論文 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

野村 昌弘*1・浦 修造*2・石井 浩司*3・鳥居 和之*4

要旨:鋼橋 RC 床版での複合劣化の原因を確認するために実験的検証と実橋から採取したコアでの詳細分析 を行った。その結果,建設時の加熱アスファルトの施工が床版表面に微細なひび割れを発生させること,凍 結防止剤散布環境下ではこのひび割れがさらに進展すること,砂利化の主たる原因は路面水の浸入に伴う凍 結融解作用であること,RC 床版に浸透した塩化物イオンは中性化フロントの影響で鉄筋位置にてピークを向 かえること,ASR の進行が RC 床版劣化に悪影響を与えることなどを確認した。 キーワード:RC 床版,複合劣化,ひび割れ,加熱アスファルト,凍結防止剤,EPMA,硫酸塩膨張

1. はじめに

鋼橋床版(以下,床版と略記)は、土木構造物の中で も荷重や環境面から過酷な状況下におかれている部材の 一つである。床版劣化の主たる原因は繰り返し荷重によ る疲労とブリージングや乾燥収縮によるひび割れから路 面水が浸透することが考えられている¹⁾。また、高速道 路における床版の早期劣化の原因として、B活荷重対策 を実施した上面増厚施工継ぎ目からの路面水の浸透²⁾、 積雪寒冷地においては凍害や冬期に散布される凍結防止 剤による塩害、アルカリシリカ反応(以下 ASR と略記) も助長していることも指摘されている³。

そこで本論文は、床版上面の環境を模試した、建設時における加熱アスファルトの施工(舗設温度約 150℃)、 その後の路面水および凍結防止剤(主成分 NaCl)の浸透、 さらに凍結融解作用の異なる環境がセメント硬化体に与 える影響を検証した。また、凍結防止剤が散布される RC 床版から採取した貫通コアにて中性化の進行と塩化物イ オンの浸透状況を確認するとともに、コア薄片を使用し て、ひび割れの発生状況や骨材界面の空隙、骨材周囲の セメント相のひび割れ、ASR の進行状況などを確認し、 RC 床版劣化における複合劣化の原因について 2、3 の考 察を行った。

2. 加熱アスファルトがセメント硬化体に与える影響 2.1 実験概要

テストピースとして,W/C=40% (PC 床版想定)と W/C=55% (RC 床版想定)のセメントペーストをφ =50mm,H=100mmのモールドに打設し,7日間20℃の 水中養生,脱型後21日間気中養生した。その後,テスト ピースのセメントペースト打設面をホットプレートにセ

ットし、加熱アスファルト施工時の温度(敷均し→初期 転圧→二次転圧→養生)と施工時間(300分)を再現し た。その際にホットプレートの温度、テストピースの温 度を5分間隔で放射温度計にて測定した。試験終了後, コアの側面および底面にアクリル系の表面被覆を施し (加熱面は被覆なし), 図-1に示すようにアルミテープ を巻き、温度20℃の環境下にて加熱面に対してのみ水を 貯めて湿潤(17時~翌8時)→水を除去して乾燥(8時 ~17時)の繰返し(以下, 乾湿繰返しと略記), 温度20℃ の環境下にて凍結防止剤の環境を想定した飽和 NaCl 溶 液を上部に貯めて湿潤(17時~翌8時)→NaCl 溶液を 除去して乾燥(8時~17時)の繰り返し(以下, NaCl 繰返しと略記),加熱面に水を貯めて凍結(17時~翌8 時,温度 - 13℃の環境)→融解(8時~17時,温度 20℃ の環境)の繰り返し(以下,凍結融解繰返しと略記)を 60日間実施した。なお、凍結の際はテストピースの側面 および底面は保温材で保護した。テストピースは、加熱 後および3種類の養生試験後に低真空下で蛍光塗料含有 エポキシ樹脂 4を含浸させ、その後加熱部分を切出し、 断片試料(厚さ 10mm)およびその薄片(厚さ 0.02mm) を作製して蛍光顕微鏡によりひび割れの発生状況などを 調べた。



*1 (株)野村昌弘の研究所 代表取締役,(株)フルテック 取締役 博(工)(正会員)
*2 (株)国土開発センター 設計事業部 設計1部 担当部長(学生会員)
*3 (株)ピーエス三菱 技術本部技術部 担当部長 工博(正会員)
*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン系 教授 工博 (フェロー会員)

2.2 実験結果

(1) 温度の測定結果

加熱アスファルトの施工温度として、フィニシャーに よる敷均し温度約 150℃、マカダムローラーによる初期 転圧約 120℃、タイヤローラーによる二次転圧約 70℃を それぞれ想定し、テストピースのセメントペースト打設 面を加温した。ホットプレートとテストピースの高さご との温度測定結果を図-2 に示す。室温は 10℃程度、ホ ットプレートの接触面はホットプレートの温度程度が作 用し、0.5cm 離れると温度は最大で 70℃程度まで上昇し た。この工程の再現により最大温度に達した時点は初期 転圧の荷重が作用時期であると推定された。なお、ホッ トプレートから 3cm 離れるとテストピースの温度は 50℃以下となった。

(2) 蛍光顕微鏡による観察結果

各工程で作製したホットプレート接触面における薄 片および断片試料の蛍光顕微鏡による観察結果を**写真**-1に示す。加熱後ではテストピース表面から深さ 5mm 程 度まで白っぽくセメントペースト相が変色し、水平方向 に卓越したひび割れが発生した。これは加熱によりセメ ントペースト内の水が蒸発したものと推察され、図-2 で示したテストピースの温度とも整合した。なお、乾湿 繰返し後では、水の供給によりセメントの水和反応が再 度発生して加熱後よりひび割れは少なくなった。一方, NaCl 繰返し後では水平方向のひび割れがさらに増加し た。また、凍結融解繰返し後では、セメントペーストが 表面から1cm程度までがチップ状となり、いわゆる床版 劣化での砂利化が再現できた。凍結融解作用の影響範囲 は水平ひび割れの発生状況から W/C=40%で約 2cm, W/C=55%で約3.5cmと推定された。これらの結果から, 1)加熱アスファルトの施工により, W/C に関係なく床版 上面には水平方向に卓越するひび割れが発生し、路面水 が浸透しやすくなること、2)床版劣化が凍結防止剤を使 用する環境では、塩分の浸透によりひび割れが拡大・進



展し,路面水がより浸透しやすくなること,3)床版で発 生する砂利化は凍結融解作用が主たる原因であり,W/C を小さくすることにより,この影響範囲を低減できるこ と,が確認できた。

3. 実橋から採取したコアの詳細分析

下部工にASR のひび割れが発生している2橋のRC床版にてコアによる詳細な分析を行った。

3.1 試験概要

RC 床版から貫通コアを採取し,中性化試験(JIS A1152) および塩化物イオン濃度分析(JIS A1154)を実施すると ともに,コアに低真空の状況で蛍光塗料含有エポキシ樹 脂を含浸させ,断片試料および薄片を作製して蛍光顕微 鏡または偏光顕微鏡にてひび割れの発生状況や ASR の 発生状況を確認した。一般に ASR の進行過程は,a)骨材 の反応リムの形成→b)骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き →c)骨材内のひび割れ形成・ゲル充填→d)骨材を取り巻 くセメントペースト内のひび割れ形成・ゲル充填→c) 骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈 殿の順で進行する⁵⁾。観察では c)~e)の進行過程を対象 に反応が確認された骨材の個数を床版上面から深さごと に整理した。また,A橋についてコアの上面および下面 を対象に電子線マイクロアナライザーによる面分析



写真-1 加熱部分における蛍光顕微鏡観察の結果(上段:W/C=40%,下段:W/C=55%)

JSCE-G574「EPMA によるコンクリート中の元素の面分 析方法」により Cl, Si, Ca, S の各元素を 0.1mm ピッチ で分析し, その結果を kg/m³または質量濃度% (mass%) で表示した。

3.2 A 橋での分析結果

(1) A 橋概要

A 橋は、富山県県道にて 1975 年に竣工した鋼単純合成 I 桁橋である。本橋では RC 床版の劣化が著しく、広範 囲にわたりひび割れが確認されたことから車両の安全性 確保のために 38 年後に PC 床版取換工事が実施された。 貫通コア (ϕ =100mm, L=215mm) は撤去した RC 床版 から採取したものである。コア側面にて骨材として川砂, 川砂利が使用されており、北陸地方で ASR を生じる安山 岩、流紋岩および溶結凝灰岩が確認された。

(2) 中性化および塩化物イオン濃度の分析結果

中性化試験はフェノールフタレイン法により,上面側 で3mm,下面側で20mmの進行が確認された。塩化物イ オン濃度の分析結果を図-3 に示す。この結果より床版 下面まで路面水が浸透していることが確認できた。また 塩化物イオンの供給は床版上面であるが,塩化物イオン 濃度のピークは上面側の鉄筋付近と,下面側鉄筋にもわ ずかなピークが確認された。中性化フロントの影響を受 けてフリーデル氏塩が分解しの,可溶性塩化物イオン濃 度の増加と固定化率の低下により,鉄筋が腐食しやすい 環境となっていた。

(3) EPMA 法による面分析の結果

貫通コアの床版上面および下面からそれぞれ長さ 8cm×幅3cmのEPMA用の断片試料を作製し,0.1mmピッチで各元素をマッピングした。Clの分析結果を図-4 に示す。Cl濃度はコンクリートの単位容積重量を 2,300kg/m³と仮定している。図-3の湿式化学分析では, 骨材を含んだ1cmピッチの平均濃度であるのに対して, EPMA法では0.1mmピッチでの濃度と骨材部分でカウン

貫通コア長(21.5cm) 3.0 中性化深さ20mm 中性化深さ3mm (上面より) (下面より) 2.5 塩化物イオン濃度(kg/m3) → 全塩化物イオン濃度 上面側鉄筋表面 ☆ 可溶性塩化物イオン濃度 2.0 固定化率 1.5 下面側 鉄筋表面 1.0 0.5 0.0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 床版上面からの深さ(cm) 図-3 湿式化学分析による塩化物イオン濃度 の分析結果(A橋)

トされる Cl を除いた濃度(骨材ピクセルを除く)の結果 も算出可能である。Cl は最大で 7kg/m³ とかなり高濃度の ものが浸透していることが確認された。同じく骨材ピク セルを除いた CaO, SiO₂および SO₃の元素マッピングの 分析結果を図-5に示す。RC 床版上面および下面で中性 化の影響により SO₃が移動・濃縮していることが確認で きた ⁶。

(4) 偏光顕微鏡観察の結果

コアより切出した断片試料(長さ 21.5cm×幅 5cm)から, 約 2cm×2.5cm の大きさで 20 枚の薄片を作製し, 偏光顕 微鏡観察を行った。観察結果は倍率 200 倍までで確認で きたものである。この結果、写真-2 に示すように床版 上面では加熱アスファルトの影響と考えられる水平ひび 割れの発生、骨材界面の空隙、骨材周囲のセメント相の ひび割れ,気泡内を埋めるエトリンガイトが確認された。 骨材界面の空隙はブリージング、骨材周囲のセメント相 のひび割れは、骨材中の粘土鉱物が乾燥して収縮したこ とにより発生したものと考えられた 7。これらの現象の 発生個数を深さごとに整理した結果を図-6 に示す。も っとも多いのは骨材界面の空隙であり床版上面から 6cm 以深において 43 個(砂: 31 個, 砂利: 12 個) 発生して いた。この空隙は本来床版上面や鉄筋付近で生じるもの と考えられるが, 観察の結果, 上面側鉄筋以深に多く発 生していることは、コンクリート打設時に十分な締固め





(1) 床版上面に発生した水平方向のひび割れ, (2)骨材界面の空隙, (3)骨材周囲のセメント相のひび割れ, (4)気泡 内を埋めるエトリンガイト



写真-2 薄片観察により確認された現象(単ニコル)

ができていなかった可能性が考えられた。また,骨材周 囲のセメント相のひび割れは床版上面から 14~17cm の 範囲で4個(砂:2個,砂利:2個)発生しており,わず かなものであった。気泡内を埋めるエトリンガイトの ほ とんどは床版上面から 5cm の範囲であり,16 個確認され た。このエトリンガイトは,床版上面付近でもっとも多 く深部に向かい減少することと図-5 に示した EPMA に よる SO₃の移動・濃縮が床版下面でも生じていることか ら判断すると,セメントペーストの硫黄が中性化の過程 で移動したものではなく,アスファルト中の硫黄が溶出 した可能性が考えられた。なお,偏光顕微鏡観察より,



気泡内のエトリンガイトが水を吸収して膨張し,セメン トペーストにひび割れを発生させるような硫酸塩膨張劣 化現象は,現段階では確認できなかった。

ASR の発生した骨材の個数を進行過程および深さご とに整理した結果を図-7に示す(写真-3参照)。57 個 (砂:28 個,砂利:29 個)の骨材で床版の深さ方向に関 係なく ASR が生じていた。ASR の進行過程別では, c が 41 個(砂:17 個,砂利:24 個), d が 13 個(砂:11 個, 砂利:2 個), e が 3 個(砂:0 個,砂利;3 個)であり, ASR の進行過程が進むに連れてそれぞれのレベルの発 生個数は減少した。なお,進行過程 c で ASR ゲルが残っ



(1)溶結凝灰岩(砂) ASR 進行過程(c), (2)流紋岩(砂) ASR 進行過程(d), (3)流紋岩(砂利) ASR 進行過程(e)
 写真-3 ASR の進行状況(単ニコル)

ているものはほとんどなかった。これは床版内では下部 工に比較して部材厚が薄く乾燥状態が継続するため,一 旦は ASR が発生するが ASR が継続できない環境にある ものと考えられた。なお,ASR の進行過程 e の発生は鉄 筋位置に発生する傾向があった。これは路面から浸透し た塩化物イオンによる ASR の促進と鉄筋周囲に発生す るブリージングに伴う空隙中に水が長期間保持されるた めと推察された。

3.3 B 橋での分析結果

(1) B 橋概要

B橋は、福井県に位置する高速道路橋であり、1975年 に竣工した3径間連続鋼鈑桁橋である。本橋は1997年に B活荷重対策として既設床版上面を10mm切削し、増し 厚コンクリート60mmを施工した。しかし、床版の劣化 が著しく、車両の安全性確保のため2012年に部分的な RC床版の打替え工事が実施された。RC床版劣化の状況 はA橋より軽微であった。貫通コア(φ=55mm,L=230mm) は、工事の際、床版下面のひび割れ箇所(幅0.3mm)か ら採取したものである。なお、このひび割れは偏光顕微 鏡観察により貫通していることが確認された。また、コ アは上面増し厚コンクリートと既設床版とが分離し、両 者の付着が期待できない状況であった。コア側面にて骨 材として川砂、川砂利が使用されており、北陸地方で ASRを生じる安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩が同様に 確認された。

(2) 中性化および塩化物イオン濃度の分析結果

中性化はフェノールフタレイン法により,下面側での み 20mm の進行が確認された。塩化物イオン濃度の分析 結果を図-8 に示す。この結果より RC 床版下面まで路 面水が浸透していることが確認できた。また,塩化物イ オン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。ひび割れが貫通している箇所では下側鉄筋の方で 塩害のリスクが高くなっていた。その一方で,固定化率 は高い傾向を示した。

(3) 偏光顕微鏡観察の結果

コアより切出した断片試料(幅 5cm×長さ 23cm)から, 約 2.5cm×2.5cmの大きさで 18 枚の薄片を作製し, 偏光 顕微鏡観察を行った。観察の結果, 写真-4 に示すよう に床版上面では切削機の影響と推定される鉛直方向およ び水平方向のひび割れ,砂粒子下面の空隙の発生が確認 され,路面水が浸透しやすい状況が確認された。供用下 において床版防水施工のため既設アスファルトを撤去す る際,切削機により床版上面の一部を削るケースが見受 けられる。これは床版の弱点を拡大するものであり,今 後切削方法を改良する必要があった。

骨材界面の空隙,骨材周囲のセメント相のひび割れお よび気泡内を埋めるエトリンガイトの発生個数を深さご とに整理した結果を図-9 に示す。もっとも多いのは気 泡内を埋めるエトリンガイトであり 35 個確認された。A 橋と同様に床版上面付近での個数がもっとも多く深部に 向かうに従い減少した。アスファルトの硫黄が溶出した ことによるものと判断された。なお、セメントペースト にひび割れを発生させるような硫酸塩膨張劣化現象は、 同様に確認できなかった。骨材界面の空隙は9個(砂:7 個,砂利:2個),骨材周囲のセメント相のひび割れは6 個(砂:6個,砂利:0個)であり、RC床版上面付近で 発生していた。B 橋は A 橋よりも施工時の品質管理が優 れていたものと推定された。











ASR の発生した骨材の個数を進行過程および深さご とに整理した結果を図-10 に示す。47 個(砂:33 個, 砂利:14 個)の骨材で RC 床版の深さ方向に関係なく ASR を生じていた。ASR の進行過程別では, c が 40 個 (砂:27 個,砂利:13 個), d が 7 個(砂:6 個,砂利: 1 個), ASR の進行過程が進むにつれて,それぞれのレベ ルの発生個数は減少した。なお,貫通ひび割れ上には床 版上面から深さ 7 cm 位置で溶結凝灰岩の砂利が激しく ASR を生じていた(写真-5 参照)。これがひび割れの原 因である可能性があった。また,ASR が比較的進行した もの(進行過程 d)は鉄筋位置に発生する傾向が B 橋で も確認された。A 橋との比較により,建設時におけるブ リージングに伴う骨材界面の空隙と乾燥収縮による骨材 周囲のセメント相のひび割れの発生,ASR の進行が RC 床版劣化に影響を与えていることが確認された。

4. まとめ

本試験により得られた主要な結果をまとめると以下 のとおりである。

(1)加熱アスファルトの施工や切削機を使用した場合には、床版上面にひび割れが発生するとともに、凍結防止剤が散布される環境ではさらにひび割れが進展し、路面水が浸透しやすい環境となっていた。また、積雪寒冷地で多発する砂利化は、凍結融解作用が主たる原因であると考えられた。

- (2) 塩化物イオンの浸透分布より,路面水がRC床版全体 に浸透していることが確認できた。また、中性化の進 行により,RC床版健全部の塩化物イオンは上側鉄筋位 置、ひび割れ部における塩化物イオンは下側鉄筋位置 にてそれぞれピークとなった。ひび割れ部では引張力 が作用する下側鉄筋で中性化と塩害による腐食が進行 し、鋼材腐食のリスクが高くなった。
- (3) EPMA により, RC 床版上面および下面で SO3 が移 動・濃縮していることが確認された。また, RC 床版上 面では気泡内を充填するエトリンガイトも確認された。 このエトリンガイトはセメント由来のものではなく, アスファルトの硫黄が浸透したことによるものであり, 硫酸塩膨張劣化現象を生じていなかった。
- (4) 骨材界面の空隙, 骨材周囲のセメント相のひび割れ, 供用後では ASR の進行が RC 床版劣化に影響を与える ことを確認した。

謝辞:本研究にて,㈱フルテックおよび㈱太平洋コンサ ルタント片山哲哉 博士(理),山本一雄 博士(理)のご協力 を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 松井繁之:移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.627-633, 1987
- 石川 裕一,青山實伸,倉戸伸浩,西尾守広:劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性,コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1393-1398,2010
- 3)森寛晃, 久我龍一郎, 小川彰一, 久保善司: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
- 4) 五十嵐心一,川村満紀:蛍光顕微鏡によるセメント系 複合材料の微視的破壊の観察,セメント・コンクリー ト, No.589, pp.30-39, 1996
- 5) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., .Izumi, S. & Hira,H. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Journal of Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004
- 6) 小林 一輔,白木 亮司,河合 研至:炭酸化によって 引き起こされるコンクリート中の塩化物,硫黄化合物 及びアルカリ化合物の移動と濃縮,コンクリート工学 論文集,Vol.1, No. 2, pp. 69-82, 1990
- 7) T. Katayama : So-Called Alkali-Carbonate Reaction
 -Petrographic Details of Field Concretes in ONTARIO, 13th
 Euro seminar on Microscopy Applied to Building Materials,
 pp.1-15, 2011