特集報文：社会資本の整備・管理における課題解決に向けて
～土木研究所第5期中長期計画で取り組む研究開発～

構造物の予防保全型メンテナンスに資する技術の開発

金澤文彦

1. はじめに

土木構造物の老朽化が進むなか、維持管理・更新コストを可能な限り抑制し持続的にインフラ機能を確保するためには、長寿命化を図るための予防保全型メンテナンスを推進していくことが重要である。このためメンテナンスサイクル（図-1）の診断、措置において、信頼性の高い論理的な診断により予防保全が可能な段階を見極め効果的な措置を行う必要があり、高度な専門技術を必要とする。特に、診断技術者は医療における医者の役割と同様に、メンテナンスサイクルの司令塔としての役割が求められる。

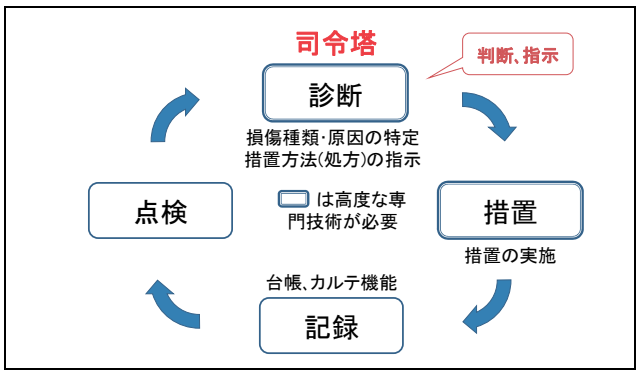

図-1　メンテナンスサイクル

しかし、国内の人口減少に伴いメンテナンス業務の担い手不足が生じつつあり、特に地方公共団体では、技術者の量・質の不足が大きな問題となっており技術面での支援が求められている。

そこで、土木研究所では、第5期中長期計画の研究開発プログラム（以下「本プログラム」という。）として「構造物の予防保全型メンテナンスに資する技術の開発」を進めている。

本プログラムでは、橋梁、トンネル、樋門等河川構造物、コンクリート構造物を対象に、次の1)～3)に示すメンテナンスサイクルの各段階における主要な技術的課題を解決し、その成果等も反映して診断支援のためのエキスパートシステムを構築することとしている。これは特に地方公共団体の維持管理業務における実務技術者不足に役立つものと考えている。

1)適切な診断を可能とするために変状を的確かつ合理的に捉える点検技術の開発
2)損傷メカニズムに応じた状態評価と措置方針を示す診断技術及び支援システムの開発
3)構造物の設置環境、施工上の制約などに対応した効果的な措置技術の開発

以下の章において、対象とする構造物ごとに研究内容を紹介する。なお、橋梁については、既報[1)]で詳述しているので、概略の内容を示す。

2. 橋梁

橋梁診断技術の開発については、信頼性向上を目的に2018年から土木研究所で官民共同研究を実施し熟練診断技術者の診断における知識や思考方法をもとに橋梁診断支援AIシステム（診断AIシステム）の開発を進めている[2)]。2021年度に、床版橋、桁橋、トラス橋を対象とする橋種の約9割をカバーした診断AIシステムVer.1.0を構築した。2022年度から本格的に試用を行い、実運用に向けた課題を見つけて改良を進め、2024年度からの3巡目の定期点検において実展開できるよう開発を進めることとしている。またアーチ橋など特殊橋も対象に加え、ほぼ全橋種をカバーするとともに、以下に示す橋種・部材ごとの研究成果も反映してシステム改良・拡充を行う。

鋼橋の上部構造については、近年の国内外における腐食損傷による通行止めの実態を踏まえると、ケーブル及び定着部など外観のみでは内部状態を把握できない部材や鋼桁端部の横桁や対傾構等、狭隘部で変状の見逃しリスクの高い部材について、その変状を早期かつ確実に把握する必要がある。このため、非破壊や微破壊により腐食や滞水等を把握する詳細調査手法の開発や、滞水しないよう

New Research Plan for Preventive Maintenance of Infrastructure

に水抜き穴を設ける改良措置、水の浸入を防ぐ多重防御措置、耐腐食性に優れた高耐久性鋼材による更新技術など長寿命化措置の開発を行う。また、定期点検の近接目視で用いる点検車や足場等の資機材を省略し点検コストを縮減するため、鋼部材の防食機能劣化・腐食に対して、小型UAVの取得画像のみで近接目視による場合と同等の診断が可能か否かを判断するための考え方や画像からスクリーニングする手法、さらには、鋼部材の亀裂・破断を画像からAIにより抽出する手法などの開発を行う。

RC床版の土砂化については、近年問題が顕在化しており、既往研究においてその要因を地覆や施工目地等から浸入する床版上面の水分と考えられており、この分布を電磁波レーダにより検知する手法の開発を進めている[3)]。今後は、土砂化メカニズムの解明を進めるとともに、電磁波レーダによる点検技術を、予防保全の段階について検知可能なレベルにまで向上させ、進行度に応じた部分的な防水・止水対策、潜在的な劣化部位の回復手法などの開発を行う。

コンクリート橋の上部構造については、飛来塩や積雪寒冷地における凍結防止剤による塩害を対象として、その損傷の特性上表面のひび割れが生じるまで目視で気づくことができないことから、劣化が進行する前に状態を評価するため、非破壊や微破壊によるコンクリート内部の塩分調査技術の適用性や調査方法等の検討、劣化状況の評価手法の検討を行う。また、予防保全に対応した措置方法の選定手法を開発するため、民間等が開発した各種塩害対策技術の効果検証、対策前の塩分除去を確認する技術の適用性検証を行う。

橋の上部構造と下部構造とを接続する構造部材である支承については、狭隘部で閉鎖的な空間に設置されることが多く、また、その形式によっては機能を司っている重要な部位を直接目視することができない既設支承もある。そのため、経年に伴う支承の損傷メカニズム[4)]の解明とともに、支承の変状が影響を及ぼす他の部材も含めて予防保全としての措置が可能な限界の状態について定量的な指標等を提案する予定である。

下部構造については、近年各地で発生した豪雨による道路橋の基礎の洗掘により長期間の通行止めや集落の孤立が発生したため、橋の機能に影響が生じないよう、洗掘に対しても予防保全の観点から点検や措置を講じる必要がある[5)]。このため、まず近年の被災事例を含めて豪雨時における河床低下のメカニズムを解明し、管理水準に応じた局所洗掘や河床低下の予測手法のメニューを整備する。この予測に必要となる河床高、周辺の護床工、澪筋等の状態を把握するため、新しいリモートセンシング技術の活用を考え、これに求める性能とその検証方法を明確化するなど技術開発が促進されるよう検討する。また、予防保全としての対応が可能な限界の状態を明確にし、その状態となる前に講じる各種対策工法の選定方法や組み合わせ方法などの提案を行う。

3. トンネル

道路トンネルでは、定期点検が一巡しその結果が維持管理計画に活用される一方で、外力の作用や老朽化によりトンネル構造の安定性や利用者の安全性に影響を与える変状リスクの顕在化が懸念される。特に外力に起因する変状は、地質の変化部や脆弱部が湧水等の影響を受けて顕在化する事例がある。このため、トンネルの診断精度を確保するためには覆工表面に現れるひび割れ等の変状に加え、設計・施工時の情報を活用して覆工背面の地山性状も考慮する必要があるが、現状では維持管理段階まで引き継がれておらず十分に活用できていない事例が多い。この結果、変状要因の推定を誤った診断や重大な変状に至る前兆現象の見落としが生じ、変状の進行により通行止めに至る事例等も散見される。設計・施工時の情報を有効に活用し設計・施工段階より潜在する維持管理段階での変状要因を事前に抽出するとともに、その情報の体系化、維持管理段階への適切な引継ぎが必要である。

点検については、民間を中心に画像や点群データを活用して迅速・広範囲・高密度な計測を特長とした点検支援技術の開発が進められている。今後、適用範囲や精度等に関する検討を進め、こうした新技術の活用を促進することが望まれる。そして、維持管理段階で変状が顕在化もしくは疑いのある個所を早期かつ簡易な手法で発見し警告できる診断技術や、その結果を踏まえた合理的な変状対策工・監視の選定手法開発が求められている。

こうした背景から、まず施工時に取得される

データと維持管理で得られる変状等の情報をもとに、設計・施工段階に潜在する維持管理段階で発生する変状について要因分析を行い、トンネル部材が有するべき機能・性能や変状が発生した場合の推移を実大実験等で確認したうえで、維持管理段階の変状発生に関する不確実性の評価手法の開発や維持管理段階へ引き継ぐべき情報を提案する。また、定期点検データ、不具合事例の収集・整理・分析結果に加え、画像やMMSデータをAI技術等で処理した情報や設計・施工時の情報を集約・保管・活用するデータプラットフォームを構築する。これらのデータをもとに、AI技術や統計手法に加え、土研に蓄積された知見や実務経験者の知見を反映したエキスパートシステムにより、変状要因、健全性、措置の方針などの診断結果を導けるように、顕在化リスクの高い変状を早期に覚知可能とする点検・診断手法の開発を行う。さらに、変状対策工の不具合事例などの実態を整理し、変状対策工の力学的機能や劣化メカニズムを解明したうえで、変状対策工・監視の合理的な選定手法を開発（図-2）することとしている。

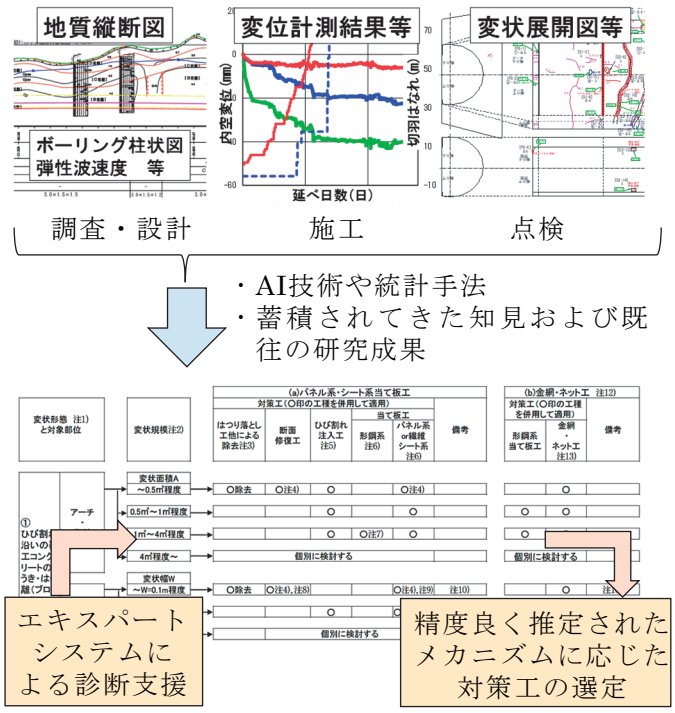

図-2　設計・施工データの診断・措置への活用イメージ

4. 樋門等河川構造物

国、地方公共団体の管理する樋門及び水門は、26,000基程度あり、河川コンクリート構造物の中でも件数が多く、国直轄管理施設では設置後40年を超過する施設が60%程度に達している。一方で点検技術者が年々減少しており点検・診断の省力化・効率化は重要な課題である。こうした現状を踏まえ、樋門等河川構造物のメンテナンスサイクルの構築が求められている。

このため、まず樋門・水門の点検の実態や結果、不具合事例を分析し、河川構造物の損傷事例や樋門等の機能への影響を検討したうえで、点検方法の着眼点を整理し、画像解析技術や点検が難しかった箇所への新たな点検技術等の適用も含め点検手法の信頼性向上を図る。また、樋門・水門の診断の実態や結果を分析し、河川構造物の周辺堤防の空洞・緩み及びコンクリート部材の損傷事例や樋門等の機能への影響を検討したうえで、損傷メカニズムの検討をもとに周辺堤防の空洞・緩み及びコンクリート部材の損傷を関連付けつつ診断の着眼点を整理し、抜上り、特徴的なひび割れパターン等、対策の要否や方法選定について判断の決め手となる情報を検討する（図-3）。これらの検討を踏まえ、点検結果をもとに樋門等の機能面への影響や材料・構造上の懸念などについて総合的に助言できるエキスパートシステムを構築するなど構造・機能を踏まえた診断手法を開発する。さらに、点検データや補修実績に関する分析をもとに河川構造物の補修要否や補修方法の考え方を検討し、補修材料・工法の適用性について実験等を通じて検討して、樋門等河川構造物の補修対策手法を開発することとしている。

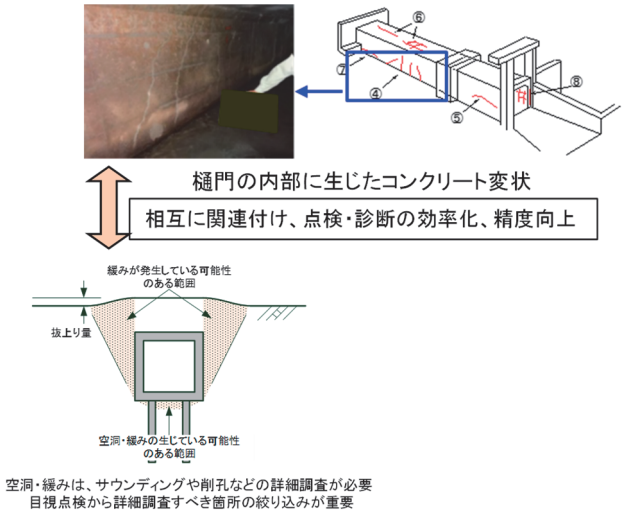

図-3　コンクリート部材の変状と堤防機能の低下

5. コンクリート構造物

コンクリート構造物の補修・補強については、過年度の研究成果をもとに「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル」(2016.8土研資料第4343号)(以下「マニュアル」という。)を公表し補修技術の向上に努めてきたが、厳しい環境下や補修の際に残ってしまう塩分のために早期再劣化する事例が報告されており、損傷メカニズムに対応した信頼性の高い補修技術を用いた設計・施工が求められている。施工現場では、工程の制約や専門職の不足により必ずしも良好な条件下で施工できていない可能性があり、求められる耐久性能や施工環境に応じた材料選定、施工の標準化による品質確保が特に重要である。例えば、近年は予防保全効果を期待して表面含浸工法や早期ひび割れ補修工法(図-4)の施工が増えているが、劣化の抑制に効果的な施工条件やタイミングが不明確な状況にある。また、施工例の多い断面修復工法や連続繊維シート工法における経年後の浮きや剥離などの再劣化については、厳しい環境条件に対する接着材料の選定や施工時の温度、湿度の影響によるものと懸念されている。

このため、表面含浸工法については、厳しい環境下での施工技術が確立しているシラン系含浸材の最適な再塗布方法の検討、塗布後の点検診断手法の検討を行う。早期ひび割れ補修工法については、軽微なひび割れ発生要因を踏まえた材料選定方法と適用方法を検討し、厳しい環境における施工方法を検討する。断面修復工法については、凍害、塩害が複合した厳しい環境における耐久性の検討、界面脆弱部を改善する浸透系塗布剤の適用方法、品質管理方法に関する検討を行い、連続繊維シート工法については、厳しい環境における施工状況や現地調査をもとに再劣化・早期劣化状況を把握し損傷メカニズムを解明して、地域特性や施工環境の違いによる材料特性・施工性・耐久性を検討し、長期耐久性評価手法の開発、補修・補強後の点検診断手法、管理手法の構築を行う。

これら、劣化状況を踏まえた予防保全に有効な補修技術の開発、厳しい環境における材料評価・施工管理標準の構築、補修・補強後の点検診断手法の開発を踏まえて、マニュアルを改訂するとともに、前述した各構造物のエキスパートシステムにこれらの研究成果を反映することとしている。

図-4　早期にひび割れを補修する各種工法

6. おわりに

本報文では、土木研究所における本プログラム「構造物の予防保全型メンテナンスに資する技術の開発」について紹介した。ここに示した取組み等を推進し、構造物の点検、診断、措置技術の信頼性向上を図り、併せてインフラメンテナンスにおけるDXによる業務の省力化、効率化を進め、予防保全型メンテナンスを実現していきたいと考えている。

参考文献

1) 金澤文彦、星隈順一：道路構造物の予防保全に向けた取組み、土木技術資料、第64巻、第1号、pp.34～37、2022.
2) 澤田守、江口康平、石田雅博：道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.8～11、2021.
3) 藤木裕二、岩谷裕太、田中良樹、石田雅博：RC床版の土砂化の予防保全に向けた技術開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.20～23、2021.
4) 二宮智大、大住道生、金澤文彦：道路橋支承の維持・補修のAI化に求められること、防錆管理、Vol.64、No.9、pp.10～17、2020.
5) 堀内智司、中浦慎之介、行藤晋也、桐山孝晴：橋梁下部構造の予防保全に向けた診断技術の開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.24～27、2021.

金澤文彦

土木研究所　道路構造物総括研究監
(兼)構造物メンテナンス研究センター次長、博士(工学)
Dr. KANAZAWA Fumihiko