

高透水性岩盤への急硬性グラウトの適用性評価

角江 俊昭¹・石井 清²・吉越 洋³

¹正会員 工博 東京電力㈱ 神流川水力建設所 (〒370-0831 群馬県高崎市新町6-19)

²フェロー会員 工博 東京湾横断道路㈱ (〒104-0002 東京都品川区東品川4-10-27)

³フェロー会員 工博 東京電力㈱ 建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

高透水性岩盤に対する基礎処理における注入工法に関して、グラウトカーテンを効率的に形成し所要の止水処理を図るためにはどのような注入材を選択するべきかは、最も重要な議論のひとつである。本論文では開口割れ目を有する岩盤に対して通常のセメントグラウトによる基礎処理では効率的なグラウトカーテンの形成が難しいことを実証的に示す。その上でダム基礎処理においてわが国で初めての採用となるゲルタイムが調整できる急硬性グラウトの適用性を検討し、実施工への本格適用を図り、本工法が極めて効率的かつ有効なものであることならびに急硬性グラウトは品質が長期的にも安定し耐久性が高いことを証するものである。

Key Words : open-jointed rock, dam foundation grouting, cement grouting, rapid hardening grout, gel time

1. はじめに

ダムの基礎岩盤には、ダム本体の力学的かつ水理的安定性を確保する上で支持力や遮水性が基本的な要求性能として求められる。また同時にダムにより湛水する調整池や貯水池の周辺岩盤においても、ダムの貯水機能を確保する上で一定の遮水性が重要となる。近年ダムサイトとして堅硬で水密性に優れた地点は少なくなり、岩盤は堅硬であっても割れ目が発達して透水性が高いといったダムサイトも少なくない。この種の岩盤として代表的なのが石灰岩である。ヨーロッパではダムの歴史とともに古くから石灰岩に起因する漏水問題が取り上げられ様々な対策が講じられてきた¹⁾。我が国においても石灰岩地帯での問題に加えて、火山岩地域における節理や自破碎性の割れ目などが発達した溶岩や溶結凝灰岩などに対する基礎処理の事例が多い²⁻⁵⁾。

高透水性岩盤に対する止水処理方法として、大きく分けて注入工法と表面遮水工法があるが、本論文では一般的に多く採用される注入工法に関して論及するものである。透水性岩盤に対する注入工法において重要なことは開口した割れ目をいかに効果的に充填し岩盤の遮水性を効率的に達成するかという点に尽きる。セメントグラウチングにおいては、グラウトの濃度を高めてゆき、さらに粘性を増加させるためにベントナイトを添加し、あるいは、大量に注入される箇所ではモルタル注入を実施するなど

して、対処する方法が一般的である。しかしながらダム基礎部や湛水池周辺に施工するグラウチングにおいてボーリング孔から注入する場合、ベントナイトセメントなどある程度流動性のあるグラウトに限定されているのが実情である。

本論文では、開口節理が発達した輝石安山岩に対するグラウチングにおいて、従来のセメントグラウトを用いた注入工法では大量に注入されるもののグラウトカーテンを効率的に形成するには限界があることを実証的に示す。そこでこのような開口割れ目を有する岩盤に対してはゲルタイムを調整できるセメント急硬材を用いたグラウト（以下急硬性グラウト）を選定することとした。この急硬性グラウトはダムの基礎処理においてわが国で初めての採用となることから、品質確認試験や現場での施工試験を通じてその適用性を検討した。これらの試験結果を踏まえ注入仕様を策定し、止水を目的とした湛水池周辺グラウチングへ本格適用を図り、急硬性グラウトを活用した基礎処理工法の効率性、有用性ならびに耐久性を注入実績や浸透流に関する各種計測によって確認した。

2. 本研究の背景

本検討の対象とした地点の水理地質性状とりわけ開口割れ目の特性ならびにこれを踏まえた実施したセメン

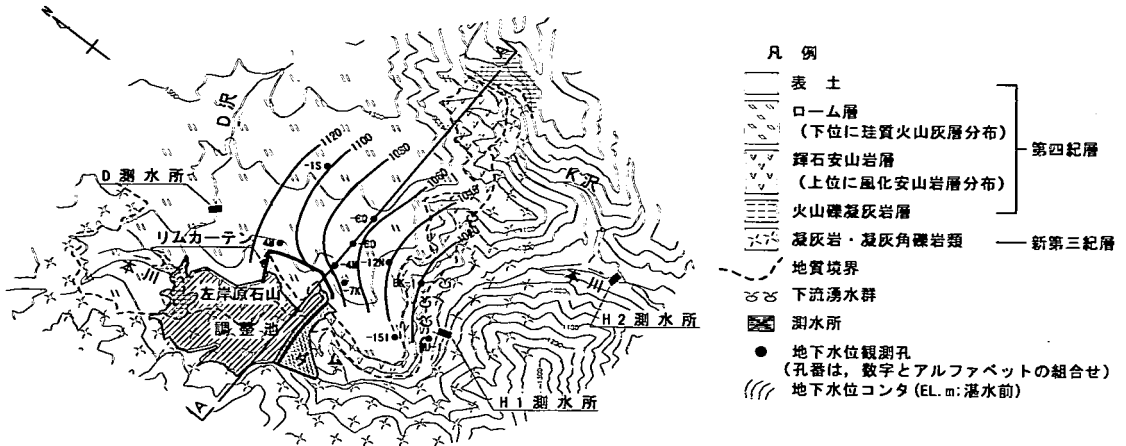


図-1 (1) 調整池周辺の地質及び地下水分布図

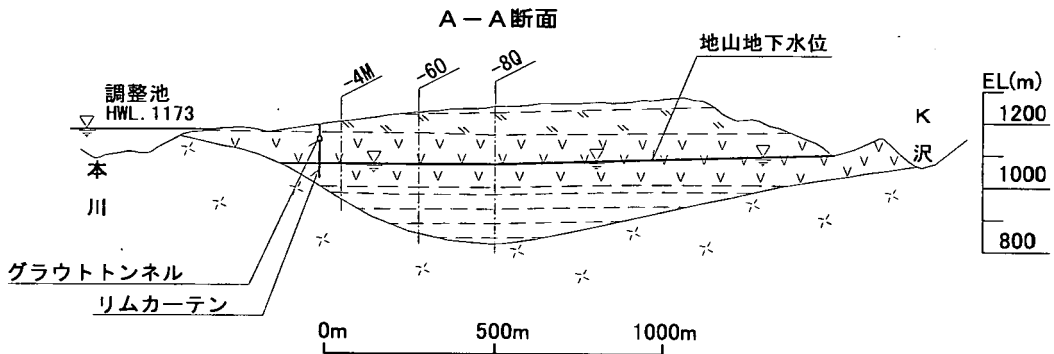


図-1 (2) 調整池左岸の地質断面図

トグラウチングによる止水対策工の実績と評価に関して述べる⁶⁾。

(1) 地質と止水対策工

a) 輝石安山岩層の節理特性と透水性

調整池周辺の地質は、図-1(1)、(2)に示すとおりであり、調整池左岸一帯に第四紀火山噴出物が広く分布している。

節理が発達した輝石安山岩層は、水平構造に近く厚く分布し、その下位には比較的固結度の低い火山礫凝灰岩や第三紀の凝灰岩類が又上位には難透水性の珪質火山灰を含むローム層が分布している。これら輝石安山岩層を挟む上下の地層の透水性は 10^{-5}cm/s オーダーと低い。輝石安山岩層の特徴として、その最上部には、多孔質な安山岩塊を取り込む形で形成された火山灰を基質とする

地層（以下風化安山岩と称す）が 10m 程度の厚さで分布している⁶⁾。

地山の地下水位は、左岸山体の調査ボーリングの結果、図-1(1)、(2)に示すとおり輝石安山岩の下位に分布し、左岸奥部から下流の湧水箇所に向かって流下している。

輝石安山岩は、岩石自体は堅硬緻密であるが、溶岩の特徴である板状節理が著しく発達した岩盤である。

板状節理は密着したものが多く、その傾斜は水平に近く、開口割れ目はこれに交差して認められる。図-2に示す調整池左岸リムカーテン沿いの調査孔（5孔、延長253m）にて実施したボアホールテレビによる観察（以下「BTV」）の結果、節理幅の分布は、図-3に示すとおりであり、割れ目幅の小さな節理が大部分を占めるが、5mm以上の開口幅を有するものが全体の約5%、10mm以上のものが全体の約2%存在している。ステージ（5

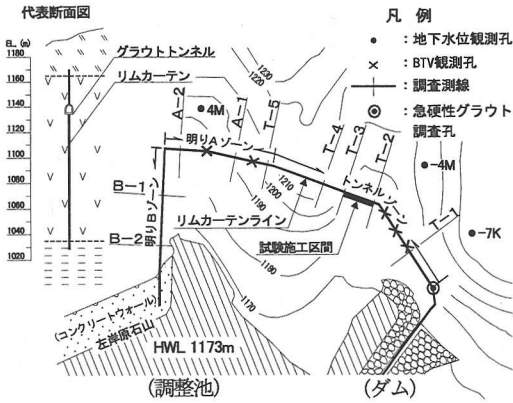


図-2 リムカーテンライン平面図

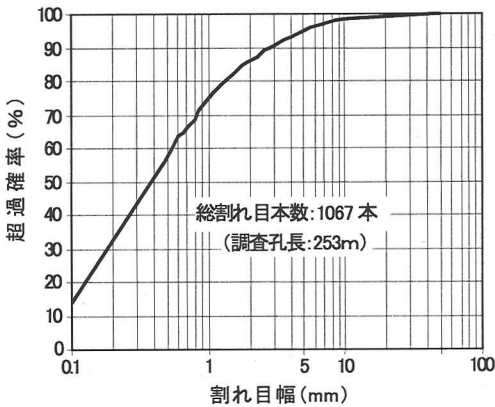


図-3 割れ目幅の超過確率図

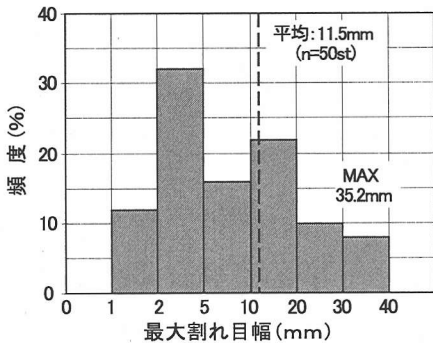


図-4 1ステージ (5m) 当たりの最大割れ目幅の頻度分布図

m) 当たりの開口割れ目本数は平均約 20 本であり、このうち幅 5mm 以上の割れ目が平均 1 本存在する。各ステージにおける最大割れ目幅の頻度分布は図-4 に示すとおりであり、観測された最大割れ目幅は 35.2mm、平均で 11.5mm である。また、1 ステージ当たりの間隙率 (割れ目幅の総和/5m) は図-5 に示すとおりであり、平均 1.1% (最大 3.6%) である。左岸側のグラウトトンネル内で観察された開口割れ目 (割れ目本数 n) は、図

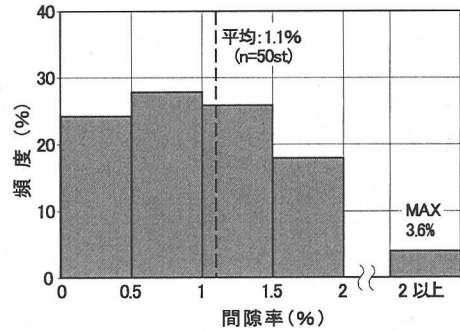


図-5 間隙率の頻度分布図

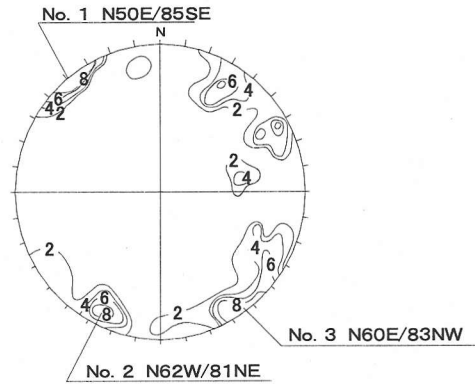


図-6 シュミットネットによる開口割れ目の密度分布 (n=179; 図中の数字は%を示す) <グラウトトンネル内での開口割れ目>

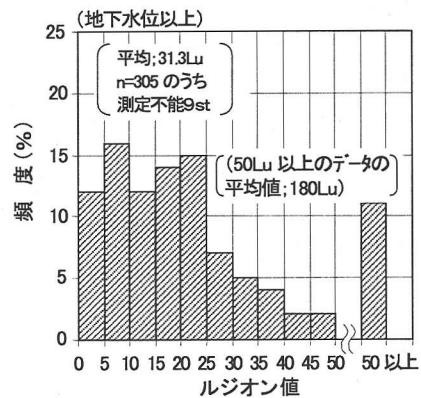


図-7 輝石安山岩のルジオン値の頻度分布図

-6 に示すように鉛直に近い急傾斜のものが卓越し、走行は一定の傾向をもたない。

同岩盤に対して左岸山体における調査孔 (図-1 (1) に示す地下水観測孔と同じ) ならびに図-2 に示す左岸リムカーテンライン沿いの注入孔を利用してルジオン試験を実施した。試験結果 (地下水位以上対象) は図-7 に示すとおりであり、平均 31.3Lu (ルジオン値算出不可の 9 ステージ (全ステージの 2.7%) を除く) と高く、

表-1 施工箇所別注入実績表

項目	単位	トンネリ	明り		合計
			Aゾーン	Bゾーン	
注入長	m	51,809	10,935	6,035	68,879
セメント注入量	ton	26,198	5,772	2,845	34,815
スラッジ注入量	m ³	9,411	2,181	1,350	12,942
単位注入量	kg/m	642	677	639	646

50Luを超えるステージも10%以上存在する。

なお以上のルジオン値と透水性の関係に関しては、別に論述したが、ルジオン試験時に乱流の影響でルジオン値はオーダーちがいで過小評価となっている可能性があることを指摘した⁷⁾。

b) セメントグラウチングによる止水対策工

湛水池左岸に分布する輝石安山岩層は、下記の水理地質的な課題を有していることから、湛水池左岸水際沿いに止水を目的としたリムカーテンを施工した。

- ・開口割れ目が認められ透水性も極めて高い箇所が存在すること
- ・またこれに起因したと思われるが地下水位もダム左岸調整池近傍においてダム湛水位(満水位)に比べ数10m以上低いこと

リムカーテンラインは図-2に示すとおりであり、ダム側400mはグラウトトンネルを利用してまたそれに接続するリムカーテンは明かりから施工した。代表断面は同図に示すとおりであり、施工範囲は風化安山岩層を含む輝石安山岩層を対象に下位は難透水性の火山礫凝灰岩までまた上位については同じく難透水性の珪質火山灰層までとした。

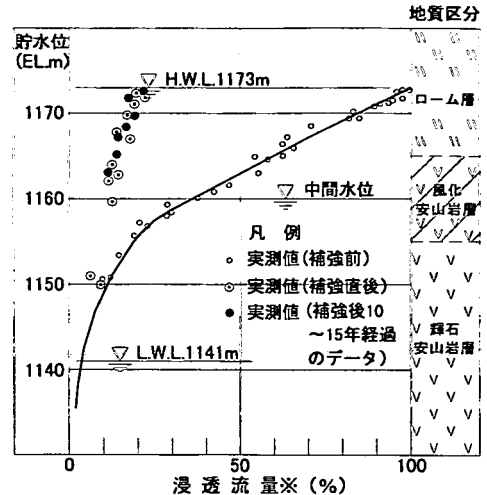
グラウチングの注入仕様は、通常のセメントグラウチングを基本として、大量に注入されるステージにおいては骨材プラントから発生するスラッジやペントナイトを増量材、増粘材として活用した。改良目標を5Lu (5Lu超過確率15%以下)として、単列のグラウトカーテンを形成した。

施工ライン箇所別の注入実績は表-1のとおりであり、いずれの箇所も5Luまでの改良に平均注入量で500kg/mを超える注入量を要した。特にスラッジ注入量も多い実績から分かるように大量に注入されるステージも少なくなかった。以上の設計や「注入基準ならびに注入実績」については文献⁹⁾に詳述する。

(2) グラウトカーテンの仕上がり状況調査

以上のグラウトカーテン施工後湛水した結果、調整池からの浸透流量は図-8(同図に示す実測値(補強前)の値)に示すように、貯水位が輝石安山岩層の上部にいたると急増する傾向が観測された。

そこで図-2に示すリムカーテンライン上の数断面に



※浸透流量は、H.W.L.の浸透流量を100として各貯水レベルでの同量を相対表示

図-8 貯水位と浸透水量との関係

対して、図-9に示すようにグラウトカーテンを横断するように調査孔を配置し、先に述べたセメントグラウチングによるグラウトカーテンの仕上がり状況について各種の調査・試験を行った。

a) 注入されたグラウトの分布状況

ボーリングコアの詳細調査により、輝石安山岩層の割れ目内に注入されたグラウトの充填状況ならびに風化安山岩層内のグラウトの分布状況の確認を行った。調査結果は図-9に示すとおりであり、輝石安山岩層の開口割れ目内に充填されたグラウトが認められる上限標高は、カーテンラインから離れるほど低くなっている。即ちグラウトカーテンの改良幅は深部に厚く、浅部で薄い仕上がりになっていることが確認された。また、ルジオン値の分布についても、グラウトの充填が認められないステージでは大部分が20Lu以上の高い透水性を示すのに対し、グラウトが認められるステージでは概ね5~10Lu以下となっており、グラウチングによるグラウトの充填が透水性の改良につながっている事を示している。

またBTVによるボーリング孔内観察により輝石安山岩層の開口割れ目へのグラウトの充填状況を調査した結果は図-10に示す通りである。BTVで確認されたグラウトの上限深度とボーリングコアで確認されたグラウトの上限深度はほぼ一致しており、これ以上のステージではステージ内の最大割れ目はグラウトにより充填されていないこと、またグラウトによる充填が認められるステージではいずれも5Lu以下に改良されていることが明瞭に確認された。

以上の調査の結果、グラウトカーテンは輝石安山岩層上部から風化安山岩層にかけて上位になるほどその改良幅は薄くなっていることが確認された。

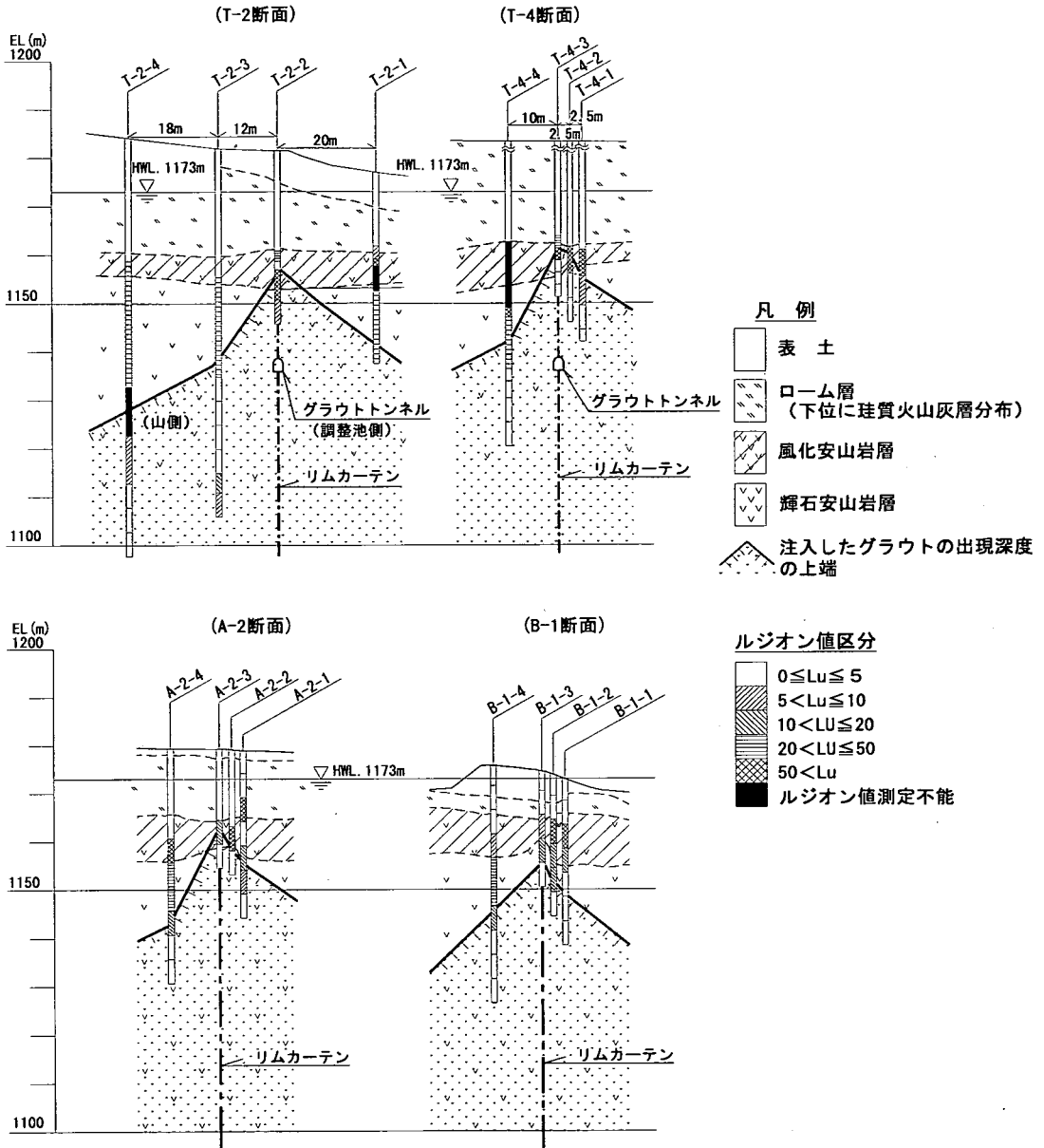


図-9 リムグラウトカーテンの調査結果

b) 原因分析

グラウトカーテンの改良範囲が下部ほど厚くなっている原因としては、図-11に示すように、注入されたグラウトは、輝石安山岩層に卓越する急傾斜で開口した割れ目を経由して主として下向きに流れ落ちたものと想定された。また、輝石安山岩の上部に分布する風化安山岩は、多孔質の安山岩塊と火山灰の基質から構成される軟質な火山角礫岩であり、輝石安山岩層のように大量のグラウトが自重で流れ落ちるとは考えにくい。しかしながらグラウティングの際の水押しもしくはグラウト注入により

軟質な基質部に破壊が生じて輝石安山岩層に至る水みちが通じ、注入されたグラウトはこの経路沿いに脈状に注入され、風化安山岩層下部の輝石安山岩層の開口節理に流れ落ちていくものと想定された。このように風化安山岩層に注入されたグラウトは大部分が輝石安山岩層の開口割れ目を通じて深部に広がるため、グラウト孔間隔を密にして注入を繰返しても、形成されるグラウトカーテンの改良範囲は深部で厚くなるものの、浅部の上部標高では改良が進まず薄いカーテンになったものと判断された。

標高	深度	地質	山値	間隙率 (%)		グラウト確認深度	最大割れ目幅 (mm)	
				0.5	1.0		注入前	注入後*
E.L.(m) 1150	30	風化安山岩層	28	○	●	-	-	-
							41.1	41.1
1140	40	輝石安山岩層	40	○	●	-	12.1	12.1
							4.5	4.5
1130	50	輝石安山岩層	4	○	●	-	7.1	1.8
							5.0	0.9
1120	60	輝石安山岩層	3	○	●	-	1.7	0.4
							1.8	0.7
1110	70	輝石安山岩層	2	○	●	-	-	-
							-	-
			6	○	●		-	-

* : グラウトにより充填されていない開口割れ目対象





-  風化安山岩層
-  輝石安山岩層
-  注入前の間隙率
-  注入後の間隙率

図-10 グラウト充填状況調査結果

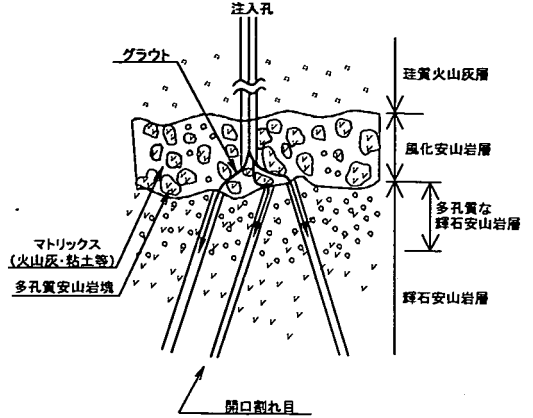


図-11 グラウトの注入状況模式図

表-2 注入材料の分類

		反応形式	暫定指針*による 使用可・不可
注入材 (グラウト)	セメント系	セメント懸濁液	水和 ○
		セメント — モルタル	
		セメント — 急硬剤	荷電置換 ○
		セメント — 粘土	
セメント系薬液	水ガラス — セメント系	荷電置換 ○	
	水ガラス — スラグ+セメント系		
薬液系	水ガラス系 (溶液タイプ)	酸系 (酸性液材)	複分解 加水分解 (ゾルの集合) ○
		金属塩類系 (瞬時にゲル化)	
	高分子系	アルカリ系 — ゲル化に アルカリ剤	荷電置換 ○
		アクリルアミド系	重合
高分子系	尿素系	重縮合	
	ウレタン系	水溶性系 — 水和反応 不溶性系 — 水和反応	△

*昭和49年建設省通達「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」

3. 急硬性グラウト材の品質評価

(1) グラウト材の選定

以上の調査の結果、開口割れ目を有する節理性岩盤に対しては、セメント単体によるグラウティングでは、注入

されたグラウトが開口割れ目内を流下し、横方向に有効に注入されないことが判明したことから止水グラウト材としての要求性能を下記のとおり設定した。

- ・改良範囲外へのグラウトの逸散を防止し、開口割れ目を経済的・効率的に充填できる材料

表-3 急硬性セメントの化学組成

材種別	グラウト	lg-loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	比重	粉末度 (m ² /g)
セメント	急硬性	0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.5	0.2	28.3	2.9	5,500
セメント	普通ポルトランド	0.4	0.2	22.1	5.2	3.0	64.7	1.0	1.7	3.1	3,200

表-4 試験配合

配合区分	配合番号	急硬材懸濁液			セメント懸濁液		セッター添加率 %
		急硬材 kg	水 %	セッター g	セメント kg	水 %	
No1	1-1			300			1
	1-2	30	190	600	120	162	2
	1-3			900			3
No2	2-1			350			1
	2-2	35	188	700	140	155	2
	2-3			1050			3
No3	3-1			400			1
	3-2	40	186	800	160	149	2
	3-3			1200			3
No4	4-1			500			1
	4-2	50	184	1000	160	149	2
	4-3			1500			3

・永久的な止水グラウト材として安全性、耐久性、強度、透水性などの品質が保証される材料
開口割れ目内をグラウトが硬化する前に流下するのを防止するために、ベントナイトを添加して粘性を増大する方法では注入時の注入管内での流動性確保との兼ね合いもあり限界があり、ゲルタイムを調整できる材料が望ましい。そのような材料としては表-2 の示すとおり、水ガラス系、セメント急硬材系、ならびにウレタン系がある⁸⁾。ウレタン系は昭和49年に原則禁止となり、以降薬液注入材の分野では、薬液注入剤の難点とされた耐久性を克服するべくシリカゾルやコロイダルシリカなどの開発が進められたが、恒久対策工としての適用事例は少なく今後の実証が待たれるところである^{8) - 12)}。

結局、以上の要求性能を満足できる材料として、「グラウチング技術指針・同解説」¹³⁾ に示される「ダムのグラウト材は原則セメント系とする」とのガイドラインも踏まえ、セメント急硬材を有力候補として選定した。

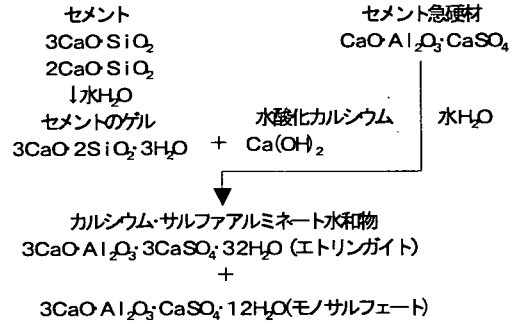


図-12 セメントとセメント急硬材の反応機構

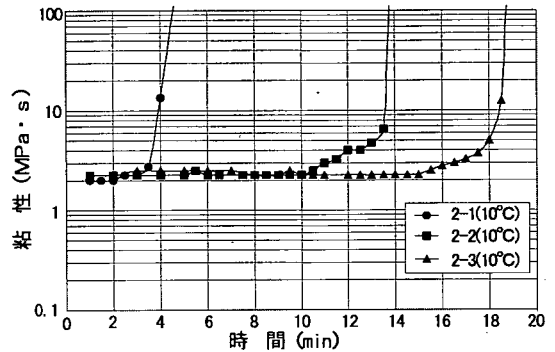


図-13 急硬性グラウト材のゲル化過程での粘性変化

今回採用したセメント急硬材¹⁴⁾は、トンネル工事における湧水処理を目的とした使用実績^{15), 16)}はあるものの、ダム基礎岩盤の止水を目的とした実績は無く、日本で初めての使用となることから、上記要求性能に照らした適用性を試験や調査で確認した。

(2) 止水グラウト材としての品質確認試験

セメント急硬材の成分は、表-3 に示すとおりであり、普通ポルトランドセメントと比べ、Al₂O₃やSO₃が多く、SiO₂が少ないのが特徴である。この懸濁液をセメント懸濁液と混ぜ合わせると、図-12 に示すように、セメントのゲル化に先行して早期にAl₂O₃やSO₃成分が反応を起し、セメント硬化物の一種であるエトリンガイト(カルシウム・サルファアルミネート水和物)を生成し、ゲル化する。セメントの水和反応の進行とともに、このエトリンガイトは一部安定型のモノサルフェートに置き換わる¹⁴⁾。セメント急硬材を添加することより早期より硬化するグラウトのゲル化時間を調整するためにセッター(オキシカルボン酸系)を遅延材として添加することとした。

上述した止水グラウトとしての要求品質を確認するため、表-4 に示す配合の組み合わせを基本に、ゲルタイム調整範囲、強度、透水性などについて試験を実施した。

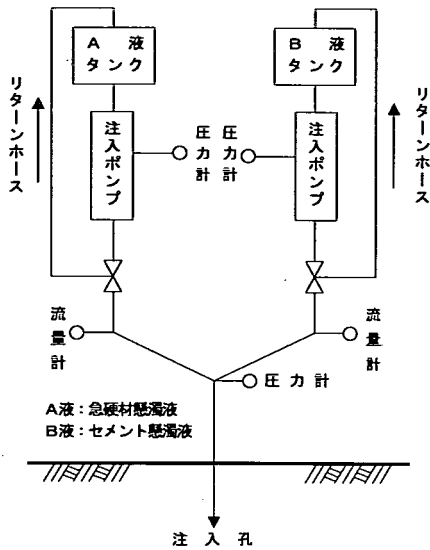


図-14 A液とB液の混合・注入方式

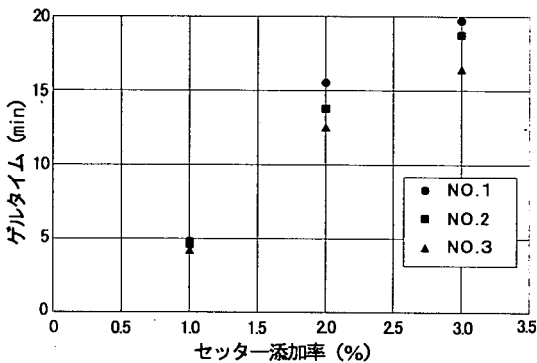


図-15 セッターの添加率とゲルタイムとの関係

① ゲルタイム調整範囲

セメント急硬材を添加したグラウト材（以下、急硬性グラウトと称す）は、図-13に示すように、ゲル化過程での粘性変化は急激に生じる。

このような急硬性を示すことから岩盤の開口割れ目へのグラウトの流下、逸散を防止し、効果的に注入するためには、ゲルタイムを適正に設定することが重要となる。本注入工法では、A液（セメント急硬材懸濁液）とB液（セメント懸濁液）とを、図-14に示すとおり注入孔口にて1.5ショット方式で混合させ注入することとなり、ゲルタイムとしては注入孔内から岩盤の一定範囲の割れ目の充填に必要な時間を設定する必要がある。即ち、所要ゲルタイム（T）は、注入孔口から注入ステージまでの注入管通過時間（A）と割れ目内充填時間（B）の和相当以上が必要となる。

当サイトでの注入孔長さは20～40m、注入流量はス

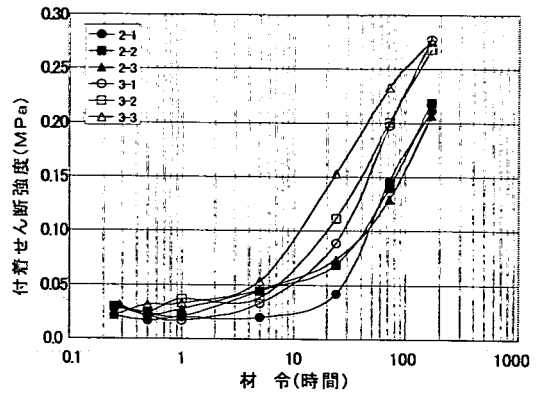


図-16 ゲル化後の材令と付着せん断強度との関係

テージ当たり20～50ℓ/分であることから、Aは30秒から1分30秒程度である。又BTVによる節理調査の結果、ステージあたりの累計割れ目幅は最大5cm程度であり、これを踏まえ注入範囲を3m（標準孔間隔）とした場合、Bは注入流量に応じて7～17分程度と計算されるが、実態的には大きな割れ目が存在するステージでは注入流量も必然的に大きくなることから最大7分程度のゲルタイムの設定が妥当と考えられる。

ゲルタイムの試験結果は、図-15に示すとおり、各配合ともセッター量を調整することで上記ゲルタイムの設定が可能と考えられる。

② 強度

強度に関する要求品質レベルとしては、注入後ゲル化して数時間後（今回の注入施工サイクルにおける隣接孔を施工するまでの標準的なサイクルタイム）の注入材の強度が隣接孔ステージにおける注入時の注入圧力（最大0.5MPa）により破壊されない程度まで短期的に強度発現しうるか、あるいは湛水後グラウトカーテンの上下流水位差（グラウトカーテンの止水性に依存するが、当サイトでの実測値から最大0.3MPa）に長期強度として対抗しうるかでいずれか大きい方で決まる。前者における要求強度の方が厳しく、これを踏まえ割れ目内に幅3cm（図-4参照）、注入半径1.5m（標準孔間隔3m）の範囲に急硬性グラウトが充填された状況を想定し、所要の付着せん断強度を求めると、0.012MPa以上（安全率4として）が必要となる。

付着せん断強度に関しては、地盤工学会基準（JGS0560-2000）に準じて一面せん断試験を実施し求めた。現地から採取した輝石安山岩の割れ目に接するようにモールドをセットし、その中に急硬性グラウトを充填後、ゲル化経過時間に応じて、その付着面を一面せん断（鉛直応力は0.01MPaで浮き上がり防止として载荷）した。ゲル化後の経時変化に伴う付着せん断強度は図-16に示すとおりであり、ゲル化数時間後において上記の

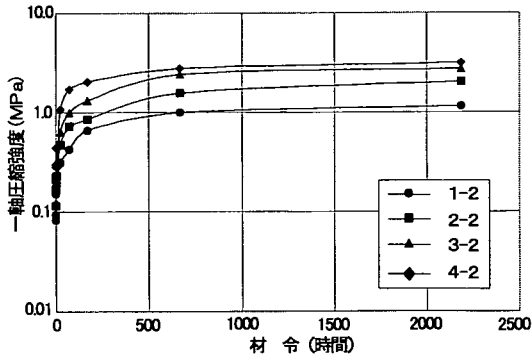


図-17 材令と一軸圧縮強度との関係

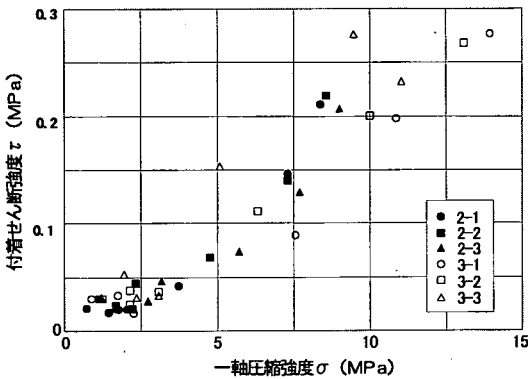


図-18 一軸圧縮強度と付着せん断強度との関係

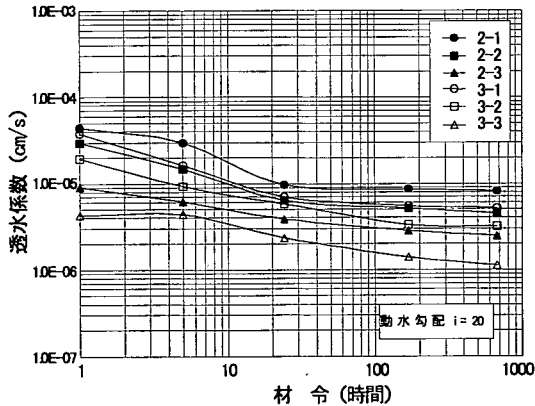
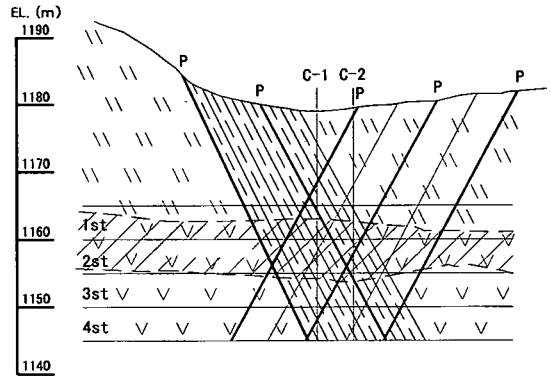
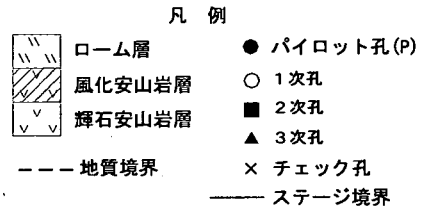


図-19 材令と透水係数の関係

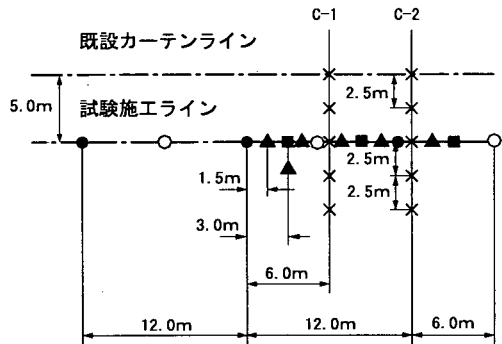
所要付着せん断強度が十分に確保できる。各配合別の一軸圧縮強度と材令との関係は図-17 に示す通りであり、一週間程度で強度の発現傾向はほぼ収束する。また一軸圧縮強度と付着せん断強度の関係は図-18 に示す通りであり、付着せん断強度は一軸圧縮強度の 1/5~1/10 程度である。

③透水性

透水性に関しては、土の透水試験法 (JISA1218) に準じて、モールド内に急硬性グラウトを充填し、ゲル化後水頭 (動水勾配 $i=10\sim30$) を変化させ、透水係数を求



(a) 孔配置断面図



(b) 孔配置平面図

図-20 孔配置図

めた。

結果は図-19 に示すとおり、かなり大きな動水勾配 (グラウトカーテン部での動水勾配最大 10 程度) においてもゲル化後一日経過すると概ね $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下の低い透水性になることを確認した。

4. 試験施工による効果確認

以上で急硬性グラウトの止水グラウトとしての品質が

表-5 注入実績と急硬性グラウトの使用実績

次数	試験施工の実績									先行実施工の実績 ^{※2}
	セメントグラウト			急硬性グラウト			計			単位注入量 (セメント単体注入) kg/m
	注入量 kg	単位注 入量 kg/m	割合 %	注入量 kg	単位注 入量 kg/m	割合 %	注入量 kg	単位注 入量 kg/m	割合 %	
パイロット孔	51,077	454	68	23,271	196	69	74,348	661	68	1,858
1次孔	14,523	176	19	8,501	10	25	23,024	279	21	1,028
2次孔	3,868	57	5	525	7	2	4,393	65	4	1,001
3次孔	5,652	50	8	1,600	14	4	7,252	64	7	892
計(平均)	75,120	196	100	33,897	87	100	109,017	285	100	958

※1 割合; 次数別注入量比

※2 先行実施工では、3次孔で収束せず

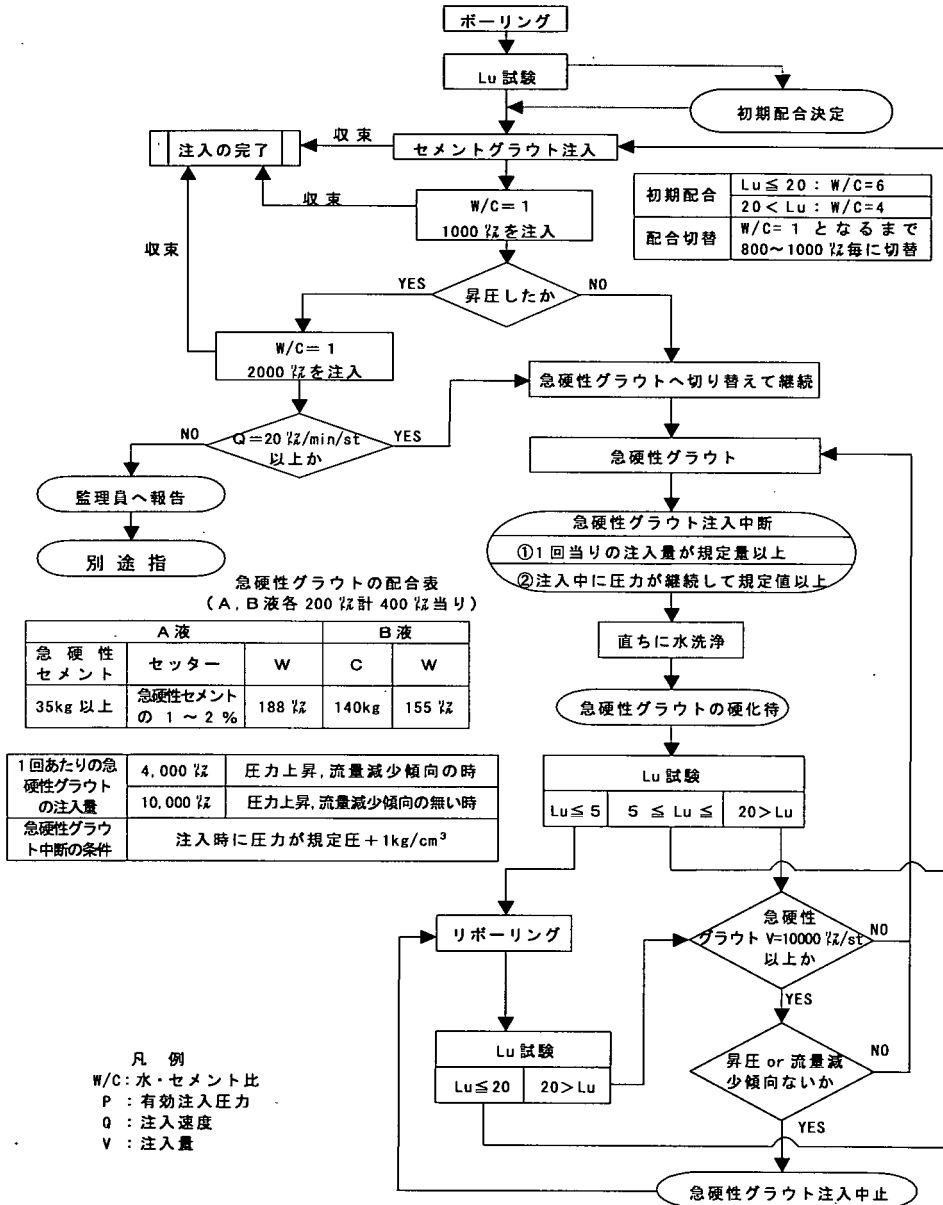


図-21 急硬性グラウトの使用フロー図

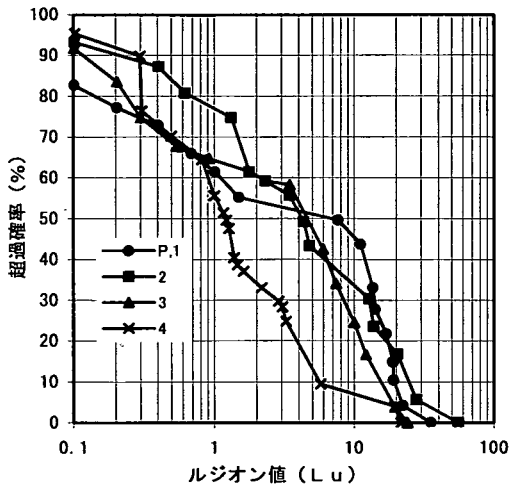


図-22 ルジオン値の超過確率図
(試験グラウチング)

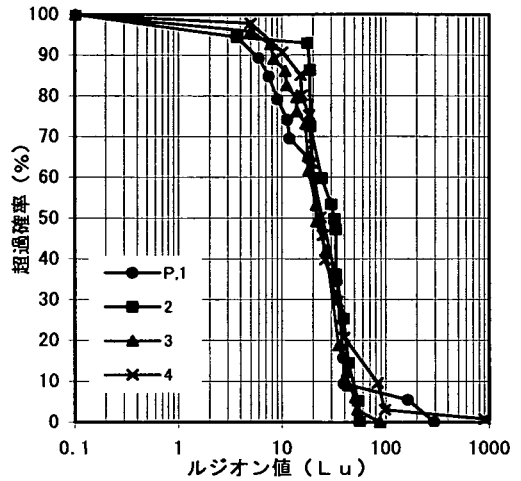


図-24 ルジオン値の超過確率図
(既設グラウチング)

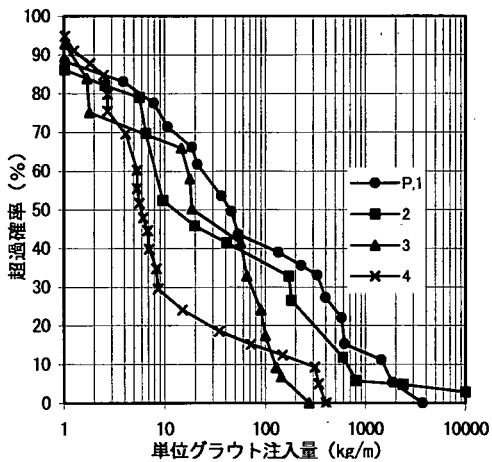


図-23 単位グラウト注入量の超過確率図
(試験グラウチング)

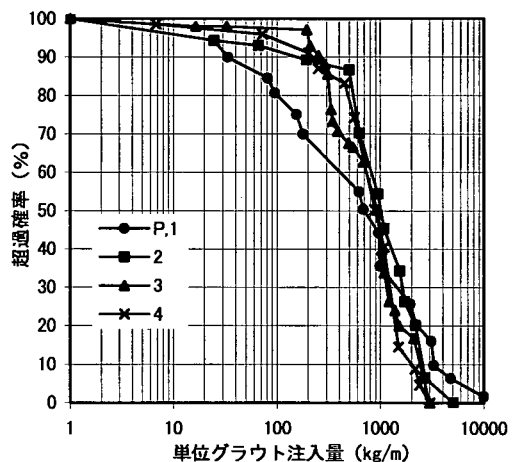


図-25 単位グラウト注入量の超過確率図
(既設グラウチング)

確認されたが、これを本格的に実施工に適用する前に実施工対象岩盤にて試験施工し、その効果を確認することとした。

試験ヤードは、図-2 に示す通り、リムカーテンラインのトンネルゾーンの間中部（先行実施したセメントグラウチングにおいて最も注入量が多く認められた箇所）を選び実施した。試験施工のラインは、図-20 に示すように先に述べたセメントグラウチングが既に施工されている既設カーテンラインから池側に5m 離し、また注入孔は開口割れ目が比較的鉛直に近い傾斜であることから斜め孔を基本パターンとした。注入仕様ならびに急硬性グラウトの使用フローは、最終的に図-21 に示すとおりとした。まず通常のセメントグラウトにて注入を開始し、注入圧力の上昇が無く、一定量以上注入されるステ

ージについて急硬性グラウトに切り替える。さらに急硬性グラウトを一定量以上注入した段階で中断し、再開に当たっては事前に水押し試験でルジオン値を確認し、20Lu 以下の場合はセメントグラウトに切り替えることとした。いずれのステージも原則的には最終段階ではセメントグラウトによる注入で完了させた。急硬性グラウトの配合は、セメント急硬材の混合量の増分に対して、材令に伴う強度発現効果が比較的高い先の試験におけるNO.2 配合を標準とした。ゲルタイムの設定は当初、5～10 分を目安に設定し注入状況に応じて順次ゲルタイムを短縮していった。

注入実績は表-5 に、また注入前ルジオン値と単位注入量の超過確率は、図-22、図-23 に示すとおりである。上図と対比するため図-24、図-25 には試験施工した筒

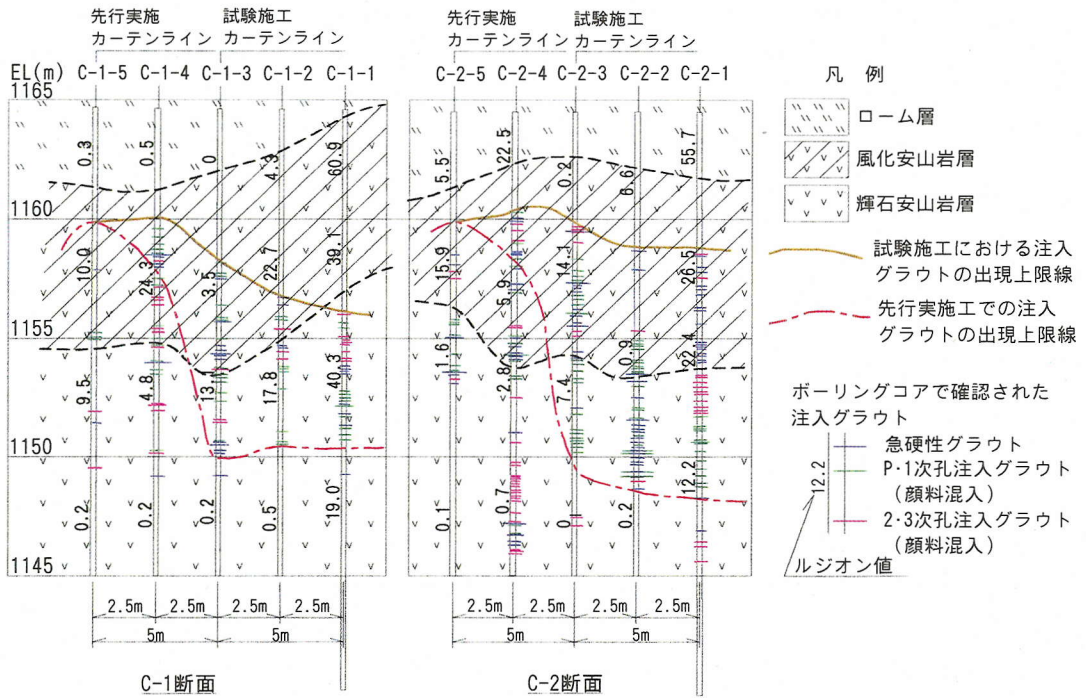


図-26 チェック孔断面のルジオン値とグラウト分布

所近傍で先行実施したセメントグラウチングにおける同様な実績図を示す。

先行実施したセメントグラウチングにおいては、初期ルジオン値は高く、注入量が多いにも拘らず次数を追ってのルジオン値や単位グラウト注入量の低減傾向が認められない。しかしながら今回の試験グラウチングでは概ね3次孔までの注入(4次孔の注入前ルジオン値)で改良目標の5Luが達成され、単位グラウト注入量(急硬性セメントも含む)は、先行実施したセメント単体のグラウチングに比べ各次数孔ともに数分の一以下に減少している。特に高次孔での単位注入量は大幅に減少している。

急硬性グラウトの使用割合は表-5に示すようにパイロット孔で70%と圧倒的に高く高次孔に到り、急減する。

一連の試験グラウチングが終了した段階で、図-20に示す位置で図-26のとおりチェック孔を実施し、注入したグラウトが横方向に広がっているか確認した結果は同図に示すとおり、先行実施したセメントグラウチングでは前述したグラウトの分布状況調査の結果(図-9)と同様、横方向へのグラウトの広がりが不十分であるのに対して急硬性グラウトを用いた注入結果では、急硬性グラウトがカーテンラインから離れても高い位置に認められ、横方向への注入が狙い通り達成されたものと判断できる。



(C-2-1 2ステージ)



(C-2-2 3ステージ)

写真-1 ボーリングコア

(C-2断面、試験施工ラインから調整池側のC-2-1、C-2-2孔)

チェック孔でのボーリングコア写真を写真-1に示すが、数センチの割れ目にも急硬性グラウト(白い充填物)が充填されていることが確認できた。

表-6 注入回数別の急硬性グラウト使用実績

次数	全ステージ数	急硬性グラウト 施工ステージ	使用比率 (%)
P孔 ※(c.t.c=12m)	460	91	19.8
1次孔 (c.t.c=6m)	448	45	10.0
2次孔 (c.t.c=3m)	711	33	4.6
3次孔 (c.t.c=1.5m)	1,135	20	1.8
チェック孔 (c.t.c=0.75m)	1,295	2	0.2
全体	4,055	191	4.7

※c.t.c=当該次孔により形成される注入孔間隔

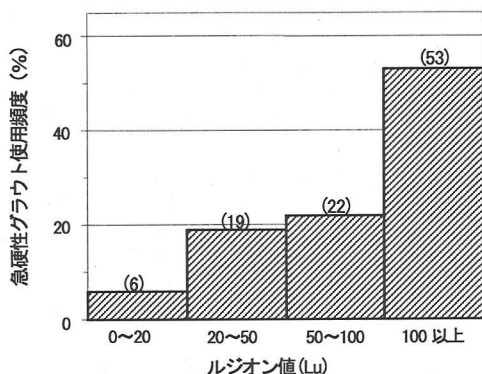


図-27 注入前ルジオン値別の急硬性グラウト使用頻度

以上のことから、開口割れ目を有する岩盤に対して、急硬性グラウトを用いたグラウチングは、開口割れ目を流下して、グラウトが逸散するのを防止でき、グラウトカーテンとしての所要幅を形成できる有効な注入方法であることが確認された。

5. 実施工への適用と止水効果確認

(1) 急硬性グラウトによる注入効果の確認

以上の品質確認試験や試験施工結果を踏まえ、セメントグラウトによるグラウトカーテンの仕上がり不十分な輝石安山岩上部を対象に先行実施したグラウトカーテンの池側に急硬性グラウトを用いた補強グラウチングを実施した。

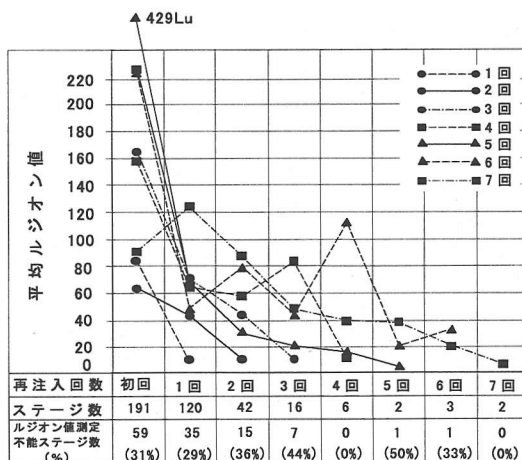


図-28 急硬性グラウトの再注入過程でのルジオン値の収束傾向

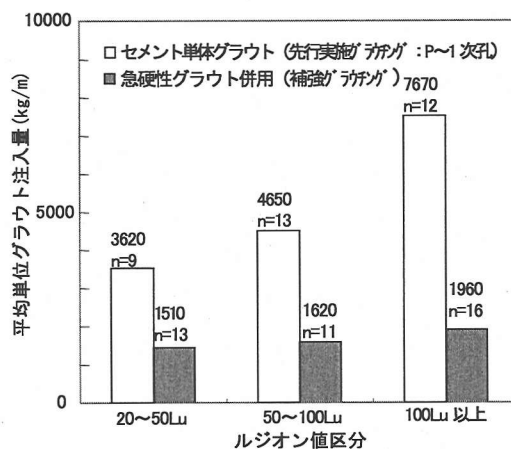


図-29 急硬性グラウト使用の有無によるルジオン値区分単位注入量 (トンネルゾーン)

急硬性グラウトに切り替える要領については、先に示したフローを基本として注入した。その結果、急硬性グラウトを使用した頻度は各次数別に、表-6に示すとおりであり、パイロット孔で20%程度使用し、高次数になるに従いその使用頻度は急減する。このように急硬性グラウトを活用した結果、試験施工と同様、概ね3次孔までの施工により目標の5Luまで改良できた。なお試験施工に比べて、P孔~1次孔での急硬性グラウトの使用頻度が少なくなっているが、これは、試験施工した区間が全施工区間の中で、注入前ルジオン値が最も高いゾーンに位置したことによるものと考えられる。

注入前ルジオン値別に急硬性グラウトの使用頻度を整理すると、図-27のようになり高ルジオン値ほどその使用頻度は高い。また急硬性グラウトを用いた場合でも注入フローに示したように、大量注入箇所では中断、再

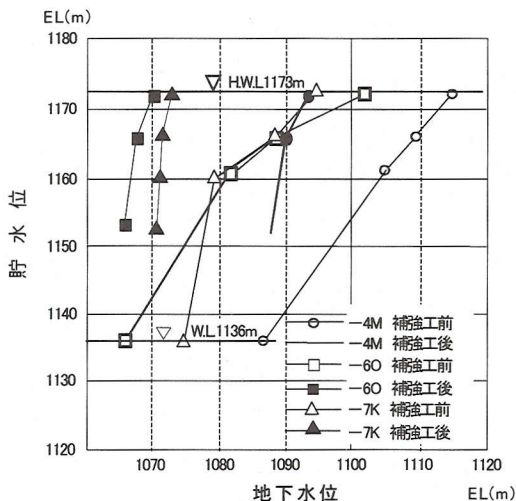


図-30 貯水位と地下水位の関係

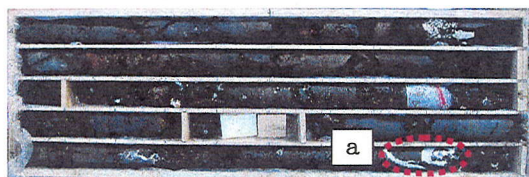


写真-2 急硬性グラウト調査ボーリングコア
(深度：20-25m)



写真-3 a部拡大写真

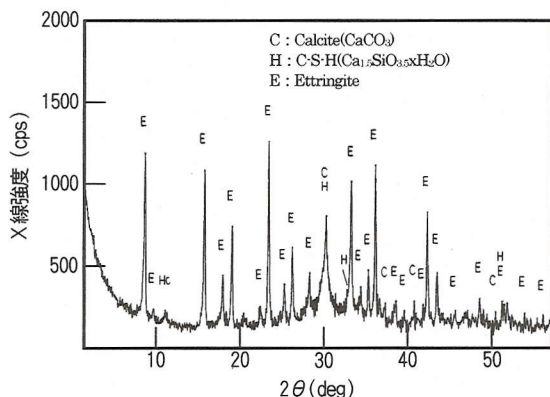


図-31 (1) XRD 分析結果 (a部の境界部)

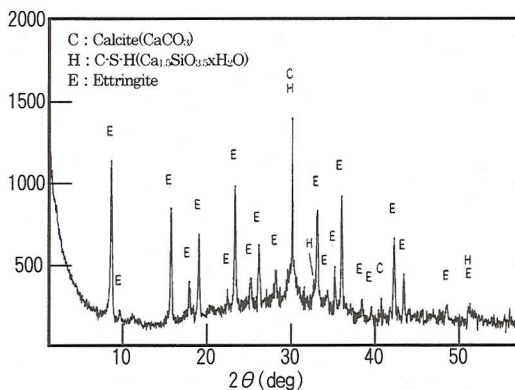


図-31 (2) XRD 分析結果 (a部の内部)

注入を繰返したが、そのようなステージでの再注入過程でのルジオン値の収束状況を図-28に示す。再注入した全191ステージのうち約85%が2回までの再注入で注入完了した。セメント単体のみを用いて先行実施したグラウチングでは、数回から十数回再注入を繰返したステージも少なくなかった。図-29には、急硬性グラウトを用いることによりセメント単体による先行実施グラウチングに比べどの程度注入量が抑制されるのかを注入前ルジオン値別に整理した。急硬性グラウトを用いた場合、特に高ルジオンステージでの注入量が著しく抑制され、改良範囲外への逸散が狙いとおりに防止でき、効果的にグラウトカーテンが形成されたものと判断される。セメント単体でのグラウチングにおいては、大量注入ステージでは中断・再注入を繰返し、完了前までに数日を要することもあったが、急硬性グラウトを用いてゲルタイムを調整することで早期に有効な注入が可能となり、注入量の大幅な抑制と併せて注入時間の短縮に大きく寄与したのと考えられる。

(2) 急硬性グラウトの耐久性の確認

急硬性グラウトを用いた補強グラウチングを完了後16年が経過した昨年、図-2に示す位置において急硬性グラウトの耐久性を確認する調査を実施した。補強グラウチングを実施したグラウトカーテンライン上で地表からボーリング(長さ：32m)を実施し、ボーリングコアを採取した。割れ目に充填されたグラウトについて、X線回折法(XRD)とX線マイクロアナライザー法(EPMA)によりグラウトの健全性・耐久性を確認した。風化安山岩層は20m付近から出現し、急硬性グラウトは同層以深で多く認められた。同層の最上位ステージ(深度；20-25m)のボーリングコアの状況を写真-2に示す。割れ目にグラウトが充填されたa部(写真-2に示す)は、写真-3に示すように割れ目内に密着して充填されている。

a部の充填グラウトに対するXRDによる分析結果は、図-31(1)、(2)に示すとおりである。前者はグラウトが割れ目と密着した境界部での結果、また後者は充填グラ

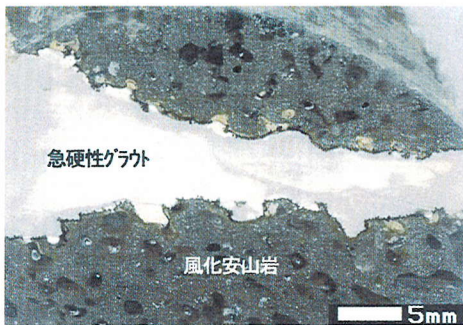


写真-4 EPMA 分析箇所

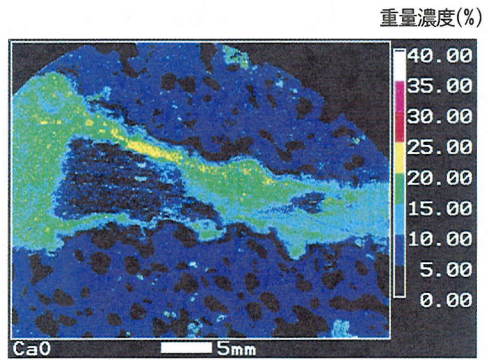


写真-5 (1) EPMA 分析結果 (CaO の濃度分布)

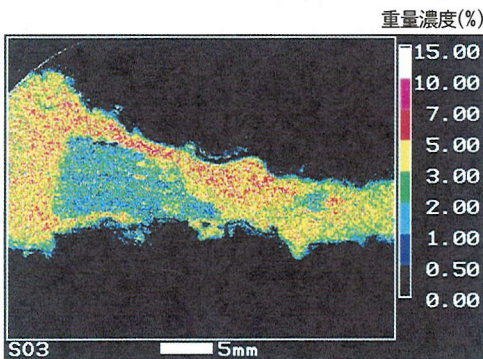


写真-5 (2) EPMA 分析結果 (SO₃ の濃度分布)

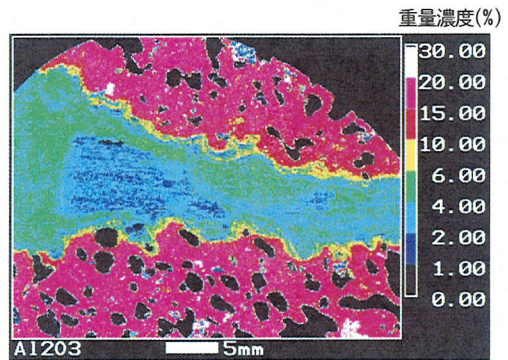


写真-5 (3) EPMA 分析結果 (Al₂O₃ の濃度分布)

ウトの内部での結果である。いずれもグラウトの結合化合物の成分としてエトリンガイトが優勢であり、先に述べたように急硬性グラウトの水和特性を反映したものとなっている。また劣化作用を受け易い境界部と劣化作用を受けにくい内部で同様な結果となっていることから、境界部での変質や劣化は無いものと考えられる。

次にa部の中で写真-4に示す部位について、EPMAにより充填グラウトを構成する元素濃度の分布を分析した。結果を写真-5(1)~5(3)に示す。エトリンガイトを構成する主元素のいずれも、割れ目境界部から内部に至り元素濃度が変化する傾向が認められないことから構成元素の面からもどの部位においても変質や劣化は進展していないものと考えられる。グラウト内部の一部に元素濃度が低い部分が認められるが、これは注入時のグラウトの配合や地下水との混連の状態によりこのような差異が初生的に生じたものと考えられる。

以上の結果から急硬性グラウトは注入後、水位変動の影響を受けながら16年が経過したが、その品質においては変質や劣化は生ぜず、グラウトとしての耐久性を保持しているものと判断された。

(3) 止水効果の確認

急硬性グラウトを用いた補強グラウチングを完了後、再び湛水による左岸からの浸透流量を計測したが、満水位において、図-8に示すとおり、補強前に比べ数分の一に低減し、同図に併記したとおり10年以上経過した現在においても、浸透流量はほとんど変化が認められない。

又リムグラウトカーテンの下流に位置する地下水位観測孔-7K、-4M、-6O(位置は図-1(1)参照)における補強グラウチング後の地下水位は図-30に示すように著しく低下した。またグラウトカーテンを挟む地下水位観測孔での観測結果においても、補強グラウチングによる効果は明瞭であり、その一例を図-32に示す。急硬性グラウトを用いたグラウチングにより所定のグラウトカーテンが形成され、これにより浸透流量が大きく抑制されたことを示している。いずれの観測値も10年以上経過した現在、変化が認められず安定している。

以上のことから急硬性グラウトを用いたグラウチングの有効性ならびに急硬性グラウトの耐久性が実証されたものと判断される。

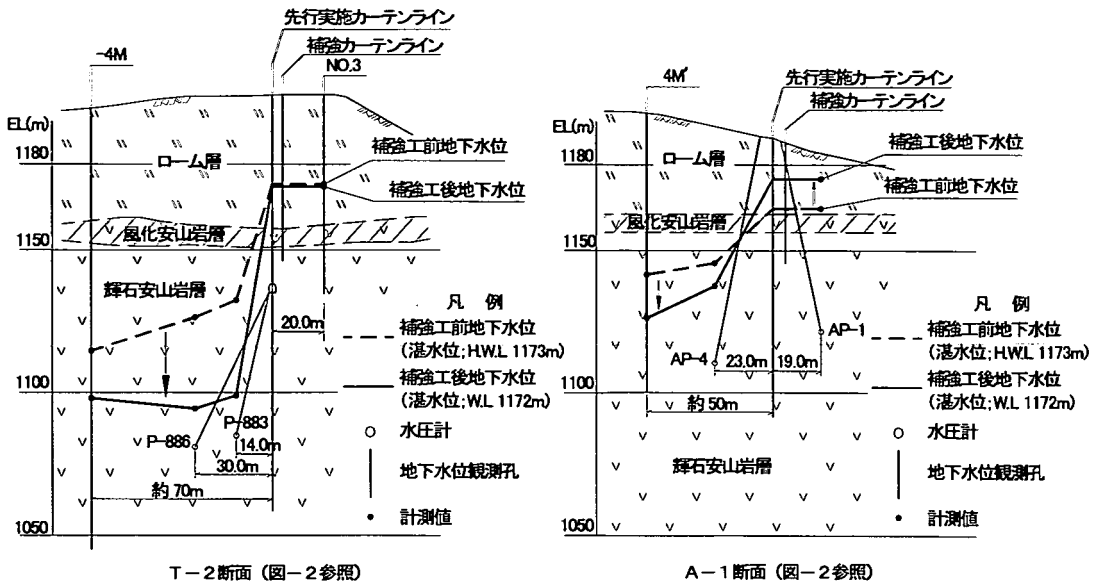


図-32 地下水位分布図

6. 結論

本研究により得られた知見は次のとおりである。

(1) 連続性の高い開口割れ目を有する高透水性岩盤の止水処理において、高粘性のセメントグラウトに加えてペントナイトや粘土を添加し粘性を高めた注入材を用いても、注入されたグラウトは横方向へ広がらず割れ目内を流下し、必ずしも効果的なグラウトカーテンの形成が図られないことが判明した。

(2) 以上のような岩盤に対する注入材料として、ゲルタイムが調整でき、しかも耐久性に優れた急硬性グラウトがダム止水処理グラウチングの注入材としての品質に優れることが確認できた。ゲル化までは粘性の変化は無く流動性を保ち、ゲル化直前に急激に粘性の増大を示す本材は注入管や割れ目入り口部での閉塞の懸念も無く適材である。

(3) 急硬性セメントを用いた試験施工の結果、注入されたグラウトは横に広がり、大きな割れ目が存在ステージにおいてもその充填が認められ、効率的にグラウトカーテンの形成が可能となった。

(4) 実施に本格適用を図った結果、特に透水性の高いステージにおいて、セメント単体によるグラウチングに比べ注入量は大幅に抑制され、併せて注入時間も大きく短縮され、急硬性グラウトをセメントグラウトと併用することによる注入効果が明瞭に現れた。

(5) 補強グラウチング完了後、16年経過した時点で調

査した急硬性グラウトの耐久性は、XRDやEPMAの試験結果から問題ないことが確認された。

(6) 湛水過程での地下水位や浸透水量の実測値から急硬性グラウトを用いたグラウチングの有効性ならびに耐久性が確認された。

7. おわりに

本研究は筆者らが経験した揚水発電所の上部調整池工事において、その周辺岩盤からの浸透流問題に端を発し、開口割れ目の発達した透水性の高い輝石安山岩の止水処理に関して、従来のセメントグラウチングではその改良に限界があり、ゲルタイムを調整できる急硬性グラウトを従来のセメントグラウトと併用することにより効率的にグラウトカーテンを形成することが可能であることを実証したものである。

当地点の場合、地下水位が低く、開口割れ目は密に発達し鉛直に近いものが卓越していることから、従来のセメントグラウトを用いたグラウチングでは注入されたグラウトが開口割れ目内を流下する傾向が強くなり、輝石安山岩の上部においてグラウトカーテンの幅が薄くなるといった結果を招いた大きな要因と判断された。今回、ダムの基礎処理工法として、わが国で初めて急硬性グラウトを採用しその有効性を確認できたが、開口割れ目を有する岩盤に本工法を補助工法として適用する場合、グラウ

トの急硬性に鑑み、開口割れ目の性状を把握しゲルタイムの設定や中断・再注入の基準などを試験施工を踏まえ個別に検討することが必要である。今回の急硬性グラウトに関する品質確認試験や試験施工の結果また、注入仕様などが今後のこの種の岩盤の基礎処理の参考になれば幸いである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京電力㈱建設部専門技術委員会の故藤井敏夫委員長(当時東京電力最高顧問)ならびに岡本舜三先生はじめ同委員会の委員の先生方からご懇篤なるご指導を賜りました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) Maurice Lugeon : BARRAGES ET GEOLOGIE, Dunod, Paris, 1932.
- 2) 市川慧 : 高透水性岩盤の止水対策, ダム技術, No.90, pp.4-11, 1994.
- 3) 岡本隆一, 三浦三郎, 中村康夫 : 九州の火山灰地域に建設されたダムの止水対策, 応用地質, 第 21 巻, 第 4 号, pp.15-26, 1980.
- 4) 広田泰久, 竹林征三 : 真名川ダムの設計と施工, ダム日本, pp.15-35, 1977.
- 5) 猿山光男 : 第四紀火砕流堆積物および琉球層群地帯の基礎処理, 土と基礎, 36 巻, 2 号, pp.81-86, 1988.
- 6) 東京電力㈱ : 玉原発電所建設工事報告書, pp.131-136, pp.203-205, pp.301-329, 1986.
- 7) 角江俊昭, 石井清, 吉越洋 : 節理性岩盤の透水性評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.721, pp.53-68, 2002.
- 8) (財)国土開発技術研究センター : 無公害型薬液等注入材料の研究開発に関する研究報告書, 1976.
- 9) 米倉亮三, 島田俊介, 盛政晴 : 最新の恒久グラウト, 土木施工, Vol.41, No.3, pp.87-93, 2000.
- 10) 土質工学会編 : 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp.43-89, 1988.
- 11) 三輪求, 米倉亮三 : 水ガラス系グラウト材の基本的性質について, 土質工学会論文報告集, Vol.34, No.3, pp.113-121, 1994.
- 12) 米倉亮三, 島田俊彦 : 薬液注入における長期耐久性の研究, 土と基礎, Vol.40, No.12, pp.17-22, 1992.
- 13) 「グラウチング技術指針・同解説」(財)国土開発技術研究センター, 1983.
- 14) 三宅信雄 : エトリンガイトのセメントコンクリートへの適用性に関する研究, 東京工業大学学士論文, pp.5-24, 1987.
- 15) 秋田勝次, 木村裕俊, 佐藤一義 : 高圧ガスを有する超膨張性地山の掘削, 土木施工, Vol.34, No.2, 1993.
- 16) 末永充弘, 元木暉里 : 「本州方算用師工区における破砕帯の施工, 土木施工, Vol.21, No.1, pp.42-57, 1980.

(2002. 10. 2 受付)

STUDY ON ADAPTABILITY OF THE RAPID HARDENING GROUT TO THE OPEN JOINTED ROCK MASS

Toshiaki KAKUE, Kiyoshi ISHII and Hiroshi YOSHIKOSHI

Regarding the more effective grouting of the foundation treatment for the highly permeable rock mass, it is very important to choose the better grout for the rock mass.

In this paper, showing that the conventional cement grouting is not good for the open jointed rock mass, the rapid hardening grout with adjustable gel-time, which has not been ever adopted in Japan, was proved to be more effective and durable over a long period by means of laboratory, in-site testing and application of the newly developed grout to the dam site with highly open jointed rock .