アルカリシリカ反応が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響

前島 拓¹・子田 康弘²・岩城 一郎³・内藤 英樹⁴・岸良 竜⁵・
鈴木 康範⁶・大田 孝二⁷・鈴木 基行⁸

¹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

²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

³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

⁴正会員 東北大学准教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail: hideki.naito.c2@tohoku.ac.jp

⁵正会員 太平洋セメント(株) 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail: ryo_kishira@taiheiyo-cement.co.jp

⁶正会員 (株) 中研コンサルタント (〒102-8645 東京都千代田区六番町6-28)
E-mail: yassuzuki@ccc.soc.co.jp

⁷正会員 一般財団法人 土木研究センター (〒116-0016 東京都台東区台東1-6-4)
E-mail: ohta@pwrc.or.jp

⁸フェロー 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail: motoyuki.suzuki.a2@tohoku.ac.jp

本研究は、アルカリシリカ反応(ASR)が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討したものである。実物大に近いRC床版を作製し、環境条件の異なるASR促進試験を行った後、水の作用の有無に着目した輪荷重走行試験を行い、各種要因がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響を検討した。その際、所定の輪走行回数におけるRC床版のたわみやひび割れの発生状況を調査すると共に、小型加振器を用いた強制振動試験を行い、ASRおよび疲労による床版の剛性低下を評価した。その結果、ASRを生じたRC床版の耐疲労性はASRによる損傷状況に依存することを明らかにし、ASRによるケミカルプレストレスの導入およびひび割れの進展と水の作用が相互に影響することを示した。さらに、これらの影響を評価する上で振動試験が有効であることを明らかにした。

Key Words : RC bridge deck, fatigue resistance, alkali silica reaction, wheel load trucking test, chemical prestress

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)は、今なお、疲労による著しい損傷事例が多く報告されている。輪荷重単独による疲労損傷は、松井の研究¹⁾において、床版下面のひび割れの進行過程により整理がなされ、その結果、床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することが可能となり、現行の維持管理方法²⁾に適用されている。一方、東北地方をはじめとする積雪寒冷地では、

凍結防止剤(主にNaCl)の大量散布に伴い、コンクリート構造物の塩害、凍害によるスケーリング、およびアルカリシリカ反応(以下、ASR)を促進させることが知られており、近年、寒冷地におけるRC床版の早期劣化が社会問題になりつつある^{3,4)}。

こうした材料劣化と疲労との複合劣化を受けるRC床版の劣化機構を解明するため、これまで多くの研究機関で材料劣化を受けるRC床版の耐疲労性に関する研究が行われてきた⁵⁻⁷⁾。このうち、著者らは、塩害がRC床版

の耐疲労性に与える影響について実験的・解析的に検討し、鉄筋腐食がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響は下側鉄筋に比べ上側鉄筋の方が大きいといった新たな知見を報告している⁸⁾。また、凍害がRC床版の耐疲労性に与える影響については、数多くの研究成果⁹⁾¹⁰⁾が報告されており、三田村らの研究⁹⁾により、床版上面のスケーリング劣化深さが進行するに伴い、RC床版の耐疲労性が低下するといった報告がある。

このように、塩害や凍害がRC部材の耐疲労性に与える影響については研究が行われており、劣化機構の解明が進められつつある。

一方で、ASRによって劣化したRC部材の耐荷性については、適切に鉄筋が配置されている場合、ASRによるコンクリートの膨張を鉄筋が拘束することでケミカルプレストレスが生じ、ASRが部材の耐荷力に与える影響は比較的小さいとされていた¹¹⁾。特に、床版部材では、橋脚や橋台に比べ部材厚が薄く乾燥状態にあることから、ASRの発生は稀であるといった知見が一般的であった¹¹⁾。しかしながら、凍結防止剤の散布が本格化して以降、ASRにより過大な膨張が発生した構造物の劣化事例が徐々に増加している。ASRにより劣化した構造物の調査結果により、ASRによる過大な膨張を起因として、コンクリートの強度低下や鉄筋とコンクリートの付着力の低下、さらには曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断などの損傷が確認されている^{12)~14)}。また、近年ではASRの発生が比較的小さいとされていた床版部材においてもASRによる損傷事例が増加しており、架替えを余儀なくされたRC床版も少なくない¹⁵⁾。床版部材では、主鉄筋および配力鉄筋方向以外の鉄筋拘束がないため、ASRが生じた場合では床版厚さ方向に大きな膨張が生じ、これが床版の構造性能に大きな影響を及ぼすと考えられる¹⁶⁾。そのため、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響を究明し、これに立脚した構造物の維持管理方法を構築することが急務となっている。

ASRとRC部材の耐荷性・耐疲労性について検討した既往の研究では、RCはりの主鉄筋方向におけるコンクリートの膨張量が300 μ mから700 μ m程度では、健全なはりと同程度の耐荷性・耐疲労性を有するといった報告がなされている^{17)~19)}。また、ASRによる劣化を与えたRCはりの曲げ載荷試験においては、ケミカルプレストレスの影響により、曲げひび割れおよびせん断ひび割れ発生荷重が増加したといった報告がされるなど、ASRによるコンクリートの膨張や、これに伴うひび割れが生じていても耐荷性がほとんど低下しないといった報告が多い^{20)~22)}。一方で、異常膨張による鉄筋破断の影響を受けたRCはりの曲げ載荷試験や、コンクリートを12000 μ m程度と過大に膨張させたRC床版供試体でのせん断疲労実験では、

RC部材の耐荷性・耐疲労性が健全な供試体よりも低下するといった報告²³⁾²⁴⁾がなされており、過大な膨張を生じた場合では、ASRの影響によってRC床版の構造性能が低下するといった知見も広まりつつある。

しかし、ASRを受けるRC部材の構造性能に関する既往の研究例は総じて少なく、未解明な部分が多い現状にある。特に、RC床版を対象とした研究例は極めて少なく、実験データも十分でない。また、ASRがRC部材の耐荷性・耐疲労性に及ぼす影響を検討した既往の研究²⁵⁾では、高温高湿度環境下において、高濃度の塩分をRC部材に供給するといった方法によりASRを急激に促進させているものがほとんどである。このようなASRを急激に促進させる試験では、実験期間の短縮に関しては有効であるものの、一般にASRによる構造物の劣化が顕在化するには数年から数十年要することを考えると、実環境に即した試験とは言い難い¹¹⁾。すなわち、凍結防止剤散布環境下においてASRにより劣化したRC床版の耐疲労性に関する研究は、未だ実構造物に近い状態では再現されておらず、ASRによるコンクリートの劣化と耐疲労性との詳細な関係をはじめとする劣化現象の把握と劣化機構の解明には至っていないと思われる。

そこで本研究では、材料劣化のうちASRを取り上げ、これがRC床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した。まず反応性粗骨材を使用して作製した実物大に近いRC床版に対して、環境条件の異なるASR促進を実施することで、ASRによるコンクリートの膨張速度および損傷状況の異なる劣化を生じさせた。そして、ASRによる劣化を受けたRC床版供試体による輪荷重走行試験より、ASRによるコンクリートの劣化を受けたRC床版の耐疲労性を評価した。また、輪荷重走行試験の各段階において、小型加振器を励振器としたRC床版の厚さ方向の強制振動試験を実施し、RC床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 供試体および実験概要

(1) 実験条件

表-1に実験条件を示す。本研究では、ASRがRC床版の耐疲労性に与える影響を検討するため、同一材料・配合で作製したRC床版供試体に対し、高温高湿度環境下においてASRによるコンクリートの膨張を早期に促進させる試験(以下、急速試験)と、屋外曝露環境下において比較的緩やかにASRを促進させる試験(以下、緩速試験)といった2種類の促進試験を実施した。また、急速試験では試験期間を変更することで、ASRによるコンクリー

トの劣化程度に差をつけた。さらに、輪荷重走行試験時における水張りの有無を実験条件として加えた計4条件を実験条件とした。

具体的には、1) 本実験の基準となる、ASR促進を行わない健全相当のRC床版供試体(以下、N-d)と、2) ASRが、耐疲労性に与える影響を確認するため、急速試験を41日間実施したRC床版供試体(以下、R-d)、3) 急速試験を59日間実施することでASRの劣化度をR-dよりも進展させ、さらにASRにより発生したひび割れに水が浸入することで、耐疲労性を急激に低下させることを想定して、輪荷重走行試験時に床版上面に真水を湛水させる水張り試験を実施したRC床版供試体(以下、R-w)、4) ASRを緩やかに進行させるため、260日間の緩速試験を実施し、さらにR-w同様に走行試験時に水張りを行ったRC床版供試体(以下、S-w)の計4条件である。

(2) 供試体概要

図-1に、供試体形状を示す。なお、図中には鉄筋ひずみゲージおよび埋込み型ひずみ計の位置を併記している。図より、供試体は3,000mm×2,000mm×160mmの複鉄筋RC床版である。主鉄筋と配力鉄筋には各々D16(SD295A)とD13(SD295A)を用い、主鉄筋のかぶり厚は上面、下面ともに支間10m以下のRC床版の最小かぶり厚である30mmとした²⁰⁾。引張側の主鉄筋と配力鉄筋の配置間隔は、それぞれ150mmと125mmである。鉄筋ひずみゲージは、床版中央に加え、床版中央より橋軸方向に900mmの位置で鉄筋のリブに貼付した。また、鉄筋により拘束される方向と自由膨張方向におけるコンクリートの膨張挙動を評価するため、橋軸方向(以下、x方向)、橋軸直角方向(以下、y方向)、鉛直方向(以下、z方向)の各コンクリートひずみを計測するものとし、各床版中央位置で3方向に埋込み型ひずみ計を埋設し、R-dおよびR-wについては床版端部付近にも同様にひずみ計を埋設した(写真-1)。

表-2に、コンクリートの示方配合を示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートであり、水セメント比を65.0%とした。使用材料については、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には砕砂(化学法で無害と判定)、粗骨材には砕石(化学法、モルタルバー法

ともに無害でないと判定)を使用した。また、ASRを促すことを目的にNaClを製造時に18.9kg/m³(Na₂O当量で10kg/m³)を外割で添加した。なお、本実験で使用するコンクリートと同一材料・配合により作製したφ100mm×200mmの円柱供試体の3本について、デンマーク法による膨張量試験を実施した結果、促進後3か月で膨張量が6000μに達しており、デンマーク法による残存膨張性の判断基準とされる4000μに比して大きな膨張量であるこ

表-1 実験条件

供試体	ASR 促進		輪荷重走行試験	
	急速試験 Rapidly	緩速試験 Slowly	乾燥 dry	水張り water
N-d	×	×	○	×
R-d	○	×	○	×
R-w	○	×	×	○
S-w	×	○	×	○

図-1 供試体概要

写真-1 埋込み型ひずみ計

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤		NaCl (kg/m ³)
					W	C	S1	S2	G	AE減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	
20	12.0	65.0	45.0	4.5	175	269	413	405	1032	1.5	0.006	18.9

C: 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³), S1: 硬質砂岩 砕砂(密度: 2.64g/cm³), S2: 花崗岩 砕砂(密度: 2.59g/cm³), G: 安山岩 砕石(密度: 2.70g/cm³)

とを確認している²⁷⁾。

各床版の材齢28日まで標準養生を行ったφ100mm×200mmのテストピースにおける圧縮強度とヤング係数は、N-dで圧縮強度22.8MPa、ヤング係数28.0GPa、R-dおよびR-wで圧縮強度27.4MPa、ヤング係数28.5GPa、S-wでは圧縮強度25.1MPa、ヤング係数29.6GPaと、バッチ間による差が生じたものの、いずれも設計基準強度18MPaを満足する結果を示した。

表-3に、使用した鉄筋の物性を示す。使用鉄筋は、全供試体共通でSD295Aを使用し、主鉄筋(D16)は降伏強度が358MPa、引張強度が527MPaであり、配力鉄筋(D13)は降伏強度が338MPa、引張強度が488MPaであった。

(3) 実験概要

a) ASR促進期間およびASR促進試験方法

本研究では前述の通り、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討するため、環境条件の異なる2条件の促進試験を行った。まず、急速試験では、大型の環境試験装置(写真-2)を用いて、槽内温度50℃、相対湿度80%の一定環境下において飽和NaCl水溶液を床版上面に湛水させることで実施した(写真-3)。なお、床版上面以外の5面には防水シートを貼付し、塩化物イオンの供給を床版上面に限定した²⁸⁾。また、圧縮強度試験に用いる円柱供試体については、同温湿度環境下での封かん養生とした。次に、緩速試験では、実験が長期に渡ることを想定し、ASRを緩やかに促進させつつ鉄筋の腐食を抑制するため、福島県郡山市の日本大学構内にある水槽を用いて、5%NaCl水溶液中に供試体を浸漬させた(写真-4)。緩速試験の際、圧縮強度試験用供試体は、側面に養生シートを貼付し、5%NaCl水溶液中に浸漬させた。

なお、各養生期間途中でのASRによる床版の劣化度は、鉄筋およびコンクリートの膨張ひずみの計測と、床版上面に発生するひび割れの観察により判定した。

b) 各床版のASR促進および養生期間

図-2に実験経過を示す。ここで、本実験のASR促進試験および輪荷重走行試験、各種養生の期間は、後述するASRによるコンクリートの膨張量、および輪荷重走行試験装置の载荷試験工程より決定した。図より、N-dでは材齢28日まで湿布養生を行い、その後、輪荷重走行試験を実施した。次に、R-dでは、28日間の湿布養生後、促進を41日間行った。その後、輪荷重走行試験準備期間において鉄筋腐食を抑制する措置として、真水湛水養生および湿布養生を27日間行い、輪荷重走行試験を実施した。R-wでは、材齢9日までの湿布養生後、R-dの急速試験が終了するまでの期間中において緩速試験を実施することで、鉄筋腐食を抑制させつつ緩やかにASRを促進させた。その後、後述するASRによるコンクリートの膨張が比較

表-3 鉄筋の物性

使用鉄筋	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏ひずみ (μ)
主鉄筋 (D16)	358	527	198	1835
配力鉄筋 (D13)	338	488	193	1826

写真-2 大型環境試験装置

写真-3 急速試験状況

写真-4 緩速試験状況

図-2 実験経過

的小さな段階で急速試験に移行した。また、急速試験は、R-dよりも18日長い59日間行い、20日間の真水湛水養生および湿布養生後、輪荷重走行試験を実施した。S-wでは、9日間の湿布養生後、260日間の緩速試験を実施した。なお、S-wでは、後述するコンクリートおよび鉄筋のひずみ増加量がR-dおよびR-wよりも緩慢であり、ひずみを統一するには、実験が大幅に長期化するため、床版上面におけるひび割れの発生状況が目視上でR-d、R-wと同程度となった段階で緩速試験を終了した。その後、輪荷重走行試験を開始するまで待機期間が生じたため、139日間真水に浸漬させることでASRの発生および鉄筋の腐食を可能な限り抑制した。

c) 輪荷重走行試験概要

本研究では、RC床版に疲労損傷を与える手段として、輪荷重走行試験を行った。

写真-5に輪荷重走行試験装置を示す。走行試験は、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、回転速度8.97rpmのモータおよびクランクアームで供試体を載せた台車を前後に1m往復運動させる機構で実施した。

輪荷重走行試験における供試体の支持条件を図-3に示す。供試体の支持条件は既往の研究²⁹⁾を参考にし、長辺方向の2辺は台車支持桁への固定はせず、丸鋼による単純支持とし鉛直方向の変位のみを拘束した。また、短辺方向の2辺は実橋の連続性の再現を考慮して、端桁による弾性支持とし、変位を拘束することで短辺からの曲げ破壊を防止した。また、荷重載荷時に発生する床版四隅の浮上りを防止するため、PC鋼棒により床版を台車支持桁に固定した。

水張り範囲(図-3中の水張り枠内)は、L型アルミ鋼材を用いて、輪荷重軌道部を中心に長さ2200mm、幅1500mmの土手を作製し、漏水防止のため、水張り枠にシリコンを注入した。その後、水張り範囲内に養生シートを敷き詰め、その上から散水を行った。なお、輪荷重走行試験途中において、水が床版上面より常時5mmを保つように留意した。

輪荷重走行試験における載荷ステップは、T荷重における1車輪分の荷重である98kN(10tf)を基本荷重とし、走行回数が10万回、20万回、25万回に達した際に、載荷荷重を29.4kNずつ増加させる段階載荷方式により実施した。

計測項目は、図-4に示すように、目標走行回数終了時点で基本荷重98kNを供試体中央に静的載荷した際の床版に発生する活荷重たわみ(弾性変形成分のみ)の計測と供試体下面のひび割れ観察である。なお、活荷重たわみの計測には高感度変位計(感度1/100mm)を用い、供試体中央に加え、供試体中央から橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ200mmずつ配置した。また、ひび割れ密度

写真-5 輪荷重走行試験装置

図-3 床版の支持条件

図-4 活荷重たわみの定義

写真-6 小型加振器

は、供試体下面のひび割れをスケッチし、パソコン上でこれをトレースした後、画像解析ソフトによって床版中央の1600mm×1200mmの範囲にあるひび割れの総延長を求め算出した。

輪荷重走行回数は、段階載荷による走行回数を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³⁰⁾。

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

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³¹⁾。

d) 強制振動試験

本研究では、ASRによるコンクリート内部の損傷度を定量的に評価するため、著者らがこれまでに開発してきた非破壊検査手法である、100～20,000Hzまでの調和振動が与えられる電磁コイル式の小型加振器を励振器とした強制振動試験を実施した^{32)～34)}。本手法は、調和振動を与えることにより加振方向の縦振動を励起させ、振動が及ぶ範囲の共振周波数を測定するものである。さらに、モード解析と同様に、ひび割れや空隙によって剛性と共振周波数が低下することに着目して、部材内部の劣化・損傷を評価する³⁵⁾ものである。なお、著者らは、本手法による床版の損傷度評価が、床版下面からの観察では検知が困難な床版内部の劣化程度を評価可能であることを示している³⁶⁾。

本実験での強制振動試験に用いた電磁コイル式の小型加振器を写真-6に示す。本実験で使用した小型加振器は、寸法φ95mm×56mm、重さ1.8kg、最大加振力50N、可変周波数100～20,000Hzである。試験方法は、小型加振器の振動面に貼付した制御加速度ピックアップの値をデジタル振動制御装置に取り込み、これが事前にプログラムした加速度パターンと合致するようにパワーアンプから小型加振器に送る電流量をコンピュータで制御する。このとき、小型加振器周辺で床版に貼付した測定用加速度ピックアップにより応答加速度を測定し、図-5に示すような共振曲線を得る。

振動試験は、加振器の振動テーブルを床版に当て、鉛直方向(床版厚さ方向)に調和振動を与えた。このとき、加振器と床版の間に、緩衝材として段ボールを挟むことで、加振器本体から床版に伝わる振動を防いだ。そして、加振点付近に計測用加速度ピックアップを厚さ0.6mmの両面テープを介して床版に接触させ、床版の定常応答(鉛直方向加速度)を測定した。これにより図-6に示すように部材全体ではなく、局所的な損傷を評価する

図-5 共振曲線の一例

図-6 周波数測定概略

図-7 周波数測定位置

写真-7 測定状況

ことが可能であり、原理として上下面で同じ計測結果が得られる。今回の測定では、掃引周波数を1,000～15,000Hz、加振器の加速度振幅1.0m/s²、測定時間18秒を基本とした。振動試験は、N-dでは実走行回数3万回、7万

回, 10 万回, 11.5 万回, 14 万回, 16 万回時の計 6 回, R-d では実走行回数 0 回, 3.5 万回, 10 万回, 18 万回, 22 万回時の計 5 回, S-w では, 実走行回数 0 回, 5 万回, 10 万回, 押抜きせん断破壊後の計 4 回行った. なお, R-w では, 実験の都合上, 共振周波数の計測を実施していない.

小型加振器による共振周波数の測定位置を図-7 に示す. 測定は, 300mm×300mm 範囲を基本とし, 輪荷重走行位置に関してはより密に計測を行った. 測定点は N-d, R-d で 41 箇所, S-w で 45 箇所である. RC 床版供試体の測定状況を写真-7 に示す. 共振周波数の測定は, N-d および R-d では床版上面で行い, 水張りを行った S-w では床版下面で実施した.

e) 実体顕微鏡によるASRの発生状況の確認

本実験では, 床版コンクリートにおけるASRの発生有無を確認するため, 実体顕微鏡を用いて反応リムの発生および, それに伴う微細なひび割れの観察を実施した. 具体的には, 輪荷重走行試験後に疲労破壊の影響を受けていない範囲で, 床版上面から床版厚さ方向にφ100mm で採取したコア(以下, 採取コア)をディスク状に切り出し, その切断面を肉眼および実体顕微鏡で観察した.

f) ASRによる床版内部のひび割れ発生状況観察

本実験では, ASRにより発生した床版内部のひび割れを観察するため, 採取コアを石膏で整形加工後, コンクリートカッターで2分割し, 蛍光塗料(シアノアクリレート性)をコンクリート表面に刷毛で満遍なく塗布させることで浸透させた. その後, 暗室内でブラックライトを当ててコア断面を観察した.

g) 供試体断面損傷状況の観察

本研究では, 輪荷重走行試験における供試体の損傷状況を確認するため, 輪荷重走行試験終了後に4分割した中央断面における破壊状況の観察を写真およびスケッチにより行った.

3. ASR促進によるRC床版の劣化状況

(1) ASRによる床版コンクリートのひずみ変化

図-8および図-9に, ASR促進による床版コンクリートのひずみ変化量を示す. なお, 前述の通り, S-wについては床版端部にひずみ計を設置していない. 図-8より, 床版中央部のひずみは, 床版を問わず鉄筋に拘束されるx方向とy方向で同じような膨張挙動を示す一方で, z方向では明らかに膨張量が増加する傾向を示した. これは, ASRによるコンクリートの膨張が鉄筋の拘束を受けにくい方向に進展したためと考えられる. また, 急速試験によりASRを促進させたR-d, R-wではz方向の膨張量が急激に立ち上がる傾向を示しているのに対して, S-wでは比較的緩やかに膨張する傾向を示しており, 環境条件の異なるASR促進試験を実施することでコンクリートの膨張速度に差が生じる結果となった. なお, 促進試験のASR促進終了時におけるひずみは, 急速試験を行った床版では, R-dのx方向726μ, y方向557μ, z方向で2700μ, R-wのx方向773μ, y方向452μ, z方向で4750μと, ASRの促進期間を変えることで, z方向で2000μ程度の差が生じる結果となった. 一方で, S-wではx方向365μ, y方向334μ, z方向で1302μと, 最も小さい膨張量を示した.

図-8および図-9より, 床版中央部と床版端部のひずみは, x方向およびy方向では同様の膨張傾向を示した. 一方, z方向の膨張量については, 床版端部でひずみが小さい結果を示した. これは, 写真-1に示すように, 定着確保のために床版端部で鉄筋厚さ方向の鉄筋が配置されていることから, z方向の膨張を拘束したものと推察される. このように, ASRによるコンクリートのひずみは, 鉄筋に拘束されるxおよびy方向では床版端部と床版中央で大きな差はないが, z方向については床版端部よりも床版中央でひずみが大きくなる傾向を示した.

(2) ASRによる鉄筋のひずみ変化

図-10に, ASR促進による床版内部の鉄筋ひずみ変化量の一例として, 床版中央位置における主鉄筋のひずみ

図-8 コンクリートのひずみ変化(床版中央部)

図-9 コンクリートのひずみ変化(床版端部)

変化量を示す。図より、鉄筋ひずみは、コンクリートの膨張量同様に、急速試験を行ったR-d, R-wではひずみが急激に立ち上がる傾向を示し、緩速試験を行ったS-wでは、緩やかな変化を示した。

図-11に、ASR促進終了時における主鉄筋のひずみ分布を示す。図より、いずれの床版についても、コンクリートのz方向におけるひずみ変化と同様に、上下鉄筋ともに床版中央部で最も大きなひずみを示した。また、各床版での中央部と端部でのひずみの差異については、概ね同程度であった。各床版のひずみを比較すると、急速試験を実施したR-w, S-wでは同程度であるのに対し、緩速試験を実施したS-wでは、いずれの鉄筋位置においても最も小さいひずみを示した。このように鉄筋ひずみは、コンクリートのひずみ変化と同様に中央よりも供試体端部付近の方がひずみは小さく、また極端なx方向およびy方向の両者のひずみの相違は認められなかった。すなわち、このひずみ計測から促進方法の違いによる3方向のASRの膨張を概ね把握できたと考えられる。

(3) 床版に導入されるケミカルプレストレス

表-4および表-5に、各床版の中央位置における鉄筋のひずみとケミカルプレストレスを示す。なお、ケミカルプレストレスは、膨張エネルギー一定則を参考としたASRが生じたRC部材のケミカルプレストレスの算出式である式(2)より算出した¹⁾。

$$\sigma_{cp} = p \times E_s \times \varepsilon_{cp} \quad (2)$$

ここで、 σ_{cp} ：導入されるケミカルプレストレス、 p ：拘束鋼材比(= A_s/A_c)、 E_s ：鋼材のヤング係数、 ε_{cp} ：鋼材に生じるひずみ、 A_s ：鉄筋の総断面積、 A_c ：コンクリートの断面積である。

表より、主鉄筋のひずみはいずれの床版においても下側よりも上側で大きく、鉄筋のひずみの差により床版上面が凸に反るような変形が生じたものと考えられる。また、各床版の鉄筋ひずみおよびケミカルプレストレスは、急速試験を行ったR-dとR-wでは、鉄筋間でのバラつきはあるものの、ケミカルプレストレスの平均値は同程度であったのに対し、緩速試験を実施したS-wではその半分程度であった。

(4) ASRによるコンクリートの劣化評価

図-12に、輪荷重走行試験開始時材齢における圧縮強度試験用供試体および採取コアによる圧縮強度とヤング係数の関係を示す。なお、図中には圧縮強度とヤング係数の設計用値³⁾を併せて示した。ここで、採取コアについては、膨張量を計測している位置で採取するのが望ましいが、ASRによるコンクリートの劣化を評価する上で、

図-10 鉄筋のひずみ変化

(a) 上側主鉄筋

(b) 下側主鉄筋

図-11 主鉄筋のひずみ分布

表-4 鉄筋のひずみ

供試体	ひずみ(μ)			
	主鉄筋		配力鉄筋	
	上側	下側	上側	下側
R-d	942	510	1036	793
R-w	902	665	681	858
S-w	492	362	356	515

表-5 ケミカルプレストレス

供試体	ケミカルプレストレス (MPa)	
	主鉄筋方向	配力鉄筋方向
R-d	1.9	2.4
R-w	2.1	2.0
S-w	1.1	1.1

疲労破壊の影響を受けていない範囲でのみコアを採取した。また、コアは後述する図-14に示す位置で床版厚さ方向に $\phi 100\text{mm}$ で採取した。なお、本実験に使用した採取コアは、 $\phi 100\text{mm}$ 、高さ 160mm と、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」によって定められる供試体寸法法の条件を満たしていないため参考値とし、図中には高さ直径比が2.0の強度に補正した結果を示している。

図より、各床版の試験開始時における圧縮強度試験用供試体(凡例にTPと表記)の圧縮強度は、促進試験を行っていないN-d(材齢34日)で圧縮強度 25.5MPa 、ヤング係数 26.3GPa 、急速試験を実施したR-d(材齢97日)で圧縮強度 34.3MPa 、ヤング係数 27.1GPa 、R-w(材齢177日)で 34.6MPa 、ヤング係数 25.3GPa であった。ASR促進を実施したR-dおよびR-wの圧縮強度試験用供試体では、設計用値よりも若干ヤング係数が低い値を示したが、これは封かん養生ではあるものの、促進期間においてASRが多少進行した影響であると考えられる。一方で、緩速試験を実施したS-wでは圧縮強度 24.6MPa 、ヤング係数 10.6GPa と圧縮強度、ヤング係数ともに設計用値よりも大きく低下する結果を示した。これは、促進期間においてASRが進行したことで、コンクリートの物性が大きく低下したためと推察される¹⁰⁾。次に、採取コアでは、N-dよりも、ASR促進を実施したR-d、R-w、S-wで圧縮強度およびヤング係数の低下が著しい結果を得た。特に、R-dおよびR-wについては、圧縮強度、ヤング係数ともにTPよりも大きく低下する結果であった。これは前述の通り、ASR促進試験中における塩分および水分の供給条件が異なったことで、ASRの劣化程度に差異が生じたことに起因すると

考えられる。それぞれの床版における採取コアの試験結果と設計用値と比較してみると、圧縮強度に対するヤング係数が大きく低下したことがわかる。これは、ASRにより床版内部にひび割れが生じたことによるものと推察され、いずれの床版についてもASRによってコンクリート内部の劣化が進行したと判断される。

(5) ASRによるひび割れおよびASRゲルの発生状況

図-13および図-14に、ASR促進後に観察した、床版上面と下面のひび割れ発生状況を示す。なお、図中の水色で示される箇所は、前述したコアの採取位置を示している。図よりいずれの床版においても、床版上面と下面では、上面でひび割れが多く発生した。床版上面からのみ塩分を供給したR-d、R-wのみならず、床版全面から塩分が供給されるS-wについても同様の傾向であったことを考えると、床版上下面のひび割れ発生状況の違いは、

図-12 圧縮強度とヤング係数

図-13 ASR促進後のひび割れ発生状況(床版上面)

図-14 ASR促進後のひび割れ発生状況(床版下面)

写真-8 実体顕微鏡による ASR ゲルの観察

写真-9 蛍光塗料によるひび割れの観察

鉄筋量の違いにより床版上面が凸に反るような変形が生じ、床版上面で引張応力が大きくなったことなどに起因すると考えられる。また、床版上面では、いずれの床版についても供試体端部にひび割れが多くみられたが、これは、供試体端部と中央では配筋量に差があることで、膨張に対する拘束度が異なったためと推察される。一方、床版下面では、ひび割れの発生は上面に比して少なかった。また、ひび割れのほとんどが主鉄筋方向に生じており、これについては主鉄筋と配力鉄筋の配筋量の差によると考えられる。

各床版のASRによるひび割れはR-d、S-wよりもR-wで多く発生する結果となった。これは、R-wではz方向におけるコンクリートの膨張量が大きく、これに伴いひび割れが多く生じたと考えられる。なお、各床版に生じたひび割れの最大のひび割れ幅は、急速試験を行ったR-dでは、上面で0.1mm、下面で0.05mm、同じく急速試験を行ったR-wでは上面で0.05mm、下面で0.05mmであったのに対し、緩速試験を実施したS-wは上面で0.1mm、下面で0.3mmと、最もひび割れ幅が大きい結果を示した。このように、ASR促進速度および促進期間を変えることで、

床版上面あるいは下面に発生するひび割れの発生形態が大きく異なることが示された。これら促進速度の違いによるひび割れ発生形態の差異については、ASR促進時におけるASRゲルの生成や移動といった時間依存性のある現象が影響している可能性³⁰⁾が考えられるが、これについては今後の検討課題としたい。

写真-8に、実体顕微鏡によって観察したASRの発生状況の例として、R-wとS-wの観察結果を示す。写真より、本実験で使用した床版では、骨材粒子周辺のセメントペーストに滲出物が認められ、ASRが発生していることが確認された。また、骨材には反応リムおよびゲルによると思われるひび割れの発生が認められ、ASRに起因したと思われるひび割れにより、床版コンクリートの劣化が進行していることが確認された。

写真-9に、床版内部に発生したひび割れの状況を示す。なお、写真中の赤丸は鉄筋位置を示しており、白着色部は整形時に使用した石膏である。写真より、まずASR促進を行っていないN-dについては、目視上ではASRによるひび割れは確認されなかった。一方で、ASR促進を実施した床版では、いずれもASRによる劣化を生じた実床

版で見られるような水平方向のひび割れが¹⁵⁾観察された。特に、急速試験を行ったR-dおよびR-wでは、水平方向のひび割れが多く見られ、ASRによる床版内部の劣化が確認された。また、R-wではR-dよりもひび割れの本数が多く発生しているが、これは、床版z方向におけるコンクリートの膨張量の差が要因と判断される。一方で、緩速試験を実施したS-wでは、目視で観察できるひび割れはR-dおよびR-wに比して少なく、ASRによるひび割れの発生は顕著でなかった。しかし、実体顕微鏡による観察ではASRに起因すると思われる微細なひび割れが観察されており、骨材周辺や骨材を横断するような微細なひび割れが多数生じていた可能性が考えられる。このような、各床版での微細なひび割れの発生機構については今後さらに究明する必要がある。

(6) 鉄筋腐食減量率の測定結果

本実験では、ASR促進時において高濃度の塩分を床版に供給していることから、鉄筋の腐食状況を定量的に評価する必要があると判断し、輪荷重走行試験後に鉄筋腐食減量試験を実施した。

試験に用いた鉄筋は、輪荷重走行範囲外の位置で鉄筋をはつり出し、上下主鉄筋、上下配力鉄筋を各床版から1本ずつ採取した。その結果、鉄筋腐食減量率はいずれの床版についても1.0%以下であり、本実験の範囲内では塩害がRC床版の耐疲労性に与える影響は軽微であると判断した⁹⁾。

図-15 載荷荷重と実走行回数

図-16 基本荷重と中央変位の関係

図-17 床版下面のひび割れ発生状況(等価繰返し走行回数：10 万回)

図-18 床版下面のひび割れ発生状況(疲労限界状態時)

4. 輪荷重走行試験による耐疲労性に関する検討

(1) 段階載荷による輪荷重走行試験結果

図-15に、輪荷重走行試験結果として、段階載荷による載荷荷重と疲労限界状態に達した際の実走行回数の関係を示す。ここで、本研究における疲労限界状態は、既往の研究⁸⁾より活荷重たわみが急増し始める状態とした。

また、疲労限界状態に至った走行回数は、活荷重たわみが急増する直前に計測を実施した走行回数とした。なお、輪荷重走行試験は、押抜きせん断破壊(床版下面が面外方向に拔出し、所定の荷重が載荷困難な状況)が生じるまで試験を継続させた。図より、N-dが実走行回数21万回で疲労限界状態に達したのに対し、R-dでは26万9000回、R-wは25万3000回と、急速試験を行った床版はいず

れも健全な床版であるN-dよりも疲労限界状態に至る走行回数が増加する結果であった。一方で、S-wでは12万回とN-dよりも早期に疲労限界状態に至った。このように、異なるASR促進に伴う損傷状況の違いによって、耐疲労性に差が生じる結果を示し、次節よりASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響を検討する。

(2) 荷重と変位の関係

図-16に、所定の回数ごとに静的載荷を行った際の基本荷重(本研究では98kN)と床版中央変位の関係を示す。なお、静的載荷によるたわみの計測は基本的には走行回数1万回ごとに計測を行い、試験初期段階および疲労限界付近では、たわみの推移を明確に判断するため、短い間隔で計測を行った。図より、走行回数2回では、N-dで0.77mm、R-dで0.88mm、R-wで0.96mm、S-wで0.90mmと、ASR促進を行った床版ではいずれも健全なN-dよりたわみが大きい結果を示した。これは、床版の下面および内部に生じたひび割れにより剛性が低下したためと考えられる。しかし、2回から10万回のたわみ量の増加は、ASR促進を実施した床版3体では0.2mm程度であったのに対し、N-dではたわみ量の増加が0.3mmと最も大きい結果を示した。これは、前述したケミカルプレストレスの影響であると考えられ、ASR促進時において床版に導入されたケミカルプレストレスが剛性の低下を抑制したと推察される。その後のたわみ量の推移は、N-dでは輪荷重走行回数および後述する床版下面に発生するひび割れの増加に伴い、徐々にたわみ量が増加していく傾向を示し、ASR促進を行った床版ではいずれもたわみの増加が小さい傾向を示した。また、疲労限界状態におけるたわみ量は、N-dで1.74mm、R-dで1.63mm、R-wで1.31mm、S-wで1.16mmと、水張り試験を実施したR-w、S-wでは剛性が大きく低下することなく疲労限界状態に至る結果となった。

(3) 床版下面におけるひび割れの発生状況

図-17および図-18に、輪荷重走行試験の初期段階、途中段階と、疲労限界状態時における下面のひび割れの進展状況を示す。供試体下面に発生したひび割れは、基本的には走行回数5万回ごとに基本荷重98kNを載荷した状態で、試験初期段階ではひび割れの進展を明確に把握するため、短い間隔で観察を行った。なお、図中に示すひび割れ線のうち、青線は輪荷重走行試験前に発生していたASRによるひび割れ(図-13参照)、黒線は本論文に示されるひび割れ図で、1つ前の段階までに観察されたひび割れ、赤線は括弧内に示す走行回数終了時点で新たに観察されたひび割れを示している。

図-17より、走行回数10万回時のひび割れは、N-dでは

写真-10 ゲルの滲出(S-w)

写真-11 コンクリートの砂利化(S-w)

輪荷重走行範囲を中心にひび割れが軸方向と軸直角方向に進展を示したのに対して、急速試験を行ったR-dおよびR-wでは、ASRによって生じたひび割れが連なるように進展する傾向を示した。一方で、S-wでは、輪荷重走行範囲のみでひび割れが進展する傾向を示した。

図-18より、各床版の疲労限界状態時におけるひび割れは、N-dでは、格子状にひび割れが形成され、床版下面のひび割れ状況に基づく劣化進行過程は状態Ⅲ²⁾の劣化期と類似のひび割れ状態を示した。これに対して、ASR促進を行った床版ではひび割れの進展が異なり、急速試験を行ったR-dおよびR-wでは、いずれも主鉄筋方向に生じたASRによって発生したひび割れが連なるように形成される傾向を示した。一方で、緩速試験を行ったS-wでは、輪荷重走行範囲で局所的にひび割れが進展する傾向を示し、生じたひび割れの本数も他の床版より明らかに少ない状態であった。なお、水張りを行った床版では、R-wで等価繰返し走行回数1700万回時、S-wで等価繰返し走行回数10万回時において床版下面で水染みが確認され、押抜きせん断破壊後の床版下面では、写真-10に示すようなASRゲルの滲出、床版上面では写真-11に示すようなコンクリートの砂利化が観察された。

(4) 共振周波数比の分布

図-19から図-21に、輪荷重走行試験の各段階で計測し

図-19 共振周波数比の分布(N-d)

図-20 共振周波数比の分布(R-d)

図-21 共振周波数比の分布(S-w)

た共振周波数比の分布を示す。ここで、共振周波数比とは、健全なRC床版における共振周波数の理論値と各段階で計測された共振周波数との比である。なお、本実験では、N-dの載荷試験前(走行回数0回時)における共振周波数の計測を実施していないため、健全なRC床版の共振周波数の理論値を、N-dのテストピース(φ100mm×200mm)の密度と動弾性係数から式(3)を用いて求めた³⁹⁾。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (3)$$

ここで、 f : 共振周波数(Hz)、 L : 床版厚さ(mm)、 E_d : 動弾性係数(N/mm²)、 ρ : コンクリートの密度(kg/m³)である。なお、既往の研究³⁹⁾により床版に対して、式(3)より求めた理論値が、実測値とよく整合することが確認されている。これより、健全なRC床版の共振周波数の理論値は10,596Hzであった。

図よりN-dでは、等価繰返し走行回数10万回までは供試体全面において共振周波数比が0.85から0.9の範囲内にあり、共振周波数比の低下は顕著でない。その後、等価繰返し走行回数50万回では輪荷重走行範囲内において共振周波数比が0.7から0.85の範囲までに低下し、供試体中央位置では0.65と大きく低下した。これは、輪荷重の作用する位置で疲労によるひび割れが進展した影響によって共振周波数比が低下したと考えられる。等価繰返し走行回数180万回では、輪荷重走行範囲内全域で共振周波数比が0.6程度となり、その後、疲労限界状態に達した。R-dの走行回数0回では、共振周波数比が概ね1.0を示す範囲が多く、床版全体の損傷度としては健全相当であった。しかし、床版中央位置については、共振周波数比が0.85程度を示す箇所があり、ASRによる床版内部の損傷が見られた。これは、前述したコンクリートのz方向のひずみが、床版端部よりも中央で大きくなることから、床版

内部における損傷が床版中央で大きくなったと考えられる。その後は、等価繰返し走行回数240万回では床版中央で共振周波数比が0.65程度まで低下し、等価繰返し走行回数1800万回ではN-d同様に、輪荷重走行範囲内全域で共振周波数比が大きく低下し、疲労限界状態に至った。一方、最も少ない走行回数で疲労限界状態に至ったS-wでは、R-d同様に走行回数0回の段階では1.0を示す箇所が多く、床版全体の損傷は大きくなかった。しかし、床版中央位置では、共振周波数比が0.8程度を示す箇所が確認された。このことから、前述した床版上下面と同様に、床版内部においても、促進方法を変更することでひび割れの発生形態に差異が生じたことが示唆された。その後の走行回数に伴う共振周波数比の低下は、床版内部の劣化の進行程度が他の2体よりも顕著であり、等価繰返し走行回数5万回時点では、共振周波数比0.6程度を示す箇所が輪荷重走行範囲内にあり、等価繰返し走行回数10万回時では輪荷重走行範囲の一部で共振周波数比が0.6を下回る結果を示した。この共振周波数比の低下は、ASRによるひび割れと疲労損傷によって生じるひび割れの相乗作用によるものだと考えられ、S-wでは載荷前で既に発生していたASRによるひび割れが輪走行作用を受けることで増幅し、内部損傷が進行したと推察される。

以上のように、輪荷重走行試験の各段階で計測した共振周波数比のマッピングを示すことによって、これまで検出が困難であった床版内部の疲労損傷の進展状況を可視化できた。

(5) 断面損傷状況

図-22に、輪荷重走行試験終了後に観察した橋軸方向断面におけるひび割れ状態を示す。なお、図中の網掛け

部はコンクリートが剥離および砂利化した位置を示している。図より、いずれの床版についても、上側主鉄筋位置において耐疲労性を低下させる要因である⁴⁰⁾水平ひび割れ(図中の青線)の進展が見られた。また、ASRを受けた床版でもひび割れの進展に違いがあり、急速試験を実施したR-d、R-wでは床版全長にひび割れが分散しているのに対して、緩速試験を実施したS-wでは、輪荷重走行範囲にひび割れが集中した。これは、前節で述べた共振周波数比分布において、S-wの床版中央位置で局所的に共振周波数比が低下している箇所と整合するような結果であった。このことから、小型加振器を用いた強制振動試験は、床版内部の損傷状態を評価する上で有効な手段であることが示唆された。また、S-wでは床版中央位置において上面から下面にかけて貫通するようなひび割れが発生しており、床版内部で局所的に疲労損傷が進行し、そこに床版上面から水の浸入があったことで早期に破壊に至った可能性があると考えられる。

なお、供試体断面の観察時において、全ての床版で鉄筋の破断や降伏には至っておらず、鉄筋の定着は十分に確保されていたことを確認している。

(6) 活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係

図-23に活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。また、図中には疲労破壊に到る直前の走行回数までをプロットしている。なお、活荷重たわみは、走行回数2回後を初期値としてその変化を示した。

図より、輪荷重走行試験開始直後(等価繰返し走行回数2回)の活荷重たわみは、N-dで0.77mmであるのに対し、ASR促進を行った床版では、R-dで0.92mm、R-wで0.96mm、S-wで0.90mmと、いずれも初期の活荷重たわみ

図-22 床版軸方向断面の損傷状況

が大きい結果を示した。これは、ASRにより床版に導入されたケミカルプレストレスの影響と、床版下面および床版内部に発生したひび割れの大小関係によるものだと考えられ、载荷初期の剛性に関しては、ケミカルプレストレスの影響以上に床版に発生したひび割れの影響が大きかったことで剛性が低下したと考えられる。しかし、その後の活荷重たわみの増加傾向は、それぞれの床版で異なった。まず、N-dでは、等価繰返し走行回数の増加とともに活荷重たわみも増加する傾向で、等価繰返し走行回数が約700万回で疲労限界状態に達した。これに対して急速試験を実施したR-dおよびR-wでは、等価繰返し走行回数1000万回までは、等価繰返し走行回数の増加に対する活荷重たわみの増加量はN-dよりも小さい傾向を示した。これは、前述したケミカルプレストレスによって、剛性の低下が抑制されたためと考えられる。等価繰返し走行回数1000万回以降は、徐々に活荷重たわみが増加する傾向を示し、R-dでは9000万回、R-wでは3300万回で疲労限界状態に至る結果となり、N-dよりも走行回数が増加する結果を示した。これまでに、高温高湿度環境下においてRC部材に対してASR促進を実施した場合、静的な耐荷力が健全なRC部材よりも向上するといった研究成果²⁰⁾が報告されているが、輪荷重が作用する移動繰返し载荷実験においても、既往の研究と同様にケミカルプレストレスの作用で耐疲労性が向上する結果を示した。また、水張り試験を実施したR-wでは疲労限界に達する走行回数がR-dの約1/4であり、耐疲労性が大きく低下する結果を示した。これは、子田らの研究⁴¹⁾において、健全な供試体に対して水張り試験を実施した場合、疲労限界状態に達する走行回数が乾燥状態で試験を行った供試体の約1/4となるといった実験結果と整合する結果であり、本実験においても水の作用により、耐疲労性が低下したと考えられる。

緩速試験を実施したS-wでは、等価繰返し走行回数に対する活荷重たわみの推移はR-d、R-wと同様の傾向を示した。しかし、等価繰返し走行回数67万回で活荷重たわみが急激に立ち上がり、他の床版よりも明らかに少ない走行回数で疲労限界に至る結果を示した。疲労限界に至った走行回数を健全供試体と比較すると、S-wは健全供試体の約1/15の走行回数で疲労限界に至っており、前述した水作用の影響以上に耐疲労性が低下する結果であった。

このように、疲労限界状態に達する等価繰返し走行回数は、促進試験の方法で大きく異なり、急速試験でASRを進行させた床版では、ケミカルプレストレスの影響により、健全な床版よりも耐疲労性が向上した。反対に、緩速試験でASR促進を進行させた床版では、ケミカルプレストレスが急速試験を行った床版の半分程度であり、

図-23 活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係

図-24 ひび割れ密度と等価繰返し走行回数の関係

図-25 床版中央の共振周波数比と等価繰返し走行回数の関係

ケミカルプレストレスの影響以上にASRによるコンクリート内部の劣化の影響が大きく、健全な床版よりも耐疲労性が大きく低下した。また、S-wについては、主鉄筋方向のコンクリート膨張量が静的な耐荷力には影響の少ないとされる範囲であっても、本実験においては、耐疲労性が大きく低下する結果を示した。

つまり、一般に、ASRにより劣化を生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴い圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが¹¹⁾⁴²⁾、RC部材の耐疲労性については、ASRによるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因により評価することが重要であることが示唆された。

(7) ひび割れ密度と等価繰返し走行回数の関係

図-24に、床版下面に発生したひび割れの密度と等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、N-dでは、走行回数約1万回程度から密度が急激に立ち上がり、その後は緩やかに増加する結果となった。これに対して、ASR促進を実施した床版では、ひび割れ密度の増加傾向がそれぞれ異なった。急速試験を行ったR-dおよびR-wでは、N-dよりも等価繰返し走行回数に伴うひび割れ密度の増加が小さい傾向を示した。これは、ケミカルプレストレスの影響により、輪荷重によるひび割れの発生が抑制されたためと考えられる。また、R-wでは、R-dよりも初期のひび割れが多く発生していたものの、疲労限界状態においてはR-dよりも小さい密度を示した。これは、ASRによるひび割れが多く発生し、輪荷重走行試験前で既にひび割れ網がほぼ定まっていたことで、新たなひび割れが生じにくい状態であったと推察される。一方で、S-wでは、ひび割れ密度の増加量が他の3体よりも明らかに小さい傾向を示し、表面上ひび割れの発生が多くない状態で疲労限界に至った。S-wでは前述した床版下面の観察により、輪荷重走行範囲に集中していたことが確認されており、またASRによるひび割れの幅も他の床版に比して大きかった。このことから、ASR促進時において発生した幅の大きなひび割れが支配的となり、輪走行作用によるひび割れの分散性が著しく低下し、輪走行範囲直下で局所的にひび割れが進展したことで、急激な疲労破壊に至ったものと考えられる。

(8) 共振周波数比と等価繰返し走行回数の関係

図-25に床版中央位置で計測した共振周波数比と等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、まず走行回数0回時の共振周波数比は、R-dで0.95、S-wで0.86と、ASR促進を実施した床版ではいずれも載荷前において共振周波数比が低下している。これは、前述の通り、ASRにより床版内部に発生したひび割れが共振周波数比を低下させたためと推察される。その後、N-dおよびR-dでは、等価繰返し走行回数10万回までは、走行回数の増加に伴い共振周波数比が徐々に低下する傾向を示した。この区間では、前述した床版下面に発生するひび割れの進展が先行しているが、これは、床版表面で観察されるひび割れの向きが床版に対して垂直であり、加振方向と同じである

ために、振動試験に与える影響が小さかったと推察される。等価繰返し走行回数10万回から約300万回においては、共振周波数比が0.6程度まで大きく低下した。この時、N-dのひび割れ密度の増加は緩やかになっていることから、疲労荷重によってひび割れが床版内部で進展したことで周波数が低下したと考えられる。その後、等価繰返し走行回数約300万回以降では、N-d、R-dともに活荷重たわみおよびひび割れ密度の増加は緩やかであるのに対し、共振周波数比は0.5程度まで低下する傾向を示した。

次にS-wでは、等価繰返し走行回数5万回時では、他の2体と同様に共振周波数の低下は見られなかった。等価繰返し走行回数5万回から10万回までの区間では、活荷重たわみとひび割れ密度が低い値で推移しているが、共振周波数比は0.73まで低下した。これは、等価繰返し走行回数10万回時点で、床版内部におけるひび割れが他の2体よりも進展したと考えられ、強制振動試験による共振周波数比を把握することで、床版内部の劣化性状を推定できる可能性が示唆された。その後、等価繰返し走行回数約67万回で活荷重たわみが急増し、疲労限界状態に至った。なお、S-wの押抜きせん断破壊後における床版中央位置の共振周波数比は0.38であった。

5. まとめ

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) ASRにより劣化した道路橋RC床版は、ASRの促進方法により床版の損傷状況および耐疲労性が大きく異なった。急速にASRを促した床版では、ケミカルプレストレスの影響により健全な床版に比べて耐疲労性がむしろ向上し、反対に、緩やかにASRを促した床版では、耐疲労性が大きく低下する結果となった。一般に、ASRを生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴いヤング係数、圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが、RC床版では、ASRによるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因によりその耐疲労性が定まることが示された。
- (2) ASRを緩やかに促進させた床版は、急速に促進させた床版よりも、コンクリートの膨張量および床版に導入されるケミカルプレストレスは小さく目視可能なひび割れの発生も顕著でなかった。しかし、顕微鏡では微細なひび割れが観察されており、ASR促進後の段階で共振周波数が明らかに低下した。このことから、ASRを緩やかに促進させた場

合、床版内部に微細なひび割れが発達し、これが床版の見かけの剛性を低下させる要因であることが示唆された。

- (3) ASR促進を実施した床版では、いずれもASRによるひび割れが支配的となり、その後の疲労による新たなひび割れの発生が抑制される傾向を示した。特に、ASRを緩やかに促進させた床版では、ASRにより発生した幅の大きなひび割れの影響により、疲労によるひび割れの分散性が乏しく、その後の輪荷重走行試験では、輪走行範囲直下で局所的にひび割れが進展し、急激な疲労破壊に至る傾向を示した。
- (4) 強制振動試験結果より、疲労損傷の各段階において複数点の共振周波数比を計測することで、部材の損傷レベルの評価および損傷範囲の推定が可能であることが示された。特に、活荷重たわみや床版下面に発生するひび割れでは疲労限界状態に至る直前までその兆候が表れないのに対して、共振周波数比では早い段階で低下傾向が認められ、床版内部の疲労損傷を検知する上で有効な手法となり得ることが明らかになった。

本研究は国内外でも例を見ない大規模かつ独創的な実験手法により、実物大RC床版供試体を用いてASR促進試験、および輪荷重走行試験を行い、ASRの促進方法がRC床版の損傷度および耐疲労性に影響を及ぼすことを明らかにした点で意義があると思われる。しかし、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響に関する研究は端緒に就いたばかりであり、未だ未解明な部分が数多く存在する。特に、実環境ではASRと疲労が同時に作用するため、今後は実環境におけるASRと疲労の劣化進行過程を踏まえた実験を実施する必要がある。本研究ではASR促進試験後に輪荷重走行試験を行ったが、まとめ(3)に示す通り、ASRにより発生したひび割れが支配的となり、その後の疲労による新たなひび割れの進展が抑制されるという結果を得た。従って、今後は予備載荷として輪荷重走行試験によりあらかじめ疲労によるひび割れを発生させた後にASR促進試験、さらには輪荷重走行試験(本載荷)を行い、ASRによるひび割れの進展状況とその後の疲労破壊に至る過程を究明する予定である。以上の実験データを3次元非線形有限要素解析モデル⁴⁾に反映させることにより、将来的には解析により凍結防止剤散布下においてASRを受けたRC床版の耐疲労性について評価することが可能になると思われる。

謝辞：本研究は、一般財団法人 土木研究センター、太平洋セメント(株)、住友大阪セメント(株)、金沢大学(久保善司准教授)、および東北大学との共同研究として行

われ、一部実験の実施にあたっては科学研究費(課題番号：24360184)の助成を受けた。また、本研究は日本大学工学部土木工学科コンクリート工学研究室の多くの学生が携わった成果をまとめたものである。さらに、本研究を進めるにあたり、前川宏一教授(東京大学大学院)、田中泰司特任准教授(東京大学生産技術研究所)、高橋佑弥助教(東京大学大学院)より有益な御助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

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) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008.
- 3) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.
- 4) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No. 71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，2006.
- 5) 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.
- 6) 子田康弘，古山幸永，岩城一郎：塩害を受けた RC 床版の劣化性状と耐荷性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 1, pp. 813-818, 2008.
- 7) 田附伸一，津吉毅，石橋忠良，松田芳範，今井勉：ASR により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究，土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 1, pp. 166-177, 2007.
- 8) 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.
- 9) 例えば小野貴之，三田村浩，林川俊郎，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性に関する研究，第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp. 75-80, 2008.
- 10) 例えば小野貴之，三田村浩，林川俊郎，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について，構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 1432-1441, 2009.
- 11) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.
- 12) 大深伸尚，鳥居和之，池富修，川村満紀：鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 1, pp. 43-48, 2000.
- 13) 小林一輔，丸章夫，立松英信：アルカリ骨材反応診断，森北出版，1991.
- 14) 上原伸郎，幸左賢二，大代武志，山口和成：複数の鉄筋破断が生じた ASR 実構造物の鉄筋損傷評価，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 866-877, 2013.
- 15) 五島孝行，大田孝二，梶尾聡，鈴木康範，井戸康清，島田守：アルカリ骨材反応で損傷した道路橋床版の調査，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，pp. 835-836, 2013.
- 16) 久保善司，佐古崇，川崎文義，横山広：床版部材の ASR 膨張挙動と FRP シート貼付けによる膨張抑制，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp.

- 1243-1248, 2009.
- 17) 小林和夫：アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能－はり部材－，コンクリート工学，Vol. 24, No. 11, pp. 70-78, 1986.
- 18) 棚橋和夫，岩永武士，小柳洽，浅野幸夫：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp. 843-848, 1996.
- 19) 小柳洽，六郷恵哲，内田裕市，長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp. 947-952, 1993.
- 20) 小柳洽，六郷恵哲，石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひびわれと RC 部材の性状，セメント技術年報，No. 39, pp. 352-355, 1985.
- 21) 岩波光保，横田弘，鳥居和之，鈴木義晃，奥山和俊：アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート部材の力学挙動と補強方法に関する提案，港湾技研資料，No. 994, 2001.
- 22) 松田豊樹，森川英典，王健：ASR が生じた RC 部材のせん断耐荷性に関する実験的検討，神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要，第 3 号，pp. 23-31, 2011.
- 23) 小林孝元，田中泰司：アルカリ骨材反応による劣化の進行した RC 床版の押し抜きせん断試験，コンクリート構造物の補修・補強，アップグレード論文報告集，第 13 巻，pp. 259-264, 2013.
- 24) 久保善司，山本晋，服部篤史，宮川豊章：ASR がコンクリート曲げ部材の耐荷性状に与える影響，材料，Vol. 50, No. 9, pp. 1013-1020, 2001.
- 25) 例えば，久保善司，上田隆雄，黒田保，野村倫一：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No. 1, pp. 1691-1696, 2006.
- 26) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(鋼橋編)，2002.
- 27) 五島孝行，太田孝二，岸良竜，大野晃，前島拓，久保善司：アルカリシリカ反応と輪荷重疲労で複合劣化した床版の疲労耐久性，土木技術資料 56-12, pp. 60-63, 2014.
- 28) 五島孝行，岸良竜，大野晃，前島拓：反応性粗骨材を用いた道路橋床版の輪荷重走行試験，第 8 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp. 1-6, 2014.
- 29) 広中憲，大西弘志，横山広，関口幹夫，堀川都志雄：道路橋 RC 床版の疲労耐久性を評価するための試験方法について，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 17-24, 2003.
- 30) 土木学会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004.
- 31) 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, 1996.
- 32) 内藤英樹，大竹雄介，齋藤知廣，鈴木基行：振動試験に基づくコンクリート部材の損傷同定に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 2, pp. 949-954, 2011.
- 33) 内藤英樹，齊木佑介，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.
- 34) 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.
- 35) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，2009.
- 36) 前島拓，内藤英樹，子田康弘，岩城一郎，鈴木基行：共振周波数の低下に着目した実道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価，構造工学論文集，Vol. 61A, pp. 777-787, 2015.
- 37) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.
- 38) Takahashi, Y., Shibata, K. and Maekawa, K. : Chemo-Hygral Modeling of Structural Concrete Damaged by Alkali silica Reaction, *Proceedings of the 1st Ageing of Materials & Structures 2014 Conference*, pp. 424-431, 2014.
- 39) 内藤英樹，大竹雄介，渡邊孝和，鈴木基行，中野聡，岩城一郎，木皿尚宏：反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 58A, pp. 150-161, 2012.
- 40) 横山広，浦修造，関口幹夫，堀川都志雄：床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 2, pp. 451-456, 2010.
- 41) 子田康弘，齊藤卓也，岩城一郎：輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 9 巻，pp. 145-150, 2009.
- 42) 宇治公隆，梁俊，新道竹文，王鋭：アルカリシリカ反応による劣化を生じたコンクリートの圧縮疲労条件下における寿命予測，土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 2, pp. 259-270, 2009.
- 43) 例えば，土屋智史，牧剛史，齊藤成彦，渡邊忠朋，前川宏一：非線形有限要素解析による RC 面部材の損傷指標と耐力評価，土木学会論文集 E2, Vol. 68, No. 3, pp. 209-224, 2012.

(2015. 3. 24 受付)

INFLUENCE OF ALKALI SILICA REACTION ON FATIGUE RESISTANCE OF RC BRIDGE DECK

Takuya MAESHIMA, Yasuhiro KODA, Ichiro IWAKI, Hideki NAITO,
Ryo KISHIRA, Yasunori SUZUKI, Koji OHTA and Motoyuki SUZUKI

This study aims at investigating an influence of alkali-silica reaction (ASR) on fatigue resistance of RC bridge deck. Firstly, using full-sized RC deck specimens, two types of ASR accelerated tests were performed by varying the environmental condition of ASR. Then, a wheel load trucking test was conducted focusing on the presence or absence of water on upper-surface of the specimen. In this experiment, the deflection and crack patterns of RC deck specimen in each number of trucking were measured, and the degradation of stiffness due to ASR and fatigue was evaluated by forced vibration test using small vibration device. As a result, it was revealed that the fatigue resistance of RC bridge deck by ASR depended on the environmental condition of ASR, which was assumed due to the introduction of chemical prestress by ASR, and the interaction of crack propagation and water action. Furthermore, the vibration test proved useful in evaluating the fatigue resistance of RC bridge deck by ASR.