

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

Experimental study on fatigue durability of RC slabs reinforced with round steel bars

赤代恵司*, 三田村浩**, 渡辺忠朋***, 岸 徳光****

Keiji Shakushiro, Hiroshi Mitamura, Tadatomo Watanabe, Norimitsu Kishi

*室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

**博士(工学), (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

**博士(工学), 北武コンサルタント(株) (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目)

**工博, 室蘭工業大学大学院教授, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

An evaluation method of the fatigue durability of the RC slabs for road bridges is required to effectively manage the maintenance of those, and many researchers have dealt with this problem. However, almost every research emphasizes the RC slabs reinforced with deformed steel bars. On the other hand, it has made clear that many RC slabs reinforced with round bars actually suffer fatal damage and degradation. Under like this condition, in this study, in order to investigate the fatigue durability of the RC slabs reinforced with round steel bars, the wheel running tests was conducted taking two kinds of rebar as variable: deformed and round steel bars. Based on the experimental results, a formula for evaluation of the fatigue lifetime of the slabs reinforced with round steel bars is proposed.

Key Words: RC slab, fatigue durability, round bar, deformed bar, wheel running test

キーワード: RC 床版, 疲労耐久性, 丸鋼, 異形鉄筋, 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. 近年, RC 床版の疲労による損傷が顕在化していることを背景に, RC 床版の疲労耐久性の評価に基づく適切な補修・補強の管理を行うことが求められており, 既設 RC 床版の残存寿命評価や, 延命手法を策定することが急務となっている^{1),2),3)}.

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.

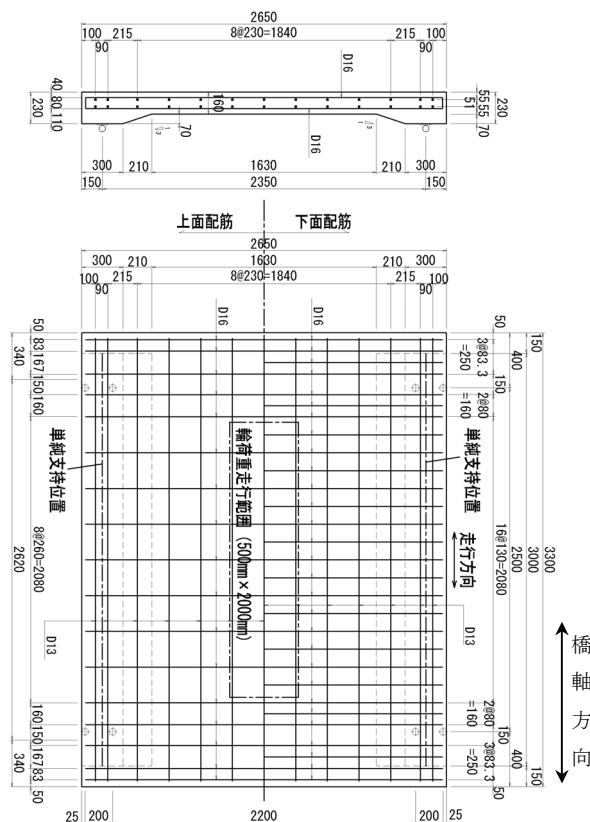
一方で, 昭和 40 年代中頃までは, RC 床版には丸鋼鉄筋が使用されていた実態があり, これらの RC 床版は, 供用開始後約 40 年が経過している. なお, 道路橋示方書においては, 昭和 48 年の示方書⁴⁾から, 鉄筋コンクリート床版に使用する鉄筋を, 異形鉄筋に限定している.

また, 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ため, 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性を明らかにすることは, 重要な課題と言える.

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⁵⁾. 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^{6),7)}. 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, 耐力などが異形鉄筋を用いる場合と異なり, 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.

そこで, 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 床版の疲労特性を把握することを目的に, 異形鉄筋を配置する場合と丸鋼鉄筋を配置する場合の RC 床版を製作し, 輪荷重走行試験を実施することで, 丸鋼鉄筋を用いた場合における, RC 床版の破壊性状および疲労特性を実験的に検討を行うこととした. また, 実験結果に基づき, 丸鋼を用いた RC 床版の疲労寿命評価式を提案している.



図－1 供試体配筋図

2. 供試体および実験方法

2.1 供試体

実験供試体は、実在した道路橋をモデルに製作した。モデルとした橋梁は、北海道内に昭和 39 年に架設された橋長 44m の 2 径間単純 RC 床版合成鈹桁橋である。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たものである。厚さ 160 mm の床版に、鉄筋として丸鋼鉄筋が配置されていた。

本研究では、この橋梁の RC 床版の形状及び配筋を準用して、2 主桁の単純版として、表－1 に示す 4 体の実験用床版を製作し、スパン中央に一定荷重による輪荷重走行試験を行った。表－2 に供試体諸元を示している。

図－1 には、供試体の配筋図を示している。図に示している配筋に対して、丸鋼鉄筋を用いる場合の供試体 3 体（以下、丸鋼シリーズ）と、異形鉄筋を用いる供試体 1 体（以下、異形シリーズ）を製作した。ここで、輪荷重走行試験における輪荷重は、丸鋼シリーズでは、供試体 RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190 の順に、110 kN, 150 kN, 190 kN とした。一方、異形シリーズの場合には DB-CON150 で 150kN とした。

供試体に使用したコンクリートの材料特性を表－3 に示した。また、鉄筋は、実橋梁の使用実態に合わせて、丸鋼鉄筋には SR235、異形鉄筋には SD345 を用いた。

表－1 供試体一覧

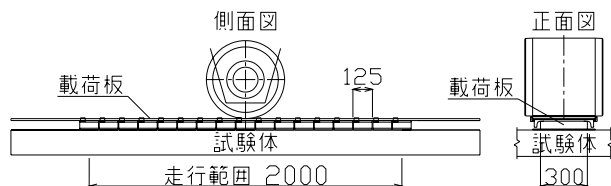
供試体名称	鉄筋の種類	輪荷重載荷方法
1 RB-CON110	丸鋼	輪荷重 110 kN 一定載荷
2 RB-CON150		輪荷重 150 kN 一定載荷
3 RB-CON190		輪荷重 190 kN 一定載荷
4 DB-CON150	異形鉄筋	輪荷重 150 kN 一定載荷

表－2 供試体諸元

供試体	配筋	床版形状	床版厚
RB-CON110 RB-CON150 RB-CON190	橋軸直角方向 橋軸方向	上面 $\phi 16$ ctc 260mm 下面 $\phi 16$ ctc 130mm 上下面 $\phi 13$ ctc 230mm	橋軸直角方向 2650 mm × 橋軸方向 3300 mm
DB-CON150	橋軸直角方向 橋軸方向	上面 $\phi 16$ ctc 260mm 下面 $\phi 16$ ctc 130mm 上下面 $\phi 13$ ctc 230mm	一般部 160 mm ハンチ部 230mm

表－3 コンクリートの材料特性

供試体名称	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
1 RB-CON110	43.0	25.9
2 RB-CON150	41.7	25.4
3 RB-CON190	36.6	26.0
4 DB-CON150	38.6	23.9



図－2 輪荷重の載荷状況図

2.2 実験方法

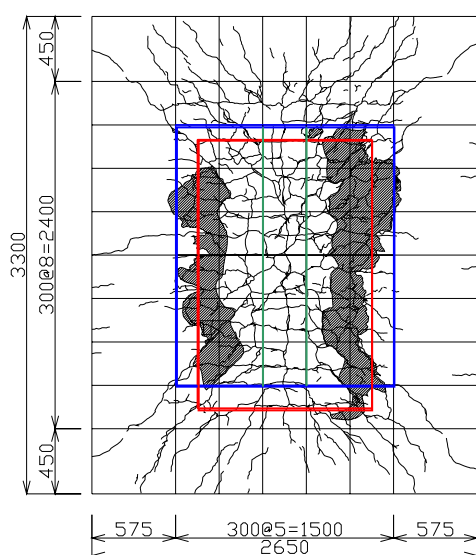
実験には、クランク式の輪荷重走行試験機を用いた。供試体は、橋軸方向支持桁上に丸鋼を介して 2 辺単純支持し、端部は横梁により 2 辺弾性支持とした。輪荷重は、図－2 に示すように、スパン中央に載荷板 (300 mm × 125 mm の鋼板) を橋軸方向に敷き並べ、その上を 2000 mm の範囲で鉄輪を往復させることにより載荷した。

輪荷重は、前述の供試体毎に設定した一定荷重とし、床版が破壊するまで走行載荷した。なお、実験中は、適時輪荷重走行を停止し、床版中央位置で輪荷重を静的に載荷して、床版下面鉛直変位および鉄筋ひずみの計測と、床版下面のひび割れ状況の記録を行った。

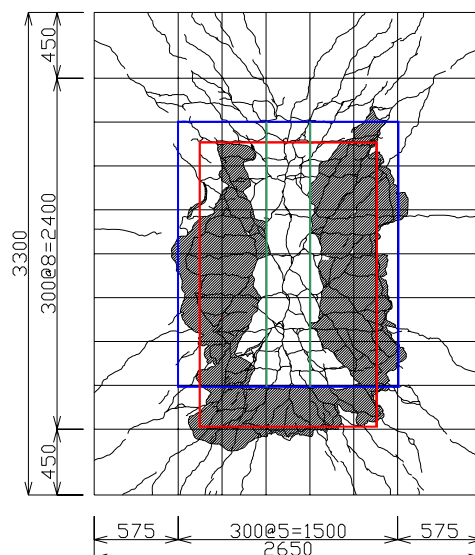
3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れおよび破壊状況

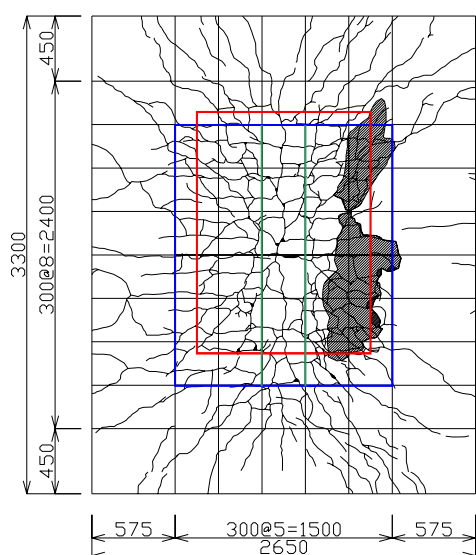
輪荷重走行試験においては、供試体 RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190, DB-CON150 の順に、216 万回、2 万 9,350 回、3,400 回、4 万 8,150 回走行時に、供試体のスパン中央位置の鉛直変位が急激に増加し破壊



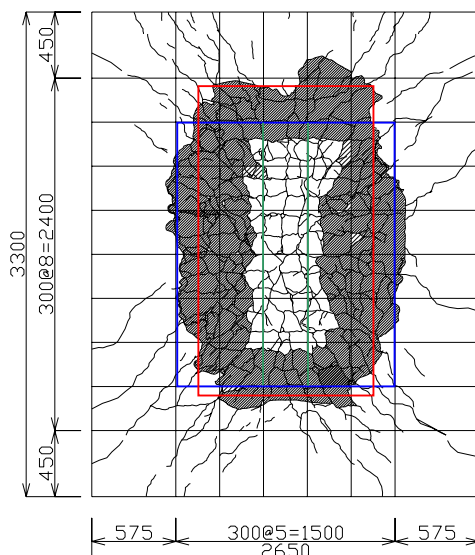
(a) 供試体 RB-CON110



(c) 供試体 RB-CON190






(b) 供試体 RB-CON150



(d) 供試体 DB-CON150

図-3 実験終了時の床版下面のひび割れ状況および破壊状況

 ひび割れ密度算出対象範囲
 ひび割れ間隔算出基準線
 押抜きせん断破壊領域

に至った。本論文では、この鉛直変位が急激に増加し始めるときの走行回数を疲労寿命と定義する。

図-3には、実験終了後における各供試体のひび割れ状況を示している。

各供試体の破壊状況は、ハッチで示した部分が下方に落ち込んでおり、いわゆる押抜きせん断破壊の状態であった。各供試体の破壊領域は、図中に赤線で示したように、RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190, DB-CON150の順に、1200 mm×1900 mm, 1200 mm×1700 mm, 1200 mm×1900 mm, 1200 mm×2100 mm (いずれも、橋軸直角方向×橋軸方向)であった。

橋軸直角方向の破壊面の位置は、全ての供試体で供試体中央から両側に約 600 mm の位置であり、ハッチの内側に、押抜きせん断破壊の範囲が収まっていた。

一方、橋軸方向の破壊領域は、丸鋼鉄筋を用いた供試体の3体では、RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190の順に、1900, 1700, 2000 mmであり、輪荷重の大きさまたは疲労寿命との直接的な相関性は見られなかった。また、丸鋼シリーズと異形シリーズを比較すると、輪荷重が同一のRB-CON150とDB-CON150では、異形鉄筋を用いた場合に比べて丸鋼鉄筋を用いた場合の破壊領域が小さくなっており、その範囲は異形鉄筋の場合の約81%であった。丸鋼鉄筋を用いた供試体の疲労寿命が、異形鉄筋を用いた場合に比べて小さくなったことは、破壊領域が異形鉄筋を用いた場合に比べて小さくなったことと関連があるものと推察される。すなわち、丸鋼鉄筋を用いた場合には、ある輪荷重に対して、異形鉄筋の場合に比べて、橋軸方向により狭い範囲で荷重を分担し

ていることを示していると考えられる。

次に、ひびわれ性状を定量的に評価するために、ひびわれ図からひび割れ密度およびひび割れ間隔を算出した。ひび割れ密度は、図中に青線で示した橋軸方向に 1.8 m、橋軸直角方向に 1.5 m の範囲内で観察された全てのひび割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、橋軸方向の平均ひび割れ間隔（以下、ひび割れ間隔）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 30 cm 間隔で 2 本を設定した。

図-4 には、ひび割れ密度と、輪荷重走行の繰返し回数を破壊時の走行回数で除した値 n/n_f （以後、無次元化繰返し回数と呼ぶ）の関係を示している。図中、ひび割れ密度は、無次元化繰返し回数 n/n_f の増分量 0.2 程度を目安に算出した。

図より、輪荷重走行開始後、いずれの供試体も破壊時走行回数の 20～40% ($n/n_f = 0.2 \sim 0.4$) の繰返し回数までにひび割れ密度が急増し、その後、ひび割れ密度の増加は緩やかになり、破壊に至っている。

輪荷重の大きさが異なる丸鋼シリーズの 3 体間で比較を行うと、輪荷重が大きいほどひび割れ密度が小さくなる傾向を示していることが分かる。破壊時のひび割れ密度を見ると、RB-CON110、RB-CON150、RB-CON190 の順に、14.8、13.2、11.5 m/m^2 であり、RB-CON150 を基準とすると、RB-CON110 と RB-CON190 の破壊時のひび割れ密度は、1.12 倍と 0.87 倍であった。このことの原因として、丸鋼鉄筋の床版においては、荷重の大きな供試体ほど、鉄筋とコンクリート間の付着のすべりが顕著に生じるため、ひび割れが分散せずに、局所化するためと考えられる。一方で、輪荷重の小さい供試体 RB-CON110 では、破壊時走行回数の 20～40% ($n/n_f = 0.2 \sim 0.4$) の範囲で、ひび割れ密度の増分が他の供試体よりも大きい傾向が見られる。これは、荷重の小さい供試体では付着のすべりが少ないため、付着作用により、ひび割れが分散する傾向が現れているものと考えられる。

また、輪荷重が等しい RB-CON150 と DB-CON150 を比較すると、ひび割れ密度の増加が緩やかになる破壊時走行回数の 40% ($n/n_f = 0.4$) 以降では、異形鉄筋を用いる場合が、丸鋼を用いる場合よりもひび割れ密度が大きいことが分かる。これは、異形鉄筋は、丸鋼鉄筋に比べて鉄筋とコンクリート間の付着強度が大きいことより、付着作用によって生じるコンクリートの引張応力が大きくなり、ひび割れが分散して生じるためと推察される。

図-5 には、ひび割れ密度と供試体中央位置で計測した鉛直変位（以後、変位）の関係を示している。図中、ひび割れ密度は、図-4 と同一時点で算定している。図より、丸鋼鉄筋を用いた 3 供試体を比較すると、輪荷重が大きいほどひび割れ密度が小さく、たわみが大きくなる傾向にあることが確認できる。

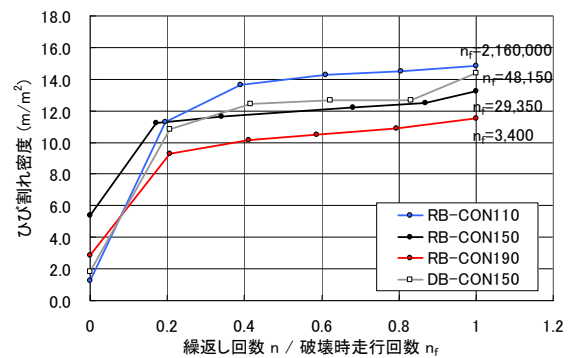


図-4 ひび割れ密度－無次元化繰返し回数関係

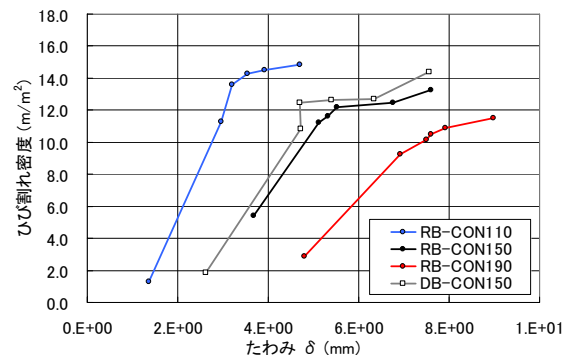


図-5 ひび割れ密度－たわみ関係

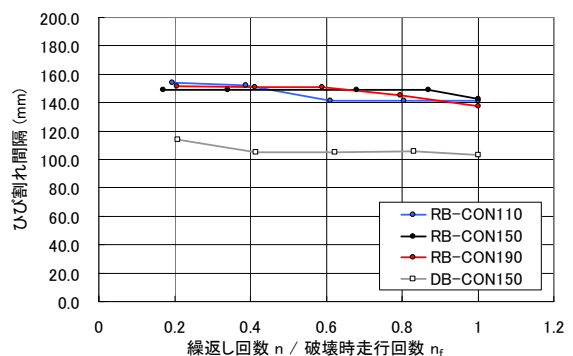


図-6 ひび割れ間隔－無次元化繰返し回数関係
(橋軸方向)

また、輪荷重の大きさが等しい 2 供試体を比較すると、ひび割れ密度が等しい場合には、丸鋼鉄筋を用いた供試体のたわみが異形鉄筋を用いる場合よりも大きい傾向にあることが分かる。このことは、丸鋼鉄筋を用いる場合の床版の断面剛性が、異形鉄筋を用いる場合よりも小さいことを意味している。これは、鉄筋とコンクリート間の付着作用が、異形鉄筋に比べて小さいことによるものと考えられる。

図-6 には、ひび割れ間隔と無次元化繰返し回数の関係を示している。図中、ひび割れ間隔は、図-4 と同様に算定している。図より、いずれの供試体も、輪荷重走行開始後、破壊時走行回数の 20% の繰返し回数ま

でにほとんどのひび割れが発生するため、図に示した範囲では、ひび割れ間隔は輪荷重の走行回数の増加によって大きく変化していないことが分かる。丸鋼鉄筋を用いた供試体間で比較すると、輪荷重の大きさによって輪荷重走行位置直下の橋軸方向のひび割れ間隔に差は見られなかった。このことから、前述のひび割れ密度に見られたひび割れ発生量の差は、これとは別の、橋軸方向及び斜め方向のひび割れによるものと推察される。

一方、異形鉄筋と丸鋼鉄筋を配筋した供試体で、輪荷重の大きさが同じである RB-CON150 と DB-CON150 の 2 体を比較すると、丸鋼鉄筋を用いた供試体のひび割れ間隔が大きい。これは、前述の通り、丸鋼鉄筋は、異形鉄筋に比べて鉄筋とコンクリート間の付着強度が小さいために、ひび割れの分散性も低くなるためと推察される。破壊時 ($n/n_f=1.0$) の橋軸方向のひび割れ間隔は、RB-CON150 が 142 mm、DB-CON150 が 103 mm であり、その比は 1.38 : 1 であった。コンクリート標準示方書⁵⁾によると、丸鋼鉄筋を用いる場合のひび割れ間隔は、異形鉄筋を用いる場合の 1.3 倍としており、本実験の結果と既往の知見が概ね近似する結果であった。

以上のように、丸鋼鉄筋の場合には鉄筋とコンクリート間の付着強度が異形鉄筋よりも小さいことより、丸鋼鉄筋を用いる場合には、異形鉄筋を用いる場合に比較して、ひび割れ間隔が大きく、かつ、たわみも大きくなることから、丸鋼鉄筋の場合には、異形鉄筋の場合に比べて、ひび割れ幅が広いものと考えられる。このことから、丸鋼鉄筋の場合には、ひび割れ面による骨材の噛み合わせ等によるせん断伝達能力が低下することで、床版のせん断伝達能力が低くなり、異形鉄筋を用いた場合に比べて疲労寿命が短くなったものと推察される。

3.2 荷重と変位の関係

図-7 には、各供試体の輪荷重の繰返し回数と変位の関係を示している。図中、縦軸は供試体中央部で計測した鉛直変位を、横軸は対数軸で輪荷重の繰返し回数を表している。

図より、いずれの供試体においても、輪荷重の繰返し回数の増加に応じて変位が徐々に大きくなり、やがて変位が急激に増加し破壊に至っている。

本研究では、先に述べた通り、床版中央の鉛直変位の計測値が急激に増加し始める時点供試体の破壊時と定義した。図中には、赤い矢印で破壊時点を示している。破壊時の輪荷重の繰返し回数は、RB-CON110、RB-CON150、RB-CON190、DB-CON150 の順に、216 万回、2 万 9350 回、3400 回、4 万 8150 回であり、その時の変位は、それぞれ 4.70、7.60、8.97、7.56 mm であった。

図より、丸鋼鉄筋を用いた供試体 3 体を比較すると、輪荷重の大きい供試体ほど変位が大きく、輪荷重の繰返し走行に対する変位増分も大きいことがわかる。

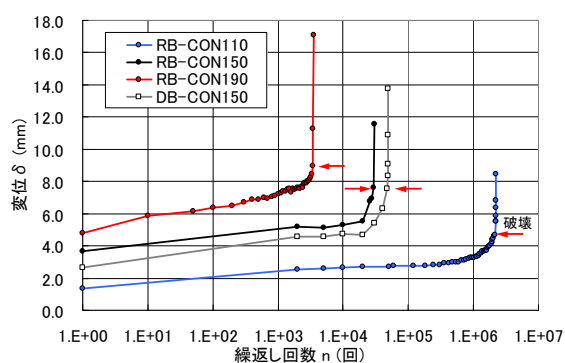


図-7 中央位置の変位—繰返し回数関係

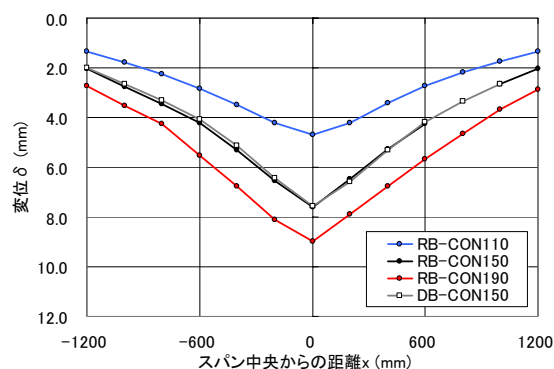


図-8 橋軸方向の変位分布 (破壊時)

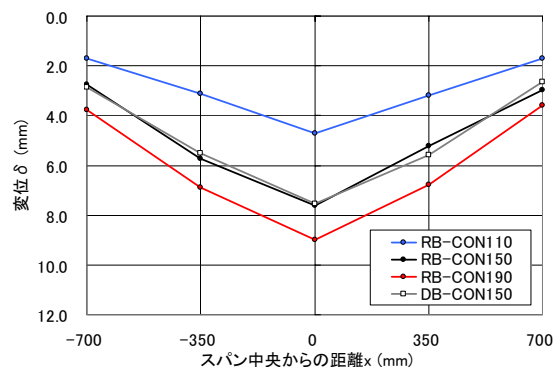


図-9 橋軸直角方向の変位分布 (破壊時)

一方で、ひび割れ間隔に関しては、ほとんど変化は見られなかったことから、変位の増加はひび割れ幅の増加と関連しているものと考えられる。しがたって、輪荷重の繰返し走行により、徐々にひび割れ幅が増加し、これに伴い床版のせん断伝達能力が低下していることが推察される。その際、輪荷重の大きな供試体ほど変位増分が大きいことから、せん断伝達能力の低下も大きく、早期に疲労寿命に達したのものと考えられる。丸鋼鉄筋と異形鉄筋を用いる場合の実験結果を比較すると、輪荷重の等しい RB-CON150 と DB-CON150 の場合には、RB-CON150 の破壊時走行回数は DB-CON150 の約 61% であったが、本試験においては、破壊時の変位に大きな差は見られなかった。

図-8, 9 に、破壊時の各供試体の橋軸方向および橋軸直角方向の変位分布の形状を示した。図から、橋軸方向および橋軸直角方向の変位分布の形状は、供試体ごとに大きな差異は認められない結果となった。

3.3 鉄筋ひずみ

図-10, 11 には、各供試体の床版下面における橋軸直角方向および橋軸方向の鉄筋のうち、スパン中央部に貼付けたひずみゲージによるひずみの計測値と、無次元化繰返し回数の関係を示している。図中、ひずみは引張を正として示している。図より、丸鋼鉄筋の供試体と異形鉄筋の供試体のいずれにおいても、鉄筋のひずみは、床版破壊時 ($n/n_f = 1.0$) 以前においては、鉄筋の塑性化によるひずみの急増は生じていないことが確認できる。本実験においては、この他にも数箇所ひずみを計測したが、同様に鉄筋の降伏は確認されていない。

なお、図-10 に示した橋軸直角方向の鉄筋のひずみ挙動において、供試体 RB-CON190 の場合には、他の丸鋼鉄筋の供試体に比べて、繰返し回数の増加に伴い、徐々に鉄筋のひずみが小さくなる傾向が見られる。これは、荷重が大きいことにより、大きな断面力が生じるため、輪荷重の繰返しにより、鉄筋とコンクリート間の付着すべりによる鉄筋ひずみの軸方向への平均化の進展が、他の供試体よりも顕著に現れたことが一因と考えられる。

次に、図-12, 13 には、破壊時における、各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ひずみ分布を示している。図中、縦軸は床版上面からの距離であり、横軸は鉄筋ひずみの計測値で、引張を正として示している。なお、図-13 の RB-CON110 の場合には、上面側の鉄筋のひずみが計測不能であったため、下面側の計測値のみをプロットしている。

図-12 の橋軸方向の断面ひずみ分布を見ると、異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 では、丸鋼鉄筋を用いた供試体 3 体に比べて、ひずみの勾配が大きくなっていることが分かる。すなわち、異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 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、丸鋼鉄筋を用いた 3 体の供試体の場合には曲げ作用が小さく軸力が卓越する傾向を示している。これは、異形鉄筋の場合には鉄筋の付着性能が優れているのに対して、丸鋼鉄筋の場合には早期に付着強度に達し膜作用が卓越することによるものと推察される。

一方、橋軸直角方向を見ると、橋軸方向に比べると顕著ではないが、異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 で、最もひずみ分布の勾配が大きいことが確認できる。

丸鋼鉄筋を用いる供試体 3 体のひずみの計測値を比較すると、橋軸方向と橋軸直角方向共に、ひずみと輪荷重間には、明確な相関性が見られない。この要因として、(1) 鉄筋ひずみの計測値は、計測点近傍のコンクリートのひび割れ状況の影響を大きく受けること、さらに、(2) 丸鋼鉄筋の場合には付着強度が小さく、付着応力度が

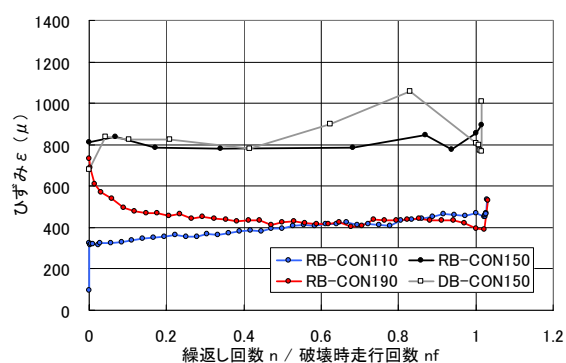


図-10 鉄筋ひずみ-無次元化繰返し回数関係
(橋軸直角方向 下面側鉄筋スパン中央部)

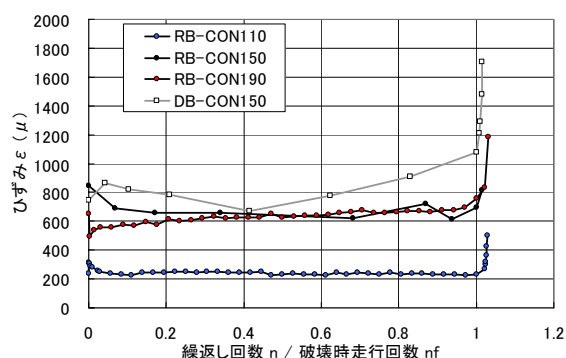


図-11 鉄筋ひずみ-無次元化繰返し回数関係
(橋軸方向 下面側鉄筋スパン中央部)

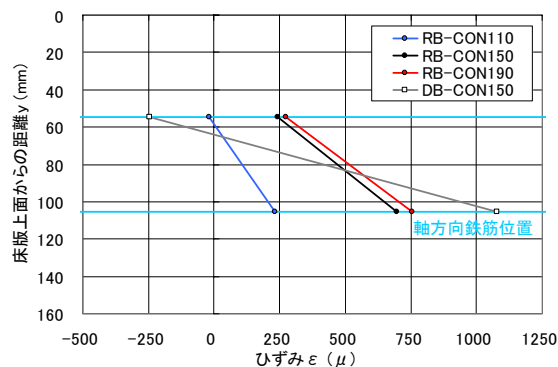


図-12 鉄筋の断面ひずみ分布 (破壊時・橋軸方向)

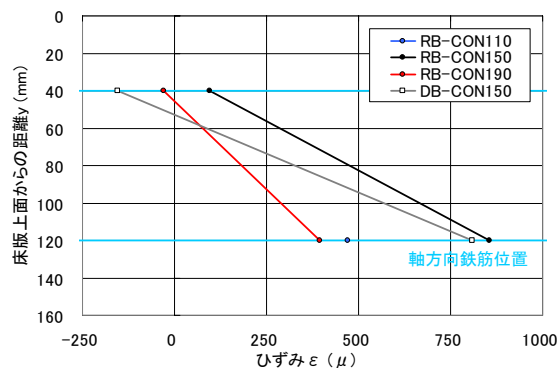


図-13 鉄筋の断面ひずみ分布 (破壊時・橋軸直角方向)

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るため、このすべりが生じた区間における鉄筋の引張りずみが軸方向に平均化されることの影響が考えられる。

4. 丸鋼鉄筋を用いたRC床版のS-N曲線

本節では、丸鋼鉄筋を用いた3体の供試体の輪荷重走行試験結果を用いて、丸鋼鉄筋を用いたRC床版に関する疲労寿命評価式を提案する。

既往の研究により、異形鉄筋を用いたRC床版の輪荷重走行試験の結果に基づいた、RC床版の疲労寿命評価式(1)が提案されている⁸⁾。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (1)$$

ここに、 P : 輪荷重 (kN)

P_{sx} : 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力 (kN)

N : 繰返し回数 (回)

丸鋼鉄筋を用いる場合の疲労寿命評価式を定式化するにあたり、まず、式(1)中にある、実験供試体の梁状化した押抜きせん断耐力 P_{sx} を求めた。梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} は、式(2)から算出される⁸⁾。式(2)は、異形鉄筋を用いた供試体の実験により定められた式であるが、本研究においては、丸鋼鉄筋を用いたRC床版の P_{sx} についても、次式を用いて算定することとした。ただし、式(2)は、異形鉄筋を用いた床版の実験結果に基づき構築された式であるため、丸鋼鉄筋床版への適用性については今後の検討課題とする。

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

ここに、 τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度

$$\tau_{smax} = 0.656 \times f'_{ck}{}^{0.606} \quad (\text{N/mm}^2)$$

X_m : 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 (mm)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度

$$\sigma_{tmax} = 0.269 \times f'_{ck}{}^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

c_m : 主鉄筋のかぶり厚さ (mm)

B : 梁状化したときの梁幅 (mm)

$$B = b + 2 \cdot d_d$$

b : 載荷板の配力筋方向の辺長

d_d : 引張配力筋の有効高さ

各供試体の材料試験結果に基づく、梁状化した押抜きせん断耐力 P_{sx} の計算結果を、表-4に示す。

次に、表中に示した梁状化した押抜きせん断耐力 P_{sx} の計算値に対する輪荷重走行試験における各供試体の輪荷重の大きさ P の比 $S = P/P_{sx}$ を求める。

表-4 実験供試体の P_{sx} の計算値

供試体		RB-CON110	RB-CON150	RB-CON190	DB-CON150
f'_{ck}	N/mm ²	43.0	41.7	36.6	38.6
τ_{smax}	N/mm ²	6.409	6.291	5.813	6.003
X_m	mm	42.9	43.4	45.6	44.7
σ_{tmax}	N/mm ²	3.302	3.235	2.965	3.072
c_m	mm	40.0	40.0	40.0	40.0
B	mm	331.0	331.0	331.0	331.0
b	mm	120.0	120.0	120.0	120.0
d_d	mm	105.5	105.5	105.5	105.5
P_{sx}	kN	269.5	266.4	254.0	259.0
P	kN	110	150	190	150
P/P_{sx}	-	0.408	0.563	0.748	0.579
n_f	回	2160000	29350	3400	48150

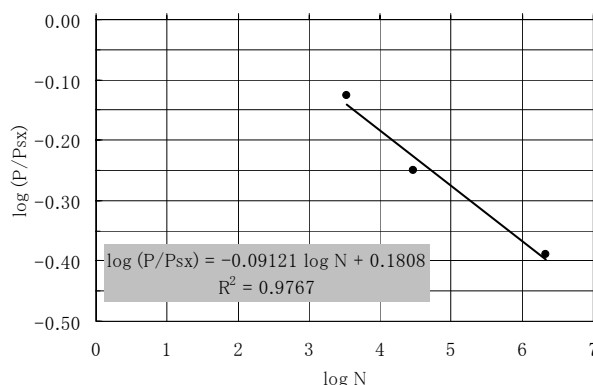


図-14 丸鋼鉄筋を用いた供試体の $\log(P/P_{sx})-\log N$ 関係とその回帰直線

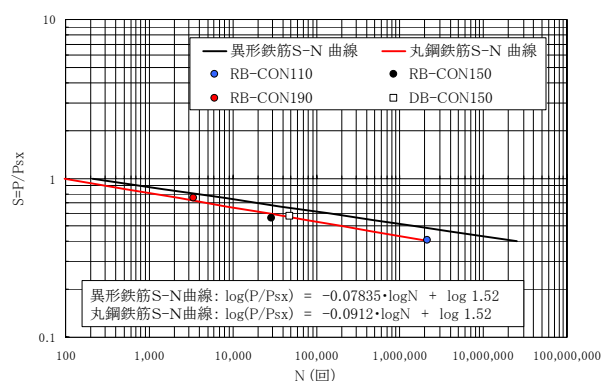


図-15 S-N関係の実験結果とS-N曲線

これと、破壊時の走行回数 n_f の関係をもとに、図-14に示すように丸鋼鉄筋を用いた供試体の実験結果に対する $\log(P/P_{sx})$ と $\log N$ の関係を表す回帰直線を求める。この回帰直線に基づき、式(1)の疲労寿命評価式にある、係数を修正することで、丸鋼鉄筋を用いる場合の床版の疲労寿命算定式を、次式のように定式化する。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.09121 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

図-15 には、既往の研究で示されている異形鉄筋を用いる場合を対象とした疲労寿命評価式（S-N曲線）と、本研究で提案の丸鋼鉄筋を用いる場合を対象とした疲労寿命評価式を示している。図より、異形鉄筋を用いる場合のS-N曲線に比べて、本研究で提案のS-N曲線は、 P/P_{ex} が一定の場合に対して疲労寿命が低下する式となっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、丸鋼鉄筋が配置された道路橋 RC 床版の疲労特性を把握することを目的に、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することで、丸鋼鉄筋を用いる場合の RC 床版の破壊性状および疲労特性について、実験的に検討を行った。本研究によって確認された事項を、以下にまとめる。

- (1) 本研究で行った輪荷重走行試験においては、いずれの供試体も押抜きせん断破壊により破壊した。破壊領域の大きさを比較すると、橋軸直角方向は同様であったが、橋軸方向は、異形鉄筋を用いる場合に比べて、丸鋼鉄筋を用いる場合で小さくなる傾向が見られた。
- (2) 破壊時のひび割れ密度は、11~15 m/m²程度の範囲であった。丸鋼鉄筋を用いる供試体間で比較すると、輪荷重の大きい供試体ほど、破壊時のひび割れ密度は小さい傾向にあった。また、輪荷重の同じ供試体で比較して、丸鋼鉄筋を用いた供試体は、異形鉄筋を用いた供試体に比べて、破壊時のひび割れ密度が小さい傾向にあった。
- (3) 異形鉄筋を用いる場合に比べて、丸鋼鉄筋を用いる場合の方が、剛性が小さくたわみが大きい傾向が見られた。これは、鉄筋とコンクリート間の付着作用が異形鉄筋に比べて小さいことに起因するものと推察される。
- (4) 輪荷重走行位置直下の橋軸方向のひび割れ間隔に関しては、丸鋼鉄筋を用いる場合の供試体において輪荷重の大きさによる差は見られなかった。異形鉄筋を用いた供試体に比べて、丸鋼鉄筋を用いた供試体は、ひび割れ間隔が大きくなる傾向が見られた。輪荷重の等しい供試体の破壊時で比較すると、約 1.38 倍の間隔であった。
- (5) 載荷板直下で計測した床版中央から橋軸方向に 1.8 m の範囲を対象に算出したひび割れ間隔と、床版中央位置での鉛直変位の計測によると、丸鋼鉄筋を用いる場合の RC 床版は、異形鉄筋を用いる場合に比べて、ひび割れ間隔が大きく、かつ供試体中央部のたわみも大きい傾向にあった。このときの丸鋼鉄筋を用いた供試体は、異形鉄筋を用いた供試体に比べ

て、ひび割れ幅が大きいことが推測される。このことから、丸鋼鉄筋を用いる場合には、異形鉄筋を用いる場合に比較して、ひび割れ幅が大きくなることで床版のせん断伝達能力が低くなり、疲労寿命が低下することが考えられる。

- (6) 丸鋼鉄筋と異形鉄筋を用いる場合の輪荷重が等しい供試体で比較すると、丸鋼鉄筋を用いた供試体の破壊時の走行回数は、異形鉄筋を用いた供試体の約 61%であった。ただし、破壊時のたわみについては、大きな差は見られなかった。
- (7) 鉄筋のひずみの計測値から、破壊時においては、異形鉄筋を用いた供試体の場合には、曲げと軸力が連成して作用しているのに対して、丸鋼鉄筋を用いた 3 体の供試体の場合には、軸力が卓越する傾向が見られた。
- (8) 丸鋼鉄筋を用いた供試体の輪荷重走行試験結果に基づき、丸鋼鉄筋を用いた場合の RC 床版を対象とした疲労寿命評価式を提案した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大阪工業大学松井繁之教授にご指導を頂いた。ここに記して、感謝の意を表する。

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) 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
- 3) 三田村浩，佐藤京，西弘明：積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について，寒地土木研究所，月報 No.676，pp.10-18，2009。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書(Ⅱ 鋼橋編)・同解説，pp.167-188，1973.2
- 5) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2008。
- 6) 赤代恵司，三田村浩，渡辺忠朋，岸 徳光：鉄筋の付着特性が RC 床版の疲労特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.727-732，2010。
- 7) 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，平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.453-454，2009。
- 8) 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。

(2010 年 9 月 16 日受付)