

長尺光学ストランドセンサを用いた道路橋RC床版の疲労損傷度評価手法に関する研究

門 万寿男¹・前島 拓²・子田 康弘³・中野 聡⁴・藤山 知加子⁵・岩城 一郎⁶

¹正会員 日揮(株) 第3プロジェクト本部 (〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1)
E-mail: kado.masuo@jgc.com

²学生会員 日本大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)
E-mail: cetk13001@g.nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学准教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)
E-mail: koda@civil.ce.nihon-u.ac.jp

⁴正会員 (株)福山コンサルタント リスクマネジメント事業部 (〒112-0004 東京都文京区後楽2-3-21)
E-mail: nakano@fukuyamaconsul.co.jp

⁵正会員 法政大学准教授 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科
(〒102-8160 東京都千代田区富士見2-17-1)
E-mail: fujiyama@hosei.ac.jp

⁶正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)
E-mail: iwaki@civil.ce.nihon-u.ac.jp

本研究は、道路橋上を走行する交通荷重により発生するRC床版下面のひずみ挙動を、長尺光学ストランドセンサを用いて計測し、その平均ひずみ波形からRC床版の疲労損傷度を評価する手法を示した。実験では、条件の異なる3種類のRC床版供試体を対象とした輪荷重走行試験を行った。その結果、(1)センサにより得られる橋軸直交方向の平均ひずみ振幅、(2)橋軸方向の平均ひずみ振幅を橋軸直交方向の平均ひずみ振幅で除した平均ひずみ振幅比、(3)時間軸上における平均ひずみ振幅比の変化点がRC床版の疲労損傷度評価指標と成り得ることを見出した。さらに、疲労損傷が詳細に調査されている実橋のRC床版にセンサを設置し、本手法の妥当性・適用性を検証したところ、現場での疲労損傷と整合する結果を得た。

Key Words : concrete deck slab, fatigue damage, strain amplitude ratio, long basis optical strand sensor

1. はじめに

わが国の交通インフラを構成する重要な構造物の一つである橋梁は、供用後 30 年以上を経過したものが多く、重交通荷重の繰返しによる RC 床版の疲労損傷などの劣化が顕在化しつつある。そのため、今後既存道路橋 RC 床版においては、これまで以上に補修・補強対策を必要とする数が増加すると考えられる。しかしながら、単に対策が必要と言っても、これを具体化するには RC 床版の損傷状況を正確に把握した後、損傷度に応じた適切な補修補強方法の選定、場合によっては更新の判断を行う必要がある。従って、RC 床版の損傷状態を合理的かつ定量的に評価可能な手法の構築が重要となる。

疲労を受ける RC 床版の損傷の程度の評価には、種々

の劣化度評価指標が導入されている。松井¹⁾、松井・前田²⁾、大西ら³⁾は、床版のたわみおよび床版下面のひび割れ密度に着目した劣化度判定法を提案し、道路橋 RC 床版の劣化度判定手法として広く採用されている。しかしながら、たわみ(活荷重たわみ)による劣化度は、床版の活荷重たわみを精緻な計測方法で正確に計らなければならぬ。また、ひび割れ密度による劣化度は、その評価がひび割れの目視観察結果に依存するため、点検者の主観が入り過度に安全側あるいは危険側の評価という偏りが生じやすくなると考えられる。

一方で、床版の疲労損傷は、床版コンクリートの部分的抜け落ちなどに進展し、重大な交通事故に発展するリスクが高いと考えられる。しかし、床版コンクリートの抜け落ち等は、ある程度損傷が進行した段階から急激

に進展することが知られており^{1), 2), 3)}, 既往の劣化度損傷評価手法のみでは、交通量が極端に多い橋梁や点検が容易ではない橋梁においては、損傷の検出に遅れが生じる可能性が考えられる。そこで、床版の常時モニタリングに基づき、床版の疲労損傷度をリアルタイムで評価可能な疲労損傷度評価指標(以下、疲労損傷指標と呼ぶ)が確立できればこの種の損傷の取りこぼしを回避できる可能性がある。

さらに、積雪寒冷地における RC 床版の損傷調査では床版下面の変状が殆ど観察されていない状態で、その疲労損傷が確認される調査結果が報告されている^{4), 5)}。このことは床版下面からの調査だけでは不十分であることを示唆している。このため、RC 床版内部の調査が可能な各種非破壊検査技術を導入し、疲労損傷を定量評価する手法が検討されている。湯浅ら⁶⁾は、通常車両走行中の AE 計測結果を分析することで、ひび割れ発生部位の特定および劣化の進行がモニタリング可能なことを示している。宮村ら⁷⁾は、RC 床版の振動特性に着目した研究として、床版を衝撃加振させ、高次固有振動モードの剛性の変化に着目し疲労損傷度を評価する手法を提案している。また、内藤ら^{8), 9)}は、局部加振による共振周波数分布より床版内部の損傷位置を推定する手法を提案している。これらの手法は、ひび割れなど変状が直接的に影響する振動特性より損傷度を評価するというものであり、定期的な計測により損傷過程を捉えることは可能なものの、床版の常時モニタリングに発展させることは難しい。

このような現状に鑑み、近年、国直轄管理国道や高速道路といった重要路線に架設される道路橋において、構造モニタリングにより構造物の健全度を評価する試みがなされている^{10), 11), 12)}。しかしながら、RC 床版のたわみやひずみ挙動をモニタリングし、得られる計測値に基づく評価指標により床版の疲労損傷度を評価しようとする手法は未だ確立されていない。今後、通行規制を必要とするような載荷試験や振動試験を行うことなく、点検員の主観が入りにくい RC 床版の連続モニタリング手法と疲労損傷度評価のための評価指標を提案することは床版の維持管理上重要な研究課題と考える。

以上の背景より、本研究は、構造物の長期連続モニタリングが可能な長尺光学ストランドセンサ(以下、光ファイバセンサと呼ぶ)を採用した光ファイバセンサモニタリングシステム^{13), 14)}を RC 床版に適用した疲労損傷モニタリングの可能性と、交通荷重(活荷重)で生じる床版下面の橋軸方向(走行方向)および橋軸直交方向(走行直交方向)の平均ひずみ振幅の変化に着目し、提案する疲労損傷指標の RC 床版への適用の可能性について検討することを目的とした。ここでは、RC 床版供試体による輪荷重走行試験並びに詳細調査で疲労損傷が観察されて

いる実橋でのひずみ計測に、疲労損傷指標を適用し、従来から採用されている指標である活荷重たわみやひび割れ密度との関係を整理することで、指標としての有効性を検証した。

2. 光ファイバセンサモニタリングシステムの概要

(1) 光ファイバセンサモニタリングシステム

通常、コンクリートのひずみ計測は、一般に箔型のひずみゲージを使用するが、ゲージ下でのひび割れの発生と同時に計測ができなくなるという欠点がある。本研究で使用する光ファイバセンサは、直接コンクリートとは接しておらず、基長が長いためひび割れが発生した場合でも計測対象箇所の平均ひずみが計測可能である。なお、ひずみ計測の原理は、光ファイバ特有のマイクロベンディングと呼ばれるファイバの変形で光がもれる現象による光の強度の変化から光ファイバの伸縮量を求めるもので、センサ固定間の変位をセンサ長(センサ固定間長)で除すことにより、平均ひずみが求められる。

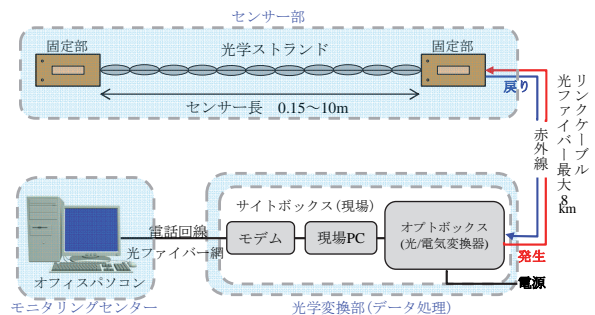


図-1 光ファイバセンサモニタリングシステムの構成

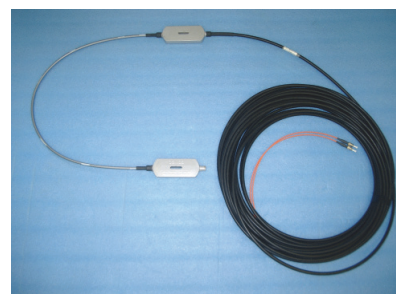


写真-1 光ファイバセンサの外観

表-1 光ファイバセンサの仕様

計測長さ	1m
計測範囲	±2.5mm
計測精度	±0.02mm
適用温度	-20~60°C
熱膨張係数	0.6×10 ⁻⁶ /°C
動的計測	100Hz

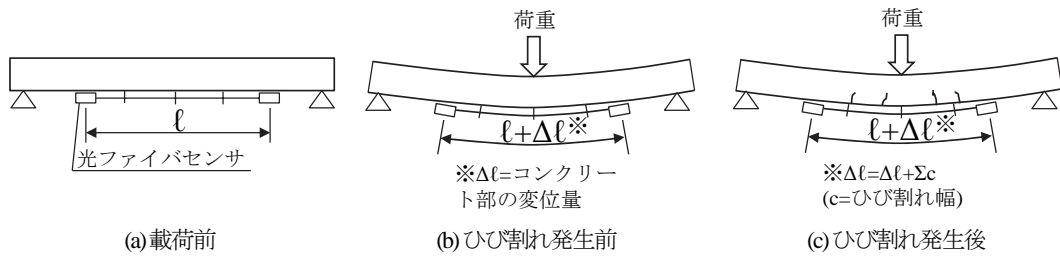


図-2 光ファイバセンサで計測される変位概念

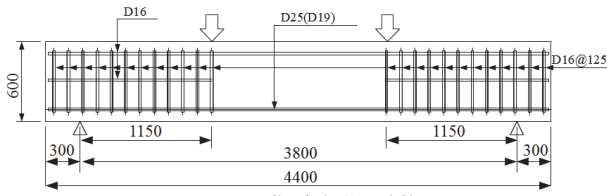


図-3 曲げ試験供試体

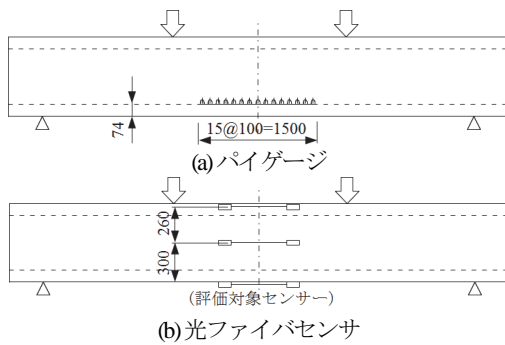


図-4 曲げ試験供試体計測範囲

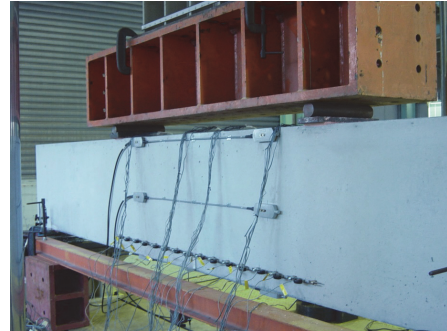


写真-2 曲げ試験供試体

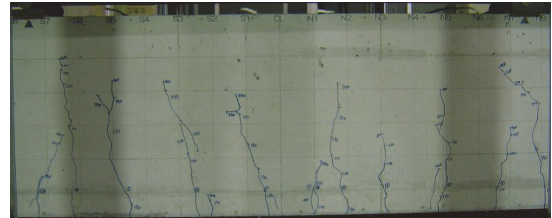


写真-3 ひび割れの発生状況

図-1に、光ファイバセンサモニタリングシステムの構成を示す。光ファイバセンサが感知した光の強度変化は、変換器でひずみに変換されパソコンに計測値が取り込まれる仕組みであり、電話回線やインターネット回線を介して遠隔監視が可能になる。本研究ではセンサ長1mの光ファイバセンサ(写真-1)を使用した。このセンサは、センサ固定間の変位(伸び縮み)を敏感に感知できる^{13), 14)}。表-1に、光ファイバセンサの仕様を示す。

(2) 光ファイバセンサによるひずみ計測の検証

a) 梁曲げ試験の概要

光ファイバセンサで計測される値は、センサ固定間の変位である。従って、図-2に示すようにコンクリートにひび割れが発生していない段階ではコンクリート自身の伸びが計測されるが、ひび割れ発生以降はコンクリート自身の伸びにひび割れ開口幅の合計が加算された量が計測されることになる。これを確認するため、RC梁供試体の曲げ載荷試験において、光ファイバセンサと表面変位計(パイゲージ)による計測結果の比較を行った。

曲げ試験供試体の計測範囲を図-3および図-4に、写真-2にセンサの取り付け状況を示す。曲げ試験における光ファイバセンサおよびパイゲージはRC梁供試体の等曲げ区間に設置しており、パイゲージは供試体側面下端か

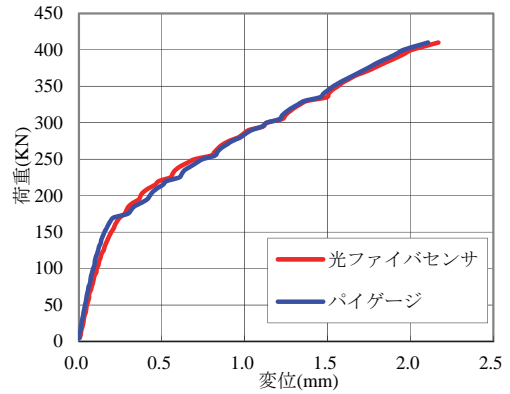


図-5 光ファイバ変位とパイゲージ変位の関係

ら74mmの高さに100mm間隔で15か所、光ファイバセンサは供試体側面の上端、断面高さの1/2の位置のほか、写真では見えにくい供試体下面に設置している。下端のパイゲージと光ファイバセンサの測定高さは74mm離れているが、設置位置の差による計測数値の差はわずかと考えられるため補正は行っていない。

b) 検証結果

載荷試験終了時のひび割れ発生状況(パイゲージ設置面の反対側)を写真-3に示す。等曲げ区間内ではほぼ一定間隔で複数の曲げひび割れが発生している。供試体下面の光ファイバセンサで計測したセンサ固定間距離の伸

表-2 供試体のコンクリートの配合

(a) A 供試体

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
					W	C	S	G	SP
20	12	4.5	66	47.6	174	264	857	996	2.64

(b) B 供試体

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張材	混和剤	
					W	C	S _L	G _L	Ex	SP	AD
20	12	4.5	40	46.8	180	420	857	996	30	2.1	14.7

(c) C 供試体

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
					W	C	S	G	SP	AD
20	20.5	4.3	65.0	45.0	175	269	818	1032	0.16	4.04

C: 普通ポルトランドセメント, S: 砕砂, G: 砕石, S_L: 人工軽量細骨材, G_L: 人工軽量粗骨材, Ex: 低添加型膨張材, SP: AE減水剤, AD: AE剤

びと、光ファイバセンサの計測範囲に連続的に設置したパイゲージ計測値の合計を図-5に示す。両者の値は曲げひび割れ発生前後共にほぼ一致している。このことは、光ファイバセンサはひび割れを含んだ供試体の平均ひずみを簡易に計測でき、間接的にはコンクリートの損傷状況の指標となり得ることを示唆している。

表-3 供試体材料特性

供試体名称	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	単位重量 (kN/m ³)
A 供試体	34.4	26.5	23.0
B 供試体	41.5	16.5	17.2
C 供試体	22.8	28.0	23.0

3. 輪荷重走行試験によるRC床版の光ファイバセンサモニタリングシステムの適用

(1) 実験概要

a) RC床版供試体

輪荷重走行試験には、材料の種類、劣化の状態を変えた3種類の供試体を採用した。表-2に各供試体のコンクリートの配合、表-3に試験開始材齢における各供試体の材料特性を示す。図-6にRC床版供試体の形状を示す。3供試体共に形状、配筋は同じであり、長さ3000mm、幅2000mm、床版の厚さ160mmであり、スパン長は1800mmである。また、主鉄筋はD16(SD295 A)、配力鉄筋はD13(SD295 A)を使用した。引張側の主鉄筋と配力筋の配置間隔は、それぞれ150mmと125mmである。A供試体は、上面から凍結防止剤の散布が行われ、塩害劣化が生じたRC床版を模擬した供試体である。塩害は供試体の上面に濃度10%のNaCl水溶液を930日間7日周期で満べなく散布することで発生させた。その結果、供試体上面のみに主筋に沿った腐食ひび割れが観察され、下面では腐食によるひび割れは観察されなかった¹⁵⁾。B供試体は軽量

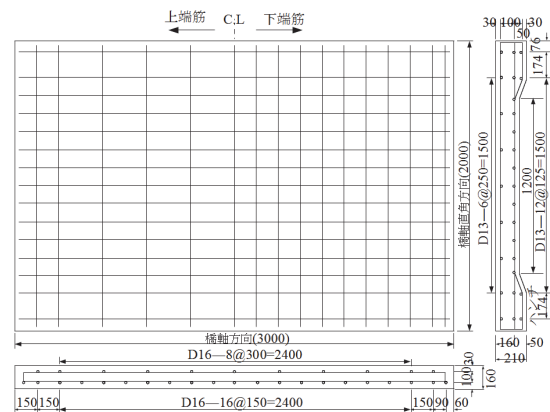


図-6 RC 供試体の形状寸法

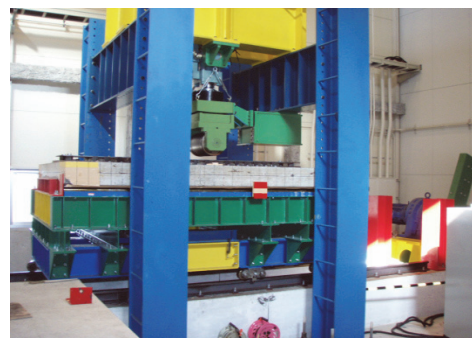


写真-4 輪荷重走行試験機

骨材と膨張材を適用した供試体であり、水の浸入による疲労損傷を模擬した実験を行うため、供試体上面を湛水状態とした水張り試験とした¹⁶⁾。なお、湛水は走行回数10万回より行った。C供試体は標準的な配合の健全な供試体である。

本研究における供試体の条件は、床版下面に生じる平均ひずみ振幅に着目した疲労損傷指標の提案を目的としているため、平均ひずみが計測できれば指標の妥当性が評価できることから、供試体の強度や載荷パターンは整合させていない。

b) 輪荷重走行試験方法

写真-4に輪荷重走行試験機の外観を示す。この装置は、鋼製フレームに鉄車輪を取り付けた油圧ジャッキを据え付け、モータおよびクランクアームで床版供試体を載せた台車を水平方向に±1m往復運動させる機構である。試験装置の諸元を表-4に示す。載荷面となる供試体上面には、輪荷重の走行範囲にベニヤ板を敷き、そこに幅300mm、長さ120mmの載荷ブロックを並べ、さらに載荷鉄板を載せた状態で輪荷重を走行させた。

図-7に供試体の支持条件を示す。図より、長辺方向の2辺(3000mm)を単純支持、短辺方向の2辺(2000mm)は弾性支持とした。

試験は段階荷重載荷方式により実施し、基本輪荷重をT荷重における1車輪分の荷重である98kN(10tf)とし、29.4kNずつ規定の走行回数に達した段階で載荷荷重を大きくした。A供試体では20万回以降20万回毎、B, C供試体では20万回まで10万回毎、これ以降は5万回毎に変更している。図-8に適用した段階載荷プログラムを示す。

c) 計測方法

図-9に供試体下面における光ファイバセンサの設置位置を示す。供試体の長辺方向(輪荷重走行方向)を橋軸方向、短辺方向を橋軸直交方向と呼ぶ。光ファイバセンサは輪荷重走行試験中に外れることがないようにオールアンカーで固定した。センサの設置状況を写真-5に示す。設

表-4 試験機諸元

項目	仕様
形状 寸法	供試体寸法 長さ 3000mm 幅 2000mm 厚さ 160~200mm
	車輪の種類 鉄輪：直径 300mm 幅 400mm
駆動	走行範囲 ±500~1000mm
	モータ回転数 0.897~8.97 rpm
載荷	載荷荷重 静的最大荷重：534kN 動的最大荷重：250kN
	シリンダーストローク 150mm(±75mm)

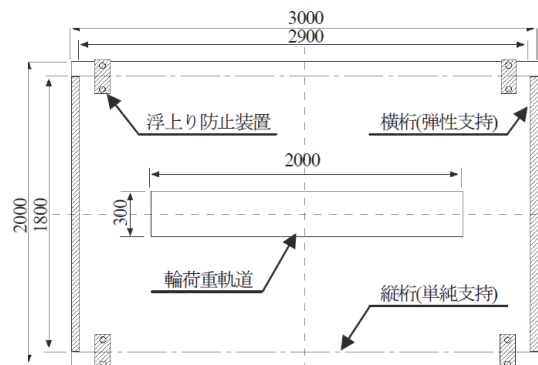


図-7 供試体支持条件

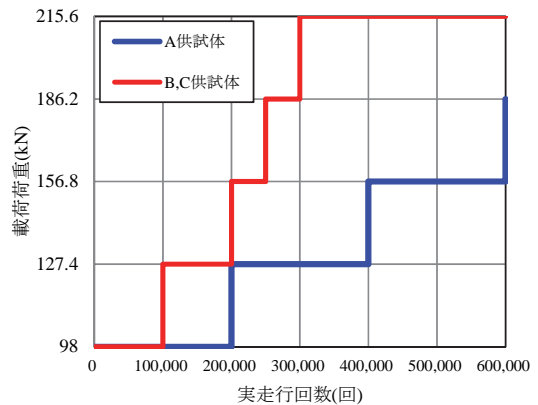


図-8 段階載荷プログラム

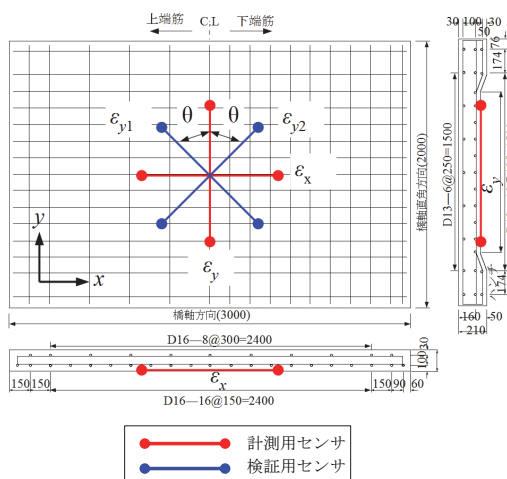


図-9 光ファイバセンサ取付け位置



写真-5 センサ設置状況

置方向は、供試体橋軸方向(x)と橋軸直交方向(y)である(図中の赤線). また、光ファイバセンサが外れた場合のバックアップとして横断軸より45° 方向にセンサを設置(図中の青線)した.

ひずみ計測は、サンプリング間隔0.01秒の動的計測とした. 計測は段階荷重による所定の走行回数に達した後、基本荷重である98kNを載荷させ、その走行中における4分間のひずみ変化を記録した. なお、供試体破壊時に光ファイバセンサが破断することを避けるため、疲労限界状態に達したと判断される時点でセンサを外した. 本研究における疲労限界状態は、走行回数の増加に伴い活荷重たわみが急増した状態と定義した¹⁵⁾.

光ファイバセンサ以外の計測項目は、98kN載荷時の床版中央における静的活荷重たわみと下面のひび割れ観察である.

(2) 静的計測による実験結果の分析

a) 静的活荷重たわみによる分析

輪荷重走行回数は、段階荷重による走行回数を98kNによる走行回数に換算した等価繰返し走行回数で評価した. 具体的には、各荷重における走行実績を、マイナー則を仮定した式(1)により98kNに換算した際の走行回数として求めた¹⁷⁾.

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} : 基本荷重 P_0 に換算した走行回数、 P_0 : 基本荷重(98kN)、 n_i : 荷重 P_i の走行回数、 m : S-N曲線の傾きの逆数(12.76)である. 本研究で用いているS-N曲線は松井が¹⁸⁾提案している梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力を基本耐力として輪荷重を無次元化し、この値を両対数グラフの縦軸に、繰返し回数を横軸にプロットし

た輪荷重走行試験から得られた曲線を採用している.

図-10に供試体毎の活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す. 供試体条件や試験条件の違いにより活荷重たわみ量は異なるが、等価繰返し走行回数の増加と共に増加し、A供試体は約98万回、B供試体は約4000万回、C供試体は約700万回を境に急増し疲労破壊に至る

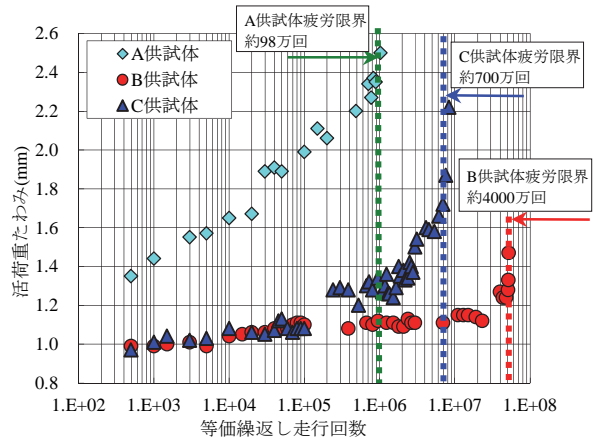


図-10 活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係

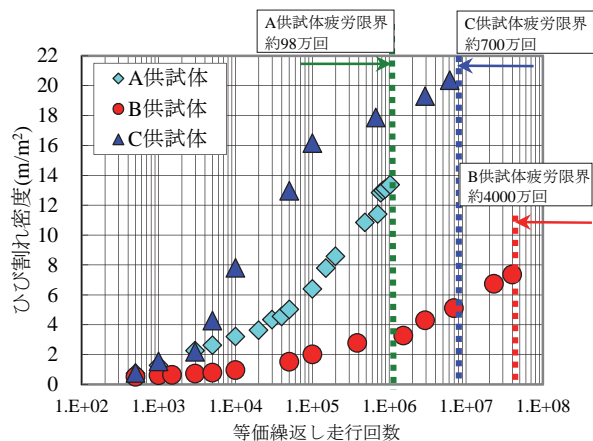


図-11 ひび割れ密度と等価繰返し走行回数の関係

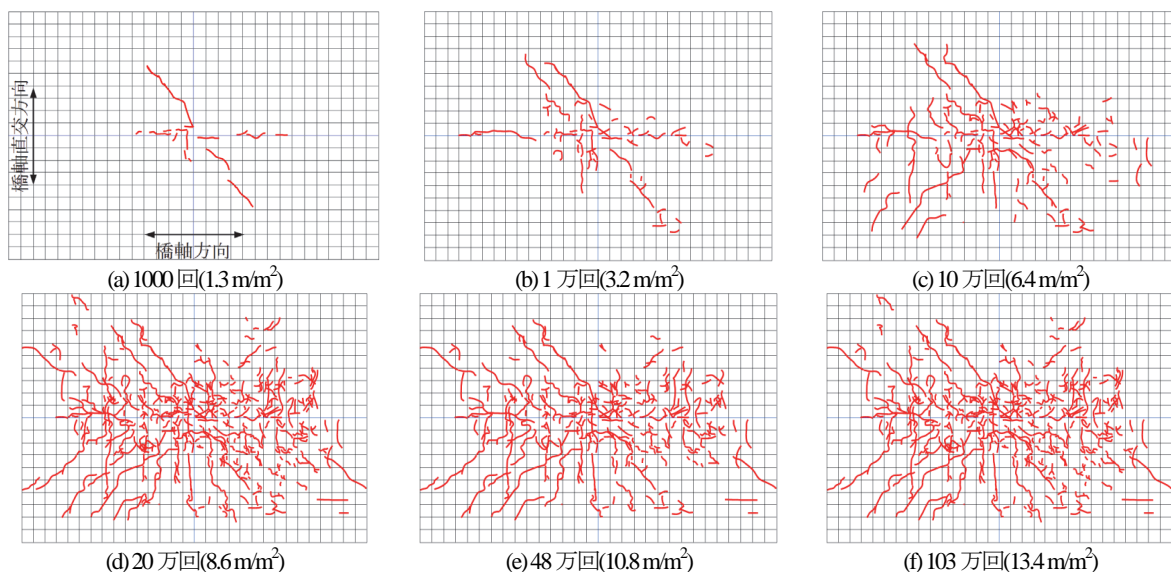


図-12 A 供試体のひび割れ状況 ()内数値 ひび割れ密度 m/m^2

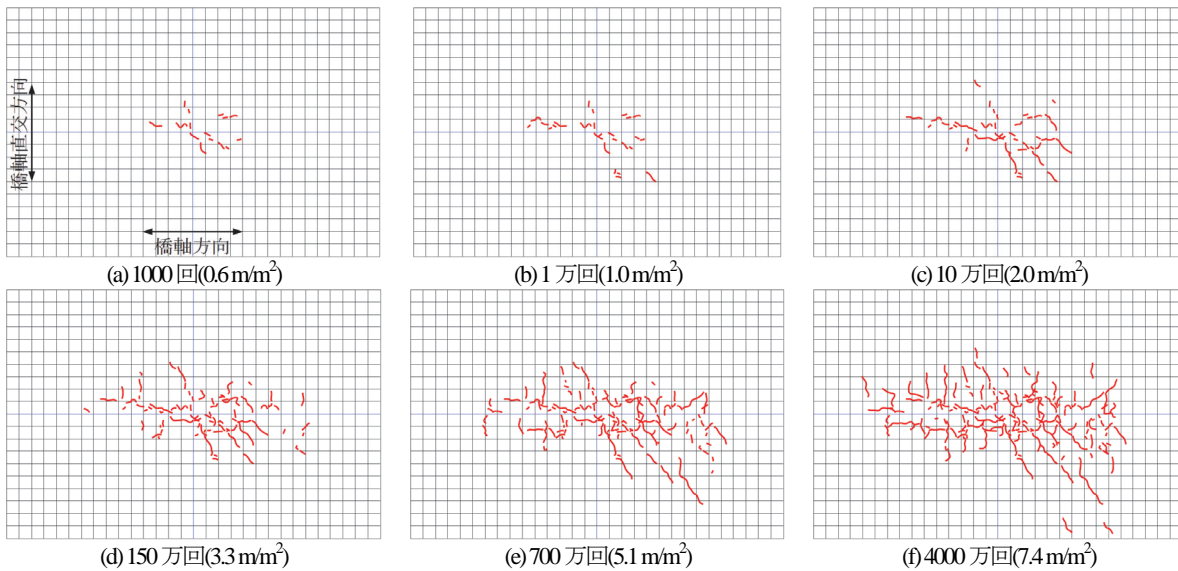


図-13 B供試体のひび割れ状況 ()内数値 ひび割れ密度m/m²

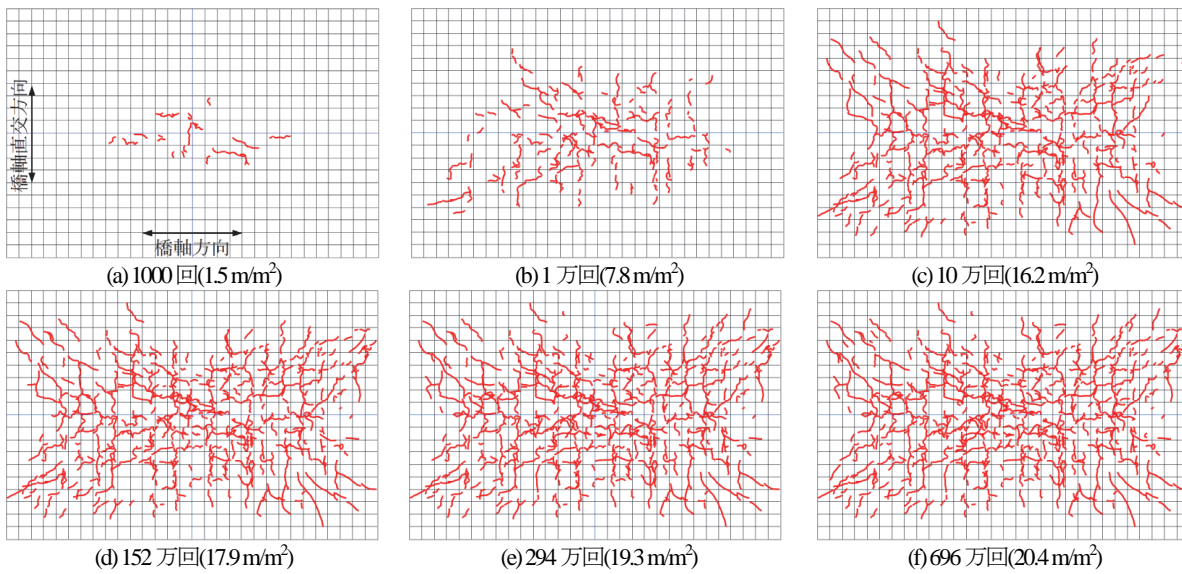


図-14 C供試体のひび割れ状況 ()内数値 ひび割れ密度m/m²

傾向は一致している。

3供試体を比較すると、塩害を模擬したA供試体に関して、活荷重たわみは約80万回程度までは走行回数の増加と共に増加しているが、これを超えると急増する傾向を示している。水張り状態で試験を実施したB供試体は、3供試体のうち最も活荷重たわみが小さく、走行回数に伴う活荷重たわみの増加速度も小さい。また、健全な供試体であるC供試体は、約10万回までは漸増しているが、10万回を境に増加速度が変化、約100万回を超えると急増する傾向を示している。以上をまとめると、3供試体のうち予め材料劣化を発生させた状態で実施したA供試体の活荷重たわみが最も大きい値を示し、C供試体、B供試体の順になっている。疲労損傷が早期に進むと言われている水張り条件のB供試体の活荷重たわみが小さくなった原因としては、圧縮強度が他の供試体よりも大きいことと、膨張材の添加によるケミカルプレストレスの

効果が考えられる。なお、何れの供試体も最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊であった。

b) ひび割れ密度による分析

図-11に、各供試体のひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係を示す。ひび割れ密度は、供試体下面のひび割れ密度観察後、床版中央1600mm×1200mmの範囲にあるひび割れ長さを計測して求めた。ひび割れ密度は、供試体条件や試験条件の違いに拘わらず、等価繰返し走行回数と共に増加し、押抜きせん断破壊が発生する疲労限界状態で最大値を迎える。疲労限界状態に達したときのひび割れ密度はC供試体が最も大きく(20.4m²/m²)、A供試体(13.4m²/m²)、B供試体(7.4m²/m²)の順になっている。この傾向は前述した圧縮強度の順序と整合している。

図-12から図-14に各供試体の下面のひび割れ発生状況の観察結果を示す。図より、3供試体共に走行回数の初期段階は、供試体中央付近を橋軸方向に進展するひび割

れが主であるが(図-12(a), 図-13(a), 図-14(a)), 走行回数が増加するに従って橋軸方向のひび割れの進展と共に, 橋軸直交方向のひび割れおよび斜め方向のひび割れの進展が目立ち始めた(図-12(b), 図-13(b), 図-14(b)). その後断続して発生していたひび割れが繋がり, 連続した橋軸直交方向ひび割れとして目立ち始める(図-12(c), 図-13(d), 図-14(b)). その時の等価繰返し走行回数は供試体によって異なるが, C供試体が最も早く(約1万回), A供試体(10万回), B供試体(150万回)の順になり, 圧縮強度の低い順序に一致している. また, 各供試体の橋軸直交方向ひび割れは疲労限界状態(A供試体: 約98万回, B供試体: 約4000万回, C供試体: 約700万回)に近づくに従い本数が増加すると共にひび割れが連続し長さも長くなっている(図-12(f), 図-13(f), 図-14(f)). この傾向はA供試体およびC供試体で顕著に表れている. 一方, B供試体は他の供試体ほどひび割れは多くなく, 疲労限界状態でもひび割れ密度は 7.4m^2 であった.

橋軸方向のひび割れは2辺を支持された1方向版としての曲げ挙動の表れであり, 橋軸直交方向のひび割れは輪荷重疲労試験で言われている版の「梁状化」の進行を表すものとされている. このため, 押抜きせん断破壊に至る過程と各方向のひび割れ進展の状況は, 2方向に設置した光ファイバセンサの動的計測結果から分析できる可能性がある.

c) 活荷重たわみとひび割れ密度の関係

活荷重たわみとひび割れ密度の関係を図-15に示す. 何れの供試体も活荷重たわみ計測時の載荷荷重が98kNと同じため, ひび割れ密度 10m^2 以下の領域ではひび割れ密度と活荷重たわみにほぼ比例的な関係があるという既往の知見¹²⁾が, 本研究においても確認された.

(3) 光ファイバセンサによる動的計測結果

a) 光ファイバセンサによる平均ひずみ振幅の定義

図-16に, 輪荷重走行中の平均ひずみ(センサ固定間距

離の変化量をもとの固定間距離で除したものの)の時間変化を記録した波形の一例を示す. 平均ひずみ波形は床版上の輪荷重位置の移動に追従し変化している. 本研究では, 図-16に示す所定走行回数終了後に計測される供試体下面の平均ひずみ波形の最大値と最小値の差を平均ひずみ振幅と定義し, 橋軸方向平均ひずみ振幅(ϵ_x)および橋軸直交方向平均ひずみ振幅(ϵ_y)とした.

b) 平均ひずみ振幅による輪荷重走行試験の分析

本研究で実施した供試体毎の平均ひずみ振幅と等価繰返し走行回数の関係を図-17(a)から図-17(c)に示す. 平均ひずみ振幅は, どちらの方向についても等価繰返し走行回数の増加と共に大きくなる傾向を示している. これは, 基本荷重98kNの走行であっても床版下面のひずみが増加していることを意味し, 疲労損傷が進展していることを表している.

橋軸直交方向の平均ひずみ振幅(以下, 単に ϵ_y とよぶ)と橋軸方向の平均ひずみ振幅(以下, 単に ϵ_x と呼ぶ)との関係に着目し, 平均ひずみ振幅の差(以下, 単に $\epsilon_y - \epsilon_x$ と呼ぶ)を図-18に示す. 走行回数1万回以上の $\epsilon_y - \epsilon_x$ の傾向を俯瞰すると, A供試体は約20万回, B供試体は約7万回, C供試体は約100万回まで $\epsilon_y - \epsilon_x$ は, ほぼ同程度で推移し, その後は疲労限界に近づくにつれ, その差が小さくなり, B供試体とC供試体については ϵ_x が ϵ_y を上回る傾向を示した. B供試体では, 約7万回と約1000万回の2段階で小さくなっているが, これは途中の10万回から水張り条件に変更し走行試験を実施したためと考える. この傾向は, 図-12から図-14のひび割れ図よりひび割れの進展が, 最初は橋軸方向のひび割れが卓越し(ϵ_y が支配的), その後橋軸直交方向のひび割れが進展する(ϵ_x の増加傾向)という床版の「梁状化」の進行と概ね一致していると言える. なお, A供試体は, ϵ_x が ϵ_y を上回るまでの傾向はないが, これはA供試体の鋼材腐食が上側主鉄筋において著しく, 床版上側の損傷が早期に生じ¹⁵⁾, 梁状化が卓越する前に疲労限界に至ったためと考える. このように光ファイバ

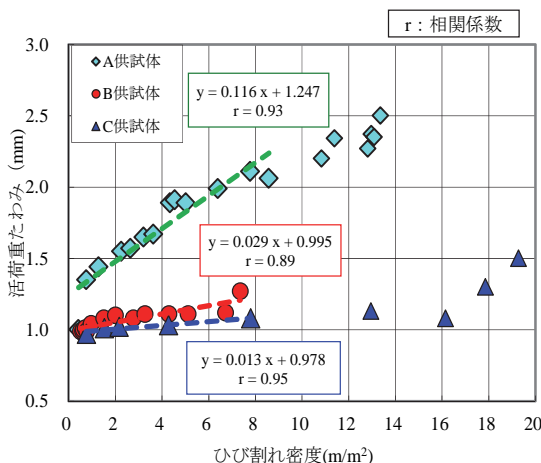


図-15 活荷重たわみとひび割れ密度の関係

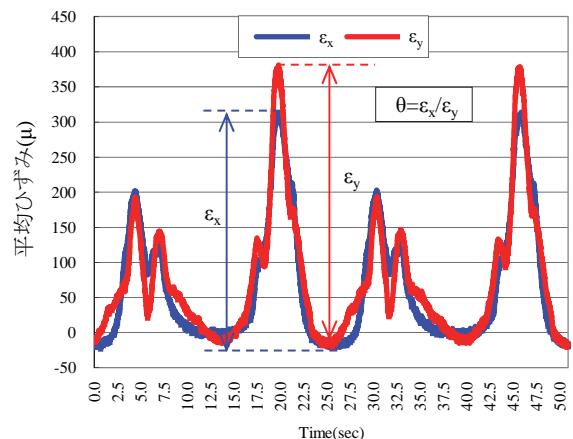


図-16 供試体下面の平均ひずみ波形

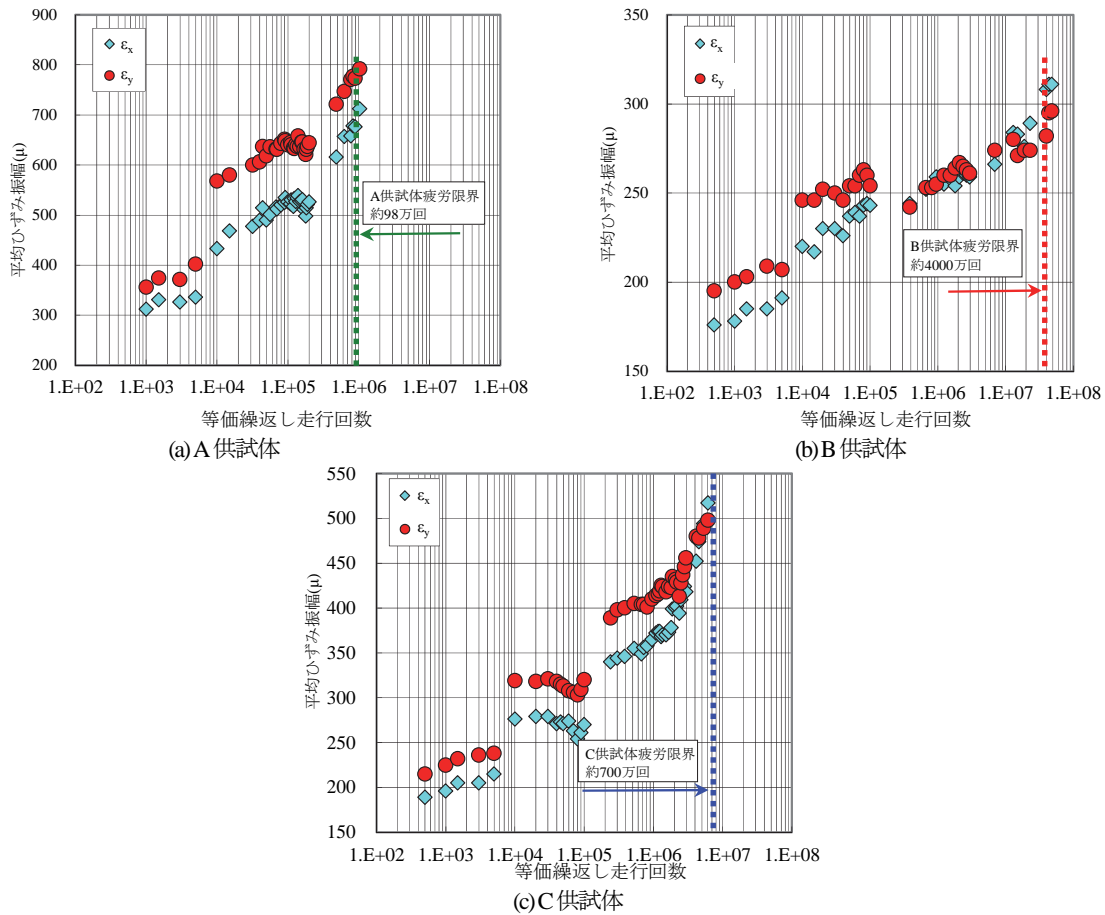


図-17 平均ひずみ振幅と等価繰返し走行回数の関係

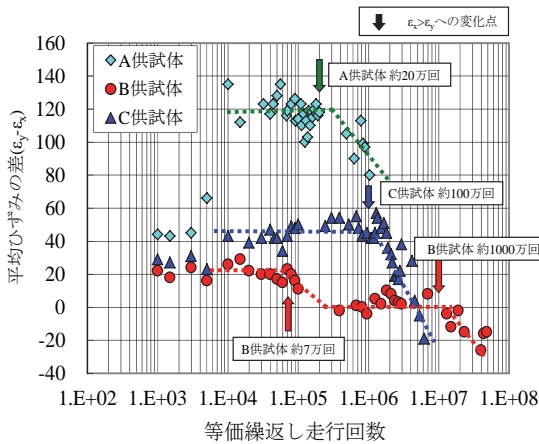
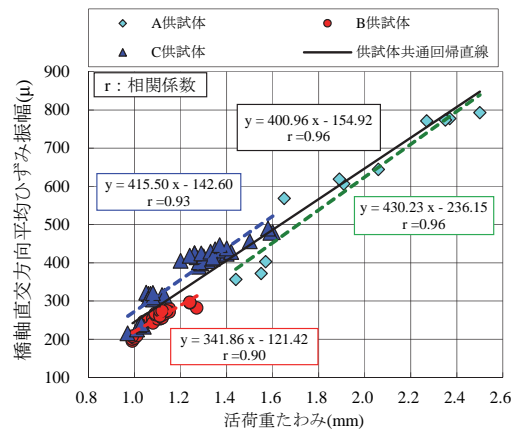
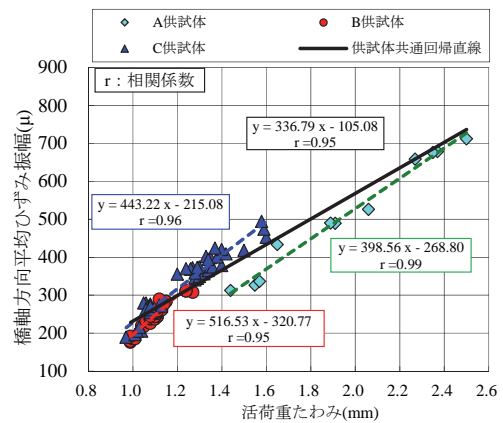


図-18 橋軸方向および橋軸直角方向ひずみ振幅の差

センサによる床版のひずみ計測においても梁の曲げ試験と同様、センサ設置範囲のひび割れの増加が計測できることが分かった。また、このセンサによるひずみ計測によってひび割れの進展に加え、梁状化の進行がモニタリングできる可能性が示された。図-19に活荷重たわみと ϵ_x および ϵ_y の関係を示す。図中に示した回帰直線と相関係数が示す通り、いずれの供試体においても ϵ_x 、 ϵ_y は活荷重たわみの増加と共に大きくなる傾向を示しており、相関係数0.9以上の高い相関性を示している。



(a) 橋軸直角方向ひずみ



(b) 橋軸方向ひずみ

図-19 活荷重たわみとひずみの関係

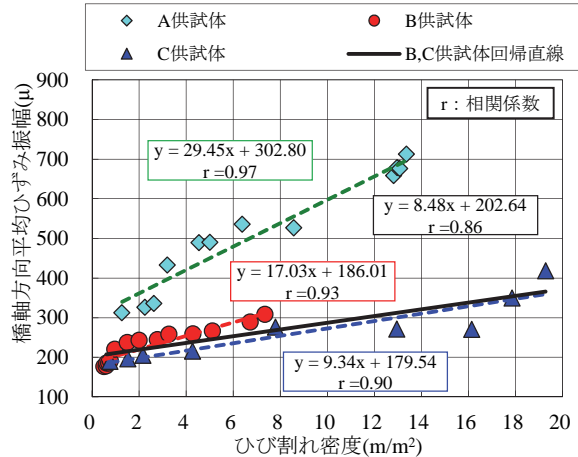
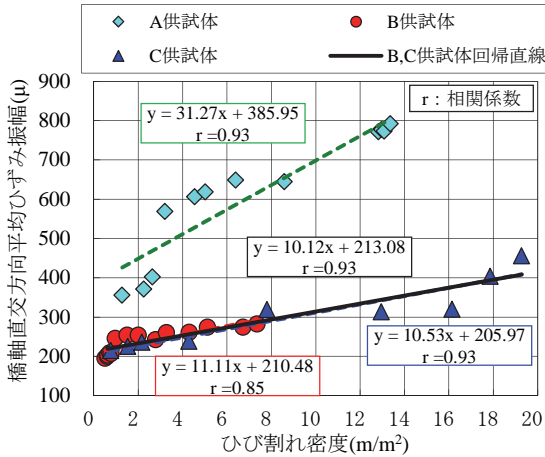
4. 輪荷重走行試験に基づくRC床版の疲労損傷度指標の提案

(1) 橋軸方向および橋軸直交方向の平均ひずみ振幅

図-19が示す通り供試体による値の違いはあるものの ϵ_x , ϵ_y は活荷重たわみに対して高い相関性を示している。また、供試体共通の回帰直線を設定し活荷重たわみとの相

関性を検討すると ϵ_x , ϵ_y 共に活荷重たわみに対する相関係数は0.95程度の高い相関性を示している。

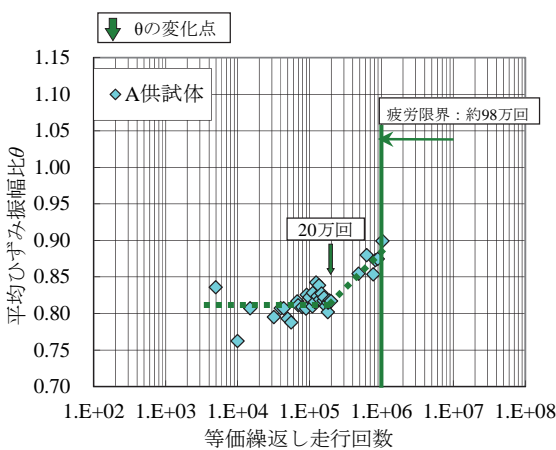
同様に、図-20が示す通り3供試体共に平均ひずみ振幅 ϵ_x , ϵ_y が増加するとひび割れ密度も増加する傾向を示し、何れの供試体においても高い相関性を示している。ただし、ひび割れ密度に関してはA供試体の開始点の値と傾きがB, C供試体と異なるため、活荷重たわみのように



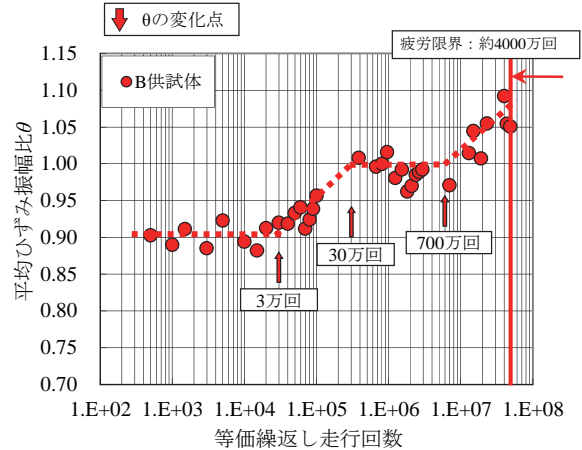
(a) 橋軸直交方向ひずみ

(b) 橋軸方向ひずみ

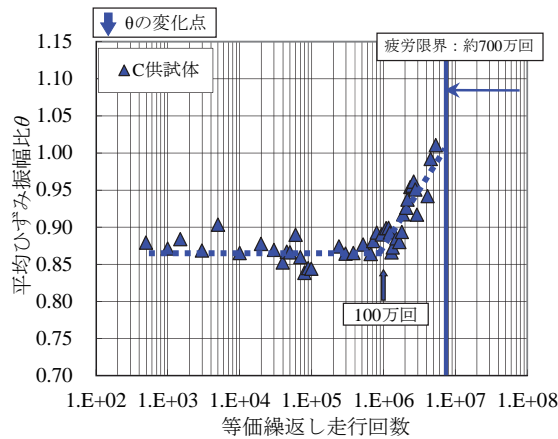
図-20 ひび割れ密度と橋軸方向ひずみの関係



(a) A 供試体



(b) B 供試体



(c) C 供試体

図-21 等価繰返し走行回数と平均ひずみ振幅比の関係

供試体の共通回帰直線が設定できない。この理由については、A供試体が塩害劣化を発生させた供試体であることに起因する可能性があるが、現段階では関係性を特定できていない。

以上の結果より、RC床版下面で計測された橋軸方向および橋軸直交方向平均ひずみ振幅 ε_x 、 ε_y は、RC床版の疲労損傷指標として広く採用されている床版の活荷重たわみやひび割れ密度^{19,20)}を推定することが可能である。しかしながら、床版の疲労損傷が進むと梁状化に至ることを考えると ε_x より ε_y を指標とした方が合理的と考える。さらに、後述する実橋での計測波形からも ε_y の方が ε_x より大きく明確に計測できるため、橋軸直交方向平均ひずみ振幅(ε_y)をRC床版の疲労損傷指標とする方が合理的と判断する。

(2) 平均ひずみ振幅比の提案

実橋で平均ひずみ振幅を用いて疲労損傷度評価を実施しようとする、交通荷重(走行車両の重量)と計測ひずみとの整合を図る必要があり煩雑である。交通流の中に検測車輛のような荷重が既知の車両を走行させ、車両橋梁通過時のひずみやたわみを求める方法^{19,20)}が確立されているが、一般車両の影響の考慮が必要となる。

このため、RC床版に損傷が発生した場合、床版の異方性が変化することに着目し、式(2)で示す平均ひずみ振幅比 θ を定義(以下、平均ひずみ振幅比 θ を単にひずみ振幅比と呼ぶ)し、この値によりRC床版の疲労損傷度を評価する指標を提案する。

$$\theta = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (2)$$

ここで、 θ : 平均ひずみ振幅比、 ε_x : 橋軸方向の平均ひずみ振幅、 ε_y : 橋軸直交方向の平均ひずみ振幅である。

ひずみ振幅比は重量の異なる通行車両でも重量の違いによるひずみの関係を整理することなくひび割れの進展状況や床版のたわみの程度が評価可能と考える。

図-21(a)から図-21(c)に、等価走行繰返し走行回数とひずみ振幅比の関係を示す。ひずみ振幅比は、供試体によって数値は異なるものの、等価繰返し走行回数と共に疲労限界まで増加する傾向を示している。さらに、ひずみ振幅比の傾向を俯瞰すると、A供試体で約20万回、C供試体で約100万回で変化点を読み取れる。B供試体では約3万回、約30万回、約700万回の3ヶ所に变化点を読み取れる。この結果は、ひずみ振幅比が変化することが橋軸方向と橋軸直交方向のひずみ量の割合が変わる、つまり異方性の状態が変わることを示唆しており、ひび割れの状態や床版内部の損傷による剛性変化がひずみ振幅比の変化として表れるものと推察される。従って、平均ひずみ振幅比を連続的に監視し、変化点を読み取ることができれば床版内部の損傷を含んだ損傷状態へ移行する走

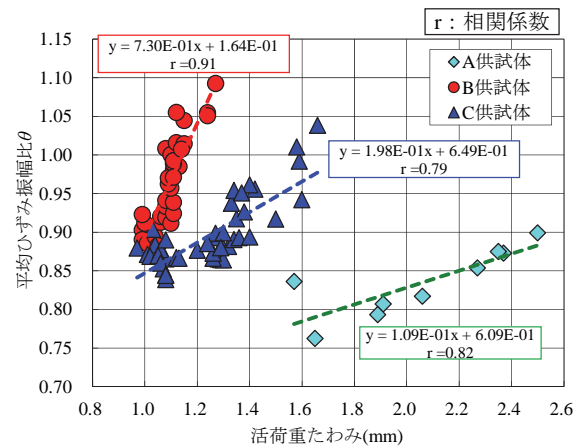


図-22 活荷重たわみと平均ひずみ振幅比の関係

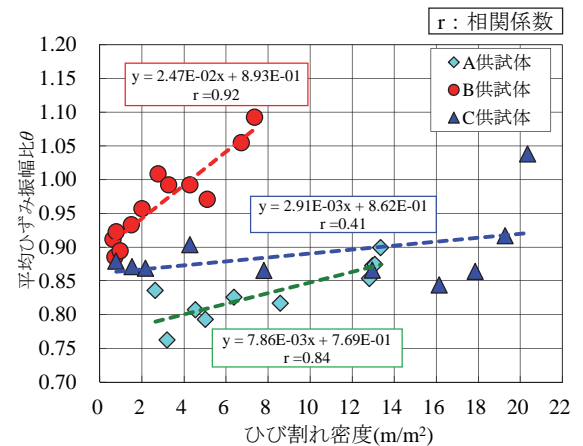


図-23 ひび割れ密度と平均ひずみ振幅比の関係

行回数を見いだせる可能性を示唆している。このことから、ひずみ振幅比の変化点を見いだすことも床版損傷が変化し始める点という広義でのRC床版の疲労損傷指標の一つになり得ると考える。

(3) 平均ひずみ振幅比と従来指標との比較

前節ではひずみ振幅比の連続的な監視の有用性を示した。ここでは、このひずみ振幅比と従来指標である活荷重たわみとひび割れ密度との関係を整理し、疲労損傷指標としてのひずみ振幅比の可能性について検討した。

図-22に、ひずみ振幅比と活荷重たわみとの関係を回帰直線と共に示す。図より、各供試体で傾きは異なるものの、活荷重たわみが増加するとひずみ振幅比も増加する傾向を示し、相関係数0.79以上と高い相関を示している。同様に、ひずみ振幅比とひび割れ密度との関係を回帰直線と共に図-23に示す。図より、A供試体とB供試体では両者に正の相関が認められるものの、C供試体に関しては相関性が弱い結果となっている。このようにひずみ振幅比と活荷重たわみ、あるいはひび割れ密度との関係には概ね相関があるものの、各供試体においてその傾

表-5 計測対象橋梁の概要

名称	供用状況	橋梁概要		劣化状況
		架設年次	橋梁概要	
A 橋梁	高速道路橋	1974年	1 径間単純非合成鋼板桁橋 (4 主桁) 上り線, 下り線が個別に架橋	上線は比較的健全であるが下り線は2/3以上の範囲で遊離石灰を伴う二方向ひび割れが観察され, 過年度の調査では床版上面コンクリートの砂利化が観察されている。
B 橋梁	国道橋	1977年	10 径間単純非合成鋼製箱桁橋 (2 主桁)	同一径間内の異なる格間にひび割れ密度 $1.0(\text{m}^2)$ 以下の健全部と $6.0(\text{m}^2)$ の劣化部が近接して存在している。

きは異なる結果となった。このことは、現時点ではひずみ振幅比そのもので疲労損傷度を絶対評価することは難しいことを意味している。しかし、例えば同一橋梁内の床版パネルのように仕様が同じであれば、ひずみ振幅比を用いて疲労損傷度の相対比較を行うことは可能であると考えられる。次章では、実橋においてこの考えの検証を行うこととした。

5. 実橋による光ファイバセンサ計測試験

(1) 概要

本研究で提案している光ファイバセンサモニタリングシステムとひずみ振幅比に着目したRC床版の疲労損傷指標が実橋に適用でき、その結果が室内試験結果と整合するか検証するため実橋による検証を行った。対象橋梁は2橋であり、詳細な調査によってRC床版の疲労損傷の程度が把握されている橋梁である。

(2) 計測対象橋の概要および計測方法

計測対象とした2橋は、いずれも東北地方に架設され、現在も供用している。これら橋梁は、詳細調査で同一橋梁内に疲労損傷が顕在化している箇所と比較的健全な箇所が確認されている。表-5に、対象橋梁の概要を示す。A橋は、供用後38年が経過し、上り線は比較的健全である。下り線では2/3以上の範囲で遊離石灰を伴う二方向ひび割れが発生しており、その間隔は50cm以下である。また、過年度の路面のアスファルトを剥がした調査では、床版上面コンクリートの砂利化が確認されている⁸⁾。B橋は、供用後35年が経過しており、同一径間内の異なる格間に健全部(ひび割れ密度： 1m^2 以下)と劣化部(ひび割れ密度： 6m^2)が存在している。

写真-6に、光ファイバセンサの設置状況を示す。センサは、計測対象とした床版の中央に設置したもので、A橋は上下線それぞれ1箇所、B橋は健全部と劣化部のそれぞれ1箇所とした。計測は、通常車両走行中の車両重量によるひずみ計測であり、サンプリング間隔を0.01秒以上とし、約60分間データを記録した。



写真-6 実橋光ファイバセンサ設置状況

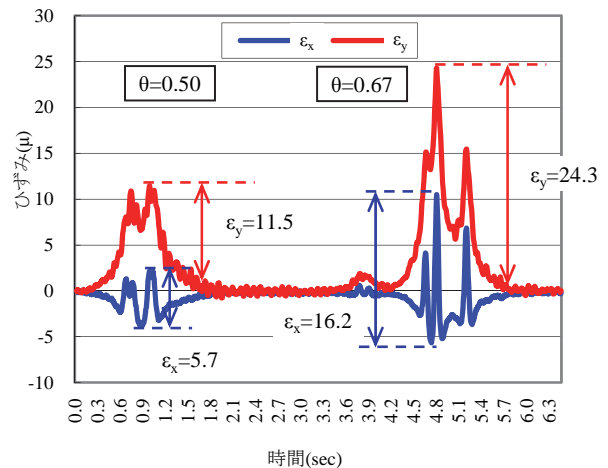


図-24 実橋におけるひずみ波形の例

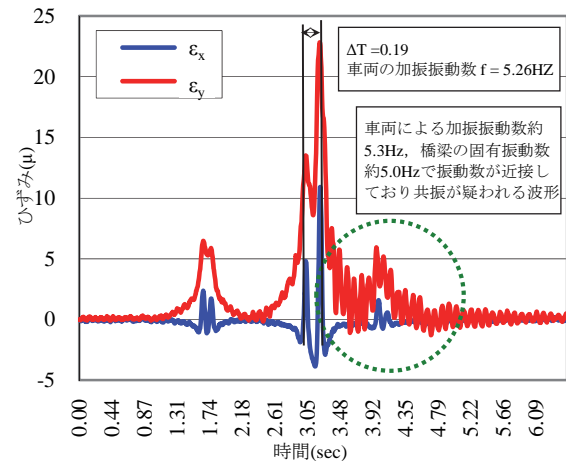


図-25 実橋において共振が疑われるひずみ波形例

図-24に光ファイバセンサで計測される平均ひずみの時間変化を示す波形の例(A橋)を示す。実橋での計測では、一般車両が多軸(多車輪)であるため、橋軸方向平均ひずみ振幅(ϵ_x)は後輪による曲げモーメントの影響を受け圧縮・引張の変化を示している。一方、橋軸直交方向ひずみ振幅(ϵ_y)は前輪、後輪それぞれの通過で変動はするものの、引張領域のひずみとして計測されている。平均ひずみ振幅の値は車両重量や通過速度によって異なるが、ここではひずみ量の大きい大型車両のひずみを評価対象とした。大型車両走行時のひずみ振幅は図-24に示すように、概ね 10μ 以上が計測され、最大は 25μ 程度であった。このため 10μ 程度以上のデータを評価対象データとして採用した。

なお、図-25に示すようにに車輛の速度、車軸距離から決まる加振振動数と橋梁の固有振動数が近接すると、共振が発生する可能性があり、ひずみ振幅が実際より大きく計測されるため共振現象が含まれた可能性のある計測波形は評価から除外した。

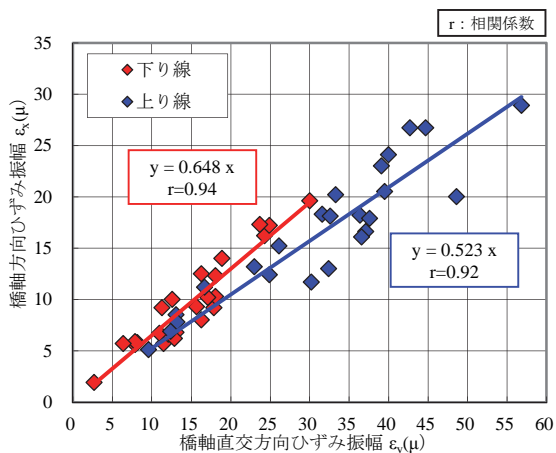


図-26 A橋上り線および下り線における計測ひずみ振幅

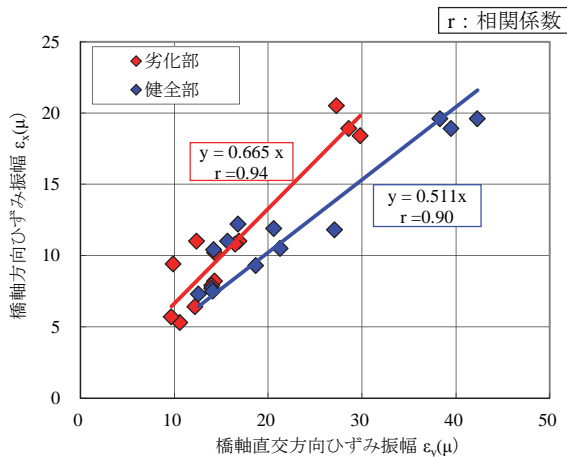


図-28 B橋劣化部および健全部における計測ひずみ振幅

(3) 橋梁計測結果

a) A橋の平均ひずみ振幅および平均ひずみ振幅比による分析

図-26に、上り線、下り線のそれぞれの床版下面で計測した橋軸直交方向および橋軸方向の平均ひずみ振幅を示す。図より、計測された両平均ひずみ振幅の値は上り線の方が大きい傾向にあるが、これは本測定時間中に計測箇所を通過した重量車両の数が異なるためと考えられる。各データ群の原点を通る回帰直線は高い相関係数を示し、その傾きは明らかに下り線の方が大きい。このことは、下り線の疲労損傷が顕在化していることを示唆しており、床版の目視調査の結果と整合している。

図-27に、計測結果によるひずみ振幅比の頻度分布を示す。図より、ひずみ振幅比は、下り線の平均値が0.654、上り線の平均値が0.537と下り線の方が大きく、4章で示した輪荷重走行試験から疲労損傷が進展するとひずみ振幅比が増加する傾向と整合している。

b) B橋の平均ひずみ振幅および平均ひずみ振幅比による分析

図-28に、健全部、劣化部それぞれの床版下面で計測

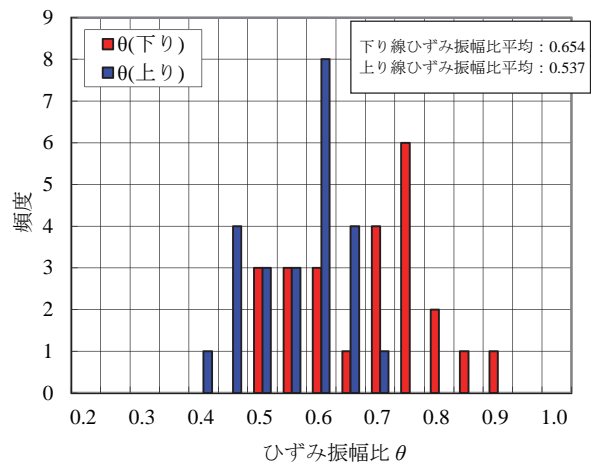


図-27 A橋上り線および下り線における床版ひずみ振幅比の頻度分布

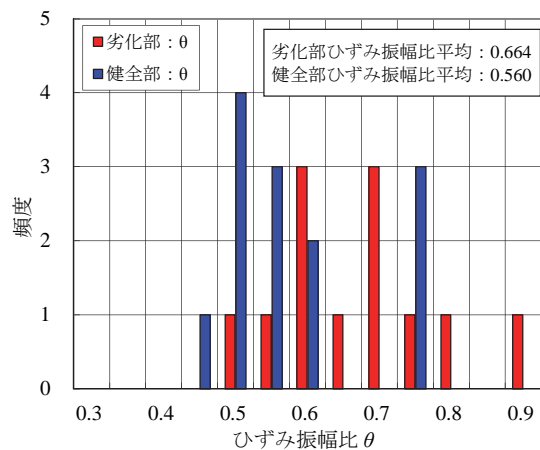


図-29 B橋劣化部および健全部における床版ひずみ振幅比の頻度分布

した橋軸直交方向および橋軸方向の平均ひずみ振幅を示す。図より、健全部および劣化部の原点を通る回帰直線は、劣化部の傾きが大きく、A橋同様、劣化部では健全部と比較しひずみ振幅比が増加するという結果を得た。

図-29に、ひずみ振幅比の頻度分布を示す。図より、平均ひずみ振幅比は、健全部の平均値が0.560、劣化部の平均値が0.664と健全部より劣化部の方が大きくなっている。B橋においても、劣化部のひずみ振幅比が健全部のひずみ振幅比より大きい事実からも、ひずみ振幅比は疲労損傷の進行を表す指標となり得る可能性を示唆している。

(4) 計測結果のまとめと考察

東北地方で供用されている実橋(2橋)で交通荷重(活荷重)による床版下面の平均ひずみの計測結果から疲労損傷が進行している床版下面でのひずみ振幅比は、健全部の値を上回る傾向を示すことを確認した。この結果は、供試体を使用した輪荷重走行試験の結果とも整合している。

また、計測で使用した光ファイバセンサモニタリングシステムは、実橋床版に簡単に設置できモニタリングシステムとしての実橋への適用性が確認できた。

6. まとめ

本研究では、道路橋RC床版を対象に、光ファイバセンサモニタリングシステムを利用した継続モニタリングが可能な疲労損傷度評価手法の検討を行った。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 本研究で使用した長尺光学ストランドセンサ(光ファイバセンサ)は、センサ長が長い計測区間のコンクリート表面にひび割れが発生した以降はひび割れの進展の度合いを平均ひずみの増加として計測できる。また、床版下面に簡単に設置することができ、床版が健全な状態から疲労限界に至るまで計測できることを輪荷重走行試験により確認できた。
- (2) RC床版供試体の橋軸直交方向平均ひずみ振幅と平均ひずみ振幅比は、活荷重たわみやひび割れ密度の増加傾向と相関関係があり、床版の疲労損傷度を表す評価指標になり得る。
- (3) 条件の異なる3種類の供試体を使用した輪荷重走行試験結果において、平均ひずみ振幅比と繰返し走行回数間に床版の疲労損傷の進行に従い平均ひずみ振幅比が段階的に移行する傾向が認められた。よって、平均ひずみ振幅比を連続的に監視し、その値が急変する変化点を見いだすことにより疲労損傷が急速に進行する時期を特定できる可能性がある。

- (4) 実道路橋2橋において、本計測手法を利用したRC床版のひずみ計測を行った結果、平均ひずみ振幅比は、疲労損傷が顕在化した箇所の方が健全な箇所よりも大きく測定される結果となった。すなわち、実橋においても平均ひずみ振幅比を用いることにより疲労損傷度を評価可能であることが示唆される結果を得た。

以上より、本研究で提案している疲労損傷度評価指標は実橋において活荷重たわみ計測のような精緻な計測と通行規制をともなう載荷試験を必要とせず、また、ひび割れの進展状況も目視点検によらず、間接的に評価できるという可能性を見いだせた。さらに、本研究で採用した光ファイバセンサモニタリングシステムが、道路橋床版の疲労損傷の状況を連続的にモニタリングできることを実橋の計測で確認できた。

しかしながら、平均ひずみ振幅比に関しては床版の疲労損傷を定量的に予測するまでには至っていない。このため、材料劣化の程度やコンクリート強度といったパラメータを変化させた床版供試体に対する輪荷重走行試験を行い、評価指標の一般性を証明するための検討を進めると共に、実橋における計測データを蓄積し、本手法の実用化に向けたさらなる検討を進める予定である。

また、本研究ではRC床版の平均ひずみ計測から簡単に求められ、計測と同時に評価結果が分かるRC床版の疲労損傷度評価指標の提案を目的としているため、累積疲労損傷度との比較は行っていない。このため累積疲労損傷度との比較は今後の検討課題としたい。さらに、解析的な評価により提案した疲労損傷度評価指標と疲労損傷度の定量的な整合性に関する検討も進めていく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、日揮(株)阿南誠一氏、福田光生氏、土屋敦子女史、ならびに日本大学工学部コンクリート工学研究室の学生諸氏の助力を得たことをここに記し謝意を表します。また、RC梁供試体曲げ載荷試験ではオリエンタル白石株式会社の手塚正道博士に、B橋梁の計測では調査会社水空舎の村坂宗信氏に多大なる協力を得たことを附記し感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版—設計・施工と維持管理—，森北出版，2007。
- 2) 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，No.374/I-6，pp.419-426，1986。
- 3) 大西弘志，岡田裕昭，内田慎哉，鎌田俊郎：道路橋 RC 床版における疲労劣化と振動特性の関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1693-1698，2007。

- 4) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.
- 5) 出戸秀明, 松崎正二, 新銀武, 丸山泰武: 積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した RC 床版予寿命診断技術の提案, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1227-1238, 2010.
- 6) 湯浅茂徳, 李正旺, 吉沢勝, 魚本健人: AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.251-259, 1999.
- 7) 宮村正樹, 子田康弘, 内藤英樹, 岩城一郎, 鈴木基行: 振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1251-1262, 2011.
- 8) 内藤英樹, 齋木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔: 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.522-534, 2011.
- 9) 大竹雄介, 内藤英樹, 中野聡, 鈴木基行: 小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1459-1464, 2010.
- 10) 三木千壽, 水ノ上敏雄, 小林祐介: 光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.31-40, 2001.
- 11) コンクリート委員会・コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会: 【委員会報告】コンクリート構造物の構造ヘルスマニタリング(SHM)の研究動向と設計手法, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.1-16, 2005.
- 12) 的場純一, 畠中真一, 藤野陽三, 阿部雅人: 【研究報告】センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について, JICE REPORT, Vol. 15, pp. 24-28, 2009.
- 13) 門万寿男, 佐藤拓哉: 光ファイバセンサによる構造物の長期連続モニタリング, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1105-1112, 2003.
- 14) 村坂宗信, 門万寿男, 手塚正道: 光学センサを用いた載荷試験時における PC 梁供試体の挙動特性報告, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-516, pp.1031-1032, 2008.
- 15) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.208-225, 2014.
- 16) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 井上治郎, 津野和宏: 水張り環境における膨張材併用軽量 RC 床版の疲労耐久性評価, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, V-296, pp.591-592, 2012.
- 17) 土木学会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 2004.
- 18) 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, pp.432-440, 1991.
- 19) 山内隆寛, 勝木太, 門万寿男, 魚本健人: PC ホロースラブ上部工の構造ヘルスマニタリングに関する基礎研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, 5-524, pp.1047-1048, 2008.
- 20) 蓮井昭則: 既設橋梁の維持管理手法に関する研究(その 1)—鋼橋の挙動モニタリング—, ハザマ研究年報, pp.1-9, 2006.12.

(2014. 8. 6 受付)

STUDY ON A METHOD OF EVALUATING FATIGUE DAMAGE FOR RC BRIDGE DECK SLAB USING LONG BASIS OPTICAL STRAND SENSORS

Masuo KADO, Takuya MAESHIMA, Yasuhiro KODA, Satoshi NAKANO, Chikako FUJIYAMA and Ichiro IWAKI

This study is intended to establish a method of evaluating fatigue damage for RC bridge deck slabs (hereinafter referred to as "RC slabs"), using the wave shapes of average strains which are measured by long basis optical strand sensors on the undersurface of RC slabs with traffic load on bridges. First of all, the wheel load tests were conducted with three different conditions of RC slab specimens. As a result, it was found that the following indicators could be the ones for evaluating fatigue damage of RC slabs. (1) Average strain amplitude in transverse direction measured by sensors. (2) Average strain amplitude ratio obtained by dividing longitudinal average strain amplitude by transverse average strain amplitude. (3) Change point of the average strain amplitude ratio in time-shift. Furthermore, to validate the reasonability and the applicability of the method, same sensors were applied on the undersurface of the RC slab of a practical bridge whose fatigue damage was carefully examined. The result showed the consistency with the actual fatigue damage.