

# 鉄筋の付着特性が RC床版の疲労特性に及ぼす影響

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○澤松俊寿  
(独) 土木研究所寒地土木研究所 三田村浩  
(独) 土木研究所寒地土木研究所 西 弘明

車両の繰返し走行による疲労劣化や床版上面の凍害劣化による道路橋RC床版の損傷事例が報告されている。このような現象に対して種々の検討が行われているが、その多くは異形鉄筋を用いたRC床版を対象としたものである。一方で、損傷を受けているRC床版には丸鋼鉄筋を用いたものが多く存在している。本研究では、異形および丸鋼鉄筋を用いたRC床版に対して輪荷重走行試験を実施し、鉄筋の付着特性がRC床版の疲労特性に与える影響について検討を行った。

キーワード：RC床版，疲労特性，丸鋼鉄筋，輪荷重走行試験

## 1. はじめに

道路橋のRC床版は、輪荷重の繰返し走行によってひび割れ損傷を生じ、劣化が進むと押抜きせん断破壊に至る。また、床版上面から床版内部に水分が浸透すると劣化が著しく加速されることが明らかになっている。さらに近年、積雪寒冷地においては、床版上面のコンクリートが凍害劣化によりスケーリングや砂利化を起し、有効床版厚が減少して疲労耐久性が大きく低下することが判ってきた<sup>1)</sup>。そのため、積雪寒冷地特有の劣化損傷を受けた既設RC床版の残存寿命評価や、それに対応した延命手法を策定することが急務となっている<sup>2,3)</sup>。

このような現状に鑑みて、RC床版の残存性能評価や延命手法等に関する検討が行われてきた。しかしながら、これらの多くは、異形鉄筋が配置されたRC床版を対象に行われたものである。

一方で、昭和40年代中頃までは、RC床版には丸鋼鉄筋が使用されていた実態があり、これらのRC床版は供用開始後約40年が経過している。近年の道路橋床版の健全性調査によると、これらの丸鋼鉄筋を用いたRC床版は疲労損傷や凍害劣化により、損傷劣化が顕在化し始めていることが明らかになっている。今後、損傷劣化がさらに急増することが考えられることから、丸鋼鉄筋を用いたRC床版の疲労特性の解明は重要な課題である。

丸鋼鉄筋は、異形鉄筋に比べてコンクリートとの付着強度が低いことが知られている<sup>4)</sup>。鉄筋コンクリート構造物の長寿命化を目的とした維持管理計画の策定のために、丸鋼鉄筋が配置されたRC構造物に着目して、RC部材としての基本的な力学的特性を明らかにする研究が行われている<sup>5)</sup>。これによると、丸鋼鉄筋を用いたRC部材は、異形鉄筋に比べて付着強度が低いため、ひび割

れ性状、変形、耐力等が異形鉄筋を用いたRC部材と異なり、場合によっては基本的な力学的性能が低い場合もあることが明らかにされつつある。

本研究では道路橋RC床版を対象として、丸鋼鉄筋が配置されたRC床版の疲労特性に関する基礎資料を得ることを目的に、異形鉄筋を配置したRC床版と丸鋼鉄筋を配置したRC床版を製作し、輪荷重走行試験を実施して、鉄筋の付着特性がRC床版の疲労特性に与える影響に関して実験的に検討した。

## 2. 供試体および実験方法

以下に、本実験において製作したRC床版供試体および輪荷重走行試験の方法を示す。

### (1) RC床版供試体

RC床版供試体は、北海道内の昭和39年に架設された橋長44mの2径間単純RC床版合成鈹桁橋を参考に製作した。本橋は、有効巾員6.0 m、床版支間2.35 mの3主桁橋であり、昭和31年鋼道路橋設計示方書に準拠して設計されている。床版厚は160 mmで、鉄筋には丸鋼が使用されている。表-1に製作したRC床版供試体の諸元を示す。配筋詳細を図-1に示す。図-1に示す配筋に対して、丸鋼鉄筋を用いた供試体（以下、丸鋼鉄筋供試体）および異形鉄筋を用いた供試体（以下、異形鉄筋供試体）の2体を製作し、輪荷重走行試験を行った。なお、それぞれの供試体のコンクリートの圧縮強度は、丸鋼鉄筋供試体が43.2 N/mm<sup>2</sup>、異形鉄筋供試体が37.2 N/mm<sup>2</sup>であった。また、丸鋼鉄筋供試体にはSR235を、異形鉄筋供試体にはSD345をそれぞれ用いた。



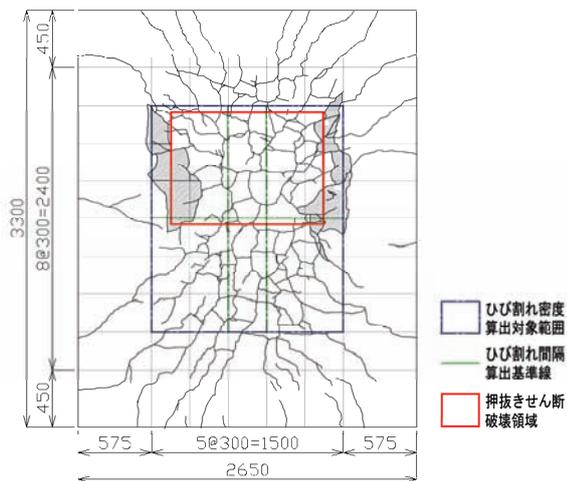


図4 丸鋼鉄筋供試体ひび割れ状況 (実験終了時)

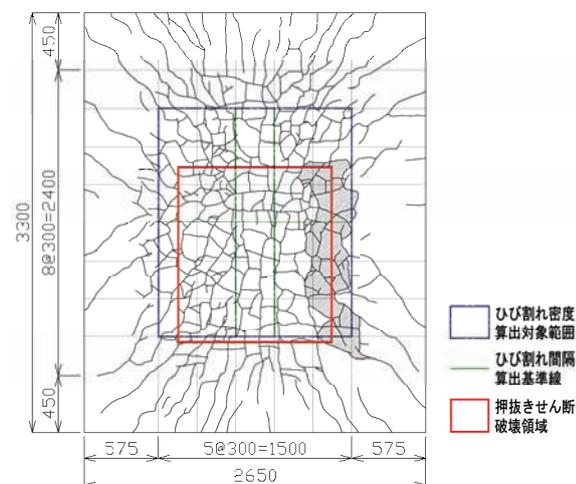


図5 異形鉄筋供試体ひび割れ状況 (実験終了時)

れを対象に算出した。一方、ひび割れ間隔についても、ひび割れ密度と同じ範囲内に基準線を設け、この基準線とひび割れとの交差点に基づき、橋軸方向と橋軸直角方向の平均ひび割れ間隔（以下、ひび割れ間隔という）を算出した。なお、ひび割れ間隔算出時の基準線は、図中に緑線で示したように、橋軸方向に2本、橋軸直角方向に1本を設定した。

図6に供試体中央位置の変位（以下、変位という）とひび割れ密度の関係を示している。ひび割れ密度の算出時点は、各載荷荷重段階の10万回走行時および実験終了時（載荷荷重200kN）である。図より、量供試体において、実橋における床版の打ち換えが推奨される限界ひび割れ密度  $10.0\text{m}^2/\text{m}^2$  を超えても、供試体下面の鉛直変位が急増し始める等の変化は見られなかった。なお、実験終了時のひび割れ密度は、丸鋼鉄筋供試体で  $13.1\text{m}^2/\text{m}^2$  程度、異形鉄筋供試体で  $17.0\text{m}^2/\text{m}^2$  程度であった。これより、異形鉄筋供試体に対する丸鋼鉄筋供試体のひび割れ密度は約75%程度であることから、異形鉄筋供試体の場合には丸鋼鉄筋供試体に比べてひび割れが分散して発生したことが分かる。

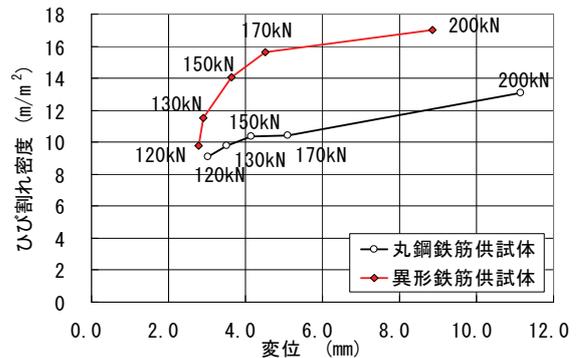


図6 ひび割れ密度－変位関係

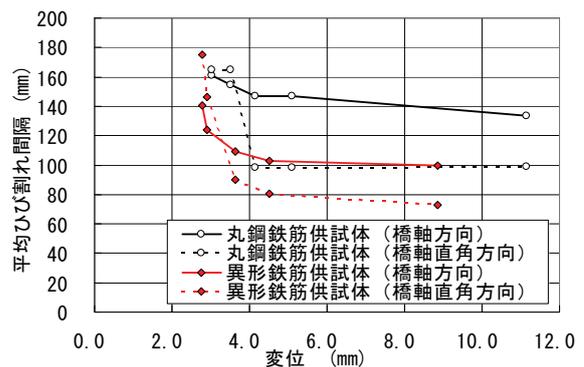


図7 ひび割れ間隔－変位関係

図7に変位とひび割れ間隔の関係を示す。図中ひび割れ間隔の算出時点は、上述のひび割れ密度の算出時点と同じである。一般に、鉄筋コンクリート部材のひび割れ本数は載荷荷重の増加とともに増加し、やがて新たなひび割れが発生せずほぼ一定（以後、ひび割れの定常状態と呼ぶ）になることが知られている。本実験では、丸鋼鉄筋および異形鉄筋供試体ともに、載荷荷重170kN（変位約5mm）の時点でひび割れの発生がほぼ収束しており、ひび割れが定常状態となる荷重と変位には、両者に大きな差異は認められない。

橋軸方向のひび割れ間隔は、橋軸直角方向に比べて若干大きい傾向が認められる。一般に異形鉄筋が配置されたRC部材の場合には、鉄筋の配置間隔が大きいほどひび割れ間隔が大きくなる。そのため、本実験の場合においても鉄筋の配置間隔の差異によって橋軸方向のひび割れ間隔が橋軸直角方向よりも大きくなったものと考えられる。なお、この傾向は、丸鋼鉄筋供試体の場合においても同様であった。

定常状態でのひび割れ間隔を比較すると、橋軸方向のひび割れ間隔は、丸鋼鉄筋供試体の場合が約130mm、異形鉄筋供試体の場合が約100mmであった。また、橋軸直角方向のひび割れ間隔は、丸鋼鉄筋供試体が約100mm、異形鉄筋供試体が約75mmであった。いずれの方向においても、丸鋼鉄筋供試体のひび割れ間隔は、異形鉄筋供試体に比べて大きいことが分かる。これは、丸鋼鉄筋は、異形鉄筋に比べて鉄筋とコンクリートとの付着

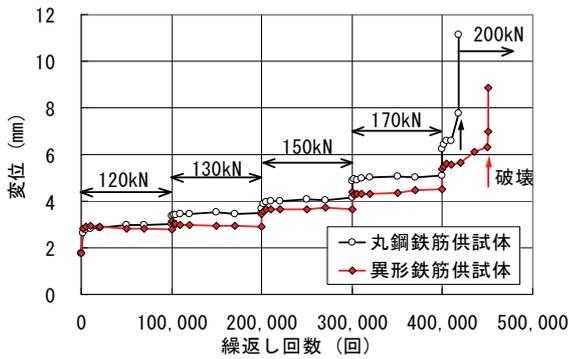


図-8 変位—繰返し回数関係

強度が低いために、ひびわれの分散性も低くなることによるものと考えられる。

なお、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>によると、丸鋼鉄筋を用いた場合のひび割れ間隔は、異形鉄筋を用いた場合の1.3倍としている。本実験結果の場合も概ね1.3倍であり、既往の知見と概ね一致する結果であった。

以上のように、丸鋼鉄筋供試体は異形鉄筋供試体の場合に比べてひび割れ間隔およびひび割れ幅が大きいことより、異形鉄筋供試体の場合よりも疲労寿命が低下したものと考えられる。すなわち、ひび割れ間隔が大きくなることによりひび割れ面でのせん断力が増加し、かつひび割れ幅の増加によりせん断伝達能力が低下することによって破壊領域が小さくなり、疲労寿命が低下したものと考えられる。

## (2) 荷重と変位の関係

図-8に、荷重の繰返し回数と変位の関係を示す。輪荷重走の行開始前に輪荷重120kNを載荷した時点での変位は丸鋼鉄筋供試体で1.76mm、異形鉄筋供試体で2.32mmと差が見られた。この時点では、いずれもほとんどひび割れが発生していない段階であることより、変位の差は材料特性による初期剛性の違いによるものと考えられる。ここでは、初期剛性の影響を除くために、120kN繰返し載荷開始前の変位の比(1.76/2.32=0.76)を異形鉄筋供試体の変位に乗ずることで補正を行った。

図より、各荷重段階における丸鋼鉄筋供試体の変位は、異形鉄筋供試体に比べて大きいことが分かる。これは、後述のように丸鋼鉄筋が異形鉄筋に比べて付着強度が小さく鉄筋とコンクリート間にすべりが生じ、床版の剛性が低下したことが原因と考えられる。

なお、図-9、10に示すように各供試体の橋軸方向および橋軸直角方向の変位分布は、両者で大きな差異は認められない。

## (3) 鉄筋ひずみ

図-11、12に、それぞれ橋軸方向と橋軸直角方向における両供試体の鉄筋ひずみと繰返し回数の関係を示す。図中のひずみは、床版の中央近傍の下面軸方向鉄筋に貼

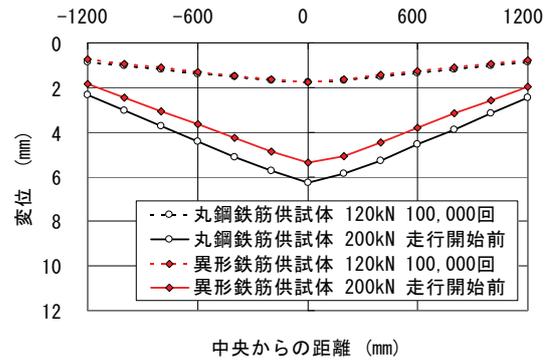


図-9 橋軸方向の変位分布

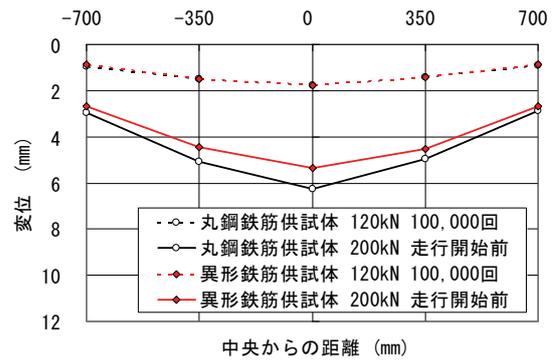


図-10 橋軸直角方向の変位分布

付けたひずみゲージによる計測値である。図-11のより、橋軸方向におけるひずみ分布は、異形鉄筋供試体の場合には荷重の増加に対応して鉄筋の引張ひずみも大きくなっている。これに対し、丸鋼鉄筋供試体の場合には荷重が増加してもひずみはほとんど増加しない傾向を示している。これは、丸鋼鉄筋が異形鉄筋に比べて付着強度が小さいこと、付着応力度が付着強度に達することで鉄筋とコンクリート間に付着すべりが生じた区間において鉄筋のひずみが軸方向に均等化されるためと考えられる。一方、橋軸直角方向ひずみの場合には、両者の差は小さいものの異形鉄筋供試体のひずみが大きい傾向を示している。

図-13、14には、両供試体の中央断面における橋軸方向および橋軸直角方向の鉄筋のひずみ分布を示している。図より、橋軸直角方向に着目すると、丸鋼鉄筋供試体と異形鉄筋供試体のひずみ分布に大きな差異は無いことが分かる。平面保持が成立するものと仮定すれば、異形鉄筋供試体の場合にはコンクリートの圧縮領域は、上縁かぶりコンクリート部分に位置していることが分かる。なお、丸鋼鉄筋供試体のひずみ状況も各荷重段階で異形鉄筋供試体の場合と大きな差異がないことより、コンクリートの圧縮領域は同様に上縁かぶり部にあることが分かる。一方、橋軸方向において、特に200kN走行開始前に着目すると、いずれの床版も軸引張力が励起し、異形鉄筋供試体の場合には曲げと軸力が連成して作用しているのに対して、丸鋼鉄筋供試体の場合には軸力が卓越す

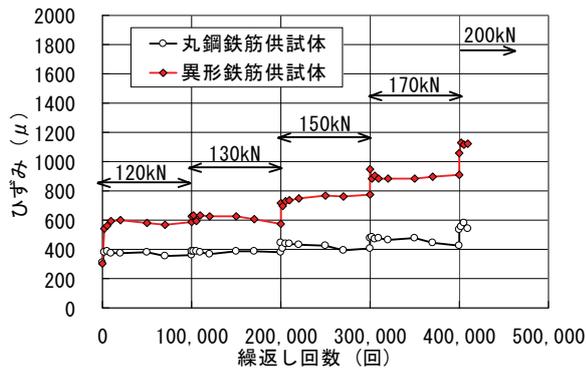


図-11 鉄筋ひずみ-繰返し回数関係 (橋軸方向)

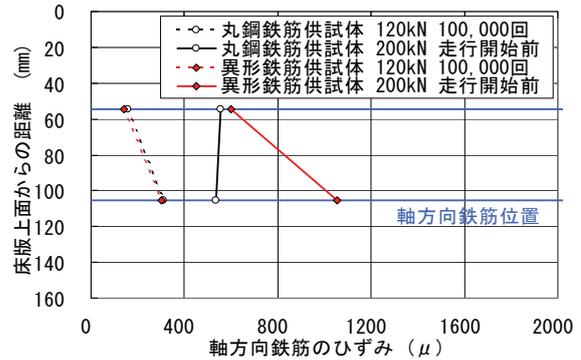


図-13 引張鉄筋の断面ひずみ分布 (橋軸方向)

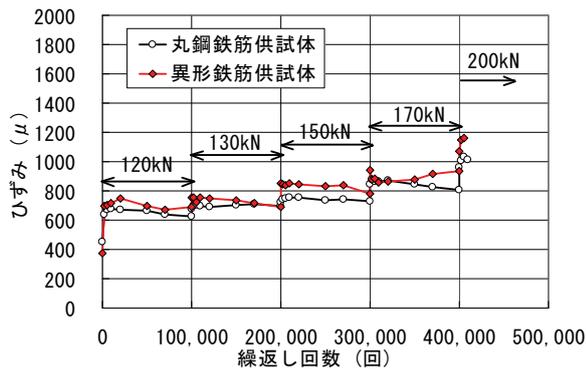


図-12 鉄筋ひずみ-繰返し回数関係 (橋軸直角方向)

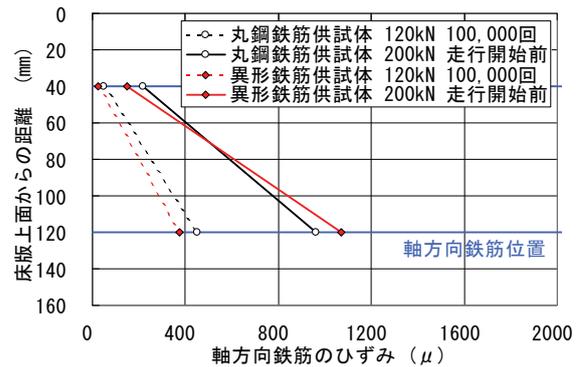


図-14 引張鉄筋の断面ひずみ分布 (橋軸直角方向)

る傾向を示している。これは、异形鉄筋供試体の場合には鉄筋の付着性能がよいのに対して、丸鋼鉄筋供試体の場合には早期に付着強度に達することにより膜作用が卓越することによるものと考えられる。

以上より、鉄筋のひずみ分布から、橋軸直角方向に関しては、両供試体で大きな差異は認められないものの、橋軸方向に関してはひずみの分布状態に違いが認められることから、荷重の伝達機構にも差異が生じているものと考えられる。これは前述のように、押抜きせん断破壊領域が橋軸直角方向では丸鋼鉄筋供試体と异形鉄筋供試体で同様であったのに対して、橋軸方向には异形鉄筋供試体と比較して丸鋼鉄筋供試体が狭い結果となっていたことと対応しているものと考えられる。

#### 4. 既往の評価法による検討

异形鉄筋供試体と丸鋼鉄筋供試体の疲労寿命を比較するために、荷重 150kN に換算した等価繰返し回数を次式により算出した。

$$DI = \sum \left( \frac{P_i}{P} \right)^m \cdot n_i \quad (1)$$

ここに、 $DI$  は等価繰返し回数 (回) ,  $P_i$  は荷重 (kN) ,  $P$  は基準荷重 (150 kN とする) ,  $m$  は S-N 線図の傾きの逆数で 12.76 とする <sup>7)</sup> ,  $n_i$  は荷重  $P_i$  の回数である。

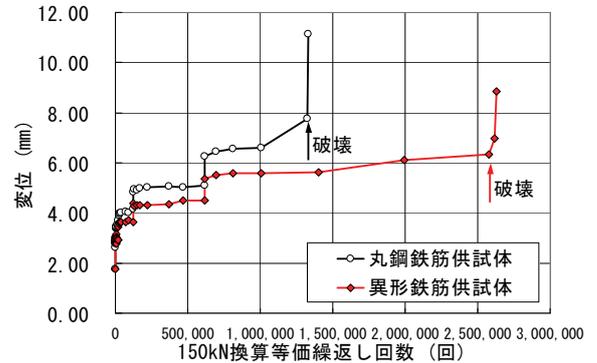


図-15 変位-150kN換算等価繰返し回数関係

図-15 に、150 kN 換算時の等価繰返し回数と変位の関係を示す。図より、丸鋼鉄筋供試体の疲労寿命は异形鉄筋供試体の約 0.51 倍であることが分かる。

既往の研究によると、RC 床版における押抜きせん断耐力は、圧縮領域のコンクリートによるせん断力の伝達、ひび割れ面でのせん断力の伝達、引張鉄筋によるせん断力の分散からなるとされている <sup>7)</sup>。

この前提に立てば、丸鋼鉄筋供試体の疲労寿命が异形鉄筋供試体に比べて低いのは、1)丸鋼鉄筋供試体が异形鉄筋供試体に比べて発生するひび割れ本数が少ないために、ひび割れ面が負担するせん断力が相対的に増加すること、2)ひび割れ幅も大きいので、せん断伝達能力が低下することにより結果として相対的に押抜きせん断耐力も低下すること等によるものと考えられる。

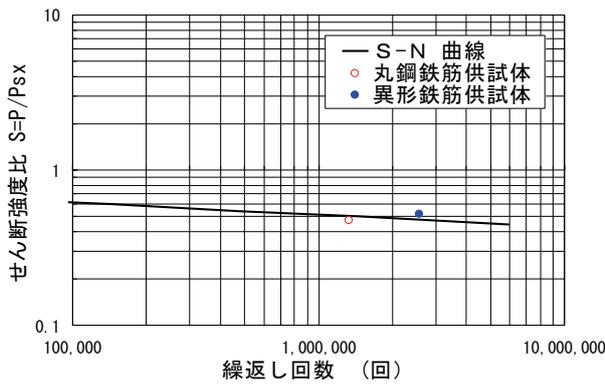


図-16 S-N曲線

表-2 計算値と実験値の比較

	単位	丸鋼鉄筋供試体	異形鉄筋供試体
輪荷重	P	kN	150
梁状化した押抜きせん断耐力	$P_{sx}$	kN	316.4
無次元荷重値 ( $P/P_{sx}$ )	S	-	0.474
繰返し回数 ((2)式による計算値)	$N_{ca1}$	回	2,862,017
繰返し回数 (実験結果)	$N_{exp}$	回	865,530
$N_{exp}/N_{ca1}$	-	-	0.46
			2.98

次に、実験結果と、式(2)で表される異形鉄筋 RC 床版を対象とした既往の疲労寿命算定手法<sup>7)</sup>により得られる計算値を比較する。図-16には、疲労寿命算定手法で提案されたS-N曲線と実験結果を比較して示している。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (2)$$

ここに、 $P$ は輪荷重、 $P_{sx}$ は梁状化した押抜きせん断耐力、 $N$ は繰返し回数である。

表-2には、式(2)により算出される輪荷重を150kNとした場合の繰返し回数と実験結果を示している。表より、実験値は計算値に対して、丸鋼鉄筋供試体で約0.46倍、異形鉄筋供試体で2.98倍となることが分かる。なお、梁状化した押抜きせん断耐力 $P_{sx}$ は次式により求めた<sup>7)</sup>。

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \times X_m \times B + 2 \cdot \sigma_{tmax} \times c_m \times B \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{smax}$ はコンクリートの最大せん断応力度、 $X_m$ は引張側コンクリートを無視した場合の圧縮側上縁から中立軸までの距離、 $\sigma_{tmax}$ はコンクリートの最大引張応力度、 $c_m$ は主鉄筋のかぶり厚さ、 $B$ は梁状化したときの梁幅である。なお、 $\tau_{smax}$ 、 $\sigma_{tmax}$ 、 $B$ は以下の式で与えられる。

$$\tau_{smax} = 0.656 f_{ck}^{0.606} \quad (4)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.269 f_{ck}^{2/3} \quad (5)$$

$$B = b + 2d_d \quad (6)$$

ここに、 $b$ は載荷板の配力筋方向の辺長、 $d_d$ は引張配力筋の有効高さである。

本研究の範囲内では、既往の疲労寿命算定手法は異形鉄筋供試体に対しては安全側に、丸鋼鉄筋供試体に対しては危険側の評価となった。今後は、さらなる検討を行い、丸鋼鉄筋を用いた場合に対する補正式を提案したい。

## 5. まとめ

以下に、本検討によって得られた知見を示す。

- 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版は、異形鉄筋を用いた場合に比べて、ひび割れ密度が小さく、かつひび割れ間隔やひび割れ幅が大きくなる。ただし、ひび割れ密度やひび割れ間隔が一定の値となる荷重は、いずれも同等であった。
- 両床版の繰返し荷重による押抜きせん断破壊領域を比較すると、橋軸直角方向は同様であったが、橋軸方向の破壊領域は、丸鋼鉄筋を用いた方が異形鉄筋を用いた RC 床版に比べて小さくなる。
- 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版は、異形鉄筋を用いた場合に比べてたわみ量が大きいが、これは鉄筋とコンクリートの付着切れにより床版の剛性が低下したことが原因と考えられる。
- 丸鋼を用いた RC 床版の疲労寿命は、異形鉄筋用いる場合の約 51%であり、異形鉄筋 RC 床版の既往の S-N 式から算定される寿命の約 46%程度であった。
- 丸鋼を用いた RC 床版が異形鉄筋を用いた場合に比べて疲労寿命が低下する要因は、発生するひび割れ本数の減少に伴うひび割れ面が負担するせん断力の増加と、ひび割れ幅の増加によるせん断伝達能力の低下に伴う押抜きせん断耐力の低下が考えられる。

## 参考文献

- 1) 三田村浩, 石川博之, 赤代恵司, 松井繁之: 積雪寒冷地におけるRC床版の下面FRPシート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1483-1488, 2009.
- 2) 三田村浩, 石川博之, 赤代恵司, 松井繁之: 積雪寒冷地における既設RC床版の延命手法について, 平成20年度 土木学会北海道支部論文報告集, 第65号, A-26(CD-ROM), 2009.2
- 3) 小野貴之, 三田村浩, 林川俊郎, 松井繁之: 積雪寒冷地におけるRC床版の疲労耐久性に関する研究, 第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.75-80, 2008.6
- 4) 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2008.3
- 5) Mohd Wildan, 中村 光, 国枝 稔, Pamavanh Kongkeo, 河村精一: 丸鋼を用いた低鉄筋比RCはりの挙動の評価, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.453-454, 2009.3
- 6) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第374号, I-6, pp.419-426, 1986.10
- 7) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版株式会社, pp.47-61, 2007.10