

# 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

米田俊一\*・中川浩二\*\*

主としてセメントの粒子径を変えた各種グラウトの基本特性および室内モデル浸透性試験の結果、次の点が明らかにされた。①間隙比の小さい砂層や狭小割れ目の岩盤への浸透性はセメントの粒子径に著しく影響され、超微粒子セメントの浸透性が優れていた。②低水セメント比や粗粒のセメントの場合には、分散剤の効果が大きい。また、実岩盤における高炉B種と超微粒子セメントの比較においても後者のグラウト効果が顕著であり、これもセメントの粒径の違いによるものと考えられる。

**Keywords** : grout, fine cement, permeation, groutability

## 1. ま え が き

近年、セメント仕上げミルや分級機およびこれらの制御技術が進歩して、平均粒子サイズが従来のセメントの5分の1から10の1のセメント（以下、超微粒子セメントと称す）を工業的規模で製造できるようになった。

超微粒子セメントの利用は、補修材としての展開も試みられているが、現在の大きな適用分野はダムあるいはトンネルといった山岳土木分野にある。周知のようにダム立地の基礎地盤が多様化、複雑化していることを受けて、グラウチングの対象基盤は硬岩のみならず、軟岩あるいは砂礫、砂等の土質基礎にも及び、グラウチング技術も多様化、精密化している<sup>1)</sup>。例えば、1988年、1989年、1990年の最近の3年間のダム工事記録、すなわち、専門誌「大ダム」、「ダム技術」、「ダム日本」、「電力土木」に記載された超微粒子セメント系グラウト関連のダム工事記録<sup>2)-5)</sup>は報告されたダム総数28件中の4件についてみられ、報告例が多くなっている（表-1）。

ダム基礎のグラウチングは定性的にも定量的にも確かな把握が困難な多種多様の自然体である地盤が対象である。特に、未固結～低固結地盤、強風化岩盤、亀裂性岩盤等の取扱いは困難であるが、これについては水資源開発公団が、多くの現場データを整理し、「グラウト工の調査設計法に関する研究」<sup>6)</sup>を通じて、グラウチングの指針を提示している。しかしながら、材料設計法、注入工法の設計法は必ずしも論理的でなく、今後も実験事例あるいは実施工事例の一層の蓄積とその有効な解析が要求される。

岩盤浸透流については従来から論理的、解析的研究が多数実施されている。例えば、佐藤らは<sup>7)</sup>岩盤内浸透流

に含まれる濁質による浸透流の時間依存や目詰り機構をろ過現象の数字モデルで検討している。また、小島らは<sup>8)</sup>微粒子懸濁液による割れ目の目詰り問題をとりあげ、物質収支則および割れ目幅変化部でのふるい効果などを考慮し、花崗岩コアに含まれる割れ目に対する粘土懸濁液グラウトの実験結果のシミュレーションを試みている。これらの研究はセメントグラウトそのものを取り扱ったものではないが、グラウトの浸透や目詰りのメカニズムを考える上で参考になる。しかしながらセメント系グラウトの注入挙動は、グラウト中のセメント粒子の分散性、分離特性、粘性およびこれらの経時変化などグラウト自体の性質が十分把握されていないことと、岩盤割れ目あるいは砂礫中の流路においてセメント粒子が捕集され、閉塞したり、流路幅急変部などで目詰りを生じるなど、非常に複雑である。そこで今まで注入現象については、実験的にも、理論的にも、系統的研究がなされていないのが現状である。

砂質層の注入については、セメントの粗粒子径と砂の微粒子径との比がある数値以上であれば浸透可能であるといった浸透限界の指標のグラウタビリティなどが従来から知られているが<sup>9)</sup>、この指標の種々の条件下での適用性についてはさらに研究が必要である。岩盤注入については、実際のダムの基礎岩盤の岩級、割れ目の走向・傾斜、割れ目の長さなどの岩盤性状とセメント系グラウトの充てん状況との関連性についての神尾らの検討事例があるものの<sup>9)</sup>、このような岩盤割れ目に対するグラウトの注入挙動の調査・研究例は非常に少ない。

本研究は、グラウト注入機構の解明、注入理論の確立の手懸かりのためにセメント系グラウト自体の基礎的性質を明らかにするとともに、室内モデル実験により、砂中、岩盤割れ目中への浸透性を検討し、さらには実際のダム基礎に適用した結果を検討したものである。

\* 工修 宇部興産（株）セメント技術センター  
（〒755 宇部市大字沖の山1-6）

\*\* 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

表-1 超微粒子セメントグラウトが最近検討されたダム

名称 (水系)	ダム形式	注入対象岩盤	グラウトの種類	注入工法
道平川 (利根川水系道平川)	重力式 (RCD)	火山礫凝灰岩と閃緑岩の板状節理発達部	コンクリーション	ステージ
只見 (阿賀野水系只見川)	中央遮水式 D771#	部分的に微細砂質砂層を介する河床砂礫堆積層	ブランク	2重管ダブルブッカー
エルム (石狩川水系赤間沢川)	中央遮水式 D771#	傾斜状火山砕屑岩類 (軟質岩)	ブランク カーテン	ステージ 2重管ダブルブッカー
海原 (木屋川)	重力式	断層により古生層と中生層とに区分される。古生層は硬質化した砂層、角礫岩、片状構造の発達した各種岩石や緑色岩類からなり、圧砕により複雑化	カーテン	2重管ダブルブッカー  ステージ

表-2 使用セメントの性質

記号	比重	ブレン・比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	粒径 (μm)	
			平均径 G50	粗粒径 G85
U1	2.94	10300	3.5	7.8
U2	2.92	9370	3.8	10.0
U3	2.92	6200	5.5	11.5
H	3.14	4480	10.5	23.7
BB	3.02	3840	13.9	33.0
N	3.13	3380	15.3	35.0

## 2. セメントおよびセメントグラウトの特性

### (1) セメントの特性

本研究に用いたセメントの種類はブレン比表面積が 6200~10300 cm<sup>2</sup>/g のポルトランドセメント-高炉スラグ系の微粒子セメント3種類 (記号; U1, U2, U3) および比較用の普通ポルトランドセメント (記号; N), 早強ポルトランドセメント (記号; H), 高炉セメント B 種 (記号; BB) であり, それらのセメントの概要を表-2 に示す。これらの粒子形状は, 顕微鏡観察によれば, N, H および BB 中の微細粒子部分と3種類の微粒子セメントの大部分の形状には見た目の違いはない。N, H, BB 中の粗大粒子はクリンカー中の結晶粒の大きさなどに影響されて形状が様々なことが目につくが, 微粒子セメントではそれらがさらに粉碎されるために, 個々の粒子の間で形状の差異が少なくなっている。

セメントの粒度はレーザー散乱法 ((株) セイシン企業製, SK レーザー使用) によった。レーザー散乱法は, レーザービームによる粒子の回折像が粒子形状および寸法に依存することを利用するもので, サブミクロンから数十ミクロンの範囲の粒径に適用できる光散乱法に属する粒度測定方法である。

### (2) セメントグラウトの粘度および懸濁性

セメントグラウトには状況に応じてセメント分散剤が用いられる。本研究においては分散剤として, ナフタリンスルホン酸ホルマリン縮合物系のコンクリート用高性能減水剤 (花王製, マイテイ 150, 記号 Mt) を用いた。

粘度および懸濁性試験に用いるグラウトは, 水, 分散剤, セメントの順でジュースーミキサーに投入し, 低速 (6000 rpm) で 15 秒間, 高速 (12000 rpm) で 30 秒間練りませたものである (練りませ量, 0.5 l)。粘度は B 型回転粘度計により測定し, また, 懸濁性は, 250 ml のメスシリンダーにより固・液界面の時間-沈下曲線を測定することによって評価した。

以上の試験はすべて 20°C 恒温室内で実施し, 各試験は, 少なくとも 2 回の繰り返しを行った。

#### a) グラウトの粘度

各種セメントグラウトの練りませ直後の相対粘度 (グラウト粘度/水の粘度) を表-3 に示す。ブレングラ

表-3 各種セメントグラウトの相対粘度

セメント	分散剤の種類	添加量 W/C	相対粘度(実測値)			相対粘度(計算値)		
			6	4	2	6	4	2
U1	-	0	4.8	10.0	99.0	1.2	1.3	1.6
	Mt	2	1.3	1.4	1.9			
U2	-	0	4.8	10.0	51.0	1.2	1.3	1.6
	Mt	2	1.2	1.6	2.0			
U3	-	0	3.0	6.0	25.0	1.2	1.3	1.6
	Mt	2	1.3	1.5	2.2			
H	-	0	1.9	2.7	9.0	1.0	1.2	1.5
	Mt	2	1.6	1.7	3.0			
BB	-	0	2.2	3.0	7.8	1.2	1.2	1.6
	Mt	2	1.7	1.4	1.7			
N	-	0	1.6	1.8	4.9	1.0	1.2	1.6
	Mt	2	1.2	1.4	1.5			

注1) 記号 -: ブレン, Mt の添加量はセメント重量%

注2) W/C は重量比

注3) 相対粘度計算式は①式を用いた

ウト (分散剤を添加しないグラウト) では, セメント粒子が細かく, 水セメント比が小さいほど粘度が急激に高くなる傾向がある。これは, セメント粒子が細くなるほど表面自由エネルギーを減少しようとするために, 凝集して, フロックを形成しようとする傾向が強くなるためと考えられる<sup>10)</sup>。

グラウトの粘度は, 表中に示すようにセメント分散剤 Mt を 2% 添加すると著しく低下し, また, 同一水セメント比のグラウトについては粒子径の異なるセメント種類間で粘度の値に大きな差が見られなくなった。なお, これらの分散剤を用いたものの相対粘度は, 全て一般に使用されているセメントグラウトの範疇の値である。表中の相対粘度計算値は高濃度サスペンションに対する Brinkman<sup>11)</sup> の式 (1) を用いて計算したものであり, 分散剤を添加したグラウトの相対粘度と全般的に一致している。これから, 十分にセメント粒子が分散したグラウトの相対粘度には溶質の体積濃度のみが支配的であり, 溶質の粒子径はほとんど影響しないものと考えられる。

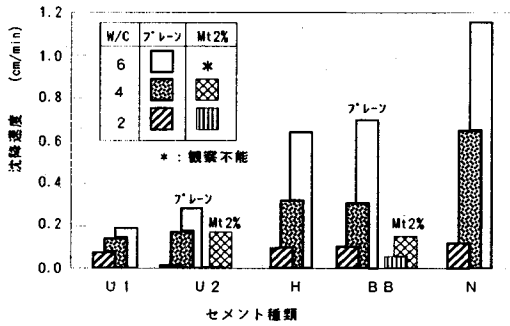
$$\eta_r = (1 - C_v)^{-k} \quad (1)$$

ここで,  $\eta$ : 相対粘度

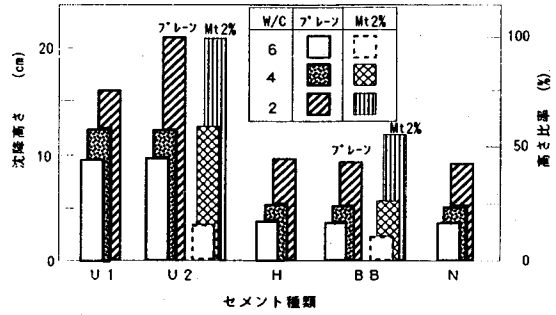
$C_v$ : 溶質の体積濃度

$k$ : 粒子形状係数 (完全球体の場合の  $k=2.5$  を採用)

なお, 分散剤として各種コンクリート用高性能減水剤および高流動化剤を取り上げた既往の実験では<sup>12)</sup>, 水セメント比が小さいところ ( $W/C=2$ ) および分散剤添加



図一 各種セメントグラウトの沈降速度



図二 各種セメントグラウトの沈降高さ

量が少ないところで分散剤の種類による粘度低減性能の差がみられ、本実験の Mt は、添加量 1% では平均的性能を、2% 添加では優秀な性能を示した。

b) グラウトの懸濁性

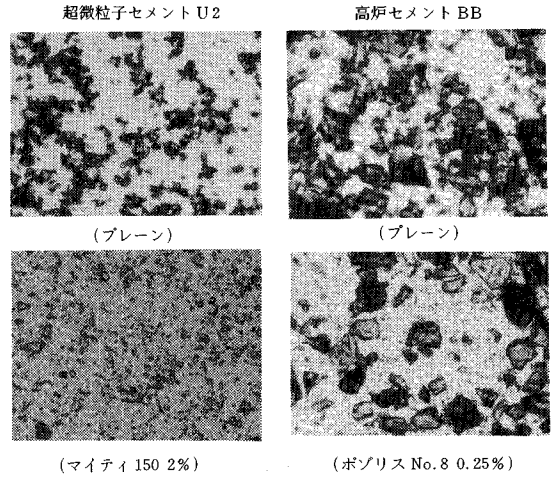
各種セメントグラウトの沈降性試験（初期高さ 21.5 cm）における固・液界面の変化状況を表す沈降速度を図一に、また、沈降高さを図二に示す。ここで、沈降速度および沈降高さは以下のように定義した。

- ① 沈降速度：時間当たりのブリージング（固・液界面より上の清澄部分の水位高さ）、ここでは、最終ブリージングの 90% が生じる点までは等速沈降域とみなせ、この間のブリージングを時間で除して沈降速度を求めた。
- ② 沈降高さ：セメント粒子沈降が終了した時の沈殿部の高さ

図一では、プレーングラウトの沈降速度は、セメント粒子径が小さいほど、水セメント比が小さいほど速度が小さくなっている。これは、ブラウン運動を行うサブミクロンオーダーのセメント粒子の量が相対的に多くなるため、また、粒子濃度が大きくなると懸濁液内の条件が変わり、特に沈降する粒子によって置換される液体の上向きの流れの影響が顕著になる、いわゆる干渉沈降が生じるためと考えられる。

分散剤添加の影響はセメント U2 と BB について検討した。この結果、水セメント比 W/C=2 および 4 については明瞭ではないが分散剤添加によって沈降速度が遅くなることもある。W/C=6 については懸濁状態が長く続き、清澄部が出現しないので固・液界面の沈降速度の観察が出来なかったが、急速に沈殿物が堆積するのがみられた。このように W/C=6 のグラウトに分散剤 Mt を 2% 添加した場合には分散の効果が顕著であり、サブミクロン粒子が溶液中に懸濁し、いつまでも浮遊する一方で、大部分のミクロンオーダー以上の粒子は急速に沈降するといった分離傾向を呈するようになった。

図二にみられるように同一水セメント比のグラウトの沈降高さは、相対的に超微粒子セメント U1, U2 の方が通常セメント H, BB, N より大きい。超微粒子セメントでは、ブラウン運動を行うサブミクロンオーダー



写真一 セメント粒子の分散状態 (W/C=6)

のセメント粒子の量が相対的に多くなることおよび干渉沈降の影響を受け易くなることからルーズな沈積構造をとるためと考えられる。

分散剤を添加した U2, BB のセメントグラウトの W/C=2 および 4 については分散剤の効果は明瞭でないが、W/C=6 の場合には沈降高さが非常に小さくなった。このように沈降高さが小さくなるのは、大きな水セメント比ではセメントの絶対量が少ないので、分散剤添加によって均一に分散したセメント粒子が再凝集や干渉沈降することなく、次の写真一に示すように粒子が個々に分散した状態で密に沈積するからと考えられる。

写真一に水セメント比 W/C=6 のグラウトのセメント粒子分散状態の光学顕微鏡写真を示す。この写真から分散剤を添加しない場合には、セメント粒子がフロック状態になっていることや、BB の粗大粒子の表面に微粒子が付着している状況あるいは分散剤添加によってセメント粒子が均一に分散された状況などがみられる。なお、この写真に示した U2 と Mt および BB とポズリス No.8 (リグニンスルホン酸塩系コンクリート用 AE 減水剤) の組み合わせはグラウトの現場でよく用いられているものである。

c) セメントグラウト材料としての特性

表-4 砂層モデル充てん砂の性質

	荒砂	細砂	けい砂 (6号A)
比重	2.64	2.63	2.63
乾燥密度 (kg/ℓ)	1510	1402	1465
間隙比	0.75	0.88	0.80
粒径 (mm)	細粒径 D15	0.46	0.26
	平均粒径 D50	0.55	0.34
透水係数 (cm/sec)	$7.72 \times 10^{-2}$	$2.68 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-2}$
---JIS-A1218---			
透水量 (ℓ/min)	7.5	6.8	4.8

注1) D15、D50の添字は加積通過率を示す。  
 注2) 図-3の砂層モデル透水量 (0.2MPa)

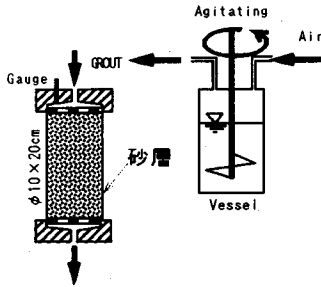


図-3 砂層モデル浸透試験装置

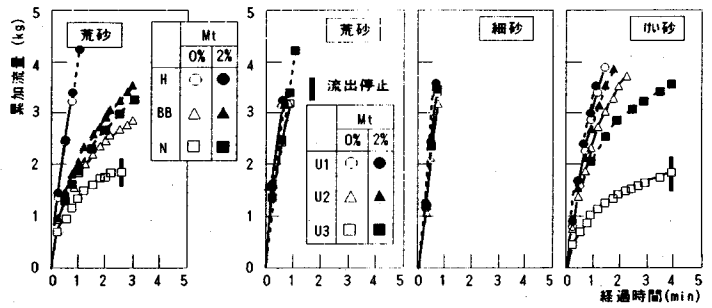


図-4 砂層注入実験結果 (W/C=6)

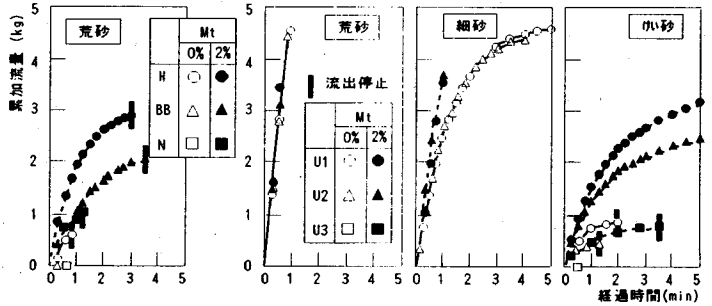


図-5 砂層注入実験結果 (W/C=2)

セメントグラウト自体の特性は粘度および懸濁性で評価される。懸濁性が優れているグラウトは、セメント粒子が溶液中に均一に分散し、かつ、材料分離が少ないものであろう。

材料分離抵抗性をよくするためには、

- ① 微細なセメント、ベントナイトなどの使用<sup>13)</sup>

- ② 水セメント比を小

グラウト材の均一な分散化のためには、

- ① 分散剤の使用

- ② 水セメント比を大

粘度低減のためには、

- ① 分散剤の使用

- ② 水セメント比を大

などが考えられ、なかでも分散剤の効果が大きい。ただし、適量の分散剤の添加により、セメント粒子が分散し、グラウトの粘度が低下するので、細かい隙間への注入が可能となるが、過剰に添加するとセメント粒子と溶液との分離が生じ易くなり、グラウトの注入速度の小さいところなどでは分離沈積物による目詰まりの発生あるいは粗な隙間では大きなブリージングによる充てん不足なども起こり得る。

### 3. 室内モデル実験による各種グラウトの浸透性比較

セメントグラウト注入による地盤改良において改良が困難とされる岩盤の代表的なものとして、1) 微細な大量の節理等が発達した岩盤、2) 風化が進み、例えば、

花崗岩では一部マサ化した岩盤などが挙げられる。ここではこれらに対するグラウトの浸透性を検討する目的から、a) 砂層、b) 岩盤割れ目のそれぞれのモデルに対する表-2の各種セメントを用いたグラウトの浸透性に関する基礎的実験を行った。

#### (1) 砂層モデル浸透試験

##### a) 実験装置

図-3に示す砂層モデルについて1次元の注入試験を行った。ここでは表-4に示す3種類の砂をφ10×20cmのモールドに2層に分けて詰め、各層を十分水締めした。

グラウトは、溶液5ℓに所定量のセメントを投入し、ハンドミキサ(茶筌型羽根、550rpm)で30秒間かく拌してグラウト液を作り、そのうち約4ℓをかく拌機付き容器に移したのち0.2MPaの圧力で注入を行った。試験はすべて2回繰り返した。なお、このハンドミキサによるグラウトの粘度は先の試験で行ったジューサミキサによるものと同等であることを確認している。

##### b) 砂層モデル注入試験結果

図-4、図-5にW/C=6およびW/C=2の場合のグラウト流出量の経時変化を示す。

いずれの水セメント比のグラウトについても、従来のセメントN、BBおよびHが浸透できるのは荒砂のみであり、透水係数が $2.68 \times 10^{-2}$ cm/secの細砂以下の砂層には全く浸透困難である。一方平均粒径が4μm以下の超微粒子セメントU1、U2のW/C=6のグラウトは、透水係数が $1.24 \times 10^{-2}$ cm/secのけい砂(6号A)

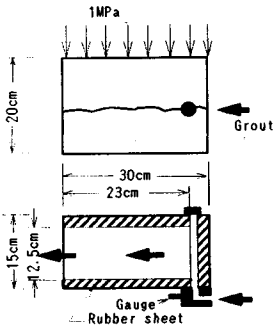


図-6 岩盤割れ目モデル

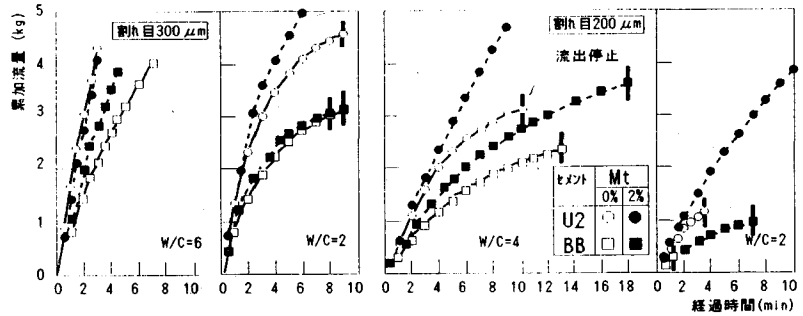


図-7 花崗岩ブロック割れ目注入実験結果

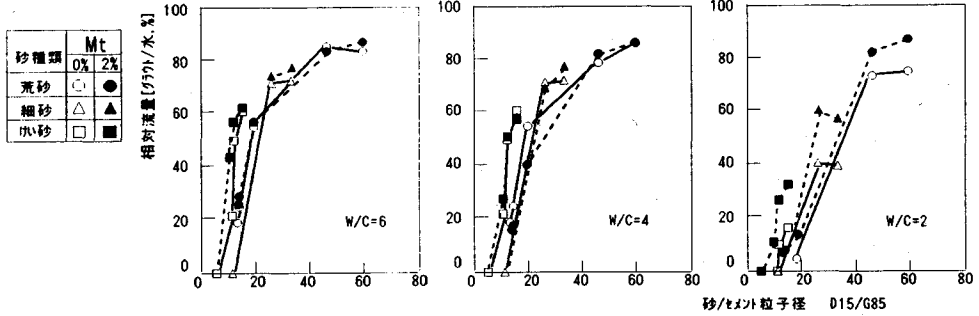


図-8 砂/セメント粒径比と相対流量 (初期1分間)

へ円滑に浸透注入できる (図-4)。なお、これらのセメントの  $W/C=2$  のプレーングラウトをけい砂に注入した場合には、短時間で流出が停止するが、分散剤の添加によって、流出量の増大、浸透の継続を図ることができる (図-5)。

従来のセメントと超微粒子セメントとの中間の粒子径である U3 の場合、図-4 に示すように  $W/C=6$  のプレーングラウトは、初期から時間経過に伴う流出量の減少が著しく、途中で流出で停止するに至ったが、分散剤添加によって浸透性が大幅に改善された。なお、このセメントの  $W/C=2$  のプレーングラウトは、図-5 に示すようにけい砂には全く浸透不可能であり、分散剤の改善効果もあまりみられない。

全体的な傾向から、砂層モデルの浸透性にはセメント粒子径が支配的であり、次いで水セメント比の大小も浸透性に影響することが分かる。また、いずれのセメントについても、プレーングラウトの流出量の時間低下の大きい場合に分散剤の効果が現れている。このことは、分散剤添加によってグラウトの粘度が低下するほかに、セメント粒子とグラウト流路面との摩擦抵抗、附着性あるいは凝集粒子ブロックの変形性などの諸性状が改善され、閉塞を生じやすい傾向が緩和されるためと考えられる。

(2) 岩盤割れ目浸透試験

a) 実験装置

図-6 に示すように、 $20 \times 15 \times 30$  cm の花崗岩ブロッ

ク (山口県黒髪島産) に人工割れ目を作り、1 次元水平流路のグラウト注入試験を行った。

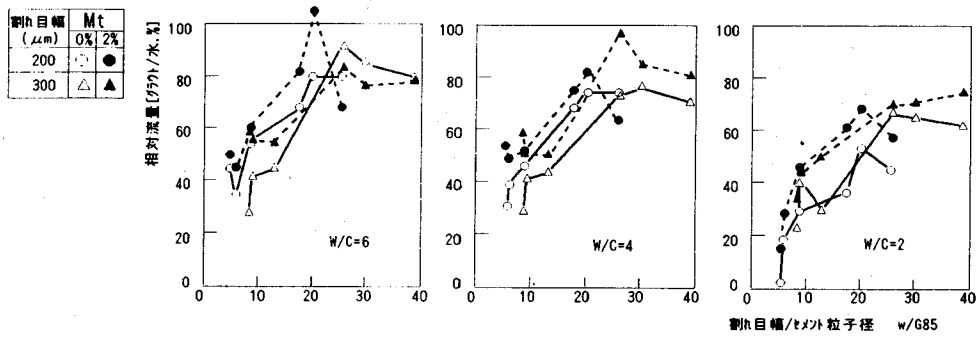
岩盤割れ目は人工割れ目を作る前にコンタクトひずみ計のチップを接着して割れ目幅の基長をとり正確に計測した。グラウトの練りませから注入試験に至るまですべて  $20^\circ\text{C}$  恒温室中で作業し、岩盤ブロック試験体は、間隔保持および漏れ止めのための薄いゴムシートを割れ目に挟み、割れ目幅を  $200 \mu\text{m}$  (実測値  $220 \sim 240 \mu\text{m}$ 、圧力  $0.2 \text{ MPa}$  下の透水量  $0.79 \text{ l/min}$ ) および  $330 \mu\text{m}$  (同、 $330 \sim 360 \mu\text{m}$ 、同透水量  $1.79 \text{ l/min}$ ) の 2 種類に設定した。これらの割れ目の断面積よりも先の砂層モデルの流路に直角な断面の間隙の総和の方が大きくなるため、モデル全体としての透水量は砂層の方が大きい (表-4 参照)。また、砂層および岩盤のそれぞれのモデル内部の流れは、前者は粒子間の仮想毛细管におけるパイプフロー、後者は平板間フローと模擬され、この違いも流量に影響していると考えられる。

なお、グラウトの調製は先の砂層モデルの場合と同じであり、圧力  $0.2 \text{ MPa}$  で注入を行い、試験はすべて 2 回繰り返しを行った。

b) 岩盤割れ目浸透試験の結果

図-7 にグラウトの注入時間・累加流量曲線の例として超微粒子セメント U2 および高炉セメント BB の試験結果を示す。

全体的傾向として、割れ目幅が小さく、水セメント比が小さいほど注入条件が厳しくなり、セメント粒径によ



図—9 割れ目幅／セメント粒径比と相対流量（初期2分間）

る浸透性能差および分散剤使用の有・無の影響などがはっきりしてくる。超微粒子セメントU2といえども水セメント比が小さくなると流出重量の時間低下が大きくなり、割れ目幅が小さい試験体については途中で流出が停止するものが多く見られた。流出の低下する原因としてはセメント粒子の割れ目面への付着、グラウト中の粗大粒子の分離沈降による流路断面の狭小化、断面狭小部における粒子の捕そく、粒子同士の凝集による粗大フロックによる閉塞、割れ目入口部における粒子アーチングなどが考えられる。本実験では流路が水平方向であるのでグラウトの分離沈降による流路への堆積が生じ易く、このことが流出量の時間低下あるいは流路閉塞に大きく影響していると思われる。

### (3) 各種セメントグラウトの浸透特性

#### a) セメント粒子径の影響

同一の砂層に対してセメントの粒径が大きくなると浸透性がどのように変化するかを示すために、図—8に砂層モデルの注入開始から初期1分間の相対流量（グラウトの流出量／水を流した場合の流出量）と砂／セメント粒径比（砂細粒径D15／セメント粗粒径G85）との関係を示す。この砂／セメント粒径比D15／G85はグラウタビリティ（G.F.）として砂質層に対する懸濁型グラウトの浸透限界の指標として使われることが多い。

一般にG.F. >15~25で浸透可能、G.F. <10では浸透不可能とされているが、本実験の結果も大略これと一致している。G.F. が10~30の範囲の相対流量はW/C=6と4とで差が少ないがW/C=2の相対流量はこれらよりかなり小さい。また、W/C=2の場合には分散剤を添加した方が相対流量が大きくなるが、W/C=4以上のグラウトが比較的浸透し易い条件下では分散剤の効果は明瞭でなくなる。

同様な考え方で、図—9に岩盤割れ目モデルの注入開始から初期2分間の相対流量（グラウトの流出量／水を流した場合の流出量）と割れ目幅／セメント粒子径比（割れ目幅w／セメント粗粒子径G85）との関係を示す。多少、実験値のばらつきがあるが、割れ目幅／セメント粒子径比と相対流量との間にはかなり密接な相関があ

る。分散剤の使用により、グラウトの浸透性が良好になることもわかる。また、水セメント比がW/C=6とW/C=4とでは差が少ないが、W/C=2の場合では割れ目幅／セメント粒子径比が大きいところでも相対流出量が小さく、グラウトの粘性の影響が伺われる。

このような割れ目の浸透限界に関しては、コンクリートの人工割れ目に関するT. B. Kennedyの研究<sup>14)</sup>がある。これによれば割れ目幅／粒径が1.7以上、余裕を見て3以上が注入できる条件としている。本実験の場合、水セメント比、割れ目幅および分散剤の有無にかかわらず、全体的に割れ目幅／セメント粒径比がw/G85=10前後以下で相対流量が激減しており、この値はKennedyの指標値よりかなり大きい。この違いはコンクリートより岩盤の方が割れ目幅が粗く、セメントが付着し易い状態であったことによると推察されるが、今後の検討が必要である。

#### b) 各種セメントグラウトのグラウチング特性

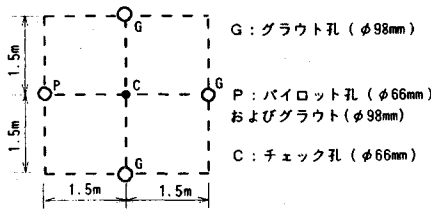
室内モデル実験において、各種グラウトの浸透性は、セメントの種類（粒子径）、水セメント比および分散剤の有無にかなり影響されることが分かった。そこで、これらの要因の組み合わせ結果の全体像をつかむために、砂層モデルを所定量のグラウトで通過する時間を表—5に一覧表示した。同様に、表—6に岩盤モデルを通過する時間をまとめた。これらから、

- ① 超微粒子セメントの低水セメント比のグラウトよりも通常のセメントの高水セメント比のほうがはるかに粘度が低い。通常セメントの浸透性は小さい。浸透特性には、粘度よりもセメント粒子径の方が支配的である。
- ② 間隙比の小さい砂層、狭小割れ目の岩盤に対し、グラウトのセメント粒子径が大および低水セメント比の条件が合わさった場合に、グラウトの浸透が困難になる。
- ③ 荒砂に対する超微粒子セメントグラウチングのように非常に浸透性が良い場合には、水セメント比の影響および分散剤の効果はあまりみられない。
- ④ 同様なことは岩盤モデルの場合にもいえるが、水セメント比が小さくなると通過時間が若干長くなる傾向がある。砂層の場合よりも流路の総断面積が小さく、グラ

表一五 各種セメントグラウトが砂層モデルを通過するのに要する時間

砂種 セメント	1 kg 通過 (sec)									2 kg 通過 (sec)										
	ブレン			Mt 2%			ブレン			Mt 2%			ブレン			Mt 2%				
	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2
	6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4
荒砂	U1	10	9	10	9	9	9	19	19	20	18	19	18							
	U2	9	10	10	10	10	10	19	20	21	19	20	20							
	H	11	17	*	11	12	63	24	68	*	24	29	*							
	BB	17	*	*	15	35	180	73	*	*	56	147	*							
	N	31	*	*	17	47	*	*	*	*	68	*	*							
細砂	U1	13	13	21	12	12	15	26	26	45	25	25	30							
	U2	14	14	21	13	13	14	28	28	45	26	26	30							
	H	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*							
6号Aけい砂	U1	18	23	*	17	18	34	39	52	*	36	40	93							
	U2	21	32	*	19	21	42	49	105	*	41	47	150							
	U3	58	89	*	17	36	*	*	*	*	57	184	*							
	H	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*							

注) \*: 5分間以内に所定量が通過できないもの  
 □: 分散剤効果あり (通過時間が80%以下に短縮)



図一〇 注入孔の配置

ウチング時間が相当長くなるので、水セメント比の違いによる粘性あるいは流路への溶質の付着の影響を受けなくなったものと考えられる。

⑤ 超微粒子セメントグラウトについては、分散剤の添加は水セメント比が小さいところで効果的であり、分散剤添加による粘度低下および流路への付着防止が有効に作用したと考えられる。

⑥ 通常セメントについての分散剤の添加は水セメント比が比較的広い範囲で効果的であり、これは分散剤のセメント粒子と流路との摩擦抵抗の低減作用と考えられる。

#### 4. 高炉セメントと超微粒子セメントの実岩盤へのグラウチング

##### (1) 注入対象岩盤の状況

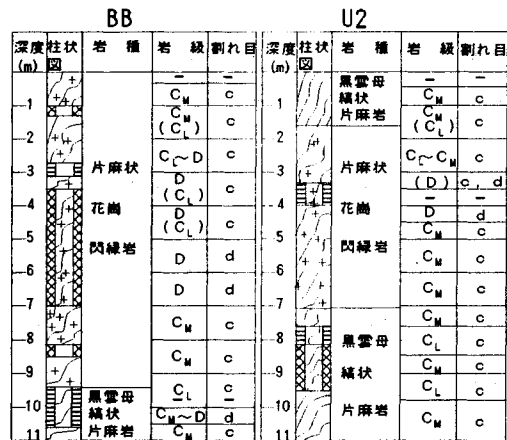
風化花崗岩切取り地山を対象に高炉セメントと超微粒子セメントグラウトの基礎処理効果についての試験を行った。

試験では、風化、変質が認められる割れ目および断層破碎部に対してセメントU2とBBの主として、粒子径の大きさがグラウトの遮水性能(ルジオン値)の改良効果に及ぼす影響を比較検討することを主目的とし、図一〇に示すような孔配置でU2のグラウト孔を4本、こ

表一六 各種セメントグラウトが岩盤割れ目モデルを通過するのに要する時間

割れ目 幅 (μm)	セメント	2 kg 通過 (min)						3 kg 通過 (min)												
		ブレン			Mt 2%			ブレン			Mt 2%									
		W/C	6	4	2	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2	W/C	6	4	2			
		6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4	2	6	4	2				
300	U1	1.3	1.5	1.8	1.4	1.3	1.4	2.1	2.4	3.0	2.2	2.1	2.3							
	U2	1.2	1.4	1.7	1.4	1.3	1.5	2.0	2.3	3.0	2.2	2.0	2.4							
	U3	1.2	1.4	1.6	1.3	1.1	1.5	1.8	2.4	2.8	2.0	1.7	2.5							
	H	2.6	2.7	4.5	2.1	2.2	2.3	4.1	4.5	*	3.2	3.7	4.2							
	BB	2.8	2.9	3.4	2.0	2.2	2.9	4.6	5.1	7.7	3.3	3.7	7.3							
	N	4.2	4.2	*	1.9	1.9	*	6.8	6.3	*	3.3	3.4	*							
200	U1	3.4	3.7	*	3.8	4.2	3.8	5.5	5.9	*	5.7	6.5	5.9							
	U2	3.4	4.0	*	2.8	3.3	4.2	5.8	8.7	*	4.5	5.2	7.1							
	U3	3.1	4.5	*	3.3	3.7	3.4	5.0	9.5	*	5.4	6.1	*							
	II	5.5	6.5	*	4.6	5.3	*	*	*	*	7.4	0.5	*							
	BB	7.0	9.0	*	5.9	5.9	*	*	*	*	10	*	*							
	N	7.5	*	*	6.0	6.6	*	*	*	*	*	*	*							

注) \*: 10分間以内に所定量が通過できないもの  
 □: 分散剤効果あり (通過時間が80%以下に短縮)



注) 断層、破碎部、変質部の記号 □ 角礫状 □ 砂礫混じり粘土状  
 割れ目クラス: (c) 割れ目沿いの岩片に風化、変質が認められ軟質化  
 (d) 割れ目として認識できない角礫状、砂状、粘土状  
 図一〇 注入試験場所の岩盤条件

れから10m離れた地点においてBBのグラウト孔を同配置で4本試験施工した。両セメント共、グラウト孔の大きさはφ98mm、ボーリング長10m、グラウト孔間隔2.21mとした。

試験場所の岩盤は図一〇に示すように強風化部、断層破碎部であり、田中の「ダム基礎岩盤分類基準」<sup>15)</sup>で分類を行えば主にC<sub>M</sub>~D級に相当する。これから両地点の図からは両セメントの岩盤の構成はほぼ同様といえるが、風化の程度はBBグラウトの方がやや著しく、先の田中による岩級区分のDと判定される部分がかなりある。一方、U2グラウトの岩級区分がDの部分はごくわずかである。

このように注入対象岩盤は細かい多くの節理が発達し

表一七 注入仕様

深度 (m)	0~2		2~5		5~10		
圧力 (MPa)	0.7		0.8		1.0		
グラウト	W/C	4		6		8	
	相対粘度	BB	U2	BB	U2	BB	U2
注入完了基準	通常完了	規定圧力に達し、注入量が1ℓ/分/㎡以下状態で押し5分間					
	リーク完了	表面リークが発生した場合は完了とする。ただし、その㎡は2次注入を行い表面リークがあれば3次注入を行う。					
	規定完了	1次注入において、200ℓ/㎡で完了。 2次、3次注入において、100ℓ/㎡で完了。(max.400ℓ/㎡)					
注入順序	深度10m(7m)~5mを全孔注入→5m~2mを全孔注入→2m~0mを全孔注入 表面リークが発生した場合は更に1㎡上部の注入を行い、同一個所より表面リーク発生を確認した場合は、その孔の注入は中止(グラウトの硬化後注入再開)。						

注) BBは、セメント重量に対しバントナイト300番、ボゾリスNo.8を5%、0.25%添加、U2はプレーンで使用。

表一八 グラウト注入によるルジオン値改良効果

深度 (m)	高炉セメント BB					超微粒子セメント U2				
	割れ目クラス	単位注入量 C (kg/m)	ルジオン値		C/Lu	割れ目クラス	単位注入量 C (kg/m)	ルジオン値		C/Lu
			注入前	注入後Lu				注入前	注入後Lu	
0~1	c	19.7	13.8	7.6	2.6	c	44.0	14.2	2.6	16.9
1~2	c	32.0			4.3	c	45.7			17.6
2~3	c	23.9			3.1	c	19.6			28.0
3~4	c	16.0	8.8	7.6	2.1	c,d	52.9	9.1	0.7	75.6
4~5	c	35.3			4.6	d,c	84.2			120.
5~6	d	61.5			36.2	c	104.4			74.6
6~7	d	50.0			29.4	c	109.4			78.1
7~8	c	18.1	3.1	1.7	10.6	c	121.5	3.9	1.4	86.8
8~9	c	9.8			5.8	c	94.9			67.8
9~10	c	3.4			2.0	c	74.6			53.3

ていると同時に強風化によりマサ化した部分も多い。そのためグラウトの岩盤中への浸透は岩盤割れ目への浸入と同様に砂質土への浸入といった状況をも有するものと考えられる。

(2) 注入試験方法

グラウトを高密度で多くの脆弱部や割れ目に注入し、パッカー周辺のリークを生じさせずに効果的に所用の改良効果を確認するためのグラウト工法として二重管ダブルパッカー工法を採用した。注入圧力および注入濃度等は同現場における他のグラウト試験の実績を参考にし、モデル実験よりは大きめの水セメント比を採ることとし、表一七のように定めた。このように水セメント比が大きい場合、前章で触れたように材料分離抵抗性および分散剤の作用効果の面から、BBには懸濁性を高めるためにバントナイトを添加し、また、U2はプレーンとした。この結果、両セメントグラウトの相対粘度は表一七に示すようにW/C=4を除いて、ほぼ同じ値となった。この実岩盤グラウティング試験の目的は、主としてU2とBBの粒子径の違いがグラウト効果に及ぼす影響を明らかにすることであり、バントナイト添加等の影響は無視できると考えた。

いずれのセメントのグラウト孔についても、4本中1本についてはグラウトに先立ちφ66mmのボーリング(パイロット孔)を行い、コア採取および透水試験を実施し、ついで同孔はグラウト用にφ98mmの拡孔を行った。また、所定のグラウト終了後、いずれのセメントに

ついても正方形配置の中央点(各グラウト孔との距離1.5m)についてφ66mmのチェックボーリングを行い、コア採取および透水試験を実施し、グラウトの改良効果を検討した。

(3) 各セメントの注入状況

a) セメント注入量

U2およびBBセメントグラウトのそれぞれの4孔平均のセメント注入量(単位注入量, kg/m)を表一八に示す。U2の総平均注入量はBBの約2.8倍であった。

深さ方向の単位注入量は、いずれのセメントについても、地表部、深度4m前後および8m以深部で注入量が小さくなっている。BBでは割れ目の状態がクラスcよりもクラスdの方が注入量が多いようである。

b) セメントグラウトの浸入の確認

グラウティング後、BBおよびU2のそれぞれのチェック孔からコアを採取し、採取コアについてセメントの浸透状況を観察した。

セメントの浸透箇所の確認は、①外観観察(色調、硬さ等)、②フェノールフタレイン・エタノール溶液噴霧による呈色(赤色)の有無、③希塩酸への溶解性(セメント部分の溶解・発泡)によった。

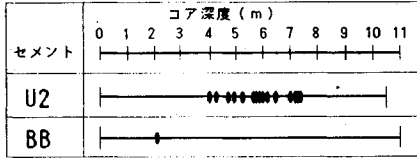
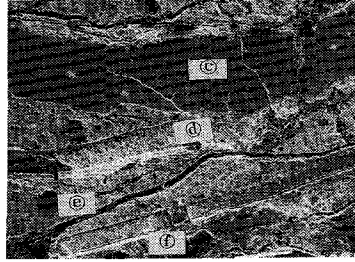
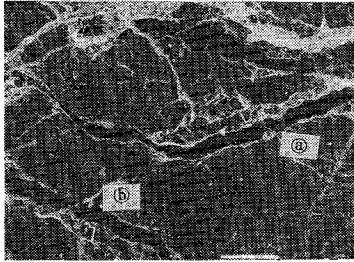
コア中にセメントの存在が確認された箇所を図一12に示す。実際にグラウトが充填されていてもセメント濃度が低すぎて、あるいは中性化などによってセメントの存在が検出できない部分もあると思われるが、コア中にセメントの存在が確認された箇所は、BB注入孔の深度



a) BB チェック孔コア片  
(深度 2.4 m)

b) U2 チェック孔コア片  
(深度 0.7 m)

c) Ca 元素分布状況  
(b) と同一面の EPMA 解析)



● セメントが検出された箇所

図-12 セメントの存在が確認された箇所

500 μm

記号	ひび割れ幅 (μm)	セメント (有無)
Ⓐ	40~150	無
ⓑ	約、125	無
ⓒ	約、600	有
Ⓓ	約、230	有
Ⓔ	40~65	一部有
Ⓕ	約、125	有

写真-2 チェック孔コア片の走査型電子顕微鏡観察

4~7mの部分を除いて、セメントの単位注入量の多い箇所と概ね一致しているようである。

写真-2は、セメントが検出されたごく近傍のコア片の走査型電子顕微鏡観察結果を示すものである。セメントの存在はEPMA解析 (Electron Probe Micro Analysis) によるCa元素の分布状況によって明確に知ることができる (写真-2c) 参照。これからBBは40μmから150μmの割れ目にセメントの痕跡が全然見られないのに対し、U2は125μmから600μmの広い範囲の割れ目に密に充填されており、40μmから65μmの非常に狭い割れ目にも一部浸透しているのを見ることができる。

前章と同様に割れ目幅/セメント粒子径比を求めると、BBの浸透が見られない割れ目は $w/G 85 = 150/33 = 4.5$ であり、一方、U2が一部浸透した微細割れ目については $w/G 85 = 65/10 = 6.5$ となり、限られた観察範囲ではあるが室内実験の浸透限界が現場注入にもほぼ適用できることが分かった。

#### (4) 注入による改良効果

岩盤透水係数の指標のルジオン値の注入前後の値、すなわち、注入前 (パイロット孔) と注入後 (チェック孔) のルジオン値を比較することでグラウトの注入効果が評価できる。表-8に示すようにU2とBBの両セメントの注入前のルジオン値はほとんど同一であるが、注入後のルジオン値はU2の方が著しく低減した。BBのルジオン値の改良効果が低いのは、写真-2a)に示すように未注入の割れ目が多く残ることによるものと考えられる。

グラウト孔が複数回で施工される場合には、グラウトの改良効果は一般的にルジオン値および単位セメント注入量の回数別の低減状態から判定される。ルジオン値が

改良目的に達していなく、かつ、回数による低減傾向があまり認められない場合や単位セメント注入量が小さい場合は、用いた注入材あるいは注入方法では改良が困難であることが示唆される。

本実験では1次孔のみであるので、このような回数に伴う低減傾向からグラウトの改良効果を判定することができないが、BBの深度5mまでは注入後のルジオン値が7.6と大きい割には単位セメント注入量が小さく、すなわち、表中に示すように単位セメント注入量/ルジオン値比 $C/Lu$ が小さく、回数を高めてさらにルジオン値を低減することが困難であることが予想される。一方、U2の深度2m以下のルジオン値は2以下であり、ダム基礎カーテングラウトで採用される目標値以下に改良され、 $C/Lu$ もかなり大きい。このU2のように目標ルジオン値が達成できた場合にはセメント使用量が少なく、 $C/Lu$ が小さい方が経済的となるが、グラウト孔の間隔を大きくとることの可能性もあり、経済性については施工法を含めて総合的に検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、各種セメントグラウトの基本特性および注入特性を明らかにするために室内モデル実験を行い、これらの結果が別途実施した現場グラウティングの結果とよく対応していることを確認した。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- ① 超微粒子セメントグラウト粘度は分散剤の添加によって通常セメントと同等となり、セメント粒子の均一な分散化が可能になる。ただし、高水セメント比の場合に分散剤を多量に添加すると材料分離の傾向が著しくなる。

② 砂層および岩盤割れ目に対する室内モデル実験では、各種セメントグラウトの浸透性はそれらの粘度よりもセメントの粒子径に左右された。

③ 特に、間隙比の小さい砂層あるいは狭小割れ目の岩盤のように注入が困難な対象物への浸透には、粒子径が小さい超微粒子セメントの方が極めて有効である。このセメントの低水セメント比のグラウティングには分散剤の使用も効果的である。

④ 風化花崗岩地山の  $C_M \sim D$  クラスの実岩盤を対象に、岩盤条件がほぼ同等と思われる隣接地において、高炉セメントと超微粒子セメントの現場グラウティングを行った。

この結果、超微粒子セメントの方が高炉セメントよりはるかに多く注入され、ルジオン値の改良効果も大であった。

⑤ 実岩盤への注入状況は、電子顕微鏡写真より超微粒子セメントは幅  $65 \mu\text{m}$  の微細割れ目まで注入できており、一方、高炉セメントは幅  $125 \sim 150 \mu\text{m}$  の割れ目には浸透しない場合もあることを確認した。

この状況は先の砂層・岩盤割れ目モデルにおける注入試験結果と良く対応している。

⑥ 従来のセメントでは改良困難な注入対象については、超微粒子セメントによって改良目的を達成することが大いに期待できる。現時点ではこの微粒子セメントの材料単価は高いが、グラウト孔の間隔を大きくとることの可能性もあり、経済性については施工法も含めて今後総合的に検討してゆく必要がある。

#### 参 考 文 献

1) 寺戸康隆：ダム基礎グラウティング (1)，ダム日本，

No. 443, pp. 45~57, 1981年9月。

- 2) 櫻井 聖・生形健司：道平川ダムのコンソリデーショングラウティングについて，ダム技術，No. 42, pp. 58~64, 1990年。
- 3) 滝本純也：只見ダムの新工法による基礎処理について，大ダム，No. 132, pp. 1~23, 1990年6月。
- 4) 谷 忠・皆木 勇：エルムダム設計，ダム日本，No. 539, pp. 79~92, 1989年9月。
- 5) 藤本芳秀・阿部哲士：湯の原ダムの基礎処理について，ダム日本，No. 548, pp. 65~91, 1990年6月。
- 6) 水資源開発公団試験所：グラウト工の調査設計法に関する研究，昭和60年度。
- 7) 佐藤邦明・伊東 洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰り機構，土と基礎，35-4, pp. 21~25, 1988年4月。
- 8) 小島圭二・登坂博行・伊藤一誠・米山一幸：地下空間利用に関する割れ目の広域グラウトの基礎実験—微粒子による目詰め—，日本応用地質学会，昭和63年度研究発表会講演文集，pp. 135~138。
- 9) 神尾重雄・玉田晟・浦山真次郎・解良一夫：亀裂性岩盤の透水性評価に関する一考察，土木学会論文集，第424号/III-14, pp. 216~269, 1990年12月。
- 10) 服部健一：特殊減水剤の物性と高強度発現機構，コンクリート工学，Vol. 14, No. 3, pp. 12~19, 1976年。
- 11) Brinkman：J Chem phys vol. 20, p. 571, 1950。
- 12) 米田俊一・馬場敦：超微粒子セメントを用いたグラウトの基礎的性質，第45回セメント技術大会講演集，pp. 738~743, 1991年。
- 13) 寺戸康隆：ダム基礎グラウティング (IV)，ダム日本，No. 446, p. 67。
- 14) T.B. Kennedy：Pressure Grouting Fine Fissures, Proc. A.S.C.E., p. 18, 1958年8月。
- 15) 福岡他：土木・建築技術者のための最新建築基礎・地盤設計施工便覧，p. 34, 建築産業調査会，1988年3月。

(1992. 1. 20 受付)

## BASIC PROPERTIES AND PENETRATION OF CEMENT SUSPENSION GROUTS WITH DIFFERENT GRAIN SIZES

Shunichi YONEDA and Koji NAKAGAWA

This paper deals with basic properties of cement suspension grouts with different grain sizes and their penetration into sand and into cracks in rock masses. The main results are as follows. (1) The penetration of the grouts into dense sands or narrow cracks increased considerably with decreasing grain size. For an ultra fine grained cement grout it was excellent. (2) Dispersion admixtures increased the penetration of grouts made of ordinary grain size cements or of fine cements with a low water cement ratio. In field grouting tests in rock, the superiority of ultra fine cement to portland blast furnace slag cement was realized.