

学 位 論 文 題 名

Model for Shear-Resisting Capacity of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon Fiber Sheet

(炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート柱のせん断耐荷力モデル)

学位論文内容の要旨

近年、阪神淡路大震災により耐震補強の必要性が再認識され、多くのコンクリート構造物の耐震補強工法が生まれてきている。そのなかで注目されているものに、炭素繊維を始めとする連続繊維シートによる巻立て補強がある。本研究の目的は、樹脂により硬化されコンクリート表面に接着された炭素繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート柱の力学的性能を明らかにすることにある。この目的のために、炭素繊維シートで補強されていない場合とされている場合について、鉄筋コンクリート柱の挙動に関し、実験および有限要素法を適用した非線形数値解析により、その解明を図った。既存の鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートはりのせん断耐荷モデルに基づき、炭素繊維シートで補強された軸力を伴う鉄筋コンクリート柱のせん断耐荷モデルを構築し、提案した。有限要素解析を行うに際しては、炭素繊維シートの要素、および、炭素繊維シートとコンクリートの間の付着性状をモデル化した接合要素を開発し、導入した。帯筋と軸方向筋の剛性、コンクリート強度、せん断スパン比、軸力の大きさを、せん断耐荷力の増加分を明らかにするための数値実験での変数とした。提案するモデルにおいては、せん断耐荷力を、帯筋、斜めひび割れ領域でのコンクリート、曲げ圧縮領域でのコンクリート、および、斜めひび割れ領域と曲げ圧縮領域を結ぶコンクリート部での抵抗せん断力の和として表現している。斜めひび割れ領域でのコンクリートの抵抗せん断力としては、骨材のかみ合わせによるものなどが含まれる。

本論文は、8章と付属資料から構成されており、各章の内容は以下のようなものである。

第1章では、本研究の背景を述べるとともに、連続繊維補強材の概説、コンクリート構造物の補強に関する現状を述べている。そして、最後に、本研究に至った経緯が示されている。

第2章では、資料調査および既往の研究の成果をまとめている。まず、建設産業で用いられている連続繊維補強材料と接着剤に関して、その特性などを示した。次に、連続繊維シートを接着する前のコンクリート表面の準備工に関して、その現状を示した。さらに、コンクリートと連続繊維シートとの界面付着、および、コンクリートはりに接着された連続繊維シートに関する主な研究成果を紹介した。最後に、連続繊維シートを柱の補強に適用した場

合の研究の紹介を行った。この研究には、連続繊維シートによるコアコンクリートの拘束効果とそのモデル、および、軸力やせん断力を受ける連続繊維シートで補強された柱に関するものが含まれる。

第3章は、実験概要を示している。まず、本研究で用いられたコンクリート、鋼材、炭素繊維シート、エポキシ樹脂の材料特性を示した。続いて、炭素繊維シートによるせん断耐荷力の向上を明らかにするために行われた、炭素繊維シートで巻立て補強された鉄筋コンクリートの実験結果、そして、コンクリートに接着された炭素繊維シートの付着応力 - すべり関係を明らかにするために行われた、炭素繊維シートの引張り実験結果を示した。

第4章は、数値解析手段として用いた有限要素解析プログラムに関し、概説している。オリジナルのプログラム構成とともに、第3章の実験結果を解析するためのコンクリートおよび鉄筋コンクリートのモデルを説明した。そして、本研究で新たに開発した2つの要素、すなわち、炭素繊維シート要素、炭素繊維シートとコンクリートとの界面付着をモデル化するための接合層要素を説明している。それぞれの要素に対し、理論的な背景とオリジナルプログラムへの導入過程について、説明を行った。

第5章は、有限要素解析結果を示している。第3章で示した炭素繊維シートの引張り試験と炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート柱の実験に対応して、有限要素でモデル化を行い、解析を行った。炭素繊維シートや鋼材の補強筋のひずみ、供試体の変形などに関する実験結果と有限要素解析結果との比較を示すことにより、新たに導入した2つの要素（炭素繊維シート要素と接合要素）の適用性とその信頼性を示した。

第6章は、提案する炭素繊維シートで補強された柱のせん断耐荷モデルの説明と、第4章で示した有限要素プログラムを用いて行った、数値実験結果を示している。数値実験は、広範な条件下で行われた。すなわち、降伏する、もしくは、降伏しない帯筋のみで補強された場合、炭素繊維シートのみで補強された場合、帯筋と炭素繊維シートの組合せで補強された場合で行われた。さらに、それぞれの場合で、帯筋と軸方向筋の剛性、コンクリート強度、せん断スパン比、軸力の大きさを数値実験での変数とした。数値実験結果を用いて、提案したせん断耐荷モデルの妥当性を示した。

第7章は、提案したせん断耐荷モデルの適用性を示すために、本研究での実験結果に加え、既往の炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート部材の結果を用いて、それらとモデルによる推定結果とを比較した。

第8章は、第1章から第7章のまとめであり、本研究により明らかになった成果を概略説明している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 典史雄
副 査 教 授 城 攻
副 査 教 授 佐 伯 昇
副 査 助教授 上 田 多 門

学 位 論 文 題 名

Model for Shear-Resisting Capacity of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon Fiber Sheet

(炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート柱のせん断耐荷力モデル)

阪神淡路大震災の教訓の一つとして、過去の設計規準に基づいて建設された構造物の耐震性能の再評価の必要性が広く認識されるようになり、現行の基準による要求性能を満足しない既設構造物の耐震補強が緊急の課題となっている。コンクリート構造物の耐震補強工法の一つとして、炭素繊維やアラミド繊維などからなる連続繊維シートによる巻立て補強工法があり、自重の増加がわずかであること、重機の使用が困難な空間でも施工が可能であることなどの特徴から注目を集めている。本研究は、炭素繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート柱の力学的挙動を実験により明らかにするとともに、炭素繊維シートの力学性状、および炭素繊維シートとコンクリートとの間の界面の付着に関する力学性状のモデル化を行い、有限要素解析における新たな要素として提案している。また、これらの要素を導入した有限要素解析による数値実験を行い、炭素繊維で補強された鉄筋コンクリート柱のせん断耐力に対する主要な変数の影響を明らかにしている。さらに、せん断耐力を、炭素繊維シート、帯鉄筋、斜めひび割れ領域でのコンクリート、曲げ圧縮領域でのコンクリート、および、斜めひび割れ領域と曲げ圧縮領域を結ぶコンクリート部での抵抗せん断力の和として表現し、それぞれに対する各変数の影響について定式化を行い、実用的なせん断耐力算定法として提案している。

本論文は、8章と付属資料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、本研究の背景、目的および範囲について述べられている。

第2章では、連続繊維シートとコンクリートとの界面付着および連続繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する既往の研究などについて述べられている。

第3章では、本研究で行われた実験の概要が述べられている。実験は、炭素繊維シートとコンクリートとの間の付着応力-すべり関係を明らかにするための付着引張実験と、炭素繊維シートで巻立て補強された鉄筋コンクリート柱の実験とからなり、前者の結果からは、炭素繊維シートの剛性が高いほど平均最大ひずみが減少し、それによって部材としての耐荷能力が増加すること、耐荷能力は主として炭素繊維シートとコンクリートとの界面の最大付着応力によって定まることなど、また後者の実験からは、柱の帯鉄筋、炭素繊維シートおよびコンクリートのせん断力分担性状などが明らかにされている。

第4章では、本研究で用いられる有限要素解析プログラム、とくに、本研究で新たに開発された炭素繊維シート要素、および炭素繊維シートとコンクリートとの界面付着をモデル化した接合要素について、その理論的な背景と導入過程が述べられている。

第5章では、第3章で示された炭素繊維シートの付着引張実験と、炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート柱の実験に対応する、有限要素解析が行われている。まず前者に対する解析結果では、炭素繊維シートのひずみ分布、最大荷重、炭素繊維シートの剛性の影響のいずれにおいても、解析結果は実験結果と良い一致が見られ、また、柱に対する解析結果では、炭素繊維シートおよび帯鉄筋のひずみ、供試体の変形など、いずれも実験結果と良い対応を示すことが明らかにされている。以上より、本研究で新たに導入された2つの要素の信頼性が十分であることが実証されている。

第6章では、第4章で提案された有限要素プログラムを用いて行われた、柱のせん断耐荷機構および耐力に関する数値実験について述べられている。数値実験は、帯鉄筋のみによる補強、炭素繊維シートのみによる補強、および両者の組合せによる補強に対して行われ、コンクリート強度、軸方向鉄筋比、帯鉄筋比、炭素繊維シート補強比、せん断スパン比、および軸力比の影響が明らかにされた。その結果をもとに柱内部のせん断力分担性状の定式化が行われ、せん断耐荷モデルとして提案されている。

第7章では、本研究および既往の研究による炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート部材の実験結果との比較により、第6章で提案されたせん断耐荷モデルが十分な精度を有することを実証している。

第8章は結論であり、本研究により明らかにされた主要な成果がまとめられている。

これを要するに、著者は炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリート柱のせん断耐荷性状を解析的に評価するため、炭素繊維シート要素およびシートとコンクリートとの間の界面付着をモデル化した接合要素を新たに開発し、それらを導入した有限要素解析による数値実験に基づいて、柱内部のせん断力分担性状と主要な変数の影響を明らかにして定式化を行い、実用的なせん断耐荷モデルとして提案するなど、多くの新知見を得ており、構造工学およびコンクリート工学の発展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。