

I-589 シールドトンネルの軸剛性に関する解析モデル 一 二次覆工を考慮した場合一

武蔵工業大学 学生 学生員 上原健太郎
武蔵工業大学 工学部 正会員 吉川 弘道
武蔵工業大学 大学院 学生員 小林 保之

1. 本研究の目的

シールドトンネルの復元力変形特性を把握するためには、覆工のモデル化とその数値解析手法を確立する必要がある。特に、軸剛性は、リング継手の影響により、圧縮側と引張側とで著しく異なり、複雑な非線形挙動を示すことが知られている。本文は、正負交番繰り返し载荷を受ける二次覆工を考慮したシールドトンネルの非線形挙動をモデル化し、その検討結果について報告するものである。

2. 基本仮定と軸剛性のモデル化

シールドトンネルの軸方向の非線形挙動をモデル化するために、図-1のような2個のシールドセグメントを長手方向に2ピース連結し、リング継手により一体構造とした一次覆工、および鉄筋コンクリートによる二次覆工で構成される並列バネを設定した。従って、全体の剛性Kについては一次覆工の剛性 K_1 と二次覆工の剛性 K_2 の和、すなわち、以下の式によって表すことができる。

$$\Delta P = K \cdot \Delta \delta, K = K_1 + K_2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ΔP ：荷重増分、 $\Delta \delta$ ：変位増分とする。

このような場合、圧縮に対しては主にセグメントと二次覆工のみが変形し、引張に対してはさらに、ひびわれの発生やリング継手の開口が付加され、圧縮と引張では異なる挙動を示す。そこで、シールドトンネルの軸剛性（接線係数）を次式のように設定した。

$$\text{圧縮剛性} = \frac{E_s \cdot A_s}{L_s} \left(1 - (1 - \beta) \exp \left\{ - \frac{(1 - \beta) \delta}{\delta_0} \right\} \right) + \frac{E_R \cdot A_R}{L_R} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{引張剛性} = \frac{1}{\frac{L_s}{E_s \cdot A_s} + \frac{1}{K_j}} + \frac{E_R \cdot A_R}{L_R} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 E_s ：セグメントの弾性係数、 E_R ：二次覆工の弾性係数、 A_s ：セグメントの断面積、 A_R ：二次覆工の断面積、 L_s ：セグメントの長さ、 L_R ：二次覆工の長さ、 K_j ：継手剛性とする。また、 β ：初期接線係数率、 δ_0 ：残留変位とする。

一次覆工については、正負交番繰り返し挙動を4STAGE

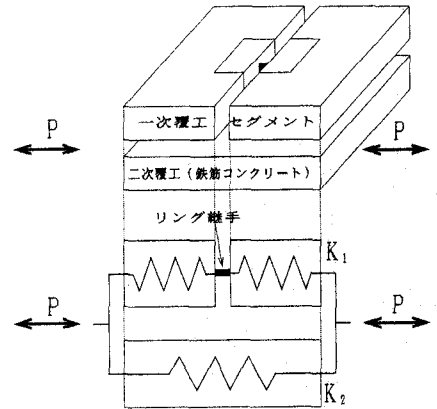


図-1 基本仮定図

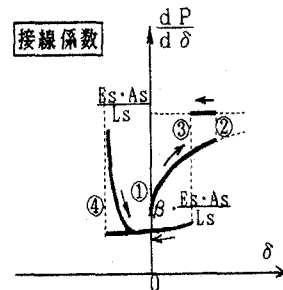
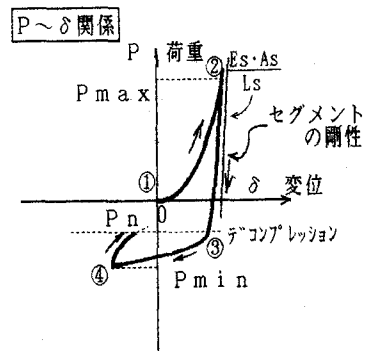


図-2 軸剛性に関する復元モデルとその接線係数

に分けて考えた渡辺らの提案式[1]を改良して用いたもので、1サイクルの変形履歴を図-2に模式的に示した。

二次覆工(鉄筋コンクリート)の引張剛性は、クラック発生前後において著しく異なることが知られている。そこで、二次覆工(鉄筋コンクリート)の等価な軸剛性は、次式のような引張硬化(Tension stiffening)を考慮した履歴モデル[2]を用いた。

$$\frac{E_R \cdot A_R}{L_R} = \frac{(np+1) \cdot E_{ST} \cdot A_R}{(np+\lambda_c) \cdot L_R}, \quad \lambda_c = \frac{\tanh(\mu_c)}{\mu_c} \quad (4)$$

ただし、 λ_c : 引張硬化係数(圧縮およびクラック発生前に $\lambda_c=0$ 、クラック発生・進展にともない $\lambda_c \rightarrow 1$ へと漸近する)、 n : 弾性係数比、 p : 鉄筋比、 E_{ST} : 鉄筋の弾性係数とする。

3. 実験結果との比較

次に、本提案式を用い、実験結果(土木研究所による静的載荷試験[3])との比較を行った。本実験は、2個のシールドセグメント(20×50×90cm)を長手方向に2ピース連結し、リング継手により一体構造とし(一次覆工)、鉄筋コンクリートの二次覆工を施したものに、圧縮～引張の繰返し載荷を行ったものである(図-1参照)。そして、前節で提案した接線剛性式(2),(3)を用いて実験結果にあてはめ、両者の比較を行い、得られた解析結果と実験結果を図-3に併記した。両者を比較すると、概ね合致し、提案モデルの妥当性を確認することができたと言える。しかし、引張変位が増大した場合、引張除荷～圧縮再載荷時において、計算値が実験値より小さい値を示していることなど、さらに詳細な検討が必要である。

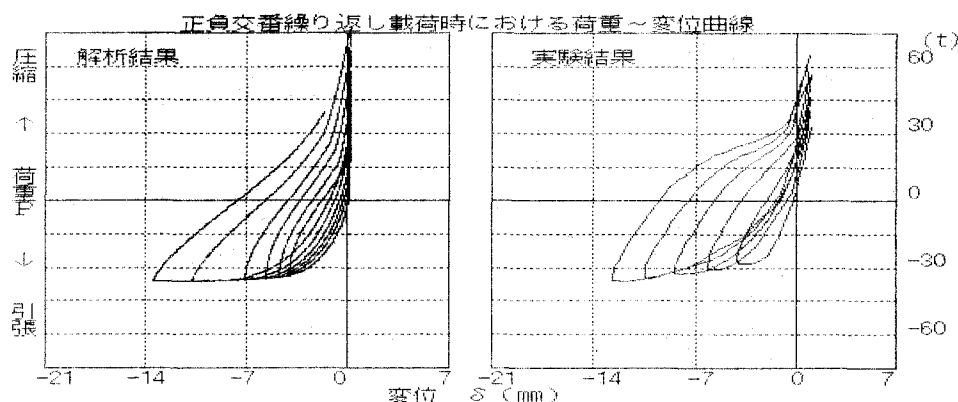


図-3 本提案手法による解析結果と実験結果の比較図

4. まとめ

本文は、シールドトンネルの軸剛性についてモデル化し、その非線形挙動を解析したもので、これにより繰返し荷重時の変形特性を合理的に表せることがわかった。今後は、一次覆工と二次覆工の荷重分担比の検討や、継手部分のさらに詳細なモデル化、加えて、クラック発生後の剛性は二次覆工の鉄筋に支配される部分が大きいので、鉄筋量に関する検討や、鉄筋降伏後の剛性の検討も必要であると思われる。

<参考文献>

- [1] 渡辺吉章・吉川弘道・小玉克巳: シールドトンネルの軸剛性に関する解析モデル, 土木学会第45回年次学術講演会概要集第5部門, 平成2年9月, PP.814~815
- [2] 小林保之・吉川弘道・小玉克巳: 繰返し荷重下における引張硬化のモデル化とその構成方程式, 第13回コンクリート工学年次講演会(投稿中)、平成3年
- [3] 川島・大日方・志波・加納: シールドトンネルの耐震性に関する研究, (その3) コンクリートシールドセグメントの載荷試験, 建設省土木研究所資料第2381号, 昭和61年4月

I-590

RCシールドトンネルの耐震設計に必要な二次覆工の長手方向最小鉄筋量

建設省土木研究所

正員 川島 一彦

〃

〇正員 杉田 秀樹

建設省郡山国道工事事務所 正員 加納 尚史

1. はじめに

多数のセグメント及び継手から構成されるシールドトンネルは、元来、個々のリング継手が変形を吸収することにより長手方向に大きな伸び性能を有する構造物である。しかし、止水等の目的からセグメントの内側に二次覆工が設置されると、伸び性能が大きく制約されることになる。特に、二次覆工が無筋であったり、わずかな長手方向鉄筋しか配筋されていない場合には、トンネルが長手方向の地震力を受けて1箇所のリング接合面で二次覆工コンクリートにクラックが生じると、長手方向力の増加に伴うトンネルの変形は当該リング接合面に集中することになるが、このような破壊形態では伸び性能が大きく低下することになる¹⁾。

シールドトンネルがこのような形態で破壊するのを防ぐためには、二次覆工の損傷を複数のリング接合面に分散させることが重要であり、このためには、二次覆工にある程度以上の長手方向鉄筋（最小鉄筋）を配筋しておく必要がある。ここでは、二次覆工の長手方向最小鉄筋量の定式化を行うとともに、これをトンネル部分模型供試体を用いた正負交番載荷実験により実証的に検討した結果を報告する。

2. 最小鉄筋量の定式化

最小鉄筋量は一次覆工と二次覆工との間の付着の程度により変化するため、ジベル筋等により両者の付着が確保されている場合と、防水シート等により両者が分離されている場合について、最小鉄筋量の定式化を行うと次のようになる。

1) 一次覆工と二次覆工の付着が確保されている場合（図1参照）

リング接合面JT2において二次覆工に生じた損傷が、他のリング接合面（JT1）でも生じるためには、次の関係が成立する必要がある。

$$(\text{リング接合面JT2の引張耐力}) > (\text{リング接合面JT1の引張耐力})$$

したがって、二次覆工の長手方向最小鉄筋量 AL_{Smin} として、次式が提案される。

$$\{P_{Ar}, P_{Br}\}_{min} + AL_{Smin} \times \sigma_{LSr} = AL \times \sigma_L \quad (1)$$

ここに、 P_{Ar} ：アンカー鉄筋の破断耐力、 P_{Br} ：リング継手ボルトの破断耐力、 σ_{LSr} ：二次覆工鉄筋の破断強度、 AL ：二次覆工の断面積、 σ_L ：二次覆工コンクリートの引張強度、である。

2) 一次覆工と二次覆工が分離されている場合（図2参照）

一次覆工と二次覆工は全く独立に変形するため、二次覆工だけの力の約合いから、最小鉄筋量 AL_{Smin} として次式が提案される。

$$AL_{Smin} \times \sigma_{LSr} = AL \times \sigma_L$$

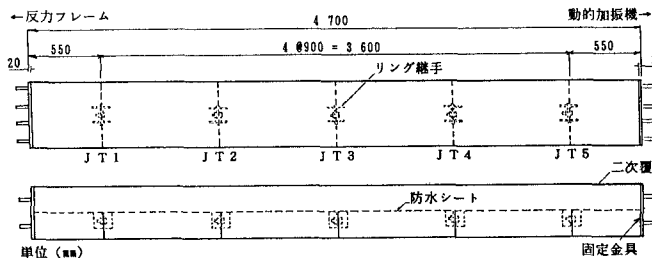


図3 実験供試体

3. 部分模型供試体の正負交番載荷実験

覆工間の付着が確保されている場合の最小鉄筋量の妥当性については、模型載荷実験を通じた検討結果を昨年度報告している²⁾。ここでは、一次覆工と二次覆工が分離されている場合の最小鉄筋量を実証的に検討するため、トンネル覆工の一部を切り出した模型供試体（図3参照）を用いて正負交番載荷実験を行った。実験ケースは、表1に示すように、二次覆工鉄筋量を変化させた3ケースとした。

ケース1～3の各々について、供試体の最終的な破壊状況を示すと図4の通りである。これによれば、式（2）による最小鉄筋量を上回る鉄筋量を配筋したケース1及びケース2では二次覆工の損傷が分散して生じたのに対して、最小鉄筋量を下回る鉄筋量しか配筋しなかったケース3では二次覆工の損傷が集中して生じ、他の箇所には何等損傷が生じなかった。したがって、一次覆工と二次覆工が分離されている場合の二次覆工の長手方向最小鉄筋量は、式（2）により適切に評価できると考えられる。

4. まとめ

覆工間の付着が完全に確保されている場合と、覆工が完全に分離されている場合について、二次覆工に必要とされる長手方向最小鉄筋量が明らかにされた。ただし、実際のシールドトンネルで、防水シート等により一次覆工と二次覆工の挙動が完全に独立したものになるかどうかについては別途検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 川島・杉田・加納：シールドトンネルの耐震性に関する研究（その5）、土木研究所資料、第2649号、昭和63年7月
- 2) 川島・杉田・加納：シールドトンネルの耐震性に及ぼす二次覆工鉄筋量の影響、土木学会第45回年次学術講演会概要集Ⅰ、pp.1210～1211

表1 実験ケース及び覆工部材の耐力

寸法 (cm ²)	一次覆工			コンクリート	二次覆工 長手方向鉄筋		
	セグメント	7本鉄筋	11本鉄筋		ケース1	ケース2	ケース3
断面積 (cm ²)	200×500cm	D13×2本	M22×1本	200×500cm	D13×4本	D13×3本	D10×4本
強度規格 (kgf/cm ²)	1000	2.53	3.03	1000	5.07	3.80	2.85
降伏強度 (kgf/cm ²)	420	SD35	8.8	240	SD35	SD35	SD35
降伏耐力 (tf)	—	3500	6400	—	3500	3500	3500
降伏耐力 (tf)	—	8.86	19.39	—	17.74	18.30	9.89
破断強度 (kgf/cm ²)	28.0*	5000	8000	19.3*	5000	5000	5000
破断耐力 (tf)	28.0	12.65	24.24	19.3	25.35	19.00	14.25
二次覆工鉄筋の破断耐力 二次覆工コンクリートの破断耐力 × 100 (%)					131.3	98.4	73.8
降伏強度 (kgf/cm ²)	—	3430	6400	—	3430***	3430***	3660***
降伏耐力 (tf)	—	8.68	19.39	—	17.39	18.03	10.43
破断強度 (kgf/cm ²)	30.9**	5140	8000	18.2**	5140***	5140***	5420***
破断耐力 (tf)	30.9	13.00	24.24	18.2	26.06	19.53	15.45
二次覆工鉄筋の破断耐力 二次覆工コンクリートの破断耐力 × 100 (%)					143.2	107.3	84.9

注) * : コンクリート標準示方書による計算値 ($0.5 \times (\text{強度規格})^{2/3}$), ** : 鉄筋の引張試験による値の平均値
*** : テストピースの割裂試験による値の平均値

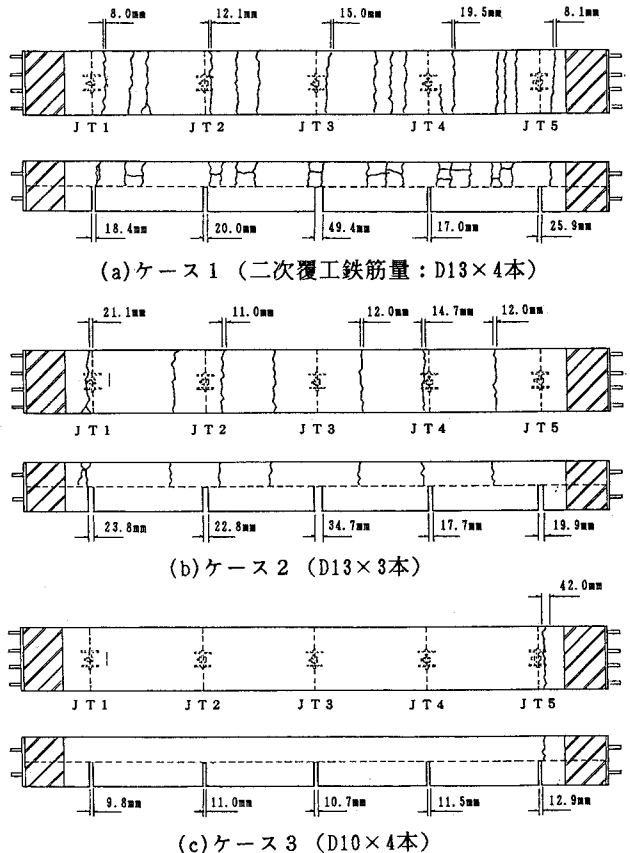


図4 供試体の最終的な破壊状況