

FEMを用いた積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究

Study on the evaluation for local shear strain of laminated rubber bearing using FEM

松田泰治*, 大塚久哲**, 中島崇之***

Taiji Mazda, Hisanori Otsuka, Takayuki Nakajima

*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 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

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 local shear strain of the bearings is needed for performance based design. Shape factor and vertical stress that have influence upon local shear strain of the bearings were examined in this research. 16 cases of analysis were conducted using FEM. The limitations of applicability of the evaluation formula for local shear strain in the design specifications were made clear.

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

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

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。積層ゴム支承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、これまでに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積層ゴムを対象としたものであり、橋梁で用いられる硬度の高いゴムを用いた矩形断面の積層ゴムを対象とした研究例は少ない。

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。

著者らはこれまでに橋梁に用いられる天然ゴム系矩形積層ゴム支承を対象として、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、水平剛性および解析限界に及ぼす影響の評価を行ってきた。しかし、橋梁用積層ゴム支承を対象としているため、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く、解析の信頼性を示すことができなかった。そこで、本研究では最初にゴムの材料試験である一軸拘束二軸伸張試験を解析によって再現することによりゴム材料のモデル化の妥当性を検討した。次に、積層ゴム支承の設計を規定する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に着目し、一層モデルを用いた4種類の解析により局部せん断ひずみを算出し、照査式と比較することによりその妥当性を検討した。最後に、積層ゴムを圧縮せん断載荷した場合、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が、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。また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曲げモーメントの簡易評価式との比較を行った。

2. ゴム材料のモデル化と妥当性の検証

2.1 ゴム材料のモデル

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

1)の提案したひずみエネルギー密度関数 W を組み込んだ。

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

ここで I_i 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を仮定した。ゴムの材料定数 a_i, b_i, c_i はゴムの二軸伸張試験から定めた。その手法は著者等による既往研究⁹⁾と同様である。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。

2.2 モデル化の妥当性の検証

有限要素法を用いて二軸伸張試験を再現し、応力ひずみ関係を求め、試験結果との比較を行う。これによりモデル化の妥当性を検証する。

(1) 解析モデル

試験で用いられたゴムシートの寸法は $145 \times 95 \times 0.5$ (mm) である。これに三種類の要素分割モデルを用意した。モデルの要素分割は X,Y,Z が図-1 に示すそれぞれの軸方向に対応し、直後の数字を当該軸方向の要素分割数とすると、X5Y5Z1 と X10Y10Z2 と X20Y20Z4 となる。それぞれのモデルの総要素数は 25、200、1600 である。要素は 8 節点ソリッド要素とした。

(2) 解析手法

二軸伸張試験を次のように再現した。拘束条件は、YZ 平面に平行な 2 面上の節点集合は X 変位を固定する。ZX 平面に平行な 2 面のうち、一方の面の節点集合は完全固定とする。他方の面の節点集合は X と Z 変位を固定し、Y 変位を等しくする。この面を Y 方向に強制変位を与える。

(3) 解析結果

解析から得られた X 方向および Y 方向の応力ひずみ関係と実験値の比較を図-2 から図-4 に示す。三種類の分割モデルにおける解析結果は実験値とほぼ一致することがわかる。図-5 に三種類の分割モデルの比較を示す。①②③は X5Y5Z1、X10Y10Z2、X20Y20Z4 に対応しており、同図から、各分割モデルに違いが全く生じないことがわかる。本検証によりゴム材料のモデル化の妥当性が確認された。

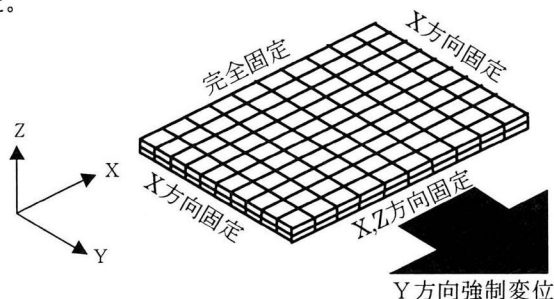


図-1 モデルと境界条件

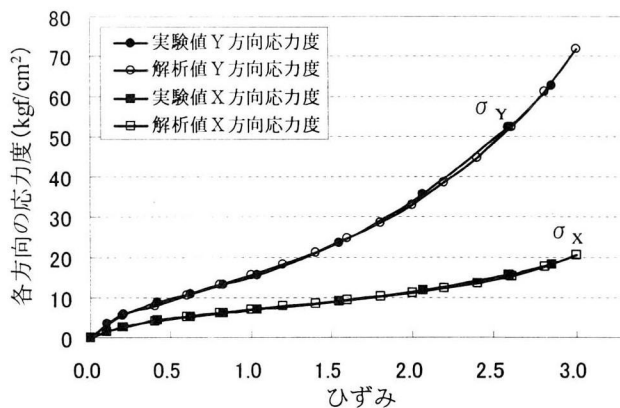


図-2 X5Y5Z1 分割モデルの応力ひずみ関係

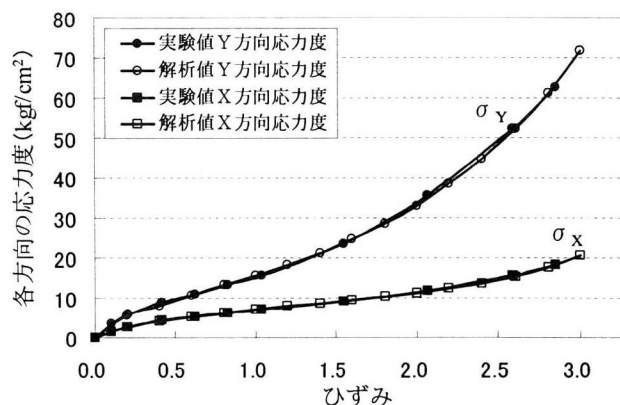


図-3 X10Y10Z2 分割モデルの応力ひずみ関係

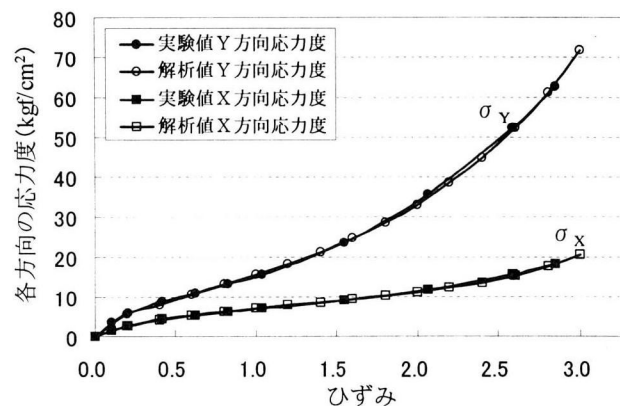


図-4 X20Y20Z4 分割モデルの応力ひずみ関係

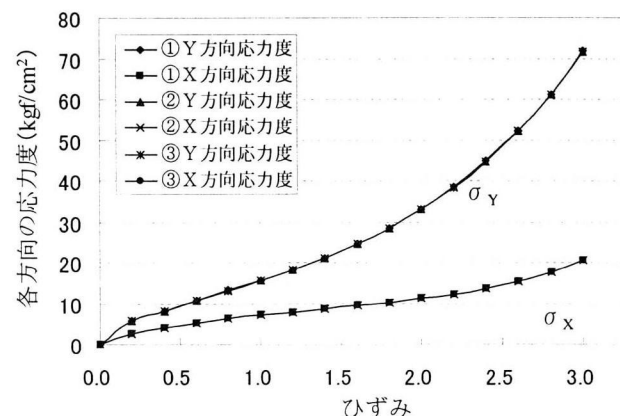


図-5 三種類の分割モデルの応力ひずみ関係

3. 一層モデルによる局部せん断ひずみの評価

免震設計マニュアル「4.2.4 積層ゴム支承の設計」¹⁰⁾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」¹¹⁾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に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別に独立に算出し、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。

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

- 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

3.1 解析モデル

本解析では図-6 に示すような 1 辺 1 m の正方形断面を有する積層ゴムを図-7 のように対称性を考慮してその 1/2 だけモデル化した。積層ゴムを圧縮せん断载荷すると、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、本研究と同手法を用いてゴム材料をモデル化した既往の研究⁹⁾から、鉛直方向を 5 から 10 程度に分割するならば水平・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⁹⁾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。

本解析では一層モデルを用いた。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 は正確に表すならば 6.25,8.33,10.4,11.9 となる。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既往研究⁹⁾を参考にし、水平断面を 20×10 分割、鉛直方向は 10 分割とした。鋼板は鉛直方向に 2 分割とした。要素は、8 節点ソリッド要素で上記の分割により水平断面では 5×5 (cm)、厚みは 0.21~0.4(cm)となった。表-1 に一層モデルの形状及び要素分割の詳細を示す。

鋼板は剛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、ポアソン比 $\nu=0.271$ とした。

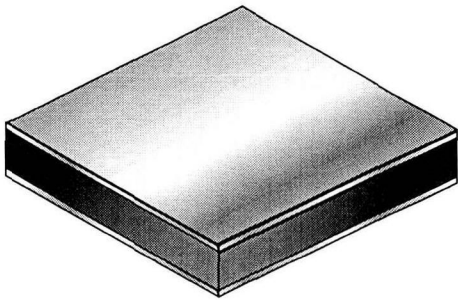


図-6 積層ゴムの一層モデル

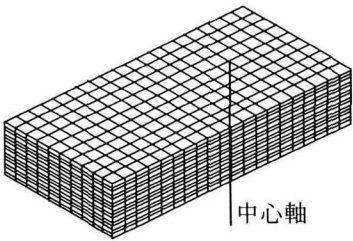


図-7 解析モデル(1/2 対称)

表-1 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	10	10	10	10
	要素厚(mm)	4	3	2.4	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	2	2	2	2
	要素厚(mm)	4	3	2.4	2.1
全体	総厚(mm)	56	42	33.6	29.4
	総分割数	14	14	14	14
	要素数×100	28	28	28	28

3.2 解析手法

一層モデルに対して(a)鉛直载荷解析、(b)圧縮曲げ解析、(c)圧縮せん断解析、(d)上鋼板の回転を許容した圧縮せん断解析を次の方法により行なった。拘束条件は、全解析でモデル下面を完全に固定し、(a)(c)はモデル上面の全節点の鉛直および水平変位を等しくし、(b)(d)は上鋼板下面の中心線を軸に上鋼板の回転を許容する。鉛直载荷(圧縮)は荷重制御により与えた。水平変位はモデル上端にゴムの平均せん断ひずみで2.5に達するまで変位制御により与えた。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。(b)は圧縮の後、剛な上鋼板の端部に偶力を与えることにより上面中央の回転軸回りのモーメントを与えた。解析手法を図-8から図-11に示す。圧縮面圧は実用面圧を考慮し 60,80,100,120 kgf/cm² (5.88,7.84,9.80, 11.8×10⁶N/m²)の四種類とした。

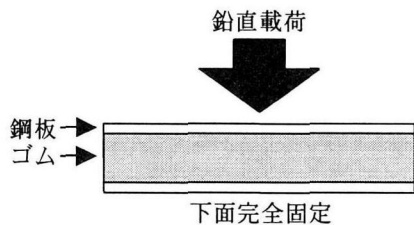


図-8 (a)鉛直载荷解析

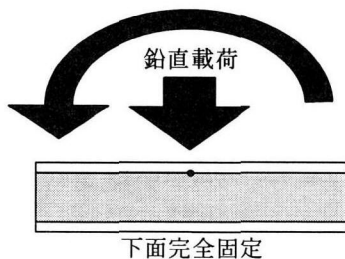


図-9 (b)圧縮曲げ解析(上鋼板回転許容)

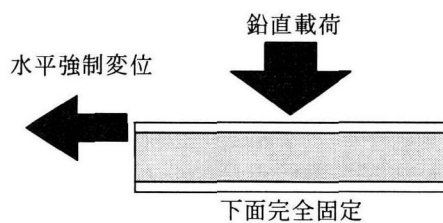


図-10 (c)圧縮せん断解析

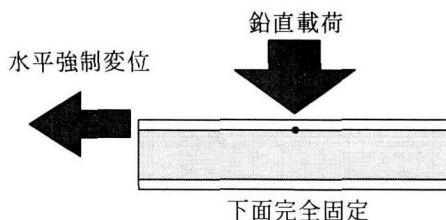


図-11 (d)圧縮せん断解析(上鋼板回転許容)

3.3 解析結果

解析結果を図-12から図-15に示す。横軸はモデル形状を表す1次形状係数 S_1 と载荷面圧(kgf/cm²)である。

(a) 圧縮時の局部せん断ひずみ

鉛直荷重のみによって発生する局部せん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した。結果を図-12に示す。図より、解析値は照査式より小さくなり、照査式が安全側の評価となっていることがわかる。両者共に圧縮荷重に比例して増加する。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。照査式は解析結果より 19~32%安全側の評価となることが確認された。

(b) 圧縮曲げ時の局部せん断ひずみ

鉛直荷重と曲げ変形によって発生する局部せん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した。結果を図-13に示す。圧縮のみの場合と同様に、解析値は照査式より小さくなり、照査式が安全側の評価となっていることがわかる。両者共に圧縮荷重に比例して増加する。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。照査式は解析結果より 17~33%安全側の評価となることが確認された。

(c) 圧縮せん断時の局部せん断ひずみ

鉛直荷重とせん断変形によって発生する局部せん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した。結果を図-14に示す。前者二つの場合と同様に、解析値は照査式より小さくなり、照査式が安全側の評価となっていることがわかる。しかし、照査式は圧縮荷重に比例して大きく増加しているが、解析結果は鉛直荷重や1次形状係数 S_1 によらずせん断ひずみ 2.75~3.15の範囲で安定している。照査式は解析結果より 18~46%安全側の評価となり、ひずみを過大に評価するケースが含まれることが確認された。

(d) 圧縮せん断時(上鋼板回転許容)の局部せん断ひずみ

鉛直荷重とせん断変形と曲げ変形によって発生する局部せん断ひずみを照査式と FEM 解析で比較した。結果を図-15に示す。解析結果は上鋼板の回転を許容しない場合よりも 2.0~4.5%大きくなることが確認されたが、全体的な傾向は上鋼板の回転を許容しない場合と同様となった。照査式は解析結果より 18~50%安全側の評価となり、ひずみを過大に評価するケースが含まれることが確認された。

3.4 要素分割による影響の評価

せん断変形を伴う変形の場合、照査式は解析結果より最大 5 割程度過大に評価するケースが含まれることが確認されたが、これには要素分割が影響を及ぼしている可能性が考えられる。そこで、最も安全側となった1次形状係数 S_1 が6で圧縮面圧が 120 kgf/cm² のケースについて要素分割が与える影響の評価を行った。

(1) 解析モデルおよび解析手法

解析モデルを表-2から表-4に示す。表に示す X10Y5Z5 の X,Y,Z は図-16のそれぞれの軸方向に対応しており、その直後の数字はその辺の分割数を示している。表に示す合計 27 モデルを作成した。基準となるモデル分割は X20Y10Z10 である。これらの要素分割数の異なるモデルに対して圧縮せん断解析を行った。

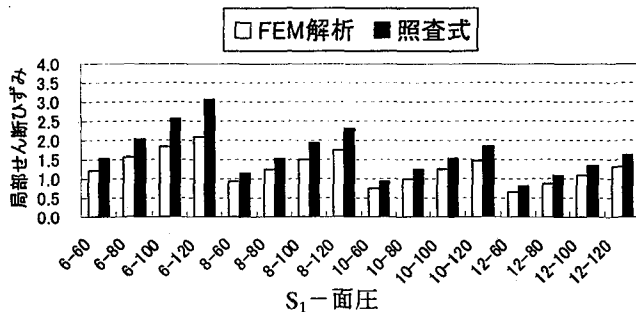


図-12 (a)圧縮時の局部せん断ひずみ

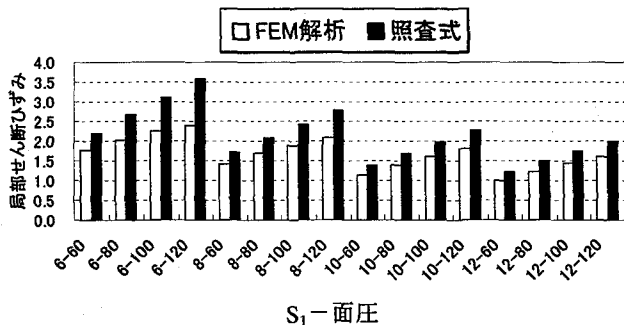


図-13 (b)圧縮曲げ時の局部せん断ひずみ

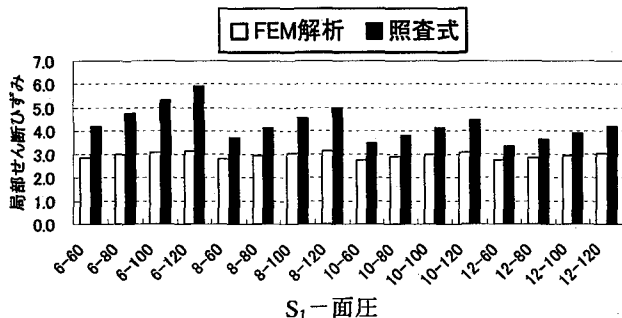


図-14 (c)圧縮せん断時の局部せん断ひずみ

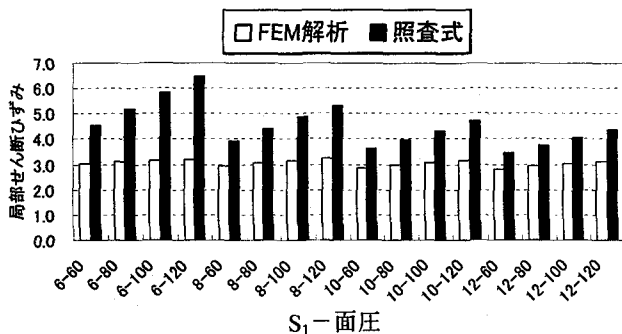


図-15 (d)圧縮せん断時の局部せん断ひずみ
(上鋼板回転許容)

(2) 要素分割の影響

図-17から図-19に解析結果を示す。Z軸方向分割数が20の場合において、二つのモデルが計算機の容量を超えたため結果を得ることができなかった。本解析結果は、局部せん断ひずみはX軸方向に分割数を増やすほど小さくなり、Y軸方向に分割数を増やしても変化がなく、Z

方向に増やすほど大きくなるという傾向を示した。最大値はX10Y5Z20モデルの3.29、最小値はX40Y10Z5モデルの2.86となり、基準のモデルに発生した局部せん断ひずみの3.14に対し、各モデルの結果は±10%程度で分布する結果となった。よって照査式が示す値の6.0に近づくことはないと判断され、要素分割が局部せん断ひずみに与える影響は著しく大きくはないことを確認した。

表-2 Z軸方向の分割数が5のモデル(Z5モデル)

	X10	X20	X40
Y5	X10Y5Z5	X20Y5Z5	X40Y5Z5
Y10	X10Y10Z5	X20Y10Z5	X40Y10Z5
Y20	X10Y20Z5	X20Y20Z5	X40Y20Z5

表-3 Z軸方向の分割数が10のモデル(Z10モデル)

	X10	X20	X40
Y5	X10Y5Z10	X20Y5Z10	X40Y5Z10
Y10	X10Y10Z10	X20Y10Z10	X40Y10Z10
Y20	X10Y20Z10	X20Y20Z10	X40Y20Z10

表-4 Z軸方向の分割数が20のモデル(Z20モデル)

	X10	X20	X40
Y5	X10Y5Z20	X20Y5Z20	X40Y5Z20
Y10	X10Y10Z20	X20Y10Z20	X40Y10Z20
Y20	X10Y20Z20	X20Y20Z20	X40Y20Z20

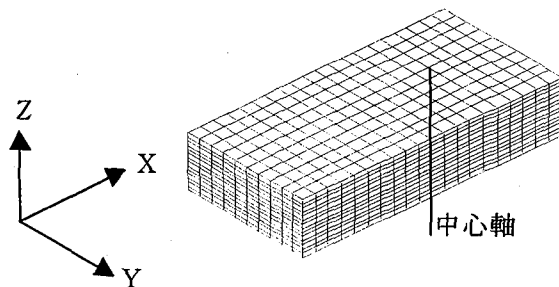


図-16 一層モデルの要素分割

3.5 照査式の適用範囲の検討

(1) 局部せん断ひずみの変化の比較

平均せん断ひずみ 2.5 では全ての場合において照査式が解析値よりも安全側の評価となっていることが確認された。次に平均せん断ひずみが2.5以下の領域における確認を行う。図-20に1次形状係数 S_1 が10のモデルに対して四種類の圧縮面圧を与えた場合の局部せん断ひずみの変化を示す。また、図-21に圧縮面圧 80 kgf/cm²を四種類の1次形状係数 S_1 を有するモデルに与えた場合を示す。これらの結果より次の事柄がわかる。平均せん断ひずみが0.0つまり、圧縮のみの場合は照査式と解析値は概ね一致している。これは「3.3(a)圧縮時の局部せん断ひずみ」で確認した通りである。せん断変形が始まると、照査式は線形に増加するのに対し、解析値は平均せん断ひずみで0.5~1.0の範囲までは照査式と概ね一致する。しかし、それ以降の範囲では照査式と解析値の差が著しく大きくなる。この理由を次のように考察する。図-22は圧縮せん断載荷時における水平方向の節点変位分布であ

る。縦軸は図中に示す一層モデル側面の鉛直方向に位置する各節点を示している。B 点は固定点であり A 点に右方向へせん断変形を 250%まで与えている。解析ケースは 1 次形状係数 S_1 が 10、鉛直面圧が 80 kgf/cm^2 である。せん断 0%は圧縮が完了した時点を示しており、側方へはらみ出した変位分布形状となることが図からわかる。照査式によると、次いでせん断载荷がなされたとしてもはらみ出し形状は端点 AB を結んだ直線よりも右側へ維持されるはずである。しかしながら、せん断 150%あたりから分布形状はほぼ直線になり、圧縮時に生じたはらみ出しは確認できなくなっている。これはせん断変形が進むにつれて圧縮の影響が薄れ、純せん断状態へ変化する現象が起きているためと考えられる。この現象により、局部せん断ひずみは平均せん断ひずみ 1.0 以降において照査式との差が著しく大きくなり始めるものと考えられる。また図-20 および図-21 より、照査式と解析値の差が大きくなり始める平均せん断ひずみは 1 次形状係数 S_1 と圧縮面圧の影響を受けることがわかる。

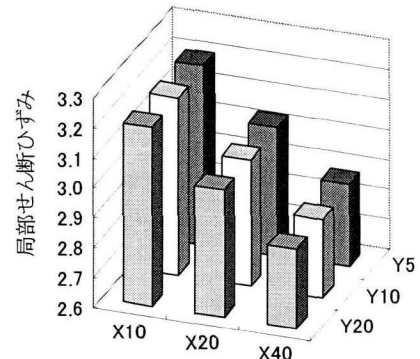


図-17 Z5 モデルの局部せん断ひずみの比較

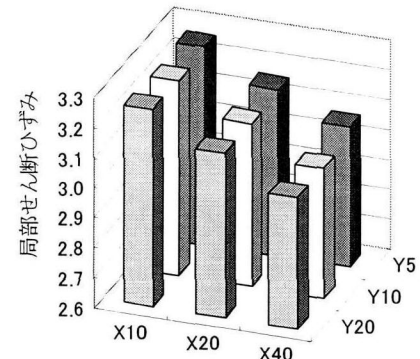


図-18 Z10 モデルの局部せん断ひずみの比較

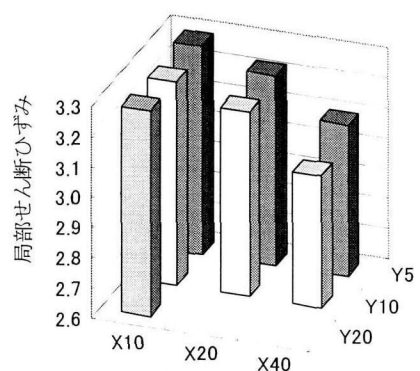


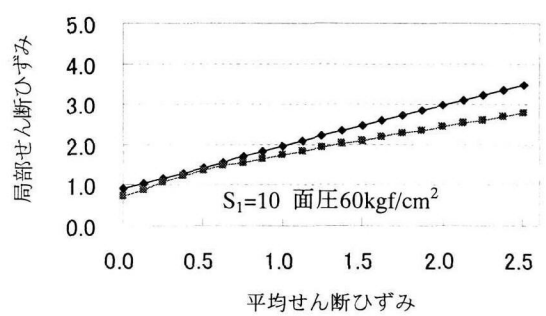
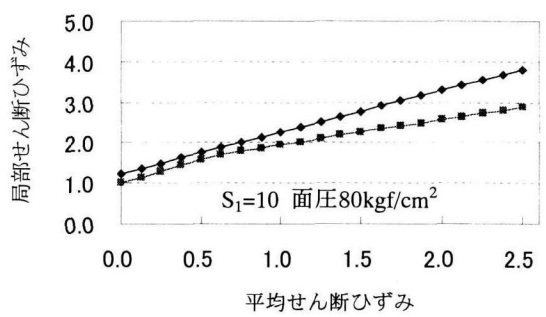
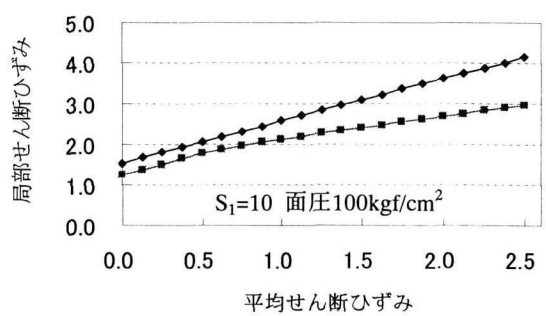
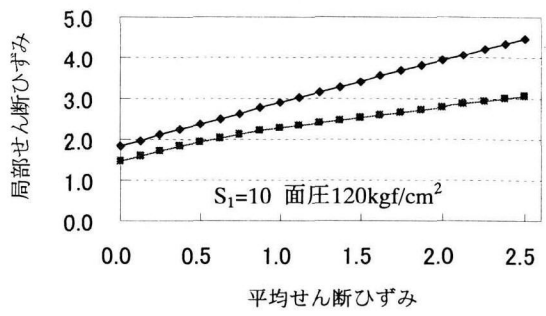
図-19 Z20 モデルの局部せん断ひずみの比較

(2) 誤差変化の評価

次に式(3)を用いて平均せん断ひずみが 0.0 における誤差により基準化した照査式と解析値の誤差の変化 X を評価した。結果を図-23、図-24 に示す。

$$X = \frac{\text{誤差}}{\text{初期誤差}} = \frac{\text{照査式値} - \text{解析値}}{\text{照査式初期値} - \text{解析初期値}} \quad (3)$$

式(3)は、誤差が初期誤差のまま変化しない場合にのみ $X = 1$ を示し続けることになる。図-23 は 1 次形状係数 S_1 が同一のモデルに対して四種類の面圧を与え照査式との誤差を式(3)により評価したものである。図より、面圧が大きいケースほど照査式との一致度が低いことがわかる。



◆ 照査式 ■ 解析値

図-20 局部せん断ひずみの変化(形状係数一定)

また、図-24 は1次形状係数 S_1 が異なる四種類のモデルに同一の面圧を与えた場合であるが、1次形状係数 S_1 が小さなモデルほど照査式との一致度が低いことがわかる。全てのケースが平均せん断ひずみ 1.0 以降の領域では線形に増加し、平均せん断ひずみ 2.5 の時点で初期誤差の約4倍の誤差が発生している。以上より、積層ゴムの圧縮せん断時に発生する局部せん断ひずみを、圧縮・せん断の各要因から発生するせん断ひずみの単純和として評価する照査式は、せん断変形の初期については解析的に得られた現象を表現できているが、せん断変形が大きくなる以降の領域においては解析結果に比べひずみを過大に評価することが確認された。

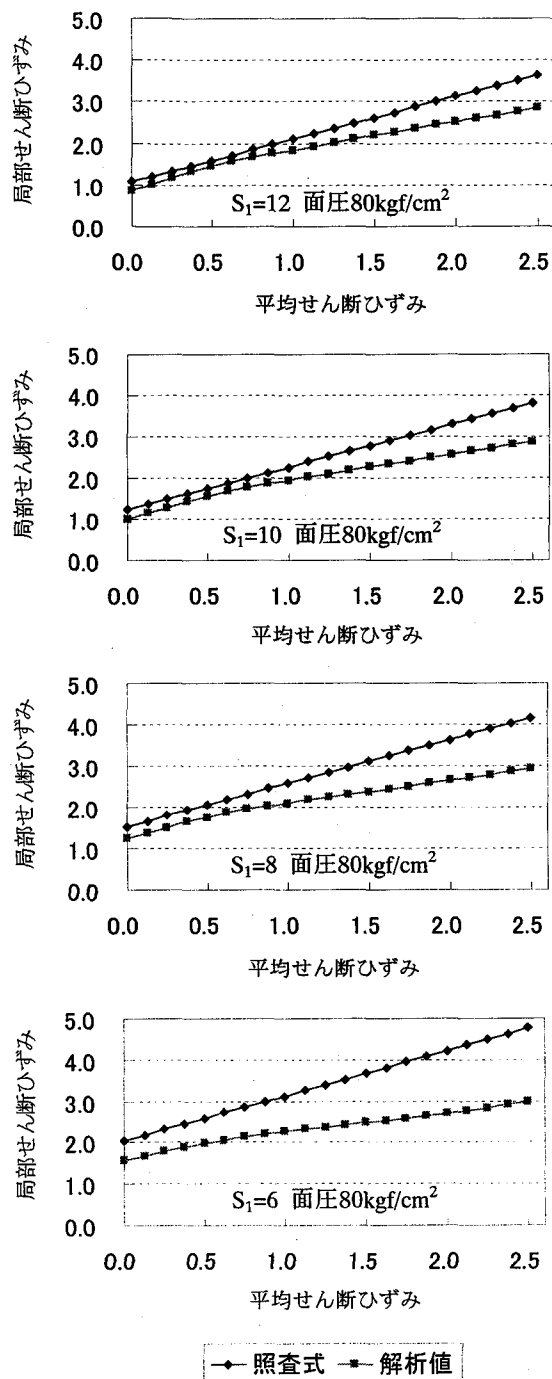


図-21 局部せん断ひずみの変化(圧縮面圧一定)

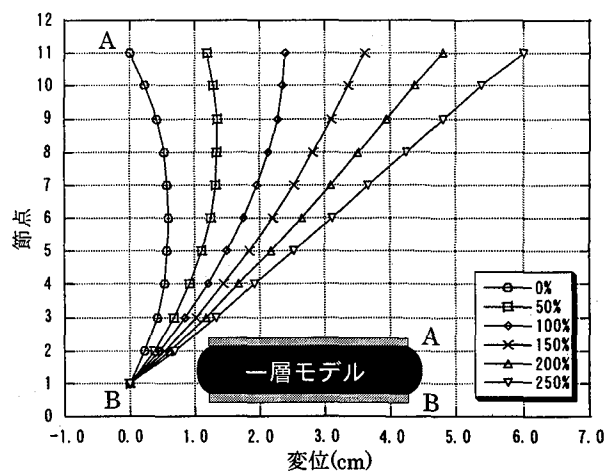


図-22 圧縮せん断時の節点変位分布

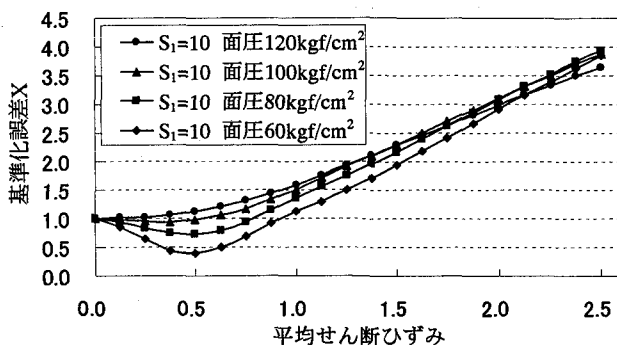


図-23 誤差の変化(形状係数一定)

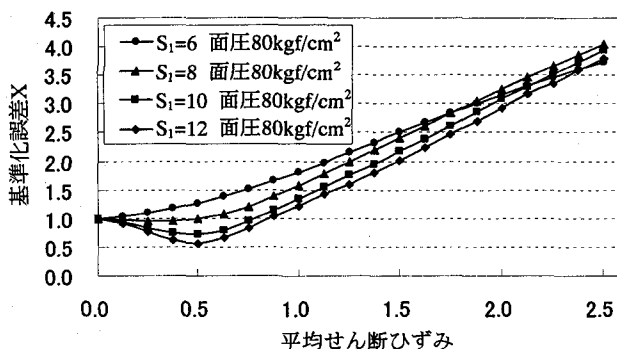


図-24 誤差の変化(圧縮面圧一定)

4. 積層モデルによる曲げモーメントの評価

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 、鉛直面圧が積層ゴム上面に生じる曲げモーメントに及ぼす影響を明らかにした。また、曲げモーメントの簡易評価式との比較を行った。

4.1 解析モデル

本解析では積層モデルを用いた。積層モデルとは実用の積層ゴム支承の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支承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、積層ゴム支承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 と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。以上の1次形状係数 S_1 四種類と2次形状係数 S_2 三種類をパラメータとして図-25に示す計12の積層モデルを作成した。本解析でも同様に1辺1m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0.35~0.5 (cm) となった。表-5に積層モデルの形状及び要素分割を示す。

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 $E=1.97 \times 10^6$ kgf/cm² (1.93×10^8 kN/m²)、ポアソン比 $\nu=0.271$ 、降伏応力 $\sigma_y=2550$ kgf/cm² (2.50×10^5 kN/m²)とした。

表-5 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			
中間鋼板	要素厚(mm)	5				5				4				3.5			
	一層分割数	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				
全体	一層分割数	2				2				2				2			
	要素厚(mm)	5				5				4				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				

S_2 S_1	8	6	4
6			
8			
10			
12			

図-25 積層モデル形状一覧

4.2 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。方法は一層モデルの上鋼板の回転を拘束した圧縮せん断解析と同じである(図-26)。与える水平変位は積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0.3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一層モデルと共通で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。

曲げモーメントは次の方法で計算した。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鉛直応力が生じる。一例として解析結果から得られた鉛直応力分布を図-27および図-28に示す。解析ケースは1次形状係数

10、2次形状係数8、鉛直面圧80 kgf/cm²であり、平均せん断ひずみ0.6を与えた場合である。圧縮を負符号、引張を正符号で表し、図の手前が積層ゴムの中心側となっている。せん断方向は右向きである。この鉛直応力に要素面積と中心間距離を掛け合わせ総和を求めた。図-29、図-30、図-31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、曲げモーメントにどのように影響を与えるかを表したものである。

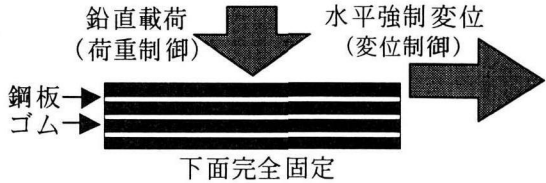


図-26 圧縮せん断解析

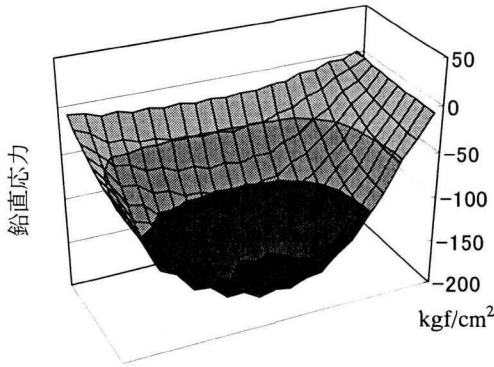


図-27 鉛直応力分布

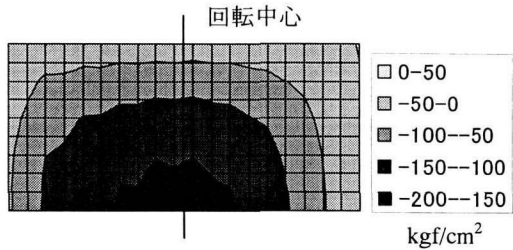


図-28 鉛直応力分布

4.3 常用域における曲げモーメント

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まで定められている。この常用域においては、曲げモーメントは線形に増加していくことがわかる。図-29に示すように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ことがわかる。図-30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-31では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ことがわかる。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。

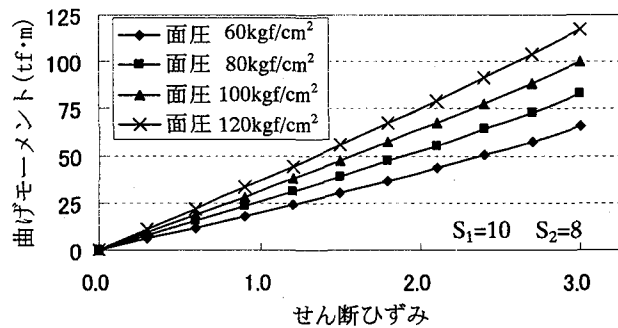


図-29 曲げモーメントの変化 (面圧比較)

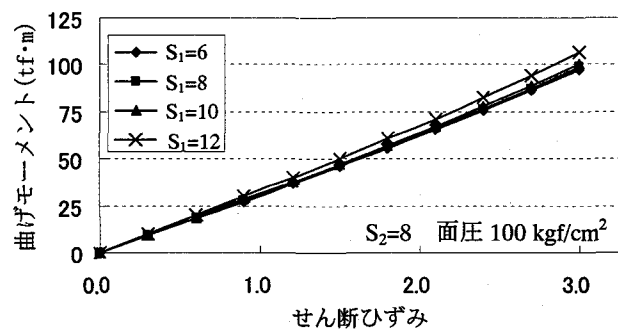


図-30 曲げモーメントの変化 (S₁比較)

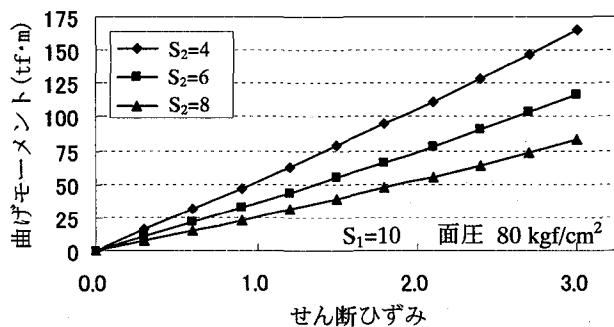


図-31 曲げモーメントの変化 (S₂比較)

4.4 曲げモーメントの簡易評価式との比較

積層ゴムに生じる曲げモーメントを計算するには、式(4)が一般に用いられている。図-32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が、これは前述の結果と一致している。解析結果とこの式による計算結果を比較することにより、式の妥当性を検討することができる。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-33から図-35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。これらの図が示すように、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。

$$M = \frac{1}{2} (P\delta + Qh) \quad (4)$$

P : 圧縮荷重

Q : せん断力

h : 積層ゴム厚

δ : 水平変位

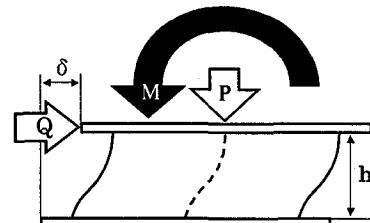


図-32 曲げモーメント概念図

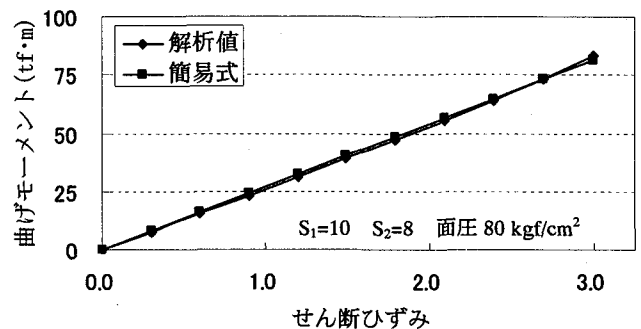


図-33 解析値と簡易式の比較 1

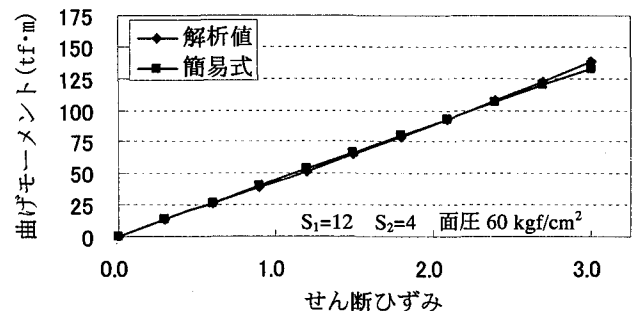


図-34 解析値と簡易式の比較 2

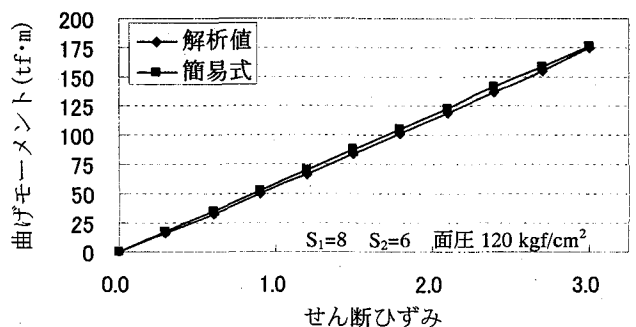


図-35 解析値と簡易式の比較 3

4.5 使用限界を超えた領域における曲げモーメント

せん断ひずみ 2.5 以降の使用限界を超えた領域における曲げモーメントの変化と簡易評価式との比較を図-36 に示す。この領域で解析結果はゴム特有のハードニング特性を示すが、これに伴い曲げモーメントの解析値はせん断ひずみが約 3.5 を超えた辺りから急激に増加し、簡易評価式では表現できなくなった。これは全ケースで確認された。この理由は(4)式中のせん断力評価においてゴムのせん断弾性係数 G をせん断ひずみに依存せず一定としたためである。

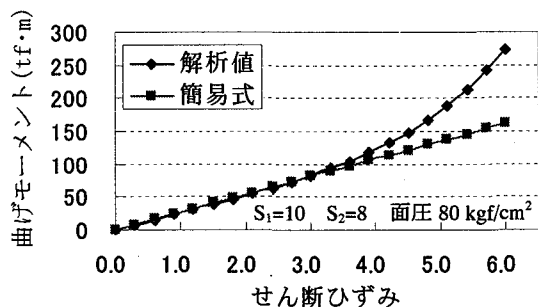


図-36 使用限界を超えた領域の曲げモーメント

5. 結論

本研究ではゴム材料のモデル化の妥当性を検討した上で、形状の異なる 4 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等を行い、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。また、12 種類の積層モデルに対し圧縮せん断解析を行い、曲げモーメントの評価および曲げモーメントの簡易評価式との比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) ゴム材料のモデル化の妥当性を二軸伸張試験の結果と比較検討した。作成した三種類の分割モデルは全て応力ひずみ関係を十分に表現可能であることを確認した。
- (2) 免震設計マニュアルが定める局部せん断ひずみの照査式と解析結果を比較検討した。せん断変形を伴わない場合は解析結果と照査式は概ね一致することを確認した。しかし、せん断変形を含む場合には照査式は解析結果を大きく上回り、過大に評価するケースが存在することを確認した。
- (3) 圧縮せん断解析において照査式と最もかけ離れた値を示したケースに対し、要素分割の影響を評価した。要素分割による解析結果の変動は±10%以内に収まり、検討を行った範囲では要素分割の影響が顕著でないことが確認された。
- (4) 免震設計マニュアルが定める局部せん断ひずみの照査式は、せん断変形の初期については現象を表現可能であることが確認された。しかし、以降の領域においては誤差が増加し、平均せん断ひずみ 2.5 の時点で初期誤差の約 4 倍の誤差が発生することが確認された。

- (5) 積層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は線形に増加する解析結果と良く一致を示すが、使用限界を超えた領域ではゴムのハードニング特性により非線形に増加する解析結果を表現できないことが確認された。

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瓦氏、須藤千秋氏より材料試験データや情報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
- 9) 松田泰治、大塚久哲、中島崇之、矢茸亘、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、土木学会、構造工学論文集、Vol.47A, pp.895~904, 2001.3
- 10) 土木研究センター、道路橋の免震設計マニュアル(案)、建設省、pp.27, 1992.12.
- 11) 日本道路協会、道路橋支承便覧、丸善、pp.151, 1991.7.

(2001 年 9 月 14 日受付)