

III-B 155 二次覆工を有するシールドトンネル横断方向の解析事例

富士総合研究所 正会員 加藤大輔
日本工営 正会員 栗木 実
富士総合研究所 正会員 真鍋 尚

1. はじめに 近年のわが国のシールドトンネルの覆工設計では、二次覆工が施工されたあとに、覆工荷重が除去あるいは累加されるような他の地中構造物の近接施工に伴い、覆工断面力の変化、断面変形を生じることから設計段階から積極的に二次覆工部材の強度を期待する場合も少なくない。さらに一次覆工施工後から土圧が十分安定した後に行なわれる二次覆工の打設に伴い、トンネル全体の自重増に伴う覆工断面力に与える影響は、現状設計において考慮されず、これらの影響が覆工断面力を増加させる場合にあっては、無視できないと考えられる。

著者らはシールドトンネルをはり-ばね構造にモデル化した解析モデルを用い、一次覆工施工後、二次覆工施工後それぞれの覆工断面力、断面変形を求めるステップ解析を行ない、トンネル構築後の土水圧荷重条件下での覆工応力状態を評価する解析モデルの構築を図った。本論では、現場施工手順を考慮した一、二次覆工間の相互作用の影響を取り入れた解析手法を述べ、解析例を示す。

2. 一、二次覆工間の相互作用を考慮した解析モデル つぎに二次覆工が打設されたシールドトンネルの一、二次覆工間の相互作用を考慮したモデル化について考える。モデル化として村上-小泉の方法(M-K法)を用いる^[1]。したがって、基本的には二次覆工もセグメントと同様にはり部材としてモデル化する。また一次覆工であるセグメントと二次覆工ははりの重ね構造としてモデル化され、両覆工間の力の伝達はジベルおよび防水シート等の両覆工間に存在する部材をモデル化したばねを介して伝達される。本論では、一、二次覆工間にはジベル筋があると想定した。この場合、ジベル筋を評価するばねは法線、接線方向の成分を有すると考え、それらのばね定数はジベル筋と二次覆工コンクリートの付着特性を考慮して算出した^[2,3]。この場合、圧縮の時は剛とするが、引張が作用した時はコンクリートの付着特性を考慮して導出した引張剛性 E_{RC} を用いて、次式より算出した。

$$K_{\text{法線}} = \frac{E_{RC} \cdot A}{W} \quad K_{\text{接線}} = \frac{G \cdot A}{D} \quad (1)$$

ここで A :ジベル筋断面積、 W :一、二次覆工間離間量、 G :ジベル筋せん断弾性剛性、 D :ジベル筋直径である。したがって、(1)式より法線方向のばねは一、二次覆工間の離間量によってばね定数が変化することに注意しなければならない。また、ジベル筋が存在しない箇所では引張が作用した場合はばね値は零とし、圧縮では剛とした。

また、施工現場において二次覆工コンクリート打設は一次覆工施工後、土圧が十分安定のち行なわれる。したがって、二次覆工打設時には土水圧荷重によってすでに一次覆工が変形しており、変形された一次覆工に二次覆工が巻かれることになる。これらを考慮すると従来のように一、二次覆工双方で土水圧を受け持つと考えると二次覆工発生断面力が過大に評価される恐れがある。そこで著者らは二次覆工に発生する断面力または応力状態をより正確に把握するために現場施工手順を考慮したステップ解析を取り入れた。まずStep 1として一次覆工であるセグメントリングのみに土水圧とセグメントリングによる自重を負荷させ、セグメントリングに発生する断面力と断面変形を求める。さらにStep 2ではすでに変形した一次覆工に対して二次覆工を巻きつけ、二次覆工の自重によるセグメントリングおよび二次覆工の断面力と断面変形をそれぞれ求める。最終StepとしてStep 1でセグメントリングに発生する断面力とStep 2において発生する断面力を重ね合わせてセグメントリングに発生する断面力として評価する。ただし、各Stepにおいて地盤による支持が期待できるものとし、地盤ばねを配し、収束計算によってその切り離しを行なう。

3. 解析例と解析結果 次にステップ解析法の解析例を示す。ここでは、解析モデルとして図1に示すような重複円形形状(Model A)と単円形状(Model B)を用いて、同一地盤条件のもとに計算を行なった。ただし、重複円形形状モデルと単円形状モデルは形状が異なるだけで荷重、剛性、継手などの物性値はすべて同じとした。それらの物性値を表1に示す。また、図3には一、二次覆工間の離間量による法線方向ばね定数の履歴を示す。さらにstep解析を用いた場合と一、二次覆工双方で土水圧を受け持つと考えた場合の断面力の比較を表2に表す。図3,4はModel AおよびModel Bに発生する断面力図(曲げモーメント、軸力)を表しており、図5では一、二次覆工で受け持つ場合のModel Aに発生する断面力分布を示す。なお、Model Aのインパート部は二次覆工とは考えず、この部分の断面力は表示していない。

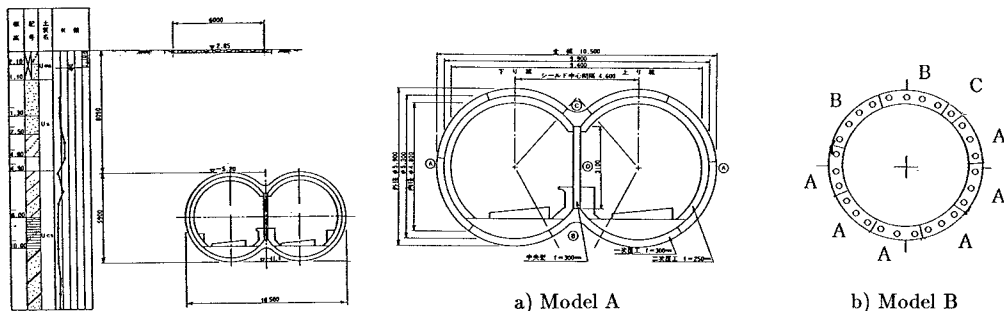


図1 解析対象とするシールド概要図と地盤条件

表 1 解析物性値

構工部材	一次覆工		二次覆工	継手ばね	セグメント間継手		リング間継手	一・二次覆工間のばね定数（横断側）		地盤ばねのばね定数（受動側）
	A-B-C型	D型			A-A-B-C間	D-B-C間		法線方向のばね定数 (tf/m)	円一15参照 非線形解析 (tf/m)	
板 (m)	0.8	0.32	1.6		7.377*10 ⁴	3.768*10 ⁴	6.554*10 ⁴			
厚 (m)	0.3	0.3	0.25							
断面積 (m ²)	2.4*10 ⁻¹	9.6*10 ⁻²	0.4							
断面二次モーメント (m ⁴)	1.8*10 ⁻³	7.2*10 ⁻⁴	2.083*10 ⁻³		5.938*10 ³ (正曲げ) 1.809*10 ³ (負曲げ)	3.747*10 ³	—			
弾性係数 (tf/m ²)	3.6*10 ⁸	3.6*10 ⁸	2.452*10 ⁸							
単位長重量 (tf/m)	6.2*10 ⁻¹	2.5*10 ⁻¹	9.6*10 ⁻¹							
				せん断ばねのばね定数 (tf/m)	∞					

表 2 一、二次覆工双方で受け持つ場合との比較

		セグメント 曲げモーメント		セグメント 軸力		二次覆工 曲げモーメント		二次覆工 軸力	
		正曲げ	負曲げ	最大	最小	正曲げ	負曲げ	最大	最小
Model A	ステップ	8.019	1.463	65.44	28.68	1.651	0.9438	1.856	-1.322
	一、二次覆工	6.866	1.790	66.13	14.99	1.739	2.480	29.29	-0.048
Model B	ステップ	3.212	1.568	43.21	26.09	1.557	-0.9231	4.734	1.032
	一、二次覆工	2.239	2.388	34.96	19.55	3.471	2.446	23.62	16.64

軸力（-）：引張を表す (t, m)

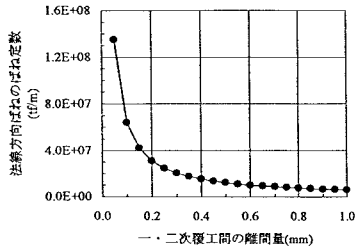


図 2 一、二次覆工間離間量を考慮したばね定数

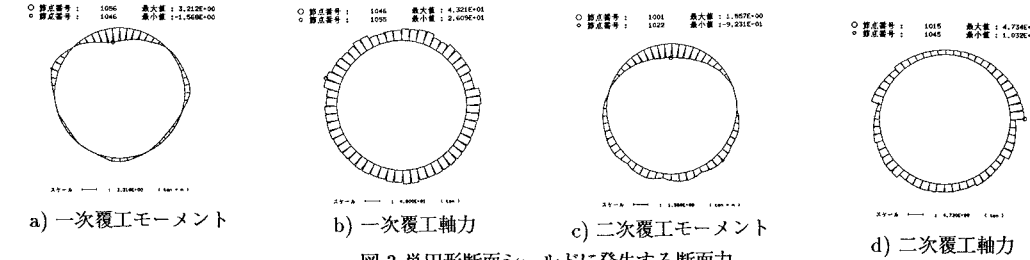


図 3 単円形断面シールドに発生する断面力

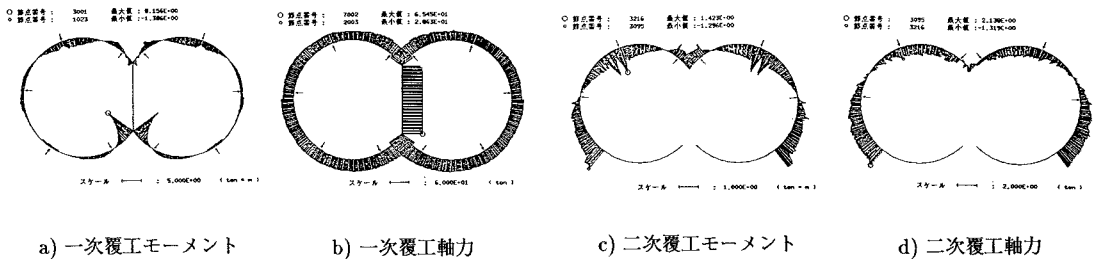


図 4 重複円形断面シールドに発生する断面力 (step 解析)

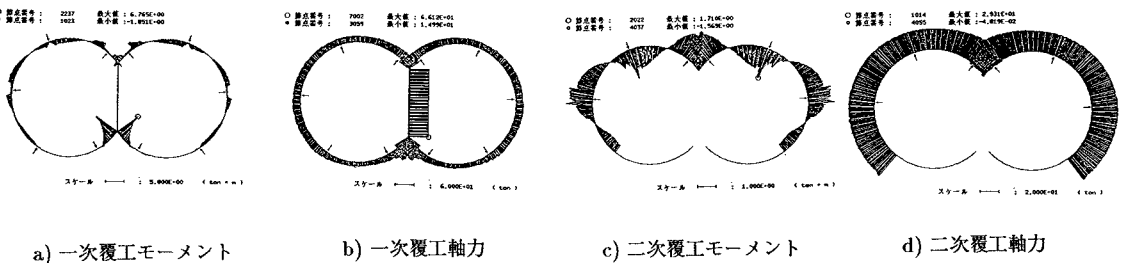


図 5 重複円形断面シールドに発生する断面力 (一、二次覆工双方で受け持つ場合)

4. おわりに 本論では二次覆工を有するシールドトンネルの横断方向解析を述べ、解析事例を示した。step 解析を用いた場合とそうでない場合では図 4.5 より二次覆工に発生する断面力に顕著な違いがみられた。特に軸力の引張、圧縮領域の分布が異なり、定量的にも相違が現れた。また、曲げモーメントの正負の分布も異なる結果となった。一方、一次覆工に発生する断面力は双方とも近い値である。

- 参考文献 [1] 村上 博智, 小泉 淳, シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文集, 296, 73, (1980)
 [2] 吉川 弘道, 田辺忠顕, 鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究, 土木学会論文集, 366, 93, (1986)
 [3] 高松 伸行, 二次覆工されたシールドトンネルの軸方向解析モデルに関する研究, 早稲田大学学位論文, (1994)