# 岩盤シールド型TBMにおける 岩盤強度推定の高精度化

亀山 克裕<sup>1\*</sup>・佐藤 隆信<sup>1</sup>・山下 雅之<sup>2</sup>・福井 勝則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西松建設株式会社 海外事業部(〒105-8401東京都港区虎ノ門一丁目20-10)
<sup>2</sup>西松建設株式会社 技術研究所(〒105-8401東京都港区虎ノ門一丁目20-10)
<sup>3</sup>東京大学工学系研究科 システム創成学専攻(〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1)
\*E-mail: kameyama ncc@pchome.com.tw

TBM工法では、掘削時に岩盤に作用する掘削抵抗力から岩盤強度を推定し、それを掘削管理に活用す る事例がある.しかし、岩盤シールド型のような機長の長いTBMでは、機体と地山の摩擦力が大きくなる ため、掘削抵抗力を過大に見積もる可能性があり、その結果、掘削抵抗力から算出した岩盤強度が実際の 岩盤性状と乖離する場合がある.本研究では、岩盤シールド型TBMの適用トンネルにおいて、摩擦力の影 響除去を目的に中折ジャッキに作用する推力を利用した掘削抵抗力の把握を試み、そこから求めた岩盤強 度と掘削ズリの点載荷試験から換算された強度との間に高い相関が得られた.

Key Words : slurry shield TBM, cutting force, articulation jack, rock strength

#### 1. はじめに

TBM掘削時の抵抗力を利用した研究は今日まで多く 報告されている.例えば,掘削体積比エネルギを利用し 支保パターンを選定した事例<sup>1)</sup>,掘削時の管理手法の一 つとしてβ値という指標を用いた事例<sup>2)</sup>,掘削抵抗より 岩盤強度を推定した事例<sup>3,4)</sup>,掘削ズリの二次破砕率を TEIという指標を用い評価した事例<sup>5</sup>などが挙げられる. これらは何れも掘削管理手法の一つとして提案されてい るが,すべてオープン型TBMを対象としたものである.

一方,高圧湧水の大量出水や可燃性ガスの発生が懸念 され、オープン型の硬岩TBMやNATMでは安全なトンネ ル施工が困難と予想される場合には、密閉型泥水式岩盤 シールドのTBMが採用される場合がある.この工法は、 切羽に泥水を充満加圧し掘削を行うため、オープン型 TBMに比べて上述のような地質に対して施工性・安全 性が高いという利点がある.その一方で、密閉型(泥水 式)ではオープン型のように頻繁に切羽状況を直接確認 することは困難であり、地山性状の把握が不十分な状況 で掘削を進めざるを得ないといった問題がある.したが って、本工法で掘削するにあたっては、TBM機械デー タ等を用いて地山の性状を間接的に把握することが重要 な掘削管理項目となる.

このような背景から、著者らは密閉型泥水式岩盤シー

ルドTBMにおいて掘削時の抵抗力から岩盤強度を推定 する手法について検討を行ってきた<sup>9</sup>.

しかし、シールド型TBMは機長が長くなるなど、掘 削抵抗力のうち岩盤掘削以外に費やされる推力を見積も ることは難しい.この点に着目しオープン型ではあるが、 機長の長いダブルシールドTBMにおいて後胴の引き寄 せ力を推力から除去することで岩盤強度推定の高精度化 を図った事例がある<sup>7</sup>.この手法は掘削サイクルに後胴 をリトラクトさせる作業を盛り込む必要があるため、い くぶん手間がかかる.

本研究では、掘削中リアルタイムに岩盤強度を精度よ く把握することを目的とし、中折れジャッキに圧力検出 装置を取り付け、実際に岩盤掘削に費やされる推力の把 握を試みた.また、その抵抗力を利用し岩盤強度の推定 を行うとともに、トルクから算出した強度および掘削ズ リを用いた点載荷試験より換算した岩盤強度との比較を 行った.

#### 2. 対象トンネル

台湾高雄縣北部において導水路築造工事に  $\phi$  6.36mの 密閉型泥水式岩盤シールドTBMが採用され,現在掘削 が行われている曾文越域引水路トンネルを対象とした.



図-1 東トンネル地質縦断図

本トンネルは東トンネル10kmと西トンネル4kmから成り, TBMは東トンネル西坑口から発進し2008年8月末現在約 で1,550mの掘削が終了している.図-1に地質縦断図を示 すとともに、図中には今回対象とした区間(9k+520~ 8k+78,距離程L=1,550m)を記した.東トンネルの主な地 質は、第三紀中新世の砂岩、頁岩および両者の互層から 成り、事前の調査結果では高土被り部の一軸圧縮強さは 130MPa程度にまで達することが予測される.本トンネ ルの地質的特徴は、向斜・背斜の褶曲構造、大規模な断 層・破砕帯、最大1300mに至る高土被りなどであり、掘 削中においては、押出し性地山、地山脆弱部、高圧・大 量湧水に加えて、有毒・可燃性ガス、高温地山の出現が 懸念されている.

#### 3. 中折れジャッキを用いた推力検出

#### (1) 中折れジャッキ圧検出の目的

図-2の推力検出箇所の違いに示すように、オープン型 TBMの場合、機長は比較的短いため、推力が周面摩擦 抵抗力に費やされる力は小さい.しかし、シールド型の 場合、前・後胴が中折れジャッキを介し連結される構造 となるため、機長が一般的に長くなり、それに伴う周面 摩擦抵抗は増大する傾向を示す.TBM掘進時の抵抗力 を利用し推定岩盤強度を算出する場合、実際に岩盤に作 用する推力を見積もることが重要となる.従来は, TBM本体重量に摩擦係数02~0.3を見込んだ摩擦抵抗力 を推力より控除するのが一般であった.しかし,この摩 擦力は地山状況等に応じ変化するため,シールド型 TBMの前胴・後胴を連結する中折れジャッキに圧力検 出装置を取り付け,後胴の周面摩擦・後続台車牽引抵 抗・テールブラシとセグメント間の抵抗力に費やされる 抵抗力などを除去することで,カッタヘッドに作用する 荷重の把握を試みた.

## (2) 中折れジャッキ圧力によるカッタヘッド作用荷重 の推定

中折れジャッキの働きを理解するため、マシンが停止 状態の場合をパターン1、マシンの動きはじめをパター ン2、そしてマシン掘進中をパターン3とする計3つのパ ターンに分類し、中折れジャッキに作用する荷重の検証 を行う.

#### a) マシン停止中(パターン1)

図-3に示すようにマシン停止中の中折れジャッキのヘッド側圧力は、土水圧から前胴の静摩擦力を引いたものとし、式(1)で表せる.

$$F2 = F - F1 \tag{1}$$



図-2 推力検出箇所の違い

- F1:前胴の静摩擦力(kN)
- F2:中折れジャッキヘッド側圧力の推力換算値(kN)

#### b) マシン動きはじめ(パターン2)

図-4に示すようにマシン動きはじめの中折れジャッキ のヘッド側圧力は、土水圧、前胴の最大静摩擦力、カッ タヘッドに作用する力の総和となり式(2)で表せる.

$$F2 = F + F1 + F3 \tag{2}$$

- ここで, F: 土水圧(kN)
  - F1 : 前胴の最大静摩擦力(kN)
  - F2 : 中折れジャッキヘッド側圧力の推力 換算値(kN)
  - F3:カッタヘッドに作用する力(kN)
- c) マシン推進中(パターン3)

図-5に示すようにマシン推進中の中折れジャッキのヘ ッド側圧力は、土水圧、カッタヘッドに作用する力、前 胴の動摩擦抵抗の総和として式(3)で表せる.

F2 = F + F3 + F4 (3)

- ここで, F : 土水圧(kN)
  - F2:中折れジャッキヘッド側圧力の推力換算 値(kN)
  - F3:カッタヘッドに作用する力(kN)

F4:前胴の動摩擦力(kN)

### (3) カッタヘッド作用荷重の推定

上記の式(3)よりF3を導くと式(4)にて示される.

$$F3 = F2 - F - F4$$
 (4)

ここで、密閉型泥水式岩盤シールドTBMの場合、Fは 切羽水圧に該当する既知の値である.また、F2は中折れ ジャッキヘッド側に圧力計を設置することにより、リア ルタイムにその作用圧を把握することができる.従来、 掘削時のTBM本体の動摩擦抵抗は本体重量に摩擦係数 を考慮した一定値として取り扱われてきたが、中折れジ ャッキに圧力検出装置を設けることで、TBM本体の動 摩擦抵抗のうち後胴部については控除することができる. ただし、前胴の動摩擦抵抗を把握する手法について現状 では、試行錯誤を重ねている段階である.

# 4. 岩盤に作用する推力の検討

#### (1) 従来の岩盤に作用する推力の推定手法

密閉型岩盤泥水式TBMにおける掘削以外に費やされ る抵抗力としては、切羽水圧・本体周面摩擦抵抗・フロ



図-6 推力と切羽水圧・フロントグリッパ抵抗 力の関係

ントグリッパ抵抗力(以降FG抵抗力とする)・後続台車牽 引抵抗・テールブラシとセグメント間の抵抗力などが挙 げられる.切羽水圧は、カッタヘッドに作用する水圧で あるため、掘削断面積と水圧の関係より抵抗力を求める ことができる.また、FG抵抗力はグリッパ先端形状が 球面の場合、その摩擦力は押し付け力と同等に評価でき る.本TBMにおける本体周面摩擦抵抗、後続台車牽引 抵抗、テールブラシとセグメント間の抵抗力の合計は、 設計上1.446kNとなっている.

距離程に対する推力の変化を図-6に示す.ここでいう 推力には、切羽水圧抵抗力およびFG抵抗力が含まれて いるため、それぞれの抵抗力についても図中に示した. 図のように、推力とされている値に含まれる切羽水圧抵 抗力の割合が大きく、切羽水圧抵抗力の挙動は推力と調 和的となっている. 図-7は岩盤に作用する推力とトルク の関係を示している.ここでの推力は、岩盤に作用する 力を示すために、図-6中に示した推力から切羽水圧・ FG抵抗力・その他の抵抗力1,446kN(本体周面摩擦抵抗・ 後続台車牽引抵抗・テールブラシとセグメント間の抵抗 力)を控除した<sup>6)</sup>. 同様の理由で、トルクについても無負 荷時特性(空転トルク154kN)が控除されている値を示し ている.

# (2) 中折れジャッキを用いた岩盤に作用する推力の推 定手法

より高い精度で岩盤に作用する推力を求めるために, 測点8k+324(距離程1,304m)において,中折れジャッキに 検出装置を設置した.中折れジャッキは6つの電磁弁に より18本のジャッキが制御されるシステムであるため, ジャッキヘッド側の圧力を計測するための検出装置を6 箇所取り付け,リアルタイムで計測できるようにした.

図-8に中折れジャッキヘッド側圧力から得られた岩盤 に作用する推力を示す.また、図中には前述の従来の方 法を用いて算出した推力も示した.ここで、従来の方法 とは、推力よりマシン設計時において試算される各抵抗 力の設計値(固定値)を除去する手法である.この手法の 場合、TBM本体周面摩擦抵抗は、地山状況に関らず一 定と仮定することになるが、実際には掘削した坑壁の状 況、スクレーパによるズリ掻き揚げ効率など諸要因によ り、大きく抵抗力は変動すると考えられる.図中の中折 れジャッキより算出した推力と従来の手法で求めた推力 の差は、このような原因によると思われる.

また、図-9に掘削毎に記録した距離程に対するTBM 本体に作用する最大静止摩擦抵抗の推移を示す.ここで の最大静止摩擦抵抗は、TBM推進を開始した直後の推 進速度0mmから1mmに変化するときの推力から同時に作 用している水圧抵抗分を控除した値を示している.図中 の最大静止摩擦抵抗力の実測値の推移を見てみると、実



図-7 岩盤に作用する推力とトルクの関係



図-9 距離程に対する最大静止摩擦抵抗力の関係 際は設計値のように一定ではなく、大きく変動すること がわかる.このことから、岩盤に作用する推力を正確に 見積もる上で、TBM本体の摩擦抵抗力(動摩擦抵抗 力)に設計値(定数)を使用することは合理的ではない と考えられる.

岩盤強度の推定には、以下に示す福井ら<sup>334</sup>により提案 された式を用いた.

$$\sigma_c = F/(c_1 \cdot p) \tag{3}$$

$$\sigma_c = T/(c_2 \cdot p^{15}) \tag{4}$$

ここで,  $\sigma_c$ : 岩盤強度(Pa) , F: 推力(N) , T: カッタ トルク(N·m) , p: 貫入量(m) ,  $c_1$ ,  $c_2$ : TBMの諸元より 求めた定数(ここで $c_1$ =20.1m,  $c_2$ =45.0m<sup>15</sup>とする<sup>6</sup>)

従来の推力推定方法を用い算出した推定岩盤強度を 図-10に示す.この結果,距離程1,100m付近までは推力 およびトルクから算出する岩盤強度を比較すると,大局 的に概ね同様の傾向を示していることがわかる.しかし, 距離程度1,100m以降において,推力より算出した岩盤強 度がトルクから算出したものより高い傾向を示している. その原因としては,TBM本体周辺の安定性が若干低下 したことにより掘削断面とTBM本体の隙間に掘削ズリ または,一部の崩落岩塊が堆積することでTBM本体の 周面摩擦抵抗力が増大したことが考えられる.このため, 摩擦抵抗力をより正確に把握するため,距離程1,304mに て中折れジャッキに圧力計を設置し計測を開始した.図 -8からも従来の手法を用いた推力と中折れジャッキから 算出したもので相違が見られることから,とくに後胴部 周辺においての抵抗力が増大している可能性がある.

中折れジャッキの圧力を利用した岩盤へ作用する推力 から岩盤強度を算出した結果を図-11に示す.また,図 中には従来の本体周面摩擦抵抗を一定とした従来の手法 による推力から求めた推定岩盤強度も併せて示した.従 来の手法で求めた推定岩盤強度と掘削ズリの点載荷試験 から求めた換算強度との間に乖離が認められるのに対し, 中折れジャッキから算出した推力を用い求めた推定岩盤 強度は、トルクから算出した強度・点載荷試験結果とも に調和的な傾向が見られる.このことから、従来の手法 により算出した推力では、特に地山の自立性が不安定な 箇所においては、後胴周辺部の本体周面摩擦抵抗力の影 響が十分除去されていないと考えられる.

### 6. まとめ

カッタヘッドが実際に岩盤を押し付けるための推力を より精度よく求め、そこから掘削時の地山性状(岩盤強 度)を正確かつリアルタイムに把握することを目的に、 中折れジャッキヘッド側圧力を利用した手法について検 討を行ってきた.本検討で得られた結果を以下に要約す



る.

- (1) シールド型TBMにおいて中折れジャッキが搭載さ
- れている場合は、ジャッキヘッド側の油圧を検知する ことで岩盤へ伝達される推力をある程度正確に把握す ることができた.
- (2) 中折れジャッキより岩盤に作用する推力を検出す ることで,推定岩盤強度の精度が従来に比べ向上した.
- (3) 中折れジャッキを用いた岩盤へ作用する推力算出 方法には、掘進時の前胴部動摩擦抵抗力の除去ができ ていない.しかし、現状では点載荷試験結果との差異 も少ないことから動摩擦抵抗は比較的小さいことが予 測される.この点について今後、検討を要するところ である.今後の展望として中折れジャッキから岩盤へ 作用する推力と推進ジャッキの推力を比較することで、 後胴部周辺の拘束度合いについて評価が可能になると 思われる.

#### 参考文献

- 1) 木村厚之,木内勉,楠本太:TBM 坑の支保パターン判 定方法に関する考察,土木学会年次学術講演会講演概要 集第3部(B), p519-520, 2002.
- (橋詰茂,井上博之:TBM 掘進データを用いた地山判 定基準の作成,前田技術研究所報,vol.41, p.127-134, 2000.
- 福井勝則,大久保誠介,本間直樹:TBM の掘削抵抗 を利用した岩盤強度の推定,資源と素材,vol.122, p.303-308, 1996.
- 4) 福井勝則,大久保誠介:TBM の掘削抵抗を利用した 岩盤物性の把握,トンネルと地下, Vol.29, pp.121-131, 1997.

- 5) 谷本親伯,仲根達人,津坂仁和,山仲俊一朗,平野 實:TBM 掘削指数(TEI)による掘削効率および地山評 価に関する研究,材料, vo.55, No.8, p777-784, 2006.
- 6) 亀山克裕,佐藤隆信,石山宏二,福井勝則:岩盤シールド型 TBM の掘削抵抗と岩盤特性の検討,第12回岩の力学国内シンポジウム,p897-902,2008.
- 7) 谷卓也,青木智幸,高山正志,工藤正彦: TBM のスキン プレートと地山間の摩擦力を考慮した掘削データによる地 山評価,土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(B), p164-165,1998.

# HIGHLY ACCURATE ESTIMATION OF ROCK STRENGTH ON SLURRY SHIELD TBM

# Katsuhiro KAMEYAMA, Takanobu SATO, Masayuki YAMASHITA and Katsunori FUKUI

Evaluation of rock properties are often used machine data during excavation on TBM tunneling. In case of slurry shield TBM which chamber is closed, main body length is longer than open type TBM. Therefore it is difficult to understand cutting force which actually forced on cutting face. The authors try to obtain thrust forced to the cutting face using hydraulic pressure installed in articulation jack. By the effect, actual cutting force of thrust can be obtained on realtime. Moreover good correlation was able to be confirmed between estimation of rock mass strength calculated by cutting force of thrust and rock strength measured by point load index.