

直交異方性弾性岩盤中のトンネルにおける 応力集中について

熊本大学 川本 昶 万

I 結 言

従来の研究の多くは地山と完全弾性体あるいは完全塑性体として取扱つてきている。しかし実際の現場においてわれわれが遭遇する岩盤は種々様々であつて、地山の成層状態、岩石の組織や成分鉱物の位置的差異、亀裂節理の発達、風化劣化の状態などのため、地山状態はかなり複雑な様相を呈していることは以前より指摘されているとありである。このような実際の岩盤や地層の性質を考慮した地山状態を考へるため、地山材料がある種のレオロギー特性を有する場合や、等質異方性、層状性、点対称性等の弾性性質をもつ場合を仮定して、それぞれの場合に対して個別に研究がすすめられるだろう。こゝではとくに地山の成層状態に伴う地山の弾性性質の異方性がいかにトンネル周辺の応力集中に影響を及ぼすかについて考察を行う。この場合トンネル周囲の岩盤の成層状態として重要なのは硬質地層に夾入する軟弱地層の性状およびトンネルと地層の走向、傾斜の関係である。このような関係から地山は非等方性の弾性体と見做され、理想的につぎの二つの場合が考へられる。まず地山の弾性性質が方向のみによつて変化する弾性係数を有するもので、いわゆる等質異方性体の場合である。つぎに弾性性質が方向および位置に關係するもので、具体的には岩盤が互に異なる弾性性質を有する層からなつてゐる場合である。後者においてとくに各層間の附着が充分であつたり、あるいは盤圧が小さくて層間のせん断破壊にうかつて層相互間に変位を生ずることのないような場合には、前者と同様に取扱うことができる。トンネルがある程度深い位置に掘削される場合には、地表面の影響を無視してトンネル位置における初期応力(盤圧)が無限遠において等分布に作用する場合を考えればよい。したがつてこの場合には円孔を含む直交異方性無限板として理論的に取扱うことができる。さらに直交異方性板に対する光弾性実験の適用も可能である。

II 単一円形トンネルの場合

1. 円孔を有する直交異方性板の応力式

図-1に示すごとく主弾性係数を E_1, E_2 ($E_2 > E_1$) とし、それらの方向を座標軸の方向に選い、 E_1 の方向が鉛直方向に作用する初期応力 p と角 δ をなすものとする。この場合の適合条件式は応力変数 F を用いればつぎのようになる。

$$a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + (2a_{11} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (1)$$

上式の各係数はいま平面ひずみ状態を考へれば、つぎのごとく弾性性質と關係している。

$$a_{11} = (1 - \nu_{13} \nu_{31}) / E_1, \quad a_{22} = (1 - \nu_{23} \nu_{32}) / E_2 \quad \left\{ \right.$$

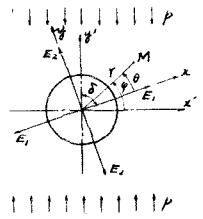


図-1

$$a_{12} = (V_{12} + V_{23}V_{32})/E_1, \quad a_{66} = 1/G_{12} \quad \} \quad (2)$$

上式で V_{12} , G_{12} は x 軸平面内のポアッソン比およびせん断弾性係数, V_{11} , V_{22} は x 軸方向に関する x 軸, y 軸方向のポアッソン比である。(1) 式の特性方程式の根はこの場合 $s_1 = i\beta_1$, $s_2 = i\beta_2$, $s_3 = -i\beta_1$, $s_4 = -i\beta_2$ (β_1 , β_2 は実の常数) となり, これらの係数はつきのように与えられる。

$$\beta_1^2 \beta_2^2 = a_{22}/a_{11}, \quad \beta_1^2 + \beta_2^2 = (2a_{12} + a_{66})/a_{11} \quad (3)$$

いま計算の簡単のために (2) においてポアッソン比の 2 乗の項が 1 に対して小さいから無視すれば, 平面応力状態の場合と同様になり, (3) はつきのごとくなる。

$$\beta_1^2 \beta_2^2 = E_1/E_2, \quad \beta_1^2 + \beta_2^2 = E_1/G_{12} - V_{12} \quad (4)$$

適合条件式 (1) を満足し, さらに境界条件:

$$\text{無限遠において, } \sigma_x^{(\infty)} = p \cos^2 \delta, \quad \sigma_y^{(\infty)} = p \sin^2 \delta, \quad \tau_{xy}^{(\infty)} = p \sin \delta \cos \delta$$

$$\text{円孔周辺において, } \sigma_r = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0$$

を満足するような応力関数³⁾を求め, それより円孔中心を原点とする極座標系の応力成分を算出すると

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -p(\cos \delta \cos \theta + \sin \delta \sin \theta)^2 + 2 \operatorname{Re}[(\sin \theta - i\beta_1 \cos \theta)^2 \varphi_0'(z_1) + (\sin \theta - i\beta_2 \cos \theta)^2 \psi_0'(z_2)] \\ \sigma_\theta &= -p(\cos \delta \sin \theta - \sin \delta \cos \theta)^2 + 2 \operatorname{Re}[(\cos \theta + i\beta_1 \sin \theta)^2 \varphi_0'(z_1) + (\cos \theta + i\beta_2 \sin \theta)^2 \psi_0'(z_2)] \\ \tau_{r\theta} &= -p\{\sin \delta \cos \delta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - (\cos^2 \delta - \sin^2 \delta) \sin \theta \cos \theta\} \\ &\quad + 2 \operatorname{Re}[(\sin \theta - i\beta_1 \cos \theta)(i\beta_1 \sin \theta + \cos \theta) \varphi_0'(z_1) + (\sin \theta - i\beta_2 \cos \theta)(i\beta_2 \sin \theta + \cos \theta) \psi_0'(z_2)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに $z_k = x + s_k y$ ($k = 1, 2$) であつて

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0(z_1) &= \frac{p a^2 (1 + \beta_1)}{4(\beta_1 - \beta_2)} \frac{2 \cos^2 \delta - 2\beta_2 \sin^2 \delta + i(1 + \beta_2) \sin 2\delta}{z_1 + \sqrt{z_1^2 - a^2(1 - \beta_1^2)}} \\ \psi_0(z_2) &= -\frac{p a^2 (1 + \beta_2)}{4(\beta_1 - \beta_2)} \frac{2 \cos^2 \delta - 2\beta_1 \sin^2 \delta + i(1 + \beta_1) \sin 2\delta}{z_2 + \sqrt{z_2^2 - a^2(1 - \beta_2^2)}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(5) 式より円形トンネル周辺応力 σ_θ を求めれば, 一般に

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{-p}{(\sin^2 \theta + \beta_1^2 \cos^2 \theta)(\sin^2 \theta + \beta_2^2 \cos^2 \theta)} \{ [(1 + \beta_1 + \beta_2) \cos^2 \delta - \beta_1 \beta_2 \sin^2 \delta] \sin^2 \theta - \\ &\quad - (\beta_1 + \beta_2)(1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \sin \delta \cos \delta \sin \theta \cos \theta + [\beta_1 \beta_2 \cos^2 \delta + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \sin^2 \delta] \cos^2 \theta \} \end{aligned} \quad (7)$$

いま (4) 式の関係を用いれば σ_θ はつきのように与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= -\frac{p}{E_1 N} \{ [(1 + n) \cos^2 \delta + m \sin^2 \delta] \sin^2 \theta - n(1 + n - m) \sin \delta \cos \delta \sin \theta \cos \theta \\ &\quad + [\cos^2 \delta + (m - n) \sin^2 \delta] \cos^2 \theta \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } m &= \sqrt{E_1/E_2}, \quad n = \sqrt{2(\sqrt{E_1/E_2} - V_{12} + E_1/G_{12}} \\ N &= \sin^4 \theta/E_1 + (1/G_{12} - 2V_{12}/E_1) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \cos^4 \theta/E_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(8) 式は G. Sonntag⁴⁾ が与えているものと同じである。トンネル応力に及ぼすポアッソン比 V_{12} の影響は地山岩盤の弾性係数のそれよりも一層小さいと思われるから, 計算を容易にするために上式に

て $V_{12} = 0$ とおけば、 G_{12} は次式により E_1 および E_2 によって一義的に定められる。⁵⁾

$$1/G_{12} = 1/E_1 + 1/E_2 \quad (10)$$

2. トンネル周辺応力分布とその考察

いま (8) 式を用いて地山の主弾性係数比 $E_2/E_1 = 1, 2, 4, 6, 8, 10$ のそれぞれの場合に対して、主弾性係数 E_1 の方向が $\delta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ と異なる場合について円形トンネル周辺応力分布を求め、その 2, 3 の例を図示すれば、図-2 (a), (b),

(c) のようである。これらの図より地山の異方性が大きいほど弾性係数の小さい方向におけるトンネル周辺応力の集中度が高くなり、この部分が危険な状態になることが考えられる。たとえば $\delta = 0^\circ$ のときには上下盤の引張応力に、 $\delta = 45^\circ$ のときには上下盤と側壁の中間部分の応力に、また $\delta = 90^\circ$ のときは側壁部分の圧縮応力に注目すべきである。もちろん E_2/E_1 および δ の値によって最大応力集中度の大きさおよびその生ずる位置は変化するわけであるから、つぎに地山の異方性がトンネル周辺の最大引張および圧縮応力の大きさおよびその位置にどのような影響を及ぼすかを調べてみる。

3. トンネル周辺に生ずる最大応力およびその位置

(8) 式を θ について微分し、その式を零とあいて解けば、つぎのようにトンネル周辺で σ_θ が最小 (最大圧縮応力) および最大 (最大引張応力) になる位置を求める式をうる。

$$\{(1-m)^2(1+m^2)\sin^2 2\delta - 4m(1-m^2)\cos^2 2\delta\}\sin^4 \theta - \{m^2(1-m)^2(1+m^2)\sin^2 2\delta - 2m(1-m)^2\cos^2 2\delta\}\sin^2 \theta + m^2(1-m^2)\sin^2 \delta = 0 \quad (11)$$

上式を用いてさきと同様の E_2/E_1 および δ の値に対して計算した結果を図示すると図-3 のようになる。さらに最大応力値と E_2/E_1 との関係を求め、 δ をパラメータとして示せば図-4 のようである。これらの図より明らかなように、いずれの E_2/E_1 の値に対しても δ が 45° に近い値の場合に最大応力を生ずる位置が、荷重方向およびそれに垂直な方向よりもっとも大きく偏移する。そしてその偏移する角度は E_2/E_1 が大きいほど大きい。つぎに最大応力値につ

いて考えれば、トンネル側壁部の圧縮応力は $\delta = 45^\circ \sim 90^\circ$ で E_2/E_1 の増加に伴ってほぼ一様に増加し、 $\delta = 0^\circ \sim 45^\circ$ の場合には逆に減少する傾向がある。また上下盤における引張応

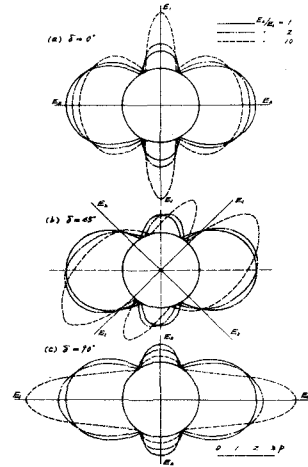


図-2

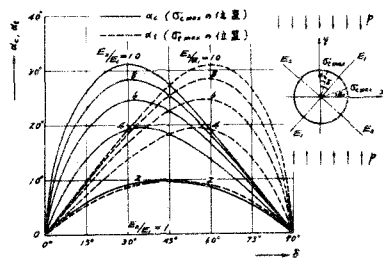


図-3

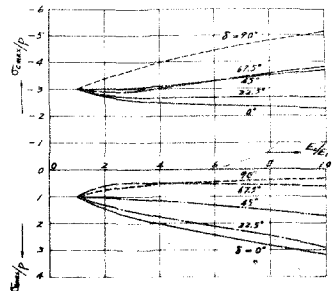


図-4

力は側壁の圧縮応力の傾向とはまったく反対に、 $\delta = 0^\circ \sim 45^\circ$ のときに E_2/E_1 の増加に伴って一様に増大し、 $\delta = 45^\circ \sim 90^\circ$ ではその変化はあまり見られない。

4. 光弾性実験による考察⁶⁾

(1) 光弾性皮膜法の適用：光弾性皮膜に生ずる等色線縞よりつぎのこゝとく下地材料の応力を求めることができる。一般に下地材料の一点に生ずる主応力の方向が図-5に示すこゝとく弾性主軸 (x, y 軸方向) と傾斜し、主応力 σ_1 の方向が x 軸となす角を φ とすると、主ひずみ ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) はつぎのように主応力 (σ_1, σ_2) で与えられる。

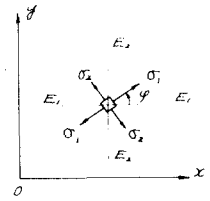


図-5

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 = & \left\{ \cos^2 \varphi / E_2 + \sin^2 \varphi / E_1 - 2(\nu_{12} / E_1 - 1 / G_{12}) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \right\} \sigma_2 \\ & + \left[-\nu_{12} / E_1 + \left\{ 1 / E_1 + 1 / E_2 + (2\nu_{12} / E_1 - 1 / G_{12}) \right\} \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \right] \sigma_1 \end{aligned} \quad (12)$$

こゝとくに自由境界においては $\sigma_1 = 0$ あるいは $\sigma_2 = 0$ であるから、いま $\sigma_2 = 0$ とすれば下地材料の自由境界での主ひずみ差はつぎのようになる。

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_M = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_1} \{ (1 + 2\nu_{12}) \cos^2 \varphi + \cos 2\varphi \} - \frac{1}{E_2} (1 - \cos 2\varphi) \cos 2\varphi + \frac{1}{G_{12}} \sin^2 2\varphi \right] \sigma_{1M} \quad (13)$$

一方皮膜の主ひずみ差はつぎのようにならわされる。

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_c = \frac{1 + \nu_c}{E_c} (\sigma_1 - \sigma_2)_c \quad (14)$$

皮膜と下地材料との接着が完全であり、皮膜の厚み t が応力、ひずみの分布の傾斜に対して小さい場合には、皮膜のひずみ状態は完全に下地材料表面のそれに等しいと考えられるから、 $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_M = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_c$ なる関係を得る。下地材料表面の反射によって皮膜を2度通過する偏光の示す光弾性縞次数は、 α と光弾性感度とすると、次式で与えられるから、

$$N = 2\alpha (\sigma_1 - \sigma_2)_c t \quad (15)$$

結局自由境界における主応力 σ_{1M} は次式のごとく高次数より求められる。ただしこの場合近似的に $1/G_{12} = 1/E_1 + 1/E_2 + 2\nu_{12}/E_1$ なる関係を用い、 $K = \alpha E_c / (1 + \nu_c)$ とおく。

$$\sigma_{1M} = \frac{NE_1}{tK} \left/ \left[\{ (1 + 2\nu_{12}) \cos^2 \varphi + \cos 2\varphi \} - \frac{1}{2} (1 - \cos 2\varphi) \cos 2\varphi + \left(1 + \frac{1}{2} + 2\nu_{12} \right) \sin^2 2\varphi \right] \right. \quad (16)$$

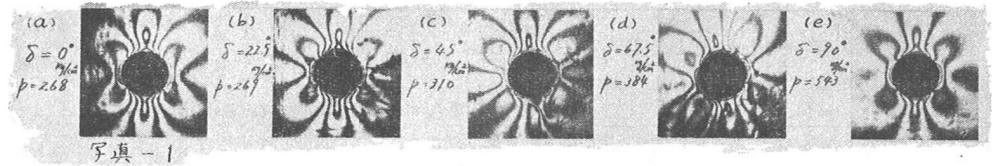
こゝで e は主弾性係数比で $e = E_2/E_1$ であり、 K は使用する皮膜によって定まる常数である。

(2) 直交異方性材料および光弾性皮膜材料：直交異方性材料は、型わく内に金属線（銅あるいは異りゆう）を一方向に規則正しく入れ、その中にエポキシ樹脂を注入成型してつくられた。この異方性材料の種々の試験片により弾性係数およびポアソン比の測定をおこなったが、全断面に対する金属線の占める割合が大さくない限り、合金材と考えて計算した値とよく一致することがわかった。

光弾性皮膜としては epoxy rubber⁷⁾ の比重会比が重量比で、epoxy prepolymer : 100, polysulfide : 50, diethylene triamine : 8 のもので、厚みが2mmのものを用いた。しかし polysulfide の性質が安定しないことおよび epoxy rubber の特性が温度によって変化しやすいことなどのため、係数 K に誤差の入る恐れがあったが、この場合の実験に用いた皮膜の特性は、 $E_c = 5500 \text{ kg/cm}^2$, $\alpha = 1.90 \text{ mm/kg}$

$V_c = 0.40$ であった。

(3) 実験方法および実験結果の考察：成型された異方性材料より正方形板(10cm×10cm)を切り出し、その表面にアルミはくおよび皮膜とエポキシ樹脂で接着し、接着が十分に完了した後その中心に12mm中の円孔がうがられた。異方性板は $E=2, 4$ のものに対して、それぞれ金属線(の方向(E_2 の方向)が荷重線(水平方向)に対して $\delta=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 傾斜したものが作られた。これらの板は等分布荷重がかけられ、反射式光弾性装置により円孔周辺の等色線縞が撮影された。等色線写真の1例($E_2/E_1=4$ の場合)を示すと写真-1(a)~(e)のようであり、これらより円孔周辺応力



分布を求めると図-6のようである。比喩のためにさきに(8)式を用いて求めた結果も同時に示されている。

これらの図より実験値と計算値とを比較すれば、それぞれの場合の応力分布の傾向、したがって直交異方性板の異方特性が円孔周辺応力状態に及ぼす影響がかなりよく類似することがわかり、この実験方法が今後任意形状の孔を有する異方性板の応力解析に有効に利用されるものと考えられる。

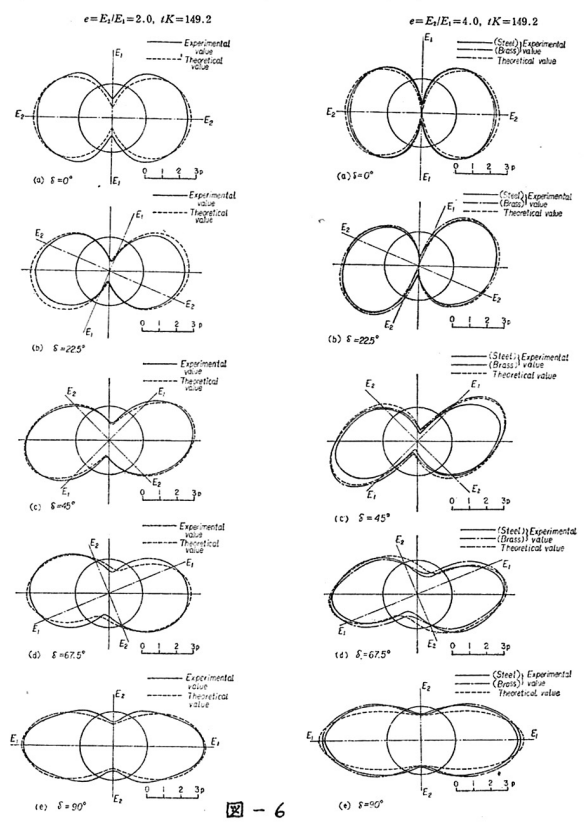


図-6

Ⅲ 双設円形トンネルの場合

1. 2個の円孔を有する直交異方性板の応力式

等方性無限板の場合の応力解析には双極座標の使用によって多くの研究がなされてきており、また光弾性実験を用いて応力集中の測定も行われている。しかし直交異方性板については2個の円孔を含む場合の久保氏の解析を見ただけである。

いま図-7に示すような場合を考えれば、応力関数が満足すべき適合条件式は

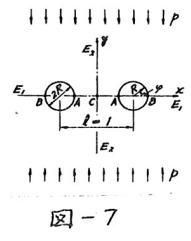


図-7

(1)式で与えられ、2円孔縁および無限遠における境界条件も満足する(1)式の一解は久保氏によって与えられている。

$$F = -\frac{p}{2}x^2 - \frac{p}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \operatorname{Re} \left[\frac{\chi_1(z_1)}{\beta_1^2} - \frac{\chi_2(z_2)}{\beta_2^2} \right]$$

$$\chi_k(z_k) = -D_{k,0} \log z_k + \sum_{n=0}^{\infty} D_{k,n+1} z_k^{-(n+1)} + \sum_{n=0}^{\infty} K_{k,n} z_k^{n+2} \quad (k=1, 2) \quad (18)$$

(18)式中の各係数間の関係が2個の内孔縁自由の条件より求められる。さらに内孔半径 R が小さくても係数は R のべき級数に展開できると仮定して、摂動法を用いてそれぞれの係数が求められる。したがって結局内孔周辺応力式は内孔半径 R のべき級数として与えられるが、実用上重要なA点、B点(図-7)の周辺応力 σ_A , σ_B , 最小断面の合力 Q , 2内孔同の中点Cの $(\sigma_y)_c$ 等は次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A/p &= -\sum_{\beta=0}^{\infty} A_{\beta} R^{\beta} & \sigma_B/p &= -\sum_{\beta=0}^{\infty} B_{\beta} R^{\beta} \\ Q/p &= -1 + \sum_{n=1}^{\infty} L_{2n} R^{2n}, & (\sigma_y)_c/p &= -\sum_{n=0}^{\infty} C_{2n} R^{2n} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

A_{β} , B_{β} , L_{2n} , C_{2n} は異方特性を示す β_1 および β_2 の多項式で与えられる。かなり煩雑になるのでここでは省略するが、又後述の結果を用いて R^{10} の項まで求められている。

2. トンネル周辺応力状態およびその考察

(19)式を用いて $E_2/E_1 = 1.0 \sim 1/10$ の直交異方性地山に等大2円形トンネルが $l/2R = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ の間隔で開削された場合に対して、外側壁(A点), 内側壁(B点), 両トンネル中点(C点)等の応力 σ_A , σ_B , $(\sigma_y)_c$ および最小断面における合力 Q と平均応力 $(\sigma_y)_c$ と計算すれば、表-1, 2, 3 のようになる。この結果の1部を図示すると図-8(a), (b) および図-9 のようである。この計算式は R^{10} の項までの係数を与えているだけであるから、 E_2/E_1 が大きい場合に対して適用できるが、 $E_2/E_1 < 1$ の場合には R が小さい場合を除いて一般に収斂性が悪くなる。それで $E_2/E_1 < 1$ の場合の応力集中が問題にされるときにはさらに多くの項数と取る必要があり、その計算はさらに煩雑になる。

これらの表および図よりつぎのことが判る。まず σ_A

, σ_B はいずれの E_2/E_1 に対しても $l/2R$ の増大に伴ってわずかに増大するが、ほとんど差異がないと見てよい。 $l/2R$ が同

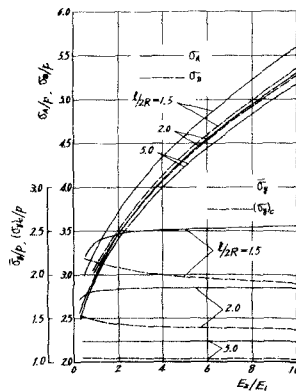


図-9

表-1

$l/2R$	$E_2/E_1 = 10$	8	6	4	2	1	$1/2$	$1/4$	$1/6$	$1/8$	$1/10$
1.5	σ_A/p 5.595	5.574	4.816	4.334	3.728	3.302	3.174	3.065	-	-	-
	σ_B/p 5.588	5.566	4.809	4.326	3.721	3.315	-	-	-	-	-
2.0	σ_A/p 5.502	4.953	4.554	4.082	3.668	3.230	2.750	2.365	-	-	-
	σ_B/p 5.269	4.925	4.536	4.074	3.673	3.257	-	-	-	-	-
3.0	σ_A/p 5.207	4.864	4.481	4.021	3.621	3.204	2.682	2.471	2.384	2.331	2.299
	σ_B/p 5.208	4.860	4.480	4.020	3.617	3.219	2.722	2.513	2.420	2.363	2.321
4.0	σ_A/p 5.185	4.848	4.465	4.016	3.617	3.206	2.696	2.481	2.386	2.330	2.291
	σ_B/p 5.187	4.850	4.469	4.021	3.616	3.208	2.713	2.504	2.412	2.357	2.320
5.0	σ_A/p 5.177	4.841	4.459	4.006	3.616	3.207	2.700	2.488	2.393	2.336	2.297
	σ_B/p 5.178	4.842	4.461	4.010	3.621	3.204	2.709	2.501	2.400	2.354	2.316

表-2

$l/2R$	$E_2/E_1 = 10$	8	6	4	2	1	$1/2$	$1/4$	$1/6$	$1/8$	$1/10$
1.5	Q/p 0.857	0.849	0.846	0.840	0.822	0.785	0.741	-	-	-	-
	$(\sigma_y)_c/p$ 2.557	2.546	2.536	2.520	2.467	2.384	2.223	-	-	-	-
2.0	Q/p 0.927	0.926	0.925	0.923	0.910	0.878	0.831	0.805	0.807	-	-
	$(\sigma_y)_c/p$ 1.854	1.852	1.851	1.846	1.836	1.817	1.781	1.729	1.634	-	-
3.0	Q/p 0.970	0.970	0.970	0.970	0.968	0.967	0.963	0.954	0.947	0.939	0.932
	$(\sigma_y)_c/p$ 1.456	1.455	1.455	1.454	1.453	1.444	1.431	1.421	1.409	1.397	1.387
4.0	Q/p 0.984	0.984	0.984	0.984	0.983	0.983	0.981	0.979	0.976	0.973	0.970
	$(\sigma_y)_c/p$ 1.312	1.312	1.312	1.311	1.311	1.310	1.308	1.305	1.301	1.298	1.294
5.0	Q/p 0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.989	0.989	0.988	0.987	0.985	0.984
	$(\sigma_y)_c/p$ 1.237	1.237	1.237	1.237	1.237	1.237	1.236	1.235	1.233	1.232	1.230

表-3

$l/2R$	$E_2/E_1 = 10$	8	6	4	2	1	$1/2$	$1/4$	$1/6$	$1/8$	$1/10$
1.5	$(\sigma_y)_A/p$ 1.900	1.937	1.951	1.997	2.079	2.143	2.146	-	-	-	-
2.0	$(\sigma_y)_A/p$ 1.349	1.379	1.394	1.399	1.430	1.448	1.508	1.525	-	-	-
3.0	$(\sigma_y)_A/p$ 1.132	1.133	1.135	1.137	1.144	1.154	1.167	1.186	1.190	-	-
4.0	$(\sigma_y)_A/p$ 1.069	1.069	1.070	1.071	1.073	1.076	1.081	1.089	1.094	1.096	1.098
5.0	$(\sigma_y)_A/p$ 1.045	1.045	1.045	1.045	1.044	1.046	1.048	1.051	1.054	1.055	1.058

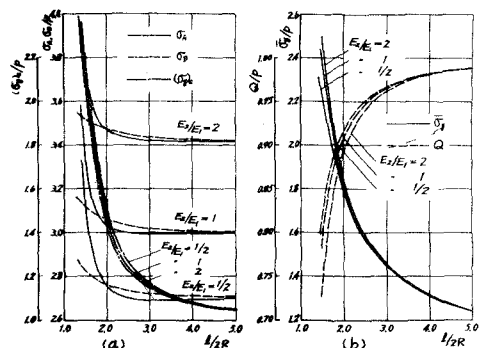


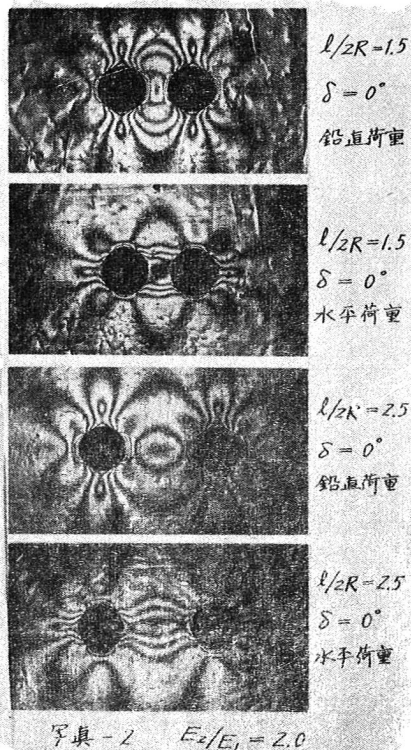
図-8

一の場合の E_2/E_1 の変化に対してはかぎり高化し、 E_2/E_1 が増加すると応力集中度は高まる。A 点と B 点とにおける応力集中度を比較すると、 $l/2R < 2.0$ のときは A 点で大きく、 $l/2R > 2.0$ では B 点、でわずかに大きくなる。また $l/2R > 5.0$ になると単独の内円トンネルと見做してよいだろう。

つぎに最小断面における合力 Q は一定のトンネル間隔に対しては E_2/E_1 が大きくなるほど大きくなり、また一定の E_2/E_1 に対してはトンネル間隔 $l/2R$ が大きくなるほど増大する。しかしこの計算した範囲内では大きな差異はない。 $\bar{\sigma}_y$ は同一の $l/2R$ に対しては E_2/E_1 が大きいほどわずかに増大し、その増大率はトンネル間隔が小さいほど大きい。 $l/2R > 4.0$ のときの $\bar{\sigma}_y$ は $l/2R$ および E_2/E_1 のいずれにもほとんど影響をうけないと見てよい。さらに $(\sigma_y)_c$ はさきの応力の傾向とは逆に、一定の $l/2R$ に対して E_2/E_1 が減少すれば $(\sigma_y)_c$ は増大する。しかし $l/2R > 5.0$ なる場合では $(\sigma_y)_c$ は初期張圧 p とほとんど変わらず、2つのトンネルの接近による影響は無視できる。

3. 光弾性実験の考察

さきにも述べたごとく久保氏の取扱った特別な場合に対してはかぎり計算は煩雑であり、また初期荷重が2円孔の中心線方向に作用する場合とか、さらに一般的に2円孔の中心線と弾性主軸の方向が傾斜したり、荷重が任意方向から作用する場合の理論的な応力解析ははなはだ困難である。そこでこのように計算の困難な一般の場合に対する応力状態と異方性の関係を明らかにするために、2, 3の場合に対して前述したごとく光弾性皮膜法を適用して実験的考察を行った。実験には $e = E_2/E_1 = 2.0, 4.0$ で、 y 軸 (鉛直方向) と主弾性係数 E_1 とのなす角が $\delta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の異方性板が用いられ、それぞれに半径 $R = 6\text{ mm}$ の円孔を2個、 $l/2R = 1.5, 2.5$ の間隔にうがつて模型がつくられた。異方性材料および皮膜材料としてはさきの単一円孔の実験と同一のものを使用した。いずれの模型も2円孔の中心線が水平になるように作られ、荷重は鉛直方向および水平方向に別々にかけられた。等色線写真の1例と示すと写真-2のようである。これらの等色線写真より円孔周辺応力分布を求め図示すると図-10(a), (b) および図-11のようである。これらの図はいずれも荷重方向に対する異方性の方向が異なる場合の応力分布の相違を比較したものであり、 E_2/E_1 が大きい場合には異方性の主軸の方向が応力分布に大きく影響を及ぼすこと、 $l/2R = 2.5$ 程度以上になると2円孔接近の影響がうすれてくること等が判る。また等方性の場合 ($E_2/E_1 = 1$) の応力分布が同時に描かれているが、この曲線との比較で異方性の影響がさらに明らかになるだろう。結局この場合の実験では単一円孔の場合の異方性の影響と、等方性の場合の2円孔接近による影響とが重畳されたような結果をえている。



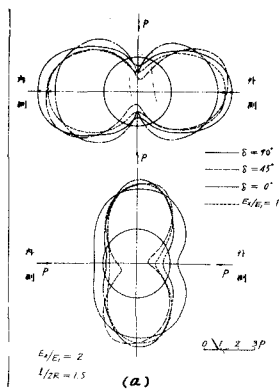


図-10

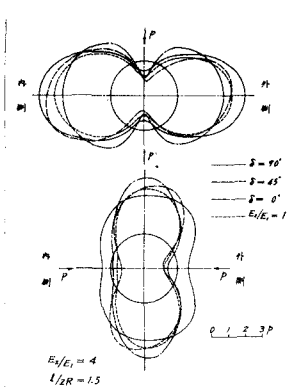
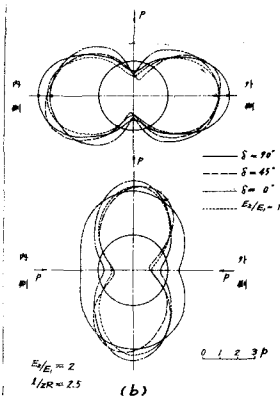


図-11

参考文献

- 1) D. P. Krynine and W. R. Judd: Principles of Engineering Geology and Geotechnics, pp. 355~357
McGraw Hill Co. Inc., 1957
- P. V. Proctor and T. L. White: Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Co. 1946
- 2) 安蔵博士の理論解によれば、トンネルの深さがトンネル半径の10倍以上になれば"地表面の影響は無視できる。
- 3) G. N. Sawin: Spannungserhöhung am Rande von Löchern, s. 174, VEB Verlag Technik Berlin 1956
- 4) G. Sonntag: Einfluß der Anisotropie auf die Beanspruchung des Gebirges in der Umgebung von Stollen,
Der Bauingenieur 33, 8, S. 287, 1958
- 5) L. Föppl: Drag und Zwang, 3 Bd., s. 177, 1947
- 6) 丹羽義次, 川本龍万: 円孔を有する異方性平板の光弾性実験, 土木学会論文集, 才83号, 1頁, 昭37.7
- 7) 河田幸三: 光弾性実験法, 機械学会才118 回講習会教材, 昭34.5
- 8) 久保敏孝: 2個円孔を含む直交異方性無限板の応力, 日本機械学会論文集, 才25巻, 才159号, 1101頁,
昭34.11