

# FEM を用いた積層ゴムの局部せん断ひずみ照査式の検討に関する研究

九州大学大学院 学生員 中島崇之 正会員 松田泰治 フェロー 大塚久哲

## 1. はじめに

現在、天然ゴム系積層ゴム支承は性能設計への移行に伴い、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。本研究では橋梁に用いられる天然ゴム系矩形積層ゴムの対象に、有限要素法により解析評価を行うものである。免震設計マニュアル「4.2.4 積層ゴム支承の設計」には特性および形状を定める設計法と安全を確保するための照査式が記されている。「(6)局部せん断ひずみの照査」に記される照査式は、積層ゴムに生じる局部せん断ひずみを、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が、ゴムの破断ひずみを安全率で割った値より小さくなるように定めている。照査式を(1)式に示す。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。本研究ではこの照査式の妥当性を確かめるため、FEM 解析から得られた局部せん断ひずみとの比較を行い、その適用性を検討した。

局部せん断ひずみの照査式

$$(\gamma_C + \gamma_R + \gamma_S) \leq \frac{\gamma_U}{f_\delta} \quad (1)$$

$\gamma_C$  : 鉛直荷重による局部せん断ひずみ  
 $\gamma_R$  : 回転角による局部せん断ひずみ  
 $\gamma_S$  : 水平変位による局部せん断ひずみ  
 $\gamma_U$  : ゴムの破断ひずみ  
 $f_\delta$  : 安全率

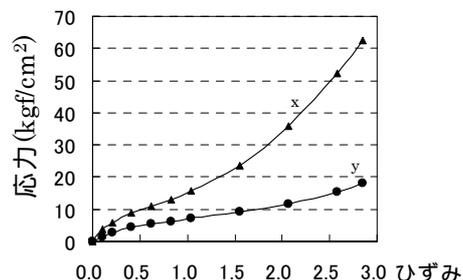


図 - 1 二軸伸張試験結果

## 2. 解析条件

### 2.1 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(2)式に示す関等<sup>1)</sup>の提案したひずみエネルギー密度関数  $W$  を組み込み、非圧縮を仮定した。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。ゴムの材料定数定数  $a_i, \dots, e_i$  は図 - 1 に示すゴムの二軸伸張試験結果から定めた。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。鋼板は弾性体としてモデル化を行った。ポアソン比  $\nu=0.271$ 、ヤング率  $E=1.97 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2(1.93 \times 10^8 \text{kN/m}^2)$  とした。

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

### 2.2 解析モデル

本解析では図 - 2 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切り出しモデルである一層モデルを図 - 3 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 の四種類のゴムシートの上下面を鋼板で挟んだものである。ここで 1 次形状係数とはゴムシートの、加硫接着により拘束された面と側方の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 1 次形状係数( $S_1$ )と呼ばれる。要素分割数は水平断面で  $20 \times 10$  分割とし鉛直方向は既往研究<sup>2)</sup>を参考に 10 分割とした。鋼板は 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  $5 \times 5$  (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。

表 - 1 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	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
全体	要素厚 (mm)	4	3	2.4	2.1
	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

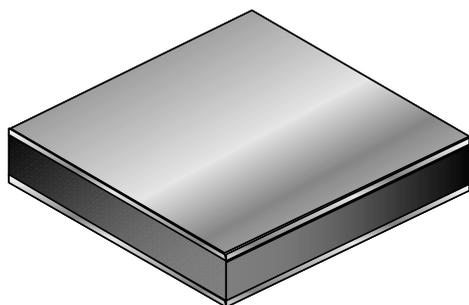


図 - 2 積層ゴムの一層モデル

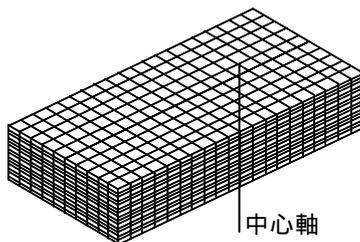


図 - 3 解析モデル(1/2 対称)

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 TEL 092-642-3268

2.3 解析手法

一層モデルに対して圧縮せん断解析を次の方法により行なった。拘束条件は、モデル下面を完全に固定し、モデル上面の全節点の鉛直および水平変位を等しくした。鉛直载荷(圧縮)は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。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。解析手法を図-4に示す。圧縮面圧Pは実用面圧を考慮し60,80,100,120kgf/cm<sup>2</sup>(5.88,7.84,9.80,11.8×10<sup>6</sup>N/m<sup>2</sup>)の四種類とした。

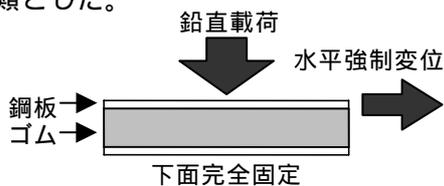


図-4 圧縮せん断解析

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。図-5にS<sub>1</sub>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-6に圧縮面圧80を四種類のS<sub>1</sub>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知見が得られた。1) 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する。2) 照査式と解析値はせん断ひずみで0.5~1.0の範囲までは概ね一致するが、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。3) 照査式の適用可能領域はS<sub>1</sub>と圧縮面圧の影響を受ける。

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(図-7, 図-8)。

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

これにより次の知見が得られた。4) 面圧が大きいケースほど照査式との一致度が低い。5) S<sub>1</sub>が小さなモデルほど照査式との一致度が低い。6) 平均せん断ひずみが1.0以降の領域では線形に増加する。7) 平均せん断ひずみが2.5の時点で初期誤差の約4倍の誤差が全ケースで発生する。

4. まとめ

本研究により、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現象を表現できているが、以降の領域においては過大に安全側の評価となることが確認された。

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) 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

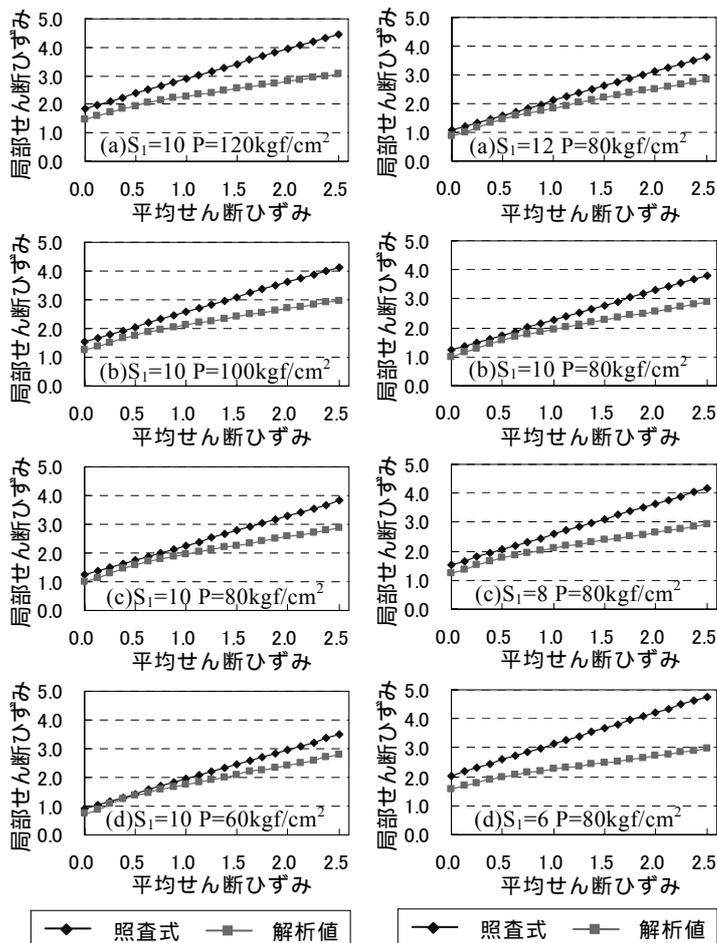


図-5 局部せん断ひずみの変化 (形状係数一定) 図-6 局部せん断ひずみの変化 (圧縮面圧一定)

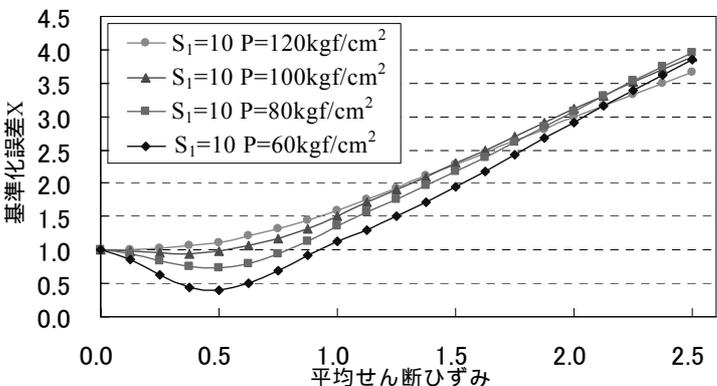


図-7 誤差の変化(形状係数一定)

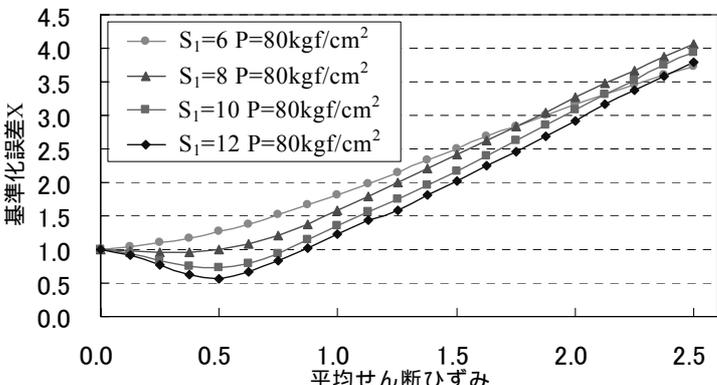


図-8 誤差の変化(圧縮面圧一定)