

III - 372 NATMの設計における理論解の適用

中部電力株式会社 正 土山茂希 正 入川 誠
清水建設株式会社 正 河田孝志 正 熊坂博夫

1. はじめに

トンネル設計手法として、地質条件、断面形状、加背割方法の複雑性よりFEM、BEMに代表される数値解析手法が用いられることが多い。数値解析手法は得られる情報は多いが、入力作業に時間がかかり、計算コストも高くつく。一方理論解析手法は、計算をプログラム化しておけば、入力は簡単であり、計算コストも安い。しかし、解析条件が制限されるため、実際の設計に用いられる例は少ない。今回、中電山手通りの設計において、解析手法として、Kirsch, Einstein & Schwartz らの提案する手法、ならびにFEM解析手法を用いて解析を行い、理論解析手法のトンネル設計における適用性について考察したので報告する。

2. 解析手法

2.1 無背割の場合のトンネル壁面変位の算定方法

図-1に示す無限弾性体中の円孔モデルの応力はKirschの解として次式で示される。

$$\sigma_r = \frac{P}{2} \frac{1}{1-\nu} \left\{ 1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 \right\} + \frac{P}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left\{ -1 + 4\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{R}{r}\right)^4 \right\} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2} \frac{1}{1-\nu} \left\{ 1 + \left(\frac{R}{r}\right)^2 \right\} + \frac{P}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left\{ 1 + 3\left(\frac{R}{r}\right)^4 \right\} \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left\{ 1 + 2\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{R}{r}\right)^4 \right\} \sin 2\theta \quad (3)$$

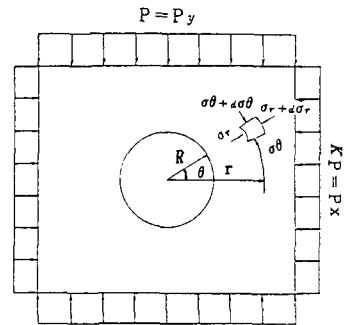


図-1 無限地山内円形トンネル

応力ひずみ-変位の関係より掘削前の半径方向変位 U_r^0 は(4)式で求まる。トンネル掘削後の半径方向変位は、応力関数を積分すると(5)式となる。したがって、トンネル壁面変位 U_r は $U_r = U_r^1 - U_r^0$ で求まる。

$$U_r^0 = \frac{(1+\nu)}{2E} \left[(1-2\nu)(P_x+P_y) + (P_x-P_y)\cos 2\theta \right] \cdot r \quad (4)$$

$$U_r^1 = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\left(\frac{P_x+P_y}{2} \right) \left(r + \frac{R^2}{r} \right) + \left(\frac{P_x-P_y}{2} \right) \left(r + \frac{R^4}{r^3} + \frac{4R^2}{r} \right) \cos 2\theta \right] - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \left[\left(\frac{P_x+P_y}{2} \right) \left(r + \frac{R^2}{r} \right) - \left(\frac{P_x-P_y}{2} \right) \left(r + \frac{R^4}{r^3} + \frac{R^2}{r} \right) \cos 2\theta \right] \quad (5)$$

2.2 支保部材を考慮した壁面変位、支保部材応力の解析方法

Einstein, Schwartz²⁾は、支保部材と地山の境界における釣合方程式、 $\sigma_r = \sigma_R$, $\tau_{r\theta} = \tau_{R\theta}$, $U_r = U_R$ $U_r = U_{OR}$ より、地山の応力ならびに壁面変位を次式で求めている。

$$\sigma_R = \frac{1}{2} P(1+K)(1-a_0^*) - \frac{1}{2} P(1-K)(1-6a_2^* + 4b_2^*) \cos 2\theta \quad (6)$$

$$\tau_{R\theta} = \frac{1}{2} P(1-K)(1+6a_2^* - 2b_2^*) \sin 2\theta \quad (7)$$

$$\frac{U_R E}{PR(1+\nu)} = \frac{1}{2} (1+K)a_0^* + \frac{1}{2} (1-K)(4(1-\nu)b_2^* - 2a_2^*) \cos 2\theta \quad (8)$$

$$\frac{U_R E}{PR(1+\nu)} = -(1-K)(a_2^* + (1-2\nu)b_2^*) \sin 2\theta \quad (9)$$

ここに、

$$a_0^* = \frac{C^* F^* (1-\nu)}{C^* + F^* + C^* F^* (1-\nu)}, \quad b_2^* = \frac{C^* (1-\nu)}{2 [C^* (1-\nu) + 4\nu - 6\beta - 3\beta C^* (1-\nu)]} \\ \beta = \frac{(6+F^*) C^* (1-\nu) + 2F^* \nu}{3F^* + 3C^* + 2C^* F^* (1-\nu)}, \quad a_2^* = \beta b_2^*, \quad C^* = \frac{ER^3(1-\nu_s^2)}{E_s A_s (1-\nu^2)}, \quad F^* = \frac{ER^3(1-\nu_s^2)}{E_s I_s (1-\nu^2)}$$

ここで、 E ：地山の変形係数、 E_s ：ライニングの変形係数、 A_s ：単位奥行き当りのライニングの断面積
 ν ：地山のポアソン比、 ν_s ：ライニングのポアソン比、 I_s ：単位奥行き当りのライニングの断面2次モーメント
 支保部材の軸圧縮力 T 、曲げモーメント M は、次式に示す微分方程式で表される。

$$R \frac{dT}{d\theta} - \frac{dM}{d\theta} = -R^2 \tau_{RO} \quad (10) \quad RT + \frac{d^2M}{d\theta^2} = R^2 \sigma_R \quad (11)$$

(10)、(11)式に(6)、(7)式で求めた σ_R 、 τ_{RO} を代入し連立方程式を解くと、 T 、 M は次式で求まる。

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2} (1+K) (1-a_0^*) + \frac{1}{2} (1-K) (1+2a_0^*) \cos 2\theta \quad (12)$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{4} (1-K) (1-2a_0^* + 2b_0^*) \cos 2\theta \quad (13)$$

3. 解析条件

解析ケースは、①標準部の土被りが浅い場合、($E = 250 \text{ kgf/cm}^2$)、②土被りが深い場合 ($E = 500$)、中間入孔部 ($E = 500$) について行った。なお、FEM解析は弾性解析とし、地層、トンネル形状を考慮した。今回の解析に用いた地質等の詳細については参考文献³⁾に示す。

4. 解析結果と考察

表-1に解析結果を一覧し、図-2に壁面変位の断面分布を、図-3に吹付けコンクリート応力の断面分布を示す。

なお、FEM解析の壁面変位量は、剛体変位成分を除いた。

壁面変位は標準部の土被りが深い場合はよく一致しているが、土被りが浅い場合、中間入孔部についてはFEM解析が理論解の約2倍となっている。これは、トンネル径に比べて土被りが浅いため、さらに中間入孔部ではトンネル天端部に分布する粘土層 (D_c 層) の影響と思われる。

吹付けコンクリート応力は、 $E_{sc} = 150,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_{sc} = 20,000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合とも、比較的良好に一致している。

5. おわりに

理論解析手法とFEM解析手法を同一のトンネルに用い、結果の比較を行った。トンネル形状が比較的円形に近く、壁面変位、吹付けコンクリート応力ともに、比較的良好に一致しており、設計手法として適用可能であると考えられる。

今後、ロックボルトの評価方法を考慮した方法や、地表面の影響を考慮した方法などについてその適用性等を検討し、理論解によるトンネル設計手法を確立したいと考えている。

(参考文献)

- 1) 今田 徹 ; 岩盤力学入門, トンネルと地下 1985年11月
- 2) H.Einstein, W.Schwartz ; Simplified Analysis for Tunnel

Supports, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, April 1979.

- 3) 近藤, 岐部 他 ; 圧気工法を併用したNATMの設計と施工, 土木学会第41回年次講演会, 第VI部門

表-1 理論解とFEM解析結果の比較

		壁面変位量 (mm)						吹付けコンクリート応力 (kgf/cm ²)					
		理論解			FEM解析			理論解			FEM解析		
		無普請	Esc=150000	Esc=20000	無普請	Esc=150000	Esc=20000	Esc=150000	Esc=20000	Esc=150000	Esc=20000	Esc=150000	Esc=20000
標準部 土被り 浅い場合 h/D=1.5	天端①	13.0	3.3	4.8	22.3	4.4	5.4	13.1	11.9	9.2	8.6		
	側壁②	12.0	1.9	3.1	17.9	0.5	1.5	14.9	13.5	10.9	10.3		
	側壁③	5.0	-3.0	-2.8	10.1	-1.6	-0.9	20.9	18.9	14.3	13.6		
	踏前④	9.0	-0.4	0.3	12.5	-3.2	-2.3	17.7	16.0	13.5	12.7		
	インバート⑤	13.0	3.3	4.8	20.4	7.1	7.9	13.1	11.9	11.6	10.9		
標準部 土被り 深い場合 h/D=6.5	天端①	26.0	7.2	10.8	28.4	7.2	10.6	37.7	30.7	35.8	29.0		
	側壁②	22.0	3.9	7.1	22.2	1.5	4.9	43.1	35.4	43.2	36.0		
	側壁③	9.0	-6.0	-3.9	8.8	-3.3	-1.2	59.2	49.7	55.4	46.9		
	踏前④	17.0	-0.6	0.2	15.4	-3.6	-0.5	50.3	41.8	48.5	40.9		
	インバート⑤	26.0	7.2	10.8	27.5	10.5	13.1	37.7	30.7	35.9	28.5		
中間入孔部 h/D=3.0	天端①	34.0	9.9	15.0	79.7	18.9	24.5	35.9	28.1	37.5	34.0		
	側壁②	29.0	5.4	10.1	58.6	2.6	8.2	40.9	32.6	43.2	37.8		
	側壁③	12.0	-8.2	-4.6	15.6	-5.7	-2.5	56.1	45.9	52.6	44.3		
	踏前④	21.0	0.7	3.5	18.9	-5.5	-7.9	47.7	38.6	46.5	38.5		
	インバート⑤	34.0	9.9	15.0	28.9	16.0	20.5	35.9	28.1	34.4	26.6		

* h/D = 土被り/トンネル直径

** Esc は吹付けコンクリート弾性係数 (kgf/cm²)

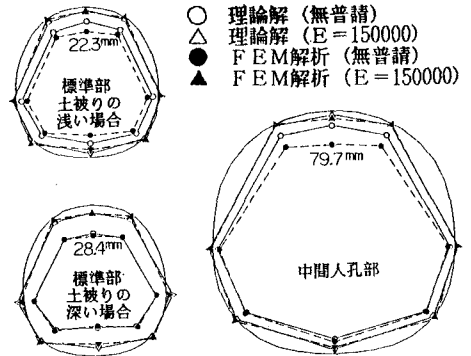


図-2 壁面変位分布

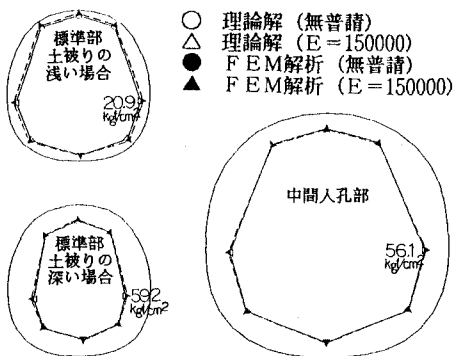


図-3 吹付けコンクリート応力分布