

III-211 NATMによる円形トンネル周辺に生ずる塑性域内の変位について

徳島大学工学部 正員 小田 英一
徳島大学工学部 正員 堀田 政国

1. まえがき

円形トンネルの施工にNATM工法をとった場合のトンネル周辺地山に生ずる塑性域内の変位を求める問題は、従来より著者らが研究してきた塑性理論とロックボルトの塑性域内のスベリ線と切ることによる地山のせん断強度常数の増加するという理論と吹付コンクリート支保工のトンネル換算内圧の理論とロックボルトの引抜き抵抗のトンネル換算内圧の理論等を総合して解析できる。この場合地山のダイレタンシー角がトンネル変位に与える影響があるので、これらのことについて得られた知見について報告する。

2. 解析手法

NATM工法における吹付コンクリートのライニング材のトンネル土圧支持効果をトンネル内圧 P_i^s として表わすには次式によるものとする。

$$P_i^s = \frac{2d}{b \sin \alpha^s} \sigma_c^s, \quad b = 2r_0 \cos \alpha^s \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 α^s :ライニング材のせん断角、 σ_c^s :ライニング材の破壊せん断応力、 d :ライニング材の巻厚、 r_0 :円形トンネルのライニング外周円の半径、 σ_c :ライニング材の圧縮強度、とする。この場合で $\sigma_c^s = 0.43 \sigma_c$ 、 $\alpha^s = 30^\circ$ とすることとする。

ロックボルトのトンネル土圧支持効果を引抜き抵抗のトンネル換算内圧 P_b^s として評価する解法については、小田、堀田²⁾の研究によるものとする。つぎにトンネル周辺に塑性域が生ずるとき、ロックボルト挿入により地山のせん断強度常数が増加するが、この解析法については小田、堀田、笠井³⁾の研究の方法によることとする。

上述の方法により求めたロックボルト地山補強による地山のせん断強度常数を求めて、トンネル内圧 $p = P_i^s + P_b^s$ が作用する場合の素掘円形トンネルと考えると、トンネル周辺に塑性域が生ずるときの塑性域内のスベリ線、弾塑性境界、応力分布については、地山の降伏条件式と応力釣合条件式より求まる連立偏微分方程式を持帯理論によつて解析して求める。これについても小田、山上⁴⁾が研究しているもので、この方法によつて解析する。

つぎにトンネル周辺の塑性域の変位を求めるには、まずみ速度と速度との関係式とモールのみ速度円とダイレタンシー角を媒介とした体積み速度とせん断み速度との関係式とよりえらるる連立偏微分方程式を持帯理論によつて特性式を導き、線型尾分法による逐次近法によつて zero extension line と変位を求める解析法を小田、堀田、笠井⁵⁾の研究によつてえられたので、この方法によることとする。

3. 解析結果と考察

トンネル解析モデルとしては図-1に示すように以前に行つたトンネル模型実験³⁾をシミュレートした。図-2はロックボルト挿入によるロックボルト挿入による換算内部摩擦角を用いて弾塑性境界の大きさを比較した。ただし換算土の掘り高 $H = 397.2 \text{ cm}$ 、土の単位重量 $\gamma = 0.0019 \text{ g/cm}^3$ 、 $r_0 = 8 \text{ cm}$ 、吹付コンクリートを考えるときは $d = 0.2 \text{ cm}$ 、 $\sigma_c = 4 \text{ kg/cm}^2$ と仮定して $P_i^s = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ となる。参考のため図-3では、地山のせん断強度常数が図-1に示す値より大でトンネル周辺が弾性状態となると、吹付コンクリート内圧効果によるトンネル円孔変位 u の相違を検討した。特にトンネル頂部、側壁中心、底部中心の u については表にして比較している。また著者らが提案しているダイレタンシー角 ψ を用いた塑性論⁶⁾により解析したものが図-4(a), (b)である。図-4(a)は $\psi = -23.8^\circ$ の場合で地山が圧縮状態になる場合で、図-4(b)は $\psi = +5.0^\circ$ の場合で地山が膨張状態になる場合である。また本解析法をロックボルト挿入時にも適用し、その結果を表-1にまとめた。これより $\psi = +5^\circ$ の場合はロックボルト本数の増加に伴い u が小となつてゐる。 $\psi = -23.8^\circ$ の

場合はロックボルト本数の増加による中の増加にかかわらず u が多少大となっているが、図-4(a)に示す如くロックボルトの $p_1^R = 0.12 \text{ kgf/cm}^2$ (定着弛緩係数0.2と仮定)と $p_2^S = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ を考えれば、塑性領域はなくなり図-4の表に示す $p = p_1^R + p_2^S = 0.22 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の u の値となり、 u の値は小となってNATMの効果が見られることになる。

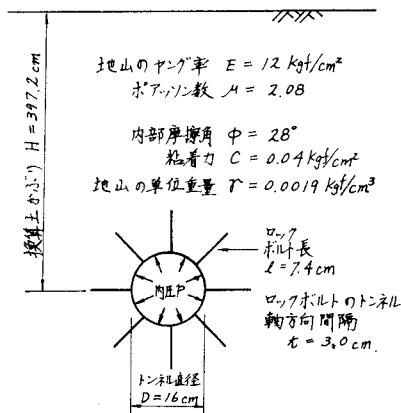


図-1 トンネル解析モデル

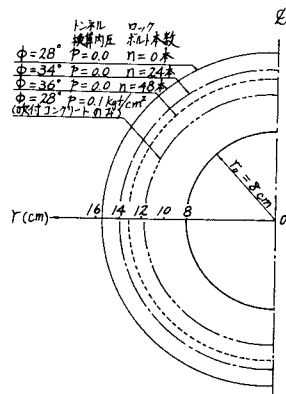


図-2 弾塑性境界

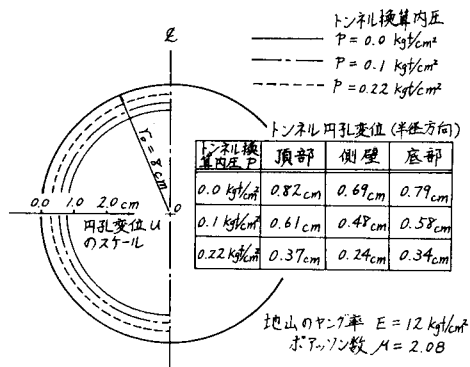


図-3 内圧が存在する場合のトンネル円孔変位 (弾性論)

表-1 ロックボルトのみの影響によるトンネル円孔変位 u (半径方向)

地山のダイラタンシ-角	地山の内部摩擦角	頂部	側壁	底部
$\nu = -23.8^\circ$	$\phi = 28^\circ$ (ボルト0本)	0.64 cm	0.52 cm	0.60 cm
	$\phi = 34^\circ$ (ボルト2本)	0.67 cm	0.53 cm	0.64 cm
	$\phi = 36^\circ$ (ボルト4本)	0.68 cm	0.54 cm	0.65 cm
$\nu = +5.0^\circ$	$\phi = 28^\circ$ (ボルト0本)	0.95 cm	0.92 cm	0.92 cm
	$\phi = 34^\circ$ (ボルト2本)	0.92 cm	0.86 cm	0.88 cm
	$\phi = 36^\circ$ (ボルト4本)	0.89 cm	0.81 cm	0.86 cm

備考：ロックボルトのあるときの中け地山の換算内部摩擦角である。

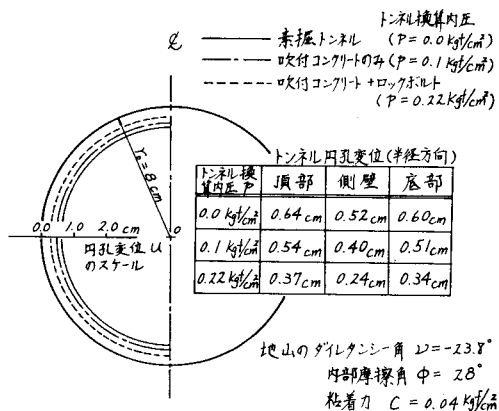


図-4(a) トンネル円孔変位 (ダイラタンシ-角 $\nu = -23.8^\circ$ の場合)

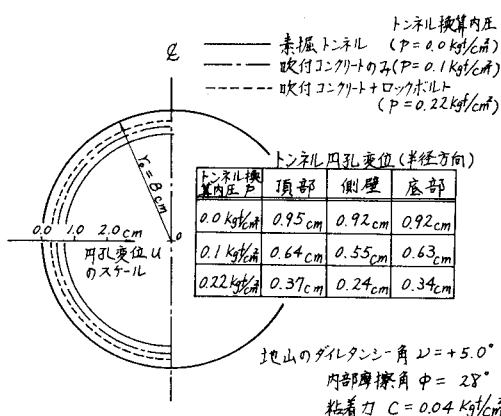


図-4(b) トンネル円孔変位 (ダイラタンシ-角 $\nu = +5.0^\circ$ の場合)

参考文献：1) 岡行俊，菅原勝彦，土木学会発行，地下構造物の設計と施工，昭和51年9月，pp.1~19，2) 小田英一，堀田政国，「弾性体としての地山中における円形トンネルのNATMの土圧支持理論について」，第16回土質工学会研究発表会昭和56年度発表講演集，3) 小田英一，堀田政国，佐井敬正，土木学会第34回学術講演会講演要集第3部，pp.563~564，4) Oda, E., Yamagami, T.: Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, June 1976, Vol. II, pp.847~858，5) 小田英一，堀田政国，佐井敬正：第15回土質工学会研究発表会昭和55年度発表講演集 pp. 825~828。