

## 学位論文題名

## マイクロメカニクスに基づくECC補強鋼床版の疲労耐久性評価に関する研究

## 学位論文内容の要旨

既設道路橋鋼床版では、重交通路線を中心に部材接合部における疲労損傷の発生が数多く報告されており、早急な疲労対策が必要となっている。その中で、アスファルト舗装の一部をセメント系材料で置き換え、鋼床版と一体化することで鋼床版に生じる応力を低減する上面増厚補強工法は、橋軸方向全長にわたる剛性向上が可能な補強工法であり、実橋梁において鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下, SFRC)を用いた舗装構造の改善が実施される事例が増加している。また近年では、SFRCに替わる増厚材料として、マイクロメカニクスと破壊力学を配合設計原理とすることで初期ひび割れ発生後のひずみ硬化挙動による高い引張抵抗性とひび割れ幅抑制効果を実現したECC(Engineered Cementitious Composite)を用いた一体化工法が提案されている。これは、主桁やUリブ上における負曲げ作用に対する優れた抵抗性や舗装ひび割れなどを誘発しないためのひび割れ幅抑制効果が期待されてのことである。

一方で、ECCが比較的新しい材料であること、配合の組合せが多岐にわたること、また構造物レベルでの疲労特性を把握するためには輪荷重走行試験等の長期間の疲労試験を要するといった様々な制約条件により、疲労耐久性に関する研究が十分でないのが現状であり、ECCの疲労破壊の支配的機構に基づいた材料設計と開発および構造物の疲労劣化挙動を予測できる解析モデルの構築と疲労耐久性・疲労寿命予測手法の開発が必要となっている。

そこで本研究では、ECCにより上面増厚した鋼床版(以下、ECC補強鋼床版)に関して、ECCの疲労破壊機構を再現した材料疲労劣化モデルに基づく非線形有限要素解析を実施し、疲労耐久性およびECCによる補強効果を数値解析的に評価することを目的とする。本論文は全6章から構成されており、各章の概要をまとめると以下ようになる。

第1章では、本研究の序論として、既設鋼床版において問題となっている疲労損傷を挙げ、その疲労対策としてECCを用いた上面増厚補強工法が有効であるとされる理由を説明した。また、関連する既往の研究を紹介するとともに、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、本研究で行う疲労解析の基礎となるECCの疲労劣化モデルの構築を行った。マイクロメカニクスを配合設計原理とするECCでは、複合材料を構成する繊維、マトリクスおよび両者界面に関する微視的材料定数から導かれるひび割れ面での繊維伝達応力-ひび割れ開口幅関係(架橋則)による材料挙動の予測が可能であり、架橋則において繰返し载荷に伴う微視的材料定数の変化を仮定することで、ECCの疲労破壊機構である繊維伝達応力の劣化をモデル化した。具体的には、ポリビニルアルコール(polyvinyl alcohol, 以下, PVA)繊維を補強用に用いたECC(以下, PVA-ECC)を対象とし、その支配的な繊維伝達応力劣化要因である繊維の疲労破断に着目して、微視的材料定数の一つである繊維の引張強度に疲労低下則を適用している。構築したモデルは、同一ひび割れ開口幅における引張応力の保持率を表す応力比の変化について、既往のPVA-ECCの材料疲労試験結果

(一軸引張疲労試験および一軸交番疲労試験)と比較することで妥当性を確認し、さらに、本モデルの有限要素解析への適用を容易にするため、応力比の変化をひび割れ開口幅と繰返し回数の関数として定式化した。

第3章では、第2章で構築した繊維伝達応力劣化モデルを用いて PVA-ECC 梁の曲げ疲労載荷解析を実施し、部材レベルでの疲労劣化挙動に対する本モデルの適用性の検証および PVA-ECC の曲げ疲労特性の解析的評価を行った。モデルの検証では、解析結果が既往の実験結果におけるたわみの変化および S-N 線図を再現することを確認し、本モデルにより疲労劣化挙動および疲労寿命の予測が可能であることを示している。曲げ疲労特性の評価では、パラメトリック解析に基づき荷重条件が PVA-ECC の疲労特性に及ぼす影響について検討した。これは、既往の研究で明らかになっている繊維架橋性能低下の荷重履歴依存性を評価することを目的としたものであり、荷重振幅を変数として採用している。パラメトリック解析の結果からは、最小荷重毎に S-N 線図が作成されること、普通コンクリートの圧縮疲労強度式と同様に最大荷重と最小荷重を用いて破壊までの繰返し回数を推定できること、その推定式が片振り繰返し載荷時と正負交番繰返し載荷時に区別して定義できることが示されており、将来的により広範囲な条件の下で実験および解析を実施することで、様々な荷重条件に対応した S-N 線図および曲げ疲労強度式の定式化が可能であるという結論に至っている。

第4章では、繰返し移動荷重を受ける ECC 補強鋼床版の有限要素解析を実施し、ECC を用いた上面増厚補強による鋼床版の疲労耐久性向上効果を解析的に評価した。解析に先立ち、既往の研究で提案されている繊維強化プラスチック製のプレート型ジベル (以下、PL ジベル) を用いた鋼-ECC 一体化構造についても簡単にまとめている。有限要素解析では、3本の U リブを有する鋼床版と ECC を PL ジベルにより一体化した合成床版構造を解析対象とし、U リブ-デッキプレート間の接合部に生じる局部応力に着目した2つの走行ラインを用意することで、走行位置が疲労耐久性に及ぼす影響も検討している。解析結果は、たわみ、鋼床版ひずみ、PL ジベルに作用するせん断力および ECC のひび割れ発生状況について確認し、設計荷重相当の輪荷重走行では、走行位置によらず 120~160 万回の走行で生じる疲労損傷のうちの多くが走行回数 20 万回までの比較的早い段階で生じるが、その後は、ECC が十分に引張力を負担できる状態に保たれ、増厚材に大きな引張力が作用する場合であっても安定した剛性向上効果が発揮されることを示した。また、ECC 補強による鋼床版ひずみの低減効果は U リブ-デッキプレート接合部で最も顕著となり、同部位に関する疲労照査結果からは、設計荷重相当の下では、補強前の 6~10 倍の耐用年数が期待されることが示された。

第5章では、鋼-ECC 合成部材の疲労き裂進展解析を行った。既設鋼床版に対する ECC 補強の効果を検討する場合、既にき裂が発生している鋼床版を想定した余寿命 (き裂進展寿命) 評価手法の開発が必要であり、本章ではその基礎的段階として、非常に簡便なき裂進展問題を対象に ECC 補強が鋼部材の疲労き裂進展に及ぼす影響を解析的に評価した。有限要素解析では、接合要素の一つである結合力要素および結合力の疲労損傷則を用いてき裂開閉口および進展挙動をモデル化しており、まず、SM490 材を対象としたき裂先端開口変位試験および線形破壊力学と Paris 則を併用した疲労き裂進展予測結果との比較から解析手法の適用性を検証している。合成部材の疲労き裂進展解析では、ECC 補強の有無によるき裂進展速度およびき裂開口速度の違いを比較し、その結果、補強後ではき裂進展およびき裂開口が抑制され、ECC のひび割れ分散性が発揮させる高疲労荷重時ほどその抑制効果が大きくなることが示された。

最後に 6 章では、本研究の結論として得られた知見をまとめ、今後の課題を示している。

# 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	上田	多門
副査	教授	横田	弘

## 学位論文題名

# マイクロメカニクスに基づくECC補強鋼床版の疲労耐久性評価に関する研究

道路橋の鋼床版は輪荷重が直接作用する部材であり、経年した既設橋において多数の疲労損傷が報告されている。疲労損傷の中でも、デッキプレートとUリブとの接合部における亀裂の報告件数が多く、これは輪荷重によるデッキプレートの局所的な負曲げに伴う応力集中から亀裂が発生・進展するものとされている。疲労亀裂の進展は、舗装の割れや陥没を招くのみならず、構造物の安全性においても重要であり、早急な対策が必要とされている。

鋼床版の疲労対策として、鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete、SFRC) による鋼床版上面増厚工法は、アスファルト舗装の一部を SFRC で置換し鋼床版と合成化することで剛性向上を図り、鋼床版に発生する応力を低減させるものであり、適用事例が増加している。また近年では、複数微細ひび割れの発生によりひずみ硬化挙動を示すセメント系繊維補強複合材料 (Engineered Cementitious Composite、ECC) を用いた上面増厚工法が提案されている。これは、0.5パーセント以上の高い引張ひずみ性能による鋼材変形への追従性、ひずみ硬化挙動による応力分担、最大でも 0.2mm 以下の微細ひび割れ幅による耐久性向上などが、期待されているためである。

しかしながら、ECC は比較的新しい材料であるため疲労特性の把握が十分でなく、合成部材である ECC 補強鋼床版の疲労挙動の把握には長期間の輪荷重走行試験を要するなどの状況により疲労耐久性に関する研究が十分ではない。

このような背景のもとで、本論文は ECC により上面増厚補強した鋼床版を対象として、ECC の微視的な疲労劣化機構に基づいた材料疲労劣化モデルを導出した上で、このモデルを組み込んだ非線形有限要素解析手法を構築することにより、ECC 補強鋼床版の疲労耐久性と ECC による補強効果を数値解析的に検討するものである。

本論文は全 6 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、ECC のひび割れ面における繊維伝達応力-ひび割れ開口幅関係において疲労劣化の影響を考慮した繊維伝達応力劣化モデルを構築している。構築されたモデルは、繊維補強複合材料の微視的材料定数により表されており、繊維の疲労破断による繊維数の減少で伝達応力の低下を再現している。妥当性は既往の疲労試験結果と比較することで確認されている。また、有限要素解析

での適用を容易とするために、モデルに対する近似式も提案している。

第3章では、繊維伝達応力劣化モデルを用いた ECC 梁の曲げ疲労載荷解析により、部材レベルでのモデルの適用性の検証と、ECC 梁の曲げ疲労特性の解析的検討を行っている。検証では梁のたわみ変化と S-N 線図の再現を確認し、疲労挙動と疲労寿命の予測が可能であることを示している。検討ではパラメトリック解析により荷重条件が曲げ疲労特性に及ぼす影響を確認しており、コンクリートの圧縮疲労強度式と同様の定式化を提案している。

第4章では、繰返し移動荷重を受ける ECC 補強鋼床版の有限要素解析を行い、鋼床版の疲労耐久性向上を解析的に検討している。解析では、3本の U リブを有する鋼床版と ECC をプラスチック製ジベルにより一体化した合成床版構造を対象とし、U リブ-デッキプレート間の接合部に生じる局部応力に着目した2つの走行ラインについて、走行位置が疲労耐久性に及ぼす影響も検討している。解析結果は、設計荷重相当では走行位置によらず 120~160 万回の繰返し移動荷重の間に ECC が十分に引張力を負担できる状態に保たれ、安定的な剛性向上効果が発揮されることを示している。

第5章では、鋼-ECC 合成部材の疲労亀裂進展解析を行っている。既に亀裂が発生している鋼床版に対する ECC 増厚補強を想定して、疲労損傷を考慮した結合力要素を用いて鋼材の亀裂進展解析を行っている。Paris 則による疲労亀裂進展計算と比較することで適用性を検証しており、ECC 補強により亀裂進展及び亀裂開口の速度抑制効果が得られることを示している。

最後に6章では、本研究の結論として得られた知見をまとめ、今後の課題を示している。

これを要するに、著者は ECC のマイクロメカニクスに基づいて疲労劣化を考慮した構成則を導出し、この構成則を組み込んだ非線形有限要素解析手法を構築し、ECC 合成鋼床版の輪荷重載荷試験を数値的に検討することで、ECC 補強鋼床版の疲労耐久性と ECC による補強効果に関する知見を得たものであり、橋梁工学、鋼構造学、複合構造学、メンテナンス工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。