

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成 果 報 告 レ ポ ー ト No. 28-9

研究テーマ

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

研究代表者:愛媛大学教授	氏家勲
共同研究者:愛媛大学特命教授	矢田部 龍一
東京大学特任准教授	全 邦釘
愛媛大学教授	吉井 稔雄
株式会社第一コンサルタンツ	楠本雅博
埼玉大学准教授	浅本 晋吾

令和元年七月

新道路技術会議

目 次

研究概要(様式3を挿入)3
第1章 はじめに
1. 1 研究の目的5
1. 2 研究の概要
第2章 簡易移動式足場の開発
2. 1 概要
2. 2 要求性能の整理
2. 3 市町村ニーズの把握
2.4 足場の設計・製作
2.5 実証実験
2. 6 研究成果の今後の活用14
第3章 人工知能ベース損傷評価システム15
3. 1 概要15
3. 2 非破壊試験+人工知能システムによる内部損傷評価手法
3. 3 画像解析+人工知能システムによるひび割れ自動検出手法
3. 4 研究成果の今後の活用40
第4章 橋梁三次元マッピングシステム 42
4. 1 概要
4. 2 適用範囲、結果解釈の信頼性指標およびその算出方法42
4.3 実橋での検証
4. 4 研究成果の今後の活用
第5章 まとめ
5. 1 まとめ・今後の課題、展望48
5. 2 研究成果の道路行政への反映

# 【様式3】

# 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成28年度採択) 研究概要

番号	研究課題名	研究代表者	
No. 28-9	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	愛媛大学 教授 氏家 勲	

市町村の狭小橋梁の点検・診断の支援を実現するため、簡易移動式足場、人工知能による点検 支援システム、橋梁3次元形状復元手法の開発を研究目的として、足場の設計およびプロトタイ プ作製、人工知能学習のためのデータ収集、人工知能・画像解析ベースのシステム構築を実施す る研究開発。

#### 1. 研究の背景・目的

平成26年から全国70万橋の橋梁で5年毎の近接目視点検が実施されている。しかし、多くの 市町村が管理する狭小幅員橋梁(有効幅員4m以下)においては、橋梁点検車使用時に通行止めが 発生すること、点検を実施しても損傷の評価や対応の要否評価が難しいことが課題として顕在化 している。

本研究は、市町村の狭小橋梁の点検において、点検時の通行止めを伴わない簡易な移動式足場 を開発し、また、透気試験や表面形状測定試験、超音波試験、圧縮強度(コンクリートテスター) 試験や、画像解析などにより人工知能の枠組みで損傷の程度や進行性や対応の適否を評価する手 法、および三次元画像モデルとして復元された橋梁に損傷をマッピングする技術を用いて点検を 支援するシステムを開発し、その迅速化、高機能化の提案を行うことを目的とした。

#### 2. 研究内容

#### 1) 簡易移動式足場の開発

簡易移動式足場に必要な性能を把握するため、既存足場の問題点や課題、安全性や作業性の面 で必要とする性能について、道路管理者・点検業者・工事業者に対してヒアリングを実施した。 また、簡易移動式足場上で作業を行うにあたり、安全衛生法で要求される機能・措置を整理し、 これらの結果を要求性能として取りまとめた。また、その要求性能に基づき、簡易移動式足場の 設計及び製作を、構造計算をもとに行った。

2) 人工知能ベース損傷評価支援システム

供試体に人工的に損傷を与えた上で、損傷箇所および健全箇所において非破壊試験を行い、非 破壊試験結果と損傷の程度の関係性を調査し、調査結果から得られた関係性を人工知能手法によ りコンピュータに学習させることにより、コンピュータが非破壊試験結果から損傷を判定するこ とが出来る手法を開発した。加えて、人工知能手法および画像解析手法の活用により、コンクリ ートのひび割れを自動で検出する手法の開発も行った。

3) 橋梁三次元マッピングシステムの開発

撮影画像を橋梁の三次元データにマッピングし、コンピュータ内に擬似的に三次元モデルを再現した上で、再現した三次元モデルに 2)で得られる損傷をマッピング出来るシステムを、 Structure from Motion(SfM)技術をもとに開発した。

#### 3. 研究成果

1) 簡易移動式足場

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要求性能を定め、それを 満たす構造の設計を行った(図1)。また、高知県安芸市に架設されているシ リグロ橋において既に実橋検証も行った(図2)。実橋検証では、作業性およ びコンクリート舗装面での移動性、安全性の検証を行った。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」に寄与できることが実橋においても検証 された。

2) 人工知能ベース損傷評価支援システム

本システムは、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指した。まず、 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、損傷を促進 させた小型供試体を作製し検討した。これらの計測結果から、損傷の進 行度を評価するシステムを人工知能技術の一手法である Random Forest 法を用いて構築した。図3は腐食損傷予測の例であり、正解との二乗平 均平方根誤差および R<sup>2</sup>値は、それぞれ 0.54、0.95 という性能が得られ ている。

また、コンクリートからひび割れを自動検出するシステム の構築も行った。本手法についても画像解析に Random Forest 法を組み合わせて解析する。検出例を図4に示す。ま た、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) 橋梁三次元マッピングシステムの開発

本研究では、画像解析技術の一種である SfM の活用により橋梁 3 次元モデルを復元し、そこに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、ひび割れ検出の指標として、感度・適合率・F 値による指標を提案した。

図5に、本手法の適用例として高知県香美市の柿城橋の復元結果を示す。 下図はひび割れ検出結果を3次元モデルにプロットしたものを拡大表示し たものである。また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という精度で復元ができている。

# 4. 主な発表論文

・<u>全</u>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

# 5. 今後の展望

簡易移動式足場、人工知能による点検システム、橋梁3次元復元手法、それぞれについて目標 としていた成果は得られたが、今後の活用のためには低コスト化および適用条件・撮影条件の精 緻化が求められる。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与

簡易移動式足場は点検時の通行止めを回避するための1つの新たな選択肢を示したものであ り、橋梁の架設環境などを総合的に判断した上での、点検手段の選択の幅を広げる。人工知能に よる点検支援システムは、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。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、例えば室内でも点検を検証可能であり、また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。

7. ホームページ等

該当なし

図2 実証試験の様子





図4 ひび割れ検出結果



図 5 柿城橋復元結果

# 第1章 はじめに

#### 1.1 研究の目的

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。

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、透 気量や電気抵抗、表面形状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のひび割れを自動検出する 手法,および3次元形状として復元する手法につい 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。

#### 1.2 研究の概要

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。 それぞれについて以下に研究の概要を述べる。

#### (1) 簡易移動式足場

簡易移動式足場に必要な性能を把握するため、既 存足場の問題点や課題、安全性や作業性の面で必要 とする性能について、道路管理者・点検業者・工事 業者に対してヒアリングを実施した。また、簡易移 動式足場上で作業を行うにあたり、安全衛生法で要 求される機能・措置を整理し、これらの結果を要求 性能として取りまとめた。また、その要求性能に基 づき、簡易移動式足場の設計及び製作を、構造計算 をもとに行った。

また、高知県安芸市に架設されているシリグロ橋 において、作業性およびコンクリート舗装面での移 動性、安全性を確認するために、実橋検証も行った。

#### (2) 人工知能ベース損傷評価支援システム

本システムは、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指した。まず、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、損傷を促進させた小型供試体を作製し検討した。 これらの計測結果から、損傷の進行度を評価するシ ステムを人工知能技術の一手法である Random Forest法を用いて構築した。

また、コンクリートからひび割れを自動検出する システムの構築も行った。本手法は、Deep learning とRandom Forest法を組み合わせて解析を行う手法 であり、既存の手法と比較して高い検出性能を発揮 することを確認することができた。

### (3) 橋梁三次元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。また、高知県、愛媛県の合 計4橋のRC床版橋で実証試験を行った。

# 第2章 簡易移動式足場の開発

#### 2.1 概要

平成24年12月の笹子トンネル天井板崩落事故を受けて、平成26年6月に道路橋定期点検要領が発行され、 全国70万橋で5年に1度の近接目視による定期点検が 実施されている。

全橋を対象とした点検の実施に伴い、特に地方自 治体が実施する橋梁点検ではいくつかの問題・課題 が顕在化している。特に、点検手法に関する課題と して、下記の事項がある。

点検要領では、近接目視点検が要求されて おり、点検機材を用する橋梁数が増大した。 地方自治体が管理する橋梁の6割程度が有 効幅員4m以下の1車線橋梁であり、橋梁点検 車を使用すると通行止めが発生、地域住民・ 橋梁利用者への影響が大きい。

このため、地方自治体が管理する1車線橋梁 に着目し、点検あるいは維持管理時の通行止め を解消もしくは低減する機材として、「移動式 吊り足場」の研究・開発を行ったものである。

#### 2.2 要求性能の整理

移動式吊り足場に要求される性能を把握す るため、道路管理者、点検業者、工事業者に対 してヒアリングを実施し、本研究開発で考慮す べき事項をまとめた。

ヒアリングの結果、検討すべき事項として取 り上げた事項を表2.1に示す。また、ヒアリング 結果および発注者との打ち合わせ結果に基づ き、図2.1に示す構造形式とした。

表 2.1 ヒアリングで得られた意見

対象者	ヒアリング内容
道路管理者 (宿毛市)	・半島を周回する道路を通行止めにする と、反対側から迂回するために時間がか かり、通行止めは避けたい。緊急車両の 到着時間の遅延が懸念される。
道路管理者 (香美市)	・吊り足場は点検機材費が高い。点検作 業費よりも機材費の方が高い場合があ る。また、点検は1日で終わるのに、設 置・撤去で2日必要。
道路管理者 (安芸市)	・山間部の橋梁では有効幅員が 4.0m 程 度のものが多い。交通量が少ないため、 通行止めもやむを得ないが、可能であれ ば通行止めは避けたい。
道路管理者 (安芸市)	・維持管理で使用している車両は、主と して軽の1BOXと、軽トラックであ る。山間部の道路では3m強の道路がほ とんどであり、普通車では維持管理にな らない。
工事業者	・足場については、現場で取り扱いが簡 単でないと使えない。アルミは衝撃や変 形に弱いと聞いている。
工事業者	・アルミ製やFRP製は曲げ応力が作用 する場合には、あまり軽量化できないの ではないだろうか。



図2.1 検討した構造形式(第1次案)

図2.1に示した構造形式の特徴を下に示す。

- 吊り足場設置時にも、橋面上を開放できるように、橋面部材はハンプ構造とし、ハンプ上を車両が通行する。
- ② 作業員の昇降時の安全性を確保するため、昇 降施設はラーメン構造とし、格子上の部材の 内部を作業員が昇降する。
- ③ 作業足場も昇降施設と同様にラーメン構造と することにより、全体剛性を向上させ、部材 寸法の縮小、軽量化を図った。

移動式吊り足場を作業現場で使用するためには、 労働安全衛生規則を満足する必要がある。

このため、まず高知労働基準協会連合会と打ち合わせを行った後、香川労働局 労働基準部 健康安 全課との協議を行った。

協議結果の概要を表2.2に示す。

表2.2 労働局との協議内容

高知県労働基準協会連合会
<ul> <li>・吊り足場上に作業員を搭乗させた状態で装置を 移動させることはダメだと判断する。</li> <li>・吊り足場よりも足場(棚足場)に該当すると思われる。</li> </ul>
香川労働局 労働基準部 健康安全課
<ul> <li>・構造上は吊り足場でなく「足場」として安衛規則</li> <li>を満足すればよい。(高所作業車にも該当しない)</li> <li>・移動時は作業員を乗せることは不可と思われる。</li> <li>・実証実験時には事前に管轄の監督署と協議する。</li> </ul>

上記協議結果より、足場移動時には作業員を搭乗 させることはできないことが明らかとなった。この ため、足場移動時には作業員は足場から橋面に退去 するものとした。

構造計算および図面作成を実施後、実橋ので検証 実験を行うために、実験場所の管轄である高知労働 局との協議を行った。

表2.3	高知労	「働局との協	議内容
高知労働	局 労	働基準部	健康安全課

- ・作業員搭乗時の判断(作業員が搭乗した状態での 足場の移動は不可)については香川労働局の判断 通り。
- 「吊り足場」との記載であるが「吊り構造」はなく名称は不適切。
- ハンプ(踏み板)上を車両が走行することに対して懸念がある。十分な検討が必要ではないか

高知労働局の意見に基づき、ハンプ上を車両が走 行する場合の安全性について検討を行った。 ハンプ上の走行時に安全性が確保されるために は、底面全面が路面に接していることが重要である。 しかし、本簡易移動式足場が対象とする市町村管理 の狭小幅員橋梁においては、路面にわだち掘れや流 動化、コンクリート舗装の剥離部など不陸がある橋 梁が多い。路面の凹部に敷設されたハンプ上に輪荷 重が載荷されると、ハンプの変形が作業足場に揺れ として伝達され、搭乗する作業員の安全性・作業性 が大きく低下すると予測される。

このため、支持構造を再検討し「移動台車構造(片 持ち支持)」を採用した。移動台車は、転倒に対する 安全率を確保できるように、カウンターウェイトを 兼ねるものとした。

移動台車の採用により、車道部の有効幅員は減少 するが、簡易移動式足場としての性能を確保するた めにはやむを得ないと判断した。



最終案とした「簡易移動式足場」では、カウンタ ーウェイトと台車に分離するものとした。

台車としてはパレットリフターを採用し、パレッ トリフターを使用できるように、台車の断面をパレ ット形状とした。このパレット部にカウンターウェ イトを設置、転倒モーメントに抵抗する構造とした。 高知労働局との最終協議内容を表 2.4 に示す。

トノノ	別内し	~~ HX // <	VI/J HAX I	1 VII.	2 2	2.7	(-)1.	)	0

表2.4 局知労働局との協議内容	
高知労働局 労働基準部 健康安全課	
・実橋における検証実験については了承する。	) 
<ul> <li>ただし、実橋実験の了承であり、当該足場に る認可ではない。</li> </ul>	対す

#### 2.3 市町村ニーズの把握

市町村のニーズを把握するために、代表的な市町 が管理する橋梁において、簡易移動式足場がどの程 度活用できるのかを検討した。

検討に使用した橋梁は、高知県安芸市(384橋)、高知県香美市(307橋)、高知県高岡郡佐川町(342橋)が管理する全1,033橋である。この3市町を選定した理由は、安芸市(海沿い)、香美市(平野部)、

佐川町(山間部)であり、合算することにより平均 的なデータが得られると考えられるためである。

簡易移動式足場の適用性は幅員による。1,033 橋の 幅員構成比を図 2.3 に示す。幅員 4m 未満の橋梁は全 体の 58%である。



狭小幅員橋梁では、桁下高が低く、地上あるいは 梯子で点検が可能な橋梁も多い。

そこで、簡易移動式足場の適用性を把握するため には、桁下高を考慮した幅員構成比が必要である。

表 2.5 に簡易移動式足場を使用することにより、 点検時の通行止めを回避できると推定される橋梁比 率を示す。

表 2.5	通行止めが回避	でき	る橋梁の割合
~ ~			

松下古	古地栖昌	現在の		有効権	構成比			
11] ["mai	有劝悃良	点検方法	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	65	57	27	140	14.4	62
4.0m以上	5.5m未満	(通行止め)	05	51	21	143	14.4	05.
	5.5ml 2 -	橋梁点検車	7	16	11	34	33	14.5
	5.5111XI	(片側交互)	,	10	11	54	5.5	14.5
		計	384	307	342	1,033	100.0	-

表 2.5 では、桁下高が 4m 未満の橋梁では、地上ま たは梯子からの点検が可能であり、通行止めは発生 しないため除外した。

また、有効幅員が 3m 未満の橋梁では点検車は使 用できず、全面吊り足場となる場合が多い。全面吊 り足場は経済性に劣るが、通行止めは発生しないた め除外した。

さらに、有効幅員が 5.5m 以上の橋梁では、片側交 互通行規制が可能であり、通行止めは発生しないた め除外した。

上記より、簡易移動式足場を使用することにより、 点検時の通行止めが回避できる橋梁の割合は全橋梁 の14.4%であり、点検機材が必要な橋梁に限定する と63.7%であることが明かとなった。

以上の検討結果を踏まえて決定した簡易移動式足 場の代表寸法を図 2.4 に示す。

また、設定寸法に基づき、1/15 縮尺模型を製作し、

細部構造や架設方法の検討を行った。製作した 1/15 縮尺模型を写真 2.1 に示す。





写真 2.1 製作した 1/15 縮尺模型

#### 2.4 足場の設計・製作

【強

参 考

図書

(1) 適用基準と参考図書

労働局との協議結果より、設計は足場の労働安全 衛生規則に準拠して行った。

ただし、設計計算に関する具体的な記載がない事 項に関しては、労働安全衛生法で規定されている類 似の規則を準用し、規則でも記載がない事項に関し ては、該当する構造に必要な性能を満足することが できる基準(例えば、道路橋示方法等)を参考とし て適用した。

- X -	
分類	適用した基準または参考した図書
海田	【総 論】労働安全衛生規則 第十章 通路、足場等
基準	【安定性】高所作業車構造規格

度】ゴンドラ構造規格

足場·型枠支保工設計指針(仮設工業会)

道路橋示方書等(日本道路協会)

表 2.6 適用した基準と参考した図書

- (2) 設計条件
- 1) 手摺り及び支柱

労働安全衛生規則に従い、手摺り及び支柱の設置 条件は下記とする。

表 2.7 手摺り及び支柱の設置・設計条件

- 手すりの設計荷重は上段の手すり位置に鉛 直方向 0.59kN/m、水平方向 0.39kN/m を 載荷する。
- 支柱の設置間隔は200cm以下とする。
- ③ 上段手すり高さは 85cm 以上とする。
- ④ 中段手すり高さは 35~50cm とする。
- ⑤ 作業面の幅木高さは 10cm 以上とする。

#### 2) 安定性の照査

安定性照査に関して、労働安全衛生法 足場等に 具体的な事例がない。

本足場は、片持ち支持構造であり、構造形態としては「高所作業車」に類似する。「高所作業車構造規格」では、最も不利な載荷状態において安全率1.3以上とする旨が記載されている。

なお、一般社団法人 仮設工業会編(2014)「足場・ 型枠支保工設計指針」では、風荷重作用時の足場の 転倒に対する安定性についての検討として、安全率 2.0以上とする旨が記載されている。

簡易移動式足場では、安全側として「足場・型枠 支保工設計指針」に記載のある安全率 2.0 以上を確 保するものとした。

表 2.8 転倒に対する安定性の照査

 $F_{s} = \frac{M_{s}}{M_{o}} \ge 2.0$ ここに、 $F_{s}$ :転倒に対する安全率  $M_{s}$ :抵抗モーメント  $M_{o}$ :転倒モーメント (最も不利な載荷状態)

#### 3) 強度計算

強度計算に関して、労働安全衛生法 足場等に具 体的な事例がない。

簡易移動式足場の作業床は、上部から鋼材により 吊り下げられており、足場の形態は「ゴンドラ」に 類似するため、「ゴンドラ構造規格」に準拠して強度 計算を行う。

ゴンドラ構造規格には、許容応力度の算定式が示 されており、この式を準用した(第一章 第二節許 容応力)。 (3) 設計および製作

前記の設計条件を元に、三次元骨組み解析により 断面力を算出し、許容応力度法により応力度の照査 を行った。



#### 2.5 実証実験

(1) 予備実験

実橋での検証実験を行うに先立って、製作した簡 易移動式足場の安全性および安定性を検証する目的 で、平成28年12月7日に予備実験を実施した。

実験は、株式会社高知丸高の協力を頂き、同社の 根曳重機工場(高知県高知市宍崎字カマガ谷336号) で実施した。なお、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。

また、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。

#### 荷積み・輸送

製作した簡易移動式足場は、2 トン移動式クレーン(ロング)に荷積み、輸送した。使用した車両の 諸元を表 2.9 に示す。



写真 2.2 2 トン移動式トラックへの荷積み状況

積載荷重	2,000 kg	荷台長	3,650 mm
車両全長	6,080 mm	荷台幅	1,790 mm
車両全高	1,930 mm	床面高	1,010 mm

表 2.9 使用した車両の諸元

2) 工場の屋根部への架設

屋根上への移動式トラックの乗り入れは不可であ り、予備実験では5トンクレーンを使用した。



写真 2.3 5トンクレーンによる架設

3) 架設完了時の状況

クレーンから吊り下げたスリングは撤去せず、張 力のみを開放している。



写真 2.4 架設完了時の状況

4) 作業員の昇降試験 作業員の昇降に当たっては、安全ブロック による転落防止対策を行った。



写真 2.5 作業員の昇降試験

5) 昇降部下での載荷状況

安定性で最も不利となる載荷状態(設計上は最外 縁に載荷)での確認。



写真 2.6 安定性で最も不利となる載荷状態

6) 作業足場先端での載荷状況

強度上で最も不利となる載荷状態(設計上は最先 端に載荷)での確認。



写真 2.7 強度上で最も不利となる載荷状態

# 7) 足場の移動

工場内では敷き鉄板上の移動としたが、非常にスムーズに移動できた。



写真 2.8 パレットリフターによる足場の移動状態

#### 8) 予備実験の総括

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。 足場の上下調整は図 2.6 に赤丸で示した箇所に設 置したクランプで行う。揺れの原因はクランプ設置 高さのばらつきによる支柱引っ張り力の不均等によ 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を 行った。



図 2.6 クランプ接合位置

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。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。

なお、カウンターウェイトは架設時のクレーン吊 り下げ重量を軽減し、作業性を上げるため、基部の パレット部と、ウェイト本体(鉄の塊)に分離した。 このため、パレット部の上面に円柱状の突起を2箇 所設け、カウンターウェイトの下面に円柱状の孔を 設けて、これらを噛み合わせることにより、作業時・ 移動時のズレ留めとなっている。

#### (2) 実橋実験

平成 28 年 12 月 16 日、高知県安芸市の実橋梁 (シリ グロ橋) において、検証実験を実施した。実験実施 場所を図 2.7 に示す。 実橋検証を実施したシリグ ロ橋の橋梁諸元を表 2.10 に、架設状況写真を写真 2.9、 2.10 に示す。

実験橋梁の選定に当たっては、高知労働局と協議 を行い、足場架設時に作業足場の高さが河床より 2.0m 未満となる橋梁とした。

また、実験実施前に道路管理者である安芸市、河 川管理者である高知県安芸土木事務所と打合せを行 った上で、交通規制に関しては安芸警察署に道路使 用届けを提出、了承を得た。



図 2.7 実橋での検証実験場所

表 2.10 橋梁諸元

橋梁名	シリグロ橋	
管理者	高知県安芸市	
交差物件	河川(帯谷川)	
橋長、幅員	橋長 15.7m、有効幅員 4.0m	
上部工形式	PC 中空床版橋	



写真 2.9 実験橋の橋面(有効幅員 4.0m)



写真 2.10 実験橋の側面(橋長 15.7m)

## 1) 荷積み・輸送

荷積みおよび輸送は、予備実験と同じ2トン移動 式クレーン(ロング)で実施したが、荷姿を変更し、 トラック走行時の安定性を考慮した。



写真 2.11 簡易移動式足場の荷姿

2) 支持装置およびカウンターウェイトの設置 橋面の所定位置に支持装置およびカウンターウェ イトを設置した。



写真 2.12 カウンターウェイトの設置

3) 移動式足場の組み立て

橋面上において、2 トン移動式クレーンを用いて、 移動式足場を組み立てた。



写真 2.13 移動式足場の組み立て

4) 桁側面への吊り下げ

2 トン移動式クレーンを用いて、移動式足場を桁 側面へ吊り下げた。



写真 2.14 移動式足場の吊り下げ

# 5) 桁下への回し込み

桁側面に吊り下げた移動式足場を回転させ、桁下 へ吊り込み、支持装置と連結した。



写真 2.15 移動式足場の桁下への回し込み

6) 移動式足場の固定

パレットリフターを下げ、支持装置を路面に接地、 移動式足場を固定した。



写真 2.16 移動式足場の固定

# 7) 作業員の昇降試験

県市町の維持管理担当者に実際に移動式足場に搭 乗してもらった。



写真 2.17 作業員の昇降試験

- 8) スリングの撤去
- 安全性が確認できたため、安全対策として設置し ていたスリングを撤去した。



写真 2.18 スリングの撤去

9) 近接目視·打音検査

移動式足場を用いて、近接目視・打音検査を実施 し、作業性を確認した。



写真 2.19 近接目視·打音試験

10) 非破壊試験の試行

移動式足場を用いて、非破壊試験(透気試験)を 試行した。



写真 2.20 非破壊試験の試行

#### 11) 足場の移動試験

予備実験では鉄板上の移動であったが、現場では コンクリート舗装面に直接足場を据え付け、パレッ トリフターで浮上、移動させた。



写真 2.21 パレットリフターによる移動

(3) 検証結果

製作した足場を実橋梁で使用して得られ た知見から、要求性能を検証した。

1) 労働局との協議結果に基づく要求性能

(1)	移動時は作業員が搭乗できないため、	昇降
	時の安全が確保されること。	

当初は作業員を搭乗させた状態で足場を移動させ る計画であったが、協議結果に基づき、移動時には 作業員を搭乗させないものとした。このため、作業 員は足場の移動の度に昇降を行う必要があり、昇降 に伴う安全性の確保を行った。

通常、昇降に伴う安全確保としては、梯子に転落 防止リングを設置する。製作した足場では、昇降部 をラーメン構造とし、作業者はラーメン構造の内部 を昇降するため、転落に対する安全性が確保されて いる。

2) ヒアリング結果に基づく要求性能

$\bigcirc$	狭小幅員橋梁(桁下高 4m 以上、有効幅員
	3m 以上 5.5m 未満) において点検時の通行
	止めを回避できること。
2	容易に運搬、架設、移動が可能である。

実橋実験で使用した橋梁は有効幅員が 4.0m である。架設時(設置および撤去時)には通行止めが必要であるが、点検作業中は足場移動時を含め、通行止めが回避できることが確認できた。

実験時の足場設置時間は1時間30分、撤去時間 は30分であり、合計2時間の通行止めとなった。 橋梁点検車を用いた場合には通常6時間(9:00~ 12:00、13:00~16:00)の通行止めとなるため、通行 止めの時間を1/3に短縮できたことになる。なお、 足場の設置に関しては、架設作業手順の見直しによ り45分程度まで短縮できる。

製作した足場は、2トン移動式クレーン車1台 で、運搬および架設が可能であることが確認でき た。

また、足場の移動方法としてパレットリフターを 使用した。実験橋の橋面は、やや劣化したコンクリ ート舗装であり、多少の起伏があったが、人力で容 易に移動できることが確認できた。

(1)	橋梁桁下の近接目視点検が可能であるこ
	と。
2	足場の最大積載重量は 100kg 以下であるこ
	と。

製作した足場は、部材連結位置を変えることによ り、橋面から作業足場までの高さを変更でき、現行 法令に基づく近接目視点検が可能であることが確認 できた。

実橋実験では、最大積載重量に近い作業員2名に よる非破壊試験を行った。最大積載重量の範囲であ れば、2名まで問題なく搭乗することができること が確認できた。

実橋検証の結果、表 2.8 の要求性能が満足されて いることが確認され、2 トン移動式クレーンでの運 搬と架設、点検作業(打音検査、非破壊試験)、足場の 移動に問題は確認されず、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 寄与できることが検証された。

#### 2.6 研究成果の今後の活用

本研究開発では、設計・製作・実験までを約4ケ月 という短期間で実施せざるを得なかった。このため、 実橋実験で得られた知見により足場構造等を改良す ることができなかった。

このため、本研究開発で得られた知見を元に足場 構造の変更を行い、自主的に試作品を製作した。

最も大きな改良点としては、実橋での施工性が悪 かった点を考慮し、現場連結を最小限とし、本体は ピン連結として、全体を折りたたみ構造とした点で ある。

図2.8に概略構造を、写真2.21に工場内での折りた たみ試験の状況を示す。足場の展開および折りたた みに要する時間は約1分であった。

今後、折りたたみ構造を採用することにより、施 工性に優れた足場を開発することができると考えら れる。





写真 2.21 工場内での折りたたみ試験

# 第3章 人工知能ベース損傷評価システム

#### 3.1 概要

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 傷評価手法
- (2) 画像解析+人工知能システムによるひび割れ 自動検出手法
- それぞれについて以下で述べる。

# 3.2 非破壊試験+人工知能システムによる内 部損傷評価手法

#### (1) 概要

本研究では、内部鉄筋の腐食、アルカリシリカ反応(ASR)、凍害による損傷について、軸方向ひび割 れや錆汁、ASRに特徴的な亀甲状ひび割れなど外部 に損傷が表出する前に、非破壊試験結果を人工知能 の枠組みで解釈することで、評価することのできる システムの構築を目指す。

本節ではまず、本研究で行った非破壊試験につい て報告する。ここでは540mmのRC供試体を作成し、 鉄筋腐食、ASR、凍害について損傷を促進させた。 これらの損傷が生じた際に、どのような非破壊試験 結果が得られるか、水セメント比、かぶり厚をパラ メータとして整理した。なお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、圧縮強度試験の5種類である。

次いで、得られたデータをもとにRandom Forest法

<sup>1)-3</sup>により学習し、非破壊試験結果から損傷の程度を 評価する人工知能モデルを構築した。その性能を交 差検証法で評価するとともに、実橋梁においても確 認を行い、目視では表出していなかった損傷の検出 を行うこともできた。

以下に、これらの詳細について述べる。

#### (2) 供試体の非破壊試験によるデータ蓄積

#### 供試体概要

本節では、非破壊試験の測定結果を人工知能シス テムで解釈することでRC桁の損傷を検出できるか、 水セメント比・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、先程の指標の検証を行 った。

コンクリート橋において、損傷の被害を受けやす い主桁部を模擬したRCはり供試体を作製した。本研 究では図3.1に示すような120mm×120mm,長さは 540mmの正方形断面を有するRCはりで、水セメント 比40%、50%、60%、70%の4種類を作成し,実験を行 っている。主鉄筋としては長さ570mmのD-16をかぶ り20mm、40mmの位置で配置し、両端20mmずつは み出させ直線定着とした。そして打設後、28日間気 中養生を行った。



配合比を表3.1に示す。なおASRを発生させる供試体 には反応促進のためにガラスカレットを練りこんで いる。

			Unit amount (kg/m <sup>3</sup> )						
Water cement ratio(%)	Compressive strength(N/mm <sup>2</sup> )	W	С	S1	S2	S3	Gl	G2	AD
40	FC61	180	449	482	234	108	464	476	4.50
50	FC49	177	346	560	270	122	450	460	2.78
60	FC56	178	296	606	294	132	428	440	2.38
70	FC36	179	259	636	308	140	420	430	2.08

表3.1 小型供試体コンクリート配合比

· 損傷促進試験

本節ではRC供試体の鉄筋腐食や凍結融解、ASRに よる損傷と非破壊試験の測定結果の関係を得ること を目的として行った実験の概要を示す。

#### 鉄筋腐食促進試験

鉄筋腐食による損傷を与える供試体については、 損傷の進展が各パラメータに与える影響をとらえる ため、電食試験などを行いながら段階的に各パラメ ータを計測する。なお、非破壊試験実施時に供試体 内部の水分を同一条件にするため各促進試験で乾燥 期間を設けている。

電食試験では供試体内部の鉄筋腐食を促進させるため、供試体の主鉄筋に電食を施した。電流制御が可能な直流安定化電源には、GW Instek社のGPS-2303(図3.2)を使用した。仕様上の出力電圧・電流は0~30V、0~3Aである。



図3.2 直流安定化電源 GPS-2303

促進試験の様子を図3.3に、電食装置の概要を図3.9に 示す。電食試験では水を入れた断面200mm×900mm、 奥行2750mmの水槽内にステンレス板を敷き、その上 に供試体を設置した。そして、ステンレス板と直流 安定化電源の陰極をリード線で接続し、供試体内部 の主鉄筋から出ているリード線を同電源の陽極に接 続し、0.2Aの直流電流を印加した。これは事前に行 った予備実験に基づき決定した。48時間通電し、そ して120時間室温20℃で乾燥させ各パラメータの測 定を行った。以降48時間通電、120時間室温20℃で乾燥を供試体表面にひび割れが発生するまで繰り返し行った。



図3.3供試体の電食試験の様子



また、電流量から理論発錆量についても算出でき る。鉄筋腐食を促進させるための電食は電気分解の

る。鉄筋腐長を促進させるための電長は電気分解の 原理を活用しており、内部鉄筋の理論発錆量 $\omega$ は、電 気量Q、電気化学当量Kより、式(3.1)に示すファラデ 一の電気分解の法則によって求められる<sup>46</sup>。なお、 電気化学当量は金属ごとに異なり、鉄の電気化学当 量は0.289mg/Cである。

$$\omega = KQ \tag{3.1}$$

#### <u>ASR促進試験</u>

本試験は、ASRを促進し、内部ひび割れを生じさせることを目的として実施した。かぶりを20mm及び40mmとした供試体を2つに分けてASRを促進させるために、1775×800×450mmの水槽を2つ用意した。初

めの2回は供試体に直接水道水を浸漬させないため に、養生マット及びラップで前処理後に温度40℃の 水道水に浸漬させた。図3.5に養生マット及びラップ で前処理した実験状況を示す。2回目以降は60℃の 1mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液中に前処理を行わ ずに供試体を浸漬させた。これは、ASRが生じるた めには適当量のアルカリが必要となるためである。 以下に実験手順を示す。各水槽に水酸化ナトリウム 水溶液を底面から1500mmの高さまで入れ、投込み湯 沸器PIPE HEATER(株式会社加島)で60℃まで温度 を上げる。温度の調整後、供試体を各水槽にかぶり 毎に分けて静置する。その後、各水槽に蓋をし、密 閉する。図3.6に試験の実施状況、図3.7にASR試験の 概要図を、図3.8にフローチャートを示す。なお、各 種非破壊試験は20℃一定の恒温室にて実施した。



図3.5 養生マット・ラップで前処理をした状況



図3.6 ASR促進試験の様子



#### 凍結融解試験

本研究では既往の研究<sup>8)</sup>に基づき液体窒素を用い てRC供試体に対し凍結融解試験を行った。液体窒素 を用いることにより、JIS規格試験と劣化のメカニズ ムは異なるが、表層部の劣化を短いサイクル数で確 認することができる。

実験の概要を図3.9に示す。凍結融解試験では、ま ずRC供試体を24時間水道水に浸け内部を満たして から行った(図3.10)。断面500mm×435mm、奥行 830mmの容器に供試体を入れ、直接供試体に2分間液 体窒素を吹き付け、2分間密閉し表面を十分に凍結さ せた(図3.11)。その後40℃の温水に5分間浸し解凍 (図3.12)を行った。この手順を1サイクルとし、3サ イクルごとに各試験の必要に応じ48時間室温20℃で 乾燥させ計測を行った。以降、2分間凍結、2分間密 閉、5分間解凍、3サイクルごとに48時間室温20℃で 乾燥、各非破壊試験、24時間水に浸けるという繰り 返しを供試体に目視で損傷が確認できるまで行った。





図3.10 水道水に浸漬された供試体



図3.11 凍結融解試験実施状況



図3.12 温水による供試体の解凍

# · 非破壞試験

本節では、非破壊試験手法およびその結果につい て述べる。前述のように、本研究では透気試験、電 気抵抗測定試験、表面形状測定試験(小型供試体の み)、超音波試験、圧縮強度試験を、損傷検出のため に提案している。

図3.13に測定点を、またそれに従いマーキングした供試体について図3.14に示す。以下では、それぞれの試験概要および結果を述べる。





図3.14 測定点のマーキングを施した供試体

#### 透気試験の原理および実験方法

コンクリートの密実性を非破壊で評価する試験方 法として、透気試験が挙げられる。また、透気試験 により評価されるかぶりコンクリートの透気性はコ ンクリートの密実性と強い相関を持つことが知られ ている。透気試験は電食試験およびASR促進試験の 場合は乾燥期間の5日目、凍害融解試験の場合は乾燥 期間の2日目に行った。

本研究で使用したトレント法<sup>9</sup>は、二重構造をもつ チャンバーによって空気を吸入し透気係数を算出す るものである。図3.15に二重チャンバーの仕組みに ついて示す。

図に示したように、二重構造のチャンバーのうち 外部チャンバーが内部チャンバーの圧力変化に伴い バランスをとることで、内部チャンバーは外側から 流入する空気に影響されることなく測定面に対して 直角に進むように制御された空気を吸入することが できる。



図3.15 二重チャンバーの仕組み

本研究では、Proceq製のPermea-TORRを使用した。 Permea-TORRは、現場でかぶりコンクリートの空気 透過性を迅速、かつ非破壊で計測することができ、 再現性および信頼性のある方法である。スイス規格 方式による測定結果では、塩化物イオンの移動、中 性化、二酸化炭素に対する透過度、キャピラリー吸 収、水密性などの他のコンクリートにおける耐久性 に関連する指標と相関があると報告されている。以 下の式(3.2)より透気係数を、式(3.3)より影響深さを 算出する。

$$kT = \left(\frac{v_C}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \qquad (3.2)$$
$$L \approx 1000 \left(\frac{2kTP_a t_f}{\varepsilon \mu}\right)^{1/2} \qquad (3.3)$$

ここで、

kT:空気透過度係数(m<sup>2</sup>)

Vc: 内部セルの容積(m3)

A:内部セルの断面積(m<sup>2</sup>)

μ:空気の粘性係数(=2.0×10<sup>-5</sup>N・sec/m<sup>2</sup>)

ε:かぶりの空隙量(=0.15)

 $P_a$ : 大気圧(N/m<sup>2</sup>)

 $\Delta P_{ieff}$ : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m<sup>2</sup>)  $t_f$ : 試験終了時時間(s)  $t_0$ : 試験開始時間(s)(=60s)

L:試験により影響を受けた概略深さ(mm)

図3.16に透気試験の実験、計測状況を示す。



図3.16 透気試験の実験状況

また、透気係数は含水比と密接な関係にあるため、 透気試験の直前にコンクリート供試体の含水率を測 定している。例えば豊水状態にある場合は空気が通 らず、絶乾状態にある場合は空気が非常に通りやす いため、透気係数を評価する際には含水率も同時に 評価することが必要となる。水分計には、株式会社 Kett科学研究所のコンクリート・モルタル水分計HI-520を使用した。その様子を図3.17に示す。また含水 率測定の際、供試体の表面状態によって測定値が異 なるため、供試体1体に対して3カ所測定を行った。 HI-520は、本体とセンサー部を一体化したハンディ タイプの高周波式水分計であり、モルタル、コンク リートの水分による誘電率(高周波容量)の変化を検 出することで水分を測定する方法を用いている。厚 さ、温度に補正ダイヤルを設定し対象物に押し当て ることで、表面から40mmまでの平均水分量が測定で きる。含水率の測定範囲はコンクリートでは、0~ 12%、モルタルでは0~15%であり、測定精度はいずれ の場合でも±0.5%となっている。



図3.17 HI-520による水分量測定の様子



図3.18 理論発錆量と透気係数の関係

#### 鉄筋腐食促進時の透気試験結果

図3.18にかぶり、W/Cごとの供試体の透気係数と 発錆量の関係、図3.19に含水率と発錆量との関係を 示す。図3.18から、発錆量が多くなるに従い一部の 供試体では,損傷度が一定のしきい値を超えると透 気係数がはねあがる様子が見て取れる。また、図3.19 からは、含水率の変化率は経過日数が長くなるほど 一定値に収束していることが確認できる。



図3.19 理論発錆量と含水率の関係

#### ASR促進時の透気試験結果

図3.20にかぶり、W/Cごとの供試体の透気係数と ASR促進試験の促進日数との関係、図3.21に含水率 とASR促進試験の促進日数との関係を示す。図3.20 からは、透気係数とASR促進試験の促進日数との関 係は一部認められる。(W/C60%・かぶり20mm, W/C50%・かぶり40mm,W/C70%・かぶり40mmの ケース)。ただ、かぶり20mm、W/C70%のケースで は、一旦大幅に上昇してまた低下しているケースが あり、これは測定ミスの可能性がある。また、図3.21 からは、含水率は大きく変化していないことが確認 できる。今後、さらに促進日数を増やせば透気係数 は上昇すると想定される。



図3.20ASR促進試験日数と透気係数の関係

#### 凍結融解試験時の透気試験結果

図3.22にW/Cごとの供試体の透気係数と凍結融解 試験の繰り返し回数との関係、図3.23に含水率と凍 結融解試験の繰り返し回数との関係を示す。図3.22 からは、透気係数と凍結融解試験の繰り返し回数と の関係が認められる。もっとも関係がうすそうなか ぶり40mmのケースでも、透気係数が落ち着いた6サ イクル目あたりと比較すると、最終サイクルでは倍 になっている。また、図3.23からは、含水率は大き く変化していないことが確認できる。今後、さらに サイクル数を増やせば透気係数は上昇すると想定さ れる。



図3.21 ASR促進試験日数と含水比の関係



図3.22 凍結融解サイクル数と透気係数の関係



図3.23 凍結融解サイクル数と含水比の関係

電気抵抗測定試験の原理および実験手法

コンクリートの電気抵抗を測定することは、かぶ りコンクリートの緻密さや含水状態を把握する上で 有効である。コンクリートの電気抵抗は直接的に緻 密さや含水状態と関連しているということだけでな く、近年の研究では電気抵抗と塩化物イオンの拡散 係数との間にも相関関係があることが示されている <sup>10</sup>。

本研究では、電気抵抗を測定するため、図3.24に示 すProceq社のresipod(プローブ間隔:50mm)を使用し た。しかし、ASR用の供試体の経過日数0日と4日に おいて鉄筋の直上で測定した際、測定値が鉄筋に大 きく影響されることが認められた。そのため、ASR のそれ以降の試験、および電食試験や凍結融解試験 の測定値は鉄筋直上部を避けて測定した。測定値は 黒丸及び赤丸の各5回ずつ計10回測定した値の平均 とした。以下に電気抵抗計の概要を示す。レジポッ ドは、完全一体型の電気抵抗計であり、4点WENNER プローブ方式により完全非破壊でコンクリートの電 気抵抗を測定することができる。測定範囲は0~ 1,000kΩcmである。

図3.25に示す測定原理のように、外側のプローブ で電流を流し、そして内側のプローブの間で電圧差 を測定する。電流は細孔液体中のイオンによって流 れるので、促進試験での損傷により電気抵抗率が変 化すると考えられる。具体的には、損傷によりコン クリート表面付近にひび割れなどの新たな空隙が生 成され、電気抵抗率が増加するものと考えられる。 測定の様子を図3.26に示す。



図3.24 表面電気抵抗計 Resipod (Proceq社)



図3.25 表面電気抵抗の測定原理



図3.26 表面電気抵抗測定の様子(鉄筋直上計測)

#### 鉄筋腐食促進時の電気抵抗測定試験結果

図3.27にかぶり、W/Cごとの供試体の電気抵抗率 と発錆量の関係を示す。劣化と電気抵抗の関係は明 確となり、すべてのケースで電気抵抗の向上を確認 することができた。



#### ASR促進時の電気抵抗測定試験結果

図3.28にかぶり、W/Cごとの供試体の電気抵抗率 とASR促進試験日数との関係を示す。図3.28から、促 進日数10日から15日の間に大幅に上昇している 様子が確認できる。一方で、一旦向上した後は、少 し低下し収束していくが、このメカニズムについて は検討を進めているところである。



図3.28 ASR促進試験日数と電気抵抗の関係

凍結融解試験時の電気抵抗測定試験結果

図3.29にかぶり、W/Cごとの供試体の電気抵抗率 と凍結融解試験のサイクル数との関係を示す。図 3.29から、電食試験の場合と同様に、初期段階で大幅 に減少している様子は確認できるが、これは内在水 分量が変化しているためと考えられ、劣化を要因と するものではないと思われる。劣化を進めていき、 20サイクルあたりから電気抵抗率は増加傾向にあり、 これは損傷をとらえていると考えられる。



図3.29 凍結融解サイクル数と電気抵抗の関係

#### 表面形状測定試験の原理および実験手法

本研究では、表面形状から求められる算術平均粗 さの変化から、劣化の早期発見の可能性を検討した。 レーザー反射により表面形状を測定することで、近 接目視より小さい変化を発見することができると想 定している。測定にはKEYENCE社のLJ-V7300(図 3.30)を用いた。測定器の仕様は表3.2及び図3.31に示 す。本研究ではサンプリング周期を0.05sとして測定 を行った。



図3.30 表面形状測定機LJ-V7300 (KEYENCE社)

	基準距離	300mm	
	Z軸(i	高さ)	$\pm 145 \mathrm{mm}$
測定	V 曲	NEAR 側	110mm
範囲	範囲 (幅)	基準距離	180mm
		FAR 側	240mm
プロフ	ァイルデー	X 軸	200
2	夕間隔	(幅)	300µm
サンプリング周期			最速 16μs

表:	3.	2	LJ-	V7300	の仕様
----	----	---	-----	-------	-----



図3.31 LJ-V7300による表面形状測定範囲

表面形状変化の要因として、凍結融解では水分の 凍結による膨張、電食では腐食生成物による膨張、 ASR ではアルカリシリカゲルの吸水による膨張を 想定し、基準距離に供試体の測定箇所を合わせ測定 を行った。測定の様子を図 3.32 に示す。

対象物について、直線状に計測結果は得られる。 計測結果の例を図 3.33 に示す。劣化が進めばコンク リートは膨らみ、図 3.33 に見られる凹凸が大きくな ると考えられるため、凹凸を表現する一指標として JISB0601 に定義されている算術平均粗さを用いた。



図3.32 表面形状測定の様子



#### 鉄筋腐食促進時の表面形状測定試験結果

図3.34にかぶり、W/Cごとの供試体の算術平均粗 さと発錆量の関係を示す。図3.34から、途中で大幅 な変形をしているものがあるが、小さな穴のような ものが途中で出来てしまってそれを拾ってしまった というような原因と考えられ、本研究で調べたい劣 化を要因とするものではないと思われる。すなわ ち、現状では、劣化が進めば進むほど変形量が多く なるといった傾向は認められない。



図3.34 理論発錆量と算術平均粗さとの関係

#### ASR促進時の表面形状測定試験結果

図3.35にかぶり、W/Cごとの供試体の表面形状変化 の標準偏差とASR促進試験の日数との関係を示す。発 錆量の場合と同様、劣化が進めば進むほど変形量が 多くなるといった傾向は現状では認められない。





図3.35 ASR促進試験日数と算術平均粗さの関係

#### 凍結融解試験時の表面形状測定試験結果

図3.36にかぶり、W/Cごとの供試体の表面形状変化 の標準偏差と凍結融解サイクル数との関係を示す。 発錆量の場合と同様、劣化が進めば進むほど変形量 が多くなるといった傾向は現状では認められない。



図3.36 凍結融解サイクル数と算術平均粗さの関係

#### 超音波試験の原理および実験手法

超音波試験は、コンクリート内部の損傷や欠陥の 有無を検知することを目的として行う、弾性波速度 を求める試験である。本試験により測定される弾性 波速度とは、弾性体内部を伝播する波動(弾性波)の 速度のことであり、P波とS波が存在する。しかし、 液体や気体を媒質として伝播する弾性波には、横方 向の復元力がないためS波は存在しない。従って本 研究ではP波の伝播速度を計測する。

超音波試験機には株式会社マルイのMIN-020-2-00(図3.37)を用いた。この測定器は、供試体の両 側面に超音波発信用センサーと受信用センサーを押 し当てることで、弾性波の透過時間を計測すること ができる。透過距離(側面の長さ)をノギスで計測し、 計測した弾性波の透過時間で除して伝播速度を算出 した。測定値は図中の3箇所において各3回測定し、 計9回の平均とした。測定の様子を図3.38に示す。



図3.37 超音波速度試験機 MIN-020-2-00 (株式 会社マルイ)



図3.38 超音波試験の様子

#### 鉄筋腐食促進時の超音波試験結果

図3.39にかぶり、W/Cごとの供試体の超音波伝達速 度と発錆量の関係を示す。図3.39から、特に現状で は、劣化が進めば進むほど超音波伝達速度が変化す るといった傾向は認められない。



図3.39 理論発錆量と超音波伝達速度の関係

#### ASR促進時の超音波試験結果

図3.40にかぶり、W/Cごとの供試体の超音波伝達 速度とASR促進試験の日数との関係を示す。図3.40 から、特に現状では、劣化が進めば進むほど超音波 伝達速度が速くなるといった傾向は認められない。





図3.40 ASR促進試験日数と超音波伝達速度の関係

#### 凍結融解試験時の超音波試験結果

図3.41にかぶり、W/Cごとの供試体の超音波伝達 速度と凍結融解試験のサイクル数との関係を示す。 図3.41から、特に現状では、劣化が進めば進むほど 超音波伝達速度が速くなるといった傾向は認められ ない。



図3.41 凍結融解サイクル数と超音波伝達速度の関係

#### 圧縮強度試験の原理および実験手法

本研究では、図3.42に示す日東建設(株)のコンク リートテスターCTS-02V4により打撃試験を行った。 コンクリートテスターは弾性係数と圧縮強度の間に 相関関係があることを利用して圧縮強度を計測する 器具である。鉄筋腐食が進行すると内部の微細ひび 割れが増大するため、巨視的な強度や剛性を低下さ せる。すなわち、本器具で圧縮強度を計測すれば、 内部鉄筋腐食を検知するための重要な情報になるの ではないかと期待できる。シュミットハンマーのよ うな類似の器具がある中で本器具を選定した理由は、 シュミットハンマーのような微破壊検査装置ではな く非破壊検査装置であること、使用されている実績 が多いことによるものである。





図3.42 コンクリートテスターCTS-02V4 (日東建設㈱)

同測定器による圧縮強度の求め方は、コンクリート を打撃することで、図3.43に示すように、コンクリ ートを完全弾性体と仮定し、質量Mのハンマが任意の 速度Vでバネ係数Kのコンクリート表面に衝突する現 象について以下のように定式化される。以下の数式 展開、および図3.43は同測定器の原理の説明のため に文献(11)より引用する。



コンクリートの弾性変形は、ハンマの運動エネル ギーによってもたらされ、ハンマの衝突によって生 じたコンクリートの変位をxとおくと、エネルギー保 存の法則から式(3.4)のように表すことができる<sup>17)</sup>。

$$\frac{1}{2}MV_{max}^2 = \frac{1}{2}Kx_{max}^2$$
(3.4)

また力Fはフックの法則より、式(3.5)のように表せる。

$$F_{max} = Kx_{max} \tag{3.5}$$

式(3.5)を*x<sub>max</sub>*について解き、これを式(2.19)に代入して整理すると、式(3.6)が得られる。

$$\sqrt{MK} = \frac{F_{max}}{V_{max}}$$
(3.6)

ここで√*MK*は、機械インピーダンスであり、発生した力の最大値あをハンマ速度の最大値(衝突時の初速度)で除すことによって得られることがわかる。バネ係数*K*は、コンクリート表面の弾性係数に相当する指標であり、コンクリートテスターではこの値から圧縮強度を推測している。本研究ではこの値をそのまま利用している。なお、同計測点での標準偏差は7N/mm<sup>2</sup>程度であり、4回打撃して得られた結果の平均値を用いている。

#### 鉄筋腐食促進時の圧縮強度試験結果

図3.44にかぶり、W/Cごとの供試体の圧縮強度と発 錆量の関係を示す。かぶり20mm、40mmの場合ともに、 W/Cが70%の供試体については圧縮強度の早期低下が 見られるものの、劣化進行との直接的な関係は明ら かとはならなかった。



図3.44 理論発錆量と圧縮強度の関係

#### ASR促進時の圧縮強度試験結果

図3.45にかぶり、W/Cごとの供試体の圧縮強度と ASR促進試験の日数との関係を示す。ばらつきが大 きく増減はするものの、傾向は明らかではない。つ まり、現状では、劣化が進めば進むほど圧縮強度が 低下する(あるいは増加する)といった傾向は認め られない。



図3.45 ASR促進試験日数と圧縮強度の関係

#### 凍結融解試験時の圧縮強度試験結果

図3.46にかぶり、W/Cごとの供試体の圧縮強度と 凍結融解試験のサイクル数との関係を示す。ばらつ きが大きく増減はするものの、傾向は明らかではな い。つまり、現状では、劣化が進めば進むほど圧縮 強度が低下する(あるいは増加する)といった傾向 は認められない。



図3.46 凍結融解サイクル数と圧縮強度の関係

#### (3) 供試体の非破壊試験によるデータ蓄積

本節では、人工知能・機械学習の一手法である Random Forest法について説明する。概念図を図2.1に 示す。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り、アンサンブル法の一種で ある。



図3.47 Random Forest法の概念図

アンサンブル法は多数の弱学習器を使用して高精度 な予測を達成する手法と定義でき,Random Forest以 外にもバギングやブースティングなどが挙げられる が,Random Forestはそれらよりも一般的に精度がよ く,また計算が速い。

Random Forestは上述のように複数の決定木の結果 から分類を行うものであるが、それぞれの決定木は 元のデータ集合から重複を許容した上でランダム選 択された複数個のサブセット、すなわちブートスト ラップサンプルから、ランダム選択された特徴量を もとに作成する.また、それぞれの決定木の成長に はCART法 (classification and regression trees)<sup>4</sup>を用い ている. CART法において, ノードtでデータを分割 する際の基準は,式(3.5)で表される不純度と言われ る指標の低下率が最大になるように決定される.こ こでは不純度としてジニ係数を用いた.

$$\Delta GI(t) = P_t GI(t) - P_L GI(t_L) - P_R GI(t_R)$$
(3.5)

GI(t)はノードtにおけるジニ係数, Pt, PL, PRは, 分割する前, 分割した後の左側, 分割した後の右側の個体の比率, <math>tL, tRは分割した後の左側および右側の 枝の先のノードである.ジニ係数は以下の式(3.6)の ように定義される.

$$GI(t) = \sum_{i \neq j} p(C_i | t) p(C_j | t)$$
  
=  $\sum_{i=1}^{n} p(C_i | t) (1 - p(C_i | t))$   
=  $1 - \sum_{i=1}^{n} p(C_i | t)^2$   
(3.6)

上式でnはクラス数,  $p(C_i | t)はノードtでクラスiのデ$ ータが選ばれる確率である.右辺の第一式は, ノー $ドtでi番目のクラスのデータが選ばれる確率<math>P(C_i | t)$ と $j \neq i$ のクラスに間違われる確率 $P(C_i | t)$ の積と考え ると,この式はノードtにおける誤り率と解釈できる. よって式(2)はもっとも誤り率を減らすことが出来 るような決定木の分岐を行っていくということに対 応している.

このようにCART法により構築された決定木はそ れ自体高い精度を持つ分類器であるが、しかし一方 で学習データを完全に振り分けるまで分割を進めて 木を成長させるため、過学習の問題が生じることが 知られている.しかしRandom Forestでは、ブートス トラップサンプリングで抽出した学習データ、ラン ダムで選択された特徴を個々の決定木の生成に用い ているため、個々の決定木間の相関が低くなり、そ の結果として過学習の影響が非常に小さくなり、汎 化能力が高まるという特長を持つ。

このRandom Forestを、(2)で収集したデータによ り学習させ、損傷程度を予測するモデルの構築を行 った。ただし人工知能システムの場合、学習データ を用いて精度を評価することは、精度が実際以上に 高く出てしまう。そこでここではK-分割交差検証法 を用いる。K-分割交差検証法とは、標本をK 群に分 類し、K-1 群の標本群を学習に用い、その学習結果 を用いて残り1 群を解析するということをK回繰り 返し、その平均を取るものである。その上で、鉄筋 腐食については電気量から計算できる理論発錆量、 ASRおよび凍害についてはサイクル数を損傷度とし、 正解との二乗平均平方根誤差、およびR<sup>2</sup>値をその評 価指標とすることを提案する。

結果を図3.48から図3.50に示す。それぞれ、横軸は 実際の損傷度、縦軸は予測された損傷度である。ま た、正解との二乗平均平方根誤差およびR<sup>2</sup>値につい ては表3.3に示す。ASRや凍害の予測結果は理論発錆 量と比較して低いが、これらはデータを増強する、 促進日数を増やすことで改善されると考えている。







図3.49 ASRによる損傷予測結果



図3.50 凍害による損傷予測結果

表3.3	平均平方二乗根誤差およびR <sup>2</sup> 値
------	------------------------------

	二乗平均平方	R <sup>2</sup> 值
	根誤差	
理論発錆量	0.54	0.95
ASR	7.18	0.65
凍害	5.77	0.80

# (4) 実橋梁での非破壊検査

本節では、高知県仁淀川市のRC中実床版橋で、橋 長7.46m、幅員2.3mの無名橋を対象に計測を行った結 果を示す。橋梁の全体像を図3.51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3.52に示す。



図3.51 無名橋の全体像



図3.52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。以下 に、該当部位の写真を示す。



図3.53 外観では損傷の存在がわからなかった部位

また、以下の図3.54から図3.58に、非破壊試験を行った様子を示す。ただし、表面形状計測については、 桁下が不安定で実行できなかった。ここでは、健全 部との比較として、構築したシステムをもとに損傷 度を評価した結果を表3.4に示す。この地域ではASR、 凍害は発生しないと考えられるにもかかわらずそれ らの結果を掲載しているが、これはあくまでもASR、 凍害のみが発生していた場合にどういう予測結果と なるかということを示したものである。



図3.54 実橋での透気試験の様子



図3.55 実橋での含水比計測の様子



図3.56 実橋での電気抵抗測定の様子



図3.57 実橋での超音波試験の様子



図3.58 実橋でのテストハンマー試験の様子

外観調査からは損傷部のうきは発見できなかったが、 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	ASR	凍害
損傷部①	3.81	30.04	30.10
損傷部2	4.53	25.49	30.57
損傷部③	3.35	32.85	30.90
損傷部④	2.10	18.68	22.28
健全部①	1.68	15.10	11.76
健全部②	1.41	12.68	8.27
健全部③	0.42	4.88	5.03

表3.4 実橋での予測結果

# 3.3 画像解析+人工知能システムによるひび 割れ自動検出手法

#### (1) 概要

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。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、第2章で示した簡易移 動式足場はその要求を満たすことが可能である。

本研究で開発した手法のフローチャートを図3.59 に示す。フローチャート内の項目のそれぞれについ て、以下に順に述べる。



図3.59 ひび割れ自動検出のフローチャート

#### (2) グレースケール変換

本研究で扱うデジタル画像は、Canon EOS 7D (1800万画素、光学センサAPS・C) で撮影されたも のである。これらの画像は画像中の各画素に対し、 赤、緑、青の光の三原色それぞれの画素値を持って おり、三原色の画素の重ね合わせによって色を表現 している。これは、RGBカラー画像と呼ばれる。本 研究では、以降の処理を効率的に行うために、RGB カラー画像を、色に関する情報を含まず、白、黒の 明暗のみで表現したグレースケール画像に変換する。

本研究では、RGB成分に差がある落書き部を相対 的に明るくすることでひび割れと誤認することを防 ぐため、一般的に行われているRGB成分の平均値や NTSC係数による加重平均を求めるグレースケール 変換ではなく、RGB成分の最大値を輝度値とするグ レースケール変換を行った。図3.60に補正例を示す。 左図で存在する赤色の落書きが右図では適切に除去 できている様子がわかる。



図 3.60 RGB 成分に差がある落書きの補正例

#### (3) 濃淡の補正

撮影画像は、壁面の影や汚れなどのひび割れ検出 に不必要な情報や、撮影条件の違いによる濃淡の差 が大きい。そこで、必要な情報を保持しつつ、後の データの取り扱いを容易にするため、前処理を行う。

様々な環境下で撮影された画像は、フラッシュの 影響によって画像の周囲が暗くなってしまう周辺減 光や壁面の影や汚れなどが見られることがあり、こ れらは画素値が比較的低いことから、ひび割れと判 定され、誤検出につながってしまう可能性がある。 よって、median フィルタを用いた式(3.7)によって 濃淡の補正を行う。

$$Img(i,j) = \frac{ImgO(i,j) \times 0.5b_m}{ImgM(i,j)}$$
(3.7)

ここで、*i,j* は画素位置、Img(i,j)は フィルタ処理後の 画像、ImgO(i,j)は処理前の画像、ImgM(i,j)は median フィルタによる平滑化処理後の画像、 $b_m$  は画素値の 最大値である。また、median フィルタのサイズは 41×41 としている。濃淡を補正する前後の画像を、2 枚を例にとり、図 3.61、図 3.62 に示す。この処理に よって、ひび割れの情報は残り、汚れや影の影響は 除去できていることがわかる。



図3.61 medianフィルタによる補正前後(画像1)



図3.62 medianフィルタによる補正前後(画像2)

# (4) 正規化

medianフィルタによる補正を行い、影や汚れの影響は取り除くことが出来たが、未だ各画像間の濃淡 は偏りがある。そこで式(3.8)を用いて正規化を行い、画像間の画素値の偏りを減らす。この処理によって、さらに学習の効率化を図ることが出来る。

$$Img_{N}(i,j) = \frac{\sigma_{t}}{\sigma_{Img}}(Img(i,j) - \overline{Img}) + \overline{Img}_{t} \qquad (3.8)$$

このとき、*Img*、*Img*、はそれぞれ、正規化後の 画像、濃淡の補正後の画像、*Img*、*Img*<sub>t</sub>、*σ*<sub>t</sub>、*σ*<sub>Img</sub>は それぞれ、濃淡の補正後の画素値の平均、正規化処 理を行う上で目標となる平均値および標準偏差、濃 淡の補正後の画素値の標準偏差である。図 3.61、図 3.62 の補正後画像を正規化した後の画像を図 3.63、 図 3.64 に示す。



図3.63 正規化処理による補正例(画像1)



図3.64 正規化処理による補正例(画像2)

(5) ディープラーニングによるスクリーニング ディープラーニング<sup>14)</sup>は機械学習手法の一つで、 階層の深いニューラルネットワークを利用したアル ゴリズムの総称である。ディープラーニングのモデ

ルにおいては、大量のラベル付きデータとニューラ ルネットワークの構造を利用して学習を行う。ディ ープラーニングは、手作業で特徴量を設定すること なく、データから直接特徴量を発見・学習すること が出来るという特徴を持つ。ニューラルネットワー クは生物の神経回路網を模倣したアルゴリズムであ る。人間の脳は、多数のニューロンが結合し合う巨 大なネットワーク構造を形成しており、あるニュー ロンから軸索に伝わった電気信号は、シナプスを介 して、次のニューロンのシナプスに伝えられる。ま た、ニューロン同士の結合部であるシナプスは、一 定以上の強さの電気信号を受けるとニューロンから 樹状突起を通って次のニューロンへ情報を伝達する。 ニューラルネットワークでは、脳内のニューロンは ニューラルネットワークのノードに相当し、樹状突 起および軸索はエッジに、シナプスは活性化関数に 相当する。神経ネットワークではニューロンを通じ て電気信号が伝わっていくのと同様に、ニューラル ネットワークのノードを通じて値が伝わっていく。

ディープラーニングのネットワークには様々なも のが存在し、例えばConvolutional Neural Network<sup>15)</sup>、 AutoEncoder<sup>14)</sup>、 Recurrent Neural Network<sup>14)</sup>などがあ る。今回は、画像認識によく利用されるConvolutional Neural Network (CNN)を用いた。

CNNは畳み込み層とプーリング層と呼ばれる特別な2種類の層を持つことに特徴がある。典型的な CNNの構成を図3.65に示す。まず入力層で画像を入 力し、次いで畳み込み層やプーリング層による計算 が繰り返され、全結合層で一般的なニューラルネッ トワークと同様の重み付き結合の計算がなされ、そ して出力層において分類結果を出力する。



畳み込み層は与えられた入力に対してフィルタを畳 み込む演算を行い、局所的な特徴を抽出する働きを 持つ層、プーリング層は一般的に畳み込み層の直後 に配置され、畳み込み層で得られた特徴の位置感度 を低下させる層、全結合層で与えられた入力画像を 1次元に展開し、そして入力および出力の全ユニット を重み付きで結合する層である。解析においては図 3.65に示したように、畳み込み層、プーリング層、 全結合層を並べた後に、出力層が設置された構造に 対して入力画像を与えることとなる。

本研究ではCNNへの入力画像のサイズを256× 256 画素とする。本研究で扱う撮影画像は3456× 5184画素であるが、その撮影画像から図3.66のよう に小領域を切り出していく。まず左上部分の256× 256 画素を切り出して解析し(図3.66の赤い実線の 四角)、次いで64画素だけ右にずらした256×256画 素(図3.66の赤い破線の四角)を切り出して解析を 行う。そのようにして解析を行い右端まで終えれば、 次は64画素だけ下にずらした256×256画素(図3.66 の赤い点線の四角)を切り出して解析を行い、また 右端まで解析を行う。この繰り返しで元画像を全て 解析する。このようにすると、必然的にオーバーラ ップが発生する。端部以外だと、同じ部分を合計16 回解析していることになる。このようにオーバーラ ップさせず、単純に64×64画素に分割して解析を行 うほうが一見効率的であるが、小領域端部にひび割 れがある場合に適切に分類できないという問題があ ったため、オーバーラップさせることとした。



図 3.66 CNN の学習のための入力画像の切出し方法

このように得られた256×256画素の入力画素に 対して、対象領域がひび割れを含むか、型枠跡を含 むかが知りたいため、本研究では図3.67、表3.5のよ うにひび割れに関する分類器と型枠跡に関する分類 器の2つを構築することとした。ひび割れ分類器につ いては、ひび割れを含むかどうかを分類する。型枠 跡分類器については、型枠跡とひび割れを同時に含 む、型枠跡のみを含む、型枠跡を含まない、のどれ に該当するか分類する。そして、オーバーラップさ れている入力画像のうち何%がひび割れを含むと判 定されたか、あるいは型枠跡を含むと判定されたか を求め、以降の解析に用いる。



図 3.67 本研究で構築する 2 種類の分類器

ひび 割れ 分類器	ひび割れを 含む	
	ひび割れを 含まない	
型枠跡 分類器	型枠跡のみ を含み、 ひび割れは 含まない	
	型枠跡と ひび割れを 同時に含む	
	型枠跡を 含まない	

#### 表 3.5 学習データに用いた画像例

なお、データ数は精度に大きく影響を与える。本研 究のデータ数は、表3.6に示す通りである。

11	、3.0 名グノハの手目	17 7 仪奴
	クラス名	画像枚数(枚)
ひび	ひび割れを含む	973,248
割れ	ひび割れを	1,000,000
分類器	含まない	
	合計	1,973,248
型枠跡	型枠跡のみを	10,570
分類器	含み、	
	ひび割れは	
	含まない	
	型枠跡と	10,029
	ひび割れを	
	同時に含む	
	型枠跡を	10,579
	含まない	
	合計	31,178

# 表 3.6 各クラスの学習データ枚数

このようにして作成したモデルに、未知の画像を 投入し、画像内にひび割れが存在するかしないか、 型枠跡が存在するかしないかを判定する。以下に示 す画像は、各領域が、ひび割れまたは型枠跡を含む と判定された確率を表現した画像である。黒い部分 は確率が0%に近いことを、逆に白い部分は確率が 100%に近いことを意味している。ここでひび割れの 確率が0と判定された領域は、次以降のRandom Forestの解析では省略する。これによって効率化が 見込まれる。

図3.63、図3.64の画像について、ひび割れ確率を 求めたものを図3.68、図3.69に、型枠跡である確率 を求めたものを図3.70、図3.71に示す。図3.61、図 3.62の元画像と比較すると明確であるが、ひび割れ が実際にある部分について、図3.68、図3.69で確か にひび割れがある確率が高いと認識できている。加 えて、特に図3.62について、図3.69ではひび割れを 見つけている一方で型枠跡をひび割れと誤認識して いないこと、また図3.71により型枠跡が型枠跡とし て検出できている様子がわかる。以下の解析でこの 確率画像についても入力として与え、計算を行う。



図 3.68 CNN で出力されたひび割れ確率(画像 1)



図 3.69 CNN で出力されたひび割れ確率(画像 2)



図 3.70 CNN で出力された型枠跡確率(画像 1)



図 3.71 CNN で出力された型枠跡確率(画像 2)

#### (5) 画素単位でのひび割れ判定

図3.68から図3.71の確率画像を踏まえて、以下で はもう少し細かく画素単位で解析を行う。着目画素 がひび割れかそうでないかの判定のために、図3.47 でも示したRandom Forest法を用いる。

本節で構築するRandom Forestの出力は着目画素 がひび割れかどうかの分類、入力は着目画素の特徴 量の集合である特徴ベクトルである。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く、 ひび割れ部分は暗い画素の集合体になっていること 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。

そのような特徴量は画像フィルタを用いれば容易 に得ることができる。例えば着目画素を含む周辺3× 3の領域の輝度値の中央値を特徴量として得たい場 合、3×3の中央値フィルタを撮影画像に適用すれば 得ることができる。

また、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ため、非正方 形型のフィルタを用いてそういった方向性を持つひ び割れの抽出を行うことができる。

本研究では、中央値フィルタに加えて、着目画素 に近いほど大きな重み、遠くなるほど小さな重みと いうような重み付き平均を得られるGaussianフィル タを用いることにした。Gaussianフィルタは以下の 式(3.9)のように定式化できる。

(3.9)

$$f'(i, j) = \sum_{l=-n}^{n} \sum_{k=-m}^{m} f(i+k, j+l)h(k, l)$$

where

$$h(k,l) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-\left(k^2 + l^2\right)}{2\sigma^2}\right)$$

上式で、f(i,j)は入力画像の輝度値、f(i,j)は出力画 像の輝度値、i, jは着目画素の画像内座標、h(k,l)は Gaussian フィルタを表現しており、フィルタの大 きさは(2m+1)×(2n+1)である。 $\sigma$ は標準偏差であり、 離れた画素の重みに影響する。本研究では、 $\sigma$ はフィ ルタの長辺の 1/2 とした。

また、フィルタサイズとしてはGaussianフィルタ は7×7、17×17、23×23、5×55、5×105の5パター ンを、中央値フィルタは7×7、11×11、15×15、3× 21、3×41の5パターンを用いることとした。中央値 フィルタはGaussianフィルタよりやや小さめなもの としている。これは、フィルタ面積が大きい場合、 中央値はひび割れでない部分の影響を強く受けるた めにひび割れ検出の特徴量として機能しづらくなる ことを反映したものである。ただし、精度はこのフ ィルタサイズにさほど敏感ではなく、フィルタサイ ズの多少の違いは結果に影響を与えないことを確認 している。ただし、本研究で用いた画像は1画素の辺 長が0.1~0.2mm程度であるが、このサイズが大幅に 変わる場合には上記のフィルタサイズは適切でなく なる可能性があるため、再度検討する必要がある。 また、(4)で求めた確率画像についてもひび割れ評価 のための入力とする。ここまで述べた特徴量を整理 すると、以下の表3.7のようになる。

(1) 着目画素の補正後の画素値(合計1個)												
(2) CNN の解析結果(合計3個)												
ひび割れを含む		型枠跡とひび	び割れを	型枠跡のみを含む確率								
確率		同時に含む研	時に含む確率									
	(3) 正方形型フィルタ(合計6個)											
Gaussian フィルタ			median フィ	イルタ								
サイズ	7×7,1	7×17, 23×23	サイズ		7×7, 11×11, 15×15							
	(4) 非正方形型フィルタ(合計 16 個)											
サイズ	5×55,	5×105	サイズ		3×21, 3×41							
回転角	90°, 4	5°, 0°, -45°	回転角		90°, 45°, 0°, -45°							

表 3.7 画素単位の Random Forest に用いた特徴量

特徴量の数について整理すると、補正後の着目画素 の画素値(1個)に加え、CNNの解析結果からの特 徴量(3個)、正方形型のGaussianフィルタと median フィルタ適用後の輝度値(2種類のフィルタ×3通り のフィルタサイズ=6個)、非正方形型フィルタ適用 後の輝度値(2種類のフィルタ×2通りのフィルタサ イズ×4通りの回転角=16個)の合計26個である。

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特徴ベク トルと、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。ただし、(4)で、ひび割れの可能性 が0とされている領域についてはスクリーニングし、 解析を行わない。

図 3.72, 図 3.73 に、図 3.61、図 3.62 の画像を解析 した結果を示す。赤色で示されている画素は、ひび 割れと検出した画素であることを意味している。概 ね良好にひび割れを検出できており、また型枠跡を ひび割れと誤認識することもほぼ防げている。しか しその一方で、まだノイズなどの誤判定結果も若干 残っている。次項ではこういった画素の除去を行う。



図 3.72 画素単位でのひび割れ解析結果(画像 1)



図 3.73 画素単位でのひび割れ解析結果(画像 2)

#### (6) 連結領域ごとのひび割れ判定

前項の検出結果で残っているノイズや誤判定結果 を除去するため、幾何学的形状に着目する。ノイズ 除去では、ひび割れとして検出されている画素の中 で連結している領域が、人為的に定めたしきい値以 下の面積であれば取り除く、という手法が一般的で ある。しかし本研究ではひび割れが長細いという特 徴を持つことにも着目し、面積だけではなく周辺長、 連結要素の領域と同じ2次中心モーメントを持つ楕 円の長軸長さ、短軸長さの合計4つの幾何学的形状 特徴を考慮する。

また、これらの判定基準について、それぞれに独 立した人為的なしきい値を定めることは必ずしも適 切ではない。例えば面積が小さくても、周辺長が長 ければ長細いということを意味しており、ひび割れ である可能性は高い。そこで、これらの判定基準を 複合的に考えることが出来るように、ここでも Random Forest を用いる。ただし、注記しておくが、 ここで構築する Random Forest は(5)で構築した Random Forest とは別物である。(5)で対象としてい るものは画素である一方、本項での Random Forest は画素の連結領域を対象としている。入力として与 える特徴ベクトルは上記の合計 4 つの幾何学的形状 特徴量、出力は画素の連結領域がひび割れかどうか の分類である。結果の例を図 3.74、図 3.75 に示す。 図 3.72, 図 3.73 で散見されたノイズを適切に省けて いる様子がわかる。このように、2 段階に分けて Random Forest を行うことで、ひび割れらしき連結 領域のみを結果として残すことができる。



図 3.74 幾何学的形状判定後のひび割れ解析結果 (画像 1)



図 3.75 幾何学的形状判定後のひび割れ解析結果 (画像 4)

# (7) ひび割れ検出結果、評価指標

ここでは、橋梁の床版、桁、橋脚、建物の内壁な ど、様々な状況で撮影したデジタル画像 100 枚につ いて提案手法により解析した。内訳は、床版 35 枚、 桁 15 枚、橋脚 25 枚、内壁 25 枚である。他の多くの パラメータ(気温など)は撮影画像の品質に大きな 影響を及ぼさないと考えられるため考慮していない。 ただ、天気は影響し得るが、基本的に影の有無と光 量の大小に落ち着くと思われ、これらは式(3.7)によ り補正可能である。他に、夜間撮影はクオリティを 大きく低下させる要因であり、フラッシュが必須で あるが、その場合の精度への影響については検討し ていない。それらの仮定の上で、提案手法の有効性 の検討については、K-分割交差検証法により行った。 K-分割交差検証法とは、標本を K 群に分類し、K-1 群の標本群を学習に用い、その学習結果を用いて残 り1群を解析するということをK回繰り返すもので あり、本研究では*K*=10とした。

次に、本研究による検出手法と既往の研究による 検出手法の検出結果を比較する。機械学習によって 分類を行った場合の分類器の性能の評価尺度は様々 存在する。本研究では、既往の研究<sup>13)</sup>でも用いられ、 二値分類問題の精度評価で一般的に用いられる指標 である、感度(sensitivity)、適合率(precision)、特異度 (specificity)、F値(F-measure)、正解率(accuracy)の5つ の項目を用いて精度を評価した。今、評価尺度の説 明のために、真陽性(TP)、偽陽性(FP)、偽陰性(FN)、 真陰性(TN)を以下の表 3.8 のように定義する。

表 3.8 クラス分類の混合行列

	正解	でコ	E	正解で負					
	( 正)	三解	でひび	(正解でひび割					
	割れ	)		れでない)					
予測で正	真陽	性		偽陽性					
(予測でひ	TP	:	True	FP	:	False			
び割れ)	Posi	tiv	е	Positive					
予測で負	偽陰	性		真陰性					
(予測でひび	FN	:	False	TN	:	True			
割れでない)	Nega	ativ	е	Negative					

これをもとに、以下のように評価尺度を定義する。 はじめに、感度について述べる。感度は、陽性のデ ータを正しく陽性と予測したものの割合である。本 研究においては、感度はひび割れと予測されたもの のうち、どの程度正解が含まれているかを表す指標 である。感度の計算には、陰性データの予測結果が 含まれていないため、全てのデータを陽性と判定す れば感度は1になる

感度(sentisivity) = 
$$\frac{TP}{TP + FN}$$
 (3.10)

続いて、適合率を表す式を式(3.11)に示す。適合率 は、予測で陽性と判断したもの中で答えも陽性であ る割合であり、正確性を評価することが出来る。本 研究において適合率は、実際のひび割れのうち、ひ び割れと検出されたものの割合を示している。

適合率(precision) = 
$$\frac{TP}{TP + FP}$$
 (3.11)

次に、特異度について述べる。特異度は、陰性のデ ータを正しく陰性と予測した割合であり式(3.9)で表 される。本研究において特異度は、正解画像におい てひび割れではなく、検出結果においてもひび割れ でないと検出された割合である。

特異度(specificity) = 
$$\frac{TN}{FP + TN}$$
 (3.12)

式(3.10)~(3.11)からも分かるように、感度を高める と適合率は下がり、適合率を高めると感度は下がる というように、感度と適合率はトレードオフの関係 にある。そこで、これらを統合して評価することが 出来る指標として、感度と適合率の調和平均を取っ たF値を用いる。F値は式(3.13)のように表され、 感度と適合率を同時に評価できるため、重要な指標 である。

# $F-measure = \frac{2 \times Sentisivity \times Precision}{Sentisivity + Precision}$ (3.13)

最後に正解率について述べる。正解率は、式(3.12) で表されるような、予測値と正解値が一致した割合 である。感度、特異度、適合率とは異なり、陰性、 陽性のデータだけでなく、全てのデータに対して計 算される。

正解率(accuracy) = 
$$\frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$$
 (3.14)

これらの項目を用いて、本研究で用いた画像に対す る本手法および大津の方法による二値化結果から算 出した評価尺度の平均値を表 3.5 に示す。大津の方 法とは、ひび割れ検出などの2値化において一般的 に使われているアルゴリズムである。

評価尺度	本手法	大津の二値化				
		手法				
感度	0.932	0.986				
適合率	0.641	0.012				
特異度	0.998	0.594				
F值	0.759	0.024				
正解率	0.999	0.542				

表 3.9 精度評価

表 3.9 を見ると、感度が大津の方法よりも低い値に なっていることが分かる。大津の方法は、過剰にひ び割れを検出する傾向にあり、その結果としてほと んどのひび割れ部を網羅することが出来ているため 感度が高くなったと考えられる。しかし、ひび割れ 以外の箇所もひび割れとして検出してしまっている ため適合率が極端に低い。また適合率に関しては、 大津の方法よりは高いものの、0.641と他の指標と比 較して低い結果になっていることが分かる。これは、 本研究による手法での検出は、ひび割れ周辺の画素 値が低い箇所もひび割れとして検出しているためで あると考えられる。つまり、現状では 1pixel 程度の 誤差が生じている。この部分は、どこまでをひび割 れの範囲と定義するのか、人間の目でも判断が難し い箇所である。一方で、特異度は 0.998 と非常に高 い結果が得られた。ひび割れではない個所を誤って ひび割れであると判定するということが、ほとんど 起きていないということが分かる。次にF値に着目 する。本手法の F 値は大津の二値化手法と比較して も、高い結果が得られた。そして、正解率について も、 0.999 と非常に高い値が得られている。このよ うに、本研究で提案する手法は、精度の高い判別が できていると言える。

また、画像を詳しく見ると、4pixel 以上のひび割れ であれば、今回撮影した画像(Canon EOS 7D(1800 万画素、光学センサ APS-C)で撮影)の範囲ではも れなく検出ができている。逆に言うと、0.1mmのひ び割れを漏れなく検出するためには、0.025mm/pixel の精度で撮影する必要がある。今回用いたカメラの 場合、75cm 以内の距離からの撮影が必要な計算とな る。また、例えば幅方向高さ方向について倍の画素 数のカメラを用いれば、2倍離れた距離から撮影で きる計算となる。

#### 3.4 研究成果の今後の活用

本章で開発した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。

#### 参考文献

- 1)Leo, B.: Random forests, Machine learning, Vol.45, No.1, pp.5-32, 2001.
- 2) Liaw, A. and Matthew W.: Classification and regression by randomForest, R news 2.3, pp.18-22, 2002.
- 3)波部 斉: ランダムフォレスト, 情報処理学会研究報 告, Vol.2012, pp.1-8, 2012.
- 4)平井 有三:はじめてのパターン認識,森北出版株式

会社, 2012

- 5)岩波 光保,横田 弘,秋本 孝:内部鉄筋が腐食した RC はりの力学性能評価のための非破壊調査手法の 適応性,港湾空港技術研究所, No.0978, 2000.
- 6)片岡 喜久雄:電気技術解説講座,日本電気技術者協 会,2007.
- 7)田澤 栄一:エース土木工学シリーズ, コンクリート 工学, pp.102, 2002.
- 8)橋本 紳一郎,橋本 親典,渡辺 健,上田 隆雄: 液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験 の提案,コンクリート工学年次論文集,Vol.27,No.1, pp.757-762,2005.
- 9) R. J. Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992.
- 10)皆川 浩,久田 真,榎原 彩野,齊藤 佑貴,市川 聖 芳,井上浩男:コンクリートの電気抵抗率と塩化物イ オンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研 究,土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, 119-131, 2010.
- 11)日東建設株式会社:CTS-02V4 取扱説明書,http://ctss.jp/doc/CTS-02v4\_manual.pdf (accessed 2018/2/26)
- 12)大津 展之:判別および最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法,電子通信学会論文誌,Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, 1980.
- 13)小池 真登,長井 宏平:新潟市市町村における橋梁 点検データを用いた経年劣化傾向分析、コンクリート 工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1339-1344, 2015.
- 14) 武井 宏将:初めてのディープラーニング,株式会社 リックテレコム, pp.19-74, 2016.
- 15) 岡谷 貴之: MLP 機械学習プロフェッショナルシリ ーズ 深層学習, 講談社, 2015.

# 第4章 橋梁三次元マッピングシステム

#### 4.1 概要

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、そこに損傷評価結果をマッピン グするシステムの開発を行う。3次元モデルの構築に より、以下のような利点がある。

・室内での点検事後検証が容易となる。

・周辺状況の記録が可能となり、損傷要因推定に寄 与できる。

・損傷の経時的な変化の追跡や、進行有無の判定が 容易となる。

本研究では、近年、ドローン測量などで用いられて いる技術であるStructure from Motion (SfM)<sup>1)</sup>によ り橋梁の3次元モデルを構築する手法を提案する。 SfMとは、視点の違う複数枚の画像から被写体の3次 元形状、及びカメラの相対位置を復元する手法であ る。また、そうして復元された点群データの表面に デジタルカメラで撮影した画像を貼り付けることで、 対象物の表面形状を3次元上に再現できる手法であ る。安価なデジタルカメラでも適用可能であるため、 維持管理現場での導入が現実的であり、維持管理技 術者以外でも簡単にデータを収集することが可能で あると考えられる。

また、本研究では、最初に撮影した画像上にひび 割れや損傷などを事前にプロットすることで、ひび 割れや損傷などを包含した3次元モデルの構築を行 える手法を開発し、それらの実証を実橋で行った。

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。その結果についても本 章で述べる。

# 4.2 適用範囲、結果解釈の信頼性指標およびその算出方法

実橋で検証した結果や橋梁点検の実務者の意見 を踏まえ、3次元形状で復元する技及びその3次元画 像にひび割れをマッピングする技術について、技術 の結果の解釈に係る信頼性を評価するために必要な 項目や指標の定義、算出方法を提案する。

まず、どの程度ひび割れが検出できたかという指標として、以下のような感度、適合率、F値といった 指標を提示する。

感度=実際にあるひび割れのうちで検出できた数 /実際のひび割れ数

適合率=ひび割れ検出結果が実際にひび割れであ る数/ひび割れ検出結果数

F値=感度と適合率の調和平均

これらの感度・適合率・F値については、ひび割れの 検出数および誤検出数が導出のために必要な項目で ある。

加えて、ひび割れ長さ、幅の誤差についても定量 的な指標として提示する。ただ、3章のように画素 単位という概念で計測することが3次元モデルの場 合には難しいため、実際の長さ・幅に対してどれだ けの誤差率があるか調べる。

加えて、鉄筋露出や剥離、漏水といった面的な損 傷がどれだけ3次元モデルに視覚的に表現できたか という指標としても、以下の感度、適合率、F値によ る指標を提示する。

感度=実際にある面的損傷のうちで表現できた数 /実際の面的損傷数

適合率=面的損傷表現結果が実際にひび割れであ る数/面的損傷表現結果数 F値=感度と適合率の調和平均

これらの感度・適合率・F値については、面的損傷の 検出数および誤検出数が導出のために必要な項目で ある。

# 4.3 実橋での検証

本研究で対象とした、3次元復元を行った橋梁を 以下の表4.1に示す。なお復元のためのSfMの原理、 およびひび割れマッピング手法については付録3に 記載しており、計算過程でAgisoftのPhotoscanを活 用している<sup>2)</sup>。以下では、3次元復元したモデルにつ いて、4.2の指標を用いて信頼性評価を行う。

-					
橋梁名	管理者	橋長	幅員		
		(m)	(m)		
四反田橋	高知県土佐市	6.0	8.2		
柿城橋	高知県香美市	7.1	3.4		

表 4.1 解析対象橋梁

#### (1) 四反田橋

四反田橋は高知県土佐市が管理するRC床版橋で あり、床版裏にひび割れが見られ、判定区分はIIと されている。作成した3次元モデルを図4.1~図4.10に 示す。完成モデルを見てみると,路面及び床版裏の ひび割れや漏水が確認出来る.また、点検台帳の諸 元を図4.11に、床版裏面の損傷スケッチを図4.12に示 す。スケッチ中には、ひび割れが32本、面的損傷が 6箇所存在する。この中で、検出できたひび割れは22 本、誤って検出されたひび割れは0本、表現できた面 的損傷は6箇所、誤って表現された面的損傷は0箇所 であった。

よって、ひび割れについては感度0.69、適合率1.0, F値0.82、面的損傷については感度1.0,適合率1.0,F値 1.0であった。基本的に面的損傷については撮影条件 が悪く無い限りは評価可能である。



図 4.1 四反田橋の全体像



図 4.2 四反田橋 3 次元モデル 上からの視点



図4.3 四反田橋3次元モデル 斜め上からの視点



図 4.4 四反田橋 3 次元モデル 横からの視点



図 4.5 四反田橋 3 次元モデル 斜め下からの視点



図 4.6 四反田橋 3 次元モデル 下からの視点



図 4.7 四反田橋 3 次元モデル 舗装のひび割れ



図4.8 四反田橋3次元モデル床版裏面のひび割れ



図 4.9 四反田橋 3 次元モデル 床版裏面のひび割 れ検出の様子



図 4.10 四反田橋 3 次元モデル 床版裏面の漏水 跡

	橋刻	路諸	元と	総合	合検査編	吉果											
橋	绿名 四反田橋						路線名 四反田田中線					Γ	高知り	新知県			
at the life		自	±ł	佐市	ī谷地		DEC 1996-4400	距離標 至		0 km			管	轄 土佐市	土佐市		
191	壮地	至					此門田保				0	km		土佐市	与建設課	赴設課	
供用開始日 不明						活荷重·	(•等級 -			適	用示方書	-					
	橋長 6 m				総径間数 1 径間												
Ŀ	上部構造形式 RC講編 (BOXカルバート)					Xカルバート)	下部構造形式 その他(橋台)			基礎形式 基礎形式			式不明				
7	(涌久)	調査		ī年		1	不明		大型車混入率			0%					
	こ地木	H+	交通	重量		-	12時間) 荷重制限										
幅	全	幅	ł	8.2 m 地覆幅		歩道幅	福 車道幅		車線	車道幅・		框線	歩道幅	地覆幅	中央帯		
員有効幅員		員		7 m	0.6 m	0 m	Or		m 0	0		n 0	0 m	0.6 m	0 m		
海岸からの距離 0.000 km 緊急輸送				路の指定 指定なし 個				優先確保ルートの指定 有									
路下条件 河川:																	





図 4.11 四反田橋 橋梁諸元



図 4.12 四反田橋 点検調書記載の床版裏面

### (2) 柿城橋

柿城橋は高知県香美市が管理する橋長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4.13~図4.20に示す。また、点検台帳の 橋梁諸元を図4.21に、床版裏面の損傷スケッチを 図4.22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。

よって、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 であった。



図 4.13 柿城橋の全体像



図 4.14 柿城橋 3 次元モデル 上からの視点



図 4.15 柿城橋 3 次元モデル 斜め上からの視点



図 4.16 柿城橋 3 次元モデル 横からの視点



図 4.17 柿城橋 3 次元モデル 斜め下からの視点



図 4.18 柿城橋 3 次元モデル 下からの視点



図 4.19 柿城橋 3 次元モデル 床版裏面ひび割れ 拡大図



図 4.20 柿城橋 3 次元モデル 床版裏面ひび割れ 検出の様子

Г	橋翊	な諸う	πĿ;	総合	〉検査編	吉果											
橋	梁名	柿坊	鼣橋				路線名	市道注	±ノI	内大智	官小学校;	線		高知県	高知県		
-	tr un	自	<b>۴</b> .	ノ原	i		自 0 km				管轄	書 香美市	ī				
191	1生地	至					山口西田市乐	至		0 km			香美市	7役所			
	(#FEE BE	844.0			107	2年	汪恭重, 笔級					演用	テキ書				
H	橋長 7.1 m				総保用	明粉		1	-	5 H H	JEG / 11						
$\vdash$	上部構造形式 RC 中実床版			下部構造	4 数		· 面ナ	「古橋台	101	北7	本 形 式	基礎形	式不明				
F	工的再造形式		調査	 ;在		XPINK	不明	11000		土型	東 混 入 率		200.0	(	215 WE /12	241.01	
交	《通条	件	交通	 i量			(昼間	12時間	1)	荷	重制限						
Arr	全	:幅員			3.4 m	地覆幅	歩道幅	車道	匾•	車線	車道幅	・ ・ 車	線	歩道幅	地覆幅	中央帯	
嚙員	有刻	动幅	, B		3 m	0.2 m	0 m		31	m 1		0m	0	0 m	0.2 m	0 m	
海	 岸から	<b>の</b>	巨雕	0.0	00 km	緊急輸送	路の指定		指	定な	L	優	先確	保ルート	、の指定	無	
F	路下条件 河川:										-						
	_																
全																	
体図																	
Ц																	
Π																	
径間																	
別																	
般図																	

図 4.21 柿城橋 橋梁諸元



図 4.22 柿城橋 点検調書記載の床版裏面

# 4.4 研究成果の今後の活用

本章で開発した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。

#### 参考文献

- 1) Forsyth, D. A. and Ponce, J.: Computer Vision: A modern Approach, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- Agisoft, L. L. C., and Russia St Petersburg: Agisoft photoscan, Professional Edition, 2014.

# 第5章 まとめ

#### 5.1 まとめ・今後の課題、展望

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、撤去に それぞれ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。

#### 5.2 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。

このように、道路行政へ反映可能な研究成果を 得ることが出来た。今後、研究の発展により、より 的確に貢献可能な手法とすることを目指す。