

論文 高速道路橋における ASR によるひび割れの特徴とコアによる潜在膨張性の評価に関する検討

河尻 留奈*1・牧野 卓也*2・小塚 正博*3・鳥居 和之*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) によるひび割れが富山地区の高速道路橋などで多数確認されているが、その中で上部工に発生した ASR は全国的な調査が不十分で、その進行性などが把握されていなかった。そこで本研究では、北陸地方の高速道路橋における上部工 (RC 桁および PC 桁) の ASR によるひび割れの特徴を調べるとともに、PC 橋および RC 橋から採取したコアによる促進膨張試験を実施することにより、ASR が発生した PC 橋の合理的な調査・診断法と維持管理を提案することを目的とした。その結果、上部工に発生した ASR については、構造物が置かれる地域的な骨材事情に注目したコアの評価による調査・診断が有効であった。

キーワード: コンクリート橋, ひび割れ, アルカリシリカ反応, ASR, 促進膨張試験

1. はじめに

北陸地方では、これまで高速道路の橋梁下部工 (橋脚や橋台, カルバートボックス) に深刻なアルカリシリカ反応 (以下, ASR) による劣化が発見されている。その際には、北陸地方の骨材の主要河川水系とそこから採取される骨材の反応性の有無を調べることにより、コンクリートの ASR 劣化度の把握と将来の劣化予測をすることが可能になってきたり。著者らは、目視点検の結果とコアによる詳細調査に基づいて、橋梁下部工の ASR 劣化度の階層化とそれらの評価基準値を提案することにより、実務に役に立つ、調査・診断法と維持管理に関するマニュアルを作成している¹⁾。その一方で、橋梁上部工 (RC 桁および PC 桁) の ASR は、全国的な調査が不十分で、ASR によるひび割れやその進行性などの特徴が把握されてこなかった。現在、北陸地方の高速道路のプレストレストコンクリート橋 (以下, PC 橋) でも、ASR によると思われるひび割れが富山地区にて多数確認されている。これまで、北陸地方では、主に地方道路橋を対象とした PC 橋の ASR 劣化状況の実態調査の報告^{2) 3)}がすでにあり、反応性骨材の地域性を考慮した ASR 劣化度の評価や対策⁴⁾がなされている。一方で、高強度のコンクリートが使用されている PC 橋では、早強セメントが使用され、水セメント比が小さいなどの配合上の特徴があり、単位セメント量 (アルカリ量) が多いという ASR 促進要因と、コンクリート内部が自己乾燥状態にあり、水分が不足するという ASR の抑制要因が混在していることが知られている²⁾。実際に、最近の PC 橋の調査では、未反応の状態でも骨材 (主に安山岩粒子) が長期にわたり残存している状況も確認されている。さらに、



写真-1 プレテン PC ホロー桁および橋台に発生したひび割れ

PC 橋に発生した ASR は、外部からの水分の侵入が少ないことから、粗骨材よりも細骨材の方がより顕著に反応しているのが特徴である。また、ASR によるひび割れは、水分と日射の影響を大きく受ける PC 桁の耳桁や桁端部に限定されている。地方道のプレテンション (以下, プレテン) 式 PC ホロー桁橋では、写真-1 に示すように、橋軸方向のひび割れが発生しており、橋台には網目状のひび割れが発生している事例が確認された。これらのひび割れは長期にわたり進展していない場合も多くあるが、その一方で顕著な ASR 劣化により PC ホロー桁橋の撤去到まで至った重大事例も発生している。しかしながら、ASR が発生した橋梁上部工の構造・使用性能の低下を調べた調査はほとんどなく、さらに PC 橋では調査時でのコアの採取位置とプレストレスが作用する方向性などにも十分な配慮が求められる^{3) 4)}。

そこで本研究では、北陸地方の高速道路橋における上

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 金沢支店 道路技術部 構造技術課 博(工) (正会員)

*2 中日本高速道路(株) 金沢支社 高速道路事業部 構造技術課 課長

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 金沢支店 道路技術部 主任研究員 博(工)

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) テクニカルアドバイザー 工博 (名誉会員)

部工（RC 桁および PC 桁）の ASR によるひび割れの特徴を調べるとともに、PC 橋および RC 橋から採取したコアによる促進膨張試験を実施することにより、ASR が発生した PC 橋および RC 橋上部工の合理的な調査・診断法と維持管理を提案することを目的とした。

2. 北陸地方における高速道路橋上部工に発生するひび割れの特徴と分類

北陸地方の地方道路橋に対しては、野村⁵⁾、大代⁶⁾、宮里⁷⁾らの調査により、塩害および ASR、凍害の地域的な特徴が明らかになっている。

まず、塩害（飛来塩分）に関しては、海岸線から 200m 以内の橋梁、具体的には北陸自動車道・松任美川海岸、福井県・越前海岸（国道 305 号）、石川県・のと里山海道（能登海浜道 I 期、II 期）、石川県・能登外浦地区（国道 249 号、地震で通行止め中）などに深刻な塩害による鋼材腐食などが発生している。また、昭和 50 年代前半には、福井県や石川県の一部で、九頭竜川河口の浚渫砂がコンクリートに使用された時期もあった。さらに、北陸地方では、スパイクタイヤの規制以後（2003 年）に凍結防止剤（主に岩塩（NaCl））が散布されており、北陸自動車道などでは塩害による鋼材腐食の目安とされる累積散布量が 1000 ton/km に達する路線が多くなっている。

次に、ASR に関しては、北陸自動車道や東海北陸自動車道では、ASR の地域発生分布図により、使用骨材（反応性岩石）の種類と ASR 劣化度をほぼ特定できる。福井県の九頭竜川流域、富山県の庄川、神通川、常願寺川流域から採取された骨材を使用した PC 橋梁は ASR 劣化を疑い、まずこれらの ASR 劣化橋梁を除外することが点検の際の合理化といえる。その際に、40 年、50 年が経過して、ひび割れ幅 0.5mm 程度でほぼ進展しない場合、ASR 劣化橋梁の対策は経過観察または簡易補修（例えば、シラン・シロキサン系塗布剤）で十分と考えられる⁸⁾。

また、凍害に関しては、北陸自動車道は平野部を通っており、縁石、地覆や L 型擁壁などの工場製品（non-AE コンクリート）にスケーリングが発生している程度であ

り、凍結融解繰り返し作用による劣化現象（スケーリングやスポーリング）は発生していない。ただし、東海北陸自動車道の白川郷および郡上、荘川などは日本建築学会による凍害危険度 2 または 3 に相当する地域⁹⁾であり、凍害との複合劣化が発生する可能性がある。最近の調査では、とくに砂の ASR による微細なひび割れが床版や橋台の凍害との複合劣化を誘発している事例が確認されている。

3. 上部工（RC 桁および PC 桁）の ASR によるひび割れの特徴（目視点検結果）

3.1 RC 桁

RC ラーメン高架橋の上部工（梁部や中間梁）に発生する ASR では、鉄筋に沿った、幅 1mm から 2mm の大きな幅のひび割れが発生している。また、これらの ASR によるひび割れが縦・横方向に繋がると、かぶりの剥離や鋼材の腐食を誘発する場合がありますので注意が必要である。富山県内では、ASR による膨張が継続した RC 橋（写真-2）にて、大規模な断面修復と打ち替えが実施された事例がある。

3.2 プレテン PC 桁やプレキャスト PC 床版（以下、PCaPC 床版）

プレテン PC 桁や工場製造 PCaPC 部材に関しては、北陸地方では製造工場がほぼ 2 社（N 社敦賀工場、P 社七尾工場）に特定できることから、PC の製造年月から工場での使用骨材の履歴を調べることにより、「ひび割れが ASR かどうか」、さらに「ASR の劣化程度と今後の進行状況」もほぼ判断できる。プレテン PC 桁では、I 桁や T 桁は断面が薄いので、ひび割れが表面（かぶり部分）でほぼ留まっているのに対して、とくに古いタイプのホロー桁は内部（ボイド）がベニヤや段ボールできており、水（凍結防止剤を含む）が内部により滞留しやすいために下フランジのひび割れが大きくなり、その影響で鋼材の腐食と PC 桁の耐力や使用性が問題になるものがある^{10)、11)}。プレテン PC ホロー桁に発生した橋軸方向のひび割れを写真-3 に、コアの偏光顕微鏡観察結果を写真-4 に示す。この桁は庄川産骨材が使用されており、流



写真-2 ASR により深刻な劣化が発生した RC 橋梁



写真-3 プレテン PC ホロー桁下フランジに発生した ASR ひび割れ

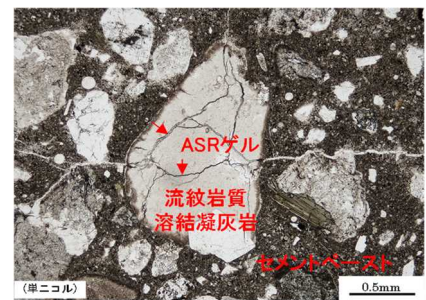


写真-4 PC 桁から採取したコアの偏光顕微鏡観察結果（P 社七尾工場製）



写真-5 ポステン PC・T 桁に発生したひび割れ（耳フランジ下部の水平ひび割れ）

紋岩質溶結凝灰岩および凝灰岩に顕著な ASR の反応痕跡と膨張ひび割れが観察された。この対策としては、勾配の低いボイド端の桁下面の箇所にてドリル（5mm 程度）で孔をあけて水抜きをすることが有効であり、その際に、水の状況（茶褐色）から鋼材腐食の有無も判断できる^{10) 11)}。なお、北陸自動車道ではプレテン桁の使用はインターチェンジなどの短区間の橋梁に限定されている。

3.3 ポストテンション式（以下、ポステン）PC・T 桁および PC 箱桁

降雨や日射の影響を受ける箇所ではひび割れの発生と ASR ゲルの滲出が観察されている。とくに、写真-5 に示すように、鉄筋および PC 鋼材に沿ったひび割れが下フランジの下面や側面の中央部、耳桁や張出し床版の側面や下面などに発生事例がある^{10) 11)}。ポステン PC 橋のひび割れの目視観察の着眼点は、コンクリートおよび鋼材の材料劣化（塩害および ASR、凍害、それらの組み合わせによる複合的な劣化もある）によるものと、構造的なもの（曲げやせん断、付着・定着など）に区別すると、PC 桁のひび割れの発生原因をより理解しやすくなる。

4. 調査概要

4.1 地域の反応性骨材の岩石学的特徴¹²⁾

富山県内の代表的な骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果と反応性骨材の岩種を表-1 に示す。常願寺川産の安山岩はオパール、クリストバライト（急速膨張性）を含み、庄川産の流紋岩質溶結凝灰岩は隠微晶質石英および火山ガラスを含むことが同定されている。それに対して、早月川・黒部川水系は非反応性の花崗岩および閃緑岩が多く含まれており、この流域での ASR の発生率はかなり小さくなっている⁹⁾。

4.2 コアによる促進膨張試験

北陸地方の高速道路橋の上部工から採取したコア（直径 55mm、長さ 150mm）を用いて、コアによる促進膨張試験

表-1 富山県内の骨材のアルカリシリカ反応性と岩種の特徴¹²⁾

骨材産地	アルカリシリカ反応性試験		骨材の主要な岩種
	化学法 (JIS A 1145)	促進モルタルバー法 (ASTM C 1260)	
早月川産	無害	無害	花崗岩、閃緑岩 (非反応性)
黒部川産	無害	不明確*	
常願寺川産	無害でない	有害	安山岩、流紋岩 (急速膨張性)
神通川産	無害	有害	
庄川産	無害	不明確*	溶結凝灰岩、流紋岩 (遅延膨張性)
小矢部川産	無害	不明確*	

※無害と有害の両者が存在する

（1N の NaOH 溶液への浸せき(80℃)）を実施して、コンクリートの ASR の有無と潜在膨張性を確認した。PC 橋に対する調査・診断時には、RC 橋と異なり、コアの採取位置とプレストレスの関係が重要になる。すなわち、コアによる促進膨張試験を適用する場合、PC 鋼材による拘束やプレストレスによって膨張が抑制されることに注意が必要になる⁴⁾。これは、PC 鋼材の拘束力の相違により、橋軸（プレストレス）方向に対して橋軸直角方向のコアは微細なひび割れの発生程度が増大するため、コアの膨張率は大きくなる傾向があると推察される⁴⁾。実際の調査時においては、コア採取は端部の橋軸直角方向に限られることから、PC・T 桁では桁端部の主桁側面の中央部にて PC 鋼材を避けて、3 本程度のコアを抜くのが望ましいと思われる。その際には、コア採取位置の ASR の発生状況を確認するとともに、水の影響を受けている箇所や大きなひび割れが発生している箇所を避けることにも注意が必要である。

4.3 調査対象

調査対象は、富山県内の北陸自動車道の RC 橋 41 橋および PC 橋 18 橋、東海北陸自動車道 RC 橋 1 橋および PC 橋 2 橋である。それらの内訳としては、RC 橋はすべて中空床版橋であり、それに対して PC 橋は中空床版 3 橋、ポステン T・I 桁 14 橋、プレテン T 桁 3 橋である。RC 橋においては、すべて中空床版の桁側面からコアを採取した。PC 橋においては、コアの採取位置が桁側面と横桁からと混在しており、路肩側および中央分離帯側との区別はされていない。代表的な上部工コンクリートの配合例を表-2 および表-3 に示す。

4.4 調査結果

主要河川水系の骨材産地ごとに分類したコアの促進膨張試験の結果について、図-1 に RC 橋、図-2 に PC 橋をそれぞれ示す。RC 橋は使用骨材の反応性の大小が下部工の促進膨張試験の結果とよく一致していた。すなわち、橋梁下部工の管理基準値（2 週での 0.1% の膨張量による評

表-2 RC 上部工の代表的な配合例

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	50.0	155	300	764	1138	0.750

表-3 PC 上部工の代表的な配合例

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	44.3	155	350	676	1174	0.875

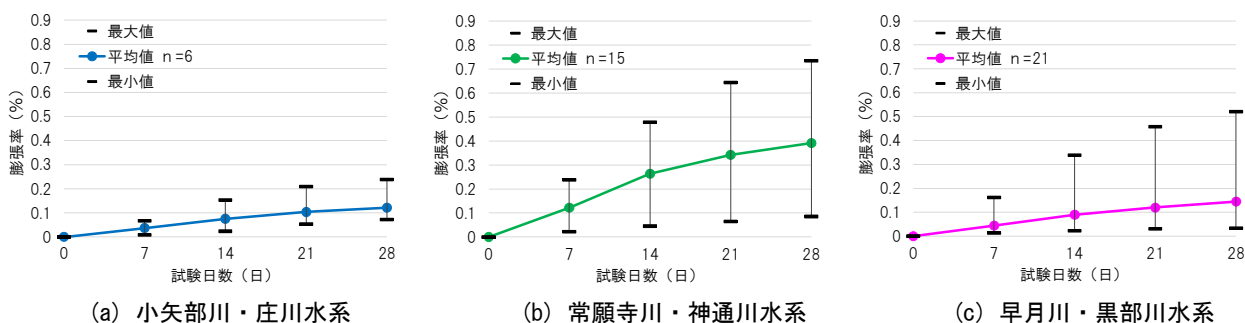


図-1 RC 橋から採取したコアの促進膨張試験の結果

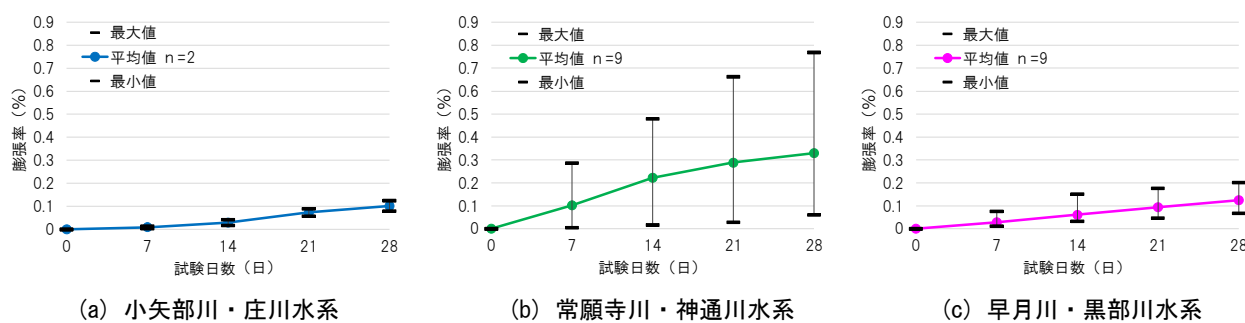
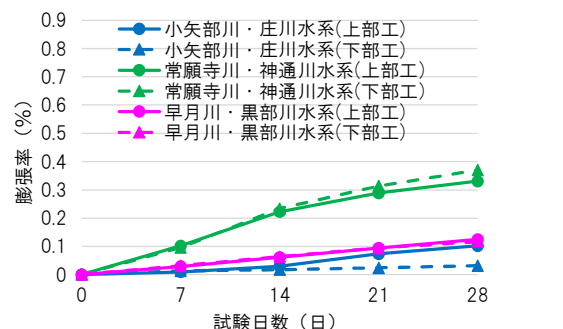
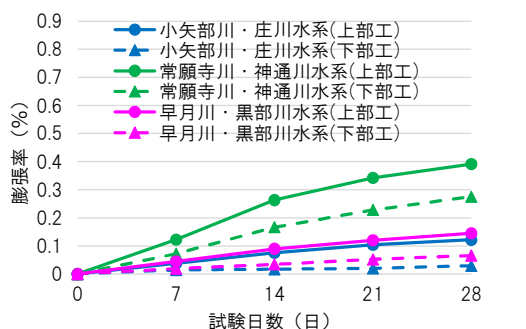


図-2 PC 橋から採取したコアの促進膨張試験の結果



価)りが適用できることが明らかになった。一方で、最大値と最小値の幅は RC 橋が大きくなった。これは、建設工事が増大した昭和 50 年代前半は、供給量に優れた常願寺川産の陸砂および陸砂利が幅広く地区内外に流通していたことが影響しており、本来の供給地域以外に常願寺川産骨材が含有している可能性があった。今回、早月川・黒部川水系に分類した骨材の中には建設(昭和 50 年代)当時の記録と実際とが異なるものがあると考えられ、正確な分析ができていないことが懸念される。

また、図-3 および図-4 はそれぞれの上部工と下部工の

平均膨張率を示している。下部工の促進膨張試験結果は、下部工から採取したコアのうち、上部工と同じ橋梁で骨材産地が共通しているものを抽出した。PC 桁の膨張率は、全体として RC 桁のものよりも小さくなる傾向があった。上部工と下部工の比較では、RC 橋はどの骨材産地も 14 日以降は上部工>下部工の関係が成り立っているのに対し、PC 橋は上部工と下部工が同程度の値を示していた。PC 橋では、RC 橋に比べて W/C が小さい (RC 橋: 50%, PC 橋: 44%) のでコンクリートは密実になり、1N・NaOH 溶液のコア内部への浸透が遅れることから、早期での判定には不

確定な要素が存在した。したがって、PC 橋での評価基準値は 3 週または 4 週での膨張率を基準とする¹³⁾、¹⁴⁾のが望ましいと思われる。

5. 撤去 PC 橋の ASR ひび割れの特徴とコアによる促進膨張試験の結果

北陸自動車道の多くの PC 橋梁で ASR ひび割れは大きな問題となっていないが、最近、ASR 劣化の進行により撤去にまで至った PC 橋が存在する。富山県内に位置する S 橋は、1975 年に供用開始された PC 斜材付き π 型ラーメン橋で、ASR による顕著なひび割れが原因で 2024 年度に撤去された。ASR 膨張の継続により、写真-6 に示すように、中空ホロー桁端部からの大きなひび割れ（PC 鋼材まで到達し、部材断面を貫通）の発生とともに、PC 鋼材の抜け出しによるプレストレスの低下、さらに S 橋の撤去時に張り出し床版付け根部を切断すると、その中央部に連続的に発達した ASR による水平方向のひび割れが観察され、耐荷性能および使用性能の低下により通行禁止の措置が取られた。

その一方で、ASR は問題とならなかったが、塩害が原因で撤去の判断がなされた事例では、石川県に位置する T 橋がある。1972 年に供用開始された 8 径間連続有ヒンジ PC ラーメン箱桁橋で、2023 年度より撤去工事が開始された。ASR 劣化を受けた PC 中空ホロー桁（S 橋）ではハンチ部に 0.5mm 幅の水平ひび割れが橋軸方向に発生するのが特徴であるが、それに対して、T 橋は、写真-7 に示すように、桁表面に乾燥収縮によるひび割れが多数発生し、そこからの劣化因子（海水飛沫）の侵入により度重なる補修を受け、LCC 比較により撤去に至った事例である。S 橋および T 橋の促進膨張試験の結果を図-5 に示す。どちらの橋梁も 3 試料の結果であり、コンクリート用骨材は S 橋が常願寺川・神通川産（反応性の高い安山岩を 30%程度含む）、T 橋が手取川産（下流域のものは安山岩が少なく反応性は低い¹⁵⁾）を使用しており、骨材のアルカリシリカ反応性の相違を明確に示す結果となった。S 橋の中で 1 試料が 40 年以上経過しているにも関わらず急激な膨張を示しているのに対して、他 2 試料は T 橋の試料とほぼ同程度の膨張率を示していた。これは、コアの採取場所によって起因するものであり、PC 橋では採取位置によっては正確な診断ができないことを十分に理解する必要がある。

以上より、上部工に発生した ASR については、構造物が置かれる地域的な事情に注目して、ひび割れおよび変位の調査・診断と対策の選定をすることが必要である。ASR によるひび割れの対策は、ひび割れ幅の 0.5mm および 1.0mm 程度を基準として大きなひび割れ幅のみに限定して、無機系注入材（高炉セメントや微細セメント系）によりひび割れ注入するか、全体的にひび割れが発生している



写真-6 桁端部に発生した部材断面貫通ひび割れ



写真-7 PC 箱桁表面に発生した乾燥収縮によるひび割れ

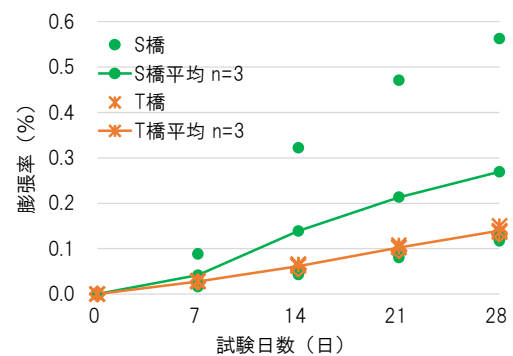


図-5 撤去された PC 中空ホロー桁橋の促進膨張試験結果

箇所のみをシラン・シロキサン系塗布剤にて表面塗布することが推奨できる⁸⁾。ASR が発生している構造物は基本的には内部からも水が回ってくるので、エポキシ系の樹脂は 10 年程度で接着性や止水性が失われることを念頭に置いて維持管理を実施するべきである⁸⁾。また、ケイ酸ナトリウム系の塗布材は ASR を促進する場合がある。さらに、亜硝酸リチウムの注入工法は費用対効果の観点から、慎重に判断することも必要である。

6. まとめ

北陸地方の高速道路橋の上部工（RC 桁および PC 桁）のひび割れの点検結果に基づいて、各部位でのひび割れの発生状況と地域での使用骨材を調べることにより、ASR と塩害（凍結防止剤および海水飛沫）、さらに凍害の劣化

要因を明確に区別することができ、橋梁の合理的な維持管理に役立つことが判明した。

本研究で得られた主要な結果をまとめると以下のようである。

- (1) RC 桁に発生した ASR ひび割れは幅 1mm から 2mm であるが、ひび割れが縦横に繋がるとかぶりの剥離や鋼材の腐食を誘発する場合があるので、調査・診断時に注意が必要である。
- (2) ポステン PC 桁や PC 箱桁に発生した ASR ひび割れは、降雨や日射の影響を受ける箇所にて鉄筋および PC 鋼材に沿ったひび割れが発生する。その際に、塩害および ASR、凍害を受けて生じる材料劣化によるものと、曲げやせん断などで生じる構造的なものに区別することが調査・診断時に重要となる。
- (3) プレテン PC 桁や PCaPC 床版に発生した ASR は、製造工場がほぼ PC2 社に特定できることから、製造年月から工場での使用骨材の履歴 (ASR の有無) を調べることで劣化要因を判断できる。
- (4) PC 橋のコアによる調査・診断時には、コアの採取位置が重要である。PC・T 桁では桁端部の主桁側面の中央部にて PC 鋼材を避けることを標準とし、3 本程度のコアを抜くのが望ましい。その際には、コア採取位置の ASR の発生状況の確認とともに、水の影響を受けている箇所やひび割れが発生している箇所を避けるなどの配慮も必要となる。
- (5) RC 橋および PC 橋の上部構造から採取したコアによる促進膨張試験結果では、PC 橋の方が RC 橋よりも膨張率が小さくなる傾向を示した。このため、PC 橋では、NaOH 溶液の浸透速度を考慮して、3 週または 4 週で膨張率を基準にすることが望ましい。

謝辞

本研究は、金沢大学深田幸史教授に多大な調査協力をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 河尻留奈, 稲葉尚文, 可計皓規, 石川裕一, 鳥居和之: コンクリート構造物から採取したコアのアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価に関する研究, 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 21 巻, pp.520-525, 2021
- 2) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.11, pp.1065-1070, 2008
- 3) 湊俊彦, 石井浩司, 丑屋智志, 鳥居和之: ASR が発生したプレストレストコンクリートコンクリート橋のひび割れの特徴と対策の現状, 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 11 巻, pp.471-478, 2011
- 4) 杉浦尚樹, 小林和弘, 深田幸史, 鳥居和之: プレストレストコンクリート桁に対するコアによる ASR 劣化度診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.877-882, 2017
- 5) 野村昌弘, 平俊勝, 鳥居和之: コアによるコンクリート構造物のアルカリシリカ反応の判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1147-1152, 2001
- 6) 大代武志, 野村昌弘, 参納千納男, 鳥居和之: 富山県における ASR 劣化橋梁の調査実態とその地域特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1059-1064, 2016
- 7) 宮里心一: 講座 PC 技術者の化学入門 第 9 回コンクリートのアルカリシリカ反応, プレストレストコンクリート, Vol.66, No.5, pp.78-81, 2024
- 8) 久保善司, 鳥居和之: アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018, 2018
- 10) 湊俊彦: 能登有料道路におけるアルカリシリカ反応が発生した橋梁の実態調査と維持管理に関する研究, 金沢大学学位請求論文, 第 6 章, pp.150-165, 2013
- 11) 湊俊彦, 鳥居和之: 北陸地方における ASR が発生した PC 橋の詳細調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1001-1006, 2011
- 12) 可計皓規, 河尻留奈, 名古屋通義, 鳥居和之: 富山県内の高速道路橋から採取したコアによるアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価, コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.11, pp.580-585, 2023
- 13) T. Katayama, M. Tagami, Y. Sarai, S. Izumi, T.Hira. : Alkali-aggregate reaction under the influence of de-icing salts in the Hokuriku district, Japan, J. of Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004
- 14) 野村昌弘, 青山實伸, 平俊勝, 鳥居和之: 北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価方法, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.3, pp.259-268, 2002
- 15) 河尻留奈, 深田幸史, 稲葉尚文, 鳥居和之: 高速道路橋コンクリート床版の塩害アルカリシリカ反応による複合的劣化機構の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.622-627, 2022