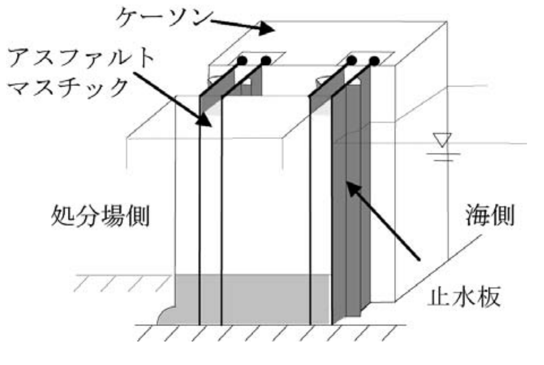
超弾性・粘性モデルによる織布強化ゴムの力学特性モデリングと簡易終局状態予測

○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

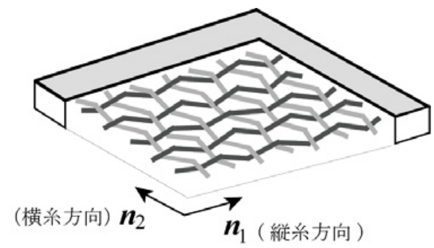
1.　はじめに

大都市圏では陸上最終処分場の建設が困難であることから，**図－1** に示すようなケーソン護岸式の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は，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．ゴム製止水板は，緊急時に耐圧部中央付近が先行して破断し，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ことを想定している．

本研究では，止水板の材料として検討している織布強化ゴム（**図－2** 参照）に関する非線形力学特性のモデル化を行い，FEM 解析結果より材料終局状態の簡易予測を行う．



図－1　ケーソン護岸式海面処分場



図－2　織布強化ゴムの平織り構造

2.　ゴム製止水板の巨視的力学特性モデリング

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，その力学挙動は異方性を示す．また，母材はゴムであることから，粘性に伴う速度依存性を示す．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と粘性特性を考慮したモデルへと発展させることにした．

2.1　多凸性型の異方性超弾性モデル

超弾性体とは，ひずみエネルギ関数 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．たとえば，ここで，$\boldsymbol{S}$，$\boldsymbol{C}$ 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．

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

本研究では，ひずみエネルギ関数 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関数を使用することにした．

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

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 $\boldsymbol{n}_i$ により決定できる変形テンソル $\boldsymbol{C}$ の不変量である．

$$J_i = \boldsymbol{n}_i \cdot \boldsymbol{C}\,\boldsymbol{n}_i,\quad K_i = \boldsymbol{n}_i \cdot (\det\boldsymbol{C})\,\boldsymbol{C}^{-1}\,\boldsymbol{n}_i \qquad (3)$$

また，ζ 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．

2.2　粘性モデル

先に提案したひずみエネルギ関数に従えば，静的応力 $\boldsymbol{S}_\infty$ は次のように求められる．

$$\boldsymbol{S}_\infty^{\mathrm{r}} := 2\partial W_{\mathrm{iso}} \big/ \partial \boldsymbol{C},\quad \boldsymbol{S}_\infty^{i} := 2\partial W_{\mathrm{ani}}^{i} \big/ \partial \boldsymbol{C} \quad (i=1,2) \tag{4}$$

ここで，応力の等方性成分と異方性成分にそれぞれ異なる粘性特性を付与できる分解型粘性モデルに従い，次式により粘性応力 $\boldsymbol{Q}_\alpha^{j}$ を定義することにする．

$$\boldsymbol{S} = \sum_j \boldsymbol{S}^j,\quad \boldsymbol{S}^j = \boldsymbol{S}_\infty^j + \sum_{\alpha=1}^{N} \boldsymbol{Q}_\alpha^j \quad (j = r,1,2) \tag{5}$$

本稿では N=1 に限定して使用することにした．また，粘性応力の発展則は次式により与えられる．

$$\dot{\mathbf{Q}}_\alpha^j + \frac{\mathbf{Q}_\alpha^j}{\tau_\alpha^j} = \beta_\alpha^j \mathbf{S}_{\mathrm{iso}}^j \quad (j = r,1,2) \tag{6}$$

3.　簡易終局状態予測

実験による観察から，織布強化ゴムの終局状態は，繊維が破断する状態と織りが解れる状態に分けられることを確認した（**図−3** 参照）．特に，後者はせん断変形時に発生していることから，前者を定義する繊維方向への伸張強度だけでなく，織物のせん断強度を定義する必要があると考えた．そこで，両者の終局強度を以下に示すように定義し，その有効性を数値解析により確認することにした．

(a)繊維の破断による強度（伸張強度）

$\lambda_{\mathrm{lim}} \le \det(\boldsymbol{F}_{ij}\boldsymbol{n}_j)$　　(繊維方向へのストレッチにより破断予測)

(b)織りの解れによる強度（せん断強度）

$\theta_{\mathrm{lim}} \le \boldsymbol{n}_1 \cdot \boldsymbol{n}_2$　（繊維間の角度の変化により解れを予測）

4.　構成モデルと簡易終局状態予測の検証

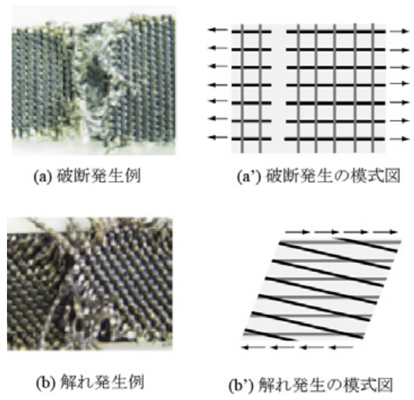
図−4 に，縦糸方向，横糸方向，45 度回転時の 3 つの試験片による一軸引張り試験結果（載荷速度 20mm/min）を示す．同図には解析結果も併せて示すが，異方性の強い非線形材料挙動を十分な精度で再現できている．また **図−5** には，30 度回転時の試験片に対し，異なる載荷速度で引張試験を実施した結果を示す．本研究で使用した粘性モデルにより速度依存性まで十分な精度で予測が可能となった．また **図−6** には，本研究で提案した簡易終局状態予測値を×（繊維破断），○（織りの解れ）マークで示す．実験とほぼ同レベルの終局値が予想されているだけでなく，実験結果と同じ破壊形態を予想可能であることを確認した．

5.今後の展望

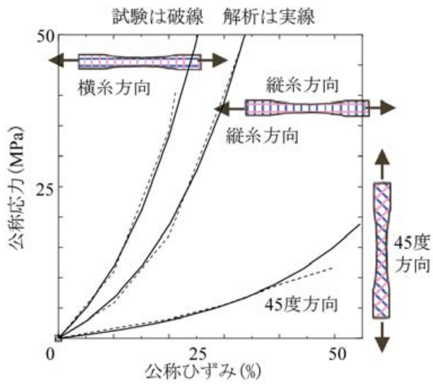
本研究で構築した構成モデルおよび簡易終局予測モデルを用い，止水板構造全体の変形時における強度予測を実施する予定である．

参考文献

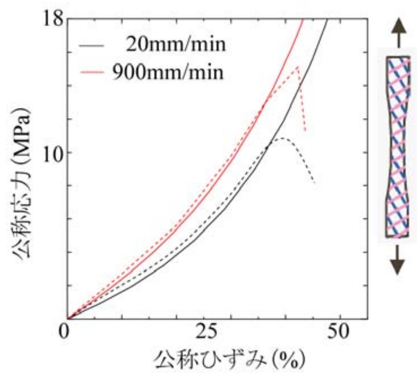
[1]　Itskov M.,Aksel N.,A class of orthotropic and transversely isotropic hyperelastic constitutive models based on a polyconvex strain.energy function,*Int. J. Solid Struct., 42,pp.4352-4371,2004.*



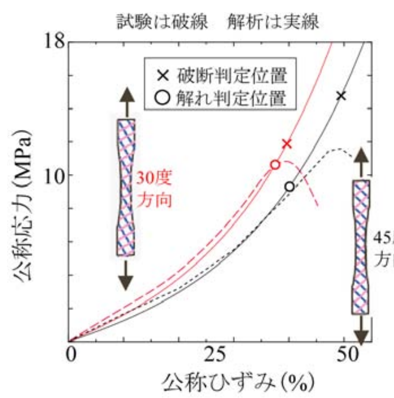
図−3　終局状態時の織布の状態



図−4　引張試験結果との比較



図−5　速度依存性の検証



図−6　終局状態予測例