

大変形追従型沈埋トンネル用継手構造の性能評価

Performance evaluation of a super-flexible joint for submerged tunnels

岩波 光保*, 横田 弘**, 宮田 正史***

Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA, Masafumi MIYATA

* 工博 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

** 工博 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 (同 上)

*** 工修 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課長
(〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7-30)

A flexible joint, named the Crown-seal joint, was developed for use in a submerged tunnel to absorb large deformation. For investigating its safety under static loads, experiments were conducted using a full-scale model of tunnel section including the Crown-seal joint. From the experimental results, it was confirmed that displacements beyond the limits were not measured on the surface of rubber even if the specified joint displacement occurred. The water-tightness of the joint was verified through seepage tests. Furthermore, strains in joint materials were calculated by nonlinear FEM analysis, and the safety of the joint to the specified joint displacement was examined by comparing the calculated strains with the allowable values.

Key Words: submerged tunnel, flexible joint, joint displacement, water-tightness

キーワード: 沈埋トンネル, 可撓性継手, 継手変位, 止水性

1. はじめに

軟弱地盤上に沈埋トンネルを建設する場合, 周辺地盤の不同沈下により沈埋函に異常な断面力が発生しないように, 沈下に伴うトンネル躯体の変形を吸収するための可撓性継手を設置することが一般的である。これにより, 同時に沈埋函に発生する断面力を大幅に低減できるため, 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。現在までに, このような可撓性継手として, 「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプ¹⁾の継手 (図-1) やベローズ継手²⁾などが開発され, 実用化に至っている。

現在建設が進められているトンネルの中には, 周辺地盤が極めて軟弱であるため, 地盤沈下による著しい不同沈下が予測されているだけでなく, トンネル線形が曲線となっていることで, ねじれの発生が懸念されるものがある。このような場合, 従来型の可撓性継手では対応することが困難であり³⁾, 大変形に追従可能な継手構造を新たに開発しなければならない。そこで, このような要求性能を満たす新形式継手構造として, クラウンシール式継手が提案された^{4), 5), 6)}。

本稿では, 従来型の可撓性継手の適用範囲 (軸方向変位 $\pm 70\text{mm}$ 程度, せん断方向変位 $\pm 40\text{mm}$ 程度) を超えるような大変形にも追従可能な新形式継手構造として,

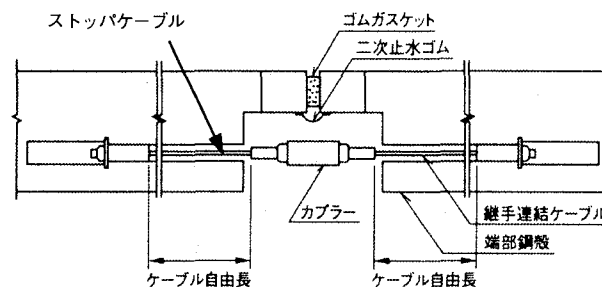


図-1 「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプの継手構造

クラウンシール式継手を取り上げ, 静的外力に対する安全性を確認するための実証実験, ならびに継手構成材料に発生するひずみを算出するための数値解析を行ったので, これらの結果について述べることにする。

2. クラウンシール式継手の概要

2.1 使用材料, 形状・寸法

クラウンシール式継手の概要を図-2に示す。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, 「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプの継手のように, 施工継手に可撓性を付与するのではなく,

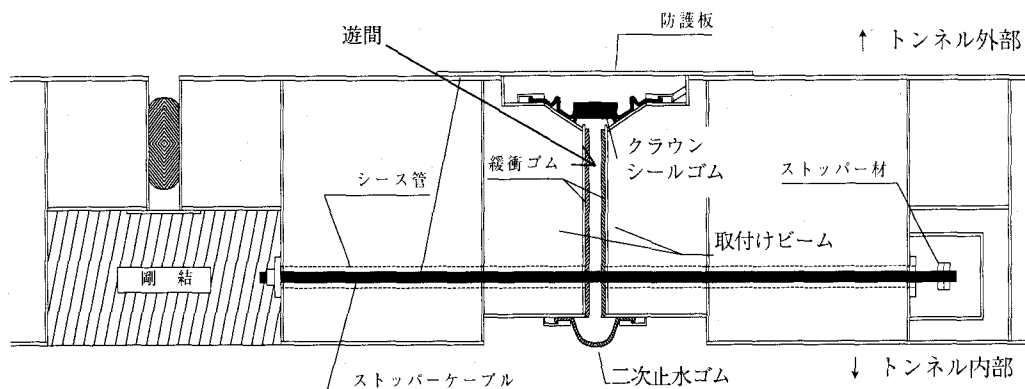


図-2 クラウンシール式継手の概要

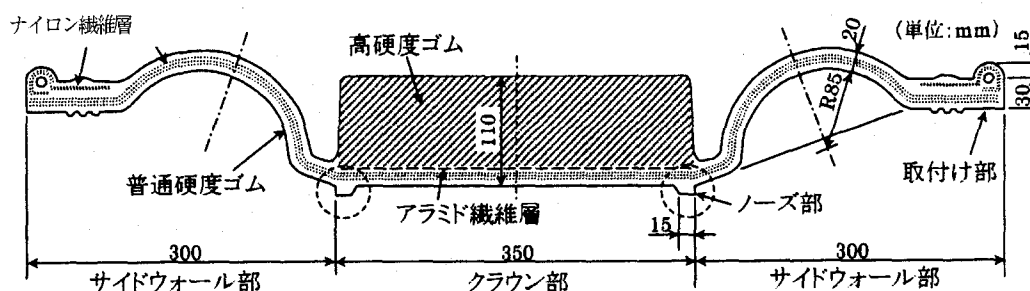


図-3 クラウンシールゴムの概要

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)	クラウンシールゴムの締着部およびノーズ部で止水を行う。継手の変形(軸方向およびせん断方向)については、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。
ストッパーケーブル	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限界値を上回った場合に、このビームを介して圧縮力が沈埋函に伝達される。
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進入を抑える。

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。硬度を大きくし、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従性を付与させる。
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を抑える。
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。

その構造を内蔵型継手とした。したがって、隣り合う沈埋函の間には、別途施工継手が必要となり、これは沈埋函接合時に剛結される。表-1に、クラウンシール式継手の構成要素とその機能を示す。

本継手は、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(一次止水ゴム)で止水性を確保するものである。本継手の継手変位追従性や止水性は、クラウンシールゴムの特性に大きく影響される。クラウンシールゴムの概要を図-3に示す。

大きな継手変位への追従性を高めるため、本継手の主要構成材料として、変形追従性に富むゴム材料を用い

た。これにより、継手部の止水性を確保しながら、従来型の継手構造よりも大きな継手変位に対応することが可能となった。しかしながら、沈埋トンネルには大きな外水圧が作用しているため、ゴムが遊間に落ち込んでしまう恐れがある。この場合、ゴムに過大なひずみが発生するだけでなく、クリープ破壊の危険性も否定できない。そこで、遊間部分のゴム厚さを他の部分よりも大きくし、剛性を高めることで、ゴムの遊間への落ち込みを防止した。

厚さを大きくした遊間部分の両側のゴム長さに余裕を持たせることで、沈埋函に生じる軸方向の変形に追従させることとした。このように、厚さを大きくした遊間部分のゴムとその両側のゴムでは、求められている機能が

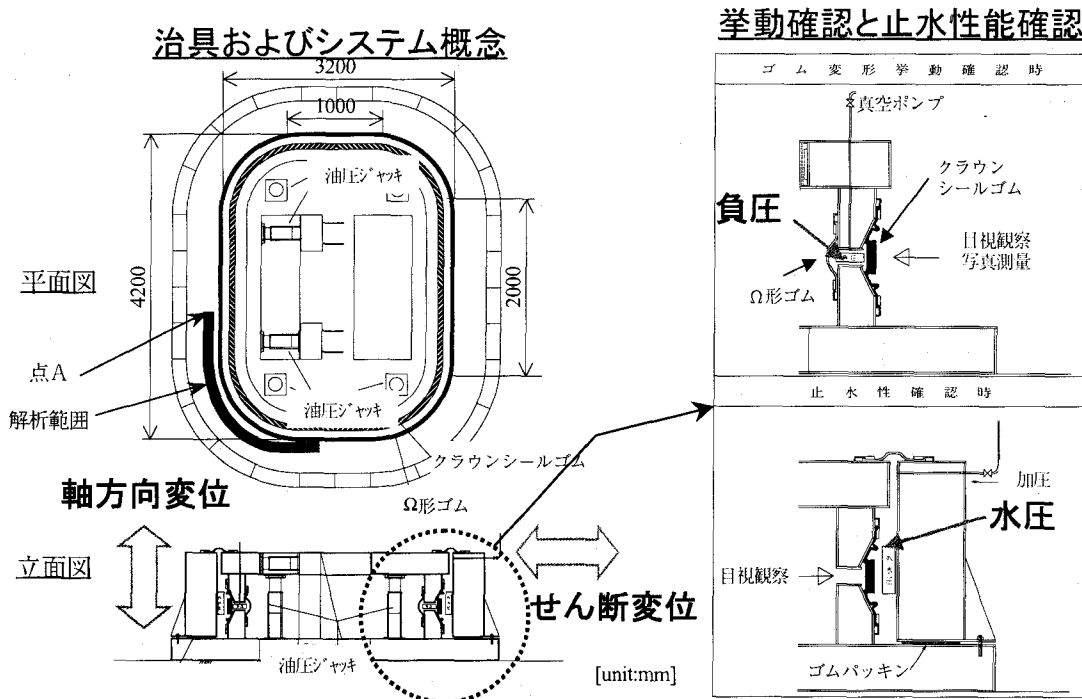


図-4 三次元実験装置の概要

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、厚さを大きくした遊間部分は、外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70度とし、一般的な止水用ゴムより硬くした。また、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、一般的な止水ゴムと同程度のゴム硬度（50度）とした。さらに、ゴムの補強材として、アラミド繊維とナイロン繊維をクラウンシールゴム内部に配置した。クラウンシールゴムを構成する各材料の特徴を表-2に示す。

次に、沈埋トンネルの軸直角方向の変位（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、沈埋函端部の鋼殻角がゴムと接触し、ゴムに損傷が生じる恐れがある。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し、止水上の弱点ともなりうる。そこで、図-2に示すように、鋼殻角とゴムが接触する部分には傾斜を設けた。これにより、継手のせん断方向変位が生じたとしても、ゴムは鋼殻傾斜部を滑るように追従し、損傷が生じることはなくなった。さらに、図-3に示すように、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配慮した。

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が生じた場合に、圧縮されて鋼殻と密着する。この結果、ゴム締着部に漏水が発生したとしても、圧着されたノーズ部で止水性が確保される。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。

2.2 クラウンシール式継手の特徴

これまでの予備検討⁹⁾により、クラウンシール式継手が継手変位を受けた場合、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ことがわかっている。また、図-2に示すストッパケーブルや沈埋函に設置されるせん断キーは、限界値以上の変形が生じて初めて、その機能が発揮されるため、限界変形量以内であれば、沈埋函に断面力がほとんど発生しない。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して対応することも確認されている。

しかしながら、本継手にはいまだ採用実績がなく、継手部の三次元的な変形挙動や止水性能には不明確な点も残されている。そこで、本継手の三次元モデルによる実証試験を行うことで、継手部に所定の継手変位が生じた場合の①クラウンシールゴムの追従性および②止水性能を検証することとした。また、クラウンシールゴム内部に発生するひずみを算定するため、非線形有限要素法による数値解析を実施した。

3. 沈埋トンネルへの適用のための実証実験

水圧作用下において継手変位が発生した際に、クラウンシール式継手がどのように追従し、またゴムがどのように変形するかは、継手の直線部をモデル化した二次元模型実験により概ね確認されている⁹⁾。これによれば、

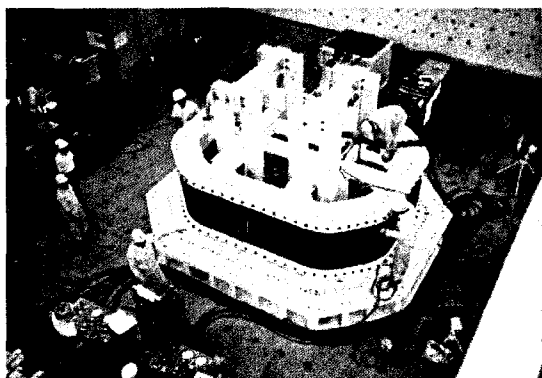


写真-1 変形挙動確認実験の状況

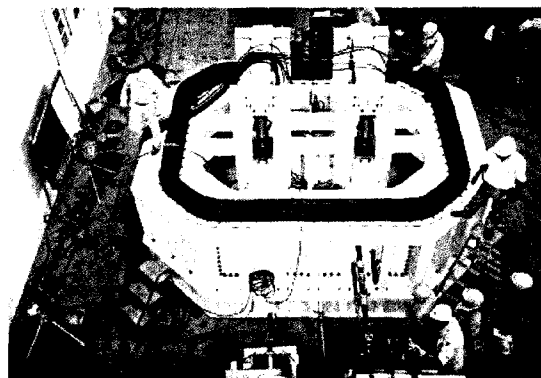


写真-2 止水性能確認実験の状況

継手部にトンネル軸方向の変形やそれに直交する方向の変形が生じて、クラウンシールゴムに局所的な異常変形が生じることなく継手全体が柔軟に追従する。しかしながら、構造上の弱点と考えられる継手コーナー部における追従性や変形挙動については明らかとなっていない。さらに、沈埋トンネル用継手構造として最も重要な機能の1つである止水性については一切確認されていない。そこで、コーナー部を含む継手構造全体の継手変位に対する追従性や変形挙動、ならびに止水性を調べるため、本継手をモデル化した円環状の三次元模型を製作し、実証実験を行った。

3.1 実験概要

(1) 試験装置

円環状に成形したクラウンシールゴム試験体に対して、軸方向変位およびせん断方向変位を同時に負荷できる試験装置を製作した。試験装置の概要を図-4に示す。試験装置内部に据え付けた油圧ジャッキを操作することで、軸方向に0～300mm、せん断方向に0～150mmの継手変位を独立にクラウンシールゴム試験体に与えることができる。試験時の状況を写真-1および写真-2に示す。

(2) クラウンシールゴム試験体

ゴムの断面寸法は実際の継手に用いられるものと同一とし、長さ方向のうち、コーナー部分は実際のものと同一の曲率とし、直線部分はコーナー部分の影響範囲を考慮して可能な限り短くした。これは、コーナー部分が止水上の弱点となる可能性が高いと考えたためである。

(3) 変形挙動確認実験

沈埋函内部に設置したΩ形ゴムとクラウンシールゴムの間を真空に近い状態として、ゴム試験体に対して負圧を作用させた。これにより、水圧作用時におけるゴムの変形状況を再現して、試験装置周囲から直接観察できるようにした。この際、真空ポンプの性能および実験装置の構造上の制約から、完全な負圧状態(100kPa)を再現することができなかったため、負圧を安定的に保持できる最大の圧力(95kPa)を作用させた。

また、ゴムの変形状況を目視にて確認するだけでなく、ゴム試験体表面を写真測量することで、ゴムの変形挙動を三次元的に追跡した。写真測量箇所は、直線部分～コ

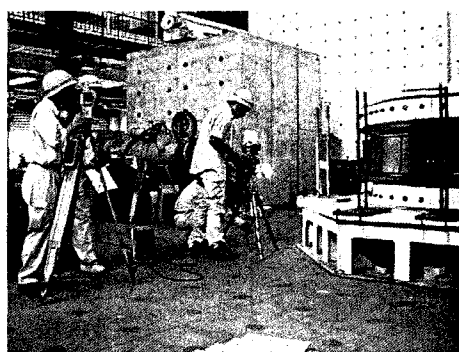


写真-3 写真測量の状況

ーナー部分の長さ約3mの範囲とし、ゴム表面の測量対象点(50mmメッシュの格子点を2台のカメラでステレオ撮影した。2台のカメラの間の距離は400mmとした。本測量の精度は、平面方向に±1mm、奥行き方向に±2mmである。写真測量の状況を写真-3に示す。

これらにより、ゴム試験体が継手変位(軸方向:0～300mm、せん断方向:0～150mm)を受けた場合のゴムの変形量や表面ひずみ量を計測し、ゴムの異常変形の有無を確認した。

(4) 止水性能確認実験

ゴム試験体とその外周に設置した鋼壁の間に水を注入し、加圧することで、ゴム試験体に対して水圧を作用させた。この際、作用させた水圧の最大値は、300kPaとした。これは、沈埋トンネル下床版が水深約30mにある場合に作用する最大下の水圧に相当する。このように、所定の水圧を作用させた状態で、ゴム試験体に継手変位を与えて、ゴム締着部からの漏水の有無を確認した。

さらに試験時には、本来の一次止水点であるクラウンシールゴム締着部における止水性だけでなく、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について確認を行った。セルフシール機能による止水性の確認は、サイドウォール内部にも水を充填した状態で水圧を上昇させ、漏水の有無を調べることで行った。

3.2 実験結果

(1) 変形挙動確認実験

継手変位の増加に伴うクラウンシールゴムの変形状況

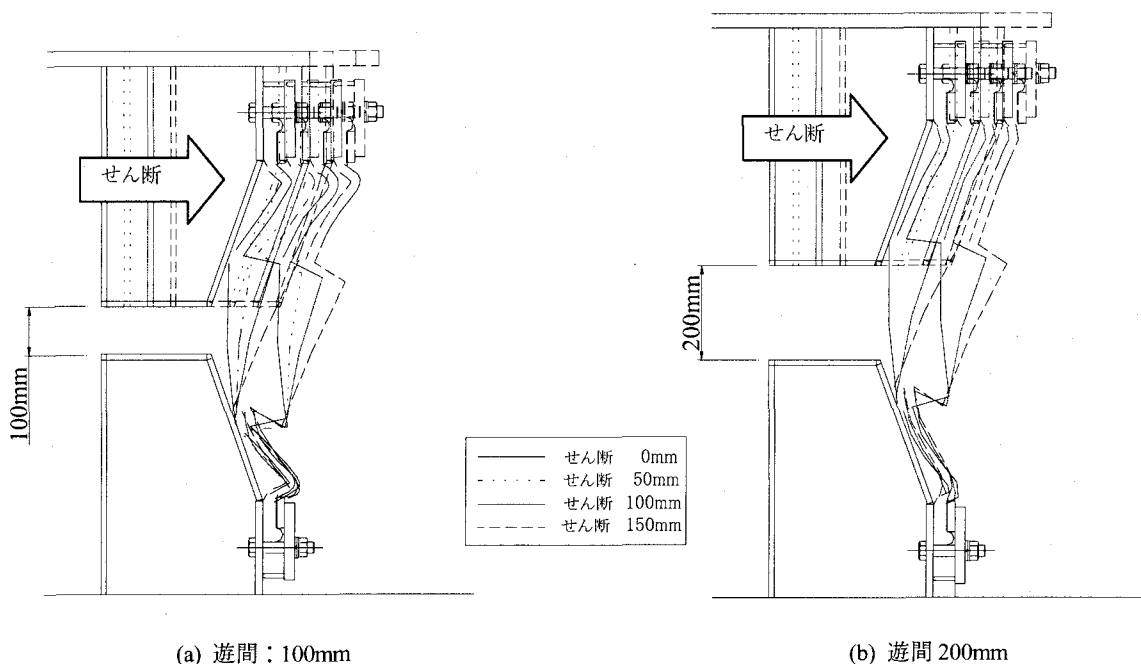


図-5 クラウンシールゴムの変形状況

を目視にて確認した結果、ゴムに異常な局所変形やねじれは生じていなかった。また継手全体の挙動をみても、尺取り虫現象や蛇行現象が発生することなく、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-5に、直線部分におけるゴムの変形状況の計測結果を示す。この図は、せん断方向変位を与えずに、遊間を100mmまたは200mmとした状態から、せん断方向変位を150mmまで増加させた場合のクラウンシールゴムの変形状況を示したものである。これによれば、軸方向変位やせん断方向変位が生じて、クラウン部がいずれかの鋼殻側に片寄ることなく、常に中立位置を保ちながら、継手変位に追従したことがわかる。

(2) 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認められなかった。また別途実施した直線部のみの二次元模型に対する止水試験の結果では、水圧が400kPaでも漏水は検出されなかった。これより、本継手は高い止水性能を有していることが確認され、水深30m相当の水圧下においても漏水は発生しないことが確認できた。

一方、ゴム締着部で万が一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図-6に示す。この図は、各水圧条件ごとに、一定の軸方向変位を与えた状態で、せん断方向変位を増加させていき、漏水が最初に検出されたせん断変位を連ねたものである。軸方向変位が250mm以下、せん断方向変位が100mm以下の範囲であれば、セルフシール機能が十分に機能することがわかった。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

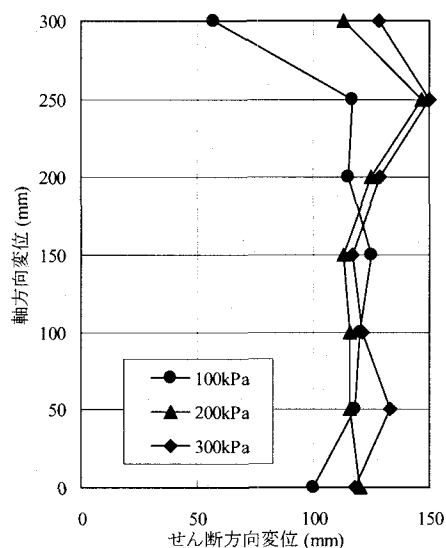
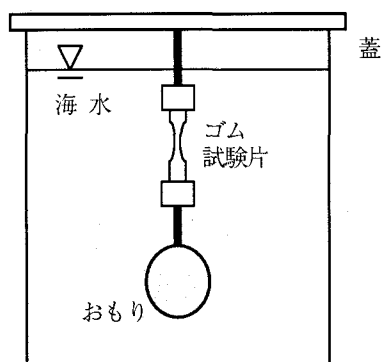


図-6 セルフシール機能の有効範囲

る部分がある。これは、水圧が小さい場合、水圧によるノーズ部の圧着力が小さくなるため、比較的小さいせん断方向変位で漏水するためと考えられる。

4. 非線形有限要素法による数値解析

クラウンシール式継手を沈埋トンネル用継手構造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り、そのためには数値解析手法の確立が不可欠である。数値解析手法を確立しておけば、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変形挙動やクラウンシールゴムの改良結果の照査にも



※ おもりの質量を変化させる。

図-7 クリープ破断実験の概要

応用することができる。

本研究では、継手変位と水圧の両方を同時に受けるクラウンシール式継手に対する非線形有限要素解析を行った。得られた解析結果を3.の模型実験結果と比較することで、本解析の妥当性を検証した。また、模型実証実験ではデータを得ることができないクラウンシールゴム内部で発生するひずみを算出し、各構成材料に対して設定した許容ひずみと比較することで、クラウンシール式継手の継手変位に対する安全性を検討した。

4.1 ゴム許容ひずみの妥当性の検討

数値解析によりクラウンシールゴム内部に発生するひずみを算出し、許容ひずみと比較する際に、許容ひずみをどのように設定するかが重要である。本研究では、各材料の特性値である破断ひずみを、適切な安全率で除して得られる値を許容ひずみとした。ゴム材料に対する安全率には、ジナ型ゴムガスケットの場合の解析結果¹⁾を参考に2.2を、繊維層に対しては、ゴム材料を使用した製品の設計において一般的に用いられている安全率2.5を用いた。すなわち、普通硬度ゴムおよび高硬度ゴムでは200%および180%、アラミド繊維およびナイロン繊維では2%および18%とした。

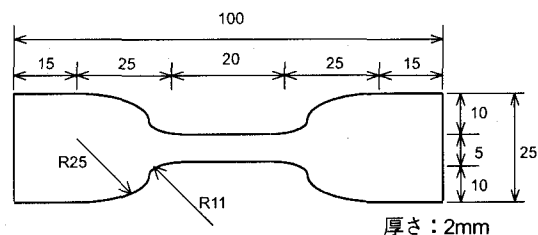


図-8 ゴム試験片 (3号形ダンベル)

しかしながら、ゴム材料に生じるひずみは時間依存性が強いいため、長期間にわたって水圧や継手変位が継続して作用した場合、ひずみが大きく変化する。そこで、海水中においてゴム試験片のクリープ破断実験を行い、クリープ変形を長期間受けた場合における許容ひずみの妥当性を検討した。なお、繊維層については、ゴム材料よりもひずみの時間依存性が顕著でないため、ここでは検討を行わなかった。

表-3 クリープ破断試験の実験ケース

項目	ケース
ゴム硬度	50度 (普通硬度ゴム) 70度 (高硬度ゴム)
荷重レベル	静的引張強さに対して、 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%
試験片数	各ケース 2 個

(1) 実験概要

図-7に示すように、海水中に所定の質量のおもりを吊り下げたゴム試験片を設置し、これがクリープ現象により破断するまでの時間を計測した。実験ケースを表-3に示す。

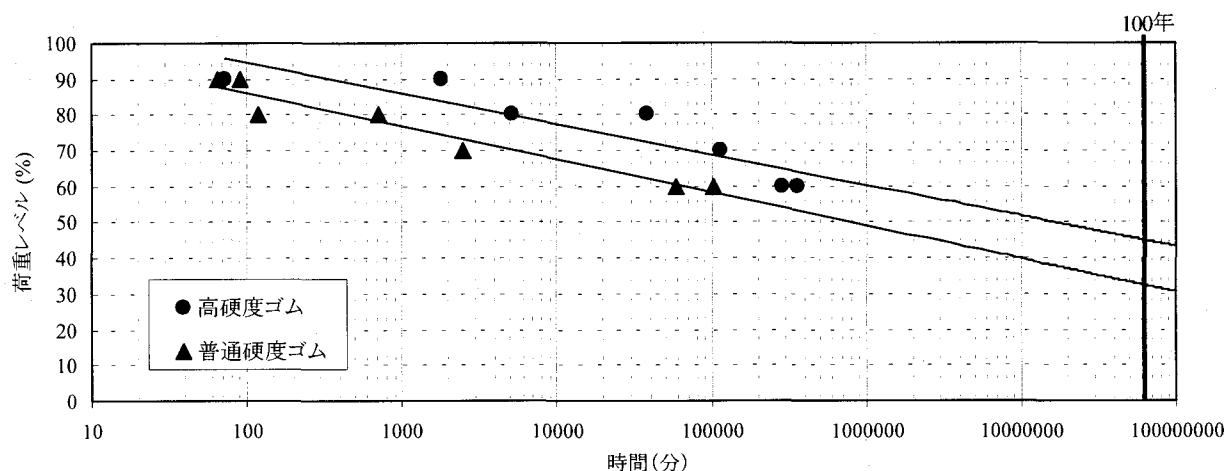


図-9 破断時間と荷重レベルの関係

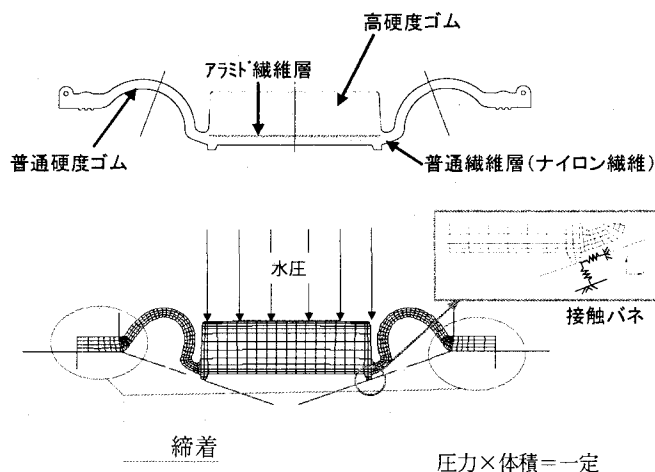


図-10 解析モデルの概要

ゴム試験片には、図-8に示すような、JIS K 6251に規定された3号形ダンベルを用いた。試験片端部の締着は、2枚のステンレス板で試験片を挟み込んで、ゴムを十分に締め付けることで行った。なお、初期状態におけるゴム試験片の静的引張強さは、普通硬度ゴムが256N（公称応力換算で25.6N/mm²）、高硬度ゴムが255N（同25.5N/mm²）であった。この静的引張強さに対して、40%、50%、60%、70%、80%および90%の質量を有するおもりを試験体に吊り下げた。なお、おもりの質量は、おもりに作用する浮力を考慮して決定した。また、水槽には蓋を設けることで、ゴム試験片が紫外線により劣化することを極力避けた。水槽内の海水は適宜交換し、常に清浄な海水に曝されるよう配慮した。

(2) 実験結果と考察

図-9に、普通硬度ゴムおよび高硬度ゴムに対して、ゴム試験片の破断までの時間と負荷荷重レベルの関係を示す。いずれのゴム種類とも、荷重レベルと破断時間の対数の間には明確な線形関係が認められる。このような関係はゴム材料一般で認められるものであり²⁾、実験結果から100年後におけるクリープ特性を直線で外挿することで推定した。その結果、100年後におけるクリープ破断限界荷重レベルは、普通硬度ゴムで33%、高硬度ゴムで45%となった。普通硬度ゴムおよび高硬度ゴムのクリープ引張試験前の初期状態における引張特性から、これらの荷重レベルに相当するひずみを求めると、普通硬度ゴムで320%、高硬度ゴムで180%となった。

このことから、ゴム材料のひずみの時間依存性を考慮してクラウンシール式継手の設計する場合、想定される継手変位が生じたとしても、普通硬度ゴムでは破断強さの33%、高硬度ゴムでは同じく45%以上の引張応力、すなわち、普通硬度ゴムでは320%、高硬度ゴムで180%の引張ひずみが発生しないようにしなければならない。これらのひずみは、本研究で設定した許容ひずみと等しいか、それを上回るものであり、ひずみの時間依存性の観点からは、設定された許容値は妥当なものであったといえる。

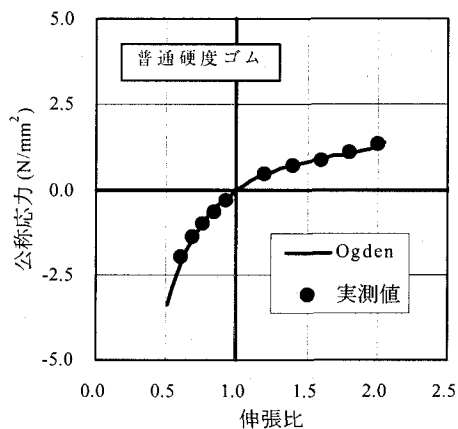
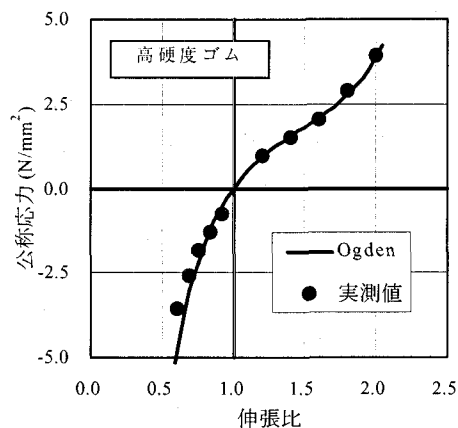


図-11 Ogden モデルによるゴムの構成則

4.2 解析条件の設定

(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、材料の非線形性がきわめて強いこと、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-10に示す。ゴム部は、非線形応力-ひずみ関係を表現するのに適したOgdenモデル⁷⁾を用いた平面ひずみ要素でモデル化した。また繊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、ノーズ部が鋼に接触しながら移動できるようにした。ゴムと鋼の摩擦係数は0~0.4の間にあり、接触圧によって摩擦係数が変化する。そこで本解析では、摩擦係数が0と0.4のケースを取り上げた。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。

高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムの材料試験結果に対して、Ogdenモデルを適用して得られた構成則を図-11に示す。図中の伸張比は、変形後の試験片長さを変形前の試験片長さで除したものである。アラミド繊維およびナイロン繊維のヤング率は、材料試験結果から、それぞれ

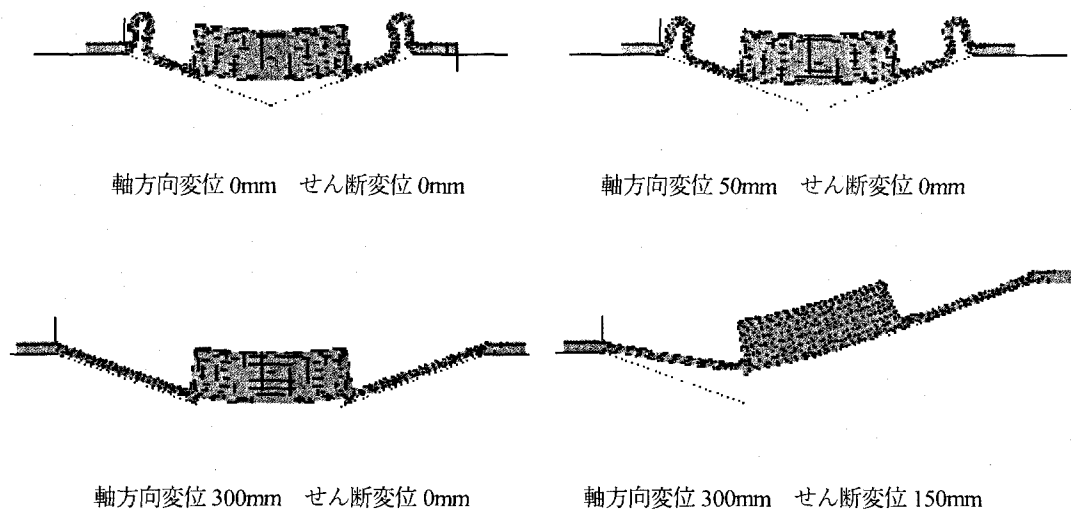


図-13 クラウンシールゴムの变形状況（二次元解析）

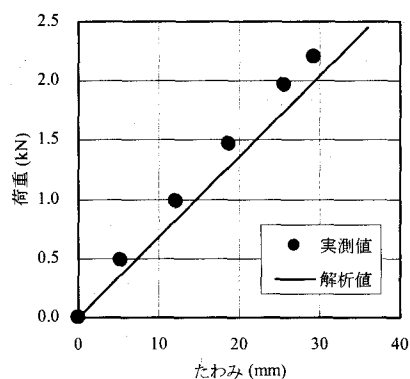


図-12 実測値と解析値の比較

$3.01 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ および $6.54 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ に設定した。

(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）の曲げ試験を行い、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。その結果を図-12に示す。これによれば、解析値が実測値よりも若干大きい、その差は10%程度と小さく、解析モデルおよび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および材料定数を用いることとした。

4.3 直線部の解析

(1) 解析の概要

4.2で設定した解析モデルおよび材料定数を用いて、クラウンシールゴムの長手方向を無視した二次元解析により、直線部のクラウンシールゴムの継手変位への追従状況を追跡した。本解析で対象とした継手変位のパターンを表-4に示す。作用水圧は、100kPaおよび300kPaとした。100kPaのケースは、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。

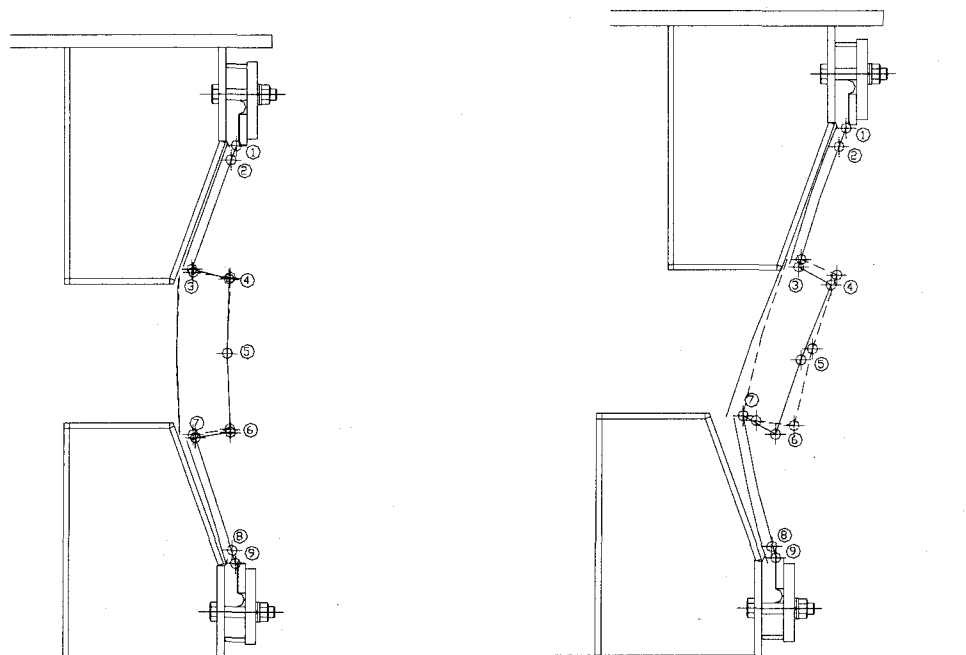
表-4 二次元解析のケース

ケース名	継手変位のパターン (mm)				
	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
軸方向変位	0	0	50	300	300
せん断変位	0	150	0	0	150

(2) 解析結果

図-13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示す。また、三次元模型実験において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-14に示す。図中の実線は実測値を、点線は解析値を示す。CASE 5におけるクラウン部の変形が、実測値と解析値で若干異なっているが、その差は10mm程度であり、継手変位を受けたクラウンシールゴムの変形状況を概ね再現できた。紙面の都合上示していないが、他のCASEにおいても同程度の精度の解析結果が得られており、本解析によりクラウンシールゴムの継手変位に対する追従挙動を数値的に評価できることがわかった。なお、ゴムと鋼の摩擦係数による解析結果の違いは、ノーズ部が鋼殻と接している箇所の変形状況を除いてほとんどなかった。

続いて、各解析ケースに対して、それぞれの構成材料で発生した主ひずみの最大値を抽出した。その結果を表-5に示す。同表によれば、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



(a) CASE 1 (軸方向：300mm，せん断：0mm) (b) CASE 5 (軸方向：300mm，せん断：150mm)

図-14 二次元解析結果と模型実験結果の比較

表-5 構成材料別の最大主ひずみ

ケース	変位パターン	材 料	主ひずみ (%)			
			直線部	コーナー部	破断ひずみ	許容ひずみ
CASE1	軸方向=0mm せん断方向=0mm	高硬度ゴム	22.0	—	390	180
		アラミド	0.1	—	5	2
		ナイロン	0.1	—	35	18
		普通硬度ゴム	43.0	—	450	200
CASE2	軸方向=0mm せん断方向=150mm	高硬度ゴム	22.0	—	390	180
		アラミド	0.5	—	5	2
		ナイロン	0.0	—	35	18
		普通硬度ゴム	70.0	—	450	200
CASE3	軸方向=50mm せん断方向=0mm	高硬度ゴム	22.0	—	390	180
		アラミド	0.1	—	5	2
		ナイロン	0.9	—	35	18
		普通硬度ゴム	30.0	—	450	200
CASE4	軸方向=300mm せん断方向=0mm	高硬度ゴム	29.0	99.0	390	180
		アラミド	0.5	0.5	5	2
		ナイロン	6.1	8.5	35	18
		普通硬度ゴム	54.0	120.0	450	200
CASE5	軸方向=300mm せん断方向=150mm	高硬度ゴム	26.0	113.0	390	180
		アラミド	0.2	0.6	5	2
		ナイロン	7.1	9.8	35	18
		普通硬度ゴム	120.0	186.0	450	200

場合のクラウンシールゴムの破断に対する安全性照査を行うことができる。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、コーナー部の検討を行うことはできないが、直線部を対象としたひずみ照査には本解析が有効であるといえる。

4.4 コーナー部の解析

(1) 解析の概要

クラウンシールゴムにせん断変位が生じた場合、コー

ナー部に大きな変形が生じることが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。4.3の二次元解析ではコーナー部の影響を考慮することはできなかったため、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う必要がある。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、安定的な解析が困難となる。そこで、コーナー部のみを対象とし

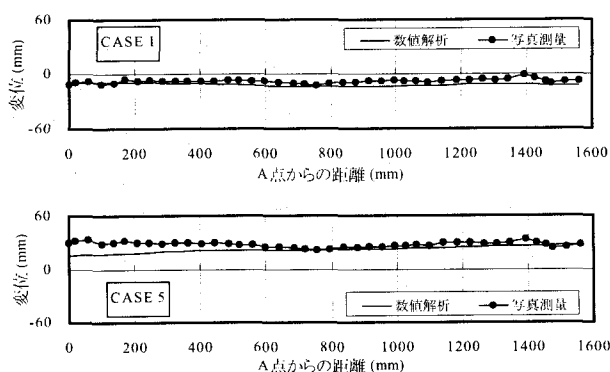


図-15 三次元解析結果と写真測量結果の比較

てモデル化を行った三次元解析を行った。解析のケースは、二次元解析の結果、継手構成材料に大きなひずみが発生したCASE4およびCASE5とした。

解析条件は、4.3の二次元解析と同一とした。なお、ゴムと鋼の摩擦係数は、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、0.4に設定した。解析モデル両端における境界条件は自由としたが、コーナー部の両側に配置される直線部の長さが解析結果に影響することが懸念された。そこで、直線部長さを0.5mおよび1mとした解析を行い、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

図-15に、コーナー部におけるクラウン部中央位置のトンネル外部への変位について、解析結果を写真測量の結果と比較したものを示す。解析対象範囲は、図-4に示したとおりであり、ここでは、CASE 1とCASE 5の場合を代表例として示す。これによれば、CASE 1およびCASE 5ともに、両者はよく一致しており、三次元解析の妥当性が示された。

また、各構成材料で発生した主ひずみの最大値を抽出した結果を表-5にあわせて示す。これによれば、コーナー部に生じる最大主ひずみは、直線部よりも大きくなっており、コーナー部でひずみが大きくなることが裏付けられた。しかしながら、各構成材料ともに発生ひずみの最大値は、許容ひずみ以下であった。以上より、コーナー部においてクラウンシールゴム内部に発生するひずみは、コーナー部近傍を三次元でモデル化して、4.3の二次元解析と同様の解析を行うことで照査可能であることが示された。

5. 結論

沈埋トンネル用の大変形追従型の新しい継手構造として、クラウンシール式継手を取り上げ、三次元模型を用いた実証実験を行うことで、静的外力に対する安全性を検討した。また、非線形有限要素法に基づく数値解析を

行った。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) トンネル軸方向 (0~300mm) またはせん断方向 (0~150mm) に継手変位が生じて、クラウンシールゴムに異常な変形や局所的なねじれは発生せず、継手変位にスムーズに追従した。
- (2) (1)と同じ継手変位下において、300kPaの水圧が作用しても、ゴム締着部からの漏水はなく、十分な止水性能が確認できた。
- (3) 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は、軸方向変位が250mmまで、せん断方向変位が100mmまでの範囲で有効であった。
- (4) ゴム材料の非線形性およびクラウンシール式継手の特徴を適切にモデル化した非線形有限要素解析を行った結果、模型実証実験でみられたクラウンシールゴムの変形挙動を数値的に追跡できた。
- (5) 数値解析により、実証実験では得られなかったクラウンシールゴム内部に発生するひずみを算定し、各構成材料ごとに設定した許容ひずみと比較した。その結果、各構成材料ごとの発生ひずみの最大値は許容ひずみを下回っており、継手部材の安全性を確認できた。
- (6) ゴム材料のクリープ破断実験を行い、100年後におけるクリープ破断限界ひずみを推定した。これによれば、(5)で用いた許容値の妥当性をひずみの時間依存性の観点から確認できた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、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

- 1) 清宮理, 矢島貴: 沈埋トンネル用ゴムガスケットの諸特性, 港湾技研資料, No.871, 1997.
- 2) 清宮理, 園田恵一郎, 高橋正忠: 沈埋トンネルの設計と施工, 技報堂出版, pp.86-88, 2002.
- 3) 戸田和彦, 花城盛三, 清宮理, 北澤壮介, 村本哲二, 岡田一郎: 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, 2000.
- 4) 横田弘, 岩波光保, 北山斉: 大変形に追従可能な新形式沈埋トンネル用継手構造の開発, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.587-592, 2002.
- 5) 横田弘, 岩波光保, 北山斉, 嶋倉康夫: 大変形追従型沈埋トンネル用新継手構造の開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1031, 2002.
- 6) 清宮理, 羽田宏, 下石誠, 林信治, 桐沢芳広: 沈埋トンネルの大変形追従型可撓性継手の提案, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1193-1198, 2003.
- 7) R. W. Ogden: Non-Linear Elastic Deformation, Dover Publishing, 1984.

(2003年9月12日受付)