

ゴムの体積変化を考慮した免震支承の力学特性評価に関する基礎的研究

九州大学工学部 学生会員 〇嶋野弘毅
九州大学大学院 フェロー 大塚久哲

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 北村幸司

1. はじめに

現在、積層ゴム支承は性能設計への以降に伴い、現象に即したより厳密な評価が求められている。本研究では、実験結果を利用してゴムのモデル化を行い、FEMにより、橋梁に用いられる天然ゴム系積層ゴム支承の一層モデルを対象に引張解析を行った。その結果を利用して新たにゴム材料の引張領域の評価を試みた。

2. 解析概要

2.1 ゴムの材料特性

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した。ひずみエネルギー密度関数 W は既往研究¹⁾を参考に、(1)式の様にゴムのエントロピー弾性に基づく項 W_B と体積変化に基づく項 W_T の和で表した。ゴムの非圧縮としてモデル化する場合 W_B だけを用いた。本研究では、 W_B として関等が提案したひずみエネルギー密度関数、(2)式を利用し、 W_T としては(3)式を利用した。(3)式により、引張面圧 p と体積ひずみ e_v 関係(p - e_v 関係)が分かれば W_T を決定することができる。

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

本研究では、既往研究²⁾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 $S_2=9$, $G=5.53 \times 10^4 \text{ MPa}$)の単純引張試験結果から得られた、 p - e_v 関係を曲線で近似((4)式)することにより、 W_T を決定した。

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

$$p = \frac{dW_T(J)}{dJ} \quad (3)$$

$$p = m_1(1.0 - \exp(m_2 e_v)) + m_3 e_v \quad (4)$$

図・1に示す。これらの関数を汎用有限要素法プログラムABAQUSにサブルーチンとして組み込んだ。ゴムの公称せん断弾性係数は $G=7.84 \times 10^4 \text{ MPa}$ (8.0 kgf/cm^2)とした。

1次形状係数 S_1 とはゴムシートの拘束表面と自由表面の比で、積層ゴムの力学特性の中で鉛直剛性や曲げ剛性に影響を及ぼす値である。2次形状係数 S_2 とはゴムシートの1辺と全ゴム層厚の比で積層ゴムの力学特性の中で特に曲げ変形に影響を及ぼす値である。

2.2 解析モデル

本解析では高さ33.6mm、1辺1mの正方形断面の一層モデルを、対称性を考慮して1/2だけモデル化した。一層モデルとはゴムシートの上下面を鋼板で挟んだものである。本研究では1次形状係数 S_1 が10の一層モデルを解析に用いた。

要素分割は既往研究³⁾を参考に、水平断面で 20×10 分割、鉛直方向はゴム部を10分割、鋼板部を2分割とした。要素は8節点ソリッド要素を用い、要素のサイズは水平断面で $50 \times 50(\text{mm})$ 、要素厚は2.4mmとし、要素数は2800とした。鋼板は剛としてモデル化した。

2.3 解析条件

一層モデルに対して引張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、モデル上面の全節点の鉛直変位が等しくなるように引張面圧を静的に加えた。

図・2に示す。引張面圧は、 1.96 MPa (20 kgf/cm^2)と $9.80 \times 10^3 \text{ MPa}$ (1.0 kgf/cm^2)の2種類とした。鉛直応力の評価位置は最も高い応力が発生する中心部を含む、対称軸上の最上部の要素を選んだ。図・3に示す。

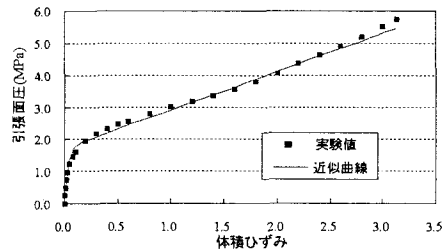


図-1 引張面圧-体積ひずみ関係

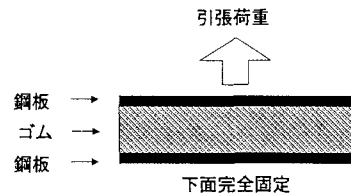


図-2 引張解析

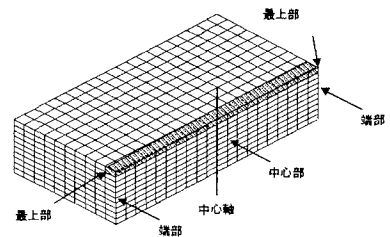


図-3 応力評価位置

2.4 解析結果

図-4に解析結果より得られた内部応力分布図を示す。非圧縮モデルが放物線状の応力分布を取っているのに対し、(4)式を組み込み体積変化を考慮したモデル(実験モデル)は応力分布が台形状となっている。

ゴムに引張面圧を加えていくと約1.96MPaから内部に空隙が生じ体積変化が大きくなる。この体積変化により、実験モデルにおいて応力が均一となり、応力分布が台形状となると考えられる。しかし、0.098MPaといった小さい荷重では体積変化が小さいのでこのような応力分布をとるとは考えにくい。

2.5 バイリニアモデル

実験モデルの鉛直応力分布評価の問題点として、実験データを近似によりそのまま関数として組み込んだことが考えられる。実験データと比べ実際の現象では、少なくとも1.96MPaまではゴムはほぼ弾性と考えられ、体積変化は実際はもっと小さいと考えられる。そこで、次のようなバイリニアモデルを提案した。引張面圧が1.96MPaに達するまでは弾性域と考え、非圧縮モデルを用いた引張解析より得られる p - e_v 関係を利用し、それより大きい引張面圧は実験結果を利用するものである。図-5にモデル図を示す。

2.6 解析条件

拘束条件及び載荷方法は2.3節と同様である。また、新に荷重を変えたときの内部応力の変化を知るために、引張面圧0.49,0.98,1.18,1.37,1.57,1.76,1.96MPa(5,10,12,14,16,18,20kgf/cm²)の7種類を用いた。

また、引張試験を解析で再現し、 p - e_v 関係について実験結果と比較した。

2.7 解析結果

解析結果を図-6~9に記す。図-6,7より、(3)式を用いたモデルと比べて荷重に応じ、内部応力分布が変化している事がわかる。また、図-8より荷重が増えるにつれ、中心部から徐々に応力分布が頭打ちになっていく状況が伺える。

また、 p - e_v 関係については図-9よりバイリニアモデルを考慮したモデルは実験結果をほぼ模擬している。

3. 結論

本研究ではFEMを用いて、ゴムの内部応力分布の評価を行った。天然ゴム系積層ゴムの引張領域のモデル化としてバイリニアモデルを提案し、その適用性を確認した。

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, pp.3-11, 1998.4
- 2) T.Mazda, H.Shiojiri, Test on Large-Scale Isolation Elements, Part2 Static Characteristics of Laminated Rubber Bearing Type, Transactions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology/Tokyo, Japan, pp.235-240, 1991.8
- 3) 関互, 深堀美英, A Large-Deformation Finite-Element Analysis for Multilayer Elastomeric Bearings, Rubber Division, Vol.60, 11-12, pp.856-869, 1987

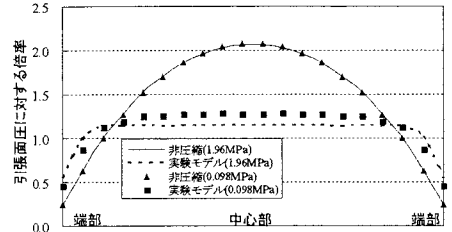


図-4 鉛直応力分布図

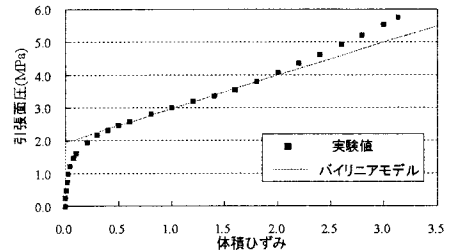


図-5 引張面圧-体積ひずみ関係

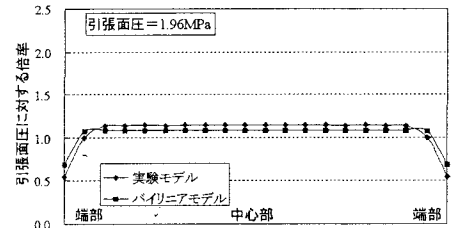


図-6 鉛直応力分布図

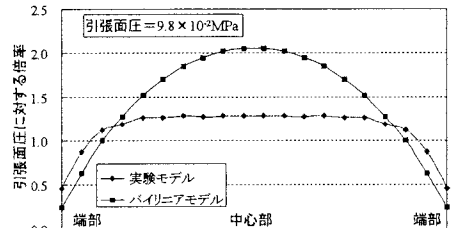


図-7 鉛直応力分布図

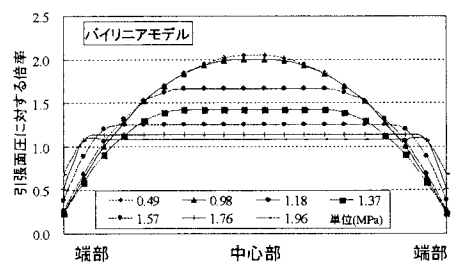


図-8 鉛直応力分布図

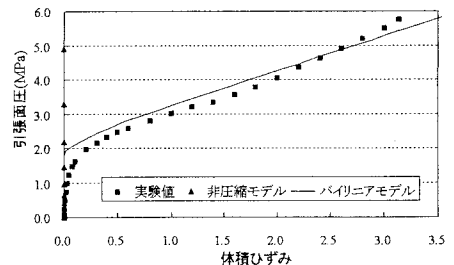


図-9 引張面圧-体積ひずみ関係