

橋梁点検用ロボット技術の活用促進に向けた取り組み

六郷 恵哲*1・羽田野 英明*2・矢島 賢治*3

2018年度に、全国の地方自治体のなかで初めて、各務原市が実施した各務原大橋（長大PC橋）の定期点検を、高解像度カメラや打音装置を備えた点検用のロボット技術を活用して支援した。この定期点検では、まずロボット技術を取り入れた事前調査を行い、その結果を踏まえて点検技術者による近接目視点検を行った。その結果、橋梁点検車による橋面片側交通規制期間を、10日間から4日間に大幅に短縮できた。点検技術者からは、「かぎられた時間のなかで見落としのない点検を実施することのリスクとプレッシャーから解放された」との感想があった。橋梁点検におけるロボット技術を、一般的な技術として広く普及させるために必要な取り組みとして、①ロボット技術の供給体制やロボット技術を活用する受発注体制の整備、②鋼橋への適用性や多主桁橋の主桁間の点検への適用性の明確化、③ロボット技術の組合せ事例の公開、④補修設計における変状寸法調査や新設橋梁の初回点検調査、補修対策の長期モニタリングなどの定期点検以外への積極的な活用が望まれることを指摘した。

キーワード：PC橋、橋梁点検、ロボット、点検支援技術

1. はじめに

インフラ維持管理の分野において、地域の大学には、研究開発に加え人材育成や新技術導入などの支援活動が期待されている。岐阜大学のインフラマネジメント技術研究センターでは、2008年に社会基盤メンテナンスエキスパート（ME）養成講座を開講し、現在までに約500名の維持管理技術者（ME有資格者）を輩出している。写真-1（QRコードよりミュージアムの3D写真リンク先に接続）に示すように、実物大のPC橋モデル、鋼桁端部モデル、トンネル断面モデル、盛土モデルで構成される教材としての「インフラミュージアム」¹⁾を岐阜大学キャンパス内に設置し、大学や企業の研修などで活用している。内閣府主導のSIPインフラ²⁾において、地方自治体などに新技術を使っていただく（実装する）ための地域実装支援活動が、2019年3月まで2年半にわたって行われた³⁾。

この地域実装支援活動のなかで、筆者ら（以下、岐阜大学SIP）は2017年度には地方自治体の橋梁点検において橋梁点検用ロボット技術を活用するための指針⁴⁾の作成やフィールド試験を行った。2018年度には各務原市が実

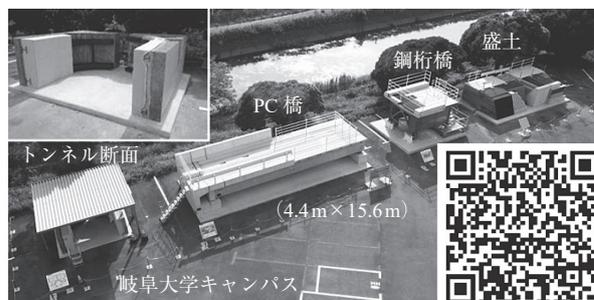


写真-1 岐阜大学のインフラミュージアム

施した各務原大橋（橋長594mのPC橋）の定期点検において、高解像度カメラや打音装置を備えたロボット技術（以下、ロボット技術）を活用した支援を行った。道路橋定期点検要領が改訂される前の2018年度の定期点検であったため、まずロボット技術による事前調査を行い、その結果を用いて近接目視点検を実施した。これにより、橋梁点検車両による橋面片側交通規制期間を10日間から4日間に短縮できた。

道路橋定期点検要領⁵⁾が2019年2月に改訂され、新技



*1 Keitetsu ROKUGO

岐阜大学
工学部 特任教授



*2 Hideaki HATANO

岐阜大学
工学部 客員教授



*3 Kenji YAJIMA

大日コンサルタント(株)
参事

術の活用を含めた見直しが行われたことから、橋梁点検支援技術の活用事例が注目されている。この解説では、各務原大橋の定期点検へのロボット技術の活用事例について紹介するとともに、こうした橋梁点検支援技術の活用促進に望まれる取組みについて述べる。

2. 橋梁点検の目的と支援技術

一般に、橋梁点検は、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検、モニタリングなどとして行われている。橋梁点検の主な目的としては、利用者の安全確保、重大事故の防止、構造物の長寿命化があげられる。点検業務の改善目標としては、点検精度の向上、点検データのより良い記録と活用、点検作業の安全性向上、点検費用の削減などがあげられる。

点検業務の支援技術としては、高解像度カメラ、赤外線カメラ、打音装置、変状検出技術、変状表示技術、診断支援技術、接近用ロボット技術などがあげられる。高解像度カメラにより、コンクリート表面のひび割れや剥落など、主に構造物の外観変状に関する情報が得られる。高解像度カメラで取得した画像を記録保存し、変状の経時変化の把握に役立つ技術の早急な確立が期待されている。赤外線カメラにより、コンクリートの浮きや内部の空洞など、主に内部変状に関する情報が得られる。

2019年2月に改正された道路橋定期点検要領には、「4. 状態の把握」において「定期点検を行う者は、健全性の診断の根拠となる道路橋の現在の状態を、近接目視により把握するか、または、自らの近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができる情報が得られると判断した方法により把握しなければならない」と記載されている。

道路橋定期点検要領の改正により、高解像度カメラは、近接目視と同程度に構造物の外観変状を把握できることが確認されている場合には、近接目視に代えて用いることができ、点検業務の効率化に有効である。高解像度カメラによる近接目視の代替は、構造物の外観変状が無い場合や軽微な場合にも、記録として残せるので威力を発揮する。

3. PC橋の定期点検へのロボット技術の活用^{6,7)}

3.1 各務原大橋の特徴と定期点検

各務原市が管理する各務原大橋は橋長594mの長大PC橋であり、自転車歩行者道幅が3mと広いことから、図-1に示すような一般的な大型橋梁点検車(懐幅4m)の利用が困難である。超大型橋梁点検車(懐幅5m)やロープワーク、点検用足場などの特殊な点検方法が必要とされ、点検費用が大きくなる。

そこで、2018年度に各務原市が実施した各務原大橋の定期点検では、図-2に示すように、ロボット技術を活用した事前調査(以下「事前調査」という)を、道路橋定期点検要領に基づく近接目視点検に先立って実施した。岐阜大学SIPが担当した事前調査では、点検対象とする部位について、ロボットに搭載したカメラなどにより取得した情報から、変状の有無や程度を把握した。建設コンサルタントが担当した近接目視点検では、事前調査の情報に基づ

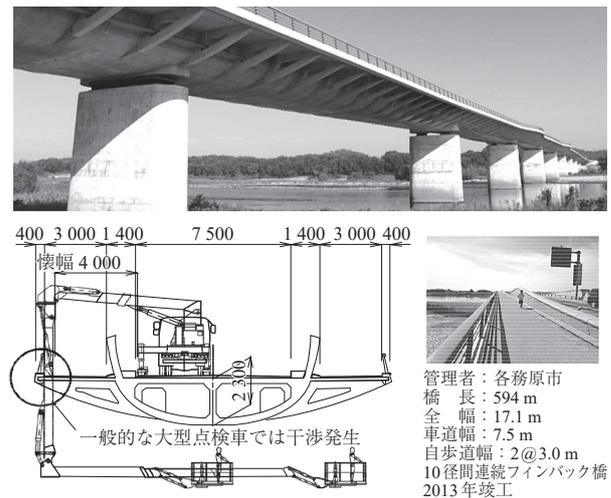


図-1 大型橋梁点検車を用いた点検が困難な各務原大橋

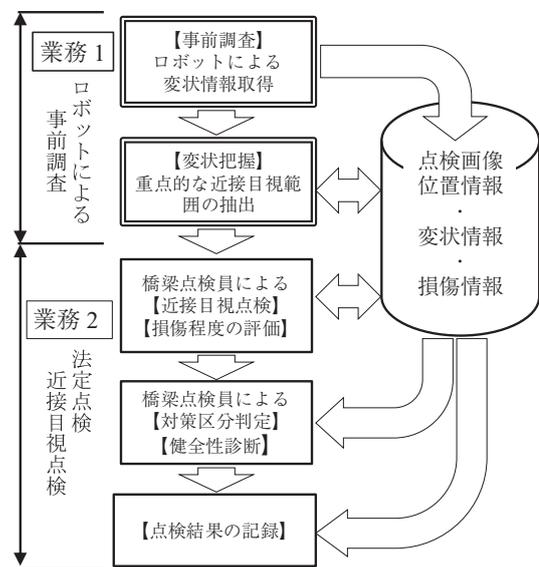


図-2 ロボット技術を活用した橋梁点検の手順

いて、とくに重点的に点検すべき部位や範囲を点検技術者があらかじめ決め、効率的な作業を行った。

3.2 ロボット技術を活用した事前調査

(1) 活用したロボット技術

岐阜大学SIPによるフィールド試験の結果⁸⁾から、各務原大橋のすべての部材の事前調査を単一のロボット技術で網羅することは、現状のロボット技術の機能・性能では難しいと判断した。このため、今回の事前調査では、フィールド試験やその評価結果⁸⁾を踏まえて、図-3に示す6種類のロボット技術を組み合わせて活用した。図-4に各ロボット技術における調査対象部材の分担を示す。具体的な実施工程を、図-5に示す。

(2) 広域調査

橋梁全体の状況把握、各種変状の位置関係の把握、橋梁のオルソ画像や3次元モデルの作成を目的として、橋梁全体を比較的視野の広いカメラで連続撮影した。0.3mm程度のひび割れを検出できる解像度(0.84mm/pixel程度)

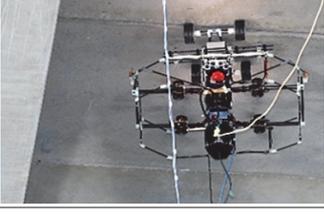
| 種類 | 技術名称 技術の特徴 | ロボットの稼働状況 | 技術名称 技術の特徴 | ロボットの稼働状況 |
|----------|--|---|--|---|
| ドローン系 | ① 二輪型マルチコプタ：車輪を活用した一定距離での近接撮影により高精細な画像が撮影できる。有線による電源供給のため、長時間の連続撮影が可能である。 |  | ② 可変ピッチ機能付ドローン：風の影響を受けにくく、撮影効率が良い。撮影距離を調整できるので、要求精度に応じて広域調査から狭域調査まで幅広い活用ができる。 |  |
| ロボットカメラ系 | ③ 橋梁点検ロボットカメラ：可搬性に優れ、操作が容易で、点検技術者が自ら操作できる。点検作業は、橋面あるいは、桁下地面から行うため、安全性に優れる。 |  | ④ 橋梁点検カメラシステム：歩道を1m程度占有した機動性の良い近接点検ができる。打検棒や赤外線カメラを活用してコンクリートの浮きの検出もできる。 |  |
| 打音点検ロボット | ⑤ 打音機能付き飛行ロボット：走行車輪を活用して打音点検と同時に近接撮影ができる。有線による電源供給のため、長時間の連続点検が可能である。 |  | ⑥ 打音点検飛行ロボット：高精度の制御技術で鉛直面の打音点検ができる。打撃音はドローンのプロペラ音を除去した聞き取りができ、有線による電源供給で長時間の連続点検が可能。 |  |

図 - 3 6種類のロボット技術

| | | A2 | P9 | P8 | P7 | P6 | P5 | P4 | P3 | P2 | P1 | A1 | |
|--------|------|--------------|----|----|---------------|----|-------------|----|---------------|----|--------------|----|---|
| 事前調査 | 広域調査 | ② | | | | | | | | | | | |
| | 狭域調査 | 上部工 | ③ | ③ | ④ | ④ | ④ | ④ | ④ | ④ | ④ | ③ | ③ |
| | | 支承周り | ① | ① | ① | ① | ① | ① | ① | ① | ① | ① | ① |
| | | 下部工 | ① | ① | ② | ② | ② | ① | ① | ① | ① | ① | ① |
| | 打音点検 | ⑥ | | ⑤ | | | | | | | | | |
| 近接目視点検 | | 標準部 橋梁点検車 | | | 拡幅部 ロープワーク | | 標準部 橋梁点検 | | 拡幅部 ロープワーク | | 標準部 橋梁点検車 | | |

① は小型マルチコプター，① は大型マルチコプター

橋梁点検車は懐幅 5m の超大型橋梁点検車

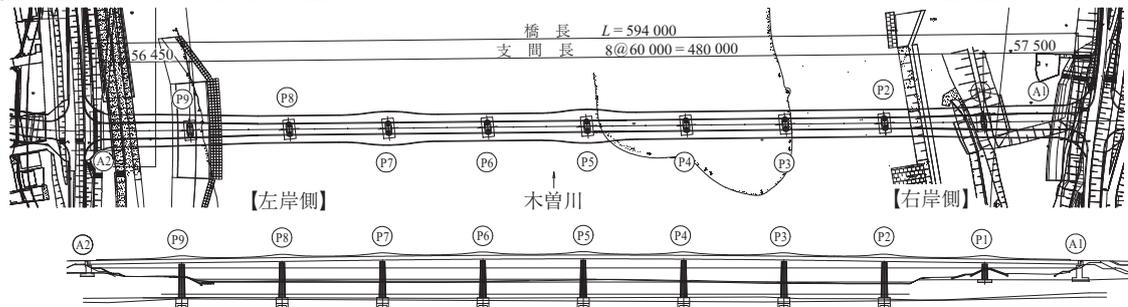


図 - 4 ロボット技術の担当範囲

| 作業項目等 | | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | |
|-----------|----------------|----------|----|----|-----|-----|-----|----|----|--|
| 事前調査 | 事前準備 (関係機関協議等) | | | | | | | | | |
| | 現地調査 | ロボット機能調整 | | | | | | | | |
| | | 広域調査 | | | | | | | | |
| | | 狭域調査 | | | | | | | | |
| | | 打音点検 | | | | | | | | |
| | 内業 | 変状状況資料作成 | | | | | | | | |
| 変状状況の把握 | | | | | | | | | | |
| 重点目視部位の整理 | | | | | | | | | | |
| 近接目視 | 事前準備 | | | | | | | | | |
| | 点検車等による近接目視 | | | | | | | | | |
| | 点検結果の取り纏め | | | | | | | | | |

図 - 5 実施工程

を要求性能とし、撮影範囲は 5m × 3.4m 程度とした。その性能は、岐阜大学 SIP のフィールド試験で確認した。

広域調査結果は、図 - 6 に示すように構造物単位（上部工 1 径間，下部工 1 橋脚）ごとのオルソ画像を 5m × 5m 程度のメッシュに分割して、各メッシュに対して撮影オリジナル画像との関連付けを行った。この撮影オリジナル画像に対しては、ソフトウェア上で変状のマーキングや注釈の記入、画像の拡大表示が可能であり、机上での変状確認と、後続の近接目視点検計画のための資料作成を効率的に実施することができた。

(3) 狭域調査

0.2 mm 以上のひび割れを含む各種変状を検出すること

表 - 1 ロボット技術による取得情報への要求内容

| | | 要 求 内 容 | 検 証 方 法 |
|--------|------------------------------------|---|--|
| 変状検出 | 有無と種類 | 変状の有無と種類を認識できる。 | 近接目視により作成された変状図と比較して、変状の位置、範囲、方向がおおむね一致している。 |
| | 位置 | 変状箇所と他の部材との位置関係を検出できる。 | |
| | 範囲 | 「局所的」か「広範囲」かを判断できる。 | |
| | 方向など | 変状の方向性やパターンを検出できる。 | |
| 水の侵入経路 | 漏水や遊離石灰などの変状について、水の浸入経路や発生源を検出できる。 | | |
| 変状計測 | 寸法 | 0.2 mm 以上のひび割れ幅を 0.1 mm 以内の誤差で計測できる。 変状の寸法を 50 mm 以内の誤差で計測できる。 | 変状と精度検証指標の計測結果が、おおむね左記に示す許容誤差の範囲内である。 |
| | 変位 | 桁遊間や支承の変位を 10 mm 以内の誤差で計測できる。 | |

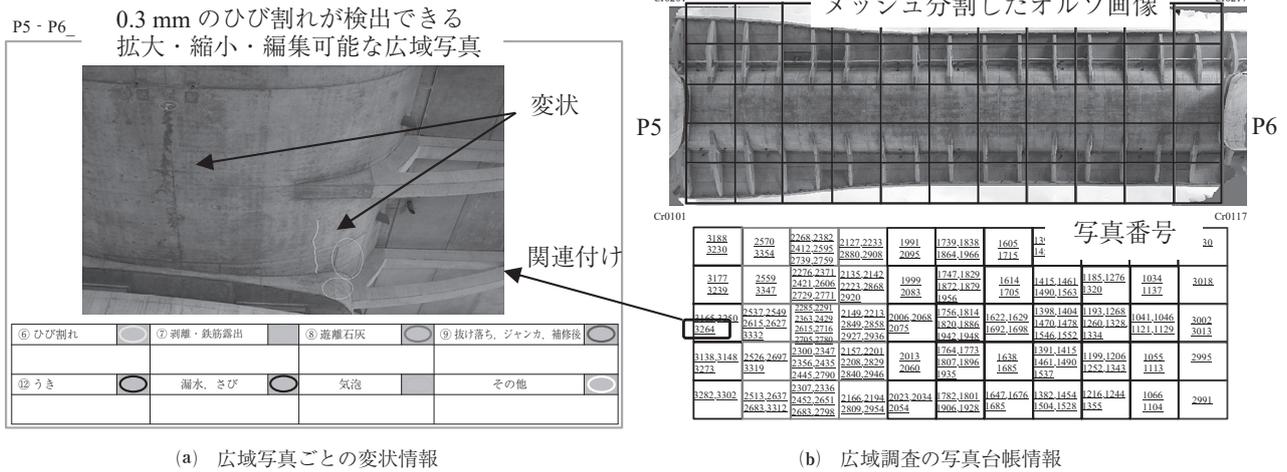


図 - 6 広域調査結果の表示例

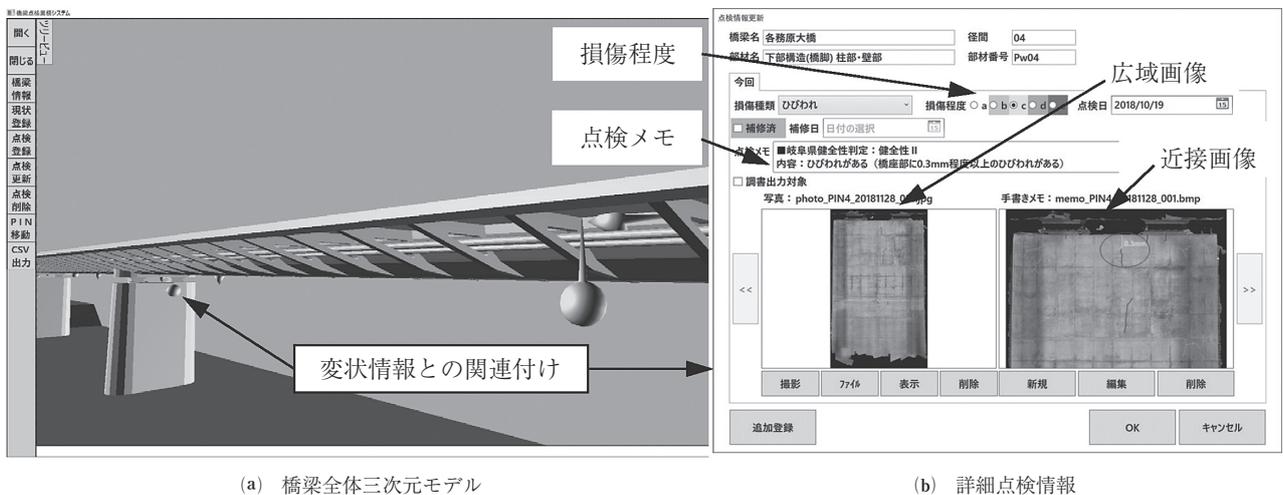


図 - 7 三次元変状マップと変状情報を紐付した狭域調査結果の表示例

を目的として、部材に近接した詳細画像を比較的狭いカメラ視野で撮影した。岐阜県橋梁点検マニュアル⁹⁾をもとに作成したロボット技術への要求性能を表 - 1 に示す。使用した技術がこの性能を満たすことを、岐阜大学 SIP のフィールド試験で確認した。

狭域調査結果については、近接目視点検の取り纏めに利用できるように変状マップと写真台帳に整理した。変状マップは、変状位置と構造物との位置関係が理解しやすいように、広域調査で作成したオルソ画像を背景に配置し、その画像上に変状位置を示す資料とした。また、図 - 7 に

示すようにタブレット端末上に三次元構造モデルを表示し、検出された変状の位置を示すとともに、変状写真(健全性判定付き)を関連付けし、近接目視点検の現場で利用することで、作業の効率化を図った。

(4) 打音点検調査

広域調査や狭域調査によって、変色などからコンクリートの剥離や浮きが疑われる部位について、ロボット技術を活用した打音点検調査を行った。なお、今回の事前調査では、剥離や浮きが疑われる部位が全区間で抽出されたが、打音点検ロボットの作業効率や利用可能期間の制約から、

下部工はP9 橋脚，上部工はP7～P8 径間で実施し，他の部位は近接目視点検において確認することとした。

3.3 事前調査結果を踏まえた近接目視点検

ロボット技術による事前調査で作成した変状図をもとに，標準部については超大型橋梁点検車を使用し，拡幅部についてはロープアクセスにより，上部工ならびに下部工の下記の部位について，近接目視点検を重点的に実施した。

- ・健全性判定でⅡ以上の変状箇所（0.3 mm 以上の幅のひび割れ箇所など）
- ・ひび割れ（0.3 mm 未満）の密集発生箇所
- ・うき，剥離が疑われる箇所

ロボット点検技術により作成された変状図をもとに近接目視点検を行ったことにより，橋梁点検車による橋面片側交通規制期間を10日間から4日間に短縮できた。近接目視点検を，必要なところだけ行えば，点検作業はさらに短縮される。ロボット技術による撮影結果では，蜘蛛の糸や施工時のコンクリートのノロをひび割れとして抽出する機会があった。しかし，ひび割れをはじめとする変状の見落としが無く，変状結果を記録できるメリットは大きい。

3.4 関係者からのコメント

各務原大橋を管理している各務原市の技術職員ならびに事前調査の情報に基づいて近接目視点検を行った点検技術者から，次のコメントが得られた。

(1) 橋梁の管理者

- ・道路管理者としては，保有するインフラ資産を適正に管理することが目的であり，その理念を踏まえてロボット技術の導入に取り組んだ結果，点検の精度が大幅に上がるとともに効率化が進み，成果面，費用面で大きなメリットがあった。
- ・この度の取組みは，新しい橋梁点検のあり方を示す大きな一歩となった。

(2) 点検技術者

- ・ロボット技術による点検で作成された損傷図をもとに近接目視点検を行うことにより，重点的に点検する必要がある箇所を特定して点検を行うことができた。
- ・かぎられた時間のなかで見落としのない点検を実施することのリスクとプレッシャーから解放された。
- ・ロボット技術による事前調査を踏まえた近接目視点検では，対象橋梁を2回診ることができ，近接目視の主目的である「見落としの排除」につながるため，この点検手法に魅力を感じている。
- ・人間のミスを補うためのロボット技術という本来の姿かもしれない。

4. 橋梁点検支援技術の活用促進に向けて

ここでは，橋梁点検におけるロボット技術を一般的な技術として，広く普及させるための対応策について述べる。

4.1 ロボット技術の供給体制の整備

橋梁点検の実作業を担当する点検実務者がロボット技術を活用する際に，ロボット技術を円滑に供給する体制の整備が必要である。橋梁点検技術者が自ら活用するロボットカメラ技術などの場合には，販売あるいはレンタルによる

供給体制が有力と考えられる。一方，ドローン系のロボット技術の場合には，個別ロボット技術による点検作業の受託だけでなく，複数のロボット技術を組み合わせて活用する点検作業を受託する体制の整備が望まれる。

4.2 ロボット技術を活用する受発注体制の整備

ロボット技術の活用推進では，受注者と発注者にとってのメリットを明確にし，受注者から積極的に技術活用を提起するような状況とする必要がある。具体的には，以下のような対応が考えられる。

(1) 点検結果の利活用の優位性に関する情報提供と点検成果様式の改良

ロボット技術を活用した橋梁点検結果は，電子化された点検結果として，3次元でのデータ参照や，前回点検成果とのデータ比較などが可能である。これら点検結果の利活用の優位性について，ロボット技術開発者側から，橋梁点検業務の発注者や受注者への情報提供を精力的に行う必要がある。また，ロボット点検技術の利活用をさらに推進するために，点検ロボット技術を活用した橋梁点検成果の新たな納品様式を定める必要がある。

(2) 業務受注時の優位性への配慮

ロボット技術の活用提案が，受注時に優位に評価されたり，業務完了時の成績で優位に評価されたりするような受注者のインセンティブを考慮した受発注体制を整備する。

(3) 業務契約の柔軟な変更

ロボット技術を活用した点検では，変状状況により近接目視の作業量の変動が大きい場合があり，業務契約内容の柔軟な変更対応が必要である。

4.3 ロボット点検の適用条件などの明確化

橋梁点検業務の受注者がロボット技術を活用する場合に準拠する参考資料として，「新技術利用のガイドライン(案)」⁵⁾と「点検支援技術性能カタログ(案)」⁵⁾が公表されている。実用面では以下に示すような情報提供や活動を行うことで，利用拡大が推進される。

(1) 鋼橋への適用性

RC橋やPC橋での実証試験は多いが，鋼橋での事例は少ない。各務原大橋で利用したようなロボット技術の性能であれば，鋼橋での適用は十分可能と思われる。鋼橋での実証試験などを積極的に推進し，その結果を公表するような活動が必要である。

(2) 多主桁橋の主桁間の点検への適用性

もっとも一般的な橋梁形式は，鋼橋では多主桁橋，PC橋ではPC-T桁橋であり，これらの形式への適用拡大が，ロボット点検の普及のキーポイントである。これらの橋梁形式では，主桁間の点検への適用性をもっとも重要である。主桁や横桁のウェブ面や下フランジ上面の点検への適用性についての情報提供が求められる。

(3) 泥などが堆積した支承周りの点検への適用性

端支点の支承周りの橋座面には，伸縮装置の損傷や排水機能の不備などで，泥などが堆積しやすく，点検の障害となる場合がある。堆積した泥などが存在する場合の適用性についての情報提供が必要である。

(4) ロボット技術の組合せの事例

現状では、1種類のロボット技術のみで橋梁点検を支援した場合、その適用範囲が限定されるため、複数のロボット技術の組合せによって、適用範囲を拡大することが重要である。これらの組合せ事例を整理して公開することで、実際の橋梁点検での活用の場が広がると考えられる。

(5) コンクリートの打音点検への対応

ドローンなどを利用した打音点検ロボットの開発も精力的に進められており、検出機能としては実用レベルに達していると考えられる。ただし、打音点検の処理速度という観点では十分とはいえず、打音点検を行う範囲を限定した利用形態が現実的である。今後は、熱画像を活用したり、ロボット点検による撮影画像からAI技術などを活用して打音点検範囲を限定するような技術開発を行い、打音点検への活用を推進する必要がある。

(6) ロボット技術を活用した橋梁点検の質問回答集 (Q&A) の整備

実際にロボット技術を利用するには、いろいろな疑問や問題点を解決する必要があると考えられる。これらの疑問や問題点についての質問回答集(Q&A)を整備・蓄積し、最新の情報をWebサイトで閲覧できるような整備が望まれる。

4.4 定期点検以外での積極的な活用

各務原大橋での定期点検(事前調査)でのロボット技術の活用成果を踏まえると、これらの点検支援技術は、以下のような活用にも適用可能であり、今後の積極的な活用が期待される。

(1) 補修設計における変状寸法調査

橋梁補修設計の際に、既存の橋梁点検成果では情報が不足するため、変状の分布や寸法計測のための調査を行う場合が多々ある。このような場合にも、橋梁点検用のロボット技術を活用した調査が有効と考えられる。

(2) 新設橋梁の初回点検調査

新設構造物の初期点検については、竣工検査の一環として、ロボット技術を活用した点検が有効と考えられる。ロボット技術を活用して構造物全面の画像を撮影することで、構造物の仕上り確認もでき、変状の有無や初期状態も把握できる。施工者としても、施工時の瑕疵の有無を判断する資料として活用できる。こうした点検については、日本橋梁建設協会やプレストレスト・コンクリート建設業協会などとタイアップした検討も有効と考えられる。

(3) 橋梁の長期モニタリングでの活用

たとえば垂井高架橋¹⁰⁾にみられるように、施工時の変状対策として、当初設計に含まれない補修・補強対策を行い、その対策の妥当性検証のために年に1回程度、長期間にわたってモニタリングを行う場合がある。このようなモニタリングでは、交通規制が不要なロボット技術を活用した手法が有効と考えられる。

5. おわりに

2018年度に、全国の地方自治体のなかで初めて、各務原市が実施した各務原大橋(長大PC橋)の定期点検にお

いてロボット点検技術を活用して支援を行った。この定期点検では、まずロボット技術を取り入れた事前調査を行い、その結果を踏まえて点検技術者による近接目視点検を行った。点検技術者からは、「かざられた時間のなかで見落としのない点検を実施することのリスクとプレッシャーから解放された」との感想があった。このロボット点検技術の活用により、参加したロボット点検技術の完成度が高まるとともに、橋梁点検車による橋面片側交通規制期間を大幅に短縮できることや、ロボット技術により取得した情報が大いに役立つことなど、ロボット点検技術を活用することのメリットが明らかとなった。

橋梁点検支援技術としてのロボット技術の場合のように、法令で技術の使用が想定されておらず、技術が使われにくいために技術開発が進まないといった状況においては、大学が中心となって、行政関係者、点検技術者、技術開発者の間で十分な意見交換を行いながら、活用促進に向けた各種の取組みを行うことが有効であった。

橋梁点検におけるロボット技術を一般的な技術として、広く普及させるためには、下記の取組みが望まれる。

- ① ロボット技術の供給体制やロボット技術を活用する受発注体制の整備。
- ② 鋼橋への適用性や多主桁橋の主桁間の点検への適用性の明確化。
- ③ ロボット技術の組合せ事例の公開。
- ④ 補修設計における変状寸法調査、新設橋梁の初回点検調査、補修対策の長期モニタリングなどの定期点検以外への積極的な活用。

参考文献

- 1) 國枝 稔, 沢田和秀, 六郷恵哲: 岐阜大学インフラミュージアムの整備, プレストレストコンクリート, Vol.60, No.1, pp.56-60, 2018.1.
- 2) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP), <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html> (閲覧日: 2019.8.8)
- 3) 岐阜大学新技術地域実装支援, <http://me-unit.net/> (閲覧日: 2019.8.8)
- 4) 新しい橋梁点検技術の適用性評価委員会: ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案) - 地方自治体向け -, 岐阜大学SIP実装プロジェクト, 2018.4
- 5) 国土交通省道路局: 道路橋定期点検要領, 新技術利用のガイドライン(案), 点検支援技術性能カタログ(案), 2019.2
- 6) 六郷恵哲, 羽田野英明, 中村俊夫: 長大PC橋の定期点検におけるロボット技術の活用, 土木技術資料, 61-5, pp.38-41, 2019.5
- 7) 羽田野英明, 木下幸治, 森本博昭, 六郷恵哲: ロボット技術を取り入れた長大PC橋の定期点検結果と今後への考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1357-1362, 2019.7
- 8) 各務原大橋点検方法検討会: 各務原大橋点検方法検討会報告書, 岐阜大学SIP実装プロジェクト, 2018.4
- 9) 岐阜県土木整備部道路維持課: 岐阜県橋梁点検マニュアル, 2016.3
- 10) 土木学会技術推進機構垂井高架橋モニタリング評価委員会: 垂井高架橋モニタリング評価委員会最終報告書, 2017.8

[2019年8月19日受付]