

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*, 阿部忠**, 澤野利章***, 水口和彦****, 野口博之*****

*日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

**博(工), 日本大学 名誉教授 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

***工博, 日本大学教授, 生産工学部土木科学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

****博(工), 日本大学教授, 生産工学部土木科学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

*****博(工), 日本大学助教, 生産工学部土木科学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

本研究は小支間で幅員方向に並列したプレキャスト取替 RC 床版について、輪荷重走行疲労実験を実施し耐疲労性の検証を行った。その結果、間詰部なしの供試体の等価走行回数に対して、輪荷重直下に間詰部を設けた供試体は 40% 低下した。一方、間詰部界面に接着剤を用いた場合、5% の低下となった。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、用水路や水路を跨ぐ小支間の 2m ~ 6m 程度の道路橋プレキャスト RC 床版および場所打ち RC 床版橋が、老朽化による漏水やひび割れの損傷を受け取替工事が検討されている。また、場所打ち床版橋での取替は現場施工期間が長期間となり、これによる長期間の交通規制が必要となる。

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。本構造は、まず工場にて輸送可能な幅 2.3m 以下とし端部に円形突起付き鉄筋を用いた機械式継手構造²⁾を設ける。工場で製作した部材を施工現場まで輸送し、間詰部に超速硬コンクリートを打ち込み一体化する。これにより、耐疲労性の向上が図れるものである。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¹⁾。

そこで本研究は小支間の道路橋の取替に際して、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プレキャスト取替 RC 床版（以下、PcRC 床版とする）を提案する³⁾。幅員方向の間詰部界面に接着剤を塗布し輪荷重直下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を基準とし、接着剤の効果による耐疲労性の評価、たわみ、間詰部界面の開閉幅、破壊時の損傷状況を検証し、PcRC 床版の実用性について検証する。



(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

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 PcRC 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

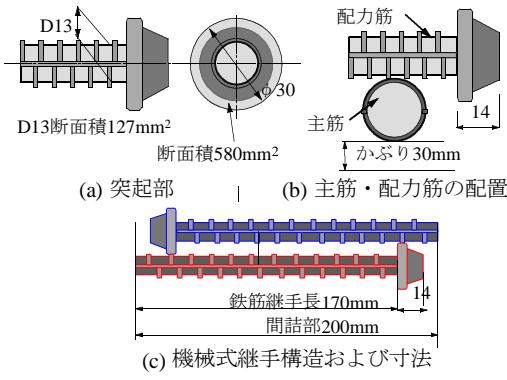


図-2 円形突起付き鉄筋と配置状況

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

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φ30mmの円形で、突起面積は580mm²となる。配置状況とかぶりは図-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が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^{3),4)}、鉄筋全長は突起部14mmを加算し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PcRC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³⁾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の碎石、最大細骨材寸法5mmの碎砂を使用する。取替PcRC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

表-1 コンクリートの配合条件

供試体	スランプ (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	
RC床版	21±2.5	38.0	46.8	461	175	790	932
間詰部	21±2.5	35.0	45.0	500	175	767	923

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)
RC床版	供試体RC-1	56.4	主鉄筋	D16	383	531
	供試体RC-N, B	57.6	配力筋	D13	365	510
間詰部	供試体RC-N, B	56.3	突起鉄筋	D13	389	576

のコンクリート圧縮強度は供試体RC-1が56.4N/mm²、間詰部あり接着剤なしの供試体RC-N、間詰部あり接着剤ありの供試体RC-B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。

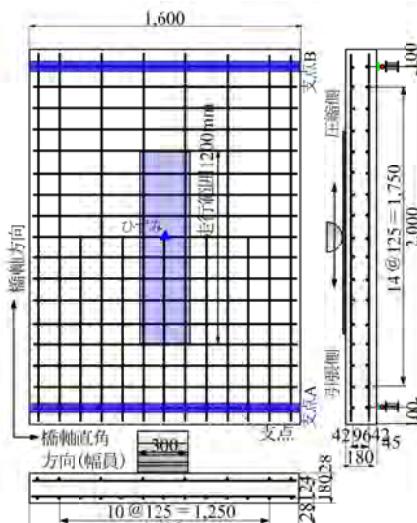
(2) 高耐久型エポキシ系接着剤(接着剤)

筆者ら³⁾は間詰部界面に接着剤を塗布しない取替PcRC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接着剤¹⁾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接着剤を用いることとする。この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。

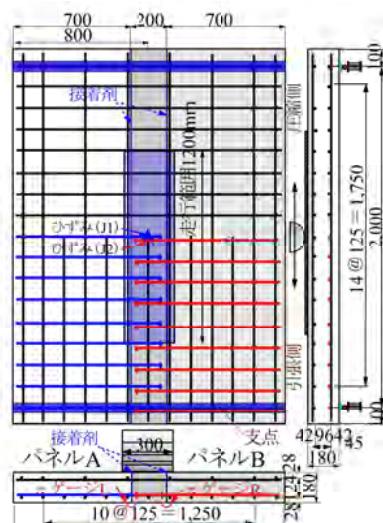
接着剤ありの供試体RC-Bの施工方法は、PcRC床版の両側に接着剤を0.9kg/m²を塗布する。接着剤の硬化時間はなわちコンクリートの打ち込み可能時間は60分程度であることから塗布後、直ちに間詰部コンクリートを打ち込み、表面を仕上げる。

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⁵⁾のB活荷重では最小厚が250mmであり、市販のPcRC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PcRC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-N,Bとする。各供試体寸法および鉄筋配置を図-3に示す。間詰部の状



(a) 供試体 RC-1

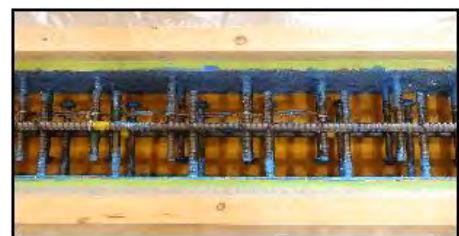


(b) 供試体 RC-N, RC-B

図-3 供試体寸法および鉄筋配置



(a) 供試体 RC-N (接着剤なし)



(b) 供試体 RC-B (接着剤あり)

図-4 間詰部の状況

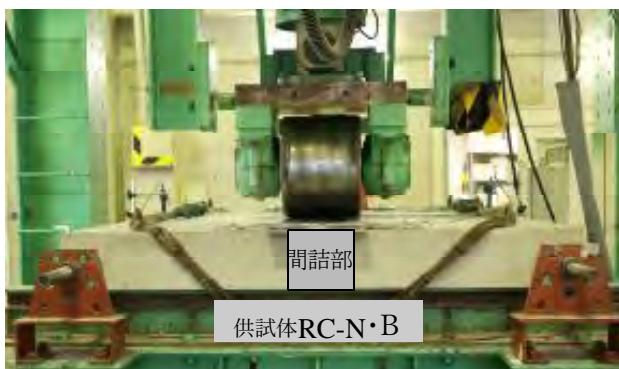


図-5 輪荷重走行疲労試験の状況

況を図-4に、接着剤の塗布状況を図-4(b)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。下縁引張側主鉄筋には D16 を 125mm 間隔で配置する。上縁圧縮側は 1/2 の鉄筋量とする。次に配力筋は下縁引張側、上縁圧縮側とともに D13 を 125mm 間隔で配置する。

(2) 供試体RC-N, RC-B

輪荷重直下に間詰部ありの供試体 RC-N, B 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、PcRC 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。

間詰部の配力筋は、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。

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-N, B 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、たわみを計測する。

図-6 に示すように、たわみは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。また間詰部界面の開閉幅の計測位置を図-6 に併記する。

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} をマイナーフレアに従うと仮定する式(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⁵⁾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)

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		
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	
RC-N	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	4,001	84,001	0.60
	等価走行回数	157,548	1,595,921	11,304,092	61,621,664	26,622,541	101,301,766	
RC-B	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	

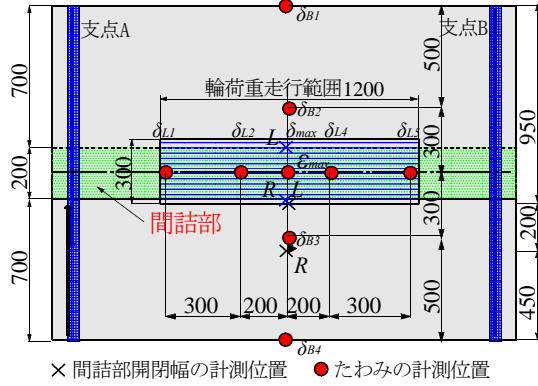
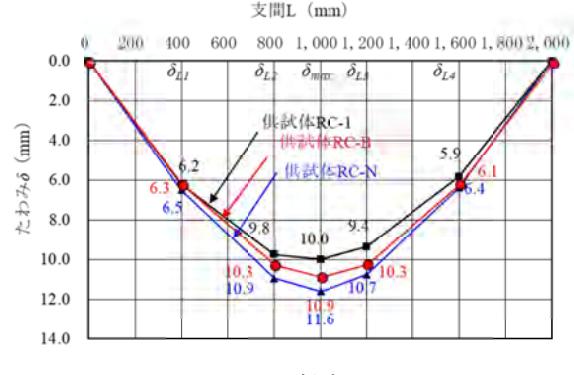
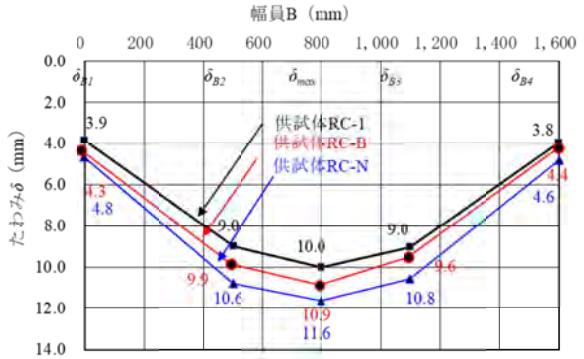


図-6 たわみの計測位置



(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

以上より、接着剤ありの供試体 RC-B 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

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-N, RC-B は図-7 に示す。また、供試体 RC-1, RC-N, RC-B 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。

(1) 供試体RC-1

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 $\delta_{L1}, \delta_{L2}, \delta_{max}, \delta_{L3}, \delta_{L4}$ それぞれ $6.2, 9.8, 10.0, 9.4, 5.9\text{mm}$ 、橋軸直角方向では、左側の δ_{B1}, δ_{B2} がそれぞれ $3.9, 9.0\text{mm}$ 、右側の δ_{B3}, δ_{B4}

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。

接着剤ありの供試体 RC-B 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。接着剤なし供試体 RC-N は 0.60 であった。

がそれぞれ 9.0, 3.8mm 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。

(2) 供試体RC-N

接着剤なしの供試体 RC-N の等価走行回数 101.301×10^6 回の支間中央のたわみは 11.6mm 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、1.05, 1.11, 1.16, 1.14, 1.08 倍で、全体平均は 1.09 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 1.23, 1.17 倍で平均 1.20 倍、右側の δ_{B3} , δ_{B4} がそれぞれ 1.20, 1.21 倍で平均 1.21 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。

(3) 供試体RC-B

接着剤ありの供試体 RC-B の等価走行回数 159.850×10^6 回の支間中央のたわみは 10.9mm 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、1.02, 1.04, 1.09, 1.10, 1.03 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 1.10, 1.10 倍で平均 1.10 倍、右側の δ_{B3} , δ_{B4} がそれぞれ 1.07, 1.16 倍で平均 1.12 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。接着剤ありの供試体 RC-B 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。

以上より、間詰部の開閉幅の影響によりたわみ量も大きくなる。よって、設計においては輪荷重直下に間詰部を設けないことを提案する。次に接着剤を用いることで間詰部界面の付着力が高まり、たわみの増加が低減される。設計においては、間詰部界面に接着剤を用いることを提案する。

6.3 間詰部界面の開閉幅と等価走行回数の関係

本研究では間詰部界面でのコンクリート接合面の離幅を開閉幅と定義し、界面以外はひび割れとする。間詰部下面の開閉幅の計測は界面に π ゲージを設置して計測し、左側の開閉幅を L、右側を R とし、間詰部界面の開閉幅と等価走行回数の関係を図-9 に示す。また、図-9 には、橋梁定期点検要領⁸⁾に示すひび割れ幅 0.2mm も併記する。

(1) 供試体RC-N

図-9 より、接着剤なしの供試体 RC-N の 1 走行後等価走行回数 9 回での開閉幅は L が 0.04mm, R が 0.03mm である。等価走行回数 0.157×10^6 回付近から開閉幅が大きくなり、ひび割れは 0.2mm に達した等価走行回数は L が 0.955×10^6 回、R は 1.753×10^6 回であり、R 側の開閉幅は小さいが、最大等価走行回数 101.301×10^6 回の開閉幅は L が 0.49mm, R が 0.51mm とほぼ同等である。

以上より、間詰部の開閉幅はほぼ左右対称に増加する。

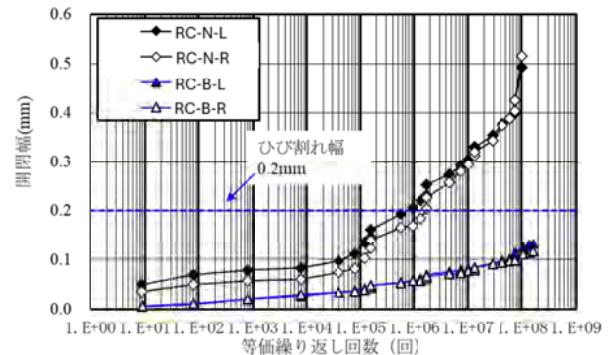


図-9 開閉幅と等価走行回数の関係

(2) 供試体RC-B

接着剤ありの供試体 RC-B の等価走行回数 9 回での開閉幅は L が 0.005mm, R が 0.007mm である。最大等価走行回数 159.850×10^6 回の開閉幅は L が 0.13mm, R が 0.12mm と同等である。接着剤なしの供試体 RC-N と比較して開閉幅が大幅に減少し、目視では確認できない。なお、間詰部中央には、橋軸方向に 0.2mm 以上のひび割れの発生が見られる。

以上より、付着性を高めるためにプレキャスト床版と間詰部界面に接着剤を用いたことにより間詰部の開閉幅が大幅に減少し、耐疲労性が向上する結果となったことから、接着剤の塗布を提案する。

6.4 破壊時の損傷状況

輪荷重走行疲労実験における破壊時の損傷状況と切断面を図-10 に示す。

(1) 供試体RC-1

間詰部なしの供試体 RC-1 の破壊時の床版下面のひび割れ状況は図-10(a)に示す。下面のひび割れは輪荷重設置面から 45 度範囲には主鉄筋方向および配筋方向の 2 方向のひび割れが発生している。特に橋軸直角方向に配置した配筋に沿ったひび割れの発生が著しい。破壊は、切断した A-A 断面に示すように輪荷重の折り返し付近、支点 A から 420mm の位置の輪荷重設置面から 45 度下面のひび割れが顕著となり、押抜きせん断破壊に至った。

(2) 供試体RC-N

間詰部界面に接着剤なしの供試体 RC-N の破壊時の床版下面のひび割れ状況は図-10(b)に示す。供試体下面のひび割れ状況は、継手構造を有する配筋の位置に発生している。間詰部下面には橋軸直角方向の曲げ引張が作用するため、間詰部界面は付着ひび割れによるはく離に伴う 0.2mm 以上のひび割れが発生している。なお、橋軸方向のひび割れの発生は見られない。破壊は支点 A から 600mm の位置で A-A 断面に示すように輪荷重直下から 45 度で分布範囲に及ぼす範囲のひび割れが顕著となり、押抜きせん断破壊に至った。

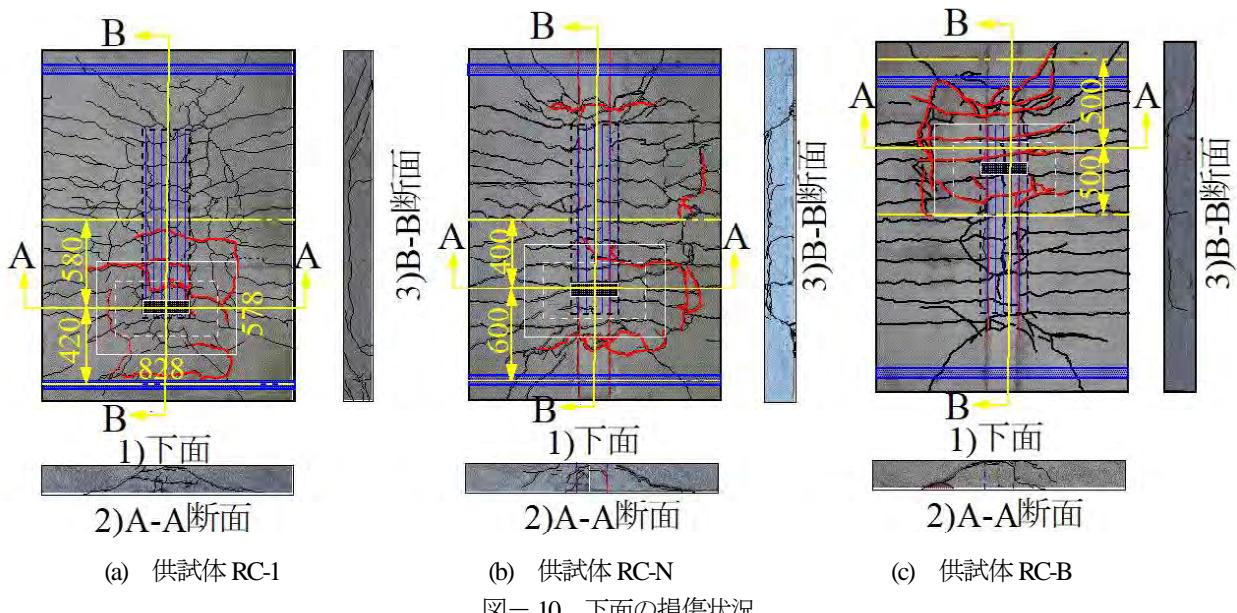


図-10 下面の損傷状況

(3) 供試体RC-B

間詰部界面に接着剤ありの供試体 RC-B の破壊時の床版下面のひび割れ状況は図-10(c)に示す。破壊した支点 B から 500mm の位置の輪荷重設置面から 45 度分布範囲に 2 方向ひび割れが発生している。間詰部左側には主鉄筋に沿った橋軸方向のひび割れが発生している。間詰部界面は接着剤の効果により、0.1mm 程度のひび割れが発生している。破壊は支点 B から 500mm の位置の設置面 45 度の範囲のひび割れが顕著となり押抜きせん断破壊に至った。

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 の結果が得られた。また、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 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 PRC 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の関係においては、間詰部なしの供試体に対して、接着剤ありの供試体は 1.06、となり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) 開閉幅においても接着剤なしの場合は橋梁定期点検要領に示すひび割れ幅 0.2mm 以上となるが、接着剤ありの場合は全て 0.2mm 以下となった。
- (4) 破壊状況は、破壊位置および下面のひび割れ状況より、継手部を有する配力筋のかぶり下面には鉄筋に沿ったひび割れが発生している。破壊位置および切

断面のひび割れ状況から判断すると、全てが押抜きせん断破壊に至った。全供試体ともに継手部の鉄筋の破断は見られない。

- (5) 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、間詰部界面に高耐久性エポキシ樹脂系接着剤を塗布することで一体化が図られ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) 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
- 2) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 川井豊: プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替 RC 床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集土木学会, Vol.68A, pp.711-721, 2022.3
- 3) 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
- 4) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針, 2007
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2017
- 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荷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
- 8) 国土交通省道路局: 道路橋定期点検要領, 2019

(2024年7月12日受付)