

論文

既設RC床版のひびわれ進行パターンと疲労耐久性に関する研究

石尾真理*, 宮原史**, 水口知樹***, 強瀬義輝****, 玉越隆史*****

* 学士, 係長, 国土技術政策総合研究所企画部企画課 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1)

** 修士, 研究官, 国土技術政策総合研究所橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1)

, * 修士, 交流研究員, 国土技術政策総合研究所橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1)

***** 修士, 室長, 国土技術政策総合研究所橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1)

国土交通省において2004年度より体系的に行われている橋梁定期点検の分析や, 近年のRC床版の抜け落ち事例から, ひびわれの本数が少ないまま局所的に床版全厚を貫通し, 疲労耐久性が著しく低下する可能性があることがわかった。

本研究では, 撤去したRC床版を用いて輪荷重走行試験を実施し, 貫通ひびわれの有無とRC床版の疲労耐久性に及ぼす影響の解明を試みた。

また, 貫通ひびわれが生じているRC床版に対する鋼板接着補強の効果について確認実験を行った結果について報告する。

キーワード: RC床版, 鋼板接着補強, 補強, 疲労

1. はじめに

国土交通省では, 2004年度に改定した定期点検要領(案)¹⁰⁾(以下「H16点検要領」という.)から, 全ての道路橋について5年毎の点検を行っている。この要領ではRC床版の点検は, 数多くの実験的研究や点検結果の劣化進行過程等^{1)~8)}を反映して, ひびわれ密度に着目した劣化の段階を評価する方法をとっている。すなわち, ひびわれは, 初期には一方向に間隔を開けて発生し, その後, 細かく格子状に発達して抜け落ちの危険性が高くなる状態まで, 徐々にひびわれ密度が高くなっていく過程を経るものとして, 評価基準が設定されている。

しかし, 近年のRC床版の抜け落ち事例や国の直轄橋梁の定期点検の分析結果からは, ひびわれ本数は全体としては少ないままに, 局部的にひびわれが床版全厚を貫通し, 床版コンクリートが抜け落ちる危険性が高い状態となるケースもあることが明らかとなってきた。

点検では外観性状に加えて外力条件や材料品質, 架橋環境など様々な情報を考慮して状態の診断が行われる。なかでも外観性状は劣化段階や残存性能を推定する上で極めて重要な情報である。そのため外観性状毎の劣化段階や残存性能との対応関係に関する知見は, 適切な診断を行う上で不可欠な要素である。

そこで, 本研究は, 国の直轄橋梁の定期点検結果から, 床版のひびわれの発達のパターンと漏水・遊離石灰の有無の組み合わせに着目して, 実績としてRC床版でみられる損傷過程のパターンを明らかにするとともに, 実際

に供用されていた橋梁から撤去された床版(以下「既設床版」という.)を用いて貫通ひびわれの有無がRC床版の疲労耐久性に及ぼす影響について輪荷重走行試験による解明を試みた。

また, 近年, 補強された床版が鋼板ごと抜け落ちるといった重大な損傷が報告されていることから, 供用下において損傷を受けたRC床版における補強の効果を把握することを目的として, 貫通ひびわれが生じた床版に対する鋼板接着補強の効果について確認実験を行った。

なお, ひびわれへの水の侵入によりRC床版の疲労耐久性が著しく低下することは既に松井ら⁹⁾により実証されており, ここではひびわれの貫通の有無のみに着目してRC床版の疲労耐久性との関係を明らかにすることとし, 輪荷重走行試験は全て乾燥状態で実施している。

2. 定期点検結果の分析

H16点検要領による損傷程度の評価は, 損傷の規模や劣化現象としての進行段階等の客観的事実の基準による評価となっており, 部材をさらに分割した要素単位で評価される。RC床版の損傷程度は, ひびわれの幅, 本数, 間隔といった下面から視認できるひびわれ性状に着目した「RC床版ひびわれ」の評価に加えて, 「剥離・鉄筋露出」「漏水・遊離石灰」「抜け落ち」でも評価される。

2.1 損傷事例

図-1は, RC床版のコンクリートが抜け落ちた例であ

る。定期点検時の損傷図からは、一方向のひびわれのみ記録されている。また、写真からは漏水が伴っていることからひびわれは貫通していたことがわかる。すなわち、定期点検時点では一方向のみのひびわれであったにもかかわらずその後5ヶ月あまりで抜け落ちに至っていることから、ひびわれが一部で床版全厚を貫通していたことが大きく影響している可能性が考えられる。

2.2 床版ひびわれの損傷図を用いた損傷過程の分析

(1) 分析に用いるデータ

まず、同一要素の2回の点検間における点検記録の損傷図の推移を用い、1回目の点検時における漏水・遊離石灰の有無が床版ひびわれの進行に与える影響に着目したRC床版の劣化特性の推定を試みる。国土交通省の地方整備局等が管理する約2万橋のうち、2004～2009年度に定期点検結果が2回分揃っており、かつ2回の定期点検結果のいずれかに損傷程度d及びeの箇所を含む橋梁から、橋梁管理カルテ¹¹⁾に、2回の点検の間に補修や補強の記録があるもの及び前後2回の点検の同一要素で損傷程度の評価が改善しているものを除いた計50橋777要素を分析した。

(2) 分析結果

同じ部位の前後2回の定期点検の損傷図から、RC床版のひびわれと漏水・遊離石灰の併発有無の状況を組み合わせ、どのような状態推移パターンが実際に生じているのかを整理した結果を図-2に示す。四角内の線は、ひびわれの方向と間隔を概念的に示したものである。漏水・遊離石灰がない場合(図中白色)、ひびわれは一方向から二方向となりさらに格子が細くなっていくが、一方向の段階で漏水・遊離石灰が生じた場合(図中灰色)、ひびわれが格子状にならないままひびわれ部の劣化が進展する場合のあることが確認された。

2.3 床版ひびわれの損傷程度を用いた損傷過程の分析

(1) 分析に用いるデータと分析方法

次に、点検記録のうち損傷程度の評価として記録されている段階評価値による統計的分析を行う。2004～2013年度定期点検データに上記2.2(1)と同様の処理を行った、合計2,766橋139,690要素とした。文献12)に示される方法により、ある点検時点(時刻tA)による損傷程度が次の点検時点(時刻tB(=tA+5年))において、どの損傷程度にどのような確率で推移するかについて、実データを数え上げて集計しマルコフ推移確率を求めた。

実際の点検間隔には多少の幅があるが、大半は概ね5年間隔で行われている。そこで算出にあたっては、分析の便を考慮し、点検間隔は一律に5年として扱っている。また、点検において記録される損傷程度の評価はa～eの最大5段階の離散的な評価である。ここでは分析の便を考慮して、表-1のとおり点数に換算して定量化する。

(2) 分析結果

マルコフ推移確率による劣化予測結果を図-3に示す。図-3(a)は、漏水・遊離石灰が生じていない場合の損傷程度の推移。図-3(b)は、漏水・遊離石灰が生じている場合の損傷程度の推移である。

供用直後に変状を生じている部材が、ある確率で存在していた可能性はあるものの、供用後に観測される状態の経年変化のみから状態推移傾向を推定することとし、t=0時点では損傷程度の評価が全てaと仮定し、経年毎の損傷程度の評価の比率を求めた。

損傷なしを示すaの割合は、漏水・遊離石灰がない場合に比べ、漏水・遊離石灰がある場合の方が早期にその割合が少なくなっている。すなわち、漏水・遊離石灰がある方がない場合に比べて、床版ひびわれに対して健全な状態を保ちにくい性質があるといえる。

また、損傷程度e及びdに着目すると、漏水・遊離石

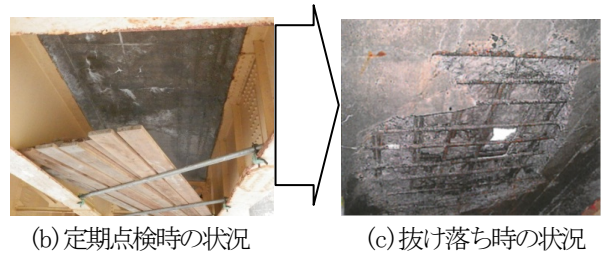
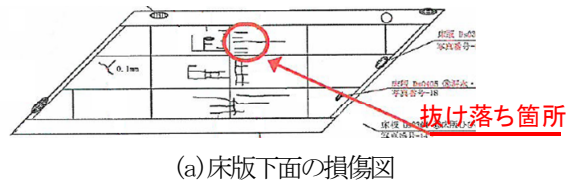
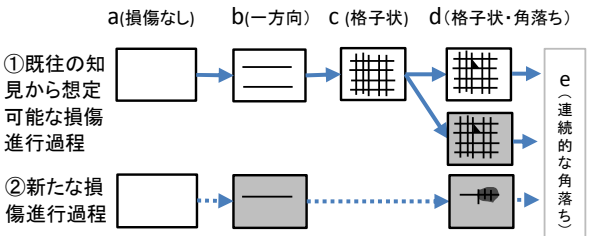


図-1 床版コンクリートが抜け落ちた例

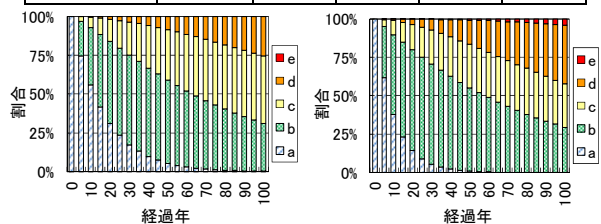


※□内の線はひびわれの方向と間隔を示す。
白色床版は、漏水・遊離石灰無。灰色床版は漏水・遊離石灰有を示す。

図-2 RC床版ひびわれの損傷程度の推移

表-1 各損傷程度の評価の定量化

	損傷無	小	← 損傷の程度 →	大	
損傷程度	a	b	c	d	e
点数	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00



(a) 漏水・遊離石灰無 (b) 漏水・遊離石灰有

図-3 損傷程度の推移

灰がある方が早期にその割合が増えていく傾向にある。このことから、漏水・遊離石灰が有の方が無と比較して、より程度の悪い状態に進行しやすいといえる。

以上のことから、漏水・遊離石灰を伴う貫通ひびわれが生じた RC 床版においては、損傷の程度が急激に進む可能性があることが示唆される。

3. 既設橋梁を用いた輪荷重走行試験

3.1 実験条件

(1) 供試体

貫通ひびわれの有無と疲労耐久性との関係について検討するため、輪荷重走行試験を実施した。

供試体は、路線の検討による新橋架設に伴い撤去することとなった 1972 年供用の橋梁から切り出した。当該橋梁は 1964 年の道路橋示方書に基づき設計された橋長 $L=76\text{m}$ の桁橋である。床版厚は 170mm と現在の道路橋示方書で設計される床版と比較すると非常に薄く、40 年以上の供用に伴い、複数のひびわれを有していた。供用中に補修・補強、床版防水工は未実施であった。床版を切り出した橋梁の一般図を図-4、橋梁諸元を表-2、供用中の状況を写真-1 に示す。

図-5(a)に切り出した 30 枚の供試体の採取位置を示す。供試体 No.1 と No.25 の 2 体を選定した。供試体の選定は、下面から視認できるひびわれの性状が類似し、貫通ひびわれの有無を比較できるものとした。供試体 No.1 (貫通ひびわれ有) 及び No. 25 (貫通ひびわれ無) の下面の状況とひびわれ図を図-6 及び図-7 に示す。なお、貫通ひびわれの有無は、透水試験を行い確認した。

供試体 No.1 及び No.25 の材料試験結果を図-8 に示す。コンクリートの圧縮強度は No. 1 と No. 25 は同程度、静弾性係数については No.25 の方が小さいものの、同時期に施工されていることやその他試料を含む平均とは差

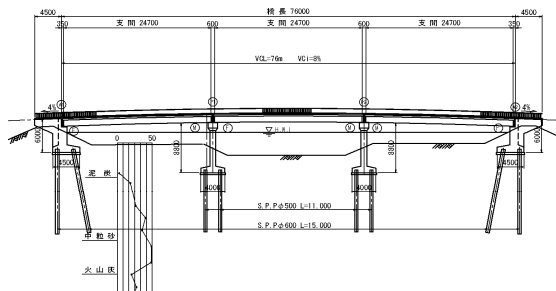


図-4 一般図 (側面図)

表-2 橋梁諸元

構造形式	鋼単線合成桁橋-3連
傾角	80°
橋長	76.000m
支間長	24.7m+24.7m+24.7m
幅員構成	全幅員8.5m、有効幅員8.0m (歩道幅0.75m+車道幅3.25m)
床版	鉄筋コンクリート床版 ($t=170\text{mm}$) σ_{ck} =記録なし
舗装	アスファルト舗装厚 $t=50\text{mm}$
使用鋼材	SS41、SM50YA、SM50YB、 SM53B、鉄筋SSD39
適用示方書	TL-14tf
設計添付書	TL-14tf
供用年月日	昭和47年10月1日

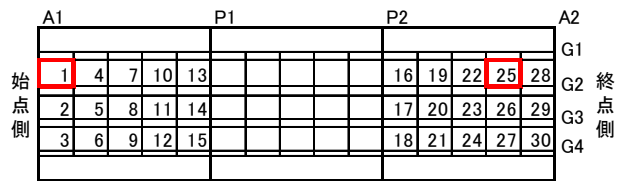


写真-1 供用中の状況

がないことからコアの採取箇所の違いによる試料のばらつきの範囲と判断した。また、鉄筋の引張強度についても同程度であると判断した。

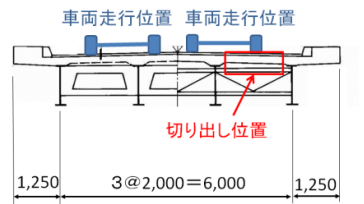
(2) 供試体の準備

撤去時の切断により供試体の床版支間の寸法が 1.7m になってしまっていたものを、供用時の床版支間 2m と同じにするため、不足した寸法分のコンクリートや鉄筋を継ぎ足す加工をしている。鉄筋の寸法及び材料は、供用中の床版と同様の挙動となるよう数値解析により決定するとともに、初期載荷で挙動を計測し、解析が妥当であることを確認している。また、載荷荷重を均一に伝えるため、舗装切削のため不均一となった RC 床版上面



※下面の展開図 □は供試体位置

(a) 平面図



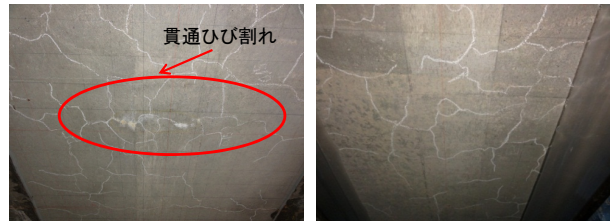
アスファルト舗装: 50mm
鉄筋コンクリート床版: 170mm

(b) 断面図

■床版諸元	
床版支間	2.0m
床版厚	170mm
主鉄筋	上面 D16@250
	下面 D16@125
配力鉄筋	上面 D16@300
	下面 D16@150

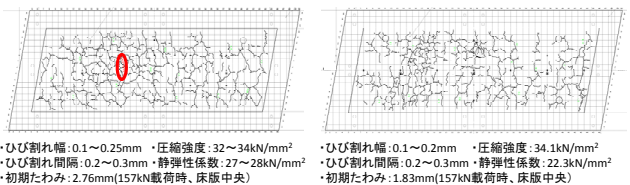
■試験条件	
幅	2.0m
長さ	4.8m
単純支持間隔	1.7m

図-5 供試体切り出し位置図



(a) No. 1 (貫通ひびわれ有) (b) No. 25 (貫通ひびわれ無)

図-6 供試体下面の状況



・ひび割れ幅: 0.1~0.25mm ・圧縮強度: 32~34kN/mm² ・ひび割れ間隔: 0.2~0.3mm ・静弾性係数: 27~28kN/mm² ・初期たわみ: 2.76mm(157kN載荷時、床版中央)

(a) No. 1 (貫通ひびわれ有) (b) No. 25 (貫通ひびわれ無)

図-7 供試体下面のひびわれ状況

供試体	試料名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	供試体	試料名	降伏点 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
No.1	A	32	27.6	No.1	1L-主筋	381	232
	C	34.1	27		1R-主筋	393	203
	平均	33.1	27.3		1L-配力筋	361	203
					平均	372	213
No.25	D	34.1	22.3	No.25	1L-主筋	378	206
					1R-主筋	388	195
	平均	31.0	23.2		1L-配力筋	394	204
その他試料を含む平均					平均	387	202
					その他試料を含む平均	380	205

図-8 材料係数

に、エポキシ樹脂を用いて平滑になるよう加工をしている。エポキシ樹脂はコンクリート中に侵入して硬化しないよう床版にビニールシートを敷き、留意しながら施工した。また、床版上面の凹凸量を水準測量によって求め、樹脂厚は試験時の荷重による割れを防ぐため最低 2mm 以上となるように管理している。施工後の測量の結果、樹脂厚は最大で 20mm 程度となった。

(3) 供試体の固定方法と载荷条件

供試体の固定方法は、橋軸方向に弾性支持、橋軸直角方向に単純支持となるように固定している。なお、弾性支持材は、事前解析を行い供用中の橋梁に近い挙動となるよう、材料、形状を決定した。

輪荷重走行試験機は、(独)土木研究所所有の試験機(クランク式)を使用した。载荷荷重は、文献 8)を参考に 157kN 一定荷重载荷とした。载荷幅は、供試体の寸法を考慮し、土木研究所流試験機における標準载荷幅より狭い 300mm とし、载荷長は標準の±1.5m とした。試験は乾燥状態で行った。

3.2 実験結果

(1) 初期载荷

初期载荷(157kN)時のたわみを図-9に示す。供試体 No.1 及び No.25 いずれにおいても全断面有効として計算した理論値(図中健全)よりもたわみが大きく、引張側コンクリートを無視とした仮定で計算した理論値(図中損傷大)よりは小さかった。No.1 と No.25 を比較すると、载荷時たわみは供試体 No.25 が 0.96mm であるのに対して供試体 No.1 は 1.48mm であった。また、除荷時、供試体 No.25 はたわみが 0 に戻ったものの、供試体 No.1 はたわみが 0.24mm 残った。

(2) 輪荷重走行試験

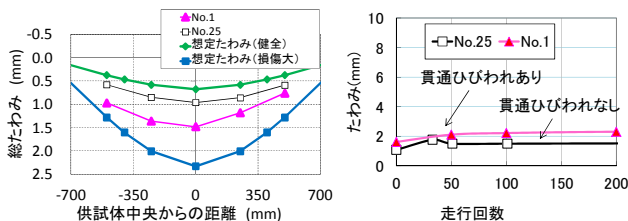
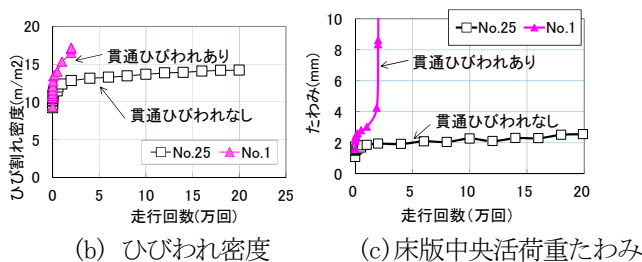


図-9 初期载荷時のたわみ (a) 床版中央活荷重たわみ (橋軸直角方向) (200回まで)



(b) ひびわれ密度 (c) 床版中央活荷重たわみ
図-10 輪荷重走行試験結果

輪荷重走行試験の結果、供試体 No. 1 は走行回数 20,050 回で破壊に至ったのに対し、供試体 No. 25 は走行回数 20 万回に達しても大きな変状はなく試験を終え、両者の耐久性に大きな違いがあることがわかった。

走行回数と活荷重たわみの関係を図-10(a),(c)、ひびわれ密度を図-10(b)に示す。ここで、ひびわれ密度とは、ひびわれ総延長を既設部の面積(5.39m²)で除した値、活荷重たわみとは、载荷時たわみから除荷時たわみを引いた値をいう。図-10(a)にみられるように、走行回数が少ないときには供試体 No.1 と No.25 の活荷重たわみの大きさは初期载荷から増加していく傾向にあるものの、供試体間のたわみ差は約 0.5mm と変わらなかった。

しかし、供試体 No. 1 は、载荷直後からひびわれ密度が増加し、走行回数 2 千回あたりから緩やかな増加傾向に移行していくのとほぼ同時にたわみが急激に増え、走行回数 20,050 回で押し抜きせん断破壊に至った。走行回数 2 千回時の活荷重たわみは 2.6mm であった。

一方、供試体 No. 25 は、ひびわれ密度が初期に増加したものの走行回数 1 千回以降はその増加は緩やかとなる。走行回数 1 千回時の活荷重たわみは 1.55mm、試験終了(走行回数 20 万回)時の活荷重たわみは 2.52mm であった。これは、供試体 No.1 において急激に増加した時点の活荷重たわみ 2.6mm より小さい値であった。

(3) 試験後の供試体

輪荷重走行試験後の供試体のひびわれ図及び切断状況を図-11 及び図-12 に示す。供試体 No. 1 の切断面は、土砂化及び水平ひびわれが生じており、実橋でみられる破壊形態と類似していた。対照的に、供試体 No. 25 は水平クラックが生じてはいるものの、その幅は小さく、外観のひびわれも試験前と比較して大きな変状はみられなかった。また、上面のひびわれ位置 20 か所にφ100 の塩ビ管を立てて接着後、色水を 200mm の高さまで入れて水圧をかけ 48 時間の透水試験を行い、切断した。床版を貫通するひびわれが確認されたもののその幅は小さく、漏水は生じなかった。

(4) まとめ

ひびわれの幅、本数、間隔といった下面から視認できるひびわれ性状が類似していても、貫通ひびわれの有無により、RC 床版の疲労耐久性が大きく異なることを確認した。貫通ひびわれの有無は定期点検において着目すべき重要な事項であるといえる。

4. 補強床版の疲労耐久性検証

4.1 概要

鋼板接着工法は、一般に厚さ 4.5mm の鋼板を RC 床版下面にコンクリートアンカーで固定し、周囲をシール後にエポキシ樹脂接着剤を 5mm 程度の隙間に注入し、既設の床版と一体化させる工法である。増厚などによる耐荷力の回復までは行わず、主にたわみを抑制してひびわれの進展を防止し、耐久性向上を図るものであり、ひびわれ密度が小さい段階では有効な延命化策とされている。しかし、本研究で明らかにしたように貫通ひびわれを生じるとひびわれ密度が小さくとも残存寿命が大幅に短くなる可能性が高く、貫通ひびわれが生じていても鋼板接着工法による延命効果が期待できるかどうかについて実験による検証を行った。

4.2 実験条件

(1) 供試体

供試体は、図-5 の No.15 とした。供試体 No.1 及び No.25 とは車線が異なるものの、ひびわれの程度（幅、間隔）が類似しており、貫通ひびわれが生じている。貫通ひびわれは、前記 3.2(3)と同様に 24 時間の透水試験により確認した。供試体の材料試験の結果、コンクリートの圧縮強度の平均は 35.4N/mm^2 、静弾性係数は 22.7kN/mm^2 であった。他の箇所よりも圧縮強度は高く、静弾性係数においては低い値であったものの、試料のばらつきの範囲であると判断した。

鋼板接着補強を行う場合、補強効果ができるだけ期待

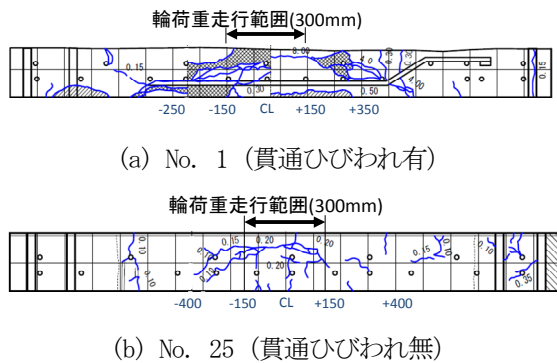
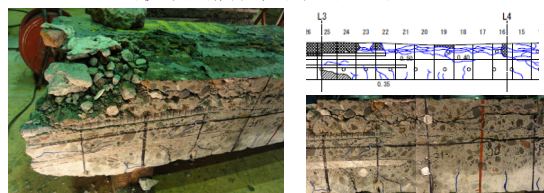
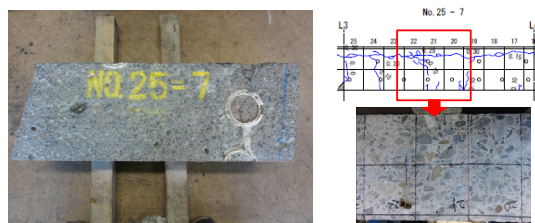


図-11 床版中央橋軸直角方向断面ひびわれ図



(a) No. 1 (貫通ひびわれ有)



(b) No. 25 (貫通ひびわれ無)

図-12 切断状況と橋軸方向断面のひびわれ

できるようにハンチ下まで接着する仕様が現在では一般的である。しかし本研究では、既往の補強工法の状態を再現するためハンチ部は接着をしていない。また、施工条件が厳しく、樹脂による床版と鋼板の十分な一体化が行えていない状態を再現するために、ひびわれ部にシールを行って樹脂が注入されないようにし、さらに床版裏面にあらかじめワックスを 3 回塗布した後アンカーボルトで鋼板を固定し、樹脂の充填を行った。

(2) 供試体の固定方法と载荷条件

供試体の支持方法と载荷条件は前記 3.1(3)と同じになるようにした。支持方法は、同様に橋軸方向に弾性支持、橋軸直角方向に単純支持。輪荷重走行試験機は、(株) I H I インフラシステム所有の試験機（クランク式）を使用し、荷重 157kN の一定荷重載荷、輪荷重の寸法は載荷幅 300mm、載荷長 ±1.5m とした。

4.3 実験結果

(1) 初期載荷

補強前の橋軸直角方向のたわみ分布を図-13 に示す。載荷時たわみは 1.13mm、除荷後は 0.13mm であった。これは、図中に示した引張無視の状態を仮定した計算結果（図中損傷大）と比較して小さいものの、わずか 20,050 回で破壊した供試体 No.1 と同等のたわみ量であった。

補強後の初期載荷時のたわみは 0.47mm、除荷時たわみも 0.02mm と補強前と比較して小さい値となった。

(2) 輪荷重走行試験

走行回数と床版中央たわみの関係を図-14 に示す。鋼板接着用エポキシ樹脂は、試験開始直後から剥離ははじめ、走行回数 5 千回で全接着面積の 80%、11.5 万回時点で 96%が剥離した。その後端部のアンカーボルトが破断しはじめ、走行回数 25 万回時点でたわみが急激に増加し、破壊に至った。

アンカーボルトが破断した走行回数 13 万回時点の床版中央の活荷重たわみは 1.6mm、25 万回時の活荷重たわみは 2.6mm であった。

図-14 に供試体中央の活荷重たわみの推移を示す。供試体 No.1 と比較して明らかに疲労耐久性が向上し、補強効果が得られたことがわかる。また、破壊に至る過程の急激なたわみの増加について、供試体 No.1 と鋼板接着補強した供試体 No.15 はほぼ同じ活荷重たわみ (2.6mm) に達した後生じていた。

走行終了後に破断が確認できたアンカーボルトの数

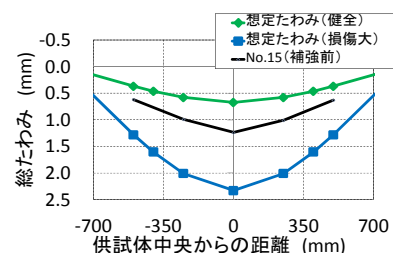


図-13 初期載荷の結果（補強前 載荷時たわみ）

は供試体(+)側 8 本, (-)側 1 本であった. 図-15 に示す供試体中央から+250mm 位置のたわみが 23 万回を超えたあたりから大きな値となっていた. これは, アンカーボルトの破断により鋼板が剥離して床版コンクリートと一体で挙動せず, 自重でたわみが生じているものである. アンカーボルトの破断面に, ビーチマークは確認できず, 鋼板の剥離によってねじ山端部の固定された部分に曲げが発生し, 最終的に破断に至ったものと推察される.

(3) 試験後の供試体

試験後切断した結果を図-16 及び図-17 に, 損傷状況を写真-2 に示す. ひびわれは床版コンクリート内部に配置している上側の鉄筋に沿って水平に進行していた. また, 写真-2 にみられるように水平ひびわれにより断面が小さくなることによってコンクリートの破砕が進行して, 土砂化したとみられる箇所もあった.

以上の損傷の状態は, 過去に重大な損傷が生じた実橋床版にも同様にみられた.

(4) まとめ

以上のことから, 貫通ひびわれが生じていても鋼板接着補強による補強効果が得られたことがわかった. また, 剥離していたとしてもある程度の疲労耐久性が期待できることがわかった.

5. おわりに

本研究で得られた結論を以下に示す.

- ①定期点検結果の分析より, 遊離石灰として確認することができる貫通ひびわれが RC 床版の損傷を急速に進行させ, 疲労耐久性を低下させている可能性が示唆された.
- ②実際に長年供用され撤去された RC 床版を用いて輪荷重走行試験を実施した結果, 乾燥状態であっても貫通ひびわれを有する床版は, 貫通ひびわれが無い床版と比較して, 10 倍以上疲労耐久性が低いことを確認した. すなわち, RC 床版のひびわれの損傷程度の評価において, ひびわれが貫通しているとみなせる場合 (漏水・遊離石灰あり) は, ひびわれ密度によらず損傷程度が大きいと評価しなければならないことが分かった.
- ③貫通ひびわれが生じている床版においても, 鋼板接着補強の効果が確実に得られることが分かった.
- ④ひびわれは床版コンクリート内部に配置している上側の鉄筋に沿って水平に進行しており, 目視で確認できない位置でひびわれが進行していることがわかった. 本研究で実施した輪荷重走行試験の結果から, 貫通ひびわれにより RC 床版の疲労耐久性が低下することを実証することができたが, この現象の力学的メカニズムの解明については今後の課題である.

参考文献

- 1) 岡田清, 岡村宏一, 園田恵一郎, 島田功: 道路橋鉄筋

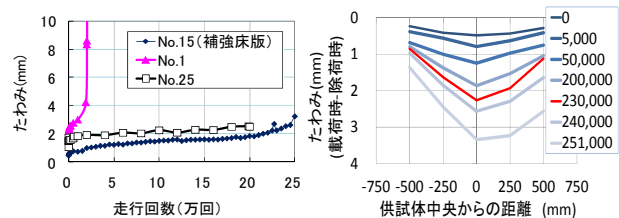


図-14 たわみの推移 図-15 載荷時たわみ分布の推移 (床版中央)

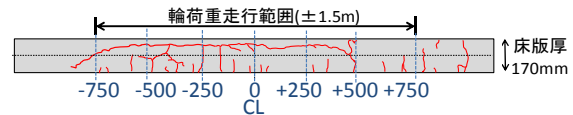


図-16 損傷図 (橋軸方向)

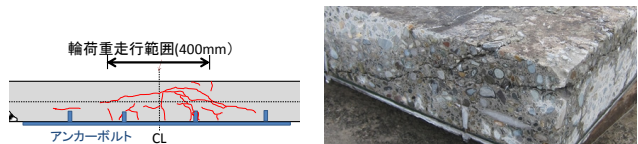


図-17 損傷図 (橋軸直角方向) 写真-2 損傷写真

コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状, 土木学会論文集, 第 321 号, pp49-61, 1982.

- 2) 前田幸雄, 松井繁之: 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, 第 6 巻, pp.221-224, 1984.
- 3) 前田幸雄, 松井繁之: 道路橋 RC 床版の劣化判定法の一提案, 土木学会論文報告集, 第 374 号, I-6, pp.419-426, 1986.
- 4) 石坂茂, 松井繁之: 2 方向支持された RC 床版の劣化機構と耐久性評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp257-270, 2003.7.
- 5) 松井繁之: 橋梁の寿命予測-道路橋 RC 床版の疲労寿命予測-, 安全工学, Vol. 30, No.6, 1991.
- 6) 松井繁之: 床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp1-12, 2006.7
- 7) 例えば, 阪神高速道路公団阪神高速道路管理技術センター: 道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991.12.
- 8) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 他: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料, 第 28 号, 2002.3.
- 9) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 1987.9.
- 10) 国土交通省道路局: 橋梁定期点検要領(案), 2004.3.
- 11) 国土交通省道路局: 橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領 (案), 2004.3.
- 12) 玉越隆史, 横井 芳輝, 石尾 真理: 全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴, 鋼構造論文集, 第 82 号, No.843, 2014.6.