

◆ 特 集 ◆

PC 技術による構造物の
機能回復・向上

PC 橋の保全技術の動向について

窪田 賢司*

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、「PC」という。）構造物は鉄筋コンクリート（以下、「RC」という。）構造物に比べ、コンクリート強度が高く、水セメント比の小さいコンクリートが用いられるため、二酸化炭素(CO₂)や塩化物イオン(Cl⁻)などの侵入量が小さく、中性化や塩害など劣化機構の観点からも耐久性が高い。さらに、プレストレスにより、ひび割れを制御できるため、ひび割れ部からの劣化因子の侵入が少なく耐久性に優れている。このような構造物を適切に建設・管理することにより、半永久的に使用可能なものと考えられる。しかしながら、昨今、建設時の設計・施工の配慮不足、また供用後の重交通や厳しい環境下にある PC 構造物において、早期に変状が顕在化し補修・補強を要するものが急増している。

このようなことから、JH 日本道路公団（以下「JH」という。）では、各種の保全技術の開発を進めている。JH が管理する高速道路は、平成 16 年 11 月 15 日現在で 7 343 km に達し、開通後の平均経過年数は約 18 年となっている。このうち、橋梁延長は約 1 100 km を占め、約 4 割が PC 橋となっている。このため、PC 橋の更なる効率的・効果的な維持管理が急務となっている。

本文では、最近の PC 橋における損傷事例、点検・調査技術、補修・補強技術および維持管理計画を策定する橋梁マネジメントシステムに関する JH の動向について述べる。

2. PC 橋の特有の損傷事例

PC 橋の損傷は、建設時の初期欠陥や厳しい使用環境下における複数の劣化機構などが重複することにより発生している。ここでは PC 橋特有の損傷の一例について述べる。

(1) コンクリート片のはく落

過密配筋構造および部材形状のスレンダー化・複雑化に伴い、建設時のコンクリート打設の締固め不足となり、空洞、ジャンカが発生し、その補修箇所のはく離（写真 - 1）。これは設計上の鋼材配置間隔の配慮不足によるもの、また



写真 - 1 コンクリートのはく離

は施工においてシースの剛性や保持方法の配慮不足などから、コンクリート打設が部分的に不十分になったものである。この場合、型枠脱型時に断面補修を行うことになるが、不良箇所の表面処理、適切な断面修復材料の選定、十分な付着性を有していなければならない。しかしながら、施工期間の制約などにより、確実な処置が行われていなく、補修箇所の記録も残されていないことが多い。このようなことから、JH では不良箇所の補修記録および構造物の初期点検を実施している。今後、供用後に実施する定期点検と比較することにより、健全性の評価を行うことにしている。

(2) 中央ヒンジ部の損傷

中央ヒンジを有する PC 箱桁橋において、クリープ・乾燥収縮による桁の垂れ下がりに伴い、伸縮装置・ゲレンク支承の遊間異常（写真 - 2）。これは想定以上に中央ヒンジ

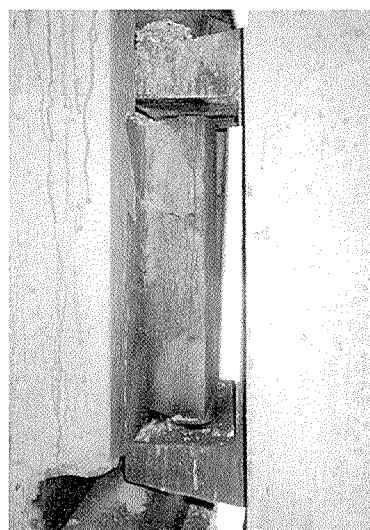
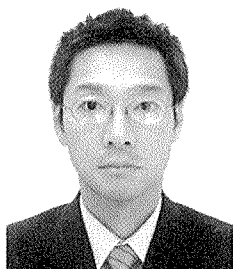


写真 - 2 ゲレンク支承の損傷



* Kenji KUBOTA

日本道路公団 技術部 構造技術課

が垂れ下がることにより、伸縮装置の段差、異常遊間、ゲレンク支承部からの異常騒音などの損傷が発生することがある。その後、伸縮装置や支承の補修を行っても再損傷が発生し、また補修間隔が短くなり、縦断線形にも影響が出始め、最終的にはPC橋本体の耐荷性能の低下につながる可能性がある。それらの対策としては、垂れ下がり量の定期監視の実施や恒久的な補修として中央ヒンジの連続化(写真-3)などがある。連続化においては、既設鋼材の位置を十分考慮した上で補強鋼材を配置する必要がある。

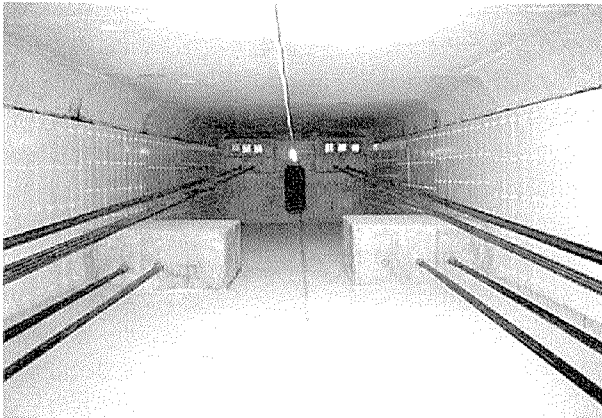


写真-3 中央ヒンジの連続化

(3) 床版間詰め部からの漏水、遊離石灰

PCI桁、PCT桁の床版間詰め部からの漏水、錆汁の発生(写真-4)。これはPC桁と間詰部の付着の不良により雨水が浸透して、床版下面に遊離石灰、錆汁が発生したものである。とくに床版横締め鋼材が配置されている場合は鋼材腐食に至る可能性がある。これらの対策としては、床版面に防水工を施すことにより、雨水の浸入を未然に防止することが有効と考えられる。

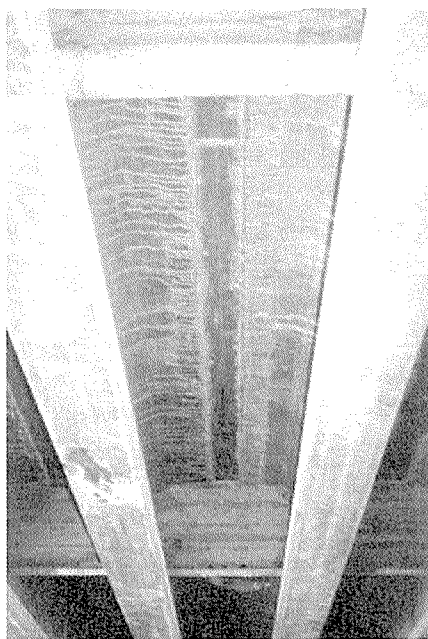


写真-4 床版間詰め部からの遊離石灰

(4) 桁の曲げひび割れ

車両の大型化・交通量の増大に伴う曲げひび割れの発生(写真-5)。これは過大な荷重積載またはプレストレス不足からの桁側面に垂直方向にひび割れが生じたものと考えられるが、複数の要因が相まっていることから、原因を特定することは困難である。詳細な調査や載荷試験など適切な検討を行い原因究明したうえで、対策することが望まれる。

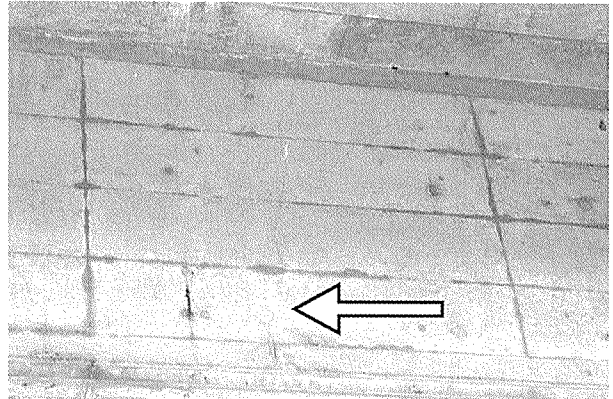


写真-5 過大な荷重積載またはプレストレス不足によるひび割れ

(5) 桁端部の損傷

凍結防止剤(NaCl)の散布による漏水・滞水に伴う塩害(写真-6)による損傷。これは、凍結防止剤散布地域において伸縮装置の損傷を放置した結果、桁端部に塩害の損傷が発生したものである。桁端部は、PC鋼材の定着部があり、橋梁本体としても重要な箇所である。さらに狭小な空間での補修作業となることから、PC構造の技術的知識、高度な補修技術を要することになる。よって、(写真-6)のような状態になる前に伸縮装置の補修を行うことが望ましい。また、建設時においては、桁端部に防水工をあらかじめ施すことや、延長床版を採用することにより伸縮装置と桁端部の位置をずらし漏水による桁端部の損傷を防止することから有効と考えられる。



写真-6 凍結防止剤の漏水による桁端部の損傷

(6) PC鋼材に沿った遊離石灰

PC鋼材に沿った遊離石灰を伴うひび割れ損傷(写真-7)。



写真-7 PC鋼材に沿った遊離石灰

これはグラウトの未充填やコンクリート打設の打ち込み不足によりシースとコンクリートに隙間が生じ、雨水や塩分がPC定着部から浸透したものと考えられる。この対策方法として、PC定着部に防水工を施すとともに、グラウト未充填箇所においては、グラウト再注入を実施することが有効と考えられる。

3. PC橋の点検・調査

PC橋は、コンクリートにひび割れが発生しないように設計していることから、外的な劣化要因の侵入が少ない。しかしながら、PC鋼材に損傷が発生した場合、構造物の耐荷性能を著しく損なうことになる。さらに供用しているPC橋のほとんどがコンクリート内にPC鋼材を配置しているため、目視点検では早期発見することがきわめて困難である。そこで、JHで技術開発を進めているPC鋼材の詳細調査およびモニタリング方法について述べる。

(1) 鉄筋切断法による残存プレストレス測定

PC橋において、異常のたわみ、ひび割れ、塩害、アルカリ骨材反応などにより、構造物の耐荷性に影響が懸念されることがある。そこで、PC橋の耐荷力を定量的に評価する方法として、構造物に導入されているプレストレス応力を鉄筋切断法¹⁾により推定する手法を開発した。鉄筋切断法はPC橋の鉄筋をはつり出し、ひずみゲージを貼り付けた後、鉄筋を切断し解放されるひずみを計測する手法である。鉄筋切断は、切断した鉄筋の復旧が困難であり、これまで実構造物での適用はあまり行われてこなかった。そこで切断した鉄筋を機械継手により復旧した場合の耐荷性状につ

いての確認を行った。鉄筋切断法による計測状況を(写真-8～写真-10)に示す。鉄筋切断法は、建設時の施工手順による影響として現場打ち床版などの後死荷重やクリープおよび乾燥収縮などを考慮したうえで、損傷の外観調査と組み合わせることにより、残存プレストレスが推定でき、PC橋の耐荷力を評価するものである。

(2) 弾性波モニタリングによるPC鋼材の破断検知

PC鋼材の破断は、PC橋の耐荷力に大きな影響を与えることになる。破断は通常の目視点検では発見しにくく、継続的な監視が必要となる。破断が懸念される構造物においては、常時計測監視によるモニタリングが有効である。モニタリング手法には、応力を測定する方法やPC鋼材の破断により発生する弾性波を測定する方法などが挙げられる。今回、PC鋼材の破断検知として、AEセンサーや加速度計等を用いた弾性波モニタリングに着目し、室内および実橋での検証実験を行い、その適用性について検討を行った²⁾。

実際の構造物は絶えず交通振動下や気象作用の影響を受けることになる。そこで、実橋において、切断用のPC鋼材を設置し人為的に破断させ、交通振動下でのPC鋼材破断を検出できるか検証した。その結果、センサーを適切に配置すれば、破断の時間および位置を高い精度で検出できることが確認された。今後は、PC橋の維持管理手法の一つとして、モニタリングの実用化に向けて検討していく予定である。

4. PC橋の補修・補強

(1) ウォータージェット工法を用いた補修・補強

構造物の耐久性向上の観点から、劣化因子の侵入を未然に防ぐための、高耐久性能型の防水工やコンクリート塗装の技術開発を進めている。しかしながら、劣化因子が浸透してしまった構造物においては、その除去方法が課題である。また、補修・補強においては、新旧コンクリートを確実に一体化させることが重要である。これらを解決するため、ウォータージェット工法(WJ工法という。)によるはつり処理の評価の定量化を図った³⁾。WJ工法の採用により、従来補修作業が困難であった桁端などの狭小箇所の劣化したコンクリートの除去などが可能となった。またグラウトの未充填の補修方法として、グラウト再注入工法³⁾(写真-11)を開発した。グラウト再注入工法は、WJ工法により鉄筋やPC鋼材を傷つけることなく、目標とするPC鋼材まで削孔し、グラウトの充填度およびPC鋼材の腐食状態を



写真-8 ドリルによるはつり状況

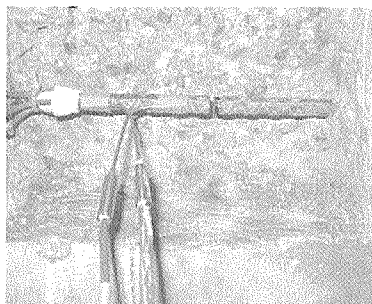


写真-9 鉄筋ゲージ取付け、鉄筋切断

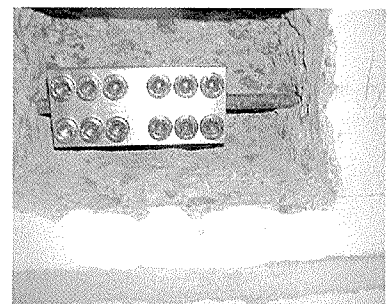


写真-10 鉄筋接続治具取付け



写真-11 グラウト再注入状況

確認した後、真空ポンプを併用してグラウトを注入するものである。

(2) プレストレス導入

RC、PC 橋において、遮音壁の設置および重交通に伴う死活荷重の増加や老朽化など、構造物の耐荷力・耐久性の向上が必要となるものが増えている。その場合、外ケーブル補強や鋼板接着補強による対策が採用されているケースが多い。しかしながら、都市内の橋梁においては、桁下の交差道路との建築限界や交通規制の制約などクリティカルになることがある。そこで、PC 鋼材に変わる炭素繊維プレートを緊張し、桁の補強を行うアウトプレート工法（写真-12）を開発した。写真-12 は RC 橋の補強として厚さ 2 mm の炭素繊維プレートを緊張してコンクリートにプレストレスを導入したものである。今後、RC・PC 橋に対する有効な補強工法の一つとして考えている。



写真-12 プレストレス導入補強

5. 予防保全・計画保全の提案

これまでの橋梁の維持管理は、ルーチン作業として点検し劣化が顕在化した箇所において対症的に修繕するのが一般的であった。予算も対前年度比などの指標を基に決定され、長期的な観点から予算配分が行われたとはいえない。その結果、年々増加する道路ストックに追いつかず、

予算の慢性的な不足が現状に至っている。今後、さらに老朽化が進んでいくと予想され、全国の橋梁構造物を統一的に予測評価し、将来のビジョンを見据えた点検・補修・維持管理が重要な課題と考える。そこで、現在の橋梁保全技術の粋を結集し、供用中の橋梁をシステムチックに健全度を評価する橋梁マネジメントシステム（JH-BMS）⁴⁾を開発したので、その概要と今後の展開について述べる。

(1) JH-BMS の特徴

JH-BMS は、橋梁諸元データと点検データを統合した保全情報活用データベースを用いて、劣化機構ごとに予測理論式を設定し、橋梁各部材の健全度を評価し、将来の劣化予測（図-1）を行うものである。また、最適な補修・補強の時期および工法を立案し、ライフサイクルコストを算出する。

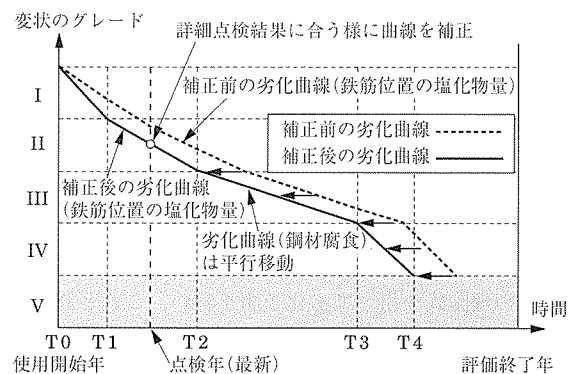


図-1 劣化予測の補正

(2) 劣化予測方法

JH-BMS の予測方法は、橋梁の部材ごとに既往の劣化予測式（表-1）により予測を行う。

表-1 劣化予測式

劣化機構	劣化予測式
中性化	中性化深さ（土木学会）、鋼材腐食量（JCI）
塩害	塩化物イオン濃度（土木学会）、鋼材腐食量（JCI）
疲労（RC床版）	疲労損傷度（松井式）
凍害	変状が顕在化した場合、定期的に詳細調査
化学的浸食	変状が顕在化した場合、定期的に詳細調査
アルカリ骨材反応	変状が顕在化した場合、定期的に詳細調査
疲労（鋼橋の主部材）	疲労評価式（（社）日本道路協会）

(3) 塩害を例にした劣化予測

劣化機構が塩害の場合の予測を例に記す。劣化の初期段階は鋼材位置の塩化物量を指標に劣化予測を行い、鋼材の腐食限界（1.2 kg/m³）に到達後は、鋼材の腐食量を指標に劣化予測を行う（表-2 参照）。

その際、各橋梁における部材諸元（かぶり、水セメント比など）、環境条件（海岸からの距離、凍結防止剤の散布量など）を劣化予測式に反映させ、劣化予測を行う。

(4) 詳細点検による劣化予測の補正

JH では目視点検に加え、中性化深さ、塩化物量調査など

表-2 変状のグレード（塩害）

変化のグレード		塩害
I	外観	外観上の変状が見られない
	閾値	塩化物イオン濃度 (kg/m ³) X 0 ≤ X < 0.8
II	外観	外観上の変状が見られない
	閾値	塩化物イオン濃度 (kg/m ³) X 0.8 ≤ X < 1.2
III	外観	腐食ひび割れが発生、錆汁が見られる
	閾値	塩化物イオン濃度 (kg/m ³) X 1.2 ≤ X < ∞
		鋼材腐食量 (%) Y 0 ≤ Y < 5
IV	外観	腐食ひび割れが多数発生、錆汁が見られる、部分的なはく離・はく落が見られる
	閾値	鋼材腐食量 (%) Y 5 ≤ Y < 10
V	外観	腐食ひび割れが多数発生、ひび割れ幅が大きい、錆汁が見られる、部分的なはく離・はく落が見られる、変位、たわみが大きい
	閾値	鋼材腐食量 (%) Y 10 ≤ Y < ∞

詳細点検を適宜実施しており、より精度の高い劣化予測を行うため、詳細点検データを基に劣化予測の補正を行う（図-1参照）。

既存の理論式を用いて劣化予測を行い、これと詳細点検の結果を照合し、劣化予測曲線を補正することで、橋梁部位ごとの劣化予測が可能になる。なお、初期欠陥や建設時の材料、施工のバラツキ、部分的な劣化の進行および複合要因による劣化など、予測式に当てはまらない損傷は、別途個別に評価するものとしている。

(5) 今後の展開

今後は、全国の橋梁緒元データと点検データを基に各路線、IC間および橋梁単位ごとに劣化予測を行い、実橋の劣

化状態と比較検証を行う予定である。また、劣化の状態に応じた補修・補強について、対策の時期および方法を立案し、最適なライフサイクルコストを算出する。この結果を踏まえ、今後の橋梁保全に関する業務の効率化を図っていく。また、アセットマネジメントでもある他のシステムと連携を図り、道路構造物全体を工学的かつ戦略的な判断のもと維持管理業務を支援していく。

6. おわりに

PC構造物の維持管理においては、とくに未解決な点が多く評価が難しい、また損傷が発見された場合、その補修・補強に関する知見が少なく、時間と労力が要することから、対症療法的な補修に留まっていることが多いようである。その結果、損傷が深刻化してしまうことが多く、結果的に費用がかさむことになる。また、近年、鋼・コンクリート複合構造および高強度コンクリートなど新技術を採用した橋梁が建設されているが、これらの維持管理手法については、ほとんど確立されていない状況にある。したがって、PC構造物を診断する技術者を育てていくとともに、効果的な補修・補強技術の開発が急務と考える。

参考文献

- 1) 横山和昭, 長田光司, 室井智文, 加藤卓也: 鉄筋切断法による実PC橋の残存プレストレス測定に関する検討, H 16 PCシンポジウム
- 2) 横山和昭, 紫桃孝一郎, 肥田研一, 二井谷教治: 弾性波モニタリング手法によるPC鋼材の破断検知に関する実験的研究, H 15 PCシンポジウム
- 3) 野島昭二, 菅野昇孝, 上東泰, 紫桃孝一郎: PCグラウトの補修技術の開発, コンクリート工学 Vol.41, No11, 2003.11
- 4) 横山和昭, 上東泰, 窪田賢司: 劣化機構を考慮した橋梁マネジメントシステムの構築, 日本道路会議論文集, 2003.11

【2005年1月25日】