

道路橋 RC 床版と UHPFRC 補修床版の 輪荷重走行疲労解析

Fatigue analysis of roadway RC bridge slab and UHPFRC repaired slab under moving wheel load test

北海道大学大学院工学研究院土木工学部門
Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Hokkaido University

教授
松本 高志
MATSUMOTO Takashi



1. はじめに

社会基盤施設の維持管理更新時代において、橋梁構造物の鉄筋コンクリート (RC) 床版は劣化状況と数量の点において重要対象となる部材の一つである。

RC 床版は鋼道路橋の構成部材の中でも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損傷劣化が報告されている。大型車両の増加に伴う輪荷重の繰り返しによる疲労劣化、雨水の床版ひび割れへの侵入による疲労劣化の促進などが RC 床版の損傷の要因と考えられている。上記の要因による RC 床版の損傷は、主として床版下面のコンクリートに二方向に広く分布するひび割れを形成し、最終的にはコンクリートの抜け落ちに至ることが輪荷重走行疲労試験により明らかにされた¹⁾。これは舗装の割れや陥没を招き、交通事故や第三者被害を引き起こす可能性とともに、構造物の使用性と安全性の問題として非常に重要である。

本稿では、RC 床版の輪荷重走行疲労における損傷・破壊挙動に対する解析手法の紹介と超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) により補修した RC 床版の輪荷重走行下疲労挙動の解析的検討について以下に述べる。

2. RC 床版の輪荷重走行疲労解析

筆者の研究室では、輪荷重走行疲労試験の RC 床版について、コンクリートひび割れにおける伝達応力劣化を疲労損傷機構とした有限要素解析の方法を構築することにより、床版の疲労挙動と寿命を解析的に再現することを可能としている^{2),3)}。コンクリート系材料のひび割れにおける骨材や繊維による架橋応力の疲労劣化は、抜け出しや破断により徐々に起こり、疲労ひび割れの進展と破壊の支配的機構であることが示されている⁴⁾。架橋応力劣化は有限要素解析に組み込まれて床版の定点疲労載荷及び輪荷重走行疲労載荷の挙動を再現しうることが示された²⁾。さらに、丸鋼鉄筋を用いた床版の輪荷重走行疲労試験の挙動を再現し、異形鉄筋と比較した丸鋼鉄筋の影響についての検討も行われている³⁾。以下では、RC 床版の輪荷重走行疲労解析の手法について概要を述べる。

2.1. 架橋応力劣化

架橋応力とは、ひび割れにおいて骨材や繊維が伝達する応力であり、主にその引張成分が材料特性や構造挙動において重要である。図1に示すのは引張荷重下のコンクリート系材料の構成則である。線形弾性挙動を経てひび割れ強度 f_t においてひび割れが生じた後は、ひび割れにおいて骨材や繊維が引張応力を伝達する。骨材や繊維はさらなる引張方向の荷重変位により抜け出しや破断が発生し、徐々に伝達応力を減少させていき、最終的には全ての骨材や繊維の抜け出しもしくは破断により伝達応力はゼロとなる。以上は単調載荷の場合の挙動である。

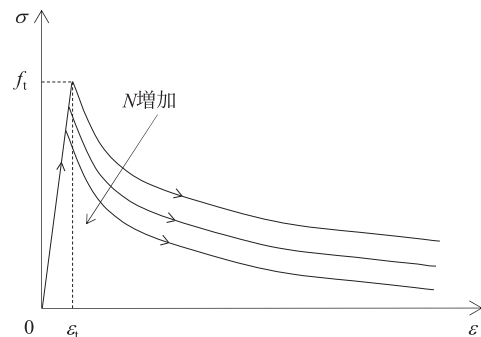


図1 架橋応力劣化

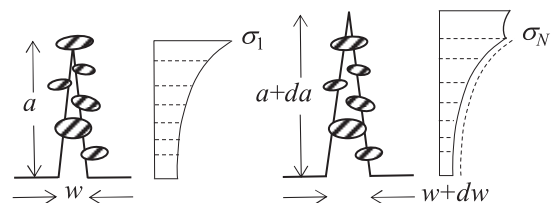


図2 疲労ひび割れ進展

図2は疲労繰り返し荷重下における架橋応力の劣化とひび割れ進展を説明する図である。ひび割れに疲労繰り返し荷重が作用した後は骨材や繊維は徐々に抜け出しもしくは破断を起こして架橋応力は劣化する。つまり右図の点線から実線のように伝達応力が減少して、ひび割れは進展し、開口幅は増大する。そして新たに進展したひび割れ部では架橋応力が発生する。このように進展す

る疲労ひび割れでは、先端近くで「新しくてまだ劣化しておらず」、開口部が「一番古くて劣化している」ことになる。図1に表しているのは架橋応力劣化を含む構成則であり、開口幅によるひずみと履歴繰返し数に依存して架橋応力が減少する架橋応力劣化則を表しており、次式に従っている。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = 1 - d \log(N) \quad (1)$$

ここに、 σ_1 と σ_N はそれぞれ1回目と N 回目の架橋応力であり d は架橋応力劣化の係数である。

2.2. 輪荷重走行疲労解析

次に、RC床版の輪荷重走行疲労試験に対する、架橋応力劣化を組み込んだ有限要素解析による床版疲労解析について説明する。図3では、床版疲労解析の手順を簡略化して示している。対称性を考慮した1/2のRC床版の有限要素モデルの上面に、輪荷重走行に対応する荷重を1往復作用させる。1往復後にひび割れた要素（黄色部分）を確認し、その要素では $N=1$ 回分の劣化を式(1)により設定する。この設定後に2往復目の荷重を作用させて、新たにひび割れた要素（緑色部分）を確認し、この要素では $N=1$ 回分の劣化を設定する。一方で、1往復後にひび割れた要素（黄色部分）では $N=2$ 回分の劣化を設定する。つまり早期に生じたひび割れにはより大きな劣化が起こっているとすると、これを繰り返すことで輪荷重走行繰返しによる疲労ひび割れの発生・進展挙動を解析的に捉えることが可能となり、併せてたわみ変化も得られる。最終的に輪荷重に耐えられなくなりたわみが大きく増大する輪荷重走行回数が疲労寿命となる。図3にはひび割れ発生時の輪荷重走行回数を色分けして示している。輪荷重走行範囲である中央部よりひび割れ範囲は版の面内方向と版厚方向へと広がり、なかでも面内対角方向へと大きく広がっているのが分かる。

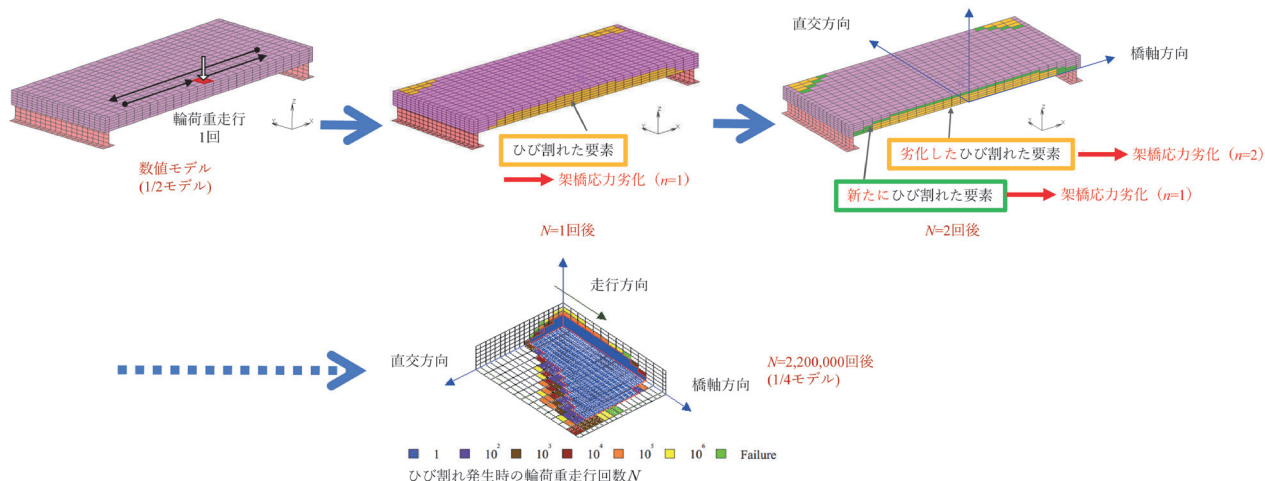


図3 床版の輪荷重走行疲労解析

3. UHPFRC 補修床版の輪荷重走行疲労解析

積雪寒冷地における道路橋RC床版では、交通量が少なく大型車混入率が低いがゆえに1章と2章で述べた荷重作用による疲労が起こりづらいつと考えられていたが、実際には床版コンクリート上面においてコンクリートの土砂化という別の損傷発生が多く報告されている。これは、床版コンクリート上面表層部における凍害や塩害との複合劣化と考えられており、凍結融解繰返しによるコンクリートの脆弱化、鉄筋腐食膨張による水平ひび割れに対して、滞水の存在と輪荷重の作用が土砂化を促進していると考えられている⁵⁾。土砂化の発生位置と滞水位置との関係も検討されているが、損傷面積は部分的であり補修は部分補修となる。一時的にでも損傷部位を部分的に修復して劣化の進行を抑制するために、高強度かつ良好な付着で荷重に抵抗し、密実な材料構造により劣化因子の侵入を防ぐ材料が求められている。

超高性能繊維補強コンクリート（UHPFRC）は、設計圧縮強度 130 N/mm^2 以上、設計引張強度 9 N/mm^2 、曲げ強度 35 N/mm^2 、ヤング率 $4.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、付着強度 2.7 N/mm^2 以上、塩化物イオン浸透深さ 0 mm 、中性化深さ 0 mm 、透気係数 $0.001 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 以下という材料特性を有する材料であり、硬化状態では、緻密で遮水性を有して、高強度でひずみ硬化性を示し、フレッシュ状態では、分離抵抗性、高流動性、自己充填性を有し、チクソトロピック性も付与できる材料である⁶⁾。

UHPFRCの材料特性は床版上面の補修に非常に適していると考えられる。本章では既存RC床版コンクリート上面の断面修復材料として用いた際の疲労耐久性を輪荷重走行疲労試験により検討した例について疲労解析を行った事例について述べる⁷⁾。

図4に試験及び解析の手順を示す。寸法 $2650 \text{ mm} \times 3300 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$ のRC床版を製作して、100万回までの階段状荷重漸増の輪荷重走行疲労荷重（図5）によ

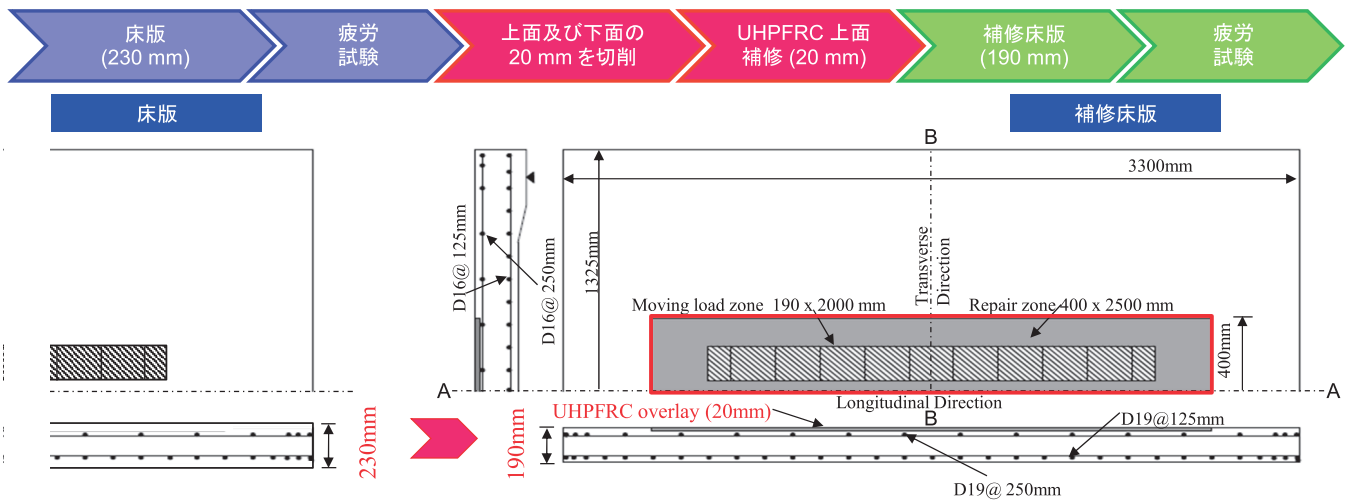


図4 試験と解析の手順

り補修前に下面ひび割れ損傷を発生させた。これを損傷のある既設床版とみなし、上面及び下面の20mmを切削して版厚190mmとした上で、輪荷重走行範囲周辺の800mm×2620mmの面積をさらに20mm切削してUHPFRCで断面修復を行った。補修床版の輪荷重走行疲労試験は、初期値120kNから200kNまで段階的に増加させて、150kN換算で200万回に達するまで続けた。解析は2章で述べた手法により行っている。

図6は補修前の床版の輪荷重走行疲労荷重に伴うたわみ変化である。解析は試験で見られた荷重の段階的増加時と保持時のたわみの増加を概ね良好に再現している。

図7は補修床版のたわみ変化である。試験とUHPFRC補修ありとなしの合計3ケースを比較している。試験と補修ありの解析を比較すると後半に乖離が見られるものの概ね同様の傾向を解析は再現している。解析において補修の有無の影響を見ると、補修なしのケースでは荷重保持時のたわみ増加が特に後半で見られる。一方で補修ありに同様の増加は見られない。これはUHPFRCの上面補修が部分的で薄層であるにもかかわらず、床版損傷進行抑制に一定の効果を示していることになる。

図8は、補修部と既設床版との付着を検討するために、図4中A-A線上及びB-B線上の界面せん断応力を示したものである。荷重繰返し数が増加するにつれて図5に従い、荷重は漸増し最終的には200kNとなるが、せん断応力はそれぞれ0.65MPaと1.2MPa程度であり、8~12MPaと報告のある界面せん断強度より十分低いことが確認された。

試験後も補修部と床版との剥離は見られず、補修部周りの床版上面にはひび割れが見られるものの、補修部にはひび割れが発生しなかった(図9右)。また、床版下面には輪荷重走行範囲周辺では二方向ひび割れが形成され、その外側で対角方向にひび割れが伸びている(図9左)。

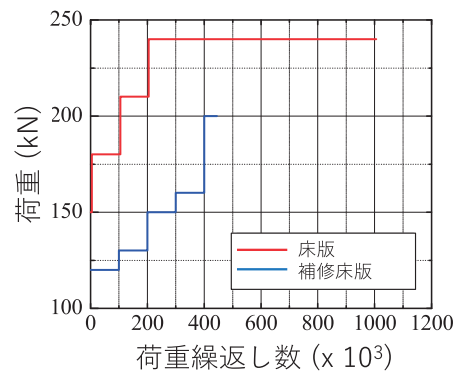


図5 階段状荷重漸増載荷

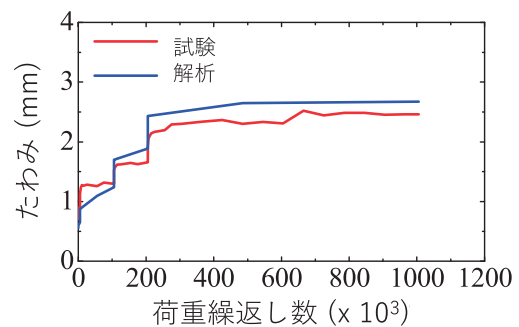


図6 たわみ変化(補修前)

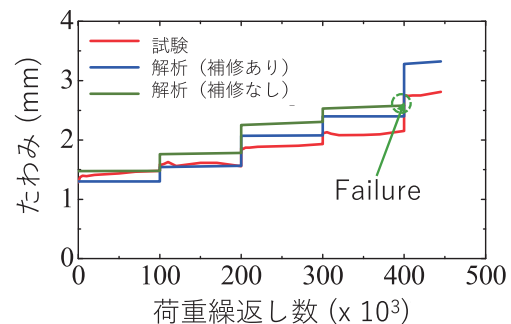


図7 たわみ変化(補修床版)

解析は UHPFRC 補修床版の界面剥離の評価を示し、ひび割れ挙動を良好に再現することができている。

4. さいごに

疲労は長い試験時間を要し、ばらつきもあるため一定の試験体数も必要である。また、実橋梁の荷重作用と環境作用の供用条件は様々である。UHPFRC は鋼床版との合成化も検討されてきている。今後も疲労解析手法の構築と様々なケースへの適用を進めていきたい。

謝辞

本稿で参照した床版の輪荷重走行試験結果は（国研）寒地土木研究所と（一財）災害科学研究所のご協力によるものである。ここに関係各位に謝意を示す。

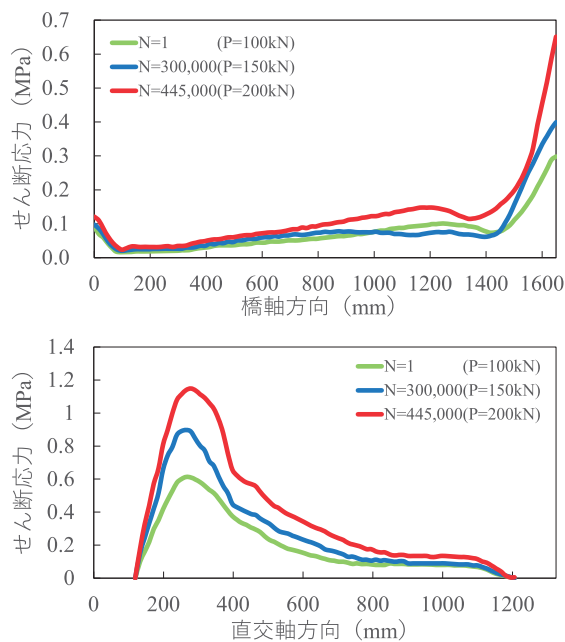


図8 セン断応力分布

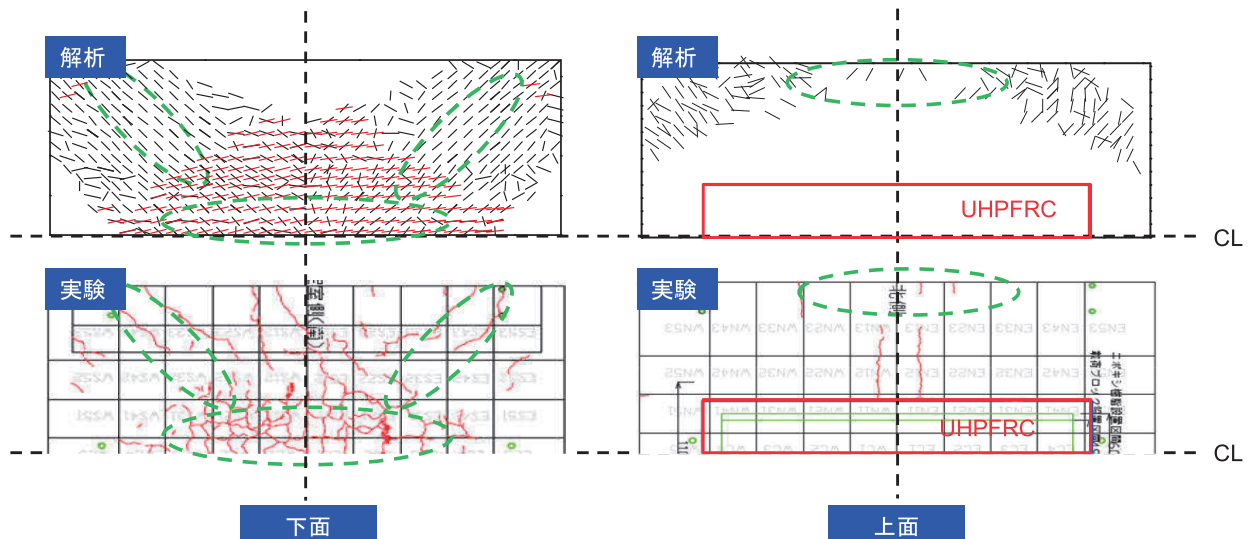


図9 ひび割れ分布の比較

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 - 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 2) Peerapong Suthiwarapirak and Takashi Matsumoto: Fatigue Analysis of RC slabs and Repaired RC Slabs based on Crack Bridging Degradation Concept, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 132, No. 6, pp. 939-948, 2006.
- 3) Ahmed Attia M. Drar and Takashi Matsumoto: Fatigue Analysis of RC Slabs Reinforced with Plain Bars Based on the Bridging Stress Degradation Concept, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 14, No. 1, pp. 21-34, 2016.
- 4) Victor C. Li and Takashi Matsumoto: Fatigue Crack Growth Analysis of Fiber Reinforced Concrete with Effect of Interfacial Bond Degradation, Cement and Concrete Composites, Vol. 20, No. 5, pp. 339-351, 1998.
- 5) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，2016.
- 6) J-ティフコム施工協会：http://j-thifcom.com/about-j-thifcom.html, 2020.
- 7) Pengru Deng, Ko Kakuma, Hiroshi Mitamura, and Takashi Matsumoto: Fatigue Analysis of Partly Damaged RC Slabs Repaired with Overlaid UHPFRC, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 75, No. 1, pp. 19-32, 2020.