

土 木 研 究 所 資 料

フィルタ基準に関する調査と考察

平成2年10月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © 1990 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

フィルタ基準に関する調査と考察

フィルダム研究室 室 長 松本 徳久
研 究 員 山口 嘉一
部外研究員 山野 雅彦*

*) 現 日本国土開発院 (1989年4月より1990年6月までフィルダム研究室に在籍)

要 旨

ゾーン型フィルダムのゾーン間に適用されるフィルタ則について、以下に示す調査及び考察を実施した。

- ① 現在、わが国でフィルダムの設計に適用されているフィルタ基準（5則）の持つ意味を、既往の研究成果に対する文献調査により検討した。
- ② 日本と諸外国のフィルダムにおけるフィルタ5則の適用状況を調査し、現実の適用上の問題点を明らかにした。
- ③ 最近提案された新しいフィルタ基準を紹介するとともに、今後我々が検討していかなければならない項目を明確にした。

キーワード：フィルダム，フィルタ則，パイピング，透水性，分散土

目 次

1. はじめに	1
2. フィルタの基準とその意味	2
2.1 現行のフィルタ基準	2
2.2 フィルタ基準の意味	2
2.2.1 透水則	2
2.2.2 パイピング則	4
2.2.3 平行則	4
2.2.4 -25mm規定	6
2.2.5 細粒分規定	6
2.2.6 緩和規定	7
3. フィルタ基準に関する調査	8
3.1 調査概要	8
3.2 調査結果	9
3.2.1 国内ダムの材料物性	9
3.2.2 国内ダムにおけるコア材料とフィルタ材料の間のフィルタ基準適用状況	10
3.2.3 国内ダムにおけるフィルタ材料とロック材料の粒度の関係	19
3.2.4 海外のダムにおける調査結果	20
4. フィルタ基準適用にあたっての問題点	26
5. 問題点に対する既往の研究からの議論	27
5.1 透水則とパイピング則の安全率	27
5.2 -25mmの規定と施工時の材料分離	30
5.3 コア材料の粒度の影響	30
5.4 フィルタ材料の粒度の影響	32
5.4.1 均等係数の影響	32
5.4.2 細粒分の含有率の影響	33
5.5 フィルタ材料の粒子形状の影響	35

5.6	フィルタゾーンへの応力集中	36
6.	フィルタ基準の最近の動向	37
6.1	概要	37
6.2	スラリー試験	38
6.3	ピンホール試験	42
6.4	Sherardらの研究	43
6.4.1	分散性土の判定、区分	44
6.4.2	新基準の提案	44
6.5	新基準の適用とその問題点	50
7.	まとめ	54
謝辞		56
参考文献		57
参考資料		
各ダムの標準断面図および各盛立材料の粒度分布		61

1. はじめに

ゾーン型のロックフィルダムは、透水性材料、遮水材料および半透水性材料により構成されている。このうち半透水性材料は、堤体積に占める割合は小さいものの、遮水ゾーンと透水ゾーンの材料の性質の急変を避けることにより応力の伝達と変形をスムーズにしたり、遮水（土質）材料の流失を防ぎ浸透水を安全に排水するという非常に重要な機能を有している。前者の目的の半透水ゾーンはトランジションゾーンとも呼ばれ、後者の目的で粒度規制を行って設けられた半透水性材料およびゾーンをフィルタ材料およびフィルタゾーンという。

フィルタ材料は、保護すべき遮水材料の粒度に従い、ある粒度条件を満足しなければならない。これが、いわゆる“フィルタ基準”である。今回は、現在我が国で適用しているフィルタ基準の意味を、既往の研究についての文献を調査することにより明確にした。また、我が国および諸外国のロックフィルダムにおけるフィルタ基準の適用状況および適用上の問題点を整理し、その問題点の解決の糸口を見い出すために既往の研究成果をもとに検討した。

さらに、最近、米国を中心に新しいフィルタ基準が示され、実際にその基準を採用している機関も出てきた。そこで、この新しい基準に関する研究動向を整理し、今後の日本のダムへの適用に際しての検討項目を明らかにした。

以上より、より現実に対応したフィルタ基準のあり方を模索した。

また、ここで研究の対象としているフィルタ基準は、なにもフィルダム堤体内の隣接ゾーン間のみに適用されるのではなく、以下に示すフィルダム基礎の浸透流制御¹⁾のうちブランケット工法、フィルタ工法、ドレーン工法などにも適用される非常に重要な基準である。

基礎における浸透流制御

1. 浸透流路長を長くすることによる浸透流の抑制
(ブランケット工法)
2. 浸透流路を遮断する止水
(カーテングラウチング、連続地中壁工法等)
3. 安全に排水させる (フィルタ工法)
4. 排水による揚圧力の低減
(ドレーン、リリーフウェル工法)

2. フィルタ基準とその意味

2.1 現行のフィルタ基準

現在、我が国のロックフィルダムのフィルタ材料に対する粒度基準は、主としてSherardら(1963)²⁾が当時の種々の研究、基準等を参考にとりまとめて作成されたもので、大ダム会議の基準³⁾のほか、建設省河川砂防技術基準(案)設計編⁴⁾の中にも採用されている。具体的な基準の内容は、以下に示すとおりである。

- 1)
$$\frac{\text{フィルタ材料の15\%粒径 (D}_{F15}\text{)}}{\text{フィルタで保護される材料の15\%粒径 (D}_{B15}\text{)}} > 5 \text{ (透水則)}$$
- 2)
$$\frac{\text{フィルタ材料の15\%粒径 (D}_{F15}\text{)}}{\text{フィルタで保護される材料の85\%粒径 (D}_{B85}\text{)}} < 5 \text{ (パイピング則)}$$
- 3) フィルタ材料の粒度曲線は、保護される材料の粒度曲線とほぼ平行であることが望ましい(平行則)。
- 4) フィルタで保護される材料が粗粒材料を含む場合は、その材料の粒径25mm以下の部分について1)および2)を適用する(−25mm規定)。
- 5) フィルタ材料は粘着性のないもので、200# (0.074mm) ふるいを通過する細粒分を5%以上含んではならない(細粒分規定)。

なお、保護される材料が粘着性に富む場合には、これらの条件を多少緩和することができるとされている(緩和規定)。

2.2 フィルタ基準の意味

上記の基準のうち、透水則とパイピング則は、基本的にはTerzaghi(1922)⁵⁾が提案し、その後Bertram(1940)⁶⁾が材料として、均一な砂と砂礫を使用した実験により初めて科学的に検証したものである。その他の基準については、その後Sherardら(1963)²⁾が当時の研究状況を把握して付加したものである。

以下では、各基準の意味について述べる。

2.2.1 透水則

この規定は、フィルタが保護される材料に比較して、十分大きな透水性(あるいは排水性)を有するための規定である。

透水係数と粒径に関しては、一般に次のことがいわれている。比較的均一な砂、礫であれば、材料の15%粒径は有効径である10%粒径と同様に材料の集合体の間隙と大きな相関があり、材料の集合体の透水性はそれらの粒径の2乗に比例するといわれている。これに関する研究は、表-2.1に示すように比較的多い。

表-2.1 粒径と透水係数の関係式

	関数	研究者												
1	$k = C \frac{r_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_s^2$ C : 定数 k : 透水係数 D _s : 土粒子の直径	Taylor et al. 7)												
2	$k = C \frac{r_w}{\mu} \left(\frac{\sin \theta - \pi/4}{\sin \theta} \right) \frac{d_e^2}{1-n}$ C : 定数 d _e : 有効粒径 θ : 土粒子格子のなす角	Slichter 8)												
3	$k = \frac{C_1}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt{1-n}} \right)^2 D_{10}^2$ D ₁₀ : 有効粒径 C ₁ : 10 なめらかな円味のある砂丘砂, U _c = 1.18 6 いちじろしく角張った川砂, U _c = 1.40 2.6 いちじろしく角張った粒子の幾分ローム質の川砂, U _c = 5.84	Terzaghi 9)												
4	$k = \frac{C_k}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)} D_w^2$ D _w : 平均粒径 C _k : 1.0 極めて角張った砂 2.3 角のある石英および石灰質砂 3.6 丸味を帯びた, そろっている川砂 5.2 ガラス球 8.2 Kozenyの半理論式	Kozeny 9) Donat 10)												
5	$k = \frac{C_z}{\mu} \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2$ D _w : 平均粒径 C _z : <table border="1"> <tr> <th>測定方法</th><th>Schönwälder</th><th>粒子の種類</th></tr> <tr> <td>空気を通して測定</td><td>2.2 ~ 2.3</td><td>ガラス球 I</td></tr> <tr> <td></td><td>1.8 ~ 2.0</td><td>ガラス球 II</td></tr> <tr> <td></td><td>1.5 ~ 1.7</td><td>円味を帯び, そろったオーデル河砂</td></tr> </table>	測定方法	Schönwälder	粒子の種類	空気を通して測定	2.2 ~ 2.3	ガラス球 I		1.8 ~ 2.0	ガラス球 II		1.5 ~ 1.7	円味を帯び, そろったオーデル河砂	Zunker 9) Casagrande 8) 田町 10) Schönwälder 10)
測定方法	Schönwälder	粒子の種類												
空気を通して測定	2.2 ~ 2.3	ガラス球 I												
	1.8 ~ 2.0	ガラス球 II												
	1.5 ~ 1.7	円味を帯び, そろったオーデル河砂												
6	$k_{10} = 332 \frac{n}{(1-n)^2} d_e^2$ k ₁₀ : 10°Cの透水係数 d _e : 有効粒径	クリューゲル 11)												
7	$k_{10} = 5572 \frac{n}{(1-n)^2} a_1^2 d_e^2$ a ₁ = 1.275 - 1.5 n d _e : 有効粒径	イェ・ア・ザマリソ 11)												
8	$k_{10} = \rho \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2$ ρ : 砂粒の均等係数 d ₁₇ : 17%粒径	ザウエルブレ 11)												

注) e : 間隙比
n : 間隙率
r_w : 水の単位体積重量
μ : 水の粘性係数

次に材料の間隙径が、その15%粒径 (D₁₅) と相関が高いことを実測により示した研究を紹介する。Sherardら(1984)¹²⁾ は、締固められた礫 (粒径9.52~25.4mm, D₁₅=11mm) 間隙に溶解したワックスを流し込み、冷却後切断して礫を除去し、その間隙径を測定した。その結果によると、最小通水径と15%粒径の関係は式 (2.1) で、平均通水径と15%粒径の関係は式 (2.2) で表され、その相関が高いことがわかった。

$$D_{min} = (0.09 \sim 0.18) D_{15} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$D_{ave} = (0.25 \sim 0.35) D_{15} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、D_{min}は最小通水径、D_{ave}は平均通水径である。

また彼らは、同時に比較的均一な砂、礫 (D₁₅=0.11~10.1mm) の透水試験を行い図-2.1に示す結果を得ている。この結果は、砂、礫のD₁₅と間隙径および透水性の相関が高いことを実証したものといえよう。

さらに、Vanmarckeら(1985)¹³⁾ は、ランダムに詰められた任意の粒度分布を持つ球の期待間隙距離D_vを統計的に算定し、D₁₅と間隙径が比例関係にあることを示している。

これらの研究により透水則を考察すると以下のとおりである。この透水則は、フィルタ材料の透水性が、

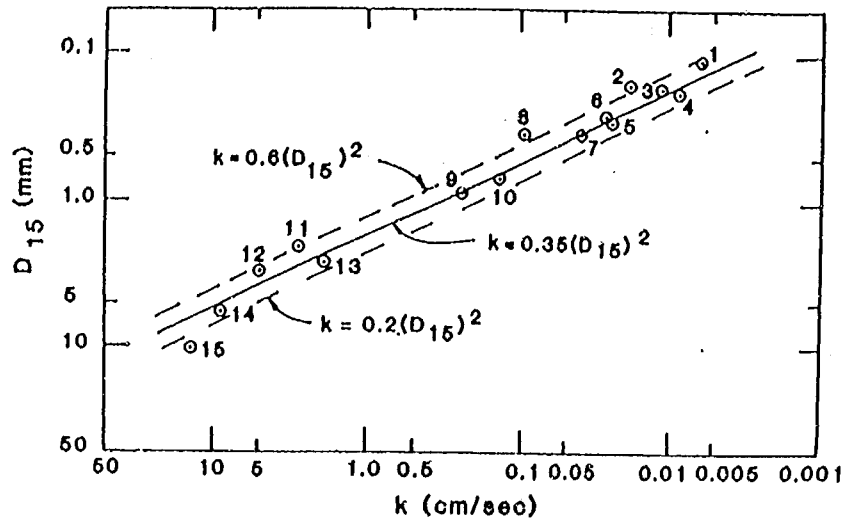


図-2.1 砂、礫の透水係数と15%粒径の関係 (sherard et al.¹²⁾)

それで保護される材料の透水性の25倍程度以上あることを保証し、そこには一般にいわれているフィルタ材料の透水性は保護されるもののその10～100倍以上が適当であるという透水性条件を見い出すことができる。

2.2.2 パイピング則

この規定は保護される土粒子が浸透流により、フィルタを通過して流亡することを避けるための規定である。

D_{F15} がフィルタの間隙の大きさを表現していることは前述したとおりである。一方、保護される材料の85%粒径 (D_{B85}) の意味は、Southworth(1980)¹⁴⁾ によれば次のとおりである。彼は、図-2.2に示すように種々の開口幅を持つふるいの上に土を置き、通水する実験を実施した。この結果、図-2.3に示すようにふるいの開口幅が土の80～90%粒径程度より大きくなると、土粒子の流亡量が急激に増加している。つまり、土の85%粒径以下の開口幅であれば、通水による粒子の流亡の可能性が少ないということである。よってこのパイピング則は、式 (2.1) または式 (2.2) で示されるように、フィルタの15%粒径と極めて相関の強いフィルタの間隙からフィルタで保護される材料、つまりコア材料の85%粒径が流亡する事を防止するための条件として、その粒径比 (D_{F15}/D_{B85}) が5以下でなければならないことを示している。

2.2.3 平行則

この平行則の意味は、以下のとおりである。保護される材料とフィルタの粒度曲線は、細かい粒径部分においてほぼ平行であることが望ましく、それはフィルタの安定性および保護される材料の細粒子の流出を防ぐ適切な機能が、フィルタ材料の比較的細粒な範囲における粒度曲線の傾度によって左右される¹⁵⁾、という考えによるものである。フィルタ基準の根幹をなす透水則、パイピング則を粒度曲線上で表すと図-2.4に示すとおりである。図からわかるように、これらは、フィルタ材料の15%粒径の範囲のみを規定し

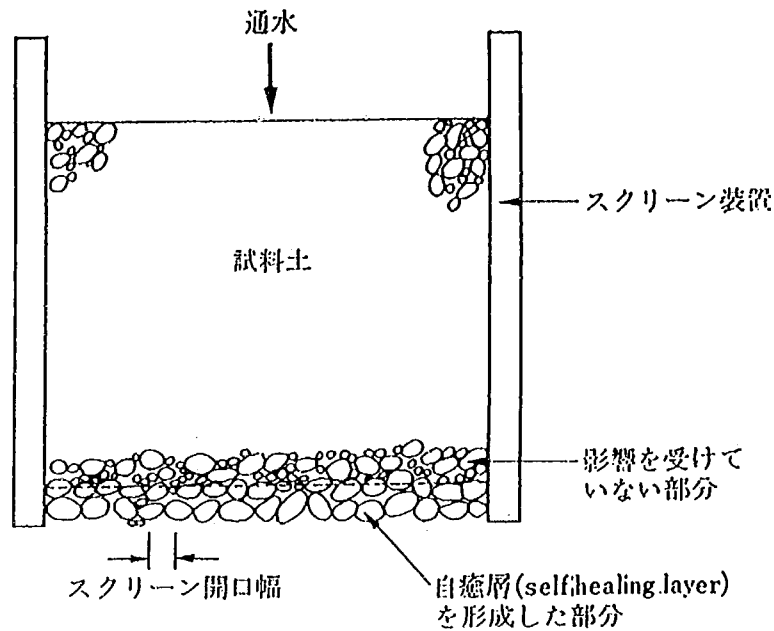


図-2.2 Southworth¹⁰⁾の実験概念図

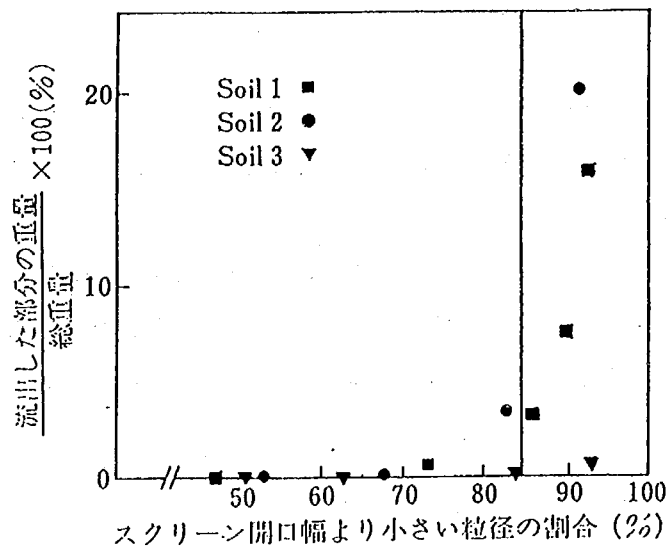


図-2.3 Southworth¹⁰⁾の実験結果

たものであり、その粒度分布曲線形状については言及されていない。そこでこの平行則によって、保護される材料の粒度曲線に対応したフィルタ材料のそれを要求している訳である。以上のことにより、この規定は透水則、パイピング則の付属規定と考えられる。

また、この規定は材料間の粒度の傾度の急変を避けることにより、フィルダムの隣接するゾーン間の応力の伝達や変形をスムーズにするという役目もなしていると考ええる。

実際の設計にあたって、この規定は厳密な形で定量的に検討されているわけではなく、多分に粒度分布曲線上での視覚的な判定によっている。

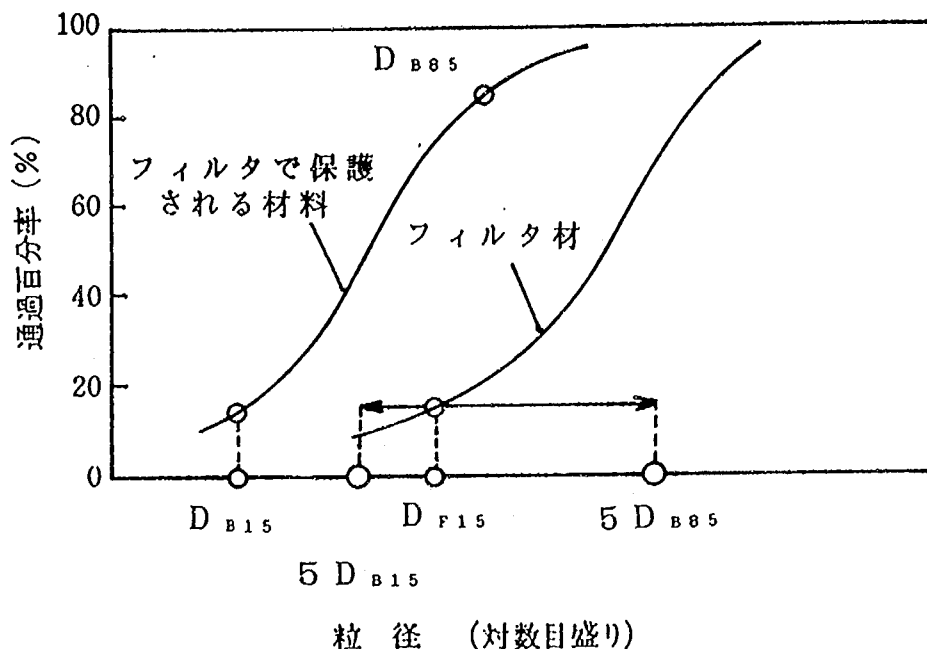


図-2.4 透水則、パイピング則による D_{F15} の範囲

2.2.4 -25mm規定

保護される材料が、砂、礫の粒径のものを多く含む場合（実際には、このような材料を堤体材料として採用することが多い）、全粒度を対象に D_{B85} を決定すると、これはかなり大きくなる。しかし、このような粒度範囲の広い材料の浸透破壊現象を考えると、上記の砂、礫粒径部分の破壊というよりも、大きな粒径間隙内の細粒部分、つまりマトリックス部分の破壊により引き起こされるといえる。このような破壊形態は、Khorら(1989)¹⁷⁾が、後述の非侵食試験（Sherardによる）の類似試験を行い指摘している。よって、こうした現象も考慮して、保護される材料の25mm以下の粒度から D_{B85} を求めるように規定しているものとする。

2.2.5 細粒分規定

この規定は、本来フィルタ材料が非粘着性であるべきことを規定している。ところで非粘着性の材料とはいかなる材料なのであろうか。Soares(1980)¹⁸⁾の言葉を借りると、「ダム湛水時の水流による侵食を助長する亀裂が仮に存在すると、それは乾燥状態では負圧により安定しているが、湿潤状態になると負圧がなくなるうえ引張強度を有していないために塞がれ、無傷の状態に戻る材料」ということになる。この条件を杓子定規に細粒分含有率で規定しようとする、Terzaghi & Peck(1967)¹⁹⁾の許容含有率0%、Vaughan(1975)¹⁹⁾の10%とまちまちの規定となってしまう恐れがある。ただ、Sherardら(1963)¹⁹⁾の基準は、多くの経験に基づいたものであり、この基準に従って多くのフィルダムが建設されており、ある程度の安全率を含んではいるものの必要な規定といえる。ただし、非粘着性材料を認定する方法を確立する必要がある。

なお、ダム堤体の深部においては、その上部材料の荷重によって拘束圧が大きくなり、細粒分含有率が高い場合でも亀裂が発生しにくい状態にあると考えられ、細粒分規定の緩和も考えられる。

2.2.6 緩和規定

緩和に関する付属規定は、フィルタで保護される材料が粘着性を有していれば、それ単体でもかなりのパイピング抵抗性を有しているためである²⁰⁾²¹⁾。例えば志村(1971, 1978)²¹⁾²²⁾によれば、砂のパイピング発生時の限界動水勾配はTerzaghiの理論解に近い1前後である。これに対して、図-2.5にその粒度を示した砂質土での実験では、 $74\mu\text{m}$ 以下を25%含有する砂質土(IP=18%)の侵食開始時の動水勾配は200を超えていたと報告している。すなわち、現行のフィルタ基準には、粘着性を有するコア材であっても、粘着性のない砂に対して有効なフィルタ材を用意しておけば安全側の措置であるとの判断が含まれている。

一方、現在では、これに対して粘着性を有する土質材料を対象にしているものの、その材料で構成されているゾーンに不等沈下、水圧破壊、施工上の不均一さなど何らかの原因によって亀裂が発生した場合を想定したフィルタ基準の新しい考え方も提案されるに至っている。これについては、6章で詳述する。

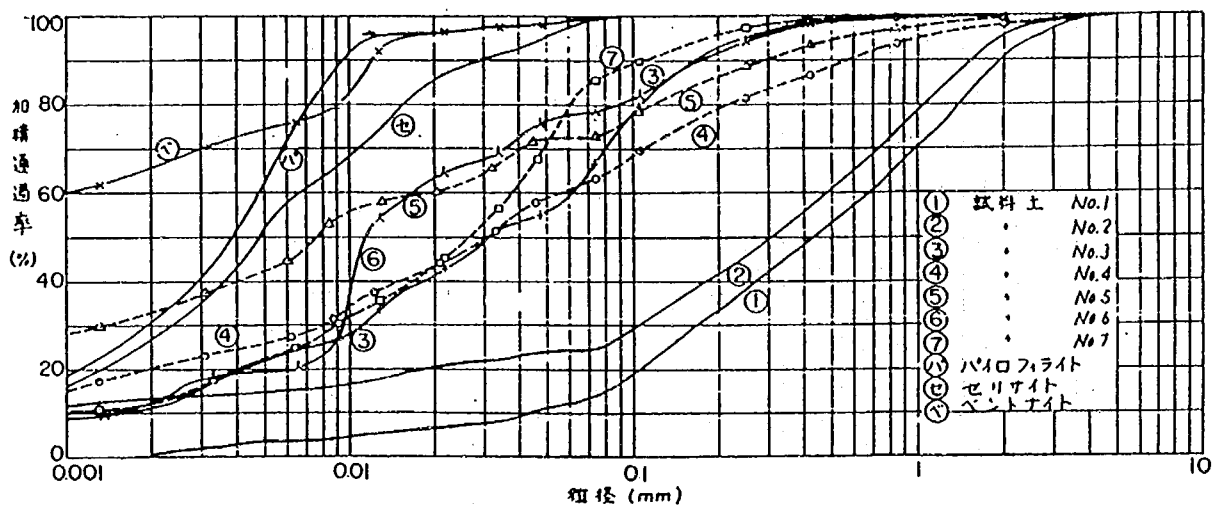


図-2.5 試料土の粒径加積曲線²¹⁾

3. フィルタ基準に関する調査

3.1 調査概要

当研究室では、フィルダムの設計、施工の段階でのフィルタ基準の適用状況、適用に際して発生する問題を抽出する目的で、昭和58年5月から8月にかけて実態調査を実施した。現在建設中の我が国のダムについては直接問い合わせたが、既設、管理中のダムおよび海外のダムは工事誌、文献等によった。

対象としたフィルダムのうち、国内のダムは表-3.1に示すとおりで、国、水資源開発公団または国の補助事業で道府県が建設、管理しているダムである（全21ダム）。また海外の調査ダムは表-3.2に示す（全

表-3.1 国内調査ダム諸元

ダム名	管理者又は 発注者	ダム型式	目 的	堤 高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 (千 m ³)	盛立完了 年月日
大 雪	北海道開発局	C. C	F.A.W.P	86.5	440	3,875	49.8
十 勝	北海道開発局	C. C	F.P	84.3	443	3,658	57.8
御 所	東北地建	C.C/P.G	F.N.W.P	52.5	210	980	55.8
漁 川	北海道開発局	C. C	F.N.W	45.5	270	647	54.8
白 川	東北地建	C. C	F.N.A.I.P	66.0	348	2,230	53.10
寺 内	水資源開発公団	I. C	F.N.A.W	83.0	420	3,000	52.1
岩 屋	水資源開発公団	C. C	F.A.W.I.P	127.5	366	5,780	50.11
有 間	埼玉県	C. C	F.N.W	83.5	250	1,600	59.4
七北田	宮城県	C. C	F.N.W	73.0	420	2,606	58.5
寺 山	栃木県	C. C	F.N.W	62.2	260	1,240	58.9
奥 野	静岡県	C. C	F.N.W	63.0	323	1,930	61.11
山 瀬	秋田県	C. C	F.N.W.I.P	62.0	496	1,582	(H2)
奈良保	水資源開発公団	C. C	F.A.N	155.0	587	11,600	63.6
阿木川	水資源開発公団	C. C	F.N.W.I	102.0	460	4,500	63.3
生居川	山形県	C. C	A	47.8	314	943	(H2)
寒河江	東北地建	C. C	F.N.A.P.W	112.0	510	10,400	62.9
末武川	山口県	C. C	F.N.W.I.P	89.5	275	2,700	63.11
七ヶ宿	東北地建	C. C	F.A.N.W.I	90.0	565	5,032	(H2)
五十嵐川	新潟県	C. C	F.N.W	75.5	360	2,278	61.12
小 屋	石川県	C. C	F.N.W	56.5	240	660	(H3)
青 土	滋賀県	C. C	F.N.W.I	45.0	280	626	62.4

凡例：ダム型式 C. C：中央遮水壁型，I. C：傾斜遮水壁型，A：アースフィルダム
 C.C/P.G：中央遮水壁型フィル，重力式コンクリート複合型
 目 的 F：洪水調整・農地防災，N：不特定用水・河川維持用水，
 A：かんがい用水，W：上水道用水，I：工業用水道用水，P：発電

表-3.2 海外調査ダム諸元

ダム名	国名	ダム形式	目的	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 (T・nl)	備考
Quail Creek Dike	America	A	F.W	23.8	604	525	盛立完了 S.59 崩壊 H.1
Teton Dam	America	A	F.A.P	93	930	7,600	盛立完了 S.51 崩壊 S.51
LG-3	Canada	I.C	F.N	93	2158	13,511	盛立完了 S.56
Port Mouth Dam	Australia	C.C	F.N	180	670	14,100	盛立完了 S.54
Srinagarind Dam	Thailand	C.C	F.A	140	610	12,100	盛立完了 S.52
Hans Storildom Dam	South Africa	I.C	F.A	57	525	—	—
Megal Dam	Canada	I.C	F.P	115	—	—	—

凡例：ダム型式 C.C：中央遮水壁型，I.C：傾斜遮水壁型，A：アースフィルダム
 C.C/P.G：中央遮水壁型フィル，重力式コンクリート複合型
 目的 F：洪水調整・農地防災，N：不特定用水・河川維持用水，
 A：かんがい用水，W：上水道用水，I：工業用水道用水，P：発電

7ダム)。これらのうち、2ダムは基礎と堤体の接触面における浸透流破壊が主な原因となって崩壊事故を起こしたダムであり、他ダムは独自のフィルタ材料の試験、調査を実施したダムである。

ダム型式としては、ロックフィルダム26ダム、アースフィルダム2ダムで、その内訳は、

1. 中央遮水壁型ロックフィルダム 21ダム
2. 傾斜遮水壁型ロックフィルダム 4ダム
3. 中央遮水壁型ロックフィル・
重力式コンクリート複合型ダム 1ダム
4. アースフィルダム 2ダム

である。また調査項目は、フィルタ材を主に、各盛立材料について以下の内容とした。

1. 代表粒度組成一覧表、および代表粒度曲線
2. 比重・アッターベルグ限界・含水比等の物理試験結果
3. 密度・透水係数の規格値および実測値
4. 施工法—撒き出し厚（仕上がり厚）・転圧機械・転圧仕様
5. 材料の材質および最大粒径

3.2 調査結果

3.2.1 国内ダムの材料物性

本来、フィルタ基準は遮水材とこれを保護するフィルタ材の間に適用される基準であるが、細粒ロックと粗粒ロックのように隣接する材料間にも準用される場合がある。この意味でここでは、コア材料、フィルタ材料間に留まらずフィルタ材料、ロック材料間についてもフィルタ基準の適用状況を検討する。

調査により明らかになった国内のダムのコア材料、フィルタ材料およびロック材料の物性と各材料の締め固め方法をまとめたものを表-3.3～表-3.5に示す。なお、多層フィルタゾーンあるいは多層ロックゾーン（トランジションゾーンも含む）を採用しているダムの場合、表にはそれぞれの細粒径材料の値を記載したが、フィルタ基準の適用にあたっては、当然のことではあるが、それぞれ隣接する材料の物性で検討した。

3.2.2 国内ダムにおけるコア材料とフィルタ材料の間のフィルタ基準適用状況

(1) 透水則

調査ダムにおける透水則の適用状況を知るために、フィルタ材料の15%粒径 (D_{F15}) とコア材料の15%粒径 (D_{B15}) の関係を図-3.1に示す。なお、図中では、コア材料の原粒度を用いたものと、25mm以下の部分の粒度を用いたものの両方を示した。また、 D_{B15} が0.074mm以下ということしか判明していないダムについては、 $D_{B15}=0.074\text{mm}$ で記載、計算してプロットしている。この図より、国内ダムのコア材料とフィルタ材料間の透水則については、原粒度に対して D_{B15} を決定しておく方が安全側の設計となるが、その場合でも透水則は満足されている。ただ、 D_{F15}/D_{B15} が基準値の5近傍にあるダムが2ダム (D_{B15} の値が確定しており、また全粒径で透水則を適用した場合) あり、それぞれ5.7、6.6という値である。しかしこれらのダムのコア材とフィルタ材の透水性の施工実績をあげると、 $D_{F15}/D_{B15}=5.7$ のダムでは、コア材の透水係数が $k_c=3.8 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ 、フィルタ材のそれが $k_f=3.4 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ で k_f は k_c の約100倍、また、 $D_{F15}/D_{B15}=6.0$ のダムでは、 $k_c=1.4 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 、 $k_f=1.3 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ で約1000倍であり、かつ図-3.2に示す国内調査ダムにおける k_f と k_c の関係と比較して突出した値ではない。またこれらは、前述した一般に言われているフィルタの透水性条件 ($k_f/k_c=10 \sim 100$ 倍以上) を十分満たしていることがわかる。

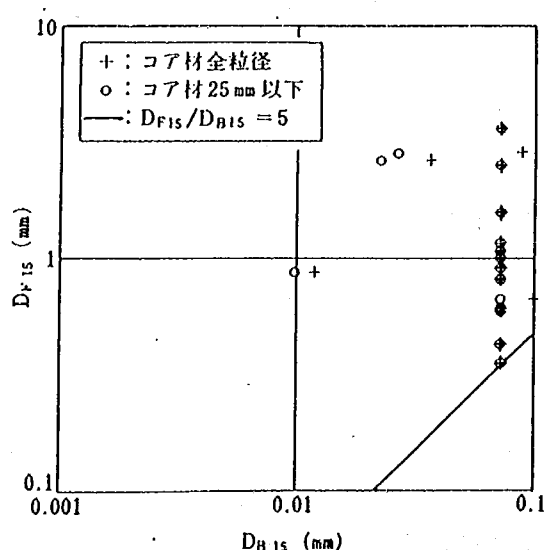


図-3.1 国内調査ダムにおける
 D_{B15} と D_{F15} の関係

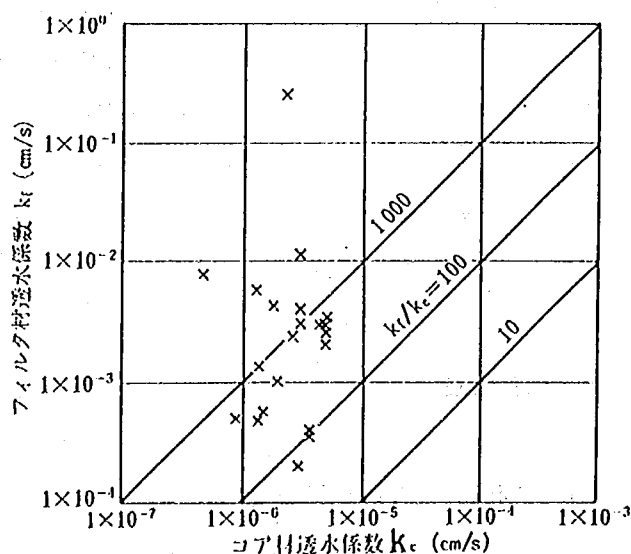


図-3.2 国内調査ダムにおける
 k_c と k_f の関係

表-3.3 国内ダム調査結果 (コア材料)

ダム名	比重	最大乾燥密度 (t/m ³)	最適含水比 (%)	締 固 め			粒 度 構 成 (mm)					74 μ m 以下 (%)	透水係数 (cm/s)		均等 係数	曲率 係数	最大 粒径 (mm)	材 質
				機 械	回数 (回)	仕上厚 (cm)	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅	実績	規 格	実 績				
大雪	2.70	2.09	10.5	20tシーブス フートローラ	20	20	<0.074	<0.074	0.7	8.0	28	15.0	1×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻⁶	—	—	150	風化粘板岩
十勝	2.73	2.05	10.6	30tタンピング	8	25	0.02	0.09	2.8	14.0	44	14.4	1×10 ⁻⁵	3.0×10 ⁻⁶	700	28	100	砂質シルト
御所	2.70	1.77	17.0	30tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.3	4.8	34	22.5	5×10 ⁻⁶	9.1×10 ⁻⁷	—	—	60	風化粘板岩シルト
漁川	2.66	2.01	15.5	8t振動ローラ	6	30	<0.074	<0.074	0.8	22.0	65	15.0	1×10 ⁻⁵	3.0×10 ⁻⁶	—	—	100	角礫凝灰岩ローム
白川	2.65	2.12	9.2	15tタンピング	8	20	0.010	0.037	0.4	4.2	27	20.0	5×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁻⁶	420	3.8	150	河床砂礫 シルト質粘土
寺内	2.75	1.89	14.0	30tタンピング	12	15	<0.074	<0.074	<0.074	2.5	17	33.0	5×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶	—	—	50	花崗岩
岩屋	2.64	2.04	11.0	30tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.5	15.0	65	20.0	1×10 ⁻⁵	5.0×10 ⁻⁶	—	—	150	風化黑色片岩
有間	2.75	1.81	14.0	30tタンピング	12	15	<0.074	<0.074	0.3	4.8	11	23.5	1×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁻⁶	—	—	50	風化石灰岩
七北田	2.86	1.76	20.0	30tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.8	12.0	32	17.8	5×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁻⁶	—	—	50	風化砂岩
寺山	2.64	1.79	17.0	30tタンピング 8t振動ローラ	12 6	20	<0.074	<0.074	0.3	7.0	22	21.3	1×10 ⁻⁵	5.0×10 ⁻⁶	—	—	150	風化凝灰角礫岩
奥野	2.72	1.59	21.8	30tタンピング	12	25	<0.074	<0.074	0.1	4.0	36	25.0	1×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻⁶	—	—	150	風化流紋岩
山瀬	2.64	1.76	17.4	16tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.3	5.5	27	20.0	1×10 ⁻⁵	2.3×10 ⁻⁶	—	—	100	風化安山岩
奈良俣	2.63	1.98	10.8	20t 振動タンピング	8	30	<0.074	0.100	0.4	3.0	29	13.7	1×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁶	—	—	150	熔結凝灰岩 泥流堆積物
阿木川	2.66	1.81	15.0	30tタンピング	12	15	<0.074	<0.074	0.1	2.1	39	28.2	1×10 ⁻⁵	4.4×10 ⁻⁶	—	—	150	マサ 2 次堆積物
生居川	2.64	1.69	19.9	22tタンピング	10	20	<0.074	<0.074	0.2	2.7	12	24.9	1×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁶	—	—	150	風化恵那礫岩
寒河江	2.75	1.79	18.2	30tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.2	4.2	48	22.5	1×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁶	—	—	150	段丘堆積物
末武川	2.76	1.85	15.5	20tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.3	3.2	21	21.4	1×10 ⁻⁵	2.6×10 ⁻⁶	—	—	150	玄武岩・岩礫
七ヶ宿	2.74	1.88	14.2	30tタンピング	8	20	<0.074	0.074	0.4	6.5	32	15.0	5×10 ⁻⁶	3.8×10 ⁻⁶	—	—	150	泥質片状ホルンフ ェルス
五十嵐川	2.61	1.44	29.0	30tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.3	8.0	40	25.7	5×10 ⁻⁶	4.8×10 ⁻⁷	—	—	150	凝灰岩 斜長流紋岩
小屋	2.62	1.77	15.0	20tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.4	10.0	35	25.0	5×10 ⁻⁶	5.0×10 ⁻⁶	—	—	150	風化凝灰岩
青土	2.67	—	—	20tタンピング	12	20	<0.074	<0.074	0.2	2.5	17	23.6	1×10 ⁻⁵	4.9×10 ⁻⁶	—	—	100	風化安山岩

表-3.4 国内ダム調査結果 (フィルタ材料)

ダム名	比重	乾燥 密度 (t/m ³)	間隙比	締 固 め			粒 度 構 成 (mm)					74 μ 通過率 (%)		透水係数 (cm/s)		均等 係数	曲率 係数	最大 粒径 (mm)	材 質
				機 械	回数 (回)	仕上厚 (cm)	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅	規格	実績	規 格	実 績				
大 管	2.62	2.248	0.165	27tブルドーザ	4	30	0.47	1.05	10.0	61	120	6	5.0	—	5.5 $\times 10^{-4}$	129.8	3.5	200	河床砂礫
十 勝	2.69	2.107	0.277	21tブルドーザ	4	40	0.50	2.80	14.0	74	150	—	3.5	1 $\times 10^{-3}$	3.0 $\times 10^{-3}$	148.0	5.3	200	緑色岩・安山岩・ 凝灰岩
御 所	2.65	2.250	0.178	21t振動ローラー	4	40	0.40	0.86	9.2	45	105	5	3.0	10 $^{-4}$ ~10 $^{-3}$	5.0 $\times 10^{-4}$	112.5	4.7	200	河床砂礫
漁 川	2.57	2.005	0.282	8t振動ローラー	4	60	0.46	1.15	8.5	56	120	5	2.9	—	1.9 $\times 10^{-4}$	121.7	2.8	150	河床砂礫
白 川	2.46	2.137	0.151	8t振動ローラー	4	40	1.30	2.60	10.0	48	110	6	2.8	5 $\times 10^{-3}$	4.0 $\times 10^{-3}$	30.9	1.6	200	河床砂礫
寺 内	2.75	2.170	0.267	8t振動ローラー	4	30	0.85	1.55	7.4	41	110	10	7.0	10 $^{-3}$ ~10 $^{-4}$	1.0 $\times 10^{-3}$	48.2	1.6	200	黒色片岩
岩 屋	2.66	2.121	0.254	8t振動ローラー	4	30	0.46	1.15	8.2	38	92	5	4.7	1 $\times 10^{-3}$	3.3 $\times 10^{-3}$	82.6	3.8	200	河床砂礫 石英斑岩
有 間	2.65	2.038	0.300	—	—	—	0.50	1.00	4.0	15	38	6	5.2	10 $^{-3}$ ~10 $^{-4}$	5.7 $\times 10^{-3}$	30.0	2.1	100	チャート
七北田	2.85	2.200	0.295	15t振動ローラー	5	40	1.00	3.60	16.0	33	58	6	5.0	—	1.1 $\times 10^{-2}$	33.0	7.8	150	玄武岩
寺 山	2.80	2.320	0.207	18t振動ローラー	5	30	0.24	0.58	2.0	18	62	7	4.4	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	2.5 $\times 10^{-3}$	75.0	0.9	200	安 山 岩
奥 野	2.75	1.910	0.440	11t振動ローラー	5	35	0.50	0.88	3.8	30	100	5	4.0	1 $\times 10^{-3}$	3.9 $\times 10^{-4}$	60.0	1.0	200	安 山 岩
山 瀬	2.82	2.240	0.259	18t振動ローラー	4	40	0.34	1.00	5.8	20	58	—	4.7	1 $\times 10^{-4}$	2.5 $\times 10^{-3}$	58.8	4.9	125	玄武岩
奈良俣	2.52	2.250	0.120	18t振動ローラー	4	30	0.32	0.66	4.0	22	70	—	5.0	5 $\times 10^{-3}$ ~1 $\times 10^{-4}$	1.3 $\times 10^{-3}$	68.8	2.3	200	流紋岩・花崗岩
阿木川	2.65	1.870	0.417	8t振動ローラー	6	45	0.44	0.90	5.5	56	140	—	4.2	5 $\times 10^{-3}$ ~1 $\times 10^{-4}$	3.0 $\times 10^{-3}$	127.3	1.2	300	流紋岩・河床砂礫
生居川	2.73	2.253	0.212	8t振動ローラー	8	40	0.18	0.35	1.7	9	24	—	4.9	1 $\times 10^{-2}$ ~5 $\times 10^{-4}$	4.2 $\times 10^{-3}$	51.1	1.7	40	玄武岩質安山岩
寒河江	2.80	2.177	0.286	8t振動ローラー	4	40	0.42	0.80	2.7	41	115	5	3.7	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	4.8 $\times 10^{-4}$	97.6	0.4	200	河床砂礫
末武川	2.72	2.090	0.301	8t振動ローラー	5	30	0.60	2.50	7.5	36	102	5	0.7	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	2.3 $\times 10^{-3}$	60.0	2.6	200	泥質片状ホルンフ ェルス
七ヶ宿	2.72	2.310	0.177	11t振動ローラー	2	40	0.19	0.42	3.2	48	120	—	5.0	1 $\times 10^{-4}$	3.4 $\times 10^{-4}$	252.6	1.1	200	河床砂礫
五十嵐川	2.63	1.929	0.363	8t振動ローラー	4	40	0.32	0.60	2.1	11	30	—	5.8	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	7.6 $\times 10^{-3}$	34.4	1.3	80	斜長流紋岩
小 屋	2.57	2.020	0.272	18t振動ローラー	4	40	0.40	0.80	3.0	20	53	5	5.0	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	2.0 $\times 10^{-3}$	50.0	1.1	150	石英安山岩
青 土	2.65	—	—	11t振動ローラー	6	20	0.60	1.00	3.0	15	44	5	2.7	10 $^{-2}$ ~10 $^{-4}$	2.8 $\times 10^{-3}$	27.6	1.7	80	河床砂礫

表-3.5 国内ダム調査結果(ロック材料)

ダム名	比重	乾燥 密度 (t/m ³)	間隙比	内部 摩擦角 (°)	締 固 め			粒 度 構 成 (mm)					透水係数 (cm/s)		均等 係数	曲率 係数	最大 粒径 (mm)	材 質
					機 械	回 数 (回)	仕上厚 (cm)	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅	規 格	実 績				
大 雪	2.65	2.186	0.21	40.0	32tブルドーザ	4	100	2.0	3.2	11	46	110	—	—	23.0	1.3	200	粘板岩・ホルンフェルス
十 勝	2.63	2.107	0.25	40.0	32tブルドーザ	4	100	1.8	2.5	11	40	92	—	—	22.2	1.7	200	角斑岩・粘板岩
御 所	2.50	1.678	0.49	40.0	21t振動ローラ	6	100	15.0	26.0	60	120	180	—	—	8.0	2.0	300	安山岩
漁 川	2.44	2.087	0.17	39.0	32tブルドーザ	4	150	30.0	42.0	110	340	600	—	—	11.3	1.2	800	安山岩
白 川	2.53	1.905	0.33	40.0	8t振動ローラ	6	100	5.0	14.0	38	90	130	1×10 ⁻¹	1×10 ⁻¹	18.0	3.2	250	安山岩
寺 内	2.50	2.220	0.13	38.0	21t振動ローラ	4	150	9.0	20.0	58	210	600	—	1×10 ⁻¹	23.3	1.8	1500	黒色片岩
岩 屋	2.65	2.160	0.23	45.5	32tダンプトラック	—	200	8.0	18.0	50	150	300	—	1×10 ⁻¹	18.8	2.1	500	石英斑岩
有 間	2.65	2.077	0.28	39.0	30t振動ローラ	6	60	2.6	4.0	9	26	60	1×10 ⁻³	3×10 ⁻¹	10.0	1.2	200	チャート・粘板岩
七 北	2.70	2.600	0.04	40.0	15t振動ローラ	4	100	7.0	15.0	35	80	150	—	—	11.4	2.2	500	玄武岩・安山岩
寺 山	2.82	2.220	0.27	42.0	20t振動ローラ	5	100	25.0	50.0	120	300	500	—	1×10 ⁻¹	12.0	1.9	600	安山岩
奥 野	2.75	1.910	0.44	41.0	11t振動ローラ	5	100	5.2	16.0	80	220	600	—	—	42.3	5.6	1000	安山岩
山 瀬	2.82	1.950	0.45	40.0	18t振動ローラ	6	100	10.0	52.0	100	200	360	1×10 ⁻³	6×10 ⁰	20.0	5.0	1000	粗粒玄武岩
奈良 俣	2.55	2.090	0.22	41.9	18t振動ローラ	4	100	6.0	11.5	30	80	210	1×10 ⁻³	2×10 ⁻¹	13.3	1.9	1000	流紋岩・花崗岩
阿 木 川	2.65	1.950	0.36	42.5	18t振動ローラ	4	100	4.0	10.0	35	120	300	1×10 ⁻²	4×10 ⁻¹	30.0	2.6	1000	流紋岩
生 居 川	2.67	1.892	0.41	41.0	12t振動ローラ	6	80	28.0	44.0	75	150	190	4×10 ⁻³	3×10 ⁰	5.4	1.3	600	安山岩
寒 河 江	2.69	2.135	0.26	40.0	18t振動ローラ	4	150	0.9	2.5	25	140	380	1×10 ⁻²	—	44.4	5.0	1500	玄武岩
末 武 川	2.74	2.150	0.27	41.8	8t振動ローラ	5	100	6.0	10.0	25	80	180	1×10 ⁻²	4×10 ⁻¹	13.3	1.3	600	ホルンフェルス
七ヶ 宿	2.68	2.050	0.31	43.3	18t振動ローラ	4	100	25.0	40.0	90	220	440	1×10 ⁻²	2×10 ⁻¹	8.8	1.5	1000	石英安山岩
五十嵐 川	2.61	1.920	0.36	45.7	8t振動ローラ	4	100	3.0	6.0	21	65	120	—	6×10 ⁻¹	21.7	2.3	600	斜長流紋岩
小 屋	2.50	1.750	0.42	37.0	18t振動ローラ	4	100	5.0	15.0	38	210	260	1×10 ⁻²	—	42.0	1.4	1000	石英安山岩
青 土	2.67	—	—	44.0	10t振動ローラ	5	75	2.6	4.8	18	42	120	—	4×10 ⁻¹	16.2	3.0	750	砂岩・ホルンフェルス

(2) パイピング則

透水則と同様、パイピング則の適用状況を知るためにフィルタ材の15%粒径 D_{F15} とコア材の85%粒径 D_{B85} の関係を図-3.3に、また25mm以下の粒度から求めた D_{B85} に対する D_{F15} の比の分布を図-3.4に示す。なお、パイピング則の適用状況についても、 D_{B85} を原粒度からと25mm以下の粒度からの両方から決定したものを採用している。透水則とは逆に、25mm以下の粒度から求めた D_{B85} を用いる方が、設計上安全側である。

図より、コア材の粒径25mm以下に適用した場合であっても、 D_{F15}/D_{B85} は最大値0.31・最小値0.04・平均値0.12と基準の5よりかなり小さく、十分な余裕があることがわかる。

透水則とパイピング則は、フィルタ規定の内でも根幹をなすものであり、この両規定の達成には各ダムとも十分な配慮が払われていることが伺える。

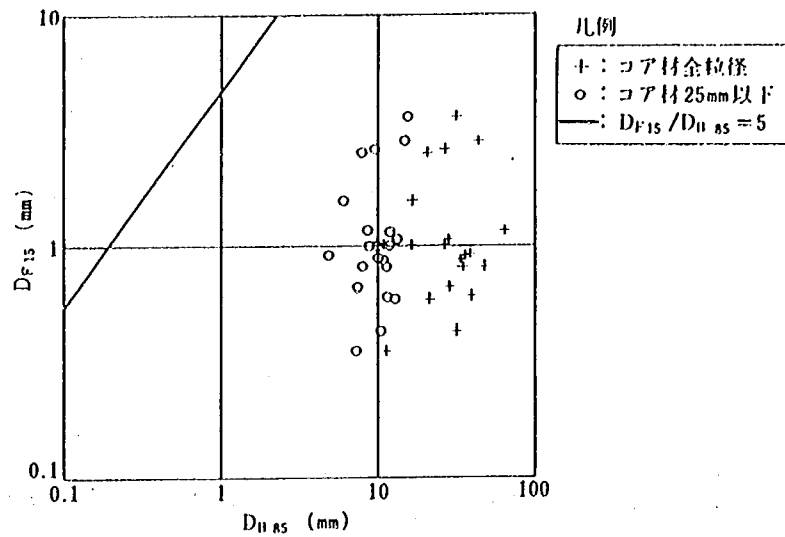


図-3.3 国内調査ダムにおける D_{B85} と D_{F15} の関係

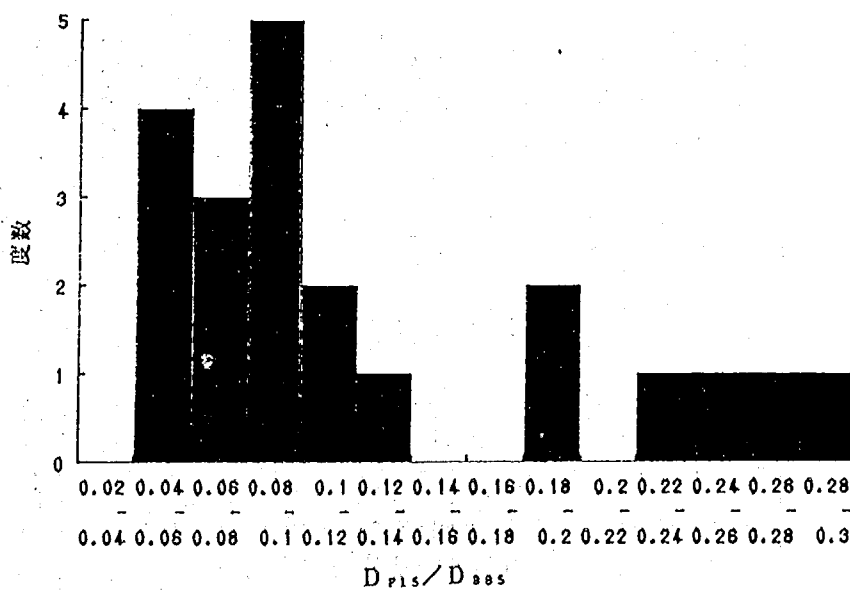


図-3.4 D_{F15}/D_{B85} の分布

(3) 粒度曲線の平行性

前述したとおり、粒度曲線の平行性については、定量的な規定ではなく、定性的なものである。ただ、現行のフィルタ基準の根幹を成す透水則、パイピング則がフィルタ材料については15%粒径と0.074mm以下の含有率のみに着目した規定となっており、その粒度構成には言及していない。そのため、これは、フィルタ材料の粒径加積曲線が、コア材料のそれに対して極端に立っている場合や寝ている場合の制限規定となっている。Khorら(1989)¹¹⁾の研究成果によると、粒度範囲の広いフィルタ材を用いる場合、フィルタ材の15%粒径以下の部分がフィルタ機能に大きな影響を与えるとされている。当然、15%粒径以下が寝ている方が、フィルタ機能が高い。

例として、寺山ダムの堤体材料の粒度分布曲線を図-3.5に示す。この図から、視覚的な判断ではあるが、粒度曲線の平行性はまずまず保たれていることがわかる。他のダムについても、ほぼ同様のことがいえる(参考資料参照)。

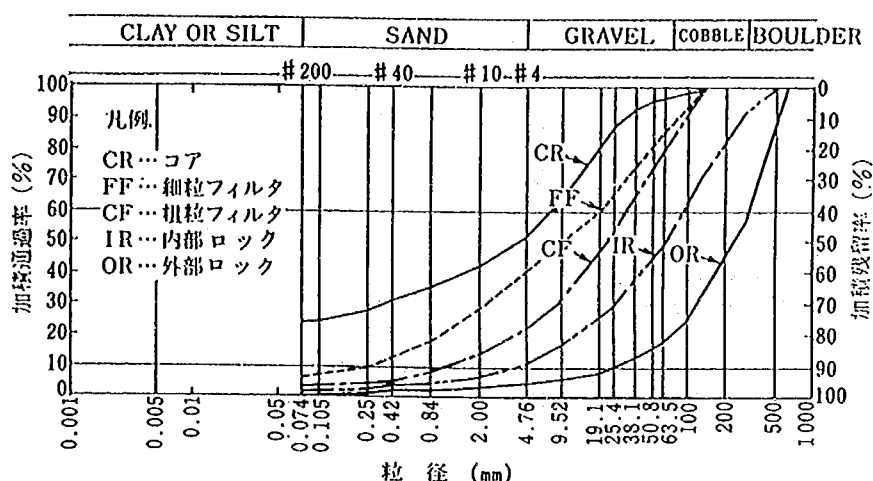


図-3.5 寺山ダム堤体材料の粒度分布曲線

(4) 細粒分の含有率制限

調査ダムのうち、盛立時のフィルタ材の細粒分含有率の管理値が規定されていたダムは21ダム中14ダムで、その管理値をまとめたものを表-3.6に示す。一方、実績値は全21ダムにおいて得られており、図-3.6に示すような分布となっている。これらの図表より、設計時より規格値を5%よりも大きい値に設定しているダムが管理値を設定しているダムの40%以上あり、また実績値の分布をみても規格値に準じた分布となっている。以上よりこの規定については、透水則、パイピング則のように厳密には守られておらず、緩和条項が適用されていることがわかる。また、これらのダムで、湛水による問題が生じたわけではなく、緩和しても結果的によいことがわかる。しかし、一方この規定のために、ダムサイト近傍の材料をそのままフィルタ材として使用できるダムが少なくなっている。具体的な対策としては、粗い材料をクラッシングし、さらに購入材で粒度調整したダム(岩屋、寺山ダム)や他との複合理由にもよるが、2層フィルタを採用しているダムもある(御所、寒河江ダム)。

表-3.6 細粒分規格値

規 格 値	ダ ム 数	%
5% 以下	8	57.2
6% 以下	4	28.6
7% 以下	1	7.1
10% 以下	1	7.1
合 計	14	100.0

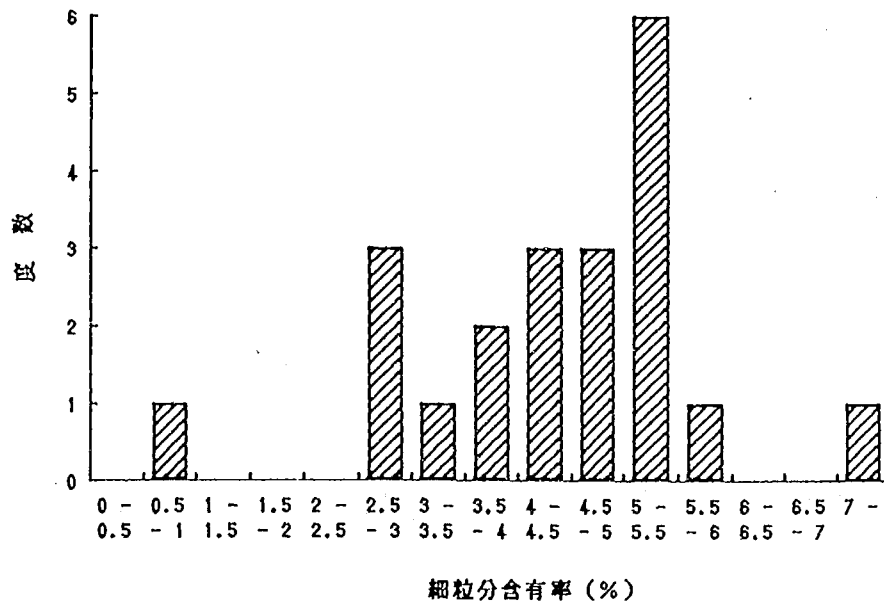


図-3.6 細粒分含有率の実績値の分布

(5) フィルタ材の透水係数

調査ダムにおいて、フィルタ材の実績透水係数は最大値 $2.5 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 、最小値 $1.9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、平均値 $1.5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であった。しかし、最大値は他ダムと比較すると少し突出した値であり、これを除外すると平均値は $2.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ である。

次に0.074mm以下の細粒分含有率と透水係数 (k_f) の関係を示すと図-3.7となるが、両者に相関があるとはいえない。一方、調査ダムの1つである岩屋ダムでは、室内試験において図-3.8に示す関係を求めており、この場合は透水性と細粒分含有率に良い相関が認められている。以上より、図-3.7のばらつきは、現場試験法の精度や各ダムの材料が異なること等が要因となっていると思われる。

また、フィルタ材の10%通過粒径 (D_{F10}) および15%通過粒径 (D_{F15}) と k_f の関係をそれぞれ図-3.9、図-3.10に示す。図-3.9に示した実線は表-2.1のTerzaghiの式をプロットしたもの（間隙率 n には調査ダムの平均値として0.207を与えた）であるが合致しておらず、図-3.10においても図-2.1でSherardの提案している式とはあまり良く一致していない。これは、両式とも比較的均一な砂礫に対して成立する式であるためである。

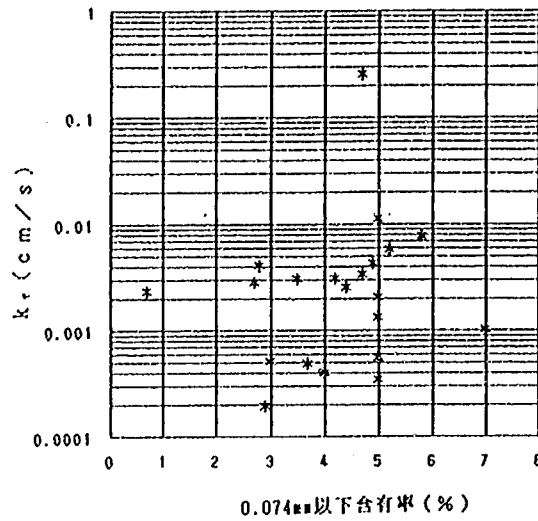


図-3.7 細粒分含有率と k_r の関係

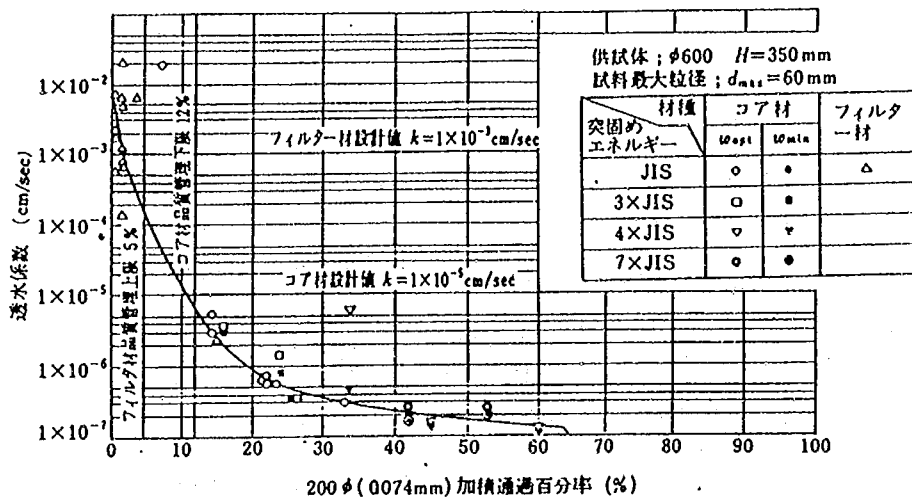


図-3.8 各材料における細粒分含有率と透水係数の関係 (岩屋ダム工事誌による)

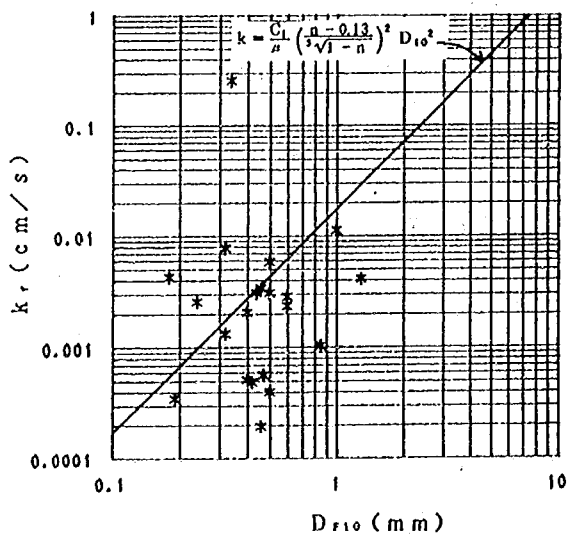


図-3.9 D_{F10} と k_r の関係

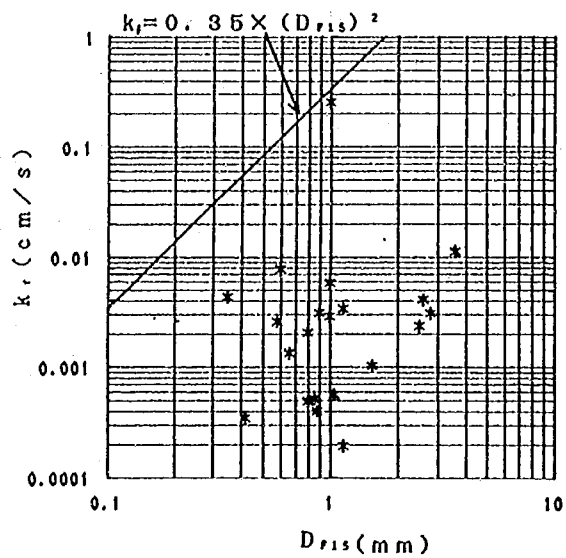


図-3.10 D_{F15} と k_r の関係

(6) フィルタ材の採取、調整方法

調査21ダムのうち、昭和63年5月現在管理中のダム10ダムについて、フィルタ材の採取および調整方法をまとめると表-3.7のようである。これによれば半数のダムが河床砂礫を採用しており、4ダムがロック材料の細粒分、1ダムがコア材料の粗粒分を採用している。また堤体基礎掘削、洪水吐掘削等の流用材を併用しているダムも3ダムある。

粒度調整方法については、オーバーサイズの除去にはグリズリ、あるいは堤体盛土時、採取場等での人力作業により全ダムで実施している。また、粒度分布調整のためプラント設備を用いてクラッシングを実施したダムが4ダム、および原粒度をなるべく使用する目的から2層フィルタとしたダムが3ダムある。図-3.11は寺山ダムのクラッシングによる生産フローシートである。このダムでは3台のジョークラッシャーを使用し、原石山の細粒材を粒度調整しており、かつ細粒分の補充のため粒径5mm以下の購入山砂を混合している。

表-3.7 フィルタ材の採取材料

ダム名	岩石名	採取場所	粒度調整方法
大雪	安山岩・凝灰岩	河床砂礫 掘削流用材	グリズリおよび堤体にて オーバーサイズ除去
十勝	安山岩・凝灰岩	河床砂礫	グリズリおよび堤体にて オーバーサイズ除去
御所	凝灰岩	河床砂礫 掘削流用材	2層フィルタ
漁川	凝灰岩	コア山粗粒分	クラッシング
白川	安山岩・花崗岩	河床砂礫	グリズリにてオーバーサイズ除去
寺内	黒色片岩	原石山細粒分 掘削流用材	2層フィルタ グリズリにてオーバーサイズ除去
岩屋	石英斑岩	河床砂礫	クラッシング
有間	チャート	原石山細粒分	グリズリにてオーバーサイズ除去
七北田	玄武岩	原石山細粒分	クラッシング
寺山	安山岩	原石山細粒分	クラッシング 2層フィルタ

と思われるが、フィルタとロックの透水性の比は10倍～1000倍程度であり、ゾーン間の透水性を漸変させるという考えからは妥当な数字と考える。

次にパイピング則であるが、図-3.14にフィルタ材料の85%粒径 (D_{F85}) と D_{R15} の関係を示す。この図よりフィルタ材料の85%粒径を全粒径で求めた場合も、また25mm以下の部分の粒度で求めた場合でも、コア材料～フィルタ材料ほどの余裕はないが、すべてのダムで満足していることがわかる。

粒度曲線の平行性については、参考資料に示した粒度分布曲線を見ると、コア材料～フィルタ材料と同様に各ダムとも堤体盛立材料全体で保たれていることがわかる。

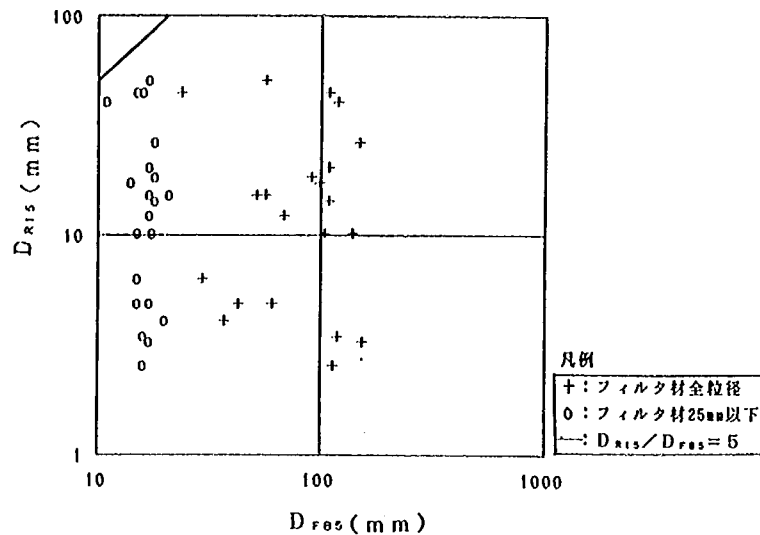


図-3.14 D_{F85} と D_{R15} の関係

3.2.4 海外のダムにおける調査結果

海外のダムにおける調査は、堤体材料の粒径に着目して実施した。調査結果を表-3.8～表-3.10に示す。

(1) 各ダムの特徴

Quail Creek Dike²³⁾ は初期湛水時において大量の漏水が観察され、その後3年を費やしてカットオフの設置や追加グラウトを施工し、湛水を繰り返したが1989年1月1日に決壊した。主原因としては、基礎の表層部において割れ目が多く透水性の高い岩にもかかわらずその処理が不完全であったため、浸透流によって堤体材料が洗い流されたことによると報告されている。またTetonダム²⁴⁾ は、1976年6月5日に、初期湛水位が最高水位EL.1622.8mに対してEL.1616.0mに達した時点で決壊した。主原因は、右岸基礎部のキイトレンチ内の深いところのコア材の内部侵食（パイピング）に依るもので、事故調査委員会の報告によれば、侵食された土粒子は、堤体中あるいは堤体と透水性の大きなアバットメント岩盤との接触面を通り抜け流出したことによる。LG-3ダム(La Grande Dam-North Section of Dam)²⁵⁾ は、フィルタ材の機能を検証するため、実際の堤体材料を使用して大型のパイピング試験と透水試験を実施したダムである。実験ケースはコア材と下流フィルタ材に留まらず、それぞれ隣接する材料で実施された。実際の堤体材料

表-3.8 海外ダム調査結果（コア材料）

ダム名	粒度構成 (mm)					74 μ m 以下(%)	均等 係数	曲率 係数	最大粒径 (mm)	備考
	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅					
Quail Creek Dike ²³⁾	<0.001	0.0015	0.003	0.06	1.20	64	—	—	80	
Teton Dam ²⁴⁾	<0.005	0.005	0.02	0.04	0.25	77	—	—	2.0	
LG-3 Dam ²⁵⁾	<0.074	<0.074	<0.074	1.00	38.10	32	—	—	200	
Dart Mouth Dam ²⁶⁾	0.002	0.02	0.074	0.50	1.80	30	250	5.5	6.0	
Srinagarind Dam ²⁷⁾	<0.074	<0.074	<0.074	4.80	38.10	34	—	—	100	
Magat Dam ²⁸⁾	<0.074	0.074	<0.074	3.50	25.40	32	—	—	75	
Hans Storijdon Dam ²⁹⁾	<0.005	0.005	0.08	0.24	0.75	28	—	—	4.8	

表-3.9 海外ダム調査結果（フィルタ材料）

ダム名	粒度構成 (mm)					74 μ m 以下(%)	均等 係数	曲率 係数	最大粒径 (mm)	備考
	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅					
Quail Creek Dike	0.2	0.3	1.2	7.0	14	5.0	35	1.0	40	下流フィルタ
	<0.001	<0.001	0.004	0.2	19	52.0	—	—	80	上流トランジション材
Teton Dam	0.18	0.42	1.8	19.1	60	5.0	106	0.7	100	隣接材料
LG-3 Dam	0.2	0.3	0.9	4.0	25.4	3.0	20	1.0	63.5	細粒フィルタ
	4.76	6.0	13.0	38.1	100	0	8	0.9	200	粗粒フィルタ
Dart Mouth Dam	0.25	0.35	1.0	4.76	12	2.0	19	0.8	19.1	細粒フィルタ
	1.0	2.5	8.0	31	60	0	31	2.1	70	粗粒フィルタ
Srinagarind Dam	0.3	0.84	5.0	37	90	5.0	123.3	2.3	150	細粒フィルタ
	0.5	1.8	11.0	63.5	180	6.0	127	3.8	350	粗粒フィルタ
Magat Dam	0.18	0.42	1.8	19.1	45.0	5.0	106.1	0.9	75	細粒フィルタ
	1.5	2.0	4.5	8.0	10.3	0	5.3	1.7	18	粗粒フィルタ
Hans Storijdon Dam	—	0.02	0.05	0.08	0.15	58	—	—	0.25	Filter Cloth
	0.12	0.2	0.35	0.75	2.0	5.0	6.3	1.4	4.76	Sand Filter
	0.84	1.9	9.0	19.1	30.0	1.0	22.7	5.1	38.1	Gravel Filter

表-3.10 海外ダム調査結果（ロック材料）

ダム名	粒度構成 (mm)					74 μ m 以下(%)	均等 係数	曲率 係数	最大粒径 (mm)	備考
	D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅					
Quail Creek Dike	0.2	0.25	3	33	90	8.0	165	1.4	120	
Dart Mouth Dam	5.0	13.0	40	160	600	0	32	2.0	1000	3Aの材料
Srinagarind Dam	12.0	22.0	61	200	450	0	16.7	1.1	900	
Magat Dam	15.0	19.1	27	53	90	0	3.5	0.9	100	フィルタに隣接する 材料
Hans Storijdon Dam	9.5	17.0	45	200	650	0	21.1	1.1	1000	

でフィルタ機能の検証実験したのはMagat Dam²⁸⁾も同様であり、このダムは特にコアゾーンに亀裂が発生した場合を想定したモデル実験も実施している。次にHans Strijdom Dam²⁹⁾は、当初設計においては幅3mの細粒フィルタ (Sand filter) と同じく3mの粗粒フィルタ (Gravel filter) を計画したが、堤体近傍に相当量の細粒フィルタとしての材料が見い出せず、このゾーン幅を1mとし、コアゾーンと細粒フィルタゾーンの間にはポリエステルを布を設置する工法を採用した。

(2) 透水則

調査ダムにおける透水則の適用状況を図-3.15～図-3.17に示す。図-3.15はコア材料に隣接する材料 (Quail Creek Dikeは上下流の材料が違うためそれぞれの材料、またHans Strijdom DamはFilter clothと細粒フィルタ材料、他ダムは細粒フィルタ材料) の15%粒径 ($D_{F(15)}$) とコア材料の15%粒径 ($D_{B(15)}$) の関係を示したものである。この図から、コア材料の全粒径および25mm以下の粒径に適用した場合で2ケース、現行の透水則よりはずれているものがある。1つはHans Strijdom DamのFilter clothに適用した場合であり、 $D_{F(15)}/D_{B(15)}$ は4.0である。Filter clothの間隙をどのように測定したかは不明であるが、このダムの場合Filter clothの間隙にコア材料が目詰まりしないことに重点をおいてその材料を選択している。また透水則の粒径比が4であることが、後述するが基準の持っている安全率より、それらの透水性に重要な影響はないともいえる。また、もう一つは Quail Creek Dikeの上流側隣接材料に適用した場合で粒径比は全粒径で0.7、25mm以下の粒径で0.8であった。この材料は、コア材料の粒径と非常に近く、しかも40%粒径以下ではコア材料よりも隣接材料の方が細くなっている (参考資料参照)。これは海外のダムでは、日本のダムに比べて貯水位の上下動があまり大きくなく、透水性より応力の伝達を考慮してのゾーニングと思われる。

図-3.16は、調査ダムの $D_{F(15)}$ と粗粒フィルタの15%粒径 ($D_{FC(15)}$) の関係を示したものであり、全粒径で適用した場合Srinagarind Damが粒径比2.1で規定よりはずれている。しかし細粒フィルタを25mm以下の粒径で適用した場合、全ダムが粒径比5以下となっている。

図-3.17は、 $D_{FC(15)}$ とロック材の15%粒径 ($D_{R(15)}$) 関係 (Quail Creek Dikeの場合、下流フィルタ材とロック材および上流トランジション材とロック材) を示したものである。この図の粒径比が約1になっている点は、Quail Creek Dikeの下流フィルタ材とロック材の関係である。両材料は、その粒度曲線 (参考資料参照) を見ると、20%粒径以下の分布がほぼ等しく、その透水性には差がないと推測できる。

(3) パイピング則

パイピング則の適用状況を図-3.18～図-3.20に示す。図-3.18は $D_{F(15)}$ とコア材料の85%粒径 ($D_{B(85)}$) の関係、図-3.19は $D_{FC(15)}$ と細粒フィルタの85%粒径 ($D_{F(85)}$) の関係、また図-3.20は $D_{R(15)}$ と粗粒フィルタの85%粒径 ($D_{FC(85)}$) の関係を示している。これらの図より特徴的なことは、調査ダムにおいて各隣接する材料間のパイピング則は、設計上安全側である25mm粒径以下で適用した場合であっても、かなり余裕を持って全ダムが満足していることである。よって透水則の適用状況と比較すると、日本の場合と同様、パイピング則の適用により配慮されていることが伺える。

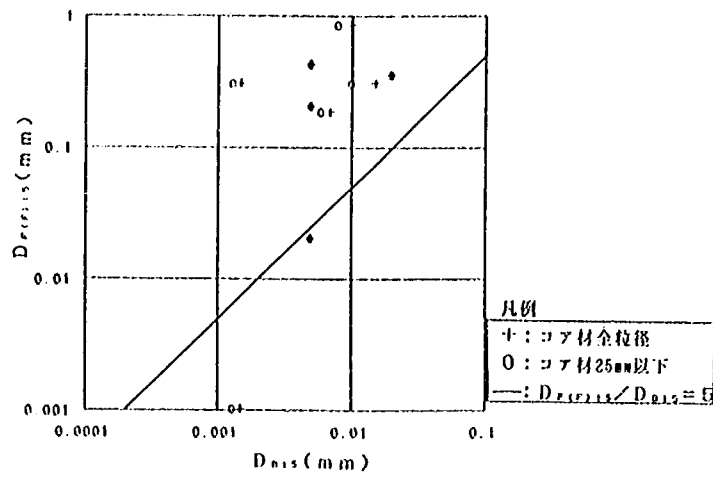


図-3.15 海外調査ダムにおける D_{B15} と $D_{F(F)15}$ の関係

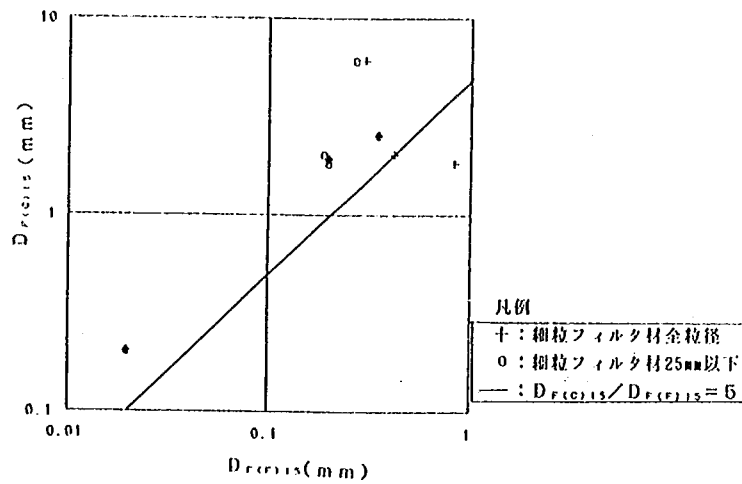


図-3.16 海外調査ダムにおける $D_{F(F)15}$ と $D_{F(C)15}$ の関係

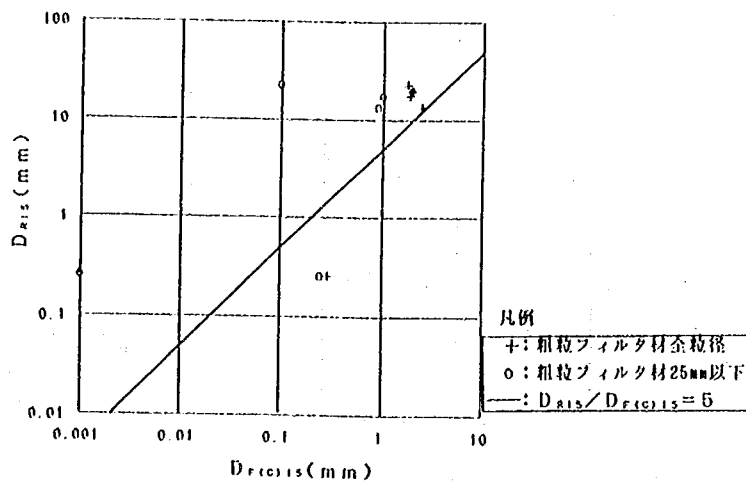


図-3.17 海外調査ダムにおける $D_{F(C)15}$ と D_{R15} の関係

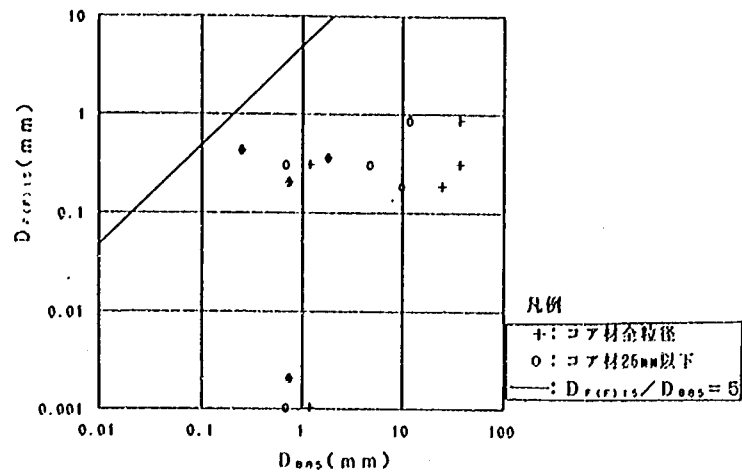


図-3.18 海外調査ダムにおける D_{B85} と $D_{F(F)15}$ の関係

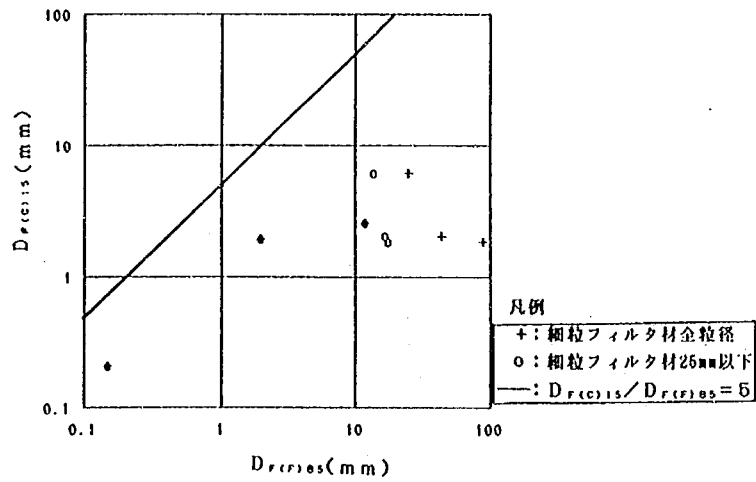


図-3.19 海外調査ダムにおける $D_{F(F)85}$ と $D_{F(C)15}$ の関係

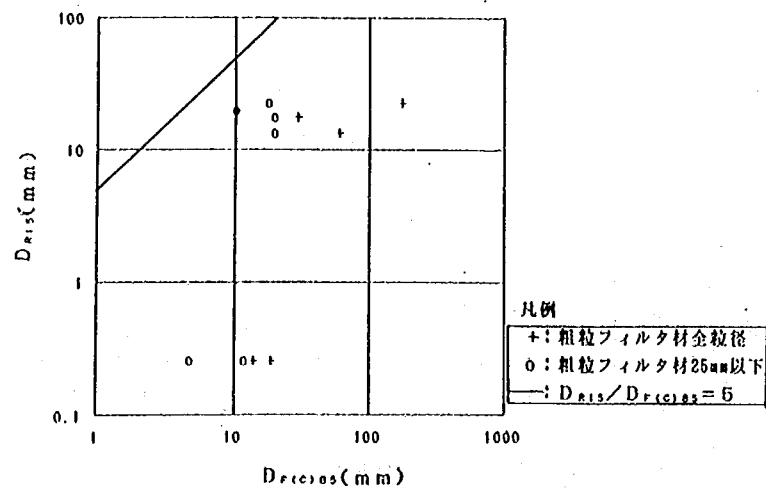


図-3.20 海外調査ダムにおける $D_{F(C)85}$ と D_{R15} の関係

これらの図には記載していないが、Quail Creek Dike決壊原因の報告書²⁹⁾には、ダムの決壊に与えた影響の一つとして、下流法尻に設置されたトゥ・ドレーン（プラスチックパイプの回りに碎石で巻立てた構造）と侵食された材料との間のフィルタ則が規定を満足していなかった点を指摘している。そしてこの結果、トゥ・ドレーンに目詰まりが発生し、適切な排水が実施されず決壊を促進したと報告されている。このことからフィルタ則の根幹をなす透水則、パイピング則については、単にフィルダムのコア材とフィルタ材に適用するのみではなく、基礎のドレーン部についても適用すべきであることがわかる。

(4) 粒度曲線の平行性

日本の調査ダムと比較すると粒度曲線の平行性には相当な差があり、必ずしも満足いくものではない（参考資料参照）。特に、Quail Creek Dikeのコア材と上流の隣接材料および下流のフィルタ材とその隣接材料であるゾーンⅢ材は、透水性に影響ある細粒分含有率が逆転しており、適切な排水機能がなされたかどうか疑問が残るところもある。

(5) 細粒分の含有率

表-3.9に示したように、Quail Creek Dikeの上流トランジション材とHans Storijsdon DamのFilter clothを除いて、コアと隣接する細粒フィルタは5%以下の規定をすべて満足している。この結果、我が国のダムに比較して、よりこの規定が守られているといえる。

4. フィルタ基準適用にあたっての問題点

フィルタ基準と実際のダムにおけるその適用状況の調査結果を前述した。この調査に際して、フィルタ基準あるいはその適用においていくつかの問題点および疑問点があることがわかった。そこで以下では、まずこれらの問題点、疑問点を列挙してみる。

- 1) 調査全ダムにおいては、フィルタ基準のうち透水則とパイピング則の適用には問題がなかった。しかし、ダムによっては粒度調整に苦労している場合もある。この基準はどの程度の安全率を有しているのか、また我が国のコア材は、ほとんどが粘着性を有しており、規定によれば緩和できることになっているが、どの点がどのように緩和できるのか。
- 2) 保護される材料、つまりコア材料が粒径25mm以上のものを有している場合、それ以下の部分に対して透水則とパイピング則を適用する根拠は何か。
- 3) もともと現行のフィルタ基準は、均一粒度に近いコア材料（均等係数 U_c が小）を対象に確立されたものである。しかし、我が国のコア材料は、大小粒径の混合したもの（ U_c が大）であり、コア材料の粒径加積曲線が寝ているときには、フィルタ基準を変える必要はないか。
- 4) 透水則およびパイピング則においては、フィルタ材料の粒度は15%粒径のみで規定されている。さらに、平行則が数値規定ではないため、両基準を満たしてもフィルタ材料の粒径加積曲線が寝ている場合もあれば、立っている場合もある。このようなフィルタの粒度曲線の形状の差は考慮する必要はないか。
- 5) 細粒分（0.074mm以下）の含有率制限の規定はどの程度の厳守事項か。
- 6) フィルタ材料としては、河床砂礫のような円礫を含むものもあれば、クラッシングにより生産された角礫を含むものもある。このような粒子形状の差異が透水則・パイピング則に影響を与えるか。
- 7) フィルタ材料の粒度はかなりよく、コア材やロック材に比べるとかなりよく締まり密度が高く仕上がる。その結果フィルタゾーンに応力集中が発生する。これが現実にはどのような現象を引き起こしているのかは判明していないが、どう対処すればよいか。
- 8) フィルタゾーンとコアゾーンの境界部における施工時の材料分離に対して、どのような対応をすべきか。

5. 問題点に対する既往の研究からの議論

5.1 透水則とパイピング則の安全率

2.2 で紹介したとおり、この両規定はTerzaghi⁵⁾ が1922年に粒子を球状体とみなしての理論的考察より提唱し、Bertram⁶⁾ が1940年にはじめて実験により検証したものである。彼の実験について簡単に記すと、図-5.1に示すようなフィルタ材料とそれで保護される材料（ベース材料）の2層供試体に対して、段階的な動水勾配を与えて浸透破壊実験を実施したというものである。実験中、供試体内の間隙水圧の変化の測定および保護される材料（ベース材料）の粒子がフィルタ材料を通過して排出される量の測定、また実験開始前と実験後の粒度分布変化の測定を実施し、フィルタの有効性を粒径比 (D_{F15}/D_{B15} , D_{F15}/D_{B85}) によって表現した。使用材料は、保護される材料は粒径0.074mm~0.21mmの砂、フィルタ材料は粒径1.2mm~2.3mmの礫であり、両材料とも均一材 ($U_c \leq 1.4$) であった。実験結果の一部を表-5.1に示すが、これらの結果より透水則、パイピング則を示す限界粒径比は、現行のそれより D_{F15}/D_{B15} で2.1~3.0倍、 D_{F15}/D_{B85} で1.7~2.3倍の安全率を持っていることがわかる。その後も多くの研究者が比較的均一な砂、砂礫を用いて検証実験を実施している。筆者らも主にこれら過去の実験のパイピング則の検証を目的として、図-5.2に示す均一な砂、砂礫を用いて図-5.3に示す装置にて実験を行った³⁰⁾。その結果を図-5.4に示す。

これら2つの実験を加えた主な過去の実験の条件を表-5.2に、破壊が発生した限界の D_{F15}/D_{B85} を図-5.5に示す。なお、試験結果についてはパイピング則のみについて示している。これは、試験材料が均一な砂、礫ということで、表-2.1で示した材料の透水性はそれらの粒径の2乗に比例するという考え方が成

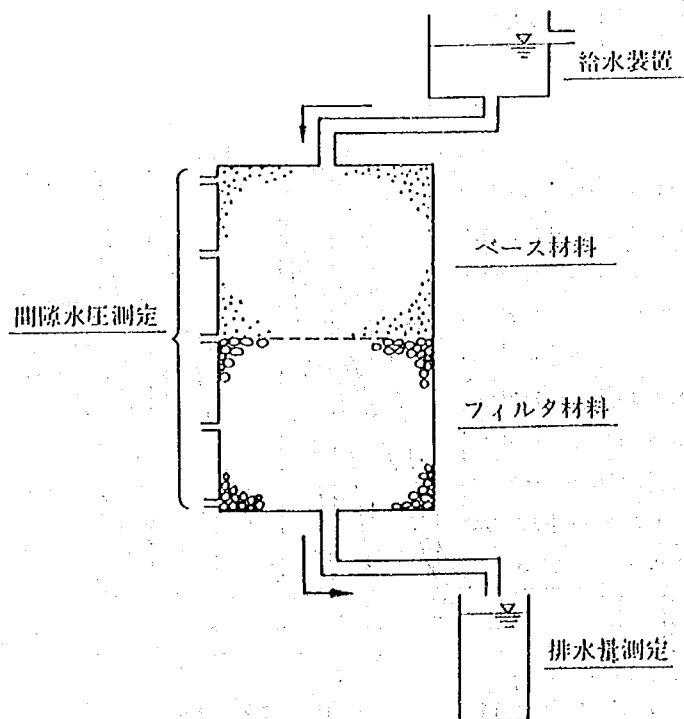


図-5.1 Bertram⁶⁾の実験概念図

り立つうえ、種々の研究者の実験でもパイピング則の方により力点が置かれていることによる。この結果を見ると、Lund³⁰⁾の比較的粒度分布の広いフィルタ材料を用いた試験で、Terzaghiの理論と同程度の結果で現基準を割り込む値となっているが、全体を通してみると、現パイピング則は1～2倍程度の安全率を有しているようである。さらにこれらの実験の条件(表-5.2参照)より特徴的なことは、すべての実験において、前述したように保護される材料があくまで粘着性を持たない砂を使用していることである。現実のコア材は、調査結果(表-3.3参照)からもわかるように明確な基準ではないが遮水性を確保するため、

表-5.1 Bertram⁶⁾の実験結果

供試体 番 号	フィルタ材 粒径 (mm)	ベース材 粒径 (mm)	動水勾配	流向 *)	限界 粒 径 比	
					D_{F15}/D_{B15}	D_{F15}/D_{B85}
1	1.2~1.6	0.074~0.1	8-8	下降流	15.0	11.5
2	1.2~1.6	0.1~0.15	6-8	下降流	10.7	8.7
3	1.6~2.4	0.15~0.21	6-8	下降流	11.5	9.0
4	1.2~1.6	0.074~0.1	8-8	上昇流	15.0	11.5
5	1.2~1.6	0.1~0.5	6-8	上昇流	10.7	8.7
6	1.6~2.4	0.15~0.21	6-8	上昇流	11.5	9.0
7	0.8~1.2	0.074~0.1	18-20	下降流	11.2	8.7
8	1.2~1.6	0.1~0.5	18-20	下降流	10.7	8.7
9	1.6~2.4	0.15~0.21	18-20	下降流	11.5	9.0

*) 上昇流

下降流

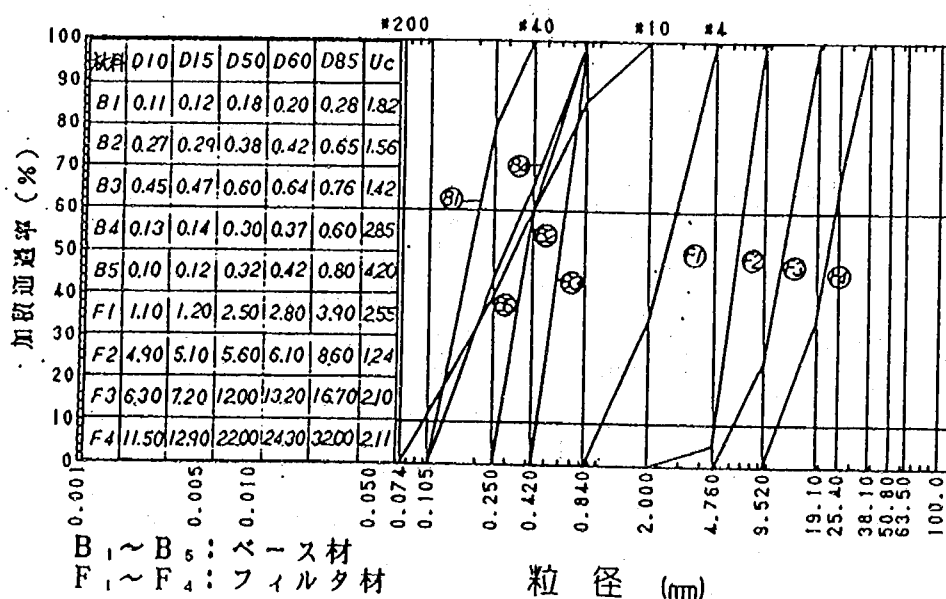
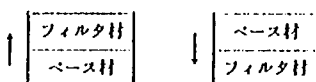


図-5.2 実験材料³⁰⁾

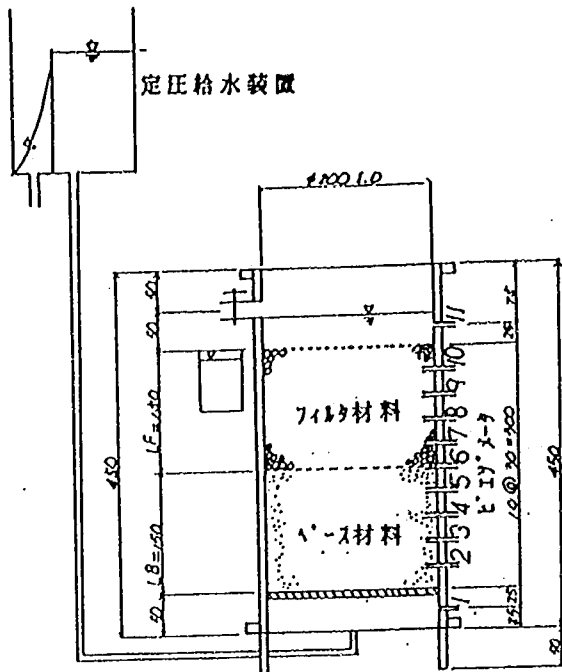


図-5.3 実験装置³⁰⁾

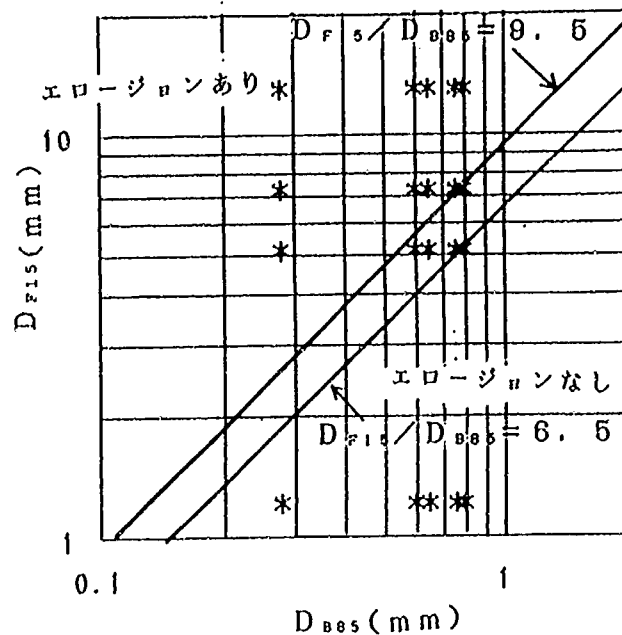
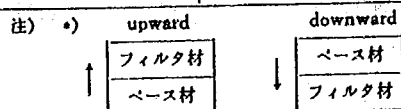


図-5.4 実験結果³⁰⁾

表-5.2 実験条件

研究者	流れの方向 ^{*)}	使用材料	動水勾配	判定方法
Terzaghi ³⁾ (1922)	—	—	—	理論による
Bertram ⁴⁾ (1) (1944)	upward downward	B ^{**) :} 74 μm ~0.21 mm 均一材 (ottawa sand) F : 1.2 mm~2.3 mm 均一材 (crushed quartz)	6~20	ベース材料の透水性の変化および試験前後の重量の変化。両材料の粒度分布の変化による。
Bertram ⁴⁾ (2) (1944)	downward	粒径は上記と同様組合せを変化	18~20	上記と同判定
Lund ³¹⁾ (1) (1949)	downward	B : $D_{B85}=0.1\text{ mm}$ ~2 mm $1 < U_0 < 8$ F : $D_{F15}=0.8\text{ mm}$ ~7 mm	10	フィルタ内にベース材粒子が混入するか否か (モールドを軽微にたたく)
Lund ³¹⁾ (2) (1949)	downward	B : $D_{B85}=0.5\text{ mm}$ 一定 F : $8 < U_0$	10	上記と同判定
Sherard ¹²⁾ (1984)	downward	B : 0.1 mm~2.5 mm F : 1 mm~20 mm 両材料とも均一材及び不均一材	不明 (水道圧力にて実験)	約 15 cm のフィルタ層を通過してベース材粒子が排出されるか否か (振動を加えることも行う)
山口・山野 ³⁰⁾ (1989)	upward	B : 0.28 mm~0.8 mm $1.4 < U_0 < 4.2$ F : 1.2 mm~12.9 mm $1.2 < U_0 < 2.6$	最大 4	フィルタ内にベース材粒子が混入するか否か



**) B : フィルタで保護される材料 (ベース材料) F : フィルタ材料

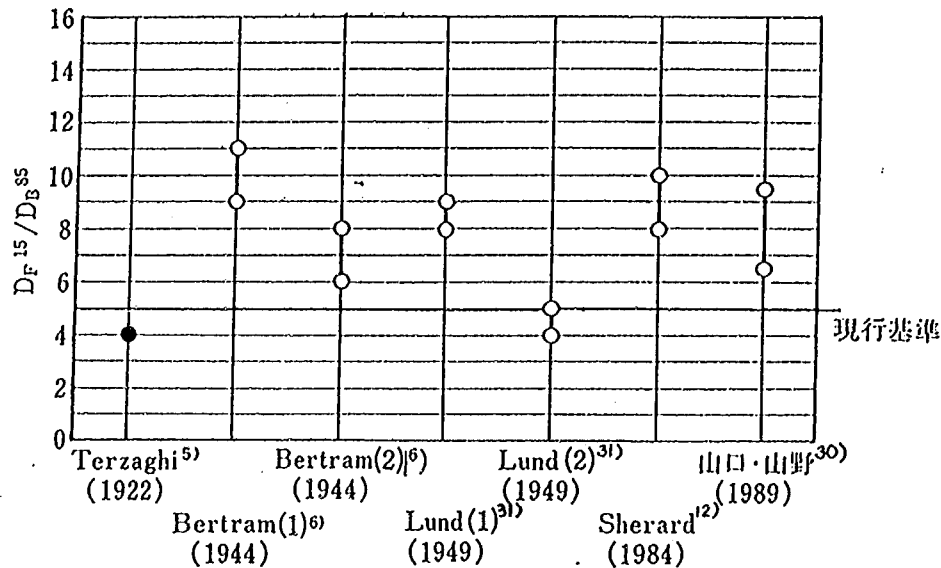


図-5.5 実験結果 (破壊時の D_{F15}/D_{B85})

0.074mm以下の含有率が15%以上であることがほとんどである。このことは2.2.6の緩和規定ですでに紹介したが、このような粘着性の細粒分をかなり含む材料に、これらの砂の試験結果を適用する時点で、すでにかなりの安全率を有しているものといえる。ただし、透水則、パイピング則が安全率を有しているという考え方の根拠は、これらの実験条件、結果からのものであって、すなわち保護される材料、フィルタ材料が完全な、傷やばらつきのない状態を想定している。

5.2 -25mmの規定と施工時の材料分離

多くの文献調査を実施したが、フィルタ基準における-25mmの規定の根拠を知ることはできなかった。ただ、前述したとおり、保護される材料に比較的大きな砂、礫を含む場合、全粒度にわたり D_{B85} を規定すると浸透破壊を受けやすい細粒部に注目した粒度決定とはいえない。(このことは、Khorら(1989)⁴⁾の研究によっても明らかにされている。) そのため、この規定はこれを防止し、パイピング則をより安全側に適用するため、細粒部に対して D_{B85} を決定する規定と考える。

しかし逆に、透水則に対してはそうではないことを考慮しておく必要がある。よって、透水則については、15%粒径の比較だけではなく、実際に透水係数の比較をすることが必要となろう。

一方、コア材料やフィルタ材料のダンピング時の材料分離は明らかに発生しているように思う。そのため、両材料の境界部に粗い材料が片寄った際には、人力による除去がなされているというのが現状である。これらの作業は大変面倒なものであるが、特にパイピング則を無意味なものにしないためにも必要不可欠な作業といえよう。

5.3 コア材料の粒度の影響

表-5.2に示すフィルタ則の検証実験の中のLund(1)³⁰⁾の実験においては、保護される材料の均等係数

Ucを1～7まで変化させた実験も実施している。この結果、Ucが変化してもパイピング則を表す粒径比には大差なしとしている。しかし、現実に建設されるフィルダムのコア材はもっと均等係数が大きく、幅広い粒度分布を持っているため、この検証実験のみで保護される材料の粒度分布の影響を判断するには無理があろう。

Lowe III (1982)³²⁾によると、パキスタンで建設されたフィルダムであるタルベラダムでは、上流側に設置された土質ブランケット中に基礎の不等沈下により生じた亀裂に沿って多数のピンホールが発生したという。彼は、ピンホールの発生原因の一つに、土質ブランケット材の粒度曲線が極端に寝ていることを指摘し、その際の安全性確認方法を示している。土質材料のパイピング則の対象が砂礫ではなく、亀裂という違いはあるが非常に参考になる。

具体的な検討方法は、図-5.6に示すように土質材料の粒度分布曲線を任意の点で粗粒部分と細粒部分に分割し、前者をフィルタ材料、後者を保護される材料と考えてパイピング則を適用し、満足していることを確認するというものである。

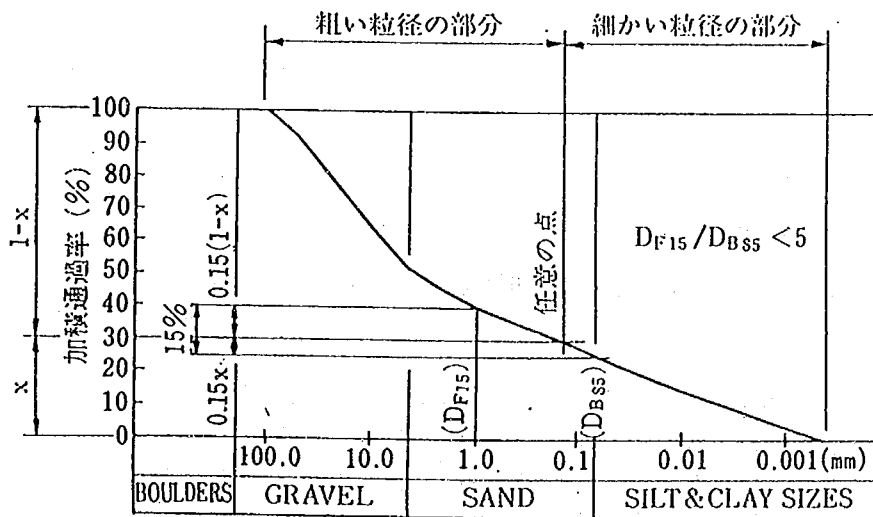


図-5.6 Lowe III³²⁾によるSelf-Filteringの基準

また、本城ら(1989)¹⁶⁾によれば、保護される材料の粗粒部の勾配に注目し、95%通過粒径と75%通過粒径の比をパラメーターとして、パイピング則を変更させる次式を提案している。

$$\frac{D_{F15}}{D_{B85}} \leq 5.5 - 0.5 \frac{D_{B95}}{D_{B75}} \quad \left(\text{ただし、} \frac{D_{B95}}{D_{B75}} \leq 7 \right) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、 D_{B95} ：保護する材料の95%通過粒径 (mm)、

D_{B75} ：保護する材料の75%通過粒径 (mm)。

式 (5.1) によれば、保護される材料の粗粒部の勾配が最大に緩くなった状態の7であればパイピング則は2以下の規定となり、相当厳しい基準となる。逆に勾配が立った1の状態ではもとの基準となっている。

ただし、上記の試験は、砂と礫といった非粘着材を対象に実施したものである。また、 $D_{B95}/D_{B75} > 7$ については、今後の検討を要することが指摘されている。

さらに、Lafleur(1989)⁴⁸⁾は、広い粒度分布のベース材を用いた実験的な検討が少ないことを指摘したうえで、①直線状粒度、②ギャップ粒度、③細粒分の少ない下に凸な粒度、の3種類の広い粒度分布のベース材を用いたフィルタ則実験を実施した。その結果、浸透流によりベース材自体が目詰まりするself-filtrationなる状態を形成する粒径を、パイピング則の基本とすることを指摘している。なお、直線状粒度の場合代表径は D_{100} ではなく D_{B50} であり、ギャップ粒度の場合は細粒側ギャップについて代表径を決定すべきとされている。

5.4 フィルタ材料の粒度の影響

フィルタ基準に影響するフィルタ材の粒度の問題としては、粒度曲線が幅広い材料(U_c が大きい材料)の場合の対処と細粒分の規定をどの程度厳守するかの問題がある。

5.4.1 均等係数の影響

フィルタの均等係数によりパイピング則にどのような影響があるかについては、前述のLund³⁰⁾が行った実験結果がある。図-5.7には、パイピング発生限界時の D_{F15}/D_{B85} とフィルタ材料の均等係数 U_{CF} の関係を示した。この結果からわかることは、 D_{F15} が同じでもフィルタ材料の粒度が寝てくるとパイピングに対する安全性が小さくなることを示している。ただし、限界時の D_{F15}/D_{B85} は4程度に収束している。さらに彼は、この結果に基づいてフィルタ基準パイピング則の指標である D_{F15}/D_{B85} を、フィルタ材の均等係数が8

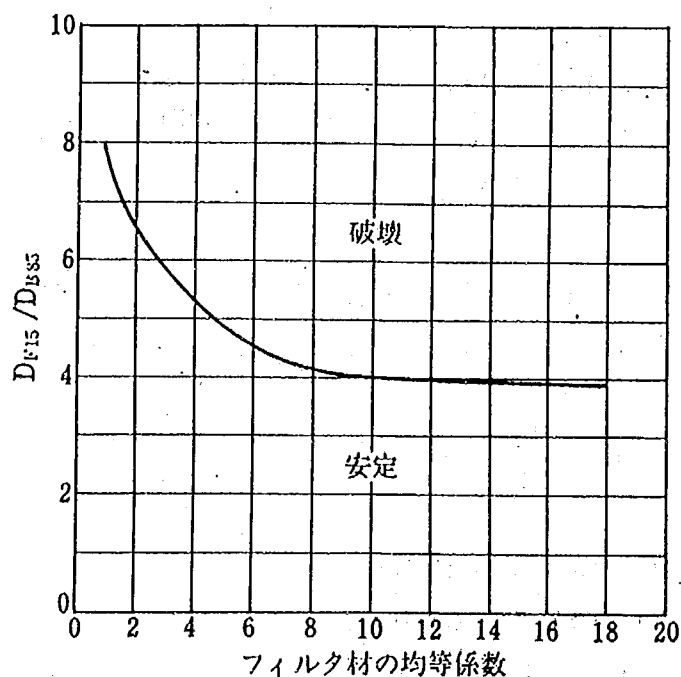


図-5.7 限界時の D_{F15}/D_{B85} と U_{CF} の関係³⁰⁾

以上の場合、分子の15%通過粒径を25%通過粒径に変更して $D_{F25}/D_{0.85}$ を使用することを提案している。

しかし、Sherard¹⁹⁾はフィルタ材の粒度分布が広がると($U_{cf} > 20$)、コア材料の細かい部分も保護され、逆に安全率が2倍程度になると述べている。ただし、これは極端な差ではなく、フィルタ基準をそれによって変更する必要はないとも述べている。このSherardの考え方は妥当だと思われる。Lundの実験結果は、使用された保護される材料が $U_c < 8$ の砂であるため、フィルタ材の粒度分布が広がることにより砂の細かい部分が流亡を防ぐ利点よりも、フィルタとしてさらに粗い材料が入ることにより大きな間隙が発生することのデメリットの方が大きかったのではないかと考えられる。このことは実際に使用される堤体材料のコア材やフィルタ材はその粒度分布が広く、かつ細粒分をある程度含んでいるため、砂と礫による試験結果を吟味せずに適用することの問題点を指摘しているように思われる。

5.4.2 細粒分の含有率の影響

3章の調査結果から理解できるように、現行のフィルタ基準のうち色々な努力が払われても最も達成しにくいのが、この細粒分の含有率の制限規定である。調査ダムにおいては、緩和規定を実際に適用して5%以上の規定値を設定しているダムもあった。

元来、この規定はフィルタ材料の透水性の規定というよりは非粘着性であることを規定したもので、それが5%以下という具体的数字で表現されている。従って、もし材質によって細粒分が5%以上あってもフィルタ材料が非粘着性であれば使用可能という姿勢で設計に望むべきと考える。近年、フィルタ材料が非粘着性であるか否かを知る簡単な試験が提案されているので、以下にVaughan(1976)³⁹⁾の方法とMantz(1975)³⁰⁾の方法を紹介する。

(1) Vaughanの方法

試験方法は、図-5.8に示すように湿潤したフィルタ材を標準モールド内にて締固め、それを水中に沈める。水中内で静かにモールドを引き抜き、その際フィルタ材料が安息角以下の角度で破壊した場合は非粘着性で、安息角以上の角度で破壊または変形しなかった場合は粘着性と判断する。

(2) Mantzの方法

図-5.9に示すように水と分級した試料を試験筒に満たす。それを水平状態に保った状態から徐々に角度をつけていき、試料が移動し始める角度を計測する。彼が実施した試料の結果を表-5.3に示す。この結果によると、 $25.5\mu\text{m}$ では粒子が移動する角度が大きく粘着性と判断でき、 $37.5\mu\text{m}$ 以上ではその角度が小さくかつほぼ同じ値を示し非粘着性と判断している。なお、この試験はフィルタ材料というよりはむしろ土粒子そのものの粘着性確認試験であって、実際現場において使用するフィルタ材の粘着性を確認する場合、その材料の含有する最小粒径にて試験を実施するなど、色々と工夫を凝らす必要があるだろう。

いずれの方法を採るにせよ、細粒分を5%以上含有するフィルタ材を使用する場合、これらの確認試験を実施することが望ましいと思われる。

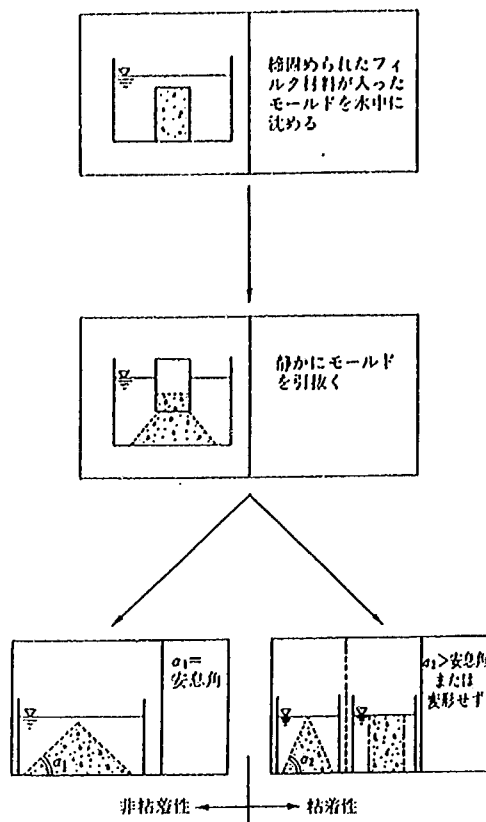


図-5.8 Vaughan³⁹⁾の粘着性確認試験概念図

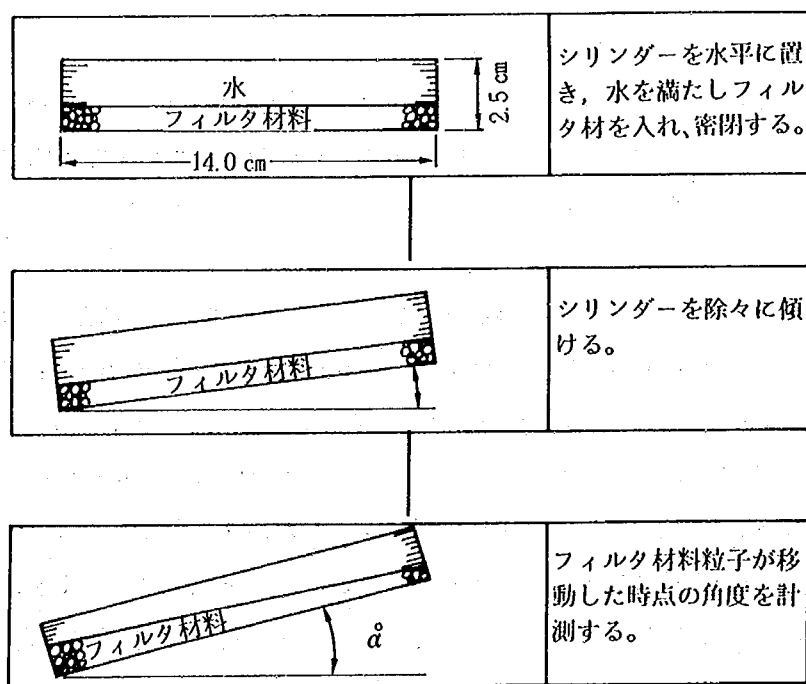


図-5.9 Mantz³⁹⁾の粘着性確認試験概念図

表-5.3 Mantz³⁹試験結果

粒 径 (μm)	粒子の動き 出す角度($^{\circ}$)	判 定
25.5	65 $\pm$ 6	粘 着 性
37.5	38 $\pm$ 3	非粘着性
46	39 $\pm$ 3	非粘着性
58	42 $\pm$ 4	非粘着性
68	41 $\pm$ 4	非粘着性
79	42 $\pm$ 4	非粘着性

5.5 フィルタ材料の粒子形状の影響

調査結果でも明らかなように、フィルタ材は河床砂礫を用いる場合と原石山から採取された碎石の細粒部分を採用する場合があります、前者の粒子形状は円礫を多く含み、後者のそれは発破、クラッシング等で角礫を多く含むようになる。Karpoff³⁵⁾の実験結果を基にした米国内務省開拓局のアースマニュアル(1974年版)に示されているフィルタ則³⁶⁾には、円礫フィルタと角礫フィルタを用いた場合の透水則とパイピング則があり、それは次のようになっている。

(1) 粒子が丸味をおび、粒径の分布しているフィルタ材

$$\frac{\text{フィルタ材料の15\%粒径 } (D_{F15})}{\text{フィルタで保護される材料の15\%粒径 } (D_{B15})} = 12 \sim 40$$

$$\frac{\text{フィルタ材料の50\%粒径 } (D_{F50})}{\text{フィルタで保護される材料の50\%粒径 } (D_{B50})} = 12 \sim 58$$

(2) 粒子が角ばって、粒径の分布しているフィルタ材

$$\frac{D_{F15}}{D_{B15}} = 6 \sim 18$$

$$\frac{D_{F50}}{D_{B50}} = 9 \sim 30$$

この基準では、極端ではないにしても、フィルタ材料として円礫を使用した方が角礫を使用した場合よりも粒径比を大きくとることができることを示している。この原因は、同じ粒径分布を持つ場合でも角礫の方が円礫よりも大きな間隙を形成しやすいためと考えられる。しかし、その差は小さく、かつ現行の透水則、パイピング則を守っていればフィルタ形状の差は全く問題ないといっても差し支えない。現実には角ばった材料を用いたフィルタ材が問題になったような事例はない。

また最近Sherard¹²⁾ は、上記の基準も鑑みたく、フィルタ材料形状の差異の影響についての実験を行っている。彼は、同粒径の円礫と角礫の透水試験を実施することにより、その間隙の大きさを推定しているが、これによると必ずしも角礫の間隙の方が大きいとは限らないことを指摘している。このことから、角礫が余程偏平な形としている場合は別として、フィルタ材として角礫を用いる場合と円礫を用いる場合の差はほとんどないと結論付けられよう。

5.6 フィルタゾーンへの応力集中

フィルタ材料は概して粒度分布が非常に良く、少ない転圧回数でも高密度が達成させられ、かつ密度が高いと圧縮性が小さくなる。このようなことからフィルタ材料については、コア材料やロック材料よりも剛性が大きくなり、応力集中を招く恐れがある。図-5.10、5.11は、調査ダムの中では密度、締固め仕様とも平均的な岩屋ダムで実施された非線形の築堤解析より求まった、等最大主応力図と降伏領域図である。これらの図より、フィルタゾーンには応力が集中し、安全率が低下していることがわかる。またこの結果、ゾーン間での沈下の差異やそれに伴う境界部でのせん断破壊をもたらす恐れがあることがわかる。

このような状況を鑑みるに、フィルタ材の過度の転圧は避け、コア材の変形性に適合する締固め状態でフィルタ材料を転圧していく必要があると思われる。

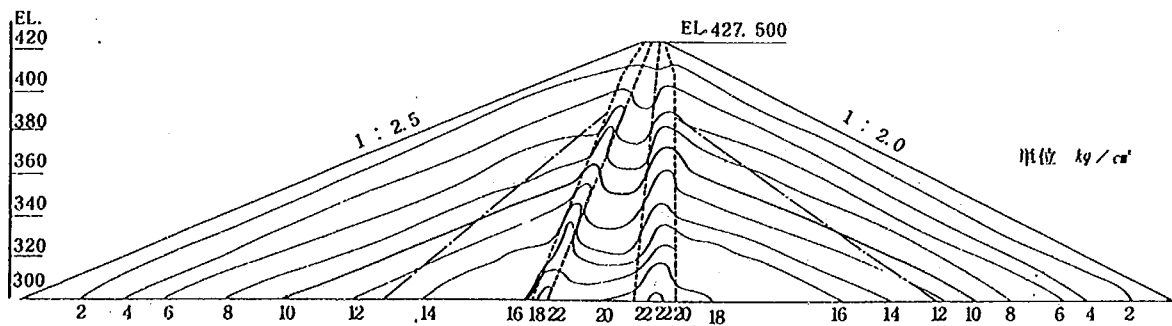


図-5.10 等最大主応力図（岩屋ダム工事誌による）

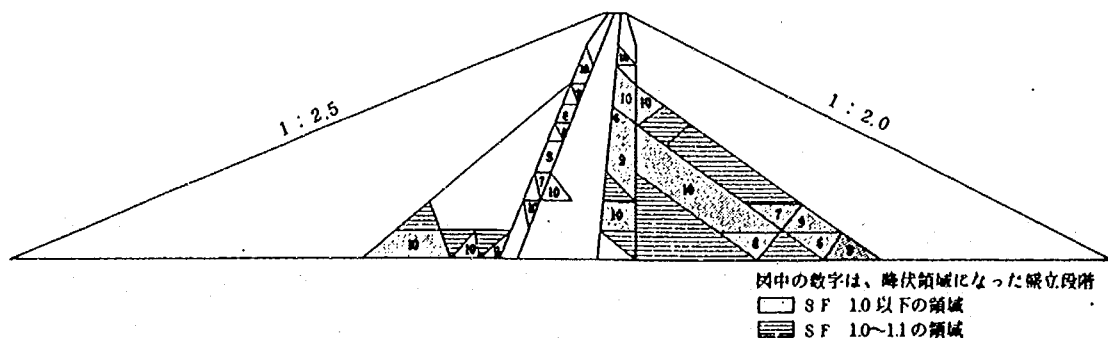


図-5.11 降伏領域図（岩屋ダム工事誌による）

6. フィルタ基準の最近の動向

6.1 概要

前章までに紹介した議論は、2つの基本的条件を規定した上での実験結果に基づいたものである。この条件とは、1つは保護する材料やフィルタ材料に全く傷がなく、浸透水に対して材料は完全な状態で対応していることであり、もう1つは保護する材料が非粘着性であるという条件である。これらの条件のもと、Terzaghiの理論以降種々の実験が成されたが、これに対して近年これらの条件をより現実の築堤材料および状況に近いかたちでフィルタの有効性を確認する方法が提案されている。すなわち前者の条件に対しては、地震、基礎の不等沈下および水圧破砕 (hydraulic fracturing) 等によって保護する材料に亀裂が発生した場合、その箇所での集中漏水の発生を考慮したうえでのフィルタ基準に関する実験方法である。そして後者の条件に対しては、現実のフィルダムのコア材が粘着性材料が使用されていることを鑑み、保護する材料を砂ではなく細粒分を多く含んだ粘着性材料を使用した方法である。これらの方法は別々に議論されるわけではなく、不完全な状態での粘着性土に対するフィルタの有効性確認の実験として扱われている。

これらの研究は、1940年にCedergren³⁰⁾ が種々の粒径を持ったフィルタに粘土のスラリーを通した実験によってフィルタを設計したことに始まる。その後、数多くの研究者により、実験方法の開発、新基準の提案がなされている。実験方法は大きく分けて2つの方法に集約される。1つは、保護する材料が浸透水によって流れ出し、濁水状態となった状況でのフィルタの有効性を検討する方法である。これはスラリー試験等と呼ばれ、フィルタを設置したモールドに上部から保護される材料を溶かした懸濁液を注入し、フィルタを通過して排出される懸濁液の濃度、通過時間、通過後のフィルタの目づまり状況等により、その有効性を評価する試験である。この試験は、懸濁液によるフィルタの有効性評価という点でフィルダムのコア材が集中漏水により溶解して流出し始めているという最悪の状況を想定した試験と考えられる。もう1つは、保護する粘着性材料にあらかじめ数mmの亀裂を設けその下流にフィルタを設置し、上流からかなり大きな動水勾配で水を流し亀裂の発達の有無、浸透排水の濁度等によりフィルタの有効性を評価する試験である。これはピンホール試験、スロット試験と呼ばれ、1976年にSherard & Deckerら³⁸⁾ が粘土の分散性評価のため開発した試験を応用したものである。粘土の分散性評価はフィルタの有効性にも大きく影響するので、この試験方法、結果については後述する。

これら、スラリー試験とピンホール試験等の大きな違いは、モデル試験として堤体中でどのような状態を想定しているかという点である。前者はコア材料が浸透水によって懸濁液になった最悪の状態での試験であり、後者はコア材料に何らかの原因で亀裂が生じた状態で、その亀裂に圧力を持った貯水が侵入した状態を仮定した試験である。本章では、これらの試験方法と結果を紹介し、新基準を適用する際の問題点を抽出して今後の方針を模索する。

6.2 スラリー試験

Mantz³⁹⁾ は、1977年に図-6.1に示す試験装置においてスラリー試験を実施した。具体的な試験方法は次のとおりである。試験材料は、スラリー材として均等係数が2以下の3種類を用いた。これらの材料の50%通過粒径(D_{50})は、 $3.4\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 、 $42\mu\text{m}$ である。このうち $D_{50}=3.4\mu\text{m}$ の材料については、スラリーにする混合水を蒸留水、水道水(硬水)、塩水(NaCl 含有量 $35\text{gr}/\ell$)の3種類を使用した。混合量はすべての材料について $30\text{gr}/\ell$ とし、5分間攪拌してスラリーとした。フィルタ材には、均等係数が1.2~1.67の8種類の砂を使用し、試験前に透水試験を実施している。この透水試験は、スラリー作成に使用した水で実施している。この実験におけるフィルタ有効性の判定基準は以下のとおりである。

有効なフィルタ——フィルタを通じて排出された水が清浄であり、フィルタ表面にスラリーの膜が発生し流速が徐々に減少していく状態。

有効でないフィルタ——フィルタを通過したスラリーの濃度は元液のそれと変化がなく、流速の減少はフィルタをスラリー中の細粒子がいくら通過するかで大きくなったり小さくなったりする状態。

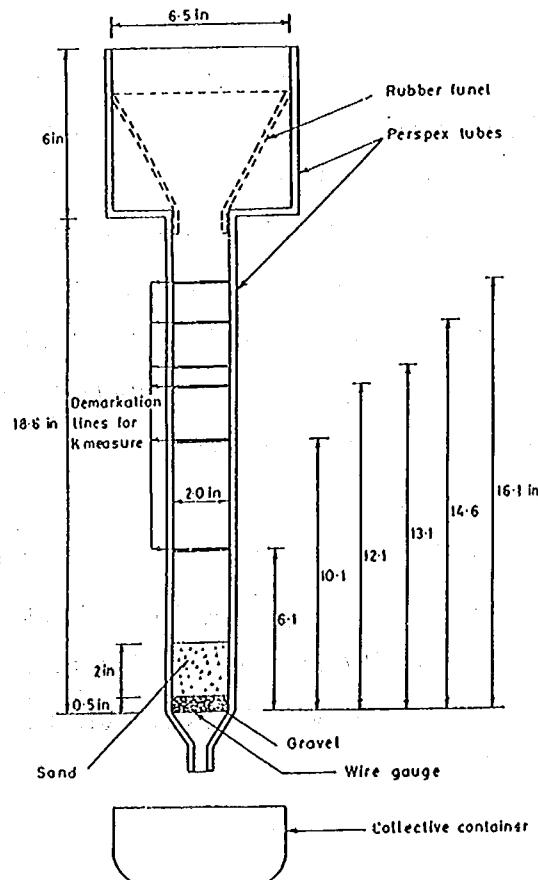


図-6.1 Mantz³⁹⁾のスラリー試験装置

実験結果のうち、スラリー材が $D_{50}=3.4\mu m$ で、それぞれ蒸留水（S1D）、水道水（S1H）、塩水（S1B）でスラリー化したものの結果を図-6.2~6.4に示す。この図より蒸留水でスラリーにした場合は D_{50} が少し小さくなっているが、水道水、塩水でスラリーにした場合は D_{50} が大きくなっており、フロック状態を形成していることがわかる。また、フィルタの有効性の判定には、現在のフィルタ則に使用されている D_{F15} を用いずにフィルタの透水係数を使用している。このことは、Vaughan(1970)¹⁹⁾が実施したCow Green Dam材料に対する実験および1978年のEmpingham Damでの実験⁴⁰⁾、さらにNaranjo(1970)⁴¹⁾が実施した実験などでフィルタの透水係数によってその有効性を判定したことに始まる。Soares(1980)¹⁷⁾は、これらの実験結果にLund(1949)⁴²⁾の実験結果を加えて、表-6.1および図-6.5を示している。この図表よりフィルタの有効性を次式で表した。

$$k_f \leq 6.7 \times 10^{-6} \times D_{85}^{1.52} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

また、Vaughanは、自分の実験結果を式(6.2)で表した。

$$k_f \leq 6.1 \times 10^{-6} \times D_{85}^{1.42} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに、 D_{85} ：保護する材料の85%通過粒径（ μm ）

（スラリー試験の場合はスラリー状態での85%通過粒径）、

k_f ：フィルタの透水係数（ m/s ）。

これらの基準は、濁水化した状態を想定した粘着性土を保護するフィルタに対する新基準といえる。ただこれらの実験では、粘土を強制的に分散したわけではなく、粘土を水中で攪拌したのみで粘土のかたまり状態（Floc状）にあるままで検討されていることに注意すべきである。

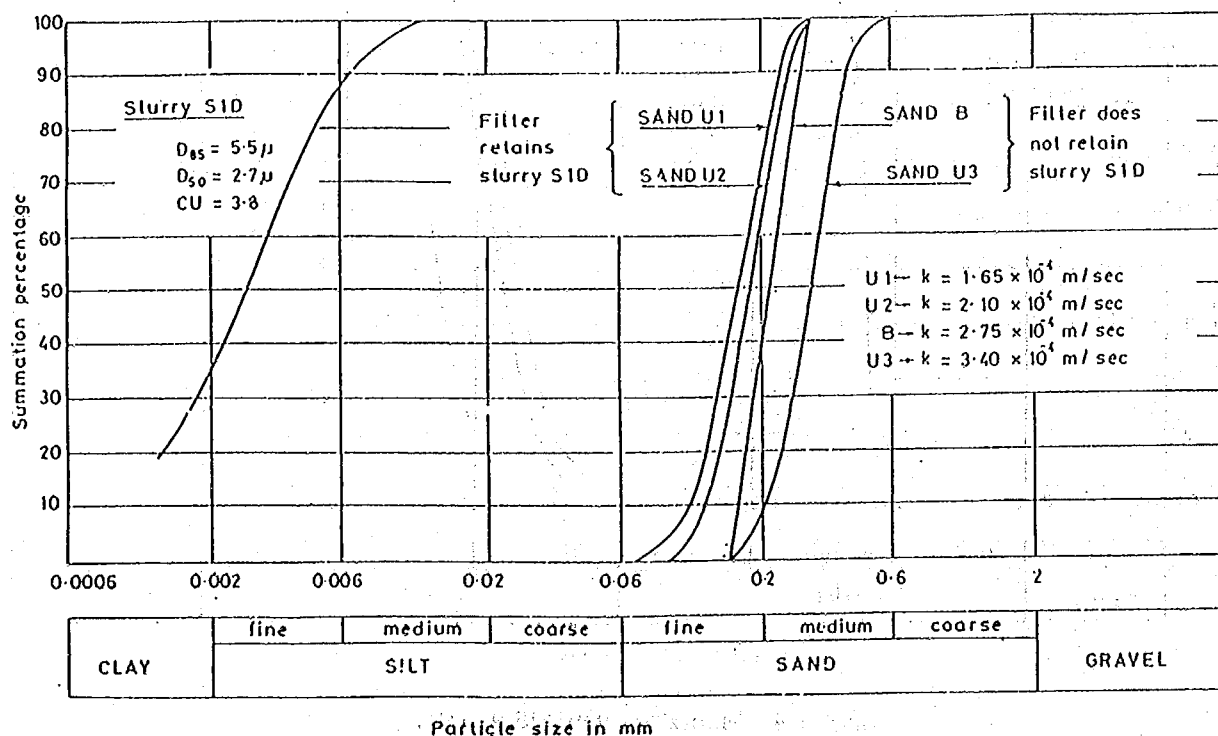


図-6.2 Mantz³⁹⁾の実験結果 1 (S1D)

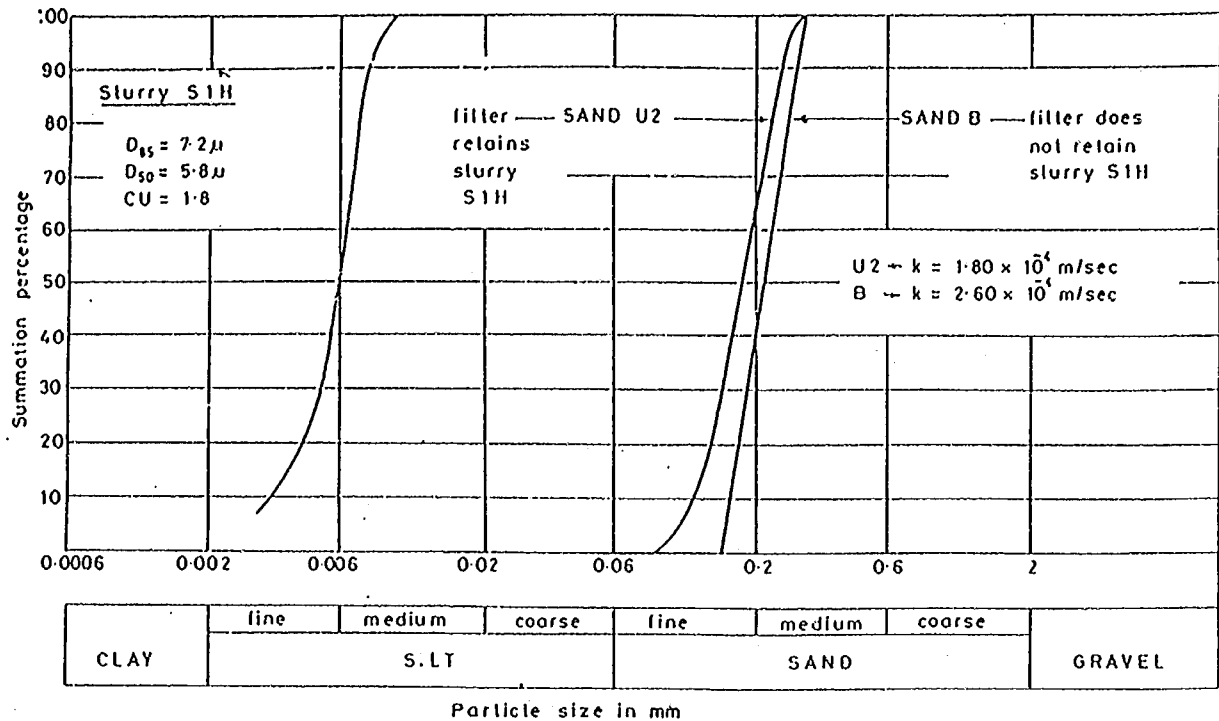


図-6.3 Mantz³⁹⁾の実験結果 2 (S1H)

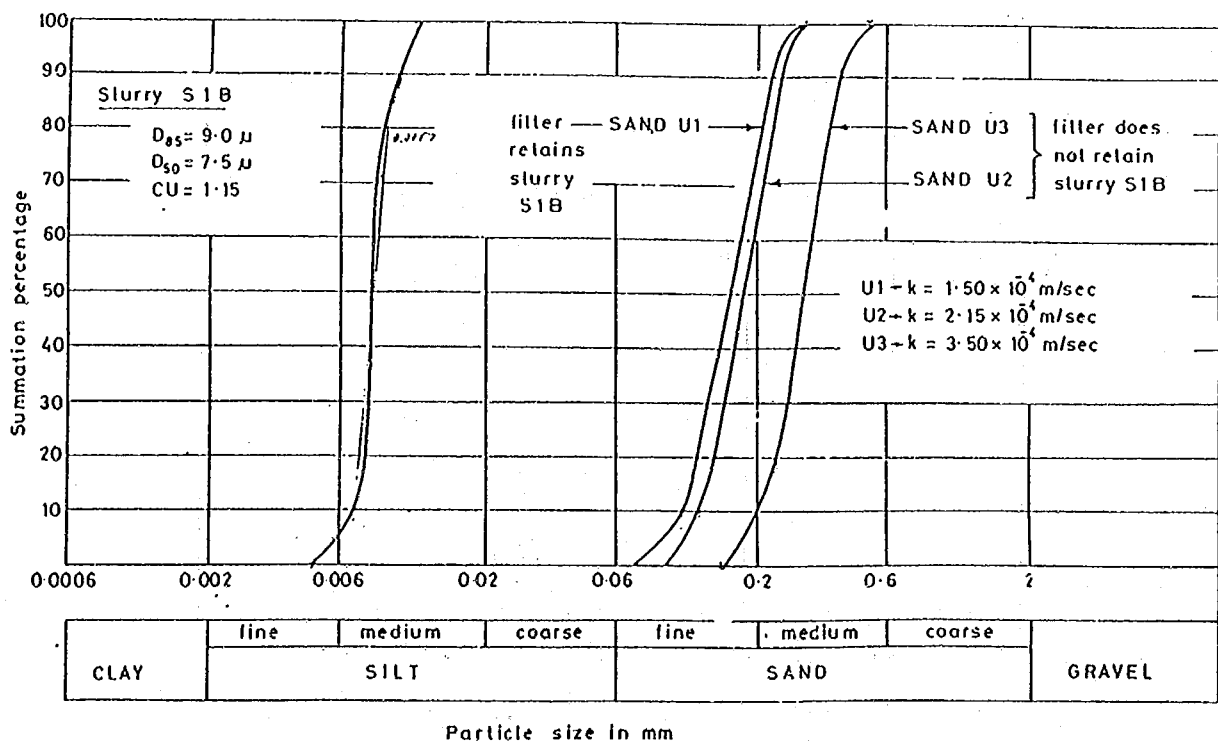


図-6.4 Mantz³⁹⁾の実験結果 3 (S1B)

Townsendら(1987)⁴²⁾は、後述するSherardら(1985)⁴³⁾の実験を確認する意味で、ダーティー・ウォーター・テスト (Dirty Water Test) を実施している。この実験は、Mantzの実施したスラリー試験と類似した装置と試験方法を採用し、フィルタの有効性の判定基準も同様であるが、特徴的なのは、あくまで分散性土を対象として、それを保護するフィルタの有効性を論じていることである。よって、スラリー材料にカオリナイトも使用しており、その濃度を変化させて実験している。結果として、彼はSherardの後述する新基準を肯定するとともに、このテストの評価として、定量的試験ではないものの不完全な状態の分散性土を保護するフィルタの有効性を調べるには有効な実験であることも指摘している。

表-6.1 Soares¹⁷⁾がまとめた実験結果

実験名	ベース材料 $D_{85}(\mu m)$	フィルタの 透水係数 (m/sec)	実験結果	フィルタ材の 粒 度
London clay filter tests from Naranjo (1970) ⁴¹⁾	$D_{85}=1.2$	1×10^{-5}	有効でない	均一材料
	$D_{85}=1.4$	1×10^{-5}	有効	
Cow Green by Vaughan (1970) ¹⁹⁾	$D_{85}=5.3$	2×10^{-4}	有効でない	粒度の広い材料
		1×10^{-4}	有効でない	均一材料
		7×10^{-5}	有効	均一材料
		2×10^{-5}	有効	粒度の広い材料
Empingham tests by Vaughan (1970) ⁴⁰⁾	$D_{85}=7.9$	4×10^{-4}	有効でない	粒度の広い材料
		1.5×10^{-4}	目詰まり現象	
		7×10^{-5}	有効	
		5×10^{-5}	有効	
Tests Series I by Lund (1949) ³¹⁾	$D_{85}=9.0$	3×10^{-4}	有効でない	均一材料
		2.2×10^{-4}	有効	
		1.5×10^{-4}	有効	
	$D_{85}=28.5$	1.9×10^{-3}	有効でない	均一材料
		8.7×10^{-4}	有効	
		3.5×10^{-4}	有効	
Test Series II by Lund (1949) ³¹⁾	$D_{85}=9.0$	3.4×10^{-3}	有効でない	均一材料
		1.9×10^{-3}	有効	
		8.8×10^{-4}	有効	
	$D_{85}=9.0$	1.6×10^{-3}	有効でない	粒度の広い材料
		4.2×10^{-4}	目詰まり現象	
		1.8×10^{-4}	目詰まり現象	
	$D_{85}=28.5$	1.3×10^{-4}	有効	
	$D_{85}=28.5$	1.6×10^{-3}	有効でない	粒度の広い材料
		7.3×10^{-4}	有効	

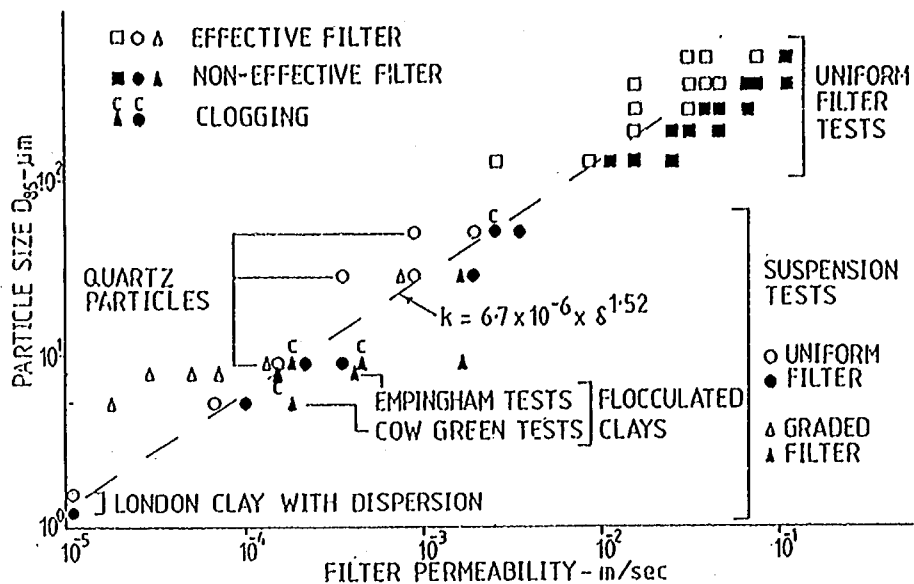


図-6.5 Soares¹⁷⁾がまとめた実験結果図

6.3 ピンホールテスト

Liu(1989)¹⁸⁾は、フィルダムのコア材料に対するフィルタの設計に際しては、何らかの原因でコアゾーンに亀裂が発生したことを前提とすべきことを指摘している。さらに、彼は、こうした状況下でのフィルタ基準を得るために、図-6.6に示すようなコア材に亀裂を発生させた供試体に250という非常に大きい動水勾配で通水し、フィルタ材料との間のパイピング則について検討した。その結果、亀裂幅を1～4mmで変化した範囲では、亀裂幅の影響はなく、フィルタ材料の20%粒径 D_{F20} が以下の条件を満たせば有効なフィルタであるとしている。

$$D_{F20} \leq \frac{0.25}{0.1 + D - 0.6D^2} \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

ここに、Dはコア材料の分散度を表し、次式で求まる。

$$D = P_1 / P_2 \quad (0 \leq D \leq 1) \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

ここに、 P_1 は分散剤を加えないときのコア材の粒径 $5\mu\text{m}$ 以下含有量で、 P_2 は分散剤を加えた場合の $5\mu\text{m}$ 以下含有量である。

上記の基準では、コア材料の分散性をも考慮に入れていることに着目させられる。コア材料の分散性に応じて要求される D_{F20} がどのように変化するか表したのが図-6.7である。この図より彼は以下の区分を提案している。

1. $D < 0.3$ の場合 $D_{F20} < 2.5\text{mm}$
2. $D = 0.3 \sim 0.5$ の場合 $D_{F20} \leq 0.8\text{mm}$
3. $D > 0.5$ の場合 $D_{F20} < 0.5\text{mm}$

また、コア材料が分散性土でない一般の状況下であれば $D_{F20} \leq 0.8\text{mm}$ を考えてフィルタ材料を選定するよう提案している。

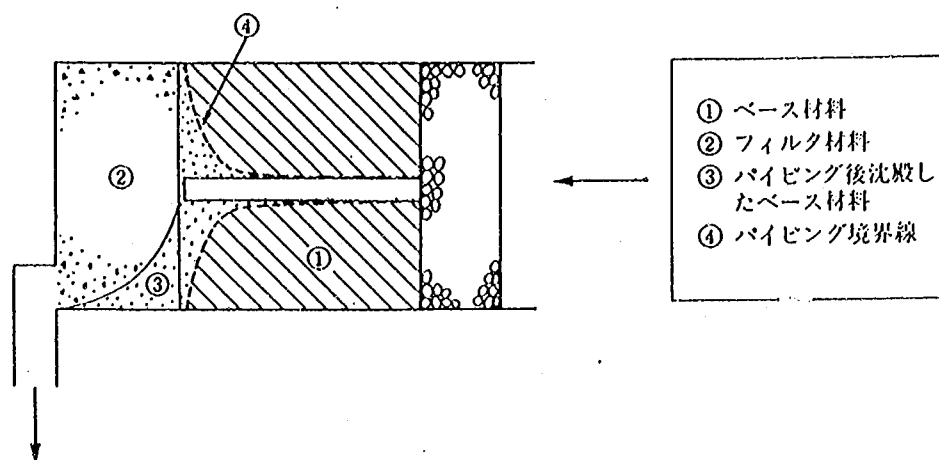


図-6.6 Liu⁴⁹⁾の実験概念図

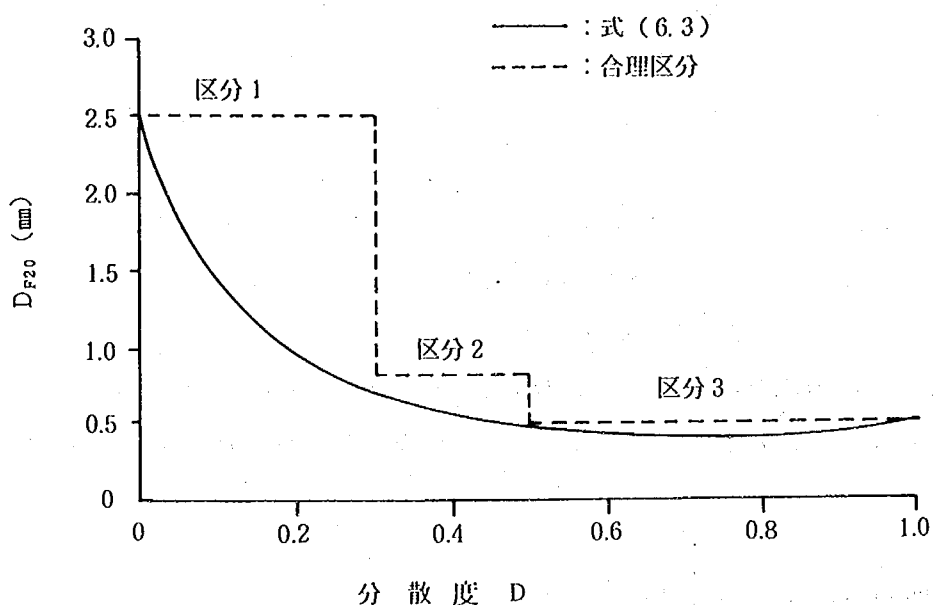


図-6.7 D と D_{F20} の関係

6.4 Sherardらの研究

Sherardらは、前述のように1963年に現行のフィルタ基準をとりまとめ²⁾ その後も砂礫フィルタの研究論文を1984年に発表している¹²⁾。一方、これと平行して1976年³⁹⁾に分散性粘土の浸透破壊は、発生した亀裂中等の集中的な進行性の漏水の結果によって発生するものと考え、まず分散性土を判定、区分する研究を実施した。また、Sherardは、既設のフィルダムにおける集中漏水の原因を分析した結果、いままで考えられた以上のダムで水圧破壊 (Hydraulic Fracturing) により発生した亀裂を通して生じているという結論に達した⁴⁹⁾。彼のその後のフィルタに関する研究は、この仮説と表裏一体の関係にあり、1984年に保護する材料に分散性土をも考慮した新基準をスラリー試験、スロット試験の結果に基づいて提案し⁴⁰⁾、1985年に非侵食試験 (No-Erosion-Filter-Test) の実施によって前年に提案した新基準を改訂した^{45), 50)}。

6.4.1 分散性土の判定、区分

実験装置は、円筒モールドの中に1mmの亀裂が入った試料を設置し、その下流側に一定粒径のフィルタを置き、上流側から蒸留水を一定水頭で流入させる。試験装置の概略図を図-6.8に示す。測定項目は、水頭、流入時間、流速、排水の濁度、亀裂の大きさの変化であり、これらによって分散性土の判定、区分を行っている。図-6.9、表-6.2に判定フローシートおよび階級区分表を示す。これによれば分散性土の判定、区分に亀裂まわりの侵食性を指標としており、つまり土粒子のナトリウムイオンが浸透水によって少なくなったり、なくなったりして粒子個々がばらばらに活動する試料は分散性土とし、逆に高い水頭の浸透水においても、ナトリウムイオン濃度に変化がなく、Floc状態を保つ場合は非分散土としている。

6.4.2 新基準の提案

1984年に実施したスラリー試験、スロット試験および翌年実施した非侵食試験の実験装置概略図をそれぞれ図-6.10、図-6.11、図-6.12に示す。このうち、スラリー試験、スロット試験は前述した他の研究者の試験装置、条件に多少の違いはあるが、概略の進め方、結果の判定方法は前述のものとはほぼ同じである。

非侵食試験は鉛直型のシリンダーを使用し、その径は図-6.12に示したように、ベース材の粒径によって大きさを変更している^{45), 50)}。また、締固めて作製したベース材層中には亀裂を設置するが、ベース材の粒径によりその層厚、亀裂の大きさを変更している。

実験方法は、上部より圧力4 kgf/cm²の鉛直下降流で水を流下させる。流下水は、試料が非分散性土の場合は、水道水を使用し、分散性土の場合は蒸留水を使用する。実験結果として、5~10分間フィルタを

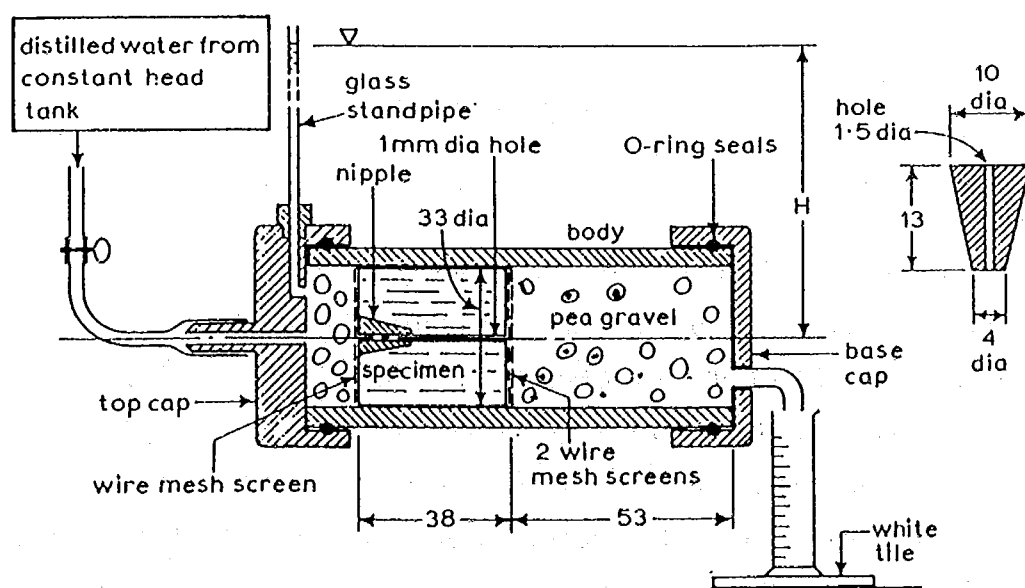


図-6.8 Sherardら (1976)³⁸⁾によるピンホール試験概略図

通過した水量とその濁度を測定し、水を止めてから装置を取り外し、ベース層の亀裂周りの侵食状況を観測する。

この試験では、ベース材の侵食を許すか否かの境界のフィルタ材の15%粒径 D_{15} を求めることを目的としている。

フィルタ効果の有無は、以下のようなメカニズムによる。まず、通水を開始すると、ベース材に開かれた孔の下端の角が欠ける。これはベース材の孔内を鉛直下方に流れていた水が、出口孔のフィルタの目詰まり後水流方向を変え、ベース材とフィルタの境界面に沿って水平方向の放射流となることによる。このようにして、ベース材の下面は次第に欠けてフィルタに流れ込むが、フィルタ材15%粒径 (D_{F15}) が D_{15b} よ

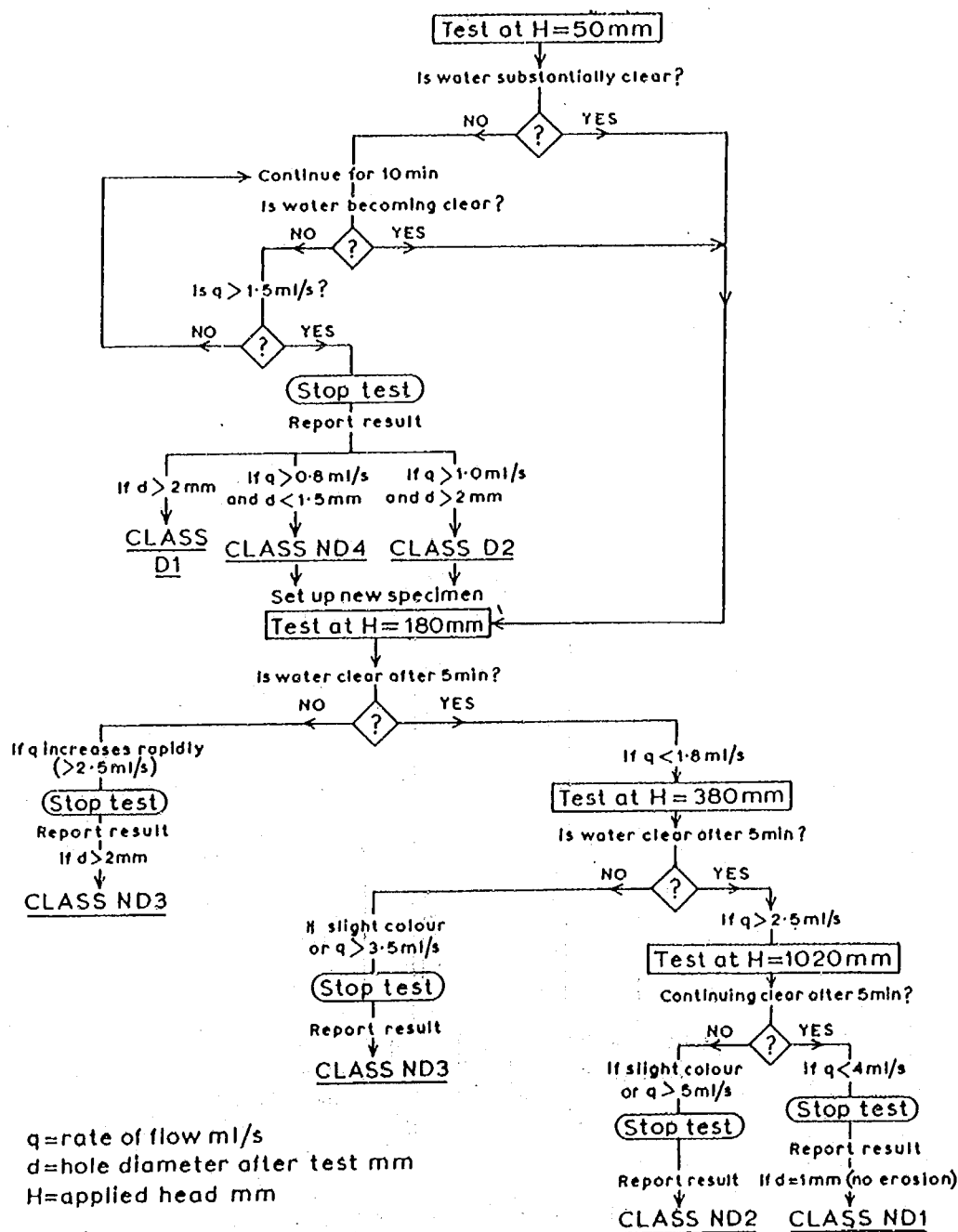


図-6.9 ピンホール試験判定フローシート³⁸⁾

表-6.2 ピンホール試験判定区分表⁽³⁸⁾

Classification	Head (mm)	Time for test (min)	Rate of flow (ml/s)	Colour, cloudiness, etc.	Hole diameter after test (mm)
Dispersive D1	50	5	>1.5	Very distinct	>2
D2	50	10	>1.0	Distinct to slight	>2
Non-dispersive ND4	50	10	<0.8	Slight but easily visible	<1.5
ND3	180	5	>2.5	Slight but easily visible	>2
	380	5	>3.5	Slight	2
ND2	1020	5	>5	Clear or barely visible	2
ND1	1020	5	<4	Crystal clear	1 (no erosion)

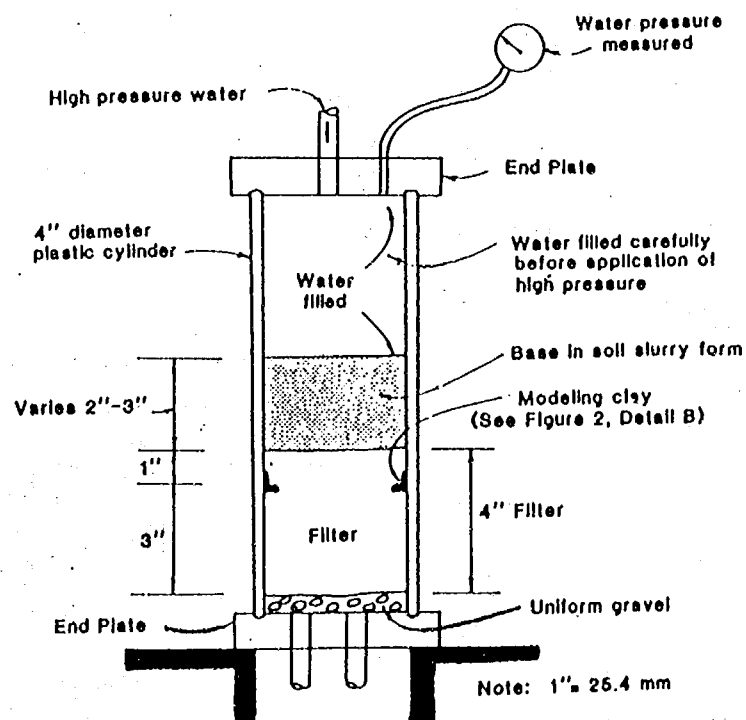


図-6.10 スラリー実験装置概略図⁽⁴⁰⁾

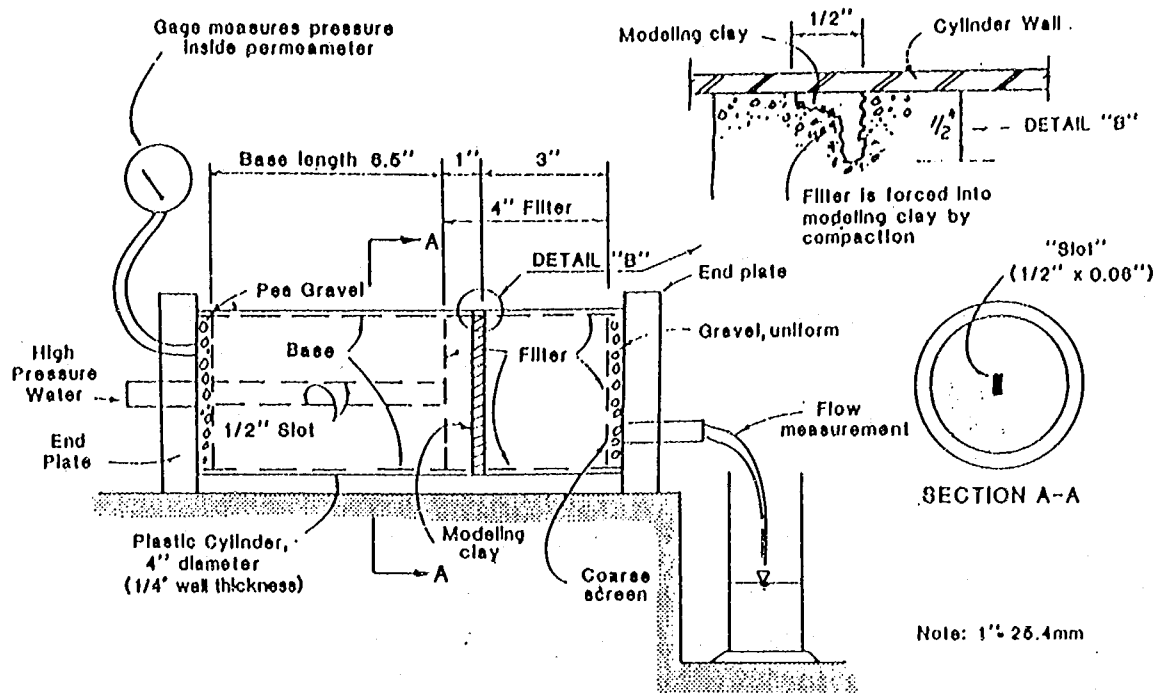


図-6.11 スロット実験装置概略図⁽⁴⁴⁾

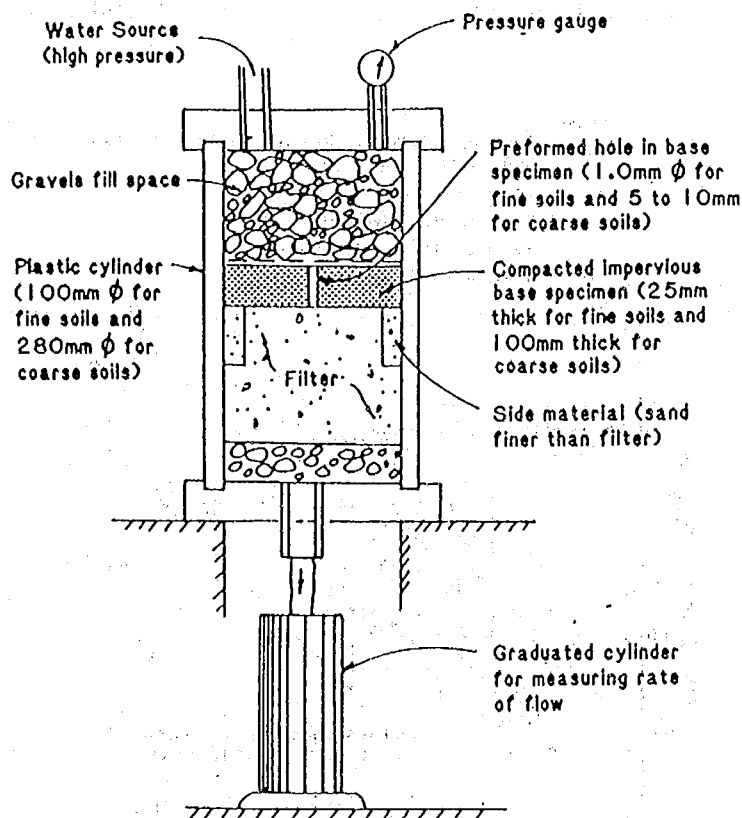


図-6.12 非侵食実験装置概略図⁽⁴⁵⁾

り小さいときには、フィルタの上面にできる1mm程度の目詰まり層により、ベース材の孔内の水圧は加えられた圧力に等しい静水圧状態となり、平衡し、ベース材の孔壁の侵食は生じない。一方逆に、 D_{F15} が D_{15s} よりも粗いときには、ベース材の孔壁の侵食に至る。ただしこのときも、孔壁の侵食された部分のベース材がフィルタ上面の目詰まり層の形成に役立ち、やがて静水圧状態の平衡に達するが、この場合いつ平衡に達するかは、供試体の径および厚さに依存する。

彼は、この試験は、今までの試験よりフィルダムコアに集中漏水が発生した場合のフィルタの有効性の良否を比較的厳密（ D_{15s} を0.1mmの精度で求めることができる）に判断でき、その実験結果は確実に再現性があるとしている。また、この試験の結果は非常にきびしい条件（穴の存在、流速、圧力等）の室内試験であるため、材料の塑性や強度に影響されなく、ベース材の粒度分布のみに影響される土の固有の値ともしている。

スラリー試験、スロット試験の結果を図-6.13に示す。これらの試験はベース材36試料中、分散性土9試料および低粘性の細粒シルト（低塑性）6試料を含んでいる。この図よりある程度の安全率を考慮して、彼は表-6.3に示す新基準を提案した。しかし、翌年の1985年にこの新基準を提案したスラリー試験、スロット試験は D_{B85} が0.1mmを超える場合には不適当だとして、非侵食試験を新たに実施し表-6.4に示す基準に改訂した。これらの基準において、ベース材の区分が前者は D_{B85} の粒径（mm）であり、後者は0.074mmの含有量（%）であるため、比較する場合不明確な部分もあるが、一例として図-6.14に示す違いがある。なお、図-6.14を描くに際して、0.074mm含有率が40%のとき、 D_{B85} が0.14mmと仮定し、また0.074mm含有率

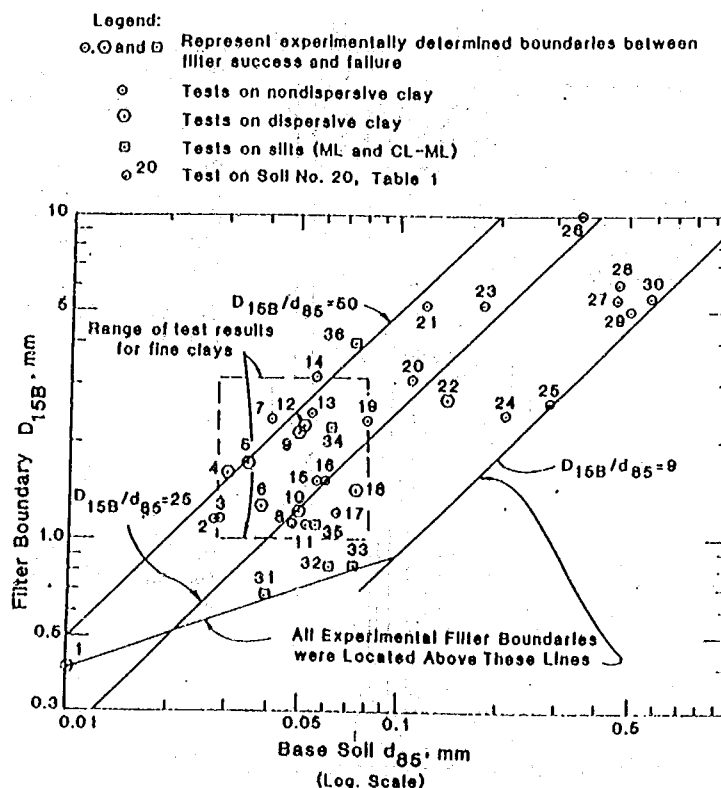


図-6.13 スラリー試験・スロット試験の結果⁴⁾

表-6.3 Sherardら (1984) ⁴⁰が提案したフィルタ基準

グループ	D_{B85} の範囲	設計基準
1	0.1~0.5mm	$D_{F15}/D_{B85} \leq 5$
2	0.03~0.1mm	$D_{F15} < 0.5\text{mm}$
2' (低塑性材)	0.03~0.1mm	$D_{F15} < 0.3\text{mm}$
3	0.02mm以下	$D_{F15} < 0.2\text{mm}$

表-6.4 Sherardら (1985) ⁴⁵が新たに提案したフィルタ基準

グループ	細粒分含有率* ($< \# 200$)	設計基準 (適切な安全率を加味してある)
1	85~100%	$D_{F15}/D_{B85} \leq 9$
2	40~85%	$D_{F15} \leq 0.7\text{mm}$
3	0~15%	$D_{F15}/D_{B85} \leq 4$
4	15~40%	グループ2と3の中間

*) $\# 4$ ふるいを通過する部分の細粒分含有率。

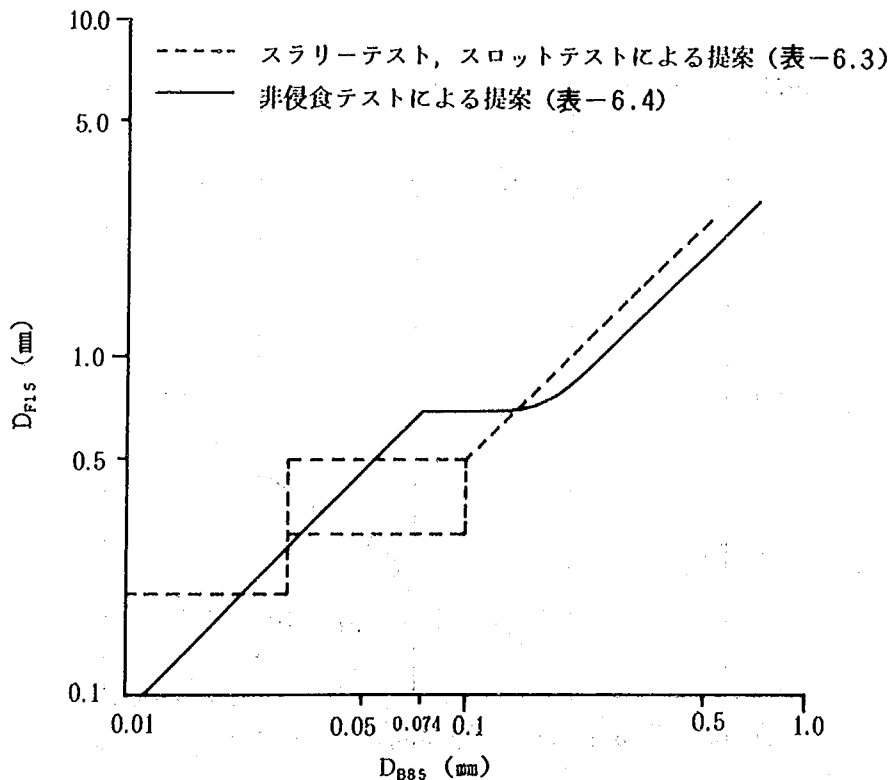


図-6.14 Sherardらが提案した基準の比較例^{40),45)}

が15%のとき、 D_{185} が0.23mmと仮定していることを注記しておく。これによると D_{185} が0.15mm以上の場合、改訂された基準の方が少し厳しくなっており、逆に D_{185} が0.05~0.15mmの区間では緩和されている（低粘性の細粒シルトに対する基準では D_{185} が0.03~0.15mmの区間）。しかし全体的にみて大きな変更はなく、むしろ現基準（ $D_{F15}/D_{185} < 5$ ）に比較して、やはり分散性土を考慮した $D_{185} < 0.1\text{mm}$ 以下の区間においてより安全側の基準となっていることに注意すべきと考える。

6.5 新基準の適用とその問題点

紹介した新基準は、式（6.1）で示されるSoaresの基準¹⁷⁾、式（6.3）、（6.4）で示されるLiuの基準⁴⁹⁾および表-6.4に表されるSherardらの改訂された基準^{45), 50)}に集約される。これらの基準を3章で調査した我が国のダム（21ダム）に適用してみる。

まず、式（6.1）を適用した結果を図-6.15に示す。横軸はフィルタの透水係数で単位は m/s である。縦軸のベース材の85%粒径は、できる限り基準を作成した条件（実験条件）に合致するよう4.76mm以下の部分の粒度での85%粒径とし、単位は μm である。この図によれば、全調査ダムにおいて十分な余裕を持って満足していることがわかる。これは、図-6.5の試験材料において、ベース材粒径が非分散性土にもかかわらず細粒であることが要因となっている。言い替えれば、海外のコア材料に比べ我が国のコア材料は細粒分が極端に多くなく、均等係数も大きいことに起因している。

次にLiuが示した基準⁴⁹⁾の適用であるが、ベース材の分散度が確認できないために一般の状況下で推奨し

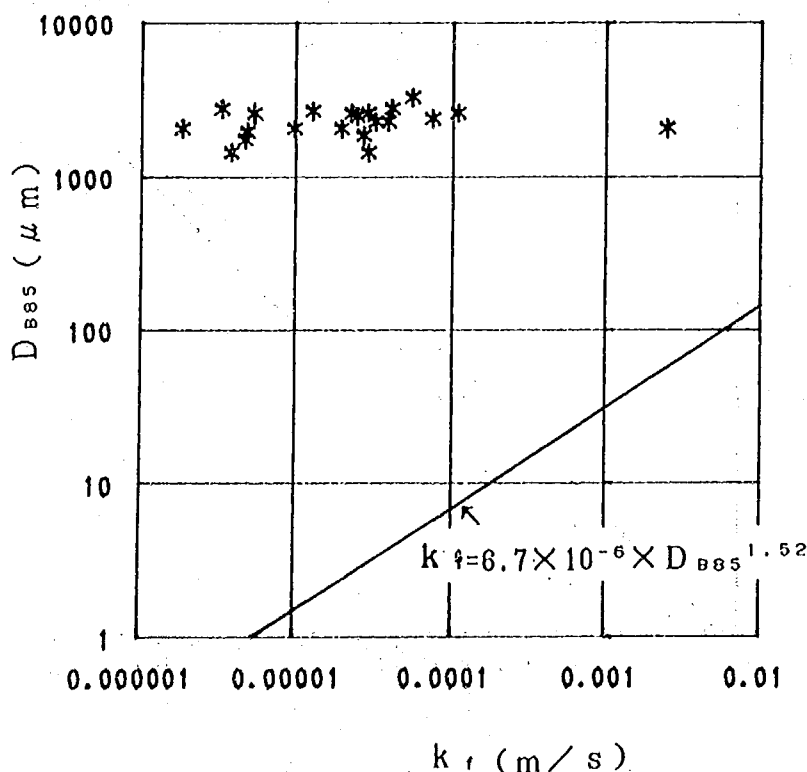


図-6.15 Soaresの基準¹⁷⁾の適用結果

ている $D_{F20} \leq 0.8\text{mm}$ を適用する。図-6.16に調査ダムにおける D_{F20} の分布を示す。これによると $D_{F20} \leq 0.8\text{mm}$ を満たすのは1ダムしかない。このことは、この基準が非常に細粒なコア材で、分散性土を対象としているためと考える。よって、まずこの基準の適用に際しては、我が国のコア材の分散性土の有無、その度合い等を確認する必要があると考える。

最後に、Sherardらが提案した表-6.4⁴⁾を我が国の調査21ダムに適用してみる。図-6.17に4.76mm以下の部分での74 μm 含有率を示す。これによれば5ダムがグループ2つまり細粒分含有率40～85%の範囲に含まれ、16ダムがグループ4（細粒分含有率が15～40%）に属している。グループ2のうち、 $D_{F15} < 0.7\text{mm}$ という基準を満足しているダムは2ダムで、4ダムが0.8mm～3.6mmとなっている。またグループ4の基

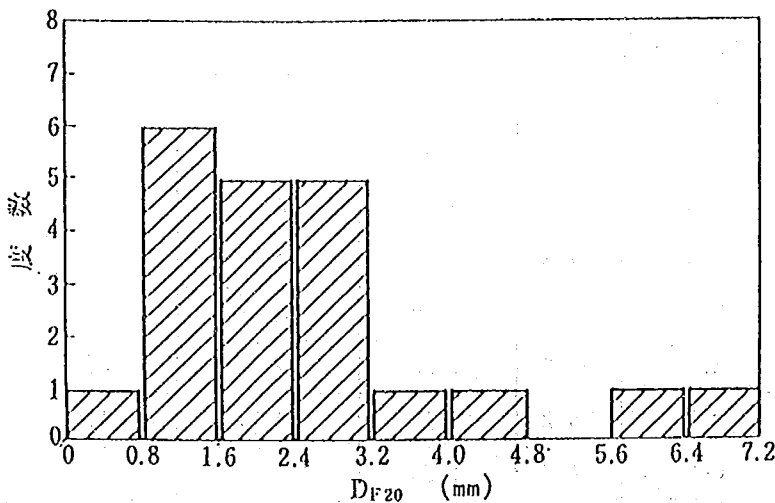


図-6.16 調査ダムにおける D_{F20} の分布

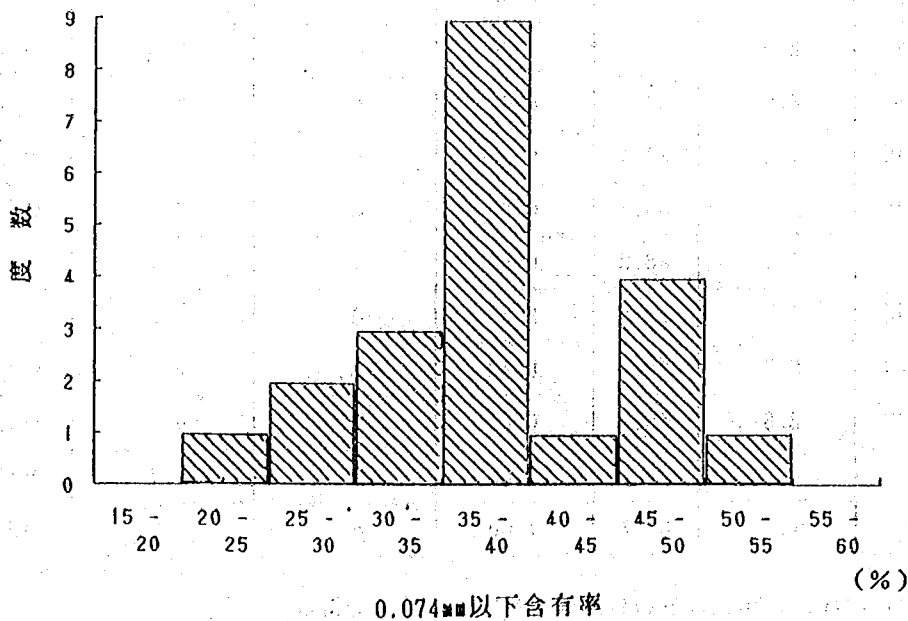


図-6.17 調査ダムにおける0.074mm以下含有率の分布

準は $D_{F15} \leq 0.7\text{mm}$ と $D_{F15}/D_{B85} \leq 4$ の中間というかたちになっているが、実際には次式を採用している^(46), 50)。

$$D_{F15} \leq 0.7 + \frac{(40 - \Lambda)(4 \times D_{B85} - 0.7)}{25} \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

ここに、 Λ ：4.76mm以下の部分での74 μm 含有率。また、粒径はmm単位である。

このSherardの基準を我が国の調査21ダムに適用した結果を表-6.5に示す。この表によると、グループ

表-6.5 Sherardの基準の適用結果

ダム名	調 査 ダ ム			適 用 結 果		
	$D_{B85}(\text{mm})$	$\Lambda (\%)$	$D_{F15}(\text{mm})$	グループ番号	$D_{F15}'(\text{mm})$	判定
大 雪	2.5	33.3	1.06	4	3.2	OK
十 勝	2.5	39.5	2.00	4	0.90	NO
御 所	1.9	36.7	0.88	4	1.6	OK
漁 川	2.0	37.2	1.15	4	1.5	OK
白 川	2.2	29.5	2.60	4	4.1	OK
寺 内	2.0	50.7	1.55	2	0.7	NO
岩 屋	2.2	39.2	1.15	4	1.0	NO
有 間	3.2	36.7	1.00	4	2.3	OK
七北田	2.5	46.3	3.60	2	0.7	NO
寺 山	2.4	45.3	0.58	4	0.7	OK
奥 野	1.4	39.4	0.88	4	0.82	NO
山 瀬	2.0	34.5	1.00	4	2.3	OK
奈良俣	2.6	20.3	0.66	4	8.3	OK
阿木川	1.4	39.4	0.90	4	0.82	NO
生居川	2.7	35.2	0.35	4	2.6	OK
寒河江	1.7	38.3	0.80	4	1.1	OK
末武川	2.5	31.8	2.50	4	3.8	OK
七ヶ宿	2.7	28.3	0.42	4	5.4	OK
五十嵐川	2.3	49.1	0.60	2	0.7	OK
小 屋	2.0	48.0	0.80	2	0.7	NO
青 土	1.8	35.3	1.00	4	1.9	OK

注) 1) D_{B85} は、4.76mm以下の粒度から決定したものである。

2) D_{F15}' は、Sherardの基準から求まる境界15%粒径。

4では16ダム中12ダムが、グループ2では5ダム中2ダムが基準をクリアーしている。基準をクリアーしていないものでも、グループ4などでは D_{FIS} と D_{FIS}' にほとんど差がなく、基準値からのずれはさほど大きくないことがわかる。ただし、ここに示した21ダムでは我が国で現在適用されているフィルタ基準のパイピング則をかなりの余裕をもってクリアーしていることから考えると、今回のSherardの基準はかなり厳しいものであることがわかる。これは、この基準がベース材に生じた亀裂中に集中漏水が発生したという厳しい状態を想定したうえでのフィルタを決定するためのものであるからである。

3つの新しく提案された基準を調査ダムに適用したが、今後これらの基準を改良するにしろ、我が国のフィルタ基準として採用するにしろ、以下の検討が必要と考える。

1. 現実のコア、フィルタ材料を用いた実験を実施する必要がある、そのためにフィルダムにおける浸透破壊をモデル化した実験として、どのような状況を想定した実験とするか。
2. 我が国のフィルダムに使用されているコア材料がどのような分散性を有しているのか。またその検討方法の選定。

7. ま と め

我が国のフィルダムにおけるフィルタ材料の設計、施工時に使用されるフィルタ基準について、その持つ意味を主として既往の文献資料から調査し、その背景を整理した。そして現行のフィルタ基準の適用状況を確認するため、国内、海外のフィルダムを調査し、その問題点を抽出し解決策を示唆した。最後にコアゾーンに亀裂が発生した場合のように非常に危険な状態を想定した場合の新しいフィルタ基準を紹介し、その適用性を検討した。

これらの調査、検討より以下の知見を得た。

- 1) 現行のフィルタ基準のうちパイピング則は、保護される材料に粘着性のない砂を用いた実験でも1～2倍程度の安全率を有しており、かつコア材料が粘着性の細粒分をかなり含む材料であることからパイピング則の安全率は2倍以上あると考えられる。
- 2) 一25mm規定は保護される材料に大きな礫を含む場合において、実際はパイピングがマトリックス部分で発生することを考慮して、パイピング則をより安全側に適用するための規定と考える。
- 3) コア材料の粒度分布が幅広く、均等係数が大きい場合、コア材料とフィルタ材料間のパイピング則の適用のみならず、コア材料の粒度分布曲線を任意の点で粗粒部分と細粒部分で分離し、その両者にてパイピング則を適用する (self-filtering) 方法や、粗粒部分の粒度曲線勾配を考慮した基準等を適用してみる必要性を示した。
- 4) フィルタ材料の粒度分布の差異は、その均等係数が大きくなると危険側になるという文献と逆に安全側であるとする文献を示したが、フィルタ基準の持っている安全率よりさほど大きな影響をもたらさないと考える。
- 5) フィルタ材料の細粒分含有率5%の制限については、必ずしも絶対的なものではなく、5%を超えてもフィルタ材料が非粘着性であることを確認すれば良いことを示し、それを知るための試験方法を紹介した。
- 6) フィルタ材料の粒子形状は、角礫の方が円礫よりも大きな間隙を形成しやすいが、フィルタ基準には大きな影響を与えないと考える。
- 7) フィルタゾーンへの応力集中の実例を紹介し、転圧方法を配慮する等の対策を検討する必要性を示した。
- 8) 最近のフィルタ基準の動向として、不安定な状態における粘着性材料を保護するフィルタの有効性確認試験を紹介した。そしてこれらの試験は、コア材料が浸透水によって懸濁液になった状態を想定した試験とコア材料に亀裂が生じた状態を想定した試験に分けることができる。
- 9) これらの試験結果より新しいフィルタ基準を紹介した。Soaresの基準は非分散性土を対象としたもので、フィルタの有効性をその透水係数で表している。Liuの基準は分散性土を対象としたもので、その分散度によってフィルタの20%通過粒径を規定した形となっている。Sherardの基準は、ベース材をその細粒分含有率によって区分し、その区分によって現行のフィルタ基準に採用されている粒径比

とフィルタの15%粒徑で規定している。

- 10) これらの新基準の適用状況を我が国のダムにて調査したが、必ずしも満足されていなかった。今後我が国のフィルタ基準を模索する上で現実の材料を使用して、どのような状態を想定した試験方法を実施するか、また我が国の使用されているコア材料が分散性を有しているかの検討を行う必要がある。

謝 辞

文献の調査にあたっては、(株)竹中土木（現アジア工科大学助教授）の本城勇介氏には貴重な論文を頂くとともに適切な御助言を賜った。フィルタ基準の適用状況の調査については、各ダムの工事事務所の方々には貴重な資料を頂き、ご協力を賜った。また、当研究室の田原則雄部外研究員（戸田建設(株)）には文献調査に関して貴重な時間を割いて御協力頂いた。

以上、末尾ながら記して謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 松本徳久・山口嘉一：ダム基礎の浸透流制御、ダム技術研究発表会論文集、pp.81～89、1986年3月。
- 2) Sherard, J.L. et al. : Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley & Sons, 1963.
- 3) (社) 日本大ダム会議：第2次改訂ダム設計基準、1978年8月。
- 4) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準(案)、設計編1、(社) 日本河川協会編、山海堂、1985年10月。
- 5) Terzaghi, K. : Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung, Die Wasserkraft, p. 445, 1922.
- 6) Bertram, G.E. : An Experimental Investigation of Protective Filters, Harvard University Soil Mechanics Series, No.7, 1940.
- 7) 例えば, Taylor, D.W. : Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, pp.111～112, 1948.
- 8) 建設産業調査会：地下水ハンドブック, 1979年9月。
- 9) 土質工学会：土質試験法, 1979年12月。
- 10) 最上武雄編：土質力学, 技報堂, p.102, 1969年8月。
- 11) ペペ クリメントフ & ゲベ プイハチョフ (外尾善次郎・永井正夫共訳)：地下水の力学, ラテイス, pp.404～411, 1967年9月。
- 12) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R. : Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.110, No.6, pp.684～700, 1984.
- 13) Vanmarcke, E.K. and Honjo, Y. : Probabilistic Description of the Void Phase of Soil with Reference to Assessing the Risk of Internal Erosion, Proc. of 4th Int. Conf. on Structure Safety and Reliability, III, pp.321～330, 1985.
- 14) Southworth, W.J. : An Experimental Evaluation of the Terzaghi Criterion for Protective Filters, Presented to the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., in partial fulfillment of the requirements for the S.M. degree, 1980.
- 15) 米国内務省開拓局編 ((社) 日本大ダム会議訳)：アースマニユアル, pp.260～264, 1977年。
- 16) Honjo, Y. and Veneziano, D. : Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils, Geotechnique, Vol.115, No.1, 1987.
- 17) Soares, H.F. : Experiments on the Retention of Soils by Filters, A Thesis Submitted to the University of London for the Degree of Master of Philosophy in the Faculty of Engineering, 1980.
- 18) Terzaghi, K. and Peck, R. : Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1967.
- 19) Vaughan, P.R. et al. : The Design, construction and Performance of Cow Green Embankment

- Dam, Geot. Vol.25, No.3, p.555, 1975.
- 20) Zaslavsky, D. and Kassiff, G. : Theoretical Formulation of Piping Mechanism in Cohesive Soils, Geotechnique, Vol.15, No.3, pp.305~316, 1965.
 - 21) 志村孝吉：粘性土における浸透侵食に関する実験的検討、電力中央研究所報告、377027, 1978年5月.
 - 22) 志村孝吉：粗粒土における限界動水コウ配について、電力中央研究所技術第二研究所報告、71001, 1971年5月.
 - 23) Report of Independent Review Team : Investigation of the Cause of Quail Creek Dike Failure, 1989.
 - 24) U.S.Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group : Failure of Teton Dam Final Report (1)(2)(3), 1980.
 - 25) J.Jacques PARE : Large Permeability and Filter Test at LG3, Proceedings of the 14th Congress on Large Dams, Question55, pp.103~122, 1982.
 - 26) Murley, K.A. : Design Consideration of Materials during Construction of Dartmouth Dam, Australia, Proceedings of the 14th Congress on Large Dams, Question55, pp.627~641, 1982.
 - 27) Champa, S. : Costruction of Srinagarind Dam, Proceedings of the 14th Congress on Large Dams, Question55, pp.225~278, 1982.
 - 28) Hills, S.F and Truscott, E.G ; Design of Internal Filters and Drains, Canadian Geotechnique Journ., Vol.20, 1983.
 - 29) Hollingworth, F. and Druyts, F.H.W.M. : Filter Cloth Partially Replaces and Supplements Filter Materials for Protection of Poor Quality Core Material in Rockfill Dam, Proceedings of the 14th Congress on Large Dams, Question55, 1982.
 - 30) 山口嘉一・山野雅彦・松本徳久：鉛直流下での2層系浸透破壊実験，第25回土質工学研究発表会論文集，pp.1669~1672，1990年6月．
 - 31) Lund, A. : An Experimental Study of Graded Filters, M.Sc. Thesis, University of London, 1949.
 - 32) Lowe III, J. and Binger, W.V. : Second Annual USCOLD Lecture—Tarbela Dam Project, Pakistan—, 1982.
 - 33) Vaughan, P.R. : La Fisuración y Erosión Interna de Nucleos de Arcilla de Presas de Tierras y el Proyecto de Filtros Para Protegerlos, Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, No.23, pp.23~34, Sept./Oct. 1976.
 - 34) Mantz, P.A. : Low Transport Stages by Water Streams of Fine, Cohesionless, Granular and Flakey Sediments, Ph.D.Thesis, University of London. 1975.
 - 35) Karpoff, K.P. : The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filters,

Proc. ASTM, Vol.55, p.1183, 1955.

- 36) United States Department of the Interior Bureau of Reclamation : Earth Manual, p.323, 1968.
- 37) Cedergren : Experiments on The Retention of Soils by Filters, A Thesis Submittes to The University of London by H.P.Soaes, p.78, 1980.
- 38) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S. and Steel, E.F. : Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils, Geo. Engg. Div., ASCE, Paper 11846, January 1976.
- 39) Mantz, P.A. : Packing and Angle of Repose of Naturally Sedimented Fine Silica Solids Immersed in Natural Aqueous Electrolytes, Sedimentology, 24, pp.819~832, 1977.
- 40) Vaughan, P.R. : Design of Filters for the Protection of Cracked Dam Cores Against Internal Erosion, Preprint 3420 Presented to ASCE Convention, Chicago, 1978.
- 41) Naranjo, A. : Personal Communication to F.L. Kinstler, 1970.
- 42) Townsend, F.C. and Stanfill, D.C. : An Experimental Evaluation of Sand Filters for Dispersive Clays, Department of Civil Engineering University of Florida, 1987.
- 43) Liu Jie : Analysis of Piping Failure of Earth-Rock Dams, International Symposium on Analytical Evaluation of Dam Related Safety Problems, ICOLD, pp.342~350, 1989.
- 44) Sherard, J.L. and L.P. Dunnigan and J.R. Talbot : Filters for Silts and Clays, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.110, No.6, 1984.
- 45) Sherard, J.L. and L.P. Dunningan : Filters and Leakage Control in Embankment Dams, Proc. Symp. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, 1985.
- 46) United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design Standards, Embankment Dams, No.13, Chapter 5, Protective Filter. 1987.
- 47) Khor, C.H. and H.K. Woo : Investigation of Crushed Rock Filters for Dam Embankment, Journ. of Geot. Engg., ASCE, Vol.115, No.3, pp.399~412, 1989.
- 48) Lafleur, J., J. Mlynarek and A.L. Rollin : Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils, Journ. of Geot. Engg. Vol.115, No.12, pp.1747~1768, 1989.
- 49) Sherard, J.L. : Hydraulic Fracturing in Embankment Dams, Proc. Symp. on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, 1985.
- 50) Sherard, J.L. and L.P. Dunnigan : Critical Filters for Impervious Soils, Journ. of Geot. Engg., ASCE, Vol.115, No.7, pp.927~947, 1989.

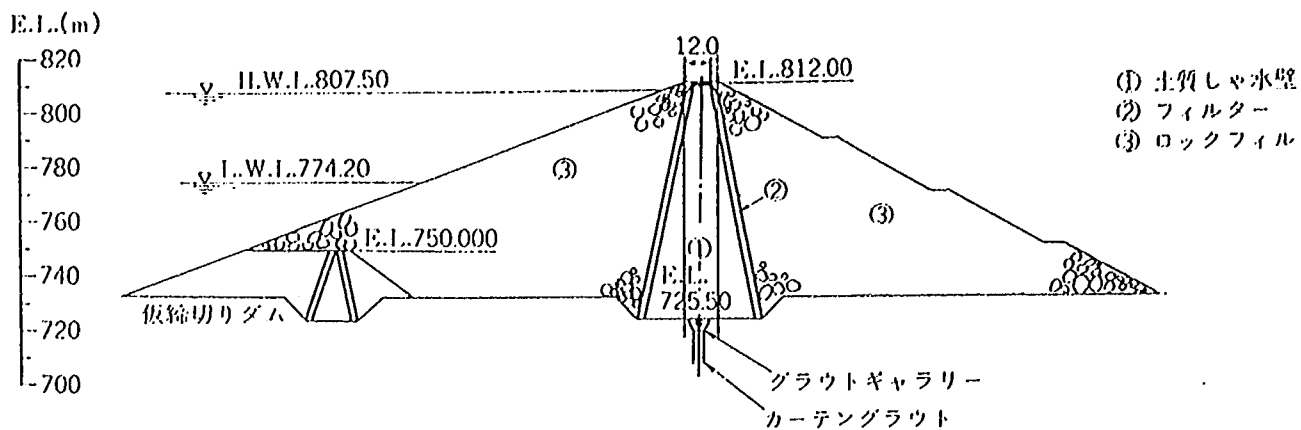
最後に調査、引用した工事誌は以下のとおりである。

大雪ダム工事誌、十勝ダム工事誌、御所ダム工事誌、漁川ダム工事誌、白川ダム工事誌、寺内ダム工事誌、岩屋ダム工事誌、有間ダム工事誌、七北田ダム工事誌、寺山ダム工事誌。

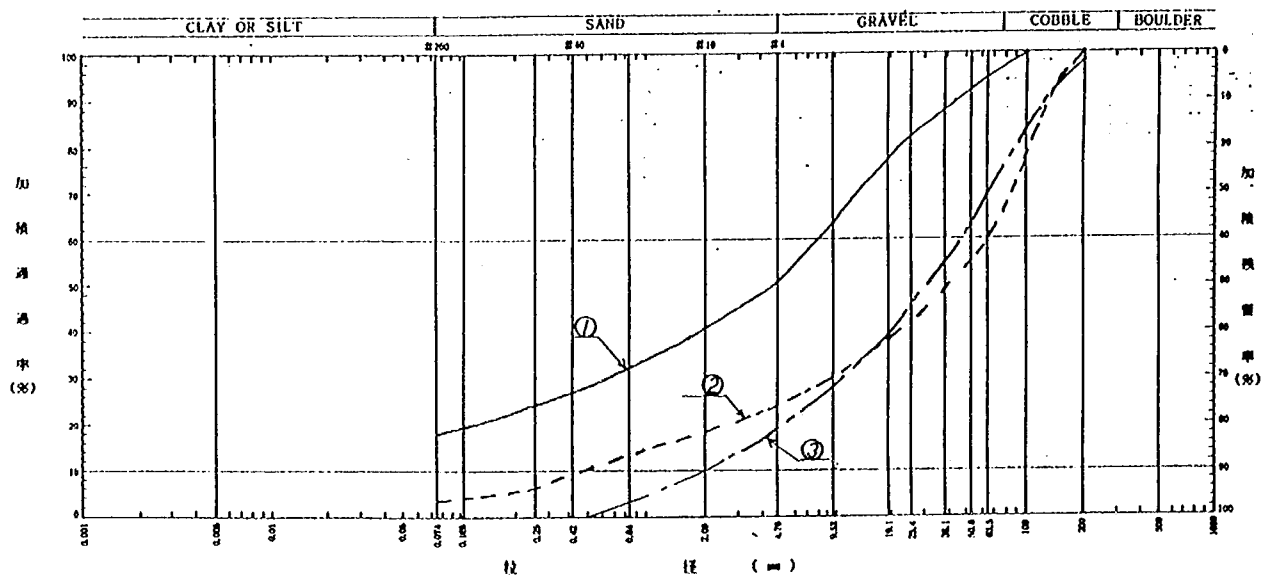
参 考 資 料

各ダムの標準断面図および各盛立材料の粒度分布

大雪ダム	十勝ダム	御所ダム
漁川ダム	白川ダム	寺内ダム
岩屋ダム	有間ダム	七北田ダム
寺山ダム	奥野ダム	山瀬ダム
奈良俣ダム	阿木川ダム	生居川ダム
寒河江ダム	末武川ダム	七ヶ宿ダム
五十嵐川ダム	小屋ダム	青土ダム
Quail Creek Dike	Teton Dam	LG-3
Dart Mouth Dam	Srinagarind Dam	
Hans Storijsdom Dam	Magat Dam	

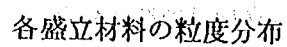
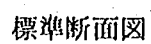


標準断面図

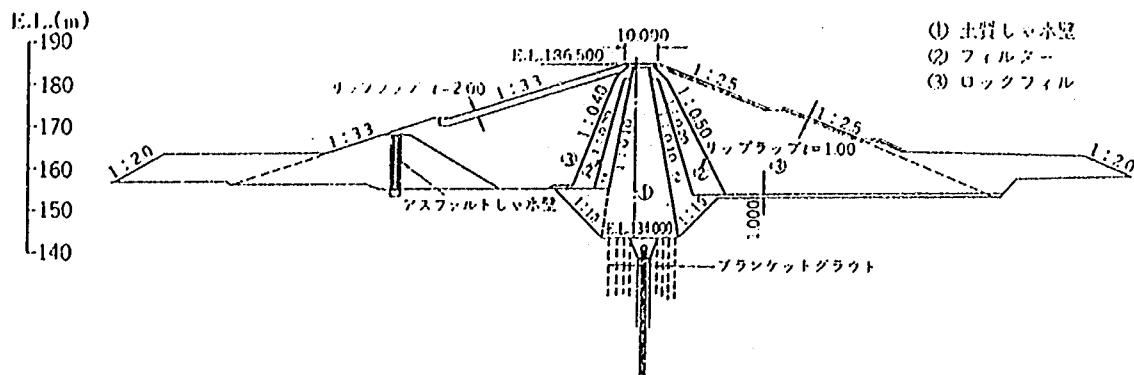


各盛立材料の粒度分布

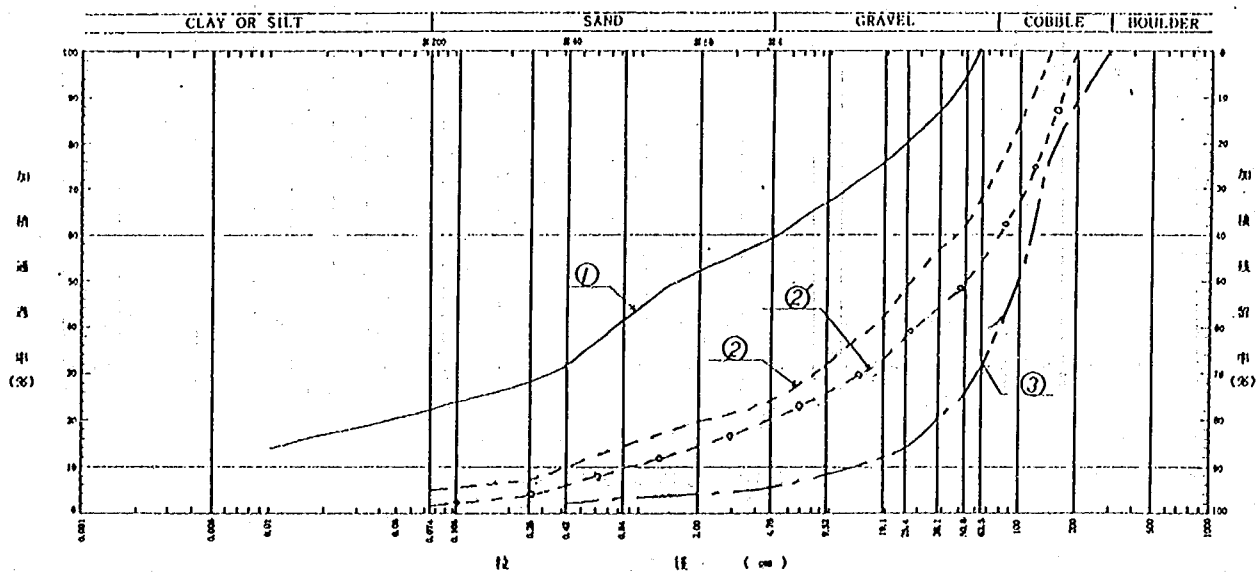
大雪ダム



十勝ダム

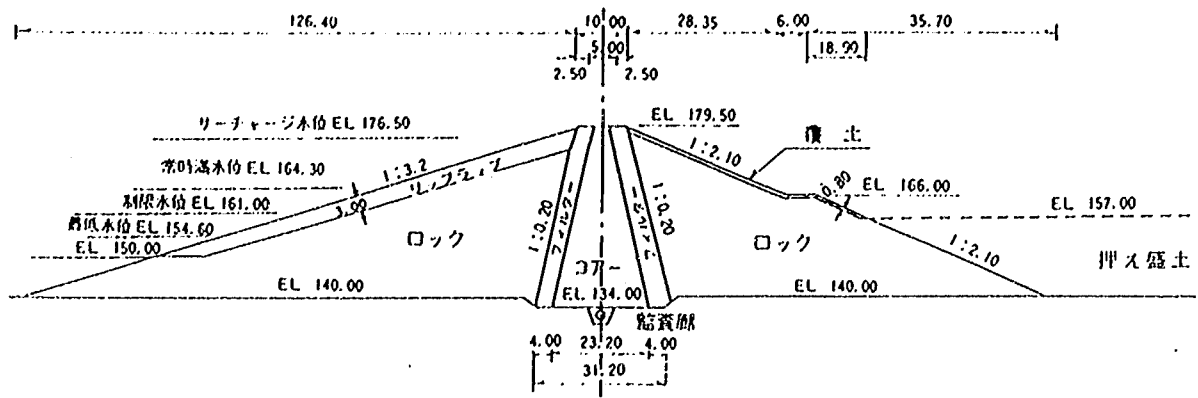


標準断面図

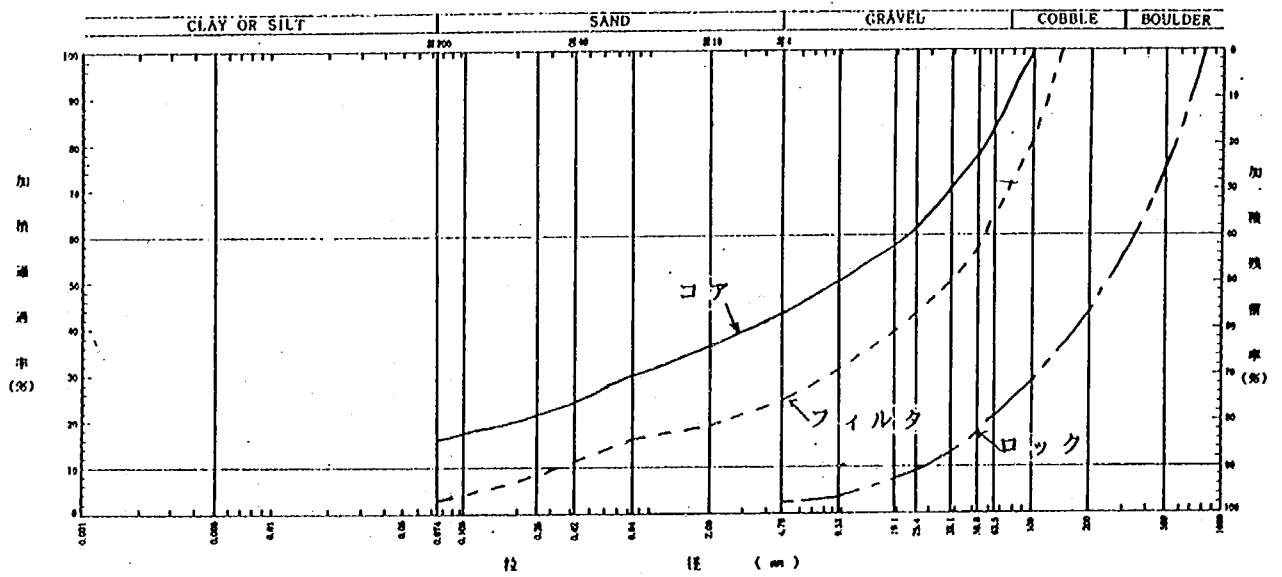


各盛立材料の粒度分布

御所ダム

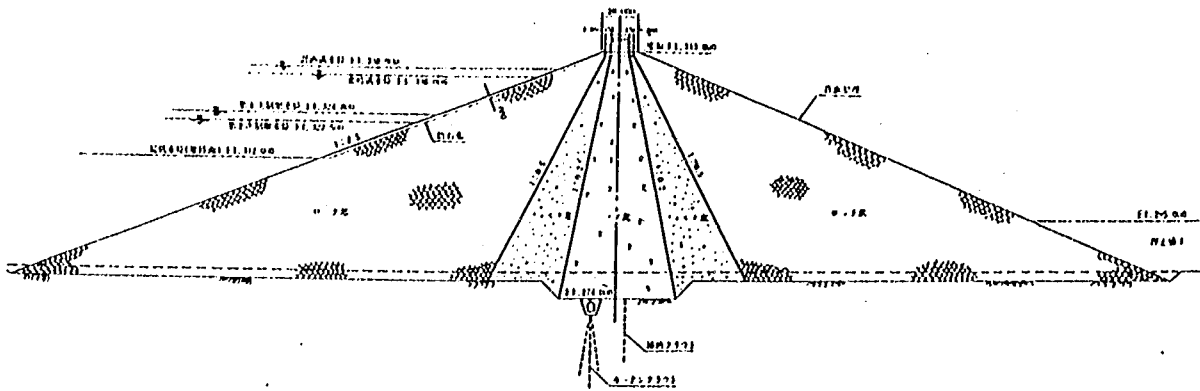


標準断面図

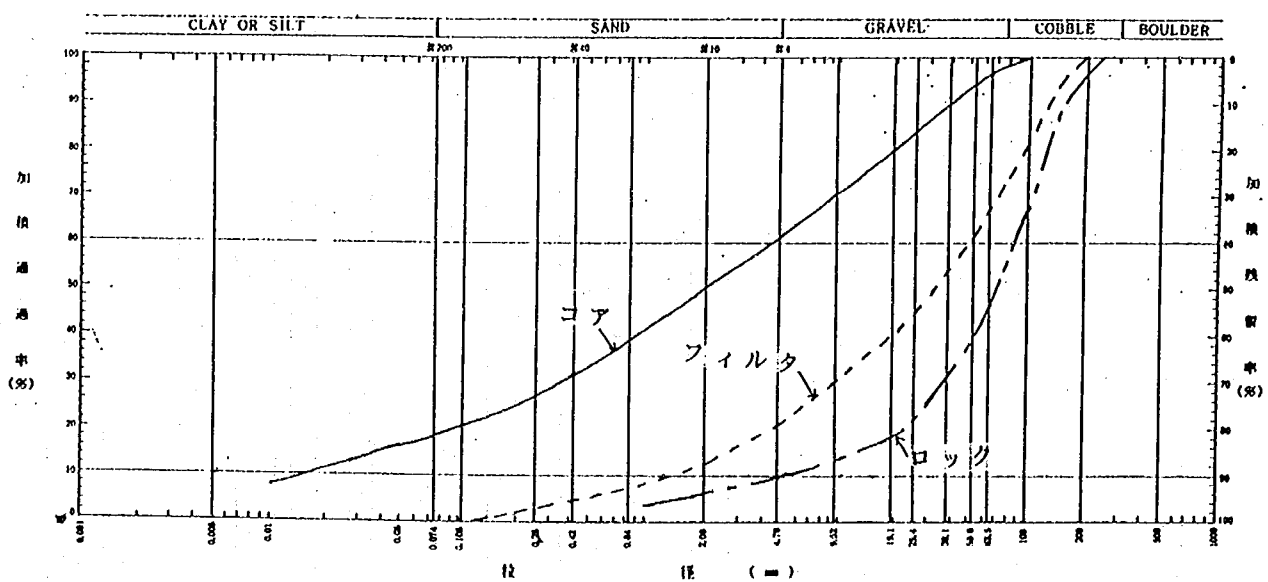


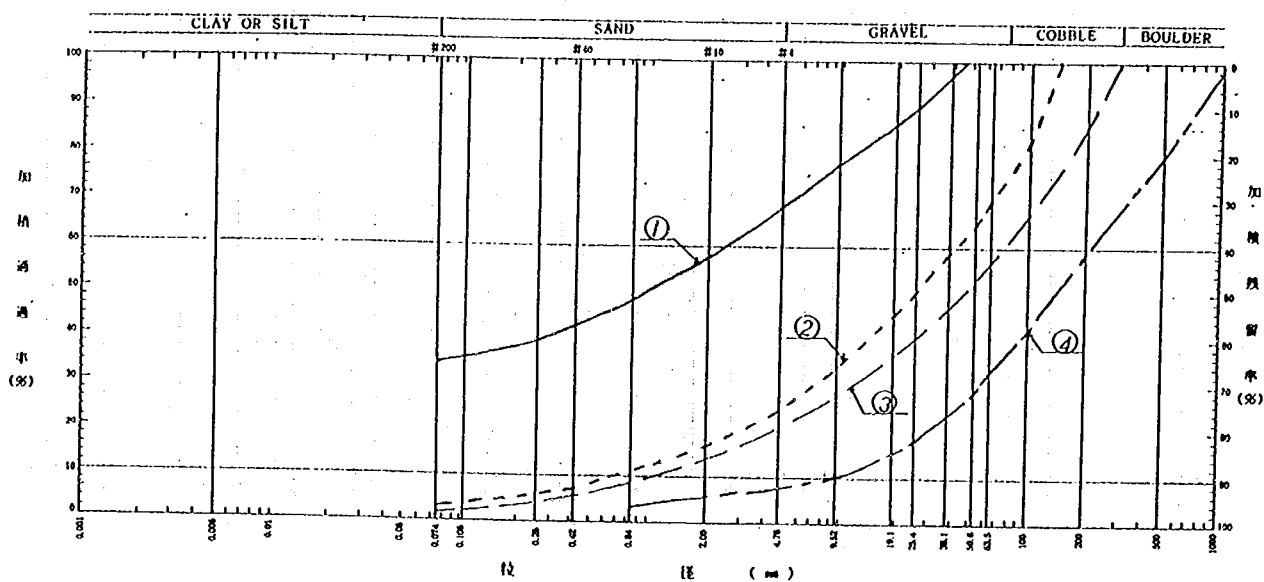
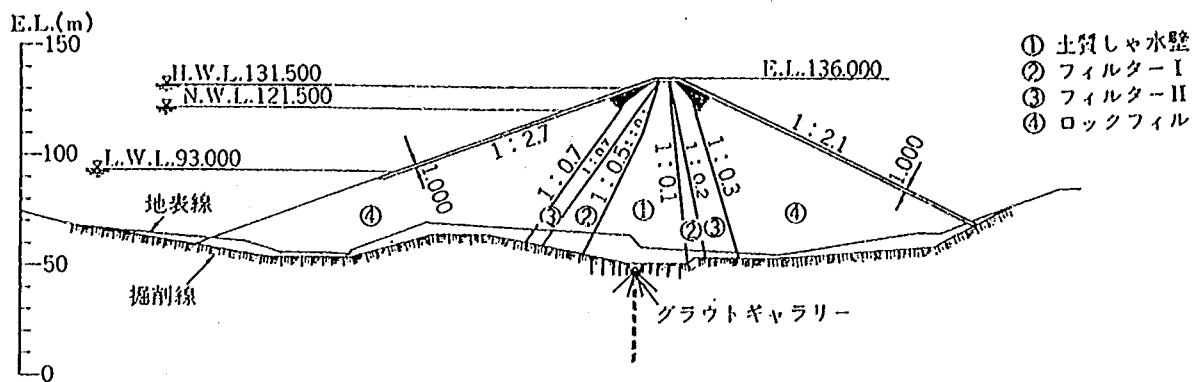
各盛立材料の粒度分布

漁川ダム

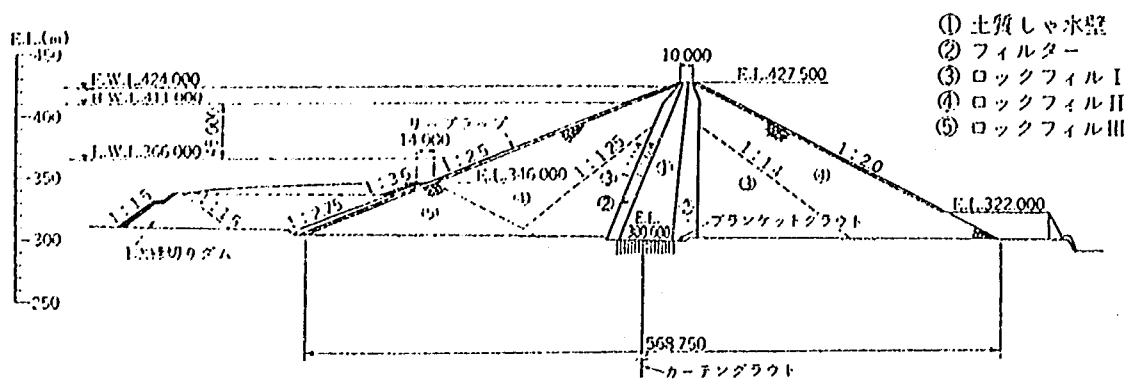


標準断面図

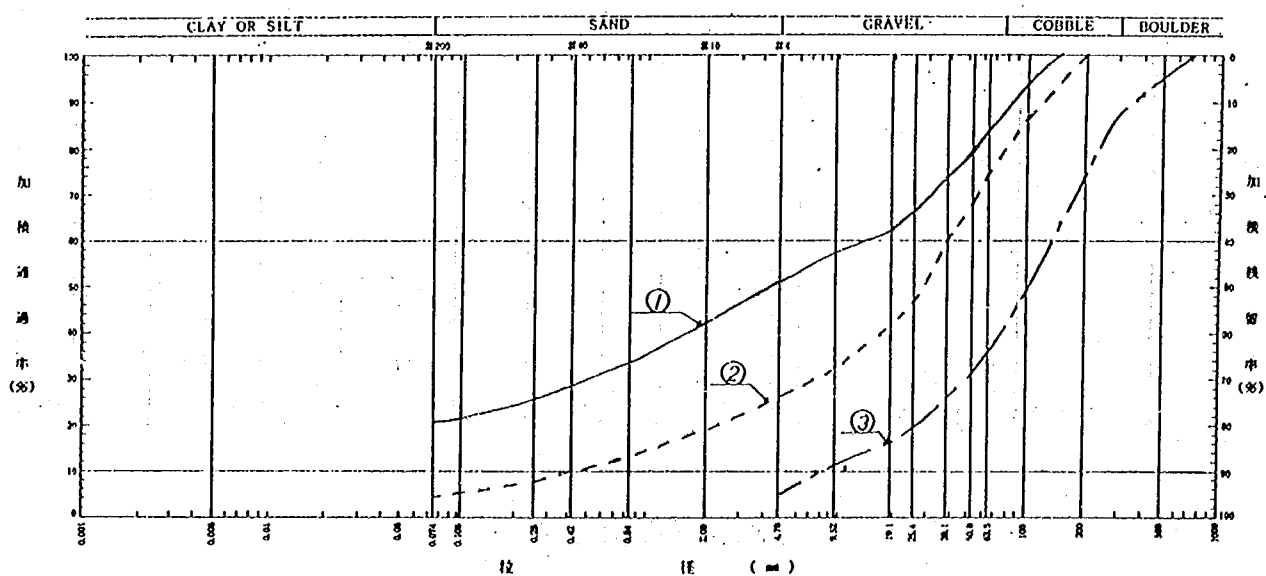




寺内ダム

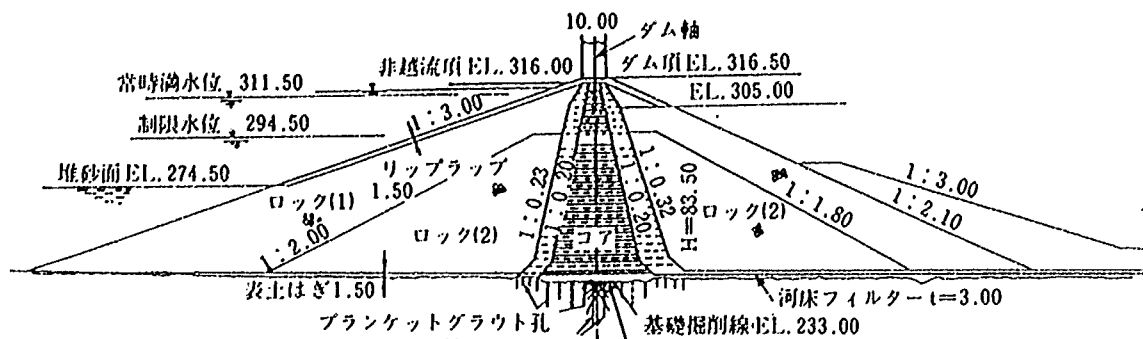


標準断面図

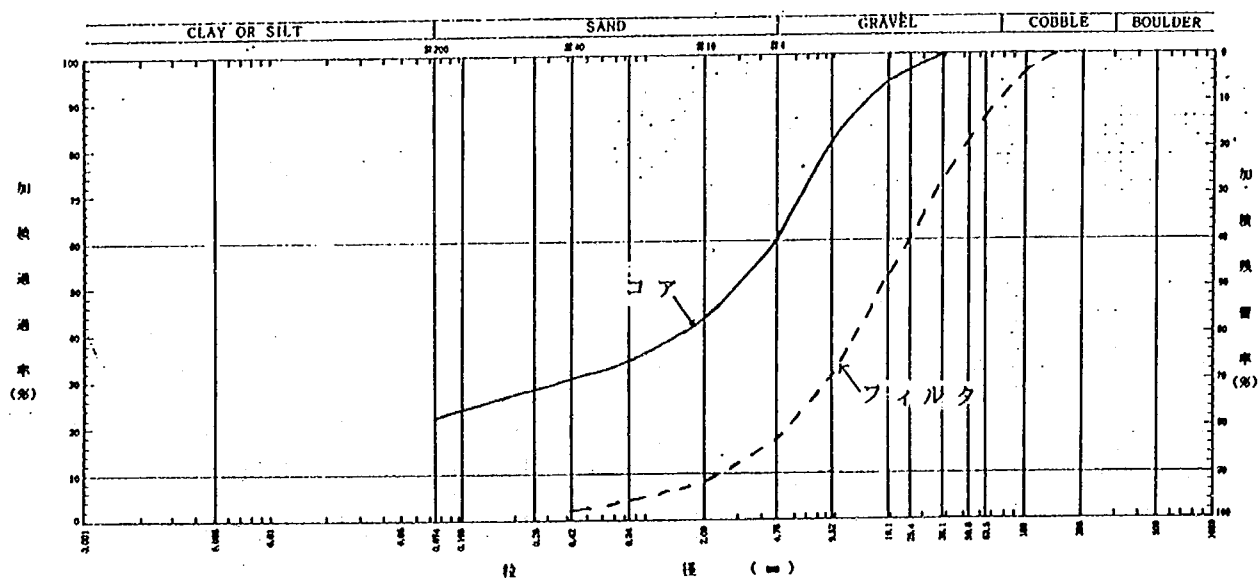


各盛立材料の粒度分布

岩屋ダム

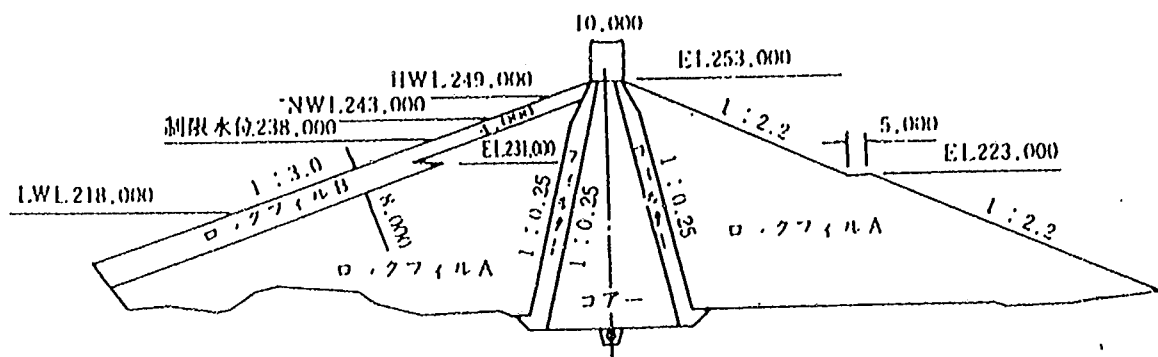


標準断面図

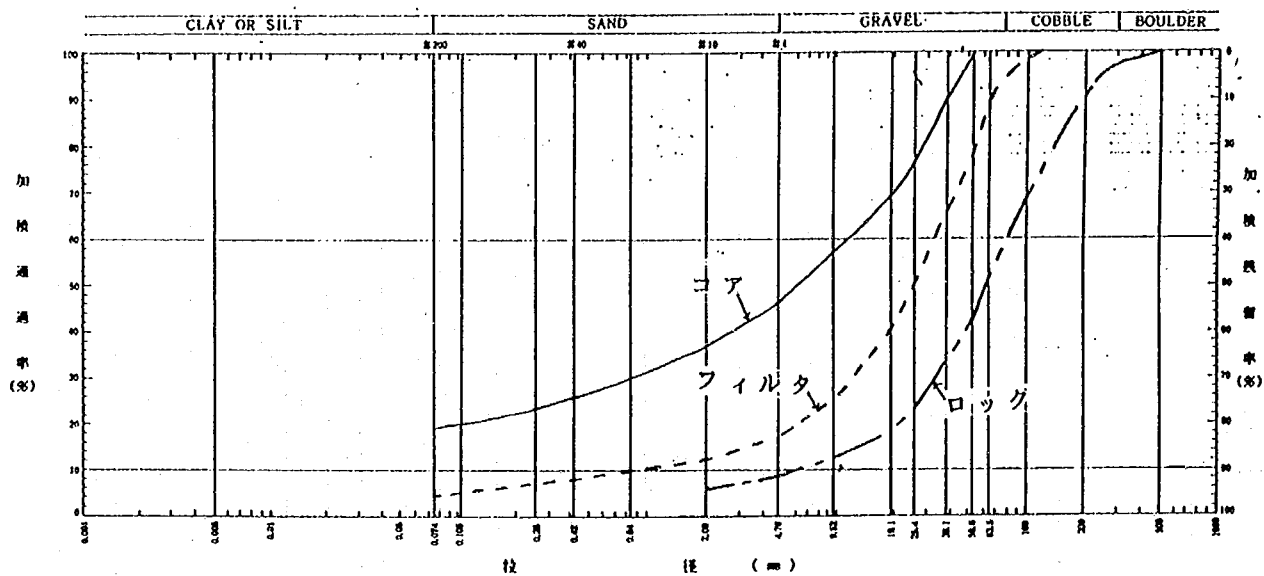


各盛立材料の粒度分布

有間ダム

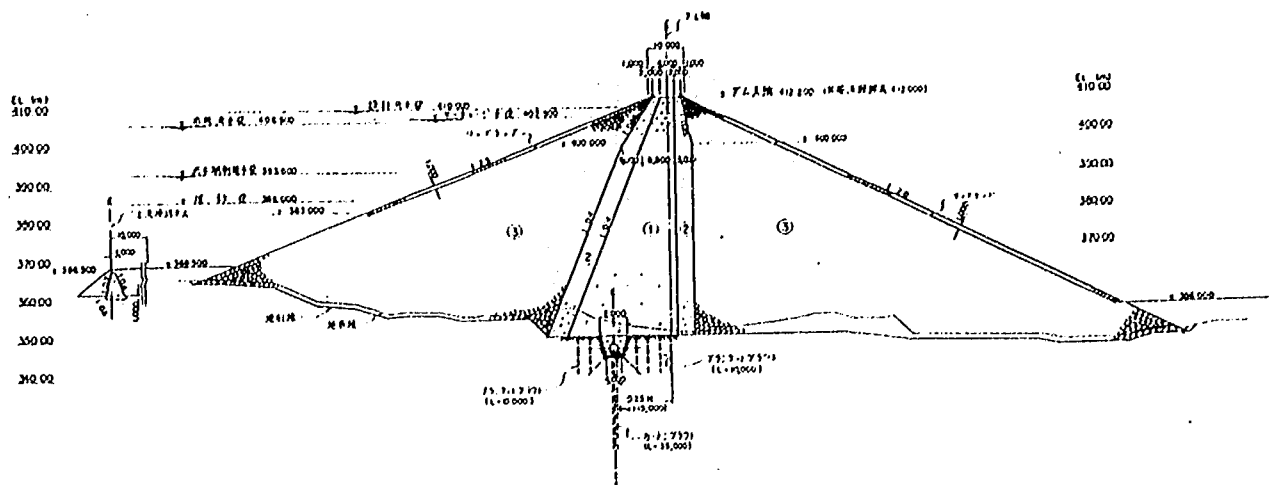


標準断面図

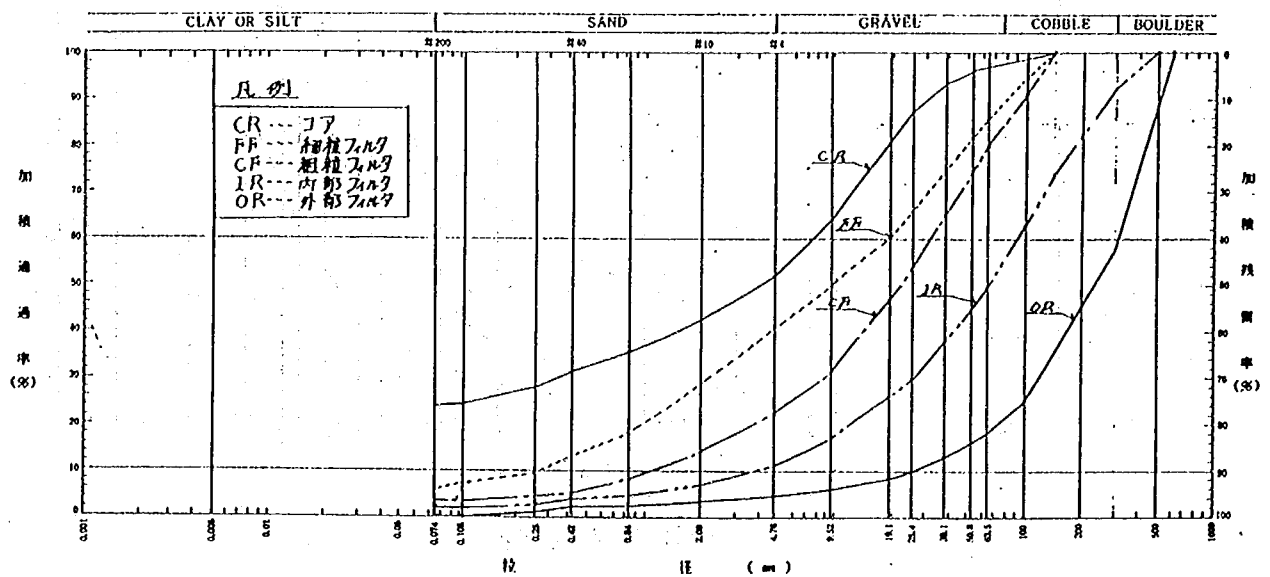


各盛立材料の粒度分布

七北田ダム

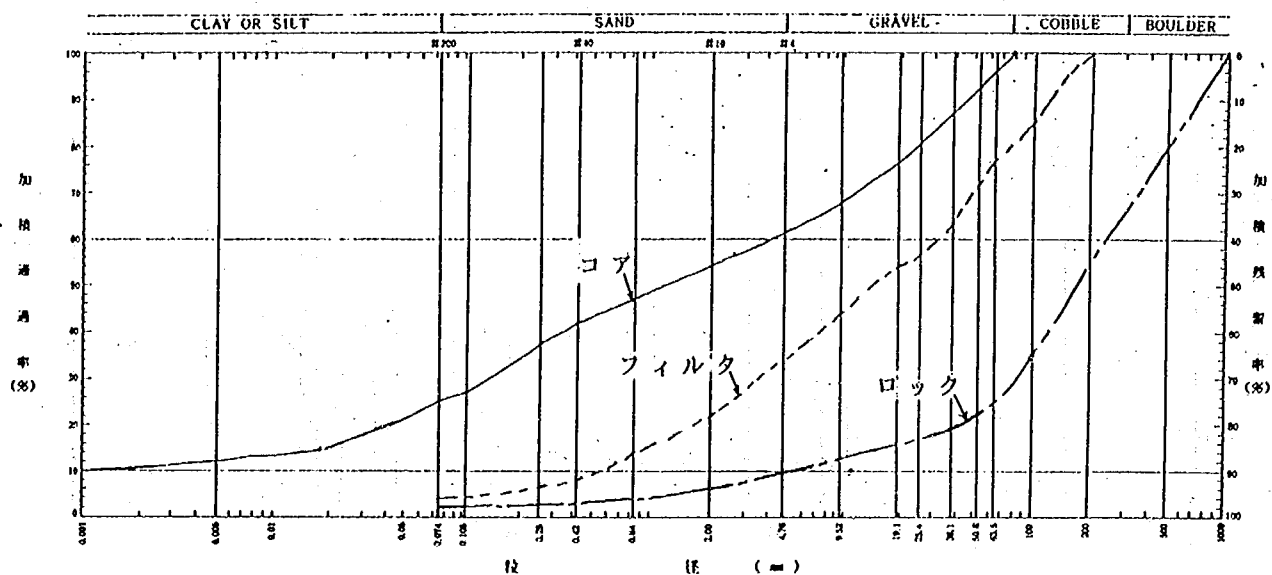
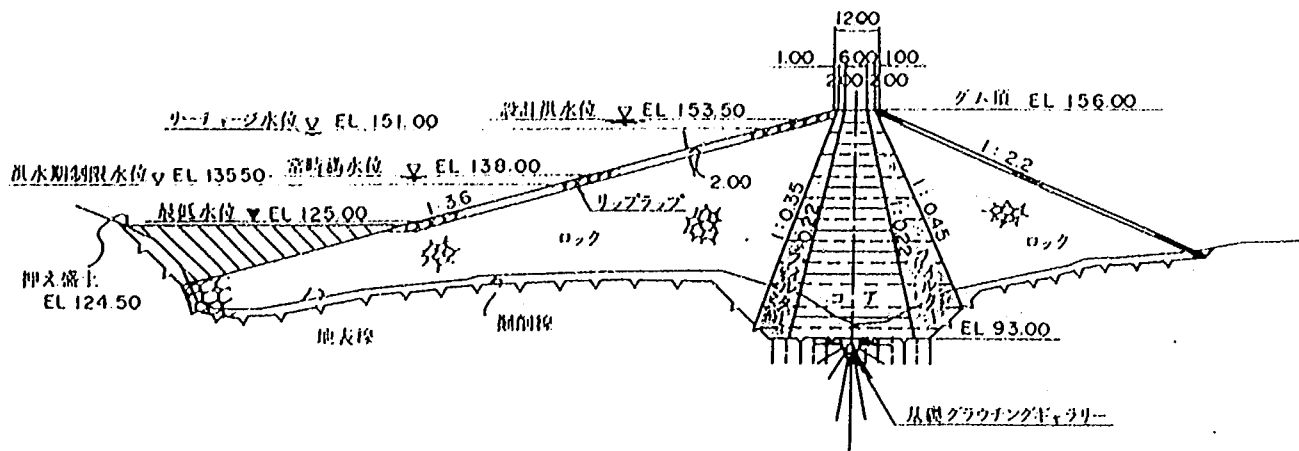


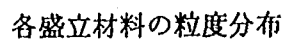
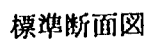
標準断面図



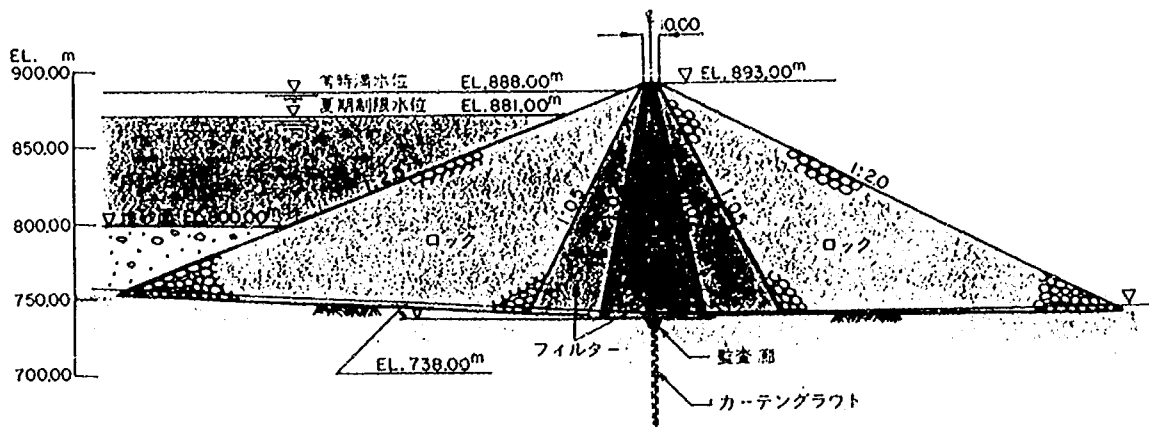
各盛立材料の粒度分布

寺山ダム

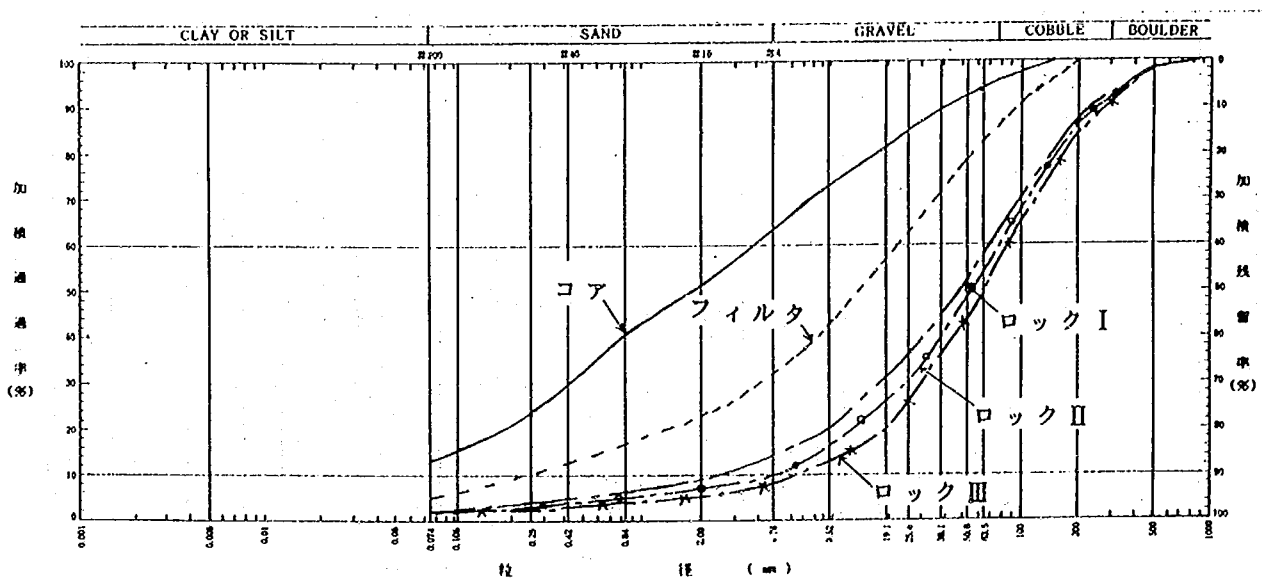




山瀬ダム

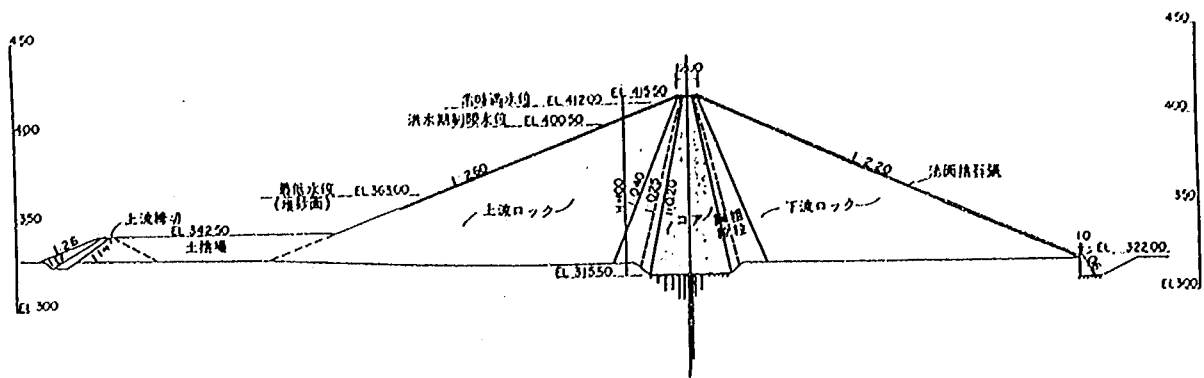


標準断面図

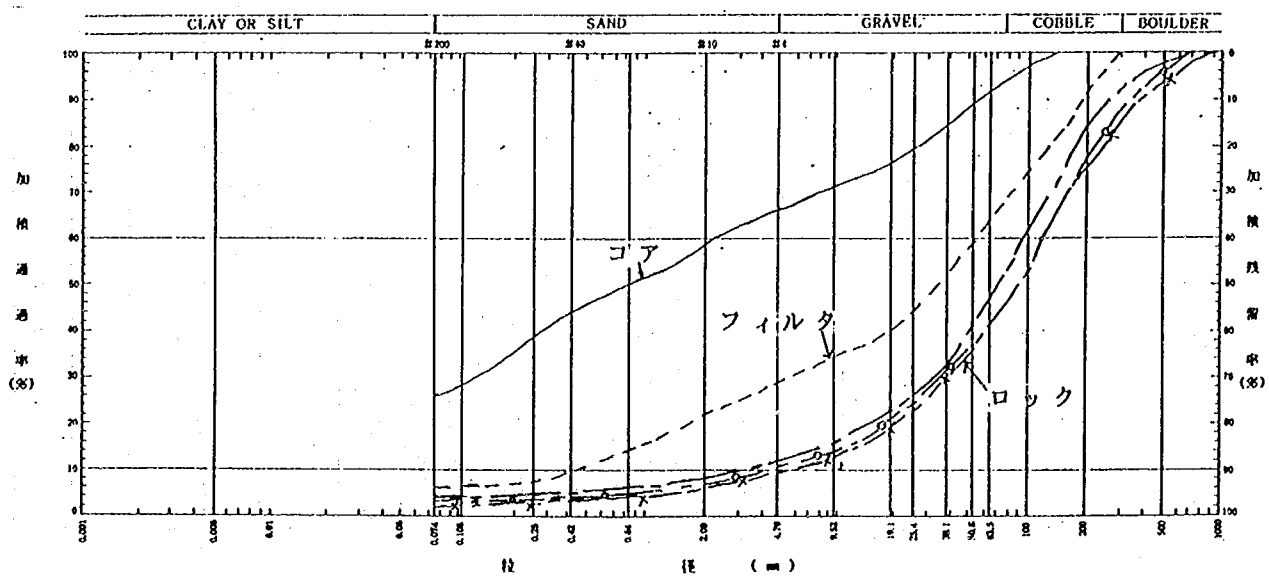


各盛立材料の粒度分布

奈良俣ダム

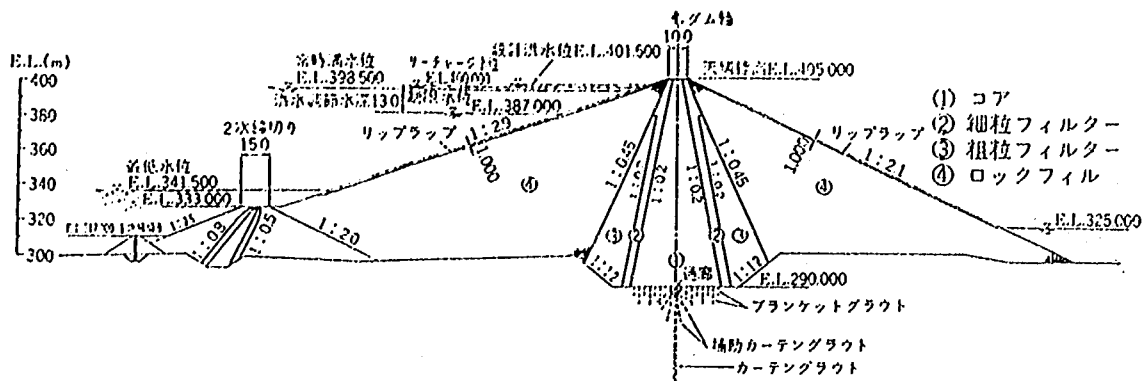


標準断面図

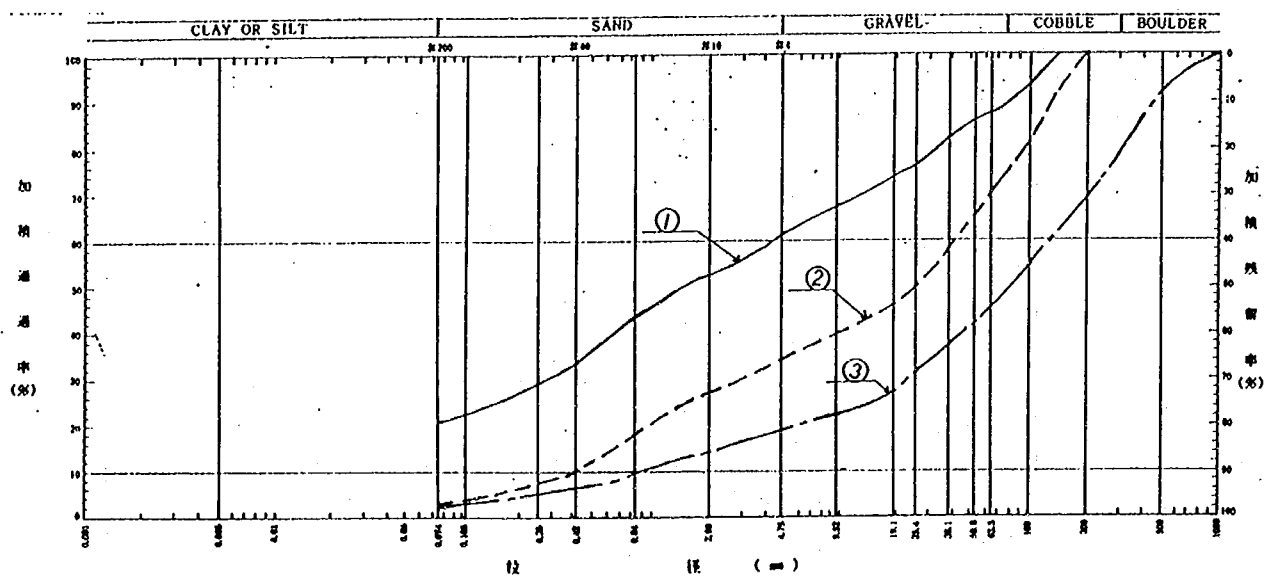


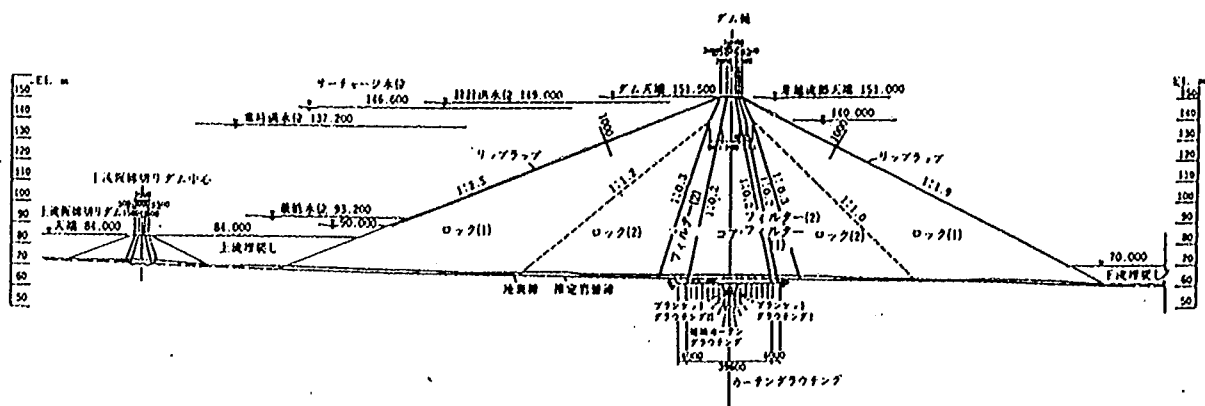
各盛立材料の粒度分布

阿木川ダム

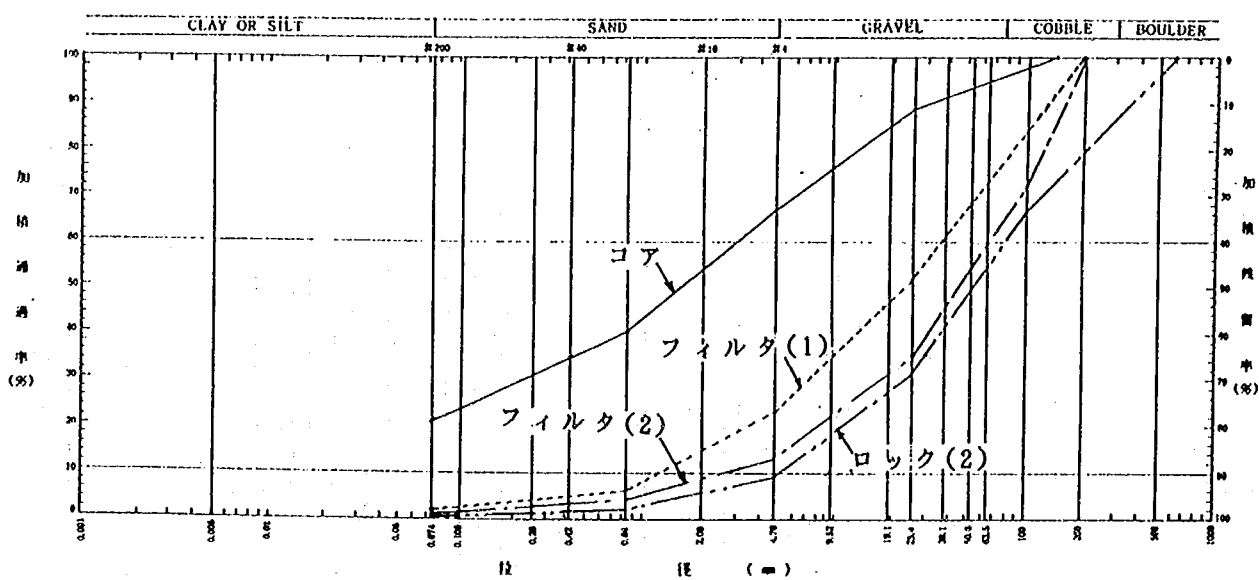


標準断面図



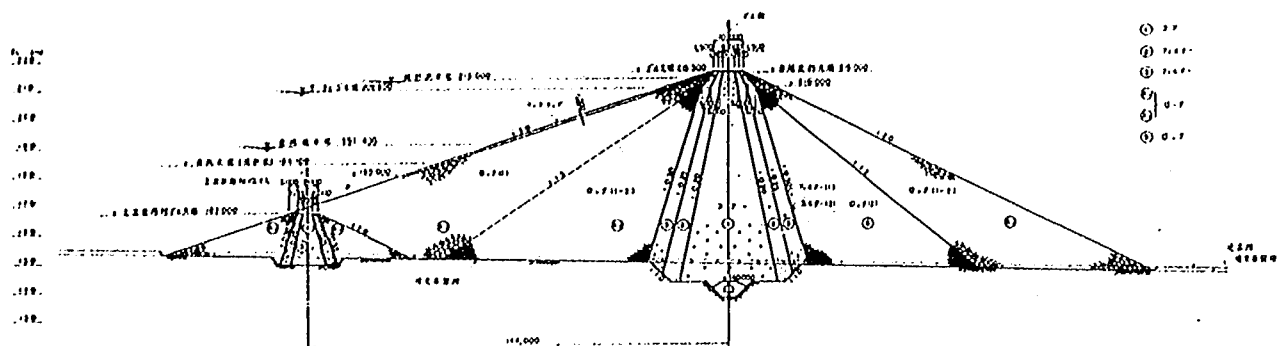


標準断面図

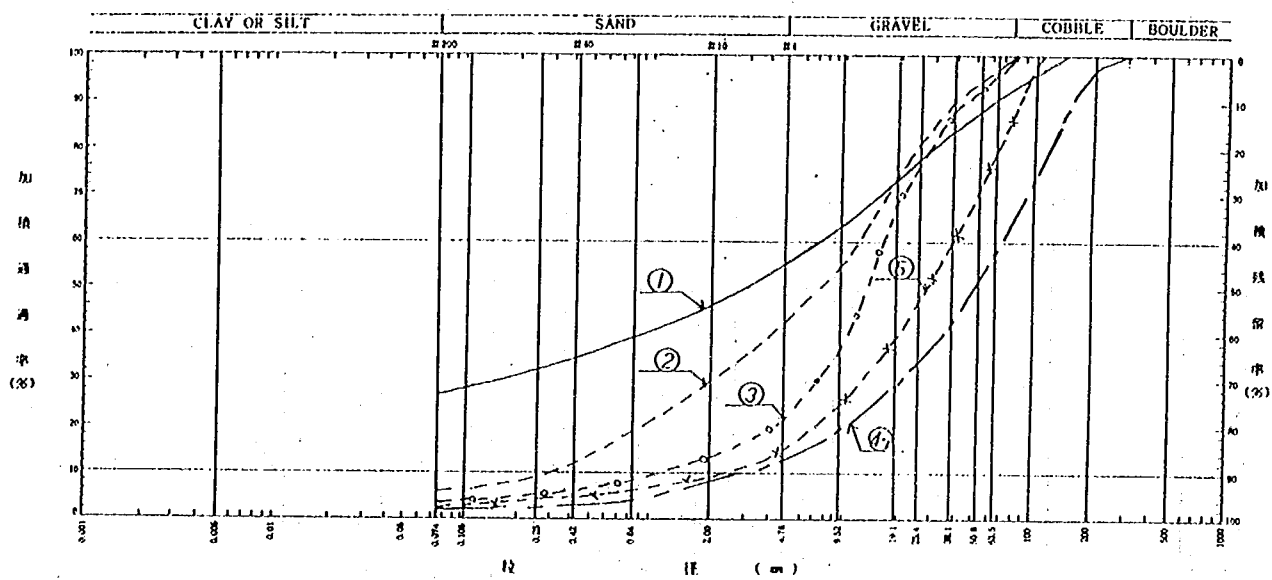


各盛立材料の粒度分布

末武川ダム

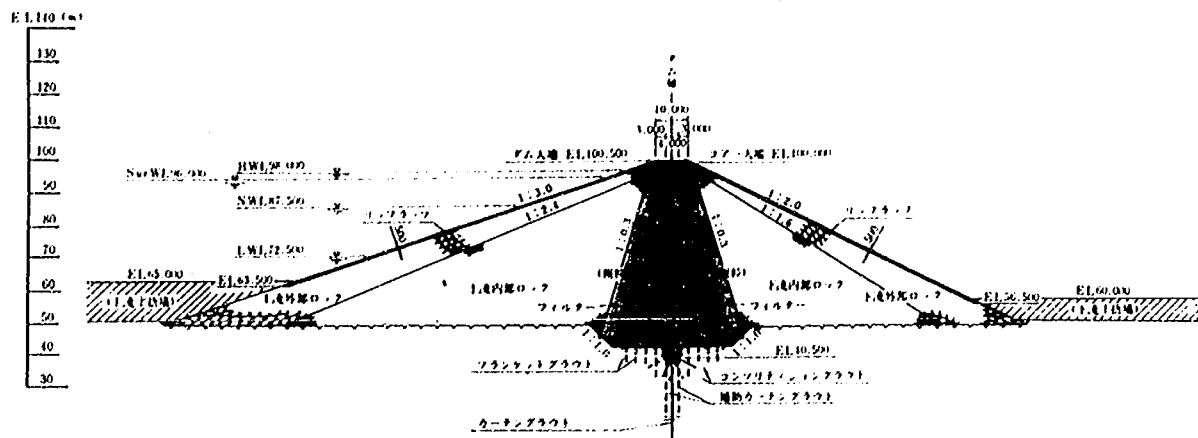


標準断面図

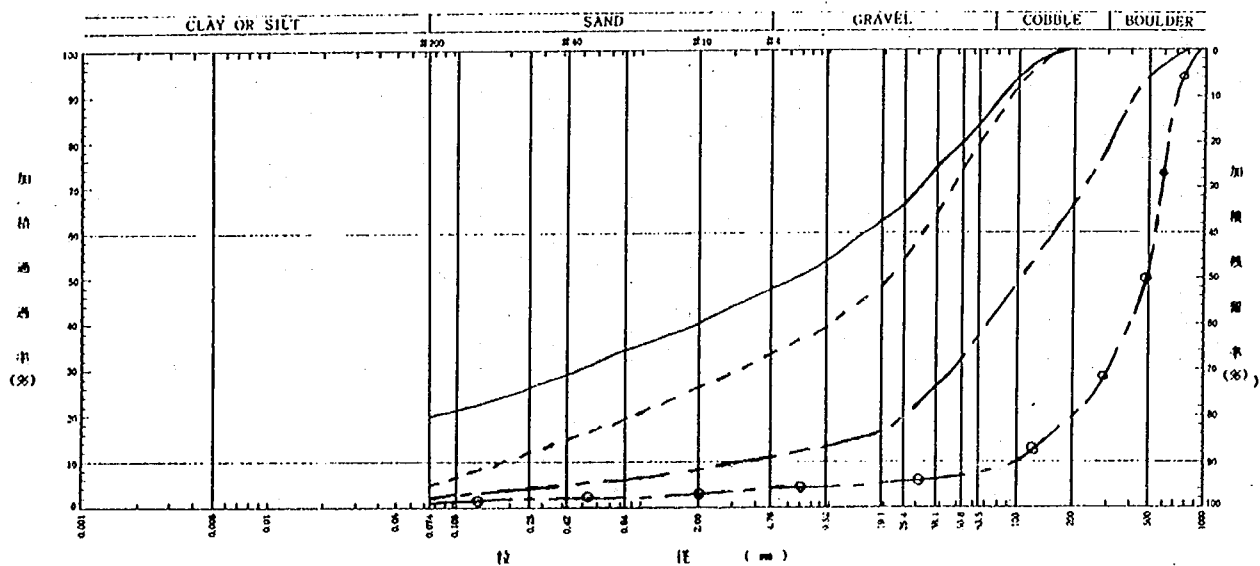


各盛立材料の粒度分布

五十嵐川ダム

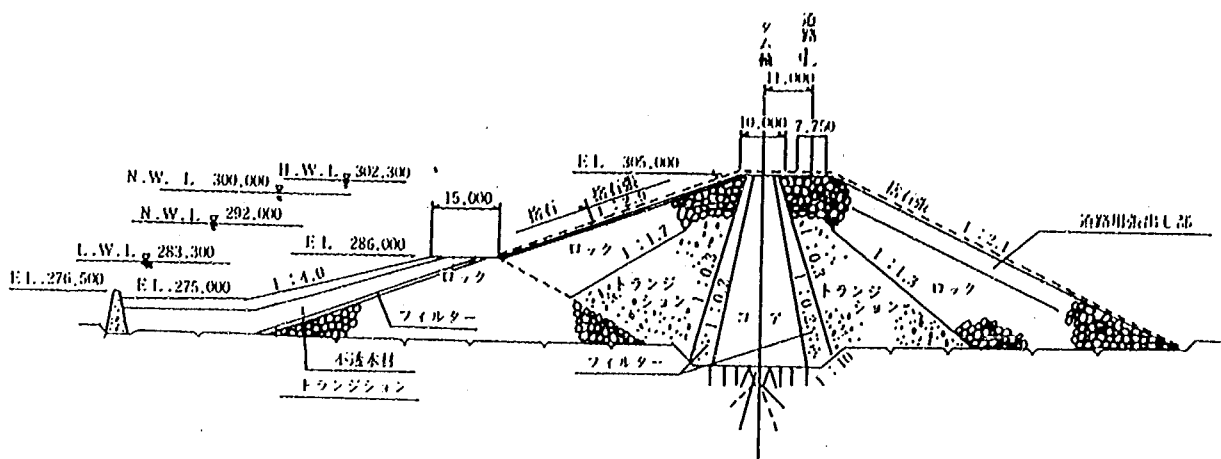


標準断面図

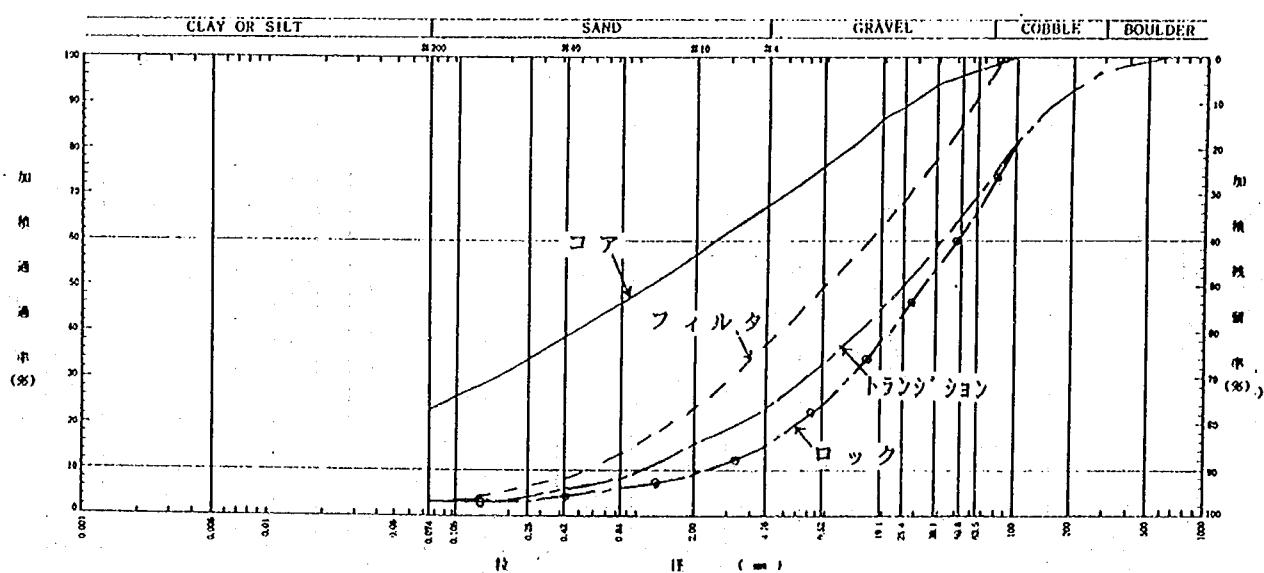


各盛立材料の粒度分布

小屋ダム



標準断面図



各盛立材料の粒度分布

青土ダム

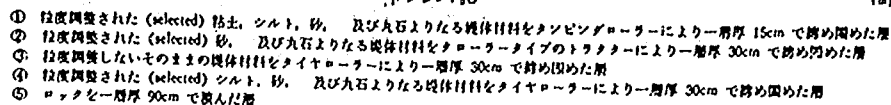
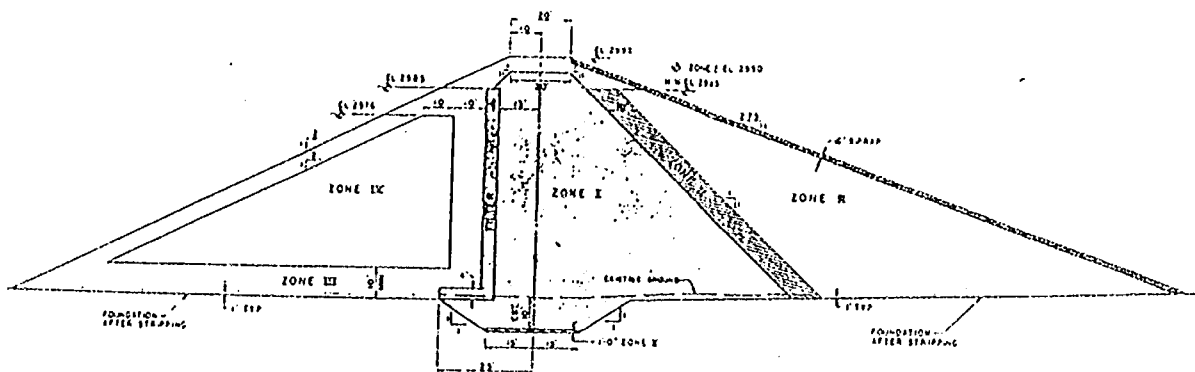


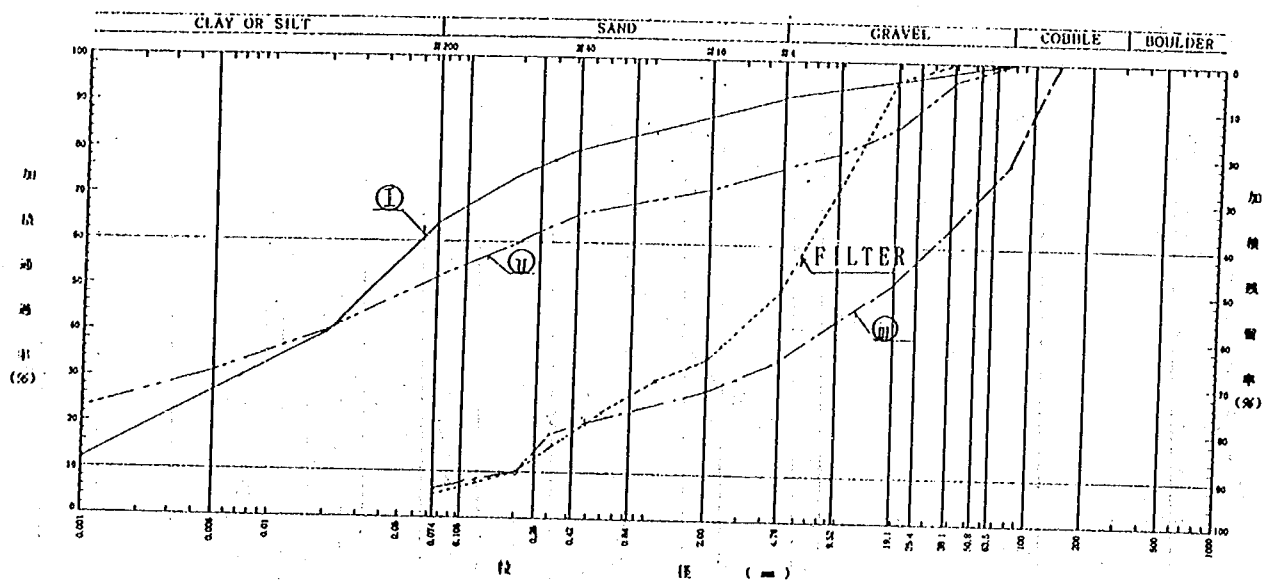
Figure 1 is a semi-logarithmic graph showing the relationship between grain size (mm) and percentage of soil components. The x-axis is logarithmic, ranging from 0.002 to 100 mm. The y-axis is linear, ranging from 0 to 100%. The graph is divided into regions for Clay or Silt, Sand, Gravel, Cobble, and Boulder. Two curves are plotted: Curve 1 (solid line) and Curve 2 (dashed line). Curve 1 starts at approximately 15% for 0.002 mm, rises to about 35% at 0.075 mm, then to 75% at 0.25 mm, and reaches 100% at 2 mm. Curve 2 starts at 0% for 0.002 mm, rises to about 10% at 0.25 mm, and reaches 100% at 2 mm. The curves intersect at approximately 0.25 mm and 35%.

各盛立材料の粒度分布

Teton Dam

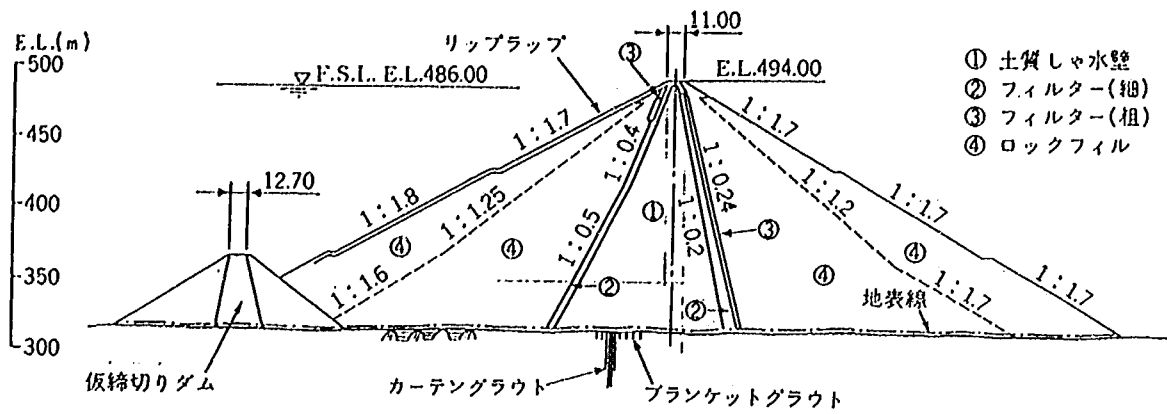


標準断面図

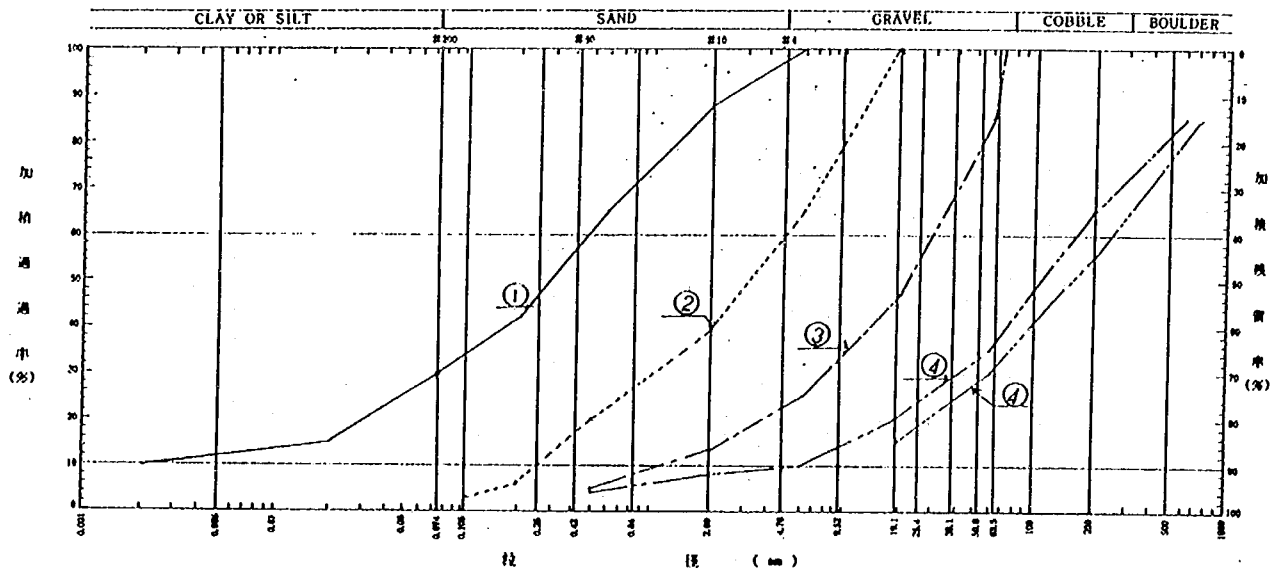


各盛立材料の粒度分布

Quail Creek Dike

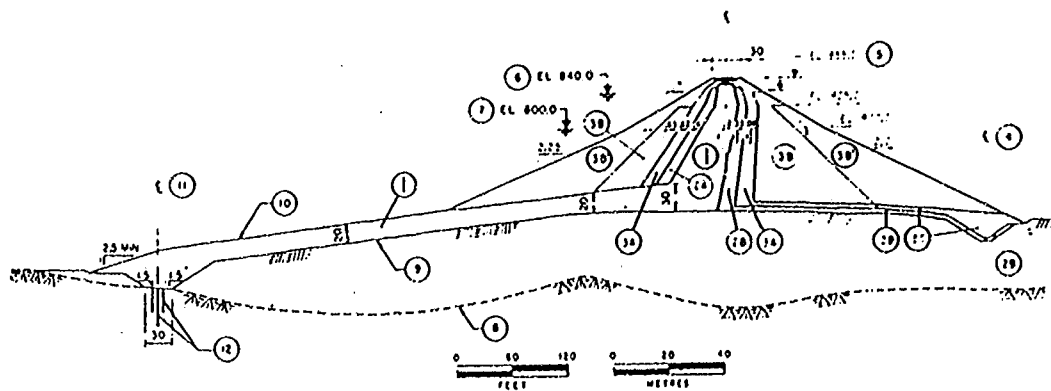


標準断面図

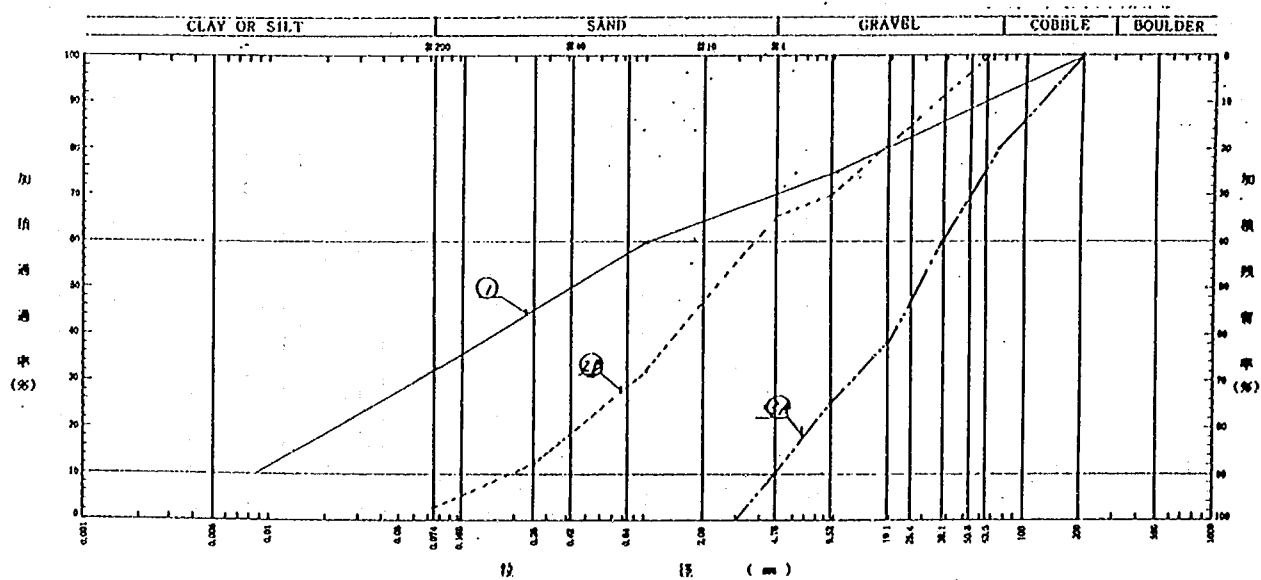


各盛立材料の粒度分布

Dart Mouth Dam

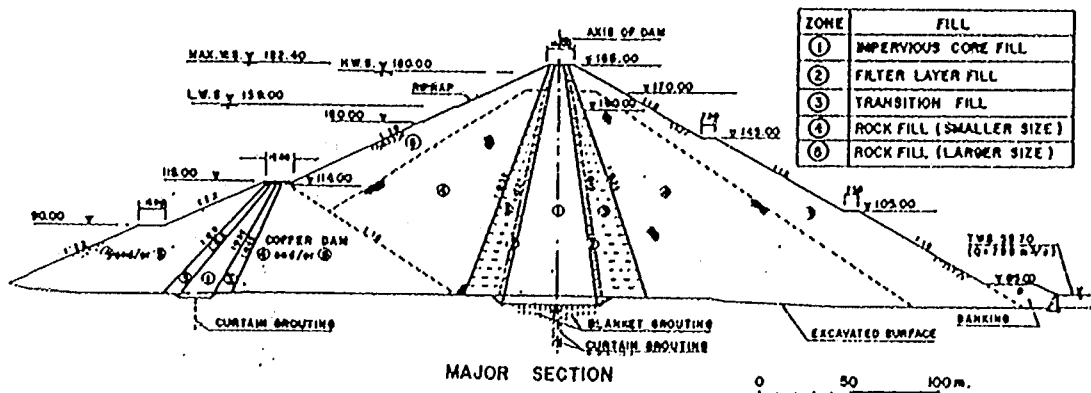


標準断面図

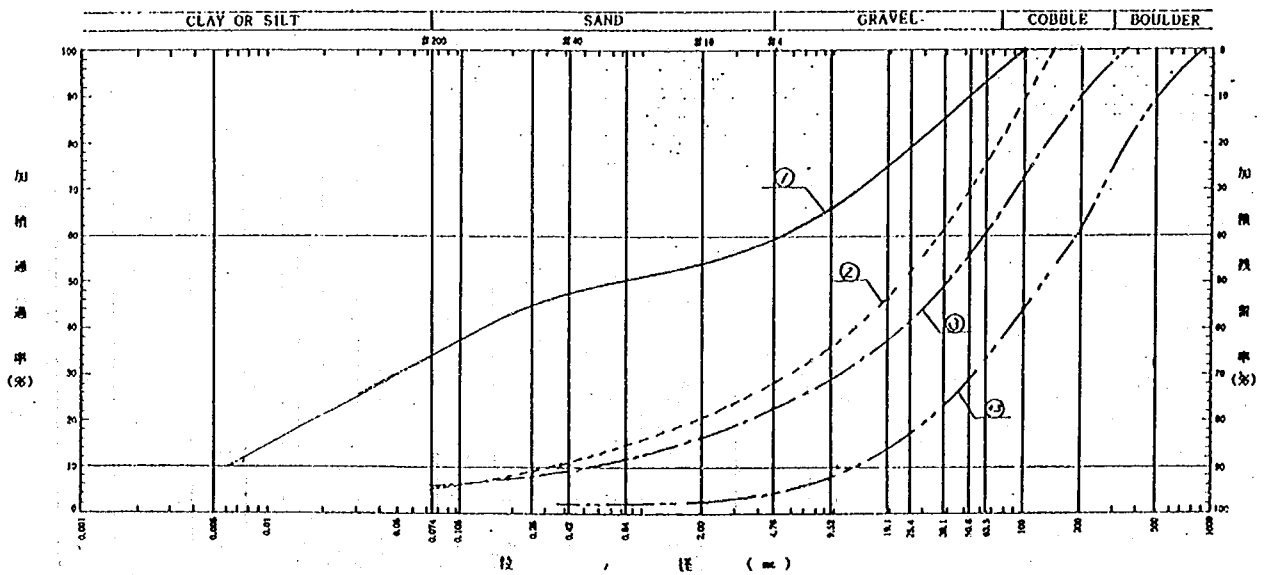


各盛立材料の粒度分布

LG-3

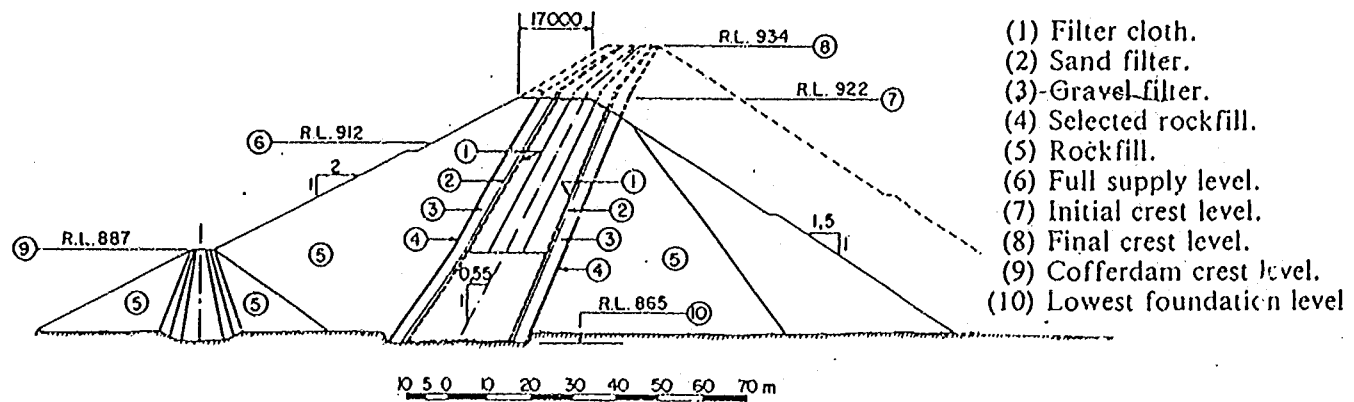


標準断面図

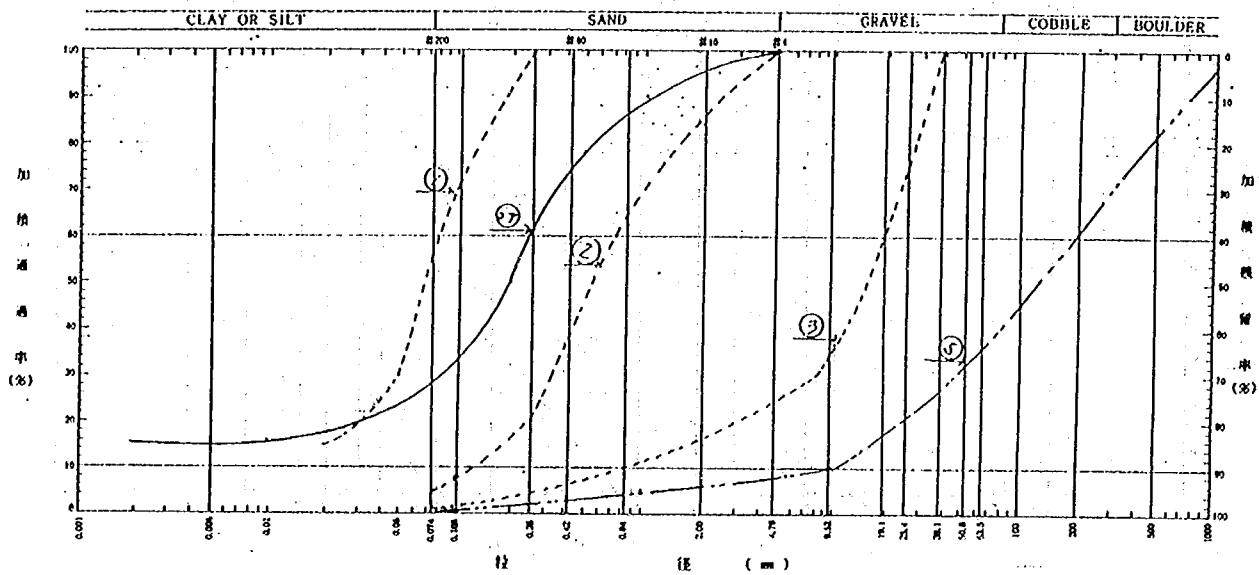


各盛立材料の粒度分布

Srinagarind Dam

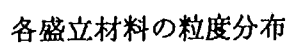
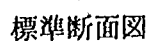


標準断面図



各盛立材料の粒度分布

Hans Storijsdam Dam



Magat Dam

要旨 ゾーン型フィルダムのゾーン間に適用されるフィルタ則について、以下に示す調査及び考察を実施した。

- ① 現在、わが国でフィルダムの設計に適用されているフィルタ基準(5則)の持つ意味を、既往の研究成果に対する文献調査により検討した。
- ② 日本と諸外国のフィルダムにおけるフィルタ5則の適用状況を調査し、現実の適用上の問題点を明らかにした。
- ③ 最近提案された新しいフィルタ基準を紹介するとともに、今後我々が検討していかなければならない項目を明確にした。

キーワード：フィルダム, フィルタ則, パイピング, 透水性, 分散土

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

フィルダム研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 26

No. 26

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第2903号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印