

6. 岩盤分類による岩盤構造物の設計－経験に基づく岩盤構造物の設計－

6.1 概説－施工事例の多い岩盤構造物の設計方法と施工法

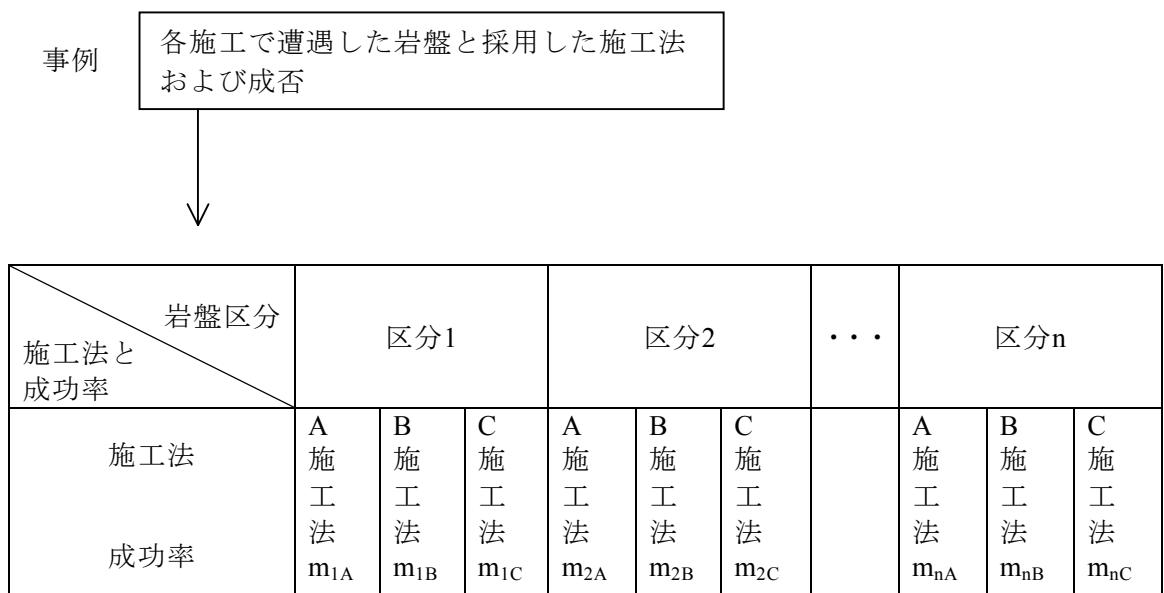
山岳トンネルやダムなど岩盤構造物の施工事例が相当数ある場合には、5章で述べた標準的な設計手法は使わないのが普通である。過去に蓄積されている経験を上手に活用すれば、多くの調査・測定・解析を省略しても、合理的な設計を行い適切な施工法を見出すことが可能である。その具体的な方法が岩盤分類法である。

本章ではこの岩盤分類法の考え方、使い方、本方法の適用限界などについて説明する。

6.2 岩盤分類法による設計の背景

6.2.1 岩盤分類法による設計の考え方

トンネルなどの岩盤構造物については、施工事例(case history)が相当数集積されている。これらは種々の岩盤を対象に様々な状況の下で施工されている。また、施工法や支保



区分nに属する岩盤に対してA施工法を採用したときの成功率

$$m_{nA} = \frac{M_{nA}}{N_{nA}}$$

N_{nA} : 区分nに属する岩盤にA施工法を採用した事例の総数

M_{nA} : // して成功した事例の総数

図6.1 施工事例の整理

も多岐に亘る。全ての施工事例について、遭遇した岩盤の性状と採用した施工法を次のように整理してみる（図6.1参照）。

- ①岩盤の品質や岩盤の状態・環境を適当に区分する。
- ②施工事例毎に、遭遇した岩盤を上記の区分にあてはめる。
- ③同時に、採用した施工法について、成功率 $m=(\text{成功した施工数})/(\text{全施工数})$ を求める。図6.1の表の下欄にこれが記されている。

図6.1からどのような施工法を採用すれば成功する率が高いか、あるいはどのような施工法が失敗する率が高いかが容易にわかる。すなわち、この図は最適な設計法の選択に使うことができる。

このような整理を系統的に推し進めたのが岩盤分類法であり、本方法は経験に基づいた設計法であることは明らかである。

岩盤分類法によって岩盤構造物を設計するには次のようにする。

- ①岩盤分類法で決められた調査を行う
- ②調査結果を岩盤分類法に照らして、調査地が岩盤のどの区分（または等級）に属するかを決める。
- ③その区分に適する設計と施工法を求める（このために、通常は表が用意されている）。

調査終了後の設計段階およびそれ以降の施工段階のいずれにおいても、この岩分類法は有用である。

6.2.2 岩盤の特性(site characterization)と岩盤分類法

岩盤分類法は次の仮説に立脚している。

- ①ある岩盤構造物の建設の可否がそれに依存するような岩盤の特性が存在する
- ②岩盤特性は等級付けができ、いくつかのパラメータを測定して求めれば決定することができる

多くの岩盤分類法では、岩盤特性として「岩盤の（総合的な）強度あるいは品質」を採用している。この強度（あるいは品質）は、岩盤を構成する基質部の強度と不連続面の性状に依存し、それらの程度に応じて等級付けをしているので、この等級付けは相当に合理的であると判断される。一方、岩盤の強度（品質）と施工可能な構造物の間には強い相関がある（例：岩盤の強度とダムの種類）。したがって、上記の①、②の仮説は妥当であり、岩盤分類法には合理的な根拠があると判断される。

しかしながら「岩盤の（総合的な）強度あるいは品質」を厳密に定量化することはできない。それよりも、この方法の信頼性と汎用性の高いことの方が工学的には重要である。岩盤分類法を決める過程で使った施工事例の数が多く、かつ採用した事例の内容（地質状

況や採用した工法など)についての情報が一定の品質(正確さ)を保っていれば、それだけ信頼性や汎用性が高くなることは間違いない。代表的な岩盤分類法であるRMR法(6.5.1参照)は世界各国での事例に基づいて作られているので、世界中で使われ有効性が確認されている。日本における事例を基に開発された岩盤区分法(6.5.2参照)は、国内では有効であるが、海外でも有効であるか否かは不明である。

下記の条件を満たしていれば優れた岩盤分類法であるといえる。

(1)分類法で指定した調査項目に従えば、間違いなく(私見を挟むことなしに)等級付けができる

(2)各調査は容易に実行でき、かつ調査項目の数が多過ぎない

唯一の調査項目によって確実な等級付けをするのは困難であり、複数の調査項目の組み合わせが必要になる。しかし調査項目が多過ぎたり、調査に多額の費用を要すれば、方法の簡便性が損なわれる。

(3)調査結果を間違いなく解釈でき、容易に最適の設計・施工法に辿り着ける

多くの岩盤分類法では、「分類表」や「点数付けと合計」が用いられ、設計者の私見を排除し、確実・容易に最適の設計法や施工法が見出せるようになっている。

6.3 岩盤分類のための指標(調査項目)－その1

岩盤分類をするには、最小限の調査が必要である。岩盤は岩盤基質部(岩石)と不連続部から構成される複合材料であるために、どのような岩盤分類法においても、岩石と不連続面に関する調査項目が含まれている。代表的な調査項目を説明する。

6.3.1 湧水の有無と程度

湧水の有無と程度は施工法の選択に際して影響を与える。

6.3.2 岩盤基質部(岩石)の強度と剛性

(1)強度

岩盤基質部(岩石)の破壊強度と残留強度はそれぞれ岩盤の強度の上限と下限の目安となるので、これらの情報は有用である。岩石は、圧縮強度の大きさから、硬岩、中硬岩、軟岩に区分することができる。

軟岩が卓越する地域にはアーチダム(図6.7参照)を建設できないのは、以下の理由から明らかである。強度が小さい軟岩は第1に、アーチの付け根(abutment)に作用する強大な荷重を支えきれない。第2に、軟岩は風化速度や風雨による削剥速度が大きいので地形は平

坦になりやすく、逆にアーチダムに適した急峻な地形ができにくい。

このように、岩石の硬軟は構造物の種類や施工法の選択などに大きく影響する。しかも、圧縮強度（または点載荷強度）は測定が比較的容易であるという利点があるので、岩盤分類の有効な指標になり得る。

表6.2には、岩石強度について、海外の代表的な区分と日本における標準的な区分の両方が示されている。両者を比べると、硬岩と中硬岩の区分はほぼ同じであるが、軟岩は異なり、日本で中硬岩に属する強度が、海外の方では軟岩に区分されていることがわかる。海外（特に、北米やヨーロッパ）には軟岩が相対的に少ない（あるいは、硬岩が相対的に多い）ことが区分に差異が生じた背景にあるのかも知れない。

(2)剛性

岩石の剛性（ヤング率）も、強度と同様に、岩盤分類の指標になり得る。ヤング率は圧縮強度の測定時にひずみを測定して評価するのが標準的な方法であるが、ひずみの測定は意外に難しい。

弾性波速度（特に、P波速度）の測定は容易であるが、この値は伝達媒体である岩盤のヤング率やポアソン比と次のような関係がある。

$$E = C \rho V_p^2$$

$$\nu = (d - 2) / \{2(d - 1)\}$$

$$d = (V_p/V_s)^2$$

$$C = (1 - 2\nu)(1 + \nu) / (1 - \nu), \rho = \text{密度}, V_p = \text{縦波速度}, V_s = \text{横波速度}$$

したがって剛性を（間接的に）評価するためにしばしば弾性波速度が使われる。

岩石の場合、ヤング率と強度の間にはよい正の相関がある（6.4.1参照）。そこで一方を指標として採用すれば他方は省略できるので、測定の容易な方を用いればよい。

6.4 岩盤分類のための指標（調査項目）－その2（不連続面の性状）

不連続面の性状は次に示すようないくつかのパラメータによって定義することができるが、いずれのパラメータも重要である。

(1)間隔(2)連続性(3)面の粗さ(4)開きと介在物の有無

6.4.1 不連続面の間隔

この値は、露頭（岩盤表面）に設定した1測線を切る不連続面間の間隔の平均値と定義される。節理のように不連続面が互いに平行に配列しているときには、測線は不連続面に垂直に取る。

不連続面の間隔が短いほど岩盤強度は小さくなり、また、落盤や斜面崩壊の危険性が高まる。トンネルなどの空洞を施工する場合には、不連続面の間隔が短くなるほど多量の支保を必要とする。

トンネルの掘削予定場所では、上記の直接的な方法は使えない。このような場合のために、いくつか方法が提案されている。ここでは2つの方法を紹介する。

(1)コアボーリングを観察する方法

不連続面の頻度に関する情報として専らRQD (Rock Quality Designation) が使われる。これはボーリング1m区間に付き得られた10cm以上のコアの総和：

$$RQD = \Sigma \text{ (10cm以上のコアの長さ)} \%$$

として定義される(図6.2参照)。ただしコアの長さの単位としてcmを採用する。

長いコアが得られない要因として次の諸点が挙げられる。

- 1)天然の割れ目がコアを横切っている場合：コアはこの部分で2つに分かれる。
- 2)コアボーリングの際に受ける外力に耐えられる強度がない場合：ここでボーリングに伴う新たな破面が形成される。
- 3)粘土や軟弱岩の場合：この部分はボーリングの泥水に融けて流失するので、コアのない状態になる。

このように、RQD値は岩盤強度と割れ目頻度について情報を与えており、RQD値の大小で岩盤分類をする試みもある(表6.2参照)。

問：図6.2に示すコアのRQD値を求めなさい。

(2)弾性波速度を用いた間接的な評価方法

弾性波速度は供試体(岩盤実質部)の方が岩盤よりも大きいのが普通である。この差異は岩盤中に存在する割れ目に起因する。したがって、両者の弾性波速度から割れ目の間隔についての情報を得ることができる。具体的には、両者の比：

$$k = V_p \text{ (岩盤)} / V_p \text{ (供試体)}$$

が、割れ目の頻度(1m当たりの割れ目の数) n と次のような関係にあることを利用する。

$$n = 5/k^2 - 4$$

上式は経験式であり、kは割れ目指数と呼ばれる。

割れ目指数kはまた、岩盤および岩盤基質部の一軸圧縮強度 σ_c (rock mass)、 σ_c (rock)と次のような関係にあるとされており、岩盤の強度を評価する経験式として使われことがある。

$$\sigma_c \text{ (rock mass)} = k^2 \cdot \sigma_c \text{ (rock)}$$

このように弾性波速度は、岩盤の割れ目の性状、剛性(6.3.2参照)、強度などの情報を含んでいるので、RQDと同様に、弾性波速度に基づいた岩盤分類ができるほどである(図

6.6参照)。

6.4.2 不連続面の連続性 (persistence)

連続性は或る面上に現れた不連続面の広がり（長さ）として定義され、短いものは連続性が悪いという（図6.3参照）。連続性は、岩盤の透水性、破碎性、せん断強度に影響する。

6.4.3 不連続面の表面粗さ

表面粗さは、不連続面の平滑の程度あるいは凹凸の程度を表すもので、数mのscaleでの凹凸を表す「うねり」と数cmのscaleでの凹凸を表す「粗さ」の2つを総合的に表現した量である。表面粗さはせん断強度に密接に関係する。

粗さは、①粗い②滑らか③つるつる

うねりは、①段差の付いた②波打った③平坦

に区分され、両者の組み合わせて9通りに区分される（図6.4参照）。

6.4.4 不連続面の開き（開口量）と介在物の有無

不連続面の開き（開口量、width, aperture）とは不連続面を構成する上下面間の距離をいう。開口量が大きいと不連続面の強度が低下する。せんだん強度に及ぼす影響は、不連続面に介在物がなくinterlockされた状態の場合が最も強く、介在物があったり開口していたり滑っている場合には小さい。

不連続面の開口部は（部分的に）充填されていることが多い。充填物質（グージ）は、断層の場合、粘土であることが多い（断層粘土という）。この粘土は断層が滑ったときに接触面が剥離したものに起源を持っている。粘土で充填された不連続面のせん断抵抗は極めて小さい。き裂内にマグマが流入すると、岩脈(dyke,sill)や裂縫充填型鉱床が形成される。

6.5 岩盤分類法と分類法の例

岩盤分類の考え方からすれば、岩盤分類は施工の種類別になされるべきである。実際に、ダム建設のための分類法、トンネル建設のための分類法が従来提案されている。ここでは、2つの分類法を紹介する。

6.5.1 Rock Mass Rating System (RMR法、Geomechanics Classification)

この分類法は Bineawskiによって開発された。これは、表6.3に示すように、岩盤の等級を次の5つの項目における各評点の和（RMR値と呼ばれる）の大きさによって決めようと

するものである。RMR値は0から100の間を取り、数値として表示されるので、判断に個人的な主観が入ることが少ない。

このRMR値に基づき、トンネルや坑道の掘削法と支保の設計を行う基準が与えられている。表6.4はRMR値と最適なトンネルの施工法および必要な支保の関係を示したもので、この表を用いればトンネルの主要な設計が可能になる。

問題：次の岩盤の等級を定めよ。

- ・岩石の一軸圧縮強度=30MPa
- ・岩盤のコアの状況（図6.5参照）
- ・節理は連続性を有し、平均間隔10cmで傾斜10°、2mm程度開口している。
- ・トンネルに流水は見られない。

6.5.2 電力中央研究所方式による岩級区分

電力中央研究所方式による岩級区分では、表6.5に示すように、岩盤の簡単な観察を基に、岩盤をAからDまでの4段階に区分する（しかし、CはC_H,C_M,C_Lの3つに区分するので、実際には岩盤を6段階に区分している）。日本ではこの区分法あるいはこれを修正した区分法がしばしば使われる。

表6.5の岩盤区分を使う際には、地質学に関する若干の素養と経験を必要とする。また、専ら観察によって判定するので結果に個人差が入る可能性がある。弾性波速度と岩盤区分の間には、図6.6に示すように、よい相関が認められる。したがって、弾性波速度だけからでも大まかな岩盤区分が可能である。あるいは図6.6は表6.5に基づく岩盤区分を確認・補足する目的に使うことができる。

表6.6はこの区分と建設し得るダムの種類（図6.7参照）の関係を示したものである。

6.6 岩盤分類法の限界

岩盤構造物を建設する場合には周囲岩盤が初期地圧の下で示す力学的挙動を予測するのが設計の基本であることを5章で述べた。しかし、ここで説明した岩盤分類法には、調査項目の中に地圧が全く入っていない。

これについて説明しておく。

過去に建設された多くの山岳トンネルの地山強度比は、2～4以上の値になっている。2～4の地山強度比の下で空洞に生じる緩み域の寸法は、空洞の代表的な寸法よりも小さい。この緩み域の大小は、もちろん空洞の維持の難易に若干は影響する。しかし不連続面

の性状が空洞の維持に影響する度合いは、それよりも決定的に大きい。例えば、密度が大きく、連続性がよく、かついくつかの系統の不連続面が存在する場合、空洞ができるにより、緩み域の有無や大小とは無関係に、空洞壁と不連続面で囲まれた閉領域（岩盤ブロック）が容易に形成される。このようなブロックが空洞内に僅かでも押してくると、周囲のブロックも連鎖反応的に動き始め、不安定な領域が拡大する。このような現象の有無は、専ら不連続面の性状に依存する。空洞の掘削や維持の難易は主に不連続面の性状に支配されることが理解されよう。RMR法では、岩盤の品質に不連続面が占める割合は70%に達しており、岩盤構造物の設計・施工にとって不連続面の性状が重要な役割を果していることが十分に考慮されている。

もし関心のある岩盤構造物が岩盤分類の記載の基になった施工事例の環境と大幅に異なる場合には、岩盤分類法は設計・施工に関して間違った指針を与える可能性がある。例えば、被りが1000mあるような大深度においては、大きな地圧の下で不連続面の強度も増加しているので、岩盤は連続体として挙動し、不連続面が諸現象に及ぼす影響は相対的に小さくなる（注）。そして応力集中による空洞周辺の破壊が主要な地圧現象となるので、山はねや激しい盤膨れなどの地圧現象に対して十分に配慮する必要がある。しかしRMR法ではこのような現象への配慮はなされていない。

このように岩盤分類法による設計法は注意して使う必要がある。

さらに付言するならば、岩盤構造物の種類によっては、岩盤の強度以外の特性がより重要な場合がある。廃棄物の処分空洞はその典型例で、この場合には岩盤の特性として隔離性が最も重要になる。

（注）被りが1000mに近い神岡鉱山の地下岩盤内で測定した弾性波速度は、しばしば室内で得られるよりも値が大きい。これは、不連続面が完全に閉じ、地圧の影響が測定結果に現れていることを示唆している。

表6.1 一軸圧縮強度に基づく岩石の硬軟の区分

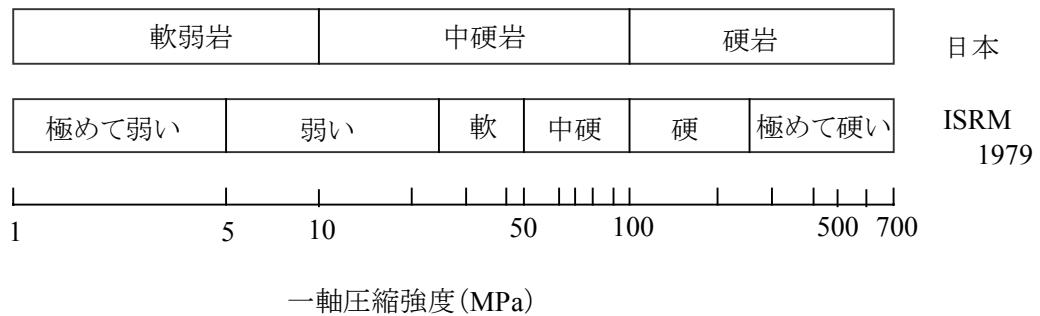


表6.2 RQD値と岩盤等級

RDQ(%)	Rock Quality
<25	Very poor
25-50	Poor
50-75	Fair
75-90	Good
90-100	Excellent

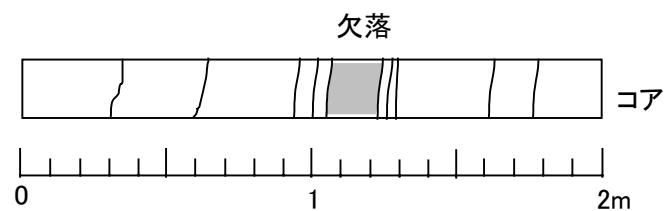


図6.2 コアに現れた割れ目とRQD

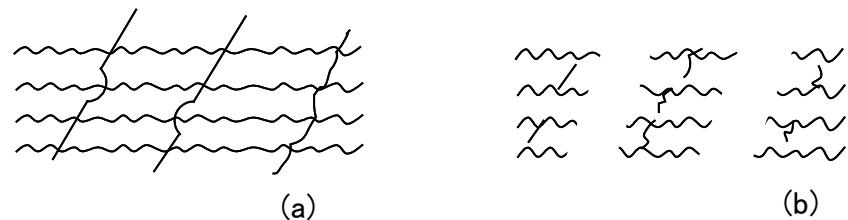


図6.3 不連続面の連続性(persistence)。斜めの群に属する不連続面の連続性は(b)の方が(a)より悪い。

表6.3 RMR法による岩盤分類のためのパラメータと点数

パラメータ			値の範囲					
1 岩盤基質部の強度	点載荷強度指標(MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	この範囲では一軸圧縮試験が薦められる		
	一軸圧縮強度(MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	点数	15	12	7	4	2	1	0
2 RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	点数	20	17	13	8	3		
3 不連続面の間隔	>2m	0.6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm			
	点数	20	15	10	8	5		
4 不連続面の状態	極めて粗い連続していない。開口していない。面が風化していない	やや粗い開口量<1mm面はやや風化	やや粗い開口量<1mm面は極めて風化	鏡面またはゲージ厚<5mmまたは開口量1-5mm	柔らかいゲージ厚>5mmまたは開口量75mm			
	点数	30	25	20	10	0		
5 地下水	トレンチ長10m間の流入量(L/分)	なし	<10	10-25	25-125	>125		
	節理水の水圧 最大主応力	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	一般的な状態	完全に乾燥	湿り気	ぬれた状態	水	流水状態		
	点数	15	10	7	4	0		

注) 第1項目の岩石の強度値における点載荷指標 I_s は、径がD、長さが約1.4Dの円柱形コアを用いて点載荷(直径両端の2点で直径方向に圧縮)し、破断時の荷重Pを用いて、次式で評価される: $I_s = P/D^2$ 。一軸圧縮強度 σ_c とは次のような相関がある: $\sigma_c = 24I_s$

表6.4 RMR値とトンネル施工法および支保

岩盤クラス	掘削	支保		
		ロックボルト (20mm径、全面接着)	吹付コンクリート	鋼枠
I 極めて良好 RMR : 81-100	全断面 掘進長3m	局部的なボルト打設以外は一般に支保は不要		
II 良好 RMR : 61-80	全断面 掘進長1.0-1.5m 切羽から20m後方まで支保完了	局部的に天盤に長さ3mのボルトを2.5m間隔で打設 金網は必要に応じて使用	必要に応じて 天盤は50mm厚さで吹付	不要
III やや良好 RMR : 41-60	上半を1.5-3m先行させるベンチ方式 各掘進発破後に支保打設 切羽から10m後方まで支保完了	長さ4mのボルトを1.5-2m間隔で天盤・側壁に全面打設。 天盤には金網使用	天盤は50-100mm厚さ、側壁は30mm厚さで吹付	不要
IV 不良 RMR : 21-40	上半を1.0-1.5m先行させるベンチ方式 掘進と同時に切羽から10m後方で支保打設	長さ4-5mのボルトを1-1.5m間隔で天盤・側壁に全面打設。 金網も使用	天盤は100-150mm厚さ、側壁は100mm厚さで吹付	必要に応じ1.5m間隔で軽量鋼を使用
V 極めて不良 RMR : <20	上半は0.5-1.5m先行させる多段ベンチ方式 掘進と同時に支保打設 掘進発破後速やかにコンクリート吹付	長さ5-6mのボルトを1-1.5m間隔で天盤・側壁に全面打設 金網も使用 下盤にもボルト打設	天盤は150-200mm厚さ、側壁は150mm、切羽は50mm厚さで吹付	0.75m間隔で重量鋼を鉄切梁とともに使用 必要に応じて先受け使用 インバートで打設

* 幅10mの馬蹄形断面、鉛直圧<25MPa、掘削は発破

表6.5 電研式岩盤等級区分（田中）

記号	特徴
A	きわめて新鮮なもので、造岩鉱物および粒子は風化、変質を受けていない。亀裂・節理はほとんどなく、あってもよく密着し、それらの面に従って風化の跡は見られないもの。岩質はきわめて堅硬でハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
B	岩質堅硬で開口した（たとえ1mmでも）亀裂あるいは節理はなく、よく密着している。ただし造岩鉱物および粒子は部分的に多少風化・変質が見られる。ハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
C _H	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けてはいるが、岩質は比較的堅硬である。一般的に褐鐵鉱などに汚染され、節理あるいは亀裂間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊がはく脱し、剥奪面には粘土質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば多少濁った音を出す。
C _M	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの普通程度の打撃によって割れ目に沿って岩塊がはく脱し、はく脱面には粘土質物質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば、多少濁った音を出す。
C _L	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟化しており、岩質も軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は減少しており、ハンマーの軽打によって割れ目に沿って岩塊がはく脱し、はく脱面には粘土質物質が残留する。ハンマーによって打診すれば、濁った音を出す。
D	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており、岩質も著しく軟らかい。節理あるいは亀裂間の粘着力はほとんどなく、ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけで崩れ落ちる。剥脱面には粘土質物質が残留する。ハンマーによって打診すれば著しく濁った音を出す。

表6.6 ダムの種類と岩盤等級

岩盤等級		コンクリートアーチダムとしての適正	コンクリート重力式ダム基礎としての適正（堤高60m以上のものを対象とする）	ロックフィルダムコア基礎としての適正（堤高60m以上のものを対象とする）
A	A	きわめて良好である	きわめて良好である	きわめて良好である
B	B	きわめて良好である	きわめて良好である	きわめて良好である
C	C _H	おおむね良好である	おおむね良好である	おおむね良好である
		C _M 不良ではあるが堅硬岩および中硬質岩のC _H 級に近いものについては検討の余地がある。ただし、軟質岩についてはダム基礎としては不適当である	不良ではあるが硬質岩および中硬質岩については、改良の余地がある。ただしこの場合、軟質岩についてはハイダムの基礎としてはあまり適当ではない	耐荷力に関してはおおむね良好である。
E	C _L	きわめて不良である	不良ではあるが、ダム天端付近などの作用力の小さな部分については基礎処理を行って、ダム基礎とする場合もある	このクラス全体としてはダム基礎として適しているとはいえない。しかし岩盤改良の可能なものの、CM級に近く水密性のものについては築造が不可能ではない
F	D	きわめて不良である	きわめて不良である	不良である

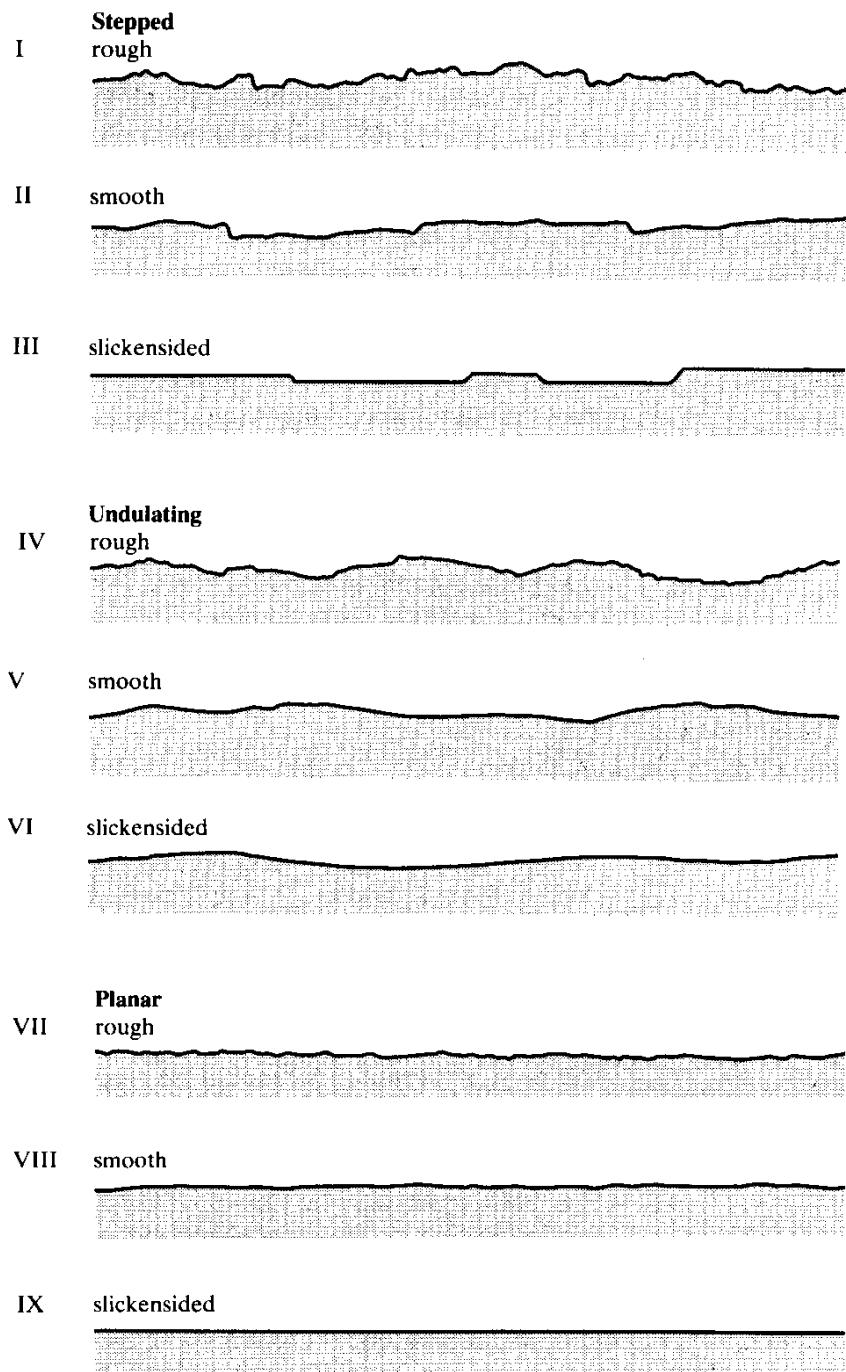


図6.4 不連続面の粗さ。 I～III(段差のついた),IV～VI(波打った),VII～IX(平面的な)。
rough(粗い),smooth(滑らか),slickensided(平滑)

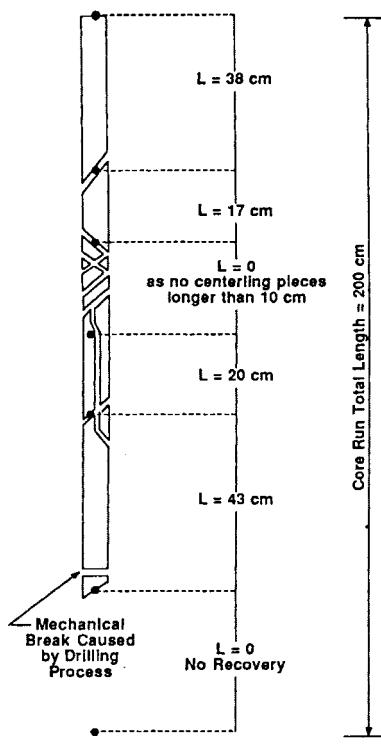


図6.5 コアのスケッチ

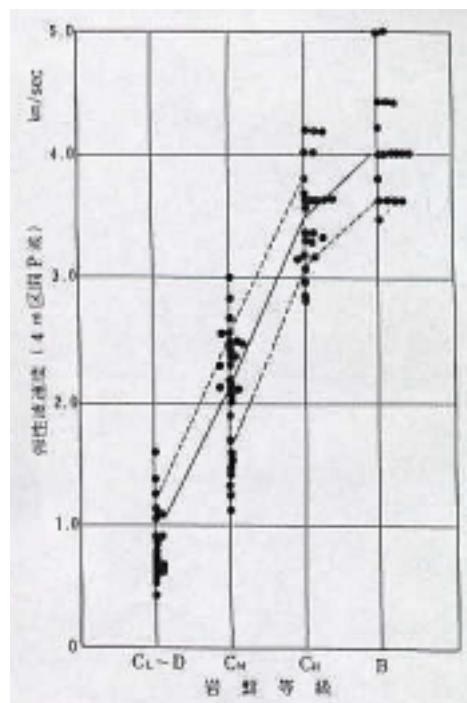


図6.6 P波速度と岩盤等級

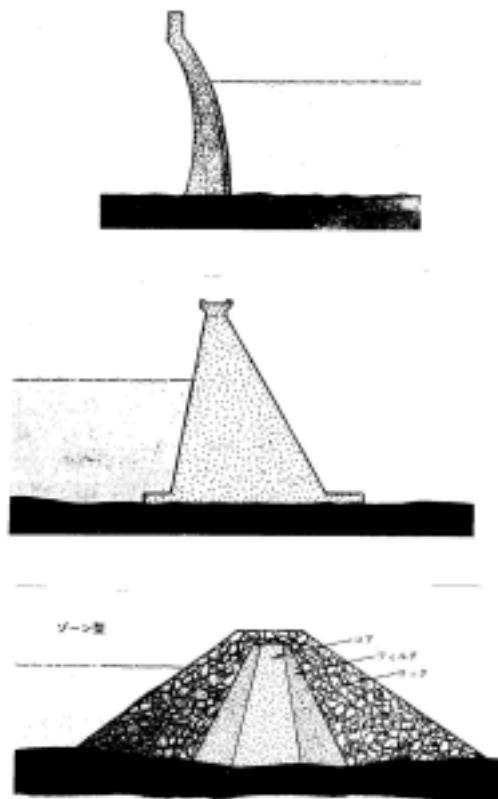


図6.7 ダムの種類。 (上から) アーチダム、重力ダム、ロックフィルダム。