

# ガス導管シールドトンネル用セグメントの力学実験と解析について

林 光俊<sup>1</sup>・斉藤 正幸<sup>2</sup>・小泉 淳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京ガス株式会社 導管技術開発センター(〒230 横浜市鶴見区末広町1-7-7)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本シールドエンジニアリング株式会社 第二事業部(〒116 荒川区西日暮里2-26-2)

<sup>3</sup>正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169 新宿区大久保3-4-1)

東京ガスでは、ガス導管シールドトンネルの工費削減をはかるため、ほぞセグメントと称する新形式セグメントの採用を決定した。このセグメントは、従来下水道トンネル等で使用されてきた継手金具を用いた標準セグメントと異なり、リング継手に凹凸のほぞを設けることによって継手金具を省略しているのが特徴である。本セグメントの採用にあたって、実物大セグメントを用いた各種実証実験および数値解析を行い構造物としての安全性を照査するとともに、本セグメントの力学特性を評価できる構造解析モデルを提案し合理的な設計方法を取りまとめた。

*Key Words* : shield tunnel, segmental lining, concrete lining, tenon segment, cost reduction, ring loading test, driving test, structural analysis model, gas pipeline

## 1. まえがき

近年、大都市圏への人口集中による都市の過密化に伴い、都市地下空間の輻輳化が進んでいる。とくに都市浅部地下空間は上下水道、電気、通信、鉄道などの市民生活に必要なライフラインが集中し、新たなライフラインを建設する空間を確保することが困難になりつつある。このため、今後、整備を進める必要のあるライフラインの建設は大深度地下空間へ移行していくことが予想される。このような状況にあって、シールド工法は周辺環境へ与える影響が少なく、大深度地下における施工が可能であることから、都市トンネル構築工法として今後需要が増大することが予想される。

東京ガスの高圧幹線のひとつである横浜幹線も市街地を通過することから、全線の6割程度にあたる約8.2kmにシールド工法を採用する計画である。トンネルは東京ガス単独区間(延長約2.2km)とNTTとの共同区間(延長約6.0km)からなり、それぞれの完成断面は図-1に示すとおりである。

わが国におけるシールド工法は、沖積粘性土地盤

に代表される軟弱地盤に対応して技術開発が進んできた。このため、シールドトンネルの覆工構造であるセグメントリングは自立性を強く求められ、セグメント継手が重厚化するとともに、セグメント本体の鉄筋量を多くするなど安全性を高くする傾向があり、セグメントのコストアップの一因となっている。結果として、現在、セグメント費がシールドトンネルの建設費の30~40%を占めるまでに至っている。

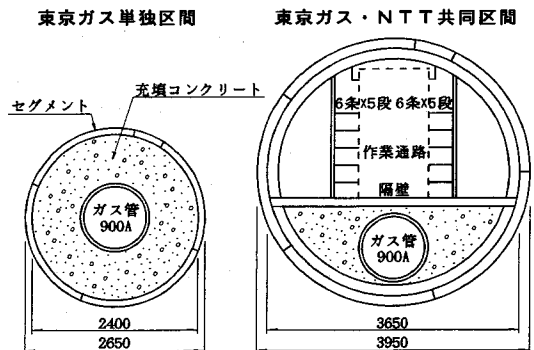


図-1 横浜幹線トンネル標準断面

そこで、大深度地下に代表される良質地盤におけるセグメント構造のあり方として、継手構造を簡略化したほぞセグメントと呼ばれる従来のような継手金具を用いないセグメント構造の採用を検討することとした。採用に当たっては、設計法は許容応力度とし、セグメント厚さについては従来の標準セグメントと同一とすることを前提とした。このセグメントは、構造が簡素なことから製作費の低減が可能であり、さらに継手ボルトが少ないことから組立時間の短縮も期待できる。

ほぞセグメントは、英仏海峡横断トンネル（仏側）で一躍脚光をあびたが、ヨーロッパにおいては1970年代から現在に至るまで多くのシールドトンネル建設に使用実績のあるセグメント構造である。

ほぞセグメントの基本構造ならびに各部の名称を図-2に示す。ほぞセグメントの特徴として以下の点が挙げられる。

- ①リング継手面に凹凸のほぞを有しており、このほぞのかみ合いによってリングとしての剛性を高め、セグメントリングの真円度を確保する。
- ②セグメント継手はコンクリートの突き合わせ構造となっており、ボルト等による引張抵抗は期待していない。このため、継手に用いられるボルトは構造部材として考慮しておらず、組立用として位置付けられる。
- ③セグメントの継手面の内外縁に4～6mm程度のクリアランスを数十mmの深さで設け、セグメント端部のコンクリートを接触させないことでコンクリートの破損を防止している。
- ④リング継手に作用するジャッキ推力、継手のせん断力に対して緩衝材（インターレーア：トランスミッションストリップとシェアーストリップの総称）を配置し、応力集中によるコンクリートの損傷を防止している。

このように、ほぞセグメントの継手は従来からわが国で多用されてきた金具継手方式のセグメントと大きく異なっていること、わが国における使用実績がないこと、ヨーロッパにおけるセグメントの設計方法<sup>1), 2)</sup>とわが国の設計方法<sup>3), 4)</sup>に相違点があること<sup>5)</sup>、さらに、ヨーロッパにおけるセグメント厚さが最も薄いもので250mmであることなどから、ガス導管用の中小口径シールドに適用するためには、その構造的な安全性を確認するとともに、わが国の設計思想に適合した設計方法を確立する必要がある。

本論文は、継手構造を簡略化したほぞセグメントの採用に伴い、その安全性の確認ならびに設計方法の確立を目的として実施した実物大供試体を用いた力学実験の結果<sup>6), 7)</sup>ならびに実験結果の解析評価

に基づいた設計方法の提案を行うことによって、洪積層以深の良好な地質条件に対するほぞセグメントの適用性を検討したものである。

## 2. 要素実験

### (1) 要素実験の概要

ほぞセグメントは、これまでに提案されている継手剛性の算定方法<sup>8)</sup>によってセグメント継手の回転ばね定数を算定することができないことや、リング継手のせん断剛性を数値解析的に評価する方法が確立していないことから、各継手の力学特性を評価するとともに、その安全性を確認することを目的として、各継手を部分的に取り出した実物大供試体による要素実験を行った。

継手の要素実験として、①リング継手のせん断実験、②セグメント継手の曲げ実験を行った。

#### a) リング継手のせん断実験

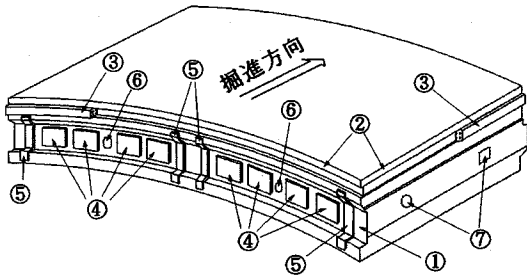
リング継手のせん断実験はリング継手のせん断剛性ならびにせん断耐力を評価するために行ったもので、表-1に示すようにセグメント厚さによるほぞ形状の違い、継手ボルトの有無、リング継手に作用する軸圧縮力を実験パラメーターとして、図-3に示すリング継手幅1000mmの供試体と、図-4に示すリング継手幅200mmの供試体について計9ケース実施した。いずれの供試体も軸力導入ならびに継手部に作用するせん断力管理を確実にを行うために直線梁とした。リング継手幅200mmの供試体に対する载荷は、リング継手のせん断力を伝達する緩衝材（シェアー・ストリップ）の幅50mmに対して、図-5に示すようにせん断力の影響範囲が概ね150mm程度であると推定して実施した。また、リング継手幅1000mmの供試体に対する载荷は概ねセグメント1ピースの弧長の1/2幅を想定したものである。

载荷は、まずリング継手ほぞの凹側を有する供試体を両側に、凸側を有する供試体を中央に配置し、油圧ジャッキで継手面に圧縮力を作用させた。次に、両側の供試体の変位を生じないように治具に固定して中央の供試体にせん断力を作用させた。

測定は、荷重とリング継手のせん断変位の関係、継手ほぞ部に発生するひずみおよびせん断耐力を把握することを目的として行い、その項目は、荷重、継手部の目違い量、コンクリートのひずみ、ひび割れなどである。

#### b) セグメント継手の曲げ実験

セグメント継手の曲げ実験は、セグメント継手の曲げ剛性を評価するために行ったもので、表-2に示すように、セグメント厚さによる継手形状の違い、



- ①ほぞ
- ②プロテクションストリップ
- ③ゴムガスケット
- ④トランスミッションストリップ
- ⑤シェアーストリップ
- ⑥リング継手ボルト孔
- ⑦セグメント継手ボルト孔

図-2 ほぞセグメントの基本構造および各部の名称

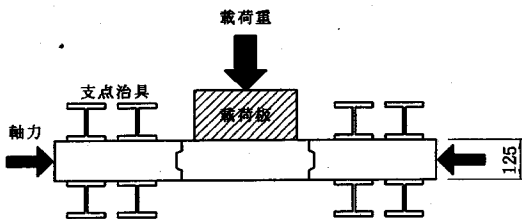


図-3 リング継手せん断実験載荷概要 (B=1000)

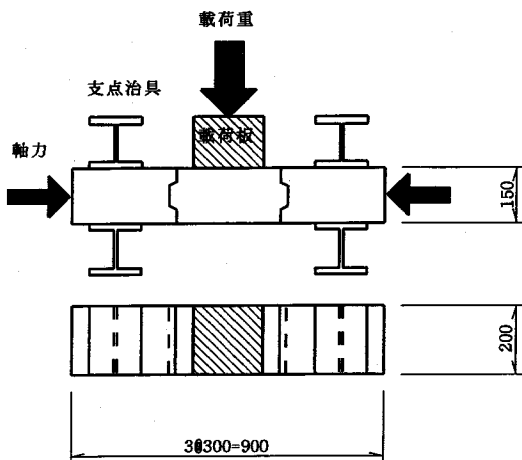


図-4 リング継手せん断実験載荷概要 (B=200)

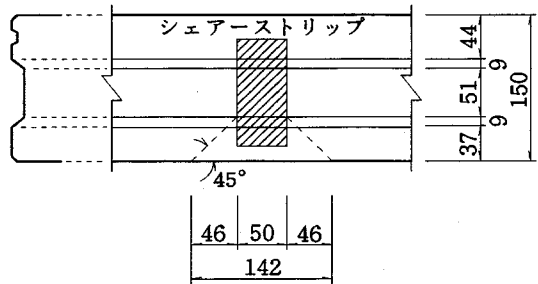


図-5 シェアーストリップの影響範囲

表-1 リング継手せん断実験ケース

	補強方法	供試体幅	継手ボルト	供試体厚さ	拘束力
1	鉄筋	1000mm	有	125mm	2.5tf/m
2	"	"	無	"	"
3	"	"	"	"	10.0tf/m
4	"	"	"	"	25.0tf/m
5	"	200mm	"	"	10.0tf/m
6	補強鋼材	"	"	"	2.5tf/m
7	鉄筋	"	"	150mm	10.0tf/m
8	"	"	"	"	25.0tf/m
9	補強鋼材	"	"	"	2.5tf/m

表-2 セグメント継手曲げ実験ケース

	導入軸力	継手ボルト	供試体厚さ	備考
1	90tf	有	125mm	非破壊
2	60tf	"	"	"
3	10tf	"	"	破壊
4	90tf	無	"	非破壊
5	60tf	"	"	"
6	10tf	"	"	破壊
7	90tf	有	150mm	非破壊
8	60tf	"	"	"
9	10tf	"	"	破壊
10	90tf	無	"	非破壊
11	60tf	"	"	"
12	10tf	"	"	破壊

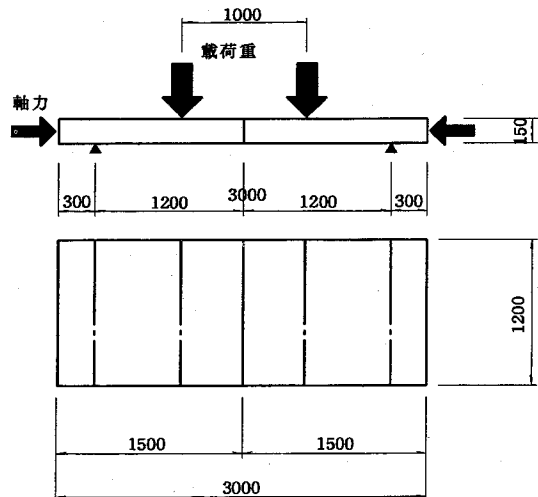


図-6 セグメント継手曲げ実験載荷概要

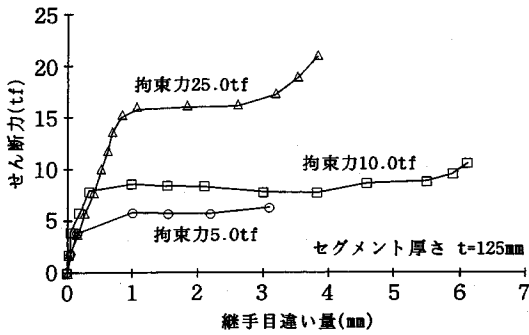


図-7 荷重と継手目違い量の関係

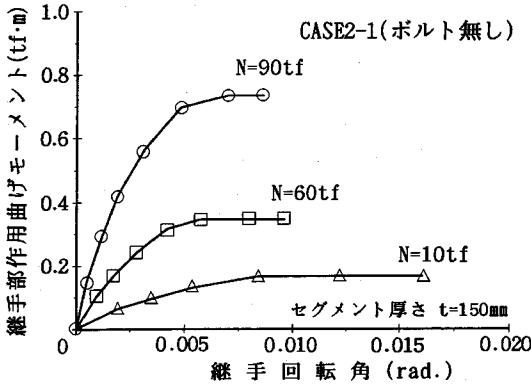


図-8 曲げモーメントと継手回転角の関係

継手ボルトの有無、セグメント継手に作用する軸圧縮力を実験パラメータとして、図-6に示すようにセグメント幅 1200mm の供試体を 2 ピース突き合わせて、セグメント継手に曲げモーメントと軸力が作用する状況を再現して計 12 ケース実施した。使用した供試体は、継手部への導入軸力を確実に管理するために直線梁とした。

荷重は、供試体両端から油圧ジャッキによって軸力を導入した後、継手部に純曲げが作用するように継手部を中心として左右対称の位置に載荷点を設けて行った。

測定は、荷重と継手の目開き量、継手部の鉛直変位および継手部に発生するひずみを把握することを目的として行い、その項目は、荷重、鉛直変位、継手目開き量、コンクリートひずみおよびひび割れなどである。

## (2) 要素実験結果

### a) リング継手のせん断実験

リング継手のせん断実験の結果から、リング継手のせん断耐力は、コンクリートのせん断、引張強度のばらつきによって、シェアストリップ 1 箇所あたり 1.5 ~ 2.6tf の間にばらついているものの、リ

ング継手に作用する設計せん断力 0.2tf に対して十分な安全率を有していることを確認した。さらに、ほぞ部の補強効果については継手ボルトによるせん断耐力の向上は認められないこと、鉄筋による補強ではほぞ部の脆性破壊が防止できること、ならびに補強鋼材を用いることでほぞ部のせん断耐力が 2 倍程度に向上することを確認した。この結果から、ほぞ部の補強方法として補強鋼材を用いることが有効であると考えられるが、設計せん断力に対する安全率を考慮して今回の設計条件では鉄筋による補強で十分な効果が得られると判断した。

また、図-7にリング継手に作用するせん断力とリング継手の目違い量の関係の一例を示す。この図から明らかなように、せん断力とリング継手の目違い量は、継手に作用する軸力によって継手に滑り変位が生じる荷重が異なるものの、滑り変位を生じるまでのせん断力と目違い量の関係や滑り変位の発生状況は概ね一致しており、セグメント厚さの違いによる明確な差は認められなかった。このことから、リング継手のせん断変位は以下の 3 つの領域に分類して定義できる。

第 1 領域は、リング継手面の摩擦抵抗がリング継手に作用するせん断力を上回っており、微小なせん断変位が生じている段階である。このせん断変位は、施工時にジャッキ推力を均等に伝達するためにリング継手に配置したトランスミッションストリップのせん断変形によって生じていると考えられる。

第 2 領域は、リング継手面の摩擦抵抗をリング継手に作用するせん断力が上回り、継手面に滑り変位が生じる段階である。

第 3 領域は、リング継手の滑り変位がリング継手のクリアランスに達し、シェアストリップの圧縮特性に依存する段階である。

### b) セグメント継手の曲げ実験

図-8にセグメント継手に作用する曲げモーメントと継手回転角の関係の一例を示す。この図から明らかなように、セグメント継手部の曲げモーメントと回転角の関係は継手部に導入される軸力によって異なる。これは、セグメント継手部における曲げモーメントと軸力の比 ( $M/N$ ) によって継手の回転ばね定数に変化するためと考えられる。このことから、セグメント継手の回転変形は以下の 3 つの領域に分類して定義できる。

第 1 領域は、セグメント継手部の  $M/N$  が継手断面のコアの中であり、継手断面が全断面圧縮状態にある段階である。理論上この領域ではセグメント継手の曲げモーメントと回転角の関係は線形として取り扱える。第 2 領域は、セグメント継手の  $M/N$  が

継手断面のコアから出て、継手断面の圧縮領域が徐々に減少している段階である。第3領域は、セグメント継手の圧縮領域が極めて小さくなり、曲げモーメントに抵抗できない領域である。理論上この領域ではセグメント継手をヒンジとして取り扱える。

また、継手ボルトによる継手の曲げ剛性の増加は認められなかった。

### 3. 継手のモデル化

継手の要素実験の結果ならびに既往の研究<sup>9)~11)</sup>を参考として、ほぞセグメントのリング継手をせん断ばねに、セグメント継手を回転ばねにモデル化することとした。

#### (1) リング継手のせん断ばね定数

リング継手のせん断ばね定数は、実験結果に基づいて図-9に示すようにモデル化した。

第1領域のせん断ばね定数は、トランスミッションストリップのせん断変形によって定まるものと考えられることから、ここでは実験結果に基づいて  $K_s=10,000\text{tf/m}$  とした。この値は、トランスミッションストリップの材質、形状寸法によって変化すると考えられるが、使用材料の特性を確認することで評価が可能である。

第1領域と第2領域の境界は、リング継手の摩擦抵抗によって変化すると考えられる。この摩擦抵抗は、図-10に示すリング継手面に導入した軸力と継手面に滑りが生じた荷重の関係から、リング継手の静止摩擦係数を  $\mu=0.3$  とし、リング継手面に作用する軸力  $N_j$  によって摩擦抵抗を求めることが可能である。第2領域のせん断ばね定数は、リング継手が滑り変位を生じている領域であることから、せん断力に対する抵抗力はないものとし、 $K_s=0\text{tf/m}$  とした。第2領域と第3領域の境界は、図-11に示すリング継手のクリアランスから定めることができる。第3領域のせん断ばね定数は、図-12に示すシェアーストリップの圧縮特性からシェアーストリップ1箇所の圧縮面積  $A_{sc}=3.0\text{cm}^2$  に対する圧縮ばねとして  $K_s=120\text{tf/m}$  を定めた。

#### (2) セグメント継手の回転ばね定数

ほぞセグメントは従来の継手金具を用いてボルトで締結する継手形式を採用していないため、セグメント継手の回転ばね定数を既往の研究<sup>8)</sup>に基づく算定方法で求めることができない。そこで、継手部に作用する軸圧縮力と曲げモーメントおよび継手部の形状・寸法からコンクリート継手の回転剛性を導い

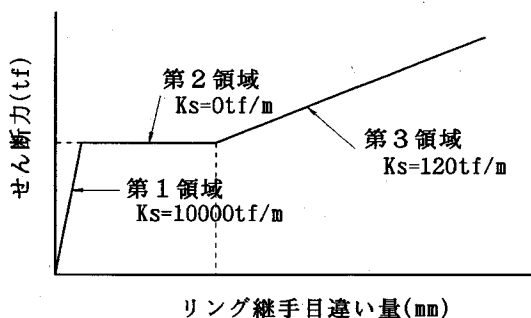


図-9 リング継手のせん断ばね定数のモデル化

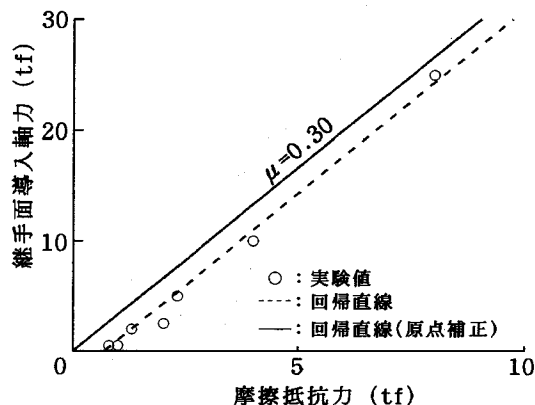


図-10 リング継手面の摩擦抵抗

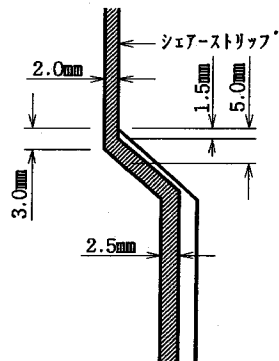


図-11 リング継手ほぞ部のクリアランス

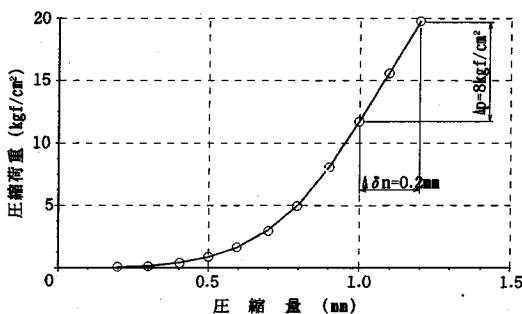


図-12 シェアーストリップの圧縮特性

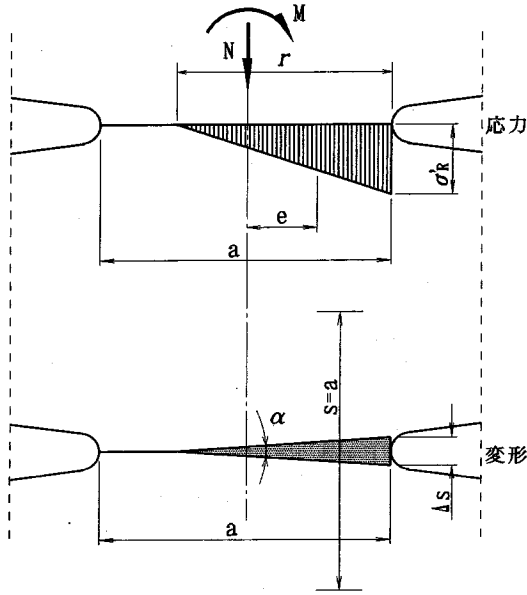


図-13 継手部の応力-ひずみ関係

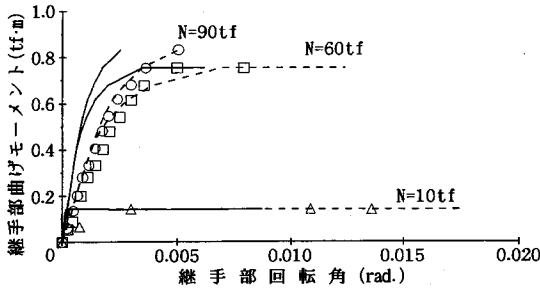


図-14 曲げモーメントと継手回転角の関係 (h=125mm)

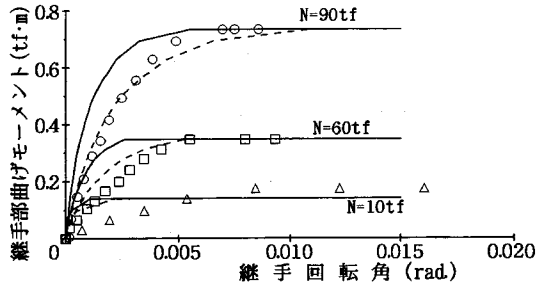


図-15 曲げモーメントと継手回転角の関係 (h=150mm)

た F.Leonhardt の Betongelenke<sup>12)</sup> に基づいた評価、  
ならびに FEM 解析による評価を行った。

#### a) Betongelenke による解析

Betongelenke によると、図-13の幾何学的関係か  
ら継手部の回転角 ( $\alpha$ ) は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\Delta S}{r} = \frac{1}{r} \cdot \frac{S \cdot \sigma'_r}{E_0} \quad (1)$$

ここで、式(2)で示される圧縮応力の影響範囲  
( $S$ ) はほぞの幅 ( $a$ ) と同一と仮定している。

$$S = \frac{\Delta S \cdot E_0}{\sigma'_r} \quad (2)$$

また、セグメント継手の回転ばね定数 ( $K_0$ ) は、  
図-13の力の釣合条件から次式を導いている。

$$K_0 = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^2 b E_0}{8} m (1-2m)^2 \quad (3)$$

ここに、 $K_0$ : 回転ばね定数 (tf·m/rad)

$\alpha$ : 回転角 (rad)

$r$ : 圧縮力の作用範囲

$K$ : 軸圧縮ひずみ

$m$ : 荷重偏心率

$$m = e/a = M/(Na)$$

$e$ : 荷重偏心量

$S$ : 圧縮応力の影響範囲

$\sigma'_r$ : 圧縮縁応力度

$\Delta S$ : 圧縮縁変形量

$N$ : 軸力 (tf)

$M$ : 曲げモーメント (tf·m)

$a$ : ほぞの幅 (m)

$$a = 0.049 \text{ m (h=125mm)}$$

$$a = 0.058 \text{ m (h=150mm)}$$

$b$ : ほぞの長さ (m)

$$b = 1.2 \text{ m}$$

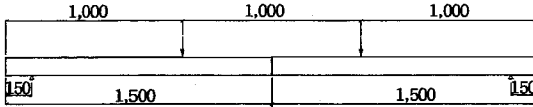
$E_0$ : コンクリートの弾性係数 (tf/m<sup>2</sup>)

$$E_0 = 3,300,000 \text{ tf/m}^2$$

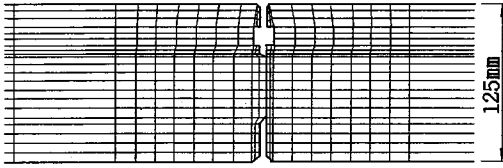
この式によって実験に用いた供試体の回転ばね定  
数を算定した結果と実験結果を図-14(h=125mm)、  
図-15(h=150mm)に示す。図中の点はそれぞれ継手  
部に導入した軸力を 10,60,90tf と変化させた場合の  
実験結果であり、実線は Betongelenke によって求  
めた理論値である。また、破線は Betongelenke に  
よって得られた回転ばね定数を 1/2 とした場合の値  
である。なお、理論値の算定にあたっては鉛直変位  
に伴う軸力の偏心量を考慮している。この図から、  
Betongelenke に基づいて算定した回転ばね定数は、  
継手部の回転剛性が極めて小さくなりヒンジに近い  
挙動を示す曲げモーメントについては良く一致して  
いるが、軸圧縮力の偏心量の増加に伴って曲げ剛性  
が低下する領域では実験結果に比べて約 2 倍の値と  
なっていることがわかる。

#### b) FEM 解析

継手部の挙動ならびにひずみ分布を FEM によ  
って解析した (使用プログラム: MARC Ver.5)。解  
析モデルを図-16に示す。FEM 解析によって得ら



(a) 全体モデル図 (単位 mm)



(b) 継手部拡大図  
図-16 FEM 解析モデル

れた、継手部に作用する曲げモーメントと継手回転角の関係から、継手部の回転ばね定数を求めた結果を図-17に示す。この図から、FEM 解析によって得られた回転ばね定数は、Betongelenkeによって求めた回転ばね定数を上回る結果となり、図-17に示すように実験結果に比べて約 2.5 倍となった。

セグメント継手が回転変形を生じるためには圧縮領域で継手部に圧縮ひずみが生じる必要がある。この圧縮変形量は、その生じる領域の大きさによって異なると考えられる。そこで、式(2)に示した圧縮応力の影響範囲について、FEM 解析によって得られる値と Betongelenke で仮定した値を図-18に示す。この図から明らかのように、圧縮応力の影響範囲は継手部に作用する圧縮ひずみの大きさや圧縮領域の大きさによって変化し、Betongelenke で仮定している圧縮応力の影響範囲( $S=a$ )に比べて小さくなっている。このため、FEM 解析による継手の回転ばね定数の算定結果が Betongelenke により得られる回転ばね定数を上回ったと考えられる。

### c) セグメント継手の回転ばね定数の算定方法

図-17に示すように、セグメント継手の回転ばね定数は、解析結果に比べて実験結果が小さい値となった。これは、セグメント継手面の不陸によって接触面積が小さくなったことによると考えられる。Betongelenke では、式(1)および式(3)に示すように、セグメント継手の回転ばね定数は圧縮応力の作用範囲( $r$ )の大きさに比例し、圧縮応力の影響範囲( $S$ )の大きさに反比例するものとしている。ここでは、その設定根拠が明確となっていない圧縮応力の影響範囲( $S$ )に継手面の不陸によって生じる応力集中の影響を提案式の $S=a$ を2倍の $S=2a$ とすることで考慮し、式(4)によって回転ばね定数を算定するものとした。図-14、図-15に式(4)によって得られる回転ばね定数と実験結果を比較する。こ

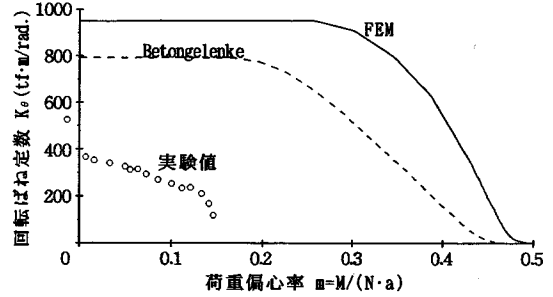


図-17 FEM と Betongelenke による回転ばね定数の比較

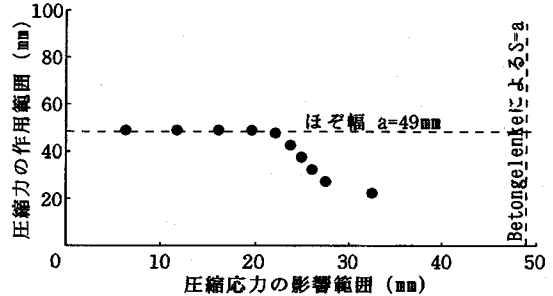


図-18 継手部の圧縮応力の影響範囲

これらの図より式(4)によって概ね実験結果を説明できると考えられる。

$$K_{\theta} = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^2bE_0}{16} m(1-2m)^2 \quad (4)$$

式(4)によって得られる回転ばね定数は、セグメント継手の精度や継手の接触面積によって変化する可能性があるが、設計上セグメント継手の回転ばね定数を小さく評価することは、千鳥組による添接効果が大きくなりセグメント本体に発生する曲げモーメントを大きく評価することとなる。このため、セグメント継手の回転ばね定数を小さく評価することは設計上安全側の評価となると考えられる。

以上のことから、設計に用いるセグメントの回転ばね定数は、その算定が簡便であること、設計上安全側の結果が得られることから Betongelenke に基づいた式(4)によって求めるものとした。

## 4. リング載荷実験

### (1) リング載荷実験の概要

ほぞセグメントのリングとしての力学的挙動は、要素実験によるリング継手のせん断ばね定数およびセグメント継手の回転ばね定数を用いて数値解析によって評価できると考えられるが、セグメントリング全体を評価する解析モデルの妥当性を検証することを目的として、表-3に示すように継手ボルト(リング継手、セグメント継手共)の有無、軸力、載荷

表-3 リング載荷実験ケース

ケース	継手ボルト		導入軸力		載荷手順	
	有	無	10tf	60tf	I	II
1	○		○	○	○	
2		○	○	○	○	
3	○			○		○

※設計荷重によってセグメントリングに発生する軸力は概ね 60tf

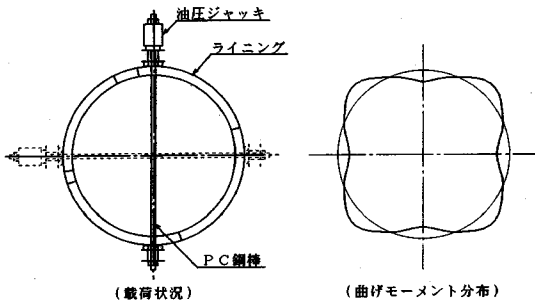


図-19 4点載荷実験

手順をパラメータとして実物セグメントを用いたリング載荷実験を行った。

従来のリング載荷実験<sup>13), 14)</sup>は、セグメント継手の影響と千鳥組による添接効果を確認するために2ないし3リングを水平に組立て、自重の影響が生じない条件下で、一直径方向から載荷する方法が用いられてきた。しかしながら、この方法ではトンネル周辺地盤の地盤反力の影響を評価していないという問題点があった。これに対して、村上・小泉による研究<sup>15)</sup>では、セグメントリングを想定した供試体の周辺に地盤反力ばねに相当する鋼管を配置することによって周辺地盤の抵抗を考慮している。この方法は、周辺地盤の地盤反力を比較的簡単に実験的に再現でき、解析におけるモデル化も容易であることから優れた方法であると考えられるが、実物大規模の実験では地盤反力に相当する剛性を鋼管で再現することが難しいなど問題点がある。また、図-19に示すように地盤反力を水平方向の集中載荷とすることで表現した4点載荷方法もあるが、曲げモーメント分布が土水圧に対して設計したものと大きく異なる問題がある。

本実験においては図-20および写真-1に示すようにセグメントリングを3リング(上下のリングは1/2幅)水平に千鳥組みし、トンネルの一直径方向に載荷することとした。さらに、はじめての試みとして、トンネル周辺地盤に硬質発泡ウレタンを用いることでセグメントリングの変形と地盤反力の関係の評価した。反力体に用いた硬質発泡ウレタンは、

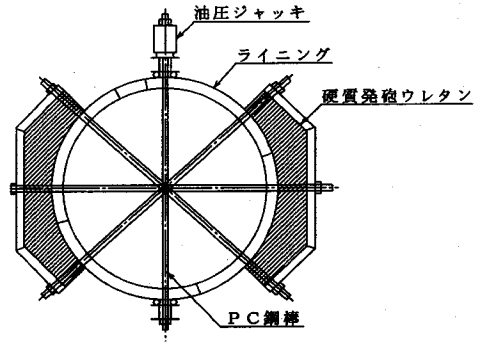


図-20 リング載荷実験載荷概要

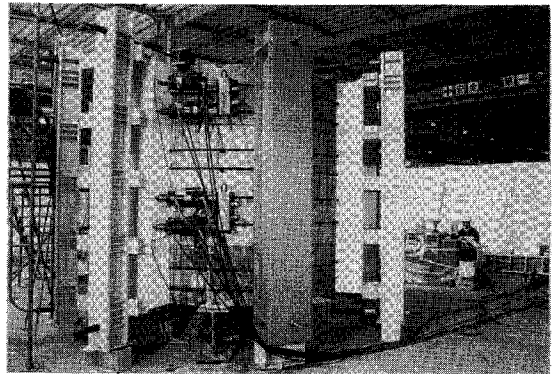


写真-1 リング載荷実験載荷状況

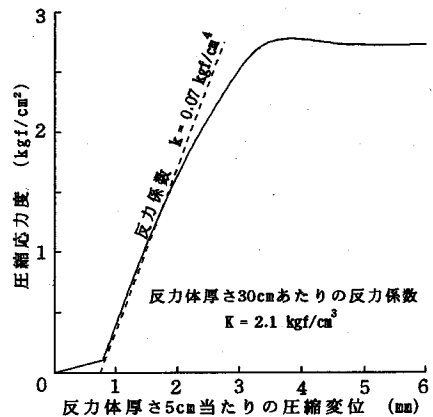


図-21 硬質発泡ウレタンの圧縮特性

圧縮特性が設計において考慮した地盤反力係数 ( $k=5\text{kgf/cm}^3$ ) と等価になるよう事前解析ならびに発泡ウレタンの圧縮特性試験を実施し、図-21に示すものを採用した。

測定は、荷重とセグメントリングの直径変化量、セグメント本体のひずみ、セグメント継手の目開き量、リング継手の目違い量の関係およびセグメントリングの耐力を把握することを目的として行い、そ



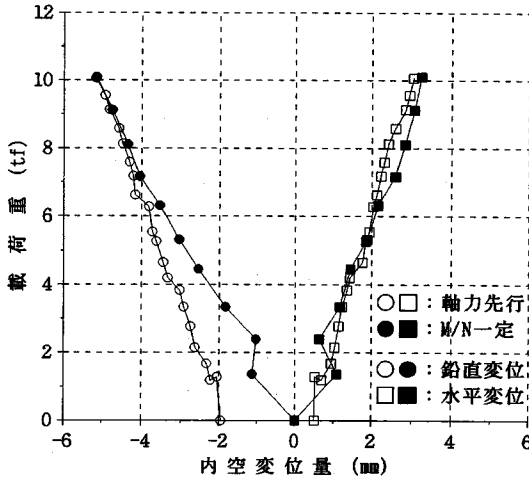


図-22 軸力導入手順の違いによる内空変位量の比較

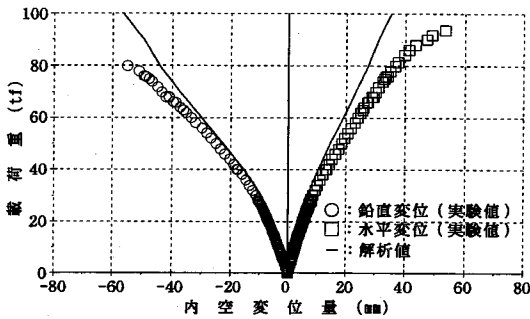


図-23 荷重と内空変位量の関係

の項目は、荷重、内空直径の変化量、主鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみ、セグメント継手の目開き量、リング継手の目違い量およびひび割れである。

(2) リング載荷実験結果

リング載荷実験の結果、セグメントリングの耐力（最大荷重 93.6tf）は計算上の破壊耐力（荷重 31.4tf）を大きく上回り十分な安全率を有していることを確認した。さらに、許容応力度レベルでのセグメント継手の目開き量は最大で 1.1mm 程度、リング継手の目違い量は最大で 1.6mm 程度と十分小さいことを確認した。図-22は、目標の軸力を導入した後、に荷重した場合、軸力と荷重との比率を一定に保つように荷重した場合のセグメントリングの直径変化量の比較を示したものである。この結果から、軸力の導入と荷重の順序による差異は十分に小さいと考えられ、実験における載荷手順はどちらにしても同じ結果が得られることを確認した。

a) 荷重と直径変化量との関係

図-23に荷重とセグメントリングの直径変化量と

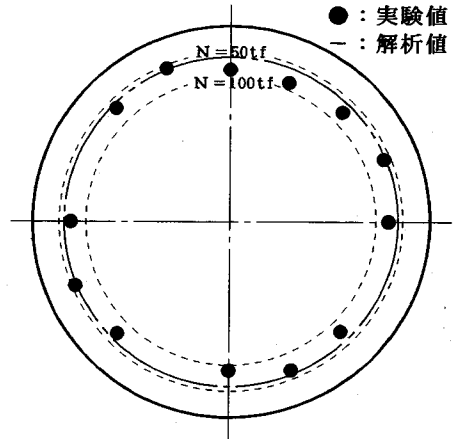


図-24 軸力分布 (P=0tf, N=60tf)

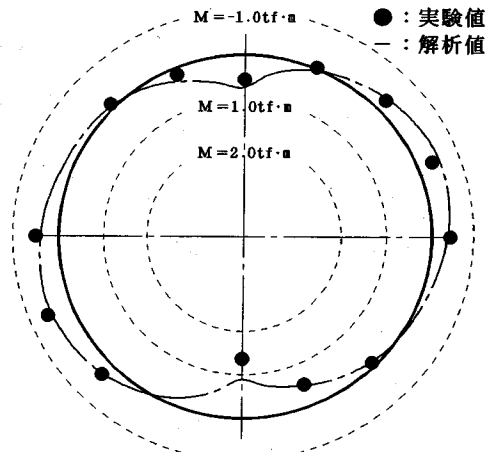


図-25 曲げモーメント分布 (P=5tf, N=60tf)

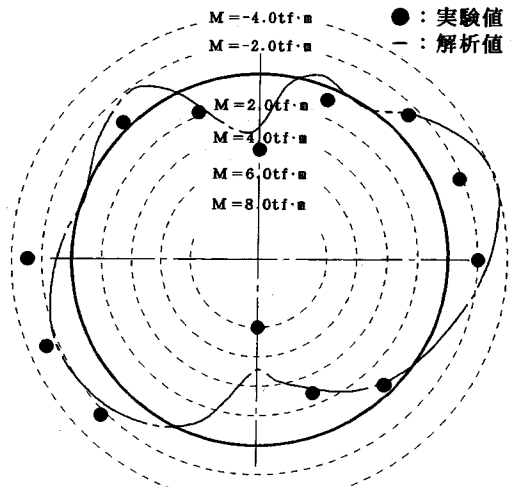


図-26 曲げモーメント分布 (P=30tf, N=60tf)

の関係を示す。この図から明らかなように、荷重と直径変化量との関係は、荷重 30tf 程度まで概ね直線関係にあり、その後、徐々に直径変化量の増分が大きくなる傾向にある。この傾向はセグメントのひび割れが荷重 28.5tf で確認されていることから、ひび割れの発生によってセグメント本体の曲げ剛性が低下していくことが原因と考えられる。

### b) 断面力の分布

図-24に主鉄筋のひずみから算定した荷重 0tf、導入軸力 60tf における軸力分布を、図-25にひび割れ発生前（荷重 5tf）の曲げモーメント分布を、図-26にひび割れ発生後（荷重 30tf）の曲げモーメント分布をそれぞれ示す。

図-24から、本実験において計画した軸力が PC 鋼線により概ね均一に導入できたこと、ならびに図-25、図-26から曲げモーメントの分布が自重ならびに土水圧に対して行われる従来の設計計算によって得られる曲げモーメント分布とその傾向が概ね一致していることが確認でき、軸力導入時の発生曲げモーメントが 0.1tfm 以下であったことと併せて軸力導入方法および硬質発泡ウレタンによる反力体の採用が妥当であると判断した。

## 5. ジャッキ推力実験

### (1) 実験概要

ほぞセグメントはシールドジャッキのスプレッダーを受けるリング継手にほぞがあるため、ジャッキ推力の受圧面積が従来の平板形セグメントに比べて小さくなる。また、継手ボルトが少ないことからセグメントの組立性の低下およびシールドテール内において自重が作用したときの変形が大きくなることが懸念される。

そこで、図-27および写真-2に示すように、シールド材を貼付け実施に極力近い状態でセグメントを組立てることで、ほぞセグメントの組立性、自重作用時のセグメントリングの変形、発生断面力の確認を行うとともに、組み立てたセグメントリングにジャッキ推力を作用させてジャッキ使用時の安全性の確認を行った。このとき、反力体側の 2 リングについては、裏込め材がすでに充填され周辺地盤の影響を受けていることを考慮して、PC 鋼線による締め付けを行っている。

ジャッキ推力実験は、ジャッキの部分的な使用による片押し状態なども考慮してセグメント図心とジャッキ推力の偏心量をパラメーターとして表-4に示す条件で行った。

測定は、ジャッキ推力とコンクリートのひずみ、

表-4 ジャッキ推力実験ケース

実験ケース	ジャッキの偏心 (mm)				ジャッキの片押し			
	0	10	20	30	A	B	C	D
CASE-1	○				○	○	○	○
CASE-2		○			○			
CASE-3			○		○			
CASE-4				○	○			

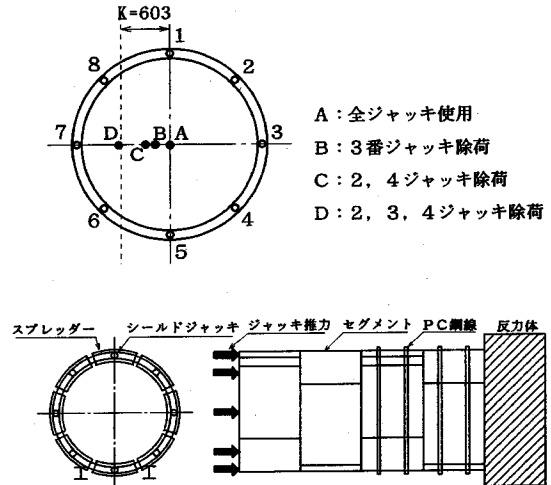


図-27 ジャッキ推力実験載荷概要

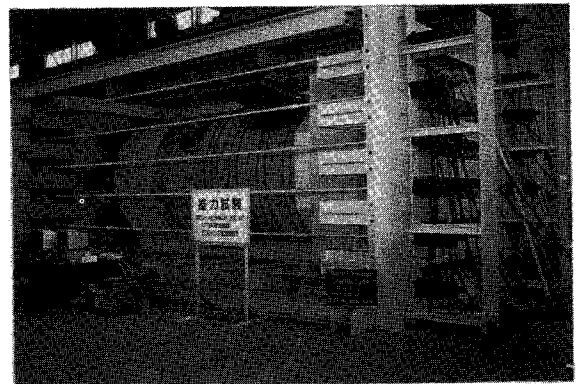


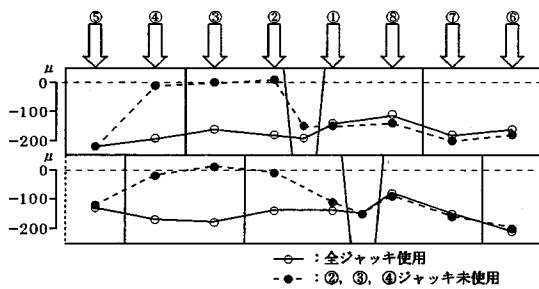
写真-2 ジャッキ推力実験載荷状況

リング継手の目開き量、リング継手に発生する割裂応力の関係を把握するとともに、セグメントの自重による発生曲げモーメントおよび直径変化量を把握することを目的として行い、その測定項目は、ジャッキ推力、コンクリートのひずみ、リング継手の目開き量、割裂補強鉄筋のひずみ、直径変化量、主鉄筋のひずみなどである。

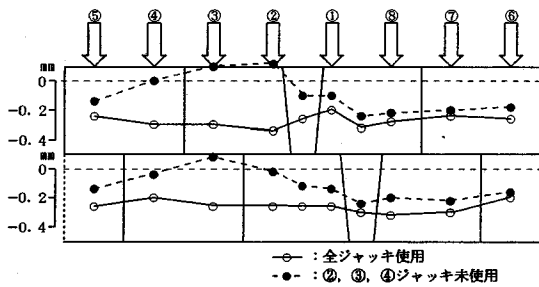
### (2) 実験結果の概要

#### a) ジャッキ推力に対する安全性

ほぞセグメントに実施工で予想されるシールドジ



(a) 圧縮ひずみ分布



(b) 目開き量分布

図-28 ジャッキ推力によるひずみと目開き量の分布

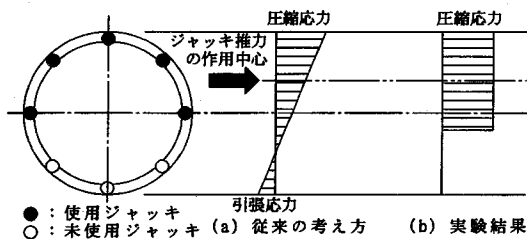


図-29 ジャッキ推力によるひずみ分布

ジャッキ推力 (100tf × 8本 = 800tf) を、片押し状態を考慮してジャッキの偏心量を変えて载荷した結果、リング継手ほぞ部およびセグメント本体に損傷は発生せず、ほぞセグメントのジャッキ推力に対する安全性が確認された。

特に、セグメントに 0.5 ~ 1.0mm 程度の目違いを生じさせた場合でもリング継手にトランスミッションストリップを配置することで、従来のRCセグメントにおいて施工に見られたひび割れや欠けが生じないことを確認した。

**b) セグメントのひずみおよびリング継手の目開き量**  
ジャッキ推力を作用させたときのセグメントのトンネル軸方向に発生するコンクリートのひずみおよびリング継手の目開き量の分布を図-28に示す。

図中の白丸は全ジャッキを作用させた状態であり、

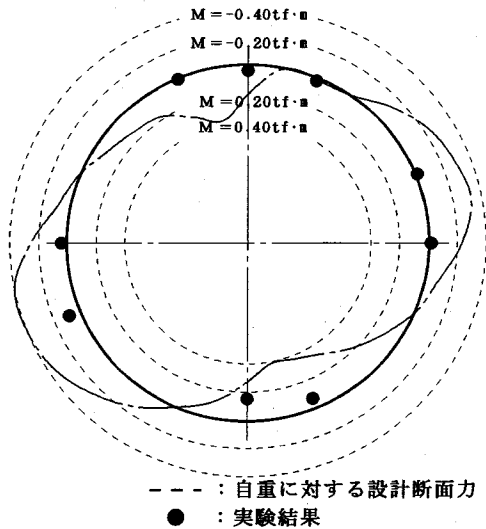


図-30 自重による発生曲げモーメント

セグメントに発生するひずみおよびリング継手の目開き量が概ね均等に発生していることが確認できる。また、図中の黒丸はジャッキを部分的に使用した状態における結果であり、ジャッキを使用していない部分ではセグメントのひずみおよびリング継手の目開き量が生じていないことが確認できる。さらに、ジャッキを部分的に使用した状態では、セグメントリングにトンネル軸方向の曲げが作用し、従来のRCセグメントでは図-29(a)に示すようなひずみ分布になると考えられてきたが、図-28(a)に示したようにほぞセグメントではセグメントがブロック化し図-29(b)に示すようなひずみ分布となっている。

トンネル縦断方向の解析において、ほぞセグメントの縦断剛性をどのように評価するかは、現場計測など、今後のデータの蓄積を待って判断していきたいと考えているが、ボルトレスセグメントであることを考慮した評価が必要であると思われる。

**c) 自重によるセグメントリングの挙動**

自重が作用した状態でのセグメントリングの変形は約 5mm 程度であり、これはセグメント外径の 1/500 以下である。また、セグメントリングを実施工に近い状態で組立てた際にも、十分な組立装置を用いていないにも関わらず精度良く組立てることが可能であった。このことから、自重によるセグメントリングの変形は、その後のセグメントの組立に支障がないことを確認した。

また、図-30に自重によりセグメントリングに発生した曲げモーメントの分布と従来の設計手法に従って自重に対する数値解析を行った結果を示す。この図から、セグメントリングの自重によって発生す

る曲げモーメントは、従来の設計方法のようにセグメントリングを全く拘束せずに算定した曲げモーメントに比べて極めて小さいことを確認した。

このように、自重による曲げモーメントが小さくなる理由として、セグメントリングは既設リングに支持されながら組立てられることや、シールドジャッキを押し付けながら組立てるためシールドジャッキの拘束効果があることなどが挙げられる。

## 6. 数値解析

### (1) 構造解析モデル

ほぞセグメントの数値解析は図-31に示す“はりばねモデル”によって行う。構造解析に用いるセグメント継手の回転ばね定数ならびにリング継手のせん断ばね定数は、継手の要素実験結果から求めたものを用いることとした。表-5に解析に用いた条件を示す。

ひび割れ発生後の解析は、最大曲げモーメントが発生する載荷点に *Betongelenke* に基づいた式(4)の回転ばねを設けることでセグメント本体のひび割れをモデル化した。このとき、ひび割れ発生位置における回転ばねの算出は鉄筋を無視して行った。

### (2) 構造解析結果と実験結果との比較

#### a) セグメントリングの直径変化量

図-23に荷重と直径変化量との関係を示す。この図から、ひび割れ発生以前のはぞセグメントの変形性能は要素実験によって求めた継手の剛性を用いてはりばねモデルによって解析することで十分に評価できることがわかる。

また、ひび割れ発生後の荷重と直径変化量との関係(図-23)をみると、実験値の方が解析値より大きくなる傾向がある。これは、セグメント本体の曲げ剛性がひび割れの発生によって低下するが、解析上は最大曲げモーメントが発生する位置についてのみひび割れを考慮した回転ばねを設けており、荷重の増加に伴ってひび割れ発生箇所が増加した状態を評価していないことが原因と考えられる。しかし、計算上のセグメントリングの許容荷重がひび割れ発生荷重以下であること、セグメントリングの変形を小さく評価することは地盤反力を期待できる地盤条件では安全側の設計結果が得られることから、設計計算にこのモデルを用いることは問題ないと考えられる。

#### b) 発生断面力

図-25にひび割れ発生前の曲げモーメントの分布を、図-26にひび割れ発生後の曲げモーメントの分

表-5 数値解析条件

セグメント外径	2,650mm	弾性係数	4,500,000 tf/m <sup>2</sup>
セグメント厚さ	125mm	回転ばね定数	(4)式による
セグメント幅	1,200mm	せん断ばね定数	図-9による
セグメント分割	4+K	反力体ばね定数	2.1kgf/cm <sup>3</sup>

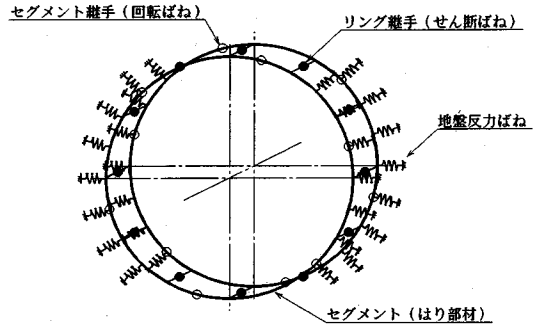


図-31 構造解析モデル

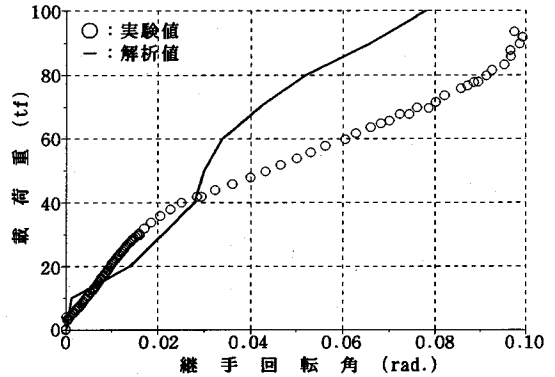


図-32 荷重とセグメント継手回転角の関係

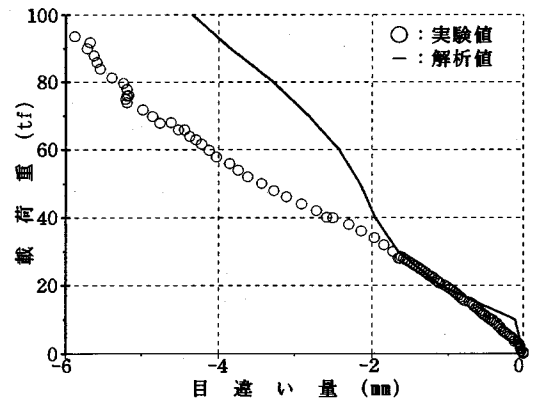


図-33 荷重とリング継手目違い量の関係

布を示す。これらの図から、ひび割れ発生前の曲げモーメントの実験値と解析値は良く一致しており、

ひび割れ発生後の曲げモーメントの絶対値はやや実験値が大きくなる傾向があるが、その分布形状は良く一致していることが確認できる。

#### c) セグメント継手の回転角

図-32に荷重と最大目開きが生じた載荷点付近のセグメント継手の回転角との関係を示す。この図から明らかなように、ひび割れ発生前のセグメント継手の回転角は、解析値と良く一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

ひび割れ発生後の荷重とセグメント継手の回転角の関係は、解析値の方が実験値より小さい。これは、すでに述べたように、解析では最大曲げモーメントが発生する載荷点のみに回転ばねを設けることでひび割れを考慮しているためと考えられる。また、ひび割れ発生後のセグメント継手の回転ばね定数は設計上ヒンジとして取り扱うべき領域であり、構造計算上この差は有為なものではないと考えられる。

#### d) リング継手の目違い量

図-33に荷重と最大目違い量が生じた載荷点付近のリング継手の目違い量との関係を示す。この図から明らかなように、ひび割れ発生前のリング継手の目違い量は解析値と良く一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

ひび割れ発生後の荷重とリング継手の目違い量との関係は、解析値の方が実験値より小さくなっている。これは、セグメント継手回転角と同様に、リング全体に分散して発生するひび割れを載荷点に発生したひび割れのみで代表していることが原因と考えられる。解析上セグメント本体の破壊荷重が31.4tfであることから、実用的な範囲においては十分な精度で目違い量を推定できるものと考えられる。

## 7. まとめ

本研究はほぞセグメントをわが国の地山条件に適用するために、セグメント構造に関する各種の性能確認実験および数値解析を行い、その結果に考察を加えたものであるが、本研究により得られた知見を列挙すれば以下のとおりである。

#### a) 安全性の照査に関して

- ①リング継手のせん断実験によって、リング継手ほぞ部のせん断耐力は設計せん断力に対して十分な耐力を有していることを確認した。
- ②実物セグメントを組立てて行ったジャッキ推力実験によって、計画ジャッキ推力に対する安全性とともに十分な精度で組立が可能であることを確認した。
- ③実物セグメントを組立てて、自重を作用させた

状態でセグメントリングに発生する曲げモーメントは、従来の設計で考慮されている曲げモーメントに比べて極めて小さいことを確認した。これは、すでに組立てられたセグメントリングやジャッキによる拘束が影響しているためと考えられる。

- ④各種要素実験、リング載荷実験、ジャッキ推力実験によって、ほぞセグメントは従来のセグメント構造と同様の設計条件に対して十分な耐力を有しており、わが国におけるシールドトンネルの覆工体として地盤条件および周辺環境条件に応じて採用が可能であることを確認した。

#### b) 設計方法に関して

- ①リング継手のせん断実験によって、リング継手の形状寸法ならびにトランスミッションストリップのせん断特性ならびにシェアーストリップの圧縮特性を得ることで剛性評価が可能であることを確認した。
- ②セグメント継手の曲げ実験によって、セグメント継手の回転ばね定数は、継手に作用する軸力と曲げモーメントならびに継手の形状寸法からLeonhardtのBetongelenkeに基づき、これに継手部の不陸などを考慮することで評価できることを確認した。
- ③地盤反力を考慮したリング載荷実験によって、セグメントリングの力学的挙動は、要素実験によって得られた各定数を用いて、はり-ばねモデルで評価できることを確認した。

#### c) 実験方法に関して

- ①地盤反力を水平直径方向の載荷で評価する方法に比べ、発泡ウレタンを反力体として用いることによって、実地盤内におけるセグメントリングに近い状況でリング載荷実験を行うことができ、設計荷重による応力状態を再現できた。
- ②周辺地盤の状況は、発泡ウレタンの圧縮剛性を調整することで再現できることを確認した。

## 8. あとがき

シールドトンネル工事において、セグメント費の削減は全体工事費のコストダウンに大きく寄与する。セグメントのコストダウンには、設計法の見直しによるセグメント断面の低減、セグメント製造方法の合理化、型枠費の低減などが挙げられるが、本研究で述べたほぞ形状による継手金具の省略は効果的な方法の一つである。

本論文では、ほぞセグメントの適用に対する安全性を確認し、あわせて解析的な評価を行うことで設

計方法を検証した。その結果、本稿で検討したセグメントのような薄い覆工厚でも、ほぞ部が要求される機能（特に、せん断耐力、ほぞ部のジャッキ推力に対する安全性等）を満足し、本トンネルに対して十分な適用性を有していることを確認した。

今後、ほぞセグメントの軟弱地盤への適用性など施工対象地盤の拡大に向けてセグメント構造の改良、開発を行っていく必要がある。また、推力実験で自重の影響は従来の設計で考慮されているもの比べて小さいことが確認されたことから、自重に対するセグメントの設計方法を見直すことは、設計断面力の中で自重による断面力が支配的となる大口径シールドトンネルにおけるRC系セグメントのコストダウンに対しても有効であると考えている。

これらの課題を解決するために、本トンネルの実施工では各種の現場計測を実施し、ほぞセグメントの挙動特性をさらに明確にしていく予定である。

最後に、本研究における実験実施にあたり、終始協力をいただいた日本高圧コンクリート株式会社の関係各位に感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) ITA working Group on General Approaches to the Design of Tunnels : Guidelines for the Design of Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.3, No.3, 1988.
- 2) H.Duddeck : Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein, *Die Bautechnik*, 1980.
- 3) 土木学会：トンネル標準設計方書（シールド編）・同解説, 1986.6.
- 4) 土木学会, 日本下水道協会：シールド工用標準セグメント, 1990.4.
- 5) 入江健二, 新治均, 大塚孝義：シールドトンネルの覆工技術 (7), *トンネルと地下*, 1993.3.
- 6) 林光俊, 滝本孝哉, 斉藤正幸：シールドトンネル用ライニングの力学実験(その1)；実物大リング載荷実験について, 第49回土木学会年次学術講演会概要集, III -670, 1994.9.
- 7) 林光俊, 斉藤正幸：シールドトンネル用ライニングの力学実験(その2)；ジャッキ推力載荷実験について, 第49回土木学会年次学術講演会概要集, III -671, 1994.9.
- 8) 村上博智, 小泉淳：シールド工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*, No.296, 1980.4.
- 9) 村上博智, 小泉淳：シールドセグメントリングの耐荷機構について, *土木学会論文報告集*, No.272, 1978.4.
- 10) 結城皓曠：継手の剛性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*, No.176, 1970.4.
- 11) 半谷哲夫, 河田博之, 小山幸則：新しいセグメント設計手法の開発, *トンネルと地下*, 第18巻6号, 1987.6.
- 12) Fritz Leonhardt, Horsch Reimann : *Betongelenke, Der Bauingenieur*, 1966.2.
- 13) 河田博之, 植野利之, 宮崎正義, 土井博己：セグメントの継手剛性に関する実験とその考察(3), *構造物設計資料*, No.50, 1977.6.
- 14) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究, *鉄道技術研究報告*, No.1303, 1985.10.
- 15) 村上博智, 小泉淳：二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について, *土木学会論文集*, 第388号, 1987.12.

(1995.2.7 受付)

## EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL ANALYSES ON THE PROPERTIES OF A NEW TYPE SEGMENT FOR GAS PIPELINE SHIELD TUNNEL

Mitsutoshi HAYASHI, Masayuki SAITOH and Atsushi KOIZUMI

With the aim of reducing the construction costs of shield tunnels for gas pipelines, Tokyo Gas has decided to use a new type segment called a tenon segment. This segment differs from the standard RC segment with metal-joints as used widely in sewage tunnels in that it features elimination of the joint by using an uneven tenon between the rings. In applying this segment, safety as a structure was verified by conducting numerical analyses and various performance tests using full-sized segments. In these studies, a rational design method was realized by proposing structural analysis models enabling evaluation of structural characteristics of this segment.