

論文 北陸地方における ASR が発生した PC 橋の詳細調査

湊 俊彦*1・鳥居 和之*2

要旨: 近年, 北陸地方(富山県, 石川県および福井県)では, ASR による劣化を生じた PC 橋が確認されている。それらの PC 橋の ASR 劣化の実態の把握が県, 市町村などで実施している「橋梁の長寿命化修繕計画」の策定における重要な課題の1つとなっている。本研究では, PC 橋の ASR によるひび割れ状況, それらの対策事例と地域ごとの反応性骨材との関係について調べるとともに, 採取したコアの力学的性質や残存膨張性などの詳細調査を実施した。また, 今回の調査結果より, ASR が発生した PC 橋の維持管理における基本的な考え方を提案した。

キーワード: ASR, PC 橋, 橋梁の長寿命化, 残存膨張性, 維持管理

1. はじめに

北陸地方では, ASR により著しく劣化した橋梁の下部構造において, これまでの調査・研究結果に基づいて, 部位ごとの補修・補強対策が実施されている。一方, コンクリート上部構造については, 今まであまり明らかになっていなかったが, ここ数年, 橋梁の長寿命化修繕計画策定のための定期点検が進む中で, 主にプレストレストコンクリート橋(以下, PC 橋)に ASR による劣化が相次いで発見されている。北陸地方の主要河川と地質図における岩体分布状況を図-1 に示す。それぞれの地域の生コン工場から出荷されるコンクリートを使用し, 現場で打設されるポストテンション桁(以下, ポステン桁)の ASR 劣化は, 北陸地方の反応性骨材の分布状況とほぼ一致している。一方, 工場製作のプレテンション桁(以下, プレテン桁)は, 石川および富山の両県内には石川県七尾市の PC 工場, 福井県内には, 福井県敦賀市の PC 工場でそれぞれ製作された桁が主に流通していた。石川県七尾市の PC 工場では, 骨材流通の関係から主に富山県の河川産骨材が使用されており, 1970 年代頃に製作されたスラブ桁や T 桁に ASR によるひび割れが確認されている。それに対して, 福井県敦賀市の PC 工場では, 滋賀県産の硬質砂岩が使用されてきたことが判明している。PC 橋の ASR 劣化の実態を把握することは, 北陸地方の「橋梁の長寿命化修繕計画」の策定において重要な課題となっている。そこで, 本研究では, 北陸地方における主要な PC 橋の形式について, 地域的な ASR の発生状況とその損傷形態を把握するための現地調査を実施した。また, PC 橋より採取したコアの力学的性質(圧縮強度や静弾性係数)および残存膨張量試験の詳細調査結果に基づいて, ASR により劣化した PC 橋の維持管理における基本的な考え方を提案した。

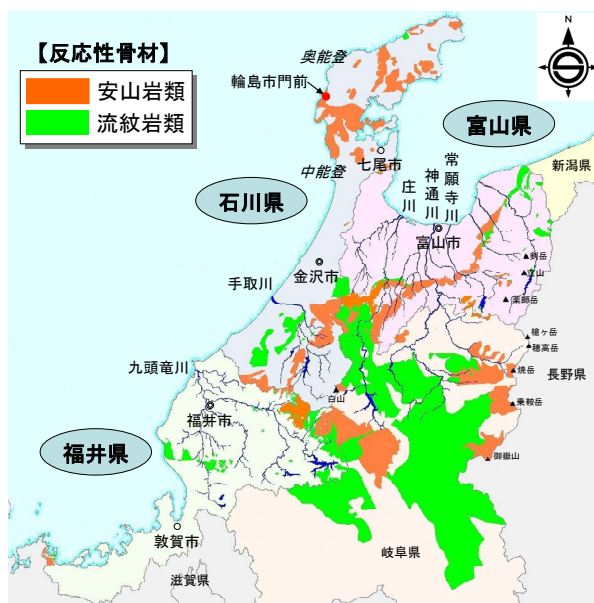


図-1 北陸地方の主要河川と岩体分布

2. 調査概要

現地では, ASR によるひび割れの発生状況(位置, 幅), アルカリシリカゲルの滲出および鋼材腐食の有無などを目視観察するとともに, 対策後の補修・補強の効果も確認している。そのうち, 主要な橋梁形式ごとに, 代表的な5橋を選択して, コア採取をともなう詳細調査を実施した。コア径は既設鋼材を避ける必要があることと, 試験値を同一の基準として評価するために, $\phi 55\text{mm}$ を標準とした。5橋の概要, 使用・環境条件および反応性骨材の種類を表-1 に示す。コア採取の試験項目としては, 圧縮強度, 静弾性係数試験および骨材の残存膨張性を調べるために, デンマーク法とカナダ法の2種類の促進膨張試験を実施している。また, コア採取後と促進膨張後においてコア薄片の偏光顕微鏡観察により主要な反応性骨材の岩種を同定している。

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境科学専攻 (正会員)

*2 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

表-1 詳細調査を実施したPC橋の概要と反応性骨材の種類

橋梁名	完成年 [経過年数]	橋梁形式	使用・環境条件	反応性骨材の種類 (河川水系)
A橋	1980(S55)年 [30年]	ポステンT桁	北陸自動車道・平野部 [※]	安山岩, 流紋岩 (常願寺川水系)
B橋	1982(S57)年 [28年]	ポステンT桁	県道・海上部 ^{※※}	安山岩, 流紋岩 (庄川水系)
		ポステン箱桁		
C橋	1971(S46)年 [39年]	プレテンスラブ桁	市道・平野部 [※]	安山岩, 流紋岩 (庄川水系)
D橋	1975(S50)年 [35年]	プレテンT桁	市道・平野部 [※]	安山岩, 流紋岩 (庄川水系)
E橋	1973(S48)年 [37年]	ポステン中空床版	北陸自動車道の跨道橋・海岸部 ^{※※}	安山岩, 流紋岩 (九頭竜川水系)

※：凍結防止剤の影響あり

※※：凍結防止剤及び海からの飛来塩分の影響あり

3. PC橋のASR発生状況と維持管理

3.1 ASRによるひび割れの特徴と損傷形態

(1) プレテン桁の調査結果

近年、石川および富山の両県内では、ASRによるひび割れが発生した同一工場製作のプレテン桁が相次いで発見されている。プレテンスラブ桁のひび割れ発生状況を写真-1(a)に示す。同時期に同じ配合で製造されたPC桁の中でもスラブ桁がI桁やT桁に比べてひび割れの発生が顕著であり、ひび割れは橋軸方向に卓越しているのが特徴である。これは、I桁やT桁が充実断面であるのに対して、スラブ桁は中空部を有する断面であることから、主桁内部にもASRの発生要因である水分が溜まりやすい構造であることが影響していると考えられる。ひび割れは、橋面排水や雨水の影響を受ける外桁端部付近に集中しており、幅は最大0.5mm程度である。また、桁間の間詰めコンクリートには現地の生コンを使用していることから、その地域のASR事情が反映されている。間詰めコンクリートにASRが発生し、コンクリートが膨張したために、舗装面にリフレクションクラックが発生した事例を写真-1(b)に示す。さらに、複合的な劣化作用により、桁端部付近の横締めPC鋼棒が主桁外に抜け出した事例を写真-1(c)に示す。このプレテンスラブ桁は、石川県白山市の山間部に架橋されており、主桁下面にはASR特有のひび割れが見られる。横締めPC鋼棒が破断し、飛び出した原因は、凍結防止剤が橋面から浸透し、腐食したPC鋼棒にASRによる膨張力が加わったためと考えられる。同様に、プレテンT桁のASRによるひび割れ発生状況を写真-1(d)に示す。降雨の影響を受けやすい外桁にて、ASRがもっとも進行する傾向があり、下フランジにPC鋼線に沿って発生するひび割れが特徴である。しかし、ひび割れは、幅が0.2mm以下と微細であり、ひび割れの進展もないことから、補修は実施されていない。一方、これまでに福井県内のプレテン

桁にASRによるひび割れは確認されていない。これは、PC桁の製造工場で使用していた細・粗骨材が化学法(JISA 1145)により「無害」と判定される福井県三国町の陸砂と滋賀県産の硬質砂岩砕石であったことが理由である。プレテンスラブ桁は20m程度の単純形式が多いことから判断して、桁自身の耐荷性能に及ぼすひび割れの影響は比較的小さいものと考えられる。同様に、横締めPC鋼棒の抜け出しにおいても、横方向の剛性低下は少なからずあるものの、横方向断面力が大きい支間中央は比較的健全なことから、緊急を要する危険な状態にまでは達していないと判断できる。

(2) ポステン桁の調査結果

その地域のコンクリートを使用し、現場製作されたポステン桁は地域ごとのASR事情(反応性骨材の種類)を反映している。石川県奥能登のポステン桁は図-1に示す輪島市門前産の反応性が高い安山岩砕石を使用していることが判明している¹⁾。この地域のポステンT桁は、プレテンT桁と同様に、外桁にもっとも顕著なASRが発生しており、下フランジから桁端定着部にかけて曲げ上げたPC鋼線に沿ったひび割れが特徴である。劣化要因がASR単独であれば、ひび割れは下フランジおよび桁端部に集中的に発生する傾向にある。次に、ポステン中空床版および箱桁は、いずれも場所打ち施工される比較的大規模なPC橋である。石川県奥能登におけるポステン中空床版のひび割れ発生状況を写真-1(e)に示す。施工時の打ち継ぎ部およびPC鋼線の定着部に沿って、水平方向に数mmの大きなひび割れが発生し、アルカリシリカゲルが滲み出していた。この構造は中空内部に水が溜まりやすいので、長期にわたりASRが進行したことで、打ち継ぎ部に集中的にASR膨張が作用したことで、大きなひび割れに進展したと考えられる。この橋梁ではひび割れ深さを採取したコアにより確認した後に、ひび割れへのモルタル注入による補修が実施された。



(a) 主桁のひび割れ
(プレテンスラブ桁)



(b) 舗装面のひび割れ
(プレテンスラブ桁)



(c) 横締め PC 鋼棒の抜け出し
(プレテンスラブ桁)



(d) 主桁のひび割れ
(プレテン T 桁)



(e) 主桁のひび割れ
(ポステン中空床版)



(f) ドリル削孔後の水の噴出状況
(プレテンスラブ桁)



(g) PC 橋への電気防食の適用事例
(プレテン T 桁)



(h) 炭素繊維シートによる補強事例
(ポステン T 桁)



(i) 炭素繊維シートの破断事例
(ポステン T 桁)

写真-1 PC 橋における ASR の発生状況と補修・補強を実施した対策事例

また、石川県中能登において、塩害環境下にあるポステン箱桁に保護塗装が施工されており、桁端部の塗装上に PC 鋼線に沿ったひび割れが発生していた。塗装上のひび割れは塗装自身が劣化することでひび割れを生じることもあるので、塗装を部分的に剥がし、コンクリートの表面状況を確認した。その結果、ASR によるものと判断できる 0.2mm~0.3mm 程度の微細なひび割れが確認された。箱桁内部には水分が滞留しておらず、乾燥状態にあったことが ASR の進行を抑制できた理由と考えられる。一方、福井県内のポステン桁では、九頭竜川水系の勝山市や大野市に ASR によるひび割れが比較的多く発生している。しかし、ASR による劣化は軽微であり、補修は必要ないと判断している。さらに、九頭竜川流域では上流部に安山岩の岩体があるので、河川産の砂利・砂に混入しているが、下流部になるにつれて、そのような安山岩の混入率が減ってくることから、ASR による劣化も軽微なものに推移することが確認された。

3.2 ASR が発生した PC 橋の維持管理

プレテンスラブ桁の当面の維持管理としては、アスファルト舗装のリフレクションクラックを通して中空部に溜まった水を桁下から抜くことや、橋面防水層の敷設および伸縮装置の改良により橋面水の浸透を防ぐことなどが考えられる。桁下からハンマードリルで中空部を削孔し、水が噴出した状況を写真-1 (f) に示す。また、能登半島の海岸線に架橋されており、塩害防止を目的とした電気防食の適用事例を写真-1 (g) に示す。この地域は奥能登の安山岩砕石を使用していることから、ASR により劣化した PC 橋が多いことが知られている。しかし、ASR と塩害の 2 つの劣化要因を比較したときに、ASR によるひび割れの進行を防ぐことよりも、塩害による鋼材腐食を止めることの方が PC 橋の長寿命化の観点からは緊急性が高いと判断される。したがって、ASR と塩害で複合劣化した PC 橋では、電気防食の実施時に、ASR により発生したひび割れにコンタクトゲージ

用のチップを貼り付け、定期的に計測を行うことにより、電気防食が ASR に及ぼす影響を把握していくことが必要であると考え。プレテン T 桁の場合、ASR 単独の劣化であれば前述のとおり、30 年以上経過しても 0.2mm 程度のひび割れ幅なので、水回りの処理を確実に行えば現状維持が可能であり、急激に進行することも考えにくい。この事例では、通電 (5mA~10 mA/m²) しても ASR が促進されないことが確認されている。次に、PC 橋の炭素繊維シートによる補強を写真-1 (h) に示す。炭素繊維シートを桁の外周に貼り付け、その上に保護塗装を施工しているが、外力に対して比較的弱いことが判明した。主桁下フランジ部に工事用の車両が接触したことで、炭素繊維シートが剥がれ、コンクリートが欠損し、内部の PC 鋼材を腐食させた事例を写真-1 (i) に示す。さらに、主桁内部の水が滲み出してくる場合もあるので、樹脂系接着剤の性能低下が懸念される。実際に、PC 鋼材の腐食を考慮した断面力を確保するために、多層にも貼り付けたことで、接着剤の効果が薄れ、浮いている箇所もある。このようなことから、炭素繊維シートはなるべく乾燥した状態で貼ることが望ましく、接着剤の耐水性および貼り合わせた箇所の紫外線劣化などを踏まえた技術開発や合理的な補強設計手法の確立が今後求められる。

4. PC 橋から採取したコアによる詳細調査

4.1 詳細調査の概要

表-1 に示す 5 橋より試験可能なコア (φ55mm) を採取している。コアの採取位置は PC 鋼材を避けた桁端部であり、採取方向は主桁の軸方向に対して直角である。コアの力学的性質 (圧縮強度および静弾性係数) の測定は JIS A 1107 「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」により実施した。橋梁ごとにコアを 3 本採取し、その平均値を採用している。コアを促進養生して残存膨張性を予測する試験方法としては、デンマーク法およびカナダ法を採用している。デンマーク法は、飽和 NaCl 溶液中に浸漬することにより、細孔溶液中の OH⁻ イオン濃度が上昇し、それが長期にわたって維持されるので、コンクリート中に反応性骨材を含有している場合には ASR が促進されることが知られている²⁾。したがって、デンマーク法において大きな膨張量を示すコンクリートは、骨材中に反応性のシリカ鉱物やガラス相が十分に残存していると判断できる。とくに、北陸地方のように、凍結防止剤 (NaCl) により、外部からのアルカリ供給の影響を受ける構造物においては、ASR による残存膨張性を評価する方法として、もっとも適切な試験法であると判断している³⁾。一方、カナダ法は ASTM C 1260 に

準拠した方法であり、80℃の 1N-NaOH 溶液に浸漬して促進養生を実施するものである。カナダ法はデンマーク法よりも短期間 (2 週) に判定できる点で有利である。デンマーク法とカナダ法の大きな相違点は、コンクリートに発生する液相のアルカリ雰囲気 (pH) である。デンマーク法はカナダ法よりもアルカリ雰囲気が小さくなるので、実際に反応する鉱物の種類が異なっている⁴⁾。さらに、デンマーク法ではコンクリート中に十分なアルミネート相 (未水和のセメント粒子 (C₃A 相)) と水酸化カルシウムが残っていることが、試験下でアルカリ雰囲気を形成するための条件になることにも注意が必要である⁴⁾。デンマーク法は、膨張量の経時変化を材齢 91 日 (13 週) まで測定する。残存膨張性の判定は、骨材のアルカリシリカ反応性の判定基準に準拠して、材齢 91 日における膨張率が 0.4% 以上の場合「残存膨張性あり」、0.1~0.4% の間の場合「不明確」、0.1% 未満の場合「残存膨張性なし」である。一方、カナダ法は、材齢 14 日の膨張率が 0.2% 以上の場合「有害」、0.1~0.2% の場合「不明確」、0.1% 未満の場合「無害」と評価される。なお、本研究では促進養生期間を 28 日 (4 週) まで継続した。コンクリートに使用された骨材の岩種と ASR に関与している反応性鉱物を同定するために、岩石・鉱物学的試験 (X線回折, 偏光顕微鏡観察, 酢酸ウラニル蛍光法など) を実施している。本研究では採取したコアより薄片を作製して、岩石・鉱物学的試験 (偏光顕微鏡観察) により反応性の岩種を同定した。

4.2 コアの圧縮強度および静弾性係数の測定結果

それぞれの PC 橋から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度比の関係を図-2 に示す。この図では、プロットが原点に近づくにつれてコンクリートの ASR による劣化度が大きいものと判断できる。一般に、建設時のコンクリートの設計基準強度はプレテン桁が 50N/mm²、ポステン桁が 40N/mm² と推定される。通常、ASR が発生していない健全なコンクリートから採取し

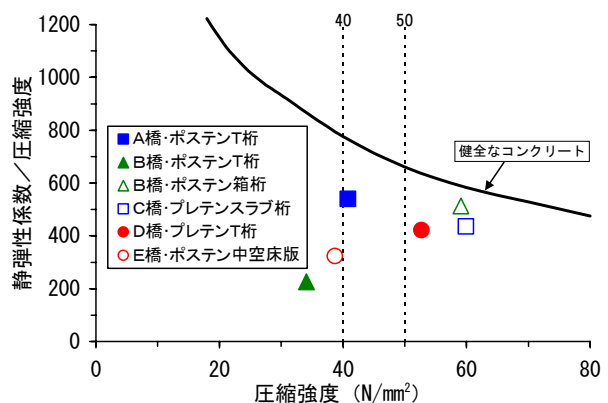


図-2 PC 橋から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数の関係

たコアの圧縮強度は設計基準強度を下回ることはない。それに対して、ASRが発生したPC橋では、図-2に示すとおり、健全なコンクリートが示す理論曲線より全て下方（原点側）に分布しており、圧縮強度および静弾性係数ともに低下しているのが明らかになった。とくに、B橋のポステンT桁では、もっともASRによるひび割れが発生している外桁において、コアの圧縮強度が最大で設計基準強度の80%程度に低下していることが判明した。

4.3 残存膨張性の評価

デンマーク法およびカナダ法による、コアの残存膨張量試験の結果を図-3に示す。また、採取コアの粒子径が5mm以上のものを対象として、コアの展開写真より同定した岩種ごとの面積から岩種構成率を測定した。粗骨材の岩種構成率を表-2に示す。富山市の平野部に架かるA橋は、表-2の岩種構成をもとに富山県のASR調査⁵⁾から判断すると、常願寺川水系または神通川の砂利・砂が使用されたと推定できる。

常願寺川産の骨材は富山県内の河川産骨材の中でもっとも反応性が高いものであるが、A橋の外観にはASRによるひび割れが全く発生していなかった。これは、凍結防止剤や雨水など、ASRが促進される要因を受けにくい使用・環境条件であったことによるものである。しかし、デンマーク法やカナダ法により外部からアルカリを供給し促進させた結果、コンクリートに大きな膨張が発生

表-2 コアの粗骨材の岩種構成率 (%)

岩種	A橋	C橋	E橋
安山岩	4.5	0.1	13.8
流紋岩・デイサイト	3.5	1.7	50.7
流紋岩～ デイサイト質溶結凝灰岩	8.0	35.2	2.1
流紋岩～ デイサイト質凝灰岩	0.0	3.1	5.3
珪質頁岩	0.1	3.3	0.8
花崗岩	12.0	15.4	4.0
閃緑岩	13.5	17.5	0.0
片岩・片麻岩	48.6	9.9	0.0
砂岩	9.8	13.7	22.0
石灰岩			1.3
計 (%)	100.0	100.0	100.0

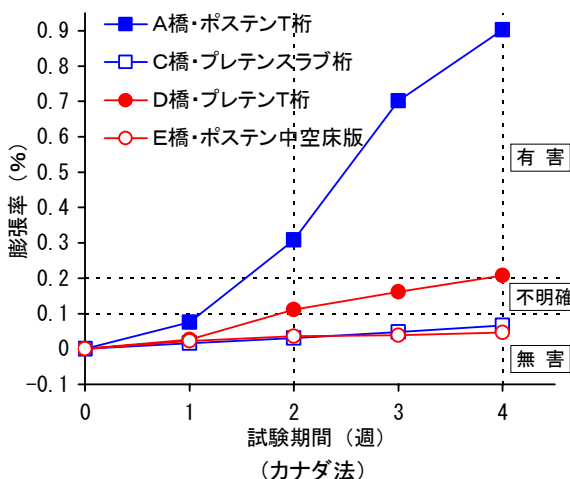
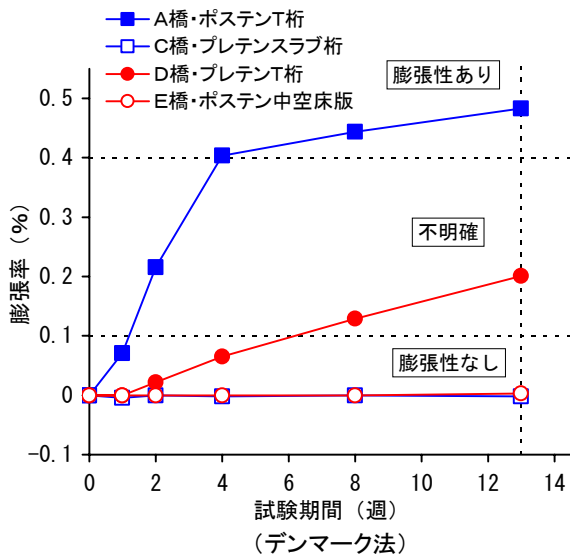
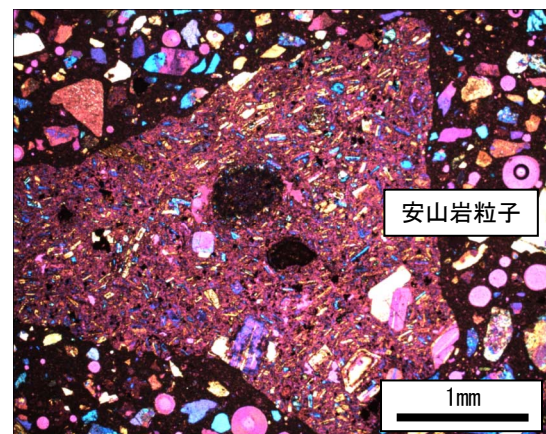
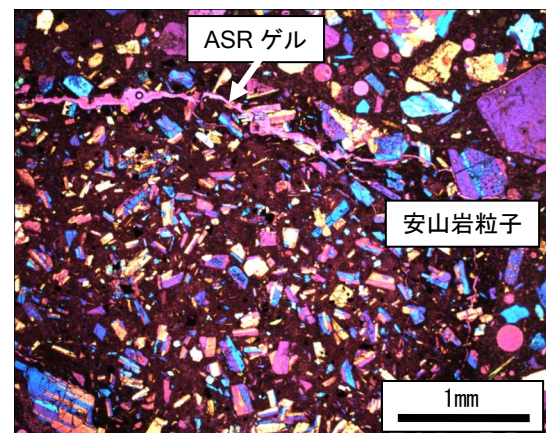


図-3 PC橋から採取したコアの残存膨張量試験の結果



(a) コア採取の直後（未反応）



(b) デンマーク法試験の終了後（ASRゲルの生成）

写真-2 ASRが発生したコンクリート薄片の偏光顕微鏡観察（A橋）

（直交ニコル（鋭敏色検板使用））

生した。このことは、これまで未反応の状態に残っていた骨材が新たに反応したことを示唆している。A橋より採取したコアの薄片試料を偏光顕微鏡にて観察した結果（写真-2 (a) および (b)）からも、デンマーク法の試験後に反応していることが観察できる。また、C橋（プレテンスラブ桁）とD橋（プレテンT桁）は、同じ工場と同じ骨材を使用して製作されている。使用された骨材は、表-2 より安山岩が少なく、流紋岩を多く含んでいるので、富山県の河川骨材の岩石構成率の特徴から富山県西部の庄川や小矢部川産のものと推定される。また、当時のセメントのアルカリ量は0.8%から1.0%程度なので、PCの単位アルカリ量は 3kg/m^3 から 4kg/m^3 と現行の規準より若干上回っていた。このように同一条件で製作されているが、両橋種では明らかに水の影響が異なるので、ASRによる骨材の反応性に差が生じている。すなわち、水の影響を受けやすいC橋（プレテンスラブ桁）ではASRによるひび割れが多く発生していることから、骨材がほぼ反応しつくしており、膨張が収束していると判断できる。それに対して、D橋（プレテンT桁）は外観上のASRによるひび割れも少なく、骨材の膨張性は残されているが、現況の使用・環境条件を維持することで、これ以上の反応の進行は抑制できると考えられる。E橋は、反応性の高い安山岩が少ない福井県九頭竜川産の骨材を使用しており、試験結果からもコンクリートの残存膨張性はほとんどないことが確認された。コアの残存膨張量試験については、北陸地方の主要な反応性骨材である安山岩に関して、デンマーク法とカナダ法とは良好な相関性があると指摘されている²⁾。図-3に示すとおり、デンマーク法で膨張しているものはカナダ法でも膨張していることがわかる。とくに、1970年代に施工されたPC橋は、水セメント比が35%程度と小さく、コンクリート内部が乾燥状態にあるので、RC橋とは異なり、水の影響を受けていない限り、反応性の骨材が未反応で残っている場合があることが判明した。そのことを踏まえた上で、促進膨張試験の結果を理解しておく必要がある。

5. 結論

北陸地方のPC橋においては、反応性骨材が使用されていた場合でも、伸縮装置の改良（非排水化）や外桁を浸透性の高い防水剤で処理しておくなどの対策を適切に実施することにより、今後、ASRが進展することは少ないと考えている。このような判断は、「PC橋の長寿命化修繕計画」の策定および維持管理において重要なことである。北陸地方におけるASR劣化が発生したPC橋の現地調査とコアによる詳細調査を通して得られた知見

をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 1970年代に石川および富山の両県内に流通していたプレテン桁は、同一工場で作られたものであった。しかし、ASRによるひび割れの発生状況および損傷形態より、ASR劣化の程度は軽微であることが確認された。
- (2) 福井県内のプレテン桁には、ASRによるひび割れは確認されなかった。これは製作工場で使用されていた骨材が非反応性のものであったことによるものである。
- (3) 外観上、もっともASRが進行していたポステンT桁においては、圧縮強度の大きな低下が見られた。劣化要因がASR単独であれば、補修箇所を外桁に限定する対策が経済的に有利である。
- (4) ポステン桁は、その地域の骨材事情が反映されていた。それに対して、プレテン桁は特定のPC工場で作られたものなので、製作時期と使用・環境条件を調べれば、ASR発生の有無および劣化進行の程度が推定できる。
- (5) PC橋では、使用・環境条件によって、反応性骨材が未反応のままに残存していることが確認された。

謝辞：本研究の実施にあたり、富山県、石川県、福井県および中日本高速道路(株)にご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居和之，大代武志，山戸博晃，平野貴宣：石川県の反応性骨材とASR劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008
- 2) 鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性，土木学会論文集，No.767，pp.185-197，2004
- 3) 鳥居和之，友竹博一：アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.251-263，2003
- 4) 鳥居和之，野村昌弘：コンクリートコアによるASR残存膨張性の評価，セメントコンクリート，No.715，pp.64-70，2006
- 5) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材とASR劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007