

シールドトンネル継手部の耐震安全性照査

小池 武¹・東俊司²・高田至郎³

¹正会員 工博 川鉄エンジニアリング(株)土木事業部 (〒112-0004 東京都文京区後楽1-1-5)

²正会員 工修 セキスイ管材テクニクス(株) (〒520-3081 滋賀県栗太郡栗東町野尻75)

³フェロー会員 工博 神戸大学工学部建設工学科 (〒657-8501 神戸市東灘区六甲台町1の1)

シールドトンネルは、コンクリート製あるいは鋼製のセグメント同士を継手部でボルト結合した構造体のため、トンネルの耐震性は相対的に剛性の小さな継手部の耐震性能に支配される。本報告では、レベル2地震動を受けた時に継手部に発生する目開き量をトンネル周辺地盤間のすべりを考慮して算定する手法を定式化し、使用限界から終局限界に至る破壊進展状況を示す限界目開き量を用いて継手部の破壊進展状況を判定する簡易手法を開発したので、その結果を報告する。

Key Words: Shield tunnel, segment, connection, seismic design, slippage, ring joint gap

1. はじめに

地中構造物は地震に対して比較的安全であると信じられてきたにも関わらず、阪神・淡路大震災では開削トンネルはもちろんのことシールドトンネルにおいても、トンネル横断部・縦断部にクラックを生じる地震被害を蒙っている事例²⁾のあることが判明した。この経験を踏まえて、土木学会関西支部ではシールドトンネルの合理的耐震設計法を確立する目的で平成11年に調査委員会が発足した。本論文は、この委員会活動¹⁾の一部を報告するものである。

レベル2地震動を受けるシールドトンネルの破壊危険度を把握するためには、トンネルに発生する地震時軸方向ひずみおよび継手部の伸び量すなわち目開き量を出来るだけ正確に把握する必要がある。また、シールドトンネルのセグメントリングと継手は直列システムを構成しているが、コンクリート製および鋼製のセグメントはその伸縮特性が異なり、その差異が継手部の目開き量に大きく影響するはずである。このようなセグメントリングと継手部の伸縮特性を正しく表現できる設計式を確立することも委員会の課題の一つである。さらに、シールドトンネルの耐震安全性を議論するためには、継手部を構成する継手板、継手板を固定するアンカー鉄筋、継手ボルトなどそれぞれの使用限界から終局限界に至る伸び限界値を明確化する必要がある。

本論文では、上述の目的のため、シールドトンネルに対する応答変位法の適用性を拡大し、また耐震安全性を評価するため継手部目開き量限界値の算定式を定式化した。そして、下水道シールドトンネルを例題として、提案式の妥当性を検討した。

2. シールドトンネルの被害

兵庫県南部地震におけるシールドトンネルの被害について、土木学会²⁾はじめ地盤工学会³⁾や河西・小池⁴⁾ら数多くの被害調査が行われている。それらを総括すれば、シールドトンネルの被害は、地上構造物に比較すれば軽微であること、しかし二次覆工コンクリートの上下斜め45度付近の4箇所縦断クラックが発生し、軸方向にところどころ輪切り状の横断クラックが発生すること、そしてこれらのひび割れからの漏水が見られることが報告されている。図1にそれらの典型的な被害モードを図示している。

輪切り状の横断クラックは、セグメントのリング間ジョイント部での破損を示唆するものである。文献2では、下水道シールドトンネルについて0.2~0.3mm幅のリング状クラックがセグメントのリング間ジョイントおよびコンクリートの打継目に相当する位置に入っていると考察している。

以下では、輪切り状横断クラックを発生するセグメントリング間ジョイントの耐震安全性照査方法について検討する。

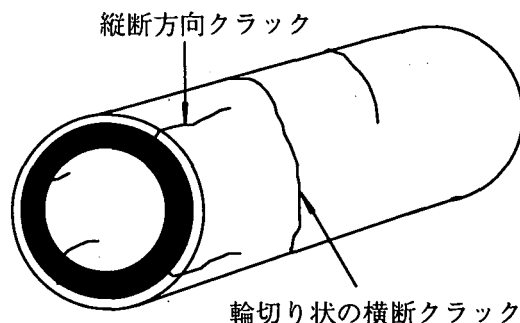


図1. シールドトンネル被害の典型的パターン^{1), 2)}

3. 応答変位法によるトンネル継手部目開き量算定方法

(1) すべりを考慮したトンネル内発生力の算定

浅層に埋設される水道・ガスパイプラインでは、鉛直応力が小さいことから地震時に管・地盤間で容易にすべり⁵⁾が発生し、管ひずみはある上限値を持つことになる。一方、シールドトンネルは一般に地表面から数十メートルの深い地盤内に設置されるためトンネル表面に作用する鉛直応力が大きく、地震時にすべりが必ずしも発生する訳

ではないが、レベル2地震動を受けた場合には、地盤条件によってはすべりが発生し、トンネルひずみがある上限値を持つことになる。図2. トンネル周辺地盤のシールドトンネルでも土の応力ひずみ特性

すべり発生を評価するすべり係数⁵⁾を取り込むと、トンネルの地震時ひずみは以下のように算定することができる。いま、トンネル周辺地盤の土の応力ひずみ特性が図2に示すバイリニア特性で表現できるとすると、トンネル表面に作用するせん断応力は次式となる。

$$\tau_G = \frac{(EA)_{eq}}{\pi D} \frac{2\pi}{L_a} \alpha_A \varepsilon_G \quad (1)$$

一方、トンネル位置でのすべり開始限界せん断応力は直応力 σ_n と粘着力 c 、摩擦角 ϕ を用いて与えられる。

$$\tau_{cr} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

応答変位法に従って、水平方向に伝播する地震波形を正弦波と仮定すると、以下に定義するすべり係数 q を用いてトンネル軸方向ひずみおよび曲げひずみを定式化することができる。

$$\varepsilon_{SA} = q \alpha_A \varepsilon_G, \quad \varepsilon_{SB} = \alpha_B \varepsilon_B \left(\frac{2\pi D}{L_a} \right) \quad (3)$$

ここで、 $D, L_a, \varepsilon_G, K_A, K_B, (EA)_{eq}, (EI)_{eq}$ はそれぞれトンネル口径、地盤歪、見かけの波長、地盤ばね、トンネル等価引張及び曲げ剛性である。

$$\alpha_A = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_A L_a} \right)^2}, \quad \alpha_B = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_B L_a} \right)^4} \quad (4)$$

$$\lambda_A = \sqrt{\frac{K_A}{(EA)_{eq}}}, \quad \lambda_B = \sqrt[4]{\frac{K_B}{(EI)_{eq}}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_G \geq \tau_{cr} &, \quad q = 1 - \cos \xi + \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \sin \xi \\ \tau_G < \tau_{cr} &, \quad q = 1; \quad \xi = \arcsin \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_G} \right) \end{aligned}$$

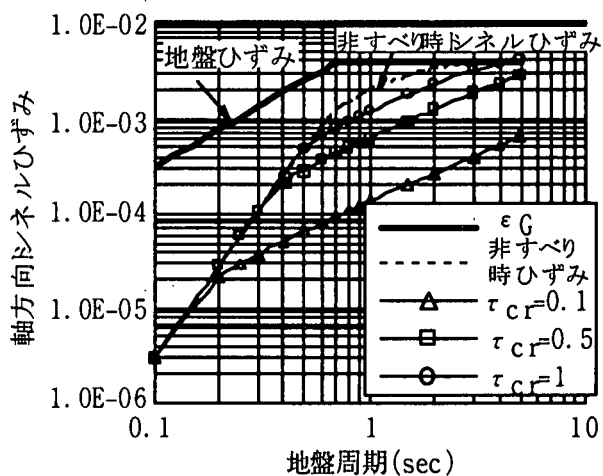


図3. トンネルひずみに及ぼす τ_{cr} (kgf/cm²)の影響

表1 トンネル内発生力の算定式

	算定式
引張力	$P^T = (EA)_{eq}^T \varepsilon_{SA}^T$
圧縮力	$P^C = (EA)_{eq}^C \varepsilon_{SA}^C$
曲げモーメント	$M = \left(\frac{2}{D} \right) (EI)_{eq} \varepsilon_{SB}$
せん断力	$Q = \frac{2\pi}{L_a} \frac{2}{D} (EI)_{eq} \varepsilon_{SB}$

(2) 目開き量算定式

1) 軸方向目開き量

軸方向の継手部目開き量⁶⁾は、表1の引張力・圧縮力を用いて次式で算定できる。

$$\delta_{eq} = \frac{P}{(EA)_{eq}} l_s \quad (5)$$

ここで、等価剛性は図4に示すように、引張側についてはボルトの伸び特性からバイリニア特性を、圧縮側についてはコンクリート材料の非延性的特性から高剛性を示す線形特性を仮定している。

ただし、 $P, l_s, E_s, A_s, K_{j1}, K_{j2}$ はそれぞれ軸力とセグメントの長さ、ヤング率、断面積、リング継手ばね総数である。

$$(EA)_{eq}^C = E_s A_s$$

$$(EA)_{eq}^{T1} = \frac{E_s A_s}{1 + \frac{E_s A_s}{l_s K_{j1}}} \quad (6)$$

$$(EA)_{eq}^{T2} = \frac{E_s A_s}{1 + \frac{E_s A_s}{l_s K_{j2}}}$$

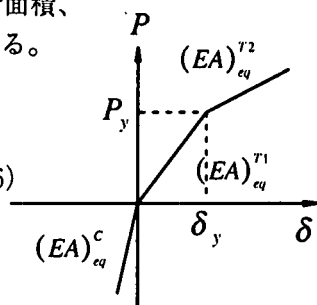


図4. トンネル軸方向の非線形剛性

2) 曲げ方向目開き量

セグメントリングが降伏する前の継手変位⁶⁾は、次式で求めることができる。

δ_j = (Ml_s / (E_s I_s)) * (D / 2) * (π sin φ / cos^3 φ) * (1 + sin φ) (7)

ここで、φ はトンネル断面の中立軸位置の角度であり、以下の式より求める。

φ + cot φ = (π / 2) * ((1 + R_l) / (1 - R_l)) ; R_l = (1 / (1 + (E_s A_s / (l_s K_j1)))) (8)

なお、セグメントリングが降伏した後の継手変位は、その表現式が複雑なため本文では割愛する。

(3) 目開き量の限界値

トンネルに作用する軸力および曲げモーメントが大きくなるに従って、セグメントリングを構成する継手板の一部が塑性ヒンジ化したり、継手板を支えるアンカーボルトの抜け出し現象が発生する。以下には、継手板と継手板のアンカー鉄筋およびボルトの破壊挙動と継手目開き量との関係を算定式の形で示す。

1) 継手板が降伏した時

δ_y = (P_y l^3 / (192 EI)) , P_y = (4bt_p^2 / 3l) σ_y (9)

ここで、E、I、t_p、b、l はそれぞれ継手板のヤング率、断面二次モーメント、板厚、板高、定着間距離である。

2) 継手板が完全塑性化した時

δ_u = (P_u l^3 / (192 EI)) , P_u = (3 / 2) P_y (10)

3) 継手板が破断した時

δ_f = ((P_f - P_u) l^3 / (48 EI)) + (P_u l^3 / (192 EI)) , P_f = (bt_p^2 / l) σ_f (11)

4) 継手板アンカー鉄筋が降伏した時

δ_Ay = (P_Ay / k_Ay) , P_Ay = σ_Ay A_a (12)

ここで、k_Ay、k_AR はアンカー鉄筋の降伏前後の伸び剛性。

5) 継手板アンカー鉄筋が破断したとき

δ_Au = (P_AR / k_AR) , P_AR = σ_AR A_a (13)

6) 継手ボルトが降伏した時

δ_By = (P_y / k_B) , k_B = (E_B A_B2 / l_B) (14)

ここで、A_B2、l_B、E_B はそれぞれボルトの有効断面積、長さ、ヤング率。

7) 継手ボルトが破断した時

δ_Bf = (P_f / k_Bf) , k_Bf = c_f k_B , c_f = (1 / 3) (15)

トンネル継手部を構成する継手板と継手板のアンカー鉄筋およびボルトの変位限界値の相対的な大小関係は、使用される材料特性により異なる。その状況を図5に模式的に示す。

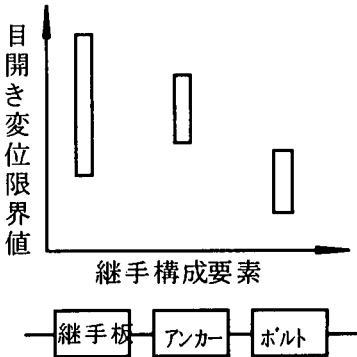


図5. 直列システムであるトンネル継手部構成要素毎の目開き量限界値の模式図 (下端が降伏変位、上端が破断変位)

4. 数値計算例

(1) 計算条件

シールドトンネルに用いる代表的な構造形式である

(1) RCセグメント形式

(2) RCセグメント+二次覆工形式

(2) 鋼製セグメント+二次覆工形式

について、地震時変位挙動を検討した。各セグメントの諸元を表2に示す。

上記3形式のトンネルが関西地方の代表的な地盤内の深さ35mに敷設されるとして、レベル2地震動を想定して、表3の計算条件のもとに応答変位法による耐震計算を行った。

表2 トンネル諸元

		構造形式		
諸元	単位	RCセグメント	RCセグメント+2次覆工	鋼製セグメント+2次覆工
外径	m	5.1	5.1	4.8
内径	m	4.7	4.2	4.2
奥行	m	1.0	1.0	1.0
断面積	m ²	3.079	5.303	0.449
断面2次モーメント	m ⁴	9.256	9.256	0.362
ヤング率	tf/cm ²	330	330	3031

表3 応答変位法に関する計算条件

項目	単位	数値
地盤変位振幅	cm	16.83
地盤周期	sec	1.16
伝播速度	m/sec	360
波長	m	418

表4 目開き量の限界値

項目	記号	単位	セグメント	
			RC製	鋼製
継手高	b	cm	9.0	15.0
継手板厚	t _p	cm	1.2	1.4
セグメント幅	W	cm	10.1	10.1
降伏応力	σ_y	kgf/cm ²	2100	2100
曲剛性	EI	tfm ²	0.184	0.0092
目開き量	継手板降伏時	δ_y	0.4	0.1
	完全塑性化時	δ_u		
	破断時	δ_f		
	ボルト降伏時	δ_y	0.07	0.07
	破断時	δ_f		
			0.5	0.5

表5 構造形式に対する断面力、目開き量の比較

諸元	単位	構造形式		
		RCセグメント	RCセグメント+2次覆工	鋼製セグメント+2次覆工
引張歪	%	0.068	0.068	0.068
圧縮歪	%	0.044	0.028	0.045
曲げ歪	%	0.0008	0.0008	0.002
目開き量	mm	6.6	6.3	0.68
引張力	tf	208	208	20.7
圧縮力	tf	4472	4837	4205
モーメント	tfm	24.4	24.4	2.36
剪断力	tf	0.368	0.368	0.035
埋設深さ	m	35		

表6 埋設深さに対する断面力、目開き量の比較

構造形式		RCセグメント+2次覆工		
諸元	単位	埋設深さ(m)		
		15	35	60
引張歪	%	0.184	0.068	0.026
圧縮歪	%	0.004	0.028	0.026
曲げ歪	%	0.007	0.0008	0.001
目開き量	mm	17.1	6.3	0.26
引張力	tf	566	208	80
圧縮力	tf	663	4837	4538
モーメント	tfm	65.8	24.4	9.35
剪断力	tf	0.99	0.368	0.141

表5の結果を見ると、鋼製セグメントの目開き量がRCセグメントの場合の十分の一程度に留まることが

わかる。これは、RCセグメントはセグメント本体の軸方向剛性が極端に大きく、継手剛性が小さいため、地盤からの強制変位はほとんどすべて継手変位として吸収されるが、鋼製セグメントではセグメント本体の伸び変形が相当程度期待できるため、地盤強制変位はセグメント本体の伸び変形で90%近く吸収され残り10%程度を継手変位で吸収しているものと解釈できる。

レベル2地震動に対して、いずれのセグメントもその目開き量が破断限界変位を超過しており、とくにRCセグメントでは限界破断変位(1.4mm)の5倍弱程度の大きな目開きを生じることになる。また、鋼製セグメントでは同様に限界破断変位(0.3mm)の2倍強程度の大きさの目開き変位を生じている。一方、曲げひずみは引張ひずみに比較してその三十分の一程度であり、曲げモーメントによるトンネル継手部の変形の影響は無視できる大きさであると言える。

5. まとめ

レベル2地震動を受けるシールドトンネルの合理的耐震設計法を確立する目的で、トンネル軸方向の発生ひずみおよび継手部目開き量を算定し、その限界値を用いて継手部の破壊進展状況を判定する簡易手法を開発した。とくに、継手部に発生する目開き量をトンネル周辺地盤間のすべりを考慮して算定する手法を応答変位法の枠組みの中で定式化することができた。

謝辞

本研究は、土木学会関西支部シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する調査研究委員会活動の一環として実施したものであり、ご指導賜った委員長土岐憲三先生ほか委員会メンバー各位のご助言・ご協力に感謝致します。

参考文献

1)シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する研究会(1999):シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン(案)
2)土木学会(1999):阪神・淡路大震災調査報告、第5巻、pp.405-423.
3)阪神大震災調査委員会(1996):阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、地盤工学会、pp.418-439.
4)河西 寛・小池章久(2000):シールドトンネルの地震被害と耐震設計への提言、基礎工、4月号.
5)Koike,T.(2000):Structural strain estimation of segmented shield tunnel for severe earthquakes, 12WCEE, No.292/7/A.
6)川島一彦他(1994):地下構造物の耐震設計法、鹿島出版会.