

浸透・固化特性からみた ソイルセメントグラウトの適用性について

貝沼憲男¹・安田 登²・神藤健一³・長瀧重義⁴

¹フェロー 工博 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎 4-1)

²正会員 工博 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎 4-1)

³工修 前田建設工業(株)技術研究所(〒179-8903 東京都練馬区旭町 1-39-16)

⁴正会員 工博 新潟大学工学部建設学科教授(〒950-2102 新潟県新潟市五十嵐二ノ町 8050)

岩盤を対象とした止水工事の一種であるグラウチング工事の合理的かつ経済的な方法の確立が必要となっている。そこで、我々はセメントにダム建設地点近傍に分布する自然発生材である土質材料(細粒分の多いロームや粘土)を添加したグラウト(以下ソイルセメントグラウトと呼ぶ)を利用し、コスト削減と土質材料を使用することによるグラウトの品質向上とを目標に一連の研究を行った。

そのうち、本論文では、ソイルセメントグラウトの浸透・固化特性について、セメントグラウトと対比した室内実験により、ソイルセメントグラウトの止水グラウトへの適用性を検討するとともに、使用するための検討手順や配合、計画方法を提案した。

Key Words: grouting, soil cement, penetration, consolidation, rock mass

1. はじめに

ダム湛水池からの漏水防止のための止水対策としては各種あるが、一般的にはグラウチング工事が行われている¹⁾。グラウチングに用いるグラウトは、主にセメントと水を混合したセメントミルクであり、逐次注入孔間隔を詰める中央内挿法による施工を行っているが、高次数まで十分な止水効果が認められない場合があり、また、事前調査から想定される必要注入量と比較して大量の注入がなされる場合が少なくない。

グラウトとして我が国では、セメントが比較的安価で均質な材料が確保でき、固化後の強度もあるため一般に使用されているが、

①ブリーディングが大きく割れ目に水みちを残す可能性がある

②ブリーディングしやすいため浸透距離が短いことが想定される

等の問題点が指摘されている²⁾。この対策として数%のペントナイトを添加することによりブリーディングを小さくすることが行われている³⁾。また、海外では空洞充填などにコストダウン効果も考慮してセメントの一部を地山に賦存する粘土等に置換することも行われている⁴⁾。そこで、我々はセメントにダム建設地点近傍に分布する自然発生材である土質材料(細粒分の多いロームや粘土)を添加したグラウト(以下ソイルセメントグラウトと呼ぶ)を岩盤を対象とした止水グラウトに有効利用し、セメント使用量を少なくするこ

とによる材料購入費の低減効果や発生土の処分費の削減と、土質材料を使用することによるグラウトの品質向上とを目標に一連の研究を行った。

ソイルセメントグラウトを実際に適用する場合、①自然発生土である土質材料の品質的なバラツキ、とくに粒径が大きなもの割れ目に対する浸透性やその分級方法についての検討②土質材料とセメントの材料分離や添加によるグラウト品質の検討③セメントに土質材料を添加すると強度が低下するので水圧や長期的安定に対する確認、等が問題となる。

筆者らは、これらの問題に対して従来のグラウトに関する研究を整理し、抽出した技術課題に対してソイルセメントグラウトの止水グラウチングへの適用性について一連の研究をしている。

本論では、室内実験でセメントグラウトとソイルセメントグラウトの浸透・固化特性を比較検討し、ソイルセメントグラウトを止水グラウトに使用するための検討手順、配合・計画方法を提案する。

2. 従来の研究例と止水グラウトに対する要求品質

土質材料を用いたグラウトの研究例としては以下のものがある。岩田は現地発生材である粘土を用いてグラウタバリティの改善効果について研究し、トンネル工事の裏込め注入等に使用した⁵⁾。この研究ではグラウトの配合はブリーディングとフロー値の関係により決定しているが、浸透性や安定性に対しては検討さ

れていない。また、船明ダムでは、ダム基礎部の砂礫層の止水に粘土セメントグラウトを用いた実績が報告されているが⁶⁾、砂礫層といういわば多孔質地盤を対象としたもので岩盤を対象としたものではない。また、久慈石油備蓄基地では、透水係数 $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ とごく低透水性岩盤を対象に低濃度の細粒粘土を用いてほとんど無圧状態で浸透させる注入工法をとって、粘土だけによるグラウト(粘土グラウト)を有効利用している⁷⁾。ここでは、石油備蓄の水封機能を期待したもので、それほど大きな動水勾配を対象としていない。また海外では、土質材料とセメントを用いたグラウトの研究は行われているが、空洞充填を目的としたもので、 $W/(C+L) < 1$ の非常に濃い配合でのものである⁸⁾。これらに対して、亀裂性岩盤を対象にして日々動水勾配が変化する発電ダム湛水池周辺の止水対策としてソイルセメントグラウトを用いて加圧注入を実施した例はない。

一方、グラウトはグラウチングの目的、注入仕様や岩盤中の割れ目幅に応じて選定する必要があると考えられる。しかし、岩盤中の割れ目が複雑なため、および、グラウトの浸透・固化のメカニズムが十分把握できていないため、セメントグラウトでもその注入仕様は現場注入実験等をもとに経験的に決めているのが現状である。

ここで、止水グラウトに要求される品質と従来の研究を整理すると次の通りである。①グラウトの粒子サイズにより注入可能な、空隙、割れ目幅があるので粒子サイズとしては割れ目に応じて選定する必要がある。例えば Kennedy はセメントグラウトを対象にした実験より、 W (割れ目幅) / D_{max} (グラウト材の最大粒径) > 1.7 のように関係を求めている⁹⁾。②グラウトのブリーディングは、割れ目に注入されたグラウトと地山の間にも水みちが残さないために重要であり、ブリーディングはないか、あっても小さい方がよい。また、船明ダムの粘土セメントグラウトでは施工中の配管内での沈降を生じさせない条件として 5% という基準を設けている。③粘性は、施工性と注入したグラウトの浸透性に関係するものである。施工性からはセメントグラウトのフロー値を 14 秒(約 $1400 \text{mPa}\cdot\text{s}$)以下、また、砂礫層を対象とした場合にはフロー値は 16 秒以下が浸透可能であるが¹⁰⁾、岩盤の割れ目に対しての研究はない。なお、ブリーディングを小さくするに従って粘性が高くなるので②と③とから適切な配合を検討する必要がある。④強度としては、割れ目に注入されたグラウトが水圧により抜け出さない強度(付着強度)と充填長が必要であり、また、長期的な安定性が必要であるが、止水グラウトとしてはほとんど強度が必要ない¹¹⁾とされているが、具体的に検討している例はない。

表-1 土質材料の基本物性

含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	土粒子密度 (g/cm^3)	最大粒径 (mm)	平均粒径 (mm)	pH	膨潤性鉱物	CEC (meq/mg)
73 ~ 152	116	67	2.5 ~ 2.7	10 ~ 19	0.02 ~ 0.04	7.2 ~ 7.5	無し	10 ~ 30

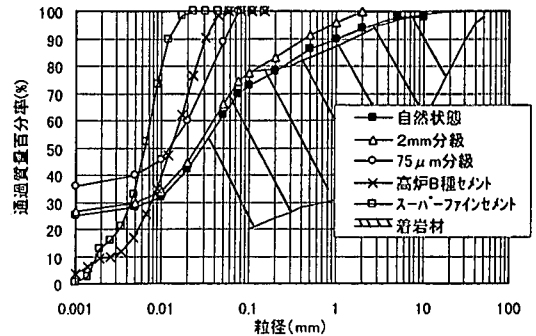


図-1 粘土、セメントおよび着岩材の粒度分布

以上のように、従来の研究はセメントグラウトに対するものか経験的なもので、ソイルセメントグラウトに対して実験をもとに浸透から固化特性まで一連の流れで研究した例はない。したがって、ここでは上記①~④の要求品質の内、②のブリーディングと③の粘性は密接に関係するので整理し、次の 3 項目について室内実験をもとに検討する。

- ①粒子サイズと割れ目幅との関係
- ②ブリーディングと粘性からみた浸透性
- ③グラウトの固化後の安定性

なお、本文中、土質材料(L)とセメント(C)の重量比率(%)を $L/(C+L)$ 、水(W)比はソイルセメントグラウトの場合は $W/(C+L)$ 、セメントグラウトの場合は W/C と以下表記する。

3. 使用した土質材料の基本物性

使用した土質材料の基本物性を表-1に示す。土粒子密度は $2.5 \sim 2.7 \text{g/cm}^3$ (セメントは 3.1g/cm^3)、粉末 X線回折による粘土の含有鉱物は石英、長石、緑泥石であり膨潤性鉱物は含有しない。また、陽イオン交換能(CEC)は $10 \sim 30 \text{meq}/100 \text{mg}$ と小さく、ソイルスラリー(10%濃度)の pH は $7.2 \sim 7.5$ とほぼ中性を示す。図-1に地山に分布する自然状態と、分級した土質材料とセメントの粒径加積曲線を示す。土質材料は自然状

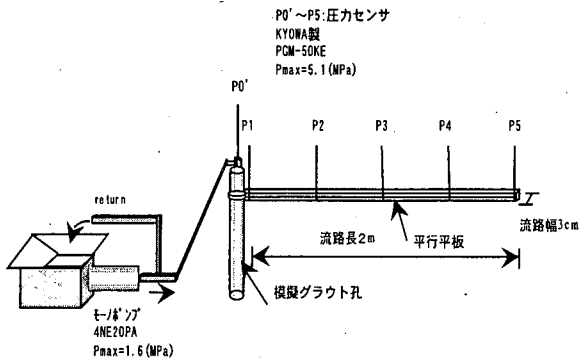


図-2 平行平板実験装置

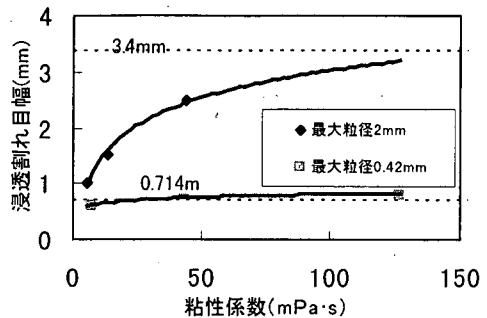
態では最大で 19mm 以上の粗粒分が含まれるため、網フルイを用いた湿式分級を行い、最大粒径を 2 種 (2mm と 75 μ m) に調整した材料についても示している。

土質材料は粘土分 (5 μ m 以下) は 2mm 分級で 25%、75 μ m 分級で 33% と多く、細粒から粗粒分まで広範に粒度分布し、土質分類ではロームに区分される。ソイルセメントグラウトの特性は、使用する土質材料に依存すると考えられるが、今回使用したものは粒度分布的にはフィルダムの着岩材やコアの細粒ブレンド材等に使用されている¹²⁾もので(表-1 参照)、膨潤性鉱物を含まない一般的な土質材料である。また、このような土質材料はダム地点の条件にもよるが、本地点のようにダム地点近傍に大量に賦存し、安価に採取可能であることが多く、場合によっては土捨て場に処分される場合もある。なお、セメントは高炉 B 種セメントを使用した。50 μ m 粒径は土質材料よりやや小さいが、粒径分布範囲が狭く、粘土分以下の細粒含有率は少ない。また、参考に超微粒子セメントを図中に示すが、高炉 B 種セメントよりもさらに細粒であるが、粘土分以下の含有率は土質材料より少ない。

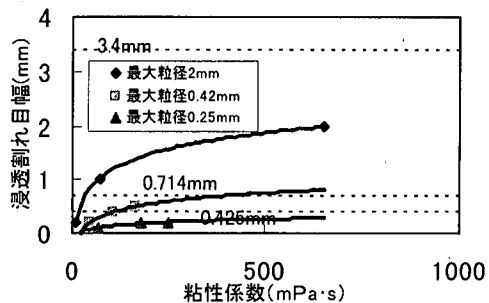
4. 粒子サイズと割れ目の関係

グラウトの割れ目への浸透の可否については、セメントグラウトでは前述したように Kennedy の関係式があるが、この関係式は実際より小さく浸透しやすいことが指摘されている¹³⁾。また、セメントと比較して粒子サイズが大きく、高粘性であるソイルセメントグラウトにもこの関係式が適用できるかを検討するために平行平板で割れ目を模擬した浸透実験を行った。

なお、既往研究¹⁴⁾によればグラウトは降伏値を持つ塑性か擬塑性流体に分類され、粘性は必ず速度により変化するものであるが、ここでの粘性は簡単のためニュートン流体として考えた。



(a) 注入圧力 0.5kgf/cm² (49.0kPa) の場合



(b) 注入圧力 10kgf/cm² (0.9MPa) の場合

図-3 グラウトの粘性、最大粒径と浸透可能割れ目幅との関係

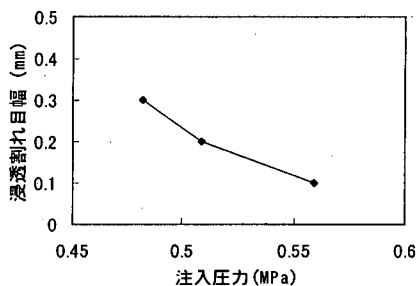


図-4 注入圧力と浸透可能な割れ目幅の関係

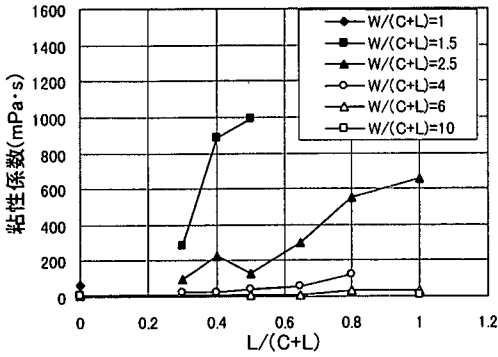
(1) 平行平板で割れ目を模擬した浸透実験

a) 実験方法

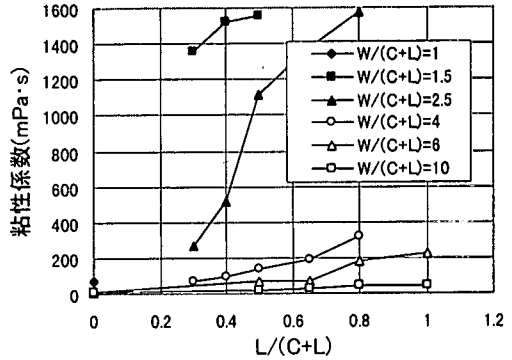
図-2 に示す模擬割れ目 (流路長 2m, 流路幅 3cm の平行平板) を使用して、土質材料の最大粒径を 2.0, 0.42, 0.25mm に分級した材料を、W/L を変化させて粘性を変えた状態で注入を行い、設定された割れ目幅毎に浸透可能か目詰まりするかを判定した。なお、注入圧力は通常の施工を考慮した 10kgf/cm² (0.9MPa) の他に、ほぼ無圧状態を模擬した 0.5kgf/cm² (49.0kPa) の 2 ケースとした。

b) 実験結果

①図-3 に示す通り、グラウトの粒子サイズと浸透可能な割れ目幅の関係は粘性に依存する傾向が確認でき、



(a) 2mm 分級の場合



(b) 75 μm 分級の場合

図-5 L/(C+L)と粘性との関係

粘性が小さい(薄い配合)ほどグラウトの最大粒径よりも小さい割れ目に浸透可能であることが認められる。また、粘性が大きくなるに従い、Kennedy が提案する浸透可能な、割れ目幅/最大粒径=1.7 倍(図中点線で表記)に漸近する傾向にある。

②割れ目を通過した粒子サイズは割れ目幅以下のものであり、割れ目に浸透できなかった粗粒分は模擬グラウト孔の孔底に沈積した。なお、目詰まりした場合、開板すると割れ目の入り口部に粒子が密実に詰まっている様子が観察され、割れ目途中での目詰まりは認められなかった。

③浸透可能な開口割れ目幅と注入圧力の関係を、グラウトの最大粒径を 0.25mm に分級した $W/L=2.5$ のグラウトを用いて求めた。結果を図-4 に示す。図-4 より割れ目幅と注入圧力には負の線形の相関が認められた。即ち、注入圧力が大きくなるほど同じ材料でもより小さな割れ目に浸透可能となることが確認された。

(2) 粒子サイズと割れ目への注入可能性について

地山に分布する割れ目は大小さまざまあり、理想的には各割れ目幅に応じたグラウトの粒子サイズを選択できれば合理的である。ソイルセメントグラウトは 2 章で述べた通り、5 μm 以下の粘土分が多く、とくに浸透実験結果より、薄い配合にした場合にはグラウトの最大粒径の 1/10 程度の割れ目まで注入可能であり、分級程度と $W/(C+L)$ を大きく低下させることにより、微細割れ目まで注入可能であると考えられる。ここで、本実験結果を用いて多変量解析を行った結果、式(1)を得た(奇与率 $R^2=0.77$)。

$$B = 0.471\phi - 0.917p + 0.002\mu + 0.589 \quad (1)$$

ここに、B: 浸透可能割れ目幅(mm)、 ϕ : 最大粒径(mm)、

p : 注入圧力(MPa)、 μ : 粘性係数(mPa·s)。

式(1)は限られたデータで求めたものであるが、浸透可能な割れ目幅は最大粒径だけではなく、粘性や注入圧力にも関係することが確かめられた。即ちこの結果より、ソイルセメントグラウトでは最大粒径や粘性を大きくすることで、セメントグラウトが大量注入される大きな割れ目に対して浸透距離を制御でき、無駄な注入が避けられる可能性があること、また、分級により最大粒径を小さくし、粘性を小さくすることで微細な割れ目にも浸透可能であることがわかる。

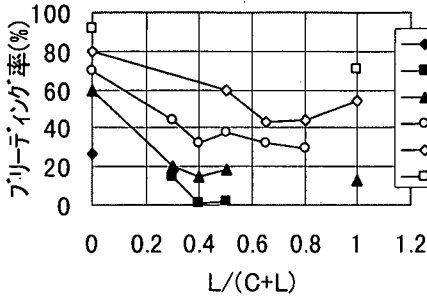
5. プリーディングと粘性からみた浸透性について

実際の注入現象としてグラウトが割れ目中に注入されると、粒子が割れ目面に引っかかることや化学的な吸着作用等により割れ目の閉塞が順次発生することも考えられるが、単純なモデルとしては注入されたグラウトは浸透距離とともに流速が低下し、粒子が沈殿する現象が割れ目中で起こっていることが想定される¹⁵⁾。この関係を平行平板の軸対称モデルでの理論解で示すと式(2)になる¹⁶⁾。浸透半径 r と流速 v の関係が求まる。

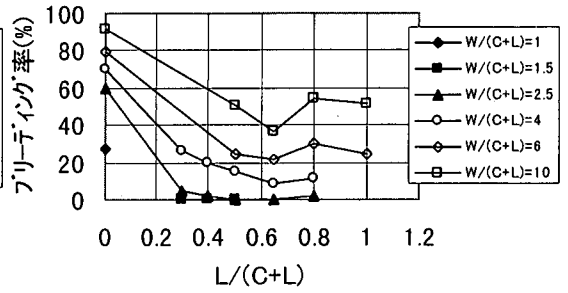
$$v = \frac{pt^2}{12\mu r} \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここに、 v : 流速(cm/sec)、 p : 注入圧力(Pa)、 μ : 粘性係数(Pa·s)、 r : 浸透半径(cm)、 r_0 : 孔半径(cm)、 t : 開口割れ目幅(mm)

式(2)がソイルセメントグラウトでも成立し、沈降し始める速度が求まればグラウトの浸透距離の推定が



(a) 2mm 分級の場合



(b) 75 μm 分級の場合

図-6 L/(C+L)とブリーディング率との関係

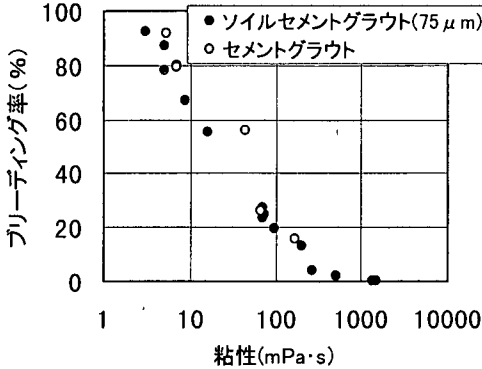


図-7 ブリーディング率と粘性係数の関係

可能となる。また、この式では、粘性が小さいほど流速が大きくなり浸透距離が大きくなる。一方、ブリーディングは水みちを残さないためにもできるだけ小さくする必要がある。また、ブリーディングはグラウトの沈降しやすさを示す指標であるので、沈降を始める流速を検討する代用特性になる可能性がある。以下ここではブリーディング率、粘性の測定結果とパイプ注入実験により求めた材料分離が始まる流速（以下限界流速と呼ぶ）との関係からグラウトの浸透性を検討する。

(1) 粘性とブリーディングの検討

グラウトの浸透性に大きく影響を与えるものに、グラウトの粘性、ブリーディングがある。それらの指標は土質材料、セメント、水の配合により異なるため、セメントと土質材料の混合率を $L/(C+L)=0\sim 100\%$ 、 $W/(C+L)=0.8\sim 10$ と試験条件を変化させて、配合と粘性・ブリーディング率の関係を室内実験により確認した。なお、ブリーディング率とは、グラウト全体の体積に対する沈降した固体分を除いた水の体積の百分率と定義されている¹⁷⁾。この結果を図-5~7 に示す。

①粘性は図-5 に示す通り、セメントグラウトの場合と比較して土質材料を添加すると増加し、とくに $W/(C+L)=2.5$ 以下で急激に大きくなる。また、分級の違いでは、

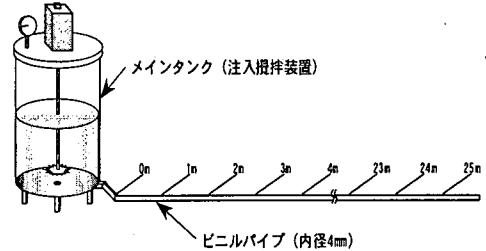
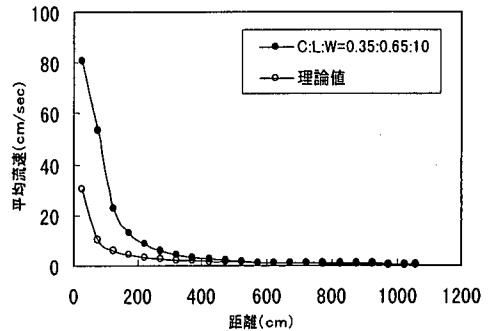


図-8 パイプ注入実験装置

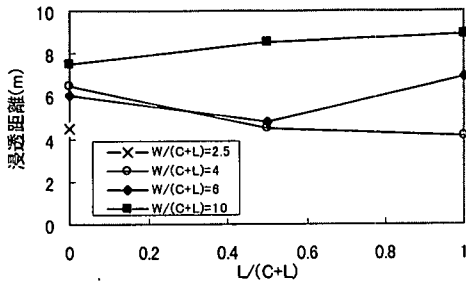


$L/(C+L)=0.65, W/(C+L)=10$
 注入圧力 $P=2.94\text{kPa}$
 パイプ内径 $d=4\text{mm}$
 粘性係数 $\mu=19.4\text{mPa}\cdot\text{s}$

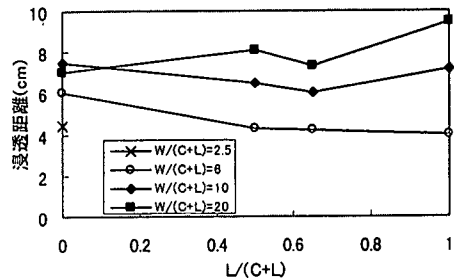
図-9 グラウトの流速と理論値との比較

75 μm 分級では 2mm 分級と比較して粘性が大きくなる傾向がある。

②ブリーディング率は図-6 に示す通り、セメントグラウトは $W/C=6$ 以上で大きく、一方ソイルセメントグラウトは同じ水比ではセメントグラウトに比較して小さい。とくに 75 μm に分級したものは小さく、 $W/(C+L)=2.5$ 以下ではほとんどブリーディングがない。また、 $L/(C+L)=50\%$ 以上で一定に近くなり、とくに $L/(C+L)=65\%$ 以上の場合、ほとんど粘土のみのグラウト

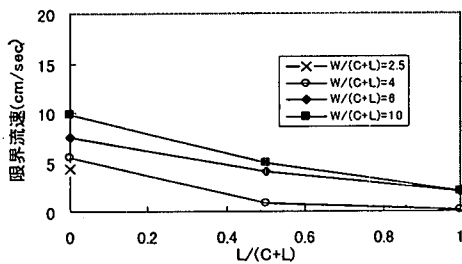


(a) 2mm 分級の場合

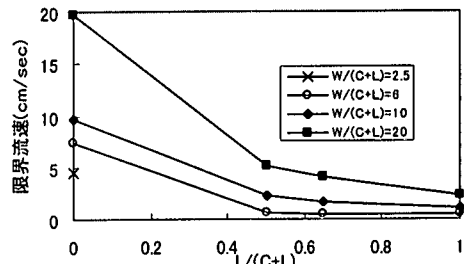


(b) 75 μm 分級の場合

図-10 L/(C+L)と浸透距離との関係



(a) 2mm 分級の場合



(b) 75 μm 分級の場合

図-11 L/(C+L)と限界流速との関係

トと同じになる。

ソイルセメントグラウトの配合としては、ブリーディングが小さく、粘性が小さい配合が望ましい。しかし、図-7に示すように75 μmに分級したソイルセメントグラウトのブリーディングと粘性の関係には負の相関が認められる。

以上から、ソイルセメントグラウトで今回試験した、L/(C+L)=30%以上の範囲の場合、ブリーディング率がほぼ一定になるL/(C+L)=50%以上が適当である。

(2) パイプ注入実験によるグラウトの沈降に関する検討

a) 実験方法

実験は、柴田の行った実験¹⁰⁾を参考にして、図-8に示す装置を用いて行った。表面がごく平滑な円形ビニルパイプ(内径4mm)を割れ目に見立て、一定圧力(0.03kgf/cm²(2.9kPa))でグラウトの配合(粘性)を変化させ、浸透距離と距離別の残存グラウトの材料構成成分の変化を把握した。パイプ中を流れるグラウトの先端流速を50cmピッチで計測し(測定した流速は50cm毎の平均)、グラウトの流れを観察した。

実験ではパイプ中に注入されたグラウトはある流速以下となると沈殿が発生し、材料と水が分離(材料分離)することが確認された。とくに材料分離が明確に認められた流速をここでは限界流速と呼ぶことにする。

b) 実験結果

①距離と流速の関係(L/(C+L)=65%, W/(C+L)=10)を図-9に示す。ここで図中には参考に層流の粘性流体の流れを表す式(3)のHagen-Poiseuilleの理論値を示す。

$$v = \frac{pd^2}{32\mu l} \quad (3)$$

ここに v:流速(cm/sec), p:注入圧力(Pa), d:パイプ内径(cm), μ:粘性係数(Pa·s), l:浸透距離(cm)

本実験では実験機器等の制約により、グラウトの注入圧は著しく低圧であり、また、19.4mPa·sと低粘性のグラウトを使用しており、実際の止水グラウトの条件とは異なっている。しかし、本実験はグラウトの限界流速と浸透距離を求めることを主な目的としているため、これらの条件は無視できると考えた。

図に示す通り、実験値は口元付近を除けば理論値と比較的良好に対応していることより、上記のような条件下では、定性的には式(2)に示した平行平板の軸対象モデルが成り立つと仮定した。

②浸透距離と配合の関係を図-10に示す。セメントグラウト W/C=4~10の浸透距離は6.0~7.5mであるのに対して、ソイルセメントグラウトの場合2mm分級、75 μm分級では明瞭な差異がなく、4~9mの範囲にある。ただし、W/(C+L)が大きくなるほどソイルセメントグラウトでは浸透距離が大きくなるのに対して、セメン

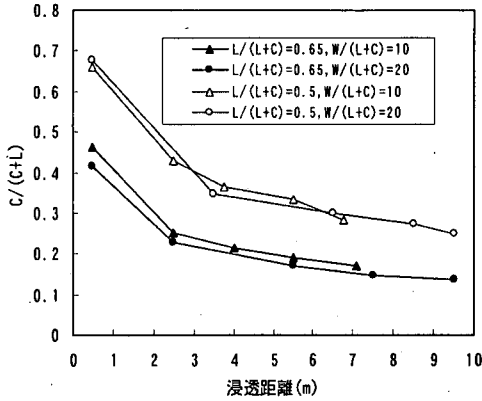


図-12 浸透距離と化学分析で求めた $C/(C+L)$ の関係

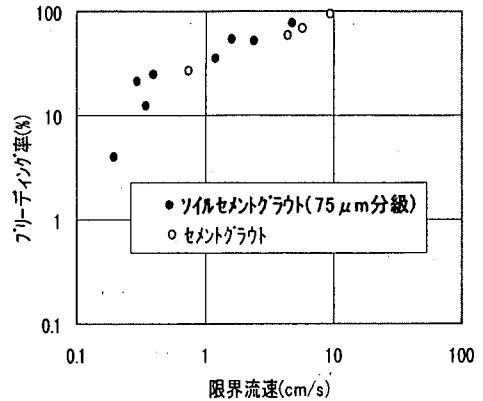


図-13 限界流速とブリーディング率の関係

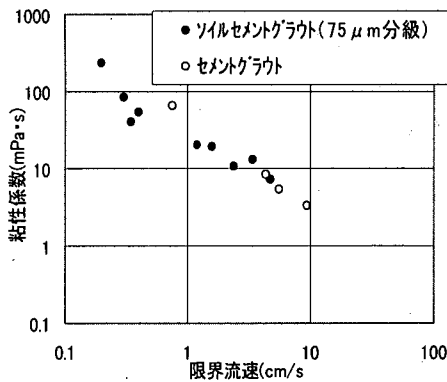


図-14 限界流速と粘性の関係

トグラウトは W/C が大きいほど浸透距離が短い傾向がある。これは前述したようにセメントグラウトでは W/C が大きくなるほどブリーディングが大きくなり沈降し易いものに対して、ソイルセメントグラウトは $L/(C+L)$ が50%以上であるとほとんどブリーディングが一定となり、 $W/(C+L)$ が大きくなるほど粘性が小さくなるので浸透距離が大きくなるものと考えられる。

③限界流速と配合の関係を図-11に示す。セメントグラウトの限界流速は、 $W/C=2.5$ では約 4.4cm/sec 、 $W/C=10$ では約 9.5cm/sec であるのに対して、 $75\mu\text{m}$ 分級のソイルグラウト ($L/(C+L)=100\%$ のものを呼ぶ) では $W/L=20$ の水比が大きいものでも、約 1.5cm/sec であり、 $W/L=6$ より濃い配合では材料分離は認められなかった。また、 $75\mu\text{m}$ 分級のソイルセメントグラウト ($L/(C+L)=50\%$) は $W/(C+L)=6$ で限界流速は 0.3cm/sec 程度、 $W/(C+L)=20$ でも 5cm/sec 以下であり、セメントグラウトと比較して小さく、かつ、セメントを入れないソイルグラウトより大きく、中間的な限界流速であった。

④距離別に含有するセメント量を化学分析¹⁹⁾により求め、固体分の土質材料とセメントの比率を求めた結果を図-12に示す。図より、グラウトの配合によりセメント含有量は異なるものの、口元付近には配合よりもセメント含有量が多くなっており、浸透距離に従ってセメント含有量が小さくなるが、先端部で一定値に収束する(初期配合が $C/(C+L)=50\%$ で30%、同様に $C/(C+L)=35\%$ で20%)傾向が認められた。

(3) ブリーディング率と限界流速

ブリーディング率と限界流速は同じ粒子の沈降特性を示す指標であることから、これらの関係を整理すると図-13のようになる。この図からはほぼ両者は正の相関関係にあり、ブリーディング率を小さくすることが限界流速を小さくし、粘性が同じであれば浸透距離を広げることになる。

(4) 浸透距離の検討

パイプ注入実験により、セメントグラウトとソイルセメントグラウトは、ほぼ同等の浸透距離であることがわかった。ここではパイプ注入実験結果の限界流速と粘性の関係を図-14にまとめて示す。この結果より、グラウトの限界流速と粘性には負の相関がある。したがって、グラウトの限界流速は、図-13のブリーディング率、あるいは図-14の粘性との関係でも推定可能である。ただし、土質材料によってはこの関係から外れることも考えられるため、パイプ注入実験で確認する必要がある。さらに、前述した浸透距離の理論式である式(2)がパイプ注入実験により成立すると仮定すると、この限界流速と割れ目幅とグラウト配合(粘性)とにより式(2)で浸透距離が推定できると思われる。

6. グラウトの固化後の安定性について

グラウトが割れ目中で固化する現象としては大別して2つのモデルが考えられる。①割れ目に注入されたグラウトの流速が低下し、限界流速以下になり沈降したり、割れ目面にグラウト粒子が偶発的に付着し、それが連続して起こり固化する現象〔自然沈降モデル〕、②岩盤に注入されたグラウトが、だめ押し注入により固化途中に加圧されることや注入圧力による変形や除荷によるリバウンドにより加圧脱水される現象〔加圧脱水モデル〕。実際の割れ目での現象は、これらが複合して起こっていると考えられるが、ここでは、強度増加が見込める加圧脱水効果は付随的なものと考え、自然沈降した場合の固化後の安定性について検討する。固化後の安定性としては、水圧による押し出しに対する付着力と長期的安定性について検討する。2章で述べたように、止水グラウトではグラウトは割れ目を充填し止水するためにはとくに大きな強度は不要で、流出しなだけの強度があれば良いと考えられるが、ここでは、より安全側の評価となる、ごく滑らかなビニルパイプ中で自然沈降して固化したグラウトの付着力実験を行い検討した。

(1) 水圧による押し出しに対する付着力の検討

a) 実験方法

実験は図-15 のような装置を用いて、目標配合のグラウトをビニルパイプ（内径 4mm）に注入し、鉛直状態で放置し、沈降固化したグラウトを長さ 10cm のパイプごと切断し、パイプに通水してその付着力を測定した。なお、付着強度とはパイプ中のグラウトが押し流されない強度であり、付着強度 $C=P$ （押し流すのに必要な圧力） $\times A'$ （パイプの断面積） $/ A$ （パイプ周囲の付着面積）と定義した。

b) 実験結果

試験結果を図-16 に示す。セメントグラウト $W/C=10$ の場合、材齢 28 日で $C=621\text{gf}/\text{cm}^2$ (60.9kPa)、同様に $W/C=3$ の場合 $C=713\text{gf}/\text{cm}^2$ (69.9kPa) である。

ソイルセメントグラウトの $L/(C+L)=65\%$ の場合、 $W/(C+L)=4$ 以上では、 $C=2.5\text{gf}/\text{cm}^2$ (0.2kPa) 以下とごく小さいが、 $W/(C+L)=3$ では $C=52\text{gf}/\text{cm}^2$ (5.1kPa) と強度発現が確認できた。また、 $L/(C+L)=50\%$ の場合、 $W/(C+L)=10$ では $C=19\text{gf}/\text{cm}^2$ (1.9kPa)、 $W/(C+L)=3$ では $C=201\text{gf}/\text{cm}^2$ (19.7kPa) と $W/(C+L)=10$ でも強度増加が認められた。ソイルセメントグラウトの付着強度は $W/(C+L)$ が大きい場合にはセメントグラウトの $1/10$ 以下だが、 $W/(C+L)=3$ と小さい場合には同じ $W/(C+L)$ のセメントグラウトの $1/3\sim 1/4$ 程度と大きく

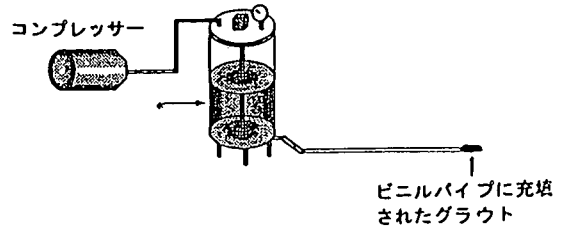
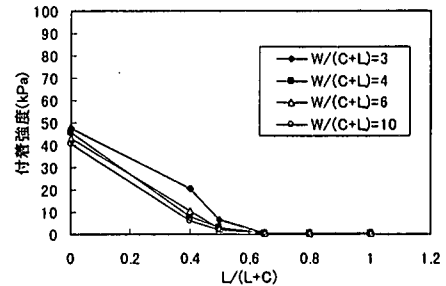
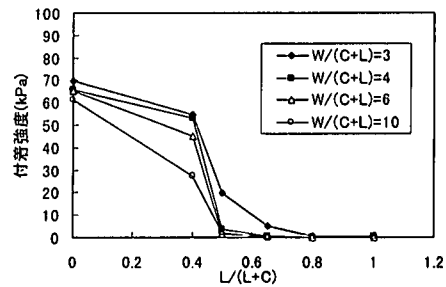


図-15 グラウト付着力実験装置



(a) 材齢 7 日



(b) 材齢 28 日

図-16 パイプ付着力試験結果

なる傾向がある。以上の結果は、 $L/(C+L)$ と $W/(C+L)$ との関係で示しているが、付着強度を固化後の W/C で整理すると、図-17 に示す通りである。ここで、固化後の W/C とは初期配合での水からブリーディング水を引いた水とセメントの重量比と定義した。この結果、付着強度は $L/(C+L)$ によらず、固化後の W/C と強い相関があることがわかる。これよりソイルセメントグラウトの配合計画を行うには、図-17 に示す付着強度と W/C の関係とブリーディング率から配合による付着強度を想定することが可能であると考えられる。ただし、使用する土質特性による影響も想定されるため、2~3 ケースの付着力試験を行い 図-17 のような関係をチェックする必要がある。

C) 水圧による押し出しに対する付着強度の検討

水圧による押し出しに対する充填物の安定性に関しては、式(4)のような提案式がある²⁰⁾。

$$q = 2Cx / e \quad (4)$$

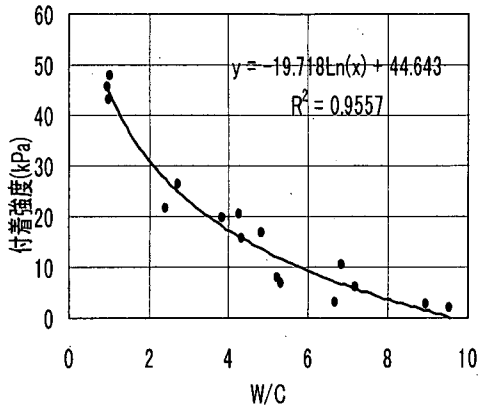


図-17 W/Cと付着強度の関係(材齢7日)

ここで e : 割れ目幅 (0.01mと仮定), q : 止水カーテンにかかる水圧 (=10kgf/cm² (0.9MPa)と仮定)
 C : 割れ目とグラウトの付着強度, x : 充填長 (止水カーテン幅5mと仮定)

式(4)よりグラウトの必要付着強度を求めると

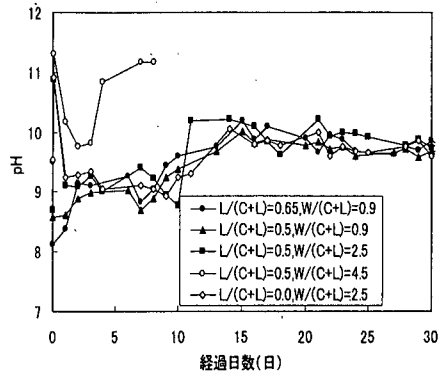
$$C = q \times e / 2X = (10 \times 0.01) / (2 \times 5) \\ = 10 \text{gf/cm}^2 \text{ (0.98kPa)} \quad (5)$$

とごく小さい付着強度で良いことになる。前述の実験結果では、 $L/(C+L)=65\%$ で、 $W/(C+L)=4$ 以上の配合ではこの条件を満足しないが、それよりも $L/(C+L)$ が小さいか、 $W/(C+L)$ が大きいかで満足する。なお、この条件はごく滑らかなビニールパイプを用いた自然沈降によるものであり、また、割れ目幅 0.01m (=1cm)という大きな割れ目を想定し、止水カーテンの水位差を100mという大きな条件である場合で、さらにパイプ注入実験結果で述べたように、ごく口元部は $L/(C+L)$ が小さくなる傾向にあり、実際のグラウト孔のごく近傍ではセメントが濃集することが予想されることより、安定性はあると考えられる。

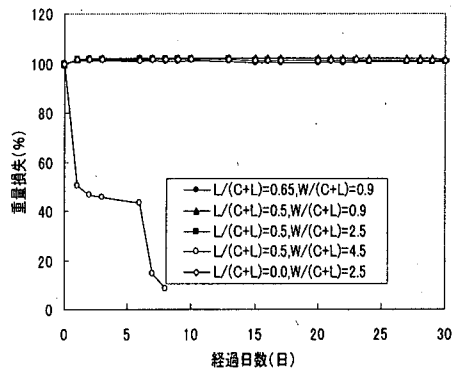
これより、ソイルセメントグラウトを止水グラウトに使用する場合、 $L/(C+L)=65\%$ より小さいものであればグラウトとしての強度的な品質は十分満足すると考えられる。

(2) 長期的安定性に対する検討

セメントに土質材料を添加したソイルセメントグラウトは、セメントグラウトよりも強度が低下するため、その長期的な安定性について検討した。試験は薬液注入材料の安定性を評価するための溶脱試験²¹⁾を参考に実施した。試験体は目標配合で簡易モールドで作成し、1週間湿潤養生させ、この供試体を水 500cm³を入れたビーカーに静置し、経時的に溶液のpHと供試体の重量測定を30日間行った。その結果を図-18に示す。安



(a) pH



(b) 重量損失

図-18 安定性試験結果

定性の指標となるpHと重量損失の変化を見ると、水比が大きく強度が劣る $W/(C+L)=4.5$, $L/(C+L)=50\%$ の供試体では試験途中にレキ片化し、初期の形状を保てない状況となり、アルカリ分が溶出しpHは11以上を示した。それに対して、セメントグラウトを含めて、他の供試体では経時的にほぼ9前後のpHを示し、重量に変化が認められなかった。

以上より、 $L/(C+L)=50\sim65\%$ のソイルセメントグラウトは、 $W/(C+L)=4.5$ 以上の薄い配合では、やや不安定であるが、 $W/(C+L)=2.5$ より小さい場合にはセメントグラウトと同様に安定であることが確認できた。

7. ソイルセメントグラウトの検討手順、配合、計画方法についての提案

(1) ソイルセメントグラウトの配合、計画方法についての提案

今回の室内試験結果をもとに従来の研究や施工試験や現場注入試験結果をもとにソイルセメントグラウト

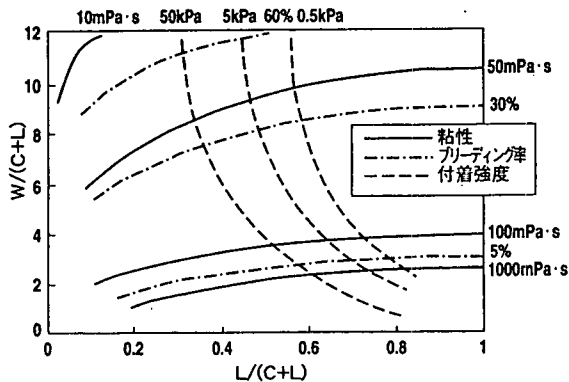


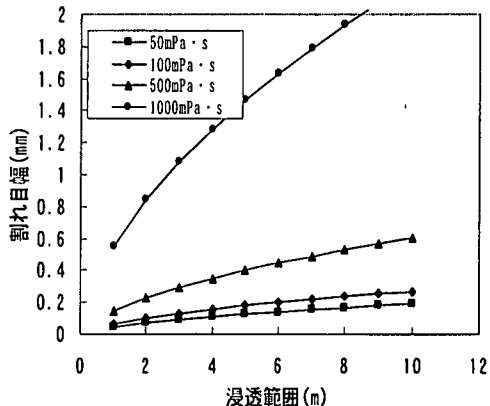
図-19 ブリーディング・粘性・強度の関係

の配合，計画方法を検討すると次の通りである。

①ソイルセメントグラウトは粒度分布範囲が広く， $5\mu\text{m}$ 以下の粘土分が多いことから，分級することによって粒子サイズが変えられ，粘性や注入圧力をコントロールすることによって大きな割れ目から微細な割れ目まで対応可能であることが確認できた。なお土質材料の粒子サイズは，水を加えて攪拌し，スラリー状にした状態($W/L=2.5$ 以上)で振動フルイ(1mm以上)やサイクロン($75\mu\text{m}$ 以上)によって比較的容易に分級できることを施工実験で確認している。現場注入実験で， $75\mu\text{m}$ はセメントグラウトと同程度の割れ目幅を対象に，一方2mmに分級したものは大量注入箇所の割れ目の粗詰めに使用し，粒子切り換えによる浸透制御の効果をj確認している。

② $75\mu\text{m}$ に分級したソイルセメントグラウトの $L/(C+L)$ と $W/(C+L)$ とを変化させた場合のブリーディング，粘性，付着強度の関係は図-19に示す通りである。この図は図-5，6，17を， $W/(C+L)$ と $L/(C+L)$ の関係で整理し，コンター表示したもので，この図より $W/(C+L)$ が小さくなるほど， $L/(C+L)$ が大きくなるほどブリーディングは小さくなり，逆に粘性は大きくなるjことが分かる。また，付着強度は $W/(C+L)$ が大きくなるほど， $L/(C+L)$ が大きくなるほど小さくなる。ソイルセメントグラウトの配合を計画する場合には，この図の3指標により適切な配合を選定する必要がある。

ここで，今回使用したソイルセメントグラウトの最適な配合を検討すると以下ようになる。別途実施したソイルセメントグラウトの施工試験による圧送限界は，粘性で $1500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 程度であるが，この結果は1回の試験結果であるため，繰り返しや長期的な影響を考慮し，施工性を考えるとより小さいほうが良いので， $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下とする。一方，船明ダム等での施工性から決められたブリーディング率が5%であるが，今回の現場実験では $W/(C+L)=10$ ， $L/(C+L)=65\%$ のブリー



式(2)に，注入圧力 $P=30\text{kgf}/\text{cm}^2(2.9\text{MPa})$ ，グラウトの限界流速 $v=0.3\text{cm}/\text{sec}$ とした時の粘性別の関係

図-20 割れ目幅と浸透範囲の関係

ーディング率でも問題なく施工できており，逆に圧送可能な粘性との関係から決める必要がある。圧送可能な粘性を $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ とすると，図-7よりブリーディング率はほとんどない。したがって，この圧送可能な粘性に近い配合が粘性とブリーディングの関係からは良く，図-19に示す通り， $W/(C+L)=2.5$ ， $L/(C+L)=50\sim65\%$ 以上の配合が適当である。一方，付着強度としては6章から， $10\text{gf}/\text{cm}^2\times 5$ (安全率) $=50\text{gf}/\text{cm}^2(4.9\text{kPa})$ とすると， $L/(C+L)=65\%$ 以下にする必要がある。

以上より，今回使用したソイルセメントグラウトの配合としては $L/(C+L)=50\sim65\%$ 付近と $W/(C+L)=2.5$ が適切な配合と考えられる。ただし，グラウトの加圧脱水等を考慮すればブリーディングが大きい配合($W/(C+L)=2.5$ 以上)でも適用可能と考えられる。

(2)浸透範囲の算定方法

6章で述べた通り，グラウトが決まればパイプ注入実験で限界流速を求め，この限界流速を用いて式(2)からグラウトの浸透範囲を算定できる。図-20に，式(2)に注入圧力 $P=30\text{kgf}/\text{cm}^2(2.9\text{MPa})$ ，パイプ浸透実験で得られた限界流速 $v=0.3\text{cm}/\text{sec}$ とした場合の，割れ目幅と浸透距離の関係を示す。なお，最近jはポアホールテレビやポアホールスキャナーによりボーリング孔内の割れ目性状が比較的容易に観察できるので，これらの結果より岩盤中の割れ目性状を把握できれば，ソイルセメントグラウトの浸透範囲や必要グラウト量を想定でき，グラウティング計画にも利用できると考えられる。

以上よりソイルセメントグラウトを止水グラウトに使用するための手順をまとめると，図-21に示すよう

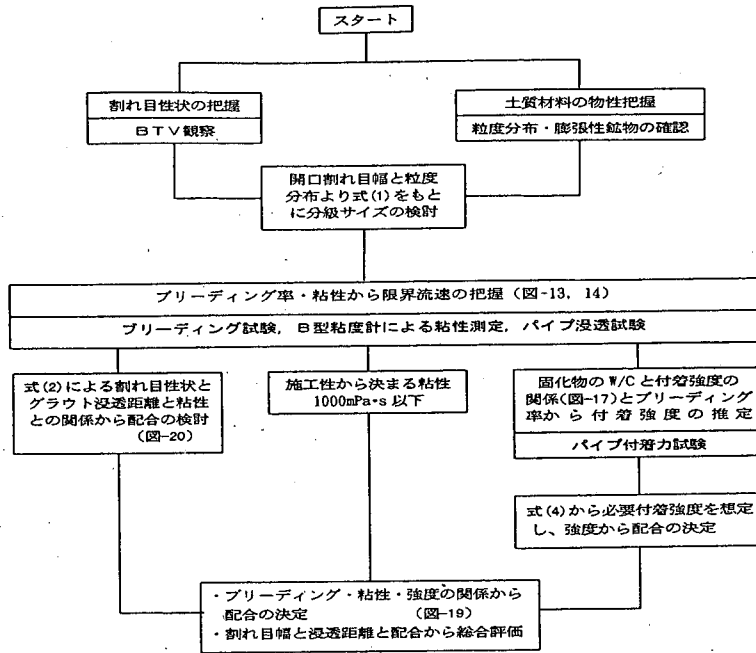


図-21 ソイルセメントグラウトの配合計画フロー

な流れとなる。

8. 結論

本研究では、セメントの一部に現地発生材である土質材料を用いることにより、止水グラウトのコストダウンと品質向上を図ることを目標に、室内実験による検討を行った。その結果、ソイルセメントグラウトを止水グラウトに使用する場合の検討手順を提案した。この手順によりソイルセメントグラウトの配合が決定でき、グラウトの浸透範囲は推定可能でありグラウティング計画に利用可能であると考えられる。

また、次のような結論を得ることができた。

- ①セメントグラウトと比較してソイルセメントグラウトは、分級により微細な割れ目から大量注入になる大きな割れ目まで対応でき、ブリーディング率が小さいため粘性の増加はあるものの、浸透距離はセメントグラウトと同等か、配合により長くなる。
- ②この方法で今回使用した土質材料の場合、ソイルセメントグラウトの配合としては、 $L/(C+L)=50\sim65\%$ 、 $W/(C+L)=2.5$ 程度が適切な配合と考えられる。
- ③グラウトのブリーディング率と粘性は負の相関があり、限界流速とブリーディング率は正の相関があるため、ブリーディング率か粘性を測定すると限界流速が推定できると考えられる。
- ④セメントに粘土を添加すると、強度低下が認められ

るが、ある添加率（本実験の粘土では $L/(C+L)=65\%$ ）以下では強度発現が認められ、安定性試験でも問題なく、長期的に十分な安定性があり、止水グラウトとして問題ない。

今回提案した配合や計画方法の妥当性を検討するために実施した、ソイルセメントグラウトによる現場注入実験や、実施工で用いる場合の材料製造方法や設備等を含め、経済性についても別途報告する予定である。

参考文献

- 1) 発電水力協会編：最新フィルダム工学，pp.409-434，1972.
- 2) 寺戸康隆：ダム基礎グラウティング(1)，ダム日本 No.446，pp.66-72，1981.9.
- 3) 例えば土木学会編：ダム基礎岩盤グラウティングの施工指針，pp.28-29，1972.
- 4) 例えば篠原淑郎，田中伸生：Srinagarind ダムの設計，施工について-Ⅱ，大ダム，No.89，pp.50-70，1979.9.
- 5) 岩田元恒：粘土セメントグラウトとその注入に関する実験的研究，北海道大学博士論文，1974.8.
- 6) 磯山泰三：船門ダム取付部砂礫層基礎の止水壁の施工について，ダム技術講演討論会論文，pp.12-34，1979.9.
- 7) 宮永佳晴：久慈石土備蓄基地における自然浸透グラウト，第11回西日本岩盤力学シンポジウム，pp.67-77，1990.7.
- 8) H・ガンプフォール，斎藤二郎訳：地盤注入，鹿島出版会 pp.286-298，1969.7.
- 9) Kennedy, T.B.: Pressure Grouting Fine Fissures, Proc. A.

- S. C. E., p. 18, 1958, 8
- 10) 文献 8) の pp. 224-225
- 11) J. タロプル, 進藤一夫訳: 岩盤力学, 森北出版, p. 389, 1967.
- 12) 例えば, 地盤工学会編: フィルダムの調査・設計から施工まで, pp. 272-273, 1983. 11.
- 13) 例えば, 米田俊一, 中川浩二: 粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較, 土木学会論文集, No. 462/VI-18, p. 106, 1993. 3.
- 14) 例えば, 谷智之, 内田善久: セメントミルクの濃度と注入特性の関係について, 第 9 回ダム工学研究発表会講演集, pp. 4-6, 1998. 11.
- 15) 例えば, 水戸義忠他, 吉川浩二, 菊池宏吉, 山田文孝: 節理性岩盤におけるグラウトの充填メカニズムに関する室内実験, 岩盤力学シンポジウム, pp. 261-265, 1996. 2.
- 16) 宮田美幸: フィルダム基礎岩盤における止水工の設計と施工に関する研究, 京都大学博士論文, pp. 33-39, 1986. 11.
- 17) 土木学会: コンクリート標準示方書, pp. 383- 384, 1996. 10.
- 18) 柴田功: ダム基礎岩盤カーテングラウチングの注入工法に関する研究, ダム技術センター, pp. 233-246, 1992. 12.
- 19) J I S R -5202 セメント中の Ca 定量法, 土木関係 JIS 要覧第 2 集, pp. 183-188, 1996
- 20) 文献 8) の pp. 119-120.
- 21) 柴崎光弘, 下田一雄: 最新・薬液注入工法の設計と施工, 山海堂, pp. 67-80, 1985. 9.
- (1998. 3. 12 受付)

APPLICABILITY OF GROUTING OF SOIL CEMENT VIEWING FROM PENETRATION AND CONSOLIDATION CHARACTERISTICS

Norio KAINUMA, Noboru YASUDA, Kenichi KANTOH and Shigeyoshi NAGATAKI

It has become important to establish a rational, economical method for the grouting work which is a kind of the water stream-stopping work in a rock mass.

We have made a series of research aiming at the cost reduction of cement by using grout (hereafter "soil cement grout") prepared by adding native soil material (loam or clay containing much fine particles) distributed in the vicinity of a site for the construction of a dam to cement and the quality improvement of grout by using the above-mentioned soil material.