

A photograph of a concrete tunnel under construction or repair. The interior shows the rough, textured walls and ceiling of the concrete structure. A bright light source is visible at the far end of the tunnel, creating a strong contrast with the dimly lit interior. The floor appears to be a smooth, reflective surface, possibly water or a wet concrete floor. The overall scene suggests a large-scale infrastructure project.

コンクリート構造物の 補修・補強設計の現状

株式会社太平洋コンサルタント 関西技術センター設計部設計グループリーダー 邊木 蘭 隆太
株式会社太平洋コンサルタント 関西技術センター長兼設計部長 濱田 讓

1. はじめに

社会インフラの中でも橋梁や道路といったコンクリート構造物は、日本の社会経済活動を支える極めて重要な基盤である。これらの構造物の多くは高度経済成長期に集中的に整備された結果、現在

では建設後50年以上が経過したものが増加し(図-1)、老朽化が深刻化している。特に、2012年の笹子トンネル天井板崩落事故以降、社会全体でインフラの維持管理に対する意識が高まり、国土交通省は2014年に定期点検制度を義務化し、5年に1度の近接目視点検を原則とした。これ

を契機に、劣化状況を適切に把握し、計画的な補修・補強を行う体制が全国的に整備されつつある。

近年の補修・補強設計の詳細調査においては、劣化現象の高度化・複雑化に伴い、より精緻な状態把握が求められている。従来の目視点検では把握が難しい微細なひび割れや内部劣化を評価するため、ドローンを活用した高解像度撮影、3Dレーザースキャナーによる形状測定、赤外線カメラによる内部剥離の検出など、非破壊検査手法が急速に普及している。また、点検で取得される膨大なデジタルデータを解析するため、AI画像解析技術を用いたひび割れ認識・分類システムが実用化されており、技術者不足が課題とされる地方自治体でも品質を確保した点検が可能となりつつある。

次に、それらの調査結果をまとめ、劣化原因の特定を行うことが重要となる。コンクリート構造物の代表的な劣化要因として、中性化、塩害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）、凍害、疲労劣化などが挙げられる。これらの劣化メカニズムは構造物ごとに異なる環境条件に大きく左右

されるため、単なる表面的な損傷にとどまらず、材料試験、鉄筋腐食の電気化学的測定、コア抜き調査など、多角的な調査に基づく原因分析が不可欠である。この結果を踏まえ、表面被覆工法、断面修復工法、電気防食工法、ひび割れ注入工法、炭素繊維シートによる補強など、多様な工法の中から最適な補修・補強方法が選定される。

さらに、近年では「長寿命化修繕計画」の策定が全国で進められており、構造物のライフサイクルコスト(LCC)を最小化しつつ安全性を確保するための戦略的マネジメントが重視されている。これにより、損傷が顕在化してから対処する「事後保全」から、劣化の進行を抑制する「予防保全」への転換が図られている。例えば、塩害が懸念される橋梁に対して、早期の表面含浸材の塗布や防食仕様の適用により劣化進行を抑えるといった取り組みが広く実施されている。また、橋梁の床版には疲労強度の高い床版取替工法が採用されるなど、長期的な耐久性向上に資する設計思想が一般化している。

補修設計の現場では、国土交通省が推進するインフラDXの取り組みが大きな役割を果たしている。BIM/CIMを活用することで、構造物の3Dモデルに点検データ・劣化履歴・補修履歴を統合し、構造物の「デジタルツイン」として管理することが可能となった。これにより、補修位置や劣化程度をモデル上で視覚的に把握でき、関係者間での認識共有が容易になるだけでなく、施工計画の合理化、コスト縮減、工期短縮にも寄与している。また、クラウド型データベースを活用したインフラ管理システムも普及し始めており、地方自治体が広域的なインフラ管理を効率的に行える環境が整いつつある。

一方で、補修設計に関する課題も依然として多い。まず、技術者不足が深刻である。特に地方の自治体ではインフラ管理を担当する技術者が限られ、専門的な判断が必要な補修設計業務を十分に実施できないケースが見られる。また、インフラの老朽化が急激に進行する一方、

限られた財源の中でどの構造物に優先的に補修を施すかの判断が求められるため、リスク評価手法の高度化が必要とされている。さらに、気候変動に伴う豪雨・高温化により、従来の設計条件では想定されなかった新たな劣化リスクも顕在化しており、これらに対応した補修設計手法の確立が急務となっている。

2. 補修・補強設計における設計部の役割

2-1 補修・補強設計の基本的な考え方

コンクリート構造物の補修・補強設計は、劣化した構造物の安全性・耐久性、使用性を回復させ、所定の供用期間を確保することを目的として実施される。新設構造物と異なり、既設構造物には個別性が強く、劣化状況、環境条件、使用履歴、施工条件などのばらつきが大きい。このため補修・補強設計では、現地調査に基づく状態把握と、性能照査に基づく性能回復の両立が求められる。

補修設計の基本方針としては、①劣化要因の除去または緩和、②損傷部の回復、③表面保護による長寿命化などが挙げられる。補強設計では、④耐荷性能の向上、⑤耐震性能の確保、⑥耐久性能の向上が主な目的となる。劣化の種類(中性化、塩害、ASR、凍害など)と損傷形態(ひび割れ、剥落、断面欠損、鉄筋腐食)に応じて、適切な工法を選定し、性能回復の度合いを定量的に評価する必要がある。

2-2 調査・診断の段階における設計部の役割

補修・補強設計(図-2)の最上流となるのが調査・診断であり、ここでの判断が後工程の品質・コスト・工期に大きく影響する。設計部は調査計画の立案段階から参画し、ひび割れ調査、コンクリートコア採取、中性化深さ測定、塩化物含有量分析、鉄筋探索、強度試験、各種電気化学的試験などを組み合わせて劣化状況を把握する。

診断結果は構造物の性能低下を示す重要なデータであり、データのばらつき

や代表値の選定根拠を明確化した上で、劣化機構の推定、今後の劣化進行予測、補修範囲のゾーニング、補修必要性の判断などを行う。適切な診断が行われていない場合、過剰補修や補修不足につながるため、設計時の判断力と経験が極めて重要である。

2-3 補修・補強工法の選定と設計仕様の策定

補修設計では、損傷の種類と原因に応じて工法を選ぶ必要がある。例えば、ひび割れにはエポキシ樹脂注入や可とう性樹脂注入、断面欠損にはポリマーセメントモルタルによる断面修復、鉄筋腐食には防食工法（再アルカリ化・脱塩・犠牲陽極法）、表面保護では遮塩・防水・中性化抑制コーティングなどが採用される。

補強工法では、鋼板接着、炭素繊維シート(CFRP)補強、RC巻立て、鋼板巻立て、PC外ケーブルなどがあり、それぞれ耐荷性能・耐震性向上に有効である。構造物の用途、施工条件、供用制限、コスト、耐久性、施工性を総合的に評価し、最適な工法組合せを決定する。

さらに、工法ごとに材料仕様、下地処理条件、品質管理項目、施工時温湿度条件、検査基準などを詳細に定義し、設計図書に反映させる。

2-4 性能照査と安全性評価の実施

補修・補強後の構造物が要求性能を満足するかどうかは、性能照査により評価される。耐荷性能では、鉄筋の減肉量や断面欠損を考慮した再評価を行い、必要に応じて補強量を算定する。耐震性能では、保有水平耐力や塑性変形能力の向上を目的とした補強工法を検討する。

耐久性能については、中性化進行速度、塩害の拡散モデル、ASRの進行予測などを用いて、補修後の耐久年数を評価する。性能照査は、設計部が発注者や管理者に対して補修・補強の妥当性を説明するための根拠となるため、合理性と透明性の高い設計が求められる。

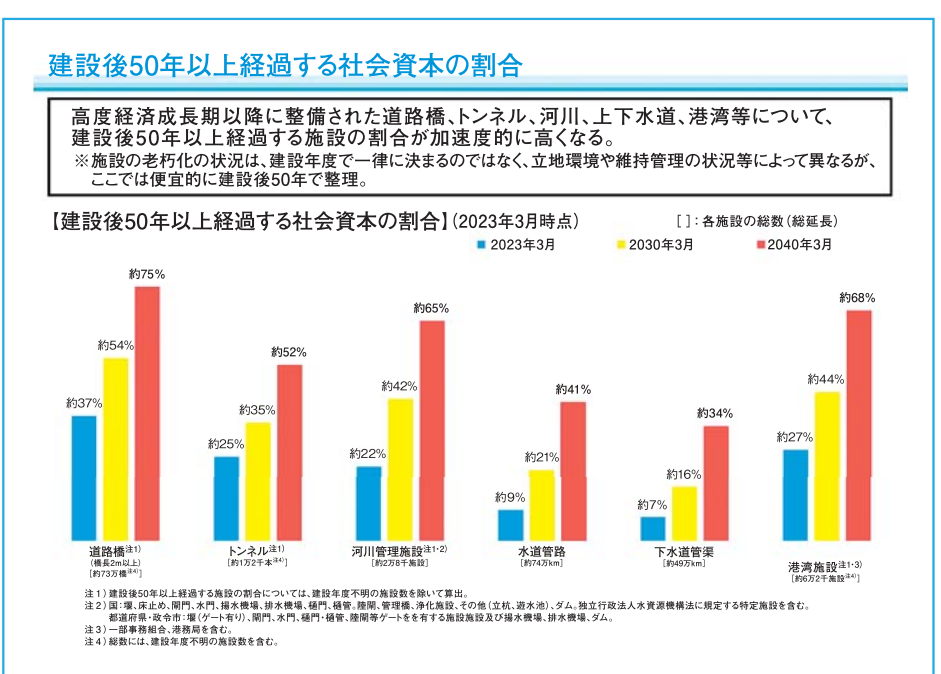


図-1 建設後50年以上経過する社会資本の割合(国土交通省インフラメンテナンス情報より抜粋)
(<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/index.html>)

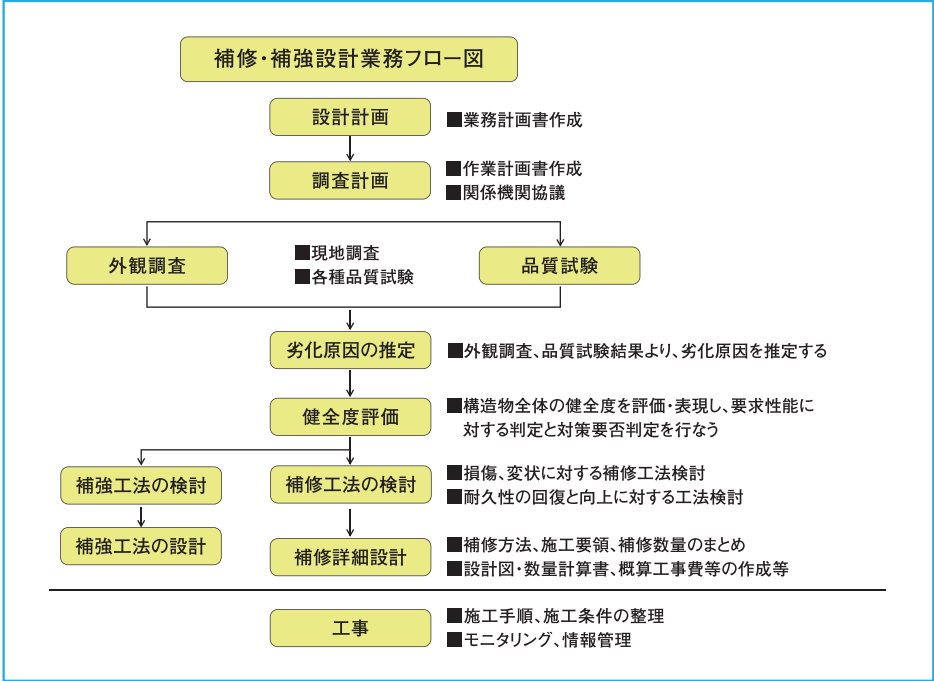


図-2 補修・補強設計フロー図

2-5 施工段階における設計部の役割

補修・補強工事は現場条件の影響を強く受けるため、設計時には施工計画書の事前確認、施工手順の妥当性評価、材料の受入検査基準の共有、施工中の不具合発見時の技術判断などを担う。

ただし、現場で想定外の損傷が発見されることも多く、その際には迅速に設計変更や追加補修方法を決定する必要がある。

また、品質検査への立会い、付着強度試験やひび割れ充填率確認など、品質

確保のための役割も重要である。施工段階での設計部の機能が不十分な場合、補修効果が十分に発揮されず、再劣化リスクが高まる。

2-6 維持管理への引き継ぎと記録の整備

補修・補強設計は工事完了で終わるものではなく、その後の維持管理に適切に引き継がれる必要がある。そのため、補修範囲、使用材料、施工条件、検査記録などを整理し、維持管理者が次回点検で確認すべき項目を明確に示す。

特に、耐久性に関する計算根拠や補修後の期待寿命、モニタリングが必要な場合の閾値設定などは、長期的な維持管理にとって重要である。設計部は、補修・補強を単発の工事としてではなく、構造物の長寿命化計画の一部として位置付け、体系的な情報管理を行う役割も担っている。



写真-1 側面



写真-2 内空断面



写真-3 頂版損傷状況



写真-4 側壁損傷状況

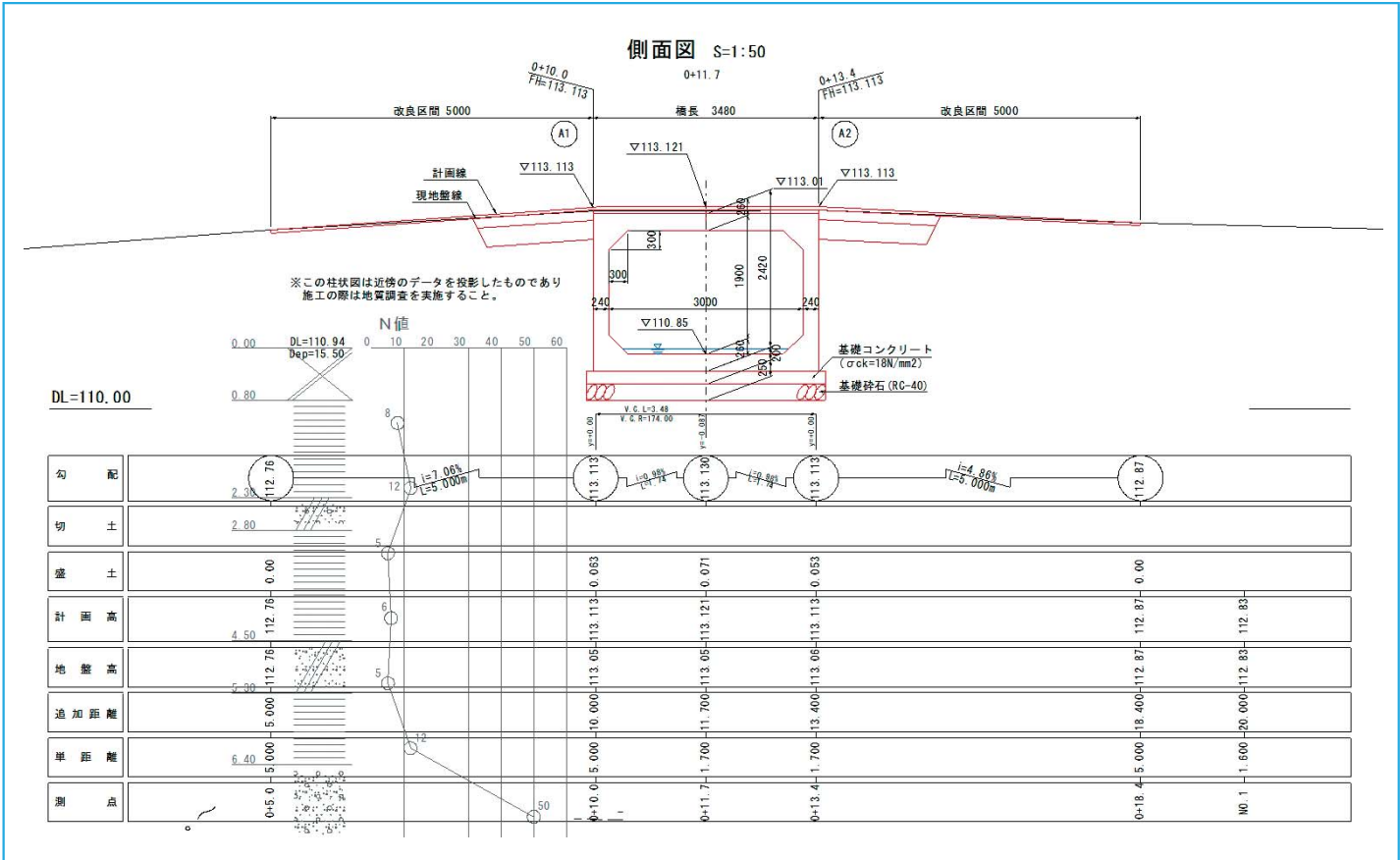


図-3 更新後の橋梁一般図抜粋

3. 事例紹介

本項では、当社で行った補修・補強設計について2つの事例を紹介する。

事例1は、ボックスカルバートの補修設計を行う予定であったが、外観変状調査の結果、補修設計では機能や性能の回復が見込まれないため、プレキャストボックスカルバートの新設となった事例である。

事例2は、架設年度不明の橋梁に対してコンクリートミキサー車が通行可能であるかどうか、橋梁上部工の耐荷重の算定を行ったものである。

3-1 事例1

「降雪地域のボックスカルバート補修・補強設計から架け替え(新設)」

業務概要

橋梁名: ○橋
架設年: 不明(橋梁台帳にて昭和61年4月調査済み)
路線名: 市道○線
上部工形式: RC橋 RC溝橋(ボックスカルバート)
基礎形式: 直接基礎
橋長: 3.48m
幅員: 7.5m(有効幅員7.0m)

本橋の外観変状調査および詳細調査にて、頂版の橋軸方向への貫通ひび割れ、側壁のひび割れが確認できた(写真-1~4)。これらの要因として、本来車両の荷重を分散させるための土被りが確保されておらず、通行車両による衝撃が直接頂版に作用したことによる疲労

によりコンクリートの損傷が促進され、頂版の下面と上面を繋ぐ貫通ひび割れが発生したと判断した。

また、本橋は寒冷地に立地しており、衝撃により発生したひび割れへ路面からの浸透水が凍結融解を繰り返しひび割れ面が摩擦し、さらに劣化が促進されたと考えられ、これらの貫通ひび割れはコンクリートの一体性を損ね、耐荷性の低下が著しく、一般的な補修設計を行ったとしても、架設当時の性能の回復は期待できないと判断し、土被り確保も含めた更新(新設)をすることとした。

図-3に更新後の橋梁一般図の抜粋を示す。

3-2 事例2

「架設年度不明の橋梁において、コンクリートミキサー車の通行に必要な耐荷力の算定」

業務概要

橋 梁 名:○橋

架 設 年:不明(1964年以降)

路 線 名:林道

上部工形式:単純RC床版橋

基 礎 形 式:不明

橋 長:9.6m

幅 員:2.9m(有効幅員2.5m)

橋梁の耐荷重を算定する際には、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度を設定する必要がある。一般には、設計時に適用された規準に準拠して許容応力度を設定するが、本橋梁の建設時期は不明で、適用規準を特定することができない。そこで、周辺情報に基づいて建設時期および適用規準を特定し、各材料の許容応力度を設定することとする。

車両載荷条件は、走行するコンクリートミキサー車の設計荷重(活荷重)を図-4に示すように、最大積載量3,000kgのコン

	前輪軸重	後輪軸重	摘要
車両重量(kg)	1610	1680	
生コン重量(kg)	0	2500	100%後輪載荷
車両総重量(kg)	1610	4180	
車両総重量(kN)	15.8	41	

表-2 コンクリートミキサー軸距				
支間(m)	軸距(m)	衝撃係数	Pf:前輪軸重	Pr:後輪軸重
9.140	2.525	-	前輪軸重	後輪軸重

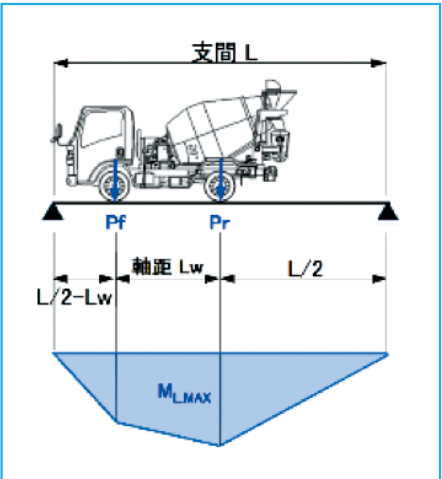


図-4 車両載荷条件

表-3 鉄筋コンクリート床版の設計計算結果一覧表					
耐荷重計算書 鉄筋コンクリート床版の設計(矩形短断面) 総括表					
区 分	名 称	入力値/許容値	単 位	摘 要	
基本寸法	版長	9.600	m	農道橋	
	支間長(斜)	9.140	m		
	車道幅	2.500	m		
	地覆幅	0.200	m		
	地覆高	0.150	m		
	斜角	90.0000	(°)		
荷重	(活荷重)群集荷重	0.000	KN/m ²	考慮しない(通常5KN/m ²)	
	最大曲げモーメント	109.841	KN/m ²	ML_max:ミキサー車の支間中央最大曲げモーメント/別途算出	
	高欄荷重	0.883	KN/m	実測値	
	種類	Co舗装			
舗装工	最大厚	70	mm	舗装重量は最大値と最小値の平均厚	
	最小厚	50	mm		
配筋条件	床版厚	40.0	cm		
	主鉄筋径 D-	25	mm		
	主鉄筋ピッチ	125	mm		
	主鉄筋振り(下面主鉄筋中心)	49.5	mm		
許容応力度	鉄筋規格	SD295			判定
	コンクリート設計基準強度	24	N/mm ²	6 c=8.0>7.2	OK
	鉄筋の許容引張応力度	140	N/mm ²	6 ck=140>138	OK
説明図	※コンクリートの設計基準強度は、現橋から採取したコア試験結果から6ck=24N/mm ² とした。(資料参照)				

クリートミキサー車による支間中央曲げモーメントを算定し、床版断面下縁に配置されている引張鉄筋に作用する引張応力度が許容値以下となること(許容応力度法)を確認する。

曲げモーメント算定のための設計条件

①床版自重:現地実測による形状寸法測定、橋梁一般図作成

②橋面荷重(地覆・高欄・舗装):現地実測による形状寸法測定、橋梁一般図作成

③コンクリートミキサー車荷重:2DG-XZU

600E(車検証により確認)

④衝撃荷重:考慮しない(幅員が狭く徐行走行のため)

⑤群衆荷重:考慮しない

⑥車両荷重:ミキサー車(型式2DG-XZUE)の後輪に、図-5に示す軸距にて生コンの積載重量と後輪軸重を静荷重として載荷し、支間中央曲げモーメントが最大となるように載荷する

また、その結果を表-1、2に示す。

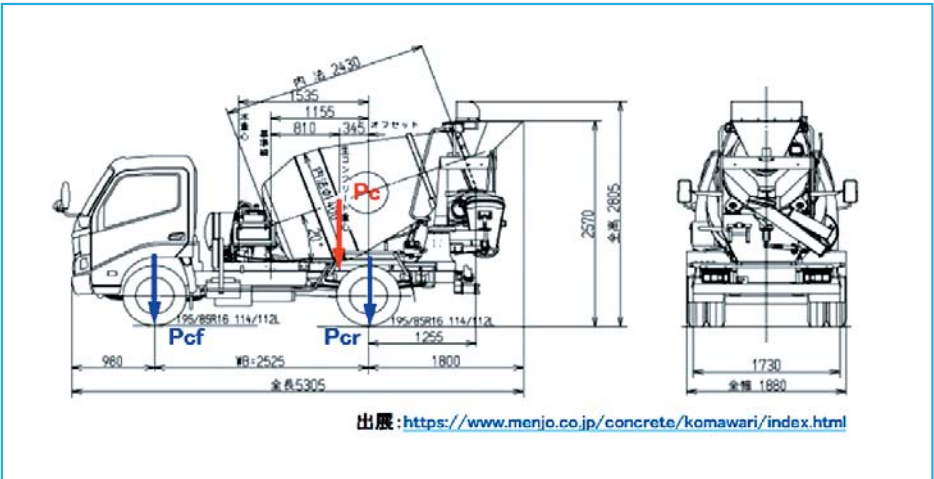


図-5 コンクリートミキサー車の軸距

以上を踏まえて耐荷力の算定をした結果、過大な衝撃を与えない限り、コンクリートミキサー車の通行に必要な耐荷力を有していると判断した。

表-3にその結果を示す。

4. コンクリート構造物における事後保全から予防保全への移行

4-1 事後保全の限界

事後保全は目に見える損傷を契機に設計や工事を行うため、突発的な交通規制や緊急対応が発生し、地域の実生活・経済活動に負荷を与える。また、劣化が進行した状態での補修は範囲が広く、断面修復量や施工手間が増大し工事費が高騰しやすい。さらに、複数の構造物で同様の時期に劣化が進むと、施工業者や技術者が不足し、必要な対策が遅延する点も指摘されている。このように、事後保全には費用増加、緊急対応の増大、社会的影響の大きさといった明確な限界が存在する。

4-2 事後保全から予防保全へ

日本では高度経済成長期に多くのインフラが整備され、その多くが供用後50年以上を迎えている。コンクリート構造物の劣化は塩害、中性化、凍害、疲労、アル

カリ骨材反応など多岐にわたり、複合的な進行を示す。従来の事後保全は、損傷が顕在化してから対策を行う方式であり、突発的な機能低下や異常が社会的影響を伴って発生する可能性が高い。こうした背景から、施設の機能や性能に不具合が生じてから修繕等の対策を講じる事後保全から、劣化の初期段階で適切に介入し、長寿命化を図る予防保全型管理への転換(図-6)が必須となっている。予防保全は安全性だけでなく、費用面や維持管理体制の持続性にも大きく寄与する。

4-3 予防保全

予防保全は、劣化の兆候が発現した段階で計画的に対策を行うことで、構造物の性能低下を最小限に抑え、長期的な維持管理コストを削減する手法である。点検データや診断結果を基に、軽微な補修や表面保護を適切なタイミングで行うことで、深刻な損傷への進行を防ぎ、より安定した運用が可能となる。また、予防保全は資産の健全度を管理するアセットマネジメントの核となる概念であり、自治体や企業の維持管理計画の高度化にも不可欠である。

4-4 予防保全の効果と今後の展望

予防保全は短期的には点検回数の増加や軽微補修に伴う費用が発生するが、長期的には緊急補修の減少、事故リスクの低減、資産価値の維持といった多面的な効果が期待できる。特に、構造物の再劣化を抑制し、ライフサイクルコストを削減できる点が大きい。今後は、データ活用的高度化と維持管理体制の強化が進み、より効率的かつ計画的な予防保全が主流となるが見込まれる。組織的なスキル向上や調達方式の見直しも併せて進めることで、持続可能なインフラ管理が実現できる。

5. おわりに

コンクリート構造物の老朽化が進む中、劣化の早期発見、計画的な補修、データに基づく判断を組み合わせることで、安全性の向上と長寿命化を両立できる。今後はデジタル技術の活用をさらに進め、効率的で持続可能な維持管理体制を確立することが求められ、事後保全から予防保全への移行は不可欠である。

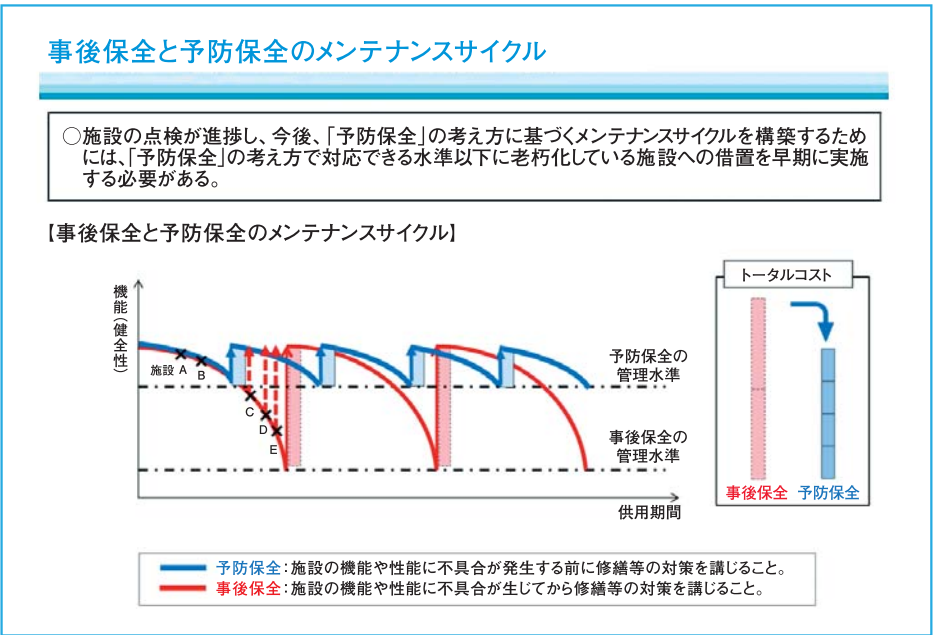


図-6 事後保全と予防保全のメンテナンスサイクルの比較(国土交通省インフラメンテナンス情報より抜粋)(<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001375673.pdf>)

へきその・りゅうた

【著者略歴】
2017年 株式会社太平洋コンサルタン
入社
現 在 同社関西技術センター設計部設計グループリーダー

はまだ・ゆずる

【著者略歴】
2023年 株式会社太平洋コンサルタン
入社
現 在 同社関西技術センター長兼設計部長