

# 既設コンクリート構造物の予防保全を目的とした 維持管理の現状と提案

竹田宣典\*1・江良和徳\*2・濱崎 仁\*3・山口明伸\*4・田中博一\*5

**概要** コンクリート構造物の維持管理において、長寿命化やLCCの観点から変状が顕在化する前に対策を講じる「予防保全」の重要性が認識されているが、予防保全的な維持管理の実施は多いとは言い難い。その理由として、劣化の初期段階における調査、診断、補修技術が体系化されていないことや、予防保全の具体的な手順が示されていないことなどが挙げられる。本稿では、維持管理業務に携わっている技術者を対象にした予防保全に関する意識や実施事例に関する調査結果と普及に当たった課題、予防保全に適用可能な調査、診断、補修技術の現状と課題、予防保全型の維持管理の手順の提案とこれに基づくライフサイクルコスト試算例について述べる。

キーワード：維持管理、予防保全、劣化、調査、診断、補修、ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

社会資本の老朽化が問題視される中、コンクリート構造物の維持管理においては、これまで、劣化が進行した構造物の対策が急務であるとの考えから、主として「加速期」あるいは「劣化期」のコンクリート構造物を対象にした事後保全的な対策を想定した研究や実施が多くなされてきた。昨今、コンクリート構造物の維持管理を長寿命化やライフサイクルコスト（LCC）の観点から捉えた場合、変状が顕在化する前に対策を講じる予防保全的な対策を取ることが有効であるという認識が広まり、予防保全型の維持管理の重要性は広く認識されるようになってきている。

国土交通省は、2014年より約70万橋の道路橋および約1万本の道路トンネルについて、知識と技能を有する者が5年に1度、近接目視を基本とする点検を行うことを法令で定めた。その判定結果は、「支障は生じていないが予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい（判定Ⅱ）」の構造物は、橋梁で46%、トンネルで56%に上り、「早期に措置を講ずべき状態（判定Ⅲ）」の予備軍が実に50%程度も控えていることが判明した。しかしながら、判定Ⅲ、Ⅳの構造物に対する事後保全型の修繕に比べて、判定Ⅱの予防保全型の修繕着手状況は極めて少ない状況にある。

このように、実際に変状が顕在化する前に補修などを行う予防保全的な維持管理が行われることは多いとは言えないのが現状である。その一因として、劣化の初期段

階における調査、診断、補修技術の情報や評価方法が体系化されていないことや、予防保全型の維持管理を行うための具体的な手順が示されていないことが一因として挙げられる。近年、予防保全を視野に入れた調査技術や補修技術が意欲的に開発されており、これらの技術の予防保全的な維持管理への適用性や適用状況、予防保全を行うに当たった課題について把握することは極めて重要と考えられる。

このような背景のもと、日本コンクリート工学会では、「既設コンクリート構造物の予防保全を目的とした調査・診断・補修に関する研究委員会」（以下「予防保全研究委員会」と記述）を2018年度に発足させ、2年間の活動後、2021年3月に委員会報告書・論文集を発刊した。この委員会では、主として劣化過程の初期段階にあり、外観上の変状がまだ顕在化していない既設コンクリート構造物の維持管理を対象として、予防保全に関する調査、診断、補修技術の体系化と具体的事例の収集を行い、予防保全の手順を提案することを目的として調査・検討を行った。

本稿では、「予防保全研究委員会」の検討内容に基づき、①維持管理業務に携わっている技術者を対象にした予防保全に関する意識や実施事例に関するアンケート調査結果と普及に当たった課題、②予防保全に適用可能な調査、診断、補修技術の現状と課題、③予防保全型の維持管理の手順の提案とこれに基づくライフサイクルコスト試算例について述べる。

## 2. 予防保全の実態と課題

### 2.1 各機関、学協会における予防保全の考え方

予防保全の現状や実態を把握するにあたり、まず各機関や学協会における予防保全の考え方を整理した。土木分野では、「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕<sup>1)</sup>」において予防維持管理という用語を『構造物に劣化を発生

\*1 たけだ・のぶふみ／広島工業大学大学院 教授（フェロー会員）  
 \*2 えら・かずのり／極東興和㈱ 事業本部補修部長（正会員）  
 \*3 はまさき・ひとし／芝浦工業大学 建築学部 教授（正会員）  
 \*4 やまぐち・としのぶ／鹿児島大学学術研究院 教授（正会員）  
 \*5 たなか・ひろかず／清水建設㈱ 技術研究所 社会システム技術センター長（正会員）

あるいは顕在化させない、もしくは、性能低下を生じさせないための予防的処置を計画的に実施する『維持管理』として定義している。建築分野では、「建築物の耐久計画に関する考え方」<sup>9)</sup>において保全に関する用語が整理されており、予防保全という用語を『計画的に対象物の点検、試験、再調整、修繕などを行い、使用中の故障を未然に防止するために行う保全』と定義し、事後保全と対比するものとして位置づけられている。

国土交通省では、構造物の機能に支障が生じていないが、早期に措置を講ずることが望ましい状態において、早期発見・早期対策を行うことにより、ライフサイクルコストの最小化と構造物の長寿命化を図ることを目的とする考え方を予防保全と捉え、従来の「事後保全型」から「予防保全型」への転換を全国の道路橋へ展開している。東・中・西日本高速道路（NEXCO 3社）が管理する高速道路構造物を例にとると、橋梁構造物の維持管理は定期点検、詳細調査の結果を踏まえて劣化予測を行い、健全度の評価、判定を行ったうえで、対策の時期や方法を計画する予防保全型の維持管理を標準としている。

## 2.2 アンケートによる予防保全の意識調査

維持管理業務に携わっている全国の技術者を対象にした予防保全に関する意識や実施事例に関するアンケート調査を実施したところ、1,055件の回答が得られた。回答者の主な業種はコンサルタント59%、建設会社22%、官公庁9%であった。回答者は1級土木施工管理技士、コンクリート診断士、技術士、コンクリート技士、RCCM等の資格を保有している技術者が多く、経験年数も21年以上が61%、16~20年が11%を占めていた。

まず、予防保全の意識調査では、コンクリートの劣化過程、事後保全や予防保全の概念について十分に理解しているという回答が70~80%程度を占めており、これらは広く認知されていることが分かった（図-1）。予防保全の有効性を維持管理費（LCC）の低減および構造物の長寿命化の観点から問う設問に対しては、いずれも予防保全の有効性を十分に認識している回答が90%を超えている。大多数の技術者が予防保全は維持管理費（LCC）を

低減でき、かつ構造物を長寿命化できると認識していることが示された（図-2）。

次に、予防保全の事例調査では、回答者の56%が予防保全に該当する業務に携わった経験があり、その件数は2011年以降に増加傾向を示していた。予防保全の対象とした構造物は橋梁が全体の68%と最も多く、次いで護岸・港湾施設、擁壁・函渠、トンネルがそれぞれ8%を占めた。予防保全として実施した業務内容は点検・調査・診断が全体の41%、補修設計が37%を占めたのに対し、補修工事は16%にとどまっている。実施した予防保全業務によって構造物の長寿命化に繋がったかどうかを問う設問では、「確実に繋がった」および「繋がったと思う」とポジティブな回答が72%を占めた（図-3）。それに対し構造物のLCC低減に繋がったかどうかを問う設問では、「確実に低減できた」および「低減できたと思う」の回答が61%にとどまっており、「よくわからない」が28%と多いことも特徴的である（図-4）。これは予防保全に関する業務経験の実施時期の多くが2011年以降であり、実施後の経過期間が短く経済性評価が困難であること、評価方法そのものが明確でないことなどが主な原因であると考えられる。これまで予防保全に該当する業務に携わっ

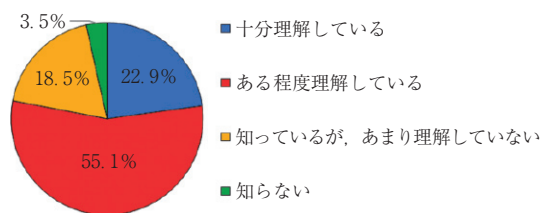


図-1 予防保全の概念を知っているか

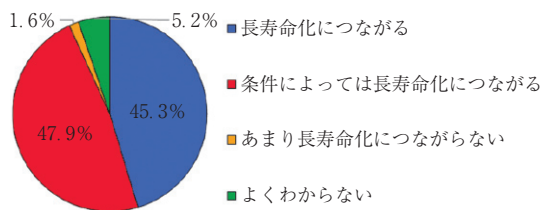


図-2 予防保全は長寿命化に繋がるか

## Preventive Maintenance of Concrete Structures, Current Status and Suggestions

By N. Takeda, K. Era, H. Hamasaki, T. Yamaguchi and H. Tanaka

Concrete Journal, Vol.59, No.10, pp.857~864, Oct. 2021

**Synopsis** In the maintenance of concrete structures, the importance of preventive maintenance from the viewpoint of service life extension and LCC is recognized, but the implementation of preventive maintenance is not widespread. The reasons for this are that investigation, diagnosis, and repair techniques for the early stages of deterioration have not been systematized, and specific procedures for preventive maintenance have not been presented. This paper describes the results of a survey on the awareness of preventive maintenance among engineers engaged in maintenance work, preventive maintenance implementation cases, and the challenges in the way of broader implementation, as well as the current state and issues concerning survey, diagnosis and repair technologies applicable to preventive maintenance. Based on the results of the above mentioned survey, a maintenance procedure is proposed along with an example of life cycle cost estimation.

**Keywords** : Maintenance, Preventive maintenance, Deterioration, Investigation, Diagnosis, Repair, Life cycle cost

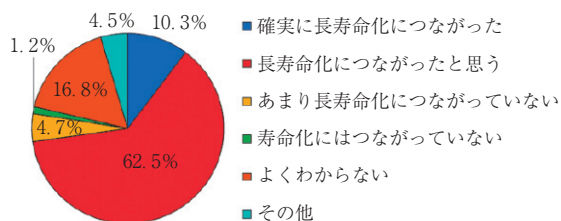


図-3 実施した業務で長寿命化に繋がったか

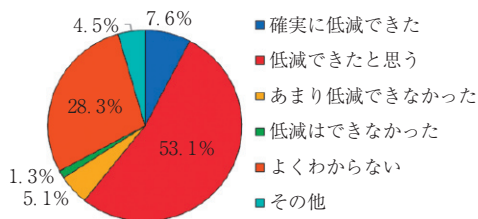


図-4 実施した業務でLCC低減に繋がったか

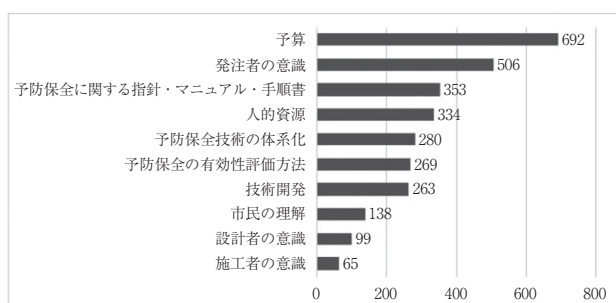


図-5 予防保全の普及に何が必要か

た経験がないと回答した44%の回答者においても、その理由の90%が「該当する業務の機会がなかった」であり、今後機会があれば予防保全に取り組んでみたいとの回答も87%を占めている。

予防保全の普及に必要な項目に関する問いに対しては、「予算」という意見が最も多かった。橋梁など多くの構造物の維持管理を行っている地方自治体において予算が不足していることは周知の通りであるが、一般には「予算」と並んで「人的資源」の不足も課題として挙げられることが多い。しかし、今回の調査では「人的資源」よりも「発注者の意識」、「予防保全に関する指針・マニュアル・手順書」を必要な要素とする意見が多く、「予防保全の有効性評価方法」、「予防保全技術の体系化」という声も多く見られた(図-5)。

以上より、予防保全に関する認識はある程度浸透しており、多くの技術者が予防保全に対し高い関心を持っているものの、予防保全の指針や評価方法の体系化が進んでおらず、これが、予算や人手の不足と並んで予防保全の普及の足かせとなっていることが示された。このことから、予防保全の認識の普及、拡大のためには、その情報の整理と体系化が重要であると考えられる。また、これらの整備された情報を積極的に発信していくことが発注者や施工者の意識改革にも繋がると考えられる。

### 3. 予防保全のための調査・診断技術の現状

#### 3.1 概要

実効的な予防保全のためには、構造物に発生している、あるいは発生する可能性のある劣化機構を予め想定したうえで、構造物の変状が顕在化する前や変状の程度が小さい段階で構造物の性能低下の状況を的確に把握し、将来の劣化進行予測や必要な対策を実施することが極めて重要である。具体的には、対象とする構造物に発生し得る劣化機構を選定したうえで、その劣化機構に対する環境外力の「作用力」と、構造物あるいはその部位・部材が有する「抵抗力」をそれぞれ適切に評価し、それら比較検討することで将来の劣化進行予測と対策の要否判断を行うことになる。

#### 3.2 考慮すべき劣化機構の選定

予防保全の対象として設定する主な劣化機構には、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、ASR、疲労などがある。予防保全においては、変状が顕在化する前や変状の程度が小さい段階での診断や対策が主眼となるため、点検結果に基づく診断だけでなく、設計時や供用中の環境や使用条件等から決まる構造物に対する作用、あるいは構造物が潜在的に保有する劣化要因などから考慮すべき劣化機構を選定し、それに応じた適切な調査・診断を行うことが重要となる。施工時点における反応性骨材の使用や海砂の除塩をはじめとする各種規定や基準類の有無や適切な施工が行われたかどうかの確認なども重要である。

点検によって局所的な変状が認められた場合は、まず、その変状が初期欠陥、損傷、劣化のいずれに起因するものかを検討する必要がある。劣化による変状が疑われた場合には、想定される劣化機構を、まずは環境条件や使用条件から決まる作用でスクリーニングにより、次に使用材料や施工性を中心とした要因を踏まえて点検で把握した変状の特徴と各劣化機構の特徴を比較することで、主要因となる劣化機構を推定することになる。

#### 3.3 環境外力の評価(塩害の場合)

ここでは、塩害に関する環境外力の例を紹介する。塩害に関する環境外力としては、飛来塩分や凍結防止剤などに起因する塩化物イオン供給量が重要な要因となる。しかし、飛来塩分は、海岸の状況や風況、陸地の地形や障害物の有無、標高によっても輸送量が異なるほか、構造物の形状によって飛来塩分の影響が大きい部位と小さい部位の差も生じる。予防保全としては、対象構造物の各部位への飛来塩分到達量を事前に評価することが極めて重要となる。以下に、現状の主な評価手法を示す<sup>3),4)</sup>。

##### (1) 直接的に飛来塩分を測定する方法

飛来塩分量を測定する方法として代表的なものに、土研式捕集器による方法がある。この測定方法では10 cm×10 cmのステンレス板に付着した塩分をタンクに貯留し、その塩分濃度を測定することにより飛来塩分量を測

定する。一方、ドライガーゼ法は、乾燥したガーゼに飛来塩分を捕集させる手法である。ガーゼに付着した塩分を精製水などに溶解させ、その塩分量を測定することにより飛来塩分量を評価する。

#### (2) 間接的に飛来塩分を測定する方法

構造物の表面に付着した塩分は全てが構造物の内部に浸透するのではなく、洗い流しやコンクリート多孔体への吸着により一部の塩分が浸透する。薄板モルタルによる捕集法では、実際の構造物に近い材料を使って浸透塩分量を評価する。一方、ガーゼ拭き取り法は、一定範囲(20×20 cm 程度)のコンクリート表面に付着した塩分をガーゼで拭き取ることで評価する。特別な機器が不要のため調査費用が安く、手軽に適用することができる。

#### (3) 蛍光 X 線による評価手法

高い測定精度を持っているが、測定範囲が微小面積の平均であることから、コンクリート面を測定する場合には骨材等の配置による塩分濃度の局所的な差異が大きくなる。その簡便さを活かして、立地条件別や部位別、さらに経時変化などを含めた環境外力の一次評価ツールとしての活用も効果的と考えられる。

#### (4) 数値シミュレーションによる手法

飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である3次元ランダムウォーク法を用いた手法が提案されている。数値計算による構造物に到達する飛来塩分粒子の総量予測モデルと組み合わせることで、より詳細な環境外力評価が可能となる。

### 3.4 構造物の状態評価 (塩害の場合)

予防保全においては、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布、鋼材の腐食状況あるいは鋼材の腐食リスクを評価することになる<sup>3),4)</sup>。

#### (1) 塩化物イオン濃度分布に基づく評価

部材から採取したコア試料やドリル削孔粉を化学分析して塩化物イオン濃度分布を定量する方法である。濃度分布が得られれば、Fick の拡散方程式の解をフィッティングさせることで表面塩化物イオン濃度と見掛けの塩化物イオン拡散係数を求め、それらに基づいて鉄筋位置での塩化物イオン濃度の将来予測から部材の状態を評価することができる。

#### (2) 鋼材の腐食状況に基づく評価

はつりによって鉄筋を直接目視で調査する方法、あるいは自然電位法や分極抵抗法といった電気化学的計測手法がある。自然電位法や分極抵抗法はいずれもコンクリート内部の鋼材の腐食状況を判定するものであり、分極抵抗法は腐食速度を定量できる。

#### (3) 鋼材の腐食リスク評価

鋼材の腐食リスクを評価する方法としては、鋼材腐食に関連する物質である塩化物イオンや液状水の量を間接的に非破壊で評価する方法がある。具体の測定方法としては、電気抵抗率法や近赤外線分光法等がある。

## 4. 予防保全における補修技術の体系化

### 4.1 概要

予防保全の考え方を適用し、効率的かつ経済的にコンクリート構造物の健全性を確保するためには、変状が顕在化する潜伏期や進展期の段階や変状の程度が小さい段階で適切にその状況を把握し、それに応じた対策(補修)を行う必要がある。また、効率性や経済性なども考えると、できるだけ簡便で効果的な調査・診断技術や補修技術が求められる。

予防保全の体系を構築するためには、潜伏期および進展期において補修を行う場合に必要となる技術について、現状でどの程度開発され、普及しているのかという現状の整理・分析が必要である。また、補修技術を選定する場合の考え方について、構造物が置かれる環境条件や構造物の状態、評価の時期などを考慮し、必要な性能項目とその評価方法、評価基準の検討が必要である。

本稿では、予防保全に適用可能な補修技術の中でも特に表面含浸工法による補修について、現状の技術の体系、変状の要因や程度に応じた材料・工法の適用性、工法・材料選定のための評価技術の現状について紹介する。その他の補修技術については、研究委員会報告書<sup>5)</sup>を参照されたい。

### 4.2 変状の要因とその程度に応じた補修工法・材料

予防保全を適切に効率よく実施するためには、変状・劣化の要因とその段階に応じた補修技術を選定することが極めて重要である。表-1に表面含浸工法の体系と変状要因・程度に応じた適用範囲を示す。

例えば、シラン系の表面含浸工法はコンクリート表層に吸水防止層を形成し、水や塩化物イオンの侵入を抑制する効果があることから、塩害、アルカリシリカ反応、凍害対策への適用が有効である。いずれも劣化過程が潜伏期において適用するのが効果的であり、既設、新設コンクリート構造物へ適用可能である。ただし、コンクリート内部は乾燥状態となることから、中性化に対しては効果が小さい場合もあり、中性化抑制対策として適用する場合は、他の補修工法との併用が必要となる。

けい酸塩系の表面含浸工法は、表層部を緻密化するとともに、アルカリ性を付与する効果もあることから、中性化、塩害、凍害対策への適用が有効である。アルカリシリカ反応への適用は、固化型であるけい酸リチウム系の適用が可能であるが、アルカリシリカ反応による膨張抑制を主目的とするのであれば、塗布型防錆材である亜硝酸リチウムを併用することで、更に効果が期待できる。

### 4.3 補修工法・材料の評価項目と評価方法

補修工法・材料の評価は、設計段階における工法・材料選定のための評価、施工段階での施工品質の評価、維持保全段階での効果の持続性の評価など、様々な段階で行われる。

表-1 表面含浸工法の体系と適用範囲

中分類	小分類	細分類	変状要因・程度に応じた適用範囲											
			塩害			中性化			ASR		凍害		化学的侵食	
			潜伏期	進展期	加速期前期	潜伏期	進展期	加速期前期	潜伏期	進展期	潜伏期	進展期	潜伏期	進展期
シラン系 表面含浸工法	シラン系	-	○	△	△	△	△	△	○	-	○	△	-	-
	シラン・シロキサン系	-												
	鉄筋腐食抑制シラン系	保護層形成系 防錆剤配合系	○	○	△	△	△	△	○	-	○	△	-	-
けい酸塩系 表面含浸工法	反応型けい酸塩系	固化型けい酸塩系	けい酸リチウム系	△	-	-	△	△	△	○	-	△	-	△
		けい酸ナトリウム系												
		けい酸カリウム系												
		けい酸塩混合系	○	△	△	○	○	△	△	-	○	△	-	or △
		副成分複合系 その他												
けい酸塩系+ シラン系含浸工法	-	○	△	△	○	○	△	○	-	○	△	-	or △	
その他	塗布型防錆材併用型	亜硝酸塩系	○	○	△	○	○	△	○	○	-	-	-	-
		その他塩系	○	○	△	○	○	△	○	○	-	-	-	-

※適用範囲凡例

○：適用対象，△：適用に検討が必要，×：適用すると支障等をきたす，-：適用対象外

表面含浸工法の場合、シラン系については、JSCE-K-571「表面含浸材の試験方法」やNSKS-04「浸透性吸水防止材」が規定されている。実構造物への含浸深さや吸水防止層の形成の確認については、採取したコアによる水中への浸せきによる水部分の測定、EPMAや熱分解ガスクロマト分析などが有効であるが、コア採取が必要であり、予防保全のために適用することは難しい場合がある。けい酸塩系については、JSCE-K-572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）」が規定されているが、施工品質や効果の持続性の評価には、表面硬度や透気試験が適用されている。

このように、現状では材料選定のための評価は行われているものの、施工品質や補修効果の持続性については非破壊、かつ標準化された方法が少なく、これらの試験方法の開発、標準化も今後の課題となる。

## 5. 予防保全を目的とした維持管理手順の提案

### 5.1 予防保全型維持管理手順の流れ

高速道路構造物、鉄道構造物、道路構造物、電力構造物、建築物における予防保全を目的とした維持管理体系の現状、予防保全に対する考え方、取組み事例について調査を行い、劣化機構に応じた予防保全を実施するための検討事項を整理した。その結果に基づき提案した「予防保全型維持管理手順の流れ」を図-6に示す。まず、標準調査（定期点検）の結果、対象とする構造物の状態が「まだ変状が生じていない」あるいは「軽微な変状が生じている」かどうかを判定する。軽微ではない変状が発生している場合には、事後保全型の維持管理に移行する。

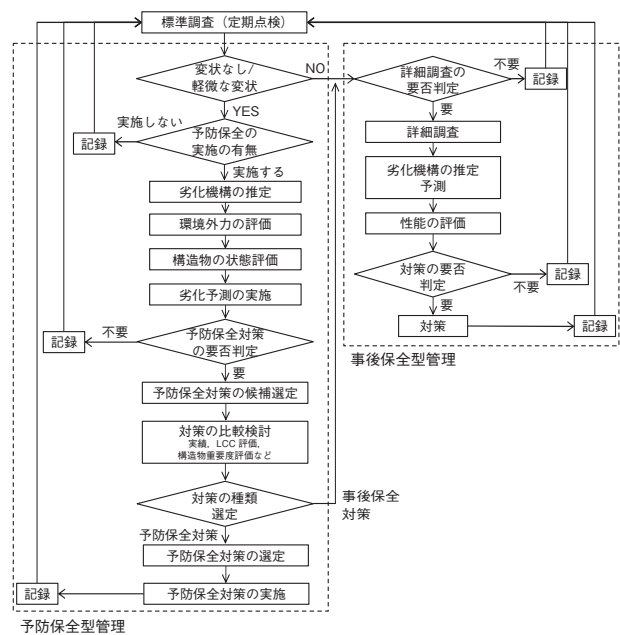


図-6 予防保全型維持管理手順の流れ

予防保全型維持管理の範囲に入っている場合には、次に維持管理を実施する管理者が予防保全を実施するかどうかを判断する。予防保全を実施すると判断した場合には、劣化機構の推定、環境外力の評価、構造物の状態評価、劣化予測の実施を行い、維持管理を実施する管理者が予防保全対策の要否判定を行う。予防保全対策の要否判定には、現状は「まだ変状が生じていない」あるいは「軽微な変状が生じている」状態であるが将来的に劣化が顕在化するかどうかを見極めることが重要である。なお、劣化機構の推定、環境外力の評価、構造物の状態評価、

劣化予測の実施については、定量的に詳細に実施することが基本であるが、これまでの同様な環境条件、劣化状況において信頼性のある評価が実施可能な場合には、実績などにより簡易的に実施してもよい。予防保全対策が必要であると判断した場合、予防保全対策の候補を選定し、実績、LCC評価、構造物の重要度評価などにより、対策の比較検討を行い、対策の種類を選定する。この際、予防保全対策と事後保全対策との比較を行い、維持管理を実施する管理者の判断により、事後保全対策を選定することも可能である。予防保全対策を選定した場合、比較結果から具体的な予防保全対策を選定して実施する。

## 5.2 予防保全を目的とした維持管理におけるLCC算定例

### (1) 概説

様々なケースを想定するため、予防保全を開始する時期、劣化環境条件および予防保全開始後の維持管理限界を検討要因とした。予防保全を開始する時期については、潜伏期、進展期、加速期前期とした。劣化環境条件については、腐食ひび割れが発生する進展期の終了時期を約35年、約25年、約15年となるように表面塩化物イオン量を設定し、それぞれの劣化速度を小、中、大とした。予防保全開始後の維持管理限界については、潜伏期、進展期、加速期前期とし、全24ケースについて維持管理シナリオを設定してLCCを算出した。さらに、劣化環境条件ごとに事後保全型維持管理を実施した場合の維持管理シナリオを設定してLCCを算出し、予防保全型維持管理を実施した場合と比較検討した。

### (2) LCC算定にあたっての前提条件

対象とした構造物は、土木学会委員会<sup>6)</sup>で実施されたケーススタディで検討された日本海沿岸部に建設された道路橋とした。劣化を評価する上部工の範囲は、主桁の側面および下面、床版の下面とした。上部工のコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は50%とした。上部工の主筋のかぶりは50mm、鉄筋径は28mmとし、配力筋のかぶりは30mm、鉄筋径は9mmとした。

対象とした劣化機構は、飛来塩分による塩害とした。潜伏期、進展期の劣化予測は、日本コンクリート工学会のLECCA2（コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム）を用いて行い、加速期前期から劣化期については、LECCA2により算出された塩化物イオン濃度から、日本コンクリート工学会のコンクリート構造物のLCC評価研究委員会報告書で示された方法<sup>7)</sup>により鉄筋の断面減少率を算出した。

対象とした補修工法は、表面含浸工法、表面被覆工法、断面修復工法、脱塩工法、電気防食工法の5種類とした。表面含浸工法については、含浸深さ、含浸した箇所の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を設定することで補修後の劣化予測が可能となる。既往の文献<sup>8)</sup>を参考にして、含

浸深さは6mm、含浸した箇所の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、コンクリートの0.01倍となる $0.005\text{ cm}^2/\text{年}$ と設定した。また、施工後20年間は含浸深さおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数は一定とし、20年ごとに再補修することとした。

表面被覆工法については、表面被覆材の膜厚と塩化物イオンの透過量を設定することで補修後の劣化予測が可能となる。膜厚は0.5mm、塩化物イオンの透過量は日本道路協会の塩害対策指針（C種）に相当するように $0.001\text{ mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ と設定した。また、施工後20年間は膜厚および塩化物イオンの透過量は一定とし、20年ごとに再補修することとした。

断面修復工法については、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を設定することで補修後の劣化予測が可能となる。断面修復材の見掛けの拡散係数は、土木学会表面処理工法設計施工指針案<sup>9)</sup>に示されている $0.25\text{ cm}^2/\text{年}$ とした。

脱塩工法については、脱塩工法施工後の塩化物イオン濃度分布を、脱塩工法施工前の0.4倍としてその後の塩化物イオン濃度分布を評価した。

電気防食工法については、外部電源方式を用い、施工後は、鉄筋の腐食は進行しないものとし、配線および電源装置を20年ごと、陽極材を40年ごとに取り替えることとした。

### (3) 維持管理シナリオの設定

予防保全を開始する際の補修時には、電気防食工法を除き、対象とする鉄筋位置の塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量より小さくなるようにした。鉄筋腐食の評価は、基本的にかぶり30mm、鉄筋径9mmの配力筋を対象とし、補修後の塩化物イオンの再拡散の影響が懸念される場合には、かぶり50mmの主筋についても評価した。構造物の劣化の進行状況は部材により異なることが考えられるが、簡略化するため、すべての桁と床版の劣化の進行は一律になるものと設定した。

予防保全型維持管理については、劣化速度3水準、予防保全開始時期3水準、予防保全開始後の維持管理限界3水準の合計24通りについて、予定供用年数で設定した維持管理限界を超えない維持管理シナリオを合計50ケース設定した。予防保全開始時期の劣化グレードを進展期とした場合の維持管理シナリオを表-2に示す。

事後保全型維持管理については、定期点検の際、剥離・剥落が確認され、鉄筋の腐食が進行し加速期後期に入っていると確認された時期に対策を実施することとした。事後保全型維持管理のシナリオを表-3に示す。

### (4) LCC算定の範囲とコスト

LCCは、初期建設コスト、維持管理コスト（点検・調査コスト、補修・補強に関わるコストなど供用時にかかるコストの合計）、撤去・更新コストの合計で基本的に算出される。さらに、機会損失費用など（維持管理を実施することによって失われる期待収入など）が考慮される

表-2 予防保全型維持管理のシナリオ  
(予防保全開始時劣化グレード進展期の場合)

No.	予防保全開始時劣化グレード	維持管理限界	劣化速度	予防保全開始時の補修工法		再補修時の補修工法		
				供用後	工法1	工法2	工法	
1	1	潜伏期	小	33年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工1回	
					脱塩工	表面含浸工	表面含浸工2回	
					電気防食工	—	陽極などの取替え	
2	2		中	24年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工2回	
					脱塩工	表面含浸工	表面含浸工3回	
					電気防食工	—	陽極などの取替え	
3	1		大	15年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工3回	
					電気防食工	—	陽極などの取替え	
4	2			進展期	小	33年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工
		断面修復工(50mm厚)	表面被覆工					
		脱塩工	表面含浸工				表面含浸工1回	
		5	中		24年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工1回
						断面修復工(50mm厚)	表面被覆工	表面被覆工1回
						脱塩工	表面含浸工	表面含浸工2回
6	1	大	15年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工2回		
				電気防食工	—			
7	2		加速期前期	小	33年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	
		断面修復工(50mm厚)				表面含浸工		
8	1	中		24年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工1回	
					断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工1回	
9	2	大		15年	断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工2回	
					断面修復工(50mm厚)	表面含浸工	表面含浸工2回	

表-3 事後保全型維持管理のシナリオ

No.	事後保全開始時劣化グレード	再劣化後維持管理限界	劣化速度	事後保全開始時の補修工法		再劣化時の補修工法		
				供用後	工法1	工法2	工法1	工法2
10	1	進展期	小	40年	断面修復工(50mm厚)		断面修復工(50mm厚)	
					電気防食工	断面修復工(50mm厚)	陽極などの取替え	
11	2		中	30年	断面修復工(50mm厚)		断面修復工(50mm厚)	
					電気防食工	断面修復工(50mm厚)	陽極などの取替え	
12	1		大	20年	断面修復工(50mm厚)		断面修復工(50mm厚)	表面含浸工2回
					電気防食工	断面修復工(50mm厚)	陽極などの取替え	

場合もある。また、LCC評価は期間が長いいため、異なる時間における貨幣価値の差をなくして比較するため、将来にかかるコストを割引率により現在価値に換算される場合もある。ここでは、構造物の予定供用年数を100年とし、予定供用期間中には撤去・更新は行わないこととした。また、機会損失費用や割引率は考慮しないこととした。したがって、LCC算定は、初期建設コスト、点検・調査コスト、補修コストの合計として実施した。

(5) LCC算定結果

劣化速度小で予防保全の開始時期を進展期とした場合のLCC算定結果を図-7に示す。維持管理限界を潜伏期とし脱塩工と表面含浸工を併用したシナリオNo.1-2および維持管理限界を進展期とし脱塩工と表面含浸工を併用したシナリオNo.4-3のLCCが事後保全と比較して半分程度と比較的小さくなる結果となった。予防保全の開始時期を進展期とした場合、断面修復工を適用する場合、

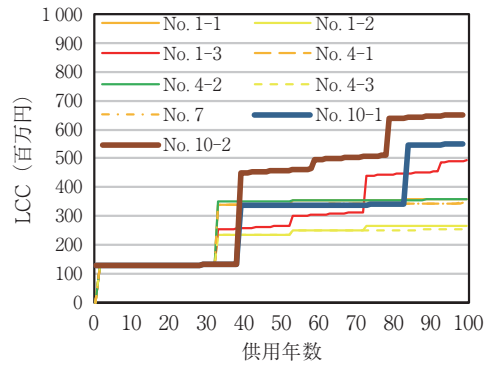


図-7 劣化速度小のLCC試算結果  
(予防保全開始時劣化グレード進展期の場合)

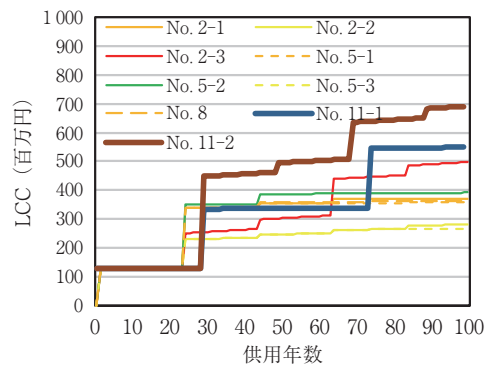


図-8 劣化速度中のLCC試算結果  
(予防保全開始時劣化グレード進展期の場合)

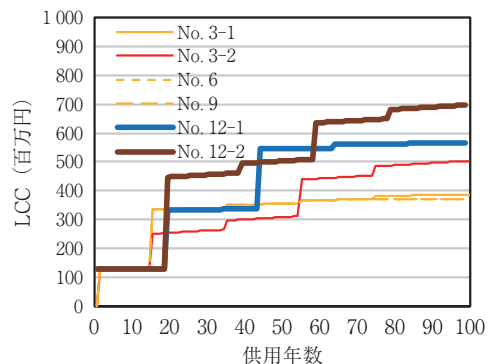


図-9 劣化速度大のLCC試算結果  
(予防保全開始時劣化グレード進展期の場合)

深さが50mmとなるため費用が高くなり、断面修復工をしない脱塩工の方が有利となった結果であると考えられる。また、予防保全開始時期を潜伏期とした場合には、表面含浸工の方が表面被覆工よりもLCCが小さくなる結果となったが、シナリオNo.4-1およびNo.4-2を比較すると、表面含浸工と表面被覆工のLCCはほぼ同等となる結果となった。これは、維持管理限界を進展期とすることで、表面含浸工および表面被覆工いずれにおいても、再補修をする必要がなくなることが影響しているものと考えられる。

劣化速度中で予防保全の開始時期を進展期とした場合のLCC算定結果を図-8に示す。脱塩工と表面含浸工を併用したシナリオNo.2-2とNo.5-3のLCCが事後保全と

比較して半分程度に小さくなる結果となった。これは、劣化速度小の場合と同様に、予防保全の開始時期を進展期とした場合、断面修復工を適用する場合、深さが50mmとなるため費用が高くなり、断面修復工をしない脱塩工の方が有利となった結果であると考えられる。電気防食を適用したシナリオ No.2-3は、事後保全と比較してLCCは9%小さくなる結果となった。76年間と長期間にわたり電気防食をすることでLCCは大きくなるものの、鉄筋腐食を確実に抑制することが可能であるため、構造物の重要度を考慮する場合、電気防食を適用するシナリオを選択の方が安全側と評価できる。

劣化速度大の場合のLCC算定結果を図-9に示す。劣化速度大については、事後保全と比較してLCCが最も小さくなる場合でも30%程度であり、劣化速度小や中の場合よりも予防保全を実施する効果が小さい結果となった。これは、劣化速度大のような厳しい環境下では、比較的早い時期に断面修復工と表面含浸工を併用した補修を実施する必要があるため、再補修回数が多くなるためと考えられる。そのため、断面修復工と表面含浸工を併用するシナリオと電気防食を適用するシナリオのLCCの差が小さくなる結果となった。したがって、劣化速度大のような厳しい環境下では、劣化の程度のばらつきなどを考慮すると、LCCは高いが鉄筋の腐食の進行を確実に防止できる電気防食工法を選択の方が安全側の評価と言える。予防保全で電気防食を適用する場合、事後保全と比較してLCCは約30%小さくなる結果となった。これは、事後保全の場合、断面修復工と併用する必要があるためであり、電気防食を適用する場合においても、予防保全の優位性が確認された。

劣化速度、予防保全開始時期などに関わらず、予防保全型維持管理を実施した場合のLCCは事後保全型維持管理を実施した場合のLCCよりも小さくなる結果となり、予防保全型維持管理の優位性が明らかとなった。しかし、予防保全管理型維持管理を実施する場合、劣化環境条件、開始時期、維持管理限界などによってLCCは大きく変化することがわかった。なるべく早い時期に開始し、その後の劣化をある程度許容するシナリオを設定すれば、LCCを小さくすることが可能であるが、実際の劣化のばらつきなどを考慮すると、LCCは若干高くなるものの、維持管理限界を潜伏期か進展期とするシナリオを選択の方が安全側であることが示された。

## 6. あとがき

本稿では、本学会「既設コンクリート構造物の予防保全を目的とした調査・診断・補修に関する研究委員会」の活動成果の概要を報告した。実務を担当する技術者を対象に行ったアンケート調査結果から、コンクリート構造物の事故の未然防止、長寿命化、LCC低減の観点から、予防保全型の維持管理を行うことが有効であるとの意見

が多く寄せられた。しかしながら、予防保全型の維持管理を普及させるには、予算、人的資源、発注側の意識、指針類の整備、技術の体系化などが必要であることが解った。今後、予防保全に適用できる技術を整理、体系化することが重要であり、これらの情報を発信していくことが発注者や施工者の意識向上につながると考えられる。近年、予防保全型の維持管理に適用できる環境外力の評価技術、構造物の調査・診断技術および補修技術が数多く開発されており、これらの技術を適切に用いることにより、効果的な予防保全型の維持管理が実施できるものと考えられる。

また、予防保全を目的とした維持管理手順の提案を行ったが、実施する際には予防保全のための対策技術の選定やLCC評価が重要となる。今後、調査・診断技術の高度化、補修技術選択のための試験方法の確立、LCC評価の蓄積と検証を重ねることにより、予防保全型の維持管理手順を確立させ、事後保全型から予防保全型の維持管理への移行が進むことを期待したい。

謝辞 本学会「既設コンクリート構造物の予防保全を目的とした調査・診断・補修に関する研究委員会」で実施しました予防保全に関する意識調査アンケートにご協力頂きました諸氏に謝意を表します。また、本委員会の活動にあたり、委員各位（野島昭二（中日本高速技術マーケティング）、上田洋（鉄道総合技術研究所）、遠藤裕丈（寒地土木研究所）、湯地輝（東洋建設）、宮内博之（建築研究所）、飯塚弘道（旭化成アドバンス）、花房賢治（ポゾリス ソリューションズ）、都築正則（大林組）、井上真澄（北見工業大学）、山本誠（住友大阪セメント）、位田達哉（国士館大学）、審良善和（鹿児島大学）、皆川浩（東北大学）、堤知明（国際廃炉研究開発機構）、松沢晃一（建築研究所）、順不同敬称略）、および顧問（十河茂幸氏（近未来コンクリート研究会））には、多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】、2018.10
- 2) 日本建築学会：建築物の耐久計画に関する考え方、1988.10
- 3) 土木学会：塩害環境の定量評価に関する研究小委員会（348委員会）委員会報告書、2015.11
- 4) 日本コンクリート工学会：自然環境下のコンクリート劣化に関するシンポジウム 委員会報告書・論文集、2018.9
- 5) 日本コンクリート工学会：既設コンクリート構造物の予防保全を目的とした調査・診断・補修に関する研究委員会報告書・論文集、2021.3
- 6) 土木学会：材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会（342委員会（第2期））委員会報告書、pp.287~387、2015.11
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリート構造物のLCC評価研究委員会報告書、pp.12~32、2012.6
- 8) 遠藤裕丈・島多昭典：寒冷環境下における約10年間のシラン系表面含浸材の効果に関する追跡調査、第56回（平成26年度）北海道開発技術研究発表会、2015.2
- 9) 土木学会：表面処理工法設計・施工指針（案）、2005.4