

コンクリート橋の予防保全に向けた診断技術の開発 ～PC橋の塩害の予防保全～

吉田英二・石田雅博

1. はじめに

コンクリート橋における塩害は、劣化の進行が比較的速く、損傷が外観に現れた時点では既に内部で鋼材の腐食が進んでおり、補修を施しても完全に機能を回復させることが困難なため¹⁾、コンクリート橋の最も深刻な損傷の一つと考えられている。そのため、損傷が重篤化する前の軽微な損傷の段階で早期に塩分を検知検出して対処することが重要であり計画的な予防保全が不可欠である。

コンクリート橋の中でも、プレストレストコンクリート橋（PC橋）は、鉄筋コンクリート橋（RC橋）とは異なり鋼材腐食が発生してからの耐力の低下する過程が短いため、鋼材腐食の進展を見逃すと落橋という重大損傷につながる場合がある²⁾。既に膨大な数のPC橋が共用されているなか、近年、老朽化したPC橋の損傷が顕在化してきており、それらをどう維持管理していくかが重要な課題である。

本稿では、コンクリート橋のPC橋を対象に、塩害に対する損傷メカニズムとそれに基づく点検、診断及び措置方針の開発に関する取り組みについて紹介する。これらの成果を診断AI³⁾の構築に取り入れることとしている。（なお、本報文では参考文献³⁾で定義する用語を用いている。）

2. コンクリート橋の塩害対策

2.1 塩害対策の経緯

これまで、コンクリート橋の塩害対策については、道路橋示方書（以下「道示」という。）をはじめとする技術関連指針において材料面や設計面、施工面での配慮が示されている（表-1）。

海からの飛来した塩分に起因する塩害への対策としては、1984年に「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説⁴⁾」が暫定指針として初めて示されている。同指針により、設計・材料の選定及び施

表-1 塩害に関する主な技術指針の経緯

年	内容
1984年2月	「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 ⁴⁾ 」を制定。鋼材防錆のためかぶりを部材ごとに設定。かぶりは塗装鉄筋の使用やコンクリート塗装で代替可能。塩害対策を必要とする地域と対策の区分を設定。
1986年6月	「コンクリート中の塩化物総量規制 ⁶⁾ 」の制定。（RC部材、ポストテンション部材は0.6kg/m ³ 、プレテンション部材は0.3kg/m ³ 以下）としている。
2002年3月	「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編」改訂 ⁵⁾ 。対策区分と最小かぶりが見直され、飛来塩分による塩害に対し、厳重な対策を取るように変更。さらに対策区分Sを設けかぶりに加えて他の対策を併用。
2004年3月	「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案） ⁷⁾ 」を制定。塩害による損傷が生じる可能性があるコンクリート橋の維持管理に適用。

工の各方面にわたって十分な配慮がなされ有効かつ経済的に塩害対策が行われることになった。しかし、その後の被害の実態や研究による知見から、耐久性上の目標年数を100年と想定した場合、同指針の規定内容では必ずしも十分でない場合があることが明らかになり、それを踏まえ2002年に道示が改訂⁵⁾され、塩害の影響による最小かぶりの見直しによる塩害対策が盛り込まれた。しかし、海岸線近傍の地区では耐久性上の目標年数100年を確保するには非常に大きなかぶりを必要とすることから、対策区分Sを新たに設けかぶりに加えて他の対策を併用することとしている。また、1990年代のスパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量が急増しており、寒冷地域において凍結防止剤に起因するものとみられる損傷が発生している。しかし、その影響については定量的に把握が出来ていない点が多く、現行規定においても対応の必要性を検討するに留まっている。さらに、外部からもたされる塩害以外に、コンクリート材料に海砂が使用されている場合などに対しても対策を講じるために、コンクリート中の塩分総量規制⁶⁾により、1986年以降に建設された橋梁で

は、初期塩化物イオン量が $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ に制限されることになった。加えて、塩害による劣化を受けやすい橋梁を早期に発見し、予防保全的な補修を行うことを目的として、2004年に「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）⁷⁾」が定められ、コンクリート橋への塩分の浸入状況を定期的に点検するとしている。

2.2 PC橋の竣工年と塩害指針類との関係

図-1に直轄管理橋のポストテンション方式のPCT桁橋を例に、竣工年別の橋梁数を示す。図中には塩害指針類が制定された年度を併せて示している。これらの橋梁は、必ずしも塩害対策が必要な橋梁ではないが、図中に示す塩害対策指針類が制定される前には、既に多くの橋梁が供用されており、塩害に対して十分な対策がなされていない橋梁が多く現存している。

技術指針類に従い所要の品質で設計・施工されたコンクリート橋梁は、供用期間中の早期に塩害による劣化現象が現れる可能性は低いですが、これら技術指針等以前に設計・施工された橋梁の中には既に劣化が生じているものもあり、将来的に劣化進行する可能性が高い。そのため、損傷が顕在化する前に適切に維持管理を行い、必要に応じて措置を行う必要がある。

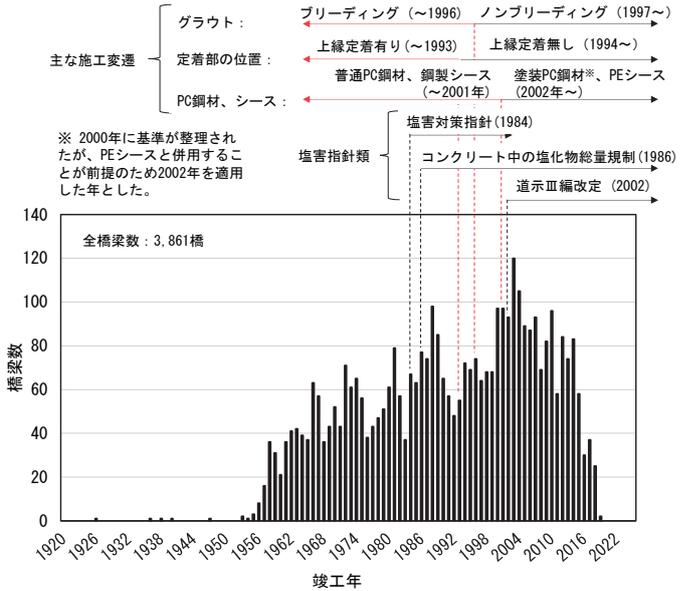


図-1 PCT桁橋の竣工年と塩害指針類との関係（直轄管理橋）

3. 塩害損傷によるPC橋の診断セット

塩害による損傷を受ける可能性のあるコンクリート橋について、将来にわたって安全に利用していくためには、点検で何を検知し、何を根拠に診断を行い、どのような措置をするべきかなど、一連で整理することが重要となる。それを踏まえ、損傷の種類毎に生じる損傷のメカニズムと点検・診断・措置の一連の技術情報を「診断セット」と称して、PC桁に関して整理した。

PC橋では、塩害による損傷を「飛来塩分によ

表-2 飛来塩による塩害の損傷の診断の着目点と措置方針の例

	メカニズム	点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な 詳細調査	診断の決め手となる情報 (措置方針の判断根拠)	措置の方針	工法例	
外観変状 無し	①塩化物イオンの供給	—	<ul style="list-style-type: none"> 塩化物イオン含有量調査（ドリルコア）※塩害特定点検で実施 	下部構造鋼材位置の塩化物イオン量が $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以上かつ上部構造かぶり範囲の塩化物イオン量が微量混入	長寿命化（遮塩）	表面被覆or含浸	
	②コンクリート表面への塩分の付着	<ul style="list-style-type: none"> 塩害防止対策の有無（表面被覆、防食鉄筋など） 		上部構造鋼材位置の塩化物イオン量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 未満かつ将来予測で10年以内に $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えない	長寿命化（遮塩）	表面被覆or含浸	
				<ul style="list-style-type: none"> ③-1. 将来劣化なし ③-2. 将来劣化あり 	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造鋼材位置の塩化物イオン量が$1.2\text{kg}/\text{m}^3$未満かつ将来予測で10年以内に$1.2\text{kg}/\text{m}^3$を超える 	延命（塩化物イオンの浸透低減・抑制、鋼材の防食）	表面被覆or含浸、電気防食
	鋼材位置の塩化物イオン量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上	④-1鋼材の錆未発生		—	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造鋼材位置の塩化物イオン量が$1.2\text{kg}/\text{m}^3$以上 	延命（塩化物イオンの除去、鋼材の防食）	電気防食 ^{注2}
		④-2鋼材の錆発生		—			
外観変状 有り	⑤ 鋼材腐食とコンクリートひび割れの発生	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材に沿ったコンクリートのひび割れ（錆汁を伴う場合もある） 	<ul style="list-style-type: none"> はつり調査、コア・ドリル削孔調査（ひび割れに錆汁が生じていない場合） 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材に沿ったひび割れが発生（錆汁を伴う場合もある） 鋼材の腐食が発生 	延命 ^{注3} （塩化物イオンの除去、鋼材の防食）	電気防食 ^{注2}	
	⑥鋼材腐食の進行、破断	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材の断面積減少、破断 コンクリートの浮き、剥落 腐食鋼材の露出 	<ul style="list-style-type: none"> はつり調査、コア・ドリル削孔調査（鋼材が露出していない場合） 	<ul style="list-style-type: none"> かぶりコンクリートの浮き、剥落が発生 腐食鋼材の露出が発生 鋼材の断面積減少、破断が発生 	延命 ^{注3} （補強）	プレストレスト導入	
	⑦鋼材破断の進行	<ul style="list-style-type: none"> 複数本の鋼材破断 曲げひび割れ 	—	<ul style="list-style-type: none"> 複数本の鋼材に破断が発生 支間中央に曲げひび割れが発生 	危機管理	モータリク、ベント設置、交通規制、架替え	
				緊急措置（損傷が複数本の桁に発生等）※詳細調査を行い個別に検討	通行止め、ベント設置、架替え		

注1 塩害特定点検より、コンクリート中の鋼材腐食が始まる全塩化物イオン量が $1.2\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ であると考えられている。ここでは、安全側の数値として $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を用いた。
 注2 電気防食を実施しない場合には、延命措置として表面被覆or含浸を行い劣化の進行を遅らせつつ、あわせて将来的な架替えも計画する。
 なお、架け替えの計画時、延命措置として鉄筋防錆修復、表面被覆または表面含浸を行い劣化進行を遅らせることについても検討する必要がある。
 注3 外観変状発生箇所のマッピングを行い、外観変状発生範囲が全面的・広範囲の場合には、将来的な架替えも計画する。

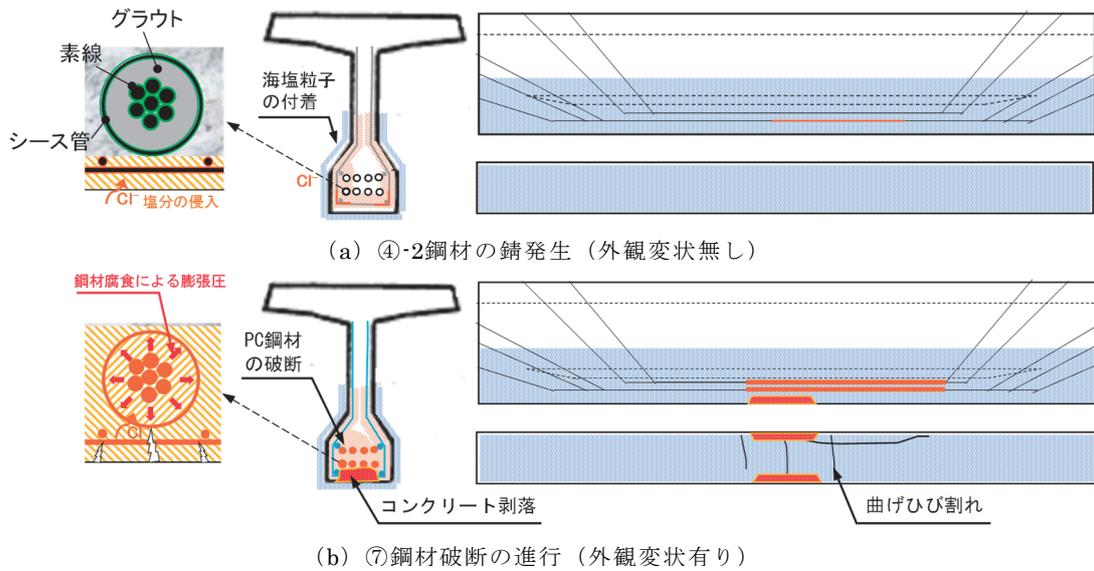


図-2 飛来塩による損傷メカニズムの一例

る塩害」、「凍結防止剤による塩害」、「海砂による塩害」の3項目に分けている。ここでは、塩害の代表的な損傷である飛来塩分と凍結防止剤による塩害の損傷と診断と措置の方針について述べる。なお、海砂による塩害の場合には、対策を施しても完全に塩分を除去するのは難しく、抜本的な対策は困難であると考えてよい。そのため、将来的な架け替えを念頭に維持管理を行うべきである。

3.1 飛来塩による損傷の点検と措置方針

表-2は飛来塩による損傷の点検、診断の着目点と措置の方針を整理したものである。

飛来塩により、コンクリート中に塩分が供給され（表-2中①②）、内部の鋼材位置での塩化物イオン濃度が一定量に達することで鋼材の腐食が始まり（表-2中④-2）、発生した錆による鋼材の膨張がかぶりコンクリートにひび割れを生じさせ（表-2中⑤）、鋼材の腐食・破断が促進（表-2中⑥⑦）し、コンクリート部材の剥落が生じるというのが一般的な塩害のプロセスである。

鋼材位置まで塩分が達していなくても、かぶりコンクリートに十分な塩分が達していれば、いずれは鋼材位置まで浸透する（図-2）。そのため、特定点検要領⁵⁾に基づき、定期的にコア採取による塩分量の検査を行うことが必要である。その結果に基づき、飛来塩の塩分量の推定を行い、将来的な損傷発生の有無を確認するとともに、適切な時期に表面被覆などの措置を行えば状態の深刻化を防止し、長寿命化すなわち予防保全につながる。それを放置すると損傷が急速に進展する可能性がある。その際、写真-1のように、グラウト充填不

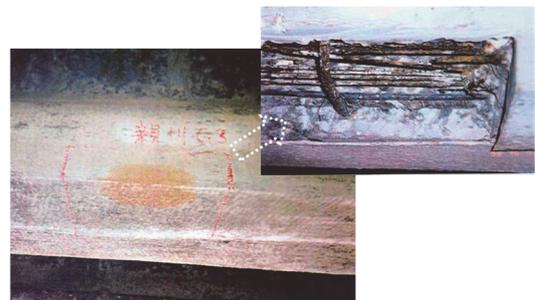


写真-1 鋼材腐食が外観変状に現れずコンクリート内部で損傷が進行している例

足が生じている場合には、鋼材腐食による膨張圧がシース内で吸収され、外観に変状が現れない場合があるので留意する必要がある。その後、PC鋼材の腐食などにより損傷が顕在化した場合には、既に耐荷力の減少が始まっているため、架け替えを前提とした維持管理に移行する必要がある。また、架け替えの判断がなされたとしても、完了までには時間を要するので、それまでの危機管理体制が必要である。

一方、PC橋ではグラウト充填不足による損傷事例が多くみられるが、それにはグラウトの品質が大きく関わっていることが報告されている⁸⁾。図-1に示すとおり、グラウトは1997年にノンブリーディング型への切り替えが行われているが、それまでは充填不足が生じやすいブリーディング型が使用されていた。そのため、1997年以前に竣工されたPC橋では、充填不足が生じているものと前提として維持管理を行う必要がある。2000年代以降では、鋼材に塗装されたPC鋼材が使用され始めたため、施工が適切に実施されていることが前提であれば、供用期間中に損傷が発生

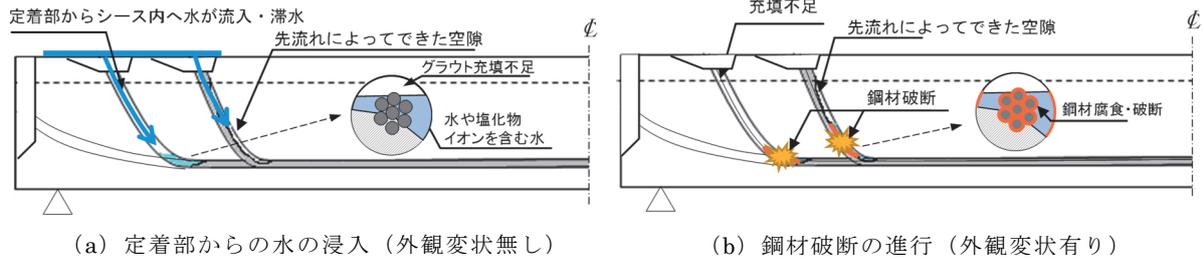


図-3 凍結防止剤による損傷メカニズムの一例



写真-2 グラウト充填不良と考えられる例

する可能性は低い。したがって、診断セットの入り口として、それら施工変遷の情報についても活用することが重要である。

3.2 凍結防止剤による塩害損傷の点検と措置方針

凍結防止剤による塩害損傷として、ケーブルの上縁定着からの凍結防止剤を含んだ水の浸入等に起因した鋼材腐食が比較的多く見られる。1993年以前のPC橋はケーブルの約半数を主桁上縁に定着しているため、上からグラウトを注入すると勾配の下の方にグラウトが流れてしまうため、鋼材の曲げ上げ付近が未充填であることが多い⁸⁾。

床版防水が設置されていない場合には、グラウトの未充填箇所に凍結防止剤を含む雨水などが浸入し、鋼材の損傷は深刻化する(図-3)。いったん鋼材腐食が生じれば、その後の進行過程は飛来塩による損傷と同様である。写真-2に示すように鋼材の定着部付近でシースに沿ったひび割れが発生している場合においては、内部の鋼材が既に腐食が生じている可能性が高い。

したがって、外観に変状が現れる前に、架橋年代からブリーディング型グラウトや上縁定着の使用の有無等を確認し、グラウト充填不良が疑われる場合には橋面防水による対策と併せてグラウトの再充填を行うことが望ましい。

4. まとめ

本稿では、PC橋対象に塩害に対する予防保全を行うために、飛来塩及び凍結防止剤による損傷メカニズムとそれに応じた点検・診断・措置の一

連の技術情報を示した。今回示したPC桁以外にも様々な構造形式があるが、当然ながら構造形式毎に損傷の種類や発生傾向も異なる。そのような構造形式毎に損傷の種類を組み合わせた診断セットも現在作成中である。

今後も、コンクリート橋の予防保全に対する意識が強化され、効率的な維持管理が行えるよう、診断技術の開発を進める。

参考文献

- 1) 例えば、松田芳範、石橋忠良、豊岡昭博、天木儀一：塩害により損傷を受けたPC橋の補修効果に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.2、pp.1015~1020、1999。
- 2) R.J.Woodward, F.W.Williams: Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan, STRUCTURAL ENGINEERING GROUP Proc.Instn Civ.Engrs, Part1, 1988, 84, Aug., pp.635-669
- 3) 澤田守、江口康平、石田雅博：道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.8~11、2021。
- 4) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、1984。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、2002。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書改訂資料、コンクリートライブラリ、No.61、1986.10。
- 7) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)、2004。
- 8) 土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設PC橋の診断技術高度化に関する共同研究—既設PC橋のグラウト充填状況に着目した解体調査—、共同研究報告書第488号、2016.3

吉田英二



土木研究所構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ
研究員
YOSHIDA Eiji

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ
上席研究員
ISHIDA Masahiro