

論文の内容の要旨

論文題目 梁離散化モデルを用いた紙葉類の変形挙動解析に関する研究

氏名 吉田和司

現在、各種のプリンタや複写機などの OA 機器、あるいは自動現金取引装置や各種発券機などの自動化機器は日常生活に必要不可欠なものとなっている。これらの装置ではいずれも紙葉類を取扱っているが、紙葉類はその材質・剛性・雰囲気条件等で挙動が大きく異なるため、開発担当者は装置の信頼性向上に苦勞している。一方、これらの装置では、更なる高信頼化はもちろん、低コスト化や開発期間の短縮が重要な課題となっており、従来の実験的手法による技術開発に加え力学に基づいた普遍的な解析的手法による技術開発が必要となっている。

本研究は、特に紙葉類を対象とした簡易的な解析モデルと変形解析手法を考案し、これを紙葉類取扱い装置の設計開発手法の一つとして適用することを目的としたものである。具体的には、(1)紙葉類取扱い装置における搬送路を構成するガイドの形状適正化を目的とした紙葉類搬送路の設計開発手法、(2)集積される紙葉類同士の衝突によって発生するジャムを防止する紙葉類集積機構の設計開発手法、の2つの手法について検討したものである。

○紙葉類搬送路の設計開発手法に関する研究内容

紙葉類を取扱う装置における紙葉類の搬送路では、紙葉類が搬送される際に発生する滞留やジャムを防ぐために搬送路を構成するガイドの形状を適正化する必要がある。このガイド形状の適正化を行う「紙葉類搬送路の設計開発手法」を確立するため、最

初に、紙葉類の静的な変形解析手法の構築について検討した。

実用的な紙葉類の変形解析を行うためには、紙葉類の特徴である折れぐせやカール（湾曲）といった初期状態での変形を考慮する必要がある。このため、まず初期たわみを有する梁の検討を行い、変形前は梁の軸に直交する断面は、変形後は必ずしも直交しないという仮定に基づいて、引張り、せん断、曲げの釣り合い式を導出した。釣り合い式は、仮想仕事の原理とポテンシャルエネルギー極小の原理から導出し、これら二つの原理から導出される釣り合い方程式と境界条件が一致することを確認した。

次に、棒要素と、軸方向の剛性を表す引張ばね、曲げ剛性を表す回転ばね、およびせん断剛性を表す軸と直交方向の引張ばねの三種類のばねから構成される梁離散化モデルを導出し、先に導出されたポテンシャルエネルギーと釣り合い式を基に、梁離散化モデルにおけるポテンシャルエネルギーと釣り合い式を導出した。また、紙葉類の端部の角度や変位が拘束されたり、紙葉類の変形がガイド等に接触して制限される場合について、ガイド形状を表す関数やラグランジェの未定定数を追加したポテンシャルエネルギーを用いて静的変形解析手法の定式化を行った。この解析手法の特長点は、紙葉類とガイドとの接触力や位置の拘束により発生する拘束力を解析的に求めることができる点である。

さらに、上述の静的変形解析手法の妥当性について検討した。まず、梁離散化モデルと静的変形解析手法による計算結果とエラスチカ理論による計算結果を比較した。その結果、提案した静的変形解析手法による計算結果は、エラスチカの理論による計算結果とよく一致し、エラスチカのような大変形解析にも適用可能であることがわかった。また、紙葉類の端部を拘束した場合の拘束力や、紙葉類とガイドとが接触した場合の接触力についても実験を行い計算結果と比較検討した。その結果、拘束力や接触力も計算結果と実験結果とはよく一致し、提案した静的変形解析手法で紙葉類の変形形状や拘束力、接触力の計算を行うことが可能であることがわかった。なお、モデル化の際には、紙葉類の種類によってせん断変形を考慮する必要があることがわかった。すなわち、紙葉類の端部が拘束された座屈のような変形の場合、プラスチックフィルムでは端部に作用する拘束力の実験値は紙葉類の長さの2乗に反比例して増加するのに対し、いわゆる紙では単純に長さの2乗に反比例しない。計算結果と実験結果は、紙のせん断変形を考慮し、かつ、紙の横弾性係数の値を非常に小さくした場合によく一致することがわかった。

以上の結果から、紙葉類が搬送中に受ける摩擦抵抗力は、計算で求められる接触力の値に紙葉類とガイド間の摩擦係数を掛け合わせることで事前に推定することが可能となった。

上述の静的解析手法を利用して、搬送される紙葉類の滞留やジャムの推定方法を考

案した。これは、ある長さ L の紙葉類の条件において、上述の方法によって算出した摩擦による搬送抵抗力と、長さ L の条件で求められた紙葉類の先端部の接触点を先端部の拘束位置として、それよりわずかに紙葉類の長さが長い $L + \Delta L$ の紙葉類の変形解析を行って得られる紙葉類先端部の拘束力から算出される先端部が進行しようとする力の大小を比較することで滞留やジャムを推定する方法である。

この滞留やジャムの推定方法を、ロール紙を取扱うプリンタの搬送路におけるガイド形状の適正化検討に適用した。これは、ロール紙繰出し部近傍の搬送路における上下のガイド間の空間が広い場合と狭い場合の二つの条件下で、上述した推定方法を用いて先端部にカールがあるロール紙の滞留を検討し、望ましいガイドの形状を定めた事例である。この事例では、上下ガイド間の空間が広いガイド形状の場合にはロール紙先端部が滞留するが、上下ガイド間の空間が狭いガイド形状場合には滞留が見られなかった。したがって、ガイド形状としては上下ガイド間が狭い方が良いことがわかった。

このように、ここで提案した静的変形解析手法や紙葉類の滞留・ジャム推定方法によって、紙葉類搬送路を構成するガイド形状の適正化を図ることが可能となった。

○紙葉類集積機構の設計開発手法に関する研究内容

現金自動取引装置や郵便区分機のように、高速で紙葉類が集積される集積機構では、集積される紙葉類同士の衝突によってジャムが発生する可能性がある。これを防止するためには、集積される紙葉類の後端部の変形挙動（落下挙動）を把握し、先行する紙葉類の後端部が後続の紙葉類の先端部と衝突しない集積時間間隔を設ける必要がある。

この「紙葉類集積部の設計開発手法」を確立するために、先の梁離散化モデルと同様な導出方法で、離散化された梁とその運動エネルギーと歪エネルギーにより表されるラグランジュ関数とハミルトンの原理を用いて梁離散化モデルの運動方程式を導出した。さらにこの梁離散化モデルを基にした集中質量と曲げ剛性を表す回転ばねから構成される紙葉類の梁離散化モデルを用い、この梁離散化モデルに関するポテンシャルエネルギーと運動エネルギーで表されるラグランジュ関数から、ハミルトンの原理を用いて運動方程式と拘束条件を導き、紙葉類の動的な変形挙動解析を行う計算手法を構築した。そして、この紙葉類の動的変形解析手法によって得られる動的な変形挙動の計算結果と実験結果を比較することにより、本手法の妥当性を検討した。

妥当性検討は、紙葉類が滑らかな面に集積される場合の変形挙動の計算結果と実験結果を比較することで行った。その結果、集積される紙葉類の変形形状、およびこの時の紙葉類先端部の水平方向位置、紙葉類後端部水平方向位置、垂直方向位置の計算結果と実験結果はよく一致することがわかった。ただし、先端部の垂直方向位置は、空気による揚力の影響を考慮していないため幾分誤差がある。しかし、後端部の挙動

の計算結果と実験結果がよく一致することから、本解析手法を用いることで集積される紙葉類の後端部の挙動を予測することが可能となり、紙葉類同士の衝突によって発生するジャムを防ぐために必要な集積時間間隔の設計を行うことが可能となった。

具体的には本解析を用いた考察から、紙葉類の後端部は先端部から発生する変形が進行して後端部へ到達した後から落下し始めるといった知見が得られた。またこの時の後端部の持ち上げ量の大小は紙葉類の後端部の落下挙動の速度には大きく影響しない知見を得た。そしてこの知見を郵便区分機の集積機構の設計へ適用し、郵便物同士の衝突によるジャムが発生しない集積機構を実現した。