

ソイルセメントグラウトの適用性に関する 実験的研究

貝沼憲男¹・安田 登²・神藤健一³・小熊 登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(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

⁴前田建設工業(株)技術研究所(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

岩盤を対象とした止水工事の一環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、セメントの一部置換によるコスト削減と、土質材料を使用することによるブリーディング防止や浸透性向上等のグラウトの品質向上とを目標に一連の研究を行った。

そのうち本論文は、室内実験から提案したソイルセメントグラウトの配合・計画方法を実際の岩盤を対象に適用し現場注入実験を行い、その有効性を検証したものである。

Key Words: grouting, soil cement, jugeon value, in-situ experiment, btv

1. はじめに

ダム建設地点における止水対策として各種の工法があるが、一般的に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としては主にセメントと水を混合したセメントミルク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的に使用されている。しかし、セメント水比C:W=1:10~1:6程度の比較的薄い配合のセメントグラウトはブリーディングが大きいため材料分離を起こしやすく、割れ目に水みちを残す可能性があることから、数%のベ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る場合がある²⁾。また、船明ダムの砂礫層の注入ではコストダウンを目的として、セメントの一部を地山に分布する粘土等に置換することが行われたが³⁾、これまで岩盤を対象とした加圧グラウチングに現地発生土である土質材料を使用したグラウトが用いられたことはない。したがって、本研究ではセメントに現地発生土である土質材料(細粒分の多いロームや粘土)を添加する(以下ソイルセメントグラウトと呼ぶ)ことによって、セメントグラウトの問題点を改善し、コストダウンを図ることを目的に一連の研究を行った。その結果、室内実験、各種施工実験により次の点を確認し、止水グラウチングに適用できる可能性を提言した⁴⁾。

- ①土質材料を分級し、最大粒径を調整することで割れ幅に適した注入ができる可能性があること。
- ②セメントグラウトよりもブリーディング率が小さく、材料分離する流速が小さいため同様な粘性をもつグ

ラウトの浸透範囲は大きくなり、施工ピッチを広げられる可能性があること。

③ソイルセメントグラウトは、セメントグラウトよりも固化後の強度は小さいが、 $L/(C+L)=65\%$ 以下、 $W/(C+L)=2.5$ 以下であれば、止水を目的としたグラウチングの場合には十分な強度(7日付着強度 $C=52\text{gf}/\text{cm}^2(5.0\text{kPa})$)以上が発現し安定であること。

④土質材料をグラウトに使用する場合、施工規模に応じたグラウト製造方法、粒子サイズに応じた分級方法、さらに、グラウト圧送方法およびグラウトの品質や注入圧力の管理方法が適用できること。

ここでは、これらの知見が、実際の施工に際しても成立するかを評価するために亀裂性岩盤での現場注入実験を実施して検討した。

本実験での具体的な検討項目は次の3項目である。

①広範な粒度分布をもつ土質材料の特徴を生かして、分級程度を変えたソイルセメントグラウトが実際の岩盤に適切に注入が可能であること。

②室内実験で示した粘性、ブリーディング、付着強度の3指標により求められるソイルセメントグラウトの計画方法が適当か検討するとともに、10Lu程度の地山を対象にして、セメントグラウトと同程度以上に止水性を改良できること。

③注入されたソイルセメントグラウトが岩盤中で固化し、十分に安定な状態になること。

なお、本実験で使用したのは、高炉B種セメント(C)、土質材料(L)、水(W)である。土質材料の配合は $L/(C+L)$ 、水比は $W/(C+L)$ と表記する。

表-1 A孔割れ目性状とルジオン値

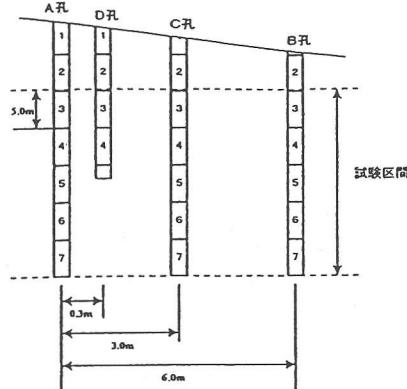


図-1 実験地点断面図

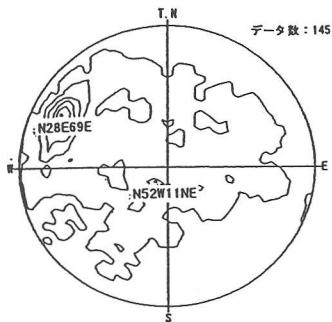


図-2 A孔割れ目のシュミットネット結果

2. 現場注入実験

(1) 実験地点の概要と地質・割れ目状況

図-1に今回の実験地点の断面図を示す。ボーリング孔は合計4本、パイロット孔相当をA孔、2次孔相当（A孔から6m離れ）をB孔、3次孔相当（A孔から3m離れ）をC孔、6次孔相当（A孔から0.35m離れ）をD孔とした。図-1に示すように、今回の試験注入地点は傾斜しており、勾配は1割5分となっている。そこで、各ボーリング孔での深度方向の注入区間（以降この注入区間のことをステージと表記し、各ステージ長は5mとする）の標高は、A孔を基準として設定した。

試験注入地点の地質は、新第三紀の角礫岩で、岩盤の岩級区分は割れ目が発達するものの、 C_f 級がほとんどを占めるような堅硬なものである。また、事前の透水試験・ボアホールテレビ（以下BTVと呼ぶ）の観察から得たA孔の割れ目性状とLu値を表-1に示す。試験地点は斜面であり比較的地表部に近いため、上部ほどLu値が大きく、最大開口割れ目幅や総開口割れ目幅が大きい傾向がある。

ステージ	最大割れ目開口幅 (mm)	総割れ目開口幅 (mm)	ルジオン値 (Lu)
3	19	161	17.6
4	9	45	16.8
5	10	20	17.2
6	0.7	14	12.7
7	7	17	9.4

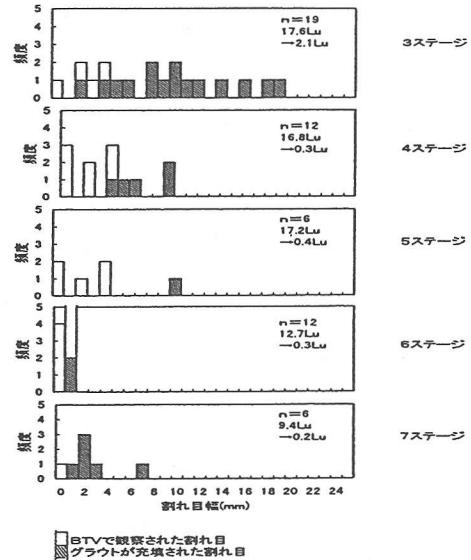


図-3 A孔割れ目分布とLu値および拡孔リボーリング後のLu値

また、主たる割れ目の走向は図-2に示す通り $N28^\circ E$ であり、試験孔の配置に対してほぼ平行であった。図-3には割れ目幅のヒストグラムを示すが、2mm以下のものが多い。最大19mmの非常に大きな割れ目も分布することが特徴的である。ただし、Lu値は割れ目幅より想定されるものより非常に小さく、割れ目の連続性がなく、水みちではない割れ目も多いことが想定される。

なお、図中に示すLuはグラウチング前のものと、グラウチング後に拡孔リボーリングした後のものである。

(2) 使用グラウトの粒子サイズと配合

割れ目に浸透する粒子サイズは、平行平板を用いた室内実験により粘性が高い条件でもグラウトの最大粒径とほぼ同程度の割れ目まで浸透し、粘性が小さい条件では最大粒径の約10分の1程度の割れ目まで浸透可能(2mm分級材料でW/L=10で割れ目幅0.2mmに浸透可能)であることが確認されている⁵⁾。これより使用する材料は割れ目幅に応じて最適と考えられる粒径にする必要がある。

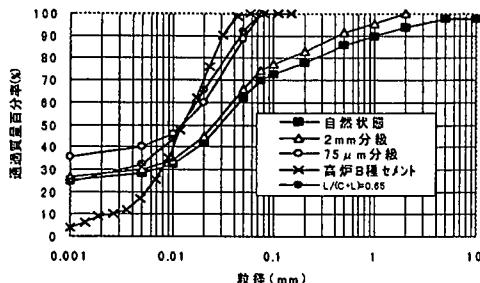


図-4 現地発生土・ソイルセメントグラウトの粒度分布

表-2 ソイルセメントグラウトの基本性状

配合 重畠比	セメント	0.35	0.35	0.35	0.35
ツイル	0.65	0.65	0.65	0.65	
水	2.5	4	6	10	
粘性係数(mPa·s)	1377	193	70	26	
P7D-値(sec)	10.06	8.30	7.95	7.65	
ブリーディング率(%)	0	7.7	21.3	35.1	
密度(g/cm³)	1.23	1.13	1.10	1.06	
固化後の自立性	有	有	有	有	
付着強度 gf/cm²(kPa) 以上	52.0 (5.1) 以上	4.4 (0.4)	2.9 (0.3)	2.5 (0.2)	

*粘性係数、フロー値、密度は混練直後、ブリーディング率は3時間経過後。

固化後の自立性、付着強度は28日経過後の試験値。

あるが、実際の施工では配合切り換えが煩雑になることを避けるために図-3に示す割れ目分布を考慮し、主に2mm以上の大きい割れ目に浸透させるために現地発生土を2mmフルイにより分級したもの（2mm分級材料）、さらに、0.1mm以下の微細割れ目に浸透可能にするために、サイクロンにより最大粒径0.075mmに分級したものの（75μm分級材料）の2種類の材料を使用することとした。図-4に使用した現地発生土とセメントを混合したソイルセメントグラウトの粒度分布を示す。

ソイルセメントグラウトは、セメント(C)と土質材料(L)の比率や水比(W/(C+L))によってその性状が大きく異なる。ここでは、経済性を考慮してできるだけ土質材料が多い配合で、かつ室内実験で確認した、ブリーディングが小さく(5%以下)、浸透性が良く材料分離しにくい粘性(1500mPa·s以下)であり、かつ、自然沈降の状態でも強度が発現する配合であるL/(C+L)=65%を使用した。ここで、止水グラウトには強度はほとんど不要であると考えられるが⁶⁾、グラウトの強度は水比(W/(C+L))によって変化するため、グラウトの押し出しに対する安定性を検討する。パイプ付着力試験で得られた必要付着強度を現地条件により、Mandelの式(1)で検討すると以下のようになる⁷⁾。

$$q = 2Cx / e \quad (1)$$

ここで、e：割れ目幅(BTV結果より2cm)、q：止水カーテンにかかる水圧(10kgf/cm²(1.0MPa)と仮定)、C：割れ目とグラウトの付着強度、x：充填長(500cmと仮定)

表-3 各ステージの注入規定圧力

ステージ	A孔 kgf/cm²(MPa)	B孔 kgf/cm²(MPa)
3	10(1.0)	10(1.0)
4	10(1.0)	15(1.5)
5	15(1.5)	20(2.0)
6	20(2.0)	10(1.0)
7	20(2.0)	15(1.5)

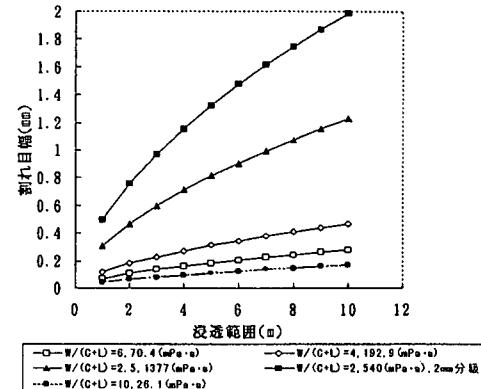


図-5 浸透範囲と割れ目幅と粘性の関係

式(1)よりグラウトの必要付着強度を求める

$$\begin{aligned} C &= (q \times e) / 2X = (10000 \times 2) / (2 \times 500) \\ &= 20.0 \text{ gf/cm}^2 (2.0 \text{ kPa}) \end{aligned}$$

となり、W/(C+L)=2.5でのパイプ付着力での試験値が52.0gf/cm²(5.1kPa)であることより、十分な強度であると考えられたため、配合はL/(C+L)=65%、W/(C+L)=2.5とした。ただし、この配合は割れ目幅を2cmというきわめて大きなものを仮定しており、実際のLu値より想定される割れ目幅は小さいと考えられ、十分な安全率をもつ強度であると考えられる。

(3) 注入仕様

a) 注入規定圧力、規定流量

注入規定圧力は、注入前に実施する透水試験で流量の急増が発生する限界圧力が確認された場合は、その限界圧力以下を規定圧力とし、限界圧力が確認できない場合には、セメントグラウトと同様に土被りを考慮した規定圧力を設定した。表-3に規定圧力を示す。なお、規定流量はポンプ能力により20ℓ/分/ステージとした。

b) 配合切り換え基準

配合切り換えは、BTV観察により求めたA孔の割れ目性状を参考に、パイプ注入実験⁸⁾より求めたグラウトが材料分離する速度(限界流速と呼び、75μm分級材料の場合、L/(C+L)=65%、W/(C+L)=6で限界流速:v_c=0.3cm/sec、同様に2mm分級材料の場合v_c=2.0cm/sec)を使って、式(2)に示す軸対称平行平板モデル⁹⁾で、浸透範囲をr=3mと

$$V_2 = \alpha \cdot V_1 \quad (4)$$

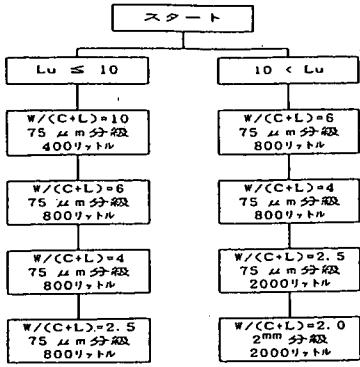


図-6 配合切り替えフロー

するための配合(粘性係数 μ)を求めた。

$$\mu = \frac{pt^2 \times 10^{-9}}{12\pi v_c} \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 v_c は限界流速(cm/s), p は注入圧力(MPa), t は割れ目幅(cm), μ は粘性係数(mPa·s), r は浸透半径(cm), r_0 はボーリング孔半径(cm)である。

式(2)を用いて注入圧力 $P=20\text{kgf/cm}^2$ (2.0MPa)とした場合の粘性(配合)をパラメーターとして、割れ目幅と浸透範囲の関係を整理したものを図-5に示す。これより、75 μm 分級で $W/(C+L)=2.5$ の場合、0.6mm 以上の割れ目幅では 3m 以上浸透可能となる。ここで、図-3 の割れ目幅の状況より、総割れ目数の 90% 以上が 3m 以上グラウトが浸透する。また、今回比較的多い 1mm 以上の割れ目幅の場合、8m 以上の浸透となるので、前述したように室内実験で確認された 1mm の割れ目幅でも注入可能である 2mm 分級に切り換えることとした。なお、割れ目幅 0.6mm 未満のものも分布することも考慮し、 $W/(C+L)=2.5$ より薄い配合についても一般的なセメントグラウチングの仕様に準拠して使用することとした。

次に、浸透範囲を 3m にするグラウト注入量を、ステージ内の総開口割れ目が同心円の平行平板状にあると仮定して算出した。ここで、注入されたグラウトが割れ目に浸透する範囲は、そのまま固化した場合(R_1)と注入されたグラウトが脱水固化した場合(R_2)で式(3)のように表わされる。

$$R_i = \sqrt{\frac{V_i}{\pi \Sigma t}} \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

ここで、 $R_1 : V_1$ より求まる浸透半径、 $R_2 : V_2$ より求まる浸透半径、 V_1 : グラウト注入量、 V_2 : 脱水固化後する場合のグラウト注入量、 Σt : ステージ内の総割れ目幅(cm)

なお、脱水固化する場合のグラウト注入量は、式(5)に示す脱水現象を考慮して補正する係数 α を用いて、式(4)で表せる。

$$\alpha = \left(\frac{C}{C+L} \frac{1}{\gamma_c} + \frac{L}{C+L} \frac{1}{\gamma_L} + \frac{W}{C+L} \frac{1}{\gamma_w} \right) \frac{\gamma_R - \gamma_w}{1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_x}} \quad (5)$$

ここで、 $C/(C+L)$, $L/(C+L)$, $W/(C+L)$ はそれぞれセメント、ソイル、水の重量比。 γ_c , γ_L , γ_w はそれぞれセメント、ソイル、水の単位体積重量(g/cm³)。 γ_x はグラウト中の固体部分の単位体積重量(g/cm³)。 γ_g は脱水固化後のグラウトの単位体積重量(g/cm³)であり、本研究では室内配合実験($L/(C+L)=0.65$, $W/(C+L)=2.5$)よりグラウトが自然状態で固化した値である $\gamma_g = 1.23(\text{g}/\text{cm}^3)$ を採用する。

ここで、式(3)～(5)により、 $r=3\text{m}$ を改良するために必要なグラウト量を算出する。ただし、ここでは注入されたグラウトは脱水固化を受けたと仮定した。10Lu 以上のステージでは、総開口割れ目幅は A 孔の 3～6 ステージの平均 4.0cm と仮定すると、 $V=1700\ell$ ($\gamma_c=3.1$, $\gamma_L=2.7$, $\gamma_w=1.0$, $\gamma_x=2.8$, $W/(C+L)=2.5$ の場合) となった。これより、バッチ切り換えを行う作業性と余裕を考慮し $W/(C+L)=2.5$ を 2000ℓ とした。また、10Lu 以下の場合には、BTB 結果より割れ目幅 1.7cm (7 ステージ) としてグラウト注入量は $V=500\ell$ と少量になるため $W/(C+L)=2.5$ を 800ℓ とした。さらに、75 μm の $W/(C+L)=2.5$ を規定量 (10Lu 以上で 2000ℓ) 注入して $r=3\text{m}$ 以上になる場合は、大きな割れ目の目詰め効果を狙った 2mm 分級グラウトに切り換えて注入を行い、浸透範囲を限定する方針とした。図-6 に配合切り替えフローを示す。なお、その他のため押し基準 (1ℓ/分/ステージ, 30 分) 等はセメントグラウトと同様とした。

(4) 実験方法

実験フローを図-7 に示す。削孔は A 孔 → B 孔 → C 孔 → D 孔の順で実施した。各孔とも、ボーリング削孔、透水試験 BTB による孔壁観察を実施し、A 孔と B 孔のみソイルセメントグラウトによる注入を実施した。なお、A 孔は複数孔であるためバックステージで注入を実施し、B 孔は割れ目のグラウト充填状況をみるために、7 ステージまで削孔後に A 孔の注入効果の確認をするために全深度で BTB 観察し、バックステージで透水試験、注入を実施した。その後、A 孔を扩孔リボーリングし、BTB 観察、透水試験、孔埋めを順次行った。次に C 孔では、透水試験、BTB 観察を行い、D 孔では BTB 観察のみ行った。なお、グラウトにはステージ別に着色剤を添加して注入状況が容易に確認できるようにした。また、B, C, D 孔では注入状況をボーリングコアで観察するとともに、注入されたグラウトの強度(針貫入試験¹⁰⁾や性状把握(電子顕微鏡観察、化学会分析¹¹⁾)等を行った。

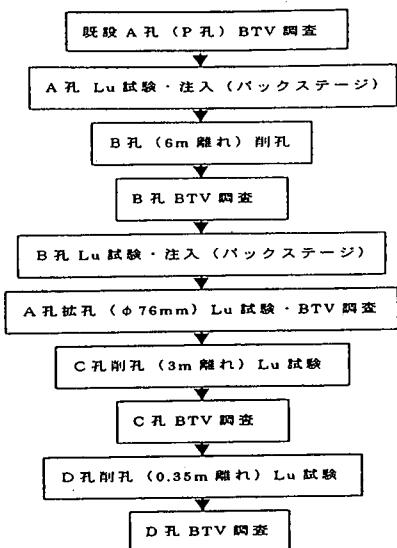


図-7 実験フロー

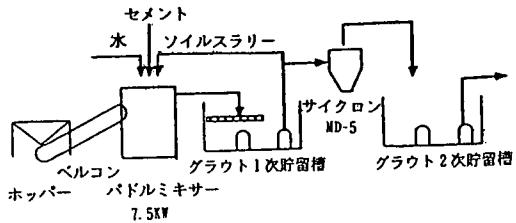


図-8 ソイルセメントグラウト製造方法

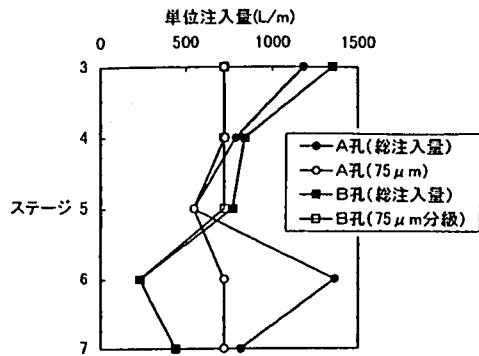


図-9 注入実績

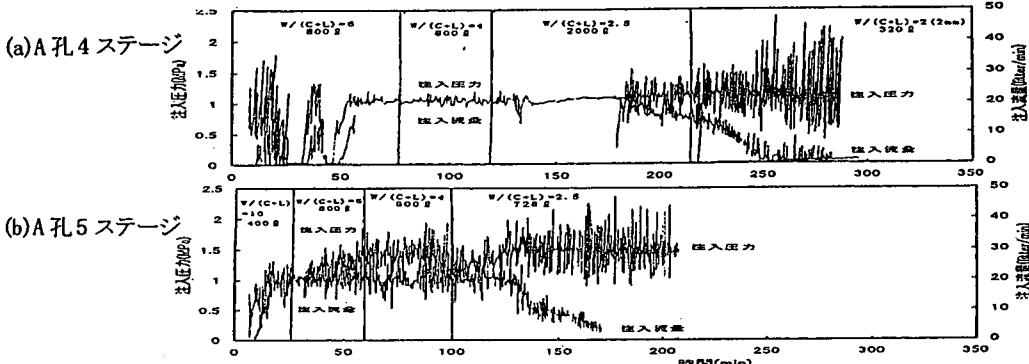


図-10 注入圧力・流量曲線の例

(5) ソイルセメントグラウトの製造方法

土質材料の分級方法やソイルセメントの混練方法は各種実験を行って検討しているが、今回は現場内の限られた敷地を利用しなければならず設備も既往のものを極力使うことにしたため図-8に示す製造方法によった。まず、現地発生土と水をパドルミキサーで混合攪拌し、 $W/L=2.5$ 程度のソイルスラリーを作り、金網フレイ（2mm）を通過させ（2mm分級）、目標配合に応じたセメントを添加し、さらに分級する場合には水力分級機サイクロン（75μm分級）を通して、ソイルセメントグラウトとした。

(6) ソイルセメントグラウトの施工管理方法

セメントグラウトと比較して粘性が高いソイルセメントグラウトを用いる場合には、注入ロッド中での圧力損失が懸念されるため、今回使用した AW ロッド（内径 36.51mm）でソイルセメントグラウトを流下させた実験により求めた圧力損失を考慮した有効注入圧力による管理を行った。また、現地発生土の粒度分布のバラツキやグラウト製造過程の影響によるグラウトの品質管理を行うためにフロー値と比重による管理を行い、注入するグラウトの最終的な配合の確認を行った。

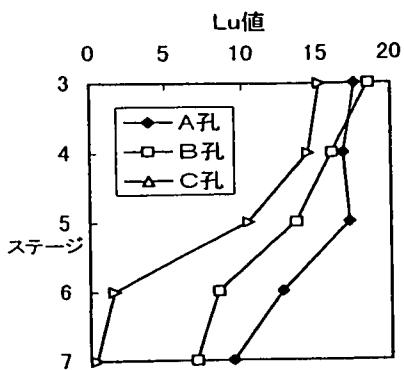


図-11 透水試験結果

3. 現場注入実験結果

(1) 注入結果

図-9に、今回のグラウト注入実験におけるA孔およびB孔の注入実績（単位注入量）をまとめた図を示す。

図より、3～5ステージにおいては、AおよびB孔で大差はないが、6および7ステージにおいてはA孔の注入実績がB孔の注入実績を大きく上回っている。

図-10に、A孔のソイルセメントグラウトの注入圧力・流量($P, Q-t$)曲線を示す。図より、配合の切り換えでは、平均的な圧力の上昇は目安である $1\text{kg/cm}^2(0.1\text{MPa})$ /2分以下¹²⁾と比較的緩やかで流量も大きな変動なく注入できている。これよりソイルセメントグラウトは問題なく注入できることが判り、今回の配合切り換え基準が妥当なものであったことが伺われる。また、図-10(a)の例に示す通り2mm分級のソイルセメントグラウトに移行しているステージでは、粒径切り換え時でも圧力・流量とも変化なく注入が行われており、時間経過とともにダメ押し状態まで通常の注入が行われた。このように、10Lu程度の地山に対して2mm分級したグラウトも使用可能であることがわかった。

(2) グラウチング後の透水試験結果

透水試験結果を図-10に示す。ここでA、B孔の結果は各孔グラウチング前の試験値、C孔はA、B孔グラウチング後の試験値である。3～4ステージでは、次数による明瞭な低減傾向は認められない。しかし、5～7ステージではA孔の注入量が大きくかつ5～7ステージの最大割れ目幅と総割れ目幅が表-1に示すように上部ステージより小さい。これよりグラウトの浸透範囲は割れ目が小さいのに注入量が多いため、他と比較してより広くなっているため、3次孔相当のC孔の6、7ステージでは低減傾向が大きく、目標である2Lu以下に改良されていることが想定される。

(3) グラウトの浸透状況

図-12にBTVおよびボーリングコア観察によるグラウトの浸透状況を示す。これより3m離れたC孔はもとより、6m離れたB孔7ステージでも割れ目に着色材のついたグラウトが観察でき、グラウトが6m以上浸透することが確認されている。また、A孔4ステージで注入されたグラウト（黄色）は、A孔より35cm離れたD孔では同じ4ステージで確認され、水平方向にグラウトが浸透している状況となっているが、6m離れたB孔では同色のものが7ステージで確認され、割れ目の連続性によると思われる浸透状況となっている。写真-1にボーリングコアで観察できたグラウトの割れ目充填状況を示す。写真-2にはBTV観察結果の一例を示す。ここで、BTVでは孔壁近傍の状況しか観察不可能であり、割れ目の凹凸や削孔水による洗い出しのためグラウトの充填状況が十分確認できないため、ボーリングコアの詳細な観察を行った。その結果、ボーリングコアの割れ目のうち、BTVで確認されていない3～5割の割れ目に少量の付着物が観察できた。この付着物がもともとの狭在物かソイルセメントグラウトかを区別することがコア観察では難しいため、これらのうち20試料を化学分析した結果を表-4に示す。

ここで、化学分析ではセメントを主に構成するカルシウムの含有量を分析しており、今回使用した高炉B種セメント単体のカルシウム含有量を100%とした場合より試料中のセメントの含有率を算出している。割れ目に狭在する流入粘土には数%程度しかカルシウム分は含有していないことから、 $C/(C+L)=10\%$ 以上含有する場合にはソイルセメントグラウトが浸透したと判断した。この場合、採取した試料の約7割にソイルセメントグラウトが浸透していることになり、ソイルセメントグラウトがBTVで観察されない割れ目にも高い確率でグラウトが浸透している可能性があると想定される。

(4) グラウトの固化後の性状

今回の実験では、割れ目に充填されたグラウトを力学的試験に供する程度に多量に採取することが困難であったが、D孔（深度10.4m）で採取できたので、その試験結果を表-5に示す。充填物の化学分析結果では $C/(C+L)$ は約0.37であり、初期配合の $C/(C+L)=0.35$ と同様なもので、含水比は30.3%と初期配合250%と比較して小さく、割れ目中でグラウトが加圧脱水を受けていることが想定される。また、針貫入試験の結果は、 $3.5\text{kgf/cm}^2(0.3\text{MPa})$ 以上であり、配合試験で $L/(L+C)=65\%$ 、 $W/(C+L)=2.5$ の28日強度は供試体が自立する程度のものであったが、これと比べて著しく強度発現が認められ、地盤中で十分強度増加が起こる可能性があることが確認できた。

また、写真-2に示したBTV観察のように、今回注入され

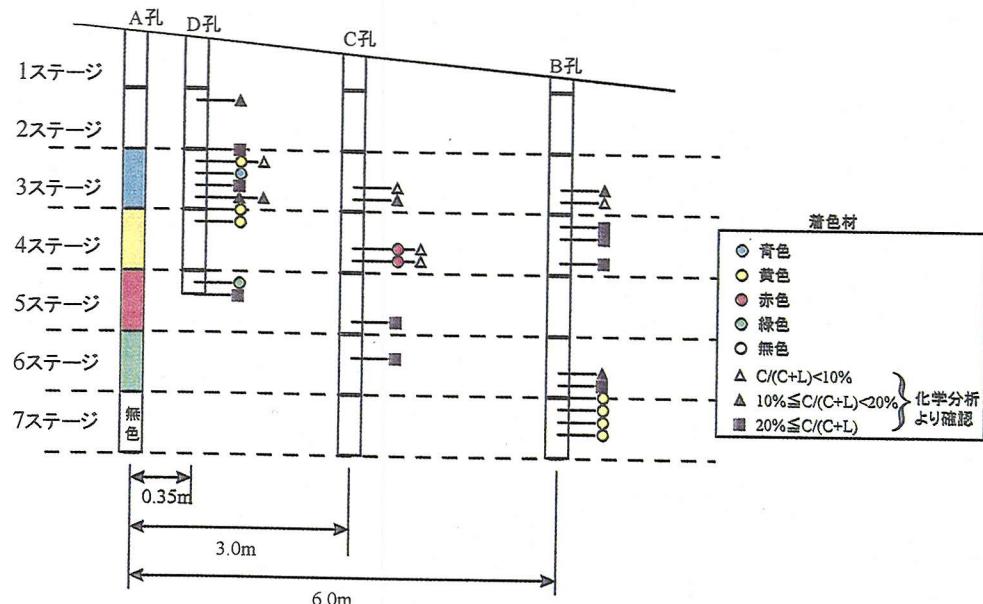


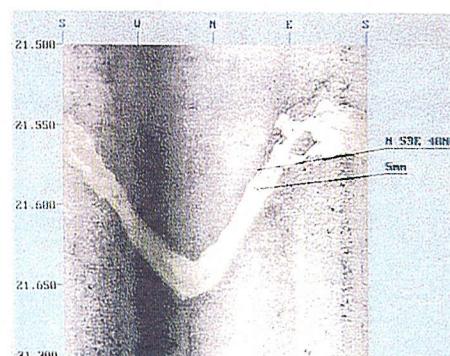
図-12 グラウトの浸透状況



写真-1 ボーリングコアで確認された黄色に着色されたグラウト (D孔深度 14.9m 付近)
(赤色は確認のために実施したフェノール反応による発色)



(a) 深度 14.9 m付近



(b) 深度 21.6 m付近

写真-2 BTVで確認されたグラウト (D孔)
(密実に割れ目を充填している)

表-4 割れ目充填物の化学分析結果

番号	深度(m)	C/(L+C)	番号	深度(m)	C/(L+C)
B孔1	9.70	0.12	C孔4	19.0	0.09
2	11.21	0.03	5	24.8	0.56
3	13.50	0.21	6	28.4	0.33
4	13.98	0.34	D孔1	5.7	0.11
5	15.52	0.36	2	10.4	0.37
6	25.49	0.10	3	10.9	0.02
7	28.00	0.40	4	12.5	0.68
C孔1	11.3	0.07	5	14.1	0.11
2	12.6	0.13	6	14.9	0.10
3	17.4	0.05	7	20.7	0.34

表-5 D孔(10.4m)充填物の物性値

採取位置	D孔(深度10.4m)
C/(C+L)	0.37
含水比	30.3(%)
qc値	3.5kgf/cm ² (0.3MPa)以上

たグラウトが岩盤内において確認された箇所においては、割れ目に密実に注入されており、ブリーディングによる水みちか残らない可能性があることが確認できた。

次に、注入後に実施した透水試験の圧力・流量($P, Q-t$)曲線を図-13に示す。この試験では、止水カーテンの上下流の水位差70m(一般的には数m程度である)に相当する圧力 $P=7\text{kgf/cm}^2(0.7\text{MPa})$ までの長時間(1時間以上)の透水量変化をみたが、流量が経時に増加する現象はなかった。これより、割れ目中のソイルセメントグラウトは、透水試験の水圧では流出せず安定であることが確認できた。

4. 現場実験からみたソイルセメントグラウトの浸透・固化特性について

(1) グラウト注入量からみた浸透範囲

A孔でのグラウト注入量からグラウトの浸透範囲を式(3)～(5)より算出した結果を図-14に示す。これはグラウトの総注入量より求めた浸透範囲と地盤中での脱水固化を考慮した浸透範囲(総注入量と75μmまでの流量より求めた2つの範囲)である。総注入量から算出される浸透範囲は何れのステージも3m以上となった。脱水固化を考慮した浸透範囲(75μm分級グラウト)は2～6m程度となっており、3ステージでは総割れ目幅が平均の3倍以上あったので浸透範囲が小さく、6, 7ステージでは総割れ目幅が平均の1/3程度であったので浸透範囲が大きくなる。また、総注入量(2mm分級グラウトまで)は、図-9に示す通り最大600ℓ/m以上注入されているが、図-14に示すように、式(3)～(5)より算出した脱水固化を考慮して同心円の平行平板状にグラウトが浸透すると考えた浸透範囲は、ほぼ改良目標値である3mを確保していることになっている。ただし、注入量が多い6ステージの浸透範囲は9m以上となった。この結果は全ての割れ目に平均的にグラウトが注入された条件であるが、図-5に示すと

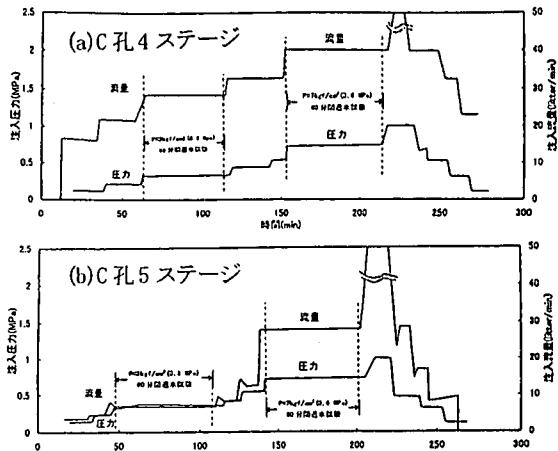


図-13 透水試験の注入圧力・流量曲線

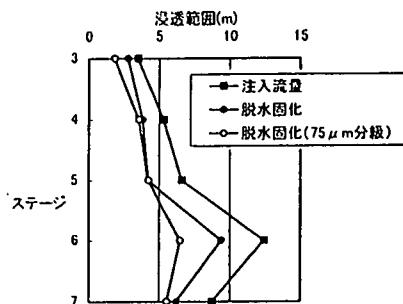


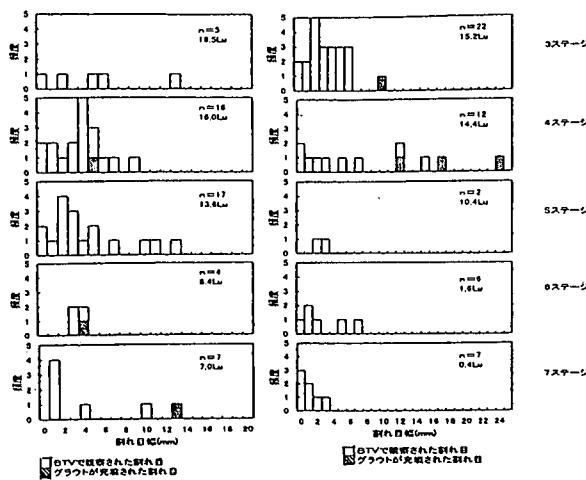
図-14 注入実績より算出した浸透範囲

おり同じ配合のグラウトでも割れ目幅に応じた浸透範囲となる。一方、実際のグラウトの浸透現象としては3.(3)に述べたように非常に複雑であるが、B孔(6m離れ)の7ステージにグラウトが確認されていることや、C孔(3m離れ)のグラウト充填状況やルジオニン値の改良状況より、当初計画の改良範囲は3mを確保できた結果となった。

(2) グラウトの分級の違いによる浸透性

次に分級の違いによる浸透性について検討する。3.(1)で述べた通り、本実験地点の割れ目性状では2mm分級に切り換えて急速閉塞等の状況は注入チャートには認められず、適切な注入が行われることが確認できた。また、A孔6ステージでは、注入前のBTUで観察された最大割れ目幅が0.7mmでも2mm分級のグラウトが注入できた。

一方、室内実験で実施した平行平板実験では小さい割れ目に対して、分級を割れ目幅より大きくしたグラウトを用いても注入可能であった。これは注入に用いている2mm分級のうち粒径の大きいものはグラウト孔の孔底に沈降し、実際に割れ目に注入されるのは割れ目幅未満のものであるからであった¹³⁾。これより今回の現場注入実験でも室内実験と同様な現象が起こっていると想定される。



(a) B孔

(b) C孔

図-15 BTV 観察によるグラウト充填状況

(3) グラウトの充填状況と透水性の改良について

BTV 観察結果等より判明した各ボーリング孔に存在する割れ目と、その割れ目のグラウト充填状況を図-3, 15 に示す。図より注入拡孔後の A 孔においては、6mm 以上の割れ目にはすべてグラウトが充填されているが、4mm 以下については部分的にしか注入されていない。特に 4, 5, 6 ステージに充填されていない割れ目が多い。一方、グラウト注入量は、図-9 に示すように 3, 6 ステージが大きい。また、注入後拡孔して測定した Lu 値は、図-3 に示すように 3 ステージの 2.1Lu 以外は、すべて 0.4Lu 以下となっている。ここで 3 ステージは注入量が多く、割れ目に比較的グラウトが充填されているのに Lu 値の改良効果が悪いのは、上位の 2 ステージが注入されていないためと考えられる。他のステージは、4mm 以下の充填されていない割れ目が多いが、Lu 値は 0.4 以下に改良されていることから、これらの未充填割れ目は、透水性にはあまり関係しない連続性がない割れ目と考えられる。

次に、6m 離れた B 孔では、A 孔のグラウトが 4mm 以上の割れ目的一部分に充填されており、図-11 に示すように Lu 値はやや小さくなっている傾向にある。A, B 孔のグラウトによって C 孔では、図-11 に示すように 6, 7 ステージでの Lu 値は改良目標値以下になっているが、BTV では割れ目にグラウトの充填は認められなかった。ただし、ボーリングコア観察結果では、3, 4, 6 ステージの割れ目にグラウトが付着している状態が観察されている。

以上のように、割れ目幅とグラウトの充填状態と透水性の改良との関係は非常に複雑で、単純には言えないが、今回対象とした岩盤では次のような傾向が推定できる。すなわち、グラウトは比較的大きな連続性のある割れ目

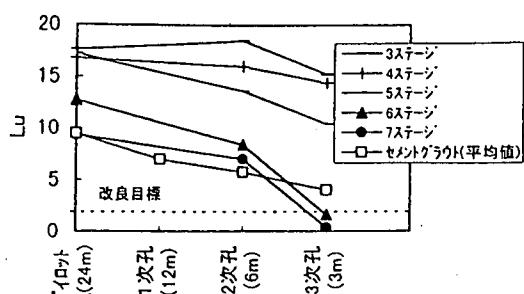


図-16 セメントグラウトとの止水効果の違い

(4mm 以上)に注入され、比較的遠方(6m 以上)まで浸透し、さらに、A, B 孔の両孔から連続性のある大きな割れ目に全体的に注入されれば、多少の未充填割れ目があっても、透水性は改良されているものと考える。

ここで、セメントグラウトとソイルセメントグラウトの止水効果について比較する。本実験地点付近で、土被りが小さく割れ目幅が大きい同様な地盤で行ったセメントグラウトによる止水効果を図-16 に示す。セメントグラウトは 55 ステージ分の実測値があり、図中の Lu 値は算術平均を示す。セメントグラウトでは次数による低減傾向が認められるが、高次孔まで注入が必要となる結果になっている。これに対して、本実験のソイルセメントグラウトでは 3 次孔相当の 6, 7 ステージでは目標である 2Lu 以下に改良されており、限られたデータであるがソイルセメントグラウトがセメントグラウトと同程度かそれ以上浸透し改良する効果があると想定される結果となった。

(4) グラウトの固化特性

図-17 には、今回採取した試料の含水比と強度の関係を示している。割れ目中の試料の含水比は何れも 40~60% の範囲内であり、割れ目中で加圧脱水を受けていることが想定されるものであった。

ここで、割れ目に注入されたグラウトが固化する現象としては自然沈降と加圧脱水が考えられるが、本実験の前に実施した室内での API 脱水試験¹⁴⁾では、セメント含有率が低く強度発現が小さいものでも、加圧脱水による強度増加が図られることが確認されていた。初期配合 L/(L+C)=65%, W/(C+L)=2.5~6.0 で、現場実験でのダメ押し基準である規定圧力(10kgf/cm²(0.9MPa)以上)で 30 分間以上圧力を保持するという条件より低い圧力である 3.0, 2.0, 1.5kgf/cm²(0.29, 0.20, 0.15MPa)で 15, 30, 60 分間で加圧脱水し、7 日間湿潤養生後に針貫入試験で強度を求めた試験結果も図-17 中に示す。

この結果より、グラウトの強度は初期含水比にかかわ

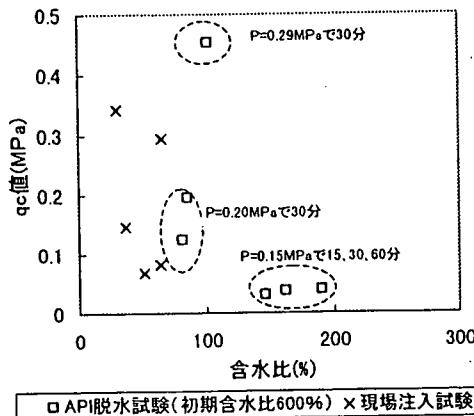


図-17 含水比と強度の関係

らず脱水圧力に関係しており、現場で採取した試料は、室内実験において 2kgf/cm^2 (0.2MPa)で30分の加圧条件とほぼ同等の強度があり、上記の事前想定がほぼ正しい可能性があることがわかった。

今回の現場注入実験で採用した配合は、安全側の設計となるグラウト自然沈降した条件での強度により決定したものであったが、3.(4)で述べたようにグラウトは岩盤中で脱水固化し十分な強度があり、注入後の長時間の透水試験でも流出する現象が認められなかったことより、止水グラウトとしては必要条件を十分満足するものと考えることができると思われる。

なお、室内パイプ実験で、口元付近の試料は初期配合と比較してセメント含有率が大きく、浸透距離とともにセメント含有率が小さくなる傾向が見られたが、3.(3)のボーリングコアーから採取した試料のセメント含有率 $C/(C+L)$ は表-4に示すとおり、注入孔近傍のD孔では最高68%を示す等濃いグラウトが確認でき、同C孔においても56%を示す等、注入孔近傍ではグラウトが濃縮する傾向が一部認められたが全体的にバラツキが多く、室内実験結果を裏付けるデータには至らなかった。

以上より、今回計画で採用した配合は浸透性や固化特性を考慮して決定した $75\ \mu\text{m}$ 分級 $L/(L+C)=65\%$ 、 $W/(C+L)=2.5$ を主に用いたが、この配合で止水グラウトとしては十分安定であると考えられる。さらにセメントグラウトに準じて採用した、 $W/(C+L)=4\sim 10$ の配合でグラウチングが終了しても、今回のダメ押し基準で加圧脱水すれば十分安定である可能性があると考えられる。

5. 結論

本研究の室内実験および各種施工実験の結果から得られた知見、とくに粘性ブリーディング、付着強度の3指標によって提案したソイルセメントグラウトの配合や計画方法にしたがって注入実験を行い、実岩盤にソイルセメントグラウトが有効である可能性があることがわかった。以下に検討結果を列挙する。

①ソイルセメントグラウトは対象岩盤の割れ目に応じた粒子サイズに調整し、実岩盤に注入できることが確認でき、さらにこの配合切換によって浸透距離をある程度限定した注入ができる可能性のあることを示した。

②土被りが小さい表層部を除いて、ソイルセメントグラウトはセメントグラウトと同程度もしくはそれ以上浸透し、低次数で目標 Lu 値まで改良できる可能性があることがわかった。

③注入されたソイルセメントグラウトは、透水試験による流出は無く、固化後の性状は割れ目に対して密実に充填されており、十分強度を持つことがわかった。また、加圧脱水の効果も期待できる可能性がある。

以上より、ソイルセメントグラウトは止水グラウトへ十分適用できる可能性があることがわかった。現地発生土は分級等の製造コストがかかるため、セメントグラウトを用いて大量注入が頻発する地山や分布する土質材料の粒径が適当であり、その品質が均質であることや、それらが処分すべき発生土である場合等の条件下では十分なコスト削減が期待できる。

今後は地盤条件が異なる地点で注入実験を行い、セメントグラウトと比較して粒度調整ができ、限界流速が小さく、強度発現が遅いこと等の特性を生かした注入方法(粒子サイズと粘性を自由に切換え、さらに入射返し注入ができるることにより、割れ目幅やその組合せに適した配合切換方法等)についても検討し、止水グラウトの合理的な施工法に結びつけていきたい。

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)例えば土木学会編：ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針, pp. 28-29, 1972.
- 3)磯山泰三：船明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.
- 4)貝沼憲男、安田登、神藤健一、長瀬重義：ソイルセメントグラウトの浸透・固化特性からみた止水グラウトへの適用性について、土木学会論文集 No. 631 III-48, pp. 49-60, 1999. 9.
- 5)文献4)
- 6)J. タロブル, 進藤一夫訳：岩盤力学, 森北出版, p. 389, 1967.
- 7)H. ガンブフォール, 斎藤二郎訳：地盤注入, 鹿島出版会 pp. 286-298, 1969. 7.
- 8)文献4)
- 9)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.
- 10)土木学会：岩石試験方法, pp. 383-384, 1996. 10.
- 11)JIS 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.
- 12)最新地盤注入工法技術給覽編集委員会編：最新地盤注入工法技術給覽 p. 498, 1997.
- 13)文献4)
- 14)沖野文吉：ボーリング用泥水，技報堂出版, pp. 103-104, 1981. 5.

(1999. 6. 2 受付)

AN IN-SITU EXPERIMENTAL STUDY FOR APPLICATION OF SOIL-CEMENT GROUTING IN ROCK MASS

Norio KAINUMA , Noboru YASUDA, Kenichi KANTOH and Noboru OGUMA

It has been needed that establishment of rational and economical grouting method which is one of the water tight construction method in rock mass. Authors study for soil cement grouting in order to cut down the grouting cost and improve the quality of grouting materials.

In this paper, Authors carried out the in-situ experiment using soil cement grout and verify the availability of soil cement grouting.