

FEM 解析による天然ゴム系矩形積層ゴムの応力分布評価とそのモデル化

九州大学 学生会員 北村幸司
九州大学大学院 正会員 松田泰治

九州大学大学院 学生会員 中島崇之
九州大学大学院 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積層ゴムの一層モデルを対象に、有限要素解析を用いて鉛直荷重・回転変形により生じた鉛直応力分布を求め、それらの分布形状を二次・三次関数として表現する簡易モデルの構築を行った。

2. 解析概要

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(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 を組み込み、非圧縮を仮定した。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。

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

2. 2 解析モデル

本解析では1辺1mの正方形断面の一層モデルを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で、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る。要素分割は既往研究²⁾を参考に計算時間と計算機の容量を考慮して定めた。水平断面で 20×10 分割とし鉛直方向は9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 $5 \times 5(\text{cm})$ 、厚みは $0.23 \sim 0.44(\text{cm})$ となった。鋼板は剛としてモデル化を行った。

2. 3 解析手法

一層モデルに対して圧縮解析、曲げ解析、圧縮曲げ解析を次の方法により行った。拘束条件は、全解析で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鉛直自重を、曲げ解析では上鋼板下面の中心線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中心軸(回転軸)回りのモーメントを与えた。圧縮面圧は実用面圧を考慮し、60, 80, 100, $120 \text{ kgf/cm}^2 (5.88, 7.84, 9.80, 11.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2)$ の4種類とした。回転角は $1/3000, 1/1500, 1/1000$ の3種類とした。解析条件を図-1から図-3に示す。



図-1 圧縮解析



図-2 曲げ解析

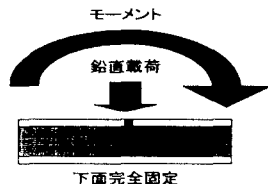


図-3 圧縮曲げ解析

3. 解析結果

3. 1 圧縮解析に基づく鉛直応力分布評価とそのモデル化

(1) S_1 が10のモデルに対して4種類の載荷面圧を与えて得られた鉛直応力分布を図-4に示す。この図中の縦軸は鉛直応力の載荷面圧に対する倍率、横軸は発生位置を示している。鉛直応力評価位置はゴムシート断面の中心に位置する要素である。この評価位置での鉛直応力は端部では応力0を示し、中心部では載荷面圧の約2倍の応力が発生する放物線分布となった。これはすべてのモデルに共通する。

(2) S_1 が10のモデルに対して載荷面圧 80 kgf/cm^2 を与えて得られた鉛直応力分布形状を二次関数として式(2)に示す。放物線モデルを構築するにあたり、ゴムシートの中心を原点とした座標軸(図-5)とする。

$$\sigma(z) = f(x) \times f(y)$$

$$f(x) = 0.0662x^2 - 169.92$$

$$f(y) = -0.0003896y^2 + 1.0 \quad (2)$$

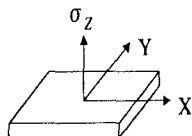


図-5 座標系

(3) S_1 が 10、載荷面圧が 80kgf/cm^2 のモデルについて放物線モデルと FEM 解析結果との比較を基準化誤差として図-6 に示す。基準化誤差とは FEM 解析結果から放物線モデルを引いたものを最大応力で割ったものである。ゴムシートの中心部では誤差はほぼ 0 であり、端部になるにしたがい誤差は大きくなるが最大でも 5% 程度である。これはすべてのモデルに共通する。

3. 2 曲げ解析に基づく鉛直応力分布評価とそのモデル化

(1) S_1 が 10 のモデルに対して三種類の回転角を与えた場合の鉛直応力分布を図-7 に示す。この図中の縦軸は鉛直応力、横軸は発生位置を示している。この評価位置での鉛直応力分布は端部ではほぼ応力 0 を示し、圧縮側と引張側はほぼ対称な放物線分布となった。これはすべてのモデルに共通する。

(2) S_1 が 10 のモデルに対して回転角 $1/3000$ を与えて得られた鉛直応力分布形状を二次・三次関数として式(3)に示す。

$$\sigma(z) = f(x) \times f(y) \quad f(x) = 0.0004x^3 - 0.00007x^2 - 1.0677x - 0.0739$$

$$f(y) = -0.0003y^2 + 1.0 \quad (3)$$

(3) S_1 が 10 のモデルについて放物線モデルと FEM 解析結果との比較を基準化誤差として図-8 に示す。ゴムシートの中心部では誤差はほぼ 0 であり、端部になるにしたがい誤差は大きくなる。これはすべてのモデルに共通する。

3. 3 圧縮・曲げ解析

S_1 が 10 のモデルに対して載荷面圧が 80kgf/cm^2 、三種類の回転角を与えた場合の鉛直応力分布を図-9 に示す。同ケース(回転角 $1/3000$)の圧縮放物線モデルと曲げ放物線モデルを重ね合わせたものとの比較を基準化誤差として図-10 に示す。ゴムシートの中心部では誤差はほぼ 0 であり、端部になるにしたがい誤差は大きくなるが最大でも 4% 程度である。これはすべてのモデルに共通する。

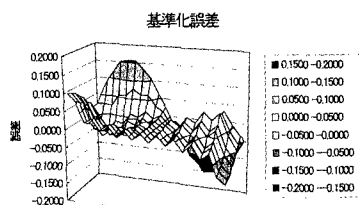


図-8 基準化誤差

(最大応力 $= -21.04\text{kgf/cm}^2$)

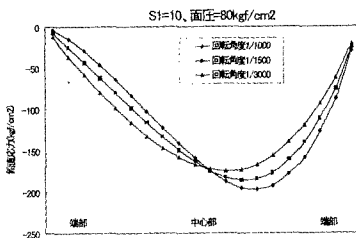


図-9 鉛直応力分布

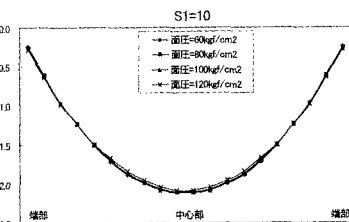


図-4 鉛直応力分布

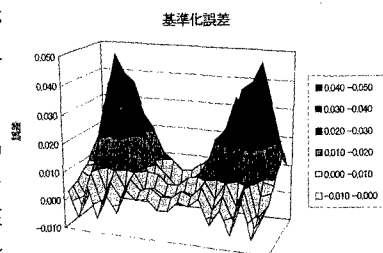


図-6 基準化誤差

(最大応力 $= -169.20\text{kgf/cm}^2$)

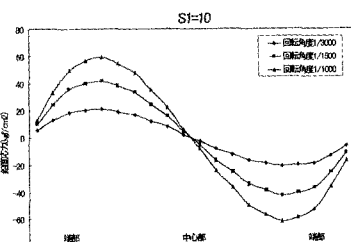


図-7 鉛直応力分布

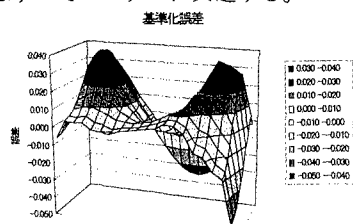


図-10 基準化誤差

(最大応力 $= -174.50\text{kgf/cm}^2$)

4. まとめ

本研究により、鉛直载荷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 倍となることを確認した。また、回転変形に対してゴム内部に発生する鉛直応力分布も放物線形状であり、中心部を挟んで圧縮側と引張側はほぼ対称となる。圧縮及び曲げ変形に基づくゴムシート内部の鉛直応力分布は 2 次関数及び 3 次関数を用いてほぼ表現でき、圧縮曲げ解析において重ね合わせることができることが確認された。

参考文献 1) 松田昭博、大島靖樹、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、1998.4 p10, 11

2) 関互、深堀美英、A LARGE-DEFORMATION FINITE-ELEMENT ANALYSIS FOR MULTILAYER ERASTOMERIC BEARINGS, RUBBER DIVISION, Vol. 60, NOVEM BER-DE CMBER, 1987 P856 ~ P869