

Development and Application of Flat Shell Element in Hybrid-type Penalty Method

VARDANIAN, Anna

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

114

(発行年 / Year)

2023-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第579号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2023-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026671>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	VARDANIAN Anna
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 835 号
学位授与の日付	2023 年 3 月 24 日
学位授与の要件	本学学位規則第 5 条第 1 項(1)該当者(甲)
論文審査委員	主査 教授 竹内 則雄 副査 教授 田中 豊 副査 教授 浜田 英明

Development and Application of Flat Shell Element
in Hybrid-type Penalty Method

1. 論文内容の要旨

近年、応力解析の分野において、モデルの次元数を削減することで計算処理の効率化を図る MOR (Model Order Reduction) 法が注目されている。例えば、詳細なモデリングではソリッド要素を使用してメッシュを分割するが、MOR 法による簡易モデル化では、平板シェル要素などの次数を減らした要素を使用する。これによって、詳細モデリングに比べて短時間でシミュレーション結果を得ることができる。

また、板ガラスの熱割れなどの現象は、面内または面外の変形問題として解析してもひび割れを表現することはできない。このような現象は、面内変形状態と面外変形状態が同時に発生した場合に生ずると考えられる。平板シェル要素は、面内力と面外力の両方を同時に受ける問題の解析にも便利に使用できる。

一方、構造物の安全性を評価するには、構造物の破壊状態と崩壊荷重を把握する必要がある。クラックなどの進行性破壊の問題を解析する場合、不連続部分の処理は一般的に複雑である。ハイブリッド仮想仕事の原理に基づくハイブリッド型ペナルティ法 (HPM : Hybrid-type Penalty Method) は、そのような問題の解析手法の 1 つである。HPM は、自由度として剛体変位と剛体回転が含まれるため、剛体変位が卓越する変位問題の解析にも適している。

HPM における平板シェル要素は未開発であり、これを開発して HPM を MOR 法に利用すれば、構造設計の初期段階でおおよその破壊特性を知ることができ、安全性評価に役立つ情報を提供することができる。また、熱割れのような問題に対する現象解明に対しても有益な情報を提供できる。

本研究の目的は、MOR 法を含むシェルモデルを用いた材料非線形を有する大変位問題において、HPM の利点を生かした平板シェル要素と非線形解析アルゴリズムを開発することである。

本研究では、はじめに Kirchhoff 理論に基づく平板要素と平面応力要素を重ね合わせて、要素毎に独立な 2 次の変位場を有する平板シェル要素を開発している。

次に、以下の手順で相対変位を計算し、要素境界辺における表面力を求めてヒンジなどの進行型の破壊解析を行う方法を提案している。

- ② 要素毎に異なるローカル座標系で表される 2 次の変位場を仮定する。
- ② この変位場を隣接する要素の どちらか一つのローカル座標系に変換する。
- ③ つづいて、要素境界辺の座標系に変換する。
- ④ 最後に、このようにして得られた隣接要素境界辺の変位から相対変位を計算する。

さらに、限界回転角を定義し、自由度のうち剛体回転角をパラメータとして荷重増分法を適用する大変位解析法を提案している。

本論文は 6 章から構成されており、概要は次のとおりである。

第 2 章では、HPM の平板シェル要素を提案し、その定式化が示されている。提案要素は、面外問題として Kirchhoff 理論に基づく平板を、面内問題として平面応力を仮定し、これらを重ね合わせることで作成している。離散化方程式を求めるため、HPM の定式化の手順に基づき、はじめにハイブリッド型仮想仕事の原理を用いて弱形式を誘導している。変位場は面内、面外とも要素毎に独立に 2 次関数を仮定している。ただし、平板シェル問題では任意の傾いた平板要素を用いるため、要素毎に異なった局所座標系を採用している。HPM では要素間の相対変位を用いて表面力を計算するが、この異なった局所座標系の変位から相対変位を求める座標変換の方法が提案されている。最後に、これらの方法で求めた離散化方程式を解き、理論解と比較することで弾性解の精度を検証している。

第 3 章では、平板シェル問題の離散極限解析について述べている。はじめに、要素境界における破壊条件の取り扱いについて整理し、平板シェル要素における表面力と構成式の間係をまとめている。材料非線形解析の解析アルゴリズムとしては、HPM で標準的に用いられている荷重増分法における r-min 法（山田法）を適用するため、材料非線形解析における荷重増分の概念を述べ、解析フローを示している。最後に簡単な数値計算例から、提案モデルで得られた崩壊荷重が解析解と同等であることを示している。

第 4 章では、平板シェル問題の大変位解析について述べている。大変位解析のアルゴリズムとして、剛体回転角をパラメータとする限界回転角を設定し、荷重増分法における r-min 法を適用する方法を提案している。また、大変位問題では、局所座標系の剛体回転により要素内の応力の座標変換が必要になる。ここでは、この変換方法を提案し、要素応力との関係について述べている。最後に、このアルゴリズムを使用した解析例を示し、解の特性と精

度について述べている。

第5章では、材料の非線形性を伴う大変位解析について述べている。非線形解析の数値アルゴリズムは、第3章、第4章で述べた荷重増分法を適用し、材料非線形解析における荷重増分率と、大変位解析における限界回転角から求まる荷重増分率の両者のうち最小のものを荷重増分率として採用する 拡張 r-min 法を提案している。さらに、このアルゴリズムの詳細な解析フローを示し、提案アルゴリズムを用いた数値例で得られた解の特徴について述べている。

第6章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の展望について述べている。

2. 審査結果の要旨

近年、構造物の安全性や複合材料の性能評価など、構造解析における様々な分野において、より詳細なモデル化を行い、スーパーコンピュータを用いるような大規模な解析による研究が進められている。これに対して、1D シミュレーションと呼ばれるコンピュータへの負荷を減らして設計の効率化を図る方法も提案されている。設計現場においては、後者の方法も有効な手法といえる。しかし、複雑な構造の応力解析においては1D シミュレーションでは困難な場合も多い。

一方、モデルの次元数を削減することで計算処理の効率化を図る MOR 法が着目を浴びている。これは、大規模解析と1D シミュレーションの間のような解析の考え方で、例えば3次元モデルを、平板要素を用いて簡略的なモデルを作成し解析する方法である。弾性解析であれば、FEM (Finite Element Method) を用いてかなりの部分実現されている。しかし、構造物の安全性の評価のためには、クラックや破壊などの解析が不可欠であり、このような非線形問題に対する MOR 法については、あまり研究されていない。

本研究はこの点に着目し、進行型破壊解析に適した HPM により、次の方法を提案している。① MOR 法に利用する平板シェル要素の開発。② 安全性評価のための平板シェルモデルの進行型破壊解析アルゴリズムの提案。③ 破壊に伴い、剛体変位が卓越する大変位解析アルゴリズムの提案。

①については、要素毎に独立な局所座標系で表される2次の変位場を持ち、Kirchhoff 理論に基づく平板要素と平面応力要素を重ね合わせた平板シェル要素を開発し、弾性解の精度を理論解と比較することで検証している。

②を実現するためには、進行型破壊を表現するため、隣接要素間の相対変位を計算する必要がある。しかし、①で開発した要素は、要素毎に独立な局所座標系による変位場であるため、異なった座標系による変位から相対変位を求めるための工夫が必要で、そのための座標変換の方法を提案している。この関係を用いて、荷重増分法における山田の方法を適用して進行型破壊解析アルゴリズムを提案し、理論解と比較することで検証している。

③については、限界剛体回転角を定義し、これをパラメータとして荷重増分法における増

分率を求める方法を提案している。この方法は、材料非線形解析法における荷重増分法と組み合わせることが容易で、材料非線形大変位解析が可能となる。

以上のように、本論文では、HPMにおける平板シェル要素を開発し、進行型破壊のための材料非線形解析アルゴリズムと、剛体変位が卓越する大変位解析アルゴリズム、それらを組み合わせた材料非線形大変位解析のアルゴリズムを提案している。この方法は、MOR法による構造物等の簡易的な安全性の評価方法の確立とともに、衝撃問題を含む平板の破壊性状を把握する手法の開発に貢献するものとする。

よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。