

立坑・トンネル接合部の耐震設計モデルと簡易計算法

ニュージェック 正会員 竹澤請一郎， 八千代エンジニアリング 正会員 中田 恒和
川崎製鉄 正会員 小池 武， 神戸大学 フェロー 高田 至郎

1. まえがき トンネルと立坑（あるいは地中管路と人孔等）の接合部（取合い部）は耐震設計上，重要な検討箇所である。トンネルや立坑は，現在，地震時の地盤変位に基づいた応答変位法によって体系化されている。これに対し，接合部の耐震設計についてもこれと整合のとれた計算手法が必要である。

ここでは，立坑が地盤変位と同じ振動数で振動するものとの仮定を置いて，トンネルの耐震計算法と同じ応答変位法の手法で，接合部の耐震計算，すなわち，伸縮継手の突込み・拔出し量や剛結継手の断面力を計算する方法を提示し，若干の試算例を示す。

2. 計算モデルと計算法

(1) 伸縮継手の突込み・拔出し量 有限長 ℓ のトンネルを弾性床上の棒要素で表わし，地震動変位， $u_G(x, t, z) = Z_1(z) \sin(\omega t - 2\pi x / L_1)$ がこれに作用したとするとトンネルの軸方向変位 u は次式で表わさる。

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} + K_1 u = K_1 Z_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{L_1}\right) \quad \dots\dots (1)$$

ここに， EA ：トンネル軸方向剛性， K_1 ：軸方向地盤ばね， Z_1 ：波動の変位振幅， L_1 ：波長， ω ：角振動数

この式の一般解は， $\xi = x / \ell$ において， $u = \alpha_1 Z_1 [a_1 \cosh \beta_1 \xi + a_2 \sinh \beta_1 \xi + \sin(\omega t - \gamma_1 \xi)] \dots\dots (2)$

軸力は， $P = EA \frac{du}{dx} = \alpha_1 P_0 \left[\frac{\beta_1}{\gamma_1} (a_1 \sinh \beta_1 \xi + a_2 \cosh \beta_1 \xi) - \cos(\omega t - \gamma_1 \xi) \right] \dots\dots (3)$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L_1} \right)^2 \frac{EA}{K_1}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\beta_1} \right)^2}$$

(α_1 ：地盤からのひずみ伝達率)

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \ell, \quad \gamma_1 = \frac{2\pi \ell}{L_1}$$

$$\frac{\gamma_1}{\beta_1} = \frac{2\pi}{L_1} \sqrt{\frac{EA}{K_1}} = \sqrt{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1}}$$

$$P_0 = EA \frac{\gamma_1 Z_1}{\ell} = EA \frac{2\pi Z_1}{L_1}$$

(P_0 ：強制変位を受ける無限連続棒の軸力振幅)

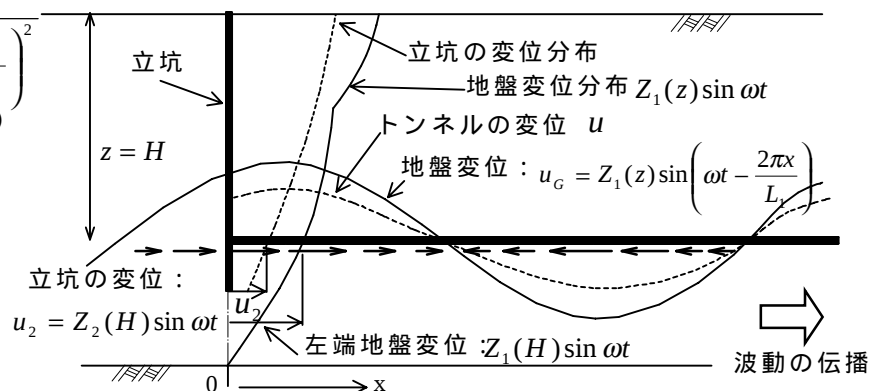


図1 接合部のモデルと地盤変位

有限長トンネルの両端で軸力 = 0 の境界条件を置いて積分定数 a_1, a_2 を決定し，トンネル長が十分大きいと仮定すると ($\beta_1 \gg 1$) トンネル左端の変位 u_1 は式 (4) で求められる。

$$u_1 = \sqrt{\alpha_1} Z_1 \sin(\omega t - \theta_1) \quad \dots\dots (4) \quad (\tan \theta_1 = \gamma_1 / \beta_1 = \sqrt{(1 - \alpha_1) / \alpha_1})$$

いま，立坑が地盤とは異なる振幅で変位： $u_2 = \pm Z_2 \sin \omega t$ (角振動数は同じ，位相 ($\pm$) は地盤と同位相もしくは逆位相) するとすると，接合部の突込み・拔出しの相対変位 $\Delta u = u_1 - u_2$ は式 (5) となる。

$$\begin{aligned} \Delta u &= \sqrt{\alpha_1} Z_1 \sin(\omega t - \theta_1) \mp Z_2 \sin \omega t \\ &= \sqrt{\alpha_1} Z_1 (\sin \omega t \cos \theta_1 - \cos \omega t \sin \theta_1) \mp Z_2 \sin \omega t \quad (\tan \theta_2 = \frac{\sqrt{\alpha_1(1 - \alpha_1)}}{\pm (Z_2 / Z_1) - \alpha_1}) \\ &= -Z_1 \sqrt{(Z_2 / Z_1)^2 + (1 \mp 2Z_2 / Z_1) \alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで，次の関係を利用した。

$$\cos \theta_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\gamma_1 / \beta_1)^2}} = \sqrt{\alpha_1} \quad \sin \theta_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} = \sqrt{1 - \alpha_1} \quad \dots\dots (6)$$

キーワード：耐震設計法，トンネル，立坑，接合部，応答変位法，地中管路

連絡先：〒542-0082 大阪府中央区島之内 1-20-19 (株) ニュージェック Tel/Fax06-6245-4901/06-6251-2565

特に、立坑の剛性が比較的小さく地盤と同じ変位をする場合 ($Z_2 / Z_1 = 1$, 同位相) , 接合部の伸縮継手の突込み・拔出しの振幅 $|\Delta u|$ は、地盤の振幅 Z_1 の $\sqrt{1-\alpha_1}$ 倍となる。

立坑回転の影響を考慮した伸縮継手の突込み・拔出し量は、回転の位相が水平変位と同じと仮定すれば、回転 θ による付加分 $\delta = (D_o/2)\theta$ を加えればよい。ここに、 D_o はトンネル外径である。

(2)剛結継手の軸力 立坑とトンネルが剛結されている場合を扱うために、有限長トンネルの両端で地盤変位と同じ振動数で同もしくは逆位相(±) で変位する境界条件を仮定し、その振幅を Z_2 として、積分定数 a_1 , a_2 を決定し、トンネル長が十分大きいとすれば、トンネル左端の軸力 P_1 は次式で表される。

$$P_1 = -\alpha_1 P_0 \left[\frac{\beta_1}{\gamma_1} \left(\frac{\pm Z_2}{\alpha_1 Z_1} - 1 \right) \sin \omega t + \cos \omega t \right] = -P_0 \sqrt{\frac{(Z_2 / Z_1)^2 \alpha_1 + (1 \mp 2 Z_2 / Z_1) \alpha_1^2}{1 - \alpha_1}} \sin(\omega t + \theta_2) \dots\dots (7)$$

特に、トンネル端部が立坑に剛結され、立坑が地盤と同じように変位する場合 ($Z_2 / Z_1 = 1$, 同位相) , 接続部での軸力振幅 $|P_1|$ は、強制変位を受ける無限連続の場合の軸力振幅 P_0 の $\sqrt{\alpha_1}$ 倍となる。

このように伸縮継手への変位伝達率 $\alpha_E = |\Delta u| / Z_1$ および剛結継手による軸力発生率 $\alpha_R = |P_1| / P_0$ は、ひずみ伝達率 α_1 と立坑 / 地盤振幅比 Z_2 / Z_1 で決まり、図-2(a),(b)のようである。

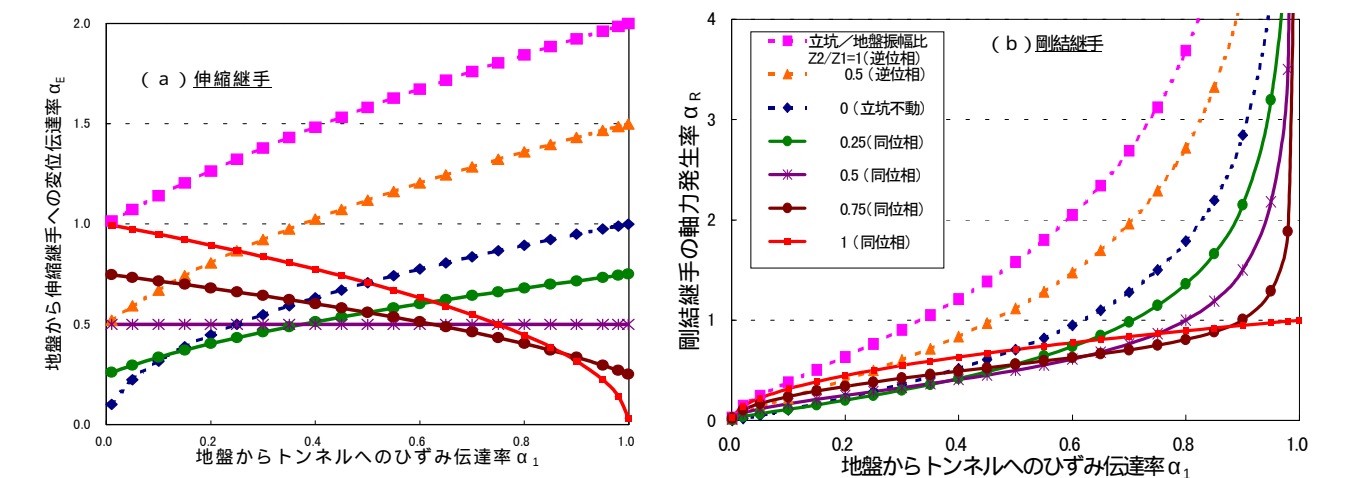


図-2 伸縮継手への変位伝達率と剛結継手の軸力発生率

3．計算例

立坑（外径φ 1 7 m，根入れ 7 0 m）に伸縮継手接続部を設けた場合の計算例を示す。トンネルとの接合部の深さは、15m，35m，60m の 3 ケースを考える。トンネルは R C セグメント製とし、圧縮軸剛性で評価した。立坑の変位および回転角は、別途、鉛直方向の地盤変位分布を与えて応答変位法によって求めたものであり、地盤と同位相の変位・回転である。伸縮継手および剛結継手とした場合の計算結果を表-1 に示す。

表-1 立坑・トンネル接合部における伸縮継手の突込み・拔出し量(ケース:RCセグメント製シールドトンネル, t=0.2m)
軸方向等価剛性EA(kN) 9.957E+07 外径Do(cm) 510

接合部の深さ	地震動レベル	波速Vs (m/s)	地震時せん断剛性 G(kN/m ²)	地盤ばね K _i (kN/m ²)	波長 L _i (m)	地盤変位振幅 Z ₁ (cm)	立坑変位振幅 Z ₂ (cm)	立坑地盤振幅比 Z ₂ /Z ₁	ひずみ伝達率 α ₁	伸縮継手への変位伝達率 α _E	突込み・拔出し量 Δu (cm)	立坑回転角 θ (mrad)	立坑の回転を考慮 (cm)	剛結継手の軸力発生率 α _R
15m	L1	130	1.44E+04	2.88E+04	420	2.84	2.60	0.915	0.564	0.608	1.726	0.850	1.943	0.691
	L2		6.52E+03	1.30E+04	420	12.24	9.10	0.743	0.369	0.611	7.476	3.500	8.368	0.467
35m	L1	240	7.81E+04	1.56E+05	420	1.36	1.35	0.993	0.875	0.351	0.477	0.450	0.592	0.929
	L2		4.73E+04	9.47E+04	420	4.47	4.40	0.984	0.809	0.430	1.922	1.950	2.419	0.886
60m	L1	350	2.35E+05	4.69E+05	420	0.46	0.45	0.980	0.955	0.210	0.096	0.310	0.175	0.962
	L2		1.74E+05	3.48E+05	420	1.74	1.70	0.977	0.940	0.241	0.419	1.000	0.674	0.951

深さ別の各ケースでみると、接合部の深さが深くなるにつれ、地盤の剛性が大きくなって地盤からのひずみ伝達率は 1 に近づき、伸縮継手への変位伝達率は小さくなるとともに、地盤の変位そのものも小さくなることから伸縮継手の突込み・拔出し量は大いに小さくなるが、深部では立坑の回転の影響が小さくない。

4．まとめ 立坑・トンネル接合部の耐震計算法について、応答変位法により定式化した。接合部の相対変位および断面力が地盤からのひずみ伝達率 α_1 と立坑 / 地盤振幅比で特徴づけられることがわかった。本法は、接合部での曲げ・せん断についても同様に展開できるので追って報告したい。なお、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」（委員長：土岐憲三京大教授）の初年度の研究活動の一部として実施したものである。