

## 光弾性実験によるトンネル交差部の応力性状

A STUDY ON STRESS CONCENTRATION OF TUNNEL INTERSECTIONS  
BY PHOTOELASTIC METHOD

今田 徹\*・山崎良一\*\*・西村和夫\*\*\*

By Toru KONDA, Ryoichi YAMAZAKI and Kazuo NISHIMURA

The photoelastic stress freezing method has been used to determine the three dimensional distribution of stress around three types of tunnel intersection located in the elastic rock mass model and of stress in the lining around the same types of intersection located in the plastic rock mass model.

The results of the study indicate that maximum circumferential stress increase ratio in the lining at the corner of the intersection is approximately equal to that in the elastic rock mass located in same points. And the maximum stress on the wall of the tunnel opposite to the corner is not significantly influenced by the presence of the tunnel intersection.

Keywords: photoelasticity, tunnel intersection, stress concentration

## 1. ま え が き

長大自動車道路トンネルの建設が可能になったのは自動車の排気ガスや煤煙に対する新技術の開発によるところが大きい。わが国で最長の道路トンネルである関越トンネルの換気方式は<sup>1)</sup>、従来の横流式でなく、集塵機付き立坑送排気型の縦流換気方式を採用している。集塵機付き立坑送排気型の縦流換気方式では、本トンネルから分岐する枝トンネルを利用して集塵機室、地下換気所またそれに付随する電気室等を地下に設ける必要がある。枝トンネルの径は施設の搬入などを勘案し、一般には本トンネルと同じ規模のものが掘削されている。また空気の流入面から、本トンネルと枝トンネルは適当な鋭角で交差することが必要である。

トンネル交差部の検討にあたっては、交差部の形状や配置が地山内の応力の状態にどのように影響するかをまず把握することが必要である。実際に起こる現象は、節理等の力学的不連続面や地山の強度特性および支保構造

の影響を受けるが、それらの影響を加味した研究は難しく、従来のトンネル交差部の多くの研究<sup>2)~7)</sup>は弾性均一地山内にあるトンネル交差部周辺の地山内応力を対象としている。

これらの研究はその研究手法によって解析的研究と実験的研究に大別できる。解析的研究はFEMやBIM (Boundary Integral Method)などを用いて数値解析的に地山内応力を求める方法である<sup>6),7)</sup>。一方、実験的研究は模型実験によって応力を求める方法で、主として三次元光弾性応力凍結法を用いたものが多い<sup>2)~5)</sup>。光弾性実験では一般に物性に関する相似則を考える必要がなく、荷重と幾何学的相似を考慮することで応力を求めることができる。

従来の研究は、解析的研究でもほとんどが弾性解析であり、実験的研究は弾性地山内の応力解析となっている。著者らはこれらの点に鑑みて、粒状体地山内にあるトンネル交差部の覆工に生じる応力性状を明確にすることを目的として、始めに弾性地山内にある円形および馬蹄形トンネルの交差部の周辺の地山内応力の解析を、ついで粒状体地山内にある円形トンネル交差部の覆工応力の解析を三次元光弾性応力凍結法を用いて行ってきた<sup>8)~11)</sup>。本文はこれらの結果を統合し、新たな知見を加えてトンネル交差部の応力性状を明らかにし、その結果に基づい

\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

\*\* 正会員 工博 東京都立大学助手 工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科  
(同上)

てトンネル交差部の設計，施工の基本的な考え方を示したものである。

2. トンネル交差部の三次元光弾性実験

(1) トンネル交差部をもつ地山内応力の実験

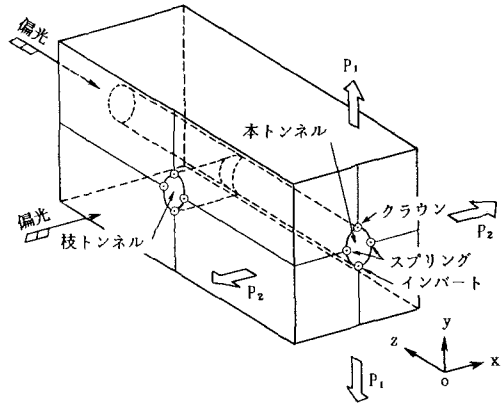
三次元光弾性実験に用いたトンネル交差部の地山モデルは，温度応力の影響が小さく，かつ負荷やスライスの採取が容易にできる小型のもので，その形状は長方形断面をもつ角柱である．トンネルは単軸応力場等で等圧状態の中に位置しており，負荷は直接載荷とする．実験は通常の応力凍結サイクルに従って応力凍結を行い，モデルの温度が室温に戻ってからスライス採取する．スライス採取後，等色線写真を撮影し，その写真を用いてトンネル周辺の縞次数分布図を描く．以下この結果を用いて応力増加率を求め，交差部の応力性状について検討する．

a) 実験モデル，応力凍結およびスライスの採取

実験モデルは断面が40×60 mm および40×70 mm で，長さは引張用治具からの応力の乱れがおよばないように，負荷に利用するところも含めて270 mm とした．  
 図一は円形トンネルの場合のトンネル交差部の近傍を描いた図である．この図の例は，本トンネルと枝トンネルが同一径で，両トンネルが90°で交差している場合である．トンネル円周上の水平直径位置がスプリング，鉛直直径位置の上部がクラウン，下部がインバートである．本論文では本トンネルならびに枝トンネルに共通しているが，スプリング位置をトンネル軸方向に連ねた線をスプリングライン，本トンネルと枝トンネルのスプリングラインの交点をスプリングラインエッジと呼称している．

表一にトンネル交差部の実験内容を示す．実験ケースは22例である．表一の記号で，Mは本トンネルを，Bは枝トンネルを表わしている．また，Lは両トンネルの軸方向が水平で交差(90°，60°，30°)し，それが負荷方向( $P_1=P$ ， $P_2=0$ )に対し垂直に位置していることを示している．Vは枝トンネルが負荷方向( $P_1=0$ ， $P_2=P$ )に垂直な平面yzに対し，90°，60°，30°で交差していることを示している．さらにHは馬蹄形を意味している．最初の英文字に続く数字は，順次本トンネルと枝トンネルの交差角度，本トンネル，枝トンネルの直径(馬蹄形ではトンネル上半分の直径)を表わしている．なお，馬蹄形断面のスプリングはトンネル上半分の円弧の始点位置とする．記号のあとに付けた通し番号は整理番号で，スライスや図面の整理に充用している．

表一に示したように，実験モデル①～④，⑤～⑧，⑨～⑫，⑬～⑮，⑰～⑳は同じグループである．①と③モデルの形状寸法は全く同じであり，②と④モデルも同一である．これは解析に必要なスライスを1個の実験モ



図一 偏光の入射方向と各部の名称

表一 トンネル交差部の光弾性実験内容

記号	$\theta$	トンネル径		モデルの断面	
		M.T.	B.T.		
ML -90-10-10	①	90°	10	10	40×60
MV -90-10-10	②	90°	10	10	40×60
BL -90-10-10	③	90°	10	10	40×60
BV -90-10-10	④	90°	10	10	40×60
ML -90-10-6	⑤	90°	10	6	40×60
MV -90-10-6	⑥	90°	10	6	40×60
BL -90-10-6	⑦	90°	10	6	40×60
BV -90-10-6	⑧	90°	10	6	40×60
ML -60-10-10	⑨	60°	10	10	40×60
MV -60-10-10	⑩	60°	10	10	40×60
BL -60-10-10	⑪	60°	10	10	40×60
BV -60-10-10	⑫	60°	10	10	40×60
ML -60-10-6	⑬	60°	10	6	40×60
MV -60-10-6	⑭	60°	10	6	40×60
BL -60-10-6	⑮	60°	10	6	40×60
BV -60-10-6	⑯	60°	10	6	40×60
ML -30-6-6	⑰	30°	6	6	40×70
MV -30-6-6	⑱	30°	6	6	40×70
BL -30-6-6	⑲	30°	6	6	40×70
BV -30-6-6	⑳	30°	6	6	40×70
MLH-90-10-10	㉑	90°	10	10	40×60
MLH-60-10-10	㉒	60°	10	10	40×60

(注)  $\theta$  : 本トンネルと枝トンネルの交差角度  
 トンネル径およびモデル断面の単位 : mm  
 M.T. : 本トンネル  
 B.T. : 枝トンネル

デルから採取できないため，同一条件の実験を2個行い，本トンネルと枝トンネルを主体にしたスライスの採取を行うためである．また，実験モデル①に対する外力は  $P_1=P$ ， $P_2=0$ ，実験モデル②に対する外力は  $P_1=0$ ， $P_2=P$  の一軸負荷である．これら個々の実験資料を重ね合わせると二軸負荷の結果を得ることができる．以下③④，⑤⑥，…のモデルについても同様である．

馬蹄形トンネル交差部モデルは，円形断面のそれより加工の工程数が増えるうえに，機械加工による仕上げが

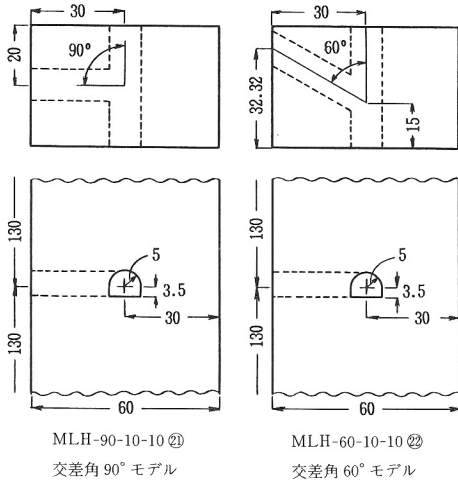


図-2 馬蹄形トンネル交差部モデルの形状寸法

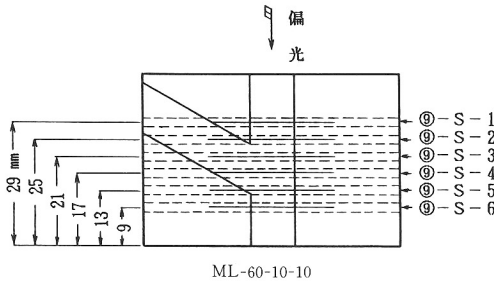


図-3 スライスの採取位置例

望めない。そこでトンネルの形状を単純化し、長方形断面の母材の中に半径 5 mm の半円溝と幅 10 mm、深さ 3.5 mm の溝をもつ 2 つのエポキシブロックを瞬間接着剤（アロンアルファ 202）で接着して製作した。図-2 に馬蹄形トンネル交差部モデルの形状寸法を示す。なお、モデルはアラルダイト B (CT 200) と硬化剤 HT 901 を混合比 100 対 30 で注型した高温硬化による光弾性実験用材料である。

トンネル交差部の地山モデルへの負荷は、モデルの上端を実験炉内の上部から懸垂し、下端に重りをつり下げる方法で行った。この方法では、モデルは引張応力状態となり、実際の応力場と異なるが、円孔周辺の応力性状は圧縮、引張りに関係なく、また、圧縮場におけるモデルの座屈、曲げ応力の発生を防ぐことができ、理想的な一軸応力状態を作ることができる。

荷重はモデル①～⑧、⑰、⑱が 60 kgf、モデル⑲、⑳、㉑が 55 kgf、モデル⑨、⑩、⑬～⑮、㉒が 50 kgf、モデル⑪と⑫が 45 kgf である。これら負荷の相違は、交差角度などを考慮して定めた。

また、スライスは、本トンネル軸または枝トンネル軸に垂直に行い、スライスの厚さは 2～3 mm とした。

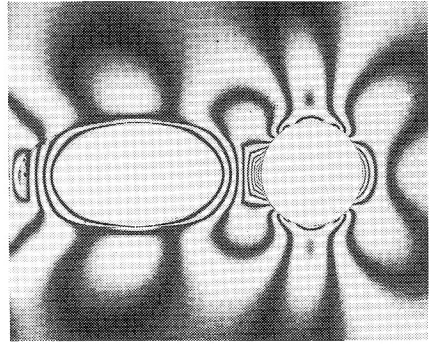


図-4 等色線写真 (ML-60-10-10) 例

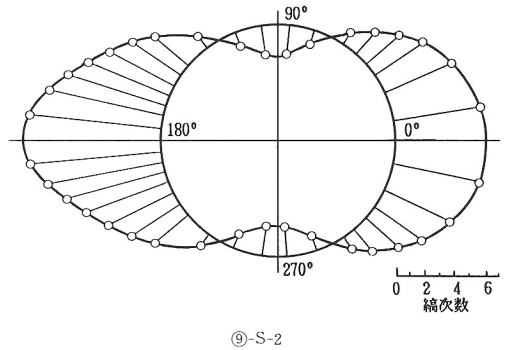


図-5 円孔周辺の縞次数分布図例

b) 実験結果

図-3 に、スライス採取位置の一例を示した。図-4 は撮影された等色線写真の一例である。これらの等色線写真の円孔まわりの部分を拡大し、それをを用いて縞次数分布図を描く。図-5 は、円孔縁まわりの縞次数分布図例である（スライスの厚さ  $t=2.2$  mm）。自由周辺では主応力の一方が零となることから、これらの縞次数分布図は直ちに応力分布に読み替えることができる。なお、縞次数 (fringe order  $\rightarrow f.o.$ ) は  $N = \alpha \sigma t$  で定義される。ここに、 $\alpha$  は使用モデル材料の光弾性感度、 $\sigma$  は主応力差 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ )、 $t$  はモデルの厚さである。本実験で使用した高温におけるモデル材料の光弾性感度  $\alpha_h$  は 4.0 cm/kgf である。

応力集中係数は、基準直応力に対する最大応力の比で与えられる。基準応力には、実験モデルにトンネルが存在しない場合の応力を用いた。図-6 は表-1 のモデル⑨に関する縞次数の分布図を例として示したものであるが、ここでの基準応力すなわち理論値は、これを縞次数で示すと

$$N = \alpha \sigma t = 4.0 \times (50/24) \times 0.22 = 1.83 \text{ 次}$$

となる。ここに、 $\sigma$  は載荷重 (kgf) をモデルの断面積 ( $\text{cm}^2$ ) で除した値 ( $\sigma_1 = 50/24$  kgf/ $\text{cm}^2$ ,  $\sigma_2 = 0$  kgf/ $\text{cm}^2$ ) である。

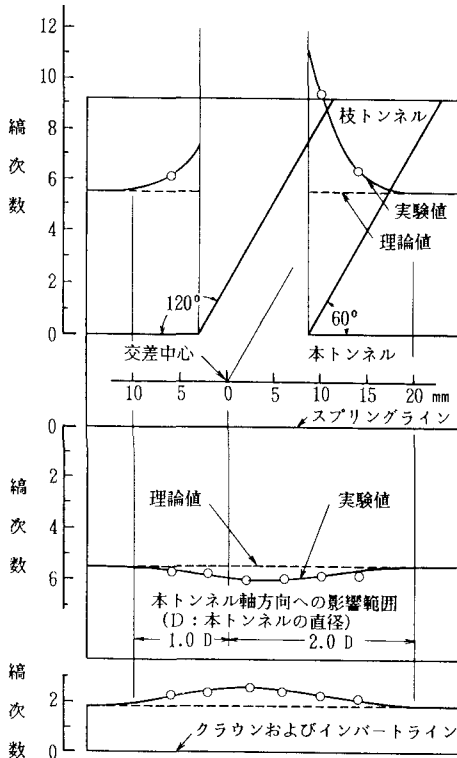


図-6 スプリングライン、クラウンおよびインパートに沿った繰回数分布の一例 (ML-60-10-10 ⑨)

弾性論によれば、小さな円孔を有する無限板が一様な張力  $\sigma_1$  を受ける場合の円孔周辺のクラウンおよびインパートの応力は  $-\sigma_1$ 、スプリングラインのそれは  $3\sigma_1$  となる。これは有限の大きさのモデルを用いた本実験の単設円形トンネルモデルについてもほぼ一致していることを確認している<sup>8)</sup>。したがって、モデル⑨についての理論値は、クラウンおよびインパートで  $N_c=1.83$  次、スプリングラインで  $N_s=1.83 \times 3=5.49$  次の繰回数となる。

一方、実験から得られる応力集中係数について、その例を⑨-S-2の交差側のスプリングラインで示すと、図-5よりこの位置の繰回数は  $N=9.4$  次であるから、これを基準応力の  $N=1.83$  で除した値  $5.14$  がこの位置における応力集中係数となる。図-6の丸印は各スライスより得られた実験値で、これと理論値を利用してトンネル交差部側へ外挿して得られた繰回数が、枝トンネルが  $60^\circ$  で本トンネルに交差している場合のスプリングラインエッジの推定繰回数である。⑨の事例では  $60^\circ$  交差側で  $11.2$  次の繰回数となる。図-11の応力増加率はこれらの値を用いて算出したもので、たとえば円形弾性地山モデルの  $60^\circ$  の値は、図-6により外挿して得られた繰回数  $N=11.2$ 、理論値  $N_s=5.49$  より応力増加率は  $[(N$

表-2 スプリングラインエッジの応力集中係数

記号	応力集中係数				
	30°	60°	90°	120°	150°
ML-90-10-10	—	—	4.8	—	—
BL-90-10-10	—	—	4.7	—	—
ML-90-10-6	—	—	4.7	—	—
BL-90-10-6	—	—	4.7	—	—
ML-60-10-10	—	6.1	—	4.0	—
BL-60-10-10	—	6.1	—	4.0	—
ML-60-10-6	—	5.9	—	4.0	—
BL-60-10-6	—	5.9	—	4.0	—
ML-30-6-6	8.1	—	—	—	3.5
BL-30-6-6	8.0	—	—	—	3.5

$-N_s)/N_s] \times 100 = [(11.2 - 5.49) / 5.49] \times 100 = 104.0\%$  となる。また、図-11の交差角度  $120^\circ$  のスプリングラインエッジの値は図-6の鈍角側の値として与えられる。

表-2は、個々に厚さの異なるスライスから得られた繰回数を、単位の厚さに換算して求めたスプリングラインエッジの応力集中係数である。この表から応力増加率を計算する場合、たとえば、ML-90-10-10 ①の  $90^\circ$  の位置では、応力集中係数が  $4.8$ 、したがって、応力増加率は  $[(4.8 - 3.0) / 3.0] \times 100 = 60\%$  となる。

図-6はスプリングライン、クラウンおよびインパートに沿った繰回数の分布を例 (ML-60-10-10 ⑨) として示したものである。スプリングライン上の繰回数分布を表示した図-6の上側の図は、スプリングラインが走る位置のトンネル交差部の水平断面図に実験結果を重ね書きしたものである。横軸は本トンネルの軸方向に沿った交差部中心からの距離であり、斜めの線は本トンネルから分岐した枝トンネルのスプリングラインを示している。縦軸は本トンネルのスプリングラインの線を、繰回数0として表わしたものである。したがって、上段のプロットはトンネル交差側の、中段のプロットはトンネル交差と反対側のスプリングラインの繰回数を表わしている。下側の図はクラウンおよびインパートにおける繰回数を同様に示した図である。丸印でプロットした値はクラウンおよびインパート軸での繰回数の平均値である。

また、図-6にはトンネルが交差することの影響範囲も表示している。影響範囲とは、単設トンネルの場合のスプリングライン、クラウンおよびインパートの位置における値を超える概略の範囲をトンネルの直径比で表示したものである。トンネル軸方向への影響範囲は、本トンネルと枝トンネルが交差する中心位置を原点とした。

c) 円形および馬蹄形トンネル交差部の地山内応力性状

円形断面における円孔周辺の繰回数分布から応力集中係数を求めると、円周上でそれが極大値をもつ位置はス

プリングライン、クラウンおよびインパートである。実験結果によれば、両トンネルが交差する平面に直角方向に外力が作用する場合、最大応力集中はトンネルが交差する鈍角側のスプリングラインエッジに発生し、その大きさは交差角が鋭角になるにつれて大きくなっている。そこで円形断面については、実験①、⑨および⑰、馬蹄形断面については⑳および㉑の資料を用い、交差角度と単設トンネルの場合の応力に対する応力増加率との関係を求めると図-11の白丸と黒丸のプロットのようになる。

図-11において、交差角度が $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ の応力増加率は、上記の実験の鋭角側スプリングラインエッジの値、 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ については鈍角側スプリングラインエッジの値である。応力増加率を求めるとき、交差角度が $180^{\circ}$ の位置の応力集中係数を3.0としているが、これは単設円形トンネルのスプリングラインの位置の応力集中係数の値である<sup>8)</sup>。

枝トンネルが負荷方向 $P_2$ に垂直な平面に対し、 $90^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ で交差している実験モデル②、④、⑥、⑧、⑩、⑫、⑭、⑯、⑲および㉑に対する実験結果の例として⑭の結果を図-8に掲げた。実験結果によれば、トンネル交差部の存在による応力集中は発生していないことが明らかになった。また、この結果を、対応するMLまたはBLモデル(①、③、⑤…)と合成し、二軸応力として整理した場合、スプリングラインエッジ、クラウンおよびインパートでは応力の相殺が行われ、応力の増加は減少する。したがって、本論文では最大応力が発生する $P_1$ による一軸負荷がある場合について論じ、 $P_2$ に関する実験結果については省略する。

トンネルの一般的な断面形状は馬蹄形であることから実験⑳と㉑は、円形トンネルとの比較を目的として計画したものである。図-7に示すように、馬蹄形トンネル交差部ではトンネル底部隅角部に応力集中が生じる。しかし、これは局部的であり、孔径の1/4だけ地山に入った位置では隅角部による影響が若干みられるが、孔径の

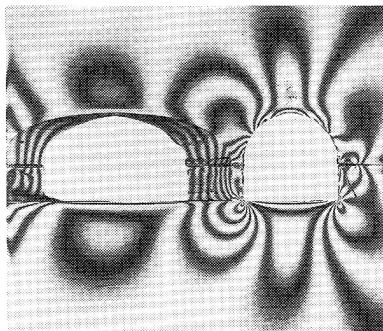


図-7 等色線写真例 (MLH-60-10-10 ㉑)  
(図-3のS-2の位置のスライスに相当する)

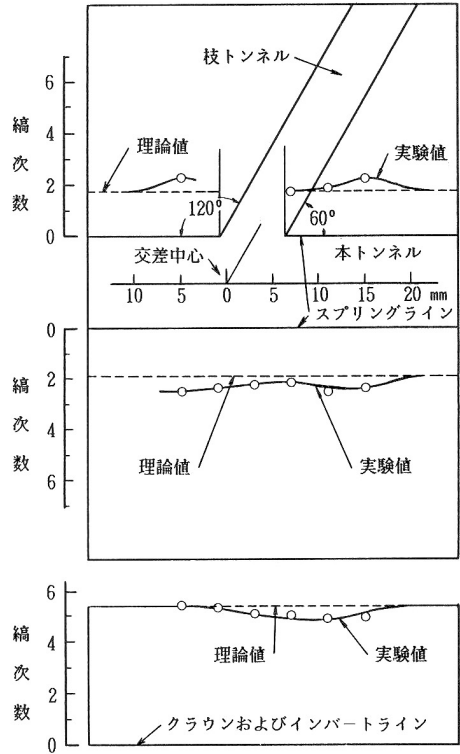


図-8 MV-60-10-6 (⑭) のスプリングライン、クラウンおよびインパートラインに沿った縞次数分布  
( $P_2=50\text{ kgf}$ , スライスの厚さ  $t=2.2\text{ mm}$ )

1/2 地山に入ると隅角部であることの影響はほとんどない。また、スプリングラインにおける応力増加率は、図-11に示すように円形断面に比較して小さくなっている。これらの結果から、トンネルの一般断面形状として用いられている馬蹄形断面は、交差する場合においても合理的な断面形状であるといえる。

なお、馬蹄形トンネルの応力増加率は単設馬蹄形トンネルスプリングラインの位置の応力集中係数<sup>4),5)</sup>2.3に対する値である。

## (2) トンネル交差部の覆工応力の実験

前節では塑性領域が生じない場合のトンネル交差部の地山内応力状態を実験から求めた。その結果、トンネル交差による影響として円形断面ではスプリングラインに最大応力が生じる。一方、馬蹄形断面では、底部隅角部に馬蹄形状の隅角による最大応力が生じ、交差による影響は比較的小さいことが確認された。このことから、覆工モデルを用いる調査においては、トンネルの一般的な断面形状である馬蹄形断面覆工による調査研究が望まれるが、ここでは基本的なものとして円形断面交差部覆工を用いる。この理由として、馬蹄形断面トンネル覆工モデルを製作する際、接着による工程が増加するために元

応力のない良い光弾性モデルができないこと、また、スプリングラインでの応力増加率は円形断面の方が大きいから、この結果は安全側となること等を考慮したことによる。

応力凍結法を用いる地中構造物の光弾性実験では、モデルの剛性がゴム状弾性域で低下し、モデルの新たな変形が進行すると同時に地山も完全に流動し終わり、平衡状態に達することが望ましい。そこで実験用地山材料としては鉛の散弾を用いた。これは実験の対象地山として砂のような塑性地山または破碎が極度に進んだ岩盤などを想定して選んだものであるが、さらに自重が大きく、熱伝導率および流動性が良好で実験中の物性の変動が少なく、光弾性実験の載荷材料としても適しているためである。なお、散弾の粒径は約2 mm、比重は11.2、単位体積重量  $\gamma$  は6.8 gf/cm<sup>3</sup>(66.6 kN/m<sup>3</sup>)、内部摩擦角  $\phi$  は三軸圧縮試験によるもので21.5°、鉛ブロックの線膨張係数は  $2.9 \times 10^{-5}/1^{\circ}\text{C}$  である。

地山材料として自重の大きい鉛散弾を用いたが、土被り高さに限度があり、解析に必要な繰回数を得るにはさらに上載荷重を必要とした。そこで鉛の散弾の模型地盤の表面に、パッキングとして耐熱性のあるシリコンラバーをかぶせ、ラバーと実験槽のふたの間に空気圧を送って上載荷重とした。実験槽の内のり寸法は250(幅)×250(奥行)×290(高さ)mmである。

円形トンネル交差部覆工の三次元光弾性実験モデルは内径54 mm、外形60 mm、肉厚3 mmのエポキシ樹脂を、交差角が90°、75°、60°となるように接着して製作したものである。接着剤はアロンアルファ202を使用した。

表—3にトンネル交差部覆工の光弾性実験内容を示した。表—3に用いた記号は表—1と同様な表示をしている。なお、記号の最初に付した英文字のLは覆工を意味している。

実験の手順としては

① 実験装置を応力凍結実験炉内に水平に据え、容器の底から13 cmの高さまで散弾を詰め、その中央に覆工モデルを置く。覆工モデルが所定の位置から移動しないように定規つき治具で軽く押さえる。散弾を投入し、覆工モデルが散弾でほぼ覆われたところで定規を取り除く。所定の高さまで散弾を詰め込み、水平にならしたのち上載荷重の空気圧を加える載荷装置を取り付ける。

② パッキングの状態を確認するために所定の空気圧をかけ、空気漏れがないかどうかを確認したのち、空気を抜く。

③ 実験炉の温度を上げる。モデル近傍の温度が130°Cに達したことを確認し、所定の空気圧をかけ、状態の安定を確認したあと徐冷して応力凍結を完了させる。なお、実験装置内の圧力は自動デジタルひずみ測定

表—3 トンネル交差部覆工の光弾性実験内容

分類	記号	$\theta$	トンネル径		鉛直方向圧力
			M.T.	B.T.	
単設	LH-00-60-00 (1)	0°	60	—	1.0
	LH-00-60-00 (2)	0°	60	—	1.5
	LH-00-60-00 (3)	0°	60	—	2.0
	LH-00-60-00 (4)	0°	60	—	2.0
交差部覆工	LH-90-60-60 (5)	90°	60	60	1.0
	LH-90-60-60 (6)	90°	60	60	2.0
	LB-90-60-60 (7)	90°	60	60	1.0
	LB-90-60-60 (8)	90°	60	60	2.0
	LH-75-60-60 (9)	75°	60	60	1.0
	LH-75-60-60 (10)	75°	60	60	2.0
	LH-60-60-60 (11)	60°	60	60	1.0
	LH-60-60-60 (12)	60°	60	60	2.0

(注)  $\theta$  : 本トンネルと枝トンネルの交差角度

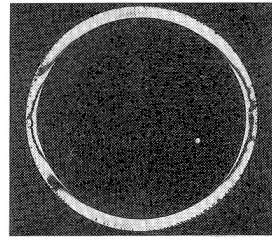
トンネル径の単位: mm

M.T.: 本トンネル

B.T.: 枝トンネル

鉛直方向圧力: kgf/cm<sup>2</sup>

土被り厚: 10 cm



図—9 等色線写真例 (LM-60-60-60(11))

(図—3のS-2の位置の本トンネル覆工のスライスに相当する)

器で監視するとともに、その結果を記録した。

応力凍結後、90°交差角モデルに対しては1つのモデルから本トンネル軸と枝トンネル軸に垂直なスライスを2種類、他のモデルについては本トンネルに垂直な場合のみについてスライスを採取した。スライスの厚さは2 mmである。枝トンネルが60°の角度で本トンネルに交差する場合の等色線写真を図—9に、交差側スプリングラインに沿った繰回数分布図を図—10にそれぞれ例として示した。なお、覆工モデル材料はアラルダイトBタイプで、その光弾性感度は  $\alpha_n = 4.0 \text{ cm/kgf}$  である。

交差部の応力性状を調べるにあたり、その基準応力には同一の実験条件で実施した単設覆工モデルの応力(表—3、実験(1)~(4))を当てることとした。単設覆工モデルの内縁では円孔全周にわたり圧縮応力が発生しており、その極値はスプリングライン、クラウンおよびインパート付近に存在し、その絶対値はスプリングライン付近で最大となっている。また、内縁応力から覆工モデルに作用する土圧を逆算すると、鉛直方向の土圧と水平方向の土圧はほぼ等しい値となり、側圧係数  $\lambda = 0.988$

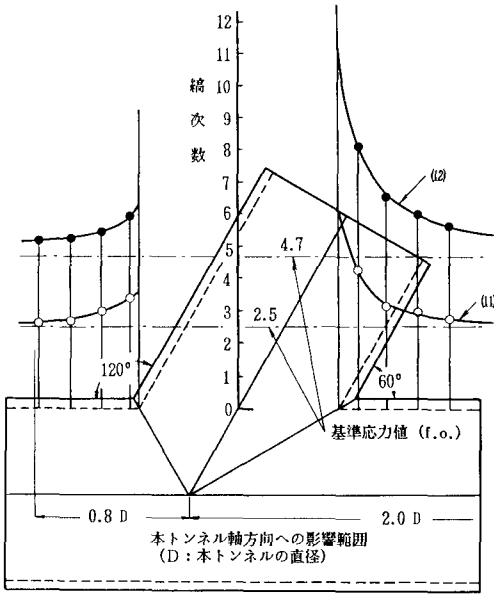


図-10 LM-60-60の交差側スプリングラインに沿った繰次数分布

であった。実験結果から単設覆工モデルの基準応力値は繰次数にして、土被り分を含めて鉛直方向圧力が1 kgf/cm<sup>2</sup>のとき、スプリングラインおよびクラウンで2.5次と1.7次、2 kgf/cm<sup>2</sup>のとき、4.7次と3.2次である。これらの値はテルツァギ<sup>12)</sup>の土圧式において、鉛散弾の内部摩擦角  $\phi = 23^\circ$  (物性値試験における値は  $\phi = 21.5^\circ$ )、覆工モデルにかかる土圧の側圧係数  $\lambda = 0.988$  としたときの計算値にほぼ一致している。なお、土被りによる繰次数は0.3次である。

### 3. トンネル交差部の応力性状

図-11に、弾性地山モデルと覆工モデルについての交差角度とスプリングラインエッジにおける応力増加率との関係をまとめて示した。弾性地山モデルの実験から、円形断面トンネルでは以下のことが明らかになった。

1) 弾性地山中におけるトンネル交差部の地山中内応力性状は、枝トンネルが本トンネルに交差する側のスプリングラインエッジをピークとする限られた部分の応力集中であり、この要素から離れたところでの交差の影響は小さい。また、枝トンネルの接続する対面のスプリングライン、クラウン、およびインパートの応力は、枝トンネルの存在による大きな影響は受けていない。

2) 枝トンネルが90°の角度で本トンネルに交差する場合のスプリングラインエッジでは、単設トンネルのときに比べておよそ60%の応力増加となる。また、本トンネル軸方向への影響範囲は、枝トンネル径の1.0倍程度、枝トンネル軸方向へのそれは、本トンネル径の1.0

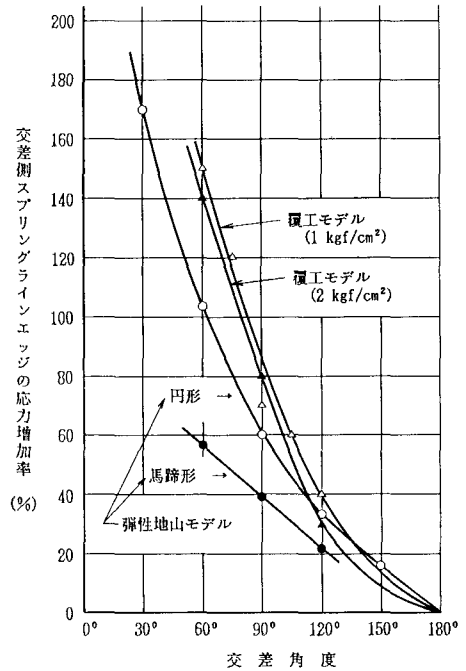


図-11 交差角度とスプリングラインエッジにおける応力増加率との関係

倍程度である。

3) 枝トンネルが60°の角度で本トンネルに交差する場合の鋭角側スプリングラインエッジではおよそ100%、鈍角側のそれでは30%の応力増加となる。また、本トンネル軸方向への影響範囲は、両者が交差する本トンネル軸の中心から測って、鋭角側が本トンネル径の2.0倍、鈍角側が1.0倍程度である。

4) 枝トンネルが30°の角度で本トンネルに交差する場合の鋭角側スプリングラインエッジでは、およそ170%の応力増加が認められる。また、本トンネル軸方向への影響範囲は、両者が交差する本トンネル軸の中心から測って、鋭角側が本トンネル径の4.0倍、鈍角側が1.0倍の合わせて5倍程度である。

5) 孔径の小さい枝トンネル(6mm)が本トンネル(10mm)に交差する場合と両者が同一径で交差する場合の応力性状には顕著な相違は認められない(表-2参照)。

馬蹄形断面交差部については、図-11からも明らかのように、スプリングラインにおける応力増加は円形の場合より少なく、むしろ底部隅角部の応力集中が問題となる。しかし、先に言及したように、隅角部の応力集中はトンネルの交差によるものではなく、トンネル形状による局所的なものであるから、隅角部を円弧にするなどの施工上の配慮で処理できる事柄であると考えられる。

粒状体地山中の覆工モデルの応力性状は

1) 枝トンネルが90°の角度で本トンネルに交差する場合、スプリングラインエッジでは、単設トンネルに比べておよそ80%の応力増加となる。交差による応力の影響範囲は、両者が交差する本トンネル軸の中心から測って、本トンネル、枝トンネルともにトンネル径程度である。

2) 枝トンネルが75°の角度で本トンネルに交差する場合の鋭角側スプリングラインエッジでは、およそ120%、鈍角側のそれでは60%の応力増加となる。また、本トンネル軸方向への影響範囲は、両者が交差する本トンネル軸の中心から測って、鋭角側が本トンネル径の1.5倍、鈍角側が1.0倍程度である。

3) 枝トンネルが60°の角度で本トンネルに交差する場合の鋭角側スプリングラインエッジでは、およそ150%、鈍角側のそれでは40%の応力増加となる。また、本トンネル軸方向への影響範囲は、両者が交差する本トンネル軸の中心から測って、鋭角側が本トンネル径の2.0倍、鈍角側が0.8倍程度である。

この実験的研究は、単純化した交差部モデルが、理想化された地山の中に設置され、外力が作用して安定している状態のときの応力性状である。交差部は、最初本トンネルを掘り、ついで枝トンネルを施工するのが一般的であるから、施工手順による応力再配分により交差部近傍の応力状態は複雑になるものと思われる。

#### 4. トンネル交差部の設計と施工のあり方

以上得られた結果から交差部における設計施工で留意すべき点を考えることにする。実験は、交差部の弾性体としての地山応力と粒状体地山中に埋設された交差部の覆工の応力について行った。弾性体としての地山応力に関する実験は側圧係数がゼロの状態に関するものであり、また、覆工の応力に関する実験は側圧係数がほとんど1の状態で行われたのにもかかわらず、応力増加率が大きいスプリングラインでの結果はよく似たものになった。実験は限られた条件についてのものであり、また、両者とも理想的な条件下で実施されているので、実際のトンネルの問題に直接適用することはできないが、ここで得られた結果は基本的な交差部の応力の状況を表わしているものと考えられる。

地山の緩みの影響については別に検討する必要があるが、得られた結果から交差部の設計施工のうえで考慮すべき点として次の事項を指摘できる。

1) 交差はできるだけ直交するようにするのが望ましい。直交する場合でも地山応力は60%程度増加し、交差角が小さくなると応力増加率は著しく大きくなる。したがって、トンネルの構造、施工の観点からは、できるだけ直交するようにすべきであるが、集塵機室としての

利用を考慮するとできるだけ乱れを生じさせないように空気を取り入れる必要がある。このためには交差角が小さいことが望ましい<sup>13)</sup>。そのため、交差角は構造上や施工上および流体力学上の問題を総合的に検討する必要がある。

2) 地山の応力が影響を受ける領域も直交する場合が最も小さく、鋭角になるに従って影響領域は大きくなる。

3) 影響を受ける領域は、交差の中心から測ってトンネル径の1~2倍程度であり比較的限られている。しかし、ここで得られている結果は弾性状態についてのものであり、地山が悪い場合は広がることになると考える必要がある。補強は鋭角部のピラーに対し集中的に行う必要がある。また、影響範囲が限られているので枝トンネルの施工は取り付け部においては、補助工法を積極的に用いても構造的に不利な分割断面による施工はできるだけ避け、構造的に有利な断面となる完成断面で極力施工すべきである。

4) 馬蹄形断面の側壁部のトンネル交差による応力増加率は円形断面に比べて小さいが、底部の隅角部でトンネル形状による応力集中を生ずる。

5) 特に、上下半に分けて分割施工する場合にはこの応力集中によって、完成断面での側壁部が痛められる可能性がある。上半分における底部隅角部の補強に留意する必要がある。

6) 粒状体地山内の覆工に生ずる応力も弾性地山内の応力と同様な傾向を示す。覆工に生ずる応力は地山の剛性との関連で異なってくるが、実験では直交する場合でも80%程度の応力増加となった。覆工を厚くすれば、覆工の剛性が増加するのでより大きな力が作用する可能性があることに留意する必要がある。

7) 覆工が受ける影響範囲は地山の場合とほぼ同様である。

#### 5. おわりに

本研究で対象とした道路トンネルにおいて、大断面どうしの交差部の設計は、実施例が限られていることから系統的な研究もなく、手探りによって行われているのが実情である。この種の交差は地下利用が盛んになっている最近の傾向を考えると、道路以外の分野も含めてますます設けられる機会が多くなるものと考えられる。

交差部の問題は三次元の問題として取り扱う必要があるため、解析は容易ではない。しかし、交差部の設計をより合理的なものとするためには、掘削によって交差部にどのような応力が生じるかを把握することがまず必要である。このため、三次元的な応力解析をするのに適している光弾性実験の応力凍結法により、交差部に生ずる応力を明らかにすることを試みた。その結果、交差部に



は条件によっては局部的ではあるが著しい応力集中が生じ、単トンネルとは異なった設計上の配慮が必要であることが示唆された。

支保構造を模した円形リングによる交差部覆工の実験では、モデル地盤の土被りに限度があるため、上載荷重に空気圧を利用した。この実験では側圧係数がほぼ1.0に近い状態となり、その応力性状は弾性状態での実験結果に酷似したものが得られた。本実験法で側圧係数を自在に変化させることは容易でなく、限られた実験結果となったが、側圧係数が小さくなるにつれて、クラウンの引張り応力が増大するので、交差のためさらに引張応力が増加する交差部クラウンの設計には注意を払う必要がある。

交差部の設計のためには、交差部に塑性領域が生じる場合や、支保構造と地山との相互干渉、地山に存在する力学的な不連続面の影響等、今後解決していかなければならない多くの問題が残されている。実験的研究を中心に行った本研究は、交差部の問題解決の第一歩として位置づけられるものであるが、設計にあたって参考となる目安を与えるものと考えている。

最後に、本研究の一部である円形トンネル交差部をもつ地山内応力の実験は日本道路公団から日本トンネル技術協会に委託された『山岳トンネルの坑口および坑内交差部設計・施工に関する研究』の一環として行われたものである。研究の実施にあたり、種々の助言を頂いた日本道路公団の関係者各位、『山岳トンネルの坑口および坑内交差部設計・施工に関する特別委員会』の委員長、委員、幹事ならびにトンネル技術協会の関係者の方々に謝意を表すものである。また、この研究を実施するにあたりご指導を頂いた東京都立大学名誉教授山本 稔博士、実験を行うにあたり協力して頂いた、本学学生宮地貢二君（現在、飛鳥建設(株)）、安食稔也君（現在、山形県庁）、小野雅之君（現在、基礎地盤コンサルタンツ(株)）に感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 定塚正行：関越トンネル（超長大道路トンネル建設の諸技術とその反省）、日本トンネル技術協会（'85トンネル技術講習会テキスト）、pp.22~31, 1985.
- 2) Riley, W. F. : Stresses at tunnel intersections, Proc. ASCE, Vol. 90, No. EM 2, pp.167~179, 1964.
- 3) Agarwal, R. and Boshkov, S. : Stress concentrations around horizontal circular tunnels, Experimental Mechanics, Vol. 8-10, pp.474~478, 1968.
- 4) 兼重・川本・岡村：坑道断面形状に関する基礎的研究(第一報)、九州鉱山学会誌, Vol. 25-8, pp.7~16, 1957.
- 5) Hiramatu, Y. and Oka, Y. : Stress on the wall surface of levels with cross sections of various shapes, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol.1, pp.199~216, 1964.
- 6) たとえば、伊藤・竹田・亀村：斜交トンネルが本線トンネルに与える影響、土木学会岩盤力学シンポジウム講演論文集, Vol.17, pp.261~265, 1985.
- 7) Hocking, G. : Stresses around tunnel intersections, Computer Methods in Tunnel Design (ed. Ansony Burt), The Institution of Civil Engineers, pp.41~60, 1978.
- 8) 山崎良一・尼田正男：光弾性実験によるトンネル交差部の基礎的研究(3)—トンネル交差部を持つ直方体の応力凍結(予備実験)—、和歌山工業高等専門学校研究紀要, 第22号, pp.1~6, 1987.
- 9) 山崎良一・今田 徹・山本 稔：トンネル交差部の応力集中について、日本光弾性学会第9回研究発表講演会講演論文集, No.9, pp.33~36, 1987.
- 10) 山崎良一・今田 徹・安食稔也：トンネル交差部の応力集中について(Ⅱ)、日本光弾性学会第10回研究発表講演会講演論文集, No.10, pp.19~22, 1988.
- 11) 山崎良一・今田 徹・山本 稔：トンネル交差部の応力集中について(Ⅲ)、日本光弾性学会第11回研究発表講演会講演論文集, No.11, pp.31~34, 1989.
- 12) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, pp.66~76, 1959.
- 13) 中道文基：長大トンネルの換気方式に関する研究、東京大学博士論文, pp.186~192, 1983.

(1990.3.29・受付)