

# 織布強化ゴム製止水板の有限要素解析と精度検証

○九州大学大学院 学生会員 上坂 隆志 九州大学大学院 正会員 浅井 光輝  
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨 シバタ工業株式会社 正会員 西本 安志  
シバタ工業株式会社 非会員 西野 好生

## 1. はじめに

近年の地球温暖化による影響か、各地でゲリラ豪雨による浸水被害が後を絶たない。下水管は毎時 50mm 程度の雨量を想定し設計、敷設されていたのに対し、ゲリラ豪雨時の雨量は毎時 100mm を上回ることから、瞬間的に洪水状態が形成され浸水被害を引き起こしている。また、都心部には地下鉄や地下街などの地下空間が広範囲に広がっており、一旦浸水してしまうと甚大な被害となることが危惧されている。このような浸水被害を未然に防ぐためには、下水管の再構築、あるいは地下空間の入り口に止水構造物(図-1)を設置する対策法があるが、コスト面から下水管の再構築は現実的ではない。また、既往の鋼鉄製の止水構造物は設置にかかる労力から瞬発性の高いゲリラ豪雨対策としては向いていないことから、設置が容易なゴム製止水板が見直されている。

本研究では、止水板の材料である織布強化ゴムに関する非線形力学特性のモデル化を行い、数値解析を援用した止水板の構造設計指針の確立を目指す。その基礎段階として、構築した数値解析技術の精度検証を行った。

## 2. 織布強化ゴムの力学特性モデリング

図-2 に示す織布強化ゴムは、ナイロン繊維を平織りした織布をゴム中央に混入することで剛性・強度を強化した材料であり、その力学挙動はゴムに起因する大変形特性・繊維に起因する異方性を示す。本研究では、ゴムの構成モデルとしての実績のある超弾性体に異方性を考慮したモデルへと発展させることにした。

### 2.1 異方性超弾性モデル

超弾性体とは、ひずみエネルギー関数  $W$  をひずみにより微分すれば対応する応力が評価できるモデルの総称である。 $S$ 、 $C$  をそれぞれ第2ピオラ・キルヒホッフ応力、右コーシー・グリーン変形テンソルとすると次のように応力が評価できる。



図-1 防水扉(鋼鉄製) 止水板(強化ゴム製)

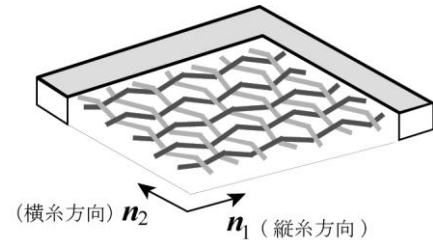


図-2 織布強化ゴムの平織り構造

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (1)$$

本研究では、ひずみエネルギー関数  $W$  は等方性成分  $W_{iso}$  と異方性成分  $W_{ani}$  に加算分解されるものとし、等方的な成分はゴムの非線形モデリングとして実績のある Mooney-Rivlin 体を使用し、異方性成分は Itskov モデル[1]を参考に、次式に示すひずみエネルギー関数を使用することにした。

$$W_{ani} = \mu_1 (J_1^{\lambda_1} - 1) + \eta_1 (K_1^{\theta_1} - 1) + \mu_2 (J_2^{\lambda_2} - 1) + \eta_2 (K_2^{\theta_2} - 1) - \zeta \quad (2)$$

ここで、同定すべき材料パラメータは  $\mu_i$ 、 $\eta_i$ 、 $\lambda_i$ 、 $\theta_i$  であり、 $J_i$ 、 $K_i$  は繊維方向を示す単位ベクトル  $n_i$  により決定できる変形テンソル  $C$  の不変量である。

$$J_i = n_i \cdot C n_i, \quad K_i = n_i \cdot (\det C) C^{-1} n_i \quad (3)$$

また、 $\zeta$  は初期応力をゼロとするための調整項であり、材料パラメータに対応して一意に求まる値である。

### 3. 一軸引張試験による構成モデルの検証

図-3(a)に、縦糸方向、横糸方向、45度回転時の3つの試験片による一軸引張り試験結果を示す。同図には解析結果も併せて示すが、異方性の強い非線形材料挙動を十分な精度で再現できている。また、同様の材料パラメータを用い、繊維配向角度を30度回転させた際の実験と計算の比較を図-3(b)に示す。本研究で構成したモデルにより繊維配向角度の影響を的確に表現可能であることを確認した。

### 4. 止水板実験とFEM解析の検証

#### 4.1 止水板構造と実験の概要

図-4に示す止水板はゴムシートに水圧が作用して変形し、次にゴムシートが縦支柱、横棧部材に接触することで格子構造全体に力が伝達する仕組みとなっている。実験では止水板背面に設置した水槽に高さ1mまで注水し、縦支柱およびゴムシートのひずみを計測した。

#### 4.2 解析と検証

汎用構造解析ソフト MSC. Marc を使用し、前項までに示した構成モデルを導入し、パーツ間の接触を考慮した非線形有限要素解析を行った。解析結果の変形図を図-5に示す。同図はミーゼスの相当応力分布を示す。また図-6には、2箇所の計測点のひずみ値と解析結果との比較を示す。ここで、A点は支柱下部の箇所であり鉛直縦方向のひずみ、B点ではゴムシートの長手方向のひずみをそれぞれ計測した。

鋼製支柱に取り付けた点Aについては試験と解析で良好な一致を示した。一方、ゴムシートの点Bについては、解析により実験時の変形の様子は追えているものの、ひずみ値はおよそ2倍の誤差があった。ここで、実験で使用したひずみゲージについては、ゴムの大変形に追随してひずみを正確に測定できていたか疑いがあることから、早急にひずみゲージのキャリブレーションを実施する予定である。

#### 5. 今後の展望

独自の構成則を導入した解析により、止水板の挙動をある程度の精度で再現できることがわかった。

今後、まずは早急にゴムシートに設置したひずみゲージの精度を確認することで解析精度を保証する。その後、支柱間隔や本数、ゴム厚さを設計変数とし、FEM解析を援用した構造設計を実施する予定である。

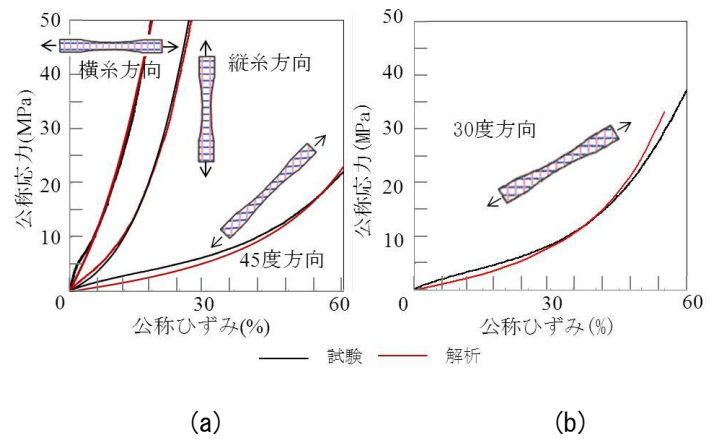


図-3 一軸引張試験と解析の比較

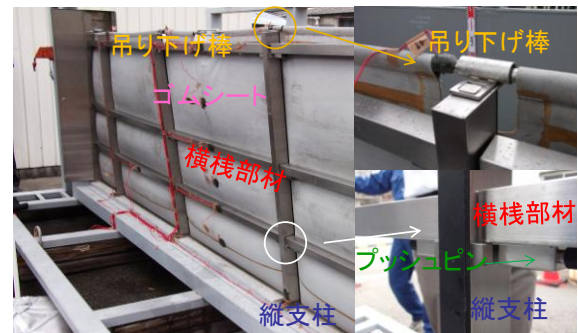


図-4 止水板構造の図

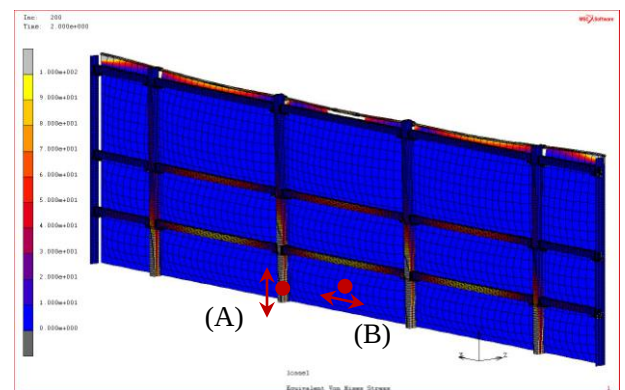


図-5 解析結果のミーゼスのコンター図

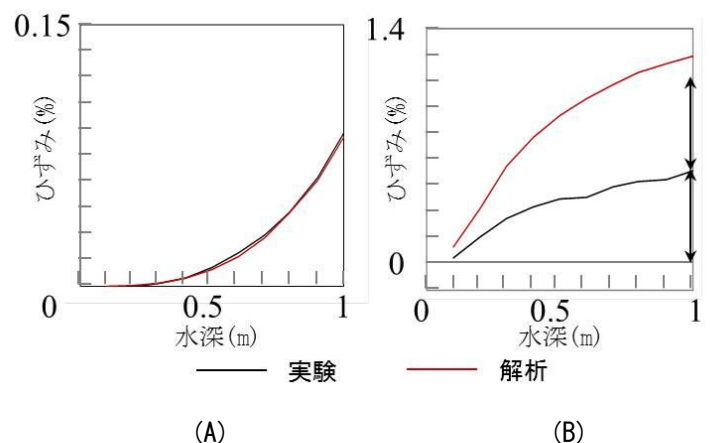


図-6 止水板実験と解析のひずみ値の比較