

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1137

September 2006

沈埋トンネル継手に用いられるゴム材料の長期耐久性

岩波 光保

横田 弘

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. 既往の調査研究	4
2.1 剛接合継手	4
2.2 柔接合継手（ゴムガスケット+ストップケーブル方式）	4
2.3 ベローズ式継手	5
2.4 クラウンシール式継手	6
3. ゴム材料のクリープ特性に関する検討	7
3.1 はじめに	7
3.2 ゴム材料のクリープ破断強さ	7
3.3 ゴム部材のクリープ変形	9
3.4 ゴム材料のクリープ促進実験	11
3.5 ゴム材料のクリープを考慮した有限要素解析	16
4. ゴム材料の応力緩和特性に関する検討	20
4.1 はじめに	20
4.2 ゴム材料の応力緩和による物性変化	21
4.3 ゴム締着部における応力緩和現象	23
5. ゴム材料の耐海水性に関する検討	27
5.1 はじめに	27
5.2 海水中にあるゴム材料の長期耐久性評価に関する事例収集	27
5.3 ゴム材料の長期耐久性評価実験	28
6. まとめ	28
7. あとがき	29
謝辞	29
参考文献	29
付録	31

Long-term Durability of Rubber for Joints of Submerged Tunnels

Mitsuyasu IWANAMI*
Hiroshi YOKOTA**

Synopsis

The design service life of submerged tunnel, which is one of the important facilities in port area, is rather long, 50 to 100 years. As for long-term durability of concrete and steel, composing main structures of submerged tunnel, essential knowledge has been obtained in terms of deterioration mechanism and countermeasure for life extension, based on results of the previous intensive studies. However, long-term behavior of rubber, which is common as a main constituent of joints of submerged tunnel, is not fully made clear, because rubber is generally used as consumable products with rather short service life. Besides, rubber used in the joints suffers large deformation and high stresses, causing severe conditions to the material. For ensuring safety of submerged tunnels throughout long service life, it is required to make clear long-term durability of rubber under marine environments.

This paper describes results of experiments on investigating time-dependent deformation characteristics of rubber as a constituent of joints of submerged tunnel. Based on the results of creep and relaxation tests on rubber specimens, structural safety of the joints is examined. Furthermore, long-term behavior of rubber exposed to seawater is investigated.

Key Words: submerged tunnel, joint, rubber, durability, creep, relaxation, resistance against seawater exposure

* Senior Researcher of Geotechnical and Structural Engineering Department
** Executive Researcher, Director General of LCM Research Center for Coastal Infrastructures
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-(0)46-844-5059 Fax : +81-(0)46-844-0255 E-mail : iwanami@pari.go.jp

沈埋トンネル継手に用いられるゴム材料の長期耐久性

岩波 光保*
横田 弘**

要 旨

港湾における重要施設である沈埋トンネルの設計供用期間は、50～100年ときわめて長い。沈埋トンネル本体の構成材料であるコンクリートや鋼材の海水中における長期耐久性については、これまで精力的に研究が進められ、そのメカニズムや対策に関する基礎的かつ有用な知見が蓄積されつつある。しかしながら、沈埋トンネル継手の構成材料として一般に用いられるゴム材料については、海水中における長期耐久性に未解明な部分が多く残されている。特に、沈埋トンネル継手のように、大変形あるいは高応力下で使用された場合の長期挙動についてはほとんど明らかにされていない。沈埋トンネルの長期供用中における安全性を確実に保証するためには、継手に用いられるゴム材料の長期耐久性を明らかにしておく必要がある。

そこで本検討では、沈埋トンネルの長期供用中における安全性に関する基礎資料を得るために、沈埋トンネル継手の大部分を構成するゴム材料に生じるひずみの時間依存性(クリープ特性および応力緩和特性)について実験を行い、長期供用中の沈埋トンネル継手の安全性について検討を行った。また、海水中におけるゴム材料の長期耐久性についても検討を行った。

キーワード：沈埋トンネル，継手，ゴム，耐久性，クリープ，応力緩和，耐海水性

* 地盤・構造部 主任研究官（構造性能評価担当）

** 研究主監，LCM研究センター長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 E-mail：iwanami@pari.go.jp

1. まえがき

沈埋トンネルは、水底トンネル工法の1つであり、あらかじめ水底に掘削したトレンチに、陸上または水上で製作した沈埋函を沈設し、水圧などを利用して接合した後、トレンチ部の埋戻しを行ってトンネルを完成させるものである。港湾区域で沈埋トンネルを採用すると、

- ・アプローチ部が短い。
- ・土被りが小さい。
- ・工期が短く航路制限が少ない。
- ・浮力を利用して沈埋函を曳航できる。

など、多くのメリットがある。沈埋トンネルは、これまでに世界で100本以上が建設され、我が国でも約30本が建設されている。このように、沈埋トンネルは、港湾における流通の大動脈として大きな役割を果たしている¹⁾。

港湾における重要施設である沈埋トンネルの設計供用期間は、50～100年ときわめて長い。沈埋トンネル本体の構成材料であるコンクリートや鋼材の海水中における長期耐久性については、各方面で精力的に研究が進められ、そのメカニズムや対策に関する基礎的かつ有用な知見が蓄積されつつある。しかしながら、沈埋トンネル継手に一般に用いられるゴム材料の場合、その海水中における長期耐久性については未解明な部分が多く残されている。特に、沈埋トンネル継手のように、大変形あるいは高応力下で使用された場合のゴム材料の長期挙動についてはほとんど検討されていない。これは、ゴム材料がタイヤやスポーツ用品のように比較的耐用年数の短い消耗品に利用されることが多いためである。したがって、沈埋トンネルの長期供用中における安全性を保証するためには、継手に用いられるゴム材料の長期耐久性を明らかにしておく必要がある。

そこで本検討では、沈埋トンネルの長期供用中における安全性に関する基礎資料を得るために、沈埋トンネル継手の大部分を構成するゴム材料に生じるひずみの時間依存性（クリープ特性および応力緩和特性）に関する実験を行い、長期供用中の沈埋トンネル継手の安全性について検討を行った。また、海水中におけるゴム材料の長期耐久性についても検討を行った。

2. 既往の調査研究

沈埋トンネル継手には多くの種類があり、様々な形式の継手が提案され、実用化されている¹⁾。ここでは、実用化されている継手の形式ごとに、その長期耐久性に関する既往の調査研究の結果をとりまとめる。

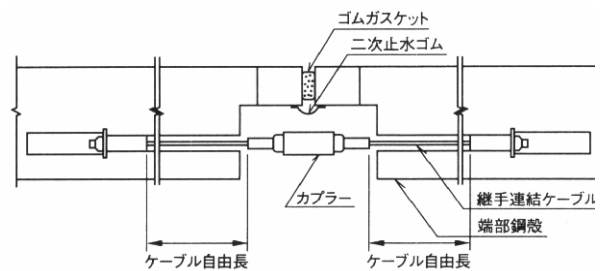


図-1 柔接合継手

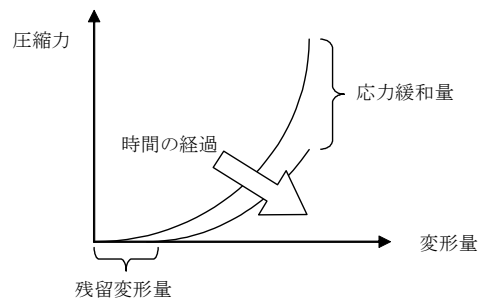


図-2 ゴムガスケットの圧縮特性

2.1 剛接合継手

水圧接合方式などにより接合された2つの沈埋函の間に、コンクリートなどを充填し、2つの沈埋函を完全に剛結する方式である。この方式によれば、継手箇所は、鋼材あるいはコンクリート（またはモルタル）で構築されるため、長期供用中における耐久性は、沈埋函本体と同程度であると考えてよい。

2.2 柔接合継手(ゴムガスケット+ストップケーブル方式)

継手を剛結合とした場合、地震力や温度変化によって沈埋函に大きな断面力が発生することがある。このため、継手を柔な構造として可撓性を持たせることで、沈埋トンネルに発生する変形を継手位置で吸収し、発生断面力を低減させることが有効である。このような柔接合継手が開発され、多くの沈埋トンネルで実用化されている²⁾。代表的な柔接合継手であるゴムガスケット+ストップケーブル方式の継手の概要を図-1に示す。本継手では、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。

この場合、ゴムガスケットにはきわめて大きな圧縮ひずみが導入されているだけでなく、ゴムガスケットの外

側は直接海水に曝されており、ゴム材料の耐久性にとって厳しい環境下にある。

ゴムガasketの止水は水圧接合時に導入された圧縮力により発揮されるが、この圧縮力は、長期供用中のゴム材料の応力緩和現象により経時的に減少することが知られている。また、大きい圧縮力が作用するゴムガasketが除荷された場合、残留変形が発生する。これらを図示すると、図-2のようになる³⁾。

現状におけるゴムガasketの止水設計では、これらの特性が反映されており、長期供用中における止水面の安全性が確保されている。これまでの設計事例では、応力緩和量としては20%、残留変形量としては15~16.5%と考えることが多い。止水設計の詳細については、既往の資料⁴⁾で整理されている。

また、ゴム材料の海水中における長期耐久性については、圧縮力を受けたゴムガasketおよびゴムのシートサンプル（厚さ：2mm）を用いた実海洋環境下での暴露実験が実施されている。暴露期間10年までの結果によれば、ゴムガasketの残留変形量は若干増加する傾向にはあるものの、その圧縮特性に大きな変化はないことが示されている。ゴム材料単体の物性についても、最も材料劣化の影響を受けやすい物性値とされる破断時伸びでも、暴露前の値の80%を下回ることはないという結果が得られている。しかしながら、ゴムの配合や硬度ならびに応力状態によって耐海水性は異なるものと考えられるだけでなく、より長期間にわたって海水作用を受けた場合の材料劣化については明らかでない。よって、さらなる検討を継続する必要があるといえる。

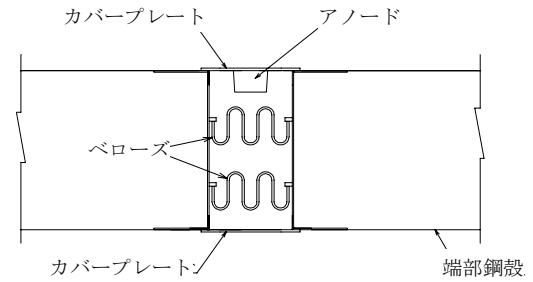


図-3 ベローズ式継手

2.3 ベローズ式継手

柔接合継手が有する可撓性によって、沈埋函に発生する断面力を大幅に低減できることが可能となり、合理的な設計手法が体系化された。しかしながら、厳しい地盤条件や設計地震力の増大などにより、従来の柔接合継手では吸収できないほど大きい継手変位の発生が懸念されるケースが出てきた。そこで、施工時の沈埋函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沈埋函内部に設置しておく方式が提案されている。このような内蔵型継手として、図-3に示すような、ベローズ式継手が那覇港沈埋トンネルで実用化されている⁵⁾。本継手は、沈埋函内部に設置した波形鋼板（ベローズ）の伸縮変形によって、函体変形に対応するものである。

本継手構造の場合、構成材料が鋼材であるため、一般的な防食を施すことにより、その長期耐久性は確保されていると考えてよい。

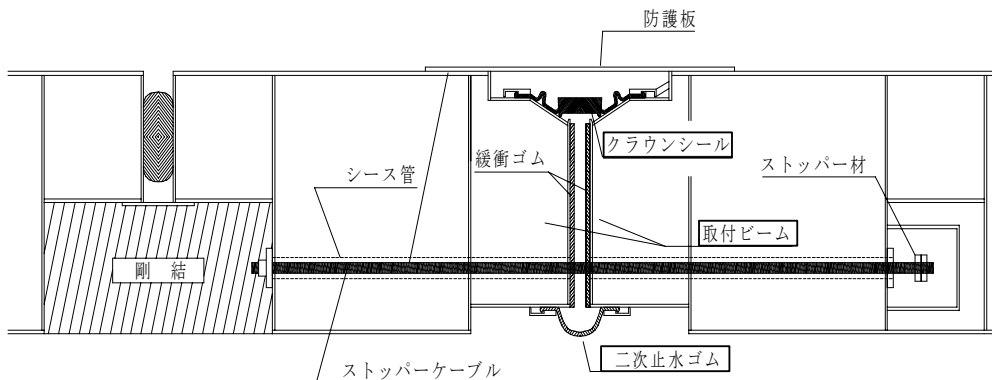


図-4 クラウンシール式継手

表-1 クラウンシール式継手の各構成要素の役割

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水圧を利用した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、本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侵入を抑える。

表-2 クラウンシールゴムの構成材料の特徴

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、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で配置している。

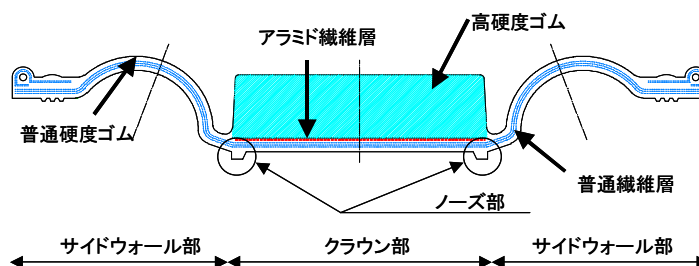


図-5 クラウンシールゴムの概要

2.4 クラウンシール式継手

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、周辺地盤の埋立てにより、きわめて大きい地盤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、従来の継手で対応できる範囲を超えることが予測されている。そこで、従来型継手では追従できないほど大きい継手変位にも対応可能な新形式継手として、クラウ

ンシール式継手が開発された⁶⁾。

本継手は、図-4に示すように、トンネル軸方向の変位およびそれと直交方向の変位が所定の範囲内であれば、クラウンシールゴムが伸縮変形することで継手変位を吸収し、かつ、止水を行うものである。これにより、大きい継手変位が生じても沈埋函に断面力がほとんど発生しない。また、継手変位が所定の値を超えた場合には、ストッパケーブルやせん断キーが機能することで、継手の安全性および止水性が確保される構造となっている。本

継手の各構成要素の役割を表-1に示す。

本継手は、鋼殻に締着されたクラウンシールゴムが継手変位に追従して変形することで、継手部の止水が実現されている。したがって、クラウンシールゴムの特性が本継手の性能を大きく左右する。これまでに、継手変位に対する追従性や水圧作用下における止水性については模型実験により実証されているが⁹⁾、長期耐久性についてはまだ検討されていない。

そこで本検討では、多くの継手の中でも、近年開発され今後多く用いられることが予測されるだけでなく、実際の供用下において継手部に大変形または高応力が作用するクラウンシール式継手を主な検討対象とする。本継手を対象として得られた知見は、他形式の継手の長期耐久性を検討する上でも多に参考になると考えられる。

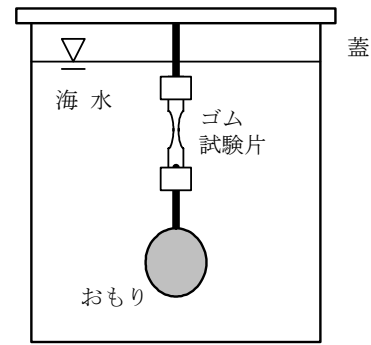
クラウンシールゴムの概要を図-5に、またクラウンシールゴムを構成する材料の特徴を表-2に示す。クラウンシールゴムは、これまでのゴムガスケットのように圧縮されて初めて、その機能を発揮するゴム製品ではなく、圧縮や引張といった様々な応力状態が生じ、その応力レベルも大きいことが特徴である。したがって、ゴムガスケットを対象としてこれまでに得られた長期耐久性に関する知見をそのまま適用することはできないと考えられる。例えば、クラウン部には常に水圧が作用することからクリープによる曲げ変形が生じること、鋼殻との締着部における反力がゴム材料の応力緩和により減少し止水性が低下することが懸念されることなど、クラウンシール式継手に特有の耐久性上の問題点が存在する。

3. ゴム材料のクリープ特性に関する検討

3.1 はじめに

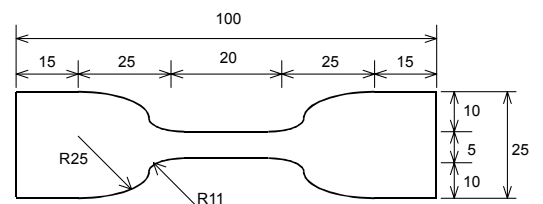
クラウンシール式継手は、水圧、継手変位あるいは地震力などが作用することで、構成材料に大きいひずみが発生する。発生ひずみの方向は、圧縮だけでなく、場合によっては引張のこともありうる。また、その大きさは継手変位の状態によってはきわめて大きいものとなる。このようなひずみが長期間にわたってゴム材料に作用し続けると、クリープ現象によって、ひずみの値は時間ともに変化するものと考えられる。クラウンシール式継手の場合、従来のゴムガスケットとは異なり、ゴムが直接的に引張を受ける、または、曲げを受けることがある。このような状況下におけるゴム材料のクリープ特性については、これまで検討されていない。

そこで、クラウンシールゴムを構成する硬度の異なる2種類のゴム材料を取り上げ、そのクリープ特性を実験的



※ おもりの質量を変化させる。

図-6 クリープ破断実験の概要



単位：mm

図-7 ゴム試験片 (JIS K 6251-3 号形ダンベル)

表-3 クリープ破断実験のケース

項目	ケース
ゴム硬度	70度 (高硬度ゴム) 50度 (普通硬度ゴム)
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

に検討した。この際、アレニウスの原理に基づくクリープ促進実験を行うことで、長期にわたるゴムの変形挙動を調べた。これにより得られたクリープ特性をもとに、有限要素解析を行い、クラウンシール式継手の安全性を検証した。また、クラウンシールゴムは、普通硬度ゴム、高硬度ゴム、アラミド繊維およびナイロン繊維が複合された構造となっており、これらが一体となって外力に抵抗する。そこで、クラウンシールゴム全体としてのクリープ現象を評価する実験についても実施した。

3.2 ゴム材料のクリープ破断強さ

(1) 実験概要

クラウンシールゴムを構成するゴム (高硬度ゴムおよび



写真-1 クリープ破断実験の状況

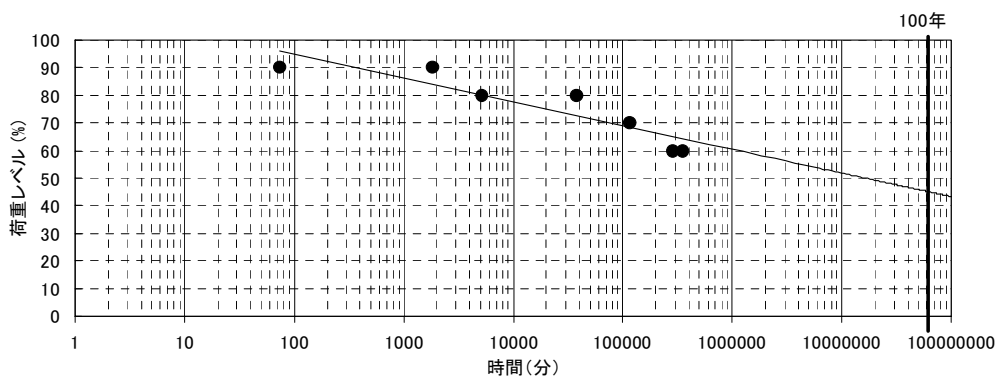


図-8 破断時間と荷重レベルの関係（高硬度ゴム）

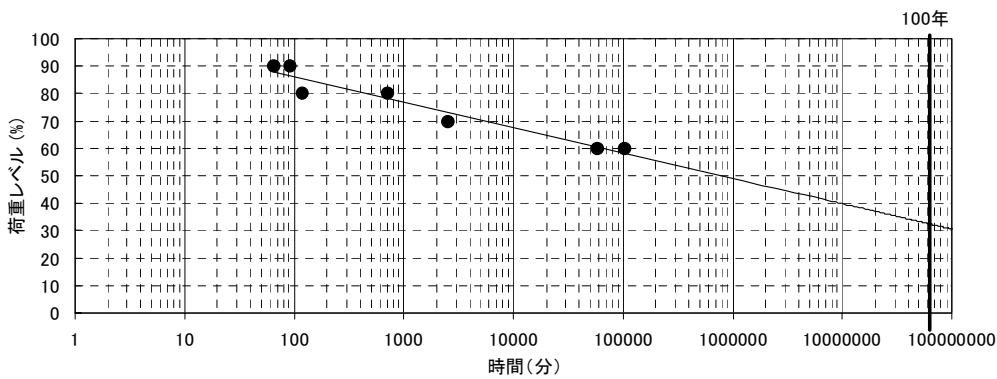


図-9 破断時間と荷重レベルの関係（普通硬度ゴム）

び普通硬度ゴム)を対象として、海水中におけるクリープ破断強さを調べた。実験では、図-6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。ゴム試験片には、図-7に示すような、JIS K 6251⁷⁾に規定された3号形ダンベルを用いた。実験開始直後は、破断が生じやすく、かつ、可能な限り正確に破断までの時間を計測する必要があるため、水槽に貼付した

AE⁸⁾(アコースティック・エミッション)センサにより、ゴム試験片が破断しておもりが水槽の底に接触する音を検知して、破断までの時間を正確に計測した。暴露開始後1週間程度で、ゴム試験片の破断が少なくなったので、これ以降は、おおよそ1回/日の頻度で、ゴム試験片の破断の有無を目視により確認した。

実験のケースを表-3に示す。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

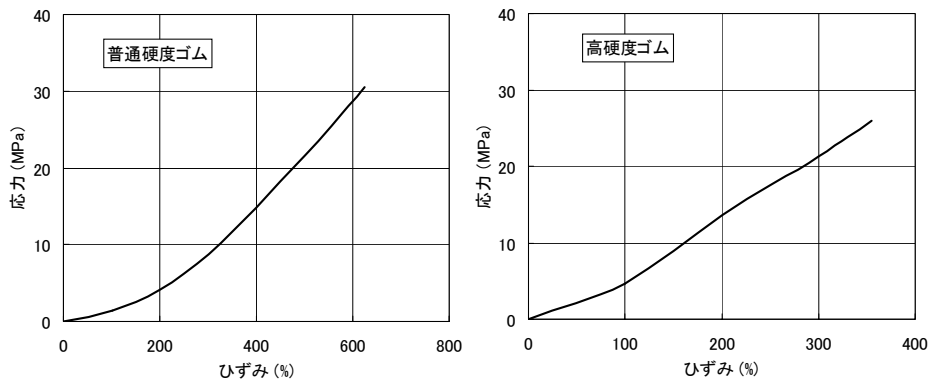


図-10 初期状態におけるゴムの引張特性

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、高硬度ゴムが255N（公称応力換算で25.5N/mm²）、普通硬度ゴムが256N（同じく25.6 N/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片に吊り下げた。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。写真-1に、試験片の設置状況を示す。

(2) 実験結果と考察

図-8および図-9に、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムに対して、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線形関係が認められる。これらより、100年後におけるクリープ破断限界荷重レベルは、高硬度ゴムで45%、普通硬度ゴムで33%と推測された。

図-10に、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのクリープ破断実験前の初期状態における応力-ひずみ関係を示す。これは、クリープ破断実験と同一の試験片を用いて実施した引張試験結果であり、4個の試験片に対する試験結果の平均である。なお、ここでの応力は、荷重を負荷する前の試験片断面積を用いて求めた公称応力である。これによれば、上で求められた100年後におけるクリープ破断限界荷重レベルに対応する引張ひずみは、高硬度ゴムで180%で、普通硬度ゴムで320%となることがわかる。

このことから、クラウンシール式継手の設計を行う際には、所定の継手変位が生じたとしても、高硬度ゴムでは45%、普通硬度ゴムでは33%以上の引張応力、換言すれば、高硬度ゴムで180%、普通硬度ゴムで320%の引張ひず

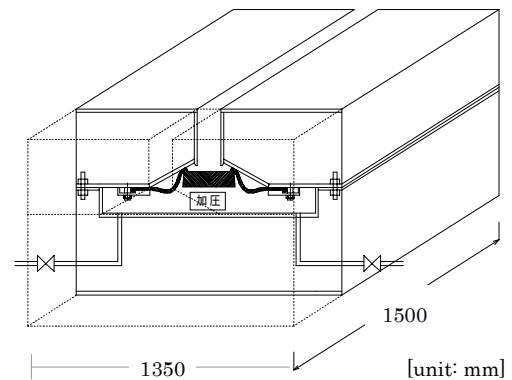


図-11 クラウン部のクリープ変形実験装置の概要

みが発生しないように配慮しなければならないといえる。

ただし、作用荷重があるレベルに達すると、どれだけの時間が経過してもクリープ破断が生じない「クリープ限界」が存在することも十分に考えられる。したがって、今後は引張荷重を受けるゴム材料の長期クリープ特性を評価する必要がある。

3.3 ゴム部材のクリープ変形

(1) 実験概要

クラウンシール式継手のうち、クラウン部は絶えず大きい水圧を受けて変形し、供用期間中にはクリープによる変形量の増加が懸念される。そこで、クラウン部に一定期間水圧を作用させ、そのクリープ変形挙動を追跡する実験を行った。実験では、図-11に示すように、実スケールのクラウンシールゴムの直線部1.5m分を製作し、鋼製の耐圧装置を用いて、クラウン部に一定水圧を作用させた。作用水圧は、大阪港夢洲トンネルの建設地点の最大水深(約-30m)を考慮して0.2MPaおよび0.3MPaとした。

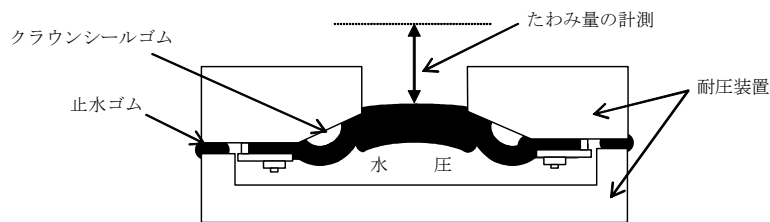


図-12 たわみ量の計測

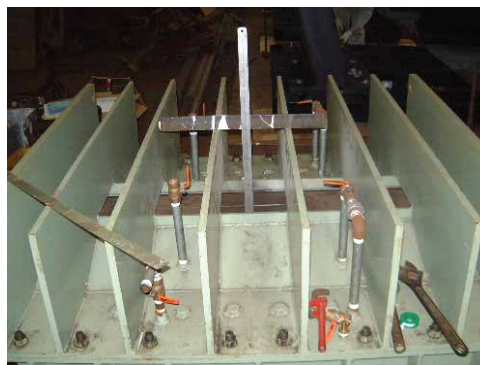


写真-2 クラウン部のクリープ変形実験の状況

水圧作用中には、図-12に示すように、鋼製の耐圧装置外部から、クラウン部のたわみ量を計測した。計測は、1～2ヶ月にわたって定期的に行った。計測にあたっては、ある一定の高さに基準高さを設けて、そこからクラウン部中央までの距離を計測し、水圧作用前からの変化量をたわみ量と定義した。クラウンシールゴム長手方向の端部における止水は、ゴムを耐圧装置に挟み込んで行った。この場合、クラウンシールゴムは端部が拘束されることから、中央部にもその影響が及ぶ可能性がある。このことを確認するために、長手方向のたわみ分布を計測したところ、中央部は端部拘束の影響を受けておらず、たわみ量が一定となる領域が存在していた。そこで、これ以降は、クラウン部のたわみ量としては、クラウンシールゴム長手方向の中央位置で計測した値を用いることとした。

写真-2に、実験に用いた装置と実験時の状況を示す。

(2) 実験結果と考察

図-13および図-14に、クラウン部のたわみ量と水圧を作用させてからの経過時間の関係を作用水圧ごとに示す。水圧を作用させた直後のたわみ量は、水圧が0.2MPaの時に35mm、水圧が0.3MPaの時に43mmとなり、水圧が大きいほど、たわみ量は大きくなった。その後のたわみ量の増加を直線近似し、100年後におけるたわみ量の推定を行

った。その結果、水圧が0.2MPaの時には47mm、水圧が0.3MPaの時には53mmとなり、それぞれ、水圧負荷直後よりもそれぞれ12mm、10mm増加し、水圧が大きいほど増分は小さくなる結果となった。このことから、データ数が少なく、実験の条件も限られているので、断定的なことは言えないが、ある一定レベル以上にはたわみ量が増加しなくなる限界点が存在する可能性がある。

クラウンシール式継手の設計を行う場合、建設時点で所定の水圧と継手変位が作用したときに発生する各構成材料のひずみなどを照査することになるが、実際には、本実験でも明らかになったように、長期供用中には経時的にクラウン部のたわみ変形が進行する。その結果、クラウンシールゴムの各構成材料に発生するひずみも変化することとなるため、長期間にわたるクラウンシール式継手の安全性を保証するためには、クリープ変形が進んだ後の状態における各構成材料のひずみの照査も必要になると考えられる。しかし、例えば100年後のクリープ状況を実験的に再現することは困難であるため、適切なクリープ促進実験を行って、その結果を踏まえた数値解析により評価することが望ましい。これについては、3.4以降で詳述する。

なお、本実験で計測されたたわみ量には、水圧作用によるクラウン部のたわみ変形だけでなく、ノーズ部のつ

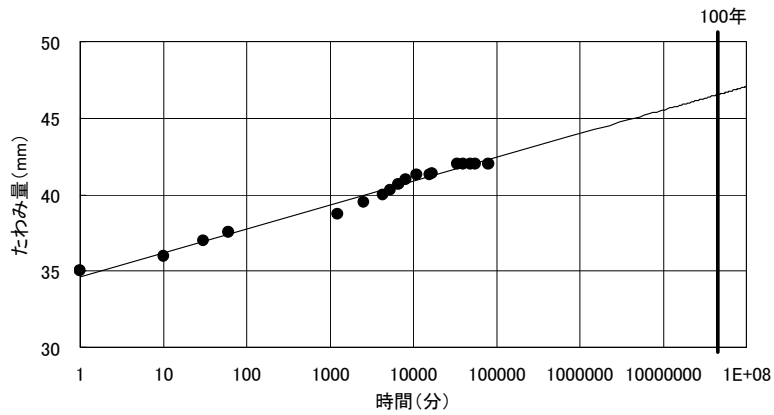


図-13 クラウン部のたわみ量の経時変化 (水圧 0.2MPa)

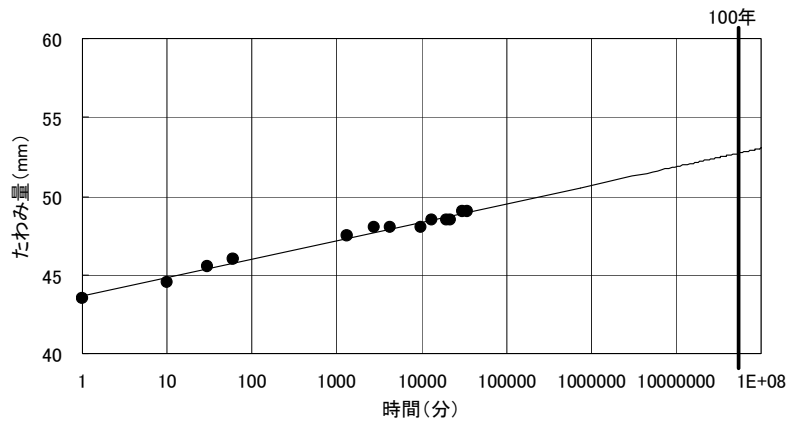


図-14 クラウン部のたわみ量の経時変化 (水圧 0.3MPa)

ぶれ量やノーズ部が鋼殻を滑ることにより生じる剛体変形も含まれていることを付記する。

3.4 ゴム材料のクリープ促進実験

(1) 実験概要

クラウンシール式継手を構成するゴム材料の長期にわたるクリープ特性を明らかにするため、クリープ促進実験を行った。一般にクリープ現象には長期間を要するため、100年といった長期供用中のクリープ現象を考慮するためには、適切な促進実験を行う必要がある。ここでは、アレニウスの原理に基づいて、大気温よりも高い環境下において、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのクリープ促進実験を行った。実験中には、クリープによる試験片標線間距離の変化を連続的に計測し、各材料のクリープ構成則を推定した。

a) 試験片

図-15に示すように、幅10 mm、長さ140 mmの試験片を

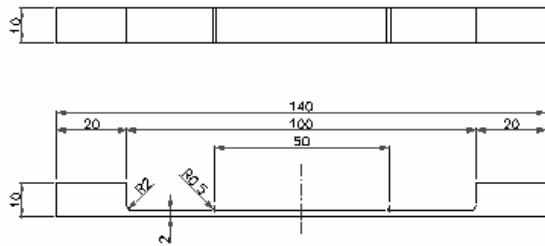
製作し、実験に供した。試験片の両端から20 mmの範囲では、試験片の厚さを10mmと厚くすることで、クリープ促進実験中のチャック部とした。クリープ区間は、試験片中央の50mmとし、その区間の厚さは2mmとした。クリープ区間には、後述するレーザ光による距離測定を可能とするため、その両端に標線を設けた。

b) 実験手順と実験条件

製作した試験片に所定の質量のおもりを吊り下げて、真水を満たした水槽内に設置した。水槽は、試験片のクリープ変形状況を水槽外部から観察できるように、両側を透明なアクリル板で製作した。また、アレニウスの原理に基づいたクリープ促進実験を行うために、加熱ヒータと制御盤によって水槽内の水温を高温に保つことができるようにした(写真-3)。

実験は、以下の方法で実施した。

- ① 水槽内部の温度が所定の温度に上昇したことを確認する。



単位：mm

図-15 試験片の形状・寸法

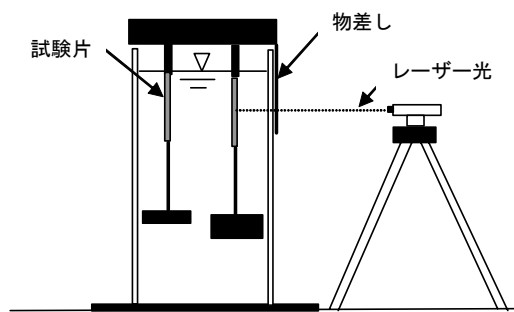


図-16 標線間距離の測定

- ② 試験片を装置に吊り下げるとともに、所定のおもりを傍らに準備しておく。
- ③ 一斉に所定のおもりを試験片に取り付け、徐々に水槽内に沈める。
- ④ 一定時間（10～30分）経過後、三脚にレーザー光を放つ装置を取り付け、前述の標線のうち、上側の標線位置にレーザー光が照射されるように調整する（図-16）。
- ⑤ 試験水槽側面のアクリル板に物差しを当て、その時の目盛りを読み取る（読取值： δ_d ）。
- ⑥ 同様の作業を下側標線についても行う（読取值： δ_d ）。
- ⑦ t 時間後の標線間距離 $\delta(t) = \delta_d - \delta_t$ を算出する。

試験水槽内の水温は、70°Cおよび55°Cの2条件とし、試験片の数量は、各ケース3個ずつの合計54個とした。測定は、約70日間継続して行った。

おもりの重量は、試験片の静的破断荷重に対して、60%、70%および80%の荷重となるように決定した（表-4）。ここで、おもりに作用する浮力の影響は考慮してある。なお、本実験では真水を用いたが、海水中におけるゴム材料のクリープ現象との違いについては、3.2で述べた海水を用いたクリープ破断実験の結果と比較することで検討できると考えた。

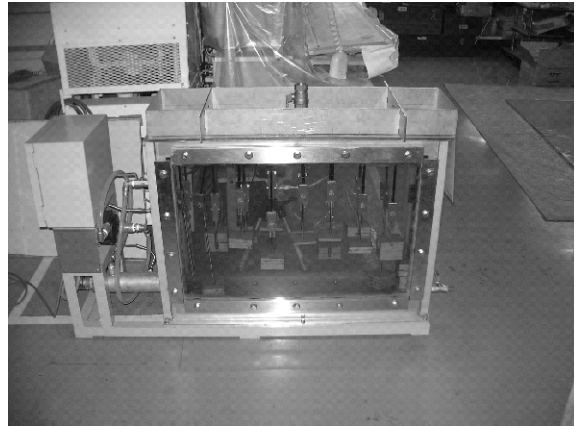


写真-3 水槽全景

表-4 実験ケースとおもりの重量

試験片の種類	発生ひずみのレベル		
	小	中	大
高硬度ゴム	5.2 N	15.5 N	31.0 N
普通硬度ゴム	3.8 N	10.3 N	20.6 N

本実験では、試験片の温度が水温と同等レベルとなるのに多少の時間が必要であること、おもりを吊り下げた後、おもりが脱落しないように、ゆっくりと水槽内に試験片を沈めたことなどを考慮して、おもりを吊り下げたから10～30分経過した状態を初期状態と考えた。その後、定期的に標線間距離を測定し、図-17に示すフローにしたがってひずみの時間依存性すなわちクリープ特性を推定した。

(2) アレニウスの原理

ゴム材料のクリープ特性や応力緩和特性などの長期変形挙動について実験的に検討を行おうとすると、実験に要する期間がきわめて長くなってしまい、現実的でない。そこで、実験期間の短縮を図るため、アレニウスの原理に基づく促進実験がしばしば用いられる。

本手法は、高温環境下における状態変化の進行速度から、化学反応速度論により、通常温度環境下における状態変化の進行速度を推定するものである。以下に、本原理の概要を示す。

化学反応速度論によれば、ゴム材料の特性がある時点 t において初期状態 X であったものが、時間 Δt だけ経過した後、ゴム材料の特性が $X + \Delta X$ に変化したとすると、これは、式(1)で表される。

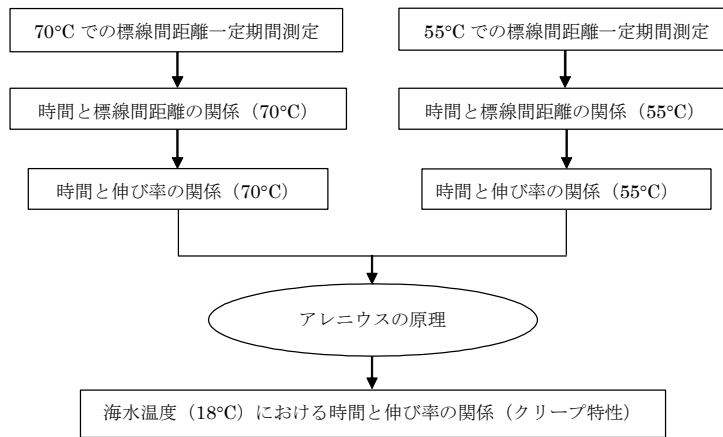


図-17 クリープ特性を導くフロー

$$-\frac{\Delta X}{\Delta t} = k \cdot X^n \quad (1)$$

ゴム材料の状態変化（劣化）の過程は、ほぼ一次反応（ $n=1$ ）であることが経験的に知られているため、ゴム材料の劣化過程は、式(2)で表すことができる。

$$-\frac{dX}{dt} = k \cdot X \quad (2)$$

式(2)を解くことで、式(3)が得られる。

$$\ln X = -k \cdot t \quad (3)$$

ここで、アレニウスの原理によると、速度定数 k は、温度の関数として、式(4)のように与えられる。

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (4)$$

ここで、 A ：定数、 E ：活性化エネルギー（J/mol）、 R ：気体定数（J/mol・K）、 T ：絶対温度（K）である。式(3)および式(4)より、式(5)が得られる。

$$\ln t = \frac{E}{R \cdot T} + \ln \left(\frac{1}{A} \cdot \ln X \right) \quad (5)$$

これより、ある温度 T_1 において、劣化状態が X となるまでに要する時間 t_1 は、式(6)となる。

$$\ln t_1 = \frac{E}{R \cdot T_1} + C \quad (6)$$

ここで、 C ：定数である。

劣化促進実験においては、通常の温度よりも高い温度

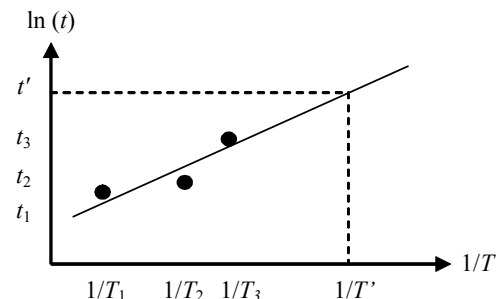


図-18 アレニウスプロット

(T_1, T_2, T_3, \dots) 条件下において、ゴムの劣化状態が X になるまでに要する時間 (t_1, t_2, t_3, \dots) を測定して、式(6)に基づいて、図-18に示すように、 $1/T$ と t の関係（アレニウスプロット）を求める。

促進実験の結果から、アレニウスプロット上の回帰直線を求めて、任意の温度 T' （ゴムが実際に使用される環境下の温度）での t' を推定する。これが、アレニウスの原理に基づく促進実験の考え方である。一般に、 T_1, T_2, T_3, \dots は、 100°C 以下に取ることが多い。これは、あまり高温にすると、劣化進行のメカニズムが変化してしまう可能性があるため、実験温度の設定には十分な注意が必要である。

(3) 実験結果

高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのクリープ促進実験より得られた標線間距離の経時変化を実験温度ごとに図-19に示す。1つのグラフには、異なる3段階のひずみレベルでの測定結果をあわせて示してある。全体的な傾向として、ひずみレベルが高いほど、実験温度が高いほど、クリープによる標線間距離の増加速度が大きいことがわ

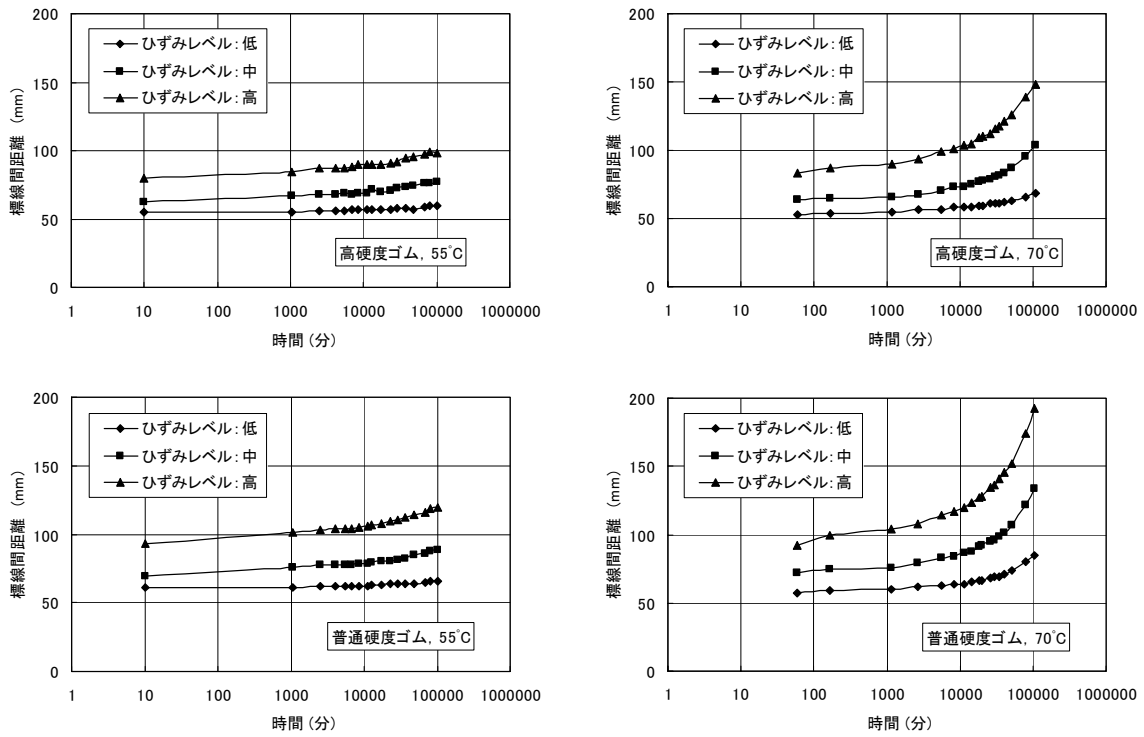


図-19 標線間距離の経時変化

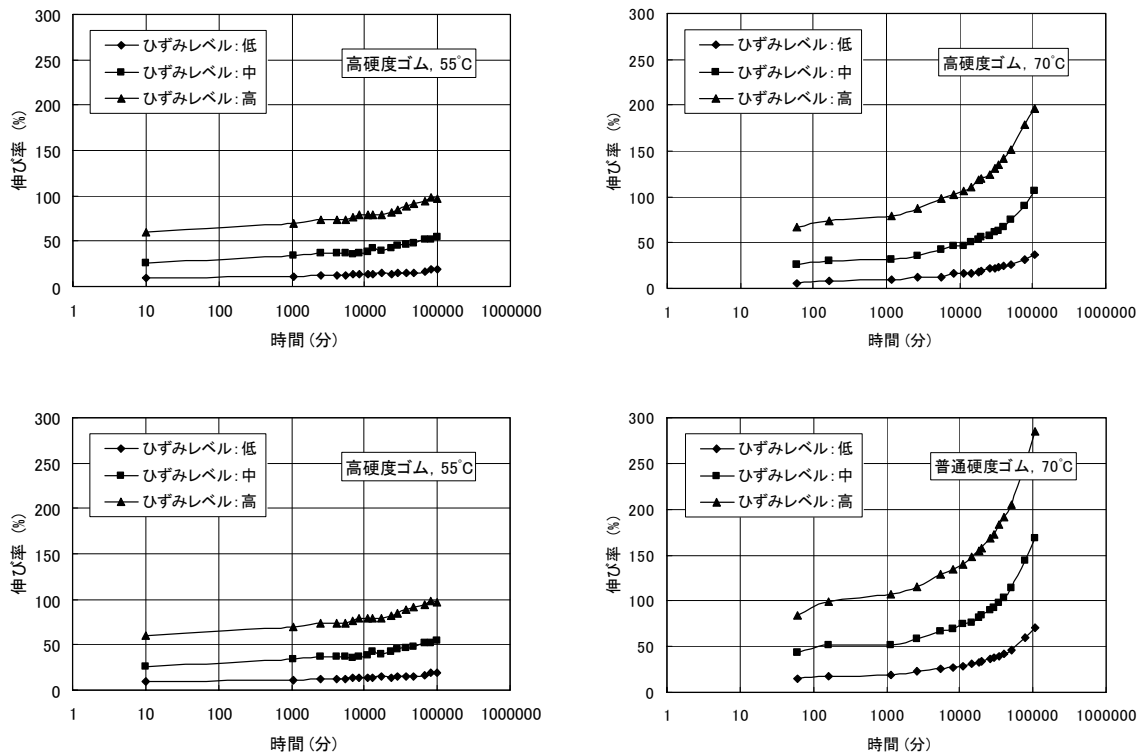


図-20 伸び率の経時変化

かる。

(4) クリープ特性の推定

図-20に、標線間距離の変化率として求められるゴム材

料の伸び率を示す。これらをもとに、図-17に示したフローにしたがって、ゴム種類ごとにクリープ特性の推定を行った。

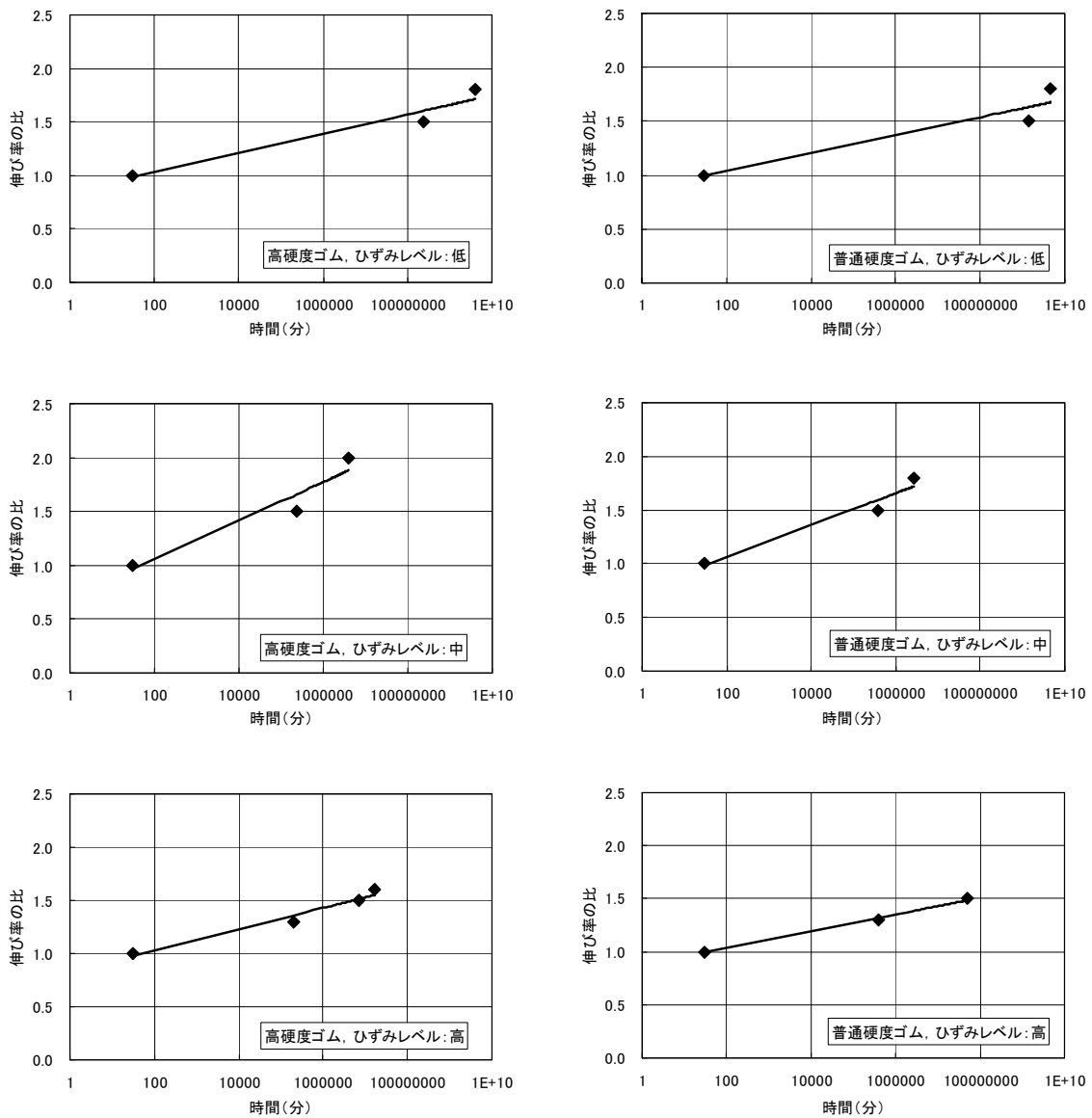


図-21 海水温度における伸び率の経時変化の推定結果

本検討では、標線間距離の変化率（伸び率）が時間の経過とともに初期状態からどれだけ変化するかを評価することで、ゴム材料のクリープ特性とした。すなわち、実験開始後10～30分経過時点における伸び率を1としたときに、時間の経過とともにその値がどう変化するかをグラフ化することで、クリープ特性を表現した。このようにして得られた異なる2つの温度条件下におけるクリープ特性から、アレニウスの原理に基づいて、一般的な海水温度におけるクリープ特性を推定した。本検討では、沈埋トンネル建設位置での海水温度として一般的に用いられる18℃を基準とした。

高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのそれぞれについてア

レニウスの原理により推定されたクリープ特性を図-21に示す。同図は、実験開始後10～30分経過時点における伸び率を1として規準化してある。これより、100年後（約 5×10^7 分後）の伸び率の比は1.5～2.0となった。したがって、沈埋トンネル建設時点でゴム材料に生じたひずみの値は、100年間の供用後には、クリープ現象によって、初期ひずみの1.5～2.0倍（150～200%）に増加する可能性があることが推定された。

(5) 促進クリープ実験結果の検証

(4)において、温水を用いたクリープ促進実験を行ったが、その実験結果から推定されたクリープ特性が実際のクリープ特性と一致するかどうかを確認するために、室

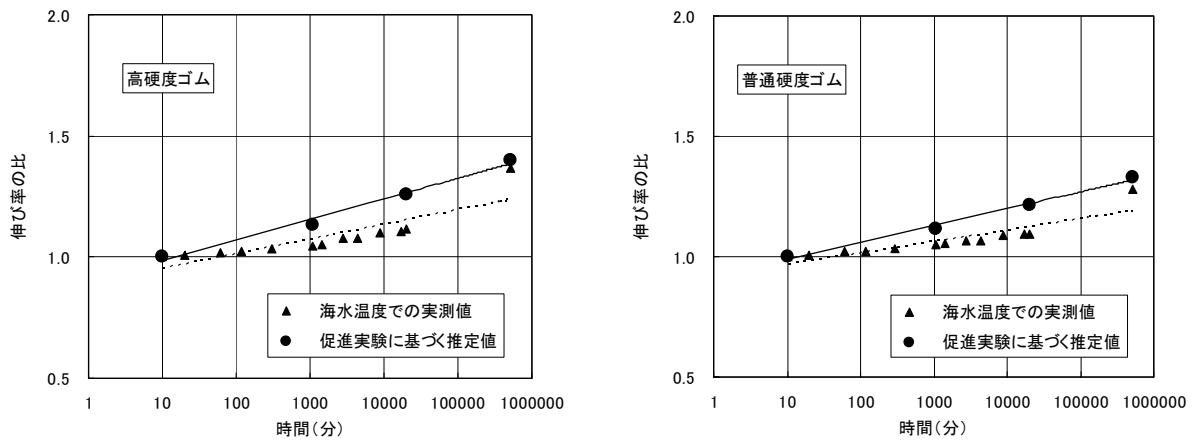


図-22 促進実験より推定されたクリープ特性の検証

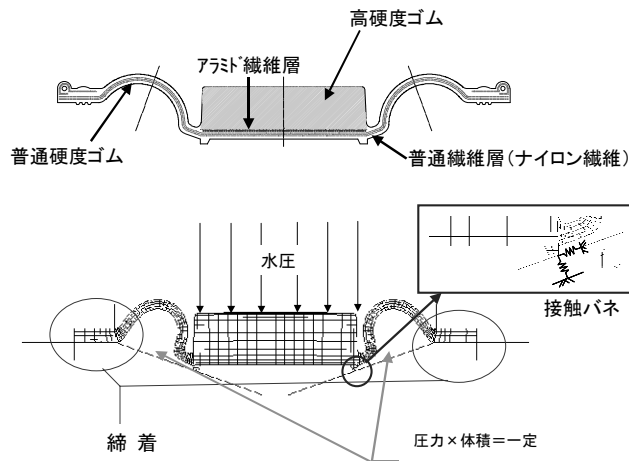


図-23 解析モデルの概要

温下における高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのクリープ特性を約150日間にわたって計測し、促進実験結果から得られた推定結果と比較した。

a) 検証実験の方法

本実験で用いた試験片は、クリープ促進実験で用いたゴム試験片と同一とし、試験片の数量は、各ゴム種類ごとに3個とした。試験片に所定のおもりを大気中で吊り下げて、標線間距離の変化を経時的に追跡した。室温については、極力18℃となるよう配慮した。

b) 実験結果と考察

図-22に、室温環境下で計測されたゴム試験片の伸び率の経時変化をゴム種類ごとに示す。同図には、促進実験結果からアレニウスの原理に基づいて推定されたクリープ特性についてもあわせて示してある。両者には、多少

の雰囲気温度差があること、実験を水中で行ったか大気中で行ったか、あるいは初期ひずみの若干の違いなどの影響はあるものの、室温でのクリープ特性と促進実験より推定されたクリープ特性に顕著な差はなく、両者はおおむね一致することが確認できた。よって、今回促進実験より推定されたゴム材料のクリープ特性は妥当であると判断し、次節で述べる有限要素解析に用いることとした。

3.5 ゴム材料のクリープを考慮した有限要素解析

(1) 概要

クリープ促進実験の結果からアレニウスの原理に基づいて推定されたゴム材料のクリープ特性を取り入れた有限要素 (FEM) 解析を行い、供用開始100年後にゴム材料

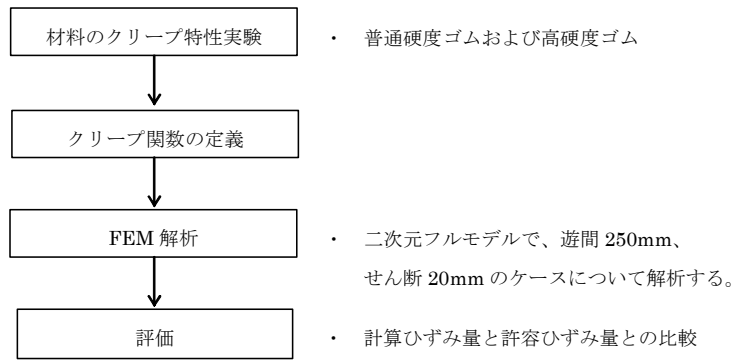


図-24 解析の手順

に生じるひずみを算定することで、クラウンシールゴムの長期供用中の安全性を検討した。過去に実施したFEM解析⁶⁾では、従来から行われてきた構成則の設定方法、すなわち静的な応力-ひずみ関係を用いたが、解析対象であるゴム材料が長期間一定条件下で使用されることを考えると、構成則の設定方法が妥当であるとは言い難い。そこで、ゴム材料の変形が時間とともに変化する現象（クリープ現象）を解析に取り込み、ゴム材料に生じるひずみが経時的にどのように変化するかを調べた。

沈埋トンネル継手に対する数値解析手法を確立しておけば、その構成材料であるゴム材料の内部で発生する局所的なひずみを算定でき、水圧や継手変位といった外力に加えて、クリープ変形を同時に受ける継手の安全性を設計供用期間にわたって数値的に照査することが可能となる。また、過去に実施した模型実験⁶⁾で検討しなかった継手変位パターンや函体のねじれなどが発生した場合の継手の追従性を数値的に確認できるだけでなく、クラウンシールゴムの細部を改良した場合の照査にも応用することができると考えられる。

(2) 解析の手順

解析モデルの概要を図-23に示す。本解析では、過去に実施したFEM解析の結果と比較できるように、ゴム材料の構成則以外の解析条件については過去の解析と同一とした⁶⁾。

解析の手順を図-24に示す。解析に先立って、まず前述のクリープ促進実験により得られたゴム材料のクリープ特性の関数化を行った。解析では、クラウンシールゴムを二次元でモデル化し、所定の水圧を作用させた後、トンネル軸方向に250mm、それと直交する方向に20mmの継手変位を与えた（これ以降、これらの継手変位をそれぞれ遊間およびせん断変位と呼ぶ）。この状態から、クリープ

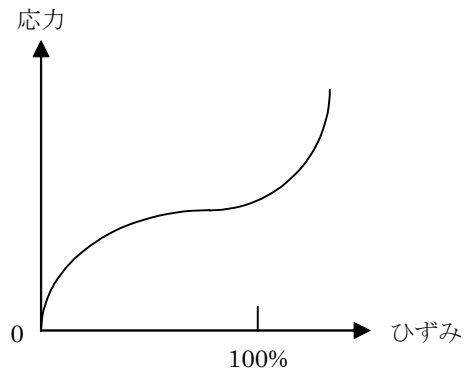


図-25 ゴム材料の応力-ひずみ関係の例

現象が開始するものと仮定して、100年後の継手の変形状況およびゴム材料に生じるひずみを推定した。解析の対象として設定した遊間250mmおよびせん断変位20mmについては、周辺地盤の沈下に起因する沈埋函同士の相対的な変位量に対する設計値である。また、沈埋トンネルの供用中に地震が発生した場合、これらの継手変位の増加が生じることも懸念されるが、本解析では地震の影響は考慮しなかった。

(3) クリープ関数の定義

a) ゴム材料の短期間挙動（弾性変形）

ゴム材料は作用時間の短い瞬間的な外力に対しては弾性的に、すなわち永久変形を残さずに挙動すると考えられる。しかしながら、この変形は金属材料の変形などと異なり、材料内部の絡まりあった高分子鎖の伸縮によって生じているため、応力とひずみの関係は直線的ではなく、図-25に示すような非線形の特性を有する。このような非線形弾性を有する材料をFEM解析でモデル化する場合、ひずみエネルギー関数を用いて、多軸場における挙

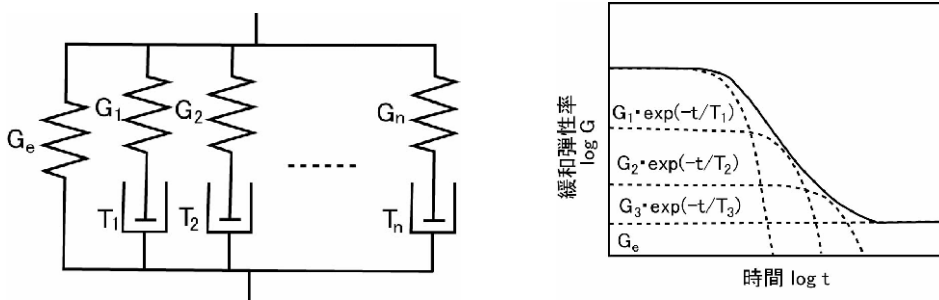


図-26 粘弾性モデル（応力緩和型）

動を表現することが一般的である．ここでは，式(7)に示すようなOgdenモデル⁹⁾を適用する．このモデルはゴム材料に対する適用性が広く認められているものである．

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (7)$$

ここで， μ_n と α_n は定数である．

b) 粘弾性材料の長期間挙動の表現

一般に，材料は，その粘性的な性質のために，荷重が与えられた状態で放置されると変形が徐々に進行する性質（クリープ），あるいは変形が与えられた状態で放置されると応力が徐々に低下する性質（応力緩和）を有する．クリープと応力緩和は見方を変えたものであり，粘性的な挙動という点から見れば，両者は同一の性質を表している．ゴム材料は，このような変形の時間依存性が強い材料の1つであるとされるため，長期間にわたる変形挙動を評価する上では無視できない現象である．

本解析におけるゴム材料はひずみエネルギー関数，すなわち応力の大きさを代表する尺度でモデル化しているため，ひずみエネルギー関数の時間依存性（この場合，緩和）を考慮することができれば，継手変形の時間依存性を表現することが可能になる．

一般に，応力緩和現象は，図-26に示すようなバネとダッシュポットを組み合わせたマックスウェル型の粘弾性モデルで表現される．ダッシュポットは瞬間的な外力に対しては追従できず，剛に挙動するので，ある変位を与えられたときの荷重は並列に配置されたバネ定数の総和（図-26の G_e および $G_1 \sim G_n$ の和）によって算定される．これが，粘性を有する材料の瞬間的な短期間応答である．

その後，ある時間が経過すると，ダッシュポットの変形が始まるため，ダッシュポットと直列に結合されたバネの荷重は徐々に緩和することになる．ここで，ダッシ

ュポットの時定数 $T_1 \sim T_n$ を短いものから長いものまで適切に設定しておけば，短い時定数をもつダッシュポットから順次緩和していくので，モデル全体の荷重の緩和現象を任意に設定することが可能となる．これを数式で表現すると，式(8)のようになる．

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^n G_i e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (8)$$

したがって，本解析では，クリープ促進実験結果から推定されたクリープ特性に合致するように，式(8)中の定数 G_e ， $G_1 \sim G_n$ ， $T_1 \sim T_n$ を適切に与えることで，ゴム材料の時間依存性変形挙動を表現した．

c) ゴム材料への応用

沈埋トンネル継手の長期変形挙動の評価にあたって，b)で述べた応力緩和型の粘弾性モデルを適用した．ただし，a)でも述べたように，短期間挙動を評価する際には，弾性率をひずみエネルギー関数で表したので，長期間挙動についても，式(8)をひずみエネルギー関数の形式で表現した式(9)を用いることとした．

$$W(t) = W_\infty + \sum_{i=1}^n W_i e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (9)$$

本検討では，ゴム材料に対して一定応力 σ の下でクリープ促進実験を行って，図-22のように，ゴム材料の時間依存性変形を伸び率の比として評価している．そこで，伸び率からひずみ μ を算定し，与えた応力 σ で除すことで，緩和弾性率 $E(t)$ を以下のように定めた．

$$E(t) = \sigma / \varepsilon(t) \quad (10)$$

本解析では，式(10)の形に変換した緩和弾性率の実験データに対してカーブフィッティングを行い，式(9)の係

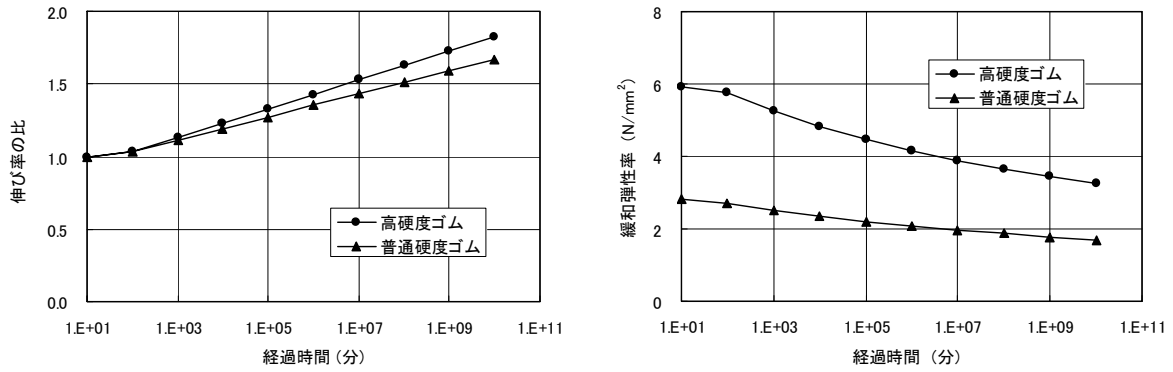


図-27 伸び率の比と緩和弾性率の同定

数を定めた。この係数の妥当性については、既述のクリープ実験を再現した解析を行うことで検証した。

(4) クリープ実験の再現解析

a) 材料定数の同定

クリープ実験の結果より、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムのクリープ特性を、2次のOgdenモデルを適用して同定した。同定された μ および α の値を以下に示す。

高硬度ゴム : $\mu_1 = 1.28877 \times 10^{-6}$, $\alpha_1 = 1.48164 \times 10$
 $\mu_2 = 3.03800 \times 10^{-1}$, $\alpha_2 = 6.30794 \times 10^{-1}$

普通硬度ゴム : $\mu_1 = 1.02022 \times 10^{-3}$, $\alpha_1 = 8.43125$
 $\mu_2 = 1.36797$, $\alpha_2 = 2.88448 \times 10^{-1}$

Ogden定数 (μ および α) を用いたときの初期弾性率 E は、式(11)で求めることができる。

$$E = \frac{2}{3} \sum_{n=1}^N \alpha_n \mu_n \quad (11)$$

式(11)を用いて、ゴム材料の初期弾性率を求めた結果、高硬度ゴムでは、 5.93 N/mm^2 、普通硬度ゴムでは、 2.82 N/mm^2 となった。

続いて、クリープ実験により得られた経過時間と伸び率の比の関係、経過時間と緩和弾性率の関係に変換した。この変換には、以下の関係を用いた。

$$\text{緩和弾性率} = \text{初期弾性率} / \text{伸び率の比} \quad (12)$$

実験結果は、3つの異なるひずみレベルに対して得られているが、図-21に示すように、これらの伸び率の比には大きな差が見られなかったため、ここでは代表的な結果として、ひずみレベルが高い場合の結果を用いた。図-27に、その結果を示す。

b) FEM解析結果と実験値の比較

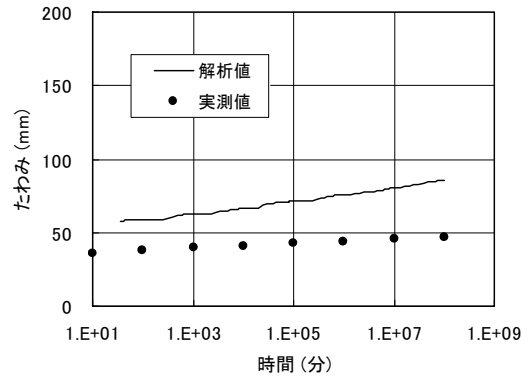


図-28 たわみの経時変化

3.3で述べたクラウン部のたわみ量がクリープ現象によって経時的に増加した実験結果を用いて、解析モデルと設定した定数の妥当性を数値的に検証した。3.3の実験では、水圧を 0.2 MPa 、遊間 250 mm としたので、これと同じ条件で解析を行った。

解析結果を実験結果とあわせて、図-28に示す。初期のたわみについては、解析結果が実験結果の約1.6倍となったが、時間経過に伴うたわみの増加傾向はおおむね一致した。初期のたわみ差は、実験モデルと解析モデルの違い、例えば、解析は2次元で行ったが、実験では模型が3次元形状であったために拘束条件が異なったことなどによるものと考えられる。しかしながら、クリープ現象によるたわみの増加傾向がおおむね再現できたことから、本解析で設定したモデルと定数を用いることで、沈埋トンネル継手におけるゴム材料の時間依存性変形挙動を数値的に評価できると判断した。

(5) 実モデルでの解析

クラウンシール式継手を2次元でモデル化して、 0.3 MPa の水圧作用下で、遊間 250 mm 、せん断変位 20 mm の継手変

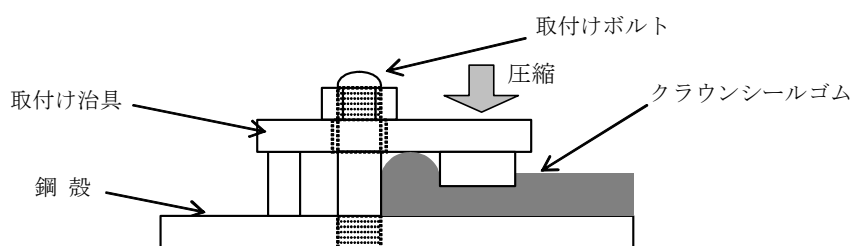


図-29 ゴム締着部の概要

位を負荷した状態（初期状態）から、ゴム材料の時間依存性変形によって、各構成材料で生じるひずみの最大値が100年経過後にどのように変化するかを数値解析で求めた。

付図-1および付図-2に、初期状態および100年経過後におけるクラウンシールゴムの変形状況を示す。これによれば、ゴム材料の時間依存性変形によって、クラウンシールゴム全体の変形が進行し、中央部分でのたわみも69mmから100mmに増加したことがわかる。次に、各構成材料（高硬度ゴム、普通硬度ゴム、アラミド繊維およびナイロン繊維）ごとに、初期状態および100年経過後における最大主ひずみ分布を描画した結果を付図-3および付図-4に示す。

表-5には、各構成材料ごとに抽出した最大主ひずみの変化を示す。これによれば、高硬度ゴムおよび普通硬度ゴムに100年経過後に生じると推測される最大主ひずみは59%および67%となり、一般的なゴム材料の破断ひずみと比較して十分に小さいことがわかった。沈埋トンネル継手のゴム材料において許容されるひずみの値をどのように設定するかは今後さらなる検討が必要であるが、本検討の範囲内ではゴム材料にクリープが生じたとしても継手の長期にわたる安全性や止水性に問題はないことが確認できた。

4. ゴムの応力緩和特性に関する検討

4.1 はじめに

3.において、ゴム材料のクリープ特性について検討を行ったが、クリープ現象は見方を変えれば、応力緩和現象になることから、ゴム材料においては応力緩和現象も長期耐久性を考える上で無視できない現象の1つである。クラウンシール式継手は、クラウンシールゴムが沈埋函の鋼殻端部に締着されることで構成されている。締着部においては、図-29に示すように、ゴムが取付け治具とボルトで圧縮されることで、鋼殻と一体化され、止水性が

表-5 最大主ひずみの比較

構成材料	初期状態	100年経過後
高硬度ゴム	30	59
普通硬度ゴム	53	67
アラミド繊維	0.42	0.46
普通繊維	3.6	4.5

単位：%

確保されている。これより、クラウンシール式継手の締着部は、継手の安全性および止水性を決定づける極めて重要な部位であるといえる。したがって、長期にわたる沈埋トンネルの供用中に、ゴム材料がどのように応力緩和していくのかを、特に締着部における安全性と止水性に着目して検討しておく必要がある。

そこで、クラウンシール式継手を構成する主な構成材料として、普通硬度ゴムを取り上げて、応力緩和を受けた場合のゴム材料単体としての物性変化を引張応力作用下において調べた。

さらに、クラウンシールゴムは、普通硬度ゴム、高硬度ゴム、アラミド繊維およびナイロン繊維が複合された構造となっており、これらが一体となって外力に抵抗している。そこで、クラウンシールゴム全体としての応力緩和特性も重要である。そこで、応力緩和現象の影響が重大であるゴム締着部を対象として、アレニウスの原理に基づいた促進実験を行い、ゴム材料の応力緩和が継手の止水性に及ぼす影響を調べた。

さらに、クラウンシールゴムには周囲の水圧により大きな引張力が作用する可能性がある。このような場合、締着部ではサイドウォール部に作用する引張力により、ゴム厚さが減少し、ボルトによる締付け力が低下することが懸念される。そこで本検討では、クラウンシールゴムのサイドウォール部に引張力を作用させた状態で、締着部におけるボルトの締付け力の計測を行い、このような



写真-4 応力緩和実験の状況

引張力作用下で締付け力が応力緩和によりどれだけ低下するかを調べて、締着部における止水性を検討した。

4.2 ゴム材料の応力緩和による物性変化

(1) 実験概要

クラウンシールゴムを構成する材料のうちで、普通硬度ゴムには大きい引張変形が常に作用していると考えられる。そこで、普通硬度ゴムが長期間にわたって大きい引張変形を受け続けた後に、その物性がどのように変化したかを調べるため、以下のような実験を行った。

図-30に示すように、普通硬度ゴムで製作した試験片に対して、所定の強制変位量を与えた状態で所定の期間、海水中に暴露した。試験片には、3.2のクリープ破断実験と同一のJIS K 6251⁷⁾に規定された3号形ダンベルを用いた。試験片の締着は、2枚のステンレス板で試験片端部を挟み込んで、ゴムを十分に締め付けることで行った。

実験のケースを表-6に示す。応力緩和期間は、1、6および12ヶ月とした。また、試験片数は2個を原則としたが、応力緩和試験中に破断が生じた場合などは、その限りではない。

所定期間の暴露が終了した試験片は、海水中から取り出して、直接引張試験に供した。これにより、試験片の引張強さおよび破断時の伸びを計測し、応力緩和を受ける前の初期状態と比較した。水槽には蓋を設置し、試験片が紫外線により劣化することを極力避けた。また、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。暴露中には定期的に試験片の状態を目視観察し、試験片の破断が確認された場合には、追加の試験片の暴露を開始するなどの対処を施した。

写真-4に、応力緩和実験の状況を示す。

(2) 実験結果と考察

図-31に、1～12ヶ月間、所定の強制変位を与えて応力

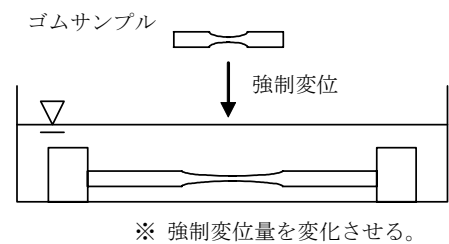


図-30 応力緩和実験の概要

表-6 応力緩和実験のケース

項目	ケース
強制変位量	100%, 150%, 200%, 300%
応力緩和時間	1ヶ月, 6ヶ月, 12ヶ月
試験片数	各ケース 1～3個

緩和させた普通硬度ゴム試験片に対して行った直接引張試験の結果を示す。引張強さは、破断時の荷重を破断位置における試験片断面積で除して求めた。これによれば、12ヶ月間の応力緩和を受けても、引張強さが大きく低下することはなかった。この傾向は、強制変位量の大小によらず認められた。

次に、引張破断時の試験片の伸びに及ぼす応力緩和期間と強制変位量の影響を図-32に示す。全体的な傾向として、応力緩和期間の増加とともに破断時伸びは低下した。データ数が少なく、バラツキも見られるが、実験結果を直線回帰して、応力緩和期間が100年の場合の破断時伸びを推定した。その結果を表-7に示す。これより、応力緩和実験時の強制変位量が大きいほど、伸び性能が低下する傾向にあった。しかしながら、最も強制変位量の大きい300%の場合でも、応力緩和期間100年後における破断時

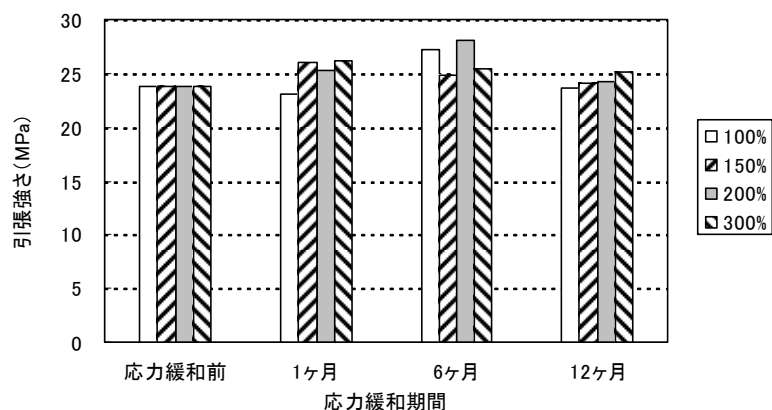


図-31 応力緩和による引張強さの変化

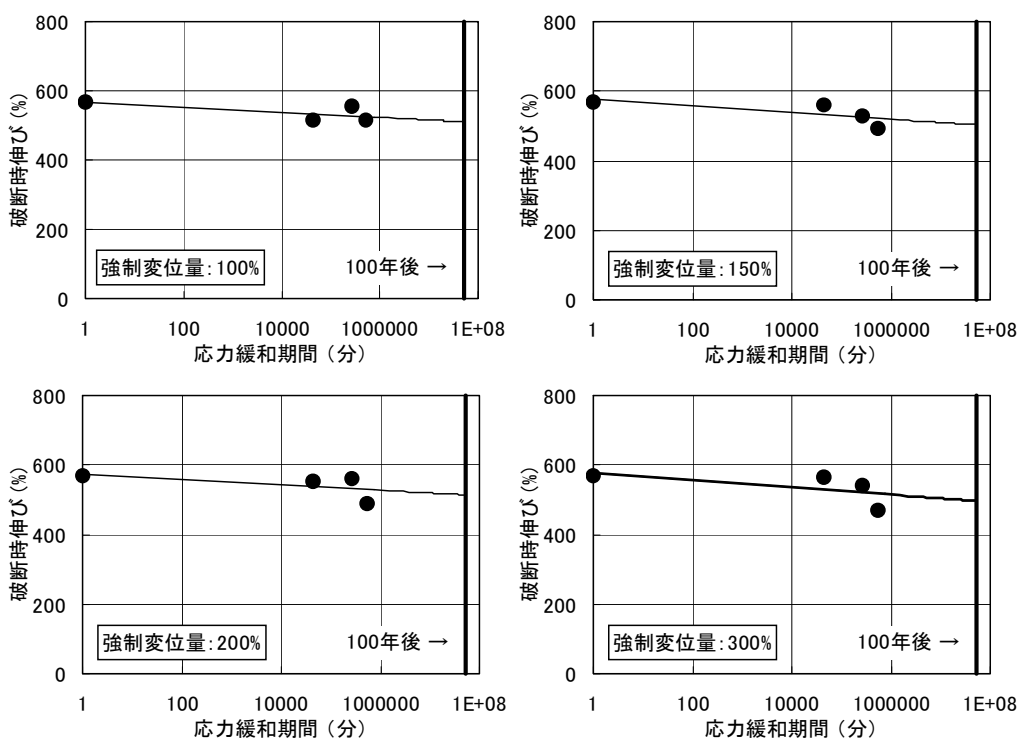


図-32 応力緩和による破断時伸びの変化

表-7 100年間の応力緩和後における破断時伸びの推定結果

	強制変位量			
	100%	150%	200%	300%
破断時伸び (%)	511	504	514	496
初期値に対する比	0.896	0.883	0.902	0.871

伸びは、応力緩和前の87%程度であった。この結果は、ゴムガasketを対象として実施された海中暴露実験結果⁴⁾と比較しても、著しく劣る結果ではなかった。これより、本実験で対象とした範囲の強制変位量による応力緩和現

象であれば、普通硬度ゴムの応力緩和にともなう引張特性の低下を特に考慮する必要がないことが示された。

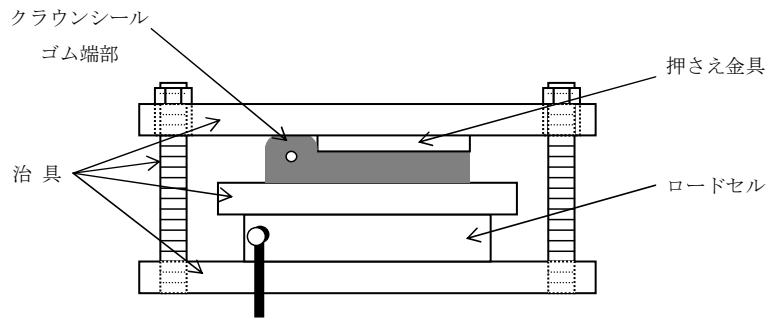


図-33 締着部の応力緩和促進実験



写真-5 締着部の応力緩和促進実験の状況

4.3 ゴム締着部における応力緩和現象

(1) 実験概要

クラウンシール式継手において、継手の安全性や止水性の鍵を握るクラウンシールゴムの鋼殻への取付けは、ゴム端部を2枚の鋼板で挟み込み、図-29に示すように、テコの原理を利用した締着によって行われている。このような形でクラウンシールゴムと鋼殻を締着した場合、沈埋トンネルの供用期間中に、ボルトのトルクが何らかの原因で緩んだり、あるいは、ゴム材料の応力緩和現象により反力が低下したりすると、当初期待していたゴムと鋼殻の締着程度が不十分となり、所要の止水性が満足できなくなる恐れがある。ただし、ボルトのゆるみによるトルク低下に起因する止水性の低下については、過去に実施された模型実験⁶⁾により、ボルトの締付けトルクの管理値である $200\text{N}\cdot\text{m}$ が $40\text{N}\cdot\text{m}$ まで低下したとしても止水性に問題がないことが確認されている。しかしながら、ゴム材料の応力緩和による反力低下に伴う止水性の低下については、まだ検討されていない。

そこで、クラウンシール式継手の締着部を切り出した実大モデルを製作し、ゴム材料の応力緩和に伴う反力低下現象について実験を行った。ゴム材料の応力緩和現象

には一般に長期間を要するため、ここでは前述したアレニウスの原理に基づいた促進実験を行った。実験では、図-33に示すような締着部モデルを、雰囲気温度を一定に保つことができる試験槽内に設置し、異なる温度下において反力の経時変化を計測した。雰囲気温度は、 80°C 、 60°C および 40°C とした。実験に先立って、あらかじめ万能試験機を用いて所定の荷重（おおよそ 10kN ）で締着部モデルのゴム部分を圧縮し、そのままの状態でもルトを締め込んだ。このときに導入された圧縮力に対する反力の大きさは、ゴム下に設置したロードセルにより計測され、試験槽内でも連続的に反力を計測できるようにした。試験槽内における応力緩和期間は、約2ヶ月とした。

一般に、アレニウスの原理に基づけば、 70°C 環境下における1日は、自然環境下の1～2年に相当すると言われている。

写真-5に、締着部の応力緩和促進実験の状況を示す。

(2) 実験結果と考察

図-34に、それぞれの温度で計測された反力と経過時間の関係を示す。図中の直線は、全実験データに対する回帰直線である。促進実験開始直後に、反力が低下せず直線性が失われている期間があるが、これは、ゴム内部の

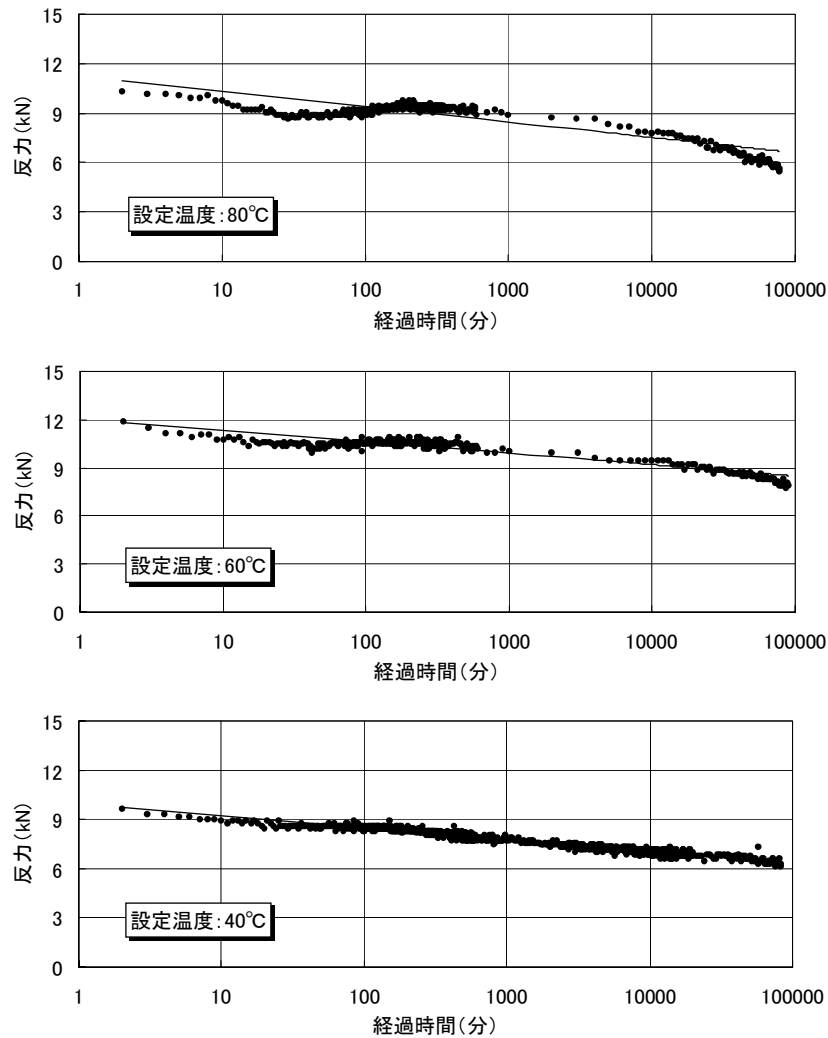


図-34 締着部の応力緩和実験結果

温度が試験槽内の温度まで上昇していなかったためと考えられる。そのため、試験槽内の温度が高いほど、この傾向が顕著であった。しかし、その後の反力は、経過時間の対数に対してほぼ直線的に低下したことがわかる。そこで、前述のアレニウスの原理に基づいて、沈埋トンネル設置位置における設定温度（18℃）での反力の経時変化を推定した。

促進実験結果から、反力が初期値から30%緩和するまでの時間と同じく40%緩和するまでの時間を求めて、アレニウスプロットを作図した。これを図-35に示す。なお、この際、30%緩和時間については、経過時間10000秒以降の実験データに対する回帰直線を、40%緩和時間については、経過時間1000000秒以降の実験データに対する回帰直線を用いて推定した。

その結果、設定温度18℃の条件下において、クラウン

シールゴム締着部の反力は、建設後5年で、初期状態から30%低下し、建設後189年で、40%低下することが推定された。よって、建設後100年では、ゴム材料の応力緩和現象により、締着部の反力が30~40%程度低下するといえる。したがって、クラウンシールゴムの鋼殻への締着にあたっては、この程度の応力緩和が生じることを十分に考慮した上で、ボルトの締付けトルクを決定する必要がある。

(3) サイドウォール部に作用する引張力の影響

クラウンシール式継手の締着部において、サイドウォール部に引張力が作用すると、締着部のゴム厚さが減少し、結果的にボルトによる締付け力が低下する可能性がある。この締付け力低下により、クラウンシールゴムの締着部からの拔出し抵抗が低下することが懸念されるだけでなく、十分な止水性を発揮できなくなる恐れがある。そこで、クラウンシール式継手の締着部に対する実大モ

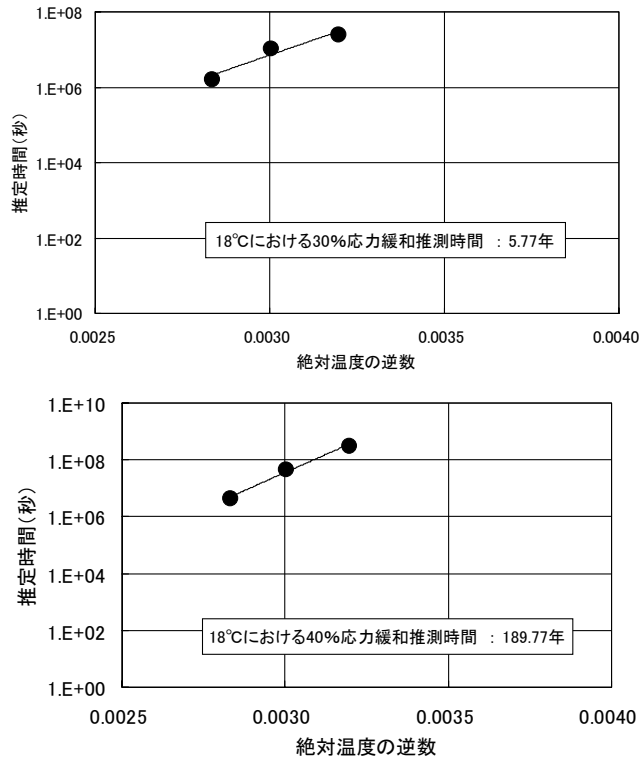


図-35 アレニウスの原理による推定結果

デルを製作し、サイドウォール部に引張力を作用させた状態で、ボルトによる締付け力の計測を行い、サイドウォール部に作用する引張力がクラウンシールゴムの拔出し抵抗に及ぼす影響を調べた。

a) 実験概要

図-36に、実験に用いた締着部モデルの概要を示す。ゴム部の幅は150mmとし、クラウン部中央でカットしたものを使用した(写真-6)。治具と押さえ金具で挟まれたクラウンシールゴム端部を、実際のクラウンシール式継手と同一の方法で締め込むことで圧縮した。

圧縮荷重を負荷した後、一定時間が経過してから、クラウンシールゴムのサイドウォール部に引張力を与えた。実験の状況を写真-7に示す。実験は、常温大気中で行った。この際、ボルトを締め込むことで得られた締付け荷重の反力をロードセルにより連続的に計測し、荷重の低下量を調べた。このような実験を、引張力が存在する場合と存在しない場合で実施し、引張力の有無が締付け荷重の低下量に及ぼす影響を評価した。また、異なる大きさの引張力が作用した場合についても実験を行い、引張力の大きさが締付け荷重の低下量に及ぼす影響についても検討を行った。実験結果のばらつきを考慮して、1ケー

スの実験に対して、各3回の計測を行った。1回の計測は、1週間連続して行った。

実験ではまず、ロードセルによる反力の計測値を確認しながら、4ヶ所のボルトを均等に締め付けた。クラウンシールゴム締着部を所定の締付けトルク(200N・m)で実際に取り付ける場合、長さ200mm(実寸法)あたりの計算上の締付け力は、18700Nとなる。本実験では、この締付け力を150mm幅に換算した $18700 \times 150 / 200 = 14025\text{N}$ を締着部モデルに負荷する締付け荷重とした。

b) 実験結果と考察

実験結果を図-37に示す。これより、締着部モデルのゴム部に生じた反力は、サイドウォール部に引張力が作用することで、最大約33%低下した。本実験における反力の計測は、締着部を圧縮して数分後から開始して、約1週間にわたって行った。これは、実際の沈埋トンネルの供用期間と比較すると、非常に短期間の挙動である。より長期間での挙動を評価しようとする場合には、ゴム締着部におけるゴム材料の応力緩和現象を考慮する必要がある。(2)で述べたように、100年後のゴム締着部における締付け力は、ゴム材料の応力緩和現象により初期値から30~40%低下することがわかっている。本実験により計測

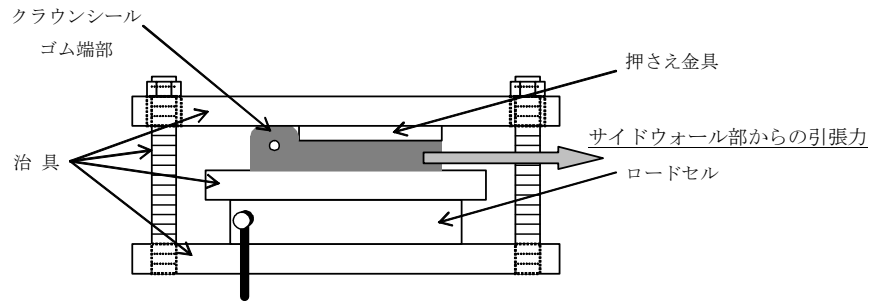


図-36 引張力を考慮した締着部の応力緩和実験



写真-6 ゴム試験体



写真-7 引張力を考慮した締着部の応力緩和実験

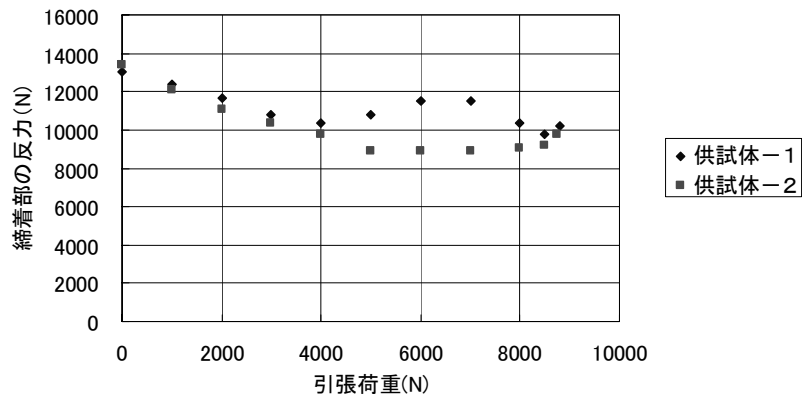


図-37 引張力を考慮した締着部の応力緩和実験結果

されたゴム締着部における反力の最小値は、長さ150mmあたり8898 Nであったことから、これを200mmの長さに換算すると、 $F_{min} = 8898 \times 200 / 150 = 11864 \text{N}$ となる。これに、100年間の供用中に生じる応力緩和量として、40%の荷重低下を考慮すると、100年後の締付け荷重 F'_{min} は、 $F'_{min} = 11864 \times 0.6 = 7118 \text{N}$ となる。

過去に実施されたクラウンシール式継手の締着部止水実験⁹⁾では、締付けトルクが40N・mの場合（締付けトルクの管理値（200N・m）の20%）でも、0.3MPaの水圧に対し

て止水性が確保できることが確認されている。したがって、このときの締付け力よりも、40%の応力緩和を考慮した締付け力 F'_{min} が大きければ、締着部の止水性は確保できていると判断される。

締付けトルクと締付け力とは比例関係にあるため、締付けトルクが40N・mの時の締付け力 F_{40} は、以下のように算出できる。

$$F_{40} = 200 \text{N} \cdot \text{m} \text{時の締付け力} \times 40 / 200 = 18700 \times 0.2 = 3740 \text{N} < F'_{min} = 7118 \text{N}$$

表-8 ゴム物性の比較

試験項目	タイヤ	配合推定試験片
引張強さ (MPa)	29	30
破断時伸び (%)	512	600
引裂き抵抗 (N/mm)	9	9

したがって、クラウンシール式継手の締着部ゴムに、サイドウォール部から引張力が作用し、かつ、ゴム材料に応力緩和が生じたとしても、100年という長期供用中でも締着部における止水性は確保できていると考えられる。

5. ゴム材料の耐海水性に関する検討

5.1 はじめに

ゴム材料が劣化する主な要因として、紫外線、温度、オゾン等が挙げられる。沈埋トンネル継手にゴム材料を用いた場合、その周辺状況から考えると、これらの要因による劣化の可能性はきわめて低いと考えられる。しかしながら、一般のゴム製品は耐用年数が短いものが多く、そのほとんどは消耗品として用いられている。したがって、沈埋トンネル継手のように、ゴム材料を長期間海水中で用いた場合の耐久性を、一般のゴム製品での実績に基づいて評価することは適切でない。しかしながら、沈埋トンネル継手に用いられているゴム材料を供用中に取り替えることは不可能であるので、ゴム材料の海水中における長期耐久性をあらかじめ検討しておく必要がある。そこで、海水中におけるゴム材料の長期耐久性評価に関する事例収集を行い、基礎的知見をとりまとめた。さらに、クラウンシール式継手の耐海水性を調べるため、クラウンシールゴムの耐海水性評価実験を行った。実験に供した試験片については、長期間にわたって海水の作用を受けたゴム物性の変化を調査できるよう配慮してある。

5.2 海水中にあるゴム材料の長期耐久性評価に関する事例収集

ゴム材料の主な用途は、タイヤやスポーツ用品などであり、耐用年数は比較的短い。また、海洋環境下においては、防舷材やオイルフェンスなどに適用されているものの、これらは基本的に交換を前提として使われているため、交換不可能な沈埋トンネル継手とは耐久性についての考え方が大きく異なる。しかしながら、これまで海洋環境下におけるゴム材料の長期耐久性について体系的に検討が行われた事例は少ない。ここでは、既往の検討

結果のうち、主なものを示す。

(1) ゴムガasketの実海洋環境暴露実験⁴⁾

沈埋トンネル用ゴムガasketの海水中における長期耐久性を調べるため、圧縮状態の実物大ゴムガasketおよびシート状のゴムサンプルを海底泥中(川崎沖)に、約10年間にわたって暴露した事例がある。

用いたゴムガasketは、長さ300mmのY-190-148-50であり、本体部を36%の圧縮率で圧縮した状態で暴露した。暴露開始後、1年10ヶ月、3年2ヶ月、5年2ヶ月および10年8ヶ月で暴露試験体を回収し、載荷試験機を用いて再圧縮した。その結果、永久ひずみによる変形量の増加はあったものの、暴露前とほぼ同様の圧縮特性を有していた。暴露後10年8ヶ月の圧縮永久ひずみ率は約12%であり、実験結果から100年後の値を推定すると約17%であった。

一方、シートサンプルの暴露実験も、ゴムガasketの場合と同一の条件下で行われている。用いられた試験片は、150×150×2mmのシートサンプルで、ゴム硬度は40度および50度であった。ゴム材料の劣化を判断しやすい破断時伸びで評価すると、暴露後10年8ヶ月経過しても、暴露前の80%以上の伸び性能を有していた。実験結果から、100年後における伸び性能の低下を推定した結果、約23%であった。なお、本実験は、厚さが2mmの薄い試験片を用いて行われたため、ゴム材料にとってはきわめて苛酷な実験条件であったと考えられる。実際の沈埋トンネル継手に用いられるゴムの断面は十分に大きいため、ゴム表面近傍で劣化が生じたとしてもゴム全体の品質や性能に及ぼす影響は相対的に小さくなると考えられる。

(2) 海面下24 mに41年間放置されたタイヤの物性調査

1941年にスコットランド沖(海面下24 m)に沈没した軍艦が41年後の1982年に引き上げられて、積み込まれていたタイヤの劣化調査が行われている。

本調査結果によれば、タイヤの外観には全く変状は認められず、海生生物による侵食も認められなかった。また、タイヤの原料ゴムの配合を推定して製作された試験片の物性と引き上げられたタイヤのゴム物性を比較した結果を表-8に示す。

これによれば、海水中に41年間放置されたタイヤのゴ

ム物性は大きく変化していないことがわかる。最も変化が大きかった破断時伸びでも、初期値に対して20%程度の低下であった。

5.3 ゴム材料の長期耐久性評価実験

クラウンシール式継手に用いられているゴム材料の耐海水性を調べるため、写真-8に示すような試験片を製作し、港湾空港技術研究所内にある海水循環水槽の海中部に設置した。設置位置は、実際の海水に常に曝されており、紫外線も当たらないと考えられるため、作用する水圧以外は、沈埋トンネル建設地点と同様の暴露環境であるとみなすことができる。試験体A(写真-8左)は、クラウンシールゴムを幅50mmで切り出したものであり、一方の試験体B(写真-8右)は、鋼製治具によりサイドウォール部に所定の引張変形を強制的に与えたものである。製作数量は、それぞれ8体とした。

暴露した試験片に対しては、定期的にゴム表面の目視観察が行われている。今後、所定の期間が経過した後に回収し、JISに定められた引張試験片⁷⁾を切り出して成型し、直接引張試験などを実施する予定である。これにより、クラウンシール式継手に用いられているゴム材料の耐海水性と、それに及ぼす引張ひずみの影響を明らかにできると考えている。

試験片の暴露は、可能な限り長期間実施することが望ましいと考えられる。今後の試験片の回収時期については、定期的に実施される目視観察により検出されるゴム表面の変状や暴露期間などを総合的に勘案して定めるものとする。

回収した試験片に対しては、可能な限り多くの項目について試験を実施して、長期にわたるゴム材料の耐海水性を多角的に評価することが望ましい。以下に、今後実施する試験の項目を示す。

<ゴム試験片全体に対して>

- ・外観目視による変状調査
- ・付着物の調査
- ・ゴム硬さの分布調査¹¹⁾

<ゴム試験片から切り出したサンプルに対して>

- ・直接引張試験⁷⁾
 - － 引張強さ
 - － 破断時伸び
- ・ゴム硬さ試験¹¹⁾
- ・空気加熱老化試験¹²⁾
 - － 引張強さ変化率
 - － 伸び変化率
 - － ゴム硬さ変化率

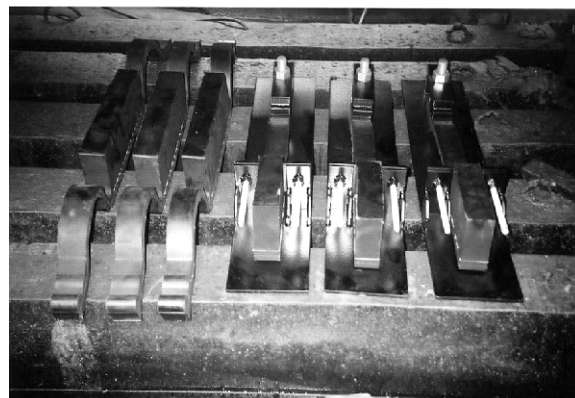


写真-8 耐海水性評価実験に用いた試験片

- ・圧縮永久ひずみ試験¹³⁾
- ・耐オゾン試験¹⁴⁾

これらの項目について試験を行って、長期間にわたる海水中への暴露にともなうゴム物性や品質の変化を検討する予定である。また、暴露開始時に与えた初期ひずみがゴム物性や品質の変化に及ぼす影響についてもあわせて検討を行う。

6. まとめ

沈埋トンネル継手の構成材料であるゴム材料では、長期間にわたって高応力あるいは大変形状態が海水中で持続する。最近開発されたクラウンシール式継手では、従来の継手と異なり、ゴム材料には大きい引張力あるいは引張変形が常に作用する。このような場合のゴム材料の長期耐久性について、変形の時間依存性および耐海水性の観点から検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) クラウンシール式継手を構成する高硬度ゴムおよび普通硬度ゴム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応力レベルを推定した結果、高硬度ゴムでは45%、普通硬度ゴムでは33%となった。これを引張ひずみに換算すると、高硬度ゴムでは180%、普通硬度ゴムでは320%となった。したがって、クラウンシール式継手の設計にあたっては、ゴム材料に発生する応力やひずみがこれらの限界値を超えないように配慮しなければならない。
- 2) クラウンシール式継手のうち、クラウン部は水圧作用を絶えず受けることからクリープ現象によるたわみ変形の増加が懸念された。これについて、実際の水圧

を利用したクラウン部のクリープ実験を行った結果、100年後におけるたわみ量は、初期状態から、水圧が0.2 MPaの時に12 mm、水圧が0.3 MPaの時に10 mm増加すると推測された。

- 3) クラウンシール式継手を構成する材料（高硬度ゴムおよび普通硬度ゴム）のクリープ特性を、アレニウスの原理に基づいた促進実験の結果から定式化し、その妥当性について、室温環境下におけるクリープ実験の結果を用いて検証した。その結果、促進実験の結果から推定されたクリープ特性はおおむね妥当であることが示された。
- 4) クリープ促進実験結果から推定されたクリープ特性を取り入れた非線形有限要素解析を実施し、ゴム材料の時間依存性変形を考慮した継手の変形解析を行った。解析では、水圧と継手変位を同時に受けるクラウンシール式継手内部で発生する最大主ひずみをクリープの影響を考慮して算定した。各構成材料ごとに得られた最大主ひずみは、それぞれの破断ひずみと比較すると十分に小さかった。したがって、ゴム材料のクリープ現象によりクラウンシール式継手の変形が進行したとしても、本継手の安全性に問題がないことが示された。
- 5) クラウンシール式継手を構成する普通硬度ゴムを対象として、応力緩和後における物性変化を調べた結果、300%の強制変位量を12ヶ月間与えたとしても、応力緩和によってゴム物性が大きく変化することはなかった。普通硬度ゴムの伸び性能の100年後における推定値は、初期状態の87%程度であり、本実験で対象とした強制変位量の範囲であれば、応力緩和によるゴム材料の物性変化を継手の長期耐久性を検討する際に特に考慮する必要がないことが示された。
- 6) クラウンシール式継手の止水性を決定づけるゴム締着部における締付け荷重の緩和現象を、アレニウスの原理に基づく促進実験を行って検討した。その結果、建設後5年で、締付け荷重が初期値から30%低下し、建設後189年で40%低下することが推定された。したがって、クラウンシールゴムの鋼殻への締着にあたっては、この程度の応力緩和が生じることを考慮した上で、ボルトの締付けトルクを決定する必要がある。
- 7) クラウンシール式継手の締着部には、サイドウォール部から引張力が作用しているため、ゴム厚さが減少し、ゴム締着部における締付け荷重が低下することが懸念された。そこで、締着部ゴムに引張力が作用した状態でボルトによる締付け荷重の計測を連続的に行った。その結果、サイドウォール部からの引張力が反力

低下に及ぼす影響は小さく、實際上問題とはなるものではないことが示された。

- 8) クラウンシール式継手に用いられているゴム材料の耐海水性について、既往のゴム材料の耐海水性に関する検討事例を調べた結果、ゴム材料の長期間にわたる耐海水性が著しく劣ると評価されたデータはなかった。さらに、クラウンシールゴムの長期にわたる耐海水性を将来的に適切に評価できるようにするため、海水中への暴露実験を開始した。実験では、ゴムに作用する引張ひずみの影響についても検討できるように配慮した。

7. あとがき

本検討では、沈埋トンネル継手の主要な構成材料であるゴム材料に、長期間にわたって引張力が作用し続けた場合の長期耐久性について、特に変形の時間依存性（クリープおよび応力緩和）および耐海水性の観点から検討を行い、沈埋トンネル継手の長期にわたる安全性を検証した。

今後は、ゴム材料の破断ひずみやクリープ特性を考慮した許容ひずみの適切な設定方法についてさらに検討を行う必要がある。また、ゴム材料の耐海水性については暴露実験を継続中であり、結果がまとまり次第報告する予定である。

(2006年6月16日受付)

謝辞

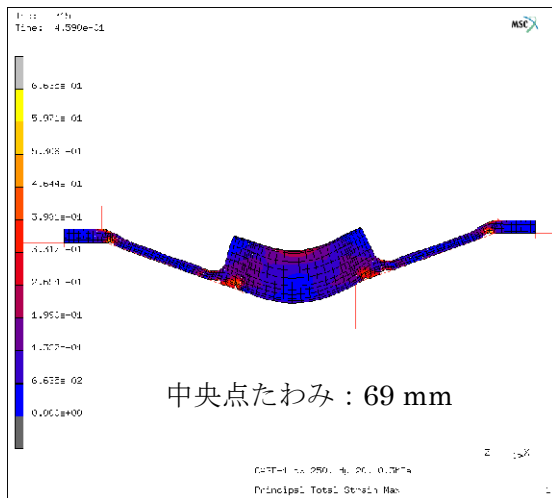
本検討のとりまとめには、大阪港夢洲トンネル構造専門部会（沿岸開発技術研究センター（当時）、委員長 清宮理 早稲田大学教授）における討議内容を参考にさせていただいた。また、各種実験の遂行にあたっては、SRIハイブリッド株式会社の関係各位に多大なるご協力をいただくとともに、貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

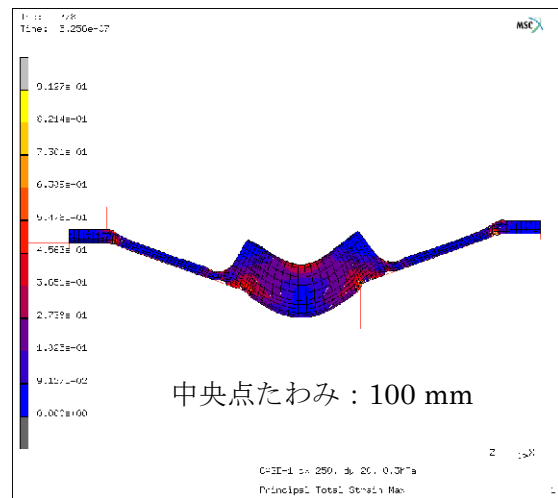
- 1) 清宮理、園田恵一郎、高橋正忠：沈埋トンネルの設計と施工、技報堂出版、2002年。
- 2) 清宮理、藤澤孝夫、山田昌郎、本多宗隆：沈埋トンネル柔継手の力学性状、港湾技研資料、No.728、1992年。
- 3) 清宮理、田邊源吾：沈埋トンネル接合部のゴムガスケットの基本的な力学試験と有限要素法解析、港湾技研資料、No.798、1995年。

- 4) 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年.
- 5) 沿岸開発技術研究センター: 沈埋トンネル技術マニュアル (改訂版), 沿岸開発技術ライブラリー, No.10, pp.69-70, 2002年.
- 6) 横田弘, 岩波光保, 北山齊, 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年.
- 7) 日本規格協会: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー引張特性の求め方, JIS K 6251, 2004年.
- 8) 大津政康 : アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 2005年.
- 9) Ogden, R.W. : *Non-Linear Elastic Deformations*, Dover Publishing, 1984.
- 10) Ab-Malek, K. and Stevenson, A. : The effect of 42 year immersion in sea-water on natural rubber, *Journal of Materials Science*, Vol.21, pp.147-154, 1986.
- 11) 日本規格協会: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法, JIS K 6253, 1997年.
- 12) 日本規格協会: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー熱老化特性の求め方, JIS K 6257, 2003年.
- 13) 日本規格協会: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの永久ひずみ試験方法, JIS K 6262, 1997年.
- 14) 日本規格協会: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー耐オゾン性の求め方, JIS K 6259, 2004年.

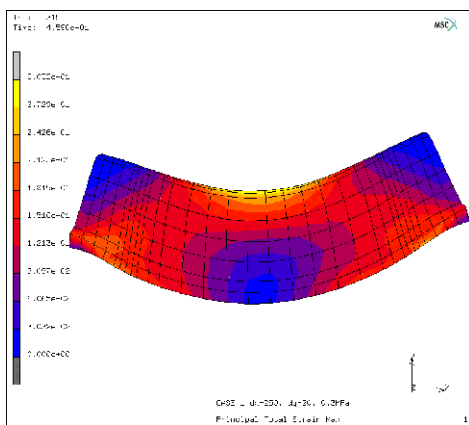
付録 クラウンシールゴムの変形図と主ひずみ分布図



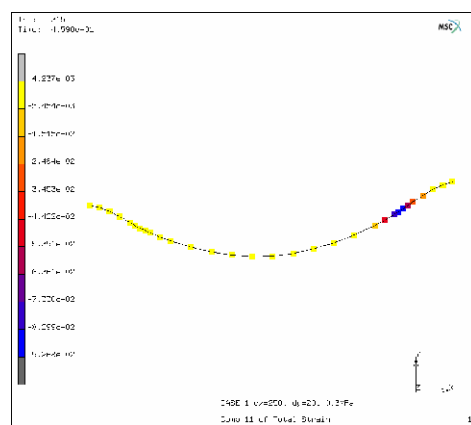
付図-1 クラウンシールゴムの初期形状



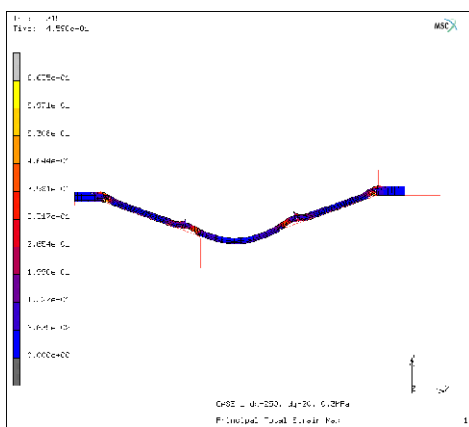
付図-2 クラウンシールゴムの100年後の形状



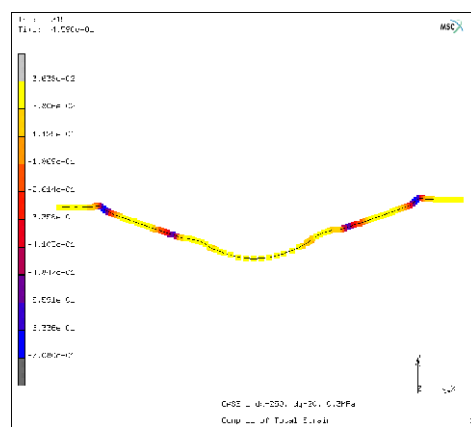
a) 高硬度ゴム



b) アラミド繊維

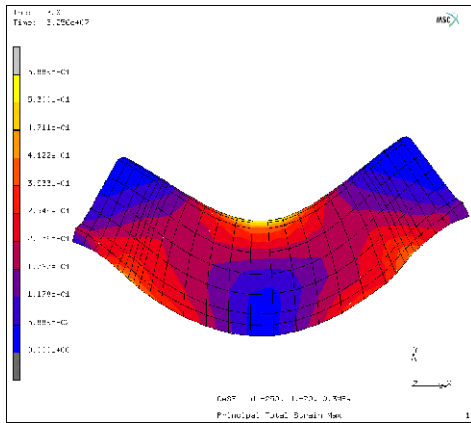


c) 普通硬度ゴム

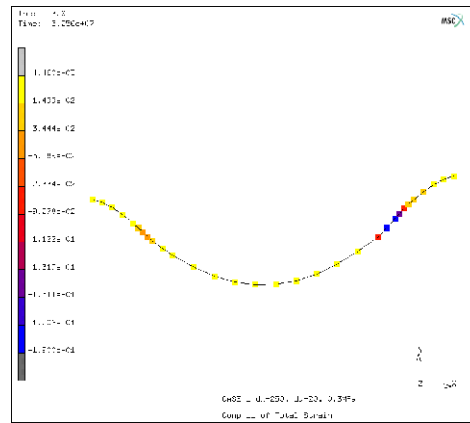


d) ナイロン繊維

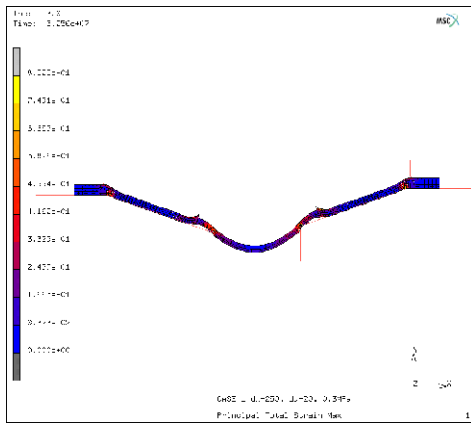
付図-3 最大主ひずみ分布 (初期状態)



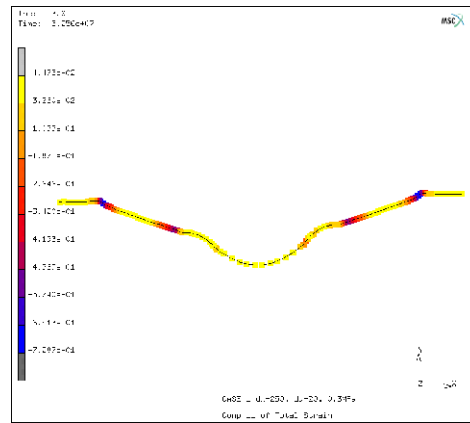
a) 高硬度ゴム



b) アラミド繊維



c) 普通硬度ゴム



d) ナイロン繊維

付図-4 最大主ひずみ分布 (100年経過後)

港湾空港技術研究所資料 No. 1137

2006. 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. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2006) by PARI

All rights reserved. No part of 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。