

研究主論文抄録

論文題目 高速衝突現象の数値解析における高精度・高効率化手法の開発に関する研究
(Study on the Development of Numerical Algorithms to Improve the Accuracy and the Effectiveness of a Hydrocode Applied to High Velocity Impact Phenomena)

論文提出者 伊東 雅晴
(by Masaharu Itoh)

主論文要旨

《本文》

物体の衝撃的な変形や破壊の現象の数値シミュレーションに用いられるコンピュータ・プログラムは衝撃解析コードとよばれ、1950年代後半に米国の国立研究所で開発されて以来、半世紀以上にわたり改良が加えられてきた。1970年代前半までに開発されたコードが有限差分法による離散化手法を用いていたのに対し、後半からは有限要素法の適用が始まった。そして80年代に入るとコンピュータの数値演算処理能力の飛躍的な向上にともない、空間次元が二次元から三次元へ拡張された。また実際の現象により近い数値モデルの構築のために、ひずみ速度依存性や温度依存性が考慮できる構成則が開発された。現在では、自動車衝突、原子力分野の仮想事故、社会基盤建屋の防弾設計など様々な分野の工学的問題に適用されている。

このように発展してきた衝撃解析コードであるが、その中で用いられている数値解析手法には、計算精度や計算効率の観点からさらに改良すべき点があると筆者は考える。そこで4つの主要な項目を選択し、それらについて研究を行った。

1) 熱連成つりあい方程式の解法

予測子・修正子法に基づく PEC (Predictor-Evaluation-Corrector) 法とよばれる既往の計算手法を改良して、修正 PEC 法を定式化した。従来の衝撃解析コードは並進運動量保存式を熱連成つりあい式から除外しているが、修正 PEC 法を用いることで並進運動量保存式・エネルギー保存式・構成式の連立方程式の解を近似的に求めることが可能となった。また、エネルギー保存式の偏差応力に前計算ステップではなく、現計算ステップの近似値を使えるようになったことで温度計算の精度が上がり、金属の熱軟化の現象を精度良く解析することが可能となった。

2) 接触点の高速大域検索法

接触点の大域検索法の一つである従来のグリッド法には欠点が2つある。それはオーバーフローおよびアンダーフローとよばれるものである。本研究では、グリッド法に基づく大域検索法を新たに考案し、この2つの問題を解決した。低速衝突と超高速衝突の2つの例題を解析し、既往の研究との比較により、改良の効果を検証した。

3) 三次元接触力

三次元接触力に関する2つの計算手法を考案した。仮想節点法と近似リーマン・スライドライン法である。

仮想節点法は一般的に用いられることが多いペナルティ法とは異なり、不確定なペナルティ係数を必要としないという長所をもつ。また、反復計算を必要としない局所検索法と組み合わせて用いることにより効率的に接触問題を解析することが可能である。この仮想節点法は、汎用衝撃解析コード ANSYS®AUTODYN®に採用されている。

近似リーマン・スライドライン法とよぶ接触力の計算手法を新たに開発した。既往の接触力計算法の多くが計算時間を考慮して点・面接触により接触力を評価しているのに対し、近似リーマン・スライドライン法は計算精度を考慮して面・面接触に基づいている。数値解析例により、近似リーマン・スライドライン法を用いた場合は、接触面で数値不安定が発生しないことを示した。

4) 空間離散化の計算手法

非構造中点連結多面体 (AMP) セルとよぶ四面体メッシュをベースとした計算要素を新たに開発した。この計算要素は、従来の四面体一次要素の短所であるロッキングの発生を効果的に抑制できるという特長をもつ。金属の衝突試験に関する六面体要素と AMP セルの解析結果を比較して、最終変形形状だけでなく試験体内部の相当塑性ひずみの分布状況についても両者が良く一致することを示した。

従来、計算メッシュは計算精度の観点から六面体要素を用いることが望ましいとされてきたが、AMP セルには六面体要素に代わりうる将来性がある。六面体要素だけで複雑な3次元形状の物体をメッシュ分割することは、汎用の要素分割ソフトウェアでも困難な課題であるが、一方四面体メッシュの使用を許せば、デローニ法などによる自動要素分割手法が適用できて、メッシュ作成に要する作業量を大幅に軽減することが可能となるので有用である。

新規に開発した上記の計算手法はすべて3次元衝撃解析コード MANJUSRI-3D に導入し、それぞれの機能を確認した。MANJUSRI-3D は本研究のために開発したコンピュータ・プログラムである。