

積層ゴムの力学特性に与える形状パラメータの影響の評価に関する研究

九州大学大学院工学研究科 学生員 中島崇之 正会員 松田泰治 フェロー 大塚久哲 正会員 矢葺亘
1.はじめに

兵庫県南部地震以降、免震橋梁の実用化が飛躍的に増加している。免震装置の一つに積層ゴムがあり、薄いゴムシートと鋼板を相互に重ね合わせ加硫接着したものである。ゴムの破断ひずみは 400%を越えるが、現行の道路橋示方書で積層ゴムの使用限界はせん断ひずみ 250%と定めており、かなり安全側で評価されている。しかし性能設計への移行に伴い、積層ゴムに対するより厳密な評価が求められている。本研究では、橋梁に用いられる角型積層ゴムについて、その形状を規定する二種類のパラメータである 1 次形状係数、2 次形状係数及び鉛直面圧が積層ゴムの水平剛性に及ぼす影響の有限要素解析による評価、及び有限要素解析の積層ゴムの性能評価に対する適用限界を明らかにすることを目的とする。

2.解析概要

《モデル形状》本解析では図 1 に示すような 1 辺 1 m の正方形断面を有する積層ゴムの図 2 のように対称性を考慮してその 1/2 をモデル化し、ゴムシート及び中間鋼板の枚数、厚みを 1 次形状係数 S_1 (ゴムシートの、拘束表面と自由表面の比) を 4 種類、2 次形状係数 S_2 (ゴムシートの直径と全ゴム層厚の比) を 3 種類、鉛直面圧 4 種類を設定することにより決定し、計 48 ケースの解析を行った。解析モデルを図 2 に示す。

《要素分割》既往研究¹⁾を参考に計算時間と計算機の容量が膨大にならない範囲で出来るだけ詳細に分割した。水平断面を全てのモデルに対し 20×20 で分割し、厚み方向にはゴムシートを 6 及び 8 分割、中間鋼板を 2 分割とした。要素形状は、8 節点ソリッド要素とし上記の分割により水平断面では 5×5 (cm) 厚みは 0.35~0.5 (cm) とした。表 1 に積層ゴムの形状及び要素分割を示す。

《解析手法》汎用有限要素プログラム ABAQUS にユーザーサブルーチンとして関等²⁾の提案したひずみエネルギー密度関数 W を組み込み、解析を行った。

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^2 \{a_i (I_i - 3) + b_i (I_i - 3)^2 + c_i (I_i - 3)^3 + d_i \exp(e_i (I_i - 3))\}$$

《解析条件》ゴム部 (超弾性体、8 節点ソリッド要素、ゴムのせん断弾性係数 $G = 7.84 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) と鋼板部 (弾塑性体、8 節点ソリッド要素、ヤング率 $E = 1.93 \times 10^7 \text{ N}$ 、ポアソン比 $\rho = 0.271$) からなる天然ゴム系積層ゴムを、下面の全節点を完全固定し、上面に鉛直面圧を静的に与えた後、水平方向にせん断ひずみ 600% までの強制変位を 30% ステップで静的に与えるものとする。図 2 に概要を示す。

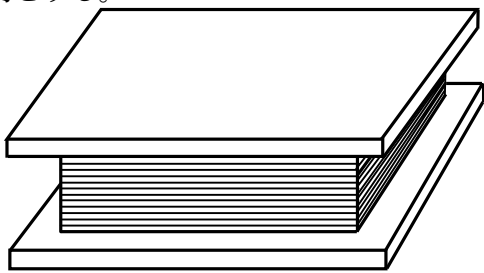


図-1 角型積層ゴム

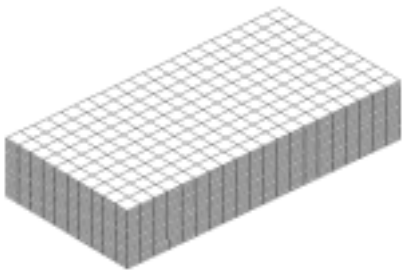


図-2 解析モデル

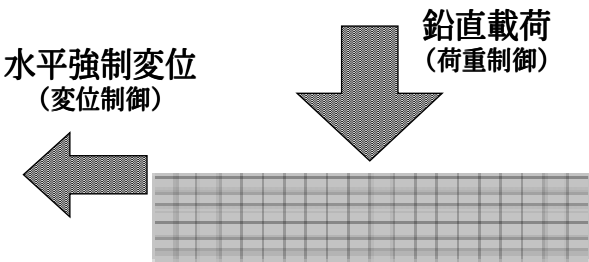


図-3 解析概要

形状 係数	S1	6.25	6.25	6.25	8.33	8.33	8.33	10.4	10.4	10.4	11.9	11.9	12
		4.17	6.25	8.33	4.17	5.56	8.33	4.17	5.95	8.33	3.97	5.95	7.9
ゴム	一層厚(mm)	40	40	40	30	30	30	24	24	24	21	21	21
	層数	6	4	3	8	6	4	10	7	5	12	8	6
	総厚(mm)	240	160	120	240	180	120	240	168	120	252	168	126
	一層分割数	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6
中間 鋼板	要素厚(mm)	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
	一層厚(mm)	10	10	10	10	10	10	8	8	8	7	7	7
	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
全体	一層分割数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	要素厚(mm)	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
	総厚(mm)	290	190	140	310	230	150	312	216	152	329	217	161
	総分割数	58	38	28	62	46	30	78	54	38	94	62	46
要素数×100		116	76	56	124	92	60	156	108	76	188	124	92

表-1 積層ゴム形状と要素分割

キーワード：免震支承，積層ゴム，形状係数，有限要素解析，ひずみエネルギー密度関数

連絡先：〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院工学研究科 TEL 092-642-3268

3.解析結果

解析結果より得られたせん断ひずみとせん断応力の関係から各せん断ひずみにおける割線剛性を求め、これを積層ゴムのばね定数の設計値で除すことによりばね定数の設計値との比較を行う。右のグラフは、1次形状係数 S_1 の違い、2次形状係数 S_2 の違い、鉛直面圧の違いに着目し、水平剛性にどのように影響を与えるかをばね定数の設計値に対する比で表したものである。一般にゴム材料の応力-ひずみ関係は逆S字型の特性を示し、初期段階でソフトスプリング特性を示した後、せん断ひずみ300%前後からハードニング特性を示す。本解析結果からも同様の傾向が得られた。全ケースにおいてせん断ひずみ70%前後で剛性低下のピークを示した。

《常用域》せん断ひずみ250%までにおいて、鉛直面圧が小さなモデルは大きなモデルに対して最大10%剛性が上昇する。1次形状係数 S_1 が大きなモデル(ゴムシート一枚の厚みが薄い)は、小さなモデルに対して最大10%剛性が上昇する。2次形状係数 S_2 が大きなモデル(積層ゴム全体の厚みが薄い)は、小さなモデルに対して最大5%剛性が上昇する。せん断ひずみ250%では、設計値の約1.3倍となった。

《使用限界域》せん断ひずみ250%以降ではハードニング特性を示し、最大5%程度の剛性差を保ちつつ、全ての形状の積層ゴムが一様に急激な剛性の高まりを示し、600%で設計値の8倍となった。

《解析の適用限界》形状及び鉛直面圧の影響によって解析が続行不能になる場合が解析48ケース中、18ケース存在した。その内16ケースが2次形状係数 S_2 が4のものであり、その分布を図-7に示す。鉛直面圧が高いほど解析は進まなかったこと、1次形状係数 S_1 の違いに多少影響されることがわかる。なお、解析上の限界に至った理由は要素形状の大変形、収束状態の悪化であった。

4.結論

- (1) 1次形状係数、2次形状係数、鉛直面圧が水平剛性に与える変動は、同一せん断ひずみにおいて最大10%、せん断ひずみ250%までの範囲においては設計値に対して-10%~+30%である。
- (2) 1次形状係数及び2次形状係数が小さく、また鉛直面圧が大きいほど水平剛性は低下する。
- (3) 2次形状係数が小さく、鉛直面圧が大きいほど有限要素法による性能評価が要素形状の大変形等により困難になる。

謝辞 解析の実施にあたっては電力計算センターの野村幸男氏に御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 松田昭博、大島靖樹他、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、1998.4 p10,11

2) 関互、深堀美英他、A LARGE-DEFORMATION FINITE-ELEMENT ANALYSIS FOR MULTILAYER ERASTOMERIC BEARINGS ,RUBBER DIVISION,Vol.60, NOVEMBER-DECEMBER,1987 p856~869

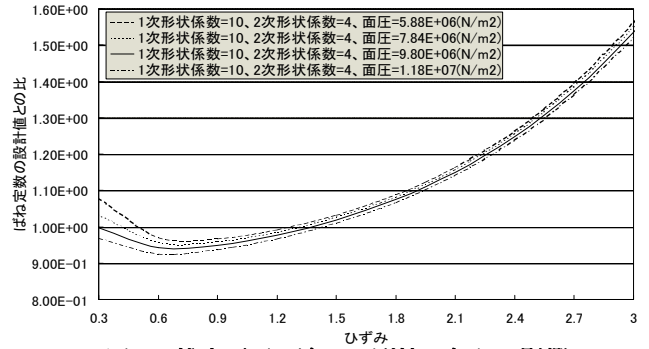


図-4 鉛直面圧の違いが剛性に与える影響

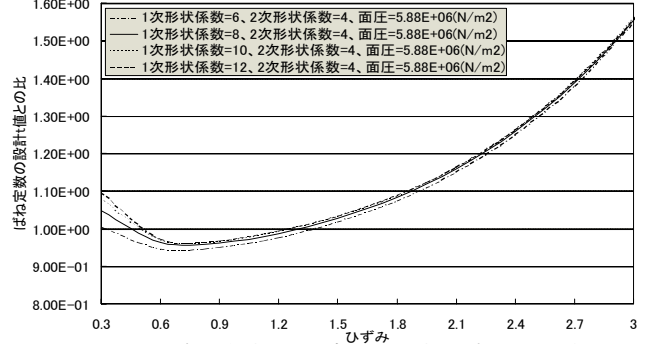


図-5 1次形状係数の違いが剛性に与える影響

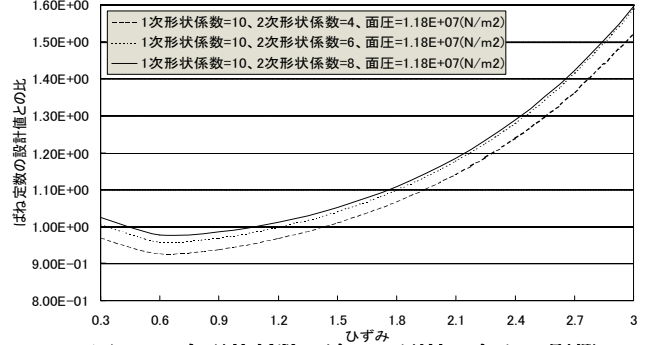


図-6 2次形状係数の違いが剛性に与える影響

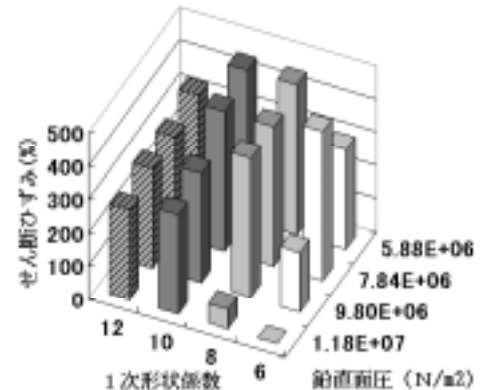


図-7 2次形状係数が4の積層ゴムの解析限界