

研究委員会 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

竹田 宣典*1・江良 和徳*2・濱崎 仁*3・山口 明伸*4・田中 博一*5・十河 茂幸*6

要旨: 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がたい。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。本委員会では、予防保全の普及を目的として、劣化の初期段階にあり外観上の変状が顕在化していない既設コンクリート構造物を対象とし、予防保全に関する調査、診断、補修技術の体系化と実施事例の調査を行い、予防保全型維持管理の手順の提案を行った。

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

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適用が多くなされてきた。一方、コンクリート構造物の維持管理を長寿命化や LCC の観点からとらえた場合、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とることが有効であるという考え方が広まり、予防保全の重要性は広く認識されつつある。

しかしながら、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ての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、「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」を 2018 年度に発足させ、2 年間の活動を行ってきた。本委員会では、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活動した。また、維持管理業務に携わっている技術者を対象に、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

行い、予防保全の現状の把握と普及に当たっての課題を抽出した。さらに、近年、構造物の調査に適用が広がっているドローンを用いた調査技術の現状と予防保全への適用性についても整理を行った。

本研究委員会では、表-1.1 に示す構成とし、下記の 3 つの WG を設置し活動を行った。

【WG1 (体系化 WG)】 予防保全に適用可能な調査・診断・補修技術に関する情報を収集、整理、分類し、適用範囲、精度、信頼度、留意点などの検討

【WG2 (適用性評価 WG)】 予防保全のために必要な環境外力評価方法、調査診断技術の性能評価方法、補修効果と持続性の確認方法などの検討

【WG3 (手順書 WG)】 劣化要因毎の予防保全の考え方、予防保全に対する事例調査とライフサイクルコスト試算、予防保全型の維持管理の手順の検討

表-1.1 委員会構成

委員長: 竹田 宣典 (広島工業大学), 幹事長: 江良 和徳 (極東興和)	
顧問: 十河 茂幸 (近未来コンクリート研究会)	
【WG1: 体系化 WG】 主査: 濱崎 仁 (芝浦工業大学)	
飯塚 弘道 (旭化成FD パン)	花房 賢治 (BASF ジャパン)
山本 誠 (住友大阪セメント)	
【WG2: 適用性 WG】 主査: 山口 明伸 (鹿児島大学)	
宮内 博之 (建築研究所)	都築 正則 (大林組)
井上 真澄 (北見工業大学)	審良 善和 (鹿児島大学)
皆川 浩 (東北大学)	松沢 晃一 (建築研究所)
【WG3: 手順書 WG】 主査: 田中 博一 (清水建設)	
野島 昭二 (中日本高速マーケティング)	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)
位田 達哉 (国土館大学)	堤 知明 (国際廃炉研究機構)

*1 広島工業大学大学院 博士 (工学) (フェロー会員)

*3 芝浦工業大学 建築学部 博士 (工学) (正会員)

*5 (株) 清水建設 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 極東興和 (株) 営業本部 博士 (工学) (正会員)

*4 鹿児島大学学術研究院 博士 (工学) (正会員)

*6 近未来コンクリート研究会 工学博士 (名誉会員)

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〕」¹⁾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」²⁾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。

上記のほかにも鉄道構造物、港湾構造物、農業水利施設、電力施設における予防保全の考え方について調査した。また、建設関連分野以外のさまざまな技術分野における「予防保全」という用語の使われ方についても整理した。

2.2 本研究委員会における予防保全の検討対象

上述したとおり、学協会や構造物管理者における予防保全の考え方や対象などは必ずしも統一されておらず、現時点で「既設コンクリート構造物の予防保全」について明確に定義づけることは難しい。そこで本研究委員会においては、検討対象とする予防保全の内容を、『変状が将来的に顕著にならないようするための維持管理行為（調査、診断、対策などからなる）全般』とした。また、検討対象とする構造物を、『当該コンクリート構造物が劣化環境下であり、まだ変状が生じていない段階もしくは既に軽微な変状が局部的に生じている段階で、かつ将来的に劣化が顕在化すると予測される状態にある構造物』とした。

2.3 アンケートによる予防保全の意識調査

本研究委員会における活動を行うにあたり、全国の技術者を対象に予防保全に関する認識やその取り組みに関するアンケート調査を実施したところ、1055 件の回答が

得られた。

まず、予防保全の認識調査では、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の理解度が高い回答者の割合が 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。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、いずれも有効性を十分に認識している回答が 90%を超えており、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-2.1）。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」、「発注者の意識」、「予防保全に関する指針・マニュアル・手順書」、「人的資源」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」や「予防保全技術の体系化」という声も多く見られた（図-2.2）。

次に、予防保全の事例調査では、回答者の半数以上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 年以降に急激な増加傾向を示していた。実施した予防保全により維持管理費（LCC）を低減できたとする回答は 60%程度にとどまり、30%程度が「よくわからない」という結果であった。これは、施工後の経過期間が短く、LCC に対する評価が現状では困難なこと、評価方法が明確ではないことが主な原因であると考えられる。実施した予防保全が構造物の長寿命化につながったとする肯定的な回答は 70%程度であった。予防保全に該当する業務に携わった経験がない回答者でも、その 80%以上が予防保全への取組みに対し前向きであり、予防保全への関心の高さがうかがえる。

以上より、予防保全に関する認識はある程度浸透して

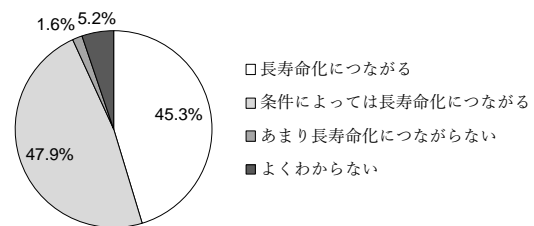


図-2.1 問「予防保全は長寿命化につながるか？」

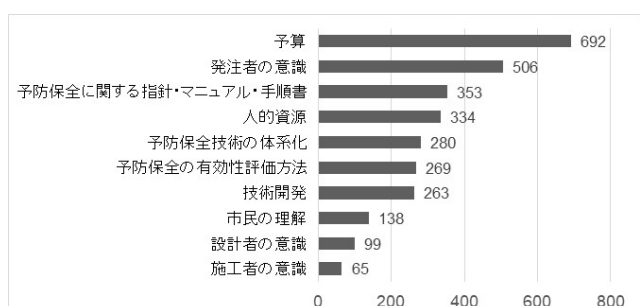


図-2.2 問「予防保全の普及のためには何が必要か？」

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つながると考えられる。

3. 予防保全のための調査・診断技術の現状

3.1 調査の概要

構造物の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、「潜伏期」や「進展期」などの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。

予防保全の観点からコンクリート構造物の調査・診断を行う際の考え方と、それに対する現状の技術について、「考慮すべき劣化機構の選定」、「環境外力の評価」、「構造物の状態評価」の各項目別に調査を行った。

3.2 考慮すべき劣化機構の選定

本委員会では、予防保全の対象として設定する劣化機構として、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、ASR、疲労の6つを取り上げている。表-3.1に各劣化機構の主な劣化要因と特徴、その劣化指標の例を示す。

図-3.1は、土木学会コンクリート標準示方書に示されている劣化機構推定に関する基本的な概念である。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。例えば、設計時あるいは実際の現地調査によって環境や作用が特定、把握できた場合には、表-3.2によって考慮すべき劣化機構を選定することができる。なお、構造物の設計や施工の状態に関する情報として、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となる。

また、点検によって局部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、表-3.1に示す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。なお、主な劣化機構による変状の外観上の特徴は表-3.3のようになる。

3.3 環境外力の評価

環境外力評価では、塩害に関する環境外力評価、凍害に関する環境外力評価および水掛かりの影響評価を対象に検討を行った。本稿では、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、鋼材の腐食反応機構

表-3.1 劣化機構と要因、特徴および指標の例¹⁾

劣化機構	劣化要因	特徴	劣化指標の例
中性化	二酸化炭素水掛かり	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中のpHを低下させ、さらに水分が供給されることによって鋼材が発錆し、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面減少を引き起こす。	中性化深さ 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面減少を引き起こす。	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、コンクリート表面からスケーリング、微細ひび割れおよびポップアウト等の形で劣化する。	スケーリング深さ 鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり、化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する。	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリシリカ反応 (ASR)	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性を有するシリカ鉱物等がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる。	膨張量 (ひび割れ)
疲労 (道路橋床版)	大型車通行量	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる。	ひび割れ密度 たわみ

に影響する水分と酸素の供給量，さらには温度やコンクリート抵抗などの詳細な情報も含まれるが，基本的には，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。

土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では，コンクリート中の鋼材周辺の塩化物イオン量を見掛けの拡散現象として推定する際に必要となる表面塩化物イオン濃度に対し，地域別および海岸からの距離に応じた参考値を示している。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，さらには標高によっても輸送量が異なるほか，同じ構造物であっても，その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が生じる。したがって，塩害に対する環境外力を予防保全の段階で把握するためには，その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。このような背景を踏まえ，近年，飛来塩分量に着目した環境外力評価に関する実験的あるいは解析的研究が数多くなされている。以下に，現状における主な飛来塩分の評価手法とその特徴を述べる。

(1) 直接的に飛来塩分を測定する方法

1) 土研式飛来塩分捕集器

海洋からの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 10cm×10cm のステンレス板に付着した塩分をタンクに貯留する。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。測定した飛来塩分量は，mg/dm/日（または mdd）という単位で整理される。ここに dm=100cm² であり，捕集部のステンレス板の面積を意味する。土研式捕集器を利用して，1984 年から 1986 年にかけて全国の沿岸部で飛来塩分計測が実施された。その成果を利用して，各地点の飛来塩分を予測する以下の式が提案されている。

$$C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6} \quad \text{式(1)}$$

C_{air} ：飛来塩分量， C_1 ：1km 換算飛来塩分量

2) ドライガーゼ法

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。塩分の捕集面積が土研式と同様のため，飛来塩分量の単位は土研式と同様になる。

(2) 間接的に飛来塩分を測定する方法

1) 薄板モルタルによる捕集法

実際のコンクリート構造物への塩分浸透を考慮すると，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。そのため，構造物へ

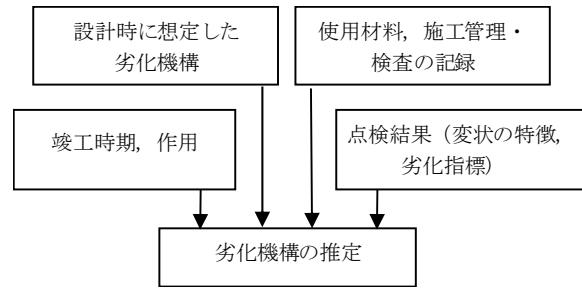


図-3.1 劣化機構の推定の概念¹⁾

表-3.2 環境，作用から推定される劣化機構

環境と作用		推定される劣化機構
環境	海岸地域	塩害
	寒冷地域	凍害，塩害
	温泉地域	化学的侵食
作用	乾湿繰返し	アルカリシリカ反応，塩害，凍害
	凍結防止剤使用	塩害，アルカリシリカ反応
	繰返し荷重	疲労，すりへり
	二酸化炭素	中性化
	酸性水	化学的侵食
	流水，車両等	すりへり

表-3.3 劣化機構による変状の外観上の特徴

劣化機構	変状の外観上の特徴
中性化	鋼材軸方向のひび割れ，コンクリート剥離
塩害	鋼材軸方向のひび割れ，さび汁，コンクリートや鋼材の断面欠損
凍害	微細ひび割れ，スケーリング，ポップアウト，変形
化学的侵食	変色，コンクリート剥離
ASR	膨張ひび割れ（拘束方向，亀甲状），ゲル，変色
疲労（床板）	格子状ひび割れ，角落ち，エフロレッセンス
すりへり	モルタルの欠損，粗骨材の露出，コンクリートの欠損

の飛来塩分量を評価するためには，コンクリートに近い材料を用いることが適切な飛来塩分量の把握につながると考えられる。佐伯らは，モルタル円盤供試体や小型薄板モルタルを同一構造物の様々な位置に接着して構造物内の局所的環境作用を評価している。

2) ガーゼ拭き取り法

日本道路協会の「ガーゼ拭き取り塩素イオン検知管法」に準じた評価手法であり，一定範囲（20×20cm 程度）のコンクリート表面をガーゼで拭き取り，拭き取ったガーゼを脱イオン水に浸け，塩素イオン検知管を用いて塩素イオンを検出する方法である。特別な機器が不要である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

分析対象試料に X 線を照射した際に発生する 2 次 X 線（蛍光 X 線）を測定して，元素の定性あるいは定量分析を行うものである。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部

的な差異が大きくなる。なお、携帯型を用いる場合は、含有塩化物イオンの濃度の精緻な分析よりも、むしろその簡便さを活かして、立地条件の違いや部位ごとの違い、経時的な変化などを含めた環境外力の把握を目的とした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。この手法は、予め構造物の立地位置における地形と風速、さらに構造物の形状から計算される仮想風速場を用意しておき、その仮想風速場に大量の塩分粒子モデルを放出し、平均流と乱流によって運ばれる塩分粒子の動きを3次元数値シミュレーションによって評価するものである。構造物に到達する飛来塩分粒子の総量を、飛来塩分の移流拡散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

構造物の状態評価手法についても、表-3.1 に示した各劣化機構について現状の技術を整理した。前節同様に、塩害を対象とした場合の概要を紹介する。

一般的に、塩害による劣化が観察されるのは、鋼材腐食に伴うひび割れが発生した後の加速期以降の時点である。したがって、将来的に劣化が顕在化すると予測される時点での部材の状態は表-3.4 のようになる。

構造物がいずれの状態であっても、将来的に劣化が顕在化すると予測される状態において対策の要否を判定しようとする場合、調査対象のほとんどは劣化が顕在化していない。したがって、外観の目視調査のみでは対策の要否を判定できない。そのため、構造物の状態を評価するためには、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調査することになる。報告書には、それぞれの調査方法と評価方法として以下の内容を示している。なお、既出の報告書にも参考となる情報が整理されている。

(1) 塩化物イオン濃度分布に基づく評価

実務において広く利用されているのは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り、JIS A 1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法) や JSCE-G 573 (実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法) 等が用いられている。また、コア試料に対する適用となるが、分析結果の分解能が極めて高い JSCE-G 574 (EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法) もある。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

表-3.4 予防保全の対象となる部材の状態

潜伏期	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材位置の全塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度未満。 鋼材腐食は発生していない。
進展期	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材位置の全塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度以上。 鋼材腐食は発生しているが、腐食生成物の発生に伴う膨張圧は小さい段階であり、腐食ひび割れは生じていない。
加速期 (前期) (1)	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材位置の全塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度以上。 鋼材腐食により生じた腐食生成物の膨張圧によって、腐食ひび割れ、浮き、剥離・剥落が部材の一部で生じている。

注(1)ひび割れが発生していたとしても局部に留まっている状態

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調査

鋼材の腐食状況を評価する方法としては、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方法である。

(3) 鋼材の腐食リスク評価

上記以外の手法によって塩害による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。これらの諸量を非破壊かつ短時間で計測することができれば、面的な鋼材リスクの情報を取得することができ、対策の要否判定あるいはその補助的情報として用いることができる。具体的測定方法としては、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 検討概要

(1) 検討の方針

従来のコンクリート構造物の維持管理においては、劣化が顕在化した時点で対策が検討され、さらに予算措置等も調査の結果に基づいて行われるため、事後保全を前提とした維持管理の体系となっていた。そのため、そこで実施されている調査・診断技術や補修技術は、変状が顕在化した状態を前提としており、予防保全の考え方を適用するために体系化されたものとはなっていない。平成29年度に実施したFS委員会では、潜伏期および進展期において調査・診断や補修を行う場合に必要となる技術について、現状の開発・普及の状況を調査した。本研究委員会では、補修工法の現状について、さらに詳細な分類、適用が可能な劣化の状態、適用上の留意点等についてとりまとめた。また、補修技術の選択やその後の維持管理のための補修技術の評価方法について整理し、現状分析と課題の抽出を行った。

(2) 対象とした構造物の状況と補修技術

本委員会では、予防保全の検討対象を「変状が顕著にならないようするための維持管理行為全般」とし、検討対象構造物を「当該コンクリート構造物が劣化環境下にあり、①まだ変状が生じていない段階、②既に軽微な変状が局部的に生じている段階で、かつ将来的に劣化が顕在化すると予測される状態にある構造物」と位置付けている。表-4.1 に検討の対象となる劣化と劣化の状態を示す。潜伏期にはいずれの要因についても外観上の変状は見られない。進展期においては、ASR や凍害については微細なひび割れなどの変状が生じた状態である。

したがって、本研究委員会では、予防保全に適用可能な補修技術として、「表面含浸工法」、「表面被覆工法」、「ひび割れ補修工法」、「電気化学的補修工法」を対象として検討を進めた。また、予防保全の考え方に基づいて維持保全が実施されている、下水道構造物の補修材料・工法についても調査の対象とした。

(3) 検討の進め方

補修工法の現状について、体系的な分類、適用が可能な劣化の状態、適用上の留意点等についてとりまとめた。とりまとめは、表-4.2 に示すフォーマットで実施した。また、補修技術の材料や工法の選定のための評価技術についても検討した。評価の目的やその時期としては、材

料・工法の選定（設計時）、施工品質の評価（施工管理）、性能の継続性の評価（維持管理）などがあり、表-4.3 のようなフォーマットにより補修技術の評価項目や評価方法についてとりまとめた。

4.2 補修技術の体系化に関する調査結果

調査結果およびそのとりまとめについて、ここでは、誌面の都合から主に表面含浸工法について紹介したい。

一口に表面含浸工法といっても、材料の種類や反応メカニズムによって区別され、適用範囲や適用条件なども異なる。また、最近では防食効果を期待した材料・工法も提案されている。委員会報告書では、これらを体系的に分類し、それぞれの材料や工法の概要をまとめている。

表-4.4 に劣化の要因と程度に応じた適用範囲を示す。工法・材料ごとに適用範囲が異なることなどを整理して表している。例えば、中性化に対する対策を考えた場合、シラン系の表面含浸材は、コンクリートの表層部を乾燥した状態とするため、中性化抑制の観点からは有効な対策とはならない。ただし、鋼材腐食抑制の観点からは、乾燥状態になることが有効に働くため、他の劣化因子の状況や他の工法との併用などにより有効な対策となり得る。また、ASR のように進展期にあつて微細なひび割れ等が生じている場合には、シラン系やけい酸塩系の含浸材は有効ではなく、亜硝酸リチウム等の ASR 抑制効果の

表-4.1 劣化過程と劣化の状態（中性化・塩害・ASR・凍害）

劣化過程	劣化の状態			
	中性化	塩害	ASR	凍害
潜伏期	外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界以上	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下	ASR による膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず、外観上の変状が見られない。	凍結融解作用を受けスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生するまでの期間
進展期	外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界未満・腐食が開始	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始	水分とアルカリの供給により膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生し、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる。しかし、鋼材腐食による錆汁は見られない。	スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生し、骨材が露出するまでの期間

表-4.2 補修技術に関する調査フォーマット

大分類	中分類	小分類	概要	適用範囲*								適用にあつての			
				塩害		中性化		ASR		凍害		化学的侵食		短所・留意点	長所・優位性
				潜伏期	進展期	潜伏期	進展期	潜伏期	進展期	潜伏期	進展期	潜伏期	進展期		
工法名	原理・使用材料等による工法の分類	方式・適用方法等による細分類	分類された工法の概要	○/△/×/ー											

表-4.3 補修技術の評価方法に関する調査フォーマット

補修工法		評価方法				適用		
大分類	中分類	評価項目	試験方法	試験時期	規格値等	①材料・工法の選定（設計）	②施工品質の確認（施工管理）	③性能の継続性の確認（モニタリング）
補修工法の分類		評価方法の概要を整理				○ / -		

ある成分をひび割れから含浸させる併用型の工法によって有効な対策とすることが出来る。このような技術的な知見等を踏まえて適用範囲を検討した。

また、各材料・工法を適用する際の留意点や長所・優位性については、表-4.5 の例のように整理した。ここでは、けい酸塩系の表面含浸工法についてのみ例を紹介しているが、各材料・工法について、技術的な情報を整理している。このように、材料の選定や施工に関わる留意点、有意点などが整理されることにより、予防保全により維持管理を行う技術者が、計画、設計、発注、管理などを行う場合の有益な情報になることを期待している。

4.3 補修材料・工法の評価と今後の課題

材料・工法の評価方法は、適切な材料・工法選択のために必要不可欠である。本研究委員会では、現状の評価項目と評価方法およびその適用目的について調査し、現状分析と課題の抽出を行った。

表面含浸工法に関しては、シラン系では、JSCE-K-571「表面含浸材の試験方法(案)」や NSKS-04「浸透性吸水防止材」が規定され、材料選択の参考とされている。また、施工品質の確認や性能の継続性については、東・中・西日本高速道路(株)の構造物施工管理要領における、散水後の表面抵抗式水分計による方法などが参考にできる。しかしながら、実際の含浸深さの確認については、プルオフ法等による確認や、試料を採取して EPMA、ガスクロマトグラフィーによる確認などが実施されている例はあるものの、非破壊かつ比較的实施が容易で標準化された方法がない。

けい酸塩系では、JSCE-K-572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」や JIS の耐磨耗性試験などが材料選定のための評価としては有効である。施工品質と性能の継続性の確認については、表層部のアルカリ付与性を試薬や蛍光 X 線分析で分析する方法、試料採取によりイオン

表-4.4 表面含浸工法の適用範囲

中分類	小分類	細分類	適用範囲										
			塩害		中性化		ASR		凍害		化学的侵食		
			潜伏期	進展期	潜伏期	進展期	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	固化型 けい酸塩系	けい酸リチウム系	△	—	△	△	○	—	△	—	△	—	
	反応型 けい酸塩系	けい酸ナトリウム系											
		けい酸カリウム系											
		けい酸塩混合系	○	△	○	○	△	—	○	△	— または △	—	
		副成分複合系 その他											
けい酸塩系+シラン系含浸工法	—	—	○	△	○	○	○	—	○	△	— または △	—	
その他	塗布型防錆材併用型	リチウム系	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	
		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-4.5 表面含浸工法の適用上の留意点(けい酸塩系表面含浸材のみ抜粋)

中分類	小分類	細分類	短所・留意点	長所・優位性
けい酸塩系表面含浸工法	固化型 けい酸塩系	けい酸リチウム系	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート表面に表面含浸材の含浸を阻害するような物質がある場合、適切な方法で除去する。 ・新設構造物に適用する場合、所定の期間養生した後に、また既設構造物においても、コンクリート表面をできるだけ乾燥状態とする。(含水率約 6%以下) ・施工後の乾燥に伴って効果を発揮するため、施工箇所に雨がつかないようにするなど、所定の期間養生が必要。 ・含浸深さは下地となるコンクリートの配合や乾燥状態に影響を受ける 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の外観を損なうことなく、比較的簡便に施工できる。 ・中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与し、脆弱なコンクリート表層を固化する。
		副成分複合系	<ul style="list-style-type: none"> ・施工後の乾燥に伴って効果を発揮するため、施工箇所に雨がつかないようにするなど、所定の期間養生が必要。 ・含浸深さは下地となるコンクリートの配合や乾燥状態に影響を受ける 	
	反応型 けい酸塩系	けい酸ナトリウム系	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート表面に表面含浸材の含浸を阻害するような物質がある場合、適切な方法で除去する。 ・新設構造物に適用する場合、所定の期間養生した後に、また既設構造物においても、コンクリート表面をできるだけ湿潤状態とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の外観を損なうことなく、比較的簡便に施工できる。 ・中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与し、脆弱なコンクリート表層を固化する。
		けい酸カリウム系	<ul style="list-style-type: none"> ・新設構造物に適用する場合、所定の期間養生した後に、また既設構造物においても、コンクリート表面をできるだけ湿潤状態とする。 	
		けい酸塩混合系	<ul style="list-style-type: none"> ・防水を目的とする場合、施工後、2週間以上湿潤状態を保持する。 ・固化を目的とする場合、施工面が乾燥し硬化するまで、降雨などにより流されないよう養生する。(概ね 4~8 時間) ・降雨が予想される場合は、早期に施工を切り上げるか、施工箇所に雨がつかないように措置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・組織を緻密化
	副成分複合系 その他			

分布を分析する方法などが実施されている。また、表層部の改質を反発硬度や透気性などによって評価している例もある。しかしながら、シラン系と同様に簡便で標準化された方法はない。

表面被覆工法、ひび割れ補修工法などについても、材料選定のための評価方法や品質基準はあるものの、施工状況や性能の持続性を、非破壊かつ簡便に評価する方法は標準化されていない。

一方で、電気化学的補修工法については、復極量試験による電位シフト量によって、補修による防食効果やその持続性の評価が可能であり、発注の条件として長期のモニタリングを行うことが前提となっている場合もある。予防保全は、必ずしも劣化因子を完全に排除するような維持管理方法ではないため、性能や再劣化を随時モニタリングできることが重要なポイントとなる。

今後の課題として、材料・工法の選択のための評価方法については、試験方法が複数提案されており、それらの整合性を確認することや、評価によって得られる試験結果が実際の要求性能とどういった関係にあるのかについて知見を重ね、それらを設計に活用するための体系が必要になると思われる。また、施工品質や性能の持続性の評価については、非破壊的かつ簡便に必要な性能を評価できる手法の開発や、それらを標準化することが課題であるといえよう。

5. 予防保全を目的とした維持管理の現状と維持管理手順の提案

5.1 各機関における予防保全を目的とした維持管理体制の現状

(1) 高速道路構造物（NEXCO）における予防保全

NEXCO が維持管理する既設橋梁の維持管理は、設計要領第二集橋梁保全編³⁾において予防保全を標準としている。さらに、コンクリート構造物の補修、補強工法の選定においては、ライフサイクルコスト（LCC）を考慮したうえで、計画的に予防保全対策を行うこととしている。

コンクリート橋の変状対策の流れにおいて、点検の結果、変状が確認されていないコンクリート構造物に対しては、将来の性能低下を予測し、必要に応じて、適切な時期に予防保全対策を実施することとしている。具体的な予防保全対策としては、前処理、断面修復、コンクリート表面保護工、はく落防止対策、塩害対策、電気防食工法などが挙げられる。

(2) 鉄道構造物における予防保全

鉄道構造物においては、平成 19 年に発刊された鉄道構造物等維持管理標準⁴⁾（以下、維持管理標準と呼ぶ）において、鉄道構造物全体を対象とした維持管理の体系

化が進められた。

維持管理標準における構造物の検査の区分は、初回検査、全般検査、個別検査、随時検査と定められている。それぞれの検査の結果、構造物の変状の程度に応じて健全度を判定し、必要な措置を講じることを基本としている。したがって、変状の発生前に保全を行うことを予防保全と定義する場合には、いわゆる事後保全を基本とした体系になっている。このように、維持管理標準における予防保全の定義は必ずしも明確ではないが、構造物が運転保安、旅客および公衆などの安全を脅かすことのないように、変状がみられないか軽微な段階で、将来の変状発生や進行を防ぐために措置を講じることを予防保全として取り扱っているといえる。

(3) 道路構造物における予防保全（北海道開発局）

北海道開発局では、「事後保全型」から「予防保全型」の管理への転換による橋梁の長寿命化は、道路橋の架け替え時期や維持・補修予算の平準化、ライフサイクルコストの縮減が期待されることから、大規模な補修や架け替えに至る前に長寿命化対策を実施している。道路橋の点検は、管理する全ての橋で実施している。点検結果は、構造物の変状に応じて、9 段階の判定区分で整理している。定期的に点検を行って早期に損傷を発見し、損傷の程度、第三者被害の可能性、自動車交通に与える影響の大きさ、迂回路の有無など道路ネットワーク機能に与える影響度などを総合的に判断し、重要度の高い箇所から補修を実施している。

(4) 電力構造物における予防保全

電力分野におけるコンクリート構造物の種類は、水力分野のダム、水路等、火力／原子力分野の取放水路、港湾等、流通分野の鉄塔基礎、洞道等、非常に多く存在する。コンクリート構造物の劣化要因は多岐に亘るが、火力／原子力発電設備では塩害、水力発電設備では摩耗や凍害が主な劣化要因と言える。

電力設備において許容できない性能低下とは、「供用期間中に公衆災害を引き起こす可能性や、電力供給に支障を生じさせる可能性があるような性能低下」であり、そこに至らないように、維持管理フローや判定基準に従って、適切な時期に適切な措置を講じるように維持管理することを原則としている。さらに、構造物重要度や変状程度に応じて、直ちに措置が必要なものと重点的に点検するもの等に区分して、許容できない変状を生じさせない原則の下で、補修要否の判定や実施時期を設定し、一時期に補修が集中しないよう維持管理費用の平準化を図っている。これは、変状をある程度許容するという点で事後保全であるが、許容できない性能低下に至らせないという点では、予防保全を前提とした体系になっているとも言える。

(5) 建築物における予防保全

建築物のなかでも、特にマンション建物の維持保全に関しては、国土交通省よりマンション管理規約のフォーマットである「マンション標準管理規約」が策定されている。この規約の維持保全のプロセスで行う修繕計画のうち、10年から15年程度おきを実施する大規模な修繕として、鉄部等塗装工事、外壁塗装工事、屋上防水工事、給水管工事、排水管工事などがある。このように、建築物の多くは、コンクリート躯体の変状に関わらず、定期的な調査診断や大規模修繕を計画的に進めることによって、外壁塗装の改修が定期的に行われるため、結果的に予防保全行為が行われているといえる。

5.2 劣化機構に応じた予防保全を実施するための検討事項

(1) 塩害

予防保全の考え方については、「変状を将来的に顕著にさせない」ことを目的とした場合、潜伏期、進展期、加速期前期が予防保全を行うタイミングと言える。

予防保全を目的とした必要な調査事項については、外観の変状、塩化物イオン濃度、鋼材の腐食、環境条件などがあり、劣化過程に応じて選択する必要がある。

予測・性能の評価については、潜伏期の期間を推定するために行う塩化物イオンの拡散予測、鉄筋腐食が開始する進展期から腐食ひび割れが発生する加速期前期までの期間を推定するための鉄筋腐食の進行予測がある。

(2) 中性化

予防保全の考え方については、「変状を将来的に顕著にさせない」ことを目的とした場合、予防保全の対象は潜伏期、進展期および加速期前期となる。

予防保全を目的とした必要な調査事項については、中性化に伴う劣化の程度を確認するために必要な項目として、中性化深さ、鋼材の位置、外観の変状などが挙げられ、劣化進行予測のために必要な項目として、温度、湿度、水掛かりなどの環境条件などが挙げられる。

予測・性能の評価については、潜伏期の期間を推定するために行う中性化の進行予測、鉄筋腐食が開始する進展期から腐食ひび割れが発生する加速期前期までの期間を推定するための鉄筋腐食の進行予測がある。

(3) アルカリシリカ反応

予防保全に対する考え方については、アルカリシリカ反応は、供用中の自然環境の作用、その他の劣化外力の作用（漏水、凍結防止剤の散布など）等によって、劣化の進行度合が大きく異なるため、効果的な予防保全が困難であることが多い。しかし、劣化が多数報告されている地域においては、潜伏期、進展期の段階で予防保全を前提とした維持管理計画を策定することも効果的であると思われる。

予防保全を目的とした必要な調査事項については、アルカリシリカ反応が発生する可能性の有無を明確にし、対策の要否を判定することを目的として実施される初期点検が重要であると考えられる。

予測・性能の評価については、アルカリシリカ反応による膨張の進行には、骨材中の反応性鉱物の種類や量、部材の配筋状況、環境条件（温度や水の供給状況）等種々の要因が複雑に影響しているため、これを定量的に予測することは困難である。コンクリート標準示方書では、膨張の進行予測は、点検に基づく方法、試験結果と解析等を組み合わせた方法のいずれかの方法を用いてもよいとしている。

(4) 凍害

予防保全に対する考え方については、凍害においては水や塩化物イオンの接触・侵入を抑えることが基本となる。潜伏期では表面被覆や表面含浸の適用、適切な排水処理が主な対策工として挙げられ、進展期以降であれば、微細ひび割れの有無や幅および深さ、スケーリング深さなどに応じてひび割れ注入・充填、断面修復を講じて性能を回復させた上で、止水、導水処理を講じるのが一般的である。

予防保全を目的とした必要な調査事項としては、水や塩化物イオンの供給の程度、日射の作用や外気温（最低温度）、これまでに作用した凍結融解の回数（経過年数）などが考えられる。

予測・性能の評価については、凍害危険度マップを用いた方法、凍害の進行を予測する方法がある。

(5) 化学的侵食

予防保全に対する考え方については、まず当該コンクリート構造物の化学的侵食に対する設計思想を知ることが重要である。下水道用コンクリートや硫酸塩土壌に建設される構造物等、酸や硫酸塩に接触する環境にあるコンクリート等のように、設計時に化学的侵食が考慮され、何らかの対策が施されている場合には、コンクリートの劣化をある程度許容するか否かといった区分や対策の具体的な方法、推定した劣化機構等を確認することが必要になる。

予防保全を目的とした必要な調査事項については、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕によると、予防保全を行う構造物に対しては、硫化水素（ H_2S ）ガスの発生状況、劣化因子の濃度、温度、湿度、二酸化炭素（ CO_2 ）濃度、コンクリート中の鋼材の発錆の有無等を継続的に把握する目的で、モニタリングを検討するとよいと記されている。

予測・性能の評価については、化学的侵食の進行を予測することは必ずしも容易ではなく、状況に応じて種々の方法がとられている。コンクリート標準示方書〔維持

管理編]では、点検結果を用いる方法、促進試験による方法、環境条件と劣化因子の移動や反応を考慮した数値解析による方法が示されている。

5.3 予防保全を目的とした維持管理手順の提案

(1) 予防保全型維持管理手順の流れ

本研究委員会が提案する予防保全型維持管理手順の流れを図-5.1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。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、環境外力の評価、劣化機構の推定、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、環境外力の評価、劣化機構の推定、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。

(2) 予防保全を目的とした維持管理におけるLCCの試算例

日本海沿岸部に建設された道路橋上部工を対象として、塩害による劣化が生じる場合について、予防保全を目的とした維持管理におけるLCCを算出した。劣化速度による影響を検討するために、劣化速度を大、中、小の3段階を設定し、予防保全を開始する時期を潜伏期、進展期、加速期前期とした場合に、事後保全型維持管理と比較して、予防保全型維持管理を行うことによりLCCが有利となる条件を整理した。

6. まとめ

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思われる。技術者を対象に行ったアンケート調査によると、今後、予防保全型の維持管理を普及させ

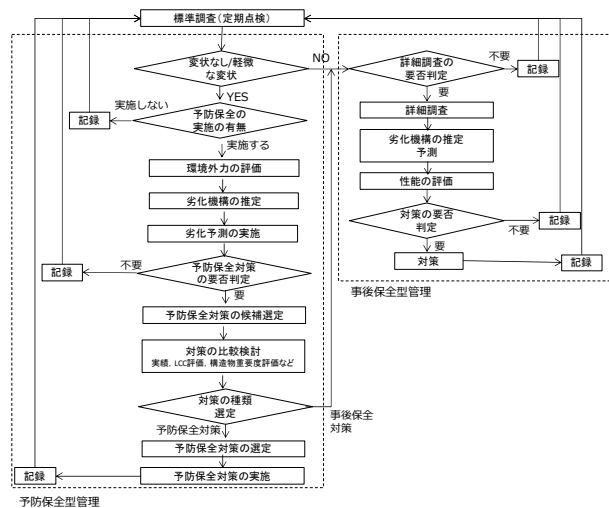


図-5.1 予防保全型維持管理手順の流れ

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との意見が多いことが解った。この結果から、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、本委員会では、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、予防保全対策技術の選定やLCC評価が重要となると考えられる。

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、予防保全の手順を確立させ、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

本委員会が実施したアンケート調査におきましては、多くの協会、団体、企業、技術者の方々に多大なご協力をいただきました。末尾ながら記して謝意を表します。

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) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁保全編，2019.7
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 コンクリート構造物)，丸善，2007