

## 剥離性岩盤におけるトンネルボーリングマシン拘束の原因解明調査

鹿島建設(株) 正会員 ○稲葉 武史 小泉 悠 山本 拓治  
成田 望 十川 誠

## 1. はじめに

本報告における対象トンネルは、総延長が約 4.2km の導水路トンネルであり、当初計画ではその大部分が掘削径 2.8m のトンネルボーリングマシン(以下 TBM とする)により掘削される予定であった。しかし、土被りが 300m を超え始めた地点より、粘板岩からなる地山で想定を上回る押出しが生じ、TBM 機体が地山によって締め付けられ、その摩擦により TBM が前進不能となる「TBM 拘束」現象が発生した。その結果、坑口から約 2950m 掘削した地点で TBM による掘削を断念し、NATM へ工法変更した。TBM 拘束の原因を明らかにすべく、理論解析による検討と、トンネル周辺のゆるみの程度を評価するための岩盤調査を実施したので、その結果について報告する。

## 2. 地質概要及び TBM 諸元

対象トンネルの地質は、主として中生代白亜紀の粘板岩であった。比較的硬質で TBM 掘進に適した地山と判断されていたにも関わらず、TBM 拘束が発生した。写真-1 は TBM 拘束時、矢板工法によって TBM 周辺を拡幅し、観察した切羽状況である。明瞭な層構造が認められる剥離性岩盤であり、当該地点が破碎帯ではないものの、褶曲によって乱されていることが分かった。拡大した写真-2 に示される暗灰色部は粘板岩、白色部は砂岩であり、細かい互層を成していた。事前の地質調査により、粘板岩の一軸圧縮強度は  $20\text{MN/m}^2$  程度で、地山強度比は 2 以上と想定されていたが、切羽で観察された粘板岩は、ハンマーで容易に叩き割ることができ、針貫入試験により推定された一軸圧縮強度は  $2\sim 5\text{MN/m}^2$  であった。なお、全線に渡り湧水は無かった。使用された TBM の諸元は、掘削径 2.8m のダブルシールド型 TBM で、カッターヘッドには岩盤切削用のローラーカッターが 23 個配備されていた。2 回目の拘束発生後、最外周のゲージカッターを調整し、カッターの構造上、取り得る最大のオーバーカット(30mm)を確保した。

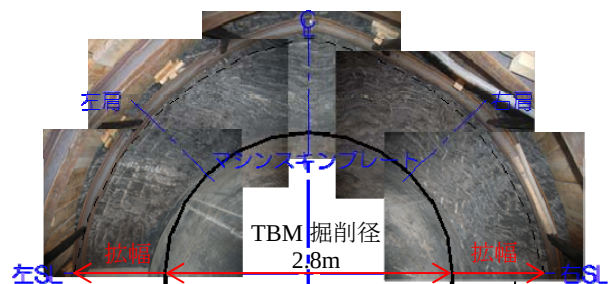


写真-1 TBM 拘束時の切羽状況

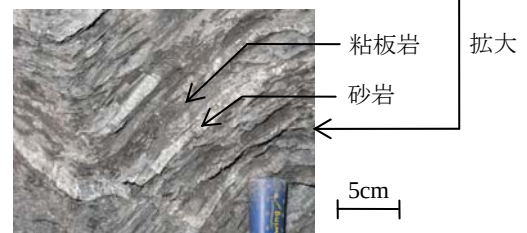


写真-2 粘板岩及び砂岩の細互層

## 3. 理論解析による土被りが TBM 拘束に及ぼす影響検討

土被りが 300m を越えた地点より、TBM 機体の締め付けが頻発し、拘束が発生したことから、土被りの増大、すなわち初期応力の増大が TBM の拘束に有意な影響を与えているものと考えられた。そこで、Kastner の弾塑性理論解を用い、トンネルの半径方向に作用する土圧と内空変位の関係を求めた。一例として、土被り 400m での計算結果を図-1 に示す。オーバーカット量が 30mm であることから、機体が締め付けられる際、内空変位  $d=30\text{mm}$  での土圧を TBM 機体は受けているものと想定した。そし

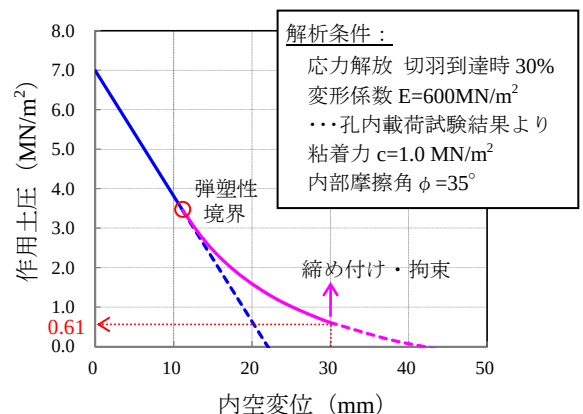


図-1 作用土圧と内空変位の関係 (土被り 400m)

キーワード TBM, 拘束, 剥離性岩盤, ゆるみ

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水 Gr. TEL042-489-6592

て、図-2に示すように、この土圧及びTBM機体の自重(394kN)に起因する摩擦抵抗 $P_1+P_2$ が、TBM機体の後胴を引き寄せる最大推力7212kNを上回ること、TBMは拘束されるものと考えた。地山と機体の摩擦係数を0.5としたときの計算結果を表-1にまとめた。想定した計算条件下において、土被り330mでTBMに土圧が作用し、土被り360mではTBM拘束の可能性が著しく高まることが示され、現場で実際に生じた現象とよく整合した。

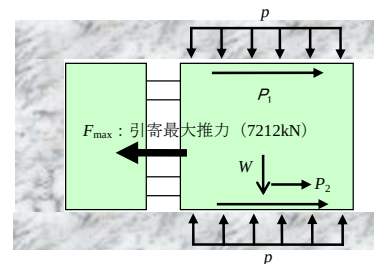


図-2 TBM 機体後胴部引き寄せ時の状況模式図

#### 4. 屈折法坑壁弾性波探査によるゆるみ域の調査

先述したように、掘削対象となった粘板岩は層構造を伴う剥離性岩盤であった。そのため、本工事で想定を上回る変形が生じた要因として、トンネル掘削に伴う応力解放により、これらの潜在的な亀裂が開き、トンネル周辺に大きなゆるみ域が形成されたことが考えられた。そこで、トンネル周辺のゆるみの程度を評価するため、TBM拘束が発生した地点と未発生地点とで、屈折法坑壁弾性波探査を実施した。両地点で得られた弾性波速度(P波速度)のコンターを図-3に示す。同図において、元の粘板岩の速度を3.25~3.5km/s以上とすると、拘束が未発生地点のゆるみ深度が2~2.5m程度であったのに対し、発生地点では6~8mまでゆるみ域が広がっていたことが分かった。2.8mの小口径TBMによる施工であることを考慮すると、想定を大きく上回るゆるみが生じていたと言える。このようにTBMの拘束が発生した地点では、土被りが大きいことに加え、褶曲によって層に平行した亀裂(へき開)が発達していた。さらに、へき開面がトンネル軸に対して水平、すなわち内空変位を増大させる方向を向いており、地山のゆるみ(潜在的な亀裂の開き)が特に進展しやすい状況にあったと考えられた。

表-1 土被りとTBM拘束の可能性

| 土被り<br>(m) | 作用土圧<br>$p$ (MN/m <sup>2</sup> ) | 必要推進力<br>$P_1+P_2$ (kN) | 最大推力 $F_{max}$<br>との関係 | 拘束の可能性 |
|------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|--------|
| 250        | 0.00                             | 197                     | $< F_{max}$            | なし     |
| 300        | 0.00                             | 197                     | $< F_{max}$            | なし     |
| 330        | 0.03                             | 949                     | $< F_{max}$            | 可能性 小  |
| 350        | 0.19                             | 4960                    | $< F_{max}$            | 可能性 中  |
| 360        | 0.31                             | 7969                    | $> F_{max}$            | 可能性 大  |
| 400        | 0.61                             | 15490                   | $> F_{max}$            | 可能性 大  |

#### 5. まとめ

対象トンネルで発生したTBM拘束の原因を解明するため、理論解析による検討と、屈折法弾性波探査を含む各種岩盤試験を実施した。その結果、土被りの増大に伴いTBM拘束の可能性が高まり、特に360mを超えるとその可能性が顕著となること、TBM拘束が発生した地点では6~8mの大きなゆるみ域が形成されていたことが分かった。以上、本事例では、当初の地質調査で得られた一軸圧縮強度や弾性波速度に基づき、掘削対象となる地山は中生代の比較的硬質な粘板岩と評価され、TBM施工が計画された。それにも関わらず、掘削に伴う応力解放及びへき開の影響によって地山が想定以上にゆるみ、過大な変状が発生し得たことから、同種の剥離性岩盤においては、工法やマシンの選定に十分な注意を要することが分かった。

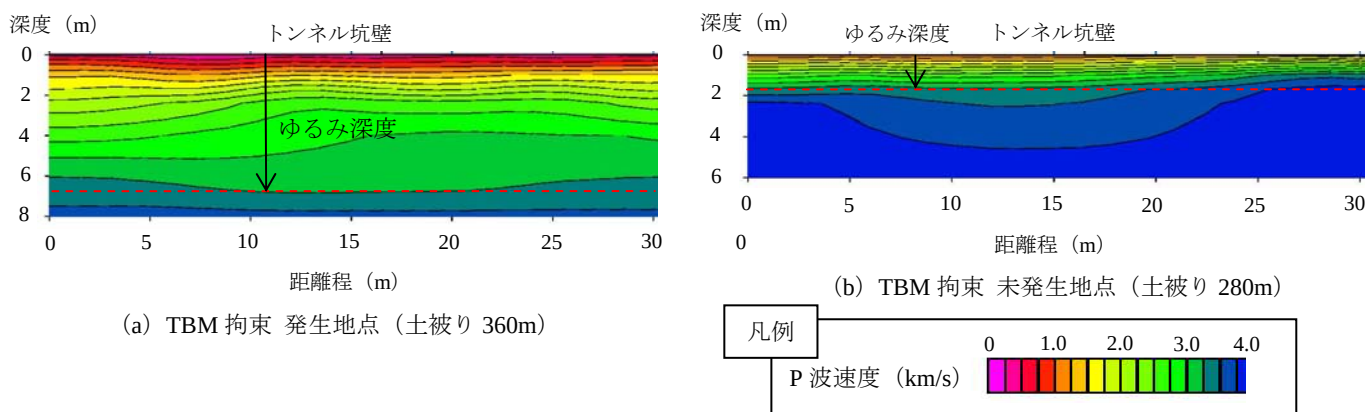


図-3 トンネル周辺の弾性波速度コンター (屈折法弾性波探査結果)