

論文 ひび割れ抽出と FEM による既設 RC 桁に対する作用履歴の推定に関する一考察

宮本 祐輔*1・渡辺 健*2・野間 康隆*3

要旨: 鉄筋コンクリート (RC) 構造物に発生しているひび割れの発生原因を推定することは、現在や将来の構造物の性能を評価し、また管理するうえで有用な情報になると考えられる。本研究では、画像によりひび割れを自動抽出し、その抽出結果を非線形有限要素解析 (FEM) により再現することで、RC 橋りょうに作用した影響要因の履歴や組合せを推定することを目的に検討を行った。そして、主桁、高欄、軌道などの重量、列車走行による荷重、架設地域の温度低下、およびコンクリートの収縮ひずみ、クリープ係数の履歴が、対象とした橋りょうに及ぼす影響について明らかにした。

キーワード: RC 桁、ひび割れ、有限要素解析、作用

1. はじめに

老朽化や少子高齢化に伴う技術者不足などの影響で、土木構造物の維持管理を効率良く行うための技術が求められている。コンクリート構造物のひび割れは外観上最も捉えやすい変状であり、これを確実に捉え、構造物の評価や予測に活用することができれば、維持管理上有効である。しかしながら、総延長距離の大きい土木構造物群に対して、目視に頼った調査では、時間や労力を要することに加え、河川や橋脚高さが高いなどの制約により、視認が困難な橋りょうも多い。一方、デジタル画像は、広域にわたるコンクリート構造物表面のひび割れを記録することに有効であることも報告されており、今後、画像の取得条件の影響などを考慮した検討が望まれる。

調査によりひび割れが確認された場合は、必要により原因の推定、性能評価、性能の予測に基づき、健全度判定や補修判断を行う。しかしながら、既設鉄筋コンクリート (RC) 主桁におけるひび割れは、列車走行や乾燥収縮など、さまざまな事象が作用することにより発生しており、それぞれの相互作用の結果であるといえる。設計における作用の組合せが設定されているものの、これを検証するには至っていない。対象構造物が受ける作用を時間軸を考慮して再現できれば、将来予測が定量的に実施できるようになり、剥落による公衆災害の防止など先手を打った維持管理、すなわち予防保全の観点に立った維持管理が期待できる。

RC 構造物の損傷を再現できるツールとして、非線形有限要素解析 (FEM) が挙げられる²⁾。数値解析の省力化を実現するためには、環境作用や荷重作用といった、構造物に対する全ての作用の時刻歴やその組合せの可能性を忠実に反映するのではなく、ひび割れと作用の因果

関係を明らかにし、検討すべき焦点を絞ることが重要である。

本研究では、画像によりひび割れを抽出し、その抽出結果を FEM により再現することで、RC 橋りょうに作用した影響要因の履歴や組合せを推定することを目的に検討を行った。検討では、供用 RC 橋りょうを対象に、画像処理によるひび割れ抽出を図った。そして、FEM を用いて、主桁、高欄、軌道などの重量、列車走行による荷重、架設地域の温度低下、およびコンクリートの収縮ひずみ、クリープ係数の履歴が、対象とした橋りょうに及ぼす影響について明らかにした。

2. 画像によるひび割れ抽出

2.1 対象構造物

本研究で対象とした供用中の鉄道 RC 橋りょうの外観を図-1に、諸元を表-1に示す。当該構造物の調査時は、建設後 12 年が経過しており、建設後、5 年から供用 (列車走行) 開始である。

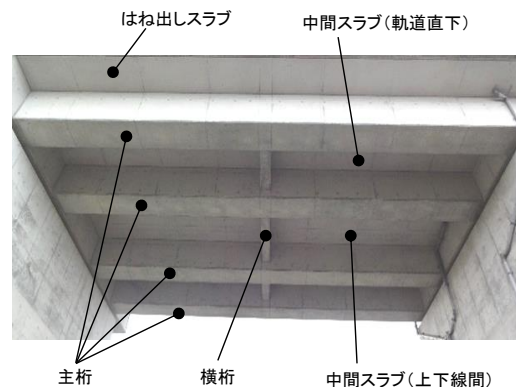


図-1 対象構造物の外観

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 副主任研究員 (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 主任研究員 博士 (学術) (正会員)

*3 株式会社安藤・間 技術研究所土木研究部 構造・材料グループ 博士 (学術) (正会員)

2.2 撮影およびひび割れの自動抽出方法

(1) 概要

本研究では、輝度と幾何学的特性を用いたひび割れ画像計測手法³⁾を用いた。本手法は、文献³⁾に示す条件下において、分解能 0.35mm を確保し撮影したデジタル画像から輝度と幾何学的特性を用いて、幅 0.20mm 以上のひび割れを 90% 検出可能であり、このうち湾曲等の小さい計測点では誤差 0.10mm 以下でひび割れ幅を計測可能な手法である。

(2) 撮影方法

RC 主桁下面 11.2m×13m、および最外方に位置する主桁の外側側面 1.1m×13m を対象に撮影を行った。撮影は一眼レフデジタルカメラと三脚を用いて、撮影面に対して非正対の状態で行った。画像一枚当たりの撮影範囲は最大 2.4m×1.8m (分解能 0.43mm) である。なお、撮影した画像は、汎用のソフトにより正対補正を行った。

(3) ひび割れの抽出方法

ひび割れ部における輝度は背景輝度より暗部になることから、まず、背景輝度を算出した。正対補正を行った画像に対し、メディアンフィルタを用いて輝度の中央値を算出し、これを画素の背景輝度とした。ここで、全ての画素に対して計算を行うと計算時間を要し非効率であるため、画像上に仮想的にグリッドを想定し、4 つの交点における背景輝度からこれらが囲む内部の画素における背景輝度を内挿した。

続いて、背景輝度よりも閾値以上輝度の低い画素をひび割れが存在する可能性がある画素として抽出した。ただし、これらは表面気泡など、ひび割れ以外の情報も含むため、幾何学的特性からひび割れを抽出した。すなわち、ひび割れは表面気泡などより辺長比が大きく、一定以上の面積を有するという幾何学的特徴に着目した。具体的には、図-2 に示すようにひび割れ等を構成する画素の面積の和を面積、ひび割れ等を内包する矩形の対角線を長さとし、面積を長さの 2 乗で除した値を判別指標として、 $S/L^2 \leq 0.1$ をひび割れとして抽出した。

(4) ひび割れ幅の計測方法

本検討におけるひび割れ幅の計測位置は、分割した格子と交わる点とした。まず、最小二乗法によりひび割れの角度を算出する。続いて、ひび割れと直交する直線上で、画素の輝度と背景輝度の差分を算出し、この輝度差の総和、分解能、ひび割れ角度の関数によりひび割れ幅を計測する。この関数により、分解能よりも小さいひび割れ幅も計測可能である。

2.3 ひび割れの抽出結果

画像処理によるひび割れの抽出結果を、図-3 および図-4 に示す。なお、画像で視認できたひび割れを記入した画像を併せて示している。比較した結果、比較的短

いひび割れについては検出結果にやや差異があるものの、比較的長いひび割れは同様の抽出結果となっており、自動検出においても、ひび割れ発生の特徴を概ね捉えていると考えられる。

画像処理で確認された対象構造物のひび割れ発生傾向として、中間スラブ（特に、主桁 BC 間）にて橋軸方向のひび割れが卓越して発生している。なお、主桁 BC 間に発生したひび割れの幅の平均値は、0.19 mm であった。また、主桁下面にはひび割れはほとんど確認されず、主桁側面に鉛直方向のひび割れが確認された。

表-1 対象構造物の諸元

構造形式	複線用 RC 単純 T 形 4 主桁
スパン長	14.0m
GL からの高さ	9.9m

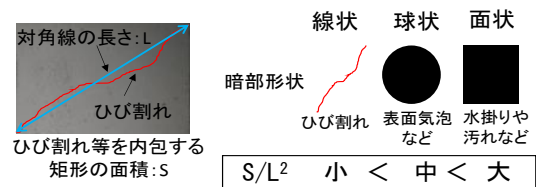
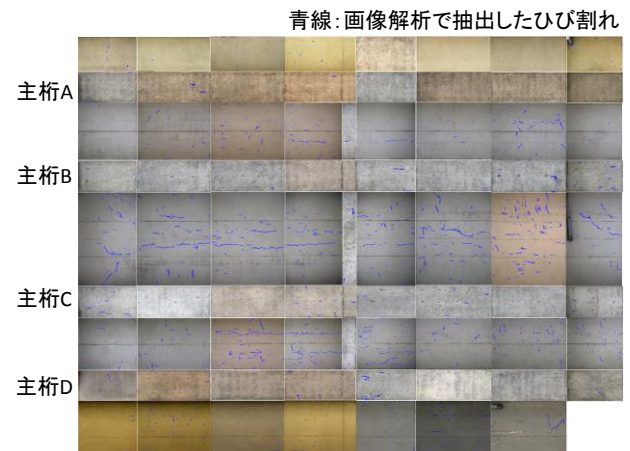
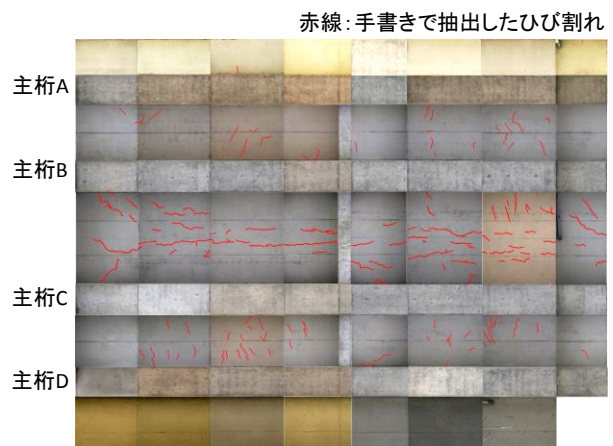


図-2 幾何学的特性によるひび割れの抽出



(a) 画像解析による自動抽出



(b) 画像から手書きで抽出

図-3 ひび割れの抽出結果 (桁下面)

3. FEMによる検討

3.1 解析モデル

解析では、DIANA10.1を用いて、既設RC主桁を3次元でモデル化した。構造物のモデル図と材料物性値を、**図-5**に示す。モデル化は4主桁全てを対象とし、横桁を含む構造全体を対象とすることで、損傷の進行に伴う部材間の荷重分担の変化にも着目した。コンクリートの応力-ひずみ関係は、Hordijk 曲線（引張側）と、Parabolic 曲線（圧縮側）を使用した⁴⁾。また、鉄筋は埋込み鉄筋要素を用いてモデル化した。なお、対象構造物は建設後12年と経年が比較的浅いことに加え、構造物に錆汁等が確認できなかったことを考慮に入れて、鉄筋腐食は考慮していない。

3.2 検討ケース

表-2に、FEM解析の検討ケースを示す。収縮ひずみ、クリープ係数、列車荷重、温度変化の有無を変数として、ひび割れひずみの経時変化を検証した。これは、ひび割れに対する照査時の作用の組合せとして、鉄道の設計標準⁵⁾の例示を参考に設定した。解析における作用のモデル化の方法を、以下に示す。

死荷重は、主桁の自重を単位体積重量によりモデル化したが、軌道、高覧などの付帯構造物による荷重を考慮して、桁に荷重として作用させている。また、軌道敷設後のロングレール縦荷重を、作用方向を高温度と低温度で180度回転させて作用させている。

列車荷重は、対象橋梁には建設から5年後以降に、列車の走行ダイヤに応じて継続して作用させている。検討では、**図-6**に示すように、移動荷重として載荷・除荷を6回繰り返して段階的に列車荷重が移動する過程を、上り線に1回、下り線に1回、上下線同時に1回を行い、これらの組合せを1セットとした。載荷のタイミングは、**図-7**に示すように温度変化の最大値および最小値としており、12年目までに計8セット与えた。これは、本研究において疲労といった繰返し荷重作用による損傷の進展は考慮していないため、温度および列車荷重の重畳が最も大きいと考えられる組合せを想定して設定したものである。なお、列車走行による制動荷重を列車進行方向に作用させることで考慮している。

温度変化は、**図-7**に示す通り、既設RC主桁が供用される地域近傍の気象観測所における温度（最高：38.5℃、最低：-6.7℃⁶⁾を参考に、温度履歴を省略して設定した。Case3は、温度変化がない条件とし、20℃で一定とした。なお、温度は、解析モデルにおいて全断面に均一の値を設定した。

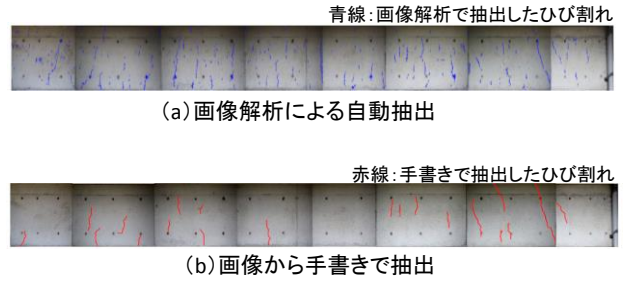


図-4 ひび割れの抽出結果（主桁A側面外側）

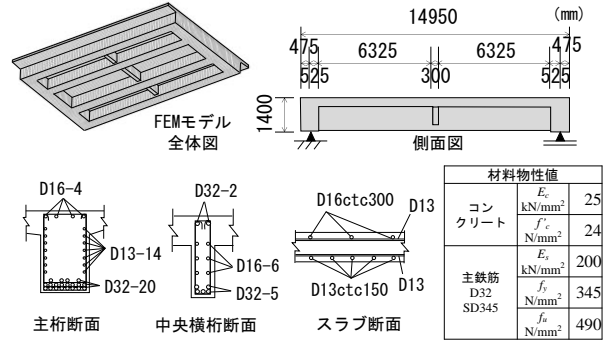


図-5 構造物のモデル化

表-2 FEM解析の検討ケース

	死荷重	列車荷重	温度変化	乾燥・クリープ
Case1	○	○	○	モデルA
Case2	○	○	○	
Case3	○	○		モデルA
Case4	○		○	モデルA
Case5	○		○	モデルB

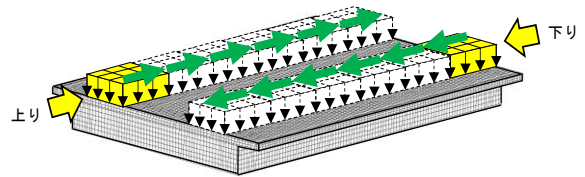


図-6 列車荷重のモデル化

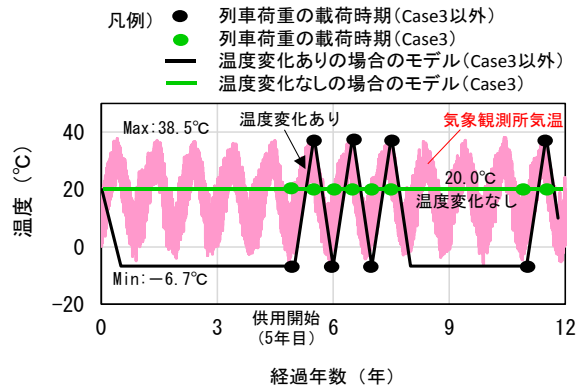


図-7 温度変化のモデル化

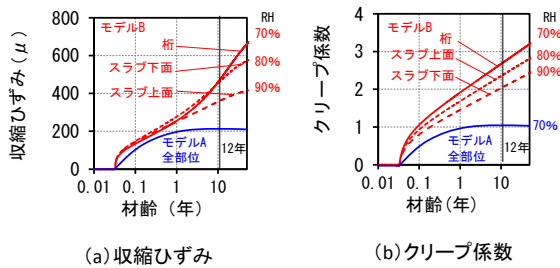


図-8 収縮ひずみ, クリープ係数

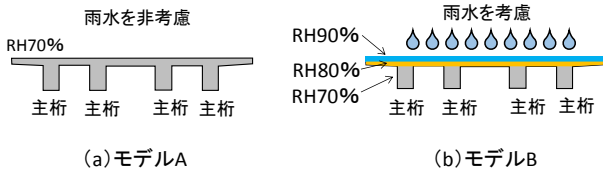


図-9 断面内における湿度の設定方法

収縮ひずみ, クリープ係数の算定式は, 図-8に示すモデル A⁵⁾とモデル B²⁾を用いた。なお, モデル B を適用する際は, 図-9に示すようにスラブ上面の RH (相対湿度) を 90%, スラブ下面を 80%, 主桁を 70%と設定することで, 雨水によるスラブ上面の水環境を考慮した。モデル A は全部材共通で RH70%に設定した。なお, RH70%は, 現地の湿度の平均値⁶⁾である。

3.3 作用の組合せの影響

解析結果として桁下面のひび割れひずみを図-10に示す。いずれの解析結果も, 画像によるひび割れ抽出を行った時期である, 建設後 12 年目のひび割れひずみを示している。

(1) 収縮ひずみ, クリープ係数の影響について

Case2 (図-10 (b)) は, 収縮ひずみ, クリープ係数を考慮していないが, スラブにひび割れひずみがほとんど発生しない点において, 現地のひび割れ状況 (図-3 (a)) と整合しない。一方, 収縮ひずみ, クリープ係数を考慮した Case1 (図-10 (a)) では, 中間スラブのひび割れが発生したことから, スラブにおける橋軸方向のひび割れの再現には, コンクリートの収縮ひずみおよびクリープ係数を考慮することが有効である。さらには, この収縮ひずみの絶対値について, Case4 (図-10 (d)) と Case5 (図-10 (e)) を比較すると, モデル A に対し収縮ひずみが大きなモデル B を用いた結果の方が, スラブにひび割れが多く, 主桁 AB 間, CD 間の橋軸方向のひび割れ (図-3 (a)) も再現できていることから, 現地のひび割れの特徴を捉えていると考えられる。

(2) 温度変化の影響について

温度変化を考慮していない Case3 (図-10 (c)) では, 主桁間のスラブにはひび割れひずみがほとんど発生

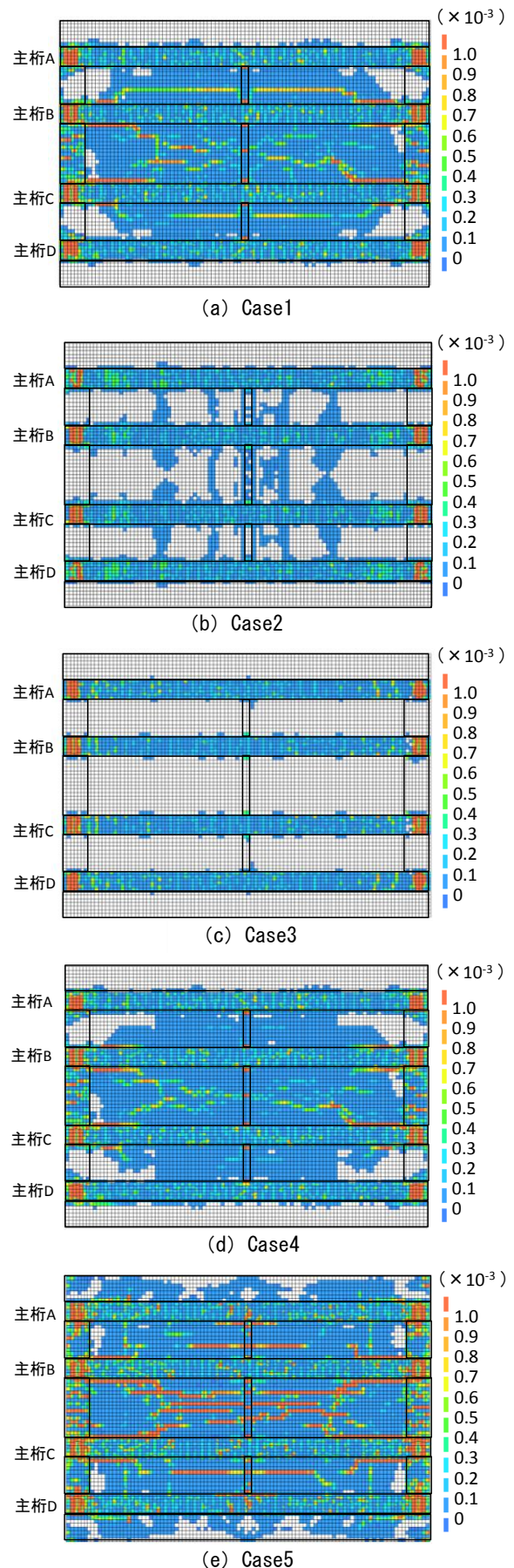


図-10 ひび割れひずみ (桁下面, 12 年目)

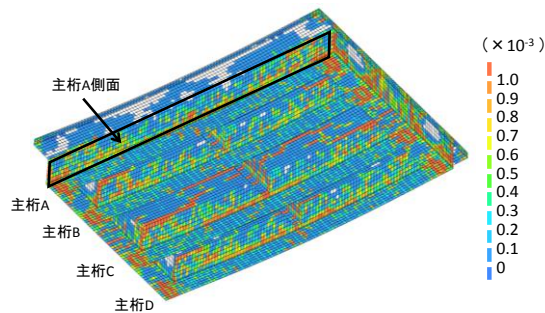


図-11 ひび割れひずみ (Case5, 主桁A側面, 12年目)

せず、現地のひび割れ状況と整合しない。解析では、温度低下によるコンクリートの収縮が発生せず、主桁間のスラブでの橋軸直角方向のひずみが抑制されたためである。(1)で述べた通り、この橋軸直角方向のひずみをひび割れの分布の特徴(図-3(a))の様に再現するには、Case2のように収縮ひずみ、クリープ係数だけでは困難であり、Case1~3では、さらに温度低下による収縮ひずみとして加味したCase1(図-10(a))が、ひび割れの分布の特徴を捉えていると考えられる。

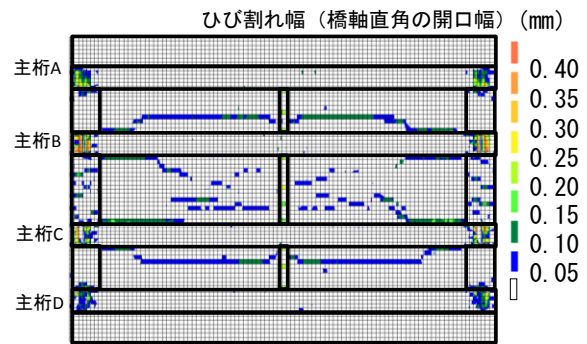
(3) 列車荷重の影響について

Case1(図-10(a))とCase4(図-10(d))を比較すると、Case4はひび割れひずみがやや小さい。特に、Case4では軌道直下の主桁AB間、CD間のスラブに生じていた橋軸方向のひび割れ(図-3(a))が再現されず、この部位のひび割れの再現には、Case1のように列車荷重相当の作用が有効であった。ただし、収縮ひずみ、クリープ係数(モデルB)を適用したCase5(図-10(e))は、現地のひび割れ分布の傾向と一致し、いずれの主桁間においても橋軸方向に進展したひび割れを捉えている。また、図-11に示すように、主桁Aに着目すると下面に比べて側面のひび割れひずみが大きくなり、現地のひび割れ状況(図-4(a))と整合する。

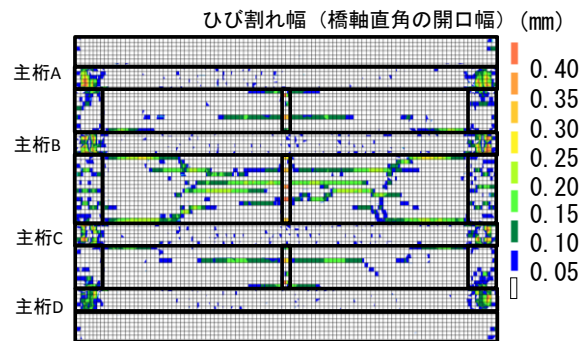
3.4 複数の材齢におけるひび割れ幅の調査結果との比較

現地のひび割れの特徴を比較的精度よく再現できた、Case1およびCase5の作用の組合せを対象に、線路直角方向のひび割れ幅を算出した結果を図-12に示す。ひび割れ幅は、ひび割れひずみを要素長で乗ずることで算出した。その結果、スラブにおけるひび割れ幅は、Case1(図-12(a))では0.05~0.1mmに対し、Case5(図-12(b))では0.15~0.2mmであった。ところで、画像処理によるひび割れ幅の計測結果の平均値が0.19mmであったことを踏まえると、Case5が12年目のひび割れ発生の特徴を、発生位置のみならずその幅を含めてより再現できていると考えられる。

ところで、Case1およびCase5の作用の組合せを対象として、建設後3年として算出したひび割れ幅を図-13に、当該構造物の建設後3年(供用開始前)に近接目

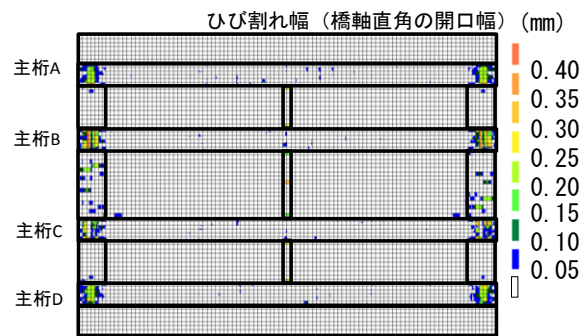


(a) Case1

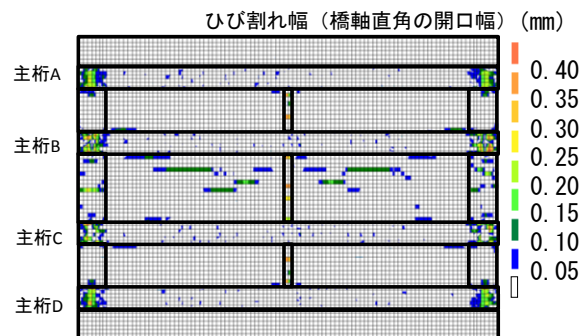


(b) Case5

図-12 ひび割れ幅(桁下面, 12年目)



(a) Case1



(b) Case5

図-13 ひび割れ幅(桁下面, 3年目)

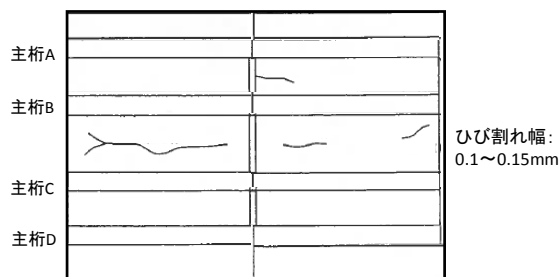


図-14 目視によるひび割れ調査記録
(桁下面, 3年目)

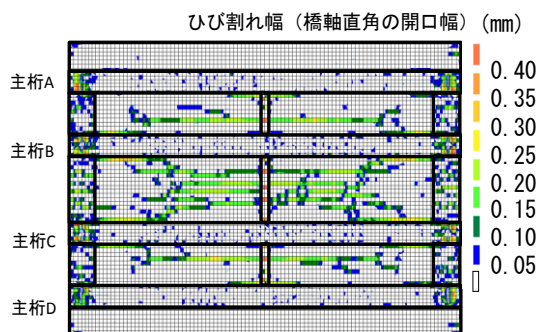


図-15 Case5によるひび割れ幅の将来予測
(桁下面, 50年目)

視で確認したひび割れの調査記録を図-14にそれぞれ示す。Case5(図-13(b))は建設後3年目では、建設後12年に対し、ひび割れの本数が全体的に少ない点、主に主桁BC間のスラブに橋軸方向のひび割れが生じていた点において、その特徴を捉えていると考えられる。一方で、Case1(図-13(a))は3年目でひび割れが殆ど確認されず、3年目のひび割れ調査記録と整合しない。

3.5 作用の組合せの推定とモデルの活用

FEMで得られた建設後12年および建設後3年に発生しているひび割れの特徴(発生部位、方向、ひび割れ幅)に着目して、これを再現可能な作用履歴の組合せを検討した結果、本研究で用いた解析手法では、Case5が適切であったと考えられる。これは、作用の履歴や組合せ(シナリオ)を適切に考慮すれば時間軸上で随時変化するひび割れの発生・進展を捉えることが可能となるが、対象としたRC橋りょうの事例では、Case5の組合せが相応しいことを示唆している。

最後に、Case5を適用して建設後50年に橋りょう下面に発生するひび割れを予測した。ここで12年以降の温度履歴は、低温(-6.7℃)で推移し、50年目で20℃に変化するものとした。図-15にひび割れ幅の予測結果を示す。建設後12年と比較して、主桁間のスラブに発生したひび割れが橋軸方向に進展したが、その他、ひび割れ幅の顕著な開口などといった、変状の進展傾向に特徴は見られなかった。なお、今回の予測では鉄筋腐食は考慮

していないが、50年を想定する場合、荷重や収縮によるひび割れに伴う鉄筋腐食や疲労等を必要により考慮することで、さらに予測精度は向上するものと推測される。

本稿では、作用の履歴の推定や変状の予測に焦点をあてており、このような変状がRC橋りょうの構造性能評価を示すまでには至っていない。構造物の管理にあたっては、構造性能評価や予測に基づく、変状の調査を定める必要があるものの、本稿の結果を踏まえると、ひび割れが進展する部位や方向が予測できることから、構造物の見べきポイントを提示することにも活用できると考えられる。また、今後の調査の結果、ひび割れの発生や進展について、予測と異なる変状が表れた場合、想定した作用の組合せを見直す必要性が示唆されるなど、調査の実質化につながると考えられる。

4. まとめ

本研究では、供用鉄道RC4主桁を対象として、画像処理によりひび割れの自動抽出を行い、その抽出結果に基づき、構造物に作用した履歴や組合せをFEMを用いて推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 画像処理によるひび割れの自動抽出を行った結果、輝度と幾何学的特性による手法を用いることで、ひび割れを概ね抽出することができた。
- (2) FEMにより、対象とした鉄道RC4主桁に発生したひび割れを再現するためには、死荷重、温度低下、収縮ひずみ、クリープ係数の履歴を考慮することが適切であった。
- (3) FEMを活用して、発生しているひび割れに基づき、作用の履歴や組合せを設定することで、ひび割れの要因や、調査の着眼点、変状や構造物の性能の予測に活用できると考えられる。

参考文献

- 1) 鵜飼正人：画像処理技術を用いてトンネルを検査する, RRR, vol.72, No.9, 2015.9
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 2018.3
- 3) 佐藤祐子, 渡辺健, 野間康隆, 西村毅, 澤田純之：輝度と幾何学的特性を用いたRC主桁のひび割れ画像計測手法の開発, 土木学会第73回年次学術講演会, Vol.73, V-611, 2018
- 4) DIANA-10.1 User's Manual -Material Library first ed.2017.2
- 5) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造, 丸善, 2004.4
- 6) 気象庁ホームページ：http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html