

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職
	氏家 勲 (うじけ いさお)		愛媛大学		教授
②研究 テーマ	名称	市町村のニーズに応える革新的な点検支援システムに関する研究開発			
	政策 領域	[主領域] 【領域8】道路資産の保全 [副領域]	公募 タイプ	タイプI ハード分野	
③研究経費 (単位:万円)	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総合計
		919 (FSとして)	1,230	1,450	3,599
④研究者氏名					
氏名		所属・役職 (※平成31年3月31日現在)			
氏家 勲		愛媛大学・教授			
矢田部 龍一		愛媛大学・特命教授			
全 邦釘		東京大学・特任准教授			
吉井 稔雄		愛媛大学・教授			
楠本 雅博		第一コンサルタンツ・取締役技術開発部長			
浅本 晋吾		埼玉大学・准教授			
⑤研究の目的・目標					
<p>四国内の市町村が管理する約34,500橋の橋梁のうち、有効幅員4m以下の狭小幅員橋梁は19,700橋(約57%)と半数以上を占めている。これら狭小幅員橋梁において橋梁点検車を使用すると、通行止めが必要になり、現道交通や周辺住民の生活活動への影響が大きいという問題がある。加えて、点検を実施しても損傷の評価や対応の要否の評価が難しいことも市町村での橋梁維持管理の課題として顕在化している。</p> <p>本研究は、市町村が管理する狭小幅員橋梁において、橋梁点検時の通行止めを回避でき、容易に輸送・架設・移動が可能な安価な簡易移動式足場をまず開発する。加えて、点検の際に行う、損傷程度の評価や対応の適否の評価を支援することを目的とし、振動や音響計測、透気量、画像解析などによる計測結果を人工知能の枠組みで解釈する手法の提案を行う。さらに、画像解析により橋梁を3次元形状として復元する手法、ひび割れを自動検出する手法についても開発し、点検結果記録手法を高度化することで橋梁維持管理・マネジメントに貢献することを目標とする。</p>					

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

本研究は、簡易移動式足場についての研究、人工知能による点検支援システムについての研究、橋梁3次元形状復元に関する研究の3つに大別される。

簡易移動式足場については、当初目標とした、要求性能の整理（楠本が担当）、それを踏まえた設計（氏家、楠本が担当）およびプロトタイプ構築（鉄建ブリッジに外注）、実橋での検証（全、矢田部、吉井、楠本が担当）が完了しており、目標が達成できている。

人工知能による点検支援システムについては、当初目標に掲げたように、計測結果と損傷程度の相関を導き、人工知能技術により損傷評価を行うプロセスを構築し、実橋での検証も行った（氏家、全、浅本、楠本が担当）。なお、供試体の作成については株式会社愛橋、および株式会社キノに外注し、測定については株式会社ロイヤルコンサルタントに外注を行っている。また、性能評価のための指標を提案した。それらの結果、実際に点検業務で活用するためには、適用条件の検討をより深める必要があるものの、計測結果から損傷の状況を把握できることが見いだせた。

橋梁3次元形状復元については、SfM技術を用いて復元し、またそこにひび割れをプロットする技術の構築、および実橋での検証を行った（氏家、全、楠本が担当）。また、性能評価のための指標を提案した。その結果、同手法についても撮影条件などのさらなる検討が求められるが、着実に復元できることを示すことができた。

## ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

FS評価で指摘を受けた事項：

- ① 従来の点検方法と比べて、どれだけのコスト削減が見込まれるかを検証する必要がある。  
→簡易移動式足場の活用に最も適している桁下高4m以上、有効幅員3m以上5.5m未満の橋梁は、例えば高知県内には14%存在する。これらの橋梁の点検コストが、作業効率の低下を加味しても、7割程度に削減できると計算している。
- ② 人工知能ベース損傷評価支援システム及び橋梁三次元マッピングシステムについて、システムの原理や精度などを分かりやすく整理していただきたい。  
→今年度の研究成果として報告されている。
- ③ 人工知能ベース損傷評価支援システム及び橋梁三次元マッピングシステムについて市町村職員が理解して実際に現場で使えるようにまとめる必要がある。  
→仁淀川市の市役所職員に使用していただき、容易に利用可能であることを確認している。
- ④ 人工知能ベース損傷評価支援システムに用いる実データとして、使用材料などの地方性を意識して収集していただきたい。  
→四国地域で散見されるアルカリ骨材反応を想定し、データ収集を行っている。
- ⑤ 橋梁三次元マッピングシステムについて、実際に市町村職員による実証を行っていただきたい。  
→③と同様に、仁淀川市の市役所職員に使用していただき、容易に利用可能であることを確認した。
- ⑥ 研究成果を円滑に実装に結び付ける観点から、現行法令等に基づく道路橋の点検・診断・記録のプロセスの中で、本技術がどのように活用できるのかを明確にした上で、研究すべき事項を設定する必要がある。

→本研究で開発する手法は、損傷程度の評価や対応の適否の評価、記録を補助・支援することを想定している。

中間評価で指摘を受けた事項：

① AIによる結果、そのロジックが現象理解と一致しているのか、データが少ないことによる不確実性も含めた検証が必要である。

→各種試験について現象理解とデータについての関係性の考察を行った。また、不確実性の評価方法として、二乗平均平方根誤差および $R^2$ 値を用いる方法論を提示した。

② 損傷や劣化が自動検出できた例だけでなく、検出できなかったケースのデータも蓄積し、より実際に使えるシステムを開発していただきたい。

→特にASRについては適切な検出結果とならなかった例も多く、そのようなデータは蓄積されつつある。その原因の考察や新たな実験の追加を通して、より効果的なシステムの構築を今後行っていく。

③ 小さな市町村には専門技術者がいない場合もあり、そのような自治体でも使えるユーザーフレンドリーなシステムとしていただきたい。

→本システムの利用については、最初に講習すれば専門的知識が必要な場面は存在せず、専門性の有無は大きく関連しないものとなっている。

④ AIについて、適用の限界等を明らかにしたうえで、利用上の留意事項を明確にしていきたい。

→適用範囲についてはあくまでも実験を行った条件の範囲内であり、その範囲外の結果については参考にならないというのが留意事項として挙げられるが、例えばかぶり厚など、実橋梁を想定した範囲の実験を行っている。

⑤ 自治体職員自身が提案するシステムを用いて全工程を点検できている事例を紹介していただきたい。

→FS評価③と共通するが、仁淀川市の市役所職員による実証を行った。

⑥ ひびわれ自動検出の精度を評価する方法論を明らかにしていただきたい。

→検出結果の信頼性の解釈指標として感度、適合率、特異度、F値、正解率という指標を提示した。また、ひび割れ幅についても、画素幅に着目し、正解との誤差を指標として提示した。

⑦ 実際の作業を想定した継続的な改良が必要である。

→今後も、実際のユースケースを想定した上で継続的な改良を行う計画である。特にH31で改訂された橋梁定期点検要領に沿ったものとする。

## ③研究成果

本研究は、①簡易移動式足場と、②人工知能ベース損傷評価支援システム、③橋梁3次元画像マッピングシステムの3項目を複合させた、市町村の狭小橋梁に適した点検支援システムの開発を目標とした。それぞれについて以下に研究の成果を述べる。

### 1. 簡易移動式足場

#### 【簡易移動式足場のニーズと設計】

簡易移動式足場について、香川・高知労働局との協議、および道路管理者・点検業者・工事業者からのヒアリングをもとに、以下の表1.1のように要求性能を定め、また達成することができた。最終的な構造を図1.1に示す。

表1.1 簡易移動式足場の要求性能

<p>労働局との協議結果に基づく要求性能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 移動時は作業員を乗せることは不可。</li> <li>② 構造上は吊り足場でなく「足場」として安全衛生規則を満足すればよい。</li> <li>③ 実橋実験の了承であり、当該足場に対する認可ではない。</li> </ul>
<p>道路管理者等ヒアリング結果に基づく要求性能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>④ 狭小幅員橋梁（有効幅員4m以下）において点検時の通行止めを回避できる。</li> <li>⑤ 容易に運搬、架設、移動が可能である。</li> <li>⑥ 歩道橋（人道橋）での使用が可能である。</li> </ul>

表1.1の中で市町村からのニーズが特に高かったのが、④の狭小幅員橋梁における通行止めの回避である。このため簡易移動式足場の開発により、通行止めがどの程度回避できるのかを調査した。表1.2に、高知県内の安芸市（海岸沿い）、香美市（平野部）、佐川町（山間部）の各市町が管理する全橋梁を対象とし、桁下高が不明な橋梁を除く1,033橋に対して簡易移動式足場が優位となる橋梁数を集計した結果を表1.2に示す。表より明らかなように、簡易移動式足場により点検時の通行止めが回避できる橋梁は、全橋梁の14.4%であり、点検機材が必要な橋梁に限定すると、63.7%で通行止めを回避できることが明らかとなった。簡易移動式足場により、点検時の通行止めが発生する橋梁の大部分で、通行止めを回避でき、市町村が重要視しているニーズに応えることができる。

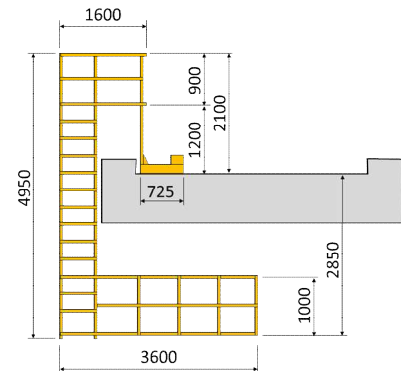


図1.1 簡易移動式足場の構造

表1.2 点検時の通行止めが回避できる橋梁の割合

桁下高	有効幅員	現在の点検方法	有効橋梁数				構成比	
			安芸市	香美市	佐川町	計	全橋梁	要機材
4.0m未満	-	地上/梯子	278	226	295	799	77.3	-
	3.0m未満	吊り足場等	34	8	9	51	4.9	21.8
	3.0m以上	橋梁点検車 (通行止め)	65	57	27	149	14.4	63.7
4.0m以上	5.5m未満	橋梁点検車 (片側交互)	7	16	11	34	3.3	14.5
	5.5m以上							
		計	384	307	342	1,033	100.0	-

## ⑧研究成果（つづき）

### 【実証実験】

簡易移動式足場については、高知県安芸市に架設されているシリグロ橋（安芸市管理、橋長15.7m、有効幅員4.0m、PC中空床版橋、桁高0.6m、写真1.1）において既に実橋検証も行っている。実橋検証では、2トン移動式クレーンで輸送・架設を行い、荷積みや架設性を検証した。また、実験には高知県および市町村（安芸市、土佐市、いの町）の維持管理担当職員も参加して頂き、実際に簡易移動式足場に搭乗して頂いた（写真1.2）。

実橋検証では、写真1.3、1.4のように模擬的な打音検査作業および非破壊検査（透気試験）を行い、作業性についても検証した。さらにコンクリート舗装面での移動性も検証した。実橋検証の結果、2トン移動式クレーンでの輸送と架設、点検作業（打音検査、非破壊試験）、足場の移動に大きな問題はなく、市町村の最も大きなニーズである「点検作業時の通行止めの低減」に大きく寄与できることが実橋においても検証された。

### 【研究成果と今後の活用、目標】

地方自治体が管理する1車線橋梁では迂回路がないものが多い。この場合には全面通行止めではなく、時間通行止め（50分間通行止め、10分間交通開放）を行っている。時間通行止めでは、橋梁点検車の据え付け・撤去にそれぞれ5分程度の時間が必要であり、実質的な点検作業時間は1時間の内40分程度である。簡易移動式足場の場合には、最初の据え付け時、最後の撤去時以外は常時交通開放することができ、点検や試験作業を中断することがない。

また点検作業以外にも、補修・補強設計に伴う寸法計測や鉄筋探査などの各種調査、地震発生直後の健全性確認などにも使用でき、実際に既に利用したい旨の打診を自治体やコンサルより受けている。

今後は、更に簡潔、短時間で用いることの出来る構造とすることを目標としている。



写真 1.1 有効幅員 4.0m



写真 1.2 実橋での設置状況

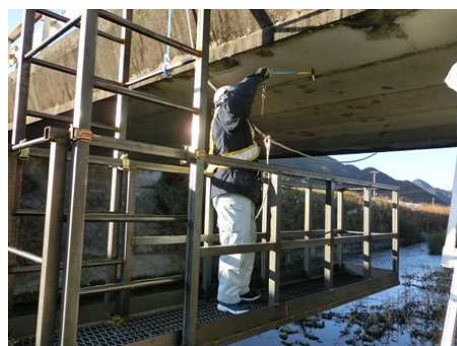


写真 1.3 打音検査の状況



写真 1.4 透気試験の状況

## ⑧研究成果（つづき）

### 2. 人工知能ベース損傷評価支援システム

本システムは市町村の狭小橋梁の点検において、前項で開発した簡易移動式足場を用いて近接できることを想定したうえで、複数の非破壊検査の計測結果や画像解析などにより、人工知能の枠組みで損傷やその進行状況を把握することを目標としている。具体的には、以下の2項目の研究を行っている。

(1) 非破壊試験+人工知能システムによる内部損傷評価

(2) 画像解析+人工知能システムによるひび割れ自動検出

それぞれについて以下で述べる。

#### (1) 非破壊試験+人工知能システムによる内部損傷評価

本研究ではまず、腐食、ASR、凍害による損傷が生じた際に、どのような非破壊検査結果が得られるか、水セメント比やかぶり厚が異なる小型供試体を作製し、そして損傷を促進させ検討した。行った非破壊試験は、透気試験、電気抵抗測定試験、表面形状測定試験、超音波試験、圧縮強度(コンクリートテスター)試験である。透気試験を例に、実験の様子を写真2.1に示す。



写真 2.1 透気試験

これらの計測結果から、腐食損傷やASR、凍害の進行度を評価するシステムを人工知能・機械学習の一手法であるRandom Forest法を用いて構築した。Random Forest法は教師データから訓練される多数の決定木の結果の平均値として、最終的な予測結果を求める手法である。

また同時に、結果の信頼性を評価するため、正解との二乗平均平方根誤差、および $R^2$ 値を指標とすることを提案した。

以下に、腐食損傷促進による発錆量を例とした結果を示す。図2.1は、電食試験の電流量より求める理論発錆量と、Random Forestにより非破壊試験結果から予測された発錆量を比較したものである。また、正解との二乗平均平方根誤差および $R^2$ 値は、それぞれ0.54、0.95である。

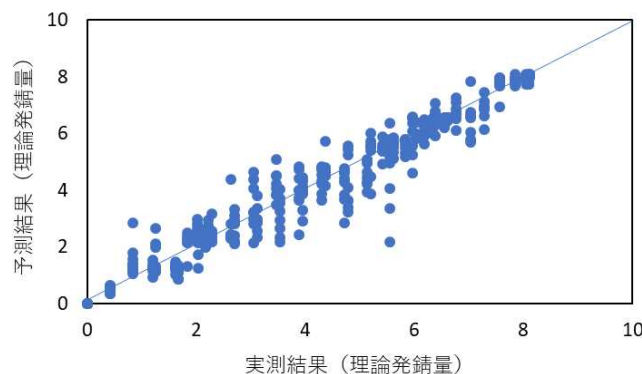


図2.1 理論発錆量予測結果



## ⑧研究成果（つづき）

また、高知県仁淀川市の橋長7.46m、幅員2.3mのRC中実床版橋（無名橋）において、本手法を用いた点検が市役所職員でも可能か、職員による実証試験を行った。橋梁の全体像を図2.2に、株式会社第一コンサルタンツにより点検された結果を図2.3に示す。



図2.2 高知県仁淀川市無名橋

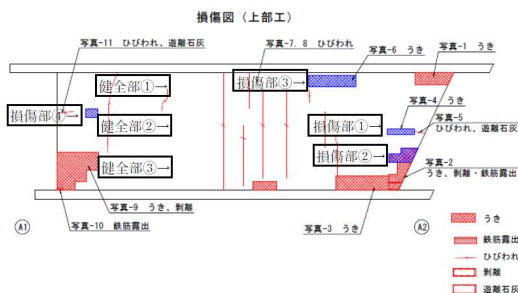


図2.3 近接目視点検結果

図2.3の中で、青色の斜線で示された部分は、外観ではうきの存在がわからなかった部分であるが、本手法により発見することができた。（表において損傷部①～④と記載）。うきは内部に空隙が生じているため、鉄筋腐食による損傷と同様の非破壊検査結果の傾向を示したと考えられる。また、健全部はうきが発生している部分とは有意な差があるものの、それぞれの中でも値が異なる。健全部③に比べて値が高い健全部①、②は損傷予備軍の可能性があると評価できる。

	理論発錆量
損傷部①	3.81
損傷部②	4.53
損傷部③	3.35
損傷部④	2.10
健全部①	1.68
健全部②	1.41
健全部③	0.42

表 2.1 損傷予測結果

### (2) 画像解析＋人工知能システムによるひび割れ自動検出

ひび割れは道路橋定期点検要領でも定められている重要な損傷指標であり、近接目視点検により位置、長さ、幅が記録・スケッチされている。しかし作業量が膨大であるという問題があるため、この解決のため、画像解析＋人工知能技術によりひび割れを自動検出する手法の開発を行った。また、検出結果の信頼性の解釈指標として感度、適合率、特異度、F値、正解率という指標を提示した。ひび割れを的確に検出するためには、近接して撮影された高画質の画像があることが望ましいが、1. で開発した簡易移動式足場はその要求を満たすことが可能である。

ひび割れ検出においては、汚れや型枠跡などのひび割れと誤認する要素が多く存在することが精度を下げる原因となっている。そこでまず、この数年注目されているディープラーニングの一種であるCNN (Convolutional Neural Network)を用いることで、そのような誤認識の要因となるような対象が写っている領域と、ひび割れが写っている領域を分類しスクリーニングする手法を開発した。

ディープラーニングによるスクリーニング結果の例を図2.4に示す。図2.4(a)は原画像、図2.4(b)はディープラーニングによる解析結果であり、ひび割れの存在する可能性が高いと評価された領域ほど濃く白色で抽出してある。図を見ると、既存手法では誤認識されていた型枠跡やPコン跡の部分はひび割れではない領域という解析結果となっており、つまり以降の解析においてこれらをひび割れと誤認識する可

### ⑧研究成果（つづき）

能性を大きく低下させている。

このようにスクリーニングをした後に、画素単位で解析を行い、着目画素がひび割れかどうかを判定するプログラムを構築する。非破壊検査結果による損傷評価の際にはRandom Forestを用いたが、本項でも用いることとする。Random Forestの入力は、着目画素の画像特徴量の集合である画像特徴量ベクトルとする。

ひび割れは周辺画素と比較して相対的に暗く、すなわち輝度値が低いことが多い。そこで本研究でも着目画素の輝度値を画像特徴量として用いるが、コンクリートの撮影画像は影や汚れなどひび割れ以外にも輝度値が低い要素が様々に存在しており、それだけの情報ではノイズや誤検出が多くなる。そこで本研究では、ひび割れ画素の隣接画素はやはりひび割れ画素であることも多いため、ひび割れ画素を中心とした領域内には暗い画素が多いということに着目し、着目画素の周辺画素の輝度値も特徴と考える。周辺画素の情報はGaussianフィルタの活用により得られるが、ひび割れは縦方向、横方向、斜め方向、といったように方向性を持つことが多いということも考慮し、一般的な正方形型フィルタだけではなく非正方形型のフィルタについても用いた。また、それに加え、図2.4(b)で求めたひび割れ可能性についても入力の画像特徴量ベクトルに含め、解析を行った。

学習の手法であるが、あらかじめ画像内のひび割れの画素を手作業で抽出しておく。そして画像内の画素に着目し、その着目画素がもつ上記の画像特徴量ベクトルと、ひび割れの幾何学的形状、着目画素がひび割れかひび割れでないかという分類との関係性をRandom Forestに学習させる。そうすることで、学習に用いていない新たな画像についても、構築したRandom Forestにより精度良くひび割れ判定ができるようになる。

図2.4で示した画像について、解析した結果を図2.5に示す。非常に良好に検出できている様子がわかる。この画像以外にも、様々な構造物や角度から撮影した画像の解析を行ったが、本研究で提示した指標によれば感度0.932、適合率0.641、特異度0.998、F値0.759、正解率0.999という結果が得られており、これらは同目的の他手法と比較して非常に高い性能の手法となっている。

### 3. 橋梁3次元画像マッピングシステム

本研究では、画像解析技術の一種であるStructure from Motion (SfM)の活用により橋梁3次元モデルを復元し、そこに2. の損傷評価結果をマッピングするシステムの開発を行った。加えて、3次元モデルの信頼性を評価するため、どの程度ひび割れが検出できたかという指標として、感度・適合率・F値による指標を提案した。また、ひび割れ長さ、幅の誤差による指標も提案した。そしてそれらの指標をもとに、本受託研究で構築した3次元モデルの評価を行った。

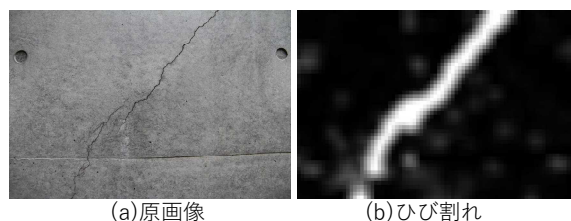


図 2.4 CNN によるひび割れ確率画像出力例



図 2.5 ひび割れ検出結果



### ⑧研究成果（つづき）

本研究では高知県のRC床版橋2橋を復元対象とした。以下に、高知県香美市の柿城橋（図3.1）を例に結果を示す。柿城橋は橋長7.1m、幅員3.4mのRC床版橋であり、床版にひび割れがあり、判定区分はⅡとされている。作成した3次元モデルを図3.2, 3.3に示す。また、点検台帳にある、床版裏面の損傷スケッチを図3.4に示す。スケッチ中には、ひび割れが19本、面的損傷が2箇所存在する。この中で、検出できたひび割れは12本、誤って検出されたひび割れは2本、表現できた面的損傷は2箇所、誤って表現された面的損傷は0箇所であった。



図 3.1 柿城橋全景

これを上記の指標に照らせば、ひび割れについては感度0.63、適合率0.86、F値0.73、面的損傷については感度1.0、適合率1.0、F値1.0である。このように、3次元復元手法を開発するとともに、その精度を評価できる指標を提示した。



図3.2 柿城橋3次元復元結果

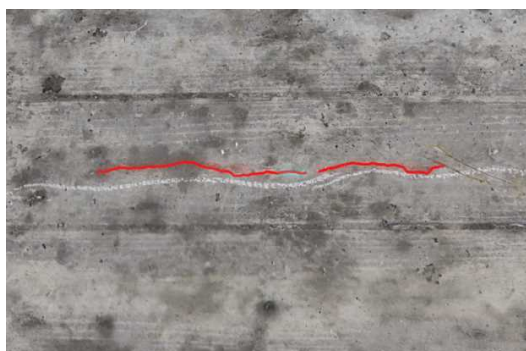


図3.3 柿城橋ひび割れ検出結果

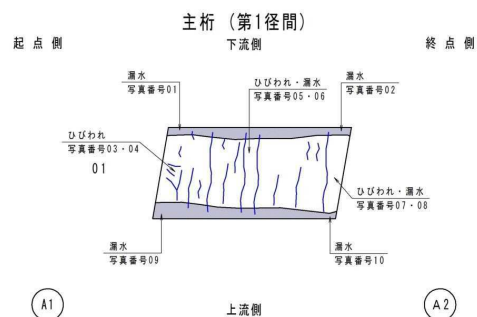


図3.4 柿城橋近接目視点検結果

#### ⑨研究成果の発表状況

- ・全 邦釘, 嶋本 ゆり, 大窪 和明, 三輪 知寛, 大賀 水田生: ディープラーニングおよび Random Forestによるコンクリートのひび割れ自動検出手法, 土木学会論文集F3, 73(2), I\_297-I\_307, 2017年

#### ⑩研究成果の社会への情報発信

- ・毎日新聞2017年6月24日、「愛媛大 AI、簡易足場…新技術で橋点検支援システム」

## ⑪研究の今後の課題・展望等

当初の研究で目指していた開発については概ね達成された。ただし、市町村での実用に向けたユースケースを考慮すると、解決すべき課題は残っている。以下に簡易移動式足場についての研究、人工知能による点検支援システムについての研究、橋梁3次元形状復元に関する研究の3項目についてそれぞれ示す。

①簡易移動式足場は、現状では組み立てに90分、撤去に30分必要である。現在、高速組み立て・撤去のための機構を開発しており、実現すればより効率的な点検が可能となる。また、アルミやFRP素材を用いれば軽量化や高強度化が見込めると考え、ユースケースを整理した上で新たな設計を行うことが課題である。

②人工知能による点検支援システムについては、計測結果を特徴量としてRandom Forest法により解釈し損傷の進行度を評価する手法を構築した。ただし、実際に活用することを考えた場合に、機器の価格などが問題となる。そこで、安価な計測器具により効果的な計測が出来るような手法の調査が求められる。

加えて、撮影画像から、ディープラーニングとRandom Forest法を活用したひび割れ自動検出手法の構築も行い、精度よい検出が出来ることを示した。

③橋梁3次元形状復元手法については、SfM技術を用いることで撮影写真から3次元モデルを構築することが可能となり、また②の手法と合わせひび割れ損傷をモデル内にプロットする手法の開発も行った。今後は、3次元モデル構築のための撮影条件のきめ細かな検討が求められる。

## ⑫研究成果の道路行政への反映

本研究で開発した簡易移動式足場は「1車線橋梁において橋梁点検車使用による点検時の通行止め」を回避するための1つの方向性を示したものであり、既存の橋梁点検車の使用を否定するものではない。しかし、新たな点検手段を提供することにより、橋梁の架設環境や交通量、経済性などを総合的に判断し、適切な点検手段を選択することができる。また点検作業以外にも、補修・補強設計に伴う寸法計測や鉄筋探査などの各種調査や、地震発生直後の健全性確認などにも使用できる。

人工知能による点検支援システム、ひび割れ検出手法は、近接目視点検における適切なサポート役となることが期待でき、点検精度の向上に繋がると期待できる。またこの手法で定期的に構造物を記録・解析すれば、損傷の進展を評価することも可能である。特に、道路橋定期点検要領の「5（1）部材単位の健全性の診断」「5（2）道路橋毎の健全性の診断」の支援を視野に入れている。

さらに、橋梁三次元復元手法により、検出された損傷の適切な取り扱いが可能となり、記録の高度化、低コスト化に寄与できる。本手法によれば、例えば室内でも現場にいるかのような臨場感を実現できるため、後日に室内で橋梁の目視点検を検証可能となったり、また次回点検時にも同様の復元を行うことで損傷の進行の有無を検出することもできる。さらに、周辺状況の記録が可能となり、損傷要因の推定にも寄与できる。加えて、損傷判定に困った場合には専門家の助言を仰ぐことも容易となる。

### ⑬自己評価

当初の研究で目指していた開発については概ね達成された。ただしユースケースを考慮すると、⑪で示したようにいくらか課題が残っており、今後、コスト低下や撮影条件のきめ細かな検討などに取り組む必要がある。

本研究で開発した簡易移動式足場は現段階においても既に（組み立て・撤去が高速化されれば更に）点検機材費の削減を図ることができる。また、人工知能による点検支援システム、および橋梁3次元形状復元手法については道路橋定期点検要領の「5（1）部材単位の健全性の診断」「5（2）道路橋毎の健全性の診断」「7記録」の支援となっており、今後の研究開発進捗にともない、道路政策に沿いながら高度化が達成できる。

橋梁の点検・診断にかかっている費用は非常に大きいことを踏まえると、本申請課題の研究費の投資価値は十分あったと評価している。