

トンネル実験における摩擦を考慮した内圧载荷方法

金沢工業大学 正会員 土屋 敬
 金沢工業大学大学院 荒川 恭行

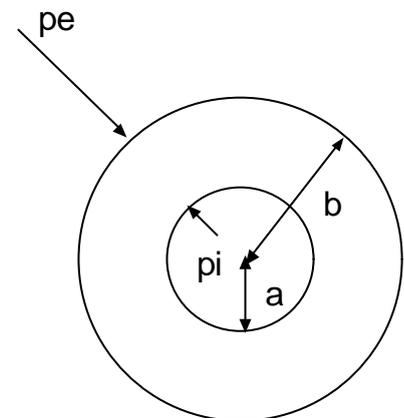
1. はじめに

土屋らはトンネルのロックボルトの最適パターンについて実験を行ってきた。これまで行ってきた実験方法はトンネルの設置された模擬地山の外周から荷重を加える外圧载荷方式であったが、昨年度より実際のトンネル掘削に近い方式として内圧除荷方式を採用した。本方式ではトンネル部分に内圧発生装置を設置した後外圧を加え、内圧を反力として発生させ、この内圧を除荷することにより掘削を表現しようとする。しかし、平面ひずみ型トンネル試験装置において拘束面の摩擦の影響から、反力として期待するだけでは内圧が発生しない問題点がある。このため外圧を加えると同時に内圧もある程度加える必要がある。本論文はこの内圧を加える割合を理論的に導いたものである。

2. トンネル試験の基本値

2次元平面ひずみ条件下の厚さ h 、半径 b の円形地盤の外面に均一な半径方向応力 p_e を作用させた後、半径 a のトンネルを掘削する模型実験(図1)を取り上げ、地盤と装置との間の摩擦抵抗応力を考慮して地盤内の応力と変位を解析的に求める。平面ひずみ状態を保ちながら、地盤外面 $r=b$ に均一な外圧 p_e を作用させて地盤に初期応力を生成させる。実際使用しているトンネル試験装置は正方形であるが、ここでは極座標系で計算するのでそれに相当する円形で解析する。解析で用いたトンネル試験の基本値は表1のように設定して、摩擦の影響を検討する。なお、 r_r は半径方向と円周方向応力、 u は半径方向地盤変位、 μ は地盤とトンネル試験装置との摩擦係数、 ν は地盤のポアソン比である。三軸試験結果から地盤のポアソン比は0.38、変形係数 E は 248.4N/mm^2 である。

パラメータ	基本値
トンネル半径 (a)	200mm
供試地盤厚さ (h)	300mm
供試地盤半径 (b)	700mm
半径方向外圧 (p_e)	1.643N/mm^2
変形係数 (E)	248.4N/mm^2



3. テフロンシートと流動化パラフィンの組合せと摩擦係数

今までテフロンシートとトンネル試験装置との摩擦係数の定量的な試験は行っていなかった。そこで今回テフロンシートとトンネル試験装置との摩擦係数を定量的に明らかにし、テフロンシートと流動化パラフィンのどのような組合せが最適化を明らかにするために、次の A、B、C、D の4種類の組合せについて実験を行い比較をした。以下 I: 鋼盤、T: テフロンシート、P: 流動化パラフィンとする。垂直応力は3種類に変化させているがトンネル実験における 1.643N/mm^2 より小さな範囲でしか実験できなかった。

A: IT 基準面となる面を鋼盤とし、テフロンシートを敷設する。

B: IPT 鋼盤とテフロンシートの上に流動化パラフィンを塗布する。

C: TT 鋼盤とテフロンシートを固定させ、その上にテフロンシートを敷設する。

D: TPT 鋼盤とテフロンシートを固定し、その上に流動化パラフィンを塗布し、テフロンシートを敷設する。

図2より TPT については摩擦係数が極端に大きくなって

図1 均一な半径方向外圧 p_e の作用する供試地盤

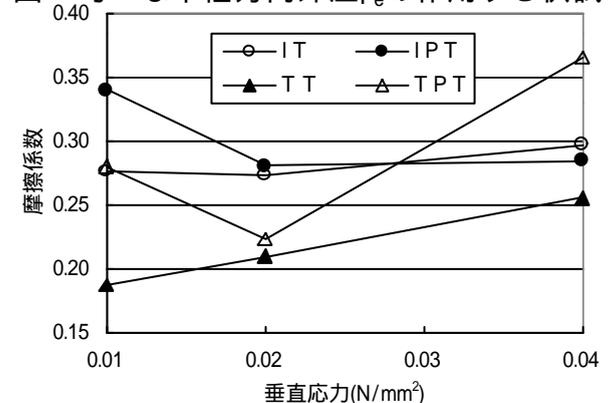


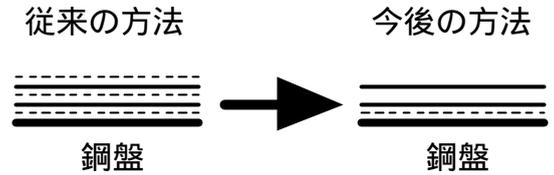
図2 垂直応力と摩擦係数の関係

キーワード: トンネル 模型実験 ロックボルト

連絡先: 〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

金沢工業大学 TEL(076)248-1100(代)

いる。今までの実験ではテフロンシートとテフロンシート間に流動化パラフィン(TPT)を塗布していたが、このパターンは図2から見ると垂直応力が最大の場合に摩擦係数が0.37と大きくなっている。これはテフロンシートと流動化パラフィンの表面張力などによって摩擦が大きくなったものと考えられる。これより今までの実験では摩擦が大きかったため、試験体の中心まで応力が伝わっていなかったことがわかる。また、TTが一番摩擦が小さく摩擦係数は0.26であった。カタログに表示されているテフロンシートの静摩擦係数は0.045でありこれより相当大きい値となった。4種類の敷設方法の摩擦係数の順序は下記のとおりである。TPT>IT>IPT>TTである。



— T : テフロンシート
 ---- P : 流動化パラフィン
 — I : 鋼盤

推定される摩擦係数

0.37

0.26

図3 従来と今後の摩擦係数

以上から、これからの実験は、TTを採用することにする。しかし鋼盤にテフロンシートを付着させるために流動化パラフィンを塗布し、IPTTとする。

4. 検討した4種類の試験条件

地山において摩擦がなければ外圧 p_e がそのまま内部まで伝達されるはずである。もし、内圧発生装置の剛性が地山剛性と同じであれば r_a (掘削径 a におけるトンネル半径方向応力) = p_e であり、またこれと直交する応力 a は $a = p_e$ となるはずである。しかし、摩擦のためにこのようにはならないで、これよりも小さくなる。ある程度の内圧を発生させないと内圧除荷試験が行えない。そこで外圧载荷と同時に内圧を若干加える必要がある。以下にどの程度内圧を加えればよいかを検討する。試験条件は表2に示す。条件1については半径方向外圧 p_e と内圧 $p_i (= r_a)$ が同じ場合である。条件2はトンネル壁面の変位が0である場合である。条件3は半径方向と円周方向の応力がトンネル壁面で同じ場合である。条件4は内圧 p_i が0の場合である。これは実験の目的としてはありえない条件であるが参考のために算出することとした。

表2 試験条件

試験条件	$r_a (= p_i)$	u_a	a
条件1	p_e		
条件2		0	
条件3			r_a
条件4	0		

5. 各試験条件の変位および内圧载荷率

各試験条件の応力と変位の結果は表3に示す。

表3 摩擦係数0.26、ポアソン比0.38で比較したときの相違

	条件1	条件2	条件3	条件4
	$p_i = p_e$	$u_a = 0$	$r_a = a$	$p_i = 0$
$p_i (= r_a) (N/mm^2)$	1.643 (100%)	1.13 (68.8%)	0.91 (55.4%)	0 (0%)
$u_a (mm)$	-0.60	0.00	0.25	1.34
$u_b (mm)$	0.90	1.08	1.15	1.51
$a (N/mm^2)$	0.12 (7.3%)	0.69 (42.0%)	0.91 (55.4%)	1.9 (115.6%)

()内は半径方向外圧に対する割合である。

ちじるしく異なる。従ってこの条件は好ましくない。条件2は内圧 $p_i = 0.688p_e$ 、 $a = 0.420p_e$ となった。この時 $a = 0.61 r_a$ となる。また、この条件 $u_a = 0$ は比較的制御しやすい目標であり現実的な試験方法の一つと考えられる。条件3は $p_i = 0.554p_e$ となった。 $r_a = a$ はトンネル周辺の状態としては理想的であり、トンネルの変形も縮小方向であり、内圧 $p_i = 0.554p_e$ の制御も比較的容易であることから、最も適しているものと考えられる。条件4は参考として算出したものであるが $a = 1.156p_e$ となりトンネル壁面で応力集中を起こしていることがわかる。これらの結果から、掘削前に掘削想定面での地山応力 a 、 r_a が同じであることが望ましいので、条件3により実験することとした。すなわち、今後の試験において外圧载荷時に同時に内圧発生装置により $p_i = 0.554p_e$ を载荷し、 $r_a = a$ とすることとした。