

氏名	にし しんのすけ 西 紳之介
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成31年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	有限変形複合シェルの分離型マルチスケール解析手法の開発とそのドライファブリックへの応用
指導教員	東北大学教授 寺田 賢二郎
論文審査委員	主査 東北大学教授 寺田 賢二郎 東北大学准教授 京谷 孝史 東北大学准教授 斉木 功 東北大学准教授 森口 周二

論文内容要約

複合材料は2つ以上の材料を組み合わせることによって均質材料よりも優れた性能を発揮する材料であり、特に航空機の主翼・胴体部や、自動車のフード（ボンネット）やルーフなど、比較的薄い形状の部材へ適用されることが多く、このような材料を複合板、複合シェルと呼ぶ。これら複合板、複合シェルの成形法として樹脂トランスファー成形があり、他の成形法と比較して成形コストが削減できるため自動車産業などで注目を集める手法である。この手法では、繊維束を織り込んだ状態の材料（ドライファブリック）を金型などで製品の形に成型（賦形）した後に樹脂を流し込んで硬化して成形する方法であり、賦形工程での状態が最終的に得られる製品の性能に大きな影響を及ぼす。そのため、数値解析によって賦形後のドライファブリックの状態を予測することは非常に重要である。このようなドライファブリックなどの複合板・複合シェルを対象とした数値解析手法として、均質化法やそれに基づくマルチスケール解析手法があるが、賦形工程のように大変形域での複合板・複合シェルを対象とした均質化法は未だ十分な検討がなされていない。また、ドライファブリックのように周期構造内に接触摩擦が観察されるような材料に対する均質化解析に関する報告例は未だ少ない。

そのような背景のもと、本研究では面内方向に周期的に単位構造（面内ユニットセル）が繰り返されて全体構造をなす複合板、複合シェルを対象に、大変形域におけるマクロ力学挙動を特徴づけるための均質化理論を構築することで対応する数値シェル試験法を開発するとともに、その解析結果に基づいて行われる分離型マルチスケール解析手法を提案した。また、開発した数値シェル試験法を、繊維束間の接触・摩擦挙動に依存して複雑なマクロ力学特性を有するドライファブリックに適用するために、手法の高度化を行った。以下に本論文の各章で得られた成果や今後の課題について述べる。

まず、第2章では複合板・複合シェルの有限変形問題に対応した均質化法の開発を行った。従来の複合板・複合シェルの均質化法の多くは、ミクロ構造内の変形を表すミクロ現在座標をミクロ初期座標の面内方向成分に関して線形関係を仮定しており、大変形域における曲げ・ねじりモードを正確に再現することができない。一方で、既往の研究例ではシェル構造に対して2次均質化法を採用し、マクロ評価点周りのTaylor 級数展開法を用いてミ

クロ現在座標を仮定している。それにより、マイクロ初期座標に関する2次関数を用いて曲げ・ねじりの変形モードの再現ができる。しかし、Taylor級数展開の2次勾配項は直接シェル理論から導出されない成分を有しており、その取扱いについては未だ不明瞭な部分が多い。また、3次以上の勾配項を考慮した展開式についても未だ報告例がない。そこで、板・シェル特有の変形モードである純曲げ・ねじりモードを大変形域においても正確にマイクロ3次元構造内に再現することを目的として、マクロのシェル構造のマクロ評価点周りの高次勾配項を用いたTaylor級数展開法を用いてマイクロ境界値問題の変形を規定した。その際、Taylor級数展開の1次勾配項についてはシェルの運動学に関連付けられるためマイクロ境界値問題の入力データとし、その他の高次勾配項については純曲げモードを再現するための条件から決定するものとした。また、マクロ合応力とマイクロ応力の関係はHill-Mandel条件を用いて導出した。そして、実際に分離型マルチスケール解析のために必要な均質化力学特性を得るための数値シェル試験法を提案した。提案手法の検証を目的として、まず均質な材料分布を有する面内ユニットセルに対して数値シェル試験を行い、同じ材料構成則と材料パラメーターを用いた場合のマクロ材料応答との比較を行った。従来の数値平板試験の結果と比べて、提案手法の方が解析結果とマクロ材料応答との誤差は小さく、手法の改善が果たしていることを確認した。また、実際に非均質性を有するマイクロ構造に対して行った結果では、数値平板試験では曲げ・ねじり変形を与えた際に局所的に不自然な変形が卓越していたが、数値平板試験ではそのような変形は観察されず、純曲げ・ねじりに近い変形モードが与えられていることを確認した。一方、本手法の課題として、均質体の検証において本来発生することのない拡張擾乱変位が発生することが挙げられる。これらは、Taylor級数展開法において考慮する次数を増加させても減少せず、より大きな変形量の問題に対して大きな誤差を招く原因となりうる。これら拡張擾乱変位を対処する方法については今後の課題としたい。

第2章で提案した数値シェル試験により得られた均質化力学特性を分離型マルチスケールの枠組みでマクロシェル構造解析に反映させるためには、得られた特性を再現可能なマクロ材料構成則を仮定し、その材料パラメーターを最適化アルゴリズムによって同定する必要がある。そこで第3章では、まず一般的な3次元材料構成則を採用可能なシェル構造解析手法に対してKaliskeが提案した異方性超弾性構成則を用いる方法について述べた。また、さらに数値シェル試験結果を精度良く再現するために板厚方向に材料パラメーターが分布するような材料構成則を提案した。これにより、積層板など板厚方向に材料が分布するマイクロ構造だけでなく、板厚方向に均質な材料分布を有するマイクロ構造に対しても、引張と曲げ特性の再現精度が向上することが期待できる。実際に板厚方向に均様に材料が分布するハニカムパネルに対して行った数値シェル試験の結果に対してパラメーター同定を行ったが、提案した材料モデルの方が板厚方向の材料パラメーターの分布を考慮しない材料モデルよりも目的関数は小さい値で収束し、パラメーター同定の精度が向上することを例証した。最後に同定されたパラメーターを用いてマクロシェル構造解析を行い、実際に面内ユニットセルを周期的に配置した3次元固体構造の解析結果との比較を行った。その結果、マクロシェル構造解析と固体解析の結果は概ね一致することを示し、数値シェル試験の結果を用いた分離型マルチスケール解析手法の妥当性を確認した。しかし、本手法におけるパラメーター同定の

精度には未だ課題が多く、全モードのマクロ材料応答に対して精度良くパラメータを同定することができなかった。これらは材料構成則の再現精度が大きく関与しており、その改良あるいは新規に開発するなどは今後の課題である。ただし、開発した均質化法の正当性については確認されており、また例えばマクロ構成則を必要としないようなマルチスケール解析手法に対しても適用可能であり、大変形域の複合板・複合シェルマルチスケール解析を行う上で有用性は高いといえる。

最後に第4章では、提案した数値シェル試験法を繊維束間の接触・摩擦がマクロ力学特性に影響を及ぼすドライファブリックへと適用するために、滑らかな形状表現に用いる基底関数を未知数の離散化にも利用できるアイソジオメトリック解析（IGA法）を採用して、数値シェル試験を行う上での様々な高度化を実現した。IGA法の基底関数にCADの汎用ソフトウェアでも採用されるNURBS関数を採用しており、任意点上で高い連続性を保証することが可能である。そのため、接触表面上で法線ベクトルが連続的に変化するため、接触・摩擦問題を扱う上で計算効率の向上を果たすことが可能になる。また、平織のドライファブリックに対して、通常の4分の1スケールである面内サブユニットセルを採用し、その面内サブユニットセルに与える周期境界条件や、縦方向と横方向の繊維束が噛み合うロッキングを再現するための方法を提案した。その面内サブユニットセルは、繊維束の曲がりに伴う初期応力の影響を考慮するため、無変形の繊維束モデルに対して織り込み過程を想定した解析を行うことでその初期形状を生成した。また、繊維方向とその垂直方向の挙動の違いを再現するため、繊維束の材料モデルとしてBonetが提案した直交異方性材料構成則を採用し、その材料パラメータについては実際に繊維束モデル内の周期構造を模擬した解析モデルに対して実施した数値材料試験の結果と整合するように決定した。数値解析例として、まずIGA法を用いた数値シェル試験の計算効率について検証するため、要素境界上の連続性の次数が1次のモデル（C1モデル）と、FEMと同様に要素境界上の連続性の次数が0のモデル（C0モデル）について数値シェル試験を行った。FEMを模擬したC0モデルと比較して、C1モデルの方が収束計算の反復回数が少なく、計算効率が向上することを例証した。次に、織り込み過程により得られた面内サブユニットセルに対して全モードの数値シェル試験を行い、面内せん断特性に関しては初期引張の影響についても検討した。特にこの面内せん断特性に関する数値シェル試験では、初期引張量に依存してマクロせん断合応力が増加するという、実験でも確かめられている物理的に妥当な結果を得ることに成功した。さらに、提案したロッキング現象を再現するための非解析領域の設定を行い、ロッキングの原因となる縦方向繊維束と横方向繊維束の接触が再現できることを確認した。本研究でドライファブリックの数値シェル試験の方法については整備されたといえるが、解析例はドライファブリックのマクロな力学挙動の特徴づけにとどまっており、第3章で例示したようにマクロ材料構成則の決定とマクロ解析については、未だ検討すべき項目が多い。特に本解析得られた引張とせん断の連成挙動が存在するなど得られたマクロ力学特性は複雑な挙動を有しているため、現存する材料構成則でこれらを再現しうるかは不透明であり、場合によっては全く新しい材料構成則を考案する必要がある。また、本研究ではロッキング現象についても扱ったが、本研究で得られたマクロせん断合応力のロッキングによる増加は実験結果と比較して小さ

く、ロッキング後の現象を十分に再現できているとは言い難い。これら分離型マルチスケール解析のためのドライファブリックの材料モデルの構築と、ロッキング現象再現のための計算効率のさらなる向上については今後の課題としたい。