

これからの維持管理について

— 高速道路の PC 橋における保全技術 —

長谷 俊彦*¹・野島 昭二*²・竈本 武弘*³

1. はじめに

わが国の社会資本整備は、1960年代からの高度成長期から急激な発展を遂げて、国民の経済や社会活動を支え続けている。しかしながら、近年は、社会資本としての議論において、その重要性や社会貢献度は支持されているものの、老朽化した社会資本を維持管理していくために必要な対策や費用については、依然、十分な国民の理解を得られる状況には至っていない。今後もわが国の経済や社会活動を十分に維持していくためには、社会資本をいかに効率的で効果的に維持管理していくかがもっとも重要な課題となる。

東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)（以下、「NEXCO 3社」という。）が維持管理する高速自動車国道については、昭和38（1963）年の名神高速道路の開通から約45年が経過した現在において、その道路管理延長は約7400kmに達しており、うち橋梁延長が約1100kmと全体の15%にも及ぶ延長の橋梁を管理している。また、供用後30年以上を経過した橋梁も増えてきており、これらの維持管理においては、適切な管理計画に基づく効率的な補修・補強を行うことはもちろんのこと、劣化に対する予防保全の実施体制を確立していくことも重要となってくる。

本稿は、道路橋におけるプレストレストコンクリート橋の視点から具体的な高速道路の事例をとって、現状の課題と維持管理の展望について述べるものである。

2. PC 橋の劣化対策と維持管理

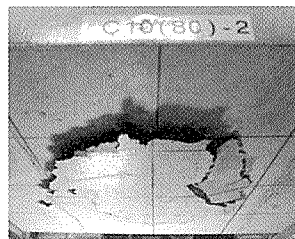
まず、高速道路における橋梁において、PC橋の劣化を例にとり、劣化の原因について示し、現状の対策や補修事例と今後、有効と思われる対策について述べる。

2.1 コンクリート片のはく落

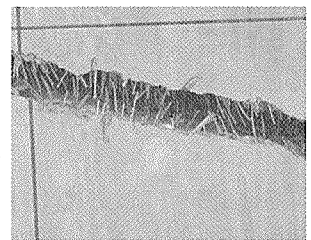
供用後30年を経過した橋梁が増加してきており、コンクリートの劣化に伴って、かぶり不足の鉄筋が中性化により腐食膨張し表面コンクリートのはく落が発生している事例がある。

このはく落事故は、コンクリート片の落下した箇所が、交差道路や歩道などであった場合には、直接、人的な被害を発生させる第三者被害のおそれがあるため、道路、鉄道、歩道などの交差部や高速道路の高架橋と並行している道路部において、はく落防止シートを貼付け施工する等の対策が鋭意実施されている。

また、建設中の橋梁についても同様に、コンクリート片のはく落によって第三者被害が想定される箇所については予防保全対策として、繊維補強コンクリートの使用（写真-1）や、型枠に繊維ネットを沿わせてコンクリートを打設して一体化させるはく落防止用メッシュシートの施工¹⁾（写真-2）が採用されている。



押抜き試験（はく落防止状況）



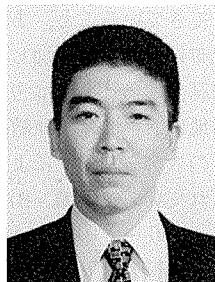
繊維補強コンクリート

写真-1 繊維補強コンクリートによるはく落対策



*1 Toshihiko NAGATANI

(株) 高速道路総合技術研究所
道路研究部 橋梁研究室
主任研究員



*2 Shouji NOJIMA

(株) 高速道路総合技術研究所
道路研究部 橋梁研究室
主任研究員



*3 Takehiro KAMAMOTO

(株) 高速道路総合技術研究所
道路研究部 橋梁研究室
研究員



写真-2 はく落防止用メッシュシートの施工

2.2 桁端部の変状

高速道路では、冬期の路面凍結防止のため、凍結防止剤 (NaCl) が多量に散布される。近年、桁端部において、凍結防止剤を含んだ漏水の影響による塩害が増加している (写真-3)。

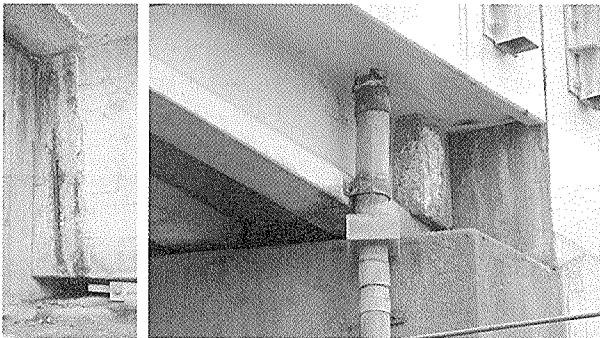


写真-3 桁端部の塩害による劣化

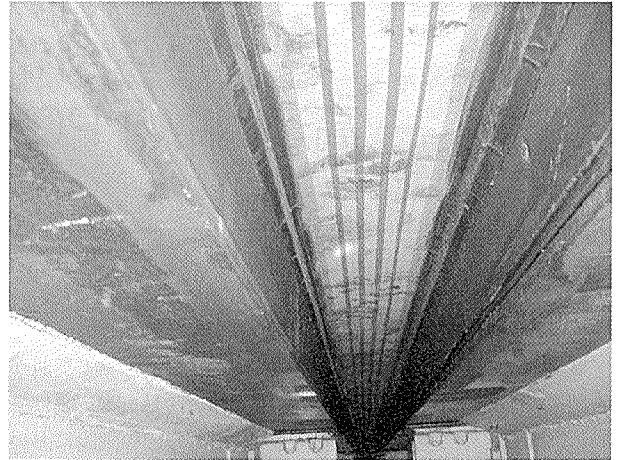
高速道路の冬期交通確保の重要性から、凍結防止剤散布に起因する塩害は、今後、増加することが懸念される。

原因は伸縮装置部における漏水で、抜本的な止水対策を講じるための補修予算の確保や長時間の車線規制が困難などの制約によって、十分な予防対策ができなかった結果、桁端部が塩害によって劣化するものである。

プレストレストコンクリート橋の場合、桁端部はPC鋼材の定着部があり、桁としてもっとも重要な箇所である。したがって、桁端部が塩害により劣化した場合は、狭小空間での補修作業が必要となり、PC構造の技術的知識と高度な技術を要するとともに、多額の補修費用が発生することになり、橋梁の維持管理にしめる影響度は非常に大きい。

既設橋においては、伸縮装置部の徹底した漏水対策を実施することが重要であると考えられる。

桁端部の漏水に対して、狭小な桁遊間部においては、発泡ウレタンやポリブタジエンなどを注入して止水する方法 (写真-4) や、延長床版を設置する方法がある (図-1)。延長床版については、桁端部と床版端部の位置をずらすことによって、桁端部位置で水が流れ込まないようにすることが可能



伸縮装置下面からみた止水対策状況

写真-4 既設橋における伸縮装置部の止水事例

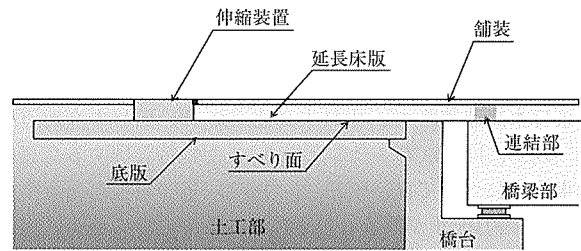


図-1 延長床版の概要図

となるため、このような構造により完全に桁端部の止水対策を行うことも有効な対策と考えられる。

2.3 コンクリート床版の劣化

コンクリート床版の劣化については、2つの原因に大きく区分される。交通荷重の繰返しによる疲労損傷と、舗装面の損傷を伴う床版上面の劣化である。

従来のコンクリート床版は、交通荷重による疲労が問題となっていた。疲労は、比較的建設年次が古く床版厚の薄い橋梁で発生する傾向にあった。過去にこの疲労が多発した結果、道路橋示方書において最小床版厚規定の見直しが行われている。

最近のコンクリート床版の劣化傾向としては、床版上面側のコンクリートのはく離やこれに起因したポットホールが発生するようになってきている。

この変状原因としては、当該床版は押抜きせん断疲労に対して十分な厚さが確保されているため、疲労が発生しにくくなってきていること、また、最近の冬期における凍結防止剤の散布量が大幅に増加したことなどによって、床版上面の鉄筋が腐食することにより発生することが考えられる。また、寒冷地においては、凍結融解作用により床版上面のコンクリートのスケリングによる劣化が主要因と思われる変状も確認されている (写真-5)。

コンクリート床版については、これまでに、移動輪荷重走行疲労試験などによって、PC床版はRC床版よりも疲労に対して十分に高い耐久性が得られることが立証されている²⁾。しかしながら、最近の床版上面劣化に関しては、凍結防止剤や凍結融解作用といったものが劣化要因となっているので、

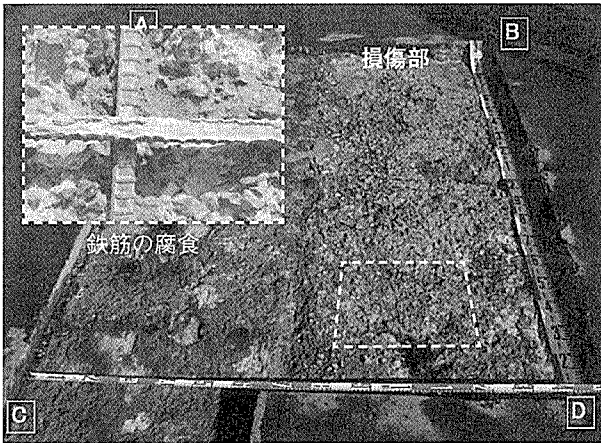
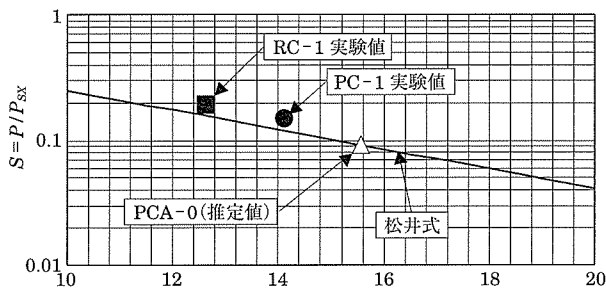


写真-5 コンクリート床版の上面劣化



P: 輪荷重 (= 100 kN) log N
 P_{SX}: 梁状の押抜きせん断耐力 N: P=100 kN 換算の等価繰返し回数

図-2 PC床版の疲労耐久性（乾燥状態）

PC床版といえども、これらの作用を受ければ将来的に、劣化を受けることが懸念される。

PC床版の耐久性を最大限発揮するためには、床版防水が必要不可欠である。床版防水については、平成14年度改訂の道路橋示方書で、アスファルト舗装を施工するコンクリート床版には、雨水等の床版内部への浸透を防ぐために防水層等の設置が原則とされた。これを受けて、床版防水に関して「道路橋示方書」の規定を補完するための技術資料として、平成19年3月に「道路橋床版防水便覧」が日本道路協会より発刊されている。

NEXCOの高速道路の床版防水に関する検討では、海外の床版防水に関する現状調査を行い、それらの知見を取り入れながら、床版防水機能の確保に関して、防水工および舗装施工時から供用期間を通じて長期耐久性を確保するための基準

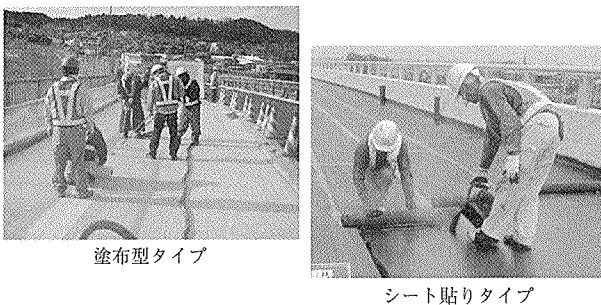


写真-6 床版防水の施工事例

化を目指している。現在、NEXCO総研で改訂基準案が作成され、性能照査試験による検証を行うとともに、NEXCO3社による現地試験施工が実施されている（写真-6）。

2.4 中央ヒンジ部の連続化

PC中央ヒンジラーメン箱桁橋の支間中央部において、ヒンジが設けられているが、路面からの排水が漏水して、その影響で中央ヒンジ部のコンクリートが劣化し、ヒンジ鉄筋が腐食している。

中央ヒンジ部には、クリープ・乾燥収縮による桁の垂下がりに伴い、伸縮装置、ゲレンク支承の遊間異常、異常騒音などの変状が発生する。垂下がりの量が増加すると桁の耐力低下につながるため、対策としては、中央ヒンジ部の連続化が必要となり、桁の連続化に伴うプレストレスの不足分は、外ケーブル補強が有効である（写真-7）。

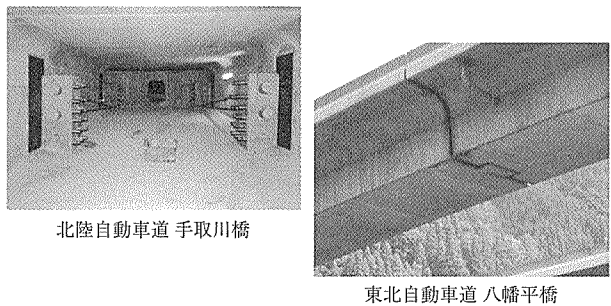


写真-7 中央ヒンジ部の連続化

2.5 導入プレストレス不足

車両の大型化・交通量の増大または、PC鋼材施工時の不具合によるグラウト充てん不良に伴うPC鋼材の腐食破断などにより導入プレストレスが不足することがある。

PC外ケーブルによる導入プレストレスの補強対策が有効である。また、外ケーブル補強を実施した橋梁において、導入プレストレスの健全度調査を行ったが、外ケーブル補強工事を行ってから約5年経過後の外ケーブルについて、プレストレスが損失することなく十分な補強効果を維持できていることが確認されている³⁾。今後も桁補強対策として外ケーブル補強は、十分、効果が期待できる工法である（写真-8）。

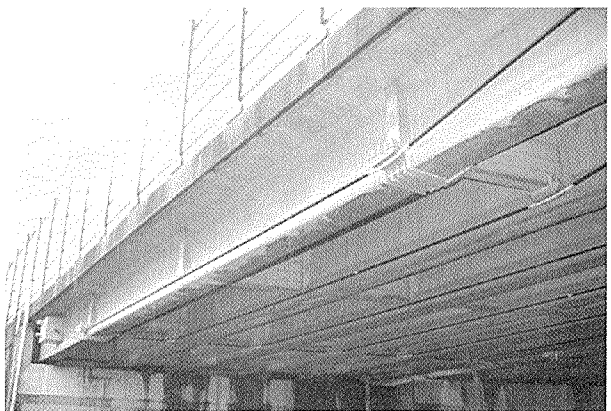


写真-8 PC桁の外ケーブル補強実施例

2.6 PC 鋼材に沿ったエフロレッセンス

PC グラウトの充てん不足やコンクリートの打込み不足により、シースとコンクリートに間隙が生じ、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、グラウト充てん不足部においては、グラウトの再注入工法が採用されている(写真-9)⁴⁾。

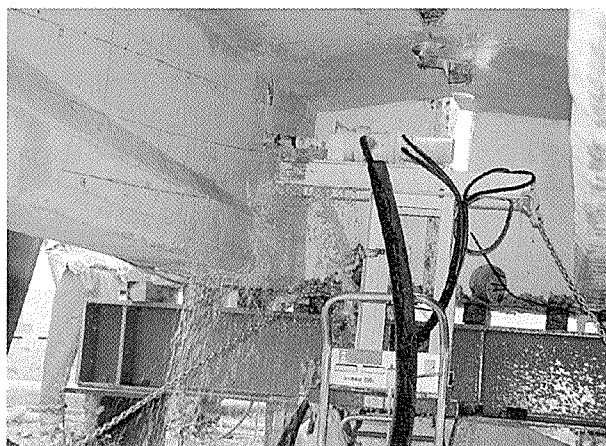


写真-9 PC グラウトの再注入工法 (削孔工)

また、本補修工法の課題として、充てん不足箇所の特定を非破壊検査で行う方法が確立されていないため、現在、鋼製シース内の充てん不足箇所を特定する非破壊検査方法の確立のため、鉄筋やPC 鋼材、シース内の空洞を模擬した供試体を用いて、複数の非破壊検査方法の適用性について比較実験を行っている。最近の非破壊検査機械については、コンクリート内部の鋼材などの可視化技術が向上してきており、500 mm 程度の厚さまでは、非破壊検査によりグラウト充てん不足箇所の特定が可能となってきた。

2.7 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、高機能防水工やコンクリート表面保護工に関する研究が進められており、さまざまな材料が開発されてきている。また、コンクリート構造物の劣化した部位は取り除い



写真-10 ウォータージェットによるはつり

て、断面修復により新旧コンクリートを確実に一体化させることが重要となってくる。

これを解決するために、ウォータージェット工法によるはつり処理の採用が標準化され、最近では、一般的な工法として認知されるようになってきた(写真-10)。しかしながら、ウォータージェット工法は、その機械の性能とオペレーターの技能により、コンクリートのはつり処理面の仕上がり状態がいかようにも異なってくることから、ウォータージェットの施工機械と機械操作者のセットで、技能評価を行い認定精度を導入して、現場施工への適用を図っている⁵⁾。

3. PC 橋の点検・調査・診断

3.1 PC 橋の点検手法

コンクリート構造物の状況を点検する手法は、従来は、遠望目視により橋梁全体としての変状を観察し、その後、検査路や足場等を利用して、構造物に接近または双眼鏡にて近接目視により変状箇所を特定する。この近接目視により特定された後に、打音によってはく離や浮きを確認する手順により、健全度を診断して判定する方法が取られてきた。最近では、経年劣化による点検対象構造物の増加に対して、かぎられた維持管理費や体制等の制約に対して、少数人数で点検業務の合理化を図るため、点検作業の効率化が急務の課題となっている。

PC 橋における変状として、最初に重要となるのは、ひび割れの発生状況や漏水の有無などの外観変状であると考えられる。そして、ひび割れ発生箇所の周辺には、以下に示すようなさまざまなコンクリートの劣化や変状の情報が確認できる。

<コンクリート表面の外観変状>

① ひび割れ、② 漏水・滞水、③ エフロレッセンス、④ はく離(うき)、⑤ 鉄筋露出、⑥ 錆汁、⑦ 劣化・変色、⑧ 鋼材破断・突出

3.2 非破壊検査

(1) コンクリートの外観変状

今後、コンクリート構造物の点検合理化を図る方法としては、非破壊検査を活用していくことが有効となる。外観変状の判定において、現実的にコンクリート構造物の表面に接近するための、検査路や足場等の設備が必要となってくる。これに対

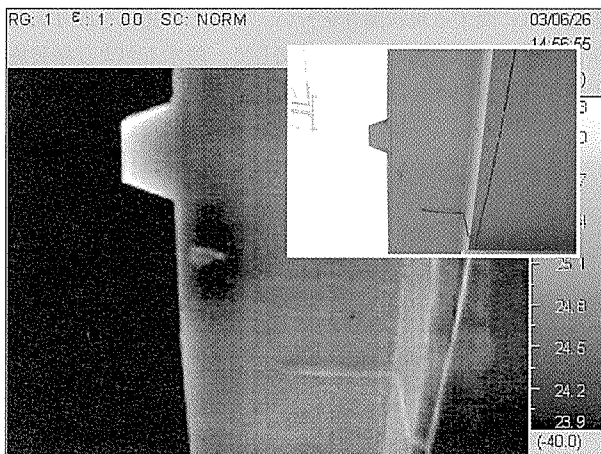


写真-11 赤外線カメラによる外観変状の特定

して、赤外線カメラによる点検が有効である(写真-11)。NEXCO 3社が管理する高速道路のPC橋においては、長大橋梁も多いため、コンクリート構造物を近接目視して点検するための時間と実施体制の効率化を図ることにより、すみやかに変状箇所を特定し、対策を実施する体制を構築することが可能となる。

(2) グラウト充てん不足部の点検

プレストレストコンクリート橋において、今後、重要と考えられる点検の一つに、グラウト充てん不足部の点検方法があげられる。グラウト充てん不足部を事前に発見し、適切な方法で、グラウトを再注入することによって、PC鋼材の腐食を抑制することが可能となる。しかし、すべてのPC鋼材を削孔によってグラウト充てん不足を確認することは、現実的に困難であり、また、時間と費用がかかることから、合理的な点検手法の確立が望まれている。

とくにPC箱桁橋のせん断補強のために配置された鉛直PC鋼棒および斜めPC鋼棒については、破断事故を未然に防止するために、非破壊検査によるグラウト充てん不足の検査を行っている(写真-12)。鉛直PC鋼棒のグラウト充てん、充てん不足を再現した供試体を作製し、各種非破壊検査方法の精度、施工性等の検証を行い、現場への適用を目指している。

3.3 鉄筋切断法による残存プレストレス測定

PC橋において、異常たわみ、ひび割れ、塩害、アルカリ

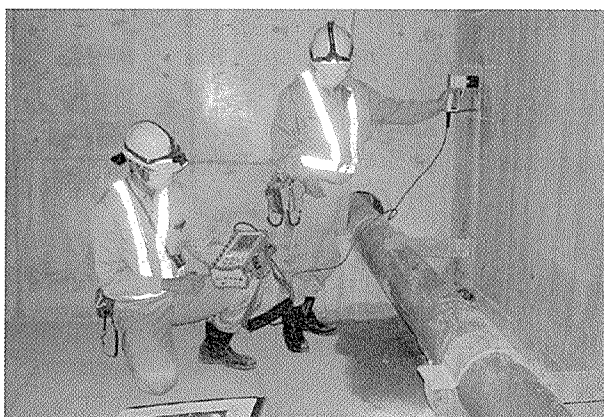


写真-12 衝撃弾性波法によるPCグラウトの点検



写真-13 鉄筋切断法による導入プレストレス推定

骨材反応などにより、構造物の耐荷力に影響することがあるため、PC橋の耐荷力を定量的に評価する方法が必要である。鉄筋切断法として、はつり出したPC橋の鉄筋にひずみゲージを貼付け、鉄筋を切断して、解放されるひずみ量を求めて、構造物に導入されているプレストレス応力を推定する方法が開発されている⁶⁾(写真-13)。

3.4 弾性波モニタによるPC鋼材破断検知

PC鋼材の破断現象は、実橋において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となる。モニタリングの手法としては、PC鋼材の破断によって発生する弾性波を検知するAEセンサーや加速時計等を用いた弾性波モニタリングによって、適切にセンサーを配置すれば、破断の時間と位置を高い精度で検知することが可能となるものである⁷⁾。

3.5 塩害対策

NEXCO 3社では、これまで種々の塩害対策工を実施してきた。それらにより得られた知見から平成20年8月、設計要領第二集橋梁保全編⁸⁾に塩害対策の節を追加制定した。

以下にその概要を紹介する。

図-3のように塩害対策の流れを示した。調査・設計段階に行う初期調査結果により対策工を選定することとし、工事実施段階に行う詳細調査結果により選定した対策工を見直し対策工の適正化を図ることとした。また初期調査と詳細調査の標準的な調査項目、内容を示した。

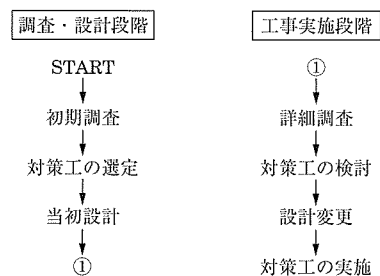


図-3 塩害対策の流れ

調査結果から対策工を選定する時に留意する事項(下記①~④)をあげた。

- ① 変状が生じていない部分では、表面除去範囲(深さ)を少なくする。
- ② 未対策部分との間でマクロセル腐食による再劣化が発生しない工法を検討する。
- ③ 断面補強を合わせて行う場合には、将来の塩分移動の影響を考慮する。
- ④ 対策後には、外部からの塩分浸入を防止する。

なお具体的な対策工は、これからのさらなる技術開発を期待し明示することは避け、一例をあげるに留めている。

4. BMS を用いた橋梁保全

4.1 高速道路におけるBMSの導入

NEXCO 3社の管理する高速道路の平成20年度における平均経過年数は、初期に供用した路線では45年を経過する

ものも見られる。一方で、国内外における橋梁の落橋事故や橋梁部材の損傷事故等、橋梁の安全に関する社会的な注目度も高まっており、今後、更なる効率的な維持管理事業が求められる。このような背景のもと、点検から補修補強に至るまでの計画的な維持管理を支援する橋梁マネジメントシステム(BMS)を構築して、平成17年度より橋梁データ入力し運用を開始してきている。

4.2 BMSの課題

維持管理計画の策定や最適な対策時期、対策工法、対策事業費の算定など、橋梁保全計画を効率のかつ精度良く遂行していくためには、健全度評価や劣化予測、LCCの算出といったBMSを構成する個々のシステムの精緻化が必要であり、客観的な判定ができるシステムであることが求められる。そのため、実際に運用をしながら、個々の問題点について改善を行っていく必要がある。以下にそれらに関連する課題を述べる。

(1) 健全度評価における課題

健全度評価については、その評価単位を「1連」で行うこととし、その健全性を表-1のとおりグレードI～Vの5段階で評価するが、実際の劣化現象は、桁端部や床版の継目部などの局所的な部位で起こることが多く、システム上では、表-1で示される状態と対策の方向性が定性的に示されているのみで、具体的評価については個々の現場の技術者判断によるところが大きい。

(2) 劣化予測における課題

劣化予測について、塩害を例にとってみると、システム上は一般的な既存劣化式(理論式)を用いた健全度評価式に対して実橋の変状グレードを比較したところ、変状結果にかい離があるケースも見られた。また、凍結防止剤による塩害については、実橋梁では多く見られる劣化であるが、システム上では、劣化予測式自体が整備されていないために、早急な劣化曲線の整備が求められている。

(3) LCC算定の課題

システム上では、変状グレードごとに想定される対策工法、工費、標準的な対策効果年数が示されているが、実際の対策では、複数の工法を組み合わせ実施していることが一般的であることから、複数工法を組み合わせた対策を行う場合に対応できるように改善が必要であった。

4.3 BMS改善の取組み

(1) 客観的な健全度評価手法の整備

健全度評価の課題に対し、現場における技術者判断による誤差をできるだけ少なくするため、以下に示す2つの客観

的な健全度評価手法を作成し、その適用性を検証した。

健全度判定式(1)(以下、「判定式」という)は、各評価部材に対し、橋梁の設計および維持管理の経験を有するNEXCO技術者(橋梁専門技術者、グループ会社含む)の健全度評価結果を集計し、変状グレードへの寄与が大きいと考えられる複数の評価項目を、重回帰分析により推定した式が提案された。

$$Y = aX_1 + bX_2 + c \dots \dots \dots (1)$$

Y: 変状グレード

X₁, X₂: 個々の部材の変状を表す変数

a, b, c: 係数

判定式の作成にあたっては、変状が生じた102橋の調査結果を基に40人の橋梁専門技術者約40名による健全度判定会議を行い、各部材の健全度評価結果をそれぞれ分析することにより、判定式は各部材ごとに作成した。

つぎに、健全度判定指標として、目で見える健全度判定図集として、橋梁の各部材の変状について、その劣化の程度、変状の広がり・位置について比較的生じやすい劣化状態を整備し、それらの健全度評価事例を図集形式にまとめたものを作成した。その結果、図集を用いることによりおのおのの評価者が同様の評価をできるようになっている。

(2) 劣化予測式の改善

前項の健全度評価手法の改善後の結果を用いて、評価部材を劣化機構毎に構造形式や環境条件単位で分類して、それぞれの変状グレードと供用年数の関係から回帰分析により劣化曲線を作成した。これにより、凍結防止剤の塩害による劣化曲線を新たに作成し、実橋をある程度評価できる精度まで向上することが可能となった(図-4)。

(3) LCC算出式の改善

LCCの算出式を改善するために、近年の補修補強工事100

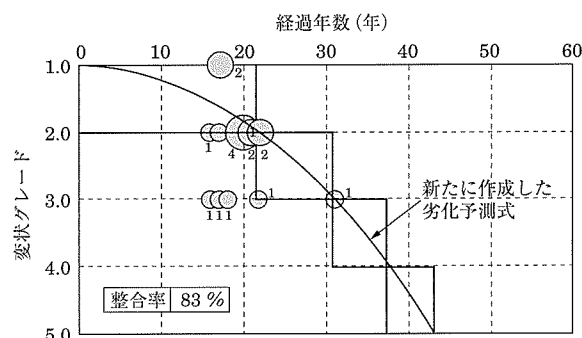


図-4 劣化曲線の精度検証

表-1 BMSの健全度評価指標

グレード	変状や劣化の進行 状態	対策の方向性		
		BMSの利活用後		利活用前
		継続観察	計画的な保全	事後保全 (すみやかに実施)
I	問題となる変状がない	↑		
II	軽微な変状が発生している	↑	↑	
III	変状が発生している		↑	
IV	変状が著しい			↑
V	深刻な変状が発生している			↑

件の事例をもとに工費分析を行い、部材、劣化機構ごとに標準的な補修補強工法の組合せパターン、標準的な位置、数量をもとに施工実態をもとに複数工法の組合せによる費用算出が可能となった。

4.4 BMS 今後の展開

高速道路橋の維持管理の現場において、かぎられた少ない事業費により、橋梁の安全性確保と耐久性向上を目指していくためには、アセットマネジメントの必要性が必要不可欠である。NEXCO グループの分割民営化後は、民間会社として更なる効率的を求められる時代となっており、これからの橋梁の維持管理を少ない現場技術者で実践していかなければならない。

そのためには、BMS のシステムを高度化させる一方で、それを活用する現場技術者の実施体制と技術者のスキルアップが必要不可欠である。平成 20 年度より、現場技術者を対象として、NEXCO 総研で 1 回あたり 20 名単位の規模で、「BMS 講習会」を毎週実施してきており、BMS 現場導入の支援を精力的に実施している。

5. おわりに

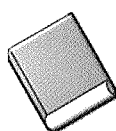
高速道路の PC 橋における維持管理は、供用後 45 年を経過した橋が増加し、維持管理の現場も待たなしの状況にある。また、PC 橋の補修補強対策については、技術的に課題も多く、すべての事象に対して、維持管理手法が確立されているわけではなく、橋梁保全の技術開発に関する要求は、これまで以上に加速していくものと予想される。したがって、

新しい補修・補強技術の積極的導入や早期確立するための体制強化が必要不可欠である。とくに維持管理の現場に携わる NEXCO 社員技術者や関連グループ技術者の点検診断や補修補強に関する技術力向上と現場力の育成が必要であるとともに、現場における維持管理組織の連携強化が最重点課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 青木圭一, 中井裕司, 多田育修: 予防保全としては落防止工法の開発: 砂付きアラミド 3 軸メッシュ工法, コンクリート工学, Vol.42, No.11, pp.28-34, 2004.11
- 2) 長谷俊彦, 上東泰, 安松敏雄: 長支間場所打ち PC 床版の移動輪荷重走行疲労試験による疲労耐久性評価, JH 試験研究所報告
- 3) 竈本武弘, 長谷俊彦, 福田暁, 肥田研一: 磁歪センサによる外ケーブル補強効果の経時的検証, H 20 年度 PC シンポジウム
- 4) 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, No.11, pp.31-43, 2003.11
- 5) 紫桃孝一郎, 上東泰, 野島昭二, 吉田敦: ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理, コンクリート工学, Vol.38, No.4, pp.40-54, 2000.8
- 6) 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 年度 PC シンポジウム
- 7) 横山和昭, 紫桃孝一郎, 肥田研一, 仁井谷教治: 弾性は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 年度 PC シンポジウム
- 8) 東・中・西日本高速道路(株): 設計要領第二集橋梁保全編, pp.3-44 ~ 3-51, 平成 20 年 8 月

【2009 年 2 月 2 日受付】



新刊図書案内

高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準

平成 20 年 10 月

定 価 6,000 円 / 送料 600 円

会 員 特 価 5,000 円 / 送料 600 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会