

プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替 RC 床版の たわみ振幅が耐疲労性に及ぼす影響

日大生産工(院) ○重松伸也, 日大名誉教授 阿部忠
日大生産工(院) 小野晃良, 日大生産工 水口和彦

1. はじめに

本研究は、取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部界面は輪荷重の走行により、はく離に伴うひび割れの発生が懸念される。そこで、プレキャスト床版界面に高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤）を塗布し、超速硬コンクリートを打ち込みした取替 RC 床版供試体（接着剤「あり」）を製作する。また、接着剤「なし」の供試体も製作し、両供試体ともに輪荷重走行疲労実験を行い接着剤「あり」、「なし」における耐疲労性の検証を行う。また、構造特性とした輪荷重走行疲労実験の過程でたわみを動的に計測し、たわみ振幅が耐疲労性に及ぼす影響についても検証する。

2. 取替RC床版の継手構造¹⁾

本実験に用いる取替 RC 床版の継手構造を図-1に示す。一般的に取替 RC 床版の継手は、橋軸方向の配力筋が継手となる。そこで、橋軸方向の配力筋の継手構造は図-1(a)に示すように、付着力を高めるために円形の突起を設けた。本取替 RC 床版供試体の配力筋には D13 の鉄筋を用いることから端部に $\phi 30\text{mm}$ の円形の突起 (断面積 707mm^2) を設ける。また、橋軸直角方向の主筋の突起形状は三角形とし、三角形底辺側がかぶりとなる。鉄筋配置においては、図-1(b)に示すように橋軸直角方向が主筋となり、配力筋は橋軸方向で主筋の内側に配置されることから突起はかぶりに影響を与えない構造である。継手長は図-1(c)に示すように 280mm とし、間詰部幅は 300mm である。なお、本論文では主筋方向の継手構造は設けないこととする。

3. 供試体寸法および使用材料

(1) 供試体寸法および鉄筋配置

取替 RC 床版供試体は、1994 年改定以降の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）²⁾ 準拠し、その 3/5 モデルとする。ここで、供試体寸法を図-2に示す。

輪荷重走行疲労実験に用いる取替 RC 床版供試

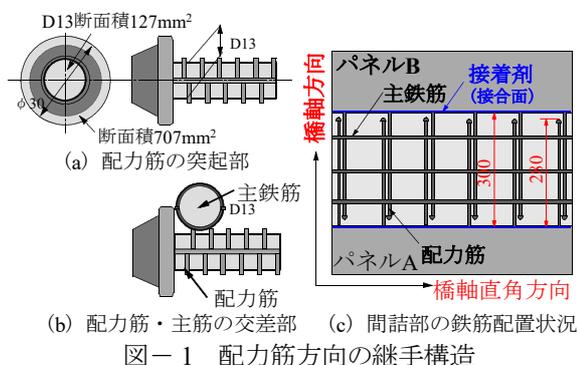


図-1 配力筋方向の継手構造

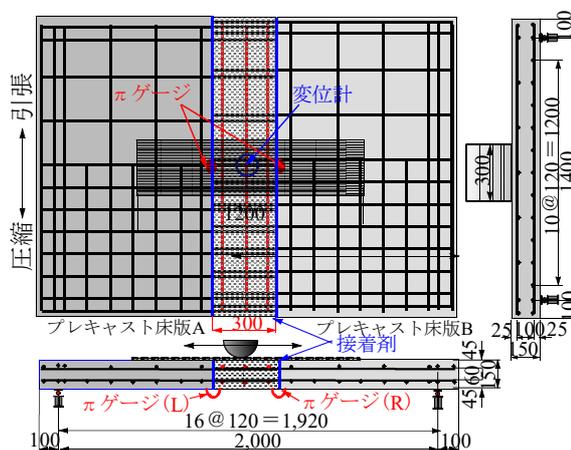


図-2 取替 RC 床版供試体寸法および鉄筋配置

体寸法は図-2に示すように、床版支間方向 $1,600\text{mm}$ 、軸方向 $2,200\text{mm}$ 、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は $1,400\text{mm}$ である。引張側の主鉄筋および配力筋には D13 を 120mm 間隔で配置し、圧縮側には引張鉄筋量の $1/2$ を配置する。

プレキャスト床版側面には 5mm 程度の凹凸、すなわち目荒しを設け、直接超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体（以下、接着剤なしとする）および側面の凹凸面に接着剤を塗布し、超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体（以下、接着剤ありとする）を 2 体製作する。輪荷重走行疲労実験における接着剤なし、ありの供試体名称をそれぞれ取替 RC-F-N、取替 RC-F-A とする。

Influence of deflection amplitude of protruding joint installed
replacement RC deck slab on fatigue durability

by

Shinya SHIGEMATSU, Tadashi ABE, Kousuke ONO and Kazuhiko MINAKUCHI

表－1 コンクリートの配合条件

取替RC床版	スランブ(cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	34.0	46.0	471	160	763	901	5.2	0.004
間詰部	8±2.5	34.0	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

W：水，C：セメント，S：砕砂，G：砕石

表－2 材料特使値

取替RC床版	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)
床版部	60.3	D13	366	539	200
間詰部	61.7				

表－3 付着用接着剤の性能

項目	接着剤	備考
外観	主剤	白色ペースト状
	硬化剤	青色液状
混合比(主剤：硬化剤)	5：1	異物混入なし
硬化物比重	1.42±0.2	重量比
圧縮強さ	102N/mm ²	JIS K 7112
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

(2) 使用材料

1) プレキャストRC床版

プレキャスト RC 床版部のコンクリート材料には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－1 に示す。コンクリートの要求性能は、圧縮強度 40N/mm² を目標とする。鉄筋には SD345，D13 を用いる。ここで、プレキャスト RC 床版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。

2) 間詰部コンクリート

間詰部コンクリートの要求性能は、材齢 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 以上発現し、材齢 14 日で 40N/mm² 以上発現する配合とする。よって、コンクリートは超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－1 に併記した。また、間詰部の鉄筋には、プレキャスト床版部と同様に SD345，D13 を配置する。ここで、材齢 28 日の間詰部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 に併記する。なお、間詰部コンクリートの発現強度は、材齢 3 時間で 34.9N/mm² である。

3) 付着用接着剤

付着用の接着剤は RC 床版および鋼床版のコンクリート増厚補強法において、打継ぎコンクリートとの付着性を向上させるために開発された接着剤である³⁾。そこでプレキャスト床版側面に接着剤

を塗布して界面の付着性能を高めることとする。ここで、接着剤の性能試験の結果を表－3 に示す。表－3 より、コンクリートとの付着強さは 3.7N/mm² 以上である。

4. 輪荷重走行疲労実験方法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、取替 RC 床版供試体の上面に幅 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。なお、床版上面には幅 300mm，厚さ 4.5mm の鋼板を設置する。ここで、輪荷重走行疲労実験における荷重と走行回数の関係を表－4 に示す。荷重は表－4 に示すように初期荷重 100kN で 20,000 回走行し、各計測は 1，10，100，1,000 回，5,000 回，以降は 5,000 回走行ごとに行う。次に、荷重 120kN，140kN，150kN でそれぞれ 20,000 回走行し、計測は 1 回走行，その後は 5,000 回走行ごとに行う。最後に荷重 160kN では、破壊するまで走行と計測を行う。また、各荷重段階において走行回数 1 回，その後は 10,000 回走行ごとに行う。走行範囲を一往復させ、その際の開閉幅およびたわみを動的に計測する。

(2) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験は段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験であり、耐疲労性の評価はマイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。式(1)は、実験載荷荷重 P_i を基準荷重 P で除した値に S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m 乗に実験走行回数 n_i を乗じることにより破壊までの等価走行回数が算定される。基準荷重 P は、本取替 RC 床版は 3/5 モデルとしたことから、道示に規定する B 活荷重 100kN の 3/5 に安全率 1.2 を考慮し、72kN とする⁴⁾。また、S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7$ を適用する⁴⁾。

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

ここに、 N_{eq} ：等価走行回数 (回)， P_i ：載荷荷重 (kN)， P ：基準荷重 (kN)， n_i ：実験走行回数 (回)， m ：S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.7)

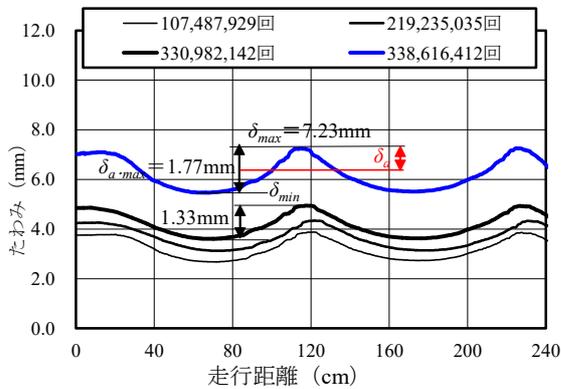
5. 輪荷重走行疲労実験による結果および考察

(1) 等価走行回数

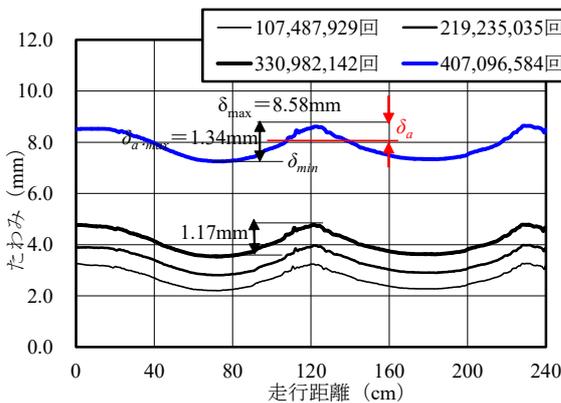
輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{eq} および等価走行回数比 (=取替 RC-F-A/取替 RC-F-N) を表－4 に示す。間詰部にコンクリートを直接打ち込んだ供試体取替 RC-F-N の式(1)より算出した等価走行回数の最大(以下、破壊等価走行回数とする)は、 338.616×10^6 回である。次に、プレキャスト RC 床版の橋軸方向側面に 5mm の凹凸と側面に接着剤 (表－3) を用いた取替 RC-F-A の破壊

表-4 実験走行回数および等価走行回数

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	150kN	160kN		
取替RC-F-N	実験走行回数	20000	20000	20000	20000	301	80,301	—
	等価走行回数	1,296,903	13,137,391	93,053,635	223,494,212	7,634,271	338,616,413	
取替RC-F-A	実験走行回数	20000	20000	20000	20000	3001	83,001	1.20
	等価走行回数	1,296,903	13,137,391	93,053,635	223,494,212	76,114,442	407,096,584	



(1) 接着剤なし (取替 RC-F-N)



(2) 接着剤あり (取替 RC-F-A)

図-3 たわみと走行距離の関係

等価走行回数は 407.097×10^6 回であり、等価走行回数を比較すると 1.20 倍である。これは接着剤を塗布することで引張強度およびせん断強度が向上し、はく離に伴うひび割れの発生が抑制され耐疲労性が向上したものと考えられる。

(2) たわみと走行距離およびたわみ振幅と等価走行回数の関係

1) たわみと走行距離の関係

輪荷重走行疲労実験によるたわみと走行距離の関係は、1 走行 240cm を動的に計測し、その結果を図-3 に示す。

取替 RC-F-N は、図-3(1)に示すように走行距離 120cm の等価走行回数 107.487×10^6 回での最大たわみ 3.875mm、たわみの変動範囲（最大たわみと最小たわみの差、以下、たわみ範囲とする）は等価走行回数 330.982×10^6 回ではたわみ範囲 1.33mm である。等価走行回数 338.616×10^6 回では、最大た

わみ 7.23mm である。

取替 RC-F-A は、図-3(2)に示すように等価走行回数 107.487×10^6 回での最大たわみ 3.213mm、等価走行回数 330.982×10^6 回ではたわみ範囲が 1.17mm である。等価走行回数 407.338×10^6 回では、最大たわみ 8.58mm である。

接着剤なしとありのたわみ範囲を比較すると、接着剤なしの供試体のたわみ範囲が接着剤ありの供試体より大きくなっていることが分かる。

床版のたわみは、主として活荷重たわみと残留たわみの和から成る。残留たわみは、コンクリートのひび割れの伸展に伴い生じる不可逆性のもので、活荷重たわみはその時点の床版剛性（曲げ剛性およびせん断剛性）を反映した可逆性のものである。輪荷重走行疲労実験におけるたわみ範囲は、実橋における活荷重たわみを表した図-3 から、1 走行における床版中央のたわみの最大値と最小値の差、すなわちたわみ範囲が荷重増加とともに増大している。

前述したように、実験におけるたわみ範囲は実橋での活荷重たわみに相当するものである。活荷重たわみの変化と疲労損傷との関係は多くの既往の研究^{5)~7)}においても検討されている。松井⁵⁾、⁶⁾ は、活荷重たわみと引張側コンクリート無視の理論たわみ（主鉄筋・配力鉄筋の断面積、有効高を考慮した直交異方性板理論値）と比較することにより、輪荷重走行載荷では活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した直交異方性板理論値に到達するまで増加し、これを越えた後に増加傾向が顕著になり間もなく破壊に至ることを基に、活荷重たわみが引張無視時の計算たわみに到達した時点を使用限界としている。

2) たわみと等価走行回数の関係

図-3 における走行距離 120cm の位置のたわみと等価走行回数の関係を図-4 に示す。

取替 RC-F-N と取替 RC-F-A のたわみを比較すると接着剤を用いることで、間詰部界面のひび割れの発生が抑制され、全体的なたわみの増加が抑制された。

3) たわみ振幅と等価走行回数の関係

コンクリートの引張側無視の断面に達しても活荷重たわみが増加するのは、走行荷重の繰返しによって断面に作用するせん断力、ねじりモーメン

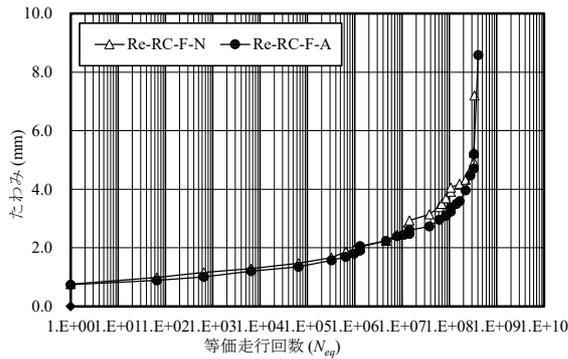


図-4 たわみと等価走行回数との関係

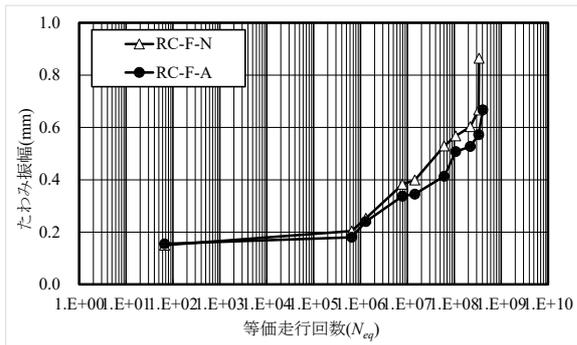


図-5 たわみ振幅と等価走行回数との関係

トが常に交番することか、曲げ引張りひびわれ面の磨耗が生じ、ひび割れが下面から上面方向へ進展することから、せん断剛性と曲げ剛性とにも徐々に低下していくためと考えられている。

そこで、図-3に示すたわみと走行距離の関係において δ_a をたわみ振幅 (たわみ範囲の1/2) と定義し、たわみ振幅は式(2)で表される。

$$\delta_a = (\delta_{max} - \delta_{min}) / 2 \quad (2)$$

ここで、 δ_a : たわみ振幅 (mm), δ_{max} : 1 走行時の最大たわみ (mm), δ_{min} : 1 走行時の最小たわみ (mm)

輪荷重走行疲労実験における取替 RC-F-N のたわみ輪荷重走行疲労実験における取替 RC-F-N のたわみ振幅は、図-5に示すように、等価走行回数の増加に従い、増加している。等価走行回数 65 回のたわみ振幅は 0.150mm, 破壊等価走行回数 338.616×10^6 回で 0.865mm である。一方、取替 RC-R-A の等価走行回数 65 回のたわみ振幅は 0.155mm である。破壊等価走行回数 407.096×10^6 回で 0.668 であり、接着剤なしの供試体のたわみ振幅を下回っている。

輪荷重走行疲労実験によるたわみ振幅と走行回数との関係を示した図-5 から、接着剤なしの供試体と比較して接着剤ありの供試体は平均 13%たわ

み振幅が低下しており継手部の耐久性能の違いが明瞭に表れていることが分かる。このことから、接着剤ありの供試体の等価走行回数が接着剤なしの供試体の 1.20 倍の向上に繋がったものとする。

この実験結果は、1 継手あたりの供試体寸法が実際の床版より小さいために生じた可能性もあるが、たわみの計測間隔を小さくするなどの工夫をすれば、たわみ振幅の変化から継手部の疲労損傷の発生や進展の状態を推定できる可能性があることが分かる。

6. まとめ

- (1) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数は、接着剤なしの供試体に対して接着剤ありの供試体は 1.20 倍の等価走行回数を得られた。これは接着剤を塗布することで引張強度およびせん断強度が高く、付着力が向上したためと考えられる。
- (2) 接着剤なしは、輪荷重走行疲労実験におけるたわみと走行距離の関係から得たたわみ振幅も大きく、剛性の低下が等価走行回数の増加とともに増加している。一方、接着剤ありの供試体は間詰部の振幅も小さく、ほぼ一定の挙動を示している。また、たわみ振幅においても接着剤なしの供試体に対して 13%ほど下回っていることから耐疲労性の向上が図られたと考える。

参考文献

- 1) 小野晃良, 阿部忠, 高橋明彦, 武田秀人 : 2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実橋における施工技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1309-1314, 2020.
- 2) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, 1994.
- 3) 阿部忠, 伊藤清志, 児玉孝喜, 小堺規行, 深川克彦 : 接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.650-661, 2020.
- 4) 松井繁之 : 道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 5) 松井繁之 : 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984.
- 6) 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.
- 7) 横山広, 長屋優子, 関口幹夫, 堀川都志雄 : 自走式試験機による道路橋床版の使用限界の評価, 第 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.49-54, 2004.