

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中住 昭吾

現在の構造解析分野における課題には大きく2つの側面がある。一つは解析の大規模化の問題である。実務の設計でよく行われているのがズーム解析と呼ばれる方法であるが、これは、グローバルモデル・ローカルモデルの境界を一致させなくてはならないことや、あるいはグローバルモデルとローカルモデルの連成効果が存在しない方法であるため解析精度の信頼性が低いということが以前より指摘されている。もう一つの側面は、解析モデルの作成に非常に労力を費やしているということである。複数のモジュール化されたメッシュを組み合わせることが可能になればメッシュ生成に要するコストは大きく低減されるであろう。

このような問題に対する解決策として、重合メッシュ法と呼ばれる手法が最近注目を浴びている。これは複数のメッシュ直接を重ね合わせて同時に解析するという手法であるが、両モデルのメッシュの整合性を考慮する必要がないという点に最大の特徴があるといえる。さらにズーム法のような境界条件のあいまいさがなく、グローバルモデルとローカルモデルの相互の影響が定式化の中に反映されているため、精度の面においても優れた手法である。

本論文は、現在の有限要素解析におけるメッシュ生成問題の解決策として、この重合メッシュ法の応用・拡張に関する研究を行ったものである。そして具体的以下の点について研究を行った。

まず、第3章では、グローバルモデルとローカルモデルの形状が異なる場合の重合メッシュ法について議論した。これは従来ローカルメッシュの変位に課していた「グローバルメッシュとの境界上での変位連続性の条件」をなくすことにより、その位置に不連続面（自由表面）が形成されることに基づいている。そしてそれを利用してグローバルモデルの一部の領域を解析対象から削除できることを指摘し、その適用例として円孔モデルを取り挙げている。ローカルモデルの変位に与えた境界条件の変化が、その境界上での連成効果により、グローバルモデルの変位の境界条件にも影響を及ぼし、その結果、その境界に自由表面が形成されることを、実際に場の支配方程式を導くことで理論的に証明した。そしてその結果、実際に穴が存在するモデルを解析した結果と等価なモデルになることを定性的にも数値的にも示した。

第4章では、グローバルモデルとローカルモデルの材料定数を異なる値にした場合に得ら

れる解が満足する支配方程式に対する考察を行った。その結果、グローバルモデルの材料定数は無意味になり、ローカルモデルの材料定数のみが、その部分の材料定数をあらわすような物理的挙動が示されること、すなわち、剛性が異なる領域内ではローカルモデルの変位から作られるひずみ・応力のみがその領域の物理的なひずみ・応力となることを数学的に示した。そしてこの理論を活用して、異種材料のモデリングを簡単に行うことができることを提案した。また、これを応用して、グローバルモデルは線形モデルままで、ローカルモデルのみを弾塑性解析する方法を提案し、モデル全体を弾塑性解析したモデルと同等の解が得られることを数値的に示した。

第5章では Mindlin-Reissner 板曲げ理論に基づく要素同士を重合メッシュ解析したときに発生するせん断ロッキング現象について議論した。Mindlin-Reissner 板曲げ理論に基づくシェル要素は、板厚が薄くなるとたわみが極端に小さくなるロッキングと呼ばれる現象を引き起こす。この対策としては、面がせん断剛性に関する積分の点数を減らす「低減積分」が効果的である。ところが重合メッシュ法の連成効果を表すマトリクスの計算は、積分点数を通常よりも多く行う点で行わなくてはならない。それはこのマトリクスの積分領域内で不連続な関数になるからで、そのためガウス積分の次数を上げて多項式関数の次数を上げるのである。その結果、低減積分を完全に実行することができず、その結果せん断ロッキングが発生してしまうこと、及び連成効果に偏りが生じるために良好な解が得られないことを示した。また、これを回避する方法として面外せん断ひずみに関する剛性のみグローバルモデルとローカルモデルを連成させない方法を提案した。そしてこの方法によってロッキングは回避され、また、積分の偏りによる不規則な変形も押さえることができていることを、薄板や厚板の解析にこの方法を適用することで数値的に示した。

第6章では、シェル要素とソリッド要素を重合メッシュ解析する手法を提案した。そして、この手法を用いて表面き裂を有する板の解析に適用し、ソリッドによる参照モデルの解析結果と比較・検証した。また、シェル要素でモデリングを行った場合にしばしば省略される形状の凸状の突起物を有する構造物を解析する場合には、突起物と等価な剛性を有する梁要素をグローバルモデルに付加しなければエネルギー的不整合を生ずることを示した。

第7章では、構造物の安全評価に非常に重要な、き裂問題の解析に重合メッシュ法を適用した。まず重合メッシュ法を用いて2次元及び3次元の基本的なき裂問題を解析し、その結果を近似解析解と比較し良好な結果が得られること数値的に示した。また、き裂進展解析においては、リメッシュが不要となる X-FEM を重合メッシュ法と結合させることを提案し、そのための定式化を行った。そしてその方法を用いてフィレットを有する構造部材の2次元き裂進展解析に適用し、実験値とほぼ同等のき裂進展経路を得ることができた。3次元問題については、理論解や近似解析解が存在する基本的な例題を線形解析した。そして高精度の応力拡大係数を得るためには、3次元の J 積分を行うことが必要であろうとの結論に達した。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。