

FEMを用いた天然ゴム系矩形積層ゴム支承の曲げモーメント評価

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

1. はじめに

積層ゴムを圧縮せん断载荷した場合、水平力および鉛直荷重と水平変位の P - δ 効果により曲げモーメントが発生する。この曲げモーメントを計算するには、支承の取り付けボルトやフランジの構造設計に用いられる簡易評価式 (1) が一般に用いられている。図 1 に概念図を示す。この式の特徴はわずか四つの項で曲げモーメントを表現できる点にある。この式によると、同一せん断ひずみレベルにおいて曲げモーメントが大きくなるのは、圧縮荷重 P が大きい場合および積層ゴム厚 h が大きい場合である。この曲げモーメントを評価するために 12 種類の積層モデルに対し圧縮せん断解析を行った。解析結果と評価式による計算結果を比較することにより、評価式の妥当性を検討した。

2. 1 材料モデル

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を行った。汎用有限要素法プログラム ABAQUS にユーザーサブルーチンとして (2) 式に示す関等¹⁾の提案したひずみエネルギー密度関数 W を組み込み、非圧縮性を仮定した。ここで I_1 は主伸張比からなるひずみの主不変量である。ゴムの材料定数 $a_1, \dots, c_1$ は図 2 に示すゴムの二軸伸張試験結果から定めた。本研究で用いたゴムの公称のせん断弾性係数は $G=8.0\text{kgf/cm}^2 (7.84 \times 10^5 \text{N/m}^2)$ である。鋼板は弾塑性体としてモデル化を行った。ポアソン比 $\nu=0.271$ 、ヤング率 $E=1.97 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2 (1.93 \times 10^8 \text{kN/m}^2)$ 降伏応力 $\sigma_y=2550 \text{kgf/cm}^2 (2.50 \times 10^5 \text{kN/m}^2)$ とした。

2. 2 解析モデル

四種類の 1 次形状係数と三種類の 2 次形状係数をパラメータとして計 12 の積層ゴムモデルを作成した。ここで 1 次形状係数とはゴムシートの拘束表面と自由表面の比を表し、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。また、2 次形状係数とはゴムシートの一辺と全ゴム層厚の比を表し、特に曲げ剛性に影響を及ぼす値であり S_2 と表される。本解析に用いる両形状係数値は実橋梁での実績を考慮した。両形状係数値は小数点以下を四捨五入して表すと 1 次形状係数 S_1 は 6, 8, 10, 12、2 次形状係数 S_2 は 4, 6, 8 である。両形状係数値には若干のばらつきがあるが、これはゴム厚の最小単位を mm としたことや、2 次形状係数 S_2 は 1 次形状係数 S_1 の影響を受けるためである。本解析では 1 辺 1 m の正方形断面を有する積層ゴム支承を対象とし、対称性を考慮してその 1/2 だけモデル化した。積層モデルの要素分割は既往研究²⁾での実績と計算時間を考慮して定めた。水平断面は全てのモデルに対し 20×10 で分割し、鉛直方向の分割は表 1 に示す通りである。要素は鋼板およびゴムともに 8 節点ソリッド要素とした。

$$M = \frac{1}{2} (P \delta + Qh) \quad (1)$$

P : 圧縮荷重 δ : 水平変位
 Q : せん断力 h : 積層ゴム厚

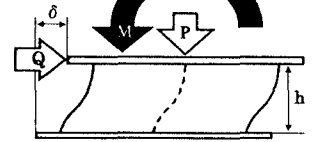


図 1 曲げモーメント概念図

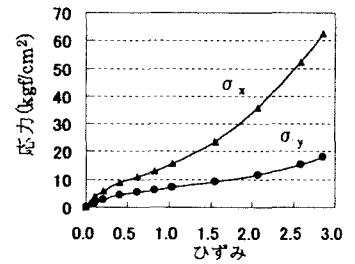


図 2 二軸伸張試験結果

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = a_1(I_1 - 3) + b_1(I_1 - 3)^2 + c_1(I_1 - 3)^3 + d_1 \exp(c_1(I_1 - 3)) \quad (2)$$

表 1 積層モデルの形状と要素分割

形状係数	S_1	6.25	8.33	10.4	11.9								
	S_2	4.17	5.36	8.33	3.97	5.95	7.94						
ゴム	一層厚 (mm)	40	30	24	21	25	27						
	層数	5	4	3	8	6	4	10	7	5	12	8	6
	総厚 (mm)	240	160	120	240	190	120	240	168	120	252	168	126
	一層分割数	8	6	6	6	6	6	6					
	要素厚 (mm)	5	5	5	4	4	4	3.5					
中間鋼板	一層厚 (mm)	10	10	10	8	7	7	7	7	7	7	7	5
	層数	5	3	2	7	5	3	9	6	4	11	7	5
	総厚 (mm)	50	30	20	70	50	30	72	48	32	77	49	35
	一層分割数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	要素厚 (mm)	5	5	5	4	4	4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
全体	総厚 (mm)	290	190	140	310	230	150	312	216	157	329	217	161
	一層分割数	58	38	28	62	46	30	78	54	38	94	64	46
	要素数 $\times 100$	116	76	56	124	92	60	156	108	76	188	124	92

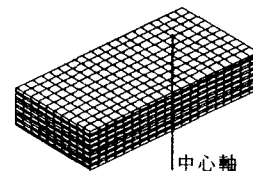


図 3 解析モデル(1/2 対称)

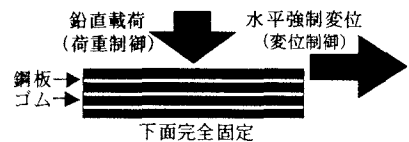


図 4 圧縮せん断解析

2.3 解析手法

積層モデルに対して圧縮せん断解析を行なった。解析概要を図4に示す。与える水平変位は積層ゴムモデルに対してゴムの平均せん断ひずみ相当で1ステップにつき0.3ずつ6.0に達するまで与えた。圧縮面圧は実用面圧を考慮し60,80,100,120 kgf/cm² ($5.88 \times 10^6, 7.84 \times 10^6, 9.80 \times 10^6, 1.18 \times 10^7$ N/m²)の四種類とした。曲げモーメントは、圧縮せん断によって最上ゴム層の最上面に位置する各要素に生じる鉛直応力に、要素面積と中心からの距離を掛け合わせ総和を求める方法で算出した。

3. 解析結果

図5, 6, 7は、鉛直面圧の違い、1次形状係数 S_1 の違い、2次形状係数 S_2 の違いに着目し、曲げモーメントへの影響を表したものである。道路橋示方書において免震支承の許容せん断ひずみは地震時保有水平耐力法による設計で2.5までと定められている。この常用域においては、図より曲げモーメントは線形に増加することがわかる。図5より鉛直面圧が大きなケースほど、曲げモーメントが大きくなるのがわかる。図6より1次形状係数 S_1 は曲げモーメントに影響をおよぼさないことがわかる。図7より2次形状係数 S_2 が小さなモデルほど、曲げモーメントが大きくなるのがわかる。これらより、積層ゴムの総厚が大きいモデルほど曲げモーメントは大きくなり、積層ゴム支承を構成するゴムシートの厚みには影響を受けないことが明らかとなった。これらは簡易評価式の傾向と一致している。

4. 簡易評価式との比較

簡易評価式においてせん断力 Q はせん断弾性係数 G を用いて計算を行ったが、 $G=8.0\text{kgf/cm}^2$ はせん断ひずみに依存せず一定値を用いた。また、積層ゴム厚 h は圧縮およびせん断によっても変化しないものとした。図8から図10にせん断ひずみ3.0までの解析結果と簡易評価式による計算結果の比較を示す。これらより、簡易式は解析値とほぼ一致することが全てのケースで確認された。

5. まとめ

有限要素法による積層ゴムモデルを用いた圧縮せん断解析により、曲げモーメントの簡易評価式は積層ゴム支承の常用域で線形に増加する解析結果と良く一致することを確認した。

【参考文献】

- 1) W.Seki, Y.Fukahori, A Large-Deformation Finite-Element Analysis for Multilayer Elastomeric Bearings, Rubber Division, Vol.60, 11-12, 1987 p856~869
- 2) 松田昭博、大鳥靖樹他、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：U98038、1998.4

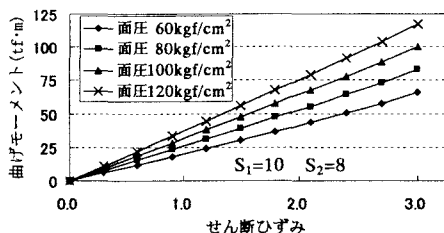


図5 回転モーメントの変化（面圧比較）

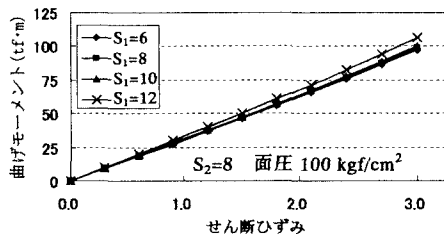


図6 回転モーメントの変化（ S_1 比較）

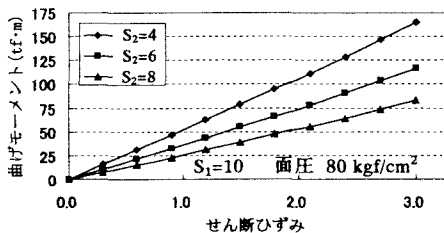


図7 回転モーメントの変化（ S_2 比較）

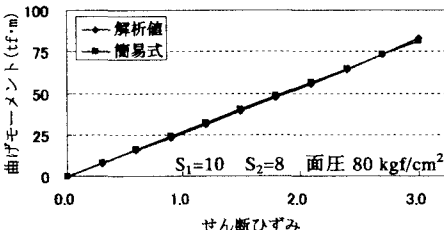


図8 解析値と簡易式の比較1

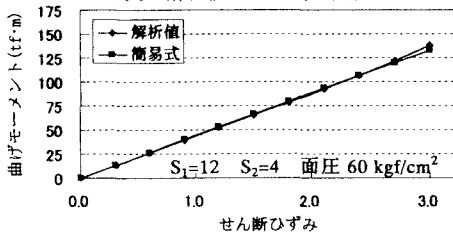


図9 解析値と簡易式の比較2

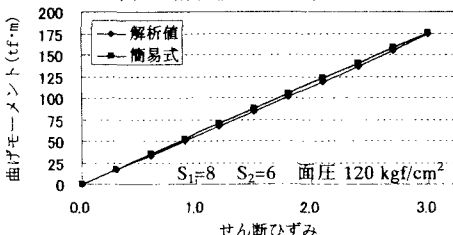


図10 解析値と簡易式の比較3