

(120) ひびわれ部の引張剛性を考慮したトンネル覆工の耐震設計法

㈱オリエンタルコンサルタンツ ○田中 努

同 橋 義規

同 大竹 省吾

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、RC部材のひびわれ部の鉄筋の抜け出し量と内部の鉄筋のひずみ分布を載荷実験により確認し、ひびわれ部の剛性の変化傾向を直接求めた。また、鉄筋のひずみ分布から鉄筋とコンクリートのずれ量を解析的に検討し、剛性の算定を行った。さらに、最も基礎的な応答変位法を用い、覆工のひびわれ部の剛性を考慮したトンネルの耐震設計法の基本概念と試算例を示した。

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 F_{max} 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、 ε_{Tmax} : トンネルに発生する最大軸ひずみ、 ε_{Gmax} : 地盤に発生する最大軸方向ひずみ、 α : ひずみの伝達率、 L : 地盤変位を正弦波状と仮定したときの波長、 k : トンネル軸方向の地盤剛性、 δ_G : 地盤の最大変位振幅、 λ : 剛比係数。

今、建設地点が決まれば、その地震活動状況や地盤条件から、 L と δ_G が決まり、 ε_{Gmax} が決まる。また、 k も同時に決まる。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、引張に対しては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 EA_{eq} は式 (4) で、また、ひびわれ部のばね定数 K_c は式 (5) で表わせる。

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

$$K_c = N \times k_c, \quad k_c = F / S_0 / 2 \quad (5)$$

ここで、 EA_0 : トンネル覆工の軸方向剛性、 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 (片側)。

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、 $E A_{s,q}$ の低下、式(3)より α の増加、さらにトンネルのひずみ 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。

したがって、ひびわれ部の鉄筋の抜け出し量 S_0 、または鉄筋1本当たりのばね定数 k_c を適切に評価することが、ひびわれ部の剛性を考慮したトンネル覆工の耐震安全性を評価するために、重要な課題となる。

4. 実験方法および結果の概要

H形鋼の支持台の上に供試体と反力梁を置く載荷装置を作成し、一端を固定して他端を手動のセンターホールジャッキにより引張った。載荷は、単調増加で鉄筋の降伏まで行った。載荷荷重 F ・端部での鉄筋の抜け出し量 S_0 ・鉄筋のひずみ分布を計測した。供試体は、図-1のように、断面の中央に鉄筋を一本配置したもので、断面と鉄筋径を変えた表-1の8ケースを対象とした¹⁾。

材料試験の結果は表-2のとおりである。本実験で得られた荷重 F と端部の鉄筋のすべり量 S_0 (=ぬけ出し量)の関係の一例を図-2に、設計に用いる等価剛性として原点からの割線勾配を図-3に示した。また、鉄筋のひずみ分布を図-4に示した。鉄筋の降伏ひずみより大きな値を示すものもあるが、測定時の初期設定にズレがあったものと思われる。

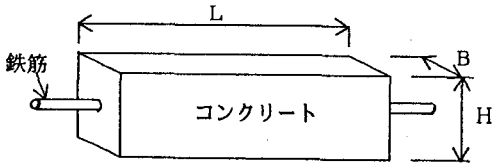


図-1 供試体の形状

表-1 実験ケース

	B×H×L(mm)	D13	D16	D19	D22
A	162×270×1000	○	○		
B	203×270×1600	○	○	○	
C	244×270×1800		○	○	○

表-2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度	277 kgf/cm ²
	引張強度	30.0 kgf/cm ²
	弾性係数	1.71×10 ⁵ kgf/cm ²
鉄筋 (SD295A)	降伏強度	4210 kgf/cm ²
	弾性係数	1.95×10 ⁶ kgf/cm ²

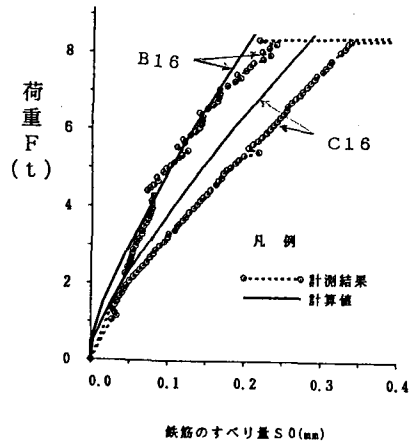


図-2 鉄筋の滑り量と荷重

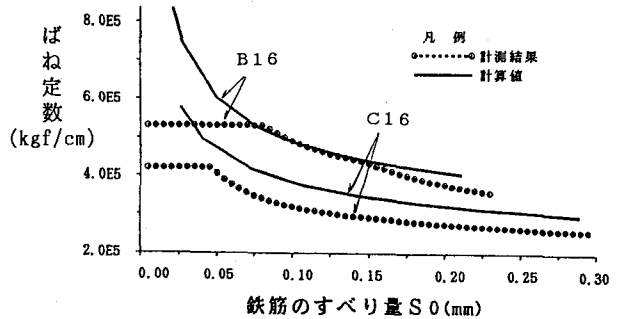


図-3 ひびわれ部の等価剛性

5. ひびわれ部の剛性の算定方法

十分に長いRC部材の鉄筋を両引きしたときの、鉄筋とコンクリートの応力度分布と付着応力度分布は、図-5のようになる²⁾。つまり、ひびわれ部の鉄筋の引張力Fが、部材内部で付着によりコンクリートに伝達されていく。鉄筋とコンクリートのひずみが一致すると相互の力の伝達がなくなって、付着応力度はゼロとなる。この位置までの距離を付着応力の伝達長 L_t と呼ぶ。

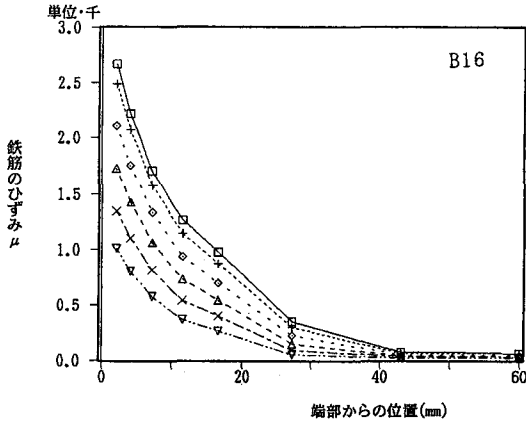


図-4 鉄筋のひずみ分布

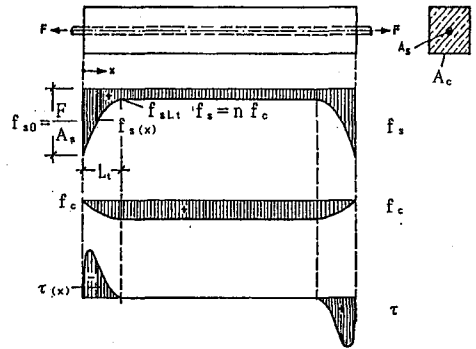


図-5 鉄筋とコンクリートの応力分布と付着応力分布

付着の基本方程式は式(6)のように表される³⁾。また、付着応力度 τ_x は、鉄筋のひずみ $\epsilon_{s,x}$ の変化量から式(7)で表される。したがって、作用荷重Fに対する鉄筋のひずみ分布 $\epsilon_{s,x}$ が求まれば、剛性が求まる。

$$d^2 S_x / dx^2 = (1 + n p) / E_s A_s \times u \times \tau_x \quad (6)$$

$$\tau_x = E_s A_s / u \times (d \epsilon_{s,x} / dx) \quad (7)$$

ここで、 $E_s A_s$:鉄筋の剛性、 n :弾性係数比、 p :鉄筋比、 u :鉄筋の周長。

本報告では、第一近似解として、岡村らの「ひずみ分布曲線は、鉄筋に沿う位置には独立で、付着力・すべりとの間に一義的な関係が成立する」という理論⁴⁾に準じ、測定ひずみを平行移動させて重ねた。それを基にひずみ分布 $\epsilon_{s,x}$ を次式で表し、未知数 L_t を回帰により求め、ひびわれ部の剛性を算定した。

$$\epsilon_{s,x} = (\epsilon_{s0} - \epsilon_{sL_t}) \cdot (x / L_t - 1)^4 + \epsilon_{sL_t} \quad (8)$$

ここで、 $\epsilon_{s0} = F / E_s A_s$:ひびわれ部の鉄筋のひずみ、 $\epsilon_{sL_t} = F / (E_s A_s + E_c A_c)$:伝達長の位置での鉄筋のひずみ。

測定ひずみとの比較を図-6に、算定した作用荷重Fとすべり量 S_0 の関係を図-2に、ひびわれ部の等価剛性を図-3に重ねて示す。

6. 実験値に基づく試算

前述のひびわれ部の剛性を用いて、表-3のような条件のシールドトンネル二次覆工の場合について、試算を行なった。ここでは、簡単にひずみの伝達率 α を1として、地盤ひずみに応じて生じる等価剛性 $E A_{e,c}$ と覆工の最大軸力 F_{max} を算定し、図-7, 8に示した。なお、ここではひびわれ間隔 s をセグメント幅に固定した。これらより、二次覆工の有無により剛性が約60倍異なること、ひびわれがあってもひずみが小さいと

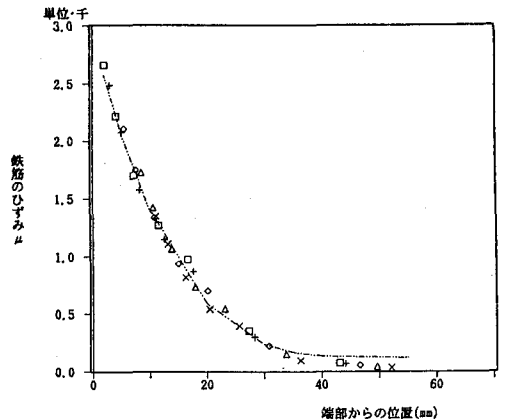


図-6 鉄筋ひずみ分布の回帰曲線

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。しかし、鉄筋が降伏しないので、一次覆工のみの剛性の約25倍に落ち着いている。

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_0 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。

7. おわりに

本実験研究により、ひびわれ部の剛性を直接確かめ、また解析的に比較的近い値を算定することができた。ただし、鉄筋の抜け出し量の計測が難しく、精度があまり高くなかったため、改良して確認する予定である。

また、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。今のところ、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、一般の設計に適用できない。今後、検討を進めていく予定である。

本実験の計画・実施に当って、東京都立大学の国府勝郎助教授に終始ご指導をいただき、また、研究室の助手と学生の諸氏には多くの助力をいただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 田中努・大竹省吾：RC覆工のひびわれ部の引張剛性に関する実験，第20回関東支部技術研究発表会，土木学会，1993.3
- 2) F.レオンハルト・E.メニッヒ：鉄筋コンクリートの設計，鹿島出版会，pp.95~98，1986
- 3) 岡田清・伊藤和幸・不破昭・平澤征夫：鉄筋コンクリート工学，鹿島出版会，pp.125~131，1987
- 4) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，pp.160~182，1991.5

表-3 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	1.0 m
		厚さ	40 cm
	弾性係数	$3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$	
リング継手	個数	25 個	
	ばね定数	$1.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$	
二次覆工	コンクリート	厚さ	20 cm
		弾性係数	$2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
	軸方向鉄筋	径本数	D16 94本 (c/c200中央一段)

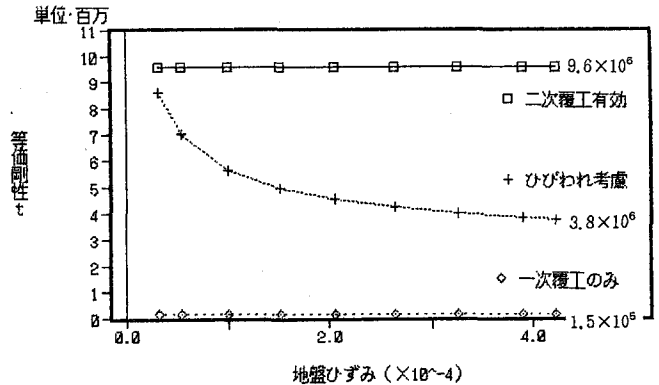


図-7 地盤ひずみ ϵ_{Gmax} と等価剛性 EA_{eq}

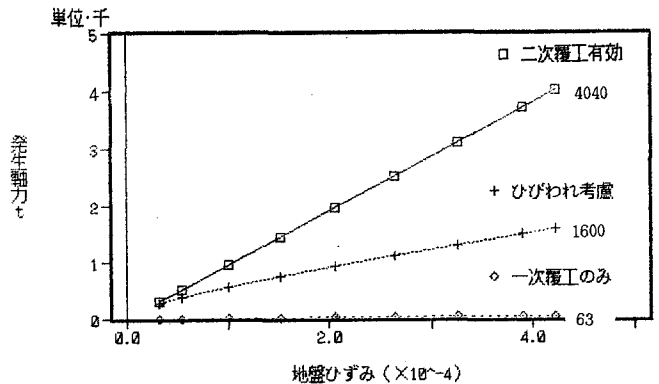


図-8 地盤ひずみ ϵ_{Gmax} と軸引張力 F_{max}