

有限要素法による弾性接触解析の一手法とその応用

学位論文内容の要旨

機械構造物においては、2 個あるいはそれ以上の弾性体間で接触し力を及ぼしあって構造をなしている部分が数多く存在する。このような接触部分では摩擦のあるすべりを伴いながら接触をしている部分も少なくない。したがって、接触をして力を受け渡している以上、これらの応力分布を明らかにしておくことは機械構造物を設計する上では有用なことである。このため摩擦接触問題を含んだ不連続体の挙動を解明することは、古くから固体力学における重要な問題の一つとして認識され、有限要素法による弾性接触解析に関しては従来より多くの研究が行われている。特に、コンピュータの発達によって数値計算力学の分野においてさまざまな手法の研究が多くの研究者によって積極的に続けられている。

接触問題に有限要素法を適用し解析する手法としては、接触物体間の接触表面に接触条件によって定まる要素特性を有する体積のない仮想的な接触要素を導入し、接触領域に幾何学的な拘束条件と力のつりあい条件を付加する手法が一般的である。この幾何学的な拘束条件を全体剛性方程式に導入するために、Lagrange 未定乗数法や penalty 法が用いられている。通常、有限要素法解析では、被接触面要素への接触点の射影によって接触面間の幾何学的関係を定義しているが、接触面の法線方向変位とすべり変位は連成しておらず、接触面での食い込みが生じる可能性がある。本論文ではその原因となる変位のずれを極力抑えることを目的として、接触面と同一面上にある無限遠方の仮想点を想定し、その点を基準にすることにより、接触面における法線方向変位とすべり変位を連成させる幾何学的関係を定める接触解析の新たな手法を提案する。

一方、弾性体同士が接触し、すべる時には接触面で摩擦力が作用するが、弾性体間の相対的なすべり速度が一定のときに二つの弾性体の一方あるいは両方に超音波振動を加えることにより、摩擦抵抗が約 80% 低減することが知られている。超音波振動による摩擦低減現象は、金属の塑性加工を行う際に、超音波領域の周期的振動を加えることによって、超音波振動の持つ性質を塑性加工に利用しようとするものであり、この現象は超音波振動の効果の一つである。塑性加工における超音波振動のその他の効果としては、超音波振動応力の重畳による Blaha 効果と言われる塑性変形能の向上、高速繰り返し衝撃荷重を加えることによる平均加工力の向上が挙げられる。これらの効果については従来よりさまざまな研究が行われているが、摩擦面の温度に関わる接触界面におけるすべり損失に関する議論はあまりなされていないようである。

以上のような背景から、本研究では、具体例として二平板による弾性円柱の圧縮と弾性角柱の圧縮、ならびに弾性平板の圧縮速度を変えることによる動的圧縮解析を行い、Hertz の接触論とスタンブ圧縮の解ならびに汎用有限要素プログラム ANSYS(北海道大学情報基盤センター)による解析結果との比較において、応力分布や変位ならびに圧縮力の本手法と他の解の差異を示し、本手法の妥当性を検討する。また、本手法の応用例として、超音波加振による摩擦低減現象の有限要素解析を行い、すべり速度と等価動摩擦係数との関係や応力ならびにすべり損失と理論解との比較から、理論解との差異を示すとともに超音波振動を加えたすべり現象の挙動を明らかにする。

本論文は以下のように全 6 章により構成されている。

第 1 章では、本論文の総括的な序論として、研究の背景について概説するとともに、解析手法なら

びにその応用例に関する本研究の意義を明確にした。

第2章では、微小変形理論における平衡方程式やひずみの説明と本研究で用いた有限要素法の説明を明記した。なお、本研究では動的応答解析を行う際の時間差分法として Newmark- β 法で定式化した。

第3章は、接触問題に有限要素法を適用し解析する手法としてのその解法の説明であり、有限要素法への適用の説明を併記し、接触に関わる幾何学的条件と力学的条件の導出の説明を明記した。

第4章では、本手法の妥当性を検討するため、二平板による静的および動的圧縮解析結果を示した。応力分布や変位ならびに圧縮力の他の解法や理論解との比較から妥当性を示した。なお、比較を行う際の解法は penalty 法を用いた。

第5章では、本手法の応用例として、超音波加振による摩擦低減現象の有限要素解析結果を示し、すべり速度と等価動摩擦係数との関係や応力、ひずみエネルギーならびにすべり損失により発生する熱量から接触面での挙動を調べ、摩擦低減現象におけるすべり損失の定量的な評価を行った。具体例として、弾性角柱を弾性板に押し付け圧縮し、一定速度ですべらせ、弾性板を超音波振動させた。また、すべり損失の定量的な評価を行うために熱量の理論解の導出を示した。

第6章では、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の展望や課題についてまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐々木 一 彰

副 査 教 授 小 林 幸 徳

副 査 教 授 成 田 吉 弘

副 査 助 教 授 加 藤 博 之

学 位 論 文 題 名

有限要素法による弾性接触解析の一手法とその応用

構造物が一体成型構造ではなく組合せ構造である限り、多かれ少なかれ部材間に接触が生じ、摩擦・磨耗損傷や漏洩などの原因となる。そのため、弾性接触解析が非常に重要であり、現在までに多くの研究が行われている。特に、近年の計算機の発達に伴う高速化や大容量化によって、パソコンレベルでの数値構造解析も十分可能となり、有限要素法や境界要素法により多くの問題が解かれている。

弾性接触問題を数値的に解析しようとするとき、材料定数や構成式の選択により多くの自由度を持つ有限要素法によることが多い。計算にあたっては、複数の解析領域の間に存在する力学的条件と幾何学的条件を同時に満たすように解析が行われる。この条件を満足させるため、有限要素法では、2物体の接触問題を2つの異なる物体として扱う場合と1つの物体として扱う場合の2通りの手法がある。2つの異なる物体として扱う手法は、接触する両者の面に、互いに力学的条件を満たす、接触力に相当する荷重を与え、両者の変位の接触条件を満足させる手法である。力学的条件と幾何学的条件とを直接同時に満足させるため、高い精度での解析が可能であるが、長時間の収束計算を必要とするため、計算効率の面から現在あまり用いられていない。

1つの物体として扱う手法はさらに2種類に大別される。接触面に接合要素を導入する手法および特殊な接触要素を導入する手法の2種類である。前者はギャップ要素あるいはジョイント要素と呼ばれる特殊な接合要素を導入する手法、後者は、接触条件によって定まる要素特性を有するバネ要素などの接触要素を用い、幾何学的な拘束条件と力学条件を付加する手法である。両者ともに一長一短があり、現在は後者の代表的な手法である penalty 法や Lagrange 未定乗数法が用いられることが多いが、いずれも特殊な接合要素やバネ要素の特性をどのように与えるかによって解の精度が大きく左右され、場合によっては、物体間での食い込みを生じることもある。

本論文では、従来の概念とは異なり、節点間の距離に比べ十分遠方に接触点と異なる仮想の点を想定し、接触面での変位の接触条件と力学条件を同時に満たすように剛性方程式を組み替えることにより解析を行う新たな一手法を提案している。本手法は、(1) 接触面での特殊な要素を必要としないため食い込みの少ない精度の良い接触解析が可能、(2) 剛性方程式を直接組み替えて解析を行うため収束計算が不要、(3) すべりを伴う接触面変位成分の連成が可能、という長所を有する。提案した手法の妥当性を検証するため、平板による円柱・角柱の圧縮解析を行い、Hertz の理論解や penalty 法による結果と比較することにより、本手法の妥当性・有意性と弾性接触を伴う静的および動的な圧縮に対する適用性を明らかにしている。さらに、摩擦を伴う接触の場合、物体に超音波加振することにより摩擦力の低減することが良く知られているが、本手法の応用例として、さほど解析の行われていない摩擦低減現象を取り上げている。この中で、すべり速度と等価動摩擦係数との関係や、応力、ひずみエネルギー密度およびすべり損失により発生する熱量を求めて接触面での挙動を検討し、超音波

加振による摩擦低減現象の定性的・定量的な評価を行うなど、新たな知見を得ている。

本論文は以下のように全6章で構成されている。

第1章は緒言であり、研究の背景について概説するとともに、解析手法ならびにその応用例に関する本研究の意義を明らかにしている。

第2章では、微小変形理論における平衡方程式やひずみの説明と本研究で用いた有限要素法の基礎理論について述べている。また、動的応答解析を行う際の時間差分法として用いる Newmark- β 法について簡単に説明している。

第3章では、有限要素法を用いた接触問題解析の新たな手法について詳しく述べており、接触に関わる幾何学的条件および力学条件について述べ、剛性方程式の組み換えについて説明している。

第4章では、二平板による円柱および角柱の静的・動的圧縮解析を行っている。得られた結果を Hertz の接触理論および penalty 法による結果と比較して本手法の妥当性について述べている。

第5章では、超音波加振による摩擦低減現象の解析を行っている。すべり速度と等価動摩擦係数との関係や、応力、ひずみエネルギーおよびすべり損失により発生する熱量を求めて接触面での挙動を検討し、定量的な評価を行い、本手法の応用について述べている。

第6章は結言であり、本研究で得られた結果を要約し、今後の展望や課題についてまとめている。

これを要するに、著者は、有限要素法による弾性接触解析における新たな一手法を提案し、その妥当性と適用性を検証し、新たな知見を得るなど、機械工学および材料力学、特に有限要素法による弾性接触解析の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。