円形シールドトンネル覆工の設計方法に関する基礎的研究（その１）

－基本的な考え方と解析方針－

パシフィックコンサルタンツ株式会社　正会員　○鈴木　久尚[1)]
パシフィックコンサルタンツ株式会社　フェロー　中村　兵次[2)]

１．はじめに

シールドトンネルの覆工の設計には，従来から慣用計算法，修正慣用計算法，およびはり－ばねモデルが広く用いられてきた．そして，これらの計算に使用される土圧は，多くの場合，全土被り土圧かテルツァギーの方法に代表される緩み土圧であった．このような計算モデルと土圧の考え方は，シールドトンネルの施工過程を無視して，完成した覆工に土圧が作用することを想定したものであると考えられる．

しかし，最近のシールド工法では，シールドボイドへ同時あるいは即時に裏込め注入を行う結果，地山の乱れは非常に小さく，そのために，シールド施工後も地山は弾性体に近い状態を保つと考えることができる．地山が弾性体に近いものであるとすると，シールド掘進に伴う地山応力の解放に対して地山も抵抗することも考えられ，結果として，覆工に作用する荷重は，従来から使用されてきた値より小さくなるとも考えられる．

本報告は，こうした観点から覆工の設計法を再検討することを目的としたもので，地山を二次元(平面ひずみ)の有限要素，覆工を弾性のはり要素でモデル化して，シールド工事の施工過程に沿って計算を行い，覆工と地山の挙動を計算により明らかにしようとするものである．

本文は(その１)として，解析の基本的考え方とパラメータの設定等について述べる．

２．有限要素法による施工過程の計算

（１）有限要素計算モデルと計算方法

本解析に用いる有限要素モデルの特徴は次のとおりである．

①地盤は弾性の二次元平面ひずみの面要素で表現し，解析は有効応力解析とする．

②解析領域は，モデルの下端をシールド下端から１Ｄ程度（Ｄ:掘削径），モデルの側面をシールド外面からシールド中心までの深さの３倍の距離をもたした．モデルの下端と側面の境界条件はいずれも固定とする．

③シールド覆工は弾性体とし，はり要素で表現する．

④裏込め材は地山要素と覆工のはり要素の間に挿入する棒要素で表現する．ただし，裏込め材の材令に伴う硬化を考慮し裏込め注入時および完成時でその剛性を変化させる．

⑤地下水と裏込め注入の存在を考慮する．

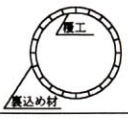
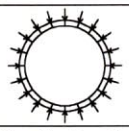
⑥計算は施工過程を考慮するものとし，縦断方向の影響は解放率αで代表させることとした（αは45%とする）．

⑦地盤と裏込材料の重量は，それぞれγ_t=18kN/m^3，γ_d=12kN/m^{3}とする．

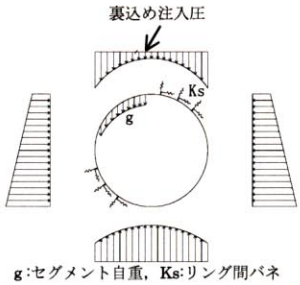
解析ステップは，**図－１**に示すように初期応力解析（STEP－１）を行い，次にSTEP－２でテールボイド部で応力を解放させる．STEP－３は，覆工および裏込め材を設置し，テールボイド内圧力を消散させるステップである．このステップでの荷重変化の入力方法を**図－３**に示す．ただし，覆工にはテールボイド中の裏込め注入圧による断面力を別途に計算し初期応力として導入する．この覆工の初期応力は**図－２**に示すように，はり－ばねモデルを用い，裏込め注入圧を作用させて算定する．なお，覆工に設置した垂直および接線方向のばねは，当該リングの安定に寄与するトンネル軸方向のせん断バネである．

STEP－４は，トンネル軸方向のアーチングの影響を解析するものであり，STEP－２の残りの解放力を作用させる．STEP－５は，シールドトンネル完成後に生じる地表面の載荷および地盤の圧密沈下の影響を計算するステップ

シールドトンネル，覆工，FEM解析，裏込め注入圧，テールボイド
[1)] 東京都新宿区西新宿２－７－１　TEL 03-3344-1903　FAX 03-3344-1906
[2)] 東京都多摩市関戸１－７－５　TEL 042-372-0111　FAX 042-372-6368

STEP-1	STEP-2	STEP-3	STEP-4	STEP-5
初期応力の計算	応力解放	テールボイド圧力の消散	縦方向のアーチングの影響	地表載荷および地盤沈下
				STEP-5(1) 載荷重 (q=100Kn/m²) STEP-5(2) 地盤沈下 (鉛直方向のみに強制ひずみを与える)
設定K_0を用いる ただし，STEP-2 以降は設定した地盤の ν とする．	$\sigma_r = \alpha\ (\sigma_0 + p_w - p_d)$ σ_r：シールド掘削面外周に作用させる荷重 σ_0：初期地盤応力（有効応力） p_w：間隙水圧 p_d：裏込め注入圧力	STEP-2 に対して，セグメントリングおよび裏込め材を設置する	$\sigma_{rf} = (1-\alpha)(\sigma_0 + p_w - p_d)$ σ_{rf}：縦方向のアーチングの影響による荷重	

図－１　解析ステップ



g：セグメント自重，Ks：リング間バネ

図－２　ﾃｰﾙﾎﾞｲﾄﾞ中の覆工の計算
（はり－ばねモデル）

表－１　有限要素法による計算ケース

計算ケース		シールドトンネルの覆工剛性とリング間ばね影響		地盤条件（静止土圧係数，変形係数）			土被りの厚さの影響	裏込め注入圧力の影響	完成後の地盤沈下および地表面載荷重の影響		
		覆工の剛性	リング間ばね	静止土圧係数	変形係数	ポアソン比	地下水	土被り厚	裏込注入圧	地盤沈下	地表面荷重
		EI (kN/m²)	K_s(kN/m²)	K_0	E (kN/m²)	ν	有無	H (m)	p_d (kN/m²)	δ (m)	q_0 (kN/m²)
1	**標準 N**	100,000	100,000	0.5	100,000	0.4	天端＋5m	15	150	1%	100
2	L-1	1,000,000									
3	L-2	10,000									
4	S-1	100,000	10,000								
5	S-2		1,000,000								
6	K-1		100,000	0.3							
7	K-2			0.8							
8	E-1			0.5	30,000					○	○
9	E-2				300,000					○	○
10	P-1				100,000	0.30					
11	P-2					0.48					
12	W-1					0.4	無し				
13	W-2						天端＋15m				
14	H-1						天端＋5m	5		○	○
15	H-2							40		○	○
16	B-1							15	50		
17	B-2								100		
18	B-3								250		

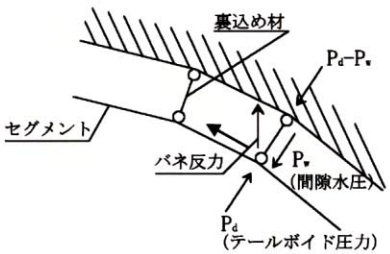
注）トンネル掘削径を 6.24m，シールドリングの径を 6.0m とする．裏込め注入圧はトンネル天端での値である．

である．地表面に載荷する荷重は q=100kN/m²とする．また，地盤の圧密沈下は各有限要素の鉛直方向に対して 1%のひずみを与えることにより表現する．

（２）計算条件

パラメータとしては，①トンネル断面構造に関するもの（覆工の剛性，リング間ばね定数），②地盤に関するもの（静止土圧係数，地盤の変形係数とポアソン比，地下水状況），③土被り厚，④施工に関するもの（裏込め注入圧力），⑤完成後の変化に関するもの（地表面載荷重，地盤沈下）を考えた．

これらのパラメータを全部同時に変動させると，計算ケースが非常に多くなるので，最初に基本ケースを設定して，そのパラメータを**表－１**に示すように１個づつ変えることとした．



図－３　ﾃｰﾙﾎﾞｲﾄﾞ圧力の消散

基本ケース［N］は，各パラメータの変動を考慮して設定した標準的なモデルである．すなわち土被り 15m (2.5D) の地盤をトンネル外径 6m のシールドが掘進することを想定したものであり，覆工構造には厚さ 30 cmの RC セグメント用い，地盤条件としては変形係数が E_0=100,000kN/m²の良好な地盤とした．

なお，トンネルの大きさは，中口径として標準的な外径 6m のシールドトンネル断面を設定した．

（３）水平地盤反力係数の計算方法

計算結果から，水平地盤反力係数（k_{fs}）は次式より求めた．

$$k_{fs} = \frac{\Delta \sigma_{hs}}{\Delta \delta_{hs}}$$

ここに、$\Delta \sigma_{hs}$：[step-3] [step-4] [step-5]の水平方向土圧の増分の和（$\Delta \sigma_{hs} = \Delta \sigma_3 + \Delta \sigma_4 + \Delta \sigma_5$）

$\Delta \delta_{hs}$：[step-3] [step-4] [step-5]の水平方向変位の増分の和（$\Delta \delta_{hs} = \Delta \delta_3 + \Delta \delta_4 + \Delta \delta_5$）