

最近の
広山の工
也殻の構
の解明な
されその
して格段
本書は
構造地質
岩盤工等
融合し
した岩の
内容は
るが、
の研究
の動向

岩の力学

基礎から応用まで

日本材料学会

編

丸善株式会社

料金受

本郷

1

差出
平成
10日

ご注文

納本
書
せひご

序

日本材料学会編「岩石力学とその応用」は我が国初めての岩の力学 (rock mechanics) に関する専門書として昭和 41 年 (1966 年) に出版された。当時土木の分野においては、1959 年の Malpasset ダム (フランス) の崩壊および 1963 年の Vajont ダム (イタリア) における貯水池への斜面の崩落がいずれも岩盤の破壊に起因するものであったことから、岩の力学に関する研究の必要性が痛感されていた時期である。また、1966 年には第 1 回国際岩の力学会議 (ISRM) がポルトガルのリスボンで開催され、岩の力学についての研究成果が国際的な場で討論されるようになった。一方、国内ではそのころ黒部ダムが完成に近づき、岩の力学に関する関心は非常に高まり、研究活動も活発に行われるようになった。rock mechanics が鉱山の分野で「岩石力学」、土木の分野では「岩盤力学」と呼ばれ、工学の一分野として専門家たちの中で認識され始めたのもその頃である。そのあたりの事情を、著者を代表して横山次郎先生がその序に次の一節を記しておられる。

「日本の岩石力学もようやくエンジンが動き出したばかりだが、もうローギアにして駆動してよい段階には達した。外国に比べて、遅れを取っているわけではない。運動者である日本材料学会会員中の岩石力学に興味をもっている有志はここにおいて、一書を著し諸氏の深い研学の成果をとりまとめ、大方の要望に答えようと決心した。学問としての体系が成立したとまでいいきると酷評を受けそうだが、とにかく文明に貢献するところが少なくはないと自負している。」

それから 25 年余、岩の力学の知見を必要とする岩盤に係わる大型土木構造物のプロジェクトは、ダムや長大橋梁の基礎はもちろん、地下発電所や石油地下備蓄などのための大規模空洞、各種廃棄物の地層処理、さらには圧縮空気貯蔵や地熱利用などエネルギーに関連したプロジェクト等々、岩盤に係わる国家プロジェクトは目白押しである。また、岩の力学、土木や鉱山の工学の分野においてのみならず、構造地質学、地球物理学など

の理学の分野においても、地球の生成や地震の発生のメカニズムの解明などにその応用範囲を広げるとともに、自然科学としての精緻さも極めつつある。さらに、地震をはじめ、火砕流、土石流、落石等の自然災害のための防災科学、防災工学などにおいては、工学と理学のそれぞれで成熟した岩の力学を、一つの目標に向かって共通の言葉、共通の理論体系で語りはじめている。そのような折から、日本材料学会岩石力学部門委員会では、先人たちの偉業である「岩石力学とその応用」の出版の意を受け継ぎ、自然科学を土台として理学と工学にわたる広い視野に立った岩の力学に関する専門書の最新版を計画した。そして、この出版を通じて当部門委員会の日頃の地道な活動・研鑽の一つの成果を世に問うものである。幸い、当部門委員会は土木、鉱山はもちろん土質、地質、地球物理、地震など多方面にわたる専門分野で活躍する研究者・技術者から構成されていることから、学際的な分野である岩の力学に関する専門書を出版することは当を得ていると自負する。なお、本書を執筆するにあたっては、次の基本的方針に従った。

まず、第I編で岩の力学について基本的事項を述べ、それをもとに構造地質学、地球物理学への展開(第II編)と岩盤力学、岩盤工学への応用(第III編)をストーリー性を重視し読み易い専門書とする。

第I編では岩石の種類や力学的性質に関する最少限の基礎知識を概説し、ついで岩石の変形と破壊に対する理学者と工学者の興味の違いについて、現在の常識となりつつあるものを共通の知識としてまとめる。第II編は理学者の目で、第III編では工学者の目で、それぞれの研究分野の常識と問題点、さらに現在の研究の動向と目標点を、最近の研究成果を踏まえて説明する。なお、そのレベルは大学院用教科書程度とするが、現場技術者や、専門家が気軽に関連分野の動向を知り、アイデアの発想や知識欲を満足させ得るものでありたい。

1993年11月30日

日本材料学会岩石力学部門委員会委員長 桜井春輔

編集委員および執筆者

委員長	小林 昭一	京都大学工学部	教授	工学博士
委員	○芦田 讓	京都大学工学部	助教授	工学博士
	足立 紀尚	京都大学工学部	教授	工学博士
	伊藤 英文	大阪府立大学総合科学部	名誉教授	理学博士
	○木山 英郎	鳥取大学工学部	教授	工学博士
	小林 芳正	京都大学理学部	助教授	理学博士
	○斎藤 敏明	京都大学工学部	助教授	工学博士
	桜井 春輔	神戸大学工学部	教授	工学博士
	佐々 宏一	京都大学工学部	教授	工学博士
	○島田 充彦	京都大学防災研究所	教授	理学博士
	○谷本 親伯	京都大学工学部	助教授	工学博士
	○中川 康一	大阪市立大学理学部	助教授	理学博士

○印：編集幹事

執筆者	小林 昭一	前掲 序章
	島田 充彦	前掲 1章, 3.4節, 3.5節, 5章, 6.1節, 6.2節
	谷本 親伯	前掲 2.1節, 2.2節, 15章
	芦田 讓	前掲 2.3節, 7.1—7.3節, 7.5—7.7節
	木山 英郎	前掲 3.1—3.3節, 13章
	中川 康一	前掲 4章, 6.3節
	菅野 強	京都大学工学部 講師 工学博士 7.4節
	斎藤 敏明	前掲 8章, 10章, 14章
	上田 敏雄	サンコーコンサルタント(株) 9.1節, 9.2.1項
	下茂 道人	大成建設(株)技術研究所 9.2.2項, 9.3節
	京谷 孝史	名古屋大学工学部 助教授 工学博士 11章
	田中 荘一	応用地質(株) 12章
	大西 有三	京都大学工学部 助教授 工学博士 16章

11 不連続性岩盤

岩盤は大小様々の不連続面（地質学的分離面）を含んだ複雑な構造体である。岩盤の力学挙動は、構成母岩材の材料特性と不連続面の配置状態およびそれら不連続面の力学特性が混ざり合って発揮された結果として具現し、岩石が示すそれとは本質的に異なる。岩盤力学・岩盤工学が対象とするのはこうした構造体としての不連続性岩盤である。

鋼構造物のように工場で生産される均質な鋼製品を構造材料とするようなものについては、試験片から構造材料の特性を特定すれば構造物全体の力学挙動は精度よく予測・評価することができる。しかしながら、自然界で形成された岩盤についてはその内部における不連続面の位置、方向、大きさ、連結性、およびそれらの力学特性といったような、岩盤の構造を特徴づけている事柄は完全に特定することはできない。それがために、岩盤については鋼構造物に対するように、構成材料（岩石）の特性を知って目的とする構造物全体の力学挙動を予測するといった力学の図式は単純にあてはまらない。岩盤の力学挙動に対する予測・評価が難しいと言われる由縁である。

不連続性岩盤の力学挙動が信頼し得る精度で予測・評価できるためには、不連続面の分布性状および力学特性が明らかにされるとともに、それら不連続面の影響を合理的に評価し得る力学モデルが確立されねばならない。本章では、岩盤中の不連続面の分布性状およびその定量化手法、不連続面の力学特性、不連続性岩盤に対する力学モデルについて述べる。

11.1 岩盤の不連続面

岩盤中の不連続面（地質学的分離面）は次のように分類されている¹⁾。岩盤の不連続面のでき方については参考文献2)に詳しく書かれている。

層層 (fault)：面に平行な相対変位が認められる不連続面。

破裂帯 (fracture zone)：断裂、圧碎などの作用によって、不連続面が集合を成して帯状

に存在するもの。

節理 (joint) : 面に平行な相対変位がない明瞭な割れ目。節理群 (joint set) と呼ばれる平行な割れ目群を形成する場合が多い。不連続面相互の間隔は数センチメートルから 10 cm 以上と様々である。

裂か (fissure) : 開口しているか、あるいは充填物があってもかつては開口していたことが明瞭な不連続面。節理との区別が紛らわしいので、通常は小さなクラックに対して用いるか、あるいは羽毛状裂か、乾燥裂か、収縮裂かのように限定的にこの用語を用いる。片理 (schistosity) : 結晶片岩、千枚岩などの広域変成岩に発達する数ミリ間隔の密な分離面。

葉理 (lamination) : 堆積岩に見られる鉱物粒子の規則的な配列による分離面。

ただし、これらの用語は地質学の立場からの分類である。岩盤力学・岩盤工学では、これらの分離面を“不連続面”あるいは“割れ目”と総称している。その細分を表す用語については地質学におけるように明確に定義されておらず、大きさや存在形態に重点をおいて、断層あるいは破砕帯 (岩盤構造物の建設位置の決定などの際に考慮すべき数十メートルから数キロメートルのオーダーに及ぶ大規模な分離面)、節理 (数十センチメートルから数十メートルのオーダーの大きさの不連続面)、片理や葉理 (岩石の変形・強度特性を劣化させかつ異方的ならしめる不連続面)、片理や葉理 (岩石の構造分離面で岩石の変形・強度特性を異方的ならしめるもの) といった意味でこれらの用語を用いる場合が多い。また、節理以下の規模の分離面を単にクラックと総称する場合もあり、不連続面に関する用語は統一されていないのが実状である。地質学では不連続面についての成因や形成過程が興味の対象とされてきたのに対し、岩盤力学・岩盤工学では、“割れ目である”という事象の力学的な取扱いに第一義的な関心が持たれてきたという違いの現れである。

ISRM (International Society for Rock Mechanics) は、岩盤力学に関する用語を統一するために 1975 年に用語集³⁾ を出版した。1982 年に ISRM の日本支部である岩の力学連合会からその日本語訳「ISRM 岩の力学用語集」⁴⁾ が出版され、わが国において用語の統一化が図られている。その中で岩盤の不連続面に関する項目は次のように解説されている。

不連続面 (discontinuity surface) : 岩盤についてのある性質が不連続になるような面

破壊面、弱面、層理面等の総称。この定義は力学的不連続面に限定されない。

弱面 (plane of weakness) : 周囲の材料の強度よりも低い (せん断、引張) 強度を有する面、あるいはせまい帯状の領域。

割れ目 (fracture) : 岩石あるいは岩盤中のあらゆる力学的不連続性を表す一般的表現。すなわち、節理、断層、き裂を総称している。

断層 (fault) : 破砕面に平行に両側の地盤を相対的に変位あるいは転位させた破砕面または破砕帯 (この変位は数センチメートルから数キロメートルに及ぶ)。

断層群 (fault set) : 多かれ少なかれ平行になっている断層の集合。

断層系 (fault system) : 2 つ以上の断層群から形成された断層の組合せ。

共役断層 (conjugate faults) : 同一応力状態で形成された断層の一对 (通常、せん断応力による組)。

節理 (joint) : 連続性の岩体中にみられる地質学的起因による割れ目。単独または組あるいは系となって出現する。しかし、その不連続面に平行な動きの、目に見える大きさの変位を伴わない。

節理群 (joint set) : 多かれ少なかれ平行になっている節理の集合。

節理系 (joint system) : 2 つ以上の節理群から形成された節理の組合せ。また、放射状や同心円状などの特徴のあるパターンをもった節理の集合体。

共役節理 (conjugate joints) : 同一応力状態で形成された節理の一对。「通常、せん断応力による組」

節理パターン、ジョイントパターン (joint pattern) : 特徴ある幾何学的関係を示す節理の集合体であり、同じ地質岩体内でも場所によってかなり変化している。

裂か (fissure) : 間隔のある割れ目。

破断 (rupture) : 不安定な状態が生じる様な破壊の発達過程。rupture と fracture が同意語として岩盤力学で用いられるのは好ましくない。

クラック (crack) : 小さな破壊面。すなわちそれが発生している構造体の大きさに比較して小さい破壊面。

層理 (bedding) : 堆積物の圧密の結果生じた岩盤中に形成されたものである。同種あるいは異種の材料-たとえば、頁岩、シルト岩、砂岩、石灰岩など-の層間の境界面を示す。

片理 (schistosity) : 粗粒状の変成岩において生ずる葉理の一種であり、一般に岩石内の板状あるいはだ円上の鉱物粒子が平行に配置されることにより起こる。

葉理 (foliation) : 異種の鉱物が片理に平行な層へ分離した結果により得られる。多少薄板状になった構造。

割開 (cleavage) : 明確な平行面に沿って割れ目をつくったり裂けやすい性質。この面は層理に対し強く斜交することがある。2 次構造であり、通常少なくとも、岩石のある領域の再結晶を伴う。

- Rock Formations in Beijing, ISRM, pp. 169~175, 1986.
- 15) 日本電気協会電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針，日本電気協会，p. 100, 1987.
 - 16) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法，第1編，土木学会，p. 15, 1985.
 - 17) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー 16 風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用，pp. 132~133, 1979.
 - 18) 16)，第2編，p. 47.
 - 19) 土木学会：軟岩の調査・試験の指針（案）—1991年版—，土木学会，1991.
 - 20) 9)，p. 136.
 - 21) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，p. 202, 1990.
 - 22) 安田 登・藤谷昌弘・田中莊一・西田和範・小池 豊：プレッシャメータによる軟岩地盤の動的変形特性把握のための模型実験，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 551~555, 1993.
 - 23) 2)，p. 253, p. 247.
 - 24) 満弘之・西田和範・板橋利昭・石井洋一：軟岩のポアソン比測定とその結果について，第15回土質工学研究発表会，pp. 1381~1384, 1980.
 - 25) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp. 202~206, 1976.
 - 26) 西尾伸也・社本康広：非排水条件下における動的ポアソン比に関する考察，第18回土質工学研究発表会講演集，pp. 507~508, 1983.
 - 27) 田中達吉・船戸明雄・曾根好徳：ボーリング孔内せん断試験による原位置岩盤試験の強度評価について，第6回岩の力学国内シンポジウム講演集，1984.
 - 28) 野沢是幸・鈴木英世・菊池宏吉・藤枝誠・曾根好徳：孔内打撃応答試験機の開発と適用（その2），第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 256~260, 1989.
 - 29) 小田桐直幸・萩原充信・並川賢治・亀谷裕志・平山伸行：レインボーブリッジ基礎地盤の変形特性，第28回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp. 1361~1364, 1993.
 - 30) 富沢修司・長谷川和夫・武内武文・大西 昇：東京港連絡橋の基礎地盤となる土丹の物性，土と基礎，Vol. 35, No. 3, pp. 63~68, 1987.
 - 31) Goto, S., Tatuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T.: A Simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 169~180, 1991.
 - 32) 越智健三・金 有性・龍岡文夫：ひずみ依存性と測定誤差を考慮した体積軟岩の変形特性の検討，土木学会論文集，No. 463/III-22, pp. 133~142, 1993.
 - 33) 大塚岩男・山本和夫・島村義晴：長大橋岩盤としての花崗岩の長期変形特性（その2），第30回土木学会年次講演会，pp. 489~490, 1975.
 - 34) 山下理男・大西有三・武内俊昭：長大橋岩盤としての花崗岩の長期変形特性（その3），第30回土木学会年次講演会，pp. 491~492, 1975.
 - 35) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー 33 岩盤の挙動の予測と実態，pp. 109~132, 1988.
 - 36) 植本直之・大塚康範・満弘之：膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果，土と基礎，Vol. 36, No. 5, pp. 43~48, 1988.

13 岩盤の工学的分類と原位置岩盤試験

13.1 岩盤の工学的評価

13.1.1 岩盤の工学的評価と岩盤分類の役割

岩盤は節理や層理などの不連続面（割れ目）* で区切られた岩石ブロックの集合体からなる。したがって、その力学的挙動は岩石ブロックをなす岩そのもの（以下、岩質と呼ぶ）の力学特性と不連続面の力学特性の複合したものになることは前に述べた。岩質と不連続面のいずれが支配的であるかは個々の岩盤によって異なり、たとえば、岩盤の対象深度によっても、表13.1に示すように、両者の相対的な重みが明らかに変化し、影響度を普遍化し難いのが実情である。

ただ、一般的にいえることは、軟岩においては、岩質と不連続面の力学的性質の差が少なく岩質を中心とした評価が可能なのに対し、硬岩では岩質よりも不連続面の影響が大きい。また、現地における不連続面の評価が重要となる。また、地表近くの岩盤では応力解放と風化により不連続面が発達し、力学的弱点になり易いものに対し、地下深所では

表 13.1 岩質と不連続面の影響度

		岩質	不連続面
地下浅所 (土木)	軟岩	○	△
	硬岩	×	○
地下深所 (鉱山)	軟岩	○	×
	硬岩	○	△

○支配的，△影響あり，×影響少ない

* 後出の ISRM 指針案において、「不連続面」とは、節理、層理、片理、へき開から断層に至るまでの岩盤中のすべての不連続面を含むものと定義され、用語としては fracture (割れ目) から discontinuity (不連続面) に統一することが提案された。わが国では従来「割れ目」の用語が多く用いられてきたが、ここでは「不連続面」を用いる。なお、問題となる不連続面の多くが節理 (joint) であるので、「節理」あるいは「ジョイント」を不連続面とほぼ同義語として用い、節理 (ジョイント) 間隔、節理系 (ジョイント・システム) などということもある。

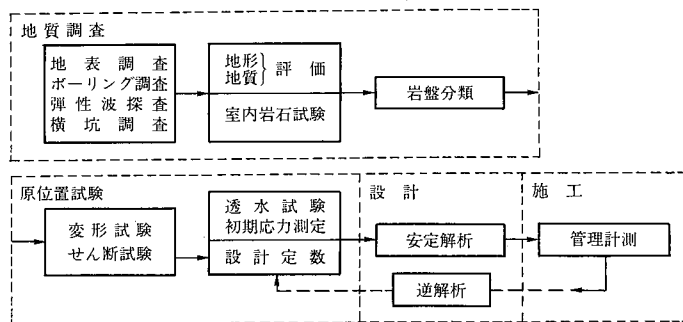


図 13.1 岩盤評価の流れ

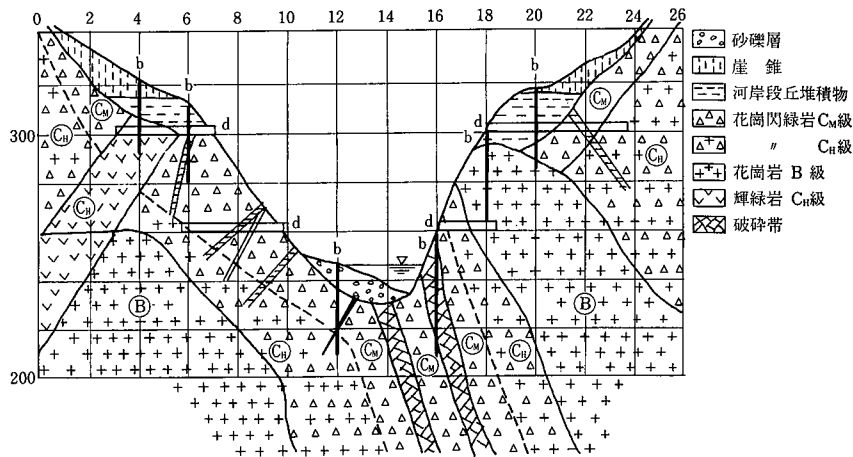


図 13.2 ダムサイトの地質断面図と岩盤分類

不連続面の風化が少ないうえに封圧により密着しており、地表におけるほど力学的弱点とはならない。したがって、上表に見られるように同じ硬岩質岩盤に対しても、地下深所を扱う鉱山分野においては岩石試験を中心とした評価体系が発達して岩石力学と呼ばれ、一方地下浅所を扱う土木分野においては不連続面を重視した現地岩盤調査・試験による評価体系を必要とし、これを岩盤力学と名付けたのも一片の真理を表している（本書では工学、理学を通じての岩質材料としての評価を岩石力学と呼び、鉱山、土木を通じての岩盤構造としての工学的評価を岩盤力学あるいは岩盤工学と呼んでいる）。

ダム基礎岩盤など岩盤評価が十分に行われる場合について、岩盤の調査から設計・施工に至る各段階の岩盤評価の流れを示すと図 13.1 のようである。例えばこれを図 13.2 に示すダムサイトの例でみると、まず地表調査、ボーリング調査(図中の記号 b)と

地点の横坑調査(図中の記号 d)によって地形と地質の評価を行う。結果は地質平面図、断面図にまとめられ、ついで岩種、岩質、不連続面の状況によって、図のような B 級、C_H 級、C_M 級、……の岩盤分類(通常は岩盤等級区分になっている)が付される。

この分類に従って、各級を代表する岩盤について、上述の横坑を利用して原位置変形試験やせん断試験が行われる。予め岩盤分類を行うことによって、費用と手数のかかる原位置岩盤試験の個数を減じ、点で捕えた試験結果から現場全体の広い範囲の岩盤の物理的・力学的性質、ひいては必要な設計定数の合理的な推定を可能にしているわけである。なお、必要に応じて岩盤透水試験や初期応力測定もこの段階で実施される。

試験結果から岩盤等級ごとの設計定数を決定し(岩盤分類についていえば、この段階での適切な修正は必要)、設計・施工へと進む。以上の各段階の岩盤評価の良否は、施工時における時々刻々の管理計測によって判定され、必要ならば設計・施工に手直し(この段階での岩盤分類の見直しも忌避すべきではない)が加えられる。特にトンネルのように事前の岩盤試験が困難な場合には、岩盤分類をもとにした経験設計が行われるが、必要に応じて管理計測の結果から逆解析によって設計定数を推定する方法も提案されている。

以上のように岩盤評価の一連の過程において、岩盤分類はできるだけ初期の段階で簡単な調査によって対象領域を工学的に同等な岩盤領域に区画する基準的役割を担っており、汎用性のある岩盤等級は変形係数やせん断強度など岩盤の設計定数に結びついたものである。さらに、付された岩盤等級とそれを決定づけた分類指標の特徴は、原位置試験結果の解釈から設計・施工の最終段階に至るまで、その岩盤に関する諸々の工学的判断の基準として生き続けることが期待される。したがってまた、当初の岩盤等級にむやみに執着することなく、各段階での適宜の見直しも必要とされる。

13.1.2 岩盤の不連続面の評価

国内・国外を問わず、岩盤分類との関連でさまざまな岩盤の不連続面の工学的評価がなされてきたのは周知のとおりである。そのため、実用化されている不連続面の指標も多岐にわたり、定性あるいは定量化の手法や表示区分も不統一であることはたびたび指摘されてきた。そのような折柄、ISRM の室内および原位置試験法の基準化委員会¹⁾は「岩盤中の不連続面の定量的表示に関する指針案(1978)」を発表した。

これは今日までに提案された岩盤の不連続面の工学的評価法の主なものを網羅し、それらを以下に述べる 10 個の不連続面指標に分類するとともに、各指標の定量的な取扱い方を細部にわたって基準化している。ただし、これらの基準がわが国の実情に合致する

状など)は群の個数と方向によって決定される。ブロックサイズとブロック間のせん断強度という2つの特性の組合せによって、与えられた応力条件に対する岩盤の力学的挙動が決定される。ブロックサイズは、代表的なブロックの平均サイズを示すブロックサイズ指標(block size index) J_b 、あるいは岩盤の単位体積内不連続面数(volumetric joint count) J_v を用いて表される。

ブロックサイズ指標 J_b : 対象とする地点で代表的なブロック数個を選んで、各ブロックについて平均サイズ(ブロック径に相当)を計算し、それら平均サイズの最頻値をその地点の J_b とする。

単位体積内不連続面数 J_v : 各不連続面群についての1m当りの不連続面数を全不連続面群について合計したものである。不規則不連続面も含まれるが、通常これは J_v 値にはほとんど影響しない。サンプル長は通常5mあるいは10mとし、例えば、3つの不連続面群と1つの不規則不連続面について測定された結果から次のように計算される。

$$J_v = \frac{6}{10} + \frac{24}{10} + \frac{5}{5} + \frac{1}{10} = 4.1/m^3$$

この J_v 値によりブロックサイズは表13.12のように区分される。また J_v と RQD とには近似的に次式の関係が成立する。

$$RQD = 115 - 3.3J_v \tag{13.4}$$

ただし、 $J_v < 4.5$ のとき $RQD = 100$ とする。

表 13.12 ブロックサイズの区分 (ISRM)

区 分	J_b (不連続面数/m ³)
非常に大きいブロック	<1.0
大きいブロック	1~3
中程度のブロック	3~10
小さいブロック	10~30
非常に小さいブロック	>30

表 13.13 ブロック形状の区分 (ISRM)

区 分	説 明
(i) マッシブな	ほとんど不連続面のない、あるいは不連続面間隔の非常に大きい
(ii) ブロック状	ほぼ立方体の
(iii) 板 状	2辺に比し、1辺がかなり小さい
(iv) 柱 状	2辺に比し、1辺がかなり大きい
(v) 不規則状	ブロックの寸法・形状がさまざまな
(vi) 破 片 状	不連続面が密で、角砂礫状の

ブロックの形状は表13.13のように区分して表示する。

13.2 岩盤分類の基本概念

13.2.1 不連続面の指標

国際岩の力学学会 (ISRM) の提案した10個の不連続面指標は表13.14のように3つに区分(岩石ブロックの形状を不連続面の分布の特性に含めると実質2区分)できる。このうち、岩盤分類の指標として最もよく用いられるのは、不連続面の分布指標としての②不連続面の間隔であり、補助に不連続面の性状指標としての⑥不連続面の幅(間隙)である。

岩盤は通常相交わる数個の不連続面群(4個以上の場合もめずらしくない)をもち、そのそれぞれの群について、不連続面間の距離を測定し、その平均値 (ISRM では最頻値を推奨している) をその群の不連続面間隔と呼ぶ。不連続面間隔の代わりに1m当りの不連続面本数を用いることもある。

不連続面の性状を表すには図13.7に示した密着不連続面、開口不連続面、充填不連続面(開口不連続面の間隙が岩石の破砕物等で充填されたもの)の3区分をし、後2者については不連続面の幅(間隙) t を付記する。

不連続面の分布や性状を間接的に評価する岩盤分類指標として、 RQD (rock quality designation) と弾性波縦波伝播速度 V_p がよく用いられる。 RQD はNXビット(孔径75mm、コア径約53mm)以上のダイヤモンドビットとダブルコアチューブを使用してボーリングを行い、コア長10cm以上のコアの長さの合計がボーリング孔長に占める割合(%)をいう。50~70%が普通、75%以上は良好で、90%以上は非常に良好な岩盤といえる。

弾性波伝播速度 V_p の測定は、地表面で行う屈折波法と調査横坑間で行う平均速度法がよく用いられる。岩石試料に対すると同様に、縦波・横波の理論式が岩盤に対しても仮定されるが、不連続面の影響が卓越するため岩盤の見掛けの E_a や ν_a に変換することなく、 V_p そのものを岩盤の不連続面の指標として用いる。なお、岩盤の見掛けの動弾性係数と岩質(縦波速度 v_p)の動弾性係数との比が $(V_p/v_p)^2$ で与えられることから、岩石

表 13.14 不連続面の指標

不連続面の分布	①不連続面の方向、②不連続面の間隔、③不連続面の連続性
不連続面の性状	④不連続面の壁面粗度、⑤不連続面の壁面強度、⑥不連続面の幅、⑦不連続面の充填物、⑧不連続面の透水性
岩石ブロックの形状	⑨不連続面群の個数、⑩ブロックサイズ

の強度や弾性係数から岩盤のそれに換算するときには、 $(V_p/v_p)^2$ 倍することがよく行われる。

以上は岩盤の力学挙動を中心に不連続面の指標を眺めたが、岩盤浸透流を問題にする場合には、岩盤の透水性と不連続面の関係が重要になる。一言でいえば、岩盤中の水の流れは、岩石の空隙を通じた1次透水と、不連続面の間隙を通じた2次透水とがあり、通常は後者によって支配される。2次透水性は、不連続面指標で述べた不連続面の方向、間隔、幅(間隙)、壁面粗度、充填物の透水性等によって定まるので、上述の岩盤分類とは別に、浸透流解析のための不連続面のモデル化をはじめ理論的研究も盛んになりつつある(前出、9章参照)。

13.2.2 岩質の指標

岩石試料によって求めた種々の力学定数(前出、2章参照)がこれにあたる。中でも、1軸圧縮強度 σ_c や弾性波速度 v_p が岩盤分類の指標としてよく用いられる。また現場での目視やハンマー打撃により判別が可能のように、岩種、岩石名と固結度あるいは風化・変質度*による軟岩、中硬岩、硬岩の区分も指標とされる。この区分は岩石の σ_c を反映したもので、区分の境界は $\sigma_c=200\sim 300\text{kgf/cm}^2$ と $800\sim 1000\text{kgf/cm}^2$ に対応している。

なお、軟岩、硬岩を岩盤分類の指標とする場合には、たとえば堆積岩の固結度のように岩石の産状による岩質本来の軟岩、硬岩の区分と、元来硬岩であった火成岩、変成岩、堆積岩が風化・変質によって中硬岩、軟岩へ劣化したものとを混同されないように十分な配慮が必要である。

13.2.3 分類の基本概念と目的別分類

土の統一分類が地盤の構成要素となる土そのものの材料特性によって実験的になされるのに対し、岩盤の場合は不連続面の特性が岩盤ごとに異なり、かつ構造物の大きさとの関連で評価されなければならないため、実用的な統一分類はきわめて困難である。岩盤分類が、ダム、トンネル、橋梁基礎等、個々の工事対象ごとに行われている(目的別分類と呼ぶ)のもこの辺の事情による。

図13.8は岩盤分類の基本概念を示したもので、横軸に岩質の指標を、縦軸に不連続面

* 岩盤分類の指標に風化度がよく用いられたが、岩盤の風化は不連続面の風化に始まり岩質の風化に至るので、最近の岩盤分類では不連続面指標と岩質指標のそれぞれの中に風化度は考慮され、独立の分類指標として風化度を用いることは少ない。

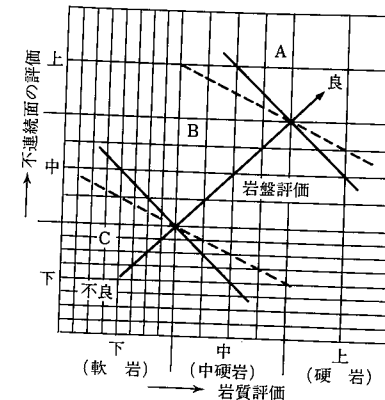


図13.8 岩盤分類の基本概念

の指標をとる。それぞれの指標には前項13.2.1, 13.2.2の中から代表的なものを採用する。両指標の組合せの結果として、対角線に沿って岩盤評価は不良から良へと変化するので、図のように対角線を横切る適当な境界線を設けて、A級、B級、C級、…と分類するのが基本となる。これらを固定できれば統一分類となるが、対象構造物との関係で分類に最適の指標の絶対値と両指標の影響の度合が異なるので、それに応じて岩盤分類を示す境界線の位置と傾斜を変える方が一般に実用的である。すなわち、目的別分類となる。

13.3 主な岩盤分類

岩盤構造物の「解析による設計」を行う場合、設計に必要な材料定数は原位置岩盤試験によって決定される。しかし、対象岩盤のすべての領域をカバーするだけの試験数をこなすことは実際的に不可能である。このため、対象領域を、まず適当な岩盤分類によって工学的性質の同等な岩盤の領域に区画し、その代表岩盤について原位置試験を実施するのが合理的である。その際、将来の類似の岩盤にこれらの結果を有効に利用するためにも、できるだけ一般性のある岩盤分類を用いて試験結果や採用した設計定数を保存・蓄積することが重要である。

トンネルのように、原位置岩盤試験(すなわち、設計定数の決定)を実施しないで岩盤分類によって「経験に基づいて設計」、「観察・計測による修正(NATMなど)」を行う場合がある(最近の逆解析による設計定数の決定は「解析による設計」を目指すもの

でありたい)。この場合は岩盤の物性のみならず、地圧や地下水、施工方法を含めた岩盤挙動分類を目指したものになりつつある。このような分類では、分類に用いた実績範囲と実績数、およびその後の適用数と適用範囲の実績のみが分類法の適否、良悪の評価を定めることになる。後述するように、この点で Bieniawski の RMR 法と Barton の Q 法が傑出しているといわれる。

以上の観点から、「解析設計」のための岩盤分類と「経験と観察・計測による設計」のための岩盤分類に2分して、代表的な分類法をみることにする。その際、13.1で述べた岩盤分類の基本的な役割の達成に各分類法がいかに腐心しているかを理解できよう。すなわち、岩盤分類は、

- ・岩盤の工学的評価に対する地質屋と技術屋の共通の言葉、
- ・分類指標はできるだけ量的・質的に単純化し、これに係る現地調査の質を向上、
- ・設計に対する定量的情報の提供を目指す、
- ・設計・施工の各段階で必要な工学的判断の基準となりうること、である。

なお、Bieniawski(1988)²⁾がトンネルの岩盤分類について注意しているように、トンネルのように「経験設計」を行う分野では岩盤分類が不可欠であるが、岩盤分類を設計そのものあるいはその代用とみなさないこと(失敗を岩盤分類の所為にしてはならない)、2種以上の岩盤分類を実施する習慣(クロスチェック、適用例の拡張)、岩盤分類は本質的に安全側に偏りがち(分類に用いた実績が安全側)、などは注意が肝要である。

13.3.1 「解析設計」のための岩盤分類(ダム基礎岩盤の分類)

a. 電力中央研究所の岩盤分類³⁾ 当初はダムの基礎岩盤の分類のために、岩質の風化・変質度と節理(不連続面)の性状を指標に、表13.15に示すように定性的な記述式分類⁴⁾が使用された。これが定着するとともに、判定の個人差をなくすために、指標の細分化と定量化が図られた⁵⁾。表13.16がそれで、岩質の指標には風化度と1軸圧縮強度、不連続面の指標には間隔、開口性、風化度がそれぞれ4段階に等級化された。これら指標の組合せによって、表13.15のA級、B級、…、D級の分類が表13.17のように定量的に表現された⁵⁾(これをもとにして表13.15を拡張した記述式分類表が主表となるが省略する)。現在ではダム基礎のみならず広く電力土木関係全般の岩盤分類として利用されている。

b. 建設省土木研究所の岩盤分類³⁾ 実用岩盤区分は対象工事または構造物に対して行うものであるから、ダムのタイプ、規模によって良否の等級分け標準は変えて考えるべきであるという観点から、ダムのタイプ、規模に応じ岩盤の分類指標の取上げ方

変える分類法も提案されている。この場合、岩盤側としては区分の基本的要素として強度的性質(固結度、風化・変質)、不均一性(異質岩種の組合せ、不連続面の頻度、不連続面の状態)、異方性(不連続の方向性、層理、片理、流理)を考え、これら3要素の中の細目(分類指標)は地質ごとに、また構造物との関連で取り上げられる。一例を示すと表13.18のようである⁶⁾。

13.3.2 「経験と観察・計測による設計」のための岩盤分類(トンネル岩盤の分類)

a. わが国の鉄道トンネルの地山分類 トンネルは地下深部に位置する線状構造物であるため、地質調査は地表踏査をはじめ地表からの弾性波調査やボーリング調査などに限られる。その結果は工学的な地山評価を含めて図13.9のようにまとめられる⁷⁾。ここに、地山評価とは、上述の地質調査結果をもとにした①施工の難易に関する定性的判定に始まり、②地山の等級分類および③解析のための地山の工学的モデルの設定を含むものである。

わが国の地山分類は岩種、不連続面の状態、地山の弾性波速度値⁸⁾を分類指標とするも

表13.15 ダム基礎岩盤の分類(田中, 1966)

名称	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。き裂、節理はよく密着し、それらの面に沿って風化の跡はみられないもの。 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)き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、変質がみられる。 ハンマーによって打診すれば澄んだ音を出す。
C _{II}	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。一般に褐鉄鉱などに汚染され、節理あるいはき裂の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剥脱し、剥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すこし濁った音を出す。
C _{III}	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。 節理あるいはき裂の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剥脱し、剥脱面には粘土質物質の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 _I	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軟らかくなっている。 節理あるいはき裂の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剥脱し、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著しく軟質化しており岩質も著しく軟らかい。 節理あるいはき裂の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くずれ落ちる。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。