

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・高水压下等の条件のトンネル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では特に高い耐震性が要求されている。

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、鋼材が弾性範囲にあっても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性の地震応答解析が必要となる。

2. 要旨

本研究では、シールドトンネルが一般には軸方向剛性が小さく、弾性床上の梁の理論で言うところの「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から修正する方法を検討し、非線形解析結果に近い値を得ることができた。その方法をここに報告する。

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、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、トンネルの軸方向のひずみ(または変位)と地盤のひずみ(または変位)の関係が、弾性床上の梁の方程式の解から、伝達率 $\alpha_x = 1 / \{ 1 + (2\pi / \lambda_x L)^2 \}$ で表わされる。ここで、 $\lambda_x = \sqrt{(K_x / EA)}$: 剛比係数、L : 波長、 K_x : 地盤ばね、EA : トンネルの引張剛性である。

港湾部の沖積層と洪積層とからなる地盤を想定し、後述のような条件で、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。

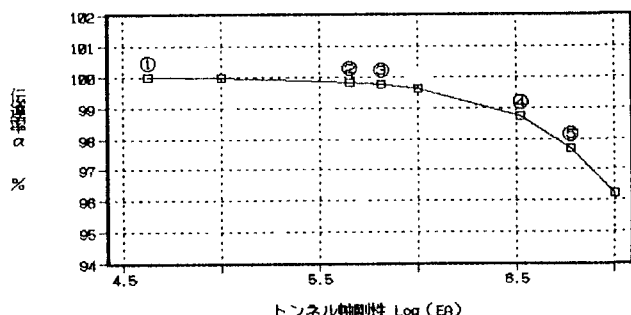


図-1 トンネル剛性と伝達率の関係

$K_x = 10000 \text{ t/m}^2$ (AcとDの境付近を想定)
EA =

- ① $\phi 3.0\text{m}$ 一次のみ(下水道) : $4.2 \times 10^4 \text{ t}$
- ② $\phi 7.0\text{m}$ 一次のみ(単線鉄道) : $4.5 \times 10^5 \text{ t}$
- ③ $\phi 10.0\text{m}$ 一次のみ(複線鉄道) : $6.5 \times 10^5 \text{ t}$
- ④ $\phi 7.0\text{m}$ 二次あり(単線鉄道) : $3.3 \times 10^6 \text{ t}$
- ⑤ $\phi 10.0\text{m}$ 二次あり(複線鉄道) : $6.0 \times 10^6 \text{ t}$

(注: ④⑤は二次覆工ひびわれ後の剛性)

L = 1 km(地震応答解析結果からの逆算値)

(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。設計上支配的な軸引張力について、剛性の変化を考えると、伸び(δ)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 δ に対して同じ軸力 P を表わせる線形の剛性($EA_0 = K \cdot L$)は、原点とその点(δ, 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。

この図-2の実線と図-1を組み合わせたことにより、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。

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も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ことと思う。

最後に、本解析法には(獨)熊谷組技術研究所の木戸義和氏との議論が非常に参考になっていることを記し、感謝の意を表します。

【*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

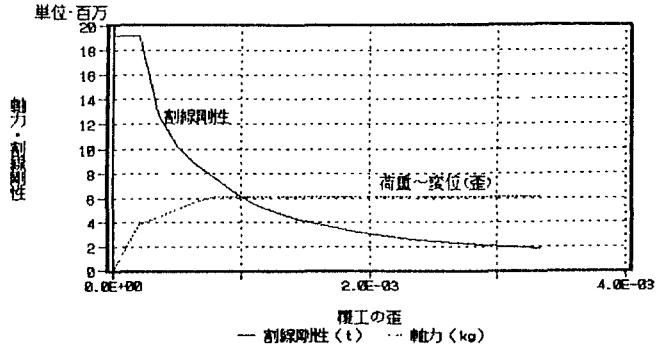


図-2 軸力・割線剛性と伸びの関係の概念

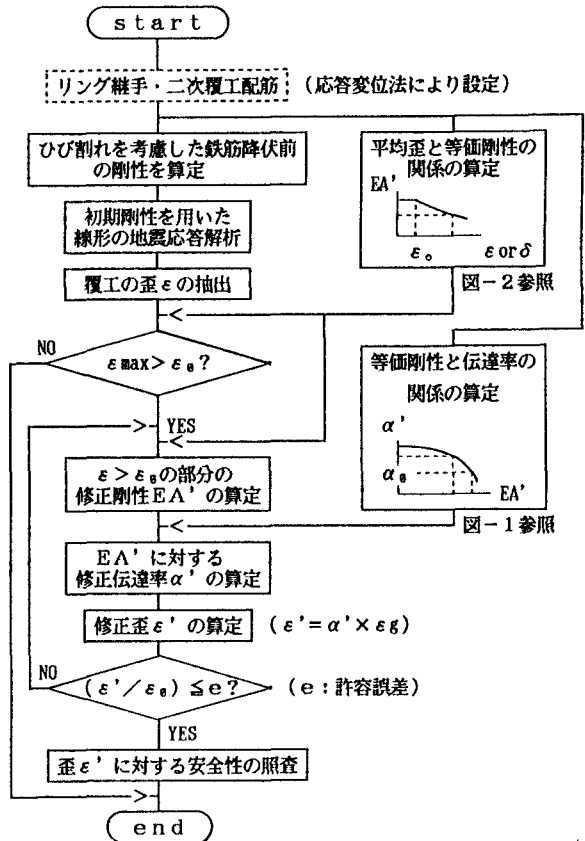


図-3 非線形性を考慮したシールドトンネルの地震応答解析の簡易計算法