

導電塗料の塗布ライン数がRC高架橋中間スラブの変状検知精度に及ぼす影響

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員

○仁平達也, 松岡弘大, 曾我部正道, 岡本大

1. はじめに 著者らは、図-1に示すように、中性化等による腐食ひび割れを導電塗料の破断で検知する手法を検討している<sup>1)</sup>。以下では、RC高架橋中間スラブにおける導電塗料の塗布ライン数が変状検知精度に及ぼす影響を検討する。具体的には、実構造物の調査結果<sup>(例えば<sup>2)</sup>)</sup>に基づいた諸数値を用いて、中性化による変状予測のモンテカルロシミュレーションを行い、破断した塗布ライン数と変状の発生程度の関係について検討する。

2. 検討方法

2.1 中間スラブにおける検討単位の設定

中間スラブは、主として橋軸方向を長辺とするその形状から、荷重を主に分担する橋軸直角方向の鉄筋が、主鉄筋としてコンクリート表面側に設置されている。本検討においては、設計図どおりに配筋されているものとし、上記を考慮した検討を行う。すなわち、図-2に示すように、主鉄筋を中心とした、主鉄筋のピッチ間隔と配力筋のピッチ間隔で囲まれた範囲を1単位とし評価メッシュとする。評価メッシュ内の腐食ひび割れが発生をした時点を検知と定義する。検討対象の中間スラブは、鉄道構造物では一般的な形状および寸法を想定した。具体的には、主鉄筋、配力筋ともにD13とし、鉄筋中心間隔は125mm、長辺方向の橋軸方向が8625mm、短辺方向の橋軸直角方向4500mmの形状とした。対称性を考慮し、線路方向にスラブ半面の範囲で検討することとした。

2.2 中性化の設定

(1) 乱数発生で与える場合(乱数モデル) 対象構造物を供用10年で、平均中性化深さ10mmの構造物(中性化速度係数 $\alpha$ の平均値を3.16(mm<sup>1/2</sup>/年))を想定した。中性化のばらつきは正規分布であるとし、標準偏差を5mmとした。(2) 従属事象で与える場合(従属モデル) 対象構造物を(1)と同一とした。中性化ばらつきは、松橋ら<sup>3)</sup>の調査結果に基づきメッシュ間の空間的な類似性を考慮したモデルにより乱数発生させた<sup>4)</sup>。

2.3 鉄筋かぶりの設定

(1) 乱数発生で与える場合(乱数モデル) 鉄筋かぶりの平均値を設計値の30mmとした。ばらつきは正規分布であるとし標準偏差を5mmとした。(2) CP制御で与える場合(従属モデル) 既往の文献<sup>1)</sup>と同様に、スペーサーの設置位置を主鉄筋のかぶり制御点として模擬し、これをCP(コントロールポイント)として、CPのみに乱数を発生し、CP間は線形補完した。スペーサー位置におけるかぶりのばらつきは不明な点もあるため、かぶりの平均値とばらつきは(1)と同様であるとした。CPは図-3に示す折曲げ鉄筋の折曲げ位置と、ハンチ筋のハンチ始点と終点とした。

2.4 変状予測モデルの設定

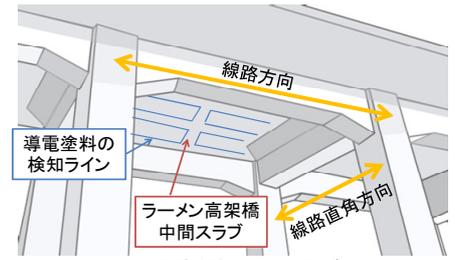
(1) 腐食ひび割れ発生しきの値 実調査結果<sup>(例えば<sup>2)</sup>)</sup>等を考慮し腐食深さ26(C/φ)mm(C:かぶり, φ:鉄筋径)とした。(2) 維持管理標準モデル 維持管理標準<sup>5)</sup>の中性化の変状予測モデルを用いた。実調査結果<sup>(例えば<sup>2)</sup>)</sup>を考慮し、進展期から加速期前期(腐食発生からはく離・はく落発生)の腐食速度を0.002mm/年(速度大)と0.001mm/年(速度小)とした。

2.5 ブリッジ現象の考慮

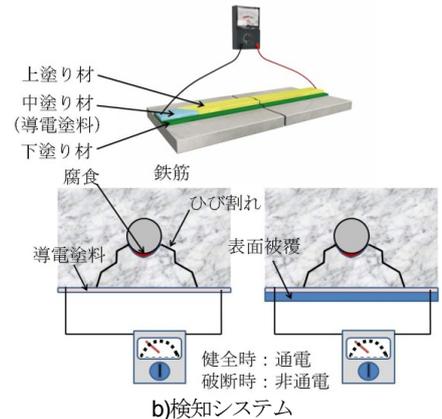
導電塗料を塗布した場合、ひび割れが発生しても塗料の一部が破断されずに通電する現象(ブリッジ現象)が報告されている。この発生率を低減する検討を別途実施しているが、本検討においては、文献1)を参考にブリッジ現象の発生率を25%とした。シミュレーション上は、評価メッシュに腐食ひび割れが発生しても導電塗料が破断せず、非検知と判断される。

2.6 シミュレーション方法

2.2~2.5より評価メッシュに諸数値を与えた中間スラブ半面を1000枚構築し、モンテカルロシミュレーションを実施する。表-1にパラメータを示す。変状予測のモデル数は2(独立モデルと従属モデル)とした。導電塗料は、腐食ひび割れの発生方向を考慮し主鉄筋の直行方向に塗布し、1ラインは、図-2に示すように、横梁からスパン中央付近までコの字に回路を構成するとした。スラブ半面に線路直角方向に125mmピッチで評価メッシュを構築した、実施工は3ライン/日程度を想定しており、3ラインを1ユニットとして検討できるように塗布し、その間隔がなるべく均等になるよう18, 9, 6, 3, 2, 1ラインを設定した。塗布ライン数18は全メッシュ上に導電塗料のラインが塗布されていることを意味する。以降のデータは平均値で評価した。



a) RC高架橋中間スラブ



b) 検知システム

図-1 検知システムの概念図

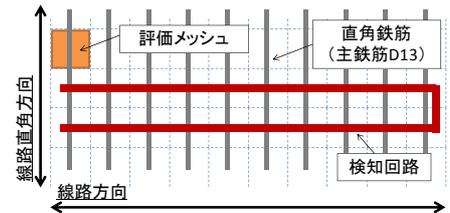


図-2 セルの定義方法



図-3 CPの設定位置

表-1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	独立モデル	従属モデル
中性化	乱数	従属
鉄筋かぶり	乱数	従属
変状予測モデル	速度大 (0.002mm/年) 速度小 (0.001mm/年)	
ブリッジ現象	25% <sup>1)</sup>	

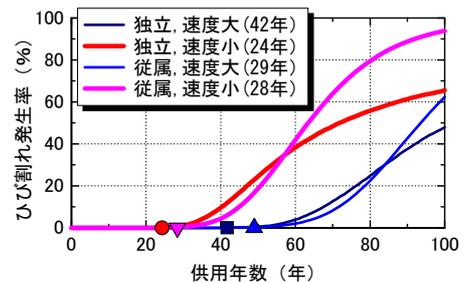


図-4 変状予測結果 (カッコ内は初変状年)

キーワード 導電塗料, 中性化, 変状予測モデル, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 Tel : 042-573-7281

**3. 検討結果** 図-4に1000回試行のモンテカルロシミュレーションによる変状の予測結果を示す。従属モデルは、独立モデルと比べ初変状(スラブ表面に変状が初めて発生)が遅くなり、ひび割れ発生率は供用年数が増加するにつれて大きくなった。これは、図-5~7に示すように、独立モデルでは中性化や鉄筋かぶりを評価メッシュごとに乱数発生させるため、局所的に変状が発生し、従属モデルでは、中性化は隣接箇所の影響を受け、鉄筋かぶりは軸方向の影響を受けるため、変状が主鉄筋に沿って発生したことに起因する。実構造物の変状はある程度の方向性や範囲を持って発生することが多く、主鉄筋方向に進行性を有する従属モデルでの変状予測がより有効であると考えられる。

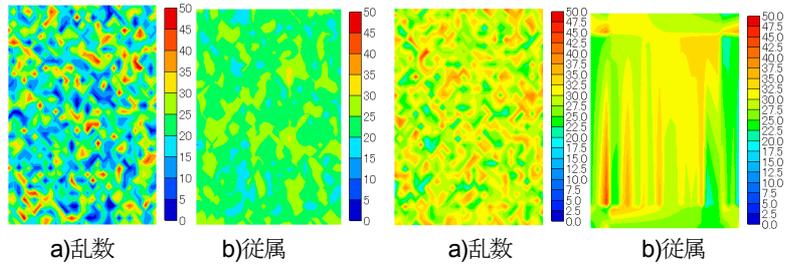


図-6 中性化の設定モデル(単位 mm) 図-7 鉄筋かぶりの設定モデル(単位 mm)

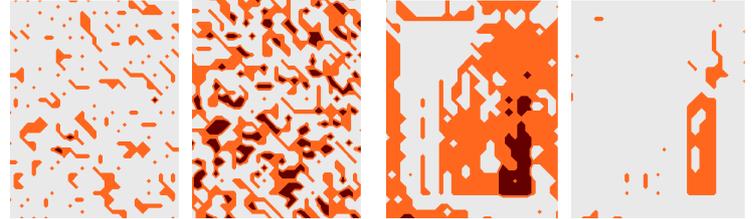


図-5 設定モデルが変状発生状態に及ぼす影響

(左: 供用50年, 右: 供用75年, 白: 変状なし, 濃色: はく離・はく落)

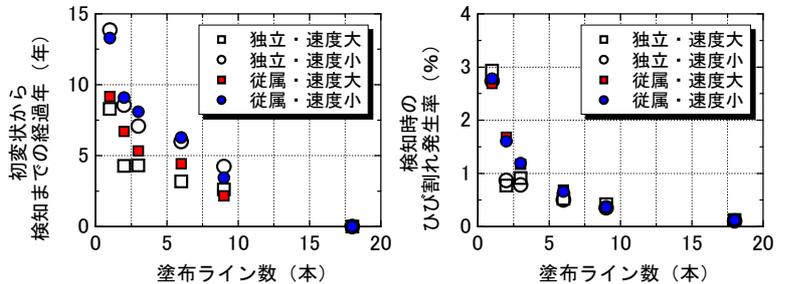


図-8 初変状からの経過年と塗布ライン数

図-9 検知時のひび割れ発生率と塗布ライン数

最初に、塗布ラインの何れかの破断時における状態について検討した。図-8に初変状から検知までの経過年と塗布ライン数の関係を示す。塗布ライン1で初変状から検知までの経過年が8~15年、塗布ライン2は4~9年、塗布ライン3で4~8年となった。図-9に検知時のひび割れ発生率と塗布ライン数の関係を示す。塗布ライン1の場合は3%程度となった。塗布ライン2の場合、独立モデルは1%程度、従属モデルは1.5%程度となった。図-8と図-9に生じた差異は、腐食速度の差異に加え、図-7に示すように、従属モデルは独立モデルと比べ乱数発生点が少ないため、変状がより局所的に発生しない等の中性化と鉄筋かぶりの設定モデルの相違に起因するものである。これらの検討結果や誤作動などのリスク等も考慮すると、初変状の検知には塗布ライン数は最低でも2または3以上が必要であると考えられる。

次に、破断ライン数と塗布ライン数との関係について検討した。破断ライン数nとは、塗布ラインのうち何れかn本が破断した時のひび割れ発生率を示すものである。本検討は、図-8と図-9の結果より、検知精度の観点から概ね安全側に評価でき、実構造物の変状の発生状態により近いと考える従属モデルで行った。図-10にひび割れ発生率と破断ライン数の関係を示す。腐食速度の違いによるひび割れ発生率の差異はほとんど生じず、破断ライン数3以下において、塗布ライン数3の場合、破断ライン2で4%程度、破断ライン3で8%程度となった。塗布ライン数6の場合、破断ライン2で1.5%程度、破断ライン3で3%程度となり、塗布ライン9の発生率と大きな差異は生じなかった。これらのことから、破断した塗布ライン以外の箇所の変状状況を推測するためには、塗布ライン6以上が必要であると考えられる。

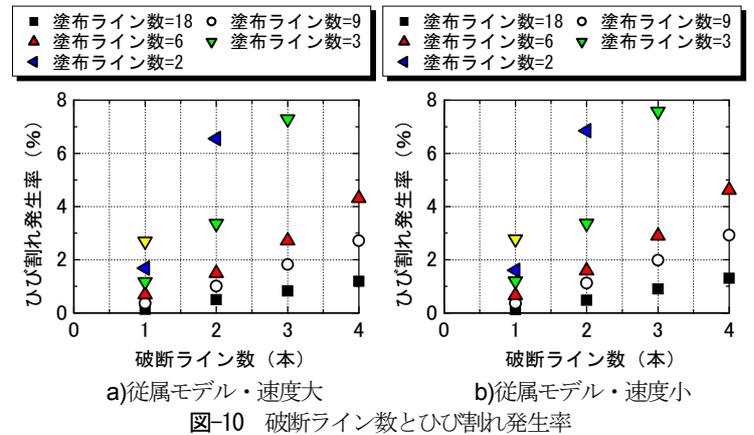


図-10 破断ライン数とひび割れ発生率

2.6より、3ラインを1ユニットとすると、初変状の検知が目的の場合は1ユニット(塗布ライン3)以上が有効であると考えられる。破断ライン箇所以外の変状状況の推測も目的とする場合は2ユニット(塗布ライン6)以上が有効であると考えられる。

**4. まとめ** モンテカルロシミュレーションにより、導電塗料の塗布ライン数がRC高架橋中間スラブの変状検知精度に及ぼす影響を検討した。①スラブ表面に変状が初めて発生した時点を検知する目的の場合、塗布ライン3以上が有効である。②破断した塗布ラインの以外の箇所の変状状況の推測を目的とする場合には、塗布ライン6以上が有効である。なお、これらは、限られた範囲での検討結果であり、更なる検討が必要であると考えられる。今後は、構造物群における最適な塗布方法および塗布ライン数について検討する。

**参考文献** 1) 大石ら: 導電塗料を用いたRC構造物のモニタリングシステムの開発, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.1642-1647, 2013 2) 曾我部ら: 鉄道高架橋のRC高欄の変状調査とその劣化予測, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009 3) 松橋ら: 中性化が進行した既設鉄道高架橋の詳細な調査と劣化予測法に関する一考察, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, pp.107-108, 2007 4) 松岡ら: RC高架橋スラブ下面の中性化速度係数の空間分布特性, コンクリート工学年次論文報告集, 2014 (掲載決定) 5) 財団法人鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編), コンクリート構造物, 丸善, 2007