

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高弾性CFRPロッドの付着性能の改善と張出しRC床版の補強への適用性 (Bond Improvement of High-Modulus CFRP Rods and Applicability for Strengthening of Cantilever RC Slabs)
氏名(Name)	長谷川 泰聡

日本の社会インフラは1970年代の高度経済成長期に建設されたものが多く、今後その多くが建設から50年を経過し、維持・更新の時期を迎えつつある。橋梁においては輪荷重を直接受ける床版の損傷が大きく、交通量の多い道路や古い橋梁では鉄筋コンクリート(RC)床版の抜け落ちも発生している。床版補強に関しては様々な工法が開発され、現在も多数の橋梁の維持補修が行われているが、その多くがRC床版下面側の補強となっている。床版上面側の補強の場合、路面高を変更させることなく、交通規制時間でもできるだけ短い補強が求められるが、それらのニーズに合致した工法はほとんどない。

本研究では耐腐食性に優れるCarbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP)ロッドを、RC床版上面に敷設した超早強ポリマーセメントモルタル(Polymer Cement Mortar:PCM)内に埋設することで、これらの課題を克服する工法を考案した。ここで引抜成形法により製造される高弾性CFRPロッドは表面の凹凸がなく、超早強PCMとの付着性能が低いといった課題が残る。そこで、Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP)リブをCFRPロッドに装着することで付着性能を改善した。本研究は、この付着改善したCFRPロッドによるRC床版の補強効果について実験的に調べたものである。

本論文の構成は7章となっており、それぞれの章の内容を以下に示す。

「第1章 序論」では、日本の社会インフラの現状を述べ、老朽化したRC床版の損傷状況に関して取りまとめた。あわせて老朽化したRC床版に対して現在実施されている補強方法についてもまとめ、その中でも本研究で採用したNear Surface Mounted(NSM)工法の概要と同工法に使用される連続繊維補強材についても概説した。

「第2章 既往の研究」では、道路橋床版の設計方法の変遷と現行の設計方法を整理するとともに、関連する既往の研究をレビューした。

「第3章 CFRPロッドの付着性能改善方法」では、直径12mmのCFRPロッドに種々の付着改善策を施した引抜き耐力試験と、これを補強材に用いたRCはりの曲げ載荷試験についてまとめた。付着性能改善策は大きく分けて2種類で6mm程度の肉厚のGFRPリブを装着する方法とCFRPロッドを25mm程度まで大径化させる方法とした。

引抜き耐力試験においてはCFRPロッドの付着耐力を向上させた場合、鉄筋の付着強度以上の耐力が得られたものの、24~27MPa程度のコンクリートでは埋設コンクリートの割裂破壊が発生することがわかった。RCはりの曲げ載荷試験においては計算上の曲げ圧縮破壊耐力の90%程度の荷重までCFRPロッドの抜け出しが発生しない結果となったが、リブ部分で大きく剛性が変化することからCFRPロッド

(和文2,000字程度 / 英文800語程度)

(about 800 words)

の破断ひずみで50%程度のひずみでロッドが破断する結果となった。CFRP ロッドの破断ひずみ程度まで有効に機能させるためには、ロッドの付着性能を低下させない程度までGFRP リブを小さくする必要があることがわかった。

「第4章 最適GFRP リブ形状の検討」では、リブ厚を6.0mm未満、リブ長を50mm以上とした場合の引抜き耐力試験についてまとめた。試験結果より、リブ長を75mmとしてもCFRP ロッドの付着耐力は向上せず、1.5～4.5mmのリブ厚の範囲ではリブ厚が厚くなると徐々に付着耐力が低下することがわかった。この試験を通じて、6.0mm未満のリブを装着する場合は、リブ長75mm、リブ厚1.5mm程度が最適の形状であることがわかった。

「第5章 GFRP リブを装着したRCはりの曲げ性能」では、第4章で得られた結果を基に、GFRP リブ加工したCFRP ロッドを埋設したRCはりを用いて、静的載荷試験による曲げ耐荷性能と定点繰返し載荷試験による疲労耐久性能についてまとめた。

静的載荷試験ではGFRP リブ加工したCFRP ロッドで補強したRCはり、計算上の鉄筋の降伏荷重以上の曲げ耐力を示し、CFRP ロッドの破断ひずみの90%程度までCFRP ロッドの抜け出しが生じないことがわかった。定点繰返し載荷試験では静的耐力の75%の荷重を上限として繰返し載荷を行ったところ、100万回から200万回の間で鉄筋が降伏したが、CFRP ロッドの抜け出しは発生しなかった。また、200万回載荷後の残存耐力試験においても静的曲げ耐力と同程度の耐力を示しながら、CFRP ロッドの荷重-ひずみ勾配も静的載荷試験時と同程度となり、繰返し載荷によるCFRP ロッドの付着性能の低下もみられなかった。以上の結果よりGFRP リブ厚を1.5mmまで薄くしてもRCはりの補強材として有効と判断された。

「第6章 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証」では、実橋に使用した場合の挙動を調べるため、上記のCFRP ロッドで補強したRC張出し床版に対する輪荷重走行試験についてまとめた。本試験では輪荷重走行下でのひび割れ進展状況、損傷が進展した際の張出し床版端部の変位増加状況、CFRP および鉄筋のひずみ進展状況を調べた。荷重レベルは補強前の鉄筋降伏荷重の130%程度（補強後の鉄筋の許容応力度の150%程度の荷重）となる60kNからスタートし、80kNまで10kNずつ階段状に増加して輪荷重走行試験を行った。本試験において初期荷重である60kNに換算した累加走行回数で350万回以上の疲労耐久性を示し、輪荷重作用位置付近で押抜きせん断破壊する結果となった。また、各荷重レベルで支点部の維ひずみ分布は概ね直線性を保っており、CFRP ロッドの抜け出しも発生していないことから、実床版を模擬した輪荷重作用下においても十分な疲労耐久性能を有していることがわかった。

「第7章 結論」では、本研究の主な成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめた。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	長谷川 泰聡
審査委員	主 査：吉武 勇
	副 査：進士 正人
	副 査：中村 秀明
	副 査：麻生 稔彦
	副 査：渡邊 学歩
論文題目	高弾性 CFRP ロッドの付着性能の改善と張出し RC 床版の補強への適用性
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>劣化損傷した道路橋の鉄筋コンクリート (RC) 床版の張出し部を補強する場合、補強対象が主に床版上面となることから、路面高を変更させることなく、交通規制時間もできるだけ短い施工期間が求められる。この課題に対し、本研究では耐腐食性に優れる高弾性 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ロッドを、RC 床版上面に敷設した超早強ポリマーセメントモルタル (PCM) 内に埋設する補強工法を考案した。引抜成形法により製造される高弾性 CFRP ロッドは表面に凹凸加工ができないため、超早強 PCM との付着性能の低下が懸念される。そこで、付着性能を改善するため Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) リブを装着した CFRP ロッドの開発を行っている。本研究は、この様々な GFRP リブを有する CFRP ロッドの付着特性を調べ、最適な CFRP ロッド形状を提案するとともに、これを用いた RC 床版について、耐荷性能・曲げ疲労耐久性・輪荷重疲労特性について実験的に評価している。</p> <p>本論文は 7 章構成となっており、それぞれの章の内容を以下に示す。</p> <p>「第 1 章 序論」では、老朽化した RC 床版の損傷状況と補強工法の現状についてまとめている。特に本研究で対象とした Near Surface Mounted (NSM) 工法とこれに用いる連続繊維補強材について詳述している。</p> <p>「第 2 章 既往の研究」では、道路橋床版の設計方法の変遷と現行の設計方法を整理しながら、本研究に関連する既往の研究をレビューしている。</p> <p>「第 3 章 CFRP ロッドの付着性能改善方法」では、種々の付着改善を図った CFRP ロッドの引抜き耐力試験と、これらを用いた RC はりの曲げ載荷試験について報告している。RC はりの曲げ載荷試験では、曲げ圧縮破壊耐力の 90% 程度の荷重まで CFRP ロッドの抜出しは生じないが、剛性が急変するリブ装着箇所でもロッドが破断する可能性があることを報告した。</p>	

(様式 9 号)

「第 4 章 最適 GFRP リブ形状の検討」では、リブ厚を 6.0mm 未満、リブ長を 50mm 以上とした場合の引抜き耐力試験について報告している。試験結果より、リブ長を 75mm としても CFRP ロッドの付着耐力は向上しないこと、1.5~4.5mm のリブ厚の範囲ではリブ厚が厚くなると徐々に付着耐力が低下すること、を報告している。実験結果より、最適の形状としてリブ長 75mm、リブ厚 1.5mm を提案している。

「第 5 章 GFRP リブを装着した RC はりの曲げ性能」では、GFRP リブ加工した CFRP ロッドで補強した RC はりを用いて、曲げ耐力と疲労耐久性について実験的検討を行っている。曲げ耐力の 75%を上限荷重とした曲げ疲労試験より、鉄筋降伏は生じたものの CFRP ロッドの拔出は生じなかったこと、200 万回載荷後の残存耐力試験においても静的曲げ耐力と同程度の耐力を示すことを報告している。

「第 6 章 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証」では、荷重レベルは補強前の鉄筋降伏荷重の 130%程度に相当する 60kN から 10kN ずつ階段状に増加させながら 80kN まで載荷した輪荷重走行試験について報告している。初期荷重である 60kN に換算した累加走行回数で 350 万回以上の疲労耐久性を示すこと、輪荷重作用位置付近で押抜きせん断破壊することを報告した。さらに中間支点上の維ひずみ分布は概ね直線性を示し、CFRP ロッドの拔出も発生していなかったことから、NSM-CFRP 補強した張出し床版は輪荷重に対して高い疲労耐久性が得られることを結論づけている。

「第 7 章 結論」では、本研究の主な成果と今後の課題について整理している。

公聴会には、学内外から 45 名（オンライン）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、主にリブ付 CFRP ロッドの製作と実床版への設置・施工方法について、既設コンクリート表層の削り精度について、補強部と非補強部の界面破壊の可能性について、薄いかぶり厚による縦ひび割れの可能性について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 7 編、参考論文 0 編）

- 1) Isamu Yoshitake, Hiroaki Hasegawa and Kodai Shimose: Monotonic and cyclic loading tests of reinforced concrete beam strengthened with bond-improved carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods of ultra-high modulus, Engineering Structures, Vol.206, 110175, 2020.
- 2) 長谷川 泰聡, 吉武 勇, 加藤 貴久: GFRP リブを付けた高弾性 CFRP ロッドの付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.76, No.2, pp.89-97, 2020.
- 3) Hiroaki Hasegawa, Nobuhiro Hisabe, Yoshiki Onari and Isamu Yoshitake: IMPROVEMENT OF MECHANICAL SHEAR RESISTANCE OF HIGH MODULUS CFRP ROD WITH GFRP RIBS, Proceedings of the 9th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2018.