

# ダム基礎岩盤用セメントグラウトの細管における流動特性

柴田 功\*

ダム基礎岩盤グラウティングにおいて、注入量はグラウトの流動特性の影響を強く受ける。本論文は、各種セメントグラウトの、濃さとブリージング防止のためのベントナイト添加が及ぼす影響を体系的に実験研究した結果による流動特性、低流速時の沈澱、粘度、降伏値を示す。さらに、ずり応力がグラウトの流れに及ぼす影響を考察して、グラウト配合の選定の考え方を提案する。

**Keywords:** dam foundation, grout, cement, bentonite, viscosity, yield value

## 1. 緒 言

ダムを築造する基礎岩盤には割れ目が発達している、その一部が隙間をつくっているのが普通である。このため、必須の基礎処理として、空隙にセメントグラウト(少量のベントナイトを混入することもあるが、ここでは総称してこう呼ぶことにする)を充填して、浸透流の抑制や岩盤の固密化を図るためのダム基礎岩盤グラウティングが行なわれている。きわめて重要な工法であるから、このグラウティングに関する研究は古くから進められているのだが、対象とする基礎岩盤の様相が多様多様であるため、グラウトの流れのメカニズムは十分に解明されておらず、実際の設計、施工に際しては、担当技術者の経験に負うところが大きく、理論に基づく体系化が強く望まれている。

グラウトの流れのメカニズムについて論ずるに際して、最も単純化したモデルの1つを考えてみよう。ボーリング孔から注入されたグラウトは、一般には孔から少し離れば流速が極めて小さくなるから、層流であると考えてよい。そこで、中心に噴出し口をもつ円板状のスリットの流れを考えると、流れは次の関係で示される。

$$q \propto p \cdot \eta^{-1} \cdot d^3 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $q$ : 注入孔の流量(スリットへの注入量)、 $p$ : 注入孔の圧力、 $\eta$ : 液体の粘度(粘性係数)、 $d$ : スリットの幅。この関係を見ると、スリットの幅が一定のとき、注入量は注入圧力に比例し、グラウトの粘度に反比例することが示されている。

著者は、グラウトの流れに大きな影響を及ぼす要素の1つである注入圧力  $p$  について研究した。すなわち、ダム基礎岩盤の大きな開口割れ目がグラウトでほぼ充填された後、基礎岩盤内地圧の主応力の1つが鉛直なとき、

$$p > 3\sigma_{Hmin} - \sigma_{Hmax} + T - U \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\sigma_{Hmin}$ : 最小水平地圧、 $\sigma_{Hmax}$ : 最大水平地圧、 $T$ : 岩盤の引張強さ、 $U$ : 間隙圧、でボーリング孔沿いのハイドロリックフラクチャリングが生じて縦の割裂ができること、さらにその後は、割裂を開いたままに保てる圧力、すなわち  $p > \sigma_{Hmin}$  として注入を続けるならば、際限なく注入の流れが続くが、 $p < \sigma_{Hmin}$  とすれば流れが止まることを明らかにした<sup>1)</sup>。

しかし、大きな開口割れ目への注入では、 $p < \sigma_{Hmin}$  としてもグラウトの流れは止まらないから、グラウトの流れに大きな影響を及ぼすもう一つの要素である粘度にかかわる流れの進め方や止め方を研究する必要がある。

多数のダムでの長年にわたる経験に基づき、現在行われているダム基礎岩盤グラウティングでは、セメントを基本材料としたグラウトを、規定最高注入圧力のものでできるだけ濃く(水セメント比  $W/C$  を小さく)して流れが止まるまで、あるいは規定全注入量に達するまで注入を続けるのが普通である。このセメントグラウトは、セメント単味で用いるよりはブリージング防止のためベントナイトセメント比 ( $B/C$ ) が3~5%のベントナイトを添加することもある。これらのセメント等の懸濁液であるグラウトの流動特性については、前者がニュートン流体、後者がビンガム流体に近いといわれているだけで、系統的な研究報告はなく、未だよく判っていないのが現状である。本報告は、実際によく用いられるダム基礎岩盤用セメントグラウトについての流動特性を細管を用いて実験的に解明し、岩盤グラウティングへの影響のしかたについて研究した成果を述べるものである。

## 2. 従来の研究

### (1) セメントの粒径

ダム基礎グラウティングでは、隙間の寸法はセメント粒径の3倍以上あれば安定した流れが生じると考えられて

\*前(財)ダム技術センター 理事  
(〒106 東京都港区麻布台2-4-5 メソニック 39 森ビル)

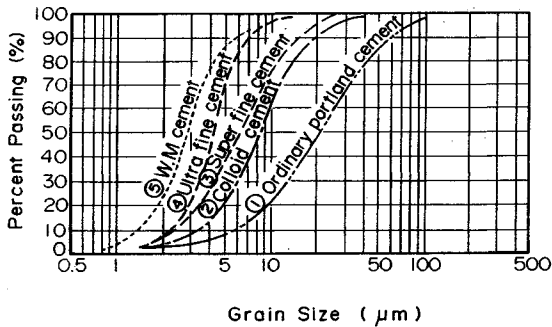


Fig.2.1 Grain sizes of various cements<sup>4),5)</sup>

いる。これは King らによるセメント 2 粒が隙間にひっかかって強固なブリッジができて流れが止められるのに、3 粒のアーチは弱くて流れが止められることは少ないとする考え方に由来している<sup>2)</sup>。

横田はセメントの平均粒径の大小ではなく、その中に含まれる大粒径のものが流れを阻害することを実験によって検証した<sup>3)</sup>。

これらの影響を受けて、わが国では、セメントの粒径を小さく製造する技術が研究され、コロイドセメント、さらに超微粒子セメントが生産されるようになって、粗粒径が著しく小さくなると共に全体として細粒化でき、良好な注入が行なわれている<sup>4)</sup>。また、工事現場において細かく粉碎する WMC の技術も開発されて、上と同様に好結果が得られている<sup>5)</sup>。これらの代表的な粒度分布は Fig.2.1 に示したとおりである<sup>4),5)</sup>。

### (2) プリージング

セメントグラウトは、セメント等の粒子の水中懸濁液であるから、攪拌後経時的に粒子の沈降が起こる。これについては古くから研究がなされており、粒径の大きいセメントほど、また薄い配合 (大きな  $W/C$ ) のグラウトほどプリージング率が大きいことが多数報告されている<sup>3)-7)</sup>。

また、ベントナイトを添加すれば、プリージング率が減少することも報告されている<sup>3),6),7)</sup>。

最近わが国で施工されたダム基礎岩盤グラウティングの施工例 30 についてみると、ベントナイトの使用実績比率は、添加率  $B/C$  が 0% のものは 57%、3% のものは 10%、5% のものは 33% となっている。

### (3) 粘度

セメント単味のグラウトについて、B. E. Clark は水セメント比  $W/C$  が 1 より小さくなると流れが塑性的になるとした<sup>8)</sup>。また、プレパクトフロー値が  $W/C$  が 2 より小さくなると急増するとして塑性流動となることを暗示した報告もある<sup>9)</sup>。

セメントグラウトに  $B/C$  が 3~5% のベントナイトを添加すると流動性が低くなるとされている<sup>3),6)</sup>。

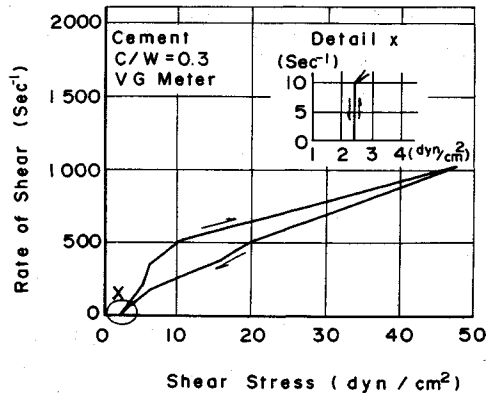


Fig.2.2 Flow property of cement grout measured by V.G. rotation viscometer<sup>9)</sup>

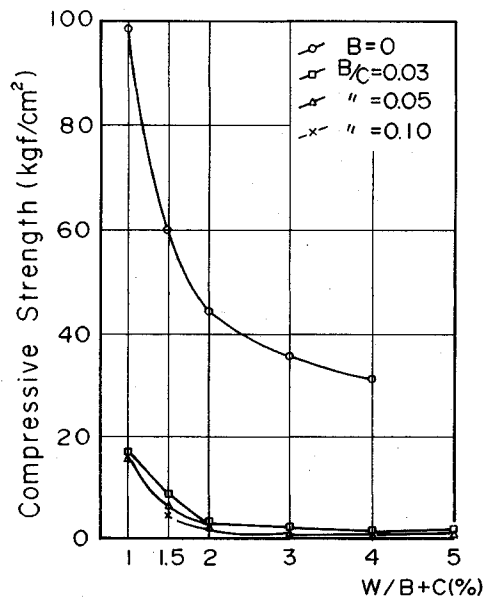


Fig.2.3 Compressive strength of sedimented grouts at 3 days after<sup>6)</sup>

$W/C$  が 0.8 の濃いセメントグラウトについてであるが、同心円筒回転型粘度計を用いると、ずり速度が早くなるにつれて、あるいは温度が上昇するにつれてみかけ粘度が低下するとの報告もある<sup>9)</sup>。

ダム基礎岩盤グラウティングで一般に用いているグラウトの濃度は、水セメント比 ( $W/C$ ) または水セメントベントナイト比 ( $W/C+B$ ) が 10 から 1 へと順次濃くしてゆくものである。しかるに、いずれの研究報告でも実用されている濃度のうち最も濃い部分の配合のグラウトのみを対象としているし、さらにその粘度 (あるいはみかけ粘度) の値は示されていない。

### (4) 降伏値

セメントグラウトの  $W/C$  が 2 以下のもの<sup>7)</sup>、および

セメントベントナイトグラウトの  $W/C+B$  が 2 以下の濃いもの<sup>9)</sup>についての降伏値を示した報告書がある。

降伏値については上記のようにいくつかの値が示されているが、粘度について述べたように、ダム基礎岩盤グラウチングにおいて一般に実用されているグラウトの濃度に対して、濃度の高い部分的なものに限られている。

また、実験に同心円筒回転型粘度計を用いているため、ずり速度とずり応力の関係を示す流動曲線は、Fig.2.2 に示すものが標準とされている<sup>9)</sup>が、管状または脈状に流れると考えられるダム基礎岩盤内での実際との流れと合致するか否かよく判らない。

(5) 強 さ

セメントグラウトに僅かの量のベントナイトを混入すると安定性を増し、ブリージング率が低下することはすでに述べた。しかし、そのようにすることによって、Fig.2.3 に示したように固化したグラウトの強度が著しく低下することが報告されている<sup>9)</sup>。

3. グラウト流動のレオロジー方程式<sup>10)</sup>

ニュートン流体の粘性流動の基本式は次のとおりである。

$$e_t = \frac{1}{\eta} \tau \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\tau$ :ずり応力、 $\eta$ :粘度、 $e_t$ :ずり速度。

水などのニュートン液体では温度を一定として  $\tau$  (あるいは  $e_t$ ) をいろいろ変えて測定しても常に一定の  $\eta$  が求められる。ところが非ニュートン液体は上の式に従わず、一定の粘度  $\eta$  が求められない。その場合でも粘度は

$$\eta = \tau / e_t \dots\dots\dots (4)$$

で与えられるが、その値は  $\tau$  (あるいは  $e_t$ ) によって変化し、この場合の粘度はみかけ粘度と呼ばれる。

非ニュートン流動においては、 $\tau$  と  $e_t$  との関係は一つの関数として与えられる。

$$e_t = f(\tau) \dots\dots\dots (5)$$

粘土グラウトの流動特性についてはいくつかの研究があり、塑性流動をすることがわかっている<sup>10),12)~14)</sup>。塑性流動をする液体は降伏値  $\theta$  をもち、 $\theta$  以上の応力で流動する。そして塑性流動をする物質の取扱いは形式的に非ニュートン流動の場合と同様に考えることができる。すなわち、一般に

$$e_t = k(\tau - \theta)^n \dots\dots\dots (6)$$

の関係が成り立つ。

この式は塑性物質のレオロジー方程式であるが、特に  $n=1$  の場合の

$$e_t = \frac{1}{\eta'}(\tau - \theta) \dots\dots\dots (7)$$

に従う流動をビンガム流動といい、粘土グラウトはこれ

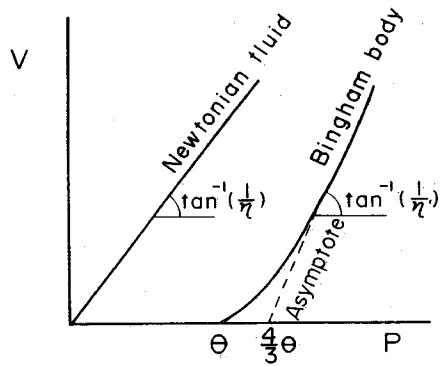


Fig.3.1 Flow of Newtonian fluid and Bingham body

に近いとされている<sup>9),11)~13)</sup>。 $\eta'$  は粘度の次元をもち、塑性粘度と呼ばれている。

ここで、いま対象としているグラウトの流れについての最も簡単なモデルとして毛細管流動をとりあげてみよう。

ニュートン流動の場合は、次のハーゲンポワジューの式で示される。

$$q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta l} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $q$ :流量、 $R$ :毛細管の半径、 $l$ :毛細管の長さ、 $\Delta p$ :管の両端の圧力差、 $\eta$ :流体の粘度。

ビンガム流動の場合は、次に示すバックinghamの式で示される。

$$q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta' l} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{2l\theta}{R\Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{2l\theta}{R\Delta p} \right)^4 \right] \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\eta'$ :流体のみかけの粘度、 $\theta$ :流体の降伏値。毛細管を用いて実験をするのに、使用する管径や長さの影響を取り除くため、

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{R\Delta p}{2l} \\ V &= \frac{4q}{\pi R^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

なるライナーの粘性率変数を用いると、Fig.3.1 に示したようにニュートン液体については、

$$\eta = \frac{P}{V} \dots\dots\dots (11)$$

として毛細管の大きさに無関係に物理常数  $\eta$  が求められる。

ビンガム塑性流動の場合は、同様に  $P$ 、 $V$  を用いると、 $P$  の大きい所で、

$$V = \frac{1}{\eta'} \left( P - \frac{4}{3} \theta \right) \dots\dots\dots (12)$$

の直線に漸近するから、この直線の勾配からみかけの粘度 (本報告ではこれも粘度と呼ぶことにする)  $\eta'$  が求まる。また、この直線を  $V \rightarrow 0$  の外挿して  $P$  軸と交わ

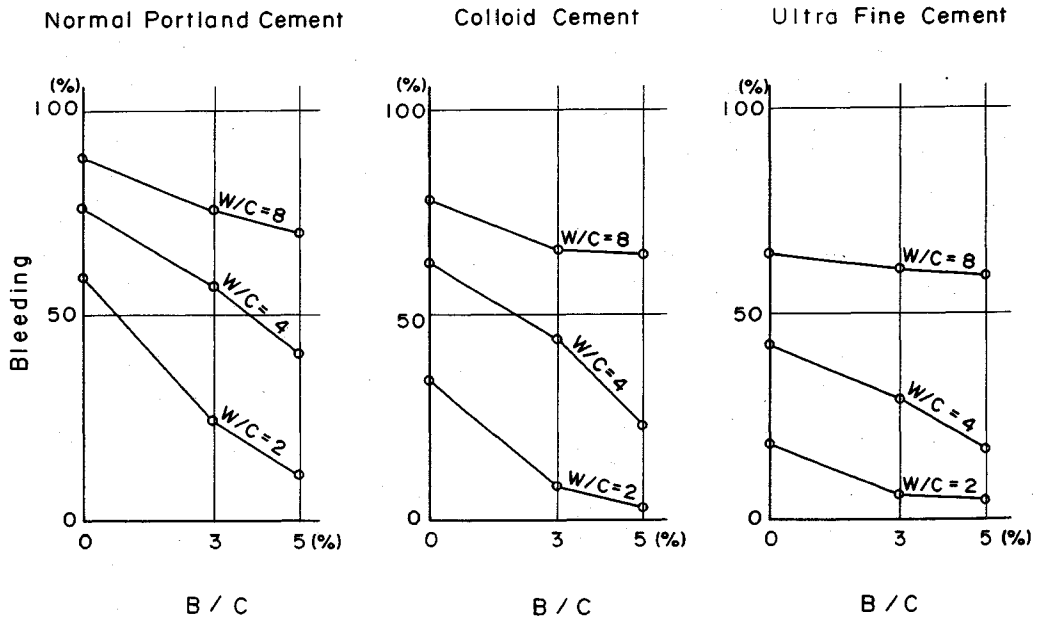


Fig.4.1 Bleedings for various grouts

る点は  $4/3\theta$  であるから、これより  $\theta$  が定まる。

なお、毛細管のビンガム流動では、

$$r_0 = \frac{2l\theta}{\Delta p} \dots \dots \dots (13)$$

で与えられる  $r_0$  を考え、中心から  $r_0$  までの部分では栓流となるものとしている。したがって、 $r_0 > R$  となるような  $\Delta P$  では、まったく流動しないから、式 (9) はこの条件下で成立することに注意する必要がある。

#### 4. 流動特性の測定

##### (1) 実験に用いた材料

###### a) セメント

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント、コロイドセメント、超微粒子セメントとした。それらの粒度分布は、Fig.2.1 に示した①、②、④とほぼ同じものである。比重はそれぞれ 3.16, 3.02, 3.00 である。

###### b) ベントナイト

実験に用いたベントナイトは、300 メッシュ、膨潤度 5.6、見掛比重 0.45 g/cc、pH 10.2 のものである。

###### c) プリージング

後述する流動試験用のパイプと同じ内径 6 mm の容器で試験した。

ベントナイト無添加のときのプリージング率は、Fig.4.1 のとおりで、セメントの粒径が粗いものほど大きい。また、各種セメント共ベントナイトを添加することによってプリージング率が低下する。

実際の岩盤中の割れ目の傾斜がいろいろであることを考慮して、容器の傾斜を 30°, 60°, 90° と変えて測定し

たところ、グラウトが薄いほど、緩傾斜になるほど、また、ベントナイト添加量が減るにつれて、プリージング率が著しく増大することが認められた。

##### (2) 実験装置

従来のダム基礎岩盤グラウチングに実用されているセメントグラウトの流動特性の測定は、同心円筒回転型粘度計によるものが大部分である。しかし、水セメント比 ( $W/C$ ) が大きいとききわめて薄くて水に近いものから、 $W/C$  が小さいとききわめて濃くて粘度が高く、せん断強さをもつものまでの、粒子懸濁液について測定するためには、対象とするグラウトを流しながら計測することが望ましい。実際の岩盤中の割れ目は面状をなすものであるが、後述するセメント粒子の状況を透視できる材料の平行板間の薄いスリット内で種々のセメントグラウトをある程度長い距離にわたって均等に流すような装置を作製することは、きわめて困難であるから、ベントナイトグラウトについての実験例<sup>12)</sup>を参考とし、次のべる要素について改良を加えてFig.4.2 に示すような装置を作成した。

セメントグラウトは粒子懸濁液であって、特に薄い固液混相流における粒子の沈降が問題となる。そのため、広いレンジの圧力勾配をかけて流速を変化させてやる必要があるが、短い管ではその両端における圧力差があまり大きくないので圧力制御に対してより高い精度を保つことが要求される。また、粒子の沈降を生じさせかつそれが観察できるためにもある程度の長さがあることが望ましい。本研究ではこのセメント粒子沈降時の管内圧力分布の変化を測定することも目的の一つとした。ところ

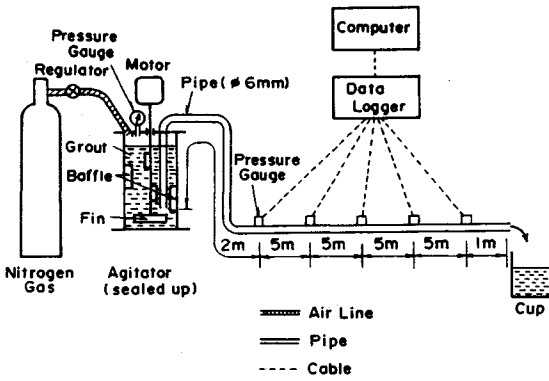


Fig.4.2 Apparatus used for measuring flow through this pipe

が種々の配合のグラウトを流すときの細管への圧力測定装置の取付加工が予想していたより難しく、なかなか良い精度を得ることができなかつた。このための予備実験によって、本実験装置は基本として、長さ 23 m、内径 6 mm の硬質ビニールパイプを通して流すこととした。さらにアジテータタンクから管への入口における乱れの影響を除くため、管への入口より 2 m の点より下流側 20 m の区間で 5 箇所の圧力測定をしながら沈澱の観察もした。

圧力勾配は窒素ガスの気圧によって所定の値を調整保持した。実験に用いた最大の気圧は 3.1 kgf/cm<sup>2</sup> である。

アジテータタンクは中心の羽根を回転させて攪拌させるものであるが、タンク内壁にも最も効果の大きいように試行して羽根を取付けてセメント懸濁液の沈澱を防止した。

粘性は温度の影響を強く受け高温時に低下するから、これを除去するため水温 20°C、室温 20°C、グラウトの温度 20°C として実験した。

### (3) 実験の精度

円管内の水流の特性については層流領域についてはナビヤ・ストークスの方程式に基づく解析解が実験により確認され、また、層流から乱流への遷移、乱流領域については、Nikuradse により系統的な実験が行われ、その結果は多くの文献に引用されている。

装置による清水での実験結果と、Nikuradse 等の実験結果とを比較して示すと Fig.4.3 のとおりであり、以下に述べる事が示されている。

① レイノルズ数が 1000 以下の層流領域については、実験から求められる抵抗係数は解析解と一致しているが、レイノルズ数が増加するに従って、実験値の方が大きな値を示すようになる。

② Nikuradse の実験では、層流域から遷移領域の間に明確な臨界領域が存在するのに対して、本実験では層流域から遷移領域に滑らかに変化している。また、このときの抵抗係数は滑面での値と比較して小さい。

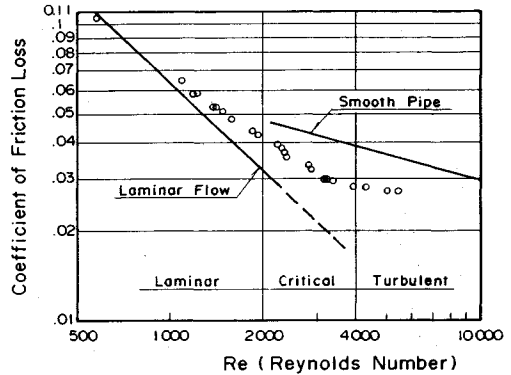


Fig.4.3 Relations between friction loss and Reynolds number in used apparatus

これらの結果を考え合わせると、円管の実験区間に 2 種の流れが混在することが考えられる。すなわち、レイノルズ数が低い場合には実験区間全てで層流状態にあるものの、レイノルズ数を高めていくと、実験区間の一部に遷移領域が発生するものと思われる。

いずれにしても、抵抗係数の値はこの種の実験の結果としては妥当なものであり、岩盤内のグラウトの大局的なレオロジー特性を把握するためにはほぼ十分な精度が確保されているものと考えられる。

### (4) 実験結果

#### a) 流動曲線

式 (10) で示した粘性率変数を用いて、実験結果の流動性を各種セメントの種々の W/C 毎に、Fig.4.4 に図示した。

この図によると、B/C=0、すなわちセメント単味のグラウトは、コロイドセメントおよび超微粒子セメントの W/C=1 の濃いものを除けば、流動曲線は原点を通るから、ニュートン流動をすることが明らかになった。

ベントナイトを添加したケースでは、W/C=8 の薄いグラウトはニュートン流動をするが、それ以外のものの流動曲線は原点を通らず、非ニュートン流動をする。この非ニュートン流動をするグラウトは、流動曲線の形状からみて、近似的にビンガム流動をするとしてもよいと考えられる。

なお、W/C=1、B/C=0.03 については管長が 20 m では流れず、3 m として測定した。また、W/C=1、B/C=0.05 については管長が 3 m でも流れなかった。

#### b) 低流速時の管内沈澱

管内圧力差が小さくなって低流速になるとセメント懸濁粒子が沈澱し始めた。その時の平均流速は 20~40 cm/sec であった。これは Cambfort が示した 4 cm/sec<sup>2)</sup> に対して 1 桁大きい値である。

この沈澱は粒子の粗いセメントで顕著に認められたが、セメントの粒子が細くなるにつれて、またベント

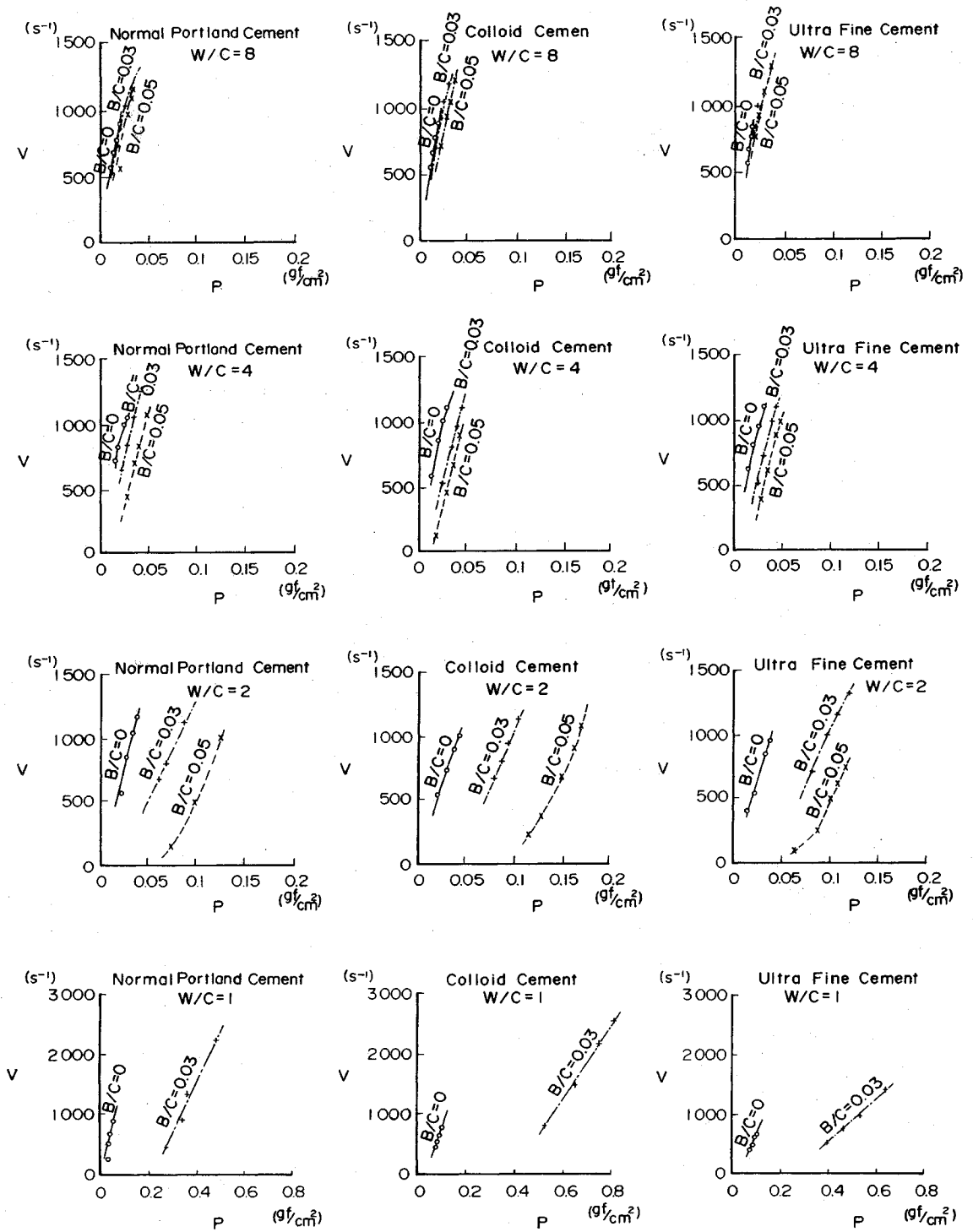


Fig.4.4 P-V Flow curves for various grouts where P and V are consistency variables shown in Ep. (10)

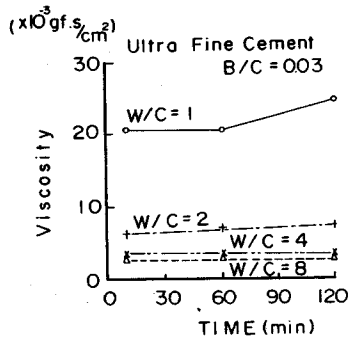


Fig.4.6 Influence of mixing time

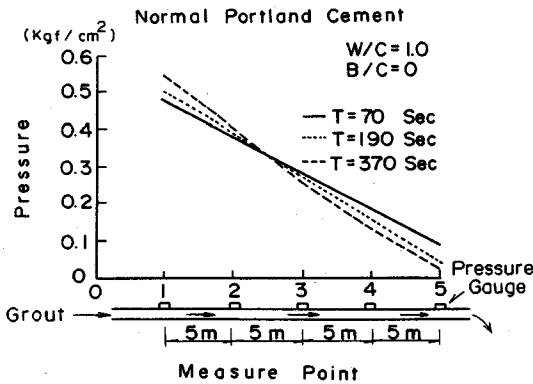
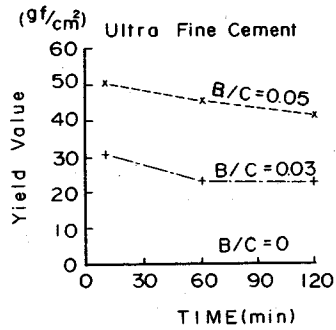


Fig.4.5 Pressure changes during sedimentation

ナイト添加量が増えるにつれて目視による判定は困難となった。

しかし、多くの実験において、管内圧力分布は、**Fig.4.5**に例を示したように、懸濁粒子の沈澱が始まると、上流側の圧力が上昇し、反対に下流側の圧力が降下した。これは同一流量のとき、上流側で沈澱に伴って管路断面が縮小されて圧力がやや上昇したのに対して、下流では固液混相流中の懸濁粒子を上流で落としてきたための粘性が低下して流れ易くなる分だけ動水勾配が減少するからではないかと考えられる。本研究の実験では、各種配合のグラウトのレオロジー特性の把握を主目的としたため、管内閉塞を生じさせないように動水勾配を調整したから、沈澱が発生してから長時間流し続けて、その後の経過をみる実験はしなかった。しかし、筆者は、上述の現象は余剰水を押し出して濃い材料をとどまらせる現象の一つだと考えているが、Kennedyの平行なスリットの中心に噴き出し口をもつグラウトの流れの実験ではそのような現象は見当たらなかったとする報告<sup>14)</sup>とは相容れない。これは、Kennedyの実験ではスリット内の圧力分布を正確に測定できていないし、コンクリートで作ったスリットに凹凸があって流れが乱れていたかもしれないためではないかと考えられる。

c) 攪拌継続時間の影響

ダム基礎岩盤グラウチングの現場では、循環式配管をして、グラウトポンプから一定の流量を送り、注入に消費した剰余のグラウトは還流させて、再度攪拌圧送する。このため、セメントグラウトの混練後1~2時間流動を続けることもある。

このような攪拌継続時間の影響は、本研究の実験において、**Fig.4.6**に一例を示したように、 $W/C=2$ 以下の濃いグラウトが濃くなるほど、また $B/C$ が増すほど顕著に現れ、粘度の増加、降伏値の低下を示した。

d) 粘度

**Fig.3.1**で説明したように、式(11)または(12)によって求めた粘度は、**Fig.4.7**のとおりである。

粘度は、粒子が細かいセメントになるほど、 $W/C$ が小さくなって濃くなるほど、さらに $B/C$ が大きくなるほど急速に大きな値となる。しかし、 $W/C$ が4よりも大きな薄いグラウトでは $W/C$ およびセメント粒径についての差は小さくほぼ同じ値である。

e) 降伏値

非ニュートン流動をするグラウトはビンガム流動であるとみなし、**Fig.4.4**の流動曲線から**Fig.3.1**で説明したようにして求めた降伏値は、**Fig.4.8**のとおりである。

セメント単味のグラウトはコロイドセメントおよび超微粒子セメントの $W/C=1$ の濃いものを除けばニュートン流動をするから降伏値は零である。

非ニュートン流動をするグラウトでは各種セメント共 $W/C=4$ よりも小さな濃いもので、濃くなるほど、また $B/C$ が大きくなるほど大きな値をもっている。しかし、 $W/C=4$ より薄いものはほとんど零に近い値である。

5. ずり応力がグラウト流に及ぼす影響

前章で述べた実験によって、ダム基礎岩盤グラウチングで実用しているセメントグラウトのレオロジー特性が大局的に明らかになった。この結果、その粘度と降伏値によって表されるずり応力がグラウトの流動に及ぼす影響の度合を、数値で明瞭に示すことができる。一例とし

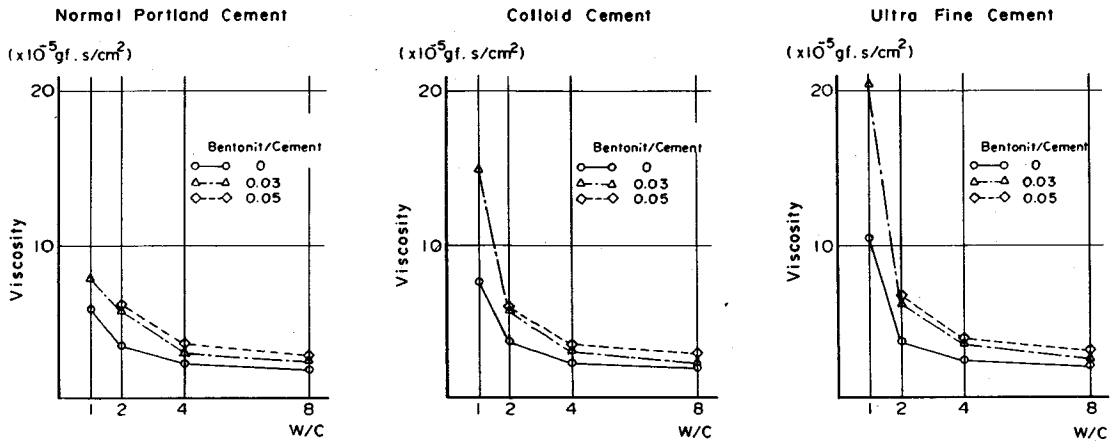


Fig.4.7 Viscosities for various grouts

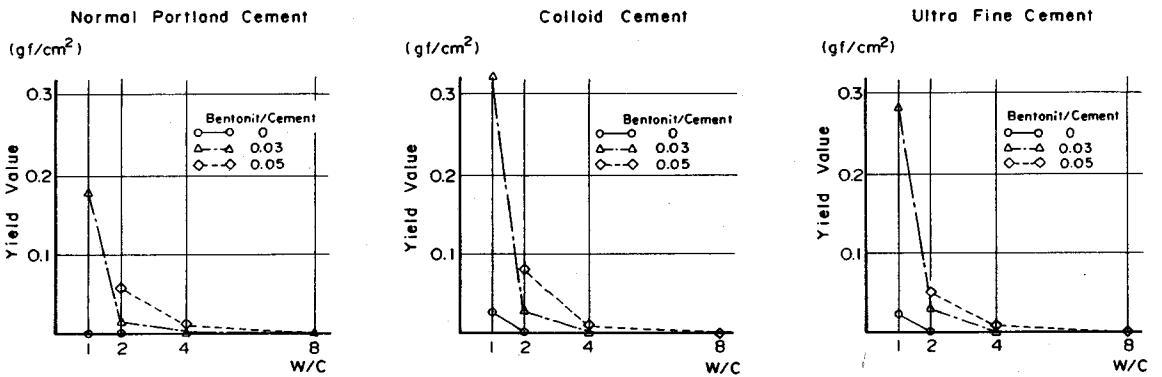


Fig.4.8 Yield values for various grouts

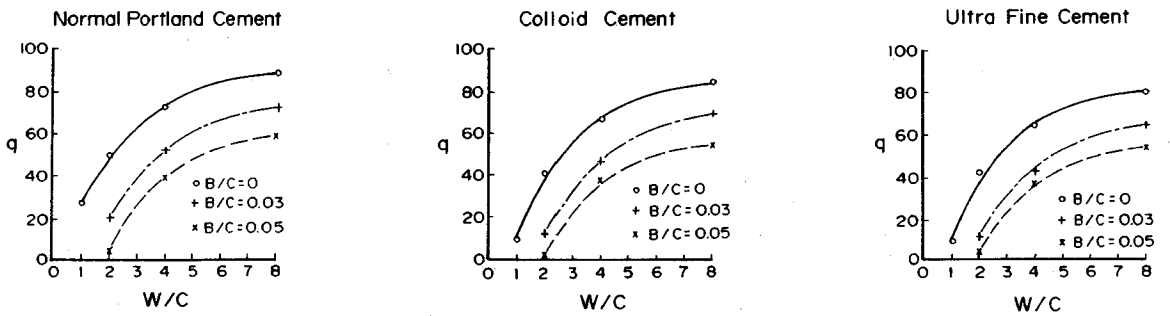


Fig.5.1 Flow rate for various grouts through  $\phi$  6mm pipe at pressure gradient of 0.5

て、動水勾配を0.5とし、本研究に用いた $\phi$ 6mmのパイプの中を通る普通セメントのグラウトの流量を、式(9)によって求めて図示すると、Fig.5.1のとおりとなる。これらの曲線で示される流量は、実験から求めた係数、あるいは数値を用いているから、実験で実測した流量とはもちろん一致している。また、異なる動水勾配に対する流量は、この図から比例関係によって求めることができる。

グラウトの流れについて Fig.5.1の曲線が示す値を用

いて考察すると次のとおりである。

①  $B/C=0$ の曲線で、 $W/C=8$ の流量に対して、 $W/C=2$ では流量はほぼ半分に低下するけれども、運ぶセメント量は約1.7倍となる。また、 $B/C=0$ 、 $W/C=2$ のときの流量と $B/C=0.03$ 、 $W/C=4$ のときの流量はほぼ等しいが、前者の運ぶセメント量は約1.7倍となる。このように、セメント注入量をできるだけ多くするためにはベントナイトの添加を避け、できるだけ濃いグラウトを注入するのがよい。



②  $W/C=4$ において $B/C=0$ から0.05に増したとき、流量は半減するし、さらに濃くした $W/C=2$ においては、 $B/C=0$ から0.05に増したとき、流量は僅か数%に減少する。岩盤に開口割れ目が著しく発達している場合には、注入されたグラウトが不必要なゾーンへ逸散し易い。このようなとき、グラウトの流れを止めるためには、濃いグラウトにベントナイトの添加量を増すことの効果が大きい。なお、2.(5)で述べたように、ベントナイトを添加すれば強さが著るしく減小するから、グラウトによる遮水壁では、そこを通る浸透流の流速が過大となって、遮水壁が侵食されないような設計にする必要がある。

③ 細い割れ目に注入するため、特殊な細粒径のセメントを使用するときは、ずり応力の影響が少ないものでなければ効果がないと考える。そのためには、ベントナイトを添加せず、 $W/C=4$ より大きな薄いセメント単味のグラウトを用いるか高温のグラウトとして、粘性によるずり応力を低下させる必要がある。

## 6. む す び

ダム基礎岩盤用セメントグラウトは水セメント重量比( $W/C$ )が8~10の薄いものから1の濃いものまでの種々の濃度のものが使用されている。グラウティング用セメントの平均粒径は22 $\mu\text{m}$ の粗いものから5 $\mu\text{m}$ の細かいものが生産されている。また、セメント粒子の懸濁性を高めるためベントナイトをセメント重量の3~5%添加することもある。

本研究では長さ約20m、内径6mmの毛細管に種々のセメントを主材料とするグラウトを流して、そのレオロジー特性を研究した。その結果、次の事項が明らかになった。

① セメント単味のグラウトは、コロイドセメントやそれより細かい特殊なセメントの $W/C=1$ の濃いものを除けば、ニュートン流動をする。

特殊な細かいセメントの $W/C=1$ の濃いセメント単味のグラウト、および3~5%の少量のベントナイトを添加したすべてのグラウトは、 $W/C=8$ の薄いものを除き、非ニュートン流動をする。その流動曲線は近似的にビンガム流動をするとしてよいと考えられる。

② 管内圧力差が小さくなって低流速になると、セメント懸濁粒子が沈澱し始まる。その平均流速は20~40cm/secであった。この沈澱が始まると、上流側で圧力が上昇し、下流側で逆に降下した。

③ 粘度(非ニュートン流体ではみかけ粘度)は、粒子が細かいセメントになるほど、水セメント比 $W/C$ が小さくなるほど、さらにベントナイトセメント比 $B/C$ が大きくなるほど大きな値となる。しかし、 $W/C$ が4よりも大きい薄いグラウトでは、およそ $2\sim 4 \times 10^{-5}$

gf.s/cm<sup>2</sup>で、あまり大きな値ではない。

④ 非ニュートン流動をするセメントグラウトの降伏値は、 $W/C$ が4よりも小さいときに濃くなるほど、また $B/C$ が大きくなるほど大きな値となる。この実験で計測できた最大値は約 $300 \times 10^{-3}$  gf/cm<sup>2</sup>である。

⑤ セメント注入量をふやしたいときには、ベントナイトを添加せず、できるだけ $W/C$ の小さい、すなわち濃いグラウトを使用するのがよい。

ただし、細かい割れ目に注入するため特殊な細粒径のセメントを使用するときは、 $W/C=4$ より大きな薄いものとするか高温にして、粘性の影響を少なくしなければ効果がない。

⑥ 逆に、グラウトの流れを止めたいときには、ベントナイト添加量の多い、濃いグラウトを使用するのがよい。

おわりに、本研究を行なうにあたって、建設省土木研究所 高須修二氏、日特建設(株) 岡孝夫氏をはじめ多くの方に適切なご指導とご協力を賜ったことを記し、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 柴田 功：ダム基礎岩盤における地圧測定と合理的なグラウティング注入圧力選定法，土木学会論文集，No.436/III-16, 1991.9.
- 2) King, J.C. and Bush, E.G.W. : Grouting of Granular Materials, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceeding of A.S.C.E., 1961.
- 3) 横田 潤：セメントグラウトにおけるセメント粒度とベントナイト混合に関する定性的実験と現場応用について，関西電力，1961.
- 4) Shimoda, M. and Ohmori, H. : Ultra Fine Grouting Material, Proceedings of the Conference of Grouting in Geotechnical Engineering, A.S.C.E., 1982.
- 5) Hiratsuka, A. and Yoshida, H. : Application and Selection of Injection Materials for Sand and Gravel Foundation Grouting beneath Dam, C 3, Sixteenth Congress on Large Dams, 1988.
- 6) セメントベントナイトグラウト性状試験，日特建設，1976.
- 7) Cambfort, H. : 地盤注入，鹿島出版会，1969.
- 8) Clark, B.E. : Theoretical Basis of Pressure Grout Penetration. Journal of American Concrete, 1955.
- 9) 土木試験報告：砂礫層基礎に対する注入工法に関する試験，電源開発土木試験所，1979.
- 10) 中川鶴太郎・神戸博太郎：レオロジー，みすず書房，1959.
- 11) Scott, R.A. : Fundamental Considerations. Governing the Penetrability of Grouts and their Ultimate Resistance to Displacement, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths, 1963.
- 12) Marsland, A. and Loudon, A.G. : The Flow Properties and Yield Gradients of Bentonite Grouts in Sands and Capillaries, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths, 1963.
- 13) Jones, G.K. : Chemistry and Flow Properties of Bentonite

---

Grouts, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice,  
Butterworths, 1963.

Grouting, Journal of the Soil Mechanics and Foundations  
Division, Proceedings of the A.S.C.E., 1961.

14) Kennedy, T.B. : Grouting with Cement, Symposium on

(1991. 10. 22 受付)

---

## THE FLOW PROPERTIES OF CEMENT GROUTS IN THIN PIPE

Isao SHIBATA

The flow properties of cement grout of different concentrations and containing up to 5 per cent of bentonite by weight have been measured in thin pipe over a wide range of pressure gradients. The flow curves obtained approximated to those given by a Newtonian type and/or a Bingham-type. The magnitudes of parameters such as a viscosity and/or an apparent viscosity and yield value increase very rapidly with the concentration of the grout and the increase of bentonite. From the results, it is recommended that the concentrated neat cement grout is suitable for the general case but the containing bentonite grout is preferable for the case of intending to prevent undesirable traveling of grout.