

報告 ロボット技術を取入れた長大 PC 橋の定期点検結果と今後への考察

羽田野 英明*1・木下 幸治*2・森本 博昭*3・六郷 恵哲*4

要旨：5年に一度の橋梁定期点検は、平成31年3月で全橋梁について1サイクルが終了する。これらの点検結果や実施状況を踏まえ、地方自治体向けの点検要領について新技術を活用した点検への見直しが進められている。筆者らは平成28年度後半より、地方自治体の橋梁点検で、ロボット技術を利用するための指針作成やフィールド試験を実施し、平成30年度には長大PC橋においてロボット点検技術を用いた橋梁定期点検(事前調査)を実施した。この報告では、その結果について報告するとともに、ロボット点検技術を活用して新たに判明した課題や適用のメリット、活用の際の留意点やアイデアについて報告する。

キーワード：橋梁点検, ロボット技術, 事前調査, ドローン, 要求性能, 広域調査, 狭域調査

1. はじめに

平成25年の道路法改正により道路管理者による点検が法定化され、平成26年からは道路法施行規則に基づく5年に一度の橋梁定期点検が開始された。全国の定期点検が必要な橋梁は約73万橋に及び、その約7割が市町村の管理となっている。そのため、地方自治体では、定期点検の効率化やコスト低減が大きな課題となっている。このような状況のなかで、5年に一度の橋梁定期点検が一巡する平成31年3月を見越して、地方自治体への技術的助言としての道路橋定期点検要領¹⁾について、これまでの定期点検の実施状況や結果を踏まえ、新技術の活用を含めた見直し²⁾が進められている。

岐阜大学では、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術において平成28年9月より「使いたくなるSIP維持管理技術のME(メンテナンスエキスパート)ネットワークによる実装(以下、岐阜大学SIP)」という研究を実施している³⁾。その活動の一部として、平成28年11月から地方自治体が管理する橋梁の定期点検にロボット技術を取り入れることを目指した活動を行ってきた⁴⁾⁵⁾⁶⁾。ロボット技術の取り入れにあたっては、道路橋定期点検要領¹⁾、岐阜県橋梁点検マニュアル⁷⁾などの現行技

術基準への適合性、ロボット技術の特徴把握、性能の評価、技術の組み合わせ方、コストや発注の考え方等、様々な課題が存在した。

筆者らは、これら課題への対応を検討した点検指針(案)等⁸⁾⁹⁾を作成するとともに、これに基づいて、各務原市が管理する橋長594mの長大PC橋(図-1)において、ロボット点検技術を用いた橋梁定期点検(事前調査)を実施した。この橋梁は歩道幅が広いことから、図-2に示すような一般的な大型橋梁点検車(懐幅4m)の利用が困難であり、超大型橋梁点検車(懐幅5m)やロープワーク、点検用足場等の特殊な点検方法が必要とされる。超大型橋梁点検車を用いる従来の近接目視点検では、10日間の片側交通規制が必要となり、交通渋滞による経済的損失も発生する。

本報告では、この事前調査について報告するとともに、実際の橋梁点検におけるロボット点検技術の活用を通じて、新たに判明した課題や適用のメリット、さらには活用上の留意点やアイデアについて報告する。

2. 各務原大橋での事前調査

2.1 実施方針と実施工程

点検ロボット技術は、岐阜大学SIPで作成した点検指



図-1 各務原大橋(左岸側より)

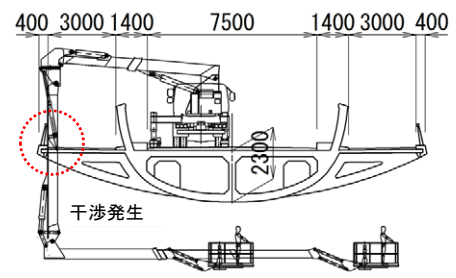


図-2 大型点検車を用いた橋梁点検

*1 岐阜大学 工学部附属インフラマネジメント技術研究センター客員教授 工博(正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 工博(正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科特任教授 工博(名誉会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科特任教授 工博(正会員)

針(案)⁸⁾があり、フィールド試験による機能検証は行われているものの、実際の定期点検における活用実績がほとんどない。そのため、橋梁管理者や点検業者が、ロボット技術の選定や適用方法を的確に判断することは、現時点では難しいと考えられた。そこで、各務原大橋の定期点検では、図-3に示すように、平成29年度に各務原大橋で二度のフィールド試験を実施した岐阜大学SIPが事前調査を支援し、その結果を踏まえた近接目視点検については、従来と同様に橋梁定期点検に精通した建設コンサルタントが実施することになった。

事前調査は、後続する近接目視点検の支援として、点検対象とする部材(床版下面、主桁、下部工)について、ロボット等の眼により変状情報を取得することを目的とした。一方、近接目視点検は、目視を重点的に実施する部材や範囲を、事前調査において検出した変状に関する情報に基づいて把握することで、作業の効率化を図ることとした。

具体的な実施工程を、図-4に示す。事前調査と近接目視点検の間に日程的な余裕を確保し、事前調査で判明した個々の変状に関する疑問点を調査・検討し、近接目視点検での適切な対応ができるように配慮した。

2.2 利用したロボット技術と組み合わせ

岐阜大学SIPにおけるフィールド試験の結果から、各務原大橋の全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⁹⁾を踏まえて、表-1に示す6種類のロボット技術をその能力が最も発揮できる

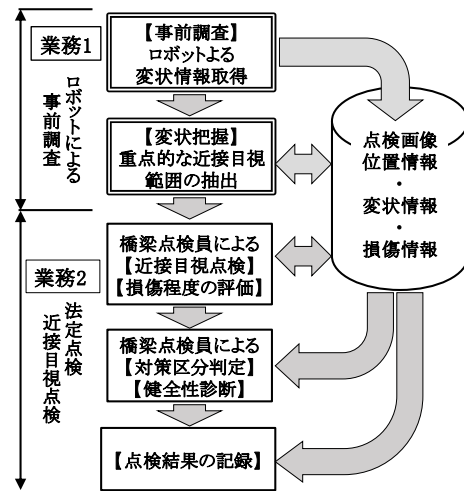


図-3 各務原大橋での橋梁点検

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)	[Bar chart showing preparation from July to August]									
	現地調査	ロボット機能調整	[Bar chart showing adjustment from August to September]								
		広域調査	[Bar chart showing wide-area survey from October to November]								
		狭域調査	[Bar chart showing narrow-area survey from November to December]								
		打音点検	[Bar chart showing tapping inspection from December to January]								
	内業	変状状況資料作成	[Bar chart showing data creation from November to February]								
変状状況の把握		[Bar chart showing status grasp from December to February]									
重点目視部位の整理		[Bar chart showing key area organization from January to February]									
近接目視	事前準備	[Bar chart showing preparation from December to January]									
	点検車等による近接目視	[Bar chart showing close-up inspection from January to February]									
	点検結果の取り纏め	[Bar chart showing result consolidation from February to March]									

図-4 実施工程

表-1 事前調査で利用したロボット技術

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できる。	

		A2		P9		P8		P7		P6		P5		P4		P3		P2		P1		A1	
事前調査	広域調査	②																					
	狭域調査	③		③		④		④		④		④		④		④		④		③		③	
	上部工			①a		①a		①a		①a		①a		①a		①a		①a		①a		①a	
	支保周り			①b		①b		②		②		②		①b		①b		①b		①b		①b	
下部工																							
打音点検			⑥				⑤																
近接目視点検		標準部 橋梁点検車				拡幅部 ロープ点検				標準部 橋梁点検車				拡幅部 ロープ点検				標準部 橋梁点検車					

丸付き番号は、表-1のロボット技術の番号を示す。①aは小型マルチコプター、①bは大型マルチコプターを示す。

橋梁点検車は横幅5mのAB1400X

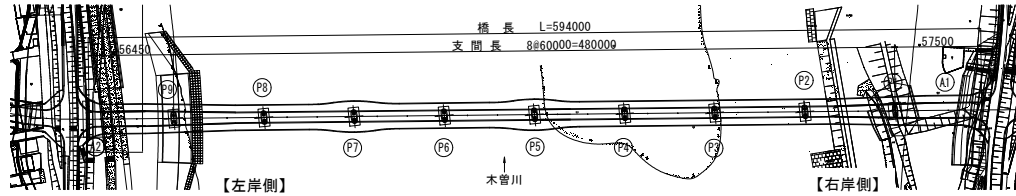


図-5 橋梁点検の分担

表-2 ロボット技術による取得情報への要求性能⁹⁾ (岐阜県橋梁点検マニュアル⁷⁾に対応)

		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、方向が概ね一致している
	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。	
	方向等	変状の方向性やパターンを検出できる。	
	水の侵入経路	漏水や遊離石灰等の変状について、水の浸入経路や発生源を検出できる。	
変状計測	寸法	0.2mm以上のひび割れ幅を0.1mm以内の誤差で計測できる。	変状や精度検証指標の計測結果が、概ね左記に示す許容誤差の範囲内である。
		変状の寸法を50mm以内の誤差で計測できる。	
	変位	桁遊間や支承の変位を10mm以内の誤差で計測できる。	

調査範囲を設定して活用することとした。図-5に各ロボット技術における調査対象部材の分担を示す。

2.3 事前調査内容

事前調査では、ロボットの技術を十分活用できるように広域、狭域、打音点検の3種類の調査を行った。

(1) 広域調査

広域調査は、橋梁全体の状況把握、各種変状の位置関係の把握、橋梁のオルソ写真や3次元モデル作成のための調査である。比較的視野の広いカメラ(撮影範囲は5m×3.4m程度)で、橋梁全体を連続撮影した。撮影画像は、0.3mmのひび割れが検出できる解像度とし、0.84mm/pixelとした。事前調査で使用したロボット技術がこの性能を満たすことは、岐阜大学SIPのフィールド試験で確認されている。広域調査は、ドローン系ロボットの高速性を生かせるので、現場作業時間が短くて済む。

(2) 狭域調査

狭域調査は、0.2mm以上のひび割れを含む各種変状の検出するための調査である。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。使用したロボット技術が表-2⁹⁾に示す要求性能を満たすことは、岐阜大学SIPのフィールド試験⁹⁾で確認されている。

(3) 打音点検調査

広域や狭域調査によって、変色等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なった。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。

2.4 事前調査結果

狭域調査結果は、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写真を背景に配置し、その画像上に変状位置を示す資料とした。さらに、図-6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同時に、変状写真(健全性判定付き)を関連付け、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。

広域調査結果は、図-7に示すように構造物単位(上部工一径間、下部工一橋脚)毎のオルソ写真を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。

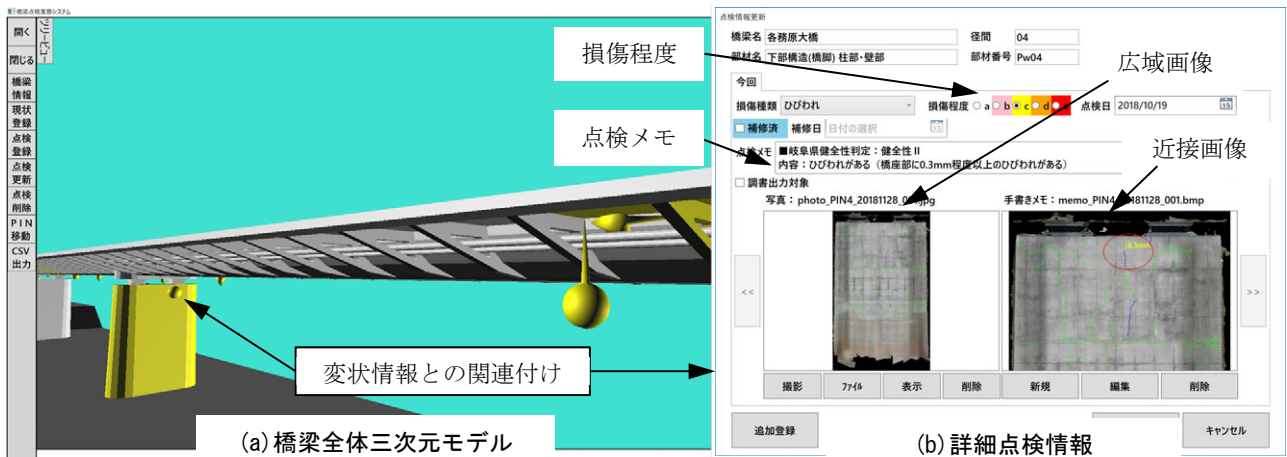
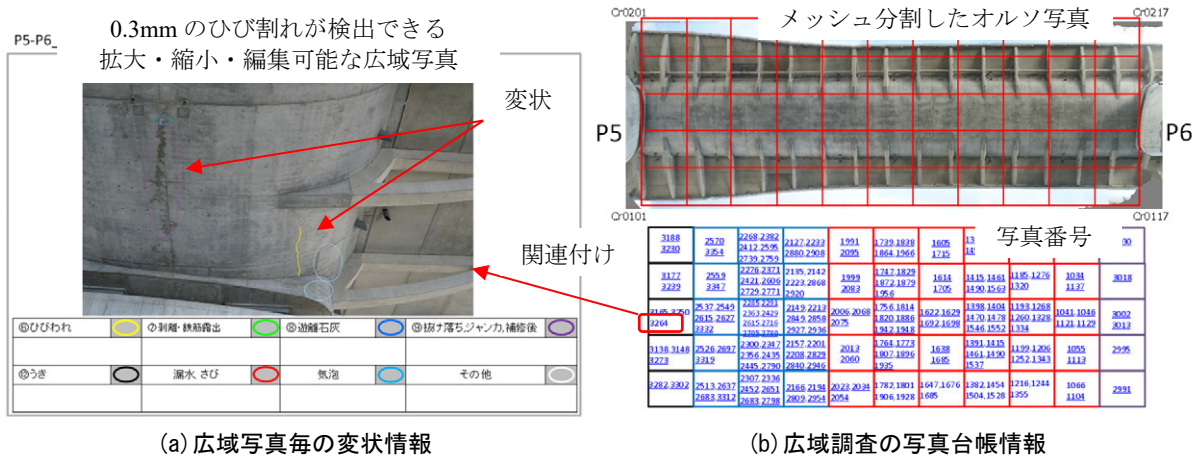


図-6 三次元変状マップと変状情報の関連付け



(a) 広域写真毎の変状情報

(b) 広域調査の写真台帳情報

図-7 広域調査結果の取り纏め

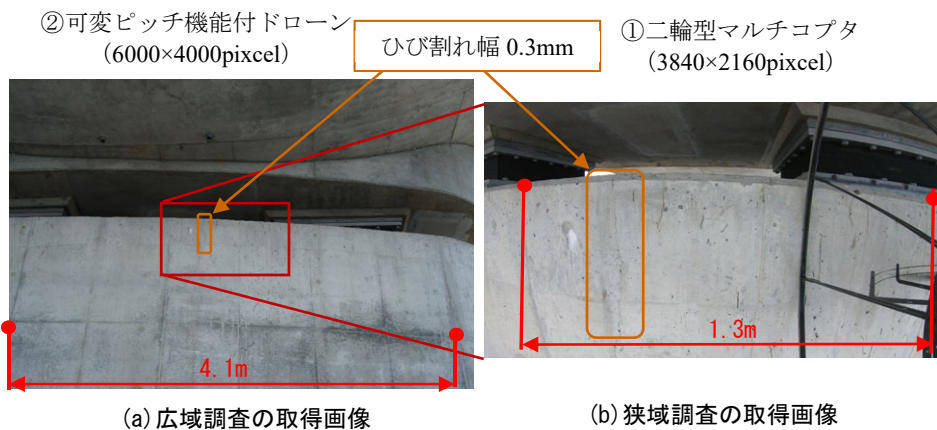


図-8 広域調査と狭域調査の取得画像比較

図-8 に示すように、広域と狭域調査の取得画像を比較した結果、広域調査の画像でも幅 0.3mm 程度のひび割れが十分検出可能であることが確認された。そのため事前調査においては、今回の広域調査で使用したロボット技術の利用形態が効果的であると判断した。今後、さらなるカメラの性能向上を図ることで、撮影精度が狭域調査のレベルに近づくことが期待され、事前調査の効率化がより推進されると考えられる。

以上のようなロボット技術を活用した事前調査を行

うことで、変状の種類や位置を事前に把握・整理し、その結果をもとに橋梁全体について重点的な近接目視点検が必要な箇所や部位を絞り込んだ。その結果、各務原大橋では、超大型点検車による近接目視作業の日数を、従来手法の 10 日間から 4 日間へと大幅に短縮することができた。

3. ロボット技術の活用に向けた課題や留意点

これまで述べた事前調査におけるロボット技術の実

装や、岐阜大学 SIP の 2 年間にわたる研究活動から、ロボット点検技術の活用において、新たに判明した課題や、適用のメリット、さらには活用上の留意点やアイデアについて、以下に提示する。

3.1 利用形態

ロボット技術の活用の形態としては、以下のような三種類が考えられる。

1) 近接目視が困難な部位の点検での活用

従来点検で対応できなかった部位に限定してロボット技術を活用する。

2) 事前調査での活用⁸⁾

ロボットの眼で事前に点検し、その後に近接目視による全面確認を行う。事前調査の結果を活用することで近接目視点検の効率化を図る。

3) スクリーニング調査での活用

ロボットの眼で事前に調査し、確認が必要な部位を絞り込み、近接目視点検を実施する。健全な橋梁では近接目視点検が不要となる場合も想定される。

今後は、橋梁全体の状態を的確に把握し記録するために、初回点検ではロボット技術による事前調査後に近接目視点検を全面的に実施し、その後の点検ではロボット技術によるスクリーニング調査に基づき、近接目視の範囲を限定する点検手法が効果的と考えられる。

3.2 ロボット技術への要求性能の提示

橋梁管理者は、利用するロボット技術に対する合理的な要求性能（例えば表-2）を具体的に提示する必要がある。要求性能の提示にあたっては、健全性区分判定に必要な最小限の変状検出精度を提示し、過度の性能要求の提示は避けるべきである。

例えば、非常に微細なひび割れ幅が計測できるような過度の性能を要求した場合、写真画像の解像度を確保するため、撮影する写真の枚数が著しく増大する。その後の画像処理やデータ管理が煩雑化するとともに、画像から健全性区分を判定する作業の効率が低下する場合もある。ロボット技術により取得する情報に求められる最低限の品質を確保しつつ、データ処理の効率化に配慮した要求性能を提示することに留意すべきである。このようなことを踏まえると、表-2 に示した要求性能は、事前調査に引き続いて実施した近接目視点検結果から判断して、適切であったと考えている。

3.3 ロボット技術の性能確認

利用するロボット技術が、橋梁管理者の要求性能を満足するかどうかは、次の三種類の確認方法がある。

1) フィールド試験での性能確認

精度検証用の指標等を設置したフィールド試験橋梁を用意して性能確認を行う。フィールド試験用橋梁は、橋梁管理者が自ら用意する他に、地域で共同利用

可能な試験用橋梁を第三者機関が用意することも考えられる。

2) 他の橋梁管理者における利用実績による確認

3) 公的機関が発行するカタログ等による確認（国土交通省において発行が予定される「新技術性能カタログ」²⁾等を利用）

現状ではフィールド試験での性能確認事例も限定されていることから、当面は 1) の対応を基本とするのがよいと思われる。なお、フィールド試験での一般性を確保するために、検証用の指標等については統一することが望ましい。また、性能確認では、調査結果が後々利用されることに配慮し、変状やひび割れ幅等の寸法の計測機能の操作性についても確認するとよい。

3.4 ドローンロボット技術利用時の作業環境の整備

ドローン方式の点検ロボット技術を利用する場合、従来の橋梁点検に比べて、次のような作業環境にも配慮する必要があることがわかった。

1) 見通しの確保

ドローンの制御には直進性の電波が使用されている場合が多いため、操縦地点から調査範囲全体の見通しを確保する。周辺に樹木が繁茂している場合は、事前に伐採等が必要な場合もある。

2) 風の特性に配慮した作業計画

一般的なドローンは、強風下（風速 5m/sec 程度以上）では、飛行安定性が低下する。地域によっては午前と午後で風の状況が変化する傾向や、橋梁に近接した場所では風が乱れやすい傾向がある。これらの風の特性を事前に把握し、効率的な作業計画を立案する。

3) 電波障害への対応

一般的なドローンの制御には、2.5GHz や 5GHz 帯の電波が用いられることが多い。これらの周波数帯の電波は、他の用途（Wi-Fi 等）やレーダーの影響を受けやすい。ドローンによる作業を安全・効率的に実施するため、事前に周辺の電波状況を確認しておくとともに、電波障害時の対策を検討しておく。

4) 河川内での作業

航空法では、ドローンの飛行は有視界飛行に限定されている。このため、川幅の広い河川に架橋された橋梁の場合は、船舶上での操作が必要となる。川の流れが速い場合や、水深が浅く船舶が河床に接触する場合には、ロボット操作者の姿勢の安定性を確保する。

3.5 ロボット技術利用時の安全対策

点検ロボット技術を利用する場合、従来点検とは異なる安全対策を行うことが必要である。

1) 制御電波障害時における安全確保

ドローンの制御信号が障害物等で遮断された場合、あるいは混信等の電波障害が発生した場合に、機体

の暴走を防ぐための対策を行う。

2) 道路利用者の安全確保

橋面下での作業であっても、ドローン等の暴走により橋上の道路利用者(車両、歩行者)に被害が及ばないような安全対策を行う。また、作業実施方法によっては、道路占用許可や道路使用許可の手続きを行う。

3) 代替機の補給・バックアップ

点検ロボットは精密機械であり、故障等のトラブル時の代替機の補給体制を確保しておく。

3.6 調査結果の整理・保管

ロボット技術を利用した点検結果は、次のような形態で整理することができる。

- 1) 2次元図面の変状マップと写真台帳(従手法)
- 2) 2次元画像の変状マップと画像の関連付け
- 3) 3次元構造モデルの変状マップと画像の関連付け
- 4) 3次元画像の変状マップと画像の関連付け

将来の方向性としては4)であるが、今回の事前調査では、コンピュータの処理能力の関係から、2)と3)の2種類での結果整理を行った。近接目視作業において、事前調査結果の参照や修正の作業性から3)の手法が望ましいと判断した。

点検結果の保管は、三種類の体制が考えられる。

- 1) 橋梁管理者ごとの保管
- 2) 県・地域単位のデータセンター等での保管
- 3) 国全体のデータセンターでの保管

地震災害等のリスクを考慮し、3)の保管体制が望ましく、調査結果の様式も統一される等の利点もある。

4. おわりに

ここでは岐阜大学 SIP で作成した点検指針(案)等^{8),9)}に基づいて、長大 PC 橋においてロボット点検技術を用いて、近接目視点検に先立つ事前調査を実施した結果について報告した。また、実際の橋梁点検に対してロボット点検技術を活用して新たに判明した課題や適用のメリット、活用時の留意点やアイデアについて報告した。その結果をまとめると以下のようである。

- (1) ロボット技術を活用して、大断面を有する大型 PC 橋梁の各務原大橋での事前調査を実施し、変状の種類や位置を事前に把握・整理することで、近接目視点検の超大型点検車による橋面片側交通規制期間を10日間から4日間へと大幅に短縮した。
- (2) ロボット技術を活用した調査で、広域と狭域の二種類の調査方法を試行し、その比較からカメラの性能向上を図ることで、広域調査の撮影精度が狭域調査のレベルに近づくことが期待され、効率的な現場作業が可能となることを示した。
- (3) ロボット技術を利用した点検結果を二種類の手法で

整理し、近接目視作業での活用面から、「3次元構造モデルの変状マップと画像の関連付け」が有効であることを示した。

- (4) 点検ロボット技術の利用形態、要求性能の提示、性能確認、作業環境の整備、安全対策等について、実装活動から得られた課題や留意点を整理した。

本報告が、点検ロボット技術を活用した橋梁点検を指向する橋梁管理者や点検技術者の参考になれば幸いである。

本研究活動は、SIP インフラ地域実装活動の一環として実施したものであり、多大なるご協力をいただいた SIP 関係者、委員会に参画いただいた方々、橋梁管理者である各務原市の関係者、ロボット技術開発者、そしてロボットによる橋梁点検活動を精力的に支えていただいた矢島賢治氏、古澤栄二氏、溝部美幸氏、加藤波男氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局:道路橋定期点検要領,平成26年6月
- 2) 国土交通省第10回道路技術小委員会配付資料:http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000418.html(閲覧日:2019年1月3日)
- 3) 岐阜大学工学部インフラマネジメント技術研究センター:使いたくなる SIP 維持管理技術の ME ネットワークによる実装 HP, <http://me-unit.net/>(閲覧日:2019年1月10日)
- 4) 蓮池里菜,木下幸治,羽田野英明,六郷恵哲:長大コンクリート橋におけるロボット技術を取り入れた橋梁点検の試み,コンクリート工学年次論文集,Vol.40, No.2, pp.1345-1350, 2018
- 5) 六郷恵哲,羽田野英明:ロボット技術による橋梁定期点検の効率化・高度化と交通規制の大幅短縮,建設マネジメント技術,2018年8月号
- 6) 蓮池里菜,木下幸治,羽田野英明,古澤栄二,六郷恵哲:ロボット技術の組み合わせによる各務原大橋の定期点検の試み,土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.74, No.2, pp. I_41-I_49, 2018
- 7) 岐阜県県土整備部道路維持課:岐阜県橋梁点検マニュアル,平成28年3月
- 8) 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)ー地方自治体向けー,岐阜大学 SIP 実装プロジェクト,平成30年4月
- 9) 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,平成30年4月