

特殊鉄筋を用いたRCプレキャスト床版の耐疲労性の検証に関する実験研究

小野工業所(株) ○高橋明彦 日大生産工 阿部忠 小野工業所(株) 小野晃良
岩手大・理工 大西弘志 東北大・工 久田真

1. はじめに

地方公共団体が管理する道路橋 RC 床版は、建設後 50 年が経過し、老朽化した床版が多く、建設地域の環境条件によっては老朽化が著しい。よって、RC 床版の補修・補強や取替床版も含めた技術開発が課題となっている。そこで本研究は、地方公共団体が管理する道路橋 RC 床版の取替を対象としたプレキャスト化した取替 RC 床版を提案する。取替 RC 床版の特徴は、継手部の鉄筋端部に突起を設けた特殊鉄筋を用いた継手構造とし、間詰部を設けた取替 RC 床版である。この取替 RC 床版試験体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し、等価走行回数から耐疲労性を評価し、地方公共団体が管理する取替道路橋床版への実用性を評価する。

2. 既往の取替床版および本提案する取替床版

2.1 既往の取替床版構造

老朽化した RC 床版に対する取替床版は、各企業や研究機関で研究・開発が進められ、新構造の取替床版が提案されている。例えば、主筋方向に PC を配置し、配力筋方向を鉄筋とし、橋桁上に並列した後、間詰部にコンクリートを打ち込み、一体化している。間詰部の鉄筋配置をループ継手構造¹⁾とし、配力筋の先端にネジを設けて付着性を高めた合理化継手構造²⁾とした取替床版などが提案されている。ループ継手を用いた取替床版の間詰間隔は 330mm、合理化継手を用いたは 280mm である。一方、PC 構造としたプレキャスト版を並列する方法として、左右の床版にコンクリート接合キーを有した縦目地部を接着剤で接合し、ポストテンション方式により、一体化する取替 PC 床版も提案され実橋で採用されている³⁾。これらの取替床版の特徴としては、間詰部の構造が特徴であり、いずれも耐疲労性が評価され、高速道路等で採用されている。

2.2 本提案する取替RC床版構造

本提案する取替 RC 床版は、地方公共団体が管理する道路橋を対象とした床版であり、従来の取替 PC 床版工法と同様にプレキャスト版を工場で作製し、現地で橋軸方向に並列しながら一体化するものである。橋軸方向に並列することで間詰部が生じることから、付着力を高めるための継手構造が必要となる。ここで、本提案する継手部の構造を図-1に示す。

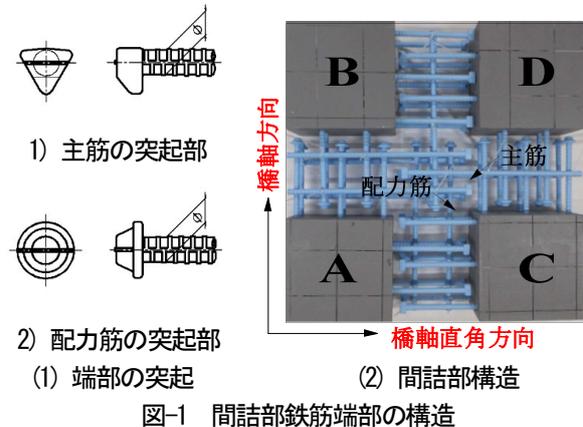


図-1(1), 1)に示すように、主筋の突起形状を三角形とした。これは主筋のかぶりを確保するために三角形形状とし、継手においては鉄筋の面と同一の高さとする。また、三角形の頂点を内側にすることで、かぶりが確保される構造である(図-1(2))。次に、配力筋方向は図-1(1), 2)に示すように、突起形状を円形とした。配力筋は主筋の内側に配置されることから円形とした場合においてもかぶりが十分確保される構造である(図-1(2))。なお、本実験では継手長を 280mm としたが、継手長 280mm の 75% (210mm) および 50% (140mm) で引き抜き試験を行った結果、鉄筋側で破断する結果が得られている^{4), 5)}。また、両突起構造は継手長 140mm 以上で付着力は十分確保される結果が得られている^{4), 5)}。

以上のように、軸方向および軸直角方向の鉄筋端部に突起を設け、間詰部の付着性が確保できる継手構造であると考えられる。

3. 供試体の使用材料および寸法

3.1 使用材料

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体のコンクリートには、普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 20mm の砕石を使用した。本供試体は、コンクリートの設計基準強度 24N/mm² を目標とした配合条件とする。また、取替床版の要求性能は圧縮強度 40N/mm² を目標とした配合であることから、取替床版と同等な条件とするために、圧縮強度を 40N/mm² とした RC 床版供試体を製作する。よって、圧縮強度 24N/mm² で

Experimental Study on Verification of Fatigue Durability of PCa Slab Using Special Rebar

Akihiko TAKAHASHI, Tadashi ABE, Kousuke ONO, Hiroshi ONISHI and Makoto HISADA

表-1 RC床版および取替床版コンクリートの配合条件

供試体名称	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	
				セメント	水	細骨材	粗骨材			
RC-A	10±2.5	54.0	47.1	341(普)	184	804	948	3.4	0.003	
RC-B	10±2.5	35.0	43.2	443(普)	155	732	968	3.1	0.004	
取替床版	床版部	12±2.5	35.0	43.2	443(普)	155	732	968	3.1	0.004
	打継部	8±2.5	32.9	40	450(超)	148	710	1157	9.0	0.004

表-2 材料特性値

供試体名称	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC-A	30.3	D13	355	498	200
RC-B	49.6	D13	355	498	200
取替床版	床版部	D13	366	539	200
	打継部				

配合した供試体を RC-A、圧縮強度 40N/mm² で配合した供試体を RC-B とし、2 タイプを製作する。次に、供試体の鉄筋には SD 345、D13 を配置した。ここで、本実験に用いる RC 床版コンクリートの配合条件を表-1、圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2に示す。表-2より、材齢 28 日の供試体 RC-A の圧縮強度は 30.3N/mm²、供試体 RC-B の圧縮強度は 49.6N/mm² である。

(2) 取替RC床版供試体 取替 RC 床版供試体のプレキャスト部のコンクリートには、RC 床版と同様に普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 20mm の砕石を使用した。コンクリートの圧縮強度は、積雪寒冷地域の土砂化を考慮すると圧縮強度を高くすることで、耐疲労性が向上する結果を得ていることから、本供試体の要求性能として圧縮強度 40N/mm² を目標とする配合条件とした。

次に、間詰部のコンクリートには、施工時に早期の解放を望むことから、超速硬セメントに 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 20mm の砕石を使用した。間詰部コンクリートの要求性能を 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm² 以上、材齢 14 日で 40N/mm² 以上確保できる配合とした。この配合による取替床版コンクリートおよび間詰コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2に併記した。表-2より、材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度は 56.4N/mm² であり、RC 床版供試体 RC-B コンクリートの圧縮強度の 1.14 倍である。また、打継目用コンクリートは、早期解放を目標とすることから超速硬セメントを用いたコンクリート材である。よって、超速硬セメントを用いた間詰コンクリートは、材齢 3 時間で 34.9N/mm²、材齢 14 日で 48.3N/mm² である。よって、打設 3 時間後に強度が確保されることから、施工の省力化が図られる。

3.2 供試体寸法および鉄筋配置

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体および取替床版

供試体の寸法は道示に準拠し、その 3/5 モデルとする。ここで、RC 床版供試体の寸法を図-2(1)に示す。RC 床版供試体の寸法は全長 2,200mm、幅 1,600mm、床版厚 150mm とする。なお、軸方向の支間 2,000mm、軸直角方向は 1,400mm とする。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。

(2) 取替RC床版供試体 取替 RC 床版供試体 (図-2(2)) の全長は RC 床版と同様に 2,200mm、幅 1,600mm、床版厚は 150mm とし、支間は軸方向が 2,000mm、軸直角方向が 1,400mm とする。鉄筋配置も RC 床版供試体と同様であり、D13 を 120mm 間隔で配置する。間詰間隔は床版中央に幅 300mm とする。これは、打継ぎ部界面の付着状況を検証するために、輪荷重幅と同じ間隔とした。間詰部の主鉄筋は D13 を上下に 3 本配置した。

3.3 取替RC床版の施工手順

取替 RC 床版の施工手順を図-3に示す。先に RC 床版部 A、B のプレキャスト版を製作する。これを、橋桁上に設置する (図-3(1))。本供試体の製作においては、工場内でクレーンによる設置を行い、型枠上に設置する時間は 15 分程度である。

プレキャスト版 A および B を設置後の間詰部の配筋状況を図-3(2)に示す。次に、実橋での施工を考慮して間詰コンクリートをジェットモビル車で練り混ぜし、直ちに間詰部に打ち込む。締固め後、表面をこて仕上げし、養生する (図-3(3))。

4. 実験方法および等価走行回数

4.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、RC 床版供試体および取替 RC 床版供試体ともに幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を繰り返し走行させる実験である。また、輪荷重走行疲労実験における初期荷重は 100kN から走行を開始し、40,000 回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加する段階荷重載荷とする。140kN で 40,000 回走行後は荷重 150kN に増大する。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 回走行ごとにたわみを計測した。

4.2 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、等価走行回数 N_{eq} を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回

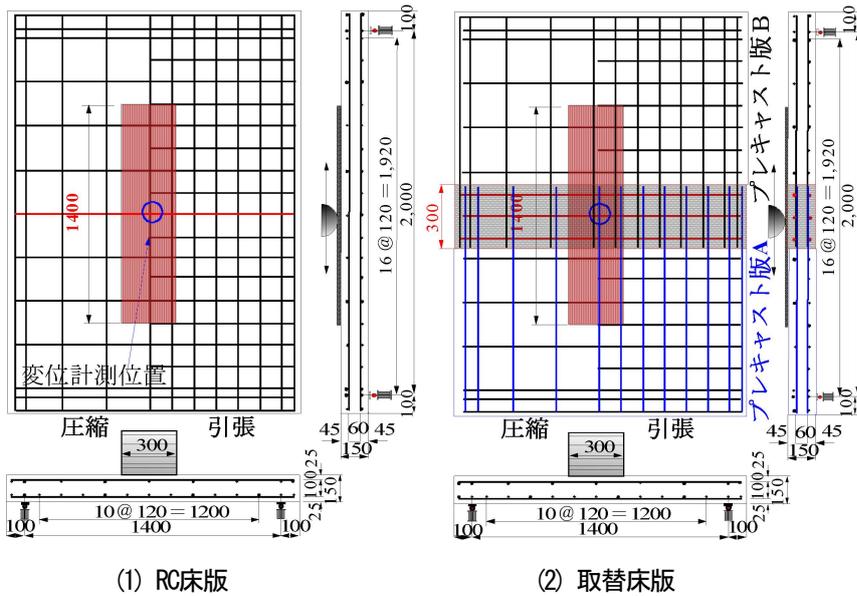


図-2 RC床版および取替床版供試体の寸法および鉄筋配置

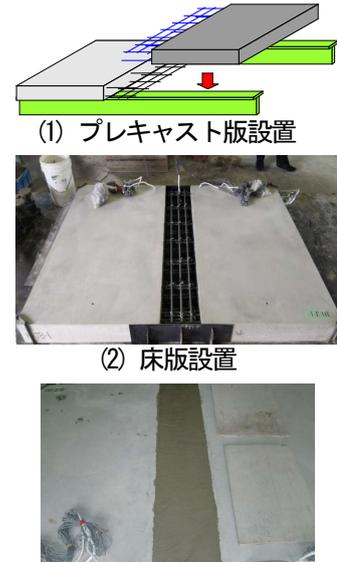


図-3 取替床版製作方法

表-3 実験・等価走行回数および等価走行回数比

供試体	実験走行回数および等価走行回数				合計走行回数	等価走行回数比	
	荷重	100kN	120kN	140kN			
RC-A	実験走行回数	40000	14000		54,000	—	0.54
	等価走行回数	2,593,806	919,617		11,789,979		
RC-B	実験走行回数	40000	29500		69,500	1.86	—
	等価走行回数	2,593,806	19,377,651		21,971,457		
取替床版	実験走行回数	40000	40000	40000	4501	22.50	12.07
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	50,297,372		

数の算定式は式(1)として与えられる。なお、式(1)における基準荷重 P は設計活荷重の $3/5$ に安全率 1.2 を考慮した 72kN として等価走行回数を算出する。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 12.7 を適用する⁶⁾。

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

ただし、 P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 (= 72kN), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数

5. 結果および考察

5.1 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{eq} および RC 床版供試体の等価走行回数比を表-3に示す。

(1) RC床版 コンクリートの圧縮強度が 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A の実験走行回数は $54,000$ 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 11.789×10^6 回である。これに対してコンクリートの圧縮強度の平均が 49.6N/mm^2 の供試体 RC-B の実験走行回数は $69,500$ 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 21.971×10^6 回であり、圧縮強度 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A の 1.86 倍となる。よって、圧縮強度を高くすることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。この 2 タイプの RC 床版供試体の等価走行回数を基準に取替 RC 床版

の耐疲労性を検証する。

(2) 取替RC床版 取替 RC 床版供試体のプレキャスト版コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度の平均は 56.4N/mm^2 、間詰コンクリートの材齢 14 日の圧縮強度の平均は 48.3N/mm^2 である。この供試体の実験走行回数は $124,501$ 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 265.273×10^6 回である。圧縮強度 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A の等価走行回数に対して、 22.5 倍となり、本提案する取替床版は本実験結果より大幅に耐疲労性の向上が図られる結果となった。また、圧縮強度が 49.6N/mm^2 の供試体 RC-B の等価走行回数と比較すると 12.07 倍となる結果が得られた。本実験供試体の間詰間隔は 300mm 、鉄筋の付着長さ 280mm であり、間詰部はプレキャスト部の 2 倍の鉄筋量が配置され、鉄筋の端部に突起を設け、コンクリートには超速硬セメントを用いていることから間詰部が強化され、本提案する取替 RC 床版の等価走行回数が向上したものと考えられる。よって、間詰部は弱点とならず取替 RC 床版全体の等価走行回数が向上する結果となった。

5.2 たわみと等価走行回数

たわみと等価走行回数の関係を図-4に示す。なお、図-4には維持管理の目安である床版中央のたわみが、床版支間 L の $1/400$ 、すなわち 3.5mm のたわみも図-4に併記した。

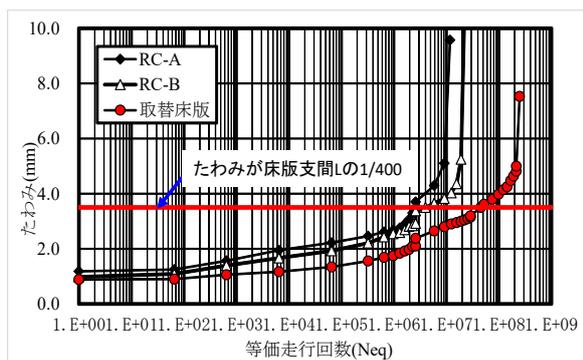


図-4 たわみと等価走行回数

(1) RC床版 コンクリートの圧縮強度が 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A の荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期たわみは 1.18mm である。その後の走行によりたわみが徐々に増加し、 $40,000$ 回走行後（等価走行回数 2.593×10^6 回）で 3.41mm である。たわみが床版支間 L の $1/400$ 、すなわち 3.5mm に達した時点の等価走行回数は 2.594×10^6 回である。荷重 120kN に上げ、1 走行後のたわみは 3.7mm である。その後の走行においてもたわみの増加が著しくなり、荷重 120kN で実験走行回数 $14,000$ 回走行（等価走行回数 11.789×10^6 回）のたわみは 9.6mm となり、破壊に至った。

一方、コンクリートの圧縮強度が 49.6N/mm^2 の供試体 RC-B の荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 1.09mm であり、供試体 RC-A のたわみを下回っている。 $40,000$ 回走行後のたわみは 2.9mm 、荷重 120kN に増加し、1 走行後のたわみは 3.38mm である。この時点で供試体 RC-A のたわみの 91% である。たわみが 3.5mm に達した時点の等価走行回数は 4.008×10^6 回であり、供試体 RC-A の等価走行回数の 1.5 倍である。この付近からたわみの増加がやや大きくなっている。等価走行回数 2.1971×10^6 回の最大たわみが 10.5mm である。よって、要求性能であるコンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 を目標とした配合により、耐久性が大幅に向上する結果が得られた。

(2) 取替RC床版 取替 RC 床版供試体のコンクリートの圧縮強度は供試体 RC-B と同様の配合であるが、材齢 28 日の圧縮強度は 56.4N/mm^2 である。間詰部は超硬セメントを用いて材齢 14 日で 48.3N/mm^2 であり、供試体 RC-B の圧縮強度と近似している。取替床版供試体は、荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 0.89mm である。荷重 100kN で $40,000$ 回走行後のたわみは 2.1mm 、荷重 120kN に増加し、 $40,000$ 回走行（等価走行回数 28.868×10^6 回）後のたわみは 3.15mm である。たわみの計測位置は間詰部の中央であることから、鉄筋が左右のプレキャスト版から定着長 280mm が重ね継手となることから曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制されている。たわみが 3.5mm に達した時点の荷重は

140kN 、等価走行回数は 45.100×10^6 回であり、供試体 RC-B の等価走行回数の 11.3 倍である。その後のこの付近からたわみの増加がやや大きくなっている。その後の走行においてもたわみは僅かに上昇している。等価走行回数 2.65273×10^6 回の最大たわみが 7.55mm である。

以上より、間詰部においては鉄筋の配置量も多く、鉄筋端部に円形の突起を設けたことから付着力も向上し、耐久性が大幅に向上する結果が得られた。よって、本提案する取替床版構造の間詰部は曲げ剛性が向上することから、弱点とならず、耐疲労性が向上することから、実用的な床版構造と言える。

6. まとめ

近年、RC 床版の老朽化や設計基準の変遷に伴い、現行示方書の規定を満足したプレキャスト床版へと取替されている。そこで、鉄筋端部に突起を設けた継手部を有する取替 RC 床版を提案し、耐疲労性の検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 輪荷重走行疲労実験における取替床版の等価走行回数は、同一条件で配合したコンクリートで製作した RC 床版供試体 RC-B に対して、 11.3 倍の等価走行回数となり、間詰部が弱点とならず耐疲労性が向上する結果が得られた。
- (2) RC 床版および取替床版の軸方向の支間中央のたわみと等価走行回数においては、取替 RC 床版の間詰部は鉄筋の付着を考慮し、 280mm の継手長とし、先端部に突起を設けたことから、間詰部の剛性が高まり、輪荷重走行によるたわみの増加が抑制され耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

参考文献

- 1) 大柳修一，大林敦裕：既設床版の半断面床版取替工法の開発（輪荷重疲労載荷試験），ピーエス三菱技報，第 13 号，2015
- 2) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.11
- 3) 水野浩，松井繁之，大西弘志，杉山俊幸，街道浩：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1111，2012.3
- 4) 小野晃良，高橋明彦，類家慧史，大西弘志，久田真：特殊頭部鉄筋を有した鉄筋継手の引き抜き性状について，土木学会第 73 回年次学術講演会，CS8-025，pp.49-50，2018.8
- 5) 高橋明彦，小野晃良，類家慧史，大西弘志，久田真：特殊頭部形状を有した鉄筋継手の偏心配置時引き抜き性状について，土木学会第 73 回年次学術講演会，CS8-026，pp.51-52，2018.8
- 6) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10