

FEMを用いた積層ゴム支承の回転ばね評価に関する研究

九州大学大学院 学生会員 ○北村幸司 九州大学大学院 正会員 松田泰治
九州大学大学院 フェロー 大塚久哲

1. はじめに

現在、積層ゴム支承は性能設計への移行に伴い、現象に則したより厳密な評価が求められている。本研究ではFEMにより橋梁に用いられる天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルに対して圧縮曲げ解析を行った。回転変形により生じる曲げモーメントと回転角の関係から回転ばねを評価し、様々な形状に対応できる基準化した回転ばね定数算出式を提案した。

2. 解析概要

$$\frac{\partial W}{\partial I_i} = a_i + b_i(I_i - 3) + c_i(I_i - 3)^2 + d_i \exp(e_i(I_i - 3)) \quad (1)$$

2. 1 ゴムの材料特性

ゴム材料はひずみエネルギー密度関数Wを用いて超弾性体としてモデル化した。汎用有限要素法プログラムABAQUSにサブルーチンとして(1)式に示す関数¹⁾の提案したひずみエネルギー密度関数Wを組み込み、非圧縮を仮定した。本研究で用いたゴムの公称せん断弾性係数は $G=7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 (8.0 \text{ kgf/cm}^2)$ である。

2. 2 解析モデル

本解析では1辺1mの正方形断面の一層モデルを対称性を考慮してその1/2だけモデル化した。一層モデルとは実橋梁で使用されている1次形状係数が6, 8, 10, 12の4種類のゴムシートの上下面を鋼板で挟んだものである。ここで1次形状係数とはゴムシートの加硫接着により拘束された面と側方の自由表面の比で、積層ゴムの力学特性の中で特に鉛直剛性や曲げ剛性に影響を及ぼす値であり、 S_1 と表される。要素分割は既往研究²⁾を参考に計算時間と計算機の容量を考慮して定めた。水平断面で20×10分割とし鉛直方向は9分割とした。鋼板は鉛直方向に2分割とした。要素は8節点ソリッド要素を用い、上記の分割により水平断面では50×50(mm)、厚みは2.3～4.4(mm)となった。鋼板は剛としてモデル化した。表-1に一層モデルの形状及び要素分割を示す。

2. 3 解析条件

一層モデルに対して圧縮曲げ解析を次の方法により行った。拘束条件は、モデル下面を完全に固定し、圧縮解析ではモデル上面の全節点の鉛直変位を等しくし鉛直荷重を静的に与えた。圧縮後の曲げ解析では、上鋼板下面の中心線(回転軸)を軸に上鋼板の回転を許容し、上鋼板の端部に偶力を与えることにより回転軸回りのモーメントを与えた。図-1に解析手法を示す。圧縮面圧は実用面圧を考慮し、 $5.88, 7.84, 9.80, 11.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 (60, 80, 100, 120 \text{ kgf/cm}^2)$ の4種類とした。道路橋支承便覧にゴム支承の許容総回転角は1/300と規定されていることから、载荷モーメントは回転角が1/300程度になるまで与えた。

表-1 一層モデルの形状及び要素分割

形状係数	S_1	6.25	8.33	10.4	11.9
	S_2	25	33.3	41.62	47.62
ゴム	一層厚(mm)	40	30	24	21
	層数	1	1	1	1
	総厚(mm)	40	30	24	21
	一層分割数	9	9	9	9
	要素厚(mm)	4.4	3.3	2.7	2.3
上下鋼板	一層厚(mm)	8.9	6.7	5.3	4.7
	層数	2	2	2	2
	総厚(mm)	17.8	13.3	10.7	9.3
	一層分割数	2	2	2	2
	要素厚(mm)	4.4	3.3	2.7	2.3
全体	総厚(mm)	57.8	43.3	34.7	30.3
	総分割数	13	13	13	13
	要素数×100	26	26	26	26

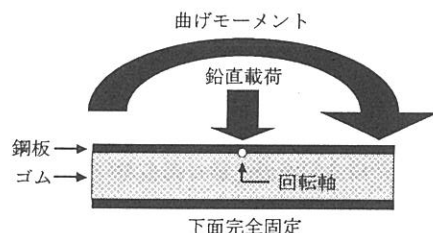


図-1 解析手法

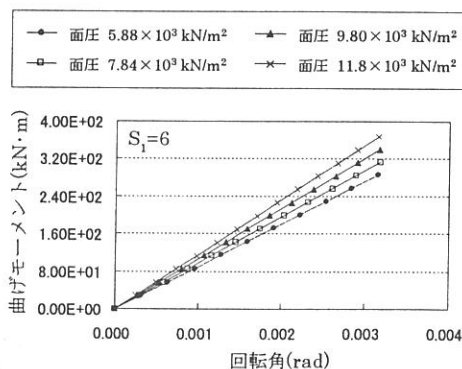


図-2 曲げモーメントと回転角の関係

3. 解析結果

3. 1 曲げモーメントと回転角の関係

図-2に載荷面圧が曲げモーメントと回転角の関係に与える影響を、図-3に1次形状係数の違いが曲げモーメントと回転角に与える影響を示した。1次形状係数 S_1 が大きくなると圧縮剛性が增大するため、曲げ剛性も増大している。ゴムの圧縮変形により、圧縮面圧が大きくなると見かけの1次形状係数 S_1 が大きくなり曲げ剛性が増加することを確認した。

3. 2 回転ばね評価

曲げモーメントと回転角の関係を直線で近似することにより、4種類の1次形状係数 S_1 に対して一層モデルの回転ばね定数を算出した。支承の設計時の許容圧縮応力度が $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 (80 \text{ kgf/cm}^2)$ であることから、圧縮面圧 $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ の場合の曲げモーメントと回転角の関係をを用いた。回転角が増すと非線形性により直線近似による誤差を考慮しなければならないが、解析結果と直線近似の誤差は全ケースで約3%程度以下であったため直線近似が可能と判断した。本解析では1/2モデルを使用したため回転ばね定数は近似直線の傾きを2倍して算出した。表-2にそれぞれ算出した回転ばね定数を示す。

3. 3 回転ばね定数の基準化

まず4種類の1次形状係数 S_1 を横軸にそれぞれの回転ばね定数を縦軸にプロットした図(図-4)を2次曲線で近似することにより、1辺が1mの正方形断面の回転ばね定数 K_R' の算出式(式(2))を導いた。ただし S_1 の範囲は6から12である。この時のプロットと近似曲線の誤差は1%未満であった。次に断面形状に対する式の基準化を行った。1次形状係数 S_1 が同じならば、端部に生じる応力ひずみ関係は等しい。その関係式を式(3)に示す。ここで $\overline{K_R}$ は基準化された回転ばね定数、 K_R は任意の断面形状の回転ばね定数、 L は回転軸上からゴムシート端部までの距離(正方形断面の1辺の長さの1/2)、 A は断面積、 M は曲げモーメント、 θ は回転角、 Σt_e はゴムの総厚である。同じ1次形状係数 S_1 において、1辺長が1mのゴムシートの A 、 L 、 Σt_e をそれぞれ A_1 、 L_1 、 Σt_{e1} とし、長さが α 倍で A_α 、 L_α 、 $\Sigma t_{e\alpha}$ とすると関係式(4)が成り立つ。長さが α 倍のゴムシートの A_α 、 L_α 、 $\Sigma t_{e\alpha}$ を式(3)に代入すると式(5)が導かれ、式(5)により S_1 が6から12までの正方形断面を前提とした様々な形状の回転ばね評価が可能となった。

4. 結論

本研究では、FEMを用いたパラメトリックな解析により、1次形状係数 S_1 が6から12までの正方形断面を有する天然ゴム系積層ゴムの回転ばね定数算出式を提案した。

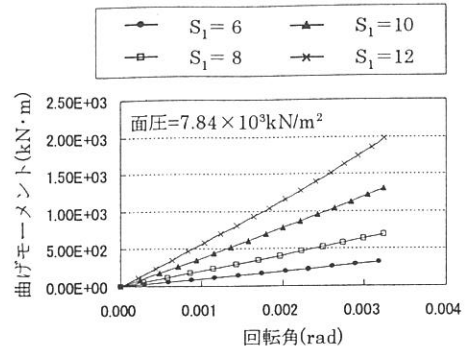


図-3 曲げモーメントと回転角の関係

表-2 回転ばね定数

1次形状係数	回転ばね定数 (kN・m/rad)
6	1.9690×10^5
8	4.1882×10^5
10	7.9167×10^5
12	1.1761×10^6

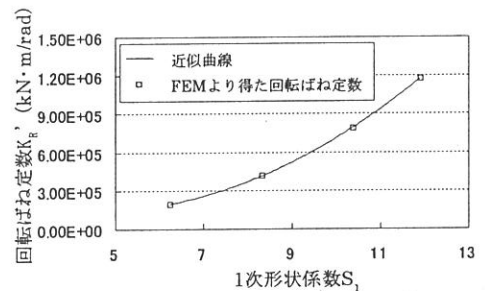


図-4 1次形状係数 S_1 の無次元化

$$K_R' [\text{kN} \cdot \text{m/rad}] = pS_1^2 + qS_1 + r \quad \begin{cases} p = 1.9145 \times 10^4 \\ q = -1.7471 \times 10^5 \\ r = 5.4203 \times 10^5 \end{cases} \quad (2)$$

$$\overline{K_R} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{AL}{L\theta} = \frac{M}{\theta} \frac{\Sigma t_e}{AL^2} \quad K_R = \frac{AL^2}{\Sigma t_e} \overline{K_R} \quad (3)$$

$$A_\alpha = \alpha^2 A_1, \quad L_\alpha = \alpha L_1, \quad \Sigma t_{e\alpha} = \alpha \Sigma t_{e1} \quad (4)$$

$$K_R = \frac{A_\alpha L_\alpha^2}{\Sigma t_{e\alpha}} \overline{K_R} = \alpha^3 \frac{A_1 L_1^2}{\Sigma t_{e1}} \overline{K_R} = \alpha^3 K_R' \quad (5)$$

- 参考文献 1) 関亙, 深堀美英, A-LARGE-DEFORMATION FINITE-ELEMENT ANALYSIS FOR MULTILAYER ERASTOMERIC BEARINGS, RUBBER DIVISION, Vol.60, NOVEMBER-DECEMBER, 1987 P856~P869
2) 松田昭博, 大鳥靖樹, 積層ゴムの非線形有限要素解析に関する研究, 電力中央研究所報告, 1998.4 p10, 11