

ゴムと繊維の複合材料によるトンネル用止水材の力学特性

Mechanical Properties of Seals Composed of Rubber and Fibers for Tunnel Joints

清宮 理*, 中野 圭崇**, 榊原 大志**

Osamu KIYOMIYA, Yoshitaka NAKANO and Daishi SAKAKIBARA

*工博, 早稲田大学教授、理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

**大学院学生, 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

Flexible joints are installed between tunnel elements to reduce large sectional force due to earthquakes and ground settlement. When tunnel is constructed near revetment or reclaimed area, large torsion force is applied for the tunnel. To cope with the torsion, Omega type rubber seal that has large deformation capacity is adopted. Torsion loading test was carried out to know torsion properties and strains of the rubber seal that was related to the endurance of the rubber materials. The strains at corner part of the rubber gasket were not so large by the test and by finite element method considering nonlinear material property until 4-5 degrees of torsion angle.

Key Words: rubber seal, torsion, loading test, strains, F.E.M. non linear property, duct

キーワード: ゴム継手、ねじり、載荷試験、ひずみ、非線形性有限要素法解析、共同溝

1. まえがき

地震、地盤の不等沈下、温度変化などによる変形を吸収し断面力を低減する目的で、トンネル、共同溝、擁壁等には止水ゴムによる柔継手が用いられる。止水ゴムの主要な機能は、断面力を吸収することおよび止水性の確保である。トンネル等が護岸に平行に設置あるいは盛り土に近接して設置された場合、不均等な地盤変形によりにねじりが生じる。とくに止水ゴムのコーナー部に大きなひずみが生じる可能性が指摘された。しかし、ひずみの大きさ等については十分な知見が得られていなかった。

ここに、止水ゴムはゴムと繊維の複合材料で構成されており、大きな変形性能を有している。繊維はゴムの補強材としての役割である。地盤沈下による変形のうち、軸方向、曲げ、せん断については従来の研究において止水ゴムの変形性能が確かめられてきた。本研究では、継手部にねじりが加わる状況下での止水ゴムの変形性能を確かめるために、継手部をモデル化し静的載荷試験を実施した。現在止水ゴムのひずみに関して設計では有限要素法によって行われている。そこで今回は材料非線形性と幾何学非線形性を考慮した有限要素法解析を、実験装置とまったく同様のモデルで実施し、実験結果と比較することで、有限要素法により実現現象が再現可能であるかどうかを調べ、発生するひずみ量の推定を行った。

ゴム材が破壊に至る終局強度はひずみ値で規定され、その値は一軸状態で500%ほどであるが、地盤沈下にもともなう止水ゴムの変形は永久にひずみとして残留するもの

であり、一般にゴム材は40～50%のひずみを保ったままの状態が続くと通常より劣化が早く進むといわれている。(参考文献7))本論文ではゴム材の破断等に対する終局強度よりむしろ耐久性に影響するひずみ、つまり、残留ひずみに着目してねじりを受けたときのひずみ量を調べた。

2. 止水ゴムの概要

2.1 継手の構造

図-1にトンネルの柔継手の構造例を示す。この継手は、ゴム製のU字形で、トンネルの函体同士を接合し地震力、地盤沈下、温度変化などによる軸力と曲げモーメ

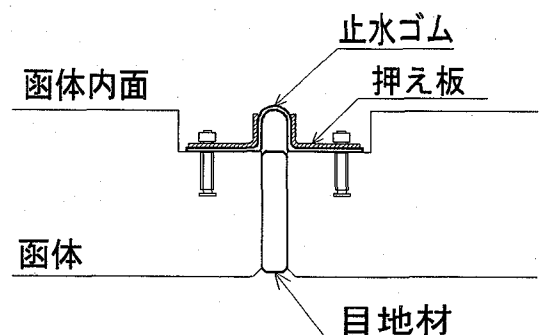


図-1 トンネルの柔継手の構造例

ントを吸収する。止水ゴムはトンネルの断面に輪状に配置しボルトにて本体に固定されて取り付けられる。そして主にある程度の引張に対して止水ゴムは機能し、函体

内面への水の侵入を防いでいる。圧縮に関しては歴青材等の目地材を函体間に配置してコンクリートの直接の接触を防止している。

また、図-2に止水ゴムの構造を示す。止水ゴムを力学的に補強する目的でゴム材の内部の中央部にナイロン製の繊維の層が挿入されている。繊維の層は、ぴんと張った所に直交してそれに織り込ませているため、縦と横で織り方が異なっている。そのため、縦および横方向で引張特性が異なる異方性を示す。

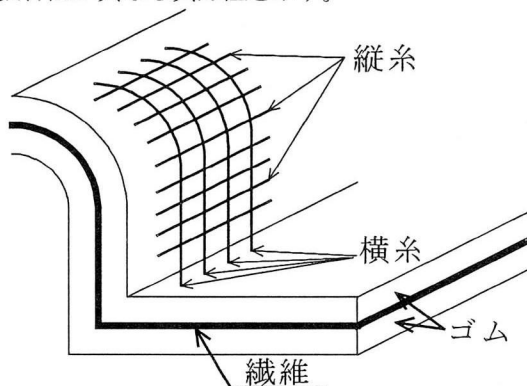


図-2 止水ゴムの構造

2.2 構成材の特徴

ゴム材は、荷重をかけると変形と荷重の関係が直線的でなく強い非線形性を示す。また変形中に体積がほとんど変わらずポアソン比は0.5に近い。このことからゴム材は、超弾性体と呼ばれている。繊維はナイロンで応力ひずみ関係がほぼ破断まで直線的である。

3. 静的載荷試験

3.1 ゴムと繊維の複合材料の一軸引張試験

(1) 供試体

止水ゴムの基本的な力学性状を知るために一軸引張試験を行った。この供試体の概要を図-3に示す。

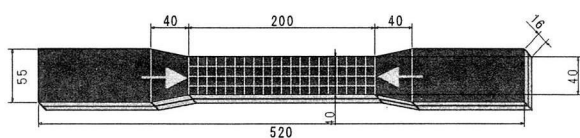


図-3 供試体の概要

供試体の全長は520mmで厚さは16mmで厚さ方向の中央に繊維が挿入されており、引張部分の幅は40mmで載荷装置のチャック部は55mmである。供試体表面にはひずみ計測に用いるために白色の塗料で10mm四方のメッシュを描いた。ゴム材はNBR (Nirile-Butadiene-Rubber) で、繊維の材質はナイロン6で、繊維の層は縦と横で引張特性が異なる直交異方性の特徴を持つ。そこで、供試体は縦方向繊維と横方向の2つとした。

(2) 供試体と同材料のゴム材・繊維材の性質

ゴム材・繊維材の性質は次のようになった。ゴムの圧

縮試験結果(供試体寸法:直径29mm、高さ12.7mmの円柱)を図-4に、繊維の引張特性を図-5に示す。圧縮試験においては圧縮量にほぼ比例して圧縮ひずみ率も大きくなっている。一方、繊維の弾性係数は、縦方向が173N/mm、横方向が89.4N/mm(幅1mmあたりという意味)であった。よって縦方向の弾性係数が横方向の2倍ほど大きい値であるといえる。また、前述した通り破断までの勾配はほぼ一定であり非線形を示さない。そして9mmから12mmののびで繊維は破断した。

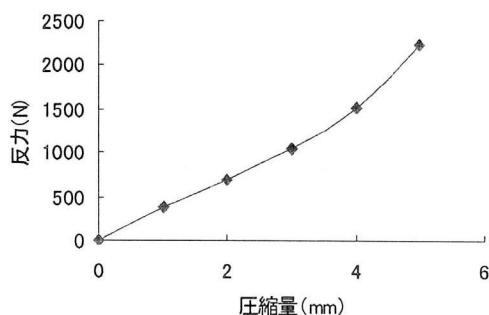


図-4 ゴム材単体の圧縮試験結果

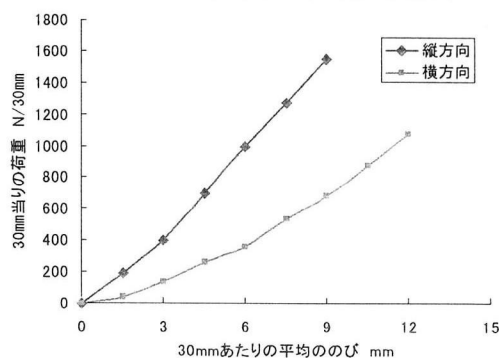


図-5 繊維単体の引張特性

(3) 試験手順

油圧式万能試験機を用い供試体両端に引張力を加えた。初期のチャック間の距離は380mmで引張試験は変位制御で実施した。載荷は、載荷装置となじませ、ゴム材料の性質を安定させるために、まず変位50mmまで与え、いったん除荷した後、再び変位を与え、内部の繊維が破断した後チャックが滑って供試体が外れたところで終了した。

ひずみの計測は、まず供試体表面に描いたメッシュの交点をデジタルカメラで撮影し、各載荷段階ごとの変位量を計測した。そしてこの増分量を基にメッシュ内でひずみが一定と仮定して計算によってひずみを求めた。

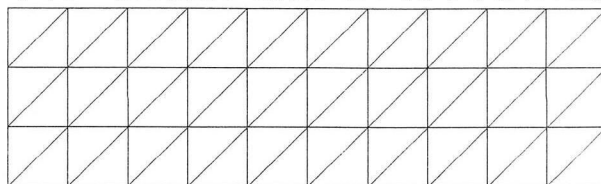


図-6 メッシュモデル図

(4) ひずみの計算方法

今回行ったねじり試験のゴム・繊維複合材の表面のひずみを、表面に描いたメッシュを図-6のように三角形要素に切り、2次元連続体におけるひずみ $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$ と変位 $(u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k)$ の関係を用いて、有限要素法的に求める。そしてこの各点の座標 (x_i, y_i) をとり、マトリックスの形にまとめると

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} y_j - y_k & 0 & y_k - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ 0 & x_k - x_j & 0 & x_i - x_k & 0 & x_j - x_i \\ x_k - x_j & y_i - y_k & x_i - x_k & y_k - y_i & x_j - x_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{pmatrix}$$

ここに $\Delta = (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_j)(y_j - y_i)$

(1)

である。ここから主ひずみを求める。計算を進めていくと、主ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は、

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\gamma_{xy}^2} \right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\gamma_{xy}^2} \right]$$

(2)

となる。この式をもとにして、実験結果で得られた各交点での変位の移動量よりひずみを計算する。

3.2 ゴムと繊維の複合材料の引張試験結果

(1) 変形状況

繊維破断直後と载荷終了時の変形状況を写真-1に示す。繊維が破断した後は、変形が極端に増大する場所と、ほとんど変化しない場所にわかれているのが目視で確認できる。試験後の供試体の側面を確認したところ、破断した繊維の一端が飛び出している場所があることが確認された。この位置で繊維が破断したと観察された。その後、破断した箇所でのゴムが延びていった。

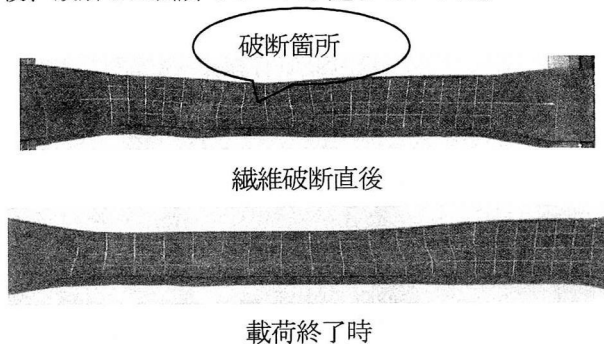


写真-1 引張試験における変形状況

(2) 公称応力と伸長比関係

図-7に公称応力-伸長比関係を示す。ここに、伸長比とは、実験前の最初の長さを1としたときのある荷重での長さの比率である。供試体1は繊維が縦方向、供試体2は横方向である。伸長比が約1.25を超えると補強繊維は破断した。またそのときの公称応力は、供試体1が2.11N/mm²、供試体2が2.19N/mm²であった。供試体内部の繊維が破断すると応力ひずみ関係の曲線の勾配は大きく

減少し負の勾配になる。その後、再び载荷を続けると再び勾配を増すが、また別の場所で繊維が破断すると、はじめの破断が起きたときと同様に勾配は減少する。これを繰り返しながら応力が増えずに伸長比が増す状態が続いた。また、供試体1、2の応力-伸張比関係がほぼ同じになったのは、大弾性体であるゴムによる影響が支配的であるからと考えられる。

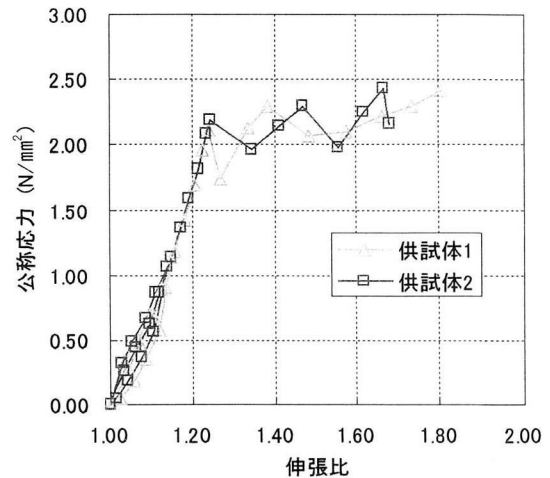
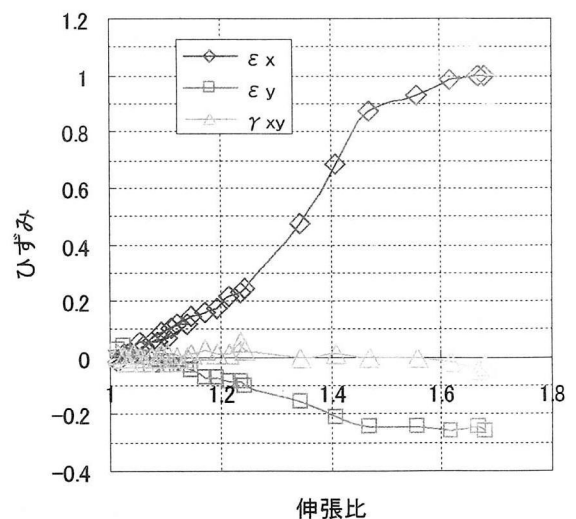


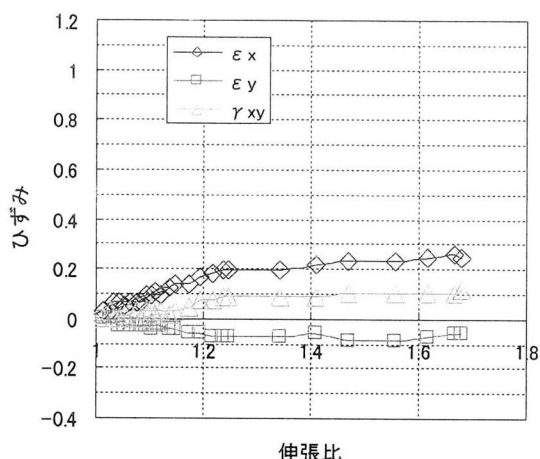
図-7 公称応力と伸張比の関係

(3) ひずみ成分と伸長比関係

供試体の表面に生じた各ひずみ成分と伸長比の関係を図-8に示す。一軸試験の引張の方向へのひずみを ε_x とし、引張の方向と直交する方向へのひずみを ε_y とした。図-8より繊維が破断する伸張比1.3までの範囲において ε_x と ε_y の比がほぼ2:1の関係を保ちながら変形していることがわかる。つまりポアソン比が約0.5でありゴムと繊維の複合材料はゴム材の特徴である等体積変化の性質を持っていることが確認された。



(a) 繊維が破断する場所の表面ひずみ



(b) 繊維が破断しない場所の表面ひずみ
図-8 表面のひずみ成分と伸張比の関係

また、表面下の繊維が破断するかどうかで表面に生じるひずみの増加の傾向に変化が現れた。繊維が破断する箇所の表面では繊維の破断（伸張比1.25付近、ひずみ0.3程度）を契機に伸張比に対するひずみの伸びが急激に大きくなるのに対し、繊維が破断しない箇所の表面では繊維が破断した後、伸張比が増してもひずみの大きさはほとんど変化しなかった。すなわち繊維が破断した箇所で、伸びが集中したことになる。

3.3 止水ゴムのねじり実験

(1) 供試体

ねじり試験に用いた供試体の概要を図-9に示す。供試体は一軸引張試験で材料特性を確かめた複合材料で構成されている。ゴムの厚さは15mmである。U字形の半円部の直径は内寸法で40mmであり、基部にはRが取り付けられている。ねじりの軸に対する断面形状は八角形で、止水ゴムの断面は半円と直線により構成されている。載荷装置への取り付け部分による八角形の一辺の長さは621mmである。載荷装置へはボルトで固定した。

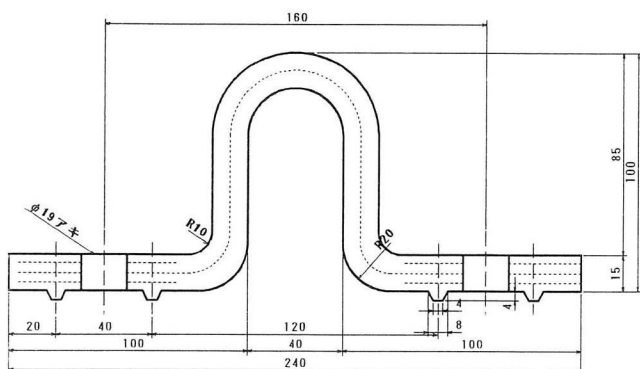


図-9 供試体の概要

(2) 載荷方法と計測項目

載荷装置の概要を写真-2に、装置断面図を図-10

に示す。供試体を取り付けるフレームは正八角形である。供試体は上下のフレームの間に完全に密封する形でフレームの内側と外側に対称的にめがらせてある。上部フレームを2台のジャッキで回転させることで、上下フレームの間に設置した供試体にねじりが加わるように静的載荷を行った。載荷は変位制御とした。また、外側止水ゴムと内側止水ゴムの間の空隙に水を充填させ止水ゴムに圧力を加えた。載荷装置に直接水道管を接続し。載荷装置に取り付けられたバルブで水圧を調整した。この水圧は深さ10m程度での地下水圧（0.1～0.2N/mm²）を模擬した値である。水圧は現地の継手の設置状況と合わせてU字系の内側より作用させた。載荷試験のケースを表-1に示す。ケース1はフレーム間に水を充填しない状態でねじりを与えた場合で、ケース2は所定の値まで水圧を与えた後ねじりを加えた場合である。

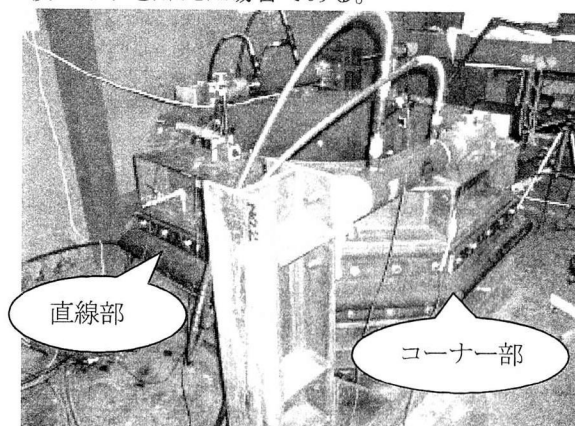


写真-2 載荷装置の概要

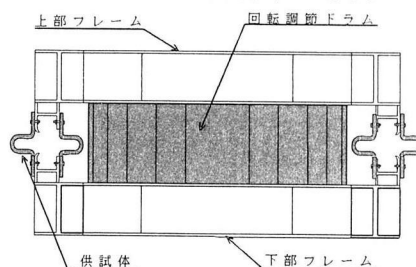


図10 装置断面図

表-1 載荷試験のケース

ケース	水圧 (N/mm ²)	最大ねじり角
1	0	5.25°
2	0.1	4.19°

計測項目は、表-2に示すように、供試体の表面ひずみ量、ねじり角、上部フレームの水圧による浮き上がり量、載荷荷重、供試体の変形状況とした。この計測は本来、内側止水ゴムでも行われるべきものであるが、装置の制約から外側のみで計測を行うものとする。ここでは、供試体の一辺の中点部分を横糸方向に断面における直線部から半円部の頂点にかけて3等分の領域に分割し、そ

れらをエリア1からエリア3とした。また、コーナー部においても同様に3等分の領域に分割してエリア4から6とした。ここでコーナー部とは八角形中2つの直線部における135度の交差部をさす。図-11に供試体断面方向から見たひずみの測定位置を示す。それぞれのエリアは30mm×30mmで1辺をさらに3等分しているの、ひとつのエリアは9つの要素で構成されている。これらのエリアにはあらかじめメッシュを描いておき、トレーシング紙にメッシュの交点を写し取り、変位を追跡することでひずみを算出した。写真測量、マーカによるレーザー光変位などの近代的な自動計測も試みたがU字形の変形が大きい場合精度が悪く今回採用できなかった。

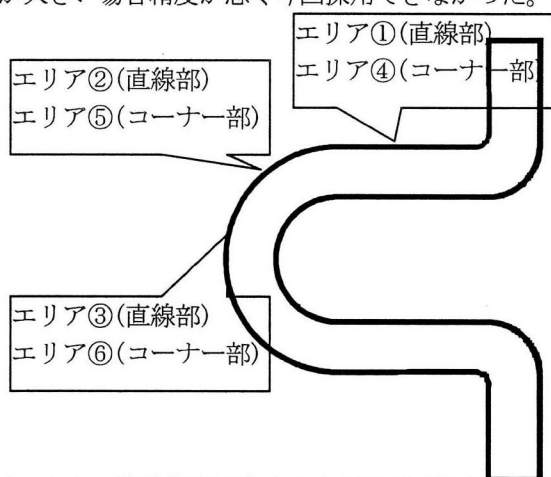


図-11 供試体断面方向から見たひずみ測定位置

表-2 計測項目

計測項目	測定器および測定方法
供試体の表面ひずみ	トレーシングペーパー (6箇所/1体)
ねじり角	変位計(2箇所/1体)
上部フレームの浮き上がり量	変位計(3箇所/1体)
载荷荷重	ポンプ圧力計
水圧	水圧計
供試体の変形状況	カメラ

3.4 止水ゴムのねじり実験結果

(1) 変形状況

写真-3に止水ゴム供試体の初期とねじりを加えた後の変形状況を示す。水圧をかけないケース1では、ねじりを加えるにしたがって2度付近から供試体のコーナー部の近傍がよじれそこでの直線部が大きく蛇行する現象が見られた。ただしコーナー部箇所の変形は大きくならなかった。ケース2において、水圧をかけると供試体の断面全体が半円の円筒状に変形し、その後4度程度のねじりを加えてもケース1のような大きな蛇行現象は見られず外側に膨れたままの形状であった。このように水圧有り無しで変形挙動が大きく異なった。

(2) ねじり角とひずみの関係

図-12にケース1のねじり角と主ひずみ ϵ_1 の関係を、図-13にケース2のねじり角と主ひずみ ϵ_1 の関係を示す。直線部とコーナー部とで比較した場合、ケース1、2のいずれもコーナー部よりも直線部の方に大きなひずみが発生している。ケース1では直線部のひずみがコーナー部よりも約6倍から3倍ほど大きく、ケース2では直線部の方がコーナー部よりも約2.5倍から4倍ほど大きかった。

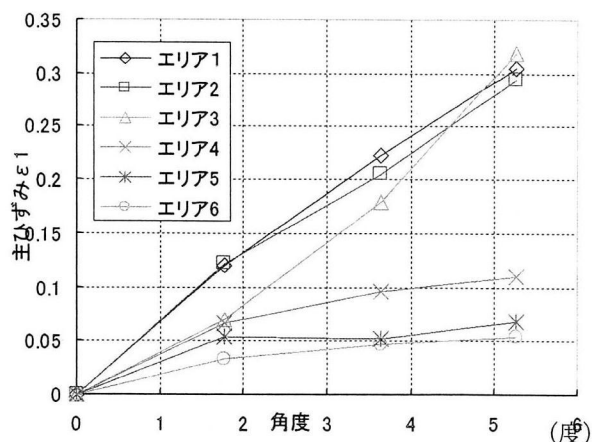
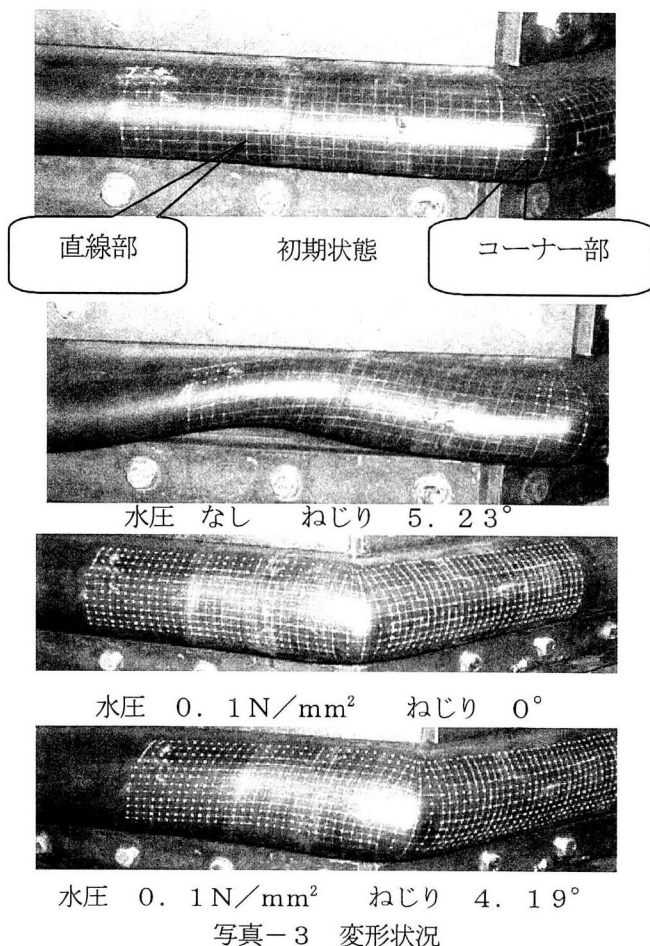


図-12 ケース1のねじり角と主ひずみ ϵ_1 の関係
(エリア1～3は直線部、4～6はコーナー部)

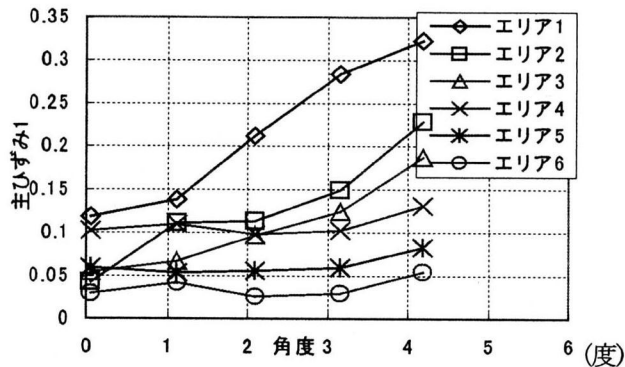


図-1 3 ケース2のねじり角と主ひずみ ε_2 の関係
(エリア1～3は直線部、4～6はコーナー部)

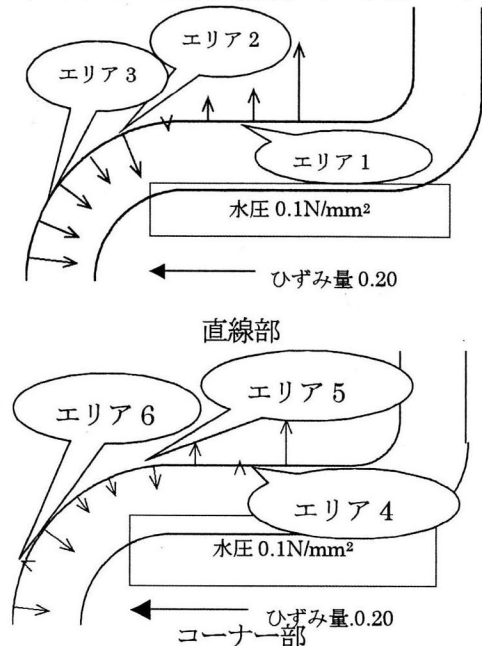


図-1 4 断面方向のひずみの分布状況
(部材内側への矢印が圧縮、外側が引張)

また、ゴムと直角方向の同一断面内で比較した場合、ひずみの大きさは直線部断面ではエリア1 > 2 > 3、コーナー部断面ではエリア4 > 5 > 6となっている。水圧をかけたときに各エリアに生じる断面方向のひずみの分布状況を図-1 4に示す。直線部ではエリア1とエリア2の間、コーナー部ではエリア4とエリア5の間で断面方向(横糸方向)ひずみは引張から圧縮に移行している。直線部とコーナー部を比較した場合、概して直線部に発生するひずみの方が大きかった。そして、ケース1とケース2ではひずみの場所ごとの性状は若干異なるが、図1 2、図1 3より最大値が生じたエリア1に着目すると、ねじり角と主ひずみの関係はほぼ同じであった。

4. 複合材料の引張試験における有限要素法解析

4.1 解析の諸元

(1) 解析モデル

一軸引張試験の供試体を対象に、ゴム材の力学特性を

確認するとともにモデル化の妥当性を調べる目的で汎用プログラムSOLVIAによる有限要素法解析を行った。解析モデルを図-1 5に、その断面図を図-1 6に示す。ゴム材にはSOLID要素を、繊維には3次元膜要素を適用した。この膜要素には、X-Y軸方向とで弾性係数について実験結果を基に変え異方性を表現した。SOLID要素と3次元膜要素の節点は共通とした。総節点数は570、総要素数は412である。そして、各要素のひずみを求めた。

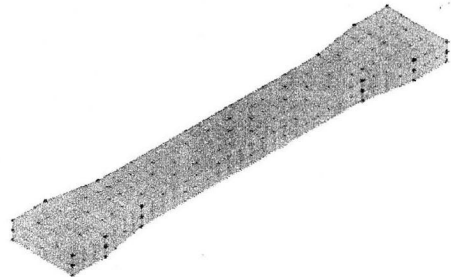


図-1 5 引張試験の解析モデル

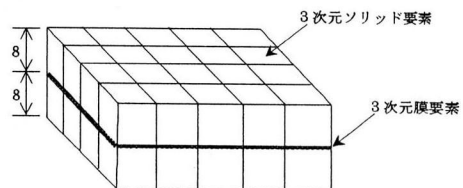


図-1 6 要素モデルの断面図

(2) 解析ケース

解析には材料非線形性と幾何学非線形性を考慮した。また繊維の直交異方性を考慮したモデル1と、繊維の破断をバイリニアでモデル化(直交異方性は考慮していない)したモデル2の解析を実施した。モデル1、2ともにゴム材にはMooney-Rivlinの提案モデルを適用した。(参考文献2))

(3) Mooney-Rivlinの式について

ここで、Mooney-Rivlinモデルの式について簡単に述べてみる。

① Mooneyの等式

ゴム材の定式化には過去、様々な研究者によってなされてきたが、Mooneyによって単純引張の場合、理論値ではなく半経験式と一致することが示された。その式は整理すると

$$\frac{f}{2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)} = c_1 + \frac{c_2}{\lambda}$$

である。ここで、 f は伸張比(λ)に対応する公称応力である。この式は、ゴムの引張試験による定数 c_1 、 c_2 を含んでいる。 $1/\lambda$ に比例して $f/[2(\lambda - 1/\lambda^2)]$ のプロットは c_2 の傾きを持った直線の関係があり、 $c_1 + c_2$ は $1/\lambda = 1$ のときにおける直線の切片である。定数 c_1 は加硫の度合いによって幅広く変化するが、 c_2 はほぼ一定である。

②Mooneyの理論

Mooneyの理論は次の仮定の下に成り立っている。

- ・ゴムは非圧縮性でかつ等方性である。
- ・フックの法則は単純せん断でも成り立つ。もしくは、前もって一軸引張や圧縮がかかった断面であっても単純せん断で成り立つ。

これらの前提を考慮してMooneyはひずみエネルギー関数を以下のように算出した。

$$W = C_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right)$$

ここに、 W : ひずみエネルギー関数

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: x, y, z 軸方向のひずみ

③Rivlinの式

ゴムの機械的性質を詳述するために、純粹で均一なひずみ状態の場合でひずみエネルギー関数 W を決める必要がある。Rivlinは純粹に数学的見地からひずみエネルギーを仮定できる一般的な式を考えた。その式は

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$$

ここに、

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2}$$

となり、これはMooneyの式と一致する。ここで I_1, I_2 は、それぞれ一次、二次の応力の不変量である。以上より、 C_1, C_2 は伸張試験での勾配と切片から決定される。ここでは $C_1=0.46$ (N/mm²)、 $C_2=0$ (N/mm²) であった。

4.2 解析結果および実験結果との比較

(1) 公称応力と伸長比関係

図-17に公称応力と伸長比の関係を示す。ここで、モデル1は繊維材料に直行異方性部材を、モデル2ではプラスチック部材を用いている。繊維破断以前では有限要素法による解析値の曲線はモデル1、2ともに実験値によく一致している。そして特に破断を考慮したモデル2では、順次破断の状況を再現できないが、ほぼ勾配が横ばいになる点などを伸張比1.4位までは再現できている。

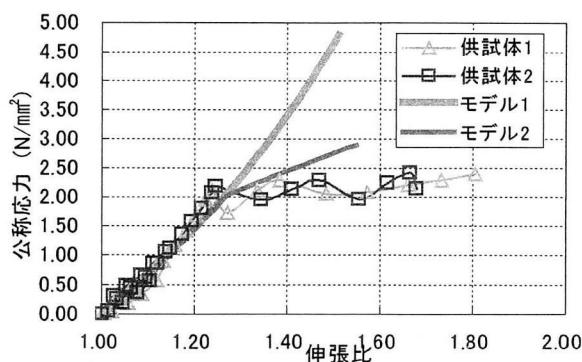


図-17 公称応力と伸長比の関係

(2) ひずみ成分と伸長比関係

各ひずみ成分と伸長比の関係を繊維破断箇所、そうで

ない箇所にわけて図-18に示す。これらは具体的には各要素に切ったうちの1つを取り出したものである。繊維の破断が起きる伸長比1.2前後まで各ひずみ成分とも実験値とモデル2解析値とでよく一致している。繊維が破断した後、その直下で破断している箇所の ϵ_x 、 ϵ_y の絶対値は解析値が実験値を下回り、繊維が破断していない箇所の ϵ_x 、 ϵ_y の絶対値は解析値が実験値を上回る結果となった。このうち、 ϵ_x は引張方向、 ϵ_y はそれと垂直方向を示している。今回の有限要素モデルでは順次繊維が切れていく現象でのひずみは再現できていない。

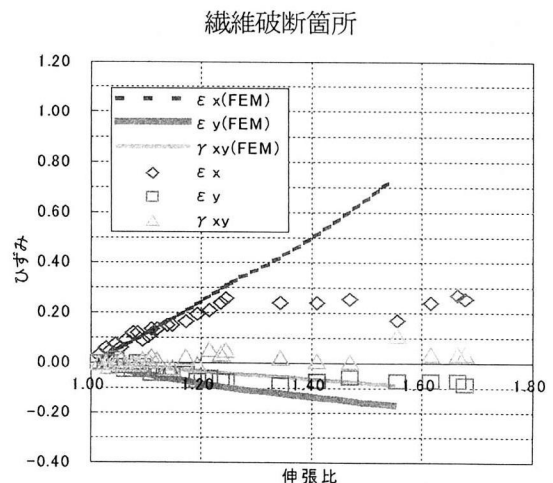
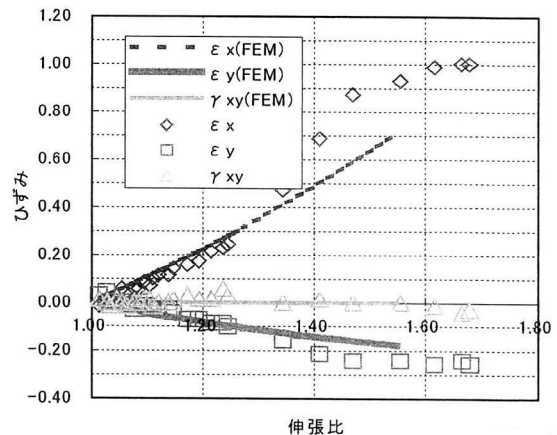


図-18 各ひずみ成分と伸長比の関係

(3) 主ひずみの実験値と解析値の比較

供試体表面に生じた各要素の主ひずみの最大値を、実験値と解析値とで比較したものを図-19に、主ひずみの繊維破断前平均値を実験値と解析値とで比較したものを図-20にそれぞれ示す。最大値を示したのは繊維の破断を解析で再現できるか否かを示すためである。また、ここでいう実験における各要素の主ひずみの平均値とは3.1(3)の項で示した、2つの三角形要素のひずみを1つの四角形要素として平均化したものである。

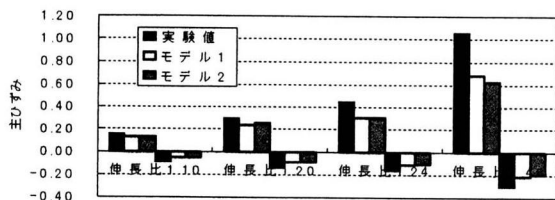


図-19 繊維破断後を含めた主ひずみ最大値の比較

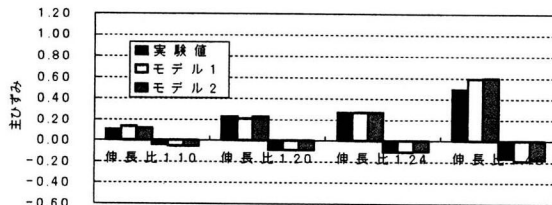


図-20 繊維破断前における主ひずみ平均値の比較

繊維破断以前の供試体表面に生じる主ひずみの平均は、実験値と解析値でほぼ一致した。供試体表面に生じる主ひずみの最大値を実験と解析とで比較したが、解析で実験値を再現することはできなかった。

5. 止水ゴムのねじり実験の有限要素法解析

5.1 解析モデル

実験供試体を直線部とコーナー部に分けてモデル化した。図-21に解析モデルの概要を示す。繊維は直交異方性モデルを適用した。直線部モデルの総節点数は5859、総要素数は5580である。コーナー部モデルの総節点数は6417、総要素数は6120である。また、先程と同様、ゴム材にはSOLID要素を、繊維には3次元膜要素を適用した。

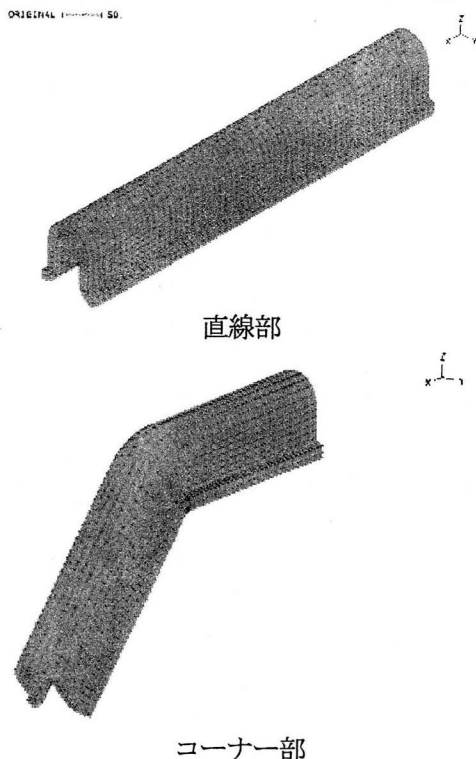


図-21 解析モデル図

拘束条件は、全方向への移動・回転は自由、載荷装置への取り付け面の一方は完全固定、もう一方は回転のみ固定とした。また、水圧およびねじりによる強制変位は図-22のようにして与えた。具体的に述べると、A面にはx・z軸方向に与えた強制変位により、合力としてねじり変位を与えた。そしてフレームの浮き上がりも考慮してy軸方向にも45mm制変位を与え、水圧は 0.01N/mm^2 を与えた。

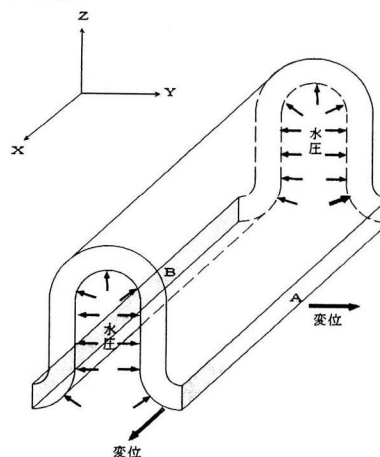


図-22 解析における水圧と荷重条件

5.2 解析結果および実験値との比較

(1) 水圧によるひずみの影響

水圧により供試体表面に生じる断面方向(横糸方向)のひずみを実験値と解析値で比較したものを図-23に示す。この場合ねじりは与えていない。直線部では、主ひずみの大きさに若干の差はあるものの、分布の傾向は、実験値と解析値でほぼ一致した。コーナー部では、解析結果が実験値に比べてより引っ張られる傾向となる結果となった。また、二次元解析による断面のひずみ-コンター図を図-24に示す。ここでは色が薄いほどひずみが大きくなっている。

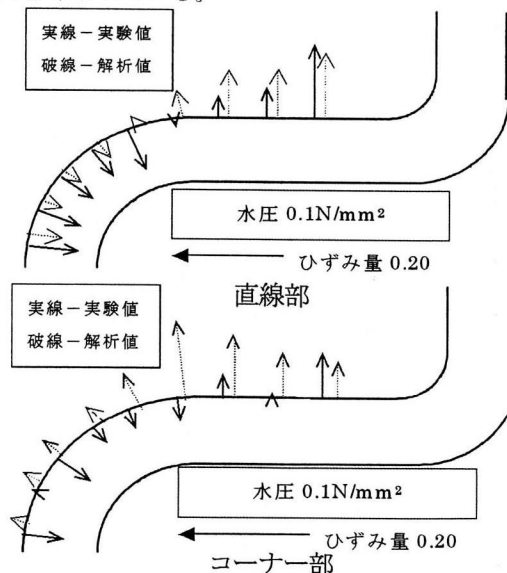


図-23 ひずみ比較図

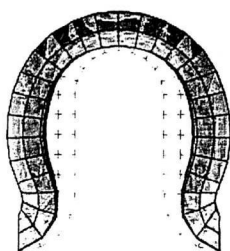
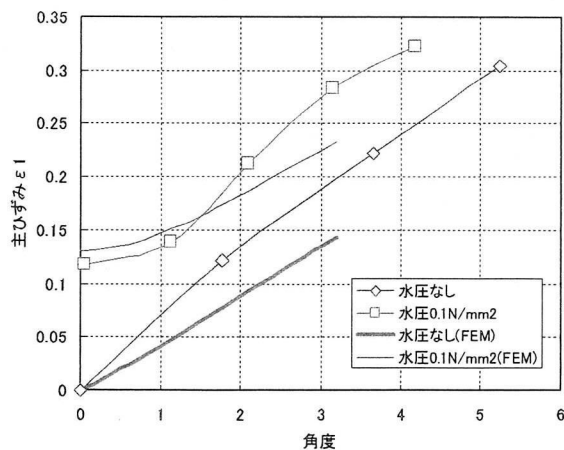


図-2 4 断面方向のひずみコンター図

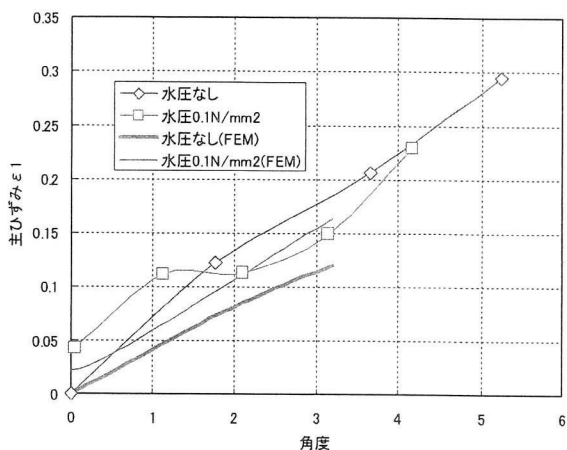
(2) 主ひずみとねじり角関係

ねじり角と主ひずみの関係を図-2 5から3 0に示す。主ひずみの値は、いずれのエリアもねじり角が最大4度から5度まででも0.35以内であった。このうち、図-1 0に示したとおりエリア1、2、3は直線部であるが、エリア4、5、6のコーナー部分を比べると全体的にひずみの値が大きくなっていることがわかり、当初危惧していたコーナー部でのひずみの集中は特に見られなかった。一般的にゴム材の長期間での耐久性を考える場合、高ひずみでは劣化の進行が早いとされるが0.35程度のひずみでは劣化の進行に影響を及ぼさない。今回選定したU字型のゴムガasketでは、かなりの量のねじれに対して低くひずみ量の発生を押さえられることが分かった。なおケース1（水圧なし）では、ほぼ解析値と実験値が一致した。ケース2（水圧あり）では、水圧による初期ひずみが一致しないことによりひずみの大きさに関しては一致をみないが、曲線の勾配の傾向は一致している。また、実験では同一断面内で比較した場合、主ひずみの大きさは断面中の直線部で最大となり、続いて中間部、半円部となるが、解析においてもこの傾向を再現することができた。ただ、解析においては計算が発散してしまうため、すべてにおいて角度が3度程度になった時点で計算が止まり、さらに大きなねじり領域まで追うことはできなかった。



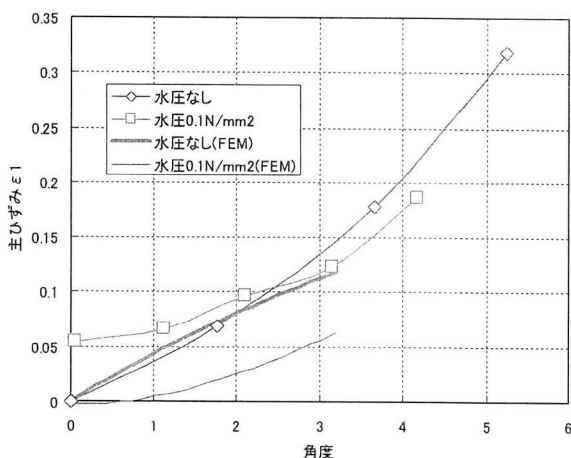
エリア1

図-2 5 ねじり角と主ひずみの関係①



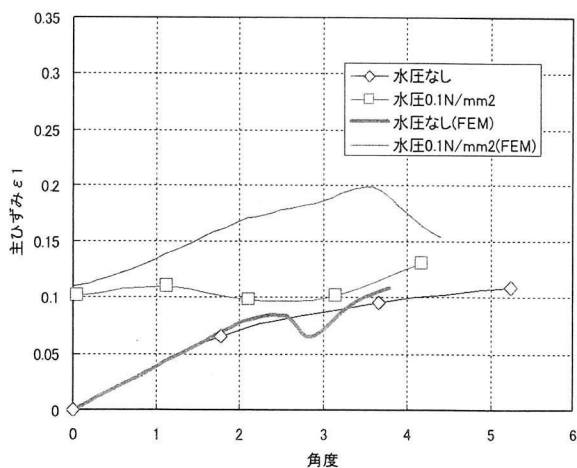
エリア2

図-2 6 ねじり角と主ひずみの関係②



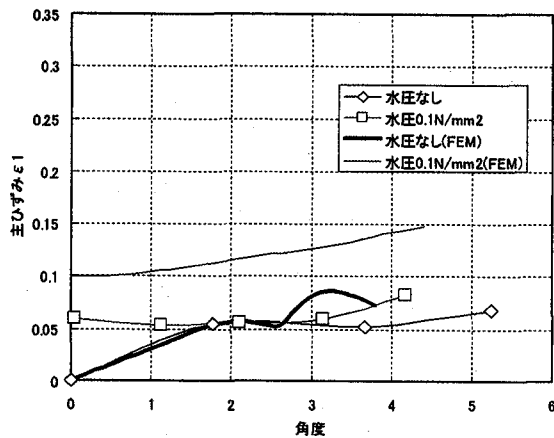
エリア3

図-2 7 ねじり角と主ひずみの関係③



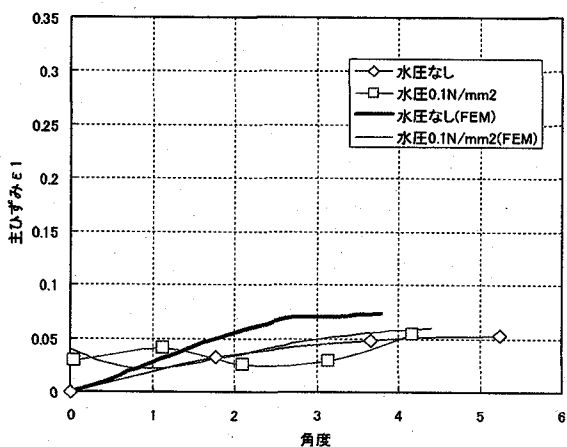
エリア4

図-2 8 ねじり角と主ひずみの関係④



エリア 5

図-29 ねじり角と主ひずみの関係⑤



エリア 6

図-30 ねじり角と主ひずみの関係⑥

6. 結論

- (1) ゴムと繊維（ナイロン）の複合材料は、一軸引張試験の結果から等体積変化することが判明した。また、繊維はひずみが0.3程度まで応力とひずみの関係が直線的でその後破断する力学性状を示した。
- (2) 繊維が破断しない範囲であれば、ひずみと応力はほぼ直線的な関係があるが、繊維が破断し始めると破断箇所でのひずみとその後のひずみが集中した。ただ、その後別の箇所でもひずみは生じており、繊維が破断した。ゴムと繊維の複合材料の挙動を有限要素法解析によって繊維が破断する前までは良く再現することができたが、繊維が順次破断する現象は今回追跡できなかった。
- (3) ねじり載荷試験では、水圧が作用していないときねじりによって止水ゴムの表面に生じるひずみは、直線部と、コーナー部で比べた場合、直線部のほうが大きかった。コーナー部ではひずみの値はそれほど大きくならなかった。水圧が作用すると供試

体全体が外側に膨れた状態のままで変形するが、水圧が作用しないときのような直線部でのねじれ現象は見られなかった。

- (4) ねじれ角を最大にしてもゴム表面に生じた主ひずみ量は0.35程度であり、このひずみ量の範囲では今回の止水ゴムに耐久性に関連した高ひずみ（0.4～0.5）（参考文献7）は生じなかったと判断できた。
- (5) 有限要素法解析の結果はねじり試験においては比較的一致したといえる。しかし、ひずみ量が大きくなると発散して計算がとまってしまうため、その点においては課題として残るところである。

7. あとがき

今回の実験ではゴムの変形が大きすぎるため、従来のひずみゲージや写真計測の使用は困難であり、ひずみの計測が手作業に頼る部分が多かったが、今後はより高精度の計測手法の開発を検討したい。ゴム材では有限要素法によりひずみの計算が精度良くでき、今後製品の開発や設計業務に有用な手段となることがわかったが、ひずみ量の大きいときの精度はまだ十分でなく今後の検討が必要である。今後更に高水圧下での挙動の確認、別形式の止水ゴムでの検討を進めていきたい。止水ゴム材は共同溝の継手、護岸ケーソンの目地材等ごく一部しか使用されないが変形の吸収と止水に重要な役割があり、最近の事故例から強度と耐久性の観点から十分な検討を今後行う必要がある。なお今回用いた供試体や材料特性の情報は住友ゴム（株）より提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 清宮理他4名：沈埋トンネル用ゴムガスケットの有限要素法解析、構造工学論文集、Vol. 41A, pp. 121-133, 1995. 3
- 2) L. R. G. Treloer：The physics of rubber elasticity, Oxford: Clarendon Press, c1975 pp. 80-100, 211-229
- 3) 清宮理、神頃明、林信治：沈埋トンネル用ゴムガスケットの座屈に関する解析と実験、構造工学論文集、Vol. 44A, pp. 257-262, 1998. 3
- 4) 清宮理、小林享、滝本孝哉：沈埋トンネル継ぎ手部のゴムガスケットの止水性評価、土木学会論文集、No. 567/VI-35, pp. 91-102, 1997. 6
- 5) 清宮理、田邊源吾：沈埋トンネル用ゴムガスケットの止水と横倒れ実験、構造工学論文集、Vol. 42A, pp. 35-42, 1996. 3
- 6) 清宮理、矢島貴：沈埋トンネルゴムガスケットの諸特性、港湾技研資料、No. 871, June, 1997, 43p
- 7) 日本ゴム協会：長期自然老化と人工促進劣化との対比に関する報告書、ゴム技術委員会報告、No. 8409, 1985. 3

(2002年9月13日受付)