

論文 UAV を活用した橋梁点検における適用橋種の拡大とコスト優位性の精査

Expansion of Bridge Type Applicability for Bridge Inspection by using UAV and Estimation for Cost Predominance

○大西 悠*1・中島 良光*2・森田 祐樹*3・光田 徹治*4・山本 和範*5

Haruka ONISHI, Yoshimitsu NAKAJIMA, Yuki MORITA, Tetsuji KODA and Kazunori YAMAMOTO

要旨：道路橋の定期点検において、点検技術者による目視点検を補完・代替する点検ロボット等新技術の導入が可能となったが、適用可能な橋梁の種類が限定的で少ないことや導入した際のコストが不明瞭なこと等から、実際の点検業務に活用された事例はまだ少ない。本実証実験では2橋の道路橋で UAV を用いた点検を実施しその適用性を確認するとともに、その際のコストの精査を行った。今回検証を行った2橋では、コンクリート部材に生じた0.1mm幅以上のひびわれや遊離石灰の抽出及び鋼部材の主な損傷状況が確認できており、近接目視と同等の結果が得られた。また、橋梁点検車が必要等の条件の場合、点検コストの削減が可能という結果が得られた。

キーワード： UAV, 橋梁点検, 維持管理

1. はじめに

インフラ運営・維持管理において、道路橋の定期点検はH31年3月の点検要領改訂により、点検技術者の目による近接目視を補完・代替・充実する点検ロボット等の新技術の導入が可能となった。しかし、実際の点検業務で本格的に活用された事例はまだ少なく、UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 通称：ドローン) を使用した点検 (以下、UAV点検と表記) についても、その可能性を期待されながら適用場面がまだ少ないのが実状である。筆者らはこの原因として、以下の問題点と実務上の課題があると考えた。

まず、検証されている橋梁の種類が表-1 に示すように限定的で少ないことである。これまで検証実績のある橋梁はPCフィンバック橋やRC床版橋といった形状変化の少ないコンクリート構造の橋梁であり、PCT桁橋や鋼板桁橋といった形状の橋梁については検証事例が少なく、現時点で多くの課題が残っている。¹⁾²⁾

次に、実際に導入した際のコストメリットが表-2 に示すように不明瞭なことである。点検実務への導入を検討した場合、UAV点検によってどのような費用が発生するのか、また、従来手法と比較してどの程度の価格なのかが不明瞭であり、導入によるコストメリットの

概算が難しかった。

これをふまえ、本実証実験では、事例の少ない2種の道路橋でUAV点検を行い、近接目視点検と同等程度の損傷検出が可能かどうかを確認した。また、UAV点検を行った1橋については発生したコストを精査し、従来の点検方法とのコスト比較を行った。今回の実証実験は、「愛知アクセラレートフィールド®」の取組の一環として、愛知有料道路上の供用状態にある橋梁で行った。

表-1 UAV点検実績のある橋種 (左) と 今後展開が望まれる橋種 (右)



	これまで実証実績のある橋種 (検証済み)	今後展開したい建設 (未検証)
点検 UAV	<ul style="list-style-type: none"> PCフィンバック橋 (PC部材) RC床版橋 (RC部材) ※ともに形状変化の少ないコンクリート構造 	<ul style="list-style-type: none"> PCT桁橋、PC箱桁橋等 (PC部材) 鋼板桁橋 (鋼部材) ※ともに桁橋タイプの構造で、未検証の鋼構造を含む 

表-2 コスト精査の概略

	従来の点検方法によるコスト	UAVでの点検方法によるコスト
精査 コスト	<ul style="list-style-type: none"> 大型橋梁点検車 (BT-4000) リース費 交通規制費 点検現場作業等に関わる人件費 	<ul style="list-style-type: none"> UAV点検作業費 画像解析、画像抽出等に関する人件費 

*1 前田建設工業(株) 土木事業本部土木設計部

Dept. of Civil Engineering Design, MAEA Corporation

*2 前田建設工業(株) ICI 総合センター

ICI General Center, MAEDA Corporation

*3 中日本建設コンサルタント(株) 東京事務所設計部

Dept. of Design, Tokyo office, NAKANIHON Engineering Consultants CO.,Ltd.

*4(株)デンソー まちづくりシステム開発部 UAVソリューション事業推進室

Dept. of Regional Development, DENSO Corporation

*5 愛知道路コンセッション(株) 道路運用部

Dept. of Road Operation, Aichi Road Concession CO.,Ltd.

2. 実証実験の概要

本実証実験は、(株)デンソーの「UAV を用いた近接撮影による橋梁点検支援システム」を用いて実施した(図-1)。本システムは、点検対象部材に対し3~5m程度の距離までUAVを飛行・接近させ、搭載カメラで部材全面を飛行撮影し、部材に生じている劣化・損傷の有無及び定量的な情報(ひびわれ幅・長さ、漏水範囲等)の検出・判定及び損傷図・損傷写真の作成データとしての記録を行うものである。

今回使用したUAVは可変ピッチ機構付きプロペラを搭載しており(図-2)、6翼を独立して自動制御する機能により橋梁下の乱流の中でも安定した飛行が可能である。さらに、測量用トータルステーションを用いた自動追尾機能を活用し、UAVに搭載したプリズムを追尾させることで、GPS電波の届かない橋梁下においてもUAVの位置情報を得ることができる。加えて、上・下・正面の3方向に距離センサーを搭載しており、障害物との衝突防止だけでなく、対象物との距離を一定に保つ機能も有する。UAV点検に際しては安全に配慮し、テレメトリー監視員(飛行・機体状態の監視)、UAVパイロット、カメラオペレーター の3名1チームで点検を行った(図-3)。今回、2種の橋梁として衣浦豊田道路の豊田知立高架13号橋(PC箱桁橋)、名古屋瀬戸道路の本線5号橋(鋼少数主桁橋)を実証フィールドに選出した(図-4、5)。

(1) PC桁橋での実用可能性の検証

PC橋での検証として、衣浦豊田道路の豊田知立高架13号橋(PC箱桁橋)を選定した。豊田知立高架13号橋

デンソー-UAV仕様		機体諸元	
	体格	1530 × 1500 × 525 (mm)	
	プロペラ径	18インチ × 60-ター	
	重量	約10kg (バッテリー重量込み)	
	ペイロード	約 2kg	
	耐風性能	10m/s	
	飛行時間	15分	

図-2 UAV仕様



図-3 UAV点検状況と点検チームの構成

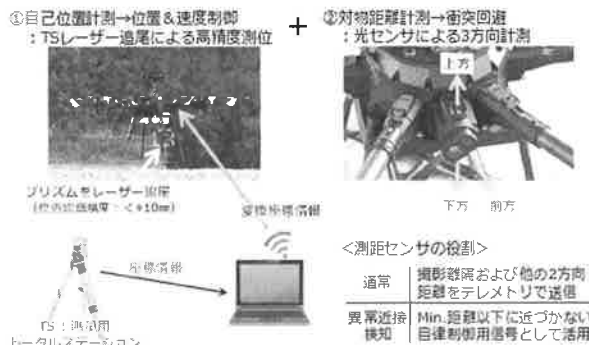


図-1 UAV点検システムの概要



図-4 衣浦豊田道路豊田知立高架13号橋位置図



図-5 名古屋瀬戸道路本線5号橋位置図

号橋の概要を示す(図-6)。

実証範囲は橋脚P89から橋脚P90径間の主桁・横桁の側面、床版の下面とした(図-7)。UAVと対象部材との離隔を3.9m確保して飛行しているため、主桁・横桁の側面は45°のあおりでの飛行撮影とした。床版下面は通常通り、正対(物体に対して正面から撮影する方法)での飛行撮影を行った。また、飛行速度はいずれも0.4m/sで行った。

今回、近接目視と同等のひびわれ抽出が撮影画像から可能か検証するため、クラックスケールをあらかじめ主桁側面・床版下面に貼付け、UAVでの撮影を行った。



路線名	衣浦豊田道路
橋梁名	豊田知立高架13号橋
橋梁形式	10径間連続PC箱桁橋
橋長	450.25m (径間長44.75m)
幅員	19.5m
供用開始	平成16年3月

図-6 衣浦豊田道路 豊田知立高架13号橋の概要

(2) 鋼桁橋での実用可能性の検証

鋼桁橋での検証として、名古屋瀬戸道路の本線5号橋(鋼少数主桁橋)を選定した。本線5号橋の概要を示す(図-8)。

実証範囲は橋脚P3-21LRから橋台A3-2径間のPC床版下面、主桁・横桁下面、主桁・横桁側面とした(図-9)。本橋梁のような鋼部材では、亀裂を除きコンクリート部材(ひびわれ抽出)ほどの画像精度を要しないこと、コンクリート橋よりもさらに狭隘な空間であることを踏まえ、主桁・横桁側面については全天球カメラを搭載し、飛行撮影を行った。PC床版下面、主桁・横桁下面については正対(一部あおり)による撮影を行った。

本橋梁も同様に、クラックスケールをあらかじめ床版下面に貼付けてUAVでの撮影画像の精度検証を行った。

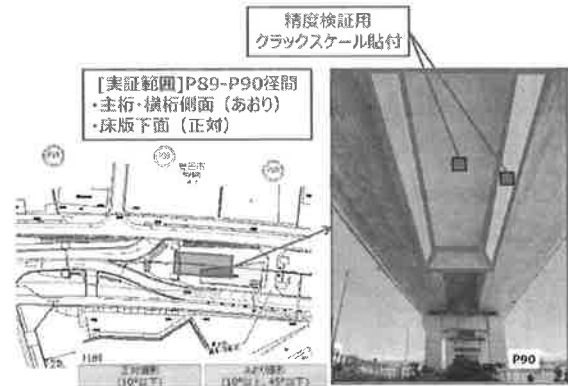


図-7 豊田知立高架13号橋での実証実験範囲



路線名	名古屋瀬戸道路
橋梁名	本線5号橋(上り、下り)
橋梁形式	5径間連続PC床版鋼少数主桁橋
橋長	190.00m (径間長34.00m)
幅員	11.7m
供用開始	平成16年11月

図-8 名古屋瀬戸道路 本線5号橋の概要

(3) UAV点検コストの比較検証

従来の近接目視による点検の場合、高所作業車や橋梁点検車を使用し、点検者が対象部材まで接近できるようにしなければならない。その際、橋梁下に点検用の足場や高所作業車を設置するスペースがない場合、リース代が高価な橋梁点検車が必要である上、有料道路上の車線を規制して行う必要がある。

UAV点検ではこうした足場を必要としないが、実際に業務に適用された事例が少ないため、UAV点検での程度費用や作業が発生するかが不明瞭であり、コスト比較が難しいことから道路管理者は導入に踏み切れないという実態がある。

本実証実験では、橋梁点検の際に大型橋梁点検車を必要とする豊田知立13号橋について、従来方法で点検した場合とUAV点検を行った場合とでコスト精査を行った。従来方法での点検作業日数は点検面積(=橋面積)で算出される。今回、1径間分(橋面積A=873m²)について検討するため、点検作業日数を1日で試算・比較検証した。

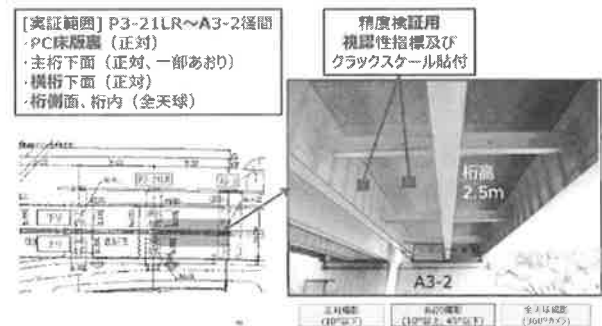


図-9 名古屋瀬戸道路本線5号橋での実証実験範囲

3. 実証実験の結果

(1) PC箱桁橋での実用可能性の検証

床版下面を正対撮影にて記録した写真画像を確認すると、現地に生じていた0.1mm幅のひびわれを抽出することができた。また、その他のひびわれや打ち継ぎ目の見極めも可能で、近接目視と同等の結果が得られたものと判断した(図-10、図-11、図-12)

また、主桁側面を45°あおり撮影にて記録した写真画像も確認した。今回は現地に目立った損傷がなかったため、あらかじめ貼付けておいたクラックスケールの幅を抽出することで画像精度の検証を行った。あおり撮影画像に正対補正をかけるため画像精度は落ちてしまうが、今回の実験では0.1mm幅まで抽出できること

を確認した(図-13, 図-14, 図-15)。したがって、桁橋タイプのコンクリート橋に対しても、主桁側面のひびわれ抽出が可能であるため、桁橋タイプの橋への点検に対しても適用が可能といえる。

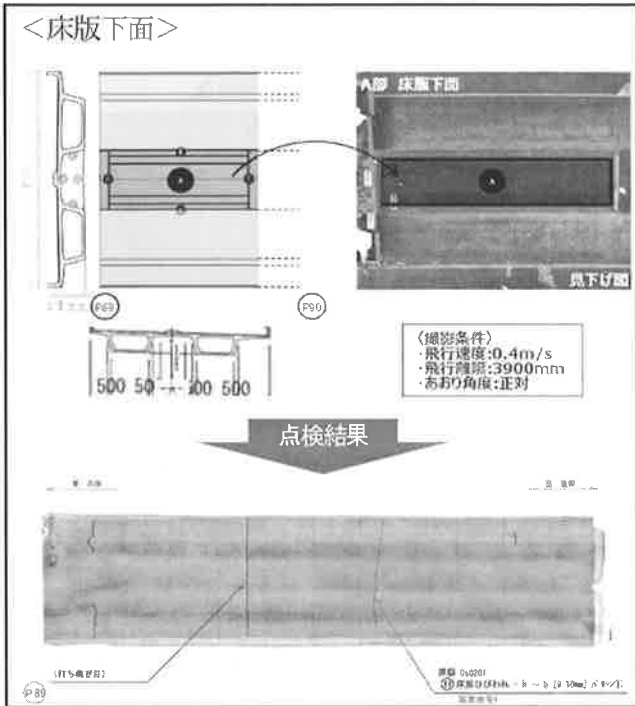


図-10 損傷図(床版下面A部)

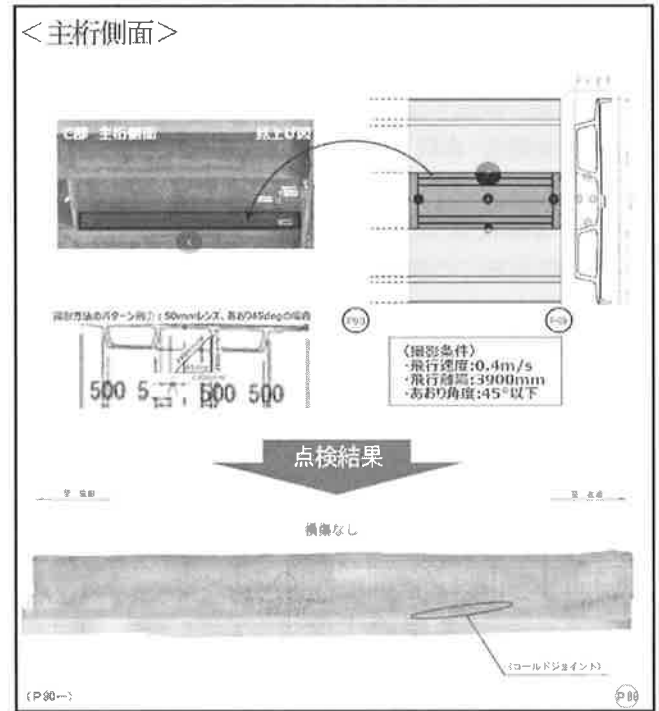


図-13 損傷図(主桁側面C部)

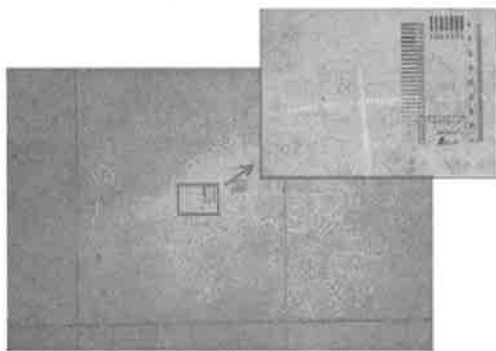


図-11 床版ひびわれ写真

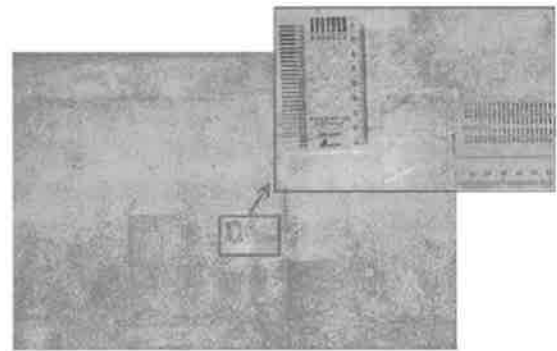


図-14 クラックスケール写真

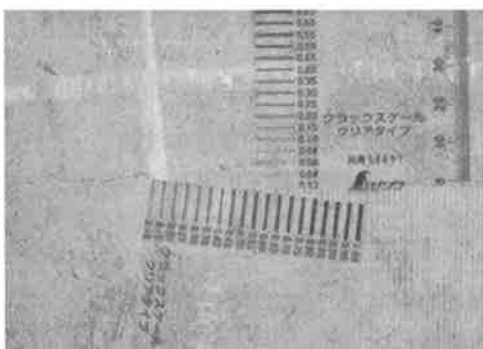


図-12 床版ひびわれ写真拡大図



図-15 クラックスケール写真拡大図

(2) 鋼桁橋での実用可能性の検証

床版下面を正対撮影にて記録した写真画像を確認すると、現地に生じていた0.1mm幅の床版ひびわれ、および遊離石灰の発生を抽出することができた。桁橋タイプのコンクリート橋と同様に、近接目視と同等の結果が得られたものと判断した(図-16, 図-17)。

また、主桁・横桁の側面を全天球カメラで撮影・記録した写真画像を確認すると、防食機能の劣化やボルトの脱落等の鋼部材の主要な損傷はおおむね抽出可能だということがわかった。(図-18)

一方で、多主桁のような狭隘空間での点検作業のケースでも作業性に支障がないか、撮影箇所数がどの程度必要か、オルソ画像への展開は問題なく可能かといった課題も浮かび、他の場面でのどのような試行をしていくかが明確になった。

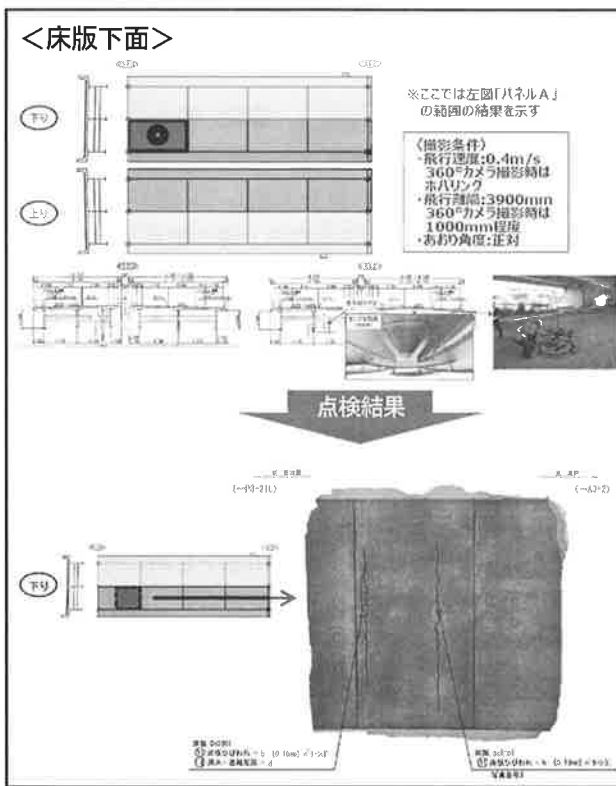


図-16 損傷図(床版下面)

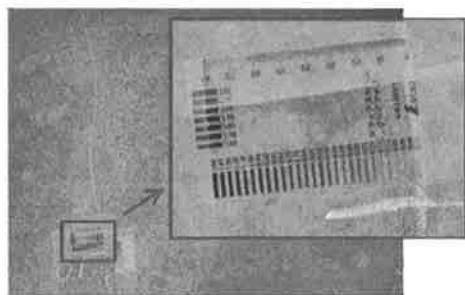


図-17 床版ひびわれ写真

<主桁・横桁>

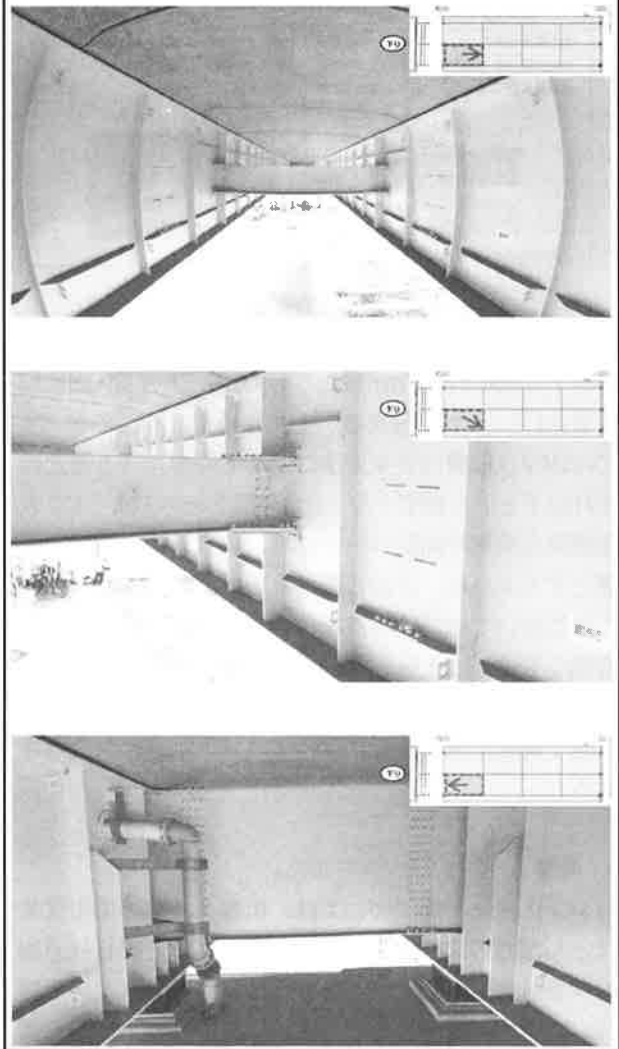


図-18 全天球カメラ撮影による鋼桁の状況

(3) UAV点検コストの比較検証

従来方法での点検作業の場合、図-19に示す通り点検日数1日(点検する橋面積 $A=873\text{m}^2$)・大型橋梁点検車使用のため高速道路上の交通規制が上下線で計2回分必要なことから、当該径間の点検コストは155万円と試算した。

UAV点検では、実際の点検面積を計上する必要があることから、橋面積に加え、主桁等の側面及び橋脚梁

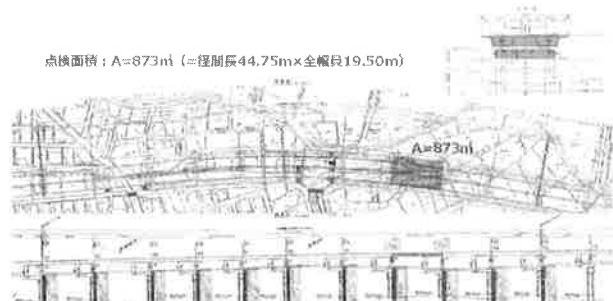


図-19 検証ケース 衣浦豊田道路(PC箱桁橋)

表-3 従来方法とUAV点検のコスト検証結果と比較

	従来方法 (大型橋梁点検車)	UAV点検 (1,100円/m ²)		
必要コスト	大型橋梁点検車 1日	85万円	主桁・床版下面 873m ²	96万円
	交通規制 2回 (29万円/回)	58万円	主桁・橋桁側面 377m ²	42万円
	点検員 1日	12万円	橋脚梁 110m ²	12万円
		Σ 155万円		Σ 150万円
				

※点検作業日数は1日とする。

部材まで計上し、試算した。この結果、当該径間の点検コストは150万円 (1m²当たり1,100円、人件費・画像解析費含む) となった(表-3)。したがって、今回のケースではUAV点検費は従来方法に対して同等コストまたはそれ以下という結果となった。今回ケースのように、大型橋梁点検車や高所ロープ作業、調査足場の設置を必要とするような、近接目視のために多額の費用がかかる橋においては、UAV点検はコスト削減の点で非常に有効な手段といえる。また、UAV点検を補助的に導入し、近接目視点検と併用するような方法でも、点検車使用日数や規制日数の削減によってコスト削減が可能と考える。

4. 考察

コンクリート橋については、桁橋タイプの橋を含めほとんどの形式の橋梁でUAV点検による近接目視点検の代替が適用可能であるという結果が得られた。今後は、実務上の課題としてカメラの標準設定の検討や構造による適用可能範囲の絞り込みといった検証が必要になるが、コンクリート橋への点検は実装段階にあると考えられる。

一方、鋼橋については、UAV点検を近接目視点検の代替とする可能性は得られたが、今回検証を行っていない多主桁橋やさらに複雑な構造でも、さらなる実証が必要である。本実証実験を通しては、今回の点検方法が他の構造の鋼橋でも適用可能か、オルソ画像化が問題なく行えるか、撮影箇所数の検討等、今後検証を進めていく必要がある項目を抽出することができた。

5. 結論

これまでUAVによる橋梁点検の適用性やコストが未検証であった2種の橋梁について、供用されている道路橋を利用しUAV点検を行い、UAVによる点検が有効であるという結果を確認した。本実証実験によって得られた知見を以下に示す。

- ・UAVを用いて桁橋タイプのコンクリート橋の主要部材を正対撮影およびあおり撮影し、撮影した画像からコンクリート部材の0.1mm幅以上のひびわれや遊離石

灰を抽出できた。これにより、桁橋タイプのコンクリート橋でも、近接目視と同等の結果が得られることを確認した。

- ・鋼桁橋においては、腐食・防食機能の劣化やボルトの脱落といった主要な損傷については概ね抽出可能であることを確認した。

- ・近接目視点検を行うために大型橋梁点検車や調査足場の設置を必要とする橋梁においては、UAV点検によるコストメリットが得られた。

本実証実験を通して、コストメリットが得られた点検箇所については、実際に橋梁定期点検業務に使用された。今後、本格的に実際の点検業務に導入するためには、さらなる実証を別の鋼桁橋でも行っていき、UAV点検の作業性や撮影方法の検証を行い、適用橋種を拡大していくことが必要である。

6. 将来展望

これまでの橋梁定期点検は、橋梁の健全度に関わらずすべての橋で高所作業車や大型橋梁点検車を配置し点検者による近接目視点検を実施しているが、今後は人員削減、コスト削減、安全性向上等の観点から、更なる合理的な点検計画の立案が求められる。本実証実験では、コンクリート部材のひびわれや鋼部材の腐食・防食機能の劣化といった損傷・劣化については近接目視と同等の結果が得られた。このことから、UAV点検で抽出する損傷や部材の「すみ分け」や事前スクリーニングの実施により、合理的な点検方法を確立することも可能である。

今後の展望として、UAVやロボットを用いたスクリーニング調査の実施およびその調査結果を反映させた合理的な点検計画の立案方法について、今後の橋梁定期点検に反映されればと考える。

謝辞

実証実験を行うに際し、道路付帯設備の使用等で愛知県道路公社のご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 富山潤ほか：UAV撮影画像の解析技術を活用した離島架橋のひび割れ点検に関する考察，土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.75, No.1, pp.11-23, 2019
- 2) 国土交通省：橋梁維持管理技術の現場検証・評価の結果 H28.3.30 (<https://www.mlit.go.jp/commo/n/001125338.pdf>) 令和4年4月10日閲覧