

I-146

ひびわれを考慮したトンネル覆工の耐震設計法

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 田中 努

同

正会員 橋 義規

1. はじめに

トンネルが地震により縦断方向に引張りや曲げ変形を受けると、覆工にひびわれを生じる可能性がある。このひびわれは、まず、コンクリートの打継ぎ目や断面欠損部に生じるが、温度ひびわれや乾燥収縮ひびわれが存在する場合は、それが拡大する。その後の挙動は、縦断方向の配筋により異なる。横断方向に生じるひびわれは、トンネルの崩壊に直結しないものの、シールドトンネル二次覆工の場合はリング継手の目開きを一ヶ所に集中させる危険性がある。また、水底や地下水位の高いトンネルでは、浸水に至らなかったとしても、漏水により維持管理費の増大や覆工および内部設備の耐久性を低下させる原因となる。

トンネルに発生する断面力は、覆工の剛性によって変化するため、ひびわれ幅と配筋量に基づくひびわれ部の引張剛性の評価方法と、それを考慮した耐震設計法を明かにする必要がある。筆者らは、最もベーシックな応答変位法を用い、別途行なったRC部材のひびわれ部の引張剛性と付着応力に関する実験研究¹⁾²⁾を踏まえながら、ひびわれ部の剛性を考慮した耐震設計法を検討した。

2. 応答変位法によるトンネル軸力の算定方法

トンネルの縦断方向の断面力およびひずみは、地盤変位を受けた弾性床土上の梁として求めることができる。今、地盤の変位に応じて発生するトンネル軸方向の最大ひずみを ε_{Gmax} で表わすと、軸力 $F(x)$ および最大軸力の算定式は、次のようになる。

$$F(x) = EA \cdot \varepsilon_{Tmax} \cdot \sin(2\pi \cdot x / L) \quad (1)$$

$$F_{max} = EA \cdot \varepsilon_{Tmax}, \quad \varepsilon_{Tmax} = \alpha \cdot \varepsilon_{Gmax}, \quad \varepsilon_{Gmax} = 2\pi \cdot \delta_G / L \quad (2)$$

$$\alpha = 1 / \{1 + (2\pi / \lambda \cdot L)^2\}, \quad \lambda = \text{SQRT}(k / EA) \quad (3)$$

ここで、 EA : トンネルの軸引張剛性 L : 地盤変位を正弦波状と仮定したときの波長

ε_{Tmax} : トンネルに発生する最大軸ひずみ k : トンネル軸方向の地盤剛性

ε_{Gmax} : 地盤に発生する最大軸方向ひずみ δ_G : 地盤の最大変位振幅

α : ひずみの伝達率

今、建設地点が決まれば、 L 、 δ_G が決まり、 ε_{Gmax} が決まる。また、 k も決まる。したがって、建設するトンネルの EA を決めれば、それに応じてすべてがわかることになる。 EA は覆工材の弾性係数 E と断面積 A により決まるが、ひびわれ部の影響を考慮しなければならない。

3. ひびわれ部の剛性を考慮した覆工の等価剛性

ひびわれの間隔は地盤変位の波長に比べて十分短いので、等価剛性を用いて表現できると仮定する。間隔 s でばね定数 K_c のひびわれ部がある場合の等価軸剛性は、次式のようにになる。

$$EA_{eq} = EA_0 / (1 + EA_0 / s K_c) \quad (4)$$

ここで、 EA_{eq} : ひびわれ部を考慮した等価軸方向剛性、 s : ひびわれ間隔

EA_0 : トンネル覆工の軸方向剛性、 K_c : ひびわれ部の軸方向ばね定数

一方、ひびわれ部のばね定数 K_c は次式で表わせる。

$$K_c = N \times k_c, \quad k_c = F / S_0 \quad (5)$$

ここで、 N : 鉄筋本数、

k_c : 鉄筋1本当たりのばね定数

F : 鉄筋に作用する引張力、

S_0 : 鉄筋の抜け出し量

覆工に断面を貫通したひびわれが発生すると、それまでコンクリートが負担していた力が鉄筋に移るため、鉄筋がコンクリートとの間ですべりを起こして抜け出し、式(5)の S_0 が増加する。この増加に伴い、ひび

われ部の剛性 K_c の低下、 $E A_{eq}$ の低下、 α の増加、トンネルのひずみ ε_T の増加が生じる。軸力 F は、これらのバランスに応じて増減する。ひびわれ部の目開き量とばね定数 K_c は、これらの関係が満足する大きさに落ち着く。

4. 実験値に基づく試算

筆者らの実験研究¹⁾²⁾では、 20×27 cmのコンクリート断面の中央にD16を一本配置し(鉄筋比 $p \approx 0.4\%$)、弾性係数比 $n \approx 11$ の場合に、式(5)のばね定数 k_c が、解析的に図-1のように表わされ、実験値と比較的よく合うことが確認されている。これを用いて、表-1のような条件のシールドトンネル二次覆工の場合に、ひずみの伝達率 α を1として、地盤ひずみに応じて生じる等価剛性と覆工の最大軸力を算定し、図-2、3に示した。なお、ひびわれ間隔はセグメント幅とした。これらより、二次覆工の有無により剛性が数10倍異なること、ひびわれがあってもひずみが小さいと全断面有効の剛性に近く、ひずみの増加に伴って、徐々に一次覆工のみの剛性に近づいていくことがわかる。

表-1 トンネルモデル条件

項目			モデル値
セグメント	コンクリート	外 径	7.0 m
		幅 度	1.0 m
		厚 さ	40 cm
		弾性係数	$3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
二次覆工	コンクリート	リング個数	25 個
		継手ばね定数	$1.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$
		厚 さ	20 cm
		弾性係数	$2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
鉄 筋	鉄 筋	径 本 数	D 16 94 本

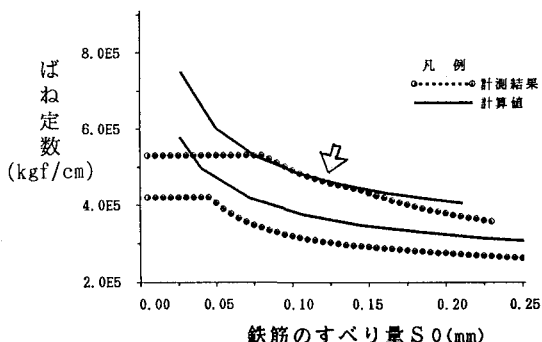


図-1 抜け出し量 S_0 とひびわれ部の k_c

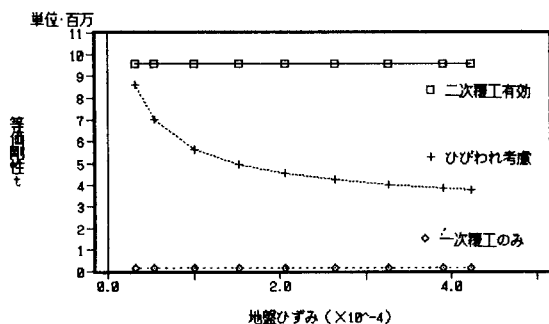


図-2 地盤ひずみ ε_{Gmax} と等価剛性 $E A_{eq}$

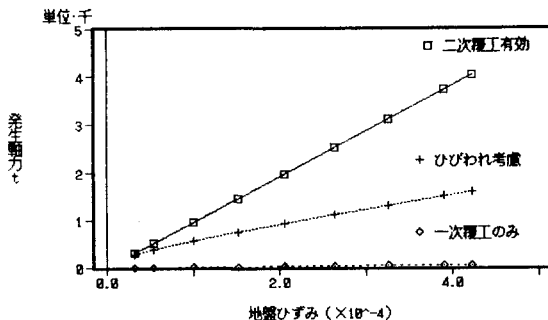


図-3 地盤ひずみ ε_{Gmax} と軸引張力 F_{max}

設計方法としては、まず、ひびわれ間隔 s をコンクリートの打継目間隔と想定して K_c を仮定して軸力 F_{max} を求め、新たなひびわれ発生や鉄筋の降伏の有無に注意しながら、ひびわれ部の剛性とひびわれ間隔の取崩計算を行ない、最後に、ひびわれ部の目開き量を基に止水性の確認を行うこととなる。

5. おわりに

本研究により、ひびわれ部の剛性を考慮した耐震設計法の基本的な考え方と、実験値に基づく試算結果を示すことが出来た。まだ、伝達長 L_t が任意の設計断面と任意の地盤ひずみに対して定められないので、一般の設計には適用できない。今後、検討を進めていく予定である。

【参考文献】1) 田中・大竹: RC覆工のひびわれ部の引張剛性に関する実験, 第20回関東支部技術発表会, 土木学会, 1993.3 ◇2) 大竹・田中: トンネル覆工ひびわれ部の地震時引張剛性, 第48回年次学術講演会, 土木学会, 1993.9