

立坑における岩盤掘削の難易性評価法に関する一提案

A NEW METHOD TO ASSESS SHAFT EXCAVATABILITY IN ROCK MASSES

勝瀬臣則¹⁾・大澤慎介¹⁾・永井哲夫²⁾・池尻 健³⁾

Shigenori KATSUSE, Shinsuke OSAWA, Tetsuo NAGAI and Takeshi IKEJIRI

It is extremely important for engineers to select suitable excavation machinery in the early stages of a project in which rock excavation is considered. Therefore, the prediction of bulldozer ripper production from geological data has been carried out. But, in the case of shaft excavation in soil and rock masses, there is no good way to estimate excavatability. In this paper, the authors propose a new method to assess shaft excavatability by the use of EI (Excavatability Index). EI is defined by conventional RQD using drill cores and RQD obtained by observing the corresponding borehole wall. And its validation for engineering applications is demonstrated.

Key Words : shaft excavation, excavatability index, rock quality designation, seismic wave velocity, excavation performance

1. はじめに

近年、下水道の整備が都市部から都市近郊に移行しつつある。それに伴い、立坑掘削の対象となる地盤は土砂から軟岩や硬岩へと変わってきている。土や岩を対象とする土工作業においては、事前調査や試験などの結果をもとに掘削の難易性を的確に判断して、現地に最も適した施工方法や機械を選定することが円滑に工事を進める上で欠かせない。

一般に、明かり工事においては、岩盤掘削の難易性を評価するために、ブルドーザによる掘削押土試験やリッパによる起砕試験が行われたり、地山の弾性波伝播速度などを判断基準とした岩盤分類が用いられたりしている。一方、山岳トンネルなどにおいては、岩盤掘削の難易性評価よりも支保の設計を主目的とした地山分類が用いられている。それに対して、土砂、軟岩、または硬岩が混在するような地盤に立坑を構築する場合、現在のところ、掘削の難易性を適切に評価できる方法は確立されていない。

そこで本研究では、立坑における岩盤掘削の難易性評価法を提案し、発進および到達立坑の掘削工事への適用を通してその妥当性を検証する。具体的には、まず、岩盤掘削の難易性評価法の現状と問題点についてまとめる。次に、ボーリングコアのRQDと孔壁のRQDの比を用いて新たに定義した掘削指数(EI)について、その意義および特徴を述べる。さらに、掘削指数と亀裂係数の相関性について、実測データをもとに考察する。最後に、この掘削指数を“亀裂係数による評価法”に取り込むことにより、岩盤掘削の難易性を簡便に評価できる方法を提案する。ここでは、立坑掘削工事に本提案法を適用することにより、その有効性について検討している。

1) (株)青木建設 大阪本店
2) 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所 土木研究室
3) 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 岩盤掘削の難易性評価の現状と問題点

わが国では、岩盤掘削の難易性を評価するために、地山を土砂、軟岩、または硬岩に区分して取り扱うのが一般的である。ここで、土砂、軟岩、および硬岩は、表－１のように定義されるものであり、それぞれ掘削工法に対応している^り。そのため、地質学的分類に見られるものとは関連がないという点に注意を要する。以下に、岩盤掘削の難易性評価法に関する現状をまとめ、立坑掘削における評価の問題点について述べる。

表－１ 掘削の難易性評価における岩盤区分

区分	区 分 概 要	掘削工法
土砂	掘削に際してブルドーザが有効に使用できる程度の土砂および転石を混じえた土質	ブルドーザ
軟岩	掘削に際してブルドーザに装着したハイドロリックリッパが有効に使用できる程度の岩および転石を混じえた土砂	リッパ
硬岩	掘削に際して発破を使用することが最も有効な岩	爆破

(1) 区分判定試験による評価法

宅地造成やダムにおける掘削などの土工工事において、実際に施工で使用される機械を用いて表－２に示すような区分判定試験^りが行える場合、その試験結果（時間当たり作業量：作業能率）に基づいて掘削の難易性を直接的に評価できる。ただし、試験が大がかりになり、経費も大きくなる点が問題である。

表－２ 区分判定試験の概要

判定区分	試験名	試 験 概 要
土砂 vs. 軟岩	掘削押土試験	ブルドーザの排土板による掘削押土試験から時間当たり作業量を求めて基準作業量と比較する
軟岩 vs. 硬岩	起砕試験	ブルドーザに装着されたリッパによる起砕試験から時間当たり作業量を求めて基準作業量と比較する

(2) 地山弾性波伝播速度による評価法

土工工事においては、前述のような区分判定試験が必ずしも可能であるとは限らない。そこで、最も簡単に岩盤掘削の難易性を評価するため、地山弾性波伝播速度による間接的な評価法が用いられている。これは、掘削の難易性を支配する主因である岩石自体の硬さと岩盤中の割れ目の発達程度を、地山の弾性波伝播速度が総合的に含んだものであることによる。本節では、代表的なものとして建設省の評価法^りを取り上げて、その概要について説明する。

まず、岩をその成因、生成年代などにより比較的固結度の高いＡグループと比較的固結度の低いＢグループに分け、地山弾性波伝播速度の値を判定基準として軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ、中硬岩、または硬岩のいずれかに岩盤を分類する。そして、掘削の難易性を評価するため、軟岩Ⅰおよび軟岩Ⅱを軟岩、中硬岩および硬岩を硬岩として取り扱う。この方法は、東北地方建設局が東北地方における土工作業の実績をもとに提案した岩の分類に基づいている^り。この分類では、リッパメーター（走時計数型の簡易探查装置）により測定された地山弾性波伝播速度をもとに、各岩種に対応してリッパビリティの限界が示されている。ただし、その他の地域において、これを岩盤掘削に関する一般的な分類法として用いる場合には注意を要する。

(3) 亀裂係数による評価法

地山弾性波伝播速度を用いる方法は経済的であるが、誤差が多くなり評価結果の精度は低くなる傾向にある⁹⁾。このような問題を解決するため、道路公団では、亀裂係数（式(1)参照）により掘削の難易性を間接的に評価する方法が提案され⁹⁾、現在では一般によく用いられている。掘削の難易性を支配する主な要因として、岩石自体の硬さと岩盤中の割れ目の発達程度が挙げられる。この方法では、前者を岩石コアの一軸圧縮強度または超音波伝播速度により、後者を地山の弾性波伝播速度と岩石コアの超音波伝播速度を用いて定義される亀裂係数によりそれぞれ評価している。そして、一軸圧縮強度と亀裂係数または超音波伝播速度と亀裂係数の関係より、地山を前述の土砂、軟岩、または硬岩のいずれかに分類する。なお、この亀裂係数は、地山に割れ目が全くなければ0であり、割れ目が多くなるにつれて1に近づくというように、割れ目の分布頻度を表す指標である。

$$C_r = 1 - \left(\frac{V_F}{V_L} \right)^2 \quad \dots(1)$$

ここで、 C_r ：亀裂係数、 V_L ：岩石コアの超音波伝播速度、 V_F ：地山の弾性波伝播速度を示す。

ただし、近年の建設機械の急速な発達、とくに大型ブルドーザの普及やリッパの改良進歩によって、土砂あるいは軟岩の領域が以前に比べると、より硬岩の方へ移っていく傾向が見られる。そのため、流動化していく施工機械の能力との関係を考慮して、今後、この岩盤分類の更新を行う必要があると考えられる。

(4) その他の評価法

(1)～(3)に示した方法をそれぞれ実際に適用した結果、リッパビリティの判定が当たる確率はせいぜい40%程度と低いことから、弾性波（縦波）の振幅減衰による新しい評価法が提案されている⁹⁾。この方法では、従来法による評価精度が低くなる原因は、岩石の欠陥度合（亀裂や空洞など）を十分に把握できないことにありと考える。試験片の振幅減衰量により岩石の欠陥度合を求めてリッパビリティを判定している。

(5) 立坑掘削における評価の問題点

岩盤掘削の難易性評価は、主として明かり工事を対象として実施されている。山岳トンネルの掘削に際しては、ロックボルトや吹付けコンクリートなどの支保工の設計を主目的とした地山分類が用いられており、岩盤掘削の難易性という観点からの評価は行われていない。一方、シールド工法や推進工法により下水道工事を行う場合、発進および到達立坑の掘削が必須となるものの、都市部においては土質地盤を対象とした掘削が主であるため、岩盤掘削の難易性評価は一般に必要とされていない。

しかし、近年、下水道の整備が都市部から都市近郊に移行しつつあり、立坑掘削の対象となる地盤は土砂から軟岩や硬岩へと変わってきている。地山が土砂、軟岩、または硬岩のどれに分類されるかによって、掘削に関わる工事費や工期がかなり異なってくるので、慎重に岩盤評価を行う必要がある。そのため、岩盤掘削の難易性評価は不可欠であるが、現状では掘削を対象とした岩盤分類法として十分なものはなく、現場技術者の主観的な判断に頼っていることが多い。

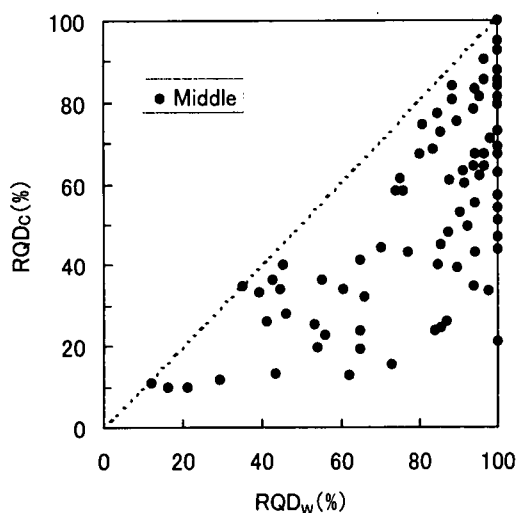
3. 掘削指数（EI）の定義と特徴

RQD（Rock Quality Designation）は、ボーリングコアから岩盤状態を定量的に評価する指標として広く用いられている。本研究では、ボーリングコアを対象として求めた RQD（以下、 RQD_c と呼ぶ）とボーリングされた孔壁を対象として求めた RQD（以下、 RQD_w と呼ぶ）の比を掘削指数（EI：Excavability Index）と新たに定義する（式(2)参照）。

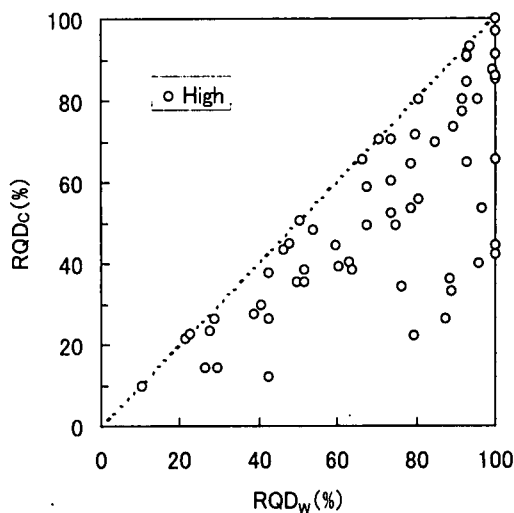
$$EI = \frac{RQD_c}{RQD_w} \quad \dots(2)$$

従来、孔壁観察法としては、ボアホールカメラ、ボアホールテレビ、またはファイバースコープなどの装置によるものが利用されていた。ただし、画像データの処理能力や作業効率が十分ではなく、観察結果の可視化においても問題があった。しかし、最近では、高解像度の CCD カラーTV カメラにより、高精度の孔壁展開画像を簡便に三次元表示できるシステムが開発され⁷⁾、 RQD_w を精度よく評価できるようになっている。

いま、前述の高精度の孔壁展開画像より RQD_w を求め、それに対応する RQD_c と合わせてプロットした結果の一例を示すと図-1 のようになる⁸⁾。ここでは、岩石コアの一軸圧縮強度をもとに、測定データを Middle (30MPa-100MPa) または High (100MPa 以上) に区分している。この図をもとに式(2)より掘削指数を求めて、その分布状況および比率をまとめると図-2 が得られる。

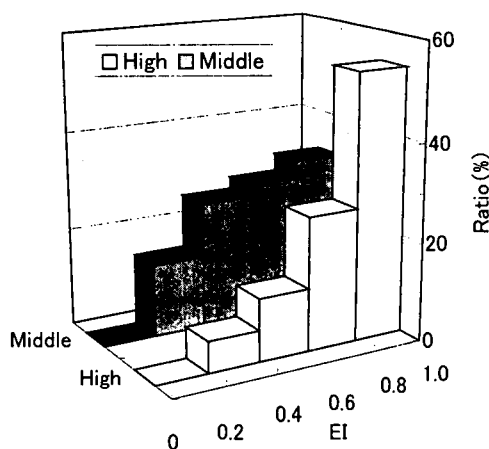


(a) Middle Strength

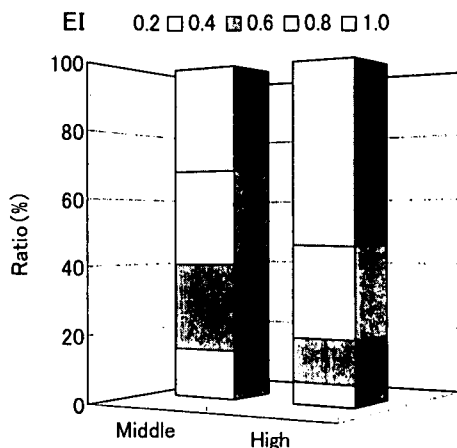


(b) High Strength

図-1 ボーリングされた孔壁のRQD (RQD_w) とボーリングコアのRQD (RQD_c) の比較⁸⁾



(a) EI の分布状況



(b) EI の比率

図-2 岩石コアの一軸圧縮強度と掘削指数の分布特性

本来、 RQD_w と RQD_c は一致すべきである。つまり、図-1において、すべての測定データは点線上に位置すべきである。しかし、 RQD_w に比べて RQD_c は小さくなる傾向にある。そして、その傾向は High よりも Middle において顕著であることが分かる。High の場合、 RQD_w と RQD_c の間に概ね相関が見られるのに対し、Middle の場合、両者の間にほとんど相関は認められない。そのため、High の場合、 RQD_c を岩盤評価の一つの指標として利用できると考えられるが、Middle の場合、 RQD_c により岩盤評価を行うと、過小評価につながる可能性が大きい⁸⁾。

RQD_w と RQD_c の差は、図-2に示すように掘削指数を用いて定量的に表すことができる。図-2では、岩石コアの一軸圧縮強度によって（ここでは、一軸圧縮強度が Middle または High のどちらに属するかにより）、掘削指数の分布特性には明確な差異が見られる。Middle の場合、 RQD_c は RQD_w に比べるとかなり小さくなり（EI も小さくなる）、EI は 0.2~1.0 まで広い範囲にほぼ一様の比率で分布している。それに対して、High の場合、過半数のデータは EI が 0.8~1.0 の範囲にあり、0.6~1.0 の間には約 80% のデータが集中している。

ボーリングの掘削に伴う応力解放や掘削中の人為的作用により、本来は密着している岩盤内の割れ目が分離することがよくある。そのため、前述のような RQD_w と RQD_c の相違が現れると考えられている⁸⁾。応力解放や人為的作用により、閉口亀裂や密着した割れ目などが分離しやすい岩盤は、見方を変え、掘削しやすい岩盤であると見なすことができる。つまり、岩石自体の硬さが同一であっても、掘削指数が小さくなるにつれて岩盤は掘削しやすくなると考えられる。地山に割れ目がほとんどなく、割れ目の密着度が高ければ EI は 1 に近い値を示し、割れ目が多くなり、密着度が低くなるにつれて 0 に近づく。このように、掘削指数は岩盤中の割れ目の発達程度と対応している。以上のことは、岩盤掘削の難易性評価に際して、掘削指数が有効な指標となる可能性を示唆している。

本研究では、掘削指数と亀裂係数の関係について考察するため、実岩盤（岩種は角礫凝灰岩）においてボーリング調査および各種試験を行った。ここでは、ボーリングコアの観察と BIP システム⁷⁾による孔壁観察の結果から掘削指数を評価し、ボーリングコアの超音波伝播速度試験と地山の PS 検層（ダウンホール法）の結果から亀裂係数を求めている。こうして得られた掘削指数（EI）と亀裂係数（ C_f ）の関係をまとめると図-3のようになる。地山に割れ目が全くなければ EI は 1、 C_f は 0 となり、割れ目が多くなるにつれて EI は 0、 C_f は 1 に近づく。このことを考慮して、実験データを回帰した結果も同図に示した。この図から、掘削指数は亀裂係数と反比例の関係にあることが分かる。

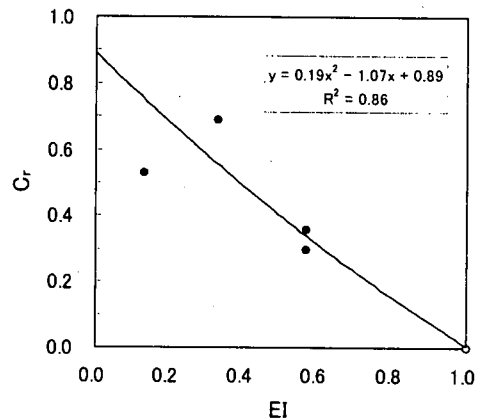


図-3 掘削指数と亀裂係数の相関

4. 立坑における岩盤掘削の難易性評価法の提案とその適用例

(1) 評価法の提案

立坑における岩盤掘削の難易性を評価する場合、第2章の(1)で示した直接法は適用不可であり、(2)~(4)で示した間接法が検討対象となる。いま、これらの方法は、判断基準として取り上げている要因という観点から次のように分類できる。

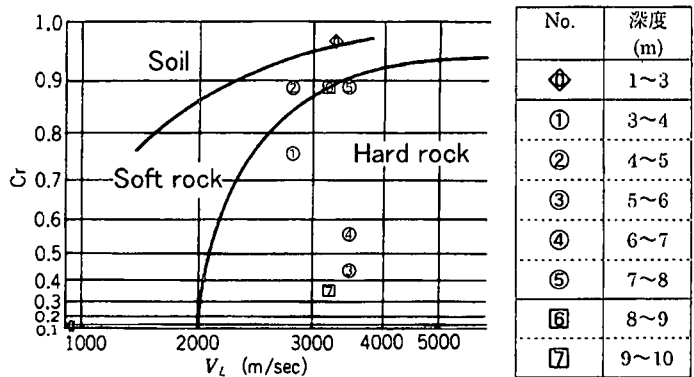
- a) 地山の特性-(2): 地山の弾性波伝播速度
- b) 岩石の特性-(4): 岩石コアの弾性波（縦波）の振幅減衰
- c) 岩石および地山の特性-(3): 岩石コアの一軸圧縮強度または超音波伝播速度と地山の亀裂係数

本研究では、c)の分類に含まれる方法を提案する。具体的には、岩盤掘削の難易性を支配する主因として、岩石自体の硬さと岩盤中の割れ目の発達程度を取り上げ、前者を岩石コアの一軸圧縮強度または超音波伝播速度により、後者を地山の亀裂係数ではなく、掘削指数によりそれぞれ評価する。そして、一軸圧縮強度と掘削指数または超音波伝播速度と掘削指数の関係より、地山を土砂、軟岩、または硬岩に分類する。ただし、現在のところ、土砂－軟岩の区分境界および軟岩－土砂の区分境界を設定するために必要なデータが十分に蓄積されていない。このデータの収集、蓄積による区分境界の設定は、本提案法にとって今後の課題である。しばらくは、前章で示した掘削指数と亀裂係数の相関性を利用して、前述の(3)の方法に掘削指数を取り込むことにより、本提案法を間接的に適用する方法を採る。

(2)適用例

都市近郊の下水道整備工事で、発進および到達立坑地点において、表層数 m 以下は岩盤の掘削が必要であった。そこで、岩盤掘削の難易性評価に本提案法を適用し、その有効性について検討した。本提案法の適用に際しては、掘削指数、岩石コアの超音波伝播速度および一軸圧縮強度が必要となる。これらの値を評価するため、ボーリングコアの観察とボアホールカメラによる孔壁観察、さらに、ボーリングコアの超音波伝播速度試験および一軸圧縮試験を実施した。また、他の間接法（第2章の(2)および(3)）との対比を行うため、PS 検層により地山の弾性波伝播速度も求めている。本提案法により、当地点における岩盤掘削の難易性を評価した結果は図－4 になる。これより、地表から GL-3.0m までは土砂、GL-3.0m～GL-10.0m までは硬岩と判定された。この結果は、他の間接法の判定結果と一致しており、実際の立坑掘削における地山状況と対応したものであった。ここで、掘削指数は深度 1m ごとに求められている。そのため、深度別に立坑掘削の難易性を評価することが可能である（図－4 参照）。この結果は、実際の地山掘削時の難易性とよい対応を示していることから、掘削中の施工管理においても有効であると考えられる。

亀裂の影響が大きい地山においては、岩石コアのサンプリングが困難であるため、岩石コアの超音波伝播速度を求められず、亀裂係数を評価できない場合がある。それに対して、掘削指数の場合、亀裂の分布状態によらず全ての岩盤において、所定の深度（通常は 1m）ごとに簡便に値を求めることができる。このことから、掘削指数は岩盤評価において有効な指標であることが分かる。



図－4 本提案法の適用結果

【参考文献】

1) 例えば、日本道路公団：土木工事共通仕様書，1977。
2) 安達経治：土砂・軟岩・硬岩の区分判定について，施工面から見た軟岩，土と基礎，Vol.34，No.11，pp.81-85，1986。
3) 建設省：土木工事積算基準。
4) 菊地新一：リッパメーターによる岩の判定と施工性について，第10回日本道路会議論文集，pp.57-59，1971。
5) 山崎 茂：新しいリッパビリティの判定法について，小松技報，Vol.29，No.1，pp.13-19，1983。
6) 若月・奥園・中島：現場および室内試験による岩質判定について，第10回日本道路会議論文集，pp.60-62，1971。
7) 例えば，亀和田・遠藤・西垣・杉江：ボーリング孔壁画像処理手法とその解析について，応用地質，Vol.34，No.6，pp.49-57，1994。
8) 最上谷・鈴木・佐藤・許：RQD法の問題点，日本応用地質学会平成2年度研究発表会論文集，pp.37-40，1990。