

## 既設橋コンクリート部材の塩害と技術開発

石田雅博・宇佐美 惣・大島義信・吉田英二

### 1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進む中で、様々な劣化要因による損傷事例が報告されている。これらの損傷に対して合理的かつ適切に維持管理を行っていくために、より効率的な検査技術や評価手法の確立が求められている。しかし、劣化損傷や変状の要因が多岐にわたるとともに、橋梁の構造特性や周辺環境、交通量などによっても耐荷性能や耐久性に与える影響が大きく異なる。土木研究所CAESARでは、劣化損傷の生じた実橋の状態を把握するため、撤去された橋梁について非破壊検査や載荷試験、解体調査を行っており、これらの取り組みを臨床研究と称し、より効率的な検査技術や評価手法の確立に向けて調査研究を進めているところである。ここでは、これらの取り組みの中から既設橋コンクリート部材の塩害に関わる技術開発について報告する。

### 2. コンクリート橋に関する塩害対策の現状と課題

#### 2.1 塩害対策の経緯

コンクリート構造物に生じる劣化原因の中で、塩分がコンクリート中に浸透し内部の鋼材が腐食し、その膨張によりコンクリートにひび割れ、剥離などが生じる、いわゆる「塩害」は、コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因の一つとして



写真-1 塩害によって鉄筋やPC鋼材が腐食破断したコンクリート橋

表-1 塩害に関する主な技術指針などの経緯

年	内容
1984年2月	「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 <sup>1)</sup> 」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。
2002年3月	「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編」改訂。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ついて、より厳重な対策を取るように変更。
2004年4月	「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案） <sup>2)</sup> 」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。

特に深刻である（写真-1）。

道路橋においては、海からの飛来塩分に起因する塩害への対策として、1984年に「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説<sup>1)</sup>」が暫定指針として初めて示された。同指針により、新設橋に対し設計、材料の選定及び施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、長期の耐久性を考慮した場合、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った。それらを踏まえ、2002年に道路橋示方書が改訂され、塩害の影響による最小かぶりの見直しなどの塩害対策が盛り込まれた。一方、コンクリート橋に関する維持管理においては、「橋梁定期点検要領（案）」に基づき、目視により外観の損傷を発見することを主体としている。しかし、外観の損傷以外にも既に鉄筋の腐食が始まっている恐れがあり、その後の対策が遅れると損傷が急速に進行する可能性がある。そのため、2004年に「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）<sup>2)</sup>」が定められ、コンクリート橋への塩分の侵入状況を定期的に点検し、鋼材が塩害により腐食する前に予防保全的な補修を行うこととしている。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、適切に維持管理を行い、必要に応じて補修・補強など

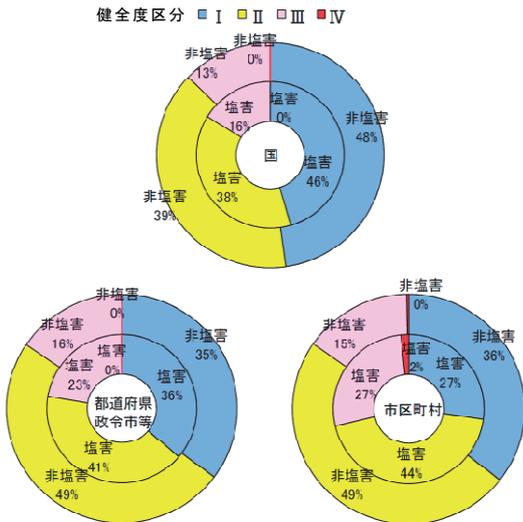


図-1 健全度分布の塩害の影響地域による比較<sup>3)</sup>

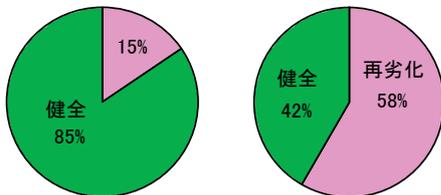


図-2 塩害が原因で補修した橋梁の10年後の再劣化割合

の対策を行わなければならない。

## 2.2 塩害により損傷した橋梁の維持管理

図-1に国、都道府県政令市など、市区町村の管理体ごとに塩害の影響地域および非塩害地域における健全度判定区分の関係を示す。なお図-1の内外の円グラフについて、内側は塩害地域、外側は非塩害地域における健全度区分を示している。この図からは特に健全度判定Ⅲ、Ⅳといった区分において、塩害が大きく影響していることが示されている<sup>2)</sup>。また、塩害を受けた橋梁に対して補修などの対策を行っている中でも、補修後の再劣化が報告されている。特に海岸線から100m以内に位置する橋梁では補修後10年以内に再劣化する割合が約6割程度報告されており、塩害を受けた橋梁の維持管理の難しさが示されている(図-2)。

一般的に塩害により損傷を受けたPCコンクリート部材は、鉄筋やPC鋼材に到達して一定の濃度以上の塩分量を超えてから鋼材の腐食が開始し、鋼材腐食による損傷が著しく進行することでPC鋼材の破断とそれに伴う耐荷性の低下が顕在化する過程を辿ると想定されている。さらに、PC鋼材の破断が増加した段階で適切な維持管理が行われない場合には、部材の耐荷力が失われて、最終的に落橋に向かうものと想定される(図-3)。

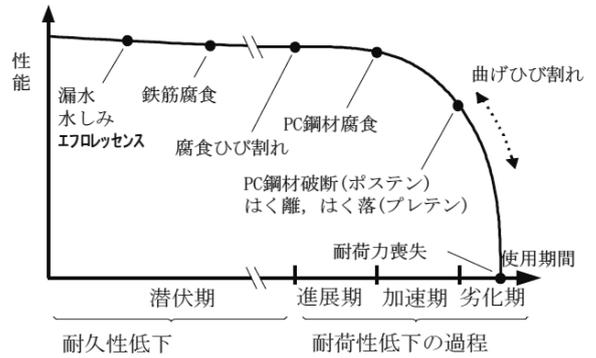


図-3 PCコンクリート部材の劣化シナリオ<sup>4)</sup>

塩害により損傷を受けた既設PCコンクリート橋については、損傷した部材がどの程度の耐荷力を有するか、また橋全体の安全性は確保されているか等、現場の維持管理において、損傷状況に応じた適切な技術的判断が求められるが、耐荷性能に関する評価手法は未だ確立されていないのが現状である。

このような背景を踏まえ、本文では塩害により損傷を受けた既設PC橋に対して、特に落橋など致命的な状態とならないために必要となる維持管理において、これを効率的に行うための橋梁の健全性の判定手法の提案、また非破壊検査技術の開発について報告する。

## 3. 土木研究所CAESARの取組み

### 3.1 橋梁の健全性の判定手法の提案

塩害により損傷を受けたPC桁橋の残存耐荷力を推定するために、簡易解析手法を適用した解析のモデル化について検討するとともに、PC桁橋の損傷程度に応じた耐荷力の評価手法を提案することを試みた。

対象橋梁は、重交通の多い国道に架かる橋梁で、1978年に竣工された橋長30.0mのPC単純ポストテンションT桁橋である(写真-2)。架橋位置が海岸線に近く、塩害による損傷が生じたため補修・補強工事が行われたが、健全状態への回復が見込まれないことから供用後36年を経た2014年に撤去された。本橋では、試験車両を用いた載荷試験が行われており、載荷試験結果を解析に反映



写真-2 対象橋梁

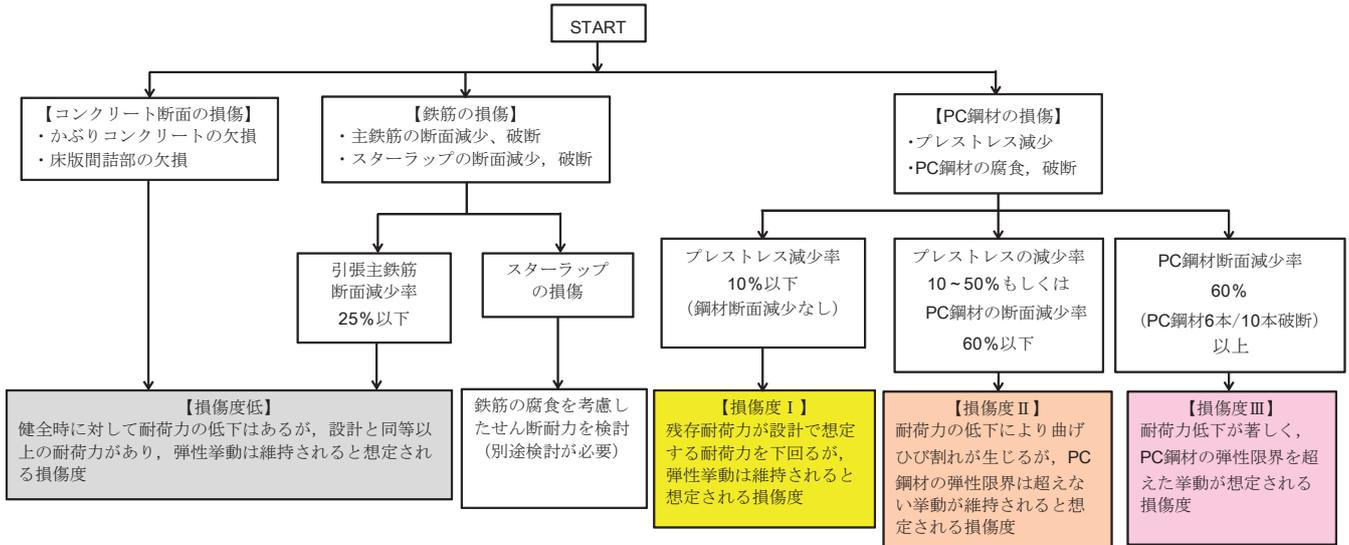


図-4 損傷度判定フロー

表-2 仮想損傷モデルによる解析ケース

載荷位置	損傷位置	実施ケース	
		損傷の種類	損傷程度
支間中央	G1桁	コンクリートの断面欠損	下フランジ被りコンクリートの欠損、間詰部のコンクリートの欠損
		鉄筋の断面損傷	断面減少率25%
		プレストレスの減少	プレストレスの減少率10%、50%
		PC鋼材の破断	破断本数1本、2本、4本、6本/10本
	G2桁	PC鋼材の破断	破断本数6本/10本
全桁 (G1-G4)	PC鋼材の破断	破断本数6本/10本	

することで、より再現性の高い解析のモデル化を行った。事前検討として載荷試験データが得られている対象橋梁の実測値と簡易解析による解析結果との比較により、解析モデルの結果が載荷試験結果の挙動に近い結果となることを確認することで解析モデルの妥当性を確認した。

そこで、対象橋梁に対し、損傷による耐力力の低下度合いを把握するため、損傷の位置・種類・程度を変化させた場合の仮想の損傷モデルによる簡易解析を行った(表-2)。これらの結果によると、コンクリートの断面欠損や鉄筋の断面減少率を想定した解析ケースでは、耐力性能に与える影響がほとんどなく、主にPC鋼材が損傷した解析ケースにおいて耐力性能が低下する傾向が見られた。これらの結果に対し、コンクリート、鉄筋、PC鋼材の損傷度を目安とした指標を示すことで、PC主桁の残存耐力力を簡易的に評価するための損傷度判定フローを整理した(図-4)。次にその結果を、図-5のとおり荷重と変位の関係によりグラフ化した。図-5のグラフは、支間や載荷条件の

異なる橋梁にも損傷度判定の適用範囲を広げるために、縦軸と横軸を正規化したものである。縦軸は、実橋での載荷試験における荷重の実測値を設計荷重で除した値とし、横軸は、同条件によるたわみの実測値をたわみの計算値により除した値としている。このグラフに、過年度に行った相見川海浜橋の載荷試験の結果<sup>5)</sup>をプロットした結果、判定指標として損傷度Ⅱ程度と推定された。当該橋梁はPC鋼材の破断が生じていること、また、載荷試験中にひび割れが生じ主桁の剛性が低下していることを考慮すると損傷度の判定指標として概ね妥当な結果であることが示された。

このことから、本簡易解析による損傷度判定手法は、PC橋梁の維持管理において補修・補強対策の要否あるいは落橋等の重大損傷を未然に防ぐための安全性を判断するための一つの目安になり得ると考えられる。今後は支間や主桁本数など条件の異なる橋梁に対して検証ケースを増やしデータを蓄積することで損傷度の判定指標の精度を向上させていきたい。

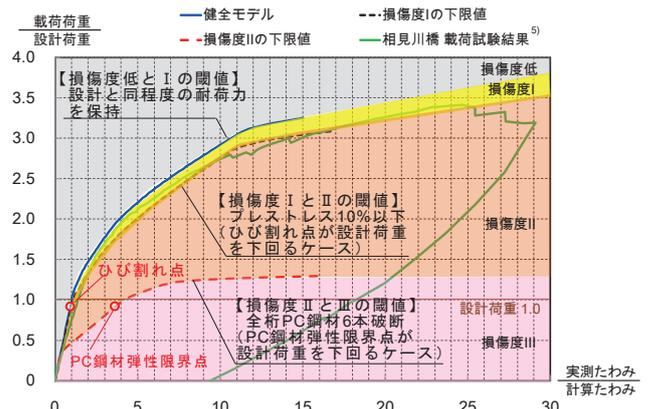


図-5 荷重-変位の関係 (損傷度判定グラフ)

### 3.2 高出力X線による非破壊検査技術の開発<sup>6)</sup>

塩害によってシース内部のPC鋼材が腐食し破断した場合、PC桁内の応力状態はグラウト充填状況や破断状況によって変化する。そのため、PC鋼材の腐食が疑われるPC桁内の腐食状況や鋼材破断箇所、またグラウト充填・未充填箇所を正確に検出することは、PC桁の残存耐荷力を評価する上で極めて重要である。CAESARでは、東京大学と連携し高出力X線透過法の開発を進めている。高出力X線透過法を用いることにより、従来よりも短時間にコンクリート橋内部の状態を検査把握することが可能となり、より効率的な診断が可能となる。

現在橋梁調査で使用されているX線源はその出力300keV以下が主流であるため、部材厚が30cm～40cm超えると照射時間が長くなるなど、事実上適用できなかった。研究開発では、3.95MeVおよび950keVの高出力X線源を用いて、屋外での適用性の確認を行っている。3.95MeVを利用した場合では、部材厚40cmに対して20秒の照射時間で画像を取得することができた。また950keVのX線源では、シース内鋼材およびその破断状況を確認することができた(写真-3)。

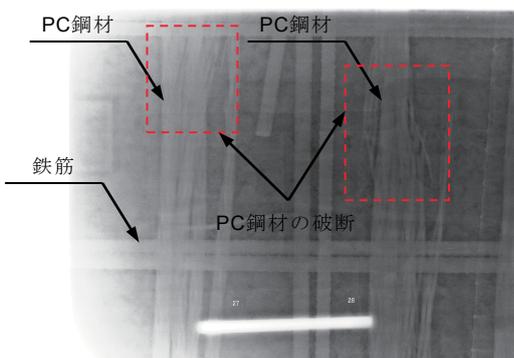


写真-3 高出力X線源(950keV)を用いた撮影画像

高出力X線源を使用することにより、より短時間にかつ鮮明に内部を確認することができた。今後は、自動的に断面をスキャンできる治具などを開発して、実用化を目指して開発を進める予定である。

### 4. おわりに

既設橋コンクリート部材の塩害対策の現状と課題について概説するとともに、必要となる技術開発についてCAESARの取組みを紹介した。

塩害などにより損傷したPC桁の耐荷力推定に際しては、高出力X線源などの非破壊検査手法を使用し、今回開発した健全性評価手法による判定を行うことで、より効率的な判断に資する可能性があることが示された。

今後、こうしたより効率的な非破壊検査手法の開発や損傷度を指標とした耐荷力の評価方法についてデータの蓄積により更に精度を高め、現地で適用される技術にしていきたい。

### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、1984
- 2) 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
- 3) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報、2015
- 4) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全－PC橋の更なる予防保全に向けて－、pp.74～75、2015.3
- 5) 木村ほか：塩害により損傷を受けたポストテンションPCT桁の耐荷力評価、構造工学論文集Vol.62A、2016.2
- 6) 木村：コンクリート構造物の非破壊検査、橋梁と基礎、第47巻、第3号、pp.49～52、2013

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  
Masahiro ISHIDA

宇佐美 惣



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 主任研究員  
Osamu USAMI

大島義信



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 主任研究員、博(工)  
Dr.Yoshinobu OOSHIMA

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  
Eiji YOSHIDA