

TBMの掘進データと周辺岩盤の亀裂分布との関連性について

On the Influence of Crack Distribution in Surrounding Rock Mass
on the In-Situ Drillability of TBM

浅野 剛*・蛭子清二*・岩垣富春**・斎藤敏明***

Takeshi ASANO, Seiji EBISU, Tomiharu IWAGAKI and Toshiaki SAITO

In this paper, the excavation rate forecast types of Gong were used and the relations between TBM tunneling data (excavation rate, thrust, cutter current) were analyzed with a view to improving the excavation rate forecast accuracy. Moreover, the area which the crack crossed the pilot tunnel for each unit length was calculated from a picture of the crack distribution taken using the pilot tunnel measuring system, and the influence of crack distribution in the surrounding rock mass on TBM tunneling data was analyzed.

As a result, it was pointed out that an understanding of the influence exerted by the crack was an important factor in improving the excavation rate forecast accuracy. In addition, it was shown to be possible to improve the forecast accuracy of the excavation rate by including the crack face area that crossed the pilot tunnel into the equation used forecast type as an index.

1. はじめに

TBM (Tunnel Boring Machine) 工法における掘進計画の立案あるいは施工の急速化のためには、切羽前方の岩盤の性状を把握し、掘進速度を精度良く予測することが重要である。

掘進速度の推定方法としては、ノルウェー工科大学 (NIT) 方式と小松・ロビンス社方式が一般的である¹⁾。NIT方式は岩石供試体を用いた脆性試験とミニチュアダリル試験から算定される指標であるDRI (Drilling Rate Index) を利用する方法であり、硬岩を中心とするTBM稼働実績を分析することによって開発されたものである。一方、小松・ロビンス社方式は数学モデルを仮定し、その係数をベンチテストの結果に基づいて定量化したものである。両者による予測値は必ずしも一致せず、特に軟岩部では後者による予測値がかなり大きくなるといわれている¹⁾。

掘進速度を予測することの困難さは、カッターの形状・配置、押し付け荷重、トルクなどの要因が影響するだけではなく、岩石の強度、亀裂分布などの地質的要因が複雑に影響することに起因するものと考えられる。丹生屋ら²⁾はDRIに亀裂密度(走査線1mあたりに交わる亀裂本数)を乗じた値を新しい指標として導入し、掘進速度に対する亀裂分布の影響の評価を試みている。また、Sanio³⁾は岩盤の破壊メカニズムを仮定することにより掘進速度予測式を誘導している。

一方、カッターディスクを用いた切削試験に基づく掘進速度の予測も試みられている。Gong⁴⁾は、数種類

* 正会員 工博 (株)奥村組技術研究所 ** 本州四国連絡橋公団第一建設局舞子工事事務所

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部資源工学教室

の岩石供試体を用いた切削試験結果に基づき掘進速度予測式を提案している。そこでは岩石の種類によらず、カッターディスクの貫入量はその押し込み荷重の2乗に比例し、トルクはカッターディスクの貫入量に比例することが示されている。これらは、Sanioによる岩盤の破壊メカニズムを仮定した予測式と概ね一致しており、NIT方式および小松・ロビンス方式もこれらを予測式の基本的な関係としている。

本論文では、係数の設定方法が明確にされているGongらの掘進速度予測式を適用し、本州四国連絡道路の舞子トンネル導坑工事（掘削径5m、延長600m）におけるTBMの掘進データ（掘進速度、推進圧、カッター電流）相互の関係を分析し、掘進速度の予測精度を向上させるための要因を分析する。次に、先進導坑画像計測システム⁹⁾を適用して得られた亀裂分布から単位掘進長あたりに亀裂が導坑を横断する面積を算出し、それらと掘進データとの関連性の分析から亀裂が掘進速度に及ぼす影響を示し、掘進速度の予測精度向上の可能性を考察する。

2. 岩石の力学特性

図-1に示すように舞子トンネル導坑工事ではTBM工法によりNo. 1～No. 4の4本の導坑が施工された。本論文では、まず岩石の一軸圧縮試験を最も多く実施し力学的情報が多く得られているNo. 1導坑に着目して分析を進める。舞子トンネル周辺の地質縦断面図を図-2に示す。地質は中生代白亜紀の六甲花崗岩が優勢に分布している。一部に小規模な断層（F1）とヒン岩脈を含むが、ほぼ均一な岩種で中硬岩または硬岩に分類される。

No. 1導坑では5mごとにシュミットハンマー試験を、25mごとに岩石コアを採取し一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験を実施した地点の一軸圧縮強度 q_u と同じ位置でのシュミットハンマー反発係数 C_s から以下の回帰式を求めた。

$$\log q_u^* = 0.7049 + 0.0222 C_s \quad (1)$$

ここで、

C_s : シュミットハンマー反発係数

q_u^* : 推定一軸圧縮強度 (MPa)

図-3に導坑の距離程を横軸にとり q_u および q_u^* を比較して示す。2800～2840mの区間ではヒン岩脈の存在、3060m付近ではF1断層の存在により q_u^* が小さくなっている。また、3060m以降は風化が進んだ部分が所々に存在しており、この区間の q_u^* の変動が大きい一因と考えられる。しかし、 q_u と q_u^* は比較的良好な対応を示しており、本報告では q_u^* を以下の分析で用いるものとした。

3. 掘進データの分析

3.1 掘進データの特徴

図-4～6に導坑の距離程に沿った掘進速度、推進圧、カッター電流の測定値の分布を、表-1にそれ

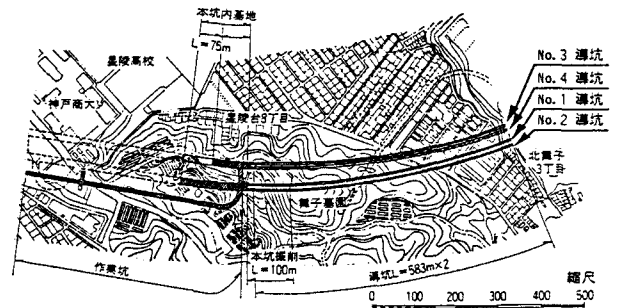


図-1 舞子トンネル導坑工事平面

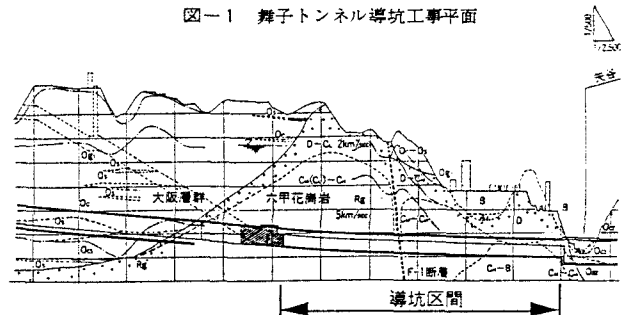


図-2 地質縦断

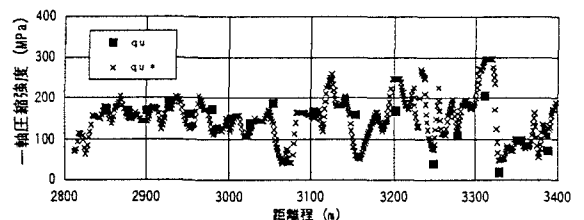


図-3 一軸圧縮強度の分布

らの平均値、標準偏差および変動係数を示す。掘進データは1掘進ごとに連続的に測定されたデータの平均値であり、その間の掘進長はおよそ1mであった。カッター回転数は一定で7.5rpmであり、カッターディスク1回転あたりの貫入量は掘進速度に比例することになる。図-4～6には掘進データの巨視的な分布傾向を見るために、区間長10m、移動距離1mの移動平均を併記した。以後、データ相互間の分析にはこれらの移動平均値を用いる。

表-1に示した3種類の掘進データの変動係数は、掘進速度、推進圧、カッター電流の順に小さくなっており、カッター電流のばらつきが小さい点を指摘できる。これは、カッター電流が施工上の管理値(130A)を越えずに一定となるように推進圧が管理されていた経緯と符合している。

表-1 掘進データの平均、標準偏差、変動係数

	平均値	標準偏差	変動係数
掘進速度 (mm/min)	23.6	7.6	0.322
推進圧 (MPa)	18.4	4.4	0.239
カッター電流 (A)	106.8	13.8	0.129

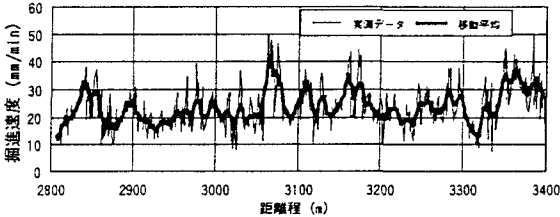


図-4 掘進速度の実測値および移動平均

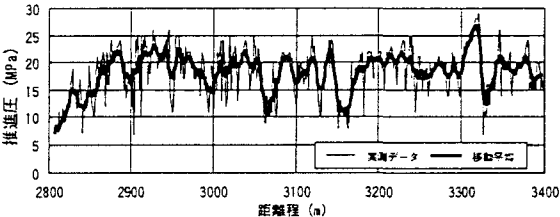


図-5 推進圧の実測値および移動平均

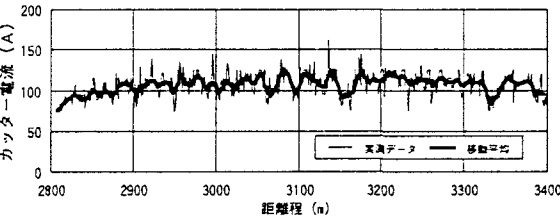


図-6 カッター電流の実測値および移動平均

3.2 掘進データと q_u^* との関連性の分析

掘進データ間の関連性およびこれらのデータと q_u^* との関連性の分析に先立って、カッターディスクの摩耗の影響が同程度となるように掘進データを抽出した。TBMには37個のカッターディスクが装備されている。No. 1導坑の掘進を終了するまでに16回、各回に7～19個のカッターディスクが交換されており、このデータに基づきカッターディスクの平均掘進距離を算出した。以下の掘進データの分析では、平均掘進距離が40～60mである場合の掘進データのみを抽出して使用した。

図-7に q_u^* と掘進データの関係を示す。同図では、掘進データ測定位置の岩石の q_u^* を25カテゴリーに分けて(各カテゴリーの q_u^* の範囲は10MPa)各カテゴリーごとに掘進データを平均して示した。ここで、単位の異なる3種類の掘進データの変化を比較するため、それぞれのデータは平均値で正規化して示した。巨視的に見れば、 q_u^* に対して推進圧は単調増加、カッター電流は一定、掘進速度は単調減少の傾向を見い出せる。

ただし、 $195\text{MPa} \leq q_u^* \leq 235\text{MPa}$ の範囲では、全体の傾向と比較して掘進速度は早く、推進圧は小さくなっていることがわかる。この原因の一つとして5章で述べるように亀裂の影響が考えられる。図-8に掘進速度と推進圧の関係を示す。図-7と同様に、 q_u^* のカテゴリーごとに

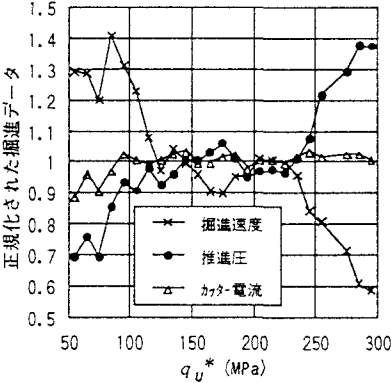


図-7 掘進データと q_u^* の関係

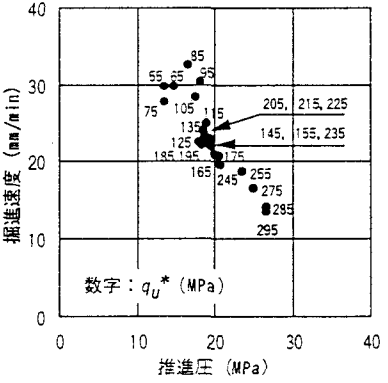


図-8 掘進速度と推進圧の関係

掘進データを平均して示している。プロットに添記した数字は各カテゴリーの q_u^* の中央値である。TBMおよび岩石の特性が一定であれば掘進速度は推進圧の2乗に比例するのが一般的であり^{3), 4)}、図-8において認められる掘進速度と推進圧の間の負の相関は周辺岩盤の特性変化に起因していると推測される。そこで、岩盤の特性変化を反映し

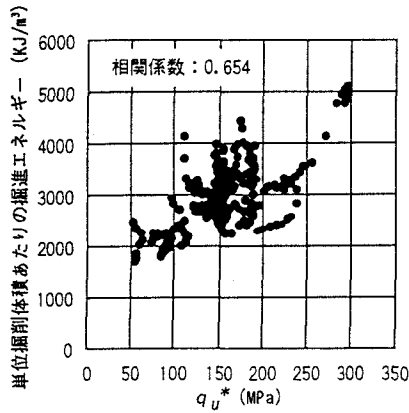


図-9 掘進エネルギーと q_u^* の関係

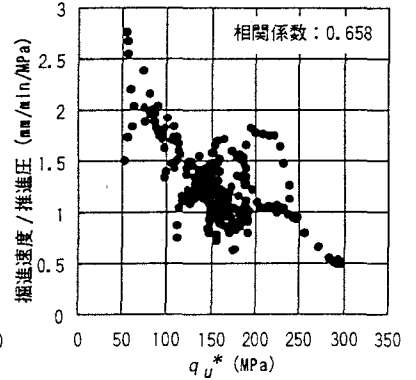


図-10 速度 / 推進圧と q_u^* の関係

た指標として、単位掘削体積あたりの掘進エネルギーと単位推進圧あたりの掘進速度を取り上げ q_u^* との関係について調べた。単位掘削量あたりのエネルギーは(カッター電流×電圧)/(掘進速度×掘削断面積)により算出した。図-9、10にそれらの関係を示す。両図より q_u^* が大きくなるほど掘進エネルギーは大きく、また単位推進圧あたりの掘進速度は小さくなっており、その相関傾向は比較的高いものとなった。これらの結果を見る限り、掘進データにより得られる上記の指標から周辺岩盤の特性変化を概ね推測することが可能と言える。

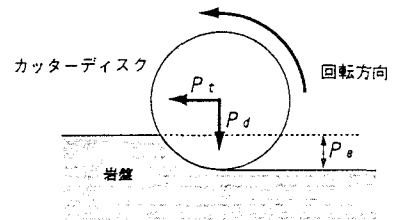


図-11 予測式における記号の説明

3.3 掘進速度予測式に基づく掘進データの分析

Gongらによる掘進速度予測式⁴⁾(以後、予測式)を引用して、掘進速度と推進圧の間に認められた負の相関関係を分析する。予測式は次式で表される。

$$P_d = K_d \sqrt{D P_e S} \quad (2)$$

$$P_t = K_t P_e \sqrt{S} \quad (3)$$

ここで(図-11参照)、

P_d : カッターディスク押し込み荷重 (kN)	K_d : $= 0.045 E^{0.27} q_u^{0.23}$
P_t : 切線力 (kN)	K_t : $= 0.029 E^{0.27} q_u^{0.37}$
P_e : 貫入量 (mm/rev.)	E : 岩石の変形係数 (GPa)
D : カッターディスク直径 (mm)	q_u : 岩石の一軸圧縮強度 (MPa)
S : カッターディスク間隔 (mm)	

式(2)において舞子トンネルでのTBMの仕様($D=394\text{mm}$, S :平均 $=79\text{mm}$)をあてはめ、 q_u^* をパラメータとして $P_e - P_d$ 曲線を描くと図-12のようになる。ここで P_d 、 D 、 S および E 、 q_u^* により決定できる K_d を式(2)に代入して P_e を計算した。また、 E (GPa)は対応する q_u^* を用い、 $0.42 \times q_u^*$ (MPa)として算定した⁵⁾。 $P_e - P_d$ 曲線は、式(2)からも明らかのように、 P_e が P_d の2乗に比例する単調増加関数である。図-12には、TBMの仕様から決まる推進圧とトルクの上限線および実際の掘進データを併記した。 P_d の上限直線は最大推進圧にスラストジャッキのシリンダーの総断面積を乗じ、これをカッターディスク総数で除して求めた。最大トルクから決まる $P_e - P_d$ の上限曲線は、各 q_u ごとに最大トルクをカッターディスク総数および平均半径(1.495m)で除して得られた最大切線力を式(3)に代入して P_e を求め、さらにその P_e を式(2)に代入して P_d を求め各点を結ぶことにより描ける。実際の掘進データについては P_e は掘進速度を単位時間あたりのカッターヘッド回転数で除した値とし、 P_d はTBMの総推力をカッターディス

ク総数(37個)で除した値とした。掘進データは図-8と同様に q_u^* により分けた25のカテゴリごとに平均値を求めプロットした。プロットに添記した数字は各カテゴリの q_u^* の中央値である。

図-12では、実測データのプロットが2種類の上限線の内側に収まっている様子が見い出せる。同じ P_d に対して、予測式の P_e (以後、 $P_{e,PRE}$)と掘進データ(実測値)の P_e (以後、 $P_{e,EX}$)を比較して図-13に示す。

$P_{e,EX}$ は $P_{e,PRE}$ よりも大きい傾向が見い出せる。予測式は亀裂のない岩石の切削実験から提案されているので、この差については岩盤に内在する亀裂の影響が最も大きいと考えられる。予測式と掘進データの比較から、前節と同様に掘進データの P_d に対する P_e の減少傾向は周辺岩盤の特性変化に起因した関係であると推測できる。

図-12において、岩盤に内在する亀裂の影響を組み入れて掘進データの q_u^* を小さく見積もれば掘進データが予測式のカーブに合ってくる。また、亀裂の存在により式(2)におけるカッターディスク間隔 S に対応して切羽に生じるカッター溝の間隔が小さくなる効果があると仮定すれば、同じ大きさの P_d に対して P_e が結果的に大きくなることになり、図-13における $P_{e,EX}$ と $P_{e,PRE}$ の差は小さくなることが予想される。

4. 亀裂分布の調査

先進導坑画像計測システムを適用してTBM掘進後に導坑周壁に現れた亀裂を撮影し、その展開画像から個々の亀裂の位置と走向および傾斜を調査した。このシステムは導坑中心軸上に設置した球面鏡に写った導坑周壁面の画像を、同じく導坑中心軸上に設置したCCDカメラにより撮影するものである。導坑軸方向に連

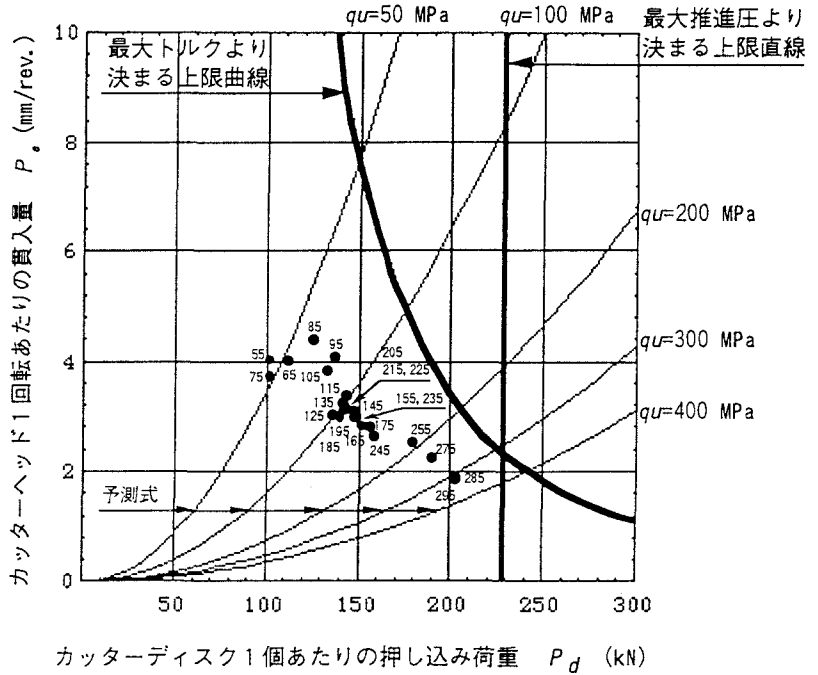


図-12 P_d と P_e の関係(予測式と掘進データの比較)

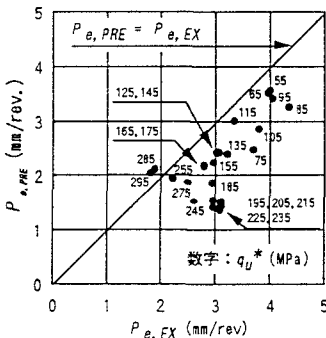


図-13 P_e の比較(予測値と実測値)

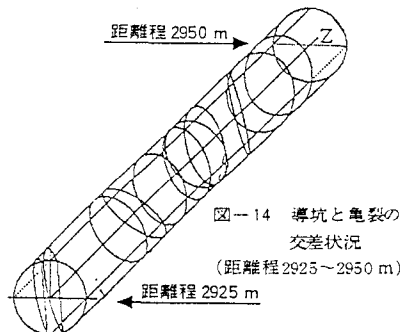


図-14 導坑と亀裂の交差状況
(距離 2925~2950 m)

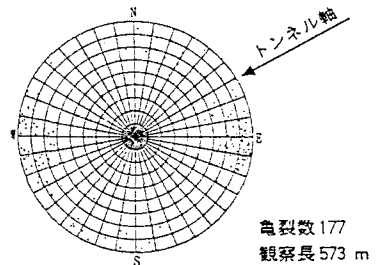


図-15 亀裂のステレオ投影

統的に画像を取り込むことができ、導坑の亀裂分布を導坑全長にわたり同じ精度で調査できる方法である⁵⁾。計測された導坑と亀裂の交差状況の一部を図-14に、亀裂面のステレオ投影図を図-15に示す。図-15より亀裂走向の第一卓越がNS方向であることがわかるが、これは4本の導坑に共通した傾向である。なお、本論文では図-14に示すように導坑全面に広がっている亀裂を考慮の対象とした。

亀裂の頻度分布および単位掘進長(1m)あたりに亀裂が導坑を横断する交差面積 A_c を図-16、17に示す。図-16、17の横軸は導坑の距離程である。図-16の亀裂数は亀裂と導坑軸が交わる地点の距離程をその亀裂の位置として求めており、その総数は177個であった。 A_c の平均値は4.9 m^2 、標準偏差は4.6 m^2 、変動係数は0.939であり、導坑に沿って様な分布となっていない。亀裂の頻度分布と A_c の分布は比較的良好に対応している。ここでは、亀裂分布を表す指標として、亀裂面の走向、傾斜が反映された A_c を用いることにした。

5. 掘進速度に及ぼす亀裂の影響

岩盤に内在する亀裂は掘削効率に大きく影響すると言われている^{7),3)}。NIT方式では、亀裂間隔および亀裂とトンネル軸の交角によりカッターディスクの地山への貫入量を補正している⁷⁾。わが国においても、弾性波速度 $V_p=5.0km/sec$ 程度の堆積岩については亀裂度(岩盤と岩石の V_p の比率)と単位押しつけ力あたりの掘進速度との間にはかなり高い相関が見られると報告されている³⁾。

本論文では亀裂の影響を考慮していないGongらの予測式と実際の掘進データを比較検討することにより掘進速度に及ぼす亀裂の影響を分析する。 $P_{e,PRE}/P_{e,EX}$ と A_c との関係は図-18のようになる。相関係数は0.664と負の相関傾向が見られ、回帰式は次式のように得られる。

$$\frac{P_{e,PRE}}{P_{e,EX}} = 0.974 - 0.050 A_c \quad (4)$$

ここで、

A_c : 単位掘進長あたりの亀裂面積 (m^2/m)

A_c が大きな区間ほど $P_{e,EX}$ が $P_{e,PRE}$ を上回る度合いが大きくなっている。また、図-7において掘進速度は早く、推進圧は小さくなっていると指摘した $195MPa \leq q_u^* \leq 235MPa$ のデータに対応する A_c は、5～

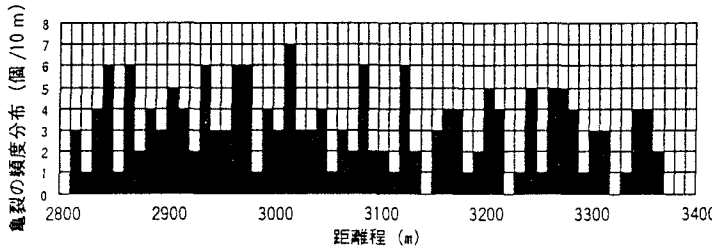


図-16 亀裂の頻度

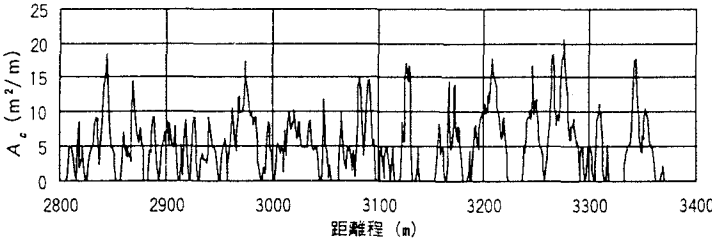


図-17 単位掘進長あたりの亀裂面積

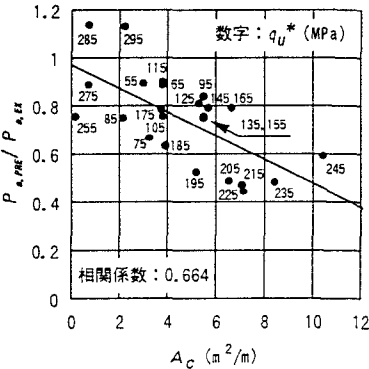


図-18 $P_{e,PRE}/P_{e,EX}$ と亀裂面積の関係

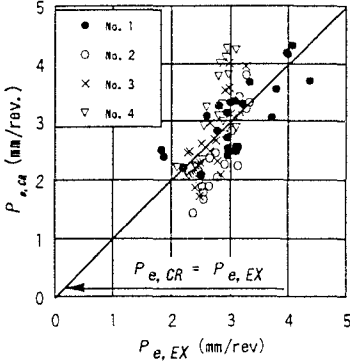


図-19 P_e の比較(補正值と実測値)

9 m²/m と相対的に大きな値となっている。このことは岩石の切削を仮定した予測式に亀裂面積という指標を組み合わせることで、実岩盤の掘進速度を精度良く予測できる可能性を示している。すなわち、予測式に含まれる岩石の強度・変形特性に関する項 K_d あるいはカッターディスク間隔 S を A_c で補正などの方法が考えられる。式(4)において $A_c = 0$ のときに $P_{e,PRE}/P_{e,EX} = 0.974 \approx 1.0$ となっているのでこれを1とし、式(2)に代入すると、亀裂面積を考慮した掘進速度予測式として次式が得られる。

$$P_e = \frac{P_d^2}{K_d^2 D S (1 - 0.05 A_c)} \quad (5)$$

式(5)は式(2)における S が $S \times (1 - 0.05 A_c)$ に置き換わった形であり、回帰式(4)を用いて S を A_c で補正したという見方もできる。図-19は式(5)により算定される P_e (以後、 $P_{e,CR}$) と $P_{e,EX}$ とを比較したものである。これまで分析に用いてきたNo. 1導坑の他、No. 2～4導坑における掘進データ、亀裂分布、式(1)から得られる q_v^* を用いて算定される結果も併記した。No. 1導坑とNo. 2～4導坑では若干傾向が異なっていることがわかる。No. 1導坑の計測データに基づく回帰式(1)をNo. 2～4導坑に適用したことがその一因となっている可能性があるが、その原因を特定するには至っていない。しかし、いずれの導坑についても $P_{e,EX}$ と $P_{e,CR}$ は比較的良く一致しており、舞子トンネルの周辺岩盤については、ここで示した A_c による補正が有効であると言える。

6. まとめ

既往の掘進速度予測式との対比からTBM掘進データ(掘進速度、推進圧、カッター電流)相互の関係を分析した。その結果、掘進速度と推進圧の間に認められた負の相関関係は岩石の強度・変形特性および岩盤に内在する亀裂分布の変化に起因すると解釈した。また、掘進速度の予測精度の向上には亀裂の及ぼす影響を把握することが必要であると指摘し、TBM掘進データと周辺岩盤の亀裂分布の関係について、既往の掘進速度予測式を適用して分析を行った。その結果、導坑を横断する亀裂面積を指標として予測式に取り込めば、掘進速度の予測精度が向上することを示した。

今後は予測式の一般化を目指してカッターディスクによる岩盤破碎メカニズムの検討とこれに基づいた掘進データの分析を進める予定である。また、亀裂幅あるいは亀裂の挟在物等も掘進速度に影響を及ぼすことが予想されるが、これらについても今後の研究課題と考えている。

7. 参考文献

- 1) 小松製作所編：TBMの諸元と性能予想、1991。
- 2) 丹生屋純夫・鈴木健一郎・丸山誠・藤原紀夫・平間邦興：TBMの掘削性と岩盤特性との相関性、第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.66-70、1996。
- 3) Sanio, H.P. : Prediction of the Performance of Disk Cutters in Anisotropic Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.3, pp.153-161, 1985。
- 4) Gong, F.・佐藤一彦・浅井秀明：円周軌道切削における岩石の切削抵抗ーディスクカッターによる岩石の切削抵抗に関する研究(第1報)、資源・素材学会誌、Vol.108, No.7, pp.559-562、1992。
- 5) 寺田道直・水原憲三・萩森健治・大塚勝司：画像処理によるTBM掘削壁面の地質調査、第13回西日本岩盤工学シンポジウム論文集、pp.60-63、1992。
- 6) 大西有三・谷本親伯：わかりやすい岩盤力学、鹿島出版会、p.126、1984。
- 7) The University of Trondheim: Project Report 1.83 - HARD ROCK TUNNELING BORING, pp.20-25、1983。
- 8) 土木学会編：わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望、pp.198-202、1976。