

論文審査の結果の要旨

氏名：小 森 篤 也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：FRP 材を用いた道路橋 RC 床版の補強法および耐疲労性の評価に関する研究

審査委員：(主 査) 教授 阿 部 忠
(副 査) 教授 澤 野 利 章
教授 師 橋 憲 貴
非常勤講師 川 井 豊

高度経済成長期に整備された道路橋は、建設後 50 年が経過し、老朽化が進行している。道路橋点検における主要部材のうち最も損傷が著しい部材は RC 床版であり、長寿命化を図るための維持管理の構築が重要な課題となっている。RC 床版の損傷要因は、主として大型車輛の繰返し走行による疲労損傷であり、これに建設地域の環境条件、すなわち海岸線に建設された道路橋の RC 床版は、飛来塩分に起因する鉄筋腐食に伴うかぶりコンクリートのはく離、積雪寒冷地域においては凍害と融雪剤の散布による塩害の複合劣化などの損傷が挙げられ、このような損傷を受けた RC 床版の補修・補強対策が重要な課題となっている。従来の RC 床版の補修・補強法では、交通規制を必要としない床版下面からの補強法として、炭素連続繊維シート接着補強、鉄筋を配置した下面増厚補強、鋼板接着補強が行われている。また、交通規制を必要とするが、上面損傷および耐荷力の向上を図るためにポリマーセメントモルタル（以下、PCM とする）による上面補修や鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚補強などが実施されている。さらに近年では、RC 床版の張出部において雨水の滞水により表面コンクリートのスケーリングや土砂化などが多く見られる。また、下面増厚補強法においては、引張補強材に鉄筋を配置し、PCM 吹付けによる下面増厚補強が採用されているものの、増厚界面のはく離による落下や配置された鉄筋の発錆などが報告され、新たな補修・補強技術の開発も急務となっている。

そこで本研究では、道路橋 RC 床版の張出部の上面損傷の補強法として、熱硬化性樹脂を繊維で強化した複合材料（以下、FRP とする）である炭素繊維ストランドシート（以下、CFSS とする）と、接着剤を用いた超速硬セメントモルタル（以下、JCM とする）上面補修・補強法における使用材料の特性値の検証、補強効果および耐疲労性の評価を行い、実用性を評価するとともに CFSS と接着剤を用いた JCM 上面補修・補強法を提案する。また、RC 床版の下面損傷および耐荷力・耐疲労性の向上を図る補強法として、軽量で錆が発生しない一面加工された FRP 材料である炭素繊維強化樹脂格子筋（以下、CFRP 格子筋とする）を配置した PCM 吹付けによる下面増厚補強および CFRP 格子筋の配置法と増厚界面に接着剤を塗布した下面増厚補強法における使用材料の特性値の検証、補強効果および耐疲労性を評価するとともに補強法を提案する。次に、道路橋 RC 床版の予防保全型維持管理計画においては健全度評価および寿命予測が重要となる。そこで、CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法における耐荷力性能を評価した上で、RC 床版の寿命予測式である S-N 曲線式との整合性を検証し、CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法における寿命予測に関する考察を述べるなど、地方公共団体が管理する道路橋 RC 床版の補強法の一助とするものである。

本論文は、全 8 章より構成されており、各章において得られた知見を以下に示す。

第 1 章「序 論」では、道路橋の主要部材の中で最も損傷が著しい RC 床版に着目し、維持管理の必要性などの背景を述べた。また、RC 床版の補強材として新材料である FRP 材に関する既往の研究、RC 床版の補強法および RC 床版の寿命予測に関する既往の研究を整理し、本研究の課題となる FRP 材を用いた RC 床版の張出部上面の補強法および FRP 材を用いた PCM 下面増厚補強法の必要性を述べ、本研究の目的の位置づけを論じた。

第 2 章「道路橋 RC 床版の現状および補修補強と長寿命化修繕計画」では、日本の道路橋の現状を示し、予防保全型維持管理の実施フローに基づいて道路橋点検、対策区分および健全性の診断、措置、記録に

ついて述べ、予防保全型維持管理の必要性を示した。また、RC床版の現状では、損傷状況と道路橋点検における損傷区分と土木学会が示す劣化過程との整合性を述べるとともに、RC床版の損傷状況および道路橋の設計基準の変遷に伴う各種補強法について事例を述べ、各種損傷に適応した補強法の必要性を論じた。

第3章「炭素繊維材料の力学特性および補強コンクリートの材料特性値」では、RC床版の補強材として採用されている炭素繊維材料の特性を述べるとともに、本研究に用いる2種類のFRP材の特性を示した。また、本提案する上・下面補強法においては、既設RC床版とセメントモルタルとの界面での離れが懸念されることから、2種類のプライマーとエポキシ樹脂接着剤を用い、引張試験および一面せん断試験を実施し、それぞれの引張強度および一面せん断強度を評価するとともに、輪荷重を受けるRC床版のセメント系モルタルを用いた増厚補強における接着剤の有効性を検証した。

第4章「CFSSおよびCFRP格子筋とコンクリートの付着特性」では、CFSSとCFRP格子筋の2種類の補強材を用い、それぞれの力学的性能を明らかにするとともに、補強時に付着界面となるコンクリートと各補強材を用いた場合の付着特性を実験的に検証した。補強材の力学的性能評価では、CFSSを各種接着樹脂で硬化させた際の性能を検証するとともにCFRP格子筋の力学的性能について評価した。また、土木学会により規定される付着試験方法により、補強材の発生ひずみ・応力との関係、剥離破壊エネルギーや付着強度および定着長さなど、設計時に必要なコンクリートとの付着性能について実験的に検証した。

第5章「張出部を有する実橋RC床版のCFSS上面接着補強法」では、疲労と塩害・凍害による複合損傷を受けて33年間供用され、撤去された実橋道路橋RC床版を補強に用いて評価した。また、既往の道路橋RC床版上面補強法について取りまとめるとともに、新たに提案するCFSSと接着剤およびJCMを組合せて補強する床版上面補強法について、定点疲労実験により耐疲労性を評価した。検証の結果、本提案する補強法は耐疲労性が確保され実用的であるとともに、JCMを用いることで工期短縮が図れることを示した。

第6章「CFRP格子筋を用いる道路橋下面増厚床版の耐疲労性の評価」では、補強材にCFRP格子筋、増厚材料にPCMを用いたRC床版の下面増厚補強法において、従来から増厚界面の処理に使用されてきたプライマーとエポキシ樹脂接着剤を増厚界面に用い、輪荷重走行実験による耐疲労性の評価を行った。また、CFRP格子筋と鉄筋相当のワイヤーメッシュを用いた供試体および有効高さを変化させてCFRP格子筋を配置した供試体の耐疲労性を評価し、本研究で提案する新たな接着剤塗布型床版下面増厚施工法の有効性について示した。

第7章「CFRP格子筋を用いた下面増厚補強床版におけるS-N曲線式との整合性」では、第6章で詳しく述べた、補強材にCFRP格子筋、増厚材料にPCM、増厚界面に接着剤を用いたRC床版の下面増厚補強法において、走行荷重実験を行い、実験耐荷力および押抜きせん断耐荷力式から、道路橋RC床版の終局破壊状況となる押抜きせん断耐荷力との整合性を確認した。併せて、補強が施されたRC床版の残存余寿命の推定を行うため、現在提案されているS-N曲線式との整合性を検証した。

第8章「総括」では、各章における結論を総括して、本論文の主な研究成果とした。各章における結論から、本論文の主な研究成果である2種類のFRP材を用いた道路橋RC床版の上・下面補強法について総括した。まず、RC床版の張出部上面補強法では、CFSSと接着剤およびJCMを組み合わせた補強法について、材料試験における付着特性、定着長の評価、定点疲労実験における耐疲労性を評価した。一方、RC床版の下面増厚補強では、界面にプライマーおよび接着剤を塗布し、CFRP格子筋を配置した下面増厚補強の界面材料による付着強度および一面せん断強度を評価および輪荷重走行疲労実験における耐疲労性を評価した。さらに、RC床版の寿命予測式であるS-N曲線式との整合性を検証し、道路橋長寿命化修繕計画における「予防保全型維持管理」に向けた道路橋RC床版に対する上・下面の新たな補強法として提案した。

以上より、本論文は FRP 材を用いた道路橋 RC 床版の上・下面の補強法を提案しているが、CFSS 材を用いた張出部の上面補強では、既設 RC 床版上面に接着剤を塗布して CFSS を接着し、セメントモルタルで補修、さらに床版支間内の下面接着補強法を併用した補強法を実施した。その結果、接着剤の効果により CFSS ははく離することなく、従来の補修法と比して大幅に耐疲労性が向上した。一方、下面増厚補強においては、プライマー塗布後、CFRP 格子筋を配置し、セメントモルタル吹付けによる下面増厚補強法は従来の補強材と同等以上の補強効果が得られた。さらに、既設 RC コンクリートに接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、終局時まで一体性が確保され耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。次に、RC 床版の S-N 曲線式との整合性については、下面増厚補強後の押抜きせん断耐荷力を適用することで、既往の研究における S-N 曲線式との整合性が確認された。よって、本提案する上・下面の補強法は、道路橋 RC 床版の補強法として実用的であることが示され、本論文で明らかになった研究成果は、道路橋 RC 床版の FRP を用いた補強法として道路橋の「予防保全型維持管理手法」の発展に大きく寄与するものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年3月10日