、各々について個々の実験を行った。

- ① セメント液の抵抗則と LW セメント液の粘性係数の特性
- ② 一様グラウト流動における侵入速度と侵入距離の測定

まず、セメント液の抵抗則については、多孔媒体充填円筒にセメント液を流した場合の定常流速と圧力の関係がどうなるかに着目したものであって、セメント液の流動がニュートン流動か非ニュートン流動となるかを明らかにするための最も基礎的な実験である。

次に、粘性係数の特性についてはセメント液と LW 液の粘性係数値および LW 液の粘性係数の経時変化関係を得るためのものである。

更に、侵入速度と侵入距離の経時変化についてはグラウト液が多孔媒体中に圧入された時、液種の違いによって侵入距離がどう変わるかを一定注入圧の下で調べるものである。

### 2.1 セメント液の抵抗則の実験

この実験は所定の濃度 (表-1 参照) のセメント液を定圧力の下で多孔媒体中を流して、流速と圧力の関係を得ようとするものである。実験装置は図-3 に示したものと同一のもので、図中⑧の多孔媒体充填円筒の長さが 0.30m と短くなって、定常状態でセメント液の浸透試験を行うものであり、⑥のグラウト液タンクの圧力を変えて、⑪のオーバーフロータンクからの流出量を測る。

- (1) Gas tank
- (2) Pressure regulating valve
- (3) Pressure gage
- (4) Agitating motor
- (5) Clamp rod
- (6) Grouting liquid tank
- (7) Valve
- (8) Porous medium pipe
- (9) Cement liquid tank
- (10) LW liquid tank
- (11) Overflow tank
- (12) Graduated Cylinder
- (13) Mercury manometer

表-1 実験条件と特性値

実験ケース	グラウト液の種類	セメントとLWの容積比	水セメント比重量比(%)	水温(°C)	平均粒径(mm)	動水配(水頭換算)	空隙率 $\lambda$	飽和度 $S$	透水係数 $k$ (cm/s)	実験による $\xi_c/l$	実験による $t_c/t_0, t_c$ (s)
Exp. A-1	LW	1:3	100	19	5.4	1.80	0.42	0.96	18.0	0.50	0.065
A-2	"	"	"	"	"	2.46	"	0.93	19.0	0.61	0.082
A-3	"	"	"	"	"	2.93	"	0.91	18.0	0.68	0.090
A-4	"	"	"	"	"	3.73	"	0.96	19.0	0.92	0.110
A-5	"	"	"	"	"	4.01	"	0.92	19.0	0.96	0.120
A-6	"	"	"	"	"	4.53	"	0.95	19.0	0.98	0.140
Exp. B-1	LW	1:3	100	19	2.5	2.48	0.38	0.87	5.5	0.40	0.110
B-2	"	"	"	"	"	2.88	"	0.89	4.2	0.44	0.120
B-3	"	"	"	"	"	3.35	"	0.82	5.0	0.55	0.140
B-4	"	"	"	"	"	4.81	"	0.89	4.9	0.68	0.160
Exp. C-1	セメント液	—	100	19	5.4	1.87	0.42	0.85	17.0	0.52	15
C-2	"	—	"	"	"	2.83	"	0.91	15.0	0.88	40
C-3	"	—	"	"	"	3.51	"	0.92	15.0	0.86	20
C-4	"	—	"	"	"	4.29	"	0.82	14.0	—	—
Exp. D-1	セメント液	—	100	19	2.5	3.58	0.38	0.83	5.4	0.90	55
D-2	"	—	"	"	"	3.95	"	0.95	3.9	0.85	60
D-3	"	—	"	"	"	4.64	"	0.83	5.3	0.96	65

## 2.2 一様多孔媒体中のグラウト侵入実験

本実験で用いた装置のシステムと各部の名称は図-3に示すように、大別すると、圧力発生源、グラウト液加圧円筒、多孔媒体、および流出部からなる。各部の名称と規模は①ガスタンク（圧力発生源、 $N_2$ ガス、 $150 \text{ kgf/cm}^2$ ）（実験時： $0 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ ）、②圧力調整バルブ、③圧力計、④攪拌機（回転数 300/s）、⑤緊締棹、⑥グラウト液タンク（耐圧透明アクリルタンク、内直径 0.25m、高さ 0.25m）、⑦バルブ（全断面開放バルブ）、⑧多孔媒体パイプ（耐圧透明アクリルパイプ、直径 0.026m、長さ 3.05m）、⑨セメント液タンク（セメント液の配合と計量）、⑩オーバーフロータンク（容量  $0.001 \text{ m}^3$  の矩形）、⑪メスシリンダー、⑫水銀マンオメーターである。本実験は、グラウト液タンク中に所定の圧入液を入れて混合しながら、ガスタンクから圧力をかけて、飽和多孔媒体パイプ中に一定圧力をかけて、液を浸透させて、侵入液フロントの進行と圧入液量を計るものである。侵入液フロントは連続写真によって、計ることができ、フロント自体の界面は明らかに観測できる。

実験手順は次のようである。初めに多孔媒体パイプに多孔体を所定の空隙率で充填し、下流オーバーフロータンクから水を徐々に浸透・飽和させ、飽和状態にしておく。次に、下流オーバーフロータンクの水面を空の状態にあるグラウト液タンクの底面と等しくするよう下流オーバーフロータンクを上昇させる。この状態で、例えばセメント液注入実験であれば、所定の配合のセメント液

をセメント液タンク中で作った後、グラウト液タンクに流下させる。そこで、セメント液タンク下側のバルブを止め、グラウト液タンクの蓋を緊締棹によって締め、攪拌機によって混合を促進する。しかる後、連続撮影カメラを用意し、ガスタンクの圧力を所定の圧力を得るまで開放し、定圧値をガスタンクの圧力計と水銀マンオメーターによって、二重にチェックして読みとる。そこで、多孔媒体パイプの直上流側のバルブのところまでグラウト液を降下させて実験準備が終わる。最後に、全断面開放バルブを開き、グラウト液の侵入の時間変化を撮影し、同時に下流オーバーフロー水量を測って、グラウト液侵入フロントが停止するまで実測を続ける。

実験ケースは表-1にまとめて示してあるように、多孔媒体としては、平均粒径 5.4mm と 2.5mm の2種類を用い、グラウト液としては LW セメント液とセメント液の2種類であった。圧力勾配（水頭換算による動水勾配）は表中にあるように与え、実験としては LW セメント液 10種、セメント液 6種の計 16 ケースであった。水セメント比や LW 配合もすべて統一し、液温も  $19^\circ\text{C}$  と一定として実験した。

本実験ではグラウト液の侵入後の飽和度も測った。この測定は各実験終了後グラウト液の充填された状態のままで、コア状のサンプルを採取して、その全重量を計ると同時に浸入液の含水比を測定することによって知ることができる。

実験に用いたセメントは高炉コロイドセメント 3-05

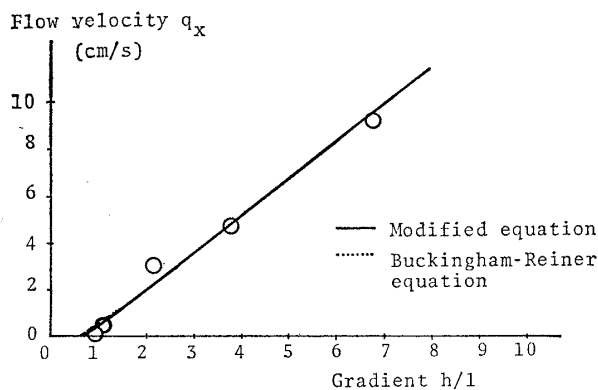


図-4 19°Cにおける  $W/C=100\%$  のセメント液の  $q_x$  と  $h/l$  の実験的關係

(日鉄工業KK), また LW は LW-50 珪酸ソーダ1号 (日本化学工業KK) であった。

### 3. 実験結果と理論の比較・検討

セメント液と LW 液について, いろいろな圧力条件下で侵入実験を試みたので, それらの結果に基づいてグラウト液の二相液としての流動メカニズム, LW 液の粘性係数および侵入液界面の経時変化を中心に 1. で述べた諸理論の適用性を検討することとしよう。

#### (1) セメント液の流動特性

まず, 初めに, 多孔媒体中のセメント液の流速  $q$  と圧力勾配 (水頭換算)  $h/l$  についての結果について述べる。既に述べたように, ガラス球充填層 (平均粒径 5.4mm の場合) 中における流速  $q$  と  $h/l$  の関係は図-4 のようになる。明らかに, 今回用いた比較的高濃度のセメント液の多孔媒体中における流動はビンガム流動ということになる。

いま, 式 (32) に述べた Buckingham-Reiner の式における定数  $a', b'$  を定めると,  $i_0=0.73$ ,  $a'=0.95$ ,  $b'=0.05$  ということになって,  $a' \gg b'$  であることが分かる。図-4 中にはこれら  $a', b'$  の値を用いて Buckingham-Reiner の式を比較してあるが, 始動動水勾配  $i_0$  を有する曲線となっている。また,  $b'=0$  と置いた Buckingham-Reiner の式は  $i_0$  を原点にもつ直線となる。

#### (2) LW 液の粘性係数の経時変化

LW 液の粘性は時間と共に急激に増大するが, それは主に配合と濃度に依存するから, 今回の実験では表-1 に示した配合として, 温度, 17.7°C, 19.0°C, 21.0°C および 26.3°C の 4 ケースについて粘性係数の経時変化を測った。それらの中で 19.0°C, つまり, 表-1 に示した実験時の温度に対応) のものを示したものが図-5 である。図-5 は縦軸に比粘性係数  $\mu_1/\mu_2$ , 横軸には無次元時間  $t/t_0$  ( $t_0$ : 硬化時間)をとってある。この実験結果から分かるように, LW 液の粘性は時間と共に急激に増加し,

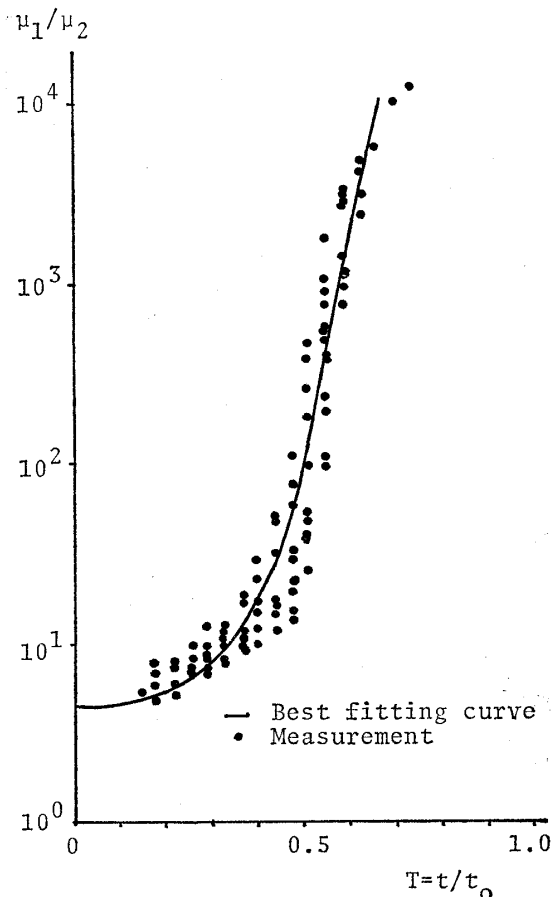


図-5 温度 19°C での LW 液の  $\mu_1/\mu_2$  と  $T$  の関係

硬化時間は  $t_0=272$  秒であった。

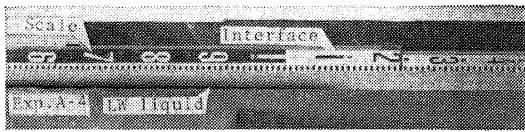
いま, 式 (14) における定数  $a, b, n$  を最小二乗法によって決めると,  $a=21.2$ ,  $b=-19.7$ ,  $n=3$  となって, LW 液の粘性係数の経時変化をうまく定式化できることが分かる。このようにして定数を決定した  $\mu_1/\mu_2 \sim t/t_0$  関係は図-5 に示してある。

同様に, 定数  $a, b, n$  が温度によってどう変わるかを示すと, 17.7°C の場合,  $t_0=303$  秒,  $a=24.2$ ,  $b=-22.9$ ,  $n=3$ , 21°C の場合,  $t_0=219$  秒,  $a=16.4$ ,  $b=-14.9$ ,  $n=3$ , 26.3°C の場合,  $t_0=181$  秒,  $a=10.1$ ,  $b=-7.0$  となった。つまり, 温度が高くなると, 同じ配合の LW 液でも硬化時間が短くなるということが明らかとなる。

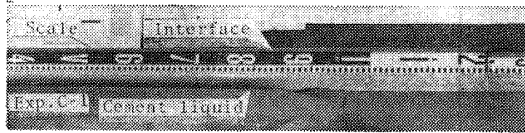
このように, 配合と温度によって粘性係数の経時変化関係を求めておけば, 1. で述べたニュートン流動による解析に適用することによって, LW 侵入距離 (放射流では半径), 注入量とその経時変化を計算することができるはずである。

#### (3) グラウト液侵入の経時変化

表-1 に示した実験ケースについて, 一様流のセメント液と LW 液の侵入経時変化を写真撮影し, 侵入距離の経時変化を測定した結果について 1. で述べた理論解



(a) Exp. A-4 (5分経過後)



(b) Exp. C-2 (5分経過後)

写真-1 グラウト液の侵入状況

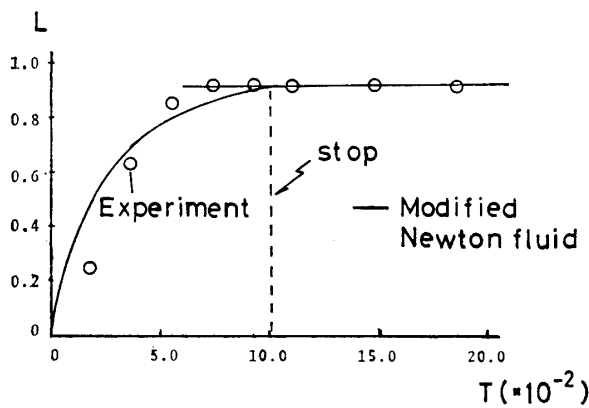


図-6 Exp. A-5 の場合の  $L$  と  $T$  の実験結果

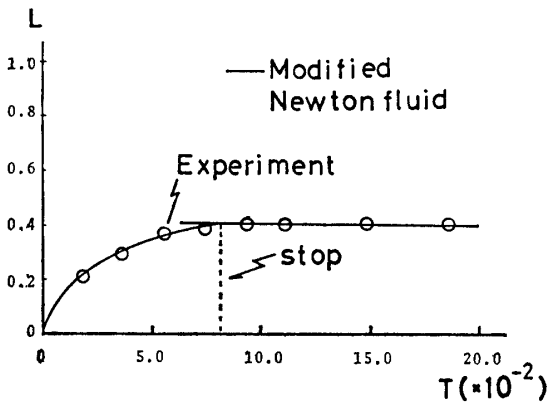


図-7 Exp. B-3 の場合の  $L$  と  $T$  の実験結果

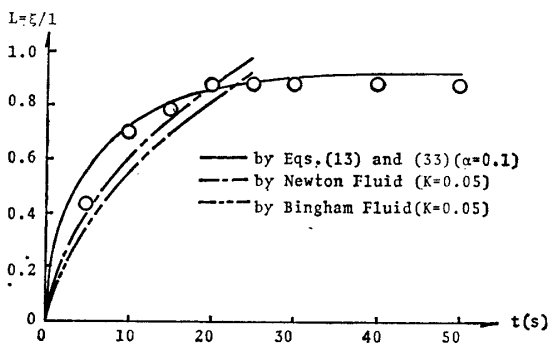


図-8  $L$  と  $t$  の関係

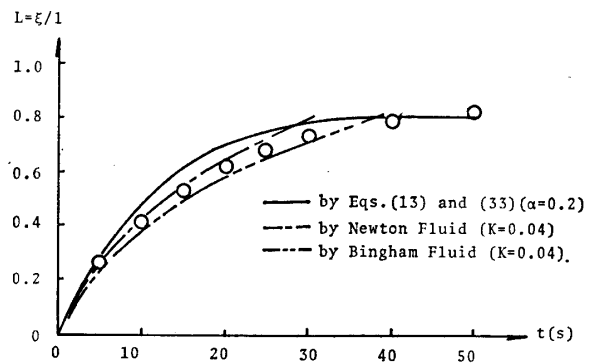


図-9  $L$  と  $t$  の関係

析結果と比較・検討してみよう。

まず、グラウト液の侵入に伴うフロント付近の写真の二例を写真-1 に示している。写真から分かるように侵入フロントは侵入初期には一様であるが、時間が経過すると共に、侵入長さが大きくなり、フロント付近では重力の影響によって傾斜してくる。

次に、侵入液の飽和度  $S$  は表-1 に実測結果を示したように、0.82~0.96 とかなり大きい。つまり、ガラス球充填層の空隙部分に液がほとんど飽和に近く充填されつつグラウト液が侵入することが分かる。

更に、グラウト液侵入距離  $\xi/l$  と時間  $t$  (あるいは  $t/t_0$ ) については、表-1 に示した諸実験ケースの中で、LW 液による実験 A-5, B-3 およびセメント液による C-3, D-1 の4つの結果を図-6, 7, 8, 9 に示した。その理由は圧力勾配がいずれもほぼ等しいものを比較するためである。実験結果によっても分かるように、侵入は圧力が一定下では必ずある時間経過すると停止してしまっている。図-6, 7 は LW 液によるものであるが、横軸は硬化時間で無次元化し、縦軸は多孔媒体充填層の長さ  $l$  で無次元化している。両者共に、硬化時間の 1/10 程度で侵入液の流動は停止してしまっている。また、充填層の粒径が小さいほど侵入距離は小さい。

他方、図-8, 9 はセメント液によるものであるが、粒径が大きいほど早く侵入し、早く停止してしまっている。侵入距離については両者あまり変わらず、やや粒径が小さいと少ないようである(表-1 参照)。

以上実験による侵入距離の経時変化について説明したが、他の実験結果もほとんど同様の性質をもっていた。

いま、これら上述の実験結果4例を対象として、1.で述べた理論の適用性を検討してみる。

初めに、LW 液の侵入については式 (15), (16) を用いて検討する(この場合を修正ニュートン流動と呼ぶこととする)。なぜなら、LW 液の流動は単純なニュートン流動ではないから、ニュートン流動の解析を行っても無意味である。図-6, 7 には計算結果を実線で示したが、



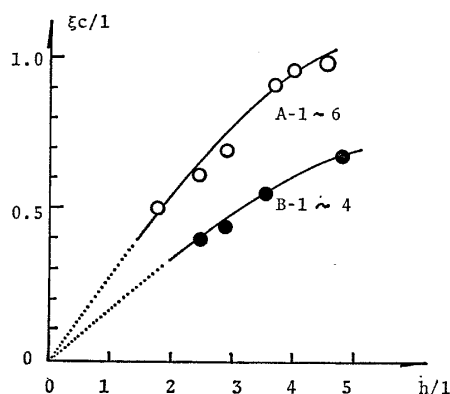


図-10 LW 液の  $\xi_c/l$  と  $h/l$  の実験的關係

実験をうまく説明しているものと思う。これらにおいて、相対浸透係数は実験より、各々、 $K=0.55, K=0.75$  である。他の実験結果も同様に  $K=0.55\sim 0.75$  の範囲で実験結果と式 (15), (16) による計算値は大変良く一致した。式 (15), (16) の理論が適切であるものと考えられよう。

一方、図-8, 9 によるセメント液の侵入についてはニュートン流動による式 (11)', ビンガム流動による式 (33), および目づまりを考慮した式 (13) と (33) の解の三者を同時に示し、実験値と比較した。図-8 は実験ケース C-3 の場合であるが、一点鎖線がニュートン流動によるもので、二点鎖線がビンガム流動によるものであり、いずれも  $K=0.05$  である。また、実線は目づまりを考慮したものを示し、 $\alpha=0.1$  の場合である。ニュートン流動による解では侵入距離は増加しつづけ、侵入フロントが停止することは理論的にあり得ない。同様に、ビンガム流動による解曲線も増加傾向はニュートン流動より小さいものの実験値より全体に大きい値をとっている。これは共に目づまりによる効果を考慮していないためであり、式 (13) と (33) の解は初期にはやや大きい値をとるが停止に至る過程では実験値をうまく説明できているものと思う。このことは図-9 の実験ケース D-1 についても同様（この場合、 $K=0.04, \alpha=0.1$ ）であった。ここで示した実験ケース C-1, D-1 の他では  $K=0.05$  であったが、 $\alpha=0.1\sim 0.2$  の値で実験値をうまく説明できた。図-8, 9 から明らかのように、セメント液の注入初期は目づまりの効果は少ないが、時間の経過に伴い侵入距離が大きくなるにつれて、目づまり効果が支配的になってくるものと思われる。一方、図-6, 7 に示した LW 液の場合は早期に侵入フロントは停止するから、侵入距離は目づまり効果よりゲルタイムに支配されるものと考えられる。

更に、図-10 は LW 液の限界侵入距離の無次元量  $\xi_c/l$  と圧力出頭勾配  $h/l$  の関係を表-1 に掲げた実験結果より描いたものであり、実験ケース A-1~6（ガラス

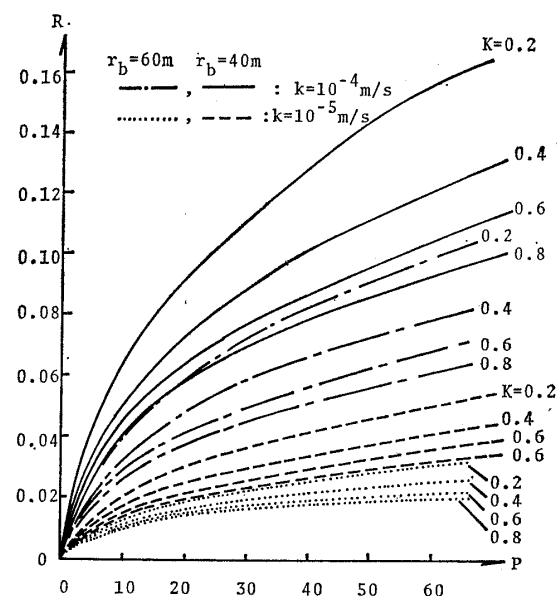


図-11 LW 液の  $R$  と  $P$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の計算曲線 ( $r_a=0.05$ m,  $r_b=40$ m, 60m,  $\lambda=5\%$ ,  $S=0.9$  の場合)

球粒径 5.4mm の場合) のほうが B-1~4 (粒径 2.5mm) の場合より  $\xi_c/l$  が大きくなることを示している。明らかに、粒径が大きいと、注入しやすいことを示している。

図-11 には LW 液が一様水平地盤に放射一次元流として注入される場合の注入半径  $R$  と注入圧力  $P$  の関係を式 (16) と式 (31) によって計算したものであり、 $r_a=0.05$ m,  $r_b=40$ m および  $r_b=60$ m とし、空隙率  $\lambda=5\%$ , 充填率  $S=0.9$ , ゲルタイム  $t_0=272$ s ととって、固有浸透係数比  $K$  をパラメータに示されている。図中、ダルシーの透水係数  $k=10^{-4}$ m/s と  $10^{-5}$ m/s による計算曲線は区別されている。図より、注入半径  $R$  は地盤の透水係数が大きいほど大きくなり、 $K$  が大きいほど注入されやすいことが分かり、透水層の影響半径  $r_b$  の小さいほど注入半径が大きくなることが知れよう。ここではあくまで参考程度に計算例を示したが、図中の圧力範囲では  $R$  は 0~6m 程度となっている。

## む す び

鉄道トンネルの中で最も難工事となった中山トンネルの貫通をまって上越新幹線も開通し、着工以来20年余、世紀の大工事といわれた青函トンネルも開通の運びになるろうとしている。これらいずれのトンネルもグラウト注入技術によるところが大きい。それほどグラウト注入技術は近年目覚しく進展し、土木施工の中で重要な位置にあると言えよう。にもかかわらず、グラウト液の地盤中の流動メカニズムや注入効果の評価についてはあまり科学的に十分な研究成果がないように思う。このような観

点から、本論では基本的にガラス球充填層中をセメント液、および LW 液が流動する際の力学的性質を明らかにし、流動解析を行ったものである。グラウト流動としては単純ではあるが、実験結果および理論の両結果からいくつか新しい結論が得られた。要約すると、次のようになる。

- ① グラウト液の多孔媒体中の流動速度は、圧力が一定の下で時間と共に減少し、侵入もやがて停止し、流れとしては安定流となる。
- ② セメント液のように凝固時間が比較的長い液の浸透流は、濃度が薄い時ニュートン流動と見なせ、ある程度濃い時ビンガム流動をとる。
- ③ LW 液の多孔媒体の流動は凝固時間に支配され、流動速度は早く減少する。
- ④ グラウト液の一樣流における侵入長は式 (11), (33), 注入放射流における侵入半径は式 (27), (35) で計算されることが実験的に実証された。
- ⑤ LW 液の粘性係数経時変化は式 (14) のように指数的に増加することが分かり、温度が高いと早く凝結する。
- ⑥ 凝固時間が短い場合の LW 液の場合の一樣流における侵入距離は式 (10), (14) で計算され、注入による放射侵入半径式 (14), (26) で求められる。
- ⑦ 濃いセメント液の浸透流はビンガム流動となり、

始動圧力値が存在する。しかし、この場合の侵入距離は近似的に式 (10)', (34) から、侵入半径は式 (27), (35) によって計算される。

実際の LW グラウト注入は注入圧の与え方が脈動的であり、非常に高い圧力で地山岩盤の割れ目に圧入されるから、本研究のような場合と多少違う流動様式であると思われるが、流れの基礎的性質は類似なものと考えてよからう。

最後に本研究を進めるに当たって、日本鉄道建設公団青函建設局の各位のご支援・ご協力を得た。記して心よりお礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Muskat, M. (1937): *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, McGraw-Hill Book Company, pp. 453-466.
- 2) 土木学会水理委員会「固液混相流の力学」研究小委員会 (1983): 「固液混相流の力学」, pp. 1-60.
- 3) 混相流シンポジウム実行委員会 (1982): 「混相流の基礎理論と応用技術」, pp. 1-255.
- 4) 北川 明・石崎勝義 (1980): 浮遊物による目づまりに関する研究, 「土木学会第 24 回水理講演会論文集」, pp. 91-96.
- 5) Sakata, M., Yamane, S., Kasami, H. and Sakamoto, A. (1979): "Pumpability and rheological properties of fresh concrete," Takenaka Tech. Res. Rept. No. 22, pp. 90-96.
- 6) 後藤康平・平井西夫・花井哲也 (1969): 「レオロジーとその応用」, 共立出版, pp. 70-72.