

シールドトンネルセグメント継手部の 局部応力性状

今田徹¹・山崎良一²・野本寿³・三戸憲二⁴・山崎宏⁵

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)

⁵正会員 工修 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)

シールドトンネルのセグメント形式は多様であるが、その殆どは、セグメント端部を突き合わせボルトあるいはほぞなどで力を伝達する形式となっている。この突き合わせ部で曲げ、軸力、せん断力の伝達が行われることになるが、これらは接触面を介して行われることになり、接触問題として局部的に非常に複雑な応力状態になる。本論文は、矩形、台形、凸型などのコンクリートセグメントで採用される単純突き合わせ、ほぞなどの基本的な継手構造に関し、軸力、曲げ、せん断を受けたときの局部応力の状況を光弾性実験により検討を行ったものである。その結果、応力の伝達が円滑に行われる場合もあるが、状況により大きな応力集中が生ずることを明らかにした。

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

1. 緒言

シールドトンネルの覆工は、セグメントと呼ばれる分割された構造要素を組み立てて作られる。そのため、継手が必要となり、組み上げられて一体となった覆工の力学的な挙動は、継手の特性によって支配される。また、継手の形式によっていろいろな形式のセグメントが使用されている。通常、セグメントの検討はセグメントをマクロにとらえて梁とし、継手部は剛性低下を表現できるバネとしている。しかし、継手構造は基本的には突き合わせ構造であり、面と面とが接触する構造になっている。このことは、継手の挙動は基本的構造である継ぎボルトなどの継手の構成、継手面の形状などの他、面の仕上がり程度の影響を受ける接触問題を含むことになる。また、最近では六角セグメント継手^{1)・2)}、凸型セグメント^{3)・4)}等にもみられるように、複雑な形状を有する継手が開発されてきている。これらの継手では、セグメントを単に梁と見なすだけでは十分でなく、継手形状の変化に伴う局部的な応力集中が問題となることが考えられる。応力の集中は局部的なひび割れの発生や欠けの原因となることになるので、セグメントの設計においてはできるだけ局部的な応力の

集中を避けなければならない。光弾性実験法は応力の伝達状況を縞模様で表現できるので、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。そこで、光弾性実験法を用いセグメントの継手部に生じる応力集中と応力伝達に関する問題を検討した。

ここで取り上げたセグメントの形状は、平面的形状が長方形となっている矩形セグメント⁵⁾、形状が台形となっている台形セグメント^{6)・7)・8)}、台形の変形として筆者らが開発を進めている凸型セグメント(図-1参照)^{3)・4)}の3種類である。

セグメントの継手面は、フラットであるものと面に半円の凹凸を設けたものがある。凹凸継手構造は、リング間継手構造に用いられており、この継手構造はピンホゾ継手と呼称されている。このことから筆者らも、凹凸継手構造をピン・ホゾ継手と呼称していた。一方、木材・石材・鉄材など二つの部材を接合するときの突起を「ほぞ」、突起をはめこむ穴を「ほぞあな」と称することから、これにちなんで「ほぞ付きセグメント」などの呼称も散見する⁹⁾。そこで筆者らも、従来言葉を取り入れた一般性のある表現として、以下この形式の継手を「ほぞ形式継手」と呼称することにする。

すでに筆者らは、光弾性応力凍結法による矩形セグメント継手リングによる実験的研究を行った⁶⁾。また、それに継続して、台形セグメントリングによる実験も実施した⁷⁾。これらの実験の結果によれば、継手の挙動はマクロにはそれぞれの継手の形状など、構造的な特性に支配されるが、ほぞ形式の継手では、局所的な応力集中が発生し、継手部の応力が複雑となる。これらのことから、継手部については十分な検討が必要であることが示唆された。

そこで、(a) 台形セグメント、六角セグメントなど、トンネル軸方向と斜めの角度を持つ突き合わせセグメント継手部の応力性状（セグメント間の応力伝達で継手曲げに対応）¹⁰⁾、(b) ほぞ形式継手における突き合わせ部の応力性状（セグメント間の応力伝達で円周方向軸力が作用する場合）^{11)・12)}、(c) 凸型セグメントにおけるように接合面が2つの平面からなるセグメントの交角における継手の応力性状（リング間の応力伝達でトンネル方向推力が作用する場合）¹⁵⁾ および(d) せん断キーを有する継手の局部応力性状（セグメント間およびリング間の応力伝達でトンネルの半径方向から外力が作用する場合）¹⁷⁾に関する光弾性実験を実施した。

以上、シールドトンネル覆工セグメント継手部の光弾性実験により、視覚的ではあるが、継手部の応力性状を明らかにすることができたので報告する。

なお、この実験に使用した光弾性材料は、アラライト B (CT 200) と硬化剤 HT 901 を 100 対 30 の割合で混合した高温硬化エポキシ樹脂である。

2. トンネル軸方向と斜めの角度を持つ突き合わせセグメント継手部の応力性状¹⁰⁾

実物モデルによる平板継手曲げ試験では、継ぎボルトで両セグメントを接続することから、そのままの形で曲げ試験を行うことができる。これに対し、継ぎボルトを用いない場合は載荷治具を用い、さらに梁モデルの長さ方向に軸力を必要とする。このことから、実物平板曲げ試験とは少し異なったものとなるが、継手部の応力伝達を見る一つの方法と考え、以下の実験を行うことにした。

図-1 は、エポキシ樹脂製のセグメント試験片である。図-2 に示す治具に、同一角度を持つ一対の試験片 2 枚を挿入し、純曲げ載荷状態で応力凍結を行った。

純曲げ載荷実験を行うために用いた治具は、試験片と同一の線膨脹係数を持つエポキシ樹脂である。これを用いるもことにより、治具とモデルは温度に対して一体となって挙動する。実験状態は三層の重

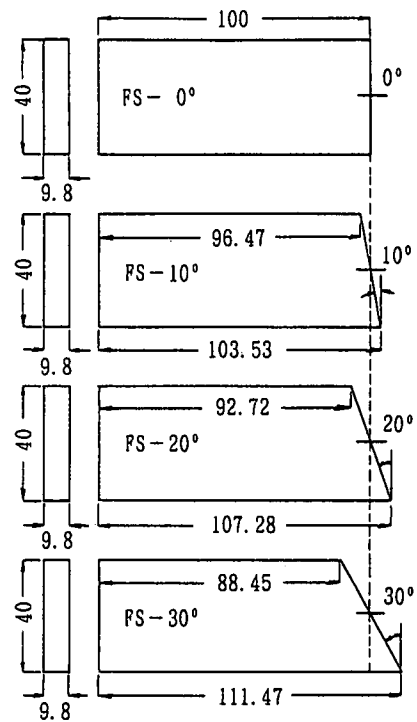


図-1 実験モデル

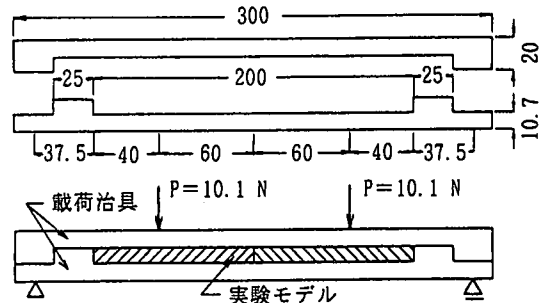


図-2 載荷治具と純曲げ載荷

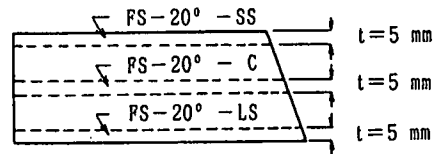
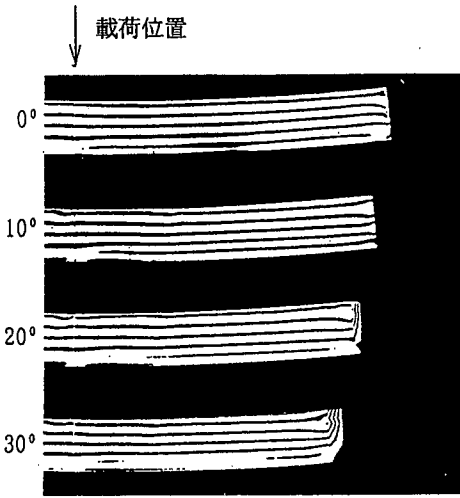


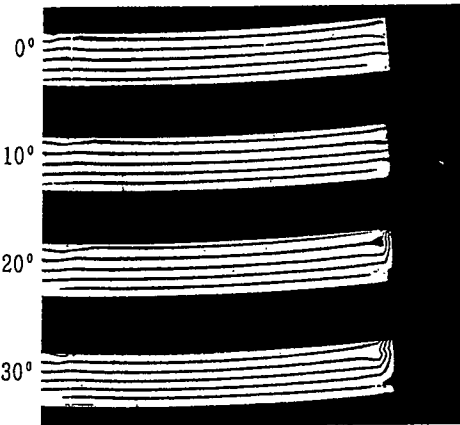
図-3 スライスの採取位置

ね梁であるが、試験片は下部治具に設けた突起の間に挿入されるので、軸方向へのずれは拘束される。このため、下部治具と試験片は一体となり、上部治具と試験片とは重ね梁的な挙動を示すことになる。

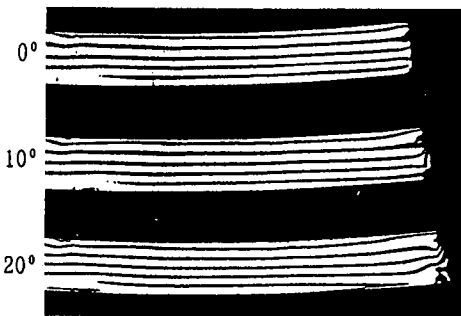
モデルの接触応力を見るためには、接触断面に対して垂直な方向のスライスを取得するのがよいが、



(a)



(b)

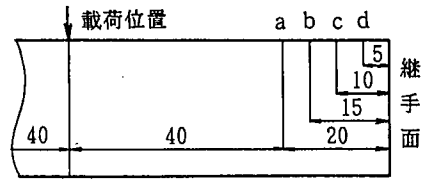


(c)

図-4 等色線写真

接触位置からの影響範囲を調べるには円周軸方向のスライスを採用した方がよい。図-3にスライスの採取位置を示す。

スライスは短い辺(SS)と長い辺(LS)および両者の中心(C)を含む、厚さ 5 mm の短冊を採取した。



(FS-0°-SS の寸法表示例)

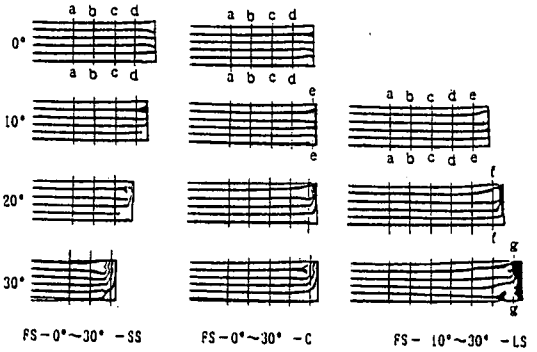


図-5 モデル継手面からの影響範囲

これらの記号として、例えば、突き合わせ角度が 20° の場合、短い辺から順次 FS-20°-SS, FS-20°-C, FS-20°-LS を用いることにする。

図-4 は、かくして得られた等色線写真(暗視野: 縞次数が 0, 1, 2, 3, ...)である。図-4(a)のグループは短い辺, (b)グループは中央, (c)グループは長い辺の実験結果である。突き合わせ角度の違いによる比較を容易にするために、図-2に示した荷重位置(左)を基準とした写真としている。また、図-4において、突き合わせ角度が 0° の場合を除き、継手面近傍の縞が乱れているのは、この位置のスライスの形状が楔になっているからである。

図-5 (等色線写真の明視野: 縞次数が 0.5, 1.5, 2.5, ...) は、モデル継手面からの影響範囲を梁幅との関係で示したものである。図の左上に掲げた長方形モデル(FS-0°-SS)において、荷重位置から計って a 位置までの距離が梁幅 (4 cm)、接手面からは梁幅の 0.5 に当たる 2 cm である。以下、b, c, d は接手面から梁幅の 0.375, 0.25, 0.125 に当たる 1.5 cm, 1.0 cm, 0.5 cm となっている。角度を有するモデルも同様である。

図-5によれば、モデル接手面からの影響範囲は、角度 0° の場合が最も小さく、梁幅の 0.125 に当たる 0.5 cm 程度である。一方、大きいのは角度が 30° の場合の長辺側 (LS) で、ここでは梁幅の 0.7 に当たる 2.8cm 程度まで影響が及んでいる。これらのことから、矩形セグメントでは継手であること

の影響は小さい範囲にとどまる。これに対し、台形セグメントの鋭角側では、継手による影響の範囲が広がる。ことに継手角度が大きくなるに連れてその影響は顕著になる、等のことが言える。

3. ほぞ形式継手における突き合わせ継手部の応力性状^{(1), (2)}

ほぞ形式継手を有するセグメントリングの実験結果⁵⁾によれば、ほぞの径が大きくなるに連れて、継手部の平板部に応力が集中する傾向にある。そこでこれら継手部の応力伝達を調査するため、ほぞの径が継手面上で変化する6種類のモデルについて実験を行った。

図-6にほぞ形式継手モデルの形状寸法、表-1に実験の種類を示した。継手面上のほぞの加工は、半円上のすべてのところで接触し、両者が無理なくはまることを目標にした。

この実験では応力凍結法を用いた。図-7に実験用載荷装置の概略を示す。装置外枠の大きさは150×150×255mmである。この中央にモデルを収納する長方形の箱が取り付けられている。この箱の手前部分の板は取り外しができるようになっている。また、中のモデルが見えるように、上中下の三カ所にのぞき窓があげられている。この箱も鉄製で、幅はモデルの寸法32mmに合わせているが、エポキシ樹脂の線膨脹を考慮し、応力凍結時に箱側面と接触しないようなクリアランスは確保している。モデルの厚さ方向については、モデルセットの段階で、モデルは裏側の鉄板に接している。これはクリアランスを持たせたモデルのセットがしにくいのと、厚さ方向の膨脹は小さく、また偏光の透過方向で光弾性効果が現れないからでもある。

実験モデルの載荷部は山形に加工してあるが、この山形に合わせた治具を用い、軸方向のみの外力が伝達するようにした。載荷は、φ15mmの丸鋼が二カ所のガイド穴を通して鉛直方向に伝達される構造の載荷治具の荷重受けに実荷重を載せて行いが、このときの載荷点の先端はモデル載荷部に取り付けた治具の穴に入っている。

応力凍結サイクルは、60分で130°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。

図-8はほぞ形式継手部の等色線写真(明視野)

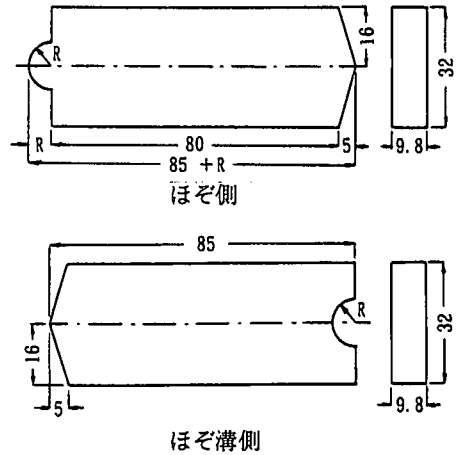


図-6 ほぞ形式継手モデルの形状寸法

表-1 実験の種類

| 記号 | ほぞの直径 mm | モデルの厚さ mm | 荷重 N |
|-----------|----------|-----------|------|
| JA - 4 R | 8 | 9.8 | 31.4 |
| JA - 6 R | 12 | 9.8 | 31.4 |
| JA - 8 R | 16 | 9.8 | 31.4 |
| JA - 10 R | 20 | 9.8 | 31.4 |
| JA - 12 R | 24 | 9.8 | 31.4 |
| JA - 14 R | 28 | 9.8 | 31.4 |

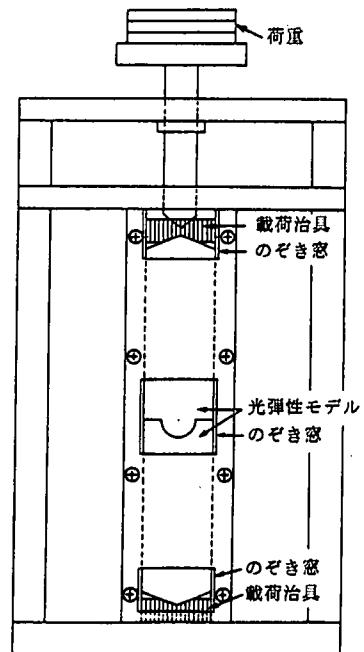


図-7 ほぞ形式継手実験の載荷概略図

である。この写真の中で対称性があり、縞模様も明瞭な $J_A - 8R$ を観察すると、ほぞ溝部の縞模様が、円孔を持つ帯板の引張試験で現れる縞¹³⁾によく似ていることが分かる。このことは、この場合の応力伝達が継手平面で行われ、ほぞでは伝達されていないことを意味している。これより、ほぞ形式継手の応力伝達は、ほぞの半径が小さい場合は継手平面で、大きくなるとほぞおよび継手平面で行われていることが推察される。両者の境目は、ほぞの半径が継手平面幅の $1/2$ を少し越えたところである。

ほぞの径が大きくなるにつれて継手平面積が小さくなる。その結果、平面部に応力が集中し、それによる破損が生じることになる。このことからほぞの径は最小必要限の大きさとし、平面部で応力を伝達させることが望ましい。

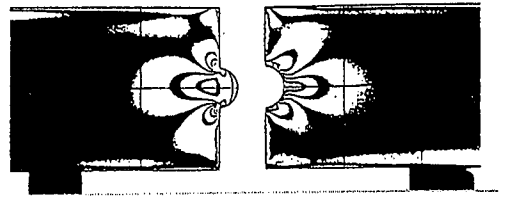
以上は実験結果からの考察であるが、この実験結果の検証と、実験資料だけではよく分からない部分の応力状態を明らかにするため、近似解析を試みた。その方法は、光弾性実験結果を参考として有限要素法による応力解析を行い、光弾性実験を再現できる解析条件を見いだすことにより、継手部の応力伝達機構を数値解析の面から明らかにするというものである。しかし、継手部の接触面は自由周辺ではないから、実験値を定量的に把握することには無理がある。このことから、ここで挙げた解析条件は種々の解析の試みの中から、実験結果を多少とも再現できるというものになる。

継手部の解析は接触問題として取り扱う内容と判断したが、接触条件である「接触面での力と変位の連続性」を考慮に入れて計算しようとする、本問題の接触部が同一材料であるため一体化した帯板の圧縮問題となってしまう。そこで数値解析においては、実験の条件を再現できるように、境界条件をいくつかに分類して解析を行い、あとで結果を合成させる方法をとることにした。

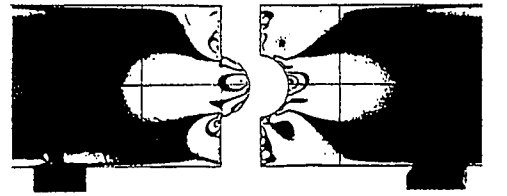
実験条件として、以下に示す4種の条件を設定した(図-9参照)。

条件1 ほぞ面(Γ_1)にクリアランスがあるとす。従って応力伝達はフラット面(Γ_2)を通して行われる。境界条件は端面(Γ_3)に一樣圧縮応力を与え、フラット面(Γ_2)は水平方向(x方向)を固定、垂直方向(y方向)をフリーとする応力条件による計算である。

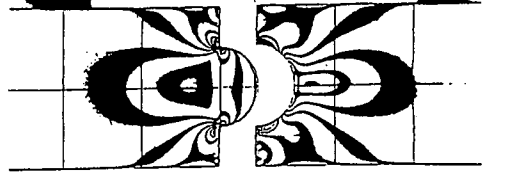
条件2 条件1での計算では、ほぞ面およびほぞ溝面(Γ_1)の変位を拘束していないため、結果として両者の変位はオーバーラップする。そのオーバーラップした変位を半分ずつ元に戻す。条件1の計算で変形した形状を初期の形状として、フラット面



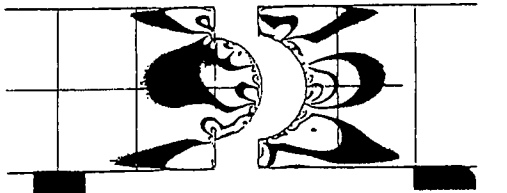
$J_A - 4 R$



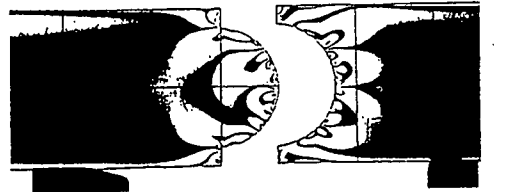
$J_A - 6 R$



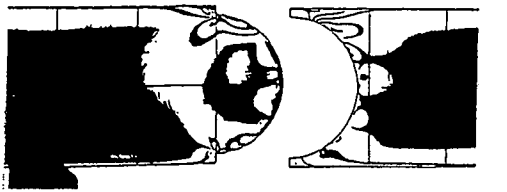
$J_A - 8 R$



$J_A - 10 R$



$J_A - 12 R$



$J_A - 14 R$

図-8 ほぞ形式継手の二次元光弾性実験

(Γ_2)と端面(Γ_3)をx方向のみ拘束した変位条件による計算である。この結果の応力分布を、条件1での応力分布に重ね合わせる。

条件3 ほぞとほぞ溝面(Γ_1)のみ接触して お

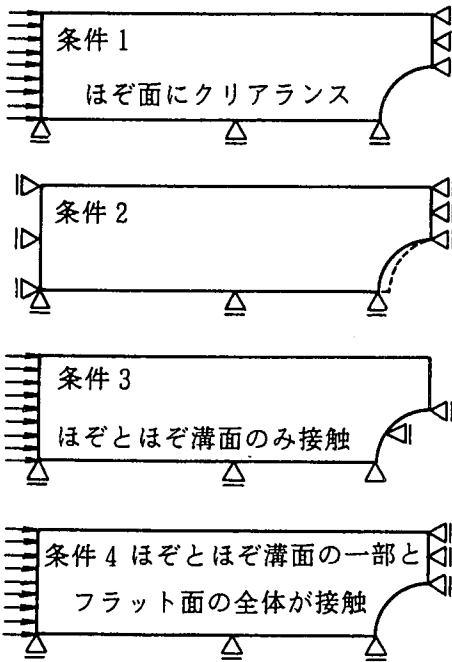
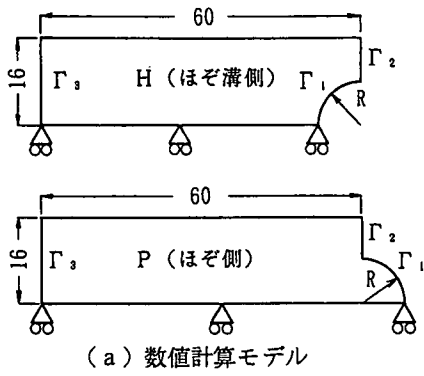
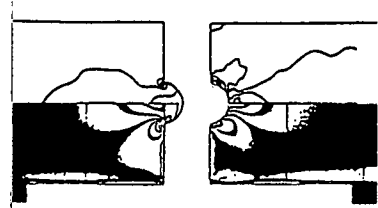


図-9 数値解析モデルと解析条件

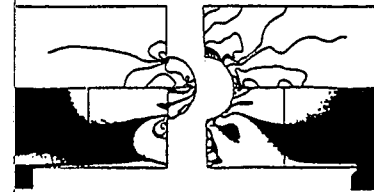
り、フラット面 (Γ_2) は接触していないという条件である。面 Γ_1 の変位は拘束し、面 Γ_2 をフリーとし、端面 (Γ_3) に条件1と同じ圧縮応力を与えるという条件による計算である。

条件4 ほぞとほぞ溝面 (Γ_1) の一部分とフラット面 (Γ_2) の全体が接触しているとするものであり、面 Γ_1 の接点一つおきに拘束を与える。残りの一つおきはフリーとする。面 Γ_2 は x 方向のみ拘束。端面 (Γ_3) に条件1と同じ圧縮応力を与えるという条件による計算である。

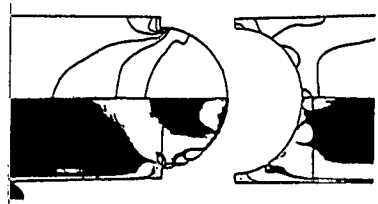
図-10に各条件による計算結果の一例を示した。条件1の場合は、ほぞとほぞ溝が接触していないので、ほぞ溝側では丸孔切り欠きを持つ帯板の引張・圧縮の場合と同じになる。 $J_A - 4R$ から $J_A - 8R$ の



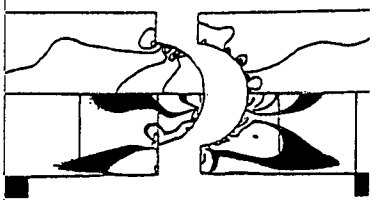
a) 条件1の場合の結果 ($J_A - 4R$)



b) 条件(1+2)の場合の結果 ($J_A - 6R$)



c) 条件3の場合の結果 ($J_A - 14R$)



d) 条件4の場合の結果 ($J_A - 10R$)
(上半分が数値計算結果)

図-10 有限要素法による数値解析

場合の結果がこの場合に近似しているが、ほぞの半径が小さい場合にはこの境界条件に近くなる。これはほぞとほぞ溝面 (Γ_1) がたとえ接触していても、その影響が少なく、フラット面 (Γ_2) での応力伝達が主力となるためと考えられる。図-10のa)に $J_A - 4R$ の結果を示した。

条件1での計算では、ほぞとほぞ溝面 (Γ_1) の変位を拘束していないため、結果として両者の変位はオーバーラップする。条件2での計算では、これを変位条件の下で解消させ、両条件下 (Γ_2 と Γ_3 が荷重作用方向に対してのみ拘束される) で得られた応力分布を重ね合わせたものである。この条件では、半径が大きくなるとフラット面 (Γ_2) に大きな応力が生じ、実験との差が目立つようになる。 $J_A - 6R$ の結果を図-10のb)に示した。

条件-3の場合は、ほぞ・ほぞ溝の半径が大きな場合に近似する。これは、ほぞとほぞ溝面 (Γ_1) を

通した応力伝達が主力となるためと考えられる。J_a - 14 Rの結果を図-10のc)に示した。

条件4の場合は、図-8に示すJ_a - 10 Rと、12 Rを想定したものであるが、ほぞ・ほぞ溝面(Γ₁)の状態は比較的良好に再現できている。

以上、4種の条件による計算結果を示した。この中で最も実験結果をよく近似していると思われる図-10のa)とd)について、Γ₁、Γ₂面上の応力状態を計算値で調べて見ると、接触面での両者の応力は一致していなかった。有限要素法による境界上の計算値は要素の重心での値であることを考慮して修正したとしても、ここで取り上げた境界条件だけではまだ不十分である。境界条件の設定見直しや追加は今後の課題とし、この計算から

- ①実験結果を近似できる境界条件は、ほぞ・ほぞ溝の半径によって異なる。
- ②数値計算と光弾性実験との組み合わせによる問題解明は有用である。

などのことが言える。①では、同種類の問題であっても、同一の境界条件による計算処理ができない場合があることを教えている。②では、数値計算における境界条件の設定の正当性が判断できると同時に、光弾性実験の結果の正当性の判断も可能となる。

4. 2つの平面から構成される継手の交角部における応力性状^{14), 15)}

シールドトンネル覆工は周辺地山からの外力を支えるとともに、シールド掘進機の推進に利用されるから、そのことを踏まえた構造としなければならない。そこで、突き合わせ平板セグメントモデルによる基礎的な推力実験を行った¹⁵⁾。

セグメントモデルの形状は図-11に示す凸型である。凸型セグメントは2つの平面から構成される交角が継手面に二カ所形成されることから、ここに応力が集中することが予想された。

セグメントは、シールド掘進機のテール部で組立られて覆工となる。この時点ではまだ覆工に外力(土圧)は作用していない。この状態でシールド掘進機を前進させることになるが、この時のセグメント覆工にはトンネル軸方向の推力が作用しているだけである。しかし、掘進機の止水および圧力保持の役目をしているテールシールを通過するところで円周方向の軸力が生じ、さらにそこを離れると泥水圧や土圧による応力が発生する。平板セグメントの突き合わせ実験では、両者をボルトで固定していないことから、両セグメントの応力伝達が不完全となる。

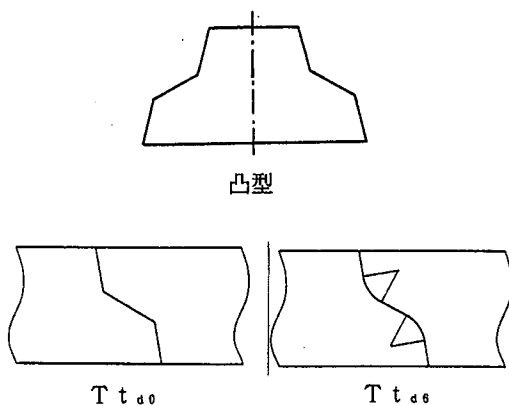


図-11 凸型セグメントモデルの形状

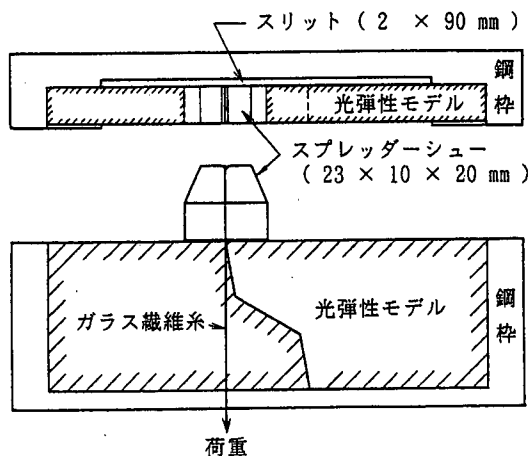


図-12 推力実験概略図

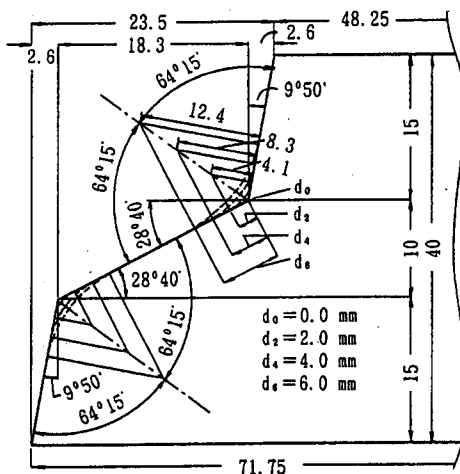
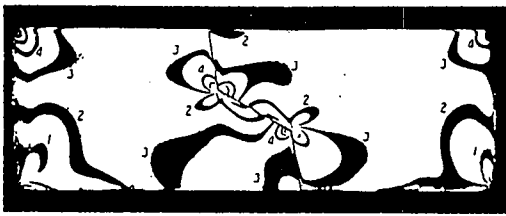
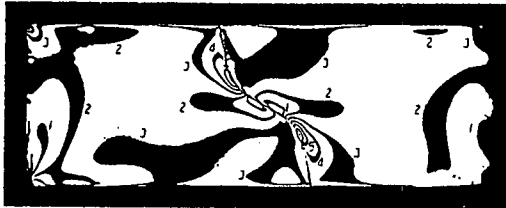


図-13 凸型セグメント凹凸部の詳細

そこで、円周方向に相当する軸力を導入した状態で実験を行うことにした。軸力はエポキシ樹脂モデル



T t_{ss}-N



T t_{ss}-N

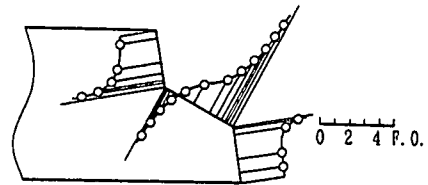
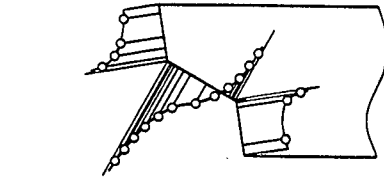
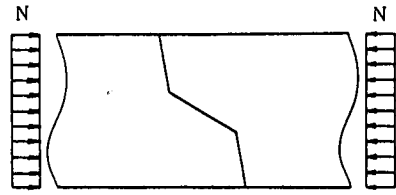
図-14 軸力Nだけが作用している場合の凸型セグメント突き合わせ部の等色線写真

の線膨脹を拘束することによって導入することができるので、実験には応力凍結法を用いた。

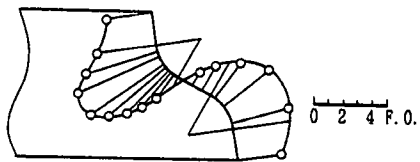
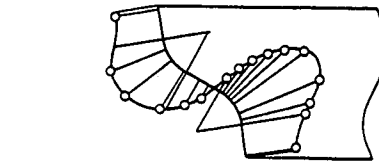
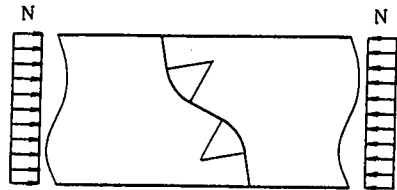
図-11に示すように、凸型セグメントは対称性を有している。そこで、対称の位置で切断し、その一方の上下を入れ替えて突き合わせると長方形になる。図-12に推力実験の概略図を示したが、両者を突き合わせたモデルの高さは40mm、幅120mm、厚さは9.8mmである。このモデルを鋼枠に入れ、トンネル軸方向からスプレッダーシューを介して推力を作用させ、その状態で応力凍結を行うと軸力を導入した推力実験が行える。

図-12の鋼枠に矩形セグメントをセットし、負荷を与えないで応力凍結実験を行うと、軸力だけが作用している場合の等色線が得られる。この実験による平均の縞次数は2.3次であった。縞次数と応力の関係は $n = \alpha \times \sigma \times t$ (n : 縞次数, α : 光弾性感度, t : モデルの厚さ) で与えられているから、軸力Nは $\alpha = 4.0 \text{ cm/kgf}$ (0.408 cm/N), $h = 4.0 \text{ cm}$, $t = 0.98 \text{ cm}$ として2.3 kgf(22.5N)を得る。

図-14に一例として、凸型セグメント突き合わせモデルに軸力だけを作用させた場合の等色線写真を示した。ここに記号T tの後の添え字は、セグメント接触面の形状変化を、凹凸の最深部または最先端からの距離を示している。ssは凹部または凸部が直線の交点であることを示し、ssは交点からの距離が両側に6mmで、この位置に立てた両垂線との距離12.4mmを半径とする円弧となっていることを表している(図-13参照)。なお、実験モデルの形状寸法は、光弾性実験と並行して行われた実物モデ



T t_{ss}-N



T t_{ss}-N

図-15 軸力Nだけが作用している場合の凸型セグメント接触位置の等色線写真

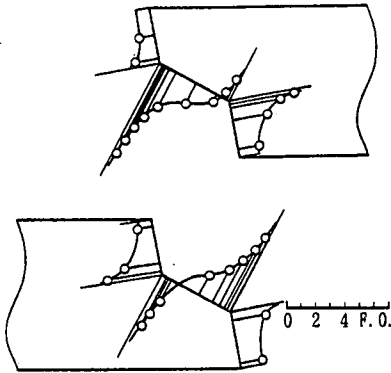
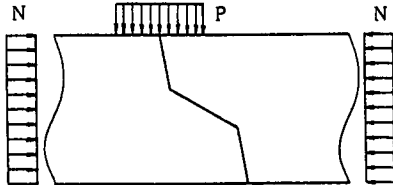
ルの形状を参考にしている^{3), 4)}。

凸型セグメント継手部の応力集中の度合いは、継手角度によって異なると考えられる。必要に応じ、実験で確かめることが望ましい。

図-15に図-14に関わる接触位置の縞次数分布を示したが、凹凸部が直線の交点となっていると



T t_{ao}-J-NP



T t_{ao}-J-NP

図-16 軸力Nと推力Pが作用している場合の凸型セグメント突き合わせ部の等色線写真と接触位置の繰次数分布

ころに大きな応力集中が生じていることが分かる。これに対し、凹凸部の形状を円弧としたものでは、応力集中もなく、よい応力分布となっている。なお、接触面は自由周辺ではないから、厳密な意味での主応力ではないことに注意する必要がある。

図-16は、軸力を導入するとともに、推力Pを作用させた実験の等色線写真と接触位置の繰次数分布である。この場合の推力位置は、両セグメント接触部の上端にスプレッターシューの中心が合っている場合である。推力荷重は $P=2.03 \text{ kgf}(19.9 \text{ N})$ である。なお、反力は鋼枠の下面全体で受けている。

図-16の結果を、図-15のT t_{ao}-Nと比較して見ると、凹部応力の減少が見られる。これは、凹部がリング方向軸力Nによって広げられるが、トンネル軸方向軸力Pによって押し戻されるからであ

る。凹部は押し広げによる応力集中が生じ、クラックの発生も考えられるので、その部を円弧にするなどの処置が必要である。なお、凹部の応力集中の度合いは、軸力と推力のバランスによって決まるので使用するセグメントでその関係を調査しておくことが望まれる。

図-16は1個のジャッキによる推力が継手部に作用している場合であるが、矩形、台形の場合も最小単位の推力が作用する場合を取り上げた。これは、実験結果を組み合わせることにより、複数の推力が作用している場合の推定ができるかと判断したことによる。

5. せん断キーを有する継手部の応力性状¹⁷⁾

土木学会発行のトンネル標準示方書によれば¹⁸⁾、セグメントリングの構造モデルを、セグメント継手の力学的な取り扱いの相違によって、① 剛性一様セグメントリング、② 多ヒンジ系セグメントリング、③ 回転ばねを持つセグメントリング、に分類している。ここで③の計算法は、リング継手のせん断剛性の大きさによって千鳥組による添接効果が表現できることから、セグメントリング耐荷機構を説明できる有効な方法であると言われている。せん断剛性による曲げモーメントの伝達を図れる構造の一つとして、せん断キーを持つ継手部が考えられる。ここでは、台形状のせん断キーを継手部に設けた場合の応力伝達や応力集中について取り上げる¹⁷⁾。

図-17は、せん断キー試験モデルの形状寸法である。円形トンネルの一部を模したものであるが、実験の都合上、長方形平板突き合わせとした。また、キー溝に止水溝の役目も付与しようという考えから、キーとキー溝の形状は台形とし、底部にシール材を貼ることを想定した。

図-18にせん断キー試験の概略を示したが、3個のセグメントモデルは、組み立てられて鋼枠にセットされる。鋼枠を用いたのは、トンネル円周方向からの軸力を導入するためである。軸力はエポキシ樹脂の線膨張を拘束することによって導入できるので、実験には応力凍結法を用いた。

図-17において、④、⑤、⑧の組み合わせモデルは、キー溝がセグメント高さの中央に位置している場合、⑥、⑦、⑨モデルは端に寄っている場合である。④、⑥モデルにはキー溝、⑤、⑦はキー、⑧、⑨は左側にキー、右側にキー溝が加工されている。

キーの寸法は、対辺の一方が6.54 mm、他方が10 mm、高さが3 mmの等脚台形(狭角: 60°)

表-2 実験の種類

| 記号 | d _{mm} | P _{0.1} (N) | P _{0.1} (N) |
|---|-----------------|----------------------|----------------------|
| Q ₂₅ P-N ₁ | 25 | 0.0 | 0.0 |
| Q ₂₅ PL-N ₁ -P _{0.1} | 25 | 19.9 | 0.0 |
| Q ₂₅ PL-N ₁ -P _{0.1} | 25 | 0.0 | 10.1 |
| Q ₂₅ H-N ₁ | 25 | 0.0 | 0.0 |
| Q ₂₅ HU-N ₁ -P _{0.1} | 25 | 19.9 | 0.0 |
| Q ₂₅ HU-N ₁ -P _{0.1} | 25 | 0.0 | 10.1 |
| Q ₃₀ P-N ₁ | 20 | 0.0 | 0.0 |
| Q ₃₀ PL-N ₁ -P _{0.1} | 20 | 19.9 | 0.0 |
| Q ₃₀ PL-N ₁ -P _{0.1} | 20 | 0.0 | 10.1 |
| Q ₃₀ H-N ₁ | 30 | 0.0 | 0.0 |
| Q ₃₀ HU-N ₁ -P _{0.1} | 30 | 19.9 | 0.0 |
| Q ₃₀ HU-N ₁ -P _{0.1} | 30 | 0.0 | 10.1 |

d: モデル上端からキー、キー溝中心位置までの距離, N₁: 軸力, モデルの厚さ t = 9.8mm

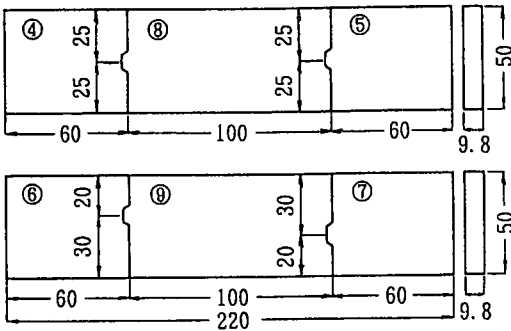


図-17 せん断キー試験モデルの形状寸法

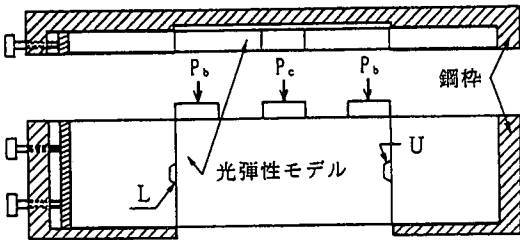


図-18 せん断キー試験の概略図

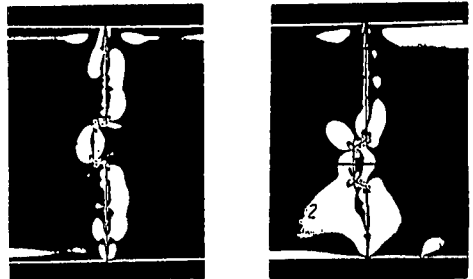
である。キー溝はキーに合わせて加工した。図-18にせん断キー試験の概略図を示したが、モデル④と⑤および⑥と⑦は下辺が全断面で支えられている。これに対し、⑧と⑨の下辺は支えられていない。外力はセグメントの厚さ方向から作用させる。

せん断キー試験のモデルとして、図-17のような組み合わせモデルにしたのは、⑧と④、⑧と⑤の間に相互干渉が生じないことから、2種類の実験内容を含ませたことによる。④、⑧、⑤の組み合わせモデルにおいて、⑧左側のキーは、④キー溝の下端で接触するが、⑧右側のキー溝は⑤上端のキーに接触する。⑥、⑦、⑨モデルの場合も同様である。

実験は図-18に示す鋼枠にモデルを挿入し、左側のねじで均等に締め付け、その状態で応力凍結を行った。この実験装置で導入される軸力 N₁は、縮次数で2次である。

表-2に実験の種類を示した。記号に用いたアルファベット文字で、Qはせん断力、PとHはキーとキー溝をピン・ホゾになぞらえた表現、LとUはキーまたはキー溝の下と上という意味である(図-18参照)。

図-19にキーおよびキー溝近傍の等色線写真の一例を示した。図-19の上段は軸力だけが作用している場合、中段は図-17に示す⑧、⑨モデルの中央に荷重を作用させた場合、下段は⑧、⑨モデル



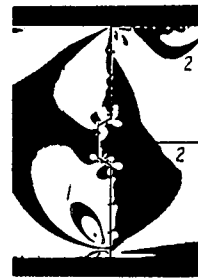
Q₂₅P-N₁

Q₃₀H-N₁



Q₂₅PL-N₁-P_{0.1}

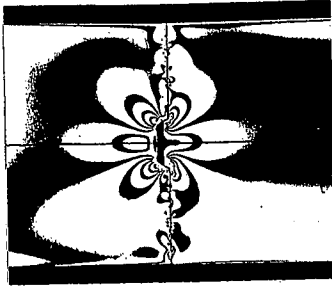
Q₃₀HU-N₁-P_{0.1}



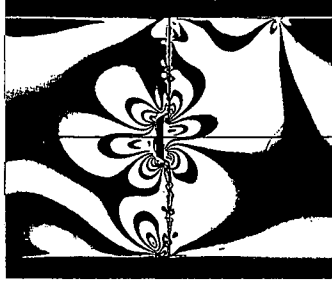
Q₂₅PL-N₁-P_{0.1}

Q₃₀HU-N₁-P_{0.1}

図-19 せん断キーせん断試験の等色線写真



(a) 軸力 N_1 のみが作用している場合



(b) 軸力 N_1 とせん断力 P が作用している場合
 図-20 シール溝を設けたせん断キーせん断試験の等色線写真

の左端、右端に荷重が載っている場合である。載荷は鋼製のスプレッダーシュー（ $23 \times 10 \times 20 \text{ mm}$ ）を介して行った。載荷重 P_{01} は P_{01} のほぼ半分となっているので、図-19の中段とそれに対応する下段接触位置の縞模様は計算上一致することになる。

図-19の中段と下段の実験では、応力がキーまたはキー溝をどのように經由して伝達するか、またどの部分に集中するかを調べるのが目的である。しかし、この等色線写真のキーまたはキー溝接触部を含む近傍の応力に際だった変化を見ることができない。強いといえば、せん断力が作用しているキーとそれに接触するキー溝では、キー溝に力が集中している。一方、せん断力が作用しているキー溝がキーの上側で接触する場合にはキー溝上側に力が集中する。これらのことは、力の伝達を考えると理解できることであるが、この様子が実験写真には顕著に表れていない。これは、キーとキー溝の組み合わせに無理がなく、両者が一体となって挙動しているからであると思われる。このことから、キーとキー溝のクリアランスは可能な限り小さくすることが望ましい。また、この部の応力集中については、キーの隅よりもキー溝隅の方が大きくなる傾向にある。これはキー溝隅の押し広げ、すなわち斜め引っ張りせん断が働いていることを意味している。したがって、破壊はこの隅から始まるので、この部の応力集中を軽減す

るような形状にしておく必要がある。

図-20は、ほぞ溝にシール材を貼付する場合を想定し、ほぞの先端を少し切り取って行ったせん断試験の等色線写真である。図の(a)は軸力 N_1 のみが作用している場合、(b)は軸力 N_1 とせん断力 P が作用している場合で、(a)は図-19の $Q_{25}P-N_1$ 、(b)は $Q_{25}PL-N_1-P_{01}$ と全く同じ条件の実験である。

図-19と図-20の両者を比較してみると、僅かな空隙を設けた後者のほぞとほぞ溝の接触部に大きな応力集中が生じていることがわかる。これらの応力集中は局部的なものではあるが、これがせん断破壊の引き金となることも考えられる。このことから、キー溝に止水溝の役目を付与することは好ましくない。キー溝接触部の応力伝達は、ほぞとほぞ溝が一体となって挙動するような状態が望ましく、それには寸法精度の高い製品を用いることである。

6. 結論

本論文は、セグメント間継手部の応力伝達に関する基礎的な調査を、光弾性実験で行ったものを取りまとめたものである。この実験では、応力の分布を視覚で捉えることができるので、応力伝達を調査するのに適した手法といえる。しかし、セグメント間は接触問題であることから、これらの応力性状を正確に把握することは容易でない。そこで、単純なモデルによる基礎的な実験と計算も取り入れ、継手部の応力性状を検討した。その結果

- 1) 台形継手はリング方向への応力の伝達領域が広がることにより、応力伝達は良好となる⁷⁾。しかし、トンネル軸方向に対する継手角度が大きくなるにつれて、鋭角部の応力に乱れが生じるので、ほどよい継手角度の選定が必要である。
- 2) ほぞ形式継手の場合、ほぞ・ほぞ溝の径が小さい場合の応力伝達は継手面で伝達され、径が大きくなるとほぞと継手面の両方で行われる。ほぞの径を必要以上に大きくすると継手平面部に応力が集中し、その部の破損の原因となる。ほぞの径は必要最小限の大きさとすることが望ましい。
- 3) 光弾性実験法と有限要素法などの数値解析法を併用することは、接触問題を含む局部応力の状況を把握するのに有効である。
- 4) 凸型セグメントの場合のように、凹凸部の先端を直線で交差させると応力集中が発生する。ジャッキ推力の影響を含めて、応力集中の影響を検討する必要がある。

5) せん断キーを持つセグメント継手では、キーとキー溝を可能な限り密着させ、両者が一体となって挙動するような状態にすることが望ましい。また、キー溝隅には斜め引っ張りせん断による応力集中が発生するので、この隅の応力集中を軽減するような形状にしておく必要がある。

6) セグメントは梁などにモデル化する構造物としての設計をするが、セグメントの形状、ほぞなどの細部構造によっては、応力集中が発生する場合もあるので、局所的な応力分布に留意する必要がある。

などのことを明らかにすることができ、継手部の応力は複雑であり、局所的な応力を考慮し、細部構造を合理的なものにする必要があることを示した。

セグメント継手部については、トンネル標準施工書（シールド工法編）・同解説¹⁰⁾の第7章セグメントの設計細目第56条で言及している（：セグメントの継手構造は、必要な強度を有するとともに、組立の確実性、作業性および止水性を考慮して定めるものとする）。これによれば継手部の応力性状は必要な強度を有するという文言に包含されることになる。

セグメントは必要な強度に加え、施工性や止水性を兼ね備えなければならないから、セグメントの開発は過去の経験を踏まえ、試行錯誤を繰り返しながら設計を試みることになる。そして強度的には設計荷重に耐えうるものを目標とするが、シールドトンネルの機械化施工が一般的となった現在、それに用いるセグメントは、強度に加え施工性と経済性に優れているものでなければならない。このようなことから、種々のセグメントが考案されているが、その形状は複雑化する傾向にある。

筆者らはこうした現状を踏まえ、セグメントの開発が経験と試行錯誤に頼るだけでなく、継手部の応力性状を踏まえた合理的なセグメントとして開発されることを期待し、継手部の実験的解明に取り組んだ。セグメント継手部は、矩形セグメントに代表されるように、基本的には突き合わせ構造であることから、接触問題を含むことになる。このため、形状によっては応力が集中し、接触応力とあわせて複雑な応力状態となる。セグメント継手部に限らず、組立による構造物は個々の部材の寸法精度が重要な要素となる。一方、寸法精度を上げることは製作費の増に繋がることであり、継手の細部構造が与える影響を十分検討して合理的なものとする必要がある。

なお、この実験で得られた一連の資料は、有限要素法などによる計算と対応させ、普遍性のある資料としてまとめて行きたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたって小山工業高等専門学校橋本彰三教授ならびに山下進講師にご助力を頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

付 録

本論文で用いた光弾性実験法に関する用語について略記する。

○ 光弾性実験法：偏光の性質を利用し、透明体で作ったモデルを用いて、外力をにう構造物の内部に起こる内力を測定する実験的な方法。内部の応力状態が等高線のような縞模様で表現できることから、応力の流れと大きさを視覚で捉えることができる。

○ 応力凍結法：光弾性実験材料（一般にエポキシ樹脂）モデルを実験炉にセットし、温度を130℃前後まで上げ、負荷を与えて徐冷すると変形が固定する。負荷を取り去っても変形が固定されていることから、この状態を光弾性装置で観測することにより、内部の応力状態を知ることができる。この方法は主として三次元光弾性モデルに適用するが、二次元モデルに適用してもよい。

○ 等色線：光弾性実験装置を用いて得られる縞模様は主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）一定の軌跡である。縞模様に色がついていることから等色線と呼称している。この縞模様を写真で撮影したものが等色線写真である。

○ 縞次数：偏光子（偏光を得る光学装置）と偏（検）光子の間に置かれたモデルに力を加え、それを徐々に増して行くと位相差も増し、偏光の強さが0から始まって明暗交互に変化する。視野が暗黒となる順番を消光次数または縞次数という。

○ 暗視野：偏光子と偏（検）光子を直交させると、その視野は暗くなり、このとき得られる縞は、0次、1次、2次、・・・となる。このような光学系を暗視野という。

○ 明視野：暗視野の光学系において、偏（検）光子を90°回転すると明視野の光学系になる。このとき得られる縞は0.5次、1.5次、2.5次・・・となり、単独もしくは暗視野で得られる縞模様に、図上で重ねて利用することができる。

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，大関宗幸：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) 山崎宏, 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二 : ウィング (凸型) セグメント実物大載荷試験 (その3) - セン断キーせん断試験 -, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 III-B 121, pp.242 - 243, 1997 年 9 月.
- 4) 三戸憲二, 今田徹, 山崎良一, 山崎宏 : ウィング (凸型) セグメント実物大載荷試験 (その4) - 軸力導入継手曲げ試験 -, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 III-B 122, pp.244 - 245, 1997 年 9 月.
- 5) 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 三戸憲二 : 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, 土学会論文集 No.588 /VI-38, pp.51-60, 1998. 3.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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概要集 III-609, pp.1208 - 1209; 1994 年 9 月.
- 9) 平出亨, 福島昭男 : ホゾ付きセグメントの性能確認試験, トンネルと地下, 第 25 巻 10 号, pp.21 - 32, 1993 - 10.
- 10) 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), 日本光弾性学会第 17 回研究発表会講演論文集, pp.117 - 120, No.17 (1995).
- 11) 橋本彰三, 山下進, 山崎良一 : シールドトンネル覆工セグメント継手部の応力解析, 日本光弾性学会第 18 回研究発表会講演論文集, pp.95 - 98, No.18 (1996).
- 12) 橋本彰三, 山下進, 山崎良一 : シールドトンネル覆工セグメント継手部の応力解析 II, 日本光弾性学会第 19 回研究発表会講演論文集, pp.141 - 144, No.19 (1997).
- 13) 西田正孝 : 材料力学 光弾性で補説する, 森北出版社, p.298, 1977.
- 14) 土木学会 : トンネル標準示方書 (シールド工法編) ・同解説, 土木学会, pp.131-134, 1996 年 7 月.
- 15) 山崎良一, 今田徹, 野本寿, 三戸憲二, 山崎宏 : シールドトンネル覆工応力について (5), 日本光弾性学会第 19 回研究発表会講演論文集, pp.137-140, No.19 (1997).
- 16) 土木学会 : トンネル標準示方書 (シールド工法編) ・同解説, 土木学会, pp.76 - 81, 1996 年 7 月.
- 17) 山崎良一, 今田徹, 野本寿, 三戸憲二, 山崎宏 : シールドトンネル覆工応力について (6), 日本光弾性学会第 20 回研究発表会講演論文集, pp.131 - 134, No.20 (1998).
- 18) 土木学会 : トンネル標準示方書 (シールド工法編) ・同解説, 土木学会, pp.90 - 91, 1996 年 7 月.

(1998. 9. 7 受付)

LOCAL STRESS AT SEGMENT JOINTS OF SHIELD TUNNEL LINING

Toru KONDA, Ryoichi YAMAZAKI, Toshi NOMOTO, Kenji MITO
and Hiroshi YAMAZAKI

Although various types of segments and segment joints are employed, most segment joints are butt type joints with flat face or tongue and groove. Therefore, the forces in the lining are transferred through contact face at the joint. The force transfer at the contacted surface is very complicated phenomenon and may produce local high stress concentration. The local stress at segment joint of basic types segments such as rectangular or trapezoidal shape under various forces is investigated by photo-elastic method. The results show that smooth stress transfer can be obtained but high stress may develop in local area which should be considered in design.