

論文

反応性粗骨材を用いた道路橋床版の輪荷重走行試験

五島 孝行*, 岸良 竜**, 大野 晃***, 前島 拓****

*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)

**工修, 太平洋セメント (株) (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

***工修, グループリーダー, 住友大阪セメント (株) (〒274-8601 千葉県船橋市豊富町 585)

****工修, 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)

近年、コンクリートの材料劣化が原因で道路橋床版が損傷する例が多く見られる。ここでは、材料劣化のうち ASR(アルカリシリカ反応)を取り上げ、ASR 促進の養生期間を変えた RC 床版供試体に対し、輪荷重走行試験装置による疲労試験を実施することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に与える影響を検討した。その結果、ASR によるコンクリートの膨張が鉄筋に拘束されたことでケミカルプレストレスが導入され、ASR 反応を有する床版は予想に反して耐疲労性が向上する結果を示した。

キーワード：アルカリシリカ反応，反応性粗骨材，輪荷重走行試験

1. はじめに

近年、東北地方をはじめとした積雪寒冷地において、凍結防止剤の大量散布に伴い、塩害や凍害、アルカリシリカ反応(以下、ASR)といった材料劣化が促進され、これら材料劣化と疲労との複合劣化によって、道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)の早期劣化が顕在化している¹⁾。

これら材料劣化のうち ASR については、従来、コンクリート中に鉄筋が適切に配置されている場合には、ASR がコンクリート構造物の耐荷力・耐疲労性に与える影響は小さいとされ、特に RC 床版については、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 の発生は少ないものとされていた²⁾。しかしながら近年では、凍結防止剤散布下において ASR 材料劣化による RC 床版の耐疲労性の低下により、取り替えを余儀なくされた床版が増加しつつある³⁾。しかし、ASR が RC 床版の耐疲労性に与える影響について検討した例は国内外を問わず極めて少なく、未だ解明されていない現状にある。

そこで本研究では、材料劣化のうち ASR を取り上げ、ASR が RC 床版の耐疲労性に与える影響について検討した。まず、同一配合で反応性粗骨材を使用した RC 床版供試体を作製し、これに対して大型の環境試験装置を用いた ASR 促進養生を実施した。その際、各供試体で促進期間に差をつけることで、ASR の劣化程度を調整した。そして、ASR を生じさせた RC 床版供試体による輪荷重走行試験によりその耐疲労性を実験的に評価した。

2. 供試体および ASR 促進養生と輪荷重走行試験の概要

2.1 実験条件

表-1 に実験条件を示す。本研究の実験条件は、ASR が RC 床版の耐疲労性に与える影響を検討するため、ASR 促進の有無とその程度⁴⁾、また輪荷重走行試験時における床版上面への水張りの有無により設定した。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、床版 I)と、②ASR が、耐疲労性に与える影響を確認するため、劣化状態を進展期相当に設定し、比較的短い期間での ASR 促進養生を行った RC 床版供試体(以下、床版 II)、③ASR を床版 II よりも進展させた加速期相当まで促進させ、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おいて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、床版 III)の 3 条件である。

2.2 供試体概要

図-1 に供試体の形状および寸法を示す。なお、図中には鉄筋ひずみゲージ位置を併記している。図より、寸法は、3,000mm×2,000mm×160mm の複鉄筋 RC 床版で

表-1 実験条件

供試体	劣化状態 ⁴⁾	床版上面の水張り有無
床版 I	健全	無
床版 II	進展期	無
床版 III	加速期	有

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。なお、スパン長は、1800mm である。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)のそれぞれのひずみ量を計測するものとし、床版中央位置で 3 方向に埋込型ひずみ計((株)東京測器研究所製: KM-100BT)を埋設した(写真-1)。

表-2 に使用したコンクリートの配合表を示す。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 等量で 10kg/m³)添加した。

2. 3 ASR 促進期間および促進方法

図-2 に実験経過を示す。図より、床版 I 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、床版 II では、28 日間の湿布養生後、ASR 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。床版 III では、材齢 9 日までの湿布養生後に、87 日間 5%の NaCl 水溶液中に浸漬させることで、緩やかに ASR を促進させた。その後、59 日間の ASR 促進養生、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。

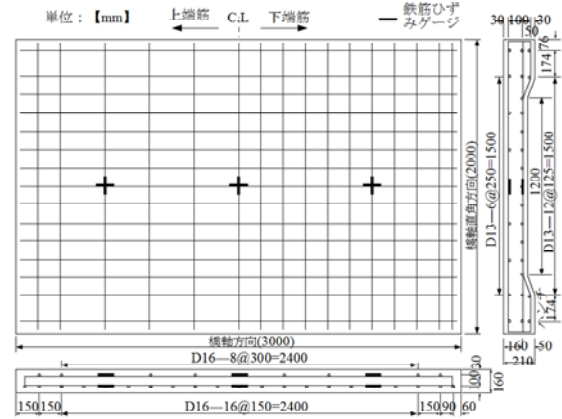


図-1 供試体概要



写真-1 埋込型ひずみ計

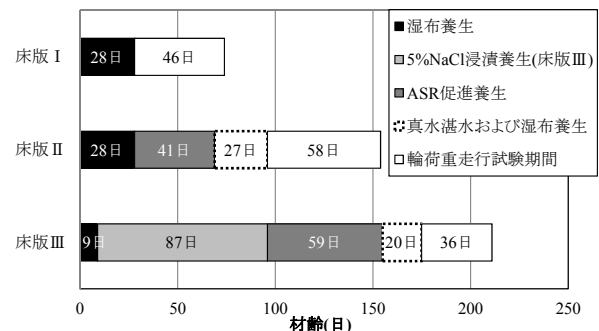


図-2 実験経過

表-2 コンクリートの配合

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	AD (C×%)	AE 剤 (C×%)	
20	12.0	65.0	45.0	4.3	175	269	413	405	1032	1.5	0.06	18.9



写真-2 ASR 促進養生状況



写真-3 5%NaCl 浸漬養生状況



写真-4 真水湛水養生状況

写真-2に ASR 促進養生状況, 写真-3に 5%NaCl 浸漬養生状況, 写真-4に真水湛水養生状況を示す。写真より, まず, ASR 促進養生は, 大型の環境試験装置を用いて, 温度が 50℃, 相対湿度が 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。なお, 床版上面以外の 5 面には防水シールを貼付し, 塩化物イオンの供給を床版上面に限定した。また, 圧縮強度試験に用いる円柱供試体(以下, TP)については, 同温湿度環境下での封緘養生とした。次に, 5%NaCl 浸漬養生は, 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。これは, ASR 促進養生前において, 緩やかに ASR を促進させることに加え, 床版内の鉄筋腐食およびアルカリイオンの濃度拡散による変化を可能な限り抑制させるものである。この際, TP は, 側面に養生シールを貼付し, 5%NaCl 水溶液中に浸漬させた。真水湛水養生については, 各種試験の準備期間において, できる限り鉄筋の腐食を抑制するため, 床版上面に真水を湛水させた。

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量の計測と, 床版に発生するひび割れの観察により判定した。

2. 4 輪荷重走行試験

写真-5に輪荷重走行試験装置を示す。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, 回転速度 8.97rpm のモータ及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ある。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, 長辺方向の 2 辺は単純支持とし, 短辺方向の 2 辺(図中の短辺斜線部)については弾性支持とした。また, 荷重載荷時に発生する床版端部の浮上りを防止するため, PC 鋼棒により床版を受桁に固定する浮上り防止装置を取付けた。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, 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(弾性変形成分のたわみ)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(株)東京測器研究所製: CDP-100)を用い, 供試体中央に加え, 供試体中央から橋軸方向, 橋軸直角方向で両方向にそれぞれ 200mm ずつ配置した。また, ひび

割れ密度は, 供試体下面のひび割れ観察後, 床版中央の 1600mm×1200mm の範囲にあるひび割れ長さを計測し求めた。

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, マイナ一則を仮定した式(1)により 98kN に換算した際の走行回数として求めた⁵⁾。

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

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(12.76)である。

3. 実験結果

3. 1 ASR 促進結果

図-4に ASR 促進による床版コンクリートのひずみ変化を示す。図より, 床版中心部のひずみ量は, 床版を問わず x 方向と y 方向では同じような増加傾向を示す一方で, z 方向のひずみは, 明らかに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, ASR 促進終了時のひずみ量は, 床版 II で x 方向 726 μ , y 方向で 557 μ , z 方向で 2700 μ であった。これに対して,



写真-5 輪荷重走行試験装置

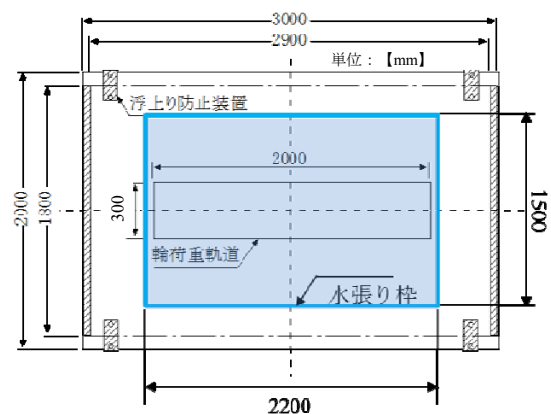


図-3 供試体支持条件

床版Ⅲでは、x 方向で 773 μ 、y 方向で 452 μ 、z 方向で 4750 μ と、鉄筋により拘束される x、y 方向では床版Ⅱと同程度のひずみ量を示したが、ASR の促進期間を変えることで、z 方向のひずみ量は床版Ⅱと 2000 μ 程度の差が生じる結果となった。なお、ASR 促進終了時における床版中央位置での主鉄筋のひずみ量は、床版Ⅱの上側で 980 μ 、下側で 763 μ 、床版Ⅲの上側で 869 μ 、下側で 557 μ と、鉄筋のひずみ量については、ASR 促進期間の違いによる差が大きいことを確認している。

図-5 に輪荷重走行試験開始時材齢における TP および輪荷重走行試験終了後に疲労破壊の影響を受けていない範囲で床版厚さ方向に採取したコア(以下、採取コア)による圧縮強度とヤング率の関係を示す。図中には圧縮強度とヤング率の設計用値⁶⁾を併せて示した。なお、採取コアでは、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の条件を満たしていないため、参考値とする。図より、各床版の試験開始時における圧縮強度は、床版Ⅰ(材齢 34 日)で圧縮強度 25.5MPa、床版Ⅱ(材齢 97 日)で圧縮強度 34.3MPa、床版Ⅲ(材齢 177 日)で 34.6MPa と、若材齢で試験を開始した床版Ⅰでは他の 2 体よりも圧縮強度が低い数値を示した。各床版より採取したコアでは、床版Ⅰよりも、ASR 促進を実施した床版Ⅱ、床版Ⅲで圧縮強度及びヤング率の低下が著しい結果を得た。設計用値と比較してみると、圧縮強度に対するヤング率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るが²⁾、今後更なる検討が必要である。

図-6 に ASR 促進を行った供試体の輪荷重走行試験前に観察した上面と下面のひび割れ発生状況を示す。図より、塩水の供給面である床版上面に関しては、床版Ⅱ、床版Ⅲのどちらについても、供試体端部にひび割れが多

くみられた。これは、供試体端部と中央での配筋量に差があることに加え、供試体端部では中央よりも拘束方向が限定されるために膨張が生じやすく、ひび割れが多く発生したと推察された。一方、床版下面では、ASR によるひび割れは床版Ⅱよりも床版Ⅲで多く発生し、ひび割れのほとんどが主鉄筋方向に生じていた。主鉄筋と配力鉄筋の配筋量の差によると考えられる。なお、いずれの床版についても輪荷重走行試験後において、鉄筋の腐食減量率が 1.0%以下であることを確認しており、塩害が RC 床版の耐疲労性に与える影響は小さいと判断された。

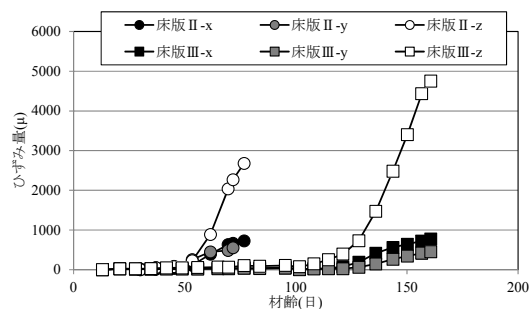


図-4 コンクリートひずみ

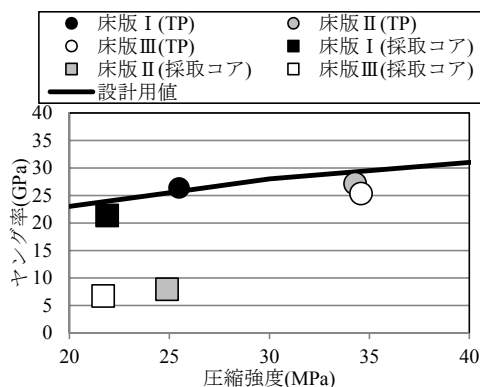


図-5 圧縮強度とヤング率の関係

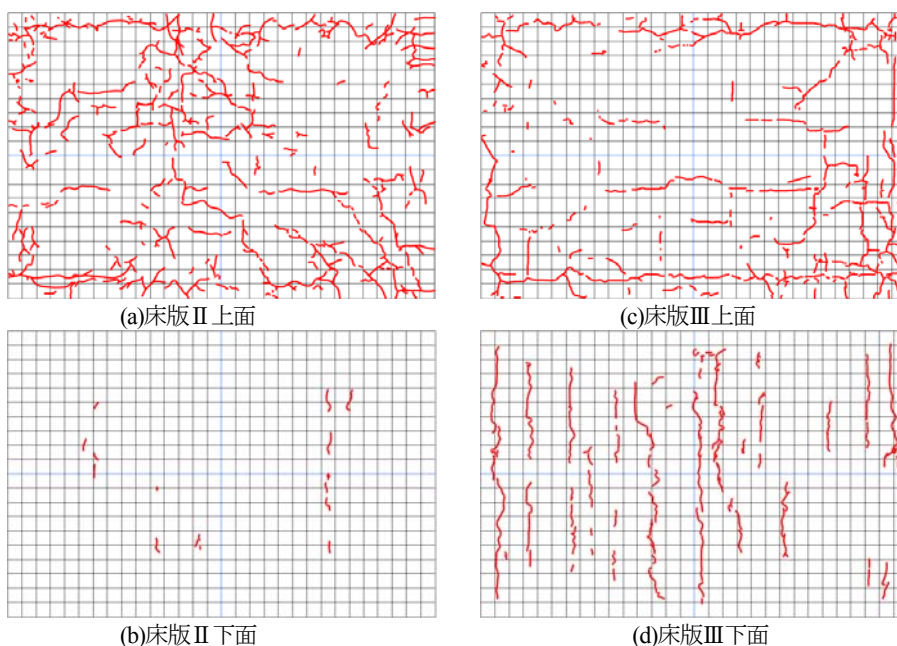


図-6 ASR によるひび割れ

3. 2 輪荷重走行試験結果

図-7 に活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、図中には比較のため、既往の研究⁷⁾で実験結果が得られている健全な RC 床版供試体(圧縮強度 33.2MPa, ヤング率 26.9Gpa で以下、健全供試体)のデータを併記している。ここで、本研究における疲労限界状態は、活荷重たわみが急増する状態とし、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。図より、各床版の疲労限界状態に至った走行回数は、床版 I で 700 万回、床版 II で 9000 万回、床版 III で 2300 万回、健全供試体で 1000 万回と、健全相当の床版 I および健全供試体よりも、ASR 促進を行った床版の方が疲労破壊に至る走行回数は増加する結果を示した。健全供試体の圧縮強度が床版 II、床版 III の圧縮強度と同程度であることから、ASR 促進を実施した床版は健全な床版よりも耐疲労性が向上したことになる。また、各床版の活荷重たわみの増加傾向は、床版 I および健全供試体が走行回数の増加に伴い、活荷重たわみが徐々に増加していくのに対し、ASR 促進を行った床版では、いずれも走行回数の増加に伴う活荷重たわみの増加量は小さい傾向を示した。これは、ASR によるコンクリートの膨張を鉄筋が拘束し、ケミカルプレストレス⁸⁾が導入されたため、活荷重たわみの増加を抑制したと考察され、床版 II と床版 III の活荷重たわみの推移が同程度である理由もこれによると解釈される。また、ASR 促進を実施した床版と比較すると、床版 III では、床版 II よりも早く疲労破壊に至っており、水の作用と床版の劣化状態が耐疲労性を低下させたと考えられる。なお、

床版 III では輪荷重走行試験後に床版上面において写真-6 に示すとおり、砂利化が確認された。

図-8 に、各床版の疲労限界状態で観察された床版下面におけるひび割れ発生状況を示す。なお、図中の赤線は輪荷重走行試験前より発生していた ASR に起因する

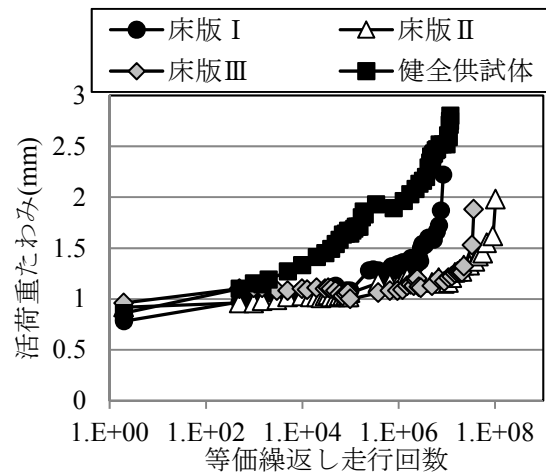


図-7 活荷重たわみ-等価繰返し走行回数



写真-6 床版 III 上面の砂利化

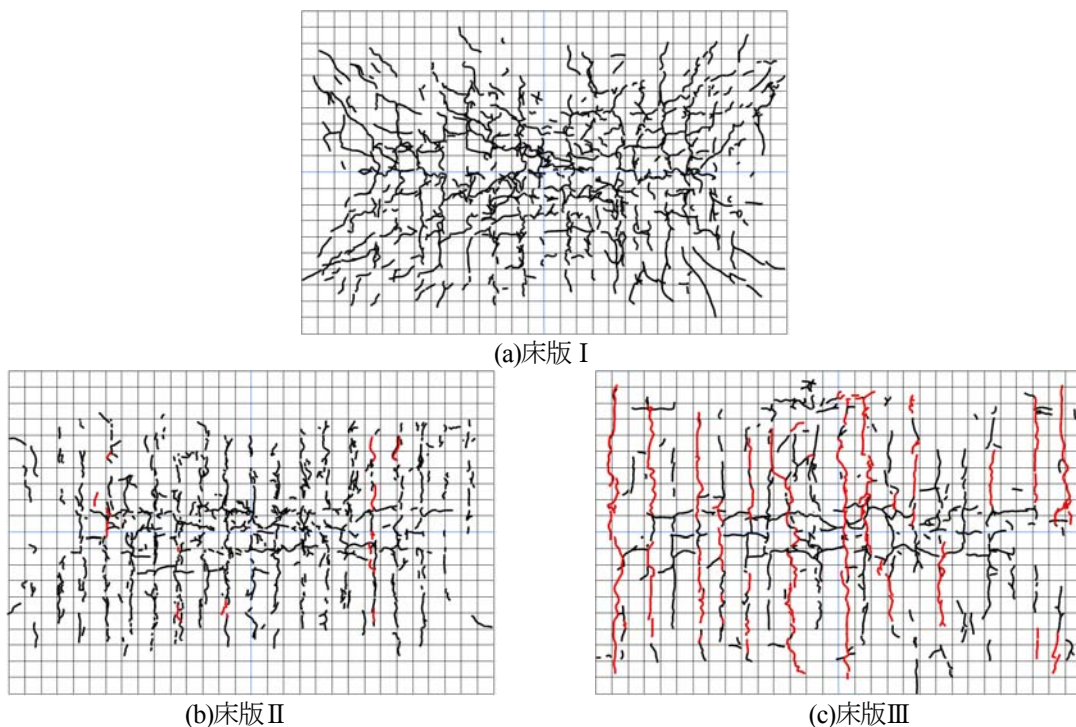


図-8 下面ひび割れ(疲労限界時)

と思われるひび割れ、黒線では輪荷重走行試験により新たに観察されたひび割れを示している。図より、床版Ⅰでは、載荷軌道部の直下の領域を中心としてひび割れが軸方向とその直角方向に進展している様子が観察され、走行回数の増加に伴いひび割れも増加していく傾向を示した。これは、既往の研究⁷⁾における健全な供試体と同様の傾向である。一方、ASR 促進を行った床版では、主鉄筋に沿うように発生していた ASR によるひび割れが派生するようにひび割れが進展した。

図-9 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との関係を示す。なお、図中には前述した健全供試体のデータも併記している。図より、初期のひび割れ密度は、床版Ⅰが $0\text{m}^2/\text{m}^2$ 、床版Ⅱが $1.68\text{m}^2/\text{m}^2$ 、床版Ⅲが $4.13\text{m}^2/\text{m}^2$ であった。各床版のひび割れ密度の増加傾向は、床版Ⅰ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 促進を行った床版はいずれも走行回数に対する密度の増加量が床版Ⅰよりも小さい傾向を示した。これは、ケミカルプレストレスが導入されたことにより、輪荷重によるひび割れの発生が抑制されたと考えられる。また、床版Ⅲでは、床版Ⅱ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床版Ⅱ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た。

以上より、本実験の範囲内では、ASR によるコンクリートの急激な膨張を鉄筋が拘束することでケミカルプレストレスが導入され、疲労によるひび割れを抑制し、床版の耐疲労性が向上する結果となった。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 大型環境試験装置を用いた ASR 促進を実施することで、実物大に近い RC 床版に認められる損傷を再現できた。
- (2) 本実験における ASR の範囲内では、ASR 促進時においてコンクリートが急激に膨張し、これを鉄筋が拘束したことによりケミカルプレストレスが導入され、RC 床版の耐疲労性が向上した。
- (3) 床版Ⅱと床版Ⅲのひび割れは、ケミカルプレストレスの影響で疲労によるひび割れの発生が抑制された。さらに床版Ⅲでは輪荷重走行試験前においてひび割れ網がほぼ定まっていたことから新たなひび割れが発生しにくい状態であったと推察された。

以上のように、反応性粗骨材を用いた RC 床版に対し、1 か月から 2 か月程度の ASR 促進を実施した結果、健全な RC 床版よりも耐疲労性が向上するといった実験結果となった。長い供用期間を経て生じる ASR による劣化床

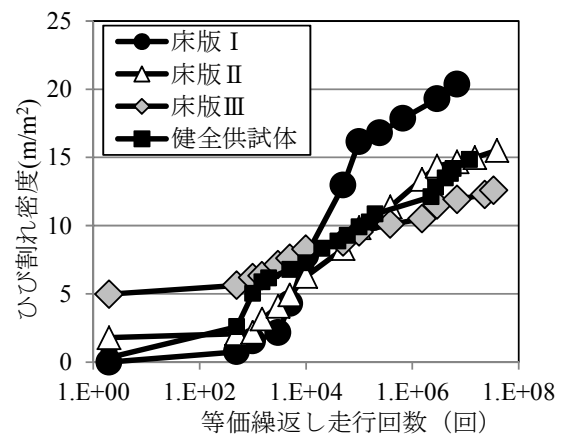


図-9 ひび割れ密度-等価繰返し走行回数

版を実験室レベルで再現することの難しさを感じるところである。今後は、実床版に生じている ASR 損傷の状態を参考とし、促進方法や期間を変えることで、より実情に即した劣化状態を検討し、劣化事例の観察や調査、また実験を通じて ASR による床版損傷の理解を深めていきたい。

謝辞

本研究は日本大学工学部 岩城一郎教授、子田康弘准教授、金沢大学 久保善司准教授との共同研究により実施しました。また、実験遂行に当たり、日本大学工学部 土木工学科コンクリート工学研究室の学生諸君に多大なご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 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，pp.432-440，1996。
- 6) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008。
- 7) 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。
- 8) 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。