

# 鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に関する最近の研究

田中良樹・村越 潤・長屋優子・吉田英二

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)床版の疲労損傷は、大型車の繰返し载荷によって、ひび割れの発生・進展、最終的には路面の抜け落ちに至る、という過程をたどる。鋼道路橋の維持管理において、RC床版の疲労に対する補修・補強は鋼材の腐食や疲労の対策に並んで大きな割合を占めている。現行基準で設計された道路橋と比較して、RC床版の疲労耐久性が相対的に低い傾向にある昭和30～40年代(1955～1974年)の橋は、鋼道路橋約6万橋のうちの1/3近くを占めている。1993年の車両制限令及び設計自動車荷重の25トンへの改正(荷重引き上げ)に伴い、損傷度の高い既設床版を中心に補修・補強が進められているが、補強された床版を含めた、既設RC床版の疲労耐久性の評価法や、より合理的な補強設計法の確立に向けて、RC床版の疲労損傷機構をこれまで以上に詳細に解明する必要がある。

本文では、2007～2012年度に、主としてRC床版の疲労損傷機構の解明及び既往の補修・補強工法の効果確認を目的として実施した、多点動的計測を伴う輪荷重走行試験の結果<sup>2)~7)</sup>を総括する。それらの結果から得られたRC床版の疲労損傷機構に関する新たな知見と、それを踏まえた鋼板接着の補強効果及び打継目の影響に関する検討結果について概説する。

## 2. 2007～2012年度に行った輪荷重走行試験

図-1、表-1～2に床版供試体の形状寸法と主な諸元を示す。比較供試体となる供試体Nは、昭和39年の道路橋示方書を適用した床版(以下、39床版)に概ね相当する。供試体N0、N2は供試体Nとほとんど同一であるが、配力鉄筋(走行方向と平行に配置)の断面積をそれぞれ0.25倍、2倍とした。

供試体NS1は、輪荷重走行により初期損傷を与えた後、下面に鋼板接着補強を施した。実施工と同様に、鋼板間の接着継手を2箇所にした。鋼板は

SS400、板厚4.5mm、接着剤厚は5mmとした。

供試体NC1～6は、床版コンクリートの部分打換えによる補修を想定した、走行直角方向の打継目を設けるため、打設を2回に分けて行った。供試体NC1～3及びNC6は、供試体Nと同様の断面諸元とし、供試体NC4、NC5は、配力鉄筋量がNC1のそれぞれ0.25倍、2倍とした。

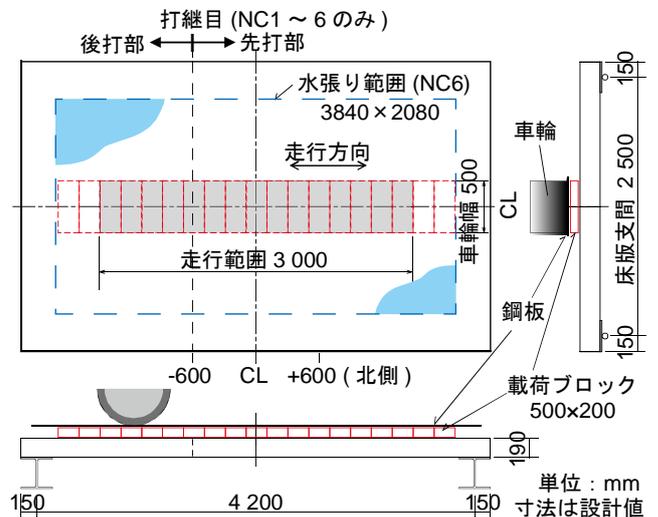


図-1 RC床版供試体の形状寸法

表-1 39床版供試体の基本諸元(設計値)

	主鉄筋			配力鉄筋		床版厚 (mm)
	呼び径	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)	呼び径	間隔 (mm)	
上段	D16	300	30	D10	300	190
下段	D16	150	160	D13	300	

注) 材質はすべてSD295A。

表-2 床版供試体の主な諸元と走行荷重

供試体	走行荷重 (kN)	床版厚 (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		配力鉄筋量	打継目の有無	備考
			先打	後打			
N	157	192	26.8	—	1	なし	39床版
N0	157	194	29.8	—	0.25	なし	
N2	157	190	27.0	—	2	なし	
NS1	294*	193	30.5	—	1	なし	鋼板接着
NC1	157	190	26.9	36.7	1	あり	
NC2	176	190	28.6	48.5	1	あり	
NC3	196	190	28.8	50.0	1	あり	
NC4	157	190	26.9	48.2	0.25	あり	
NC5	157	190	27.2	48.9	2	あり	
NC6	157	190	26.7	48.2	1	あり	水張り

注) NC1～6の床版厚は設計値。配力鉄筋量は供試体Nに対する比で示す。\*) 初期損傷導入時は147kN。

床版供試体の支持は、2辺(長辺)単純支持、他の2辺を弾性支持とした。図-1に示す走行範囲に、鋼製ブロック(200mm×500mm)を連続して並べ、その上に鋼板を敷設した。荷重は、その鋼板の上に、表-2に示す走行荷重一定で輪荷重を走行させる、一定荷重走行とした。計測項目は、変位、床版内部のコンクリート及び鉄筋のひずみ、ひび割れ幅とした。ひずみと変位の全164点を対象として、所定の回数ごとに、床版中央で静的荷重を行った際の計測と、その直前1分間の走行中における計測を行った。

### 3. RC床版の疲労損傷機構

#### 3.1 既往の研究

1960年代(昭和40年前後)、道路橋RC床版の早期劣化が頻繁に見られたことから、床版の実態調査が実施された<sup>1)</sup>。その調査の結果から、配力鉄筋量や床版厚が疲労耐久性に及ぼす影響が大きいと考え、RC床版の設計基準が徐々に見直された。

1980年代後半、輪荷重走行試験の導入により、RC床版の疲労損傷機構の解明が進められた(例えば図-2)<sup>8)</sup>。また、RC床版の疲労耐久性を表わすS-N線として $P/P_o-N_f$ の関係が提案され、配力鉄筋量の影響が包含される静的押し抜きせん断耐力の評価式( $P_o$ )を用いて表された( $P$ :試験時の走行荷重、 $N_f$ :抜け落ち破壊までの繰返し数)<sup>8)</sup>。その後、輪荷重走行試験下のRC床版がはり状化することを考慮して、 $P_o$ の代わりに $P_{sx}$ という指標を用いた評価式が提案された<sup>9)</sup>。

$$P_{sx} = 2 B (\tau_{smax} x_m + \sigma_{tmax} c_m) \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $B$ : 荷重幅の両端に配力鉄筋の有効高さ $d_d$ を加えた値( $=b_b+2d_d$ )、 $b_b$ : 荷重ブロックの走行方向辺長(200mm)、 $\tau_{smax}$ : コンクリートの最大せん断応力度( $=0.252f_c' - 0.00251f_c'^2$ )<sup>8)</sup>、 $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度、 $x_m$ : 主鉄筋断面の中立軸計算値、 $\sigma_{tmax}$ : コンクリートの最大引張応力度( $=0.269f_c'^{2/3}$ )<sup>8)</sup>、 $c_m$ : 主鉄筋のかぶり厚さ

この指標では、配力鉄筋の有効高さ $d_d$ が考慮されているが、適用範囲を配力鉄筋比25%以上に制限した上で、配力鉄筋量の影響は直接に評価されていない。

#### 3.2 主鉄筋の挙動とアーチ機構形成

表-2に示した供試体の輪荷重走行試験の結果を用いて、主鉄筋方向に関する、疲労損傷過程におけるRC床版の内力の変化を検討した。図-3に、一例として、供試体Nの下段主鉄筋のひずみの変化を示す。

この結果から、繰返し走行荷重により比較的早期に床版コンクリート内部にせん断ひび割れ(走行方向に直交する断面で見たときの斜めひび割れ)が発生して、下段の主鉄筋のひずみ分布が、繰返し数の増加とともに、版としての分布から支間方向に均等な、

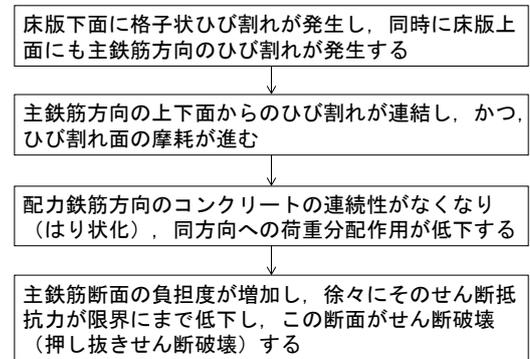


図-2 輪荷重走行試験における床版供試体の疲労損傷機構<sup>8)</sup>

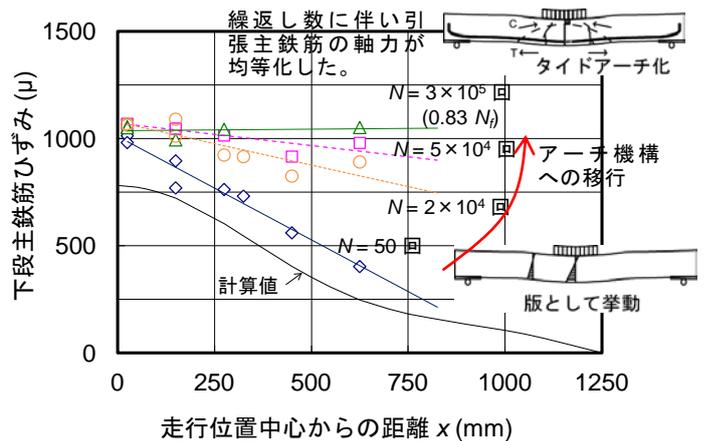


図-3 供試体Nの床版中央下段主鉄筋のひずみ分布

注)  $x$ : 走行直角方向の距離。  
計算値はコンクリートの引張強度を無視した二辺単純支持RC床版の直交異方性版理論による。

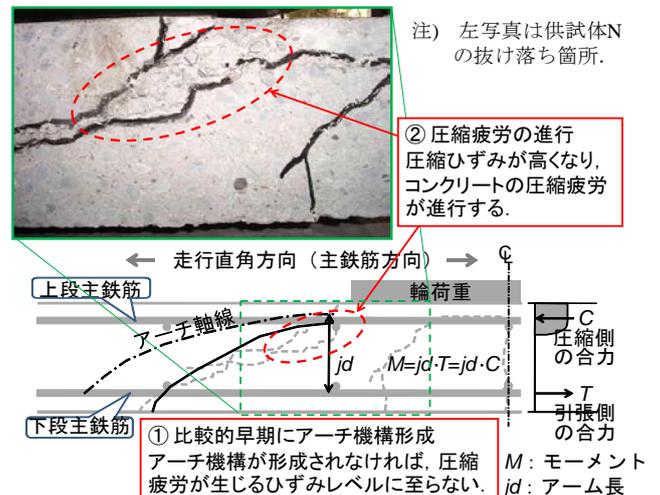


図-4 輪荷重走行試験におけるRC床版供試体のアーチ機構形成と圧縮域のコンクリートの疲労<sup>2),3)</sup>

タイドアーチのタイ状の分布に変化することがわかった。すなわちアーチ機構に大きく依存する耐荷機構に移行し(以下、単にアーチ機構という)、かつ走行範囲にわたって(それぞれの主鉄筋位置で)主鉄筋方向にアーチ機構が形成されることが認められた。

また、アーチ機構形成までの輪荷重走行載荷の繰返し数 $N_s$ は、主鉄筋ひずみから算定されるみかけの中立軸が低下し始める回数と概ね一致することがわかった。この点に着目して、旧土木研究所で行われた数多くの輪荷重走行試験の結果についても、データを見直して $N_s$ を求めた。

RC床版内にアーチ機構が形成された後は、圧縮部材を構成するコンクリートに、数10万回の繰返し数でもコンクリートの圧縮疲労破壊が生じ得るレベルのひずみ(800~1000 $\mu$ 程度)が作用することを確認した(図-4)。繰返し走行載荷初期のコンクリートの圧縮ひずみは輪荷重が157kNであっても500 $\mu$ 以下であり、コンクリートの圧縮疲労破壊が生じるひずみレベルに至らなかった。

### 3.3 配力鉄筋量の影響

図-5に、供試体N、N0、N2の結果から得られた配力鉄筋量と繰返し数 $N_s$ 、 $N_f$ の関係を示す。アーチ機構形成までの繰返し数 $N_s$ 、抜け落ち破壊までの繰返し数 $N_f$ とともに、配力鉄筋量の影響を顕著に受ける部分があることがわかった。

図-6に、供試体N、N0、N2のアーチ機構形成までの繰返し数 $N_s$ と $P/(2V_d)$ の関係を示す( $P$ :試験時の走行荷重)。床版コンクリートのせん断耐力を想定した指標 $V_d$ は、はりと同様に主鉄筋比や荷重条件の影響を受ける可能性もあるが、床版については現時点で明確でないことから、暫定的に次のとおり定義したものである<sup>4)</sup>。

$$V_c = \tau_{smax} B_d d_m \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $B_d$ : 荷重幅の両端に配力鉄筋断面の中立軸計算値 $x_d$ を加えた値(= $b_b+2x_d$ )、 $d_m$ : 主鉄筋の有効高さ

図中の39床版、47床版は、旧土木研究所における試験結果<sup>2)</sup>を示す(47床版は、昭和47年の道路橋示方書を適用した床版に相当する供試体)。また39床版の結果に基づく回帰曲線を示す。これにより、アーチ機構形成までの繰返し数 $N_s$ は、配力鉄筋量の影響も考慮した $P/(2V_d)$ と比較的良好な相関が得られることがわかった。

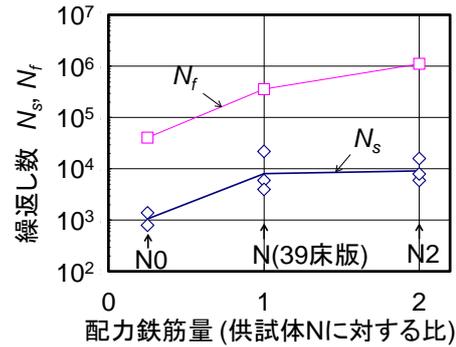


図-5 配力鉄筋量と繰返し数 $N_s$ 、 $N_f$ との関係

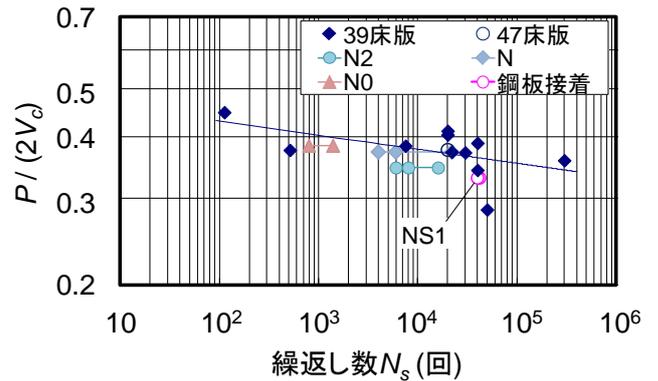


図-6  $P/(2V_d)$ と $N_s$ の関係

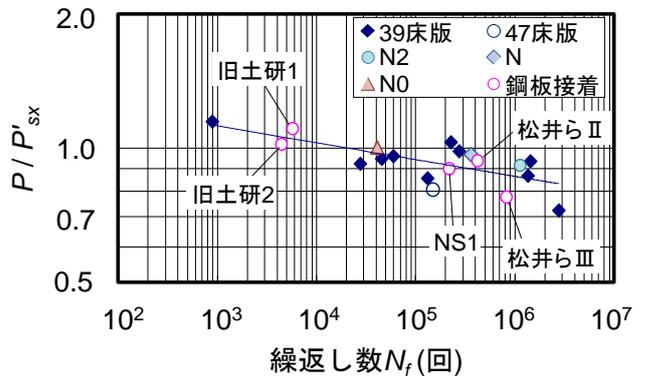


図-7  $P/P'_{sx}$ と $N_f$ の関係

注) 松井らの結果は文献10)より、旧土研1、2は文献11)よりそれぞれ引用した。

次に、抜け落ちまでの繰返し数 $N_f$ について、図-7に $P/P'_{sx}$ との関係を示す。この指標のうち $P'_{sx}$ は、次式のとおり、式(1)におけるはり化幅 $B$ の代わりに、配力鉄筋量の影響を考慮するため、前出の $B_d$ を用いたものである<sup>4)</sup>。

$$P'_{sx} = 2 B_d (\tau_{smax} x_m + \sigma_{tmax} c_m) \quad \text{式(3)}$$

この図より、抜け落ちまでの繰返し数 $N_f$ に及ぼす配力鉄筋量の影響(特に配力鉄筋量が著しく少ない床版を考慮する場合は)、 $P'_{sx}$ でより適切に評価できることがわかった。

### 3.4 配力鉄筋の挙動と膜作用

39床版を含め、表-2に示した供試体の場合、RC床版(引張無視)としての計算上の上段配力鉄筋のひ

ずみは、上段配力鉄筋が中立軸付近にあるためにごく軽微な値である。図-8に、配力鉄筋量が少ない供試体N0の上段配力鉄筋の各繰返し数における残留ひずみ分布(輪荷重が直上にないときの値)を示す。輪荷重が測定位置の直上にいる時は、上段配力鉄筋にさらに引張側のひずみが生じていた。上下の配力鉄筋のひずみから中立軸を算定すると、繰返し数の増加とともに、配力鉄筋方向のひずみが断面の大部分において引張側となった。すなわち配力鉄筋量が少ない場合、配力鉄筋方向の挙動が版から膜の挙動に近づく傾向があることがわかった(以下、単に膜作用という)。供試体N0ほどではないが、39床版である供試体Nでも同様に膜作用の兆候が認められた。

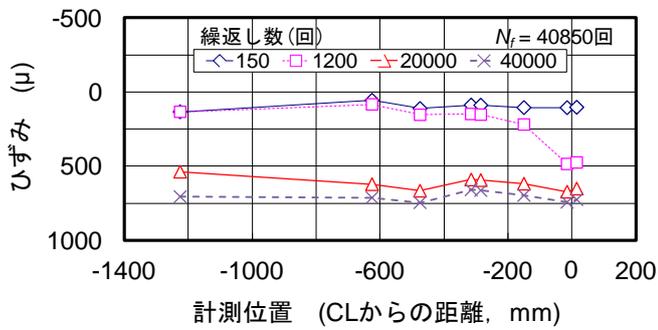


図-8 配力鉄筋量が少ない供試体N0の上段配力鉄筋の残留ひずみ分布

これまでRC床版の上面のひび割れや貫通ひび割れが発生する理由として、コンクリートの乾燥収縮の他、横せん断力とねじりせん断力の複合作用、ねじりモーメントと垂直せん断力の交番作用、集中荷重下の三次元的な応力などが考えられている。これらとともに、配力鉄筋量が少ない場合に見られる膜作用は、床版上面のひび割れや貫通ひび割れの発生を促進すると考えられる。配力鉄筋方向のコンクリートのせん断抵抗は、これらのひび割れを含めた膜作用の影響(引張下に置かれること)によって、低下すると考えられる。この点が、少ない配力鉄筋量がRC床版の疲労耐久性の低下をもたらした理由の一つであると考えられる。

### 3.5 アーチ機構と膜作用の交差

39床版を含めて、配力鉄筋量が少ないRC床版では、繰返し数とともに、主鉄筋方向にはアーチ機構への移行が見られ、配力鉄筋方向には膜作用が見られており、主鉄筋方向と配力鉄筋方向でまったく異なる耐荷機構にそれぞれ変化していくことがわかった。図-9に、アーチ機構と膜作用が交差する場合の模式図を示す。配力鉄筋方向には、膜作用への移行

とともに、たわみが繰返し数とともに増加していく傾向にある。一方、主鉄筋方向はアーチ機構に移行してコンクリートの上縁に高い圧縮力が負荷されるため、上縁付近のコンクリートが上方に押し上げられる傾向にある。輪荷重が直上に来た時は、上縁のコンクリートが押さえられて、アーチが有効に機能するが、輪荷重がそこから少し離れると、アーチ軸に沿った圧縮力は負荷されつつも、上からの押さえがなくなるために、上縁のコンクリートがより一層上方に押し上げられる傾向にある。39床版のように、中立軸位置が上段鉄筋の高さ付近にある場合、上段鉄筋を境に、上側のコンクリートと下側のコンクリートが引き裂かれる方向に挙動する可能性が高いと考えられる。このことは、39床版の場合に、輪荷重走行位置の直下に水平方向のひび割れが発生しやすい理由の一つと考えられる。

これらの挙動は、輪荷重走行試験によるRC床版の疲労耐久性が、一点載荷試験による場合に比べて著しく低くなる<sup>8)</sup>ことと、深く関連していると推察される。

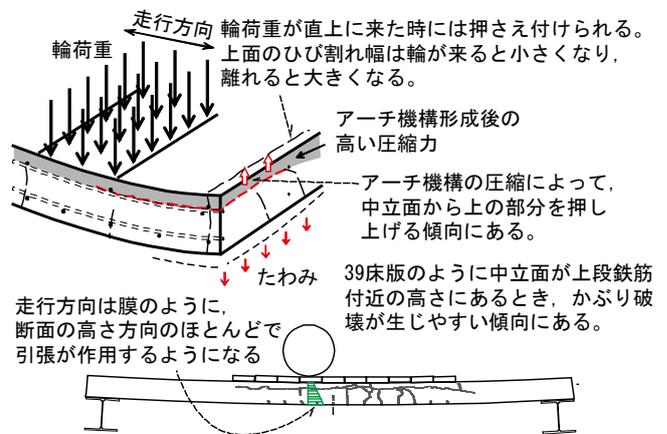


図-9 アーチ機構と膜作用の交差(模式図)

## 4. 鋼板接着の補強効果

RC床版の鋼板接着補強の効果については既に検討されているが(例えば文献10)、上記の視点から供試体NS1を用いた輪荷重走行試験によって再検討を試み、次の結果が得られた。

- (1) RC床版の主鉄筋方向の耐荷機構が一旦アーチ機構に移行しても、鋼板接着によりアーチ機構が解消され、劣化したRC床版が版として曲げ挙動を示す状態に回復することがわかった。
- (2) 図-10に、供試体NS1の鋼板接着前後における、上下配力鉄筋のひずみの変化を示す。補強前は、繰

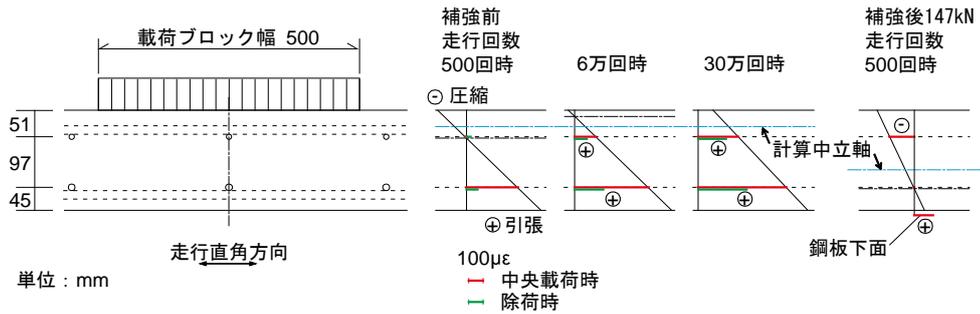


図-10 供試体NS1の床版中央、輪荷重147kNの直下における上下配力鉄筋のひずみの変化

返し数とともに上段配力鉄筋の引張ひずみが増加し、一旦、膜作用の兆候が見られたが、鋼板接着後は、中立軸位置の顕著な変化によって、上段配力鉄筋のひずみが圧縮側に転じて、版としての挙動が回復することが確認できた。

(3) 鋼板接着されたRC床版も疲労損傷の過程において、アーチ機構への移行が認められた。図-6に、供試体NS1の結果を示す。鋼板接着されたNS1の  $V_c$  は、鋼板接着のないRC床版の約2倍<sup>9)</sup>であり、図-6のS-N図によれば(39床版と同様に評価できるとすれば)、アーチ機構形成までの繰返し数  $N_s$  が著しく改善されることがわかる。このときのコンクリートの有効断面(式(2)中の  $B_d d_m$ )を図-11に示す。鋼板接着されたRC床版では、RC床版に比べて、せん断に寄与する有効高さがコンクリート全高に広がるだけでなく、鋼板による配力鉄筋方向の断面性能が大きく改善されることで、 $V_c$  の計算に用いる有効幅  $B_d$  を大きくすることにも効果が表れていたと考えられる。

(4) 供試体NS1は、鋼板継手の剥離の進展を伴いながら抜け落ち破壊に至った。図-7に、供試体NS1の結果を、補強されていないRC床版の結果とともに示す。また、鋼板接着されたRC床版の既往の試験結果<sup>10),11)</sup>も併せて示した。鋼板接着されたRC床版の疲労耐久性は、 $HP'_{sx}$  を用いて、RC床版の結果と同様に表せる可能性がある。図-7に示した試験結果に関して、鋼板接着されたRC床版の  $P'_{sx}$  は、補強前のRC床版の1.5~1.9倍<sup>9)</sup>であり、疲労寿命としては著しく改善されていた。なお、 $P'_{sx}$  の計算では、主鉄筋断面の中立軸位置を鋼板の断面を考慮した値とする一方、鋼板の接着継手の剥離を考慮して、配力鉄筋断面の中立軸位置を鋼板のないRC断面として算定した値を用いた。鋼板間の接着継手の剥離を考慮しても、鋼板接着によって、疲労耐久性が改善された。

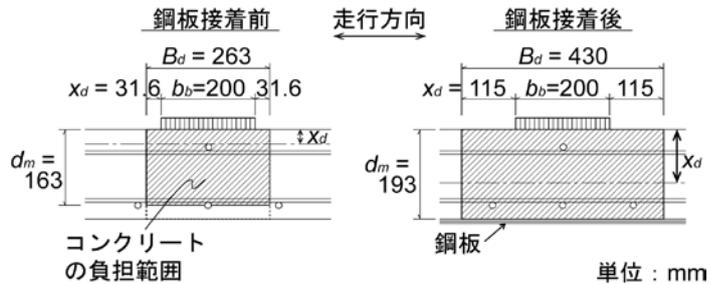


図-11 供試体NS1の鋼板接着前後の有効断面

これまでRC床版の疲労耐久性が鋼板接着によって大きく改善されることが知られているが、それは上記(1)~(4)の理由によるところが大きいと考えられる。

### 5. 打継目の影響

RC床版の抜け落ちが生じた場合、応急的にコンクリートの部分打ち換えが行われることがあるが、別の部位あるいは新旧コンクリートの打継目付近で再び抜け落ちに至る事例が見られる(写真-1)<sup>12)</sup>。



写真-1 部分打換えされたRC床版の打継目での疲労損傷事例<sup>12)</sup>

この事例で見られたように、走行直角方向の打継目は、輪荷重走行下に不連続点を設けることから床版の弱点になると推定していたが、供試体NC1~6の結果では、いずれも打継目の開きが早期に生じたにもかかわらず、打継目で抜け落ちに至ることはなかった。このことから、水張りの有無にかかわらず、打継目の存在が必ずしもRC床版の疲

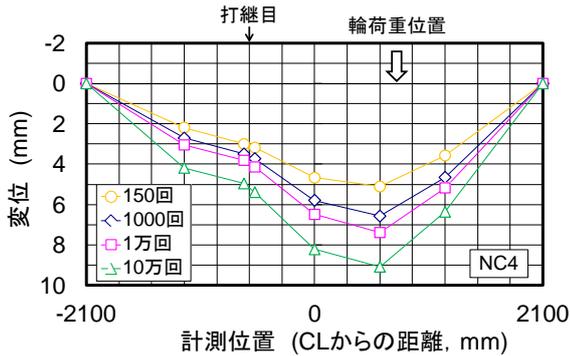


図-12 供試体NC4の配力鉄筋方向のたわみ分布

劣耐久性に影響を及ぼすとは限らないことがわかった。図-12に、配力鉄筋量が少ない供試体NC4を例に、輪荷重が打継目から離れた位置にある時の配力鉄筋方向のたわみ分布を示す。

打継目は、版の境界条件を形成して、弾性ヒンジとなりやすく、負曲げが生じて、上下に貫通する開きを誘発する。その後の打継目の開きの拡大や先打部の疲労損傷の進行は、ヒンジ化(ばね定数の低下)をさらに助長する。しかし、弾性ヒンジとなった打継目自体は、他の一般部に比してRC床版の抜け落ちが生じ難い構造となる傾向にあった。

それにもかかわらず、写真-1に示したとおり、実橋では打継目で抜け落ちが生じる原因として、a)部分打換えの後に残された旧来の床版が、外見上は疲労損傷が見られなくとも、抜け落ちた部分と同等の輪荷重走行履歴を受けていること、b)打継目の負曲げによって、アスファルト舗装のひび割れを誘発して、路面からの水の浸入を容易にすることの二点が考えられる。打継目付近のみで水が浸入したときには、その部分でコンクリートの疲労耐久性が著しく低下することから、局所的に疲労が進行する可能性がある<sup>12)</sup>。

## 6. おわりに

現在、炭素繊維シート補強の設計・施工指針(案)の見直しに向けて、炭素繊維補修・補強工法技術

研究会と共同研究を実施している。本文で述べた鋼板接着の効果確認の手法を参考に、新たな視点から炭素繊維シートの補強効果について調査を行っているところである。

近年、路面からの塩水の浸入により、塩害や、アルカリ骨材反応、凍害などのコンクリートの劣化を伴った複合的な抜け落ちが生じるなど、現場におけるRC床版の劣化形態は多様化する傾向にある。そうした複雑な現象の解明においても、まずはそれぞれの(ここでは疲労の)劣化機構を明確にしておく必要がある。

## 参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点、橋梁と基礎、2-7、pp.1~5、1968.7.
- 2) 長屋優子、村越潤、田中良樹：繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討、コンクリート工学年次論文集、pp.907~912、2008.7.
- 3) 田中良樹、村越潤、長屋優子：道路橋RC床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響、コンクリート工学年次論文集、pp.913~918、2008.7.
- 4) 田中良樹、村越潤、長屋優子：鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に及ぼす配力鉄筋の影響、第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集、土木学会、pp.161~168、2012.6.
- 5) 田中良樹、村越潤：繰返し移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動、構造工学論文集、59A、土木学会、pp.1124~1137、2013.3.
- 6) 吉田英二、村越潤、田中良樹：打継目を有する鉄筋コンクリート床版の輪荷重走行試験、第67回土木学会年次学術講演会概要集I、pp.1151-1152、2012.9.
- 7) 吉田英二、村越潤、田中良樹：打継目を有するRC床版の疲労耐久性に及ぼす水の影響、第30回日本道路会議、No. 5017、2013.10.
- 8) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究、大阪大学博士論文、1984.11.
- 9) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、pp.627~632、1987.
- 10) 松井繁之、栗田章光、中井博、黒山泰弘：鋼板接着工法により補強したRC床版の疲労性状、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.247~254、1986.9.
- 11) 松尾伸二、西川和廣、内田賢一、川間重一：既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強に関する検討、橋梁と基礎、pp.25~32、2000.11.
- 12) 田中良樹、村越潤、長屋優子：橋面アスファルト舗装の透水性が鉄筋コンクリート床版の耐久性に及ぼす影響、橋梁と基礎、2008.11~12.

田中良樹



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員  
Yoshiki TANAKA

村越 潤



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員  
Jun MURAKOSHI

長屋優子



(独)土木研究所つくば中央研究所技術推進本部 主任研究員  
Yuko NAGAYA

吉田英二



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員  
Eiji YOSHIDA