

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 残留膨張性の評価

熊谷 善明*¹ ・ 大深 伸尚*² ・ 奥田 由法*³ ・ 鳥居 和之*⁴

要旨: 北陸地方では、凍結防止剤の散布量が増加しており、鉄筋腐食とアルカリ骨材反応(ASR)による複合劣化が懸念されている。同地域のコンクリート橋脚の調査結果より、コンクリート構造物の損傷に及ぼす凍結防止剤の影響を確認することができた。凍結防止剤の影響を受けたコンクリート橋脚のASRによる残留膨張性の評価には飽和 NaCl 溶液浸漬法が有効であり、試験終了後のコアの強度減少率より、今後の橋脚の損傷の程度を予測することが可能であった。

キーワード: 凍結防止剤, ASR, 鉄筋腐食, 残留膨張性, 複合劣化, 耐久性診断

1. はじめに

北陸地方の橋梁では、スパイクタイヤの使用が禁止された以後、道路の安全確保のために大量の凍結防止剤(塩化ナトリウム)が散布されており、その使用量は年々増加している。橋梁に散布された凍結防止剤は、凍害によるスケールリングやコンクリート中の鉄筋腐食などを促進させることが指摘されている¹⁾。

一方、北陸地方ではアルカリシリカ反応性を有する反応性骨材が長年使用されており、ASRによる損傷を受けたコンクリート橋脚が多く存在する。同地域のASR損傷コンクリート橋脚では近年の凍結防止剤の散布量の増加により、塩分浸透による鉄筋腐食とASRによる複合劣化が懸念されている²⁾。実際、凍結防止剤の影響

を受けたASR損傷コンクリート構造物の補修および補強法を検討する際には、使用骨材の種類と反応性鉱物の同定、コンクリートの品質と残留膨張性の評価、コンクリート構造物の使用および環境条件などを正確に把握することが必要となる³⁾。

本研究は、長期間にわたって凍結防止剤の影響を受けた石川県能登地方の橋梁を対象として、凍結防止剤として散布された塩分の浸透状況と鉄筋腐食との関係を調べるとともに、コンクリートコアのASRによる損傷度とその残留膨張性を検討したものである。

2. 試験概要

調査対象構造物の特徴を表-1に示す。調

表-1 調査対象橋脚の構造形式およびコンクリートの特徴

	建設年	上部構造	橋脚形式	使用骨材	最大骨材寸法	設計基準強度	内在塩分
A橋	S.54	単純鋼合成桁4連	T型	安山岩碎石	25mm	21N/mm ²	無し
B橋	S.53	2径間連続鋼桁	T型	安山岩碎石	25mm	21N/mm ²	無し
C橋	S.54	単純鋼合成桁6連	T型	川砂利	40mm	21N/mm ²	無し
D橋	S.54	PC単純桁9連	T型	安山岩碎石	25mm	21N/mm ²	無し
E橋	S.48	PC単純桁5連	ラーメン型 (張出し有り)	安山岩碎石と川砂利の混合物*	25mm	21N/mm ²	0.5kg/m ³ 程度

* 川砂利の海上輸送時に海水の影響を受けており、内在塩分が存在する。

* 1 (株)ピー・エス 工修 (正会員)

* 2 (株)アルスコンサルティング取締役社長 工修 (正会員)

* 3 (株)ピー・エス北陸支店技術部担当部長 博(工) (正会員)

* 4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-2 測定項目および測定方法の詳細

	測定項目	測定方法	
コンクリートコア による屋内試験	圧縮強度および 弾性係数	切り出したコンクリートコア(直径 55mm, 長さ 110mm)にて測定した。	
	塩化物イオン 含有量	コンクリートコア(直径 55mm)を表面から 10mm ごとに切り出し, J CI-SC5 に従って電位差滴定法により塩化物イオン含有量(2N の硝酸溶解)を測定した。	
	ASRゲルの 観察	コンクリートコアを割裂し, 酢酸ウラニール蛍光法にて ASR ゲルの生成状況を観察した。	
	残留膨張量	飽和 NaCl 溶液浸漬法	コンクリートコア(直径 55mm)を 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬し, 膨張量の経時変化を測定した。
実橋での現地 計測	ひび割れ幅の 経時変化	コンタクトゲージ用チップを橋脚の側面に貼り付け, ひび割れ幅の進展を計測した。	

査の対象とした橋梁は、石川県能登地方の供用年数が 20 年程度の単純桁を有する橋梁であり、平地部にあるE橋以外の橋梁は山間部に位置する。

コンクリートコアの測定項目および現地計測の詳細を表-2に示す。コンクリートコア(直径: 55mm)は、橋脚下段(地上 1.5m 付近)、梁(張出し部および中央部)、フーチング部などより採取した。コンクリートコアは、中性化深さ(フェノールフタレイン 1%溶液噴霧)、塩分含有量(2N の硝酸溶解による全塩分量)およびアルカリシリカゲルの生成状況(酢酸ウラニール蛍光法)を調べた後に、橋脚の表面部および内部を代表するコア試験体を各3本ずつ切り出し、圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度を測定した。同時に一部の橋脚では、ひび割れ幅の経時変化の現地計測(年3～4回程度)を実施し、コンクリートコアの屋内試験の結果と併せて橋脚の損傷の程度を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 橋脚の劣化状況

コンクリート橋脚の劣化状況を表-3に示す。調査対象の5橋梁では、いずれもジョイント部より路面排水が流下している様子が観察されたが、橋梁の構造形式および路面の勾配の相違により、凍結防止剤の及ぼす影響の程度は異なっ

表-3 劣化状況の目視観察結果

		鉄筋の 腐食度 ⁽¹⁾	ASRゲルの 生成状況 ⁽²⁾	変色
A橋(橋脚)		III	III	有り
B橋(橋脚)		II	III	有り
C橋(橋脚)		I	I	有り
D橋(橋脚)		II	III	有り
E 橋	梁端部	IV	IV	無し
	梁中央 部	III	IV	無し
	橋脚	I	II	無し
	フーチ ング部	I	II	無し

(1) I: 腐食無し II: 部分的かつ表面的な腐食

III: 全体的かつ表面的腐食 IV: 断面欠損を伴う腐食

(2) I: 無し II: 少ない III: 多い IV: 非常に多い

ていた。A, B, Dの各橋脚では、ASRによって、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが橋脚の下端から上部に向かって発達していた(写真-1参照)。これらの橋脚では、凍結防止剤が流れた側面(a側面)とその反対側面(b側面)でASRによるひび割れの発達および鉄筋の腐食度に大きな相違が確認された。とくに、凍結防止剤の影響を受けた梁の劣化は非常に顕著であり、A橋梁の梁側面ではコンクリートの剥落が観察された。また、C橋梁ではASRによる損傷は観察されなかったが、梁側面は黒色に変色し、表面から2cm 程度が剥離しており、表面組織の脆弱化を伴う特

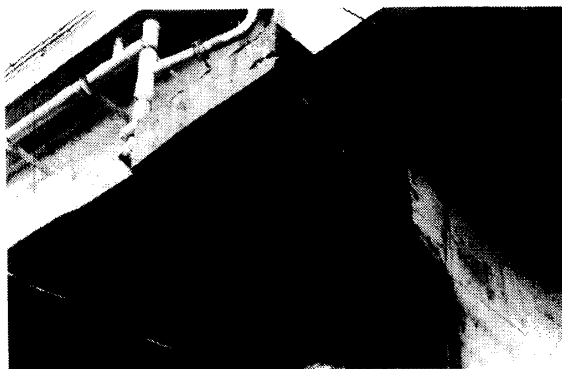


写真-1 橋脚の劣化状況(A橋)



写真-2 梁表面部の変状(C橋)



写真-3 梁端部の劣化状況(E橋)

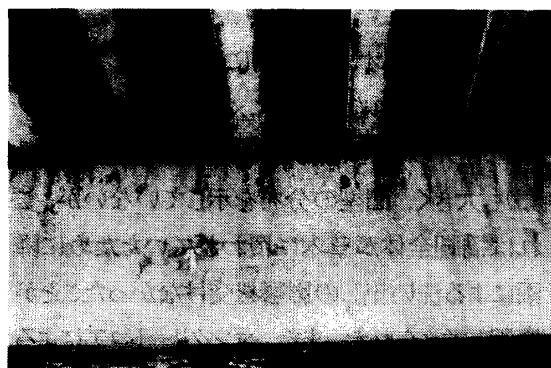


写真-4 梁中央部の劣化状況(E橋)

微的な変状が観察された(写真-2参照)。一方、張出し部を有するE橋の梁は梁全体がASRによる大きな損傷を受けており、とくに梁端部には亀甲状のひび割れが観察され、内部の鉄筋も激しく腐食していた(写真-3参照)。また、梁中央部では、下部の引張り鉄筋に沿った水平方向のひび割れが発生するとともに、スターラップの腐食によりかぶりコンクリートの剥離が観察された(写真-4参照)。しかし、E橋の柱部は、降雨および路面排水の影響をほとんど受けなかったので、ASRによる損傷も軽微なものになった。

3.2 塩化物イオンの浸透と鉄筋の腐食状況

橋脚より採取したコンクリートコアの塩化物イオンの測定結果を図-1に示す。路面排水が流れた側面と反対側面の塩化物イオンの測定結果の比較より、コンクリート橋脚の内部に侵入

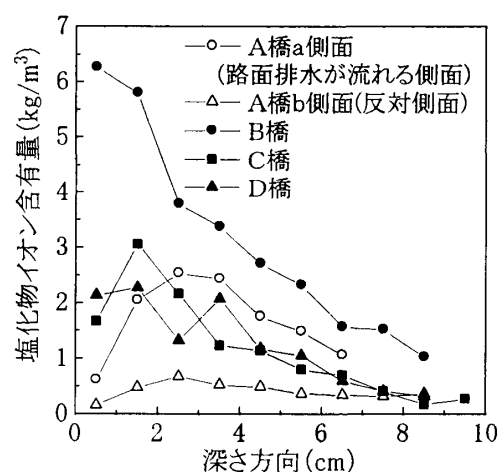


図-1 塩化物イオンの測定結果

した多量の塩化物イオンは冬期に路面に散布された凍結防止剤(塩化ナトリウム)によるものであると判断された。また、A、C橋脚の塩化物イオン含有量の分布は、表面から2~3cmで最大になる凸型の濃度分布を示したが、これは表面

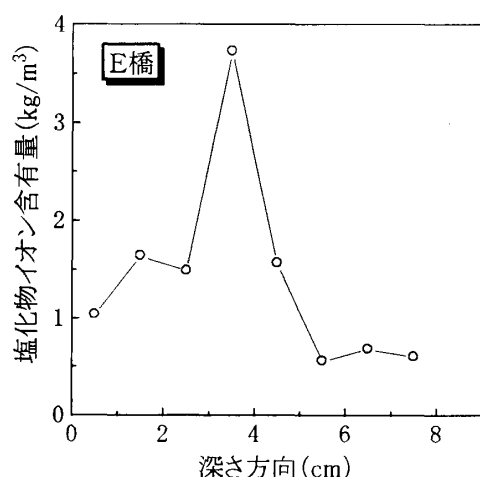


図-2 塩化物イオンの測定結果(E橋)

部の塩化物イオンが降雨により流出したことが原因と推察された。それに対して、B橋のコンクリートコアの塩化物イオン含有量は、他の橋梁よりも大きく、凸型の分布を示していないが、これは橋脚全体が草木に覆われていたために降雨による洗い出しの影響を受けなかったことが原因と考えられた。また、コンクリートコアによる調査では、いずれの橋脚でも中性化は認められなかったが、表面部(0~2cm)に茶褐色の変色領域が観察された。

E橋の梁端部より採取したコンクリートコアの塩化物イオンの測定結果を図-2に示す。コンクリートコアの塩化物イオン含有量は最大で 3.7kg/m^3 の値を示し、これは鉄筋の腐食が進行する限界塩化物イオン量 1.2kg/m^3 を大きく上回っていた。E橋では、凍結防止剤がASRによるひび割れを通して浸透しており、梁端部の鉄筋には激しい腐食が観察された。

3.3 残留膨張性の評価

橋脚から採取したコンクリートコアの飽和NaCl溶液浸漬法による残留膨張量の測定結果を図-3に示す。本方法では、NaClが外部より常時供給されることによりコア内部のOH⁻濃度が上昇するとともに、NaClの存在によりシリカの溶解度が増大しアルカリシリカゲルの生成が促進されるために、凍結防止剤の影響を受けるコンクリート橋脚の残留膨張性の評価には適していると指摘されている⁴⁾。図-3に示すように、C

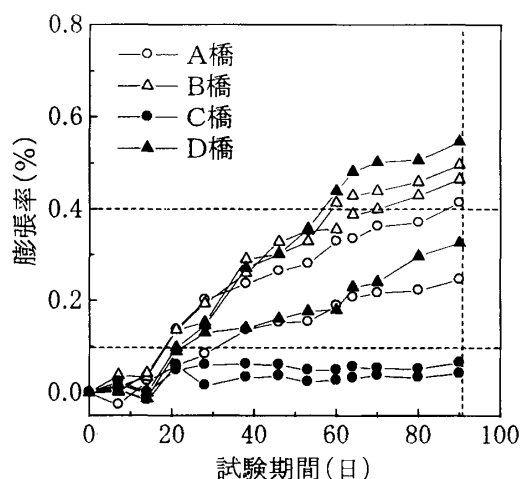


図-3 橋脚の残留膨張量の測定結果

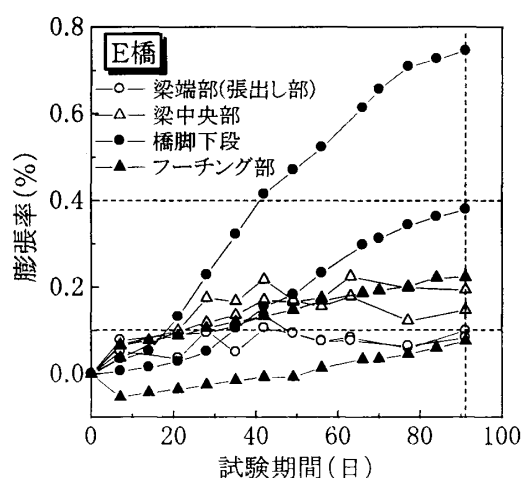


図-4 残留膨張量の測定結果(E橋)

橋脚のコアのみがほとんど膨張しておらず、「残留膨張性無し(0.1%以下)」と判定された。これは目視観察の結果とも一致しており、C橋では骨材にASRを生じる反応性成分が含有されていなかったものと考えられた。また、A、B、Dの各橋脚の膨張量は0.2%~0.6%の範囲で、「不明確(0.1%~0.4%)」又は「残留膨張性有り(0.4%以上)」となり、凍結防止剤が供給される環境下ではこれらの橋脚は今後膨張が継続される可能性が高いと判断された。実際の橋脚での挙動を3年間にわたって調べたA橋脚では、年平均0.1%のひび割れ幅の進展が計測されており、飽和NaCl溶液浸漬法による判定結果は妥当であった⁵⁾。

E橋の各箇所から採取したコンクリートコアの飽和NaCl溶液浸漬法による残留膨張量の測定

表-5 コンクリートコアの強度試験結果

橋梁	採取コアの強度試験結果		飽和 NaCl 溶液浸漬法終了後の強度試験結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
A橋	15.5～22.0(19.1)	5.8～9.1(7.30)	12.5～4.3(13.5)	3.23～8.17(5.09)
			29%低下	32%低下
B橋	26.5～32.4(29.0)	9.9～16.7(12.7)	13.5～4.0(19.0)	4.90～6.20(5.40)
			57%低下	36%低下
C橋	25.1～31.7(28.0)	22.7～28.2(25.8)	26.0～1.4(28.6)	21.3～2.70(23.5)
			2%増加	9%低下
D橋	19.3～28.1(23.0)	6.0～21.5(11.1)	12.7～7.3(15.8)	3.71～5.30(4.57)
			32%低下	59%低下

() ; 平均値

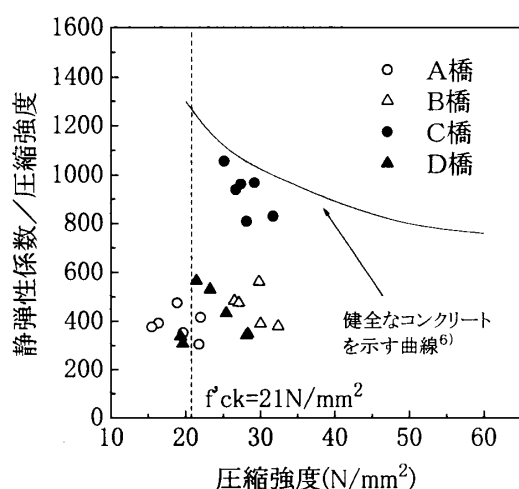


図-5 圧縮強度と弾性係数の関係

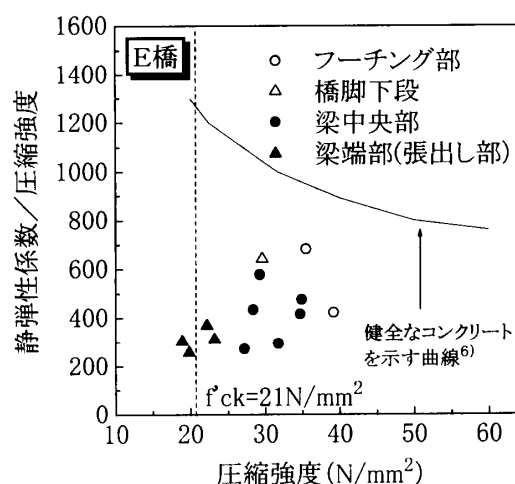


図-6 圧縮強度と弾性係数の関係(E橋)

結果を図-4に示す。梁より採取したコアに関して、中央部は「不明確(0.1～0.4%)」、端部は「残留膨張性無し(0.1%以下)」と判定された。端部の「残留膨張性無し」という結果は、これまでに凍結防止剤の影響でASRが活発に進行しており、反応がほとんど終了していることが原因と考えられた。一方、柱部より採取したコアは、0.7%の高い値を示すものもあり、「残留膨張性有り(0.4%以上)」と判断された。柱部のコアの膨張曲線は全て増加傾向にあり、水分および塩化物イオンが供給される条件下では今後ASRが進行する可能性が認められた。また、フーチング部から採取したコンクリートコアは「残留膨張性無し(0.1%以下)」と判断されたが、これはコンクリートの配合(使用骨材の反応性)の相違に

よるものであることが確認された。

3.4 圧縮強度および弾性係数

コンクリートコアの強度試験結果を表-5に示す。コアの圧縮強度は、Aを除くB、C、Dの各橋脚で設計基準強度(21N/mm²)を満たしていた。しかし、C橋以外の橋脚は静弾性係数が大きく低下しており、コンクリートはASRによる損傷を受けているものと考えられた。また、飽和 NaCl 溶液浸漬法終了後の圧縮強度および静弾性係数は、Cを除いたA、B、Dの橋脚でさらに大きな低下が認められた。強度試験の結果より判断して、50℃の飽和 NaCl 溶液浸漬法はASRが生じていないコンクリート(C橋脚)の強度には悪影響を与えていないので、試験終了後に強度試

験を合せて実施することにより、凍結防止剤によるASRの促進が橋脚の強度低下に及ぼす影響を正確に評価できるものと考えられた。コンクリートコアの圧縮強度(f_c)と弾性係数(E)の関係を示した図-5より、A、B、D橋脚から採取したコンクリートコアは、健全なコンクリートを示す曲線から大きく離れており、弾性係数/圧縮強度の分布状況は、各橋脚のASRによる損傷度の目視観察結果と概ね一致した⁶⁾。

図-6はE橋の各箇所より採取したコンクリートコアの圧縮強度(f_c)と弾性係数(E)の関係を示したものである。梁中央部から採取したコンクリートコアの圧縮強度は $27\sim 35\text{N/mm}^2$ の範囲に分布しており、設計基準強度(21N/mm^2)を上回る値を示した。一方、梁の端部の圧縮強度は $10\sim 23\text{N/mm}^2$ の範囲であり、内部のコンクリートでは断面欠損を伴う大きな損傷も確認された。E橋の場合、梁部の弾性係数/圧縮強度の値はフーチングや柱に比べかなり小さくなった。とくに、梁の端部の値は健全なコンクリートの1/3程度であり、ASRによる損傷度が大きいことを表していた。

4. まとめ

凍結防止剤が散布されたASR損傷コンクリート橋脚の調査では、塩分の浸透状況と残留膨張性を正確に把握し、補修・補強設計に役立てることが重要であり、5橋梁にてコンクリートの損傷度を詳細に調べた。

本研究により得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- (1) 凍結防止剤として散布された塩分の浸透により、コンクリート橋脚には鉄筋腐食とASRによる複合的な損傷が発生していた。
- (2) 凍結防止剤の影響を受けるコンクリート橋脚のASRによる残留膨張性を予測する方法として飽和NaCl溶液浸漬法が有効であった。また、試験終了後に強度試験を実施することにより、橋脚のA

SRによる損傷の程度を評価することができた。

- (3) 凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚では圧縮強度および弾性係数の大きな低下が認められた。

謝辞 : 本調査の遂行にあたり御助力頂いた金沢大学工学部 川村満紀教授に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 三浦尚 他: 融雪剤によるコンクリート構造物の耐久性におよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.29-88, 1999.
- 2) 鳥居和之, 奥田由法, 松田康孝, 川村満紀: 凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋の調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.173-178, 1998.
- 3) 奥田由法, 鳥居和之, 熊谷善明, 掛布眞司: 融雪剤が散布されたRCラーメン高架橋の劣化度診断調査, 日本コンクリート工学協会・融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会論文集, pp.49-56, 1999.
- 4) 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.
- 5) 鳥居和之: 凍結防止剤によるコンクリート構造物の損傷と防止対策, セメント・コンクリート, No.635, pp.40-46, 2000.
- 6) 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.