

I-551 シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果

— （その2）プレストレス導入時の軸力—軸ひずみ関係の簡便なモデル化とその試算例 —

（機）間組技術研究所 正会員 辻田 満 正会員 脇田 和誌
 同 上 正会員 三原 正哉 正会員 松原 勝己
 同 上 正会員 新井 伸夫

1. まえがき

「シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果（その1）」¹⁾において述べたように、筆者らは、シールドトンネル軸方向にプレストレスを導入することにより、トンネル軸方向の引張剛性が増大し、かつ、セグメント間の目開きが遅れるという定性的傾向を、小型直方体セグメントを用いて実験的に確認した。本報では、この実験結果に基づいて、引張外力によりプレストレス導入軸力が開放されるまではシールドトンネルの圧縮剛性で変形し、プレストレス導入軸力の開放後に継手部引張応力が発生するという簡便的な軸方向変形特性を仮定して、地震時にシールドトンネルに発生する断面力の試算を行った。

シールドトンネルに生じる断面力については、川島ら²⁾の提案している方法において、境界条件を若干修正することにより算定を行った。

2. 断面力算定におけるトンネル軸剛性のモデル化と基本的仮定

シールドトンネルに発生する軸方向力 N と伸びひずみ ϵ との間に、図1に示すような関係を仮定する。図1において、 N_0 はプレストレス導入軸力、 $(EA)_{eq}^c$ および $(EA)_{eq}^t$ はトンネルの等価圧縮剛性、等価引張剛性を表している。なお、継手部への応力は、 $N \geq N_0$ の領域で発生するものとした。解析方法は、図2に示すように、無限長のトンネルに無限長の正弦的な変位を地盤バネを介してトンネルに作用させて応答を求める応答変位法を用いた。ここに、トンネル軸方向の単位長さ当たりの地盤バネ k_g は一様であると仮定した。

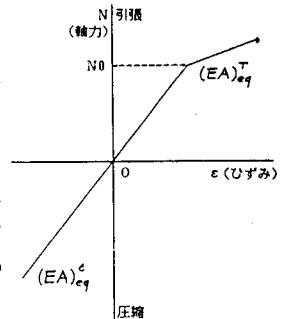


図2の注目領域の点Aでのトンネル軸方向の変位を $\delta(x)$ とすれば、軸方向 図1 軸力—軸ひずみ関係のつり合い式、図1に示した軸力—軸ひずみ関係および軸ひずみと軸変位の関係より、次式で表される δ に関する2階常微分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} N \leq N_0 ; (EA)_{eq}^c \cdot d^2 \delta / dx^2 - k_g \delta &= -k_g U \\ N \geq N_0 ; (EA)_{eq}^t \cdot d^2 \delta / dx^2 - k_g \delta &= -k_g U \end{aligned} \right\} (1)$$

本報では、式(1)における地盤変位 U を、 $U = U_0 \sin(2\pi x/L)$ とした。ここに、 L は地震動の波長、 U_0 は変位振幅である。なお、境界条件としては、次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \delta_r(0) &= 0, \delta_c(L/2) = 0, \delta_r(\eta) = \delta_c(\eta) \\ (d\delta_r/dx)_{x=\eta} &= (d\delta_c/dx)_{x=\eta} \\ N_0 &= (EA)_{eq}^c (d\delta_c/dx)_{x=\eta} \end{aligned} \right\} (2)$$

式(2)において、 η は、 $N \geq N_0$ と $N \leq N_0$ の境界を表す位置である。また、川島ら²⁾は、式(2)の最後の境界条件で $N_0 = 0$ とした場合の解を誘導している。したがって、本報の解で $N_0 = 0$ とすれば、川島らの解と一致する。

3. 計算に用いたシールドトンネルの断面諸量および計算結果

表1および2に、計算に用いたシールドトンネル1次覆工、リング継ぎボルトおよび2次覆工の諸元を示

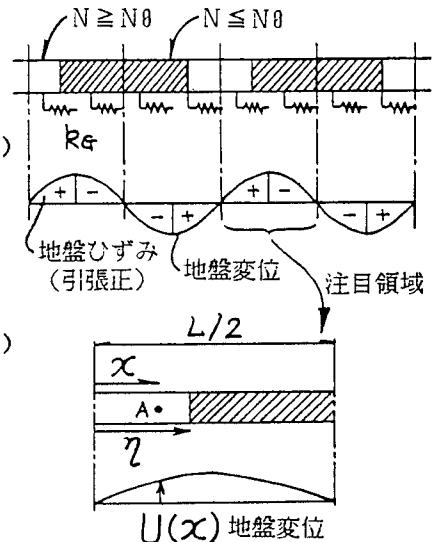


図2 解析モデル（川島ら²⁾を修正）

す。断面力の算定にあたっては、等価引張剛性の評価に必要となる継手部の剛性として、継手ボルトの軸剛性を用いた。また、2次覆工の影響を考慮した場合については、1次覆工と2次覆工を並列バネとしてモデル化した。

表3に、入力地盤変位振幅 U_0 、波長 L 、軸方向地盤バネ k_g および導入プレストレス N_0 を種々変化させた時に、シールドトンネルに発生する軸方向断面力の計算結果（2次覆工を考慮しない場合）を示している。表3から、ケースAからEまでについて、軸方向導入プレストレス量が大きくなるほど、発生する引張軸力は大きくなるが、発生するひずみ量と継ぎ手1本当りの引張力は減少していることがわかる。

表4は、2次覆工を考慮した場合のトンネルに発生する断面力の計算結果を示している。表4によれば、表3と同様の傾向がみられ、2次覆工を考慮するとトンネル全体に発生する引張軸力は増大するが、継ぎ手に働く引張力は緩和される傾向にあることがわかる。

図3は、各ケースごとの継ぎ手1本当りの引張力を比較したものであり、軸方向プレストレスを導入することによって継手への発生応力の減少がみられる。図3によれば、1次覆工への軸方向導入プレストレス量として、50 kg/cm²を考慮すれば、ケースAを除いて、継ぎ手1本当りの引張力が、ボルト1本当りの降伏耐力5.2tfよりも下回っており、プレストレスの効果がうかがえる。

4. あとがき

本報では、小型セグメントを用いた実験結果の定性的傾向に基づいて、シールドトンネル軸方向にプレストレスを導入した時のトンネル軸剛性の簡便なモデル化を提示するとともに、地震時に発生する断面力の試算を行った。

その結果によれば、プレストレス導入により継ぎ手に発生する引張力が緩和される傾向がみられた。今後は、先に示した実験結果¹⁾の詳細な分析を進めることにより、継ぎ手部の剛性評価方法やプレストレス導入時の引張外力に対する剛性評価方法の検討を行い、設計への適用に向けてより現実的なモデル化の方法を考えてゆきたいと思っている。

<参考文献>1)辻田満、脇田和試、三原正哉、松原勝巳、新井伸夫；シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果 ―（その1）RCセグメント模型を用いた軸方向交番荷重実験―、第43回土木学会年次学術講演会第1部門、昭和63年10月 2)川島一彦、大日方尚巳、志波由起夫、加納尚史；シールドセグメントの耐震性に関する研究 ―（その1）シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用―、土木研究所資料、No.2262、昭和60年10月

表1 1次覆工と2次覆工の諸元

	1次覆工	2次覆工
外 径 (mm)	13400	12200
内 径 (mm)	12200	11400
厚 さ (mm)	600	400
断 面 積 (m ²)	24.13	14.83
ヤング係数(t/m ²)	3.75×10^6	2.7×10^6

表2 ボルトの諸元

本 数 (本)	62
呼び径	M36
強度区分	8.8
ヤング係数(t/m ²)	2.1×10^7

表3 軸方向断面力計算結果（2次覆工なし）

ケース	プレストレス N ₀ (kg/cm ²)	最大引張軸力 N _t (tonf)	最大引張ひずみ E _t ($\times 10^{-4}$)	最大圧縮軸力 N _c (tonf)	最大圧縮ひずみ E _c ($\times 10^{-4}$)	継ぎ手1本当りの 引張力(tonf)	入力データ
A	0	6508.9	3.04	22570.0	2.49	105.0	$U_0=2.616$ $L=494.97$ $k_g=400000$ /m/m
	25	11059.4	3.02	22324.5	2.47	81.1	
	50	15537.6	2.96	22162.9	2.45	56.0	
B	0	3761.0	1.76	10908.3	1.21	60.7	$U_0=2.051$ $L=494.97$ $k_g=100000$ /m/m
	25	7775.9	1.48	9916.1	1.10	28.1	
	50	9578.8	1.06	9578.8	1.06	0	
C	0	4131.7	1.93	13039.3	1.44	66.6	$U_0=1.858$ $L=494.97$ $k_g=200000$ /m/m
	25	8485.8	1.81	12505.0	1.38	39.6	
	50	12177.2	1.39	12215.8	1.35	1.8	
D	0	3606.4	1.69	12609.3	1.39	58.2	$U_0=1.485$ $L=509.12$ $k_g=400000$ /m/m
	25	8140.8	1.65	12415.0	1.37	34.0	
	50	12235.0	1.41	12334.1	1.36	2.7	
E	0	4809.3	2.25	18201.0	2.01	77.6	$U_0=2.051$ $L=551.54$ $k_g=700000$ /m/m
	25	9407.7	2.24	18142.7	2.00	54.4	
	50	13972.8	2.22	18116.8	2.00	30.8	

表4 軸方向断面力計算結果（2次覆工あり）

ケース	N ₀ (kg/cm ²)	最大引張ひずみ E _{tmax} ($\times 10^{-4}$)	1次覆工 引張軸力 (tonf)	2次覆工 引張軸力 (tonf)	最大引張ひずみ E _{tmax} ($\times 10^{-4}$)	1次覆工 圧縮軸力 (tonf)	2次覆工 圧縮軸力 (tonf)	継ぎ手1本当りの 引張力(tonf)	入力データ
A	0	2.61	5585.4	10440.0	2.24	20272.0	8960.0	90.1	$U_0=2.616$ $L=494.97$ $k_g=400000$ /m/m
	25	2.56	10084.4	10240.0	2.21	20000.5	8840.0	65.4	
	50	2.47	14497.9	9680.0	2.19	19819.5	8760.0	39.2	
B	0	1.17	2505.8	4680.0	0.93	8452.7	3736.0	40.4	$U_0=2.051$ $L=494.97$ $k_g=100000$ /m/m
	25	0.95	6645.5	3812.0	0.85	7676.4	3392.0	9.9	
	50	0.84	7583.9	3352.0	0.84	7583.9	3352.0	0	
C	0	1.48	3167.2	5920.0	1.21	10950.5	4840.0	51.1	$U_0=1.858$ $L=494.97$ $k_g=200000$ /m/m
	25	1.35	7495.0	5400.0	1.16	10498.0	4640.0	25.6	
	50	1.14	10317.0	4560.0	1.14	10317.0	4560.0	0	
D	0	1.46	3124.4	5840.0	1.26	11403.0	5040.0	50.4	$U_0=1.485$ $L=509.12$ $k_g=400000$ /m/m
	25	1.40	7602.0	5600.0	1.23	11151.5	4920.0	25.3	
	50	1.22	11041.0	4680.0	1.22	11041.0	4680.0	0	
E	0	2.09	4472.6	8560.0	1.90	17193.0	7600.0	72.1	$U_0=2.051$ $L=551.54$ $k_g=700000$ /m/m
	25	2.07	9025.8	8280.0	1.89	17104.5	7560.0	48.4	
	50	2.05	13556.5	8120.0	1.88	17014.0	7520.0	24.1	

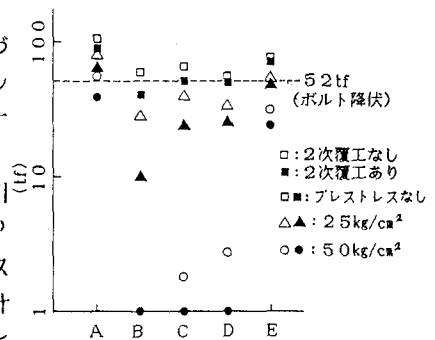


図3 継ぎ手1本当りの引張力