

学 位 論 文 題 名

積層構成が異なるCFRP梁の変形挙動と断面耐力に関する研究

(Study on deformation behaviors and ultimate section forces of CFRP beams with different laminate structures)

学位論文内容の要旨

近年、高耐久性を有する構造材料の一つとして、炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer、以下、CFRP) が着目されている。今日では、構造物の耐久性・維持管理性を向上させることは、非常に重要な課題であると認識されている。このような背景の下、CFRP は、高強度・高剛性かつ軽量、および耐腐食性に優れる材料であり、従来の構造材料である鋼材およびコンクリートにはない材料特性を有しているため、構造物のさらなる耐久化を達成できる構造材料として研究されている。特に、橋梁の梁部材への適用が着目され、道路橋の建設プロジェクトにおいて CFRP を梁部材として適用した事例もある。

CFRP は積層複合材料であり、単層板と呼ばれる個々の薄い層の積層体であるため、CFRP から構成される梁 (以下、CFRP 梁) の材料特性を設計する上では、積層構成と呼ばれる単層板を積層させる構成が重要となる。これは、CFRP 梁の材料特性は積層構成に依存し、積層構成が CFRP 梁の変位と断面耐力に影響を与えるためである。

しかしながら、積層構成が CFRP 梁の変位と断面耐力に与える影響は、これまでに研究された CFRP 梁の積層構成が限られていることから、その影響の把握は十分ではない。また、積層構成が異なる CFRP 梁における変位と断面耐力の算定式は明確に示されておらず、そのような算定式の開発が課題となっている。

そこで本研究では、積層構成が異なる CFRP 梁を作製して曲げ載荷実験を行い、積層構成の違いが梁の変位と断面耐力に与える影響を明らかにすることで、それらの影響を考慮できる変位と断面耐力の算定式を開発することを目的とした。本論文は全 8 章で構成されており、以下に各章の要約を示す。

第 1 章では、CFRP の特徴をまとめ、梁部材として着目されている理由を示した。また既往の研究において、橋梁の梁部材への CFRP の適用性が示されている中で、積層構成が CFRP 梁の変位と断面耐力に与える影響は十分に明らかになっていないことを説明し、その背景に基づいて本研究の目的を述べた。

第 2 章では、積層理論に基づいた CFRP 梁の材料特性の算定方法について述べた。まず、CFRP を構成する単層板の弾性定数を力学モデルにより算定できることを説明した。その後、単層板の弾性定数から算定される単層板の剛性を、積層理論と CFRP 梁の積層構成に基づいて重ね合わせることで、CFRP 梁の弾性定数を算定できることを述べた。さらに、積層理論に基づいた、進行性破壊解析と呼ばれる方法を用いることで、CFRP 梁の強度も算定できることを示した。

第 3 章では、積層構成が異なる CFRP 梁の材料特性について述べた。まず本研究では、CFRP 梁の積層構成、補剛材の有無、および載荷実験におけるせん断スパン長を実験パラメータとして載荷実験を行うことを示した上で、補剛材を有さない供試体と補剛材を有する供試体の大きく 2 つに分

けて議論を進めることを説明した。補剛材を有さない供試体では、5種類の積層構成を採用した。結果として、積層構成が異なることで、CFRP 梁の弾性定数は変化することを示した。補剛材を有する供試体では、2種類の積層構成を採用し、材料特性を算定すると共に材料試験も行った。結果として、積層構成の違いにより CFRP 梁の弾性定数および強度は異なることを示した。

第4章では、本研究で行う4点曲げ載荷実験の方法について述べた。まず、補剛材を有さない供試体を対象として、1種類のせん断スパン長を採用した載荷条件、および変位とひずみの計測方法を説明した。次に、補剛材を有する供試体を対象として、3種類のせん断スパン長を採用した載荷条件、変位とひずみの計測方法、および補剛材の設置方法を説明した。

第5章では、CFRP 梁の変位と断面耐力の算定式を示した。変位算定式に関しては、梁のせん断変形を考慮できる Timoshenko 梁理論に基づき、本研究で行う4点曲げ載荷実験を対象として導いた。断面耐力算定式に関しては、材料破壊と局部座屈による断面耐力の算定式を示した。まず、補剛材を有さない供試体を対象とした面外方向せん断応力に起因した材料破壊によるせん断耐力算定式、および補剛材を有する供試体を対象とした梁軸方向直応力と面内せん断応力の相互作用を考慮した材料破壊による曲げ耐力算定式を導いた。その後、補剛材を有さない供試体と補剛材を有する供試体の両方を対象とした局部座屈による曲げ耐力算定式を示した。

第6章では、補剛材を有さない供試体と補剛材を有する供試体の変位の実験値と変位算定式による算定値を比較し、変位算定式が妥当性を有することを示した。まず、積層構成が異なることで、各供試体の荷重-梁軸方向直ひずみ関係における剛性および荷重-面内せん断ひずみ関係における剛性は変化し、それに伴って、同荷重レベル下における曲げ変位とせん断変位の大きさは異なることを明らかにした。次に、各供試体の全体の変位に対する曲げ変位とせん断変位の寄与率を検討し、積層構成が異なる場合は、梁軸方向弾性係数と面内せん断弾性係数が変化するため、曲げ変位とせん断変位の寄与率も変化することを述べた。最終的に、各供試体の荷重-変位関係における初期剛性と変位算定式から得られた剛性は概ね一致し、積層構成およびせん断スパン長が異なる場合においても、変位算定式を適用できることを示した。

第7章では、補剛材を有さない供試体と補剛材を有する供試体の断面耐力を算定し、実験結果との比較を行うことで、材料破壊によるせん断耐力と曲げ耐力の算定式が妥当性を有することを示した。補剛材を有さない供試体の実験では、積層構成の違いに依らず、ほぼ同荷重レベル下において、供試体は載荷点近傍で破壊に至った。補剛材を有さない供試体を対象としたせん断耐力の算定値は、実験値と概ね一致する結果であった。補剛材を有する供試体の実験では、供試体の破壊はすべて載荷点で生じ、積層構成およびせん断スパン長が異なることで破壊荷重は変化した。補剛材を有する供試体を対象とした梁軸方向直応力と面内せん断応力の相互作用を考慮した材料破壊による曲げ耐力の算定値は、実験値とよく一致した。一方で、補剛材を有さない供試体と補剛材を有する供試体の両方を対象とした局部座屈による曲げ耐力の算定値は、実験値よりも明確に大きく、供試体の破壊は局部座屈によるものではないことが明らかとなった。

第8章は結論であり、本研究で行った検討と得られた知見をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	松 本 高 志
副 査	教 授	林 川 俊 郎
副 査	教 授	横 田 弘
副 査	教 授	蟹 江 俊 仁

学 位 論 文 題 名

積層構成が異なるCFRP梁の変形挙動と断面耐力に関する研究

(Study on deformation behaviors and ultimate section forces of CFRP beams with different laminate structures)

近年、炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer、以下、CFRP) の構造利用が注目されている。CFRP は、その高強度性、軽量性、高耐食性を利点として、航空宇宙産業などで用いられている。社会基盤用途においても、安全性と耐久性を確保できる構造材料として有望であるが、橋梁などの大型構造物を前提とした CFRP 構造部材の設計法はいまだ合理的に確立されていない。

CFRP は積層複合材料であるため、繊維の量と配向を変化させることができるが、任意の繊維量と配向を有する積層板の変位や耐力を算定する手法が確立されているとは言えない。これにより、異方性を踏まえた変位の算定や、破壊や座屈により決まる耐力の算定などに道筋がついておらず、構造部材の解析と設計、材料と構造の最適化において、主として実験によっている現状がある。

このような背景のもとで、本論文は、橋梁の主部材を想定した箱形断面 CFRP 梁を対象として、積層構成、載荷条件、補剛の有無がたわみ変位と断面耐力に及ぼす影響を実験的に把握するとともに、CFRP の積層構成を考慮したたわみ変位と断面耐力の算定式を構築することを目的としている。

本論文は全 8 章から構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景と既往の研究成果をまとめており、研究の目的とともに論文の構成を示している。

第 2 章では、理論に基づいた CFRP の材料特性の算定方法を示している。積層理論を用いて単層板の特性より積層板の剛性と弾性定数を算定する方法をまとめている。さらに、進行性破壊解析と最適化手法を用いて単層板の特性より積層板の強度を推定する方法を構築している。この方法により、斜め配向層を有する積層板の小規模試験体から得られる材料試験強度を補正することを提案している。

第 3 章では、箱形断面 CFRP 梁に用いた材料の特性について述べている。本研究では、無補剛の梁と補剛した梁について曲げ載荷実験を行っており、CFRP 材料の積層構成として複数のケースを設けている。これらの積層構成について、第 2 章で示された算定方法に基づき、弾性定数と剛性、強度を算定している。また、材料試験値と算定値との比較により、算定方法の妥当性を示している。

第 4 章では、曲げ載荷実験の方法について述べている。箱形断面 CFRP 梁の寸法、載荷条件、計

測器の配置、補剛方法がまとめられており、せん断スパン長は複数のケースを設けている。

第5章では、箱形断面 CFRP 梁のたわみ変位と断面耐力の算定式を示している。たわみ変位算定式に関しては、CFRP のせん断変形を考慮するために、Timoshenko 梁理論に基づいて導いている。断面耐力算定式に関しては、破壊もしくは局部座屈について示している。破壊による耐力は、面外方向せん断応力に起因した破壊によるせん断耐力、および組み合わせ応力での破壊による曲げ耐力の式を本論文で新たに導き出している。局部座屈による曲げ耐力は、箱形断面梁の圧縮フランジとウェブについて、異方性材料についての算定式をまとめている。

第6章では、箱形断面 CFRP 梁のたわみ変位について、実験値と算定値の比較を行い、たわみ変位算定式が妥当性を有することを示している。荷重-変位関係における初期剛性とたわみ変位算定式から得られた剛性は概ね一致しており、補剛の有無および積層構成、せん断スパン長が異なるケースにおいても、算定式が適用できることを示している。

第7章では、箱形断面 CFRP 梁の断面耐力について、実験値と算定値の比較を行い、断面耐力式が妥当性を有することを示している。無補剛の梁については、積層構成の違いによらず、ほぼ同荷重で同様の破壊発生を示したが、これが面外方向せん断応力に起因した破壊によるせん断耐力により説明でき、算定値と概ね一致することを示している。補剛した梁については、積層構成およびせん断スパン長により終局荷重が異なるが、こうした広範な条件下においても組み合わせ応力での破壊による曲げ耐力の算定値で説明でき、算定値とよく一致することを示している。一方で、局部座屈による曲げ耐力の算定値は実験値より明確に大きく、本研究の実験範囲では局部座屈による終局状態ではないことを明らかにしている。

最後に第8章では、本研究の結論として得られた知見をまとめている。

これを要するに、著者は、箱形断面 CFRP 梁の破壊に至る挙動を広範な実験条件で明らかにし、異方性を有する積層複合材料である CFRP の材料特性を考慮したたわみ変位と断面耐力の算定式を構築して、箱形断面 CFRP 梁の部材性能に関する知見を得たものであり、橋梁工学、複合材料学、複合構造学、構造力学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。