

(68) 押し出し性地山におけるTBM推力の研究

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

Determination of Value of Thrust Jack Force for TBM

Masayasu Hisatake Kinki University
Tomio Ito Osaka Institute of Technology
Yoshinobu Iai Ohbayashi Corporation

Abstract

Recently, the tunnel construction method with a tunnel boring machine(TBM) has become very popular in rock ground. Because it equippes computer control system in execution and fluid transportation system of muck. Therefore, high velocity of excavation is expected and low cost of tunnel construction can be promised. But when TBM is used at poor ground with high overburden, TBM is sometimes caught by the ground surrounding the tunnel because of less force of thrust jacks equepped. In other words, there is no method proposed to determine reasonable thrust jack force for TBM. In this paper, in order to determine the thrust jack force reasonably, a method is proposed by taking excavation velocity of TBM, time dependency and initial stresses of the ground and three dimensional deformation characteristics of a tunnel into account. By applying the method to a practical problem, validity of the method is confirmed.

1. はじめに

トンネルボーリングマシン(TBM)工法は流体輸送式ズリ搬出システム、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。TBM工法はシールド工法に比べ、土かぶりの大なる地山で用いられるため、これに作用する地圧は大となり、したがってTBMに装備すべきジャッキの推力も大となる。しかし、TBMに作用する地圧が、TBMの掘進速度、外板の剛性、地山の初期応力および力学特性等の影響を受けるため、装備すべきジャッキ推力の合理的な算定手法は確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、時間依存性を示す地山にTBM工法を採用する場合について、上記諸条件を考慮して装備すべきジャッキ推力の算定手法を提案し、その妥当性を現場実測により検討する。

2. 解析手法

TBMに作用する地圧を求めるには、あらかじめ、素掘トンネルの内面変位を明らかにしておく必要がある。そこで粘弾性地山における素掘トンネル変位をあらかじめ求めておき、次に、TBMが進行する場合について、それに作用する地圧、及び必要なジャッキ推力を以下求めることとする。

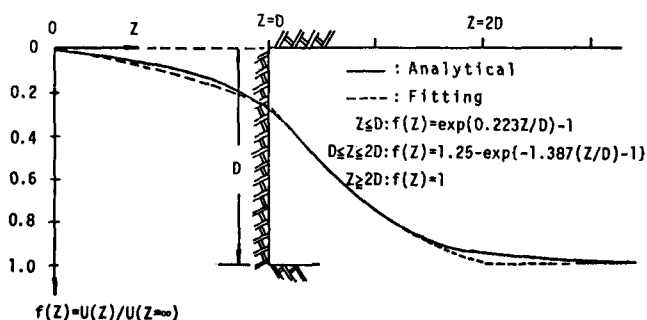


図-1 切羽周辺の変位特性

2-1 掘進速度を考慮した素掘トンネルの内面変位

図-1の実線は等方初期応力 P_0 の作用する弾性地山内に円形トンネルを掘削した場合について、3次元境界要素解析より求めたトンネル境界及びトンネル境界前方地山の半径方向変位 u を、平面歪状態の成立するトンネル境界の半径方向変位で無次元化し、その結果を示したものである。この結果から、切羽の前後それぞれにおいて、トンネル直径 D にほぼ等しい区間を3次元変形領域とみなすことができる。又、無次元化された変位がポアソン比 ν によってあまり変化しないことから、その変位を図-1に示す関数 $f(z)$ によって近似的に表すことができる。ここに z は、切羽の前方距離 D の位置に原点を有し、坑口に向かう座標とする。この $f(z)$ を用いれば、粘弾性地山内に円形トンネルを瞬間的に掘削した後の変位 u は次式で与えられる。

$$u(z) = \alpha_0 \phi(t) f(z) \quad (1)$$

ここに、

$$\alpha_0 = DP_0/4 \quad \phi(t) = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \ln(1+t)$$

t : 時間(日) , $\phi(t)$: クリープ関数

G_1 : せん断弾性係数 , G_2 : 遅延せん断弾性係数

次に、図-1において、トンネルが速度 V で掘進される場合において、トンネル前方 J 点の変位は、次のように積分表示される。

$$u(t) = \alpha_0 \int_0^t \phi(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(v\tau) d\tau \quad (2)$$

ただし、時間 t は、 J 点に変位し始めた時を基準とする。すなわち、式(2)を用いれば、素掘トンネル内面の経時変位は容易に求められ、これは地山のクリープ関数、初期応力、トンネル直径、掘進速度の関数であることがわかる。

2-2 TBMに作用する地圧

図-2に示すように、粘弾性地山内に円形のTBMを速度 V で掘削する場合について、TBMの外板に作用する地圧、及び変位の経時変化を3次的に求めることとする。

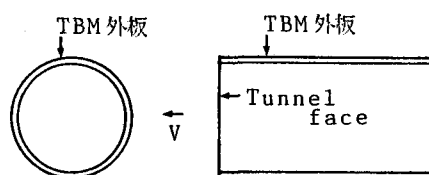


図-2 トンネル断面図

なお、TBM外板の厚さは、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の地山変位は無視する。

さて、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 を m 個に分割することにより、次式のように表すことができる。

$$u^s(t_{m+1}) = B_1 P_s(t_{m+1}) \quad (3)$$

$$B_1 = a_0^2 / (h_0 E_0)$$

ここに 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。また、地山に作用する応力 P は

$$P(t_{m+1}) = P_s(t_{m+1}) \quad (4)$$

一方TBM外面の変位に関する境界条件は次のようにあらわすことができる。

$$u^s(t_{m+1}) = \Delta u(t_{m+1}) - \frac{a_0}{2} \int_{t_1=0}^{t_{m+1}} \phi(t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} P_s(\tau) d\tau \quad (5)$$

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(2)より次式のごとく求められる。

$$\begin{aligned} \Delta u(t_{m+1}) = & a_0 \int_0^{t_{m+1}+t_0} \phi(t_0+t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(v\tau) d\tau \\ & - a_0 \int_0^{t_0} \phi(t_0-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(v\tau) d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

ここで式(3)を式(5)に代入すれば、

$$B_1 P_s(t_{m+1}) = \Delta u(t_{m+1}) - \frac{a_0}{2} \int_{t_1=0}^{t_{m+1}} \phi(t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} P_s(\tau) d\tau \quad (7)$$

ところが上式の積分は、時間間隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ が十分小ならば、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \phi(t_{i+1} - \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} P_s(\tau) d\tau \\ = \phi(0) P_s(t_{i+1}) - \phi(t_{i+1}) P_s(0) - \int_{t_i}^{t_{i+1}} P_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \phi(t_{i+1} - \tau) d\tau \\ \doteq \phi(0) P_s(t_{i+1}) - \phi(t_{i+1}) P_s(0) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \{P_s(t_{i+1}) + P_s(t_i)\} \\ \times \{\phi(t_{i+1} - t_{i+1}) - \phi(t_{i+1} - t_i)\} \end{aligned}$$

したがって、これを式(7)に代入すれば P_s を次式のように順次求めることができる。

$$P_s(t_{m+1}) = \frac{\Delta u(t_{m+1}) + K_1(t_{m+1})}{M_2(t_m) + K_2(t_{m+1})} \quad (8)$$

$$M_2(t_m) = B_1$$

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

$$\begin{aligned} K_1(t_{m+1}) = 0.25 a_0 \{ \{\phi(0) - \phi(t_{m+1} - t_m)\} P_s(t_m) \\ + \sum_{j=1}^{m-1} \{P_s(t_{i+1}) + P_s(t_i)\} \{\phi(t_{m+1} - t_{i+1}) - \phi(t_{m+1} - t_i)\} \} \end{aligned}$$

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。時刻 t_{m+1} での $F(t_{m+1})$ は次式で算出される。

$$F(t_{m+1}) = 2\pi a_0 \mu \int_0^L P_s(s) ds = 2\pi a_0 V \mu \int_0^L P_s(vt) dt \quad (9)$$

(ただし、 L : TBM 長)

3. 現場への適用及び考察

TBM 掘進中、ジャッキ力不足により TBM を前進させることができなくなった現場に対して、本手法によるジャッキ力の算定値と、装備していたジャッキ力とを比較し、本手法の妥当性について検討する。

3-1 現場の地質状況及び変位測定方法

この付近の地質は、軟弱粘土層、これに伴う脆弱な破碎帯、及び細割れ目は多いものの比較的新鮮な岩盤部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 の周辺を拡幅掘削後 2.7 m 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-3 に示す切羽後方 1.4 m の A、B、C、D 点であり、それらの経時測定変位を図-4 に示す。

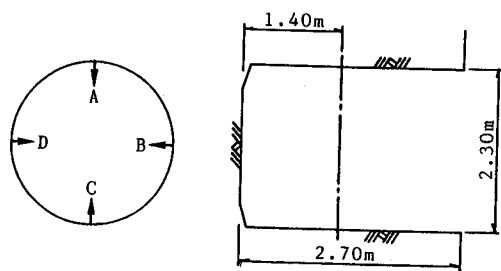


図-3 変位測定位置

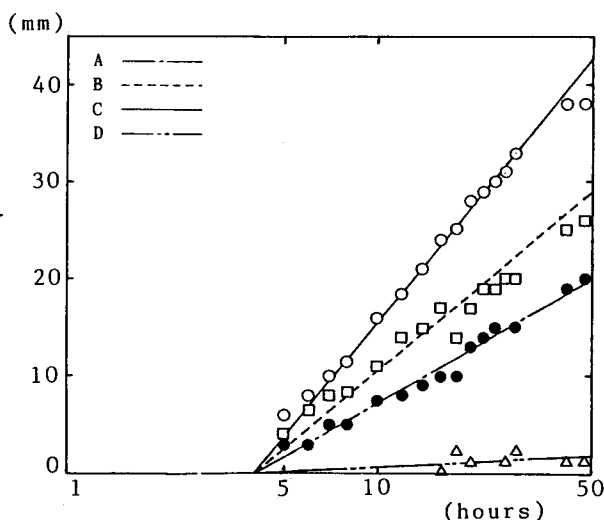


図-4 経時測定変位

3-2 地山の初期応力及びクリープ関数の逆解析

TBMに作用する地圧を求めるには、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。そこで、図-4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 (σ_1 , σ_3) およびクリープ関数を求めたところ、以下の通りであった。

$$\sigma_1 = 383.8 \text{ tf/m}^2, \quad \sigma_3 = 190.1 \text{ tf/m}^2, \quad \sigma_1 \text{ の方向 } \theta = 32.9^\circ$$

$$\phi(t) = \{1 + \ln(1+t)\} / 304.1 \quad (\text{cm}^2/\text{kgf})$$

ただし、 θ は、坑口から見て右側スプリングラインから反時計方向に図った角度である。

ところで、式(9)を導くにあたり、地山の初期応力は等方的としたが実際はそうではない。しかし、TBMの剛性は地山に比べて大であり、従って地山の変位を十分拘束し、また地山と外板との間にすべりが無いものと仮定すれば、上記二主応力からTBMの半径方向初期応力を求め、これを $P_0(\theta)$ に置き換えて F を算定してもよいものと思われる。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 $= 2.1 \times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$ 、外板厚 $= 2.5 \text{ cm}$ 、クリアランス $= (\text{TBM掘削機直径} - \text{TBM外板直径}) / 2 = 2.5 \text{ cm}$ である。

3-3 ジャッキ力の算定

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 を算出したところ以下の結果が得られた。

$$\text{TBMに作用する最大推進抵抗力} = 828.8 \text{ tf}$$

一方、TBMに装備されていたジャッキ力の値は上記の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ジャッキ力より大となり、TBMが地山に捕捉され、身動きがとれなくなった原因が解析的に明らかになったものと思われる。