

ロックフィル材料の試験と設計強度に関する既往実績の調査

まつ い いえ たか
松 井 家 孝*

1. ま え が き

本資料は、この小特集号にマッチするものとして、編集委員会からの示唆を受けて、1982年に出版した「ロックフィル材料の試験と設計強度」の内容を紹介するために作成したものである。

「ロックフィルダムの試験と設計強度」は、土質工学会内に設けられた「粗粒土の強度に関する研究委員会（委員長：最上武雄東大名誉教授）」の研究成果を取りまとめたものであり、そのねらいは次のようであった。

- ① 1960年代初頭より建設が急ピッチで進められてきた近代工法によるフィルダムがかなりの数にのぼるにもかかわらず、これらの主要構造材料である粗粒材料（ロック材料、フィルター材料など）の強度に関するデータがまだまとめられていない状況にあったため、これらのデータを収集・分析しておく必要があった。
- ② これら試験データの収集・分析を通して、試験データと母岩の特性との関係、試験データ相互間の相関関係を把握し、これら試験データが設計値を決定する際にどのように生かされ、実施工での実態がどのようなであったかをまとめておこうとした。

そこで、粗粒土の強度に係わる諸因子および強度試験に関するアンケートを全国的に実施し、建設省・農林水産省・水資源開発公団・電力各社・建設会社・その他の協力のもとに、72ダムに関するデータを収集することができた。これらのデータに関して各要因相互の相関関係を知るために、2000枚をこえる図面を作成し検討する一方、粗粒土の強度に関する文献調査を行い、理論的裏づけを得ようと試みた。この結果としての研究報告書は次の3部より構成されている。

- A. 粒状材料の強度に関する研究の文献調査
- B. 既往の諸試験結果から見た粒状材料の強度
- C. 設計強度

2. 粒状材料の強度に関する研究の文献調査

この課題に関しては、ロック材料の強度評価の確定的な考え方が定まっていないため、強度に及ぼす様々な影響要因に関して文献調査をした結果をまとめた。その内容の個

々について紹介することは不可能であるため、以下にその目次を掲げ、全体像の把握に役立てることとする。（章の番号は、原文によるものとする）

1. ま え が き
2. 粒状材料の強度に及ぼす応力条件の影響
 - 2.1. 基本事項
 - 2.2. 拘束圧の影響
 - 2.3. 中間主応力の影響
 - 2.4. 応力履歴の影響
3. 粒状材料の強度に及ぼす実験条件の影響
 - 3.1. 供試体の大きさの影響
 - 3.2. せん断試験機における供試体形状・境界条件の影響
 - 3.3. 異なった試験機の中の強度の比較
 - 3.4. 砂のせん断強さ・変形に及ぼすひずみ速度の影響
4. 粒状材料の強度に及ぼす材料特性の影響
 - 4.1. 圧縮性
 - 4.2. せん断強度
5. 粒状材料の強度に及ぼす振動の影響
 - 5.1. 考慮すべき振動の影響
 - 5.2. 物体力の粒状体に与える基本的影響
 - 5.3. 静的せん断強さと物体力

3. 既往の諸試験結果から見た粗粒材料の強度

3.1 既往の諸試験データ収集の項目

粗粒材料の設計値を定めるための試験は、直接的には三軸圧縮試験や一面せん断試験のようなせん断試験であるが、母岩の特性を知るための試験と、材料の締固めの程度を知るための試験をも含めなければならない。そこで次のような項目を取り上げ、調査用紙を作成して各機関に調査への協力を要請した。

- ① ダムの諸元（名称・所在地・高さ・のり面勾配など）
- ② 材料の用途（ロック・フィルター・トランジション）
- ③ 材料特性（岩種・岩級・一軸圧縮強度・吸水率・比重(G_s , G_a , G_b)・粒子形状）
- ④ 粒度(D_{max} , D_{60} , D_{30} , U_c)……試験値・設計値・実績値
- ⑤ 供試体寸法（三軸圧縮試験の場合：直径×高さ、一

*（財）電力中央研究所 土木研究所 立地部調査役

表-1 粗粒材料の分類

大分類	岩石名と岩石分類	整理上の分類
火成岩	花崗岩(粗粒花崗岩, 細粒花崗岩) 花崗閃緑岩, 閃緑岩 (花崗岩類)	I-A
	斑れい岩, かんらん岩 (塩基性深成岩類)	
	花崗斑岩(角斑岩), 石英斑岩, ひん(玢)岩 輝緑岩(粗粒玄武岩)	
	濃飛流紋岩, 石英粗面岩質凝灰岩 《中生代》(古期火山岩類)	I-B
	流紋岩, 安山岩 《新生代》(酸性, 中性火山岩)	I-C
	玄武岩 (塩基性火山岩類)	I-D
	凝灰岩, 凝灰角礫岩《新生代》	II-A
	溶結凝灰岩 《新生代》	
	輝緑凝灰岩 《中生代》	II-B
	火山砕屑物(火山角礫岩, 集塊岩)	II-C
堆積岩	礫岩 砂岩, 泥岩, 頁岩, 粘板岩 (古生代, 中生代, 砕屑岩類) 《古第3紀, 中生代, 古生代》	III-A
	礫岩, 砂岩, 泥岩, 頁岩 《新第3紀》(新生代砕屑岩類)	III-B
	石灰岩	III-C
	チャート	
	生物化学堆積岩	
変成岩	広域変成岩 結晶片岩(黒色片岩, 石英片岩, 緑色片岩)	IV-A
	片麻岩	IV-B
	接触変成岩 ホルンフェルス	
堆積物	砂 礫 層 河床砂礫, 段丘砂礫	V

面せん断試験の場合: 縦×横×高さ, 供試体最小寸法と D_{max} との比)

⑥ 締固め (方法, ρ_a , 間隙比(e , e_a , e_b)).....試験値・設計値・実績値

⑦ 強度試験法 (三軸圧縮試験または一面せん断試験, 含水状態, 最小側圧または最小直応力・中間側圧また

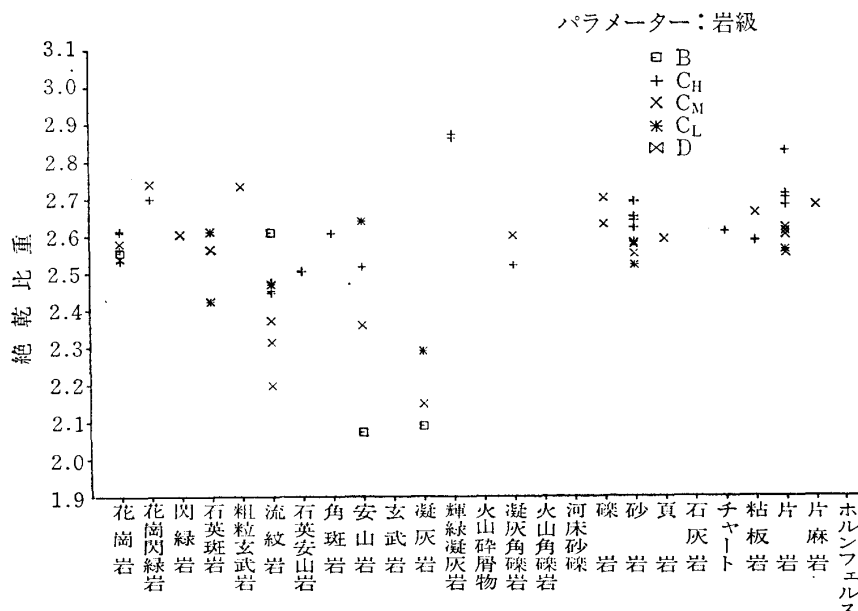


図-1 岩種別の絶対乾比重の値

表-2 全岩種にわたる母岩および試験材料の基本的性質の範囲

基本的性質		記 号	単 位	最大値	最小値
母岩	絶乾比重	G_b	1	2.870	1.820
	吸水率	Q	%	15.2	0.3
	一軸圧縮強度	q_u	kgf/cm ²	2.554	103
試験材料	均等係数	U_c	1	900	1.6
	60% 粒径	D_{60}	mm	110	1.5
	30% 粒径	D_{30}	mm	60	0.25

表-3 供試体の寸法

	供試体寸法(mm) ($d \times H$, $L \times H$)	数量 (箇)	割合 (%)	含水状態(箇数)		
				自然乾燥	湿潤	飽和
三軸圧縮試験	1200×2400	20	15.3	11	6	3
	600×1200	5	3.8	0	2	3
	500×1200	6	4.6	0	2	4
	500×1000	5	3.8	0	0	5
	300×700	48	36.6	26	15	7
	300×600	38	29.0	3	27	8
	290×630	2	1.5	0	2	0
	100×250	6	4.6	0	6	0
	50×110	1	0.8	0	0	1
	合計	131	100	40 (30.5%)	60 (45.8%)	31 (23.7%)
一面せん断試験 (単純せん断試験を含む)	2500×900	2	2.1	2	0	0
	2500×600	16	16.7	6	0	0
	2000×550	5	5.2	15	0	0
	1500×850	4	4.2	4	0	0
	1500×600	27	28.1	1	26	0
	1500×550	1	1.0	1	0	0
	1300×1200	1	1.0	0	1	0
	1130×830	1	1.0	0	1	0
	1130×600	3	3.1	0	3	0
	1130×550	4	4.2	0	4	0
	1130×500	7	7.3	2	5	0
	1000×600	2	2.1	0	2	0
	600×300	2	2.1	1	0	1
	500×300	8	8.3	0	8	0
	300×300	6	6.3	0	5	1
	その他	7	7.3	5	2	0
	合計	96	100	37 (38.5%)	57 (59.4%)	2 (2.1%)

は中間直応力・最大側圧または最大直応力, 破壊時軸差応力)

⑧ 強度 (内部摩擦角: ϕ , 粘着力: c)
.....試験値・設計値・実績値

⑨ 変形特性 (変形係数: E_{50} , E_f , 破壊時ひずみ: ϵ_f , 破壊時容積変化量: $(\Delta V/V)_f$)

3.2 粗粒材料の母岩の分類とグループ分け

粗粒材料の母岩の特性は, 粗粒材料の強度や変形特性を支配する要因の一つである。岩石はその形成過程によって火成岩・堆積岩・変成岩に分類される。これらは, 原石山で発破掘削により採取されるが, 河床砂礫や段丘砂礫もよく利用されるので, 上記3種類のほかに堆積物も分類の一項に

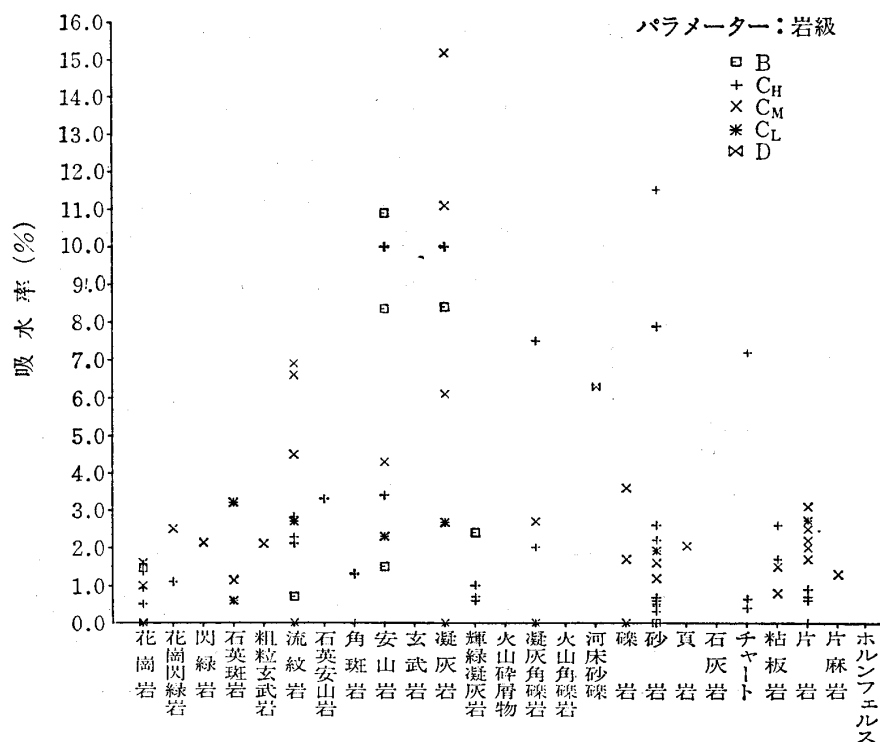


図-2 岩種別の吸水率の値

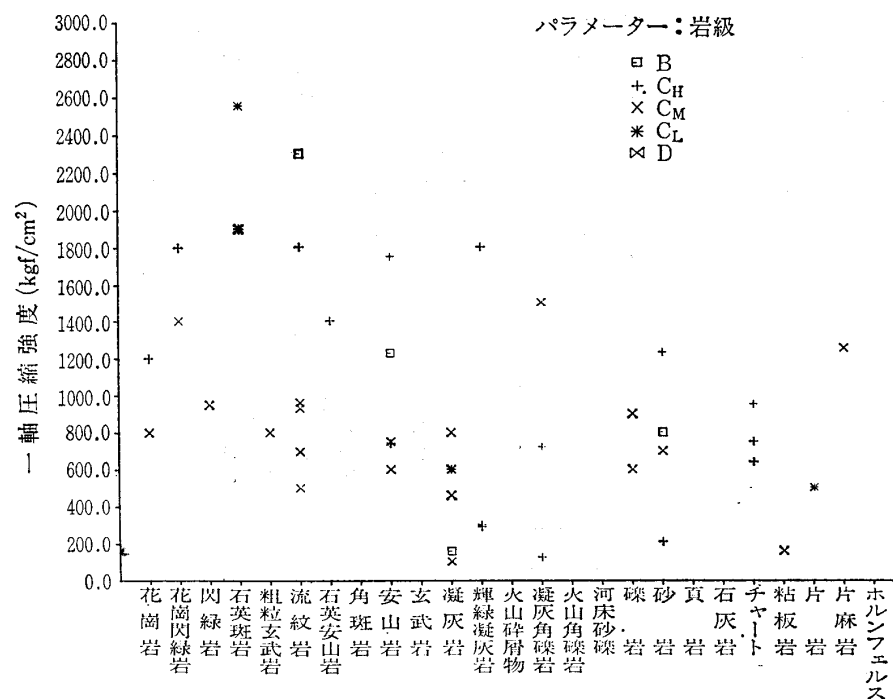


図-3 岩種別の一軸圧縮強度の値

加えた。これらに含まれる岩石の種類は、表-1に示すとおりであり、これらをその地質的特性からI-A～Vまでにグループ分けした。調査に現れた分類ごとの出現率は、火成岩34%、堆積岩49%、変成岩5%、堆積物12%であった。なお、岩石は風化、変質、断層等の要因で同一岩種でも異なる性質を示すので、工学的に分類された岩級区分(B, C_H, C_M, C_L, D: 電研・田中による)を考慮して検討した。

3.3 母岩および試験材料の基本的性質

全岩種にわたる母岩の基本的性質および試験材料粒度の

数値の範囲は表-2に示すとおりであり、これら基本的性質の値の分布は図-1, 2, 3に示すとおりであった。ここで比重の値として絶対比重: G_0 を用いているが、この理由は、 G_0 は粒子のみの質量を粒子中の空隙を含めた体積で除したのとして定義された量であり、これを用いて計算される間隙比 e_0 は岩石粒子間の純粋な間隙比を与えるところから、フィルダム材料の力学特性を整理するのに有用であると考えられているためである。

3.4 試験材料の粒度

試験材料は調査横坑の掘削ざりからが多いが、場合によっては原石採取場における小規模な発破試験によって得られるざりを用いることもある。この状態の粒度をここでは「原粒度」と定義する。一方、試験に用いられる粒度は、試験装置の規模に応じて適切に定められることになるが、これを「試験粒度」と定義する。この試験粒度には「相似粒度」と「せん頭粒度」の2種類があり、前者が用いられる場合が多い。

3.5 強度試験における供試体寸法と試料の最大粒径

粗粒材料の強度試験は、三軸圧縮試験あるいは一面せん断試験で行われるのが一般である。前述のように、粗粒材料は最大粒径が大きいために、できるだけ大きな供試体を試験対象とすることが望ましいが、試験装置の製作・試験に要する費用の点で制約がある。調査結果によれば、その種類は非常に多く、表-3に示すとおりであり、直径120cmの超大型三軸試験装置が実用に供されているが、その主流は直径30cmの大型三軸試験装置である。このような大型三軸試験で用いられる試料の最大粒径は図-4に示す

とおりである。既往の研究によれば、

- ① 三軸圧縮試験では、供試体直径: d と最大粒径: D_{max} との比が5～6以上
- ② 一面せん断試験では、せん断箱の長さ: l と D_{max} との比が10～20以上で、せん断箱の高さ: h と D_{max} との比が5～6以上

であれば、 D_{max} が試験結果に及ぼす影響は無視し得る程度に小さいといわれている。三軸試験では、図-4に示すようにほぼこの原則は守られているが、一面せん断試験ではこの制約よりも大きい D_{max} を使う例がかなり多い。

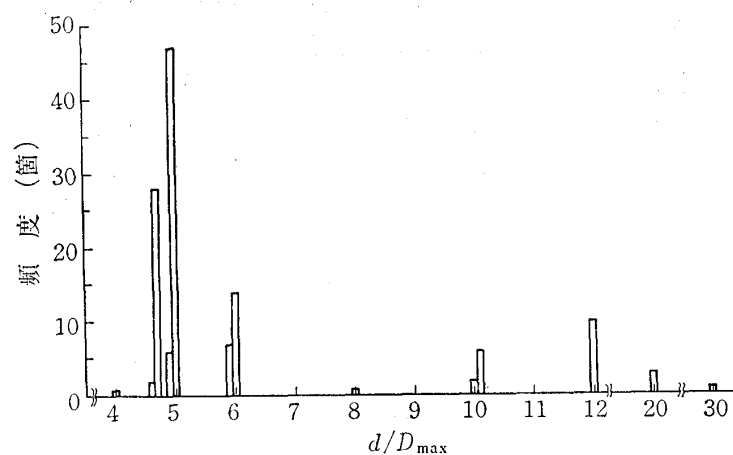


図-4 三軸試験における供試体直径と最大粒径の比

3.6 密度（間隙比）と強度との関係

締め固められた粗粒材料の強度に影響する要因としては、母岩の岩種、一軸圧縮強度、粒度、吸水率などもあげられるが、調査結果によれば、最も顕著な影響を及ぼしているものは密度（間隙比）であった。

一方、粗粒材料の強度を示す指標としては、 c , ϕ が対象となっているが、粗粒材料の破壊包絡線は直線ではなく、上に凸な曲線となるため（図-5）、 c , ϕ は一定値とはならないことはよく知られている。このため、直応力 σ が 6 kgf/cm^2 に相当するせん断応力 τ_0 を定義し、これによる検討も行っている。

(1) 相対密度と強度

現状では、粗粒材料の相対密度： D_r を求めるための試験法は統一されていないため、すべての試験結果を D_r で整理することはできず、また、 D_r を適用した例が少ない。しかし、図-6 に示す例に見られるように、 D_r が大きくなれば ϕ は大きくなる傾向は明白であり、 $3 \sim 4^\circ$ も大きな値を得ることが示されている。

(2) 三軸圧縮試験における e_0 と ϕ との関係

図-7 に e_0 と ϕ の関係の一例を示した。これによれば、 e_0 の $0.8 \sim 0.2$ 範囲で、 ϕ は $35^\circ \sim 44^\circ$ 程度まで上昇しており、 e_0 が ϕ に与える影響が顕著であることを示している。

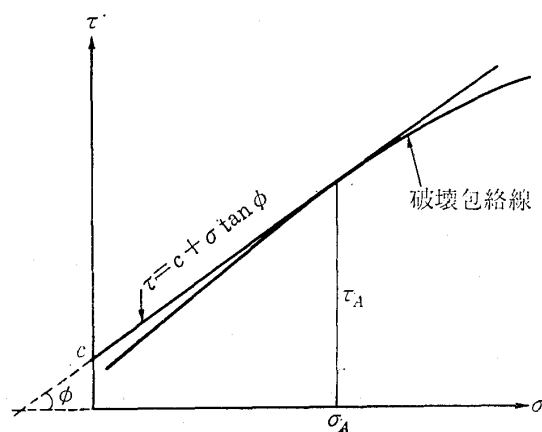


図-5 破壊包絡線とモールクーロンの破壊規準

これと同様な傾向は、 c , τ_0 についても現れている。

4. 試験値・設計値・実績値相互間の関係

フィルダムの設計・施工においては、試験値により設計値を定め、実施工における管理試験によって、実績値が設計値を下回っていないことを確認することが必要である。これの対象となる項目としては、粒度、密度、強度などが上げられる。

4.1 粒度

図-8 には、材料の粒度の実態を示したが、これらは最大粒径に差があるほかは、原粒度と実績粒度との間には大差ないことが示されている。

4.2 密度

設計密度は、所定の強度が得られる試験密度と等しいか、やや小さ目の値を選定している。ところが、施工実績として得られた密度は、図-9 に示すように、設計密度を確実に上回っており、密度と強度との関係から推定して、かなり余裕をもつことが分かった。

4.3 強度

フィルダムの設計においては、試験で粘着力 c が測定されてもこれを余裕と見なし、強度としては ϕ のみを採用することが一般である。図-10 に示すものは、ダム高と設計 ϕ 値の関係であるが、試験で大きな ϕ 値が得られていてもかなりの余裕を見ていること、ダム高が高くなればできるだけ大きな ϕ 値を得る努力がなされていること、既往の設計 ϕ 値は 43° を上限としていることが、読みとれる。

図-11 は試験 ϕ 値と設計 ϕ 値との関係を示すものであり、試験値よりも最大 5° 程度余裕をもって設計値が定められ

岩級区分	ρ_{dmax} の試験方法区分
□ B	1. 振動法：振動台，加速度=5g
+ CH	2. 振動法：ハンドバイブレイター
× CM	3. 衝撃法：ランマー， $E_c=11.25 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$
△ D	4. 衝撃法：ランマー， $E_c=16.9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$

同一試料データー

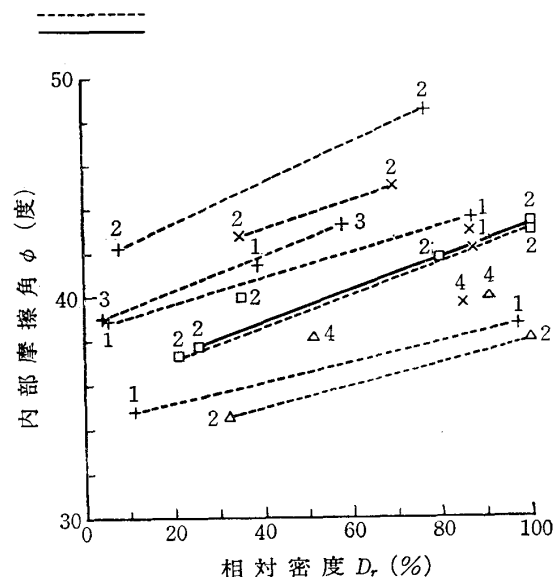
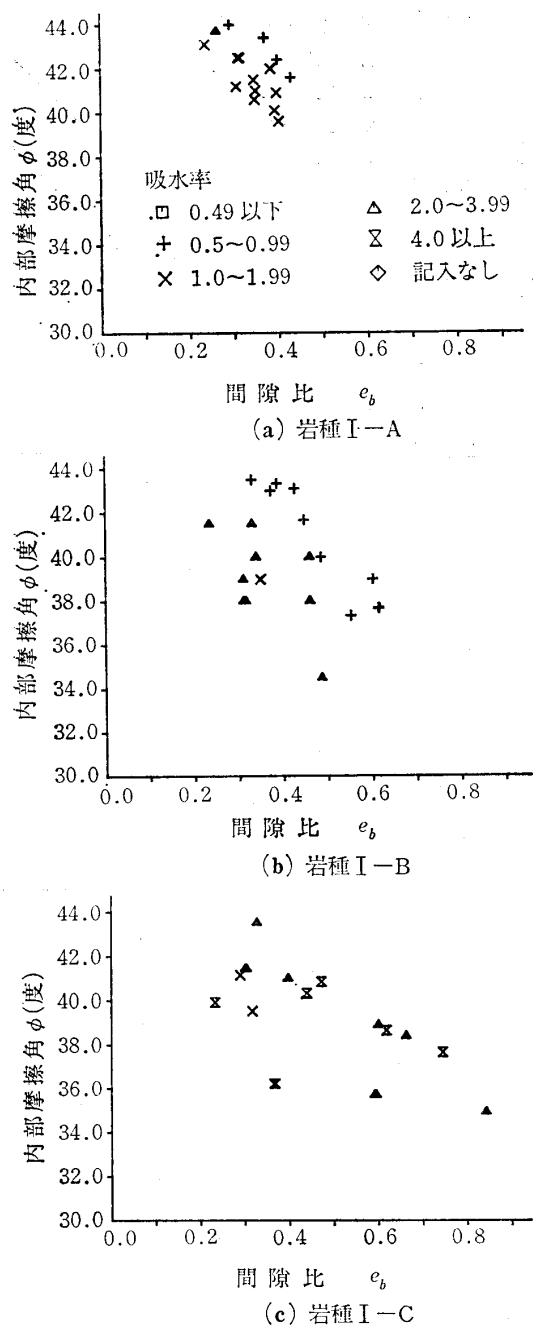


図-6 相対密度と内部摩擦角の関係

図-7 間隙比と ϕ の関係 (三軸)

ていることを示している。ただし、図中のA線よりも上にあるプロットは、密度をパラメーターにして試験値を求めたときの点のうち小さな密度に対応しており、設計値決定には関与していない。

図-12に一面せん断試験における設計 ϕ 値と試験 ϕ 値の関係を示したが、試験 ϕ 値として 50° をこえるものまで含まれているのに、設計値は 42° 程度に抑えられており、試験方法に問題を内包していることが分かる。

なお、強度に関する実績値は、盛立面から不かく乱試料を採取して三軸試験を実施した例もあるが、一般には、設計密度を上回る実績密度が得られたことを確認することによってその目的を達している例が大部分である。

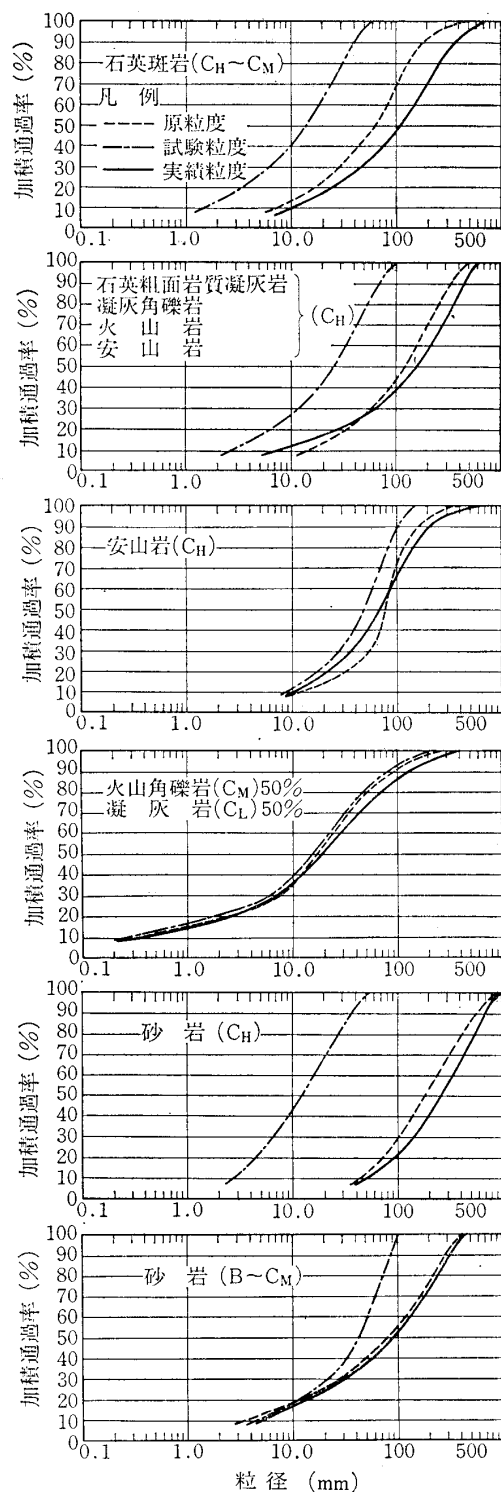


図-8 原粒度、試験粒度および実績粒度の実態

4.4 施工実績

施工実績としては、ケースヒストリーとして次の諸ダムについて解説されている。

寺内ダム (水資源開発公団), 岩屋ダム (水資源開発公団・中部電力), 瀬戸ダム (関西電力)。

5. 粗粒材料の試験における課題

上記の諸検討を踏まえ、今後の課題を次のように指摘している。

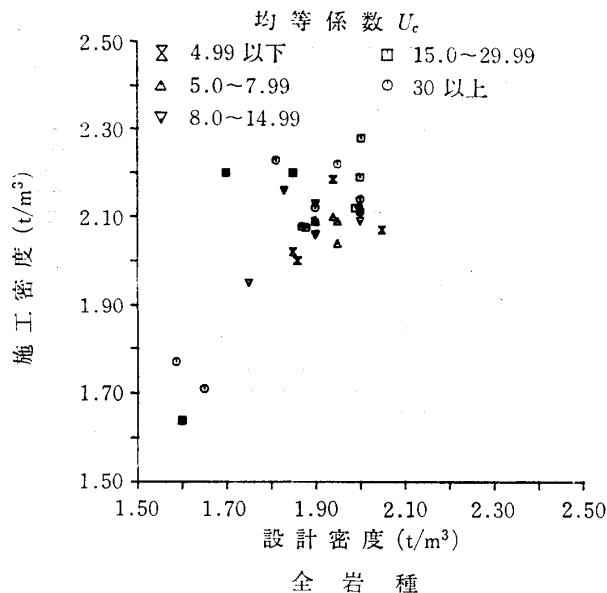


図-9 設計密度と施工密度の関係 (三軸)

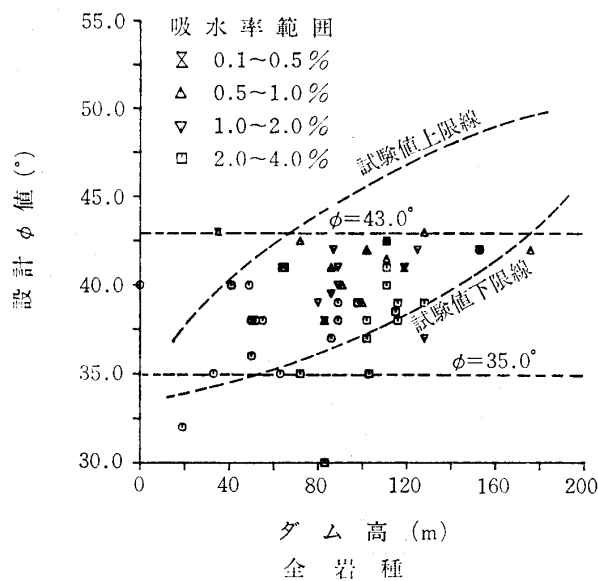
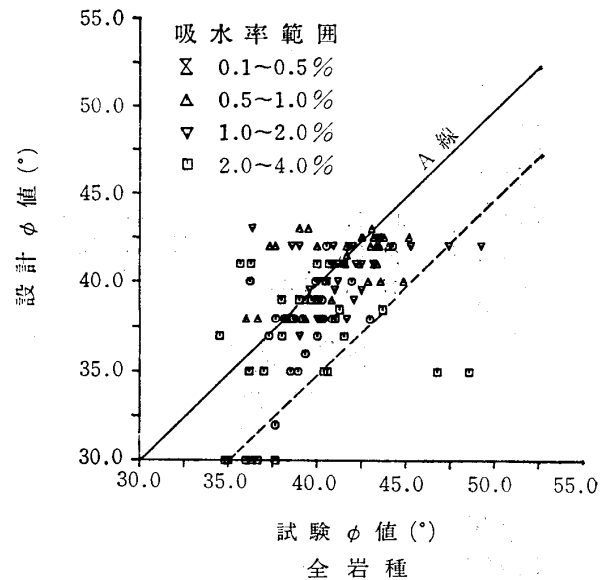
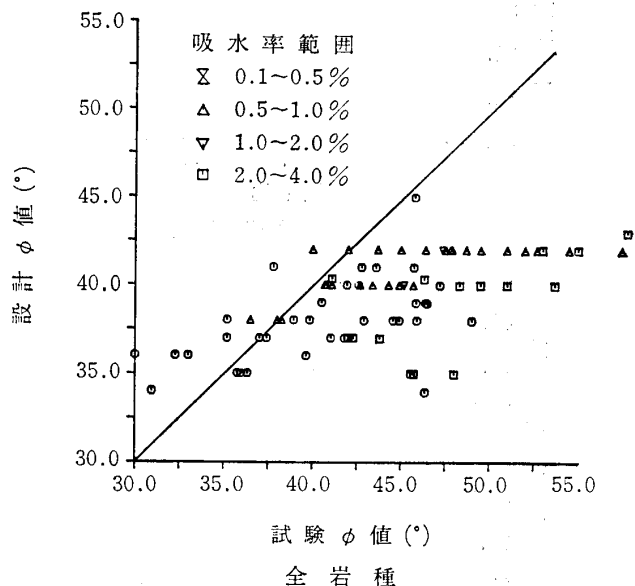
図-10 ダム高と設計 ϕ 図-11 試験 ϕ と設計 ϕ (三軸圧縮試験)図-12 試験 ϕ と設計 ϕ (一面せん断試験)

表-4 強度特性に影響を与える因子

	試験自体の精度		試験と実物(現場)との対応	
	関係する因子	記述箇所	関係する因子	記述箇所
試験装置	試験機の機構	3.3.1	せん断機構 (機種を選択)	3.3.4
	供試体の形状	3.2.2		
	供試体の境界条件	3.2.1 3.2.3		
試験条件・方法	ひずみ速度	3.4	応力条件	2章
			排水条件	3.3
			振動の影響	5章
試料			試料の代表性	
供試体	供試体の大きさ (d/D_{max} 効果)	3.1	粒度・ D_{max} 効果	4.2
			密度・相対密度	4章
	供試体内の不均一性		締固め方法	
			含水状態	4.2.5

(注) 記述箇所とはA部門(1章~5章)に記述されている箇所をさす。

- ① 室内試験の条件と実物のフィルダムがおかれる条件を一致させること(表-4)。
- ② 三軸圧縮試験と一面せん断試験における強度の評価
- ③ 設計値決定に際しての c, ϕ の取扱い
- ④ 円弧すべり面法以外の F.E.M. などの解析法への強度・変形特性の適用法
- ⑤ 動的強度・変形特性の適用法

6. あとがき

「ロックフィル材料の試験と設計強度」は、非常な労力を費やして既往のデーターを整理・分析したものであるが、この中で指摘された課題を究明する目的で、現在、「粗粒材料の試験に関する研究委員会(委員長: 林 正夫)」の活動が行われている。

(原稿受理 1985.4.8)