論文　積雪寒冷地における鋼橋 RC 床版の劣化メカニズムと補修に関する一考察

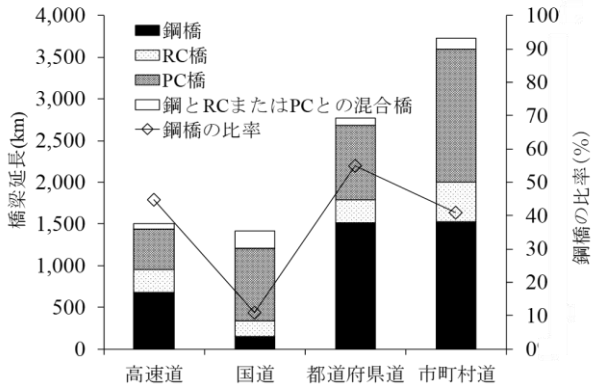
野村　昌弘[*1]・安藤　陽子[*2]・津田　誠[*3]・鳥居　和之[*4]

要旨：本論文は，積雪寒冷地における比較的交通量の少ない鋼橋 RC 床版で劣化が発生していることに着目し，実橋から採取したコアで詳細分析を行った。その結果，路面水が浸透する場合，ASR が進展拡大して橋の使用性能に影響を与えること，骨材として粘土鉱物を含有する泥岩や頁岩は凍害の影響を受け，骨材にひび割れを発生させ ASR を助長すること，凍結防止剤を散布する環境では ASR や凍害より遅れて塩害が加速的に進行し，中性化との複合劣化により床版の耐荷力に影響を与えることなど，積雪寒冷地における床版劣化のメカニズムと補修のポイントについて考察した。

キーワード：RC 床版，複合劣化，中性化，凍結防止剤，塩害，ASR，凍害

1. はじめに

道路橋におけるコンクリート系床版は，橋梁部材の中で最も損傷が著しい部材であり，その主たる原因は「大型車両の繰り返し走行による疲労損傷」，「建設地域の環境条件による損傷」が挙げられる [1)]。これらの影響を受ける床版厚の薄い鋼橋 RC 床版（以下，床版と略記）にて劣化が顕在化し，高速道路各社ではプレキャスト PC 床版への取替工事が盛んに実施されている。一方，著者らは，橋梁点検業務に携わる中で積雪寒冷地における床版劣化が必ずしも交通量の多くない県道や市町村道にも波及していることに着目しており [2),3),4)]，交通量による「疲労損傷」より積雪寒冷地等「環境条件による損傷」が床版の寿命に大きく影響していると考えている。**図－1** は，国土交通省 2016 年道路統計年報 [5)]をもとに作成した橋梁延長と管理者の関係を示したものである。鋼橋の延長は高速道の 670 ㎞に比較して，都道府県道および市町村道を併せると約 3,000 ㎞を超えるのが現状である。床版劣化が進行することによって，財政的にも厳しい県および市町村でも，今後多額の維持管理費が必要となってくることが予測され，その補修対策や維持管理手法の構築が急務となっている。



図－1　道路管理者別の橋種別延長

本論文では，積雪寒冷地における高速道路橋および交通量の多くない県道橋や市町村道橋を対象に床版から貫通コア（φ=55mm）を採取し，中性化の進行と塩化物イオンの浸透状況を把握した。また，コア薄片を使用して，ひび割れの発生状況やアルカリシリカ反応（以下，ASR と略記）の進行状況などを確認し，積雪寒冷地に着目した床版劣化における複合劣化のメカニズムと補修のポイントについて考察を行った。

2. 調査対象橋の概要

調査対象は，**表－1** に示す 1965 年～1976 年にかけて供用した北陸地方の高速道路橋および県道橋，中部地方の高速道路橋，東北地方の市道橋および町道橋の 5 橋である。A 高速橋および B 高速橋は，1995 年および 1998 年に B 活荷重対策として，床版上面を 20mm はつり取り，鋼繊維補強超速硬コンクリート（t＝60mm）による上面増厚工法での補強が実施されたが，床版の劣化が進行，アスファルト舗装に損傷が多発，車両の安全走行を確保できなかったことから 2011 年および 2009 年にプレキャスト PC 床版に取換えられた経緯がある。コアは撤去した床版で遊離石灰が発生していない健全部から採取している。C 県道橋，D 市道橋および E 町道橋は補修経緯がないが，アスファルト舗装には補修跡が多く点在し，**写真－1** に示すように床版下面には劣化が進行した高速道

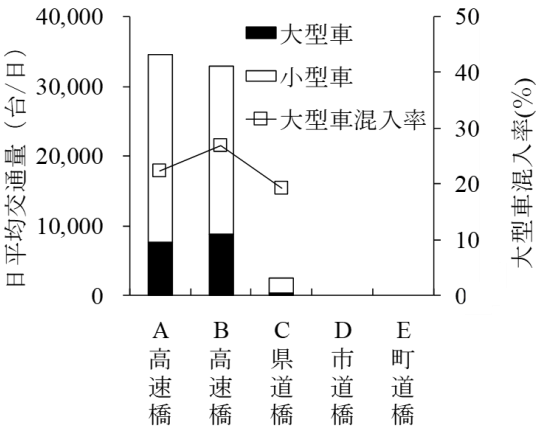
*1（株）野村昌弘の研究所　代表取締役　博士（工学）（正会員）
*2 金沢大学　理工研究域 環境デザイン学専攻（正会員）
*3 石川工業高等専門学校　環境都市工学科　准教授　博士（工学）（(正会員）
*4 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系　特任教授　工博　（フェロー会員）

表－1　調査対象橋梁の諸元

橋名	地区	供用（年）	床版全幅(m)	主桁間隔	床版厚(mm)	鉄筋の配置	設計荷重	凍結防止剤の散布状況	試験コアの採取位置の状況
A 高速橋	北陸	1975	11.45m	3@3m	210	複鉄筋	TL-20	供用より散布開始，1992 年より頻繁に散布	ひび割れなし
B 高速橋	中部	1976	11.45m	3@3m	210	複鉄筋	TL-20		ひび割れなし
C 県道橋	北陸	1973	9.2m	3@2.5m	180	単鉄筋	TL-20	1992 年より適宜散布開始	ひび割れ有り 遊離石灰発生
D 市道橋	東北	1965	6.8m	1@3.7m	250	単鉄筋	TL-14	供用より散布なし	ひび割れあり 遊離石灰発生
E 町道橋	東北	1970	9.8m	4@1.9m	180	単鉄筋	TL-14	供用より散布なし	ひび割れあり 遊離石灰発生

(1)C 県道橋　(2)D 市道橋　(3)E 町道橋

写真－1　床版下面の劣化状況



図－2　調査対象橋梁路線の交通量

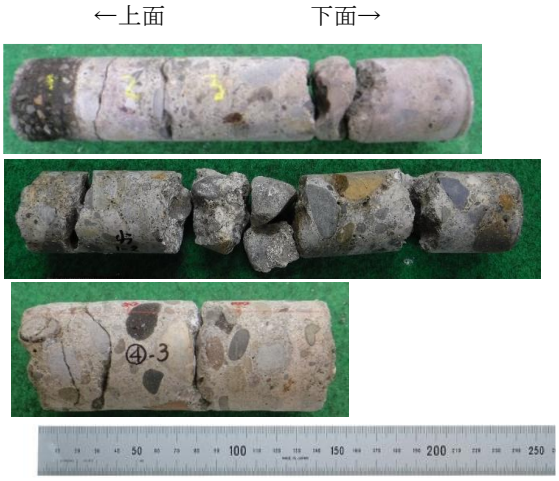
路橋床版と同様な 2 方向の遊離石灰を伴ったひび割れが発生していた。コアはこの近傍より採取した。また，この 3 橋は床版上面側に鉄筋の配置のない単鉄筋構造となっている。なお，D 市道橋および E 町道橋は積雪寒冷地であるが，凍結防止剤は散布していない。

図－2 は，2015 年度における全国道路・街路交通情勢調査により各橋路線の日平均交通量と大型車混入率を示したものである [6]。A 高速橋および B 高速橋は日平均交通量が 30,000 台を超え，大型車混入率も 25%程度，C 県道橋の日平均交通量は 2,500 台，大型混入率は 20%程度に対して，D 市道橋および E 町道橋はデータがないものの生活道路として利用される程度であり，大型車の通過はほとんどない。このように交通量に関係なく床版劣化が進行しているのが現状である。

3. コアの分析結果

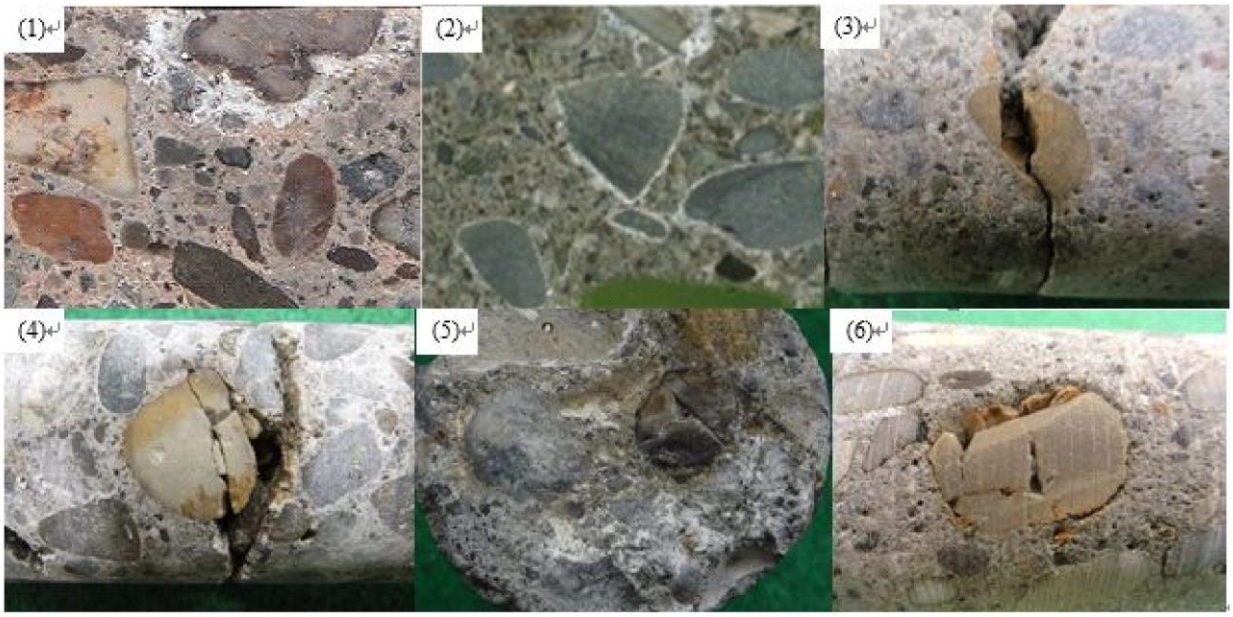
3.1 コアの外観

A 高速橋および B 高速橋は，床版の健全部から採取したものであり，コアは破断していなかったが，床版の劣化部から採取した他の 3 橋のコアは**写真－2** に示すように水平方向に破断する傾向があり，ASR が進行しているものと推察された [3),4),7)]。なお，D 市道橋の床版健全部か



上から C 県道橋，D 市道橋，E 町道橋

写真－2　劣化した床版から採取した貫通コア



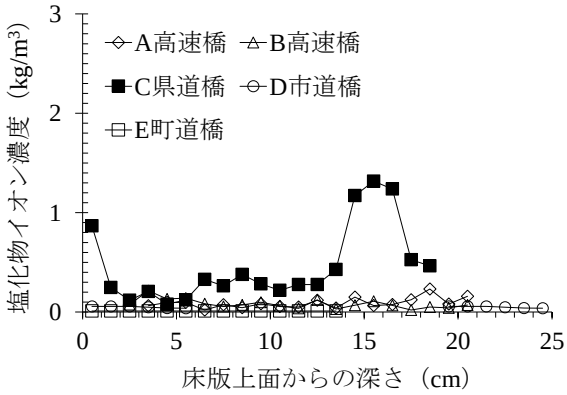
(1)A 高速橋：溶結凝灰岩周囲から発生した白色ゲル，(2)B 高速橋：安山岩周囲から発生した白色ゲル，(3)C 県道橋：泥岩に発生したひび割れ，(4)D 市道橋：泥岩に発生したひび割れ，(5)D 市道橋：頁岩のひび割れと白色ゲル，(6)E 町道橋：泥岩に発生したひび割れ

写真－3　骨材周囲に発生した白色生成物と骨材のひび割れ

ら採取したコアでは，床版厚 250mm が確認できたが，125mm 位置でコンクリートがきれいに分離した。これは供用した 1965 年当時, ポンプ車が十分に普及していない時代であり [8]，生コンの連続打設が困難で床版を 2 層にわけて施工したものと考えられた。供用後，路面からの水の浸透により，層間の付着が確保できず，床版としての一体化が継続できなかったことも床版劣化の原因と推察された。また，E 町道橋の床版健全部から採取したコアでは，床版厚 180mm が確保できた。しかし，劣化部から採取したコア長は 145mm であり，設計厚が確保されていなかったことも床版劣化の原因と考えられた。また，各コアではコンクリート用骨材として河川産骨材の川砂，川砂利が使用されており，**写真－3** に示すように骨材の周囲に白色生成物の発生や骨材のひび割れが認められ，ASR の進行が確認された。

3.2 中性化および塩化物イオン濃度

コアで実施した中性化試験（JIS A1152）では，各コアとも床版下面より 20mm 程度の中性化の進行が確認できた。全塩化物イオン濃度分析（JIS A1154）の結果を**図－3** に示す。C 県道橋以外では塩化物イオンの浸透がほとんど認められない。凍結防止剤が頻繁に撒布される A 高速橋および B 高速橋のように床版が健全な状態では塩化物イオンが浸透していなかった。一方，C 県道橋では，塩化物イオンの浸透が認められ，その供給は床版上面であるが， 塩化物イオンのピークは，中性化フロントの影響を受け下面側の鉄筋付近となった [9]。路面水対策を十分に実施しなかった場合，さらに下側鉄筋の塩化物イオン濃度が増加し，中性化との複合劣化により，鉄筋腐食が進行し，床版の耐荷性能に大きな影響を与えることが考えられた。

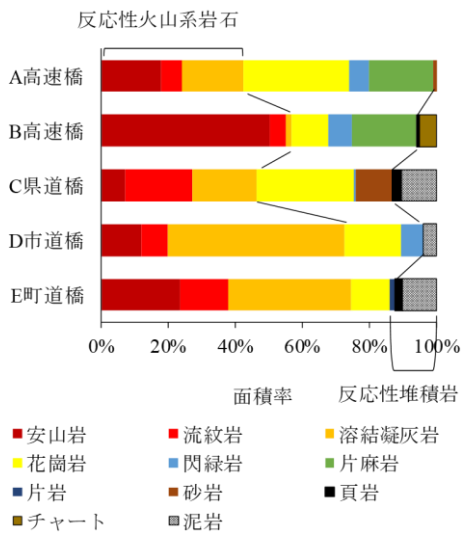


図－3　全塩化物イオン濃度の分析結果

3.3 ASR

(1) 砂利の岩種構成率

コア側面に分布する φ=5mm 以上の砂利に対して岩種を判定するとともに，おのおのの面積を算出して岩種ごとの面積構成比率を集計した結果を**図－4** に示す。ASR 反応性の火山系岩石として安山岩，流紋岩および溶結凝灰岩が 42～74%を占めるとともに，遅延膨張型の堆積岩として頁岩，チャートおよび泥岩が A 高速橋以外で 3～13%含有することが確認できた。各床版とも砂利の 4 割以上，潜在的に ASR を生じる岩種を含有していた。A 高速橋および B 高速橋では，塩化物イオンの浸透が認めら



図－4　砂利の岩種面積率の算出結果

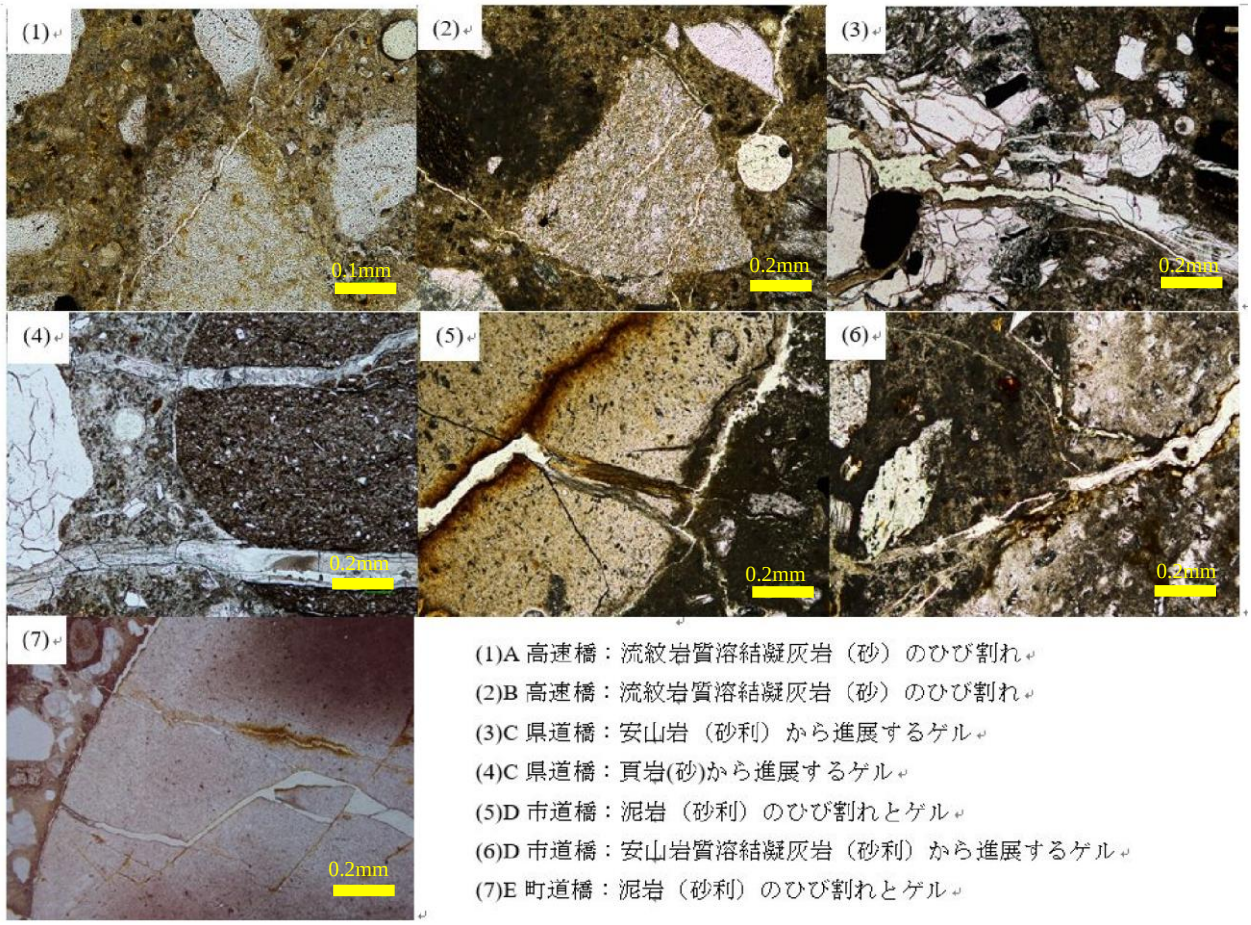
れなかったが，路面水が浸透した箇所では，ASR が促進されることが推定され，PC 床版への取換えに至った根本の原因は ASR によるものと考えられた。

(2) 偏光顕微鏡観察

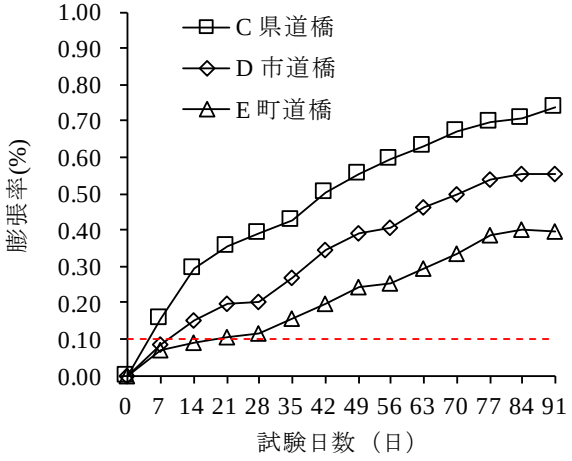
コアから作製した薄片による偏光顕微鏡観察の結果の事例を**写真－4** に示す。床版の健全部からコアを採取した A 高速橋および B 高速橋では，砂利で顕著な ASR は確認できなかった。なお，一部の砂（流紋岩質溶結凝灰岩）でひび割れが発生し，セメントペーストへと進展していたが，ゲルは確認できなかった。一旦，発生した ASR が水の供給がなかったことから，反応が継続できなかったものと推察された[9]。また C 県道橋，D 市道橋および E 町道橋は，床版上面付近で微細なひび割れが多く発生していた。ひび割れの起源の多くは，砂利と砂とも火山系岩石（安山岩，流紋岩，溶結凝灰岩），および堆積岩（頁岩，泥岩）が顕著に ASR を生じたものであった。骨材からセメントペーストにかけてゲルを伴ったひび割れがネットワークを形成し地図状に進展していた。特に泥岩については，ひび割れの発生形態が ASR を生じた他の岩石とは異なるものがあり，凍結融解作用の影響を強く受けている可能性が推察された[4]。また，これらの 3 橋では床版上面に鉄筋が配置されておらず，ASR 発生後の膨張を鉄筋により拘束できなかったことも劣化を促進させた原因と考えられた。

(3) 残存膨張性

ASR の進行が顕著であった C 県道橋，D 市道橋および E 町道橋のコアで実施したアルカリ溶液浸漬法（基長 50mm，温度 80 度，1 N・NaOH 溶液浸せき）の結果を**図－5** に示す。コアの膨張は右肩上がりに上昇し，試験日数 21 日での膨張率が 0.1%を越え，ASR による残存膨



写真－4　偏光顕微鏡（単ニコル）により確認された ASR の進行状況



図－5　アルカリ溶液浸漬法の結果

張性を十分に有していると判断された。今後，さらにASR による膨張が進展する可能性が推測された。

4. 床版劣化のメカニズムと補修に関する考察

本論文の調査範囲内では，積雪寒冷地おいて交通量による要因は床版の劣化に大きな影響を与えるものとはなっていなかった。劣化要因に着目すると建設後まもなく中性化と ASR は同時に進行する。路面水の影響を受けない場合でも床版内部に保有された水により一旦は ASR が発生するものの反応が継続できない。しかし，アスファルト舗装の劣化により路面水が浸透すると ASR と凍害が相互に連係して進展し砂利化の発生，床版の使用性能の限界，すなわち，アスファルト舗装に損傷が発生し，車両の安全な交通を妨げる原因となるものと考えられる。特に凍害はコンクリート用骨材として粘土鉱物を多く含有する泥岩および頁岩が使用される場合，**写真－6** に示すようにひび割れが発生して，ASR を助長，床版の部分的な陥没に進展する場合もあるものと考えられる。さらにアスファルト舗装の補修を繰返すうちに凍結防止剤を散布する環境では，ASR や凍害の劣化進行を助長するとともにある時点で塩害が加速的に進行して ASR や凍害による劣化を追越し中性化との複合劣化により，下面側の鉄筋腐食のリスクを高め，床版の耐荷性能の低下に繋がるものと推察された。

写真－6　野外で凍害の影響を受けた泥岩のひび割れ

床版健全度を維持するために路面水対策が必須であったが，床版防水にも経年劣化が進行することを考慮しておかなければならない。また，橋梁の延命化のためには床版の部分的な打替えも考えられる。なお，ASR 反応性の岩種は日本全国に分布している [10]。このため，床版補修の着目点としては，ASR を発生させない，凍結防止剤を浸透させない，凍害を起こさないことを基本とした使用材料による対策，すなわちフライアッシュや高炉スラグ微粉末の活用，空気連行性の確保，床版上面からの路面排水の侵入を防ぐ高性能防水工や排水対策が有効と考えられる。

5. まとめ

建設地域の環境条件が大きく異なる積雪寒冷地で実施した床版から採取したコアの詳細分析の結果，劣化要因が混在した複合劣化が発生していた。また，床版の維持管理では路面水を浸透させないことや使用材料が重要なポイントであった。得られた主要な部分をまとめると以下のとおりである。

(1) 比較的交通量の少ない県道橋，市町道橋の床版においても高速道路橋と同様な 2 方向に発達した遊離石灰を伴うひび割れが進行しており，採取したコアが水平方向に破断し，激しい ASR を生じていた。また，上側鉄筋の配置がされていなかったことや生コンの打設方法が床版劣化を促進させた一原因でもあった。

(2) 凍結防止剤を散布する環境の床版では，塩化物イオンのピークが，中性化フロントの影響を受け下面側の鉄筋付近となった。路面水対策を十分に実施しなかった場合，さらに下側鉄筋の塩化物イオン濃度が増加し，中性化との複合劣化により，床版の耐荷性能に大きな影響を与えることが考えられた。

(3) コンクリート用骨材として使用された粘土鉱物を含有する泥岩や頁岩は，凍害によるひび割れや ASR によるゲルが発生し，床版劣化の原因となっていた。

(4) 床版の建設後まもなく中性化と ASR は進行するものの路面水の浸透があった場合，ASR と凍害が促進され床版の使用性能の限界に達するものと考えられた。なお，凍結防止剤を散布する環境では，ASR と凍害の劣化を塩害と中性化との複合劣化がある時点で追越し，床版の耐荷性能が限界に達するものと推察した。

(5) 床版補修の着目点としては，ASR を発生させない，凍結防止剤を浸透させない，凍害を起こさないことを基本とした使用材料による対策，フライアッシュ

や高炉スラグ微粉末の活用，空気連行性の確保，床版上面からの路面排水の侵入を防ぐ高性能防水工や排水対策が有効と考えた。

謝　辞

本研究は，内閣府・JST による SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として実施したものです。ご協力とご支援を頂いたことに感謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会 : 道路橋床版の維持管理マニュアル，p .7，2016
2) 森　寛晃ほか : 寒冷地で供用された RC 床版の劣化要因推定，コンクリート工学論文集，Vol.24，No.1，pp.1-9，2013
3) 小林孝一ほか : 山間寒冷地における RC 床版の ASR と凍害による複合劣化の事例とその検証実験，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.70，No.3，pp.320-335，2014
4) 田中良樹ほか : 道路橋における凍結融解と ASR の影響を受けたコンクリート劣化調査，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.72，No.3，pp.214-233，2016
5) 国土交通省ホームページ : 道路統計年報 2016　道路の現況　を加工して作成
6) 国土交通省ホームページ : 平成 27 年度　全国道路・街路交通情勢調査　一般交通量調査　箇所別基本表及び時間帯別交通量表 を加工して作成
7) 青山實伸ほか : 鋼橋 RC 床版の ASR 劣化に伴うひび割れ発生に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.859-864，2017
8) 小林一輔 : コンクリートが危ない，岩波新書，616，pp.142-150
9) 野村昌弘ほか : 加熱アスファルト混合物敷設が鋼橋 RC 床版に与える影響と実橋でのコアの詳細分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.931-936，2017
10) 広野真一ほか : わが国の代表的な反応性骨材と ASR の発生に関するデータ整理，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1035-1040，2016