

(I-17) ひびわれ部の剛性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
正会員 橘 義規
正会員 大竹省吾

1. はじめに

トンネルが地震や地盤沈下により縦断方向に引張りや曲げ変形を受けると、覆工コンクリート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、施工時の温度差や乾燥収縮による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、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、ひびわれ幅のコントロールと適切な配筋量を決定するためには、ひびわれ部の引張剛性を考慮した耐震設計法をまとめる必要がある。

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出来る。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。

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

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

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

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 でのばね定数 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。

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

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。

$$K_c = N \times F / S_0 = N \times E_s A_s / L_f \quad \text{..... (式5)}$$

ここで、 N : 鉄筋本数、 F : 鉄筋に作用する引張力、 $E_s A_s$: 鉄筋の剛性

S_0 : 鉄筋の抜け出し量、 L_f : ひびわれ部のみかけの自由長

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 および L_f が増加する。これらの増

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)の見かけの自由長 L_f (cm)が、次式のように表わされた。

$$L_f = (1 - 2/\pi) \times L_t, \quad L_t = 0.00615 F + 14.8 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式6)}$$

ここで、 L_t : 付着応力の伝達長 (cm), F : ひびわれ部の引張力 (kgf/本)

これを用いて、表-1のような条件のときに、発生する覆工の軸力とひびわれ部の目開き量を算定した。ひびわれ部のばね定数 K_c ・間隔 s ・等価剛性 $E A_{eq}$ ・軸引張力 F_{max} ・ひびわれ部の目開き量の関係を図-1~4に示す。設計は、まず、ひびわれ間隔 s をコンクリートの打継目程度に想定して K_c を仮定し、軸力 F_{max} とひびわれ部の目開き量を求め、新たなひびわれ発生の有無・ひびわれ部の止水性や鉄筋の降伏の有無に注意しながら、収斂計算を行なう。

表-1 地盤・地震・トンネル条件

項 目	検討値	想定モデル
地盤変位 δ_G	0.03 m	$V_s = 200$ m/s
波長 L	140 m	$H \approx 30$ m
地盤剛性 k	7300 tf/m ²	
トンネル剛性 $E A$	2.5×10^8 tf	4車線開削
ひびわれ荷重 F_{ct}	20000 t/m ²	$A_c = 100$ m ²
鉄筋量 A_s	D16 $\times$ 750本	

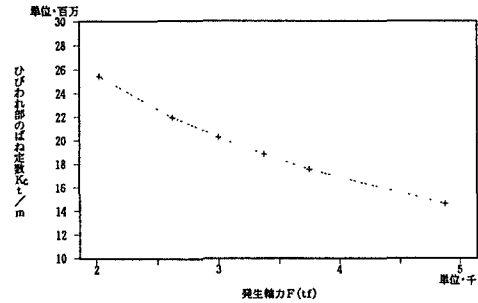


図-3 ばね定数 K_c と軸引張力 F_{max}

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)2)田中・大竹:「RC覆工のひびわれ部の引張剛性に関する実験」,「RC覆工のひびわれ部の引張剛性と付着特性」,第20回関東支部技術研究発表会,土木学会,1993.3

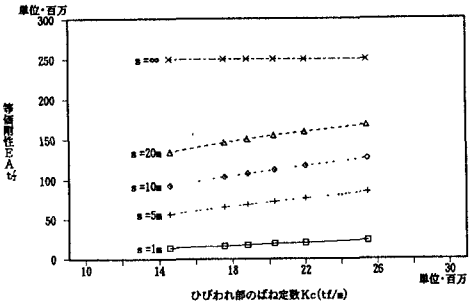


図-1 ひびわれ部の $K_c \cdot s$ と等価剛性 $E A_{eq}$

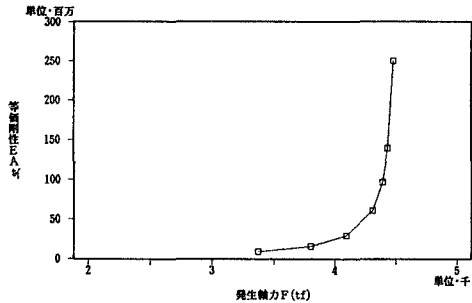


図-2 軸引張力 F_{max} と等価剛性 $E A_{eq}$

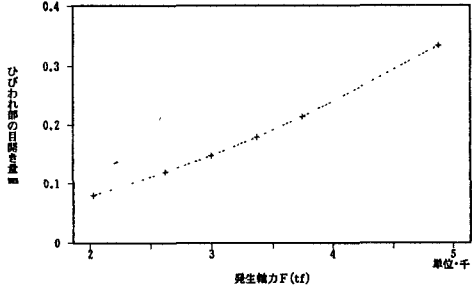


図-4 軸引張力 F_{max} と目開き量