

I - 22

NATM計測データを用いた地山強度の推定について

北海道大学 学生員 新 宅 幸 夫
 北海道大学 正 員 三 上 隆
 開発局土研 正 員 城 野 忠 幸
 (株)アイコンサルタント 正 員 長 尾 俊 雄

1. はじめに

わが国の地山区分は、硬岩の場合は地山の弾性波速度が、軟岩の場合は地山強度比が主に使われている。地山の弾性波速度は、岩石の硬さと亀裂の多寡、風化変質の程度を表すが、亀裂の多いわが国の地山を計画段階で定量化し、評価する指標として実用的である。

また、北海道においては、切羽からの先進ボーリングによって施工中の地山の評価が行われ、地山の評価が直ちに施工に反映されるシステムが採られている。先進ボーリングによる地山中の亀裂の評価は、Deere¹⁾によって提唱された次式のRQD(Rock Quality Designation)で行うのが最も一般的である。

$$RQD = \frac{10\text{cm 以上のコアの総長}}{1 \text{ 掘伸長}} \times 100 \quad (1)$$

長尾・大島(1974)²⁾は、破碎帯の多い北海道の地質の特殊性を考慮し、1m当たりの5cmコア長の総計を用いたRQD(5)を用いて、掘削工法とRQD(5)の関係を最初に見出し、その成果は現在の北海道の『道路トンネル設計施工要領』に生かされている。

その後、道路公団や建設省の地山分類でも、RQD区分と設計パターンの対応が示され、またダムに対してもRQDと地山区分の対応が示されている。

本研究は道内の切羽からの先進ボーリング(21トンネル、約10000m)や補助工、地山の諸物性値データを基にした前記要領の細区分を目的としているが、本論文は、その中でRQD(5)区分、(孔内)弾性波速度Vpの関係を検討したものである。

2. 道内の道路トンネルのデータベースの評価

地山は岩石の種類によってその成因が大きく異なる上に、形成されてから長い間の地殻運動や風化、変質作用など様々な影響を受けきわめて複雑多様な状態を持って存在している。また地山の内部構造は直接見ることができず、様々な試験からそれを予測しなければならない。そういったこともあり、類似岩盤における工事の経験は詳細な試験や解析に相当する有力な情報となっている。

岩盤を対象とする工事を実施しようとする場合、安全かつ合理的に進める上では岩盤の性質・条件を明らかにしなければならない。しかし現場において計測された数々のデータを、すぐその場でフィードバックさせることは困難であり、理論に基礎をおき、なおかつ現場担当者が利用できるような簡易な地山等級決定の方法が必要とされる。

そこで本研究は、このデータベースを使用して、DEMATEL法による地山等級決定の際の決定因子の解析及び数量化分析第Ⅱ類による地山等級評価を試みた。

1) DEMATEL法³⁾ (DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory)

DEMATEL法は'82年にスイスのパテル研究所において、米カンザス州立大学のファン教授とティルマン教授が主体となりDEMATELプロジェクトを実施した。これは意志決定理論の手法の一つで、主観に基づく項目間の関連性を図式化するもので、問題点を明確にできる方法である。

Estimation of Rock Mass Strength with Measuring Data in NATM

by Sachio SHINTAKU, Takashi MIKAMI, Tadayuki SHIRONO, Toshio NAGAO

本論文では、地山等級に関係のある項目として、後述の表－1に現れる RQD(5)，弾性波速度，一軸圧縮強度等からなる 11 項目を選び、影響行列 (M) の各要素を作成した。影響の程度を（なし，小，中，大）に分け、それぞれ (0, 1, 2, 3) の数値で評価したものである。

表－1 影響行列 (M)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	行の 合計
RQD(5)	1	0	2	3	1	1	1	2	2	1	3	3	19
変形係数 (孔内載荷)	2	1	0	1	1	1	1	1	3	1	1	3	14
弾性波速度	3	3	1	0	2	3	2	2	2	2	3	3	23
一軸圧縮強度	4	1	2	1	0	2	2	3	2	3	2	2	20
超音波伝播速度	5	1	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	19
比重	6	1	1	2	1	3	0	3	2	3	2	2	20
準岩盤圧縮強度	7	1	2	2	2	2	3	0	2	3	3	2	22
岩盤の弾性係数	8	2	2	2	2	2	1	2	0	2	2	2	19
地山強度比	9	1	1	1	2	2	2	3	2	0	2	2	18
亀裂係数	10	2	1	3	1	1	1	2	2	1	0	3	17
地山等級	11	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	0	17
列の合計		15	15	19	15	19	16	22	21	20	22	24	

0: 影響なし
1: 影響 小
2: 影響 中
3: 影響 大

行を加算したものは、その行の項目が及ぼす影響の大きさ (W: 発信) を示し、列を加算したものは、その列の項目が受ける影響の大きさ (V: 受信) を示している。間接的な影響については影響行列 (M) の積をとることで作れる。ある要因 A が他の要因を通じて要因 B に及ぼす 2 次的な影響の大きさは影響行列 (M) の 2 乗に一致する。同様に M の 3 乗は 3 次的な影響の大きさを示している。したがって間接的なものも含めた影響の大きさは、関係行列 (M)

$$M^* = M + M^2 + M^3 + \dots + M^N \quad (2)$$

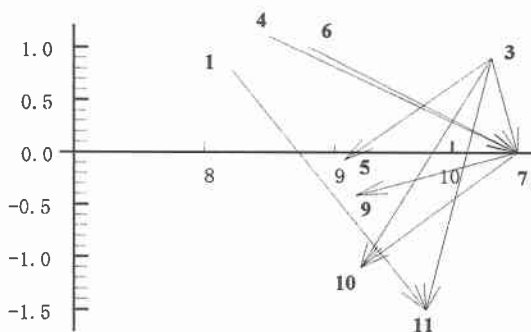
によって求められる。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} M^N = 0 \quad \text{のとき}$$

$$M^* = M(I - M)^{-1} \quad (3)$$

で示される。

影響行列と同様、関係行列 (M*) の行と列について、それぞれ加算した (W*, V*) は間接的な影響を含めた項目の影響を及ぼす大きさ (発信)，及び影響を受ける大きさ (受信) を表す。図－1 は水平軸に W*+V*，垂直軸に W*-V* を取り、示したものである。図－1 はこの出力結果である。水平軸は右側になるほど、発信・受信の程度がともに大きく、項目の活性強さ (重要度) を示しているということなので、本図では 1-4-6-5-9-10-11-3-7 の順に重要度が増している。従って、本調査のパラメータとして 3 (弾性波速度) を選択した妥当性が示されている。垂直軸は発信と受信の差を示しているの、上部にいくほど発信が大ということになる。よって 1-3-6-4 の順に影響力が増している。ここでも 1 (RQD(5)), 3 (弾性波速度) が 11 (地山等級) 決定の際の重要なパラメータであることが確認できる。



図－1 要因関連図

2) 数量化分析第Ⅱ類^{4), 5)}

数量化分析第Ⅱ類とは外的基準が分類で与えられている場合の、1と0の数値からなるデータの数量化分析である。この分析の目的は、(i) 要因(item)、範疇(category)及びサンプル（または個体）を数量化（実数を割り当てる）することによって、分類を数量的に行うこと、(ii) 分類に対する各要因の寄与の程度を数量的に表現すること、(iii) データとして得られていなかった新しいタイプのデータがどのグループに最も近いのかを数量的に表そうとすることである。今回は(i),(ii)を目的として使用した。

グループ r の v 番目のサンプルが、要因 i の α 番目の範疇に対して反応した場合1、反応しない場合0となるようなダミー変数 $x_{i(\alpha)}^{r(v)}$ を定義する。ここで添字のとり値の範囲は

$$i=1,2,\dots,K \text{ (要因)} \quad (4)$$

$$\alpha=1,2,\dots,l_i \text{ (範疇)} \quad (5)$$

$$r=1,2,\dots,M \text{ (グループ)} \quad (6)$$

$$v=1,2,\dots,n_r \text{ (サンプル)} \quad (7)$$

である。各要因において、どれか1つの範疇に反応し全要因が K 個であるから

$$\sum_{i=1}^K \sum_{\alpha=1}^{l_i} x_{i(\alpha)}^{r(v)} = K \quad (8)$$

が成り立つ。各サンプルの値は

$$y^{r(v)} = \sum_{i=1}^K \sum_{\alpha=1}^{l_i} x_{i(\alpha)}^{r(v)} a_{i(\alpha)} \quad (r=1,2,\dots,M; v=1,2,\dots,n_r) \quad (9)$$

なる線形式によって得られるものと仮定する。係数 $a_{i(\alpha)}$ は実数であり、カテゴリーウェイト(category weight)と呼ばれるもので各カテゴリーの重み（重要度）を示している。これによりサンプル数量 $y^{r(v)}$ が決定される。その値によるグループ間の分離の良さはかかるのに相関比を用いる。相関比は $y^{r(v)}$ の全分散とグループ間分散 σ_B^2 の比

$$\eta^2 = \frac{\sigma_B^2}{\sigma^2} \quad (10)$$

で表される。この値を最大にする $y^{r(v)}$ （すなわちカテゴリーウェイト $a_{i(v)}$ の値）を求める。

この数量化理論第Ⅱ類を用いて、地山分類をするための影響因子（アイテム）の重みをはかり、外的要素としての地山区分を判別する。外的基準としては地山等級を、内的要因としてはRQD(5)と孔内検層は現場で判断されたAからEまでの7段階に、湧水は、なし・10 l/secまで・10 l/sec 以上の3段階に分類した。データとしては幌満トンネル、新礼文華トンネルなど6トンネル、170組を解析した。相関比 η^2 を最大にする解として求めた場合、図-2のようになる。ここで各要因においてレンジが大きいほどサンプル数量に与える影響が大きい。これによるとRQD(5)の重みが大きく、RQD(5)が地山判定に大きな影響があること示している。RQD(5)は等級別に明らかに重みがとれているが、弾性波速度については多少ばらつきが見られる。

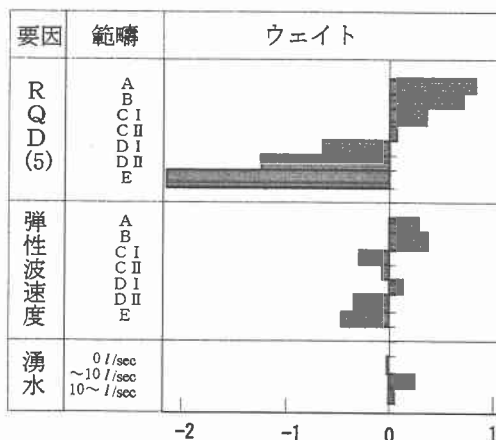


図-2 カテゴリーウェイト

これは弾性波速度が孔内検層によって数10m単位に行われているためと思われる。また標本観測値に対する回帰平面の当てはまりの度合いを示すものとして重相関係数がある。これは目的変数の標本値とサンプル数量との相関係数であるが、今回の場合0.819と高く、ある程度の信頼性を持っているといえる。

4) 道内トンネルにおける地山等級とRQD(5), V_p の関係

先進ボーリングデータを用いた地山等級とRQD(5)等の解析を行った。RQD(5)については現場計測のものを、RQD(10)については写真より計測したものをを用いた。岩種(大分類・小分類), 累積RQD(5), V_p , 地山等級を1組としたものを同じく約10000mぶん1661組そろえた。

RQDは1m毎に, 孔内検層は平均約30m毎に1つの数値が入っており, 岩種は大分類として火山岩・火山性堆積岩・堆積岩・深成岩・半深成岩・変成岩の6種に分類した。地山等級はA・B・C I・C II・D I・D II・Eの7段階に分類されている。

これらのデータを岩種別, 地山等級別でRQDと弾性波速度 V_p の関係を解析したが明確な相関は表れなかった。これは V_p が孔内検層により数10mにわたって計測されていることが原因と思われる。またRQDについては各現場によりコアの計測の仕方に違いが見られたので, このことによってもばらつきが予測される。

しかし, 岩種別と弾性波速度にはある関係が見出され, 火山岩, 深成岩, 半深成岩ではC I・C IIとD I・D IIとの間で平均 V_p の値に大きな開きがあることが示されている。(図-2)

また累積RQD(5)と地山等級の間には, データ数の少ない地山等級AとBを除いて依存性が認められ, 例えば火山岩, 堆積岩について示せば図-3となる。C I, C II, D I, D II, Eにおいて大小関係は明確に出ているものが多い。累積RQD(5)は現場担当者が区間RQD(5)を一目で, 客観的に判断できるようしたものである。

3. まとめ

本研究は以下のように要約される。

DEMATEL法による地山分類の影響因子の決定に有効であること, RQD, 弾性波速度が大きく関わるということがわかった。弾性波速度において, 岩種によりCパターンとDパターンの間には大きな差のあることがわかった。また累積RQD(5)とC IからEまでの相関が示された。

今回のデータでは弾性波速度(孔内)が30m以上の計測がほとんどであったので, 細かなデータが望まれる。今後は地山の諸物性値データ等を考慮し, また補助工法を含めたC I, C II及びD I, D IIの地山等級区分を試みる予定である。

参考文献

- 1) D.U.Deere: Geological Considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice, pp.1-20, 1969
- 2) 長尾俊雄・大島紀房: トンネル地質調査と施工との対比, 応用地質学会誌 第15巻 第2号, pp.84-85, 1974
- 3) 木下栄蔵: 意志決定論入門, 啓学出版, 1992
- 4) 河口至商: 多変量解析入門 I, II, 森北出版, 1973
- 5) 駒沢 勉・橋本捷久: パソコン数量化分析, 朝倉書店, 1988

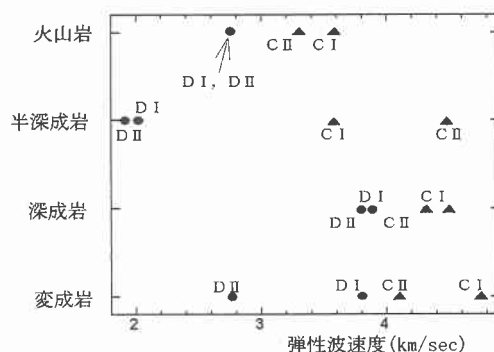


図-2 地山等級と弾性波速度の関係

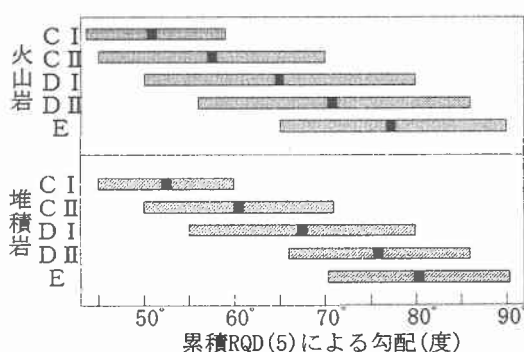


図-3 地山等級と累積RQD(5)の関係