

# 港湾空港技術研究所 資料

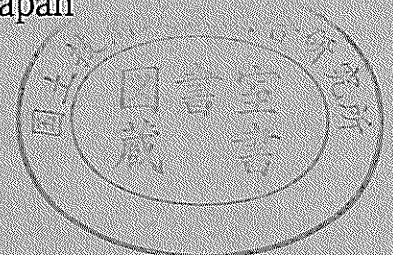
TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1031      September 2002

大変形追従型沈埋トンネル用新継手構造の開発

横	田	弘
岩	波	光保
北	山	斉
嶋	倉	康夫

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 開発の経緯 .....	4
2.1 可撓性継手 .....	4
2.2 新形式継手構造の開発 .....	4
3. クラウンシール式継手構造の特徴 .....	6
4. 模型実験による沈埋トンネル用継手構造としての適用性検討 .....	7
4.1 二次元模型による実証実験 .....	7
4.2 三次元模型による実証実験 .....	9
4.3 模型実験結果のまとめ .....	16
5. クラウンシール式継手構造の数値解析手法に関する検討 .....	16
5.1 解析モデルおよび材料定数の設定 .....	17
5.2 二次元解析 .....	18
5.3 三次元解析 .....	21
5.4 数値解析結果のまとめ .....	24
6. 結 論 .....	25
7. おわりに .....	25
謝 辞 .....	25
参考文献 .....	25

# Development of New Flexible Joint Structure for Submerged Tunnels

Hiroshi YOKOTA\*  
Mitsuyasu IWANAMI\*\*  
Hitoshi KITAYAMA\*\*\*  
Yasuo SHIMAKURA\*\*\*\*

## Synopsis

Development of a new-type flexible joint for submerged tunnels was described. This joint called Crown-seal joint can absorb larger deformation in a submerged tunnel element than other conventional flexible joints. Crown-seal joint mainly consists of rubber, which was reinforced by plastic fibers. Its applicability to actual submerged tunnels was examined through some experiments using a full-scale model of tunnel section including Crown-seal joint. From the experimental results, it was made clear that no harmful deformation and local distortion were observed on the surface of rubber even if the displacement at the joint occurred in the direction parallel and perpendicular to the tunnel element. Water-tightness of the joint was confirmed through the seepage tests utilizing water pressure.

The deformation behavior of Crown-seal joint was numerically evaluated by 2-D and 3-D non-linear finite element analyses. The maximum principle strains in the components of the joint were calculated, and compared to their ultimate and allowable strains. Consequently, no local strain beyond the allowable level was detected in any components, indicating the adequate safety of Crown-seal joint even if the displacement at the joint occurred under water pressure applied.

Therefore, the applicability of Crown-seal joint to actual submerged tunnels was satisfactorily verified based on the experimental and analytical investigation.

**Key Words:** submerged tunnel, flexible joint, rubber, water tightness, local strain, FEM

---

\* Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\* Ex-Head of Kobe Port and Airport Technical Office, Kinki Regional Development Bureau

\*\*\*\* Ex-Staff of Kobe Port and Airport Technical Office, Kinki Regional Development Bureau  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5059 Fax : +81-468-44-0255 e-mail:hiroy@pari.go.jp

# 大変形追従型沈埋トンネル用新継手構造の開発

横田 弘\*  
岩波 光保\*\*  
北山 斉\*\*\*  
嶋倉 康夫\*\*\*\*

## 要 旨

沈埋トンネルの函体に発生する断面力を低減するために、可撓性継手が用いられることがある。本稿では、従来型の可撓性継手よりも大変形に追従可能な新形式継手（クラウンシール式継手構造）の開発経緯，ならびに沈埋トンネル用継手としての適用性を検証するために行った模型実験および数値解析の結果を示す。クラウンシール式継手構造は、主に繊維強化されたゴムで構成されており、沈埋函に発生する継手変位に柔軟に対応できることが特徴である。

本継手構造の二次元および三次元模型を製作し、水圧作用下において、継手変位を受けた場合のゴムの変形挙動および止水性能を調べた。その結果、300kPaの水圧作用下において、トンネル軸方向に300mm、せん断方向に150mmの継手変位が生じて、ゴムに異常な変形やねじれは発生していなかった。また、止水性能についても十分に確保されていることがわかった。

さらに、継手変位を受ける本継手構造の変形挙動を三次元的に追跡できる非線形有限要素解析手法を確立した。これにより、ゴム内部で発生している局所ひずみを算定することが可能となり、破断ひずみや許容ひずみと比較することで、継手構造の安全性を評価できた。

以上より、従来型の可撓性継手よりも大変形に追従可能なクラウンシール式継手構造を沈埋トンネル用継手として用いても特段の支障がなく、適用性は十分であることが確認できた。

キーワード：沈埋トンネル，可撓性継手，ゴム，止水性能，局所ひずみ，有限要素解析

---

\* 地盤・構造部 構造強度研究室長  
\*\* 地盤・構造部 構造強度研究室  
\*\*\* 前 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所長  
\*\*\*\* 前 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
電話：0468-44-5059 Fax：0468-44-0255 e-mail:hiroy@pari.go.jp

## 1. まえがき

軟弱地盤上に沈埋トンネルが建設される場合、地震時の発生断面力を軽減するために、函体の変形を吸収する継手（可撓性継手）が函体接合部あるいは函体内部に設置される。（清宮ら、2002）これにより、函体に発生する断面力を大幅に低減することができ、函体の設計を経済的かつ合理的に行うことが可能となる。これまでに、可撓性継手として、「ゴムガスケット+ストップケーブル」タイプの継手や函体内蔵型のペローズ継手などが開発され、実用化されている。

現在大阪港で建設が進められている夢洲トンネルの場合、周辺埋立て地における大きな地盤沈下に伴う不同沈下が予測されているだけでなく、トンネル線形の特殊性に起因する函体のねじれの発生が懸念されている。このようなトンネル変形に対しては従来型の継手構造では対応することが困難であることから、新形式の継手構造を開発することとした。

本稿は、このような新形式継手構造の開発の経緯、ならびに沈埋トンネル用継手としての適用性を検証するために実施した模型実験および数値解析の概要について述べたものである。

## 2. 開発の経緯

### 2.1 可撓性継手

沈埋トンネルには、水中での函体どうしの接合のための施工継手が存在する。「ゴムガスケット+ストップケーブル」タイプの継手構造（図-1）には、函体接合のための施工継手としての機能だけでなく、函体変形を吸収するための可撓性も備えられている。

本継手構造では、函体に発生する圧縮力はゴムガスケットが、また引張力はストップケーブルが分担することで、継手位置に可撓性が付与されている。しかしながら、施工条件や設計条件によっては、ゴムガスケットの圧縮量や圧縮ひずみが許容値を超えることもあり、その適用範囲には限界がある（清宮他、1997）。

そこで、施工時の函体接合のために必要な継手とは別に、函体変形を吸収することのみを目的とした継手をあらかじめ函体に設置することが提案されている。このような内蔵型継手の1例として、図-2に示すペローズ式継手構造が、那覇港トンネルで実用化されている（戸田他、2000）。本継手は、函体内部に設置した波形鋼板（ペローズ）の変形によって、函体変形に対応するものである。

現在、大阪港で建設が進められている夢洲トンネルの

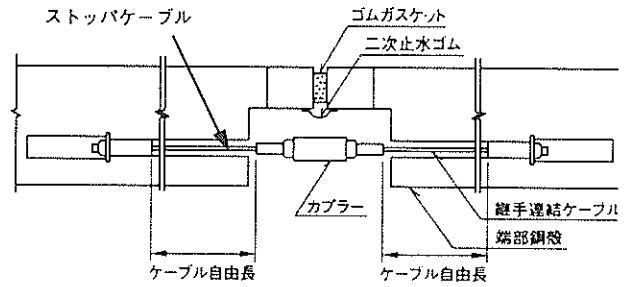


図-1 「ゴムガスケット+ストップケーブル」タイプの継手構造

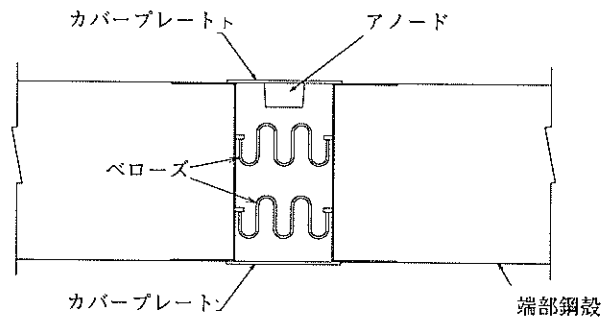


図-2 ペローズ式継手構造

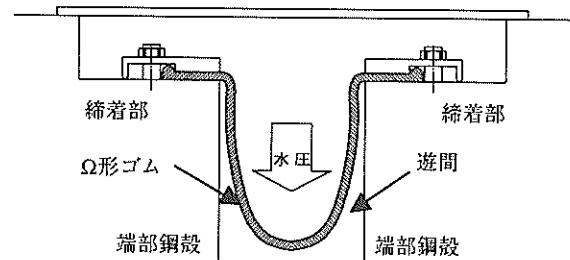


図-3 Ω形ゴムの適用

場合、きわめて大きな地盤沈下が予測されているだけでなく、トンネル線形が特殊であることから、大きな不同沈下の発生が懸念されている。これまでの検討により、本トンネルの不同沈下による函体変形は、従来型の継手構造では対応できないことが予測されている。そこで、従来型継手では対応できないほど大きな継手変位にも追従可能な新形式継手構造の開発を行った。

### 2.2 新形式継手構造の開発

従来型の継手構造よりも大きな変形に追従できるようにするためには、その構造を内蔵型継手として、変形追従性に富むゴム材料を用いることが望ましいと考えた。内蔵型継手の構成材料として、剛性の低いゴム材料を用いることで、継手部の止水性能を確保するとともに、よ

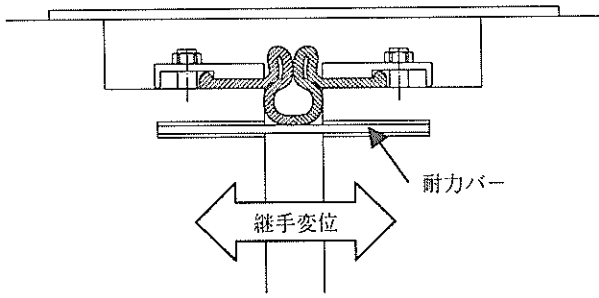


図-4 耐力バーを用いた場合

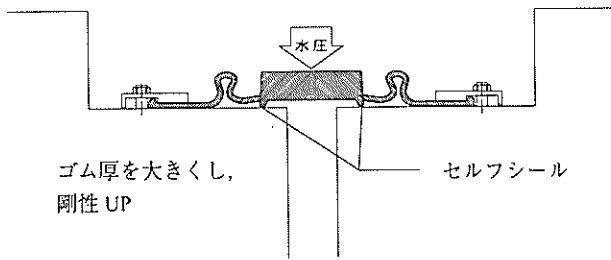


図-5 遊間部へのゴムの落下防止

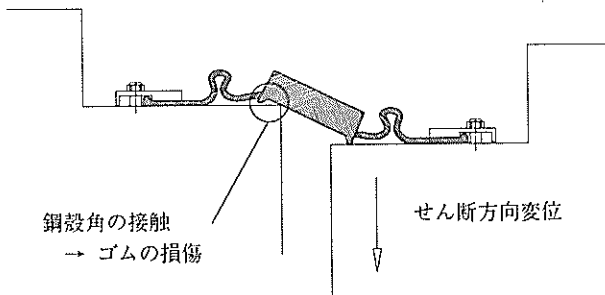


図-6 せん断方向変位が生じた場合の挙動

り大きな継手変位にも対応することが可能となる。例えば、図-3に示すように、沈埋トンネル用継手の二次止水

材として一般に用いられるΩ形ゴムを内蔵型継手の主要部材に適用すると、外水圧によりゴムに異常な変形が生じて、過大なひずみが発生するだけでなく、クリーブ破壊の危険性も否定できない。

シールドトンネルではあるが、東京湾横断道路トンネルの継手部には、図-4に示すような耐力バーが設けられ、止水ゴムが遊間に落ち込むことを防止している。しかしながら、沈埋トンネルに発生する継手変位は、シールドトンネルのそれと比較して大きいため、図-4に示すように、止水ゴムに異常な変形が生じることが懸念される。そこで、止水ゴムが遊間に落ち込むことを防ぐために、図-5に示すように、遊間部に位置するゴムの厚さを大きくして剛性を高めることとした。これにより、水圧によるゴムのたわみ変形を小さく抑えることができるため、ゴムが遊間に落ち込むことはない。また、厚みを大きくした部分の両側のゴム長さに余裕を持たせることで、トンネル軸方向の変位に追従可能となる。このように、厚みを大きくした中央部のゴムとその両側のゴムでは、求められる機能が異なっているため、両者のゴム硬度を変えることとした。すなわち、厚みを大きくした中央部は、水圧による変形を極力小さくする必要があるため、ゴム硬度を一般の止水用ゴムより高くした。一方、その両側の部分は沈埋函の変形に柔軟に追従する必要があるため、一般の止水ゴムと同程度のゴム硬度とした。

次に、沈埋トンネルの軸に直角方向の変位（これ以降、せん断方向変位と呼ぶ）が発生した場合を考えると、図-5の継手構造は、図-6のように変形することとなる。この場合、継手取付け部の鋼殻角がゴムと接触し、ゴムに損傷を与えて、止水上の弱点ともなりうる。継手構造の耐久性を考えると、このような損傷の発生は避けなければならない。

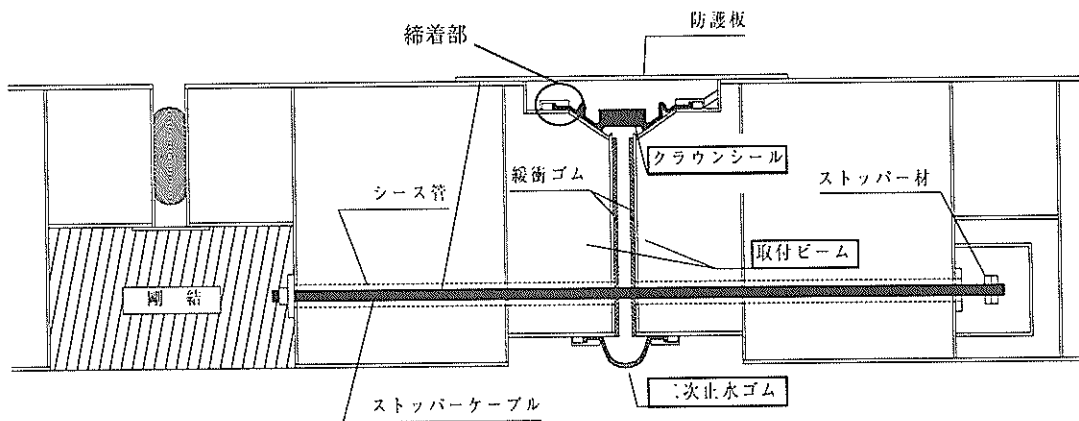


図-7 クラウンシール式継手構造の概要

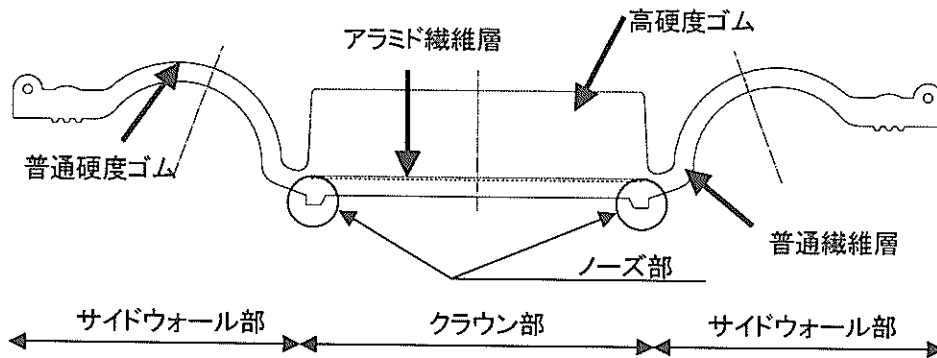


図-8 クラウンシールゴムの詳細

そこで最終的には、図-7に示すように、鋼殻角とゴムが接触する部分に傾斜を設けることで、ゴムに損傷が生じないように配慮した。以上のような経緯で形状が決定された継手をこれ以降、クラウンシール式継手構造と呼ぶこととする。

### 3. クラウンシール式継手構造の特徴

以上のような経緯により、従来型継手よりも大変形に追従できる継手構造として、図-7に示すクラウンシール式継手構造を開発した。各構成要素の機能を表-1に示す。

表-1 主要構成要素とその機能

構成要素	主な機能
クラウンシールゴム (一次止水ゴム)	締着部およびノーズ部で止水を行う。継手変位(軸方向およびせん断方向)に対しては、ゴム本体の弾性で対応する。
二次止水ゴム	Ω形ゴムによって、一次止水のバックアップを行う。
ストッパケーブル	軸方向引張変形量が許容値を上回った場合に軸方向引張力を分担する。
取付けビーム	クラウンシールゴムおよび二次止水ゴムの取付け部を有する。軸方向圧縮変形量が許容値を上回った場合に、このビームを介して圧縮力が函体に伝達される。
緩衝ゴム	軸方向圧縮によって、取付けビーム同士が接触する場合、ビームに局所的な応力が発生しないようにする。
防護板	継手内への土砂等の侵入を抑える。
せん断キー	せん断方向変形量が許容値を上回った場合にせん断力を分担する。

本継手構造は、継手端部間に遊間を設けることで軸方向の継手変位に対応し、その外部に取り付けたクラウンシールゴムで止水性能を確保するものである。本継手の性能は、クラウンシールゴムと呼ばれる一次止水ゴムの特性に大きく依存している。クラウンシールゴムの詳細を図-8に、また各部分の機能を表-2に示す。

表-2 クラウンシールゴムの構成要素とその機能

構成要素	主な機能
高硬度ゴム (硬度70度)	クラウン部の大部分を構成する。硬度を高くして、クラウン部の自立性(セルフサポート性)を向上させている。
普通硬度ゴム (硬度50度)	サイドウォール部、ノーズ部、ならびにクラウン部の一部を構成する。ノーズ部には止水性を、サイドウォール部には追随性を付与するため、硬度を50度としている。
アラミド繊維	クラウン部の引張側に、片織りで配置され、クラウン部のたわみ変形を抑える。
普通繊維 (ナイロン繊維)	サイドウォール部およびクラウン部に配置される。多方向の変形に追従できるように平織りとしている。

継手部における軸方向変位に対しては、遊間の伸縮およびクラウンシールゴム本体の弾性で対応し、せん断方向変位に対しては、クラウンシールゴム本体の弾性変形のみで対応する。ストッパケーブルおよびせん断キーは、許容変形量以上の変形が生じて初めて、その機能が発揮されるため、許容変形量以内であれば、断面力をほとんど発生させずにトンネル変形に追従できる。また、遊間の初期設定次第で、様々なパターンの軸方向変位に対応できる(表-3)。

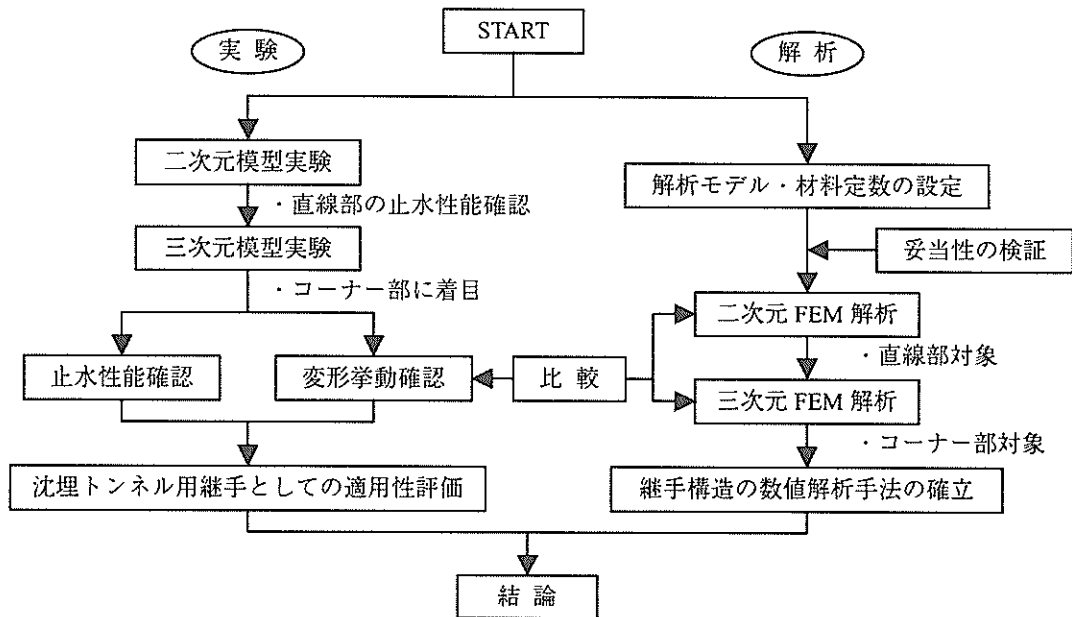


図-9 検討のフロー

表-3 遊間の初期設定と許容軸方向変形量

設定遊間量	0	50	100	150	200	250	300
許容圧縮変形量	0	50	100	150	200	250	300
許容引張変形量	300	250	200	150	100	50	0

単位：mm

クラウンシールゴムが鋼殻と接触する位置に、ノーズと呼ばれる小突起を設けることで、継手変位が生じた場合に、これにスムーズに追従できるよう工夫されている。またノーズ部は、クラウンシールゴムが水圧を受けてたわみ変形した場合に、圧縮されて鋼殻と密着する。この結果、万が一、ゴム締着部に漏水が発生した場合でも、ノーズ部で止水性能が確保される。この締着部の漏水に対するフェールセーフ機能を、これ以降、セルフシール機能と呼ぶこととする。このセルフシール機能の存在も、本継手構造の大きな特徴の1つである。

以上のように、本継手構造は、大変形追従型の新しい沈埋トンネル用継手として有効であると考えられる。しかしながら、本継手にはいまだ適用実績がなく、継手部の挙動や止水性能に不明確な点も多く残されている。そこで、本継手構造の二次元および三次元模型による実証試験を行うことで、水圧作用下において所定の継手変位が生じた場合のクラウンシールゴムの変形挙動と止水性能を調べた。さらに、ゴム内部における局所ひずみの算

定および継手構造の設計・照査に不可欠となる数値解析手法を、ゴム材料の強い非線形性を考慮に入れた非線形有限要素解析を行うことで確立した。図-9に、検討のフローを示す。

#### 4. 模型実験による沈埋トンネル用継手構造としての適用性検討

水圧作用下において継手変位が発生した場合に、クラウンシール式継手構造がどのように追従し、またゴムがどのように変形するか、ならびに沈埋トンネル用継手構造として最も重要な性能の1つである止水性能について明らかにするため、模型実験を行った。まず直線部をモデル化した二次元模型を製作し、クラウンシール式継手構造の止水性能を確認した。続いて、コーナー部における追従性・変形挙動および止水性能を評価するため、継手全体をモデル化した円環状の三次元模型を用いて検討を行った。

##### 4.1 二次元模型による実証実験

###### (1) 実験概要

###### a) 試験装置の概要

図-10および写真-1に、試験装置の概要を示す。クラウンシールゴムのノーズ部が鋼殻と接する斜面部には、耐久性の向上を図り、かつクラウンシールゴムの移動をスムーズにするため、短繊維補強したビニルエステル樹脂



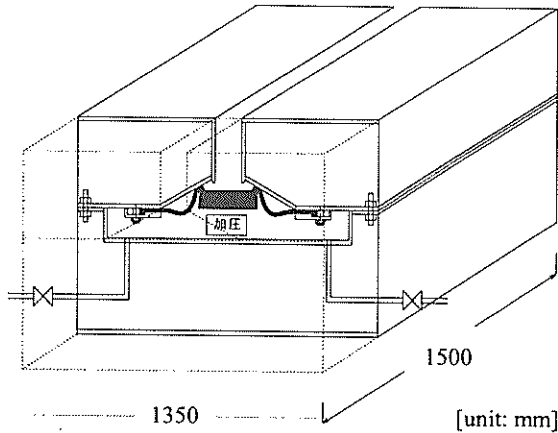


図-10 二次元試験装置の概要

を塗布した。クラウンシールゴムを構成する高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムの物性は、表-4のとおりである。このうち、引張強さおよび伸びについては、JIS K 6251に基づいて試験を行い、ゴム硬さについては、JIS K 6253に基づいて試験を行った。また、老化物性はJIS K 6257に準拠して、70℃で168時間の空気加熱老化試験を行った。表-4の試験結果は、いずれもJISの規格値を満足していた。

また、圧縮永久ひずみ試験 (JIS K 6262)、耐水性試験 (JIS K 6301) および耐オゾン試験 (JIS K 6259) についても試験を行ったが、いずれの試験結果も規格値を満足していた。

表-4 ゴムの物性

引張試験および硬さ試験		
項目	高硬度ゴム	普通硬度ゴム
引張強さ (MPa)	24.1	22.4
伸び (%)	390	490
ゴム硬さ	69	50
空気加熱老化試験		
項目	高硬度ゴム	普通硬度ゴム
引張強さ変化率 (%)	-7.9	-1.8
伸び変化率 (%)	-2.6	-6.1
ゴム硬さ変化率	+2	+4

b) 締着部における止水性能に関する検討

図-11に示すように、装置下部のタンクを水で満たし、水道圧および手押しポンプを用いてクラウンシールゴムに水圧を作用させた。作用水圧は、100, 200, 300および400kPaとした。これらは、それぞれ水深10, 20, 30およ

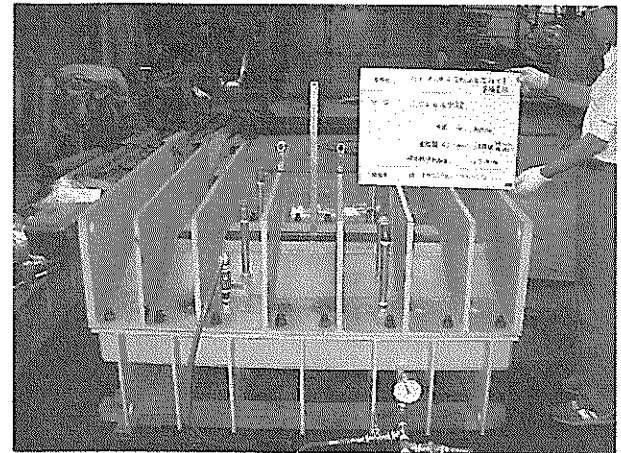


写真-1 二次元実験の状況

び40mの水圧に相当するものである。ちなみに、夢洲トンネルにおける下床版の最大水深は約30mである。また、実際の使用環境下においては、クラウンシールゴムを取り付けているボルトのトルクが経時的に減少していくことが懸念される。そこで、ボルトが緩んだ状態における止水性能についても検討を行った。具体的には、締付けトルクの管理値である200N・mを基本ケースとして、その60% (120N・m) および20% (40N・m) のケースを設定した。ここで、40N・mのトルクは、おおよそ人間がスパナで軽く締めた程度に相当する。以上の条件下において、継手部からの漏水の有無を目視により確認した。

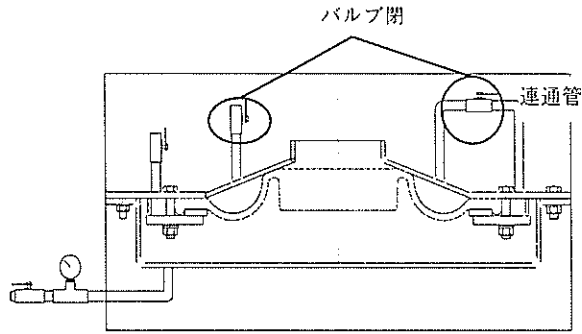
c) セルフシール機能に関する検討

クラウンシールゴム締着部において、止水性能が損なわれた場合のフェールセーフとしてのセルフシール機能について検討を行った。実験では、図-11に示すように、連通管を開いてサイドウォール内も水で満たした後、a)と同様に水圧を作用させ、ノーズ部からの漏水の有無を目視により確認した。この際、2つあるサイドウォールのいずれにも水を満たした場合と片側のみに水を満たして偏圧が作用した場合の2とおりについて実験を行った。

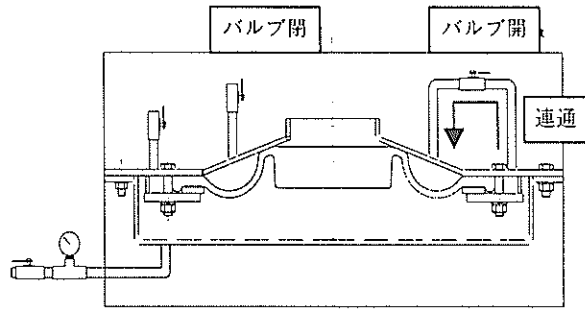
(2) 実験結果

a) 締着部における止水性能

表-5に、実験結果を示す。これによれば、クラウンシールゴム取付けボルトの締付けトルクが管理値の20%まで低下しても、水圧300kPaまでは漏水が確認されなかった。表中において、締付けトルクが40N・mの場合のみ「水圧300kPaまで漏水なし」となっているが、これは、水圧400kPaのときに締着部から漏水したのではなく、装置の



(a) 締着部の止水確認



(b) セルフシール機能確認 (片側のみ開放)

図-11 二次元模型による止水性能確認

他の部分から漏水してしまい、正確な測定ができなかったことを意味している。これより、継手変位が発生していない条件下において、クラウンシール式継手構造の直線部の止水性能は、大阪港夢洲トンネルの場合の要求性能を満足していることが確認できた。

表-5 締着部における止水性能

締付けトルク (N・m)	実験結果
200	水圧400kPaまで漏水なし
120	水圧400kPaまで漏水なし
40	水圧300kPaまで漏水なし

表-6 セルフシール機能に関する実験結果

サイドウォールの状態	水圧 (kPa)	漏水の有無
両側とも水を充填	100	無
	200	無
	300	無
	400	無
片側のみ水を充填	100	無
	200	無
	300	無
	400	無

b) セルフシール機能

表-6に、実験結果を示す。この表によれば、2つのサイドウォールの両側とも水が満たされた左右対称な場合でも、片側のみ水が満たされた左右非対称な場合でも、水圧400kPaまでセルフシール機能は有効であったことがわ

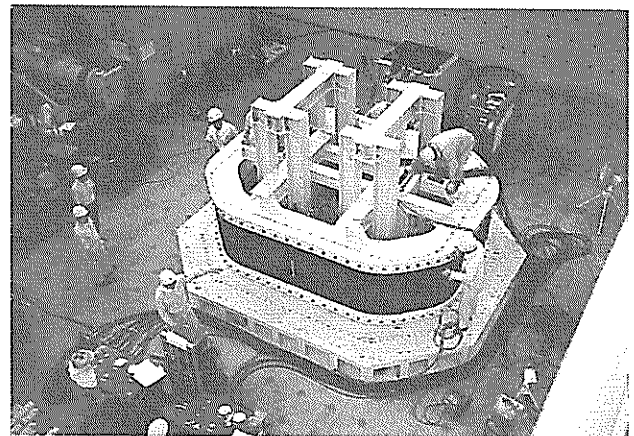


写真-2 三次元試験装置

かる。これより、クラウンシール式継手構造のセルフシール機能が、ゴム締着部での漏水に対するフェールセーフとして有効であることが確認できた。

4.2 三次元模型による実証実験

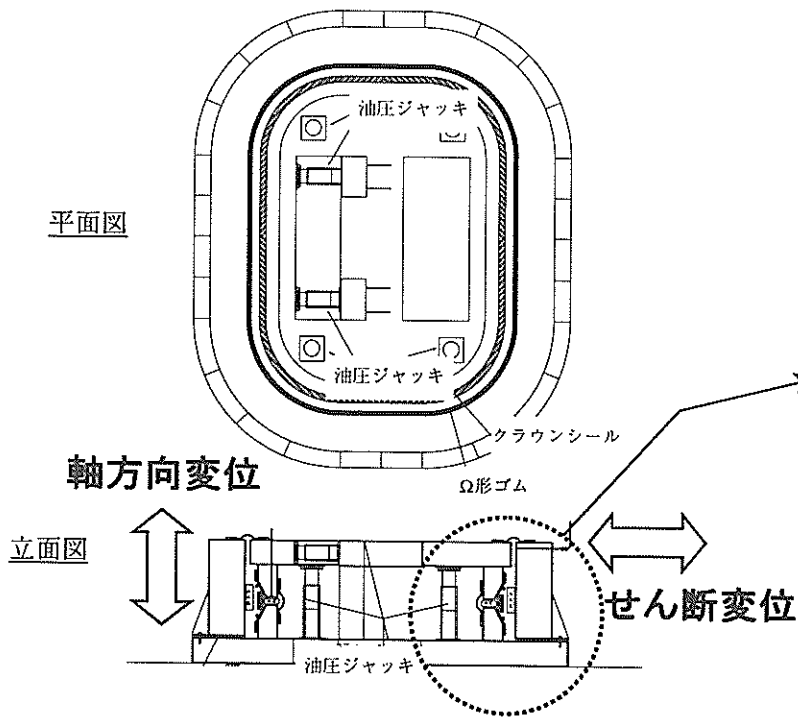
トンネル断面を模擬した円環状の試験装置を用いて、クラウンシール式継手構造の継手変位に対する追従性およびゴムの変形挙動を、特にコーナー部に着目して検討した。また、軸方向またはせん断方向の継手変位が生じた場合の本継手構造の止水性能についても実験的に明らかにした。

(1) 実験概要

a) 試験装置および実験ケース

円環状に成形したクラウンシールゴム試験体に対して、軸方向およびせん断方向の継手変位を同時に負荷できる試験装置を製作し、クラウンシール式継手構造の変形挙

## 治具およびシステム概念



## 挙動確認と止水性能確認

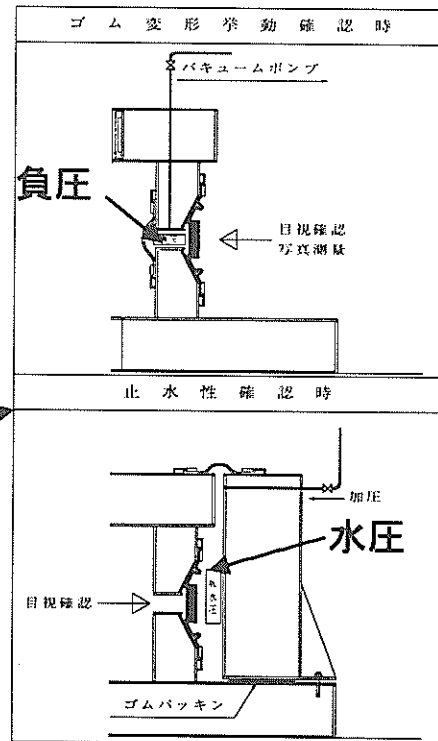


図-12 三次元実験装置の概要

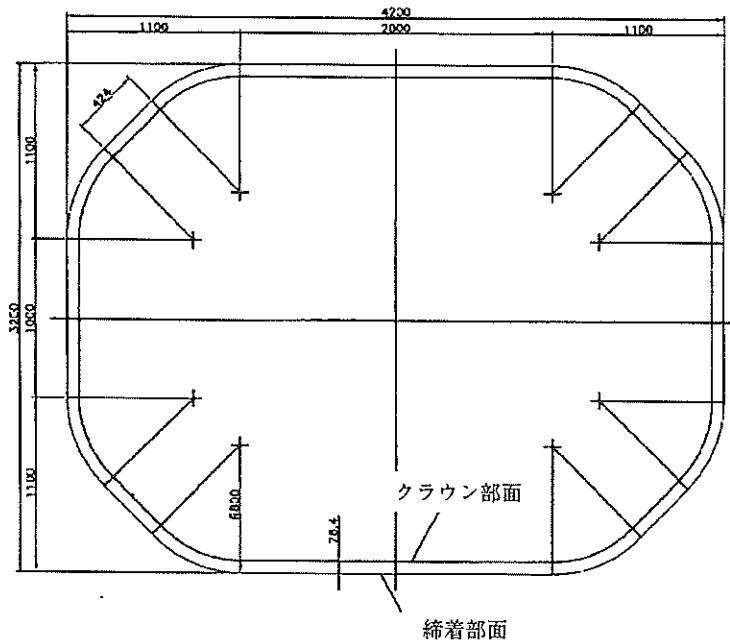
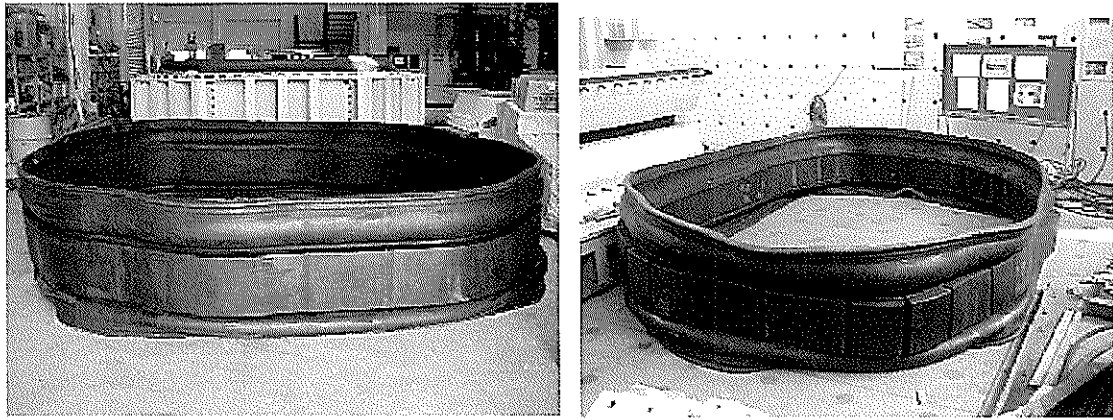


図-13 ゴム試験体の概要

動および止水性能を調べた。

用いた試験装置を図-12および写真-2に示す。試験装置内部に据え付けた油圧ジャッキを制御することで、ゴム

試験体に対して、軸方向に0~300mm、せん断方向に0~150mmの継手変位を独立に与えることができる。クラウンシールゴムが鋼殻と接する斜面部には、二次元模型に



(a) 溝なし試験体

(b) 溝あり試験体

写真-3 ゴム試験体の外観

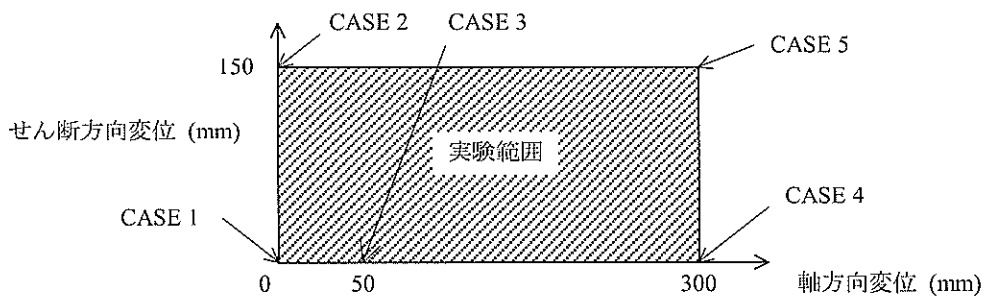


図-14 三次元模型を用いた実証実験の対象範囲

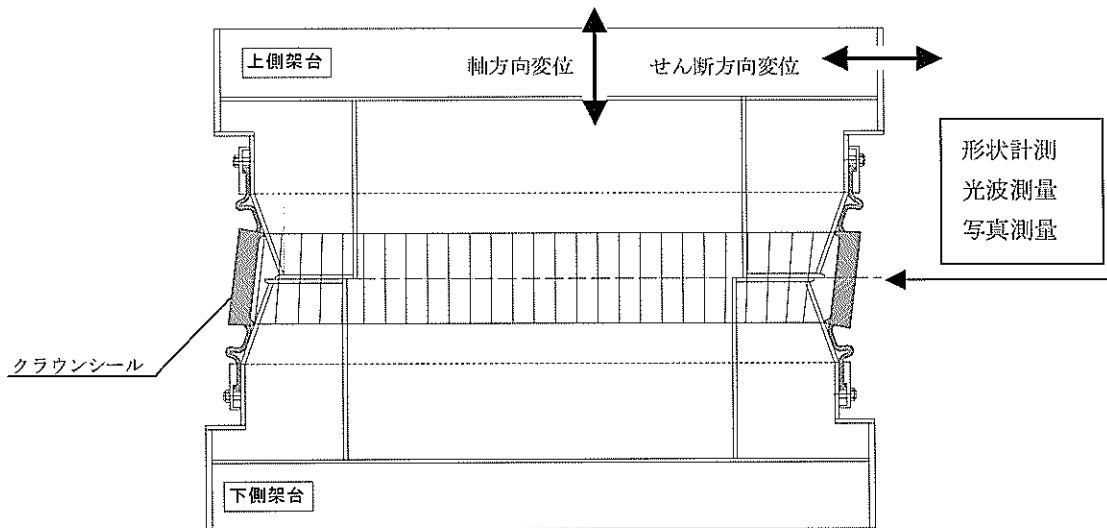


図-15 変形挙動確認実験の概要

よる実証実験と同一の処理を施した。また、クラウンシールゴム試験体を構成する高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムの物性は、二次元模型に用いたものと同一とした。

ゴム試験体の形状・寸法については、断面寸法は実際

の継手と同一とし、長さ方向のうち、コーナー部は実際の継手と同一の曲率とし、直線部はコーナー部の影響範囲を考慮した上で可能な限り短くした。ゴム試験体の種類は、図-13に示すように、①円環状に加工したのみのも

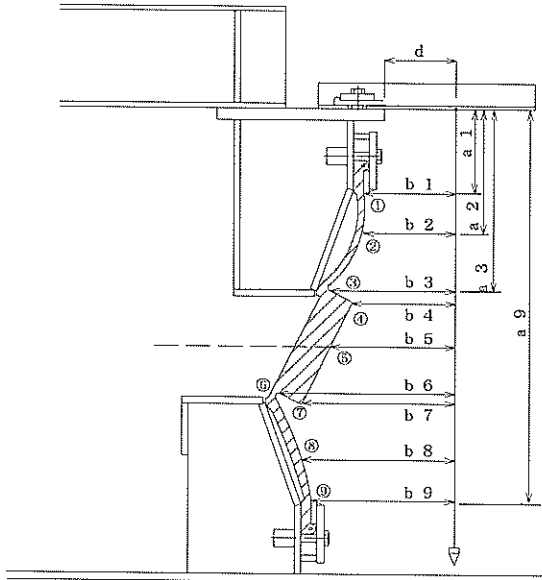


図-16 クラウンシールゴムの形状計測

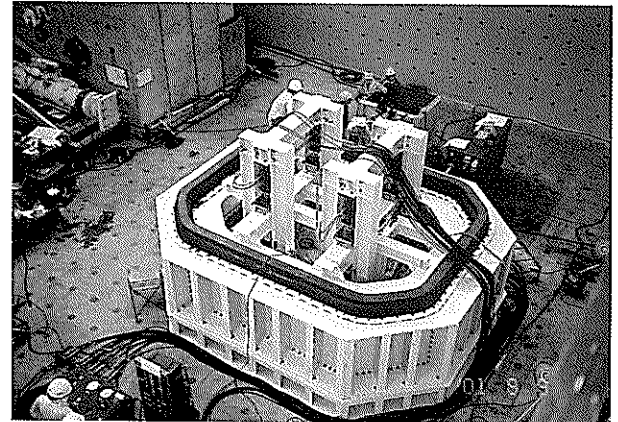


写真-4 止水性能確認実験の状況

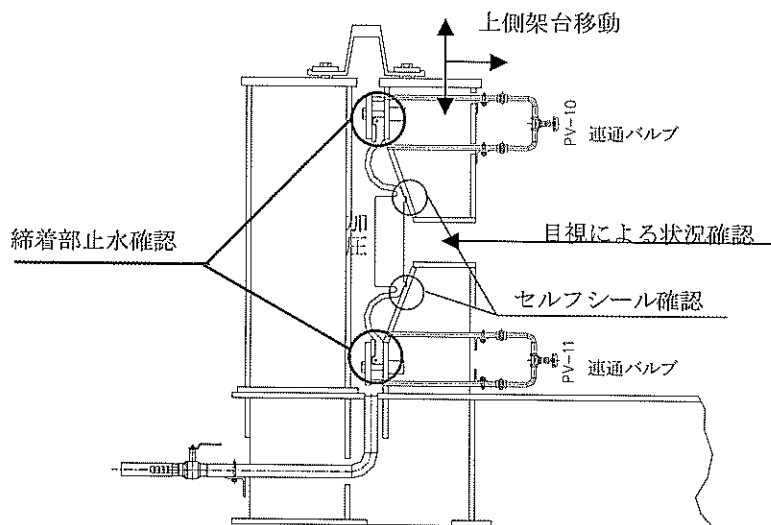


図-17 止水性能確認実験の概要

の（溝なし試験体）と、②継手変位に対する追従性向上を目的として、クラウン部に溝を設置したもの（溝あり試験体）の2種類とした。溝の深さおよび幅は、それぞれ90mm、20mmとし、曲率変化点および直線部・曲線部中間点に溝を設けた。ゴム試験体の概観を写真-3に示す。

継手部に与える変形のパターンとしては、図-14に示す範囲を対象とした。すなわち、軸方向に0～300mm、せん断方向に0～150mmの継手変位を与えた。ここで、クラウンシールゴムを取り付けた2つの鋼殻の間に開きや目違いがない状態を軸方向変位=0、せん断方向変位=0とした。実験においては、軸方向あるいはせん断方向のい

れかの変位を固定した状態で、もう一方の変位を連続的に増加あるいは減少させた。

#### b) 変形挙動確認実験

クラウンシールゴムの変形挙動確認実験の概要を図-15に示す。このように、試験装置周囲から継手変位に伴うゴムの変形状況を直接観察できるように、ゴム試験体に対して水圧の作用方向とは反対方向から負圧を作用させて、水圧作用によるゴムの変形状況を模擬した。このとき、作用圧力は-95kPaとした。このようにクラウンシールゴムに負圧を作用させた状態で、試験装置内部に設

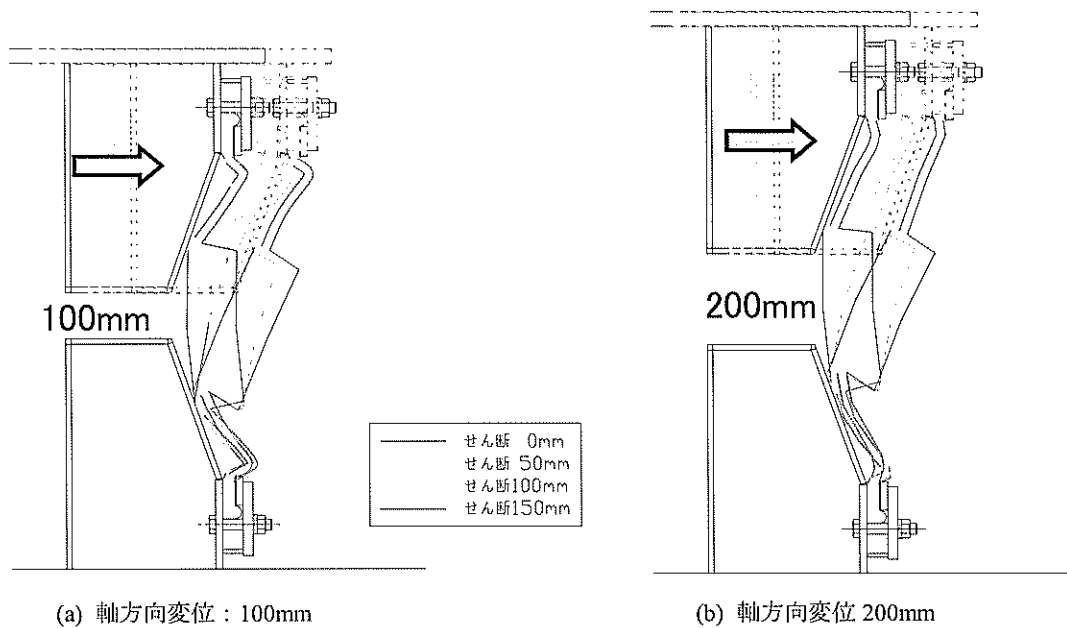


図-18 クラウンシールゴムの変形状況

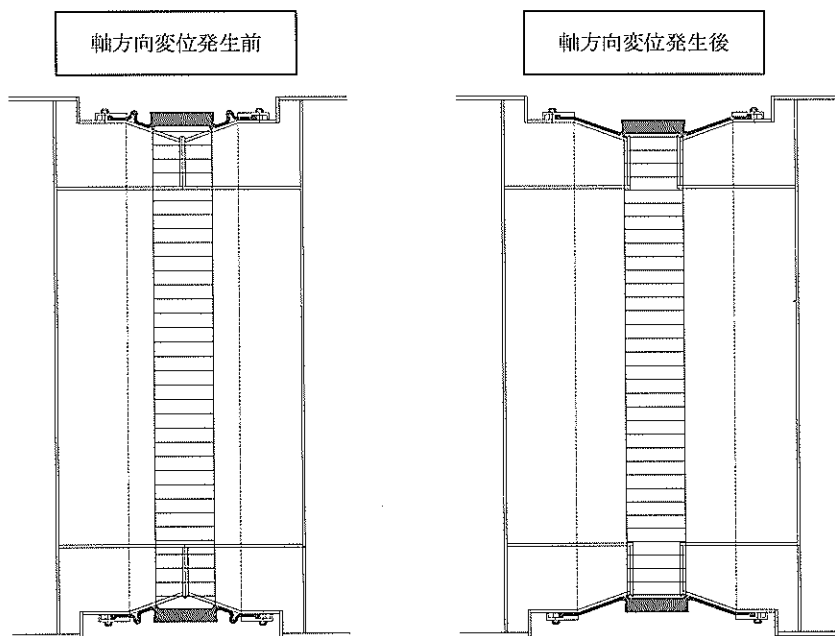
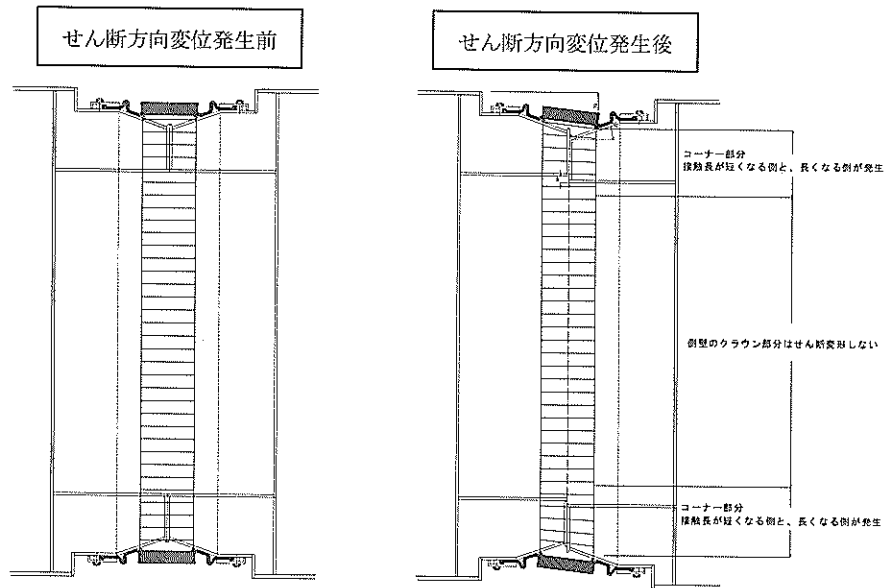


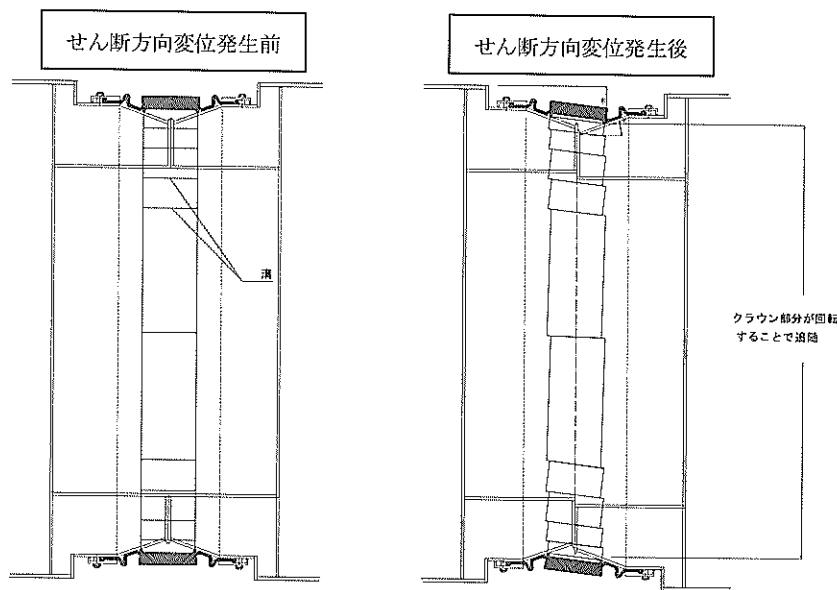
図-19 軸方向の継手変位に対するクラウンシールゴムの変形挙動

置した油圧ジャッキを制御することで、図-14に示す継手変位を生じさせた。この際、継手変位に対する追従性やゴムの変形状況を目視にて確認するだけでなく、ゴム表面を写真測量することで、ゴムの変形挙動を三次元的かつ定量的に評価した。写真測量箇所は、直線部～コーナ一部分の約3mの範囲とし、測量点は50mmメッシュの格子点とした。この測量結果は、別途実施した数値解析の検討

結果の妥当性を検証するために用いた。さらに、継手変位に対するクラウンシールゴムの変形状況を簡略的に捉えるため、ゴム試験体の長辺部中央にてゴムの形状計測を行った。本計測では、図-16に示すように、クラウンシールゴムの代表的な部位①～④（締着部、クラウン端部、サイドウォール端部など）の二次元座標  $(a, b)$  を、鋼殻端部から所定の距離  $(d)$  だけ離れた測線で計測すること



(a) 溝なし試験体の場合



(b) 溝あり試験体の場合

図-21 せん断方向の継手変位に対するクラウンシールゴムの変形挙動

で、クラウンシールゴムの形状を調べた。

c) 止水性能確認実験

止水性能確認実験の概要を図-17に示す。ゴム試験体を取り囲むように鋼壁を設けて、上部に止水ゴムを取り付けた後、ゴム試験体外部に水を満たした。ポンプや差圧調整弁などを用いてゴム試験体に100、200および300kPaの水圧を作用させた。水圧を負荷した状態で、図-14に示す継手変位を与え、ゴム締着部から漏水がないかどうか

を目視にて確認した。実験の状況を写真-4に示す。

さらに、二次元実験と同様に、セルフシール機能による止水についても調べた。実験では、サイドウォール内にも水を満たした状態で、所定の軸方向変位を与え、せん断方向変位を増加させた。せん断方向変位がある値に達すると、セルフシール機能が働かなくなり、ノーズ部から出水する。このときのせん断方向変位を記録した。作用水圧は、100、200および300kPaとした。

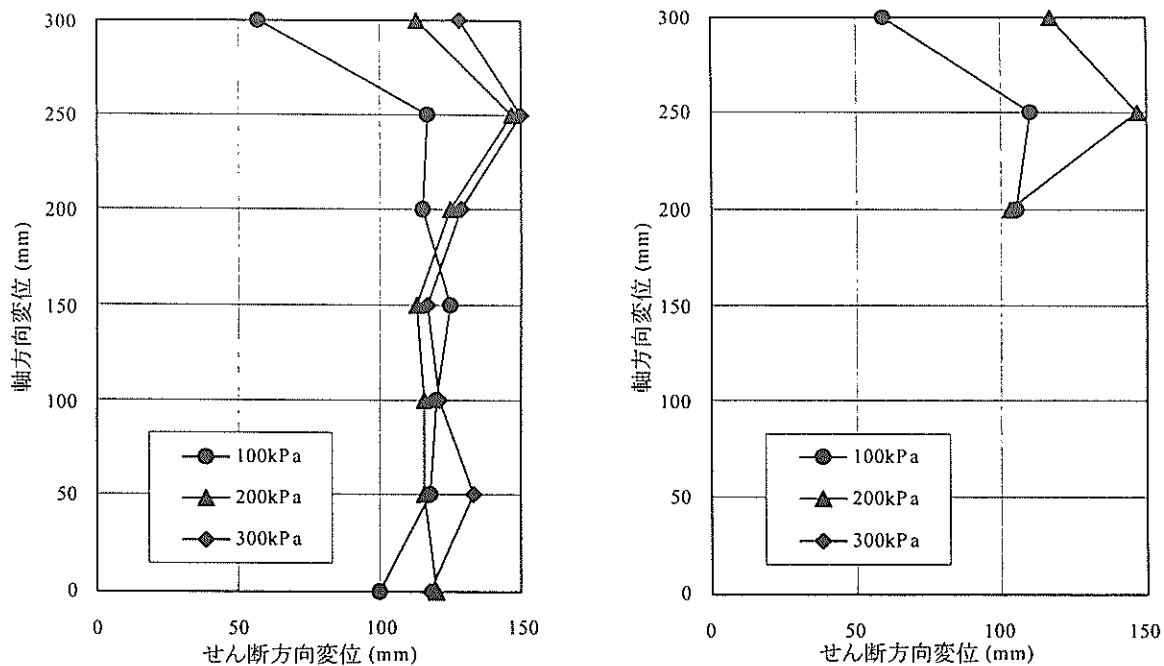


図-22 セルフシール機能の有効範囲

(2) 実験結果

a) 変形挙動確認実験

継手変位にともなうクラウンシールゴムの変形状況を目視にて観察した結果、溝なし試験体においては、ゴムに異常な局所変形やねじれは生じていなかった。継手全体の挙動をみても、縦座屈（尺取り虫現象）や蛇行現象も発生することなく、軸方向変位およびせん断方向変位のいずれに対してもスムーズに追従していた。図-18に、ゴム試験体長辺部中央におけるゴムの変形状況を示す。これによれば、軸方向やせん断方向の継手変位が生じて、クラウン部がどちらかに偏るようなことなく、中立の位置を保っていることがわかる。

一方、溝あり試験体においては、せん断方向変位を受けた場合、溝部にせん断変形が集中してしまい、溝の基部で局所的なねじれが発生した。その結果、溝で囲まれたクラウン部が回転することでせん断方向の継手変位が吸収された。継手全体の挙動の観点からみても、溝があることで、継手変位に対する追従性が著しく改善されたとは言えず、クラウンシールゴムの変形状況も溝の有無にかかわらず違いは認められなかった。よって、クラウンシールゴムに溝を設置しても、人為的に構造上の弱点を増やすだけで、特段のメリットを見出せなかった。

以上より、クラウンシール式継手構造の継手変位への追従性および変形挙動について、以下のことがわかった。

- ・軸方向の継手変位に対しては、縦座屈（尺取り虫現象）や蛇行現象を示すことなく、クラウン部が中立性を保ちながら、ゴムが柔軟に変形することで吸収した（図-20参照）。
- ・せん断方向の継手変位に対しては、溝なし試験体の場合、コーナー部がせん断変形することで、継手全体として継手変位を吸収した。一方、溝あり試験体の場合、溝で囲まれたクラウン部が回転することでせん断方向の継手変位を吸収した（図-21参照）。
- ・溝あり試験体がせん断方向変位を受けた場合、溝の基部に著しいねじれが生じたが、溝なし試験体では異常な変形は生じなかった。

b) 止水性能確認実験

水圧を300kPaまで負荷した状態で、本実験で対象とした継手変位（軸方向：0～300mm、せん断方向：0～150mm）が生じて、ゴム締着部からの漏水は一切認められなかった。よって、クラウンシール式継手構造の止水性能は、大阪港夢洲トンネルにおける要求性能を十分に満足するものと考えられる。

さらに、万が一、ゴム締着部で漏水が発生した場合のフェールセーフとしてのセルフシール機能について調べた結果を、各水圧ごとに図-22に示す。図中、折線よりも左側の範囲が、セルフシールが有効に機能する領域であ



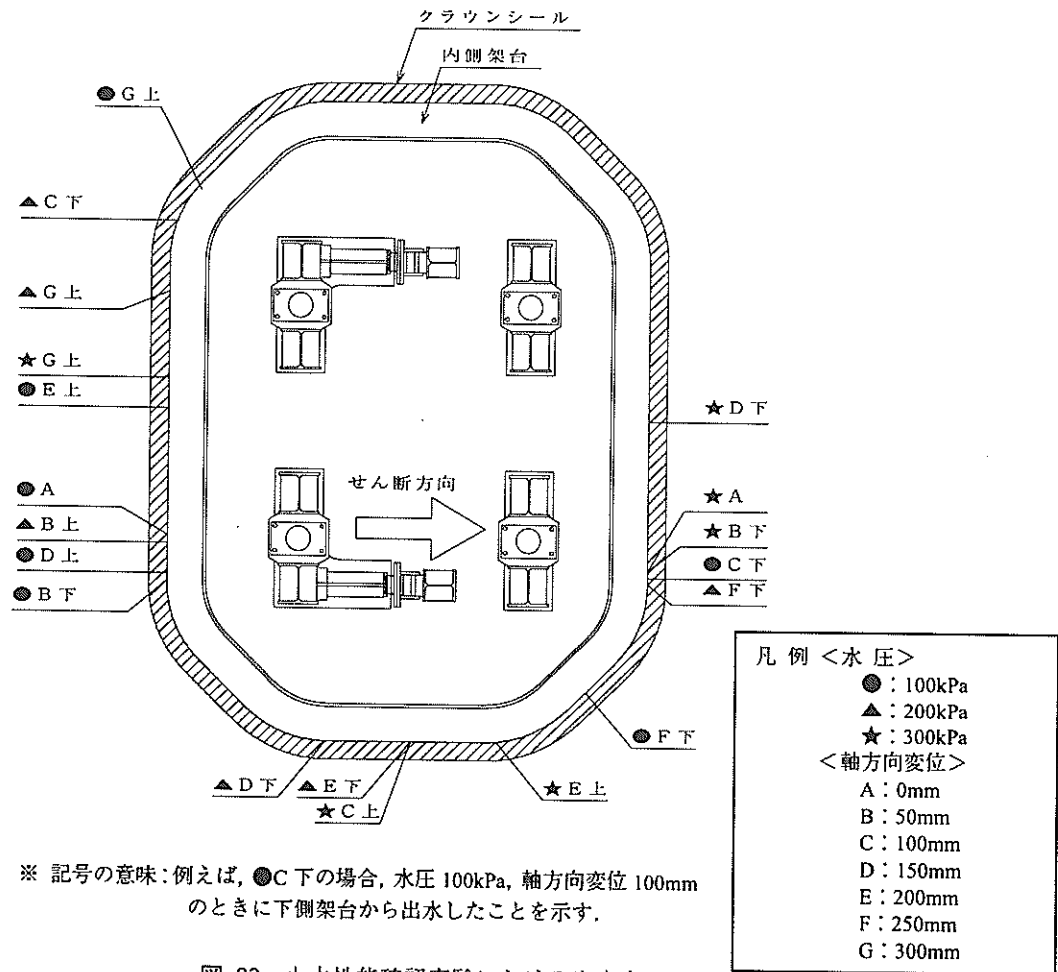


図-23 止水性能確認実験における出水点

る。これによれば、水圧が100kPaで軸方向変位が大きい場合に、一部セルフシール機能が劣っていた。これは、作用水圧が小さかったため、水圧によるサイドウォール部の押付け力が小さかったためと考えられる。しかしながら、その他の条件下においては、せん断方向変位がおおよそ120mm以下であれば、セルフシール機能が有効であることがわかった。

図-23に示すように、セルフシールが破れて出水した箇所は各ケースでまちまちであり、必ずしもコーナー部が止水上の弱点とはなっていないかった。また、溝なし試験体と溝あり試験体で締着部での止水性能に違いはみられなかった。

#### 4.3 模型実験結果のまとめ

クラウンシール式継手構造の模型実験を行った結果、本実験で対象とした範囲内の継手変位が生じてても、継手全体がスムーズに追従することがわかった。特に、溝なし試験体では異常な変形やねじれは認められなかった。

また、本実験で対象とした範囲内の継手変位であれば、クラウンシールゴム締着部の止水性能は十分であった。さらに、そのフェールセーフとしてのセルフシール機能の有効性についても確認することができた。以上より、クラウンシール式継手構造を沈埋トンネル用継手として用いることに特段の支障はないことがわかった。

#### 5. クラウンシール式継手構造の数値解析手法に関する検討

クラウンシール式継手構造を沈埋トンネル用継手として用いるためには、その設計方法や照査方法を整備しておく必要がある。そのためには数値解析手法の確立が不可欠である。ここでは、水圧と継手変位が同時に作用するクラウンシール式継手構造の非線形有限要素解析を行った。また、4.の模型実験結果との比較を行い、解析結果の妥当性を検証した。

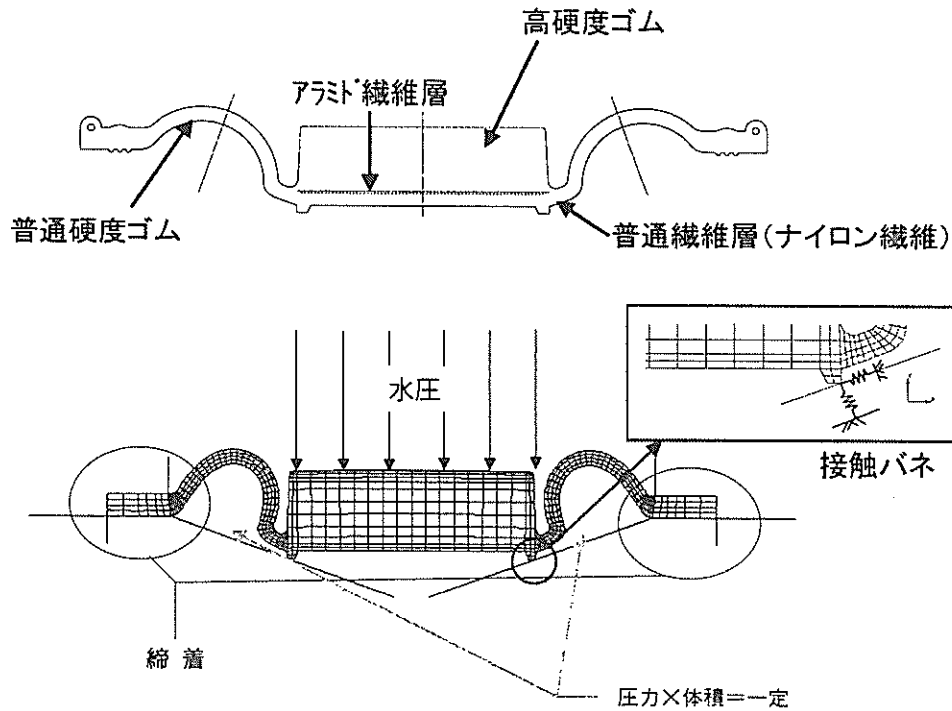


図-24 解析モデルの概要

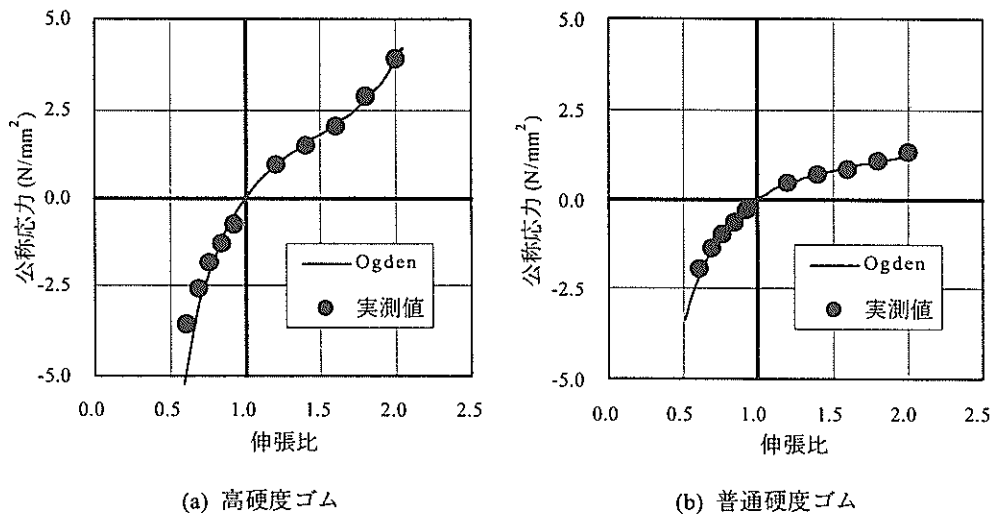


図-25 Ogden モデルの同定結果

本継手構造に対する数値解析手法を確立しておけば、ゴム内部で発生している局所的なひずみの照査を行うことが可能となり、水圧と継手変位を受ける本継手構造の安全性を照査することが可能となる。また、模型実験で検討しなかった継手変位パターンを受けた場合の継手の追従性やクラウンシールゴムの改良結果の照査にも応用することができる。

### 5.1 解析モデルおよび材料定数の設定

#### (1) 解析モデルの概要

一般に、有限要素解析でゴム材料を取り扱う場合、材料の非線形性が強いこと、あるいは変形量が非常に大きいことに注意が必要である。本解析で用いたモデルを図-24に示す。ゴム部は、多軸場における非線形な応力-ひずみ関係を表現するのに適したOgdenモデル (Ogden, 1984) を用いた平面ひずみ要素でモデル化した。用いたひずみエネルギー関数は、二次のものを用いた。また織

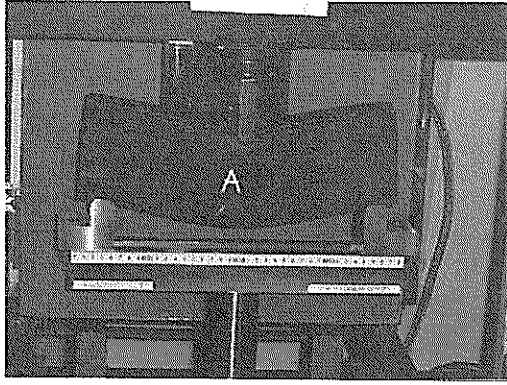


写真-5 曲げ試験の状況

維層は引張方向のみに剛性を有するトラス要素として表現した。

ゴム締着部における境界条件は固定とし、ノーズ部には接触バネを取り入れ、ノーズ部が鋼殻に接触しながら移動できるようにした。一般に、ゴムと鋼の摩擦係数 $\mu$ は0~0.4の間にあり、接触圧によって摩擦係数が変化することが知られている。そこで本解析では、摩擦係数 $\mu=0$ および $\mu=0.4$ のケースを取り上げることにした。また、サイドウォール内にトラップされた空気がサイドウォールに及ぼす内圧についても、ボイルの法則に基づいて作用させた。

## (2) 材料定数の設定

各構成材料の材料定数については、クラウンシールゴム試験体の製作に用いた材料と同一のロットから採取した試験片の材料試験結果を基に決定した。

### a) ゴム材料

Ogdenモデル中の諸定数同定するために、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムの引張試験および圧縮試験を行った。引張試験は、長さ300mm、幅30mm、厚さ2.2mmのゴムサンプルを用いて、標点間距離を100mmとして実施した。一方の圧縮試験は、直径29mm、厚さ12.7mmの円筒状ゴムサンプルを用いて行った。本試験結果に基づいて、Ogdenモデルの諸定数を同定した結果を図-25に示す。

### b) アラミド繊維層

直径0.65mmのアラミド繊維1本の引張試験を行った結果、0.5kNで5%のひずみが生じた。これより、ヤング率を $3.01 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ とした。クラウンシールゴムの製作に用いたアラミド繊維層は、50mm幅あたり35本のアラミド繊維が配置されているため、これを考慮した有効繊維断面

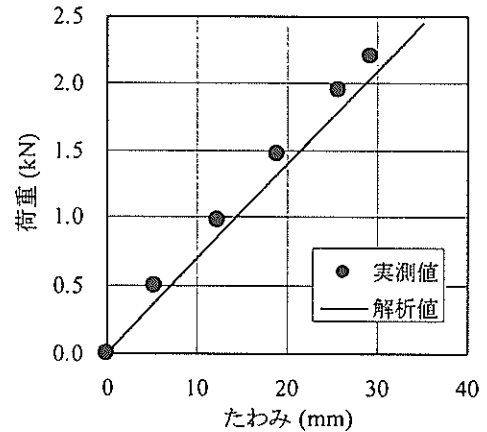


図-26 実測値と解析値の比較

積を用いて解析を行った。

### c) ナイロン繊維 (普通繊維) 層

幅30mm、厚さ1.5mmのナイロン繊維層の引張試験を行った結果、3kNで30%のひずみが生じた。この繊維層の繊維有効厚は0.5mmであることから、ヤング率を $6.54 \times 10^2 \text{N/mm}^2$ とした。解析にあたっては、ナイロン繊維の位置に、繊維有効厚0.5mmのトラス要素を導入した。

## (3) 妥当性の検証

上記のように設定した解析モデルと材料定数の妥当性を検証するため、クラウンシールゴムからクラウン部を切り出した試験片 (厚さ50mm) の曲げ試験を行った。スパンは300mmとし、スパン中央1点荷荷とした。曲げ試験の状況を写真-5に示す。試験結果から得られるスパン中央におけるたわみの実測値と解析値を比較した。

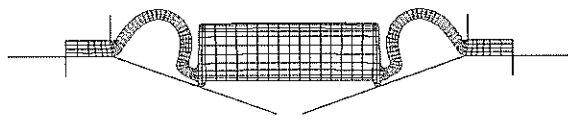
たわみの実測値と解析値の比較結果を図-26に示す。これによれば、両者はほぼ一致しており、解析モデルと材料定数の設定が妥当であったことを示している。よって、これ以降も上記の解析モデルと材料定数を用いて解析を行うこととした。

## 5.2 二次元解析

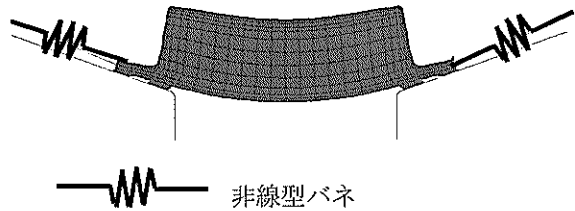
### (1) 解析の概要

クラウンシールゴムの長手方向を無視した二次元解析を行った。5.1で設定したモデルおよび材料定数を用いて、水圧作用下におけるクラウンシールゴムの継手変位への追従状況を解析的に追跡した。

軸方向変位が小さい状態では、サイドウォールにたるみが生じるため、解析が収束しない場合がある。そこで、サイドウォール部を非線形バネで置き換えて単純化したモデルを用いた解析も行った。この非線形バネは、サイ



(a) フルモデル



(b) 非線形バネモデル

図-27 二次元解析におけるフルモデルと非線形バネモデル

ドウォールがたるんだ状態では剛性を持たないが、たるみがなくなった場合には剛性を有するものである。ここでは、便宜上、前者の解析をフルモデル解析、後者を非線形バネモデル解析と呼ぶこととする。両者の解析モデルの違いを図-27に示す。

フルモデル解析の結果、クラウンシールゴムの各構成材料における主ひずみの極値は、サイドウォール部には生じなかった。また、フルモデル解析と非線形バネモデル解析の結果を比較した結果、継手変位に伴うクラウン部の変形状況や主ひずみの分布がほぼ等しくなることがわかった。よって、これ以降の検討では、両者の解析結果に大きな差はないものとして、解析の目的に応じて2つのモデルを使い分けることとした。

解析のケースを表-9に示す。水圧が100kPaのケースは、三次元模型実験において負圧を作用させた変形挙動確認実験の結果と比較するためのものである。

表-9 二次元解析のケース

ゴムと鋼の摩擦係数 ( $\mu$ )					
0			0.4		
作用水圧 (kPa)					
100			300		
継手変位パターン					
ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
軸方向 (mm)	0	0	50	300	300
せん断方向 (mm)	0	150	0	0	150

(2) 解析結果

a) 三次元模型実験結果との比較

図-28に、クラウンシールゴムが継手変位を受けた場合

のクラウン部の変形状況をフルモデルで解析した結果を示す。なお、このときの作用水圧は100kPaである。これによれば、軸方向あるいはせん断方向に継手変位が生じて、クラウン部が中立の位置を保ちながらスムーズに追従している状況がよく捉えられている。CASE5においては、せん断方向変位が大きいため、片側のノーズ部が鋼殻から離れていることがわかる。このことは、三次元模型実験時に、このような継手変位下において、セルフシール機能が有効でなかったことを裏付けるものである。

本解析結果を、三次元模型実験時にゴム試験体長辺部中央で計測したゴムの変形状況と比較した結果を図-29に示す。図中、赤線が二次元解析結果、青点が実測値であり、丸数字は図-16に示したクラウンシールゴムの位置を示している。この位置では、コーナー部の影響が非常に小さいと考えられるため、二次元での解析結果と三次元模型実験の結果を比較できるものと考えた。これによれば、本解析によりクラウンシールゴムの変形挙動、例えば、クラウン部のたわみやサイドウォール部のたるみ・伸びなどをよく追跡できていることがわかる。

また、ゴムと鋼の摩擦係数が解析結果に及ぼす影響は、摩擦係数 $\mu=0.4$ の場合が $\mu=0$ の場合より、ノーズ部のつぶれが大きかった以外は、ほとんど認められなかった。

b) 局所ひずみの評価

各継手変位パターンに対して、クラウンシールゴム内部で発生した局所ひずみを評価するため、各構成材料で発生した主応力および主ひずみの最大値を抽出した。解析に先立って、フルモデル解析を行った結果、締着部を除くサイドウォール部にひずみの極値は発生していなかった。よって、ここでは非線形バネモデルによるクラウン部の解析結果に基づいて局所ひずみの評価を行った。

表-10に、摩擦係数 $\mu=0.4$ の場合の結果を示す。ノーズ部

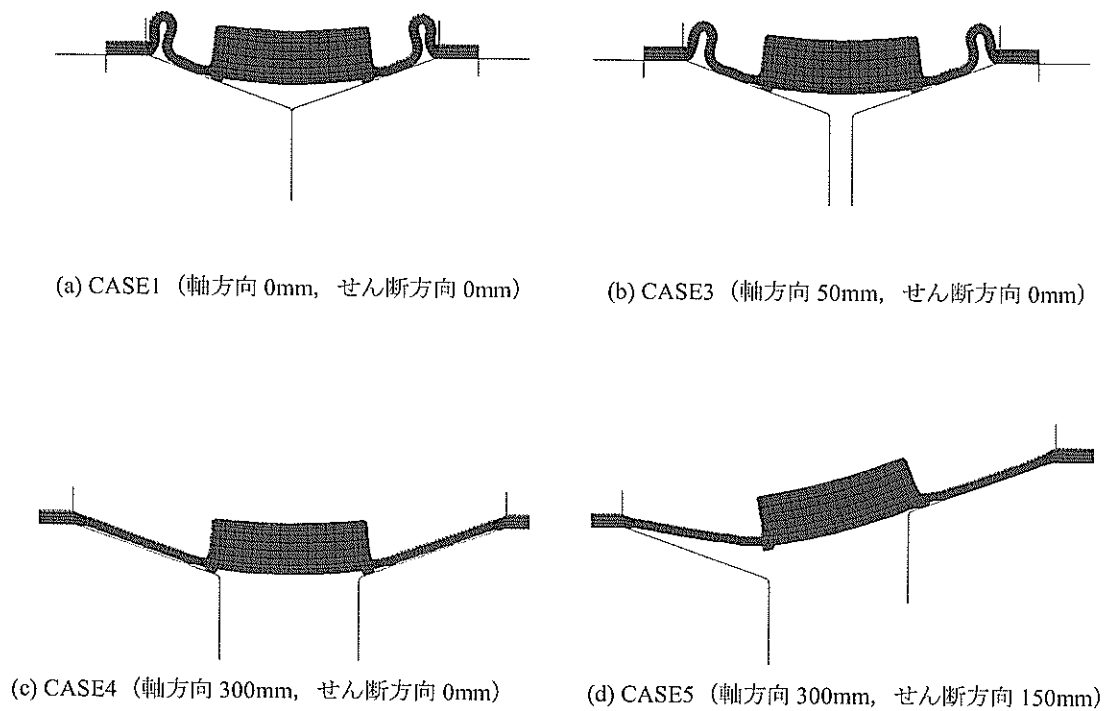


図-28 クラウンシールゴムの変形状況 (摩擦係数 $\mu=0.4$ )

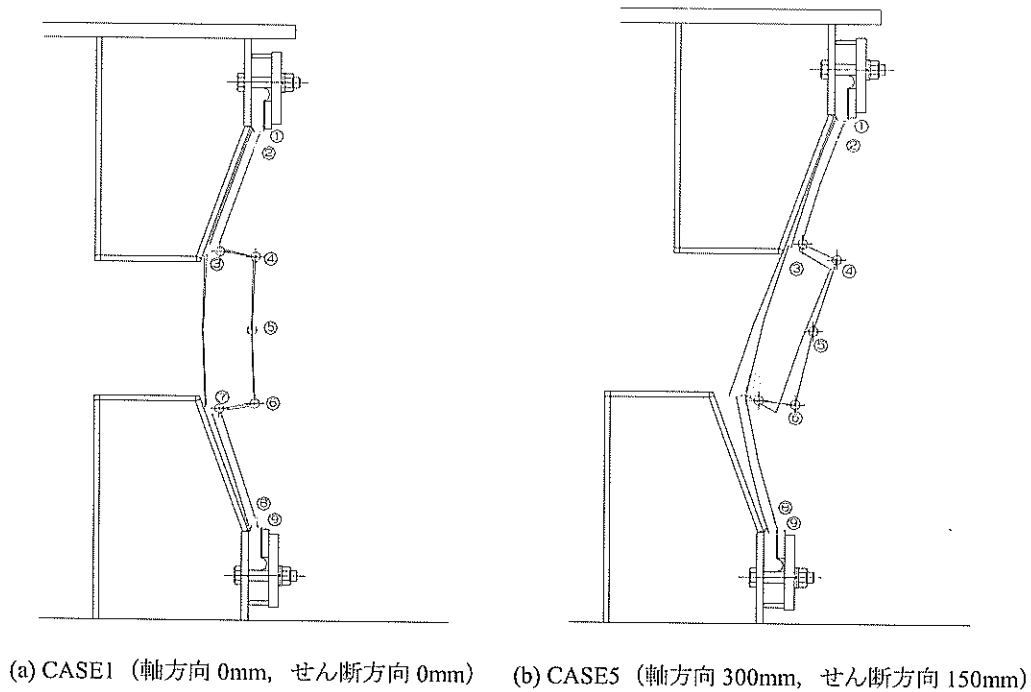


図-29 二次元解析結果と模型実験結果の比較 (摩擦係数 $\mu=0.4$ )

については、圧縮されて初めてその機能を発揮する箇所であることから、最大値の抽出対象とはしなかった。なお、摩擦係数 $\mu=0$ の場合の結果は $\mu=0.4$ の場合と概ね同様

であった。各構成材料の主ひずみの最大値は、サイドウォールとクラウンの接続部である断面急変部で発生する場合が多かった。これは、断面が急激に変化することで、

表-10 主応力および主ひずみの最大値の抽出

ケース	変位パターン	材 料	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )		主ひずみ (%)				
			二次元	三次元シェル	二次元	三次元シェル	三次元ソリッド	破断ひずみ	許容ひずみ
CASE1	軸方向=0mm	高硬度ゴム	0.2	0.3	22.0	2.0	—	390	180
		アラミド	33.3	4.1	0.1	0.6	—	5	2
	せん断方向=0mm	ナイロン	5.9	2.0	0.1	2.0	—	35	18
		普通硬度ゴム	0.0	0.2	43.0	3.4	—	450	200
CASE2	軸方向=0mm	高硬度ゴム	0.8	0.4	22.0	8.9	—	390	180
		アラミド	21.6	5.1	0.5	0.8	—	5	2
	せん断方向=150mm	ナイロン	2.9	8.9	0.0	6.9	—	35	18
		普通硬度ゴム	0.2	0.3	70.0	19.4	—	450	200
CASE3	軸方向=50mm	高硬度ゴム	0.2	0.3	22.0	2.0	—	390	180
		アラミド	34.3	4.1	0.1	0.6	—	5	2
	せん断方向=0mm	ナイロン	5.9	2.0	0.9	2.0	—	35	18
		普通硬度ゴム	0.4	0.2	30.0	3.4	—	450	200
CASE4	軸方向=300mm	高硬度ゴム	0.0	0.3	29.0	2.2	99.0	390	180
		アラミド	147.0	4.3	0.5	0.6	0.5	5	2
	せん断方向=0mm	ナイロン	35.3	2.0	6.1	2.0	8.5	35	18
		普通硬度ゴム	0.5	0.2	54.0	3.4	120.0	450	200
CASE5	軸方向=300mm	高硬度ゴム	0.0	0.4	26.0	8.9	113.0	390	180
		アラミド	176.4	4.8	0.2	0.7	0.6	5	2
	せん断方向=150mm	ナイロン	39.2	9.3	7.1	7.2	9.8	35	18
		普通硬度ゴム	0.6	0.3	120.0	17.8	186.0	450	200

応力の不連続が生じたためと考えられる。

表中の破断ひずみは各材料の特性値を、許容ひずみは、ゴムに対しては安全率2.2を、繊維層に対しては安全率2.5を確保するように便宜的に定めたものである。ゴムの安全率は、ジーナ型ゴムガスケットの場合の解析結果（清宮ら、1997）を参考に定めたものであり、繊維層の安全率は一般的に用いられている値を採用した。

同表によれば、主ひずみの最大値が発生するのは、CASE4やCASE5といった軸方向変位が大きい場合であることがわかる。これらの最大主ひずみを許容ひずみと比較すると、本解析で対象とした継手変位が発生しても、クラウンシールゴム内部のひずみは、いずれも許容ひずみ以下であったことが確認できる。このようなひずみの比較を行うことで、水圧および継手変位を受けた場合のクラウンシールゴムの破断に対する安全性を照査することができる。ここでの解析は、クラウンシールの長手方向の影響を無視しているため、コーナー部の影響を考慮した検討を行うことはできないが、直線部のみのひずみ照査には本解析は有効であるといえる。また、二次元解析を行うことで、クラウンシール式継手構造にとって厳しい継手変位パターンを特定することも可能である。

### 5.3 三次元解析

#### (1) 解析の概要

クラウンシールゴムにせん断変形が生じた場合、コー

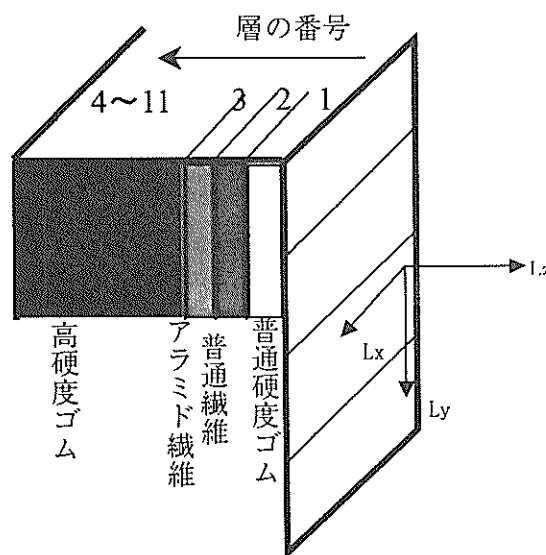


図-30 シェル要素の概要

ナー部に大きな変形が生じることが三次元模型実験の結果で明らかとなった。したがって、コーナー部の内部ひずみは直線部と比較して大きいことが推測される。5.2の二次元解析ではコーナー部の影響を考慮することができなかったため、続いてクラウンシールゴムの長手方向を含めた三次元解析を行った。しかしながら、クラウンシールゴムの三次元モデルを作成すると、節点数・要素数が膨大となり、計算時間が長くなるだけでなく、安定的

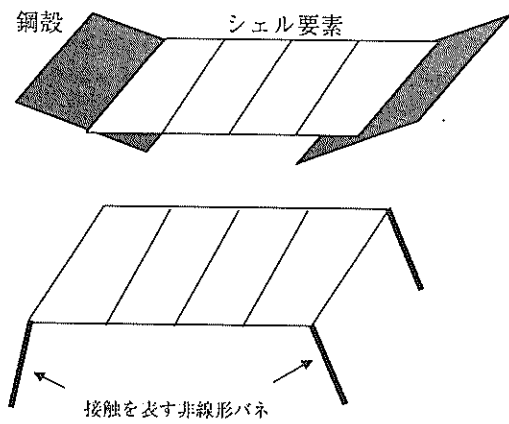


図-31 シェル要素の配置

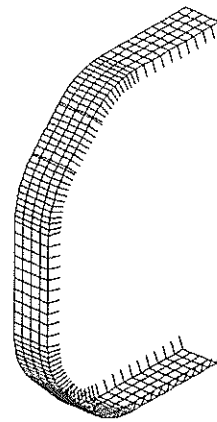


図-32 要素分割の一例

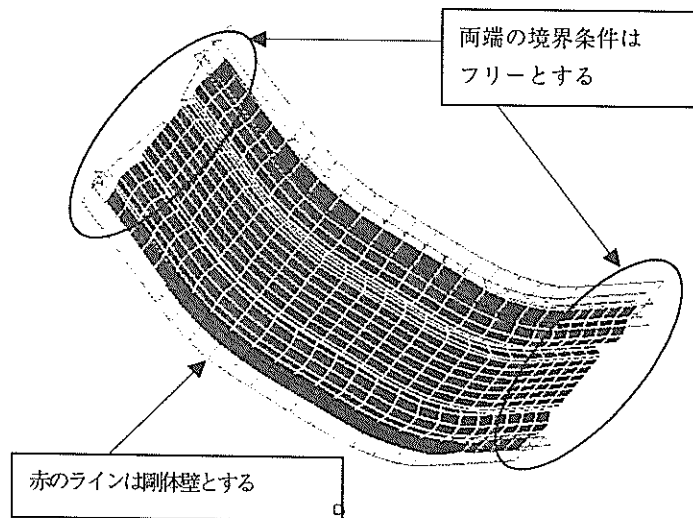


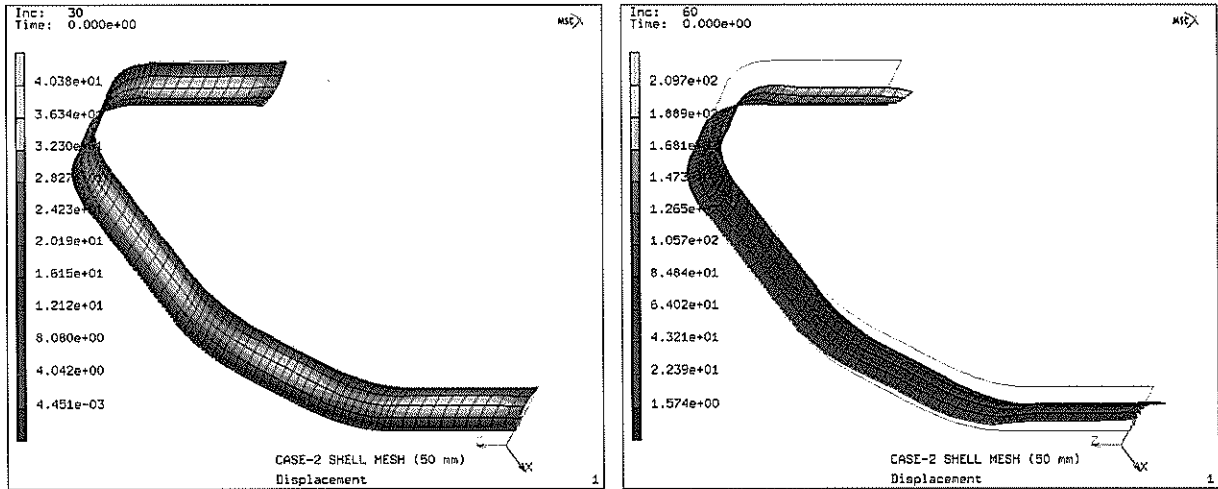
図-33 ソリッド要素を用いた解析モデル

な解析が困難となる。そこで、簡便な解析手法としてシェル要素を用いた解析を行い、クラウンシールゴム全体の変形挙動を概略で把握することとした。さらに、クラウンシールゴム内部で発生する局所ひずみを定量的に評価するため、より精度の高い解析が可能なソリッド要素を用いた解析もあわせて行った。また、ゴムと鋼の摩擦係数 $\mu$ は、解析結果にあまり影響しないことが二次元解析の結果から明らかとなったので、 $\mu=0.4$ で一定とした。

a) シェル要素を用いた解析

図-30に示すように、クラウン部を11層からなるシェル要素でモデル化し、図-31のように、接触バネを介して鋼殻上に配置した。これをクラウンシールゴム長手方向に

連結することで、図-32に示すような要素分割を行った。このように、解析対象の対象性を考慮して、円環状のクラウンシールゴム試験体の1/2を対象として解析を行った。本解析によれば、クラウンシールゴムの全体挙動や継手変位への追従性を評価することができるが、クラウン部の厚さ方向の影響を無視した解析となっているため、内部ひずみの絶対値の算定・比較には不向きである。ただし、継手変位を受けるクラウンシールゴムのうち、どの部分のひずみが大きくなるかといった相対的な評価は十分可能である。よって、内部ひずみを精度良く算定できるソリッド要素を用いた解析を行う範囲を限定することを目的として、シェル要素を用いた解析を行い、最大主ひずみの発生が予測される位置を事前に特定することは



(a) CASE4 (軸方向 300mm, せん断方向 0mm) (b) CASE5 (軸方向 300mm, せん断方向 150mm)

図-34 シェル要素を用いた解析結果

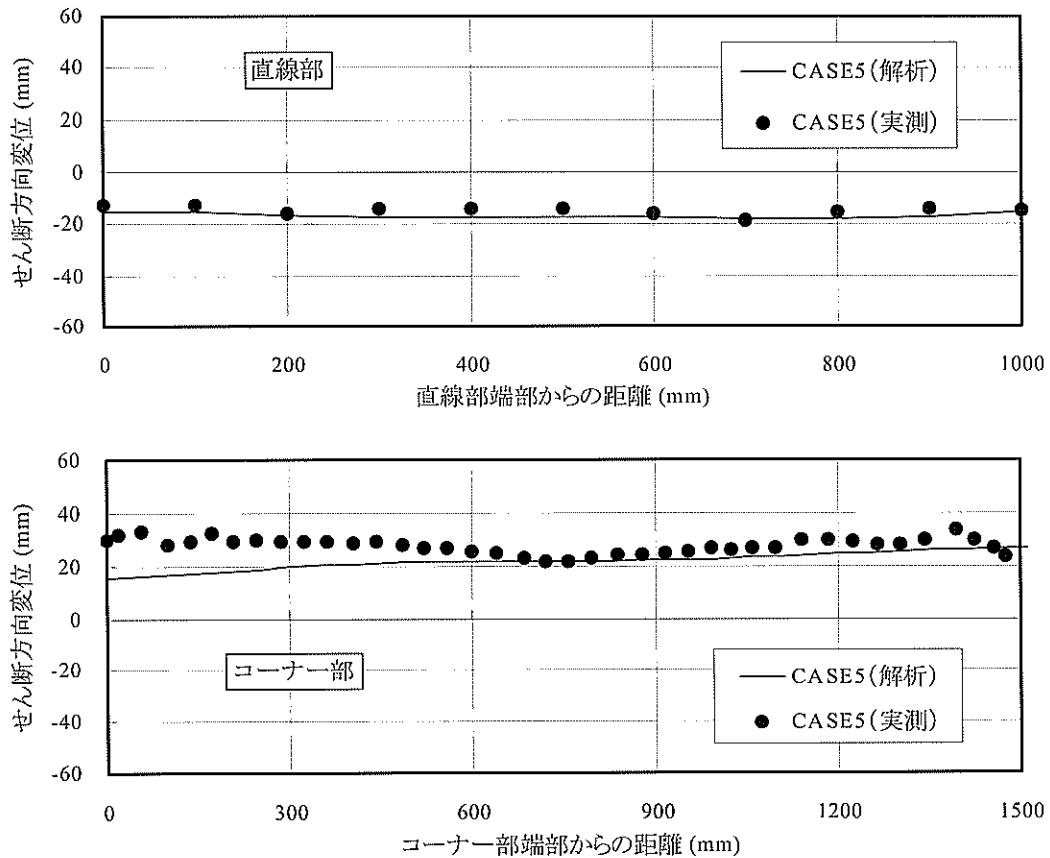


図-35 シェル要素を用いた解析結果と写真測量結果との比較

実用上有用である。

b) ソリッド要素を用いた解析

本解析は、基本的には5.2の二次元解析と同様のものがある。したがって、節点数・要素数が莫大となるため、

使用したコンピュータの制約上、解析範囲を極力狭くする必要があった。そこで、a)のシェル要素を用いた解析結果から、最大ひずみが発生すると推測される位置をあらかじめ特定した上で解析範囲を決定した。シェル要素を用いた解析の結果、直線部よりもコーナー部の方がひず



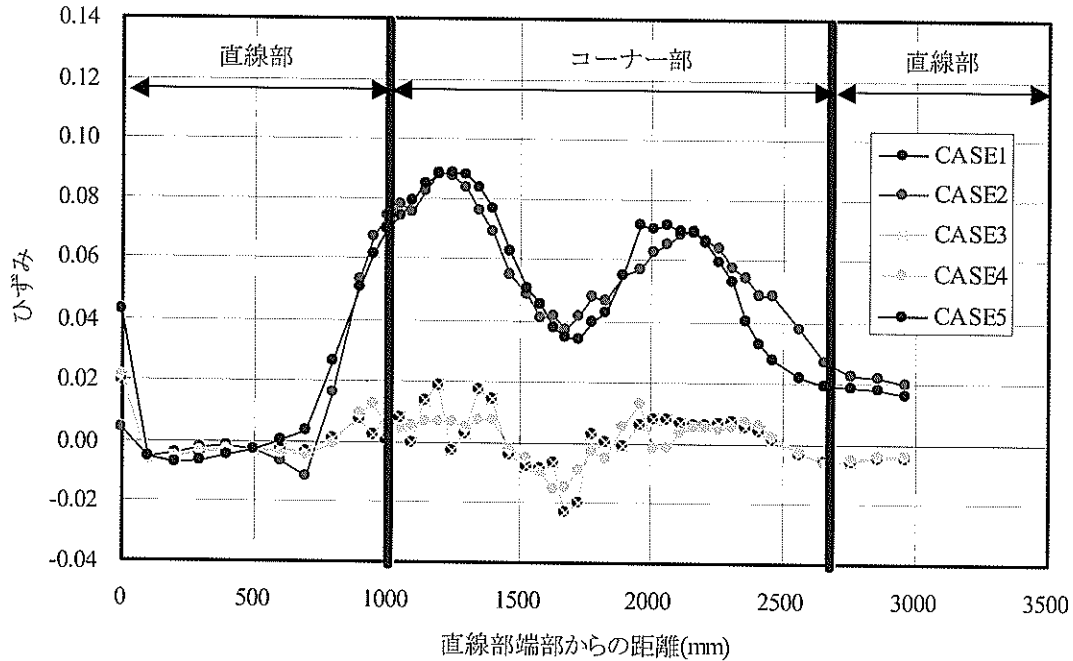


図-36 ひずみのパスプロット (高硬度ゴム端部)

みが大きくなったので、コーナー部の両側に直線部の一部を組み合わせた範囲を対象として要素分割を行った。要素分割図を図-33に示す。モデルの両端の境界条件は自由としたが、コーナー部の両側の直線部長さが解析結果に影響することが懸念された。そこで、直線部の長さを0.5mおよび1mとした解析を行い、この長さの違いがコーナー部のひずみ分布に及ぼす影響を調べた。その結果、いずれの場合のひずみ分布もほぼ同様となることがわかった。そこで、節点数・要素数を極力減らすため、コーナー部に取り付ける直線部の長さは0.5mとした。

## (2) 解析結果

### a) シェル要素を用いた解析結果

解析結果の1例として、水圧が300kPa、軸方向変位が300mmの場合に、せん断変位が0および150mmの場合のクラウンシールゴム全体の変形状況を図-34示す。これによれば、シェル要素を用いた解析を行うことで、継手変位を受けたクラウンシールゴムの変形挙動を三次元的に追跡できることがわかる。三次元模型実験時に実施した写真測量によるゴムの変形状況と比較した結果の一例を図-35に示す。ここで示したのは、最も変形が大きかったCASE5の直線部およびコーナー部におけるせん断方向変位の比較である。図中の横軸は、直線部あるいはコーナー部端部からのゴム試験体長手方向の距離であり、縦軸はクラウン部中央のせん断方向への変位量である。この

図によれば、クラウン部中央のせん断方向への変位量に対する解析値と実測値はよく一致していることがわかる。同様に、他の継手変位パターンにおいても、直線部およびコーナー部ともに解析値と実測値はよく一致していたことから、シェル要素を用いた三次元解析結果は、実際のゴムの変形挙動をよく表現できるものと考えられる。

図-36に、ひずみ分布の一例として、高硬度ゴム端部に発生したひずみを試験体長手方向にプロットした結果を示す。図中の横軸は、直線部端部からのゴム試験体長手方向の距離である。これによれば、内部ひずみは、せん断方向変位が加わった場合のコーナー部で極値をとることがわかる。前述のように、本解析結果から内部ひずみの絶対値に関する論議はできないが、参考までに各構成材料で発生した主ひずみの最大値を表-10に示す。

以上より、シェル要素を用いた三次元解析を行うことで、継手変位を受けるクラウンシール式継手構造の全体変形挙動を追跡することが可能であり、内部ひずみが相対的に大きくなる部位を特定できることがわかった。

### b) ソリッド要素を用いた解析結果

材料内部に大きなひずみが発生する継手変位 (CASE4およびCASE5) に対して、コーナー部をソリッド要素を用いてモデル化した三次元解析を実施した。その結果から、各構成材料で局所的に発生する主ひずみの最大値を抽出すると、表-10のようになった。これによれば、最大

主ひずみは二次元解析結果よりも大きくなっており、コーナー部で発生ひずみが大きくなることが裏付けられた。しかしながら、各構成材料ともに主ひずみの最大値は、許容ひずみ以下であった。このように、コーナー部における内部ひずみの照査は、シェル要素を用いた三次元解析により、ひずみが大きくなる範囲を特定し、その範囲をソリッド要素でモデル化した解析を行うことで可能であることが示された。

#### 5.4 数値解析結果のまとめ

クラウンシール式継手構造の数値解析手法を確立することを目的として、非線形有限要素解析を行った。解析モデルおよび材料定数を適切に設定して解析を行うことで、継手変位に対するクラウンシールゴムの追従状況を的確に追跡できた。また、各構成材料内部で局所的に発生するひずみを算定することも可能であり、この結果に基づいて、内部ひずみの照査を行うことができた。

ここで示した解析手法は、クラウンシール式継手構造を有する沈埋トンネルの設計・照査を行う上で有益なツールとなるだけでなく、4.の実証実験で取り扱わなかった継手変位パターンが生じた場合の追従性を評価することも可能となる。例えば、ねじれを受ける場合や変位量に偏りがある場合などである。また、今後本検討結果を踏まえてクラウンシールゴムの形状・寸法などを若干改良することになったときには、その適否を本解析で判断することも可能である。

## 6. 結論

大変形追従型の新しい沈埋トンネル用継手構造として、クラウンシール式継手構造を取り上げ、その継手変位への追従性およびゴムの変形挙動、ならびに止水性能について模型実験を行うことで明らかにした。その結果、トンネル軸方向に300mm、せん断方向に150mmの継手変位が生じた場合でも、クラウンシールゴムに異常な変形・ねじれを生じることなく、継手変位にスムーズに追従した。また、その際の止水性能も十分であった。さらに、ゴム締着部からの漏水に対するフェールセーフとしてのセルフシール機能の有効性についても確認することができた。したがって、沈埋トンネル用継手として、クラウンシール式継手構造を用いることに特段の支障はないことが示された。

また、継手部の設計・照査手法の確立に不可欠な数値解析手法についても検討を行った。ゴム材料の特性などのクラウンシール式継手構造の特徴を十分に考慮した非

線形有限要素解析を行うことで、継手変位への追従状況およびゴムの変形状況を精度良く表現できた。また解析結果から、各構成材料内部において発生する局所ひずみを抽出し、許容値と比較する内部ひずみ照査の手法を提案した。

## 7. おわりに

本検討により、クラウンシール式継手構造の継手変位への追従性およびゴムの変形挙動、ならびに止水性能が明らかとなり、その数値解析手法を確立した。実際に沈埋トンネル用継手に適用するためには、他にも以下のような検討課題が残されている。

- ・許容変位量の設定（軸方向、せん断方向）
- ・沈埋トンネル全体系の解析手法の確立
- ・継手部の詳細設計
- ・長期耐久性（応力緩和、クリープ、耐海水性）
- ・施工方法（ゴム材料の品質管理、現地での取付け）
- ・クラウンシールゴム構成材料の許容ひずみの設定

なお、クラウンシールゴム本体ならびにその構成材料の長期耐久性については、現在クリープ試験、応力緩和試験および海水浸漬試験を実施中であり、結果がまとまり次第報告する予定である。

(2002年5月30日受付)

## 謝辞

本研究のとりまとめにあたっては、大阪港夢洲トンネル構造専門部会（沿岸開発技術研究センター、委員長 清宮理 早稲田大学教授）における討議内容を参考にさせていただいた。また実証実験の遂行にあたり、五洋建設株式会社および住友ゴム工業株式会社の関係各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 清宮理・矢島貴（1997）：沈埋トンネル用ゴムガasketの諸特性，港湾技研資料，No.871。
- 清宮理・園田恵一郎・高橋正忠（2002）：沈埋トンネルの設計と施工，技報堂出版。
- 戸田和彦・花城盛三・清宮理・北澤壮介・村本哲二・岡田一郎（2000）：沈埋トンネル柔継手の構造による地震応答の相違，構造工学論文集，Vol.46A，pp.939-946。
- Ogden, R.W. (1984) : *Non-Linear Elastic Deformations*, Dover Publishing.

港湾空港技術研究所資料 No.1031

2002.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.0468(44)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 あんざい

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。