

論文 間詰部界面に接着剤を用いたプレキャスト取替RC床版の輪荷重走行疲労実験による耐疲労性の評価

重松伸也*¹・阿部忠*²・水口和彦*³・鈴木健*⁴

要旨：本研究は橋軸方向を支間とし幅員方向に並列したプレキャスト取替 RC 床版について，間詰部界面に接着剤を塗布した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し，耐疲労性の検証を行った。供試体は，間詰部なしの供試体，曲げの影響を考慮し幅員方向の輪荷重直下，およびせん断の影響を考慮し輪荷重の端部にそれぞれ間詰部を設けた供試体を用いた。間詰部界面に接着剤を用いた供試体の等価走行回数 は，間詰部なしの供試体のそれぞれ 0.95, 1.01 となり接着剤の効果により同等となった。よって，実橋においてはプレキャスト RC 床版と間詰部界面に接着剤を用いることを提案する。

キーワード：プレキャスト RC 床版，接着剤，輪荷重走行疲労実験，耐疲労性

1. はじめに

近年，支間 2m ～ 6m 程度の道路橋 RC 床版橋は，老朽化によるプレキャスト床版間からの漏水やひび割れなどにより取替工事が検討されている。一方，筆者らは鋼主げた間の幅員方向を支間とし，橋軸方向に間詰部を設けたプレキャスト RC 床版を提案し¹⁾，実橋で採用されている。この間詰部を応用して，橋軸方向を支間とし幅員方向に間詰部を設けた取替プレキャスト RC 床版（以下，取替 Pc.RC 床版とする）を提案する。本構造は輸送可能な幅 2.3m 以下とし，間詰部には円形突起付き鉄筋¹⁾を用いた機械式継手構造を設け一体化する。よって，耐疲労性の向上が図れるものである。

筆者らは間詰部界面に接着剤を用いない供試体で輪荷重走行疲労試験を行い，耐疲労性を報告した²⁾。また，間詰部界面の疲労による付着力低下によるひび割れ（以下，はく離とする）を抑制するために高耐久型エポキシ系接着剤（以下，接着剤とする）の有効性を報告した³⁾。

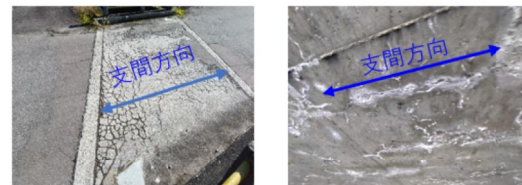
そこで本研究は，橋軸方向を支間とし幅員方向の間詰部界面に接着剤を塗布した輪荷重直下および輪荷重端部に間詰部を設けた供試体を製作し，輪荷重走行疲労実験を実施した。間詰部なしの供試体²⁾を基準とし，間詰部の位置と接着剤の効果による耐疲労性の評価，たわみ，破壊時の損傷状況，鉄筋ひずみを検証し，取替 Pc.RC 床版の実用性について検証する。

2. 既設の小支間RC床版橋の損傷状況

小支間の既設床版橋の損傷事例を図-1に示す。図-1(a)は支間 4.3m，幅員 6.5m の Pc.RC 橋で，幅 1.5m 程度のプレキャスト材が幅員方向に並列されているのみであ



(a) プレキャストRC床版—左：上面，右：下面



(b) 場所打ちRC床版橋—左：上面，右：下面

図-1 小支間床版橋の損傷事例

る。損傷状況はプレキャスト材間の接合面から漏水と輪荷重による接合面の擦り磨きによる遊離石灰が発生している。次に，図-1(b)は，支間 4.4m，幅員 8.0m の場所打ち RC 床版橋である。損傷状況はコンクリート舗装が剥がれ，床版上面はセメント成分が溶出し2方向ひび割れに侵入している。なお，アスファルト舗装により部分補修されている。また，床版下面は橋軸方向にひび割れと遊離石灰が発生している。

3. 円形突起を用いた継手構造

本供試体に用いる継手構造は図-2に示すように，橋軸方向が主筋，幅員方向が配力筋となる。継手構造は図-2(a)に示すように D13 鉄筋の先端はφ 30mm の円形で，突起面積は 580mm²となる。配置状況とかぶりとは図-2(b)に示すように橋軸方向の主筋内側に円形突起付き

*1 日本大学 生産工学研究科土木工学専攻博士後期課程（正会員）

*2 日本大学 名誉教授 博士（工）（正会員）

*3 日本大学教授 生産工学部土木工学科 教授 博士（工）（正会員）

*4 （株）小野工業所 技術部

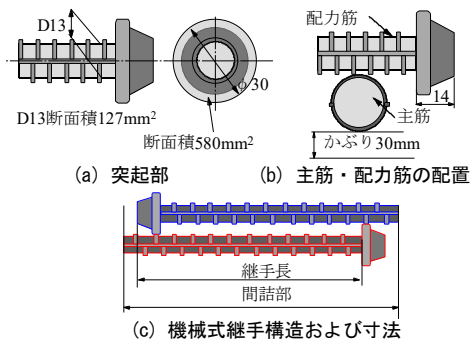


図-2 円形突起付き鉄筋と配置状況

表-3 付着用接着剤の特性値

項目		接着剤	備考
外観	主剤	白色ペースト状	異物混入なし
	硬化剤	青色液状	
混合比(主剤:硬化剤)		5:1	重量比
硬化物比重		1.42	JIS K 7112
圧縮強さ		102N/mm ²	JIS K 7181
圧縮弾性係数		3976N/mm ²	JIS K 7181
曲げ強さ		41N/mm ²	JIS K 7171
引張せん断強さ		15N/mm ² 以上	JIS K 6850
コンクリート付着強さ		3.7N/mm ²	JIS A 6909

の配力筋が配置されることから道路橋示方書・同解説⁴⁾(以下、道示とする)に規定されるかぶり確保できる配置となる。重ね継手状況は図-2(c)に示すように間詰部幅を200mmとし、鉄筋継手長を170mm^{2), 5)}、鉄筋全長184mmとした。なお、供試体の全体図を図-3に示す。

4. 供試体の使用材料および寸法

4.1 使用材料

(1) RC床版, 間詰部

取替Pc.RC床版供試体のRC床版部のコンクリートは、間詰部なしの供試体RC-1と同様²⁾で配合条件を表-1に示すように、普通ポルトランドセメントに最大粗骨材寸法20mmの砕石、最大細骨材寸法5mmの砕砂を使用する。取替Pc.RC床版の要求性能は、コンクリートの圧縮強度40N/mm²を目標とする。コンクリート圧縮強度および鉄筋材料特性値は表-2に示すように、実験時のコンクリート圧縮強度は供試体RC-1が56.4N/mm²、間詰部ありの供試体RC-M, RC-Sは57.6N/mm²である。なお、圧縮強度の差異は製作日が異なるためである。主鉄筋にはSD345, D16を用いる。

間詰部のコンクリート圧縮強度の要求性能はRC床版部と同様に圧縮強度40N/mm²とする。間詰部には一般的に超速硬コンクリートが用いられるがRC床版部と同様に、普通ポルトランドセメントを用いる。骨材はRC床版部と同様とし、配合条件を表-1に併記する。ここで、間詰部のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2に併記する。実験時の間詰部のコンクリー

表-1 コンクリートの配合条件

供試体	スランブ(cm)	W/C(%)	S/a(%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(kg/m ³)
				セメント	水	細骨材	粗骨材	
RC床版	21±2.5	38.0	46.8	461	175	790	932	4.61
間詰部	21±2.5	35.0	45.0	500	175	767	923	5.25

表-2 材料特性値

供試体	コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	鉄筋(SD345)					
		鉄筋の種類	鉄筋径(mm)	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)	
RC床版	供試体RC-1	56.4	主鉄筋	D16	383	531	200
	供試体RC-M, RC-S	57.6	配力筋	D13	365	510	200
間詰部	供試体RC-M, RC-S	56.3	突起鉄筋	D13	389	576	200

ト圧縮強度は56.3N/mm²ある。

(2) 高耐久型エポキシ系接着剤(接着剤)

筆者ら²⁾は間詰部界面に接着剤を塗布しない取替Pc.RC床版の輪荷重走行疲労実験において、間詰部界面の付着力の低下により等価走行回数が間詰部なしの供試体に対して低下する結果を得た。一方、輪荷重走行における間詰部コンクリートとの付着力を高めるために付着用接着剤³⁾を用いた結果、間詰部界面の付着力が向上し耐疲労性が向上した。よって、本供試体の間詰部界面に付着用接着剤を用いることとする。ここで、付着用接着剤の特性値を表-3に示す。表-3よりコンクリートとの付着強さは3.7N/mm²以上を有している。

4.2 供試体寸法および鉄筋配置

支間2.0mのRC床版橋の床版厚を道示⁴⁾のB活荷重では最小厚が250mmであり、市販のPc.RC版も同等な厚さである。そこで本供試体の床版厚は、道示の床版厚の72%モデルとなる180mmとする。供試体は間詰部なしの供試体RC-1、およびPc.RC床版の輪荷重直下に間詰部を設け曲げの影響を受ける供試体RC-M、輪荷重端部から間詰部を設けせん断の影響を受ける供試体RC-Sの3タイプとする。各供試体寸法および鉄筋配置を図-3に示す。接着剤の塗布状況を図-4に示す。

(1) 供試体RC-1

間詰部なしの供試体RC-1の寸法は図-3(a)に示すように、支間2,000mm、全長2,200mm、幅1,600mm、床版厚180mmである。引張側主鉄筋にはD16を125mm間隔で配置する。圧縮側は1/2の鉄筋量とする。次に、配力筋は引張側、圧縮側ともにD13を125mm間隔で配置する。

(2) 供試体RC-M

輪荷重直下に間詰部ありの供試体RC-Mの寸法は図-3(b)に示すように、外形寸法および鉄筋配置は供試体RC-1と同様である。間詰部は輪荷重直下に幅200mmを設ける。よって、Pc.RC床版部の左右パネル寸法は幅700mmとする。パネル間の接合面にはコンクリート打継目処理剤を塗布し脱型後、ワイヤーブラシで切削し3mmの凹凸(目荒し)を設けた。

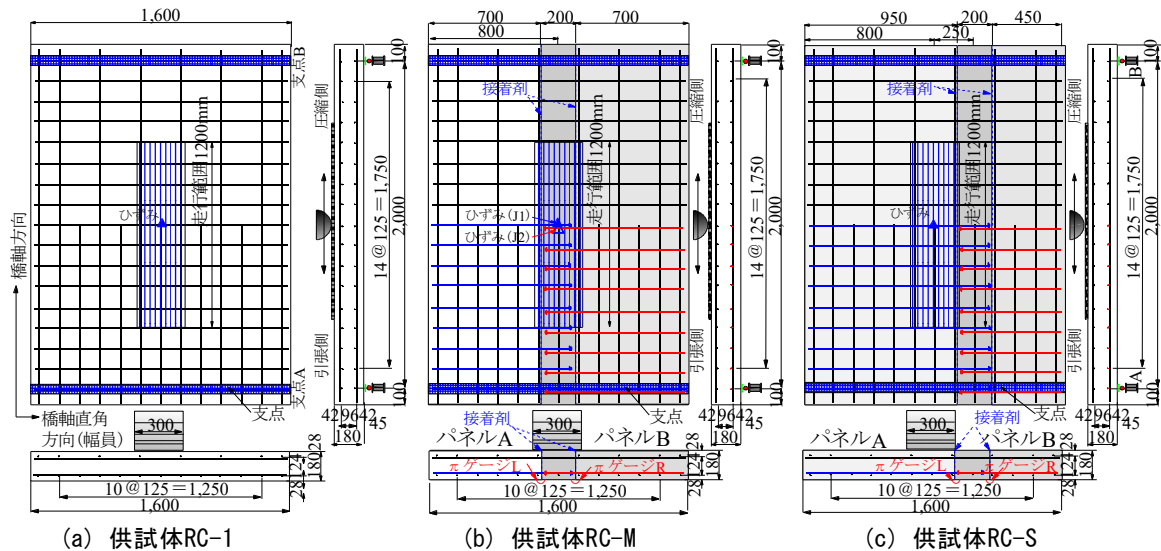


図-3 供試体寸法および鉄筋配置

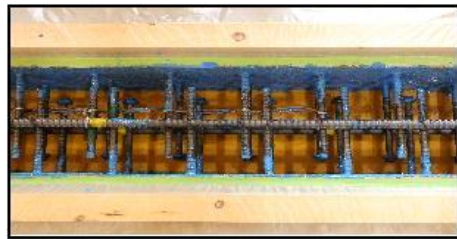


図-4 接着剤を塗布した供試体 (RC-M, S)



図-5 輪荷重走行疲労試験の状況

間詰部の配筋筋は、引張側には図-2に示す D13 の円形突起付き鉄筋を 125mm 間隔で配置した。圧縮側には円形突起なし鉄筋を各々 125mm 間隔で配置した。

(3) 供試体RC-S

輪荷重端部から間詰部ありの供試体 RC-S の寸法は図-3(c)に示すように、外形寸法および鉄筋配置は供試体 RC-1 と同様である。間詰部は輪荷重の端部から幅 200mm を設ける。よって、左パネルは幅 950mm、右パネルは幅 450mm とする。パネル間の接合面には供試体 RC-M と同様に 3mm の凹凸(目荒し)を設けた。間詰部の配筋筋は供試体 RC-M と同様である。

5. 実験方法および等価走行回数

5.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、図-3に示すように、供試体中央に幅 300mm の輪荷重を橋軸方向に 1,200mm の範囲

を供試体が破壊するまで繰り返し走行させる。輪荷重走行疲労実験の状況と供試体 RC-M および RC-S の間詰部の位置を図-5に示す。支持条件は 2 辺単純支持とした。輪荷重走行疲労実験における初期荷重は 100kN で 20,000 回走行し、20,000 回ごとに荷重を 20kN 増加し、160kN 以降は 170kN で破壊するまで走行させる。各実験において輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに間詰部界面の開閉幅、たわみ、鉄筋ひずみを計測する。

5.2 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験は、等価走行回数 N_{eq} を式(1)より算出して耐疲労性を評価する。なお、本供試体はモデル化した供試体であることから、式(1)における基準荷重 P は道示⁴⁾に規定する T 荷重 100kN の 72%である 72kN に輪荷重走行中の床版走行面の凹凸により荷重変動を含めた安全率 1.18 を考慮した 85kN とする⁶⁾。また、S-N 曲線の傾きの逆数 m の絶対値には松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線式の 12.7 を適用する⁷⁾。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^{m \times n_i} \quad (1)$$

ただし、 P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 = 85kN, n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 = 12.7

6. 結果および考察

6.1 等価走行回数および等価走行回数比

輪荷重走行疲労試験における等価走行回数および等価走行回数比を表-4に示す。間詰部なしの供試体 RC-1 の等価走行回数 N_{eq} は式(1)より算出すると 167.834×10^6 回であり、この等価走行回数を基準に供試体の耐疲労性を評価する。

表-4 等価走行回数および等価走行回数比

供試体名称	走行回数	荷重					等価走行回数 合計 (回)	等価走行 回数比
		100kN	120kN	140kN	160kN	170kN		
供試体 RC-1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	14,000	94,000	—
	等価走行回数	157,548	1,595,921	11,304,092	61,621,664	93,155,603	167,834,828	
供試体 RC-M	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	12,800	92,800	0.95
	等価走行回数	157,548	1,595,921	11,304,092	61,621,664	85,170,837	159,850,062	
供試体 RC-S	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	14,200	94,200	1.01
	等価走行回数	157,548	1,595,921	11,304,092	61,621,664	94,486,397	169,165,622	

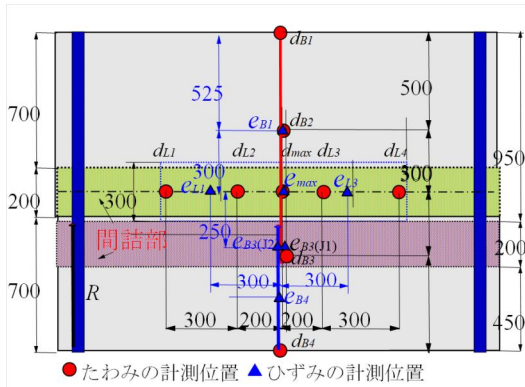


図-6 たわみ・ひずみの計測位置

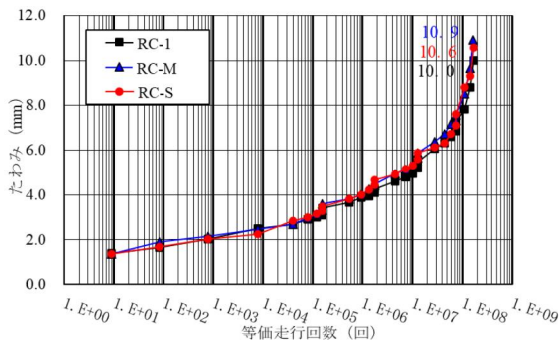


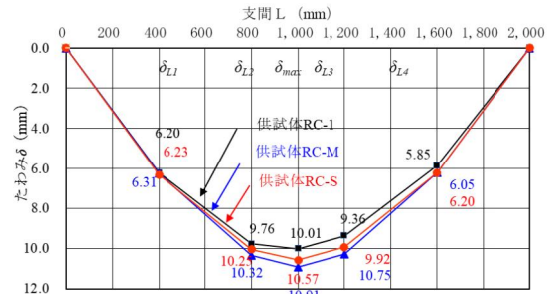
図-7 たわみ δ_{max} と等価走行回数 N_{eq} の関係

輪荷重直下に間詰部を設けた供試体 RC-1 の等価走行回数は 159.850×10^6 回であり、供試体 RC-1 の等価走行回数の 0.95 である。次に、輪荷重端部から間詰部を設けた供試体 RC-S の等価走行回数は 169.165×10^6 回である。供試体 RC-1 の等価走行回数の 1.01 倍である。間詰部界面に接着剤を用いない供試体ではそれぞれ 0.60, 0.82 であった²⁾。

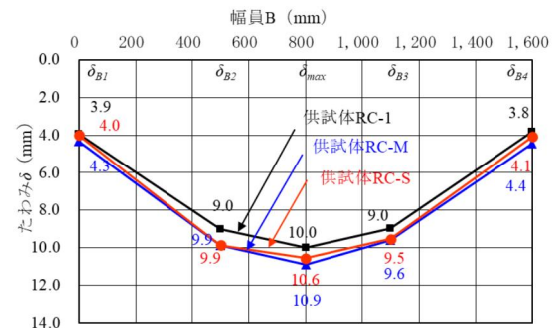
以上より、接着剤を用いた供試体 RC-M, RC-S は間詰部なしの供試体 RC-1 と同等の耐疲労性が得られた。

6.2 たわみと等価走行回数の関係

図-6に示すように床版中央の橋軸方向の5点、橋軸直角方向300mmの位置の5点を計測する。床版中央のたわみ δ_{max} と等価走行回数 N_{eq} の関係を供試体 RC-1, RC-M, RC-S は図-7に示す。また、供試体 RC-1, RC-M,



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-8 橋軸方向の各計測点の最大たわみ

RC-S の各測定点の最大たわみと橋軸方向および橋軸直角方向の関係をそれぞれ図-8(a), 図-8(b)に示す。

間詰部なしの供試体 RC-1 の等価走行回数 167.834×10^6 回の支間中央のたわみは 10.0mm である。また、各観測点の最大たわみは、橋軸方向 δ_{L1} , δ_{L2} , δ_{max} , δ_{L3} , δ_{L4} でそれぞれ 6.2, 9.76, 10.01, 9.36, 5.85, 橋軸直角方向では、左側の δ_{B1} , δ_{B2} がそれぞれ 3.9, 9.0, 右側の δ_{B3} , δ_{B4} がそれぞれ 9.0, 3.8 である。破壊は支点 A から 420mm の位置で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

輪荷重直下に間詰部を設けた供試体 RC-M の等価走行回数 159.850×10^6 回の支間中央のたわみは 10.91mm である。各計測点の最大たわみは、橋軸方向は供試体 RC-1 に対して、 δ_{L1} , δ_{L2} , δ_{max} , δ_{L3} , δ_{L4} でそれぞれ、1.01, 1.05, 1.09, 1.09, 1.05 倍で、全体平均は 1.06 倍である。橋軸直角方向は供試体 RC-1 に対して、左側の δ_{B1} , δ_{B2} がそれぞれ 1.16, 1.10 倍で平均 1.13 倍、右側の δ_{B3} , δ_{B4} が

それぞれ 1.09, 1.06 倍で平均 1.08 倍である。破壊は支点 B から 500mm の位置で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

次に、輪荷重端部から間詰部を設けた供試体 RC-S の等価走行回数 169.165×10^6 回の支間中央のたわみは 10.57mm である。各計測点の最大たわみは、橋軸方向は供試体 RC-1 に対して、それぞれ 1.02, 1.02, 1.06, 1.05, 1.05 倍であり、全体平均が 1.04 倍である。橋軸直角方向は供試体 RC-1 に対して、それぞれ左側が 1.07, 1.06 倍で平均 1.07 倍、右側が 1.09, 1.02 倍で平均 1.06 倍である。破壊は支点 A から 600mm の位置で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

輪荷重直下に間詰部を設けた供試体 RC-M のたわみ量が間詰部なしの供試体 RC-1 の 1.06 倍と大きくなる。また、間詰部界面に接着剤を使用することで付着効果が高まり、ほぼ左右対称にたわみの増加が見られる。

よって、設計において輪荷重直下に間詰部を設けないことを提案する。

6.3 ひずみと等価走行回数の関係

本実験における鉄筋のひずみの計測位置は図-6に示すように、中央の ϵ_{max} 、橋軸方向 300mm の各位置 ϵ_{L1} , ϵ_{L3} 、橋軸直角方向 300mm の各位置 ϵ_{B1} , ϵ_{B3} および ϵ_{B3} より 300mm の ϵ_{B4} とする。

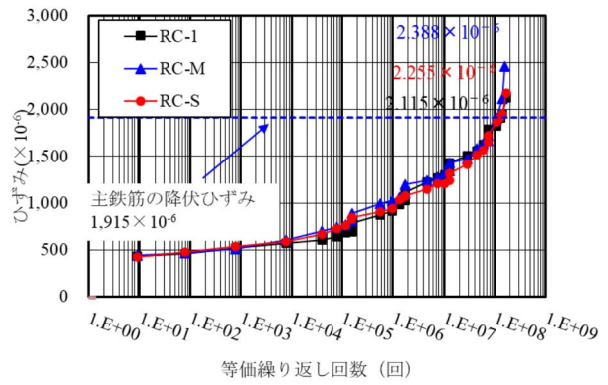
(1) 主鉄筋（橋軸方向）

供試体 RC-1, RC-M, RC-S の床版中央の主鉄筋（橋軸方向）のひずみと等価走行回数の関係を図-9(a)に示す。なお、RC-M(J1)は図-6に示す配力筋継手部の左、RC-M(J2)は右鉄筋のひずみである。また、表-2に示す主鉄筋 D16 の降伏強度より算出した降伏ひずみ 1.915×10^{-6} も図-9に併記する。

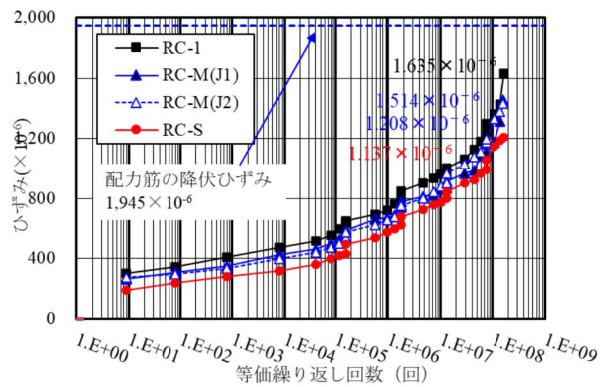
間詰部なしの供試体 RC-1 の主鉄筋ひずみ ϵ_{max} と等価走行回数 N_{eq} の関係は図-9(a)に示すように、主鉄筋が降伏ひずみに達した等価走行回数は 132.000×10^6 回である。等価走行回数 167.832×10^6 回の主鉄筋ひずみ ϵ_{max} は 2.125×10^{-6} である。また、図-10(a)に示すように中央から 300mm 離れた主鉄筋ひずみ ϵ_{L1} は 2.319×10^{-6} であり降伏し、反対側の ϵ_{L3} は 1.878×10^{-6} であり降伏に至っていない。

輪荷重直下の間詰部を設けた供試体 RC-M の主鉄筋が降伏ひずみに達した等価走行回数は 109.000×10^6 回である。供試体 RC-1 の 83% である。等価走行回数 159.850×10^6 回の主鉄筋ひずみ ϵ_{max} は 2.388×10^{-6} である。また、図-10(a)に示すように中央から 300mm 離れた主鉄筋ひずみ ϵ_{L1} は 1.796×10^{-6} であり降伏に至ってなく、反対側の ϵ_{L3} は 2.003×10^{-6} であり降伏している。

次に、輪荷重端部から間詰部を設けた供試体 RC-S の主鉄筋が降伏ひずみに達した等価走行回数は 127.000×10^6 回である。供試体 RC-1 の 75% である。等価走行回数 169.165×10^6 回の主鉄筋ひずみ ϵ_{max} は 2.255×10^{-6} である。また、図-10(a)に示すように中央から 300mm 離れた主鉄筋ひずみ ϵ_{L1} は 2.319×10^{-6} であり降伏し、反対側の ϵ_{L3} は 1.744×10^{-6} であり降伏に至っていない。

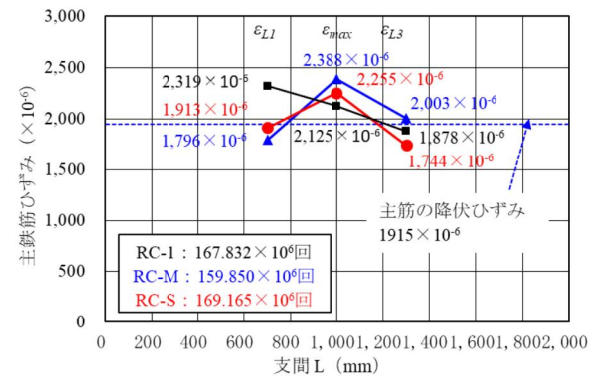


(a) 主鉄筋

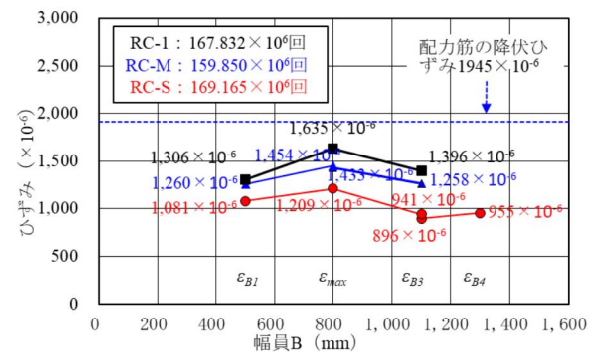


(b) 配力筋

図-9 主鉄筋のひずみと等価走行回数の関係



(a) 主鉄筋



(b) 配力筋

図-10 各計測点のひずみ

10⁶ 回であり、供試体 RC-1 の 96%、である。等価走行回数 169,165×10⁶ 回のひずみは 2,255×10⁻⁶ である。また、図-10(a)に示すように中央から 300mm 離れた主鉄筋ひずみ ϵ_{L1} は 1,913×10⁻⁶、反対側の ϵ_{L3} は 1,744×10⁻⁶ で降伏に至っていない。

以上より、供試体 RC-M、RC-S の降伏ひずみに達した等価走行回数は、間詰部なしの供試体 RC-1 のそれぞれ 83%、96%である。

(2) 配力筋（橋軸直角方向）

供試体 RC-1、RC-M、RC-S の床版中央の配力筋（橋軸直角方向）のひずみと等価走行回数の関係を図-9(b)に示す。

間詰部なしの供試体 RC-1 の配力筋ひずみ ϵ_{max} と等価走行回数 N_{eq} の関係は図-9(b)に示すように、等価走行回数 167,832×10⁶ 回のひずみ ϵ_{max} は 1,635×10⁻⁶ で降伏に至っていない。

輪荷重直下の間詰部を設けた供試体 RC-M(J1)(J2)の等価走行回数 159,850×10⁶ 回のひずみ ϵ_{max} はそれぞれ、1,454×10⁻⁶、1,433×10⁻⁶ で降伏に至っていない。

次に輪荷重端部から間詰部を設けた供試体 RC-S の等価走行回数 169,165×10⁶ 回のひずみ ϵ_{max} は 1,209×10⁻⁶ で降伏に至っていない。また、図-10(b)に示すように中央から離れた配力筋ひずみ ϵ_{B1} 、 ϵ_{B3} 、 ϵ_{B4} もいずれも降伏に至っていない。

以上より、間詰部界面に付着用接着剤を用いることで間詰部なしと同等の耐疲労性が得られた。よって、円形突起を設けた機械式継手は本実験の範囲内では引張応力に十分抵抗できると考えられる。

7. まとめ

(1) 等価走行回数において、間詰部界面に接着剤を用いた供試体の等価走行回数は、間詰部なしの供試体に対して、輪荷重直下に間詰部を設けた供試体は 0.95、輪荷重の端部から間詰部を設けた供試体は 1.01 の等価走行回数を得られた。また、間詰部界面に接着剤を用いない供試体²⁾ではそれぞれ 0.60、0.82 であった。本実験の範囲内では間詰部界面に接着剤を用いることで同等の耐疲労性の結果が得られた。よって、取替 Pc.RC 床版は実用的である結果が得られた。

- (2) たわみと等価走行回数との関係においては、間詰部なしの供試体に対して、輪荷重直下に間詰部を設けた供試体は 1.06、輪荷重の端部から間詰部を設けた供試体は 1.03 となり、輪荷重直下に間詰部を設けた場合たわみ量が大きくなる。よって、設計において輪荷重直下に間詰部を設けないことを提案する。
- (3) 鉄筋ひずみの関係では、間詰部なしの供試体に対して、間詰部が曲げを受ける場合、床版中央主鉄筋のひずみの増加は大きくなる。配力筋は輪荷重直下および輪荷重の端部から間詰部を設けた供試体は、いずれも降伏ひずみに達していない。よって、円形突起を設けた機械式継手は本実験の範囲内では引張応力に十分抵抗できると考えられる。
- (4) 本提案は、現場での施工期間を短縮できるプレキャスト構造とし、間詰部界面に付着用接着剤を塗布することで一体化が図ることから場所打ち構造と同等の耐疲労性を有すると考える。

参考文献

- 1) 高橋明彦，阿部忠，小野晃良，大西弘志，久田真：間詰部を設けた取替床版の耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，655-664，2019.3
- 2) 重松伸也，阿部忠，木村延久，鈴木健：プレキャスト取替 RC 床版の輪荷重走行疲労実験による耐疲労性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，pp.1063-1068，2023.7
- 3) 重松伸也，阿部忠，小野晃良，佐々木茂隆：輪荷重走行疲労実験におけるプレキャスト床版間詰部接合面の開閉幅の抑制効果に関する実験，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，第 22 巻，pp.279-284，2022.10
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2017
- 5) 土木学会：鉄筋定着・継手指針，2007
- 6) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川合豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-54，2011.1
- 7) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007