

水路幅を支間とするプレキャスト RC 床版の輪荷重走行疲労実験による耐疲労性の評価および接着剤の効果

日大生産 (院) ○重松伸也 日大・名誉教授 阿部忠 日大生産工 澤野利章
日大生産工 野口博之 (株)小野工業所 鈴木健

1. はじめに

本研究は、間詰部を設けない Pc.RC 床版を基準とし、取替 Pc.RC 床版に継手部を有する間詰部の位置が、耐疲労性に及ぼす影響について検証する。また、間詰部界面における付着用接着剤の有無が耐疲労性に及ぼす影響について検証する。耐疲労性の評価において間詰部の位置および接着剤の効果を検証し、用水路および水路上に用いる取替 Pc.RC 床版の実用性を検証する。

2. 円形突起鉄筋を用いた継手構造および継手長

幅員方向の Pc.RC 床版には機械式継手を設ける¹⁾。本供試体に用いる機械式継手には、円形突起付き鉄筋を用いる。その形状・寸法を図-1に示す。本取替 Pc.RC 床版の継手構造となる配力筋には D13 を用いる。D13 を用いた場合の機械式継手長は道示²⁾の規定によると 217mm である。本供試体はモデル化した RC 床版を用いることから間詰部間を 200mm、鉄筋継手長を 170mm³⁾ (道示の 78%)、鉄筋全長を 184mm とした。本供試体の継手構造は図-1(1)に示すように、D13 の場合の突起部はφ 30mm の円形、面積は 580mm² となる。次に、配置状況は図-1(2)に示すように、橋軸方向の主筋の内側、道示²⁾に規定するかぶり 30mm を確保する配置とする。

3. 供試体の使用材料

(1) RC床版

取替 Pc.RC 床版供試体の RC 床版部のコンクリー

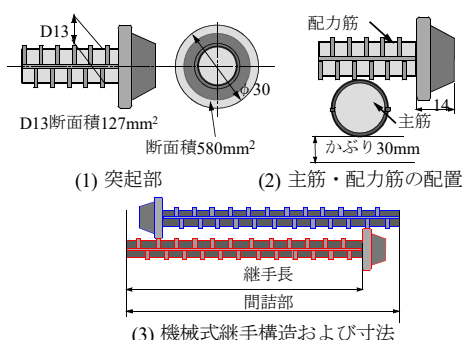


図-1 円形突起付き鉄筋

トには、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 の砕砂を使用し、配合条件を表-1に示す。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。主鉄筋には SD 345, D16 を用いる。ここで、材齢 28 日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に示す。RC 床版の材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度は供試体 Pc.RC-N, Pc.RC-A1, B1 が 56.4N/mm²、接着剤を用いた供試体 Pc.RC-A2, B2 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。

間詰部のコンクリートの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。骨材には最大粗骨材寸法 20mm の砕石、最大細骨材寸法 5mm の砕砂を使用し、配合条件を表-1に示す。また、主鉄筋は RC 床版部と同間隔となるよう D16 を配置する。次に、配力筋は図-1(3)に示すように間詰部幅が 200mm であり、継手長 170mm、全長 184mm で配置する。円形突起鉄筋を継手長 170mm、全長 184mm で配置する。ここで、材齢 28 日の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。間詰部のコンクリートは材齢 28 日でそれぞれ 55.8, 56.3N/mm² である。

(2) 高耐久型エポキシ系接着剤 (付着用接着剤)

筆者ら⁴⁾は橋軸方向に並列する取替 RC 床版の輪荷重走行疲労実験において走行を繰り返すことで間

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		
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	Pc.RC-N, Pc.RC-A1, B1	56.4	主鉄筋	D16	383	531	200
	Pc.RC-A2, B2	57.6	配力筋	D13	365	510	200
間詰部	Pc.RC-N, Pc.RC-A1, B1	55.8	主鉄筋	D16	383	531	200
	Pc.RC-A2, B2	56.3	突起鉄筋	D13	389	576	200

Evaluation of Fatigue Resistance and Adhesive Effects of Replacement Precast RC Slab for Bridge with Space over Water Way by Wheel Load Running Fatigue Tests

Shinya SHIGEMATSU, Tadashi ABE, Hiroyuki NOGUCHI, Toshiaki SAWANO and Ken SUZUKI

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)	5:1		重量比
硬化物比重	1.42N/mm ²		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

詰部界面の付着力低下により、はく離が生じる結果を得た。そこで、間詰部コンクリートとの付着力を高め、界面のはく離を抑制するため、付着用接着剤^{5), 6)}を用いた。その結果、間詰部界面の付着力が向上し、併せて耐疲労性が向上した。よって、本供試体の Pc.RC 床版側面に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。コンクリートとの付着強さは 3.7N/mm² 以上を有している。

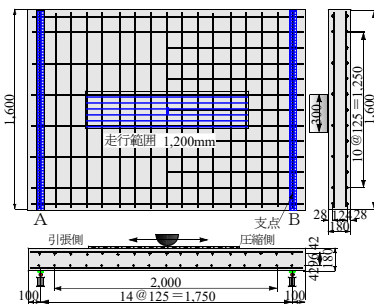
4. 供試体寸法および鉄筋配置

支間 2.0m の RC スラブ橋の床版厚を B 活荷重で設計した場合の最小厚は 250mm である²⁾。また、市販のプレキャスト RC 版も同等な厚さである。

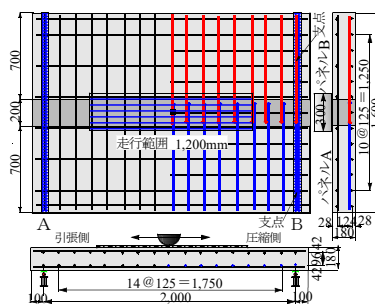
本供試体の床版厚はモデル化した 180mm とすると、道示に規定する床版厚の 72% である。本実験に用いる供試体は、打ち継ぎ目を設けない Pc.RC 床版の輪荷重直下に曲げの影響を考慮した間詰部およびせん断の影響を考慮した間詰部を設けた供試体の 3 タイプとする。各供試体寸法および鉄筋配置を図-2 に示す。

(1) 供試体 Pc.RC-N

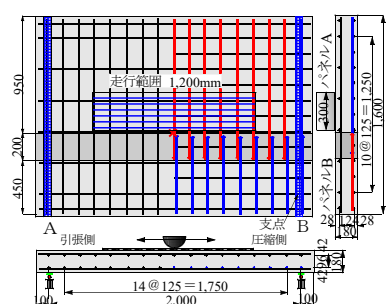
供試体 Pc.RC-N の寸法は図-2(1)に示すように、支間 2,000mm、全長 2,200mm、幅 1,600mm、床版厚 180mm である。引張側主鉄筋には D16 を 125mm 間隔で配置する。圧縮側は 1/2 の鉄筋量とする。次に、配力筋は引張側、圧縮側ともに D13 を 125mm 間隔で配置する。



(1) 供試体 Pc.RC-N



(2) 供試体 Pc.RC-A1, A2



(3) 供試体 Pc.RC-B1, B2

図-2 供試体寸法および鉄筋配置

(2) 供試体 Pc.RC-A1, Pc.RC-A2

供試体 Pc.RC-A1, A2 の寸法は図-2(2)に示すように、外形寸法および鉄筋配置は供試体 Pc.RC-N と同様である。曲げの影響を考慮した幅 200mm の間詰部を設け、輪荷重の作用による間詰部界面の開閉幅を検証する。よって、Pc.RC 床版部のパネル A および B の寸法は支間 2,000mm、幅 700mm とし、接合面には 3mm の凹凸(目荒し)を設けた。間詰部幅は 200mm、全幅は 1,600mm とした。配力筋は、引張側には図-1 に示す D13 の円形突起付き鉄筋を 125mm 間隔で配置し、突起付き鉄筋の継手長 170mm とする。

(3) 供試体 Pc.RC-B1, Pc.RC-B2

供試体 Pc.RC-B1, B2 の寸法は図-2(3)に示すように、外形寸法および鉄筋配置は供試体 Pc.RC-A と同様である。供試体 Pc.RC-B1, Pc.RC-B2 は、せん断の影響を考慮した間詰部を設け、輪荷重が左間詰部界面に作用により、間詰部界面がせん断の影響を受けた場合の開閉幅を検証する。よって、パネル A の幅 950mm、パネル B は 450mm、間詰部を 200mm とし、全長 1,600mm とした。パネル A および B の接合面には 3mm の凹凸、すなわち目荒しを設けた。

5. 輪荷重走行疲労実験および等価走行回数

(1) 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、図-2 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、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、供試体 Pc.RC-A および B の間詰部の位置を図-3 に示す。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 回走行ごとに輪荷重を橋軸方向中央に停止し、間詰部界面の開閉幅、たわみ・鉄筋ひずみを静的に計測する。

(2) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は、等価走行



図-3 輪荷重走行疲労試験の状況

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²⁾に規定する T 荷重 100kN の 72%、すなわち 72kN を安全性を考慮した 85kN にして等価走行回数を算出した。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

(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。

間詰部を設けない供試体 Pc.RC-N の等価走行回数 N_{eq} は式(1)より算出すると 167.834×10^6 回である。この等価走行回数を基準に間詰部界面における接着剤の有無による供試体の耐疲労性を評価する。

曲げの影響を考慮した間詰部を設けた供試体 Pc.RC-A1 の等価走行回数は 101.301×10^6 回であり、供試体 Pc.RC-N の等価走行回数との比は 0.60 である。

間詰部側面に付着用接着剤を塗布した供試体 Pc.RC-A2 の等価走行回数は 159.850×10^6 回であり、供試体 Pc.RC-N の等価走行回数との比は 0.95 であり、ほぼ 5%低下している。また、接着剤を用いない供試体 Pc.RC-A1 の 1.58 倍の等価走行回数である。

一方、せん断の影響を考慮した間詰部を設けた供試体 Pc.RC-B1 は、間詰部側面にせん断作用を及ぼした場合を想定した載荷状態である。等価走行回数は 137.891×10^6 回であり、供試体 Pc.RC-N の等価走行回数との比は 0.82、供試体 Pc.RC-A1 との比は 1.25 である。また、間詰部側面に接着剤を用いた供試体 Pc.RC-B2 の等価走行回数は 169.165×10^6 回であり、間詰部を設けない供試体 Pc.RC-N の等価走行回数の

表-4 等価走行回数および等価走行回数比

供試体名称	等価走行回数 合計(回)	等価走行回数比	
Pc.RC-N	167,834,828	—	
Pc.RC-A1	101,301,766	0.60	A2/A1
Pc.RC-A2	159,850,062	0.95	1.58
Pc.RC-B1	137,891,956	0.82	B2/B1
Pc.RC-B2	169,165,622	1.01	1.23

1.01 倍である。接着剤を用いない供試体 Pc.RC-B1 の 1.23 倍である。

以上のように、供試体 Pc.RC-A1, B1 は間詰部側面の付着力が低く、間詰部なしの供試体の等価走行回数を下回る結果が得られた。一方、供試体 Pc.RC-A2, B2 は接着剤を用いたことで間詰部側面の付着力が向上、併せて耐疲労性の向上が図られた。

(2) 破壊時の損傷状況

輪荷重走行疲労試験における破壊時の損傷状況を図-4に示す。

供試体 Pc.RC-N は図-4(1)に示すように、下面は輪荷重走行位置から 45 度下面の橋軸方向と橋軸方向の 2 方向にひび割れが発生している。とくに、曲げの影響による橋軸直角方向に配置した配力筋に沿ったひび割れの発生が著しい。破壊は、輪荷重の折り返し付近、支点から 420mm の位置で輪荷重設置面から 45 度下面に分布しているが、支点 A 付近のひび割れに起因するせん断破壊である。

供試体 Pc.RC-A1 は図-4(2)に示すように、下面は曲げの影響により配力筋に沿ったひび割れの発生が著しい。なお、主筋方向のひび割れの発生が見られない。また、間詰部界面は付着切れによる離れに伴う 0.2mm 以上のひび割れが発生しているが上面には達していない。破壊は支点から 600mm の位置にあり、輪荷重設置面から 45 度で分布し、曲げ破壊となった。また、供試体 Pc.RC-A2 は図-4(3)に示すように、下面は破壊した支点 B から 500mm の位置、輪荷重設置面から 45 度分布範囲にせん断によるひび割れと曲げによるひび割れが発生している。また、中央付近は配力筋に沿った軸直角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が目視で確認しにくい。破壊は支点から 500mm の位置で曲げ破壊となった。

次に、接着剤を用いた供試体 Pc.RC-B1 は図-4(4)に示すように下面は継手部の左側には主筋および配力筋に沿った 2 方向にひび割れ発生し、継手部の右側には配力筋に沿ったひび割れのみ発生している。間詰部界面は離れに伴う 0.2mm 以上のひび割れが発生しているが上面には達していない。破壊は支点 B から 600mm の位置、せん断スパン比 $a/d = 3.9$ であ

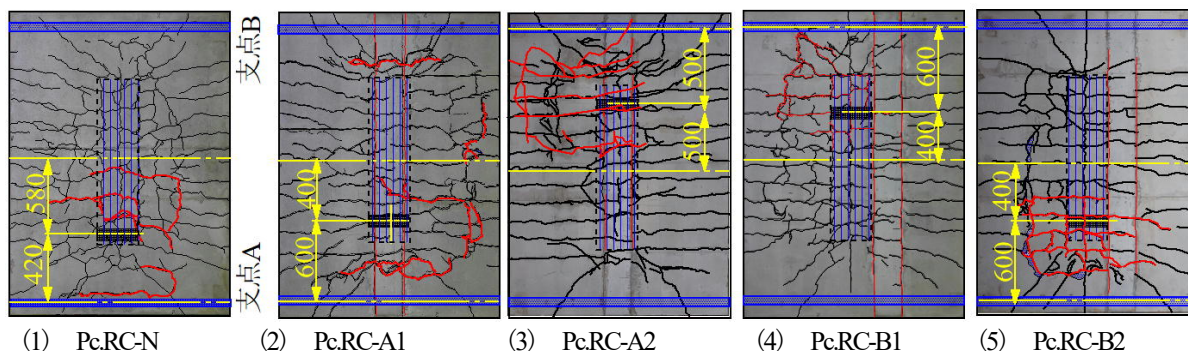


図-4 下面の損傷状況

り、曲げ断破壊となった。また、供試体 Pc.RC-B2 は図-4(5)に示すように、下面はプレキャスト床版部の軸直角方向に配力筋に沿ったひび割れが発生している。間詰部右側の界面は接着剤の効果により 0.1mm 以下のひび割れが発生している。破壊は、支点 A から 600mm、せん断スパン比 $a/d = 3.9$ の位置で、輪荷重から 45 度下方に分布したひび割れによる曲げ破壊となった。

接着剤なしの供試体 2 体はともに上面にはひび割れの発生が見られない。接着剤を塗布した供試体は 2 体ともに荷重 170kN でそれぞれ 12,800, 14,200 回走行し、等価走行回数は接着剤を塗布しない供試体の 1.58, 1.23 倍であることから、上面の走行面にも損傷がみられる。また、接着剤により間詰部界面は破壊荷重付近まで接着されていたと考えられる。なお、間詰部中央には 0.2mm 以上のひび割れが軸方向に発生している。よって、間詰部側面に接着剤を塗布することで、等価走行回数、すなわち耐疲労性が向上する結果が得られた。よって、実橋の設置においては付着用接着剤を用いることを提案する。また、せん断スパン比 $a/d = 2.5$ 付近はせん断の影響を考慮した設計が必要であると考えられる。

7. まとめ

(1) 等価走行回数において、継手部を設けない供試体に対して、円形突起付き継手および曲げの影響を考慮した間詰部を設けた供試体は 40%低下した。また、せん断の影響を考慮した間詰部を設けた供試体は 18%低下した。次に、間詰部界面に接着剤を用いた供試体の等価走行回数は、継手部を設けない供試体に対して曲げの影響を考慮した間詰部を設けた供試体は 5%低下、せん断の影響を考慮した間詰部を設けた供試体は同等の等価走行回数が得られた。よって、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耐疲労性が向上する結果が得られた。よって、取替 Pc.RC 床版は耐疲労性が評価できることから実用的である結果が得

られた。

(2) 破壊時のひび割れ状況においては、間詰部を設けない供試体はせん断スパン比 $a/d = 2.7$ でせん断破壊、曲げの影響を考慮して間詰部を設けた供試体はせん断スパン比 $a/d = 3.9$ 、せん断の影響を考慮して間詰部を設けた供試体はせん断スパン比 $a/d = 3.9$ で曲げ破壊となった。接着剤を用いた供試体もそれぞれせん断スパン比 $a/d = 3.2, 3.9$ で曲げ破壊となった。よって、せん断スパン比 $a/d = 2.5$ 付近まではせん断力の影響を考慮して設計する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋定着・継手指針，2007
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III，2017
- 3) 鈴木健，重松伸也，阿部忠，野口博之，師橋憲貴：円形突起付き異形鉄筋の引き抜き試験による耐荷力，土木学会第 78 回年次学術講演会，2023，I-251
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Tadashi Abe, Kiyoshi Ito, Noriyuki Kozakai and Takayoshi Kodama：Proposition of Thin-Layer Repairing Methods Using Low-Elasticity Polymer Portland Cement Materials and Glue and Study on the Fatigue Resistance of Reinforced Concrete Slab，International Journal of Polymer Science，Volume 2018，Article ID 6545097，pp.1-8,2018.10
- 7) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007