

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

Study on local shear strain of laminated rubber bearings
in nonlinear of pile foundation using FEM

松田泰治*、大塚久哲**、北村幸司***、片山英一郎****

Taiji Mazda, Hisanori Otsuka, Kouji Kitamura, Eiichiro Katayama

*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)

****セントラルコンサルタント(株)九州支店 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東3-11-28)

Recently the seismic rubber bearings has become one of the methods in the seismic design of important structures. However the laminated rubber bearings as a seismic isolation system 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. In this study, analysis of laminated rubber bearings using FEM have conducted a computed equation of its rotational spring rate. Then, in nonlinear dynamic analysis of a highway bridge considered rotational spring rate of rubber bearings supports, laminated rubber bearings of maximum response were conducted. By reproduced the results using FEM, the local shear strain of laminated rubber bearings were evaluated.

Key Words: seismic isolator, laminated rubber bearing, finite element method, strain density function, rotational spring rate, nonlinear dynamic analysis, local shear strain

キーワード: 免震支承、積層ゴム、有限要素法、ひずみエネルギー密度関数、回転ばね定数、非線形動的解析、局部せん断ひずみ

1. はじめに

免震機構は上部構造と基礎の間に免震装置を設置して、構造物の固有周期を長周期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。免震構造において、構造物と地盤を絶縁するための装置のことを免震支承と呼び、そ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、水平方向は柔軟かく支持する機能を持ち、免震支承として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の力学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)}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を対象に行われてきているため、橋梁用の矩形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、より現象に則した厳密な評価を行うことが求められている。

本研究ではFEMを用いて正方形断面の天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルに対して圧縮曲げ解析を行った。

回転変形により生じた曲げモーメントと回転角の関係から回転ばね定数を算出し、様々な形状に対応できる回転ばね定数の算出式を導いた。次にタイプBの支承を有する地震時水平力分散構造の橋において、橋脚基部に塑性ヒンジを考慮した動的解析を行い、ゴム支承部にFEMより算出した回転ばね定数を与えた場合と、自由に回転を許容させた場合で、それぞれのゴム支承の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回転ばね定数を与えた場合の積層ゴム支承の最大変形状態をFEMを用いて再現することにより、積層ゴム支承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。

2. FEMによる一層モデルの解析概要

2.1 ゴム材料のモデル化

ゴム部には、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。ひずみエネルギー密度関数 W は関等¹⁾の提案した式(1)を用い、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組み込んだ。

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

ここで、 I_1 は主伸張比 λ_i からなる変形の主不変量と呼ばれるものである。このひずみエネルギー密度関数 W は $I_3=1$ として非圧縮と仮定している。一般に積層ゴムの圧縮解析を行う場合、ゴムのポアソン比が0.5ではなく僅かに小さいため、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)場合である。本研究では積層ゴム支承の1次形状係数が12以下のものを対象としているため、ゴムシートは建築用に用いられているものに比べ厚肉であり、圧縮時には側方へ大きくはらみだすため、鉛直方向に対して圧縮性の影響は少ないと考えられる。また既往研究⁹⁾の厚肉積層ゴムを対象とした試験結果とFEM解析結果の比較より、厚肉積層ゴムの材料における非圧縮の適用性が確認されている。従って、ここでは非圧縮を仮定した。

ゴムの材料定数 $a_1, \dots, e_1$ の算出方法を以下に示す。strip biaxial condition(引張り軸直角方向のひずみを一定に保ち伸張する拘束条件)における二軸伸張試験(図-1に二軸変形の概要を示す)から得られた応力ひずみ関係(図-2)より、座標軸 (x, y, z) を $(1, 2, 3)$ と置き換え、ひずみの主不変量 I_1 で偏微分したひずみエネルギー密度関数 $W(I_1, I_2)$ とひずみの主不変量 I_1 に換算し(関係式を式(2)に示す)、最小二乗法により式(1)と関数近似を行い最適な各定数を求めた。図-3に本解析に用いた偏導関数値 $\partial W / \partial I_1$, $\partial W / \partial I_2$ とひずみの不変量 I_1 および I_2 の関係を示す。本解析に用いた(1)式の材料定数を表-1に示す。既往研究¹⁰⁾から、有限要素法を用いて二軸伸張試験を再現し、応力ひずみ

関係を求めることにより、試験結果とモデル化の妥当性が確認されている。また、本解析で用いたゴムの公称せん断弾性係数は $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2 (8.0 \text{ kgf/cm}^2)$ である。

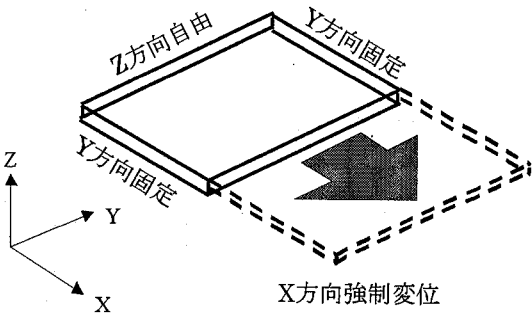


図-1 二軸変形の概要

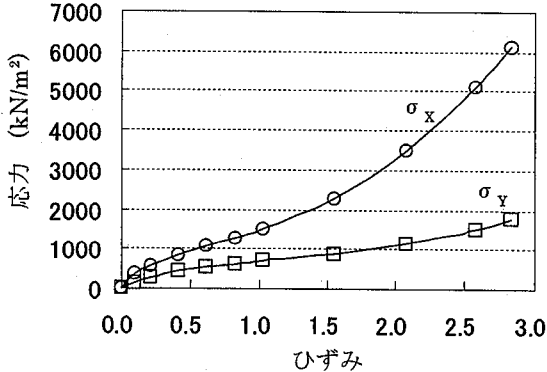


図-2 二軸伸張試験より得た応力ひずみ関係

$$\begin{cases} \lambda_1 = \varepsilon_1 + 1 \\ \lambda_2 = \varepsilon_2 + 1 \end{cases} \begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left(\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} \right) \\ \frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left(\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} \right) \end{cases}$$

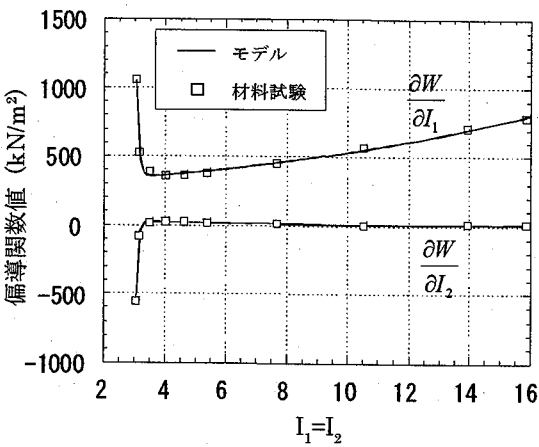


図-3 ひずみの主不変量と偏導関数値の関係

2.4 解析結果

図-7から図-10に載荷面圧が曲げモーメントと回転角の関係に与える影響を、図-11に1次形状係数の違いが曲げモーメントと回転角の関係に与える影響を示した。

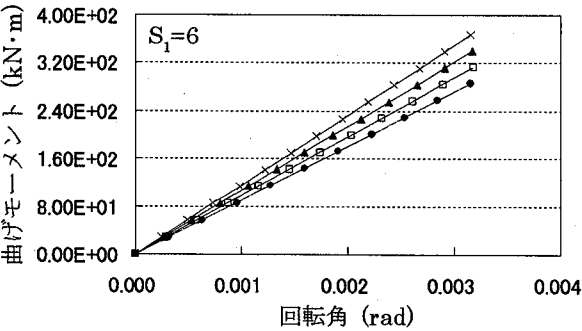
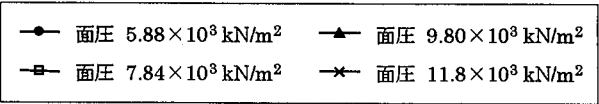


図-7 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=6$)

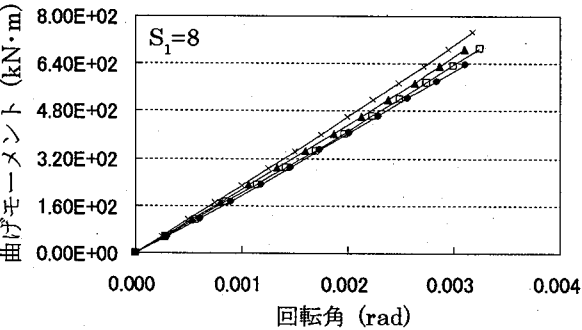


図-8 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=8$)

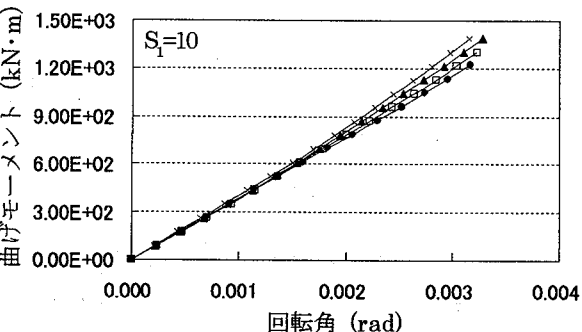


図-9 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=10$)

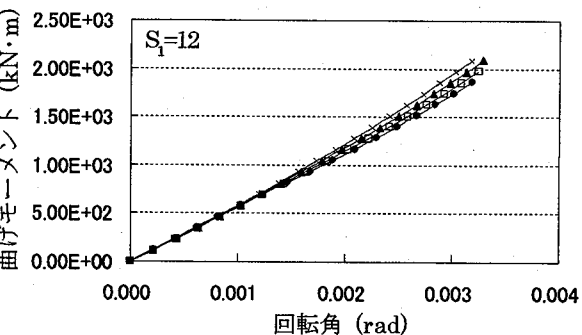


図-10 曲げモーメントと回転角の関係($S_1=12$)

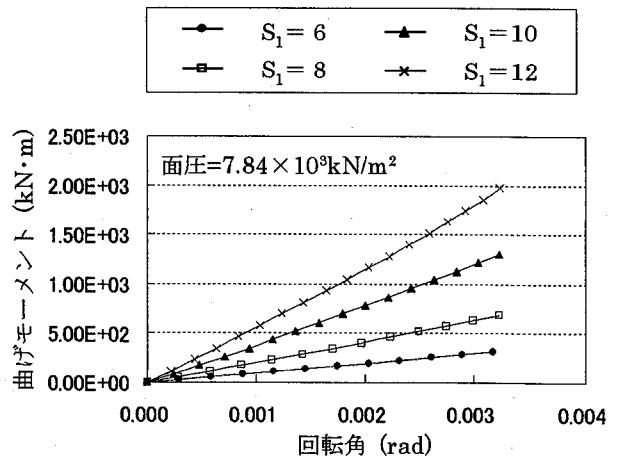


図-11 曲げモーメントと回転角の関係
(面圧= $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$)

1次形状係数 S_1 が大きくなると圧縮剛性が増大するため、曲げ剛性も増大している。圧縮による初期変形の影響で曲げ剛性は圧縮面圧の増加に伴い、増加している。ゴムの圧縮変形により見かけの1次形状係数が大きくなり曲げ剛性が増加することを確認した。次に解析結果を直線で近似することにより、4種類の1次形状係数 S_1 に対して一層モデルの回転ばね定数を算出した。支承の設計時の許容圧縮応力度が $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ であることから、圧縮面圧 $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ の場合の曲げモーメントと回転角の関係をを用いた。回転角が増すと非線形性により直線近似による誤差を考慮しなければならないが、解析結果と近似直線の誤差は全ケースで約3%程度以下であったため、直線近似が可能と判断した。一例として1次形状係数 S_1 が8のケースの直線近似を図-12に示す。本解析では1/2モデルを使用したため、回転ばね定数は近似直線の傾きを2倍して算出した。表-3にそれぞれ算出した回転ばね定数を示す。

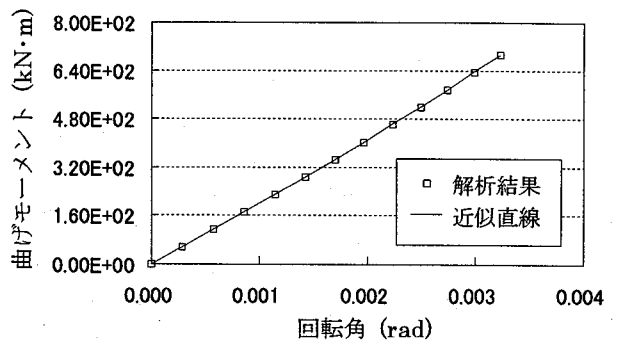


図-12 曲げモーメントと回転角の関係の直線近似($S_1=8$)

表-3 回転ばね定数

1次形状係数	回転ばね定数 (kN·m/rad)
6	1.9690×10^5
8	4.1882×10^5
10	7.9167×10^5
12	1.1761×10^6

表－1 ゴム($G=7.84 \times 10^2 \text{kN/m}^2$)の材料定数

	単位	$i = 1$	$i = 2$
a_i	kN/m^2	347.1	26.749
b_i	kN/m^2	16.445	-4.1765
c_i	kN/m^2	1.4718	0.2285
d_i	kN/m^2	1181.7	-1098.8
e_i		-13.283	-16.312

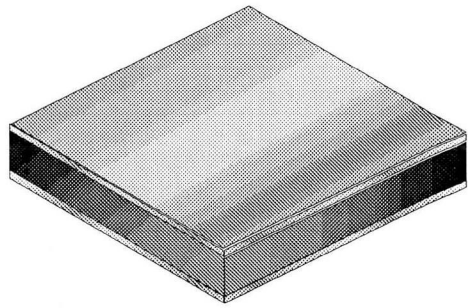
2.2 解析モデル

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一層モデルを図－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。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。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。

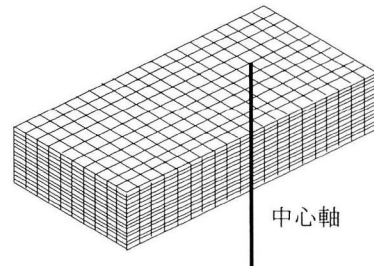
本研究と同手法を用いてゴム材料のモデル化した既往の研究⁵⁾から、鉛直方向を5から10程度に分割するならば水平・鉛直方向の荷重変位関係にはほとんど誤差は生じないことが確認されている。また、水平断面の研究⁵⁾において、36(円周方向6,半径方向6)から64(円周方向8,半径方向8)の5通りに分割した場合も水平・鉛直方向の荷重変位関係にはほとんど差は生じないことが確認されている。これらの実績を考慮して、一層モデルの要素分割は水平断面を20×10分割、ゴム部の鉛直方向は9分割とした。鋼板の鉛直方向は2分割とした。要素は8節点ソリッド要素を用い、上記の要素分割により、水平断面では50×50(mm)、厚みは2.3～4.4(mm)となった。鋼板は剛と仮定した。表－2に一層モデルの形状および要素分割の詳細を示す。

表－2 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
	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	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



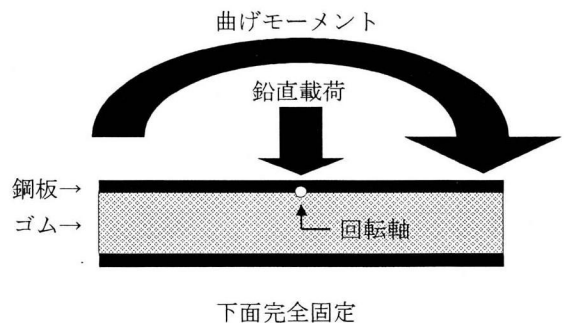
図－4 積層ゴムの一層モデル



図－5 解析モデル(1/2対称)

2.3 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曲げ解析を次の方法により行った。拘束条件はモデル下面を完全に固定し、圧縮解析ではモデル上面の全節点の鉛直変位を等しくし鉛直荷重を静的に与えた。圧縮後の曲げ解析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－6に示す。圧縮面圧は実用面圧を考慮して5.88,7.84,9.80,11.8×10³kN/m²(60,80,100,120kgf/cm²)の4種類とした。道路橋支承便覧¹¹⁾にゴム支承の許容総回転角は1/300と規定されていることから、載荷モーメントは回転角が1/300程度になるまで与えた。最大載荷モーメントは $S_1=12$ のケースで2.12×10³kN・mである。



図－6 圧縮曲げ解析(上鋼板回転許容)

2.5 回転ばね定数の基準化

まず4種類の1次形状係数 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-13)を二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(3))を導いた。ただし S_1 の範囲は6から12である。この時のプロットと近似曲線との誤差は1%未満であった。

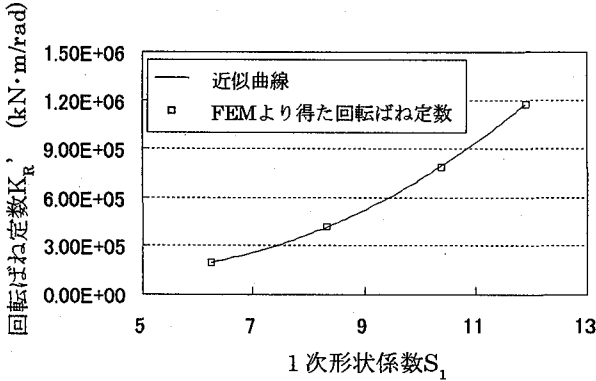


図-13 二次曲線による近似

$$K_R' [kN \cdot m / rad] = pS_1^2 + qS_1 + r \quad \begin{cases} p = 1.9145 \times 10^4 \\ q = -1.7471 \times 10^5 \\ r = 5.4203 \times 10^5 \end{cases} \quad (3)$$

次に断面形状に対する式の基準化を行った。1次形状係数 S_1 が同じならば、端部に生じる応力ひずみ関係は等しい。その関係式を式(4)に示す。ここで $\bar{K}_R$ は基準化された回転ばね定数、 K_R は任意の断面形状の回転ばね定数、 L は回転軸上からゴムシート端部までの距離(正方形断面の1辺の長さの1/2)、 A は断面積、 M は曲げモーメント、 θ は回転角、 $\sum t_e$ はゴムの総厚である。同じ1次形状係数 S_1 において、1辺長が1mのゴムシートの $A, L, \sum t_e$ をそれぞれ $A_1, L_1, \sum t_{e1}$ とし、長さが α 倍で $A_\alpha, L_\alpha, \sum t_{e\alpha}$ とすると関係式(5)が成り立つ。長さが α 倍のゴムシートの $A_\alpha, L_\alpha, \sum t_{e\alpha}$ を式(4)に代入すると式(6)が導かれ、式(6)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天然ゴム系積層ゴムの回転ばね評価が可能となった。

$$\bar{K}_R = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{M}{AL}}{\frac{L\theta}{\sum t_e}} = \frac{M \sum t_e}{\theta AL^2} \quad K_R = \frac{AL^2}{\sum t_e} \bar{K}_R \quad (4)$$

$$A_\alpha = \alpha^2 A_1, \quad L_\alpha = \alpha L_1, \quad \sum t_{e\alpha} = \alpha \sum t_{e1} \quad (5)$$

$$K_R = \frac{A_\alpha L_\alpha^2}{\sum t_{e\alpha}} \bar{K}_R = \alpha^3 \frac{A_1 L_1^2}{\sum t_{e1}} \bar{K}_R = \alpha^3 K_R' \quad (6)$$

3. 積層ゴム支承の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、橋脚基部の塑性ヒンジを考慮した動的解析を行い、ゴム支承部を自由回転とした場合(以下、ケース1)とFEMより算出した回転ばね定数を与えた場合(以下、ケース2)の積層ゴム支承の応答回転角を比較した。また回転ばね定数を与えた場合の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の評価を行った。

3.1 道路橋を用いた非線形動的解析の概要

(1) 対象橋梁

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Iげた橋を対象とし、橋脚高さは15mに設定した。図-14に本橋の側面図を、図-15に橋脚形状を、表-4に橋梁諸元を示す。

(2) 解析条件

解析は全体系モデルによる非線形動的解析を行った。積層ゴム支承は1つの集約ばねとしてモデル化し、橋軸方向のみ解析を行った。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波を使用した。表-5にゴム支承の形状及び各ばね定数を記す。本解析に用いたゴム支承のせん断弾性係数は $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2 (10.0 \text{ kgf/cm}^2)$ であったが、二軸伸張試験データは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、式(6)より求めた $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の回転ばね定数を1.25倍したものを $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の回転ばね定数とした。

(3) 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。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。ケース1でのゴム支承の最大応答回転角は、ゴム支承を挟む桁下端と橋脚頂部の2節点の相対回転角の時刻歴を求め、その最大値を用いた。ケース2では、ばね要素の応答回転角の最大値を用いた。表-6にケース1, 2のゴム支承の最大応答回転角と最大応答水平変位を示す。回転ばね定数を与えた場合のほうがタイプIでは約14%、タイプIIでは約11%回転角が減少した。ケース2において、積層ゴム支承の回転角は許容総回転角1/300よりも約6~8倍の回転角が生じることを確認した。また平均せん断ひずみはタイプIで2.17、タイプIIでは2.33発生し、許容平均せん断ひずみ2.50未満となった。

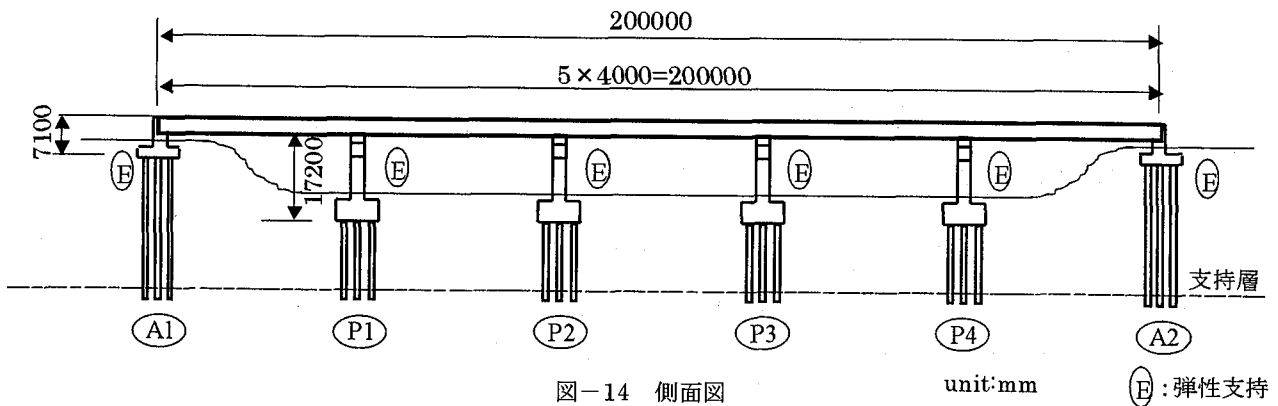
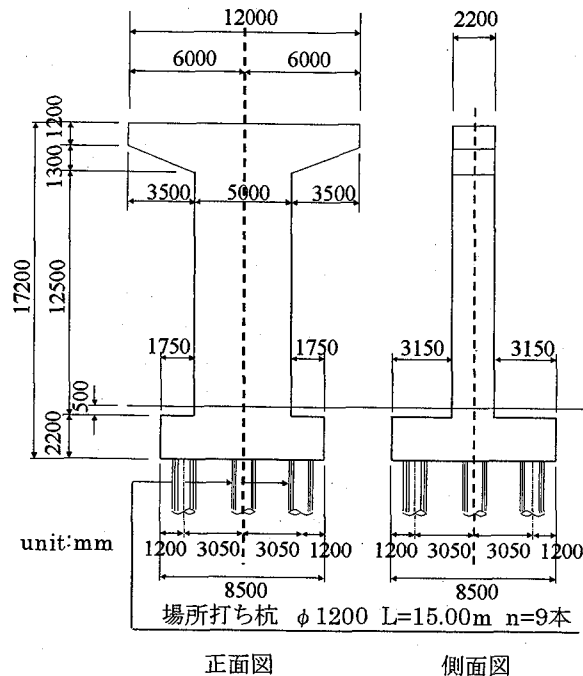


図-14 側面図

unit:mm

(E):弾性支持



正面図

側面図

図-15 橋脚形状

表-4 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-5 支承形状および支承ばね

	単位	橋台(A1,A2)	橋脚(P1~P4)
形状		矩形	矩形
橋軸幅	m	0.530	0.680
橋直幅	m	0.530	0.680
一層の厚さ	mm	20	24
1次形状係数		6.63	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
全体水平ばね定数	kN/m	7.647E+03	2.360E+04
全体回転ばね定数	kN・m/rad	2.093E+05	5.212E+05

表-6 ケース1, 2のゴム支承の最大応答回転角及び最大応答水平変位

		ケース 1	ケース 2
タイプ I	回転角 (rad)	0.02432	0.02101
	水平変位 (m)	0.191	0.208
タイプ II	回転角 (rad)	0.03095	0.02760
	水平変位 (m)	0.204	0.224

3.2 FEMによる局部せん断ひずみの評価

(1) 解析モデル

本解析では表-5に示したP1橋脚の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。積層モデルの正方形断面の1辺の長さは0.68m、一層厚は24mm、4層構造であり、1次形状係数 S_1 は7.08、2次形状係数も7.08である。ここで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。

本解析で用いるゴムの公称せん断弾性係数は $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ であるため、先の回転ばね定数と同様の理由により、 $G=7.84 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ で行った二軸伸張試験結果の応力ひずみ関係を1.25倍してゴム材料のモデル化を行った。表-7に $G=9.80 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ のゴムの材料定数を示す。

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 20×10 で分割し、鉛直方向にはゴムシートを8分割した。上記の分割により水平断面では $34 \times 34 \text{ (mm)}$ 、厚みは 3 (mm) となった。表-8に積層モデルの形状及び要素分割を示す。

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 $E=1.93 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.271$ 、降伏応力 $\sigma_y=2.50 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ とした。上下鋼板は剛と仮定し、要素は8節点ソリッド要素を用いた。

(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、圧縮解析は一層モデルでの手法と同じで、圧縮後のせん断曲げ解析で

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、水平変位及び回転軸回りのモーメントを漸増载荷した。圧縮面圧は $7.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ とし、水平変位及び回転角は表-6に示した最大応答値を与えた。载荷モーメントはタイプⅠで $1.33 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、タイプⅡで $2.22 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ となった。図-16に解析手法を示す。

(3) 解析結果

積層ゴムの単純引張試験の既往研究⁸⁾から、平均引張面圧が約 $1.96 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 (20 \text{ kgf/cm}^2)$ のときゴムは引張降伏し、この値を超えるとゴム内部に空隙が発生するなどして、ゴムが引張降伏することが明らかとなっている。またFEM解析を用いた既往研究¹²⁾からは、本研究と同じ形状の一層モデルの圧縮解析より、ゴムシート断面の中心部では圧縮面圧の約2倍の鉛直応力が発生し、引張面圧を与えた場合も同様であることが確認されている。これらから、引張降伏応力度は平均引張面圧 $1.96 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ を载荷した時には中心部において引張応力度 $3.92 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ が発生すると考えられ、この値をゴムの引張降伏応力度と仮定する。本解析モデルの圧縮せん断曲げ解析より、ゴム内部に発生する引張応力が $3.92 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ となる時は、タイプⅠとタイプⅡの結果を平均すると平均せ

表-7 ゴム(G10)の材料定数

	単位	$i=1$	$i=2$
a_i	kN/m^2	433.6	33.589
b_i	kN/m^2	20.619	-5.2733
c_i	kN/m^2	1.8358	0.2891
d_i	kN/m^2	1465.0	-1359.3
e_i		-13.192	-16.191

表-8 積層モデルの形状及び要素分割

形状係数	S_1	7.08
	S_2	7.08
ゴム	一層厚(mm)	24
	層数	4
	総厚(mm)	96
	一層分割数	8
	要素厚(mm)	3
中間鋼板	一層厚(mm)	3
	層数	3
	総厚(mm)	9
	一層分割数	1
	要素厚(mm)	3
上下鋼板	一層厚(mm)	6
	層数	2
	総厚(mm)	12
	一層分割数	2
	要素厚(mm)	3
全体	総厚(mm)	117
	総分割数	39
	要素数×100	78

ん断ひずみが1.25, 回転角が0.01656(rad)であり、この時ゴムは引張降伏すると考えられる。ABAQUSではゴムの降伏を定義することができないため、ゴムの降伏以降については解析で評価することはできない。

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。図-17に積層モデルの変形図(タイプⅠ)を示す。ゴムの引張降伏を考慮しない場合、上記の方法により局部せん断ひずみの最大値はタイプⅠで3.40(FEMから直接得られる公称ひずみ $NE_{xz}=2.00$)、タイプⅡで4.03($NE_{xz}=2.44$)となった。局部せん断ひずみは平均せん断ひずみと比較するとタイプⅠで約1.57倍、タイプⅡで約1.73倍となった。局部せん断ひずみの最大値の発生位置は、最上層のゴムシートで、図-17中の白矢印部である。また最下層のゴムシートにおける右側の中央部の局部せん断ひずみは、タイプⅠで3.07, タイプⅡで3.19生じた。

本解析におけ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(3mm)で除しているが、ゴムシートが厚肉であるため、圧縮変形と曲げ変形により解析時の上下隣接節点間距離は縮んだものや伸びたものが存在する。曲げ変形により引張応力が生じている要素は、上下方向に変形しており、せん断変形は他の要素に比べ小さい。このため他の要素がせん断変形を負担して、大きな局部せん断ひずみが生じている。

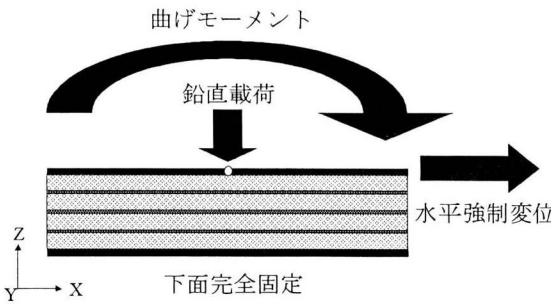


図-16 圧縮せん断曲げ解析

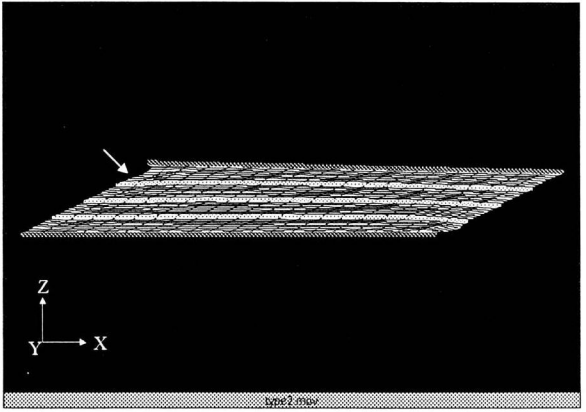


図-17 積層モデル(タイプⅠ)の変形図

4. 結論

FEMを用いて天然ゴム系矩形積層ゴムの一層モデルを対象に圧縮曲げ解析を行い、回転変形により生じた曲げモーメントと回転角の関係から回転ばね定数を算出した。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、回転を自由に許容した場合と回転ばね定数を与えた場合の最大応答回転角を評価した。また回転ばね定数を与えた場合の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) FEMを用いてパラメトリックな解析を行い、1次形状係数6から12までの正方形断面を有する天然ゴム系積層ゴムの回転ばね定数の評価式を提案した。
- (2) ゴム支承部にFEMより算出した回転ばね定数を与えた場合と自由に回転を許容した場合の最大応答回転角は、回転ばね定数を与えることによりその応答値はタイプIで約14%、タイプIIで約11%減少することを確認した。また地震時には許容総回転角1/300よりも約6~8倍の回転角が生じる可能性があることを確認した。
- (3) 橋脚基部が非線形に入った際の積層ゴム支承の最大変形状態をFEMを用いて再現した。ゴムの引張降伏を考慮しない場合、局部せん断ひずみは平均せん断ひずみよりタイプIで約1.57倍、タイプIIで約1.73倍発生することを確認した。
- (4) 積層モデルの圧縮せん断曲げ解析より、本解析モデルでは平均せん断ひずみが1.25、回転角が0.01656(rad)に達するとゴムは引張降伏すると考えられる。

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, 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
- 10) 松田泰治, 大塚久哲, 中島崇之, 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, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.48A,2002.3
- 11) 日本道路協会, 道路橋支承便覧, 丸善, pp.162, 1991.7
- 12) 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研究, 土木学会, 構造工学論集, Vol.47A,2001.3

(2002年9月13日受付)