

2 方向载荷時のゴム支承挙動の数値解析

名古屋工業大学 学生会員 森井 伸一
 名古屋工業大学 フェロー会員 小畑 誠
 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳顕

1. はじめに

橋梁の耐震設計においてゴム支承が重要な役割を果たしており、その変形特性、破壊特性の的確な評価の必要性が高い。ゴム支承は破壊にいたるまでに数 100%のせん断変形に耐えること、またいくつかのゴム材料特有の材料特性を持つことから、これまでもゴム材料の挙動の精度良い数値解析を目指す研究が多くなされてきている。著者らはこの中で変形による材料劣化を表す Mullins 効果に注目して応力ひずみ関係の改良を提案してきており、一軸の繰返し载荷については実験結果をよりよく表すことができることを示した¹⁾。本研究では2方向载荷時について検討する。

2. 損傷を考慮したゴム材料の応力ひずみ関係のモデル化

ゴム材料の特性を表すモデルとして超弾性、塑性特性および損傷劣化挙動を含むもので構成する(図1)。ブロック2のスライダ部分は流れ理論にもとづく塑性挙動に対応する。ブロック1および2のバネの超弾性部分には一般化された Mooney-Rivlin 型のエネルギー密度関数を用いた。さらにブロック1のバネには次のように損傷の効果を含んでいる。

$$W = \eta(E(\text{非圧縮変形}) + U(\text{圧縮変形})) \quad (1a)$$

$$E = \sum_{i+j=1}^3 A_{ij} (\bar{I}_1 - 3) (\bar{I}_2 - 3)^j, \quad U = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (I_3 - 1)^{2i}, \quad \bar{F}_{ij} = (I_3)^{1/3} F_{ij}, \quad (1b-d)$$

$$\bar{C}_{ij} = \bar{F}_{ki} \bar{F}_{kj}, \quad I_3 = \det F_{ij} \quad (1e,f)$$

ここに F_{ij} は変形勾配テンソル, $\bar{I}_j$ は $\bar{F}_{ij}$ から得られる Cauchy-Green テンソル $\bar{C}_{ij}$ の不変量である。Mullins 効果を表現するためのダメージ関数 η は繰返し時に実験結果をよりよく再現するように、損傷曲面(図2)を導入して次のような形式のものを用いる。

$$\eta = \begin{cases} 1 - f_c D_f \tanh(f_d D_s (E_{\max} - E)) & E < E_{\max} \\ 1 & E = E_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_c = \phi(R_{mem}, R_c), \quad f_d = (1 + \cos 2\theta)/2 \quad (3b,c)$$

$E_{\max}$ は変形履歴中の E の最大値である。損傷曲面とは図2にあるように Cauchy-Green テンソルの非圧縮部分 $\bar{C}_{ij}$ の空間で定義された降伏曲面類似の概念であり、変形による拡大や移動による発展を想定している。これにより変形による異方的な損傷の影響を考慮することができる。スライダ部分の加工硬化則には等方硬化および移動硬化の混合

硬化則を仮定した。有限要素解析には汎用プログラムである ABAQUS²⁾に上述の応力ひずみ関係をユーザーサブルーチンの機能を用いて導入したものを用いた。

この応力ひずみモデルではブロック1および2の超弾性バネ、ブロック2のスライダの加工硬化特性など合計 40 個程度の材料定数を含むこと、また一回の解析に多くの時間が必要なことから、完全な試行錯誤による決定は現実的ではなく、ある程度の戦略をもって行う必要が

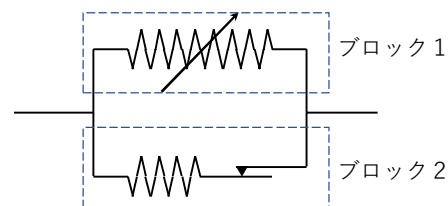


図1 ゴムの弾塑性モデル

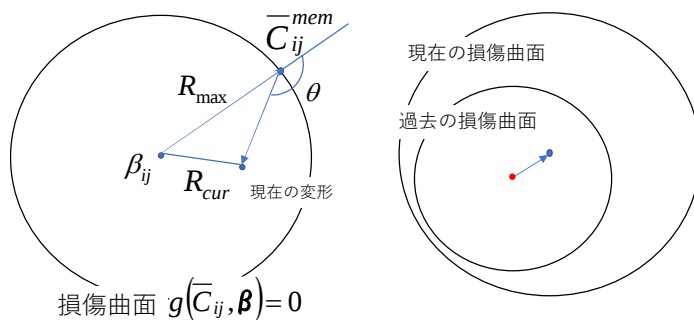


図2 損傷曲面とその発展

キーワード：ゴム材料，ゴム支承，応力ひずみ関係

連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会工学専攻

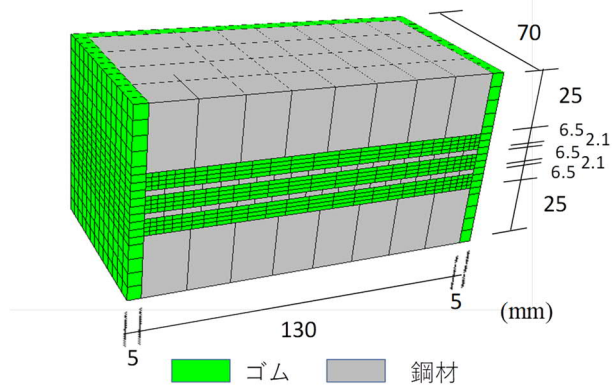


図3 解析モデル

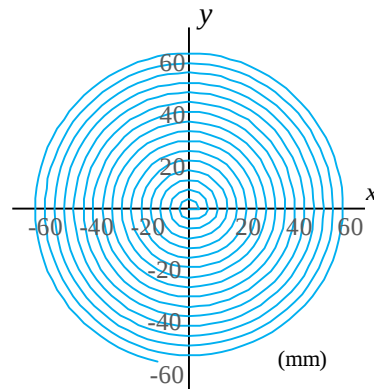


図4 2方向载荷パターン

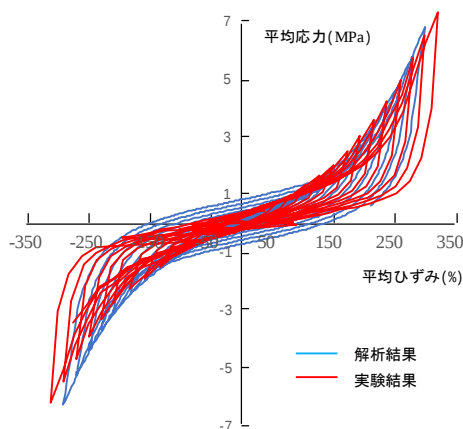


図5 解析結果（1方向载荷）

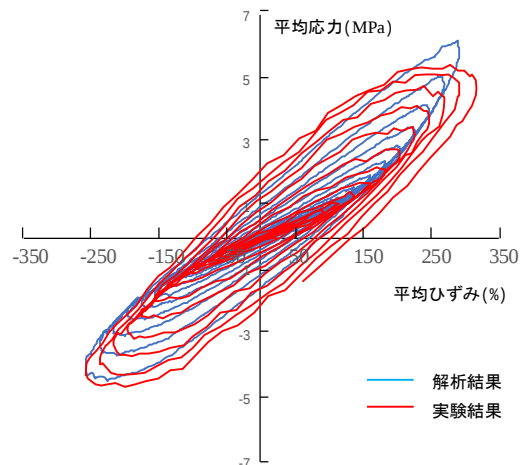


図6 解析結果（2方向载荷）

ある．ここではまずは骨格となるブロック1，2の超弾性バネの係数を決定し，一軸繰返しの実験結果を再現するようにスライダの加工硬化，ゴムの Mullins 効果，損傷曲面のパラメータを試行錯誤的に決定していく．次に2方向载荷の実験結果には強い塑性履歴の影響がうかがわれるのでブロック1とブロック2の弾性比を考慮するという方法によった．

3. 数値計算例

図3に1方向载荷用のゴム支承の寸法および半分モデルの要素分割を示す．1方向载荷では一定軸力のもとで漸増的な振幅を大きくする1方向繰返し载荷を行っている．2方向载荷では若干小さめの供試体を用いて一定軸力下で変位制御による図4に示すらせん状の载荷を行った．要素分割には鋼材に3次元の連続体要素 C3D8，ゴム部材に C3D8H を用いている．結果を図5，6に示す．図6はy方向の平均せん断応力と平均せん断ひずみの関係である．すでに示したように1方向载荷だけではあれば，実験結果をよく再現するような材料パラメータを見つけることは可能であるが，2方向载荷も含めての再現度には限界がある．図5,6にあるように全体としてはある程度再現しているものの1方向载荷に若干のずれ生じるのを認めざるを得なかった．これは特に2方向载荷に対する塑性挙動の影響が大きいためであり，構成モデルに改善の余地のあるものと思われる．

4. まとめ

一般化された Mooney-Rivlin モデルをベースに異方性を持つ Mullins 効果を含むゴム材料の構成モデルを提案し，2方向载荷を含む実験結果の再現を試みた．全体としてはある程度の再現ができているが，単純な加工硬化則を持つ流れモデルでは完全な再現が難しい可能性がある．

参考文献

- 1) 小岩千紗，小畑誠，後藤芳顕，材料劣化を考慮した繰返し载荷下のゴム材料挙動の数値解析，I-487，第72回土木学会全国大会概要集，2017
- 2) Abaqus6-14, Dassault Systems

謝辞：本研究の一部は基盤研究(A)16H02359の援助を受けました．