

III-B 49 トンネルボーリングマシン掘進データの分析例（その1）

— 掘進データ相互の関連性 —

奥村組 正会員 蛭子清二 奥村組 正会員 浅野 剛
奥村組 正会員 西村正夫 奥村組 正会員 牧野卓三
本州四国連絡橋公団 藤原洋一

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、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、DRIを用いるノルウェー工科大学方式、小松・ロビンス社方式が一般的である¹⁾。しかし、掘進速度にはカッターの形状・配置、押し付け荷重、トルクなどの要因の他に、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と考えられ、掘進速度の正確な予測を難しいものになっている。本報告では、岩石の切削試験から提案されたGongらの掘進速度予測式²⁾（以後、予測式）を用い、本州四国連絡道路の舞子トンネル導坑工事（掘削径5m、掘進延長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明らかにする。

2. 岩石の力学特性

舞子トンネル周辺の地質はほぼ均一な中生代白亜紀の六甲花崗岩であり、中硬岩または硬岩に分類される。図-1にTBM導坑における一軸圧縮強度(q_u)の分布を示す。この導坑では5mごとにシュミットハンマー試験が、25mごとに一軸圧縮試験が実施されており、図-1に示した q_u は一軸圧縮強度とシュミットハンマー反発係数の回帰式から算出したものである。

3. 掘進データの分析

図-2～4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3種類のデータの平均値、標準偏差および変動係数を示す。3種類の掘進データは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であった。図-2～4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 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

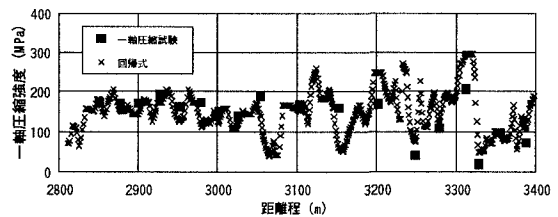


図-1 一軸圧縮強度の推移

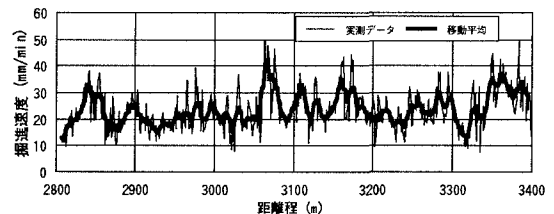


図-2 掘進速度の実測値および移動平均

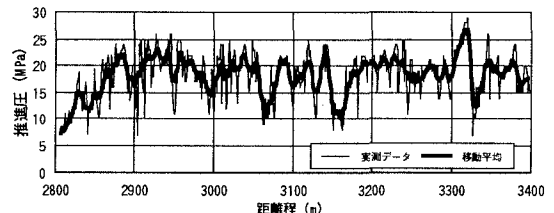


図-3 推進圧の実測値および移動平均

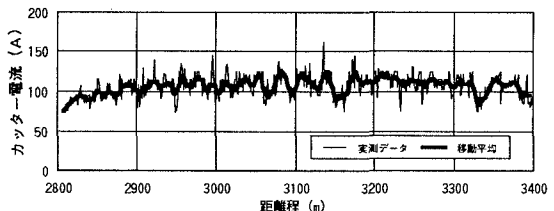


図-4 カッター電流の実測値および移動平均

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、カッター電流が上限値を越えずに一定となるように推進圧が管理された結果であると解釈できる。また、周辺岩盤が一様であったなら掘進速度と推進圧の変動係数は同程度と考えられるので、周辺岩盤の特性変化が掘進速度に影響したと示唆できる。

次に、カッター電流を一定と見なして推進圧と掘進速度の関係に着目して分析する。なお、カッターディスクの磨耗の影響を考慮して、カッターディスクを交換した掘削延長が40～60 mである場合の掘進データのみを抽出して使用した。図-5に掘進速度と推進圧

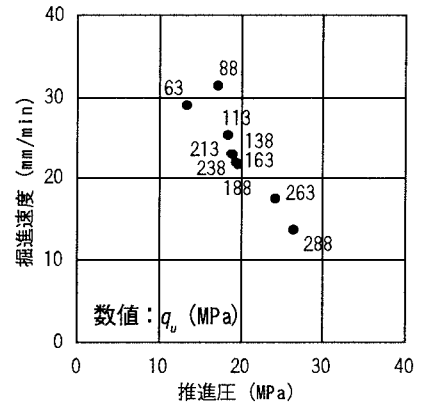


図-5 掘進速度と推進圧の関係

同図では、掘進データ測定位置の岩石の q_u を10カテゴリーに分けて各カテゴリーごとに掘進データを平均して示した。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および岩石の条件が同じ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る^{2), 3)}。しかし、図-5では掘進速度と推進圧の間に負の相関が認められる。また、 q_u が大きい場合に掘進速度が小さく推進圧は大きい。この関係を予測式と比較して図-6に示す。予測式では岩石の種類によらずカッターの貫入量 P_g (掘進速度に比例) はカッターディスクの押し込み荷重 P_d (推進圧に比例) の2乗に比例する。図-6にはTBMの仕様から決まる最大推進圧および最大トルクの上限線も併記した。予測式と掘進データの比較から、掘進データの P_g に対する P_g の減少傾向は q_u の変動に起因した見かけの関係である可能性を示唆できる。さらに、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傾向を見い出せる。すなわち、予測式の q_u の代わりに岩盤の強度変形特性をインデックスとして用いれば、予測式の精度が向上すると考えられる。

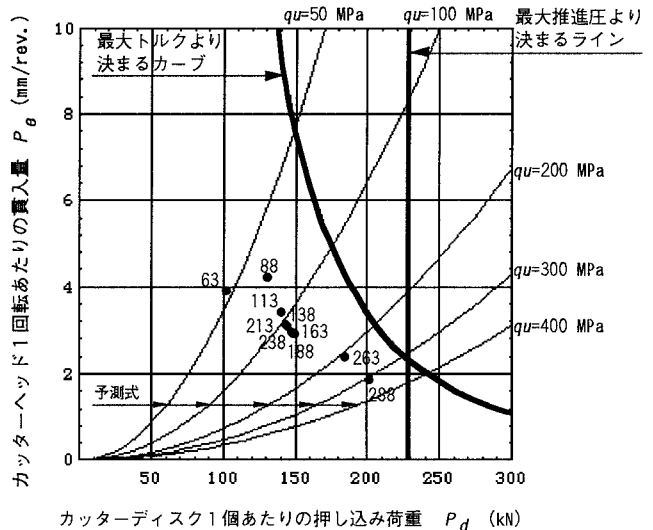


図-6 P_g と P_d の関係 (予測式と掘進データの比較)

4. 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の分布の変化に起因して発現したと解釈し、掘進速度予測精度の向上には亀裂の及ぼす影響の把握が重要であると指摘した。

参考文献

- 1) TBMの緒元と性能予想、小松製作所、1991。
- 2) 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。
- 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。