

## (148) 非線形性を考慮したシールドトンネル地震応答解析法

東京湾横断道路株式会社 元 山 宏  
同 上 三 木 克 彦  
同 上 林 光 俊  
㈱オリエンタルコンサルタンツ ○ 田 中 努

### 1. はじめに

今日シールドトンネルは、施工技術等の進歩により、大断面・急曲線・小土かぶり・高水圧等の条件下への適用が可能になるとともに、トンネル上方や周囲へ与える工事の影響を小さく抑えることも可能なため、都市トンネルの有力な工法として定着している。しかし、都市部では、地盤が軟弱で地下水位下の場合が多く、また河川や航路を横断する場合もあり、鉄道や道路トンネルなどの重要施設では特に高い耐震性が要求されつつある。

シールドトンネルは、1 m前後の間隔で存在するリング継手により、比較的可撓性に富み、周辺地盤の変形によく馴染むため、力学的には地中構造物として優れた特性を有する構造物と考えられる。しかし、「L-2地震(\*)」と呼ばれる巨大地震を想定した場合や、二次覆工を構造主部材と考えずに鋼材の降伏を許す設計を行おうとする場合には、降伏後の覆工剛性の変化を考慮した非線形の地震応答解析が必要となる。

### 2. 要旨

本研究では、シールドトンネルの地盤に対する変位の「伝達率」がほぼ1に近いことに着目して、初期剛性を用いた線形計算結果を、後に覆工の非線形特性に応じて修正する方法を考案し、1～2回の繰返し計算で十分に覆工の歪が収束することを確認した。また、覆工の非線形特性に関しては、二次覆工のひびわれ発生や鉄筋の抜け出し、一次覆工とはくりやずれ等を含む複雑な挙動も、非線形ばねとジョイント要素を用いたモデルにより解析的に把握できることも、実験値との比較により確認できた。

### 3. 解析方法

#### (1) ひずみの伝達率

トンネル軸方向の耐震解析法は、静的な応答変位法による解析も地震応答解析も、地盤の変位が地盤ばねを介してトンネルに伝わるという広義の「応答変位法」によっている。一般に応答変位法では、地盤のひずみ(または変位)に対するトンネルの軸方向のひずみ(または変位)の比が、トンネル軸に沿った地盤の変位分布を正弦波状と仮定すれば弾性床上の梁の方程式の解から、次式で表わされる。

$$\alpha_x = 1 / \{ 1 + (2\pi / \lambda_x L)^2 \}$$

$$\lambda_x = \sqrt{K_x / EA} \quad : \text{剛比係数}$$

L : 変位分布の波長

K<sub>x</sub> : 地盤ばね、

EA : トンネルの引張剛性

東京湾横断道路シールドトンネルの海底平坦部での地盤条件において、いくつかのトンネルモデルについて伝達率を求めると、図-1のようになる。

従来シールドトンネルについては、「トンネルのひずみ≒地盤のひずみ」という関係があると言われているが、同図から、一次覆工のみの剛性の低いトンネル(①～③)の場合には全くその通りであること、二次覆工があるトンネルは若干伝達率が小さいものの、二次覆工コンクリートひびわれ後の剛性を考えれば、同図の④、⑤のようにほぼ同様な状況になることが分かる。

伝達率が1近くでほぼ一定であるということは、覆工剛性が変化してもトンネルに発生するひずみはあまり変わらないことを意味するものである。したがって、覆工に降伏する部分が生じ剛性の分布が一様でなくなっても、トンネル軸方向の応力やひずみの再配分による変化は小さいものと考えた。

【計算条件】

$K_s = 10000t/m^2$  (沖積粘性土と洪積層の境界付近を想定)

$L = 1km$  (地震応答解析結果からの逆算値)

$EA =$  ①  $\phi 3.0m$ 一次のみ(下水道) :  $4.2 \times 10^4 t$       ④  $\phi 7.0m$ 二次あり(単線鉄道) :  $3.3 \times 10^6 t$

②  $\phi 7.0m$ 一次のみ(単線鉄道) :  $4.5 \times 10^5 t$       ⑤  $\phi 13.9m$ 二次あり(横断道路) :  $2.0 \times 10^7 t$

③  $\phi 13.9m$ 一次のみ(横断道路) :  $4.7 \times 10^6 t$       (注: ④⑤は二次覆工ひびわれ後の剛性)

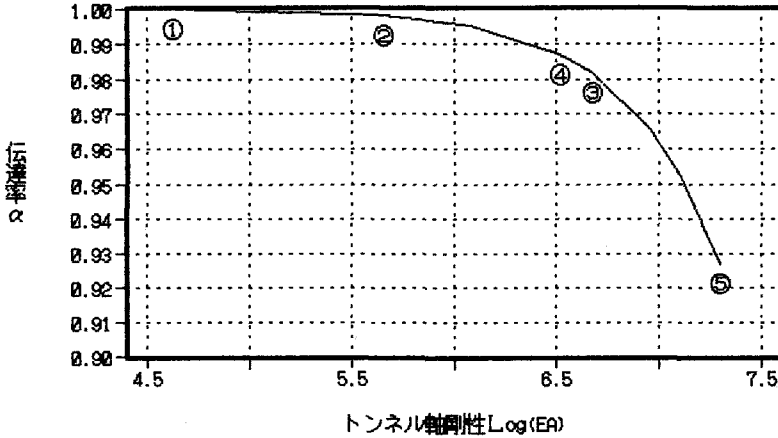


図-1 トンネル剛性と伝達率の関係

(2) 計算法

地震時にリング継手の面板や二次覆工の鉄筋が降伏すると、剛性が著しく変化する。トンネル縦断方向の設計で支配的な軸引張力について、剛性の変化を考えると、伸び( $\delta$ )と軸力( $P$ )の関係は、一般に図-2の破線のようなになる。ある着目した伸び $\delta$ に対して同じ軸力 $P$ を表わせる線形の剛性( $EA_{eq} = K \times L$ )は、原点とその点( $\delta, P$ )を結ぶ割線勾配( $K = P/\delta$ )で表わせる。着目する変位が変わればこの等価(割線)剛性も変化し、図-2の実線のような非線形の変化を示す。

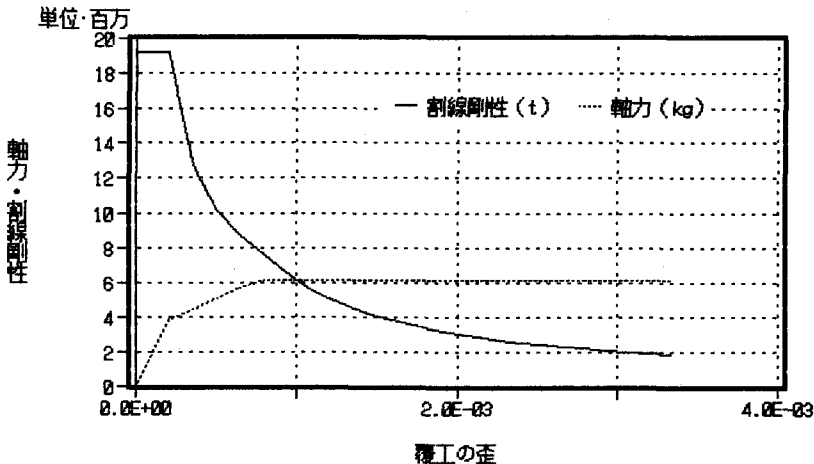


図-2 軸力・割線剛性と伸びの関係の概念

この図-2の実線と第一次近似解として求めた地震応答解析結果の覆工のひずみから、トンネル剛性を修正することができる。解析法全体の流れを図-3に示す。

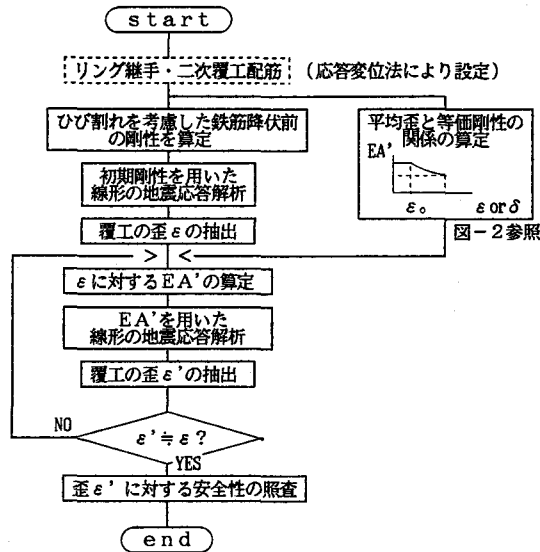


図-3 非線形性を考慮したシールドトンネル地震応答解析

(3) 覆工の非線形特性

一般にシールドトンネルはセグメントを継手ボルトにより連結して構築するが、継手金物を用いる形式のリング継手では、継手面板が不等辺の周辺固定板としてばね作用をするため、弾性範囲を越えると強い非線形性を示す。さらに、二次覆工を施し軸方向筋を配筋する場合は、二次覆工のひびわれにより、ひびわれ部鉄筋のばね作用や、覆工間のずれ等が生じ、これによりトンネル全体の軸方向の挙動はかなり複雑なものとなる。

このように非線形特性は2～3の実験により確認されているが、実験により得られた荷重～変位関係は、トンネルを構成する名部材を図-4に示すようにばね要素やジョイント要素（すべりを表すのに用いる）等で構成し、引張強度や付着特性を適切に定めることにより、かなりよく再現することができる。

図-5は、土木研究所と共同で行った、覆工部分モデルの軸方向載荷実験のうちの、二次覆工のある場合の実験結果を、上記の数値モデルによりシミュレートしたものであり、トンネルの複雑な挙動をかなりよく把握していると考えられる。

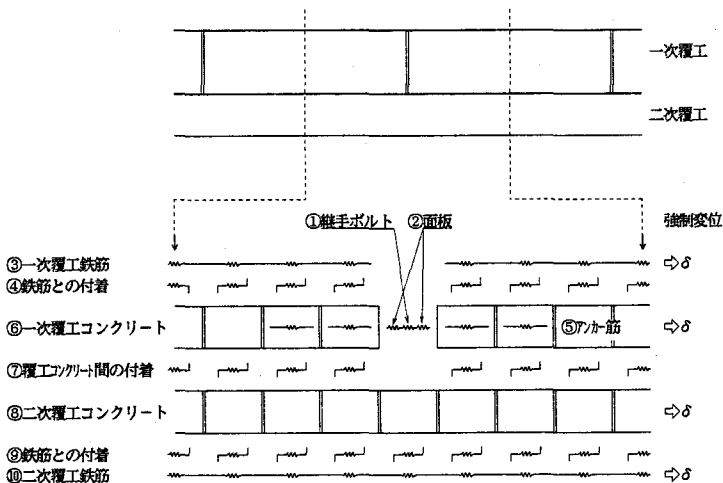


図-4 覆工非線形特性の解析モデル

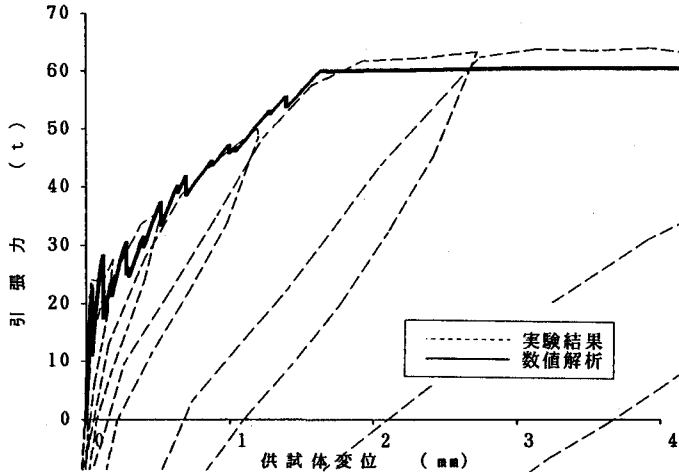


図-5 覆工非線形特性のシミュレーション結果

(4) 試算結果

図-6は、前述の「L-2地震」に対し、シールドトンネルの地震応答解析を、図-3に示したフローチャートに従って行った結果である。図-6によれば、トンネルひずみは剛性の補正前後でほとんどかわらず、2回目の応答計算で十分な精度が得られることがわかる。なお、図-6は二次覆工がある場合の結果であり、一次覆工のみの場合は、補正の前後でトンネルひずみはほとんど一致する。

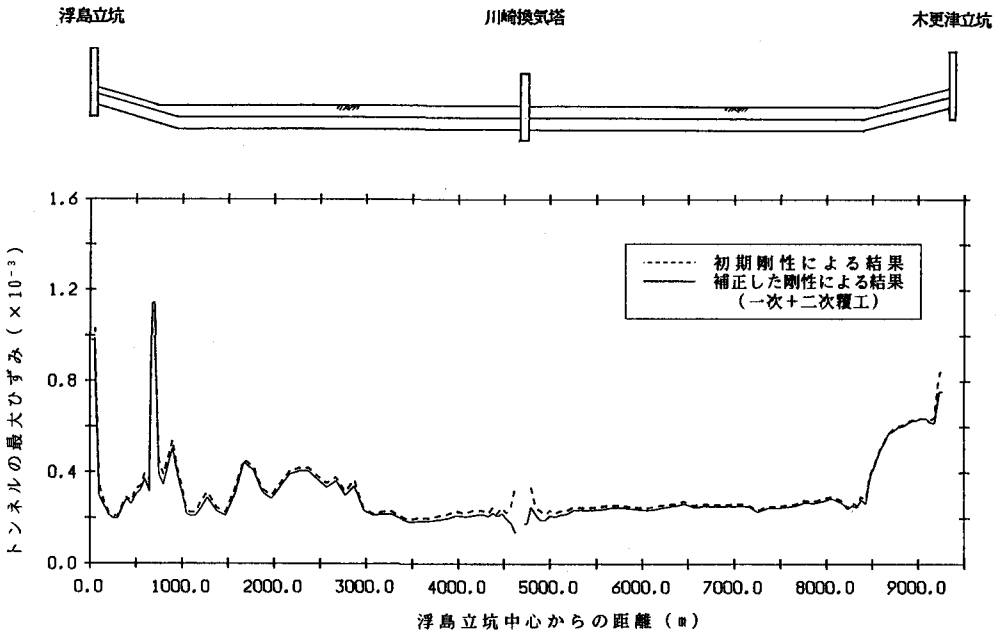


図-6 地震応答解析結果

4. おわりに

これまで用いられて来たリング継手の面板は比較的降伏しやすく、また二次覆工がある場合も地震時のひびわれの発生にとまない覆工剛性は非線形な挙動を示す。このため、より安全かつ経済的な設計を目指せば通常の設計地震レベルでも非線形解析が必要となるが、本解析法を用いれば比較的容易に近似値が得られる。

【\*印参考文献】「動的解析用入力地震動の設定法」土研資料No.2120, S59年3月, 土木研究所振動研究室