

FEMによるゴム材料の圧縮性を考慮した積層ゴム支承の 局部せん断ひずみ評価に関する研究

Study on local shear strain of laminated rubber bearings using FEM
considering compressibility of rubber material

松田泰治*, 大塚久哲**, 北村幸司***

Taiji Mazda, Hisanori Otsuka, Kouji Kitamura

*博(工) 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)

Recently laminated rubber bearings have become one of the methods in the seismic design for important structures. On the other hand, accurate evaluation of the strength of the bearings is needed for performance based design. In this study, analysis of laminated rubber bearings considering compressibility of rubber material have been conducted using FEM. From the analytical results, stress distribution and rotational spring constants of laminated rubber bearings with several shape factors were evaluated. And the deformation characteristics of a laminated rubber bearing during large earthquakes was confirmed by the dynamic response analysis of a highway bridge.

Key Words laminated rubber bearing, finite element method, compressibility, rotational spring constant, local shear strain

キーワード: 積層ゴム支承, 有限要素法, 圧縮性, 回転ばね定数, 局部せん断ひずみ

1. はじめに

免震橋梁は橋脚頂部に免震装置を設置して、上部構造の固有周期を長周期化することや高減衰化することにより、構造物に加わる地震力を低減させるものである。その免震装置の一つに積層ゴム支承がある。積層ゴム支承は横方向へのゴム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し、水平方向は柔らかく支持する機能を有し、免震構造の性能を左右する重要な役割を担っている。

積層ゴム支承の普及に伴い、有限要素法解析によってこれまでに積層ゴム支承の力学特性評価を行うための研究が数多くなされてきた。関、深堀等の二軸伸長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)}を通して、天然ゴム系積層ゴム支承の弾性挙動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、これらの研究は建築で用いられている断面形状が円形の積層ゴム支承を対象に行われてきているため、橋梁用の矩形積層ゴム支承を対象とした研究例は少ない。

天然ゴム系積層ゴム支承を用いた既往の破断試験によれば、天然ゴム系積層ゴム支承の破断ひずみは350~400%であ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14年3月改訂)において積層ゴム支承の使用限界はせん断ひずみ250%と定められており、ばらつき等を考慮して安全側で評価されている。また既往研究^{9),10)}より、橋脚が塑性化した際の積層ゴム支承には、活荷重によって想定される回転角 $1/300\text{rad}$ の約8~10倍の回転角が生じることが報告されている。今後は性能設計への移行に伴い、積層ゴム支承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。

著者等は、橋梁に用いられる矩形積層ゴム支承を対象に、一層モデルを用いてゴム材料を非圧縮と仮定したFEM解析により圧縮面圧と引張面圧に対してゴム内部に生じる鉛直応力分布の評価や回転ばね評価、橋脚基部が塑性化した際の積層ゴム支承の局部せん断ひずみと引張応力の評価を行ってきた^{10),11)}。一般にゴム材料の圧縮性の影響を大きく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)場合である。橋梁用積層ゴム支承の1次形状係数は一般に12以下のものが多く、建築用に用いられているものに比べて厚肉であるため、圧縮時にはゴムが側方へ自由に移動可能で大きくは

らみだす．この効果により剛性が低下するため，鉛直方向の特性に対して圧縮性の影響は少ないと考えられる．しかし，実際のゴム材料にはわずかな圧縮性がある．そして積層ゴム支承の鉛直方向の特性は，圧縮荷重に対しては高い剛性を発揮するが，引張荷重に対しては剛性が相対的に低く，引張面圧が約1.96MN/m²(20kgf/cm²)に達するとゴム内部に空隙が生じ，見かけの剛性が著しく低下することが確認されている¹²⁾．

そこで本研究では，汎用FEMコード(ABAQUS)に，ゴム材料の圧縮性を考慮できる圧力と体積ひずみ関係をサブルーチンとして組み込んだFEM解析を行った．これを用いて天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルを対象に圧縮解析と引張解析を行い，ゴム材料の圧縮性を考慮したことによる鉛直応力分布や鉛直荷重と鉛直ひずみ関係に与える圧縮性の影響を評価した．同様に圧縮曲げ解析を行い，回転ばねを評価した．最後に，タイプBの支承¹³⁾を有する地震時水平力分散構造の橋梁において，積層ゴム支承部にFEMより算出した回転ばねを与え，橋脚基部の塑性化を考慮した非線形動的解析を行い，積層ゴム支承に生じる最大応答変位及び最大応答回転角を評価した．それらの結果を用いて積層ゴム支承の最大変形状態を，ゴム材料の圧縮性を考慮したFEMより再現し，局部せん断ひずみとゴム内部に発生する最大引張応力を評価した．

2 ゴム材料のモデル化

2.1 非圧縮と仮定したモデル化

ゴム部には，弾性ポテンシャル関数 W を用いて，超弾性体としてモデル化を行った．弾性ポテンシャル関数 $W = W(I_1, I_2, I_3)$ は偏差成分と体積変化を表す平均成分に分離でき，以下のとおりとなる¹⁴⁾．

$$W = W(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + W(J) \quad (1)$$

ここで， $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ は体積変化を取り除いた不変量を表し以下のとおりとなる¹⁴⁾．

$$\bar{I}_1 = I_1 / I_3^{1/3}, \bar{I}_2 = I_2 / I_3^{2/3} \quad (2)$$

式(1)の右辺第1項は伸びやせん断などの偏差成分の変形特性を，右辺第2項は体積変化の変形特性を表す．非圧縮と仮定したモデル化では，式(1)の右辺第2項をゼロとし，右辺第1項には，関等¹⁾が提案した式(3)を用い，ABAQUSにサブルーチンとして組み込んだ．式(3)は $W(\bar{I}_1, \bar{I}_2)$ を $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ で偏微分した式であり，ゴムの材料定数 $a_i, \dots, e_i$ は公称せん断弾性係数 $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ (5.64kgf/cm²)及び $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ (8.0kgf/cm²)のゴムの二軸伸長試験から定めた．その手法は筆者等による既往研究¹⁰⁾と同様である．また4章において $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ (10.0kgf/cm²)の積層ゴム支承を対象としているが，その二軸伸長試験結果を入手できなかったため，公称せん断弾性係数と比例関係が成立すると仮定し， $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ で行った

二軸伸長試験結果の応力ひずみ関係を1.25(=9.80/7.84)倍してゴム材料のモデル化を行った．表-1にゴムの材料定数を示す．

$$\frac{\partial W(\bar{I}_i)}{\partial \bar{I}_i} = a_i + b_i(\bar{I}_i - 3.0) + c_i(\bar{I}_i - 3.0)^2 + d_i \exp\{e_i(\bar{I}_i - 3.0)\} \quad (3)$$

表-1 ゴムの材料定数(Gの単位はkN/m²)

$G5.53 \times 10^2$	単位	i=1	i=2
a_i	kN/m ²	204.82	13.524
b_i	kN/m ²	13.23	-1.6072
c_i	kN/m ²	0.2352	0.06311
d_i	kN/m ²	171.5	-68.6
e_i		-2.12	-6.44
$G7.84 \times 10^2$	単位	i=1	i=2
a_i	kN/m ²	347.3	26.63
b_i	kN/m ²	16.3954	-4.13423
c_i	kN/m ²	1.4747	0.2258
d_i	kN/m ²	1191.5	-1110.4
e_i		-13.375	-16.435
$G9.80 \times 10^2$	単位	i=1	i=2
a_i	kN/m ²	433.9	33.44
b_i	kN/m ²	20.5565	-5.22056
c_i	kN/m ²	1.8397	0.2856
d_i	kN/m ²	1477.2	-1373.7
e_i		-13.283	-16.313

2.2 圧縮性を考慮したモデル化

積層ゴム支承の鉛直剛性は，圧縮領域と引張領域で大きく異なるため，体積変化の成分 $W(J)$ は圧縮領域と引張領域に分けて定義した．圧縮領域の圧縮性関数は，既往研究⁵⁾を参考にした．その圧縮性関数を式(4)に示す．

$$p = \frac{\partial W(J)}{\partial J} = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{2i}{D_i} (e_v)^{2i-1} \quad (4)$$

ここで p は圧力， e_v は体積ひずみ， D_i は定数である．既往研究では $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の積層ゴム支承を対象としているが，本研究では $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ と $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ を対象としているためそれらの試験データが必要であるが，入手できなかった．そこで先の二軸伸長試験結果と同様に公称せん断弾性係数と比例関係が成立すると仮定し， $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ で行った体積圧縮試験結果の応力ひずみ関係を1.42(=7.84/5.53)，1.77(=9.80/5.53)倍して式(4)の材料定数 D_i を決定した．

引張領域の圧縮性関数は，まず既往研究⁸⁾で行われた鉛入り薄肉積層ゴム支承(1次形状係数 $S_1=40$ ，2次形状係数 $S_2=9$ ， $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$)の単純引張試験結果から得られた引張面圧と鉛直ひずみ関係に基づき定めた．

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

面の比で、積層ゴム支承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。2次形状係数とはゴムシートの1辺と全ゴム層厚の比で、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。

単純引張試験結果よりゴム材料を非圧縮と仮定してFEM解析した際のひずみ量を差し引いて引張面圧と体積ひずみ関係を算出した。図-1に $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の単純引張試験結果とFEM解析結果を示す。本研究では $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ と $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の積層ゴム支承を対象としておりそれらの試験データが必要であったが入手できなかった。そのため $G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の単純引張試験結果から得られた引張面圧と鉛直ひずみ関係を用いた。そしてその関係を式(5)を用いて最小二乗法により関数近似を行い各定数を定めた。近似結果を図-2に示す。式(4)及び式(5)中の材料定数を表-2に、本研究で定義した圧縮性関数を図-3, 4に示す。

$$p = \frac{\partial W(J)}{\partial J} = E_1(1.0 - \exp(E_2 e_v)) + E_3 e_v \quad (5)$$

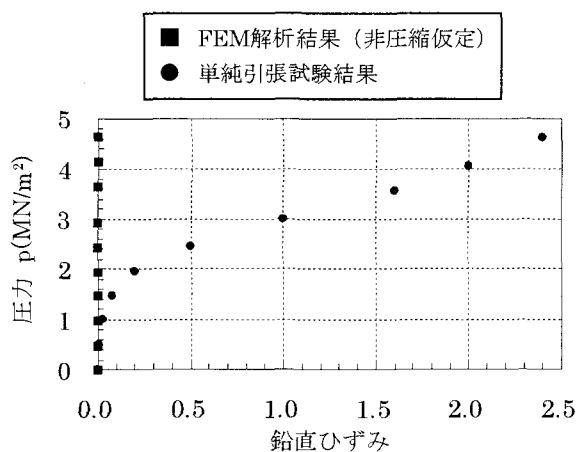


図-1 引張試験結果とFEM解析結果

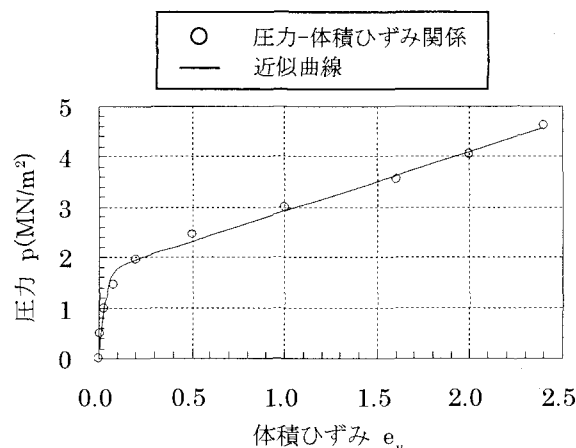


図-2 近似結果 (引張領域)

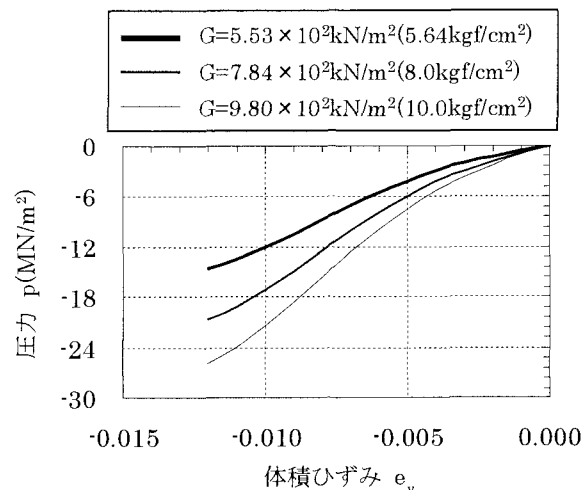


図-3 圧縮性関数 (圧縮領域)

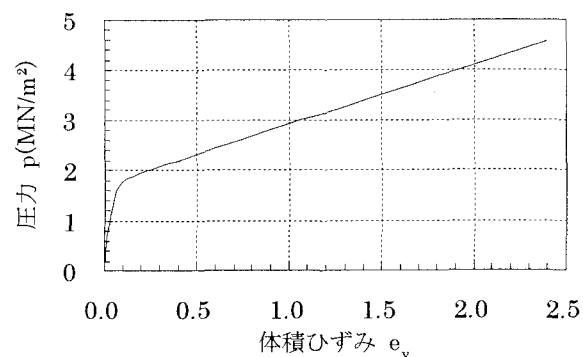


図-4 圧縮性関数 (引張領域)

表-2 ゴム材料の圧縮性関数の材料定数

(Gの単位は kN/m^2)

	単位	$G=5.53 \times 10^2$	$G=7.84 \times 10^2$	$G=9.80 \times 10^2$
D_1	m^2/kN	3.435×10^{-6}	2.421×10^{-6}	1.937×10^{-6}
D_2	m^2/kN	3.364×10^{-10}	2.372×10^{-10}	1.897×10^{-10}
D_3	m^2/kN	-8.887×10^{-14}	-6.266×10^{-14}	-5.010×10^{-14}
D_4	m^2/kN	7.444×10^{-17}	5.249×10^{-17}	4.194×10^{-17}
E_1	kN/m^2	1.717×10^3		
E_2		-3.306×10^1		
E_3	kN/m^2	1.195×10^3		

なお、本研究では S_1 が6から12の積層ゴム支承を対象としているため、それらの引張試験結果が必要であったが入手できなかった。入手可能であったのは S_1 が5と40の積層ゴム支承の引張試験結果であった。薄肉積層ゴム支承($S_1=40$)では引張状態において空隙が多く発生し、引張時のゴムの材料特性をより精度良く評価できると判断し、薄肉積層ゴム支承の引張試験結果を評価に用いた。

次に本研究で提案した引張領域の圧縮性関数の適用性を確認するために既往研究^{8),12)}で行われた単純引張試験結果とFEM解析の比較を行った。比較した積層ゴム支承は、引張面圧に対する圧縮性関数の定義に用いた鉛入り

薄肉積層ゴム支承⁸⁾($S_1=40, S_2=9, G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$)と天然ゴム系厚肉積層ゴム支承¹²⁾($S_1=5, S_2=5, G=5.53 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$)とした。図-5, 6に試験結果とFEM解析結果の比較を示す。鉛入り薄肉積層ゴム支承においては全体的に良好な一致を示した。天然ゴム系厚肉積層ゴム支承については、試験結果は鉛直ひずみが2.0を超えるとハードニングを起し、FEM解析結果との差が顕著になるが、鉛直ひずみ2.0以下では良好な一致を示していると判断できる。よって本研究では式(4), (5)を圧縮性関数としてサブルーチンに組み込んだ。

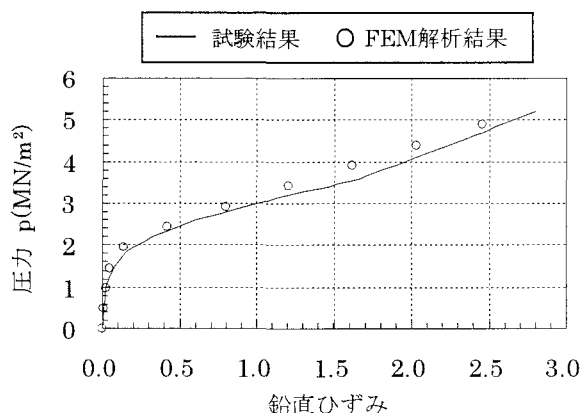


図-5 試験結果とFEM解析結果の比較
(鉛入り薄肉積層ゴム支承)

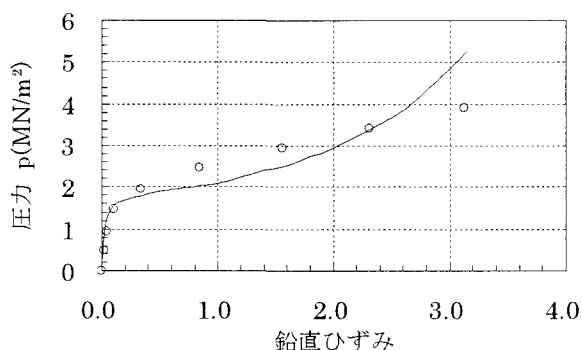


図-6 試験結果とFEM解析結果の比較
(天然ゴム系厚肉積層ゴム支承)

3. 一層モデルの解析概要

天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルを対象に圧縮解析と引張解析を行い、鉛直応力分布及び鉛直荷重と鉛直ひずみ関係を算出し、ゴム材料の圧縮性を考慮したことによる影響を評価した。次に一層モデルの圧縮曲げ解析を行い、ゴム材料の圧縮性を考慮した回転ばね評価を行った。

3.1 解析モデル

本解析では図-7に示すような1辺1mの正方形断面を有する一層モデルを図-8のように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 S_1 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モデルである。本解析に用いる 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 S_1 は小数点以下を四捨五入して表示する。

本研究と同手法を用いてゴム材料の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はほとんど誤差は生じないことが確認されている。また、既往研究⁹⁾において、円形断面を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はほとんど差は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、一層モデルの要素分割は水平断面を20×10分割、ゴム部の鉛直方向は9分割とした。鋼板の鉛直方向は2分割とした。要素は8節点ソリッド要素を用い、上記の要素分割により、水平断面では50×50(mm)、厚みは2.3~4.4(mm)となった。鋼板は剛と仮定した。表-3に一層モデルの形状および要素分割の詳細を示す。ゴムの公称せん断弾性係数は $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ とした。

表-3 一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
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

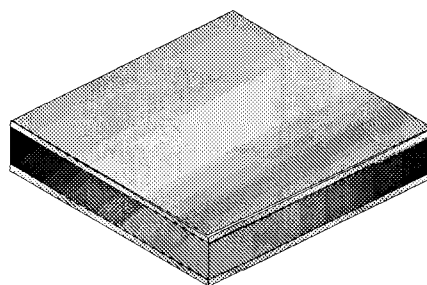


図-7 積層ゴム支承の一層モデル

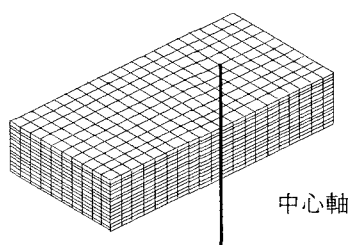


図-8 解析モデル(1/2対称)

3.2 解析手法

天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルに対して圧縮解析と引張解析、圧縮曲げ解析を次の方法により行った。圧縮解析と引張解析は、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鉛直荷重を静的に与えた。圧縮曲げ解析では、モデル下面を完全に固定し、圧縮解析(STEP1)は上記と同じで、圧縮後の曲げ解析(STEP2)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まわりのモーメントを与えた。解析手法を図-9に示す。圧縮面圧は実用面圧を考慮して5.88, 7.84, 9.80, 11.8MN/m²(60, 80, 100, 120kgf/cm²)の4種類とした。引張面圧は、既往研究¹²⁾から明らかとなっている見かけの剛性が著しく低下する際の面圧を1.96

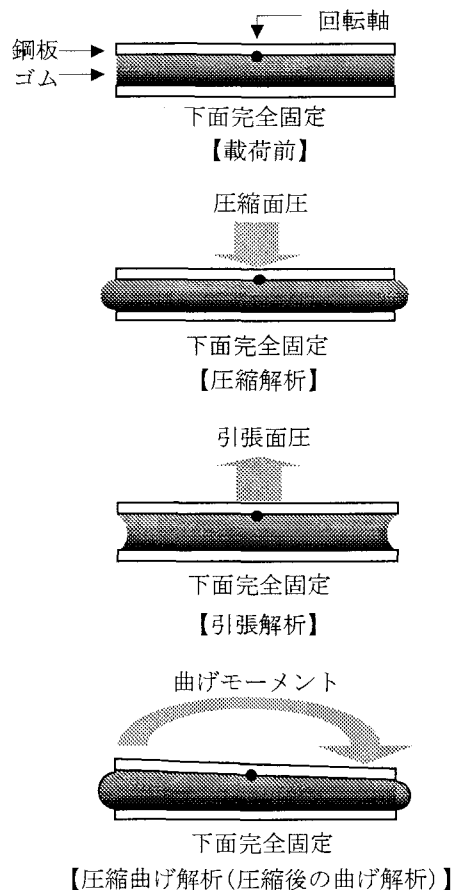


図-9 解析手法

MN/m²と仮定した。圧縮曲げ解析における载荷モーメントは、一層モデルの回転角が積層ゴム支承の設計における活荷重によって想定される回転量1/300radに達するまで与えた。

3.3 鉛直応力分布評価

(1) 圧縮解析結果

4種類の S_1 の一層モデルに許容圧縮応力である圧縮面圧7.84MN/m²を与えた時のゴム内部に生じる鉛直応力分布を図-10から図-13に示す。鉛直応力の評価位置は、図-14に示す軸対称面の最上層に位置する要素である。ゴム材料を非圧縮と仮定した場合は、中心部で载荷面圧の2.0～2.1倍の鉛直応力が発生する放物線分布となることを確認した。圧縮性を考慮した場合も、中心部で载荷面圧の1.9～2.0倍の鉛直応力が発生する放物線分布となった。また、 S_1 が大きくなるほど圧縮性の影響を強く受けることを確認した。

次に $S_1=10$ 、圧縮面圧11.8MN/m²のケースにおける圧縮面圧と鉛直ひずみ関係を図-15に示す。本ケースでは圧縮性を考慮したことにより鉛直剛性が約4割低下し、 $S_1=6$ のケースでは約2割、 $S_1=12$ のケースでは約5割低下した。

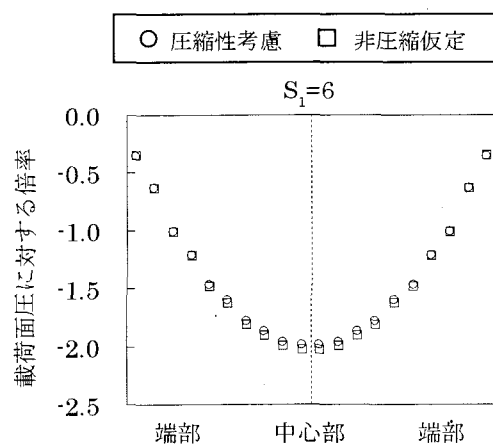


図-10 鉛直応力分布($S_1=6$)

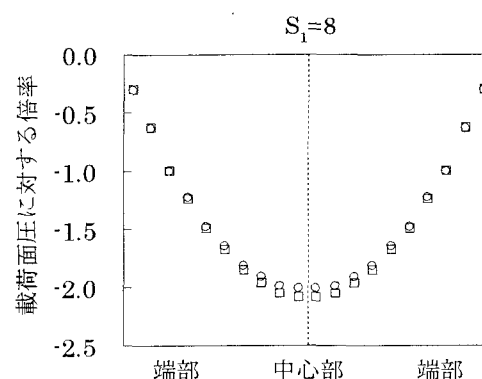


図-11 鉛直応力分布($S_1=8$)

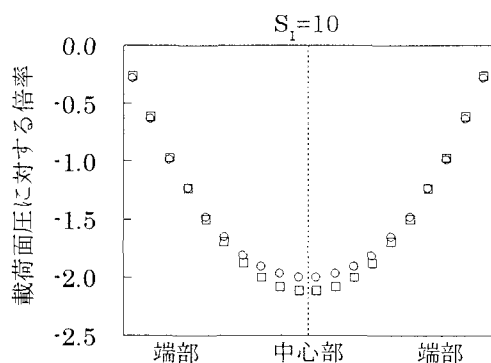


図-12 鉛直応力分布($S_1=10$)

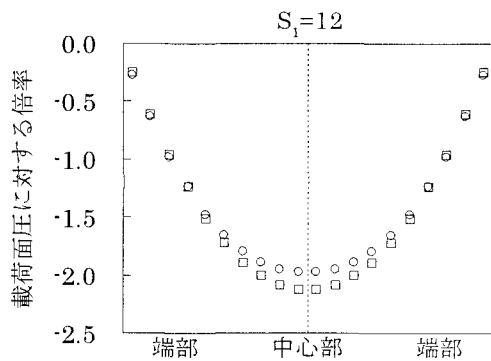


図-13 鉛直応力分布($S_1=12$)

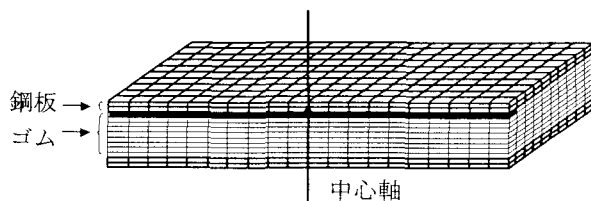


図-14 鉛直応力の評価位置

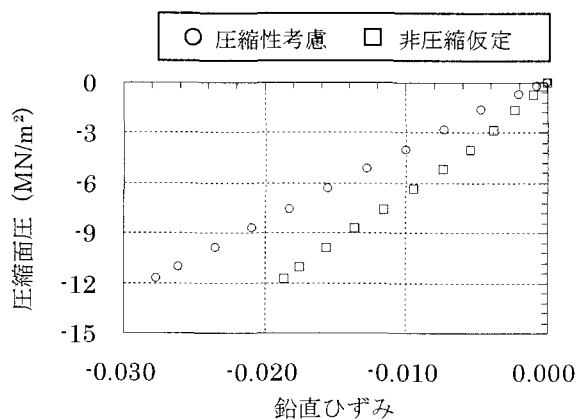


図-15 圧縮面圧と鉛直ひずみ関係($S_1=10$)

(2) 引張解析結果

(1)と同様に一層モデル($S_1=10$)に引張面圧 1.96MN/m^2 を与えた時のゴム内部に生じる鉛直応力分布を図-16に示す。ゴム材料を非圧縮と仮定した場合は、中心部で荷重面圧の約2.0倍の鉛直応力が発生する放物線分布となった

が、圧縮性を考慮した場合は、台形状の鉛直応力分布となり中心部では荷重面圧の約1.1倍の鉛直応力が発生した。他の S_1 のケースにおいても同様となった。これはゴムが体積変化を起こして見かけの剛性が低下し、応力が頭打ちとなるためである。

次に $S_1=10$ のモデルにおける引張面圧と鉛直ひずみの関係を図-17に示す。全ケースともゴム材料を非圧縮と仮定した場合はほとんど鉛直ひずみは生じないが、圧縮性を考慮したことにより引張面圧が 1.96MN/m^2 のとき $S_1=6$ のケースで0.18、 $S_1=12$ のケースで0.13生じた。

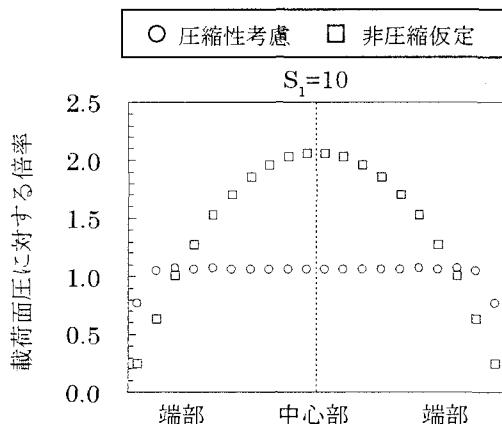


図-16 鉛直応力分布($S_1=10$)

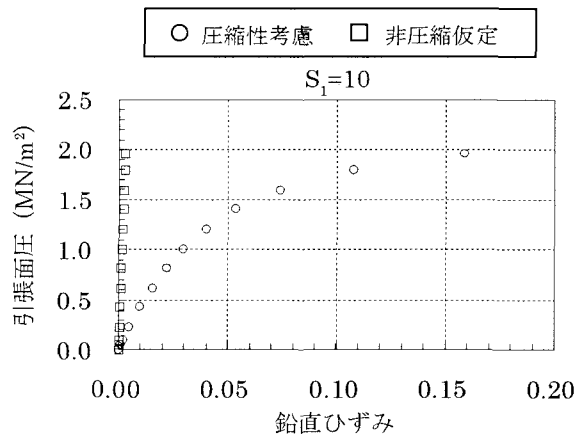


図-17 引張面圧と鉛直ひずみ関係($S_1=10$)

3.4 回転ばね評価

(1) 曲げモーメントと回転角の関係

4種類の S_1 の一層モデルに圧縮面圧 7.84MN/m^2 を与えた時の曲げモーメントと回転角の関係を図-18から図-21に示す。 S_1 が小さいケースではゴム材料の圧縮性を考慮したことによる影響はほとんど見られないが、 S_1 が大きくなるとその影響は顕著に見られた。次にそれらを直線で近似し、本解析では1/2モデルを使用したためその傾きを2倍することによりそれぞれの回転ばね定数を算出した。表-4にそれぞれ算出した回転ばね定数を示す。

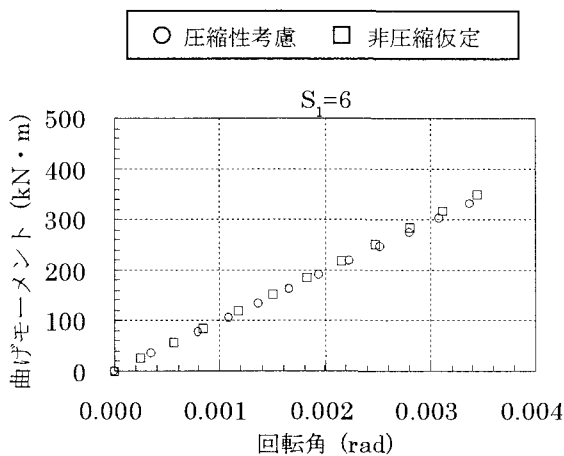


図-18 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=6$)

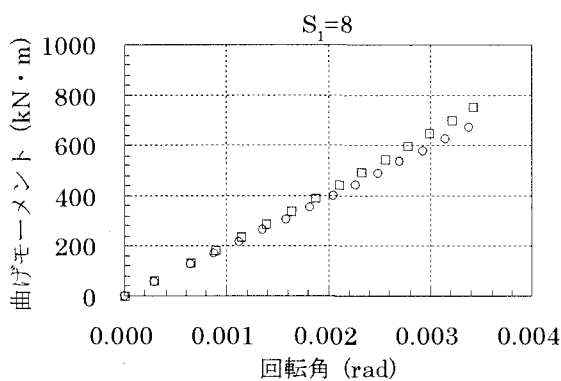


図-19 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=8$)

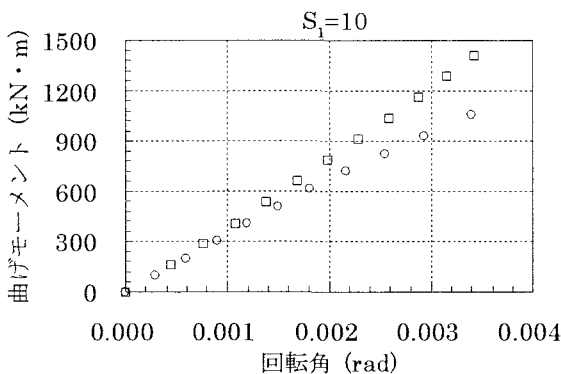


図-20 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=10$)

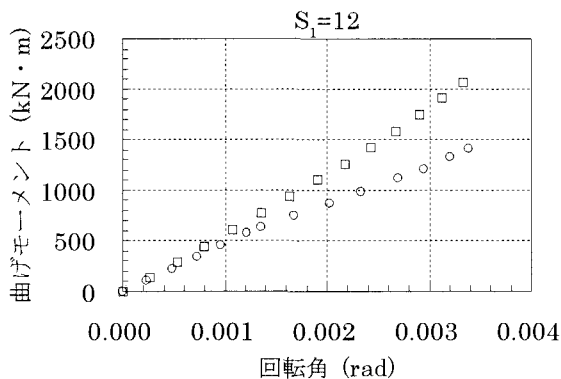


図-21 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=12$)

表-4 回転ばね定数

1次形状係数	回転ばね定数 (kN・m/rad)	
	非圧縮仮定	圧縮性考慮
6.25	2.0342×10^5	1.9651×10^5
8.33	4.2883×10^5	3.9282×10^5
10.4	8.0707×10^5	6.4435×10^5
11.9	1.1957×10^6	8.4574×10^5

(2) 回転ばね定数の基準化

様々な形状に対応できるように回転ばね定数の基準化を行った。その方法については既往研究¹⁰⁾と同じである。まず4種類の 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-22)を2次曲線で近似することにより、1辺が1mの正方形断面を前提とした回転ばね定数 K_R' の算出式(式(6))を導いた。式(6)中の定数を表-5に示す。ただし S_1 の範囲は6から12である。

次に α (1mの1辺長に対する倍率)を用いて断面形状に対して基準化された式(7)を以下に示す。(基準化の方法は省略する。)式(7)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に対応できるゴム材料の圧縮性を考慮した積層ゴム支承の回転ばね評価が可能となった。

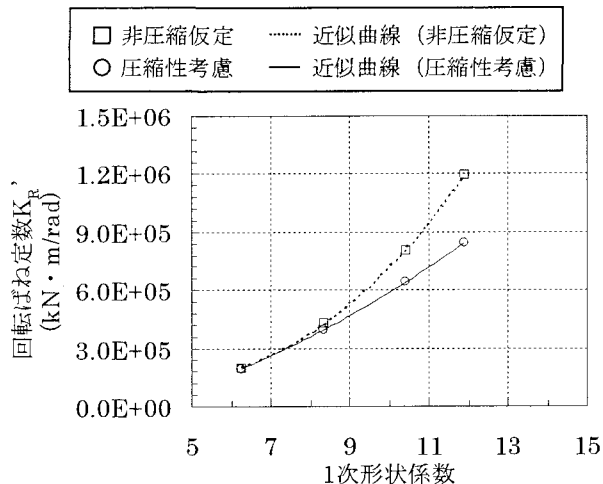


図-22 2次曲線による近似

$$K_R' [kN \cdot m / rad] = pS_1^2 + qS_1 + r \quad (6)$$

$$K_R = \alpha^3 K_R' \quad (7)$$

表-5 回転ばね定数算出式の各定数
(単位 ; kN・m/rad)

	非圧縮仮定	圧縮性考慮
p	1.9458×10^4	5.4618×10^3
q	-1.7846×10^5	1.5980×10^4
r	5.6014×10^5	-1.1742×10^5

4. 積層ゴム支承を対象とした局部せん断ひずみの評価

タイプB支承を有する地震時水平力分散構造の橋において、積層ゴム支承にFEMより算出した回転ばね定数を与え、橋脚基部の塑性ヒンジを考慮した非線形動的解析を行い、積層ゴム支承の最大応答水平変位及び最大応答回転角を算出した。その最大応答値をもとに、積層ゴム支承の最大変形状態をFEMを用いて再現し、局部せん断ひずみ及びゴム内部に発生する引張応力の評価を行った。

4.1 非線形動的解析の概要

(1) 解析条件

本解析では、日本道路協会による「道路橋の耐震設計に関する資料」に示されている5径間連続橋¹⁾げた橋を対象とし、橋脚高さは15mに設定した。図-23に本橋の側面図を、表-6に橋梁諸元を示す。

対象橋梁の全体を平面フレームでモデル化し、5基の積層ゴム支承は1つのばね要素で集約し、その鉛直方向は剛ばね、水平方向・回転方向は線形ばねとした。上部構造は全て線形はり要素、橋脚は非線形はり要素、塑性ヒンジ部は非線形回転ばねでモデル化した。数値解析法はNewmark- β 法($\beta=0.25$)を用い、積分時間間隔は0.002秒とした。入力波は道路橋示方書に規定されている標準加速度応答スペクトルの適合波を用い、タイプⅠ及びタイプⅡそれぞれについて各波形3波使用し、橋軸方向に入力し解析を行った。1次固有周期は1.45秒となった。表-7に積層ゴム支承の形状及び全体の各ばね定数を記す。本解析に用いた積層ゴム支承のせん断弾性係数は $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ であったため、公称せん断弾性係数と比例関係が成立すると仮定し、式(7)より求めた $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の一層モデルの回転ばね定数を $1.25(=9.80/7.84)$ 倍したものを $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の一層モデルの回転ばね定数とした。それらの回転ばね定数をそれぞれの層数で除すことにより積層ゴム支承の回転ばね定数を算出した。

(2) 解析結果

解析結果はP1橋脚の支承を対象とし3波平均して算出した。積層ゴム支承の軸力変動は、3%程度未満であったため軸力変動は考慮する必要がないことを確認した。表-8に積層ゴム支承の最大応答回転角と最大応答水平変位を示す。

表-6 橋梁諸元

上部構造形式	5径間連続鋼Iげた橋
支間割り	5×40m=200m
全幅員	12.000m
橋脚形式	T形橋脚
基礎	場所打ち杭
地盤種別	Ⅱ種地盤

表-7 積層ゴム支承の形状及び全体の各ばね定数

	単位	橋台 (A1, A2)	橋脚 (P1~P4)
形状		正方形断面	正方形断面
1辺長	m	0.530	0.680
1層の厚さ	mm	20	24
1次形状係数		6.63	7.08
2次形状係数		2.94	7.08
層数	枚	9	4
せん断弾性係数	kN/m^2	980	980
支承の個数	個	5	5
水平ばね定数	kN/m	7.647×10^3	2.360×10^4
回転ばね定数 (非圧縮仮定)	$\text{kN} \cdot \text{m/rad}$	2.401×10^4	1.336×10^5
回転ばね定数 (圧縮性考慮)	$\text{kN} \cdot \text{m/rad}$	2.364×10^4	1.324×10^5

表-8 積層ゴム支承の最大応答値

		非圧縮仮定	圧縮性考慮
タイプⅠ	回転角(rad)	0.02345	0.02346
	水平変位(m)	0.1959	0.1958
タイプⅡ	回転角(rad)	0.03001	0.03001
	水平変位(m)	0.2096	0.2095

4.2 FEMによる局部せん断ひずみ評価

(1) 解析モデル

本解析では表-7に示したP1橋脚の積層ゴム支承をモデル化し、積層モデルの上下に剛な鋼板を設けた。一層モデルと同様に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1辺の長さは0.68m、一層厚は24mm、4層構造であり、 S_1 、 S_0 とも7.08である。

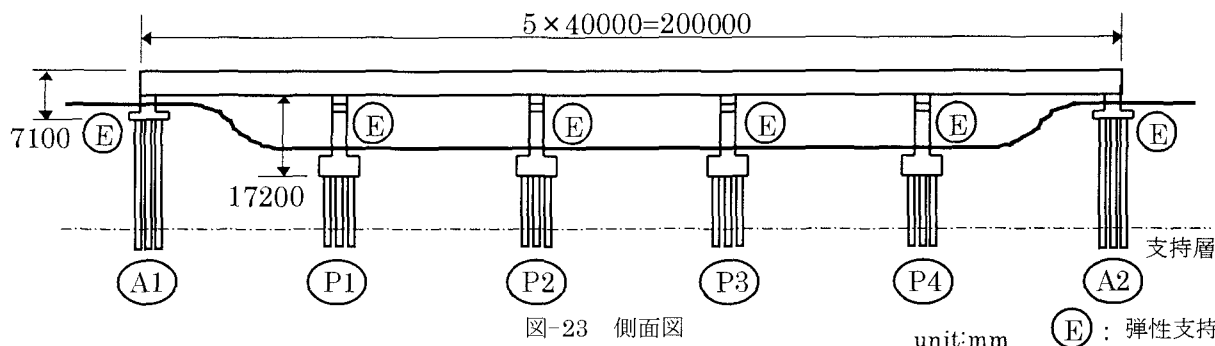


図-23 側面図

unit:mm

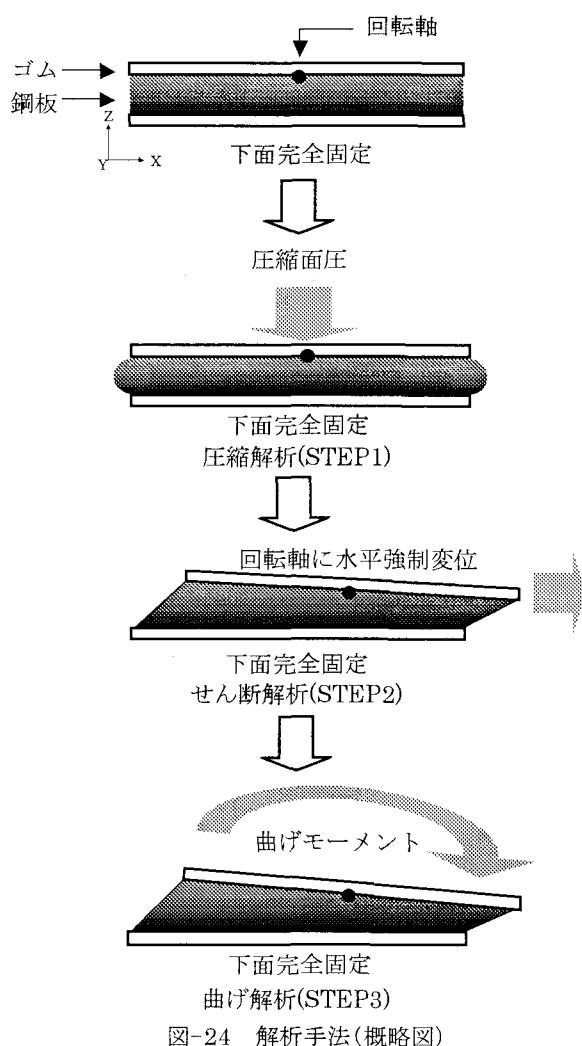
Ⓔ：弹性支持

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。一層モデルと同じくゴムシートを 20×10 で分割し、鉛直方向には8分割した。上記の分割により1要素は $34 \times 34(\text{mm})$ 、厚みは $3(\text{mm})$ となった。上下・中間鋼板の鉛直方向の分割数は2とした。

中間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 $E=1.93 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.271$ 、降伏応力 $\sigma_y=2.50 \times 10^2 \text{N/mm}^2$ とした。上下鋼板は剛と仮定した。

(2) 解析条件

積層モデルに対して圧縮せん断曲げ解析を次の方法により行った。モデル下面を完全固定し、圧縮解析(STEP1)は一層モデルでの手法と同様に、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圧縮面圧を静的に与えた。圧縮後のせん断解析(STEP2)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、回転軸に目標水平変位を与えた。せん断後の曲げ解析(STEP3)では回転軸を鉛直方向に固定し、目標となる回転角に達するまで回転軸回りのモーメントを载荷した。圧縮面圧は許容圧縮応力である 7.84MN/m^2 とし、水平変位及び回転角は表-8に示した最大応答値を与えた。図-24に解析手法を示す。



(3) 解析結果

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。表-9に解析結果を示し、図-25, 26に積層モデルの変形図を示す。図中の矢印は自由表面の右及び左部分における最大局部せん断ひずみの発生位置である。

ゴム材料の圧縮性を考慮したことにより、せん断と曲げ変形によって生じる引張応力は頭打ち状態となり、最大引張応力は非圧縮と仮定した場合よりも大幅に減少した。

最大局部せん断ひずみが発生している部分は、曲げ変形による影響を強く受ける右下部分であり、平均せん断ひずみの約2倍発生することを確認した。そして圧縮性を考慮したことにより最大局部せん断ひずみは非圧縮と仮定した結果よりも約1割増加した。また、積層ゴム支承の平均破断ひずみが350%~400%であることから、右下部分では破断している可能性も考えられる。

表-9 解析結果

	タイプⅠ		タイプⅡ	
	非圧縮仮定	圧縮性考慮	非圧縮仮定	圧縮性考慮
左部最大局部せん断ひずみ	2.800	2.910	3.267	3.074
右部最大局部せん断ひずみ	4.447	4.623	4.823	5.220
最大引張応力(kN/m^2)	2.28×10^3	1.12×10^3	7.18×10^3	1.15×10^3

5. 結論

ゴム材料の圧縮性を考慮したFEMを用いて積層ゴム支承の一層モデルを対象に圧縮解析と曲げ解析、圧縮曲げ解析を行い、ゴム内部に生じる鉛直応力分布や鉛直荷重と鉛直ひずみ関係、回転ばね定数を評価した。その回転ばね定数を用い、地震時水平力分散構造の5径間連続げた橋を対象に非線形動的解析を行い、最大応答回転角と最大応答水平変位を評価した。その最大応答値より積層ゴム支承の最大変形状態をFEMを用いて再現し、その局部せん断ひずみ及びゴム内部に発生する引張応力を評価した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) ゴム材料を非圧縮と仮定した場合も圧縮性を考慮した場合も、圧縮面圧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倍となり、圧縮性を考慮した場合の方が載荷面圧に対する倍率は1割程度小さくなった。また、圧縮性を考慮したことによる鉛直剛性の低下は、最大で $S_1=12$ のケースでは約5割となることを確認した。

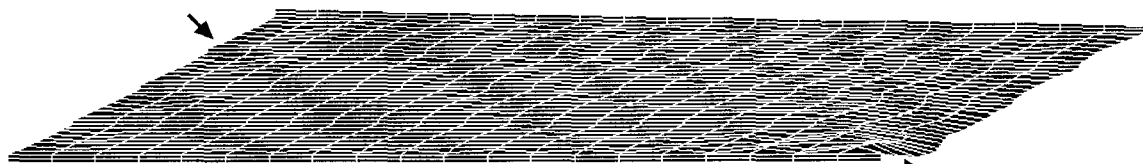


図-25 積層モデルの変形図 (タイプ I, 非圧縮仮定)

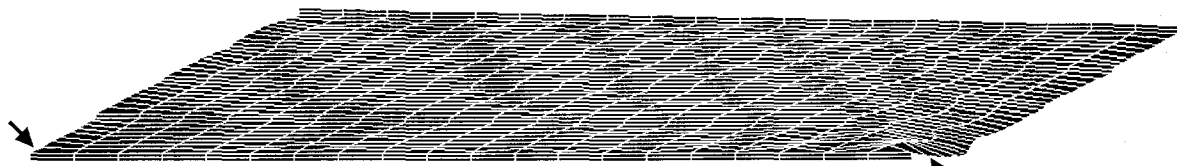


図-26 積層モデルの変形図 (タイプ I, 圧縮性考慮)

(2) ゴム材料を非圧縮と仮定した場合は、引張面圧に対してゴム内部に発生する鉛直応力分布は、中心部で載荷面圧の約2倍生じる放物線形状となるが、圧縮性を考慮すると、全体的に載荷面圧の約1.1倍の鉛直応力が生じる台形分布となった。また非圧縮と仮定した場合は、ひずみはほとんど生じないが、圧縮性を考慮したことにより大ひずみが生じることを確認した。

(3) 一層モデルを対象とした回転ばね定数を評価した。圧縮性を考慮したことにより、 S_1 が大きくなるほど回転ばね定数は減少し、 $S_1=12$ のケースで約3割減少した。

(4) FEMを用いた静的解析より、橋脚基部が塑性化した際の積層ゴム支承の最大局部せん断ひずみは、平均せん断ひずみの約2倍発生した。積層ゴム支承の平均破断ひずみが350%~400%であることから破断している可能性が考えられる。また、ゴム材料の圧縮性を考慮したことにより約1割程度局部せん断ひずみは増加した。引張応力は、ゴムの体積変化により見かけの剛性が低下して応力が増加しないため、非圧縮を仮定した結果と比較して大幅に減少した。

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) T.Mazda,H.Shiojiri, Numerical Method for Analysis of Laminated Elastomer 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 Elastomer 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63, 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) 庄司学, 川島一彦, RC橋脚の塑性回転変形が高減衰積層ゴム支承の設計に与える影響, 土木学会第56年次学術講演会 (平成13年10月)
- 10) 松田泰治, 大塚久哲, 北村幸司, 片山英一郎, FEMを用いた橋脚基部が非線形に入った際の積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.49A, 2003.3
- 11) 松田泰治, 大塚久哲, 中島崇之, 矢葺亘, 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影響, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.47A, 2001.3
- 12) 松田泰治, 矢花修一, 大鳥靖樹, 石田勝彦, 厚肉積層ゴムの力学特性に関する実験的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.B, pp1747~1752, 1994
- 13) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成13年12月
- 14) 川端季雄, ゴムの力学[I]~[VII], 日本ゴム協会誌, 第53巻3号~11号, 1980 (2003年9月12日受付)