

## 繊維補強ゴム製止水板の効率化 FEM 解析へ向けた基礎検討

○九州大学大学院 学生会員 木村 嘉之 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. 緒言

大都市圏では廃棄物の最終処分場用地の確保が困難であり、ケーソン式護岸等で海面埋立処分場が建設されている。隣接するケーソン間の遮水工として、施工性の良さ・変形追随性の両面からゴム製止水板構造が期待されている。構造設計では、地震時などで予想される独立したケーソンの様々な変形パターンに対し、ゴムの強度を十分に確保する必要がある。それに先立ち本研究では、効率化 FEM モデル構築へ向けた基礎検討を行った。

### 2. 止水板構造の概観

止水板の概観を図-1、図-2 に示す。緊急時には、耐圧部中央付近でゴム破断が先行して起こることを想定し、後に中央部のドーム状の緩み部が展開し遮水性を確保するといったフェイルセーフの概念を取り入れた遮水構造となっている。この特徴は、地震時などにおいてケーソン間に目地寸法のずれが生じた場合、アスファルトマスチックの自己充填性とゴム製止水板の形状変化によりケーソンの運動に追従することにある。

止水板の詳細な形状および寸法を図-3 に示す。断面寸法が 510 (mm)×10 (mm) に対し、長さが 16,000 (mm) もある細長形状である。また使用するゴムは、平織り構造の織布で補強することで強度を向上させる。このため、巨視的な力学特性は、織布を構成する繊維の配向性や伸び特性の違いに大きく依存した異方性特性を示す。

### 3. 効率化 FEM 解析技術への事前検討

#### 3.1 シェル要素による解析モデルの効率化

上記の形状の止水板をソリッド要素により FEM 解析するには、要素寸法は板厚を基準とすることが望ましく、精度が期待できるアスペクト比 (1:1:1 が理想) のモデルを生成すると膨大な要素数が必要となる。そこで、図-4 に示すようにシェル要素による離散化することで解析モデルを効率化し、解析規模の低減を検討した。

予備検討として、大ひずみ・大変形問題におけるシェル要素の精度検証を実施した。ここでは、理論解が与えられる周辺固定の板問題を用い、理論解・ソリッド要素

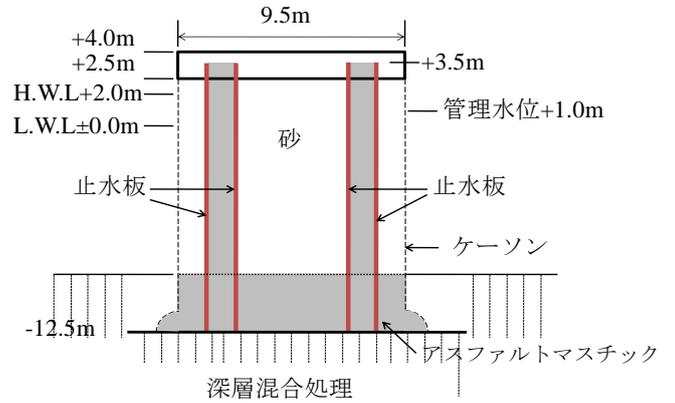


図-1. 外周護岸基本断面

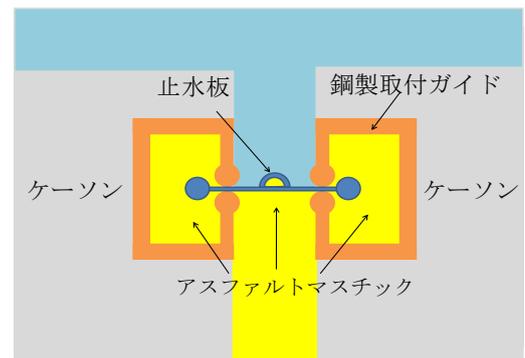


図-2. 止水板設置概念図

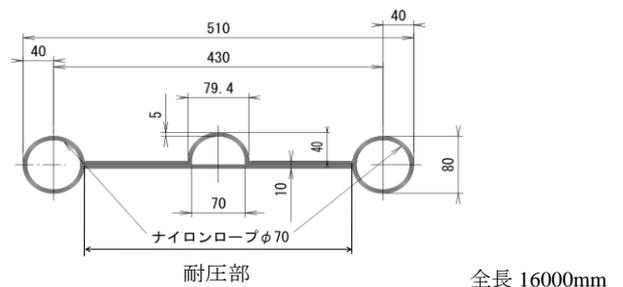


図-3. 止水板形状図

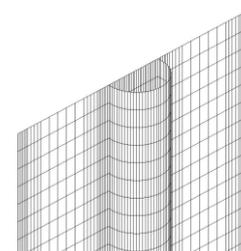


図-4. シェル要素モデル (止水板上部拡大)

との解の比較を行った．計算結果の一覧を図-5 に示す．ここで，理論解は次式により与えられる．

$$q = \frac{w_0 E h^3}{a^4} (1.37 + 1.94 \frac{w_0^2}{h^2}) \quad (1)$$

ここで， $q$  (N/mm<sup>2</sup>) は等分布荷重， $w_0$  (mm) は鉛直方向変位， $E$  (=2.1×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>) はヤング率をそれぞれ示し，正方形板の寸法は幅  $a=100$  (mm)，板厚  $h=5$  (mm) と設定した．シェル・ソリッド要素モデルはともに板面内を 10×10 に要素分割しており，ソリッドはさらに断面方向に 4 分割した．シェル要素を用いた解析モデルの方が，解析の総自由度が少ないにも関わらず，全域にわたって精度がよいことが確認できる．これは，ソリッド要素の結果においてはロッキング現象が生じたためと考えられる．

### 3.2 巨視的な構成則による材料モデルの効率化

ゴムは特有な非線形弾性挙動を示し，しばしば Ogden あるいは Mooney-Rivlin モデルなどの超弾性体としてモデル化される．本研究では，後者のモデルに別途，直交異方性に関するひずみエネルギー関数を導入することで，補強繊維に起因する異方性特性を巨視的な構成則として取り扱うことにした．

$$W = W_M + K_1^{ani_1} (I_4 - 1)^{\beta_1} + K_2^{ani_1} (I_5 - 1)^{\beta_2} + K_1^{ani_2} (I_6 - 1)^{\gamma_1} + K_2^{ani_2} (I_7 - 1)^{\gamma_2} + K^{coup_1} (I_1 - 1)^{\delta_1} (I_4 - 1)^{\delta_1} + K^{coup_2} (I_1 - 1)^{\delta_2} (I_6 - 1)^{\delta_2} + K^{coup_{ani}} (I_4 - 1)^{\xi} (I_6 - 1)^{\xi} \quad (2)$$

ここで， $W_M$  は Mooney-Rivlin モデルによりゴム自身に蓄えられるひずみエネルギー関数であり，2 項目以降が補強繊維に貯蔵されるエネルギーを与えることで異方性の影響を表現する．また， $I_1 \sim I_3$  は右 Cauchy-Green テンソル  $C$  の 1 次から 3 次までの不変量あり， $I_4 \sim I_7$  は繊維の方向を現わす構造テンソルと  $C$  から新たに定義されるテンソルの不変量である．あとは通常の手順により，ひずみエネルギー関数を Green-Lagrange ひずみ  $E$  で微分することで応力ひずみの構成関係が与えられ，再度  $E$  で微分をすれば非線形問題の数値解法で必要となるトータルラグランジュ表記の接線係数が評価できる(詳細は文献[1]を参照)．本研究では，MSC.MARC のユーザ定義モデル(Hypela2)により上記のモデルを組み込んだ．

図-6 には円孔穴あき板モデルの解析結果を例示する．ここでは一方向にのみ剛な繊維を使用し，異方性が顕著に表れるような設定にしている．材料定数は同じまま，繊維の方向設定を変更することで異方性の発現の仕方が顕著に異なることが再現できている．

### 4. 結論

本研究では，ゴム製止水板の強度特性評価へ向け，構造および材料モデルの両面から簡易化を図るための基礎検討を実施した．前者はシェル要素による大変形問題の精度を確認し，後者は直交異方性モデルの性能を確認した．これらの基礎検討の結果から得られた知見を生かし，今後は簡易化モデルを用い止水板の強度特性評価を効率的に実施していく予定である．

### 参考文献

[1] S.Reese, T.Raible and P.Wriggers, "Finite element modeling of orthotropic material behavior in pneumatic membranes", *Int. J. Solid.Struct.*, Vol.38, 9525-9544 (2001)

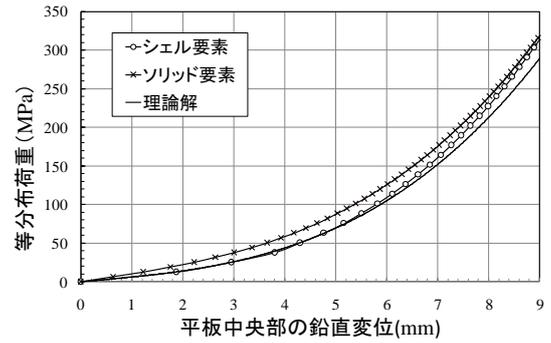
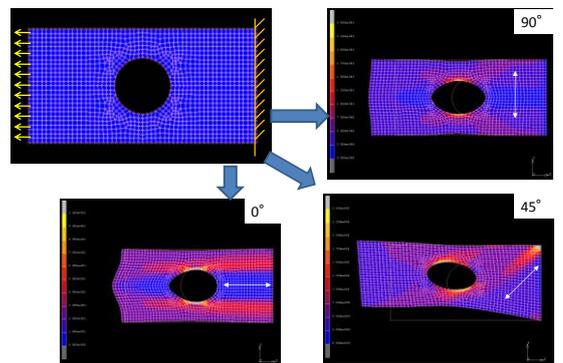


図-5. 平板中央部鉛直方向荷重-変位関係



図中矢印は繊維の強軸方向を示す

図-6. 異方性超弾性モデルによる円孔板の引張解析例