

コンクリート構造物の損傷画像を用いた健全度診断に関する基礎的研究

南 貴大¹・藤生 慎²・福岡 知隆³・塩崎 由人⁴・高山 純一⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takahoro1993@gmail.com

²正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学博士研究員 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学大学院特任助教 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: yuto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁶フェロー 金沢大学教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

日本では、約73万橋の橋梁が存在しており、一斉に高齢化が進んでいる。予防保全的維持管理を行うために5年に1度の頻度で近接目視により点検・診断が行われている。しかし、財源・人材が不足している地方公共団体にとって近接目視点検を継続的に行うことは困難である。そのような中、近年、維持管理の効率化に向けて画像データの活用が期待されており、ひびわれ等の損傷の自動検出・半自動・手動検出に関する研究がなされている。しかし、損傷図の作成までに留まっており、維持管理計画を立てる上で必要な健全度の診断の自動化までは行われていない。診断結果の客観性の確保のため、本研究では、ひびわれ検出後の点検対象物の健全度評価の自動化に向けて、過去の定期点検時の橋梁の諸元データ、損傷図データから得られるひびわれの数・形状といった特徴量と健全度・発生要因の関係性について分析を行った。

Key Words : *soundness of bridge, bridge inspection, crack map, automatic diagnosis.*

1. はじめに

日本では、高度経済成長期に建設された社会基盤施設が一斉に高齢化が進んでおり、それらの維持管理が重要視されている。道路管理者は、5年に1度の近接目視点検が義務付けられている。定期的な点検を行うことで、橋梁の最新の状態を把握するとともに、措置の必要性の判断を行う上で必要な情報を取得し、予防保全的維持管理を可能にしている。定期点検の結果を蓄積し活用することで、効率的で効果的な維持管理計画を策定することが可能になりつつある^{1) 2) 3) 4) 5)}。しかし、地方公共団体では財源、人材が不足しており、継続的に近接目視点検を続けることは困難である。また、既存の点検業務では専門技術者が行うとはいえ、点検者によって点検・診断結果にばらつきが生じることが指摘されている⁶⁾。そのため、より効率的で点検者の主観性の少ない点検・診断手法が求められている。

これらの課題を克服する新たな点検・診断手法と

して、近年では画像データの活用性が期待されており、近接目視点検に代替する遠隔撮影システムの開発に向けて、画像データから、コンクリート構造物のひびわれを自動検出^{7) 8) 9) 10)}・半自動検出¹¹⁾を試みている研究が数多くなされている。しかし、橋梁の定期点検では、損傷を検出することだけではなく、検出された損傷をもとに健全性についても診断を行っている。画像データを用いたひびわれの自動検出が行われている一方で、検出されたひびわれをもとに健全性の診断については自動で行えていないのが現状である。既存の点検・診断手法では、診断者によるばらつきが少なからず含まれており、効果的な維持管理計画を立てる上では、このような診断者の主観的な判断に伴うばらつきを最小限に抑える必要がある。

本研究では、ばらつきの少ない客観性を担保した診断結果を取得するために、過去の橋梁の定期点検において、検出した損傷を記録しているひびわれの損傷図と健全度の診断結果の関係性を分析を行った。

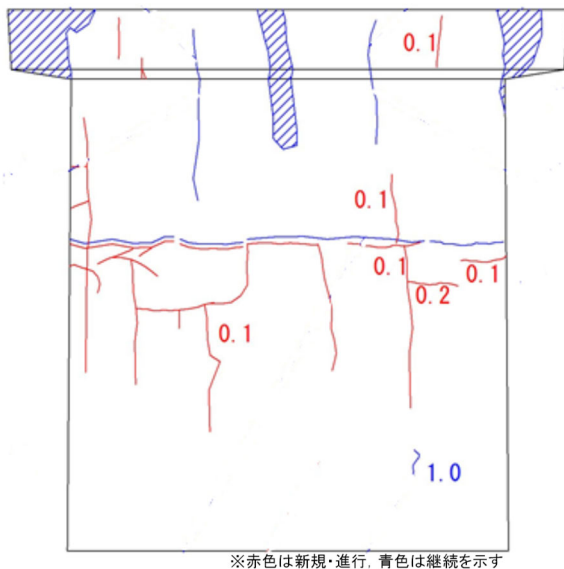


図-1 橋梁定期点検による損傷図の一例

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

橋梁の定期点検における、損傷の検出に関する研究ではなく、健全度・損傷度の診断に関する研究について整理する。

広兼ら¹²⁾は、コンクリート床版のデジタル画像47枚を対象として、サポートベクターマシンを適用することで、ひびわれによる構造物の損傷度を推定している。ひびわれの発生パターンとひびわれの集中度の指標を用いて損傷度の分類を試みている。

大島ら¹³⁾は、橋梁全体の健全度を評価方法として、数量化理論およびファジィ数量化理論を適用した場合の評価方法の比較を行い、橋梁の健全度に影響する様々な因子と部材損傷の相関性について検討するとともに耐震性を考慮した健全度評価方法に提案している。

杉本ら¹⁴⁾は、サポートベクターマシンを用いて、部材単位で行われている社会基盤施設点検の結果を利用して供用年数をもとにして社会基盤施設単位での総合的な健全度と補修の順位付けを行う手法を提案している。

橋梁の定期点検における健全性の診断に関する研究の多くは、橋梁全体の総合的な健全度や補修優先順位を決定する手法の提案であり、本研究では、部材単位の健全度を検出された損傷から判定する手法について着目している。本研究では、これまで蓄積された近接目視点検の損傷図のデータとそれをもとに診断された健全度の結果の関係性について分析を行った。また、ひびわれの発生要因としてアルカリ骨材反応（以下：ASR）に着目し、画像から取得できる情報で、ASRと診断されたコンクリート構造物のひびわれの特徴について把握を行った。これまで専門技術者が行ってきた健全度・ひびわれ発生要因診断の事例の傾向を把握することで、診断結果の抑制する対策の提案や若手技術者への知識の伝承につながると考えている。客観性のある点検結果を蓄積

することによって、より効果的な維持管理計画の策定につながると考える。

3. 使用データ

本研究では、I県H市で2016年・2017年度に行われた定期点検の結果を用いた。

3.1. 橋梁の定期点検の概要

定期点検では近接目視によって損傷の程度を把握して、橋梁・部材単位で構造上の健全性の診断・評価を行っている¹⁵⁾。

橋梁毎の健全性の診断は橋梁単位で総合的な評価をつけるものであり、健全度の判定区分はI：健全、II：予防保全段階、III：早期措置段階、IV：緊急措置段階、の4段階で評価される。一般的に橋梁を構成する部材の健全度の合成値あるいは構造物の性能に影響を及ぼす主要な部材に着目してもっとも厳しい評価値で評価される。主要な部材として、主桁、床版、橋脚・橋台、基礎、支承部、伸縮装置などが挙げられ、各部材が橋梁全体に与える影響を加味した重み係数を設定することで橋梁単位の健全度を算出している。しかし部材単位の健全度が道路橋全体の健全度に及ぼす影響は、構造形式や、架橋環境条件、当該の重要度によって異なるため、各部材の重みは道路管理者によって異なっている。

部材単位の健全性の診断は構造上の部材区分あるいは部位毎、損傷種類ごとに行うことを基本としており、健全度の判定区分はI：健全、II：予防保全段階、III：早期措置段階、IV：緊急措置段階、の4段階で評価される。損傷種類は部位・材料種別によって異なっており、例えば、鋼部材であると腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化などが、コンクリート部材であるとひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、床版ひびわれ、うきなどが評価する損傷種類として挙げられる。

本研究で対象としたコンクリート橋脚のひびわれの損傷程度の評価区分は、最大ひびわれ幅に着目した程度と最小ひびわれ間隔に着目した程度の組み合わせによって評価される。診断された損傷程度に基づき部材単位の健全度が診断されている。

3.2. 損傷図データ

橋梁の定期点検では、近接目視によって検出した損傷を図-1に示すように損傷図として記録している。損傷の状況をもとに損傷原因を考察する場合、点検対象部材の損傷の種類・程度・発生箇所などを整理した損傷図が重要な情報源となる。本研究で対象とするコンクリートひびわれでは、単にひびわれの大小だけでなく、ひびわれの状況をもとにASRなどの発生要因を検討している。

3.3. ひびわれ損傷データの作成

本研究では、I県H市で2016年・2017年度に行われ

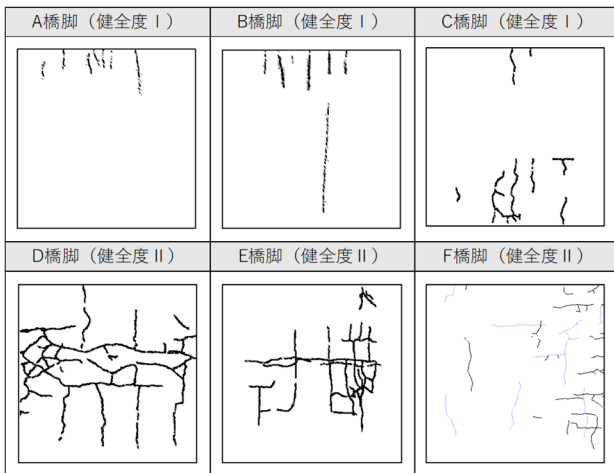


図-2 対象とするひびわれ損傷データ

た定期点検で健全度 I と診断された3つのRC橋脚と健全度 II と診断された3つのRC橋脚を分析対象とした。構造形式は壁式橋脚とT型橋脚に限定した。また、損傷図の記録の方法については、点検を行った点検業務受注者に依存するため、同じ点検業務受注者が行っている損傷図データを選定した。

本研究では、大きさの異なるRC橋脚を比較するため、また、損傷図にはコンクリートひびわれ以外の損傷についても記録されているため、損傷図を加工してひびわれ損傷データの作成を行った。以下、ひびわれ損傷データの作成手順について記述する。

- ① 画像編集ツールを使用し、定期点検で得られた損傷図を1080×1080pixelにリサイズを行う。
- ② リサイズされた損傷図の上に透過率の高い1080×1080pixelの画像を重ね、ひびわれの上を1 pixelのフリーハンドのペンツールでトレースを行う。0.2mm未満のひびわれと0.2mm以上のひびわれについては色を変えて区別を行う。
- ③ リサイズした損傷図を削除し、1080×1080pixelのひびわれのみがトレースされている画像(ひびわれ損傷データ)を取得。

本研究で対象とした6つのRC橋脚の損傷図を基に作成したひびわれ損傷データを図-2に示す。

4. ひびわれ画像から特徴抽出

本研究では、健全度の診断時に考慮している可能性のある特徴として「ひびわれの規模」「ひびわれの形状」「ひびわれの発生箇所」の3つに着目して分析を行った。それらの特徴をひびわれ損傷データから抽出を行った。以下、それぞれの特徴について、ひびわれ損傷データからの抽出方法について記述する。

4.1. ひびわれの規模

「ひびわれの規模」は対象部材であるRC橋脚の全体に対して、どの程度ひびわれが入っているのかを示す。本研究では、ひびわれをトレースしたピ

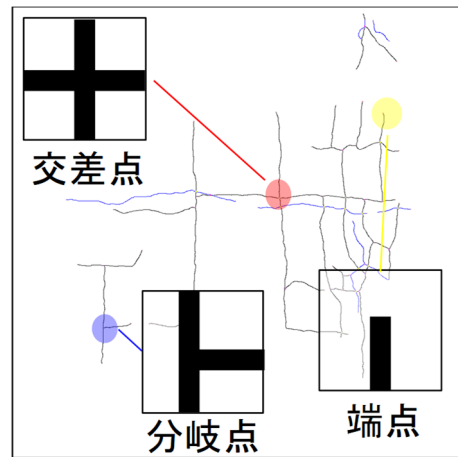


図-3 ひびわれの交差点・分岐点・端点の一例

クセル数を指標として用いた。ひびわれ損傷データにおける0.2mm未満のひびわれのピクセル数と0.2mm以上のひびわれのピクセル数を「ひびわれの規模」の指標として用いた。

4.2. ひびわれの形状

ひびわれの形状はひびわれの発生要因を検討する上で重要な特徴である。本研究では、ひびわれの交差する点の総数、ひびわれの分岐する点の総数、ひびわれの端点の総数を「ひびわれの形状」を表す指標として用いた。図-3にひびわれの交差点、分岐点、端点の一例を示す。ひびわれの交差点、分岐点、端点の検出方法としてパターンマッチングを採用した。パターンマッチングでは、7×7pixelの範囲を総当たりでチェックしており、端部に関しては8近傍のパターンと外周部に到達している線分が1つであることを条件として検出した。ひびわれの交差点、分岐点に関しては、中心の8近傍に含まれる線分の画素数と外周部に存在する線分の画素数を条件として検出した。

4.3. ひびわれの発生箇所

ひびわれが部材のどの位置に集中しているのか、全体に広がっているのかについて表す特徴として「ひびわれの発生箇所」を考慮した。本研究では、1080×1080pixelのひびわれ損傷データを360×360pixelのメッシュに9分割を行い、分割されたメッシュに含まれる総ひびわれピクセル数(0.2mm未満のひびわれピクセル数+0.2mm以上のひびわれピクセル数)の算出を行った。各メッシュで算出された総ひびわれピクセル数を、全体の総ひびわれピクセル数で除することで、各メッシュに含まれるひびわれが全体のひびわれに占める割合を算出した。

5. ひびわれの特徴と健全度の関係性の分析

本章では、定期点検で健全度 I と診断されたRC橋脚と健全度 II と診断されたRC橋脚のひびわれ損傷データから得られる特徴の差を明らかにする。ひ

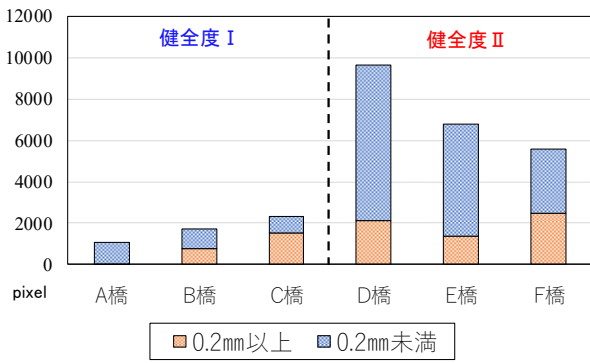


図-4 ひびわれの規模と健全度の関係

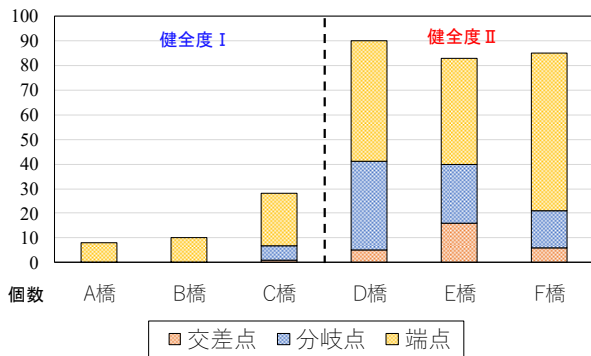


図-5 ひびわれの形状と健全度の関係

ひびわれ損傷データから得られる特徴の健全度間の差を明らかにすることで、健全度の自動分類や健全度の幅の大きさについて把握することが可能である。

5.1. ひびわれの規模と健全度の関係

各ひびわれ損傷データから算出したひびわれのピクセル数について図-4に示す。健全度 I と健全度 II では、総ひびわれピクセル数に大きな差があることが分かる。ひびわれの大きさについて、ひびわれ幅 0.2mm以上のひびわれのみに着目してみると、健全度 I であるC橋と健全度 II のE橋に差がみられなかった。このことから健全度 I と健全度 II の分類の際は、ひびわれの幅ではなく、ひびわれの量が影響していることが分かった。

5.2. ひびわれの形状と健全度の関係

各ひびわれ損傷データから算出したひびわれの交差点の数、ひびわれの分岐点の数、ひびわれの端点の数について図-5に示す。健全度 I のRC橋脚と比較して、健全度 II の橋脚はひびわれの交差点・分岐点・端点の数が、すべて多い傾向がみられた。また健全度 I のRC橋脚にはひびわれの交差点や分岐点がほとんど見られない傾向がみられた。

5.3. ひびわれの発生箇所と健全度の関係

各ひびわれ損傷データから算出した9分割したメッシュのひびわれの比率について図-6に示す。メッシュが赤色が濃いほどそのメッシュにひびわれが集中していることを示している。健全度 I のRC橋脚

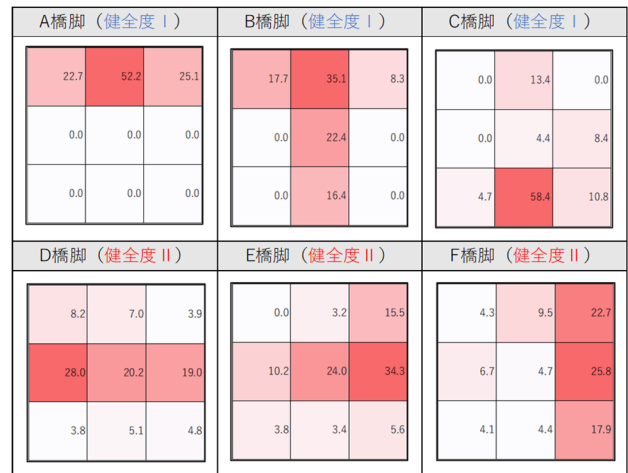


図-6 ひびわれの発生箇所と健全度の関係

は上部か下部にひびわれが集中している傾向にあるのに対して、健全度 II のRC橋脚は中央部にひびわれが集中している傾向にあることがみられた。

6. ひびわれの特徴量と発生要因の関係性

橋梁の定期点検では、ひびわれが発生した要因について診断しており、ASRによるもの、塩害によるものについては点検調書に記載されている。本研究で対象とした橋脚のうち、E橋についてはASRの判定がなされている。また、D橋、F橋に関しては、ASRの判定はなされていないものの、ASRである可能性があるとして記載されており、経過観察が必要であるとしている。塩害に関しては、どの橋脚にも見られなかった。本章では、ASRと診断された橋脚、ASRの疑いがある橋脚のひびわれの特徴を考察する。

図-4に示すように、ASRであるE橋がひびわれの量が最も多いという傾向ではなく、ひびわれ幅 0.2mm以上のひびわれについても量が多いというように際立った特徴はみられなかった。しかし、図-5に示すように、他の橋脚に比べて、E橋はひびわれの交差点の数が多くことが分かる。ASRの疑いのあるD橋とF橋に関してもひびわれの交差点数がある程度見られる。ASRの特徴として亀甲状のひびわれであることが言われており、画像からひびわれの形状が亀甲状であるという特徴は、ひびわれの交差点の数が一つの代理指標になる可能性があることがわかった。

7. まとめと今後の課題

本研究では、ひびわれ検出後の健全度診断における自動化に向けて、過去の近接目視で検出されたひびわれの損傷図と診断された健全度の関係性について分析を行った。本研究では、RC橋脚のひび割れを対象として、ひびわれの規模、ひびわれの形状、ひびわれの発生箇所の観点から健全度 I と健全度 II

の差異について把握を行った。

ひびわれの規模については、ひびわれの総量が健全度Ⅱが健全度Ⅰより多いこと、ひびわれ幅が0.2mm以上のひびわれの量については大きな差はみられないことが分かった。

ひびわれの形状については、健全度Ⅱは健全度Ⅰに比べてひびわれの交差点の数、ひびわれの分岐点の数、ひびわれの端点の数がすべて上回っていることが分かった。また、健全度Ⅰと診断されたRC橋脚は、ひびわれの交差点とひびわれの分岐点がほとんど見られず、1方向が多い傾向がみられた。

ひびわれの発生箇所については、健全度Ⅰと診断されたRC橋脚は橋脚の上部や下部にひびわれが集中しているのに対して、健全度Ⅱと診断されたRC橋脚は橋脚の中央部にひびわれが集中している傾向がみられた。

ひびわれの発生要因としてASRを対象に、ASRと診断された橋脚のひびわれの特徴の把握を行った。その結果、ひびわれの量、ひびわれ幅については、特に特徴がみられなかったが、ASRと診断された橋脚はひびわれの交差点の数が多い特徴がみられた。

本研究では、健全度Ⅰと健全度Ⅱの差異について分析を行っているが、健全度Ⅱと健全度Ⅲ、健全度Ⅲと健全度Ⅳの差異についても明らかにする必要がある。点検経験者のヒアリングから、特に健全度Ⅱと健全度Ⅲの判定が難しいという意見が挙げられており、人による判定のばらつきが大きいことが考えられるため、健全度の境目の明確化が求められる。

本研究では、データ数が少なかったため、基礎的な分析にとどまっている。今後は、健全度・ひびわれ発生要因が診断された損傷図のデータ数を増やし、統計的な分析を粉う必要がある。

また本研究では、損傷図から得られる情報と健全度・ひびわれ発生要因の関係性について分析を行っているが、健全度を診断する上で、環境条件や橋梁の諸元についても考慮していることが考えられる。今後は損傷図から得られる情報に加えて環境条件・橋梁の諸元などの情報も組み合わせて、健全度・ひびわれ発生要因の診断の特徴を把握する必要がある。

本研究では、損傷はコンクリートひびわれについてのみ分析を行っている。他の部材を考慮する場合や遊離石灰や他の損傷が伴うことで健全度が変化することが考えられるので、他の部材や他の損傷についても考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 南貴大, 藤生慎, 中山晶一朗, 高山純一: 定期点検結果を用いた既存コンクリート桁の劣化速度に影響を与える環境要因分析, 土木学会論文集 D3, Vol.73, No.5, pp323-330, 2017.
- 2) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 4, pp.255-271, 2012.
- 3) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法: 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, PP473-491, 2006.
- 4) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Nguyen Dinh THAO, 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.2, pp63-80, 2015.
- 5) 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 社会基盤施設の多元的劣化過程モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No. 1, pp34-51, 2016.
- 6) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順, 平西邦裕: 現地調査に基づく撤去橋梁の健全度診断と余寿命推定およびその検証方法, コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 3, pp119-132, 2012.
- 7) 今井道男, 太田雅彦, 露木健一郎, 今井浩, 三浦悟, 村田一仁, 高田巡: 高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.1, 279-289, 2016.
- 8) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩: 橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集 24, 52-61, 2013.
- 9) 南貴大, 藤生慎, 高山純一, 須田信也, 奥村周也, 渡辺一生: 超高解像度カメラで撮影された画像を用いた橋梁点検の実施可能性に関する基礎的検討, 社会技術研究論文集, Vol.15, pp54-64, 2018.
- 10) 木本啓介, 山口浩平, 奥松俊博, 河村太紀, 松田浩: 光学的計測手法による仮設足場を必要としない橋梁点検手法の開発, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 47(89), pp.59-66, <http://hdl.handle.net/10069/37675>, 2017.
- 11) 藤田悠介, 田口岳志, 浜本義彦: コンクリート構造物の外観検査のための画像合成および半自動ひび割れ評価, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.1, pp18-32, 2018.
- 12) 広兼道幸, 野村泰稔, 楠瀬芳之: コンクリート構造物のひび割れ形状に基づく損傷度分類への線形 SVM の適用, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp739-749, 2008.
- 13) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, Vol.2001, No.675, pp201-217, 2001.
- 14) 杉本博之, 一間恵伍, 阿部淳一, 古川浩平: SVM による社会基盤施設の健全度の総合的評価とそれによる順位付けに関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp658-669, 2009.
- 15) 国土交通省道路局国道・防災課, 橋梁定期点検要領, http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_6.pdf, 2018年10月17日閲覧

A BASIC STUDY ON BRIDGE SOUNDNESS DIAGNOSIS USING CRACK MAP IN BRIDGE INSPECTION

Takahiro MINAMI¹, Makoto FUJII², Tomotaka FUKUOKA³, Yuto Shiozaki⁴,
Junichi TAKAYAMA⁵,

In Japan, there is a discussion about the replacement or extension of the service life of the bridges built during the rapid economic growth period, which are now reaching the end of their planned service period. As issues with the continuing close visual inspection of bridges are surfacing, the remote imaging system is expected to become a new inspection method that replaces close visual inspection. Although the automation of the creation of the data of damage has been achieved, the automation of the diagnosis of the soundness level has not been performed. In order to ensure the objectivity of the diagnosis results, in this study, in order to automate the soundness level evaluation, we analyzed the relationship between the data of damage and the soundness level evaluation value at the time of periodic inspections in the past.