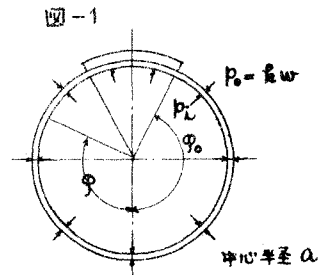


大阪大学工学部 正員 伊藤 富雄
大 林 組 正員 山崎 武則

1. 概説 グラウト注入を十分行なうように注意しても、圧カトンネルのライニングの背後には、しばしば空隙が残れそれがライニングの破壊の原因になる。しかし圧カトンネルの背後に空隙が存在する場合、それがライニングの強さに如何なる影響を与えるかについては、なお不明な点が多い。そこでわれわれは、この問題について理論的計算を行ない模型実験により検討を加えたので、その結果について報告する。

2. 理論解析 解析には薄膜理論を採用し、荷重としては右図-1に示すように内圧 P_i と地盤反力 $R \cdot w$ (R : 地山の地盤係数、 w : ライニングの半径方向の変位) を考え、かつ空隙にはこの $R \cdot w$ が作用しないとし、またパイプの自重を無視することにより基礎式は、
 $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$



$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + \frac{dw}{d\varphi} = 0$$

$$\frac{dw}{d\varphi} + w + \frac{D}{Na^2}(w + \frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{d^4 w}{d\varphi^4}) + \frac{a^2}{N}(Rw - P_i) = 0$$

$$\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi$$

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + \frac{dw}{d\varphi} = 0$$

$$\frac{dw}{d\varphi} + w + \frac{D}{Na^2}(w + \frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{d^4 w}{d\varphi^4}) - \frac{a^2}{N}P_i = 0$$

ここで u : 接線方向の変位 a : ライニングの中心線の半径 t : ライニングの肉厚
 ν : ライニングのポアソン比 E : ライニングの弾性係数
 $N = Et/(1-\nu^2)$ $D = Et^3/12(1-\nu^2)$

これらの方程式から変位 u , w を求め、さらに断面力 $M(\varphi)$, $N(\varphi)$, $S(\varphi)$ を導くと次式のようにになる。

$$0 \leq \varphi \leq \varphi_0$$

$$N(\varphi) = \frac{D}{a^3} [\sqrt{\eta^2 - 1} \{ C_4 \cosh \alpha \varphi \cos \beta \varphi - C_3 \sinh \alpha \varphi \sin \beta \varphi \} + (1 - \eta^2) C_1] + a P_i$$

$$M(\varphi) = \frac{D}{a^2} \{ C_1 + \sqrt{\eta^2 - 1} (C_4 \cosh \alpha \varphi \cos \beta \varphi - C_3 \sinh \alpha \varphi \sin \beta \varphi) \}$$

$$S(\varphi) = \frac{D}{a^2} \sqrt{\eta^2 - 1} \{ C_4 (\alpha \sinh \alpha \varphi \cos \beta \varphi - \beta \cosh \alpha \varphi \sin \beta \varphi) - C_3 (\alpha \cosh \alpha \varphi \sin \beta \varphi + \beta \sinh \alpha \varphi \cos \beta \varphi) \}$$

$$\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi$$

$$N(\varphi) = \frac{2D}{a^3} C'_4 \cos \varphi + a P_i$$

$$M(\varphi) = \frac{D}{a^2} (C'_1 + 2C'_4 \cos \varphi)$$

$$S(\varphi) = -\frac{2D}{a^3} \cdot C'_4 \sin \varphi$$

ここに $\eta = 1 + \{(1-\nu^2)a^4 R\}/EI$ $\alpha = \sqrt{(\eta-1)/2}$ $\beta = \sqrt{(\eta+1)/2}$ である。又積分定数 $C_1, C_3, C_4, C'_1, C'_3, C'_4$ は空隙と地山との境界における条件から決まるものである。

3. 実験概要と結果について

理論解析の結果と検証するために模型実験を行った。ライニングの模型には硬質塩化ビニールパイプを用い、その寸法は、内径45cm 外径47cm 長さ1mである。また地山の模型としては石膏を用い、その配合は水：焼石膏＝4：3（重量比）とした。パイプおよび石膏のE、νは次の通りである。

$$\text{パイプ} : E = 3.99 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \quad \nu = 0.38$$

$$\text{石膏} : E = 2.78 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2 \quad \nu = 0.17$$

載荷試験にさいしては、パイプ周辺に中心角20度に相当する空隙をつくり、またパイプ周辺には図-2に示す各点に、ストレインゲージを貼付し、内圧をかけたときの測定値から求めた断面力 $M(\theta)$, $N(\theta)$ は表-1 に示した。

さらに石膏の地盤係数を求めるために、空隙を同一配合の石膏でうめたのち、内圧をかけるとき、ゲージの測定値から軸力を求めた。そして次式により地盤係数は $k = 302.37 \text{ kg/cm}^2$ を得た。

$$k = E \{ a^2 t + (t^3/12) \} \{ (a p_i) / N_{\theta=0} - 1 \} / a^2 (1 - \nu^2)$$

さらに上記の諸値から求めた積分定数は

$$C_1 = 2.340,663 \times 10^{-3} \quad C_3 = 1.283,262 \times 10^{-14} \quad C_4 = 0.74,993 \times 10^{-14}$$

$$C'_1 = 50.861,995 \quad C'_3 = 50.805,621 \quad C'_4 = 25.764,455$$

であり、これらの値を前頁の諸式に代入して計算した断面力 $M(\theta)$, $N(\theta)$ は表-1 に理論値として示した。

4. 結論 表-1 からわかるように理論値と実験値の間には多少の相違はあるけれども、この実験の性質からすれば、一応満足すべき結果が得られたと思われる。それによって、圧カトンネルのライニングの空隙の影響は本論における方法で計算してよいと考える。空隙の影響は、曲げモーメントについては、その部分に局部的に現われている。軸力については空隙のない場合(5.14kg)に較べて2割以上の増加を示している。剪断力は、計算結果によると地山との境界において $S(\theta) = 2.86 \text{ kg}$ で軸力の2割強であった。ちなみに空隙中心(③)におけるパイプ外面の引張応力は実験値を例にとると 31.32 kg/cm^2 となり他の各点の4倍強であった。実際のコンクリートライニングの場合には本実験ほど曲げモーメントの影響は大きくないものと思われるが、空隙による局部破壊の可能性は十分にある。破壊には、別の2,3の計算結果によると、境界における剪断力によるものと、空隙中心におけるライニング外面での引張破壊の2通りが考えられるが、それは空隙の大きさ、地山及びライニングの弾性定数によって異なるものと思われる。以上、要するにライニング背後の空隙は、その強さに致命的な影響を及ぼすために、クラウト注入は十分に注意してなされねばならないことを示唆するものである。

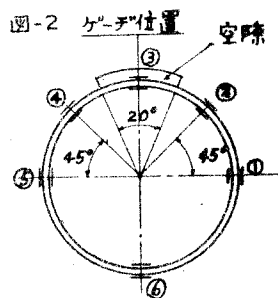


表-1

		単位		軸力(kg) 曲げモーメント(kg-cm)						
		ゲージ位置	①	②	③	④	⑤	⑥		
実験値	N(軸力)		6.98	6.38	7.48	5.98	5.89	5.39		
	M(曲げ)		0.03	0.07	-3.98	0.10	0.05	0.03		
理論値	N(軸力)		6.72	6.72	6.51	6.72	6.72	6.12		
	M(曲げ)		0.12	0.12	-4.90	0.12	0.12	0.12		

但し 圧力 $p_i = 1.00 \text{ kg/cm}^2$