

リスク管理の視点から考察したインフラメンテナンス －河川管理施設を中心として－

末次忠司

(一社)地域国土強靱化研究所 顧問

概 要

中央自動車道・笹子トンネルにおける天井板崩落事故（2012）を契機として、時代の流れは建設の時代から維持管理の時代へと変わった。高度経済成長期に建設された多数のインフラは経年的に劣化・老朽化し、今後補修・補強・更新が迫られるインフラが時期的に集中することが懸念される。そして、埼玉県八潮市における下水道による道路陥没事故に見られるように、単なるインフラの維持管理の問題ではなく、インフラの劣化・老朽化により事故が増加したり、それを起因とする災害リスクが今後高まる可能性もある。

本技術資料ではこうしたリスク管理の視点から、インフラの維持管理について考察した。考察の視点は維持管理計画、点検・補修・補強技術、新技術・新材料、技術者不足である。考察の対象施設は堤防や樋門等の河川管理施設を主としているが、他施設の手法が適用できる場合もあるので、個別のインフラではなく、道路（橋梁、トンネル）・水道・下水道等を含めたインフラ全般を対象に、施設の劣化・老朽化に対して長寿命化させるために、計画・技術・人の面から、我々技術者が行うべきことについて記述を行った。

本技術資料では特に巡視・点検におけるリスクの見つけ方、点検結果に基づく補修・補強・更新の行い方、インフラのリスク管理に重点を置いて、技術の紹介・解説を行った。また今後有望な新技術・新材料について、主要なものを紹介するとともに、維持管理技術については、ハード管理技術、ソフト管理技術に分けて記述した。本技術資料が建設コンサルタントや官公庁の技術職員の業務の参考になれば、幸いである。

目 次

1. インフラ維持管理の概要	3
2. 計画的な補修・更新対応	7
3. 事後保全から予防保全への転換	9
4. リスクの見つけ方（巡視・点検）	11
4.1 河川管理施設の点検等	12
4.2 河川管理施設以外の施設の点検等	15
5. 点検結果に基づく補修・補強・更新	17
5.1 補修・補強方法	19
5.2 点検車・探査車等	20
5.3 更新・撤去等	22
6. インフラのリスク管理と新技術・新材料の導入	23
6.1 ハード管理技術	23
6.2 新材料の導入	25
6.3 ソフト管理技術	26
7. 技術者不足対策	29

Abstract

Periodic current of public works changed from construction to management of infrastructure as a result of collapse accident of ceiling boards at Sasago Tunnel (2012). As many infrastructures that were built in economic growth period are deteriorating over time, repair or renewal period (budget) of infrastructure may concentrate in near future. And like the road collapse due to the sewage accident at Yashio City, Saitama Pref., the situation may bring about not only the maintenance of infrastructure, but also problem that disaster risk increases.

In this technical report, I considered about the maintenance of infrastructure from the viewpoint of risk management. The viewpoint of consideration is facility maintenance plan, the technique of inspection, repair, reinforcement, and new technology, the shortage of engineer. The target facilities are mainly river administrative facilities such as levee, sluice gate and so on in this report, but other facilities (road, bridge, tunnel, water supply and sewage) that technique can be applied for river facilities are also considered.

And I mentioned about the maintenance plan, technique and engineer that are related to the infrastructure management, so as to lengthen the facility life. Concerning the maintenance technique, I described structural management technique and non-structural management technique separately. In this report, mentioned topics are as follows.

- 1) Outline of maintenance of infrastructure
- 2) Systematic response for repair and renewal
- 3) Conversion from breakdown maintenance to preventive maintenance
- 4) Detection of risk (patrol, inspection)
- 5) Repair, reinforcement and renewal based by inspection result
- 6) Risk management of infrastructure and introduction of new technology and material
- 7) Countermeasure for shortage of engineer

1. インフラ維持管理の概要

歴史的に見ると、インフラ維持管理は1980年代に米国で大きな問題となった。米国では1930年代にルーズベルト大統領によるニューディール政策（世界恐慌(1929～)に対する経済政策）が実施され、景気下支えとしての公共事業が活発に行われた結果、1980年代にインフラ老朽化問題が顕著に露呈した。この事態の実態を記した「荒廃するアメリカ（1982）」が監訳されて出版された。この米国に次いで、日本は世界的に2番目のインフラ老朽化問題に直面している状況である。

日本では以前より、インフラに関して維持管理の重要性が言われてきたが、公共事業関係費（国土交通省関係）が減少したり、管理者や技術者が施設建設に重点を置いていたため、維持管理は後回しにされてきた。そこに、中央自動車道の笹子トンネルの天井板崩落事故（2012.12，写真1）が発生したのを契機として、国土交通省等はインフラの点検や老朽化対策を本格化した。この事故では天井板を支えるボルトの強度不足や接着剤の劣化により、天井板が約140mにわたって崩落し、車両3台が天井板の下敷きとなり、走行中の車の9人が死亡した。リスク管理の視点からは、天井板吊り下げ部材の設計・施工・経年劣化、点検・維持管理手法に関する検討が重要となる。



写真1 笹子トンネルの天井板崩落事故（山梨県大月市）（著者加筆）¹⁾

インフラ対策の動きとしては、表1に示すように、国土交通省は笹子トンネル事故を受けて、翌年の2013年を「社会資本メンテナンス元年」として、

- ・2013.11 インフラ長寿命化基本計画：国として1つの計画，メンテナンスサイクル（点検→診断→措置→記録→点検）の下で，目標に対して維持管理施策の方向性を定めた
- ・2014.5 インフラ長寿命化計画（行動計画）：省庁ごと・自治体ごと（公共施設等総合管理計画）の計画を策定した

長寿命化計画では維持管理施策の方向性を定めるとともに，組織ごとの施設管理計画を定めた。また，2024年には国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）（第二期）（改訂）が定められ，予防保全型のインフラメンテナンスへの本格転換，新技術の普及による生産性向上，集約・再編等によるインフラストック適正化の取組推進を目指すこととした。

一方，笹子トンネル事故以降も，福岡の博多駅前陥没事故（2016.11，写真2）が発生するなど，インフラのリスク管理の重要性が益々高まっていった。福岡の事故は市営地下鉄七隈線のトンネル延伸工事に伴う崩落事故で，トンネル上部の岩盤層の強度が低く，岩盤上の土砂・地下水が坑内へ流入したことが原因であったが，流動化処理土の活用等により1週間で復旧が完了*し，その速さは海外から称賛された。その後の動向として特筆すべきことは，国土交通省が橋梁等の点検結果に基づいて，「全国道路構造物情報マップ」，いわゆる損傷マップ（橋梁，トンネル等）を情報公開（2021）したことである。

*水中でも短時間で固まる流動化処理土（固化材，残コン等）等により，陥没は短期間で埋め戻してきた

表1 インフラ関連年表（笹子トンネル事故以降）

年. 月	インフラ関連事項
2012.12	中央自動車道の笹子トンネルで天井板崩落事故が発生
2013	社会資本メンテナンス元年
2013.11	インフラ長寿命化基本計画
2014.5	国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）
2016	インフラメンテナンス国民会議，インフラメンテナンス大賞
2018	インフラの維持管理・更新費の推計 事後保全から予防保全への転換
2019	定期点検要領の改正
2020～	地方公共団体のインフラ維持管理における民間活力活用や新技術導入の促進をテーマに議論，国土交通省「点検支援技術性能カタログ」
2021.3	国土交通省「インフラ維持管理における新技術導入の手引き(案)」
2021.6	国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）（第二期）
2021.8	全国道路構造物情報マップ
2022.4	インフラメンテナンス市区町村長会議
2022.12	社会資本整備審議会の提言「総力戦で取り組むべき次世代の「地域インフラ群再生戦略マネジメント」
2023.4	国土交通省「道路橋の集約・撤去事例集」
2024.4	国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）（第二期）（改訂）



写真2 地下鉄工事中の道路陥没事故（福岡博多駅前）²⁾

従前インフラの老朽化対策が十分行われなかったのは、施設の点検手法・頻度，補修・補強・更新等の対策，予算の減少，技術者不足に関する課題があったと考えられる*。このうち，予算の減少は社会保障予算が8兆円(1980)→17兆円(2000)→35兆円(2020)と増加しているのに対して，公共事業予算は7兆円(1980)→11兆円(2000)→10兆円(2020)と，ほぼ横バイ傾向である。なかでも，道路事業では骨太の方針2006において，行革推進法に基づき，2009年より道路特定財源が一般財源化された結果，社会保障（福祉）等の他予算と競合しながら，予算を確保せざるをえない状況となっている。

*地方自治体が定期点検を実施していない理由は，①技術不足（65%），②資金不足（62%），③人材不足（50%）であった（複数回答）³⁾

また，技術者不足は維持管理にかぎらず，市町村の行政サービスの維持で大きな課題である。技術者不足どころか，土木・建築技師がゼロの市町村も全国の市町村の1/4もある。技術者不足に関して短期的に技術養成することは難しく，技術者不足を補う点検手法等を考える必要がある。著者らは施設数の多い樋門*を対象に，樋門の資料と現地の施設状況のデータを元に，技術的にそれほど詳しくない人でも，施設の健全度を判定できる「健全度診断手法」を開発した⁴⁾。この手法は現地観察（堤体拔上がり，護岸不同沈下等）および資料調査（基礎形式，地質条件，止水矢板等）結果より，樋門の健全度評価を行い，詳細調査の必要性を判定するもので，考え方は他の施設にも応用可能である（地質会社の専門家のノウハウを

活用した)。開発の契機は樋門の事故が発生した後、建設本省が全国の樋門の点検を行うよう通達を出したが、専門家が少なく、点検要員の確保に苦勞したことであった。

*樋門は全国に約 2.3 万あり、うち国管理の樋門は約 8 千ある。水門等が樋門（圧倒的に多い）に次いで多い

樋門で特に問題となるのは、床板下の空洞や堤体内のクラックを通じた浸透で、堤防は土堤で自重等で沈下するが、樋門は杭などで支持されていると沈下せず、土堤の沈下に追従しないために、樋門付近の盛土が抜け上がって、空洞やクラックが発生する（図 1、写真 3）。特に 1973～1984 年に建設された多くの樋門は長尺支持杭で支持されていて沈下しにくいので、こうした情報を調査や点検の判断に活用するのが良い。なお、このような樋門における浸透に対しては、底板下の水の移動を確認できる連通試験が有効であるし、削孔して直接 CCD スコープ（超小型カメラ）やボーリング孔内に挿入したボアホールカメラで観察する方法もある。

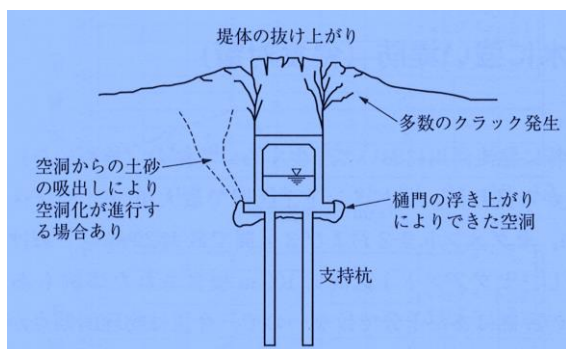


図 1 樋門まわりに発生する空洞等⁵⁾



写真 3 樋門付近の盛土の抜け上がり⁶⁾

ところで、2025.1 に埼玉県八潮市^{やしお}の中央一丁目交差点で道路陥没事故が発生し、メディアで大きな話題となった（写真 4）。原因は直径 4.75m の鉄筋コンクリート製の下水道管（1983 年敷設）が硫化水素に伴う腐食による破損によって、周辺の土砂が管内へ流入し、この土砂流出により直径 5m、深さ約 10m の空洞が発生したため、陥没後進入した 2 トントラックが穴に落下した（管腐食の直接の原因は硫化水素が下水中の細菌の働きで生じた硫酸である）。下水の流入により水が貯まり、周囲の土砂が崩れるなどしたため、トラック運転手の救出には長時間を要した。福岡の事故等も含めると、道路陥没事故は交通や住民生活など、広範囲に影響をおよぼすし、復旧には困難が伴うことが分かる。また、地中には水道、下水道、ガス等多数の配管が敷設されており、電気・通信や共同溝があるなど、高密度に利用されている。リスク管理の視点からは、ライフライン等の埋設情報が一元的に管理されておらず、災害や事故時の対応が後手後手に回ることが課題であり、今後事業者間で情報を共有することが必要である。



写真 4 八潮市における道路陥没事故⁷⁾



写真 5 水道管破裂に伴う 30m の水柱⁸⁾

また、近年老朽化した水道管の破損により、水柱が高く上がる映像をよく目にする（写真5は浜松市の事例）。水道は建物の高い所まで給水できるよう、水道管内の水圧は0.2~0.4MPa（メガパスカル）と高くなっている。0.1MPaで10mの高さまで水を持ち上げることができるので、水道管が破損すると最大40mの水柱が発生する可能性がある。実際、大阪府箕面市（2023）では40mの水柱が発生した。この事故は50年前に建設された水道管が老朽化により破損したのが原因であった。

これらの報道を目の当たりにすると、多くの人が上下水道の老朽化の進行が早いと感じるかもしれない。確かに、水道管に伴う道路陥没は（3千~6千）件/年、下水道管に伴う道路陥没は（3千~5千）件/年発生している⁹⁾が、陥没件数は減少傾向にあり、下水道管の陥没事故（ほとんどが陥没50cm以下の事故）は15年間で2/3に減少した。ここで、建設後50年以上経過するインフラの割合を見ると、表2の通りである。2023年データで見ると、下水道管渠より、河川管理施設や道路橋の方が圧倒的に老朽化が早く、メディアでとり上げる「目につきやすい」状況と実際の状況とは乖離していることが分かる。ただし、統計データの取り方や年次により異なるデータもあり、表3を見ると、道路橋やトンネルの老朽化が早い。老朽化しても使用できる施設もあるが、老朽化が進行すると壊れる施設もあり、写真6には老朽化による落橋事例を示した。表3のなかで、下水道管は材質がコンクリートであるため、他のインフラ同様耐用年数（会計処理上、施設の減価償却費を計算するための年数でもある）は50年であるが、水道管は材質が鉄・ポリエチレンであるため、耐用年数は40年である。

表2 建設後50年以上経過する施設の割合(1)¹⁰⁾

	2018.3	2023.3	2033.3	備考
河川管理施設	約32%	約42%	約62%	約1万施設
道路橋	約25%	約39%	約63%	約73万橋
港湾岸壁	約17%	約32%	約58%	約5千施設
トンネル	約20%	約27%	約42%	約1万1千本
下水道管渠	約4%	約8%	約21%	約47万km

表3 建設後50年以上経過する施設の割合(2)¹¹⁾

	2023.3	2030.3	2040.3	備考
道路橋	約37%	約54%	約75%	橋長2m以上, 約73万橋
トンネル	約25%	約35%	約52%	約1.2万本
河川管理施設	約22%	約42%	約65%	約2.8万施設
水道管路	約9%	約21%	約41%	約74万km
下水道管渠	約8%	約16%	約34%	約49万km



写真6 老朽化による落橋（沖縄）¹²⁾

また、施設の損傷数と供用年の関係を見たデータもあり、首都高速道路の高架橋では延長あたりの損傷数が供用からの経過年数に比例して、特に供用年数が30年を越えると、損傷の増加割合が増える傾向にある（図2）。図中のマークは路線の違いを表している。ここで、インフラの耐用年数であるが、土木構造物は50年程度で、気象が比較的好条件であると、100年程度供用できる場合がある。材料がコンクリートの場合、下記に示す6つの劣化要因があり、これらの要因が多い地域・状況ほど、耐用年数は短くなる。ここで、中性化とは大気中のCO₂がコンクリート内に侵入し、コンクリートが強アルカリ性から中性になると、鋼材の塗膜が破壊され、耐腐食性が低下する現象である。

- 1) 塩害（塩化物イオン）
- 2) 中性化（CO₂）
- 3) 凍害（凍結融解）
- 4) 表面の摩耗・衝撃
- 5) 乾燥収縮
- 6) 施工不良

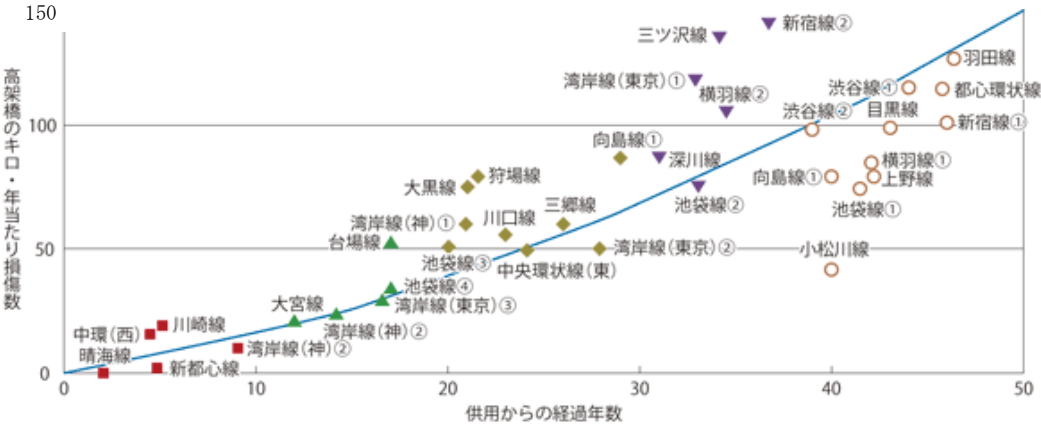


図2 高架橋の供用年数と損傷数との関係（2001～2013）¹³⁾

2. 計画的な補修・更新対応

こうした施設の老朽化への計画論として、念頭に置いておくべきことは、補修・更新の優先順位付けと補修・更新時期の平準化である。施設の劣化・老朽化は定期点検等により、その度合いを明らかにし、予算計画と一体となって、補修・更新時期（優先順位）の決定を行う。高度経済成長期に建設された施設が多いため、補修・更新時期が集中する傾向にある。そこで、予算の平準化を図るため、それに対応した補修・更新計画とする。河川管理施設（直轄で約1万施設）の施設数の推移をみると、図3の通りで、1960年代半ばから1990年までに多くの施設が建設され、ピークは1978年である*。施設の約8割が樋門で、地域的偏在もあり、九州地方に約3割ある。直轄河川の費用負担（国負担率）は、改良工事が2/3であるのに対して、維持や修繕は10/10と負担率は高い。加えて、労務単価の上昇もあって、河川維持修繕費は2010年以降増加傾向にある。

*施設数のピークは橋梁(1970年)、港湾(1980年)、砂防(1990年)、水道(1996年)、下水道(1998年)である

他の計画上の対応としては、水道や下水道事業では個々の市町村ではなく、対象範囲を広くする広域化・共同化により、職員数の減少*対策やコスト縮減を図る方法もある。県内の組織の連携で注目されている「秋田モデル」では、下水道事業（約5,300kmの下水管）の経営戦略や工場の積算を株式会社ONE・AQITA（県、市町村、民間事業者の出資で設立）が担っている。今後50年間で120億円以上の費用削減を行い、職員の少ない市町村に対して、県が点検・保守業務を共同発注している。今後の人口減少の状況下では、リスク管理の視点で、県と市町村の行政機能を一本化し、広域連携したり行政サービスを再編し

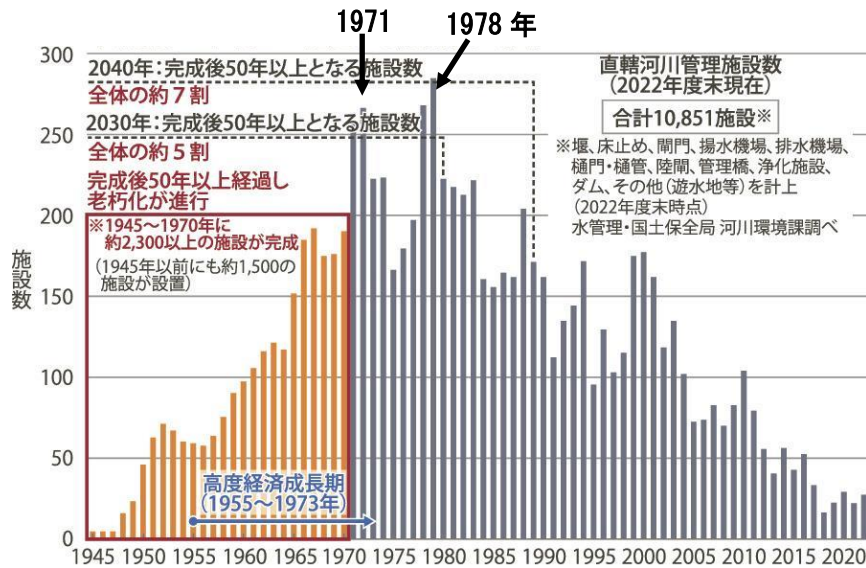


図3 直轄河川管理施設数の推移 (2022年度末現在) 14)

ていくことが不可欠となってくる。

*職員数は水道分野では過去40年間で37%減、下水道分野では過去20年間で34%減という状況である

他には水道事業において、計画給水人口から見て、香川県・広島県・群馬県などで広域化が進んでいる¹⁵⁾。ここで広域化というと、一般的には組織の事業統合を思い浮かべるがそれだけではなく、経営・管理の一体化、施設の共同化などの形態もある。経営の一体化では、組織・管理は一体だが、料金体系は異なる

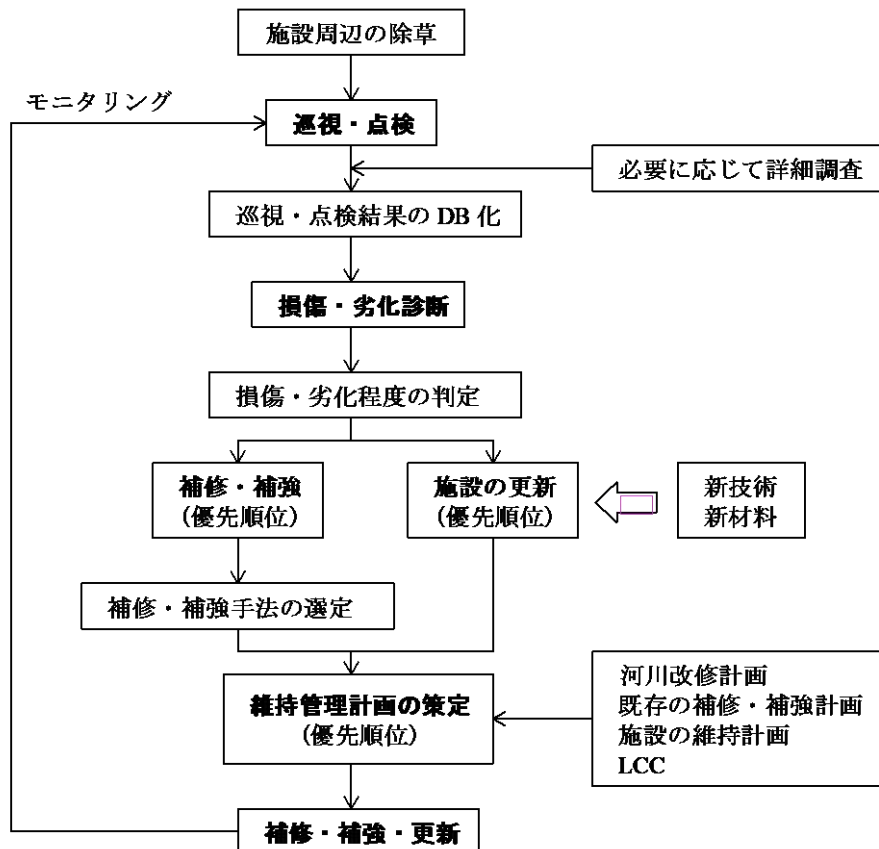


図4 システム的に考えた維持管理フロー図 (著者加筆・修正) 16)

っても良いし、管理の一体化では水質検査や施設管理を一体で行っている。一方、下水道事業では汚水・汚泥処理の共同実施、調査・計画・水質検査の共同発注等が行われている¹⁷⁾。

施設の維持管理を巡視・点検から補修・更新までの流れで系統的に考える。一連の流れは図4に示す通りで、巡視・点検結果に基づいて損傷・劣化診断を行い、施設を補修・補強するか、更新するかを判定し、判定区分等により補修等の優先順位付けを行う。維持管理計画の策定にあたっては、既存の補修・補強計画など他計画との整合を図る必要がある。図中のLCCとはLife Cycle Costの略語で、LCC=計画・設計費+初期建設費+維持管理費+解体処分費+社会的費用（環境対策費等）である。LCCが重要なのは、初期費用が安くても、運用コストが高い場合、長期的には高コストになるからである。

インフラの維持管理が実施された後、施策や計画に対する達成度はKPI（重要業績評価指標）により評価される。KPIとはKey Performance Indicatorの略語で、例えば5か年計画に対して、小規模樋門の無動力（自然開閉）化の実施率やダム堆砂問題の解消率が年度ごとに示される。この指標により、計画の達成度と改善点（目標）が明らかになる。長期的な視点で設定される目標達成指標のKGI（重要目標達成指標：Key Goal Indicator）もある。

3. 事後保全から予防保全への転換

維持管理の考え方としては、施設が大きく損傷してから修理・修繕する事後保全（BM, Breakdown Maintenance）から、施設が致命的なダメージを受ける前に少しずつメンテナンスを重ねる予防保全（PM, Predictive Maintenance）へと転換しつつある*。予防保全によりインフラの品質低下防止、設備・機械の長寿命化が図れると同時に、保全計画が明確になる。予防保全に先鞭をつけた施策は東京都のアセットマネジメントで、2004年から推進された。東京都は橋梁等の状態を把握・評価し、今後の状態を予測した。当時の石原都知事の所信表明（2004年）で、既に「予防保全型の道路管理」が述べられていた。なお、アセットマネジメントとはメンテナンスサイクル（点検→診断→措置→記録→点検）での情報に基づいて、施設全体を効率的に管理する手法である。

*河川管理施設は洪水災害で被災した施設を修理・更新することが多いため、他施設に比べると事後保全が多い

図5に示すように、予防保全では事後保全より短いサイクルで維持管理（メンテナンス）を行い、インフラの長寿命化を図るものである。予防保全により、施設の劣化を確認したり、損傷が軽微な段階で修繕すると、維持管理費を削減できる。予防保全への転換により、事後保全と比較した「平成30年推計」では、5年後、10年後、20年後で維持管理コスト（インフラ全般）が約3割減少し、30年後（2048年度）には約5割削減できるという国土交通省の試算結果もある¹⁸⁾。

維持管理・更新費用 約5.2兆円（2018年度）→約12.3兆円（2048年度）：事後保全
 約5.2兆円（2018年度）→約6.5兆円（2048年度）：予防保全

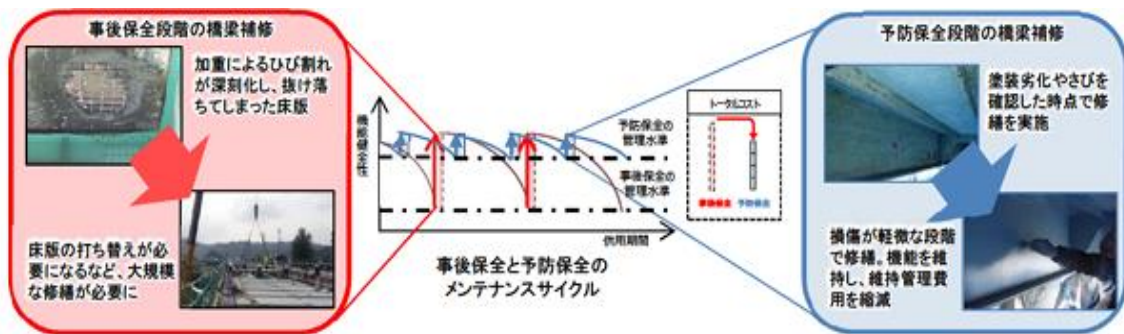


図5 予防保全の考え方に基づくインフラメンテナンスへの転換¹⁹⁾

社会資本整備審議会では、今後のインフラメンテナンスへの提言として、2022年に「総力戦でより組むべき次世代の「地域インフラ群再生戦略マネジメント」～インフラメンテナンス第2フェーズへ～」を取りまとめ、予防保全への転換を着実に進めるための戦略としている。すなわち、市区町村が道路・上下水道などの地域インフラを群として捉えて（既存の行政区域にこだわらない広域的な視点で）、効率的・効果的に管理することを目指している。

コンクリート構造物等の耐用年数は50年程度であるが、これまで予防保全的に補修・補強を行った結果、耐用年数以上に長期間問題なく供用されている事例がある。施設の損傷・劣化に着目して、長寿命化を図る技術や材料も重要であるが、下記に示す事例のように、特に大きな問題もなく、長期間供用された施設の長寿命化要因を分析することも、リスク管理の視点上重要であり、今後の調査・研究テーマともなる。

<名島橋（福岡）>

福岡市の多々良川（2級河川）に架かる7径間の鉄筋コンクリートアーチ橋（全長204m、1933年竣工）で、これまで変状調査結果を踏まえ、適時適切に補修・補強（床板の修繕、橋梁の基礎補強等）を行ってきた結果、90年以上経過した現在でも、大きな損傷もなく使用されている。名島橋は国道3号線に架かり、交通量は6万台以上/日と少なくない。1957年までは福岡県が管理し、1958年以降は国が管理している。2018年に国の登録有形文化財に指定された。

<山梨県内のインフラ>

著者の職場があった山梨県内には多数の治水遺構（土木遺産）などが存在し、今でも現役で活躍しているインフラが多数ある（その一例が表4）。特に勝沼堰堤は今から100年以上前に施工された施設であるが、堰堤機能を維持して甲府盆地を水害から守るとともに、周囲と調和のとれた優れた景観を保っている（写真7）。また、笹子隧道は20世紀初めに建設された鉄道用隧道であるが、今でも現役使用に耐える強度を保持している。

表4 山梨県内の古い時代のインフラ²⁾

分野	施設名	竣工年 所在地	インフラの概要
トンネル	笹子隧道	1902 大月市	全長4,656m（当時日本一）、幅員4.58mの赤レンガ製の鉄道用隧道で、今も現役使用に耐える強度を保持している
堰堤	勝沼堰堤 （写真7）	1917 甲州市	笛吹川支川日川にある高さ18.3m、長さ99.8mの石積みの重力式砂防堰堤で、維持管理が容易になるよう、自然（岩盤）を有効利用している
	芦安堰堤	1926 南アルプス市	日本最初のコンクリート製堰堤で、高さ22.68m、長さ59mの砂防堰堤である。上部はアーチ式堰堤となっている。釜無川支川の御勅使川にある
橋梁	ながとろ 長潭橋	1925 甲府市	コンクリート製のアーチ橋で、荒川上流にあり、名勝昇仙峡のシンボルとなっている
ダム	丸山貯水池	1937 甲府市	荒川用水のアースダムで、高さが約19mある。周囲約4kmの人工湖で、通称千代田湖と称されている

注) 笛吹川、釜無川、荒川はいずれも富士川水系である



写真7 勝沼堰堤（左：上流側，右：下流側）

耐用年数以上の長期間にわたって供用されてきた全国の事例を紹介してきた。インフラ全体で見た時、どれぐらい古い施設があるかという点、古いインフラは建設年度が不明な施設が多いが、統計で計上されている施設では、道路・港湾施設は1920年頃で、100年以上前の施設がある。河川管理施設は1930年頃で、90年以上前の施設がある。一方、建設時期が新しい下水道は、古い施設でも1950年頃で、長くて70年程度などと、施設によって供用年数は異なっている。

インフラメンテナンスに関する動きとしては、産学官民が一丸となってメンテナンスに取り組む社会の実現に向けて、技術や知恵を出し合うプラットフォーム（基盤となる環境・体制）として、インフラメンテナンス国民会議（2016）が設立され、専門家・技術者・行政だけでなく、市民や企業等も参加して、インフラの維持管理における分野横断的な連携を推進し、技術やノウハウの共有が進められている。例えば、地方自治体（ニーズ）と民間（シーズ）間の技術のマッチングを行うための地方フォーラム（全国10ブロック）が展開されている。

5章に後述するように、直轄に比べて、市区町村施設の老朽化対策は進んでおらず、措置を講ずべき判定区分Ⅲ・Ⅳの施設が多い。そこで、地方自治体において、予防保全への本格転換や新技術の活用など、効率的・効果的なインフラメンテナンスの実現を目的として、市区町村長で構成するインフラメンテナンス市区町村長会議（2022）を設立し、トップダウンによるメンテナンス施策の推進を図ることとなった。2025年の会議では、首長の参画率は実に約7割であった。会議を通じて、産学官民の会員ネットワークを生かし、地域一体でメンテナンスに取り組んだり、技術者体制づくりが行われている。

4. リスクの見つけ方（巡視・点検）

河川管理施設の点検手法としては、巡視（施設の状態確認、不法占用・投棄等の把握）、平常時点検（日常、定期、出水期前）と出水時点検（出水時、臨時）があり、補修・更新では特に定期点検において、日常点検で確認しにくい施設の細部にわたって、劣化の箇所・状況を把握している（図6）。出水時点検においては、洪水による施設の変状や漏水、流木による閉塞などを調べる。定期点検の頻度は施設により異なり、近接目視による点検は洪水などの自然現象の影響が大きな河川・ダム・砂防施設が1回以上/1年であるのに対して、人工公物である道路・水道・下水道施設は1回以上/5年である。海岸施設は1回/5年が目安となっている。昨今の道路陥没事故等を見ると、人工公物であっても、1回以上/3年の目視点検を行うべきであると言える。なお、河川用ゲート設備等の定期点検には年点検と月点検があり、月点検としては管理運転点検と目視点検が行われている。

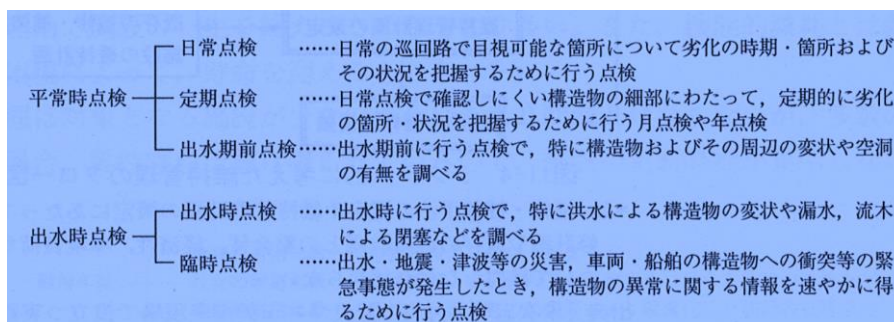


図6 時期・頻度から見た点検の種類（河川管理施設）²¹⁾

道路メンテナンス年報（年報により「見える化」が促進された）より、道路・トンネルの定期点検状況を見ると、1巡目は2014～18年度の5年間に行われ、点検により判定区分Ⅲ・Ⅳとされた橋梁の修繕等の完了率は86%であった。管理者別の完了率を見ると、国土交通省が82%、高速道路会社が85%と高いのに対して、市区町村は62%と低い状況である²²⁾。例えば、2014年度の点検結果を見ると、30年以上を経過した橋梁で、判定区分Ⅲ・Ⅳが全体の2/3と多かった。また、2巡目は2019～23年度に、3巡目は2024年度から実施されている。2巡目点検終了時と1巡目点検終了時を比較して、建設後50年経過した橋梁数が増加（約13万橋→約21万橋）したが、修繕等の結果として、判定区分Ⅲ・Ⅳの橋梁数は着実に減少（6.9万橋→5.6万橋）している。3巡目点検に向け、下記の項目に関して、点検要領の見直しが行われた。

＜質の向上＞腐食が与える影響など、判定区分の判断根拠を記載する

＜点検の省力化＞ドローン等の点検支援技術の活用方法を明確にする

また、施設が十分機能を発揮できないのは、物理的な劣化・老朽化以外に、社会的要因（計画変更、安全性向上など）、機能的な新技術・新材料の出現等による陳腐化等の要因があることにも注意する。例えば、橋梁の架替え理由を調べた結果では、供用年数の長い橋は改良工事（路線・線形の改良、河川改修）、損傷等が多く、供用年数の短い橋は改良工事、機能上の問題（幅員狭小）、耐荷力不足等が多く²³⁾、物理的要因よりも社会的要因が多い。以下では、特に物理的なインフラの劣化・損傷リスクの見つけ方を示しているが、最近の新しい点検・検査・施工技術については、6.1節と6.3節に記述している。

4.1 河川管理施設の点検等

河川管理施設の場合、築堤や引堤工事の際に、堤体開削が行われれば、その機会を利用して、堤体断面の土質構成や混入異物等を調査する。堤体開削がない場合、堤体内は非破壊検査により調べる必要があるし、護岸や橋脚等は水中の施設状況を把握することが重要である。非破壊検査手法（表5）はそれぞれに得失があり、電磁波の反射による誘電率分布を調べる地中レーダ（電磁波探査法）は、深度5m程度（低周波数だと10m）まで探査できるが、鉄筋等の金属があれば探査できない（写真8）。また、人工震源による表面波よりS波速度構造を調べる表面波探査法は、深度20m程度まで探査できるが、分解能はそれほど高くない。他に電気探査法や弾性波探査法もあるが、堤体等の浅い深度では測定精度が低いため、本技術資料では割愛した。

堤体内の探査も重要であるが、大きな水害を発生させるのは洪水の越水に伴う破堤（約7割）であり、高さが低い堤防から越水しやすい。部分的に低い堤防は越水深が高くなって破堤を起こしやすい。例えば、平成16年水害の信濃川^{かりやたがわ}支川刈谷田川^{いからしがわ}・五十嵐川^{まるやまがわ}、円山川などはこの事例である。著者が関東地方の河川で行った堤防天端の不陸（凹凸）調査によれば、未舗装区間では50～100m程度の区間内で見て最

表5 非破壊検査技術による堤体内探査の適用性等²⁴⁾

技術名	原理等の概要	適用性または留意事項
地中レーダ (電磁波探査法) (写真8)	地中に高周波の電磁波(数十MHz～数GHz)を放射し、堤体内部で反射した波より誘電率分布を捉えて、浅部の構造・空洞・埋設物を探査する	深度5m程度まで探査(低周波数のアンテナでは10m程度まで探査)できるが、粘性土では1m程度の探査しかできない。鉄筋等の金属があれば探査できない
表面波探査法	人工震源により発生させた地盤の表面波(地表面を伝わるレイリー波)を利用し、地震計で得られた伝播速度の波長(周波数)による違いを逆解析してS波速度構造を調べ、堤体地質等を判断する	分解能は必ずしも高くないが、深度20m程度までの概略の地質分布を把握するのに適している



写真8 地中レーダによる探査風景(カート搭載型)²⁵⁾

大20cm程度で、舗装区間では河川により大きく異なり、10cm以下の河川もあれば、最大50cm程度の河川もあった²⁶⁾。越流水深は20～40cm程度であるので、例えば上下流区間より30cm低い不陸区間は越流水深(越流水のせん断力)が約2倍*になり、越流水により侵食・破堤しやすくなる。

*越流水のせん断力は、越流水深にほぼ比例して、大きくなる

地盤沈下の影響もあり、例えば円山川流域が位置する豊岡盆地は、地下水くみ上げに伴う地盤沈下により地盤が1～2cm/年低下している(最大は関東平野南部の10cm/5年)他、築堤の自重に伴う堤体圧縮により、堤体は更に沈下し、堤防高が十分確保できていない区間がある(完成堤の整備率が低い)。従って、リスク管理の視点から、減災も含めて堤防高の管理が重要となる。堤防高はRTK-GPS(測量精度は数mm～数cm)やRTK-GNSS*(同1～5cm)などにより計測する。

*RTKはReal-Time Kinematic, GPSはGlobal Positioning System, GNSSはGlobal Navigation Satellite System(人工衛星を利用した地球規模の測位システム)の略語である

一方、堤体の劣化・老朽化については、その見方に注意する必要がある。堤防のリスクチェックでは、堤体・のり面の変形・沈下を中心に見る(図7)。特に特徴的な侵食による被災・変状に関する点検のポイント²⁷⁾は下記の通りであるので、それぞれの箇所について、入念に被災や変状を調べておく。浸透に関しても、同様の点検ポイントがあるが、本資料では割愛した。リスク管理の視点からは、目につきにくいブロック裏等の箇所や水中の施設状況を注意して見ておくことが重要である。

<侵食による堤防の被災・変状に関する点検のポイント>

- ・護岸ブロックの流失・沈下やのり覆工下の空洞は、土砂の吸い出しやのり面の侵食につながる。対策としては吸い出し防止シートを敷設する
- ・表のり面の縦断(堤防法線)方向に亀裂や空洞があると、河岸や護岸の基礎が沈下または流失している危険性がある。横断方向の亀裂は地震によりできた可能性がある
- ・連節ブロックの上流端のめくれは、次の洪水でブロック全体の流失につながる恐れがある
- ・樋門や水門等、施設周りの侵食は、施設と堤防が一体となって被災を引き起こす危険性がある

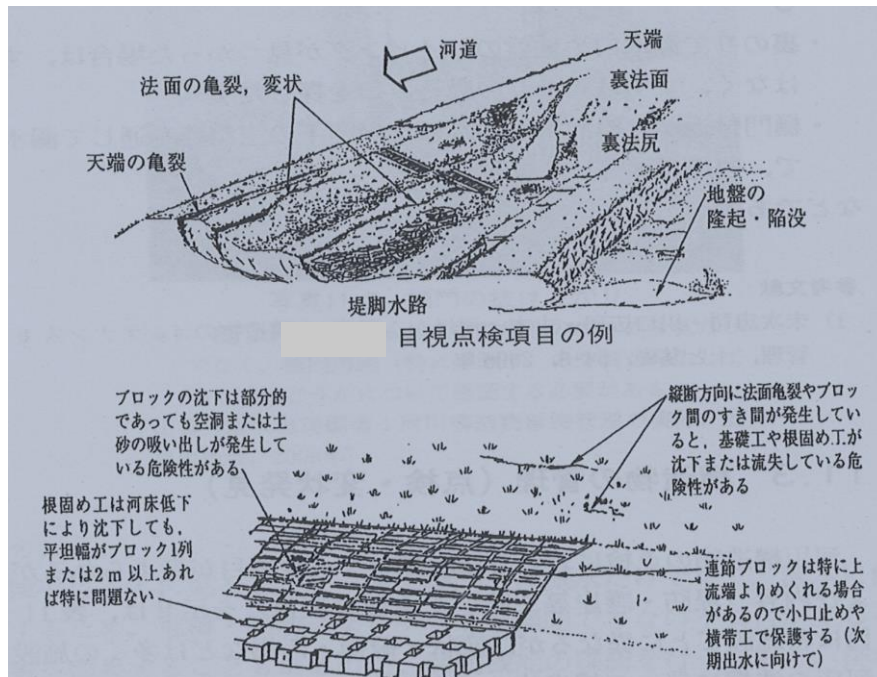


図7 侵食被害を見る場合の注意点 (著者修正) 27)

河川管理施設の点検で重要な水中調査では、潜水士や水中ドローンによりリスクを発見することができる。海岸や河川の計測では、一度に広範囲を計測できる3次元サイド・スキャン・ソナー(C3D)が適用できる。C3Dはトランスデューサ(変換器)から発射されたファンビーム(周波数200kHz)が河床などで反射したエコー(音波)を受信して、位相差から水深を求める装置で、水深35cm~200mで計測可能である(写真9) 28)。ビームのスワス角は従来のナローマルチビームが120度であったのに対して、C3Dは160~170度と広く、計測期間は短期間ですむ。また、ダム堤体や海水取水施設等では、ROV(遠隔操作の無人潜水艦, Remotely Operated Vehicle)の1種である水中ドローン*が点検などに活用されている(写真10)。一般的には水中ドローンで補修箇所を見つけたら、即補修するのではなく、ダイバーが潜って詳細調査を行う。水中ドローンの最大潜航深度は300mで、高精細ハイビジョン撮影ができる。しかし、河川の護岸付近などは水深が浅く、草木などにより航行は困難な場合があるので、水中調査は難しい。

*水中ドローンの運用上のポイントは、様々な環境下で安全に潜航させるには「外部給電」、多様なセンサーを多数搭載できる「拡張性」を有していることである

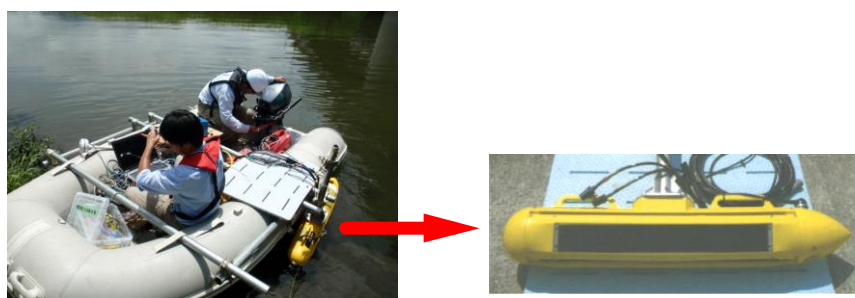


写真9 サイド・スキャン・ソナーによる河川地形の測量



写真 10 水中ドローンによる取水工の点検状況²⁹⁾

4.2 河川管理施設以外の施設の点検等

橋梁や高架橋等の施設は、水面上や空中にあるため、施設点検は簡単ではない。そこで、首都高速道路では耐用年数 100 年を目指して、床板下に人が入れる空間を有する点検足場（恒久足場）を常設し、頻繁かつ臨機応変に点検できる体制としている。この足場はアルミニウム製で橋梁・道路下を覆っているため、鋼橋の塗装回数を減らしたり、部材の劣化を防ぐ効果も有している。

また、コンクリート中の PC（プレストレストコンクリート）鋼材の腐食を見つけることは難しい。PC 鋼材の内部腐食を中性子や X 線で非破壊検査する方法も研究されていて、理化学研究所は検査に小型中性子源システム（RANS-II*）を用いた中性子イメージング法を行っている³⁰⁾。中性子は X 線に比べて透過力が高く、水の検出能力が優れているため、中性子が塗膜下の水に反応して減衰すると、透過率比（乾燥処理後の透過率/浸漬直後の透過率）が大きくなる特性を利用している。一方、トンネルでは一般車両に着脱可能な撮影装置を装着し、走行しながらトンネル内壁面を撮影して、撮影画像から高精度な展開画像を作成し、微細な変状を判別している（写真 11）。このような点検支援技術（橋梁・トンネルに関する 7 技術）は、国土交通省「点検支援技術性能カタログ（2020 年～）」に技術の検証結果がまとめられている。

*RANS は RIKEN Accelerator-driven Compact Neutron Systems の略語である



写真 11 トンネルモニタリング技術³¹⁾

インフラの点検では、コンクリート部材（コア）を抜き出して、劣化度や物性の変化を調べる場合がある。コンクリートに 5～10cm の孔を開け、コンクリートのサンプルを取り出し、中性化試験（アルカリ性状態）、塩化物イオン含有量（塩化物の浸透量）試験を行う。過去の試験結果によれば、塩化物イオン含有量はコンクリート表面からの距離が長いほど、少なくなるとはかぎらない。他にコンクリート表面をエアピック等で鉄筋が露出するまで微破壊し、直接目で見て鉄筋の腐食度を調査する方法や、鉄筋が露出するまで微破壊し、鉄筋の腐食度を電氣的に調査する方法（自然電位法）もある。

下水道等の地中構造物は、人が管内に入って目視点検する場合があるが、管径が小さな下水道（φ 60cm 未満が 8 割以上）も多く、近年は調査用ロボットによる点検も多くなっている。例えば、BSL 社の

GESICAM（ゲスイカム）は、障害物や段差を乗り越える自走式のTVカメラ車両により、遠隔操作しながら下水管の劣化や腐食を検知し、モニターしたり、USB録画できる（写真12）。カメラの高さを調整できる電動リフトの他、管内の結露や湿気の中でも、熱線によりカメラの曇りを取り除ける仕組みがある。20～80cmの管径の下水道に対応し、150m（ケーブル長）以内の区間の検査が可能である。



写真12 下水管内検査用TVカメラ車両（ソニー製）（著者加筆）³²⁾

また、調査方法で見れば、打音調査（検査）などがある。打音調査ではコンクリート部材の表面をハンマーで叩くと、剥離や空洞があるコンクリートでは、低い音が発生するので分かる。浮きや剥離が発生しやすい打継目や目地部およびその周辺を重点的に調査する（予め調査範囲を絞る）と、打音調査による点検等の判定のバラツキを少なくできる。また、バネを内蔵したシュミットハンマー（コンクリートテストハンマー）でコンクリート表面を打撃した際の内蔵ハンマーの反発度からコンクリート強度を推定する（反発度が大きいほど、圧縮強度が大きい：反発硬度法）方法もある。

マクロな河川堤防等の施設管理のためには、ドローンの活用が考えられる。経済産業省は2025.3にドローン航路の施策を打ち出した。これは河川沿いや送電線沿いにドローンを航行させて、インフラの巡視・点検や物流を行うもので、下記に示す天竜川水系や埼玉・秩父エリアが利用エリアとして想定されている。将来的には複数の航路を接続し、全国を網の目状に結ぶデジタルインフラとして整備する計画（約4万km）で、技術の海外輸出も視野に入れている。

<天竜川水系（浜松市）>

浜松市天竜区106km、市街地および浜名湖周辺74kmの計約180kmにドローン航路を設定する。途中にモビリティハブやターミナル基地（3箇所）を設ける。具体的には物流サービス事業者のドローン航行により得られた河川映像データを用いて、建設コンサルタント会社がオルソ画像（歪みを修正した画像）^{ひずみ}を生成し、インフラの変位分析を行うことで、インフラの変状を検知するものである。

<秩父エリア>

延長約150kmの送電線上空を利用して、ドローンによる物流を行う。

一方、インフラの変状を更にマクロに見る方法として研究開発が進められているのは、人工衛星に搭載されたレーダによる監視技術の応用である。JAXA（宇宙航空研究開発機構）は、2014年に打ち上げた人工衛星「だいち2号」に搭載されたLバンド合成開口レーダ（PALSAR-2）*を用いて、インフラの変位モニタリングについて研究している³³⁾。この方法ではANATIS（衛星SARデータによる変位監視ツール、Automated Nationwide Application of Timeseries InSar）を用いることにより、変位を高精度に検出できる。研究では観測データの解析結果（河川堤防の沈下・はらみ出し、港湾施設の沈下）と現地調査結果との比較が行われ、今後技術の社会実装（商用利用）を目指している。

*合成開口レーダは雲を透過するので、天候に左右されずに地上のインフラを撮影できる

次に施設の点検や異常の発見等により、事故を未然に防ぐことができた3つの事例を紹介する³⁴⁾。インフラのリスク管理（リスクの見つけ方など）にとって、参考となる事例である。

<木曾川大橋（三重県）>

木曾川大橋（国道 23 号，交通量：6 万台以上/日）は 1963 年に竣工した 12 連のワーレントラス橋（橋長 858m）で，老朽化が進んでいた。専門家が 2007 年に点検を行った際に，斜材の腐食により，橋全体が上下に波打つ状態を目視した*ため，詳細点検を行った結果，道路を支える H 型鋼の破断が見つかった。これは橋の崩落に直結する重大な損傷であった。また他にも腐食している斜材が複数見つかり，橋全体の補強工事が行われ，事故の未然防止につながった。

*破断した斜材の下が高水敷であったため，国土交通省職員がここで点検していて，異常を見つけた。ここが河道（水面の上）であれば，発見が遅れた可能性がある

<山陽新幹線（福岡県）>

JR 西日本・山陽新幹線の福岡トンネル（小倉ー博多間）で 1999 年にコンクリート塊が落下し，走行中の新幹線ひかりを直撃する事故が発生した。新幹線車両の屋根が長さ約 16m，幅約 1m に渡ってめくれ上がり，パンタグラフの一部が破損した。幸い死傷者は出なかったが，新幹線の安全性を脅かした事故であった。この事故を受けて，山陽新幹線の全トンネルの点検を実施した結果，北九州トンネル内で，約 226kg のコンクリート塊が 5 つに割れて線路脇に落下しているのが見つかるなどして，その後の事故の未然防止につながった（写真 13）³⁵⁾。



写真 13 落下していたコンクリート塊（山陽新幹線・北九州トンネル）³⁶⁾

<砂防堰堤（広島県）>

西日本豪雨（2018.7）の影響で大規模な土石流が広島県安芸郡坂町を襲ったため，砂防堰堤が決壊し，複数の死者を出す惨事となった。想定を上回る土砂の流入により，砂防堰堤は 50m にわたって袖部の壁などがすべてなくなる決壊事故となった。砂防堰堤は 1947 年に石積みで作られたもので，住民より老朽化しているという心配の声が上がっていて，コンクリート製の砂防堰堤が建設中であった（2020 年完成予定）。しかし，広島土砂災害（2014.8）の災害復旧に予算があてられたことにより，砂防堰堤の建設は遅れ気味となっていた。

5. 点検結果に基づく補修・補強・更新

巡視・点検結果は，施設の適正管理や防災・減災の観点から，また点検の効率化・充実を図るため，劣化・老朽化の診断前に施設情報をデータベース化しておく。データベースの 1 システムとして，国管理河川で運用しているデータベースシステム「**RiMaDIS***（リマディス）」がある。このシステムでは，データセンターからデータを一元化し，モバイル通信による屋外からの迅速なアクセスに対応できるよう，インターネットで国土交通省の本省・整備局・事務所等の間で情報を共有し，帳票作成の効率化，現地情

報の集計，維持管理データの一元管理などを図っている（図8）。本システムは河川の巡視ではよく活用されているが，施設の点検ではまだ約半分の利用にとどまっている。

* RiMaDIS は River Management Data Intelligent System の略語である

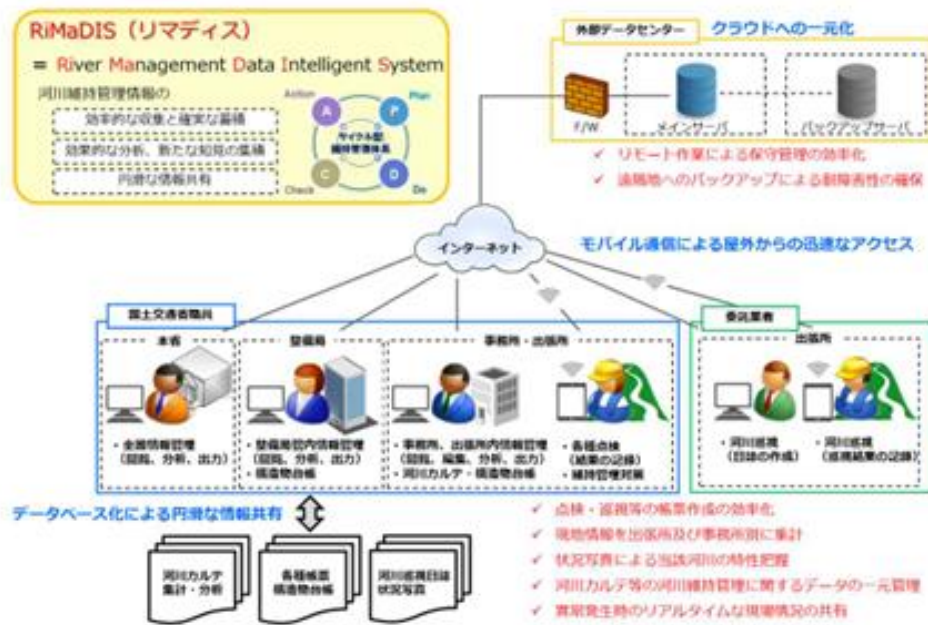


図8 RiMaDIS の概要 37)

施設の点検により，劣化や老朽化の程度に対しては下記に示す判定区分（橋梁等）が出される。写真14に示した地方自治体管理の橋梁の事例は，床板の鉄筋が露出したり，橋脚が大きく洗掘され，判定区分Ⅳの危険性の高い損傷事例である。なお，全国橋梁の点検結果では，判定区分Ⅲ・Ⅳは全体の1割程度で，うち約9割は地方公共団体の橋梁であった。また，河川管理施設の損傷事例を見ると，護岸の事例が多く，根固め工は河床低下に追随する沈下は問題ないが，写真15のような大きな沈下はのり覆工や堤体等にも影響する危険性があり，対処が必要である。他に堤防の亀裂（浸透被害を起こす場合がある）や樋門の損傷事例などがある。

- ・判定区分Ⅰ：健全 構造物の機能に支障なし
- ・判定区分Ⅱ：予防保全段階 予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
- ・判定区分Ⅲ：早期措置段階 構造物の機能に支障の可能性，早期に措置を講ずべき状態
- ・判定区分Ⅳ：緊急措置段階 構造物の機能に支障，または緊急に措置を講ずべき状態



(1)床板鉄筋の露出



(2)橋脚周りの洗掘

写真14 危険な損傷事例（橋梁） 38)



(1)根固めブロックの沈下



(2)堤防のり面の侵食

写真 15 危険な損傷事例（河川）

河川管理施設の点検結果は変状箇所ごとに、次に示す a～d の 4 段階で評価され、評価区分が c, d の場合は詳細点検を行うこととしている。これに対して、一連区間の点検結果の評価では、a→A, b→B, c→C, d→D として評価される。

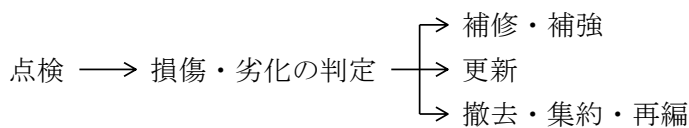
- a. 異状なし
- b. 要監視段階 : 変状あり
- c. 予防保全段階 : 変状あり+補修等 ⇒ 詳細点検
- d. 措置段階 : 機能支障あり+補修・更新 ⇒ 詳細点検

国管理の河川管理施設の点検結果（2020 年度）の評価区分は、表 6 に示すように、評価区分 C が堤防で 31%、樋門で 21%、水門で 34%で、評価区分 D の施設はなかった。いずれの施設も評価区分 B（変状が見られるが補修するほどではない）の割合が最も多かった。

表 6 河川管理施設の評価区分ごとの割合³⁹⁾

	A	B	C	D	施設数等
堤防	5%	64%	31%	0%	14,346.7km
樋門	16%	63%	21%	0%	8,430 施設
水門	11%	55%	34%	0%	353 施設

施設の点検結果が判明すると、次の段階として補修・更新等を行う。すなわち、



というように、損傷・劣化・老朽化の程度に対して、補修するか、更新するか、撤去するかなどについて判定するとともに、対応の優先順位をつける。たとえ、損傷・劣化等がなくても、堤防嵩上げ、道路線形の改良、幅員狭小などの理由で、施設を更新する場合もある。ここで、上記した集約とは施設の数減らして対応すること、再編とは複数の施設の機能を 1 箇所の施設で持たせることである。次に、各施設の補修・補強方法について述べる。

5.1 補修・補強方法

施設の点検結果や判定区分に基づいて行われる補修・補強方法を主要な施設ごとに示すと、下記の通りである。特に樋門の空洞・空隙、コンクリートの鋼材を対象とした補修・補強方法が多数ある。

<樋門>

- ・底版下の空洞や隙間等はグラウトなどで充填しておく。浸透水流調査のグラウトホールを通じて、

グラウトを注入する。また、樋門のゲートが錆びて劣化している場合、錆びをしっかりと落としてから、表面塗装を行う

- 樋門の函体（円形ヒューム管）の継手部の開きやクラックに対して、管更生工法（管内面に新管を構築する工法）により補修を行う。この工法では硬質塩化ビニール製のセグメントを管の内側に挿入し、セグメントと管渠の間にグラウトを注入（充填）して、新しい管渠に更新する。すなわち、管の取り外しを行わずに補修・補強できる

<道路橋>

- PC 鋼材のグラウト再注入：塩害等による劣化促進やグラウトの充填不良に対して、PC 鋼材のグラウト不足を補うために再注入を行う。「PC グラウト再注入工法の手引き 40)」に従って、グラウトを再注入する
- 鋼製大型伸縮装置の取り換え：大型車の増加に伴う疲労亀裂等が見られた橋梁のビーム（梁）損傷に対して、伸縮装置（温度変化や乾燥収縮等に対応して追従する、ジョイントとも言う）を交換する
- 鋼橋の重防食塗装：架設時の打ち傷に起因した腐食や上塗り塗膜の消耗に対して、腐食因子の侵入を防ぐために、重防食塗装を行う。重防食塗装とは腐食要因を遮断する塗料を下塗りし、耐候性に優れた塗料を上塗りすることを言う
- 海上飛沫部および水中部は、ステンレス鋼を巻きつけて防食する。大気部は通常行う塗装に加えて、金属（アルミニウム、マグネシウム）溶射後、重防食塗装で防食する 41)。コンクリート中の鉄筋は早期劣化対応となるエポキシ樹脂被覆鉄筋を採用する。水中部だけの場合より、水中と大気中両方に曝される場所の方が劣化しやすい

<コンクリート構造物>

- 耐震対策として、柱や梁に高強度の炭素繊維（巻きつけに火気や溶接が不要）を巻いて、コンクリート躯体を補強する方法がある（図 9）。鋼板補強やコンクリート巻き立てなどの工法（橋脚の曲げ耐力、せん断耐力およびじん性の向上が図れる）に比べて、短期間で施工できる

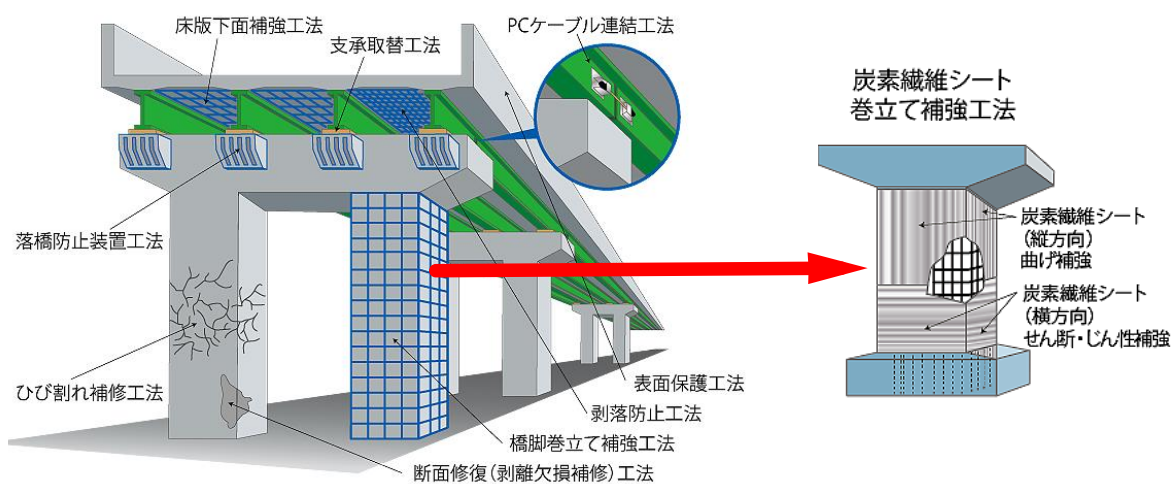


図 9 耐震補強工法と炭素繊維巻き立て補強工法（著者修正・加筆） 42)

5.2 点検車・探査車等

点検・補修・補強にあたっては、施設の壁や背面（床版裏など）など、通常のやり方では対応が難しい場所や状況に適した点検車・探査車等には、小型ドローンの他に下記に示すものがあるので、目的や状況に対応させて適宜活用する。

<壁面走行ロボット>

青木あすなろ建設と3社で共同研究されている「壁面走行ロボット」(ICM社製)は、裏面のバキュームで壁に吸着し、搭載されたカメラで外表面の目視点検とハンマーによる内部の打音検査を行う(写真16)。遠隔操作により、コンクリートのひび割れ、浮き(下地からの剥離)を点検することができる。他にプロペラの推進力と走行輪により壁面・天井走行して、構造物を点検(劣化状況、損傷箇所等)することが可能なロボットも(株)ITSなどにより開発されている。キャタピラが磁石性で、鋼材(柱や壁)にはりついて壁面・天井走行するタイプもある。



写真16 壁面走行ロボット 43)



写真17 橋梁点検用のゴンドラ車 44)

<橋梁点検車>

ゴンドラ車は橋梁点検車の先端ブーム(腕の部分)を改造し、専用ゴンドラ(50m昇降可能)として製作された特殊車で、1台2役(橋桁下面と橋脚)を実現している。写真17に示した日本ピソー社の「GC-240L」は、ブームを降ろした状態で、橋梁上の車体設置面から下部100mまでのアクセスが可能で、左右に70度旋回でき、これまで橋梁点検車では届かなかった高い橋脚面や河川部などの高所作業車が立ち入れなかった場所の点検も可能になった。ゴンドラ積載重量は最大240kgである。

<道路・橋梁のレーダ探査車>

(株)土木管理総合試験所の高速移動型3D(3次元)レーダ探査車「ROAD-S(ロードス)」*は、地中レーダ探査により道路・橋梁床版を計測した波形データのわずかな変化を、デジタル信号処理とAI(ディープラーニング<深層学習>)を活用して自動で検出できる。特殊劣化診断アルゴリズムで波形がチェックされ、診断結果は色分けされて出力されるため、専門知識がなくても異常箇所(空洞、わだち掘れ)を判断できる(図10)。このように、本システムは最小のLCCで、道路の異常診断をできる利点を有している。

*3Dレーダ探査車の探査速度は50km/hで、他の探査車は80km/hのものもある

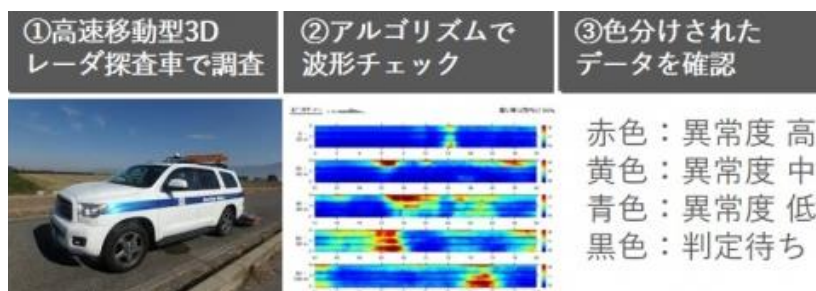


図10 高速3Dレーダ探査車の調査結果による診断の流れ 45)

<災害対策用機械（災害派遣車）>

洪水や地震等の災害時に、応急作業の支援や被害軽減を目的として、例えば国土交通省・中部地方整備局に配備されている排水ポンプ車（30m³/分、60m³/分）、照明車（1.2kw）、衛星通信車（写真18）、対策本部車等の災害対策用機械で、各地で発生する災害や施設の被災に対応できる。このうち、衛星通信車は災害現場の映像等をKu-SAT（衛星小型画像伝送装置）により、衛星経由で本部へ送信したり、ヘリコプターの映像を本部へ送信できる。こうした衛星通信システムは、地上通信網の有無や被災の影響を受けることなく、通信回線を構築できる。



写真18 衛星通信車（国土交通省中部地方整備局）46)

5.3 更新・撤去等

施設の劣化や老朽化が激しいと、補修・補強するよりも、更新した方が良い場合がある。例えば、ゲートが老朽化した小規模樋門では、ゲートが無動力のフラップゲート（写真19）*に替えると、更新・管理コストを低くおさえることができるし、ゲート操作の必要がなくなり、高齢化した操作員対応ともなる（70才以上の操作員が25%：2015年度調査）。フラップゲートは油圧シリンダにより作動するようにしておくと、水路と河川の水位差がなくてもスムーズに開閉できるようになる。

*フラップゲートは下方が固定されておらず、流水の水圧により開いて排水できるが、排水先河川の水位が高くなると、ゲートは閉まって河川からの逆流を防ぐ

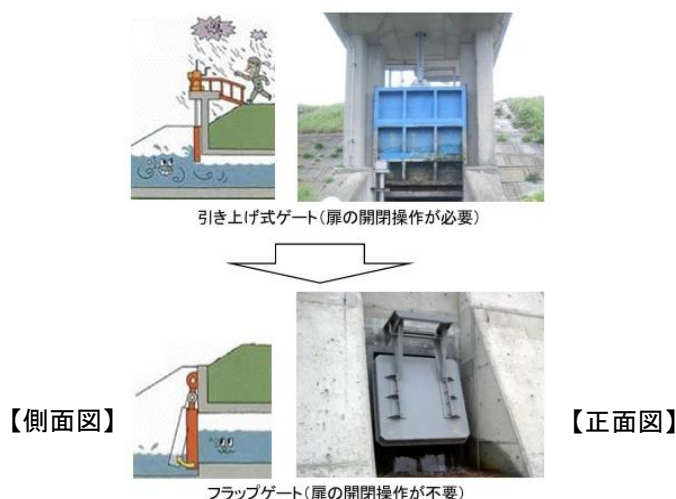


写真19 樋門のフラップゲートへの更新（著者加筆）47)

老朽化したインフラは更新されつつあるが、更新率はそれほど高くない。例えば、水道の更新率を見ると0.6%であり、老朽化率20%程度に対しておよそ1/30である。すなわち、更新すべき施設の1/30しか更新されていないのが実態である。なお、水道管を1km更新するのに、約2億円を要する。単純計算で

約 74 万 km の約 2 割の約 15 万 km を更新するには、約 30 兆円を必要とする。水道管の更新を促進するには、水道料金を上げる必要があるが、料金格差は全国の自治体間ですでに約 8 倍（兵庫県赤穂市の 853 円/月に対して、北海道夕張市は 6,841 円/月）あり、料金を上げるのは難しい市町村も多い。今後は給水エリアをコンパクト化することも検討していく必要がある。

また、下水道事業ではこれまで公共下水道（下水道による処理人口 81%）を中心としたインフラネットワークの構築を行ってきたが、今後都市域は公共下水道により対応するにしても、人口の少ない郊外域や山間地は合併処理浄化槽（浄化槽 9%）で対応することを考える必要がある。人口減少下の状況にあつては、地域によっては予算を要する大規模インフラではなく、小規模分散型のインフラへの転換を図ることが重要である。

一方、施設の劣化や老朽化が供用に適さないほど激しい場合は、施設の撤去・集約について検討する。河川改修事業に伴う橋梁等の（更新のための）撤去もある（5.3 節参照）。施設の撤去・集約の際は、交通や住民の利便性に大きな影響をおよぼさないかどうかについて調べておく。今後の人口減少（コンパクトシティ化）を考えて、地域住民と協議のうえ、施設を集約することを考えた撤去もある。住民にはインフラが減っても、豊かな生活を享受できる、「省エネ」ならぬ「省インフラ」生活を行ってもらよう、啓発活動（意識改革）を通じて喚起していく。

施設の集約にあたっての工夫としては、劣化・老朽化しているが、重要性がそれほど高くないインフラ（道路、橋梁）は通行・重量制限などを行って、安全性を確保する。道路橋に関しては、国土交通省から「道路橋等の集約・撤去事例集（2025）」が出されている。例えば、公園等は数が減っても、利用者（子供、高齢者）に応じた公園づくりを行えば、十分ニーズを満足させることができる。リスク管理の視点からは、施設の更新や撤去について検討することは重要である。

6. インフラのリスク管理と新技術・新材料の導入

国土交通省は 2021 年に「インフラ維持管理における新技術導入の手引き(案)」を発行した。新技術（ロボット、センサー等）の導入状況を見ると、2021 年度は 2019 年度に比べて導入が進み、46%の管理者が導入している⁴⁸⁾。国・都道府県・政令市では 99%で導入されているのに対して、市区町村の導入率は 38%と低い状況である。

	<2019 年度>		<2021 年度>
導入している	35%	⇒	46%
導入していない	63%	⇒	49%
未回答	2%	⇒	5%

6.1 ハード管理技術

新技術の事例としては、ハードに関係する維持管理技術があり、加速度センサ、超音波透過法、5G（第 5 世代通信規格）等を活用したハード管理技術がある。それぞれのシステムや技術は、最先端のセンシングや情報通信技術を駆使したもので、リスク管理に活用できる。

<構造物モニタリングシステム>三井住友建設

このシステムは高精度の 3 軸方向の加速度センサ（MEMS<小型・軽量化>センサ）を構造物に設置し、固有振動数推定に独自のアルゴリズムを使用して、構造物の日常的变化の検知や異常変位の検知（長期たわみの推定）を高精度に行うことができる（図 11）。固有振動数が低下すると、構造物が損傷している可能性がある*。同様に地震直後の施設の健全性判定にも用いることができる。ソーラーパネルや電池

により駆動可能なため、特に電源確保が難しい橋梁等でのモニタリングに適している。寺迫ちょうちよ大橋（宮崎）、武庫川橋（兵庫）などでの実績がある。

* 損傷要因の検知は減衰定数（パワースペクトル）ではばらつき、損傷に伴うモードシェープでは感度が悪いので、検知には固有振動数が最適である（九州大学 大塚久哲教授）



図 11 構造物モニタリングシステム 49)

<非破壊検査>NEXCO 西日本イノベーションズ

本手法は超音波透過法により、超音波パルスの伝播速度分布を計測し、コンクリート内部の欠陥を探索するものである。剥離箇所（空隙）があると、強い反射波が検出され、透過波は検出されないのので、橋脚断面を探索した図 12 では梁部の中央に伝播速度が遅い箇所（青・紺色：空隙がある可能性）が見られるなど、損傷位置の推定ができる。一方、超音波表面波法では超音波パルスの伝播経路途中に欠陥等があると、パルスが端部で回折して進行するため、ひび割れ深さを算定することができる。

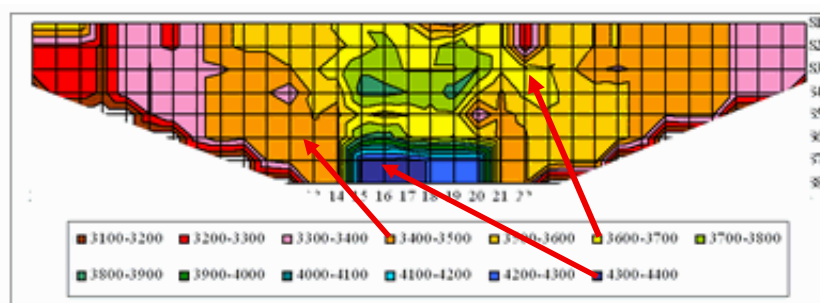


図 12 橋梁の超音波伝播速度の分布図（著者加筆） 50)

<無人化施工技術>

これからの時代は 5G を活用して無人化施工を行う。従前の無人化施工は 1991 年に発生した長崎・雲仙普賢岳（火砕流災害、43 名死亡）で行われた災害復旧のように、オペレータがモニターを見て、重機等を操作することが多かった。4G では人工衛星、中継局、オペレータ間の情報のやりとりにより、重機等を操作するようになった。施工技術の進展により、砂防事業では無人化施工が除石工から砂防堰堤工へと適用が広がった。この際、4G の課題は

- ・映像が不鮮明
- ・映像伝送にタイムラグがある
- ・データ伝送容量の不足

などであった 51)。これらの技術は 10 年ごとに進化していて、5G では 10Gbps（1 秒間に 10^9 ビットのデ

ータ伝送)という超高速の伝送(通信)速度で、データの遅延が1ミリ秒程度と、精度が向上しており、今後5Gを活用した無人化施工が期待される。

無人化施工の事例として、大林組は5Gと5GHz帯無線を利用して、3台の建設機械(油圧ショベル、キャリアダンプ、ブルドーザ)の遠隔操縦と、1台の建設機械(振動ローラ)の自動運転による盛土施工を行った(図13)。現場から400m離れた場所からの遠隔操縦をメインに、約300km離れた大阪府枚方市からの超遠隔操縦の実証実験も行った。試験の結果、(操作レバーに装着できる)汎用遠隔操縦装置を用いれば、オペレータが遠隔操縦室から建設機械を動かせるし、GNSS(人工衛星による全球測位衛星システム)データの取得により、建設機械のアンテナを基地局に向けさせ、良好な電波状態を保てば、質の高い遠隔操作を行うことができることが分かった⁵²⁾。



図13 5G 総合実証実験の実施状況⁵³⁾

新技術の活用支援にはNETIS(国土交通省・新技術情報提供システム, New Technology Information System)や次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム(国土交通省)が活用されている。NETISは新技術情報を共有・提供するためのデータベースで、入札時の総合評価方式での提案で技術評価点が上がるなど、受注機会を高めることができる。約3千件の新技術が登録され、延べ約2万件/年が活用されている。後者のロボットシステムはインフラ点検を効果的・効率的に行い、また人が近づくことが困難な災害現場調査や災害復旧を迅速かつ的確に実施する実用的なロボットの開発・導入を促進するもので、トンネル・橋梁・水中の維持管理、調査・応急復旧の災害対応が重点分野となっている。これまで公募により、60~70技術の評価が行われた。

6.2 新材料の導入

施設の維持管理では新技術とともに、長寿命化のために新材料の適用も重要である。また、変状や劣化を管理しやすい可視化できる新材料も開発されている。有望な新材料としては、

- ・炭素繊維：アクリル繊維やピッチ(石油・石炭の副産物)で作られ、鉄の1/4の軽さで、10倍の強度を有する。コンクリートの柱や梁にエポキシ樹脂で接着させる「耐震補強材への適用」などが考えられる(5.1節に前述)

- ・シリコンシーリング材：水路やボックスカルバートの水漏れ補修のためのシーリング目地*¹の耐候性・耐久性が改善され、寿命が有機系シーリング材の5倍以上（10,000時間におよぶキセノン耐候性試験(暴露試験)*²）。伸縮装置用のシーリング材もある
 - ・ひずみ可視化シート：シートを鉄鋼やコンクリートに貼り付けると、オパール薄膜（ナノテクノロジーフィルム）の粒子間に充填されたシリコン・エラストマー（合成ポリマー）が薄膜の波長変化により、
- *1：モルタルを目地（部材間の継ぎ目）に使うと、地盤変化の影響で目地にひびが入る場合がある
 *2：キセノン耐候性試験で10,000時間暴露すると、50～60年分の屋外暴露に相当する

構造体の塑性変形やモルタルのひび割れを色の変化として可視化できる（図14）

などが開発されている。他の新材料としては、ビニルエステル樹脂でできたガラスフレーク塗料（長持ちする塗装材料）やフッ素樹脂塗料⁵⁴、無機ジンクリッチペイント（亜鉛を多く含んだ塗料で、防錆効果が高い）等がある。ガラスフレーク塗料は流木等のダメージに強く、フッ素樹脂塗料は大気中における長期の耐候性に優れている。無機ジンクリッチペイントを用いると、価格は高いが供用後の塗装・防錆作業の回数・コストを減らすことができるし、施設の延命化にも有効である。有機系ペイントは作業性が良いが、耐食性は無機系ペイントが優れている。

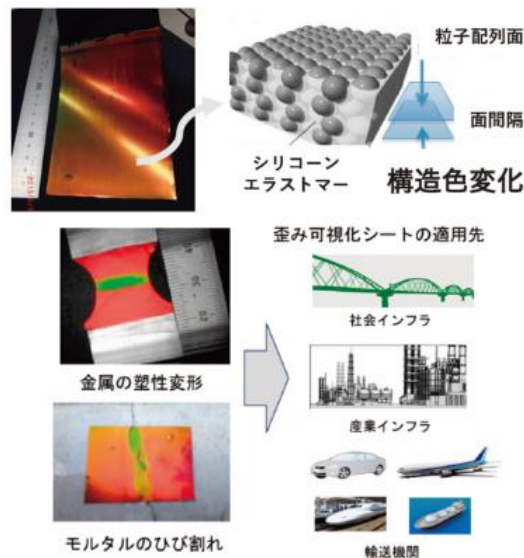


図14 ひずみ可視化シートの仕組み⁵⁵

新材料でなくても、材料を変えることにより、初期費用が高くてもトータルコストを下げることは可能である。水門や樋門のゲートはSS材（一般構造用圧延鋼材）で製作されることが多いが、ステンレスを用いると耐食性に優れて、塗装頻度が少なくてすむ（錆びない訳ではない）ため、トータルコストを削減することができる。なお、小型ゲートで操作性を重視するのであれば、重量がステンレスの約半分のアルミニウム（鉄などより変形しやすい）もある。

6.3 ソフト管理技術

上記では主としてハードの管理技術について記述してきた。下記では、データを処理・加工して、維持管理に活用するためのソフトの管理技術について述べたい。事例としては、3次元点群データ、非破壊検査ソフト、AIモデルを活用したソフト管理技術が開発されている。

<スマートインフラマネジメントシステム (iDREAMs) >首都高速道路(株)

維持管理計画の立案に、技術者の意思決定支援として、iDREAMs (intelligence-Dynamic Revolution for Asset Management systems) が活用できる。iDREAMs は GIS を基盤とする総合プラットフォームで、車に搭載したレーザ計測器等を使った MMS (モバイル・マッピング・システム) により計測した 3次元点群データを用いて、構造物の基準面を作成し、各点の差分より構造物の変状を見つけるなど、画像解析や AI 等の活用により、構造物の劣化・損傷に関する総合的な分析を行うことができる (図 15)。



図 15 iDREAMs による分析・診断・予測 56)

<3D スキャンシステム>CREAFORM

施設のリスク管理手法としては、例えばインフラの被災分析を行う 3D スキャンシステム 57) などがある。このシステムを用いると、3D スキャナーで生成した 3次元測定データを、非破壊検査のために設計されたソフトウェアモジュールにより、非破壊検査の知識と実績に基づくノウハウを組み合わせで解析し、インフラ被災の危険を分析できる。このように、本システムはインフラの完全性を正確に評価する保守メンテナンスに活用できる。

<維持管理支援システム>アイ・エス・ピー

インフラの点検や現地調査の効率化のため、構造体表面の変位や変状を 3D データで把握し、点検業務を支援するインフラ維持管理支援システム「MEMOREAD (メモリード)」が開発された。「点群からの 3D モデル化技術」を活用し、その差分量 (施設の損傷、凹凸) から構造物の経年劣化を可視化する技術である (図 16)。コンクリートの浮きや剥落、ジャンカ (砂利が集まってできた空隙、豆板<表面に骨材が集まる>)、¹⁴がれ等の早期発見、現地調査工程の短縮、点検者の負担軽減につながる事が期待される。ダムの場合では、貯水池内の堆積土の差分量 (堆砂量) を調査し、ダム土砂管理につなげることができる。



図 16 インフラ維持管理支援システム 58)

<漏水リスク評価> (株) 天地人

地球観測衛星の観測データと、水道事業者が保有するデータ（水道管路情報、漏水履歴、オープンデータなど）を組み合わせて、AI（機械学習）により解析し、約 100m 四方の地区ごとに漏水リスクを評価する「水道管の漏水リスク管理業務システム」である。本システムにより、効率的・効果的な水道管のメンテナンス、有収率（収入として計上される水量/配水場からの給水量、全国平均で 90%）の向上が期待できる。このシステムはインフラメンテナンス大賞（2023 年度）*を受賞した。

*インフラメンテナンス大賞はインフラメンテナンスに関わる事業者等の取組を促進し、メンテナンス産業の活性化を図るための表彰制度で、2016 年度に始まった

<被災予測> NTT グループ

災害発生時に点検や補修を行った全国の NTT の通信設備（屋外）データから被災パターンを学習した予測 AI モデル（被災予測モデル）を構築した（図 17）。本モデルにより設備の被災確率が高いか、低いかを予測することができる。豪雨や想定地震に対して、事前の準備を行うプロアクティブ（先取り）な対応により、減災・早期復旧が可能となる。



図 17 被災予測 AI の概要 59)

<災害影響評価> 三菱総研

三菱総研では災害リスクに対する「対策効果」の可視化を行った。大災害の起こりやすさを示すハザードデータ、インフラがどの程度災害に耐えられるかを表すアセットデータ、利用実態データ等を入力し、大災害に見舞われた際のインフラの損壊程度や利用停止日数、経済への影響を評価するシステムを開発した。具体的には愛知県・西三河地方の工業用水を対象に、老朽化した管路が地震により受ける被災程度を想定し、管路更新によるリスク低減分布（網状管路のリスク）を分析・図化した。

<その他>

他のリスク対応としては、人為的操作ミスへの対応（フェイルセーフ[誤操作・誤動作をさせないための工夫]など）、水道管と下水道管の誤接合対応などがある。誤接合により、蛇口をひねると汚水が出てくる事故があるが、誤接合はそれほどまれな事故ではない。誤接合は逆流による水道水の汚染、ひいては水道水による健康被害の発生につながる危険がある。

一方、近年パソコンやコンピュータを遠隔で攻撃するサイバー攻撃に対するソフト対策も重要となっている。NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）によると、表 7 に示したように、ウクライナ（2015）で電力施設が狙われ、6 時間停電になったり、米国（2018）で水道施設のコンピュータがランサムウェア感染（PC がウイルスに感染し、データが盗まれた。マルウェア感染*の 1 種）した。日本でも電力会社の機密情報がサイバー攻撃により流出したが、いずれも従業員が機密情報を格納していた自宅 PC にマルウェアが感染したのが原因であった。インフラ管理では、こうしたリスクへの対応も必要で、電力・ガス等の重要インフラに関して、サイバーセキュリティ基本法（2014）により、セキュリティ強化が図られている。

*マルウェアとはコンピューターウイルス（宿主で増殖）、ワーム（単独で増殖）、トロイの木馬（自己増殖しない）、スパイウェア等、PC などに不利益をもたらす悪意のあるプログラムやソフトウェアのことで、感染すると情報が流出したり、ファイルが改ざんされる危険性がある⁶⁰⁾

表 7 近年のサイバー攻撃による被害状況（著者修正・加筆）⁶¹⁾

発生年月	分野	国・組織	被害状況
2005.6	電力	日本 関西電力	原発の機密情報がファイル共有ソフト（ウィニーソフト）経由で流出した
2006.5	電力	日本 中国電力	火力発電所の機密情報がファイル共有ソフト（ウィニーソフト）経由で流出した
2012.8	石油	サウジアラビア 国営石油会社	サイバー攻撃により、3 万台のワークステーションが停止・破壊された
2014.3-8	地下鉄	韓国 公営企業	サイバー攻撃により、5 か月の間に 58 台の PC が悪意あるソフトウェアをインストールされた
2015.12	電力	ウクライナ 電力会社	電力会社がサイバー攻撃を受け、約 6 時間停電した他、顧客対応を妨害された
2017.7	電力	アメリカ 州電力運営会社	情報システム系ネットワークがハッキングされた
2018.10	水道	アメリカ 州水道当局	ランサムウェアに感染した

ただし、これらの新技術の導入により、施設の管理や点検が高度化・効率化する一方、新技術導入の課題としては、導入コスト（コストに見合った効果(経済的便益)が得られるか）、プライバシーへの配慮（個人・企業情報）、新技術の使いこなしなどが考えられる。

7. 技術者不足対策

リスク管理のための技術者不足対策としては、上記したような新技術を導入する他、AI, ICT, IoT*などの DX（デジタル・トランスフォーメーション）技術を駆使して、技術者不足を技術的に補うことが考えられる。それぞれの技術の活用方法は下記の通りである⁶²⁾。

- AI：AI と機械学習アルゴリズムの活用により、技術力の高い人でなくても、インフラ状態の診断技術を向上することができる。収集したデータを AI により解析し、施設の損傷予測や予防メンテナンスの最適化を行い、施設の長寿命化を図ることができる

- ・AR/VR：AR(拡張現実)/VR(仮想現実)を活用したリモートトレーニングにより、拠点と作業現場が離れていても、維持管理の経験が短い作業者を迅速にトレーニング(技術習得)することができる。例えば、熟練作業者のボルト締結動作を動画として保存し、トレーニング教材として活用している
- ・ロボット：災害現場や高所などの危険な環境下での作業では、危険作業をロボットに代替させることにより、作業者の安全性を向上させることができる。千葉工大や東北大学などにより開発された災害対応ロボ「Quince(クインス)」は、被災空間でも遠隔活動が可能で、放射線に対する耐久性を改良して、東京電力・福島第一原発内部の建屋撮影や線量計測などでも活用された

*AIは人工知能、ICTは情報通信技術、IoTは設備のインターネット化である

他の技術者不足対策としては、技術の伝承が考えられる。団塊の世代が2010年代末までに大量に退職し、技術力の高い技術者が減少することを考えると、技術を次世代に伝承していくことも重要である。例えば、国土交通省近畿地方整備局には近畿河川技術伝承会があり、近畿地方整備局に在職経験のある河川技術者が、在職中に培ってきた技術や貴重な経験を現役職員に引き継ぐことを目的に、2000年度から活動が行われている。1年に30回程度の講演・講義、実務指導(不具合堤防模型*を使った堤防点検講習など)、意見交換などを行っている⁶³⁾。四国地方整備局管内にも同様の四国河川技術伝承会がある。

*不具合堤防は堤防の陥没・空洞、護岸の沈下、函渠の抜け上がり等を想定した模型である

また、官民の技術者の技術を継承し、管理水準を維持していくため、河川維持管理技術者や河川点検士の河川技術者資格制度が2015年に創設された。河川維持管理技術者には河川の状態把握と分析・対応技術、河川管理上の判断に有益、的確な提案のスキルが、また河川点検士には点検技術、点検による変状の把握のスキルが求められている。河川技術者資格の受験資格や合格率等は表8の通りである。このような資格の他には、専門家や上級技術者を講師とした研修制度が技術力養成に有効である。

表8 河川技術者資格の受験資格や合格率等⁶⁴⁾

	受験資格	合格率	登録数(2026.1)
河川維持管理技術者	7年以上の実務経験、うち2年以上の指導的立場での実務経験	20~30%	506名 東京71, 大阪62
河川点検士	1年以上の河川に関する実務経験	50~60%	7,092名 北海道588, 福岡468

参考文献

- 1) 日経XTECH：連載 中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故，<https://xtech.nikkei.com/kn/atcl/bldcolumn/15/00050/> (2023.8.10 閲覧)。
- 2) 朝日新聞：博多駅前の道路30m陥没、大量の水流入 地下鉄工事中，<https://www.asahi.com/articles/ASJC82Q11JC8TIPE002.html> (2020.6.5 閲覧)。
- 3) 国土交通省：道路橋の予防保全に向けた有識者会議資料，2008。
- 4) 大谷悟・末次忠司・小林裕明ほか：樋門・樋管の健全度評価手法，土木技術資料，Vol.40，No.12，(財)土木研究センター，1998。
- 5) 21) 末次忠司：河川の減災マニュアル，技報堂出版，2009。
- 6) 国土交通省：樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領，2012。
- 7) 読売新聞オンライン：八潮の道路陥没、スロープ拡幅で水の湧出部分を迂回へ，<https://www.yomiuri.co.jp/national/20250203-OYT1T50061/> (2025.2.22 閲覧)。
- 8) 中日新聞：静岡のニュース 30メートルの水柱 浜松市西区で水道管破裂，<https://www.chunichi.co.jp/article/742196> (2025.2.23 閲覧)。
- 9) 末次忠司：災害・社会リスクへの処方箋—災害リスクを知り，社会リスクに備える—，技報堂出版，2021。
- 10) 国土交通省：国土交通白書2020(令和2年度)，日経印刷，2020。
- 11) 国土交通省：インフラメンテナンス情報，社会資本の現状と将来予測，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (2025.2.20 閲覧)。

- 12) 国土交通省：道路橋の集約・撤去事例集，2023.
- 13) 首都高速道路株式会社：首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会 報告書，2014.
- 14) 日刊建設工業新聞：国交省／直轄河川施設の老朽化対策加速～新技術導入や汎用品活用，ダムの堆砂除去も，
<https://www.decn.co.jp/?p=156363>（2025.8.4 閲覧）.
- 15) 国土交通省：広域連携の進展ー上下水道ー，近年における広域連携の実施例，
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/content/001753507.pdf>（2025.2.22 閲覧）.
- 16) 末次忠司編著：河川構造物維持管理の実際，鹿島出版会，2009.
- 17) 国土交通省：下水道事業における広域化・共同化の事例集（概要版），2024.
- 18) 国土交通省：予防保全の促進に向けた取組（インフラメンテナンス），社整審・交政審技術部会 第5回国土交通技術行政の基本政策懇談会，2019.
- 19) 内閣府 HP：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画），持続可能なインフラメンテナンス，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/k_dai10/sankou1.pdf（2025.2.23 閲覧）.
- 20) 「石井敬康・正岡和繁・東孝次郎ほか：山梨県における近代土木遺産，土木史研究，第18号，土木学会，1998」に基づいて，著者が作成した.
- 22) 国土交通省：記者発表資料 橋梁等の2023年度（令和5年度）点検結果をとりまとめ～道路メンテナンス年報（2巡目の公表～），1巡目点検で判定区分Ⅲ，Ⅳの橋梁の修繕等の実施状況，
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001759974.pdf>（2025.2.27 閲覧）.
- 23) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501，I-29，1994.
- 24) 「藤井友竝編著：現場技術者のための河川工事ポケットブック，山海堂，2000」に基づいて作成した「土木学会構造工学委員会：センシング情報社会基盤，土木学会，2015（末次執筆箇所）」より引用した.
- 25) 国土交通省関東地方整備局：記者発表資料 マッチングの現場試行の結果，3技術について NETIS 登録に十分な技術と確認，地中レーダ探査技術を用いた浅層地下構造の把握できる技術【株式会社パスコ】，
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000772301.pdf（2025.2.27 閲覧）.
- 26) 末次忠司：河川堤防の耐越水性向上について，水利科学，No.317，（社）日本治山治水協会，2011.
- 27) 末次忠司・川口広司・古本一司ほか：講座 土構造物のメンテナンス6，河川堤防における点検と維持管理，土と基礎，54-8，地盤工学会，2006.
- 28) 末次忠司・佐々木いたる・川本豪ほか：サイドスキャンソナーによる利根川河床地形の計測，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，第2部門，2008.
- 29) ドローンジャーナル：藤川理絵の水中ドローン最前線 Vol.6，東京久栄の事例，インプレス総合研究所，
<https://drone-journal.impress.co.jp/docs/special/1183592.html>（2025.2.23 閲覧）.
- 30) 理化学研究所：小型中性子源システムで鋼材内部腐食を非破壊で可視化することに成功ー老朽化するインフラ構造物の安全性の確認，維持管理コスト低減が可能にー，https://www.riken.jp/press/2013/20130909_3/（2025.2.25 閲覧）.
- 31) リコー：社会インフラ，トンネルの維持管理を効率化，トンネルモニタリングサービス，
<https://www.ricoh.co.jp/products/list/tunnel-monitoring-service>（2025.3.4 閲覧）.
- 32) (株)BSL：下水道テレビカメラ，ゲシュカム-800，<https://b-sl.org/products/gesuicam800>（2025.3.9 閲覧）.
- 33) 宇宙航空研究開発機構：衛星を活用したインフラ点検作業の効率化について，
https://www.jaxa.jp/press/2019/04/files/20190418b_01.pdf（2025.2.25 閲覧）.
- 34) 自治体公共 Week：インフラ老朽化問題の現状と事故事例，
https://www.publicweek.jp/ja-jp/blog/article_61.html（2025.3.3 閲覧）.
- 35) 國島正彦・石原行博：JR 西日本新幹線トンネルにおけるコンクリート剥落[1999年6月27日・同年10月9日，福岡県]，失敗知識データベースー失敗百選，<https://www.shippai.org/fkd/hf/HD0000130.pdf>（2025.3.8 閲覧）.
- 36) 時事通信社：新幹線の事故，写真特集，
https://www.jiji.com/jc/d4?p=sin630-jpp00582597&d=d4_tt（2025.3.8 閲覧）.
- 37) 国土交通省：インフラメンテナンスに関するこれまでの取組のレビュー，河川管理施設および河道の点検の効率化・充実，
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001443960.pdf>（2025.3.3 閲覧）.
- 38) 国土交通省：予防保全によるメンテナンスへの転換について，損傷事例（橋梁），
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001375673.pdf>（2025.2.22 閲覧）.
- 39) 「国土交通省：河川の戦略的維持管理について，2022」に基づいて，著者が作成した
- 40) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレスト・コンクリート構造物の補修の手引き[PC グラウト再注入工法]，2020.
- 41) 首都高速道路株式会社：首都高速道路の大規模更新・修繕及び機能強化に関する技術検討委員会 中間とりまとめ報告書（参考資料），2022.
- 42) (株)アクト・ファクトリー：橋梁の耐震補強工法，
https://actfactory.net/works/diagnosis/bridges_seismic/（2025.3.12 閲覧）.
- 43) 青木あすなる建設：技術・ソリューション 壁面走行ロボットによるインフラ点検システム，
<https://www.aconst.co.jp/technology/renewal/robot/>（2025.3.4 閲覧）.
- 44) BUILT：[特集]脱3Kから新3Kへ導く建設×IT，ゴンドラ車は橋梁点検車とゴンドラの1台2役を担う，
<https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/1904/26/news052.html>（2025.2.26 閲覧）.

- 45) PR TIMES : (株)土木管理総合研究所, インフラ点検の「作業時間」と「コスト」を大幅削減 専用車の走行だけで道路・橋梁の「異常」を瞬時に診断初の本格導入決定! 収益化スタート,
<https://prt-times.jp/main/html/rd/p/000000002.000053188.html> (2025.2.26 閲覧) .
- 46) 国土交通省中部地方整備局中部技術事務所: 衛星通信車,
https://www.cbr.mlit.go.jp/chugi/bousai/pdf/kikai/h2706_eisei.pdf (2025.3.2 閲覧) .
- 47) 内閣府 HP : 国土交通省: 河川管理施設の老朽化対策, 河川管理施設の高度化・効率化対策,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/5kanenkasokuka/pdf/kakutaisaku3.pdf (2025.2.22 閲覧) .
- 48) 国土交通省: インフラメンテナンス情報, 新技術等の導入状況,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/shinngijyutudounyuu.pdf (2025.2.22 閲覧) .
- 49) 三井住友建設: 構造物モニタリングシステム,
<https://www.smcon.co.jp/service/structure-monitoring-system/> (2025.3.4 閲覧) .
- 50) NEXCO 西日本インベーションズ: 非破壊検査, コンクリート構造物の超音波測定,
<https://w-nexco-inv.co.jp/business-content/non-destructive/> (2025.2.22 閲覧) .
- 51) (一財)先端建設技術センター: 令和3年度 先端建設技術セミナー, 5Gを活用した無人化施工の可能性について, 5G総合実証試験の実施状況, <https://www.actec.or.jp/seminar/pdf/20210903/2021090305.pdf> (2025.2.26 閲覧) .
- 52) 大林組: 5Gによる遠隔操作プロジェクト, Project Story 05, 将来は月面の建設プロジェクトに, 5Gを使った新しい時代の建設工事, <https://www.obayashi.co.jp/obytri/projectstory/story5/> (2025.3.3 閲覧) .
- 53) (一財)先端建設技術センター: 令和3年度 先端建設技術セミナー, 5Gを活用した無人化施工の可能性について, 5G総合実証試験の実施状況, <https://www.actec.or.jp/seminar/pdf/20210903/2021090305.pdf> (2025.2.26 閲覧) .
- 54) 明嵐政司・守屋進・西崎到: 河川・ダム施設防食ガイドライン(案) 塗料・塗装編, 土木研究所資料, 第3684号, 2000.
- 55) 物質・材料研究機構: SIP 戦略的イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, インフラ長寿命化・強靱化のための構造材料技術,
<https://www.nims.go.jp/SIP-infrastructure/achieve07.html> (2025.2.26 閲覧) .
- 56) 官邸 HP : 首都高速道路株式会社 土橋保全・交通部長, 革新的インフラマネジメントシステム“i-DREAMs”の社会実装, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo2018/infla/dai2/siryu2.pdf> (2025.3.6 閲覧) .
- 57) CREAFORM : 非破壊検査ソフトウェアプラットフォーム, <https://www.creaform3d.com/ja> (2025.2.22 閲覧) .
- 58) BUILT : [特集]脱 3K から新 3K へ導く建設×IT, 点群からの 3D モデル化で, インフラ構造物の経年変化を把握,
<https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/2309/18/news053.html> (2025.3.3 閲覧) .
- 59) NTT : NTT の災害対策技術とは? - 通信インフラを守る技術の紹介, 多様な災害に対するインフラの被災予測 AI を構築, <https://www.rd.ntt.as/asmedia/article/0005.html> (2025.2.26 閲覧) .
- 60) NTT : マルウェアとは? ウイルスとの違いは?, マルウェア,
https://www.ntt.com/business/services/network/internet-connect/ocn-business/bocon/knowledge/archive_19.html (2025.3.5 閲覧) .
- 61) NEDO の HP : 日立製作所, サイバー攻撃から重要インフラを守る,
<https://www.nedo.go.jp/content/100904079.pdf> (2025.2.22 閲覧) .
- 62) Blue innovation : インフラメンテナンスの新技術 5 選と活用事例を解説,
https://www.blue-i.co.jp/cloud_mobility/column_13.html (2025.2.23 閲覧) .
- 63) 全建 HP : 近畿河川技術伝承会の取組紹介,
https://www.zenken.com/kikkansi/vol_66/12/zk_vol66_12_41_43.pdf (2023.3.18 閲覧) .
- 64) (一財)河川技術者教育振興機構: 河川技術者資格, <https://www.ree.or.jp/registration-status/#count> (2026.2.5 閲覧) .