

博士論文審査報告書

論文題目

道路橋コンクリート床版の 疲労損傷機構と寿命予測

Fatigue Damage Mechanism and Lifetime Prediction
of Highway Bridge Concrete Deck Slabs

申請者

竹田	京子
Kyoko	TAKEDA

建設工学専攻 構造設計研究

2021年2月

竹田京子氏の論文に関し、慎重に審査員と学科教員で審査を行ったので審査内容を報告する。まず建設工学専攻の博士論文としての要件である、土木学会構造工学論文集など主要な論文集に筆頭著者として数編の論文が採択・掲載されたことを確認し、研究業績が十分にあることを認めた。また 2020 年 11 月 2 日に開催された予備審査会、2021 年 1 月 7 日に開催された公聴会などの口頭発表と質疑応答から、研究内容に独創性があり完成度が高いことを確認した。研究倫理に関する所定の講義の単位を取得していること、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。以上より博士論文の要件を満たしていることを確認した。以下に審査した本論文の内容について述べる。

道路橋コンクリート床版に交通車両の繰返し荷重が作用することでコンクリート塊が抜け落ちるといった疲労劣化の問題が認識されて以来、1970 年代から今日に至るまで、コンクリート床版の疲労破壊に関する実験的および解析的研究が行われてきた。特に、輪荷重走行試験を用いた実験的検討が数多く報告されてきたが、研究機関により異なる実験結果を統一的に説明できる疲労寿命評価法は確立されておらず、それゆえ、合理的に疲労限界状態を照査することができなかった。本論文にこの課題の解決法が見出されている。

本論文の目的は、繰返し移動輪荷重を受ける道路橋コンクリート床版の疲労破壊機構を明らかにした上で、破壊機構に基づいた疲労寿命評価法を構築することにある。鉄筋コンクリート（RC）床版の破壊形式は複数存在し、破壊形式に応じた疲労寿命評価法が必要であることを指摘し、特に、輪荷重走行試験で観察される RC 床版の梁状化後のせん断圧縮破壊形式に着目して、解析および実験的検討により RC 梁部材のせん断抵抗機構と疲労破壊機構を解明した。その上で、疲労破壊機構に基づいて残存せん断耐力低下モデルを構築するとともに、RC 床版の疲労寿命評価法を提案し、過去に実施された輪荷重走行試験の実験データとの比較によりその適用性の高さを示した。さらに、残存せん断耐力低下モデルに基づく階段状漸増荷重の評価法を構築し、RC 床版以外のコンクリート床版構造として、プレストレストコンクリート（PC）床版や継手鉄筋を用いたプレキャスト PC 床版接合部に対する疲労寿命評価法を考案し、疲労に対する実床版の合理的な設計法を完成させた。本論文では、このような多くの成果が、5 つの章に体系的にまとめられている。以下に、各章の概要を述べる。

1 章では、道路インフラの高齢化と維持管理に関する研究背景と、道路橋コンクリート床版の疲労破壊に関する国内外の既往の研究を整理するとともに、将来の設計体系におけるこの研究の位置づけを明確にしている。

2 章では、RC 床版は繰返し移動輪荷重を受けることで梁状化することから、せん断補強筋を持たない RC 梁を RC 床版の梁状化部材と見立てて、せん断抵抗機構とせん断圧縮破壊形式の疲労破壊機構を明らかにした。具体的には、解析的検討では、三次元非線形有限要素解析を用いて、疲労荷重と静的荷重

との比較を通じた疲労破壊機構に関する考察を行い、疲労载荷では、静的载荷における破壊時の梁の割線弾性係数を大きく下回ることや、圧縮ストラットの圧縮軟化領域が静的载荷よりも疲労载荷の方が広範囲であったことから、損傷を受けた箇所から別の箇所へと応力が再分配され、徐々に損傷領域が拡大することで、最終的に静的耐力よりも小さい作用荷重で破壊に至ることを明らかにした。また、実験的検討では、サンプリングモアレ解析により梁のせん断変形量が疲労破壊の直前に増大すること、ならびに、ひび割れ幅とずれ量から斜めひび割れに沿ったせん断伝達応力を求め、骨材の噛み合わせによるせん断抵抗成分と圧縮部コンクリートのせん断抵抗成分をそれぞれ算出した結果、疲労振幅の最大荷重時のせん断抵抗成分の分担割合は、繰返し回数に関わらずほぼ一定であることを明らかにした。さらに、疲労振幅の最小荷重時の圧縮部コンクリートの応力状態に着目し、疲労破壊直前のせん断応力の疲労振幅が増大することで、疲労寿命が急速に低下する可能性があることを示した。すなわち、水平方向圧縮疲労と鉛直方向せん断疲労が同時に作用する多軸応力疲労によりせん断圧縮破壊が決定するという疲労破壊機構を新たに見出した。また、圧縮部コンクリートの平均圧縮ひずみが梁の疲労損傷を表し、これが梁の平均せん断剛性の変化と相関関係にあることから、平均せん断剛性の低下が疲労損傷を代表するパラメーターであると考えて、RC床版の梁状化部材の残存せん断耐力と繰返し回数の関係を表す残存せん断耐力低下モデルを構築した。

3章では、実床版と輪荷重走行試験の実験床版の比較から、RC床版に生じる破壊形式を3つに分類し、破壊形式に応じた疲労寿命評価を行う必要性を示した上で、輪荷重走行試験で観察されるせん断圧縮破壊形式の疲労寿命評価法を構築した。また、その他2つの破壊形式である土砂化後の押抜き破壊形式と鉄筋降伏・破断形式の疲労寿命の評価の考え方を示した。RC床版のせん断圧縮破壊形式の疲労寿命評価法は、梁状化部材のせん断耐力式と疲労寿命を表すS-N曲線式からなる。この評価法の特徴は、輪荷重走行試験におけるRC床版を、梁状化部材同士が平行に隣接した状態で配力筋により連結されている梁部材にモデル化し、その梁部材のせん断耐力を、土木学会コンクリート標準示方書の棒部材のせん断耐力式において、圧縮強度の影響を表す項の修正と配力筋の影響を表す項の導入、さらに、支持条件の差異と水分供給の有無を考慮する係数を導入することで算出する点にある。提案した疲労寿命評価法を用いて、過去の84体の輪荷重走行試験結果の評価を行い、実験データを統一的に評価可能であることを明らかにした。また、土砂化後の押抜き破壊形式に対しては、湿潤条件下でRC床版の上層が橋軸方向と橋軸直角方向の2軸圧縮応力の疲労作用を受けることで段階的に土砂化が進行し、断面損失により押抜き曲げ耐力の低下によって生じるという疲労寿命の評価の考え方、鉄筋降伏形式に対しては、梁状化による曲げ引張破壊耐力の低下によって生じるという評価の考え方、鉄筋破断形式に対しては、主鉄筋

の引張応力が繰返し作用することで鉄筋破断が生じるという評価の考え方を、計算例を通じて明快に示した。

4章では、輪荷重走行試験における階段状漸増载荷を受ける RC 床版の疲労寿命評価法を構築し、その評価法を拡張することで、PC 床版、プレキャスト PC 床版接合部といったコンクリート床版構造の疲労寿命評価を可能とした。作用する荷重の大きさが変動する疲労载荷試験における RC 床版の疲労寿命評価法は、それまでに受けた荷重履歴による疲労損傷が、残存せん断耐力の低下により表されるという考えに基づき、2章で構築した残存せん断耐力低下モデルを用いた方法である。この疲労寿命評価法が高い予測精度を有していることを、過去の輪荷重走行試験において階段状漸増载荷を受けて破壊した 27 体の RC 床版の実験結果との比較を通じて明らかにした。また、3章で提案したせん断耐力式にプレストレスの影響を考慮する項を導入することで PC 床版の疲労寿命評価法へと拡張した。さらに、継手鉄筋を用いた接合部を有するプレキャスト PC 床版について、継手鉄筋のループ形状や端部拡径形状が接合部の主鉄筋に拘束力を与え、主鉄筋の付着向上により接合部の耐力が向上するという三次元非線形有限要素解結果に基づき、継手鉄筋による拘束力が主鉄筋の付着を向上させること、接合部の幅で梁状化すること、継手鉄筋が配力筋として作用すること、を考慮した PC 床版接合部のせん断耐力と疲労寿命の定量評価法を提案した。

第 5 章では、本論文の結論と今後の課題がまとめられている。

道路橋コンクリート床版の疲労寿命予測は、橋梁の設計と維持管理における重要な課題であった。本論文では、RC 床版、PC 床版、接合部の全てを対象に、その疲労寿命を定量的に予測できる手法の開発に成功しており、コンクリート工学、構造工学、維持管理工学上の貢献は大なるものと判断される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2021 年 1 月

審査員

主査 早稲田大学 教授 博士(工学) 北海道大学 佐藤 靖彦

副査 早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 岩波 基

副査 早稲田大学 教授 博士(工学) 大阪大学 小野 潔

副査 早稲田大学 教授 博士(工学) 東北大学 秋山 充良
