

ダム建設における風土岩に対する設計と施工

Treatments of Weathered Rocks in Dam Construction

播 田 一 雄 (はりた かずお)

水資源開発公団試験所 構造解析課 課長

久 納 誠 (くのう まこと)

水資源開発公団試験所 第一試験課フィルダム
材料試験室 室長

神 尾 重 雄 (かんお しげお)

建設省中国地方建設局 殿ダム工事事務所 所長

山口 茂 (やまぐち しげる)

水資源開発公団試験所 第一試験課フィルダム材
料試験室

1. はじめに

近年我が国では、多目的ダムをはじめとしてダム建設の必要性はますます増大しており、風化岩等の地質的に難度が高い地点でも、ダム技術の進歩によって経済的かつ安全にダムが建設されるようになってきている。

本稿は、風化岩を材料や基礎とした
ダム建設の例として、

- ① 風化岩を堤体材料として使用した事例（寺内ダム、布目ダム右岸鞍部止水処理工）

- ② 風化岩を堤体基礎とした場合のグラウチングによる遮水性の改良の事例（布目ダム右岸鞍部止水処理工）

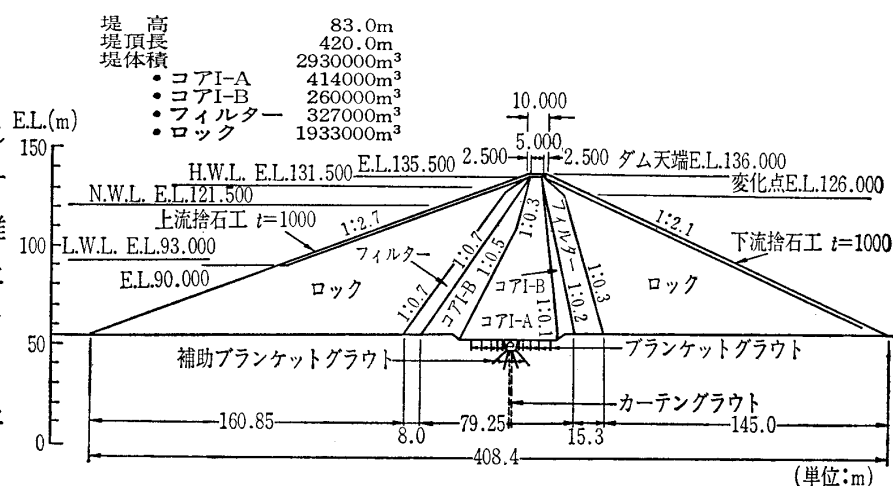
の設計施工の概要を紹介するものである。

2. 堤体（コア）材料としての風化岩 ～寺内ダム

2.1 寺内ダムの概要

寺内ダムは、当公団が筑後川支流佐田川に建設した中央コア型ロックフィルダムである。

佐田川流域は三郡変成帯地質区に属し、ダムサイト周辺は主に黒色片岩からなる。ダムサイトは全般に風化が厚く、特に左岸側洪水吐基礎部の山腹斜面は基岩である黒色片岩の風化が顕著であった。同斜面の表層は細粒な風化残留土(以下、細粒土と称す)が5～7mの厚さで分布し、その下層には黒色片岩の組織を残す風化軟岩が続いている。この風化軟岩



図一1 寺内ダム標準断面

表一1 細粒土，粗粒土の代表的な性質

項 目		細 粒 土	粗 粒 土
土 の 分 類		$C_L \sim C_L - S_C$	S_C
自 然 含 水 比 (%)		20~23	13~15
比 重		2.74~2.76	2.75~2.77
粒度	最 大 粒 径 (mm)	15	60~100
	細 粒 分 含 有 率 (%)	40~60	20~34
液 性 限 界		40~43	37~40
突 固 め	最大乾燥密度 (t/m^3)	1.65~1.70	1.82~1.90
	最 適 含 水 比 (%)	18~20	14~16
	(自然~最適)含水比 (%)	+3~+5	-1~+1
	突固め後の細粒分 (%)	50~64	28~40
透水 係数	最適含水比時 (cm/s)	$2 \sim 3 \times 10^{-6}$	$2 \sim 8 \times 10^{-6}$
	最 小 値 (cm/s)	$1 \sim 2 \times 10^{-6}$	$0.9 \sim 2 \times 10^{-6}$
せん断 強さ	粘 着 力 (kgf/cm^2)	0.5~0.6	0.2~0.3
	内 部 摩 擦 係 数	0.55~0.65	0.60~0.65
間隙 圧	最適含水比時 (%)	40	20
	(最適+2)含水比時 (%)	80	60

は、外見は塊状でも片理の密着度が低く、ハンマーの軽打で分離し、手で砕くことができるほど軟質な

ものが多く、掘削後に粗粒土になる¹⁾。

寺内ダムの堤体標準断面を図-1に示し、細粒土・粗粒土の性質を表-1に示す。

2.2 盛立材料(コア)の選定

堤体と洪水吐の基礎掘削で比較的良質な土質材料が大量に得られるため、コア材料はすべて基礎掘削からの流用とし、しかも経済性を考慮し、安全性も十分検討した上で、堤体積の約1/4を占める67万 m^3 をコアゾーンとした。

図-1に示すとおり、コアゾーンは次の理由によりI-A、I-Bの二つに区分した。

① 表層の細粒土を単独で使用することは賦存量の面で不十分であり、施工性も落ちる。

② 品質管理が最も重視されるコアの体積が大きい²⁾ため、コアゾーンを2分して確実な遮水性が要求される中心のゾーン(I-A)については、より細粒で透水係数の小さい材料とし、外側のゾーン(I-B)についてはやや粗い粒度とすれば品質管理が容易となる。

なお、外側のI-Bゾーンについては、粗粒土を単独に使用するよりも遮水性が良くなることから、粗粒土と細粒土の混合土とした。

2.3 コアゾーンの施工

I-Aゾーンは、品質管理の万全を期すため全量仮置きを義務づけ、I-B材料は直送でも可とした。ストックパイルは上流土捨場にI-A材料を約40万 m^3 仮置きした。ストックパイル築造時には、採取場で粒度、含水比を測定したが自然含水比が最適含水比より1~2%高めの材料であったので含水量調整はほとんど不要であった。パイリングは、材料を互層にまき出し、1層の厚さを20cm以下とした。

ストックパイルからの採取時にはブルドーザーで斜めに削り出し、パワーショベルにて下層から上層までほぼ均等に積み込み、材料の均質化を図った。

コア材料は、地山の状態ではまだ岩の組織を残し、人力掘削ではつるはししか受けつけない硬い風化岩であるが、重機の掘削により一度ほぐされると、ブルドーザーによる採取場での押土、ストックパイルでの敷きならし作業により、容易に破砕され土砂化する。転圧は自走式タンピングローラー(825B, 30t)により行った。口絵写真-11にコア転圧状況を示す。

200#以下の細粒分はI-Aで31~35%、I-Bで18~24%と多いが、5 μm 以下の粘土分の含有率はI-Aで5~8%程度とそれほど多くなく、最適含水比も低い³⁾ため、ダンプトラックで盛立面を走行することができ、直接まき出し位置まで運搬し、ブルドーザーにてまき出しを行った。

施工の面からは非常に扱いやすい材料であったといえる。

3. 堤体材料としての風化岩

~布目ダム右岸鞍部止水処理工

3.1 右岸鞍部止水処理工の概要

布目ダムは当公団が淀川水系布目川に試験湛水中の重力式コンクリートダムである。

布目川流域は領家帯地質区に属し、ダムサイトの大部分は柳生花崗岩(中粒黒雲母花崗岩)からなる。ダムサイト左岸の基礎岩盤はおおむね $C_M \sim C_H$ 級の良好な岩からなり、河床部から右岸にかけては、数条の断層の周辺を主体に風化岩がやや深部まで分布するが、これら重力式ダム基礎の大半は C_M 級以上の良好な岩からなる。一方、右岸鞍部の基礎は、断層等の影響により地山深部までまさ化が進行している。このため、右岸鞍部をダム本体と同様のコンクリート構造物とすると非経済的となるためフィルダムおよびグラウチングによる止水処理工を採用した。

布目ダムおよび右岸鞍部止水処理工の概要を図-2に、止水処理工の標準断面を図-3に示す。

3.2 盛立材料(コア)の選定

(1) 室内試験

布目ダム周辺は花崗岩地域にあるため、止水処理工のコア材は風化花崗岩を用いることになる。このため、当初計画ではまさ土を主とした材料の組合せで検討されていた。布目ダムでは、このまさその風化度に応じて粗粒まさ(M_1)、中粒(M_2)、細粒(M_3)の3段階に区分している。表-2にまさの分類を示す。

コア材料の選定に当たっては、コア山から採取されるまさ $M_1 \sim M_3$ 単体あるいはそれらを組み合わせた場合、およびそれぞれの混合比を変化させた場合等で種々検討したが、所要の遮水性が得られなかった。これは、まさ材はその最大粒径が15mm以

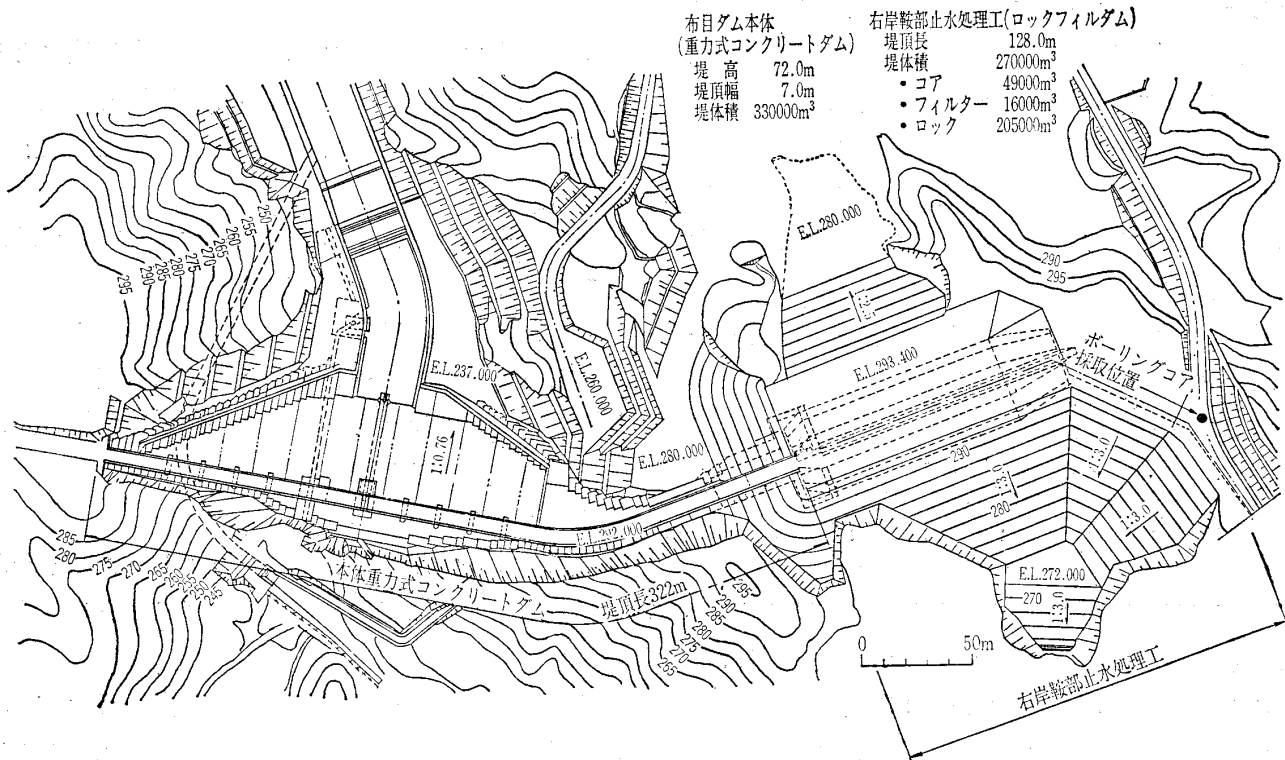


図-2 布目ダム一般平面

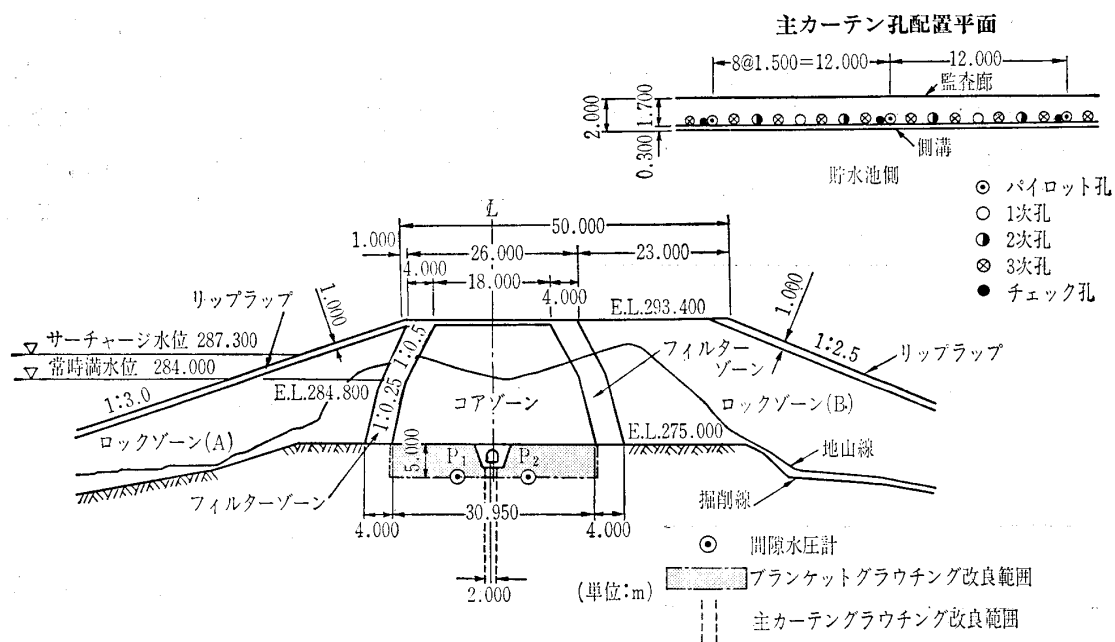


図-3 右岸鞍部止水処理工標準断面

表-2 まさの分類

分	類	自然含水比 (%)	D_{max} (mm)	-74 μ m (%)	I_p	比重 G	指圧によるボーリングコアの反応
M ₁	まさ化の程度 (弱) 粗粒まさ	5 $\pm$	15.9	10%以下	4.4~7.9	2.714	指圧により容易に分離できない
M ₂	まさ化の程度 (中) 中粒まさ	9~17	15.9	10%以上	8.5~16.3	2.709	指圧により容易につぶすことができる
M ₃	まさ化の程度 (強) 細粒まさ	30~40	9.52	20%以上	10.4~14.9	2.695	ボーリングコアは完全に軟質化

下の材料であり、これらの材料の混合を変えても粒度分布の変化が小さく締まりにくい材料であるため、力学的改良効果が小さいことが原因であると思われる。

る。

そこでまさのみでなく、原石山から採取される C_L 級 (風化) 花崗岩とまさ M₃ の混合材について

報文-2131

検討した。 M_3 はほとんど粒径10 mm以下であるのに対し、 C_L 級花崗岩は+10 mmを50%程度含んだものである。両材を混合することによって礫分を増し、粒度の分布範囲を広くし密度の増加を図ることができる。混合比(重量比)は次の4とおり設定し、コア材としての適性判断のため一連の室内試験を行った。

試験は、一般にコア材に対して行われる小型モールド($\phi 100$ mm)を使用して行うため、試料の最大粒径は15.9 mmとした。

$D_{\max}=15.9$ mmでの混合比	
C_L 級花崗岩 : M_3	1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4
-74 μ m 含有率 (%)	17.8, 20.9, 21.9, 23.2

これらの混合比は $D_{\max}=150$ mm の全粒径に換算するとほぼ $C_L : M_3=2 : 1 \sim 1 : 2$ となる。

コア材に要求される物理的性質および力学的性質を満たす混合材の粒度として、試験によって得られた目安は次のとおりである。

$D_{\max}=15.9$ mmでの細粒分(-74 μ m)含有率	
物理特性(コンシステンシー)によると	18%程度以上
締固め特性によると	17~23%
透水特性によると	18~23%
強度特性(三軸試験)によると	24%程度以下

以上より総合的に判断し、混合比を-74 μ mの細粒分含有率が20.9%である $C_L : M_3=1 : 2$ ($D_{\max}=150$ mmでは1 : 1)に決定した。

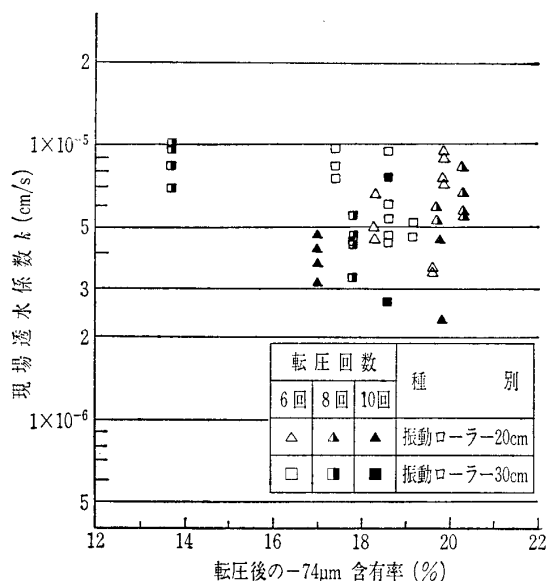


図-4 現場転圧後の「粒度～透水係数～転圧回数」

(2) 現場転圧試験

コアの盛立開始に先立ち、前述の室内試験により決定したコア材(1 : 2)を用いて現場転圧試験を実施した。転圧後の「粒度～透水係数～転圧回数」の関係を図-4に示す。

現場透水係数は、すべて基準値である $k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s をクリアしている。

なお、施工仕様は現場乾燥密度や施工性その他も考慮し、振動ローラー16tによる8回転圧、1層の仕上がり厚は30 cmとし、コアの盛立を開始した。

3.3 盛立後の確認試験

(1) 室内試験

盛立面に搬出する直前の材料をストックパイルより採取し、室内にて透水試験および三軸圧縮試験を行った。

透水試験では、透水係数 k は最適含水比時で 6.0×10^{-7} cm/s、含水比の品質管理基準の上限である $w_{opt}+2.5\%$ 時では 7.0×10^{-7} cm/s、最小透水係数は 4.0×10^{-7} cm/s となっており、室内透水試験の品質管理基準 1.0×10^{-6} cm/s を十分満たしている。

三軸圧縮試験では、有効応力表示による強度定数は $c'=0.3$ kgf/cm²、 $\phi'=35^\circ$ であり、十分に設計値($c'=0$ kgf/cm²、 $\phi'=30^\circ$)を上回っており、強度的にも問題のない試料であった。

(2) 現場透水試験

コアゾーンの盛立は平成元年5月に開始され、同年12月に終了したが、この間コア盛立転圧面で行われた現場透水試験結果を図-5に示す。

透水係数は盛立面の標高や実施時期にかかわらず、 10^{-6} cm/s オーダーで安定しており、現場透水係数 $k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s 以下の基準を満たしている。

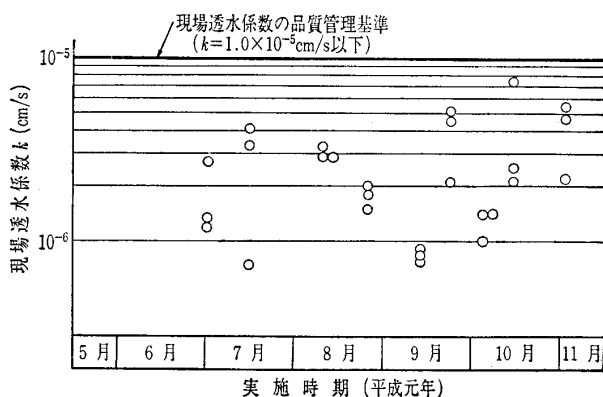


図-5 現場透水試験結果

4. 風化岩に対するグラウチング ～布目ダム右岸鞍部止水処理工

4.1 右岸鞍部止水処理工の基礎処理

右岸鞍部の基礎岩盤は、風化花崗岩（まさ）が厚く分布しており、基礎処理としてコア敷を対象としたブランケットグラウチングとダム軸沿いの主カーテングラウチングを実施した。

本章は主カーテングラウチングの設計・施工結果の概要について述べるものである。地質概要、孔配置等は前章を参照されたい。

右岸鞍部で行ったボーリング調査により、まさの透水性に関する基礎的データが集められ、概要は次のようにまとめられた²⁾。

- ① まさの透水性は上部ほど大きく、 M_2 、 M_3 は5～10 Lu、 M_1 はおおむね5 Lu 以下となっていたが、 M_1 の中には10～数10 Lu の高透水ゾーンが点在している。
- ② 主要断層周辺部は比較的高透水ゾーンとなっていて、5～20 Lu であった。

調査ボーリング孔で実施したルジオンテストの $P \sim Q$ 曲線から得られたまさの限界圧力は3～9 kgf/cm²で、風化度により幾分減少し、深度により増大する傾向にあった。

地質調査の結果から、コア基礎は M_2 、 M_3 をほぼ掘削除去することとし、 M_1 まさを基礎とした。主カーテングラウチングは、右岸リム部の $M_1 \sim M_2$ 、コア基礎の M_1 に点在する高透水ゾーン、および断層周辺の高透水ゾーンの改良を目的とするものである。

4.2 主カーテングラウチングの施工仕様

右岸鞍部では、前述の調査ボーリングの結果を踏まえた上で、まさのグラウチング特性の把握や適切な注入方法の決定を目的として、各種の試

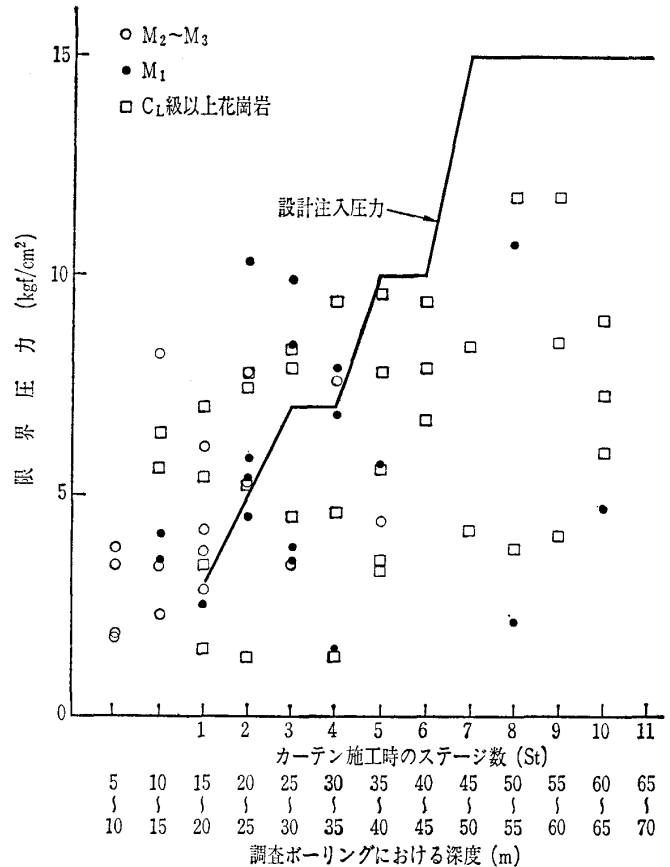


図-6 右岸鞍部主カーテンの注入圧力と限界圧力

表-3 カーテングラウチングの施工仕様（右岸鞍部）

1. 施工期間	昭和63年10月～平成2年5月					
2. 施工時期	盛立高10m以上					
3. 施工深度	20 m または 5 Lu 程度以下の分布深度					
4. 施工方法	ステージグラウチング（1ステージ5 m）					
5. 削孔機械	ロータリー式ボーリングマシン					
6. 施工順序	12mを1施工グループとし、中央内挿法により順次施工する。					
7. 注入機械	グラウトポンプ：定吐出量型グラウトポンプ、37～100 l/min プラント：自動中央プラント 圧力、流量計：自記記録式制御装置付グラウト流量圧力計					
8. 注入圧力	ス テ ー ジ	1	2	3, 4	5, 6	7～
	注入圧力(kgf/cm ²)	3	5	7	10	15
9. 透水試験および圧力	パイロットおよびチェック孔で行う $0 \rightarrow 0.2P \rightarrow 0.4P \rightarrow 0.6P \rightarrow 0.8P \rightarrow 1.0P$ $(0.1P) \quad (0.2P) \quad (0.3P) \quad (0.4P) \quad (0.5P)$ 単位：kgf/cm² P：注入圧力 () はまさ部 測定は各10分間とし、昇圧速度は0.5 kgf/cm²とする。					
10. 水押し圧力	注入圧力の1/2とし、測定時間および昇圧速度は透水試験に同じ。					
11. 注入材料	高炉セメント（B種）、ベントナイト（#300以下）、混和剤（ポゾリス No.8）					
12. 注入配合および切替え配合		開始配合				
		切 替 え 順 序				
C : W	1 : 10	1 : 8	1 : 6	1 : 4	1 : 2	1 : 1
切替え量	600 l	←	←	←	←	←
13. 注入規制	注入速度：4 l/min/m 以下 昇圧速度：0.5 kgf/cm ² /m 以下					
14. 完了基準	流量が0.2 l/min/m 以下となつてから30分間以上ため押しを行つて完了					
15. 改良目標	5 Lu 超過確率15%以下					

験施工が実施された。

試験施工としては、超微粒子セメントの使用、二重管ダブルパッカー注入工法、ステージ長1mによる注入等も試みたが、改良度・工事費・施工性等を総合的に判断すると、高炉セメント使用によるステージグラウチング工法（ステージ長5m）に代わるべき理由がなく、まさのグラウチングの事例を参考にして、最終的に表-3に示す施工仕様で決定した。

4.3 主カーテングラウチング施工結果

(1) 注入圧力の設定

調査時に実施されたボーリングテストから得られた限界圧力と主カーテングラウチング本施工における設計注入圧力の関係を図-6に示す。

まさが厚く分布する1～6ステージ（0～30m）

までは、岩盤に変位を与えない程度の圧力を目安としておおむね限界圧力付近に、深部の主に硬岩が分布するステージではグラウト到達距離などの注入効率も考慮し、限界圧力よりもやや高めで設定した。

調査ボーリングと施工時の深度のずれは、堤敷の平均掘削深（約15m）を目安に設定しているが、中央内挿による施工次数の進捗に伴い周辺岩盤の固密度が増し、限界圧力も上昇するので、必ずしもこの関係が保たれ続けるわけではない。

(2) 透水性、注入量からみた改良効果

施工次数別のルジオン値、単位長当たりの注入セメント量の超過確率図を図-7に示す。

施工の進捗により改良が進む様子がわかる。チェック孔におけるルジオン値は改良目標（5 Lu 以下85

%）を十分満足し、高透水ゾーンもない。単位注入セメント量もほとんど10 kg/m 以下の非常に低い値に仕上がっており、十分な改良効果が読み取れる。

(3) 湛水中の間隙水圧データによる注入効果の確認

湛水位がEL. 285.4 m まで上昇した際に、図-3に示すように設置されている2台の間隙水圧計 P_1 と P_2 の水頭差が0.3 kgf/cm² となった。

基盤（まさ M_1 ）やコアゾーンの透水係数には実測値を与え、主カーテングラウチングの改良範囲を2mと仮定して透水係数を順次変化させて P_1 地点と P_2 地点の水圧差が0.3 kgf/cm² となるように浸透流解析を逆解析した。

それによると、主カーテングラウチングは基盤の透水性を1/5程度に低下させる効果があったという結果がでた。

(4) ボーリングコアのセメントミルク注入状況

チェック孔より採取したボーリングコア（ M_1 まさ、地山深度23 m）のヘアクラックをセメントミ

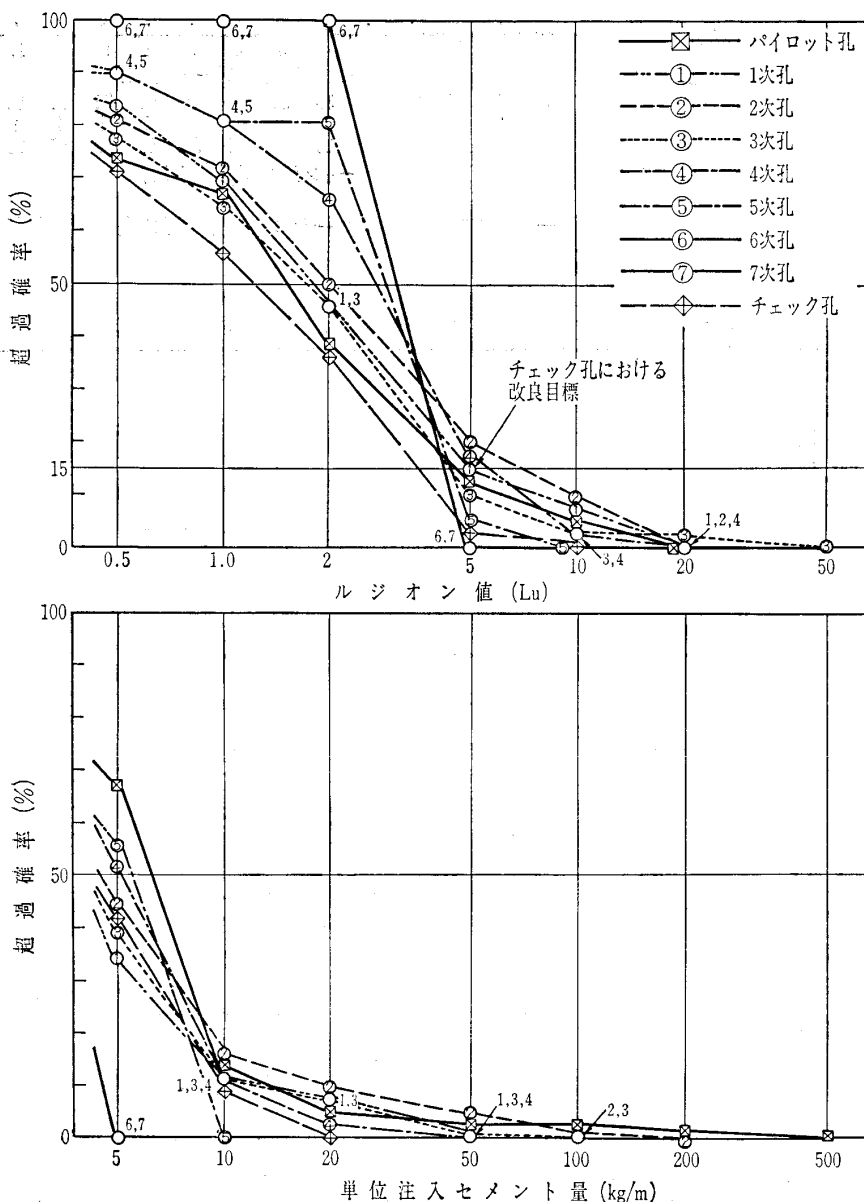


図-7 右岸鞍部主カーテンのルジオン値、単位注入量超過確率

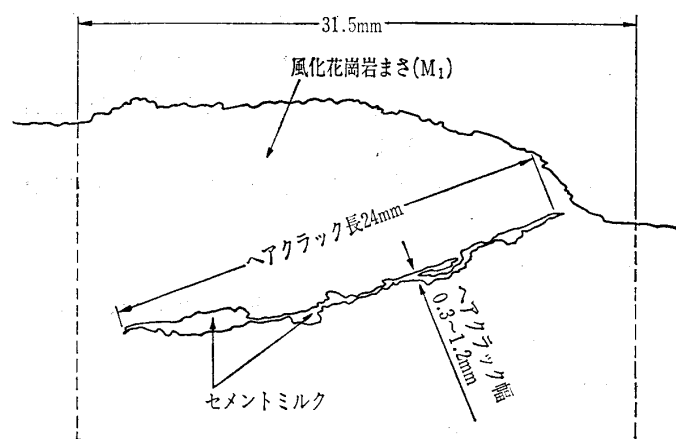


図-8 セメントミルク充填状況の模式図

ルクが充填している様子を図-8 および口絵写真-12に、コア採取位置を前章の図-2に示す。

セメントミルクの厚さは 0.3~1.2 mm であり、セメントミルクは石英や長石などの鉱物粒子を破壊することなく、 M_1 まさ中に存在する潜在的な弱面に沿って入り込んでいったように見える。

(5) 施工結果まとめ

一般に、まさ土のような強風化岩の微小な間隙にグラウトを浸透させることは難しく、割裂・変位を起こして局部的に注入されやすいと言われているが、当ダムでは次のような項目に特に留意して慎重な施工を行った結果、岩盤の変位もほとんどなく、浸透流の解析からも良好な遮水性の改良結果が得られた。

- ① かぶり厚を十分とったこと（監査廊と盛立高 10m）。
- ② 注入圧力を限界圧力を目安に設定したこと。
- ③ 注入速度と昇圧速度をできるだけ低めたこと。
- ④ 透水および水押し試験圧力を注入圧力の 1/2 に抑え、岩盤の変位や亀裂の発生を極力なくしたこと。
- ⑤ グラウトの浸透性を良くするために AE 減水剤やベントナイトを添加したこと。

5. おわりに

ダム建設地点の地形地質条件が多様化する中で、風化岩を堤体材料およびダム基礎とした事例として、寺内、布目両ダムの設計施工の概要を簡単に紹介した。

紙数の都合により説明が不十分な点があると思われるので、寺内ダムについては既刊の工事報告書等を、布目ダムについては今後報告されるのでそれらを参照していただければ幸いである。

参考文献

- 1) 水資源開発公団寺内ダム建設所：寺内ダム工事誌，pp. 40~41 ほか，1980。
- 2) 菅原 捷・中村康夫・双木英人：布目ダム地質解析（その2）—地質調査資料整理とりまとめ—，水資源開発公団試験所，pp. 41~53，1986。

（原稿受理 1991. 3. 4）