

衝突系のモデル化とその応用に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16296

氏 名	本 江 哲 行
生 年 月 日	
本 籍	富山県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博甲第357号
学位授与の日付	平成12年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	衝突系のモデル化とその応用に関する研究
論文審査委員(主査)	佐藤 秀紀(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	茶谷 明義(工学部・教授) 神谷 好承(工学部・教授) 岩田 佳雄(研究科・助教授) 喜成 年泰(研究科・助教授)

学 位 論 文 要 旨

Abstract

This paper deals with modeling and it's application of an impact system, which is composed of ball and flat body. An impact model considering both duration of impact and energy loss is proposed. The resultant force due to impact is formulated by introducing a new complex stiffness based on Hertz's contact theory. From the expression for the resultant force, the impact system is modeled by both a nonlinear spring and a nonlinear dashpot. The characteristics of the nonlinear spring is expressed by using Hertz's theory, and that of the nonlinear dashpot is expressed by a function of the displacement and the velocity. The model parameters are determined by the configuration, the material value and the coefficient of restitution in the impact system. Experiment and simulation are carried out to demonstrate the accuracy of the proposed model for two systems.

In the first system, high polymer ball and steel rod with flat ends are used as impact elements. In second system, ball and rod of high polymer are used. The validity of the model is shown from comparison between experiment and simulation. In addition, an impact model in considering of a change of system characteristics during impact is proposed, and, it's validity is examined.

Moreover, this model is applied to ball-impact-damper. In numerical simulation, an analysis considering both rotation and slip of ball is proposed. The validity of the model is shown from comparison between experiment and simulation. Also, damping characteristics in the free vibration of the system is obtained by using this model.

1. はじめに

機械や構造物、スポーツ用品などにおいて、多くの衝突現象が存在する。衝突現象の解析には、精度の良い衝突モデルが必要となる。従来のモデルでは、衝突時間とエネルギー損失を考慮できなかったり、モデルの各パラメータと衝突系の形状や材質の関係が不明確なことから、定量的解析が困難であった。

本論文では、球と平面からなる衝突系に対し、衝突系の運動の定量的解析が可能なモデルの導出を目的とする。そのため、以下の基本モデルを提案する。すなわち、衝突系の形状や材料

特性を考慮できるHertzの接触理論を基に、衝突の本質的特性であるヒステレシス特性を満足する新しい減衰数式モデルを導く。これを基に、種々の材料を用いた実験と数値シミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証するとともに、衝突特性を明らかにする。さらに、提案した衝突モデルの応用として、ボールインパクトダンパの自由振動減衰特性を解析し、実験との比較を行う。これによって、ダンパを付加した振動系の減衰特性と系パラメータの関係を明らかにし、ダンパ設計の資料を提供する。

2. 衝突系のモデル化

衝突系としては、図1に示すように、質量 m の丸棒が高さ h から半球に自由落下し、衝突した場合を考える。衝突時に丸棒に働く力は、衝突による接触力と重力を考えると、衝突時の丸棒の運動方程式は

$$m \ddot{x} = P + m g \quad (1)$$

となる。ここで、 P は衝突力の総和、 g は重力加速度、 x は、丸棒と球の法線方向の変位量とする。

衝突時に平面(丸棒)と半球に働く衝突力は、図2に示すように、Hertzの接触理論による非線形ばねと非線形ダッシュポットでモデル化する。衝突力を複素ばね係数 K^* と損失係数 γ を用いて次のように表す。

$$\begin{aligned} P &= -K^* x^{3/2} = -K(1 + j\gamma) x^{3/2} \\ &= -K x^{3/2} - j\omega x \frac{\gamma}{\omega} K |x|^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 j は虚数単位である。半波正弦波の運動を仮定し、減衰に関する係数として $\alpha = \gamma K / \omega$ を用いると、衝突力は次式で表される。

$$P = -K x^{3/2} - \alpha |x|^{1/2} \dot{x} \quad (3)$$

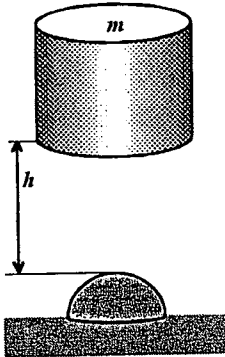


Fig.1 Free drop motion

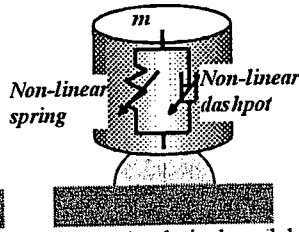


Fig.2 Analytical model

係数 α は、エネルギーの関係から次式となる。

$$\alpha = 0.834 K \frac{(1-e^2)}{(1+e^2)} \sqrt{\frac{4K}{5m} \left(\frac{5m}{8K} v_0^2 (1+e^2) \right)^{1/5}} \quad (4)$$

ここに e は反発係数、 v_0 は衝突速度を示す。

3. 金属平面と高分子球からなる衝突系

提案した衝突モデルの妥当性を検討するために、数値シミュレーションと実験の比較を行った。実験と数値シミュレーションは、ナイロン半球とスチール丸棒、ジュラルミン丸棒の各落下高さにおける衝突について行った。数値計算に用いる反発係数 e は実験値を用い、非線形ば

ね係数 K はカタログ値から計算したばね係数 K を用いた。スチール丸棒の落下高さ $h=20\text{mm}$ における実験結果と数値計算結果の履歴特性の比較を図3に示す。履歴特性において数値計算と実験値は、ほぼ一致している。また、ジュラルミン丸棒の場合においてもよい一致を示した。このことにより、提案した衝突モデルは定量的解析が可能であり、妥当なモデルであるといえる。

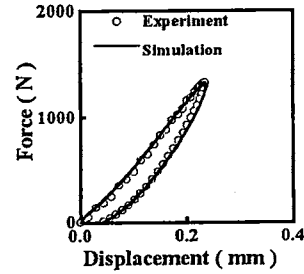


Fig.3 Comparison between experiment and simulation (Steel rod:h=20mm)

4. 高分子材料衝突系

提案した衝突モデルを高分子材料からなる衝突系に適用した。系の挙動は、実験的および解析的に明らかにし、モデルの適用の妥当性の検討を行った。衝突の実験と数値計算は、ABS半球とABS、PC、PEの3種類の高分子丸棒について行った。落下高さ $h=150\text{mm}$ における実験結果と数値計算結果の比較を、それぞれ図4、5に示す。ABS(図4(a))、PC(図4(b))両丸棒については、履歴特性において計算値と実験値は、ほぼ一致している。衝突速度、反発係数が変化しても一致しており、モデルの妥当性を示しているといえる。PE丸棒(図5)の場合、履歴特性において、衝突速度が増し、最大衝突力が大きくなると実験値は、途中から特性が変化するような折点(例えば、図で約500Nの箇所)が表れ、解析結果と異なる。ABS、PC丸棒についても、衝突速度を大きくすると同様な特性変化が生じた。このことより、本モデルは、衝突特性が途中で変化しない領域では、衝突速度、反発係数が変化しても適用できるといえる。しかし、衝突特性が変化する領域では、特性変化を考慮した衝突モデルが必要である。そこで、衝突特性が途中で変化する場合の数式モデル化を試

みた。衝突特性を区間Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに分けて考える。区間Ⅰは、衝突開始から折点までの区間。区間Ⅱは、折点から最大変位までの区間で、区間Ⅲは、最大変位以降の区間とする。数値計算と実験の比較を図6に、PE丸棒の結果を示す。図より、折点付近の衝突特性および衝突時間は、ほぼ一致しており、特性が変化した衝突系の全体の特性を良く表現している。

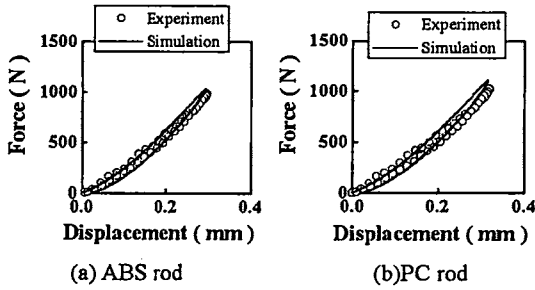


Fig.4 Hysteresis characteristics (h=150mm)

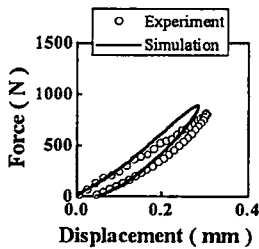


Fig.5 Hysteresis characteristics (PE rod:h=150mm)

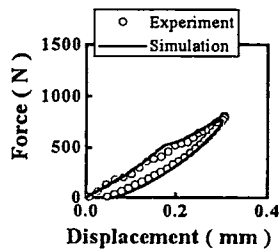


Fig.6 Hysteresis characteristics (PE rod:h=150mm)

5. ボールインパクトダンパの解析

提案した衝突モデルの応用として、ボールインパクトダンパを取り上げる。図7に示すように、質量 M の本体と2枚の板ばねからなる主振

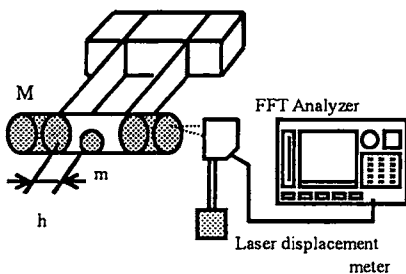


Fig. 7 Experimental apparatus

動系と可動質量 m のボールおよび、すきま $2h$ から構成されるインパクトダンパについて数値解析を行う。主振動系に作用する力は、ボールからの力と主振動系の復元力と減衰力と加振力を考える。また、ボールに作用する力としては、衝突による接触力と主振動系からの慣性力と重力を考え、さらに、回転運動も考える。衝突の際にボールと壁面に働く接触力は、壁面に対して法線方向と接線方向を考える。衝突系は、図8に示すように非線形ばね、非線形ダッシュポットに、接線方向にはスライダを加えモデル化する。法線方向に働く接触力は、Hertzの接触理論による弾性復元力と減衰力で

$$F_n = (-K_n \delta_n^{3/2} - \alpha_n |\delta_n|^{1/2} v_n) \quad (5)$$

と表され、 K_n は非線形ばねの係数、 α_n は減衰の係数、 δ_n はボールと壁面の変形量、 v_n は速度を表す。接線方向の接触力は滑りがない場合、弾性力のみとし、Mindlinの接触理論より

$$F_t = -K_t \delta_t \quad (6)$$

$$K_t = \frac{8\sqrt{R}G}{2-\sigma} |\delta_n|^{1/2} \quad (7)$$

図9に、ボールインパクトダンパを付加した主振動系の時刻歴応答の実験結果と数値計算結果を示す。また、数値計算は、ボールの回転と滑りを考慮しない場合についても行った。図から、滑りと回転を考慮した数値計算結果と実験

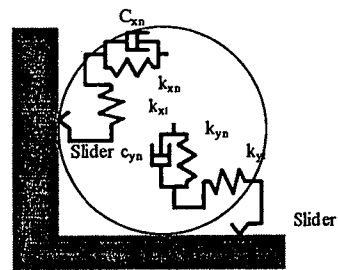


Fig. 8 Analytical model

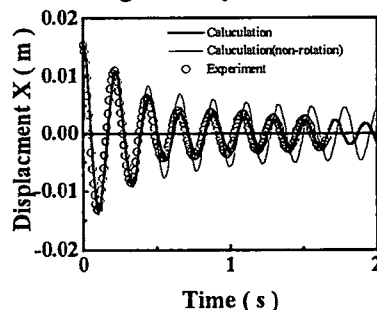


Fig. 9 Response of the system with ball-impact damper(R=0.015m,X0=0.014m)

結果は、ほぼ一致しており、提案した衝突モデルと本解析手法は妥当であり、滑りと回転を考慮する必要がある。

ボールインパクトダンパによる1自由度系の自由振動の減衰評価(制振効果)は、系の減衰の特性が粘性減衰系と異なることから、過去の研究で提案された減衰勾配 C と残留振幅 b で行った。図10に減衰特性と無次元量 J との関係を示す。無次元量 J はすきま h と初期変位 X_0 の比(h/X_0)とする。図より、減衰勾配に対

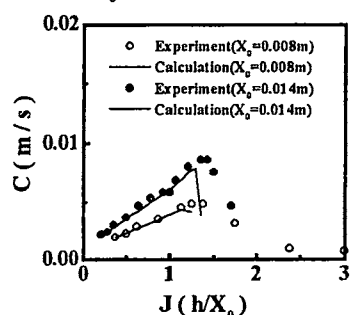


Fig. 10 Effect of the initial displacement X_0 on the damping parameter

して、初期変位が変化しても、無次元量 J の最適値は一定であることがわかる。このことは、ある初期変位による最適すきまが求まれば、初期変位を変化させた場合の最適すきまを計算できることを意味する。

6. おわりに

本研究を要約すると以下の通りである。

球と平面からなる衝突系の定量的解析を目的として、Hertzの接触理論を拡張した新しい衝突モデルを提案し、実験と数値解析により、その妥当性を確認した。提案した衝突モデルの係数は衝突材料の物性値と形状、および反発係数などの実験条件より求めることが可能であり、従来のモデルより応用性が高いといえる。提案したモデルを基本として、衝突特性が衝突の途中で変化する場合についてもモデルを提案した。さらに、インパクトダンパの運動解析にこのモデルを応用し、実験と併せてその減衰特性を明らかにした。

学位論文審査結果の要旨

平成12年1月25日に第1回の学位論文審査委員会、平成12年2月4日に口頭発表会ならびに第2回学位論文審査委員会を開催し、以下の通り判定した。

本研究は、最近、振動・騒音及びスポーツ工学の分野で重視されている衝突問題について、衝突時間およびエネルギー損失を伴う衝突系のモデルが従来適切なものが得られていないのに鑑み、新たな一般性のあるモデル化の手法を提案し、実験と数値シミュレーション解析により、その妥当性を検証するとともに、その応用を試みたものである。提案している基本モデルは、Hertzの接触理論による非線形剛性項と、それを基に非線形複素剛性の考え方から、衝突特性を満足するよう反発係数を利用して導いた非線形減衰項からなる。金属と高分子材、および高分子材同士から作られた衝突系の実験を行って、衝突特性を明らかにするとともに、提案したモデルによる数値シミュレーション解析を行い、モデルの妥当性を確認している。さらに、このモデルをインパクトダンパの振動解析に応用し、実験と比較してモデルの妥当性を検証するとともに、インパクトダンパの特性を明らかにして設計資料を提供している。

以上、本研究の成果は今後の衝突問題の解析に大きな寄与をなすものであり、工学上きわめて有用な知見を得たものと認められる。よって、本論文は博士(工学)の学位を受けるに値するものと判定する。