

矩形セグメント継手の応力性状に関する光弾性実験的研究

今田徹¹・山崎良一²・野本寿³・三戸憲二⁴

¹正会員 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

²正会員 工博 東京都立大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

³正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所(〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間2570)

⁴正会員 西松建設株式会社 土木設計部(〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

シールドトンネル覆工用セグメントピースの形状の大部分は矩形であるが、トンネル構造および施工等の合理化に応えるため、各種の形状によるセグメントの利用が考えられている。本論文はこうした事情を背景に、各種セグメント形状の基礎になると考えられる矩形セグメントを対象にして、セグメント継手部の応力性状を光弾性実験の応力凍結法を用いて検討したものである。

考察は剛性一様リング実験値の応力性状を基準にとり、矩形セグメントリングの実験結果をそれと比較している。限られた実験条件の下での結果ではあるが、継手部の応力性状を視覚的に明らかにしている。

Key Words : shield, segment lining, segment joint, rectangle segment, photoelasticity

1. 緒言

現在、わが国におけるシールドトンネル覆工用セグメントピースの形状は、口径の大小を問わず、大部分がトンネル軸に平行に分割され、その平面的形状は矩形となっている（以下矩形セグメントという）。これに対し、セグメント継手の力学的性能の向上、自動組立および急速施工などに応えるために、六角セグメント^{1), 2)}、台形セグメント^{3), 4), 5)}等の利用も考えられている。

セグメントをあらかじめ工場で製作し、これをシールド機テール内でボルトやピンなどの継手部材を介して組み立てたものがセグメント覆工である。この覆工の力学的性状は、その覆工形状が円形の場合には剛性一様リングとの対比において見ることができる。しかし、このセグメント覆工には地山条件の相違による土圧をはじめ、水圧やシールド機を前進させるための施工時荷重等、その大きさや作用方向を一律に特定できない要素をもつ複雑な外力が負荷されることになる。このため円形セグメント覆工においても、その力学的挙動が不明なところがあり、いまだその機構が十分に解明されていないのが現状である⁶⁾。

しかし、特定された荷重に対する円形セグメント

覆工強度については、セグメントとそれをリングとするときの継手部材の強度に依拠した結果として表現できる。したがって、覆工に作用する外力さえ特定できれば、覆工応力についての解析は可能となる。そこで、円形トンネルに作用する複雑な土圧を、便宜的にパターン化した荷重図⁷⁾を与え、これに基づいた覆工の設計が一般に行われている。

大深度地下工事はロボットの導入に拍車をかけたが、施工機械の開発にともない、通常のトンネル施工にもロボットが導入され、その傾向はますます増大するものと考えられる。それにともない、プレハブ部材で構成されるトンネル覆工は、ロボットによる施工性がセグメントを採用するにあたっての重要な要素の一つになる。このため、シールドトンネル用セグメントは、力学特性に加え施工性と経済性に優れたものを開発する必要に迫られている。

すでにセグメント覆工に関する研究開発は各機関でとりあげ^{2), 3), 4), 5)}、実用化に向けての研究を続けているが、それらの基礎となるものはセグメントやそれにより組立てられた覆工の力学特性である。

セグメントピースが矩形の場合の覆工については、継手剛性や挙動に関する研究を多くの人が手がけている^{8), 9), 10, 11)}。これらは、構造解析や実験に基づいて力学特性を論じ、シールドトンネル覆工の設

計に対する資料を提供している。しかし、セグメントの継手部応力や覆工全体の応力の流れを視覚で示すようなものは見当たらない。光弾性実験法は全体の応力分布や応力集中が形状によってどのように変化するかを見るのに適している。セグメント覆工の応力は、接觸問題を含む応力の問題であり、これを視覚で捉えることの意義は大きいものと考えている。

著者らは、機械化施工を念頭においていた新しいセグメント形状を対象としたシールドトンネル覆工開発研究の第一歩として、光弾性実験法による矩形セグメント継手に関する実験的な研究を試みた。調査は軸力の導入に摩擦の影響がでたため、矩形のセグメントで構成される円形覆工の実験結果を、剛性一様リングの実験または計算結果と比較するという方法で行われたが、ここに参考となる結果が得られたので報告する。

2. 光弾性応力凍結法によるセグメント継手実験

(1) 実験概要^{12), 13)}

シールドトンネル覆工に作用する荷重によって、トンネルの断面内には曲げモーメント、軸力、せん断力による応力が発生する。セグメントで組み立てられたリングに、曲げモーメントや軸力を発生させるためには、モデルを砂中に埋設しての自然土圧によるか、あるいは強制的にモデルの周囲から力を与えるかのどちらかによる。実際との対応を考えれば自然土圧による実験が望ましいが、前者においては外力の特定がむずかしく、また、後者においては軸力導入に工夫を必要とする。ここでは基礎的な調査ということで、軸力の大きさは不特定となるが、境界条件の明らかな後者を採用することにした。しかし、最終的には埋設しての自然土圧による実験が必要であると考える。

軸力は、シリコンシートリングを実験モデルに被せて導入した。このリングは厚さ 1.5 mm のシリコンシート 2 枚を、接着剤であるシリコーン系接着剤で接合したものである。この場合シリコンシートリングの内径は、実験モデルの外径より少し小さくする。これによりセグメントで組み立てられているリングは円周方向に締めつけられるから、自立した円形リングになる。ここで注意しなければならないことは、モデルとシリコンシートの接觸面の摩擦である。この摩擦を極力小さくするために、シリコングリースをモデルとシリコンシートの間に塗布した。

表-1 に実験モデルおよび載荷の一覧を示した。モデルの形状は外径が 100 mm、内径 84 mm で、ト

表-1 実験モデルおよび載荷一覧

記号	荷重 (N)	略記号
L - N ₀ - P ₂	P ₂ = 6.3	: 剛一様荷 2
L - N ₁ - P ₀	P ₀ = 0.0	: 剛一様軸 1
L - N ₁ - P ₁	P ₁ = 4.9	: 剛性一様軸荷 1
LRF4 - N ₁ - P _n	P ₁ = 4.9	: 矩平 4 割
LRU _{4,4} - N ₁ - P _n	P ₁ = 4.9	: 矩溝 4 割
LRF6 - N ₁ - P _n	P ₁ = 4.9	: 矩平 6 割
LRU _{4,6} - N ₁ - P _n	P ₁ = 4.9	: 矩溝 6 割

(注) (剛一様荷 2) : 剛性一様リング
 (剛一様軸 1) : 剛性一様リング
 (剛一様軸荷 1) : 剛性一様リング
 (矩平 4 割) : 矩形 4 セグメント
 (矩溝 4 割) : 矩形 4 セグメント
 (矩平 6 割) : 矩形 6 セグメント
 (矩溝 6 割) : 矩形 6 セグメント

ンネル軸方向の長さが 35 mm の円筒である。モデルは剛性一様なリングと矩形セグメント 4 および 6 ピースで組み立てられたリングの 2 種類である。また、継手部がフラットであるものとピン・ホゾを有するものがある。

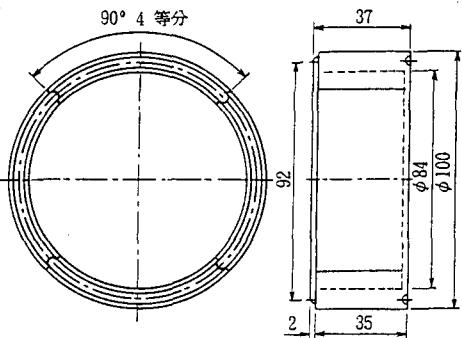
ピン・ホゾ継手は、セグメント継手部の一方に半円形の突起が、他方に半円形の溝がある構造となっている。今回の実験では、この円形部の直径として、2, 3, 4, 5, 6 mm の 5 種類を用意した。

モデルへの外力は、軸力と鉛直直径方向に集中荷重を作用させる 2 種類である。これらの実験を区別するために記号を用いたが、それを以下に示す。

表示法

- L : 覆工
- R : 矩形
- F : フラット継手
- U : ピン・ホゾ継手
- U_n : サフィックス n の数値はピン・ホゾの直径 (mm) を示す。
- N_n : 軸力、n=0 は軸力なし、n=1 は軸力あり (繰次数にして 4.2 次)
- P_{n,n} : 集中荷重、最初の n は集中荷重の種類 (P₀ = 0 N, P₁ = 4.9 N, P₂ = 6.3 N), 2 番目の n は荷重の作用位置 (n = 1 はセグメントピース本体中心位置, n = 2 は継手中心位置) を示す。

記号の一例を挙げれば、LRF4 - N₁ - P₁ は、矩形フラット継手 4 セグメントリングに軸力 N₁ を



矩形セグメント4ピース構成リングモデル

図-1 実験モデルの形状・寸法

導入し、セグメント本体の中心位置に荷重 P_z を作用させた実験、ということになる。

なお、導入された軸力 4.2 次に対応する外圧を求めてみる。縞次数 n は式(1)で与えられている。

$$n = \alpha \sigma t \quad (1)$$

ここに、 α は光弾性感度、 σ は応力、 t はスライスの厚さである。これより、応力は $\sigma = n / (\alpha t) = 4.2 / (0.408 \times 1.0) = 10.3 \text{ N/cm}^2$ となる。これから、実験モデルに発生している単位長さあたりの軸力 N は、モデルの断面積を A として、 $N = \sigma \times A = 10.3 \times 0.8 \times 1.0 = 8.24 \text{ N}$ を得る。軸力は $N = p r$ (r :モデル重心までの半径) で与えられるから、 $p = N / r = 8.24 / 4.6 = 1.79 \text{ N/cm}^2$ (17.9 kpa) となる。

リング間継手部にもピン・ホゾを加工したが、これはセグメント組み立て時の真円を確保するためなどの実験上の都合によるが、将来的にはリング間継手の応力性状を調査するときの一項目とする含みもある。

a) 実験モデル

実験に使用する光弾性材料は、高温硬化エポキシ樹脂、アラルダイト B (CT200)と硬化剤 HT 901 を 100 対 30 の割合で混合した注型用樹脂である。

剛性一様リングモデルは元応力の調査、円周方向に導入される軸力の調査、直径方向外力による実験、軸力と直径方向外力の合成による実験に使用する。

b) 応力凍結

応力凍結炉 (幅 2.0 × 高さ 1.5 × 奥行き 1.0 m) の中央に置かれた荷重装置に、覆工モデルである円形リングをセットして応力凍結を行った。載荷は図-2 に示すように、鉛直荷重を直径 8 mm の載荷鋼棒を介し、セグメント幅に線荷重として伝わる方法を採用した。この場合載荷方向の鉛直性を確保するために載荷ガイドを設けるとともに、ガイドと載荷

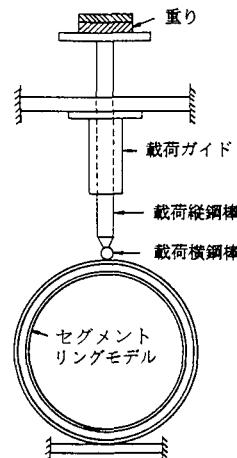


図-2 載荷

鋼棒との接触面にはグリースを塗布し、載荷が円滑に行われるようとした。

応力凍結サイクルは、60 分で 130 °Cまで温度を上げ、その温度で 90 分間据え置いた後、1 時間当たり 5 °C の割合で徐冷した。これらは、実験炉に取り付けられているデジタルプログラム温度調節計で行っているから、応力凍結に対する温度管理はすべての実験モデルに対し、同一条件となっている。

c) スライスの採取

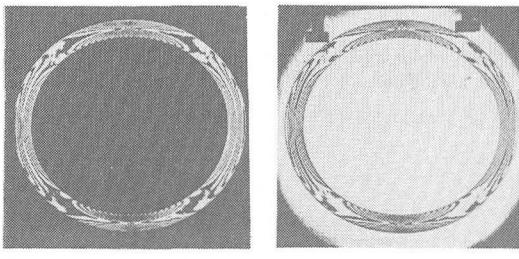
応力凍結後、セグメントトンネル軸方向幅の中心を挟んだ厚さ 10 mm のスライスを採取した。また、一部のモデルについてはスライス採取位置による縞次数分布の相違を見るためにセグメントの端を含むスライスも採取した⁴⁾。スライスの採取では、応力変化の影響を除去するために可能なかぎり薄いスライスを切り出すことが望ましい。しかし、薄いスライスで多くの縞を望むことは、載荷重の増加となり、ひいてはモデルの変形を大きくすることになる。加工上のこととも考慮し、中央部のスライス厚は全て 10 mm とした。スライスの切り出しあは、金鋸と糸鋸を用いて採取し、切断面はヤスリとサンドペーパーで所定の厚さに仕上げた。

d) 等色線写真

採取したスライスは、リング状態を崩さないために、セグメント継手部の内縁と外縁をメンディングテープで止め、浸漬液 (α モノブロムナフタリンと流動パラフィンの混合液) に入れ、等色線を撮影した。写真撮影後、縞次数の確認を行った。

(2) 実験結果

a) 剛性一様リングの実験値と計算値 ($L - N_0 - P_z$: 剛一様荷 2)



暗視野
(L-N_o-P_z : 剛一様荷 2)

図-3 剛性一様リングの直径方向に集中荷重を作用させた場合の等色線写真

剛性一様リングの実験は、セグメントの応力伝達を検討する際の基準となるものである。

実験に当たっては、最大縞次数 10 縞を目標とした。円筒の直径方向に荷重 P が作用する場合の曲げモーメントの一般式は、円筒の直径方向水平断面からの角度を θ として

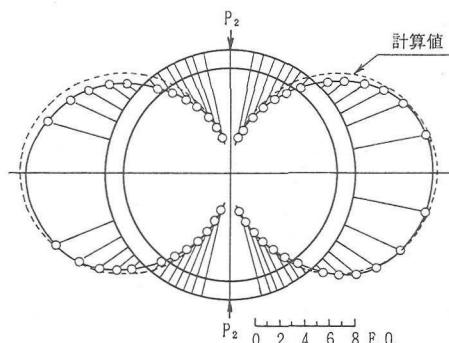
$$M = 0.5 P r (1 - \cos \theta) \\ - P r (\pi - 2) / 2\pi \quad (2)$$

で与えられている。最大曲げモーメントは載荷点の断面に発生する。いま、スライスの厚さを 1.0 cm, モデル材料の光弾性感度を 0.408cm / N とし、載荷点の内縁に 10 縞を出すのに必要な荷重を試算する。1 縞出すのに必要な応力は、式(1)より $\sigma = n / (\alpha t) = 1 / (0.408 \times 1.0) = 2.45 \text{ N/cm}^2$ である。一方、断面の応力は $\sigma = (M y) / I$ より、 $\sigma = 9.375 \text{ M}$ となる。式(2)から $M_{\max.} = 0.318 \text{ Pr}$ であるから、これより、 $P = 2.45 / (9.375 \times 0.318 \times 4.6) = 0.179 \text{ N}$ を得る。したがって、必要な荷重は $0.179 \times 3.5 \times 10 = 6.3 \text{ N}$ となる。

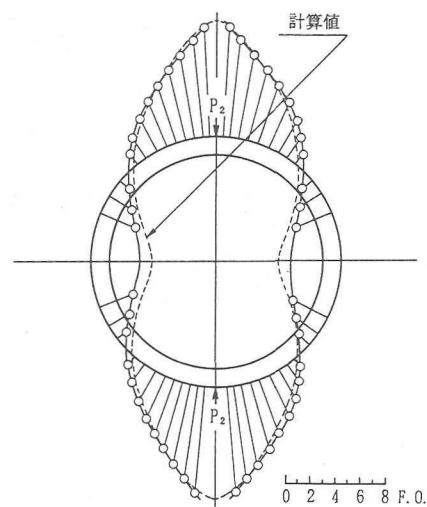
最大縞次数 10 縞は、円周方向の軸力導入による相殺分を考慮したためで、軸力導入のある実験での最大縞次数はこれより少なくなる。図-3 に剛性一様リングの直径方向に荷重を作成した場合の等色線写真、図-4 にこの写真より得られた内外縁の縞次数 (fringe order, F.O.) 分布図を示した。縞次数と応力の関係は式(1)で与えられている。式(1)により、応力は $\sigma = n / (\alpha t)$ で表される。なお、暗視野は縞次数が $1, 2, 3, \dots$ 、明視野は $0.5, 1.5, 2.5, \dots$ を示している。

縞次数分布図の基準線はいざれも外縁としているが、これは分布図の比較を容易とするためである。図-4 には計算値も破線で描かれているが、この計算値は曲梁公式¹⁴⁾によるものである。

内・外縁の縞次数分布図の作成は、等色線写真に直径方向の鉛直・水平の基準線を記入する。次に、



(a) 内縁 (L-N_o-P_z : 剛一様荷 2)



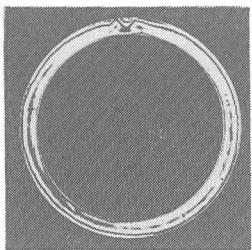
(b) 外縁 (L-N_o-P_z : 剛一様荷 2)

図-4 直径方向に集中荷重がある場合の内縁、外縁の縞次数分布 外径 = 100 mm, 内径 = 84 mm, P_z = 6.3N, スライスの厚さ t = 10 mm, 光弾性感度 $\alpha = 0.408 \text{ cm/N}$

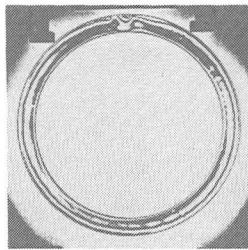
一次の縞が内縁または外縁に交わる点を定め、円の中心からこの点を結ぶ線を放射状に描く。これらの作業を順次縞次数全部に対して行った後、分度器でこれらの位置を測り、これを放射線図に記入して行き、内外縁の縞次数分布図を完成させる。このようにして描かれたものが図-4 である。

b) 剛性一様リングの軸力導入実験 (L-N_o-P_z : 剛一様軸 1)

本実験での軸力導入は、セグメントリングモデルにシリコンシートリングを被せるという方法を採用



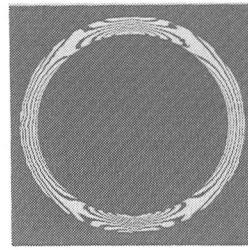
暗視野



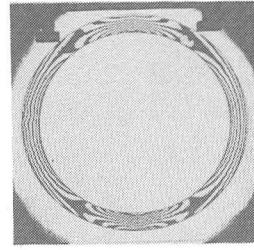
明視野

(L - N₁ - P₀ : 剛一様軸1)

図-5 剛性一様リングの円周方向に締めつけ力を与えて得られた軸力の等色線写真



暗視野



明視野

(L - N₁ - P₁ : 剛一様軸荷1)

図-6 等色線写真

したが、所定の軸力値を導入する方法が確立されていない。そこで、予備実験によりそれを求めるにした。具体的には、セグメントリングモデルがリングとして自立し、かつ直徑方向に4.9N程度の荷重を作用させることができるようにリングを目標として作製した。

軸力の導入に実際に用いたものは、厚さ1.5mmシート2枚を接着して作製した2組のリングである。したがって、6mm厚さのシリコンシートリングを用いたことになるが、両者の内径は異なっている。このように2つのシリコンシートリングを用いたのは、セグメントリングモデルにこれを被せることが容易になることを考えてのことである。

図-5は、剛性一様リングモデルにシリコンシートリングを被せ、応力凍結を行って得られた等色線写真である。リングモデル断面には多少の不均一さはあるが、ほぼ一様で、平均して約4.2次の縞が認められる。なお、写真的上部の一部に縞の乱れが見られるが、これは被せたシリコンシートリング接合部の凹凸が原因している。

c) 軸力導入リングモデルへの載荷実験

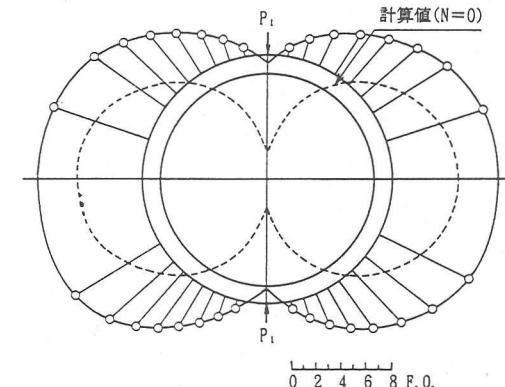
軸力導入リングモデルへの載荷実験は下記の3種類である。

- ① 軸力導入剛性一様リングへの載荷実験
- ② 軸力導入矩形4セグメントリングへの載荷実験
- ③ 軸力導入矩形6セグメントリングへの載荷実験

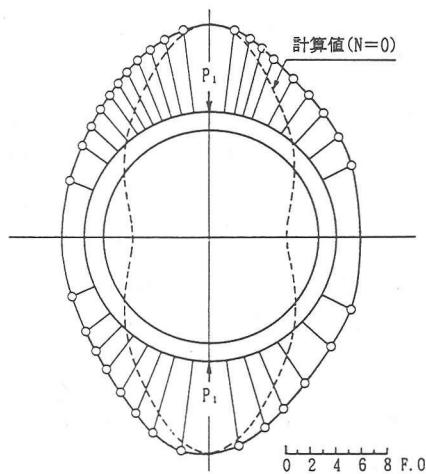
① 軸力導入剛性一様リングへの載荷実験

図-6は軸力導入モデル (N₁: 6mm厚さのシリコンシートリングによる軸力導入) の直徑方向に荷重がある場合の等色線写真である。この写真的内外縞の縞次数分布を図-7に示した。図中に示した破線の曲線は、軸力0の場合の計算値¹⁴⁾である。

② 軸力導入矩形4セグメントリングへの載荷実験



(a) 内縁の縞次数分布



(b) 外縁の縞次数分布

(L - N₁ - P₁ : 剛一様軸荷1)

図-7 円周方向軸力と直徑方向に荷重がある場合の内外縁の縞次数分布

図-8は矩形4セグメントリングモデルの等色線写真で、(a)がフラット、(b)がピン・ホゾ継

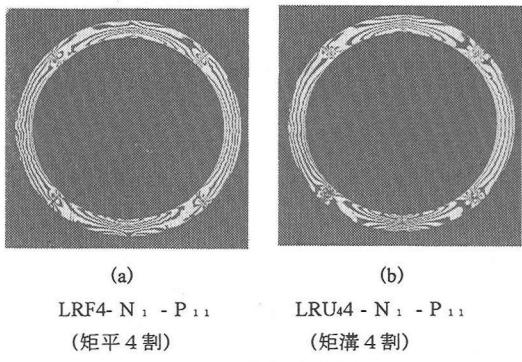


図-8 等色線写真

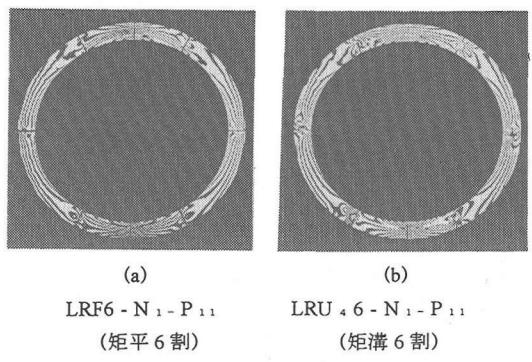
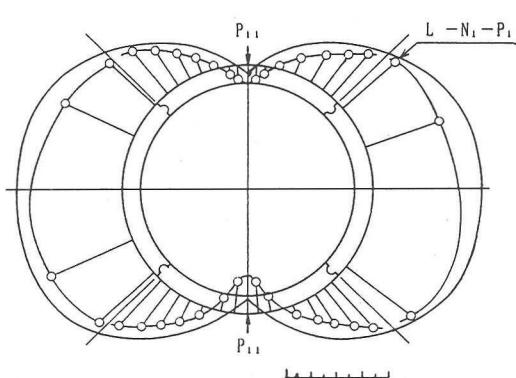
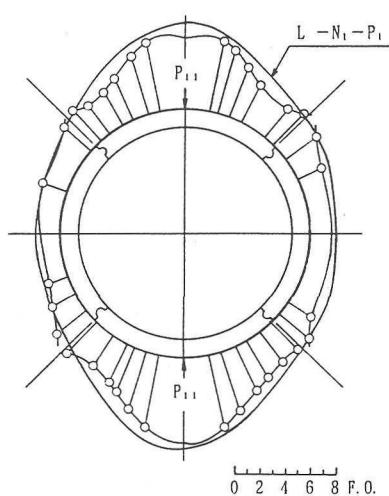


図-10 等色線写真



(a) 内縁の皺次数分布

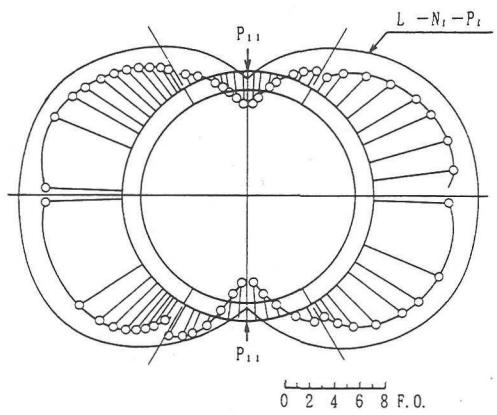


(b) 外縁の皺次数分布

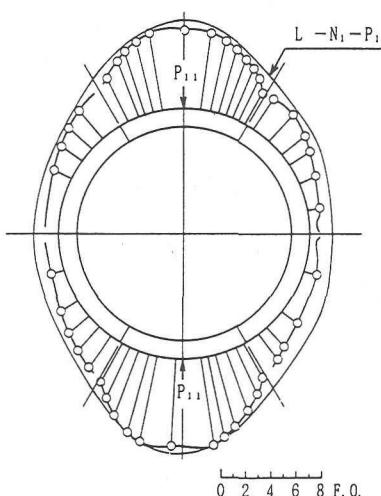
(LRU₄4 - N₁ - P₁₁: 矩溝4割)

図-9 円周方向軸力と直径方向に荷重がある場合の内外縁の皺次数分布

手の場合である。図-9に(b)の場合の内外縁の皺次数分布を示した。また、図の中で実験値近傍の



(a) 内縁の皺次数分布



(b) 外縁の皺次数分布

(LRF6 - N₁ - P₁₁: 矩平6割)

図-11 円周方向軸力と直径方向に荷重がある場合の内外縁の皺次数分布

○印の無い実曲線は図-7に示した剛性一様リングモデルにおける実験値(L - N₁ - P₁: 剛一様軸荷

1) である。なお、以下に示す図-11も同様である。

③ 軸力導入矩形6セグメントリングへの載荷実験

図-10は矩形6セグメントリングモデルの等色線写真で、(a)がフラット、(b)がピン・ホゾ継手の場合である。図-11に(a)の場合の内外縁の縞次数分布を示した。

3. 実験結果の考察

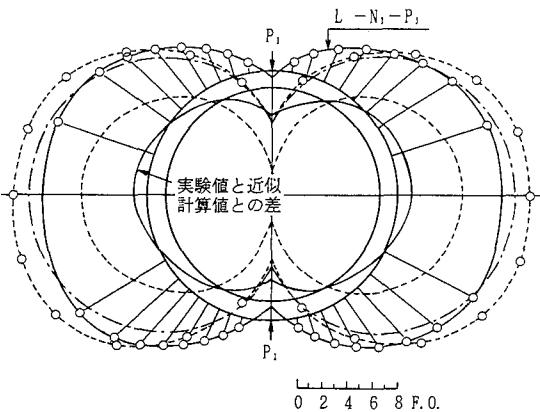
剛性一様リングに対する直径方向への載荷実験は、本実験法の精度を示すことになる。図-3に等色線写真を示したが、時間効果による元応力に加え、閉じたリングであるための不静定力による元応力が認められる。

元応力をリング内縁について見ると、クラウン、インバート近傍では縞が戻り、スプリングライン近傍では流れている。これは、リング内縁に一様な張力が存在していることを示している。一方、外縁では一様な圧縮力が入っている。この元応力は、材料の注型(130℃のエポキシ樹脂と硬化剤の混合液を型に注いで硬化させること。)時の硬化過程で入るものと考えられ、焼鈍しても除去できない。したがって、これについては元応力の大きさを調べて補正する必要がある。なお、補正を必要とするものは、この実験のように閉じたリングの場合で、セグメントで構成されるリングでは元応力は解放されて小さな値となるので、一般には補正を必要としない。なお、剛性一様リングの内縁における元応力の大きさは1.0次前後である。

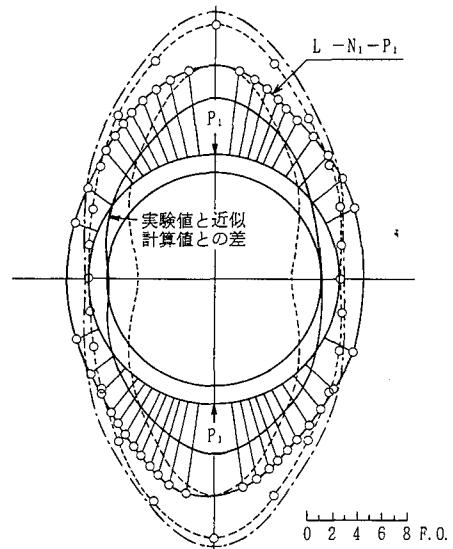
図-4に併記されている破線の分布図は、計算値である。補正していない実験値との比較になるが、両者はかなり良い近似を示している。この結果よりモデルの形状・寸法、載荷法は適切なものであると判断して良い。

図-6は、軸力(N_1)導入モデルの直径方向に $P_1 = 4.9N$ を作用させて得られた等色線写真である。これの内外縁の縞次数分布を図-7に示した。図中の破線の曲線は、軸力が導入されていないリングの直径方向に荷重4.9Nを作用させて得られた計算値¹²⁾である。

図-7(a)は内縁の縞次数分布であるが、実験値は計算値に軸力(N_1)を加算したものとして説明できる。これに対し、図(b)に示す外縁の分布図での実験値と計算値は単純加算となっていない。これはモデルと軸力導入用シリコンシートリングとの間の摩擦等が関係しているものと考えられるが、以下それについて考察する¹³⁾。



(a) 内縁の縞次数分布



(b) 外縁の縞次数分布

- : 実験値 (荷重 P_1 による実験値 + 軸力 N_1)
- : 計算値 (荷重 $P_1 = 4.9N$)
- : 近似計算値 (荷重 P_1 による計算値 + 軸力 N_1)
- : 修正実験値 (実験値 + $P = 2.2N$)

図-12 円周方向軸力と直径方向に荷重がある場合の内外縁の縞次数分布

図-12において、丸印のついた実曲線と破線で示す曲線は、図-7で示したものと同じものである。また、一点鎖線で示した曲線は、破線で示した計算値に導入された軸力値の4.2次を加算した内・外縁の縞次数分布である。

図-12に示す一点鎖線は、実験結果を取り入れ

た近似的な値ではあるが、軸力と直径方向荷重を外力とする実験結果はこれに一致しなければならない。図-12によれば、内・外縁ともクラウンとインパートおよびスプリングラインの近傍で計算値と実験値の相違が認められる。そしてこれらの相違は、いずれも実験値が計算値より小さくなっている。

以上のことから、この実験結果は何らかの傾向を示しているものと考え、近似的な試算を行った。まず、図-12(a), (b) の実験値（丸印のついた実線）と一点鎖線の差を求め、その値を内・外縁の分布図として描くと、この図の傾向が図-12に示してある破線の計算値に良く似ていることが認められた。そこで、このような分布図となる外力を逆算してみると、リングの直径方向に荷重 $P = 2.2 \text{ N}$ (4.9 N の 45 %) を作用させた場合に相当することが分かった。図-12の丸印のついた破線の曲線は、剛性一様リングに上記の荷重を作用させて得られる内・外縁の縞次数を、それぞれ対応する位置の実験値に加えて得られた縞次数分布である。図-12によれば、この丸印のついた破線の分布図が、一点鎖線で示した近似的な計算値に似ていることが分かる。このことから以下のことが推定される。

一つは、軸力導入に用いたシリコンシートリングがエポキシ樹脂リングモデルと一体となっていることから、軸力導入用リングが直径方向作用外力の一部を負担している。他の一つは、シリコンシートリングとモデルとの間の摩擦が、モデルの収縮または伸びを妨げたことの二点である。

この実験における応力凍結機構を示すと、ガラス状弾性（室温から 90 ℃ 近辺）におけるエポキシ樹脂モデルは、温度の上昇に合わせ、シリコンシートリングを押し広げながら膨張する。二次転移域を経てゴム状弾性（115 ℃ 以上）に入ると、モデルは軟化するが、そのときの弾性係数はガラス状弾性の 1 / 150 程度になる。このため、モデルはシリコンシートリングの収縮力で縮められるとともに、直径方向の外力につり合う状態で応力凍結が行われる。

モデルとシリコンシートリングの間には、シリコングリースを塗布して摩擦の除去を試みたが、これだけでは不十分であったようである。クラウンとインパートにおいては、直径方向作用外力と温度降下にともなうモデルの縮みが、シリコンシートとの間の摩擦で妨げられている。また、スプリングライン近傍では、直径方向作用外力により、モデルは伸びたいわけであるが、これまたその伸びをシリコンシートが妨げている。

軸力導入のために用いたシリコンシートリングがモデルと一体となって挙動することが、結果的には

外力の軽減に繋がっているのに加え、モデルの伸縮がシリコンシートとの摩擦で自由に動けないことも、実験値と理論値が合わない理由としてと考えられる。自由周辺であるモデル内縁は、摩擦の影響が緩和されるものの、モデル外周辺の影響を受けていることは明らかである。

このように、軸力導入がある実験結果は、計算結果と合わせた形で比較することができないものとなつたが、このことは軸力導入の一手段としてシリコンシートリングを採用した場合の必然の帰結である。しかし、セグメント間の応力伝達を調べるという意味合いから言えば、実験条件を同一としたセグメントリングの実験結果を剛性一様リングの実験結果と（図-7, L-N₁-P₁ : 剛性一様軸荷 1）比較することで所期の目的は達せられると考え、この手法による実験的研究を進めた。

図-8は、軸力導入矩形 4 セグメントモデルの実験結果である。また、図-9にはピン・ホゾ継手の場合の内外縁の縞次数分布を示した。図-8では比較のため、継手部の形状がフラットの場合 (a) とピン・ホゾの場合 (b) の等色線写真を掲げた。両者を比較すると継手部を除きほとんど一致している。図-9には剛性一様リングの実験結果（図-9 : L-N₁-P₁ : 剛性一様軸荷 1）も併記されているが、軸力導入矩形 4 セグメントの実験結果はこれとも良く似た結果となっている。

継手の形状としては、フラット継手の方が、応力集中も少なく、応力の流れもいい。これに対し、ピン・ホゾの場合は継手部に応力集中が発生する。しかし、矩形 4 セグメントの場合の内外縁の縞次数分布の大きさで見る限り、ピン・ホゾの存在に關係なく両者はほとんど同じである。

図-10と11は、6 セグメントモデルに関する実験結果で、4 セグメントの場合と同様な形式で資料を掲げている。図-10において、フラット継手の場合は4 セグメントの実験結果とほとんど同様である。これの内外縁の縞次数分布を示したのが図-11であるが、この図からも明らかである。これに対し、ピン・ホゾを持つ実験では図-10 (b) で分かるようにスプリング位置における外縁付近の縞の乱れが目立つ。

図-13に示した等色線写真は、ピン・ホゾ径を順次変化させたものであるが、これによれば、応力分布図全体の変化は少ないものの、ピン・ホゾ径が大きくなるに連れて、継手部を含む近傍の応力集中は増大する。このことから継手部の応力集中に関しては、フラットの形状のものが一番良いことが分かる。施工上等の関係から、ピン溝を設ける場合でも、

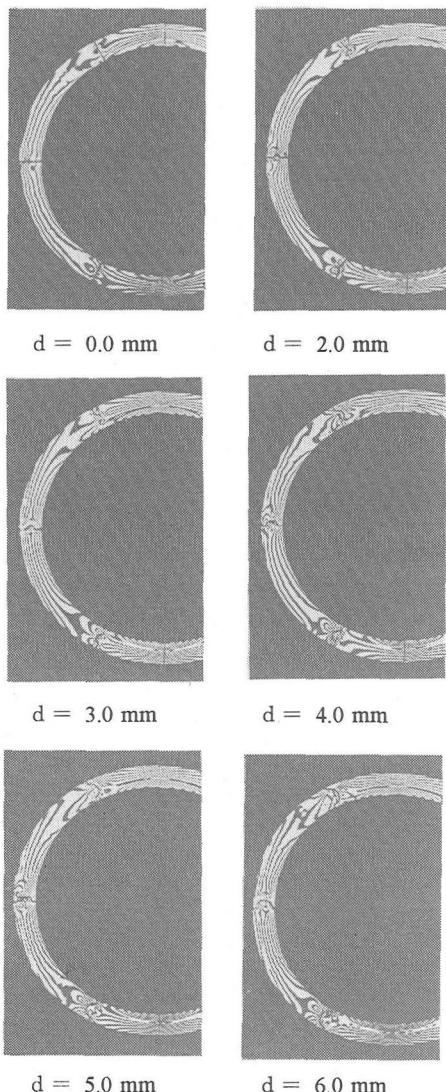


図-13 ピン・ホゾ径 (d =直徑) の相違による矩形セグメント継手部の応力状態

最小必要限の大きさにすることが望ましい。

4. 結言

本論文は、通常用いられている矩形のピース形状をしたセグメント継手部の応力性状を三次元光弾性の応力凍結法により実験的な考察を試みたものである。実験は矩形4および6セグメントリングに軸力を導入し、応力状態が一番厳しい直径方向に外力を作用させたモデルで実施した。継手部はフラットなものとピン・ホゾの2種類で、ピン・ホゾ継手では補足的にピン・ホゾの径を変化させた実験も実施し

た。

軸力は、シリコンシートリングをセグメントリングモデルに被せて導入したため、両者の接触面には摩擦が発生し、外縁における応力分布は計算値と一致しない。そこで、実験は軸力と外荷重の2種類とした同一条件で行い、剛性一様リングとの対比でそれぞれの力学特性を論じた。それらをまとめると

- 1) 矩形4および6セグメントリングのフラット継手は継手部に応力集中の発生が少なく応力伝達も良好である。

- 2) 矩形6セグメントリングにおいて、ピン・ホゾを変化させた実験結果によれば、ピン・ホゾ径が大きくなると継手部を含むその近傍の応力集中も増大する。このことから、定性的ではあるが、施工上でピン溝を設ける場合でも最小必要限の大きさとすることが望ましい。

- 3) ピン・ホゾ継手のような構造でも、応力の乱れは局部的で、その影響範囲は小さい。

等のことが言える。

シールドトンネル覆工用セグメントとしては、トンネル周辺地山の広範な反力を期待する多ヒンジ系セグメントリングは別として、それによるリングの力学性状が剛性一様リングの挙動に近いものが理想的と考えられる。今回の実験結果では、セグメントの継手面がフラットの場合が応力伝達が最も滑らかであり、ピン・ホゾ継手の場合でも、ピン・ホゾの大きさが小さい方が応力集中が少なく、応力伝達が良好であることが判明した。このため、矩形以外のセグメント形状の開発に当たっては、これらのこと考慮する必要がある。

今回の実験は、セグメント間継手の応力伝達に限られたものであるが、光弾性実験により力学性状を視覚的に把握することができた。また、実際の覆工との違いはあるものの、この実験を通じいくつかの示唆を得ることができた。今後は、軸力導入方法について検討を加え、継手構造の合理化、セグメントの自動組立および高速施工を目的とした矩形以外のセグメントピース形状について、その継手部の応力性状に関する実験を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 山本稔、森 麟、相馬誠人：六角セグメント現場を視察して－中華人民共和国引台入泰灌漑用水路－、トンネルと地下、第24巻3号、pp.35 - 42、1993年
- 2) 都甲博二、荒川賢治、寺崎勝、大関宗孝：わが国初の六角形セグメントの開発、土木学会誌、vol. 78, pp.17- 19, 1993 - 4.

- 3) 今田徹, 山崎良一, 野本寿: 台形セグメント継手の力学特性について, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集III-11, pp.76-77, 1993年9月.
- 4) 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 三戸憲二: 台形セグメント継手の力学特性について(2), 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集III-608, pp.1206-1207, 1994年9月.
- 5) 今田徹, 三戸憲二, 山崎良一, 野本寿: 台形セグメントの開発-台形セグメント載荷曲げ試験結果について-, 土木学会第49回年次学術講演会講演会講演概要集III-609, pp.1208-1209, 1994年9月.
- 6) 土木学会: セグメントの設計, トンネル・ライブドリーム 第6号, 土木学会, 1994年6月.
- 7) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 土木学会, 1988年6月.
- 8) 久保慶三郎, 結城皓軒: シールドセグメントの応力に対する継手構造の影響, 土木学会論文集, 第150号, 1968.
- 9) 結城皓軒: 継手の構造と組み方を考慮したシールドセグメントの解析, 土木学会論文報告集, 第176号, 1970.
- 10) 村上博智, 小泉淳: シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第296号, 1980.
- 11) 河田博之, 長崎光男, 澤 健: セグメントの継手剛性に関する実験とその考察, 構造物設計資料, No.68, 日本鉄道施設協会, 1981.
- 12) 山崎良一, 今田徹, 三戸憲二, 橋本彰三: シールドトンネル覆工応力について(2), 日本光弹性学会第17回研究発表会講演論文集, pp.117-120, No.17 (1995).
- 13) 山崎良一, 今田徹, 野本寿, 三戸憲二: シールドトンネル覆工応力について(3), 日本光弹性学会第17回研究発表会講演論文集, pp.121-124, No.17 (1995).
- 14) I. OHNO: Formula for stress curved beam, Memo. of Fac. of Tech. Tokyo Met.Univ. (Tokyo Jap.) No.4 1954.
- 15) 山崎良一, 今田徹, 三戸憲二, 野本寿: シールドトンネル覆工応力について(4), 日本光弹性学会第18回研究発表会講演論文集, pp.99-102, No.18 (1996).

(1996.7.8 受付)

PHOTOELASTIC INVESTIGATION FOR STRESS BEHAVIOR OF RECTANGLE SEGMENT JOINT

Toru KONDA, Ryoichi YAMAZAKI, Toshi NOMOTO and Kenji MITO

Due to the recent demand for cost reduction and for the rational design to cope with for various needs in shield tunnel construction, many types of segment lining have been attempted. Most shield linings consist of rectangular shaped segment, but authors are developing trapezoidal shape segment.

As the basis of this work, a study on the joint characteristics of rectangular segment has been carried out by using three dimensional freezing photo-elastic method. First the applicability of the method in the study is discussed. Although the stress distribution obtained is somewhat different from actual situation due to the difficulty of loading method of axial force, the results show the method is very helpful to study overall stress as well as local distribution at joint by giving visual pattern. The stress distribution patterns of segmented lining of rectangular type are shown in comparison with the uniform jointless lining.