

論文 水の浸入を受けるプレキャスト床版継手部の耐疲労性に関する実験的検討

何 宗耀*1・前島 拓*2・細谷 学*3・岩城 一郎*4

要旨：本研究では、従来構造のループ継手および継手部の省力化を可能とした新たな鉄筋継手を用いたプレキャスト床版供試体を作製し、上面湛水状態での輪荷重走行試験を行うことで、床版継手部の耐疲労性について実験的に検討した。その結果、継手部に新鉄筋継手を用いることで、従来構造に比べて床版の耐疲労性を飛躍的に向上させることが示された。また、従来構造のループ継手を用いた床版では、継手部近傍において局所的な損傷が生じ、そこに水が浸入することで耐疲労性を著しく低下させることを明らかにした。

キーワード：プレキャスト床版、継手部、輪荷重走行試験、耐疲労性

1. はじめに

道路橋床版では、頻繁な過積載等の軸重違反車両の走行により、疲労損傷の促進が顕著となっている。これら道路橋床版については、工事渋滞の軽減や現場施工の合理化の観点から、プレキャスト床版による床版取換え工法の採用が増加している。

一方、プレキャスト床版による床版取換え工事を行う場合、接合部すなわち継手部が必要となる。既往の接合構造は、所定の継手性能を保つために比較的大きな間詰幅および過密な配筋が必要であり、製造・施工が煩雑になるため、施工誤差等の施工不良が比較的生じ易い。これは、継手部単体の耐荷性を低下させるなど、局所的な弱点を生じさせるリスクが高く、プレキャスト床版の耐疲労性を低下させることが懸念される¹⁾。

こうしたプレキャスト床版継手部の構造性能に関する研究は複数の研究機関で進められている。この内、佐々木ら²⁾は RC ループ継手を用いたコンクリート床版に対して、乾燥状態での輪荷重走行試験を実施している。その結果、RC ループ継手を用いた床版では、継手部と床版本体部の界面にひび割れおよび段差が生じるなどの損傷が確認されているものの、継手のない RC 床版と同程度の耐疲労性を有し、たわみの推移や床版下面に生じるひび割れの発生形態についても大きな差異がないことを明らかにしている。一方で、道路橋コンクリート床版においては、床版内部に水が浸入することで耐疲労性が大幅に低下することが知られている。そのため、プレキャスト床版の接合部界面におけるひび割れや段差から水が浸入することで、耐疲労性が低下するリスクが高い。しかし、輪荷重走行下において水の浸入を受けるプレキャスト床版継手部の耐疲労性について研究した例は極めて少ない現状である。

著者らはこれまでに道路橋プレキャスト床版を対象として、継手部の省力化を可能とした上で、高耐久・高品質を確保し得る接合部の継手構造(以下、新鉄筋継手)を開発してきた³⁾。新鉄筋継手は先端の治具を嵌合構造することで接合部の幅および配筋量を極力減らすことが可能であり、接合部に鋼繊維を混入した高性能な無収縮モルタルを充填することで先端治具周囲に配置された治具の変形拘束および引張抵抗性を向上させ、従来継手と同等以上の曲げ耐力、せん断挙動を有することが確認されている。また従来の接合方法である重ね継手やループ継手と比べると、嵌合する先端治具の配置可能な 100mm 程度に縮小できる上に、間詰め材に繊維補強モルタルを使用するため打設手間を少なくするなど、現場施工の省力化が可能である。さらに新鉄筋継手床版の据付は平面的に T 型治具が C 型治具内に収まって配置でき、また鉛直方向では床版製作時に設置した基準点同士の相対誤差を検測定規で確認することにより判定できるため、鉄筋継手の配置誤差が構造性能上の制限値以下に収まるように鉄筋の検測を明確に、効率的に把握し管理することができる。

以上より、新鉄筋継手は従来の継手構造よりも現場施工の手間と不具合の発生リスクを極力軽減させることが可能な構造であり、道路橋プレキャスト床版継手部の耐疲労性を向上させることが期待される。

そこで本研究では、従来構造のループ継手および新鉄筋継手を用いたプレキャスト床版供試体を作製し、上面湛水状態での輪荷重走行試験を実施することで、水の作用下における新鉄筋継手と従来構造継手の耐疲労性を比較検討した。また、輪荷重走行試験の各段階において強制振動試験を行うことで、各床版の継手部および床版本体における疲労損傷過程を評価した。

*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 工学部土木工学科助教 博士(工学) (正会員)

*3 大成建設株式会社 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

2. 床版供試体の概要

図－1 に床版供試体形状を示す。本実験では、従来型のループ継手構造とするプレキャスト床版(以下、ループ継手床版)、と新鉄筋継手をを用いたプレキャスト床版(以下、新鉄筋継手床版)の2体を作製した。図より、供試体寸法は、長さ 3000mm、幅 2000mm、厚さ 200mm であり、継手部の幅は、ループ継手床版が 360mm であるのに対して、新鉄筋継手床版が 100mm である。なお、ループ継手床版ではあき重ね構造とするため、図中に示すように左右の床版の配筋を半ピッチずらして配筋した。

図－2 に各床版の継手構造を示す。ループ継手は双方の U 字状の鉄筋を組み合わせ、出来たループ中に側方から鉄筋を通す形になっている。一方、新鉄筋継手は片方の鉄筋先端に矩形プレートを取り付け、他方の鉄筋には先のプレートを包み込むような形状の治具を取り付け嵌合させる構造とした。また、ループ継手床版では異形鉄筋 SD345(ループ内内側 D19、初期ひび割れ補強筋 D13)、新鉄筋継手床版では溶接構造用延圧鋼材(SM570、SM490)を使用し、新鉄筋継手床版においては、先端治具と鉄筋の結合を摩擦圧接とした。

表－1 に試験開始時材齢における圧縮強度を示す。なお、両床版の本体およびループ継手床版の継手部は同じコンクリートを使用し、新鉄筋継手床版の継手部には 9mm の鋼繊維を混入した無収縮モルタルを用いた。

3. 実験概要

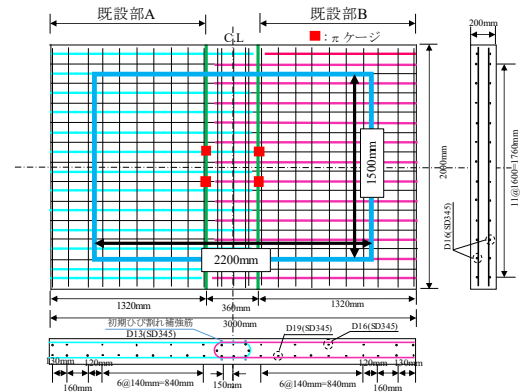
3.1 輪荷重走行試験機の概要

写真－1 に輪荷重走行試験装置を示す。輪荷重走行試験は、鋼鉄フレームに鉄車輪を取付けた油圧ジャッキを据え付け、回転速度 8.97rpm のモータ及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実施した。載荷面となる供試体上面には、輪荷重走行範囲にベニア板を敷き、そこに幅 300mm、長さ 120 mm 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橋軸方向の 2 辺(支持間距離 2900mm)を単純支持、橋軸直角方向の 2 辺(支持間距離 1800mm)を弾性支持とした。

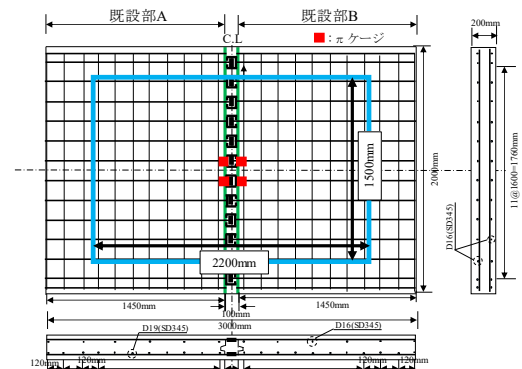
3.2 輪荷重走行試験方法

輪荷重走行試験は、98kN (10tf)を基本荷重とし、走行回数 4 万回ごとに載荷荷重を 29.4kN ずつ増加させる段階荷重方式を採用した。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。各荷重における走行実績は、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数として求めた。

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

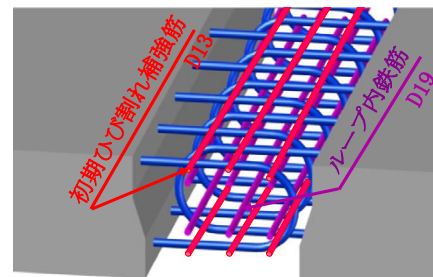


(1) ループ継手床版

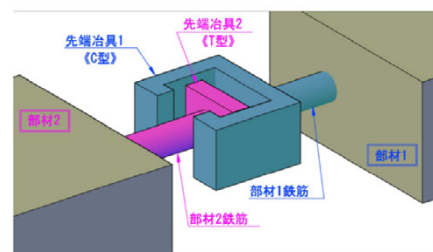


(2) 新鉄筋継手床版

図－1 供試体形状



(1) ループ継手床版



(2) 新鉄筋継手床版

図－2 継手部の構造

表－1 圧縮強度試験結果

ID	既設部A	継手部	既設部B
ループ継手	56.8	60.3	63.6
新鉄筋継手	60.8	113.1	64.7

(単位：MPa)

ここで、 N_{eq} ：98kN に換算した等価繰返し走行回数、 P_i ：実際に載荷した荷重(kN)、 P_0 ：基本荷重(本試験で98kN)、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数である。本研究は松井ら⁴⁾の提案する RC 床版の疲労寿命予測式($m=12.76$)を参考とした。

輪荷重走行試験時における計測項目は、規定の走行回数毎に98kNを床版中央に載荷した際の活荷重たわみ(弾性変形成分のたわみ)、無損傷時のたわみから疲労損傷の蓄積により増加したたわみ(以下、総たわみ)、床版に発生するひび割れの観察、継手部と本体の目開き量および強制振動試験による共振周波数の計測である。たわみの計測には高感度変位計(感度 1/100mm)を用い、供試体中央に加え、供試体中央から橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ200mm ずつ配置した。

なお、輪荷重走行試験中は図-1 に示す青線の範囲(2200×1500mm)でL型アンクルによる土手を設け、床版上面から5mm 程度の水を常時満水させた状態で試験を行った。

3.3 強制振動試験概要

図-3 に強制振動試験の概念図を示す。なお、既往の研究により、本手法は床版下面からの観察では検知が困難な床版内部の劣化程度を評価可能であることが示されている⁵⁾。

強制振動試験は、小型加振器の振動面に貼付した制御加速度ピックアップの値をデジタル振動制御装置(コンピュータ)に取込み、これが事前にプログラムした加速度パターンと合致するようにパワーアンプから加振器に送る電流量をコンピュータで制御する。計測は小型加振機を床版上面に接触させ、指定した周波数帯域にわたってほぼ均等な強度を持つホワイトノイズを入力波とした加振方法により床版に局所的な振動を励起させ、振動が及ぶ範囲の共振周波数を計測した。なお、本実験では周波数領域を2,000～15,000Hz とし、制御加速度のパワースペクトル密度が $0.020G^2/Hz$ となるホワイトノイズを発生させた。なお、振動試験は走行回数1万回毎に床版中央、3万回毎に図-4 に示す25点で実施した。

4. 実験結果及び考察

4.1 たわみー等価繰返し走行回数

図-5 に供試体中央の活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。ここで、本研究における疲労限界状態は、既往の研究⁶⁾を参考として活荷重たわみが急増する状態と定義した。また本実験では、疲労限界状態を確認した後、床版のたわみが大きく、所定の荷重が載荷困難な状況まで試験を継続させた。図より、ループ継手床版の活荷重たわみは、走行回数に伴い緩やかに増加する傾向であったが、等価繰返し走行回数4億回から増加が

顕著となり5億900万回で疲労限界に至った。一方、新鉄筋継手床版では走行初期から等価繰返し走行回数1200万回まで活荷重たわみが一定に推移し、それ以降は走行回数に伴って活荷重たわみが徐々に増加して疲労限界に至った。また、新鉄筋継手床版が疲労限界に至った走行回数は約75億回と、ループ継手床版の10倍以上の走行回数であり、従来構造の床版と比して耐疲労性が著しく向上する結果であった。

図-6 に総たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、走行初期から等価繰返し走行回数4億回までは、床版間における差異はなく、継手部の形状を問わず走行回数に伴い指数関数的にたわみが増加する傾向であった。その後は、ループ継手床版では等価繰返し走行回数4億回、新鉄筋継手床版では等価繰返し走行回数61億回以降に、総たわみの増加が顕著となり疲労限界に至った。

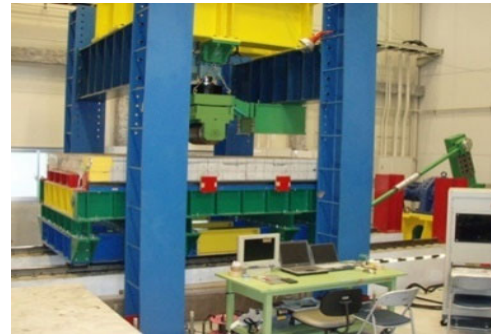


写真-1 輪荷重走行試験装置

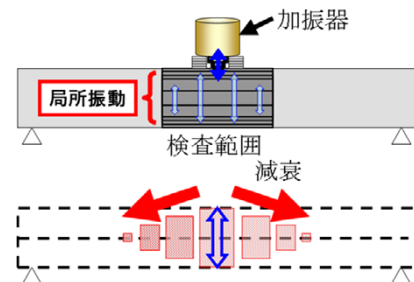


図-3 強制振動試験の概念図

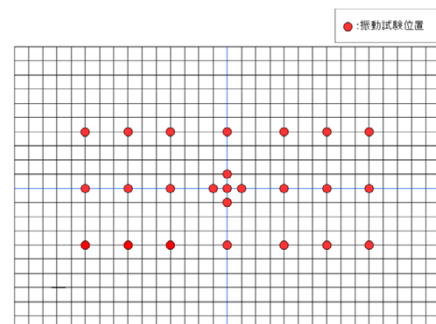


図-4 強制振動試験測定位置

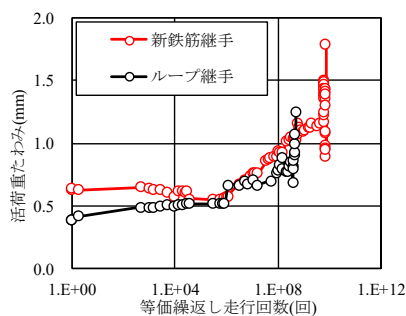


図-5 活荷重たわみと等価繰返し走行回数

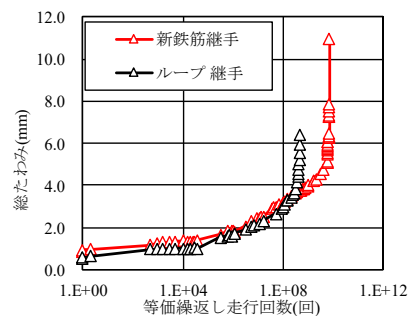
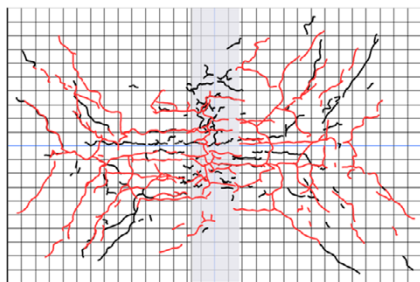
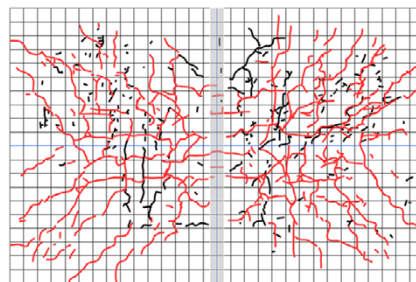


図-6 総たわみと等価繰返し走行回数

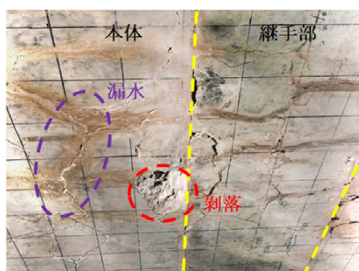


(1) ループ継手床版

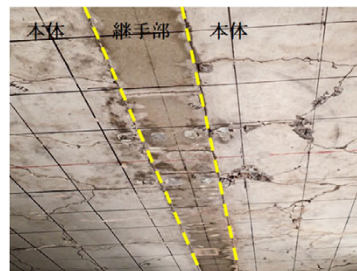


(2) 新鉄筋継手床版

図-7 疲労限界時における床版下面のひび割れ発生状況



(1) ループ継手床版



(2) 新鉄筋継手床版

写真-2 輪荷重走行試験終了時における継手部近傍の損傷状況

4.2 床版下面のひび割れ発生状況

図-7 に疲労限界時における床版下面のひび割れ発生状況を示す。なお、図中の黒線はひび割れ幅 0.1mm 未満、赤線は 0.1mm 以上のひび割れであり、水色着色部は継手部範囲である。図より、ループ継手床版では床版中央において橋軸直角方向にひび割れが発生し、このひび割れから継手部付近にひび割れが集中する形状であった。また、ループ継手床版では輪荷重走行試験中盤(等価繰返し走行回数 3 億回程度)から床版中央付近で漏水が確認された。これに対して新鉄筋継手は、継手部のひび割れがほとんどなく、床版全域にひび割れが分散する形状を示した。また、床版の破壊直前まで継手部からの漏水は確認されず、継手部近傍での局所的な損傷は観察されなかった。写真-2 に輪荷重走行試験終了時における継手部近傍の損傷状況を示す。写真より、ループ継手床版では継手部と床版本体の境界におけるひび割れの発生が顕著

であり、最終的には継手部境界付近においてひび割れが格子状に連なった箇所では双方のコンクリートがブロック状に剥落するという破壊形態であった。一方、新鉄筋継手床版では、継手部での損傷はほとんどなく、床版本体部での押抜きせん断破壊に至った。

既往の研究²⁾により、乾燥状態で輪走行作用を与えた RC ループ継手床版の破壊性状は、継手部を含んだ押抜きせん断破壊であり、継手部の損傷が耐疲労性低下の直接的な原因とはならないことが報告されている。しかし、本実験のように床版上面への水の供給がある場合には、既存の研究と同様に継手部および床版本体との境界面に生じ、そこから水が浸入することで疲労損傷を急激に促進させ、プレキャスト床版の耐疲労性を著しく低下させることが示唆された。これに対して新鉄筋継手床版では、短繊維補強無収縮モルタルを間詰め材に使用したことで継手部におけるひび割れの発生および水の浸入を抑制

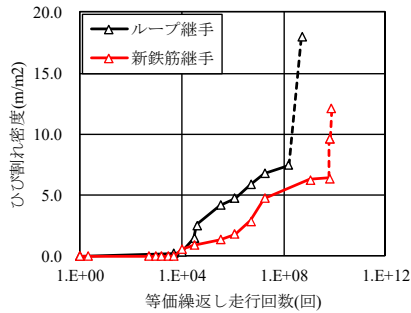


図-8 ひび割れ密度と等価繰返し走行回数

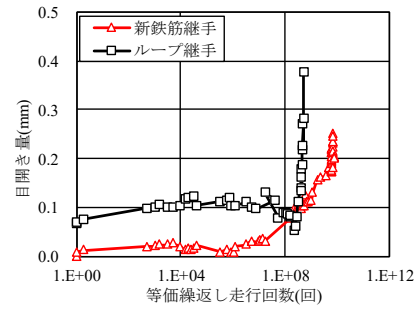


図-9 目開き量と等価繰返し走行回数の関係

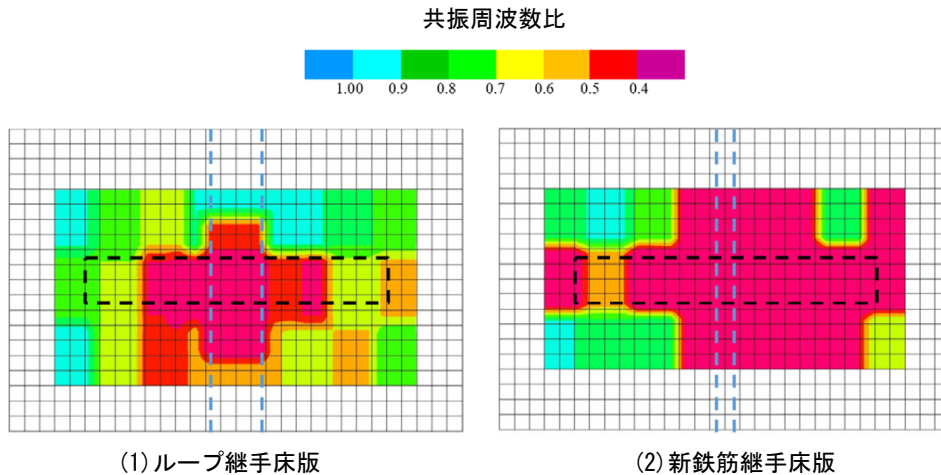


図-10 疲労破壊時共振周波数比のコンターマップ

したことで、プレキャスト床版の耐疲労性を飛躍的に向上させたと考えられる。

4.3 床版下面のひび割れ密度-等価繰返し走行回数

図-8 に床版下面のひび割れ密度と等価繰返し走行回数の関係を示す。なお、図中の点線以降のプロットは疲労破壊時のひび割れ密度を示している。図より、等価繰返し走行回数 1 万回までは両床版で同様の推移を示したが、ループ継手床版では走行回数 1 万回時点からひび割れ密度が急増し、 7.4m/m^2 とひび割れ密度が小さい段階で疲労限界に至った。これは、前述した間詰部近傍のひび割れが走行回数 1 万回時点から発生し、このひび割れを中心に局所的にひび割れが進展したことで床版全体にひび割れが分散しなかったものと考えられる。一方、新鉄筋継手ではひび割れ密度が徐々に増加する傾向であり、既往の研究⁸⁾において水張り状態で輪荷重走行試験を実施した RC 床版と同様のひび割れ密度(10.0m/m^2)で疲労限界に至った。新鉄筋継手床版では、嵌合構造および短繊維補強無収縮モルタルの使用によりループ継手床版よりも床版本体間の一体性が向上し、通常の RC 床版同様に床版全域にひび割れが分散したものと考えられる。

4.4 目開き量-等価繰返し走行回数

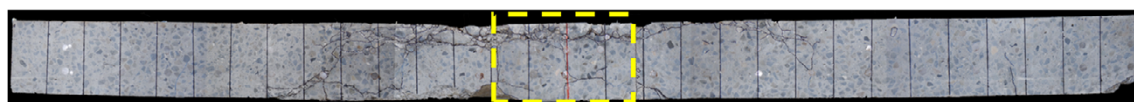
図-9 に目開き量と等価繰返し走行回数の関係を示す。ループ継手床版は走行初期段階から目開き量が大き

く、その後は一定に推移するものの、走行回数 1700 万回時点で目開き量の低下が見られ、等価繰返し走行回数 4 億回時点から目開き量が急激に増加する傾向であった。なお、ループ継手床版では走行回数 3 億回時点で床版下面からの漏水が確認されており、この段階から床版本体と継手部の境界で急激に損傷が進行したものと推察される。一方、新鉄筋継手床版では走行初期から緩やかに目開き量が増加する傾向であり、疲労限界状態まで継手部と床版本体の一体性が急激に低下することはなかった。

4.5 疲労破壊時における共振周波数比のコンターマップ

図-10 に疲労破壊時における共振周波数比のコンターマップを示す。なお、図中の黒色点線で囲まれた範囲は輪走行範囲であり、水色点線で囲まれた範囲は継手部範囲である。ここで、共振周波数比とは、輪荷重走行 0 回時における共振周波数と疲労破壊時に計測した共振周波数の比である。図より、ループ継手床版では継手部及び床版本体との境界面付近で局所的に共振周波数が低下する結果であった。ループ継手床版では、床版本体と継手部の界面が構造上の弱点となり、局所的に疲労損傷が進行したことで早期に疲労破壊に至ったと考えられる。一方、新鉄筋継手床版では床版全域で共振周波数の低下が顕著であり、局所的な剛性の低下は見られなかった。

4.6 疲労破壊後における橋軸方向の床版切断面



(1) ループ継手床版



(2) 新鉄筋継手床版

写真-3 疲労破壊後における橋軸方向の床版切断面

写真-3 に疲労破壊後における床版橋軸方向の切断面を示す。なお、写真中の黄色点線で囲まれた範囲は継手部の範囲である。図より、ループ継手床版では輪走行範囲直下で床版本体と継手部に水平ひび割れが見られ、継手部では床版鉛直方向に貫通するひび割れが生じていた。また、床版下面でコンクリートブロックの剥落があった位置で、床版上面コンクリートの砂利化が観察された。一方、新鉄筋継手床版では床版本体にのみ水平ひび割れおよび顕著な砂利化が見られ、継手部にはいずれも確認されなかった。また、継手部には床版鉛直方向のひび割れの発生はなく、短繊維補強モルタルを使用したことでひび割れの発生および水の浸入を抑制したものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 新鉄筋継手を用いたプレキャスト床版は、従来のループ継手を用いた床版と比較して、水の作用下においても床版の耐疲労性を飛躍的に向上させることが示された。
- 2) 新鉄筋継手を用いたプレキャスト床版は、せん断キーおよび嵌合構造を有することで床版本体間の一体性が向上し、さらに間詰部への短繊維補強無収縮モルタルの使用により継手部のひび割れの発生および水の浸入が抑制され、継手部が構造上の弱点となることはなかった。
- 3) ループ継手を用いたプレキャスト床版は、乾燥状態での輪荷重走行試験ではループ継手単体の損傷が疲労破壊の直接的な原因とはならないが、水の作用下においては継手部および床版本体との境界部で局所的に疲労損傷が進行し、そこに床版上面から水が浸入することで耐疲労性が著しく低下することが示された。

謝辞：本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(研究代表者：

前川宏一)によって実施された。また、本研究は日本大学工学部土木工学科構造・道路工学研究室(旧・コンクリート工学研究室)の多くの学生が携わった成果をまとめたものである。さらに、本研究を進めるにあたり、日本大学工学部土木工学科 子田康弘教授に多大な御協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉松秀和, 松井繁之, 大澤浩二, 中山良直, 水野浩, 表真也: 床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継手の開発, 土木学会構造工学論文集, Vol.60A, pp.1159-1168, 2014.8
- 2) 佐々木保隆, 八部順一, 太田貞次, 内田賢一, 宮崎和彦, 西川和廣: RC ループ継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重載荷試験, 第一回鋼橋床版シンポジウム論文集, pp.155-160, 1998.11
- 3) 北村 健: 合理化施工を可能にする道路橋プレキャスト床版の耐荷性および施工性に関する実験的研究, 日本大学乙第 7273 号, pp.101-210, 2019.11
- 4) 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, 1996.12
- 5) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行: 局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造, Vol73, No.2, pp.133-14, 2017.4
- 6) 島野孝則, 前島 拓, 子田康弘, 岩城一郎, 田中泰司: 輪走行作用下における RC 床版の疲労損傷過程に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, V205, pp.409-410, 2017.9
- 7) 子田康弘, 齊藤卓也, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.145-150, 2009.10
- 8) 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