

地域実装のための橋梁点検ロボット技術の実証 —江島大橋プロジェクト—

木本 啓介¹・若原 敏裕²・金氏 眞³・藤井 優⁴・黒田 保⁵

¹正会員 (株) 計測サチコンサルタント クリエイティブ事業部 (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1 丁目 665-1)
E-mail: kimoto@krcnet.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 (株) 大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2 丁目 2-2 富国生命ビル)
E-mail: wakahara@ohsaki.co.jp

³正会員 東亜グループ工業 (株) 管路グループ 技術開発室 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 2 丁目 10-3)
E-mail: makoto.kaneuji@toa-g.co.jp

⁴正会員 鳥取県 県土整備部技術企画課 (〒680-8570 鳥取県鳥取市東町 1 丁目 220)
E-mail: fujiim@pref.tottori.lg.jp

⁵正会員 鳥取大学大学院教授 工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101)
E-mail: tkuroda@tottori-u.ac.jp

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」では土木インフラの維持管理・更新・マネジメントに役立つ新技術が開発され、実用されている技術が多々ある。これらの新技術を地域へ普及展開するため、地域の大学を中心とする地域実装支援チームが全国に 12 チーム組織された。その 1 つである鳥取大学チームは、4 つのロボット技術の適用性を検証する江島大橋での実証試験「江島大橋プロジェクト」を実施した。江島大橋プロジェクトでは、地域の橋梁点検への新技術の導入を目的として、ロボット技術開発者と地元建設コンサルタントが協働するとともに橋梁点検業務発注のための仕様書や積算の基礎資料を作成した。

Key Words: SIP Infrastructure, bridge inspection, robot technology, regional implementation

1. はじめに

社会インフラの高齢化に伴う老朽化が進むわが国では、2012年の笹子トンネル事故のような重大な事故リスクの顕在化や維持修繕費の増大が社会問題化している。厳しい財政状況が続き、熟練技術者の減少が進む中、予防保全による事故の防止とインフラのライフサイクルコストの最小化を実現するためには、新しい技術を活用したインフラマネジメントシステムの確立が必須である。

2014年度からスタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(以下 SIP インフラ) では、藤野陽三氏(現、城西大学学長)を PD (プログラムディレクター) として、道路橋をはじめとする土木インフラの維持管理・更新・マネジメントに役立つ新技術が開発されており、それらの中には国土交通省の新技術情報提供システム (NETIS) に申請・登録されるなど実用されている技術が多々ある¹⁾。

これらの新技術を社会実装するには、土木インフラの大半を管理している地方自治体への普及展開が重要なため、2016年度に地域の大学を中心とする地域実装支援チームが全国に 12 チーム組織された。その一つである鳥取大学チームは、人口減少に伴って技術者不足が懸念される地方自治体において、ロボット技術を土木インフラの維持管理・更新・マネジメントにどう活用できるかを主たるテーマとして活動するなかで、境港管理組合協力のもと江島大橋(図-1)の定期点検にロボット技術の適用性を実証する「江島大橋プロジェクト²⁾」を実施した。



図-1 江島大橋全景

2. 実証試験の概要

(1) 江島大橋プロジェクトの目的

多くのロボット技術の開発が実用レベルに近づいていることを踏まえ、ロボット技術を橋梁点検の実務に活用するためには、ロボット技術適用時の制約条件や実状に則した点検期間や点検費用、そして点検業務発注時の仕様書、積算基準などを含めた橋梁点検の体制など多くのことを確認する必要がある。さらには、安全性の確認が必要であり、いかなる状況においても第三者に対して危害を及ぼさないことを確認する必要がある。江島大橋プロジェクトでは、以下の3つの目的を設定した。

- ・地方自治体において新技術を活用した効率的な橋梁点検を実現する
- ・地元コンサルタントにおいて新技術を活用して点検技術者の育成を図る
- ・さらなる新技術の開発を促進する

江島大橋における実証試験で新技術（ロボット技術）の適用性を評価するとともに、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針」を策定して橋梁点検に新技術（ロボット技術）を適用するための道筋をつけることを目指した。

(2) 江島大橋の概要と点検における課題

江島大橋は鳥取県境港市渡町と島根県松江市八束町江島の間にかかる大型橋梁で、2004年に供用を開始した。全長は 1446.2m で、中海をまたぐ主橋梁部は中央径間 250m の 5 径間連続 PC 有ヒンジラーメン箱桁橋である。箱桁の高さ（最大 15m）や橋梁の勾配（最大 6.1%）、海面からの高さ（最大 44.7m）といった構造的制約条件と約 15,000 台/日の交通量があり、仮に片側通行規制した場合に発生が予測される重大な渋滞による社会的損失から橋梁点検車を用いた人による近接目視点検が困難であり、供用開始以来、遠望目視による点検となっている。

(3) 実証試験範囲

各ロボット技術は運動性能や搭載センサの違いにより点検対象部位によっては、作業性・効率性が大きく変化する。そのため限られたロボットのみであらゆる部位の点検を実施する場合、非効率となる可能性がある。効率的な点検実施のためには、対象部位に応じた特性を持つロボットを用いることが有効であると考え。そこで、江島大橋主橋梁部全体を「複数のロボット技術の組み合わせによる効率的な点検の実証」ならびに「従来点検手法では難度が高い部位のロボット技術活用による効率化」という2つの視点から、図-2に示す江島大橋渡海部の中央ヒンジから境港側の橋脚 PW1 までの 125m 区間を実証試験の対象範囲と設定した。当範囲での適用性が実証できれば、主橋梁部全体の効率的な点検が可能と言える。

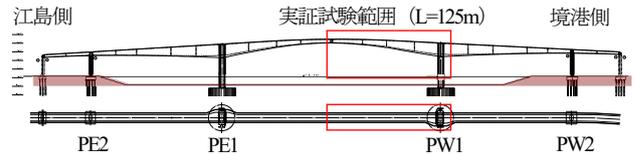


図-2 江島大橋一般図 実証試験対象範囲

3. 適用したロボット技術と実施体制

(1) 点検ロボット技術に要求した性能・機能と成果

点検ロボット技術には、オペレータの技量に依存せず安全に対象に近接すること（近接機能）、安定的に均質なデータが取得できること（位置制御機能）、第三者被害を与えない措置が可能であること（安全性能）、そしてそれらを満たしたうえで損傷評価に資する品質のデータが取得できること（計測性能）が要求される。本実証試験では上記性能・機能を有していることを要求した。また、画像撮影ロボットにおいては以下の2点を求めた。1点目は「道路橋定期点検要領³⁾」ではPC構造物において0.1mm幅以上のひび割れ抽出が要求されていることから、0.1mm幅以上のひび割れが視認可能な画像を撮影することで、2点目は対象部材を網羅的に確認できる展開画像が作成可能な画像を撮影することである。打音・触診ロボットにおいては、張出床版下面においてコンクリートのうきを効率的に検出することを求めた。

(2) ロボット技術の選定と点検対象部位

SIP インフラ等で開発された点検ロボットは、目的・用途、移動機構、制御方法により分類され、それらの中から点検目的や対象橋梁の構造形式、構造諸元、架橋環境等を踏まえ、上記(1)に示す機能・性能を有する以下の4つのロボット技術を選定し、それぞれのロボットの特性に合った点検対象部位を設定した。

(i) 橋梁点検ロボットカメラ

ポールの先に搭載されたカメラを手元のタブレットPCにより操作し、任意範囲を1点から放射状に連続撮影する技術である。撮影された複数枚の画像からステッチにより合成画像を作成し、デジタルクラックスケールやL型スケールを用い、ひび割れ幅などの損傷抽出を行う。0.1mm幅以上のひび割れの抽出するための目標画素分解能は、0.3mm/pixelである。暗所での撮影が可能で機動性に優れていることから箱桁内部を点検対象とした。

(ii) 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

橋面歩道上の操作台車から鉛直ロッドを介して水平アームユニットを吊り下げ、アームユニットに搭載したカメラを遠隔操作してクラックスケールと共に近接画像を撮影する技術である。撮影した画像は、あおり補正等により合成し、展開画像を作成する。展開画像から損傷を抽出し、ひび割れ幅は同時に撮影したクラックスケール

表-1 江島大橋プロジェクトで適用したロボット技術

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
ロボット技術名称	橋梁点検ロボット	橋梁点検支援ロボット『視る・診る』	二輪型マルチコプタ	打音機能付飛行ロボット
分類① (用途・目的)	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット	打音・触診ロボット
分類② (近接機構)	ポール型ロボット	車両型ロボット	飛行型ロボット	飛行型ロボット
開発チーム	三井住友建設 日立産業制御ソリューションズ	ジビル調査設計	富士通	新日本非破壊検査
実証試験対象部位	上部工内面 (箱桁内部)	上部工外面 (桁高 10m 以下) 非常駐車帯張出床版	上部工外面 (桁高 10m 以上) 橋脚	上部工張出床版下面 (打音検査)
				
協働した建設コンサルタント	ヨコ 技研コンサルタント サンテックコンサルタント	西谷技術コンサルタント	アヒコンサルタント	荒谷建設コンサルタント

を用い算出する。0.1mm 幅以上のひび割れの抽出するための目標画素分解能は、0.4mm/pixel である。歩道を走行しながら撮影が可能のため、上部工外面を対象とした。ただし、アーム長が最大 10m のため桁高が 10m 以下の箇所のみを対象とした。

(iii) 二輪型マルチコプタ

車輪付きの有線給電タイプの UAV が遠隔操作により接近・接触し、搭載カメラで連続的に近接画像を撮影する技術である。撮影した画像は、Structure from Motion により接合され、対象範囲のオルソ画像を生成する。オルソ画像からデジタルクラックスケールなどを用いてひび割れなどの損傷抽出を行う。0.1mm 幅以上のひび割れの抽出するための目標画素分解能は、0.3mm/pixel である。車輪接地により鉛直方向への機動性に優れていることから橋脚と桁高 10m 以上の上部工外面を対象とした。

(iv) 打音機能付飛行ロボット

有線式のマルチコプタ上部に車輪駆動機構と打音点検機構を搭載している。マルチコプタの飛行機能で橋梁の床版など人が容易に近づけない部位に接近して車輪を押し当てて走行しながら打撃子により打撃し、収集された音データから周波数解析により領域ごとの健全部評価指数を集計して浮きの有無を評価する。水平面に車輪が接地して移動する機構のため、張出床版下面を対象とした。

(3) 実証試験の実施体制

管理者である境港管理組合と山陰地方でのロボット技術の実装を見据えて、鳥取県と島根県の各自治体、両県の建設コンサルタントの技術者が参画し、実証試験を実施した。特に、地域の橋梁点検に導入するためには、地元建設コンサルタントの技術者がロボット技術を理解し、

それを用いた点検を実施することが必要となる。そこで、ロボット技術開発者と地元建設コンサルタントが協働して点検計画、経費算出、実証試験実施、点検結果整理、報告書作成を実施することとした。適用したロボット技術とその特徴、点検対象部位、協働した地元の建設コンサルタントを表-1 に示す。

(4) 実証試験における安全管理

本実証試験では安全かつ効率よく実施するため「実証試験における安全管理」を策定した。特に橋上・海上作業では風向・風速が最も影響を与える可能性があることから、乱流による急激な風速変動等の影響も考慮して安全に飛行できる風速を設定する必要がある。SIP インフラで想定している UAV の風速安定性に関わる運用最大風速は 10m/s (平均風速) であり、各開発チームの技術は、開発目標をクリアしている。そこで、境港管理組合提供の過去気象データ⁴⁾を基に各ロボット技術の耐風安定性や稼働率を考慮し、平均風速の中断・中止基準値(飛行型：5m/s, ポール型, 車両型：7m/s)を設定した。

4. ロボット技術の精度確認試験

ロボットで取得した画像データの精度を確認するには、対象部位を人による近接目視で確認する必要があるが、江島大橋主橋梁部は人の近接が困難である。そこで、人による近接目視で真値の取得が可能な試験ヤードを確保し、江島大橋の点検と同じ条件で各ロボットが取得したデータと真値を検証する精度確認試験を実施した。

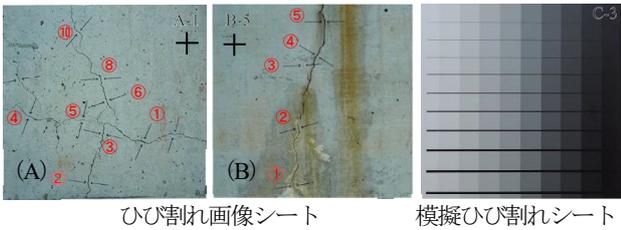


図-3 貼付した評価用シート

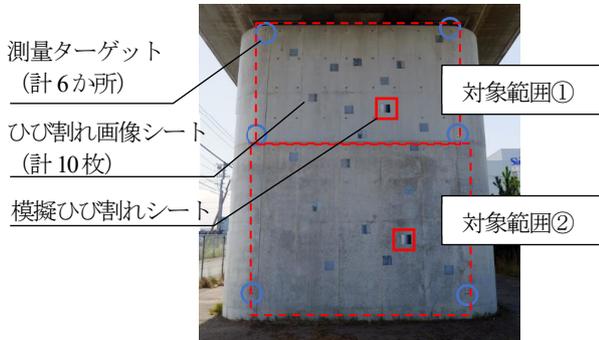


図-4 PE10橋脚への評価シート設置状況

(1) 画像撮影ロボットの精度確認試験⁵⁾

画像撮影ロボット(i) (ii) (iii)を対象に以下の計測精度の確認を行った。

- ・計測可能なひび割れ幅および計測精度
- ・損傷の位置の計測精度

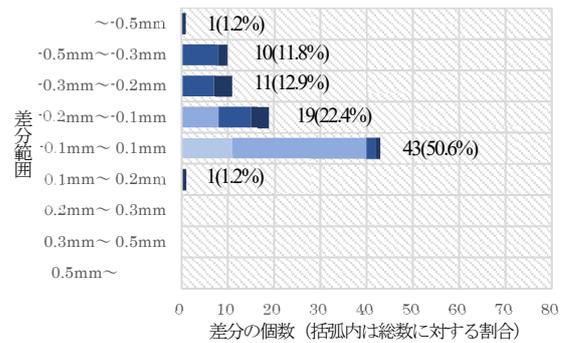
a) 試験評価方法

精度確認試験ヤードを事前調査したところ0.1mm幅のひび割れは見受けられるものの0.2mm幅以上のひび割れがなく、その他の損傷も見られないため、計測性能を検証するために必要な損傷画像を他のコンクリート構造物を対象に高解像度撮影し、20cm角のシートに印刷して精度確認試験ヤードに貼付し損傷の代用とした。各開発チームは精度確認試験ヤードにて、実証試験と同様の仕様および手順で計測し、指定した損傷部の計測結果と著者らが事前に計測した「真値」と比較して精度を確認した。「真値」は、入念な近接目視点検と高精細なオルソ画像を用いて取得した。

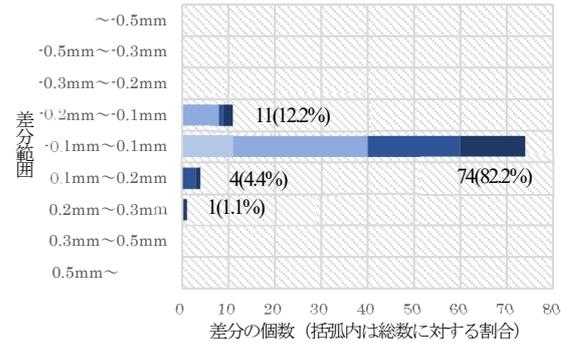
b) 評価対象

江島大橋 PE10 橋脚の上下に対象範囲を設定し、計 10 枚の「ひび割れ画像シート」, 「模擬ひび割れシート」, 「標定用ターゲット」を貼り付けて評価対象とした。

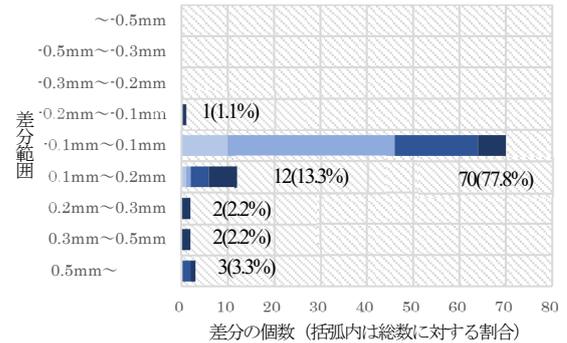
- ・0.1~2.0mm 幅のひび割れを有する「ひび割れ画像シート」を計 10 枚準備した。各シートには 5 もしくは 10 カ所 (全 90 カ所) のひび割れ幅計測位置を矢印で示した。
- ・段階的に白からグレイ値を変えた背景色の上に 0.1~3.0mm 幅のひび割れを模した線が配置された 20cm 角の「模擬ひび割れシート」を貼り付け、撮影画像から背景色とひび割れの視認性を検証した。
- ・画像解析のための「標定用ターゲット (5cm 角)」を複数枚貼付して、その位置情報 (座標) をトータルステーションにより測量して開発チームに配布した。



(i)橋梁点検ロボットカメラ



(ii)橋梁点検支援ロボット『見る・診る』



(iii)二輪型マルチコプタ

0.2mm未満 0.2mm以上0.5mm未満 0.5mm以上1.0mm未満 1.0mm以上
真値幅による区分

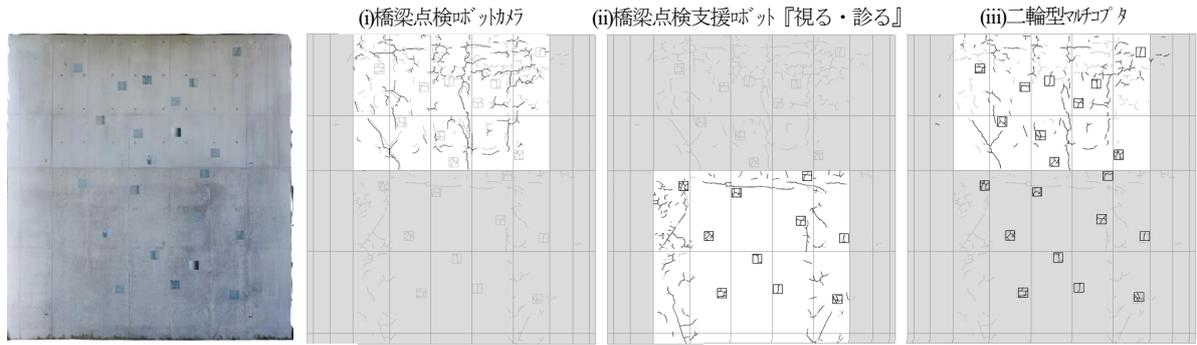
図-5 真値との差分分布図

各評価シートを図-3、橋脚への設置状況を図-4 に示す。

c) 画像撮影ロボットの精度確認試験結果

- ・計測可能なひび割れ幅および計測精度確認

3つのロボット技術が判定したひび割れ画像シート上のひび割れ幅計 90 箇所の精度確認を行った。図-5 は真値ひび割れ幅と計測値の各差分の個数を0.1mmごとに集計したグラフである。「道路橋定期点検要領³⁾」では0.1mm単位で損傷の程度が区分されることから0.1mmごとに集計した。各棒グラフは真値ひび割れ幅を基準に0.2mm未満, 0.2mm以上0.5mm未満, 0.5mm以上1.0mm未満, 1.0mm以上の4つに区分している。誤差が±0.1mm範囲に(i)は50.6%, (ii)は82.2%, (iii)は77.8%収まっており、(i)が他2つの技術と比較して、やや正答率が低い結果となったが、その操作性や簡易性を考慮すると点検精度と



真値のベースとしたオルソ画像

黒線：各チームが記載した損傷図，灰線：真値損傷

図-6 損傷図の比較

して十分な結果であると考えられる。各技術で使用カメラが異なるため一概には言えないが、これらの結果より、解像度約0.3mm/pixelの画像から0.1mm幅のひび割れは、十分抽出可能であると言える。

・ 損傷の位置の計測精度確認

ロボットによる撮影画像から作成した損傷図を事前に準備した「真値損傷図」と重ね合わせて比較することで、ロボットによるひび割れ位置の計測精度を検証した。各チームが作成した損傷図と真値損傷図を重ね合わせた結果を図-6に示す。(i)はひび割れの位置に差が生じている。これは、カメラ位置を中心とし放射状に撮影した画像から損傷をスケッチするため生じていると推測されるが、型枠目地を基準とすることでひび割れの位置を大きく誤認識する可能性は低いと考えられる。(ii)と(iii)は、正対撮影した画像からあおり補正等による展開画像やSfMを用いたオルソ画像を作成し、図面と重ね合わせて、画像上をトレースしているため、高精度な位置情報を持った損傷図が作成されている。

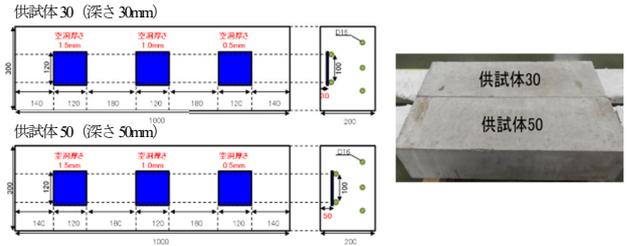


図-7 試験に使用した供試体

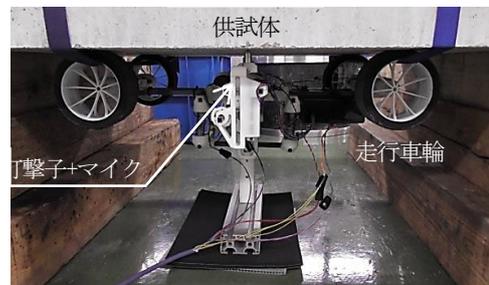


図-8 試験状況

(2) 打音ロボットの精度確認試験

画像による精度確認試験と同様に、打音についても現地で精度確認ができない。そこで、名古屋大学で作製された供試体を使用して(iv)打音機能付飛行ロボットの打音機能の精度確認試験を実施した⁹⁾。

a) 試験評価方法

コンクリート内部に120×120mmの浮きを模した厚さの異なる空洞(0.5mm, 1.0mm, 1.5mm)が深さ30mmと50mmに配置された2種類の供試体(図-7)を用いて打音検査を実施し、空洞の検出の可否を確認することで打音機能付飛行ロボットの精度確認試験とした。図-8に示すように点検ロボットの打音検査機構部を走行機構部に取り付け、打撃力が大きく変動しないよう4つの車輪を供試体に押し当てた状態で実施した。

b) 打音ロボットの精度確認試験結果

供試体30および供試体50の空洞部と空洞のない健全部に対して実施した打音打撃機構による打音スペクトルと健全度評価指数の結果を図-9に示す。図中グラフの縦

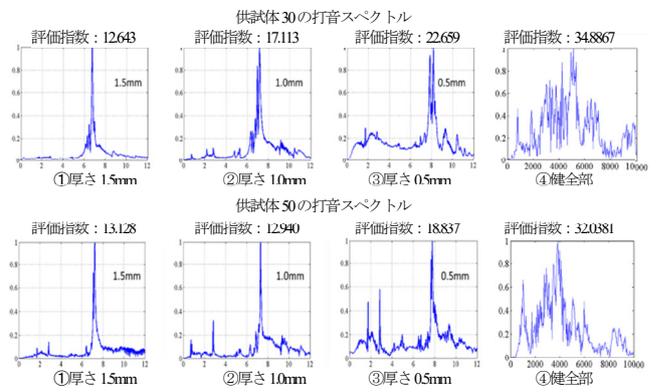


図-9 試験結果

軸は打音振幅の最大値を1として正規化した打音強度であり、横軸は周波数である。健全部のスペクトルは広い帯域幅で分布しているが、空洞部のスペクトルには6~8kHzの周波数帯域に狭い帯域幅で強度が強い部分があり、健全部との打音スペクトルの現れ方に明らかな違いがみられる。スペクトル分布から作成した評価指数については、健全部は空洞部に比べかなり大きな数値を示している。打音スペクトルの現れ方や評価指数の数値から深さ30~50mmの範囲については空洞厚さが0.5mmと薄い場合でも空洞の検出は可能であると考えられる。

5. 実証試験

(1) 事前検討

a) ロボット技術の制約条件

ロボット技術を活用するためには、使用に際して環境条件（ロボット搬入・設置、操作者の足場、電波障害、飛行制限、騒音、GNSS等）や気候・天候（雨天、風向・風速）の制約を受ける場合があり、計画時に確認が必要である。本実証試験では各ロボットの制約条件を確認し、特に以下の点においては対策を検討し、実践した。

・風の影響

橋軸に直角方向の風が卓越している場合は UAV の安定した飛行が困難となる。境港管理組合提供の過去気象データ⁹から、当該地域では春季（3～5月）ならびに夏季（6～8月）は橋軸方向の風が頻出し、4～10月は6m/s以上の風速の出現率が低いことが分かった。そこで、風向や風速の出現状況に加え梅雨明け時期等を考慮し、7月初旬から8月にかけて現地作業を行うこととした。

・作業時間

夏季の場合、気温が上昇する午後は上昇気流の発生により大気が不安定となり、雷雨の発生も予測される。さらに、一日の中でも早朝から午前中は風速が小さいため、作業は早朝5時から正午頃までに実施することとした。

・UAV 操作者の足場

UAV を操作者が目視できる安定した足場を飛行範囲の近傍に確保する必要がある。船舶は揺動の影響で安定性に欠け、仮設足場は江島大橋下が国際船舶の航路となっているため、常設が不可となる。そこで、安定性があり移動が可能な台船を操縦者の足場として利用することとした。台船は船舶なので係留基地で人と計測機器類を載せたあと現地に曳航することができ、計測場所に応じて比較的自由に係留場所を移動させることが可能である。図-10に台船の設置と台船上での作業状況を示す。



図-10 台船の設置と台船上での作業状況

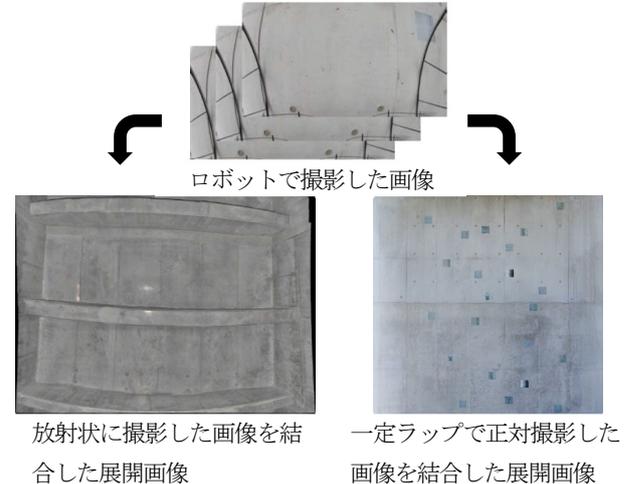


図-11 展開画像の作成



図-12 大型タッチパネルによるバーチャル目視点検状況

b) 関係機関との協議及び許認可手続き

実証試験実施にあたり管理者である境港管理組合をはじめ境海上保安部や管轄警察署、周辺漁協、周辺自治会など関係機関との事前協議および許認可手続きを行った。

(2) 取得データと損傷程度の評価

a) 画像撮影ロボット

江島大橋のような大規模橋梁でロボット技術により近接画像を取得する場合、膨大な数量となり、個々の画像を確認するには多大な労力が必要となるうえ、位置の把握が困難となり、非効率な点検手法となる。そこで本実証試験では、膨大な撮影画像を接合した展開画像を用いて損傷程度の評価を行うこととした。展開画像を面的に確認することで位置を把握しつつ損傷程度の評価が可能であり、省力化・効率化が図れる。

展開画像は、図-11に示すよう大きく2種類に分けられる。一つは撮影対象範囲の中央にカメラを設置し、撮影範囲を放射状に連続撮影し、それらの画像を接合したものである。撮影範囲の端部ほど斜めに撮影することとなり歪みが発生した状態で接合するため湾曲した展開画像となる。もう一つは、一定のラップ率を保持した状態で連続的に正対撮影した画像から画像解析処理により合成したものである。歪みが除去されたオルソ画像となるため、尺度を与えることで図面と重ね合わせることが可能な位置精度の高い展開画像となる。

作成した展開画像を大型モニタに等倍で映し出し、スクロールしながら損傷を視認することで、あたかも点検技術者が橋梁に近接して目視点検しているのと同じ感覚で評価を行う「バーチャル目視点検」が可能となる。現地の状況を室内で再現でき、管理者・点検者が同じ視点で評価することができる。図-12は、精度確認試験で作成した橋脚のオルソ画像を大型モニタに等倍で表示し、



図-13 画像撮影ロボット各チームの作業状況と作成した展開画像の一部

「ひび割れ描画支援システム⁷⁾」によりひび割れをトレースしている状況である。

図-13 に各チームの作業状況と作成した展開画像の一部を示す。

(i) 橋梁点検ロボットカメラ

中央ヒンジ～PW1 間の桁内約 1,800 m²を地元の建設コンサルタントと協働して4日間でロボットによる画像撮影が完了した。上床版下面や桁側面などの各面を一点から放射状に撮影し、それらの画像を接合したものが展開画像となる。接合後はゆがみが生じた状態となる。

(ii) 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

中央ヒンジから桁高が10mまでの桁側面、下面、張出床版下面および非常駐車帯張出床版下面の約 1,040 m²を地元の建設コンサルタントと協働して4日間でロボットによる画像撮影が完了した。ロボットのアームに搭載したカメラで連続的に撮影し、市販ソフトウェアでコンクリート目地を基準にあおり補正しながら接合して展開画像を作成した。撮影毎にクラックスケールを写すため、全範囲にクラックスケールが配置された展開画像となる。

(iii) 二輪型マルチコプタ

PW1 橋脚側面、桁高10m以上の桁側面および桁下面の約 1,475 m²を地元の建設コンサルタントと協働して8日間でロボットによる画像撮影が完了した。車輪付きの有線給電 UAV を台船上で離着陸させ、対象面に接地しながら連続的に撮影を行った。撮影された膨大な画像は

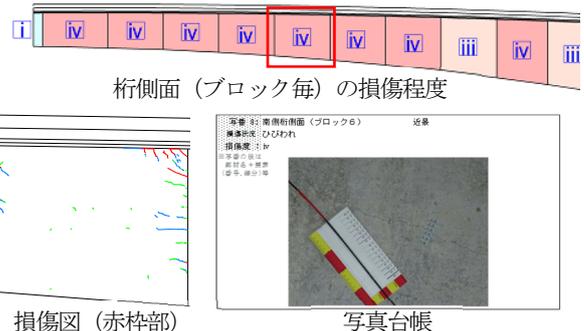


図-14 損傷程度評価および点検調書を作成例

SfMにより解析し、展開画像を作成した。

各チームが作成した展開画像をもとに「鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル⁸⁾」に準じてバーチャル目視点検を実施し、一部損傷図の作成と損傷程度の評価、点検調書の作成を行った。図-14 にその一部を示す。なお本実証試験では、調査対象部位の面積が大きいため、コンクリート目地を基準に数m範囲ごとのブロックに分割して、評価を行った。

b) 打音ロボット

(iv) 打音機能付飛行ロボット

中央ヒンジ～PW1 間の張出床版下面約 250 m²を地元の建設コンサルタントと協働して4日間でロボットによる打音点検が完了した。有線給電 UAV を台船上から操縦し、対象面に接地し車輪で移動しながら連続的に打音点検を実施した。健全部評価指数を集計したヒストグラムでは異常部は黄色～赤色で表示されるが、対象範囲にお

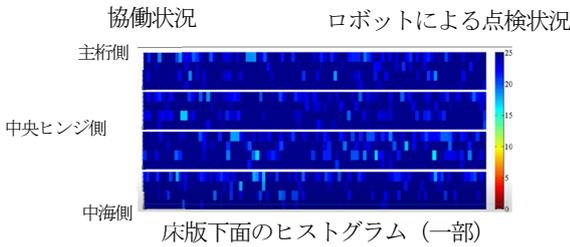


図-15 打音ロボット作業状況と作成したヒストグラムの一部

いては浮きと思われる箇所は確認されなかった。図-15に作業状況と張出床版下面のヒストグラムの一部を示す。

画像撮影ロボット、打音ロボットとも精度確認試験で十分な精度は保有していることが実証されており、実証試験範囲においても同質の情報を取得し、そこから従来の近接目視点検と同様の損傷抽出、損傷程度評価、点検調査作成が可能であることが実証できた。さらに、展開画像や打音結果を可視化したヒストグラムなどが点検結果の根拠となるため、複数の技術者による精査が可能となり、経年変化を捉えやすく客観的で定量的な評価が可能というメリットがある。

(3) 協働した地元の建設コンサルタントによるロボット技術の評価

地方自治体が管理する橋梁点検業務は主として地元企業が担っているため、本実証試験ではロボット技術開発者と地元の建設コンサルタントの協力体制のもと作業を実施した。建設コンサルタントの点検技術者は、ユーザの立場から機材搬出入時の課題やロボット操作の難易度など開発者が把握しづらい外業・内業における利点や課題を評価し取り纏め、開発者にフィードバックすることで、より現場に則した技術開発の促進を目指した。

6. 社会実装に向けた基礎資料作成

ロボット技術を活用した橋梁点検業務を計画するためには、ロボット技術の機能、計測性能、制約条件および安全性等を把握するための技術資料と付帯設備や安全対策を含めた積算資料などの基礎資料が必要になる。そこで、本実証試験結果からロボット技術の技術資料と江島大橋渡海部を4つのロボット技術を活用して点検した場合の積算のための基礎資料を作成した。

(1) 「ロボット技術シート」作成

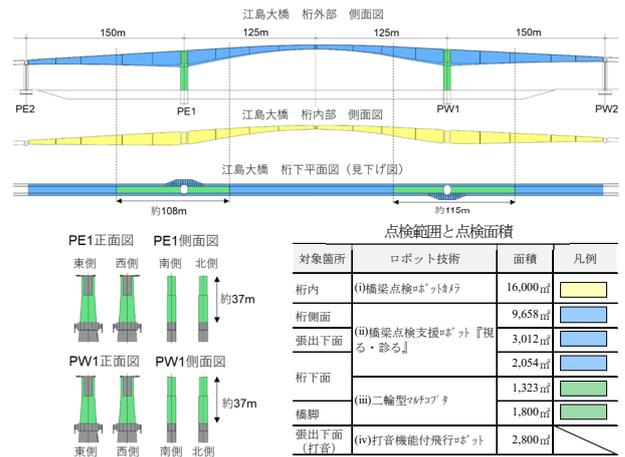


図-16 各ロボット技術の点検範囲区分と点検面積

本実証試験では江島大橋を試験フィールドとして点検への適用性を検証するとともに、4つのロボット技術に対し、精度確認試験を実施し十分な計測精度を有していることを実証した。それらの結果を基に各ロボット技術の基本諸元や運動性能、計測性能、損傷検出精度などをとりまとめた「ロボット技術シート」を作成した。「ロボット技術シート」は、国土交通省が定めた「点検支援技術性能カタログ」に相当するものだが、記載項目が若干異なることと本実証試験において実証された内容を纏めたことから別名称「ロボット技術シート」とした。

(2) ロボット技術を活用した橋梁点検業務の積算基礎資料作成

a) ロボット技術の点検範囲と点検面積算定

本実証試験では構造と環境を踏まえ、主橋梁部全体の中で点検が困難な箇所を含む一部範囲を対象として各検証を実施した。実証試験および精度確認試験結果より、4つのロボット技術はそれぞれの特徴的な性能を發揮し、「3. (1) 点検ロボット技術に要求した性能・機能と成果」で示した要求を満たせる技術であることが実証できた。そこで、適用した4つのロボット技術を組み合わせ、それぞれの特徴を活かしつつ、江島大橋主橋梁部を網羅できるよう点検範囲を設定することで、主橋梁部全体の効率的な点検が可能であると考え、ロボット毎の点検範囲区分と対象面積を算出した。(図-16)

b) 点検日数の算定

実証試験の外業、内業において、協働した建設コンサルタントは各作業に要した時間と数量(点検面積や作業人員数)を記録し、そこから各ロボット技術のサイクルタイムを算出した。表-2は(i)橋梁点検ロボットカメラの外業における1日の作業時間の一例である。撮影対象箇所へのカメラ移動・設置と撮影を1サイクルとした場合、カメラ移動・設置作業に平均10分、撮影作業に平均25分要しているため、サイクルタイムを35分とした。1サイクルでの撮影面積は、おおよそ20㎡であった。

表-2 (i)橋梁点検ロボットカメラのサイクルタイム例

作業項目	備考	時間(分)	サイクルム(分)
作業員昇降	PW3より進入	30	30
桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
カメラ設置	カメラ移動 撮影設定	10	35
撮影	20㎡あたり	25	
機材仮置き	桁内に機材残置	30	30
桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
作業員昇降		30	30

表-3 点検対象面積と点検必要日数 (外業)

ロボット技術	項目	桁内	桁側面	桁下面	張出下面(南)	張出下面(北)	非常駐車帯下面(南)	非常駐車帯下面(北)	橋脚(PE1)	橋脚(PW1)	合計
(i)	調査面積	16,000	-	-	-	-	-	-	-	-	16,000㎡
	調査日数	27	-	-	-	-	-	-	-	-	27日
(ii)	調査面積	-	9,658	2,054	1,400	1,400	106	106	-	-	14,724㎡
	調査日数	-	14	3	2	2	1	1	-	-	23日
(iii)	調査面積	-	-	-	-	-	-	-	450	450	1,800㎡
	調査日数	-	-	636	687	-	-	-	1	1	6日
(iv)	調査面積	-	-	-	1,400	1,400	-	-	-	-	2,800㎡
	調査日数	-	-	-	8	8	-	-	-	-	16日

各ロボット技術について、同様に算出した外業、内業のサイクルタイム(実証試験実績値)と各開発者へのヒアリング結果(開発者が想定するサイクルタイムや人員数など)を総合的に勘案し、a)で設定した範囲を点検するために必要な日数を算出した。表-3は外業における各ロボット技術の点検対象面積と点検必要日数である。

c) 歩掛基礎資料の作成

サイクルタイムから算出した外業、内業の点検日数ならびに開発者へのヒアリング結果(ロボット技術を運用するための1パーティの人数、機材損料等直接経費等)をもとにまずは江島大橋渡海部を点検対象とした場合の仮見積もりをロボット技術ごとに作成した。作成した仮見積もりと「設計業務等標準積算基準書平成30年度版¹⁰⁾(以下、標準積算基準)」を参考に積算を行った。積算を行ううえで、ロボット技術を活用する場合、従来の近接目視点検と比較すると、現地点検結果から損傷評価するまでの作業の流れ(例えば画像処理等)が大きく変わる。この部分は標準積算基準では「定期点検」と「点検調査書作成」に含まれる部分であるが、ロボット技術を活用する場合に必要な画像処理等に対する費用は見込まれていない。そこで標準積算基準の「定期点検」の項目を「現地点検」「データ整理および処理解析」「損傷評価・損傷図作成」の3項目に細分化することでロボット技術を活用した場合に必要な項目を追加した。それ以外の項目については、基本的には標準積算基準を用いるものとした。なお、「第三者被害予防措置」については、本実証試験で実証したロボット技術では現状対応できないことから、割愛した。図-17に業務委託料の構成改定案を示す。「定期点検」を3項目に細分化したう

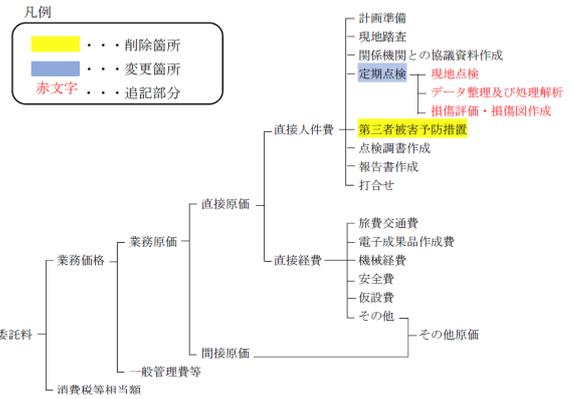


図-17 業務委託料の構成改定案

表-4 「定期点検」の歩掛案

区分	職種	直接人件費						
		主任技術者	技師長	主任技師	技師(A)	技師(B)	技師(C)	技術員
単価		65,500	61,700	52,700	46,300	37,900	30,800	26,200
1) 現地点検				0	0	46	23	23
2) データ整理及び処理解析					0	4	16	4
3) 損傷評価・損傷図作成				0	0	2	4	28
単位面積あたりの人工数(少数第2位切上げ)		(1000㎡あたり)						
1) 現地点検				0.0	0.0	3.2	1.6	1.6
2) データ整理及び処理解析				0.0	0.0	0.3	1.1	0.3
3) 損傷評価・損傷図作成				0.0	0.0	0.2	0.3	2.0

で各ロボット技術の仮見積もりをこの項目に沿うように統一した。併せて各ロボット技術の技術者の職種についても統一し、単位面積当たりの点検にかかる人件費を算出して歩掛を作成した。表-4は(ii)橋梁点検支援ロボット『見る・診る』を用いて対象範囲を点検した場合の例である。渡海部のうち約14,000㎡の調査に必要な人工数を集計した表(上表)と、そこから単位面積(1000㎡)あたりの人工数を算出した表(下表)であり、これが「定期点検」の歩掛案となる。同様の手順で各ロボット技術の歩掛案も作成した。当歩掛案を用いて4つのロボット技術活用による江島大橋主橋梁部の点検費用を試算すると、足場仮設による従来の近接目視点検と比較して約1/3の費用縮減が期待できる。

実証試験で得られた成果から作成した基礎資料をもとに鳥取県は今後のロボットを用いた橋梁点検業務の実施を見据えて、特記仕様書(案)とロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準を作成し、2019年3月に鳥取県建設技術センターHPで公開した。

7. まとめ

本実証試験で適用した4つのロボット技術は、精度確認試験と実証試験結果から橋梁点検に適用可能な計測精度を有しており、江島大橋のような大規模橋梁の点検に対して安全かつ安定的に均質なデータをロボットが取得し、それらのデータを基に損傷程度の評価が十分可能であることが実証できた。さらには、ロボット技術開発者と鳥取県内の建設コンサルタント技術者が協働により実証試験を実施したことは「地元建設コンサルタント技術者のロボット技術を用いた橋梁点検の体感」、「地元建

設コンサルタント技術者からロボット技術開発者へのユーザーとしての意見のフィードバックによるさらなる技術開発の促進」と両者にとって有益なものであった。

また、本実証試験で得られた成果から点検業務発注時に橋梁管理者に必要となる仕様書や積算の基礎資料を作成した。これらの資料を基に鳥取県は2019年3月に「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託特記仕様書(案)」と「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準」を発出した。加えて、SIP インフラ地域実装支援鳥取大学チームでは、有識者等による「橋梁点検への新技術の適用性評価委員会」が組織され、委員会より本実証試験の結果を踏まえ「ロボット技術を活用した橋梁点検指針(案)」が示された。当指針は地方自治体等が「道路橋定期点検要領³⁾」に基づいて行う橋梁の定期点検において新技術(ロボット技術)を安全かつ適切に活用することを目的として、ロボット技術活用の基本的な考え方、ロボット技術の機能と性能、ロボット技術を点検に活用するための必要手順、ロボットで取得したデータの処理および記録作成の留意点ならびにデータの保存・利用方法について取り纏めたものである。

今後、鳥取県ではこれらの基礎資料や指針等を活用し、地元の建設コンサルタントと共にロボット技術の活用事例を増やし、新たな課題抽出や適用性の検証を行いつつ、活用の幅を広げ本格的な社会実装に向かっていくことが期待される。ロボットなどで取得したデータによる3次元モデルの作成方法¹⁾なども準備されつつあることから、ロボット技術を活用した橋梁点検が社会に普及し、橋梁点検の効率化が図られていくことが望まれる。

謝辞: 本実証試験の実施にあたりご支援を頂いた国立研究開発法人科学技術振興機構に感謝申し上げます。また、フィールドを提供頂いた境港管理組合、鳥取県、鳥根県ならびにロボット技術開発者である三井住友建設藤原保

久氏、ジビル調査設計毛利茂則氏、富士通沢崎直之氏、新日本非破壊検査和田秀樹氏、実証試験に参加頂いた地元建設コンサルタント(ヨナゴ技研コンサルタント、サンイン技術コンサルタント、西谷技術コンサルタント、アサヒコンサルタント、荒谷建設コンサルタント)の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術：インフラ技術総覧，2019.
- 2) SIP インフラ地域実装支援鳥取大学チーム：江島大橋プロジェクト実証試験報告書，2019.
- 3) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2019.
- 4) 境港管理組合：周辺の自然環境，pp.13-15，2017.
- 5) 木本啓介，黒田保，藤井優：橋梁点検においてロボットが撮影した画像から抽出された損傷の精度確認試験，JSPRS 秋季学術講演会発表論文集，C-6，2019.
- 6) 三浦泰人，新田益大，和田秀樹，中村光：打音機構を搭載した飛行ロボットによる内部欠陥検出手法の開発と実橋梁への適用，構造工学論文集，Vol.65A，2019.
- 7) 西村正三，原健司，木本啓介，松田浩：3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成，写真測量とリモートセンシング，Vol.51，No.1，pp.46-53，2012.
- 8) 鳥取県県土整備部道路企画課：鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル，pp.52-53，p.84，2015.
- 9) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ(案)，2020.
- 10) 一般財団法人経済調査会：設計業務等標準積算基準書平成30年度版，pp.4-1-12-4-4-21，2018.
- 11) 下川光治，服部達也，森川博邦：UAVを活用した橋梁の3次元モデル作成方法に関する考察，令和3年日本写真測量学会年次学術講演会，pp.87-90，2021.

(Received September 30, 2021)

(Accepted January 10, 2022)

DEMONSTRATION OF BRIDGE INSPECTION ROBOT TECHNOLOGY FOR REGIONAL IMPLEMENTATION - ESHIMA OHASHI BRIDGE PROJECT -

Keisuke KIMOTO, Toshihiro WAKAHARA, Makoto KANEUJI, Masaru FUJII
and Tamotsu KURODA

In the Infrastructure Maintenance Renovation and Management Program of SIP (the Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion Program), many advanced technologies have been researched and developed for new maintenance and management works for an infrastructure since 2014. In order to spread these cutting-edge technologies into the local governments, 12 regional implementation support teams based on regional universities have been organized nationwide. One of them, the Tottori University team, verified the applicability of 4 robot technologies in the series of the demonstration test at the Eshima Ohashi Bridge. Those 4 robot technologies were evaluated successfully, and basic performance data for practical use were obtained from those verifications, to develop the specifications.