## 岩盤の強度

堆積岩の堆積過程での軟岩，硬岩の物性変化を図１に示す．横軸は圧密過程における間隙比 $e$ で，縦軸は固結の程度として一軸圧縮強度 $q_u$ を生成年代別に表している．本図によると，両者の変化は連続的である．なお，一般に軟岩と呼ばれている範囲は1MN/m²(10kgf/cm²)～10あるいは20 MN/m²(100あるいは200kgf/cm²)程度の範囲である．

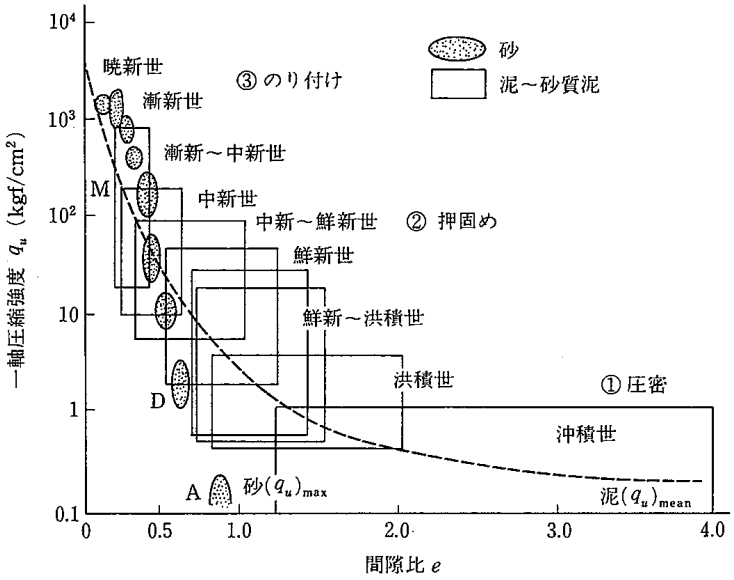



**図１ 岩化に伴なう日本の新生代堆積物の物理的性質の変化**[1)]

図２は，花崗岩における岩盤分類を示す．一般に風化軟岩と呼んでいるのは，土砂化の著しく進んだＤ級の一部「風化土」を除いた，Ｄ～$C_L$級に対応する．また，物性値として強度，透水性および風化の指標としての弾性波(Ｐ波)速度の概略を図の右端に示す．

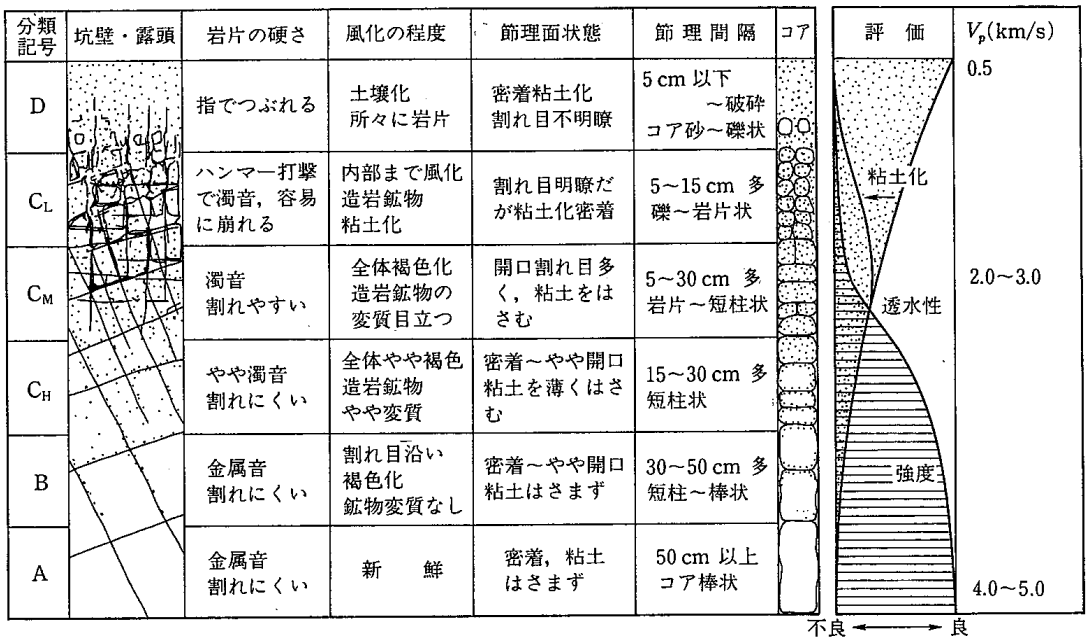



**図２ 模式的な岩盤分類**[1)]

図３は，高速道路において崩壊したのり面についての地質構成の分類を示している．これによると，道路等の切土のり面は，67%が風化部，破砕帯，変質部で，19%が切土により生じた急激な風化部，残り14%が未固結層または崖錐等の崩積土層で発生しており，何らかの地質劣化部で発生することが圧倒的に多いと言える．

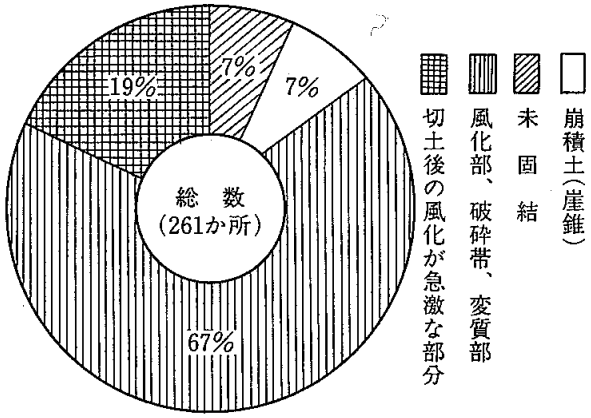



**図３ 崩壊のり面の地質構成の分類**[1)]

このような崩壊を引き起こす要因となる地質劣化部は，必ずしものり面全体に分布するわけではなく，一般にある一定の地質構造に基づいている．図４は，この崩壊を引き起こす地質構造を示すものであり，のり面表層の風化が進行する場合，岩盤の割れ目が多い場合，層理面・破砕帯などの地質的弱面(弱層)が一定方向に卓越分布する場合に起きやすいことを示している．

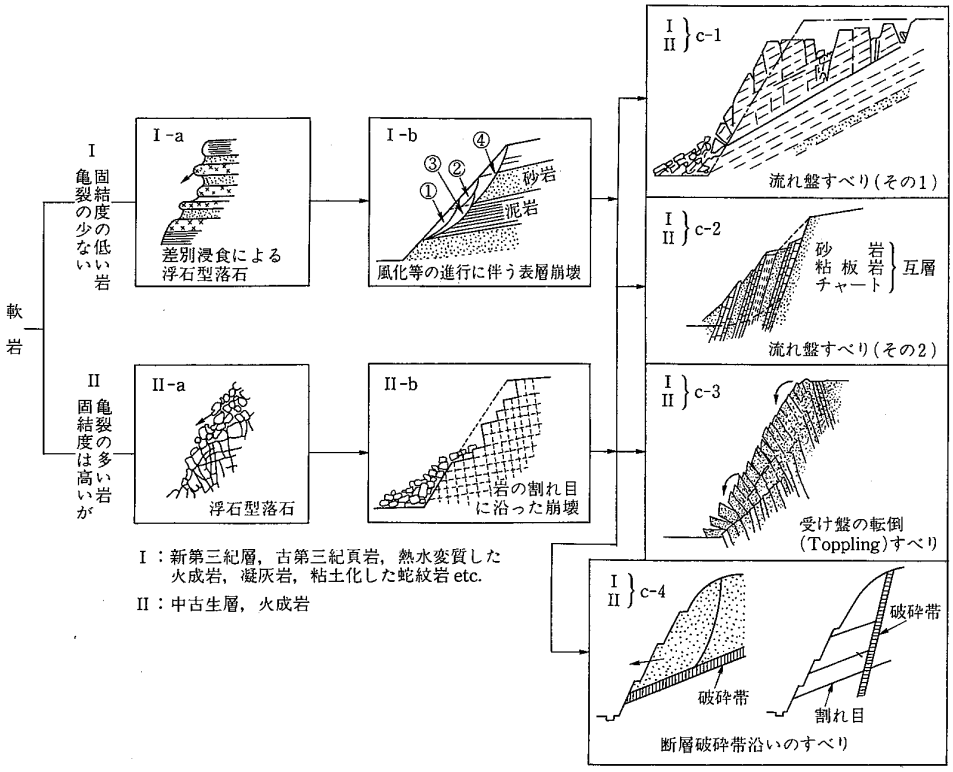



**図４ 切土のり面における地山条件と崩壊形態**[1)]

## 岩盤の工学的分類

岩盤の強度評価の目安を与えるものとして岩盤分類による方法がある．従来よりわが国の各機関でいくつかの岩盤分類が開発されてきたが，これらに加えて，最近ではRMR(Bieniawski)[2]やQ値(Barton)[3]による方法が実際の現場でもよく用いられるようになってきた．表1にRMR法，表2にQ値による岩盤分類を示す．RMR法は岩石の一軸圧縮強度，ボーリングコアのRQD，節理面の間隔・方向・状態，地下水の湧出量の合計評価点を5階級に分けて分類するもので，それぞれに対応するトンネル掘削時の切羽自立時間を想定している．Q値はRQD，Jn（節理数とその形態などから求める），Jr（節理の密着具合や伸長度，鏡肌の有無などから求める），Ja（節理面の変質状態や粘土鉱物の種類，その挟在の有無から求める），Jw（地下水の湧出量とその水圧から求める），SRF（トンネル掘削時の土被り，破砕帯，塑性流動などによる応力低下から求める）の6要素から算出する指標である．RMR法やQ値法は定量的な岩盤分類方法としてわが国では急速に用いられてきたものの，何れも硬岩ないし中硬岩といわれる亀裂性岩盤に適用されている．分類をHoek-Brownの破壊基準に適用することにより岩盤の変形・強度特性が推定されているが，この破壊基準は十分に不連続面が発達する岩盤にのみ適用されるべきである．

**表１　RMR法による岩盤の分類[4]**

（a） 分類要素と評点

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | インタクトな岩の一軸圧縮強度 | >200 MPa | 100～200 MPa | 50～100 MPa | 25～50 MPa | <25 MPa |
| | 評点 | 10 | 5 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | RQD（ボーリング・コアの性質） | 90～100 % | 75～90 % | 50～75 % | 25～50 % | <25 % ないし強風化 |
| | 評点 | 20 | 17 | 14 | 8 | 3 |
| 3 | 節理間隔 | >3 m | 1～3 m | 0.3～1 m | 50～300 mm | <50 mm |
| | 評点 | 30 | 25 | 20 | 10 | 5 |
| 4 | 節理の方向（走向・傾斜） | 非常に有利 | 有利 | 中位 | 不利 | 非常に不利 |
| | 評点 | 15 | 13 | 10 | 6 | 3 |
| 5 | 節理の状態 | 密着：分離<0.1 mm，不連続 | | ほとんど密着：<1 mm，連続，グージなし | 開口：1～5 mm 連続，グージ<5 mm | 開口：>5 mm 連続，グージ>5 mm |
| | 評点 | 15 | | 10 | 5 | 0 |
| 6 | 地下水（トンネル10 m当たりの流量） | 滴水 | | <25 $l$/min | 25～125 $l$/min | >125 $l$/min |
| | 評点 | 10 | | 8 | 5 | 2 |

（b） 岩級と評点

| 分類No. | I | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|---|
| 分類の記載 | 非常に良好な岩 | 良好岩 | 中位の岩 | 不良岩 | 非常に不良な岩 |
| 評点 | 100 ← 90 | 90 ← 70 | 70 ← 50 | 50 ← 25 | <25 |

（c） トンネルでの岩級の掘削性

| 分類No. | I | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|---|
| 支保工間隔 | 5 m | 4 m | 3 m | 1.5 m | 0.5 m |
| 平均自立時間 | 10年 | 6カ月 | 1週間 | 5時間 | 10分 |

## 表２　Q値による岩盤の分類[5)]

| 節理群の数 | Jn |
|---|---|
| A．塊状，無又はわずかな節理 | 0.5−1.0 |
| B．1節理群 | 2.0 |
| C．〃　と不規則節理 | 3.0 |
| D．2節理群 | 4.0 |
| E．〃　と不規則節理 | 6.0 |
| F．3節理群 | 9.0 |
| G．〃　と不規則節理 | 12 |
| H．4節理群以上，不規則，変位した節理，〝角砂糖状〞など | 15 |
| J．破砕岩，土砂状 | 20 |

〈注記〉
(i) 交差部の場合は (3.0×Jn)
(ii) 坑門部の場合は (2.0×Jn)

| 節理面の粗さ | | Jr |
|---|---|---|
| (a)(b)岩盤が接触している場合 | A．連続していない節理 | 4.0 |
| | B．粗いか又は不規則，波打ち | 3.0 |
| | C．平滑，波打ち | 2.0 |
| | D．すべり面，波打ち | 1.5 |
| | E．粗いか又は不規則，平坦 | 1.5 |
| | F．平滑，平坦 | 1.0 |
| | G．すべり面，平坦 | 0.5 |
| (c)岩盤面が接触しない場合 | H．岩盤面が全く接触しない厚さの粘土鉱物より成るゾーン | 1.0（名義上） |
| | J．岩盤面が全く接触しない厚さの砂状，礫状または破砕されたゾーン | 1.0（名義上） |

〈注記〉
(i) 適当な節理群の平均的な間隔が3 m以上の場合には1.0を加える。
(ii) Jr=0.5 という値は，平坦なすべり面を有する節理が線構造を有し，その線構造が有利な方向を有するという条件で使うことができる

| 節理面の変質度 | | Ja |
|---|---|---|
| (a)岩盤面が接触している場合 | A．十分な強度，堅硬，無軟化，不透水性物質例えば石英又は緑簾石などで充塡 | 0.75 |
| | B．表面汚染のみで性質不変の節理面 | 1.0 |
| | C．やや変質した節理面。軟質でない鉱物の被覆，砂状物質，遊離した粘土に分解された岩など | 2.0 |
| | D．シルト質又は砂質粘土の被覆，粘土の小破片(軟化していない) | 3.0 |
| | E．軟質又は低摩擦係数の粘土鉱物被覆，例えばカオリン，雲母など。緑泥石，滑石，石膏や少量の膨張性粘土も同様。(被覆は連続せず厚さ1～2㎜以下) | 4.0 |
| (b)10cmせん断変位前に接触する場合 | F．砂状物質，遊離粘土に分解した岩など | 4.0 |
| | G．十分締固まった軟質でない粘土鉱物で充てん（連続的，厚さ5㎜以下） | 6.0 |
| | H．中～弱い締固め，軟質，粘土鉱物で充てん(連続的，厚さ5㎜以下) | 8.0 |
| | J．膨張性粘土の塡充，例えばモンモリロナイト（連続的，厚さ5㎜以下)。Jaの値は膨張性粘土の含有量のパーセントと水の出入などに左有される。 | 8.0−12.0 |
| (c)岩盤面が接触しない場合 | K，L，M．分解又は破砕された岩のゾーン又は縞と粘土（G，H，Jの粘土の状態の記載参照） | 6.0，8.0または8.0−12.0 |
| | N．シルト質又は砂質粘土のゾーン又は縞，小粘土片（軟質でない） | 5.0 |
| | O，P，R．厚く，連続する粘土のゾーン又は縞（G，H，Jの粘土の状態の記載参照） | 10.0，13.0または13.0−20.0 |

| 節理内の水に関する要素 | Jw |
|---|---|
| A．無水掘削又は微少な湧水，例えば局部的に5ℓ/min以下 | 1.0 |
| B．時々節理塡充物を洗い出す程度の中位の湧水又は水圧 | 0.66 |
| C．塡充物がない節理で十分な強度を有する岩盤で大きな湧水又は水圧 | 0.5 |
| D．節理充塡物の流出を伴う大量の湧水又は水圧 | 0.33 |
| E．例外として爆破時に大量の湧水又は水圧 | 0.2−0.1 |
| F．例外として顕著な岩盤劣化なしに継続するような大量の湧水又は水圧 | 0.1−0.05 |

〈注記〉
(i) 要素のC．からF．は自然のままの評価である。もし排水ますが設置されればJwの値は増加する。
(ii) 氷層による特殊な問題については考慮しない。

| 応力に関する要素 | | SRF |
|---|---|---|
| (a)削部を横断するようなトンネル掘削時に岩盤のゆるみを誘起するような弱帯が掘 | A．粘土含有又は化学分解された岩から成る弱いゾーンの多数の事象，周辺岩盤の極端なゆるみ（深度がどのような場合でも） | 10 |
| | B．単一の粘土含有弱帯または化学的に分解された岩（掘削深さ50m以浅） | 5.0 |
| | C．単一の粘土含有弱帯または化学的に分解された岩（掘削深さ50m以深） | 2.5 |
| | D．十分な強度を有する岩盤（粘土遊離）中に多くの破砕帯，周辺岩盤のゆるみ（深度にかかわらず） | 7.5 |
| | E．十分な強度を有する岩盤（粘土遊離）で単一の破砕帯（掘削深さ50m以浅） | 5.0 |
| | F．十分な強度を有する岩盤（粘土遊離）で単一の破砕帯（掘削深さ50m以深） | 2.5 |
| | G．ゆるんだ開口節理，極端な割れ目または〝角砂糖状〞など（深度にかかわらず） | 5.0 |
| (b)十分な強度を有する岩，岩盤応力の問題 | H．低い応力，地表付近 $\sigma_c/\sigma_1>200$　$\sigma_t/\sigma_1>13$ | 2.5 |
| | J．中間的な応力 200−10　13−0.66 | 1.0 |
| | K．高い応力，非常に緊結された構造（一般に安定性には有利で，岩壁の安定には不利かもしれない） 10−5　0.66−0.33 | 0.5−2 |
| | L．弱度の山はね（塊状岩） 5−2.5　0.33−0.16 | 5−20 |
| | M．強度の山はね（塊状岩） <2.5　<0.16 | 10−20 |
| (c)圧縮岩（高い強度のない岩の塑性流動の影響下のあま） | N．弱度の圧縮岩盤圧力 | 5−10 |
| | O．強度の圧縮岩盤圧力 | 10−20 |
| (d)膨張性岩盤（水に影響されて活動する化学的膨張） | P．弱度の膨張岩圧 | 5−10 |
| | R．強度の膨張岩圧 | 10−15 |

〈注記〉
(i) SRFのこれらの値は，もし関係ある破砕帯が，空洞と交差はしないが，影響するというだけでも25～50%減じる。

(ii) 強度の異方性のある応力の場（計測された場合）に対して：
$5 \leqq \sigma_1/\sigma_3 \leqq 10$であるとき$\sigma_c$と$\sigma_t$を$0.8\sigma_c$と$0.8\sigma_t$に減ずる
$\sigma_1/\sigma_3>10$であるとき$\sigma_c$と$\sigma_t$を$0.6\sigma_c$と$0.6\sigma_t$に減ずる
ここに　$\sigma_c$は拘束されない圧縮強度
$\sigma_t$は引張り強度（点荷重）
$\sigma_1$，$\sigma_3$は最大，最小三応力

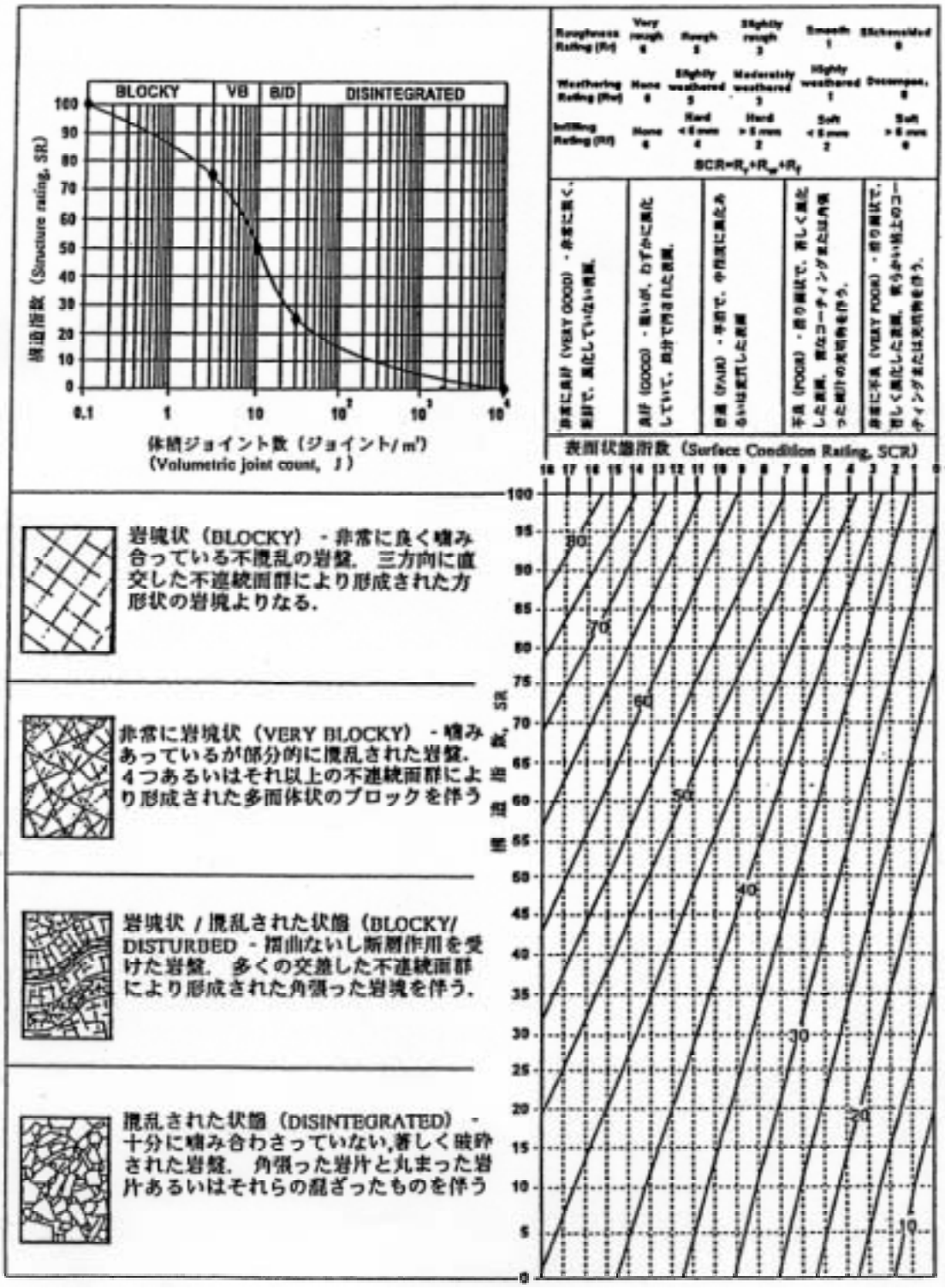
(iii) 地表下のクラウン部の深度が，スパンの広さよりも小さいところでは有効な記録がある。SRFの提案値は，このようなケースでは2.5から5に増やす（H参照）

しかし，比較的良質な岩盤ではRMR値から岩盤特性が評価されるけれども，RMR値が低い不良な岩盤や著しく破砕された岩盤などのようにRMR値そのものを算出できないような岩盤では，その評価は困難である．

Hoek[6)]はこのような不良な岩盤を含めて，種々の地質学的条件に対する岩盤強度の低減

を見積もるために，岩盤の状態に応じた分類方法としてGeo1ogical Strength Index(GSI)なる分類指標を導入している．最近になって，多くの原位置岩盤試験結果とHoekのGSIによる評価を比較検討することにより, H.Sonmez & R.Ulusay [7]が修正GSIを提案している．基本的にはHoekのGSIと同じであるが，表3に示すように岩盤構造指標を0～100に，岩盤表面の状態を表す指標を18段階に，各々区分して使用しやすくしている．

**表３ 修正GSI（H.Sonmez & R.Ulusay,1999）[7]**



参考文献


1) 土木学会：軟岩評価－調査・設計・施工への適用－，1992
2) Bieniawski,Z.T.：Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, Proc, 3rd Int, Cong. Rock Mech., Vol.2, Part A, pp27-32, 1974
3) Barton,N., Lien,R. and Lunde,J.：Engineering Classification of rock Masses for Design of Tunnel Support, Rock Mech., Vol.6, No.4, pp.189-236, Springer-Verlog, 1974
4) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの地質調査と岩盤計測，1999
5) 日本応用地質学会：岩盤分類 応用地質特別号，1984
6) Hoek, E.：Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.Vol. 35, No. 1, 63-68, 1998
7) H. Sonmez, R. Ulusay：Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of rock slopes., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 36, No. 6, 743-760, 1999