

TBM の掘削性と岩盤特性との相関性

——室内試験による掘削能率指標の適用性検討——

丹生屋 純 夫 鈴木 健一郎 丸 山 誠
藤 原 紀 夫 平 間 邦 興

Correlation Between Drillability of TBM and the Character of Rock Masses

——Application of Efficient Indexes of Drilling by Laboratory Testing——

Sumio Niunoya Kenichirou Suzuki Makoto Maruyama
Toshio Fujiwara Kunioki Hirama

Abstract

In foreign countries, DRI (Drilling Rate Index) and BWI (Bit Wear Index) have been introduced as indexes to predict drillability for TBM. However, in Japan, neither of these indexes have been applied for a TBM project. We carried out the Brittleness test and Siever's J-value Miniature test using rock samples to calculate DRI, and attempted to investigate the relationship between DRI and the penetration rate of TBM. To calculate BWI, the Abrasion test was carried out, and the relationship between BWI and the abrasion rate of the cutter bit was investigated.

As a result, it was clear that a good relationship existed, and that a better relationship would exist if we included the crack frequency in DRI. It was also made clear that the procedures carried out for each test were reasonable.

概 要

TBM 工法の掘削能率を予測するための指標として、海外では TBM ドリリング指標 DRI および TBM ビット摩耗指標 BWI が提案され、検討が行われている。しかし、これらの指標の国内における適用性は検証されていない。この報告は、次の 2 点に主眼を置いて述べるものである。① DRI や BWI を求める室内試験手法の確立。② ①によって得られる指標の実現場への適用性検討。

①については、採取したボーリングコアまたは掘削ズリにより、室内において TBM の掘削状況を再現しながら、短時間で簡易的に行える試験手法（脆性試験、ミニチュアドリル試験、摩耗試験）を確立できた。また、②については、TBM 施工現場において、延長約 400 m にわたり採取した掘削ズリで①の試験を行い、DRI と BWI を求め、TBM の掘進速度やカッター摩耗量との関係を調べた。その結果、これらの指標には、十分な相関性があること、さらに地山のき裂分布を考慮することにより掘削管理に適切な指標であることが認められた。

これらの結果は、TBM 掘削の予測・管理が本試験法で得られる指標により、可能であることを示唆するものである。

1. はじめに

我が国の自動車交通網を構成する高規格幹線道路網の供用延長は、計画 14,000 km のうち平成 4 年度末で 5,929 km となり、6,000 km 時代を迎えている¹⁾。平成 7 年度には、日本を縦貫する幹線も概成している。また、東名・名神高速道路とともに 21 世紀の日本の基幹となって機能する高速道路として、6 車線の第二東名・名神高速道路を計画している。この第二東名・名神高速道路において、トンネルの道路構造別延長比率は、整備計画 303 km に対して約 20% を占めており、東名・名神高速道路の 3% と比べ、大幅にトンネルが増加することになる²⁾。よって、工事計画において、これらの超大断面トンネルの

施工法の選択が重要であり、有効な手法の一つとして TBM (Tunnel Boring Machine) 工法を用いた先進導坑全断面掘削工法が挙げられている。

しかし、TBM 工法の掘削管理や事前の施工性の予測は、これまで一般に用いられてきた強度や弾性波速度等の地山物性値だけでは困難で、各物性値を組み合わせて予測・管理を行っているのが現状である。そのため、TBM の掘進速度やビットの交換時期を的確に予測し、施工管理に用いることが可能な指標を確立することが、重要な課題となっている。

海外では、脆性試験 (Brittleness test) とミニチュアドリル試験 (Siever's J-value Miniature test) を行うことによって求められる TBM ドリリング指標 (DRI) ;

Drilling Rate Index), さらに摩耗試験 (Abrasion test) を行うことによって求められる TBM ビット摩耗指標 (BWI; Bit Wear Index) が提案されており, 硬岩における TBM 純掘進速度等の掘削性との相関性について様々な検討が行われている^{3),4)}。しかし, 国内では馴染みが薄い上に, これらの指標を求めるための具体的な室内試験についても文献によって種々の方法があり, 確立していないのが現状である。

この報告は, 次の2点に主眼を置いて, TBM による掘削性の予測・管理の可能性について述べるものである。

- ① TBM の掘削能率を表す DRI や BWI を求めるための室内試験手法の確立。
- ② 国内実現場での TBM トンネル施工データとの比較による上記室内試験結果の適用性の検討。

2. TBM 掘削能率指標

2.1 室内岩石試験方法

TBM ドリリング指標 (DRI) は, TBM の掘進速度あるいは岩石に対するカッタービットの切削性を評価する目的で NTH (Norwegian Institute of Technology) により開発されたものであり, 後に一部修正され, 現在に至っている。

DRI は, 1943年に, N. von Matern と A. Hjelm er が開発した脆性試験と1950年に Siever が開発したミニチュアドリル試験の組み合わせによって得られる指標である。具体的な試験方法については文献によってやや異なる。よって, 今までの種々の文献を参考にしながら, 独自の試験方法, 基準を設定した。以下にそれぞれの試験手順などについて述べる。

脆性試験は, 打撃による岩石の破碎程度を確認する試験であり, その概念図を図-1に示す。試験手順を以下のように定める。

- ① 網目寸法 9.5 mm と 19.0 mm のふるいを用いて, 粒径約 10~20 mm の岩石試料 0.5 kg を用意する。
- ② 岩石試料をモールドに詰める。
- ③ 写真-1 に示すように, モールドに詰めた岩石試料に対して, 重量 14 kgf の錘を支棒を通じて高さ 25 cm より 20 回落下させる。
- ④ 錘を落下させた後, 破碎した岩石試料を網目寸法 9.5 mm のふるいにかけて, 通過重量百分率を求める。

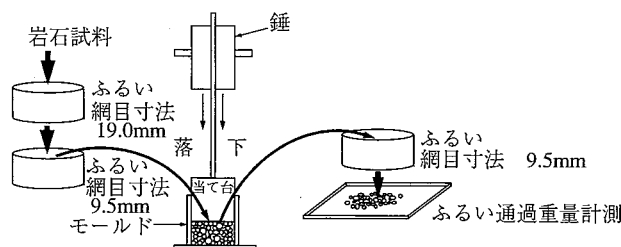


図-1 脆性試験概念図

この通過重量百分率が脆性値 (Brittleness value) であり, 岩石試料の脆性度を評価するものである。

ミニチュアドリル試験は, ドリルによる岩石の切削程度を確認する試験であり, その概念図を図-2に示す。試験手順を以下のように定める。

- ① 拳大ほどの岩塊試料を, モールドに固定する。
- ② 写真-2のように, モールド内に固定した岩塊試料に 20 kgf の力でドリル (材質: タングステンカーバイト) を押し当てながら 200 回転させる。
- ③ 200 回転終了後, ドリルの貫入量を 1/10 mm 精度で計測する。

この貫入量がシーバーの J 値 (Siever's J-value) であり, 岩石試料におけるドリルの切削度を評価するものである。なお, 200 回転する前にビット全長が貫入してしまう試料の場合は, 試験結果より単位秒当たりの貫入量を割り出し, 試験時間とドリル回転数の関係から 200 回転相当の貫入量を算定した。

TBM ビット摩耗指標 (BWI) は, TBM の純掘進速度あるいは岩石に対するカッタービットの摩耗性, 耐久性および交換時期等の掘削能率を評価する時に適用されるものであり, DRI 同様 NTH によって開発された。

BWI は, DRI と摩耗試験の組み合わせによって得られる指標である。摩耗試験については, 独自の試験手順を考案した。

摩耗試験は, ビットの摩耗量でその岩石の硬軟程度を確認する試験であり, その概念図を図-3に示す。試験手順を以下のように定める。

- ① 現場より採取してきた岩石試料を粒径 1 mm 程度の粉末状にすりつぶす。
- ② 粉末状になった岩石試料 0.5 kg のうち, 約半分を研磨剤として試験装置の円盤上に敷き, 残りの試料は試験中に補給できるようにしておく。
- ③ 試験前のビットの重量を mg で計測しておき, 円盤上に敷いた試料に接触するように設置する。
- ④ 写真-3に示すように, 設置したビットを 10 kgf の錘で押さえつけながら, 円盤を 100 回転させる。

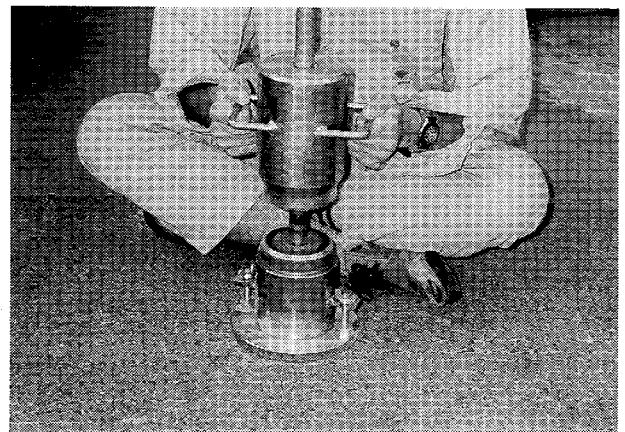


写真-1 脆性試験

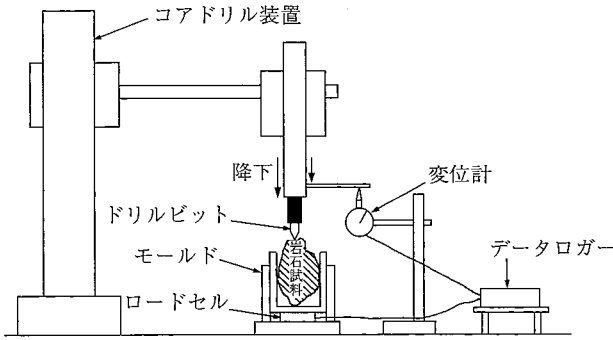


図-2 ミニチュアドリル試験概念図

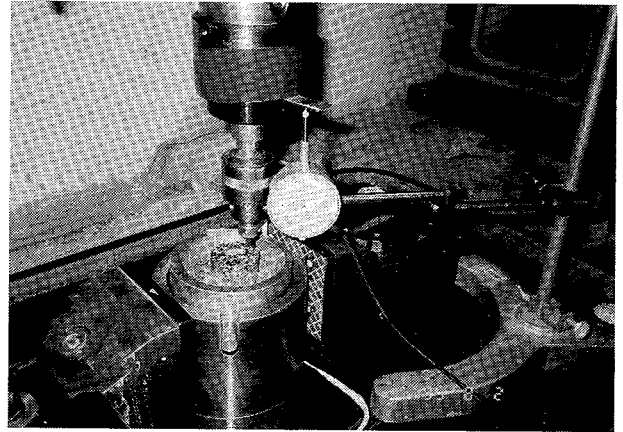


写真-2 ミニチュアドリル試験

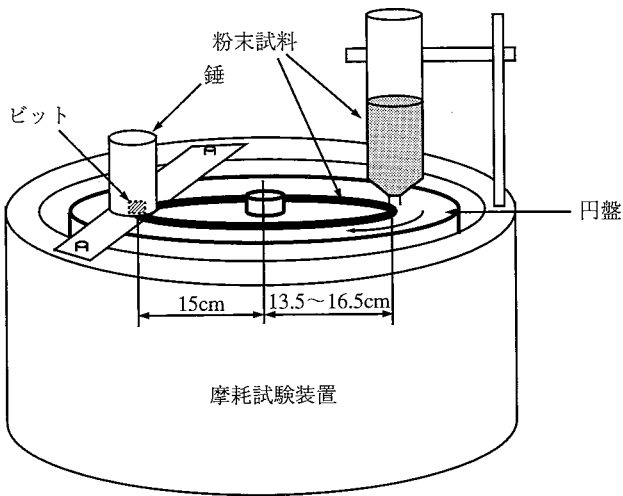


図-3 摩耗試験概念図

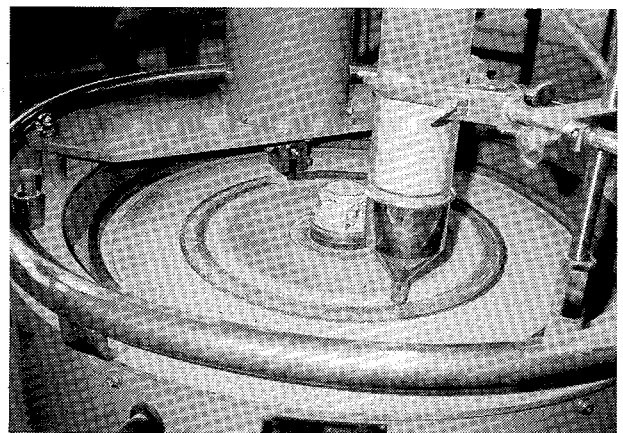


写真-3 摩耗試験

⑤ 100回転終了後のビット重量を計測する。

試験前と試験後のビットの重量損失量(mg)が摩耗値 (Abrasion value)であり、岩石試料によるドリルの摩耗度を評価するものである。

2.2 TBM 掘削能率指標の算定方法

DRI は、図-4³⁾に示すダイアグラムによって算定する。このダイアグラムは、NTH が実験データに基づいて作成したもので、脆性試験で得られた脆性値を横軸に、ミニチュアドリル試験で得られたシーバーの J 値をパラメータに、縦軸に設定した DRI を読み取るものである。DRI が大きい岩石ほど強度的に軟質であり、小さい岩石ほど硬質である。

BWI は、図-5³⁾に示すダイアグラムによって算定する。このダイアグラムも NTH が経験的に作成したもので、摩耗試験で得られた摩耗値を横軸に、算定された DRI をパラメータに、縦軸に設定した BWI を読み取るものである。DRI とは逆に、BWI が大きい岩石ほど強度的に硬質であり、小さい岩石ほど軟質である。

表-1 に我々が行った主な岩石試料における、一軸圧縮強度と DRI および BWI の値を示す。

表-1 主な岩石による指標

	一軸圧縮強度 (MPa)	DRI	BWI
火山礫凝灰岩	15.0	54.7	22.9
玄武岩	95.0	42.1	34.7
大谷石	9.8	61.5	23.4
花崗岩	154.0	12.2	76.3

3. 試験結果および考察

3.1 室内岩石試験結果

室内試験に使用した岩石試料は、某トンネル現場の TBM 施工箇所のうち、事前調査によって硬岩地域であると予想された延長約 400 m 区間から、約 20 m ごとに 22箇所採取した。脆性試験および摩耗試験用試料は、岩砕機通過後、ベルトコンベアで輸送される粒状岩石を用い、ミニチュアドリル試験用試料は TBM マシン本体のチャンパー内の岩塊を採取し用いた。各岩石試料における、脆性試験、ミニチュアドリル試験および摩耗試験の結果を示したのが表-2である。表中の脆性値は、脆性試験の結果、シーバーの J 値はミニチュアドリル試験の結果、そして摩耗値が摩耗試験の結果を表している。

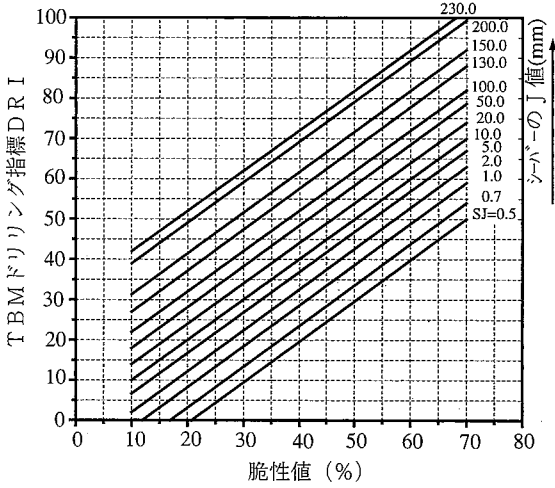


図-4 DRI 算定ダイアグラム

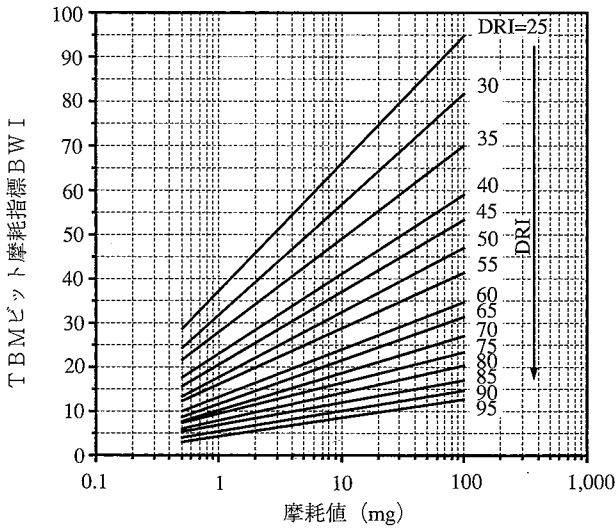


図-5 BWI 算定ダイアグラム

表中のシーバーの J 値の算定方法は、前述した通り単位秒当たりの貫入量より、200回転相当分の貫入量に換算したものである。TBM 掘進延長距離に対して、脆性値とシーバーの J 値をプロットした結果を図-6 に示す。

脆性値は24.7~63.7%、シーバーの J 値は 5.8~64.9 mm の間に分布する。このうち、玄武岩で平均脆性値は 39.9%、平均 J 値は 16.7 mm 程度になるのに対し、火山礫凝灰岩では平均脆性値50.6%、平均 J 値 27.6mm が得られ、岩石の硬軟や脆さによって差が現れている。また、両者の値は、TBM 掘進延長距離に対してほぼ同じような変化を示している。掘進延長距離 100 m から 200 m 付近までの区間は、脆性値とシーバーの J 値は大きい値を示している。これは、二つの指標の性質から、前後の区間と比べて軟質な岩石が存在していると判断できる。250 m 付近においては逆の傾向が得られている。

摩耗値をプロットした結果を図-7 に示す。摩耗値は 2~11 mg の間に分布し、玄武岩では平均値 5.5 mg、火山礫凝灰岩では 5.0 mg が得られている。図-7 を見ると、TBM 掘進延長距離に対して他の 2 試験結果とは逆に推

表-2 室内岩石試験結果

岩石試料採取地点	脆性試験値 (%)	シーバーの J 値(mm)	摩耗値 (mg)
STA157+47.650	24.7	14.3	6.0
27.650	43.6	20.2	2.0
11.400	37.8	10.2	9.0
STA156+82.900	30.2	24.9	4.0
64.400	40.4	12.4	3.0
23.200	59.3	64.9	3.0
STA155+93.600	63.7	32.4	6.0
74.600	53.1	28.5	4.0
62.600	47.3	17.8	8.0
48.600	29.3	24.0	8.0
38.600	42.4	19.4	3.0
17.800	39.7	6.4	3.0
14.650	29.3	6.7	5.0
STA154+98.650	39.2	5.8	11.0
83.600	48.6	31.4	4.0
56.650	48.5	22.3	6.0
16.000	40.3	19.6	8.0
6.100	51.9	10.8	6.0
STA153+87.100	36.7	15.5	6.0
74.400	38.1	18.9	6.0
66.000	44.0	16.8	5.0
51.000	44.6	21.0	2.0

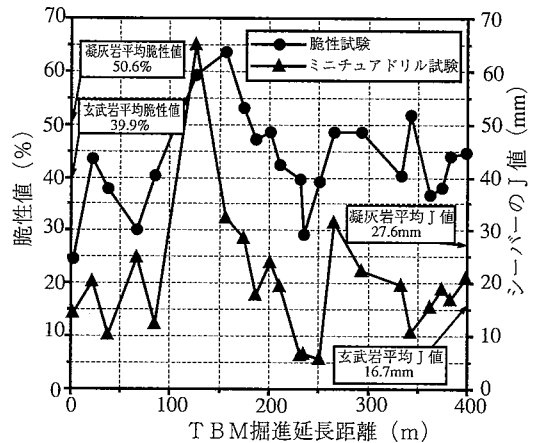


図-6 脆性試験結果とミニチュアドリル試験結果

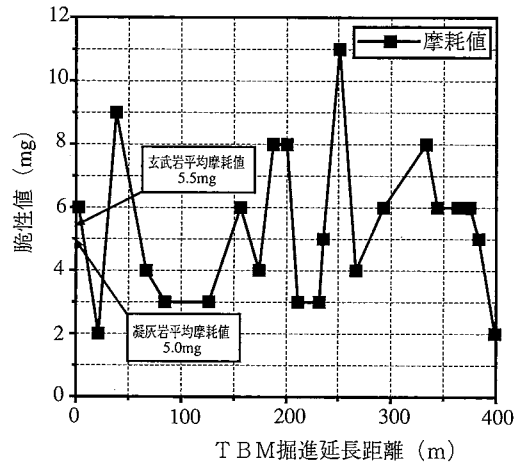


図-7 摩耗試験結果

移している。摩耗値は、他の 2 試験値とは逆の性質を持っていることを考えると、同様の傾向が得られていると言える。しかし、両岩石の平均摩耗値では、他試験のような大きな差が得られなかった。その原因として、例えば石英鉱物のような、玄武岩中には少なく、火山礫凝灰

表一3 掘削能率指標算定結果

岩石試料採取地点	TBM掘進延長距離(m)	DRI	BWI	TBM純掘進速度(mm/sec/tf)
STA157+47.650	1.875	26.6	58.8	6.566E-3
27.650	21.875	48.8	21.4	8.834E-3
11.400	38.125	39.2	40.3	6.841E-3
STA156+82.900	66.625	38.6	33.9	4.352E-3
64.400	85.125	41.3	31.7	4.158E-3
23.200	126.325	67.9	13.3	1.709E-2
STA155+93.600	155.925	70.0	15.6	1.543E-2
74.600	174.925	58.2	18.3	2.790E-2
62.600	186.925	50.7	28.9	1.051E-2
48.600	200.925	53.5	25.6	7.094E-3
38.600	210.925	45.7	27.2	8.193E-3
17.800	231.725	37.5	31.7	4.015E-3
14.650	234.875	27.0	56.7	4.691E-3
STA154+98.650	250.875	38.1	41.7	2.582E-3
83.600	265.925	49.2	25.3	4.792E-3
56.650	292.875	48.1	27.5	1.149E-2
16.000	333.525	43.6	33.3	1.702E-2
6.100	343.425	54.9	24.2	1.370E-2
STA153+87.100	362.425	39.0	37.2	6.196E-3
74.400	375.125	41.2	37.2	3.346E-3
66.000	383.525	46.3	30.3	5.250E-3
51.000	398.525	49.8	21.4	5.244E-3

岩中に多く存在するような硬質な鉱物の影響と思われる。よって、BWIは含有する岩石の鉱物組成に影響するものと言える。

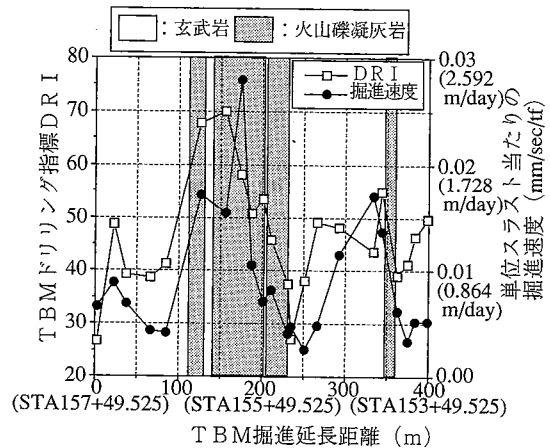
3.2 DRIとTBM純掘進速度

表一3は、各試料採取地点におけるDRIとBWIの算定結果である。得られたDRIを掘進延長距離に対してプロットすると図一8となる。横軸にTBM掘進延長距離を、左縦軸にDRIを示している。同図に掘進約1mごとに自動計測されたTBM純掘進速度を、一定スラスト推力1tfあたりに換算してプロットし、地質要因のみによるTBM純掘進速度とDRIの推移を対比する⁵⁾。玄武岩(一軸圧縮強度95MPa)の分布する区間では、DRI=30~50(平均DRI=42.1)と低く、掘進速度も低下している。一方、火山礫凝灰岩(一軸圧縮強度15MPa)の分布する区間では、DRI=50~70(平均DRI=54.7)と玄武岩の区間より高く、掘進速度も速くなっている。つまり、DRIが岩種や岩石の硬軟程度による純掘進速度の変化に十分対応していることがわかる。

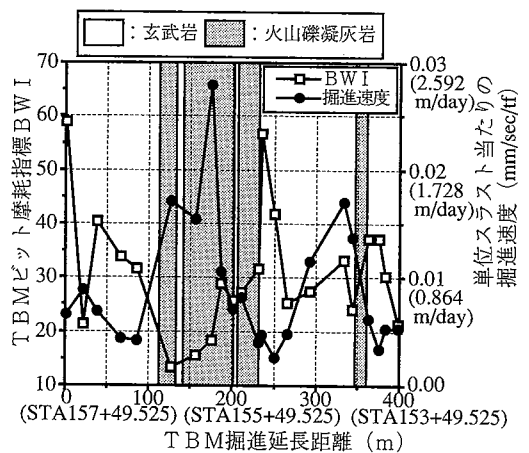
3.3 BWIとカッタービット摩耗量

表一3からBWIを掘進延長距離に対してプロットすると図一9となる。図一8と同様に横軸にTBM掘進延長距離を、左縦軸にBWI、右縦軸にTBM純掘進速度を示している。玄武岩の分布する区間では、おおむねBWI=25~50(平均BWI=34.7)と高く、掘進速度は低下している。また、火山礫凝灰岩の分布する区間はBWI=13~30(平均BWI=22.9)と低い値で、掘進速度は玄武岩区間よりも大きくなっている。つまり、BWIは掘進速度と相反する推移を示すことが確認できる。

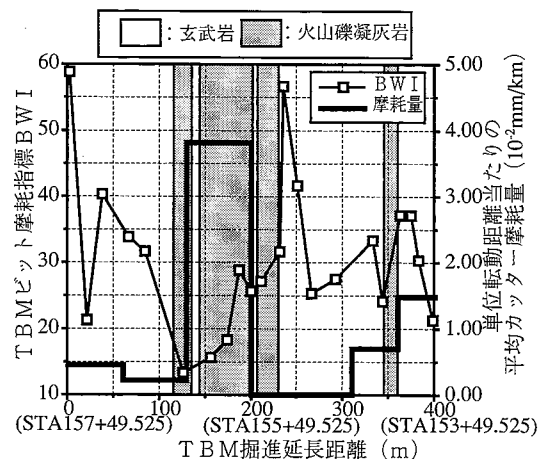
また、転動距離(TBMフェイスの回転により、カッタービットが岩盤を切削する円周距離)1kmあたりの各カッターの摩耗量を平均した値とBWIを対比させたも



図一8 TBM掘削位置におけるDRIと純掘進速度



図一9 TBM掘削位置におけるBWIと純掘進速度



図一10 TBM掘削位置におけるBWIとカッター摩耗量

のを図一10に示す。このグラフより、平均カッター摩耗量の多い区間でBWIは上昇傾向にあり、少ない区間では下降傾向にあることが確認できる。つまり、BWIとカッタービットの摩耗性との間には十分相関性のあること

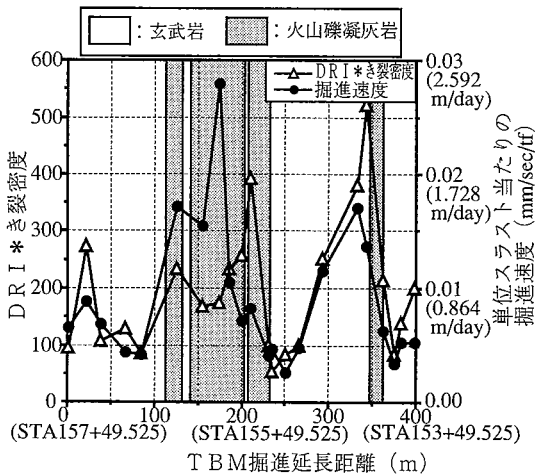


図-11 TBM掘削位置における新DRIと純掘進速度

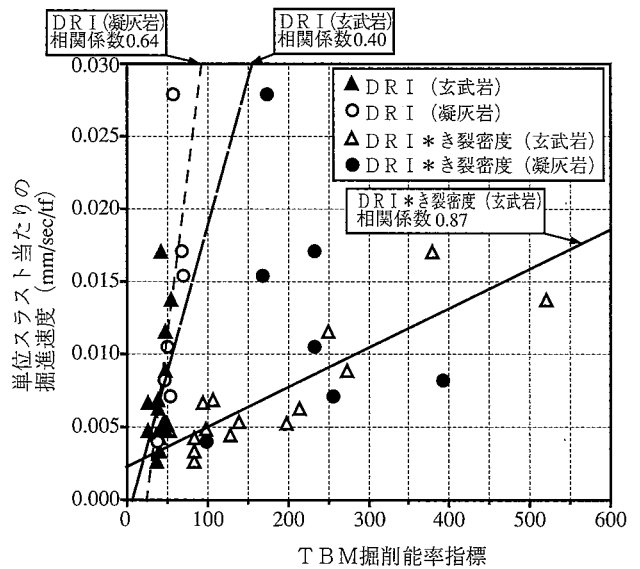


図-12 指標と純掘進速度の関係

がわかる。なお、火山礫凝灰岩の分布している範囲で平均摩耗量が最も多く出ているのは、前述した石英のような硬質な鉱物の影響と思われる。

3.4 新指標の提案

以上の結果より、DRIおよびBWIを用いることにより、岩石の硬軟程度によるTBMの掘削性のある程度把握できることが示唆された。しかし、これらの指標は岩石試料レベルの指標であり、実際はき裂を含んだ岩盤内を掘削しているため、TBM純掘進速度はき裂の影響を多分に受けているはずである。よって、周辺なき裂分布を考慮すると、TBMの掘進速度を精度良く予測、決定することができると思われる。

そこで、DRIにその地点で計測したき裂密度(走査線1m当たりにかかるき裂本数)を掛け合わせたものを、新しい指標として算定してみる。図-11にTBM掘進延長距離に対する(DRI * き裂密度 = DRI')の新指標と掘進速度の推移を示す。また、図-12はDRIおよび新指標DRI'と掘進速度との関係を表したものである。これらによると次のようなことがわかる。

① 玄武岩の分布する区間では、図-8のDRIと掘進速度の推移関係よりも、その相関性はさらに良いことが認められる。図-12では、DRIおよび新指標DRI'の両方も右上がりに分布する傾向が確認できるが、その相関係数を見ると、DRIが0.40、新指標DRI'が0.87とDRI'の方がはるかに良いことがわかる。

② 火山礫凝灰岩の分布する区間では、図-8のDRIと掘進速度の推移関係よりも、相関性の低いことが認められる。図-12を見ても、DRIでは右上がりに分布し、相関係数も0.64が得られたが、新指標DRI'では相関性を認めることが出来なかった。

4. おわりに

TBMの純掘進速度と岩石試料レベルでの掘削性に関する二つの指標DRI、BWIとの関係を調べたところ、次のようなことが判明した。

① 脆性値とシーバーのJ値によって得られるTBMドリリング指標DRIは、TBMの掘進速度との間に相関性のあることが確認できた。また、硬岩区間では、現地でのき裂分布を考慮すると、いっそうTBM掘削性を的確に表現できることが判明した。

② 摩耗試験とDRIによって得られるTBMビット摩耗指標BWIは、カッタービットの摩耗量ときわめて相関性の高いことが確認できた。

①、②より、今回行った脆性試験、ミニチュアドリル試験並びに摩耗試験等の試験方法や試験基準が、掘削能率を評価する上で十分適用でき、妥当であることが確認できた。

これらの指標を実際のTBMによるトンネル工事の設計・施工において、純掘進速度やビットの交換時期の予測に適用していくには、表-1のように今後様々な岩種の試験データを収集するとともに、その岩盤におけるき裂分布がTBMの掘進に与える影響を調べ、各予測式を確立していかなければならない。

参考文献

- 1) 佐藤：国道整備とトンネル計画，道路セミナー「道路トンネル計画と設計・施工」，建設しんぼう社，(1994)
- 2) 山田：大断面トンネルの設計，施工の現状と課題，平成6年度第1回岩盤力学委員会研究報告会，土木学会岩盤力学委員会トンネル・地下空洞小委員会，(1994)
- 3) Bjorn Nilsen, Levent Ozdemir: Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance, Rapid Excavation and Tunneling Conference, p.833~852, (1993)
- 4) R. Selmer-Olsen, O. T. Blindheim: On the Drillability of Rock by Percussive Drilling, International Society for Rock Mechanics, Vol. 3, p. 65~70, (1970)
- 5) 三谷，他：TBM貫入速度の予測について—硬岩地質における小断面TBMの事例研究—，応用地質，Vol. 26, No. 4, p. 7~22, (1985)