

論文の内容の要旨

論文題目 ニューラルネットワーク援用並列有限要素法を用いた
CFRP 構造物の損傷解析に関する研究

氏 名 山口 太一

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、比強度、比弾性に優れているため、軽量化による燃費改善を目的に、航空機等への適用が進んでいる。運輸部門での CO₂ 排出量は全体の約 20%であるため、CFRP による機体や車体の軽量化は CO₂ 排出量の削減に効果的である。しかしながら、CFRP は、炭素繊維と樹脂から成る複合材料であるため、繊維破断、マトリックスクラック、繊維樹脂界面のはく離といった複雑な形態の損傷を生じる。そのため、実験での評価が不可欠である。航空機の評価においては、**Building block approach** という評価手法が用いられ、有孔引張試験片のような試験片レベルから、部分構造、実大構造へと試験結果を積み上げていき評価が行われている。新型の航空機の認証には、約 1 万回の試験が行われる。実験回数を削減するために、シミュレーションを用いた CFRP の損傷解析の開発が行われているが、樹脂と繊維は分けてモデル化しない等モデルの簡略化が行われており損傷を精度良く評価することができない。損傷予測を高精度に実施する有力な手法として、有限要素解析において CFRP の繊維、樹脂、繊維樹脂界面を分けて詳細にモデル化することが考えられるが、有限要素モデルがこれまでになく大規模になるという問題がある。

また、CFRP は老朽化した橋梁にシートとして貼り付けることで補強に用いられる。全国約 72 万橋のうち、建設後 50 年を経過した橋梁の割合は 10 年後に 52%となるため、補強技術への期待は大きい。しかしながら、航空機等とは異なり、橋梁の数は莫大なため個々の橋梁を詳細に構造解析することは時間的に困難であり、補強の効果を効率的に予測する手法が必要である。

本研究では、繊維、樹脂、繊維樹脂界面をモデル化した CFRP モデルを用いた詳細な損傷解析を可能とすることを目的に、大規模並列有限要素法とニューラルネットワーク

を利用した解析技術を開発した。また、CFRP 構造物の効率的な構造解析を可能とすることを目的に、有限要素法とニューラルネットワークを利用した応力集中予測手法を開発した。

第 2 章では、並列有限要素法ソルバ **FrontISTR** をシーズコードとして、大規模モデルの界面損傷解析を行える手法を提案した。Double cantilever beam (DCB) 試験の実験結果との比較から、約 7 千万自由度の大規模モデルにおいて界面損傷進展解析を精度良く行えることを示した。3 次元モデルの DCB 試験のシミュレーションにおいても、メッシュサイズを小さくすることで実験値に近い値が得られた。メッシュサイズを小さくすることでサブステップの大きさを小さくしなくても収束するという収束性の向上もみられた。並列有限要素法で界面損傷進展解析が行えるようになったことで、複合材料に特徴的な界面損傷について大規模モデルを用いた詳細な解析が可能となった。

第 3 章では、複合材料の解析には不可欠なマルチスケール解析手法の一つであるゾーミング法の境界条件設定を、機械学習の一つであるニューラルネットワークを利用して行える手法を提案した。従来のゾーミング法と比較して、有限要素法ソルバのプログラムを書き換えることなく利用できるシンプルな手法である。グローバルモデルを詳細なメッシュを用いて解析した結果との比較から同等の精度で構造解析が行えることを示した。また、微小なフィレットのようにローカルモデルの一部がグローバルモデルの外側にある場合も比較的精度の良い結果が得られることが分かった。**FrontISTR** に適用することで、繊維 1 本 1 本まで詳細に再現した大規模 CFRP モデルでの詳細な解析が可能となった。

第 4 章では、開発した手法を用いて CFRP の損傷解析を実施した。繊維樹脂界面の損傷進展解析について、マイクロドロップレット試験の実験との比較から精度の良い解析が行えることを示した。また、繊維の破断を含めたモデルについても、フラグメンテーション試験のシミュレーションを実施し妥当な解析結果が得られることを示した。さらに、有孔引張試験片を対象とし、繊維、樹脂、繊維樹脂界面の損傷を考慮した解析を実施した。樹脂の損傷や、繊維樹脂の界面剥離等の詳細な評価を行った。また、先行研究の実験で示されているように、層厚が変化したときに層間損傷の進展の度合いが変化する様子を捉えることができた。繊維、樹脂、繊維樹脂界面まで詳細にモデル化した CFRP モデルでの損傷進展解析が可能になった。剛性が大きく低下する場合の収束性の向上が今後の課題である。

最後に、第 5 章では、ニューラルネットワークを用いてフィレット部の応力集中を予測することで効率的な有限要素解析を行える手法を提案した。メッシュ分割が容易で計算時間も短い角部モデルでの有限要素解析結果から、ニューラルネットワークを用いてフィレットがある場合の応力を予測する。角部周辺の応力分布のみを入力とすることで、幅広い形状に適用できる可能性がある。単純な角部とフィレット部モデルから学習データを作成したが、学習済みニューラルネットワークは、学習に用いていない形状におい

でも高い精度でフィレット部の応力を予測できることができた。また、実形状に近い CFRP で補強された橋梁モデルにおいても、学習済みニューラルネットワークを適用し、精度良くフィレット部の応力が予測できた。フィレット部を詳細な要素で分割した解析結果と比較して、計算時間を削減しつつ精度の良い解析を可能にした。

第 2 章、第 3 章、第 4 章において、大規模 CFRP モデルを用いた詳細な損傷解析が可能となった。今後、樹脂や界面の改良による損傷への影響評価、層厚を変化させることによる損傷進展への影響評価に利用できると考えられる。CFRP 構造物の信頼性向上による運輸機器のさらなる軽量化につながれば、CO₂削減という大きな問題の解決にも寄与できると考えられる。

第 5 章において、CFRP 構造物の効率的な構造解析に向けた基礎的な成果が得られた。この技術を基に構造物を CFRP で補強した際の応力集中部への効果を迅速に評価できれば、橋梁等の社会インフラの老強化という社会問題の解決に寄与できると考えられる。