

特 集

# 最近の診断・

# リニューアル技術



## 【企画趣旨】

我が国で PC 構造物が建設されてから半世紀近くが経過し、この間、多種多様な形式の PC 構造物が建設され社会資本としてストックされてきました。しかし、既設 PC 構造物には長期間供用されてきたものも多く、補修や補強を必要としているものが増加傾向にあります。このため、既設構造物を適切に維持管理し、長寿命化していくことが必要であり、この命題に対して PC 技術者の果たす役割は大変重要です。

このような状況の中、本誌では、昨年 52 巻 2 号の特集号において、高耐久化・長寿命化の観点から、計画、設計、材料、施工などの各分野における取組を紹介しました。しかし、これらの多くは、主に新設の構造物を対象とした内容でしたが、近年の新設に対する公共工事費の増加が望めない状況を考えますと、既設構造物の状態を正確に診断し、適切に補修・補強して、長寿命化していく技術こそが、今まさに求められています。

このような背景に鑑み、今回の特集号では、最近行われている診断と補修・補強の技術について紹介することとし、『最近の診断・リニューアル技術』を企画いたしました。

今回の特集号では、既設コンクリート構造物を長期にわたり供用していくための診断・補修・補強の最新技術などを紹介するとともに、設計および工事報告では、最近の補修・補強工事、部分的な取替え工事、耐震補強工事について紹介しました。なお、ここでの「リニューアル技術」とは、構造物の全撤去・再構築は対象とせず、部分的な取替えを含めた補修・補強を行うことにより構造物を更新させる技術として定義いたしました。

今回の特集号が、読者にとって有益で、これからの診断やリニューアル業務を行ううえでの一助となることを期待しております。

## 本特集号 担当編集委員

飯島 基裕・岩波 光保・上田 高博  
上原富士夫・戸島 敦嗣・西永 卓司

# インフラ施設・設備の高耐久化，延命化

宮川 豊章\*

インフラ施設・設備を形成するプレストレストコンクリートの高耐久化および延命化について、その必要性、現状についてとりまとめ、今後の課題について述べ、シナリオに基づくストックマネジメントの必要性を示した。とくに、塩害およびアルカリシリカ反応については、その動向を紹介した。

キーワード：インフラ，高耐久化，延命化，診断，補修補強，シナリオ

## 1. はじめに

インフラ，社会基盤を構成する施設・設備は，種々のハザードシナリオ中で安定してその機能を市民に提供しなければならないという使命がある。そのインフラの代表的な構成要素であるプレストレストコンクリート（以下，PCと略称する）あるいはPCからなるシステムは市民社会を支え続けなければならないものであるため，基本的には“丈夫で美しく長持ち”する必要がある。

PCは，単なる工場製品ではない場合が多く，電気製品などとは異なって，発注時にはまだ影も形もなく，その最終の品質は現実化されていない。言い換えれば，製造成果としての製品ではなく，建設プロセスを含めた一品生産の構造物の購入を行っている。したがって，最安値のものを無条件に購入することにはきわめて危険が伴う。なかでも，高耐久化，延命化などの長寿命化はこの費用中に適切で定量的に組み込まれることが少なく，従来なおざりにされがちであった，といつてよい。

しかも，PCに要する環境も含めた費用は，設計や建設ばかりではない。計画・設計・建設・維持管理のすべてにその費用は発生する。PCの生涯シナリオをどのようにデザインするかを設定し，計画・設計・施工・維持管理によって現実化するかが大きな課題となっている。

本文では，本号が最近の診断・リニューアル技術に関する特集号であることから，プレストレストコンクリート技術協会第39回技術講習会テキスト<sup>1)</sup>を参考に，既設構造物に焦点をあてた高耐久化・延命化について紹介したい。なお，詳細には是非テキストを参照していただければ幸い

である。

## 2. 高耐久化

高耐久化という言葉は，新設構造物に対して用いられる場合が多い。しかし，その知見は既設構造物の補修補強工法に適用できる部分も多い。ここでは，コンクリートと補強材に分けて，簡単にその動向を紹介する。

### 2.1 コンクリート

コンクリートの高耐久性に関わる技術としては，①コンクリート自体の品質確保・向上，②打ち込まれたコンクリートの均質性・密実性の確保，③コンクリートのひび割れ対策などがある。使用するコンクリートの特性を理解し，設計時（鋼材量，プレストレス導入，構造解析，温度応力解析等），施工時（適切な施工方法，計測，クーリング，養生等），施工後（排水設備，防水材，表面保護工等）の各対策でうまく補い合い，総合的にバランス良く，PC構造物の耐久性を高めることが重要である。

塩害やアルカリ骨材反応に対する効果を期待して，PC橋において高炉スラグ微粉末が利用される場合も多い。また，マスコンクリート対策として，従来の高炉セメントB種よりも比表面積を小さくするとともにスラグ混入量を増やした低発熱型高炉セメントも使用されている。これには，初期膨張を有し，コンクリートの収縮が若干小さくなるという効果もある。ただし，収縮補償用コンクリートには膨張材が利用されることが多く，橋梁においては，少数主桁橋の場所打ちPC床版のひび割れ対策を契機に，さまざまな部位に使用されている。

近年コンクリートの過大な収縮が問題となっており，これに伴い，収縮低減剤の使用が増えている。最近では，収縮低減剤を含むAE減水剤あるいは高性能AE減水剤の開発も進んでいる。しかし，収縮低減剤のなかには，その種類および使用量によってコンクリートの凍結抵抗性が著しく低下する場合がある。このため，凍結融解抵抗性が要求される環境条件下で使用する場合には注意を要する。

通常のコンクリートよりも，自己・乾燥収縮を大幅に低減したコンクリートも開発され始めている。「低収縮コンクリート」等と呼称されているが，明確な定義はなく，一般には膨張材と収縮低減剤を組み合わせたもの，さらに発泡



\* Toyooki MIYAGAWA

京都大学 大学院  
工学研究科 教授

剤、石灰岩系骨材、低熱ポルトランドセメント等を組み合わせたものがある。図 - 1 は、高強度コンクリートと低収縮型高強度高流動コンクリート（膨張材、収縮低減剤を使用）の収縮ひずみを比較したものである<sup>2)</sup>。

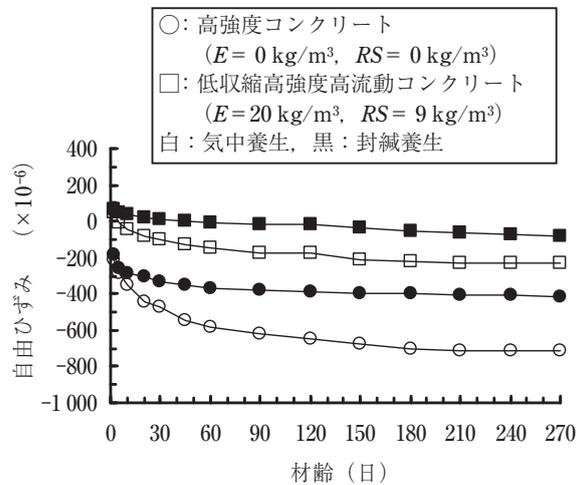


図 - 1 コンクリートの自由ひずみの経時変化

なお、以上述べたよりもさらに高耐久性を期待できるものとして、超高強度繊維補強コンクリートや複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料などがある。

## 2.2 補強材

鉄筋の防食性を高めたものとして、エポキシ樹脂塗装鉄筋が多く使用されている。鋼材自体の耐食性を高めたものにステンレス鉄筋がある。土木学会では、2008年に「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)」が、2010年には「エポキシ樹脂を用いた高性能PC鋼材を緊張材とするPC構造物の設計施工指針(案)」が制定されている。

PCに特有の補強材に関連する項目としてPCグラウトがある。グラウトは、PC鋼材がコンクリートと一体となって挙動するために付着性が要求されるが、同時に鋼材防食性が必要である。しかし、後者は過去においては無いがしるにされがちであり、現在種々のグラウト不良に起因する劣化が報告されている。この問題を解決するためにグラウトマニュアル等が整備されるとともに、プレグラウト鋼材が開発された。樹脂系プレグラウトPC鋼材は、写真 - 1 に示すとおり、PC鋼材の外側に未硬化のエポキシ樹脂を塗布し、さらにその外側をシースによって保護したものである。

## 3. 延命化

既設構造物の維持管理の場面では、耐久性の向上に対して延命化という言葉が用いられる場合が多い。PC橋の診断、補修補強に関する主要な技術指針類を表 - 1<sup>1)</sup> に示



プレグラウト PC 鋼より線



プレグラウト PC 鋼棒  
(樹脂製シース使用)



プレグラウト PC 鋼棒  
(鋼製シース使用)

写真 - 1 プレグラウト PC 鋼材

表 - 1 コンクリート構造物の維持管理に関連する技術指針類

対応技術	タイトル	発刊機関	発刊年月
維持管理全般	コンクリート標準示方書 [維持管理編]	土木学会	2008.3
	PC橋の耐久性向上マニュアル [第二部 維持管理編]	PC技協	2000.11
表面被覆・断面修復	塩害を受けた土木構造物の補修指針 (案)	土木研究センター	1988.5
	表面保護工法設計施工指針 (案)	土木学会	2005.3
	プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き (案) [断面修復工法]	PC建協	2009.9
電気化学的な方法	電気化学的防食工法設計施工指針	土木学会	2001.11
	ASRに配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン (案)	日本材料学会	2007.11
	塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書	土木研究所他	2008.3
補強	コンクリート構造物の補強指針 (案)	土木学会	1999.9
	炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針 (案)	土木研究所他	1999.12
	連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針	土木学会	2000.7
	外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル (案) [改訂版]	PC建協	2007.4

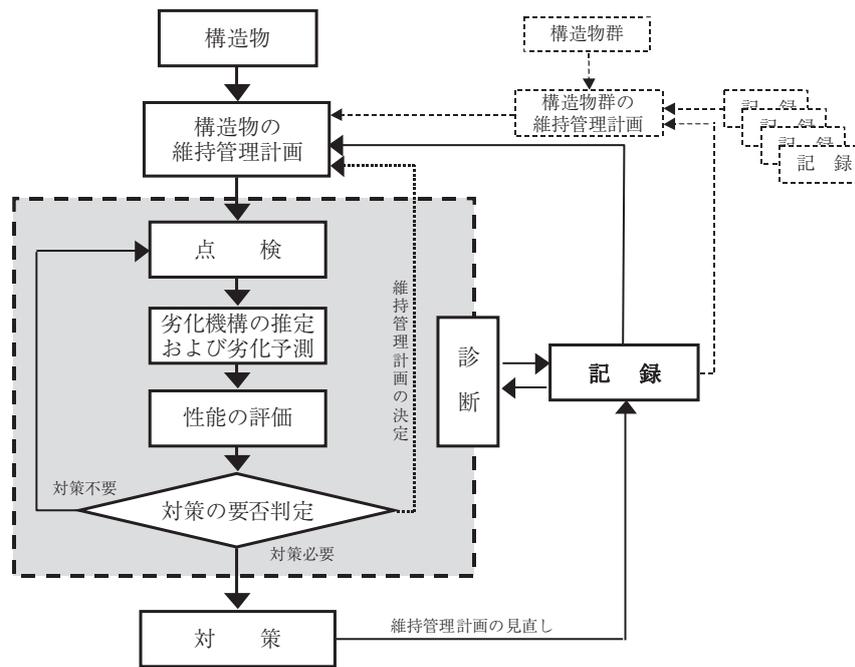


図 - 2 一般的な維持管理の手順

す。

維持管理の一般的な手順を図 - 2<sup>3)</sup> に示す。基本的な流れの当初で考慮される維持管理区分については、現在事後維持管理がもっとも一般的であろう。しかし、費用対効果の観点からは予防維持管理の方が経費的には安価にすむ場合が多い。予防は事後と比べて技術的とくに点検においては非破壊検査など高いレベルが要求される場合もあるが、対策についてはむしろ容易な場合も多く、重要度の高い構造物に適用されるのが一般的である。したがって、事後と予防を適切に組み合わせることによって、構造物群の維持管理費用は最小化を図ることができる。しかも、膨大な劣化構造物群に一時期にまとめて対策を施すような財政的に危機的な事態を避けることができる。これを適切に実行するためには適切な維持管理シナリオを元とした戦略的な維持管理が必要とされる。

### 3.1 診断

維持管理にあたっては、既設構造物の現在の性能および将来の性能を適切に予測する必要がある。劣化機構に基づいた適切な予測を用いた診断があって初めて適切な補修補強対策が可能となる。

診断技術の開発が比較的進んでいる腐食関係の診断に用いられる調査方法を表 - 2<sup>4)</sup> に示す。PC 特有の問題であるグラウト不良に起因する PC 鋼材の腐食および劣化においては、種々の非破壊検査法や削孔してボアホールカメラで目視するなどが試みられている。しかし、簡便さ、精度などにおいてまだ手法的には確立しているとはいえないのが現状である。

腐食した PC 鋼材では、引張強さの低下に比べ伸びの低下が著しいことに注意を要する。しかし質量減少率が 5% 程度までのものであれば設計上の疲労強度を有することが

表 - 2 鉄筋腐食に対する主な調査方法

調査の区分	調査の方法	評価項目
目視点検 (たたき調査含む)	ひび割れ, はく離, はく落, 錆汁, 遊離石灰, 変色, 漏水, 変位・変形, 鉄筋腐食状況 (鉄筋露出時)	構造物の外観上のグレード 鉄筋の腐食のグレード
破壊検査	はつり調査	鉄筋径 腐食減量
微破壊非破壊検査	自然電位法	自然電位
	交流インピーダンス法	分極抵抗
	直線分極抵抗法	分極抵抗
	四電極法	コンクリート抵抗率
	位相角法	電気 2 重層容量
非破壊検査 (研究段階)	電磁パルス法	
	AE法	
	電磁誘導加熱法	
埋設センサ	自然電位	腐食の可能性
	マクロセル腐食電流	深さ方向の腐食環境の変化を評価
	電気抵抗	
	電位差	
	分極抵抗	腐食の有無, 速度
pHセンサ	腐食環境	
非破壊非接触	近赤外分光法	コンクリート表層部の塩化物量
非破壊	電磁波法	かぶりコンクリートの塩化物量

確認されている (図 - 3)<sup>5)</sup>。また、塩害を受けた PC 部材の耐力力に関しては、これまで曲げ挙動に関する検討が中心であったが、最近では PC 鋼材を電食させた場合の PC 梁のせん断耐力や、PC 鋼材の端部グラウト未充てん部で破断した際の PC 部材の曲げせん断耐力に与える影響などの検討もなされてきている。

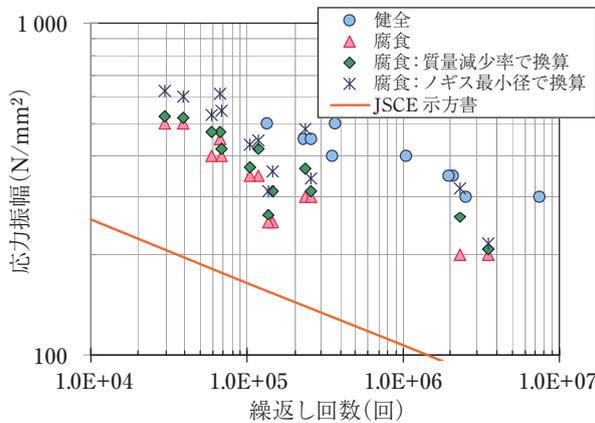


図 - 3 健全・腐食 PC 鋼線の S-N 関係

アルカリシリカ反応の予測については、鳥居らを中心とした精力的な検討がある。また、アルカリシリカ反応によって劣化し、鉄筋の曲げ加工部が破断したコンクリート構造物の安全性について、超音波透過法の斜角法を用いて劣化部コンクリートの範囲を推定し健全部を明らかにしたうえで、センサ移動型の電磁誘導法を用いて破断を探索した結果を用いた安全性評価も試みられている<sup>6)</sup>。

### 3.2 補修補強対策

最近、一般競争入札において、補修補強工事の入札が不成立となるものが多い。補修補強は、更地から建設できる新設とは異なり、はるかに細やかな知識・配慮が必要である。これに対して、正当な対価が配慮されていない場合も多いことがこの不成立の一因となっている。

具体的な補修補強工法については表 - 1<sup>1)</sup> に示す指針類を参考とすると良い。ここでは、代表的な劣化機構である塩害とアルカリシリカ反応を取りあげ、以下に対策技術の最近の動向について述べる。

#### (1) 塩害への対策

塩害は、海からの飛来塩分によるものと、路面に散布された凍結防止剤によるものが多い。また、過去には塩害の危険性に対する認識が低く、構造細目上十分なかぶり確保されなかったことも早期塩害劣化を招いた原因のひとつといえる。

塩害を生じた PC 橋への対応は、従来、表面被覆と断面修復を基本としたものであった。しかし、たとえば表面被覆では、コンクリート中に塩分が多く浸入している場合、残留している塩化物イオンあるいはその補修後の再拡散により腐食を生じさらにマクロセルにより加速された事例も報告されている。また、電気化学的脱塩工法は、PC 鋼材の水素脆化が懸念されることから PC 橋への適用が避けられてきたが、通電方法などの改良によってその適用が可能

となっている。このような背景より、技術指針類が近年着々と整備されてきている (表 - 1<sup>1)</sup>)。

また、断面修復を部分的に行う場合の鉄筋腐食による再劣化メカニズムや、塩害補修用材料として亜硝酸塩などを含んだ防食材の長期的な効果、撤去 PC 桁を使用して静的載荷条件下で連続通電方式による脱塩工法を適用した場合の補修効果など新たな知見が得られてきている。

なお、塩害を受けた ASR 構造物への電気化学的補修工法の適用については、「ASR に配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン (案)」<sup>7)</sup> を参考とするとよい。

PC 特有の問題である、グラウト不良の補修については、NEXCO、阪神高速道路 (株) あるいは (財) 鉄道総合技術研究所など種々の機関で真空充てん工法などを利用した形で提案されてきた。これらによる一定の補修効果は認められているものの、未充てん箇所の確認や確実な再グラウト法の確立、補修効果確認手法などまだ課題も多く残っている。

#### (2) アルカリシリカ反応 (ASR) への対策

ASR が初めて社会的な問題となった時点では、PC 橋では大きな問題とはなっていなかった。しかし、各地で ASR 劣化の事例が確認され、ASR によるコンクリート劣化が PC 部材に与える影響を明確にする必要があった。そこで、(株) プレストレスト・コンクリート建設業協会では、平成 15 年度から 20 年度にかけて関西支部を中心に学識経験者や構造物管理者の協力を得て ASR 対策検討委員会を設置し、PC 構造物の ASR 劣化に関する基礎的なデータの収集、確認試験による劣化メカニズムの検証および補強方法の検討を行っている (写真 - 2)。その結果、以下のことが明らかになった<sup>8)</sup>。



写真 - 2 ASR 劣化試験体

① ASR 劣化試験体で、ひび割れ密度が 6.0 m/m<sup>2</sup>、内部ひずみで 0.45 % を超えて劣化が著しく進行したが、プレストレス変化量は健全な試験体と同程度であった (図 - 4)。② 設計荷重レベルの載荷試験を行った結果、剛性低下が見られたものの平面保持性能、弾性挙動とも健全試験体と大きな差異はなく、また PC 部材としての復元性能を有していた。③ スターラップの破断を想定してせん断補強を行ったせん断耐力試験によれば、残存膨張が付加さ

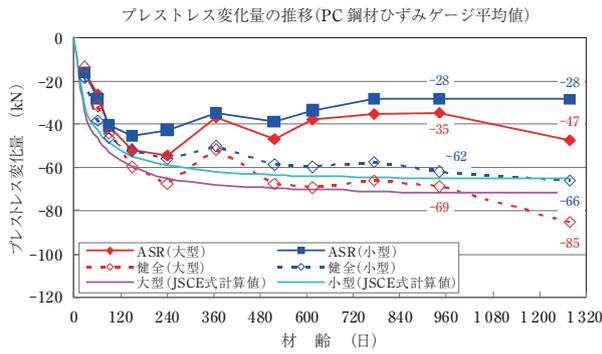


図 - 4 プレストレス変化量

れた状態でも所定の補強効果が得られた。

このほかにも、亜硝酸リチウムイオン内部圧入工法を実構造物に適用し、施工後4～5年経過時のASR抑制効果を検証したものや、ASRによる膨張の影響で多数の微細なひび割れが生じている場合の表面含浸材の補修効果を実験的に確認したものなど、ASR劣化を受けたコンクリート構造物の延命化を図るための有益な知見が得られている。

### 3.3 PC 構造物の補修補強上の留意点<sup>9,10)</sup>

PC 構造物の補修補強工法には、表面保護工法、断面修復工法、電気防食工法、脱塩工法、外ケーブルによる補強等、さまざまな工法がある。このうち、断面修復工法は、古くから行われていて現在でも一般的な補修方法として広く適用されている。しかし、その考え方の基本はRC構造物の補修を想定したものであり、PCを十分に意識したものとなっていない。そこで、PCに断面修復工法を適用する場合の留意点について以下に示す。

#### (1) 断面はつりの影響について

PCにはプレストレスによる応力が常時作用しているため、断面はつりの影響が鉄筋コンクリート部材の場合と異なることが想定される。PC鋼材のかぶりよりも深くまではつりを進めると、①部材の変形が上反りになるとともに、最終的に上縁側でひび割れが生じるようになる、②はつりに伴うプレストレスの再分配の影響が無視できなくなり、既設部の応力状態が大きく変化する、③部材の弾性短縮によりプレストレス力の減少が顕在化することなどが確認されている。

が確認されている。

#### (2) 断面修復材の選定について

断面はつりの影響がとくに顕著になるのは、残された既設部ではなく、プレストレスが解放されて無応力状態となる断面はつりをを行った部位である。この部位には、断面修復を行ったのみでは元よりもひび割れ耐力が低下することがあるため、外ケーブル補強を行うなどしてプレストレスを導入する必要が生じる場合がある。とくに大規模な断面修復を行う場合には、プレストレスの損失が大きくなると外ケーブルの必要本数が増すため、断面修復材として静弾性係数が大きく、かつ、収縮ひずみやクリープ係数の小さいものを選定するのがよい。

断面修復材はセメント系と樹脂系に大別され、さらにセメント系はコンクリート系とモルタル系に分類することができる。また、モルタル系の断面修復材には、ポリマーを含むもの、ひび割れ防止やはく落防止などの使用目的に応じて膨張材や短繊維などを含むものなど、さまざまなものが開発されている。これらのなかから、モルタル系断面修復材3種類、コンクリート系断面修復材(高流動コンクリート)1種類、および既設を対象としたPC橋に使用される通常のコンクリート(既設コンクリート、水セメント比40%)1種類を選び、これらの諸物性を調べた。その結果、モルタル系断面修復材の静弾性係数は13.5～26.5 kN/mm<sup>2</sup>であり、既設コンクリート(38.0 kN/mm<sup>2</sup>)の1/3～2/3程度の値であった。高流動コンクリートの静弾性係数には、既設コンクリートとの差異は認められない。また、収縮ひずみは、図-5に示すとおり、既設コンクリート

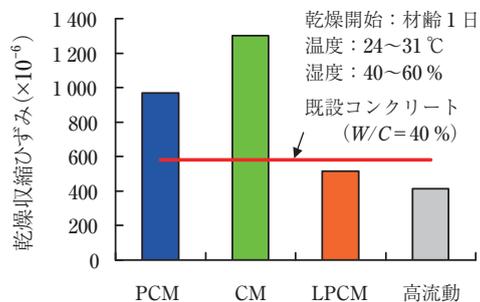


図 - 5 断面修復材の収縮ひずみ

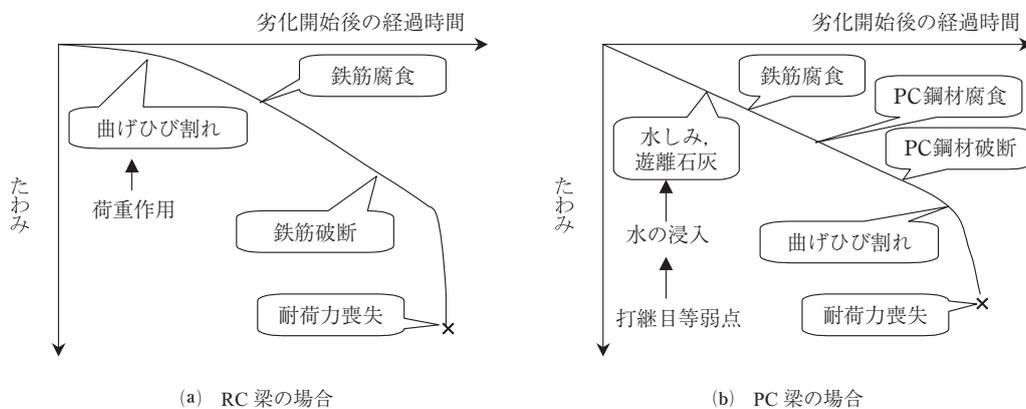


図 - 6 RC 梁と PC 梁の予想される劣化シナリオ

と同等のものが存在する一方で、1.7～2.2倍に達するものが存在する。なお、ここで比較した高流動コンクリートは、膨張材と収縮低減剤を使用し、収縮低減を図っているため、既設コンクリートよりも収縮ひずみが小さいが、それらの対策を講じない場合には収縮ひずみが大きくなる場合もある。

#### 4. おわりに

PC 構造物を“造りこなす”ことのみが要求された時代は去ったと考えてよい。構造物を“造り、使いこなす”ことが要求されている。ここで、どのように使いこなすかによって、診断、補修補強法に要求されるものは変わってくる。しかも、図-6に示すようにRCとPCの予想される劣化シナリオ<sup>11)</sup>は異なる。したがって、PCにふさわしいこれからの生涯のシナリオの明確化が必要とされている<sup>12)</sup>。なお、補修補強等に関わる最新情報は「補修、補強、アップグレード論文報告集<sup>13)</sup>」を参考とするとよい。

PC 構造物は社会活動、個人活動を支える基盤として市民社会を支えてきている。したがって、PCは本来“丈夫で美しく長持ち”しなければならない。創造的なシナリオを基にしたストックマネジメントに期待が寄せられるのである。

最後に本文を記述するにあたってご協力いただいた、渡辺博志(独 土木研究所)、手塚正道・二井谷教治(オリエンタル白石(株))、北野勇一(川田建設(株))、西垣義彦(株 ピーエス三菱)、藤田学・谷口秀明(三井住友建設(株))の各位に謝意を表して結びとしたい。

#### 参考文献

- 1) 宮川豊章, 渡辺博志, 手塚正道, 二井谷教治, 北野勇一, 西垣義彦, 藤田学, 谷口秀明: コンクリート構造物の長寿命化, PC 技術協会第 39 回技術講習会テキスト, pp.61-87, 2011
- 2) 谷口秀明, 浅井洋, 樋口正典, 三上浩: 膨張材と収縮低減剤による各種コンクリートの収縮低減効果, 第 16 回 PC の発展に関するシンポジウム論文集, pp.167-170, 2007
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2008.3
- 4) 上田隆雄, 宮川豊章: コンクリート構造物の劣化と問題点, 材料と環境, Vol.59, No.4, pp.111-116, 2010.4
- 5) 竹内祐樹, 中村英佑, 村越潤, 木村嘉富: 塩害の影響を受けた PC 桁から採取した腐食 PC 鋼材の力学特性に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集 V-049, 2009.9
- 6) 宮川豊章, 井上晋, 森川英典, 服部篤史, 山本貴士, 葛目和宏: ASR 劣化構造物安全性能評価手法の開発, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート, No.17-7, 新道路技術会議, 2008.7
- 7) 日本材料学会, 日本エルガード協会, コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会: ASR に配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン (案), pp.1-41, 2007.1
- 8) PC 建設業協会: ASR 対策検討委員会報告書, 2009.3
- 9) 北野勇一, 藤田学, 手塚正道, 渡辺博志: PC 構造物の補修技術 - 断面修復工法を適用する際のポイント -, コンクリート工学, Vol.48, No.5, pp.106-109, 2010.5
- 10) PC 建設業協会: PC 構造物の補修の手引き (案) [断面修復工法], 2009.9
- 11) PC 建設業協会: PC 構造物の維持保全 - PC 橋の予防保全に向けて -, 2010.3
- 12) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田弘, 服部篤史: 土木技術者のためのアセットマネジメント - コンクリート構造物を中心として -, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.24-43, 2008.2
- 13) 日本材料学会: コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.1-10, 2001.10 ~ 2010.10

【2011 年 1 月 31 日受付】



刊行物案内

## 第 39 回 PC 技術講習会テキスト

PC 構造物の長寿命化技術と課題

平成 23 年 2 月

定 価 6,000 円 / 送料 500 円

会員特価 5,000 円 / 送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会