

橋梁の定期点検結果とセンサーデータを 組み合わせたコンクリート床版の 健全性評価に関する研究

南 貴大¹・福岡 知隆²・吉倉 麻衣³
小澤 幸雄⁴・瀬良 良子⁵・藤生 慎⁶

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

³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: m.yoshikura@stu.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 ジオ・サーチ株式会社 (〒461-0001 愛知県名古屋市東区泉1-12-35 1091ビル6階)
E-mail: y-ozawa@geosearch.co.jp

⁵正会員 ジオ・サーチ株式会社 (〒461-0001 愛知県名古屋市東区泉1-12-35 1091ビル6階)
E-mail: r-sera@iis.u-tokyo.ac.jp

⁶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: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp (Corresponding Author)

橋梁の老朽化が進んでいる中、定期的に近接目視における外観検査を行っている。コンクリート床版の外観検査では、床版ひびわれ・遊離石灰・鉄筋露出・うきなどの項目を目視・打音で把握し、健全性・対策区分を評価している。損傷の状態が著しいものに関しては内部の劣化状況を把握する詳細点検が実施されるが、外観検査での内部劣化的中率は高いといえるものではない。本研究では、点検の高度化を図るために、定期点検に記録されている損傷状態とマイクロ波で観測可能な鉄筋腐食や滞水などの内部劣化の関係性を明らかにすることを目的とする。定期点検で記録されている損傷図からコンクリート床版の各損傷の特徴量を画像処理によって取得し、外観の損傷状況を評価した。

Key Words: bridge inspection, data of damage, automatic diagnosis, microwave sensor

1. はじめに

高度経済成長期に一斉に建設された橋梁の老朽化が進んでいる。そのような中、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¹⁾。本研究で対象とするコンクリート床版においても、定期点検時に、床版ひびわれ、遊離石灰、鉄筋露出を近接目視で、うきに関しては打音検査で点検を行っており、その結果を基に部材の健全性・対策区分について診断を行っている。これらの診断において内部の劣化状況については、外観の損傷から間接的に類推し耐荷性能を判断している。一方で、マイクロ波を照射しながら道路上を走行し、床版内部の劣化

状況を点検する走行車両が開発されている。舗装の上からマイクロ波を照射することで非破壊で内部に発生するひびわれや鉄筋腐食、滞水などの情報を取得できる。点検の高度化が求められている中、外観の損傷状況の検査結果と内部の劣化状況を組み合わせ相互に補完した構造物の評価が予防保全的維持管理を行う上で必要である。しかし、道路管理者の財源・人材が不足しているという課題が残る中²⁾、すべての橋梁において同様な質と頻度で2種類の点検を継続的に行うことは困難である。そこで、本研究では、外観の損傷から内部劣化、内部劣化から外観の損傷を相互に精度よく類推することができるように、近接目視点検の結果とマイクロ波を照射できる検査車両の診断結果を用いて、外観の損傷状況と内部の劣化状況の関係性を明らかにすることを目的とする。本稿では、I県で実施された橋梁の定期点検の損傷図を用い

て、RC床版の外観の損傷状況を評価した。

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、健全性の診断に関する研究について整理する。

大島ら³⁾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⁴⁾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することで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。

橋梁の健全性の診断に関する研究の多くは、部材単位で診断された情報を基に橋梁全体の総合的な健全性や補修優先順位を決定する手法の提案である。一方、本研究では、部材単位の対策区分について、検出された損傷の情報を基に診断を行う手法について着目しており、橋梁全体の総合的な健全性や優先度を決定する上で重要な情報の取得に寄与すると考えている。

また、広兼ら⁵⁾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。

本研究では、外観の損傷から内部劣化、内部劣化から外観の損傷を相互に精度よく類推することができるように、近接目視点検の結果とマイクロ波を照射できる検査車両の診断結果を用いて、外観の損傷状況と内部の劣化状況の関係性を明らかにすることを目的とする。本稿では、I県で実施された橋梁の定期点検の損傷図を用いて、RC床版の外観の損傷状況を評価した。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基に診断された対策区分の関係性について分析し、熟練技術者が行ってきた対策区分の診断の事例の傾向を把握した。

3. 使用データ

本研究では、I県で2014-2018年度に行われた国管理の橋梁の定期点検の結果を用いた。また、コンクリート床版を対象部材としたため、コンクリート床版を構成していない橋梁は分析対象から除外した。また、損傷図の記録の方法は、道路管理者や点検を請け負う業者によって多少異なっている。本研究では、点検を請け負う業者に

よる損傷の記録方法・診断のバラツキの影響を除くために、点検業者を1つに絞り分析を行った。本研究では、53本分のRC床版の損傷図と診断結果のデータを使用した。

(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、把握した損傷については損傷図に記録し、部材単位で損傷度、損傷の発生要因、対策区分、健全性の診断を行い、それらを総合して橋梁全体の健全性を評価している⁶⁾。

(2) 対策区分の判定

定期点検では、橋梁の損傷状況を把握したうえで、構造上の部材区分あるいは部位毎、損傷種類ごとの対策区分について表-1の判定区分による判定を行う⁶⁾。定期点検では、当該橋梁の各損傷に対して補修等や緊急対応、維持工事対応、詳細調査などの何らかの対策の必要性について、定期点検で得られる情報の範囲で判定する。本研究で対象にする部材である床版は径間単位で評価されている。対策区分の判定は、変状原因や将来予測、橋梁全体の耐荷性能等へ与える影響、当該部位、部材周辺の部位、部材の現状、必要に応じて周辺の橋梁の状況等をも考慮し、今後管理者が執るべき措置を助言する総合的な評価であり、橋梁診断員の技術的判断が加えられたものである。各損傷に対して、次回定期点検までの維持・補修等の計画を検討する上で特に参考とされる最も基礎的な評価であるため、統一的な基準で行われることが重要であるとされている。

損傷種類は部位・材料種別によって異なっており、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床版は主に、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うき、床版ひびわれなどの損傷を対象としている。その中でも床版ひびわれの判定区分は複雑であり、ひびわれの方向、ひび割れの幅、間隔、漏水・遊離石灰の有無によって判定区分が異なる。

本研究では、床版ひびわれの対策区分に着目して、損傷図から得られる情報から床版ひびわれの対策区分を推定するモデルを作成する。本研究で使用したの床版ひびわれの対策区分の内訳は、判定区分B:43サンプル、判定区分C1:6サンプル、判定区分S1:2サンプル、判定区分S2:2サンプルである。

判定区分Bとは、損傷があり補修の必要があるものの、損傷の原因、規模が明瞭であり、直ちに補修するほどの緊急性はなく、放置していても少なくとも次回(5年程度以内)の定期点検に構造物の安全性が著しく損なわれることはない判断できる状態である。判定区分C1は、

表-1 対策区分の判定区分⁶⁾

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事に対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

損傷が進行しており、予防保全の観点から、少なくとも次回の定期点検までには補修等をする必要があると判断できる状態である。判定区分 S1 は、損傷があり、補修等の必要性の判定を行うにあたって原因の確定など詳細な調査が必要と判断できる状態である。判定区分 S2 は詳細調査を行う必要がないものの、追跡調査が必要と判断できる状態をいう。本稿では、これらの対策区分ごとに損傷図から取得できる情報を集計する。

(3) 定期点検における損傷図の概要

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。損傷度、損傷の発生要因、対策区分、健全性を診断する場合、点検対象部材の損傷の種類・程度・発生箇所、過去の点検時からの損傷の進展度合い・新たな損傷などを整理した損傷図は重要な情報となる。本研究で対象とするコンクリート床版の床版ひびわれは、他の損傷との発生の有無によって損傷程度が異なるため、損傷の状況を面的に把握できる損傷図は有益な情報である。

損傷図は、点検業者によって記録方法が異なるが、本研究で使用した損傷図では、各損傷について過去の点検時に検出されたものと、当該点検で検出したものを区別して記録しており、表-2、表-3、表-4に示すような損傷度についても記録している。床版ひびわれについては、ひびわれの幅についても記録している。

(4) 損傷図データの作成手順

本研究では、I県で2014-2018年度に定期点検が行われた橋梁でコンクリート床版を構成要素とし、床版ひびわれが生じているものを使用した。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を選定した。分析に使用した損傷図は53本の径間分のRC床版のデータである。本研究で扱った損傷図はCADで作成されたものがPDFデータとして記録されているものであった。そのため、損傷図には床版の損傷以外の損傷や注釈などが記載されているので、損傷図から診断に関わる有益な情報のみを含む損傷図データを以下の手順で手動で取り出した。

表-2 剥離・鉄筋露出の損傷度の判定区分⁶⁾

区分	一般損傷状況
a	損傷なし
b	-
c	剥離のみが生じている
d	鉄筋が露出しており、鉄筋の腐食は軽微である
e	鉄筋が露出しており、鉄筋が著しく腐食または破断している。

表-3 漏水・遊離石灰の損傷度の判定区分⁶⁾

区分	一般損傷状況
a	損傷なし
b	-
c	ひびわれから漏水が生じている。 錆汁や遊離石灰はほとんど見られない
d	ひびわれから遊離石灰が生じている。錆汁はほとんど見られない。
e	ひびわれから著しい漏水や遊離石灰（例えば、つらら状）が生じている。 又は漏水に著しい泥や錆汁の混入が認められる

表-4 うきの損傷度の判定区分⁶⁾

区分	一般損傷状況
a	損傷なし
b	-
c	-
d	-
e	うきがある。

- ① 画像編集ツールを使用し、定期点検で得られた損傷図の部分をクリックする。ここでクリックされた損傷図は各床版によって画像の大きさが異なるものとなる。
- ② クリックされた損傷図の上に透過率の高い画像を重ね、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。0.1mmごとに色を変えて、ひびわれ幅で区別できるように記録を行った。剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきについては損傷度を区別できるように色を変えてアンテーションを行った。その際、床版ひびわれ以外の損傷はペンツールを使用せずに、塗りつぶし機能を使用した。また過去の点検時に検出された損傷と、該当年の点検で新たに検出された・進展した損傷は区別ができるように色を変えてトレースを行った。
- ③ クリックされた損傷図を削除し、損傷のみがトレースされている画像（損傷図データ）を取得した。

以上の作成手順で作成した損傷図データの一例を図-2に示す。

4. 損傷図データから診断に関わる特徴量の抽出

本研究では、床版ひびわれの診断時に考慮している可能性のある特徴量として「ひびわれの規模」、「ひびわ

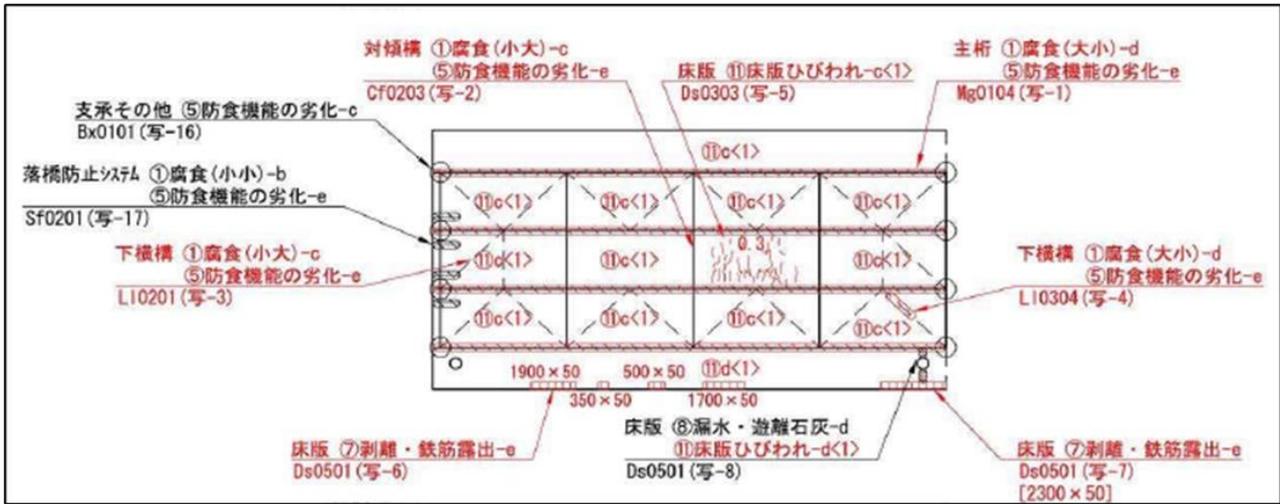


図-1 床版の損傷図の一例

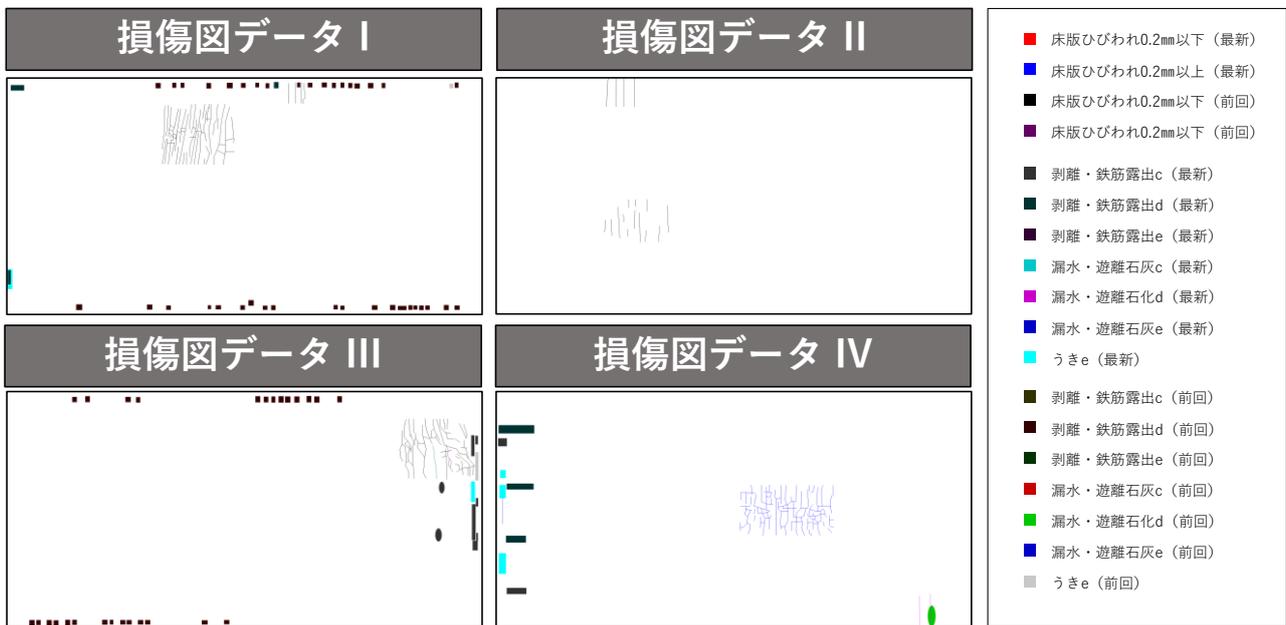


図-2 損傷図データの一例

れの形状」, 「その他損傷の規模」, の3つに着目して分析を行った. 分析に用いた特徴量を損傷図データから抽出を行った. 以下に, それぞれの特徴量について, 損傷図データからの抽出方法について記述する.

(1) ひびわれの規模

「ひびわれの規模」は対象部材であるコンクリート床版の全体に対して, どの程度ひびわれが発生しているかを示す. 本研究では, ひびわれをトレースしたピクセル数を各損傷図データのデータサイズ (総ピクセル数) で除し100を乗じた値を指標として用いた. 径間長や幅員が異なる損傷図を使用しており, 規模を合わせるために, ひびわれのピクセル数を損傷図データの画像サイズで除した. また, 本稿ではひびわれの幅については考慮せずにピクセル数を集計した. また, 最新の点検時に

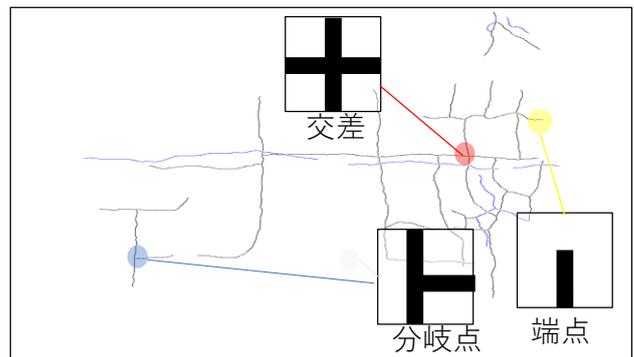


図-3 ひびわれ形状の指標 (交差点・分岐点・端点)

検出されたひびわれと前回点検時に検出されたひびわれについては区別せずに, ひびわれの通算ピクセル数を算出した.

(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。また、床版ひびわれの損傷度の判定区分にもひびわれの方向性について考慮すべき事項となっている。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、7x7 pixel 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つであるか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。

交差点、分岐点、端点の数は、前回点検時に検出されたひびわれと最新の点検時に検出されたひびわれを区別せずに通算のひびわれの形状から抽出を行った。本研究では、「ひびわれの形状」を示す指標として、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の3変数を用いた。

(3) その他の損傷の規模

その他の損傷の規模については、ひびわれと同じ面に発生している剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきについて考慮した。剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきはそれぞれ表-2、表-3、表-4 に示すような損傷度の判定区分で記録されている。各損傷について損傷度ごとにピクセル数を数え上げ、ピクセル数の集計を行い、損傷図データの画像サイズ（総ピクセル数）を除いた値に 100 を乗じた値を指標として用いた。前回点検時に検出された損傷と最新の点検時に検出された損傷の通算のピクセルの数（「剥離・鉄筋露出： $c \cdot d \cdot e$ 」「漏水・遊離石灰： $c \cdot d \cdot e$ 」「うき： e 」）を指標として用いた。

床版ひびわれについては路面舗装のひびわれの影響も考えられるが、本稿では考慮しないものとし、今後の課題とした。

5. 外観の損傷状況と内部劣化の関係性の分析

本章では、損傷図データから取得された外観の損傷の特徴量とマイクロ波を照射し取得される床版の内部劣化のデータの関係性を分析し、考察する。本稿では、損傷図データから取得された外観の損傷状況の特徴量の集計のみを示す。

表-5 対策区分における外観損傷の特徴量の平均値・標準偏差

評価指標	床版ひびわれの対策区分				
	B	C1	S1	S2	
ひびわれの割合 (%)	平均値	0.3	0.8	0.6	0.4
	標準偏差	0.3	0.3	0.3	0.3
ひびわれの交差点の数	平均値	3.3	42.2	14.5	18.5
	標準偏差	6.7	36.4	7.5	18.5
ひびわれの分岐点の数	平均値	1.3	20.7	1.5	28.0
	標準偏差	2.8	19.0	0.5	28.0
ひびわれの端点の数	平均値	28.8	94.0	66.5	86.5
	標準偏差	20.8	55.9	33.5	79.5
剥離・鉄筋露出の割合 (%)	平均値	0.2	0.3	0.3	0.6
	標準偏差	0.5	0.4	0.0	0.6
漏水・遊離石灰の割合 (%)	平均値	0.3	1.1	2.0	0.8
	標準偏差	0.4	1.5	1.1	0.8
うきの割合 (%)	平均値	0.2	0.4	0.1	0.5
	標準偏差	0.3	0.4	0.0	0.5



図-4 検査車両による内部劣化の調査の様子

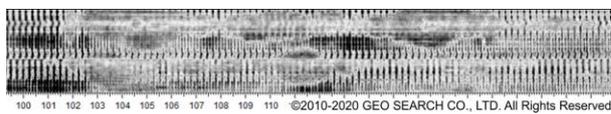


図-5 コンクリート床版の内部劣化の調査結果の一例

(1) 外観の損傷状況の集計

定期点検時に診断された対策区分ごとに損傷図データから得られる外観損傷の特徴量を集計し、平均値と標準偏差を算出したものを表-5に示す。対策区分 B に比べ、対策区分 C1, S1, S2 ではひびわれの割合や交差点、分岐点、端点の数が大きい傾向がみられた。また、同じ対策区分と評価されているにもかかわらず、標準偏差が大

大きく、一概に一つの特徴量で対策区分を決定することは困難であることが明らかとなった。今後はこれらの特徴量を説明変数とし、対策区分や内部劣化の状態を目的関数とした分類モデルを構築する必要がある。

(2) マイクロ波の照射による床版内部の劣化状況

本研究では、内部劣化を計測する手法として、スケルカTMを使用する。検査車両を用いて、走行しながらマイクロ波を照射し、路面上から非破壊で内部のひびわれ・鉄筋腐食・滞水の評価する。検査の様子を図-4に、マイクロ波による検査の結果を図-5に示す。内部劣化の調査を定期点検で損傷がみられる RC 橋脚に対して実施し、内部劣化を評価するとともに、外観の損傷との関係性を分析する。

6. まとめと今後の課題

本研究では、近接目視点検で記録している損傷図から損傷の特徴量を抽出し、対策区分ごとに特徴量の平均値・標準偏差を算出し、これまで熟練技術者が行ってきた対策区分の診断の事例の傾向を把握した。その結果、対策区分 B に比べ、対策区分 C1, S1, S2 ではひびわれの割合や交差点、分岐点、端点の数が大きい傾向がみられた。また、同じ対策区分と評価されているにもかかわらず、標準偏差が大きく、一概に一つの特徴量で対策区分を決定することは困難であることが明らかとなった。今後は損傷図データから得られるの特徴量を説明変数とし、対策区分や内部劣化の状態を目的関数とした分類モデルを構築する必要がある。そのために、損傷図の記録の整理がなされている RC 床版に対して、マイクロ波を照射する検査車両を用いて内部劣化状況の把握を行う。

本研究では、損傷図の記録方法が比較的整っている国管理の橋梁点検結果を用いた。国管理であり対策区分が比較的高い床版のみが有効サンプルとなっていた。特に財政や人材不足の課題がある市町村管理の橋梁について分析し、比較を行う必要がある。そのために、道路管理者・点検業者によって記録方法が異なる損傷図から得ら

れるデータをそろえて分析する手法の検討が必要である。また、データセットについても十分な量が得られていないため、今後の課題としてデータセットの効率的な取得方法を検討する必要がある。

本研究で対象とした部材・損傷は、コンクリート床版の床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきといった床版の下面の情報のみであるが、床版内部の劣化に与える影響として舗装の状態についても考慮する必要がある。そのため、該当する部材・損傷以外の状態についても今後考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：老朽化対策の取組み、
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>, 2020年5月29日閲覧
- 2) 一般社団法人次世代センサ協議会「自治体橋梁における橋梁点検業務実態調査報告書」
http://www.socialinfra.org/p_activity/questionnaire/Bridge_tenken_Digest.pdf, 2020年5月29日閲覧
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省道路局国道・防災課, 橋梁定期点検要領,
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf, 2020年5月3日閲覧
- 7) ジオ・サーチ株式会社 スケルカ技術とは
<http://www.geosearch.co.jp/tech/> 2020年5月3日閲覧

0
0

A STUDY ON THE SOUNDNESS EVALUATION OF CONCRETE SLABS BY COMBINING THE RESULTS OF REGULAR BRIDGE INSPECTION AND SENSOR DATA

Takahiro MINAMI, Tomotaka FUKUOKA, Mai YOSHIKURA,
Yukio OZAWA, Ryoko SERA, and Makoto FUJII

As the bridges are aging, periodic close visual inspections are conducted. In the visual inspection of concrete floor slabs, items such as cracks in the floor slab, free lime, exposed reinforcing bars, and slabs

are visually and tapped, and the soundness and countermeasure classification are evaluated. Detailed inspections are carried out to understand the internal deterioration status of those with significant damage, but the accuracy rate of internal deterioration in the visual inspection is not high. In this study, in order to build a model that estimates internal deterioration from the information obtained by visual inspection, the damage state recorded in the periodic inspection and the inside such as rebar corrosion and water retention that can be observed by microwaves are used. The purpose is to clarify the relationship of deterioration. The feature amount of each damage of the concrete floor slab was acquired by image processing from the damage diagram recorded in the periodic inspection, and the damage condition of the appearance was evaluated.