

FEM を用いた積層ゴムの力学特性に与える 形状パラメータの影響評価に関する研究

Study on evaluation of effects of Shape factors in characteristics of laminated rubber bearing using FEM

松田泰治*、大塚久哲**、中島崇之***、矢葺亘****

Taiji Mazda, Hisanori Otsuka, Takayuki Nakajima, Wataru Yabuki

*工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (同上)

***九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 修士課程 (同上)

****九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (同上)

Laminated rubber bearings as a seismic isolator are used in safety shear strain range based on design specifications of highway bridges in Japan. On the other hand, accurate evaluation of the strength of the bearings is needed for performance based design. Two kinds of shape factor that have influence upon horizontal stiffness of the bearings were adopted in this research. 48 cases of analysis were conducted using FEM. The applicability of FEM for the evaluation of characteristics of the bearings was made clear.

Key Words: seismic isolator, laminated rubber bearing, shape factor, finite element method, strain energy density function

1. はじめに

ゴム支承は構造物の水平および鉛直方向への移動や回転をゴムの弾性変形により吸収させる支承である。積層ゴム支承は横方向へのゴム材のはらみ出しを抑制し支承としての支持機能を強化するために、ゴム層間に補強材として薄い鋼板を挿入し加硫接着した積層構造をなしている。積層ゴムは上部構造の重量を支持すると同時に、横方向には上部構造を柔らかく支持する特性を持ち、地震力に対して構造物の固有周期を長周期化するとともに地震力を低減させる免震装置として免震構造における重要な役割を担っている。

免震構造の普及に伴い、これまで有限要素法解析により積層ゴムの特性の評価を行うための研究が数多くなされてきた。関、深堀等の二軸伸張試験結果に基づくひずみエネルギー密度関数の定式化をはじめとする一連の研究^{1)~6)}により、天然ゴム系積層ゴムの弾性挙動には超弾性構成式によるモデル化により、その水平特性およびせん断変形によって発生する鉛直変形を含む鉛直特性が評価できることが明らかとなっている。しかし、これらの研究は主に建築で用いられる断面形状が円形の積層ゴムを対象に行われてきており、ゴム強度はせん断弾性係数 $4\sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ である。それに対し橋梁用の積層ゴムの断面形状は矩形であり、ゴム強度もせん断弾性係数 $8\sim 12 \text{ kgf/cm}^2$ と大きく、このような特性、形状の積層ゴムを対象とした研究例は少ない。

また天然ゴム系積層ゴムを用いた既往の破断試験によれば、天然ゴム系積層ゴムの破断ひずみは 400% を越えることが報告されている^{7),8)}。道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編(平成 8 年 12 月改訂)において積層ゴムの使用限界はせん断ひずみ 250% と定められており、安全側で評価されている。今後は性能設計への移行に伴い、積層ゴムの使用限界を明らかにして、現象に則したより厳密な評価を行うことが求められている。

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 $P-\delta$ 効果により曲げモーメントが発生し、ゴム層には曲げ変形が生じる。この結果、積層ゴムには圧縮せん断と曲げが混在する複雑な変形挙動を示す。場合によっては支持機能や変形能力の低下をもたらすが、その度合いは積層ゴムの変形時の安定性を示す指標である 2 次形状係数によって大きく左右される。一般に、2 次形状係数が大きいほど曲げ変形の影響が少なく設計変位を大きく取ることができると、1 次形状係数が小さいほど、鉛直および曲げ方向の剛性が低く不安定となり水平変形能力が低下することなどが知られている。

本研究では橋梁に用いられる天然ゴム系矩形積層ゴムを対象に、有限要素法解析により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 次形状係数および鉛直面圧が積層ゴム支承の応力・ひずみ分布、水平剛性および有限要素法による解析の限界に及ぼす影響を明らかにした。最初に 1 次形状係数の異なる四種類の一層

モデルに対して鉛直荷重解析および圧縮せん断解析を行い、内部応力分布およびひずみ分布を明らかにした。また局部せん断ひずみを算出し、免震設計マニュアルの定めるゴムの局部せん断ひずみの照査式との比較を行った。その上で、1次形状係数、2次形状係数の異なる12種類の積層ゴムモデルに対し鉛直面圧4種類を設定して合計48ケースの有限要素法による解析評価を行った。

2. 解析概要

2.1 材料のモデル化

(1) ゴム材料モデル

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(1)式に示す関等りの提案したひずみエネルギー密度関数 W を組み込んだ。

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = a_1(I_1 - 3) + b_1(I_1 - 3)^2 + c_1(I_1 - 3)^3 + d_1 \exp(e_1(I_1 - 3)) \quad (1)$$

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。このひずみエネルギー密度関数 W は $I_3=1$ として非圧縮性を仮定している。一般に積層ゴムの圧縮解析を行う際、ゴムのポアソン比が0.5ではないため、ゴム材料の圧縮性を考慮する必要がある。しかし、圧縮性の影響を受けるのはゴムの鉛直剛性を支配する1次形状係数が大きい(ゴムシートが薄肉)場合であり、建築で用いられる1次形状係数が20~40の積層ゴムがこれにあたる。本研究で取り扱う積層ゴムの1次形状係数は12以下でゴムシートは厚肉であり、この場合ゴムは圧縮時に側方へ大きくはらみ出すため鉛直剛性に対して圧縮性の影響は少ないと考えられる。従ってここでは非圧縮性を仮定した。ゴムの材料定数は図-1に示すゴムの二軸伸張試験から得られた応力ひずみ関係を、ひずみの主不変量 I_1 により偏微分したひずみエネルギー密度関数 W ($\partial W / \partial I_1$) とひずみの主不変量 I_1 の関係に換算し、定数 $a_1, \dots, e_1$ を定めた。図-2、図-3に解析に用いたゴム材料モデルの $\partial W / \partial I_1$ とひずみの主不変量 I_1 および I_2 の関係を示す。解析に用いた(1)式の材料定数を表-1に示す。要素は8節点ソリッド要素を用いた。また、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。

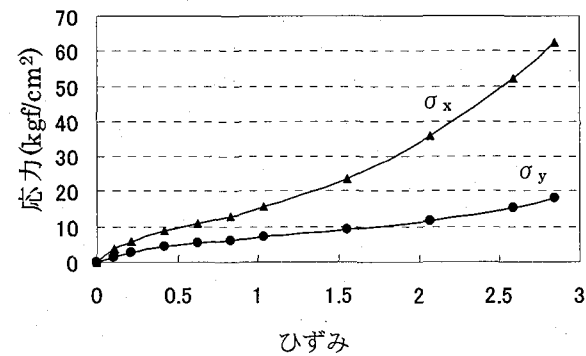


図-1 二軸伸張試験による応力ひずみ関係

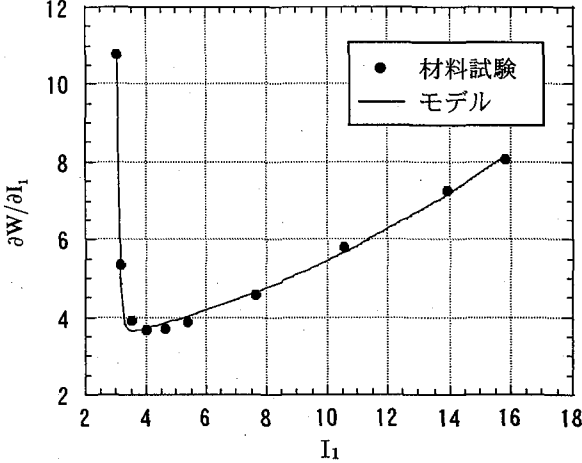


図-2 ひずみの主不変量 I_1 と $\partial W / \partial I_1$ の関係

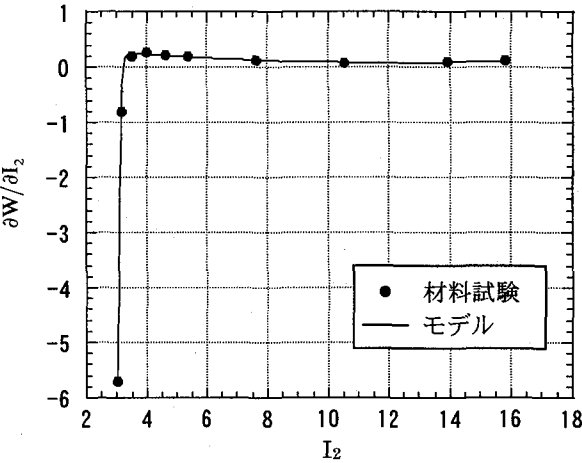


図-3 ひずみの主不変量 I_2 と $\partial W / \partial I_2$ の関係

表-1 材料定数

	i=1	i=2
a_i	3.544	0.27171
b_i	0.1673	-0.04219
c_i	0.015048	0.002304
d_i	12.158	-11.331
e_i	-13.375	-16.435

(2) 鋼板モデル

鋼板は弾塑性体としてモデル化を行った。要素は8節点ソリッド要素とし、ヤング率 $E=1.97 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2(1.93 \times 10^8 \text{ kN/m}^2)$ 、ポアソン比 $\nu=0.271$ 、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

本解析では図-4に示すような1辺1mの正方形断面を有する積層ゴムを図-5のように対称性を考慮してその1/2だけモデル化した。既往の研究⁵⁾より、積層ゴムを圧縮せん断荷重すると、ゴムの圧縮および曲げに伴う側方へのはらみ出しとせん断変形が生じる。側面のゴムのはらみ出しやせん断変形を詳細に評価するには、ゴムシート一層を鉛直方向に細かく分割する必要があるが、5から10程度の分割数ならば水平・鉛直方向の荷重変位関係にほとんど差が生じないことが確認されている。また、水平断面に

おける分割数は円形断面積層ゴムを対象とした既往の研究⁵⁾において、36(円周方向 6、半径方向 6)から 64(円周方向 8、半径方向 8)の 5 通りに分割した場合も水平・鉛直方向の荷重変位関係にほとんど差が生じないことが確認されている。これらの実績を考慮してモデルの要素分割を決定した。

(1) 一層モデル

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 の四種類のゴムシートの上下面を鋼板で挟んだモデルである。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。本解析に用いる 1 次形状係数 S_1 の値 6,8,10,12 は正確には 6.25,8.33,10.4,11.9 である。これはゴム厚の最小単位を mm としたためである。以後 1 次形状係数 S_1 は小数点以下を四捨五入して表示する。

一層モデルの要素分割は鉛直載荷解析用と圧縮せん断解析用の二種類を用意した。ただし一層モデルの水平断面は 20×10 で分割し共通である。鉛直方向の分割数は既往研究を参考に鉛直載荷解析用で 5 分割とした。5 分割のケースでは応力評価を行う積層ゴムの鉛直方向の中心と鉛直方向中央の要素が一致する。圧縮せん断解析用のモデルでは側方のはらみ出しの形状が複雑になることが予想されるため、鉛直載荷解析用の 2 倍である 10 分割とした。ゴムシートを 5 分割したモデルは鋼板を分割せず、10 分割したモデルは鋼板を 2 分割とした。要素は、8 節点ソリッド要素で上記の分割により水平断面では 5×5 (cm)、厚みは $0.42 \sim 0.8$ (cm) 及び $0.21 \sim 0.4$ (cm) となった。表-2 に一層モデルの形状及び要素分割の詳細を示す。

(2) 積層モデル

積層モデルとは実用の積層ゴム形状を規定する二つの形状係数である 1 次形状係数と 2 次形状係数から積層ゴム形状を決定したものである。ここで 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、積層ゴムの力学特性の中で特に曲げ剛性に影響を及ぼす値であり S_2 と表される。1 次形状係数 S_1 は一層モデルと共通とし、2 次形状係数 S_2 は 1 次形状係数 S_1 同様に実橋梁での実績を考慮して、4,6,8 の三種類とした。2 次形状係数 S_2 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 としたこと以外に、2 次形状係数 S_2 が 1 次形状係数 S_1 の影響をも受けるためである。以後 1 次形状係数 S_1 と同じく 2 次形状係数 S_2 は小数点以下を四捨五入して表示する。以上より 1 次形状係数 S_1 四種類と 2 次形状係数 S_2 三種類を設定することにより図-6 に示す計 12 の積層ゴムモデルを作成した。

積層モデルの要素分割は既往研究での実績と計算時間を考慮して定めた。水平断面は一層モデルと同じく全てのモデルに対し 20×10 で分割し、鉛直方向にはゴムシートを 6 および 8 分割、中間鋼板を 2 分割とした。上記の分割により水平断面では 5×5 (cm) 厚みは $0.35 \sim 0.5$ (cm) となった。表-3 に積層モデルの形状及び要素分割を示す。

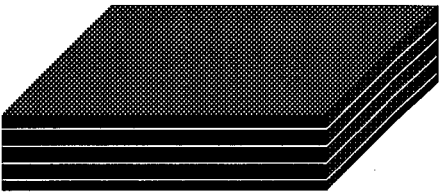


図-4 積層ゴム

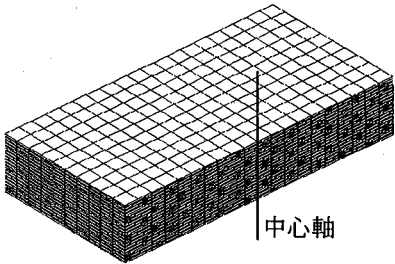


図-5 積層モデル

表-2 一層モデル形状と要素分割

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	5	10	5	10
	要素厚 (mm)	8	4	4.8	2.1
中間鋼板	一層厚 (mm)	8	6	4.8	4.2
	層数	2	2	2	2
	総厚 (mm)	16	12	9.6	8.4
	一層分割数	1	2	1	2
	要素厚 (mm)	8	4	4.8	2.1
全体	総厚 (mm)	56	42	33.6	29.4
	総分割数	7	14	7	14
	要素数 $\times 100$	14	28	14	28

表-3 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	6.25	8.33	4.17	5.56	8.33	4.17	5.95	8.33	3.97	5.95	7.94
ゴム	一層厚 (mm)	40			30			24			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			6			6			6		
	要素厚 (mm)	5			5			4			3.5		
中間鋼板	一層厚 (mm)	10			10			8			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
	一層分割数	2			2			2			2		
	要素厚 (mm)	5			5			4			3.5		
全体	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 $\times 100$	116	76	56	124	92	60	156	108	76	188	124	92

	2次形状係数 8	2次形状係数 6	2次形状係数 4
1次形状係数 6			
1次形状係数 8			
1次形状係数 10			
1次形状係数 12			

図-6 積層モデル形状一覧

2.3 解析手法

一層モデルに対して鉛直载荷解析と圧縮せん断解析を、積層モデルに対しては圧縮せん断解析を次の方法により行なった。鉛直载荷解析は、モデル下面を完全に固定し、モデル上面の全節点の鉛直変位が等しくなる拘束条件のもと、荷重が均等に载荷される分布荷重を荷重制御により与えた。解析手法を図-7に示す。圧縮せん断解析は、モデル下面を完全に固定し、モデル上面の全節点の鉛直変位および水平変位が等しくなる拘束条件のもと、モデル上面端部に対して強制変位を変位制御により与えた。载荷および境界条件を図-8に示す。与える水平変位は一層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0.5づつ2.5に達するまで、積層モデルに対して1ステップにつき0.3づつ6.0まで与えた。ここで平均せん断ひずみとはゴムに与えられた水平変位をゴムの総厚で除したものである。圧縮面圧は実用面圧を考慮し一層モデルと積層モデルで同じ値を設定し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。一層モデルの鉛直载荷解析には上記の圧縮面圧に引張面圧20 kgf/cm² (1.96×10^6 N/m²)を加える。この引張面圧は既往の研究⁷⁾から明らかとなっている積層ゴムの引張降伏面圧の実験値である。

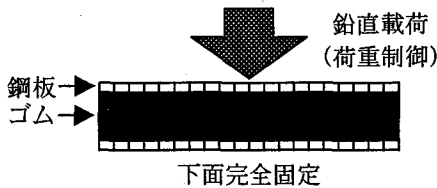


図-7 鉛直载荷解析

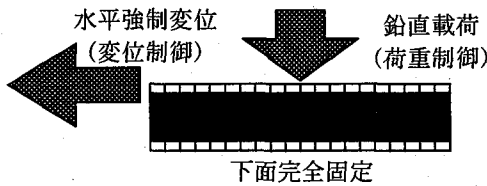


図-8 圧縮せん断解析

3. 一層モデルによるゴムの応力ひずみ状態の評価

3.1 鉛直载荷に基づく応力分布

1次形状係数 S_1 と面圧が鉛直応力分布に与える影響を明らかにするため、一層モデルによる鉛直载荷解析を行った。1次形状係数 S_1 が四種類 (6, 8, 10, 12) の一層ゴムモデルに対して圧縮面圧で四種類 (60, 80, 100, 120 kgf/cm²) を与えた。その結果得られた鉛直応力分布を図-9および図-10に、引張面圧20 kgf/cm²を载荷した場合を図-11に示す。これらの図中の縦軸は鉛直応力の载荷面圧に対する倍率、横軸は発生位置を示している。鉛直応力評価位置は図-12に示すゴムシート断面の中心を通る線分に位置する要素である。この評価位置での鉛直応力は端部ではほぼ応力0を示し、中心部では载荷面圧の約2倍の応力が発生する放物線分布となった。これはすべてのモデルに共通し、引張面圧を载荷した場合の分布形状も同一である。

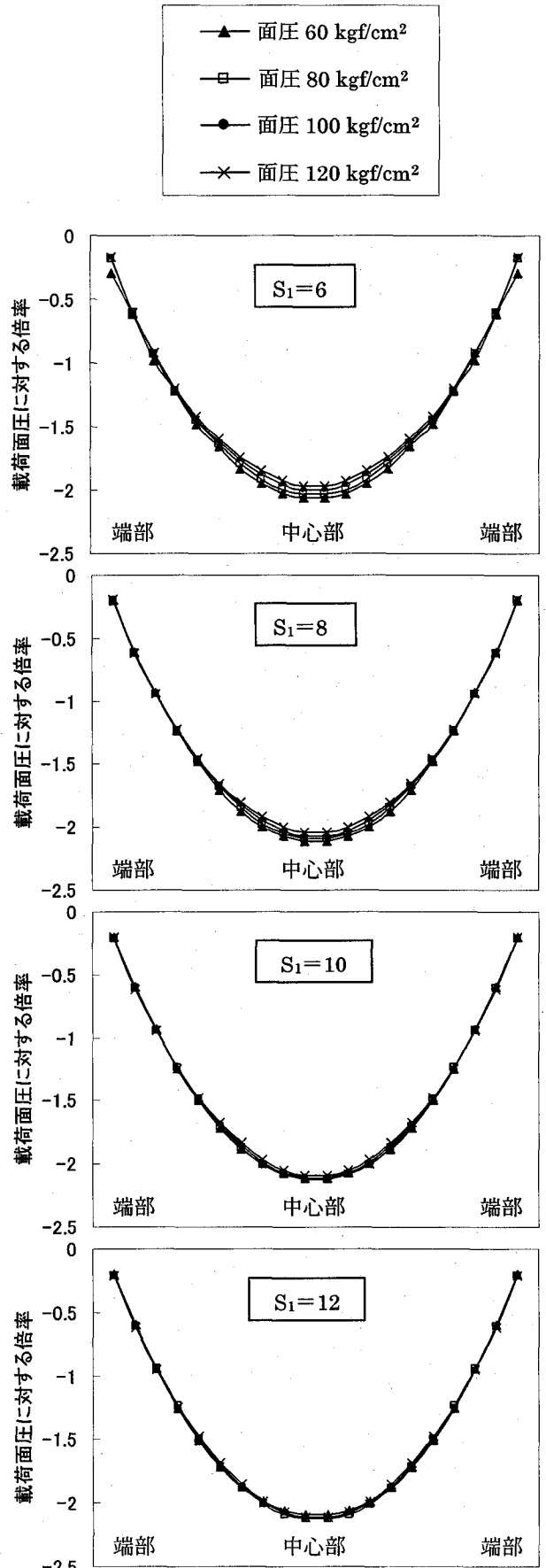


図-9 面圧が鉛直応力分布に与える影響

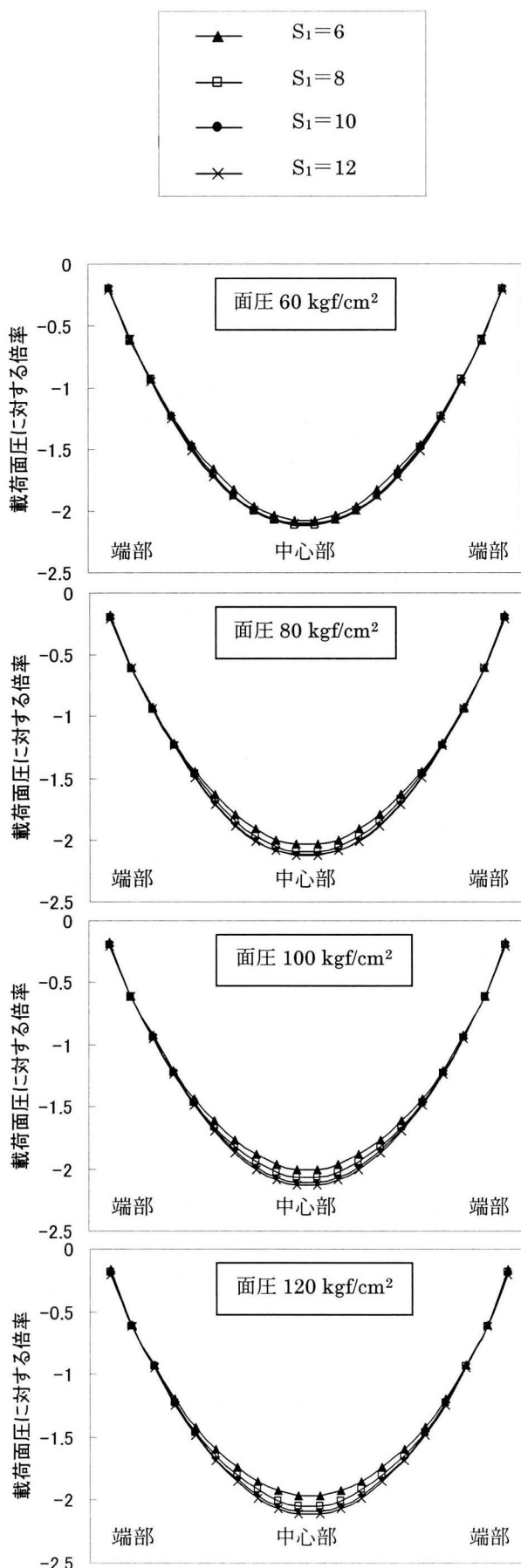


図-10 1次形状係数が鉛直応力分布に与える影響

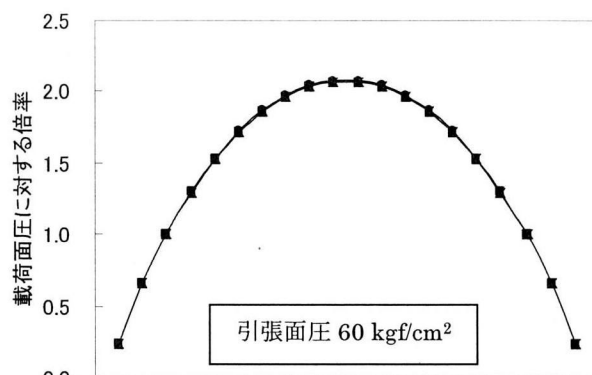


図-11 引張時の鉛直応力分布

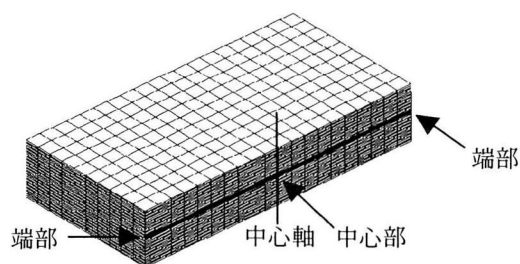


図-12 鉛直応力評価位置

(1) 圧縮応力分布

次に水平断面においてはどのような応力分布を示すのか圧縮、引張について確認を行った。圧縮荷重を行ったときの鉛直応力分布の代表例として1次形状係数 $S_1=12$ 、圧縮面圧 120 kgf/cm² の場合を図-13 および図-14 に示す。中心は図の手前側である。鉛直応力分布は、端部ではほぼ応力 0 を示し、中心部に近づくにつれ大きくなり中心部では荷路面圧の約 2 倍の応力が発生し、その分布形状は放物線分布であることがわかる。

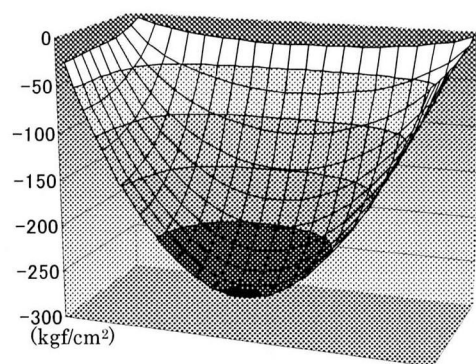


図-13 鉛直応力分布($S_1=12$, 圧縮面圧 120 kgf/cm²)

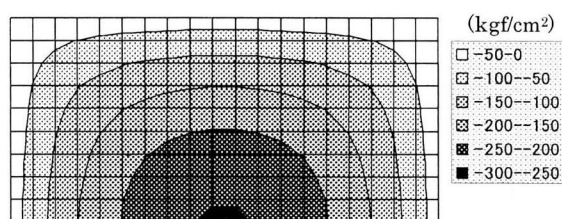


図-14 鉛直応力分布($S_1=12$, 圧縮面圧 120 kgf/cm²)

道路橋支承便覧(平成3年7月改訂)の「3.6.2 ゴム支承の設計手順(2)(j)補強材応力度の検討」には、積層ゴムの補強材すなわち内部鋼板が受ける支圧応力度について述べられている。支圧応力度は同書によれば、支承中央部で最大となり一般には平均支圧応力度の2倍程度になるとあるが、本解析結果はこの記述に合致する。

(2) 引張応力分布

同形状の一層モデルに対して既往の研究から明らかとなっている引張降伏面圧の実験値 20kgf/cm^2 を与えたときの鉛直応力分布を図-15 および図-16 に示す。ゴム中心は図の奥側に位置する。端部ではほぼ応力 0 を示し、中心部では載荷面圧の約2倍の応力が発生しており、分布形状も圧縮載荷時と同様に放物線分布である。

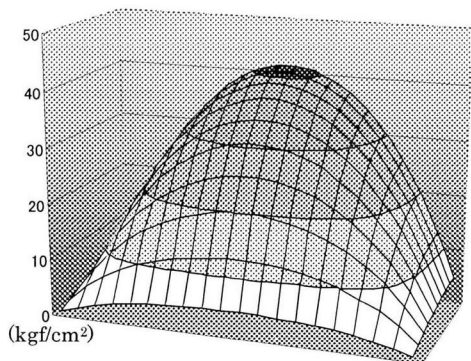


図-15 鉛直応力分布($S_1=12$, 引張面圧 20kgf/cm^2)

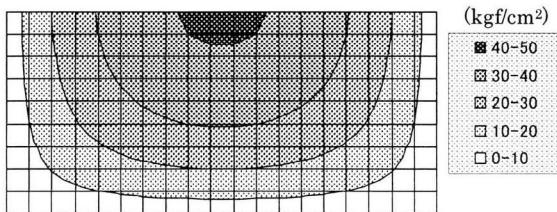


図-16 鉛直応力分布($S_1=12$, 引張面圧 20kgf/cm^2)

3.2 1次形状係数と面圧が鉛直応力分布に与える影響

鉛直載荷解析結果の図-9 および図-10 から次のことがわかる。同形状モデルでは面圧が大きいものほど載荷面圧に対する倍率が中心部で小さくなる。これは面圧が大きいほどゴムは圧縮され、見かけの1次形状係数 S_1 が大きくなり応力が均等化するためと考えられる。この傾向は1次形状係数 S_1 が小さいほど顕著となるが、ゴム厚が厚いものほど圧縮により見かけの1次形状係数 S_1 が大きくなるためと考えられる。同一面圧下においては、高面圧時に1次形状係数 S_1 が大きいほど載荷面圧に対する倍率は大きくなっている。本解析より、載荷面圧に対して最大2.2倍の鉛直応力が発生したが、工学的には中心部で約2倍の応力が発生するとみなして差し支えないと考えられる。

次に一層ゴムモデルに引張面圧 20kgf/cm^2 を与えたときの鉛直応力分布に1次形状係数 S_1 が与える影響を評価する。引張時の鉛直応力分布を示す図-11 から1次形状係数 S_1 の違いによる鉛直応力の差異は大きくないことがわかる。これは圧縮面圧載荷時に比べ低面圧状態であるた

めと考えられる。

3.3 鉛直方向における分布形状

断面方向においては中心部で最大応力が発生することが分かったが、一層内の鉛直方向で分布形状に違いがあるかを調べるために1次形状係数 $S_1=12$ 、圧縮面圧 $=120\text{kgf/cm}^2$ の一層モデルを対象に詳細な応力分布の分析を行った。5分割した内の最上層(上から一層目)、中央層(上から三層目)、その中間層(上から二層目)の三層間で比較した結果を図-17 に示す。これより、各層間で鉛直応力に大きな差異はないことがわかる。よって一層ゴムモデルではゴム中心軸上に応力が集中することが確認された。

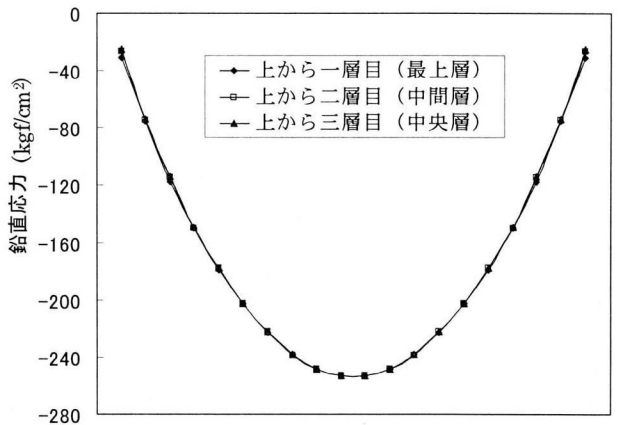


図-17 圧縮面圧下の三層間応力比較

圧縮載荷時と同様に、引張時に層方向で応力の分布形状に違いがあるかを調べるために、三層間で比較した結果を図-18 に示す。これより圧縮載荷時と同様に、層方向では差異が生じず応力は中心軸上に集中することが確認された。従って、平均面圧 20kgf/cm^2 で引張降伏が生じゴム中心軸部で約二倍の応力が生じていると考えられる。この時のゴムの引張破断応力は約 40kgf/cm^2 である。

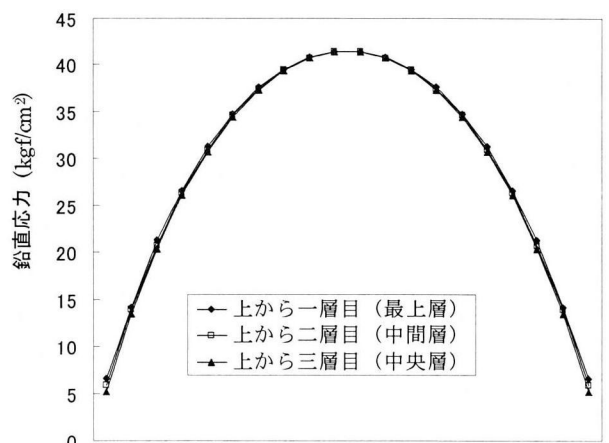


図-18 引張面圧下の三層間応力比較

3. 4 局部せん断ひずみの評価

(1) 免震設計マニュアル照査式との比較

免震設計マニュアル「4.2.4 積層ゴム支承の設計」には設計法と共に設計値が許容値以内となるための照査式が記されている。本研究では「(6)局部せん断ひずみの照査」に着目し、照査式と FEM 解析結果の比較検討を行う。免震設計マニュアル「4.2.4(6)局部せん断ひずみの照査」は、道路橋支承便覧「3.6 ゴム支承の設計」に基づき、鉛直荷重・水平力・回転変形により積層ゴム端部に生じる局部せん断ひずみが許容値以内であることを規定したものである。道路橋支承便覧では常時に対してのみ局部せん断ひずみの照査を行うこととしているが、免震設計では積層ゴム支承は免震装置として主要な構成部材であることから、免震設計マニュアルでは局部せん断ひずみの照査を地震時にも適用することとなっている。照査式を(2)式に示す。照査式は鉛直荷重・水平変位・回転変形の各要因により生じた局部せん断ひずみの和(左辺)が、ゴムの破断ひずみを安全率で割った値(右辺)より小さくなるように定めている。ここで注目すべき点はある複合外力の作用により積層ゴムに生じる局部せん断ひずみを三種類の局部せん断ひずみに別々に独立に算出し、それぞれの単純和として評価している点である。圧縮せん断変形時には、積層ゴムの有効支持面積の減少に伴い鉛直荷重による局部せん断ひずみにに対して安全側の補正が行われている。そこで免震設計マニュアルに定められるゴムの局部せん断ひずみの照査式の妥当性を確かめるため、FEM 解析から得られた最大せん断ひずみとの比較を行い、その適用性を検討する。せん断ひずみの評価位置は各一層モデルにおける鋼板直下の A から C の各節点である。評価位置を図-19 に示す。図-19 は上下鋼板を除いたゴムシートの 1/2 モデルである。せん断ひずみの算出方法はせん断方向の節点変位を初期状態における上下隣接節点間距離で除し、これによりゴムの局部せん断ひずみの最大値を評価した。なお本解析では先述のように要素の大変形を予想して鉛直方向についてこれまでの 2 倍の 10 分割でゴムを分割している。

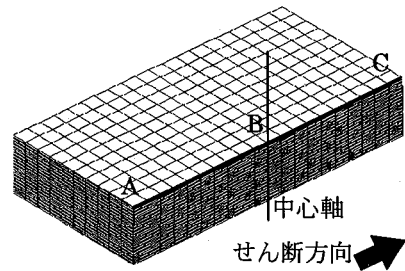


図-19 せん断ひずみ計測位置

(a) 圧縮時のゴムの局部せん断ひずみ

鉛直荷重のみによって発生するせん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した結果を図-20 に示す。せん断ひずみは圧縮荷重に比例して増加する。FEM 解析結果は免震設計マニュアルで定められる局部せん断ひずみより最大 32% 小さく、免震設計マニュアルの定める値が安全側であることが明らかとなった。1 次形状係数 S_1 が小さいモデルほど差が大きくなっているが、全体的な傾向は照査式と FEM 解析結果で良く一致している。

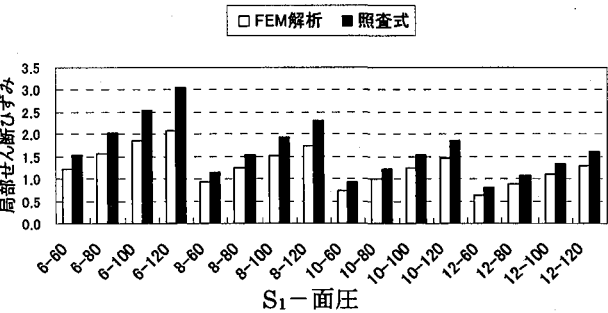


図-20 圧縮時の局部せん断ひずみ

(b) 圧縮せん断載荷時のゴムの局部せん断ひずみ

圧縮荷重を載荷した状態でせん断ひずみ 2.5 を与える圧縮せん断解析を行い、発生するせん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した結果を図-21 に示す。免震設計マニュアルの定める局部せん断ひずみは鉛直荷重と水平変位のそれぞれから発生するせん断ひずみの単純和として与えられ、概ね鉛直荷重のみによるゴムの局部せん断ひずみに 2.5 を足し合わせた値となる。FEM 解析結果はこれらに比べ面圧 0 のケースを除けば 15% 以上小さくなり、せ

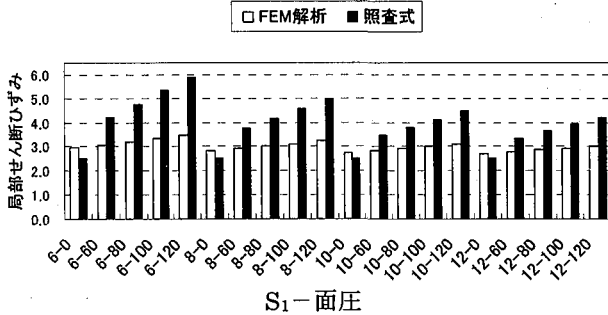


図-21 圧縮せん断時の局部せん断ひずみ

局部せん断ひずみの照査式

$$(\gamma_C + \gamma_R + \gamma_S) \leq \frac{\gamma_U}{f_\delta} \quad (2)$$

γ_C : 鉛直荷重によるゴムの局部せん断ひずみ

γ_R : 回転角によるゴムの局部せん断ひずみ

γ_S : 水平変位によるゴムの局部せん断ひずみ

γ_U : ゴムの破断ひずみ

f_δ : 安全率

$$\gamma_S = \frac{u_B}{\sum l_e} \quad (3)$$

u_B : 地震時の設計変位

$\sum l_e$: ゴムの総厚

ん断ひずみで最大 2.4 もの差異が生じた。FEM 解析結果は鉛直荷重によらずせん断ひずみ 2.6~3.4 の範囲で安定している。一方照査式では鉛直荷重の増加によりせん断ひずみが著しく増加している。これは先述の圧縮によるゴムの局部せん断ひずみが独立して加算されるため、非常に安全側の評価となっている。これらの結果より圧縮せん断変形時は鉛直荷重と水平変位のそれぞれから発生するせん断ひずみを単純和として評価することは著しく安全側の評価となり、現象を忠実に表現できていないと考えられる。面圧 0 のケースは全形状モデルにおいて照査式を上回る結果となっている。これは面圧 0 のケースであることから照査式で評価される局部せん断ひずみは水平変位によるゴムの局部せん断ひずみのみである。このせん断ひずみは照査式(3)式においては地震時の設計変位を総厚で除した値と定められており平均せん断ひずみに等しく、局部を表すものではないため FEM 解析結果が上回るものと考えられる。

(2) せん断変形におけるせん断ひずみ分布の変化

せん断変形におけるせん断ひずみ分布の変化を明らかにするため 1 次形状係数 S_1 が 10 の一層モデルに対し面圧が 0 kgf/cm² の場合と 100 kgf/cm² の場合の比較検討を行う。せん断ひずみの評価位置および計算方法は免震設計マニュアルによる局部せん断ひずみとの比較に示すものと同じである。面圧が 0 kgf/cm² の場合と 100 kgf/cm² の場合の平均せん断ひずみ 2.5 までのせん断ひずみ分布の変化を図-22 および図-23 に示す。せん断方向は AC 方向である。面圧が 0 kgf/cm² 場合は全要素でほぼ同じ値のまま増加していく。面圧が 100 kgf/cm² の場合はせん断変形 0 の時点で両端部に圧縮による局部せん断ひずみが左右対称に生じている。ここで負の値は逆方向のせん断ひずみが生じていることを表している。せん断ひずみが 1.0 までは、鉛直荷重によるせん断ひずみの分布形状を保ったまま、せん断ひずみの進行に伴い増加していく。せん断ひずみが 1.0 を越え 2.5 へ近づいてゆくと局部せん断ひずみ分布の勾配は緩やかになり、局部せん断ひずみは鉛直荷重に基づくものと水平変位に基づくものの単純和では表現できなくなる。この領域では鉛直荷重よりも水平変位による局部せん断ひずみが卓越し全体の局部せん断ひずみに大きく影響を及ぼすようになっていく。従って、圧縮変形により局部せん断ひずみは発生するが、更なるせん断変形によって圧縮の寄与が相対的に減少し、純粋なせん断変形による局部せん断ひずみが卓越するようになっていくと考えられる。また図-22、図-23 に示す局部せん断ひずみ分布の変化において、ひずみ分布に不連続な部分が生じている。この不連続部はせん断ひずみ 1.25 未満では主に端部 A・C 点近傍に、せん断ひずみが 1.25 以上については全域に生じている。このせん断ひずみは節点変位から算出しているが、節点変位にも不連続部は確認された。この原因のひとつとして本研究では 8 節点ソリッド要素に非圧縮性を仮定しているため、表面端部要素が著しく変形した場合にその要素と辺を共有する内部の要素が変形の影響を受けることが考えられる。このような点に関しては今後要素分割を密にしたケースや圧縮性を考慮したケースと比較検討してゆく必要があると考える。

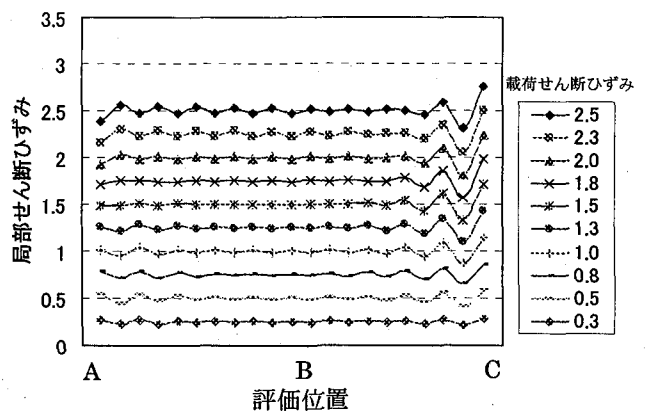


図-22 せん断ひずみ分布の変化(面圧 0 kgf/cm²)

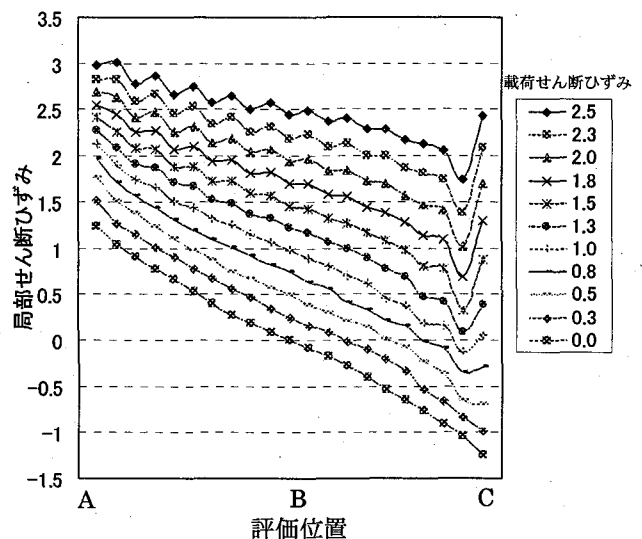


図-23 せん断ひずみ分布の変化(面圧 100 kgf/cm²)

4. 積層ゴムモデルによる力学特性の評価

1 次形状係数、2 次形状係数の異なる 12 種類の積層モデルに対し鉛直面圧四種類を設定して合計 48 ケースの有限要素法による解析評価を行った。積層モデルに圧縮せん断解析を行い 1 次形状係数 S_1 、2 次形状係数 S_2 、鉛直面圧が水平剛性および有限要素法による解析の限界に及ぼす影響を明らかにした。

4.1 全領域における水平剛性

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。図-24、図-25、図-26 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、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 3.0 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 0.7 前後で剛性低下のピークを示した。

4.2 常用域における水平剛性

道路橋示方書「8.4.2 免震支承の安全性の判定」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-24に示すように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%剛性が上昇するという結果が得られた。また図-25より1次形状係数 S_1 が大きなモデルは、小さなモデルに対して最大10%剛性が上昇するという結果が得られた。図-26では2次形状係数 S_2 が大きなモデルは、小さなモデルに対して最大5%剛性が上昇するという結果が得られた。せん断ひずみ2.5における剛性は設計値の約1.3倍となった。

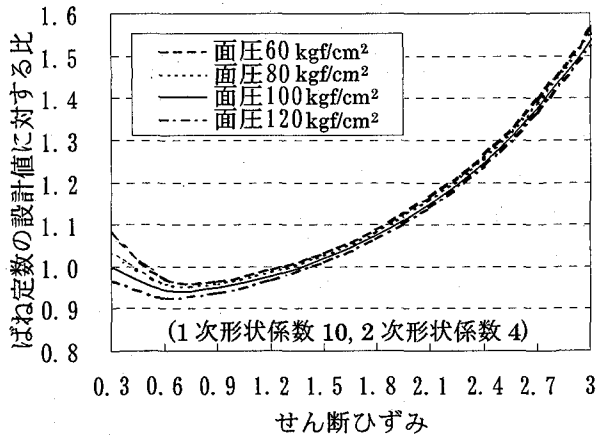


図-24 鉛直面圧が剛性に与える影響

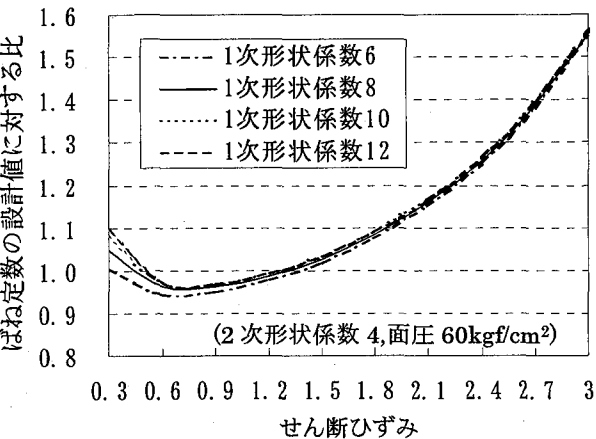


図-25 1次形状係数が剛性に与える影響

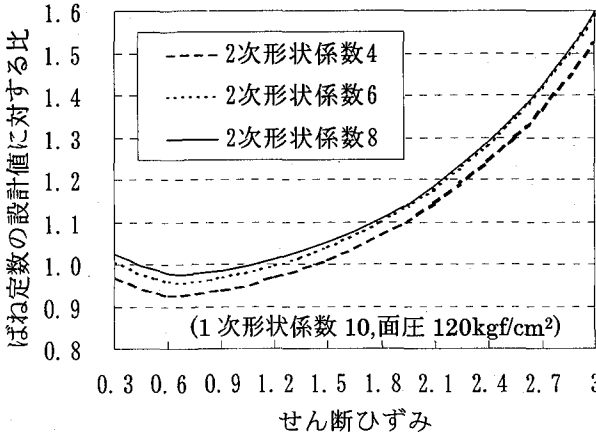


図-26 2次形状係数が剛性に与える影響

4.3 使用限界域における水平剛性

積層ゴムはせん断ひずみ2.5以降の使用限界域においてゴム特有のハードニング特性を示し、全ての形状の積層モデルが最大5%程度の剛性差を保ちつつ、急激に剛性が高くなった。せん断ひずみ6.0では設計値の約8倍となった。

4.4 解析の適用限界

形状およ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48ケース中、18ケース存在した。その内16ケースは2次形状係数 S_2 が4のものであり、その分布を図-27に示す。鉛直面圧が高いほど解析により評価可能なせん断ひずみレベルが低下する。また、1次形状係数 S_1 の違いによっても解析による評価の限界は大きく影響を受けることがわかる。解析上の限界に至った理由のひとつは、大変形時の要素形状のゆがみで凸多角形を維持できなくなり、収束に至らなかったことによる。

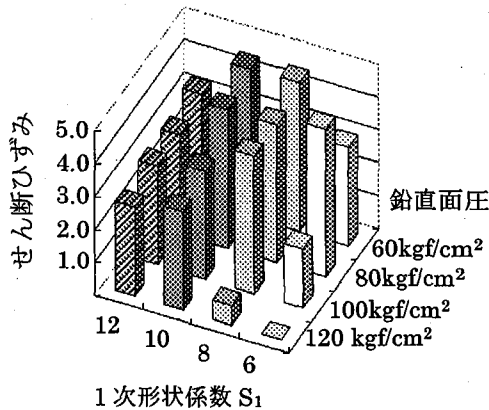


図-27 2次形状係数 $S_2=4$ の積層ゴムの解析限界

5. 結論

本研究では橋梁に用いられる天然ゴム系矩形積層ゴムを対象に、有限要素法解析により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次形状係数および鉛直面圧が積層ゴム支承の応力・ひずみ分布、水平剛性および有限要素法による解析の限界に及ぼす影響を明らかにした。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉛直荷重に対してゴム内部に発生する鉛直応力分布は放物線形状であり、載荷面圧に対する倍率は中心軸上で約2倍となる。
- (2) 鉛直荷重によるせん断ひずみは、免震設計マニュアルが定める局部ひずみの照査式より19~32%小さいが、傾向は一致し、安全側の評価となることが確認された。
- (3) 圧縮せん断載荷によるせん断ひずみは、平均せん断ひずみが1.0を越える領域で免震設計マニュアルに定める、鉛直荷重とせん断変位の両者によって生じる局部せん断ひずみ照査式の単純和を用いると過大に安全側の評価となることが確認された。
- (4) 1次形状係数、2次形状係数、鉛直面圧が水平剛性に

与える影響は、同一せん断ひずみにおいて最大10%、せん断ひずみ2.5までの範囲においては設計値に対して-10%~+30%であり、1次形状係数および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ことが確認された。

- (5) 2次形状係数が小さく鉛直面圧が大きいほど、有限要素法解析による性能評価が大変形時の要素形状のゆがみ等により困難となることが確認された。

おわりに

本研究では橋梁用積層ゴムを対象として解析を行っているため、断面形状やゴム硬度の異なる既往の解析や載荷試験の結果との整合性を確かめることが難しい。今後、研究を進めるにあたり、要素分割方法やゴムの圧縮性に関する検討等を行い、載荷試験結果との比較を行っていく予定である。

謝辞：ひずみエネルギー密度関数の設定にあたってはブリヂストンの関互氏、須藤千秋氏より材料試験データの御提供を頂きました。また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) W.Seki, Y.Fukahori, A Large-Deformation Finite-Element Analysis for Multilayer Erastomeric Bearings ,Rubber Division, Vol.60, 11-12,1987 p856~869
- 2) T.Mazda, H.Shiojiri, Numerical Method for Analysis of Laminated Erastomer Bearings, Transactions of the 11 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology / Tokyo , Japan,1991,8,pp.175~180
- 3) T.Mazda, H.Shiojiri, Numerical Analysis of Laminated Erastomer by FEM, Transactions of the 12 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology / Stuttgart, Germany , 1993,8 ,pp.249~254
- 4) 松田泰治、矢花修一、塩尻弘雄、有限要素法による免震用積層ゴムの大ひずみ解析法の開発、電力中央研究所報告：U92061、1993.3
- 5) 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
- 6) 松田昭博、大鳥靖樹他、大変形有限要素法を用いた免震要素積層ゴム特性試験シミュレーション、日本機会学会論文集(A編)65巻635号、1999.7
- 7) T.Mazda, H.Shiojiri, Test on Large-Scale Isolation Elements ,Transactions of the 10 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology / Anaheim ,USA, 1989,8,pp.679~684
- 8) T.Mazda, H.Shiojiri, Test on Large-Scale Isolation Elements ,Part2 Static Characteristics of Laminated Rubber Bearing Type , Transactions of the 11 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology / Tokyo , Japan,1991,8,pp.235~240

(2000年9月14日受付)