

論文 凍結防止剤の影響を受けた ASR 損傷コンクリート橋脚の調査

鳥居和之*¹・奥田由法*²・松田康孝*³・川村満紀*⁴

要旨：北陸地方の橋梁では、冬季に凍結防止剤が多量に散布されており、反応性骨材を含有するコンクリート橋脚にはASRによる損傷と塩分浸透による鉄筋腐食との複合劣化が懸念されていた。今回の調査では、ASR損傷橋脚の補強設計のための基礎資料を得ることを目的として、コンクリート橋脚のASRによる損傷の程度と塩化物イオン浸透量を詳細に調べた。その結果、凍結防止剤として散布された塩化ナトリウムおよび塩化カルシウムは比較的短期間にコンクリート内部に浸透しており、凍結防止剤のASR損傷および鉄筋腐食におよぼす影響が明らかになった。

キーワード：凍結防止剤, ASR, 鉄筋腐食, 複合劣化, 現地調査, 補修・補強

1. まえがき

北陸地方では、アルカリシリカ反応性を有する安山岩質および流紋岩質の砕石が長年にわたって使用されており、各種コンクリート構造物にASRによる損傷が発見されている。また、この地方の橋梁では、冬季間に路面の凍結防止のために岩塩（塩化ナトリウム）および塩化カルシウムが多量に散布されており、ASRおよび鉄筋腐食におよぼす凍結防止剤の影響が懸念されていた¹⁾。凍結防止剤がASRを促進することは、多くの研究者により指摘されているが、実構造物にて凍結防止剤の影響が調査された事例は少ない²⁾。また、実構造物では、ASRと鉄筋腐食、凍結融解などの損傷が同時に進行する場合もあるが、それらの作用による複合劣化現象についてはこれまでほとんど検討されていない。

本研究は、凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚よりコンクリートコアを多数採取し、ASRによる損傷の程度および残留膨張性を調べるとともに、スケーリングが生じた橋脚側面から採取したコンクリートコアの

塩化物イオン濃度の分布と表面組織の変化、鉄筋の腐食状況との関係について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 橋脚の劣化状況

K橋は、能登半島を縦貫する有料道路の山間部に位置するプレテンション単純T桁橋（昭和55年建設）であり、橋脚および橋台にASRによるひび割れが発見された。K橋の2本の橋脚（P3, P6）では、日射や降雨の影響を直接に受けるP6橋脚は1年を通して日陰となる部分が多いP3橋脚よりもASRによるひび割れの発生が顕著であった。また、両橋脚ともに、路面排水が伸縮目地から流れている橋脚側面でASRによるひび割れが多くなるとともに、スケーリングを伴う表面劣化が路面排水が流れた跡に発生していた（写真-1参照）。この地域の有料道路では、冬季間（12月上旬から3月中旬）に橋梁の路面凍結の防止のために岩塩（塩化ナトリウム）および塩化カルシウムが多量に散布されており、散布量は平成3年のスパイクタイヤの禁止以後に急速に増加している。

*1 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博（正会員）

*2 ピー・エス(株)北陸支店工務部（正会員）

*3 神戸市役所 工修

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博（正会員）

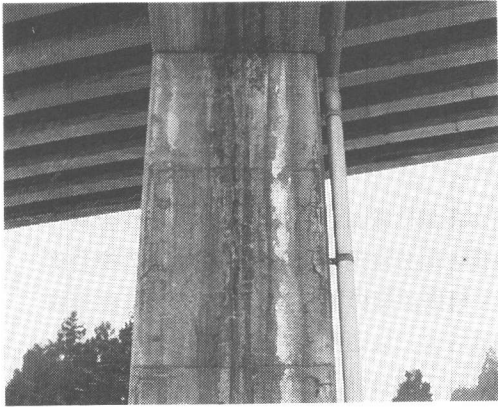


写真-1 コンクリート橋脚の劣化状況
(P 6 橋脚, A 側面)

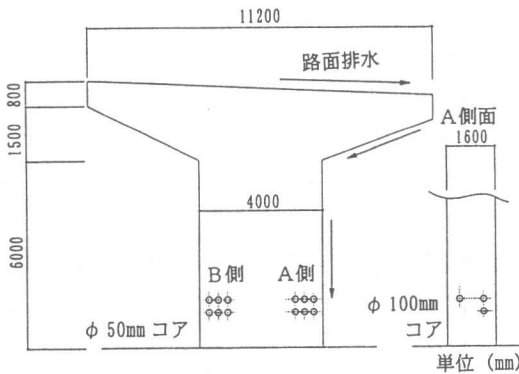


図-1 コンクリートコアの採取位置

2.2 調査項目

橋脚におけるコンクリートコアの採取位置を図-1に示す。今回の調査では、P 3およびP 6の2橋脚の両側より圧縮強度用および残留膨張測定用のコンクリートコア（直径5 cm，長さ20 cm）をそれぞれ3本ずつ合計24本採取し、橋脚の各箇所でのASRによる損傷の程度および残留膨張性（飽和NaCl溶液浸漬法¹⁾，50℃の飽和NaCl溶液に浸漬し、残留膨張量を測定する方法）を調べた。また、路面排水が流れていた側面（A側面）とその反対側面（B側面）にて、コンクリートコア（直径10 cm）を軸方向鉄筋の位置で3本ずつ採取し、鉄筋の腐食状況を観察するとともに、かぶりコンクリートの塩化物イオン含有量の分布を電位差滴定

法（JCI-SC5）に従って測定した。さらに、凍結防止剤による表面劣化の機構を明らかにするために、表面の劣化部分および内部の試料について走査型電子顕微鏡観察（SEM-EDXA），示差走査熱量分析（DSC）およびX線回折分析（XRD）を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度，弾性係数および残留膨張量

P 3およびP 6橋脚より採取したコンクリートコアの圧縮強度，弾性係数および超音波パルス速度の結果を表-1に示す。K橋の橋脚のコンクリート（設計基準強度：24 N/mm²）には、反応性珪物として火山ガラスおよびクリストバライトを含有する黒崎安山岩砕石（最大寸法：25 mm）と川砂が使用されていた。酢酸ウラニール蛍光法¹⁾によるコンクリートコアのアルカリシリカゲルの観察では、表面部（0～2 cm）ではアルカリシリカゲルがあまり認められないが、それより内部ではアルカリシリカゲルによる発色が顕著であり、とくに5～10 mmの安山岩砕石粒子の周囲にアルカリシリカゲルの生成と微細なひび割れの発生が観察された。Diamond³⁾は、乾燥の影響を受けた部分では細孔溶液中の水酸化アルカリが固定され、再度吸水した時にも固定された水酸化アルカリは溶解しないことを報告している。今回の調査でも表面部はアルカリシリカゲルが観察されないことが多く、乾燥および炭酸化によるアルカリの固定化による影響について検討する必要があるものと思われる。P 3およびP 6橋脚にはほぼ同一のコンクリートが使用されていたが、橋脚の環境条件の相違によりコンクリートの圧縮強度はP 3よりもP 6の方が、また路面排水の影響を受けた側面の方が小さくなり、ASRによるひび割れが多く見られたP 6橋脚のA側では強度測定が不能なものおよび設計基準強度を大きく下回るものがあった。ASRによる損傷を受けたコンクリートでは、コンクリートの力学的性質の変化が圧縮強度よりも弾性係数に鋭敏に現

表-1 コンクリートコアの圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度

橋脚	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (KN/mm ²)	パルス速度 (m/sec)	中性化深さ (mm)	橋脚	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (KN/mm ²)	パルス速度 (m/sec)	中性化深さ (mm)
P3 (A側)	31.9	18.1	4100	22.0	P6 (A側)	***	***	***	2.8
	29.9	18.1	4080	6.5		21.7	12.0	3760	5.7
	32.4	17.6	4590	16.0		18.2	7.1	3550	2.1
平均值	31.4	17.9	4260	14.8	平均值	20.0	9.6	3660	3.5
P3 (B側)	22.6	11.7	3810	8.2	P6 (B側)	25.8	8.1	3990	1.8
	34.8	19.9	4240	6.3		22.5	5.8	3380	3.7
	30.2	19.3	4360	11.5		26.0	7.1	3540	9.0
平均值	29.2	17.0	4140	8.7	平均值	24.8	7.0	3640	4.8

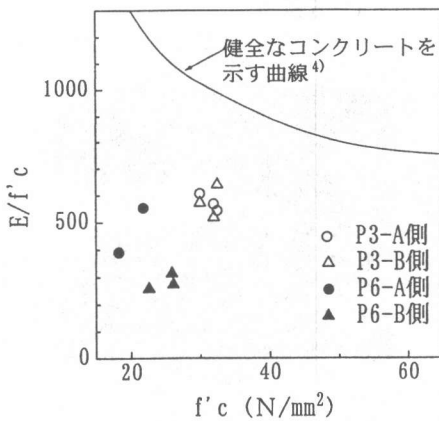


図-2 コンクリートコアの圧縮強度と弾性係数/圧縮強度比の関係

れることを利用して、両者の関係よりASRの損傷の度合いを推定する方法が提案されている⁴⁾。図-2はコンクリートコアの圧縮強度と弾性係数/圧縮強度比の関係を示したものである。両橋脚の弾性係数/圧縮強度比は健全なコンクリートの値の半分程度であり、P6のコンクリートコアはP3のものよりも弾性係数/圧縮強度比が小さくなる傾向が認められた。これらの結果は目視観察による劣化状況とも良く一致しており、圧縮強度と弾性係数との関係を検討することによりASRによる劣化状況を推定することが可能であった。また、P6橋脚の一部のコアでは、2~3cm間隔で輪切り状のひび割れが発生していたが、これはコンクリートコア採取時の鉄筋拘束の開放により生じたものと推測

された。

飽和NaCl溶液中でのコンクリートコアの膨張量の変化を図-3および4に示す。飽和NaCl溶液浸漬法¹⁾では、コンクリートコアの残留膨張性は浸漬後3ヵ月における膨張量が0.4%以上を膨張性あり、0.1~0.4%を不明確、0.1%未満を膨張性なしと判定する。P3およびP6橋脚の浸漬後3ヵ月におけるコンクリートコアの膨張量は0.1~0.4%であり、判定は不明確の領域にあった。しかし、浸漬後3ヵ月においても膨張は収束する傾向になく、K橋の建設後の経過年数も比較的少ないことから、本橋脚ではアルカリシリカ反応は十分に進行しておらず、残留膨張性ありと判断した方が良いものと思われた。現在、P3およびP6橋脚では、実橋脚でのコンタクトゲージによる膨張量(基長:10cm)の計測を実施しているが、P3およびP6橋脚ではそれぞれ1年間に0.08%および0.1%程度の膨張量があり、飽和NaCl溶液浸漬法の結果との対応が認められた。したがって、K橋の橋脚では残留膨張性を考慮した補修・補強対策が必要であり、補修・補強後もその挙動に注意する必要がある。

3.2 塩化物イオン含有量と鉄筋腐食状況

P3およびP6橋脚の路面排水が流れていた側(A側面)とその反対側(B側面)における塩化物イオン含有量の分布を図-5に示す。路面排水が流れなかったB側面では塩化物イオン

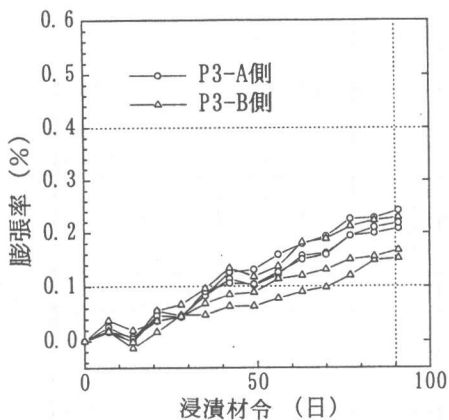


図-3 コンクリートコアの残留膨張量 (P3橋脚)

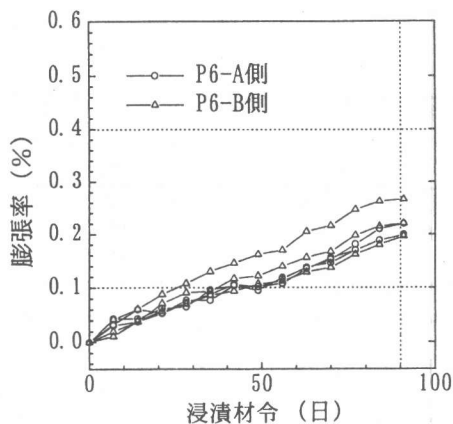


図-4 コンクリートコアの残留膨張量 (P6橋脚)

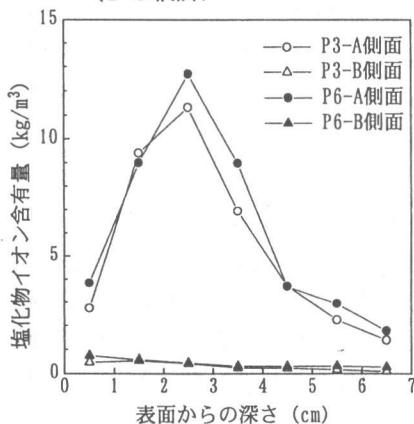


図-5 コンクリートの塩化物イオン含有量

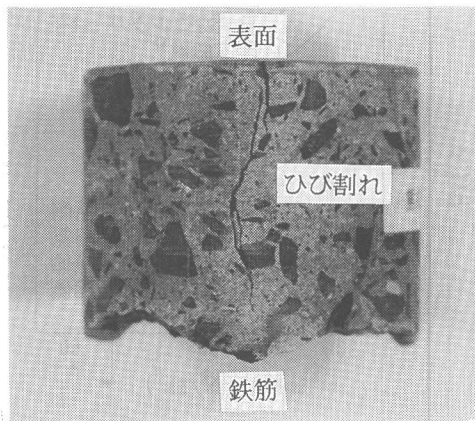


写真-2 コアのASRひび割れの状況

がほとんど含有されていないことより、橋脚コンクリートには内在塩分は含まれておらず、コンクリート内に多量に浸入した塩化物イオンはすべて凍結防止剤によるものであることが判明した。K橋の供用期間は約15年であり、凍結防止剤が冬季の3ヵ月間だけに散布されていたことを考えると、凍結防止剤によるコンクリートへの塩化物イオン浸透はかなり急速であることが分かる。また、P3およびP6橋脚の路面排水が流れていた側の塩化物イオンの濃度分布は類似しており、表面から2~3cmで最大になる凸型の濃度分布を示していた。これは、表面部の塩化物イオンが降雨により流出したことや、炭酸化により遊離した塩化物イオンが内部に移動したことが原因と考えられた。

コンクリートコアのASRによるひび割れの状況を写真-2に示す。P3およびP6橋脚の側面部のひび割れ(表面でのひび割れ幅: 1mm)は主鉄筋(かぶり厚さ: 6~7cm)まで到達しており、主鉄筋位置でのひび割れ幅は0.1mm程度であった。また、常時降雨の影響を受けているA側面では全体として中性化がほとんど見られなかったが、ASRにより発生したひび割れ部分はフェノールフタレイン溶液でほとんど発色せず、中性化が局部的にかなり内部にまで進行しているのが観察された。とくに、P6橋脚のコンクリートコアでは、ひび割れがアルカリシリカゲルで完全に充填されておらず、鉄筋位置での塩化物イオン量も鉄筋腐食の限界値とされる2~3kg/m³になっていたため、P6

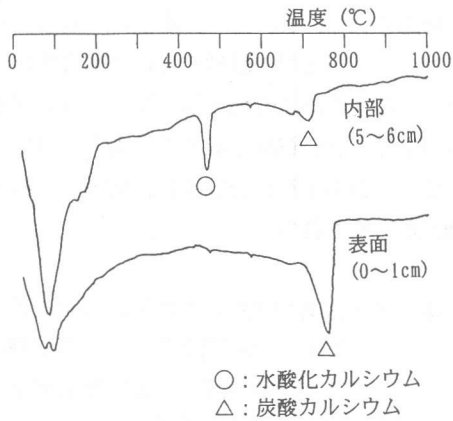


図-6 コンクリート表面および内部の DSC 曲線 (P 6 橋脚, A 側面)

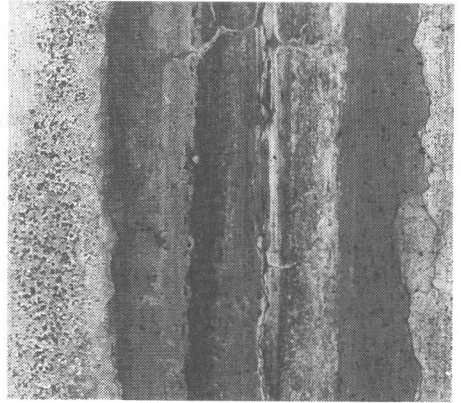


写真-3 コンクリート表面の劣化状況 (P 6 橋脚, A 側面)

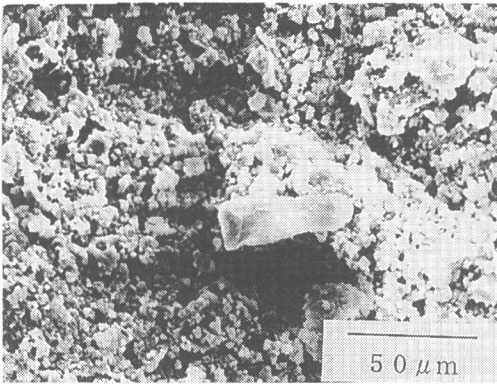


写真-4 スケーリングが生じた表面部の SEM 像

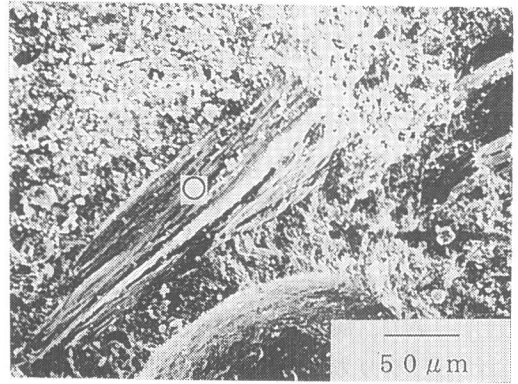


写真-5 茶色に変色した部分の SEM 像 (○印: CaO と Fe₂O₃ を含む鉱物)

橋脚の軸方向鉄筋には軽微な腐食が既に発生していた。

3.3 表面の劣化状況と内部組織

石川県能登地方では冬季に積雪はあるが、温度が氷点以下になることは比較的少なく、凍結融解作用によるコンクリートの劣化現象は能登地方の山間地でもこれまでほとんど報告事例がない。P 3 および P 6 橋脚の A 側面では、写真-3 に示すようにコンクリート表面のセメントペースト層が失われ、砂粒が表面に露出しており、凍結防止剤の影響によると推測されるコンクリート表面のスケーリングが観察された。また、スケーリングが発生したコンクリートコア

の割裂面の観察では、コンクリート表面から約 1 cm までの部分が茶色に変色していた。

コンクリートの変色部分 (0~1 cm) および内部 (5~6 cm) の DSC 曲線を図-6 に示す。表面の変色部分では、健全な内部と比較して C-S-H ゲルの吸熱ピーク (150°C) および水酸化カルシウムの吸熱ピーク (460°C) が見られず、炭酸カルシウムの大きな吸熱ピーク (760°C) が存在するのが分かる。同様な結果は X 線回折分析でも確認されており、変色部分ではセメント硬化体を構成する C-S-H ゲルおよび水酸化カルシウムが分解および消失していることが確認された。コンクリート表面の変色部分の SEM-EDXA 分析では、表面部

は多孔質な組織に変化しているとともに、 CaO と Fe_2O_3 より構成される比較的大きな結晶の鉱物が存在しており、このことが表面部の変色に関係しているものと思われた（写真-4および5参照）。変色部分は内部組織がかなり脆弱になっており、この原因として炭酸化によるセメント水和生成物の分解および塩化カルシウム溶液による化学的腐食の可能性が認められた^{5), 6)}。

4. 結論

凍結防止剤（塩化ナトリウムおよび塩化カルシウム）が長年にわたって使用されたASR損傷コンクリート橋脚の現地調査および橋脚から採取したコンクリートコアの屋内試験を実施した。

本調査により得られた主要な結果は以下に示すとおりである。

- (1) 凍結防止剤が流れていたコンクリート橋脚の側面では、多量の塩化物イオンが短期間にコンクリート内に浸透しており、凍結防止剤の浸透によりアルカリシリカ反応によるひび割れが促進されていた。
- (2) 凍結防止剤の浸透により鉄筋位置での塩化物イオン量は $2\sim 3\text{ kg/m}^3$ になっており、橋脚の軸方向鉄筋には軽微な腐食が発生していた。
- (3) 凍結防止剤の影響によると推測されるコンクリート表面のスケーリングが観察され、茶色に変色した表面部では水酸化カルシウムが完全に消失していた。
- (4) 今回調査した橋脚のように凍結防止剤の影響を受けるコンクリート構造物では、飽和NaCl溶液浸漬法は残留膨張性を推測する方法として有効であった。

今回の調査結果より、K橋のコンクリート橋脚はASRの残留膨張性があり、かぶりコンクリートには多量の塩化物イオンが存在すること

が確認された。このため、本橋脚の補修・補強では、凍結防止剤の影響を受けた側面をはつり出し、鉄筋の防錆処理をした後に、プレキャストパネルをPC鋼線で締め付ける工法（PCコンファインド工法）を採用し、橋脚の一部では施工が開始された。

謝辞：本調査の遂行にあたり、御助力頂いた（株）国土開発センター 笹谷輝彦氏並びに金沢大学工学部 熊谷善明氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹内勝信・川村満紀・鳥居和之：アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの組織と残留膨張性の予測，材料，Vol. 43, No. 491, pp. 963-969, 1994.
- 2) 川村満紀・竹内勝信・杉山彰徳：外部から供給されるNaClがアルカリシリカ反応によるモルタルの膨張に及ぼす影響のメカニズム，土木学会論文集，No. 502, pp. 93-102, 1994.
- 3) Diamond, S. : Alkali-silica Reaction Some Paradoxes, Proc. of the 10th Int. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp. 3-14, 1996.
- 4) 小林一輔・森弥広・野村謙二：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集，No. 460, pp. 151-154, 1993.
- 5) 鳥居和之・川村満紀・山田正弘・スザンタ・チャタジー：NaClおよび CaCl_2 溶液中におけるモルタルの劣化，セメント・コンクリート論文集，No. 46, pp. 504-509, 1992.
- 6) 笹谷輝彦・鳥居和之・川村満紀：塩化カルシウム溶液によるコンクリートの化学的腐食，セメント・コンクリート論文集，No. 49, pp. 720-725, 1995.