

# 画像およびFEMを用いたRC桁のひび割れ発生要因分析

渡辺 健\* 宮本 祐輔\*\*

Analysis of Factors for Cracking at RC Girders by Using Image Analysis and FEM

Ken WATANABE Yusuke MIYAMOTO

To predict causes of the cracking of concrete is useful for evaluating the present or future performance of reinforced concrete structures. The objective of this study is to evaluate the influential factors acting on the reinforced concrete girders by automatically extracting cracks from images and reproducing the extraction results by non-linear finite element analysis (FEM). The paper clarifies the effect of the weight of girders, soundproof wall, tracks, vehicle, temperature, shrinkage, and creep of concrete on the performance of the RC bridge.

キーワード：鉄筋コンクリート（RC）桁、画像、ひび割れ、非線形有限要素解析、収縮

## 1. はじめに

コンクリート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、外観で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、維持管理に有効である。しかしながら、総延長距離の大きい鉄道構造物群に対して、目視に頼った調査では、大きな労力を要することに加え、河川中にある、橋脚高さが高いなどの制約により、視認が困難な対象物も多い。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が報告されており<sup>1)</sup>、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。

構造物の管理において、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、変状の予測、性能評価、性能の予測に基づき、健全度判定や補修の判断を行う。しかしながら、既設の鉄筋コンクリート（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、対象構造物の変状の要因を特定できれば、構造物の変状や性能に関する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<sup>2)</sup>。通常この解析には大きな労力を要するが、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を推定することを目的として検討を行った。本検討では、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、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

図1に対象とした鉄道RC橋りょうの外観を、表1にその諸元を示す。以下に示す構造物の画像による調査は、建設後12年目に行った。なお、建設5年後に、供用（列車走行）が開始されている。

### 2.2 撮影およびひび割れの自動抽出方法

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<sup>3)</sup>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ることで、幅0.20mm以上のひび割れを約90%検出可能である。特に、湾曲等の小さい計測点では、誤差0.10mm以下で計測可能である。

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

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

\*\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

対して非正対の状態では撮影を行った。画像一枚当たりの撮影範囲は、最大  $2.4\text{m} \times 1.8\text{m}$ （分解能  $0.43\text{mm}$ ）である。撮影した画像は、汎用のソフトウェアにより正対補正を行った。

ひび割れ部における輝度は背景輝度より低くなることから、はじめに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大きな計算時間を要し非効率であるため、画像上に仮想的なグリッドを想定し、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、背景輝度に対して、輝度があるしきい値より低い画素を、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、幾何学的特性に着目して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（図2）。ひび割れ等を構成する画素の面積の和を面積  $S$ 、ひび割れ等を内包する矩形の対角線を長さ  $L$  とし、面積を長さの2乗で除した値を判別指標として、 $S/L^2 \leq 0.1$  となるものをひび割れとして抽出した。

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。この処理により、分解能よりも小さいひび割れ幅が計測可能である。

### 2.3 ひび割れの抽出結果

図3および図4に、画像処理によるひび割れの抽出結果と、人間の目により抽出したひび割れの抽出結果の例を示す。いずれも、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。その結果、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、長いひび割れは人間の目と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間の中間スラブに発生したひび割れの幅の平均値は、 $0.19\text{mm}$ であった。また、主桁下面にはひび割れが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。



図1 対象構造物の外観

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         |

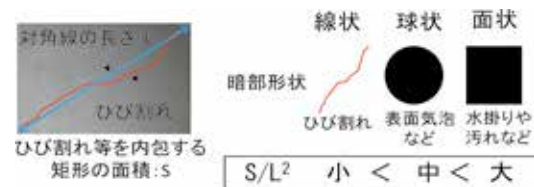
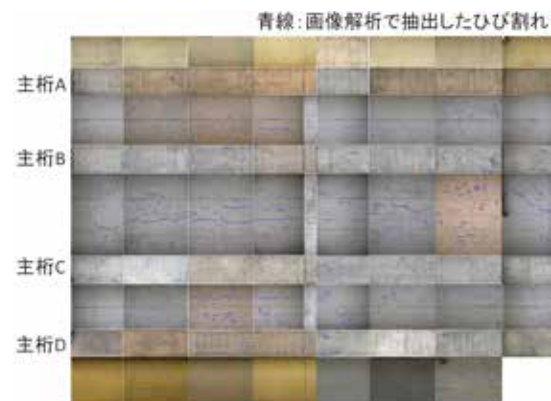
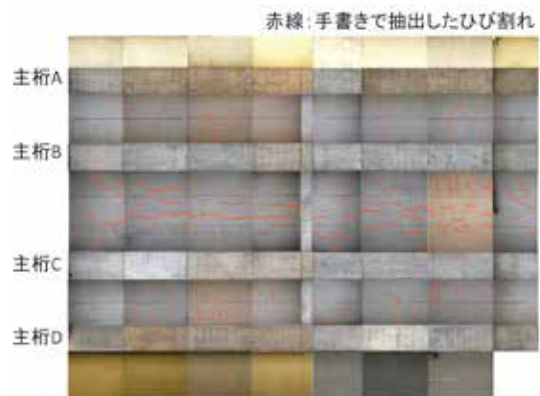


図2 幾何学的特性によるひび割れの抽出



(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

本解析では、DIANA10.1 を用いて、既設 RC 主桁を 3 次元でモデル化した。図 5 に、構造物のモデルと材料物性値を示す。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<sup>4)</sup>。また、鉄筋は埋込み鉄筋要素を用いた。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。これらは、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<sup>5)</sup> 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、高欄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た。また、軌道敷設後のロングレール縦荷重を、高温時と低温時で作用方向を 180 度反転させて作用させた。

列車荷重は、対象橋梁の建設から 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、列車荷重を移動荷重として載荷・除荷を 6 回繰り返して段階的に移動する過程を、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 セットとしてモデル化した。図 7 に、温度変化のモデル化方法を示す。載荷のタイミングは、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等の繰返し荷重作用による損傷の進展を考慮していないため、温度および列車荷重を同時に作用させた影響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も考慮しており、列車進行方向に作用させている。

温度変化は、図 7 に示す通り、対象地域近傍の気象観測所における温度（最高：38.5℃、最低：-6.7℃）<sup>6)</sup> を参考に、温度履歴を一部省略して設定した。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 8 に、検討で用いた収縮ひずみおよびクリープ係数の試算例を示す。収縮ひずみおよびクリープ係数の算定

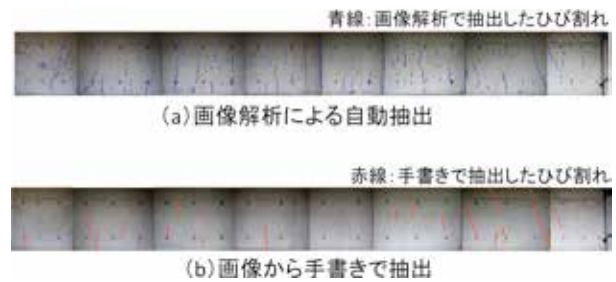


図 4 ひび割れの抽出結果（主桁 A 側面外側）

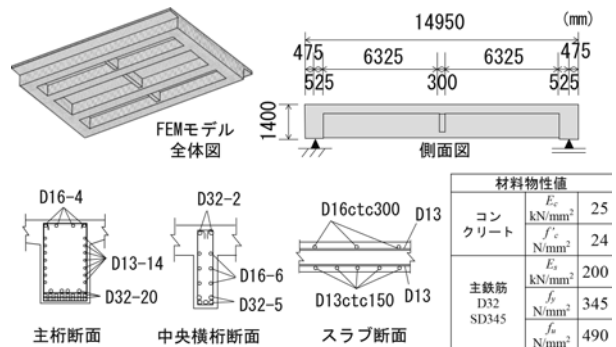


図 5 構造物のモデル化

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    |

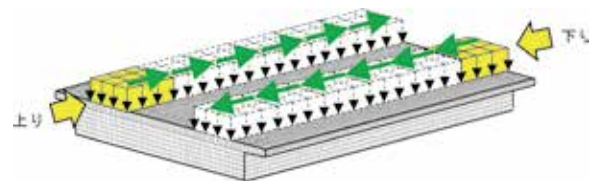


図 6 列車荷重のモデル化

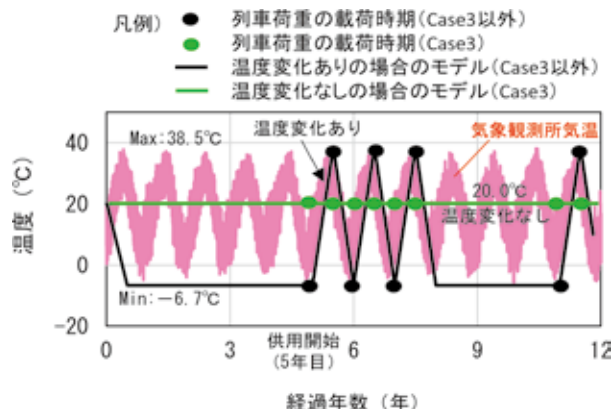


図 7 温度変化のモデル化

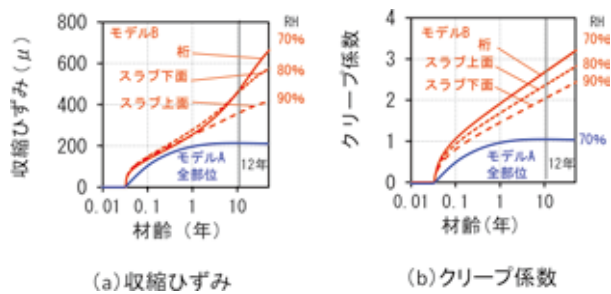


図8 収縮ひずみ，クリープ係数

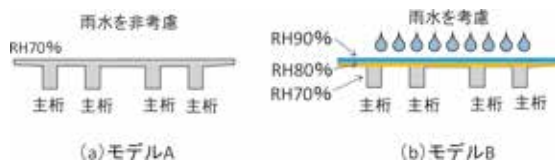


図9 断面内における湿度の設定方法

式は、モデル A<sup>5)</sup> とモデル B<sup>2)</sup> を用いた。図9に、断面内における湿度の設定方法を示す。モデル B を適用する際は、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 RH=70% に設定した。なお、RH=70% は、現地の湿度の平均値<sup>6)</sup> である。

### 3.3 作用の組合せの影響

図10に、桁下面のひび割れひずみの解析結果を示す。いずれの解析結果も、画像によるひび割れ抽出と同じく、建設後12年目のひび割れひずみを示している。

#### 3.3.1 収縮ひずみ，クリープ係数の影響

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。

#### 3.3.2 温度変化の影響

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あまり発生せず、現地のひび割れ状況と整合しない。この原因は、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

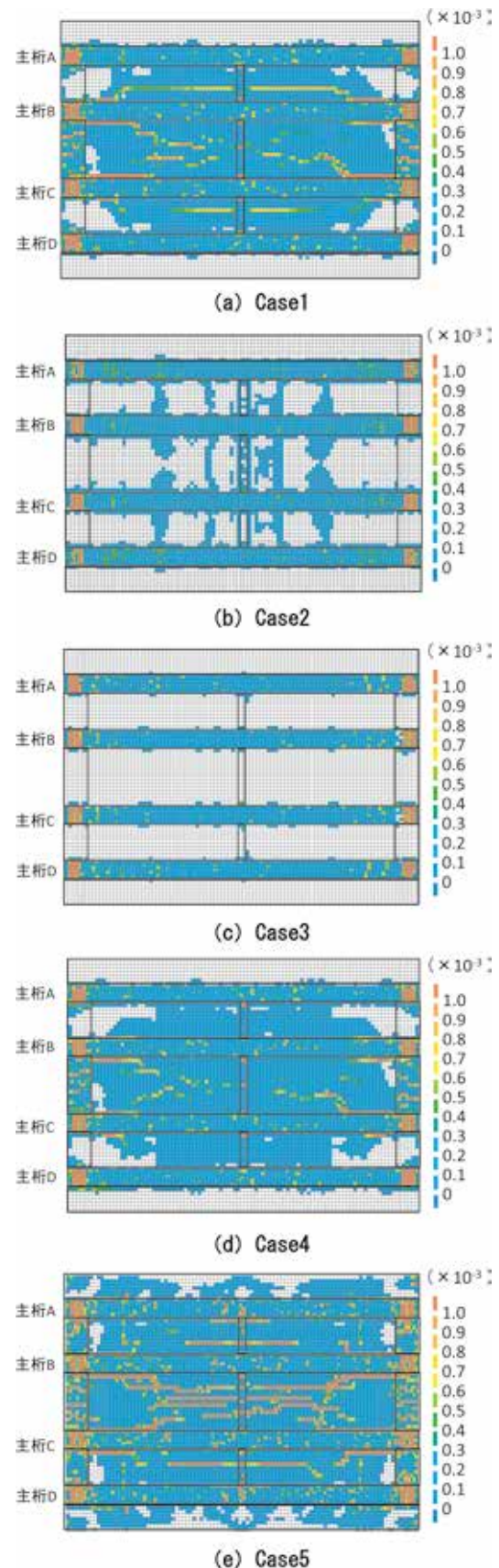


図10 ひび割れひずみ (桁下面, 12年目)

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。3.3.1項で述べた通り、この橋軸直角方向のひずみとひび割れの分布の特徴(図3(a))を再現するには、Case2のように収縮ひずみ、クリープ係数の考慮だけでは困難である。さらに、Case1~3を比較すると、温度低下による収縮ひずみを加味した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。

### 3.3.3 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。Case4では、特に軌道直下の主桁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。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、現地の状況(図4(a))と整合する。

### 3.4 複数の材齢の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良好に再現できた、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に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であるのに対し、Case5(図12(b))では0.15~0.2mmとなった。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、位置のみならずその幅を含めて、Case5が12年目のひび割れの特徴をより正確に再現できていると考えられる。

Case1およびCase5の作用の組合せを対象として、建設後3年目について算出したひび割れ幅を図13に示す。また、図14に、当該構造物の建設後3年目(供用開始前)において近接目視で確認したひび割れの調査記録を示す。Case5(図13(b))は、建設後12年目に対し、建設後3年目の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等の特徴を捉えていると考えられる。一方、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ことがわかる。

### 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年目および建設後3年目で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、これらを再現可能な作用履歴の組

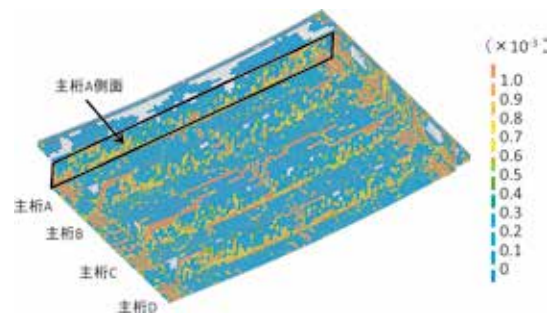
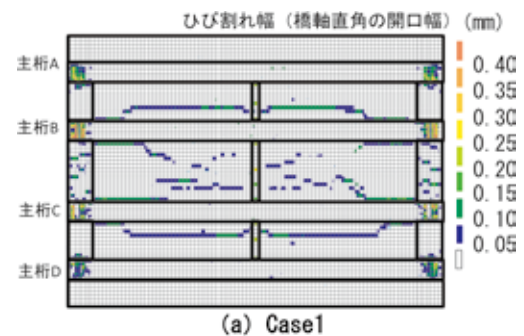
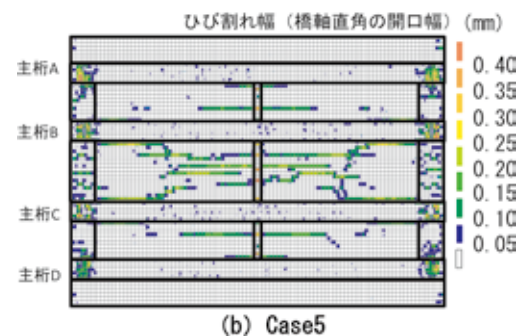


図11 ひび割れひずみ(Case5, 主桁A側面, 12年目)

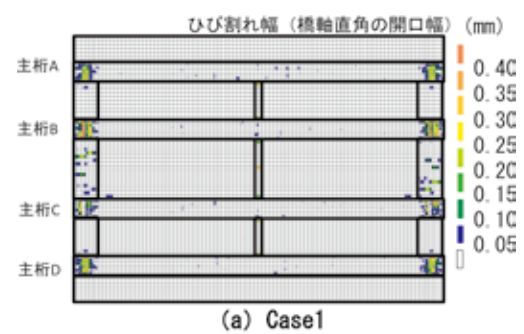


(a) Case1

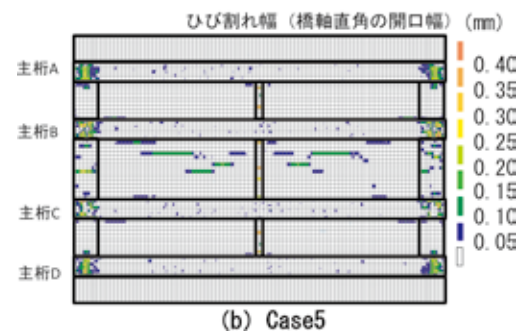


(b) Case5

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)

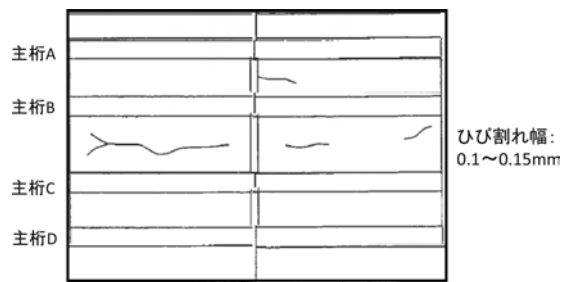


図 14 目視によるひび割れ調査記録（桁下面，3 年目）

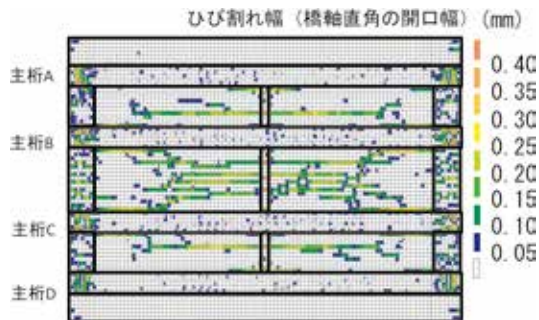


図 15 Case5 によるひび割れ幅の将来予測（桁下面，50 年目）

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，変化するひび割れの発生・進展を時間軸上で捉えることが可能であり，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 年目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 年目以降の温度は，低温（ $-6.7^{\circ}\text{C}$ ）とし，50 年目で  $20^{\circ}\text{C}$  に設定した。図 15 に，ひび割れ幅の予測結果を示す。建設後 12 年目と比較して，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，さらに予測精度が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，このような変状を有する 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が，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，検査において見る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現れた場合，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，

調査方法の実態に合わせた改良につながると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) RC 桁に生じているひび割れの抽出を，輝度と幾何学的特性による画像解析手法を用いることで，目視観察により取得した結果とほぼ同様の結果が得られた。
- (2) FEM で得られた建設後 12 年目および建設後 3 年目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，死荷重，温度，コンクリートの収縮などで生じていることが推定された。
- (3) 推定された要因に基づき，今後，橋りょう下面に発生するひび割れを予測した。これは，構造物の調査の要点を提示するだけでなく，予測と異なる変状が現れた場合，想定した要因を見直す必要性が示唆されるなど，調査方法の改良につながると考えられる。FEM を用いたことで，このような変状が RC 橋りょうの構造性能評価にも可能であることから，複合劣化の事象や予兆が捉えにくい事象の個別検査および措置の軽減に活用できると考えられる。

なお，本論文は文献 7 とほぼ同じ内容を含んでいる。

#### 謝 辞

画像によるひび割れ抽出では，株式会社安藤・間の野間康隆氏にご協力いただいた。ここに謝意を記す。

#### 文 献

- 1) 鶴飼正人：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
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018
- 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 HP：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>（最終アクセス日：2020 年 11 月 4 日）
- 7) 宮本祐輔，渡辺 健，野間康隆：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.1417-1422，2019