(15) 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－

Correlation between drillability of TBM and the character of rock masses

— Application of efficient indexes of drilling by laboratory testing —

丹生屋純夫*・鈴木健一郎*・丸山　誠*
藤原　紀夫*・平間　邦興*
Sumio Niunoya, Kenichirou Suzuki, Makoto Maruyama
Toshio Fujiwara and Kunioki Hirama

In foreign countries it has been introduced DRI (Drilling Rate Index) and BWI (Bit Wear Index) as indexes to predict drillability for TBM. However in Japan, we didn't yet apply both the indexes to any TBM projects. We carried out the Brittleness test and Siever's J-value Miniature test using rock samples to calcurate DRI, and tried to investigate the relationship between DRI and the penetration rate of TBM. And they carried out the Abrasion test to calcurate BWI, and tried to investigate the relationship between BWI and abrasion rate of cutter bit.

As a results, it was clear that there existed the good relationship, and there existed better relationship if we put the frequency of cracks in DRI. And it was also clear that procedures of each test we carried out were reasonable.

1. はじめに

TBM (Tunnel Boring Machine) 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[1),2)]。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

*　正会員（株）大林組技術研究所

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。

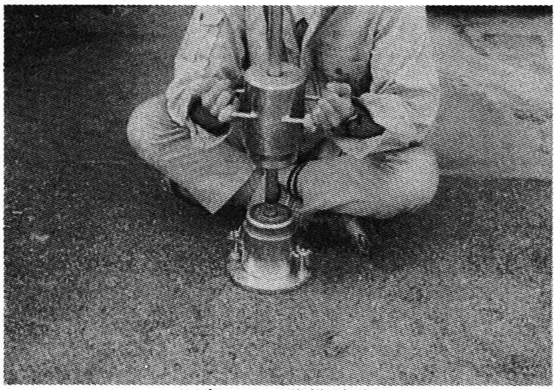
DRIは、1943年に、N.von Matern と A.Hjelmer が開発した脆性試験と1950年にSieverが開発したミニチュアドリル試験の組み合わせによって得られる指標である。具体的な試験方法については文献によってやや異なるため、今までの種々の文献を参考にしながら、独自の試験方法、基準を設定した。以下に各試験手順などについて述べる。

脆性試験は、写真－1に示すように粒径約10～20㎜の岩石試料0.5㎏をモールドに詰め、14㎏の錘を支棒を通じて高さ25㎝より20回垂直落下させる。錘の落下によって破砕した岩石試料を網目寸法9.5㎜のふるいにかけ、通過重量百分率を求める。これが脆性値（Brittleness value）であり、岩石試料の脆性度を評価するものである。

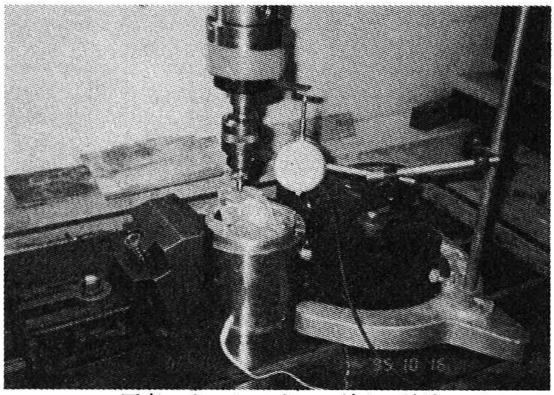
ミニチュアドリル試験は、写真－2のようにモールド内に固定した拳大ほどの岩石試料に20㎏fの力でドリル（材質：タングステンカーバイト）を押し当てながら200回転させ、1/10㎜精度で貫入量を計測する。この貫入量がシーバーのJ値（Siever's J-value）であり、岩石試料におけるドリルの切削度を評価するものである。なお、200回転する前にビット全長が貫入してしまう試料の場合は、試験結果より単位秒当たりの貫入量を割り出し、試験時間とドリル回転数の関係から200回転相当の貫入量を算定する。

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、耐久性及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。摩耗試験についても、独自の試験手順を考案した。

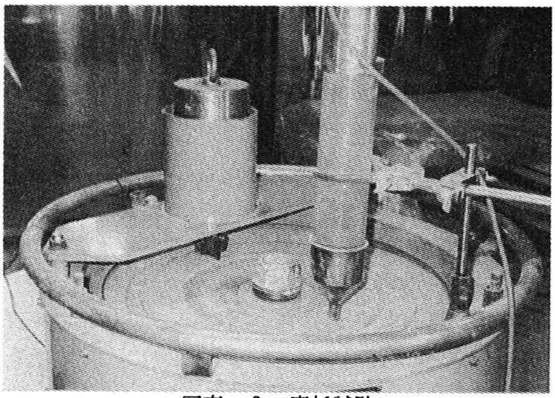
摩耗試験は、写真－3に示すように粒径約1㎜程度にすりつぶした岩石試料を研磨材のように円盤上に敷き、その上に固定した鋼材性のビットの上に10㎏の錘を載せる。円盤を100回転させ、試験前と試験後のビットの重量損失を㎎で求めたものが摩耗値（Abrasion value）であり、岩石試料によるビットの摩耗度を評価するものである。



写真－1　脆性試験



写真－2　ミニチュアドリル試験



写真－3　摩耗試験

2・2　TBM掘削能率指標の算定方法

DRIは、文献[1]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、脆性値を横軸に、シーバーのJ値をパラメータとして、縦軸に設定したDRIを

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

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

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、文献[1]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、摩耗値を横軸に、算定されたDRIをパラメータとして、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。

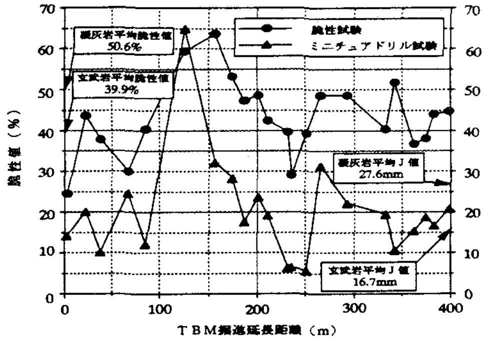
表－1は主な岩石試料における、一軸圧縮強度とDRI及びBWIの値を示したものである。

3. 試験結果及び考察

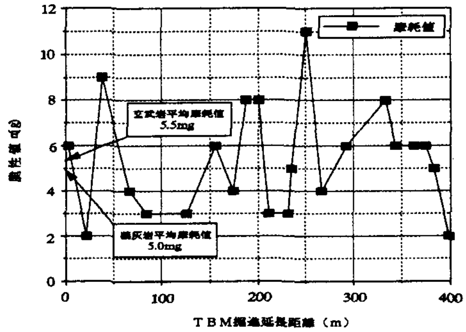
3・1　室内岩石試験結果

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400m区間から、約20m毎に22ヶ所で採取した。脆性試験及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バ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及び摩耗試験の結果を示したのが表－2である。また、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－1に、摩耗値をプロットした結果を図－2に示す。それぞれの図中には、各岩石のおける平均試験値も併せて示してある。



図－1　脆性試験結果とﾐﾆﾁｭｱﾄﾞﾘﾙ試験結果



図－2　摩耗試験結果

脆性値とシーバーのJ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100mから200m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おり、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。250m付近においては逆の傾向が得られている。

一方、図－2の摩耗値を見ると、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－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

表－３　掘削能率指標算定結果

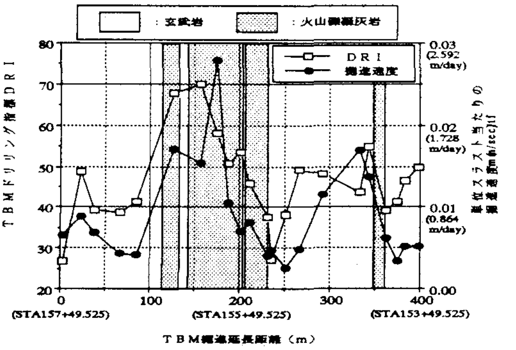
岩石試料 採取地点	ＴＢＭ掘進 延長距離（m）	ＤＲＩ	ＢＷＩ	ＴＢＭ純掘進速度 （mm/sec/tf）
STA157+47.650	1.875	26.6	58.8	6.566E-3
27.650	21.875	48.8	21.4	8.834E-3
11.400	38.125	39.2	40.3	6.841E-3
STA156+82.900	66.625	38.6	33.9	4.352E-3
64.400	85.125	41.3	31.7	4.158E-3
23.200	126.325	67.9	13.3	1.709E-2
STA155+93.600	155.925	70.0	15.6	1.543E-2
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

してプロットすると図－３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毎に自動計測されたTBM純掘進速度を、一定スラスト推力1tf当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[3]。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。

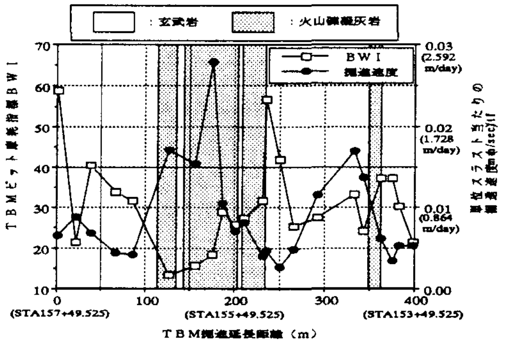
３・３　BWIとカッタービット摩耗量

表－３からBWIを掘進延長距離に対してプロットすると図－４となる。図－３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。

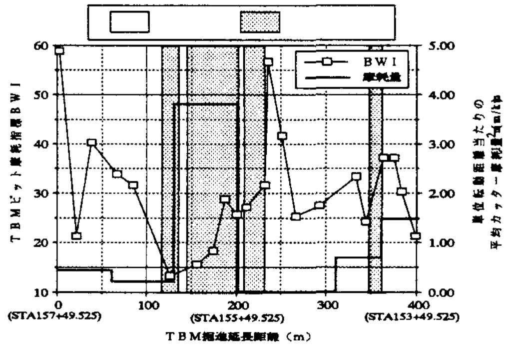
また、転動距離（TBMフェイスの回転により、カッタービットが岩盤を切削する円周距離）1km当たりの各カッターの摩耗量を平均した値とBWIを対比させたものを図－５に示す。このグラフより、平均カッター摩耗量の多い区間でBWIは上昇傾向にあり、少ない区間では下降傾向にあること



図－３　TBM掘削位置におけるDRIと純掘進速度



図－４　TBM掘削位置におけるBWIと純掘進速度

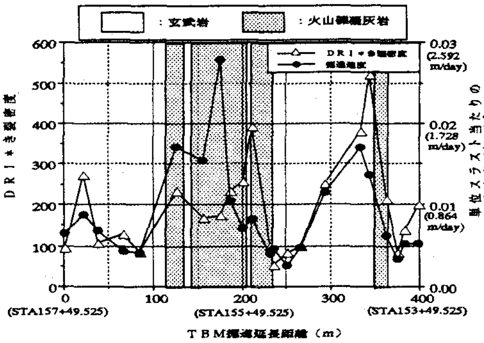


図－５　TBM掘削位置におけるBWIと
カッター摩耗量

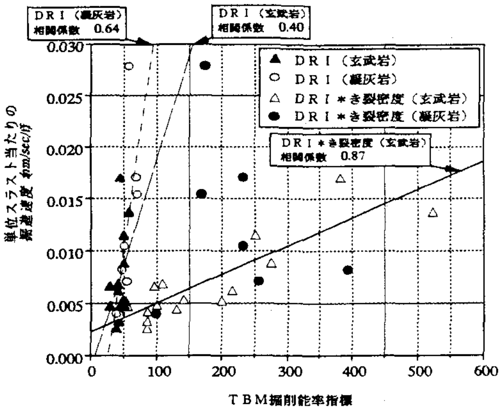
が確認できる。つまり、BWIとカッタービットの摩耗性との間には十分相関性のあることがわかる。なお、火山礫凝灰岩の分布している範囲で平均摩耗量が最も多く出ているのは、前述した石英のような硬質な鉱物の影響と思われる。

３・４　新指標の提案

以上の結果より、DRI及びBWIを用いることにより、岩石の硬軟程度によるTBMの掘削性を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



図－6　TBM掘削位置における新DRIと純掘進速度



図－7　指標と純掘進速度の関係

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、周辺のき裂分布を考慮すると、TBMの掘進速度を確度良く予測、決定することができると考えられる。

そこで、DRIにその地点で計測したき裂密度（走査線1m当たりに交わるき裂本数）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－6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－7はDRI及び新指標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－3のDRIと掘進速度の関係よりも、その相関性はさらに良いことが認められる。図－7では、DRI及び新指標DRI'の両方と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－3のDRIと掘進速度の関係よりも、相関性の低いことが認められる。図－7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。

5. 参考文献

1) Bjorn Nilsen,Levent Ozdemir : Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance、Rapid Excavation and Tunneling Conference、pp.833-852 (1993)

2) R.Selmer -Olsen,O.T.Blindheim : On the Drillability of Rock by Percussive Drilling、International Society for Rock Mechanics、Vol.3、pp.65-70 (1970)

3) 三谷ら：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、２６巻４号、pp.7-22、1985