

FEMを用いた積層ゴムの局部せん断ひずみに与える形状係数の影響評価に関する研究

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。「(6)局部せん断ひずみの照査」に記される照査式は、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。照査式を(1)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。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

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

γ_C : 鉛直荷重による局部せん断ひずみ
 γ_R : 回転角による局部せん断ひずみ
 γ_S : 水平変位による局部せん断ひずみ
 γ_U : ゴムの破断ひずみ
 f_δ : 安全率

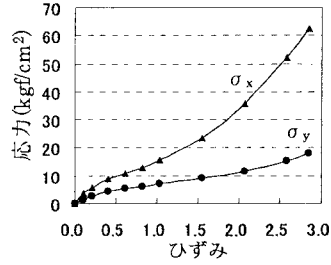


図-1 二軸伸張試験結果

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 1) の提案したひずみエネルギー密度関数 W を組み込み、非圧縮性を仮定した。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 $a_1, \dots, e_i$ 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。

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

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、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。要素分割数は水平断面で 20×10 で分割とし鉛直方向は既往研究 2) 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 $5 \times 5 \text{ (cm)}$ 、厚みは $0.21 \sim 0.4 \text{ (cm)}$ 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。

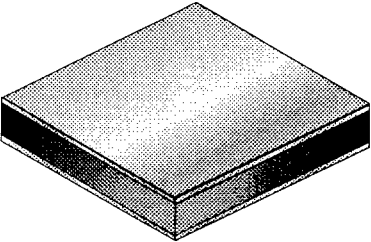


図-2 積層ゴムの一層モデル

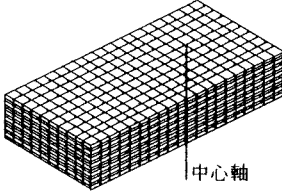


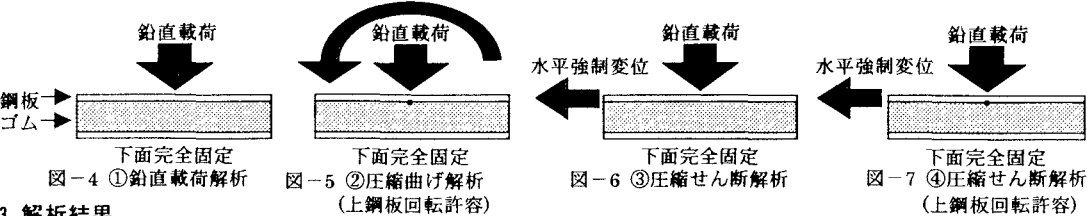
図-3 解析モデル(1/2 対称)

表-1 一層モデルの形状と要素分割

形状	S_1	6.25	8.33	10.4	11.9
係数	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 $\times 100$	28	28	28	28

2.3 解析手法

一層モデルに対して①鉛直载荷解析、②圧縮曲げ解析、③圧縮せん断解析、④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、①③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、②④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。②は圧縮の後、回転中心の鉛直変位を固定し、端部に集中荷重を与えた。解析手法を図-4 から図-7 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。

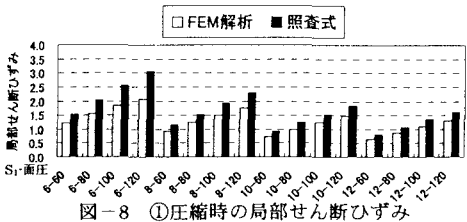


3. 解析結果

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。

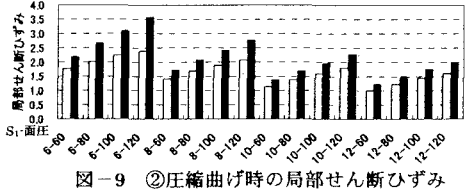
①圧縮時の局部せん断ひずみ

図-8より、せん断ひずみは圧縮荷重に比例して増加し、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。



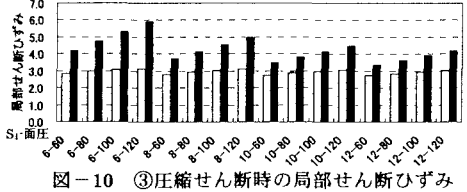
②圧縮曲げ解析時の局部せん断ひずみ

図-9より、解析結果は照査式の傾向と一致し、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。



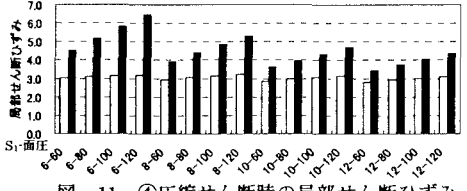
③圧縮せん断時の局部せん断ひずみ

図-10より、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が、照査式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。照査式は解析結果より18~46%安全側の評価となり、過大に安全側の評価となるケースが含まれることが確認された。



④圧縮せん断時(上鋼板回転許容)の局部せん断ひずみ

図-11より、解析結果は上鋼板回転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。照査式は解析結果より18~50%安全側の評価となり、過大に安全側の評価となるケースが含まれることが確認された。



4. まとめ

照査式は解析結果より17~50%安全側の評価となることが確認された。せん断を伴う変形の照査式による評価は、解析結果よりも著しく大きくなるケースが含まれることが確認された。これにより、せん断を伴う変形によって生じる局部せん断ひずみを、水平変位と鉛直荷重および回転角のそれぞれから発生するせん断ひずみの単純和として評価することは非常に安全側の評価となり、現象を忠実に表現できていないと確認された。

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) 松田昭博、大島靖樹他、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