

V-394 シールドトンネルの軸剛性に関する解析モデル

(株) 前田建設 正会員 渡辺吉章
 武蔵工業大学 正会員 吉川弘道
 武蔵工業大学 正会員 小玉克巳

1. はじめに

シールドトンネルのような線状地中構造物の地震応答解析を行う際には、覆工のモデル化とその数値解析手法が重要な課題となる。特にトンネル軸方向の場合、軸剛性が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。また、継手部分に変形が集中するため継手部分の挙動を詳細にモデル化する必要があると考えられる。本文は、圧縮～引張の繰り返し载荷を受けるシールドトンネルの非線形挙動をモデル化し、実験結果（建設省土木研究所によるRCセグメントの静的载荷試験）との比較を行い、その検討結果について報告するものである。

2. 軸剛性モデルの基本式

シールドトンネルのモデル化は、セグメント本体 ($E \cdot A / L$)、リング継手部 (k_j) によって構成される直列バネ (図-1c) として評価する。さらに実験結果の非線形挙動を勘案して、表1のような4段階に分け各々に基本式を設定した。これらは、荷重 P ～ 全体変位 δ の関係を $K = dP / d\delta$ (接線係数) の形で表すことにした。

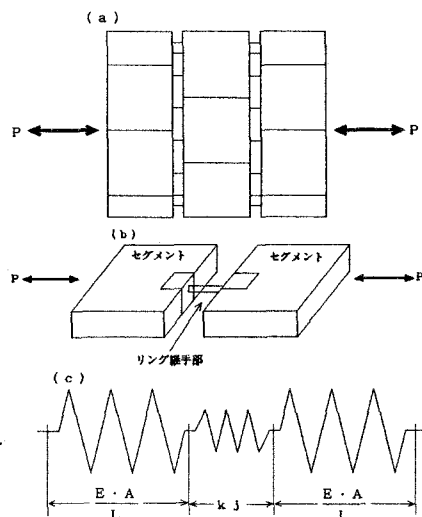


図-1 実験概要とモデル図

表-1 各段階における軸剛性モデル

STAGE	変位増分	勾配	遷移条件	基本式 (接線係数) $dP / d\delta$
1		+	+	$K_1 = \frac{E \cdot A}{L} \left\{ 1 - (1 - \beta) \exp \left\{ - \frac{(1 - \beta) \cdot \delta}{\delta_0} \right\} \right\}$
2		-	+	$K_2 = \frac{E \cdot A}{L}$
3		-	+	$K_3 = \left(\frac{L}{E \cdot A} + \frac{1}{k_j} \right)^{-1}$
4		+	+	$K_4 = K_1$
記号	$E \cdot A$: 本体の軸剛性, L : セグメント長さ, β, δ_0 : パラメーター, k_j : 継手剛性 P_{MAX} : 最大圧縮荷重, P_{MIN} : 最大引張荷重, P_N : 初期導入ボルト張力, δ : 全体変位			

4段階（STAGE）とは、圧縮載荷（ P_{MAX} まで）、圧縮除荷～引張載荷（ボルト初期締め付け力 P_N まで）、引張載荷（初期締め付け力喪失後～ P_{MIN} まで）、圧縮再載荷である。

継手変位は圧縮に対してはセグメント本体の剛性に支配されるが、セグメント接合面の密着度が必ずしも完全ではないために圧縮載荷と共に $P \sim \delta$ 関係が $E \cdot A/L$ の傾きを持つ線形挙動ではなく、徐々に $E \cdot A/L$ の傾きに近づく、非線形挙動を呈している。このため、STAGE1の接線剛性 K_1 は、 $E \cdot A/L$ を終局最大値とする漸近曲線で表した。引張に対しては、主にリング継手の引張剛性に支配されるが、そのバネ特性は継手金具面板の曲げ剛性より求めることができる。すなわち、継手部の金具面板を背面の定着板により支持された平板としてモデル化し、この平板の中央にボルト張力が集中荷重として作用する場合のたわみ量から評価すれば良い。

このとき、平板の支持条件が固定端から両端ヒンジに連続的に移行するため、次のような式を導入した。

$$k_j = \alpha \cdot k_1 + (1 - \alpha) \cdot k_2$$

（ただし、 k_1 ：固定時の剛性、 k_2 ：ヒンジ時の剛性、 $\alpha = (P + P_{MIN}) / (P_N - P_{MIN})$ ）

また、通例の実験結果を見ると、STAGE2→STAGE3への境界が不明瞭である。そこで、STAGEが P_N 前後で徐々に移行する次のような式を導入した。

$$K_{2.3} = (1 - \alpha')^n \cdot K_2 + \alpha'^n \cdot K_3$$

（ただし、 $n=1$ 、 $\alpha' = (P + P_{MAX}) / (P_{MAX} - P_{MIN})$ ）

3. 実験結果との比較

次に、本提案式を用い実験結果（土木研究所によるシールドセグメントの静的載荷試験 [1]）との比較を行った。本実験は、下水道用標準セグメント（20×50×90cm）を長手方向に2ピース連結し、リング継ぎ手により一体構造としたものに正負交番繰り返し載荷を行ったものである（図-1も参照）。基本式（常微分方程式）の数値解析手法としては、オイラー法による増分重ね合わせ法を用い、QUICK BASICによりプログラミングした。得られた解析結果（本例では $\delta_0=0.11\text{mm}$ 、 $\beta=0.1$ を仮定している）を図-2に、実験結果を図-3に併記した。両者を比較すると、おおむね合致し、解析モデルの再現性が良好であることを示している。しかし、STAGE1の非線形挙動が実験値を上回るなど、さらに詳細な検討が必要である。

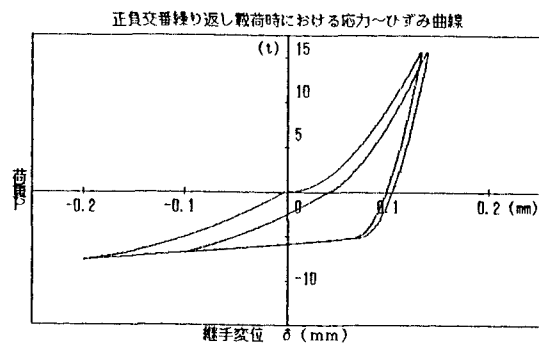


図-2 解析結果

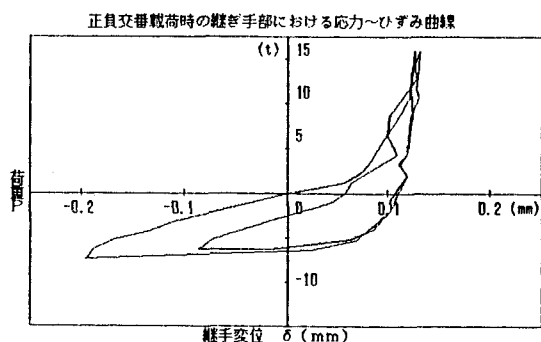


図-3 実験結果

4. まとめ

軸方向に非線形なバネ特性を持つシールドトンネルをモデル化し、その非線形挙動を解析した。これにより、接線係数法による本提案モデルが、シールドトンネルの変形特性を合理的に表現できることがわかった。また、型式の異なるシールドセグメントに対しても、基本式中のパラメーター（ β 、 δ_0 、 α 、 α' ）を調整することにより対処できる。

<参考文献> [1] 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