

土 木 研 究 所 報 告

第173号

ロック材料の三軸圧縮試験と強度特性.....松本徳久
渡辺和夫

昭和62年3月

建設省土木研究所

Copyright © 1987 年 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ロック材料の三軸圧縮試験と強度特性

フィルダム研究室 松本 徳久*

ダム構造研究室 渡辺 和夫**

Triaxial Compression Tests and Strength Properties for Rockfill Materials.

要旨:

本報告は、フィルダムのロック材料を対象とした三軸圧縮試験とその強度特性についてとりまとめたものである。

ロック材料の比重・粒度・密度は重要な材料設計値である。この材料特性について原石山の地質状態に着目した事例調査と現場・室内密度試験結果から考察を加えた。

また、ロック材料のせん断強さを求める三軸圧縮試験方法には確立されたものがない。試験方法に関しては主に試験粒度・試料最大粒径・せん断速度・供試体作製方法に実験的検討を加えてその手法を提案した。

ロック材料の強度特性は基本的な設計要素である。三軸圧縮試験より得られたデータを基に、岩質・粒度・密度状態が主にせん断強さと変形性に関与していることを明らかにした。

キーワード: フィルダム, ロック材料, 三軸圧縮試験, せん断強さ, 密度

Synopsis:

The paper describes the large-scale tri-axial tests and strength properties for rockfill materials.

The specific gravity, gradation and unit weight of rockfill materials are basic design parameters. The effects of geological features on these parameters are analysed by using the data obtained from case studies, and field and laboratory tests.

The details of the procedures of large-scale triaxial tests to obtain the shear strength of rockfill materials have not been specified. The paper proposes the gradation, maximum grain size and processing procedure of the specimen, and loading velocity based on the experimental results.

The shear strength of rockfill materials is one of the fundamental elements in the design of rockfill dams. The strength properties are discussed in relation with rock properties, gradation, and density of the materials.

Key Words: filldam, rockfill, triaxial test, shear strength, density

目 次

1. まえがき	(3)
2. ロック材料	(4)
2.1 ロック材料の定義と役割り	(4)
2.2 材料調査と選定	(5)
2.3 粒度組成	(8)
2.4 単位体積重量	(15)
2.5 材料試験	(19)
3. 三軸圧縮試験	(24)
3.1 試料条件	(24)
3.1.1 粒径範囲	(24)
3.1.2 供試体寸法	(27)
3.2 供試体の作製	(33)
3.3 せん断速度	(37)
3.4 飽和・不飽和試験	(38)
3.5 三軸圧縮試験の要点	(39)
4. 三軸圧縮変形と強度特性	(44)
4.1 変形性	(45)
4.2 粒子破碎	(51)
4.3 せん断強さ	(51)
4.3.1 最大せん断応力	(51)
4.3.2 見掛けの粘着力	(54)
4.3.3 せん断抵抗角	(56)
4.4 品質の低下した材料の性質	(59)
5. 結 論	(61)
6. あとがき	(63)
参考文献	(63)

1. まえがき

まずはじめに、わが国のダム建設事例では、どのような条件の時にフィルダムが採用されているのか、その概略をとりまとめておく。

ダムの型式をコンクリートダムにするか、フィルダムにするかは、ダムサイトの地形・地質・施工中の洪水量（これにより仮排水路と2次締切の規模が決まる）、完成後の洪水量（これにより洪水吐の規模が決まる）、候補フィル材料の特性と賦存量、貯水池の用途、気候・環境、施工性および管理時の操作性などの要素、ならびに全体としては経済性を考慮して決定される。

わが国の貯水池築造の目的は、主として、灌漑用水の供給、発電、治水および上水水供給である。表-1・1は、現在（昭和58年度）建設中のダム（予算措置として建設中という意味で実質的には調査中のものを含む）の型式をダム総覧¹⁾に基づいて集計したものである。農業用のダムでは、アースダムとロックフィルダム^(注)の両者が全ダムの79%を占めている。農業用ダムにフィルダムが多いのは、流域面積が小さいものが多く、洪水吐の規模が小さいこと、堤高の低いものも

表-1・1 わが国のダム型式の集計（昭和58年度建設中）

農業用ダム（農水省所管）										
ダムの型式	地 域	北海道	東北	関東	信越 北陸	中部	近畿	中国	四国	九州 沖縄
アーチ式コンクリートダム							1			1
重力式コンクリートダム		6	5	1	3	2	5	8	2	41
アースダム		5	4	4	10	9	4	4	3	50
ロックフィルダム		30	36		13	5	4	10	1	120
その他		2								2
計		43	45	5	26	16	14	22	6	214

発電ダム（電力会社）										
ダムの型式	地 域	北海道	東北	関東	信越 北陸	中部	近畿	中国	四国	九州 沖縄
アーチ式コンクリートダム						1				1
重力式コンクリートダム		3	2	3	2	2		1	2	16
アースダム										
ロックフィルダム		1	1	2		2		1	1	9
その他										
計		4	3	5	2	5		2	3	26

河川総合開発・治水ダム（建設省所管）										
ダムの型式	地 域	北海道	東北	関東	信越 北陸	中部	近畿	中国	四国	九州 沖縄
アーチ式コンクリートダム				1	1					2
重力式コンクリートダム		16	26	17	30	10	19	30	11	212
アースダム			2	1			2			3
ロックフィルダム		4	14	9	10	5	2	2		55
その他		1	1	5		2	3	1		16
計		21	43	33	41	17	26	33	11	295

〔注〕アームダムとは堤体が均質な土質材料により構成されているもの。

ロックフィルダムとは堤体がフィル材料の性状と機能に対応した複数のゾーンにより構成されているもの。

多く、アースダムやロックフィルダムが経済的であることによると思われる。発電用のダムは、揚水式発電の上池については、流域面積が小さいからこれも洪水吐の規模が小さくなり、フィルダムが経済的である場合が多い。

建設省所管のダムは、多目的あるいは治水目的のダムであるが、ほとんどが洪水調節目的を含む。したがって流域面積が比較的大きく、洪水吐の規模がダムの規模に比し相対的に大きく、洪水時の流水制御の操作性その他を総合的に考えるとコンクリートダムが好まれる場合が多い。したがって、建設省所管のダムで、ダム型式としてフィルダムが採用されるのは、地質が軟岩等でコンクリートダムよりもフィルダムが適し、かつ流域面積が小さいという条件のときが多い。フィルダムをコンクリートダムと比較してみると、地質に対する順応性は高いが、堤体の越流に対しては弱いいため、堤体と分離して十分な容量の洪水吐を設けねばならず、洪水吐が大きくなるとフィルダムのメリットが小さくなる。また、フィルダムでは、洪水吐の掘削材を堤体材料に使うことにより、合理的な設計ができるとの主張もあるが、わが国の地形事情では、洪水吐掘削と堤体盛立が同時施工できる場合は極めて少なく、施工は複雑となり、かつ洪水吐の掘削材が堤体材料に適しているとも限らず、大容量の洪水吐はやはりフィルダムにとって重荷となるわけである。

以上をまとめると、わが国で主にフィルダムが採用される場合は、経済性の比較検討を含み流域面積が小さい（洪水吐容量が小さい）ときあるいは、地質が余り良くないとき（コンクリートダムに適しにくいという意味であり、フィルダムの基礎として不適という意味ではない）であることが多い。地質が余り良くなく、かつフィルダムをロックフィルダムで建設しようとするときには、良好なロック材料を大量に得る困難さを伴う場合がある。このような時にはロック材料の材質と使用可能量が大きな問題となるわけである。

現在、フィルダム堤体の静的条件下での安全性を検討する一方法として、ダム設計基準²⁾では「安全性の検討は原則として円形すべり面について、スライス法により検討する」と規定している。スライス法によりダム堤体の断面形状設計を行う場合にフィル材料について2つの設計値が必要である。その設計値とは堤体材料の①単位体積重量・②せん断抵抗角の大きさである。また、その他に③材料の長期的な耐久性が要求される。

単位体積重量、せん断抵抗角の値は、一般的には実

施調査段階において堤体材料の選定が行われた後で設計値検討のための室内試験を実施して決定される。建設途中においては施工単位体積重量についての管理試験が実施される。また、せん断抵抗角の値については材質の変化等の室内試験時条件と異なった場合などには設計値確認のための管理試験が実施される。

ロックフィルダムの堤体材料の中では特に堤体積の過半以上（堤高100m級のダムでは百万 m^3 単位で材料が必要となる）を占めるロック材料は堤体の力学的安定性を分担している重要なフィル材料である。

ロック材料の場合には、土質材料に比較して大きな粒径で構成されている。したがって土質材料を対象とした通常の試験方法³⁾をそのまま適用して試験できない場合が多い。ロック材料を対象とした室内試験では構成粒子が大きい（ほぼ2mmから1000mm程度の粒径で構成されている）ため大型の試験装置が必要である。また、試験方法が標準化されていないため、試験装置の大きさ、試験方法については実施機関によってまちまちな点が多い。

フィルダムの材料試験に関しては、「フィルダムの設計と施工に関する研究」というテーマで昭和49年度から3年間、建設省技術研究会の指定課題として検討が行われた。その成果としては昭和50年度に「フィル材料の試験要領（案）」（建設省河川局開発課・建設省土木研究所）を作成している。しかし、暫定的なものであり、試験要領として確立されたものではない。

フィルダム研究室では、昭和48年度に大型三軸圧縮試験装置・振動締め試験装置等のロック材料を対象とした力学試験装置を製作した。昭和49年度以降には、上述した装置を用いて、ロック材料の重要な設計値である単位体積重量・せん断抵抗角を求める試験方法の確立と材料の力学特性を求めるための室内試験を継続実施してきた。本報告書では、これらの研究成果を基に、ロック材料を対象とした事例調査結果および三軸圧縮試験の方法・強度特性に関する基本的な項目・内容について整理・分析して、とりまとめ報告する。

2. ロック材料

2.1 ロック材料の定義と役割

わが国のフィルダム関係の技術者が普通に「粗粒材料」と言うときは、ゾーン型ダムの透水性ゾーンに配置する材料を意味する。フィルダム工学における材料の名称を整理すると表-2-1になると思う。つまりダム

表-2-1 フィルダム材料の分類と名称

フィルダム材料の分類	粒度による分類	透水性による分類
ロック材料 砂礫材料 土質材料	粗粒材料 細粒材料	透水性材料 半透水性材料 不透水性材料

の分野における「粗粒材料」とは、原石山から採取されるロック材料あるいは河床堆積物の河床砂礫である。透水性の点では透水性あるいは半透水性の材料を意味している。

一方、「ロック材料」とは、例えば第2次改訂ダム設計基準⁴⁾によると、「ロック材料は、所要のせん断強さと排水性を有するものでなければならない。……（中略）……一般に、ロック材料は、堅硬かつ耐久的であり、大きなせん断強さを有し、自由な排水が阻害されないものが望ましい。」とされている。つまり、ダム工学の分野でのロック材料又は粗粒材料は、粒度について粗粒ということだけではなく、透水性又は排水性および耐久性についても一定の性質を持つことが望まれているわけである。

わが国の初期のロックフィルダムである石淵ダム（1953年）、皆瀬ダム（1963年）、御母衣ダム（1960年）では、透水性ゾーン又はロックゾーンの締め固めは、射水工法によって施工された。射水は、ロック材料の中の細粒分を吹き飛ばすことにより、大塊同志の接触を確保し、接触点を水でなめらかにし、かつ弱い接触点は破碎することにより締め固め効果を上げるのに役立った。したがって、当時のロック材料の粒度に関する概念は、大塊かつ均一粒径に近いものであった。

一方、最近のロック材料の粒度事例では、最大粒径が150mm～1000mm程度、重量百分率で50%に対応する粒径が20mm～150mm程度、同様に10%に対応する粒径が1mm～20mm程度の粒径範囲に分布した混合粒径のものが多く、また、施工方法も振動ローラによる転圧が多くなってきている。このように、わが国のロック材料の実態は、この約20年間で変化しており、また、ロック材料に関する概念あるいは定義も変化しているわけであるが、最近のロック材料の定義を文章で書けば、前述のダム設計基準のように「堅硬かつ耐久的な岩石よりなり、所要のせん断強さと排水性を有するもの」というあたりであり、具体的にこのような性質を持った材料とは、締め固めた状態で、平均粒径がおおよそ5mm以上、74 μm 以下の細粒分はほとんど含まず、透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{cm/S}$ 以上というような材料が該当すると思われる。

2.2 材料調査と選定

ロック材料を採取する原石山は、所要の材質の材料が得られ、かつ出来るだけダムサイトに近いことが望ましい。所要の材質とは、堅硬かつ耐久性があり、しかも排水性のよい（したがって細粒分の少ない）ということである。また、原石山とダムサイトの距離は、工事費に大きく影響する。なぜならば、一般に堤体の盛立施工は、採取・運搬・盛立という工程を経て実施されるが、このうち運搬に要する費用は、道路の建設費・維持費、運搬機械の損料・燃料およびオペレーターの労賃などより構成されることにより、運搬距離に比例する部分が多いからである。ただし、平面図の上で近くても、標高差があるときには許容される道路勾配の関係から、必ずしも運搬距離は近くならないので注意を要する。また、ダム本体および洪水吐の掘削によって生ずる掘削材が堤体材料として使えるかどうかを検討することも必要である。しかし本体の掘削材は、ダム基礎として不適だから掘削するわけで、風化やその他の原因による材質の低下が激しく、ロック材料として使えるものは少ない場合が多い。また、ロック材料を大量に採った跡地は、掘削法面が出現し法面保護や環境の点も考慮されねばならない。貯水池内で材料が得られれば、貯水容量の増加にも寄与し、望ましいことは言うまでもない。

したがって、ロック材料の調査では、まずダムサイト近傍から調査範囲を設定し、この範囲内に所要の材料と賦存量のロック材が存在するかどうかを調査し、ないときには更に遠い地点を調査していくことになる。

フィルダム研究室では、昭和57年度にロック材料の調査・設計・施工に関する事例調査を実施した⁵⁾。ここにおける事例調査の対象ダムは、表-2・2に示すように建設省所管の直轄ダムおよび補助ダムが主で（18ダム）、電力ダム（7ダム）を含む計25ダムである。したがって、わが国フィルダムのすべての傾向を述べるというわけにはいかないが、主として建設省所管のロック材料調査等に関する概略を知ることができる。

事例調査の結果によれば、材料調査対象半径はダムサイトより最大20km程度であるが、採取地のほとんどが5km以内であった。

図-2・1は表-2・2のダムにおける堤体盛立量とボーリングおよび調査横坑数量の関係を示したものであり、盛立量または採取量が少ないものより多い方が調査数量が多い傾向が認められる。

原石山調査の目的は、どのような材質の材料がどれ

だけ採れるかということ把握する点にあるが、限られた調査数量で原石山の全体の状況を推定するためには、地質調査結果に頼らざるを得ない。横坑からの採取試料を試験して強度を求めても、このサンプルが地山全体を代表するものでなければ、設計値は定まらないわけである。したがって、地質調査によって原石山の採取予定材料の岩級区分を行い、それぞれの岩級について代表するサンプルを採取し試験して設計値を定めることになる。

地質調査では被覆層（段丘堆積層、崖錐など）の厚さ、風化の程度と深さ、断層などの破碎帯の分布、変質の分布および岩種の分布に注目して調査が実施される。

大規模なロックフィルダムでは、ロック材料の所要量は 10^6m^3 オーダーにもなるから、このような大量の岩石材料を安定して得るためには、ロック材料と地質の関係を無視できない。前述したように、地質がよくないからコンクリートダムでなくフィルダムという例も多いから、そのような地質条件下でのロック材料の確保は、特に重要である。例えば、表-1・1からわかるように、わが国のフィルダムは、北海道、東北、信越、北陸および九州の地域で相対的に多く採用されており、近畿、中国および四国で少なく、これらは、ダム基礎の地質と関係しているわけである。すなわち、フィルダムの多く採用されている地域は、新生代新第三紀以降の比較的地質の新しい地域であり、いわゆる「軟岩」が多く分布している（なお、ここにおける「軟岩」とは、一軸圧縮強度が $100\sim 200\text{kgf/cm}^2$ 以下で一応の固結状態にある点で土とは区別されるという定義とする）。このような地域で大量の良好なロック材料を得るためには、地質に関する理解が欠かせないわけである。

表-2・2に示した調査対象ダムについてロック材料の特性と地質の関係に着目して整理してみると以下のようである。

まず、ダムサイトおよび材料採取地の地質を次のように7区分するものとする。

- ① 中・古生代および新生代古第三紀の堆積岩（ S_1 ）
これに含まれる岩石としては砂岩、粘板岩、輝緑凝灰岩、チャート、石灰岩などがある。
- ② 新生代新第三紀以降の堆積岩（ S_{II} ）
これに含まれる岩石としては砂岩および泥岩が主で、いわゆるグリーンタフ地域の火山性堆積岩は I_{II} として除いてある。
- ③ 火成岩類（ I_1 ）
これは、深成岩（花崗岩・閃緑岩など）、半深

表-2.2 調査対象ダム

ダ ム 名	事 業 者	竣 工 年	型 式	堤 高 (m)	堤 頂 長 (m)	堤 体 積 (10 ³ m ³)	ロックゾーン の 体 積 (10 ³ m ³)	所 在 地
1 大 雪	北海道開発局	1974	中 央 コ ア 型	87	440	3,875	3,300	北 海 道
2 十 勝	北海道開発局	1983	〃	84	406	3,720	2,895	北 海 道
3 漁 川	北海道開発局	1980	〃	42	270	647	499	北 海 道
4 御 所	建 設 省	1981	〃 (複合型)	53	210	1,007	758	岩 手
5 白 川	建 設 省	1980	〃	69	348	2,233	1,718	山 形
6 岩 屋	中部電力・水公団	1976	〃	128	360	5,795	4,765	岐 阜
7 寺 内	水資源開発公団	1978	〃	83	420	3,014	2,014	福 岡
8 福 地	沖 縄 開 発 庁	1974	〃	92	260	1,601	1,315	沖 縄
9 樽 水	宮 城 県	1976	〃	43	237	551	384	宮 城
10 漆 沢	宮 城 県	1980	〃	80	308	2,200	1,743	宮 城
11 七北田	宮 城 県	1982	〃	74	420	2,520	1,894	宮 城
12 前 川	山 形 県	1980	〃	50	265.5	645	441	山 形
13 四 時	福 島 県	1983	〃	84	300	2,629	2,280	福 島
14 手取川	電源開発・建設省	1979	〃	153	420	10,102	8,733	石 川
15 三 保	神 奈 川 県	1978	〃	95	512	5,816	5,099	神 奈 川
16 広 瀬	山 梨 県	1975	〃	75	255	1,379	973	山 梨
17 荒 川	山 梨 県	1983	〃	88	325	3,086	2,539	山 梨
18 双 葉	北海道開発局	1979	アスファルト表面遮水壁型	60	234	660	660	北 海 道
19 武 利	北海道電力	1980	アスファルト中央コア型	16	173	77	67	北 海 道
20 高 瀬	東 京 電 力	1978	中 央 コ ア 型	176	362	11,600	9,300	長 野
21 七 倉	東 京 電 力	1978	〃	125	340	7,200	5,800	長 野
22 下小島	関 西 電 力	1973	〃	119	283	3,490	2,737	岐 阜
23 南 原	中 国 電 力	1975	〃	86	305	2,213	1,600	広 島
24 明 神	中 国 電 力	1976	〃	89	402	3,268	2,558	広 島
25 稲 村	四 国 電 力	1981	〃	88	352	3,100		高 知

成岩（ひん岩など）、火山岩（流紋岩・安山岩・玄武岩など）であるが、新第三紀の火成岩については一部 I_{II} と明確な区分が困難なものがある。

④ 新生代第三紀の火山性堆積岩 (I_{II})

これは、いわゆるグリーンタフ地域の堆積岩を主とするもので、凝灰角礫岩などを代表とする。 S_{II} 、 I_I との区分は明瞭でないものである。

⑤ 新生代第四紀の熔結凝灰岩 (I_{III})

支笏火山、阿蘇火山周辺の熔結凝灰岩は代表的なものである。

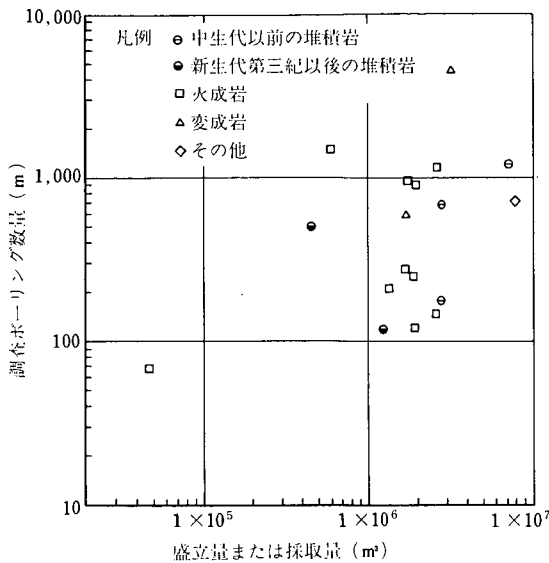
⑥ 変成岩 (M)

これには、片岩、片麻岩、ホルンフェルスなどが含まれ、地質時代としては、本調査の範囲内では中生代以前のものである。

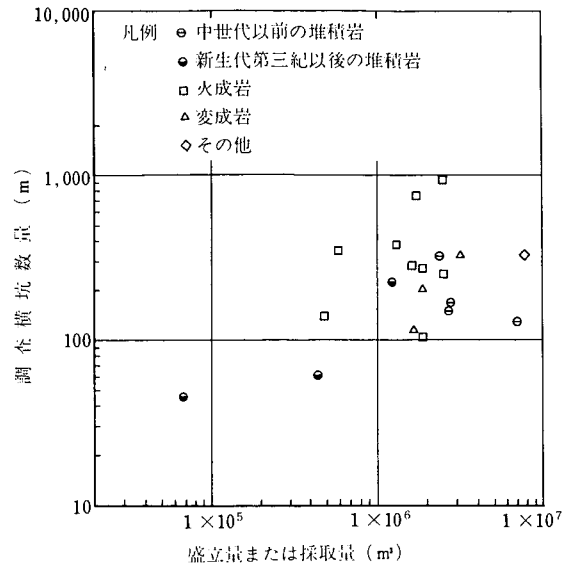
⑦ 第四紀の堆積物 (Q)

これは火山泥流や湖成堆積物を含む。

さて、表-2.3は、表-2.2のダムのロック材料の岩種をリストアップしたものである。ダムサイトの地質は、 S_I から Q まで各種の地質により構成されているが、ロック材の岩種としては、 S_{II} 、 Q は使われていないことがわかる。一般にダムサイト近傍には、ダムサイトの地質に類似した岩種が分布している場合が多い。ロック材の原石山はダムサイトに近いことが一般に経済性の点から好ましいから、ダムサイトの岩種と異なる岩種の材料をロック材としていることは、ロック材の入手に苦勞している場合が多いことを示している。また、ダム基礎が I_{II} であるダムサイトが7箇所あるが、ロック材に I_{II} が使われているのは3箇所であり、 I_{II}



(a) 盛立量と調査ボーリング数量



(b) 盛立量と調査横坑数量

図-2.1 堤体盛立量と調査数量

の地質も原石山をダムサイトの地質とは異なるものに求めている事例が多いことがわかる。また逆に、 $S_I \cdot I_I \cdot M$ などの地質のダムサイト地点では、ロック材の岩種はダムサイトのそれとほとんど同じものを選んでおり、品質の良いロック材が得られ易いことを示している。

$S_{II} \cdot I_{II} \cdot I_{III} \cdot Q$ は、いわゆる軟岩に属しているが、わが国の軟岩地帯は、およそ次のように分類できる⁶⁾。

I) 新第三紀層の堆積岩

- 1) グリーンタフ地域の堆積岩
- 2) 非グリーンタフ地域の堆積岩

II) 第四紀の熔結凝灰岩

III) 風化花崗岩

上記のI)は、 S_{II} と I_{II} を主としているが、そのうちのグリーンタフ地域は、北海道から東北・北陸の日本海側および九州にかけて広く分布し、この地域のロック材は堆積岩からは求めにくく、貫入岩・熔岩などの火山岩が主としてロック材として使用されることが多い。しかし、この地域は、一般に変質（グリーンタフ変質、熱水変質など）が激しく、熔岩でも変質したものが多く、堅硬で耐久性のある大塊は取れにくい場合がしばしばである。非グリーンタフ地域の堆積岩は、房総半島などに典型的に分布しているが、この地域では、まずロックフィル材料は得られず、コンクリート

ダムとしたときの骨材も船等で他地域より運搬されたこともある。第四紀の熔結凝灰岩は、新規の火山活動によるものであり、北海道、東北、九州に多いが、この熔結凝灰岩がロック材として使えるかどうかは、熔結度による。すなわち、低熔結あるいは非熔結のものはロック材料にはならないが高熔結のものはロック材として使えることもある。風化花崗岩は、花崗岩地帯には必ず存在するわけであるが、これは風化部さえ除去すれば新鮮な花崗岩がでるわけで、ロック材としては、風化層の浅い、採取し易い地点を捜せば、問題は解決される。

以上ロック材と地質の関係をまとめると、およそ次のように言えよう。

① ロック材料として適当な岩種

S_I : 中・古生代および新生代古第三紀の堆積岩

I_I : 火成岩類

M : 変成岩(片理面の発達の著しい片岩などを除く)

② 注意して使用すべき岩種

I_{II} : 新生代第三紀の火山性堆積岩

I_{III} : 新生代第四紀の熔結凝灰岩

(熔結度の低いものは特に注意が必要)

③ ロック材としては問題の多い岩種

S_{II} : 新生代新第三紀以降の堆積岩

表-2.3 ダムサイトの地質とロック材料の岩種

ダム名	ダムサイトの地質	ロック材料の岩種						
		中・古生代 および新生代古 第三紀の堆積岩 S _i	新生代新第三紀 以後の堆積岩 S _{ii}	火成岩類 I _i	新生代第三紀 の火山性堆積 岩 I _{ii}	新生代第四紀 の熔結凝灰岩 I _{iii}	変成岩 M	第四紀の 堆積物 Q
1大 雪	S _i , 粘板岩	●粘板岩(砂岩)						
2十 勝	S _i , 粘板岩, 角斑岩	△(粘板岩)		▲角斑岩				
3漁 川	I _{iii} , 熔結凝灰岩					⊗熔結凝灰岩		
4御 所	Q, I _{ii} , 火山泥流, 凝灰岩			□両輝石安山岩				
5白 川	S _{ii} , 凝灰質砂岩			⊠安山岩				
6岩 屋	I _i , 濃飛流紋岩			①石英斑岩				
7寺 内	M, 黒色片岩						△黒色片岩	
8福 地	S _i , 粘板岩	石灰岩						
9樽 水	I _i , 安山岩, 集塊岩			⊕安山岩	◇凝灰角礫岩			
10漆 沢	I _{ii} , 凝灰角礫岩			⊙安山岩, 石英粗面岩				
11七北田	S _{ii} , I _{ii} , 凝灰角礫岩等			▽玄武岩, 粗輝石安山岩				
12前 川	I _{ii} , 火山礫凝灰岩			⊕流紋岩				
13四 時	M, 緑色片岩, 黒色片岩						△緑色片岩, 珸質片岩	
14手取川	M, S _i , 礫岩, 片麻岩	■礫岩					片麻岩	
15三 保	I _{ii} , 凝灰角礫岩			(安山岩)	○凝灰角礫岩			
16広 瀬	M, I _i , 花崗岩, ホルンフェルス			⊙花崗閃緑岩			ホルンフェルス	
17荒 川	I _{ii} , 凝灰角礫岩			⊠安山岩				
18双 葉	I _{ii} , 凝灰岩			▽安山岩				
19武 利	Q, I _{ii} , 河床砂礫, 凝灰岩				◇安山岩質凝灰岩			
20高 瀬	I _i , 花崗岩			▲花崗岩				
21七 倉	I _i , 花崗岩			花崗岩				
22下小島	M, 片麻岩	▽砂岩, 礫岩						
23南 原	I _i , 花崗岩			■花崗岩				
24明 神	I _i , 花崗岩			花崗岩				
25稲 村	M, 片岩類						▷石英片岩(緑色片岩)	
計		5	0	16	3	1	5	0

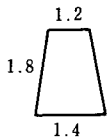
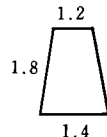
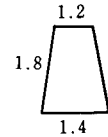
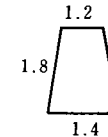
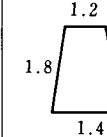
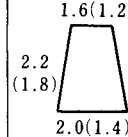
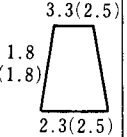
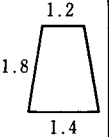
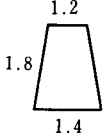
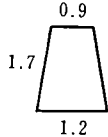
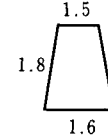
2.3 粒度組成

ロック材料の基本的な設計値としては前述したように、単位体積重量とせん断抵抗角の2つがある。また、単位体積重量とせん断抵抗角の両者間には後述(「4. 三軸圧縮変形と強度特性」)するように密接な関係がある。しかし、また単位体積重量は、「2.4. 単位体積重量」で述べるように締固めエネルギーと材料の粒度組成によって大きく変化するという大きな特徴を有している。したがってロック材料の粒度組成は、表面に現われない重要な設計要素であるわけである。

通常の場合、実施調査段階に調査横坑や堅坑を掘り、材料の粒度調査を行い、実施工時の粒度組成を推定する方法が採用されている。これは、調査段階で実施工時と同様な規模で材料の採取試験を行うことが工程・予算的な面からできないためである。したがって調査段階に得られた粒度分布に関するデータは貴重なものとなる。また、原石山の岩種・岩質が類似な他ダムの施工事例を参考とする場合もある。

表-2.4にロック材料の横坑内採取方法の事例を示す。また、図-2.2にロック材料の横坑内採取粒度の事例を示す。表-2.4より、調査横坑断面寸法には大きな差は

表-2・4 ロック材料の横坑内採取方法の事例

ダ ム 名	有 間	竜 門	竜 門	前 川	七 北 田	三 保	辺 野 喜	三 国 川	岩 屋	七 ャ 宿	寺 山
岩 種	チャート (粘板岩)	花崗岩	花崗岩	流紋岩	複輝石安山岩	火山碎屑岩 (凝灰岩, 安山岩)	粘板岩	斑れい岩	石英斑岩	安山岩	安山岩
地 質 年 代	古生代二疊系	中生代	中生代	第三紀中新世	第三紀中新世	新第三紀	中生代	新生代～古生代	白堊紀末～第三紀	第三紀中新世	新生代第三紀
一軸強度 (kg f/cm ²)	736 ～1080	376	573				1120～1530	200 ～3000	1785～2900		1270～1910
G_b	2.42～2.47	2.51～2.55	2.55～2.58	1.75～2.29	1.79～1.83	2.77～2.83	2.65～ 2.72	2.93～3.03	2.45～2.61	2.56～2.60	1.73～2.69
Q (%)	2.6 ～3.5	1.3 ～2.0	1.0 ～1.3	4.7～17.3	12.3～13.9	0.1 ～2.4	0.3 ～ 1.2	0.2 ～0.9	0.6 ～2.9	2.7 ～3.3	1.1 ～2.1
穿孔長 (m)		1.2	1.2	1.1		1.2 , 1.3	0.8 , 1.3	0.9 ～1.0	0.8	1.2	
穿孔径 (mm)	22	30	30	36		22	32	32			
穿孔本数 (本)		19, 25, 28, 32	20, 26, 27, 28, 30	20, 24	24	20, 24	8, 20	22～26	5	20	9 15
火薬の 種 類	榎 2 号	榎 2 号 桐 3 号	榎 2 号 桐 3 号	榎 2 号	新桐	榎 2 号	榎 2 号	榎 2 号	桐 3 号	ダイナマイト	桐 3 号
全火薬使用量 (kg f)	262	3.8 , 5.0 , 5.6 , 6.0	5.0 , 5.4, 5.6	9.4 , 19.2		104.3, 794.7	8.5 , 4.0	22, 82.3	0.25, 0.75	5	32 138
単位火薬使用量 (kg f/m ²)				4.0 , 8.2		0.92, 1.70	1.8 , 2.0	3.1 , 3.4	0.24, 0.64	推 定 (2.3)	3.8
横 坑 断 面 (幅×高) m											

加
積
残
留
率
(%)

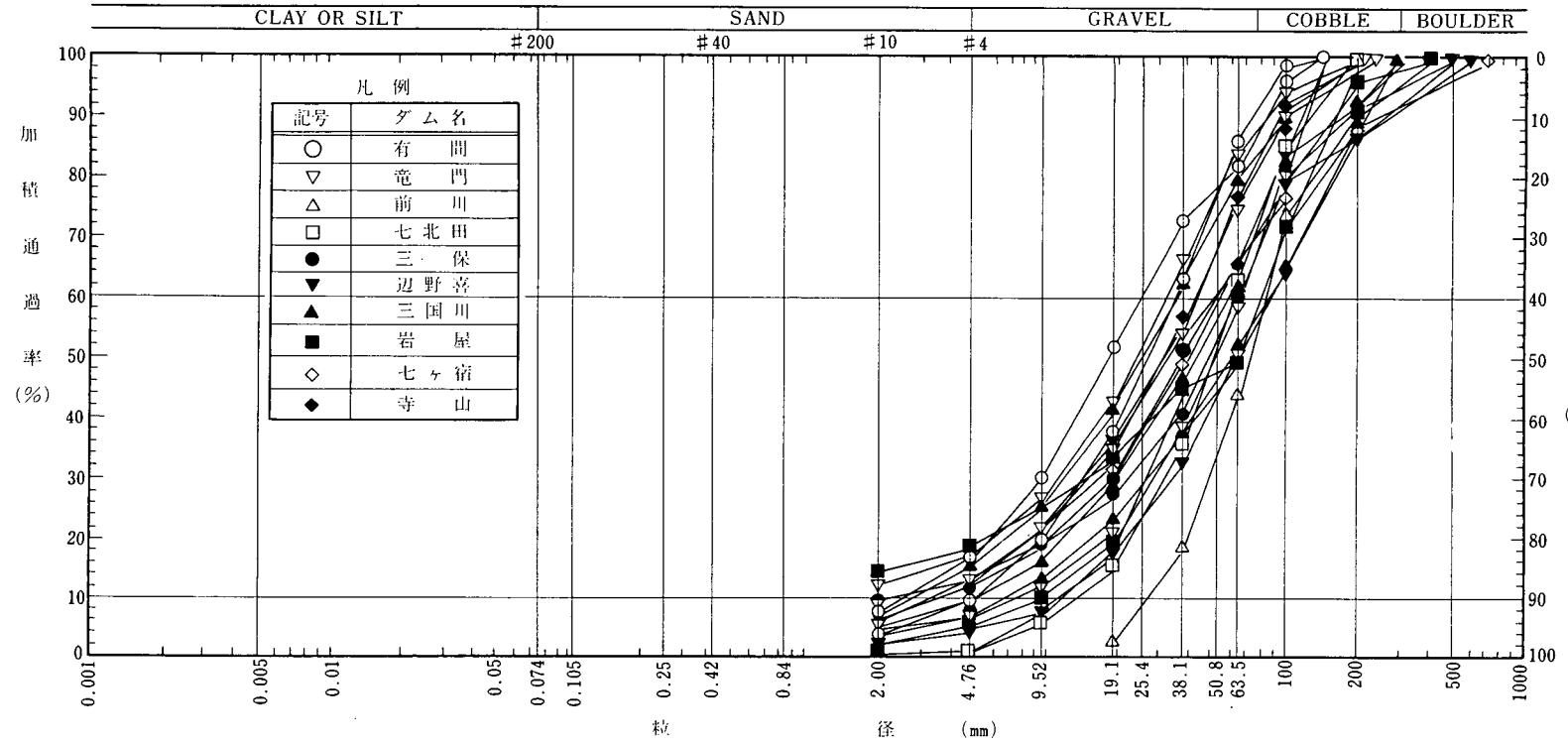


図-2.2 ロック材料の横坑内採取粒度事例

(11)

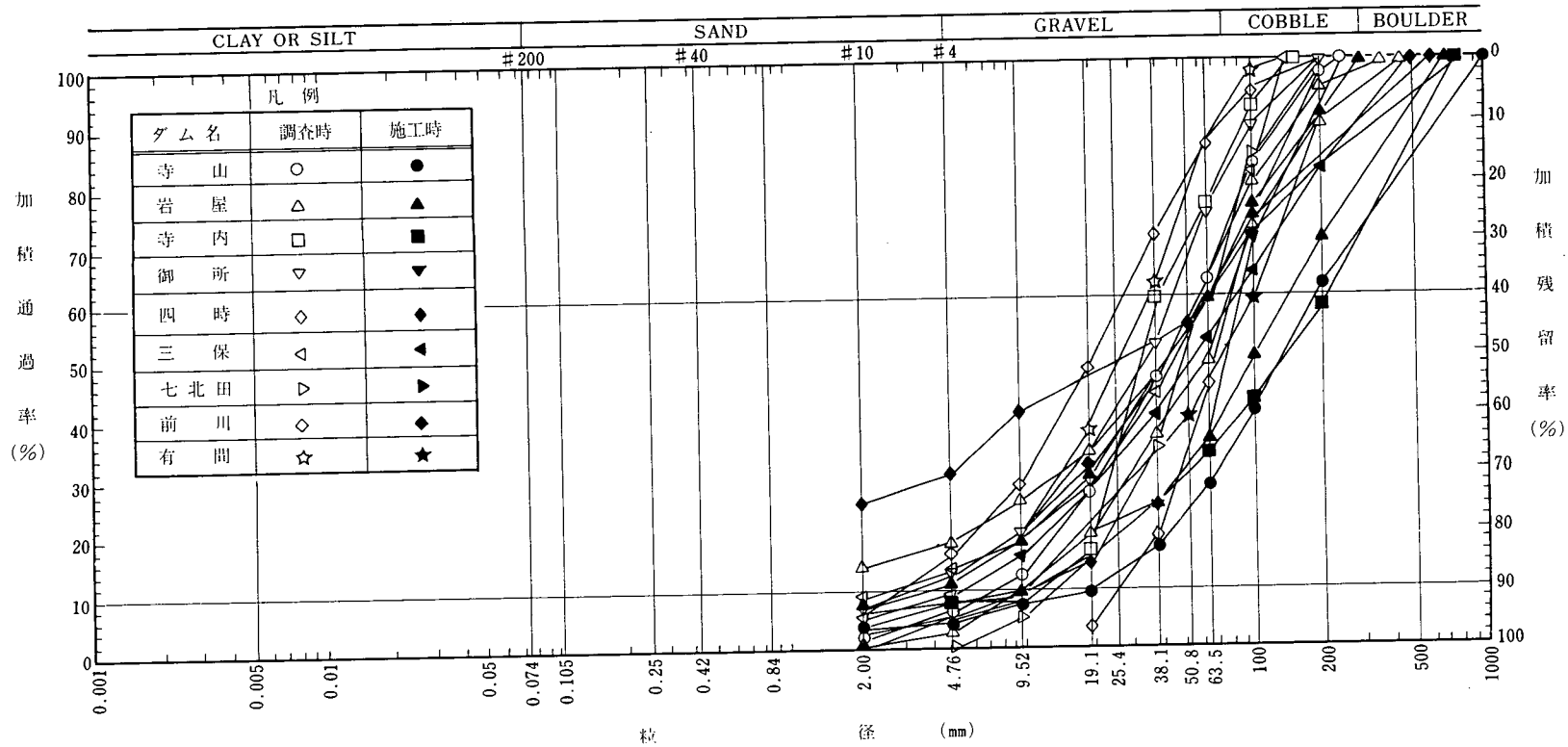


図-2.3 ロック材料の調査時と施工時の粒度比較事例

ない。しかし、採取断面における穿孔本数・単位火薬量に相違が認められる。これらの相違は、原石山の岩質・性状（硬度・クラックの多少等）に合せた穿孔条件（方法）を設定して行ったことに起因していると考えられる。図-2・2の採取粒度の事例と表-2・4を対応してみると、採取方法の相違が採取粒度に明確に反映されていない傾向にある。事例では、最大粒径がほぼ150～700mmの範囲に分布して、4.76mm粒径以下の重量百分率はほぼ20%以下である。また均等係数 U_c （重量加積通過率が10%に対応した粒径で60%に対応した粒径を除した値）は、事例のほとんどが、7～20の範囲にある。しかし、他ダムの場合に比較して絶対比重 G_b が小さくて吸水率 Q の大きい前川ダム・七北田ダムの場合には $U_c=3\sim4$ と小さな均等係数の粒度組成となっている。竜門ダムでは、穿孔本数・火薬量が採取粒度分布に与える影響比較試験を実施したが、均等係数に顕著な差違が認められていない（図-2・2の▽記号の分布範囲）。以上の事例から判断すると、通常のロック材料の場合には、採取時条件（穿孔本数・火薬量等）に比較して材料採取箇所の地質条件によって採取時粒度が支配されていることが考えられる。

図-2・3に9ダムについて調査した、ロック材料の調査時（調査横坑内）と施工時（品質管理試験の平均的分布）の粒度比較事例を示す。

9ダムのうち、5ダムの事例では、調査時の粒度曲線と施工時の粒度曲線には強い相似性が認められる。しかし、残りの4ダム（寺内・四時・七北田・前川）の事例では、調査時の均等係数に比較して施工時の均等係数の方が約6～48倍と大きく、幅広い粒径範囲の粒度組成となっている。4ダムについて前述した「2.2 材料調査と選定」で分類した岩種と対応してみると、寺内・四時ダムの場合には変成岩（ M ）、七北田・前川ダムの場合には火成岩類（ I_1 ）であり、いずれもロック材料として適当と判断される材料である。4ダムの事例にみられるような差違が現われた原因については不明であるが、原石山の地質状態に影響されて調査時粒度組成よりも施工時粒度組成の方が小さな粒径から大きな粒径までの幅広い粒径範囲で構成される傾向にあることを示唆しているものと考えられる。

施工時の材料最大粒径寸法は、施工管理基準の中で規定しているダムもあるので人為的なものと原石山での採取時の原粒径そのままの場合がある。しかし、巨視的には、異なるダム間（異なるロック材料）での粒度分布曲線を比較してみると、かなり強い相似性が認められる。前述した、横坑内採取粒度と現場施工時粒

度の事例データから材料の D_{20} 粒径（粒径加積通過率20%に対応している粒径サイズ）より大きな粒径範囲での加積通過率の特性を平均的に近似すると式（2・1）のように表わすことができるものと考えられる。

$$P = \frac{d}{\frac{d_{\max}}{1000} + 0.009d} \quad \dots\dots\dots (2\cdot1)$$

d : 粒径 (mm)

$d_{\max}$: 最大粒径 (mm)

P : d 粒径の加積通過率 (%)

一般に、原石山での材料採取にはベンチカット工法が採用されている。表-2・5にベンチカット工法の事例を示す。図-2・4に穿孔間隔とベンチ高さの事例を示す。

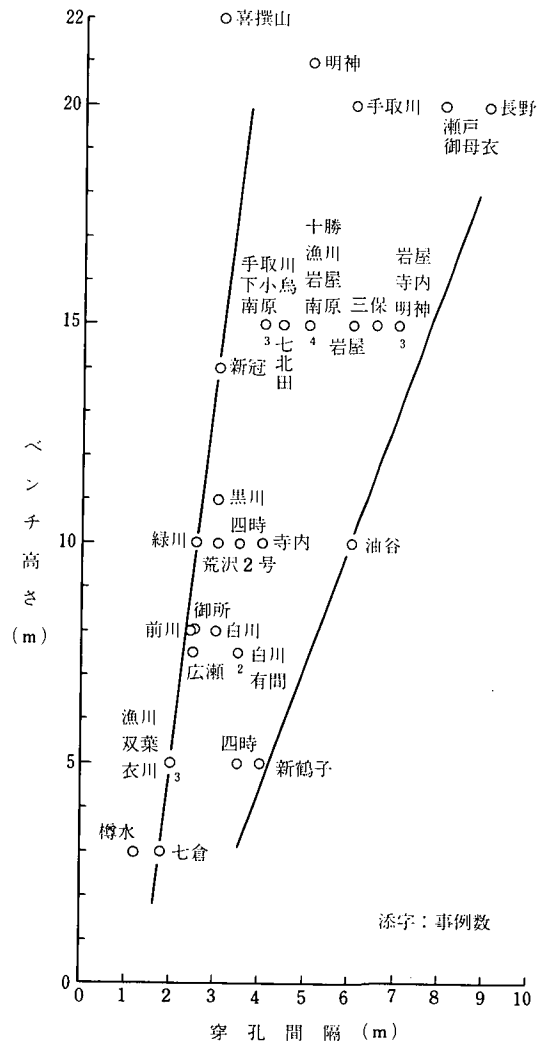


図-2・4 ロック材料のベンチカット工法における穿孔間隔とベンチ高さ

事例では、穿孔間隔は1～8m程度の範囲である。ベンチ高さは3～22mと大きな差があり、原石山の形状・採取量および施工計画の相違によるものと考えられる。しかし、単位薬量はほとんど0.2-0.4kgf/m³の範囲にありほぼ一定した値を示している。

図-2・5に最近のロック材料施工粒度分布の事例を示す。

以上、ロック材料の粒度組成の特徴についてまとめるとおおよそ以下のものであろう。

① 横坑内で採取調査して得られた粒度分布曲線と

実施工事の粒度曲線には、比較的に強い相似性が認められる。

② しかし、原石山の材質の分布状態によっても異なるが、調査時粒度組成に比較して施工時粒度組成の方が広い粒径範囲で構成される（均等係数が大きい）傾向にある。

③ また、原石山の材料品質の良否・キレツ性状によつては、採取方法（ベンチの規模・火薬量・穿孔間隔等）が採取粒度組成に影響を与えることも十分に考えられる。したがって、調査時点におい

表-2・5 ベンチカット工法によるロック材の採取事例（その1）

ダム名	新鶴子	衣川	有間	荒沢2号	前川	七北田	三保
岩種	安山岩	熔結凝灰岩	チャート(粘板岩)	石英粗面岩	流紋岩	複輝石安山岩	火山碎屑岩(凝灰岩, 安山岩)
地質年代			古生代二疊系		第三紀中新世	第三紀中新世	新第三紀
孔間隔 (m)	4	2	3	3	2.4	4.4	6.5
薬量 (kgf)	276.7	9,000	20	164	14.4	350	250
単位薬量 (kgf/m ³)	0.3	0.3	0.25	0.15	0.34	0.31	0.213
火薬の種類	3号桐ANFO	3号桐ANFO	3号桐ANFO	3号桐ANFO	ANFO	ANFO	あかつき, ANFO
ベンチ	高さ (m)	5	5	7.5	10	8	15
	巾 (m)	10	10	9	9	2.4	4.3
	長さ (m)	20	70	21	12	2.4	17.6
せん孔機	CD-8	クローラードリル	CD-8	クローラードリル	DC-8	DC-8	ドリルマスター(T-4)
せん孔径 (mm)	100	65	100	65	90~105	100	165
せん孔長 (m)	5.6	6	8	12.5	8.3	18	17.1

表-2・5 ベンチカット工法によるロック材の採取事例（その2）

ダム名	四時	漁川	御母衣	緑川	御所	広瀬	明神
岩種	緑色片岩	熔結凝灰岩	花崗岩	砂岩, 頁岩	両輝石安山岩	花崗閃緑岩ホルンフェルス	花崗岩
地質年代	古生代	第四紀洪積世		中生代	新生代第三紀	中生代	中生代
孔間隔 (m)	3.5	2, 5	8~12	2.5	2.5	2.5	5~7
薬量 (kgf)		108, 101.5	162, 829				456, 490
単位薬量 (kgf/m ³)		0.36	0.301			0.34~0.38	0.33
火薬の種類	ダイナマイトANFO	3号桐ANFO	アンモンTNT		3号桐ANFO	ANFO	ANFO
ベンチ	高さ (m)	10	5, 13	15~25	10	8	7.5
	巾 (m)	4.5	3.8, 5		6	5	10
	長さ (m)	28~35				140~160	45
せん孔機	CD-8	クローラードリル	ビスサイラスCo. 50-R		CD-6	クローラードリル	ブラストホールドリル
せん孔径 (mm)	100	65, 165	250		38, 65	65, 66	165, 200
せん孔長 (m)	11.5	6, 15	22		9.3	8.1	17~23

(14)

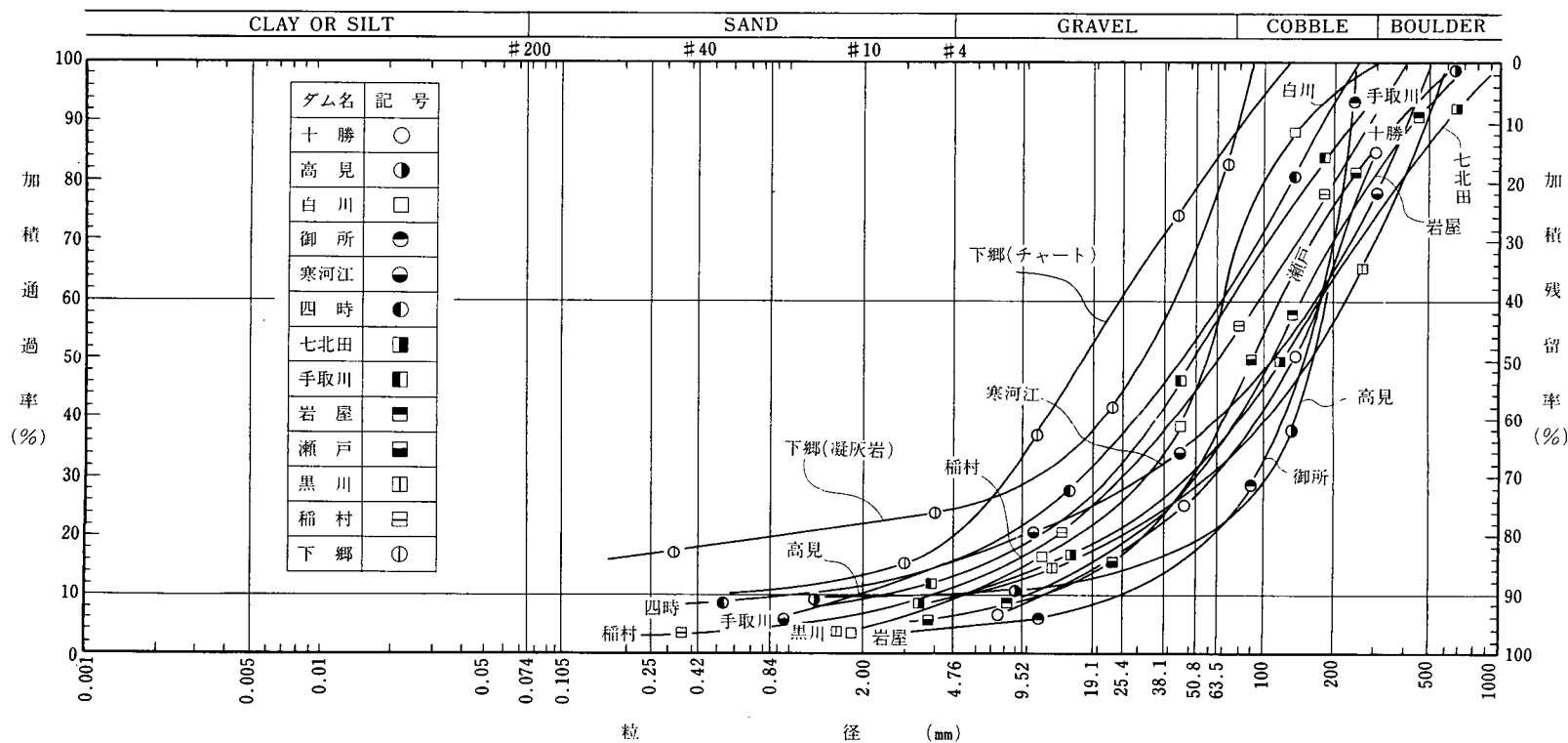


図-2.5 ロック材料の施工粒度分布事例

表-2.5 ベンチカット工法によるロック材の採取事例（その3）

ダ ム 名		南 原	長 野	新 冠	寺 内	岩 屋
岩 種		花崗岩	凝灰岩 砂岩	チャート、輝緑凝灰岩 粘板岩、砂岩	結晶片岩 (黒色片岩)	石英斑岩
地 質 年 代		中生代	中生代		古生代二疊紀	白亜紀末-第三紀
孔間隔 (m)		4	9		4, 6.5, 7	5, 6 ~7
薬 量 (kgf)		285,432	720,000			591,009
単位薬量 (kgf/m ³)		0.21	0.42			0.236
火 薬 の 種 類		ANFO	TNT ANFO	3号桐 ANFO	ANFO	3号桐 ANFO
ベン チ	高 さ (m)	15	20	14	10, 15	10 ~15 15 ~20
	巾 (m)					5
	長 さ (m)					
せ ん 孔 機		CD-8	クローラー ドリル		クローラードリルマスター CD-8, DC-45	TYCD-10 CD-8
せん孔径 (mm)		100	250		115, 165	100 ~165
せん孔長 (m)		17.9	20~25		13, 17	16.5 ~17.2

て対象材料の粒度分布の変動範囲についても検討・考慮しておくことが必要である。

- ④ 施工事例図-2.5より、最大粒径は100~1000mm程度、加積通過率60% (D_{60}) 粒径が40~200mm程度、4.76mm粒径以下の含有率が20%程度以下の粒度組成範囲の材料がロック材料の粒度組成となっている。

2.4 単位体積重量

ここでは単位体積重量を2分類し、堤体の設計計算に用いる単位体積重量を設計単位体積重量といい、転圧施工した時の単位体積重量を施工単位体積重量と呼ぶことにする。

ロック材料は粒度組成が同じでも、単位体積重量が異なると強度・変形性・排水性が異なったものになる。したがって単位体積重量は堤体設計および施工のうえで重要な値である。また、単位体積重量は粒度組成と施工条件によって大きく影響される。

調査・設計段階ではまず本体施工時の材料条件を精度良く推定して施工可能な設計単位体積重量について検討する必要がある。設計単位体積重量が精度良く設定できれば、その単位体積重量を中心とした力学的な試験等を実施して実施設計に反映されることになる。

一般に、本体盛立工事の直前に材料の設計単位体積重量の施工性の確認、施工基準（まき出し厚さ、転圧機種、転圧回数等）を決定する目的で現場盛立試験が実施される。

調査時期に本工事と同様な材料採取・転圧方法による現場試験ができれば、これが最も精度の良い単位体積重量値である。しかし、実際には、調査時期に本工事と同じ条件・方法で試験することができない。したがって、調査横坑等から採取した試料を用いて室内試験を行って適切な設計単位体積重量を設定しなければならない場合が多い。

室内試験と現場施工で大きく異なる点は、①室内と現場の粒径範囲を同じにできない場合が多い、②室内と現場での締固め方法を同じにできない、等である。①については、原粒径を室内で試験可能な粒径範囲まで小さくした相似粒度組成（原粒径範囲全体を n 分の1にする）について試験している場合が多い。②については、現場転圧施工による単位体積重量と同じ単位体積重量を室内試験で得るための相当仕事量を知るために、一般に突固め方法による室内試験が行われている。しかし、土質試験⁷⁾の場合のように統一された試験方法が定められていないのが現状である。

ロック材料の締固め特性に与える主な要素としては粒子形状・粒子強度・粒度組成・締固め仕事量・モールドの大きさ（室内試験の場合）・施工機械（現場の場合）・締固め方法等が考えられる。通常のロック材料について行った室内突固め試験・室内振動締固め試験および現場盛立試験結果から判断すると、粒度組成（均等係数）が締固め単位体積重量を大きく支配しているものと考えられる^{8) 9)}。

図-2.6に試験方法による均等係数と空隙比の関係に

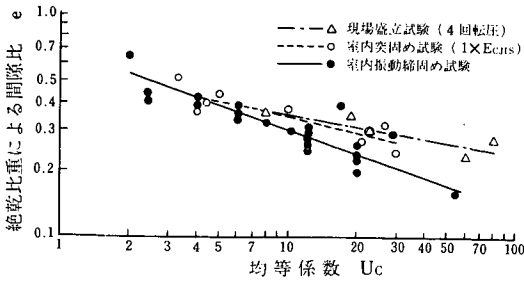


図-2-6 試験方法による均等係数と間隙比関係の比較

表-2-6 現場盛立試験仕様

ダム名	転圧機械	まき出し厚 (m)
寺内	21t. 振動ローラ	1.5
七北田	15t. 振動ローラ	1.0
四時	13.5t. 振動ローラ	1.0
手取川	"	1.2
保村	"	1.0
稲村	"	1.0
	"	1.5

表-2-7 現場盛立試験試料

ダム名	岩種	絶乾比重 G_s	吸水率 $Q(\%)$	均等係数 U_c	最大粒径 $D_{max} (mm)$
寺内	黒色片岩	2.660	0.6	17	600
七北田	複輝石安山岩	2.038	6.8	19	300
四時	緑色片岩	2.894	0.7	8	170
手取川	片麻岩、礫岩	2.575	1.54	60	200以上
三保	角礫凝灰岩	2.586	1.0	80	200
稲村	石英片石	2.68	0.5	23	400

ついでに比較を示す。なお、図中の直線は、最小二乗法により求めたものである。現場盛立試験は、表-2-6および表-2-7に示す仕様・試料について行った結果である。室内突固め試験は、表-2-8および表-2-9に示す仕様・試料について行った結果である。また、室内振動締固め試験は、表-2-10および表-2-11に示す仕様・試料について行った結果である。図-2-6より、3種類の異なる試験方法とも材料の均等係数値が小さなものに比較して大きな方が小さな間隙比状態の密度に締固まる傾向が現われている。図-2-6のデータより、材料の均等係数 U_c が締固め間隙比を支配すると仮定すると両者の関係を式(2.2)のように表わすことができるものと考えられる。

$$e_b = a \cdot U_c^b \quad (2.2)$$

e_b : 絶乾比重¹⁰⁾による間隙比

U_c : 材料の均等係数 (D_{60}/D_{10})

a および b : 締固め試験から求める定数

ここで、ロック材料の締固まり特性は、締固め方法が一定の場合には、式(2.2)の関係があるとする。

式(2.2)の関係をを用いて同じ単位体積重量に締固めるための室内突固め仕事量と重機による転圧回数を下記に示す手順・方法により求めた。

- ① 室内突固め試験データより突固め仕事量($1 E_{cjs}$ の n 倍)別に均等係数と突固め間隙比の関係を式(2.2)として最小二乗法を用いて求める。
- ② 現場盛立試験データより同じ転圧回数別に均等係数と締固め間隙比の関係を式(2.2)として最小二乗法を用いて求める。
- ③ 着目する材料の均等係数を①の結果に代入して突固め仕事量に対応した間隙比を求める。

表-2-8 室内突固め試験仕様

ダム名	材 料	モールド			ランマ			突 固 め		
		直 径 (cm)	高 さ (cm)	容 積 (cm)	重 量 (kgf)	落 下 高 (cm)	直 径 (cm)	層 数	回 数	仕 事 量*
寺 内	黒 色 片 岩	30.0	35.4	25,000	10.0	75.0	10.0	5		0.5, 1.0, 1.5 2.0, 4.0
七北田	安 山 岩 ①							5	139	1.0
"	安 山 岩 ② 玄 武 岩	30.0	35.4	25,000	4.5	45	5	3	139	0.6 0
四 時	緑 色 片 岩	55.0	60	142,550	15.0	100	10	3		0~3.2
三 保	角 礫 凝 灰 岩	30.0	35.4	25,000	4.5	45.0	5.0	5	139	(0.7 ~ 1.0) 1
稲 村	石 英 片 岩	30	35.4	25,000	10	50	10	5		0.5, 1 2, 3

* J I S A 1210第1法 ($E_c \approx 5.6 \text{ cmkgf/cm}^2$) を1とする。

表-2.9 室内突固め試験試料

ダム名	岩 種	均等係数 U_c	絶乾比重 G_b	吸 水 率 (%)	最大粒径 (mm)
寺 内	黒色片岩	3.3	2.70	0.6	63.5
七北田	安山岩①	4.1	1.825	13.8	80
〃	〃 ②	30.0	1.953	11.0	63.5
〃	玄 武 岩	4.4	2.712	2.5	〃
四 時	緑色片岩	5	2.99	0.57	76.2
〃	〃	10	〃	〃	〃
〃	〃	20.8	〃	〃	〃
三 保	角礫凝灰岩	23	2.795	1.03	60
稲 村	石英片石	27	2.68	0.6	63.5

表-2.10 室内振動締固め仕様

項 目	条 件 お よ び 方 法
絶 乾 重 量	78kgf (試料重量)
振 動 数	30Hz
振 動 時 間	480 sec / 層
層 数	6層 (1層約10cm)
締固めエネルギー	振動時の加速度は起振モーターの偏心重錘重量 (枚数) を変化することにより調整する。試験加速度 4 g
最 大 粒 径	試験試料の最大粒径は63.5mmとする。
モ ー ル ド	内径30cm・高さ60cm

④ ②から、③で着目した均等係数に対応した転圧回数別の間隙比を求める。

⑤ ④から、転圧回数と間隙比の関係図を作成して両者の関係より③で求めた突固め仕事量別の間隙比に対応した転圧回数を求める。

図-2.7に同じ単位体積重量が得られる13.5トン振動ローラーの転圧回数と室内突固め試験仕事量(J I S A 1210第1法の $E_c \div 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^2$ を1 E_{CJIS} とする)の関係で整理した結果を示す。図中の直線式は転圧回数と E_{CJIS} の倍率の関係を1次式の関係として最小二乗法により求めたものである。

データ数が少なくバラツキがあるが、図-2.7よりまき出し厚さが1.0~1.25mで13.5トン振動ローラーによる転圧回数6回で得られる密度は、室内突固め試験で1.9× E_{CJIS} に相当するエネルギーによって得られる単位体積量にほぼ等しいものと考えられる。また、材料の敷均し作業(転圧回数が零回)により加えられるエネルギーは0.4× E_{CJIS} 程度であると考えられる。

図-2.8に、表-2.6および表-2.7に示した仕様・材料で実施された、現場盛立試験時の転圧回数と間隙比の関係を示す。図-2.8の事例にみられるように、転圧回数が4回程度までは間隙比の低下は著しい(単位体積重量が増加する)が6回以上になっても多くの材料で

表-2.11 室内振動締固め試験試料

ダム名	岩 種	均 等 係 数 U_c	平均絶乾比重 $\bar{G}_b$	平均吸水率 $Q(\%)$
前 川	流 紋 岩	2.4	1.880	13.9
			2.201	6.9
白 川	緻 安 山 密 岩	17	2.611	1.0
御 所	安 山 岩	20	2.056	9.2
		6	2.053	9.1
竜 門	花 崗 岩	28	2.763	0.8
		4	2.744	0.8
	花 崗 岩	28	2.763	0.8
	流 紋 岩	2	2.452	2.1
		12	2.486	2.3
七ヶ宿	風 流 紋 化 岩	6	2.435	3.45
	石 安 山 英 岩	20	2.473	4.16
	閃 緑 岩	12	2.612	2.2
		20	2.588	2.6
			2.632	2.2
寒河江	玄 武 岩 (半風化)	12	2.676	2.2
		12	2.722	2.2
	玄 武 岩	20	2.604	4.8
		20	2.701	2.8
三国川	斑 れ い 岩	20	2.923	0.6
		12	2.952	0.8
		6	2.919	0.7
		4	2.919	0.8
	斑 れ い 岩	10	2.965	0.6
		8	2.967	0.5

[注] 試料最大粒径は63.5mm

は、それほど間隙比が低下しない傾向にある。

以上の事例試験にみられるように、ロック材料の締固め特性は、粒度組成・締固め方法・転圧回数(又は締固め仕事量)により締固め後の単位体積重量が変化する。一般にロック材料の盛立工程は、採取→運搬→ダンブ→まき出し→転圧の順番に行われる。そこで、ここでは、ダンブ→まき出し後の単位体積重量と転圧された後の単位体積重量の関係がおよどの程度なのか転圧に用いた機種別にみている。

図-2.9に盛立試験で得られたまき出し後と転圧後における絶乾比重による間隙比の関係の事例を示す。図

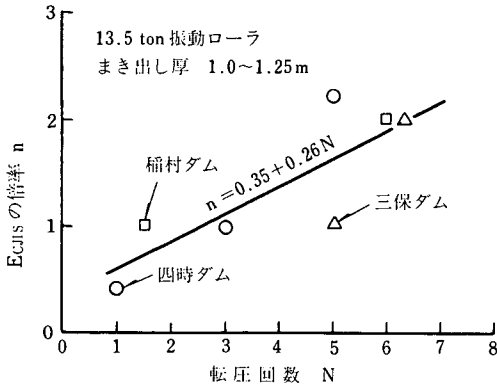


図-2-7 盛立試験の転圧回数と室内突固め試験の突固めエネルギーの関係

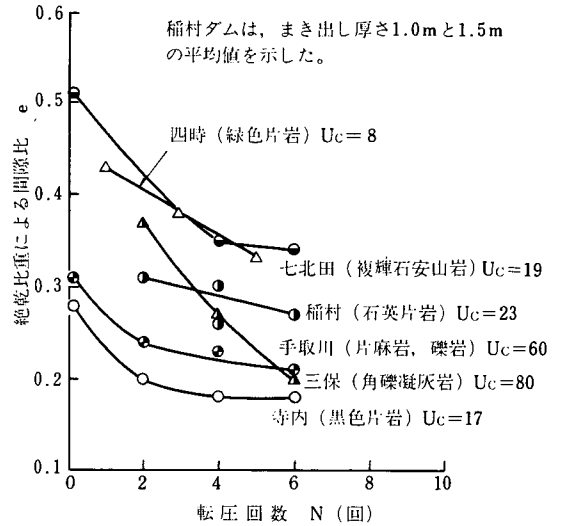


図-2-8 現場盛立試験で得られた転圧回数と間隙比の関係

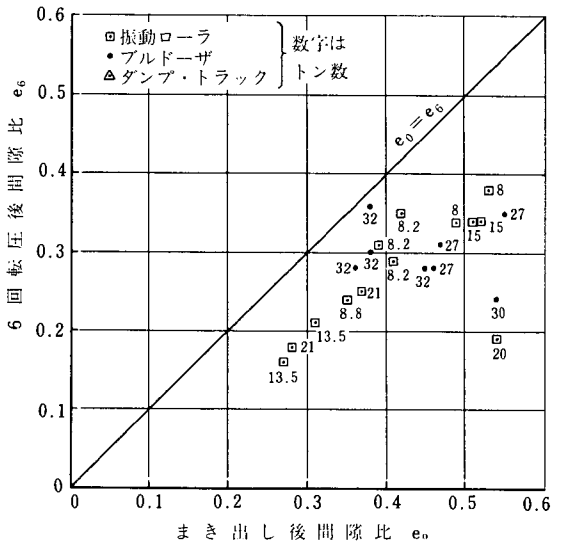
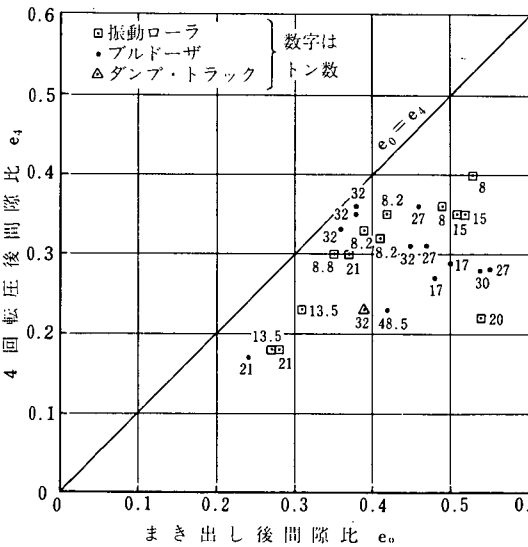


図-2-9 盛立試験で得られたまき出し後と転圧後の間隙比

-2-9の事例では、まき出し厚さは0.5~2.0mの範囲にあるがほとんどが1m程度の場合である。事例では、8~15トン級の振動ローラで4~6回転圧することによって、まき出し後の間隙比の8割前後の間隙比に締固まる傾向が認められる。また、まき出し後の間隙比が小さければ締固め後の間隙比も小さく、また同様に大きければ大きい傾向にある。

図-2-10に現場施工管理試験で得られた均等係数と絶対比重により求めた間隙比の関係を示す。事例では、13トン級以上の振動ローラで4~6回転圧の場合が多

い。図中には、図-2-6に示した直線（実験式によるもの）を重ねて示してある。室内締固め試験と施工実績密度の關係に着目してみると、事例のほとんどが室内突固め試験で1 E_{cu} の仕事量で得られた間隙比より小さな間隙比（高い単位体積重量）の単位体積重量となっている。また、13事例のうち7事例では室内振動締固め試験より得られた実験式の直線より小さな（下方側）間隙比状態の単位体積重量に締固め施工されている。

一般に、比重が小さく吸水率の大きな材料を室内締

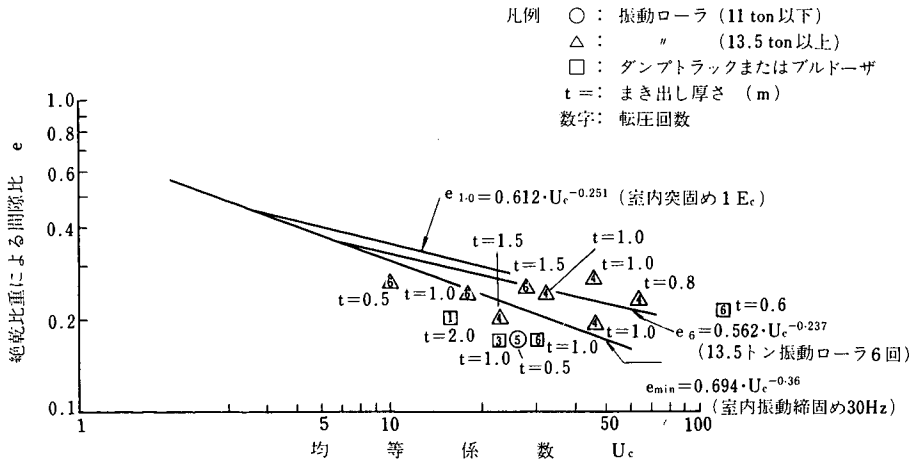


図-2.10 均等係数と間隙比関係 (施工実績)

固めおよび現場で締固めた場合に粒子破砕が多く生じる場合がある。粒子破砕が多く生じると、初期粒度組成が変化して、締固め・転圧後の単位体積重量に影響を与える場合があるので注意が必要である。しかし、通常のロック材料では粒子破砕が少なく粒度組成が大きく変化する場合が少ない。したがって、上述した事

例等にみられるロック材料の締固め特性を把握しておくことによって室内試験によって信頼性の高い施工可能な設計単位体積重量を設定することができるものと考えられる。

近年では、ロックゾーンの締固めは重機転圧により施工されており、一般に高い締固め密度が得られることから振動ローラが用いられている。

表-2.12に、図-2.5に示したロック材料の施工粒度分布事例に対応した、ロックゾーン転圧機械の事例を示す。

表-2.12 ロックゾーンの転圧機械の事例

ダム名	透 水 ゾ ー ン			
	転 圧 機 械	まき出し厚	締 固 め 数	走行速度
十 勝	ブルドーザ 32t (D155A)	1.0 m	4	km/hr 3
高 見	振動ローラ 13.5t (SAW185)	1.0 1.5	4	
白 川	振動ローラ 8.2t (BW210)	仕上り 1.0	6以上	3以下
御 所	振動ローラ 21t (SP60)	0.5	6	2
寒 河 江	振動ローラ 18t (SP60)	1.5仕上	6以上	3以下
四 時	振動ローラ 13.5t (SAW185)	1.0仕上	4	2
七 北 田	振動ローラ 15t (BW151)	仕上り 1.0	4以上	2
手 取 川	振動ローラ 13.5t (SAW185)	0.6~ 1.5	4 ~ 6	2
岩 屋	載荷32t ダンプ (HD320)	2 以下	1以上	
瀬 戸	振動ローラ 15t (BW15A)	1.0	4	
黒 川	振動ローラ 13t (CH60)	1.0~ 1.5	2以上	
稲 村	振動ローラ 13.5t (CH60)	1.2	6	2
下 郷	振動ローラ 21t (SP60)	1.0	4	2

2.5 材料試験

ロック材料の試験は、実施する時期により、調査段階の試験、設計段階の試験、施工管理段階の試験に分けられる。調査段階の試験は、材質を判定することが主目的であり、岩石試験が主体をなす。設計段階の試験は、粒度試験、締固め試験、せん断強度試験が中心で、ロック材料の主な設計値である単位体積重量とせん断強さを決定する。施工管理段階の試験は、主として現場密度試験により設計値が満足されているかどうかを確認するものである。

2.5.1 調査段階の試験

調査段階の試験は、候補の原石がロック材料として望ましい材質、すなわち堅硬で耐久性があり、かつ締固めた状態でせん断強さが大きく排水性の良いものであるかどうかを判断するのが目的であるので岩石試験が主体となる。岩石試験としては、比重・吸水量および一軸圧縮試験が一般的で、この他に材料によっては耐久性を知る目的で、安定性試験、凍結融解試験、すりへり試験、風化試験などを実施されるが、今のところ、耐久性試験については標準となるものではなく、種

々の試験結果を総合して判断している。

ロック材料の比重試験については、ロック材料に大小の粒径が含まれているので、粒径に応じて試験方法を変えているのが普通である。例えば、4.76mm以上の粒径については、コンクリート用骨材のうち粗骨材料の試験方法 J I S A 1110、4.76mm以下の粒径については、土粒子の試験方法 J I S A 1202を適用する。

また、粒径の大きな粒子の比重は、岩石内の空隙の体積の評価および空隙内の水の含有状態により、真比重 G_R 、表乾比重 G_a 、および絶乾比重 G_b の三種が次式により定義され、吸水率も求めておく。

$$G_R = \frac{A}{A - C} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$G_a = \frac{B}{B - C} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに、

A : 絶乾重量

B : 表乾重量

C : 水中重量

$$G_b = \frac{A}{B - C} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Q = \frac{B - A}{A} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

また必然的に、比重と吸水率の間には式 (2.7)・

$$G_b = \frac{1}{Q + \frac{1}{G_R}} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$G_a = (1 + Q) G_b \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

式 (2.8) の関係がある。しかし、合成比重としての各比重が上式に従うのは、下記の合成比重・合成吸水率とした場合である¹¹⁾。

$$G = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{G_i}} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q = \sum f_i \cdot Q_i \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ただし、 G : 着目した比重による合成比重

f_i : 各粒度階における残留率

$Q_i \cdot G_i$: 各粒度階における吸水率・比重

一軸圧縮強度は通常、J I S M 0302に準拠して実施され、供試体径は、66mmのボーリング孔より得られた、径50mm程度のものをを用いることが多い。

以下、表-2.2のダムにおける比重、吸水率および一軸圧縮強度の事例を示す。図-2.11は、表-2.2のダムで調査時の候補材料の絶乾比重と吸水率を示したものであるが、吸水率の多いBのグループの材料は、調査さ

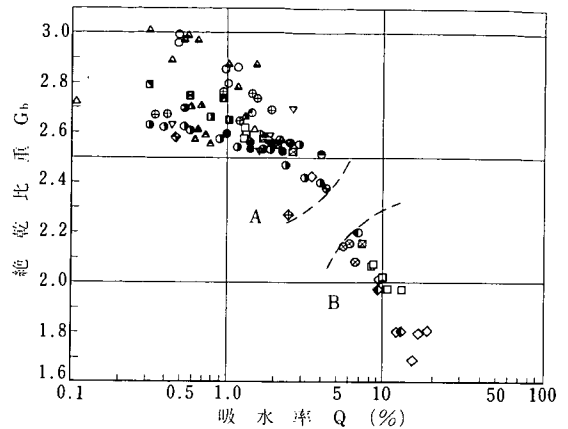


図-2.11 岩石の絶乾比重と吸水率

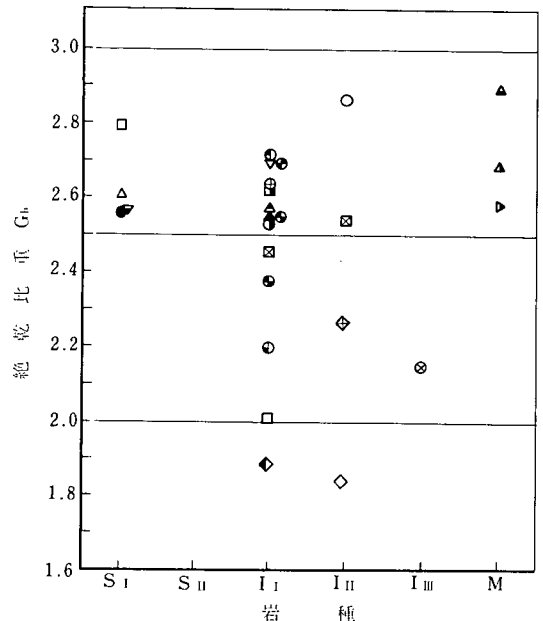


図-2.12 岩種別の絶乾比重

れただけで現実には使われていないか、又は内部ロックとして使用されたものである。図-2.12は、岩種別のロック材料の絶乾比重を示したものである。これによるとS I・Mの岩種は絶乾比重が2.5以上あり、空隙が少ないことがわかる。図-2.13は、岩種別の一軸圧縮強度を示している。図-2.14は、一軸圧縮強度と吸水率の関係を岩種区分が分かるようにして表示したものである。図-2.14によると、古期堆積岩を除いては、吸水率が小さいほど一軸圧縮強度が大きい。この事例における古期堆積岩は、ややもまれた粘板岩であるために、吸水率が小さい割には強度が小さかったわけである。

以上の事例およびその他の経験をまとめると、ロッ

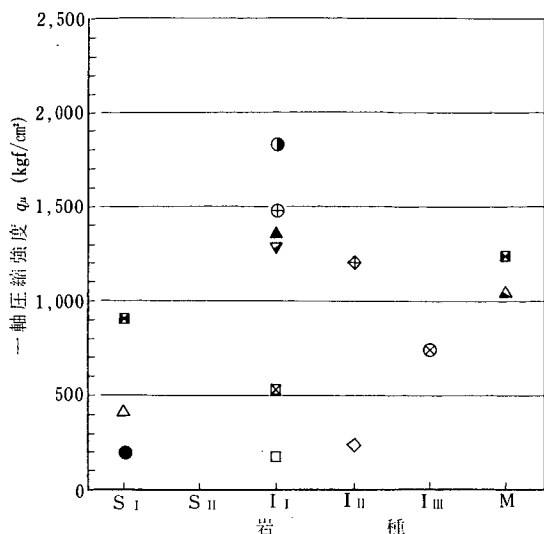


図-2-13 岩種別の一軸圧縮強度

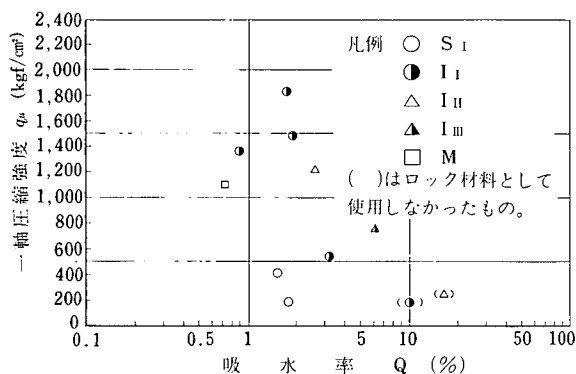


図-2-14 岩石の一軸圧縮強度と吸水率の関係

ク材料の調査時における材質のめどとしては、絶乾比重が2.3以上、吸水率が5%以下、一軸圧縮強度250kgf/cm以上というあたりであり、中でも絶乾比重2.5以上、吸水率2%以下、一軸圧縮強度500kgf/cm以上のものは、良好な材料の特性を持っていると言える。

ロック材料の耐久性については、重要な問題であるが、現在のところ決め手となる試験方法は確立されていない。フィルダムの堤体を使用した岩石が劣化する要因としては、温度変化、凍結融解、水浸・乾燥の繰り返し、拘束応力、表面の目射や風雨および特殊な場合として浸透水中の化学物質の作用などが考えられる。これらの要因について、まだきちんと調べられているわけではないが、堤体内部では外部よりも劣化させる度合は小さいことは間違いない。したがって、外部に配置する材料については良好な材料を配置することが設計の原則である。

材料の劣化の原因は、原石内の空隙あるいは微小き

れつが、乾湿繰り返し・凍結融解により徐々に開き、物理的に細粒化するものと、岩石が、熱水変質や続成作用により、岩石内に粘土鉱物を有しており、これが、掘削による応力開放、含水変化など採取後の環境変化により細粒化・粘土化する場合がある。後者の恐れのある岩石は火山岩系統に多いが、そのような場合にはX線回析や偏光顕微鏡観察を行い、粘土物質の種類と含有量を調べるべきである。

凍結融解試験および硫酸ナトリウムによる安定性試験は、岩石内の空隙を膨張させる強度試験の一種であり、損失重量が少ないほど好ましいことには違いないが、ある値より大きかったらロック材として不適ということでもない。ただ、リップラップ材の場合には、凍結融解試験で、108サイクル目の重量損失10%以下のものを適切にリップラップ材とする判断事例もある¹²⁾。

現場における手軽で確実な耐久性試験は、曝露試験である。これは、横坑などから採取した原石を現地の自然環境下に曝露し、1~2年観察し、定期的に粒度、比重、点載荷強度、動弾性係数などを測定するものである。

2.5.2 設計段階の試験

現在のフィルダムの設計法では、せん断強度が法面勾配に大きく影響することはもちろん、単位体積重量（厳密には飽和重量と水中重量の差）も上流法面勾配に大きく影響する。また、せん断強度も単位体積重量に影響されるから、ロック材料の設計単位体積重量の決定は、全体として設計に大きな影響を持つ。

ロック材料の単位体積重量は、室内締固め試験により推定し、最終的には現場盛立試験により確認する。現場盛立試験は、本工事が始まらないと実施はかなり困難であるから、調査・設計時においては、室内締固め試験および類似ダムの事例をもとに単位体積重量の設計値を定めることになる。

ロック材の室内締固め試験は、今のところ標準的な規格はない。締固め方法は、振動によるものとランマ落下による突き固めの2方法が主であり、このうち振動による方法は、粒子の破壊が少なく粒度変化は少ないが、締固め仕事量の算定方法がなく、相互の比較が難しい点が難点である。

汎用性の点では現在のところランマ落下による突固め方法が採用されている場合が多い。したがってランマ落下法に関する突固め試験方法に関する実験的検討を加えたので以下、その主な結果¹³⁾について紹介しておく。

試験に使用した材料は砂岩で、平均絶乾比重が2.644

で硬質なものである。

1) 試験粒度の作成方法

(1) 内径が30cmと50cmのモールドを用いた試料の最大粒径に着目した比較試験結果では、最大粒径が相似粒度条件でモールド内径の5分の1以下のとき一定した締固め密度が得られた。以上のデータから内径30cm・容積25,000cm³モールドを使用して締固め試験を実施する場合は、相似粒度条件で試料の最大粒径を19.1~63.5mm（モールド内径の5分の1程度）としても、試験密度に影響を及ぼさない（図-2・15）。

(2) 相似粒度の手法で試料の最大粒径を小さくする方法は、細粒分が少ないときは有効な方法であるが、内径30cmと50cmモールドを用いた比較試験より、0.84mm以下の粒径試料が重量百分率で40%を超えると、間隙比が大きくなる傾向がある。また、単一粒径材料を用いた比較試験結果では粒径が0.84mmより小さくなると締固め間隙比が増加するデータが得られている。

(3) 細粒分が多い材料の場合には(2)の結果を考慮すると(1)の条件より63.5mm以上の粒径を除く必要がある。したがって試料の粒度分布を原材料の粒度分布と相似にすることができない。このような場合には、(2)の条件を考慮して作成した相似粒度において粒径63.5mmの加積通過率を100%として粒径50.8~63.5mmの間で粒度曲線を補正する。これは相似粒度分布において粒径50.8mm以上の粒径含有率を粒径50.8~63.5mmの粒径で置換（オーバーサイズ置換）することである。

内径30cmモールドを用いて置換量が零の時の締固め密度を基準にして置換量を最大50%まで変化させて密度の比較を行った。その結果、置換量が重量百分率で20%以下では間隙比がほぼ一定であるが、30%以上になると間隙比が大きくなるデータが得られた（図-2・16）。

2) ランマ条件

ランマの自由落下による締固め比較試験結果では内径30cm・容積25,000cm³のモールドを使用した場合、ランマ直径15cm・重量15kgf・落下高さ50cmの条件が最も試験密度が安定して得られた。また、汎用性の点からもこのランマ条件は適当であると考えられる。

以上、室内の実験的検討結果より試料の作成方法・条件および突固め用ランマ条件について基礎的なデータが得られている。しかし、今後さらに実材料を考慮した締固め手法を確立するためには、①許容最小粒径

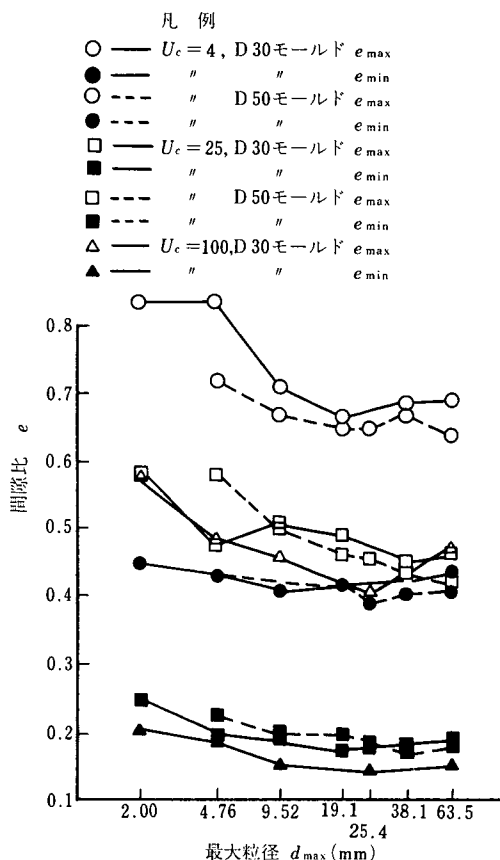


図-2・15 試料の最大粒径と間隙比の関係
($U_c = 4, 25, 100$)

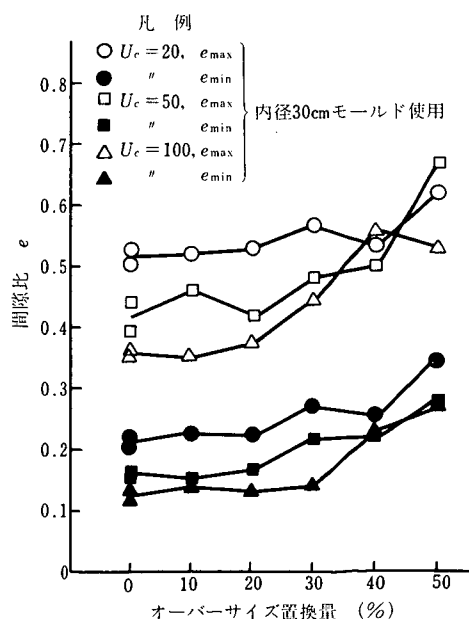


図-2・16 オーバーサイズ置換量と間隙比の関係

寸法と含有率, ②オーバーサイズ置換の方法, 等の試験条件が試験値に与える影響をさらに明確にしていくなければならないものと考えられる。

ロック材料のせん断強度は, 三軸圧縮試験または一面せん断試験によって求められる。一面せん断試験は, 試験機の構造 (上載荷重の載荷方式・上箱または下箱移動方式) により, 結果にバラツキが多いために, 最近では, 径30cm, 高さ60cm程度の三軸圧縮試験機によりロック材料の強度を求める場合が多い。

ロック材料のせん断強度は, 締固められた材料の間隙比に大きく影響されるから, せん断試料の間隙比は, 通常2~3種設定される。また粒度も少なくとも2粒度は設定されるから, 試験ケースは, 同一岩種について4~6ケースが少なくとも実施される。三軸試験におけるせん断方法は, 良好な材料のときは気乾状態でも飽和状態でもほぼ同じ結果を与えるが, 低品質の材料のときには飽和すると強度が落ちるので, 気乾と飽和の両方で実施すべきである。排水・非排水については, 排水が普通である。

せん断強度の設計値は, 試験に用いた岩石の原石山全体における代表性, 試験時に設定した精度と密度の妥当性, 試験機 (三軸か一面か) と試験方法 (側圧, 排水条件, 最大粒径) などを総合的に判断して決定する。

2.5.3 施工管理段階の試験

施工管理段階のロック材料の試験は, 品質管理のための試験として実施され, 最終的には設計で想定した単位体積重量と強度を持った透水ゾーンが施工されていることを確認するための試験である。試験項目としては, 比重・吸水率などの岩石試験, 粒度試験, 密度試験およびせん断試験などがある。このうち, せん断試験は, 試験結果がでるまでに日時がかかり, 品質管理試験としては使えないから, 原石山の材質が余程変化したときなどの他は, 余り実施されない。したがって, 施工管理段階での試験は, 岩石試験, 粒度試験, 現場密度試験が中心となる。

廃棄岩かどうか, どのゾーン区分の材料かなどの判断は, 原石山の掘削面の露頭観察により行われるが, 岩石試験はこれらの判断をより正確にするものである。また施工中に粒度が変わったときには, 所定の密度が得られなかったり, 透水性に問題がでたりする場合があるので, 調査・設計段階の試験データを見直したり追加試験を実施することが必要となる。

施工管理段階の試験の中で重要であり, かつめんどうなのが現場密度試験である。フィルダムのコア材に

ついては, 単位体積重量測定にRIによる測定法が普及しているが, 今のところ, ロック材料の現場単位体積重量は, 現場盛立面でビットを掘り, その穴の体積を水置換法で測定するという方法に頼らざるを得ない。この方法は, 特に粒径の大きいロック材のとき多くの労力を要し, かつ付近の盛立作業を停止させるから, そう頻繁に行う訳にはいかない。また, ビットの体積測定が難しく, 注意しないと精度が出ない。現場試験調査によると, ビットの径は最大粒径の3倍以上, 深さは1層分, 水置換に用いるシートは薄手のもの (農業用ビニールシート, 厚さ0.15mm程度, ただし角ばった岩石のときは, もっと厚くせざるを得ない) で試験地点表面の標高は, メッシュに区切り測量による方法で求めるのがよい¹⁴⁾。ロックゾーンの品質管理試験の一番重要な現場密度試験方法について, より手軽で精度の高い試験方法の開発が待たれるところである。

ここで, 現場単位体積重量測定用ビットの最小径について若干の考察を加えておくことにする。まず前提条件として, 以下の3項目を基本として考察する。

- 1) 測定用ビット内より採取した材料と盛立材料の粒度組成が同じであるとする。
- 2) 粒径の大小によらず材料の比重値が一定である。
- 3) 材料の岩石粒子を球形と仮定する。

ここで,

P_{max} : 盛立材料に含まれている最大粒径の重量 (体積) 百分率 (%)

$100 - P_{max}$: 盛立材料に含まれている最大粒径以下の重量 (体積) 百分率 (%)

とすれば, 最大粒径以下の粒径を含有するに必要な有効体積は最大粒径体積の m_1 倍となる。

$$m_1 = \frac{100 - P_{max}}{P_{max}} \dots\dots\dots (2.11)$$

岩石粒子 (球形と仮定) の重量 (体積) は粒径の3乗に比例することから, 最大粒径の $\sqrt[3]{m_1}$ 倍が最大粒径以下の粒径体積の総和に等しい岩石粒子 (球形) の直径となる。したがって最大粒径を含めたビットの必要直径は式 (2.12) に示すように, 最大粒径の n_1 倍となる。ここで, 必要直径はビット容積に等価な球の直径に相当する。

$$n_1 = 1 + \sqrt[3]{m_1} \dots\dots\dots (2.12)$$

たとえば, 加積残留率10%を最大粒径の対象として, 式 (2.11), 式 (2.12) よりビットの必要直径を求めると最大粒径の約3倍となり, ビットの必要容積はそ

表-2-13 試験時期と試験項目

◎必ず実施すべき試験
○材料により実施すべき試験

試験項目・規格	試験時期	調 査 設 計 施 工 段 階 階 階 階 階		
		調 段	設 計 階	施 工 管 理 階 階
比重・吸水率	J I S A 1110 J I S A 1202	◎	◎	◎
一軸圧縮試験	J I S M 0302 K D K S 0502	◎		
安定性試験		○		
凍結融解試験		○		
風化試験		○		
X線回折		○		
偏光顕微鏡観察		○		
室内締固め試験	大型 内径30cm容量25ℓ		◎	
室内せん断試験	大型 三軸または一面		◎	○
粒度試験	J I S A 1102 J I S A 1204		◎	◎
現場密度試験				◎

の球体積となる。

現場比較試験時のビットは深さが直径の0.7~1倍の円筒形である。したがって試験時のビット容積は必要球体積の1~1.5倍となっている。このことからビットの必要な直径および容積の計算値と比較試験結果がほぼ一致している。

以上ロック材料の試験について実施時期と試験項目についての概要をまとめると、表-2-13のとおりである。

3. 三軸圧縮試験

せん断試験方法を大別すると直接せん断試験と間接せん断試験方法に分類される。前者の試験方法としては一面せん断試験、後者の試験方法としては三軸圧縮試験が一般的である。

一面せん断試験および三軸圧縮試験とも土質材料を対象とした小さな供試体試験が可能な試験装置は一般に普及して使用されている。しかし、ロック材料のように土質材料に比較して大粒径で構成されている材料について試験しようとした場合には、試験装置を大型化するか、原材料を限られた試験装置で試験できるように小さくする方法が考えられる。

わが国では、1970年代の頃からロック材料を対象と

した大型の三軸圧縮試験装置が製作され使用されている。その理由の1つとしては、一面せん断試験方法に比較して三軸圧縮試験方法の方が、試験時供試体に作用している応力状態が明確であるとともに応力を制御した試験が安定して可能であることがあげられる。

現在では三軸圧縮試験装置は種々の改良が加えられて一面せん断試験装置よりも利用され、一般化してきている。ロック材料のせん断強さを求めるために最も一般に使用されている供試体は直径30cm、高さ60cmの円柱形のものである。しかし、実際に試験を行う場合の試験方法・試験装置精度等の最も基本的で重要な点に関して解明されていない課題が多く残されている。

フィルダム研究室では、ロック材料のせん断強さを三軸圧縮試験で求める場合の試験方法に関する問題点を解明するため、実験的検討を加えてきた。本章では、上述の試験方法に着目して実施した実験結果についてとりまとめている。

3.1 試料条件

3.1.1 粒径範囲

事例にみられるように、ロック材料の均等係数は通常10以上の場合が多い。また細粒分（74 μ m以下）も一般に15%以下である。以上の点から、日本統一土質分類によるとGW（粒度の良い礫）に当たる。したがって、ロック材料を対象とした室内試験を行う場合には、基本的にロック材料本来の性質が反映された試験条件を考慮すべきである。

一般に、ロック材料は大粒径の粒子で構成されている。したがってロック材料の力学的性質を室内試験によって求める場合には、原材料の全体を室内で試験可能なサイズまで小さくした相似粒度を作成して行われる。しかし、原材料全体を低減する場合にどの程度まで許容されるかの点については解明されていない。

上述した問題点を解明するため、ロック材料のせん断抵抗角を精度良く求める場合に相似粒度条件をどこまで低減することが可能であるかの点に着目した比較試験¹⁵⁾を実施した。その要点を以下に示す。

比較試験に用いた三軸圧縮試験装置は、直径10×高さ20cm・直径30×高さ60cmの供試体試験が可能な異なる二種類を用いた。表-3-1に試験条件および方法を示す。表-3-1のD10・D30はそれぞれ直径10cmまたは直径30cmの供試体試験を指す。表-3-2に試験材料の物理的性質を示す。また、図-3-1に試験粒度曲線（均等係数が6）を示す。試験粒度曲線は、粒径サイズを変化させるために相似粒度の手法により調製して行った。

表-3-1 試験条件および方法

供試体 項目	D10	D30
供試体の状態	不飽和状態 ($w < 1\%$)	
排水条件	圧密排水試験 (CD)	
せん断方法	側圧一定軸方向変位制御法	
試験側圧	2, 4, 6 kgf/cm ²	
軸方向変位速度	1 mm/min ($\approx 0.5\%/min$)	3.3 mm/min ($\approx 0.5\%/min$)
圧密方法	試験側圧まで 1 kgf/cm ² /min の速度で増圧し試験側圧を保つ	
圧密完了基準	体積変化が零または供試体体積の 0.05%/min 以下の状態	

表-3-2 材料の性質

岩種	斑れい岩
真比重	2.89~3.08
絶乾比重	2.88~3.05
表乾比重	2.90~3.06
吸水率	0.3~1.0%
粒子自体の強度	点載荷圧裂試験による引張強度 $S_t^{16)}$ $S_t = 130 \sim 340 \text{ kgf/cm}^2$ (粒径 63.5~9.52 mm)

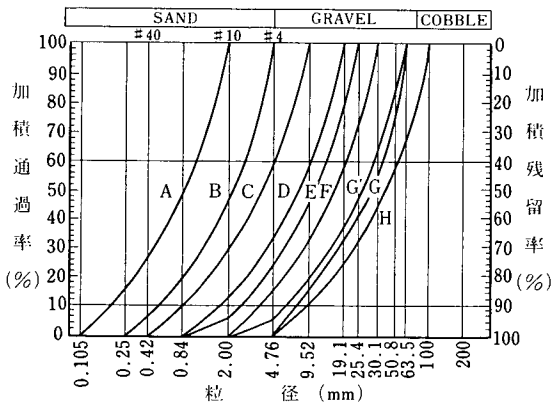


図-3-1 試験粒径加積曲線 ($U_c = 6$)

しかし、粒度曲線 G' については粒径 2~4.76 mm の含有率が小さく、材料の分離が想定されたため若干粗粒側の粒度曲線 G について試験した。

試験供試体の密度条件は下記の二通りの方法を設定して実施した。なお、供試体は不飽和状態である。

① 試験供試体初期間隙比 (e_o) 一定試験

締固め予備試験結果より締固め可能単位体積重量を考慮して D10 試験 ($d_{max} = 2, 4.76, 9.52, 19.1, 25.4 \text{ mm}$) について初期間隙比 e_o を 0.56 に、D30 試験 ($d_{max} = 9.52, 19.1, 38.1, 63.5 \text{ mm}$) で

は $e_o = 0.45$ に統一して行った。

② 供試体圧密後間隙比 (e_c) 一定試験

各側圧に応じて初期間隙比の異なる供試体を作製して、圧密後の供試体間隙比を統一する方法である。

圧密後の間隙比については①の圧密データを参考として決定した。D10 試験 ($d_{max} = 2, 4.76, 9.52, 19.1, 25.4 \text{ mm}$) では $e_c = 0.53$ とした。D30 試験 ($d_{max} = 9.52, 19.1, 38.1, 63.5 \text{ mm}$) では $e_c = 0.435$ に統一して行った。

上記のように供試体の初期密度状態を変えた主な理由は、せん断試験は圧密排水条件であるため、圧密過程における圧密量が個々の供試体で大きく異なった場合に試験値に大きく影響を与えることが想像されたためである。また、せん断開始直前の供試体密度状態がせん断強さに影響することも十分に想像されたためである。

供試体の作製は、D10・D30 供試体とも 6 層締固めとし、自立のため真空ポンプにより 10 cmHg $\approx 0.13 \text{ kgf/cm}^2$ で吸引した後モールドを解体した。

図-3-2 に最大粒径と圧密体積ひずみの関係を示す。試験中の供試体体積変化量は、側圧加圧装置ピストンの変位量から換算した外体積変化量より求めている。体積変化量を供試体初期体積で除した圧密体積ひずみは、最大粒径および側圧の増加とともに増加している。これらには、ゴムスリーブが側圧の増加に伴って供試体側面の凹凸部に密着することによって生じる見掛けの体積変化量 (ゴム膜貫入量) が大きく含まれているものと考えられる。

最上によれば、三軸圧縮試験時の供試体間隙比 e とせん断抵抗角 ϕ との関係¹⁷⁾ を式 (3-1) で与えている。

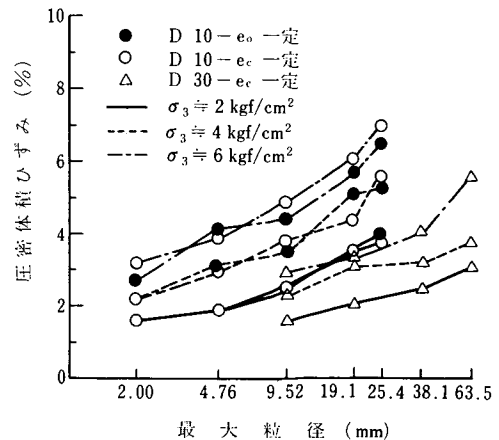


図-3-2 最大粒径と圧密体積ひずみ

$$\sin \phi = \frac{3 K_t}{2(1+e) + K_t} \quad (3.1)$$

K_t : 三軸圧縮試験より求まる材料定数

式(3.1)によれば材料のせん断抵抗角 ϕ の大きさは供試体の間隙比 e に影響されることがわかる。したがって本試験結果の整理は、供試体の間隙比に若干のバラツキがあるため式(3.1)を用いて統一した間隙比(e_o および e_c)におけるせん断抵抗角の値とするため ϕ_o を修正した。ここに ϕ_o の値は、見掛けの粘着力 $C=0$ として式(3.2)により求めた値である。ここで ϕ_o に着目した理由は異なる側圧条件別に最大粒径が試験値に与える影響の程度を調べるためである。

$$\phi_o = \arcsin \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 + \sigma_3)_f} \quad (3.2)$$

ここに、添字 f は破壊時を意味する。

また、供試体単位体積重量の他に、試験時の側圧の大きさにも若干のバラツキがあるため、間隙比によって補正した ϕ_o と統一した側圧 $\sigma_3=2, 4$ および 6 kgf/cm^2 に対応した ϕ_o を直線補間の手法によって求めた。したがって ϕ_o の値は、統一した供試体の単位体積重量と統一した試験側圧によって補正しているのこの補正值を ϕ_o'' と表示する。

最大粒径と ϕ_o'' の関係を図-3.3と図-3.4に示す。 $e_c=0.53$ でのD10において、最大粒径が $2 \text{ mm} \sim 4.76 \text{ mm}$ の間は最大粒径が大きくなると ϕ_o'' は小さくなり、 $9.52 \text{ mm} \sim 25.4 \text{ mm}$ の間は最大粒径が大きくなると ϕ_o'' も大きくなる傾向を示している。また、最大粒径が 9.52 mm ではD10とD30の ϕ_o'' はほぼ等しいが、最大粒径が 19.1 mm ではD10はD30より大きな ϕ_o'' となっている。

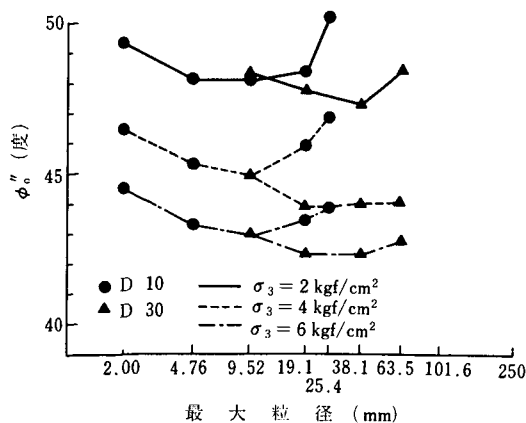


図-3.3 最大粒径と ϕ_o'' ($e_c=0.53$)

後者の傾向については、最大粒径が 19.1 mm および 25.4 mm の供試体径 D と最大粒径 d_{max} の比 D/d_{max} はそれぞれ 5.2 および 3.9 であるため、供試体寸法の影響が現われたものと考えられる。

$e_o=0.56$ での ϕ_o'' の値についても $e_c=0.53$ での ϕ_o'' と同様の傾向を示している。

次に、ロックフィルダム設計値として一般に用いられているせん断強度定数のせん断抵抗角 ϕ_{CD} について述べる。せん断抵抗角 ϕ_{CD} は3種類の側圧条件で得られた側圧と最大主応力差の係数に最小二乗法(一次式)を適用することによって数値計算によって求めた¹⁸⁾。

図-3.5に最大粒径と各試験時の e_o に若干の差異があるため式(3.1)により $e_o=0.56$ に統一して求めた推定せん断抵抗角との関係を示す。D10試験については、最大粒径が $2 \text{ mm} \sim 19.1 \text{ mm}$ と大きくなるに従い ϕ_{CD} は減少の傾向を示しているが、 25.4 mm になると急に大きくなっている。これは供試体寸法の影響によるものと考えられる。D30試験については、最大粒径が 9.52 mm を除いて $19.1 \cdot 38.1$ および 63.5 mm でほぼ一定の値を

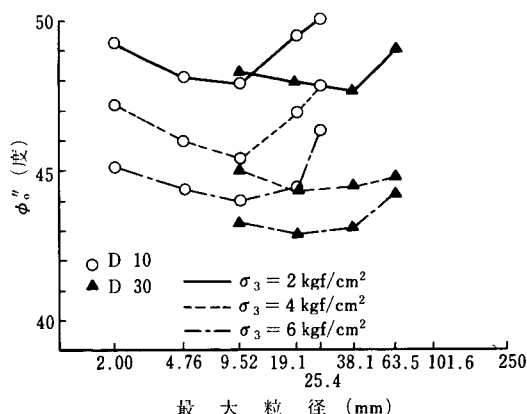


図-3.4 最大粒径と ϕ_o'' ($e_o=0.56$)

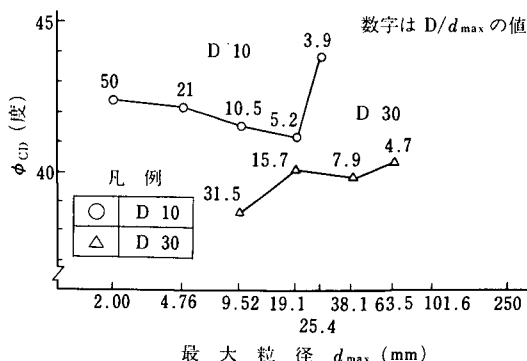


図-3.5 最大粒径と $e_o=0.56$ での推定せん断抵抗角

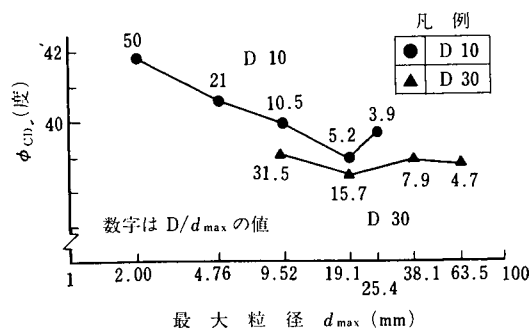


図-3-6 最大粒径と $e_c = 0.53$ での推定せん断抵抗角

示している。全体としてみた場合、試験機（供試体径）相互の値に差があり、試験機（供試体径）が大きくなると ϕ_{CD} が低下する傾向にある。

図-3-6に最大粒径と $e_c = 0.53$ での推定せん断抵抗角の関係を示す。最大粒径が9.52および19.1mmでのD10とD30試験との ϕ_{CD} は、 e_c 一定試験の場合に較べてほとんど差がない。最大粒径が19.1mmまでは最大粒径が大きくなると ϕ_{CD} は低下するが、19.1mm以上ではほぼ同じ値を示している。なお、最大粒径が19.1mmにおける粒度組成での細粒分（4.76mm以下）の含有率は30%程度である。D10試験の最大粒径25.4mmについては供試体寸法の影響が現れているが、D10試験の19.1mmおよびD30試験の63.5mmについては ϕ_c でみられたように明確には供試体寸法による影響が現れていない。

以上の試験結果より得られた結果は、下記のとおりである。

本実験に用いた粒度・材料条件では、供試体初期単位体積重量を一定にした試験（ e_c 一定試験）結果では若干のバラツキがあるが、圧密後の供試体単位体積重量を一定にした試験（ e_c 一定試験）では、①相似粒度条件、②最大粒径が供試体径の5分の1以下の条件の基で細粒分（4.76mm以下の粒径に着目した場合）の含有率が30～40%程度以下である条件を満足すれば、安定してロック材料のせん断抵抗角を求めることができるものと考えられる。

3.1.2 供試体寸法

原粒度のロック材料を実施工時のように締固めてせん断試験を行うことができれば、それが最も信頼性の高いデータであろう。しかし、現実的にはそのような条件・方法で試験することは非常に困難である。したがって、室内試験によって原粒度材料のせん断強さを精度良く推定するための手法を確立することが望まれているわけである。

現在わが国でロック材料を対象として製作され使用

されている三軸圧縮試験装置で試験可能な供試体寸法は、著者らの知る範囲では、直径30・40・50・60・120cmのもので一般に供試体の高さが直径の2倍程度のものである。したがって与えられた試験装置（供試体寸法）によってどの程度の粒径範囲と供試体寸法条件で試験することによって安定して一定のせん断強さを求めることができるかが重要な研究課題となっているわけである。

上述した点に着目して、種々の供試体寸法により最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究成果が多数、発表されている。表-3-3にすでに発表されている既往の研究成果の一部をとりまとめている。表-3-3にみられるように同じ目的での比較試験において各研究者によって得られた成果の内容が一定せず、三通りの研究結果が発表されており、結論が得られていないのが現状である。

以上の問題点（研究課題）に着目して、供試体直径が30・50・120cmの異なる三種類の三軸圧縮試験装置により最大粒径と供試体寸法を変化させた比較三軸圧縮試験を行った²⁷⁾。

試験に用いた材料の性質を表-3-4に示す。材料は、せん断試験によって粒子の破碎が多く生じた場合に結果の解釈が複雑となることが予想されたため堅硬な岩質のものを使用することとした。

図-3-7に比較試験に採用した粒径加積曲線（ $U_c = 6$ ）

表-3-4 材料の性質

岩	比	種	斑れい岩
真	重	重	2.97～3.10
絶	比	重	2.89～3.08
乾	乾	重	2.92～3.09
表	水	率	0.2～1.0%
吸		度	$q_u = 1000 \sim 1500 \text{ kgf/cm}^2$
収		状	Zinggの分類 ²⁸⁾ によると板状、塊状、棒状と色々な形状で構成されている。
強			
粒			

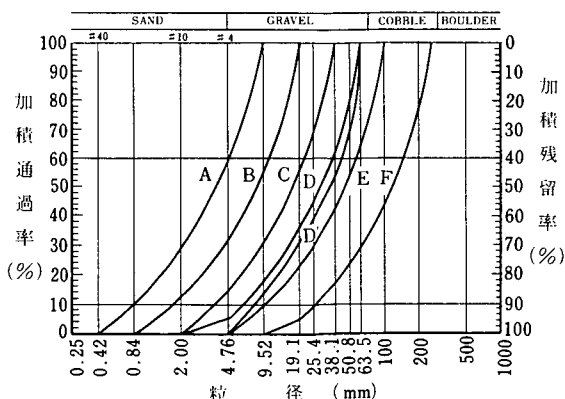


図-3-7 試験粒径加積曲線（均等係数が6）

表-3-3 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究 (その1-1)

文 献 項 目	20) 岩 屋 ダ ム	21) 野田 (神戸大) 他	22) 酒見 (フジ工業) 他	19) Marachi, Chan, Seed, Duncan			23) 24) 水野, 大蔵, 貞弘	
A 試験装置				小 型 1 室 式	中 型 同 左	大 型 同 左	大 型 1 室 式	超大型 同 左
1. 三 軸 室			1 室 式	供試体上部より下方に 載荷	供試体下部より上方に 載荷	供試体下部より上方に 載荷	供試体下部より上方に 載荷	”
2. 軸 載 荷 の 方 向			供試体直径と同寸法の 円形	供試体直径と同寸法の 円形	同 左	同 左	供試体直径と同寸法の 円形	”
3. 上下加圧盤の形 状			回転可能	回転可能	”	”	回転可能	”
4. 上部加圧盤の回 転の有無			分離型 (平面)	分離型 (球面)	”	”	分離型 (球面)	”
5. 上部加圧盤とプ ッシュロッドま たは反力受け部 との関係			有孔盤 (φ 5 mm, 2 cm 千鳥)	ポーラスメタル	有 孔 盤	”	ポーラスメタル	”
6. 上下加圧盤の排 水方法			10mm/枚×1枚 (布入り)	0.6 mm/枚×1~5枚	1.6 or 3.2mm/枚 3.2~8.0 mm	”	1mm厚×2枚 (D200) 2mm厚×2枚 (D300)	3mm厚×1枚+ 5mm厚×1枚 or 3mm厚×3枚 同 左
7. ゴムスリーブ	0.5 mm (φ100 mm) 3 mm (φ150, 300 mm)		油圧サーボ方法	MTS electrohydraulic System	同 左	同 左	電動油圧ポンプ式	”
8. 軸 載 荷 方 法			油圧を水圧に変換 (ノルウェー型恒圧 装置)	水 圧	空 気 圧	水 圧	空圧制御水圧置換式	”
9. 側圧の加圧方法	コンプレッサ 蓄圧水 槽式		供試体上部反力を三軸 室内の内部で測定	供試体上部反力を三軸 室内の内部で測定	三軸室内のキャップ部 の変位測定, 軸載荷用 ピストンの変位量を測 定	三軸室内のキャップ部 の変位測定, 軸載荷用 ピストンの変位量を測 定	三軸室の外部 (供試体 上部) で測定	”
10. 軸方向荷重の測 定			軸載荷用油圧シリンダ ーの変位量を測定				軸載荷用油圧シリンダ ーの変位量を測定	”
11. 軸方向変位の測 定			外体積変化量 (三軸室 室内の水の出入量) ビューレット管方式 機械的に補正する	内体積変化量をビュー レット方式で測定	同 左	同 左	外体積変化量をペロフ ラム型で測定	”
12. 体積変化の測定	ビューレット水位計光 電管自動追尾方式						機械的に補正する	
13. 載荷用ピストン の貫入量補正			マイクロコンピューター 3 分間に 1 回測定値を プリントアウトする	1 BM-1620 パンチテープに収録	同 左	同 左	15秒間に 1 回測定値を プリントアウトする	同 左
14. 試 験 機 制 御								
15. 試験時の測定間 隔	X-Yレコーダによる 連続測定							

表-3.3 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究 (その1-2)

文 献 項 目	20) 岩 屋 ダ ム		21) 野田 (神戸大) 他		22) 酒見 (フジタ工業) 他		19) Marachi, Chan, Seed, Duncan		23) 24) 水野, 大蔵, 貞弘	
16. 測定項目および 順序	同時測定 応力~ひずみ, 容積変化		①側圧 ②軸荷重 ③体積変化④軸変位		軸変位, 軸荷重, 体積変化		同 左		同 左	
17. 供試体直径と高 さとの比	250 mm/100 mm=2.5 700 mm/300 mm=2.3		200 mm/100 mm=2.0		2400mm/1200mm=2.0		178 mm/71mm=2.5		762 /306 =2.5	
18. 端面摩擦の除去							2288/914 =2.5		400 mm/200 mm=2.0 600 mm/300 mm=2.0	
B 試験時の精度										
1. 軸 荷 重			3.4 t o n		0.01kg f /cm ² (14kg f /cm ² 以下)				0.2 kg f /cm ²	
2. 側 圧			0		0.1 kg f /cm ² (70kg f /cm ² 以下)				0.01kg f /cm ²	
3. 軸 変 位			0.005 mm						1 /500	
4. 体 積 変 化			1.06 cm ³		0.72cm ³				10cm ³	
C 試験材料										
1. 母 岩 の 岩 種	濃飛流紋岩		道路用砕石		安山岩 q _u = 600~1000kg/cm ² (乾燥) q _u = 500~800kg/cm ² (飽和) G _s = 2.23~2.26 Q = 7~10%		三種類の材料について各試験機で実施している ① 粘板岩 ② かんらん石玄武岩 ③ 角閃岩		流 紋 岩	
2. 粒子自体の強さ									q _u = 1000~1500kg f /cm ²	
3. 比重および吸水 量	G _s = 2.654 G _k = 2.613 Q = 0.59%						G _s = 2.26 2.87 2.94 (1 / 4 以上) 2.86 (1 / 4 以上)		G _k = 2.544~2.579 Q = 1.24~1.55%	
4. 粒 子 形 状					塊 状				塊状, 板状	
5. 粒 度 分 布	相似粒度		相似粒度		相似粒度		very angular angular rounded		相似粒度	
6. 均 等 係 数	U _c = 11		U _c = 2.1		A 粒度 U _c = 20.1 B 粒度 U _c = 5.6		U _c ≈ 7 U _c ≈ 7		U _c = 9.5, 11.2	
7. 最大粒径 (mm)	5, 15, 60		2, 4.76, 9.52, 19.1		60, 100, 200		11.9, 50.8, 152.4		同 左	
8. -4.76mm (%)	100, 70, 25		100, 100, 60, 0		A 25, 12 B 9, 0		同 左		同 左	
9. D / d _{max}	20~5		50, 5.2		20~6				31.7, 50.8, 101.6	
10. 密 度	e _u = 0.45, 0.55 0.65 (G _s)		D _r = 30, 60, 100 %		A e _u = 0.5 B e _u = 0.65		e _u = 0.457 e _u = 0.430 e _u = 0.216		e _u = 0.351, 0.303 (e _s による)	
11. 含 水 状 態	w = 1.2 %								0.45~ 0.6 %	

表-3-3 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究 (その1-3)

文 献 項 目	20) 岩 屋 ダ ム	21) 野田 (神戸大) 他	22) 酒見 (フジタ工業) 他	19) Marachi, Chan, Seed, Duncan			23) 24) 水野, 大蔵, 貞弘
	ランマ突固め 振動バイブレータ		大型三軸用バイブレー タ	小 型 エアーハンマー5層 供試体自立のため真空 ポンプで吸引	中 型 ロータリーバイブレー ター (重さ33.8kg f) 10層 同 左	大 型 同 左 同 左	振動テーブル
E 三軸圧縮試験方 法 1. 供試体の状態 2. 排水条件 3. せん断方法 4. 試験側圧 (kgf/cm ²) 5. 軸方向変位速度 6. 圧密方法 7. 圧密完了基準	圧密排水試験 ひずみ制御法 1, 2, 3, 5 1%/min	気乾燥状態 軸方向変位制御 0.5, 1.0, 1.5 1mm/min	気乾状態(w = 2~4%) 圧密排水試験 2, 4, 6	飽 和 状 態 圧密排水試験 ひずみ制御 2.11, 9.84, 29.5, 45.7			自然含水比状態 圧密排水試験 ひずみ制御 2, 4, 6, 8 1%/min
F 試 験 結 果	粒子の大きさは ϕ にあ まり影響しない	最大粒径が大きくな ると ϕ も大きくなる	最大粒径が大きい方が ϕ は小さい	最大粒径が大きくなると ϕ は減少する			最大粒径の増大にともない, ϕ はやや低下する

表-3.3 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究 (その2)

項 目	文 献	
	石川、大塚、井口 25)	Holtz, Gibbs 26)
A 試験装置 1. 三軸室 2. 軸載荷の方向 3. 上下加圧盤の形状 4. 上部加圧盤の回転の有無 5. 上部加圧盤とプッシュロッドまたは反力受け部との関係 6. 上下加圧盤の排水方法 7. ゴムスリーブ 8. 軸載荷方法 9. 側圧の加圧方法 10. 軸方向荷重の測定 11. 軸方向変位の測定 12. 体積変化の測定 13. 載荷用ピストンの貫入量補正 14. 試験機制御 15. 試験時の測定間隔 16. 測定項目および順序 17. 供試体直径と高さとの比 18. 端面摩擦の除去	一 室 式 供試体下部より上方に載荷 供試体直径と同寸法の円形 電気油圧サーボ方式 ペン書きによる連続測定 600 mm/300 mm=2.0	一 室 式 供試体下部より上方に載荷 供試体直径と同寸法の円形 回転可能 分離型 (球面) ピストン径=5.1 cm ボーラスメタル 0.8 ~ 1.5 mm 圧縮試験機を利用 空気圧を水圧に変換 軸載荷用ピストンの変位量をダイヤルゲージで測定 外体積変化量 (三軸室内の水の出入量) レコードによる連続測定 (軸荷重, 側圧) 572 mm/229 mm=2.5
B 試験時の精度 1. 軸荷重 2. 側圧 3. 軸変位 4. 体積変化		
C 試験材料 1. 母岩の岩種 2. 粒子自体の強さ 3. 比重および吸水量 4. 粒子形状 5. 粒度分布 6. 均等係数 7. 最大粒径 (mm) 8. -4.76mm (%) 9. $D/d_{\max}$ 10. 密度 11. 含水状態	流紋岩 $q_u = 1000 \sim 2000 \text{ kg f/cm}^2$ $G_k = 2.64$ $Q = 0.24 \sim 0.36\%$ 塊 状 せん頭粒度 13.6, 11.4, 7.6 15, 30, 60 45, 25, 10 20, 10, 5 $c_u = 0.360 \sim 0.628$	河川堆積物 (片麻岩, 花崗岩, 片岩が卓越) $G_k = 2.52 \sim 2.63$ subangular to subrounded せん頭粒度的 6 ~ 12 19.1, 38.1, 76.2 80, 50 12, 6, 3 $D_r = 70\%$ ($c_u = 0.404 \sim 0.418 \dots - 4.76\text{mm} 80\%$ $c_u = 0.293 \sim 0.317 \dots - 4.76\text{mm} 50\%$ 湿った状態 (規定していない)
D 供試体作製方法	バイブレーターランマ 5 層	
E 三軸圧縮試験方法 1. 供試体の状態 2. 排水条件 3. せん断方法 4. 試験側圧 (kg f/cm^2) 5. 軸方向変位速度 6. 圧密方法 7. 圧密完了基準	圧密排水試験 ひずみ制御 1, 3, 5 1%/min	飽和状態 (圧密後に飽和する) 圧密排水試験 ひずみ制御 0.36%/min
F 試験結果	粒子の大きさは ϕ にあまり影響しない	$d_{\max} = 19.1 \sim 76.2\text{mm}$ で粒子の大きさは ϕ にあまり影響しない

を示す。均等係数が6という粒径範囲の小さい粒度組成を選定した理由は、相似粒度条件に従って最大粒径を変化させるため、最大粒径を小さくした場合に細粒分を多く含有してロック材料本来の性質を求めることができなくなる場合も考慮したためである。

三軸圧縮試験は、圧密排水条件（C D試験）で試料は気乾状態（ $w < 1\%$ ）とした。表-3・5に試験方法の詳細を示す。表中のD30・D50・D120とは供試体直径がそれぞれ30・50・120cmを指す。

供試体の単位体積重量は、初期間隙比 $e_0 = 0.45$ に統一した密度状態に設定した。空隙比の値は、供試体の乾燥密度と材料の平均絶対乾比重により定義して求めたものである。

供試体の作製方法は、D30供試体の場合には6層締固めとして、テーブル振動方式の締固め試験機（鉛直振動、30Hz、加振時間8分/層）によって行った。D50供試体の場合には、まず1層目および2層目を粒度が片やらないようにモールド内に入れてから2層分を電動ランマ（自重33kgf）で所定の高さまで締固める。3層から5層までは1層毎に所定の高さまで締固める方法である。また、D120供試体の場合には、最大粒径が101.6mmの時には8層、250mmの時には6層締固めとした。締固めは重量533kgfの振動締固め機により試料上面より所定の高さとなるように行った。

表-3・6に供試体の初期と圧密後の空隙比を示す。圧密による空隙比の減少率は、D30・D50およびD120供試体とも側圧の小さなものより大きな方が大きく現われている。空隙比の減少率は、D50およびD120に比較してD30供試体の方が大きく、圧密後の空隙比が小さくなっている。しかし圧密量に差を生じた主要原因につ

いては不明である。ただし試験途中の方法で異なる点としてはD50・D120供試体の場合には、供試体の自立を助けるため0.2~0.5kgf/cm²の負圧を与えた状態で圧密を開始しているがD30の場合には負圧を与えていないことが上げられる。しかしD30の予備試験によれば負圧の有無が空隙比に与える影響は0.02~0.04程度であった。

図-3・8に側圧と最大主応力差の関係より求めたせん断抵抗角 ϕ_{CD} ・見掛けの粘着力 C_{CD} と最大粒径の関係を示す。D30試験の最大粒径9.52mmを除くと、同一試験機の範囲では最大粒径が小さなものより大きな方がせん断抵抗角がわずかに小さくなる傾向が認められる。また、同じ粒度条件（最大粒径が同じ）では、供試体径の小さなものより大きな方がせん断抵抗角がわずかに

表-3・5 試験方法の詳細

供試体 項 目	D30	D50	D120
試 験 側 圧 (kg f/cm ²)	1.5, 3, 4.5, 6,	2, 4, 6	2, 4, 6
軸方向変位速度 (mm/min)	6(≒1%/min)	3.3(≒0.33%/min)	3.3(≒0.14%/min)
圧 密 方 法	試験側圧まで 1 kg f/cm ² /min の速度で増 圧し、試験 側圧を保つ	手で試験側 圧まで増圧す る。約1min の所要時間	試験側圧まで1, 2, 4, 6 kg f/cm ² のステップ で段階的に 増圧速度は0.1 kg f/cm ² /min
圧密完了基準	体積変化が零 または供試体 体積の0.05% /min以下の 状態	体積変化が供 試体体積の0.05 %/min以下 の状態	各ステップで体 積変化が零、供 試体体積の0.05 %/minあるい はステップ継続 時間が8時間を 越えた場合

表-3・6 供試体の初期と圧密後の空隙比

粒度	ケース名	側圧 σ_3 (kg f/cm ²)	間 隙 比		$\frac{e_c}{e_0}$	粒度	ケース名	側圧 σ_3 (kg f/cm ²)	間 隙 比		$\frac{e_c}{e_0}$
			初 期 e_0	圧 密 後 e_c					初 期 e_0	圧 密 後 e_c	
A	D30— $d_{m,9.52}$	1.5	0.469	0.442	0.94	C	D50— $d_{m,38.1}$	2.0	0.45	0.437	0.97
		3.1	0.472	0.420	0.89			4.0	0.45	0.435	0.97
		4.5	0.465	0.404	0.87			6.0	0.45	0.426	0.95
		6.1	0.470	0.396	0.84						
B	D30— $d_{m,19.1}$	1.5	0.451	0.414	0.92	D	D50— $d_{m,63.5}$	2.0	0.45	0.441	0.98
		3.0	0.446	0.405	0.91			4.0	0.45	0.435	0.97
		4.6	0.451	0.386	0.86			6.0	0.45	0.428	0.95
		6.2	0.452	0.373	0.83						
C	D30— $d_{m,38.1}$	1.5	0.443	0.404	0.91	E	D50— $d_{m,101.6}$	2.0	0.45	0.440	0.98
		3.1	0.452	0.389	0.86			4.0	0.45	0.436	0.97
		4.6	0.434	0.366	0.84			6.0	0.45	0.429	0.95
		6.2	0.451	0.367	0.81						
D	D30— $d_{m,63.5}$	1.5	0.480	0.417	0.87	E	D120— $d_{m,101.6}$	2.0	0.45	0.437	0.97
		3.0	0.480	0.400	0.83			4.0	0.449	0.428	0.95
		4.5	0.486	0.380	0.78			6.0	0.449	0.426	0.95
		6.2	0.474	0.377	0.80						
D	D30— $d_{m,63.5}$	1.5	0.480	0.417	0.87	F	D120— $d_{m,250}$	2.0	0.448	0.433	0.97
		3.0	0.480	0.400	0.83			4.0	0.446	0.419	0.94
		4.5	0.486	0.380	0.78			6.0	0.442	0.417	0.94
		6.2	0.474	0.377	0.80						

に小さくなる傾向を示している。

一般にロック材料のせん断強さは同一材料、同一粒度分布の場合には、密度の小さなものより大きな方が大きな値となることが知られている。そこで、圧密終了時、すなわちせん断直前の供試体間隙比に着目して整理した結果を図-3・9に示す。図より圧密後の供試体平均間隙比とせん断抵抗角の間に強い相関性があることが認められる。

以上の整理結果より、圧密後の平均間隙比とせん断抵抗角のデータから同じ間隙比で期待できるせん断抵抗角を推定してみた。推定の方法は、最上の式(3・1)を用いて行った。表-3・7に間隙比が0.4の場合における推定せん断抵抗角の値を示す。また、図-3・10に表-3・7の結果を用いて最大粒径と推定せん断抵抗角の関係を示す。図-3・10より最大粒径および供試体寸法の増大

表-3・7 推定せん断抵抗角 ($e=0.4$)

粒度	供試体	d_{max} (mm)	圧密後平均 間隙比	試験せん断 抵抗角(度)	k_t	$e=0.4$ の推 定せん断抵 抗角(度)
A	D30	9.52	0.407	40.9	0.786	41.1
B		19.1	0.388	43.0	0.817	42.6
C		38.1	0.372	42.8	0.803	41.9
D'		63.5	0.386	42.4	0.804	42.0
C	D50	38.1	0.433	40.9	0.800	41.8
D		63.5	0.435	40.9	0.801	41.9
E		101.6	0.435	40.6	0.795	41.6
E	D120	101.6	0.430	40.1	0.782	40.9
F		250	0.420	38.9 (39.8)	0.752 (0.770)	39.4 (40.3)

[注]：() 内の値は $\sigma_3 = 2.4 \text{ kgf/cm}^2$ のデータから求めた値。

に対して一定あるいはほんのわずかにせん断抵抗角が減少の傾向にある。

図-3・10の結果にみられるように同じ試験装置では試料の最大粒径が供試体の約10分の1から5分の1の範囲ではほぼ一定したせん断抵抗角が得られている。しかし、三種類の試験装置より得られたせん断抵抗角に着目してみると同じ粒度条件でも供試体寸法の大きな方が小さなものより若干、小さな値を示している。

以上の試験結果より、できる限り原粒度の粒径状態に近い試料を用いて試験を行うことを前提とした場合には、まず試料の最大粒径は供試体直径の最大5分の1程度までは許容できるものと判断される。次に供試体寸法がどの程度のもので許容可能かの点に着目してみると、相似粒度の適用限界(図-3・6の比較試験結果)等から判断すると現在一般に普及して使用されている直径30cm・高さ60cm程度を含めたそれ以上の大きさのもので良いと考えられる。本比較試験で大きく異なる点は、供試体の作製方法とせん断速度の2点である。せん断抵抗角に対しては後者に比較して前者の影響が大きいものと考えられる。この点に着目した比較試験結果は「3.2 供試体の作製」・「3.3 せん断速度」の項で記述してある。

3.2 供試体の作製

試験対象材料の粒度組成・単位体積重量・三軸圧縮試験条件等が設定されたとする。三軸圧縮試験は、フィールド内のある部分(要素)に着目して行う要素試験の一種であることを前提としている。したがって

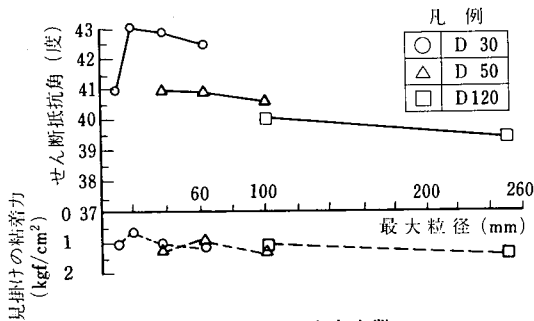


図-3・8 最大粒径と強度定数

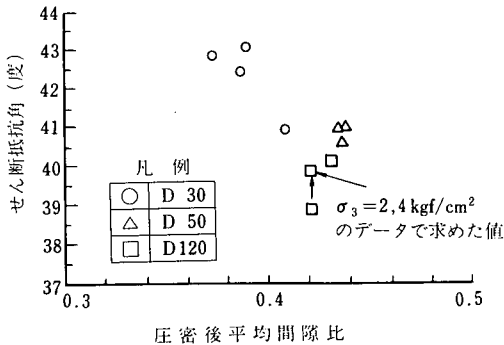


図-3・9 圧密後間隙比とせん断抵抗角

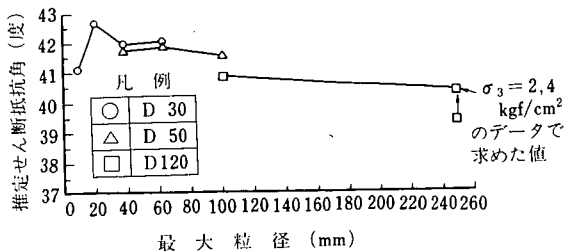


図-3・10 最大粒径と $e=0.4$ での推定せん断抵抗角

てまず供試体は、粒度組成・密度が均一な異方性の無い等方質のものを作製することが最も重要な仕事である。また、供試体の軸方向に均等に応力を載荷するためには、供試体の上下端面は供試体軸に直角な平面で（上下端面が平行である）できるだけ平滑に仕上げておくことが必要である。

以上の供試体作製時の相違がせん断抵抗角にどの程度の大きさで影響を与えるかを把握するために実験的な検討を加えた²⁹⁾。

実験的検討は、①供試体端面の処理程度がせん断強さに与える影響を求める。②供試体内の密度不均一性がせん断強さに与える影響を求める点に着目して行った。

表-3-8に試験材料の性質を示す。端面処理に関する試験には斑れい岩、供試体内密度の密度分布比較には安山岩を用いた。2岩種とも一軸圧縮強度の大きな堅硬なロック材料である。また、図-3-11に各々の試験に用いた材料の粒度分布を示す。試料の最大粒径は、直径30cm供試体の三軸圧縮試験装置を使用することから許容最大粒径と考えられる63.5mmとした。

供試体の端面処理に着目した試験の方法・条件を表-3-9に示す。三軸圧縮試験供試体の端面摩擦が強度に及ぼす影響については、すでに Bishop and Green らの研究³⁰⁾があり、砂を用いた試験結果より供試体高さが供試体直径の2倍以上のときは端面摩擦の有無が ϕ_c に影響しないとの報告がある。本試験では端面摩擦を低減することが困難なことから端面の平滑度（凹凸の程度）に着目した比較試験とした。表-3-10に試験ケースと端面処理の方法を示す。端面処理方法は試料と同じものを用いて、下部端面では細粒層を設ける。また上部端面では締固め終了面の凹部に細粒材料を入れて面を平らにする。

表-3-11に端面処理比較の結果を示す。供試体は6層締固め方法として単位体積重量は圧密後に着目して絶対乾比重で求めた間隙比0.435を目標とした。試験結果（ $\sigma_3 = 2 \sim 6.2 \text{ kgf/cm}^2$ ）では、せん断抵抗角・見掛け

の粘着力成分はそれぞれ、 $40.9 \sim 41.2^\circ \cdot 1.4 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ の一定した範囲にある。以上のことから本試験で行った端面処理方法の範囲ではせん断強さの試験値に与える影響はないものと判断される。しかし、供試体に

表-3-8 試験材料の性質

供試体 項目	D 30	D 30
岩 種	斑れい岩	安 山 岩
真 比 重	2.95~3.03	2.70~2.74
絶乾比重	2.87~2.98	2.36~2.55
表乾比重	2.90~3.00	2.50~2.60
吸 水 率	0.5 ~ 1.0 %	2.2 ~ 5.8 %
強 度	$q_u = 1000 \sim 1500 \text{ kgf/cm}^2$	$q_u = 900 \sim 1200 \text{ kgf/cm}^2$
試験目的	端面処理	供試体内密度分布比較

表-3-9 試験の方法・条件

項 目	方 法 ・ 条 件
供 試 体 寸 法	径30×高60cm
圧 密 後 供 試 体 間 隙 比	0.435
せ ん 断 速 度	3.3mm/min
目 標 試 験 側 圧	2, 4, 6 kgf/cm ²

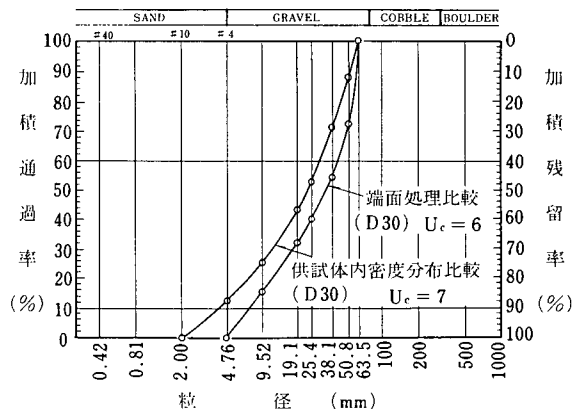


図-3-11 試験粒度分布

表-3-10 試験ケースと端面処理方法

試 験 ケ ー ス	下 部 端 面 処 理				上 部 端 面 処 理			
	処 理 方 法	粒 径 (mm)	厚 さ (mm)	投入量 (gf)	処 理 方 法	粒 径 (mm)	厚 さ (mm)	投入量 (gf)
A	無 処 理	—	—	—	無 処 理	—	—	—
B	D ₁₀ 粒径程度の厚さの2倍処理	9.52~2.00	13	1300	D ₁₀ 粒径以下平滑な処理	9.52~2.00	—	700
C	単一粒度処理	4.76~2.00	6.5	700	D ₁₀ 粒径以下平滑な処理	4.76~2.00	—	500
D	D ₁₀ 粒径程度の厚さ処理	9.52~2.00	6.5	650	D ₁₀ 粒径以下平滑な処理	9.52~2.00	—	500

表-3-11 端面処理比較の結果

試験ケース	σ_3 (kg f/cm ²)	初期乾密度 (gf/cm ³)	間隙比の変化			$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg f/cm ²)	強度定数	
			e_o	e_c	e_f		ϕ_{CD} (度)	C_{CD} (kg f/cm ²)
A (無処理)	6.2	2.006	0.503	0.434	0.402	29.84	41.1	1.4
	4.1	2.024	0.490	0.434	0.419	22.41		
	2.0	2.045	0.474	0.434	0.447	13.74		
B (2.0 ~ 9.52mm粒径 1.3 cm処理)	6.2	2.000	0.508	0.436	0.396	29.58	40.9	1.4
	4.1	2.014	0.497	0.434	0.413	21.95		
	2.0	2.041	0.477	0.436	0.444	13.67		
C (2.0 ~ 4.76mm粒径 0.65cm処理)	6.2	1.996	0.511	0.436	0.397	29.28	40.9	1.4
	4.1	2.019	0.493	0.436	0.421	21.68		
	2.0	2.037	0.480	0.436	0.446	13.39		
D (2.0 ~ 9.52mm粒径 0.65cm処理)	6.2	1.998	0.509	0.434	0.395	30.85	41.2	1.5
	4.1	2.019	0.493	0.436	0.417	22.05		
	2.0	2.038	0.479	0.436	0.444	14.67		

載荷重を均等に与えるためには特に上部端面を平滑に仕上げるのが当然望ましいことは言うまでもない。

次に供試体内密度に着目した試験について述べる。

表-3-12に試験の方法・条件を示す。また、表-3-13に供試体内密度分布の条件を示す。供試体の作製方法は6層締固めとした。6層のうち2層ずつを表-3-13に示す密度分布となるように所定の締固め後の供試体高さとなるように締固め、圧密後の平均間隙比を0.35に統一した。

表-3-14に試験結果(圧密排水条件・不飽和気乾試料)を示す。図-3-12に各側圧ごとに粘着力成分が零として最大主応力差の関係 {式 (3-2)} より求めたせん断抵抗角 ϕ_o の関係を示す。試験側圧の範囲では、 ϕ_o は上部が密なケースIV・VIが大きい。側圧が4 kg f/cm²以下では ϕ_o は供試体が一様なケースVIIが最も小さく現

われている。側圧が6 kg f/cm²付近ではバラツキが大きいがケースVIIは平均的な ϕ_o を与えている。この理由としては、側圧が小さいときには密度の不均一な供試体ではLの部分(単位体積重量が一番小さい部分)が全体の強度を支配しやすいと考えられる。しかし、側圧が大きくなると供試体全体が一様化の方向になろうとするために強度にバラツキが生じるとも解釈される。

図-3-13に異なる4種類の側圧と最大主応力差の関

表-3-12 試験の方法・条件

項 目	方法・条件
供 試 体 寸 法	径30×高60cm
圧密後供試体平均間隙比	0.35
せん断速度	6 mm/min
目標試験側圧	1.5, 3, 4.5, 6 kg f/cm ²

表-3-13 供試体内密度分布の条件

試験ケース	I	II	III	IV	V	VI	VII
供試体の位置							
上部の3分の1	L	M	L	D	M	D	M
中部の3分の1	M	L	D	L	D	M	M
下部の3分の1	D	D	M	M	L	L	M

M: 基準密度(間隙比が0.35の密度)

L: Mの間隙比よりも約0.05間隙比が大きいゆるい密度

D: Mの間隙比よりも約0.05間隙比が小さい密な密度

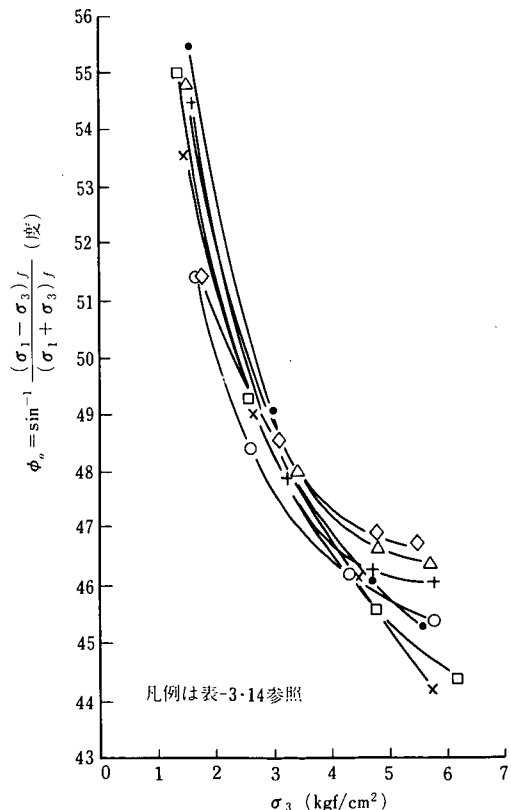
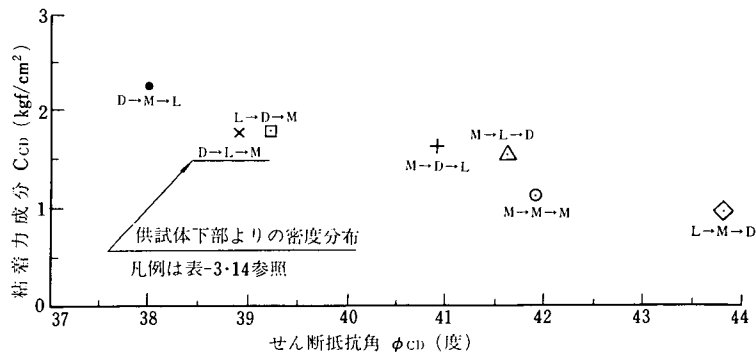


図-3-12 σ_3 と ϕ_o の関係

表-3.14 供試体の密度および最大主応力差等

試験ケース (供試体下より の締め具合)	側 圧 σ_3 (kgf/cm ²)	代表物性値	供試体作製時間隙比			間 隙 比			破 壊 時 軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kgf/cm ²)	強度定数 ϕ_{CD} (度) C_{CD} (kgf/cm ²)	凡 例 記 号
			供 試 体 下 部	供 試 体 中 部	供 試 体 上 部	初 期 e_0	圧密後 e_c	破壊時 e_f			
Ⅰ (D→M→L)	1.55	D－密詰め	0.318	0.372	0.419	0.369	0.349	0.340	14.47	38.0	●
	3.0		0.335	0.385	0.435	0.384	0.350	0.366	18.48		
	4.7	M－標準詰め	0.353	0.398	0.449	0.399	0.350	0.393	24.18	2.25	
	5.55	L－緩詰め	0.357	0.398	0.453	0.402	0.349	0.389	27.23		
Ⅱ (D→L→M)	1.5	$G_b = 2.52$	0.322	0.422	0.374	0.371	0.350	0.345	12.40	38.9	×
	2.7		0.336	0.430	0.386	0.383	0.350	0.363	16.73		
	4.5	$U_c = 7$	0.342	0.439	0.398	0.391	0.350	0.378	23.34	1.80	
	5.8	$Q = 3.4\%$	0.353	0.447	0.395	0.397	0.350	0.387	26.64		
Ⅲ (M→D→L)	1.6	$S_t = 133$	0.372	0.321	0.422	0.371	0.350	0.347	13.98	40.9	+
	3.25		0.387	0.336	0.431	0.383	0.350	0.369	18.73		
	4.7	kgf/cm ²	0.389	0.345	0.445	0.392	0.350	0.373	24.53	1.65	
	5.8	板・棒状	0.402	0.347	0.448	0.398	0.350	0.392	29.84		
Ⅳ (M→L→D)	1.5		0.371	0.422	0.323	0.371	0.349	0.341	13.41	41.6	△
	3.4		0.380	0.437	0.335	0.388	0.350	0.368	19.73		
	4.8		0.394	0.437	0.348	0.392	0.350	0.380	25.61	1.57	
	5.7		0.402	0.450	0.345	0.398	0.350	0.383	30.02		
Ⅴ (L→D→M)	1.37		0.424	0.319	0.376	0.376	0.350	0.336	12.41	39.2	□
	2.6		0.433	0.336	0.387	0.384	0.350	0.360	16.30		
	4.8		0.442	0.346	0.391	0.392	0.350	0.380	23.97	1.79	
	6.2		0.448	0.355	0.389	0.398	0.350	0.392	28.96		
Ⅵ (L→M→D)	1.75		0.420	0.377	0.319	0.371	0.351	0.338	12.53	43.8	◇
	3.1		0.435	0.392	0.341	0.388	0.350	0.357	18.54		
	4.8		0.445	0.393	0.346	0.392	0.350	0.380	25.99	0.99	
	5.5		0.442	0.402	0.395	0.395	0.350	0.388	29.49		
Ⅶ (M→M→M)	1.7		0.392	0.395	0.414	0.394	0.350	0.363	12.15	41.9	○
	2.6		0.415	0.414	0.428	0.414	0.350	0.375	15.46		
	4.3		0.431	0.431	0.402	0.430	0.347	0.398	22.32	1.15	
	5.75		0.396	0.396	0.402	0.398	0.350	0.325	28.35		



係（一次式）より数値計算で求めたせん断抵抗角 ϕ_{CD} と見掛けの粘着力成分 C_{CD} の関係を示す。図より供試体の下部が密な場合には粘着力成分が大きくせん断抵抗角が小さい。逆に供試体の上部が密な場合には粘着力成分が小さくせん断抵抗角が大きい。また、中部が密な供試体はその中間的な大きさ傾向を示している。

現在、ロックフィルダムの設計では試験で得られた見掛けの粘着力成分は余裕として無視している。したがって材料のせん断抵抗角は設計上重要な値である。しかし、本試験例ではせん断抵抗角の最大値と最小値の差は5.8度もあり、供試体内密度の均一性は試験上非常に重要な要素であることがわかる。またこの他に供試体作製時の細部・手順（締固めの方法を含む）が強度試験値に大きな影響を持っているものと推察される。

3.3 せん断速度

現在、ロック材料を対象とした三軸圧縮試験でのせん断速度は土質試験法における透水性の良い土質材料を対象とした1%/minの速度で試験されている場合が多いようである。

気乾砂を用いた三軸圧縮試験におけるひずみ速度の影響について Lee, Seed and Dunlop 等³¹⁾の研究がある。側圧が6 kgf/cm²以下で $10^{-2} \sim 10^4$ /minのひずみ速度範囲ではせん断強さにほとんど影響しないことが報告されている。しかし、ロック材料を対象としたせん断速度の影響に関する研究は少ない。

ロック材料を対象としたせん断速度とせん断強さに着目した比較試験を実施した³²⁾。せん断速度がせん断強さに与える影響は細粒分が少ない粒度のときには粒径の影響は少ないと考えられるので直径10cm高さ20cmの供試体三軸圧縮試験装置を用いて試験を行った。試験材料は、表-3・8に示した斑れい岩を使用した。図-3・14に試験粒度分布（均等係数が6）を示す。また、表-3・15に試験の方法・条件を示す。

供試体の密度条件は、圧密後の間隙比を統一して行った。圧密後の統一間隙比は、供試体の乾燥単位体積重量と絶対比重から求めた0.50の値とした。材料の密度特性は、J I S A 1210 T-1979の突固め試験（第一法）により締固めた場合、締固め仕事量が零の場合および4 E_cの時に各々、間隙比で0.82・0.43であった。

試験時の圧密過程は供試体内を約0.1 kgf/cm²の負圧で吸引した状態で側圧を増圧して側圧が0.1 kgf/cm²程度になった時点で大気開放して圧密を継続した。圧密による間隙比の減少は側圧が2・4・6 kgf/cm²で各々0.05・0.07・0.09程度であった。また、圧密後の統一

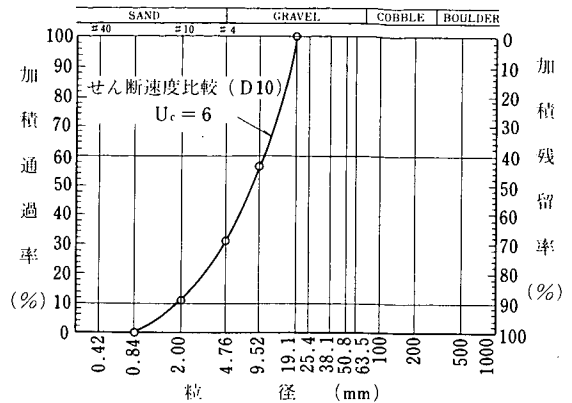


図-3・14 試験粒度分布

表-3・15 試験の方法・条件

項 目	方法・条件
供 試 体 寸 法	径10×高20cm
圧 密 後 供 試 体 間 隙 比	0.50
せ ん 断 速 度 %/min	供試体高さに対する百分率 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00
目 標 試 験 側 圧	2, 4, 6 kgf/cm ²

間隙比は、0.50±0.01の範囲で統一して試験することができた。

試験結果を側圧と最大主応力差の関係で整理したものを図-3・15に示す。図より各々の側圧条件での最大主応力差の大きさは同程度でありせん断速度の影響は認められない。

側圧と最大主応力差の関係より最小二乗法により求めた見掛けの粘着力成分は1.28~1.52 kgf/cm²、せん断抵抗角は40.4~41.2度の範囲にあり、本試験で行った材料・粒度組成条件で0.25~2.0%/minのせん断速度範囲では試験値に与える影響は認められない。

せん断後の粒子破碎率は Marsal の定義³³⁾により求めると側圧の小さなものより大きな方が多く生じる傾向が現われており、破碎率は3~6.5%で速度との関係は見られなかった。

以上のせん断速度に着目した比較試験結果より判断してロック材料のせん断強さは一般に採用されている1%/min程度の範囲ではせん断強さに与える影響は非常に小さいものと考えられる。しかし、透水性の良いロック材料についての排水条件試験を行う場合には、間隙圧発生の有無を考慮して試験目的に応じたせん断速度を選定すべきである。

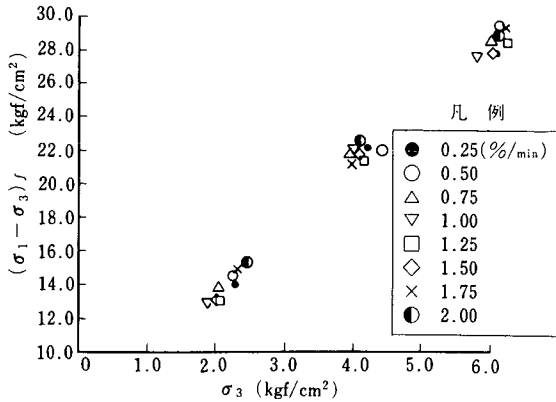


図-3-15 側圧と最大主応力差

3.4 飽和・不飽和試験

ロック材料の三軸圧縮試験計画を立案する場合には、試験の対象材料・粒度組成の他に試験側圧範囲および試験方法と試験条件について検討が加えられる。試験方法はロック材料（透水性材料）を対象としていることから通常では、圧密排水試験（C D試験）で軸ひずみ制御方法によって行われている。しかし試験時の試料状態については飽和および不飽和の二種類に大別されているが、一般的には不飽和気乾状態で試験されている場合が多いようである。

不飽和状態の試料条件について試験されている主な理由は、堅硬で品質の良い（風化・変質作用を受けていない）ロック材料の場合には、飽和と不飽和状態では試験誤差の範囲内で試験値に大きな差を生じないためである。

飽和・不飽和状態が三軸圧縮試験値に影響を及ぼす要因としては①岩石粒子の接点間に存在する水によって摩擦の大きさが変化する、②岩石粒子が吸水することによって岩石粒子自体の強度が変化する等が考えられる。

花崗岩を用いて風化の程度と試料の含水状態が試験値に与える影響に着目した試験例³⁴⁾では、材料が新鮮なものは試料の含水状態に影響されないで一定した最大主応力差と変形性が現われている。しかし、材料自体の風化の程度が大きくなるにしたがって含水状態によって試験値に差を生じている。その傾向は、風化の程度が小さいものより大きな方が大きな影響を受けている。

図-3-16は輝緑凝灰岩について比較三軸圧縮試験（供試体径30cm・C D試験・試料最大粒径63.5mm・均等係数が22）を行った結果である。岩石粒子の平均絶対比重は2.84、平均吸水率は1.7%であり、粘土鉱物

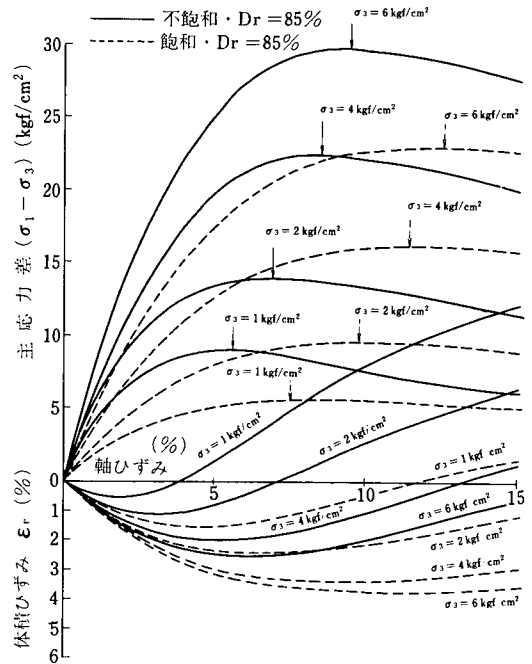


図-3-16 応力～ひずみ曲線の比較

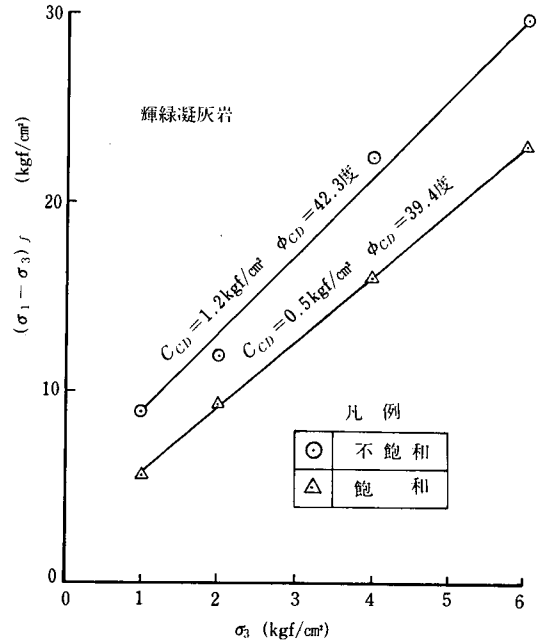


図-3-17 最大主応力差の比較 (Dr = 85%)

が若干含まれている材料である。応力ひずみ曲線の比較では、試料を飽和することによって最大主応力差が低下するとともに最大主応力差がめいかに現われない。また、体積ひずみと軸方向ひずみの関係にも大きな差が現われている。図-3-17に示すせん断強さで比較すると、せん断抵抗角は不飽和よりも飽和の方が約

3度低下している。また、見掛けの粘着力成分も飽和よりも飽和の方が約0.7kgf/cm²小さく現われている。

以上の比較試験の事例にみられるように、特に変質・風化が認められるロック材料を試験対象とした場合には飽和・不飽和状態によって試験値が大きく変化する場合がありますので材料の性状を十分に把握してから試験条件を決定する必要がある。さらにこのような材料の場合には長期的な安定性・耐久性についての調査試験（たとえば温度および含水量の変化を与える試験）も合せて実施することが望ましい。

3.5 三軸圧縮試験の要点

本項では、第2章および第3章における事例および三軸圧縮比較試験データの分析結果を基にして三軸圧縮試験の手順に関するポイントについて記述することにする。

三軸圧縮試験を実施する場合の作業を大別すると下記の3項目となる。

- ① 試験粒度条件の設定。
 - ② 試験対象密度の設定。
 - ③ ①と②の材料供試体条件における三軸圧縮試験。
- 以下にその手順に従って列記する。

1) 粒度・密度条件の検討

- (1) 試験粒度は横坑内採取データおよび類似な材質条件の他ダムの施工事例を参考とする。基本的には推定実粒度分布に相似な試験可能な粒度分布にした粒度組成について行う。通常では粒度分布には幅が存在することから2～3種類程度の粒度範

囲を想定しておくことが望ましい。

- (2) 試験密度の設定は設計密度を中心にそれより大きい密度および小さな密度状態を対象とすることが望ましい。

概略設計または実施設計段階では対象材料に関する情報としては物理特性（比重・吸水率）・調査横坑内での掘削粒度特性に限られる。限られた情報の基で密度に関して検討を加えるためには一般に①室内突固め試験、②材料条件が類似なダムの施工事例調査等の結果が参考とされている。

室内締固め試験方法については標準化されたものがないが、従来一般に採用されている突固めによる方法が汎用性の点で有効であると考えられる。図-3-18に室内で振動締固め方法（表-2-10）と突固め方法（モールド容積25ℓ・内径30cm・15kgfランマ・落下高50cm・3層締固め）によって得られた均等係数と絶対乾比重 G_s によって求めた間隙比の関係を示す。図-3-18のデータ範囲では振動方式の方が突固め方式に比較して小さな間隙比状態に締固まる傾向にある。

ロック材料の締固め密度は粒度組成によって左右されるから、試験密度の設定に当っては2種類以上の想定粒度を対象として $0 E_c$ ・ $1 E_c$ ・ $2 E_c$ ・ $3 E_c$ 程度に締固め仕事量を変えて試験して設計対象密度について検討することが望ましい。また、締固めによって岩石粒子がどの程度破碎するかについてもフルイ分析によって把握しておくことが望ましい。岩石粒子の破碎が多い場合にはロック

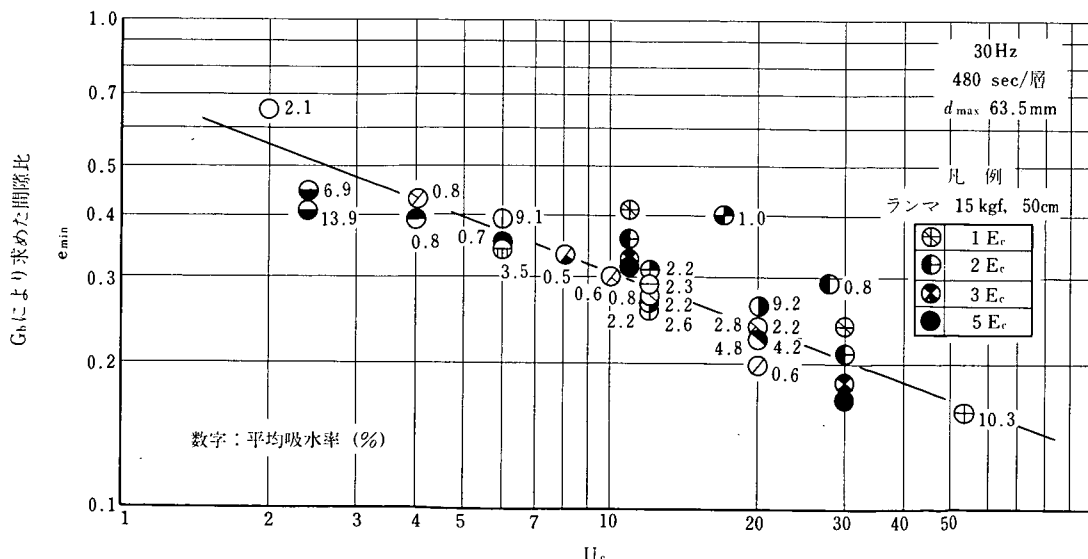


図-3-18 均等係数と最小間隙比（室内試験データ）

材料の排水機能が阻害される場合も生じるので要注意事項である。

以上、ロック材料の設計時の密度に関する試験は室内試験が中心となる場合が多い。したがって、設計時に想定した材料の性質は、本施工の開始とともに、できるだけ早く現場盛立試験を実施して確認することが望ましい。

表-3-16にロックゾーンの施工密度事例を示す。

また、表-3-17に主なフィルダムの透水性材料の設計値等の事例を示す。

2) 三軸圧縮試験手順

(1) 図-3-19にせん断強さを求める試験手順の概略を示す。また、以下に三軸圧縮試験の中で重要な点についての考え方・方法を示す。

(2) 試験を行う場合には、必ず試験装置の機械的な

誤差と供試体作製時等における人的誤差を伴う。人的な誤差については①十分注意して作業を行う、②異状なデータが現われた場合に再試験を行う、③データ数を増やす等によってある程度の誤差以内におさめることは可能である。しかし、機械的誤差については試験後に補正できない場合が多いので日常の点検・精度確認を実施して試験にそなえておくことが基本的で重要なことである。

(3) 試験時の精度を高めるためできる限り供試体の直近で試験時供試体の挙動計測を行うことが望ましい。

(4) 供試体の作製は、試料最大粒径の1.5倍程度の厚さを1層分の厚さとする。各層毎に試験粒度に適合したものをモールド内に粒度および密度が片よらないように均等に締固めることが重要である。

表-3-16 ロックゾーンの施工密度事例

ダム名	本 体 施 工							
	転圧試験時 均等係数	転 圧 機 械	まき出し厚 (m)	転 圧 回 数	密 度 (tf/m^3)	均等係数	絶 乾 比 重	絶乾比重による 間隙比
1. 大雪	(3)	32t ブルドーザ	1.0	4	$\gamma_d = 2.186$	(30)	(2.563)	0.17
2. 十勝	13	32t ブルドーザ	1.0	4	$\gamma_d = 1.999$			(0.28)
3. 漁川	41	32t ブルドーザ	1.5	4	$\gamma_d = 2.087$	(13)	2.304	
4. 御所	5.5	21t 振動ローラ	0.5(1.0)	6	$\gamma_d = 1.678$	10.1	2.122	0.26
5. 白川	(24)	8.2t 振動ローラ	1.0	6	$\gamma_d = 1.896$	11.8		(0.30)
6. 岩屋	120	32t ダンプトラック	2.0	1	$\gamma_d = 2.160$	15.8	2.589	0.20
	24	32t ダンプトラック 48t ブルドーザ	1.0	$\frac{1}{2}$	$\gamma_d = 2.229$	23.3	2.603	0.17
7. 寺内	17	21t 振動ローラ	1.5	4	$\gamma_d = 2.22$	(23)	(2.66)	0.20
8. 福地	7	10t 振動ローラ	0.3	4		(54)		
		10t 振動ローラ	0.6	4		(2)		
9. 樽水	18	ブルドーザ D120A	0.5	3,6	$\gamma_d = 2.018$	(43)		
11. 七北田	19	13.5t 振動ローラ	1.0	4	$\gamma_d = 1.688$	(47)	2.010	0.19
12. 前川		11t 振動ローラ	0.5	5	$\gamma_d = 1.870$	26.1	2.192	0.17
13. 四時	8	13.5t 振動ローラ	1.0	4	$\gamma_d = 2.272$	46.8	(2.894)	0.27
14. 手取川		13.5t 振動ローラ	0.6	4				
	60	13.5t 振動ローラ	0.8	4	$\gamma_d = 2.077$	(64)	2.55	0.23
	60	13.5t 振動ローラ	1.5	6	$\gamma_d = 2.045$	(28)	2.55	0.25
15. 三保		13.5t 振動ローラ	1.0	4	$\gamma_d = 2.292$			
	80	13.5t 振動ローラ	1.0	4	$\gamma_d = 2.315$	(32)	2.861	0.24
		13.5t 振動ローラ	1.0	4	$\gamma_d = 2.317$	(18)	2.864	0.24
19. 武利		21t ブルドーザ	0.6	6	$\gamma_d = 2.00$	(120)	2.41	0.21
(注)	() 書き は推定値。					() 書き はグラフより 読み取った値。	() 書き は推定値。	

表-3-17 主なフィルダムの透水性材料の性質（試験値・設計値）

ダム名	岩種	比重	吸水率 (%)	せん断試験方法	試験結果		設計値		
					γ_e 及び e	せん断抵抗角	乾燥密度	湿潤密度	せん断抵抗角
十勝	角斑岩 粘板岩	2.567	2.2	大型一面 2.5×2.5×0.9m	1.797 0.43	度 40.5	tf/m ² 1.89	tf/m ² 1.95	度 40
高見	砂岩	2.69	2.0	大型三軸 D30×H70cm	2.14 0.26 2.14 0.26	41.2 42.0	2.12 2.12	2.19 2.17	39 41
白川	安山岩	2.46	2.9	大型一面 1.5×1.5×0.6m	1.69 0.46 1.88 0.31	40.6 46.3	1.80	1.80	40
御所	安山岩	2.018	10	大型三軸 D30×H60cm	1.479 0.36	40	1.493	1.568	40
寒河江	玄武岩	2.68	3	大型三軸 D30×H60cm	1.85 0.40	40	1.96	2.02	40
四時	緑色片岩	3.00	0.6	大型一面 0.5×0.5×0.5m	2.00 0.50	45	2.00	2.014	40
七北田	玄武岩	2.695	2.5	大型三軸 D30×H60cm	1.865 0.45	45.7	1.80	1.83	42
手取川	片麻岩	2.57	1.3	大型三軸 D30×H70cm	1.70 0.51	40.9	1.99	2.04	38
岩屋	石英斑岩	2.613	0.6	大型三軸 D30×H70cm	1.83 0.43	43.8	1.830	1.853	43
瀬戸	砂岩 頁岩	2.63～ 2.67	0.4	大型三軸 D50×H120cm	1.90 0.39	40.8	1.90	1.95	40
黒川	凝灰岩	2.60	2.0	大型三軸 D30×H60cm	1.90 0.37	39.2	1.90	1.92	39
稲村	石英片岩	2.665	1.7	大型一面	1.95 0.37	41.4	2.00	2.02	41
下郷	凝灰岩 チャート	2.69 2.75	8.3 1.0	大型三軸 D30×H60cm	1.88 (0.43) 2.08 (0.32)	43.5 44.0	1.80 1.90	1.89 1.96	38 42

(5) 使用メンブレンはなるべく薄いもので伸張性の高いものを選定することが望ましい。

(6) 供試体締固め作製後は、0.3kgf/cm²程度の負圧を供試体に与えた状態を初期供試体形状寸法とすることが望ましい。また試験時には側圧の加圧途中で大気開放する。

(7) 試験は、圧密排水・ひずみ制御（1%/min以下）方式とする。また、通常の材料の場合には不飽和状態、低品質の材料の場合には飽和試料状態で試験した方が安全側である。しかし、通常の材料でも飽和状態でせん断強さが低下すると予想される材料については飽和状態についても試験する。

(8) 試験側圧については対象とする堤体内応力範囲を考慮して3～4種類の側圧を設定して行う。通常、8kgf/cm²以下の側圧条件で良いと考えられる。

(9) 試験時の供試体密度状態は、せん断直前で（または圧密後）統一した密度とすることが有力な一方法であるが、図-3-20に示すように堤体内の圧密過程と三軸圧縮試験時の圧密過程における圧密量が必ずしも一致しないこともある。また圧密体積量の測定精度の問題もあり、供試体作製時の初

期密度を統一する方法も広く採用されている。

以上の項目は実験室で実際に行う試験時における主な考え方とその方法であり、十分に注意して行うことによって試験誤差を最小にすることは可能であると考える。

3) 結果の整理

次に試験データに基づきロック材料のせん断抵抗角 ϕ_{CD} を求める、または定めることが最終目標であり重要なことである。

一般にモールの応力円群に接する包絡線は図-3-21に示すように上に凸な曲線となる場合と直線となる場合に大別できる。一本の直線となった場合には、図-3-22に示すように最大主応力差時の側圧 $\sigma_3 f$ と最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3) f$ の関係を用いて最小二乗法（一次式）によって m_o と f_o を求めることができる。したがってモール・クーロンの破壊基準に従って式（3-3）・式（3-4）よりせん断抵抗角 ϕ_{CD} と見掛けの粘着力 C_{CD} を求めることが出来る。

$$\sin \phi_{CD} = \frac{m_o}{2 + m_o} \dots\dots\dots (3-3)$$

$$C_{CD} = \frac{f_0}{2\sqrt{1+m_0}} \dots\dots\dots (3\cdot4)$$

しかし、図-3・21に示したように包絡線が曲線形状を

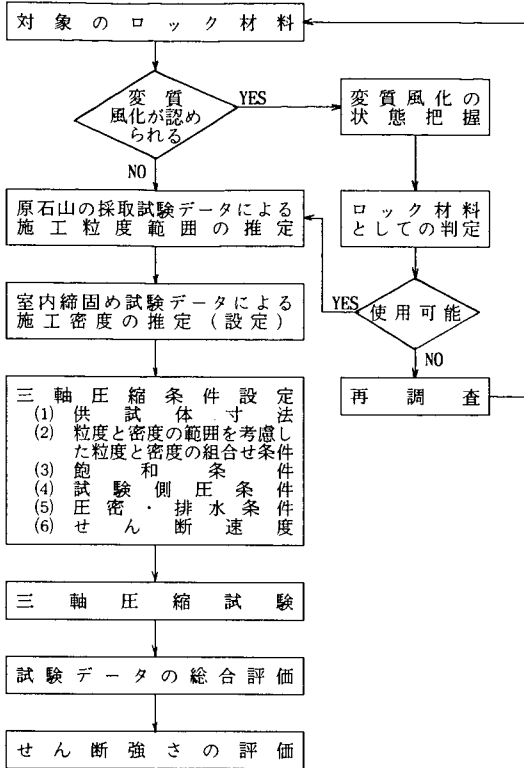


図-3・19 せん断強さを求める手順の概略

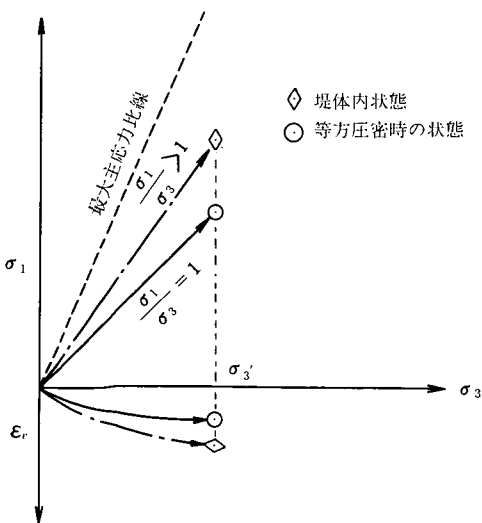


図-3・20 堤体内と等方圧密過程の比較モデル

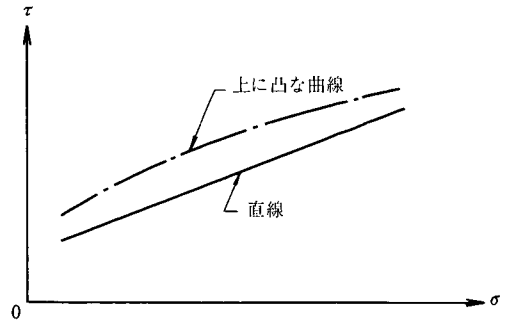


図-3・21 典型的なモールの応力円に接する包絡線

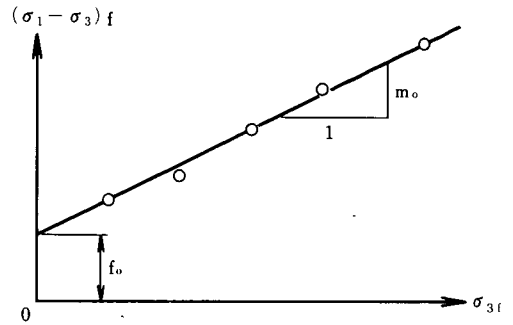


図-3・22 $\sigma_3 f$ と $(\sigma_1 - \sigma_3) f$ のプロット

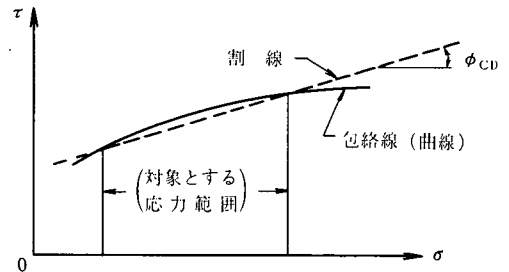


図-3・23 曲線包絡線の ϕ_{CD} の求め方

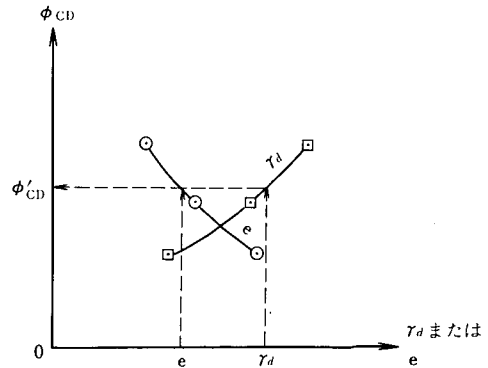


図-3・24 試験結果の整理

表-3・18 ロックゾーンの細分類名称と設計せん断抵抗角

ダム名	ロックゾーンの細分類名称					設計数値 の異なる ゾーン数	※ 設計せん断抵抗角 ϕ_{CD}				ロックゾー ンの体積 ($\times 10^3 \text{m}^3$)
							上流側		下流側		
							外 部	内 部	外 部	内 部	
1大雪	ロ ッ ク					1	38°	38°	38°	38°	3,300
2十勝	ロ ッ ク					1	40°	40°	40°	40°	2,895
3漁川	ロ ッ ク					1	39°	39°	39°	39°	499
4御所	ロ ッ ク					1	40°	40°	40°	40°	758
5白川	ロ ッ ク					1	40°	40°	40°	40°	1,718
6岩屋	ロ ッ クⅠ (外 部)	ロ ッ クⅡ (内 部)				2	43°	39°	39°	43°	4,765
7寺内	ロ ッ ク					1	38°	38°	38°	38°	2,014
8福地	トランジション	ロ ッ ク				2	42°	40°	40°	42°	1,315
9樽水	ランダムロックA	ランダムロックB	リップラップ			2	40.4° 36.9°	36.9°	36.9°	40.4° 36.9°	384
10漆沢	内部ロック	外部ロック				2	41°	41°	35°	41°	1,743
11七北田	ロ ッ クA (下流・上流内部)	ロ ッ クB (上流外部)				2	42°	39°	39°	39°	1,894
12前川	ロ ッ ク					1	38°	38°	38°	38°	441
13四時	トランジション	ロ ッ ク				2	40°	40° 35°	40° 35°	40°	2,280
14手取川	トランジション	内部ロック	外部ロック			3	42°	38° 40°	38° 40°	42°	8,733
15三保	細粒ロック	中粒ロック	粗粒ロック			3	41°	36° 38°	36°	38°	5,099
16広瀬	ロ ッ ク					1	40°	40°	40°	40°	973
17荒川	ロ ッ クⅠ	ロ ッ クⅡ				2	42°	37°	37°	42°	2,539
18双葉	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3			2	44°	38° 50'	38° 50'	44°	660
19武利	トランジション	ロ ッ ク				2	39°	35° 39°	35° 39°	39°	67
20高瀬	インナーシェル	アウターシェル				2	42°	40°	40°	42°	9,300
21七倉	インナーシェル 上 流	インナーシェル 下 流	アウターシェル 上流上部	アウターシェル 上流下部	アウターシェル 下 流	4	42°	40°	38°	42°	5,800
22下小島	トランジション	上流ロック	下流ロック			2	41°	41°	40°	40°	2,737
23南原	上流ロック	下流ロック				2	41°	41°	39° 30'	39° 30'	1,600
24明神	上流ロック	下流ロック内部	下流ロック外部			3	41°	41°	39°	40°	2,558
25稲村	ロ ッ ク1 (上流上部)	ロ ッ ク2 (下流外部)	ロ ッ ク3 (上流下部)	ロ ッ ク4 (下流フィルターの下流)	ロ ッ ク5 (下流内部)	2	41° 39°	41° 39°	39°	41°	
						平 均	40.6°	39.1°	38.5°	40.3°	

※ 上・下流とも「内部」、「外部」の区分は、原則として表面から8m～10m程度までを「外部」それ以内を「内部」として標準断面図をもとに分類した。

示した場合にはせん断強度定数を一義的に定めることはできない。ここでは現行の設計手法では透水性材料（ロック材料）の場合にはせん断抵抗角のみが設計値の対象となっていることを前提として以下にせん断抵抗角 ϕ_{CD} の評価方法の一案について示しておく。

図-3・23に示すようにモールの応力円群の接線が曲線となった場合、①曲線の接線勾配 ($d\tau/d\sigma$) を対象とする、②曲線の割線勾配 ($\Delta\tau/\Delta\sigma$) を対象とする場合の二通りが考えられる。①の接線勾配による方法を採用した場合には直応力に対応した数だけ ϕ_{CD} の値が求められることになる。また、②の割線方法を採用した場合には一個の ϕ_{CD} 値が定まる。しかし対象とする応力範囲を大きくとり過ぎると応力範囲位置によっては割線勾配を過大または過少評価する場合も生じることになり、応力範囲の設定には十分な検討が必要となる。

同一材料で複数の ϕ_{CD} 値を考慮することは現行の安定計算手法において堤体内の想定すべり面上の直応力に対応した ϕ_{CD} を用いることである。これは、材料の強度特性を忠実に評価することになる。

現行の安定計算手法では、すべり面での直応力に応じて ϕ を変えることはしていない。したがって、適切な応力範囲での三軸圧縮試験結果より得られる割線勾配からひとつの ϕ を求めておくのが現実的であると考えられる。ただし、この問題は、より合理的な設計法に向けての試験の問題というよりも設計法の課題である。なお、「4.3 せん断強さ」において後述するように、 $C \cdot \phi$ を用いずに $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ または τ を直接用いて安定計算を行う方が試験値に対してより忠実であると考えられる。

三軸圧縮試験データに基づきせん断抵抗角が求められた。次に図-3・24に示すように間隙比 e または乾燥単位体積重量とせん断抵抗角 ϕ_{CD} の関係で整理する。図-3・24に示す関係より設計密度に対応したせん断抵抗角 ϕ_{CD} を求める。この値が設計値決定のための重要参考値となる。

一般的には、試験データより求められたせん断抵抗角 ϕ_{CD} に原石山の材質変化・施工時の粒度および密度変動値を考慮した適切な余裕を付加して最終的な設計せん断抵抗角 ϕ_{CD} の値が決定されることになる。

ロックゾーンの設計せん断抵抗角の事例を表-3・17および表-3・18に示す。設計値としては $\phi_{CD} = 38 \sim 43$ 度の範囲の事例ダムが多い。また試験値に対する設計値は95~100%のダムが多いようである。

4. 三軸圧縮変形と強度特性

本章では、供試体の直径が30cm・高さが60cmの三軸圧縮試験装置を用いて実施したロック材料の三軸圧縮試験結果についてとりまとめている。特に変形性については近年フィルダム堤体の築堤解析に用いられる変形性を表わすパラメータの大きさに着目した。また、フィルダムの設計値として用いられるせん断抵抗角の大きさに与える要因について若干の考察を加えている。その他に、近年ダムサイトの地質条件が悪化するに伴い堤体材料としての品質も従来のものに比較して低下がみられるため、このような材料特性についても若干の試験結果について記述している。また後述する間隙比の値は絶対比重 G_b の値を用いて求めたものである。

三軸圧縮試験時の基本的な試験条件は、試料最大粒径63.5mm・不飽和圧密排水条件・側圧一定軸方向変位制御法によるものである。図-4・1にD30三軸圧縮試験機の概略構造を示す。また、試験機は以下に列記する機能等を有するものである。

- ① 試験時の軸方向変位および側圧の大きさは電気式油圧サーボ弁により制御する方式である。
- ② 軸方向荷重（変位）は供試体の下部から上部に向って載荷する。また、側圧は油圧ピストンにより油圧を水圧に変換して与える方式である。
- ③ 計測は側圧・軸荷重・体積変化・軸変位の4項

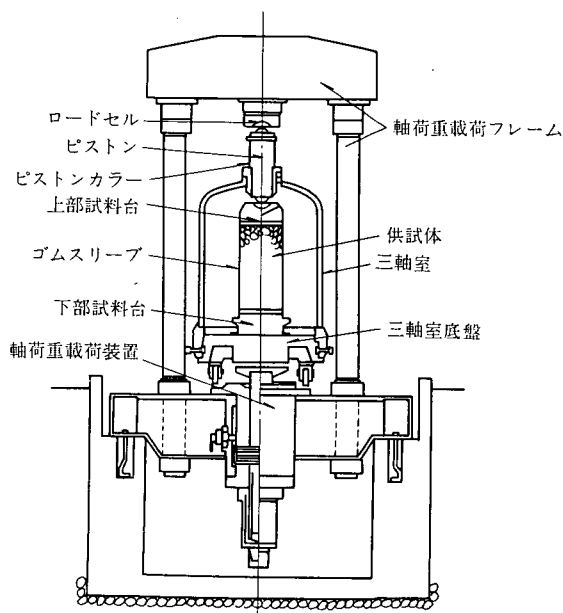


図-4・1 大型三軸圧縮試験機

目であり、データはペンレコーダで連続して記録する。

④ 計測方式と試験データの信頼性は下記のとおりである。

- a. 軸荷重 : 容量50tf (ヒズミゲージ方式),
最小読み取り量0.2tf, 総合精度
 $\pm 0.40\% F S$
- b. 側 圧 : 容量30kgf/cm² (ヒズミゲージ方式),
最小読み取り量0.1kgf/cm², 総合
精度 $\pm 0.33\% F S$
- c. 軸変位 : 容量150mm (ポテンシヨメータ),
最小読み取り量0.5mm, 総合精度
 $\pm 0.33\% F S$
- d. 体積変化 : 容量10リットル(側圧加圧用ピスト
ンの変位量をポテンシヨメータで
検出して、変位量から体積変化量
に電氣的に変換した外体積変化),
最小読み取り量40cm³, 総合精度
 $\pm 0.40\% F S$

⑤ 計測方法については、軸荷重は三軸室の外部で、軸変位は軸方向載荷ピストンの変位を、側圧は三軸室の底部で検出している。

4.1 変形性

三軸圧縮試験によって得られる応力～ひずみ曲線の形状について供試体単位体積重量(または間隙比)の大きさに着目して分類すると表-4・1に示すようである。表-4・1に示した応力～ひずみ曲線の模式図は、側圧が一種類の場合である。実際の試験では3～4種類程度の異なる側圧の大きさに試験を行うため、各側圧ごとに応力～ひずみ曲線が得られることになる。このこと

は、一般に自然材料(ここではフィル材料を対象に考えている)の変形性は側圧に依存して非線型性を有しているためである。

材料の変形性を表現する一方法として、Kondnerの方法³⁵⁾がある。この方法は、軸方向応力を単調に増加させる三軸圧縮試験から得られる土の非線型な応力～ひずみの関係を双曲線で近似するものである{式(4・1)}。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b \cdot \varepsilon_a} \dots\dots\dots (4 \cdot 1)$$

$\sigma_1 - \sigma_3$: 主応力差

ε_a : 軸方向ひずみ

a, b : 実験より求まる材料定数

三軸圧縮試験より得られる応力～ひずみ曲線を式(4・1)で近似することによって初期接線変形係数 E_i と軸方向ひずみまたは応力の大きさに応じた接線変形係数 E_t を表現することができる。

Kulhawy・Duncan・Seedらは³⁶⁾, Janbuが実験的に明らかにした拘束応力 σ_3 と E_i の関係式(4・2)に着目するとともにモール・クーロンの破壊基準を用いて式(4・1)を基本として応力～ひずみ曲線の非線型性について表現できることを示した。

$$E_i = K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \dots\dots\dots (4 \cdot 2)$$

P_a : 大気圧

K, n : 実験から求まる材料定数

また、材料のポアソン比についても変形係数の場合と同様に軸方向ひずみ ε_a と半径方向ひずみ ε_r の関係を双曲線で近似する試みがなされている。またその時の材料初期接線ポアソン比 ν_i は式(4・3)によって表

表-4・1 三軸圧縮試験で得られる変形性の分類

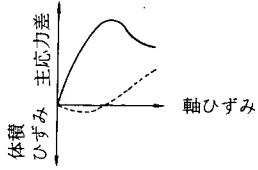
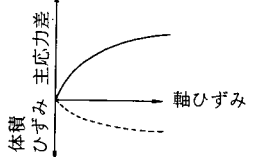
供 試 体 の 乾 燥 密 度	応 力 ～ ひ ず み 曲 線 の 形 状	応 力 ～ ひ ず み 曲 線 の 特 徴
乾燥密度が非常に 大きい (相対密度が非常 に高い場合)		① 軸方向ひずみが15%以内で明確な主応力差の最大値が現れる傾向にある。 ② 体積ひずみが軸方向ひずみの小さな範囲で圧縮現象であるが最大主応力差が現れると膨張現象となる。
乾燥密度が中程度 である (相対密度が50% 前後の場合)		① 軸方向ひずみが15%以内で明確な主応力差の最大値が現れない傾向にある。 ② 体積ひずみは軸方向ひずみが増加するに伴い圧縮現象の傾向を示す場合が多い。

表-4.2 ロック材料の非線型定数一覧表

岩 種	U_c	$\bar{G}_b$	$\bar{Q}$	$\bar{e}_o$	$\bar{e}_c$	E_i		ν_i			E_{os} (kg f/cm ²)	凡 例
						n	K	D	F	G		
流 紋 岩	2.4	1.880	0.139	0.404	0.301	0.83	210	9.5	0.18	0.18	300	●
		2.201	0.069	0.630	0.504	0.62	153	11.8	0.13	0.13	230	
				0.753	0.524	0.55	121	8.8	0.11	0.11	160	
				0.447	0.392	0.17	280	18.0	0.23	0.47	500	
				0.507	0.357	0.75	210	10.8	0.11	0.14	380	
緻 密 安 山 岩	17	2.611	0.010	0.439	0.364	(0.14)	(1,170)	8.3	0.30	0.39	1,110	⊕
				0.581	0.480	(0.70)	(250)	10.0	0.19	0.20	480	
				0.402	0.328	(0.42)	(520)	18.0	0.21	0.28	1,110	
安 山 岩	20	2.056	0.092	0.262	0.216	0.18	930	10.0	0.27	0.40	1,450	⊙
	6	2.053	0.091	0.389	0.329	0.23	570	6.5	0.31	0.39	660	⊙
花 崗 岩	28	2.763	0.008	0.293	0.229	0.50	820	14.5	0.24	0.34	2,000	●
	4	2.744	0.008	0.400	0.351	0.73	380	19.2	0.17	0.23	630	
				0.388	0.332	0.84	770	18.0	0.32	0.39	960	●
阿蘇熔岩	53	1.920	0.103	0.159	0.118	0.5	940	15.5	0.24	0.42	3,030	⊕
花 崗 岩	28	2.763	0.003	0.297	0.251	0.74	650	16.3	0.33	0.31	2,220	●
流 紋 岩	2	2.452	0.021	0.665	0.559	0.36	350	9.7	0.33	0.30	420	○
	12	2.486	0.023	0.843	0.712	0.46	220	14.5	0.13	0.15	290	
				0.335	0.279	0.38	660	20.5	0.22	0.27	1,430	⊖
風 化 流 紋 岩	6	2.435	0.0345	0.556	0.494	0.52	190	17.5	0.10	0.12	300	⊕
				0.481	0.405	0.48	390	12.2	0.16	0.22	770	
				0.388	0.334	0.28	660	17.0	0.20	0.27	1,270	
石 英 安 山 岩	20	2.473	0.0416	0.387	0.329	0.76	195	11.4	0.24	0.29	910	●
				0.269	0.226	0.59	520	14.1	0.25	0.38	2,630	
閃 緑 岩	12	2.612	0.022	0.332	0.278	0.46	380	10.0	0.25	0.33	1,060	⊖
				0.474	0.399	0.51	270	9.3	0.21	0.26	480	
		2.588	0.026	0.271	0.230	0.20	820	9.8	0.32	0.44	1,820	⊕
				0.378	0.314	0.32	470	12.5	0.23	0.28	710	
	20	2.632	0.022	0.273	0.232	0.19	620	13.5	0.24	0.35	1,720	⊕
				0.393	0.316	0.42	350	13.0	0.22	0.27	730	
玄 武 岩 (半風化)	12	2.676	0.022	0.335	0.282	0.25	560	12.9	0.24	0.32	1,250	⊕
				0.575	0.424	0.40	300	12.5	0.20	0.24	530	
玄 武 岩	12	2.722	0.022	0.404	0.340	0.14	540	13.1	0.25	0.28	910	⊕
				0.309	0.255	0.25	680	13.0	0.21	0.33	1,670	
	20	2.604	0.048	0.294	0.244	0.30	410	15.0	0.19	0.25	1,000	⊕
				0.404	0.341	0.60	210	10.0	0.21	0.26	560	
	20	2.701	0.028	0.251	0.213	0.48	880	18.3	0.28	0.39	3,700	⊕
				0.330	0.282	0.49	390	15.3	0.19	0.24	1,060	
斑 れ い 岩	20	2.923	0.006	0.265	0.224	0.18	1,520	12.0	0.28	0.41	3,030	⊖
				0.416	0.354	0.14	650	15.0	0.21	0.24	790	
	12	2.952	0.008	0.299	0.259	0.28	1,250	16.5	0.22	0.31	2,330	●
				0.357	0.309	0.42	790	16.8	0.16	0.24	1,180	
	6	2.919	0.007	0.390	0.332	0.30	1,190	16.0	0.29	0.33	1,330	●
				0.423	0.363	0.22	1,190	17.5	0.22	0.26	1,220	
	4	2.919	0.008	0.463	0.395	0.28	880	16.5	0.18	0.26	950	⊗
斑 れ い 岩	10	2.965	0.006	0.340	0.278	0.34	920	19.0	0.19	0.22	1,110	⊗
				0.425	0.348	0.38	550	19.0	0.13	0.14	580	
	8	2.967	0.005	0.386	0.314	0.48	800	23.0	0.18	0.19	720	⊗
				0.465	0.380	0.59	530	27.0	0.06	0.07	570	

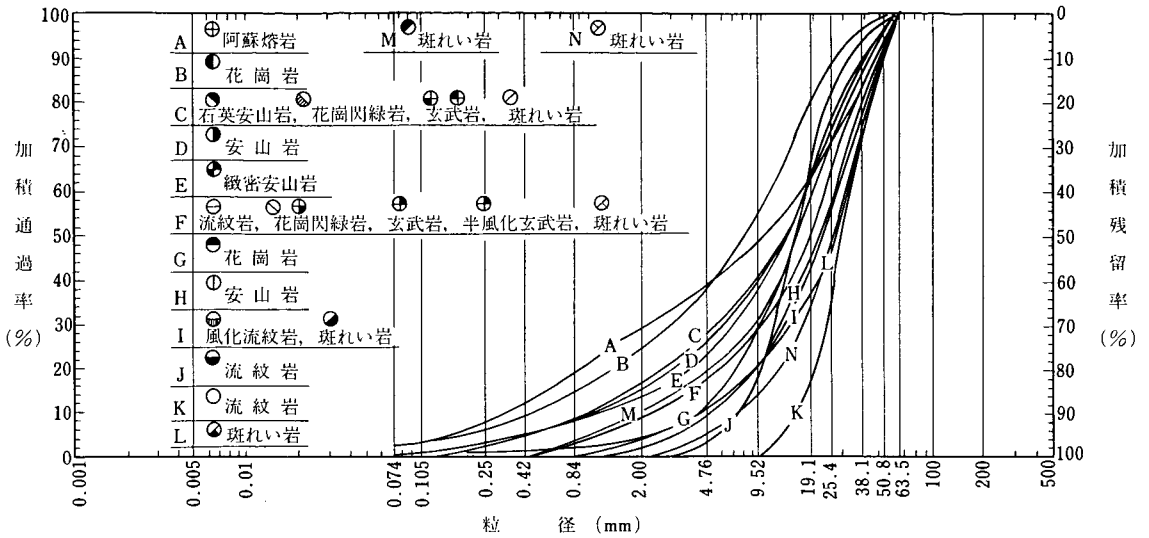


図-4.2 D30供試体三軸圧縮試験粒度分布

わされている。

$$\nu_i = G - F \cdot \log \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

G, F : 実験から求まる材料定数。ただし,
 $\nu = \nu_i + D \cdot \epsilon_r$ の関係で近似して D
 は一定としている。

本項では、ひずみの小さな範囲に着目（非線型応力解析結果では発生するひずみが比較的小さいため初期の変形性が結果を支配する場合が多い）して特に初期接線変形係数 E_i と初期接線ポアソン比 ν_i を支配する材料定数（ $n \cdot K \cdot F \cdot G$ 等）について整理した結果を示す。

図-4.2にD30供試体三軸圧縮試験粒度分布を示す。試験に用いたロック材料は、8種類の火成岩類であり、実ダムで使用または使用予定の材料である。試験材料の均等係数は2.4～53の範囲に分布しており、基本的には調査横坑内における採取試験結果の粒度組成と相似な粒度分布として試験している。

表-4.2に試験材料の平均物性値（比重・吸水率）・均等係数・供試体間隙比（ $\bar{e}_0$ は初期供試体平均間隙比・ $\bar{e}_c$ は圧密後供試体平均間隙比）および非線型定数等を示す。試験側圧条件は、1.5・3.0・4.5・6.0 kgf/cm² の4種類（一部2・4・6 kgf/cm² の3種類）を基本として行ったものである。

図-4.3から図-4.5に初期変形係数 E_i に大きな影響を与えると考えられる圧密後平均供試体間隙比 $\bar{e}_c$ と式（4.2）の材料定数（ $n \cdot K$ ）の関係および $n \sim K$ の関係を示す。図-4.3より $\bar{e}_c$ と n の間には明確な相関性

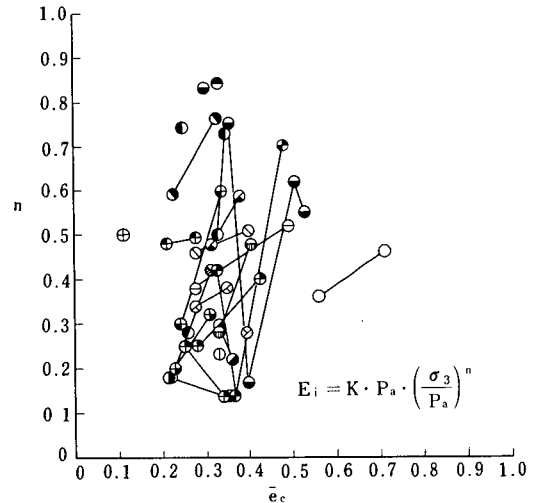


図-4.3 圧密後平均間隙比と n の関係

は認められない。しかし、図-4.4では $\bar{e}_c$ が大きいものより小さい方が K の値が大きく現われる傾向が認められる。図-4.5では、 n が大きいものより小さい方が K が大きく現われる傾向が認められる。以上の整理結果より、供試体のせん断開始直前の乾燥単位体積重量が小さいものより大きい方が初期接線変形定数 K が大きくなる。しかし、側圧の影響が E_i に与える影響が小さくなる（ n は K が小さいものより大きい方が大きい傾向にある）ものと考えられる。初期接線変形係数 E_i の大きさを $\sigma_3 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の場合についてみると（図-4.4） $E_i \approx 100 \sim 1500 \text{ kgf/cm}^2$ と大きな範囲に分布していることがわかる。

次に初期接線ポアソン比 ν_i に着目して整理した結

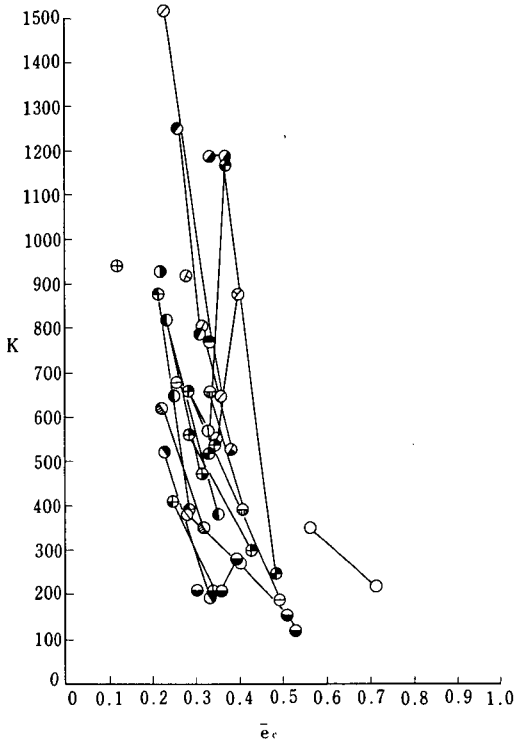


図-4-4 圧密後平均間隙比とKの関係

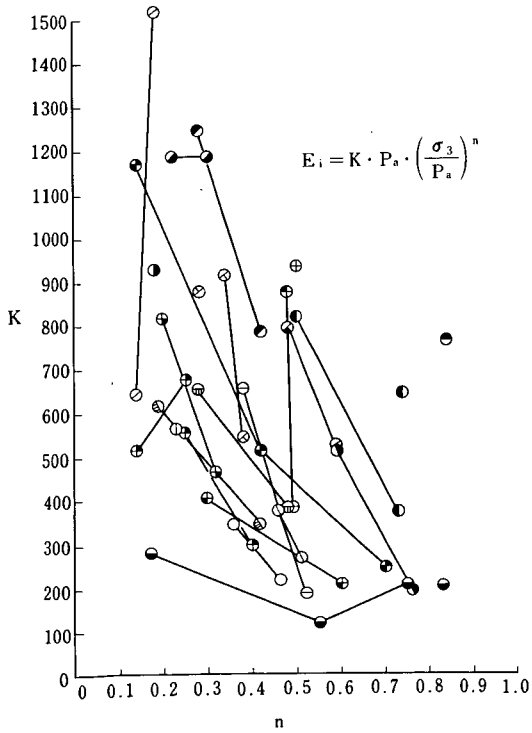


図-4-5 nとKの関係

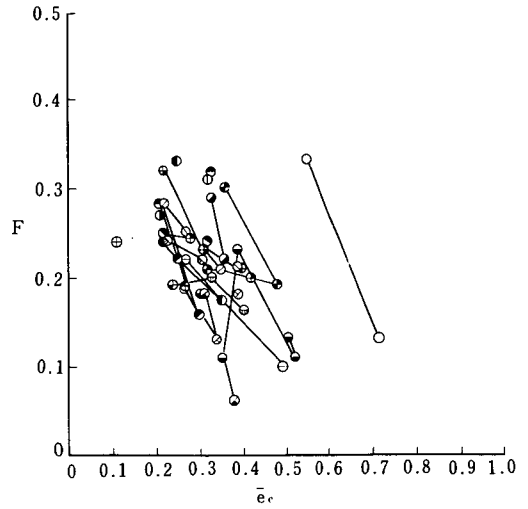


図-4-6 圧密後平均間隙比とFの関係

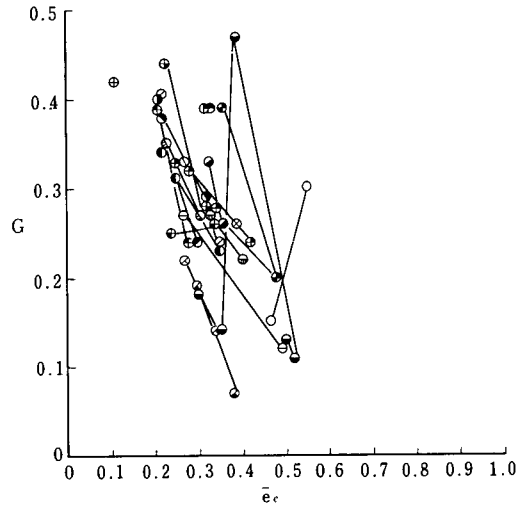


図-4-7 圧密後平均間隙比とGの関係

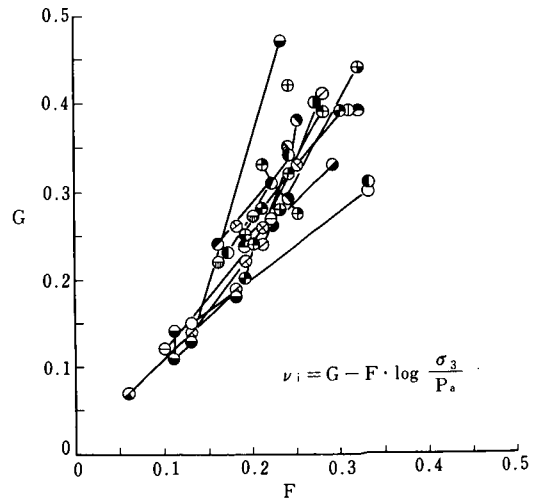


図-4-8 FとGの関係

果についてみてみることにする。

図-4・6～図-4・8にせん断直前の平均供試体間隙比と式(4・3)の材料定数($G \cdot F$)および $F \sim G$ の関係を示す。図-4・6および4・7より供試体の乾燥単位体積重量が小さいものより大きな方が G および F が大きく現われる傾向にある。このことより、供試体密度が小さいものより大きな方が初期ポアソン比が大きい反面では側圧の影響を大きく受けることを示唆しているものと考えられる(図-4・8)。初期接線ポアソン比 ν_i の大きさを側圧が 1 kgf/cm^2 の条件についてみてみると $\nu_i \approx 0.07 \sim 0.47$ の範囲に分布している。なお、ポアソン比について整理を行う場合に用いた半径方向ひずみ ϵ_r は式(4・4)により求めたものである。

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r - \epsilon_a}{2} \dots\dots\dots (4.4)$$

ϵ_r : 体積ひずみ

ϵ_a : 軸方向ひずみ

図-4・9に接線変形係数およびポアソン比を表現する材料定数 K と G の関係を示す。図より G が小さなもの

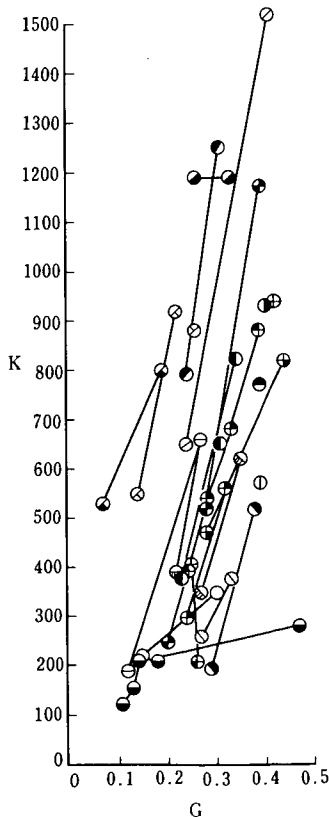


図-4・9 G と K の関係

より大きな方が K が大きく現われる傾向を示している。

以上のことより供試体の密度が K および G に与える影響が大きいとともに K と G は密接に関連していることが認められた。

三軸圧縮試験では、表-4・1に示したように軸方向ひずみの変化に伴って体積ひずみが生じるのが通常である。

体積ひずみは一般的に図-4・10に示すように主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)と密接な関係がある。一般に図-4・10の関係で整理を行うと最大主応力差の約85%程度以下においては側圧の大きさによらず安定して一定した($\sigma_1 - \sigma_3$)と ϵ_r の関係を示す。ここで図-4・10の中で直線近似できる範囲(最大主応力差の約85%程度以下の範囲)に着目して体積変化係数 E_{rs} を式(4・5)によって定義するものとする。

$$E_{rs} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta \epsilon_v} \dots\dots\dots (4.5)$$

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$: 主応力差の変化量

$\Delta \epsilon_v$: 体積ひずみの変化量

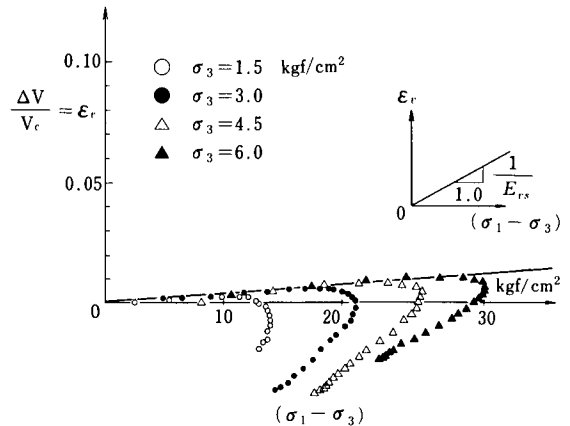


図-4・10 三軸圧縮試験より得られる($\sigma_1 - \sigma_3$)と ϵ_r の関係

図-4・11にせん断直前の平均供試体間隙比 $\bar{e}_c$ と体積変化係数 E_{rs} の関係を示す。図より、供試体密度状態の小さなものより大きな方が体積変化係数が大きく現われる傾向を示している。この結果は、供試体の乾燥単位体積重量が小さなものより大きな方が圧縮体積ひずみが小さく主応力差が大きく現われることを示している。また、 E_{rs} の値が側圧の大きさによらず一定して現われれば E_{rs} を用いて材料のポアソン比 ν を式(4・6)によって表現できるものと考えられる。

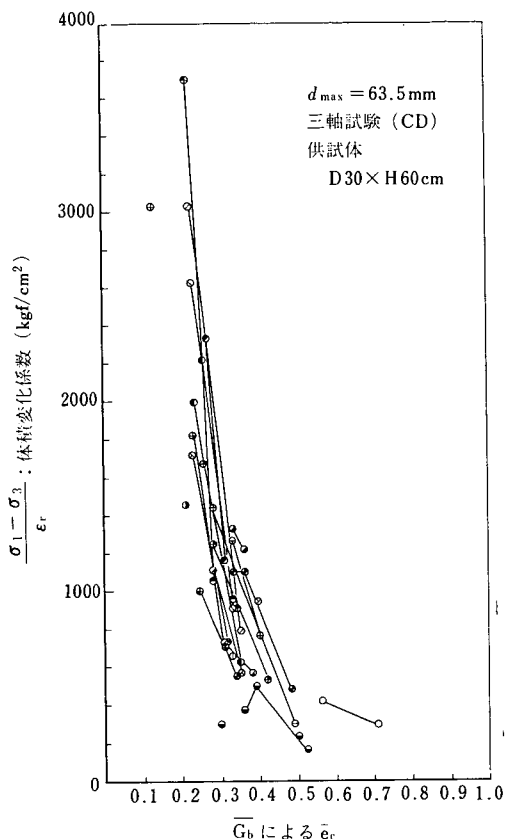


図-4-11 圧密後の間隙比と体積変化係数

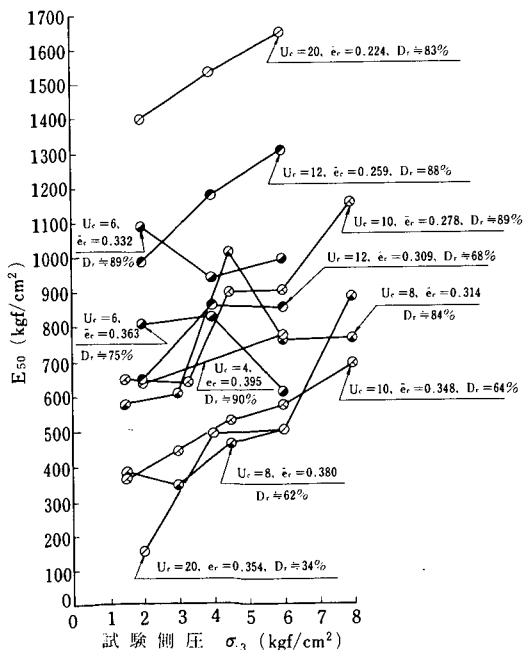


図-4-12 σ_3 と E_{50} の関係 (斑れい岩の例)

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \epsilon_a \cdot E_{vs}} - \frac{1}{2} \quad (4.6)$$

ϵ_r : 供試体半径方向ひずみ

ϵ_a : 供試体軸方向ひずみ

$\sigma_1 - \sigma_3$: 主応力差

E_{vs} : 体積変化係数

ロック材料の初期変形性 (変形係数・ポアソン比) は、前述の三軸試験結果より供試体の間隙比の大小および側圧の大きさによって影響されることが理解される。変形性に影響を与える要因の1つである間隙比は前述した式 (2.2) のように材料の均等係数 (粒度組成) により変化する。

ここで最大主応力差の2分の1とそれに対応した軸方向ひずみの関係より求めた変形係数 E_{50} についてみる。図-4-12は、斑れい岩の三軸圧縮試験結果について σ_3 と E_{50} について整理したものである。なお変形係数 E_{50} は式 (4.7) により求めた値である。

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) / 50}{\epsilon_{a50}} \quad (4.7)$$

$(\sigma_1 - \sigma_3) / 50$: 最大主応力差の2分の1

ϵ_{a50} : $(\sigma_1 - \sigma_3) / 50$ に対応した軸方向ひずみ

まず E_{50} の大きさを側圧に着目してみると側圧の小さなものより大きな方が E_{50} は大きくなる傾向が顕著である。次に供試体の間隙比に着目すると同じ均等係数の粒度組成では ϵ_c の大きなものより小さな方が E_{50} は大きく現われている。均等係数 (粒度組成) に着目すると相対密度の値 D_r が同程度では均等係数が小さなものより大きな方が大きな E_{50} が現われる傾向が認められる。相対密度の定義は以下のとおりである。内径30cm・高さ60cmモールド内に静かに試料を60cmまき出した時の間隙比を最大間隙比とする。また、試料を6層に分けて電動ランマ (33kgf・950打撃/分・載荷盤直径20cm) で60cm厚に締固めて粒子破砕が認められない状態で最も締った時の間隙比を最小間隙比とする。

相対密度は、(最大間隙比 - 相対密度を求める間隙比) を (最大間隙比 - 最小間隙比) で除した値を百分率で表わしたものである。斑れい岩の例では $U_c = 4 \sim 8 \cdot D_r \approx 83 \sim 90\% \cdot \sigma_3 = 1.5 \sim 8.0 \text{ kgf/cm}^2$ の試験条件では $E_{50} \approx 650 \sim 1650 \text{ kgf/cm}^2$ 値を示している。

本項では、主に供試体の間隙比・均等係数・試験側圧に着目して初期接線変形性・ E_{50} について整理した。しかしこの他に粒子の強さ・粒子の形状・試験時の応

力状態等によっても変形性が変化することが十分に考えられるので今後の研究課題の1つであろう。

4.2 粒子破碎

三軸圧縮試験の手順としては、①試料準備、②供試体作製、③せん断試験、④データ整理、等の工程に分類することができる。①試料準備段階では試験目標粒度となるように粒度調整を行う。②供試体作製では所定の乾燥単位体積重量に締め固める。以上の試験手順の中で粒子破碎が生じると考えられる工程は、②供試体作製と③せん断試験時である。

粒子が破碎する時の形体を分類してみるとおよそ下記のようなと考えられる。

- ① 試料（岩石粒子）に応力が増えらるることによって
- ① 粒子の角が欠ける場合。
- ② 粒子中の潜在クラックが弱部となって分割される場合。
- ③ 粒子強度より大きな応力が作用して複数に分割される場合。

等が考えられる。しかし、供試体作製時およびせん断試験時に岩石粒子がどのようなメカニズムで破碎されているかの点については不明である。岩石粒子が破碎することによって試験時の初期粒度分布状態が変化することになる。このことにより供試体作製時の締めまり特性およびせん断特性（せん断強さおよび変形性）に与える影響については解明されていない。しかし経験的には、強度の低い材料は粒子破碎現象を伴いせん断強さも一般に小さい場合が多い。

現在のところ岩石粒子破碎そのものの自体を定量的に表現する手法が確立されているとは言い難い。しかし、粒子破碎現象はロック材料のせん断特性または所要の排水機能に悪影響を与える場合も考えられるので現象を把握しておくことが望ましい。

粒子破碎を定量的に表現する方法には、Marsal または Leslie の定義による粒子破碎率がある。現在では Marsal の定義による破碎率表現が一般に用いられているようである。Marsal の破碎率とは、初期粒度分布と試験後粒度分布を比較するもので粒径階級別の重量百分率の値を試験前後で差引きする。差引きした値の正または負の値の合計値を破碎率 B (%) で表現するものである。

図-4・13に本試験で調査した側圧と粒子破碎率 B の分布を示す。図より側圧の小さなものより大きな方が破碎率が大きく現われる傾向にある。図に示した側圧範囲では $B \approx 3 \sim 18\%$ 程度の粒子破碎が生じている。

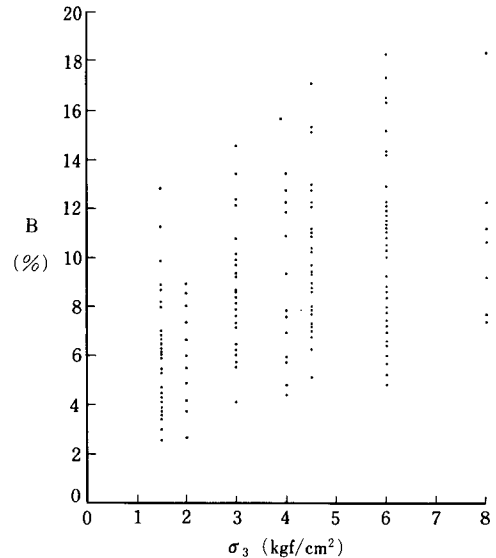


図-4・13 側圧と粒子破碎率の分布

粒子破碎は試料のフルイ分け分析の数値を用いて求めるため、フルイ分けの精度によっても値が影響される。木枠の標準網フルイによって行う人力フルイ分け時に含まれる誤差は重量百分率でほぼ3%程度³⁷⁾と考えられる。粒子破碎の傾向についてみるとほぼ構成粒子の平均粒径以上が破碎作用を主に受けているようである。したがって粒子破碎が生じることによって初期粒度組成は細粒側の粒度組成に移行する結果となる。

4.3 せん断強さ

ロック材料のせん断強さはモール・クーロンの破壊基準によって求められる。せん断強さは通常、見掛けの粘着力 C_{CD} とせん断抵抗角 ϕ_{CD} および直応力 σ によって表現される。特にロック材料のせん断強さを表現する設計値としてはせん断抵抗角が重要な値である。以下では三軸圧縮試験より得られたロック材料のせん断強さに着目し、データを整理した結果に若干の考察を加えている。

4.3.1 最大せん断応力

フルイ材料の場合においても材料のせん断強度 τ_f は、モール・クーロンの破壊基準による式(4・8)によって表わされている。

$$\tau_f = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (4 \cdot 8)$$

C : 粘着力

σ : 直応力

ϕ : せん断抵抗角

式(4・8)は、側圧一定の三軸圧縮試験において複

数の異なる側圧条件で得られる破壊時の軸方向応力と側圧の関係から材料定数($C \cdot \phi$)が求められる。材料定数は三軸圧縮試験より得られたモールの応力円群に接する一次式(4.8)から求められる。

試験側圧 σ_3 で得られた最大軸方向応力 σ_{1f} に着目してみることにする。 σ_3 と σ_{1f} の関係を図上にプロットした例を図-4.14に示す。 $\log \sigma_3$ と $\log \sigma_{1f}$ の間に強い直線関係が認められる。他のロック材料についても同様なプロットを行なうと顕著な直線関係が認められている。以上のことから σ_3 と σ_{1f} の関係を式(4.9)で表わすことができるものとする。ただし、式(4.9)

$$\sigma_{1f} = n_o \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (4.9)$$

P_a : σ_3 と同じ単位の大気圧

n_o, m : 三軸圧縮試験より求まる定数

は試験側圧範囲1.5kgf/cm²から8.0kgf/cm²において適用しているものである。このことは $\sigma_3 < 1.5\text{kgf/cm}^2$ での試験データが無いので適用範囲を限定しておくものである。

表-4.3に式(4.9)の材料定数 n_o と m の一覧表を示す。また、図-4.15に m と n_o の関係を示す。 n_o の値はほぼ5~12の範囲に分布している。また、 m の値は0.65~0.95の範囲に分布している。 m の値が1.0に近いほど σ_{1f} と σ_3 の関係は直線関係(一次式)に近いことを表わしている。図-4.15より、 m が大きなものより小さな方が n_o が大きくなる傾向が顕著に認められる。また、図中の分布範囲(またはバラツキ)の傾向に着

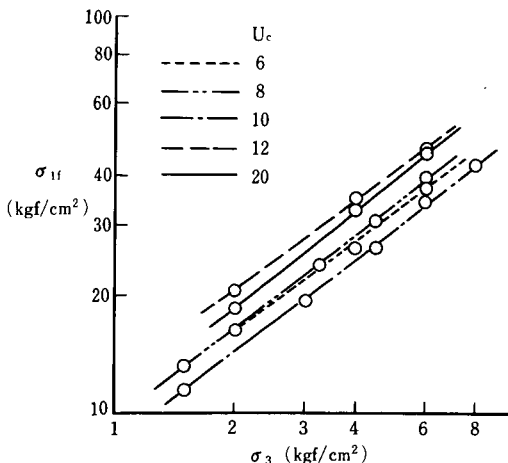


図-4.14 σ_3 と σ_{1f} の関係(斑れい岩の例)

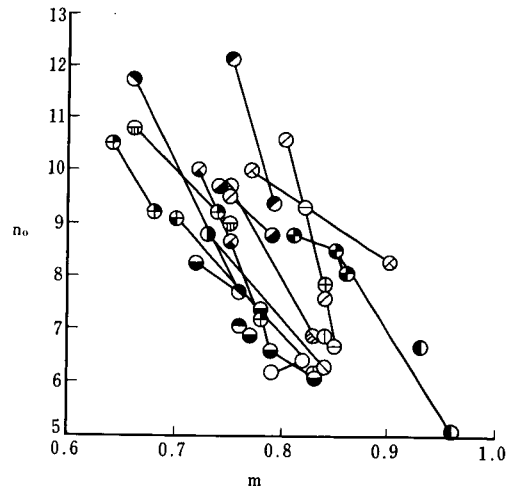


図-4.15 m と n_o の関係 ($\sigma_{1f} = n_o \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m$)

目してみると斑れい岩(●・○・△)・緻密安山岩(⊕)・花崗岩(⊙)は他の岩種材料条件に比較して図中の右上部(全体に n_o および m が大きい傾向)に分布している。これらのロック材料にみられる特徴は、過半以上が①深成岩、②平均吸水率がほぼ1%程度、③均等係数がほぼ10以上の条件を満たしている材料である。以上のことから品質が良くて粒度組成条件の良い材料は n_o および m が大きな値を示すものと考えられる。

ここで、式(4.9)を変形して式(4.10)のように表わすことにする。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2} = \frac{1}{2} \left\{ n_o \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m - \sigma_3 \right\} \quad (4.10)$$

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 最大主応力差

図-4.16に上述した n_o および m の分布範囲特性を考慮して σ_3 と $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ の関係で整理した結果を示す。図-4.16にみられるように σ_3 に対する $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ の分布幅が存在しており、 $\sigma_3 = 1.5\text{kgf/cm}^2$ で $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2 = 3.5 \sim 7.5\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_3 = 6\text{kgf/cm}^2$ で $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2 = 10.5 \sim 20\text{kgf/cm}^2$ 程度の範囲である。

図-4.16では、岩質・粒度組成に着目して $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ の分布範囲を2分している。図中の④の範囲での $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ が期待できるロック材料は吸水率が小さく粒度組成が良い($U_c > 10$)深成岩類、③の範囲での $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ が期待できるロック材料は④に比較して若干吸水率が大きい火成岩類に該当するものと考えられる。

図-4.16に示す $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ の大きさ分布の概略

表-4.3 ロック材料の材料定数 (n_o, m)

供試体寸法: $D = 30, H = 60\text{cm}$

岩 種	U_c	$\bar{G}_b$	$\bar{Q}$	$\bar{e}_o$	$\bar{e}_c$	$\frac{1 - \bar{Q}}{1 + \bar{e}_c}$	材 料 定 数		凡 例
						n_o	m		
流 紋 岩	2.4	1.880	0.139	0.404	0.301	0.662	6.9	0.77	●
		2.201	0.069	0.630 0.753 0.447 0.507	0.504 0.524 0.392 0.357	0.619 0.611 0.669 0.686	6.6 6.1 8.3 7.4	0.79 0.83 0.72 0.78	
緻 密 安 山 岩	17	2.611	0.010	0.439 0.581 0.402	0.364 0.480 0.328	0.726 0.669 0.745	8.8 8.1 8.5	0.81 0.86 0.85	⊕
安 山 岩	20	2.056	0.092	0.262	0.216	0.747	8.8	0.73	●
	6	2.053	0.091	0.389	0.329	0.684	6.9	0.84	①
花 崗 岩	28	2.763	0.008 0.008	0.293 0.400	0.229 0.351	0.807 0.734	8.5 5.1	0.85 0.96	●
	4	2.744	0.008	0.388	0.332	0.745	7.1	0.76	●
阿 蘇 熔 岩	53	1.920	0.103	0.159	0.118	0.802	7.9	0.84	⊕
花 崗 岩	28	2.763	0.008	0.297	0.251	0.793	6.7	0.93	●
流 紋 岩	2	2.452	0.021	0.665 0.843	0.559 0.712	0.628 0.572	6.4 6.2	0.82 0.79	○
	12	2.486	0.023	0.335 0.566	0.279 0.494	0.764 0.654	9.3 6.7	0.82 0.85	⊖
風 紋 化 岩	6	2.435	0.0345	0.481 0.388	0.405 0.334	0.687 0.724	9.0 10.8	0.75 0.66	⊖
石 安 山 英 岩	20	2.473	0.0416	0.387 0.269	0.329 0.226	0.721 0.782	7.7 11.7	0.76 0.66	●
閃 緑 岩	12	2.612	0.022	0.332 0.474	0.278 0.399	0.765 0.699	8.8 6.3	0.73 0.84	⊖
		2.588	0.026	0.271 0.378	0.230 0.314	0.792 0.741	9.2 7.2	0.74 0.78	⊕
	20	2.632	0.022	0.275 0.393	0.232 0.316	0.794 0.743	9.7 6.9	0.75 0.83	⊖
玄 (半武風化) 岩	12	2.676	0.022	0.335 0.505	0.282 0.424	0.763 0.687	10.2 7.0	0.69 0.76	⊕
玄 武 岩	12	2.722	0.022	0.404 0.309	0.340 0.255	0.730 0.779	9.2 10.5	0.68 0.64	⊕
	20	2.604	0.048	0.294 0.404	0.244 0.341	0.765 0.710	9.1 6.2	0.70 0.83	⊕
	20	2.701	0.028	0.251 0.330	0.213 0.282	0.801 0.758	12.0 9.0	0.63 0.73	⊕
斑 れ い 岩	20	2.923	0.006	0.265 0.416	0.224 0.354	0.812 0.734	10.6 7.6	0.80 0.84	⊖
	12	2.952	0.008	0.299 0.357	0.259 0.309	0.788 0.758	12.1 9.4	0.75 0.79	●
	6	2.919	0.007	0.390 0.423	0.332 0.363	0.745 0.728	9.7 8.8	0.74 0.79	●
	4	2.919	0.008	0.463	0.395	0.712	9.5	0.75	⊗
斑 れ い 岩	10	2.965	0.006	0.340 0.425	0.278 0.348	0.778 0.738	10.0 8.3	0.77 0.90	⊗
	8	2.967	0.005	0.386 0.465	0.314 0.380	0.757 0.721	10.0 8.7	0.72 0.75	●

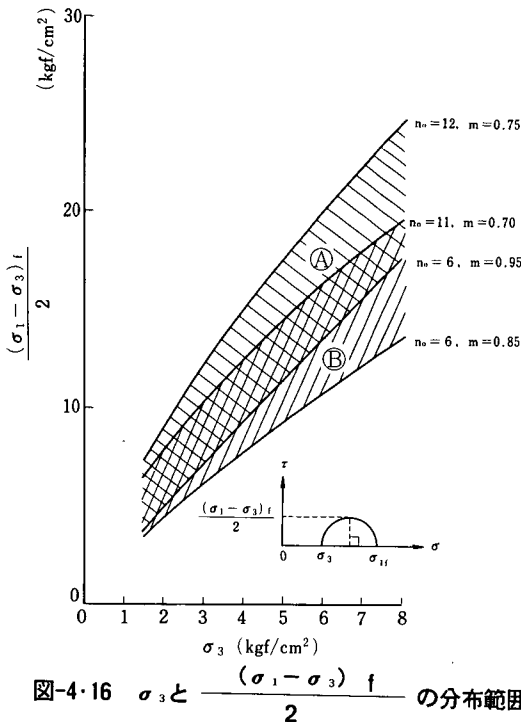


図-4.16 σ_3 と $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$ の分布範囲

分類は限られた試験データによるものであり、岩の成因、岩石粒子の形状・供試体密度状態によってなお変化する可能性もある。したがって今後ともデータの蓄積が望まれる。しかし、図-4.16によって通常のロック材料でのせん断強さの概略値を知ることができるものと考えられる。

4.3.2 見掛けの粘着力

モール・クーロンの破壊基準により定義されている式(4.8)における粘着力 C の項について実験結果を基に考察を加えてみることにする。

表-4.4にロック材料の大型三軸圧縮試験(CD)結果を示す。なお表中の分類とは強度定数 ($C_{CD} \cdot \phi_{CD}$) の決定方法を表わしたもので以下の分類方法を指す。

分類A：モールの応力円に対する包絡線が一本の直線で近似可能であることから試験側圧範囲を対象として求めた。

分類B：高側圧部でモールの応力円に対する包絡線が曲線傾向を示すが、低側圧部（3種類の側圧）では直線近似可能な場合で低側圧部を重視して求めた。

分類C：モールの応力円に対する包絡線が上に凸の曲線形状を示す場合で、平均包絡線による一本の直線近似により求めた。

表中の分類にみられるように、モールの応力円群に

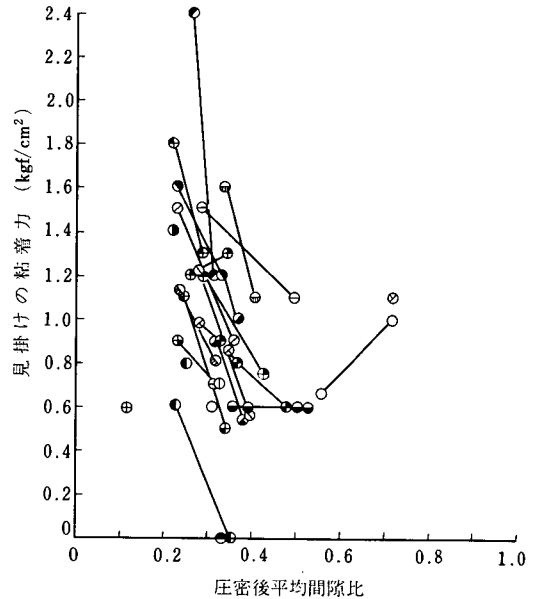


図-4.17 圧密後間隙比と見掛けの粘着力

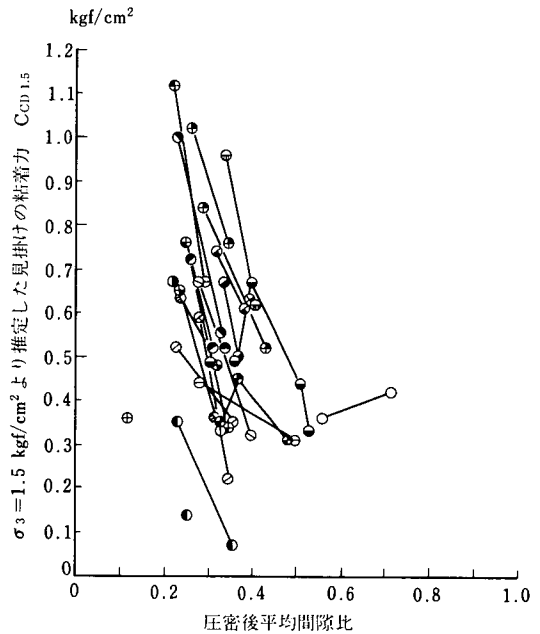


図-4.18 圧密後間隙比と推定見掛けの粘着力

に対する包絡線は一般に一本の直線で代表することが困難な場合が多いことがわかる。

見掛けの粘着力 C_{CD} に与える要因として供試体の圧密後平均間隙比との関係で整理した結果を図-4.17に示す。図-4.17にみられる特徴・傾向は、 C_{CD} の値は 0 ~ 2.4 kgf/cm² と広い範囲に分布しており、間隙比の大きなものより小さな（密度が小さなものより大きな

表-4.4 ロック材料の大型三軸圧縮試験 (C D) 結果

供試体寸法: $D = 30$, $H = 60\text{cm}$

岩 種	U_c	$\overline{G}_s$	$\overline{Q}$	$\overline{e}_o$	$\overline{e}_c$	$\frac{1 - \overline{Q}}{1 + \overline{e}_c}$	強 度 定 数		分類	凡 例
							C_{CD} (kgf/cm^2)	ϕ_{CD} (度)		
流 紋 岩	2.4	1.880	0.139	0.404	0.301	0.662	0.6	39° 21'	B	●
		2.201	0.069	0.630 0.753 0.447 0.507	0.504 0.524 0.392 0.357	0.619 0.611 0.669 0.686	0.6 0.6 0.6 0.6	38° 39' 37° 46' 40° 22' 40° 51'	A A C C	
緻 密 安 山 岩	17	2.611	0.010	0.439 0.581 0.402	0.364 0.480 0.328	0.726 0.669 0.745	(0.8) (0.6) (0.9)	(45° 30') (45° 00') (44° 10')	C C B	⊙
安 山 岩	20	2.056	0.092	0.262	0.216	0.747	1.4	39° 41'	A	⊙
	6	2.053	0.091	0.389	0.329	0.684	0.7	39° 57'	B	⊙
花 崗 岩	28	2.763	0.008 0.008	0.293 0.400	0.229 0.351	0.807 0.734	0.6 0.0	43° 12' 41° 32'	C A	⊙
	4	2.744	0.008	0.388	0.332	0.745	0.0	44° 20'	A	⊙
阿 蘇 熔 岩	53	1.920	0.103	0.159	0.118	0.802	0.6	44° 00'	B	⊕
花 崗 岩	28	2.763	0.008	0.297	0.251	0.793	0.8	44° 02'	C	⊙
流 紋 岩	2	2.452	0.021	0.665 0.843	0.559 0.712	0.628 0.572	0.66 1.0	38° 42' 34° 48'	C C	○
	12	2.486	0.023	0.335 0.566	0.279 0.494	0.764 0.654	1.52 1.1	43° 31' 38° 00'	C C	⊖
風 流 紋 化 岩	6	2.435	0.0345	0.481 0.388	0.405 0.334	0.687 0.724	1.1 1.6	41° 30' 42° 06'	C B	⊖
石 安 山 英 岩	20	2.473	0.0416	0.387 0.269	0.329 0.226	0.721 0.782	1.2 1.6	38° 30' 43° 00'	C B	⊙
閃 緑 岩	12	2.612	0.022	0.332 0.474	0.278 0.399	0.765 0.699	1.22 0.56	39° 57' 39° 34'	A A	⊖
		2.588	0.026	0.271 0.378	0.230 0.314	0.792 0.741	0.9 0.7	43° 05' 39° 20'	B C	⊕
	20	2.632	0.022	0.275 0.383	0.232 0.316	0.794 0.743	1.13 0.81	43° 24' 39° 54'	A C	⊖
玄 武 岩 (半 風 化)	12	2.676	0.022	0.335 0.505	0.282 0.424	0.763 0.687	1.2 0.75	43° 10' 38° 20'	B B	⊕
玄 武 岩	12	2.722	0.022	0.404 0.309	0.340 0.255	0.730 0.779	1.3 1.2	39° 30' 42° 30'	B B	⊕
	20	2.604	0.048	0.294 0.404	0.244 0.341	0.765 0.710	1.1 0.5	41° 30' 39° 55'	B B	⊕
	20	2.701	0.028	0.251 0.330	0.213 0.282	0.801 0.758	1.8 1.3	42° 37' 40° 50'	C C	⊕
斑 れ い 岩	20	2.923	0.006	0.265 0.416	0.224 0.354	0.812 0.734	1.5 0.9	46° 24' 42°	A A	⊖
	12	2.952	0.008	0.299 0.357	0.259 0.309	0.788 0.758	2.4 1.2	44° 18' 42° 36'	C C	⊙
	6	2.919	0.007	0.390 0.423	0.332 0.363	0.745 0.728	1.2 1.0	43° 20' 42° 30'	A C	⊙
	4	2.919	0.008	0.463	0.395	0.712	1.1	42° 36'	A	⊗
斑 れ い 岩	10	2.965	0.006	0.340 0.425	0.278 0.348	0.778 0.738	0.98 0.86	45° 14' 42° 4'	B B	⊗
	8	2.967	0.005	0.386 0.465	0.314 0.380	0.757 0.721	0.90 0.54	44° 59' 44° 11'	B B	⊗

もの) 方が大きな見掛けの粘着力 C_{CD} が現われる傾向にある。

図-4-18に圧密後供試体平均間隙比と推定見掛けの粘着力の関係を示す。なお、推定見掛けの粘着力は以下の定義・方法により求めた値である。

まず、式 (4-9) を変形して式 (4-11) とする。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = n_o \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m - \sigma_3 \cdots \cdots (4-11)$$

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{d\sigma_3} = n_o \cdot m \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{m-1} - 1 \cdots \cdots (4-12)$$

また、式 (4-11) の接線 (一次式) 式は式 (4-13) で表わされる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = f_o + \sigma_3 \cdot \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{d\sigma_3} \cdots \cdots (4-13)$$

f_o : $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 軸上の切片

モルクーロンの破壊基準と式 (4-13) より見掛けの粘着力 C_{CD} は式 (4-14) で表わされる。

$$C_{CD} = \frac{n_o \cdot P_a \cdot (1-m) \cdot (\sigma_3/P_a)^m}{2 \sqrt{n_o \cdot m \cdot (\sigma_3/P_a)^{m-1}}} \cdots \cdots (4-14)$$

式 (4-14) を用いて見掛けの粘着力を推定した理由は、上述したようにモールの応力円群に接する包絡線の形体が異なる影響を除くことを配慮したためである。図-4-18に示した値は $\sigma_3 = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ の外挿値である。図-4-18の方が図-4-17に比較して C_{CD} の分布範囲が小さく現われて (低側圧を重視したため) おり、圧密後供試体平均間隙比との相関性が強く現われている。図-4-17または図-4-18より供試体の密度状態が見掛けの粘着力に与える因子の1つであることが認められるが、なお他の因子も影響を与えているものと判断される。

図-4-19は、材料の均等係数 (粒度組成) と見掛けの粘着力の関係を示す。なお、図中における粘着力の値は式 (4-14) により推定 (外挿) したものである。図より推定見掛けの粘着力の過半以上が $C_{CD1.5} = 0.25 \sim 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲に均等係数によらず一定して分布している。図より判断するとロック材料の見掛けの粘着力は均等係数 (粒度組成) にほとんど影響されないものと考えられる。

以上、ロック材料の見掛けの粘着力 C_{CD} について本試験データより得られた知見は、

- ① 通常のロック材料より得られる見掛けの粘着力 C_{CD} はほぼ $0.5 \sim 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲に分布している。
- ② 供試体初期またはせん断直前の密度状態が見掛

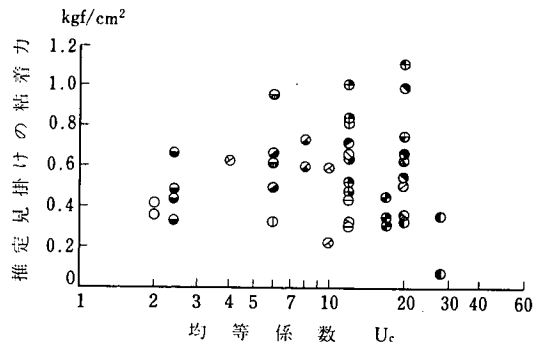


図-4-19 均等係数と見掛けの粘着力

けの粘着力 C_{CD} に与える影響が大きい。

- ③ 粘着力 C_{CD} はせん断抵抗角 ϕ_{CD} で認められたような粒度組成による影響が現われていない。
- 等である。

現行の設計法においては、ロック材料の強度設計値はせん断抵抗角 ϕ_{CD} のみであり見掛けの粘着力 C_{CD} は評価されていない。

このことは、「3.5 三軸圧縮試験の要点」で述べたようにロック材料のせん断強度を安定計算にとり入れる上での将来の課題と考えられる。

4.3.3 せん断抵抗角

本項では、ロック材料のせん断抵抗角 ϕ_{CD} の大きさ範囲および ϕ_{CD} に与える要因について試験データを基に若干の分析と考察を加えることにする。

大型三軸圧縮試験結果のデータは表-4-4に示したとおりである。まずロック材料のせん断抵抗角 ϕ_{CD} は供試体の密度状態に大きく影響される³⁸⁾ことが知られている。したがって等方圧密によって供試体の間隙比状態がどの程度変化するかに着目したものを図-4-20に示す。本試験条件 (試験時メンブレンは厚さ 2 mm のものを2枚重ねにて使用・試験側圧が $1.5 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲)・材料条件 (粒度および密度) では若干のパラッキがあるが巨視的にみれば圧密後の平均間隙比は初期平均間隙比の約85%程度の値となっている。また、初期間隙比が小さなものより大きな方が圧密による間隙比の変化量が大きくなることが顕著に現われている。

図-4-21にせん断直前の供試体平均間隙比すなわち圧密後供試体平均間隙比 $\bar{e}_c$ とせん断抵抗角 ϕ_{CD} の関係を示す。図-4-21より圧密後間隙比の大きなものより小さな方がせん断抵抗角が大きい傾向が顕著に現われている。また、表-4-4と対応してみると均等係数の大きな粒度組成の方がグラフの左側に位置する傾向にある。

「4.2 粒子破碎」で述べたようにロック材料の岩石粒子は供試体作製時およびせん断時に粒子破碎現象を

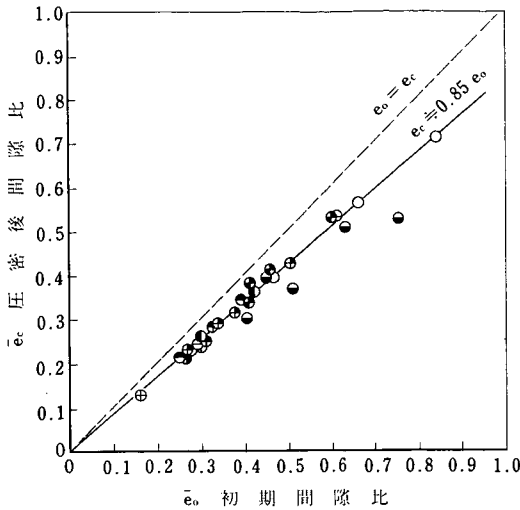


図-4-20 供試体の初期と圧密後の平均間隙比

伴う。粒子破碎に与える要因の一つは試験時の応力範囲および岩石粒子自体の強さが考えられる。ここでは、試験時の応力範囲はほぼ同条件であるので岩石粒子の強さに着目してみる。岩石の一軸圧縮強度 q_u に与える要因の一つとして吸水率が知られている³⁹⁾。

図-4-22に岩石粒子の吸水率及び圧密後平均間隙比とせん断抵抗角の分布範囲をプロットして示す。図-4-22より吸水率が小さなものより大きな方がせん断抵抗角が低下する傾向が認められる。このことから岩石粒子の吸水率（圧縮強さを表すパラメータの一つ）がせん断抵抗角に関与していることが考えられる。

せん断抵抗角を表す式として粒状体を対象とした最上の式⁴⁰⁾が一般に知られている。ここでは式(4-15)の關係を用いて材料定数 k を求めて均等係数との關係で整理してみた。

$$\sin \phi = \frac{k}{1 + e} \quad (4-15)$$

ϕ : せん断抵抗角

e : 間隙比（本項では G_0 による値）

k : 材料定数（試験より求まる）

図-4-23に均等係数と最上の定数の分布を示す。定数 k は均等係数と粒子形状に依存する⁴¹⁾ ようである。

図-4-23においては均等係数 U_c が大きなものより小さな方が k の値が大きくなる傾向にある。また、本試験の材料・試験条件では材料定数 k は0.8~1.0程度の範囲に分布しているがなおバラツキが認められる。式(4-15)によれば k が定まれば間隙比 e に $\sin \phi$ は依存

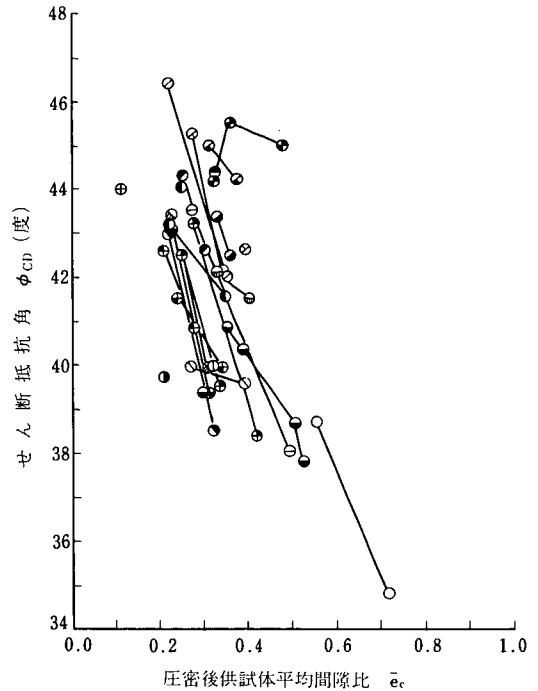


図-4-21 e_c と ϕ_{CD} の関係（火成岩類）

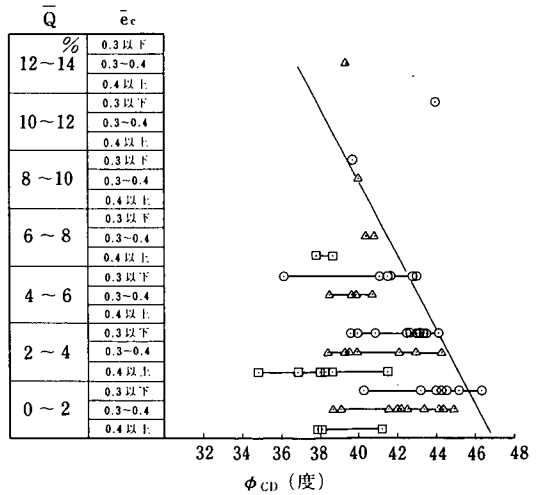


図-4-22 吸水率及び圧密後平均間隙比とせん断抵抗角

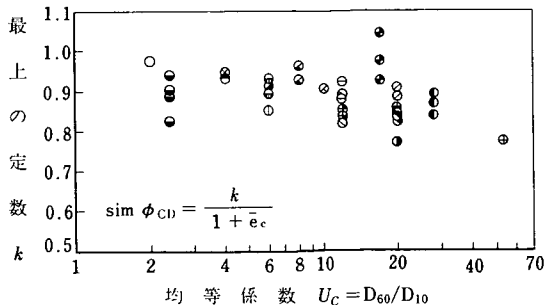


図-4-23 均等係数と最上の定数分布

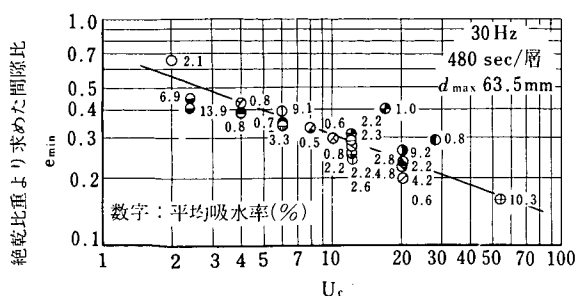


図-4-24 均等係数と最小間隙比

することになる。ところで間隙比 e はロック材料の場合「2.4 単位体積重量」で述べたように材料の均等係数に大きく依存している。

図-4-24に均等係数と最小間隙比 e_{min} の関係を示す。図-4-24は三軸圧縮試験時の試験供試体密度条件を設定するための予備試験として実施した締固め試験結果である。 e_{min} の定義は締固め仕事量を増加しても間隙比の低下が期待できなくなった時点で岩石粒子破砕の少ない状態での値である。図-4-24より緻密安山岩(●)を除いて図中の直線(最小二乗法)を中心に±0.1以下の間隙比のパラツキ以内で e_{min} が均等係数に大きく依存していることが認められる。

以上のデータ内容から判断して、ロック材料のせん断抵抗角に最も大きく影響を与える因子は、①供試体の密度状態、②岩石粒子の強さ、③材料の粒度組成であると考えられる。しかし粒子形状による影響も十分に考えられるが本試験では粒子形状を表現する最適な材料係数が未知である。

上記の点を考慮して式(4-19)によってロック材料のせん断抵抗角 ϕ_{CD} を求める実験式について検討を加えた。

まず密度と岩石粒子の強さを表現する係数について仮定する。密度については単位体積当りの岩石粒子体積を表わす係数として式(4-16)を定義する。

$$K_V = \frac{1}{1 + e} \quad (4-16)$$

e : 間隙比 (G_b により求めた値)

つまり、式(4-16)は単位体積当りの岩石粒子体積の占有率を表わしている。また、岩石粒子の強さを表わす係数を吸水率 Q を用いて式(4-17)のように定義することにする。これは、 $Q = 0$ の場合に

$$K_Q = 1 - Q \quad (4-17)$$

Q : 吸水率 (実数)

岩石粒子本来の強さを期待し、吸水率が大きくなるに従って本来の強さが比例的に低下するものと仮定している。

次に ϕ_{CD} を材料の粒度組成を表わす係数の一つである均等係数 U_c と式(4-16)および式(4-17)を組合せて式(4-18)の関係として仮定する。

$$\phi_{CD} = K_o \cdot K_V \cdot K_Q \cdot U_c^{K_u} \quad (4-18)$$

ϕ_{CD} : せん断抵抗角 (度)

K_o, K_u : 定数

K_V : 単位体積当りの岩石粒子体積の占有率

K_Q : 岩石粒子の強さを表わす材料定数

式(4-18)を書き直すと式(4-19)となる。

$$\phi_{CD} = \frac{1 - \bar{Q}}{1 + \bar{e}_c} \cdot K_o \cdot U_c^{K_u} \quad (4-19)$$

表-4-4のデータ(48個)を用いて式(4-19)に最小二乗法を適用した結果、相関係数 $\gamma = 0.60$ を示した。ここで、図-4-24の均等係数と最小間隙比の関係についてみると前述したように緻密安山岩(●)の締固まり程度(特性)が他の試料に比較して差異が認められる。そこでこの点を考慮・判断して緻密安山岩のデータを除いたデータ(45個)を用いて再度、式(4-19)に最小二乗法を適用してみた。その結果、相関係数が0.80、標本偏差(標準偏差)が±1.2度、中央誤差が±0.82度の値を示し、式(4-20)の実験式が得られた。

$$\phi_{CD}(\text{度}) = \frac{1 - \bar{Q}}{1 + \bar{e}_c} \cdot \frac{63.29}{U_c^{0.04679}} \quad (4-20)$$

$\bar{Q}$: 平均吸水率

$\bar{e}_c$: 圧密後平均間隙比

以上、通常のロック材料(火成岩類)のせん断抵抗角に着目した分析結果より式(4-20)の実験式が得られた。しかし、式(4-20)はデータ数の少ない限られた岩種に適用して求めたものである。したがって今後さらに異なる岩種・岩質のデータを加えて修正される余地が残されていることは言うまでもない。参考として式(4-20)により $Q < 1\%$ 条件での間隙比と推定せん断抵抗角の関係を示す。図-4-25より同じ間隙比状態でも粒度組成によってせん断抵抗角が変動することがわかる。また間隙比が0.1変化するとそれに伴ってせん断抵抗角が約2度変化する。図-4-25の例は $Q < 1\%$ の場合であり、その他岩質(破砕風化作用の有無)の程度によってさらにせん断抵抗角が変化する可能性を含んでいることを付記しておく。

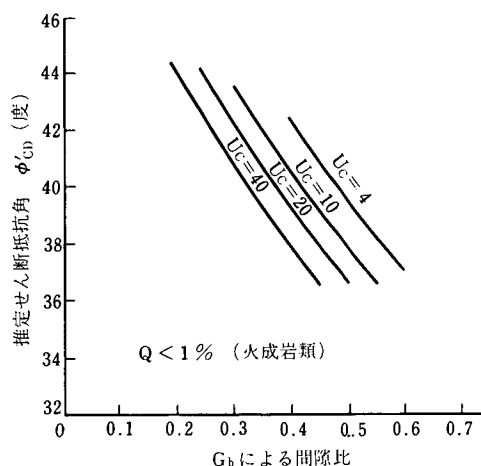


図-4-25 式(4-20)による推定せん断抵抗角

4.4 品質の低下した材料の性質

品質の低下した材料とは変質・風化作用を受けた材料を主に指す。土質工学会の用語集⁴²⁾によれば変質・風化の定義は以下のとおりである。変質の定義は岩石の構成鉱物が化学変化を起こして新しい鉱物に変わることによって岩質に変化を生じる現象。風化の定義は岩石が気象・気候的環境の基で物理的・化学的に変化をうけることを総称している。また、化学的な風化現象なども含まれる。

火成岩の平均的鉱物組成は、石英・長石類・輝石等であり重量比でほぼ全鉱物組成の85%程度を占める。また特に有色鉱物は変質を受けやすく、変質すると粘土鉱物に至る⁴³⁾。粘土鉱物は吸水することによって原容積が膨張することが知られており、その結果岩石の力学的性質、特に強度が大きく低下する結果となる。

以下に風化が認められる粗粒玄武岩を対象としたロック材料の長期強度特性試験結果⁴⁴⁾の例を示す。

試験材料は、寒河江ダム(建設省東北地方建設局)の原石山に含まれるもので、変質・風化の程度が強いのでロック材料から除外された岩石の中から採取したものである。X線回析試験結果によれば主要構成鉱物は初生鉱物である単斜輝石・かんらん石・斜長石と変質鉱物である緑泥石・モンモリロナイト・イライトである。また、試験材料の平均的物性値は、平均絶対乾比重 $G_b = 2.63$ 、平均吸水率 $Q = 5.1\%$ 、一軸圧縮強度 $q_u = 80 \sim 500 \text{ kgf/cm}$ 程度である。

岩石粒子の強度変化に着目した試験として以下の方法を採用した。岩石粒子(粒径70mm前後)に対して①実験室搬入直後、②ホーローバット上で2日間水中状態後、2日間炉乾燥(40℃)を1サイクルとして合計

30サイクルその状態を与える、③直径30・高さ60cmの三軸試験供試体に締固めた後、2日間飽和状態・2日間自然排水状態を1サイクルとして合計30サイクルその状態を与える。上記三種類の状態を与えた後で岩石粒子の圧裂引張り強さ(非整形の岩石粒子に点載荷を与えて極限荷重を求め、その値を点載荷間隔の二乗で除して圧裂引張り強度を求める点載荷圧裂試験法による)の比較を行った。なお上記③の状態は、30サイクル後に等方圧密応力(2・4・6・8 kgf/cm²)条件下で三軸圧縮試験を実施している。

図-4-26に圧裂引張り強さの分布比較を示す。搬入直後の粒子および長期載荷・三軸試験後の粒子より得られた圧裂引張り強さは0.5~52.6 kgf/cm²の範囲にあり、両者を平均値でみると20.8・20.2 kgf/cm²と差異は認められない。しかし、乾湿繰返し後粒子では前者に比較して平均値で約4.5分の1程度の圧裂引張り強さとなっている。また、岩石粒子に乾湿繰返しを与えた(上記の②状態)ところ、5サイクル位までは重量損失は少なく、肉眼観察および顕微鏡薄片観察によってもきれつは認められなかった。しかし、10サイクル位

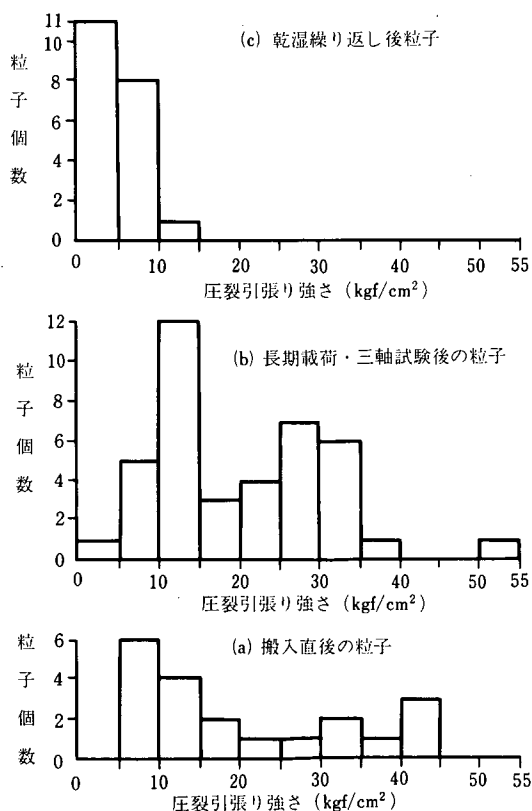


図-4-26 圧裂引張り強さの分布比較

から除々にヘアクラックが発生し30サイクル後には多くの粒子はバラバラになり点載荷強度も低下した。なお、40℃炉乾～水浸での粒子内空隙の飽和度は、およそ50～100%の間で変化している。

上記の試験結果より岩石粒子の状態、特に飽和度の変化と拘束条件が岩石の性質に与える影響が大きいことが予想される。そこで表-4・5に示す5種類の状態を岩石粒子に与えることによってそれらの状態が重量損失現象にどのような影響を与えるかを求める試験を行った。上載応力の有無とは下記に示す状態を指す。

1) 上載応力無

ホーローバット内に岩石粒子(粒径50mm程度)を静かに置いた状態。

2) 上載応力有

内径10cm・深さ15cmの有孔塩化ビニル管容器の中に岩石粒子(粒径50mm程度)を入れてその回りに直径約2mmのガラスビーズ(透水係数が約1cm/sec)を入れる。その後、ガラスビーズ上面より約0.1kgf/cm²の上載応力を一定して与える。

図-4・27に飽和度変化と重量損失率(30サイクル後)の関係を示す。図より飽和度変化の小さなものより大きな方が重量損失率が大きくなる傾向にある。また、拘束応力の無い状態よりも有の方が重量損失率が小さくなる傾向が現われている。

集合体のせん断強さに着目した試験として下記の方法による比較試験を行った。試験目的は主に材料の含水状態と含水状態の履歴が三軸圧縮強さに与える影響を求めることである。

直径30cm・高さ60cmの三軸圧縮用供試体を0.36の目標間隙比状態の密度となるように締め固めて作製する。次に①不飽和試料状態で通常の圧密排水試験を行う、②飽和試料状態で通常の圧密排水試験を行う、③等方圧密状態(0.2と0.4kgf/cm²応力について各1供試体)の基で2日間飽和状態・2日間自然排水を1サイクルとして30サイクルその状態を与える。その直後に通常

の飽和・圧密排水試験を行う。

上記①と②については同じ条件で2供試体、③については異なる2種類の等方圧密応力条件で各1供試体ずつに対して試験側圧 $\sigma_3 = 2 \text{ kgf/cm}^2$ でのせん断試験を行った。図-4・28に応力～ひずみ曲線の比較を示す。図-4・28にみられる特徴は、不飽和に比較して飽和状態の方が小さな最大主応力差が現われている。これは、「3.4 飽和・不飽和試験」で示した他の試験例と一致した傾向である。飽和状態では、試験の含水状態の履歴および事前等方圧密(上記③の等方圧密を指す)の相違が応力～ひずみ曲線に反映されず明確な差異が現われていない。このことの主な理由は、③の試験状態では自然排水によって岩石粒子間で形成されている間隙に含まれる水は排水されるが、岩石粒子内の水までは排水されず常に岩石粒子内は飽和度 $S_r = 100\%$ 状態にあったものと考えられる。

表-4・6に $\sin \phi_o = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$ の関係

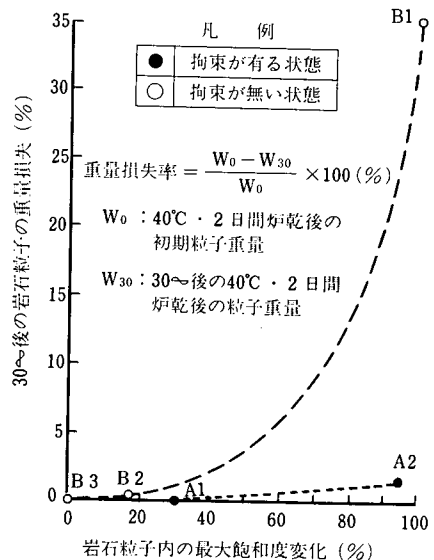


図-4・27 飽和度変化と重量損失率

表-4・6 せん断抵抗角 ϕ_o ($\sigma_3 = 2 \text{ kgf/cm}^2$)

供 試 体	ピーク時	$\epsilon_a = 15\%$ 時
長期載荷後 ($\sigma_c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$)	37.8度	37.8度
長期載荷後 ($\sigma_c = 0.4 \text{ kgf/cm}^2$)	39.7	38.9
作成直後・飽和 (1)	40.8	39.9
" (2)	41.3	38.8
作成直後・不飽和 (1)	41.4	40.8
" (2)	42.2	39.7

表-4・5 試験条件

試 験	上載応力の 有 無	試験条件 (1～)	
		水中状態	乾燥状態
A 1	有	2日間	2日間炉乾40℃
A 2	有	"	3日間 "
B 1	無	"	2日間 "
B 2	無	"	1日間室内放置
B 3	無	連続水中 (90日間)	

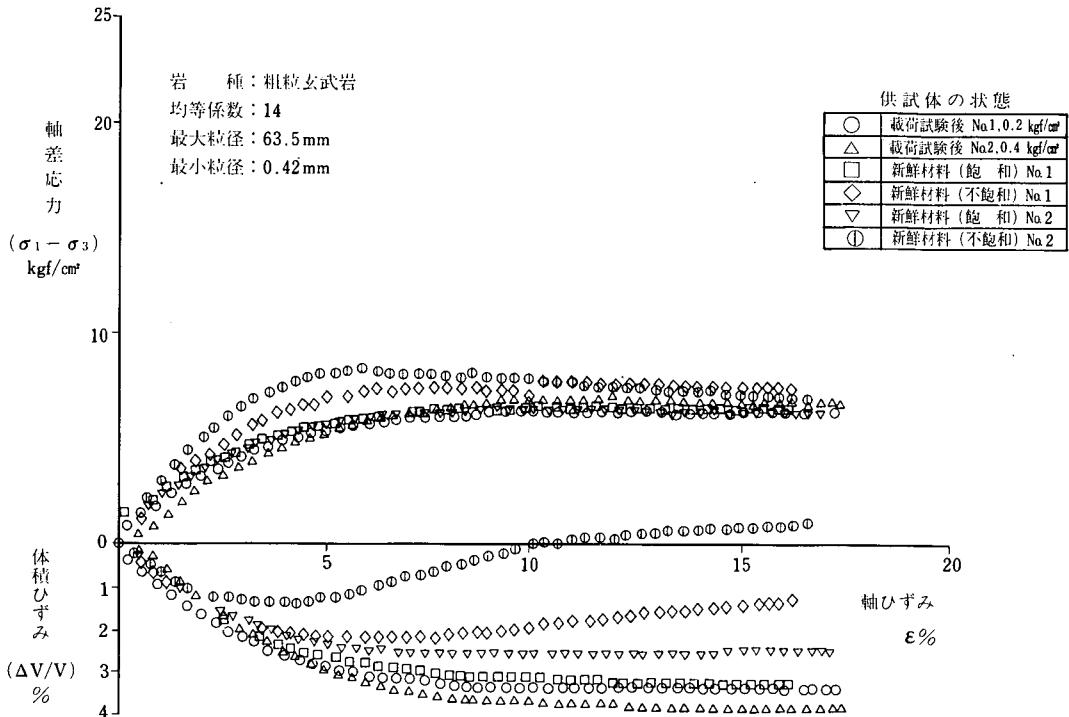


図-4-28 $\sigma_3 = 2 \text{ kgf/cm}^2$ での応力～ひずみ曲線の比較

係より求めたせん断抵抗角 ϕ_0 の値を示す。ピーク時の ϕ_0 で比較してみると最小値と最大値の差は $\Delta \phi_0 = 4.4$ 度である。また、軸方向ひずみ $\epsilon_a = 15\%$ での最小値と最大値の差は $\Delta \phi_0 = 3$ 度であり、軸方向ひずみが大きくなるに伴って最小値と最大値の差 $\Delta \phi_0$ は小さくなる傾向にある。

以上の試験事例から判断して、品質の低下した材料の主な性質は、

- 1) 変質・風化して粘土鉱物が含まれている場合には岩石粒子内の飽和度変化の大きさが岩石粒子の強度を大きく支配する。
- 2) 1) との関連で岩石粒子に拘束応力を与えた場合の方が与えない場合に比較して岩石粒子の重量損失率が小さくなる傾向にある。
- 3) 岩石粒子内の飽和度が100%程度と一定の状態であればせん断強さの大きさもほぼ一定の値を示す傾向にある。
- 4) 不飽和試験値に比較して飽和試験の方が最大せん断応力が低下する傾向にある。

品質の低下したロック材料の強度特性については今後さらに重要な調査研究課題となることが予想される。したがってロック材料の使用条件等をモデル化した試験方法の標準化も必要となろう。また、既設ダムロッ

クゾーン内の挙動特性（温度・飽和度）の把握に基づく材料評価基準の策定に期待するものである。

5. 結 論

以上、ロック材料に関する事例データおよび室内三軸圧縮試験データを基に整理・分析して得られた結論を項目別にまとめると以下に示すとおりである。

1) ロック材料

- (1) ロック材料を地質の関係で整理すると、およそ次のとおりである。

- ① ロック材料として適当な岩種
 - a. 中・古生代および新生第古第三紀の堆積岩
 - b. 火成岩類
 - c. 変成岩（片理面の発達の著しい片岩などを除く）

② 注意して使用するべき岩種

- a. 新生代第三紀の火山性堆積岩
- b. 新生代第四紀の熔結凝灰岩（熔結度の低いものは特に注意が必要）

③ ロック材料としては問題の多い岩種

- a. 新生代新第三紀以降の堆積岩

- (2) ロック材料として要求される性質は、①堅硬・

②耐久的・③締固め後の透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 以上・④締固め密度が大きくせん断強さも大きいことが望ましい。物性値的には、絶乾比重2.5以上、吸水率2%以下、一軸圧縮強度500kgf/cm²以上のものは一般に良好な材料特性を持っている。

- (3) 粒度組成に関しては、横坑内採取粒度と施工時粒度はかなり強い相似性が認められる。これは、採取方法に比較して原石山における地質条件が主に採取粒度組成を支配しているものと考えられる。
- 2) 密度

- (1) ロック材料の締固まり特性は、均等係数と密接な関係があり、締固め仕事量が一定の場合には式(2.2)に示したような指数関数の形で表わすことができるものと考えられる。

$$e_b = a \cdot U_c^b \dots\dots\dots (2.2)$$

e_b : 絶乾比重による間隙比

U_c : 材料の均等係数 (D_{60}/D_{10})

a, b : 締固め試験から求まる定数

- (2) 現場盛立施工 (主に13トン級振動ローラ、まき出し厚1m程度) では、4~6回程度の転圧回数ではば一定の密度に締固まる。その時の仕事量はJIS A 1210 (第1法) の1~2倍の仕事量に対応している。

- (3) 室内突固め比較試験では、

- ① 試料最大粒径がモールド内径の5分の1以下。
- ② 粒径0.84mm以下の含有率が40%以下。
- ③ オーバーサイズの置換量が20%以下。
- ④ 実粒度と相似な粒度を基本とする。

等の条件で、モールド内径30cm (容積 $25 \times 10^3 \text{ cm}^3$)・ランマ重量15kgf・ランマ直径15cm・ランマ落下高50cmの場合に最も安定した試験値を得ることができた。

- (4) 現場密度試験方法に関しては、比較試験によるとピットの径は最大粒径の3倍以上、深さは一層分、水置換法に用いるシートは厚さ0.15mm (農業用ビニールシート) 程度の条件が必要である。

3) 三軸圧縮試験における供試体条件

- (1) 三軸圧縮試験時の粒度条件は、従来一般に行われている実材料の相似粒度を適用できるものと考えられる。しかし、粒径4.76mm以下の含有率が30~40%以上になるとロック材料本来の力学的性質を求めることが出来ないものと判断される。
- (2) 試料の最大粒径と供試体寸法 (供試体径と高さの比が1対2) に着目した比較三軸圧縮試験結果

より、試料の許容最大粒径は、ほぼ供試体径の5分の1程度である。また、供試体寸法および試料最大粒径が大きくなるとせん断抵抗角が若干、減少の傾向にある。

- (3) 三軸圧縮試験用供試体内の密度の不均一性が試験値 (せん断強度定数 $C_{CD} \cdot \phi_{CD}$) に与える影響が非常に大きい。比較試験例では ϕ_{CD} の最大値と最小値の差は5.8度であった。

- (4) 供試体径と高さの比が1対2の条件では、供試体端面 (特に上端面) の平滑度とせん断速度 (0.25~2.0%/min) の相違が三軸圧縮試験値に与える影響は非常に少ない。

4) 強度特性

- (1) 飽和または不飽和条件での三軸圧縮試験結果は、通常の材料の場合には試験値に顕著な差が現われないが品質の低下 (風化・変質しているもの) した材料の場合には不飽和状態に比較して飽和状態の方が三軸圧縮強さが低下する。

- (2) 三軸圧縮試験より得られる変形性は、供試体密度・側圧に大きく依存しており非線型性を示す。初期変形係数は密度・側圧が小さなものより大きな方が大きい。初期ポアソン比は密度が小さなものより大きな方が大きい。しかし、その反面では密度が小さなものより大きな方が側圧による影響が大きくなる傾向にある。

- (3) 粒子破碎率に関しては、せん断時に生じる破碎率を求めることができなかった。しかし、側圧の小さなものより大きな方が破碎率が大きく現われる傾向にある。

- (4) 三軸圧縮試験より得られる最大主応力 σ_{1f} と側圧 σ_3 の関係は本試験側圧範囲 (1.5~8 kgf/cm²) では式 (4.9) の指数関数の関係で表わすことが出来るものと考えられる。

$$\sigma_{1f} = n_o \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \dots\dots\dots (4.9)$$

P_a : σ_3 と同じ単位の大気圧

n_o, m : 試験より求まる定数

- (5) モール・クーロンの破壊基準より得られる見掛けの粘着力 C_{CD} は圧密後密度の小さなものより大きな方が大きく現われる傾向にある。通常のロック材料の試験値では、0.5~1.6kgf/cm²の範囲であり粒度組成の影響は認められない。しかし、見掛けの粘着力 C_{CD} を精度良く求めるためには非常に小さな側圧条件での三軸圧縮試験が必要である。

- (6) モール・クーロンの破壊基準より得られるせん断抵抗角 ϕ_{CD} は、①せん断直前の密度状態、②岩石粒子の強さ、③粒度組成に大きく影響される。火成岩類より得られた試験データより実験式を求めた結果、式(4・19)の関係で ϕ_{CD} を表現できるものと考えられる。

$$\phi_{CD} = \frac{1 - \bar{Q}}{1 + \bar{e}_c} \cdot K_o \cdot U_c^{K_u} \dots\dots\dots (4 \cdot 19)$$

$\bar{Q}$: 平均吸水率

$\bar{e}_c$: 圧密後平均間隙比

U_c : 均等係数

K_o, K_u : 三軸圧縮試験より求まる定数

通常のロック材料で得られるせん断抵抗角は38～45度($U_c=2\sim50$)程度である。また、間隙比が0.1変化すると ϕ_{CD} は約2度程度変化する。式(4・19)より圧密後の密度状態がせん断抵抗角に関与している。したがって圧密後の供試体密度に着目した試験方法の検討が必要であると考えられる。

- (7) 品質の低下した材料の性質についてはデータ数が少ないが、変質鉱物を含有している場合には以下の特徴・傾向がある。

- ① 乾湿の繰返しにより岩石粒子内の飽和度 S_r の変動幅が大きいほど岩石強度の低下が顕著である。しかし、岩石粒子に拘束応力条件を与えた場合には若干、強度低下が鈍る傾向にある。
- ② 不飽和三軸結果に比較して飽和三軸結果のピーク時せん断強さは低下する。しかし、軸方向ひずみが大きな領域では両者の差が小さくなる傾向にある。

- (8) 現行のダム堤体安定計算手法の精度と合理性を考慮すると、モールの応力円群に接する包絡線が上に凸な曲線形を示す場合には、対象とする適切な応力範囲を考慮して強度を求めるべきである。

6. あとがき

はじめに述べたように、昭和49年から昭和51年までの3年間、建設省技術研究会では「フィルダムの設計と施工に関する研究」を指定課題として、フィルダムの全般的な問題をとりあげた。その成果の一つとしては、「フィルダム材料の試験要領(案)」を作成している。それは暫定的なものであり、正式に試験要領として決定したものではないが、これを基に各機関において従来に比較してかなり統一された試験がなされるよ

うになったことは大きな成果であったと考える。

特にロック材料のような大粒径で構成されているものを対象とした試験方法も研究初期の段階であり、試験値と設計値との関連については大きな研究課題の一つであった。フィルダム研究室では、大型のせん断試験装置を製作して試験データを蓄積するとともに現場データの調査・収集を実施してきた。その成果の一端としてロック材料の調査・試験に関するデータに基づきロック材料の力学的な特性の概略についてとりまとめることができた。その結果、ロック材料の岩質・密度・粒度組成が集合体としての力学的特性に大きく関与していることが明らかにされた。

今後、さらにロック材料の力学特性を解明していくためには、フィルダム堤体内の応力・変位挙動特性を計測して実挙動に対応した室内試験も必要となってくる。昭和57年度にはロック材料を対象として大型の中空ねじり単純せん断試験装置(外径80cm・内径40cm・高さ80cm)を製作⁽⁴⁾して現在試験データの蓄積・分析が開始されたところであり、今後の研究成果に期待するところが大きい。

ロック材料の品質の面では、既設ダムのそれと比較して低品質の材料を使用するケースも今後多くなることが十分に予想されるところである。したがって従来の調査・試験の項目・内容に加えて新たな視点での研究が当然望まれるわけである。

ダム工学は一般に経験工学の要素が強い。したがって今後とも試験値に加えてダム技術者としての目からも細部に渡る検討に基ずき、より合理的なダム設計を可能とするため今後とも継続してロック材料の力学特性を解明して行くことが必要である。

最後に、本所報をまとめる基礎データの蓄積に関係した各ダム工事事務所およびフィルダム研究室の諸氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本ダム協会「ダム総覧」1984。
- 2) 日本大ダム会議「第2次改訂ダム設計基準」1978。
- 3) 土質工学会「土質試験法」1979。12。
- 4) 前掲2), p p 73～74
- 5) 松本徳久・渡辺和夫・吉野内真二「ロック材料の調査・設計・施工に関する事例調査」土木研究所資料 第1839号, 1982。
- 6) R.Iida, R.Nakano, N.Matsumoto: "Experiences and problems of construction of dams on soft rock foundations

- in Japan", Proc. of Int. Symp. on Weak Rock/Tokyo, pp 1285-1292, 1981。
- 7) 前掲3), p p 277 ~ 303
- 8) 前掲5), p p 22 ~ 23
- 9) 松本徳久・渡辺和夫・吉野内真二「ロック材料の室内締固め試験と現場盛立密度」土木技術資料, 24-12, 1982
- 10) 監修建設省河川局「多目的ダムの建設」第3巻, p. 284, 1977
- 11) 土質工学会「ロックフィル材料の試験と設計強度」p p 285 ~ 286, 1982
- 12) 地質担当者会議「凍結融解試験法によるリップラップ材の耐久性判定基準(案)について」, 土木研究所資料第1552号, 1980。
- 13) 松本徳久・渡辺和夫・岩田充弘・小川 優「ロック材料の室内締固め試験方法の実験的検討」土木技術資料, 27-11, p p 33 ~ 38, 1985。
- 14) 松本徳久・渡辺和夫・岩田充弘・小川 優「粗粒材料の密度試験に関する実験的検討」土木研究所資料第2233号, 1985。
- 15) 松本徳久・渡辺和夫・村上清基「ロック材料の最大粒径と三軸圧縮強度」土木技術資料, 25-12, p p 40 ~ 45, 1983。
- 16) 平松良雄・岡 行俊・木山英郎「非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験」日本鉱業会誌, Vol. 81, No. 932, p p 1024 ~ 1030, 1965。
- 17) 最上武雄編「土質力学」p p 998 ~ 1032, 1972。
- 18) 前掲3), p. 520
- 19) Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. and Duncan, J.M. "Strength and Deformation Characteristics of Rock fill Materials," Report No. TE-69-5 to State of California Department of Water Resources, Univ. of California, 1969。
- 20) 水資源開発公団, 中部電力株式会社「岩屋ダム工事誌」1978。
- 21) 野田 耕, 谷本喜一, 長谷康生「砂の力学的性質に及ぼす粒度と密度との影響について」第8回土質工学研究発表会講演集, p p 153 ~ 156, 1973。
- 22) 酒井徳行, 鎌田正孝, 石井武美, 栗原明美「粗粒材の大型・中型三軸圧縮試験結果の比較」第12回土質工学研究発表会講演集, p p 357 ~ 360, 1977。
- 23) 水野光章, 大藪勝美, 貞弘丈佳「フィルダム材料の最適試験手法に関する研究」水資源開発公団試験所第一試験課報告第7803号, 1979。
- 24) 水野光章, 大藪勝美, 貞弘丈佳「フィルダム材料の最適試験手法に関する研究」水資源開発公団試験所第一試験課報告第7916号, 1980。
- 25) 石川 明, 大塚 一, 井口芳博「ロックフィルダムの大型試験機による材料試験」水と土, 第28号, p p 20 ~ 29, 1977。
- 26) Holtz, W.G. and Gibbs, H.J. "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils," Proc. A.S.C.E. SMI, pp 1 ~ 22, January 1956
- 27) 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, 24-7, 1982。
- 28) 粒子形状についてまとめたものとして, 前掲17), p p 896 ~ 904。
- 29) 松本徳久・渡辺和夫・小川 優「ロック材料の三軸圧縮試験方法に関する実験的検討-端面処理・せん断速度・供試体の一様性-」土木技術資料, 26-3, p p 16 ~ 22, 1984。
- 30) Bishop, A.W. and Green G.E. "The Influence of End Restraint on the Compression Strength of a Cohesionless Soil," Geotechnique, Vol. 15, pp 243 ~ 266, 1965。
- 31) せん断速度の影響についてまとめたものとして, 土質工学会「ロックフィル材料の設計強度」pp 69 ~ 74, 1982。
- 32) 前掲29), p p 16 ~ 22
- 33) R.J. Marsal "Mechanical Properties of Rockfill, Embankment-Dam Engineering," Casagrande Volume, pp 130 ~ 132, 1972。
- 34) 前掲31), p p 91 ~ 92
- 35) Kondner, R.L. "Hyperbolic Stress-Strain Response; Cohesive Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, "ASCE, Vol. 89, No. SM1, 1963。
- 36) Kulhawy, F.H., Duncan, J.M. and Seed, H.B. "Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Embankments during Construction," Report No. TE-69-4 to U.S. Army Engineers, WES, Univ. of California, 1969。
- 37) 松本徳久・豊田光雄「ロック材料の相対密度試験」土木研究所資料第1757号, 1982。
- 38) 前掲27), P 59
- 39) たとえば, 桑原啓三, 「岩石の圧縮強度と剪断強度による分類の試み」応用地質特別号, p p 25 ~ 33, 日本応用地質学会, 1984。
- 40) 前掲17), P 1029。
- 41) kについてまとめたものとして前掲11), p p 81

～91

- 42) 土質工学会「岩の工学用語解説集」1973。
- 43) 土質工学会「岩の工学的性質と設計施工への応用」
p p 1 ～ 7 , 1974。
- 44) 松本徳久・渡辺和夫「ロック材料の長期強度特性」
第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p p
133～138 , 1984。
- 45) 松本徳久・渡辺和夫「大型せん断試験装置の開発
ーねじり単純せん断・三軸圧縮伸張試験機の紹介
ー」土木技術資料 p p 50～53, V o l . 26, No12,
1984。

記 号 と 単 位

記 号	単 位	表 示 内 容	記 号	単 位	表 示 内 容
B	%	粒子破碎率	d	mm	粒径
D_{10}	mm	10% (有効) 粒径	d_{max}	mm	最大粒径
D_{20}	mm	20%粒径	e		間隙比
D_{60}	mm	60%粒径	e_b		G_b 比重により定義した間隙比
D_{10}	cm	三軸供試体径 (10cm)	e_o		供試体初期間隙比
D_{30}	cm	三軸供試体径 (30cm)	e_c		供試体圧密後間隙比
D_{50}	cm	モールドおよび三軸供試体径 (50cm)	f_i		粒度階における残留率
D_{60}	cm	三軸供試体径 (60cm)	σ	kgf/cm ²	直応力
D_{120}	cm	三軸供試体径 (120cm)	σ_1	kgf/cm ²	供試体軸方向応力
E_{cjs}	cm · kgf/cm ²	突固め仕事量 ($E_{CJS} \div 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^2$)	σ_{1f}	kgf/cm ²	最大供試体軸方向応力
E_i	kgf/cm ²	初期接線変形係数	σ_3	kgf/cm ²	側圧
E_{vs}	kgf/cm ²	体積変化係数	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	kgf/cm ²	最大主応力差
E_{50}	kgf/cm ²	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ における割線変形係数	τ	kgf/cm ²	せん断応力
G_a		比重 (表乾状態)	ϕ	度	せん断抵抗角
G_b		比重 (絶乾状態)	ϕ_o	度	せん断抵抗角 (原点と応力円の接線)
G_g		比重 (土粒子の比重 G_s に対応)	ϕ_{CD}	度	せん断抵抗角 (排水条件)
K_V		粒子体積占有率	C	kgf/cm ²	粘着力
K_Q		粒子の強さを表わす係数	C_{CD}	kgf/cm ²	見掛けの粘着力 (排水条件)
P	%	粒径加積通過率	ϵ_a		供試体軸方向ひずみ
P_a	kgf/cm ²	大気圧	ϵ_r		供試体半径方向ひずみ
P_{max}	%	d_{max} の重量百分率	ϵ_v		供試体体積ひずみ
Q		吸水率	v_i		初期接線ポアソン比
S_r	%	飽和度	w	%	含水比
U_c		均等係数 (D_{60}/D_{10})			

ロック材料の三軸圧縮試験と強度特性

土木研究所報告
第173号 1987年3月

松本 徳久

渡辺 和夫

要 旨：

本報告は、フィルダムのロック材料を対象とした三軸圧縮試験とその強度特性についてとりまとめたものである。

ロック材料の比重・粒度・密度は重要な材料設計値である。この材料特性について原石山の地質状態に着目した事例調査と現場・室内密度試験結果から考察を加えた。

また、ロック材料のせん断強さを求める三軸圧縮試験方法には確立されたものがない。試験方法に関しては主に試験粒度・試料最大粒径・せん断速度・供試体作製方法に実験的検討を加えてその手法を提案した。

ロック材料の強度特性は基本的な設計要素である。三軸圧縮試験より得られたデータを基に、岩質・粒度・密度状態が主にせん断強さと変形性に関与していることを明らかにした。

キーワード：フィルダム, ロック材料, 三軸圧縮試験, せん断強さ, 密度

**Triaxial Compression Tests and Strength Properties
for Rockfill Materials.**

Report of PWRI
Vol. 173 March 1987

by **Dr. Norihisa Matsumoto, Kazuo Watanabe**

Synopsis :

The paper describes the large-scale tri-axial tests and strength properties for rockfill materials.

The specific gravity, gradation and unit weight of rockfill materials are basic design parameters. The effects of geological features on these parameters are analysed by using the data obtained from case studies, and field and laboratory tests.

The details of the procedures of large-scale triaxial tests to obtain the shear strength of rockfill materials have not been specified. The paper proposes the gradation, maximum grain size and processing procedure of the specimen, and loading velocity based on the experimental results.

The shear strength of rockfill materials is one of the fundamental elements in the design of rockfill dams. The strength properties are discussed in relation with rock properties, gradation, and density of the materials.

Key words : filldam, rockfill, triaxial test, shear strength, density

土木研究所報告第173号

昭和62年3月8日発行

発行 建設省土木研究所
〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭1番地
電話 0298 (64) 2211

印刷 株式会社 廣 栄 社
〒101 東京都千代田区内神田1-3-5
電話 (03)295-3545(代表)

本研究報告より転載又は複製する場合は、前もって
建設省土木研究所情報資料課に連絡のうえ、許可を
得てください。

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 173 March 1987

CONTENTS

Triaxial Compression Tests and Strength Properties for Rockfill Materials.	Norihisa Matsumoto Kazuo Watanabe
--	--------------------------------------
