

(53) 超微粒子セメントによるグラウチングに関する検討

宇部興産株式会社 正会員 米田 俊一
〇坂井 秀紀
山口大学工学部 正会員 中川 浩二

Basic Study and Application on Grouting with Super-finely Ground Cement

Shun-ichi YONEDA Ube Industries Co.LTD
Hideki SAKAI Ube Industries Co.LTD
Koji NAKAGAWA Yamaguchi University

Recent years, it is a great problem to treat the foundation rocks on a dam site, because it has become increasingly difficult to construct one on a tight foundation. In many cases the grouting of cement-milk can not improve permeability of the foundation rock, and it is necessary to grout it by too many stages. In such a grouting, super-finely ground cement is used, but the data on the effects of grouting using this type of cement are not sufficient.

It remains to be proved to estimate the economical design in due consideration of effect and cost, because this cement material is very expensive.

This paper reports on the results of the grouting at a laboratory and on a dam site using super-finely ground cement.

1. は じ め に

近年、諸ダムが必ずしも堅硬な岩盤上に建設されない状況が増加するに伴って、基礎岩盤の処理が大きな問題となっている。特にセメントミルクの注入によって止水性が顕著に改良できないような基礎岩盤はしばしば見られ、非常に高次孔までのグラウチングを余儀なくされている。このような場合にセメント粒子を著しく小さくした超微粒子セメントが注入材として用いられることがあるが、その効果については十分な資料がない。さらにこの場合セメント材料が高価なこともあって作用効果とコストの両面からみた経済性などその評価が今後の課題と思われる。

本研究は、この点についての資料とするため超微粒子セメントを用いたグラウチングについて室内実験と現位置試験を行った結果について報告するものである。

表-1 使用セメントの性質

セメント	記号	比重	ブレン (cal/g)	平均粒径 (μm)	粒径加積曲線の85%径 (μm)
超微粒子セメント1	U ₁₀	2.94	10300	3.5	7.8
超微粒子セメント2	U ₉	2.92	9370	3.8	10.0
超微粒子セメント3	U ₆ (U ₆₂)	2.96 (2.92)	6080 (6200)	8.1 (5.5)	15.7 (11.5)
早強セメント	H	3.14	4480	10.5	23.7
高炉セメントB種	B ₉	3.02	3840	13.9	33.0
普通セメント	N	3.13	3380	15.3	35.0

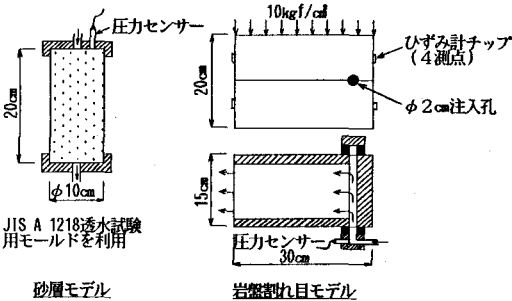


図-1 注入試験モデル地盤供試体

2. 使用材料および試験方法

2. 1 使用材料

表-1に示すように粒子径を3段階に変えた超微粒子セメントと従来のセメント3種を用いた。この外、室内実験では混和剤としてナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤を比較のために用いた。また現場注入試験において高炉セメントB種(B_B)のグラウトにはベントナイト300番をB_Bの5重量%添加したものを用いた。

表-2に室内実験に用いたセメントミルクの粘性(B型粘度計による)を示す。

2. 2 室内モデル実験の方法

図-1に示す砂層モデルと岩盤割れ目モデルについて1次元の注入試験を行った。砂層モデルでは表-3の3種類の砂をφ10×20cmのモデルに2層に分けて詰め、各層を十分水締めした。

岩盤割れ目モデルに用いたブロックは黒髪島産の花こう岩であり、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、割れ目幅の基長を測定した。注入試験では割れ目にゴムシートを挿入して間隔を一定に保った。設定割れ目幅は200 μ m(220~240 μ m)と300 μ m(330~360 μ m)の2通りとした。なお試験済み供試体の割れ目を接着・硬化させ切り出した断面の実体顕微鏡による割れ目幅の測定結果では、コンタクトひずみ計による設定ひび割れ幅0.33mmに対し、実測割れ目幅は若干小さく0.26mm(69測点の平均)であった。

セメントミルクの練り混ぜにはハンドミキサ(茶せん型羽根、550rpm、30secかくはん)を用い、容量5 ℓ のかくはん機付き圧力容器に移したのち圧送した。砂層、岩盤両モデル共に注入圧力は2kg/cm²に制御し、セメントミルクが全量流出するまで、あるいは途中で閉そくするまで注入を行った。なおセメントミルクの練り混ぜおよび注入はすべて20℃恒温室中で実施し、試験は2回繰り返した。

2. 3 現場注入試験の方法

風化花こう岩地山においてB_B(高炉セメントB種)によるグラウト孔を4本、これから10m離れた地点にU₀(超微粒子セメント、ブレン値9370)によるグラウト孔を4本試験注入した。グラウト孔の配列は図-2のとおりであり、両セメントについて全く同一の正方形配置とした。パイロット孔およびチェック孔によってコア採取とルジオン試験とを実施した。

グラウト工法としては2重管ダブルパッカー工法を採用し、表-4の注入仕様の下で注入区間33cmのバルブグラウティングを行った。

3. 砂層モデル注入試験結果について

図-3は注入開始から1分経過後のセメントミルク流出量を表したものである。図中流出量が4kg以上のセメントミルクは流出速度の経時低下がほとんどなく、パッチ全量が流出したが、流出量がこれより少ないものについては流出量が少ないほど流出速度の経時低下が著しくなる

表-2 セメントミルクの粘性

セメント	無添加			混和剤*		
	水セメント比(%)	200	400	水セメント比(%)	200	400
U ₁₀	248	25.0	12.0	4.7	3.5	3.2
U ₀	128	26.0	12.0	5.4	3.6	3.2
U ₀	63.0	14.9	7.5	5.4	3.7	3.2
H	22.5	6.7	4.8	7.5	4.2	4.0
B _B	25.7	7.4	5.0	5.9	3.6	3.5
N	12.2	4.5	3.9	3.8	3.5	3.1

注) *セメント重量の2%添加

表-3 砂層モデル充てん砂の性質

種類	比重	乾燥密度(kg/l)	空隙率(%)	平均粒径(mm)	粒径加積曲線の15%径(mm)	流出速度(g/sec)	透水係数(cm/sec)
荒砂	2.64	1.510	42.8	0.55	0.46	99.4	8.16 $\times 10^{-2}$
細砂	2.63	1.402	46.7	0.34	0.26	82.5	4.90 $\times 10^{-2}$
6号A洗砂	2.63	1.465	44.3	0.18	0.12	77.6	3.40 $\times 10^{-2}$

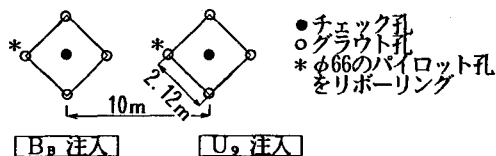


図-2 注入孔の配置

表-4 注入仕様

項目	仕 様
深 度 (m)	0~2 2~5 5~10
圧 力 (kg/cm ²)	7 8 10
注入材 W/C (%)	400 (*600) 600 800
注入完了	規定完了 規定完了
基 準	規定完了 規定完了
注 入 順 序	規定完了 規定完了

注) *U₀の3次注入の場合

傾向がみられた。なお図中には粒子グラウトの適用限界の指標として使われることの多いグラウタビリティ比¹⁾も併記した。本試験で用いた充てん砂の透水係数はいずれも 10^{-2}cm/sec のオーダーであるが、セメントと砂の種類を組み合わせて、セメントミルクの注入性能に大きな違いがみられた。従来のセメントN、B₈およびHは砂の粒子径が $420\sim 210\mu\text{m}$ の細砂以下の地盤では全く浸透することができない。一方平均粒径が $4\mu\text{m}$ 以下の超微粒子セメントのU₁₀、U₉は平均粒径 $200\mu\text{m}$ 以下の6号A珪砂への浸透注入が可能である。一般にセメントミルク注入で代表される粒子グラウトの適用条件は、 $D_{15}/G_{85}\geq 15$ 、 $D_{10}/G_{95}\geq 8$ といわれているが、この指標値の妥当性は図-3の試験結果によっても概ね裏付けされる。

荒砂、細砂に対するU₁₀、U₉のセメントミルクの流出速度は 4kg/min 以上であるが、本実験に用いた各々の充てん砂に対する水単独の流出速度は、荒砂、細砂、6号A珪砂について、それぞれ 5.96 、 4.95 、 4.65kg/min であり、これらのセメントミルクは非常に透過性が優れていることがわかる。またこのように透過条件がよい場合には水セメント比あるいは混和剤使用の有無の影響は明瞭でない。

微粒子セメントの注入性能に及ぼす各種要因の影響は6号A珪砂を用いた場合に比較的明瞭に現れている。すなわちセメント粒子径、水セメント比、混和剤の有無の影響が予測される通りの傾向を示すものとなっている。先述のグラウタビリティ比はこれらのセメントに対し、 $D_{15}/G_{85}=10.4\sim 15.4$ 、 $D_{10}/G_{95}=6.7\sim 9.3$ であり、グラウト材の性能をシビアに評価するにはグラウタビリティの限界指標値に近い条件で試験を実施することが必要なことを示している。

充填砂 種類	セメント 種類	混和剤使用			プレーン			グラウタビリティ比	
		W/C(%)			W/C(%)			D_{15}^*	D_{10}^*
		600	400	200	600	400	200	G_{85}	G_{95}
荒砂	U ₁₀							59.0	40.7
	U ₉							46.0	31.0
	H							19.0	12.2
	B ₈							13.9	9.2
	N							13.1	9.2
細砂	U ₁₀							33.3	22.2
	U ₉							22.0	16.9
	H							11.0	6.7
	B ₈							7.9	5.0
	N							7.4	5.0
6号A珪砂	U ₁₀							15.4	9.3
	U ₉							12.0	7.0
	U _{6.2}							10.4	6.7
	H							5.1	2.8
	B ₈							3.6	2.1
	N							3.4	2.1

1分経過後流出量
凡例
流出量(kg) 4以上 4~3 3~2 2~1 1以下 0
注) * D_{15} 、 D_{10} : 砂の粒径加積曲線の15%、10%径
 G_{85} 、 G_{95} : 注入材の粒径加積曲線の85%、95%径

図-3 砂層モデル注入試験結果

4. 岩盤割れ目モデル注入試験結果について

岩盤割れ目モデルブロックの1次元セメントミルク注入試験の時間・累加流量曲線の一例を図-4に示す。割れ目幅が小さく、水セメント比が小さい程注入条件が厳しくなり、セメント種類による性能差および混和剤の改良効果などがはっきりしてくる。

超微粒子セメントU₉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流出の途中で流出が停止するものも見られた。流出の低下の原因としてはセメント粒子の割れ目面への付着、セメントミルク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補そく、粒子同士の凝集による粗大フロックによる閉そく、割れ目入り口部における

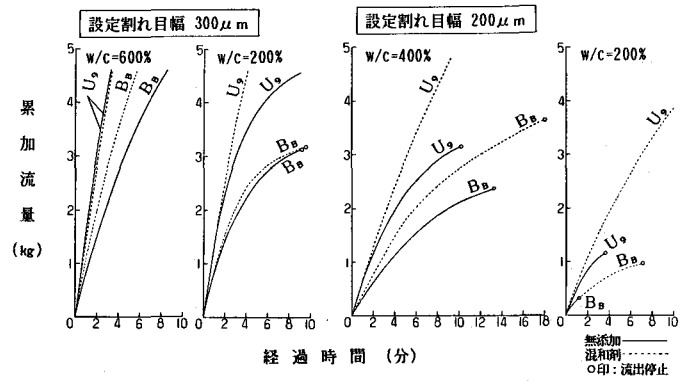


図-4 岩盤割れ目モデルブロックの注入試験結果の一例

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セメントミルクの分離沈降が生じ易く、流出量の時間低下あるいは流路閉そくに大きく影響していると思われる。汎用セメントのN、B_E、Hは粒子径が比較的大きく、例えば割れ目幅200 μ mに対するセメントの粒径加積曲線の85%径の比は、それぞれ8.4、6.1、5.7であり、粗大粒子の沈降が流路断面の大幅減少に直結し、流量変化に著しい影響を及ぼすであろうことが推察される。

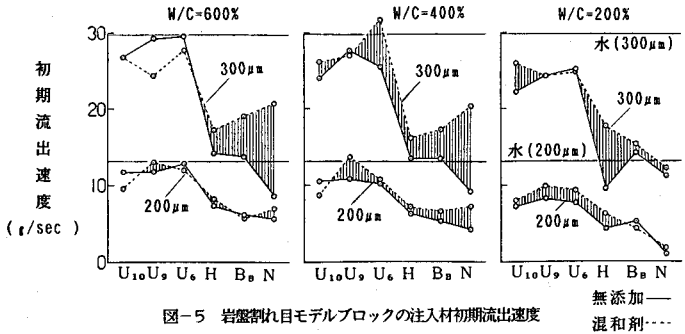


図-5 岩盤割れ目モデルブロックの注入材初期流出速度

表-2に示したように混和剤を用いないプレーンセメントミルクで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粘性が高くなるが、混和剤を使用すると粘性の低下が著しく、セメントの種類および水セメント比による違いは明瞭でなくなる。粘性の面ではセメントNが最も有利のはずであるが先の砂層モデルおよびこの岩盤割れ目モデルでは逆の結果が得られており、必ずしも粘性が注入性能の支配的要因であるとはいえない。混和剤によって透過性能が向上するのはセメントミルク中の凝集粒子が一次粒子に分散して分離抵抗性が高まるゆえであると推察できる。

図-5は各セメントの初期30秒間の平均流出速度を比較したものである。超微粒子セメントU₁₀、U₉、U₆の間ではあまり差がみられず、水セメント比600%および400%では水同等の透過性が観察された。汎用セメントのN、B_E、Hの間ではプレーンのNの流出速度が小さい。Nについては、水セメント比400%、600%では混和剤の添加によりB_EおよびHと同程度まで差を縮小することができるものの、水セメント比200%の厳しい条件下では混和剤の効果も及ばないようである。

5. ダム基礎への適用例

5. 1 注入対象岩盤の状況

図-6にB_EおよびU₉の注入試験場所のそれぞれのチェック孔の柱状図を示す。注入対象岩盤は強風化部、断層破碎帯部であり、田中の「ダム基礎岩盤分類基準」²⁾では主として岩級区分C_L～D級に相当する。

柱状図から両セメント注入場所の岩盤の構成は全体的にはほぼ同様といえるが、風化の程度はB_Eの方がやや著しく、U₉よりもDクラスと判定される部分が多い。

5. 2 注入量

B_EおよびU₉のそれぞれの4孔平均の単位注入量を図-7に示す。岩盤の条件はほぼ同じとみなされるがU₉の単位注入量はB_Eの約2.8倍となった。

深さ方向の単位注入量は、いずれのセメントについても割れ目の状態が割れ目沿いの岩片に風化、変質が認められ軟質になっている部分(クラスc)あるいは割れ目として認識できない角れき状、砂状、粘土状コアとして判定される部分(クラスd)について多くなっている(図-6参照)。またクラスcよりもクラスdの方が注

B _E 注入				U ₉ 注入			
深度 (m)	柱状図	岩種区分	割れ目の状態	深度 (m)	柱状図	岩種区分	割れ目の状態
1		—	—	1		黒雲母 絹状 片麻岩	—
2		C _W	c	2		C _W	c
3		C _L (C _L)	c	3		C _W (C _L)	c
4		C _L ~ D	c	4		C _L ~ C _W	c
5		D (C _L)	c	5		C _W (D)	c, d
6		D (C _L)	c	6		D	d
7		D	c	7		C _W	c
8		D	d	8		C _W	c
9		C _W	c	9		C _W	c
10		C _W	c	10		C _L	c
11		C _L	c	11		C _W	c
		C _W ~ D	d			C _L	c
		C _W	c			C _W	c

図-6 柱状図

入量が多いようである。なおクラスdの部分は岩級区分Dに対応している。

クラスdおよびDの部分の注入傾向が大きいことから、これらのクラスの多いB_E地点の方がU₉地点よりも注入量が多くなりそうであるが実績は逆になっており、それだけU₉の浸透性が優れていることがわかる。

5. 3 ルジオン値

図-8にB_EおよびU₉のパイロット孔（グラウト前）およびチェック孔（グラウト後）のルジオン値を示す。パイロット孔のルジオン値の分布状況は、B_EとU₉との間で差がほとんどない。また深さ方向のルジオン値の分布は地表面に近いほど値が大きく、割れ目状態の分布とは一致していない。

グラウチングの効果はチェック孔のルジオン値で評価することができる。すなわちB_Eの注入によって深度0～5mの範囲でルジオン値は7.6となり、注入前のルジオン値が深度0～2mで13.8、深度2～5mで8.8であったので、それぞれ44%および14%の改良効果を得られたことになる。深度5～10mの部分については最初のルジオン値が小さいものの注入後のルジオン値は約半分になった。

一方、U₉のグラウチングによってルジオン値は深度0～2mの範囲で14.2が2.6に、深度2～5mの範囲で9.1が0.7に激減し、それぞれ82%および92%という極めて大きい改良効果を得ることができた。深度5～10m部分は初期ルジオン値が小さいにもかかわらず、注入後のルジオン値は約3分の1になった。

6. あとがき

グラウチングの理論あるいは技術はダム、トンネル等の施工実績の増加に伴って現場対応型で発展してきたといえる。しかしながら非常に多様で正確な状況把握が出来ない自然地盤を対象とするものであるので、グラウチングのメカニズムの解明、論理的な注入設計法、的確な施工法などが無いのが現状である。

本研究は、近年施工困難なところで使われることの多い超微粒子セメントの注入性能を明確にし、グラウチングの理論確立、材料・施工技術の発展のための基礎資料を得ることを目的としている。

今回の研究では、その第一歩として粒子径を変えた各種セメントを対象に共通のモデル地盤実験を行うことにより、超微粒子セメントと汎用セメントとの注入性能の相違を明確にすることができた。また実際のダム基礎岩盤において超微粒子セメントの優れた特性を確認することができた。

参考文献

- 1) 土質工学会「地盤改良の調査・設計から施工まで」p271、昭53.3月
- 2) 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」p34、建築産業調査会 昭63.3月

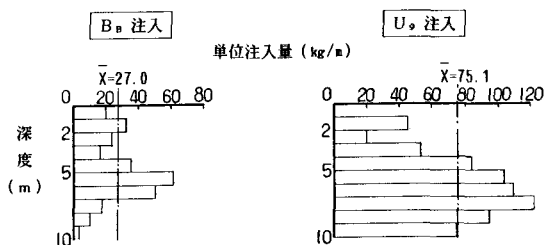


図-7 単位注入量

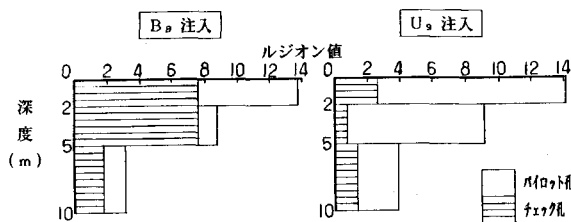


図-8 ルジオン値