705 要素の実測特性に基づく履歴非線形機械振動系の特性解析に関する研究

Vibration Analysis of Mechanical System with Hysteretic Nonlinearity Based on Measured Property of Actual Element

○正 入野 成弘 (中大院) 正 佐藤 壽芳 (中大理工) 正 大隅 久 (中大理工)
正 渡部 和 (日立ビアメカニクス) 熊川 正一 (ブリヂストン)

Naruhiko IRINO, Hisayoshi SATO, Hisashi OHSUMI,
Chuo University, 13-27, Kasuga 1chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8551

Kazushi WATANABE, Hitachi Via Mechanics, Ltd 2100, Kamiimaizumi, Ebina-shi, 243-0488

Shoich KUMAKAWA, BRIDGESTONE CORP., Kashiocho 1, Totsuka-ku, Kanagawa, 244-0812

Suspension devices using rubber in mechanical system show hysteretic nonlinearity, which have been dealt by some model as bilinear, Ramberg-Osgood model and others. In the analyses these models had difficulties to adapt parameters of the models to those measured for the devices. A method is developed which makes it possible to provide equivalent linearized transfer function numerically for the hysteretic nonlinear characteristics evaluated from the actual elements in terms of Preisach model. This makes it possible as well that the frequency response characteristics of the system can be obtained by solving the simultaneous equation in which the transfer functions are substituted into the equation of motion. An approximate modal approach to the nonlinear system can be conducted on the basis of measured characteristics for the devices.

Key Words : Nonlinear Vibration, Hysteretic Nonlinearity, Preisach Model, Equivalent Linearization Method, Multi-Degree-of-Freedom, Approximate Modal Approach.

1 はじめに

履歴非線形復元力を有する機械振動系の解析では、履歴非線形復元力はバイリニア型や、Ramberg-Osgood モデルをはじめとする様々な履歴復元力特性モデルが用いられている。しかし、実際のゴム支持装置の履歴復元力特性をこれらのモデルによって模擬する時、パラメータの設定が難しい場合が生じていた。

本研究ではこれまで、磁気ヒステリシス特性の表示に用いられるプライザッハモデル⁽¹⁾⁽²⁾を用いて、実系要素について実験的に評価される荷重・変位間の履歴非線形特性をもとに数値特性モデルを構成し、運動方程式と連立して振動数応答特性を求める手法を検討してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。本報告では、上記の手法を用い、加硫ゴムの荷重・変位特性に対してこの手法を適用した。これによって要素の実測特性に基づいた振動特性解析を行った。

2 履歴復元力特性モデル

2.1 プライザッハモデルによる履歴復元力特性の表示

プライザッハモデルは、図1(b)の履歴復元力特性を図1(a)のリレー型の特性を集積として表す手法である⁽³⁾⁽⁴⁾。図1(a)の特性は、変位 x が微小に増加する値と微小に減少する値に対する荷重 F の変化量との関係として表される。ここで、増加するときの変位を x_i 、減少するとき変位を x_d として、互いに独立な変数であるとする。この変位の微小な増加減少に対する荷重 F の変化との関係で表される。これを $\eta(x_i, x_d)$ とし、プライザッハ分布関数と呼び

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_d} = \eta(x_i, x_d) \quad (1)$$

と表すことができる。履歴復元力特性を表す変位と荷重の関係は、変位の増加 x_i と変位の減少 x_d が変化する範囲で式(1)を積分することにより表される。実系の要素に対して x , F の関係として履歴復元力特性が得られる時、この微小要素特性となるプライザッハ分布関数の値を求めることによって、実系の履歴復元力要素の数値特性モデルを構成することが可能となる⁽³⁾⁽⁴⁾。

Fig. 1 An element of hysteretic characteristics (a) and a set of elements (b)

2.2 ゴムの履歴復元力特性の数値特性モデル

加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの動的性質試験方法⁽⁵⁾(JIS K 6394:1998)の非共振方法に基づき、ゴム試験片を5Hzで加振し、図2の荷重・変位特性のデータを取得した。このデータの歪をローパスフィルタによって取り除いた。

前報⁽³⁾⁽⁴⁾の手法では、取得する履歴復元力特性のデータの变位振幅は等間隔である必要がある。これに対し、実測の荷重・変位特性において等間隔の変位振幅を取得することは難しい。そこで本報では、変位振幅の異なる

20 個の履歴復元力特性のデータを変位増加時と変位減少時に分け、それぞれ最小値、最大値で履歴曲線を並べこれを平面補間した。図3は変位増加時の履歴曲線を変位の最小値で並べた図である。この平面から、任意の変位振幅の履歴曲線を用いて数値特性モデルを作成した。履歴曲線の平面補間には MATLAB Spline Toolbox の csapi 関数を用いた。

Fig. 2 Hysteretic characteristics of rubber

Fig. 3 Surface constituted by hysteretic curve

Fig. 4 Numerical model based on measured property

3 ゴム要素を持つ3自由度系の周波数応答特性解析

前節におけるゴムの履歴復元力特性から得られた数値特性モデルを剛性要素とする直列3自由度系を構成した。この系にたいして等価線形化法を適用し、周波数応答特性解析を行った。3つの質点の質量はすべて $m = 48.5\text{kg}$ 、質点3に $F = 10(\text{N})$ の加振力が加わる。図5に結果を示す。周波数応答特性は共振峰が減っていることに対して、反共振溝が大きくでている。

Fig. 5 Frequency response of 3 degree of freedom system based on actual property of rubber

4 まとめ

本研究では、機械振動系における履歴復元力要素特性をプライザツハモデルによって表し、実測特性に基づいた振動応答特性解析を可能とした。この結果は、以下のように纏められる。

1. 実測した荷重-変位のデータを平面補間する手法を用いて、履歴復元力特性を数値的に表した。
2. ゴムの実測特性に基づき、振動系の周波数応答特性解析を等価線形化法を用いて行った。

本研究は、新エネルギー・産業総合技術開発機構 (NEDO) による提案公募研究 (97S21-005)、工作機械技術振興財団助成 (平成 8, 9 年度)、科学研究費補助金 (基盤研究 (c)(2))(平成 11 年度) を受けたことを記し、関係各位に深甚の謝意を表する。

参考文献

- (1) Preisach, F., Über die Magnetische Nachwirkung, *Zeitschrift für Physik*, **94**, 5-6, (1935) 277.
- (2) 奥村浩士・木嶋昭, ヒステリシス特性のデジタルシミュレーションとその応用, 電気学会論文誌 B, **103**-B, 7, (1983), 451-458.
- (3) 入野成弘・佐藤壽芳・大隅久・渡部和, 履歴を有する非線形機械系の振動特性解析に関する研究, 日本機械学会, D&D2000, アブストラクト集, No.00-6, (2000), 68.
- (4) 入野成弘・佐藤壽芳・大隅久・渡部和, 履歴特性を有する機械系の振動特性解析に関する研究, 日本機械学会, D&D2001, アブストラクト集, No.01-5, (2001), 130.
- (5) 日本規格協会, JIS ハンドブック 2000 ゴム, **J70-A**, 3, (2000), 882-888.