

## 均質多孔媒体におけるグラウト注入の理論と実験

(Experiments and Dynamic Analyses of Injecting Grout)  
in Homogeneous Porous Media

佐藤 邦明\* (Kuniaki Sato)

キーワード：グラウチング／室内実験／解析／地盤  
(IGC : E 7/K 2)

## 1. はじめに

トンネルや地下空洞に限らずダム基礎、地下掘削といった土木工事においてもグラウト技術は不可欠なものとなっており、その有効性や施工実績は語るまでもない。しかし、グラウトによる改良地盤・岩盤の力学的強度、安定性の量的評価に加え、グラウト液の流動・侵入プロセスおよび改良後の水理効果といったことについては研究の余地があろう。このことはグラウトの適正施工量の設計や効果の判定に伴ってあいまいさを残すことになる。

従来、地盤や岩盤の改良、遮水に用いられてきたグラウト液は大別して、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短いもの、更に単なる増粘材の役割をもたせるものに分けられよう。いずれの場合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過程における予測、他は注入完了後、その水理効果および力学上の安定性・強度がどうであったか、この二点であろうと考える。このことについて、基礎的な研究は二・三報告されているが<sup>1)~3)</sup>、放射一次元流の流動プロセスにおけるものは見当たらない。

本論は水平および鉛直均質多孔質地山モデル中にグラウト液としてセメント液および  $LW$  液を定圧注入した時、ニュートン流と非ニュートン流としての放射流の理論解析を行い、これら解析結果の適用性を調べるために室内実験を行ったものである。ここで得られた研究成果が直ちに実際の地盤や岩盤の場合に現場で適用し得るとは必ずしも言えないが、現象把握の基本となるものと考えたのでここにまとめて報告するものである。特に液・

液二相流の取扱いにより注入半径と注入量の経時変化の量的評価に力点を置いて述べる。

## 2. グラウト流動モデルと基礎理論

## 2.1 水平地山モデルへの注入

低濃度のセメント液のように比較的凝固時間の長い流体を水で飽和された地盤や岩盤に一点から定圧で注入するような場合はニュートン流動することが実験的に認められている。しかし、粘性がある程度高くなると、注入液は多孔媒体中をビンガム流動することが基礎的な実験によって分かっている<sup>4)</sup>。更に、 $LW$ 液のような注入液は侵入の過程で時間と共に凝固し、粘性が経時的に増加することも知られている。従って、ここではニュートン流動、ビンガム流動および粘性の経時的増加を考慮した流動の三者に分けて解析することとする。いずれの解析においても水平地山モデルは図-1 に示したように、幅  $b$  の水平な流体 2 で飽和された多孔媒体において、その中央から流体 1 を一定の圧力差で注入する場合である。図中、グラウト液は注入孔と外側境界の圧力差によって、同心円状に時間と共に侵入し、流体 1・2 の境界

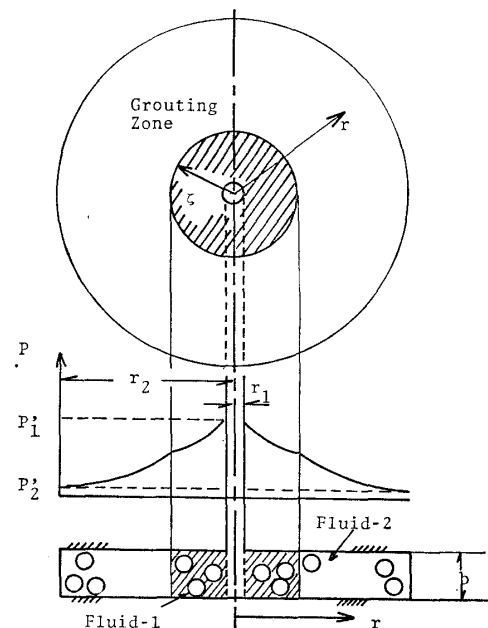


図-1 水平地山モデル

\* 埼玉大学工学部 助教授 (浦和市下大久保 255)  
(1985.4.13 原稿受付・討議期限 1986.10.1, 要請があれば1か月の期限延長可能)

は明りょうであって界面力は考えないこととする。

(1) ニュートン流動の場合

図-1 に注目し、まず界面の式は、

$$nS_c \left. \frac{d\zeta}{dt} - q_{r_1} \right|_{r=\zeta} = 0, \quad (1)$$

となる。ここで、 $n$ : 間隙率、 $S_c$ : 間隙中にグラウト液の占める割合 (充填率)、 $\zeta$ : 注入孔中心よりグラウト液の界面までの半径、 $q_{r_1}|_{r=\zeta}$ :  $r=\zeta$  でのグラウト液の流速、 $r$ : 注入孔中心よりの座標、 $t$ : 時間である。次に、運動の式は流体 1, 2 共にニュートン流動を考えるとダルシーの式より、

$$\left. \begin{aligned} q_{r_1} &= -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{dp_1}{dr} \\ q_{r_2} &= -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{dp_2}{dr} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ここに、 $\mu_1, \mu_2$ : 各々流体 1, 2 の粘性係数、 $p_1, p_2$ : 各々流体 1, 2 における圧力、 $k_1, k_2$ : 各々流体 1, 2 の固有浸透係数、 $q_{r_1}, q_{r_2}$ : 各々流体 1, 2 の浸透流速である。

更に、流体 1, 2 において圧力勾配は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dp_1}{dr} \right) &= 0: r_1 \leq r \leq \zeta \\ \frac{d}{dr} \left( r \frac{dp_2}{dr} \right) &= 0: \zeta \leq r \leq r_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

でなければならない。

一方、界面および境界条件は、

$$r = \zeta: \left. \begin{aligned} p_1 &= p_2 \\ q_{r_1} &= q_{r_2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となり、

$$\left. \begin{aligned} r = r_1: p_1 &= p_1' \\ r = r_2: p_2 &= p_2' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。ここで、 $r_1, r_2$ : 各々注入孔半径および外側境界までの半径、 $p_1', p_2'$ : 各々  $r=r_1, r_2$  における境界圧力である。

式 (1)~(5) を用いて解は次のように求まる。

式 (3) は積分して、

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

となる。ここに、 $C_1, C_2, C_1', C_2'$ : 積分定数である。

条件式 (4) と式 (2) より、

$$C_1 \log_e \zeta + C_1' = C_2 \log_e \zeta + C_2', \quad (7)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{k_1 \mu_2}{k_2 \mu_1}, \quad (8)$$

を得るから、式 (6) と (7) より  $C_1', C_2'$  を消去すると、

$$C_1 \log_e \left( \frac{\zeta}{r_1} \right) p_1' = C_2 \log_e \left( \frac{\zeta}{r_2} \right) + p_2'$$

となる。

上式と式 (8) から、 $C_1, C_2$  は次のように決まる。

$$C_1 = \frac{k_2 \mu_1 (p_1' - p_2')}{k_1 \mu_2 \log_e (\zeta/r_2) - k_2 \mu_1 \log_e (\zeta/r_1)},$$

$$C_2 = \frac{k_1 \mu_2 (p_1' - p_2')}{k_1 \mu_2 \log_e (\zeta/r_2) - k_2 \mu_1 \log_e (\zeta/r_1)},$$

となる。

従って、式 (2) は式 (6) により、

$$q_{r_1}|_{r=\zeta} = -\frac{k_1 k_2 (p_1' - p_2')}{\{k_1 \mu_2 \log_e (\zeta/r_2) - k_2 \mu_1 \log_e (\zeta/r_1)\} r}, \quad (9)$$

となるから、式 (1) へ代入して、

$$\frac{d\zeta}{dt} - \frac{1}{nS_c} \frac{k_1 k_2 (p_1' - p_2')}{\{k_2 \mu_1 - k_1 \mu_2 \log_e (\zeta/r_2) - k_2 \mu_1 \log_e (r_1/r_2)\} \zeta} = 0, \quad (10)$$

を得る。

式 (10) は無次元化して

$$\frac{dR}{dT'} - \frac{NI}{\{(KM^* - 1) \log_e R - KM^* \log_e B\} R} = 0, \quad (11)$$

ここに、 $R = \zeta/r_2$ ,  $T' = t/\tau$ ,  $N = 1/nS_c$ ,  $I = h/r_2$ ,  $K = k_2/k_1$ ,  $M^* = \mu_1/\mu_2$ ,  $B = r_1/r_2$ ,  $p_1' - p_2' = \rho_2 g h$ ,  $h$ : 換算水頭、 $\tau = \nu_2 r_2 / k_2 g$ ,  $\nu_2$ : 流体 2 の動粘性係数とする。

式 (11) の解は初期条件  $T=0$  で  $R=B$  とおくと、

$$\begin{aligned} R^2 \{ (KM^* - 1)(2 \log_e R - 1) - 2KM^* \log_e B \} \\ + B^2 (KM^* + 2 \log_e B - 1) - 4NIT' = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

と書ける。

式 (12) は定圧注入による注入半径と時間の関係を与えるものであり、注入総量  $\bar{Q}_r$  は、

$$\bar{Q}_r = \pi b n S_c \zeta^2, \quad (13)$$

で求まる。

一方、 $LW$  液のようにグラウト液自体が凝固するまでの時間 (ゲルタイム:  $t_0$ ) 内で粘性の時間変化を伴うものについては、式 (10) を

$$\frac{dR}{dT} - \frac{NDI}{[\{KM^*(T) - 1\} \log_e R - KM(T) \log_e B] R} = 0, \quad (14)$$

と書くことができる。ここに、 $R, N, I, K, B$  の表現は式 (11) の場合と同じであるが、 $T = t/t_0$ ,  $D = t_0/\tau$ ,  $M^*(T) = \mu_1/\mu_2$ ,  $t_0$ : ゲルタイムとする。

ここで注意したいのは  $M(T)$  は時間の関数となり、実験によると、

$$M^*(T) = \exp \left\{ \frac{a}{1 - T^\alpha} + b \right\}, \quad (15)$$

の形となる<sup>3)</sup>。ここに、 $a, b$ : 定数、 $\alpha$ : 指数であって、セメントの種類、水・セメント比、 $LW$  とセメントの配合、および温度によって変わる。

したがって、 $LW$  液のように時間と共に粘性が増加しつつ注入されるような場合は式 (14) と式 (15) を同時に解けば、注入半径の経時変化を求めることができる。これは解析解を得ることができないので数値積分することになる。

(2) ビンガム流動の場合

グラウト液の粘性が増すと、その多孔媒体中における流動はニュートン流動をするとは限らず、むしろビンガム流動に近いものとなることが知られている。したがって、ここでは流れの運動方程式として多孔媒体中のビンガム流動式として知られている Buckingham-Reiner の式を用いて放射流動解析を試みる<sup>5)</sup>。

流れのモデルは図-1 に示されたものとし、まず、連続の式は式(1)と同じものを用い、次に、流体1, 2 に関する運動の式はそれぞれ Buckingham-Reiner の式, Darcy の式を用い、

$$\left. \begin{aligned} q_{r1} &= -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{dp_1}{dr} \left[ 1 - a' \left( \frac{dp_0/dr}{dp_1/dr} \right) + b' \left( \frac{dp_0/dr}{dp_1/dr} \right)^4 \right] \\ q_{r2} &= -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{dp_2}{dr} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

とする。ここで、 $a', b'$  : 定数,  $p_0$  : 限界圧力, 他の記号はニュートン流動の場合と同じ水理量とする。

圧力勾配に関しては式(3)を用い、また界面および境界条件は同じく式(4)とする。つまり、ニュートン流動の場合と違う点は運動の式(2)の代わりに式(16)を用いることのみである。

したがって、解は式(16)の第一式の [ ] 中第三項は微小項であるから  $b'(dp_0/dr/dp_1/dr)^4 \approx 0$  とおくと、ニュートン流動の場合と同様にして、

$$\frac{dR}{dT'} - \frac{N\{I - I_0 \log_e(R/B)\}}{\{(KM^* - 1) \log_e R - KM^* \log_e B\} R} = 0, \quad (17)$$

を得る。ここで、 $I_0 = a'h'/r_2$ ,  $h'$  : 限界圧力相当水頭であり、他の無次元量はすべて式(11)の場合と同じである。

2.2 鉛直地山モデルへの注入

いま、図-2 のように水底の均質地山に水平注入孔を設けて注入する場合を考える。この地山に注入孔のみを

設けている状況では丁度水底地盤へ単一排水孔を埋設した形態となって、湧水があるはずである。したがって、排水孔周囲の水は二次元流となっているが、孔内の湧水圧より高い圧力でグラウト液を圧入すると、グラウトの流れはこの水圧に打ち勝ってほとんど同心円状に侵入するはずである。ここで述べるグラウトの注入解析は従来行われてきた水底における排水孔への流れのポテンシャル解析を用いて進めることとする<sup>6), 7)</sup>。

流れの場合としては注入孔周辺のグラウト侵入帯:  $r_1 \leq r < \zeta(t)$  ( $r_1$ : 注入孔半径) と水で飽和されている地山領域:  $\zeta(t) \leq r$  とに分けられる。

まず、グラウト帯内の流れは注入孔を中心に同心円状に起こるとし、放射流の式は

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dh_1}{dr} \right) = 0, \quad h_1 = C_1 \log_e r + C_1', \quad (18)$$

と書ける。ここに、 $r$ : 注入孔よりの放射座標,  $h_1$ : グラウト帯内のポテンシャル水頭,  $C_1, C_1'$ : 定数とする。

注入孔回りにおける境界条件と注入量  $Q_1$  は、

$$\left. \begin{aligned} r = r_1, \quad h_1 &= \frac{p_1'}{w_1} - l \\ Q_1 &= 2\pi r_1 \left( -\frac{k_1 w_1}{\mu_1} \frac{dh_1}{dr} \Big|_{r=r_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

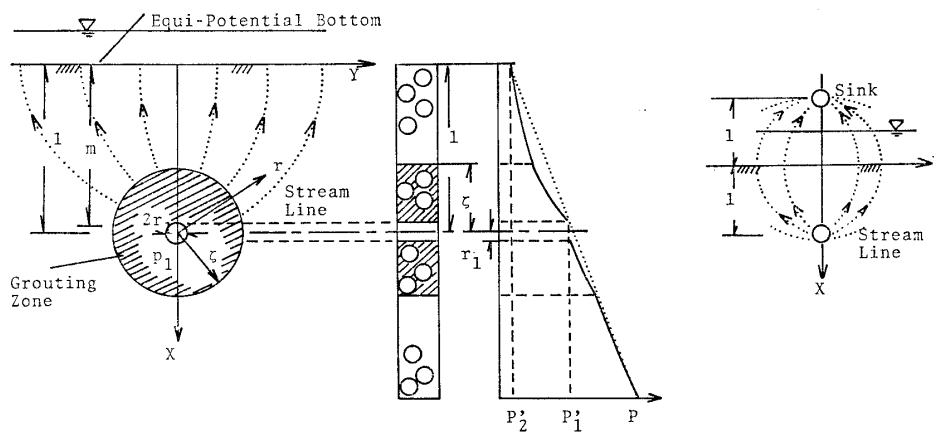
とする。ここに、 $k_1$ : グラウトの固有浸透係数,  $w_1$ : グラウト液の単位重量,  $\mu_1$ : グラウトの粘性係数,  $l$ : 注水孔の深さ,  $p_1'$ :  $r=r_1$  での孔壁圧力とする。

式(19)を用いて式(18)の定数  $C_1, C_1'$  を決めると、

$$\begin{aligned} C_1 &= -\mu_1 Q_1 / 2\pi k_1 w_1, \\ C_1' &= (p_1' / w_1) - l + \mu_1 Q_1 \log_e r_1 / 2\pi k_1 w_1 \end{aligned}$$

となるから、グラウト帯内のポテンシャル水頭  $h_1$  は、

$$\begin{aligned} h_1 &= -\frac{\mu_1 Q_1}{4\pi k_1 w_1} \log_e \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 + \frac{p_1'}{w_1} - l \\ &= -\frac{\mu_1 Q_1}{4\pi k_1 w_1} \log_e \frac{(x-l)^2 + y^2}{r_1^2} + \frac{p_1'}{w_1} - l, \quad (20) \end{aligned}$$



(a) 鉛直地山への注入 (b) 仮想湧源による流れ

図-2 鉛直地山モデルと流れ

となる。ここに、 $x, y$ : 座標である。

一方、グラウト帯外の地山領域における流れに注目すると、グラウト注入によって地下水の流れの場合は丁度図-2の右側に示したように $y$ 軸を中心に $x=-l$ に仮想吸源を置いたときの場合に相当する。この場合の地下水のポテンシャル水頭 $h_2$ は

$$h_2 = C_2 \log_e \frac{(x-m)^2 + y^2}{(x+m)^2 + y^2} + C_2', \quad (21)$$

と表わせる。ここに、 $C_2, C_2'$ : 定数、 $m$ : ポテンシャル中心深さとする。

地下水流れの境界条件および水底への流出量 $Q_2$ は各々、

$$h_2]_{x=0} = \frac{p_2'}{w_2}, \quad Q_2 = 2 \int_0^\infty \frac{k_2 w_2}{\mu_2} \frac{\partial h_2}{\partial x} \Big|_{x=0} dy, \quad (22)$$

とかける。ここに、 $w_2$ : 水の単位重量、 $k_2, \mu_2$ : それぞれ水の固有浸透係数および粘性係数、 $p_2'$ : 水底での水圧とする。

したがって、式(21)、(22)から定数 $C_2 = -\mu_2 Q_2 / 4\pi k_2 w_2$ 、 $C_2' = p_2' / w_2$ と決まり、

$$h_2 = -\frac{\mu_2 Q_2}{4\pi k_2 w_2} \log_e \frac{(x-m)^2 + y^2}{(x+m)^2 + y^2} + \frac{p_2'}{w_2}, \quad (23)$$

となり、 $m$ の値は $h_2(l-\zeta, 0) = h_2(l+\zeta, 0)$ とおくと、 $m = \sqrt{(l+\zeta)(l-\zeta)}$ と決まる。

次に、グラウト帯内におけるポテンシャル水頭 $h_1$ の式(20)と地下水流れの $h_2$ の式(23)を用いて、流れの領域1, 2を接続するため、 $p_1 = (h_1 + x)w_1$ 、 $p_2 = (h_2 + x)w_2$ を用いて、 $r = \zeta(t)$ のうえで

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_2, \quad (\text{圧力連続}) \\ \frac{k_1 w_1}{\mu_1} \frac{dh_1}{dr} &= \frac{k_2 w_2}{\mu_2} \frac{dh_2}{dr} \quad (\equiv Q = Q_1 = Q_2 : \text{流量連続}) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

が成り立つはずである。

よって、式(20)、(23)および式(24)を用いて、注入量 $Q$ は

$$Q = \frac{2\pi k_1}{\mu_1} \left\{ \frac{p_1' - p_2' + (w_2 - w_1)\zeta - lw_2}{\log_e(\zeta/r_1)} - \frac{k_1 \mu_2}{k_2 \mu_1} \log_e \left( \frac{m-l+\zeta}{m+l-\zeta} \right) \right\}, \quad (25)$$

と求まる。

更に、界面の式は

$$nS_c \frac{d\zeta}{dt} - q_{r_1}|_{r=\zeta} = 0$$

から、 $q_{r_1}|_{r=\zeta} = -k_1 w_1 / \mu_1 [dh_1/dr]_{r=\zeta}$ を用い、

$$\frac{d\zeta}{dt} - \frac{1}{nS_c} \frac{k_1}{\mu_1} \times \frac{p_1' - p_2' + (w_2 - w_1)\zeta - lw_2}{\log_e(\zeta/r_1) - \frac{k_1 \mu_2}{k_2 \mu_1} \log_e \left( \frac{\sqrt{(l+\zeta)(l-\zeta)} - l + \zeta}{\sqrt{(l+\zeta)(l-\zeta)} + l - \zeta} \right)} \frac{1}{\zeta} = 0, \quad (26)$$

となる。

式(26)は無次元化して、

$$\frac{dR}{dT'} - \frac{N\{I + (1-W)R - 1\}}{\left\{ KM^* \log_e(R/B) - \log_e \left( \frac{\sqrt{1-R^2} - 1 + R}{\sqrt{1-R^2} + 1 - R} \right) \right\} R} = 0, \quad (27)$$

となる。ここに、

$$R = \zeta/l, \quad T' = t/\tau, \quad N = 1/nS_c, \quad I = h/l,$$

$$W = w_1/w_2, \quad B = r_1/l, \quad K = k_2/k_1, \quad M^* = \mu_1/\mu_2$$

とする。

同様に $LW$ 液のようにゲルタイム $t_0$ をもつものについては、

$$\frac{dR}{dT} - \frac{ND\{I + (1-W)R - 1\}}{\left\{ KM^*(T) \log_e(R/B) - \log_e \left( \frac{\sqrt{1-R^2} - 1 + R}{\sqrt{1-R^2} + 1 + R} \right) \right\} R} = 0, \quad (28)$$

と表せる。

ここに、 $D = t_0/\tau$ 、 $T = t/t_0$ 、他の量は式(27)のものと同じ。

結局、グラウト注入による界面の位置 $\zeta$ は解析的に解き難いので式(27)あるいは(28)を数値解析することによって求まり、注入量 $Q$ は、 $\zeta$ が経時的に求まるので、式(25)から得られる。

ビンガム流動の場合には水平地山モデルと同様の手順で導びかれ、注入量 $Q$ は、

$$Q = \frac{2\pi k_2}{\mu_2} \times \left\{ \frac{a' C_{h_0} w_1 \log_e \left( \frac{\zeta}{r_1} \right) + p_1' - p_2' + (w_2 - w_1)\zeta - lw_2}{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \log_e \left( \frac{\zeta}{r_1} \right) - \log_e \left( \frac{m-l+\zeta}{m+l-\zeta} \right)} \right\} \quad (29)$$

となる。ここに、 $C_{h_0} = -\rho_2 g h' / w_1$ 、 $h'$ : 限界圧力の水頭である。

更に、界面の式は、

$$\frac{dR}{dT'} - \frac{N\{I - I_1 \log_e(R/B) + (1-W)R - 1\}}{\left\{ KM^* \log_e(R/B) - \log_e \frac{\sqrt{1-R^2} - 1 + R}{\sqrt{1-R^2} + 1 - R} \right\} R} = 0, \quad (30)$$

となる。ここに、 $I_0 = a'h'/l$ であり、他の無次元量は式(27)の場合と同じ。

### 2.3 単一破砕帯モデルへの注入

単一破砕帯が図-3のように水底下の地山に任意の方向に存在するような場合に深さ $l$ 点から注入を行った時にグラウト液が侵入すると考える。この場合のグラウト液の流れは一次元流であって、定圧力で注入するとグラウト液は時間と共に侵入する。

この場合に界面の式は、

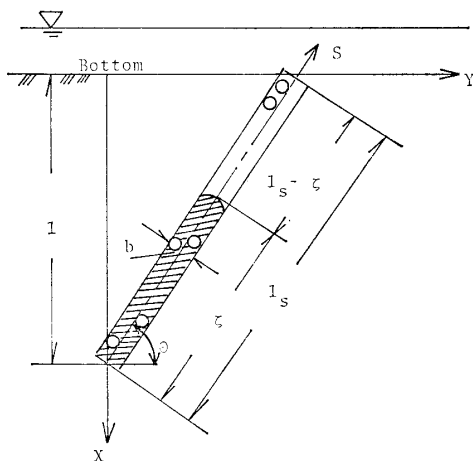


図-3 鉛直地山中の傾斜破砕帯モデル

$$nS_c \frac{d\zeta}{dt} - q_s|_{s=\zeta} = 0, \quad (31)$$

と書ける。ここに、 $s$ ：破砕帯に沿って採った座標、 $q_s$ ：グラウト流速とする。

また、運動の式は流体 1, 2 について、

$$q_s = -\frac{k_1}{\mu_1} \left( \frac{dp_1}{ds} + w_1 \sin \theta \right) = -\frac{k_2}{\mu_2} \left( \frac{dp_2}{ds} + w_2 \sin \theta \right), \quad (32)$$

である。ここに、 $\theta$ ：破砕帯の水平となす角、他の記号は 2.2 の場合と同じ。

圧力分布は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 p_1}{ds^2} = 0 &: r_1 \leq s < \zeta(t), \\ \frac{d^2 p_2}{ds^2} = 0 &: \zeta(t) \leq s \leq l_s \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

となり、 $l_s = l / \sin \theta$  である。

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} s = \zeta, & \quad p_1 = p_2 \\ s = l_0, & \quad p_2 = p_1' \\ s = l_s, & \quad p_2 = p_2' \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

ととる。ここに、 $l_0, l_s$ ：各々境界値である。

解は次のように得られる。

式 (33) は積分して、式 (34) より、

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= C_1(s - l_0) + p_1' \\ p_2 &= C_2(s - l_s) + p_2' \end{aligned} \right\}$$

となり、式 (32), (33) を用いて、積分定数  $C_1, C_2$  は

$$C_1 = -\frac{(p_1' - p_2') - (w_1 k_1 \mu_2 - w_2 k_2 \mu_1)(\zeta - l_s) \sin \theta}{k_2 \mu_1 (\zeta - l_0) - k_1 \mu_2 (\zeta - l_s)}$$

$$C_2 = -\frac{k_1 \mu_2 (p_1' - p_2') - (w_1 k_1 \mu_2 - w_2 k_2 \mu_1)(\zeta - l_0) \sin \theta}{k_2 \mu_2 (\zeta - l_0) - k_2 \mu_2 (\zeta - l_s)}$$

となるから、

$$q_s|_{s=\zeta} = -\frac{k_1}{\mu_1} \left( \frac{dp_1}{ds} + w_1 \sin \theta \right) = -\frac{k_1}{\mu_1} (C_1 + w_1 \sin \theta)$$

$$= -\frac{k_1 k_2 \{ (p_1' - p_2') - \sin \theta \{ w_1 (\zeta - l_0) - w_2 (\zeta - l_s) \} \}}{k_1 \mu_2 (\zeta - l_s) - k_2 \mu_1 (\zeta - l_0)} \quad (35)$$

となる。

従って、界面の式 (31) へ代入して、無次元化すると、

$$\frac{dL}{dT} \frac{N[I - \sin \theta \{ (W-1)L - (WB-1) \}]}{(KM^*-1)L - KM^*B+1} = 0, \quad (36)$$

となる。ここで、

$$L = \zeta / l_s, \quad T' = t / \tau, \quad N = 1 / nS_c, \quad I = h / l_s, \quad W = w_1 / w_2,$$

$$B = l_0 / l_s, \quad K = k_2 / k_1, \quad M^* = \mu_1 / \mu_2$$

とする。

同様に、 $LW$  液のようにゲルタイム  $t_0$  をもつものは、

$$\frac{dL}{dT} \frac{ND[I - \sin \theta \{ (W-1)L - (WB-1) \}]}{(KM^*(T)-1)L - KM^*(T)B+1} = 0, \quad (37)$$

と書け、 $D = t_0 / \tau$  である。

注入量  $Q$  は破砕帯の幅を用い、式 (36), (37) を解いて求まる。

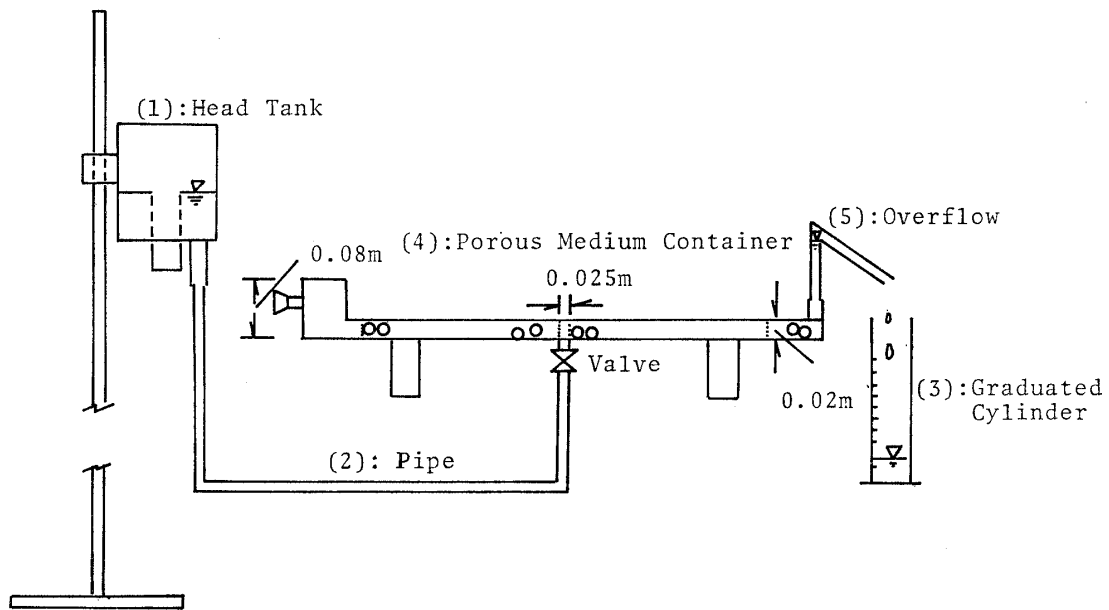
### 3. 実験とその内容

上述した水平・鉛直地山における注入理論の適用性とグラウトの流動メカニズムを明らかにし、理論に係るパラメーターの値を決定するために、スケールの違った二種類の実験装置によってセメント液と  $LW$  液による定圧注入実験を試みた。

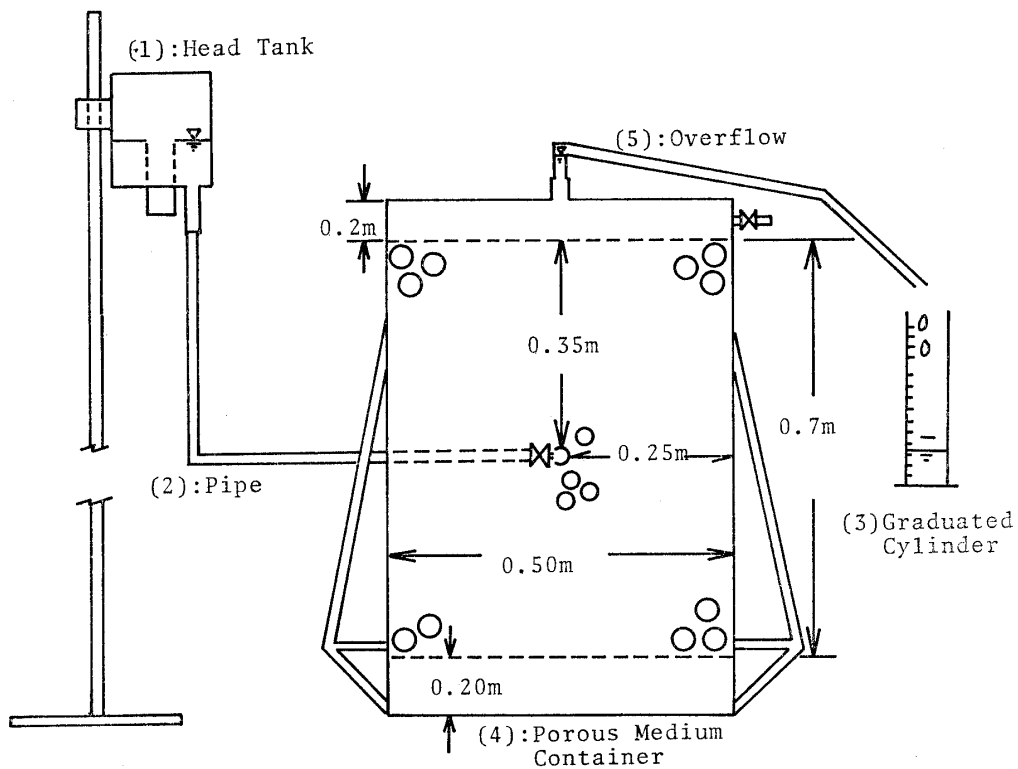
#### (1) 実験装置

実験装置は図-4, 5 のように大別して矩形薄型水槽と円形薄型水槽の二種を用いた。矩形薄型水槽は多孔媒体を充てんする充てん槽、長さ 0.70m, 幅 0.50m, 厚さ 0.02m であり、充てん槽の両端に幅 0.20m の貯留部をもつ透明アクリル製であって、充てん槽の中央に直径 0.025m の円形注入孔が設けられている。一定圧力の注入を行うため、注入孔から直径 0.20m, 高さ 0.15m の円筒オーバーフロー水槽に結ばれている。また、グラウト注入量は予め計量されているが、チェックのために、貯留部的一端から定位置でオーバーフローさせて下流側でメスシリンダーに溜め、その水位変化から任意時刻における侵入量を知ることができる。この装置を用いて、矩形薄型水槽の場合に水平と鉛直地山注入の二種の実験を行う。両者の違いは単に水槽が水平であるか、鉛直に直立しているかにある。実験装置は簡単なものであるが、多孔媒体の均質充填と空気の混入を防止する注意を要す。

一方、注入実験によるスケール効果と多孔媒体によるグラウト液の侵入過程における圧力変化を詳細に知るため、大型の円形薄型水槽による実験も行った。実験装置は図-5 に示されているように、直径 1.40m, 厚さ 0.03m の円盤状の充てん槽であり、その周囲は厚さ 0.15m の



(a) 水平地山への注入実験の場合



(b) 鉛直地山への注入実験の場合

図-4 矩形水槽

貯留部で巻かれている。この円盤状多孔媒体充填槽の中心に直径 0.042m の注入孔があり、攪拌器付きの圧力容器があって、注入中は圧力ガスボンベ ( $N_2$ ) と結ばれている。圧力容器中の作用圧力は水銀マンネーターによって計る。グラウト注入による侵入液の容量は圧力容器中の液位計と下流側のオーバーフロー水槽からの流出量によってチェックする。また、充填槽中の注入中の圧力は

マンネーターによって計る。圧力容器の詳細は図-5 中の上端に示すように、耐圧容器であり、取扱いが容易なようにいくつか工夫がなされている。

(2) 実験方法と実験ケース

注入実験は比較的簡単であるが、矩形薄型水槽による場合の実験方法と円形薄型水槽のそれは多少違うので別々に述べる。

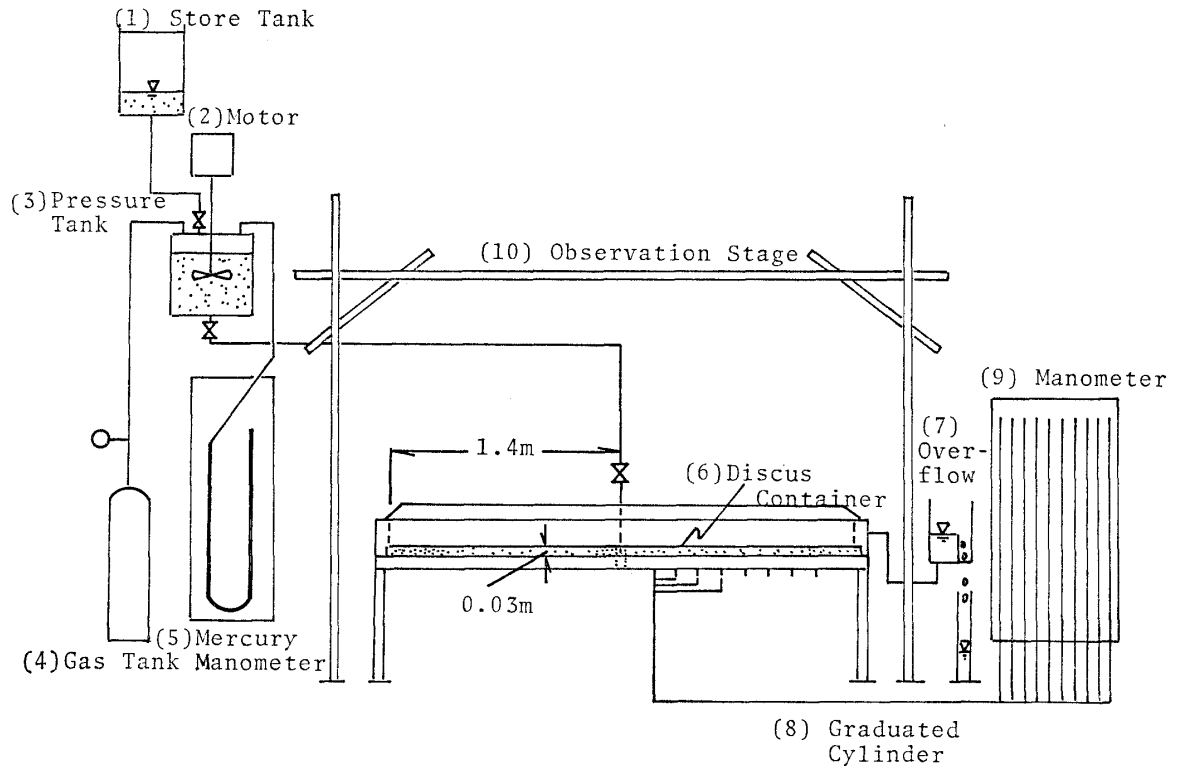


図-5 円形水槽

まず、矩形水槽の水平地山における実験法から説明すると、矩形水槽の貯留部を充填槽からはずし、充填槽を鉛直に直立状態でガラス球を充填した後、多孔板をはめて、再び貯留部をネジで固定する。ついで、定圧タンクおよび下流側タンクを硬質パイプ（直径 0.04m）で接続し、ガラス球充填槽に空気が残留しないように徐々に給水する。次に、上流定圧タンクに定量のグラウト液を入れ、注入孔のバルブに至るまでのパイプ中にグラウト液が飽和され、実験準備が完了する。実験に当たってグラウト液の定圧注入による円形状の界面半径の経時変化

を高感度カラーフィルムにより定時撮影すると同時に下流メスシリンダーの水位計測によって流量を計る。実験による計測はこの二つの事柄であって、実験そのものは界面が充填槽の側壁に到達すると終わるから、数分で終了する。

この実験方法や順序は鉛直地山モデルの場合も全く同じである。ただ充填槽が鉛直になっている点が違うのみである。

他方、円形薄型水槽による実験は、装置が大きくなるため、実験に手間と準備時間を要するが、実験は原理的

表-1 実験 ケー ス

Case	グラウトの種類	セメント液：水ガラス溶液 (CM:WG) 容積比	セメント液の水・セメント比 W/C(%)	水温 $\theta$ ( $^{\circ}$ C)	多孔媒体粒子の平均粒径 (mm)	間隙率 $n$	圧力差 (水頭換算) (m)	限界動水勾配 $L_0$	透水係数 (m/s)	無次元時間 $\tau$ (sec)	境界値 $r_2, l$ (m)	Kの値
CH-1	セメント液	—	100	11.4	2.5	0.39	0.50	0.4	0.02	9.37	0.25	0.03
// -2	//	—	//	8.8	//	//	0.37	—	//	9.37	//	//
// -3	//	—	//	8.4	//	//	0.20	0.4	0.018	16.95	//	//
// -4	//	—	//	10.3	//	//	0.14	—	//	8.85	//	0.04
CV-1	セメント液	—	100	9.5	2.5	0.39	0.38	—	0.03	10.57	0.335	0.01
// -2	//	—	//	12.7	//	//	0.20	—	//	13.00	//	0.02
// -3	//	—	//	13.4	//	//	0.13	—	//	12.68	//	//
// -4	//	—	//	10.0	//	//	0.05	—	//	13.95	//	0.01
LH-1	LW液	4:3	100	10.4	2.5	0.39	0.21	—	0.03	10.94	0.25	0.5
// -2	//	//	//	11.1	//	//	0.14	—	//	9.47	//	0.8
LV-1	LW液	4:3	100	15.2	2.5	0.39	0.33	—	0.03	9.18	0.340	1.0
// -2	//	//	//	12.3	//	//	0.33	—	//	11.74	0.320	0.3
// -3	//	//	//	10.6	//	//	0.19	—	//	12.21	0.3175	0.3
// -4	//	//	//	14.5	//	//	0.05	—	//	14.13	0.3225	0.1
CH-01	セメント液	—	70	5.7	3.97	0.41	1.70	0.3	0.06	67.2	0.142	0.01

に上述したものと同様である。図-5 において、円形水槽の蓋をとって、碎石を均質に充填し、蓋をしてねじで固定した後、付属装置によって円形水槽を直立させて、振動を与えて碎石をしっかりと充填する。マンメーターをビニールパイプで接続し、注入孔と圧力容器をフレキシブルパイプで連結する。次に、水槽中に水を給水して充填槽が飽和され、加圧タンクを一旦上昇させてグラウト液を所定の量入れて、注入孔の入口までフレキシブルパイプ中にグラウト液を満たして、下流オーバーフロータンクを所定の高さに固定して実験準備を終える。そこで、グラウト液の侵入状況を定時間隔で撮影するカメラを設置し、注入孔の全断面開放バルブを開放して実験を

開始するわけであり、同時に注入量も加圧タンクの減水位と下流オーバーフロー流量を計って測定する。

実験ケースは表-1 にまとめてあげたように、矩形薄型水槽によるセメント液注入は水平および鉛直地山モデル共に4ケースであり、LW液注入によるものは各々2および4ケースであり、いずれの注入液も水・セメント比は100%と統一し、セメント液とLW液の配合は4:3とした。また、円形水槽による実験は大変大がかりとなるのでセメント液による1ケースのみとした。いずれの実験においても空隙率は39%とし、注入動水勾配は0.54~2.14とした。

実験に用いた多孔媒体としては図-6 にそれらの粒径

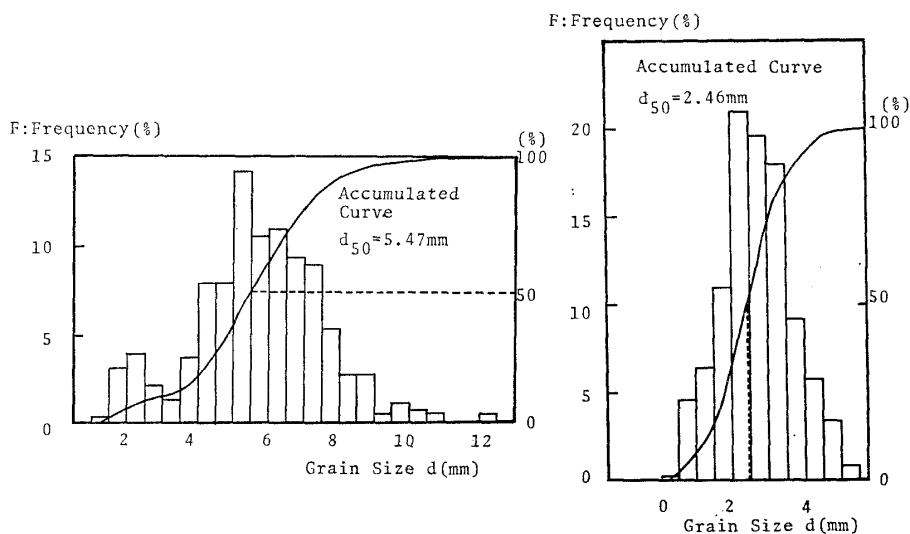
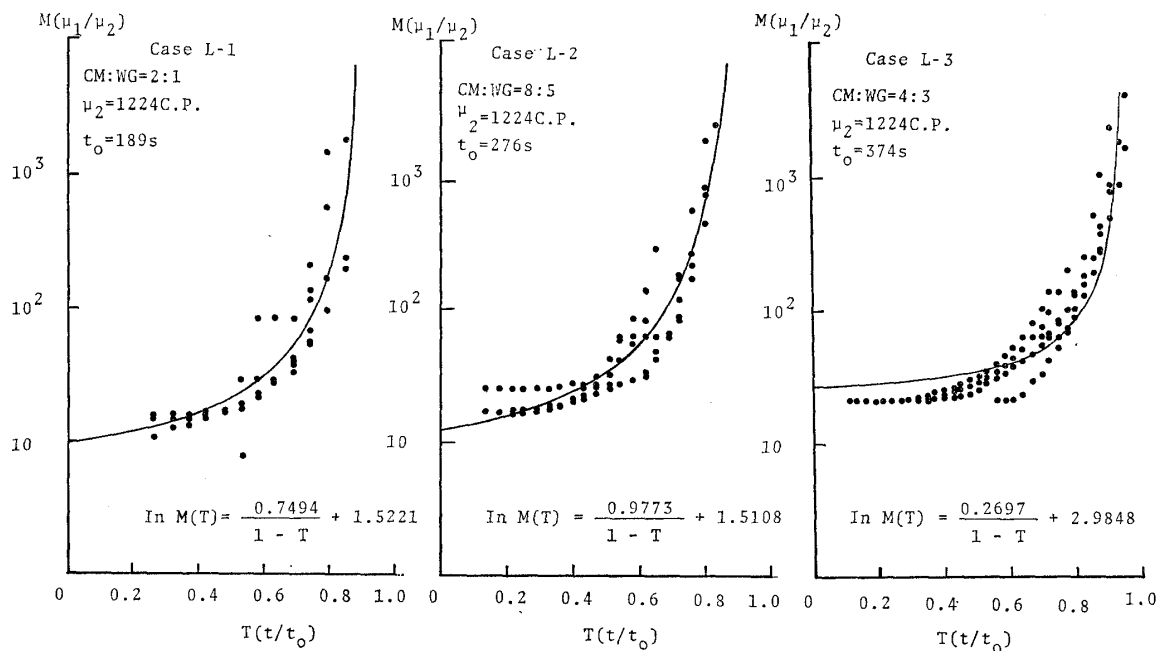


図-6 充填多孔媒体の粒径分布



(a) セメント液と水ガラスの配合 2:1 の場合 (b) セメント液と水ガラスの配合 8:5 の場合 (c) セメント液と水ガラスの配合 4:3 の場合

図-7 配合の違いによる LW 液の粘性経時変化



分布を示すように、50%の粒径  $d_{50}=5.47\text{ mm}$  の碎石と  $d_m=2.46\text{ mm}$  の透明ガラス球であった。

グラウト液としてはセメント液と  $LW$  液であったが、セメントは高炉セメント（日本セメント(株)アサノ高炉B種、比重 2.85）を用い、水ガラスは日本化学工業(株)の50珪酸ソーダ1号（比重 1.52~1.55）であった。

### (3) $LW$ 液の粘度試験

セメント液と水ガラスを適当な割合で混合すると、 $LW$  液は徐々に凝固する。この凝固のプロセスにおいて、 $LW$  液の粘度は経時的に変化し、増加することになる。これはグラウト液自体の物性変化として予め測定しておく必要がある。粘度測定はよく知られている回転式粘度計（東京計器 BM 型粘度計）によった。この粘度計は測定液を容器に入れておき、回転軸の先につけた金属円筒を定速で回転させて、軸に作用する回転に要するトルクを計って粘度を知るものである。図-7にはこのようにして得られた粘性係数比（グラウト液の粘性と水のその比）と無次元時間（ $t_0$ :ゲルタイム）の関係を示したものである。図はセメント液と水ガラスの配合比が 2:1, 8:5 および 4:3 の場合であるが、配合によって粘性の増加率が変化している。

これらの関係は式(15)において、 $\alpha=1$ とにおいて、 $L-1$ の場合  $a=0.7494$ ,  $b=1.5221$ ,  $L-2$ の場合、 $a=0.9773$ ,  $b=1.5103$ ,  $L-3$ の場合、 $a=0.2697$ ,  $b=2.9848$ , でかなり適合している。したがって、式(15)の適合性は認められるが、 $LW$  の配合や温度によって定数が変わることが明確である。

## 4. 実験結果と理論の比較・検討

表-1に示したように、実験ケースは15ケースであったが、ここで実験結果の中で代表的なものについて5ケースを示すことにする。

初めに、グラウト注入による侵入状況の写真を示したものが写真-1である。この写真は表-1中実験ケース  $LV-1$  の場合であり、矩形鉛直地山中に  $LW$  液を注入したものである。 $LW$  液の侵入経時変化、初期、2, 4, 16秒時点における状況を示している。写真から分かるように、侵入はほとんど注入孔を中心にもつ同心円となっており、 $LW$  液の粘性が高いため注入液自体に作用する重力の影響はほとんど見られない。

ここで、実験的に得られたグラウト侵入経時変化を本論で導びいた理論式と比較してみる。その場合、グラウト液の物性値と透水係数は分かっているが、グラウト液の流動機構は水のそれと違い、放射流固有の抵抗を受けるから実験から  $K=k_2/k_1$  を決めることとする。まず、水平地山モデルへセメント液を注入した場合（実験ケー

ス  $CH$ ）、ニュートン流動と考えた時は式(12)により、ビンガム流動に関しては、式(17)の数値解による。次に鉛直地山モデルのセメント液注入の場合（実験ケース  $CV$ ）、ニュートン流動の式(27)の解による。又、ビンガム流動の場合は式(30)によって解析する。

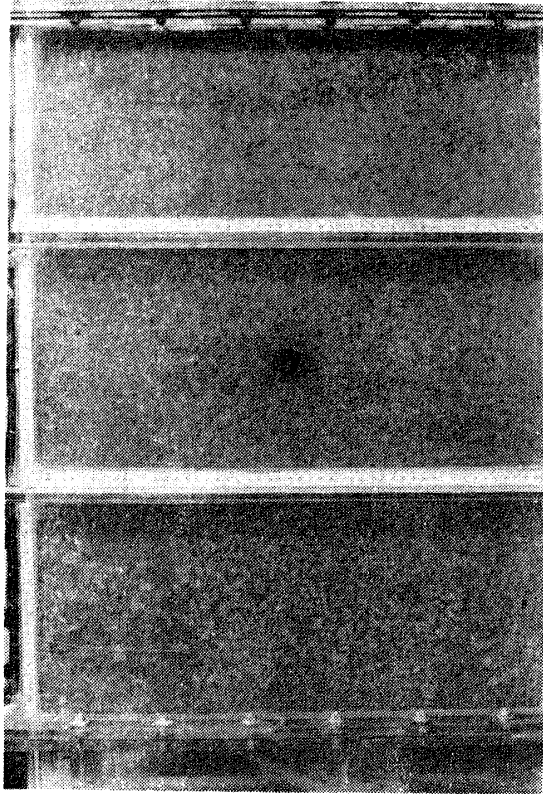
さらに、水平地山モデルへの  $LW$  液注入の場合（実験ケース  $LH$ ）、式(14)を用い、鉛直地山モデルの  $LW$  液注入の場合（実験ケース  $LV$ ）には式(28)により、各々式(15)と組み合わせて数値解を得る。

写真によって得られた界面形状の経時変化を読みとって作図し、水平、鉛直地山へセメント液を注入した場合について  $R=\zeta/r_2$ ,  $T=t/\tau$  の関係を示したものが、図-8, 9であり、各々実験ケース  $CH-3$ ,  $CV-3$  に対応する。図-8中には式(12)および式(17)より求めたニュートンおよびビンガム流動に対応する理論曲線を示し、 $K$ の違いによる適合度を読みとることができる。この場合はビンガム流による理論のほうが実験値とよく適合していることが分かる。同様に、図-9では界面形状が真円でないため上側（upと略記）、中央（middle）、下側（down）半径が多少違うため各々区別してプロットしているが、ニュートン流動の理論とよく一致している。グラウト液の侵入半径は初期に急に大きくなり、時間の経過に伴ってその成長速度が小さくなり、ある程度時間が経過すると、ほとんど停止してしまうことが興味深い性質と考えられる。

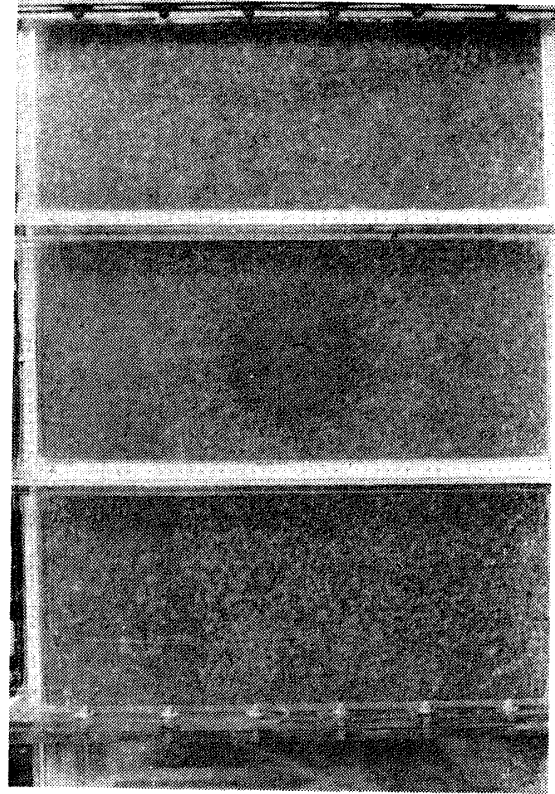
同様に、 $LW$  液による水平および鉛直地山への注入実験結果についても図-10, 11に示してある。各々の図中には、式(14)および式(28)を基本式とし、式(15)の実験式を組合わせて得た理論曲線も併せて描いている。この場合、グラウト充填率  $S_c=0.9$  を実験より用いている。また、図中（a）はグラウト界面形状を示しているが、水平、鉛直地山の場合共にグラウト液に作用する密度効果、つまり重力の影響は粘性が高く、かつ  $LW$  液自体の経時的凝固作用のために見られず、界面形状はほとんど同心円と見てよからう。本論で導びいた  $LW$  液の注入理論は実験結果をうまく説明しているものと思われる。

更に、水平地山における碎石の大型実験による結果と式(12), (17)による理論値が図-12に示されている。この場合にはニュートン流動による理論よりビンガム流動のそのほうが実験結果をうまく説明することが分かる。充填率は実験的に  $S_c=0.88$  であった。

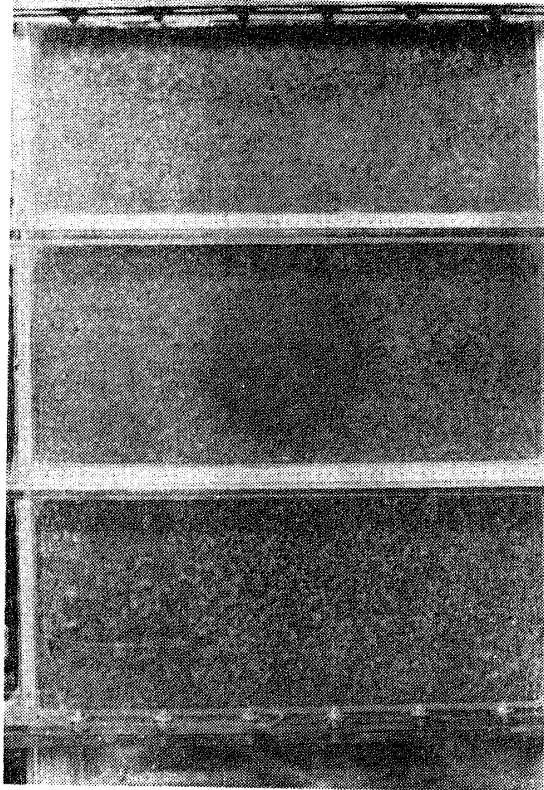
このようにして得られた固有浸透係数  $K$  の値は各実験ケースに対応して、表-1にまとめて示してある。 $K$  の値は実験ケース  $CH, CV$ （セメント液の場合）には 0.01~0.04 の範囲にあり、 $LH, LV$ （ $LW$  の場合）は 0.1~1.0 の範囲にある。これらセメント液と  $LW$  液の場合



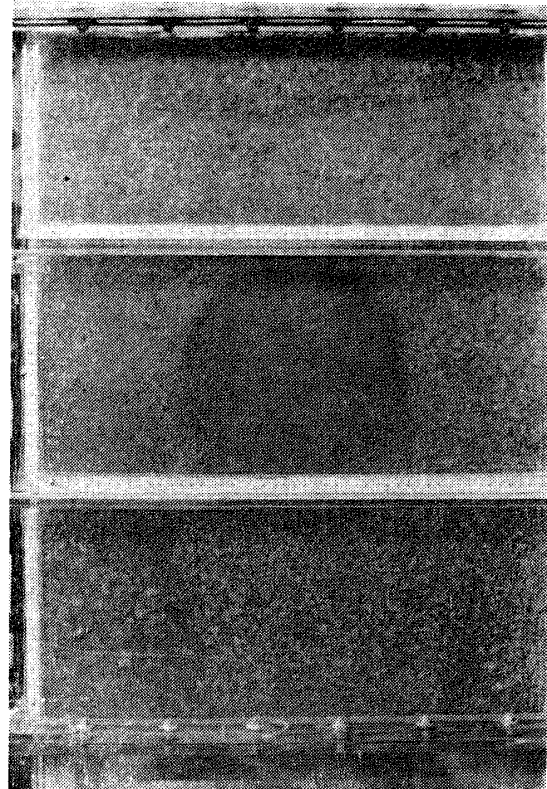
0 秒



2 秒

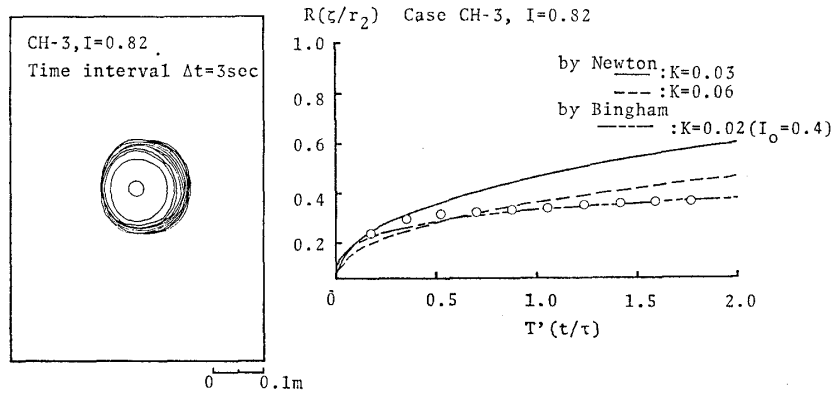


4 秒



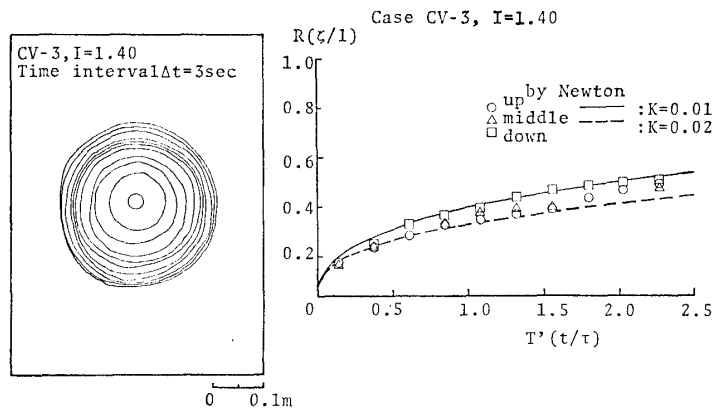
16 秒

写真-1 LW 液の注入経時変化 (LV-1 の場合)



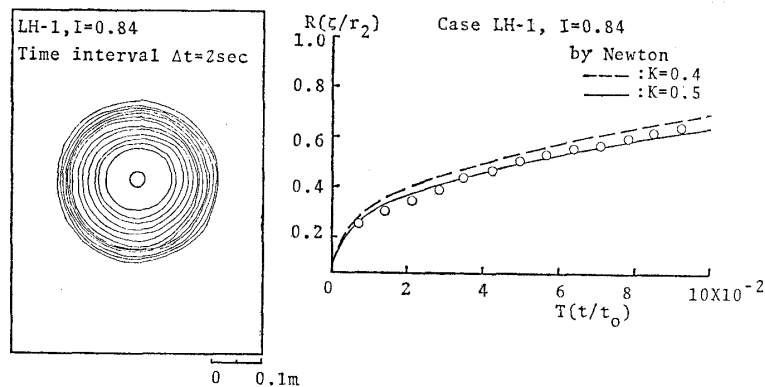
(a) 界面の経時変化 (b)  $\zeta/r_2 \sim t/\tau$  の関係

図-8 水平地山モデルのセメント液注入結果 (CH-3 の場合)



(a) 界面の経時変化 (b)  $\zeta/l \sim t/\tau$  の関係

図-9 鉛直地山モデルのセメント液注入結果 (CV-3 の場合)



(a) 界面の経時変化 (b)  $\zeta/r_2 \sim t/t_0$  の関係

図-10 水平地山モデルの LW 注入結果 (LH-2 の場合)

の差は流動特性の違いに加え、LW液の経時的な凝固による空隙閉塞が影響するものと考えられる。

む す び

グラウト液が水で飽和された多孔媒体中に圧入される場合の一次元放射流をいわゆる非混合二相流として、水平および鉛直注入について理論と実験の両面より解明し

た。二相流の解析は非混合液・液二相流の常とう手段となっている連続式と運動の式を立てて界面の式および境界条件を与えて解くものであるが、グラウト液そのものがニュートン流動をすることは限らず、ビンガム流動や硬化を伴う流動であるため、抵抗則として運動の式に新しい工夫を加えたのが本論の解析の特徴である。解析結果からグラウト注入量と侵入距離の経時変化を理論的に知

ることができた。一方、実験は碎石を充填した水平大型地盤モデルとガラス球を充填した鉛直地盤モデルの二つを用い、グラウト液としてはセメント液と  $LW$  液の二種類であり、注入は一点からの定圧注入とした。実験の目的は理論がどの程度実験結果を説明し得るかを知らんとグラウト液の種類によってどの理論が有効であるかを調べることであった。本論の結果は次のように要約されよう。

①セメント液の流動は水・セメント比が増すとニュートン流動と見なせるが、粘性が大きいとビンガム流動となる。

②グラウト液の粘度が水に比べて十分大きいと、実用的には密度差による重力の影響は無視し得ることが分かった。

③  $LW$  液は実用的な配合で流動粘度は今回行った実験の範囲では式 (15) によって表される。

④水平な飽和多孔媒体中への定圧注入では式 (11), (14), (17) を解いてそれぞれ注入距離を算定できることが実験によって確認された。

⑤鉛直飽和多孔媒体中へ定圧注入では式 (27), (28), (30) によってそれぞれ注入距離を算定できる。

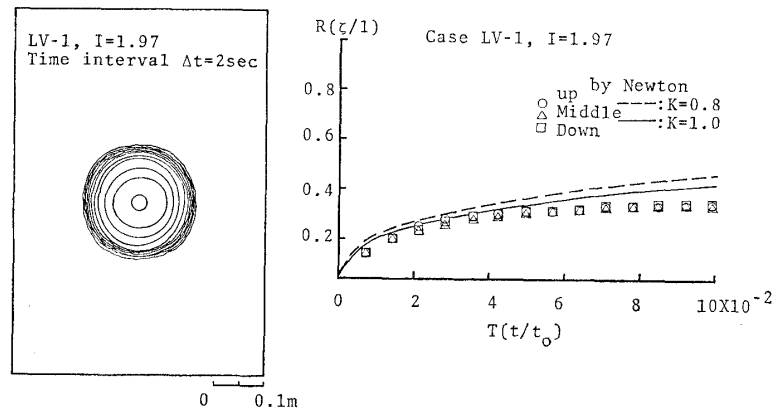
本論で述べたグラウト注入解析と実験結果が実際の地盤や岩盤に対しても応用できると言い切れないが、現場での現象の解釈、平均的な注入半径および注入量の算定の根拠となり得るものとする。

本研究を進める過程で土木学会、青函トンネル土工研究委員会各位からも暖かいご協力を頂いたことを記して、心よりお礼申し上げる次第です。

なお、本研究の実験に当たって、本学工学部建設系大学院生石山宏二君の助力があったことを記してお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Muskat, M. (1937): The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, McGraw-Hill Book



(a) 界面の経時変化 (b)  $z/l \sim t/t_0$  の関係  
図-11 鉛直地山モデルの  $LW$  液注入結果 (LV-1 の場合)

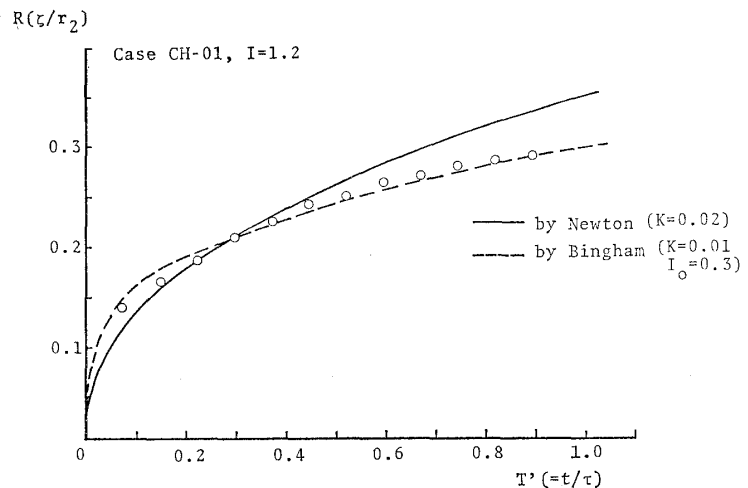


図-12 水平円形地山モデルのセメント液注入結果

Comp., pp. 453-466.

- 2) 水理委員会密度流研究小委員会 (1975): 「土木学会論文報告集」, No.243, pp.99~121.
- 3) 佐藤邦明・加藤幸男(1985): 多孔媒体におけるグラウト液の流動機構に関する基礎的研究, 「土質工学会論文報告集」, Vol.25, No.3, pp.157~166.
- 4) Sakata, M. et al (1979): "Pumpability and rheological properties of fresh concrete," Takenaka Tech. Rept. No.22, pp.90-96.
- 5) 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.
- 6) 佐藤邦明(1980): グラウトによるトンネル湧水変化解析, 「トンネルと地下」, 第11巻10号, pp.47~52.
- 7) 百田博宣・佐藤邦明(1985): 地下空洞を対象とした気液二相流に関する研究, 「第17回岩盤力学シンポジウム」, 土木学会, pp.71~74.