

岩盤の工学的表示方法

よし なか りゅう の しん
吉 中 龍 之 進*

1. ま え が き

土や岩盤を取扱う工学では工事の経験が重要視される。特に岩盤は土に比べ事例が少なく経験が貴重である。経験を情報として正しく伝えるには、施工した岩盤の性質がある種の分類で明らかにしたうえで行なう必要がある。工事の経験には数少ない現地岩盤試験が含まれよう。

土の分類は土粒子の性質と土塊の性質で行なわれる。しかし分類の主眼が材料としての土にあるためか自然土の土塊の性質を含む分類はないようである。

一方、岩盤では岩石コア（土粒子に相当）の性質と岩盤のそれとは本質的に異なるという考え方が強かったため、土とは逆に現地岩盤の特性を主体とした分類が行なわれてきた。しかし今日従来の“不良岩”も工事の主要対象となるに及んで、分類も土と共通の考え方で見直す気運が生まれてきた。

分類の基礎となる性質は分類特性 (Index properties) と呼ばれるが、何を分類特性とするかは結果を利用する立場によって当然異なる。しかし一般的にはその特性の測定が比較的容易であり、かつその特性が、岩盤の他の工学的諸量とよい相関をもつことを基準に選ばれる。

風化度、弾性波伝ば速度、ボーリングコアの採取状態、割れ目の発達程度、地質の種類、構成岩石 (Intact または Intrinsic rock) の諸性質などは従来から岩盤分類の分類特性として用いられてきた。以下では岩盤の分類特性の性質と表示方法についての現状を述べてみたい。

2. 風化状態の表示

地表近くの岩石は大気に接することによって変質を受ける。作用が主として力学的であるものを機械的風化と呼び、化学的なものを化学的風化と呼んでいる。前者では岩石が破碎を受け岩体の不連続化が促進され、後者では化学成分の変化、岩石を構成する初生的な鉱物が粘土鉱物その他の2次鉱物へと変化する過程である。

これらの過程は岩石、岩盤を初生的状態から力学的な面において劣化の過程をたどらせる。そのため風化の程度は岩盤の劣化の状態を示す重要なインデックスとなる。風化作用を力学的と化学的の2過程に分けて取扱う関係から、

それぞれの過程における状態で表示する。

2.1 化学的 (鉱物化学的) 風化度の表示

未風化の岩石と風化した岩石の化学成分を比較すると両者に顕著な差が認められる。

この関係を利用して、風化ポテンシャル指数 WPI や風化進行指数¹⁾ (Weathering Direction または Products Index, PI) がそれぞれ(1), (2)式で示される。

$$WPI = \frac{(K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O^+) \times 100}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + FeO + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)} \dots\dots\dots(1)$$

$$PI = \frac{SiO_2 \times 100}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + Al_2O_3} \dots\dots\dots(2)$$

ここに H_2O^+ は $112^\circ C$ 以上の水和水である。

また、風化中アルミナの量は変化しにくいことからアルミナに対するシリカ (石英および結合シリカ) のモル率および、未風化の岩石に対する風化岩の全成分損失量²⁾、鉄分、カルシウム分の変化などの表示を用いる方法もある。図-1 は新鮮な花コウ岩からの変化を示す。

以上のほか、個々の造岩鉱物の2次鉱物 (粘土鉱物など)

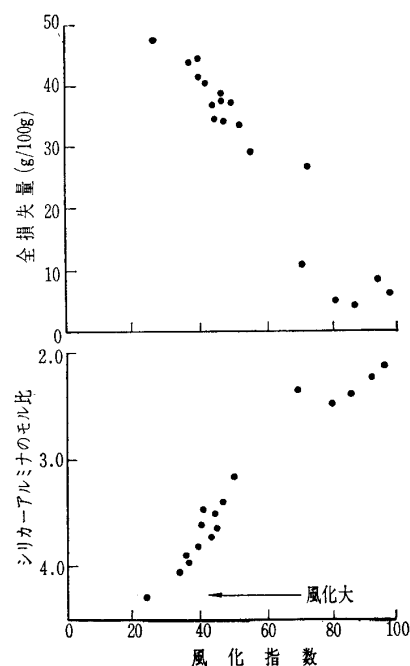


図-1 花コウ岩の風化度の表示例
(B.P. Ruxton, 1968 による)

* 工博 埼玉大学助教授 理工学部建設基礎工学科

への変化を表示する方法もある。しかし、分類特性に取上げる段階に至っていないように思われる。

2.2 物理的性質による風化度の表示

岩石の機械的風化による破碎作用あるいは、先の化学的風化作用の結果、岩石の物理的力学的性質はさまざまに変化する。その結果に基づいて風化度を表示することができる。

岩石の物理的性質のうち風化の影響を鋭敏に反映する性質はいろいろあるが、その性質が他の力学的性質と密接に関係するものは風化度のインデックスとなる。岩石の強さも風化に支配されるが、ここでは非破壊試験法などに基づく基本的性質のみを考える。

間げきの量はこのような意味で重要である。未風化のものは間げき率 n が 0.3~1.0% 程度、風化が進むと $n=30\sim40\%$ と変化する。間げき率あるいは間げき比の表示には構成鉱物の比重や体積の測定が必要で、風化が進んだ試料では取扱いがめんどろとなる。そこで飽和状態での含水比を変質指数 (alteration index) または間げき指数と呼ぶ量で、岩石の性質を表示する方法が用いられる。ダンカン (Duncan)³⁾ はこれを i_s で示し岩石の分類、および岩石の力学的性質に対してきわめて重要なインデックスであることを示している。図-2, 3 に間げき指数と岩および岩盤の力学的性質の一例⁴⁾ を示す。

弾性波伝ば速度による風化度の表示も有効である。速度の測定は現在では非常に普及した方法でありかつ非破壊で

ある点で基礎物性値として多用される。

イリエフ (Iliev) は(3)式を提案⁵⁾ し風化係数 k を求めた。

$$k = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに V_0 は未風化の岩石の P 波速度であり V は k を表示する岩石の速度である。 k を 5 段階に分け表-1 のように表現している。

表-1 風化係数 (Iliev (1966)) による風化度の表示

k	風 化 度
0	新 鮮
$0 < k < 0.2$	わずかに風化した
$0.2 < k < 0.4$	風 化 した
$0.4 < k < 0.6$	強く風化した
$0.6 < k < 1.0$	きわめて強く風化した

以上のほかショア硬度、ビッカース硬度なども機械的風化の影響をよく表示し、また岩石の他の工学的性質とよい相関があることが報告されている。試験片の作成の手間が省け、また多数の測定値を容易に求められるなど、多くの利点があり今後岩石材料の分類特性として活用される可能性があろう。

2.3 野外の風化観察に基づく岩盤表示

野外での岩盤観察により風化程度を判定し岩盤を区分する方法は、ダム岩盤調査の初期から行なわれている。風化の程度は未風化の岩石を基準にし、造岩鉱物の変質、割れ目の粘土物質の介在、岩質の軟化の程度で表現している。その代表的な例は表-2 に示す田中⁶⁾ の方法であろう。現在この分類法に多少の定量的表現などの修正を加えてよく利用しているが、本質的には本法は岩盤の風化程度に基づく区分法である。

フックス (Fookes) ら⁷⁾ Imperial College of Science and Technology のグループも同様の見方で岩盤の工学的区分を行なっている。表-3 はこれを示したものである。

表-2 ダム基礎岩盤の分類(田中) (表現について一部加筆, 吉中)

記 号	地 質 の 特 徴
A	造岩鉱物* が風化・変質していない新鮮なもの。割れ目はよく密着し、その面に沿う風化はない。ハンマーで打診すると澄んだ音を出す。
B	造岩鉱物は部分的に多少風化・変質するが岩質は堅い。割れ目は密着。ハンマーで打診すると澄んだ音を出す。
C _H	造岩鉱物は風化しているが岩質は比較的堅い。一般にかつ鉄鉱などにより着色。岩塊間の結合力が、わずかに減少し、ハンマーの強打で岩塊が割れ目に沿ってはく離する。割れ目に粘土をはさむことがある。ハンマーで打診すると少し濁った音がでる。
C _M	造岩鉱物は風化し、岩質も多少柔らかくなる。ハンマーの普通の強さの打撃で岩塊が割れ目に沿ってはく離する。割れ目に粘土などをはさむことがある。ハンマーで打診すると多少濁った音がでる。
C _L	造岩鉱物は風化し岩質も柔らかくなる。ハンマーの軽打で岩塊が割れ目に沿ってはく離し、割れ目面に粘土が残る。ハンマーで打診すると濁った音がでる。
D	造岩鉱物は風化し柔らかく、岩質も著しく柔らかい。岩塊間の結合力は、ほとんどない。ハンマーでわずかに打つだけで崩れる。割れ目には粘土をはさむ。ハンマーで打つと著しく濁った音がでる。

* 石英を除く他の造岩鉱物

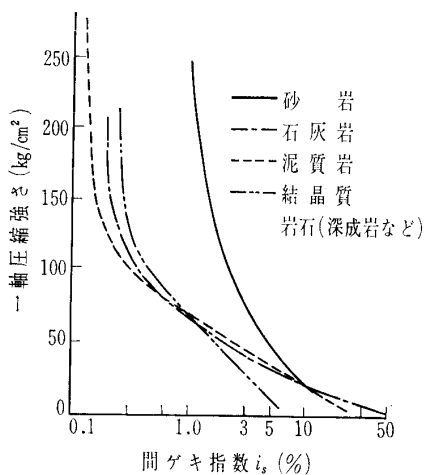


図-2 間げき指数と一軸圧縮強さの関係 (Duncan, 1969)

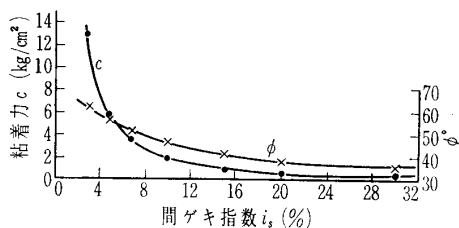


図-3 間げき指数と花こう岩岩盤の原位置セン断特性 (Manuel Rocha, 1964)

表-3 風化度に基づく岩盤の野外分類法 (Fookes, Horswill)

等級	表 現	略記号	地 質 の 特 徴
I	新 鮮 な	Fr	岩盤の変色強度の低下などの風化の影響なし。
II	わずかに風化した	Sw	岩盤はわずかに変色。割れ目は開口し、表面が着色していることがある。岩石は野外でみる限りにおいては、新鮮な岩石に比べ強さの低下はない。
III	や (中 程 度) 風化した	Mw	岩盤は変色。割れ目は開口することがある、また岩盤の内部まで割れ目に沿う変質が進んでいる場合があり割れ目表面の変色はより強い。岩石は野外観察でも新鮮な岩石に比べてかなり弱くなる。
IV	強 風 化 した	Hw	岩盤は変色。割れ目は開いていることがあり、また割れ目近くの岩石組織は変化している。岩石は内部まで変質しているが岩石のレックは残る。
V	完 全 に 風 化 した	Cw	岩盤は変色し、外見は土に変わっているが、岩石の構造(fabric)は残る。土の性質は、一部元の岩盤の性質に支配される。
VI	残 留 土	Rw	岩盤は変色し、元の岩盤の構造は全くなり、完全な土になる。

田中とフックスらの表現を比較するとA B C DがI II III IVに対応し、田中はフックスの等級ⅢをCH, CM, CLの3細分していることがわかる。

以上の表現には割れ目の間隔に関する表示は含まれない。割れ目の成因は風化現象とは別の過程によるものであるという判断による。

区分のための野外作業では未風化の岩盤の特徴と鉱物を判定する地質工学的な技量が必要であるが、区分結果は工学的性質をよく反映することが知られている。しかし区分が個人的要素に支配されやすいので、他地域および他人の区分とは厳密には対応しないのも当然であろう。

田中分類に対して各地のダム岩盤の速度を測定し岩種ごとに両者が対応しうることを示した研究⁸⁾がある。その概略の傾向を表-5に示した。

3. ボーリングコアの採取状態の表示

ロータリーボーリングで岩盤のコアを採取する場合、コアの採取状態—採取率、コアの平均長さ、最大長さなど—は岩盤の原位置における割れ目、硬さ、均一性などの状態に支配される。しかし、機械を操作する側の条件やコアチューブの種類にも大きく支配されるので事情は複雑である。

これらの事情を勘案してディーア (Deere)⁹⁾は、ボーリングの単位掘進長において長さ10 cm以上のコアの占める割合で岩盤の質を判断する方法を提案した。この場合コアチューブの径を5.3 cm (NX)以上、コアの分離面はボーリングの作業の前から存在していたものという条件がつく。岩盤の質の表示はRQD (%) (Rock Quality Designation)で行ない(4)式で求める。

$$\text{RQD}(\%) = \frac{\text{10 cm 以上のコアの累計長さ}}{\text{単位掘進長さ(たとえば1 m)}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(4)$$

RQDによって岩盤を表-4のように区分する。

RQDは10 cm以上の長さのコアの量で岩盤を表示する

March, 1973

表-4 RQD と岩盤の良好度表示 (Deere 他, 1967)

RQD (%)	状 態
0 ~ 25	非 常 に 悪 い
25 ~ 50	悪 い
50 ~ 75	普 通
75 ~ 90	良 好
99 ~ 100	非 常 に 良 好

ものであるから、10 cm 以上 (岩盤の割れ方) は岩盤の性質に関係しないとするもので、したがって RQD とは 10 cm 以下になった細粒のコアの分量が岩盤の性質を支配するという見方といえよう。

岩盤が柔らかい、あるいは「悪い岩盤」の場合はコアの長さは本来の割れ目によるばかりでなく、岩盤のくだけやすさによる。このような場合、新しくできた割れ目を区別することは困難であり、まして採取率が100%以下になると、このような判定は不可能である。実際の面からみると、基準的なボーリング条件で採取したコアについて機械的に10 cm以上の長さのコアを測るのが便利である。この場合 RQD は文字どおり岩質の表示であって割れ目のみでも硬さの表現でもない。

RQD と岩盤の工学的性質とにより相関性のあることが見出されている。たとえば現地岩盤の弾性係数 (平板載荷法、水室法による) と、コアの弾性係数との比と RQD、

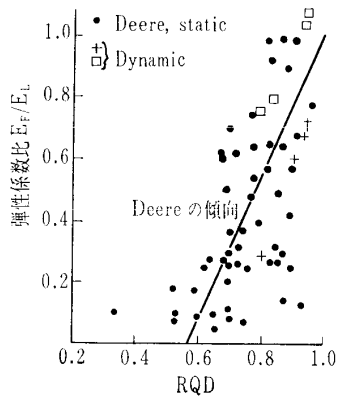


図-4 RQD と弾性係数比 (E_F/E_L : 現地/ E_L : コア) の関係 (Cooper, Blouin, 1970)

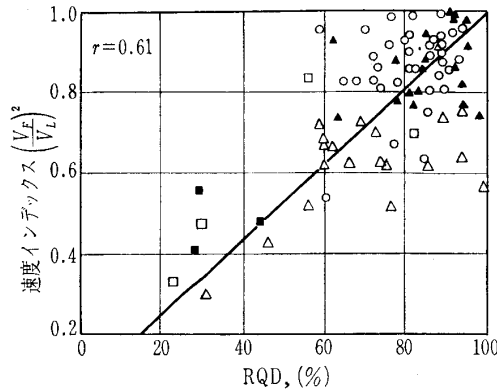


図-5 RQD (3m 単位) と速度インデックスの関係 (Geyer, Myung, 1970)

資料-198

岩盤の弾性波速度とコアの弾性波速度の比と RQD, および割れ目との関係など, 多くのデータが最近報告されている。図-4, 5⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ に 2 例を示す。

4. 現地岩盤の弾性波速度による表示

岩盤の調査に弾性波探査法が利用されたのは 1950 年ごろからといわれる。現在ではこの方法はさまざまな現地条件に適用できるよう考案されており, それぞれが特徴のある方法である。したがって表示された値のもつ意味も測定法との関連で考える必要がある。

速度値は, 任意の区間内の岩盤のすべての弾性に関する性質を含む。速度値のみでは岩盤の状態がわからない。

そのため現地岩盤を作る岩石の速度との比較で, あるいは地層の種類, 岩石の種類とのかね合いから岩盤の状態を評価することが行なわれる。

コアの速度値との比較で岩盤の性質を評価する方法は小野寺¹¹⁾によって導入され, 動的弾性係数の比を岩盤良好度 (Soundness) と定義している。この関係は当時のダム岩盤に適用されたもので, 主として硬岩が対象となる。軟岩や風化岩ではコアそのものの速度値が小さく, またこの種の

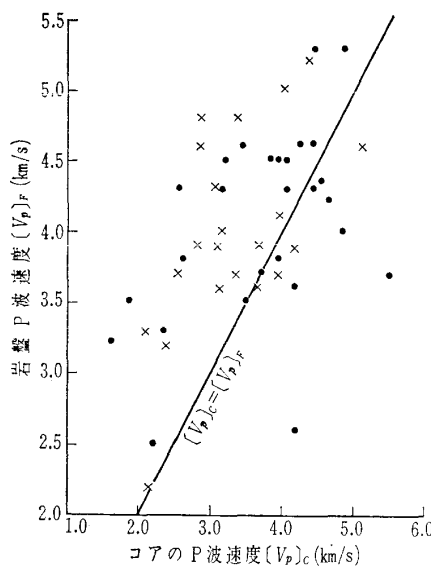


図-6 花コウ岩の P 波速度 (コアと岩盤)
(本四風化花コウ岩研究分科会資料, 1972)

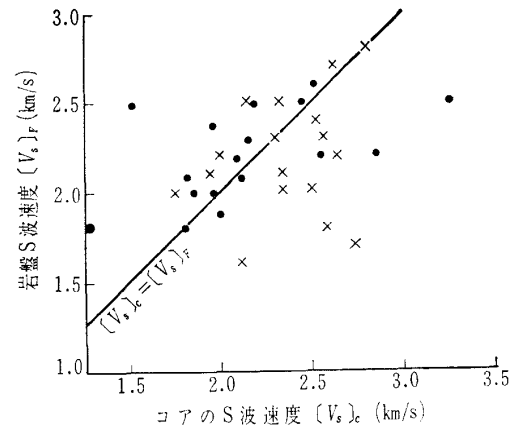


図-7 花コウ岩の S 波速度
(本四, 風化花コウ岩研究分科会資料, 1972)

岩盤では割れ目などの影響が現地速度にはいりにくい。

図-6, 7¹³⁾ は花コウ岩についての資料である。測定はボーリング孔を用いた現地岩盤速度とコア速度を用いている。現地速度とコアの速度値はほぼ等しいか, むしろ現地の方が大きくなっている。

しかし硬岩では岩盤良好度が割れ目の密度, 弾性係数の低減率, 岩盤の強さ (池田¹⁶⁾による準岩盤強度) などよい相関が報告されており, 重要な分類特性である。

岩盤の弾性波速度を用いた岩盤区分の方法は従来からダム, トンネル関係でよく利用される。この区分は先に述べたように地質的所見 (風化, 割れ目, 岩の硬さなど) と併記される。表-5 は同一の地質的所見に対して与えられた岩盤 P 波速度を比較したものである。地質所見は田中の分類を基準として他を対応させた。

5. 岩盤の割れ目に関する表示

岩盤の性質を決定的に支配するのは割れ目といわれる。岩盤の性質に影響する割れ目の特性は, ①方向性, ②割れ目の間隔, ③割れ目面の開口度および充てん物, ④面の凹凸性, ⑤面の連続性などがある。方向性は岩盤の異方性を決定づけるが, 表現は面の走向・傾斜角の統計処理によって平均方向, バラツキを示し図上ではシュミットネットなどの立体投影法が利用される。斜面などの安定性問題を図

表-5 岩 盤 区 分 と P 波 速 度

提 案 者	分 類 表 示					
田 中 治 雄	A	B	C _H	C _M	C _L	D
増 田 (1963)	良 質 健 岩 3.8 ~ 4.5		健 岩 2.8 ~ 3.3	普通岩 1.8 ~ 2.3	不 良 岩	
小野寺, 工藤 (1963)	A (非常に良い)	B (良 い)	C (中程度)	D (やや悪い)	E (悪 い)	
岩盤力学委員会 (トンネル, 1968)	硬 岩 1 4.9	硬岩 2 4.5	硬 岩 3 3.8	硬岩 4 3.0	硬岩 5	
陶山, 東山 (1968)	A (良 い)	5.0	B (普 通) 4.0	C (悪 い)	3.0	D (きわめて悪い)

枠内の数値は区分境界の速度 (km/s)

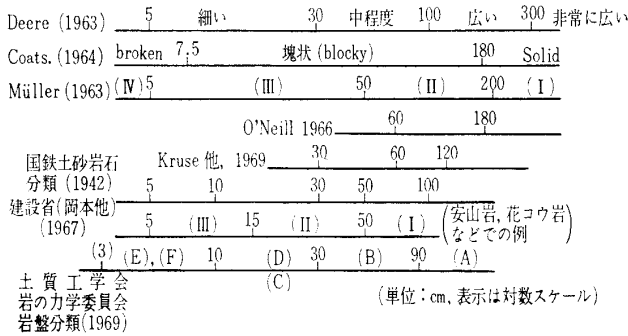


図-8 割れ目間隔の区分表示の例

上で検討することがある。

割れ目間隔も統計処理すべき量である。間隔の表現は土の粒径区分と同様、区分表示が行なわれる。この表示は、国内的にも国際的にも統一された方法はない。岩盤工学の立場で、かつ公的な組織などを通じて発表されている区分表示は図-8 のようである。最大 3 m, 最小は 3~5 cm でその間を分割している。区分で比較の共通したところは 30 cm, 5 cm, 100 cm である。区分の取り方は、結果を利用する立場で異なるであろうが岩盤表示の基本でもあるので統一した表現が望まれる。

割れ目の間接的表示法にき裂係数¹⁴⁾、変形係数と弾性係数の比、コアと現地変形試験での係数の比などがある。また RQD を割れ目のインデックスとして利用する研究もある。

割れ目の開口性 (接触性) は接触係数 (Duncan, 1969)、ジョイント厚さ (joint thickness) などで、また割れ目の連続性は分離度 (degree of separation) で定義³⁾される。いずれも岩盤の変形・せん断特性を支配する重要な量であるが今後の研究にまたねばならない所が大きい。

6. その他の分類特性

岩盤を構成する岩石の性質も岩盤の分類特性である。岩石の一軸圧縮強さと岩盤の弾性係数 (ジャッキ法) にかんがりの相関性¹⁵⁾がある事実はこのことを示す。この意味から岩石コアの各種の力学的性質を利用できるが、測定法の普及度、容易さ、岩石の良悪に関せず求めうるることなどから分類特性としての価値が決まる。

一軸圧縮強さは岩石強さの代表的特性であり、他の力学的性質との間に各種の相関関係が認められている。

また供試体の整形をほとんど必要としない非整形試料による引張り強さ測定法などは、分類試験として大いに利用できるものと考えられる。同様の意味で岩片の粉碎性を求めるプロトジャコノフの方法も役立つ。

以上のほか、岩石の種類、タイ積岩の種類と年代も岩盤の工学的性質の基本的性質を表示する。洪積層の砂岩と古生層の砂岩は硬さ、含水率、風化に対する安定性その他あらゆる性質において異なる。また岩石の地質表示はその岩盤の分布状態や割れ目など構造要素の概要を推定させる。

表示のスケールとの関係でその取扱い方と重要性が変わるものと考えられる。

7. 複数の分類特性による表示

二つ以上の分類特性を用いてより細かく岩盤の特徴を表示しようとする方法である。2 種類の特性の組合わせを用いた場合、図-9 の 2

軸 [A] [B] の分類特性を、[A] に構成岩石の弾性係数 E_c 、[B] に割れ目間隔 L をとると $E_c \rightarrow$ 大、 $L \rightarrow$ 大で連続弾性体的性質、 $E_c \rightarrow$ 小、 $L \rightarrow$ 小で不連続非弾性的性質の強い状態が表示される。一般に前者は "良好な"、後者は "不良な" 岩盤である。

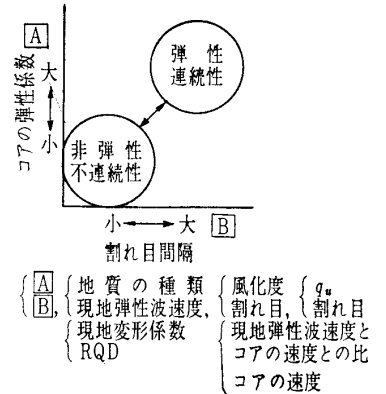


図-9 分類特性の複合表示

[A], [B] に各種の分類特性の組合わせが可能であるが、図-9 に示した組合わせが提案されている。その他 3 要素による表示の例もある。

7.1 地質の種類と現地弾性波速度

わが国のトンネル関係で数種類の提案がある。弾性波速度は少なくとも地山を通過した波の値であり、その区間の状態をよく反映すると信じられている点で有力な情報である。表-6¹⁶⁾は分類法の一例である。

この種の方法は設計施工に対する指針と密接に関連づけるよう配慮している特徴がある。たとえば地圧、火薬量、巻厚、掘削、支保工などへの条件を与えるものもある。

しかし弾性波速度の表示精度、弾性波速は具体的に岩盤のどの性質を意味するか、「地質」の表示に対する適性および施工指針がどの程度適切であったか (実証) などの検討が必要であろう。

7.2 風化の程度と割れ目

バーランド (Burland) 他¹⁷⁾ はイギリスのチョーク地盤の分類を風化と割れ目間隔で合計 I \rightarrow V 段階に分類している。この区分は平板載荷試験などによる弾性係数 (4,000~100,000 kg/cm² の範囲)、および岩石片より求めた弾性係数との比 (表-7) がよく対応をすることを報告している。

田中の分類に割れ目間隔を取入れた分類が、各地のダムサイトで試みられているが分類形式はここにはいる。ミュラー (Müller) も同種の分類を試みている。この種の区分では、特定の風化段階に特定の割れ目間隔をあてはめている。したがってさまざまな地質には適用できないが、限定された範囲内では有効な工学的表示であろう。

7.3 岩石の一軸圧縮強さ q_u と割れ目

表示の内容としては簡単明瞭である。しかし大きい

表—6 岩盤強度分類 (池田和彦)

分類	岩 質						良好の程度	備 考
	A	B	C	D	E	F		
1	>5.0		>4.8	>4.2			良	1) 切羽に湧水がついて回わるようであれば分類を1段階落す 2) 膨張性岩石 (ジャ紋岩, 変朽安山岩, 石墨片岩, 泥岩, 凝灰岩, 温泉余土) は速度値にとられず特として考える。この場合は速度は4.0km/secより小さく, ポアソン比は0.3より大きい。
2	5.0~4.4		4.8~4.2	4.2~3.6				
3	4.6~4.0	4.8~4.2	4.4~3.8	3.8~3.2	>2.6		中	3) 風化岩でポアソン比が0.3より小さい場合は分類を1~2段階あげる。
4	4.2~3.6	4.4~3.8	4.0~3.4	3.4~2.8	2.6~2.0			
5	3.8~3.2	4.0~3.4	3.6~3.0	3.0~2.4	2.2~1.6	1.8~1.2	不良	
6	<3.4	<3.6	<3.2	<2.6	<1.8	1.4~0.8		
7					<1.4	<1.0		

注1. 1~7は岩盤強度分類の大きさの順次である。 3. 岩質のA~Fは
2. 数値は弾性波速度 (km/sec) を示す。

A: 古・中生層, 深成岩・半深成岩, 変成岩および火山岩の一部。
B: はく離性の強い変成岩, 層理の細い中・古生層。
C: 中生層, 古第3紀層の一部, 火山岩。
D: 第3紀層。
E: 新第3紀~洪積層。
F: チュウ積~洪積層。

表—7 岩区分と弾性係数比

区 分	弾 性 係 数 比
I	—
II	0.6 ~ 0.8
III	0.2 ~ 0.4
IV	0.1 ~ 0.2
V	0.1

表—8 岩の分類表とその記号説明

(a) 分 類 表

第1分類記号	第2分類記号	A	B	C	D	E	F
H ₁		H ₁ A	H ₁ B	H ₁ C	H ₁ D	H ₁ E	H ₁ F
H ₂		H ₂ A	H ₂ B	H ₂ C	H ₂ D	H ₂ E	H ₂ F
H ₃		H ₃ A	H ₃ B	H ₃ C	H ₃ D	H ₃ E	H ₃ F
H ₄		H ₄ A	H ₄ B	H ₄ C	H ₄ D	H ₄ E	H ₄ F
H ₅		H ₅ A	H ₅ B	H ₅ C	H ₅ D	H ₅ E	H ₅ F
S ₁		S ₁ A	S ₁ B	S ₁ C	S ₁ D	S ₁ E	S ₁ F
S ₂		S ₂ A	S ₂ B	S ₂ C	S ₂ D	S ₂ E	S ₂ F
S ₃		S ₃ A	S ₃ B	S ₃ C	S ₃ D	S ₃ E	S ₃ F

(b) 副 分 類 表

第1分類記号	第2分類記号	a	b	c	d	e
V ₁		V ₁ a	V ₁ b	V ₁ c	V ₁ d	V ₁ e
V ₂		V ₂ a	V ₂ b	V ₂ c	V ₂ d	V ₂ e
V ₃		V ₃ a	V ₃ b	V ₃ c	V ₃ d	—
V ₄		V ₄ a	V ₄ b	V ₄ c	—	—
V ₅		V ₅ a	V ₅ b	—	—	—

(a) 分類表の記号説明

記 号	記 述
第1分類記号	
H ₁	平均一軸圧縮強さが 1000 kg/cm ² 以上である
H ₂	" 500~1000 kg/cm ² "
H ₃	" 100~500 kg/cm ² "
H ₄	" 100~500 kg/cm ² の膨潤性岩である
H ₅	異方性岩 (片岩など) で, 平均一軸圧縮強さが 100~500 kg/cm ² である
S ₁	平均一軸圧縮強さが 10~100 kg/cm ² の砂質岩である (風化花こう岩を含む)
S ₂	" 10~100 kg/cm ² の粘土質岩である
S ₃	" 10~100 kg/cm ² の膨潤性岩である
第2分類記号	
A	平均き裂間隔が 90 cm 以上である
B	平均き裂間隔が 30~90 cm である
C	平均き裂間隔が 10~30 cm でき裂間充てん物がない
D	平均き裂間隔が 10~30 cm でき裂間充てん物がある
E	平均き裂間隔が 10 cm 以下でありき裂間充てん物がない
F	平均き裂間隔が 10 cm 以下でありき裂間充てん物がある

(b) 副分類表の記号説明

記 号	記 述
第1分類記号	
V ₁	供試体弾性波速度が 5 km/s 以上である
V ₂	" 4~5 km/s である
V ₃	" 3~4 km/s である
V ₄	" 2~3 km/s である
V ₅	" 2 km/s 以下である
第2分類記号	
a	地山弾性波速度が供試体速度の 80% 以上である
b	" 70~80% である
c	" 60~70% である
d	" 50~60% である
e	" 50% 以下である

バラツキがある岩石の q_u をどうして求めるか, また不良岩ほどコアを得にくいなどの難点がある。表—8は岩の力学委員会で作成した分類法¹⁸⁾である。分類結果の一般的な工学的特性は先に図—9に示したとおりであるが具体的な特性値との関係は, 土木学会岩盤力学委員会の「岩盤の変形およびせん断特性に関する調査報告」¹⁹⁾にみるができる。本法は構成岩石の性質 (土粒子の性質) と不連続性

(土塊の性質)の表示であり, 今後特性値測定法の進歩につれて分類要素の選定も変わりうるものと思われる。

7.4 ボーリング孔変形係数 E_b と RQD

最近, ボーリング孔を利用した変形試験法が岩盤試験にも多用されるようになった。 E_b は岩の硬さ, 割れ目の状態を含む重要なインデックスである。 E_b を変形性の分類特性に, RQD をこわれやすさの分類特性に用いた分類法

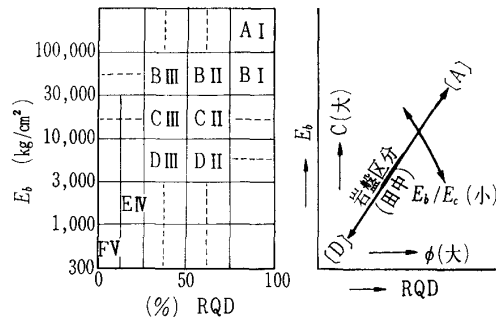


図-10 E_b -RQD 分類

がある。

この方法は岩盤調査の主体をボーリングに求めなければならない場合に有効である。両特性ともボーリングそれ自体を利用した原位置試験値であるので、原位置岩盤の状態表示ともいえる。コアの特性値をインデックスにする場合は試験に耐える寸法のコアが採取できること、平均値を求めるに足る試験数が得られることが条件となる。

図-10 は瀬戸内の花コウ岩に対する分類法である。 E_b の区分を A→F で示し区分間隔は小さい値を細かく、大きい値を粗くするよう対数間隔をとっている。RQD はディアーの区分に準じているが、RQD の値の小さい所を細分している。このようにして E_b -RQD の組み合わせ表示を行った場合、分類の位置と岩盤特性の関係は右図のようで種々の工学的性質を表現しうることがわかる。肉眼と経験に基づく岩区分は、対角線の方で変化し、肉眼区分は工学的特性の総合的表示であることが示されている。

本分類は客観的定量表示であるが E_b 、RQD 双方の測定法の普及と基準化の問題がある。

7.5 岩盤の「強度」・「不均一性」・「異方性」

岡本・安江²⁰⁾は岩盤（ダム）の工学的区分は画一的に行なうべきものでなく、ダムの規模、形式およびダムサイト岩盤に適応した分類特性を選定することとし、その組み合わせ

表-9 岩盤の区分基準

強度	(硬さ)	固結度
		風化・変質
不均一性	異質岩種の組み合わせ	互層(硬質岩)
		レキ質岩
	割れ目の間隔	充填物
		面の凹凸
異方性	割れ目の方向性	層理面
		片理面
	割れ目の状態	面の延長(連続性)
		面の延長(連続性)

表-11 岩盤の評価例(下釜ダム)

評価区分	評価	細区分の組み合わせ
[A]	良好	AI a, AI b, BI a, BI b
[B]	やや良好	AI c, AI a, AI b, BI c, BI a, BI b, CI a
[C]	やや不良	AI c, CI b, CI c, CI a, CI b
[D]	不良	残りの組み合わせ

で表示することを提案している。岩盤を評価した工学的に表示する場合、岩盤の「強度」、「不均一性」、「異方性」が区分基準の基本要素であり、各区分基準を具体的に表-9 のように分け、先に述べた方針で区分表示が行なわれる。

適用例を表-10 に、また総合評価の結果の例を表-11 に示す。表-10 の区分例にみられるように区分要素(分類特性)は各現場において任意に定めることになる。

7.6 その他

コアの弾性波速度(割れ目なしの状態)と地山速度との速度比(劣化の度合)を分類特性としたものがある。これを表-8 (b) に示す。岩の力学委員会の副分類表である。4 参照。

表-10 岩盤の区分例(岡本・安江)

(a) 下釜ダム(安山岩の例)			(b) 裾花ダム(凝灰角レキ岩の例)		
区分要素	細区分	内容	区分要素	細区分	内容
岩石の硬さ	A	堅硬 ⁽¹⁾	硬さ	A	堅硬
	B	一部堅硬、一部軟質、全体にやや軟質 ⁽²⁾		B	中程度あるいは硬軟が入り混じる
	C	軟質 ⁽³⁾		C	軟質
割れ目の間隔	I	50 cm 以上	割れ目の間隔 ⁽⁴⁾	I	50 cm 以上
	II	50 ~ 15 cm		II	50 ~ 15 cm
	III	15 cm 以下		III	15 cm 以下
割れ目の状態	a	密着	角レキの比重 ⁽⁵⁾	a	50% 以上
	b	開口状		b	50 ~ 20 %
	c	粘土をはさむ		c	20% 以下

(1) ハンマーで火花が出る程度

(2) ハンマーで強打して1回で割れる程度

(3) ハンマーでくずせる程度

(4) ここでの数値は一例であり、現場条件で異なる

(5) 概算 1m² 中の面積比

8. あとがき

今回触れることができなかったが、トンネル、水路、ダムなどの個々の現場においてもすぐれた岩盤表示例が数多くある。個々の現場に最も適した表示法は最も望ましいことであるが、また他との比較を共通の物指しで行なうこと、また、そこで得た関係を他地域に利用することも必要である。この意味から各界で統一された区分表示の出現が望まれる。土質工学会岩の力学委員会の分類法もこの主旨に沿うものであろう。分類法の統一は分類試験方法の標準化と普及が一体とならなければならない。本文がこのような動きへの一助となれば幸である。

参考文献

- 1) Reiche, P. : Graphic representation of chemical weathering, J. Sed. Petrology, Vol. 13, pp. 58~68, 1943
- 2) Ruxton, B.P. : Measures of the degree of chemical weathering of rocks, J. Geol., Vol. 76, pp. 518~527, 1968
- 3) Duncan, N. : Engineering Geology and Rock Mechanics, Vol. 1, pp. 80~184, Vol. 2, pp. 35~49, Leonard Hill, London, 1969
- 4) Rocha, L. : Mechanical behaviour of rock foundation in concrete dams, 8ème Cong. I.G.B., Question 28, R. 44, 1964
- 5) Iliev, I.G. : An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties, Proc. 1st Cong. ISRM, Vol. 1, pp. 109~114, 1966
- 6) 田中治雄 : 土木技術者のための地質学入門, pp. 28~36, 山海堂, 1964
- 7) Fookes, P.G. and Horswill, P. : Properties of Rocks, Discussion, *In-situ* Investigation in Soils and Rocks, Conf. by BGS, 1969
- 8) 増田秀夫 : ダム基礎岩盤の弾性的性質決定に対する弾性波速度の利用, 大ダム, Dec. pp. 16~21, 1963
- 9) Deere, D.U., et al. : Design of surface and near surface construction in rock, Proc. 8th Sympo. Rock Mech., AIME, pp. 237~302, 1966
- 10) Cooper, H.F. and Blouin, S.E. : Dynamic *in-situ* properties from buried high explosive arrays, Proc. 12th Sympo. Rock Mech. AIME, pp. 45~70, 1970
- 11) Geyer, R.L. and Myung, J.I. : A tool for *in-situ* determination of the elastic moduli of rocks, Proc. 12th Sympo. R.M., p. 97, 1970
- 12) Onodera, T. : Dynamic investigation of foundation rocks *in-situ* Proc. Sympo. 5th R.M. pp. 517~533, 1963
- 13) 本四連絡地盤地質検討委資料, 風化花コウ岩の分類法, 土質工学会, 1971
- 14) 工藤慎一 : ダム基礎岩盤の調査, 土木技術資料, Vol. 2, No. 3, 1960
- 15) 岩盤力学委員会 : 岩盤のセン断強度調査報告, 土木学会誌, Vol. 55, No. 6, 1970
- 16) 池田和彦 : トンネルの岩盤強度分類, 鉄道技研報告, No. 695, 1969
- 17) Burland, J.B. and Lord, J.A. : The load deformation behavior of Middle Chalk, *In-situ* Investigation of Soils and Rocks, BGS, pp. 3~15, 1969
- 18) 岩の力学委資料 : 統一岩盤分類法の適用方法, 土質工学会, 1969
- 19) 岩盤力学委 : 岩盤の変形およびセン断強度調査報告, 土木学会誌, Vol. 57, No. 9, pp. 51~58, 1972
- 20) 岡本隆一・安江朝光 : ダムサイトにおける岩盤区分の試み, 土木技資, Vol. 8, No. 9, 1966

(原稿受理 1973.1.9)

訂 正

土質工学会誌「土と基礎」Vol. 20, No. 12 (1972.12) 通巻 178 号「路盤上スラブ軌道における盛土の変形」: 伊東孝之・岩崎高明, pp. 25~32 の一部に誤りがありましたので, おわびして訂正させていただきます。

p. 25 図-2: 盛土の経時沈下

p. 26 表-1: 山陽新幹線 (新大阪~岡山) 沈下測定一覧

} 沈下量はすべて表示の値の1/10でしたのでご訂正ください。

*

*

*