

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（FS研究対象）】

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）		大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 環境建設工学コース		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	公募 タイプ	タイプ I		
		[副領域]				
③研究経費（単位：万円）	平成28年度					
	920					
④研究者氏名						
氏名		所属・役職				
矢田部龍一		愛媛大学 教授 防災情報研究センター部門長				
全 邦釘		愛媛大学 准教授				
吉井 稔雄		愛媛大学 教授				
楠本 雅博		(株)第一コンサルタンツ 取締役 技術開発部長				
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指す。</p>						

⑥ F S 研究の結果

FS採択から本格採択に向けた条件として、新道路技術会議より以下の2点が提示されている。

1. 足場に関する研究はFS期間内に完了させること。
2. 診断システムの原理を明らかにすること。

それぞれについてのFS研究の結果を以下に述べる。また、新道路技術会議よりFS研究の課題としては提示されていないが、最初の研究計画で挙げている、

3. 画像解析によるひび割れ評価技術・橋梁3次元形状復元技術の開発による点検記録の高度化についても研究が進んでいる。これらそれぞれについて以下で述べる。

1. 簡易移動式足場

(1) 要求性能の整理

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実施した結果から、簡易移動式足場としての要求性能を表1.1とした。

表1.1 簡易移動式足場の要求性能

労働局との協議結果に基づく要求性能	
①	移動時は作業員を乗せることは不可。
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。
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。
道路管理者等ヒアリング結果に基づく要求性能	
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。
⑤	容易に運搬、架設、移動が可能である。
⑥	歩道橋(人道橋)での使用が可能である。

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。調査では、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橋に対して集計を行った。集計結果を表1.2に示す。表1.2は、本研究で開発する簡易移動式足場を使用することにより、橋梁点検車による点検時の通行止めを回避できる橋梁の割合を示したものである。

表1.2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。

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	-

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十分応えることができる。

(2) 足場の設計・製作

労働局との協議で「労働安全衛生規則に基づき、手摺りや転落防止リングなどの転落防止対策が必要」との指示があった。また、地覆に沿った梯子状の部材を昇降するためには、足を確実に差し込むための余裕が地覆側面と梯子との間に必要であり、最終構造の決定に反映した。

また、全体を立体ラーメン構造とすれば転落防止対策を部材剛性に活かせるうえ、ラーメン格点内を昇降・移動する構造とすれば利便性も高い。最終構造では橋梁縦断方向に梯子状のステップを設け、ステップにより簡易移動式足場の側面を昇降する形とした(図1.1~1.2)。

簡易移動式足場の転倒に対する安定性を確保するため、路側に所要重量を有するカウンターウェイトを設置するものとした。

そうして決定した図1.1~1.2の構造形式で立体骨組解析を行い、設計断面力を求めた。部材寸法はゴンドラ構造規定の許容応力度に基づき決定している。安定計算については足場の設置基準に基づき行っており、転倒に対する安全率 $F_s > 2.0$ を確保していることを確認している。なお、実験前の労働局協議においては、図1.1~1.2に示した図面で細部構造の説明を行い、実橋における検証実験実施の了承を得ている。

図1.3は立体骨組解析で作業足場先端に偏心荷重を載荷させた場合の変形図である。

写真1.1は、細部構造を確認するために作成した1/15縮尺模型である。

本FS研究で製作した簡易移動式足場は実験後の損傷状況確認のため塗装は行っていない。また、クレーン吊り下げ重量は253kg、カウンターウェイトを含む総重量は985kgであり、2トン移動式クレーンで運搬、架設する計画とした。

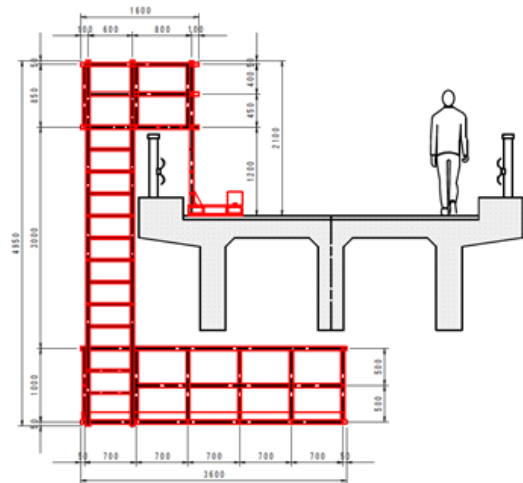


図 1.1 簡易移動式足場の構造

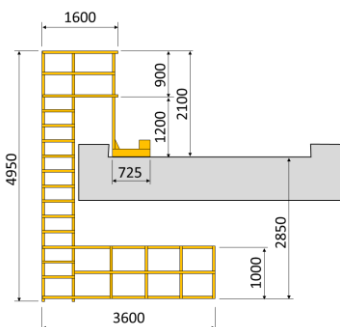


図 1.2 足場の代表寸法

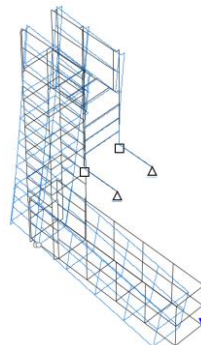


図 1.3 立体骨組解析



写真 1.1 1/15 縮尺模型

(3) 足場の実橋検証

【予備実験】

実橋検証に先立って、製作した簡易移動式足場の安全性・安定性を確認する目的で、工場敷地内での予備実験を実施した。

予備実験は工場の屋根部で実施したため移動式クレーンでの架設は困難である。5トン・クレーン車を用いた。なお、作業員の安全性を確保するため、クレーンからのスリングは保持したままとしているが、張力は開放している（写真1.2）。

予備実験の結果、作業員の昇降時に水平方向の揺れが発生することが確認された。簡易移動式足場は近接目視に対応するように作業足場を桁高に合わせて上下することができる。上下調整は図1.4に赤丸で示したクランプで行う。揺れの原因は各クランプ設置高さのばらつきによるものと推察された。このため、本実験に向け、クランプ設置高さを確実に合わせられるように改良（支持金具の設置等）した。

簡易移動式足場上での作業員の昇降および移動を行っても、水平方向の揺れ以外には、過大なたわみや振動は確認されず、実橋検証を実施しても安全性・安定性に問題はないと判断した。

また、パレットリフターによる簡易移動式足場の移動に関する実験も実施した（写真1.4）。敷き鉄板上での移動であったが非常にスムーズに行うことができた。

【実橋検証】

予備実験の結果を受けて水平方向の揺れを軽減するように改良した後、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）において実橋検証を実施した（次ページ写真1.5～1.7）。

なお労働局との協議に基づき、河床から作業足場までの高さが2.0m未満となる橋梁を選定している。

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 作業員の昇降



写真 1.3 作業員の移動



写真 1.4 足場の移動

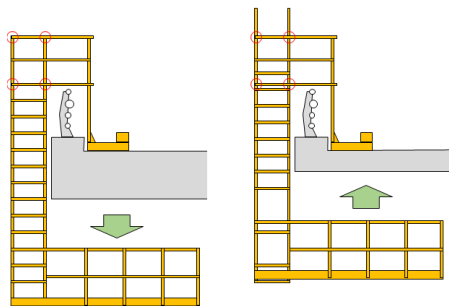


図 1.4 作業足場の高さ調整

本橋梁では作業足場から桁下までの高さが1.8mとなるように図1.4で示したクランプを固定した。実橋検証では水平方向の揺れは確認されなかった。

実橋検証では、写真1.7～1.8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、作業性に関しても検証した。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。

【研究の成果と今後の活用】

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。

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も多い。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や、地震発生直後の健全性確認などにも使用できる。

簡易移動式足場の社会実装には、架設作業の省力化・時間短縮や、添架物や路面勾配への対応など改良すべき点もあるが、今後有用な点検手段の一つとして簡易移動式足場の開発ができた。



写真 1.5 有効幅員 4.0m



写真 1.6 実橋での設置状況



写真 1.7 打音検査の状況



写真 1.8 透気試験の状況

2. 人工知能ベース損傷評価・診断支援システム

本システムは、様々な計測結果や橋梁諸元などの情報を人工知能の枠組みで評価し、損傷程度や補修補強等の対応の適否の評価を支援することを目標としている。一方でFS研究期間内では、本システムの原理を明らかにすることを求められている。FS研究の委託元の国土技術政策総合研究所の橋梁研究室と打ち合わせした結果、原理を明らかにすることはソースコードを公開することだというアドバイスを頂いた。それを踏まえソースコードは既に国総研側に提示済みであり、加えて最終報告書にも記載する。また、軸方向ひび割れなどが発生する前の段階で鉄筋腐食を評価するという課題に対して人工知能ベースシステムの適用可能性を検討し、有効性を示すことも大切というご意見を伺ったので、以下のように行った。

鉄筋腐食は鉄筋近傍のコンクリートに内部ひび割れを生じさせる。内部ひび割れはコンクリート表面を打撃した際の近傍点での振動や、コンクリートテスターやシュミットハンマーから得られる反発強度、透気係数などに影響を与えると考えられる。そこで本FS研究では写真2.1に示すように5.5mのRC梁を作成し、その半分は電食試験により腐食を促進させる一方で（図2.1）、残りの半分はエポキシで皮膜して（写真2.2）腐食しないようにすることで、鉄筋腐食が上述のパラメータに与える影響について調べた。なおRC梁は2体作成しており、以下A桁、B桁とする。



写真 2.1 電食試験・計測を行った RC 梁とその設置状況

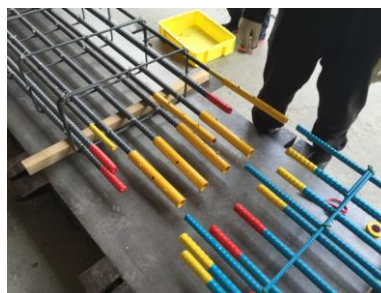


写真 2.2 エポキシ被膜した鉄筋

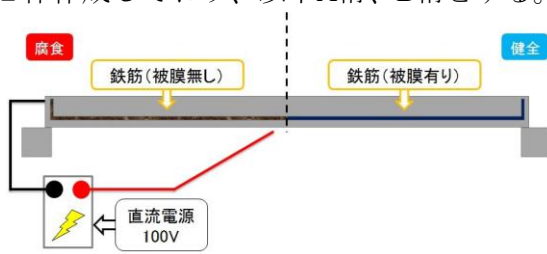


図 2.1 本研究の電食試験の模式図

電流を流し腐食を促進させていく過程で、梁の固有振動数、コンクリートテスターより得られる反発強度、打撃点近傍の振動の卓越振動数、透気係数、打撃点近傍の反発音がどのように変化するか調べた。その結果、腐食損傷に対して明確に相関があったのがコンクリートテスターより得られる反発強度、打撃点近傍の振動の卓越振動数、透気係数の3項目であった。なお反発強度についてはアイティエス社のコンクリートテスターCTS-02V4の結果を、卓越振動数は日本非破壊検査協会規格 NDIS 2426-2に従い得られた結果を、透気係数についてはトレント法による結果を用いた。次ページの図2.2に、反発強度および卓越振動数のコンター図を示す。

透気係数については、劣化進行に伴い表2.1のような結果が得られている。

表 2.1 劣化程度と透気係数の関係

コンクリートの劣化程度		透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)
表面損傷 なし	鉄筋腐食なし	10^{-3} オーダー
	鉄筋腐食あり	$10^{-2} \sim 10^0$ オーダー
表面損傷 あり	マイクロクラック	$10^0 \sim 10^1$ オーダー
	ひび割れ	$10^3 \sim 10^4$ オーダー

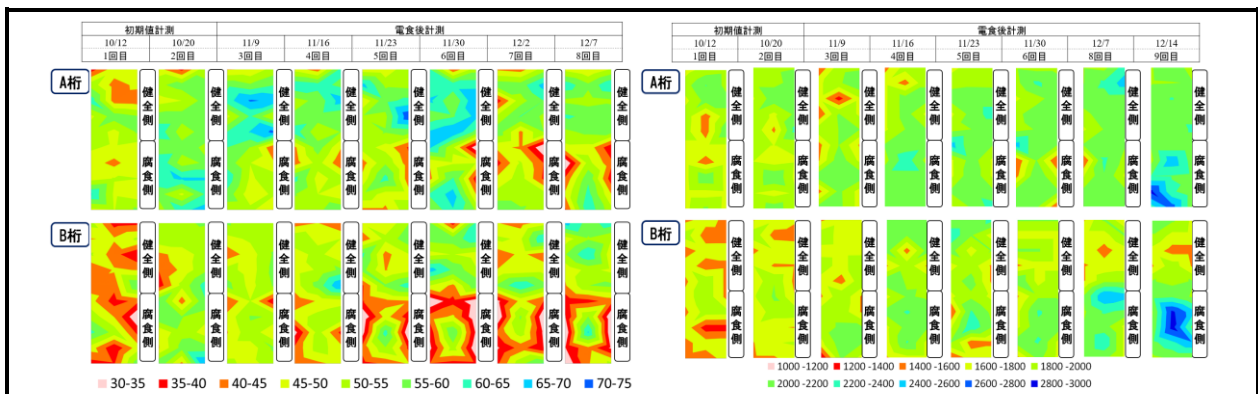


図 2.2 電食試験を行った梁に対する試験結果 (左図：コンクリートテスターによる圧縮強度分布 (単位:MPa)、右図：打撃点近傍で得られた振動の卓越振動数分布 (Hz))

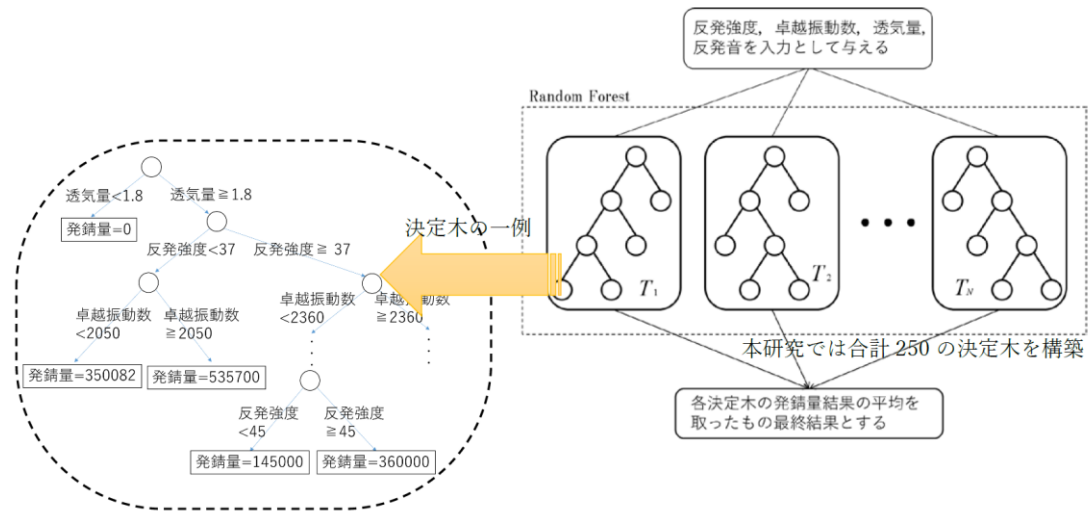


図 2.3 Random Forest法の概念図

これらの結果が得られたので、人工知能・機械学習の一手法であるRandom Forest法を用いて、鉄筋腐食評価システムを構築する。概念図を図2.3に示す。Random Forest法は教師データから訓練される多数の (ここでは250個の) 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。決定木とは図2.3の左に示すような、場合分けを繰り返して値を予測する手法であり、その場合分けルールはCART法というアルゴリズムに従い教師データから学習して作られる。Random Forest法は計算コストの割に非常に精度が良いことが知られている。

特にここでは、得られた試験結果を入力として、電食試験の電流量から評価できる腐食量を求めるRandom Forestを学習・構築した。判定結果を次ページの図2.4に示すが、概ね良好であることがわかる。入力と出力の組み合わせを適切に与えて学習をすれば精度があがるRandom Forestは様々な用途で用いることが可能であり、本格研究では損傷位置や周辺環境、交通量、損傷進行性などから対策要否判定も行う計画である。また、次項で説明するひび割れ自動検出でもRandom Forestを用いた解析を行っている。

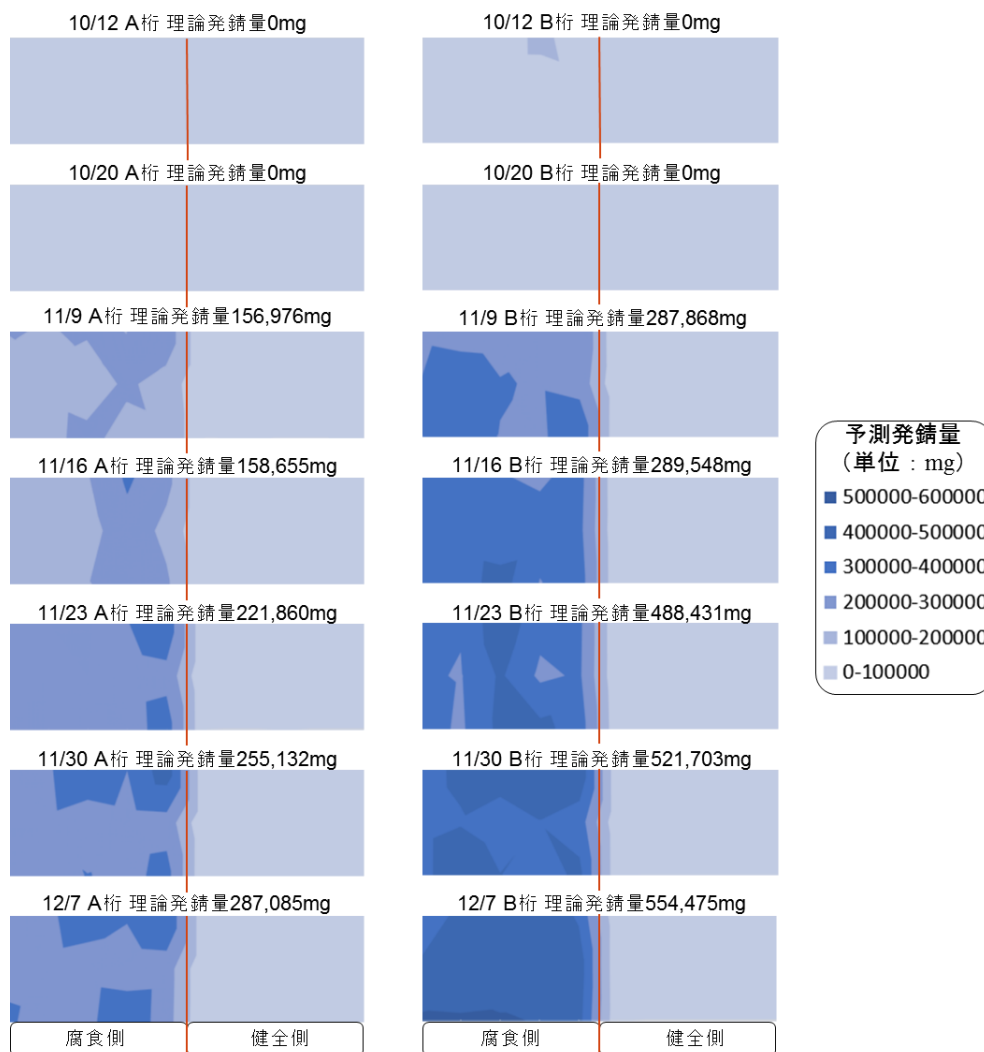


図 2.4 人工知能ベースシステムによる損傷評価結果

また、実橋（高知県安芸市、北芝線 1 号橋）でうきの検出可能性についても調べている。まず J-BEC において橋梁点検・診断を担当していた点検技術者に、うきがどの範囲に存在するか手作業で調査をしていただいた。次いで、打音試験によって発生する音を記録し、フーリエ解析を行った。技術者がうきと判定した部位については平均 1911Hz、うきと判定していない部分は平均 1121Hz という周波数が得られており、この両者は t 検定によれば有意に差があることが示されている ($p < 0.01$)。現在はデータがやや少ないが、今後データを増やすことで、同様に人工知能ベースの枠組みで判定が可能になると想定している。

3. 画像解析によるひび割れ評価技術・橋梁3次元形状復元技術の開発による点検記録の高度化

本研究では、画像解析技術の活用により橋梁3次元モデルを復元し、そこに損傷をマッピングするシステムの開発を行う。全体像を以下の図3.1に示す。

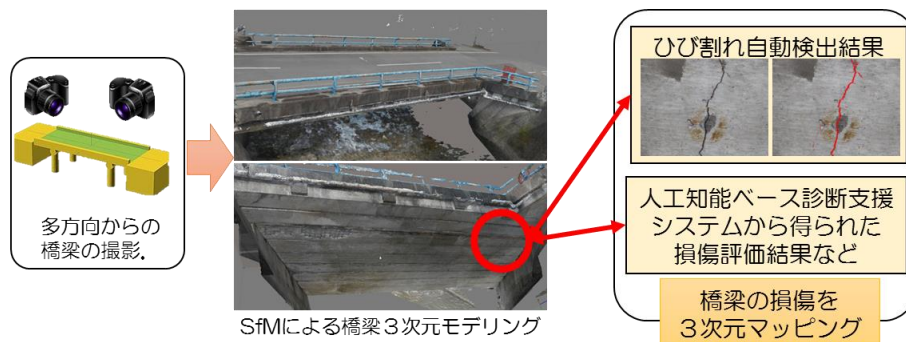


図 3.1 橋梁3次元マッピング

上記の全体像を実現するには橋梁の3次元モデリング（図3.1中央）と、ひび割れ自動検出手法の開発が必須となる（図3.1右上）。それぞれ近接して撮影した高い画質の画像があることが望ましいが、(1)で開発する簡易移動式足場はその要求を満たすことが可能である。

撮影画像から画像解析によりひび割れを検出する手法について、進捗を以下に述べる。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、これらが画像解析により自動検出できれば、作業量が大幅に低下し、市町村の点検支援となる。本FS研究では、周辺の画素値や線状の要素の有無などの情報を入力、ひび割れの有無を出力として、図2.3に示したRandom Forestを学習しひび割れ自動検出モデルのプロトタイプの構築を行った。それによるひび割れ自動検出結果の例を以下の図3.2に示す。精度よくひび割れを検出できている様子がわかる。また、毎回の点検でこの評価を行えばひび割れの経時的進展なども評価可能となり、診断の支援となる。

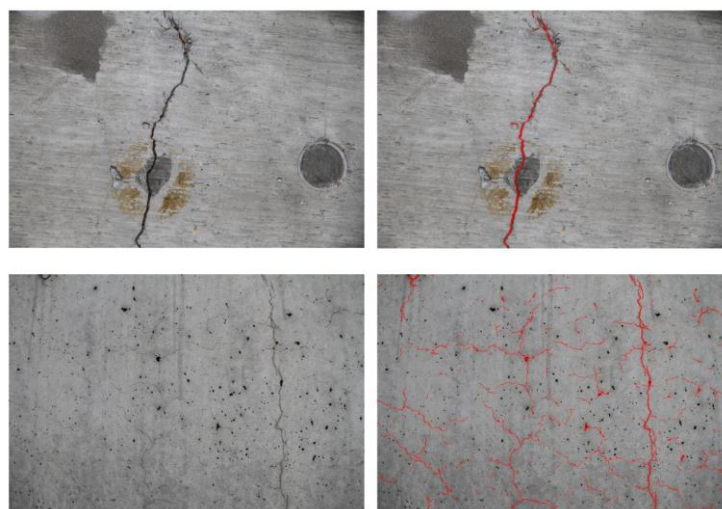


図 3.2 画像解析によるひび割れ自動検出結果

さらに、図 3.1 中央に示した橋梁 3 次元マッピング手法についてもプロトタイプの開発は完了している。あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの 3 次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である **Structure from Motion (SfM)** という技術を用いている。図 3.3 に一例を示す。この手法と上述のひび割れ検出手法、ここまでの損傷マッピング手法を組み合わせることで、現行の記録手法よりも高度な記録手法となると考えている。

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。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。



図 3.3 橋梁 3 次元復元結果

⑦本格研究の見通し

本研究の構成を整理すると、①簡易移動式足場の開発、②人工知能ベース損傷評価・診断支援システムの開発、③画像解析によるひび割れ評価技術・橋梁3次元形状復元技術の開発による点検記録の高度化、に分けることが出来る。

① 簡易移動式足場の開発

開発は既に完成して実証試験も終えており、新道路技術会議より提示されていた条件を満たしている。本研究により狭小幅員橋梁に用途を絞った簡易足場の有効性、必要性を示すことができた。成果の活用方法としては、開発目的とした「橋梁点検車による点検時の通行止めの回避」以外にも、時間通行止めによる点検・試験作業の中断回避、補修・補強設計時の諸元調査、地震発生直後の健全性確認などが想定される。

② 人工知能ベース損傷評価・診断支援システムの開発

新道路技術会議より原理を示すようにという指示を受けていた。本FS研究では入力と出力の関係を与えて人工知能ベースシステムの一つであるRandom Forestを学習させれば、精度のよい評価結果が得られることを、鉄筋の内部腐食評価を例に示すことが出来た。本格研究では、損傷の位置や環境条件などについても入力として与えることで、損傷の程度だけでなく補修の必要性など対応の適否についても人工知能ベースシステムの枠組みで評価し、診断を支援することを目指す。本格研究の進捗のためには点検調書などのデータ収集が必要となるが、四国地整の協力によりほぼ終えている。成果の活用方法であるが、FS研究で行った鉄筋腐食の検出は、道路橋定期点検要領の「5（1）部材単位の健全性の診断」の支援となる。また、本格研究での成果は道路橋定期点検要領の「5（2）道路橋毎の健全性の診断」の支援となるようなものにする計画である。

③ 画像解析によるひび割れ評価技術・橋梁3次元形状復元技術の開発による点検記録の高度化

新道路技術会議より特に何も条件は提示されていなかったが、前項のように既にプロトタイプ作成まで終えており、本格研究の期間内で問題なく達成できる見込みである。成果の活用方法であるが、道路橋定期点検要領の「7記録」が大きく高度化する。

例えば室内でも現場にいるかのような臨場感の実現や現状の綿密な記録を可能とする。これにより後日室内でも橋梁の目視点検を検証可能となり、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、要領で定められているような限定的な範囲の写真ではなく周辺状況の記録が可能となるため、損傷要因の推定などに役立つ。加えて、必要に応じて専門家の助言を仰ぐことも容易となるため、市町村管理の橋梁を対象とした維持管理ツールとして非常に有用である。

さらに今後の展開としては、図面の復元や三次元FEMモデルへの変換も視野に入り、性能評価などについても活用可能である。またバーチャルリアリティ（VR）や拡張現実（AR）による点検・補修計画の策定などにも将来的に活用できると考えられる。

⑧特記事項

FS採択から本格採択に向けた条件として新道路技術会議より提示されていた簡易移動式足場の研究の完成と、人工知能ベースシステムの原理を明らかにすることという課題については達成することが出来たと自己評価している。更に、本格採択のための条件として求められていなかった画像解析によるひび割れ評価技術と橋梁三次元形状復元技術についてもプロトタイプは完成しており、当初目標以上の進捗状態となっている。

簡易移動式足場や人工知能ベースシステムについては、昨年12月に高知県内で実施した実橋検証には、本研究がターゲットとしている高知県や、安芸市、土佐市、いの町などの地方自治体の維持管理担当職員も参加して頂き、「是非使ってみたい」との意見を頂いた。また、「橋梁までの道路に建築限界があり橋梁点検車が通行できない」、「通行止め時間に一般車両が来ると通行させざるを得ず、作業が思うように進まない」など、当初想定外の意見ではあったが、簡易移動式足場の有用性を向上させる、新たな活用方法の提案に関する意見も頂いた。

さらに、新たなアプリケーションとして、「人工知能ベースシステムを使用して、損傷程度の定量的な評価はできないか」、「損傷が顕在化する前に、損傷発生の可能性を把握することはできないか」などを先方より提案されるなど市町村のニーズを掘り起こすインパクトのある研究であった。

画像解析によるひび割れ評価技術と橋梁三次元形状復元技術については、四国地整や愛媛県および高知県、市町村職員、建設コンサルタントの技術者などから、そのプロトタイプについて既に高評価を得ており、実用化に至るスケジュールの問い合わせを受けるなど期待が高い。

特に現在の点検調書では原則として損傷が発生している箇所の画像しか記録されないため、点検調書に記録のない箇所は、損傷がなかったのか、損傷を見落としているのか、点検者が記録の必要のない損傷と判断したのか識別できない。また、損傷箇所のみ画像では損傷発生原因を推定することが困難な場合がある。現状の点検要領に付加して、橋梁全体の三次元画像で記録することにより、橋梁維持管理の質を飛躍的に向上できる。