

# 博士論文概要

## 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

2020年12月

現在のコンクリート構造物の設計においては、設計段階において構造性能照査に加えて疲労や腐食といった耐久性照査を行い、これを満たすことで供用期間にわたり初期の構造性能が確保され、劣化を生じずに構造物を使用できるものと仮定をしている。しかし、実際には、複数の作用を同時に受けることで劣化作用が互いに進行を促進させるため、実構造物では構造性能が低下する。特に道路橋コンクリート床版は、供用期間を通じて交通荷重による疲労作用に加えて水や塩害といった環境条件による複合作用を受けるため、劣化が顕在化しやすい部材である。道路橋コンクリート床版に交通車両の繰返し載荷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多く行われてきた。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、これらのデータを統一的に説明可能な疲労寿命評価法は確立されておらず、合理的に疲労限界状態を照査することができていない。

本研究の目的は、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である。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載荷の評価法を構築し、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の提案を行った。本論文は5つの章からなる。以下に各章の概要を示す。

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本研究の位置づけを明確にする。

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。解析的検討では、三次元非線形有限要素解析を用いて、疲労載荷と静的載荷との比較を通じて疲労破壊機構に関する考察を行い、疲労載荷では、静的載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載荷よりも疲労載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、疲労上限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、疲労下限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、圧縮疲労と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、平均せん断剛性低下が疲労損傷を代表するパラメータであると考えて、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床版に生じうる破壊形式を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考え方を、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を、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、計算例を通じて示した。

4章では、輪荷重走行試験における階段状漸増載荷を受けるRC床版の疲労寿

命評価法を構築し，その評価法を通じて 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載荷試験における 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で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る手法である．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載荷を受けて破壊した 27 体の RC 床版の実験データ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，提案式を PC 床版の疲労寿命評価へと拡張した．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張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析に基づき，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 床版接合部の疲労寿命の定量的な評価法を示した．さらに，先行荷重の大小によって RC 床版の疲労寿命が変化することを試算を通じて示すとともに，接合部を有するプレキャスト PC 床版のプレストレス量や継手鉄筋による拘束力の大きさに着目した疲労寿命の試算を行い，本研究で提案した疲労寿命評価法が，コンクリート床版の合理的な設計を行う有用な手法となりうることを示した．

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．

本研究の成果を総括する．本研究では，RC 床版の疲労寿命評価は，破壊形式に応じて行う必要性を示した上で，まず，輪荷重走行試験におけるせん断圧縮破壊形式に関する評価法を構築した．解析的および実験的手法から，せん断圧縮破壊に至る RC 床版の梁状化部材のせん断抵抗機構と疲労破壊機構を明らかにし，せん断耐力式と S-N 曲線式からなる疲労寿命評価法を提案した．また，せん断圧縮破壊形式以外の，土砂化後の押抜き破壊形式，鉄筋降伏・破断形式の疲労寿命評価の方針を示した．さらに，階段状漸増載荷を受ける RC 床版の疲労寿命評価法と，PC 床版およびプレキャスト PC 床版接合部の疲労寿命評価法を考案し，過去の輪荷重走行試験の実験データに対して適用性を確認した．これらの成果は，コンクリート床版の性能評価として広く実施されている輪荷重走行試験の定量的な評価法として有用であると同時に，実床版における構造形式の決定や破壊形式の選択といった合理的な設計手法の構築に大きく寄与できるものと考えられる．

道路橋コンクリート床版の疲労寿命予測は，構造工学およびコンクリート構造工学分野における大きな課題であった．本研究では，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た．

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 竹田 京子 印

(2020年 12月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 論文	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: 荷重履歴に着目したせん断補強筋を持たない RC はりの変形性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.559-564, 2020.7</li> <li>○ 2) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: 繰返し移動荷重を受けるプレキャスト PC 床版接合部の疲労寿命の定量評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.66A, pp.774-782, 2020.3</li> <li>○ 3) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: 疲労荷重下のせん断補強筋を有さない RC 梁の損傷機構に関する解析的検討, プレストレストコンクリート工学会第 28 回シンポジウム論文集, Vol.28, pp.191-196, 2019.11</li> <li>○ 4) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: せん断補強筋を持たない RC はりの静的荷重と疲労荷重による損傷過程と破壊機構に関する実験的検討, コンクリートの補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文集, Vol.19, pp.451-454, 2019.10</li> <li>○ 5) <u>Kyoko TAKEDA</u>, Yasuhiko SATO: An Analytical Study on Effects of Loading History to Shear Behavior of RC Beams under Cyclic Loading, Proceedings of the fib Symposium 2019, pp.1677-1683, 2019.6</li> <li>○ 6) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: 輪荷重走行試験における PC 床版の疲労寿命予測に関する検討, プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集, Vol.27, pp.173-176, 2018.11</li> <li>○ 7) <u>Kyoko TAKEDA</u>, Yasuhiko SATO: Development of fatigue life prediction for RC slabs under traveling wheel-type loading, IALCCE 2018 Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering-Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision, Vol.6, pp.1851-1856, 2018.10</li> <li>○ 8) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: 支持条件と階段状漸増荷重の影響を考慮に入れた輪荷重走行試験における RC 床版の疲労寿命予測に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40 No.2, pp.601-606, 2018.7</li> <li>○ 9) <u>Kyoko TAKEDA</u>, Natsuko HAMADA, Yasuhiko SATO: Proposal of a fatigue life prediction method for RC slabs failed under traveling wheel-type load test, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.4, No.1, pp.1-11, 2018.6</li> <li>○ 10) <u>竹田京子</u>, 濱田那津子, 佐藤靖彦: 輪荷重走行試験における RC 床版の疲労寿命予測に関する一検討, 第 26 回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.26, pp.129-134, 2017.10</li> </ul>
c. 講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦: プレキャスト PC 床版接合部の継手鉄筋が接合部材の力学特性に及ぼす効果に関する解析評価, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-610, 2020.9</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c. 講演	<p>2) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦：プレキャスト PC 床版接合部の継手鉄筋が接合部材の力学特性に及ぼす効果に関する解析評価, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-610, 2020.9</p> <p>3) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦：継手によるプレキャスト PC 床版接合部の疲労耐久性の定量的評価, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会概要集, V-34, 2019.9</p> <p>4) <u>Kyoko TAKEDA</u>, Yasuhiko SATO : A Comparative Investigation on Fatigue Life Prediction Methods of RC Slabs under Moving Loads, 12th Japanese German Bridge Symposium, Vol.12, 頁番号無し, 2018.9</p> <p>5) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦：輪荷重走行試験における RC 床版のせん断耐力低下を考慮した階段状漸増載荷の評価, 土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会概要集, V-501, 2018.08</p> <p>6) <u>Kyoko Takeda</u>, Natsuko Hamada, Yasuhiko Sato : Analytical Investigation on Fatigue Life of Reinforced Concrete Bridge Deck Slabs Under Traveling Wheel-Type Loading, Asian Concrete Federation The 2nd ACF Symposium 2017, F004, 2017.11</p> <p>7) 濱田那津子, <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦：移動輪荷重下における RC 床版の疲労耐久性評価式の提案, 土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会概要集, V-203, 2017.9</p> <p>8) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦：移動輪荷重下に置かれる RC 床版の疲労寿命に関する解析的検討, 土木学会北海道支部 論文報告集第 73 号, E-06, 2017.1</p>
e. その他	<p>(論文)</p> <p>1) Muhammad Aboubakar FAROOQ, <u>Kyoko TAKEDA</u>, Yasuhiko SATO, Kyoji NIITANI : Mechanical Properties of Concrete with Blast Furnace Slag Fine Aggregates subjected to Freeze-Thaw Cycles, Proceedings of fib Symposium 2017, pp.65-72, 2017.6</p> <p>2) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦, 長谷川武春：積雪寒冷地のダムコンクリートのスケーリング抵抗性とその進行予測, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.393-398, 2016.10</p> <p>(講演)</p> <p>1) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦, 長谷川武春：積雪寒冷地のダムコンクリートのスケーリング進行予測に関する検討, 土木学会全国大会 第 71 回年次学術講演会概要集, V-259, 2016.9</p> <p>2) <u>竹田京子</u>, 佐藤靖彦, 長谷川武春：積雪寒冷地に約 40 年供用されたダムコンクリートのスケーリング抵抗性に関する実験的検討, 土木学会北海道支部 論文報告集第 72 号, E-35, 2016.1</p>