

論文審査の結果の要旨

氏名：元 燦 豪

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：道路橋 RC 床版の炭素繊維シート補強法における耐疲労性の評価に関する研究

審査委員：（主査） 教授 博士(工学) 阿 部 忠

（副査） 教授 工学博士 澤 野 利 章

教授 博士(工学) 柳 内 睦 人

非常勤講師 工学博士 川 井 豊

近年、高度経済成長期に整備された社会資本ストックが同時期に高齢化を迎え、その維持管理が重要な課題となっている。とくに、日本経済の発展に大きく貢献してきた道路網に建設された橋梁は、一般に橋梁の寿命と言われている建設後 50 年が経過し、今後、老朽化した橋梁が年々増大することになる。そこで国土交通省では、橋梁の損傷が軽微な段階で修繕を繰返し、橋梁の長寿命化および修繕費用の平準化を図るための「予防保全型維持管理計画」、すなわち「道路橋長寿命化修繕計画事業」を策定した。これによって、地方公共団体では、2007 年から一斉に橋梁点検を実施し、健全度を評価し、建設後 100 年間維持するための修繕計画が立案、報告されている。橋梁点検結果によると橋梁部材の中で、損傷が最も著しい部材は RC 床版である。現在、供用されている道路橋床版は道路橋示方書の改訂、交通量の増大、建設地域の環境条件などに伴い、耐荷力不足、材料の劣化が進行し、床版損傷や劣化に対する補修・補強法および建設後 100 年間維持するための補強対策が計画されている。これらのことから各研究機関や企業では補修・補強材および補強法の開発が積極的に行われている。

そこで本研究は、道路橋 RC 床版の長寿命化を図るために、連続炭素繊維シート（CFS）および施工の合理化を図る目的で開発された炭素繊維ストランドシート（CFSS）を用いて、床版下面接着補強した RC 床版の輪荷重走行疲労実験を行い、補強効果および耐疲労性の評価を行う。次に、CFS 全面接着補強した RC 床版の残存寿命の推定を行なうための S-N 曲線式を求めるとともに、再劣化に対する再補強時期の推定を行うために、新たに D-N（劣化値-繰返し数）曲線式を提案する。さらに、道路橋 RC 床版を 100 年間維持する補修方法の一つとして CFS 全面接着補強法と鋼繊維補強コンクリート（SFRC）による上面増厚補強法とのサイクル補強法についても提案し、損傷 RC 床版に対する合理的補強法の確立と既存の RC 床版の維持管理における最適な補強サイクルの提案など、多角的視点から総合的に検討する。

本論文は、全 8 章より構成されており、その要旨は次のとおりである。

第 1 章「序論」では、高度経済成長期に建設された道路橋は、一般的に橋梁の寿命といわれている建設後 50 年を経過する橋梁が増大している。中でも RC 床版の損傷が著しく、その維持管理が課題となっている。これら研究背景、既往の研究、実験方法および寿命の推定を解明する意義を述べて、本研究目的の位置づけを論じている。

第 2 章「道路橋 RC 床版の現状および点検要領」では、道路橋 RC 床版の損傷状況、損傷事例などの RC 床版の現状を述べるとともに、橋梁点検要領および維持管理マニュアルに基づく道路橋の点検要領および各種補強法の現状と課題について述べ、RC 床版の損傷状況および劣化過程に対応する各種補強法との整合性を検証している。

第 3 章「炭素繊維材料の基本概念および力学特性」では、道路橋 RC 床版の補修・補強に用いられる代表的材料である炭素繊維補強材料の種類や分類、力学特性を述べる。また、繊維補強材料を用いる補修・補強工法における一般的な施工について示すとともに、本研究で使用する CFS および施工の合理化を目的とした新材料である CFSS の特徴や施工の合理化について詳述している。

第 4 章「CFS 全面接着・CFSS 格子接着補強した RC 床版の耐疲労性の評価」では、CFS 全面接着補強および CFSS 格子接着補強法における補強効果、および耐疲労性を評価する。そのため、コンクリートの圧縮強度と寸法の異なる 3 タイプの RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し、コンクリートの圧縮強度の影響および寸法効果の影響が耐疲労性に及ぼす影響を考察している。

第5章「CFS全面接着補強 RC床版の耐疲労性の評価および各種劣化要因を適用したS-N曲線式」では、第4章で得られた乾燥状態における等価走行回数を基に、CFS全面接着補強後の疲労による性能低下や湿潤状態などの各種劣化要因を考慮した補強等価走行回数の算定法を検討し、残存寿命、再劣化に対する補強時期を推定するS-N曲線式を提案している。

第6章「実橋RC床版の寿命予測との整合性」では、高度経済成長期の設計基準（1964年）から現行示方書（2012年）までの間に改訂された設計基準を用いて改訂年度ごとに設計し、RC床版の耐用年数および損傷したRC床版にCFS全面補強した場合の残存寿命、再劣化に対する最適補強時期を、提案したS-N曲線式を用いて推定する方法を述べている。

第7章「道路橋RC床版の予防保全型維持管理におけるサイクル補強」では、道路橋RC床版におけるサイクル補強対策の実験検証として、RC床版供試体に疲労損傷を与えた後1次補強し、さらに再劣化に対して2次補強した床版に輪荷重走行疲労実験を行い、累積等価走行回数を算定することによりサイクル補強における耐疲労性を評価し、RC床版を100年間健全に維持するための補強対策策定の一助としている。

第8章「総括」では、本研究における結論を総括して、本論文の主な研究成果を以下のようにとりまとめている。

- 1) RC床版の損傷状況と劣化過程の関係から判断すると、劣化過程が進展期から加速期（前期）において各種補強方法を施す必要がある。進展期から加速期（前期）における補強対策としては、通行止めを必要としない下面からの補強を推奨する。一方、桁下施工空間に制約がある跨線橋などにおいては、通行止めが必要となるが上面増厚補強が有利となる。また、加速期（後期）から劣化期の損傷に対しては、適切な調査診断に基づき床版取替も含めた対策の検討が必要となる。
- 2) 補修用炭素繊維材料の材料特性値および施工性の観点から、道路橋RC床版の下面補強においてはCFS全面接着補強が多く採用されている。しかし、CFS補強法ではプライマーや接着剤の養生時間が施工開始から終了までに、それぞれ8時間以上必要となる。これに対して、施工の合理化を図る目的で開発された新材料であるCFSSを用いた格子接着補強法では、施工時間の短縮および施工後の点検が容易となる。
- 3) RC床版にCFS全面接着補強およびCFSS格子接着補強した供試体を用いた輪荷重走行疲労試験結果において、無補強RC床版供試体に比して各タイプともに16.4~25.3倍の補強効果が得られた。しかし、劣化を想定して製作したコンクリート圧縮強度が設計基準強度以下の供試体に、CFS全面接着補強およびCFSS格子接着補強した場合は、設計基準強度を満足している供試体の補強効果の0.3~0.4%となり、耐疲労性の向上は少なかった。したがって、床版の点検調査においてコンクリートの圧縮強度が設計基準強度以上であることを確認した上で、CFSおよびCFSS材を用いた補強対策を講じる必要がある。
- 4) 輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数との関係より、等価走行回数の増加に伴うたわみの増加を再補修・補強時期の予測指標とすることができると分かった。そのため、性能低下指標として床版たわみの初期値とたわみ増分の比を劣化値と定義し、等価走行回数との関係をD-N曲線式として新たに提案した。この指標を用いた場合、たわみによる健全度の限界値は、CFS補強法における再補強時期を想定したたわみが床版支間Lの1/400までとすることができる。また、実橋RC床版の設計基準の変遷による低減係数や建設されている地域の環境条件などを考慮した低減係数を求め、補強等価走行回数および再劣化の時期を推定するS-N曲線式を提案した。
- 5) 設計基準の改訂に伴い、RC床版の設計活荷重、最小厚、鉄筋量なども改訂されている。そこで、設計基準改訂年次ごとの基準により設計されたRC床版を対象に、既往の研究で提案されているRC床版のS-N曲線を用いてRC床版の耐用年数を、また提案するCFS下面接着補強した場合のS-N曲線式を用いて残存寿命および再劣化の発生までの年数を算定した。その結果、1973年以前の設計基準で設計されたRC床版は、現行示方書による床版に比して床版厚が薄いことから、耐荷力性能を向上するための補強法とCFS下面接着補強法の併用が必要であることを明らかにした。また、1980年以降の設計基準では床版厚が厚くなることから耐用年数が大幅に向上する結果が得られた。
- 6) 道路橋長寿命化修繕計画におけるRC床版の修繕計画では、再劣化に対するサイクル補強が計画されている。そのため、RC床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、劣化過程が進展期から加速期（前期）程度の疲労損傷を与えた後、1次補強法としてCFS下面接着補強し、その後の再劣化に対する2次補強法にはSFRC上面増厚補強法を計画することで長寿命化が可能となることを明らかにした。また、1次補強にSFRC上面増厚補強した床版は2次補強にCFS下面接着補強することによっても

長寿命化が図れる。なお、3次補強については、既設 RC 床版の損傷が著しくなることから損傷状況を適切に調査した上で健全性を評価し、床版取替も含めた補強対策の検討が必要である。

以上、本論文は道路橋 RC 床版の補強法の一つである CFS 下面接着補強および施工の合理化を図るために開発された CFSS 格子接着補強した RC 床版の補強効果および耐疲労性を評価することにより、これらが道路橋床版の補強材および補強法として実用的であることを明らかにしている。また、ライフサイクルコストの算定においては、CFS 下面接着補強した場合の余寿命推定を行なう新たな S-N 曲線式を提案するとともに、道路橋 RC 床版を供用開始後 100 年間健全に維持するための最適な補強サイクルを提案している。よって、本研究で明らかにした事項は、RC 床版に CFS, CFSS を用いた下面接着補強法および予防保全型維持管理の発展に大きく貢献するものと評価できる。

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 年 月 日