

徳島大学工学部

正会員

小田英一

阿南工業高専

正会員

○米津 聖

高知工業高専

大谷 昌

徳島大学大学院

渡辺 弘

1. まえがき

トンネル地山の主働土圧が設計計算のように高さ一定の等分布荷重として働いてくることがなく、大部分の場合は偏荷重や集中荷重が土圧となって巻立トンネルアーチ部に作用する。トンネルの上部半断面底設導坑掘削段階における土圧付近の応力状態については前年度に報告した。¹⁾ 本研究はインバートアーチを有する巻立トンネルに鉛直土圧として鉛直集中荷重がトンネル拱頂に作用したとき、側壁底面およびインバートアーチ底面の反力分布と下壁の応力分布、地山周辺の応力分布を光弾性実験より求めた解析結果を示したものである。インバートアーチを有する巻立トンネルの設計で圧力線を図式解法で求めるとき、インバートアーチ部の圧力線の図式解法はトンネル側壁底面およびインバートアーチ底面の反力分布の割合が必要となる。これを求めるため本研究は意義があると考えられる。

2. 実験概要

トンネル周辺地山を形成する岩盤は複雑な性質を有しており、地山の成層状態や節理、片理、岩目などの存在によって、いわゆる異方性体と考えられるものが多いが岩盤を一般的に等質の二次元等方性弾性体と仮定し、地山、ライニンアの Model として共にエポキシ樹脂を用いた。エポキシ樹脂の力学的性質は光弾性感度 0.029 cm/kg 、板厚 4.00 mm 、ヤング率 $E_c = 30000 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.33 \sim 0.35$ である。トンネル半径 R に対するアーチ厚 t の比を 0.3 とした。実験方法として閉合したライニンア部（馬蹄形巻立にインバートアーチのある形）の供試体を写真-1のごとく作り、地山に作用する応力の単位荷重の主働土圧の作用方向がトンネル中心を通り鉛直線より水平方向に向かい、それぞれ $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の角度となって集中土

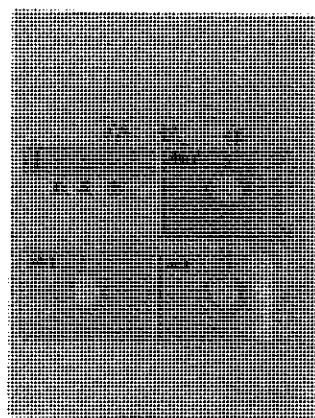


写真-1

圧がライニンアに作用した各種の場合を示す。なお今回は写真-2のごとく鉛直集中荷重がライニンアの拱頂に作用した場合（角度 0° の場合）について報告する。光弾性実験において、トンネル下壁および拱の地山の簡次数分布とその次数、等傾線を記録し、その上で主応力線を図上に記入して Shear Difference Method²⁾により直応力

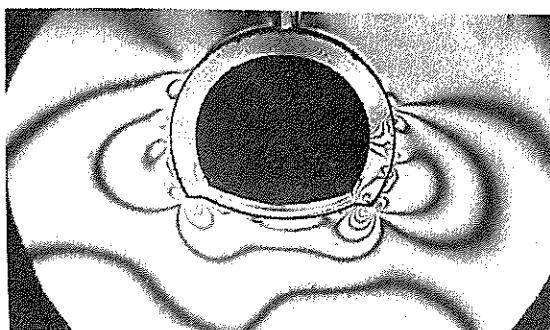


写真-2

せん断応力を求めた。

3. 実験結果とその考察

(i) トンネル周辺の応力解析

載荷重が鉛直線方向に作用した場合は写真-1の供試体 No.1 であり、これについて述べる。座標の水平軸を x 軸とし、鉛直軸を y 軸とすれば、水平方向直応力は σ_x 、鉛直方向直応力は σ_y 、せん断応力は τ_{xy} となる。載荷重を単位荷重 1 fringe とした供試体 No.1 におけるトンネル周辺の σ_x の分布を示したのが図-1 であり、トンネル周辺の σ_y の分布を示したのが図-2 であり、さらにトンネル周辺の τ_{xy} の分布を示したのが図-3 である。

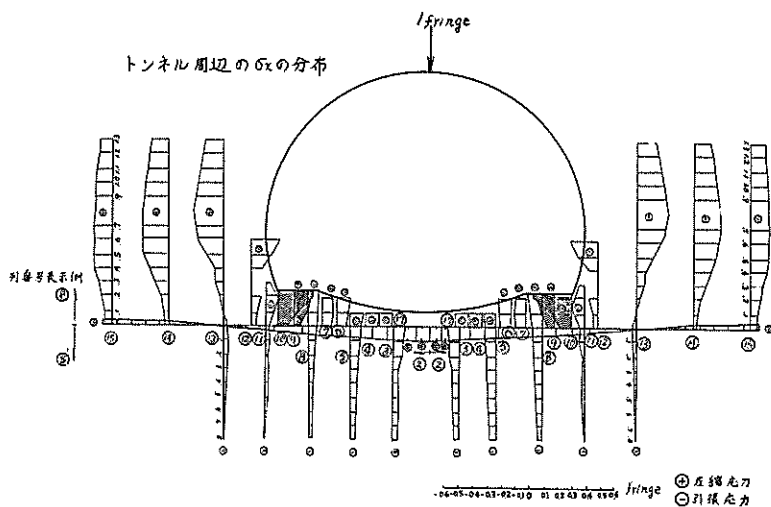


図-1

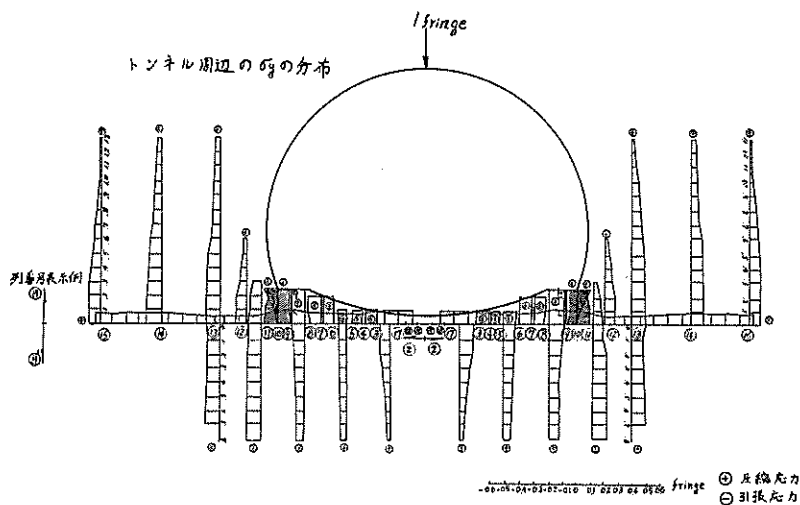


図-2

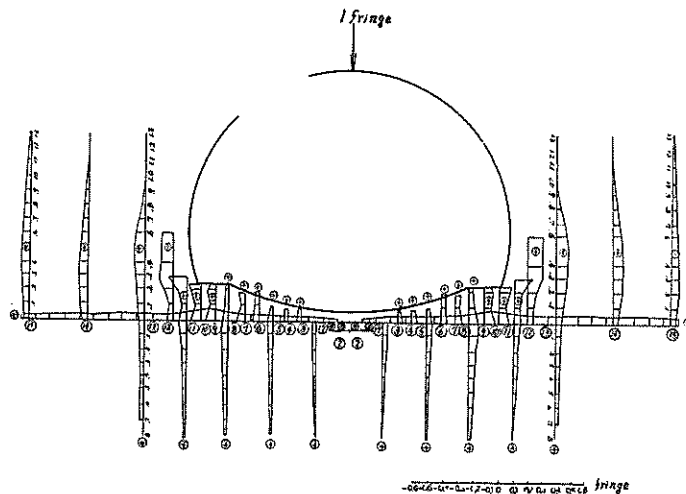


図-3

(ii) 実験の考察

トンネル周辺地山の σ_y の分布について(図-1参照): ライニンア部が閉合されているので上から集中荷重を受けるとアーチが降下して、巻立の左右が拡がることが予想される。実験値からその状態がわかる。すなわち⑩列、⑪列の6~10の点では大きい圧縮力が生じ、最大値は⑩列の8点で、1 fringe の載荷重に対して 0.218 fringe となっている。インバートアーチ下面においては引張が生じている。なお、垂直集中荷重 80 kg に対して側壁に作用する水平反力の合計は約 60 kg となった。

トンネル周辺地山の σ_x の分布について(図-2参照): トンネル側壁底面付近で大きい圧縮力を生じインバートアーチ下面では一様な圧縮応力が生じている。その値は脚部⑩列の25点では載荷重 1 fringe に対して 0.194 fringe でインバートアーチ下面では約 0.085 fringe である。

トンネル周辺地山の τ_{xy} の分布について(図-3参照): トンネルの形と載荷状態の左右対称性より鉛直中心軸上では $\tau_{xy} = 0$ となる。トンネル側壁底面において τ_{xy} が最大となることから、この付近に大きいせん断応力が働くことが予想され、実験においてもそれが現われている。すなわち、⑩、⑪、⑫列の2~6点では大きい値となっている。⑪列の3点において最大となり、その値は載荷重 1 fringe に対して 0.129 fringe を示している。

4. トンネル側壁底面およびインバートアーチ底面の反力分布について

光弾性実験において、鉛直集中荷重 $P = 80 \text{ kg}$ が拱頂に作用したときアーチ脚部、およびインバートアーチ面において反力が生じる。 R はインバートアーチ中央の底面反力としての応力とする。地山応力を求めるには R を求めるなければならない。座標方向の分割間隔 $\Delta x = 0.2 \text{ cm}$ 、供試体板の厚さ $d = 0.6 \text{ cm}$ とする。表-1の σ はトンネル側壁底面およびインバートアーチ底面の鉛直方向直応力である。鉛直集中荷重がトンネル頂点に作用しているため反力分布は左右対称となることから、鉛直方向の力の釣合条件式より

$$\sum \sigma_y \times \left(\frac{d}{\alpha d}\right) \times d \times d = \frac{1}{2} P \text{ ----- (1)}$$

$$\text{ただし } n = \alpha d$$

n : 縞次数 (fringe)

$\alpha = 0.0929 \text{ cm/kg}$: 光弾性感度

応力 / fringe は $\left(\frac{d}{\alpha d}\right) \text{ kg/cm}^2$ となる。(1)式の左辺は $d \times d \times \left(\frac{d}{\alpha d}\right) \times \sum \sigma_y$ となり、表-1より

$\sum \sigma_y = 13P - 5.231$ (fringe) が得られ、(1)式より P を求めると $P = 1.850$ (fringe) となる。これを表-1に代入して応力が求められる。このようにして求められたトンネル側壁底面およびインバートアーチ反力分布を図-4に示す。図-4によれば、トンネル半径 R に対するアーチの巻厚 t の比が 0.3 の場合、鉛直荷重の約 1/4 をトンネル側壁底面で受けることが判明した。

表-1 伏設体 No.11 の反力

区 間	R	σ_y (fringe)	σ_y (kg/cm ²)	反力 (kg)
0 ~ 1	$R = 0.166$	29.857	3.583	
1 ~ 2	$R = 0.150$	30.136	3.616	
2 ~ 3	$R = 0.276$	27.904	3.348	
3 ~ 4	$R = 0.487$	23.997	2.880	
4 ~ 5	$R = 0.588$	22.323	2.679	
5 ~ 6	$R = 0.515$	23.434	2.813	
6 ~ 7	$R = 0.457$	26.355	2.947	
7 ~ 8	$R = 0.347$	26.229	3.147	
8 ~ 9	$R = 0.012$	32.926	3.951	
9 ~ 10	$R = 1.218$	54.133	6.496	
10 ~ 11	$R = 0.611$	21.765	2.612	
11 ~ 12	$R = 1.342$	8.929	1.071	
12 ~ 13	$R = 1.522$	5.860	0.703	

$\sum \sigma_y = 13P - 5.231$ (fringe)
備考 反力 = $\sigma_y \times d \times d$ at 0.25m division

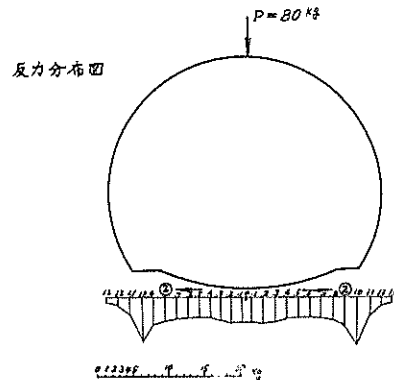


図-4

参考文献

- 1). 小田英一, 米澤 聖: トンネル逆巻工法におけるアーチ部完成時の荷重による地山応力の光弾性実験について 昭和45年7月 第22回 土木学会中四国支部学術講演集 7/68 ~ 7/71
- 2). Max Mark Frocht: Photo-Elasticity Volume 1 August 1949
- 3). 辻二郎, 西田正秀, 河田孝三共著: 光弾性実験法