

III-274 悪質地山における NATM の合理的な設計

前田建設工業(株) 正会員 梨本 裕 高森 貞彦

1. はじめに

良質地山に対しては NATM の標準支保パターンが確立されているが、悪質地山に対しては設計手法が確立されているとは言えないのが現状である。NATM の適応範囲を拡大していくためにも、また、その拡大に対応していくためにも、悪質地山における NATM の設計手法を確立する必要がある。その際、Fenner-Pacher 曲線とも呼ばれる支保圧(支保による内圧)-変位曲線の利用方法が課題になると考えられる。この曲線には、悪質地山の場合、最小(かつ極小)支保圧が存在すると言われており、これを目標にすれば合理的な設計に結び付くと考えられるが、同時に、それでは大きな変位を許し過ぎるという懸念もあり、最小支保圧が設計目標として最適のものであると断定できないからである。円形トンネルにおいて覆工応力が許容値と一致する状態で設計内空を確保するという条件を付けると、支保圧-変位曲線から掘削半径(=設計内空半径+覆工厚+地山変位)-変位曲線に変換できる。前者に最小支保圧が存在する場合、後者にも最小(かつ極小)掘削半径が存在し、しかも、最小掘削半径を与える変位は最小支保圧のそれ以下になる。

本文では、最小支保圧と最小掘削半径の設計目標としての有用性を比較検討した。

2. 最小支保圧と最小掘削半径

(1) 支保圧-変位曲線

初期地圧が等方で一様な地山における円形トンネルを想定する。弾性地山の強度降伏条件と塑性地山の降伏応力条件を(1)、(2)式で定義し、塑性変形に伴う平均体積歪を e とすると、トンネル壁面の地山変位 U と壁面に作用する支保圧 P の関係は(3)~(6)式で表される。

$$\tau = C_p + \sigma \cdot \tan(\phi_p) \cdots \cdots (1) \quad \tau = C_r + \sigma \cdot \tan(\phi_r) \cdots \cdots (2)$$

τ : せん断応力 C_p, ϕ_p : ピーク強度時の粘着力, 内部摩擦角

σ : 垂直応力 C_r, ϕ_r : 残留強度時の粘着力, 内部摩擦角

$$U = R - \{(Ra - Ua)^2 - (1 + e) \cdot (Ra^2 - R^2)\}^{1/2} \cdots \cdots (3) \quad R : \text{掘削半径}$$

$$Ra = R \cdot \{(\sigma_{ra} + \lambda \cdot Q_r) / (P + \lambda \cdot Q_r)\}^\lambda \cdots \cdots (4) \quad Ra : \text{弾塑性境界半径}$$

$$Ua = Ra \cdot (\sigma_o - \sigma_{ra}) \cdot (1 + \nu) / E \cdots \cdots (5) \quad Ua : \text{ " 変位}$$

$$\sigma_{ra} = (2 \cdot \sigma_o - Q_p) / (1 + \xi) \cdots \cdots (6) \quad \sigma_{ra} : \text{ " 半径方向応力}$$

$$Q_p = 2 \cdot C_p \cdot \cos(\phi_p) / (1 - \sin(\phi_p)) \quad E : \text{地山の弾性係数}$$

$$Q_r = 2 \cdot C_r \cdot \cos(\phi_r) / (1 - \sin(\phi_r)) \quad \nu : \text{ " ポアソン比}$$

$$\lambda = (1 - \sin(\phi_r)) / 2 / \sin(\phi_r) \quad \sigma_o : \text{初期地圧}$$

$$\xi = (1 + \sin(\phi_p)) / (1 - \sin(\phi_p)) \quad e : \text{塑性領域の平均体積歪}$$

ただし、塑性領域が発生しない $Ra \leq R$ のときは(7)式で表される。

$$U = R \cdot (\sigma_o - P) \cdot (1 + \nu) / E \cdots \cdots (7)$$

上記の式では地山の自重による物体力の影響を無視しているので、P. Eggerの考えに従って(8)式に示すように塑性領域の自重を支保圧に付加する。

$$P_i = P + (Ra - R) \cdot \gamma \cdots \cdots (8) \quad \gamma : \text{地山の単位体積重量} \quad P_i : \text{塑性領域の自重を考慮した支保圧}$$

P をパラメータにして(3)~(8)式により U と P_i を求めると支保圧-変位曲線が作成できる。

(2) 支保圧-変位曲線から掘削半径-変位曲線への変換

(1)の支保圧と変位の関係においては設計内空と覆工の安全性が考慮されていない。覆工応力が許容値と一致する状態で設計内空を確保するには(9)と(10)式で与えられる掘削半径 R_o と覆工厚 T が必要である。

$$R_o = R_i \cdot \sigma_{ca} / (1 - U/R) / (\sigma_{ca} - P) \cdots \cdots (9)$$

$$T = R_i \cdot P / (\sigma_{ca} - P) \cdots \cdots (10) \quad R_i : \text{設計内空半径} \quad \sigma_{ca} : \text{覆工応力の許容値}$$

覆工厚は覆工を円筒シェルと見なして計算するが、覆工が負担する支保圧は(9)式に示すように塑性領域の自重を含まないPとし、この塑性領域の自重はロックボルトが支保するものとする。ロックボルトの変位抑止効果を無視すれば、(8)と(9)式により支保圧－変位曲線から掘削半径－変位曲線へ変換できる。

(3) 支保圧－変位曲線と掘削半径－変位曲線

表－1の計算条件のとき、図－1の支保圧－変位曲線と掘削半径－変位曲線が得られる。この図から、最小支保圧が存在するときには最小掘削半径も必ず存在するが、その逆は必ずしも成立するとは限らないこと、しかも、最小掘削半径を与える変位は最小支保圧のそれ以下になることなどが推察される。

3. 設計例

覆工厚は曲線上の設計目標点において(10)式により計算する。ロックボルトの長さLとピッチ b_1 (円周方向)は塑性領域を弾性領域に縫い付けることができるように(11)と(12)式により計算する。

$$L = B + L_o = (R_a / R - 1) \cdot R_o + L_o \cdots (11)$$

$$b_1 = R_o \cdot N_a / B / b_2 / \gamma / (R_o + B / 2) \cdots \cdots (12)$$

B : 緩み高さ N_a : ロックボルトの許容軸力

L_o : 定着長 b_2 : トンネル軸方向のピッチ

2のCase Cの条件に下記の条件を加え、ロックボルトの打設範囲をトンネル壁面全部(Case①)、上部2/3(Case②)、同1/2(Case③)、同1/3(Case④)としたときの施工費と変位の関係を図－2に示す。

$$R_i = 5\text{m} \quad b_2 = 1\text{m} \quad L_o = 1\text{m} \quad N_a = 15.2\text{t}$$

$$\text{掘削単価} = 1.5\text{万円}/\text{m}^3 \quad \text{覆工単価} = 3.5\text{万円}/\text{m}^3$$

$$\text{ロックボルト単価} = \{0.4 \times (L - 4) + 1.2\} \text{万円}/\text{本}$$

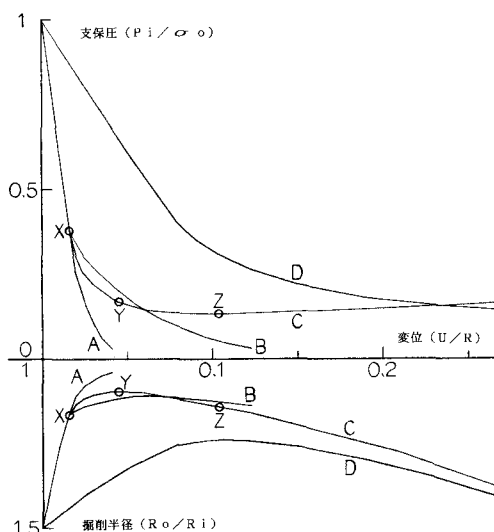
どの曲線上でも施工費は弾性限界に対応する点(これ以上変位を許すと塑性領域が発生する点で、図中のX)と最小支保圧に対応する点(図中のZ)で高く、最小掘削半径に対応する点(図中のY)付近で最小になっている。このことから、塑性領域の発生をある程度許した方が合理的な設計に結び付くが、その最適目標は最小支保圧ではなく最小掘削半径であることが示唆される。

4. おわりに

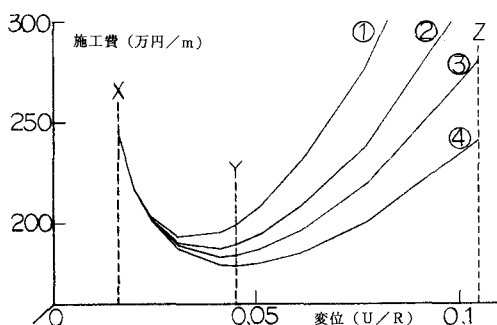
支保圧－変位曲線に最小支保圧が存在するような悪質地山におけるNATMトンネルでは、設計内空に対して最小掘削断面(円形断面の場合最小掘削半径)が存在し、しかも、これが設計目標として最小支保圧より合理的である可能性が高いことを示した。

表－1 計算条件

Case	A	B	C	D
条件				
E (t/m ²)	10000			2000
Cp (t/m ²)	28.9			5.77
Cr (t/m ²)	28.9		0.289	5.77
e	0	0.1	0	
Qp / σ_o	0.5			0.1
その他	$\sigma_o = 200 \text{ t/m}^2, \gamma = 2 \text{ t/m}^3$ $\nu = 0.3, \phi_p = \phi_r = 30^\circ, R = 5\text{m}$ $\sigma_{ca} = 600 \text{ t/m}^2, E = 100Q_p$			



図－1 支保圧－変位曲線と掘削半径－変位曲線



図－2 施工費－変位曲線(Case C)