# 積層ゴム支承の鉛直方向における圧縮・引張り挙動のモデル化

山梨大学 学生会員 〇小森 誠太, 山梨大学 正会員 吉田 純司

山梨大学 非会員 栗野 華衣

# 1. はじめに

道路橋ではゴムを応用した免震装置(免震積層ゴム支 承)が数多く採用されている.積層ゴム支承の橋梁では桁 の自重の影響で引張り変形はほとんど生じないと考えら れてきたが,東北地方太平洋沖地震<sup>1)</sup>や熊本地震では桁が 橋軸直角方向に回転することで支承部分に引張り変形が 生じ,損傷が生じたと予測された.地震による免震橋梁 の挙動を把握し,被害分析を行うためには,精度の高い 支承のモデル化が必要になる.しかし,現段階では積層 ゴム支承の水平方向の復元力モデル<sup>2)-4)</sup>は数多く提案さ れているものの,鉛直方向のモデルは希少である.

そこで、本研究では免震用の積層ゴム支承を対象として、支承の鉛直方向における圧縮・引張り挙動を、小型の拘束ゴム層の載荷実験により詳細に把握し、それを基に精緻な復元カモデルの構築を目的とする.

### 2. 拘束ゴム層の圧縮・引張り挙動の把握

本研究では積層ゴム支承の力学特性を把握するために, 図-1に示すような動的3軸載荷試験装置を用いて拘束ゴ ム層の圧縮・引張り試験を行った.試験片である拘束コ ム層は,図-2のように円柱形の鋼板間にゴム層を接着し たものである.また,ゴムは橋梁免震用のせん断弾性係 数1.2 [N/mm<sup>2</sup>]の天然ゴムである.

本実験では、上記の試験片に様々な振幅での静的な繰 り返し圧縮/引張り変形を与え、その際の応力-ひずみ関 係(応力=荷重/ゴム層の断面積、ひずみ=変位/ゴム厚)を 取得した.得られた引張り時および圧縮時の復元力特性 をそれぞれ図-3、図-4に示す.これらの図をみると、引張 り時には、ひずみがある一定値以下の場合に弾性的挙動 を示しているが、ある一定値を超えると剛性が急激に劣 化し、変形のみが大きく進展していくことがわかる.ま た、圧縮時には、引張り時と比べて、剛性が高く剛性の 劣化はほとんど見られなかった.

#### 3. 復元カモデルの構築

#### (1) モデルの概要

本研究では、上記のゴム層の圧縮・引張り挙動を再現 するための復元カモデルとして、図-5のように弾塑性要 素、ダメージ型弾性要素および非線形弾性要素を並列に 組合せた復元カモデルを提案する.以下では、それぞれ の要素について詳細を示す.

### (2) 弾塑性要素

この弾塑性要素は、引張り変形を受けた際の履歴ループを再現することを目的とし、Graesser<sup>3)</sup>らが提案した形状記憶合金(SMA)の挙動を表すための弾塑性モデルを用いている.具体的には、応力 $\sigma$ 、ひずみ $\varepsilon$ として以下のような微分方程式で表される.

$$\dot{\sigma} = E\left[\dot{\varepsilon} - \left|\dot{\varepsilon}\right| \left| \frac{\sigma - \beta}{\bar{\sigma}} \right|^{N} \operatorname{sgn}(\sigma - \beta) \right]$$
(1)

ただし、βは背応力を表し、次のように表される.

$$\beta = \mu \overline{\sigma} \left| \frac{\varepsilon}{\overline{\varepsilon}} \right|^{C} \tanh\left(a \frac{\varepsilon}{\overline{\varepsilon}}\right) \cdot u(-\varepsilon \dot{\varepsilon}) \tag{2}$$

ここに, $\sigma$ :降伏応力, $\bar{\epsilon}$ :降伏ひずみ,E:ヤング率,  $N \in [1,\infty]$ :弾性から塑性への遷移の滑らかさを制御する 定数であり, $\mu$ ,a,Cは非負の実定数である.また, sgn は符号関数,uはユニットステップ関数を表してい る.

# (2) ダメージ型弾性要素

引張り変形時に現れる剛性の劣化を再現するため、本研究では、過去に生じた最大変形に応じてダメージを受ける劣化型の弾性要素を用いた.この要素での応力 $\sigma_d$ は、次式のように表される.

$$\sigma_{d} = g(\eta) \cdot \left[ \gamma E \varepsilon + \overline{\tau} \left\{ \frac{(|\varepsilon|/\delta)^{q}}{1 + (|\varepsilon|/\delta)^{q}} \right\} \operatorname{sgn}(\varepsilon) \right]$$
(3)

ただし、 $\gamma$ ,  $\overline{\tau}$ ,  $\delta$ , qは正の材料定数である. また,  $g: ダメージ関数, \eta: 過去に経験した最大ひずみであ$ り、次式のように表される.

$$g(\eta) = 1 - (1 - \theta) \frac{(\eta / b)^m}{1 + (\eta / b)^m}$$
(4)

$$\eta = \max_{0 \le s \le t} \left| \mathcal{E}(s) \right| \tag{5}$$

ここに、 $\theta \in [0,1]$ 、b、mは材料定数である.

# (3) 非線形弾性要素

圧縮時の応力-ひずみ関係に見られる曲線的な弾性挙動を再現するため,圧縮時のみ機能する非線形の弾性要素を用いる.具体的には,以下のように表される.

$$\tau = \begin{cases} A\overline{\sigma} \left(\frac{\varepsilon}{\overline{\varepsilon}}\right) + B\overline{\sigma} \left(\frac{\varepsilon}{\overline{\varepsilon}}\right)^2 \operatorname{sgn}(\varepsilon) & \varepsilon \le 0 \\ 0 & \varepsilon \ge 0 \end{cases}$$
(6)

ただし、A, Bは材料定数である.

#### (4) 実験結果との比較

実験で得られた応力-ひずみ関係とモデルによる数値 計算結果とを比較したものを図-6,図-7に示す.これらの 図より圧縮挙動と引張り挙動ともに提案したモデルによ り実験結果を精度よく再現できていることがわかる.

# 4. まとめ

本研究では、積層ゴム支承の鉛直方向における圧縮・ 引張り挙動を精緻に再現できる復元カモデルの構築を目 的とした.実験で得られた応力-ひずみ関係とモデルによ る数値計算結果とを比較したところ、圧縮挙動と引張り 挙動ともに精度よく再現することができた.今後は水平 変形を受けている場合や、積層ゴム支承の寸法・形状が 変化した場合の詳細な実験を行い、それらをパラメータ に反映させた復元カモデルを構築していくつもりである.

キーワード 積層ゴム支承,鉛直方向,圧縮・引張り挙動,復元力モデル

連絡先 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 山梨大学工学部 TEL: 055-220-8521 E-mail: g20tc003@yamanashi.ac.jp







図-7 圧縮変形時の実験での復元力特性とモデルによる 復元力特性の比較



図-2 拘束ゴム層の試験片



図-4 圧縮試験で得られた復元力特性



図-6 引張り変形時の実験での復元力特性とモデルによ

る復元力特性との比較

# 【参考文献】

- 藤田亮一, 貞松昌憲, 高橋良和: 2011年東北地方太平洋沖 1) 地震により被災した既設免震橋の損傷要因分析,土木学会 論文集, Vol.72, No.4(地震工学論文集第35卷), pp378-392, 2016.
- 2) 藤田隆史, 鈴木重信, 藤田聡: 建物免震用の高減衰積層ゴ ムに関する研究(第1報,履歴復元力の基本特性と解析モ デル),日本機会学会論文集 (C編),56 巻 523 号,1990.
- Constantinou, M.C., Mokha, A. and Reinhorn, A.: Teflon 3) bearings in base isolation. II: Modeling, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.2, pp.455-474, 1990
- 五十嵐晃, 党紀, 村越雄太, 伊東俊彦: 免震用積層ゴム支 4) 承の水平 2 方向復元力特性に関する実験および復元力モ デルの比較検討, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp.I-311-325, 2013.
- Graesser, E.J. and Cozzarelli, F.A.: A Multi-dimensional 5) Hysteretic Model for Energy Absorbing Devices, Technical Report NCEER-91-0006, State University of New York at Buffalo, 1991.