

粉体圧送グラウチングの適用地盤と標準的な注入仕様に関する研究

藤澤 侃彦¹・中村 昭²・山口 嘉一³・小林 正宏⁴・小沼 栄一⁵・山縣 秀年⁶

¹フェロー (財)ダム技術センター (〒106東京都港区麻布台二丁目4-5)

²工修 建設省北陸地方建設局 富山工事事務所 (〒930 富山県富山市石金三丁目2-37)

³正会員 工博 建設省土木研究所 ダム部フィルダム研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

⁴正会員 工修 株式会社熊谷組 土木本部土木技術部 (〒162 東京都新宿区津久戸町2-1)

⁵正会員 工博 秩父小野田株式会社 中央研究所 (〒285 千葉県佐倉市大作二丁目4-2)

⁶正会員 日特建設株式会社 技術本部筑波研究所 (〒300-26 茨城県つくば市東光台五丁目5番地)

表面改質した超微粒セメント粉体を圧縮空気とともに地盤中に浸透注入する「粉体圧送グラウチング」は、軟岩地盤を対象に研究が進められてきた遮水性改良工法である。本論文では、まず、粉体圧送グラウチング用に開発した注入材料を紹介した。次に、粉体圧送グラウチングの適用性を明確にする目的で実施した、原地盤より採取した不攪乱試料および砂供試体への室内注入試験、注入固化体の顕微鏡観察、および注入材料の遮水性、硬化特性について述べ、粉体圧送グラウチングの適用地盤、および適用地盤に対する標準的な注入仕様を提案した。

Key Words : cement powder grouting, permeability, soft rock ground, surface-treated cement

1. はじめに

近年の我が国におけるダムサイトの地質条件は、ますますその厳しさを増しており、硬岩よりも強度がかなり小さい軟岩を基礎にダムを建設しなければならない事例が増加している。軟岩基礎に対しても亀裂性の硬岩基礎と同様、止水処理工法としてセメントミルクによるグラウチングが一般的に用いられている。しかし、軟岩地盤は一般的に限界圧力が低く、注入時のリークの発生が懸念されるため、高压注入が採用できないばかりか、限界圧力以下の低圧力でセメントミルクが十分に浸透できるほど大きな間隙を有していない¹⁾。従って、通常はリーク防止を目的にコンクリート等で表層を処理した後、地山の限界圧力より若干大きな注入圧力で注入する方法が採用されている。しかし、この方法ではセメントミルクが新たに形成された亀裂に集中して注入されるため、特にダグシーフローが主たる浸透形態であるような軟岩地盤では所定の遮水効果が必ずしも得られず、注入孔数が増加する等の問題が生じる場合もある。このように、従来のセメントミルクによるグラウチングでは浸透注入が困難となることが多い軟岩地盤に対する新しい遮水性改良工法として、「粉体圧送グラウチング」が開発された^{2),3)}。

粉体圧送グラウチングは、超微粒セメント粒子の表面を水溶性シリコーン樹脂で改質処理することで気中における凝集性・付着性を低下させた「改質セメント」を圧縮空気により地盤中に浸透注入する工法である。本工法は、セメントミルク注入と比較して、水よりはるかに浸透性に優れた圧縮空気を注入媒体として用いていること、およびセメント粒子の表面改質により気中での分散性向上を図った点で、軟岩地盤への浸透注入に優位性を発揮することが期待され、研究が開始された。まず、森ら⁴⁾は豊浦標準砂層への室内注入試験結果より、圧縮空気を媒体として注入された改質セメントが沈着・堆積・再飛散を繰り返しながら地盤間隙内を浸透していくメカニズムを確認した。また、森ら⁵⁾は円管モデルによる注入現象の解析を試み、改質セメントの浸透条件の一つとして、地盤間隙内の空気流速が0.8m/s以上必要と算定した。さらに、高樋⁶⁾、竹林ら^{7),8)}は原位置のマサ地盤に対して注入試験を実施し、限界圧力以下での注入で、注入孔から最大半径0.8mという実用的な浸透範囲が確保されるとともに、注入後の透水係数が1オーダー以上低下することを確認した。

このように、マサ地盤に対する本工法の適用可能性を示す一方、高樋ら⁹⁾は同じ軟岩地盤に属するシラスでは改質セメントの浸透注入が困難であると報告している。

表-1 改質セメントの粉体物性と浸透性

材 料	物性と浸透性	粒 径 分 布 ^{注1}			安息角 [degree]	空気圧送浸透性 ^{注2} 豊浦標準砂層 通過時間 [min]	
		平均粒径 [μm]	通 過 分 [%]				
			10.55 μm	1.01 μm			1.01~10.55 μm
未改質セメント		4.9	89.3	8.9	80.4	50	不通過
改質セメント	標準品	5.5	88.5	7.3	81.2	37	41
	HG I	5.6	94.3	4.5	89.8	28	23
	HG II	5.3	95.1	5.0	90.1	26	18

注¹: レーザー回折式 (マイクロトラック社製) による測定.

注²: 供試体直径0.1m, 高さ0.36m, 砂層乾燥密度1.63t/m³, 注入圧力0.37MPa.

表-2 採取試料の物性

物性項目	A(マサ)	B1(マサ)	B2(マサ)	C(マサ)	D(シラス)
50%粒径 [mm]	1.43~2.03	1.00~2.30	1.20~1.88	1.15~1.77	0.34~0.45
自然含水比 [%]	3.1~7.2	5.8~9.4	5.9~7.5	5.3~8.7	19.1~26.9
乾燥密度 [t/m ³]	1.78~2.16	1.59~1.70	1.78~1.91	1.79~1.94	1.34~1.49
間隙率 [%]	20.9~34.5	38.1~39.9	28.0~32.8	26.7~32.4	44.7~50.3
飽和度 [%]	21.7~56.4	21.0~45.4	40.1~47.8	35.3~52.5	60.2~89.6
75 μm以下の含有率 [%]	2.0~4.0	6.0~9.0	6.0~9.0	4.0~8.0	20
透水係数 [×10 ⁻⁵ m/s]	2.5~2.8	13~35	4.1~5.7	3.6~5.6	0.20

従って、軟岩地盤での本工法の適用性を、地質および物性の面から明らかにしておく必要が生じた。また、改質セメントについても、浸透限界、水和反応の遅れが指摘されるとともに、適切な注入圧力、送気流量、粉体供給速度等の具体的な注入仕様についても系統立てた研究が不十分であった。

本論文では、まず、改質セメントの粉体物性および浸透性能を示した。次に、各地のダムサイトから採取した不攪乱試料への室内注入試験および注入固化体の顕微鏡観察について述べ、実用的な改良範囲を得た過去の現場注入試験結果を基準とした検討により、粉体圧送グラウチングの適用地盤を明確にした。さらに、適用地盤への最適な注入仕様を明らかにする目的で実施した、砂供試体への室内注入試験について述べた後、最も浸透性に優れた改質セメントの遮水性、硬化特性を室内試験結果より示した。最後に、これらの結果を基に、粉体圧送グラウチングの適用地盤および適用地盤に対する標準的な注入仕様を提案した。

2. 改質セメントの改良

粉体圧送グラウチング用の注入材料として、これまで市販の超微粒セメント (平均粒径4.9 μm, 未改質品) をシリコーン樹脂で表面コーティングした改質セメント「標準品」を使用してきた。標準品は未改質品に比べ気中における分散性に格段の向上が認められるものの、浸透性のさらなる向上を目指して、①セメント粒子の表面コーティングの均質化、②粒子径の均一化を行うことで標準品を改良し、「改良品」として「HG I」および「HG II」を製作した。HG IIはHG Iよりも粒径

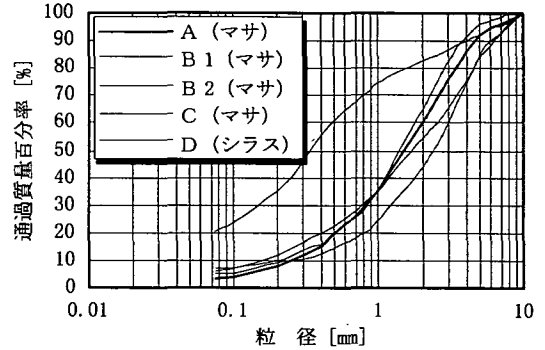


図-1 採取試料の粒径加積曲線

10.55 μm以上の粒子をさらに分級し、粒子径の均一化をさらに図ったものである¹⁰⁾。

改良品は表-1に示すように、標準品に比べ1.01~10.55 μmの粒子群割合が約9%上昇して粒子径の均一化が達成され、安息角が約10度減少して付着力が低下していることがわかる。また、直径100mm, 高さ360mmの円柱形豊浦標準砂層への空気圧送試験¹⁰⁾における通過時間は標準品の41分に対し、HG Iが23分、HG IIが18分と短縮され、結果的に浸透性が大幅に向上していることが判明した。

3. 適用地盤の検討

(1) 不攪乱試料に対する室内注入試験

a) 対象試料

セメントミルクによる浸透注入が困難と判断されている軟岩基礎のダムサイト候補4地点 (A~D) 内の5カ所

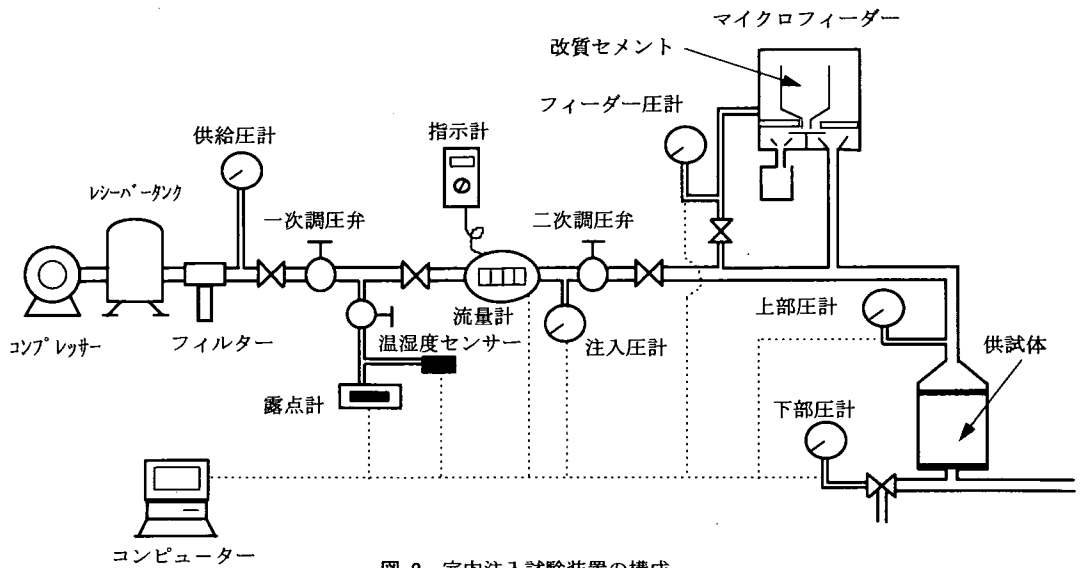


図-2 室内注入試験装置の構成

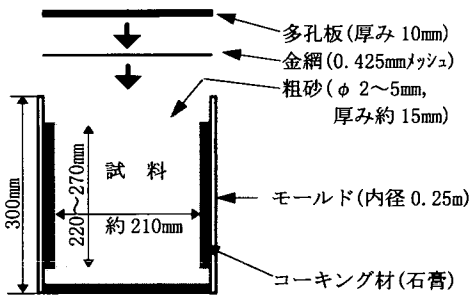


図-3 不攪乱試料供試体の構成

(Bダムサイトのみ2カ所でB1, B2と記す) から、ネールサンプリング法¹¹⁾により32個の円柱形不攪乱試料(直径約210mm, 高さ約300mm)を採取した。試料の物性および粒径加積曲線をそれぞれ表-2, 図-1に示す。試料A, B1, B2は均質なマサであり, 試料Cは粘土分で充填された亀裂を多く含むマサである。試料Dはシラスである。なお, 試料Aの採取地点では過去に竹林⁸⁾が改質セメントの標準品を用いた現場注入試験を実施し, 注入孔から最大半径0.8mという実用的な改良範囲を得ている。

b) 注入材料

注入材料は, 最も浸透性に優れたHG IIを主に使用した。ただし, 過去に標準品による現場注入試験を実施している試料Aについては, 比較のため標準品も使用した。

c) 試験装置

図-2に室内注入試験装置の構成を示す。コンプレッサーより供給された圧縮空気は, フィルターでオイルミストを除去され, 一次調圧弁および二次調圧弁で所定の注入圧力に調圧された後, マイクロフィーダーより定量

表-3 不攪乱試料に対する注入条件

試料名	注入圧力 [MPa]	送気流量* [m ³ /hr(大気圧 換算流量)]	粉体供給速度 [g/min]	注入材料	供試体数
A (マサ)	0.04~0.24	42.4~88.2	5.0	HG II	6
	0.06	30.5, 43.7	5.0	標準品	2
B1 (マサ)	0.04~0.18	41.8~86.3	5.0	HG II	6
B2 (マサ)	0.06~0.35	10.4~94.0	5.0	HG II	5
C (マサ)	0.06~0.33	13.5~92.6	5.0	HG II	9
D (シラス)	0.10~0.70	4.96~86.8	5.0	HG II	4

注*: 注入初期の値。

供給された改質セメントとともに供試体に定圧注入される。マイクロフィーダーはホッパー下の回転テーブルに堆積した改質セメントを掻取る方式で, テーブルの回転数により粉体供給速度を1~50g/minまで1g/min刻みで調整できる。

供試体は図-3にその構成を示すように, 表面を平らに成形した採取試料の上下端に直径2~5mmの粗砂, 金網, 多孔板の順で装着した。なお, 成形前に表面の粘土塊, 浮き石, 横断面上の亀裂部分を予め除去したため, 供試体高さは220~270mmとなった。

d) 試験方法

注入試験は, まず圧縮空気のみを送気して所定の注入圧力まで速やかに昇圧した後, 改質セメントを注入した。注入中は圧力一定とし, 送気流量が徐々に低下して1m³/hr (0°C, 0.1MPa換算流量: 以下, 大気圧換算流量と称す) 以下となった時点, または改質セメントが供試体下端部を通過した時点で注入を終了した。

注入圧力は, 表-3の注入条件に示すように, 注入装置の限界送気能力94m³/hr (大気圧換算流量) 以下で, 試料内部あるいは試料とコーキング材との境界部に亀裂を發

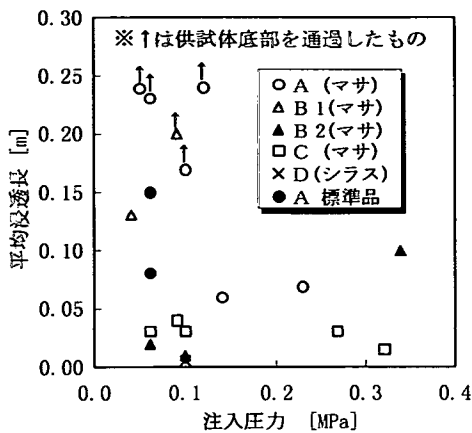


図-4 注入圧力と平均浸透長の関係

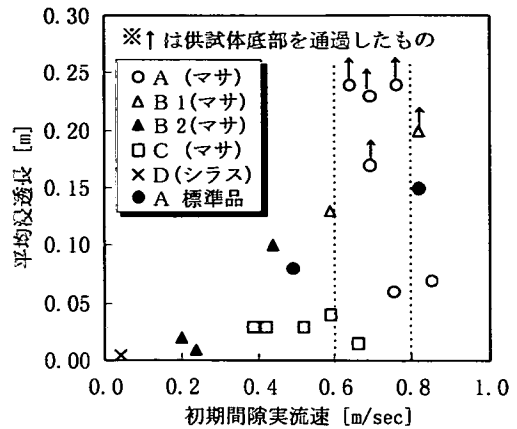


図-5 初期間隙実流速と平均浸透長の関係

生させない程度とした。粉体供給速度は、A地点の現場注入試験の実績 $50\text{g}/\text{min}^{7,8)}$ に対し、単位注入断面積当りの粉体供給量がほぼ同じとなるように $5\text{g}/\text{min}$ とした。なお、現場注入試験の注入区間の孔壁面積は $3,110\text{cm}^2$ （注入孔径 66mm ，注入区間長 1.5m ）で、供試体上部表面積は 346cm^2 （直径 210mm ）である。また、試験中は送気流量，空気温度，空気湿度，露点，供試体上下部圧力，フィーダー内圧力をリアルタイムで測定・管理した。

注入終了後は4週間水中養生（水温 40°C ）した後，試料をモールドから抜き取り，外周面から中心に向けて慎重に削り取った。直径 200mm に達したところで供試体上面および外周面にフェノールフタレイン水溶液を噴霧し，赤色化した部分の上端からの長さを12点測定し，それらの平均を平均浸透長とした。なお，測定箇所の違いによる浸透長のバラツキはほとんどなかった。

(2) 室内注入試験結果

注入圧力と平均浸透長の関係を図-4に示す。なお，後述の考察時を含めて，注入中に改質セメントが潜在亀裂，注入圧により形成された亀裂，およびコーキング部を通じて試料下部から漏出した供試体の結果は除いている。

図-4より，均質なマサである試料A，B1はいずれも 0.1MPa 前後の低圧力で改質セメントが供試体底部を通過した。また，標準品を注入した試料Aでは，注入圧力 0.06MPa で $0.08\sim 0.15\text{m}$ の平均浸透長を得た。ここで，試料Aは注入孔から最大半径 0.8m という実用的な浸透範囲を確保した現場注入試験と同地点から採取した試料であることから，標準品による試料Aの室内注入試験結果は本工法の適用性判定の目安と考えられる。HG IIを注入した試料A，B1の平均浸透長は，いずれも標準品を注入した試料Aのそれを上回っている。よって，HG IIを用いれば，A地点，B1地点ではいずれも実用的な浸透範囲を得ることができると考える。なお，図-4中の試

料Aに平均浸透長が 0.05m 程度のものが見られるが，これは飽和度が他試料より高いことが原因であり，詳細は(3)，d)で述べる。

次いで，試料B2は注入圧力 0.06MPa における平均浸透長が 0.02m 程度と浸透注入が困難であると推測される一方，注入圧力の上昇に伴い平均浸透長が延びる傾向を示した。そこで， 0.3MPa 以上で注入を試みたが， 0.1m の平均浸透長を得た1試料以外は試料内部に亀裂が生じて注入を終了した。この結果より，B2地点においても，新たな亀裂を発生させずに高圧力で注入できればかなりの浸透注入が期待できると考えるが，適用性を正確に判断するには限界圧力より若干低い注入圧力下での浸透性を明確にする必要がある。

一方，CおよびDの各試料の平均浸透長はそれぞれ 0.05m 以下， 0.01m であった。試料Cでは亀裂内に充填されている粘土分が改質セメントの亀裂面の通過および周辺への浸透を妨げている状況が観察された。また，試料Dは細粒分含有率が 20% と高く，改質セメントの浸透自体が困難であった。従って，C地点，D地点における本工法の適用は困難であることがわかった。

(3) 適用地盤に関する考察

前節で示した室内注入試験結果，ならびに過去に実施した現場注入試験後に採取した注入固化土塊の顕微鏡観察結果より，地質性状，初期間隙実流速，初期透気係数，飽和度，間隙幅，細粒分含有率に着目し，本工法の適用地盤について考察した。

a) 地質性状

室内注入試験より，本工法の適用が可能と判断した試料A，B1はともに均質なマサであった。また，新たな亀裂を発生させずに高圧力で注入できれば浸透注入が期待できる試料B2も同様のマサであった。一方，本工法の適用が困難と判断した試料Cのマサは粘土分で充填さ

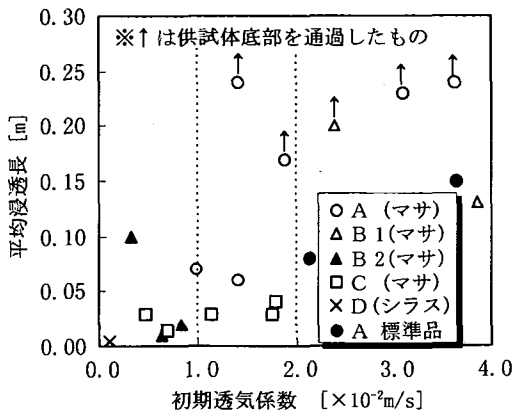


図-6 初期透気係数と平均浸透長の関係

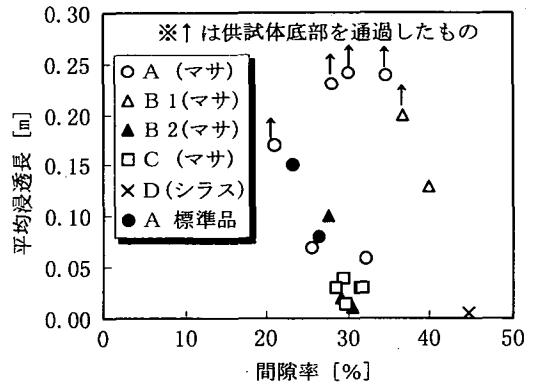


図-8 間隙率と平均浸透長との関係

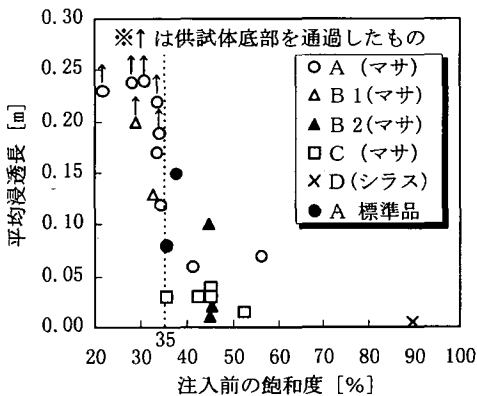


図-7 飽和度と平均浸透長の関係

れた亀裂が多いこと、試料Dのシラスは細粒分が多いことから、改質セメントの浸透を妨げていた。このことより、本工法は均質で粘土分で充填された亀裂が少ないマサ地盤で適用可能であることがわかる。また、泥岩との複雑な互層をなしていない均質で多孔質な砂岩等への適用も期待できる。

b) 初期間隙実流速

図-5に注入開始時の試料上端部の空気流速を間隙率で除して求めた初期間隙実流速と平均浸透長の関係を示す。

図より、本工法の適用が期待できると判断した試料A、B1、B2はいずれも初期間隙実流速の上昇に伴い平均浸透長が延びる傾向を示した。森ら⁴⁾は、一旦間隙内で付着した改質セメント粒子が再飛散する空気流速を標準品の場合で0.8m/sと算定している。図-5に示した試料Aの標準品の平均浸透長が、初期間隙実流速0.8m/s程度の場合に約0.5m/sの場合の2倍程度に伸びているのは、改質セメント粒子の再飛散によるところが大きいと考える。

一方、標準品よりも浸透性に優れたHG IIの場合は、試料Aに見られるように、初期間隙実流速0.6m/s付近でも供試体底部を通過していることから、HG IIが再飛散

する空気流速は標準品より小さい0.6m/s程度と考える。従って、本工法による浸透注入が期待できる地盤にHG IIを注入する場合は、0.6m/sの初期間隙実流速を確保すれば、良好な浸透長が期待できると考える。なお、試料Aの中には、初期間隙実流速が0.8m/s程度で注入しているにもかかわらず、平均浸透長が0.05m程度と短い試料がある。これはこれらの試料の飽和度が他のマサ試料より高いためで、詳しくはd)で述べる。

c) 初期透気係数

図-6に注入初期の空気流速から求めた初期透気係数と平均浸透長との関係を示す。

図より、初期透気係数が $2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 以上の試料にHG IIを注入した場合は、標準品を初期間隙実流速0.8m/sを確保して注入した試料Aと同等あるいはそれより長い浸透長が得られていることがわかる。また、 $1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ の範囲では、飽和度が比較的高かった試料Aの2試料および粘土脈の多い試料C以外の試料Aの2試料は、平均浸透長が伸びている。従って、飽和度が比較的低く、粘土脈の少ないマサ地盤において、初期透気係数 $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 以上が確保できる場合は、良好な浸透長が期待できると考える。なお、具体的な飽和度の基準値についてはd)で述べる。

d) 飽和度

図-7に注入前の飽和度と平均浸透長の関係を示す。

図より、HG IIによる注入の場合、飽和度が35%程度を超えると平均浸透長は0.1m以下に大きく減少することがわかる。このように浸透長が減少するのは、一旦改質セメントが水分子に付着すると、水分子の架橋および水和硬化に伴う非常に大きな吸着力が働くため、再飛散できなくなるためと考える。従って、試料B2および試料Cの平均浸透長が0.1m以下でしかないのは、いずれの試料も飽和度が35%以上と高いことも原因の一つと考えられる。このように、改質セメントの浸透性を左右する飽和度の基準値は35%付近にあると予測される。従って、本

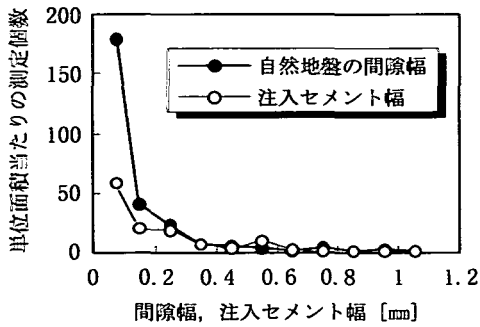


図-9 間隙幅および注入セメント幅の測定頻度 (Aダムサイト均質なマサ)

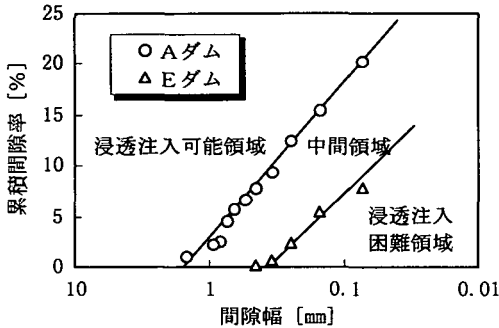


図-10 間隙幅と累積間隙率の関係

工法を飽和度の高い地盤に適用する場合は、粉体注入前に圧縮空気のみを送気する、いわゆる「事前送気」を十分行い、間隙内の水分を出来るだけ乾燥させることが必要と考える。

e) 間隙幅と累積間隙率

図-8に示すように、今回の室内注入試験結果からは、地盤の間隙率と平均浸透長との間に明確な関係が認められなかった。これには、地盤内の水分条件、つまり飽和度も大きく影響しているが、ここでは、間隙率という地盤全体としての平均的な間隙の割合ではなく、個々の間隙の大きさに着目した考察を加える。

そこで、AダムサイトおよびEダムサイト（いずれもマサ）で採取した自然地盤試料と、標準品による現場注入試験後に採取した注入地盤試料に対し、顕微鏡を用いて間隙状況を観察した。試料は黄色の顔料を付加したエポキシ樹脂を採取地盤に含浸硬化させて採取した。また、観察は実体顕微鏡を用い、試料表面の0.05mm以上の間隙幅をメッシュ法（付録参照）で測定した。注入試験後の試料については、セメント部分を予めフェノールフタレイ水溶液による着色で識別した。なお、Eダムサイトは粘土脈が多く分布するマサ地盤で、過去の現場注入試験において浸透性が悪いと判断された地盤である。その物性は平均粒径1.2~1.8mm、自然含水比3.2~6.4%、

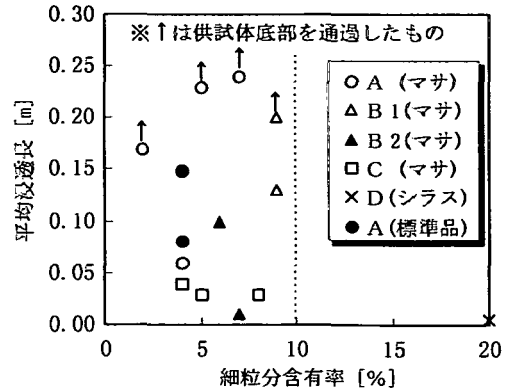


図-11 細粒含有率と平均浸透長の関係

平均乾燥密度 2.18g/cm^3 、平均間隙率19.4%、細粒分(75 μm 以下)含有率4~7%、現場試験より求めた透水係数 $6.6 \times 10^{-6}\text{m/s}$ である⁸⁾。また、注入前の飽和度は未測定であるが、粉体注入前にAダムサイトと同様、事前送気を行い、含水比を十分低下させていることから、先に述べた高飽和度による浸透性低下の影響は小さいと判断した。

図-9にAダムサイトの自然地盤の試料の間隙幅と注入試験後の試料の注入セメント幅の1 cm^2 当たりの測定個数を示す。図より、改質セメント（標準品）は間隙幅0.2mm以上のかかなりの部分に浸透しているが、0.1mm以下ではセメントの浸透していない部分が多いことがわかる。従って、改質セメントの浸透に必要な最小間隙幅は0.1~0.2mmと推測される。

図-10にAダムサイトおよびEダムサイトの自然地盤の試料に対し、メッシュ法で求めた0.05mm以上の間隙幅を2乗したものと観察対象面積(1 cm^2)との比率を、間隙幅の大きいものから順次累積して求めた便宜上の累積間隙率の分布を示す。

図より、現場注入試験で実用的な浸透長を得たAダムサイトの間隙幅と累積間隙率の関係は、浸透注入が困難であったEダムサイトのそれより明らかに間隙幅および累積間隙率がともに大きい値のところに分布していることがわかる。このことより、本工法の適用地盤を事前に予測する指標として、間隙幅と累積間隙率の関係が有効となる可能性があると考えられる。

図-11に細粒含有率と平均浸透長の関係を示す。図より、細粒含有率10%以下であったマサ地盤の各試料については平均浸透長との相関関係は見い出せなかった。これは、平均浸透長の短いマサ試料が、いずれも飽和度35%程度以上と注入困難な状態にあること、さらに試料Cは粘土分で充填された亀裂が多いことも起因していると考えられる。しかし、細粒含有率が高くなると、地盤の間隙幅が狭く、かつ保水力が高まり、浸透性が悪くなることは、定性的には容易に理解できる。このことより、

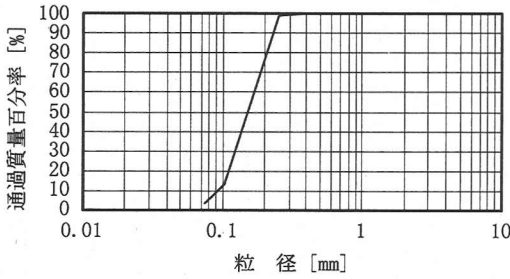


図-12 7号珪砂の粒径加積曲線

表-4 砂供試体の物性

50%粒径	[mm]	0.15
乾燥密度	[t/m ³]	1.456~1.496
間隙率	[%]	43~45
透水係数	[$\times 10^{-5}$ m/s]	3.5~4.2

良好な浸透性が期待できるマサ地盤の条件は、飽和度が35%程度以下で、粘土分で充填された亀裂が少なく、さらに細粒分含有率が今回の試験実績に基づいた10%以下であることが望ましいと言えるが、これらの条件は独立したものではなく、互いに関連し合っている。

一方、シラスである試料Dの平均浸透長が極端に短かったのは、細粒分含有率が20%となることにより、間隙率が大きくても間隙幅が狭くなること、さらに、保水力が高まり飽和度が高くなる(表-2参照)ことによると考える。

(4) まとめ

5カ所から採取した不攪乱試料への室内注入試験結果を、現場注入試験において実用的な浸透範囲を確保したAダムサイトのマサ試料での注入試験結果を基準として検討した結果、良好な浸透長が期待できる注入条件として、①改質セメントHG IIの使用、②地山の限界圧力以下で初期間隙流速0.6m/s以上の確保、③初期透水係数 1×10^{-2} m/s以上、④初期飽和度35%以下、などがわかった。これらの条件が地盤の初期条件として満たされない場合には、地山地下水位の低下や事前送気などの対応が必要となる。

4. 注入仕様の検討

本章では、砂供試体への室内注入試験結果より、前章で示した粉体圧送グラウチングの適用地盤に対し、良好な浸透長を確保し、かつ効率的な注入を行うための標準的な注入仕様について検討した。

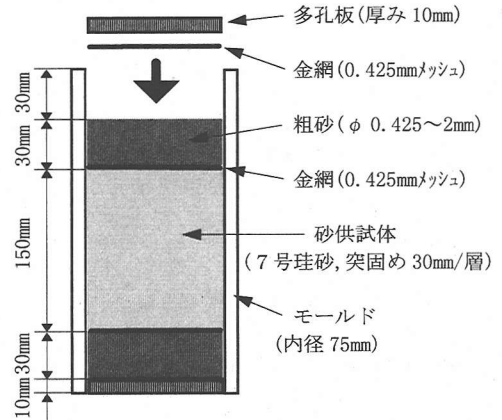


図-13 砂供試体の構成

表-5 砂供試体の注入条件

注入材料	注入圧力 [MPa]	粉体供給速度 [g/min]	供試体数
標準品	0.1	1.0	1
	0.2	1.0, 4.7, 11	3
	0.4	1.0, 5.0, 13.8	3
HG II	0.1	11	1
	0.2	2.0, 11, 30, 50	4

(1) 砂供試体に対する室内注入試験

a) 対象試料の選定

試料砂の選定にはまず、注入場作製の再現性を重視し、乾燥状態の均等な砂を用いることとした。次いで、注入圧力、粉体供給速度等の注入操作条件を広範囲に変化させて注入することから、ある程度の浸透長が見込め、かつ供試体を簡単に通過しないような粒径の砂を選定する必要がある。そこで、5~8号の4種類の珪砂に対し、標準品による予備注入試験(供試体高さ150mm、注入圧力0.1MPa、粉体供給速度1.0g/min)を実施した。その結果、標準品により、供試体を通過することなく、注入時間160分で60~95mmの浸透長を得た7号珪砂を選定した。図-12に7号珪砂の粒径加積曲線を示す。

b) 砂供試体の構成

図-13に砂供試体の構成を示す。

内径75mm、高さ250mmの透明な円筒形のアクリル樹脂製モールドの上端から直径73mm、長さ60mmの鉄製のディスクと金網(0.425mmメッシュ)を挿入した後、0.2kgの7号珪砂を入れ、層厚30mmになるよう突固めた。この作業を5層(全長150mm)繰り返した後、金網、粗砂(粒径0.425~2mm、層厚30mm)、多孔板(厚み10mm)を順に装着した。次いで、モールドを反転し、鉄製のディスクを取り出した後、同じ要領で粗砂、多孔板を装着した。砂供試体の物性を表-4に示す。

c) 試験方法

注入試験は不攪乱試料の室内注入試験と同じ装置(図

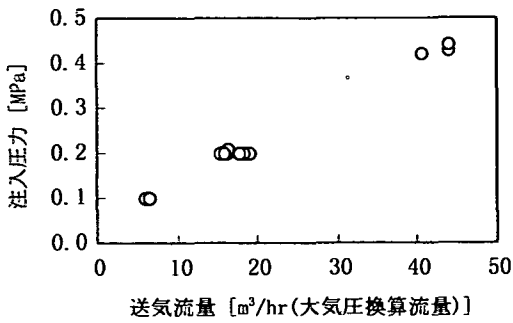


図-14 注入開始時の送気流量と注入圧力の関係

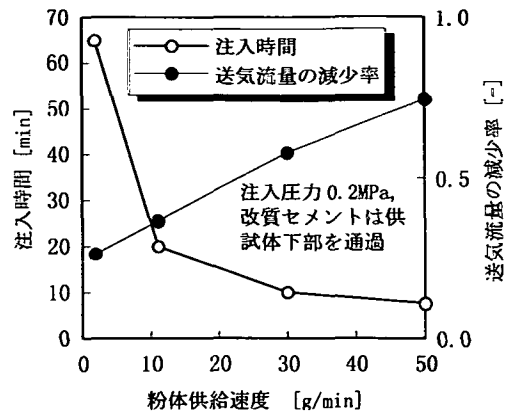


図-16 粉体供給速度に対する注入時間および送気流量減少率の関係(HG II)

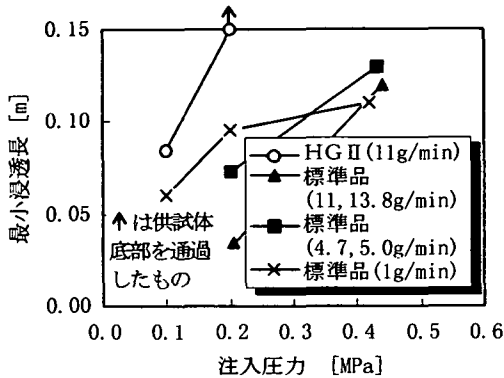


図-15 注入圧力と最小浸透長の関係

(2) 注入仕様に関する考察

a) 注入圧力

図-15にほぼ同一の粉体供給速度で複数の注入圧力の結果のあるものについて、注入圧力と最小浸透長の関係を示す。

図より、最小浸透長は注入材料および粉体供給速度によらず注入圧力の増加に伴い伸びていることがわかる。また、HG IIの最小浸透長は、同じ注入圧力の標準品より長く、浸透性が高いことがわかる。一方、注入圧力0.2 MPaの標準品の最小浸透長は、粉体供給速度が速くなるにつれて短くなる傾向を示し、特に、粉体供給速度11 g/minの試料では、注入圧力0.1 MPaで注入した試料よりも短いことがわかる。この理由は、注入圧力0.2 MPaでは、標準品の再飛散が期待できる最低限の初期間隙実流速(0.8 m/s)付近の流速であったことから、粉体供給速度が大きくなると、再飛散が十分行われず閉塞しやすくなるためと考える。このことから、再飛散が可能となる初期間隙実流速近傍の注入圧力では、粉体供給速度を小さくする必要があり、注入効率が低下する。

従って、HG IIを用いた場合の粉体圧送グラウチングに置き換えて考えてみると、注入圧力は初期間隙実流速0.6 m/s以上を確保するとともに、地盤の限界圧力内で出来る限り高い圧力とすることで、浸透範囲の拡大、あるいは粉体供給速度を速くして注入効率の向上を図ることが望ましいと考える。

b) 粉体供給速度

図-16に、粉体供給速度によらず全てのケースで改質セメントが供試体下部を通過した、HG IIを注入圧力0.2 MPaで注入した場合の粉体供給速度と注入時間、および注入開始時と注入終了時の送気流量の差を注入開始時のそれで除して求めた送気流量の減少率との関係を示す。

図より、粉体供給速度の増加に伴い、注入時間が短くなっていることから、粉体供給速度を大きくすることに

-2参照)、試験方法で実施した。

表-5に注入条件を示す。注入材料には標準品およびHG IIを用い、注入圧力は0.8 m/s付近の初期間隙実流速が得られる0.2 MPaを基準に標準品が0.1, 0.2, 0.4 MPaの3段階、HG IIが0.1, 0.2 MPaの2段階とした。また、粉体供給速度はマイクロフィーダーの調整限界の1~50 g/minの範囲で広く設定した。注入終了後は1週間水中(水温40℃)養生した後、砂供試体をモールドから押し出し、改質セメントが硬化(濃緑色化)した部分の供試体上面からの最小長さ(以下、「最小浸透長」と記す。)を測定した。浸透長は周面に近いほど若干長くなるが、供試体が均質であるため浸透長の差は大きいものではなく、かつ最小浸透長を代表的な浸透長とすることに大きな問題はない。

d) 試験結果

各供試体の注入開始時の送気流量は、図-14に注入圧力と送気流量の関係を示すように、各圧力段階でほぼ同等であった。従って、透気性の観点から、砂供試体はバラツキが小さい範囲で作製されていると考える。初期間隙実流速は、注入圧力0.1, 0.2, 0.4 MPaでそれぞれ0.45, 0.8, 1.15 m/s程度であった。

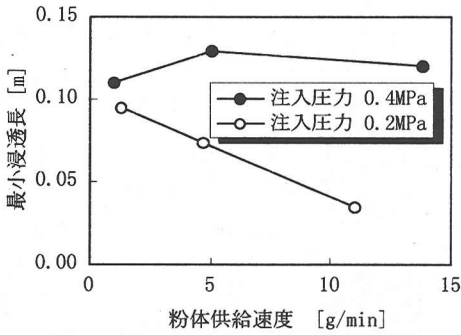


図-17 粉体供給速度と最小浸透長との関係(標準品)

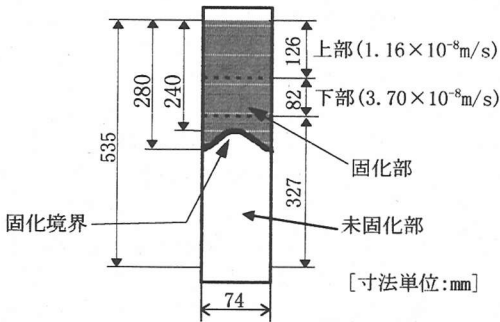


図-18 注入後の改質セメント硬化による固化部および供試体分割位置と透水係数

より注入時間の大幅な短縮が期待できる。しかし、送気流量の減少率は粉体供給速度が増加するにつれ上昇する傾向を示していることから、実地盤での注入を想定した場合の最終の浸透範囲は、粉体供給速度の増加とともに狭くなると推測される。従って、粉体供給速度は、ある浸透範囲、注入圧力に対し、最も注入効率の良い最適値が存在すると考える。

また、図-17に、標準品における粉体供給速度と最小浸透長の関係を示す。なお、図中に示した値は、送気流量が $1\text{m}^3/\text{hr}$ (大気圧換算流量)以下となり、注入を終了した試料である。

図より、注入圧力 0.2MPa の場合は、粉体供給速度が $1\text{g}/\text{min}$ から増加するにつれて最小浸透長が減少する傾向を示す。しかし、注入圧力 0.4MPa の場合には、粉体供給速度が $1\text{g}/\text{min}$ から $13.8\text{g}/\text{min}$ まで増加しても最小浸透長はあまり変化せず、最小浸透長が減少し始める粉体供給速度はさらに大きな値であることが予想される。このことより、再飛散が期待できる初期間隙実流速よりも速い流速で注入すれば、最適な粉体供給速度は高濃度側に大きく移行し、注入効率を飛躍的に高められることがわかった。

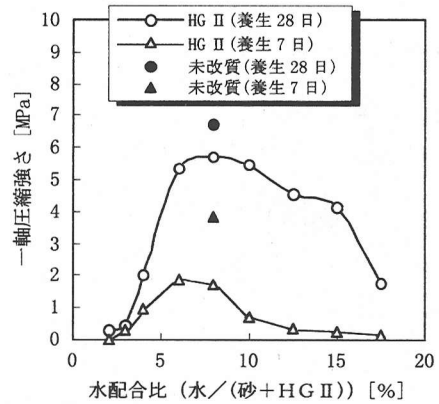


図-19 砂(91%) / HG II (9%)混合固化体の一軸圧縮強さ

5. 改質セメントHG II注入固化試料の特性

改質セメント標準品の注入固化体については、Aダムサイトでの現場注入試験1年後の開削調査結果より、地山の自然含水比(3.9~6.7%, 平均4.6%)のみで浸透範囲全域にわたり固化体を形成していることを確認するとともに、その透水係数が原地盤の $3.2 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (平均 $4.8 \times 10^{-5} \text{m/s}$)に対し、 $2.9 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-7} \text{m/s}$ (平均 $1.6 \times 10^{-7} \text{m/s}$)とダム基礎の遮水性を十分満足していることが示されている⁹⁾。一方、本論文では、HG IIが浸透性の面より粉体圧送グラウチングに最適な材料であることを示してきた。

本章では、HG IIについて、遮水性、硬化反応性、固化条件等の面から、粉体圧送グラウチング材料として適用性を検討する。

(1) HG II 固化体の遮水性

直径 74mm 、高さ 535mm の7号珪砂供試体に対し、一定注入圧力(0.4MPa)の下でHG IIによる粉体注入試験を実施し、28日水中養生後(水温 40°C)の固化体の透水係数を求めた。砂供試体は前章の室内注入試験と同様の方法で作製し、乾燥密度 $1.49 \text{t}/\text{m}^3$ 、間隙率 44% 、透水係数 $4.6 \times 10^{-5} \text{m/s}$ である。

試験は、先述の室内注入試験と同じ装置(図-2参照)、試験方法で実施した。粉体供給速度は、砂供試体への室内注入試験結果における浸透長および注入時間の両面からの検討結果より、かなり浸透効率の良い注入が行えると判断した $3\text{g}/\text{min}$ とした。注入は170分で終了し、28日水中養生後のセメントの硬化による固化長は、図-18に示すように、供試体上部から $240 \sim 280\text{mm}$ であった。

注入後の供試体は、28日間水中養生した後、固化部分を図-18に示すように上、下2体に切断して透水試験に供した。

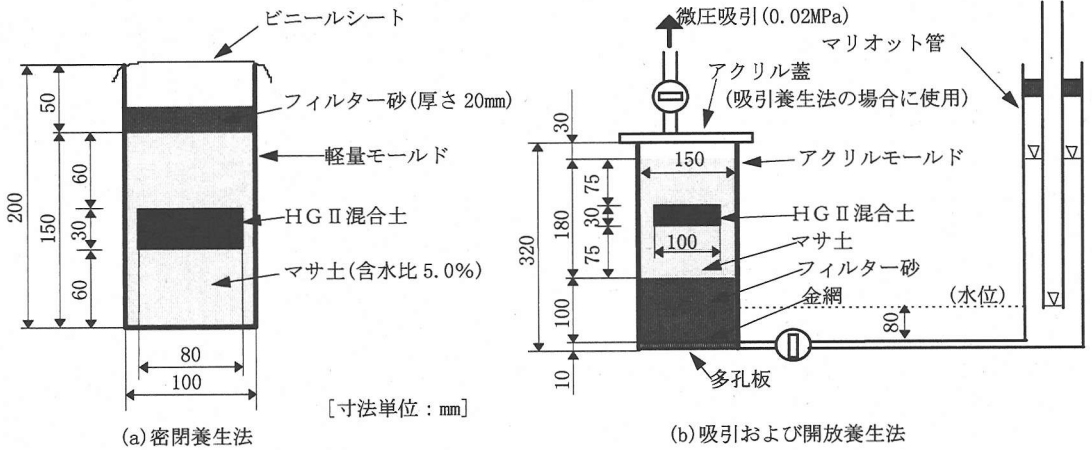


図-20 室内固化試験供試体の構成

透水試験の結果、HG II 注入固化体の透水係数は、上、下部それぞれ 1.16×10^{-8} 、 3.70×10^{-8} m/s であり、ダム基礎として十分な遮水性を有することがわかった。

(2) 改質セメントHG IIの硬化特性

HG IIは、セメント粒子表面を撥水性の高い水溶性シリコーン樹脂で均質にコーティングしているため、未改質のセメントに比べ水和反応の遅れが予想される。

図-19に砂とHG IIの混合固化体の各種水配合比における20℃の湿空養生7日および28日の一軸圧縮強さを示す。ここで、砂には豊浦標準砂を用い、砂とHG IIの混合重量比は約10:1である。また、28日養生後のHG II混合固化体の一軸圧縮強さが最も大きい水配合比8%の場合のみ、同じ配合比で未改質セメントの混合固化体も同様に実施した。

図より、水配合比8%では、砂とHG IIの混合固化体は、養生7日強度で未改質セメントの50%程度の強度発現となり、水和反応の遅れを示していることがわかる。しかし、養生28日強度では、未改質セメントの80%程度の強度を発現しており、水和の遅れをかなり回復していることがわかる。このことより、HG IIは未改質セメントに比べ初期の水和反応は遅れるが、その材令とともに遅れは回復することがわかった。

(3) HG II 混合土の固化条件の検討

不飽和地盤に注入されたHG IIの硬化に必要な水分条件を求めるため、マサ土の不飽和攪乱試料の中にHG II混合土を設けた供試体の室内固化試験を実施した。

a) 室内固化試験

HG II混合土は、室内注入試験に供した不攪乱試料Aと同じマサ試料を自然含水比相当の含水比5%程度とそれより大きい10%程度に調整したものに、HG IIを乾燥

重量比で5%添加・混合して作製した。なお、HG IIの添加量は、不攪乱試料Aへの室内注入試験より得られたHG IIの浸透範囲と注入量の結果から求めたものである。

養生方法は、HG IIの水和反応に与える周辺地盤条件の影響度合いが未知のため、①密閉することにより供試体内の含水量を一定とする密閉養生法、②供試体内の含水比一定の下で供試体下部のフィルター砂内に水面を設定し、上部より強制吸引する吸引養生法、③②と同じ条件下で、上部から水分を自然蒸発させる開放養生法の3種類とした。

図-20に供試体の構成を示す。密閉養生法に使用する供試体は、内径100mm、高さ200mmの軽量モールドに含水比約5%に調整したマサ土を1層50mmづつ3層突固めた。突固めは方法はJIS A 1210に準拠し、締固め仕事量はStandard Proctorの1E₁相当とした。HG II混合土を含む2層目は、まず軽量モールド内にマサ土を厚み10mm程度満たした後、内径80mm、肉厚1mm、高さ35mmの円形リングを中央に置き、リングの内側にHG II混合土を、外側にマサ土をリング上端まで満たした後、リングを抜き取り、上部をマサ土で満たして突固めた。その後、供試体上部よりフィルター砂を厚さ20mm程度投入し、規定量の水道水を加え、上部をビニールシートで密閉した。

吸引養生法および開放養生法に使用する供試体は、内径150mm、高さ320mmの亚克力モールド下部に厚さ30mmの鉄製ディスクと金網を装着した後、1層60mmづつ3層突固めた。突固めおよびHG II混合土の仕込み方法は密閉養生法と同じとした。突固め終了後はフィルター砂を厚さ100mm分投入し、多孔板(厚み10mm)金網を装着した後、モールドを反転し、供試体上部より鉄製ディスクと金網を取り出し、マリョット管を装着し、開放養生法に用いた。この供試体に亚克力蓋を装着したものを吸引養生法に使用した。

表-7 室内固化試験の試験条件

養生方法	密閉養生				吸引養生		開放養生
試料 No.	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	C-1
初期含水比 [%]	5.0	5.6(10.1)	5.6(13.0)	5.6(18.0)	5.2	9.4	5.2
初期飽和度 [%]	22.0	24.7(44.5)	24.8(58.0)	25.1(80.8)	25.7	47.6	28.5
加水量 [cm ³]	0	90	150	250	—	—	—
養生日数 [day]	14, 28, 56	14, 28, 56	14, 28, 56	14, 28, 56	14, 28, 56	14, 28, 56	56
初期乾燥密度 (マサ全体) [t/m ³]	1.665 ~1.688	1.672 ~1.684	1.666 ~1.690	1.683 ~1.693	1.735 ~1.814	1.763 ~1.768	1.814
試料数	3	3	3	3	3	3	1

注：() 内は加水後の値を示す。

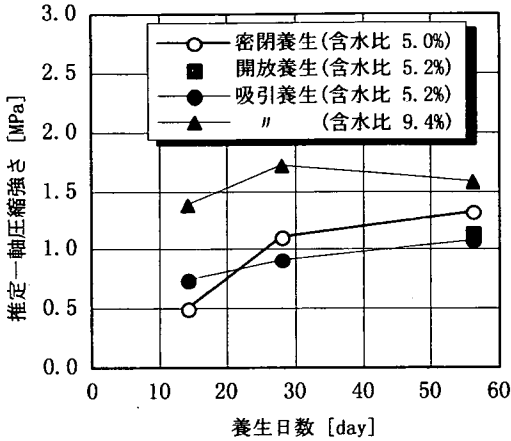


図-21 養生日数と強度の関係

試験ケースは、密閉養生法が含水比5%で締め固めて作製した供試体に対する加水量0, 90, 150, 250cm³ (加水後の含水比はそれぞれ5.0, 10.1, 13.0, 18.0%) の4種類, 吸引養生法が含水比5.2, 9.4%の2種類, 開放養生法が含水比5.2%の1種類である。表-7に試験条件を示す。なお、密閉養生試料については、加水後の試料全体の平均含水比、飽和度も示してある。

養生の開始は、密閉養生法が供試体上部をビニールシートで密閉した直後、吸引養生法は底部から80mmの水位までマリOTT管に給水し、上部から0.02MPaで吸引を開始した時点、開放養生法がマリOTT管に給水した時点とした。

養生14, 28, 56日目 (開放養生法は56日目のみ) に、各試験条件につき1体の供試体上部の不飽和攪乱試料をHG II混合土が表面に露出するまで取り除いた後、露出面中心付近の任意の5点で針貫入試験¹²⁾を行い、得られた針貫入勾配を、岡田ら¹³⁾が提案した相関式に代入し、推定一軸圧縮強さを求めた。なお、養生7日目の測定については、(2)節の結果から、HG IIの初期水和の遅れが著しく、強度が十分に発現しないと判断して実施しなかった。また、任意の5点での測定値には著しく大きなバラツキはなかった。

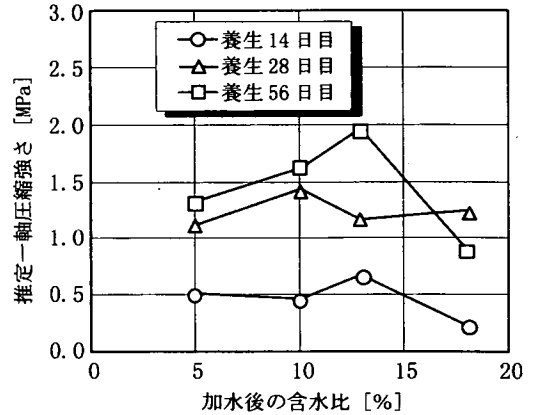


図-22 加水による強度変化 (密閉養生)

b) 試験結果

図-21に目標含水比5, 10%の場合の養生日数と推定一軸圧縮強さの関係を示す。ただし、密閉養生で加水したものは除いている。

図より、目標含水比5%の試料は養生方法によらず、養生14日目には強度が発現し、28日目ではほぼ固化が完了し、典型的な軟岩の強度に近い1MPa程度の一軸圧縮強さが得られることがわかる。このことから、HG IIは含水比5%程度の地盤内で十分硬化することがわかった。また、目標含水比5%の場合、試料の密度差が養生方法ごとにある程度あったにもかかわらず、養生方法による強度のバラツキが少ないことから、HG IIは浸透注入範囲内の水分のみで硬化したものであり、かつこの強度発現はセメントの硬化によるものであると推測する。一方、吸引養生法の含水比9.4%の試料も28日目に固化がほぼ完了し、含水比5%の試料より大きな強度を示した。これは、含水比5%程度でも十分な強度発現が期待できるが、それよりも含水比が大きい場合には、より大きな強度発現があることを示唆している。

図-22に密閉養生した試料の加水量に対する推定一軸圧縮強さの経時変化を示す。

図より、加水量0cm³ (含水比5.0%)、90cm³ (加水後含水比10.1%)、250cm³ (同18.0%) の試料は、養生

28日目でHGⅡの硬化がほぼ完了しているのに対し、150cm³（同13.0%）の試料は、28日目以降もさらに強度が増加する傾向を示していることがわかる。また、養生56日目の一軸圧縮強さは、加水量が少ないうちは加水量の増加とともに高くなる傾向を示し、加水量150cm³で約2.0MPaと最も高くなり、250cm³では0.93MPaと大きく低下している。これらのことから、5%以上の含水比領域では、当初は含水比の上昇に伴い強度が増加するが、13%程度をピークとして強度発現がやや低下する傾向、すなわち最適な含水比が存在する可能性が見られる。

(4) 注入後の養生方法に関する考察

室内固化試験結果より、HGⅡは自然含水比5%前後のマサ地盤内で養生28日目にはほぼ硬化が完了し、ダム基礎として十分な遮水性を有し、かつ軟岩の強度に近い地盤を形成できることを確認する一方、自然含水比よりも高い含水比領域で、最大固化強度が得られる最適な含水比の存在を示した。

これらの成果から、HGⅡを注入した場合の自然含水比5%程度の地盤に対する注入後の養生方法は、過去の標準品による現場注入試験と同様、注入孔の水洗い、孔壁保護のためのセメンテーションにより間接的に給水し、粉体圧送グラウチングにより乾燥した改良地盤の水分を補う程度で十分と考える。なお、セメントの硬化にとって最適な含水比付近の含水比での養生は、不飽和の実地盤では長期間にわたる含水比の管理が困難であること、得られる固化強度も自然含水比5%で養生したものとの差が5割程度と極端に大きくないことから、必要ないと考える。

6. 適用地盤および標準的な注入仕様の提案

実地盤の不攪乱試料および砂供試体への室内注入試験を主体とした試験結果を、実用的な改良範囲を得た過去の現場注入試験結果を基準として検討して得られた成果に基づき、粉体圧送グラウチングの適用地盤および適用地盤の標準的な注入仕様を以下に提案する。ただし、研究対象地盤の中心はマサ地盤であったため、以下の提案もマサ地盤を主対象とした記述としている。

(1) 粉体圧送グラウチングの適用地盤

- ①地質性状：均質で粘土分で充填された亀裂が少ないこと
- ②初期間隙実流速：0.6m/s以上（HGⅡ使用時）
注入圧力は地山の限界圧力以下であること。
- ③初期透気係数： 1×10^{-2} m/s以上（HGⅡ使用時）
- ④飽和度：35%程度以下

飽和度が35%以上の地盤でも、事前送気により地盤内を十分乾燥できれば適用可能となる場合がある。

⑤細粒含有率：10%以下

なお、初期間隙実流速および初期透気係数による適用性評価方法は、現場での送気試験が有効であるが、室内で実施する場合は、3章に示した室内注入試験装置を用いて対象地盤から採取した不攪乱試料供試体に新たな亀裂を発生させない圧力以下（地山の限界圧力以下での注入を想定）で送気試験を行い、②、③に示した基準値を満たした場合に適用可能と判断する。なお、標準品を使用する場合は、初期間隙実流速0.8m/s以上、初期透気係数 2×10^{-2} m/s以上を適用条件とする。

(2) 適用地盤に対する粉体圧送グラウチングの標準的な注入仕様

- ①注入孔の削孔：空気式あるいは気泡式等、水を使用しない削孔方法とする
水を用いての削孔は、地盤内の含水を増加させるため、事前送気に時間を要し、注入効率の低下を招く。
- ②事前送気：送気流量を管理しながら地山の限界圧力付近まで徐々に昇圧し、送気流量が安定した時点で終了する
- ③注入区間長：地質の層厚に応じて適切な長さに設定する
あまり数多くの粘土分で充填された亀裂が存在する場合は、本工法の適用が好ましくないこともあり得るが、適用する際には粘土分で充填された亀裂間隔を考慮した試験区間長の設定が必要となる。
- ④注入材料：HGⅡを使用する
- ⑤注入圧力：地山の限界圧力以下で、それに出来るだけ近い圧力とする
- ⑥粉体供給速度：設定した浸透領域が確保でき、注入時間が最も短縮できる速度とする

初期間隙実流速が0.6m/s付近の場合は、粉体供給速度を遅くし、確実に浸透注入させる。一方、初期間隙実流速が0.8m/s以上と大きい場合は、粉体供給速度を出るだけ速くし、効率良く浸透注入させる。

- ⑦養生：自然含水比5%程度の地盤であれば特に必要ないが、空気圧入により乾燥した場合でも、注入孔の水洗い、あるいはセメンテーション等の間接的な給水により補われる可能性が高い
- ⑧養生期間：自然含水比5%程度の地盤であれば4週間程度とする
自然含水比が5%よりかなり低い場合は、予め5章(3)に示したHGⅡ混合土による室内固化試験を実施し、混合土の固化状況および固化時間を確認する。なお、注入

対象地盤の浸透範囲の目安は、3章に示した室内注入試験を供試体に新たな亀裂を発生させない範囲で極力大きい注入圧力、粉体供給速度5g/min程度で実施し、得られた平均浸透長が図-4、図-5に示した標準品による試料Aのそれと同等の長さであれば、最大半径80cm程度の浸透長を確保できると判断する。

7. おわりに

粉体圧送グラウチングの適用地盤および適用地盤に対する注入仕様を明らかにするため、室内注入試験を実施し、その結果を実用的な改良範囲を得た過去の現場注入試験結果を基準に検討するとともに、浸透性のさらなる向上を目指し、従来の改質セメント標準品を改良した改質セメントHGⅡについて、浸透性、遮水性、硬化特性の面から検討し、以下の知見を得た。

- (1) 改質セメントHGⅡは、標準品に比べ、浸透性能が格段に高く、その注入固化体は、初期水和に多少の遅れが見られる以外は、通常の未改質セメントと同等の遮水性、硬化特性を有しており、粉体圧送グラウチングに最も適した材料であることがわかった。
- (2) 粉体圧送グラウチングが適用できる地盤は、マサ地盤を中心とした検討結果より、均質で粘土分で充填された亀裂が少なく、飽和度が35%程度以下で、限界圧力付近の注入圧力で改質セメントの再飛散可能な透気性を有する地盤であることがわかった。特に、HGⅡを用いる場合は、初期間隙実流速0.6m/s以上、初期透気係数 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 以上必要である。
- (3) 粉体圧送グラウチングの適用地盤を事前に予測する指標として、間隙幅と累積間隙率の関係が有効となる可能性があることがわかった。
- (4) 改質セメントの再飛散流速よりさらに大きな初期間隙実流速を確保すれば、粉体圧送グラウチングは最も広範囲に効率よく注入できることがわかった。
- (5) 粉体圧送グラウチングの適用地盤および適用地盤に対する標準的な注入仕様を提案した。詳細は6章に示した。

改質セメントHGⅡを用いた粉体圧送グラウチングは、従来の標準品以上の浸透範囲、および粉体供給速度を速くすることにより、注入時間の大幅な短縮化が可能となり、均質で粘土分で充填された亀裂が少なマサ地盤や、泥岩との複雑な互層をなしていない均質で多孔質な砂岩等の不飽和地盤での実用化が期待できる。今後は、HGⅡによる現場注入試験を行い、実用性を実証するとともに、飽和地盤における注入方法の確立、ダム以外への適用の可能性等の研究課題に取り組み、粉体圧送グラウチングの実用化を目指したい。

なお、本研究は建設省土木研究所共同研究「粉体圧送グラウチングによる基礎岩盤遮水性改良に関する研究」（建設省土木研究所、川崎地質株式会社、株式会社熊谷組、清水建設株式会社、秩父小野田株式会社、戸田建設株式会社、日特建設株式会社）における共同研究成果の一部であることを付記する。

付録

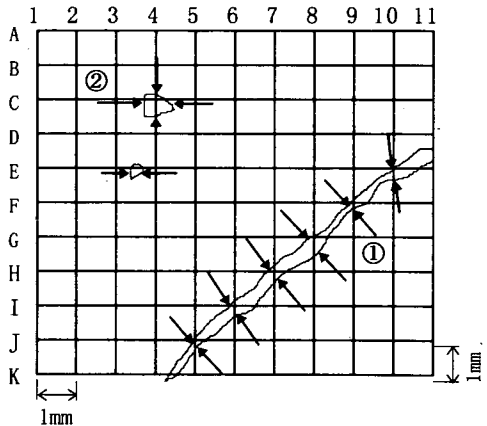
メッシュ法手順

- (1) 顕微鏡写真等の観察試料から1cm×1cmの範囲を任意に選び縦横ともに10等分のメッシュを引く。
- (2) 各メッシュ上に位置する間隙幅は次のように測定する。

脈状の場合：各メッシュ上の交点における間隙の最短幅を測定(図中①)。

不定形の場合：各メッシュ上の間隙の長さを測定(図中②)。

なお、各メッシュ上に位置していない不定形の間隙、および0.05mm以下の間隙幅のものは測定しない。



参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会編：軟岩—調査・設計・施工の基本と事例—，土木学会，pp.1-22，1984。
- 2) 堀家茂一，森 邦夫，市川 慧，柴田 徹：多孔質岩盤の透気特性と粉体グラウト効果に関する研究，土木学会論文集，No.397/VI-9，pp.51-58，1988。
- 3) 堀家茂一，北 健二，森 邦夫：粉体注入工法の開発，第7回エアロゾル科学・技術研究討論会，pp.171-173，1989。
- 4) 森 邦夫，柴田 徹，堀家茂一：地盤中への粉体注入現象の研究，土木学会論文集，No.445/III-18，pp.27-35，1992。
- 5) 森 邦夫，柴田 徹，堀家茂一：地盤中への粉体注入現象の解析，土木学会論文集，No.481/III-25，pp.21-30，1993。
- 6) 高橋堅太郎：ドライグラウト工法による現位置注入試験，ダム技術，No.27，pp.45-56，1988。

- 7) 竹林征三, 高樋堅太郎, 横塚尚志, 堀家茂一, 北健二: ドライグラウチング工法とその実用化試験, 大ダム, No. 139, pp. 65-69, 1992.
- 8) Takebayashi, S., Fujisawa, T., Yasuda, N., Kobayashi, M., Yoneda, Y. and Tahara, N.: Applicability of Cement Powder Grouting Method, *Proc. Second International Conference on Ground Improvement Geosystems*, pp. 83-88, 1996.
- 9) 高樋堅太郎, 上大田孝成: シラスに対するドライグラウト工法による原位置注入試験, ダム技術, No. 37, pp. 4-14, 1990.
- 10) 中村 昭, 山口嘉一, 小沼栄一, 佐々木豊: 粉体圧送グラウチング用改質セメントの開発, 粉体工学会誌, Vol. 33, No. 9, pp. 734-739, 1996.
- 11) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, pp. 509-510, 1990.
- 12) 土木学会岩盤力学委員会編: 軟岩の調査・試験の指針(案)-1991年度版一, 土木学会, pp. 56-59, 1991.
- 13) 岡田 滋, 泉谷泰志, 飯塚友之助, 堀内澄夫: 針貫入試験による軟岩地山強度の推定, 土と基礎, Vol. 32, No. 2, pp. 35-38, 1985.
- 14) 建設省土木研究所, ほか: 粉体圧送グラウチングによる基礎岩盤遮水性改良に関する共同研究報告書, No. 129, pp. 40-60, 1995.

(1996. 12. 16 受付)

OPTIMUM GROUND CONDITIONS AND STANDARD SPECIFICATIONS FOR CEMENT POWDER GROUTING METHOD

Takahiko FUJISAWA, Akira NAKAMURA, Yoshikazu YAMAGUCHI,
Masahiro KOBAYASHI, Eiichi ONUMA and Hidetoshi YAMAGATA

The cement powder grouting method (CPGM), which surface-treated microfine cement powder is injected with dry compressed air into interstices, has been developed for the purpose of enhancing the watertightness of soft rock grounds. This paper presents the physical properties of the surface-treated cement for the CPGM. Secondly, we report that the laboratory injection tests using the undisturbed samples taken from soft rock sites and sand specimens, the microscope observation of grouted rock samples, and watertightness and hardening characteristics of surface-treated cement. Finally, we propose optimum ground conditions and standard specifications for the CPG