

伝達マトリックス法を用いた積層ゴムの力学特性評価法に関する研究

九州大学工学部 ○学生員 高山 智宏

九州大学工学部 正 員 松田 泰治

日本大学理工学部 正 員 塩尻 弘雄

(財)電力中央研究所 正 員 平田 和太

1. まえがき

近年のゴム鋼板の接着技術の向上により免震用の積層ゴムの開発・実用化がなされている。積層ゴムの力学特性は主として載荷実験により確かめられているが、設計にあたっては精度が高く簡易な評価式が望まれる。ここでは伝達マトリックス法を用い、幾何学的非線形と材料非線形および粘性減衰を考慮して評価できる手法の開発を行い、積層ゴム全体の荷重と変形の関係を算定し、既往の実験結果との比較により、その妥当性を検証した。

2. 解析手法

本解析法は鋼板に挟まれたゴム一層の変形を仮定して、伝達マトリックス法により多層の積層ゴムの解析を行うものである。ゴムの変形はせん断と曲げおよび軸方向変形を考慮し、内部鋼板は剛と仮定した。ゴムの粘性減衰はせん断方向のみ、材料物性の非線形性はせん断方向と曲げ特性について考慮した。

図-1に示すような鋼板に挟まれたゴムの下端面中央のA点と上端面中央のB点における力の釣合を考慮すると

$$M_B = M_A - \Delta y \cdot Q - \Delta x \cdot P$$

とおける。A点およびB点における平均回転角 ϕ_m 方向のせん断力 T_m と ϕ_m 直角方向の軸力 N_m は

$$T_m = P \cdot \sin \phi_m + Q \cdot \cos \phi_m$$

$$N_m = Q \cdot \sin \phi_m - P \cdot \cos \phi_m$$

また、 ϕ_m 方向せん断変位 $\Delta \gamma$ と軸方向相対変位 Δs

$$T_m = \frac{G(\gamma) \cdot A_r}{t_r} \cdot \Delta \gamma + \frac{\mu \cdot A_r}{t_r} \cdot \Delta \dot{\gamma}$$

$$N_m = \frac{E_c \cdot A_r}{t_r} \cdot \Delta s$$

γ : ゴム一層あたりのせん断ひずみ

μ : 単位面積あたりの等価粘性減衰係数

A_r : ゴムの断面積 t_r : ゴム一層厚

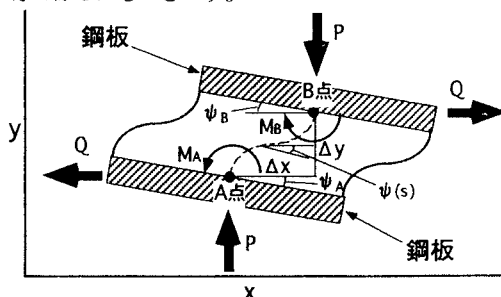
ゴム一層内の任意の点sにおけるゴムの回転角を ψ とすると軸方向ひずみ ε_n およびその面におけるモーメントMは以下になる。

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta s}{t_r} - \frac{d\psi}{ds} \cdot n$$

$$M = - \int_n E_b \varepsilon_n dA$$

n : 中心から ψ 方向の長さ

ここで、曲げによって発生する断面内の鉛直応力-鉛直ひずみの関係には図-3のような弾性非線形を仮定する。こうした関係式と積層ゴムの形状と荷重の関係から中央点でのモーメント M_m が0になるように収束計算を行って積層ゴムの変形時の挙動を求める。なお、以下では積層ゴムのひずみとは変位をゴム総厚で除したものをいう。



P : y方向軸力 (圧縮正)

Q : x方向せん断力 (右正)

M_A, M_B : A点およびB点におけるモーメント

ψ_A, ψ_B : A点およびB点における回転角

Δx : x方向のゴム層内変位

Δy : y方向のゴム層内変位

$\psi(s)$: 任意の点sにおける回転角

図-1 ゴム一層における荷重と変形の関係

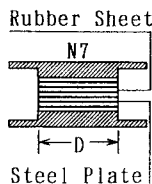
3. 解析結果

本解析手法の妥当性等を確認するため既往の実験結果との比較検討を行った。検討対象は図-2に示す天然ゴム系厚肉積層ゴムの載荷試験結果²⁾である。解析に使用した物性値は表-1のとおりである。せん断弾性係数 G は1次形状係数が同じで解析対象のN7より曲げ変形を受けにくいゴム層数3の試験データをもとに定め、単位面積あたりの等価粘性減衰係数 μ は鉛直応力に応じて得られた等価粘性減衰定数 h_h より決定した。引張降伏応力 σ_y は積層ゴムの単純引張試験結果²⁾を参考に -20 kgf/cm^2 と仮定した。

試験体N7のせん断ひずみ-せん断応力の実験結果と解析結果をそれぞれ図-4, 5に、せん断ひずみ-鉛直ひずみの実験値と解析値の比較を図-6に示す。図-4, 5より、せん断ひずみ-せん断応力の解析結果は実験結果とほぼ合致した。また、せん断ひずみ-鉛

直ひずみは実験結果の方が定量的に大きくでている。

試験体	N 7
直径 D(mm)	209
ゴム厚 t_r (mm)	10.5
ゴム層数 n	4
鋼板厚 t_s (mm)	4.4
1次形状係数 S_1	4.98
2次形状係数 S_2	2.84



S_1 = 拘束加圧面積 / 自由表面積 (ゴム一層あたり)
 S_2 = 直径 / ゴムの全層厚

図-2 積層ゴムの形状

表-1 解析に用いた物性値

ゴムの縦弾性係数 E_o	22.4 kgf/cm ²
ゴムのせん断弾性係数 $G(\gamma)$	$4.28 + 0.067\gamma - 0.007\gamma^2$ kgf/cm ²
体積弾性係数 E_∞	10890 kgf/cm ²
ゴムの硬さによる補正係数 κ	0.85
引張降伏応力 σ_y (圧縮正)	-20.0 kgf/cm ²
等価粘性減衰定数 h_H	0 k/c ² : 1.237 25 k/c ² : 2.397 50 k/c ² : 6.409
圧縮に対する見かけの縦弾性係数 $E_{apc} = E_o(1 + 2 \cdot \kappa \cdot S_1^2)$ 圧縮性を考慮した圧縮に対する縦弾性係数 $E_c = \frac{E_{apc} \cdot E_\infty}{E_{apc} + E_\infty}$ 曲げに対する見かけの縦弾性係数 $E_{apb} = E_o(1 + 0.667 \cdot \kappa \cdot S_2^2)$ 圧縮性を考慮した曲げに対する縦弾性係数 $E_b = \frac{E_{apb} \cdot E_\infty}{E_{apb} + E_\infty}$	

4. まとめ

曲げに対する縦弾性係数の材料非線形を考慮することにより、局部的に引張降伏が生じた積層ゴムのせん断ひずみ-せん断応力の履歴の評価が可能であることが確認された。せん断ひずみ-鉛直ひずみの実験結果と解析結果で差異が生じた原因の一つとして、厚肉で S_2 が小さいために解析で剛と仮定した鋼板に実験時には曲げ変形が生じたことが考えられる。(参考文献)

- 1) 松田・塩尻: 伝達マトリックス法による積層ゴムの簡易解析, 日本建築学会構造工学論文集 Vol. 39 B, 1993年3月
- 2) 松田 他: 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 第2分冊, 1994年12月
- 3) 飯塚真臣: 免震構造設計指針 積層ゴムの大変形マクロモデル pp545~563

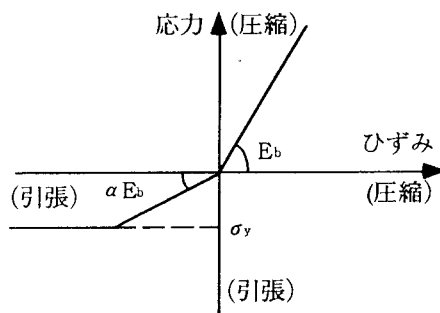


図-3 ゴムの応力-ひずみ関係

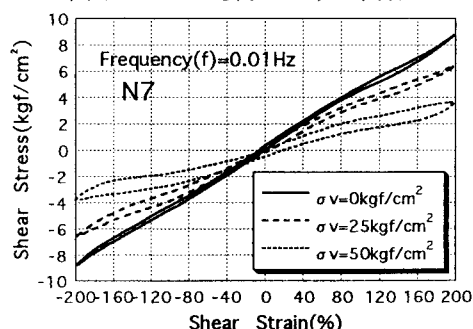


図-4 せん断ひずみ-せん断応力 (実験値)

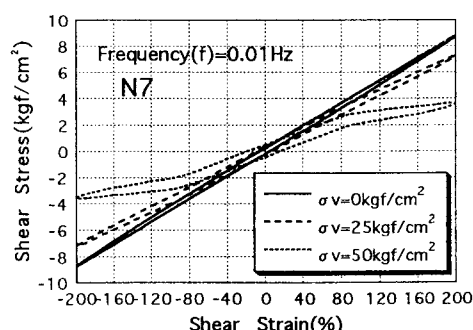


図-5 せん断ひずみ-せん断応力 (解析値)

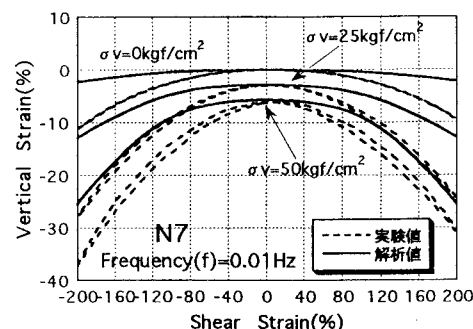


図-6 せん断ひずみ-鉛直ひずみ