凍結防止剤により劣化したプレテンションホロースラブ桁橋の詳細調査とその劣化機構の解明

岩城一郎¹・子田康弘²・大越雅城³・上原子晶久⁴・鈴木基行⁵

¹正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

E-mail: iwaki@civil.ce.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学准教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

³正会員 専門技師 (一財)ふくしま市町村支援機構 (〒963-8041 福島県郡山市富田町字登戸13-1)

⁴正会員 弘前大学准教授 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

⁵フェロー 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

凍結防止剤としてNaClが散布される環境下で著しい劣化を引き起こし、解体撤去を余儀なくされたプレテンションホロースラブ桁橋の現場調査を行い、その実態を把握するとともに、解体桁の一部を実験室に搬入し、詳細調査を実施した。その結果、劣化桁の下フランジには高濃度の塩化物イオンが浸透しており、このことが塩害のみならず凍害を促進していた可能性が示唆された。そこで、実験室において劣化桁を模擬した供試体を作製し、現場の状況に合わせた凍結融解試験を行った。その結果、内在あるいは外来により高濃度のNaClを含有したNon-AEコンクリートが凍結防止剤を含む水による凍結融解作用を受けると、著しい凍害を引き起こすことを明らかにした。

Key Words : deicing salt, pretension hollow slab girder bridge, chloride induced deterioration, frost damage, scaling

1. はじめに

近年、我が国の積雪寒冷地の道路には冬期の交通流確保のため多量の凍結防止剤（主にNaCl）が散布されるようになり、これによる橋梁をはじめとする道路構造物の劣化が顕在化しつつある。凍結防止剤にはNaClの他にCaCl₂、酢酸系、尿素系等があるが、大量に散布される地域では耐久性上の問題が指摘されつつも、主に経済的理由からNaClの使用を余儀なくされているのが実状である。凍結防止剤による劣化問題は、1990年代初頭のスパイクタイや禁止の法制化を受けて以来、凍結防止剤散布量が急増したことに端を発しており、本格散布から未だ20年程度しか経っていないこと、沖縄県や日本海沿岸等で顕在化する塩害は海岸線付近に限定される一方で、凍結防止剤は沖縄県を除くほとんどの都道府県で散布されており、問題が広域に及ぶことから今後大きな社会問題へと発展する恐れがある。この問題については早くから指摘されていたりものの、既設構造物を中心にその対策が十分とはいえない状況にあり、凍結防止剤散布下で橋梁に著しい劣化が進行し、大規模な補修を余儀なくされ

るケースも出始めている²⁾。

このような背景の下、凍結防止剤としてNaClが散布される環境下で著しい劣化を引き起こし、解体撤去を余儀なくされたプレテンションホロースラブ桁橋が見つかった。そこで本研究では、本橋の現場調査を行い、その実態を把握するとともに、解体桁の一部を実験室に搬入し、詳細調査を実施した。その結果、劣化桁の下フランジには高濃度の塩化物イオンが浸透しており、このことが塩害のみならず凍害を促進していた可能性が示唆された。よって、劣化桁を模擬した供試体を作製し、現場の状況に合わせた凍結融解試験を行い、その機構解明を試みた。

2. 調査対象橋梁と調査の概要

(1) 調査した橋梁(湖山橋)の概要

a) 架設位置およびこれまでの経緯

今回の調査対象橋梁である湖山橋は、岩手県盛岡市と秋田県秋田市を結ぶ主要幹線道路である国道46号仙岩峠付近(秋田県側)の急峻な斜面に架設されていた。本橋

の架橋位置を図-1に示す。架橋位置に近い田沢湖測候所（気象統計情報）の過去30年間における冬期（12月～2月：90日）気温データより、日平均気温が 0°C 未満の日数は65日、最高気温が 0°C 未満の日数が30日、最低気温が -10°C 以下になる日もあり、冬期間中は当該橋を含む管理区間内で平均約40ton/km/年もの凍結防止剤が散布されている。本橋の構造形式は、14径間の単純PC橋であり、14連のプレテンションホロースラブ桁からなる。橋梁諸元を表-1に、一般図を図-2に示す。

本橋は、1975年の供用開始後、34年で解体撤去に至った。表-2に、解体撤去に至るまでの経緯を示す。表より、1991年度にスパイクタイヤの使用禁止が法制化され、凍結防止剤の本格散布が始まり、1995年度の橋梁定期点検において主桁下面に鉄筋の露出が発見された。2004年度

図-1 調査対象橋の架橋位置

表-1 調査対象橋の諸元

橋梁名	湖山橋			路線名	一般国道 46 号 現道		
所在地	自	秋田県仙北市田沢湖町生保内地内		距離標	自	百米標 39.4km＋距離 48m	
	至	秋田県仙北市田沢湖町生保内地内			至	百米標 39.6km＋距離 78m	
竣工 年月	1975(S50)年 12 月	橋 長	229.60m	けた長	16.38m	支間長	15.80m
活荷重	TL－20	等 級	一等橋	適用示 方書	S43 プレストレストコンクリート道路 橋示方書		
上部工 形式	プレテンション方式 14 径間単純 PC ホロースラブ桁橋						
下部工 形式	A1 橋台…逆 T 式深礎杭A2 橋台…1 層 3 連の立体ラーメン式深礎杭						
	P1～10 橋脚…2 柱門型ラーメン式(フーチングなし)桂直結の 2 本単独深礎杭						
	P11～13 橋脚…2 柱門型ラーメン式(フーチングあり)直接基礎

図-2 調査対象橋の一般図

表-2 調査対象橋の経緯

年度	点検・補修履歴等
1991年度	スパイクタイヤの使用禁止により、凍結防止剤の本格散布が始まる。
1995年度	橋梁定期点検において主桁下面に鉄筋の露出が見つかる。
2004年度	橋梁定期点検において主桁下面のコンクリートのはく離と鉄筋の露出、PC鋼線の破断が見つかる。
2006年度	主桁上面の全体的な劣化が見つかる。桁中空内に水が溜まっており、その水抜きを実施する。補修工事の実施：主桁上面の断面補修、緊急応急対策工事の実施：仮設ベントの設置
2009年度	解体撤去

写真-1 橋梁定期点検時(2004年度)の劣化状況

の橋梁定期点検では、写真-1に示すように、主桁下面のコンクリートのはく離と鉄筋の露出に加え、1部の主桁でPC鋼線が破断していることが見つかった。これを受けて、2006年度より本格的な補修工事が始まり、詳細な点検を行った結果、主桁中空内に水が溜まっていることがわかり、中空内の水抜き、断面修復や橋面防水、また仮設ベントによる安全対策を施した³⁾。しかしながら、その後も劣化の進行を止めることができず、2009年度に解体撤去を余儀なくされた。写真-2と写真-3は、解体撤去直前の様子であり、補修後も主桁下面のPC鋼材の破断が確認されている。解体撤去時点における劣化の主因は、凍結防止剤の散布による塩害とされており、我が国の内陸部において凍結防止剤の影響で塩害劣化が卓越し、解体撤去に至った数少ない事例と判断された。そこで、著者らを中心とする官学産の共同研究体制の下、本橋の解体撤去にともない主桁のサンプリングを行いその劣化状況を調査することとした。なお、本橋に関する資料にはコンクリートの配合等詳細は記載されておらず不明である。

写真-2 本橋解体撤去時の橋梁全景

(a)鋼材の破断(第12径間, G1桁)

(b)かぶりののはく落と鋼材の腐食(第4径間, G1桁)

(c)比較的健全な部分(第8径間, G1桁側から)

写真-3 本橋解体撤去時の主桁下面の状況

図3 現場調査における推定圧縮強度

写真4 桁ブロックの搬入状況

図4 調査対象とした桁ブロック (赤色)

b) 調査の概要

本調査は、1)現場調査と、2)桁ブロックによる詳細調査の2つに区分される。まず、1)現場調査は、現橋の把握と、解体にともないブロック化し詳細調査を実施する桁の選定を目的とした目視調査と推定圧縮強度測定である。次に、2)桁ブロックによる詳細調査は、ブロック化後のコンクリート中の塩化物イオン濃度測定、および鋼材の腐食状況の観察である。

推定圧縮強度は、「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(案) (JSCE-G 504-2007)」⁴⁾に従い、桁の側面と下面で測定した。コンクリート中の塩化物イオン濃度は、「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定(案) (JSCE-G 573-2007)」⁴⁾に従い、ブロック化した桁よりφ32mmで採取したコアを15mm毎にスライスし、0.149mm以下に粉碎したものを試料とし、イオンクロマトグラフ法により測定した。また、鋼材の腐食状況の観察は既往の研究⁵⁾に従い、選定した桁ブロックのコンクリートを鋼材の組み立て状態を保持したまま

全てはつり、鋼材だけの状態とすることで行った。

3. 調査の結果と考察

(1) 現場調査

本調査は、2009年7月に実施した。調査時には既に解体撤去工事の準備工と撤去後の軽量盛土による道路施工が始まっていた。まず、桁の劣化状態を目視により調査した結果、著しい劣化が認められた径間は図-2に示す第12径間であった。ここでは、鋼材腐食とかぶりコンクリートのはく落といった塩害劣化にとどまらず、桁下のコンクリートが全て欠落し、外から中空が見える状態で、鋼材の破断も確認された(写真-3(a)参照)。次に劣化が顕在していたのが第4径間であり、鋼材腐食とかぶりコンクリートのはく落が生じていた(写真-3(b)参照)。反対に比較的健全な径間は第8径間であった(写真-3(c)参照)。このように、本橋全体が同様な劣化状態とはなっておらず、

径間毎に劣化の程度が大きく異なっていた。また、橋軸直角方向の14主桁を比較すると、図-2に示すG1桁に劣化が集中していた。これは、本橋の排水勾配と関係していると考えられる。すなわち図-2に示す通り、山側(G14桁側)から谷側(G1桁側)へ向けて片勾配がついているため、凍結防止剤を含む水がG1桁に集まる構造となっていたことが原因と考えられる。なお、本橋の図面に横断、縦断勾配は記載されておらず、地覆部に水切りは設置されていなかった。

リバウンドハンマーを用いた反発度による推定圧縮強度の測定は、第4径間、第8径間、第12径間におけるG1桁とG2桁の下面で行った。図-3に測定結果を示す。図より、第4径間と第12径間のG1桁の下面は、それぞれ12.8MPa、35.7MPaと本橋のコンクリートの設計基準強度50MPa³⁾を大きく下回り、かつ、ばらつきが大きいのにに対して、G2の下面は約60MPaと設計基準強度を満足していた。これに対して比較的健全な第8径間のG1桁とG2桁は56MPa程度と設計基準強度を上回っていた。このよう

に第4径間と第12径間G1桁の推定圧縮強度が低い原因は、目視では浮きが生じていないと判断される測定箇所であっても軽微な浮きや微細ひび割れ等の劣化が進行し、反発度が低下したためと考えられる。

図-5 桁ブロック断面の実測寸法

図-6 上フランジの塩化物イオン濃度分布

図-7 下フランジの塩化物イオン濃度分布

(2) 桁ブロックによる詳細調査

a) 桁ブロックの概要

現場調査より、詳細調査の対象を前節で述べたように劣化状態の異なる第4径間、第8径間、および第12径間に設定した。詳細調査は、対象桁を現場より福島県郡山市郊外の仮置き場へ搬入し、実施した(写真-4)。搬入の際、1径間分の桁全長を運搬することは困難なため、解体時点で桁を長さ約2000mmのブロック状に切断し、その一部を仮置き場まで運搬した。図-4に調査対象とした桁ブロックの位置図を示す。なお、図の(1)から(8)の数字は切断しブロック化した数であり、各径間とも8ブロックに切断された。対象桁ブロックは図中の赤色で示すG1桁3ブロックとG2桁1ブロックとし、第12径間については谷側のG14桁を比較用に確保した。

図-5は一例として第8径間G1桁(6)ブロックにおける桁断面図の寸法と鋼材位置の実測値を示したものである。桁の断面寸法は、外寸が幅約600mm、高さ約650mmであり、その中に幅約450mm、高さ約350mmの中空部分が存在する。PC鋼材(図中の赤丸)は、上側に4本、下側に15本配置、鉄筋(図中の青丸)は、上側に4本配置されていた。なお、本ブロックを対象に中性化深さを測定したところ何れも10mm以下であり、中性化は鋼材腐食に直接的な影響を及ぼしていないと考えられる。

b) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度分布の測定は、各径間のG1桁に対し、上下フランジと山側および谷側のウェブについて行った。図-6と図-7に、上下フランジの測定結果を示す。図中の鋼材位置は、施工誤差でブロック毎に異なるため概略値である。図-6より、上フランジは上面より約50mmまでは鋼材腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)を上回る塩化物イオン濃度が検出されているものの、鋼材位置においてはそれを下回る結果となった。つまり、橋面から浸透した水中の塩化物イオン濃度は鋼材を腐食させるような量ではなかったといえる。図-7に下フランジにおける塩化物イオン濃度分布を示す。図中には、実測値の他に、コンクリート標準示方書[設計編]⁹中の式(1)に示す塩化物イオンの拡散方程式による計算値を併せて示した。かつこの値は式(1)中の C_o である。これらの値は図-7の中空底面からの距離10-20mm付近の塩化物イオン濃度から外挿される表面塩化物イオン濃度を想定したものであり、かつ現行の示方書上、比較的厳しい腐食性環境に属する値を想定したものである。計算値は、水セメント比(W/C)=38%と設定し、式(2)を用いて算出した塩化物イオンの見かけの拡散係数により求めている。W/C=38%とした根拠は、本橋と同年代の1970年代当時の主桁作製の状況に精通しているコンクリート2次製品の製造に携わる技術者へのヒアリングより、概ね設計基準強度50MPaのコンクリートの配合が、W/C=38%程度(普通ポルト

表-3 下フランジの寸法と鋼材位置塩化物イオン濃度

桁 ブロック	下フランジ 厚 (mm)	かぶり (mm)	鋼材位置の塩化 物イオン濃度 (kg/m ³)
第4径間 G1	141	27	4.05
第8径間 G1	160	40	1.40
第12径間 G1	130	30	2.60
第12径間 G2	155	25	0.83
第12径間 G14	137	33	0.80

(a)谷側

(b)山側

図-8 ウェブの塩化物イオン濃度分布

ランドセメント使用)であったことによる。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot C_o \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年)における塩化物

(a)第4径間

(b)第12径間

写真5 G1桁の鋼材腐食状況(全体)

(a)第4径間

(b)第12径間

写真6 G1桁の鋼材腐食状況(下フランジ)

イオン濃度(kg/m^3), C_o : 表面における塩化物イオン濃度(kg/m^3), D_q : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), erf : 誤差関数, γ_d : 予測の精度に関する安全係数で1.0とした. なお, t の値は凍結防止剤の本格散布から解体撤去に至るまでの期間(18年)とし, 凍結防止剤が散布されない春, 夏, 秋も含んでいる.

$$\log_{10} D_q = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2)$$

ここに, D_q : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), W/C : 水セメント比

図より, 下フランジのほぼ全域で鋼材腐食発生限界濃度($1.2\text{kg}/\text{m}^3$)を上回る塩化物イオン濃度が検出され, 最も劣化していた第12径間と次に劣化していた第4径間では, 厳しい腐食性環境にあったことが明らかになった. また, その分布は, 見かけの拡散係数による計算値とは異なり, 表面と内部の塩化物イオン濃度に大きな差がなく, ほぼ定常状態に達している可能性を示唆する結果となった. 一方, 比較的健全な第8径間や第12径間のG2桁, G14桁では, 鋼材位置で $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ には達しておらず, 第12径間のG2桁やG14桁では全域にわたり鋼材腐食発生限界濃度を下回っており, これらの結果は当該桁が外観上健全であったことと整合した. このように, 第12径間と第4径

間のG1は, 上フランジよりも下フランジのコンクリートに高い塩化物イオンが浸透していたことが著しい劣化を生じさせたと考えられる. その理由は, 第2章でも述べたように, 供用中の定期点検より主桁中空の中に水が溜まっていたことが確認されており, そのような状況から下フランジでは通常の塩化物イオンの拡散現象に加え, 中空部分に溜まった塩化物イオンが重力の影響を受け, 下方に向かって浸透した影響が加わったため著しい鋼材の腐食を生じさせたと考えられた. なお, 中空に水が溜まるような侵入経路, すなわち水みちについては解体時の本調査から発見することができなかった. 表-3に, 以上の関係を整理した下フランジの厚さ, かぶり, 鋼材位置における塩化物イオン濃度を示す.

図-8にウェブの塩化物イオン濃度分布を示す. 図より, ウェブにおいても塩化物イオンの浸透は確認されたが特に高い濃度は検出されなかった. このように, 本橋のコンクリートへの塩化物イオンの浸透は桁の上面から側面へと水が回り込み浸透するような状況ではなく, 何らかの原因で中空に溜まった凍結防止剤を含む水により中空内から下フランジの下方へ向けて浸透したことで鋼材が腐食し劣化したものと考察された.

図-9 下フランジコンクリートのCOMP像

図-10 実測空気量4.5%のコンクリートのCOMP像

c) 鋼材腐食状況の観察

鋼材腐食状況の確認は、第4径間のG1桁と第12径間のG1桁を対象とした。写真-5に全体を、写真-6に下フランジの最も劣化の激しい部位を示す。これらの写真より、上フランジの鋼材ではほとんど腐食が見られず、ほぼ健全な状態であった。これに対して下フランジは激しく腐食しており、第4径間のG1桁は、中心部の5本で著しい腐食やPC鋼材の破断が見られ、塩害による激しい劣化を受けていることが確認された。第12径間の下フランジは、第4径間のように著しい腐食やPC鋼材の破断は見られなかった。このように本橋は、同一架橋地点にありながら、径間、桁、桁ブロック毎に劣化の状況が著しく異なり、その原因は凍結防止剤を含む水の侵入経路とその量、および中空に塩水が湛水しやすい状況にあったかなどに起因するものと考えられた。

(3) 調査のまとめ

現地調査と詳細調査により判明した本橋の劣化状態をまとめる。

- ・ 本橋は同一架橋地点にありながら、径間、桁、ブロックごとに劣化の状況が著しく異なった。
- ・ 劣化は、中空内における湛水が原因と推察され、湛水の有無とその量が劣化度を変化させたものと推察される。
- ・ 本橋には片勾配がついており、G1桁に凍結防止剤を含む水が集まりやすい状況から、特に下フランジの塩化物イオン濃度は鋼材腐食発生限界濃度を大きく上回る非常に厳しい腐食性環境であった。
- ・ 以上より、中空に凍結防止剤を含む水が湛水したことで、高濃度の塩化物イオンが拡散と重力の影響により下フランジ下面に向かって浸透したことがG1桁下フランジの著しい劣化の要因であることが明らか

になった。

このように、本橋梁が供用後35年も経たず解体撤去に至った理由は、凍結防止剤による塩害が主因であることが明らかになったが、これを踏まえても解体撤去に至るまでの年数が短く、凍結防止剤の本格散布からは20年弱という状況である。そこで、塩害の他にひび割れや凍害といった副次的な要因が複合した劣化の可能性もあり、調査終了後にコンクリート組織を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した。図-9は、一例として撮影した第4径間G1桁下フランジコンクリートのSEMによる反射電子組成像(COMP像)である。COMP像では、空隙、ひび割れなどは黒色として写ることを利用し、コンクリート細部を観察したところ、エントレインドエアの量が非常に少なく、Non-AEコンクリートに近いものであることが判明し、加えて試料の処理過程で生じる骨材周りの網目状のひび割れとは明らかに異なるひび割れ(図中の矢印)も発生していることがわかった。比較のため、図-10に実測した空気量が4.5%の一般的なAEコンクリートのCOMP像を示す。この図と図-9を比較すると、本橋梁で使用されたコンクリートでは、明らかにエントレインドエアの量が少ないことがわかる。架設地点は冬期に低温環境にさらされるため、図中の矢印で示したひび割れは、凍害に起因したものであると考えられる。さらに、主桁はプレキャスト桁であり、製造時に蒸気養生を行っていることから、蒸気養生時に発生したひび割れが進展した可能性も示唆される。

従って、次章ではコンクリートに発生したひび割れと凍害や養生の影響を調査することで本橋が早期劣化に至った要因を究明する。

4. 高濃度のNaClを含有するコンクリートの耐凍害性

(1) 概説

上述の劣化調査を受け想定した本橋の凍害劣化シナリオを整理すると、1) 高濃度の塩化物イオンが含まれた状態で凍結融解作用を受けた、2) コンクリートの空気量が極めて少なかった、3) 蒸気養生に起因するひび割れが凍害に影響を及ぼしたことが要因として挙げられる。そこで、これらの影響を実験的に検証することを目的に、高濃度のNaClを含有した実PC橋仕様（以下、対象橋仕様）供試体と、これに対し実験条件を変化させた比較用供試体を作製し、凍結融解試験を実施することにより、これらの耐凍害性を比較検討した。実験シリーズは、コンクリート練混ぜ時にNaClが内在した場合の耐凍害性に与える影響を検討したシリーズ（以下、シリーズI）とコンクリート硬化後にNaClが外から侵入した場合の耐凍害性に与える影響を検討したシリーズ（以下、シリーズII）とした。ここでシリーズIは高濃度の塩化物イオンを含有するコンクリートの耐凍害性を早期に調べることを目的に行ったものであり、シリーズIIでは、凍結防止剤散布による塩化物イオンの侵入はコンクリート硬化後に進むため、この状況を模擬したより実態に近い条件として実施した。

(2) 実験条件

a) シリーズI

表-4に、実験条件とこれらを変化させた供試体の種類を示す。実験条件は、コンクリートの圧縮強度、エントレインドエアの有無、内在塩の有無、養生方法とした。ここで、対象橋仕様は、圧縮強度40MPa以上を満足するためW/C=40%、Non-AEコンクリートとし、コンクリート中に内在塩を含有させてコンクリートを製造した上で蒸気養生を行った。この対象橋仕様をベースに、W/C=40%、Non-AEコンクリート、内在塩有、水中養生を行ったものをNon-AE+内在塩とし、養生の影響を検証した。さらに、W/C=40%、Non-AEコンクリート、内在塩無、水中養生を行ったものをNon-AEとし、内在塩の影響を検証した。一方、W/C=40%、AEコンクリートに対し内在塩の有無を比較したもの（内在塩、PC仕様：養生は何れも水中養生）、PC仕様に対し、圧縮強度30MPa以上を満足するためW/C=50%とし、他の条件を同じにしたRC仕様を設定した。表-5に、コンクリートの配合を示す。使用セメントは、普通ポルトランドセメントとし、細骨材Sには、砕砂（福島県新地町産、表乾密度2.65g/cm³、粗粒率2.73、吸水率1.56%）、粗骨材Gには、砕石（福島県いわき市産、表乾密度2.72g/cm³、吸水率0.67%）を用いた。また、混和剤としてAE減水剤を使用した。粗骨材の最大寸法G_{max}は20mmであり、目標スランプを

表-4 実験条件(シリーズI)

供試体	設計基準強度		エントレインドエア		内在塩		養生	
	40MPa	30MPa	有	無	有	無	蒸気	水中
対象橋仕様	○			○	○		○	
Non-AE+内在塩	○			○	○			○
Non-AE	○			○		○		○
内在塩	○		○		○			○
PC仕様	○		○			○		○
RC仕様		○	○			○		○

表-5 コンクリートの配合(シリーズI)

配合条件	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m³)										
						水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤						
										AE 減水 剤	AE 剤	高性 能減 水剤	塩 化 物			
対象橋 仕様	20	8	1.5	40	48.0	175	438	816	937	—	—	26.3	5.0			
Non-AE+ 内在塩		10												—		
Non-AE		8											—			
内在塩		12	4.5					50	175	350	854	950		6.13	0.077	—
PC仕様																
RC仕様																

8cm～12cm, 目標空気量をNon-AEコンクリートが1.5%, AEコンクリートが4.5%とした。なお, 内在塩は, 凍害劣化が表面から進行することを考慮し, 湖山橋の下フランジで検出された表面付近の塩化物イオン濃度を参考に, コンクリート製造時にコンクリートに対し塩化物イオン換算で 5.0kg/m^3 のNaClを外割添加した。

表-6に, 各コンクリートのフレッシュ性状を示す。蒸気養生は昇温速度を 20°C/h , 温度保持時間を4時間(65°C), 降温速度を 4.5°C/h とし, 相対湿度ほぼ100%で管理された環境試験装置内で行った。蒸気養生後は, 材齢24時間で脱型し水中養生を材齢28日まで行った。一方, その他の供試体に対しては材齢28日まで標準水中養生を行った。

b) シリーズII

表-7に, 使用したコンクリートの配合を示す。本コンクリートは凍結防止剤散布下におけるRC床版の疲労耐久性評価を目的にレディーミクストコンクリートにより製造したものであるが, 本実験の目的とも合致したため転用することとした。使用セメントは, 普通ポルトランドセメントである。細骨材Sには, 2種類の砕砂(S(1): 福島県白河市産, 表乾密度 2.64g/cm^3 , 粗粒率2.70, 吸水率1.20%, S(2): 福島県須賀川市産, 表乾密度 2.59g/cm^3 , 粗粒率2.50, 吸水率1.14%), 粗骨材Gには, 砕石(福島県いわき市産, 表乾密度 2.73g/cm^3 , 吸水率0.67%)を用いた。また, 混和剤としてAE減水剤を使用した。粗骨材の最大寸法 G_{max} は20mmであり, 目標スランブを12cm(実測値: 11.5cm), 目標空気量を4.5%(実測値: 4.5%)とした。水セメント比(W/C)は, 呼び強度18MPaとしたため, 64.3%と高めの設定になっている。呼び強度18MPaのコンクリートを使用した理由は, 早期劣化が問題となっている床版コンクリートの圧縮強度は比較的低いことから,

そのコンクリートを再現するためには実強度24MPa程度のコンクリートが妥当と判断したためである。

コンクリートは打込み後, 実験室内(約 20°C)で材齢5日間湿布養生し, その後同一環境で気中養生した。

(3) 凍結融解試験方法

a) シリーズI

凍結融解試験方法と供試体形状($100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$)は, JIS A 1148⁹⁾に従った。ただし, 凍結防止剤散布下における凍害環境を想定し, 既往の研究⁷⁾に従い試験溶液には3%NaCl水溶液を用いた。試験は材齢28日から開始した。凍結融解サイクルは, 供試体の内部温度で $+5^\circ\text{C} \sim -18^\circ\text{C}$ の温度履歴を4時間/サイクルでかけ, 300サイクルまで行った。測定項目は, 所定のサイクル時の相対動弾性係数と質量減少率である。

b) シリーズII

凍結融解試験方法は, ASTM C672⁸⁾に準拠し行った。

写真-7に, 供試体形状を示す。写真より, 供試体は, 直径150mm, 高さ80mmの円柱供試体であり, 試験面を打込み面とし止水テープで土手を作製した中にシリーズIと同様の3%NaCl水溶液と真水(凡例: それぞれS, W)を湛水させ, 凍結融解試験を行った。

このシリーズは, 耐凍害性に対する外来塩による試験面の塩化物イオン濃度の違いを評価するものである。そのために凍結融解試験に先立ち10%NaCl水溶液の上面湛水を行った。また塩化物イオンの浸透期間を変化させることにより, 上面10mmまでの平均塩化物イオン濃度を 14kg/m^3 と 22kg/m^3 という2条件のコンクリートを準備し, 1条件5体で凍結融解試験を実施した。ここで, 前者の塩化物イオン浸透期間は280日, 後者は473日と長期にわたっており, コンクリートは十分に飽水していると考えられる。このように, 塩化物イオン濃度は実態よりも高いことは明らかであるが, 今回はその影響の有無を評価するため既存の供試体を転用した。今後, 実態に即した外来塩による塩化物イオン濃度を再現し, その耐凍害性に及ぼす影響を調べる必要がある。測定項目は, 試験面のスケーリング量であり, 5サイクル毎にスケーリング片を回収し, 乾燥質量を測定した。

表-6 コンクリートのフレッシュ性状(シリーズI)

配合条件	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 ($^\circ\text{C}$)
対象橋仕様	7.0	1.9	23.0
Non-AE+内在塩	8.0	2.0	24.0
Non-AE	7.0	1.5	23.0
内在塩	10.0	5.0	23.0
PC仕様	13.0	4.8	23.0
RC仕様	11.5	5.3	23.5

表-7 コンクリートの配合(シリーズII)

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンブ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
					水 W	セメント C	細骨材 S(1)	細骨材 S(2)	粗骨材 G	混和剤 (AE減水 剤)
20	12	4.5	64.3	46.6	178	277	425	414	1005	2.77

写真-7 供試体形状

図-11 圧縮強度試験結果(シリーズI)

(4) 実験結果および考察

a) シリーズI

図-11に各供試体の材齢28日における圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は各々の目標強度を満足する結果であった。

図-12および図-13にそれぞれ質量減少率と相対動弾性係数の測定結果を示す。図中の各凡例に対するW/C、塩分量、空気量等の値は表-5、表-6を参照されたい。

図-12より、AEコンクリートの場合、同一サイクルにおける質量減少率は、PC仕様、RC仕様、内在塩の順に大きくなる傾向であった。すなわち、所定の強度を満足するAEコンクリートは本シリーズの中では比較的低い質量減少率を示したが、内在塩有の場合、無の場合に比べ、質量減少率が増加する傾向を示した。一方、Non-AEコンクリートの場合、予想通りAEコンクリートよりも質量減少率が明らかに増加した。特に、Non-AE+内在塩では102サイクル目より質量減少率が急増し、対象橋仕様は34サイクル時点でコンクリートが崩壊するという著しい劣化を示した。これより、Non-AEコンクリートにおいて内在塩が存在すると耐凍害性が顕著に低下し、さらにこれに蒸気養生の影響が加わると極めて劣悪な凍害を引き起こすことが明らかになった。既往の研究⁹⁾でも、蒸気養生を行ったコンクリートでは、適切な養生がなされないとひび割れの発生を助長し、そこに水分が供給され凍結融解作用を受けると耐凍害性が著しく低下することが指摘されているが、本研究でも同様の結果が得られた。

図-13より、AEコンクリートでは内在塩有の場合、他と比べ200サイクルを超えた時点で相対動弾性係数が低下するものの300サイクル終了時の相対動弾性係数は何れも60%を満足する結果となった。これに対し、Non-AEコンクリートでは、内在塩有(Non-AE+内在塩)、さらに蒸気養生を行った場合(対象橋仕様)、相対動弾

図-12 質量減少率(シリーズI)

図-13 相対動弾性係数(シリーズI)

性係数の低下傾向が著しかった。このように、内在塩が存在した条件で、空気量が少ない場合や、蒸気養生を行った場合に、NaCl 水溶液下で凍結融解作用を受けると、コンクリートの耐凍害性が著しく低下するという現象を明らかにすることができた。

図-14 に、相対動弾性係数と質量減少率の関係を示す。図より、まず、AE コンクリートでは、PC 仕様と RC 仕様の質量減少率の増加による相対動弾性係数の低下傾向が同様であった。一方、内在塩は、相対動弾性係数が 80% 程度までは PC 仕様、RC 仕様と同様の傾向を示したが、80% 以下になると相対動弾性係数の低下割合が大きくなった。次に、Non-AE コンクリートでは、AE コンクリートよりも質量減少率の増加による相対動弾性係数の低下割合が大きく、内在塩と同じく相対動弾性係数 80% 以下になると相対動弾性係数の低下割合がさらに大きくなる傾向を示した。このうち、Non-AE+内在塩と対象橋仕様は、質量減少率の増加に伴い、著しく相対動弾性係数が低下する結果となった。ここで質量減少率はスケーリング量の評価であり、相対動弾性係数はコンクリート表面からのひび割れの影響を含むコンクリートの力学的性質を示していると解釈される。従って、同一の質量減少率で比較すると、Non-AE コンクリートは AE コンクリートに比べ相対動弾性係数が低下し、内在塩や蒸気養生の影響を受けるとさらにその傾向が顕著になることから、これらの条件下ではコンクリート表層付近で凍害による内部劣化が激しく進行していることが推察される。

写真-8 は、凍結融解試験終了後の供試体の状態である。これより、PC 仕様は、凍害の程度が軽微で、RC 仕様、内在塩、Non-AE の順に劣化の程度が大きくなった。一方、対象橋仕様は、原形をとどめていない程崩壊していた。Non-AE+内在塩についても一部崩壊が認められ、それ以外の部分も崩壊寸前の状態であり、この崩壊過程は対象橋仕様に類似していた。このことより、蒸気養生を行った空気量の極めて低いコンクリートは、潜在的に耐凍害性が低く、これに加え高濃度の塩化物イオンを内在する状態で凍結融解作用を受けると、著しい劣化を引き起こす可能性が示された。

b) シリーズII

シリーズ I は、コンクリート製造時に予め NaCl を添加し作製した供試体に対し行ったもので、コンクリート硬化後に外部から浸透する凍結防止剤の作用とは異なる。そこで、外来塩によりコンクリート内部に塩化物イオンが蓄積された供試体に対し、NaCl 水溶液下での凍結融解試験をシリーズ II として実施した。

図-15 に、スケーリング量の変化を示す。図より、真水(W)の場合、含有する塩化物イオン濃度によらずスケーリング量に大きな差異はなかった。これに対して、3%NaCl 水溶液の場合(S)、含有する塩化物イオン濃度が

図-14 相対動弾性係数と質量減少率の関係

高い方が明らかにスケーリング量は増加する傾向を示した。このことより、外来塩においても高濃度の塩化物イオンがコンクリートに含有すると、凍結防止剤を含む水による凍結融解作用を受け、コンクリートのスケーリングが促進することが明らかになった。さらに、その影響は含有する塩化物イオン濃度が高い程顕著に現れる可能性が示された。

5. まとめ

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 本橋の劣化度調査を行った結果、劣化は横断方向の片勾配により凍結防止剤を含む水が集約されるG1桁で顕在化したが、その程度は径間や桁ブロックによって大きく異なる傾向を示した。
- (2) 著しい劣化を引き起こした桁ブロックでは中空内に凍結防止剤を含む水が湛水していたことが判明しており、桁ブロックの塩化物イオン濃度分布を測定したところ上フランジとウェブでは鋼材腐食を発生させる程の塩化物イオン濃度は確認されなかったものの、下フランジにおいては鋼材位置で高濃度の塩化物イオンが検出された。すなわち、著しい塩害を受けた桁ブロックでは、NaCl水溶液が中空内に湛水し、これが拡散と重力の影響により下フランジの下方に向けて浸透したことにより、PC鋼材を腐食、破断させるとともに、その膨張圧によりコンクリートをはく落させたと考えられる。
- (3) 下フランジのかぶりコンクリートを目視観察したところ、凍害によると思われるスケーリングや脆弱化

写真-8 凍結融解試験終了後の供試体の状態

が認められ、走査型電子顕微鏡(SEM)による反射電子組成像(COMP像)を観察したところひび割れが発生していることや、エントレインドエアがほとんど連行されていないことを確認した。その結果、本橋は凍結防止剤由来の塩害のみならず凍害による複合劣化により早期劣化を引き起こした可能性が示唆された。

- (4) 本橋を模擬した実験条件を設定し、凍結融解試験を行った結果、Non-AEコンクリートが高濃度の内在塩を含有した場合、NaCl水溶液下における凍結融解作用下で凍害が著しく促進し、蒸気養生を行った場合、さらに劣化が促進することを明らかにした。また、外来塩がコンクリート中に侵入した状態で、NaCl水溶液を用いた凍結融解試験を行った結果、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高いほどスケーリングが卓越する結果となった。
- (5) 以上のことから、本橋の早期劣化は凍結防止剤に由

図-15 スケーリング量の変化(シリーズⅡ)

来する塩害のみならず特殊な条件下における凍害の複合劣化によるものであることが明らかになった。なお、本橋のような劣化に対する対策として、新設

時あるいは劣化が顕在化する前に、排水経路を十分に把握した上で、今回のように中空に湛水しない措置を講じるとともに、凍結防止剤を含む水が直接構造物に作用しないよう留意することが重要と思われる。

コンクリート構造物の凍害と塩害の複合劣化による問題はコンクリート標準示方書¹⁰⁾においても指摘されており、実験室レベルにおいては研究例も散見されるが、実構造物における実態把握は十分とは言えず、その劣化機構についても未解明な点が多い。よって、今後は内在塩あるいは外来塩によりコンクリート中に高濃度の塩化物イオンが含有された状態でNaCl水溶液による凍結融解作用を受けた際の著しい劣化を引き起こす機構について物理・化学的側面から詳細な研究を行う必要がある。既往の研究により、塩化物系の凍結防止剤が作用するとコンクリートが化学的劣化を引き起こすことが報告されており¹¹⁾、また凍害は塩化物の存在下において物理的作用により促進することも報告されていることから¹²⁾、今後、本研究で明らかにした劣化環境においてコンクリートの複塩の存在とその種類、細孔構造やひび割れ等に着目した研究を進める予定である。

内在塩や外来塩に起因するコンクリートの凍害に関する研究は、今後、凍結防止剤散布下におけるRC床版上面における砂利化や水平ひび割れの発生機構、海水に浸かったがれきを再生骨材としてコンクリート二次製品に利用する際の耐久性といった問題にも波及する可能性があり、慎重に研究を進める必要があると思われる。

謝辞：本研究は国土交通省東北地方整備局東北技術事務所との共同研究として行った。また、室内試験の実施にあたっては、著者が所属する機関の学生および職員より多大なる協力を得た。ここに記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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 報告書・論文集，1999.10
- 2) 本莊清司，井手上文雄，上東泰，谷口秀明，丸屋剛，宮川豊章：塩害劣化した RC 中空床版橋への吹付けによる断面修復工法の適用，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.75-88，2005.9
- 3) 湖山橋補修対策検討委員会：一般国道 46 号湖山橋補修対策検討報告書，2007.7
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書【規準編】，2007.5
- 5) 岩城一郎，上原子晶久，子田康弘，内藤英樹，皆川浩，鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋 PC 桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.413-432，2010.11
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3
- 7) 三浦尚，板橋洋房，岩城一郎：凍結防止剤の影響を受けるコンクリートの凍害劣化に関する実験的研究，融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，pp.159-166，1999.10
- 8) American Society for Testing and Materials: Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C672, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, pp.344-346, 1998.
- 9) 大塚浩司，庄谷征美，阿波稔：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.97-111，1998.2
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008.3
- 11) 森寛晃：塩化物系の凍結防止剤によるコンクリートの化学的劣化に関する研究，コンクリート工学，Vol.49，No.8，pp.43-49，2011.
- 12) 遠藤裕丈，田口史雄，名和豊春：スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.348-365，2010.9

(2012.5.21 受付)

INVESTIGATION OF PRETENSION HOLLOW SLAB GIRDER BRIDGE DETERIORATED DUE TO DEICING SALT AND ITS MECHANISM

Ichiro IWAKI, Yasuhiro KODA, Masaki OOKOSHI, Akihisa KAMIHARAKO,
and Motoyuki SUZUKI

First, in a pretension hollow slab girder bridge severely damaged due to sodium chloride used as deicing salt, the detailed field inspection was performed. Next, using concrete cores sampled from the blocks of girders, the mechanical properties and chloride ion concentration of concrete were measured. Further, by removing whole concrete from blocks, the corrosion condition of steel inside was observed. From the results of these inspections, it was recognized that some girders involved highly-concentrated chloride ions and this fact resulted in not only chloride induced deterioration but also severe frost damage. Thus, additional experiments simulating actual concrete properties and environmental conditions were conducted. The experimental results revealed that Non-AE concrete involving highly-concentrated chloride ion remarkably accelerated frost damage under deicing salt.