

論文 ASR を受けた実物大鋼主桁上 RC 床版の膨張収縮挙動および劣化性状に関する実験的検討

前島 拓*1・岸良 竜*2・子田 康弘*3・岩城 一郎*4

要旨：本研究は、アルカリシリカ反応(ASR)により劣化を受ける道路橋 RC 床版の膨張収縮挙動および劣化性状について、大学構内に作製した実物大の鋼主桁上 RC 床版を用いた屋外曝露試験により評価したものである。その結果、ASR を生じた RC 床版のひび割れ発生形態および膨張挙動について、その温度依存性を明らかにし、さらに鉄筋および主桁による拘束の影響により同一床版内においても床版コンクリートの膨張挙動に差が生じることを示した。また、ASR による劣化進行度を評価する上で透気試験および振動試験が有効であることを明らかにした。

キーワード：アルカリシリカ反応, RC 床版, 膨張収縮, 強制振動試験, 透気試験

1. はじめに

近年、東北地方をはじめとする積雪寒冷地における道路橋コンクリート床版(以下、RC 床版)では、凍結防止剤(NaCl)の大量散布に伴い、アルカリシリカ反応(以下、ASR)、塩害による鋼材腐食、および凍害によるスケールングが促進され、これら材料劣化と交通作用の繰返しによる疲労との複合劣化による RC 床版の早期劣化が社会問題になりつつある。このような各種材料劣化を受ける RC 床版の劣化機構に関する研究は複数の研究機関により進められているものの¹⁾、実験例は少ないといえ未解明な点が多い。特に、材料劣化のうち ASR については、これまで橋脚や橋台に比べ部材厚が薄い床版部材では ASR の発生は稀であるといった知見が一般的であったが、近年では床版部材においても ASR による損傷事例が増加しており、劣化機構の解明が急務である²⁾。しかし、凍結防止剤散布環境下において ASR を受ける RC 床版は、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²⁾、実床版では主桁による拘束条件下で ASR による床版コンクリートの膨張が生じることを踏まえると、実環境下に近い状態での実験モデルの再現は難しく、その研究例は極めて少ない。

以上の背景より、本研究では ASR を受ける RC 床版の

劣化機構の解明を目的として、反応性粗骨材を使用したコンクリート床版(通称:ロハスの橋³⁾)を実物大鋼主桁上に作製し、約2年間の屋外曝露環境下において、床版内部に埋設した各種ひずみ計による膨張挙動の計測と、透気試験、強制振動試験、および床版に発生したひび割れの目視観察により表層品質と劣化進行度を評価した。

なお、本稿では打込み時(2016年3月)から2017年12月までの計測結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および構造形式

表-1に、コンクリートの配合を示す。コンクリートの製造には移動式バッチャプラントを使用した。水セメント比を55.0%とした。使用材料は、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)コンクリートに外割で添加した。なお、本実験に使用したコンクリートと同一材料・配合で作製した円柱供試体(φ100mm×H200mm)3本について SSW 試験⁴⁾を実施した結果、促進後91日時点で6000μの膨張量に達するこ

表-1 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)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤		NaCl (kg/m ³)
					W	C	S	G	AE 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)	
20	12.0	5.7	55.0	45.0	168	305	847	977	1.0	0.001	18.9

*1 (株)NIPPO 総合技術部技術研究所 博士(工学) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 (正会員)

*3 日本大学 工学部土木工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

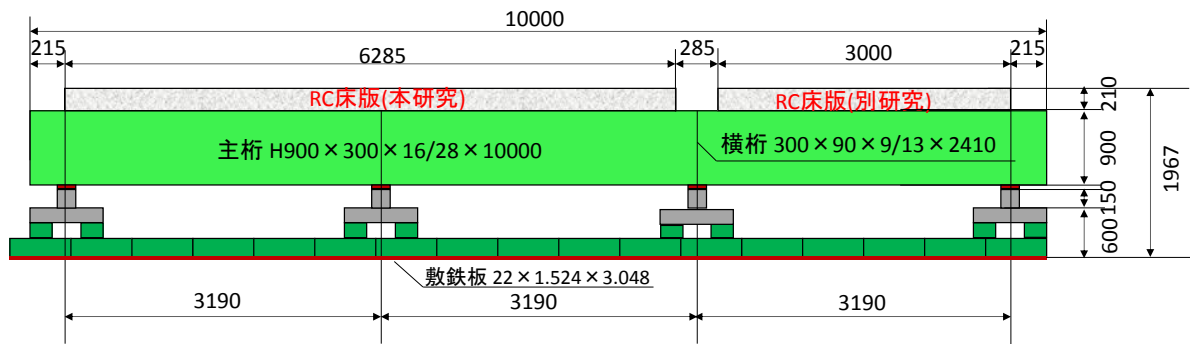


図-1 構造一般図(側面)

とを確認している。

図-1 および図-2 に本橋の一般図を示す。図より、本橋は道路橋示方書に従い設計された非合成鋼 2 主 I 桁橋であり、主桁は非合成桁を想定して 900-H を使用した。なお、床版の浮上りの防止を目的にスラブアンカー(丸鋼 $\phi 16$)を溶接した。RC 床版の形状は、長さ 6285mm、幅 3500mm、床版厚 210mm であり、主桁間は 2500mm である。ここで、本床版では、ASR を促進させるためにコンクリート練混ぜ時に NaCl を添加しており、鉄筋の腐食が著しく進行する可能性がある。そのため、本床版に使用した鉄筋は、主鉄筋(D19)、配力鉄筋(D16)いずれもエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した(写真-1)。また、ASR の促進を目的として、床版上面が常に湿潤状態を保つように、床版上面に水が均等に分布する特殊加工フィルム(液体搬送シート)を敷設した。なお、静弾性係数試験に用いる円柱供試体については、現場水中養生とした。写真-2 に本橋の全景(福島県郡山市日本大学構内で撮影)を示す。

2.2 計測項目

図-3 に床版の配筋図および各種ゲージと非破壊検査の位置を示す。鉄筋ひずみゲージは、中央(図中の C および M)ラインについては主鉄筋に貼付し、その他の 4 点については配力鉄筋に貼付した。埋込み型ひずみ計は、中央(図中の C および M)ラインについては、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(y 方向)、橋軸直角方向(x 方向)、鉛直方向(z 方向)の 3 方向に設置し、その他については、x および y の 2 方向に設置した。なお、埋込み型ひずみ計については、床版厚さの中央位置に設置した。床版内外の温度測定は熱電対により計測し、床版上下面の相対湿度についても測定した。これらのデータはデータロガーを用いて計測開始から 60 分のインターバル計測にて記録・収集した。各種非破壊検査については、表層品質と ASR の進行に伴う床版内部の劣化進行度の評価を実施した。なお、表層品質については、所定の材齢でトレント法⁹⁾による透気試験および目視によるひび割れの観察を行うことで評価した。ここで、透気試験については、他実験の計測機器との関係から、床版片側の

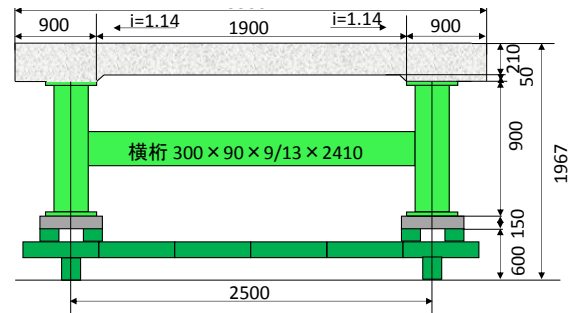


図-2 構造一般図(断面)



写真-1 配筋状況



写真-2 本橋の全景

任意の 5 点で計測した。床版また、ASR による床版内部の劣化進行度については小型加振器(写真-3)を励振器とした強制振動試験⁹⁾により評価した。なお、強制振動試験は、小型加振器を床版下面に接触させ、1,000~15,000Hz の周波数帯域にわたってホワイトノイズを入力波とした加振方法により床版に局所的な振動を励起さ

せ、振動が及ぶ範囲の共振周波数を計測した。

これらとは別に床版と同一バッチから採取したコンクリートを用いて作製した円柱供試体について、材齢 28 日、91 日、182 日で静弾性係数試験を実施した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度とヤング率の関係

図-4 に圧縮強度とヤング率の関係を示す。なお、図中には圧縮強度とヤング率の設計用値(図中の実線)を併記している。図より、材齢 28 日および 91 日時点では、実験結果と設計用値が近い数値を示しているが、182 日時点ではヤング率および圧縮強度の低下が認められ、円柱供試体については、材齢 91 日以降に ASR が著しく進行したものと判断された。

3.2 床版内外の温湿度変化および膨張収縮挙動

(1) 外気温湿度および床版内部温度

図-5 に外気温度と相対湿度および材齢 667 日現在までの床版内部温度変化を示す。図より、床版内部温度は、施工直後(2016 年 3 月 2 日)から夏季にかけて上昇し、冬にかけては降下するというように季節に応じた温度履歴が計測されている。また、床版内部の温度は夏季には外気温度よりも 7℃程高い値で推移していたが、冬季に入るとその差はほとんど見られなくなった。一方、湿度については変動はあるものの、夏季および秋季に比較的高い湿度を示した。

(2) 床版コンクリートの膨張収縮挙動

図-6 に床版内部に埋設した埋込み型ひずみ計の計測結果を示す。なお、図中には床版上面で計測した外気温度を併記している。図より、コンクリートのひずみは設置箇所および方向に限らず、外気温が 25℃を超えた材齢 120 日から膨張が見られ、特に鉛直方向(z)で著しい膨張を示した。これは、橋軸直角方向(x)および橋軸方向(y)では鉄筋によりコンクリートの膨張が拘束されるため、拘束の小さい z 方向に膨張が進展したものと推察される。その後は、冬季の気温が低下する期間(材齢 230 日から 440 日)では膨張が収束する傾向を示し、再び気温の上昇する材齢 400 日から 550 日では、コンクリートが膨張する傾向を示した。また、z 方向におけるひずみは、主桁による拘束の影響が小さい床版中央(M-C-Z)で最も大きな膨張を示したものの、床版の位置において膨張量に多少バラツキはあるが、温度依存性に関する傾向は面的に生じる傾向であった。なお、材齢 667 日現在では、W-C-Z で 3500 μ 、その他の z 方向で 5500~6300 μ のひずみを示している。y 方向および x 方向のコンクリートひずみについては、いずれの計測箇所においても y 方向よりも x 方向のひずみが大きい傾向を示した。これは、配筋量の差に伴う拘束条件の違いによるものだと考えられる。

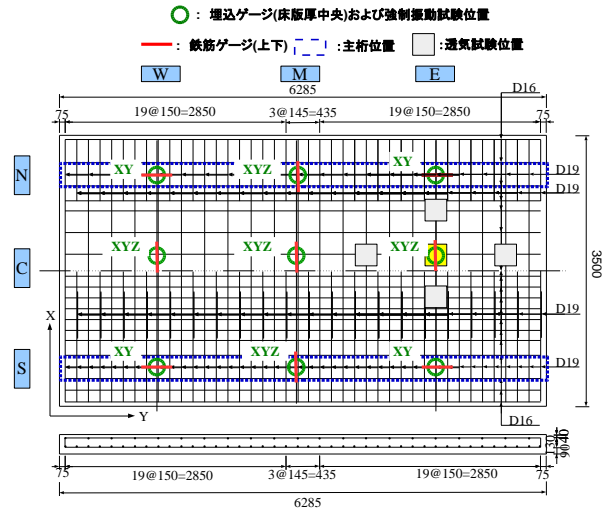


図-3 配筋図および各種ゲージと非破壊検査位置

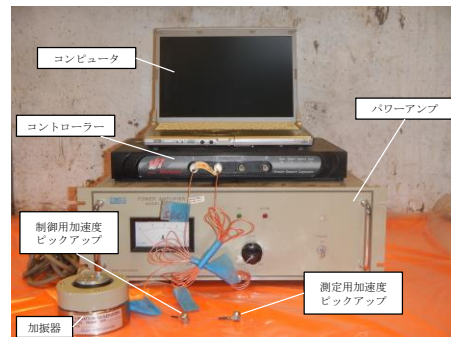


写真-3 強制振動試験装置

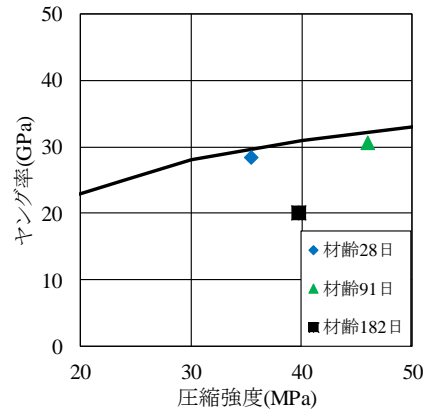


図-4 圧縮強度とヤング率の関係

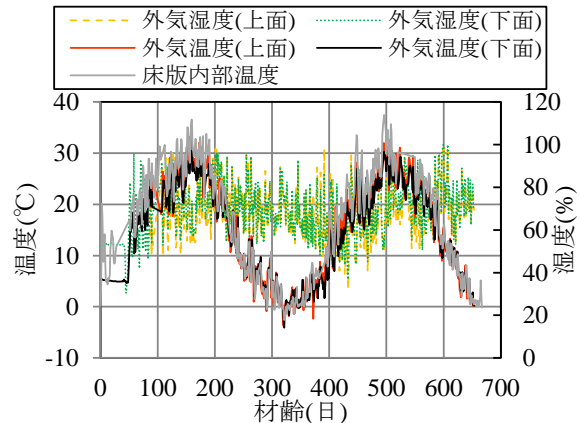


図-5 外気温湿度および床版内部温度の変化

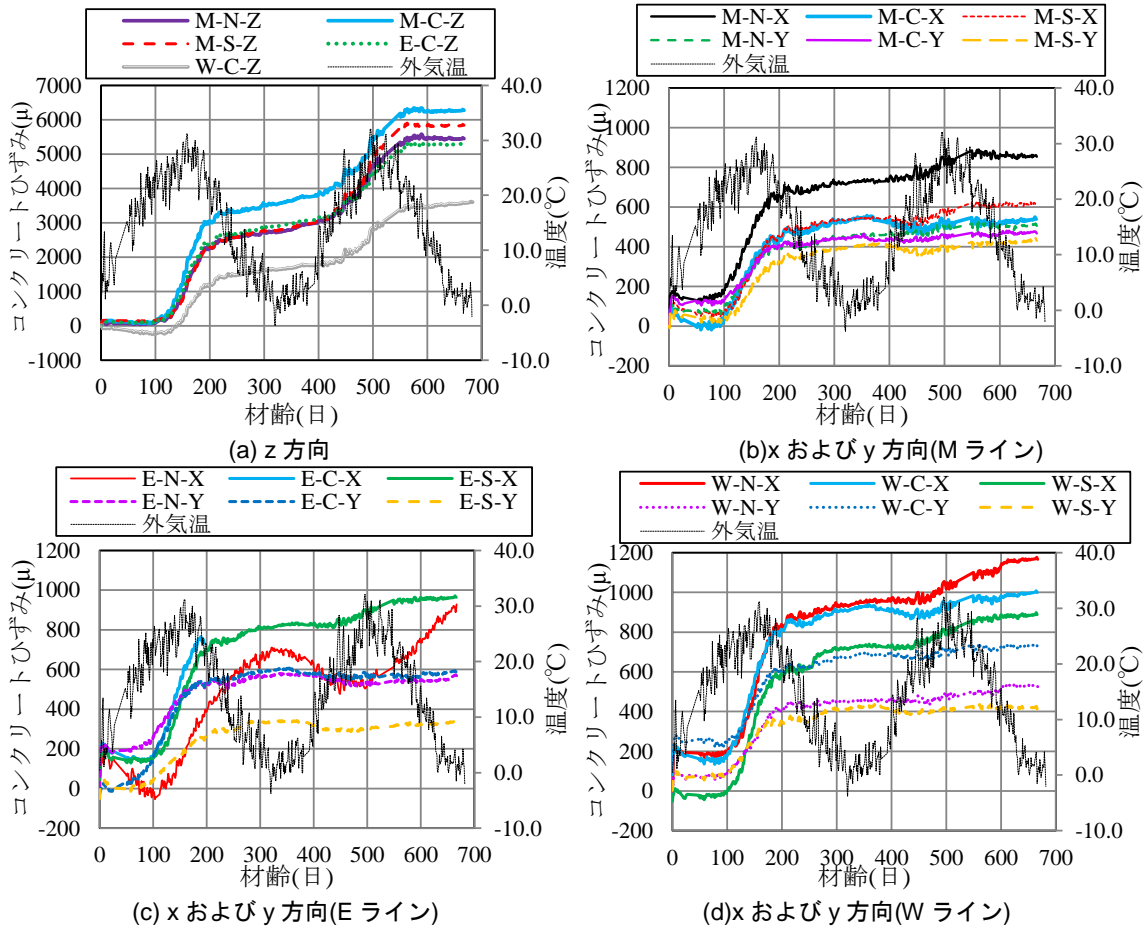


図-6 コンクリートのひずみ変化

設置箇所によるひずみの違いについては、y 方向では設置箇所による大きな差異は認められなかったのに対し、x 方向のひずみについては、西側で最も大きい膨張を示し、反対に中央位置では最も小さいひずみであり、z 方向と同様に ASR に伴う膨張は方向においてもバラツキがある可能性が考えられる。このような測定箇所による膨張挙動の違いについては、主桁や鉄筋による拘束条件の違いに加え、局所的な日射や温度の変化、またコンクリート練混ぜ時における反応性骨材および NaCl の濃度ムラ等が考えられる。この種の評価については、今後床版からコアを採取し分析を行うことで詳細に調査する予定である。

図-7 に z 方向のひずみ速度(μ/日)と温度変化の関係を示す。なお、図中のデータは、床版全体の膨張傾向を把握するため、週間ごとの膨張量を平均化しプロットしている。図より、コンクリートのひずみ速度は、外気温が 25°C を超える期間では急速となり、反対に外気温が 20°C を下回ると速度が低下する傾向を示した。また、同様のサイクルが 2 年間に渡って計測されたことから、ASR によるコンクリートの膨張は温度依存性が明瞭であり、本実験の範囲内では ASR による床版コンクリートの膨張は、外気温 20°C 付近に反応の境界があることが示された。

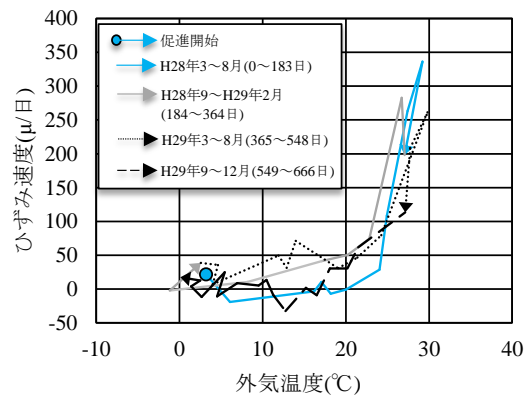


図-7 コンクリートのひずみ推移(z 方向)

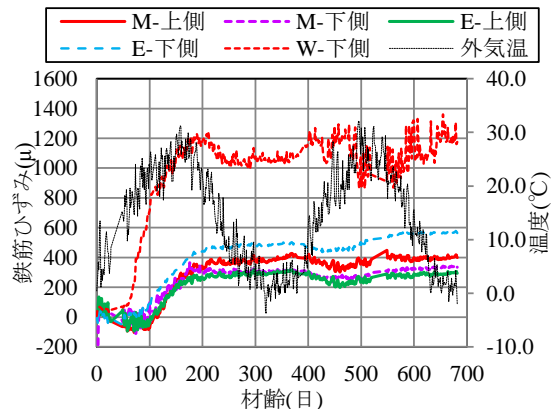


図-8 鉄筋のひずみ変化

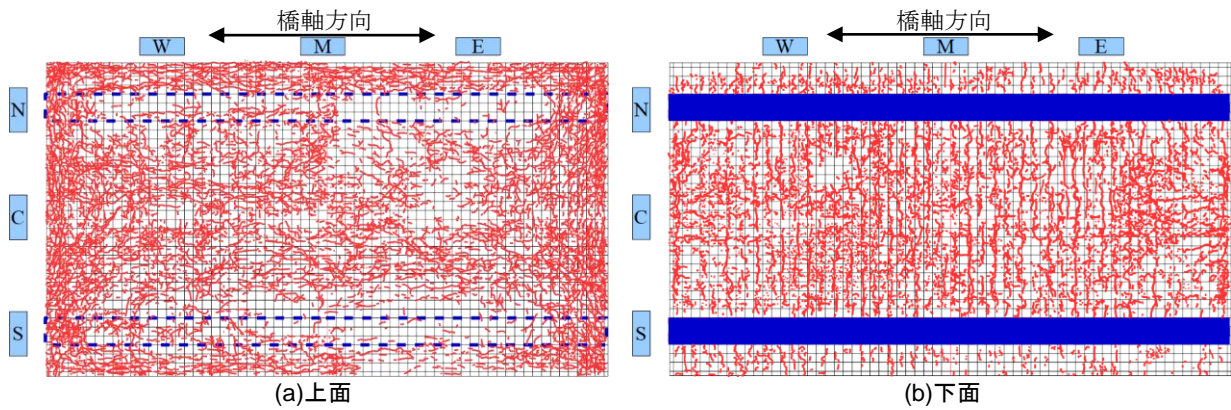


図-9 床版に発生したひび割れ(材齢 667 日現在)

(3) 床版内部鉄筋のひずみ変化

図-8 に内部鉄筋のひずみ変化の代表値として、床版中央軸(C)ラインにおける鉄筋のひずみ変化を示す。なお、西側の上側主鉄筋については、ひずみゲージの断線により精緻な計測ができておらず、データを除外した。図より、床版内部の鉄筋ひずみは、コンクリートの x 方向におけるひずみと同様に、西側で最も大きなひずみを示した。また、いずれの計測位置においても、下側鉄筋よりも上側鉄筋でひずみが大きい傾向を示した。この上下間のひずみの差異については、床版上面では液体搬送シートによる水分供給がされており、床版上下面で ASR の進行程度に差が生じたことに加え、床版下側では主桁による拘束が大きく鉄筋量も多いことからひずみが小さくなったものと考えられる。

3.2 表層品質および劣化進行度

(1) ひび割れ発生状況

図-9 に、床版上下面に発生したひび割れの発生状況を示す。図より床版上面では、床版端部におけるひび割れが多く見られた。これは、定着確保を目的に床版端部に鉛直方向の鉄筋が配置されているため、コンクリートの膨張に対する拘束度が床版端部で大きくなったことに起因すると考えられる。また床版上面では、床版中央位置において橋軸方向へのひび割れが多く生じているが、これは床版中央位置における膨張が大きいことに加え、床版上下面で ASR の進行程度に差異が生じたことから床版上面が凸に反るように変形し、床版中央で引張応力が大きくなったためと考えられる。一方で床版下面については、床版上面とは異なり、橋軸直角方向へのひび割れが多く見られた。これについては、床版上面で凸に反るような変形をするのに対し、主桁が橋軸方向への変形を拘束することで、橋軸直角方向に引張が生じたためと考えられる。なお、床版上下面で観察されたひび割れのほとんどは夏季に発生したものであり、外気温が 20℃を下回る期間では、膨張が緩やかになると同時にひび割れの発生もほとんど見られなくなった。

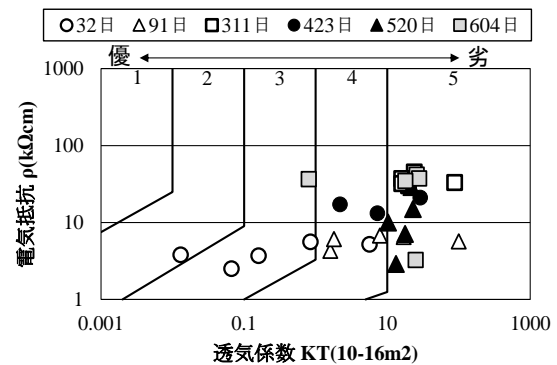


図-10 透気試験結果

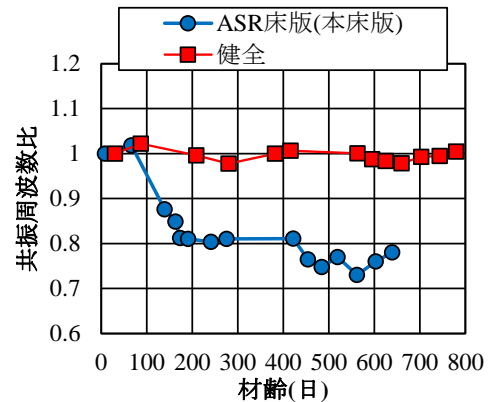


図-11 強制振動試験結果

(2) 透気試験結果

図-10 に、トレント法による透気試験結果を示す。図中の横軸は透気係数を示し、この値が小さいほど透過性が低いことを意味する。一方、縦軸は電気抵抗を表し、水は電気を通し易いことから、この値が低いほど細孔中に多くの自由水が残存していることを表す。図中の数字は透気係数と電気抵抗から判断される評価レベルを示している⁵⁾。なお、前述の通り床版上面には常時液体搬送シートが敷設されているため、透気試験は床版下面で実施した。図より、材齢が進むにつれて透気係数が大きくなる傾向を示し、床版コンクリートの表層品質が低下していることがわかる。また、外気温が 20℃以下となる材

齢 423 日～600 日の期間では透気係数の変動が小さいものの、外気温が 25℃以上となる夏季で再度透気係数が大きくなる傾向を示した。このように、透気係数の増大する時期は、前述したコンクリートの膨張挙動やひび割れの発生時期と一致しており、床版表層の品質低下を評価することで、ASR の劣化進行度を検知し得る有効な手段であることが示唆された。

(3) 強制振動試験

図-11 に、強制振動試験により得られた共振周波数比の平均値を示す。ここで共振周波数比とは、材齢 7 日時点の共振周波数と規定の材齢で計測された共振周波数との比である。図中には本床版と同様に鋼主桁上で非反応性骨材を使用して作製した健全な RC 床版(以下、健全床版で水セメント比 55%)のデータも併せて示す。なお、本研究では共振周波数比を 9 点計測しているが、計測位置による差はほとんどなく、変動係数が 3%程度であることを確認している。図より、健全床版は材齢 800 日時点でも共振周波数比の低下がないのに対し、ASR 床版では材齢 66 日以降に共振周波数比の大幅な低下が見られた。この共振周波数比の低下はコンクリートの膨張挙動やひび割れの発生時期と一致しており、ASR の影響により床版内部においてひび割れ等の損傷が発生したためと考えられる。また、材齢 191 日から 416 日の期間では共振周波数比は一定に推移した。それ以降は再び低下する傾向を示し、膨張挙動やひび割れの発生状況と一致しているが、著しい計測値の低下は認められなかった。実物大の暴露試験より、ASR による内部損傷は疲労損傷とは異なり、内部においてもひび割れが進展するのと同時にひび割れをゲルが充填することで、共振周波数比から判断される損傷が見かけ上安定しているかのように解釈される可能性もあるが、強制振動試験により共振周波数比を求めることは、ASR を受ける RC 床版内部の劣化を把握するのに有効と考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 実物大鋼主桁上床版を用いた曝露試験を実施した結果、ASR を受ける RC 床版の膨張挙動は、外気温が 25℃を超える期間で大きく膨張し、反対に外気温が 20℃を下回る期間では膨張が停滞するといった温度依存性が明確に示された。
- (2) ASR による床版コンクリートの膨張は、同一床版内においても、主桁および鉄筋による拘束条件の違いによりコンクリートの膨張挙動が異なる傾向を示し、これらの影響により床版に発生するひび割れの発生形態が床版上下面で異なることを明らかにした。

- (3) 透気試験による表層品質の評価および強制振動試験による共振周波数比の計測は、床版内部の膨張挙動およびひび割れの発生時期と整合する結果を示し、床版の ASR 劣化進行度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。

なお、本研究は現在も継続中である。今後は、本床版に対して載荷実験を実施し、ASR による劣化が RC 床版の耐荷性に及ぼす影響について検討するとともに、ASR を受ける RC 床版の補修・補強工法についても検討を進めていく予定である。また、これらの実験で得られたデータを解析モデル⁷⁾に反映させることで、凍結防止剤散布下において ASR を受けた RC 床版の劣化機構について解析的にも評価を進める予定である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費基盤研究(A) 15H02259 の助成を受けて行われた。また、本研究を進めるにあたり、田中泰司特任准教授（東京大学生産技術研究所）、高橋佑弥講師（東京大学大学院）より有益な御助言を賜りました。なお、本実験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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、前島拓ほか：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，土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, P126-145,2016.
- 2) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.
- 3) 岩城一郎ほか：「ロハスの橋」プロジェクト —凍結防止剤散布下における高耐久 RC 床版の実現を目指して—，橋梁と基礎，2016 年 2 月号，pp.26-31，2016.
- 4) 三浦尚ほか：外部から侵入する塩化ナトリウムがアルカリ骨材反応に及ぼす影響，第 47 回セメント技術大会講演集，pp.432-437,1993.
- 5) R.J. Torrent and G. Frenzer : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete, Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992, 1995.
- 6) 杉山涼亮ほか：ランダム加振による RC 床版の非破壊試験法，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，Vol.15, pp.471-476.2015.
- 7) 例えば，Takahashi, Y. : 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.