

III-139

TBMの必要推力の算定

近畿大学理工学部 正会員 ○ 久武勝保
 大阪工業大学 正会員 伊藤富雄
 大林組東京本社 正会員 居相好信

1. はじめに

トンネルボーリングマシン(TBM)工法は流体輸送式掘削システム、コンピューターによる施工管理システムを有し、掘削を迅速かつ経済的に進めることができるという利点を持っており、近年その評価が高まっている。しかし、TBMに備えるべき推力の合理的な算定手法は確立されておらず、推力不足によるトラブルが懸念される。そこで本研究では、押し出し性地山にTBM工法を採用する場合について、TBMの掘進速度、外板の剛性、地山の初期応力・時間依存性等を考慮した推力算定手法を提案し、その妥当性を現場実測により検討したのでその結果について報告する。

2. 解析の概要

粘弾性地山内に円形トンネルをTBMで建設する場合を想定し、TBMの外板に作用する経時地圧を求めた後、必要推力を算定することとする。なお、外板厚さは、トンネル直径に比較して十分小であるから、それらは軸力のみで地圧に抵抗するものとし、またトンネル軸方向地山変位は無視する。いま、等方初期応力(P_0)下の粘弾性地山に素掘トンネルを速度 V で掘進する場合において、トンネル境界前方 J 点のトンネル半径方向変位 u は、次式で与えられる¹⁾。

$$u(t) = \alpha_0 \int_0^t \phi(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(v\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに、 $\alpha_0 = DP_0/4$ 、 t は J 点に変位し始めた時を基準にした時間、 $\phi(t)$ はクリープ関数、 D はトンネル直径、 f は u の特性曲線である。実際には、切羽手前にTBM外板があるので、切羽通過後において、グリアランス(=TBM掘削機半径-外板半径)だけトンネル内面が変位すると、外板に地圧が作用することになる。地圧による外板外面の半径方向変位を u^s とし、また P_s をTBMが受ける地圧とすれば、変位 u^s は地圧作用後の時間 t_i を m 個に分割することより、

$$u^s(t_{m+1}) = B_1 \cdot P_s(t_{m+1}) \quad (2)$$

ここに $B_1 = a_0^2 / (h_0 E_0)$ であり、 a_0 、 E_0 、 h_0 はそれぞれトンネル半径、TBM外板の弾性係数、TBM外板厚である。一方TBM外面の変位に関する境界条件は次のように表すことができる。

$$u^s(t_{m+1}) = \Delta u(t_{m+1}) - \frac{a_0}{2} \int_{t_1=0}^{t_{m+1}} \phi(t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} P_s(\tau) d\tau \quad (3)$$

ここに Δu はTBM切羽通過時($t_0 = D/V$)以後における素掘トンネル内面の増分変位であり、式(1)より求められる。ここで式(2)を式(3)に代入し、時間間隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ を十分小にとれば、次のように P_s を順次求めることが出来る。

$$P_s(t_{m+1}) = \frac{\Delta u(t_{m+1}) + K_1(t_{m+1})}{M_2(t_m) + K_2(t_{m+1})} \quad (4)$$

$$M_2(t_m) = B_1, K_2(t_{m+1}) = 0.25 a_0 \{ \phi(0) + \phi(t_{m+1} - t_m) \}$$

$$K_1(t_{m+1}) = 0.25 a_0 \{ \phi(0) - \phi(t_{m+1} - t_m) \} P_s(t_m)$$

$$m-1$$

$$+ \sum_{i=1} \{ P_s(t_{i+1}) + P_s(t_i) \} \{ \phi(t_{m+1} - t_{i+1}) - \phi(t_{m+1} - t_i) \}$$

$$i=1$$

上のようにして求めた $P_s(t_{m+1})$ をTBM外板の全面積にわたって積分したものに、地山とTBMとの間の摩擦係数(μ)を乗じたものが、TBMの推進抵抗力 F となる。

次に、地山の初期応力が等方状態でない場合を考えれば、外板剛性が地山に比べて十分大であり、外板がトンネル変位を完全に拘束すると仮定すれば、トンネル横断面内の外板に作用する地圧 P_k は、トンネル境界

で掘削解放した応力ベクトルを P_{0k} として、次式で求められる¹⁾。 $P_k(Q, t_i) = W(t_i) \cdot P_{0k}(Q)$ 。ここに、 Q は外板外面の位置、 W は、掘進速度 V 、特性曲線 f 、クリープ関数 ϕ 、地圧作用後の時間 t_i の関数であるスカラー量である。上式は、地圧のモードが経時的に変化しないことを表している。しかし、実際には外板は変形すると考えられる。そこで、次に外板の変形を考慮して地圧を求めることとするが、その場合、外板の変形は微小であるとし、また上式から地圧のモードは経時的に変化しないと仮定すれば、 P_0 をトンネル半径方向解放応力 σ_{ra} に置き換えることより二次元初期応力下の地圧 $P_s(t, \theta)$ が、式(4)で近似的に求められる。ただし、 Δu はトンネル横断面内初期応力の平均値 ($(\sigma_1 + \sigma_3)/2$; σ_1, σ_3 は最大、最小主応力) を等方的に解放することと仮定して算定する。したがって、TBMに作用する総抵抗力 F は

$$F = \mu \cdot a_0 \cdot \int_0^{L/V} \int_0^{2\pi} P_s(\tau, \theta) \cdot d\theta \cdot d\tau \quad (5)$$

3. 現場への適用及び考察

推力不足によりTBMを前進させることができなくなった現場に対して、本手法による推力の算定値と、装備していた推力とを比較し、本手法の妥当性について検討する。この付近の地質は、軟弱粘土層、これに伴う脆弱な破碎帯等から構成されている。TBMが地山に拘束され、推力不足により動かなくなったので、TBMの周辺を掘削後2.7mをTBMで掘進し、直ちに後退して内空変位測定を実施した。なお、測定位置は図-1に示す切羽後方1.4mのA、B、C、D点であり、それらの経時測定変位を図-2に示す。TBMの地圧を求めるにはあらかじめ地山の初期応力とクリープ関数を求めておく必要がある。図-2に示す経時変位結果からトンネル横断面内の最大・最小主応力及びクリープ関数を三次元逆解析²⁾より求めたところ、以下の通りであった。 $\sigma_1 = 383.8 \text{ tf/m}^2$, $\sigma_3 = 190.1 \text{ tf/m}^2$, σ_1 の方向 $\theta = 32.9^\circ$, $\phi(t) = \{1 + \ln(1+t)\} / 304.1 \text{ (cm}^2/\text{kgf)}$, t : 日。ただし、 θ は、坑口から見て右側スラッタラインから反時計方向に図った角度である。なお、実働計画掘進速度 $V = 10 \text{ m/day}$ 、トンネル直径 $D = 230 \text{ cm}$ 、摩擦係数 $= 0.3$ 、外板弾性係数 $= 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、外板厚 $= 2.5 \text{ cm}$ 、クリアランス $= 2.5 \text{ cm}$ である。以上より、諸定数が決定されたので、これらを本解析手法に適用してTBMに作用する推進抵抗力 F を算出したところ、 828.8 tf が得られた。一方、TBMに装備されていた推力の値は上記の6割たらずであった。すなわち、TBMに作用する抵抗力の方が装備推力より大となり、TBMが地山に捕捉された原因が解析的に明らかになったものと思われる。

1) 久武: トンネルの合理的設計、施工に関する基礎的研究、大阪大学学位論文、1982

2) 久武・須藤・宮里: トンネルA計測結果を用いた地山初期応力の推定、第21回岩盤力学に関するシンポジウム、1989

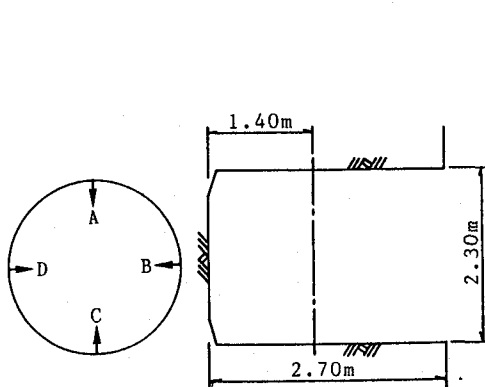


図-1 変位測定位置

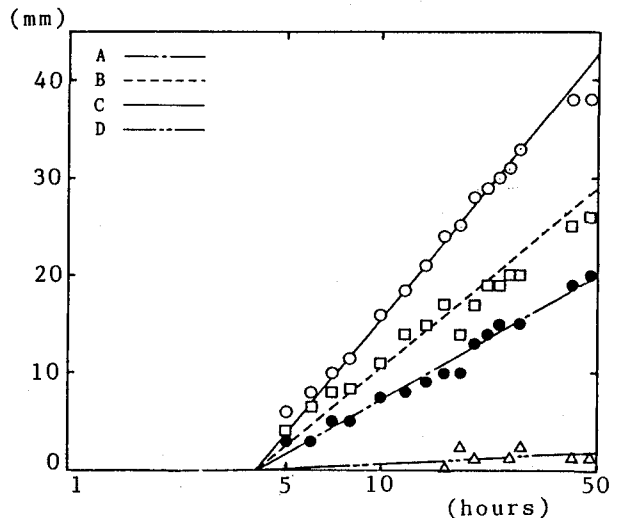


図-2 経時測定変位