

# 論文 供用後 50 年で架替えに至った実道路橋 RC 床版の詳細調査と残存疲労耐久性に関する検討

前島 拓<sup>\*1</sup>・子田 康弘<sup>\*2</sup>・小山田 桂夫<sup>\*3</sup>・岩城 一郎<sup>\*4</sup>

**要旨:** 凍結防止剤散布環境下において供用後 50 年が経過し架替えに至った実道路橋 RC 床版より, 50 年間供用された原床版と 7 年前に取替えられた床版を切り出し, コンクリートおよび鋼材の詳細調査と輪荷重走行試験機を用いた疲労試験を行った。その結果, コンクリート内への塩分浸透は少なく, 原床版で鋼材位置に達する中性化の進行が認められたものの環境作用の影響は大きくはなく, 劣化の主因が疲労荷重による損傷と推察された。また, 輪荷重走行試験と S-N 関係に基づく残存疲労耐久性の評価より, 原床版の余寿命は短く疲労限界状態に近かったと推察され, 取替え床版も疲労耐久性が著しく低下していることが分かった。

**キーワード:** 疲労寿命, 実道路橋 RC 床版, 残存疲労耐久性, 輪荷重走行試験

## 1. はじめに

我が国の道路橋は, 1960 年代の高度経済成長期に架設数が急増し, 橋長 15m 以上を対象とすると, 現在までに約 152,000 橋がストックとして存在し, 今後劣化の顕在化が懸念されている。特に東北地方をはじめとする積雪寒冷地における道路橋 RC 床版は, 大型車交通量の増大による疲労損傷の進行に加え, 凍結防止剤混じりの水の侵入による凍害と塩害という複合劣化を受けやすい部材であり, 早期劣化により取替えを余儀なくされた橋梁も少なくはない。今後, 対策を必要とされる橋梁の増加が予想される中で, インフラの更新が難しいとされる昨今の社会情勢を踏まえると, RC 床版の補修・補強方法の選定や, 取替え時期の判断を合理的に進める手法の確立が急務であり, そのためには実道路橋 RC 床版の疲労耐久性の評価が重要になると考えられる。

このような背景のもと, 本研究では供用年数 50 年が経過し, 架替えに至った道路橋の RC 床版を切り出し, コンクリートと鋼材の詳細な調査を行うとともに, 当研究室所有の輪荷重走行試験装置を用いた疲労試験を実施し, 残存疲労耐久性の評価を行った。

## 2. 実験対象とした橋梁および RC 床版の概要

表-1 に橋梁諸元を示す。実験対象とした橋梁は, 直轄国道の一般国道 4 号に架設されていた旧白河橋である。本橋は, 1961 年より供用が開始された 5 径間単純鋼合成鈹桁橋(4 主桁)であり, 橋長が 160m, 幅員が 8.9m であった。写真-1 は, 本橋の撤去前の全景である。

床版供試体は, 橋軸方向に 3m, 橋軸直角方向に 2m とする範囲を切り出し, 輪荷重走行試験機に設置できるよ

表-1 橋梁諸元

橋梁名	旧白河橋
路線名	一般国道 4 号
交通量	24 時間交通量: 24,656 台 24 時間大型車交通量: 7355 台 (平成 22 年度交通センサス)
凍結防止剤散布量	4.5 ton/km(1 シーズン)
竣工年月	1961 年
橋長	160.10m
適用示方書	S31 鋼道路橋設計示方書



写真-1 対象橋梁全景



写真-2 切出し床版  
(手前: 原床版, 奥: 取替え床版)

う整形した。写真-2 に, 切り出した床版を示す。

表-2 に床版供試体の概要を示す。実験を実施した供試体は, 1)供用から撤去までの 50 年間使用し, 途中床版

\*1 日本大学 工学研究科 博士前期課程(学生会員)

\*2 日本大学 工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 国土交通省 東北地方整備局東北技術事務所

\*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

下面の部分補修が施された床版(以下、原床版)と、2)供用43年目に応急的な打換えを実施した中で一部床版において鉄筋自体も更新し取り替えた状態になった床版(以下、取替え床版)の2体である。この2体の供試体における使用材料は異なり、原床版には丸鋼(主筋φ16、配力筋φ13)、粗骨材には川砂利が使用されていた。一方、取替え床版は、異形鉄筋(主筋D19、配力筋D13)、粗骨材には碎石が使用されていることが搬入時の切断面の観察により確認された。

図-1に、床版供試体切出し位置を示す。実験を実施した供試体の供用期間の床版位置は、原床版が第3径間(図中の赤枠)、取替え床版が第5径間のジョイント付近という大型車の衝撃荷重を含む疲労損傷を受けやすい位置(図中の青枠)である。なお、図-2より、輪荷重走行試験における輪走行の範囲は、概ね床版供試体の供用時における大型車輪距範囲上にあることを確認している。

図-3に切断面、図-4に床版下面のひび割れ観察結果を示す。図-3より、原床版には、一部に水平ひび割れが観察されたものの切断面全体にはひび割れの進展が観察されておらず、これに対して取替え床版には、上側鉄筋に沿った水平ひび割れが目視によって観察された。断面における疲労損傷は、供用年数が短い取替え床版の方が顕在化している傾向であった。ただし、橋軸直角方向断面の観察より、両供試体ともに輪走行範囲には水平ひび割れは生じてはいなかった。

図-4より、下面のひび割れは、原床版の場合、ひび割れよりもかぶり部のコンクリートがはく離する劣化(図中の網掛け部)が多数確認された。一方、取替え床版は、疲労荷重による軸直角方向のひび割れが進展しており、下面のひび割れ状態は状態Ⅱ(進展期)<sup>1)</sup>程度と判定された。

このように供用年数が長い原床版の切断面には疲労限界状態の目安となる水平ひび割れの発生がほとんど認められず、反対に取替え床版は下面の損傷状態は加速期までには達してはならないものの、床版上縁側に水平ひび割れの発生が認められた。

表-2 供試体概要

供試体名	経過年数	供用時の対策	使用粗骨材	使用鋼材
取替え床版	7年	取替え	碎石	異形鋼棒(D19, D10)
原床版	50年	下面部分補修	川砂利	丸鋼(φ16, φ13)

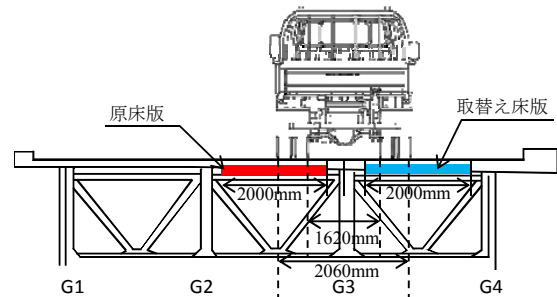


図-2 大型車の走行範囲と床版の位置関係

### 3. 実験概要

#### 3.1 輪荷重走行試験の概要

##### (1) 輪荷重走行試験装置

写真-3に、輪荷重走行試験装置を示す。この装置は、鋼鉄フレームに鉄車輪を取り付けた油圧ジャッキを据え付け、モータおよびクランクアームで床版供試体を載せた台車を水平方向に1m往復運動させる機構で輪荷重の走行状態を再現している。載荷面となる供試体上面には、輪荷重走行範囲にベニヤ板を敷き、そこに幅300mm、長さ120mmの載荷ブロックを並べ、さらに載荷鉄板を載せた状態で輪荷重を走行させた。また、供試体の支持条件は走行方向の2辺(支持間距離:2900mm)を単純支持、他の2辺(支持間距離:1800mm)を弾性支持とした。

##### (2) 輪荷重走行試験方法

輪荷重走行試験は、T荷重における1車輪分の荷重である98kN(10tf)を基本荷重とし、規定の走行回数で載荷荷重を29.4kNずつ増加させる段階載荷荷重方式を採用した。計測項目は、目標回数終了時点で基本荷重98kNを供試体中央に静的載荷した際の床版に発生する活荷重たわみ(弾性変形成分のたわみ)の測定と、供試体下面のひび割れ観測である。ここで、活荷重たわみは、供試体下面中央に設置した高感度変位計(感度1/100)により計

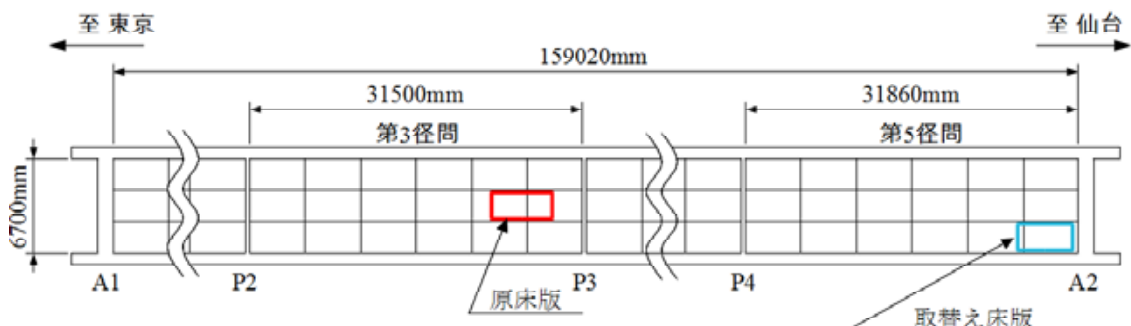


図-1 床版切出し位置

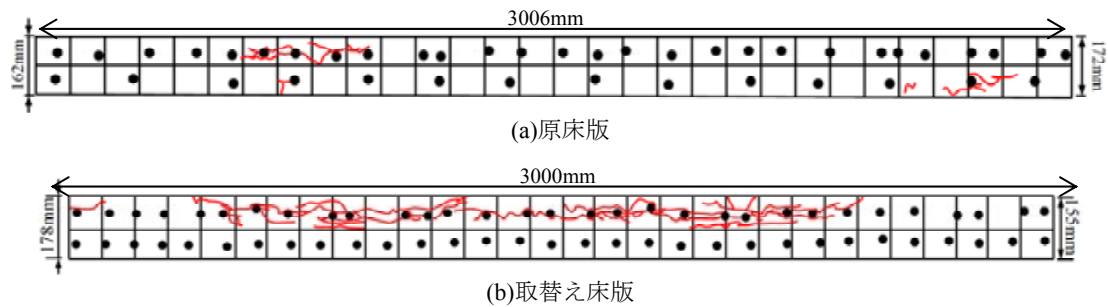


図-3 橋軸断面のひび割れ(試験前)

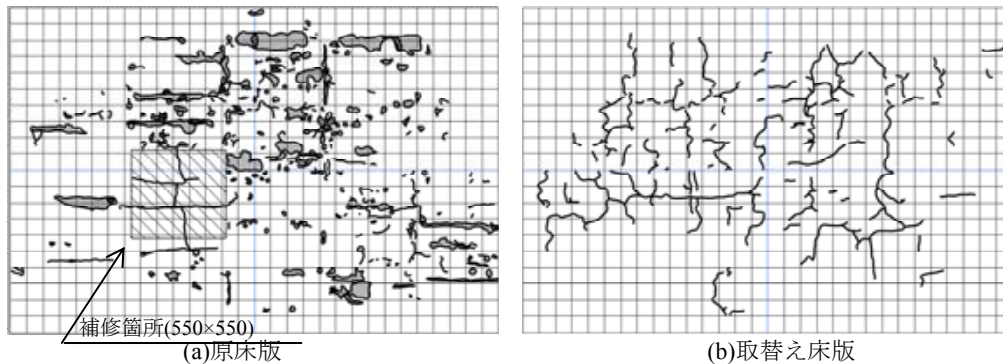


図-4 試験開始前における下面ひび割れの発生状況

測したもので、98kN を静的載荷した際に生じる最大たわみと荷重を除荷した際の残留たわみとの差とした。

輪荷重走行回数は、段階載荷による走行回数を 98kN に  
よる走行回数に換算した等価繰返し走行回数で評価した。  
具体的には、各荷重における走行実績を、マイナー則を  
仮定した式(1)により 98kN に換算した際の走行回数とし  
て求めた。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (1)$$

ここで、 $N_{eq}$ ：基本輪荷重  $P_0$  に換算した等価繰返し走  
行回数、 $P_i$ ：実際に載荷した輪荷重(kN)、 $P_0$ ：基本輪荷  
重(本研究では 98kN)、 $n_i$ ：荷重  $P_i$  の走行回数、 $m$ ：S-N  
曲線の傾きであり、原床版は赤代ら<sup>2)</sup>の提案する丸鋼を用  
いた RC 床版の疲労寿命予測式の傾き 10.96、取替え床  
版は松井ら<sup>3)</sup>の提案する異形鉄筋を用いた RC 床版の疲  
労寿命予測式の傾き 12.76 を用いた。

### 3.2 コンクリートおよび鋼材の試験方法

コンクリート圧縮試験および静弾性係数試験方法は、  
「コンクリートの圧縮試験方法(JIS A 1108)」および「コ  
ンクリートの静弾性試験方法(JIS A 1149：2001)」に準拠  
し、輪荷重走行試験後に疲労破壊の影響を受けていない  
範囲で採取したコアを用いて実施した。コンクリートの  
塩化物イオン濃度の測定は、「硬化コンクリート中に含ま  
れる塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154:2012)」に準拠し、  
イオンクロマトグラフ分析法により実施した。コンクリ  
ートの中性化深さは、「コンクリートの中性化深さ測定方  
法(JIS A 1152：2002)」に準拠し、圧縮試験同様に採取  
したコアを割裂した後、フェノールフタレイン溶液を割裂



写真-3 輪荷重走行試験装置

面に噴霧し、赤紫色に呈色しなかった深さを測定した。

鋼材の腐食減量試験に用いた鋼材は、輪荷重走行試験  
後に供試体を中央から 4 分割し、そのうち 1 つを解体す  
ることで採取した。腐食減量率は、鋼材を 500mm に切  
断後、10%クエン酸水素二アンモニウム溶液に浸漬し除  
錆を行い、式(2)により算出した。

$$W_{loss} = (W_{init} - W_{corr}) / W_{init} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $W_{loss}$ ：腐食減量率(%)、 $W_{init}$ ：採取した中で明  
らかに腐食が認められなかった鋼材の重量(g)、 $W_{corr}$ ：腐  
食後の重量(g)である。

引張試験は、万能試験機を使用し、「金属材料引張試  
験方法(JIS Z 2241)」に準拠し実施した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 コンクリートおよび鋼材の物性

図-5 に、供試体より採取したコアによる圧縮強度と  
ヤング率の関係を示す。図中には圧縮強度とヤング率の

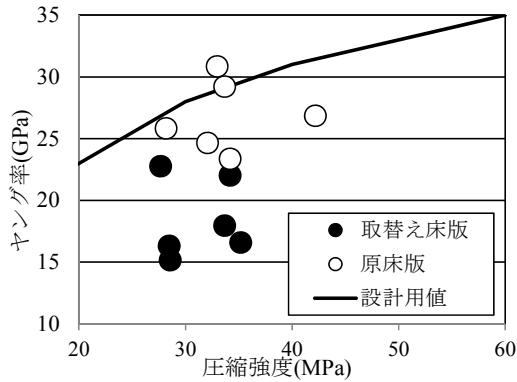


図-5 圧縮強度とヤング率の関係

設計用値<sup>4)</sup>を併せて示した。図より、原床版は、圧縮強度が33MPaから40MPaの範囲にあり、ヤング率は供試体6本のうち、3体は設計用値に近い値を示し、3体は設計用値よりも低い値を示した。これに対して取替え床版は、圧縮強度28MPaから34MPaと原床版よりも低く、さらにはヤング率が15GPaから22GPaと設計用値よりも明らかに低い結果となった。この要因は、原床版では50年間にも及ぶ疲労の蓄積が影響し、取替え床版ではジョイント付近という衝撃荷重を受け易い位置にあったことで急激に疲労劣化が生じたためと推察された。加えて、低品質の骨材が混在し、ヤング率が低くなったという可能性もあり、コンクリートの品質に関する調査を今後の課題とする。

図-6に、供試体より採取したコアによる塩化物イオン濃度分布と中性化深さ、および試験後に採取した鋼材の腐食減量試験の結果を示す。図より、塩化物イオン濃度は、取替え床版の上側主筋位置において腐食発錆限界濃度 $1.2\text{kg/m}^3$ を若干上回っているものの、原床版、取替え床版ともに $1.0\text{kg/m}^3$ 以下の濃度を示した。凍結防止剤散布により、塩害が顕在化したRC床版の塩化物イオン濃度は上縁付近で約 $10\text{kg/m}^3$ の塩分が含有している報告<sup>5)</sup>もあり、これに比べれば本供試体の塩化物イオン濃度は低濃度と判断される。鋼材の腐食減量率は、原床版の下側主筋が3.4%と、この中では最も高い腐食減量率を示したが、全体的には著しい鋼材腐食は認められなかった。なお、原床版の下側主筋の腐食減量率がこの中では高いが、これは中性化が下側主筋まで進行したことが影響したものと考えられた。

表-3に、鋼材の引張試験結果を示す。引張試験は、解体時の目視観察によって、明らかに腐食が認められなかった鋼材と腐食減量率がほぼ0%に近い鋼材を選択し、主筋、配力筋のそれぞれ3本ずつ行った。表より、各種鋼材の降伏応力は、300MPaから350MPaの範囲内にあり、ヤング率も200GPa程度を示した。よって、丸鋼はSR295相当、異形鉄筋はSD295A相当と推定された。

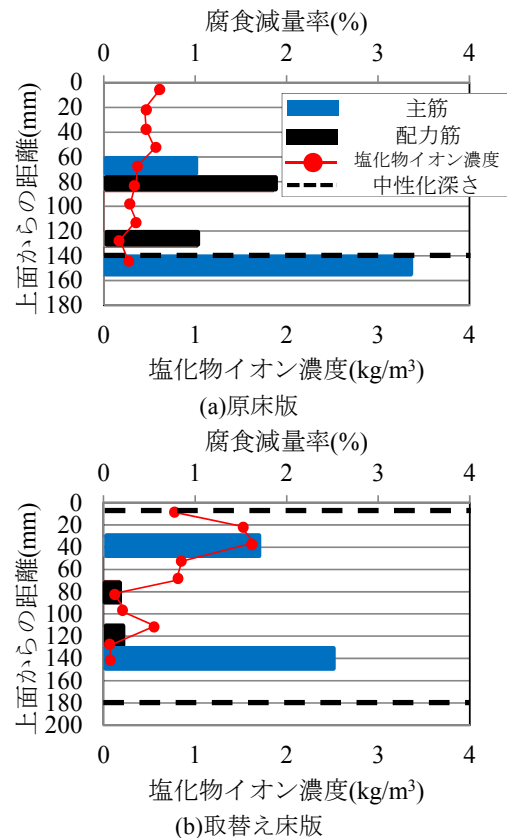


図-6 鋼材腐食減量率-塩化物イオン濃度-中性化深さ

表-3 鋼材引張試験結果

供試体	鋼材	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
原床版	主筋(φ16)	356	489	193
	配力筋(φ13)	316	432	197
取替え床版	主筋(D19)	349	526	210
	配力筋(D10)	350	540	199

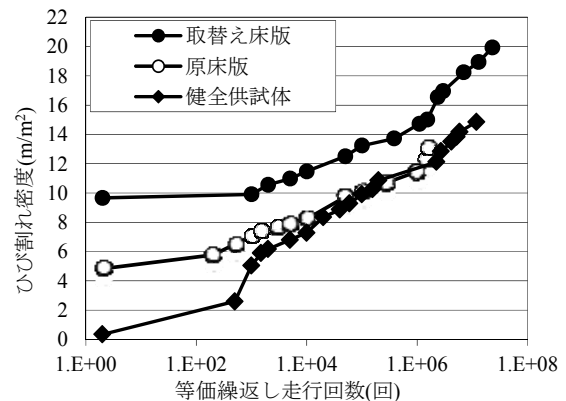


図-9 ひび割れ密度-等価繰返し走行回数

#### 4.2 輪荷重走行試験結果

##### (1) 活荷重たわみ-等価繰返し走行回数

図-7に、活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。なお、図中には後述する当研究室における床版厚が160mmとする輪荷重試験用供試体(以下、健全供試体)のデータも併せて示した。ここで、本研究における疲

劣限界状態は、活荷重たわみが急増した状態と定義した。図より、走行回数 2 回の活荷重たわみは、健全供試体 0.86mm に対し、床版厚さの大きい取替え床版が 0.88mm と、同程度の活荷重たわみであった。これは、取替え床版のヤング率が低く、剛性の低下が要因と考えられた。一方、床版厚さが健全供試体程度の実床版は 1.42mm であり、明らかに大きい値を示した。これは、供用 50 年が経過し疲労による損傷が著しいためと考えられた。その後の活荷重たわみの変化は、両供試体とも走行回数の増加に伴い、徐々に増加する傾向を示した。疲労限界に達した走行回数は、取替え床版が走行回数 3200 万回、実床版が走行回数 230 万回であった。

### (2) 供試体下面ひび割れ発生状況

図-8 に、実床版および取替え床版の疲労限界状態時に観察した下面のひび割れ発生状況を示す。図より、実床版には、短小なひび割れが全面に発生する傾向を示し、取替え床版では、輪荷重走行試験前より発生していたひび割れが発達するように下面全体へ進展する傾向であった。これら下面のひび割れ進展の違いは、使用材料の違いが疲労によるひび割れの発生形態にも影響を及ぼしたものと考えられた。

### (3) ひび割れ密度-等価繰返し走行回数

図-9 に、下面ひび割れの密度と等価繰返し走行回数との関係を示す。図より、走行回数 2 回のひび割れ密度は、実床版は  $4.84\text{m}^2$ 、取替え床版が  $9.66\text{m}^2$  であった。その後の走行回数の増加にともなうひび割れの増加傾向は、実床版は健全供試体と同様の傾向を示したが、取替え床版ではひび割れ密度がさらに増加するような傾向であった。疲労限界のひび割れ密度は、実床版では  $13.1\text{m}^2$ 、取替え床版が  $19.9\text{m}^2$  と異なった。これは、使用鋼材とその鉄筋量の違いが一因と考えられた。下側の主鉄筋比は、取替え床版が異形鋼棒で 1.27% であったのに対して、実床版は丸鋼で 0.46% と、明らかに取替え床版の方がひび割れの分散性が良好であったことがひび割れ密度の増加傾向に影響を及ぼしたと解釈された。

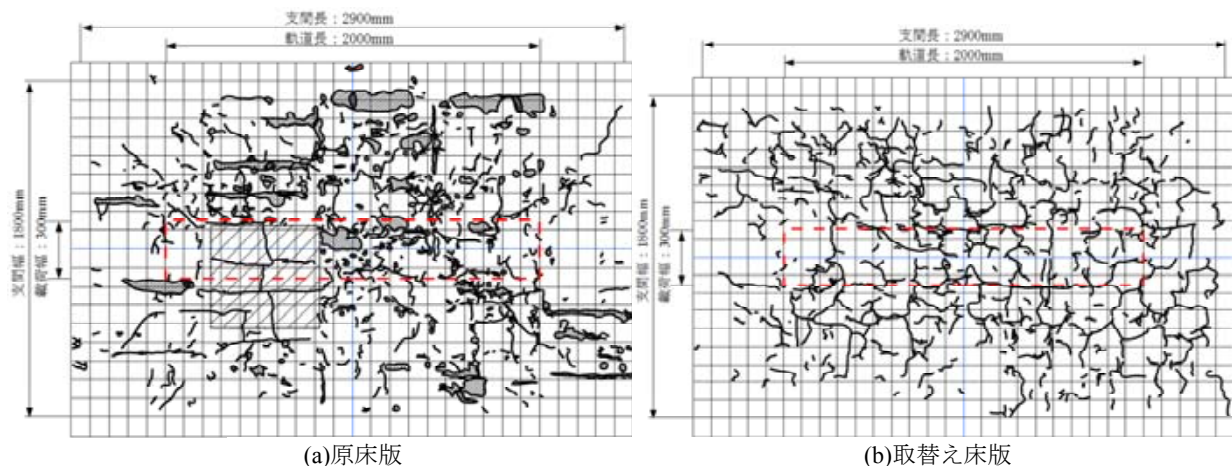


図-8 疲労限界状態時における下面ひび割れの発生状況

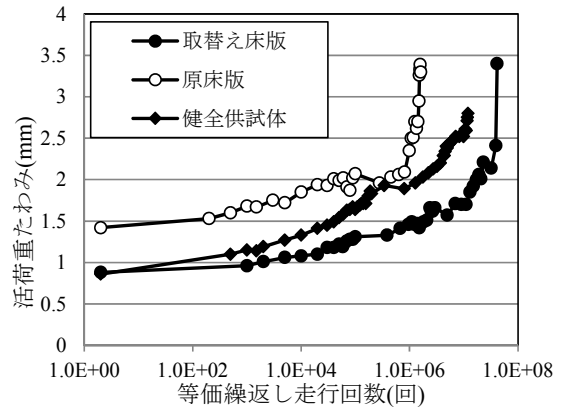


図-7 活荷重たわみ-等価繰返し走行回数

### (4) 供試体断面損傷状況

写真-4 に、実床版および取替え床版の輪荷重走行試験後に供試体を中央より軸方向と軸直角方向で 4 分割した際の橋軸断面を示す。写真より、実床版と取替え床版のどちらの供試体についても RC 床版の疲労耐久性を低下させる要因である水平ひび割れの発生が確認され、疲労限界がこの種のひび割れの発生に起因したものと考えられた。また、実床版については、取替え床版よりも供試体下面から上面に向けて進展しているひび割れが多く、供用中に発生したひび割れであれば上下面を貫通していたとも考えられ、実床版は撤去時点ではり状化していた可能性も考えられる。また、実床版の補修箇所は、供用中か輪荷重走行中かは不明だが補修材(モルタル系)がはく離しており、補修方法によってはその後の疲労荷重の繰返しによって一体性が保てなくなると推察された。

## 5. S-N 関係を用いた実道路橋 RC 床版の残存疲労耐久性評価

図-10 に、S-N 関係を示す。図中に黒の実線で描かれる S-N 曲線は、式(3)に示す松井らの提案する既往の推定式<sup>3)</sup>によって描かれるものであり、異形鉄筋を用いた健全な RC 床版の疲労寿命を精度よく予測することができる。また、赤の点線で描かれる S-N 曲線は、式(4)に示す

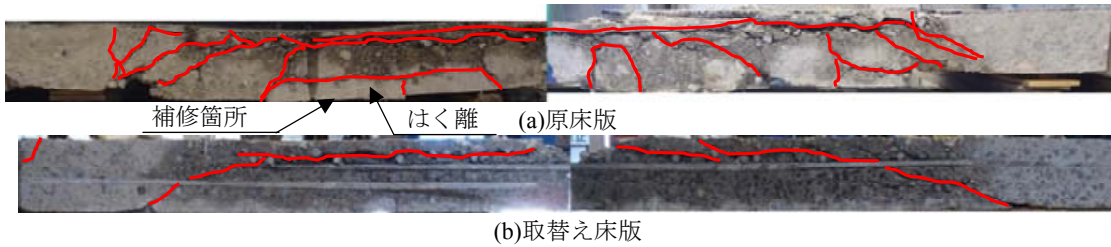


写真-4 供試体断面の損傷状況(橋軸断面)

赤代ら<sup>2)</sup>により提案された丸鋼を用いた RC 床版の疲労寿命算定式である。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

$$\log(P/P_{sx}) = -0.09121 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (4)$$

ここで、P：基本荷重(本研究では 98kN)、 $P_{sx}$ ：はり状化した RC 床版の押抜きせん断耐荷力、N：走行回数である。図より、原床版と取替え床版は、推定式より左に位置しており、疲労寿命予測よりも試験による走行回数は少ないという結果を得た。これは、供用中の疲労荷重による疲労損傷が影響していると考えられ、予測よりも減少した走行回数が大略、実疲労荷重により疲労寿命が消耗した分とみなされた。また、推定式により余寿命を推定すると、原床版は、疲労寿命 1800 万回に対して余寿命 230 万回と短く、推定からは疲労限界に近い状態であったと判断される。一方、取替え床版は、疲労寿命 6 億 4700 万回に対して余寿命 3200 万回と、供用年数 7 年を考えれば余寿命が短く、疲労耐久性の低下が著しいと評価された。ただし、この評価は輪荷重走行試験に基づく余寿命評価であり、精緻な予測には、対象橋梁の大型車交通量に加え、軸重占有率の測定結果に基づく残存疲労寿命年数の推定<sup>6)</sup>が必要になる。本研究対象橋梁の実荷重レベルの余寿命予測には、供用が開始された 1961 年から現在に至るまでの交通量および軸重占有率を評価しなければならず、この種の評価については今後の課題とする。

## 6. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 本橋床版のコンクリート中の塩分濃度は、鋼材腐食限界濃度  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  をほぼ下回り、鉄筋も著しい腐食は認められず、原床版下側鉄筋が中性化の影響で腐食減量率が高くなる傾向であった。
- (2) コンクリートのヤング率は、特に取替え床版で 20GPa 程度の低いヤング率を示した。これは、長年の疲労荷重の蓄積や衝撃荷重の影響であると推察された。
- (3) 輪荷重走行試験より、同一橋梁内の RC 床版ではあるが、コンクリートの物性といった使用材料の性質

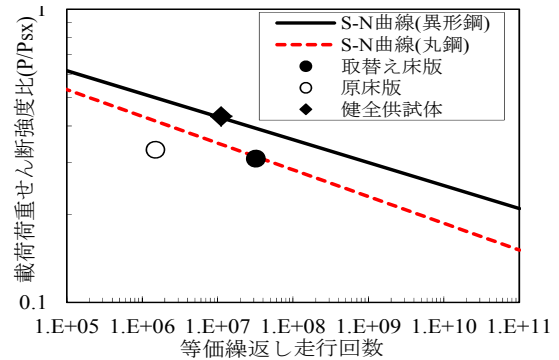


図-10 S-N 関係

や、衝撃荷重の影響の違い等により、輪荷重走行試験による疲労耐久性が大きく異なった。

- (4) 輪荷重走行試験に基づく残存疲労耐久性の評価より、原床版は、余寿命 230 万回と短く、架替え時点で疲労限界に近い状態であったと判断される。一方、取替え床版は、供用年数 7 年と短期だが余寿命 3200 万回と、極端に短く試算された。これは、ジョイント付近という衝撃荷重による疲労損傷が加わったことが要因と考えられ、このような部位に着目した設計、施工、維持管理における対策の重要性を示唆する結果となった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008。
- 2) 赤代恵司，三田村浩，渡辺忠明，岸徳光：丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究，構造工学論文集，vol57A，pp.1297-1304，2011。
- 3) 松井繁之：橋梁の長寿命予測-道路橋 RC 床版の寿命予測-，安全工学，Vol.30，No.6，pp.432-440，1996。
- 4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008。
- 5) 例えば，本荘清司，藤原規雄，葛目和宏，牧博則：凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の実橋調査，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，第 8 巻，pp.125-130，2008。
- 6) 三田村浩，安達優，石川博之：橋梁床版を用いた車両軸重測定と測定データから推定した床版の残存寿命，寒地土木研究所月報，No.637，pp.2-16，2006。