

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

富山 潤¹・須田 裕哉²・崎原 康平³・山田 義智⁴・堀口 賢一⁵・岡部 成行⁶

¹正会員 琉球大学准教授 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡字千原1番地)
E-mail: jun-t@tec.u-ryukyu.ac.jp

²正会員 琉球大学助教 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡字千原1番地)
E-mail: ysuda@tec.u-ryukyu.ac.jp

³正会員 琉球大学准教授 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡字千原1番地)
E-mail: sakihark@tec.u-ryukyu.ac.jp

⁴正会員 琉球大学教授 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡字千原1番地)
E-mail: b985553@tec.u-ryukyu.ac.jp

⁵正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: kenichi.horiguchi@sakura.taisei.co.jp

⁶正会員 株式会社オカベメンテ (〒900-0003 那覇市安謝1-4-35)
E-mail: n-okabe0524@okabe-m.jp

琉球大学では、点検に多くの制約を受ける離島架橋に対して戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program : SIP)インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の開発技術のひとつであるひび割れ画像解析技術の実証実験を行い、目視点検の結果と良い相関を得た。この結果は橋梁管理者に評価され、本技術が実橋梁の点検業務の一部に利用された。本技術の実証実験に対する沖縄での取り組みは、新技術を地域実装に導いたひとつの実装モデルといえる。

本論文では、本技術が実証実験から地域実装に至った取り組み、経緯および課題について考察する。さらに、新技術のコストメリット、効率性および高度化についても考察する。また、新技術の地域実装を通して新しい技術開発が行われた事例についても紹介する。

Key Words : crack image analysis, concrete bridges of remote islands, regional implementation, SIP

1. はじめに

近年、我が国の社会インフラ施設の老朽化対策は喫緊の課題であり、その対策を検討するために必要な現況調査の迅速化や調査の遠隔操作化などの要求が高まっている。一方、政府は、新技術の開発及び社会実装に向けた取り組みとして、戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program : 以下、SIP と称す)を創設した¹⁾。SIP の課題のひとつに「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関する分野(以下、SIP インフラと称す)があり、点検・モニタリング・診断技術、構造材料・劣化機構・補修・補強技術、情報・通信技術、ロボット技術、アセットマネジメント技術の5つの項目において研究開発が行われている²⁾。また、地方自治体等における SIP インフラで開発された

技術(以下、SIP 開発技術)の利用、いわゆる社会実装を促す目的として、琉球大学は、2016年に地域実装支援チームのひとつとして、「亜熱帯島嶼に適した橋梁維持管理技術の実装と診断ドクターの育成(研究責任者: 琉球大学工学部 有住康則)」(以下、琉球大学 SIP と称す)に採択された³⁾。沖縄県の地理的特性は後述するように島嶼環境であることから、離島苦解消のため、本島と離島、離島と離島を結ぶ多くの海上橋(以下、離島架橋と称す)が建設されている。また、国内唯一の亜熱帯海洋性気候に属し、一年を通して高温多湿で、かつ冬季は大陸からの強風による冬季風浪や夏から秋にかけては台風の影響などにより、海から多くの塩分が供給される環境下にある。これらの環境下に置かれた構造物は、劣化速度が他府県に比べ速く、合理的かつ効果的な維持管理が要求される。

番号	橋名	主な橋種	完成年度	橋長(m)
1	桃原橋	PCホロー桁橋	架替中 ^{※1}	17.00
2	奥武橋	PCホロー桁橋	1979	150.00
3	羽地奥武橋	PCT桁橋	1981	77.00
4	伊計大橋	下路式鋼ランガー桁橋	1981	198.35
5	瀬底大橋	鋼ニールセンローゼ橋	1984	762.00
6	藪地大橋	PC箱桁	1985	193.00
7	慶留間橋	PCラーメン橋	1988	240.00
8	池間大橋	PC箱桁橋	1991	1,425.00
9	屋我地大橋	PC箱桁橋	1992	300.00
10	来間大橋	PC箱桁橋	1994	1,690.00
11	宮城橋	大宜味村	1995	100.00
12	浜比嘉大橋	PC箱桁橋	1996	900.00
13	奥武橋	PC橋	1996	93.10
14	世開橋	PC中空床版橋	1997	96.30
15	平安座海中大橋	斜張橋	1997	280.00
16	塩屋大橋	PC箱桁	1998	360.00
17	阿嘉大橋	バランスドアーチ橋(PC)	1998	530.00
18	野甫大橋	PC変断面箱桁橋	2003	320.00
19	古宇利大橋	PC箱桁橋	2004	1,960.00
20	ワルミ大橋	上路式RC固定アーチ橋	2010	315.00
21	伊良部大橋	PC箱桁・鋼桁(航路部)	2014	3,540.00

※1: 2018年現在

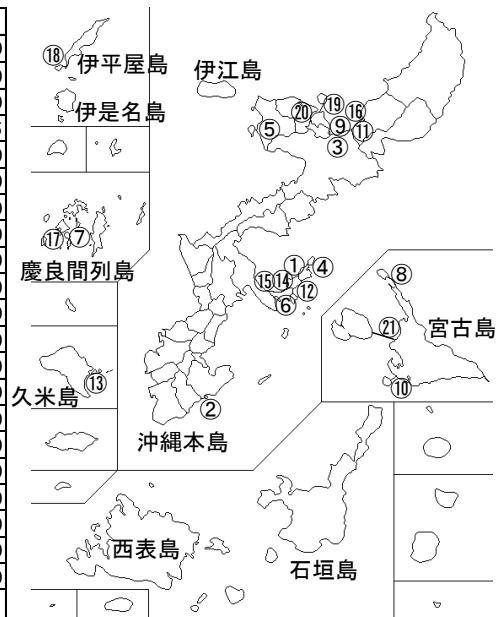


図-1 沖縄県の離島架橋建設状況(2017 現在)⁷⁾

沖縄県の離島架橋は、比較的大規模かつ海上橋ということもあり、現在の状態(健全性)を把握するための点検は多くの制約を受け、適切な点検と高度な診断が困難な場合がある。このような背景から琉球大学 SIP では、離島架橋をターゲットに SIP 開発技術の地域実装を一つの目的に活動を進めてきた³⁾。

本論文では、琉球大学 SIP が実証実験を行った SIP 開発技術の中で、その成果が、管理者に評価され、実際の構造物の点検業務に利用された T 社の開発してきたコンクリートのひび割れ画像解析技術(「画像解析技術を用いた遠方からの床版ひび割れ定量評価システムの構築」、以下、T 社 SIP 技術と称す)⁴⁾について、地域実装に至った取り組み、経緯および課題について考察する。さらに、新技術のコストメリット、効率性および高度化についても考察する。また、実証実験を連携して行った地元建設コンサルタントにおいては、T 社 SIP 技術により得た結果に対する 3 次元可視化技術を開発したことから、その概要も紹介する。

2. 沖縄県橋梁維持管理の課題(ニーズ)

ここでは、沖縄県における離島架橋の維持管理の課題について、地理的特性、自然環境および塩害環境の観点から整理する。

(1) 地理的特性

沖縄県は、日本の南西に位置し、東西に約 1,000km、南北に約 400km の領域に無人島も含めて約 160 もの島々からなる島嶼環境である⁵⁾。このような背景から、沖縄県は、離島に住む人々の生活改善を目的に、図-1 に示

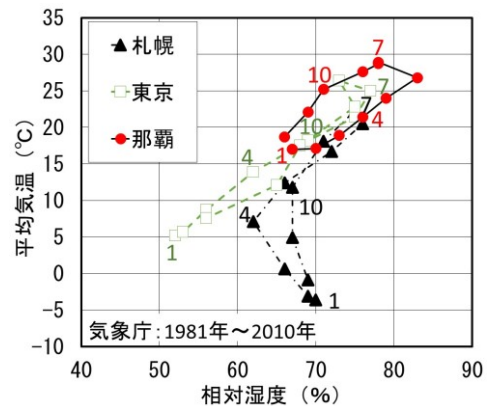


図-2 クライモグラフ(図中の数字は月を表す)

すように離島架橋が 2017 年 4 月現在で 21 橋建設されている⁶⁾。このうち 21 番目に示す 2015 年 1 月 31 日に供用が開始された伊良部大橋は、設計耐用期間 100 年と設定され、コンクリート部では、塩害、アルカリシリカ反応(ASR)、温度応力の抑制対策を考慮し、耐久性の高いフライアッシュコンクリートの使用や、鋼桁部では、塩害対策に Al-Mg 溶射などが用いられるなど、多くの高耐久性技術が採用されている⁷⁾。

(2) 自然環境と塩害環境

沖縄県の気候区分は、亜熱帯海洋性気候であり、図-2 に示すクライモグラフ⁸⁾からわかるように沖縄県の温湿度の環境は、札幌、東京に比べ年間を通して高い。また、飛来塩分環境としては、冬季は大陸からの強風による冬季風浪および夏季から秋季にかけては台風接近・直撃時に海から大量の塩分が供給される⁸⁾。

琉球大学 SIP では、SIP 開発技術のひとつである「道路インフラマネジメントサイクルの展開と国内外への実



図-3 土研式飛来塩分捕集器

装を目指した総括的研究(研究責任者:東京大学 石田哲也)」(以下、東京大学 SIP と称す)と連携した共通試験を実施している。この試験の目的は、適切な維持管理を行うために必要な「作用」と作用を受けたコンクリートの「応答」の地域性を把握することであり、特徴的な環境作用が想定されるいくつかの地域を選定し、塩害(塩分浸透, 鉄筋腐食), アルカリシリカ反応(ASR)膨張に関する共通暴露試験を行っている。塩害に関する作用の測定として、沖縄本島北部(国頭村辺土名)の暴露試験場を利用し、図-3に示す土研式飛来塩分捕集器を用いた飛来塩分計測を毎月行っている。図-4に2017年1月~12月の結果を示す。図-4より沖縄県の飛来塩分量は、前述したように冬季風浪と台風による影響が大きいことがわかる。なお、本暴露試験場は、消波ブロック海岸に面し、台風などの強風時には直接波しぶきを受ける環境であり、台風時の値が異常に高いのはそのためである。この計測結果から推測されるように、沖縄県の離島架橋の下部工については、この環境と同様の激しい塩害環境であると考えられる。

(3) 橋梁点検における沖縄のニーズ

上記に示した環境に置かれた構造物の劣化速度は比較的早く進行すると考えられ、定期的な点検が必要である。しかし、離島架橋は、海上橋であり、なおかつそのほとんどが長大橋であることから、下部工においては足場の設置が困難であり、さらに上部工においては、スパンが長く橋梁点検車を用いた点検では時間を要することや狭隘部へのアクセスが困難など、近接目視点検時に多くの制約を受けるといった問題がある。

図-1に示すように沖縄県には離島架橋が現在21橋梁存在し、設計供用期間100年で設計された古宇利大橋および伊良部大橋を除いた耐用年数が50年と想定される離島架橋のうち、30年以内にその年数に達するのが16橋も存在する。したがって、新しい橋梁においても、劣化の生じていない、あるいは少ない今の段階から適切な点検および高度な診断を行い、現状を把握した効果的かつ合理的な維持管理が必要である。このため、現行の点

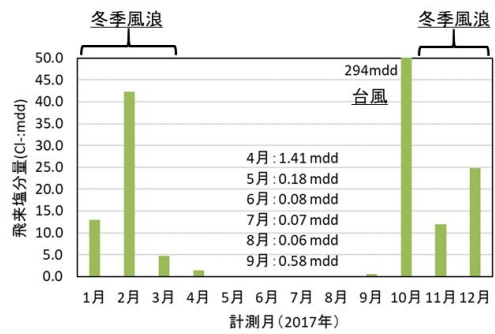


図-4 飛来塩分(2017年1月~2017年12月)

検技術に加え、離島架橋に対する新しい点検技術の開発は非常に重要で、特に「遠方から点検が可能な技術」、「遠隔で点検が可能な技術」に対するニーズは高い。

3. T社SIP技術と高精度UAV撮影技術(シーズ)

前述したように、沖縄県の離島架橋の点検に関するニーズとして、「遠方から点検が可能な技術」、「遠隔で点検が可能な技術」がある。琉球大学 SIP では、SIP 開発技術について、沖縄県のニーズを鑑み、さらに、地元で開催した SIP 技術講習会時に行なったニーズ調査の結果を参考に、いくつかの SIP 開発技術を選定し、実証実験を行なった³⁾。これ以降には、そのうち地域実装に成功した T 社 SIP 技術を紹介する。なお、SIP 技術講習会時のアンケートについては後述する。

T 社 SIP 技術を簡単に説明すると、ひび割れの生じたコンクリート表面を撮影したデジタル画像からひび割れ幅、長さおよび分布(ひび割れマップ)を定量的に求めることができる技術である。本技術は、要求されるひび割れ幅を精度良く解析するために必要な画素サイズのデジタル画像を撮影することができれば、ひび割れ幅の検出精度が90%以上あり、点検技術として強力なツールである。したがって、精度の良いデジタル画像を撮影する技術も重要となる。

T 社 SIP では、撮影技術についての検討も自社で行っているが、「要求されるひび割れ幅を精度良く解析するために必要な画素サイズ」のデジタル画像を撮影することができれば、その技術は T 社 SIP に頼らなくてもよいことになる。そこで琉球大学 SIP では、T 社 SIP 技術を地元沖縄に実装し定着させるために、T 社 SIP 技術はデジタル画像を用いたひび割れを解析する技術と位置付け、ひび割れを撮影する技術は、UAV, 3D レーザースキャン、建設現場 3D モデリング(BIM/CIM)など新技術を活用した構造物の点検などを積極的に行っている地元建設コンサルタントと連携することにした。

つまり、本論文でいう新技術とは、T 社 SIP 技術と高機能な UAV 機器を有した地元建設コンサルタントの高

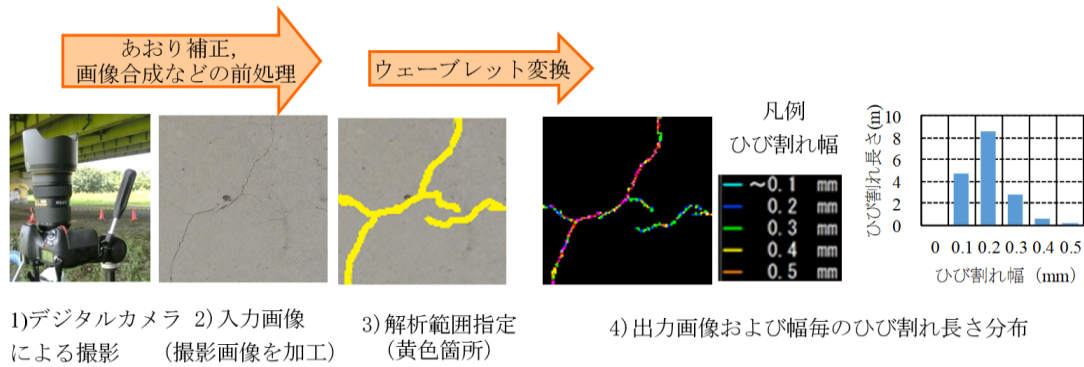


図-5 ひび割れ画像解析の解析手順

度な操作技術による高精度な UAV 撮影技術を合わせたシーズということになる。

以下に沖縄で実証実験を行った T 社 SIP 技術と UAV を用いたひび割れ撮影技術の概要を示す。

(1) T 社 SIP 技術

a) 技術概要

T 社 SIP 技術は、デジタル画像データにガボールフィルタに基づいたウェーブレット変換を適用し、画像データの濃淡情報に関するウェーブレット係数を求めてひび割れ判定を行い、ひび割れを検出するものである⁴⁾。

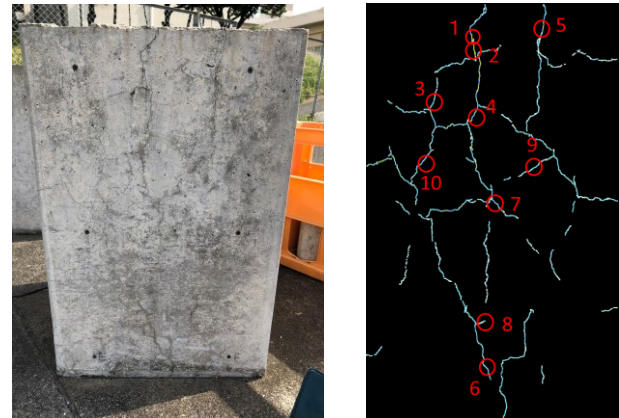
ひび割れ画像解析の手順を図-5 と併せて以下に示す。

- 1) デジタルカメラにて、調査対象を撮影する。
- 2) 撮影画像をあおり補正、画像合成などの前処理をし入力画像を作成する。
- 3) 入力画像のひび割れ解析範囲を指定し、ウェーブレット変換する。
- 4) ひび割れ画像およびひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布図を出力する。

本手法は、従来の輝度情報からひび割れを判別する方法に対して、コンクリートの汚れや色の濃淡によるばらつきの影響を低減し、また、空間分解能の 1/4 以上のひび割れ (例えば、空間分解能 0.8mm/pixel の画像の場合は幅 0.2mm 以上のひび割れ) を検出できる特徴を持つ。また、ひび割れ画像解析により得られるひび割れ密度、平均ひび割れ幅およびひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布といった定量データにより、詳細なコンクリート構造物の補修、補強計画を立案することが可能となる。さらに、デジタルカメラの画像を使用することで、非接触で遠隔調査が可能となり、目視が著しく困難な箇所やアプローチしづらい狭隘部における点検作業の効率化、作業環境や安全性の向上といった利点もある。

b) 精度

ここでは、T 社 SIP 技術のひび割れ幅の解析精度について、調査を行った結果を示す。ひび割れ解析対象は、琉球大学暴露試験場にある暴露試験体である。暴露試験体表面には、亀甲状のひび割れが生じている。図-6 に



(a) ひび割れが生じた試験体 (b) ひび割れ解析結果
図-6 精度検証に用いた試験体および解析結果

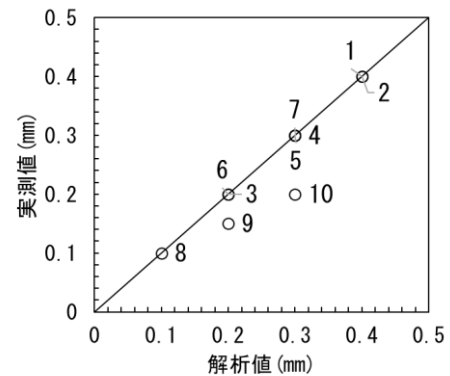


図-7 ひび割れ幅の精度検証

ひび割れの生じた試験体およびひび割れ解析結果を示す。精度評価のため、図-6(b)に示した 10 カ所のひび割れ幅に対して、クラックスケールによる測定結果とひび割れ解析結果の比較を行った。

図-7 に実測値と解析値の比較を示す。この結果から、実測値と解析値は、おおむね良好に一致していることがわかる。このことから、T 社 SIP 技術によるひび割れ幅の検出精度⁴⁾は非常に高いといえる。

(2) 高精度 UAV 撮影技術

a) UAV 選定基準の概要

T 社 SIP 技術の特徴は上述したように「空間分解能の

表-1 使用した機体及びデバイスの仕様

UAV	製造メーカー	DJI
	機体名称	MATRICE 210 RTK
	重量 (最大離陸重量)	3,800g (6,140g)
	最大風圧抵抗	10m/s
	最大飛行時間	20~30分
搭載カメラ	製造メーカー	DJI
	名称	ZENMUSE X5S
	画素数	2,080万画素
操縦装置	製造メーカー	DJI
	名称	CENDENCE



図-8 使用した UAV (MATRICE 210 RTK)

合 1/4 以上のひび割れ（空間分解能 0.8mm/pixel の画像の場合は幅 0.2mm 以上のひび割れ）を定量的に検出できる」ということであり、離島架橋のコンクリート表面の検出に要求されるひび割れ幅(以下、要求ひび割れ幅と称す)を遠隔・遠方から検出するためには、UAV (Unmanned aerial vehicle) を利用することが必須となる。コンクリート表面のひび割れを高解像度に撮影するための UAV 選定には以下の項目に留意する必要がある。

- ・電波干渉に強い機種
- ・風圧抵抗の高い機種
- ・最大飛行時間の長い機種
- ・GPS が届かない範囲でも安定して飛行可能な機種
- ・レンズ交換式の高画素カメラが搭載可能な機種

特に離島架橋の調査では、風圧抵抗の高い機種を選定する必要がある。また、構造物の種類や部材によって、UAV が被写体まで近付ける距離が変わるために焦点距離を変えることができるレンズ交換式も必要条件となる。

本実証実験では、上記の条件を満足する機種として、DJI 社の MATRICE 210 RTK⁹⁾を採用することにした。

使用した機体及びデバイスの仕様を表-1 に示す。また使用した UAV を図-8 に示す。なお、本 UAV は、カメラを機体上部に設置し、橋梁上部工床板下面の撮影も可能であり、実証実験においても床版下面の撮影が可能であることを確認した。

b) UAV 操作・撮影技術

UAV を用いた橋梁点検では、UAV を構造物に遠隔から近接させるため、以下に示す高度な操作技術が可能な UAV 操作技術者（人材）が必要となる。

- ・ホバリング制御技術（直径 60cm 以内）
- ・上昇および下降能力技術（直径 60cm 以内）

- ・ノーズインサークル技術（8の字飛行）
- ・離陸地点帰還技術（安全対策）

また、UAV に搭載されたカメラを用いてひび割れを撮影するためには、カメラを選定する知識はもちろんのこと、それに加え、撮影技術に対する知識も重要である。例えば、カメラに必要な知識および設定については以下の項目が挙げられる。

- ・送信機によるカメラ設定操作
- ・カメラとジンバル（ブレ防止）の設定
- ・F 値（絞り値）：F4.0～F5.5 程度
- ・ISO 感度：200～400 程度

なお、画角（撮影寸法）は、カメラの性能や対象とするひび割れ幅および角度などに応じて設定する必要がある。今回の設定は、目標分解能 0.8mm/pixel であるため、画角は「縦 3.2m×横 4.2m」となる。

c) 撮影前の事前準備（踏査）

海上橋である離島架橋の現場において高繊細かつ高解像度のデジタル画像を撮影するには、高性能の UAV を使用すること、また、高度な操作技術が必要など以外に、撮影前の事前準備が重要である。大まかな事前準備の項目を以下に示す。

- ・飛行許可化の必要性確認（航空法の規制¹⁰⁾）
- ・周辺地形等を考慮した UAV 飛行ルートを選定
- ・構造物周辺の風況の確認
- ・GPS 受信の困難な場所の確認および RTK (Real Time Kinematic GPS) 基地局の設置位置の確認
- ・コンパス・カメラキャリブレーションの実施

特に RTK 基地局の設置個所の選定は重要である。橋梁の下は GPS における衛星からの UAV 位置情報の取得が困難なため、RTK 基地局（既知点からの補正観測情報を携帯電話や無線を利用し、移動局に送信し、移動局の位置をリアルタイムで計測する方法）を適切な位置（橋梁直角軸方向）に設置し、UAV と RTK 基地局を通信させることで UAV の位置情報を取得し安定飛行が可能となり、高解像度なデジタル画像撮影が行える。

上記に示したように、遠方から遠隔で離島架橋などコンクリート表面のひび割れの高繊細かつ高解像度なデジタル画像を撮影するためには、「高機能な機器」、「高度な UAV 操作技術」、「撮影に必要なカメラの知識」「事前準備」などが必要ということが、実証実験で明らかとなった。なお、当日は「公共測量における UAV の使用に関する安全基準（案）」¹¹⁾を遵守して飛行した。

4. 実証実験

ここでは、T 社 SIP 技術が沖縄県の離島架橋を対象に実証実験が行われた経緯や得られた知見などを概説する。



図-9 A大橋位置図(Google mapより)

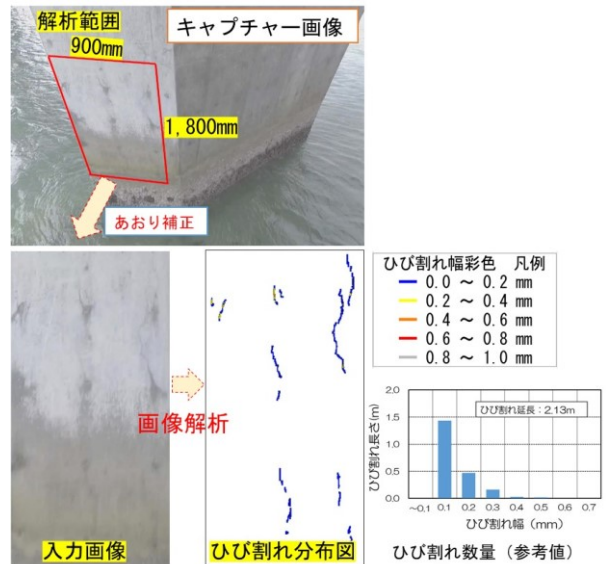


図-10 試行解析結果

表-2 実施項目(担当者)とスケジュール

No.	実施項目	2017年															
		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月	
		前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後		
1	打ち合わせ(5/18)		5/18														
2	解析対象候補選定 (管理者・点検業務受注者)		↔														
3	解析対象決定 (撮影担当者)			↔													
4	撮影機材等の打ち合わせ (T社・撮影担当者・琉大)				↔												
5	下部工撮影 (撮影担当者)					↔											
6	上部工(箱桁下床版)撮影 (撮影担当者)						↔										
7	下部工画像解析 (T社)						↔										
8	上部工画像解析 (T社)							↔									
9	評価検討会 (全メンバー)									↔							

(1) 実施までの経緯

a) 開発技術説明会

2016年11月25日に琉球大学において、T社SIP技術の開発者による技術説明会を実施した。案内は、(一社)沖縄県測量・建設コンサルタンツ協会および沖縄県土木建築部(管理者)に行い、参加者は管理者と地元建設コンサルタントの約30名であった。

技術講演会では、T社SIP技術の理論や方法に加え、実構造物における実証実験の結果の説明があり、解析技術に対する参加者の理解を助ける内容であった。

b) 構造物管理者からの提案

上記の技術説明会の後、質疑の時間には、ひび割れ解析への多くの質問や課題などが挙げられた。これらの議論の中で管理者から、実証実験を行う前に、試行実験として、当時(2016年度)定期点検が実施されていた離島架

橋(A大橋:PC連続箱桁橋、橋長900m)において、T社SIP技術と近接目視点検の比較検討をしてはどうかという提案があり、2016年度は、A大橋の点検業務を行ったA建設コンサルタントからUAV撮影動画を提供頂き、T社の方で、動画からひび割れのある箇所をいくつか選定し、静止画を作成した後、ひび割れ画像解析(以下、試行解析と称す)を実施し、ひび割れが検出可能かどうかを検討した。参考のため図-9にA大橋の位置図を、図-10にひび割れ解析の試行結果を示す。

今回の試行解析に用いた画像は、ひび割れ解析を想定していない動画からのキャプチャー画像(静止画像)のため解像度に問題があり、精度保証はできないものの、ひび割れ検出の可能性を示す結果を得ることができた。この結果を管理者に報告し、本手法の有効性を理解して頂き、2017年度に本格的な実証実験を行うこととなった。

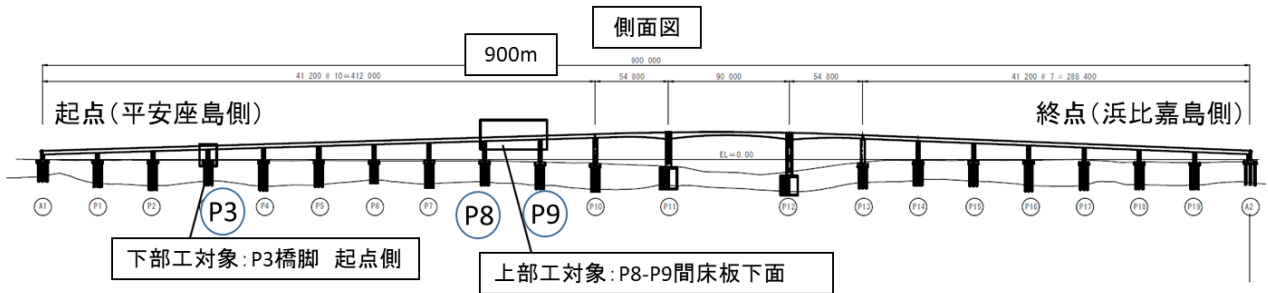


図-11 撮影箇所 (A大橋側面図)

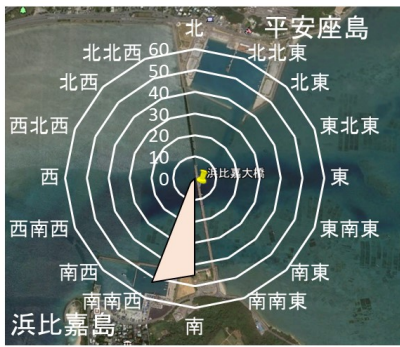


図-12 平均風速の風向別割合

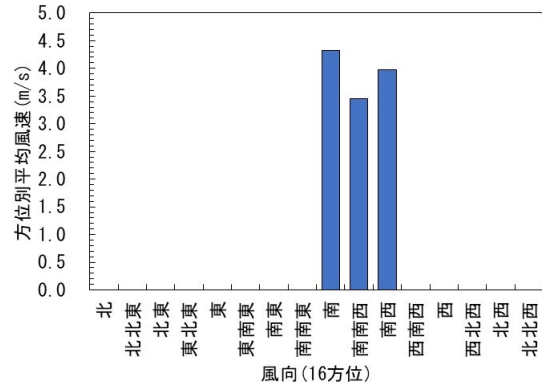


図-13 平均風速の風向別平均風速

(2) 実施体制

表-2 に実証実験の実施項目, 表中括弧内に担当者および当初スケジュールを示す。

まずはじめに試行解析の結果を受け, 2017年5月18日に, 琉球大学 SIP, T社 SIP, A大橋管理者(沖縄県土木建築部中部土木事務所), 沖縄県土木建築部技術・建設業課, A大橋定期点検受注者, UAV撮影担当者であるB建設コンサルタントから構成する実証実験メンバーにより打ち合わせを行い, 実施の方法, 役割分担, 実施日などの方針を決めた(No.1)。以下に役割およびスケジュールの概要を表中の番号を参照しながら説明する。

ひび割れ撮影および解析対象となる候補箇所を, 対象橋梁の状況を把握している管理者および点検業務受注者が近接目視点検結果をもとに選定し(No.2), 次に撮影担当者が, 安全に撮影が行えるか選定箇所を現地で確認し, 最終的に解析対象を決定した(No.3)。図-11に選定した撮影箇所を示す。その後, T社 SIP・撮影担当者・琉球大学 SIPで, 解析精度0.2mm以上の要求ひび割れ幅が検出できるよう撮影機器等の選定を行った(No.4)。撮影は, 下部工と上部工を別の期間に分けて行った。

下部工は2017年7月19日(No.5), 上部工は2017年9月6日(No.6)に実証実験を行った。しかし, 上部工の目視点検の結果では, 対象としたP8-P9箱桁下床版下面のひび割れ最大幅は0.05mm程度であったため, ひび割れ解析で設定した0.2mm程度以上の精度では, ひび割れ解析が困難であることはわかっていた。しかし, 今回使用したUAVは上向きカメラを設置できることから, そ

の性能の確認と目視点検で発見できなかったひび割れを新たに発見できる可能性があることから実証実験を実施した。なお, 上部工の実証実験の当初計画は2017年8月(表-2参照)であったが, 天候などの影響により, 1ヵ月遅れの実施となった。

T社 SIPによる下部工のひび割れ解析(No.7)は予定通り実施できた。上部工のひび割れ解析(No.8)は, 上向きカメラを取り付けたUAVによるひび割れ撮影は可能であったが, 軽微なひび割れのみであったため, ひび割れ解析は実施しなかった。

最後に得られた解析結果について評価を行った(No.9)。

(3) 実証実験当日の状況

ここでは, A大橋下部工の実証実験当日の状況と結果の概要について説明する。

なお, 上部工下床版下面については, 前述の理由によりひび割れ解析は行っていない。

実証実験は, 2017年7月19日に実施した。当日の天候は晴れ, 風況も穏やかであった。参考のため, 実証実験当日の平均風速の風向別割合および平均風速と風向の関係を最寄りの宮城島気象観測所の10分ごとのデータを用いて, 図-12および図-13に整理した。これらの図からもわかるように実証実験当日は, 南寄りの風向が卓越し, 平均風速も5m/s以下とUAV飛行に支障のない風況であったことがわかる。なお, UAVの飛行禁止については, 表-3に定める禁止基準を設定し, 風速については, 現地で風速を測定し, 飛行可能かを確認した。

表-3 撮影飛行禁止基準

項目	基準
天候	雨天日は、飛行禁止.
風速	1分間の平均風速が7m/s以上の場合は飛行禁止
落雷・霧	落雷や霧の発生が予想される場合は飛行禁止



図-14 UAV撮影時の飛行ルート

図-14にA大橋に対するUAV撮影の飛行ルートを示す。RTK基地局は橋梁軸方向とほぼ直角に設置することで、UAVの安定飛行が可能となり、また、図-12にあるように風向は橋軸方向が卓越し、撮影を実施したP3平安座側は、風の影響を受けにくい状況であった。以上の理由より、ひび割れ解析に必要なブレのない高繊細な高解像度のデジタル画像が撮影できた。

写真-1, 2, 3に当日の状況写真を示す。実証実験は、公開実験とし、実施メンバー以外に地元建設コンサルタント数社が参加した。また、地元新聞記者が取材に訪れ、その様子が地元新聞で紹介された。

(4) 実施結果

A大橋のP3橋脚は、A1橋台から3径間(123.6m)離れた海上に位置する。P3橋脚起点側の点検図を図-15に示す。この図から、橋脚正面および側面の下側領域にひび割れが生じていることが確認できる。そこで、ひび割れ調査箇所は側面片面と正面とした。なお、図-15(b)には、ひび割れ解析と比較した領域の拡大図を示している。

A大橋のP3橋脚起点側の撮影画像を図-16に、解析によるひび割れ図を図-17に、ひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布を図-18に示す。図-15の目視点検のひび割れ箇所の(青丸で囲った箇所)に対応する解析結果を、図-17のひび割れ図で拡大して示している。この結果から、本手法により目視点検結果と類似したひび割れが検出できていることがわかる。なお、前述したようにT社SIP技術のひび割れ幅の検出精度が90%以上でありその妥当性を確認していることから、本調査では、遠方の構造物のひび割れ調査への適用可能性を主に確認した。また、いくつかの箇所で見接目視によるひび割れ幅の確認を行い、0.1mm以内の誤差であることを確認した。

図-16に示した調査箇所内の総ひび割れ長さの関係か



写真-1 UAV撮影状況



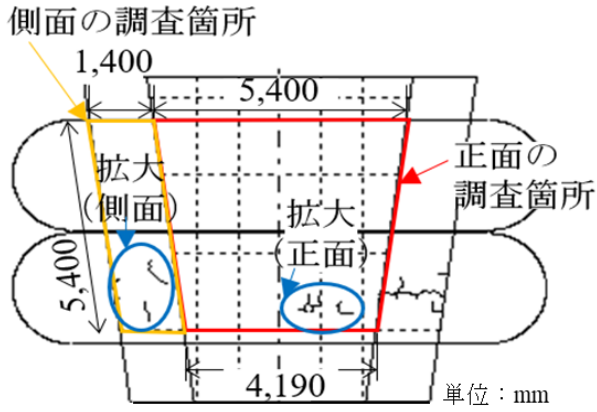
写真-2 ひび割れ解析状況



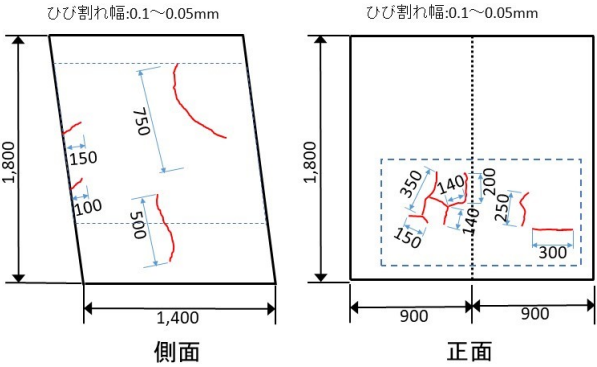
写真-3 参加者の状況

ら、側面、正面ともに5.0m程度、平均ひび割れ幅は、側面で0.21mm、正面で、0.37mmであった。また、従来の点検ではクラックスケールを用いて測定した部分のひび割れ幅の情報しか得られていないが、今回試行した画像解析技術では、図-18に示すように、ひび割れ幅ごとのひび割れ長さやひび割れの総延長、平均ひび割れ幅といった定量的な情報を調査範囲全体にわたって得ることができる。このため、例えば点検後のひび割れ補修設計を行う場合に、よりの確に補修数量を算定することが可能になると考えられる。

以上の結果より、UAV搭載カメラによる撮影画像をT社SIP技術に用いることより、従来の点検での離島架橋特有の問題である容易に近づけない場所に足場や橋梁点検車などを用いない橋梁点検が可能である。また、ひび割れ解析結果は、ひび割れ図のみならず、ひび割れ幅毎のひび割れ長さのデータが得られるため、定期的に点



(a) 点検図 (全体)



(b) 点検図 (破線: 解析と比較対象領域)

図-15 P3橋脚平安座島側の点検図

検することでひび割れの進展の有無など維持管理に必要な情報を定量的に示すことが可能である。

(5) 新技術のコストメリット、効率性、高度化

ここでは、参考のため、従来のロープアクセス工法を用いたひび割れ点検と本技術の点検費用および作業量についての比較の概略を示す。

2017年現在における点検単価を参考に、実橋梁(調査範囲: 橋梁部 12,200m², 床板部 5,600m²)においてロープアクセス工法と「UAV撮影技術+T社SIP技術」のひび割れ点検費用を比較したところ、概算ではあるが、ロープアクセス工法に比較し、本技術による費用はおよそ55%程度まで抑えることが可能であった(コストメリット)。また、現地での点検の作業とその準備、後片付けに要する時間が従来の10%程度になることは大きな利点であると考え(効率性)。

なお、比較に際し、従来の目視点検では、ひび割れ図の作図までとし、ひび割れ画像解析による調査では、さらにひび割れ幅と長さの定量評価までとしている(高度化)。ただし、上記のコスト比較は調査範囲が広いためコストメリットが大きく試算されているが、小規模な橋梁調査であればコストメリットは小さくなると考えられる。このため、すべてのケースで費用は従来の55%程度とはならないことを付け加えておく。

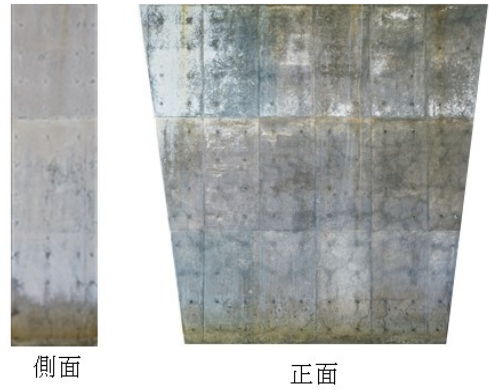


図-16 P3橋脚起点側の撮影画像(入力データ)

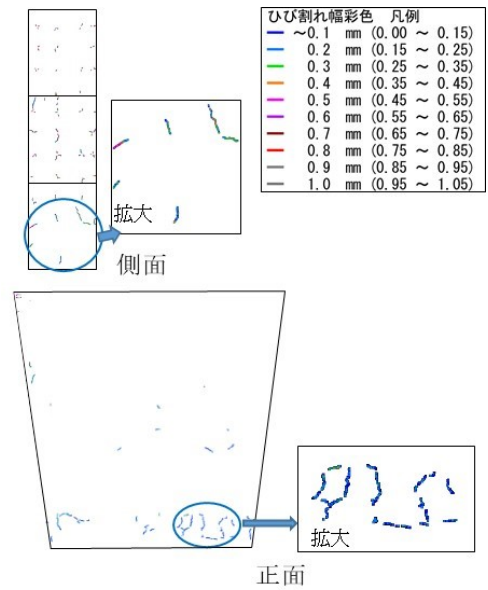
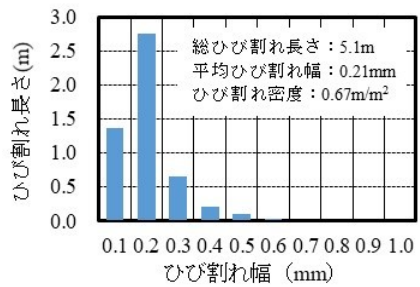
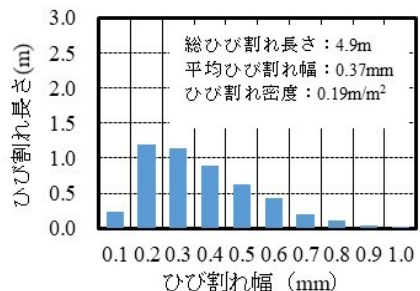


図-17 P3橋脚起点側のひび割れ図



(a) 側面



(b) 正面

図-18 P3橋脚起点側のひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布

5. 地域実装の成功要因と課題

「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(研究責任者:岐阜大学 六郷恵哲)」(以下,岐阜大学 SIP と称す)は,岐阜県内地域に対し SIP で提案された新技術の社会実装を目指し,新技術の社会実装に関わる発注者,技術開発者,受注者へ個別アンケート,ヒアリング調査,また,新技術の実装実験を行い,新技術の社会実装に対する障害・課題・対策を立場毎に整理し,その対策を提案している¹²⁾。さらに,岐阜大学 SIP は,橋梁点検車や吊り足場等高価な機材の抑制による点検費用低減とともに,点検作業の安定性向上,さらには交通規制にともなう社会的な経済損失の低減効果を期待して,長大コンクリート橋を対象に新技術であるロボット技術を取り入れた橋梁点検の試みと「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案)」の作成について報告している¹³⁾。

琉球大学 SIP においてもいくつかの新技術の実証実験を行ったが,文献 12)に報告されているように新技術をインフラ構造物のメンテナンスへ適用することは容易ではなかった。しかし,T 社 SIP 技術については,産学官の連携および下記に示すニーズとシーズのマッチングの成立および新技術を用いなければ点検できない構造物の存在などがあり,実証実験の結果,本技術が実際の橋梁の点検業務の一部に利用されるという地域実装に至った。以下に地域実装に至った要因について考察する。

(1) 管理者からの評価

A 大橋における実証実験の結果は,目視点検以上の結果を得られることがわかり,その技術に対する管理者の関心と期待は高く,点検技術として高い評価を得ることができた。このため,平成 29 年度は A 大橋 1 橋の実証実験の予定が,沖縄県北部土木事務所管理 1 橋および沖縄県宮古土木事務所管理 1 橋においても実証実験を行うことができた¹⁴⁾。

3 橋梁の実証実験における管理者からの評価と課題としては,離島架橋のような近接目視点検の困難な構造物に対して,遠方・遠隔からコンクリート構造物のひび割れの点検が可能なのは評価できるとした。

一方で,国土交通省から 5 年に 1 回の点検においては近接目視点検¹⁵⁾が義務付けられていることから,実証実験を行ったひび割れ解析技術と点検技術者による近接目視による方法が同等なひび割れ評価方法であるかの最終判断がつかず,維持管理へどのように活用してよいかわからないとし,現段階においては橋梁全体の損傷を短時間に検出するための第 1 スクリーニングのような利用に限定され,ひび割れ解析技術の活用方法については,今後の課題であるとした。

(2) 地域実装

今回の実証実験において,撮影を担当した B 建設コンサルタントは,T 社と開発技術(ひび割れ画像解析ソフト)の使用について,秘密保持契約を結び,自社で撮影からひび割れ解析までを行えるようになり,SIP 技術が地元建設コンサルタントの技術として定着し,地域実装されたことになる。しかし,上記に示した管理者からの課題として,点検には,原則近接目視という制限があり,定期点検への新技術の利用は難しいと考えられた。しかし,A 大橋を管理する中部土木事務所所管の橋梁で,2017 年度に定期点検が行われる橋梁のうち,橋梁点検車,吊り足場,ロープアクセス工法などによる近接目視点検が困難な橋梁があることが調査計画の段階で明らかとなった。このため,今回の実証実験を連携して行った A 大橋管理者は,定期点検を受注した地元コンサルタントと協議を行った。その結果,「UAV 撮影技術+T 社 SIP 技術」を点検業務のなかで利用することを決定し,B 建設コンサルタントが,「UAV 撮影技術+T 社 SIP 技術」によるひび割れ点検を行い,点検報告書を提出し,実橋梁における新技術の地域実装に至った。

新技術が採用された理由のひとつに,管理者が実証実験に対して計画の段階から評価まで係っていたため,その技術の有用性を理解していたことも挙げられる。つまり,新技術の実証実験には,計画の段階から管理者に参画してもらうことが重要であることを意味している。

(3) 地域実装に至った要因に対する考察

上記に示したように沖縄県では,SIP 開発技術のひとつである T 社 SIP 技術が地元コンサルタントの UAV 撮影技術と連携し,新技術の地域実装が成功した一例といえる。この取り組みは,他の新技術の地域実装の参考となると考えられるため,その成功要因を以下に列記する。

- SIP 技術講習会による新技術の周知およびニーズ調査(学による運営・調査)。
- 沖縄県の地理的特性,自然環境および塩害環境などから,沖縄県の離島架橋の点検に必要な新技術に対するニーズと,「UAV 撮影技術+T 社 SIP 開発技術」のシーズとのマッチングの成立(学による調整)。
- T 社 SIP 開発技術に必要である「遠方から高解像度のデジタル画像を撮影する技術」というニーズと,沖縄県の地元コンサルタントの「UAV による高解像度のデジタル画像撮影技術」というシーズのマッチングの成立(学による調整)。
- 地元建設コンサルタントの「UAV を用いた橋梁の点検技術の高度化」に対するニーズと T 社の「デジタル画像解析によるひび割れを検出する技術」のシーズのマッチングの成立(学による調整)。
- 地元の産官学連携による実証実験の実施(新技術に対

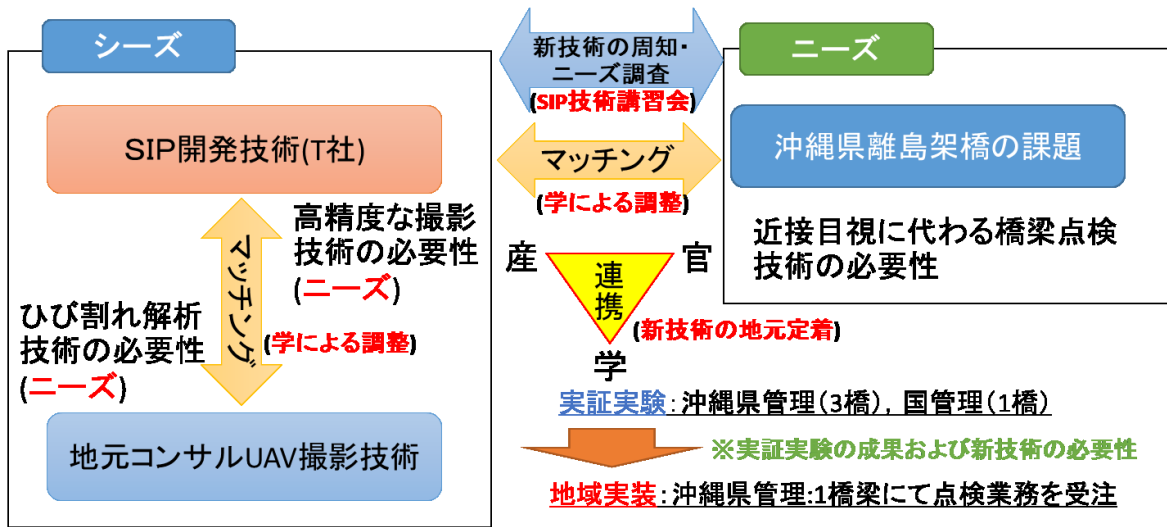


図-19 地域実装の成功要因

する管理者の理解および新技術の地元建設コンサルタントへの定着)。

図-19 は、上記に列記した項目を図でまとめたものである。このように今回の取組みが成功した要因は、沖縄県の離島架橋の点検の効率化という明確な官のニーズに対して、これを解決できる産の持つシーズが上手くマッチングしたことである。また、産の持つ UAV による高精度な画像撮影技術と撮影画像からのひび割れ評価技術というそれぞれのシーズは、単独ではニーズを十分に解決できないが、2つのシーズがマッチングすることで相乗効果を発揮し、ニーズを解決することに寄与したことも成功の要因と考える。さらに、このような産官のニーズとシーズを第三者の立場から客観的に把握し、適切にマネジメントを行った学の役割も大きく、これもこの取組みが成功したひとつの要因と考える。今回の取組みは、新たな点検技術を迅速に導入できた成功事例として今後の新技術の実装の先鞭になると考えられる。

なお、2017年度は、県道道路橋3橋のみならず、国道橋1橋梁において、B建設コンサルタントが下請けとして「UAV撮影技術+T社SIP開発技術」による点検の試行が実施され、目視点検と比較し、良好な結果を得た。今後も国道の道路橋点検業務において、「UAV撮影技術+T社SIP開発技術」を利用した点検が検討され、さらなる展開が期待される。

(4) ユーザー側からの評価および課題

上記には管理者からの課題を述べたが、以下には、T社SIP技術のユーザーであるB建設コンサルタントからの評価と課題を表4に示す。

ユーザー側の評価としては、現場技術に対応し、ひび割れ点検を実施した経験のある技術者は使いやすいと評価されている一方で、いくつかの課題も挙げられている。その中で、新しい打音技術やひび割れ以外の変状を把握

表-4 T社SIP技術のユーザーからの評価

項目	コメント
評価	<ul style="list-style-type: none"> 現場技術に対応した解析ソフトだと思われる。 コンクリートのひび割れ等点検を実施した経験のある技術者は使いやすいと思われる。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ひび割れ解析のデータが膨大な場合、ひび割れ解析に時間がかかる。 ひび割れ解析領域の指定として、ひび割れ付近を人がトレースする必要はあるが、今後はひび割れの自動認識も必要である。 型枠の寸法など、現地でのスケーリング(解析領域寸法の確定)が出来ないと、ひび割れ解析が出来ないという弱点がある(開発者と相談中) 現行の打音検査に代わる UAV を用いた新しい打音技術が必要である。 ひび割れ以外の変状を把握する技術が必要である。

する技術の必要性が挙げられている。これは、コンクリート構造物の健全性を総合的に評価するためには、ひび割れ以外の浮き・剥離などの損傷も適切に評価できることが必要であるというのがユーザーの認識であり、今回試行したT社SIP技術のみならず、他の類似技術にもこのような観点からの技術開発が望まれていると考える。

(5) 技術講習会アンケートの概要

ここでは、2017年2月21日に行ったSIP技術講演会のアンケートの結果について紹介する。なお、技術講演会では、4つのSIP開発技術の講演を行い、そのうちの1技術は、T社SIP技術であった。

参加者は58名で、参加者年齢は40代~50代が半数以上を占め、職業割合は、官公庁16%、建設コンサルタント67%と80%以上を占めていた。また、SIPの認知度については、2017年2月時点では、半数以下という結果であった。また、SIP開発技術の一覧を配布し、活用し

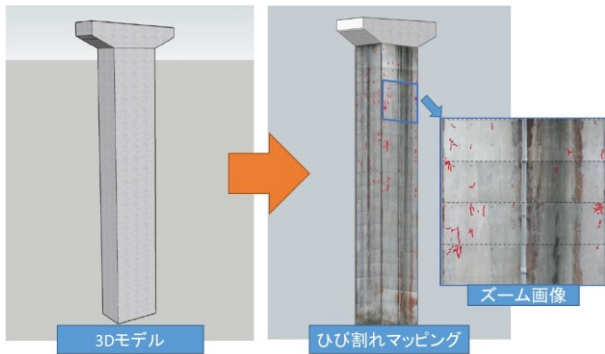


図-20 ひび割れの3Dマッピングの一例

たい新技術や新技術の利用に対する障害などについて自由記述方式でアンケートを行った。その結果、活用したい新技術に、今回実証実験した「UAV や T 社 SIP 技術」に関する項目が全回答数 28 件中、14 回答あり、沖縄県において、UAV による点検技術や T 社 SIP 技術のようなデジタル画像から損傷を検出する技術に対するニーズがあることがわかった。

一方で、新技術の利用に対する障害として、コスト、人材、新技術に対する基準や指針の未整備、実績、発注者の新技術に対する認知度などが挙げられている。

上述したように、T 社 SIP 技術は、コストについては従来の方法よりも低く抑えることが可能である。また、ひび割れ解析は、熟練した技術者でなくてもある程度訓練すれば解析が可能である。したがって、T 社 SIP 技術は、アンケート結果にあるコスト、人材という面では障害にはならないことも地域実装に至った要因だと考える。

また、発注者(管理者)の新技術の認知度の低さ、新技術の実績、新技術に対する基準なども障害として挙げられており、こられの問題を改善するためには、今後も実証実験を管理者と連携して行い実績を積み重ね、かつ、新技術の利用法なども管理者と継続的に協議していくことが重要であると考えられる。

6. 新たな技術開発

T 社 SIP 技術を習得し、遠方から高精度のひび割れ解析が行えるようになった B 建設コンサルタントは、受注した点検業務のなかで独自の技術開発に成功した。

その技術はひび割れの3次元可視化技術であり、平面的なひび割れ分布(図-17 参照)を図-20 に示すように対象構造物の3Dモデルにマッピングする技術である。この技術は、点検した結果を3Dモデルにマッピングすることで、パソコンの画面を見ながら、マウス操作により自由に移動・回転・縮尺変更することができ、管理者は構造物のひび割れ損傷の位置や程度をパソコン上で確認することができる。また、周辺環境などと総合的に判断し、どのような原因でひび割れが生じたのかなどの推

測や構造的にどの程度の影響があるかなどの判断材料と成り得ると考える。今後の継続的な開発に期待したい。

7. まとめ

本論文では、SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント」で開発された技術を地域実装するための支援チームとして琉球大学 SIP が実施した T 社 SIP 技術と地元建設コンサルタントの高精度 UAV 撮影技術を組み合わせた新技術の実証実験およびその結果を受け、地域実装された取り組み、経緯および課題について考察した。さらに、新技術のコストメリット、効率性および高度化についても考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 撮影を担当した地元建設コンサルタントは、条件を満足する UAV を選定し、それを安定して操作する技術を有し、UAV に搭載した市販の高性能カメラにより、高繊細な画像を撮影することができた。
- (2) 得られた高繊細で高解像度な対象構造物のひび割れ画像を入力画像としたひび割れ画像解析から得られるひび割れ図は、点検図にあるひび割れと類似した結果が得られ、遠方の構造物のひび割れ調査への適用可能性を確認した。
- (3) 新技術を地域実装するためには、地元のニーズと新技術のシーズのマッチングの成立が必要である。ただし、新技術を地域実装するためには、新技術のシーズと地元のニーズ以外に、地元のシーズと新技術のニーズのマッチングも重要なポイントであった。
- (4) 新技術の周知やニーズ調査には、新技術に関する講習会などが有効であり、その運営に対する学的作用は重要であることが明らかとなった。
- (5) 適切なシーズとニーズのマッチングには、学的作用が重要であることがわかった。
- (6) 新技術の地域実装には、コストや使用難易度も重要な項目であることがわかった。
- (7) 調査範囲が広い場合、新技術を適用することで、ロープアクセスによる点検よりも時間および費用を大幅に削減できることがわかった(参考価格:2017年度点検単価)。
- (8) 沖縄県における SIP 技術の実証実験を通じて SIP 技術を利用した新技術の開発も行われた。

今後は、本論中に示した課題解決に取り組み、本技術が橋梁の点検技術として、一般的に採用されるよう実証実験を重ね、実績を積み、管理者と協議していく予定である。

謝辞: 本研究は SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の地域実装支援の一環として実施しました。ここに記して感謝いたします。さらに、実証実験に当た

つては、沖縄県中部土木事務所、沖縄県北部土木事務所、沖縄県宮古土木事務所、(株)中央建設コンサルタント、(株)芝岩エンジニアリングに多大なご協力を頂いた。また、飛来塩分の分析には、東京大学 SIP、(一財)沖縄県建設技術センター 比嘉正也氏、アール・アンド・エー 風間洋氏に協力頂いた。ひび割れ解析の精度評価については、琉球大学工学部環境建設工学科 4年次の古田泰祐君に協力頂いた。この他、本取り組みは多くの方々のご協力のもと実施することができた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム，HP (<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>)，2018年7月12日閲覧
- 2) JST：SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術，HP (<http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>)，2018年7月12日閲覧
- 3) 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 SIP インフラ地域実装支援チーム：SIP インフラ新技術地域実装活動報告書—地域のインフラ維持管理の今後に向けて—，土木学会技術推進機構 SIP インフラ連携委員会新技術の地域実装促進小委員会，No. B-3, C-9, D-5, D-6, 2019.1.
- 4) 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集 E2, Vol. 68, No. 3, pp. 178-194, 2012.
- 5) 沖縄県：沖縄県の島嶼の状況，離島の概況について，HP (<http://www.pref.okinawa.jp/site/kikaku/chiikirito/ritoshinko/ritou-gaikyou.html>)，2018年3月20日更新
- 6) 沖縄県：沖縄県の離島架橋 2016，HP (<http://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/dorogai/kikaku/pamph-ritoukakyou2016.html>)，2017年2月27日更新
- 7) 仲嶺智，渡久山直樹，翁長正勝：沖縄県離島架橋 100年耐久性検証プロジェクトにおける取組について，一般財団法人 土木研究センター，土木技術資料 (www.pwrc.or.jp/thesis_shouroku/thesis_pdf/1310-P044-047rep_nakamine.pdf)，55-10, pp. 44-47, 2013.
- 8) 風間洋，富山潤，砂川勇二，比嘉正也，小簾俊介：沖縄県の海岸線に 11年間暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性に関する研究，土木学会論文集 E2, Vol. 73, No. 3, pp. 251-270, 2017.
- 9) DJI社：MATRICE210 カタログ，HP (<https://enterprise.dji.com/jp/products/drones>)，2018年7月13日閲覧
- 10) 国土交通省：無人航空機のルール，無人航空機の飛行の許可が必要となる空域について HP (http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000041.html)，2018年7月31日閲覧
- 11) 国土交通省 国土地理院：公共測量における UAV の使用に関する安全基準(案)，2017.3
- 12) 蓮池里菜，木下幸治，矢島賢治，高木朗義，六郷恵哲：インフラ構造物のメンテナンス等への新技術活用における障害と対策に関する考察，土木学会論文集 F4, Vol. 73, No. 4, pp. I_100-I_111, 2017
- 13) 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.
- 14) 鈴木三馨，本澤昌美，堀口賢一，岡部成行，鈴木浩一，山田義智，富山潤，崎原康平，須田裕哉：画像解析技術を用いた離島海上橋のひび割れ定量評価，土木学会西部支部沖縄会第7回技術研究発表会，pp. 20-23, 2018.1
- 15) 国土交通省 HP，道路橋定期点検要領：<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html> (閲覧日：2018年7月25日)

(2019.1.7 受付)

EXAMINATION OF CRACK INSPECTION ON BRIDGES LEADING TO REMOTE ISLANDS USING UAV DIGITAL IMAGE ANALYSIS TECHNOLOGY

Jun TOMIYAMA, Yuya SUDA, Kohei SAKIHARA, Yoshitomo YAMADA, Kenichi Horiguchi and Naruyuki OKABE

The University of the Ryukyus conducted an empirical experiment on new crack image analysis technology (T Corporation) which is one of the development technologies of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) infrastructure maintenance, renovation and management technology to concrete bridges of remote island with many restrictions on inspection, and obtained results were good agreement with visual inspection results.

The result was evaluated by the bridge manager, and this technology was used for the part of the inspection service of a concrete bridge. The approach in the University of the Ryukyus for the empirical experiment of this technology is one implementation model which led the new technology to the regional implementation.

In this paper, the background and the consideration of success factors that led to the regional implementation of this technology from the empirical experiment are shown. Moreover, cost merit, efficiency and sophistication of this technology are examined.

Also, new 3D visualization technology for crack analysis was developed through the regional implementation.