

耐震設計用レオロジーモデルとパラメータの同定：RBとLRBの場合

Parameter identification of rheology model for seismic design: Rubber bearing and Lead rubber bearing

埼玉大学  
 埼玉大学  
 埼玉大学  
 ゴム支承協会  
 土木研究所寒地土木研究所

○正員 奥井 義昭 (Yoshiaki Okui)  
 学正員 A. R. Bhuiyan  
 市野 一樹 (Kazuki Ichino)  
 正員 今井 隆 (Takashi Imai)  
 正員 三田村 浩 (Hiroshi Mitamura)

1. はじめに

橋梁の耐震設計の非線形動的解析において、ゴム支承は通常、バイリニアでモデル化されているが、このモデルは、ある特定の振動数および振幅においてゴム支承が正弦波加振された実験データに基づき定められている。したがって、ゴム支承の粘性効果に起因するひずみ速度依存性が考慮されておらず、バイリニアモデルの弾塑性挙動によって減衰性能がモデル化されている。

このような状況を改善すべく、著者らはゴム支承の温度依存性の検討や粘性効果を含めたレオロジーモデルの開発を進めている<sup>1),2)</sup>。別報<sup>2)</sup>では高減衰ゴム支承(HDR)についてレオロジーモデルとそのパラメータ決定方法について紹介している。本報告では同じモデルを用いて天然ゴム系積層ゴム支承(RB)と鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)について、実験結果からモデルパラメータの決定し、レオロジーモデルを用いてシミュレーションを行った結果を報告する。

なお、パラメータの同定のための実験方法および供試体については別報<sup>1,2)</sup>に詳述されているため、本文においてはこれらの説明は省略する。

2. レオロジーモデル

提案するレオロジーモデルを、図1に示す。この図において、A, B, Cはバネ、Sはスライダ、Dはダッシュポットを表す。ゴム支承のせん断応力 $\tau$ は図1(b)に示すように3つの部分の和で表される。すなわち、

$$\tau = \tau_{ep} + \tau_{ee} + \tau_{oe} \tag{1}$$

ここで、せん断応力 $\tau_{ep}$ ,  $\tau_{ee}$ ,  $\tau_{oe}$ はそれぞれバネA, B, Cに作用するせん断応力を表す。

バネA, Bは線形バネ、バネBは非線形バネとなっていて、各バネの部分に作用するせん断応力とせん断ひずみの関係は次式で表される。

$$\tau_{ep} = C_1 \gamma_a \tag{2}$$

$$\tau_{ee} = C_2 \gamma + C_3 \text{sgn}(\gamma) |\gamma|^m \tag{3}$$

$$\tau_{oe} = C_4 \dot{\gamma}_c \tag{4}$$

ここで、 $C_i$ , ( $i = 1, 4$ ),  $m$ は定数であり、 $\text{sgn}()$ は次式で定義される符号関数である。

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0, \\ 0 & x = 0, \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

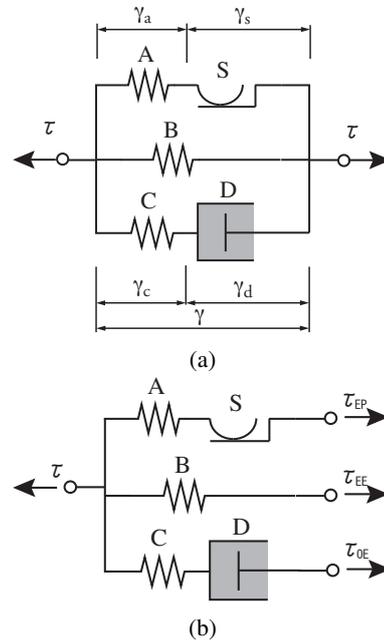


図1 レオロジーモデル

スライダSについては、スライダSに作用するせん断応力 $\tau_{ep}$ が、限界せん断応力 $\tau_{cr}$ になると滑り出し、次式で表される。

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_s = 0 & |\tau_{ep}| < \tau_{cr}, \\ \dot{\gamma}_s \neq 0 & |\tau_{ep}| = \tau_{cr}. \end{cases} \tag{5}$$

ここで、ドットは時間微分 $(\dot{\phantom{x}}) = d(\phantom{x})/dt$ を表す。

最後にダッシュポット部分の構成モデルは、ダッシュポット部分のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_d$ と全せん断ひずみ $\gamma$ の非線形関数で表される。具体的には、ダッシュポット部分が載荷時と除荷時で異なる関数となり、次式で与えられる。

$$\tau_{oe} = \begin{cases} A_l \exp(q|\gamma|) \text{sgn}(\dot{\gamma}_d) |\dot{\gamma}_d / \dot{\gamma}_0|^n & \text{loading} \\ A_u \text{sgn}(\dot{\gamma}_d) |\dot{\gamma}_d / \dot{\gamma}_0|^n & \text{unloading} \end{cases} \tag{6}$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0 = 1.0[s^{-1}]$ は基準ひずみ速度、 $A_l, A_u, q, n$ は定数である。

載荷時と除荷時は次式により定義する。

$$\frac{d}{dt} |\dot{\gamma}_d| > 0 \quad \text{loading} \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt} |\dot{\gamma}_d| < 0 \quad \text{unloading} \tag{8}$$

表 1 シミュレーションに用いたパラメータ

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$\tau_{cr}$	$m$	$A_l$	$A_u$	$q$	$n$
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		MPa	MPa		
RB	1.25	0.80	0.0055	2.54	0.13	7.8	0.07	0.015	0.32	0.14
LRB	2.5	0.70	0.0050	6.42	0.19	7.6	0.40	0.34	0.31	0.12

つまり、ダッシュポット部分のひずみの絶対値が増加していれば載荷状態、減少していれば除荷状態とする。

### 3. リラクゼーション試験による非線形粘性の同定

LRB に関してリラクゼーション試験より得られたオーバーストレス  $\tau_{oe}$  とダッシュポット部分のひずみ速度  $\dot{\gamma}_d$  の関係を図2に示す。同図より、オーバーストレスはひずみ速度のべき乗則で表され、HDR とは異なり全ひずみ  $\gamma$  には依存しないことが分かる。したがって、LRB のモデル化においては式 (6) において  $q=0$  として良いことがわかる。

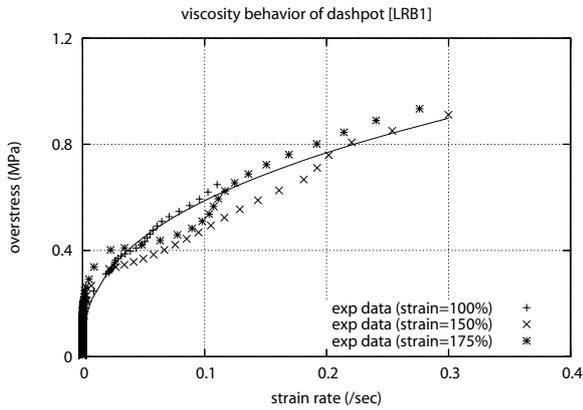
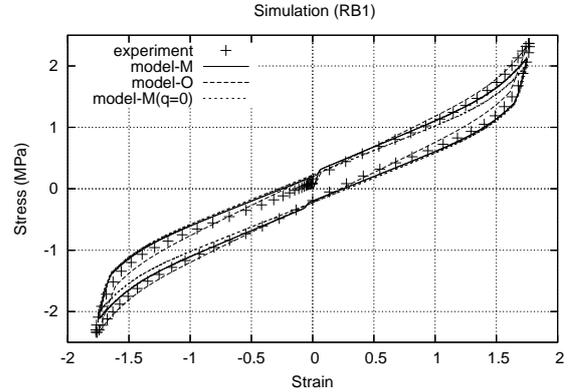


図 2 LRB におけるオーバーストレス  $\tau_{oe}$  と  $\dot{\gamma}_d$  の関係

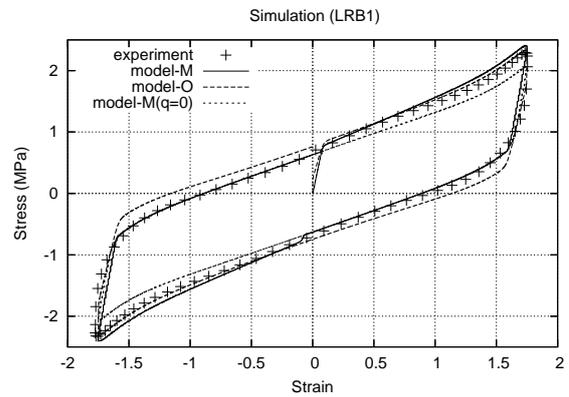
### 4. 正弦波加振実験のシミュレーション

提案するレオロジーモデルを用いて正弦波加振 (振動数 0.5Hz, せん断ひずみの振幅 175%) の場合の実験結果をシミュレーションした結果を図3に示す。実験結果は Mullins 効果を除く目的で、正弦波加振の実験開始から第4サイクル目の応答を用いている。同図において、+は実験結果、model-M は前節のモデルで表1のパラメータを用いたときの結果、model-O はダッシュポットのモデルにおいて載荷時と除荷時の区別を無くして簡略化したモデル、model-M( $q=0$ ) は前節のモデルで  $q=0$  とすることで、減衰のひずみの依存性をなくして簡略化したモデルを表す。

天然ゴム支承 (RB) については、表1の粘性の大きさを表すパラメータ  $A_l, A_u$  共、小さく粘性要素を無くしたモデルでもほぼ、実用上問題ないものと思われる。一方、鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) については、粘性自体は考慮する必要があるが、 $A_l=A_u$  として載荷時と除荷時で減衰を同じとし、かつ  $q=0$  とすることで粘性のひずみ依存性を無視したモデルでほぼ実用上問題ないものと思われる。



(a)



(b)

図 3 正弦波加振のシミュレーション: (a) RB, (b)LRB

### 5. まとめ

天然ゴム支承および鉛プラグ入り積層ゴム支承のレオロジーモデルとそのパラメータについて報告した。今回の報告では昨年度行われた実験データに基づきパラメータを決定したが、一部データの欠損等もあるため、今年度実施中の実験データにに基づいて最終的なレオロジーモデルとそのパラメータを確定する予定である。また、モデル橋梁を用いた地震時応答解析において、提案するレオロジーモデルのパラメータに関する感度解析を実施し、各パラメータの影響度を評価することでモデルの簡略化等を検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 今井隆他: 寒冷地における橋梁用ゴム支承の性能評価実験 (その2), 土木学会北海道支部 H19 年度年次学術講演会講演概要集, 2007.
- 2) Bhuiyan, et al.: Experimental Investigation of Laminated Rubber Bearings and Their Modeling: High Damping Rubber Bearing, 土木学会北海道支部 H19 年度年次学術講演会講演概要集, 2007