

V-37 岩盤における吹付コンクリートの施工効果について。

熊本組技術研究所 第1部長 正会員 犬塚本夫

熊本組技術研究所 第1部 正会員 上野正高

まえがき

最近発達してきた岩盤掘削における支保工形式には、従来の鋼アーチ式支保工に代って1)ロックボルト、2)吹付コンクリート、3)グラウト及び葉注等がある。これらの支保工の根本思想は、『周辺地山と協調して、地山の強さを利用する支保工形式』と考えられる。つまり地山強度を補強することにより、地山を自立させることを目的とする。本研究は、最近もちいられる機会の多くなったこれ等支保工の施工効果がどの程度期待出来るかを理論的に探求し、合理的施工方針を論じようとするものである。

(1)弾性体地山におけるトンネル周辺応力及び変形

問題を簡単化するためにトンネル断面を円形断面にかざると、

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
 \sigma_\theta &= \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
 \tau_{rt} &= \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta
 \end{aligned} \right\} \text{---- (1)}$$

但し P_1 : 垂直荷重

$$\left. \begin{aligned}
 \text{トンネル頂部の変位は } w &= \frac{P_1 \cdot r_a}{E} \frac{2m^2 - 3m + 1}{m(m-1)} \\
 \text{トンネル側部の変位は } u &= -\frac{P_1 \cdot r_a}{E} \frac{m^2 - 4m + 1}{m(m-1)}
 \end{aligned} \right\} \text{---- (2)}$$

r_a : トンネル半径

m : ポアソン数

(2)塑性体地山におけるトンネル周辺応力 (弾性体地山における塑性領域の発生)

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{rp} &= \frac{\sigma_{cd}}{K-1} \left\{ \left(\frac{r}{r_a}\right)^{K-1} - 1 \right\} \\
 \sigma_{\theta p} &= \frac{\sigma_{cd}}{K-1} \left\{ \left(\frac{r}{r_a}\right)^{K-1} K - 1 \right\} \\
 \tau_{rep} &= 0
 \end{aligned} \right\} \text{---- (3)}$$

但し σ_{cd} : 一軸圧縮強度

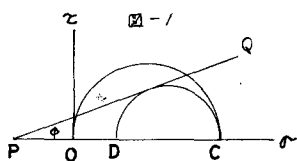
$$K = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\text{塑性領域の範囲 } r_0 = r_a \left\{ \frac{2}{K+1} \frac{P(K-1) + \sigma_{cd}}{\sigma_{cd}} \right\}^{\frac{1}{K-1}} \text{---- (4)}$$

(3)トンネルの安定性

岩盤中のトンネルが安定するか否かの判定にモールの応力円で検討する。

1)トンネル周辺応力が圧縮の場合



一軸試験より圧縮、せん断強度を求め内部摩擦角を計算しモールの円をえがく。図-1にて周辺応力を求めてC点に記入し $\widehat{OC}$ をえがく。 $\widehat{OC}$ がP-Q線を切る場合は周辺応力を $\widehat{DC}$ に減じないとトンネルは安定しない。

2)トンネル周辺応力が引張の場合

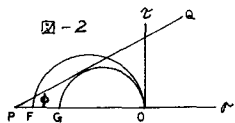


図-1の方法と同様方法で検討する。

つまり $\widehat{FO}$ はP-Q線を切るのでトンネルは崩壊する。したがって、 $\widehat{FO}$ なる引張力を $\widehat{GO}$ まで縮小することによって $\widehat{GO}$ は線P-Q

に接して、トンネルはつり合状態に保つことが出来る。

ハ) 支保工の安定力

図-1、図-2、で説明したように、モールの円でトンネルが安定するかどうかを検討する事が出来る。
以上を計算式で表現すると、

$$R_r = \frac{6.09R - 2.80 \tan \alpha}{\tan \alpha} \quad \text{---- (5)}$$

但し余：支保工の安定力

S_0 ：せん断力

R ：応力集中係数

α ： $45^\circ + \frac{1}{2}\phi$

(4) 余振による応力集中

余振によりトンネル内面の凹凸によって発生する応力集中を理論的に求める事は非常に困難である。
しかしながら、この問題はトンネル支保工を考える上に非常に重要である。従ってこれらの問題を解くために、比較的容易である光弾性実験によって、応力集中の傾向を研究してみた。

ハ) 光弾性実験による応力集中

実験により、表-1、表-2、の結果を得た。

表-1は余振(ノッチ)が任意の位置に発生した場合の余振(ノッチ)の深さに対する応力集中であり、表-2は余振が対称形に発生した場合のものである。
但し余振(ノッチ)の形状は相似形で、尖端には曲率をつけて無限大の応力集中がないように考慮した。

ロ) 理論値による応力集中

余振の形状を函数で表現することは非常に困難であるから、ここではハイポトロコイド座標により、正方形断面の隅角部を円形断面に対する余振部分に当ると考えることにより、その隅角部の応力集中を求めてみた。その結果を表-3に示す。

表-3 対称形余振の位置と応力集中、係数 R

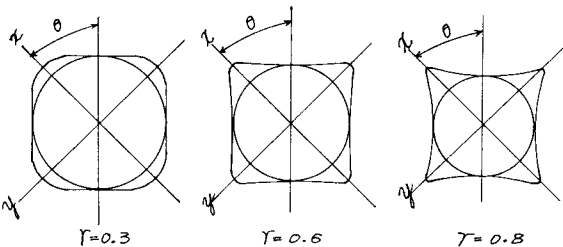


図-3 ハイポトロコイド座標の正方形断面による円形断面に対する余振形の近似。

表-3により余振による応力集中の傾向が推定出来る。
つまり余振の尖端が鋭角な場合には応力集中は無限大になるので計算しても無意味なものになる。結局理論的には求められたにしても、余振は全くランダムに生ずるから、それと全く一致した応力集中を求める事は出来ない。ある程度近似であれば満足するよりほかない。

以上の結果を統合すると表-3の結果を基礎にして、図-1及び図-2でトンネルの安定性を検討し、その結果にもとずいて(5)式により支保工の安定力を計算することが出来ることとなる。

表-1

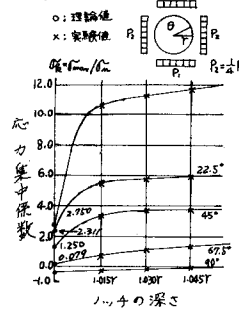
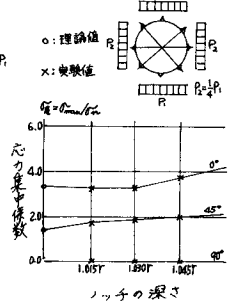


表-2



m	r	θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
5	0.3		-0.06	-0.26	1.13	2.32	3.51	4.38	4.70
	0.6		0.34	0.33	2.67	5.00	7.33	9.04	9.67
	0.8		1.13	2.50	6.20	11.25	16.30	20.00	21.38
6	0.3		-0.31	-0.03	0.96	2.23	3.49	4.42	4.76
	0.6		-0.19	0.48	2.31	4.79	7.28	9.11	9.78
	0.8		-0.03	1.43	5.38	10.78	16.18	20.13	21.58
7	0.3		-0.48	0.13	0.84	2.16	3.48	4.45	4.81
	0.6		-0.54	0.16	2.06	4.66	7.25	9.15	9.85
	0.8		-0.78	0.75	4.85	10.48	16.10	20.20	21.73
8	0.3		-0.60	0.23	0.76	2.12	3.48	4.47	4.84
	0.6		-0.74	-0.06	1.87	4.56	7.23	9.18	9.90
	0.8		-1.30	0.28	4.50	10.28	16.05	20.28	21.85

(5) 吹付けコンクリートの設計厚

(5)式により支保工の安定圧力を求める事が出来るが、あるいはその他の方法によってトンネルに作用する荷重が既知になった場合には、吹付けコンクリートの所要厚は次式によって求めることが出来る

$$\sigma = \frac{P \times a}{t} \quad \text{--- (6)}$$

但し、 σ : 吹付けコンクリートの許容応力

P : 一様な荷重 a : トンネル半径

t : 吹付けコンクリート所要厚

(6) 吹付けコンクリートの曲げの強さ

図-4を参照して、 a_0 : 歪み前の半径、 $a_0 - \Delta a$: 歪み後の半径、 $d\theta$: 歪み前の中心角、

$d\theta'$: 歪み後の中心角、 dl_0 : 歪み前の外側部材の長さ、 dl : 歪み前の中心軸の部材長さ、

dl_1 : 歪み前の内側部材の長さとする図-4の関係より、 $dl = (a_0 - \frac{t}{2}) d\theta = (a_0 - \frac{t}{2} - \Delta a) d\theta'$

$$d\theta' = \frac{a_0 - \frac{t}{2}}{a_0 - \frac{t}{2} - \Delta a} d\theta, \quad \Delta dl_0 = \left((a_0 - \Delta a) \frac{a_0 - \frac{t}{2}}{a_0 - \frac{t}{2} - \Delta a} - a_0 \right) d\theta,$$

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta dl_0}{dl_0} = \frac{\left[(a_0 - \Delta a) \frac{a_0 - \frac{t}{2}}{a_0 - \frac{t}{2} - \Delta a} - a_0 \right] d\theta}{a_0 d\theta} = \frac{\Delta a}{a_0} \frac{\frac{t}{2}}{a_0 - \frac{t}{2} - \Delta a}$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{t \cdot \Delta a}{a_0 a_0 \gamma}, \quad \text{同様にして } \epsilon_1 = -\frac{1}{2} \frac{t \cdot \Delta a}{a_1 a_0 \gamma}$$

以上の計算より吹付けコンクリートの曲げ強度(σ)は

$$\sigma = \epsilon E = \frac{E}{2} \frac{t \times \Delta a}{a_0 \times a_0 \gamma} \quad \text{--- (7)}$$

となる。

(7) 吹付けコンクリート設計の手順

a) R、T、M、工法等により理想的円形に弾性体地山に掘削が行なわれた場合及び、B工法等で掘削し、ほとんど余掘が無い場合は、(2)式によりトンネル変位を求めて(7)式に変位を代入して、

吹付けコンクリートの所要厚さを決める事が出来る。この手順を用いて覆工コンクリートの場合にも適用出来るものとする。

か) 発破工法等によって出来た不必要な余掘を吹付けコンクリートで充填する事により応力集中を解放することが可能である。余掘による応力集中をなくすることにより、地山が自立出来るか否かを検討する事が、図-1、図-2から可能である。その後でa)の考え方で所要厚さを求めて施工すれば、永久支保工としての吹付けコンクリートの効果が期待出来る。

o) 塑性体地山では(3)式によって求めたトンネル周辺応力を支持するに必要な吹付けコンクリートの所要厚さを求めることが出来る。

(8) 吹付けコンクリートと地山の通用性

a) 弾性体地山: 弾性体地山にトンネルを掘削する場合にトンネル壁面は普通凸凹になり応力集中をもたらす。さらにトンネルの内面に外力が作用しないので壁面の応力は全て接線応力でポアソン数が異なる場合によって応力分布が変化し引張応力及び圧縮応力が生じる。岩盤強度がいずれも大きい場合にはトンネルは崩壊しないで自立する。このような場合における吹付けコンクリートはまず壁面の凸凹を平滑にすることによって応力集中をなくすることに大変役立つものとする。

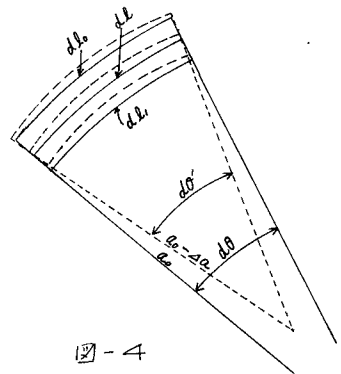


図-4

さらに弾性体岩盤にトンネルが掘削され、地山のつり合としてトンネル周辺にすべり面が生じるとトンネル周辺に塑性領域が形成される。その場合は(4)式により塑性領域の範囲を計算し(3)式によって周辺応力を求めて吹付けコンクリートを薄肉円筒の構造物と見なす十分な施工効果が期待出来る。

6) ゆるみを生じる地山：トンネルを掘削すると歪みエネルギーの解放と地山のつり合を保つために、トンネルは変形及び沈下をもたうす。従来ゆるみによるトンネルの荷重はトンネルの沈下に比例するものと考えられその結果グラントアーチを形成してつり合を保つ。したがってゆるみによる荷重は、グラントアーチ領域内の岩盤が作用するのでトンネル壁面の沈下量を出来るかぎり少なくすれば、ゆるみによる荷重も小さくなる事は当然である。普通トンネルが掘削されて支保工が施工されるまでにかかりの時間を要してしまう、その点吹付けコンクリートは他の支保工形式と異なり掘削と支保工の間隔を最も短縮する事が出来、点及び線形で支保することなく平面で支保するために経済的で安全性にすぐれている利点がある。

7) 膨張性の地山：地山の膨張圧は一般に粘土性の岩石が風化及び吸水し体積変化するものと考えられる。あるいは空気と水とにより化学的变化により岩石が体積変化する場合である。膨張圧については多くの議論がかわされていて根本的な原因はまだ明らかにされていない。

前述の原因で膨張圧が発生する場合には吹付けコンクリートは岩盤を風化させない事により最もすぐれた支保工の施工効果が期待出来る。しかしながら膨張性地山の大半は岩盤張度が地山の重力をささえるにまじりしために塑性流動をなし、トンネル荷重として作用している。明らかに膨張圧と塑性流動圧とを混同してはいけないもので塑性流動をなしている地山での吹付けコンクリートの施工効果を期待する事は非常に困難である。

(9) 結論

a). ①、②でトンネル周辺にはどれだけの応力が発生し、トンネルがどれだけ変形するかを検討した。

b). 前述のトンネル周辺応力に対して、トンネルが安定するのにどれだけの安定力が必要かを検討した。

c). 余振による応力集中の傾向を、光弾性実験と理論式とから近似的に推定した。

表一、表二、表三より吹付けコンクリートで余振を充填させるだけでどれだけ応力集中を減少させることが出来るかを推定し、これにより吹付けコンクリートの余振り充填による施工効果を解明した。

d). 吹付けコンクリートの機能及び施工効果を原理的に考察し、それにより合理的に吹付けコンクリートの設計及び施工をすることを提案し、本研究の結びとする。