

築堤材料としての半透水・透水性材料の使用上の二、三の留意点

On the use of semi-pervious and pervious materials as embankment fill

にし だ たけ ぞう
西 田 武 三*

1. ま え が き

フィルダム築堤材としての半透水・透水性材料には、以下に示す種類の材料が使用されるケースが多い。

半透水性材料……透水係数 k が $1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-3}$ cm/s の範囲を満たすもので、フィルター材料としての砂、砂利、碎石やロック材としての風化岩、軟岩に属するもの、砂礫などがある。

透水性材料…… $1 \times 10^{-3} < k$ cm/s を満たすもので、ロック材のうち、中硬岩から硬岩に属するものや玉石まじり砂礫などがある。

本稿では、このような築堤材料を使用する場合、設計、施工段階に至るまでの二、三の留意点を日常業務を通じて経験した実施例に基づき、以下にとりまとめたものである。

2. フィルター材料の選定条件と実務上の問題

半透水性材料のうち、フィルター材料については、通常表一の条件を満たす材料が使用される。が、この⑤条件を厳守することは、ケースによっては次のような問題点があると思われる。

(1) フィルター条件のうち、①②は、それぞれ次のような役目を持っている。すなわち

- ①パイピング防止、クラックのSelf-Healingを発揮する
- ②ベース材料との相対的な透水性の目安を与える

である。

これに対し前述の条件を厳守することは、ベース材料の細粒分がかなり少なくない限り、フィルター材料との粒度のギャップが過大となり、①に対する作用効果が失われる懸念がある。

(2) 表一¹⁾は既設ダムのベース材料とフィルター材料の透水係数比を示したものである。これを見ると判明するとおり、多くのダムが堤高50mを越える高堰堤であるため、堤体の力学的な安定度を高める目的で粗粒な不透水性材料を使用している。

したがって、フィルター材料も粗粒となり、透水係数比が、1000~10000を示すものもあり、フィルターゾーン幅員が狭小であると、工事中における粗粒子の分離とそれに伴うクラック発生時のSelf-Healing効果の欠除、パイピン

表一 フィルター条件

- ① $F_{15}/B_{85} < 5$, ② $F_{15}/B_{15} > 5$
- ③ Fの粒度曲線は、Bの粒度曲線とほぼ平行であることが望ましい。
- ④ Bが細粒材料を含む場合、その材料の25mm以下の部分について①および②を適用する。
- ⑤ Fは粘着性のないもので、0.074mm (200#) 以下の細粒分含有率は、原則として5%以下とするのがよい。
- ⑥ Fの透水係数は、Bのそれより、10~100倍程度であることが望ましい。

注) ・Fは、フィルター材料、Bは、フィルターで保護される材料を表し F_{15} , B_{15-85} の各数字は、各々の15, 85%粒度を示す。
・フィルター条件については、ある書物では、①~④は同一条件、⑤の条件で5%以上含んではならないと限定し⑥については、特に記述していないものもある。

表二 既設ダムの k の比

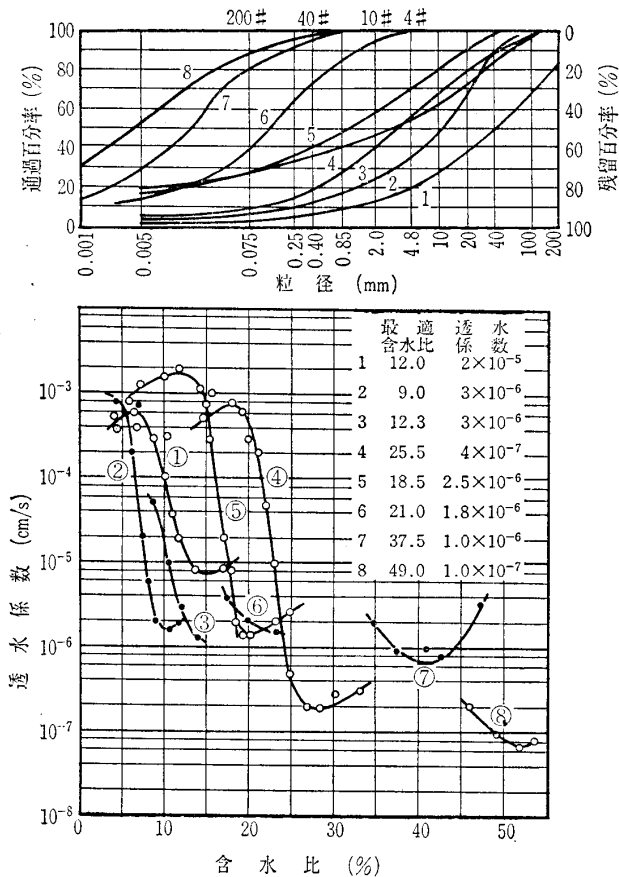
ダ ム 名	粒径 4.8mm 以上 含有率(%)	粒径200#以下 含有率(%)	k の 比
高 瀬	78	8(細), 3(粗)	360~1770
手 取 川	54.4	4.5	49~340
岩 屋	31~41	4.7	960
七 倉	60	5, 4	380~7500
下 小 鳥	60	13	2~20
魚 梁 瀬	48	3	2000~6000
瀬 戸	59	5, 0	190~1840
水 窪	45	4	100~1000
牧 尾	65	3	1000
新 冠	45~65	0.5	1000~10000
三 保	53.9	3.8	100
黒 川	60	9, 4	200
喜 撰 山	55	20, 5	70
カ ツ サ	24~45.6	9	1660~52000
明 神	5	4.2	30~250
二 居	41~54	3	60~5150
南 原	2	4.2	30~270
寺 内	62	4	500
油 谷	54.8	5.2	900
広 瀬	0	—	1000~10000
本 沢	47.5	3	100
内 谷	54.5	6.1	200
漆 沢	28.6~30.1	—	309~2500
水 窪	—	—	1351

注) 4.8mm以上含有率は、ベース(コア)材料の、200#以下含有率は、フィルター材料の値である。
・ k の比は、ベース材料とフィルター材料の透水係数比を示したものである。

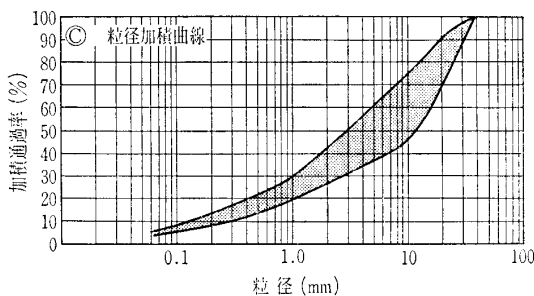
グの発生などの問題が生ずることも考えられる。

本来、⑤条件は図一²⁾でも見られるとおり、その材料の粒度構成や粗粒分の性質(破碎細粒化される粗粒分もある)、含水状態などにより、不透水性材料の領域に入ることとを防止するために設けられたものである。

*錦三祐コンサルタンツ 技術第一部 次長



図一 各試料の透水性係数—含水比曲線



図二 フィルター材料の粒度分布

しかし、不透水性材料として細粒分の勝った材料を使用することが多い堤高50m前後あるいはそれ以下の堤体においては、この点によく留意し、フィルター材料の粒度分布やフィルターゾーン幅員の決定する必要がある。

次にAダムの例を紹介する。

当初、選定されたフィルター材料の粒度分布は、図二のとおりであり粒径0.074mm以下の含有率 $\leq 5\%$ を守ったものであった。この材料に対し現場透水試験を実施した結果は、散水転圧状態でも、 $k=n \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を示し、透水性係数比が、約500となった。このため0.074mm以下含有率を7～8%にした結果、 $k < 10^{-3} \text{cm/s}$ を示し300程度となった(表一3参照)。

以上の事例から判明するとおり、0.074mm以下含有率 $\leq 5\%$ を厳守しすぎると細粒分優勢の不透水性材料を使用する堤体にあつては、フィルター本来の機能が期待できな

表一3 フィルター材料のkとその比

撤き厚 (cm)	比重	吸水量 (%)	粒径200#以下含有率 (%)	k ($\times 10^{-3} \text{cm/s}$)	k の比
20	2.682	1.37	4.7	0.374	83
30	2.685	1.36	4.8	2.250	500
40	2.685	1.34	4.8	2.475	550
20	2.700	1.30	6.9	0.106	24
30	2.692	1.32	7.7	0.675	150
40	2.691	1.32	6.9	1.255	280

- ・各SV90D (11 ton 振動ローラー) で6回転圧
- ・ $\phi_{\text{max}} = 38.1 \text{mm}$
- ・ k の比は表一2のものと同じ意味である。

くなる場合もあり、ダムの安全上、好ましくない。この点に関しては、三国³⁾も注意を促がしている。

このためフィルター材料の選定に当たっては、透水性係数比が、10～100程度(筆者は他ダムの実績や①条件との関係も考慮し、10～500程度が妥当と考えている)に注目するとともに、かつ不透水性ゾーンと透水性ゾーンとの間に中間粒度分布を有するトランジション的なゾーンがなく、粒度分布差が大きすぎる場合には、二重フィルターにするか工事中における粗粒子の分離による不透水性ゾーンへの悪影響を多少ともカバーするためにフィルターゾーン幅員を広く確保するなどの配慮が必要であろう。

3. 現場と室内試験粒度との差に対する調査対応法

半透水や透水性材料のような粗粒材料は、施工段階で砂礫の堆積状況や原石山の地質状況によって、いろいろな粒度分布の材料として堤体中使用される。このような築堤材料の特性を室内試験段階で十分把握し、設計、施工に反映させるためには、次の2点を満たすことが望ましい。

- (1) 現場粒度に合わせたあらゆる粒度分布の材料に対して、試験を実施する。
- (2) 現場に発生するすべての岩質、岩種あるいは礫質、礫種の材料について、(1)を加味し試験を実施する。

しかし、最大粒径の点や調査試験期間および費用などの面で現実には不可能である。したがって、これら諸点を考慮し現場に近い状況で、かつ期間、費用が少なく済む方法で試験を実施し、その結果を設計、施工に反映させることが、重要なことになる。

ここで前述の(1)(2)条件のうち、(1)については、今日までに種々の実験研究がなされており、最大粒径の違いによるせん断抵抗角への影響は、間隙比が同じで粒度分布曲線が平行であれば、表れないことが報告されている⁴⁾ことから、現場と試験室における最大粒径の違いによる問題は生じないと考えてよいであろう。

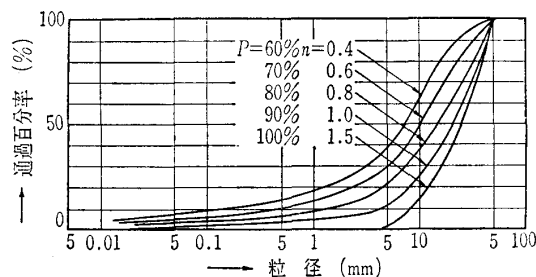
残る問題として、いろいろな粒度分布の材料に対し室内試験においていかに対応するかであるが、一つの方法として次のような試験が考えられる。

ある一つの最大粒径 (Seed (シード)⁵⁾ の説明によれば、

表—4 透水性材料試験結果 (Bダム, 大型試験)

試料名 Talbot・ n	比重	突固め効果 $E_c(\%)$	w (%)	ρ_d (t/m^3)	e	D_r (%)	三軸圧縮試験	
							$c(tf/m^2)$	$\phi(^{\circ})$
P_{60} ($n=0.4$)	2.71	50	2.1	1.937	0.40	54.3	5.6	44°00′
		100		1.980	0.37	68.0	8.7	43°20′
		200		2.053	0.32	90.4	12.5	43°30′
P_{70} ($n=0.6$)	2.70	50	1.7	1.952	0.38	51.4	8.5	43°30′
		100		2.017	0.34	75.1	8.6	44°40′
		200		2.055	0.31	88.6	9.5	46°20′
P_{80} ($n=0.8$)	2.70	50	1.3	1.932	0.40	55.0	6.1	45°20′
		100		1.980	0.36	71.8	9.0	44°20′
		200		2.020	0.34	85.1	10.7	45°30′
P_{90} ($n=1.0$)	2.69	50	0.9	1.830	0.47	38.2	9.2	42°30′
		100		1.901	0.42	64.7	8.5	44°00′
		200		1.971	0.36	88.9	9.2	45°40′
P_{100} ($n=1.5$)	2.69	50	0.6	1.733	0.55	25.5	7.2	42°40′
		100		1.775	0.52	47.9	8.0	43°00′
		200		1.838	0.46	78.8	11.8	42°45′

注) ・供試体の大きさは、直径300×高さ600mmである。・突固め効果 $E_c(\%)$ については、注1)参照のこと。



図—3 粒度分布曲線図

試験供試体直径の 1/6 以下におさえることが望ましいとしている。また土質試験法⁹⁾には、1/4 以下と記されている) に対し Talbot(タルボット) 指数: n を $n=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5$ などに変化させた粒度分布の異なる試料を作成し試験を実施する。このような状態で現場発生材料は、これら試験試料のいずれかに平行あるいは中間の粒度分布となり、室内試験により得られたせん断強度、その他の力学特性は、現場材料のそれを反映しているものと解して支障ないであろう。

したがって、(1)に(2)条件すなわち材質や種類による組合わせが加われば、現場発生材料の力学特性をおおむね把握することができたことになる。

Bダムにおいては、(1)条件のみを満たした試験を実施した。図—3には、試験試料の粒度分布曲線を示し、表—4は、これら試料の試験結果を示したものである。この結果、粒度分布や締固め効果の違いにより力学特性がいろいろ変化していることが分かる。この試験において不足した点は、材料の質、種類の違いによる組合わせが一つのみであった点であり、調査試験期間や経費の面で許容されるならば、他の質、種類の材料についても、このような一連の試験を行い調査しておくことが、現場対応を考えた場合、必要であろう。

以上の点より、堤体ゾーニング中、半透水あるいは透水性ゾーンが、構造上、重要な役割を果たす堤体にあつては、少なくとも5(粒度分布)×2~3(質、種類)の組合わせ数量に見合うだけの室内試験を実施し、現場材料特性を把握すべくデーターを集積することが望ましいと考えられる。

4. 設計数値と施工管理値との関係

半透水、透水性材料のような粗粒材料に対し、現場盛土管理でよく採用される方法として、所要の透水性やせん断強度の確保、変形量を少なくするなどの条件から、

- (1) 粒径の規制(最大粒径: D_{max} や 50%粒径: D_{50} , 粒径 0.074mm 以下含有量規制)と乾燥密度: $\rho_d(\rho_d \geq n_1)$ や比重: $G(G \geq n_2)$ の規制
- (2) ρ_d と G から求まる間隙比: e のみで規制(締固まり程度を ρ_d から、材質を G から判断する方法で $e \leq n_3$ と規制)

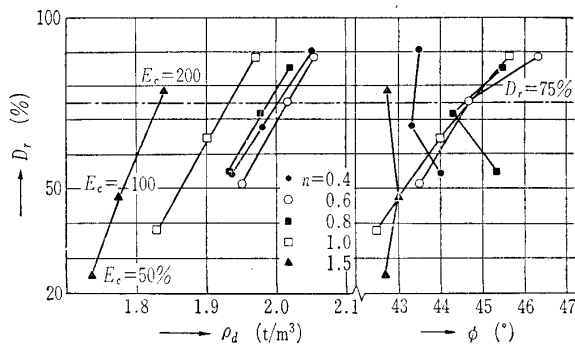
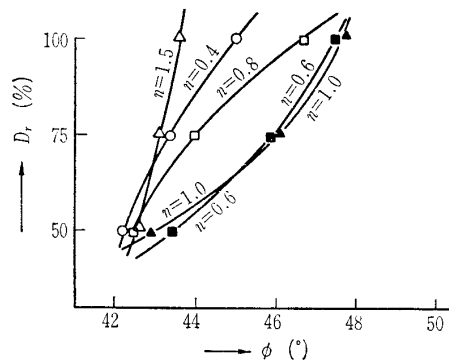
などが、その管理の容易さから採用されている場合が多い。しかし、このような方法で問題となるのは、下記のような点であろう。

例えば、BやCダムの室内試験結果でも見られるとおり、粒度分布曲線の勾配が緩くなる Talbot 指数: n の小さな試料の試験結果では、 e は小さく ρ_d やせん断抵抗角が大きくなる。すなわち、よく締固まった状態となる。

Bダムの試験結果で明らかなように、Talbot 指数が、 $n=1.5$ のように大きくなった試料では、 $E_c \times 400\%$ (注1)で締固めても $n=0.4$ のジグギング法による緩詰め状態には遠く及ばない ρ_d , e の値となる(表—4, 図—4参照)。

すなわち、 $n=1.5$ のような粒度分布の材料による試験

注 1) JIS A 1210 に規定された試験方法により、Standard Proctor として有名な締固め仕事量 $E_c \div 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kg/cm}^3$ を 100%としたもので、400%は 4 倍に相当する。

図—4 D_r と ρ_d , ϕ との関係 (Bダム)図—5 D_r と ϕ との関係 (Cダムの例)

結果に基づき、 $e \leq n_a$ 、 $\rho_d \geq n_b$ と規定した場合、 $n=0.4$ の材料にとっては、締固め程度が非常にルーズな状態でもこの規定を満足し、その結果、盛土の力学特性（せん断強度や沈下などの変位特性）が低下し、設計数値を満たすことができず、堤体の安定性に悪影響を及ぼす。

この点については、BやCダムの試験結果でも粒度分布曲線の違いによる力学特性の差が顕著に表れていることから容易に予測できるであろう。

したがって、調査試験段階においては、3章で述べた程度の組み合わせ試験数量を最低実施し、あらゆる状態の材料に対し、設計、施工管理段階で十分な検討ができるようデータを集積する必要があると考えられる。

前述のような問題に対する一つの解決法としては、図—4, 5に示したように相対密度： D_r をパラメーターとして整理すれば、いろいろな粒度分布の材料に対しても比較的スムーズに適正値を見つけ得るであろう。

いずれにしても、設計段階では材料特性に見合った堤体のゾーニングはもちろんのこと、粒度特性を考慮した設計数値や管理値の選定（間接的には、 D_r による規定が反映されていることになる）を行う必要があると考えられる。このことは、大粒径の透水性材料を扱うゾーンに対していえることであり、比較的粒径の細かい半透水、透水性材料からなるゾーンに対しては、 D_r による管理が比較的容易に実施でき優れていると判断される。

5. 透水性材料の耐久性に関する問題

堤体の安定上、重要な役割を持つ透水性ゾーンは、堤体ゾーニング中、上・下流斜面表層に位置し、場合によっては、更にその表層にこのゾーンを波浪・表面水による浸食や風化作用から保護するため、大塊の良質岩や玉石などからなる薄層の保護層を設けることがある。

このため透水性ゾーンに使用される材料は、ダムの立地条件により、日射風化、水分膨潤収縮、凍結融解などのような物理的風化作用や溶解、酸化、水酸化、炭酸塩化作用などの化学反応によって生ずる化学的風化作用の影響を受けることになる。

通常、ダムの耐用年数は、貯水池の機能上（設計堆砂量は、100年分を計上する）、100年あるいは、それ以上と考えられ、堤体の安定面から重要な役割を占める透水性材料には、その特性が力学的に優れていることはもちろんのこと、風化に対しても耐久性のある材料を使用する必要がある。

この意味で耐久性の有無を判定するための目安としては、表—5⁷⁾に示す値が適用されている。

ここに紹介するDダムの例は、通常の岩石試験結果による判定では、表—5の値を上回り、かつハンマーでたたけば金属音のする岩にもかかわらず施工後、大気中に露出した表層（表面より鉛直方向に約50cmの部分）岩塊のみが、完全に破碎細粒化し泥状になった。以下にこの原因、対策について記述する。

なお、材料特性を表—6⁸⁾に、また軟岩を使用した既存ダムの材料特性を表—7に示した。この値を見る限りDダムの岩は優れた中硬岩クラスの岩である。

一方、本原石山が、採取地として採用されたのは、民間

表—5 判定諸基準

判定項目	基準値 ¹⁾	基準値 ²⁾
比重	2.5以上	2.5以上
吸水率	3%以下	3%以下
安定性	12%以下	12%以下
すりへり量	40%以下	—
圧縮強度	—	400 kgf/cm ² 以上
適合岩石	玄武岩、安山岩、硬質砂岩、硬質石灰岩など	

注 1) コンクリート砕石 (JIS A 5005)

2) 農林水産省、設計基準による。

表—6 岩石の特性

項目	特性
原石状況	原石山の岩は玄武岩である。東北地方新第三系標準層序によると、西黒沢の四沢層に属する。帯緑黒色塊状を呈し、所々に沸石脈がある。
岩石試験結果	比重—2.72 吸水率—1.58% 安定性—0.8% 圧縮強度—500~700 kgf/cm ² 大型一面せん断— $c=3.03 \text{ tf/m}^2$, $\phi=40^\circ 24'$

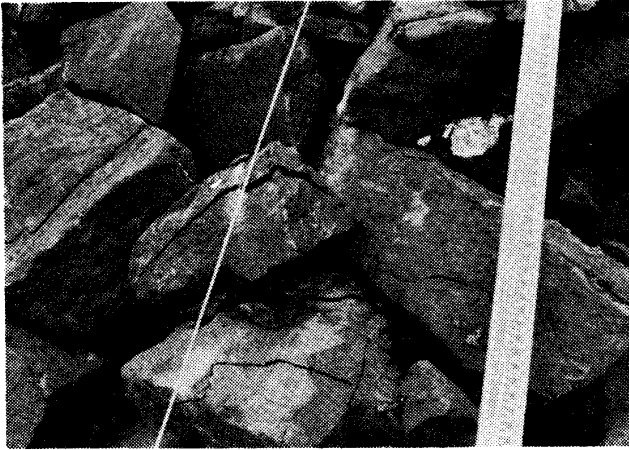


写真-1 き裂の入り始め



写真-2 表面より風化

のコンクリート骨材用の碎石場が以前からあった実績や凍結融解試験、岩石試験結果などが、表-5を上回っていたことによる。

(1) 風化状況

透水性ゾーンの盛立ては、昭和50年度から約4か年にわたり実施され、53年8月に完了した。

風化による細粒化現象は、54年度に一部に見られ、55年8月ころより51、52年度に盛り立てられた材料に顕著に表れ始め、53年度施工部分にも大きなき裂が入り始めた。この状況は、写真-1、2、口絵写真-3に示したとおりである。55年度以後には、この現象を重視し、風化原因の究明と対策を目標にしていろいろな調査試験が実施され、この時点からその一員として加わった。

最初、堤体のり面の施工年度別の風化状況を調査するため、各年度盛立てを代表する標高に3箇所ずつ計9箇の調査用孔を深さ2.0mまで掘削した。この調査孔を肉眼観察した結果は、前述したとおりである。また、岩塊を孔内および原石山より採取し室内試験をした結果は、表-8に見られるとおり、一部のものを除きコンクリート用骨材として合格するものであり、このデーターからは短期間にこのような風化現象が生じることは推測しがたいものであった。

(2) 風化原因調査

表-7 ダムの軟岩ロック材使用例

ダム名	岩 種	比 重	吸水量 (%)	安定性 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
水 窪	花崗せん緑岩	2.57	1.94	8.3	510
小田川	玄武岩	2.43	5.92	1.19	577
早瀬野	石英粗面岩質凝灰岩	2.37	5.55	5.22	258~479
岩 洞	硅化粘板岩	2.63~2.68	—	2.0	1200~2400
白 川	緻密岩安山岩	2.53	3.0	—	400~750
九頭竜	角礫凝灰岩	2.67	1.2	—	—
厚 真	泥 岩	2.23	7.0	100.0	240
日出生	熔結凝灰岩	2.31	5.1	13.8	300
樽 水	角礫凝灰岩・安山岩	2.10	17.0	100.0	—
野花南	シルト質泥岩	2.35	6.0	—	—
沼 田	砂 岩	2.23	11.5	—	—
山田池	輝緑凝灰岩・チャート	2.63	0.6	—	200~300
竹 山	安山岩	2.61	3.37	8.7	1068

表-8 調査孔試験値

試 料 名	比 重	吸 水 量 (%)
51年度 (5点平均)	2.72	2.0
52年度 (4点平均)	2.73	2.76
53年度 (3点平均)	2.74	1.96
原石山 (3点平均)	2.72	1.87

風化原因を追求するため、まず物理的風化面より堤体のり面の岩塊を用い室内試験を実施した。また、試験を実施するかたわら堤体においても温度計を埋設し、日射風化による影響を検討すべくのり面表層から堤体内部への温度変化を調査した。以下にこれらの調査試験結果をまとめて報告する。

(i) 温度、吸水量を変化させた繰返し試験

岩塊に対し、表-9に示したような温度差、吸水状態を変化させ繰返し試験を実施した。その結果、自然状況と近似する曝露試験において風化細粒化現象が見られた。これに対し、凍結融解や乾湿試験のような温度差の過酷な試験においては、顕著な風化現象は見られなかった。このことは、別途実施した凍結融解や安定性試験の結果においても同様のことがいえる(表-10参照)。

(ii) 堤体内部の温度変化

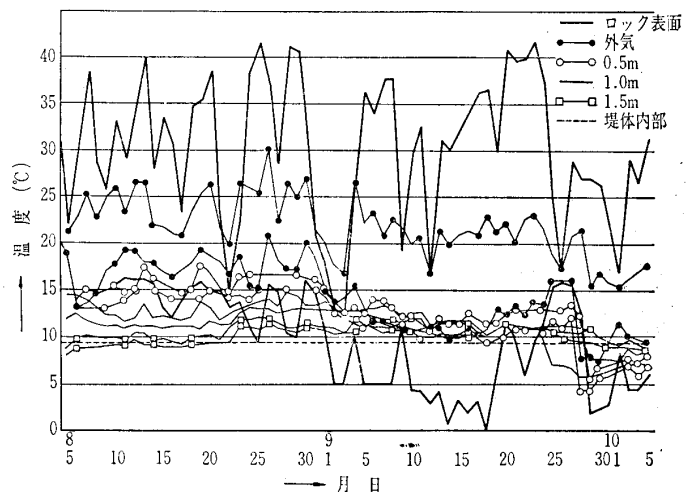


図-6 堤体内部深度別最高最低温度変化図

表—9 風化試験結果

番号	試験名	試験方法	個数	平均残重量率	細粒度合	水分の変化		温度の変化		日射の有無	
						変化の程度	度合	変化の程度	度合	有・無	度合
1	浸水試験	水中に浸し放置	5箇	$\frac{90.5\%}{434 \text{ 日}}$	小	無変化	無	室温	小	無	小
2	凍結融解試験	凍結と融解の繰返し	9箇	$\frac{96.9\%}{300 \text{ 日}}$	小	ほとんどなし	小	$-15 \sim +25^{\circ} 40^{\circ}\text{C} \pm$	中	無	小
3	曝露試験	昼間外気夜間浸水	12箇	$\frac{59.7\%}{381 \text{ 日}}$	大	自然状態と同じ	中	$20^{\circ}\text{C} \pm$	小	有	大
4	乾湿試験	浸水強制乾燥繰返し	9箇	$\frac{86.8\%}{300 \text{ 日}}$	中	強制乾湿繰返し	大	$85^{\circ}\text{C} \pm$	大	無	小
5	吸水量試験	堤体材料の深度別吸水量の測定		深度 0 m 0.5 1.0 1.5		吸水量 0.66% 0.59 0.19 0.15		1.0m以深では、吸水量は小さい。			
6	堤体温度測定	堤体内部の深度別温度変化測定		外気温 深度 0 m 0.5 1.0 1.5 埋設計器		温度差 7.8° 20.6 1.4 1.4 0.8 0.1		堤体表面の温度差は、外気温の約3倍あるにもかかわらず、内部では 2°C 以下となり図—6から判明する とおり1.5m以下では、外気温の影響がほとんどなくなる。			

表—10 玄武岩の凍結融解試験結果

試料名	比重	吸水量(%)		超音波伝ば速度		凍結融解試験結果	
		0サイクル	終了時	0サイクル(km/s)	終了時(km/s)	終了サイクル	観察
1	2.68	0.81	1.07	4.47	4.95	205	初期のひび割れに沿って大きく分割
2	2.63	1.52	3.61	3.61	4.21	300	隅が欠け落ちた程度
3	2.64	1.85	2.30	3.39	—	61	試料名1と同じ
4	2.68	1.92	2.22	3.59	—	61	3個に分割された
5	2.68	0.52	1.65	4.40	4.32	300	248サイクルで一部分が欠け落ちる
6	2.67	0.86	2.13	4.46	4.69	218	大きく分割された
7	2.65	1.00	2.52	4.33	4.65	300	大きな損傷はなし
8	2.62	1.22	—	4.07	4.35	205	大きく分割された

注) 試験は、ASTM C—666 方法Aに準じて実施、凍結温度 -17.8°C

表—9、図—6 から判明するとおり、堤体内の温度はのり面表層より1.5m以深となると最高と最低との温度差は小さくなり、外気温の影響は、ほとんどなくなる。

表面保護層の厚さと乾湿や凍結融解の繰返しなどによる劣化度との関係については、岡本他⁹⁾の研究があり、被覆厚さと劣化度との間には、指数関係が認められている。

したがって、日射風化や凍結融解による風化の影響を受ける材料については、良質保護材による表面被覆が、風化防止上、効果大きい。既設ダムの事例として、厚真、樽水、漆沢、野花南ダムなどがあり、これらのダムは、いずれも材料特性を考慮した表面保護層が施工されている。

(3) 風化原因の追求試験

(1)、(2)の段階では、材料をとりまく環境条件を室内において短時間に再現させるような方法により、最も大きな影響力の風化現象を究明しようとしたものである。

これに対し本試験は、岩塊の中のどのような鉱物が、どのような作用を受け風化作用を早める原因となったかを追求するため実施されたものである。

試験は、偏光顕微鏡観察、X線回折、化学分析、ソクスレー抽出の各試験である。

(i) 偏光顕微鏡観察

偏光顕微鏡を用いた観察結果は、次のとおりである。

明りょうな斑状組織を示し、斑晶としては、普通輝石が最も多く、他に斜長石(亜灰長石)と変質したカンラン石を有する。石基は比較的粗粒で短冊状の斜長石(亜灰長石)とその間に入る粒状の普通輝石が主体であり、その他に変質した斜方輝石、石英、変質したガラス、不透明鉱物などが見られ石英も存在する。変質鉱物は、緑褐色でかなり複雑屈折を示し、光学的にはスメクタイト^{注2)}である可能性を示す。

(ii) X線回折

試料は、堤体表層部で著しく風化を受けたもの、および新鮮な原石の二試料である。この二試料中の変質鉱物を純粹にした後、鉱物学的検討が行われた。新鮮な原石においては、乳鉢を用い80#以下に粉碎した後、水中に懸濁し沈降法により径4 μm 以下の粒子を採取し

- ・それをそのままガラス板に塗布したもの
- ・1規定MgCl溶液または、1規定KCl溶液で4回洗

注2) モンモリロナイト群と同義名、マグネシウムの多い粘土の名前として使用される。

表—11 変質鉱物の化学組成

成 分	新 鮮 岩 (10点の平均)	風 化 岩 (8点の平均)
Si	3.354	3.407
Ti	0.019	0.008
Al	1.294	1.038
Fe ²⁺	0.616	0.813
Mn	0.006	0.009
Mg	1.051	1.420
Ca	0.479	0.113
Na	0.159	0.092
K	0.237	0.424

浄することにより Mg または K 飽和させたあとガラス板に塗布したもの

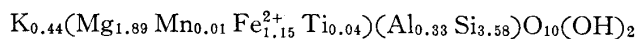
の二種類である。これらの試料を風乾、エチレングリコール処理、グリセロール処理を行ったものについて、X線回折を実施したものである。なお、風化を受けた試料については粉碎することなく直接水中に懸濁し、同様の処理を施したものである。

X線回折の結果、新鮮岩、風化岩両試料とも、15.2Åに底面反射を示し、エチレングリコール処理で各々16.7、16.9Å、グリセロール処理でともに、17.7Åに膨張し明らかにスメクタイトであることを示している。その膨張性は両試料で明らかに差を示し、風化岩中のものの方が小さく、これは層電荷の違いに起因しているものと考えられる。

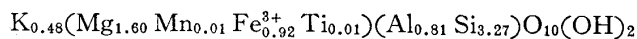
(iii) 化学分析

X線回折試験と同様、各試料の4μm以下の部分のK飽和したものについて、EPMA法により化学分析を行い得られた結果をO₁₀(OH)₂当たりの陽イオンの原子比で表すと表—11のようになる。X線回折の結果、両試料にかなりの量含まれている不純物は、斜長石である。K飽和したスメクタイトには、Ca、Naは存在しないため、Ca、Naをすべて斜長石に由来したものとし、その量を表—11の値から差し引き補正を行った。この結果に基づく原子比から求められる構造式は、次のようになった。

新鮮岩中の変質鉱物



風化岩中の変質鉱物



なお、Feは前者では二価、後者では三価と仮定した。

この構造式は、鉱物が両者とも鉄に富むサポナイトであることを示し、風化岩中のものの方が、層電化が大きいことが分かる。また、新鮮岩の方が四面体サイトのAlによる置換が小さいこと、風化岩中の八面体サイトに空席があることが判明した。

以上の試験結果より、変質鉱物は鉄に富むサポナイトであり、層電化は風化岩中の方が大きいことが分かった。

(iv) ソクスレー抽出試験

風化の進行を室内で再現するため、ソクスレー抽出試験を実施した。ソクスレー抽出とは、図—7のような抽出装

置を用い、試料は円筒ろ紙に入れて抽出器に置きフラスコに蒸留水を入れて加熱すると蒸発し、冷却器で冷やされて凝結し抽出器に滴下する。抽出器に水がたまるとサイフォンでフラスコに戻る。これが繰り返されて抽出された成分が、フラスコ中に集積することになる。

本試験においては、フラスコに160mlの蒸留水を取り7日間抽出し、集積した成分の濃度を測定してその重量を求めた。

試験には、新鮮岩と比較のため静岡県天城湯ヶ島町大川端キャンプ場付近で採取した中新世湯ヶ島層群中の玄武岩を粉碎して得た16~80μの粒度のものが用いられた。後者の岩は、初生鉱物が前者の岩と類似しているが、サポナイトを全く含んでいない。この二試料に以下の前処理を施して下記の六試料を調整した。

No. 1 新鮮岩 無処理

No. 2 新鮮岩 紫外線(波長254nm^{注3)})照射、10時間

No. 3 新鮮岩 6% H₂O₂に1時間ずつ三回加熱

No. 4 新鮮岩 1規定NaClで4回洗浄

No. 5 比較用岩 無処理

No. 6 比較用岩 No. 3と同処理

NaとKについての試験結果を表—12に示した。No. 4にNaが多いのは、NaClで前処理した試料なので当然である。その他の試料については、多少のNaが検出されているが、有意の差は出ていない。試料中には、NaおよびKを含む鉱物として斜長石があるが、これはこの程度の処理では安定であり、分解しないことを示している。No. 3の抽出液は、褐色に色付いており、Feが溶出したことを示している。このことは、その原料中に鉄に富むサポナイトが含まれていることを裏付けているといえよう。

(v) 考 察

本ダム堤体の透水性材料は、中新世の玄武岩であり、いわゆるグリーンタフ変質を受けている。グリーンタフ変質

表—12 ソクスレー抽出結果

試 料 番 号	試 料 重 量 (g)	抽 出 量	
		Na(mg)	K(mg)
No. 1	8.781	1.5	0.01
No. 2	5.205	1.1	0.01
No. 3	4.668	0.7	0.01
No. 4	5.571	5.7	0.01
No. 5	10.246	0.76	0.01
No. 6	8.032	0.94	0.01

注 3) 標準波長の単位を表し1nm=1000⁻¹×1μmに当たる。詳細は、東京天文台編纂：理科年表、昭和59年、pp. 498参照。

における変質鉱物については、玄武岩などの塩基性岩が埋没変成的性格の変質作用を受けた場合、サポナイト〜サポナイト緑泥石混合層を経て、緑泥石の分帯ができることが明らかにされている。

今回の試験により、原石中の変質鉱物は鉄に富むサポナイトで、その鉱物学的性質は、他のグリーンタフ地域のものと大差ない。

サポナイトは、膨張性粘土鉱物の一種で水を吸水し膨張する性質を持っている。化学分析の結果によれば、風化過程では、サポナイト中のFeの酸化と八面体サイトからのFe、Mgの溶脱が起こっている。変質鉱物を前処理として H_2O_2 で処理した結果、直ちに色が褐色に変化したこと、風化物中の変質鉱物のEPMA分析にあたり脱鉄処理をしたところ、色が青灰色に変化したことなどから判断し、Feの酸化は、Fe、Mgの溶脱に比較し速やかな反応であると考えられる。

したがって、まずFeの酸化が起こり、それによる層電荷の減少が水を吸って膨張するきっかけとなり、その膨張が岩石に多くのクラックを生じさせ水の浸透を促進し、Fe、Mgの溶脱を早めたのであろう。しかも堤体のり面表層が特に酸化作用を受けやすい環境下にあったことが、表面岩塊の風化作用を促進させたものと考えられる。

以上のとおり風化原因としては、前述したものや応力解放などの物理的風化作用と化学的風化作用とが複雑にからみ合い生じたものであろう。

近年、治水利水上の要請によりダム計画が急増した結果、地質の悪い所やこれに付随して良質な透水性材料の確保が困難なサイトが、多くなってきている。

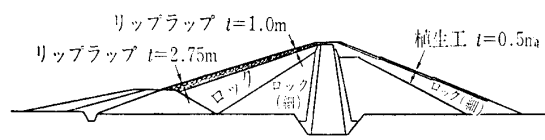
したがって、Dダムのようなケースも今後多く出てくると予想されるので、通常の岩石試験のみでなく、X線回折、化学分析、その他いろいろな角度から検討を加えることが必要であると考えられる。

(4) 対策工

以上の調査試験結果より堤体のり面付近の材料は、過酷な温度の上昇下降現象を受けやすく、このような環境条件が鉱物の風化要因となる化学的風化作用を助長し、岩塊を数年の間に泥状に破碎細粒化させたものであろう。以上のような風化現象に対する防止策としては、調査試験結果や他ダムの実施例などから、熱的遮閉効果や熱拡散率を小さくするような効果を持つ表面被覆工を実施することが望ましいと判断された。このような被覆工としては、以下のようものが考えられる。

- ① 粘性土と植生工による被覆工
- ② アスファルト舗装その他二次製品による被覆工
- ③ 耐久性に優れた透水性材料による被覆工

これらの工法に対し、ダムの目的、堤体型式、基礎処理工との関係、工事費、その他維持管理などを比較検討した



図—8 上・下流斜面保護工

結果、③の方式を採用し、表層風化材料を除去した後、表層大塊ゾーン下には細粗粒材料がよく混合された河床砂礫材料をフィルター効果を持たせ設けた。図—8には、堤体標準断面を示した。

6. ま と め

本稿においては、半透水、透水性材料に関する諸基準や判定方法を、調査、設計、施工に関して実務面を通じてながめてみると、いろいろな問題点につき当たることが多く、最近、経験した二、三の事例を紹介しとりまとめたものである。

特にフィルダムの場合、築堤材料一つとり挙げても、各ダムによって性質が異なることはもちろんのこと、同一土取り場やゾーン内においても、微妙な差がある。したがって、このような分野では、各ダムを担当する技術者の経験や考え方が、調査設計方針や施工管理方法において大きなウエイトを占めることは、まぬがれないのが現状であろう。このような観点に立ち、事例をまじえ、二、三の意見を述べたものである。

本稿が、この方面に携わられる方々の一助としてお役に立てば幸甚に存ずるしだいです。

おわりに当たり、本報文中とりあげましたダムの調査設計において、御指導御助言をいただきました京都大学長谷川教授、岐阜大学仲野教授、静岡大学長澤教授、岩手大学高橋教授、多田助教授の諸先生方および青森県本多所長、田端主任はじめ関係各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 電力土木技術協会編：最新フィルダム工学（改訂新版），pp. 50, 51, 58, 59, 1981.
- 2) 三國英四郎：透水試験，土質調査試験結果の解釈と適用例，土質工学会，pp. 282~283, 1968.
- 3) 三國英四郎：ロックフィルダムの漏水と対策，土と基礎，Vol. 31, No. 4, p. 2, 1983.
- 4) 松本徳久・渡辺和夫・小川 優：ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験，土木技術資料，Vol. 24, No. 7, p. 24, 1982 など.
- 5) Seed, H.B.: フィルダム討議会，議事要録，p. 31, 昭和46年9月29日~10月1日.
- 6) 土質工学会編：土質試験法（第4刷発行），p. 203, 1970.
- 7) 農林水産省構造改善局編：土地改良設計基準，設計ダム，pp. 157, 158, 192, 1981.
- 8) 通商産業省編：昭和50年度広域調査報告書，八甲田地域，p. 88, 1976.
- 9) 岡本隆一・中村康夫・加藤則男：岩石の劣化速度に関する考察，土木技術資料，Vol. 21, No. 2, 1979.

（原稿受理 1984.3.28）