# 論文　導電塗料を用いた鉄道 RC 高架橋中間スラブの変状検知方法の検討

仁平　達也[*1]・松岡　弘大[*2]・曽我部　正道[*2]・岡本　大[*3]

**要旨**：鉄道 RC 高架橋中間スラブの腐食ひび割れを検知する適切な導電塗料回路の構築を目的として，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実施した。その結果，線路直角方向からみて，横梁からスパン中央付近までコの字に塗布すれば，導電塗料に発生するブリッジ現象による検知精度の低下はほとんどないこと，スラブ半面に検知ラインを 3 本設置すれば，検知年差異が 5～7 年程度，検知時の腐食ひび割れ発生率が 1.0%程度の精度を有するモニタリングが可能となること等が分かった。

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

## 1.　はじめに

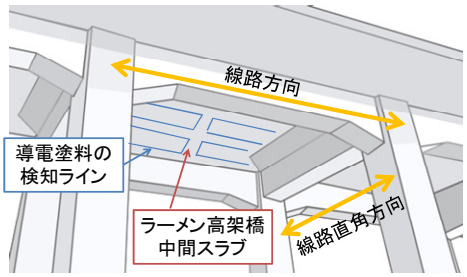
著者らは，構造物の性能低下を抑制し，第三者被害の発生を抑えるという観点から，**図－1** に示すように，中性化等による腐食ひび割れを導電塗料の破断で検知する手法を検討しており，最初の適用部材として，表面積が大きい中間スラブを考えている．そのために，導電塗料の性能確認試験を実施するとともに，効果的な塗布回路や検知ライン数について検討している [1)]。また，これまでに既設 RC 構造物の中性化や鉄筋かぶりの統計的な処理[例えば 2),3)]により，各部材内でのばらつきについて定量的に検討してきた。この結果を用いて，鉄道構造物等維持管理標準・同解説（コンクリート構造物）[4)]（以下，維持管理標準）の変状予測モデル等により，ある一定程度の精度を有する予測手法を提案してきた[例えば 5)]。

これらを考慮し，導電塗料の適切なライン数とその検知精度等について検討する目的で，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った。具体的には，実構造物の調査結果に基づいた諸数値を用いて，供用されている状態や変状発生している状態を想定し，表面被覆材の有無と，性能確認試験で報告されている，未検知の現象であるブリッジ現象も考慮した検討を行った。

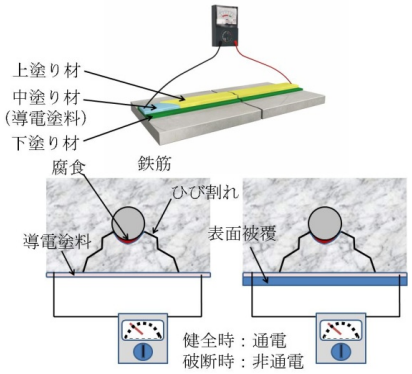
## 2.　検討方法

### 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。一般的に，腐食ひび割れの限界値とされる鉄筋腐食深さや腐食量の指標は，鉄筋径とかぶりの関数で与えられている [4)]。実現象においても，かぶりが小さく，鉄筋径が同じまたは大きい主鉄筋の方が配力筋よりも腐食ひび割れの発生に対して支配的である。そこで，本検討においては，

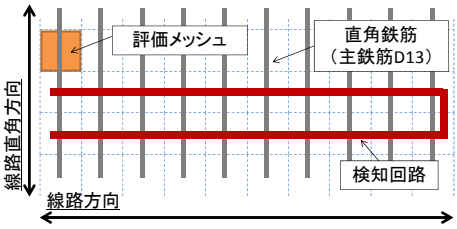



a)RC 高架橋中間スラブ




b)検知システム

**図－1　導電塗料を用いた検知システムの概念図**




**図－2　セルの定義方法**

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，検討範囲をセルと定義し，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。

*1 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　工修　(正会員)
*2 鉄道総合技術研究所鉄道力学研究部構造力学　博（工）　(正会員)
*3 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　博（工）　(正会員)

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。本検討においては，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/√年））を想定した。実構造物の調査結果 [2]等を考慮し，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。この正規分布から乱数を発生させ，各メッシュの中性化深さを与えた。

#### (2) 従属事象で与える場合（従属モデル）

対象構造物を上述と同じ供用 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/√年））とした。ばらつきについては，松橋ら [6]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。本論文ではこのモデルを従属モデルと呼ぶ。モデルの妥当性については別途検討しているが，本研究の範囲を大きく超えるために別の機会に発表することとし，概要を以下に説明する。

中性化深さの進行には隣接するメッシュ間で空間的な類似性（空間分布特性）が存在することが指摘されており，実構造物の詳細な調査と分析が行われている。調査・分析結果に基づき，空間分布特性を考慮した乱数が発生できるよう以下に示す中性化速度係数における変動の空間パワースペクトル $Y_{95}$ が提案されている。

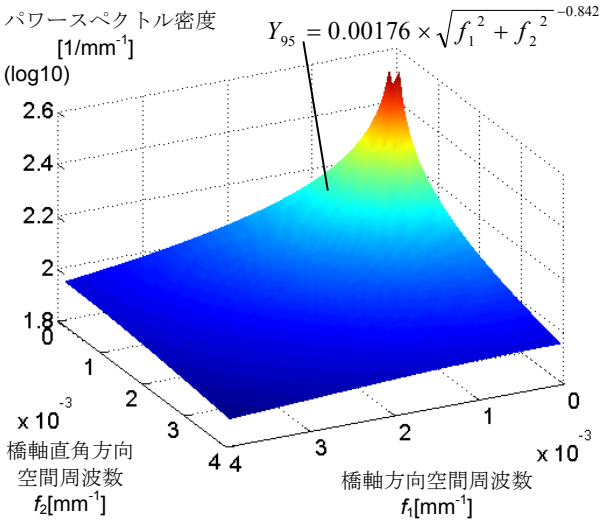
$$Y_{95} = 0.00176\sqrt{f_1^2 + f_2^2}^{-0.842} \qquad (1)$$

$$Y_{95} = 0 \qquad (f_1 = 0, f_2 = 0) \qquad (2)$$

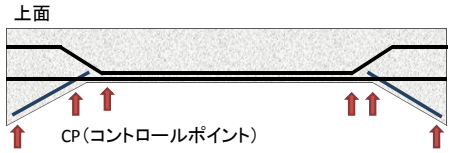
なお，$f_1$，$f_2$ は橋軸方向の空間周波数と橋軸直角方向の空間周波数をそれぞれ表わしている。空間パワースペクトル式(1)，(2)は**図－3** に示すように 3 次元空間中の曲面であり，橋軸および橋軸直角方向の空間周波数とその振幅を表わしている。式(1)，(2)は以下に示す空間パワースペクトルを中性化速度係数の変動 $y(l_1, l_2)$に変換するためには 2 変量フーリエ逆変換，

$$y(l_1,l_2) = \pi F_1 F_2 \cdot \sum_{f_1=\Delta f_1}^{F_1}\sum_{f_2=\Delta f_2}^{F_2}\left(\sqrt{Y_{95}(f_1,f_2)} + i\theta(f_1,f_2)\right)\cdot \exp\left\{-i2\pi\left(\frac{l_1 f_1}{F_1} + \frac{l_2 f_2}{F_2}\right)\right\} \qquad (3)$$

を利用する。なお，式(3)中の $i$，$F_1$，$F_2$，$\Delta f_1$，$\Delta f_2$ は位相情報，各方向のナイキスト周波数および周波数刻みをそれぞれ表わす。これらの値は部材寸法およびメッシュ寸法から一意に算出される。本研究の場合では**図－2** に示す対象部材の各寸法から，　$F_1$=$F_2$=0.004[mm$^{-1}$]，$\Delta f_1$=2.22×10$^{-4}$，$\Delta f_2$=2.86×10$^{-4}$ となる。シミュレーションにおいては，位相情報 $i\theta(f_1,f_2)$を-$\pi$/2～$\pi$/2 の一様分布に従ってランダムに発生させ，式(3)の 2 変量フーリエ逆変換を実施する。これにより，**図－3** の空間分布特性を有した中性化速度係数の 2 方向ランダム系列（行列）$y(l_1, l_2)$を得た。以上の設定のもと，式(3)により空間分布特性を考慮した中性化速度係数の変動を得た。




**図－3　中性化速度係数の変動の空間パワースペクトル**




**図－4　コントロールポイント（CP）の設定位置**

### 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。実構造物の調査結果 [3] 等を考慮し，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（CP 制御モデル）

鉄筋かぶりのばらつきは，施工時のスペーサー位置の影響を受けると考えられる。そこで，既往の文献 [1]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－4** 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，それ以外のかぶりは，CP 間で直線的に鉄筋が配置されるとした。以上より，本モデルは橋軸直角方向の同一断面において CP が 6 箇所あるものとする。

### 2.4　変状予測モデルの設定

#### (1) 腐食ひび割れ発生のしきい値

実際の調査結果 [5]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 [4]の中性化による変状予測モデルを用いた。ただし，実際の調査結果 [5] 等を考慮し，**表-1** に示すように，進展期から加速期前期（腐食発生からはく離・はく落発生）までの腐食速度が 0.001mm/年（腐食速度小）と 0.002mm/年（腐食速度大）の 2 段階で実施した。

### 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導電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。これまでの性能確認試験において，ブリッジ現象の発生例は，導電塗料の塗布幅 5mm で最大 25%程度である [1]。現在，この発生率を低減する検討を別途実施しているが，上記の値で検討すれば安全側に評価出来ると考える。そこで，腐食ひび割れの 25%はブリッジ現象により非検知するとしたケースを検討した。シミュレーション上では，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　表面被覆材の設定

表面被覆材を塗布しないケースと，供用 10 年後に塗布し，その後 10 年間有効となるケースで検討した。

### 2.7　シミュレーション方法

2.2～2.6 をパラメータとして，評価メッシュに諸数値を与えた中間スラブを 1000 枚構築し，モンテカルロシュミレーションを実施する。**表-1** にパラメータを示す。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が 36 個あることを踏まえ，塗布間隔がなるべく均等になるようにコの字に 18，9，6，3，2，1 ラインを設定した。**図－5** の a)に 3 ライン設定した塗布パターン（S タイプ）を示す。1 ライン 8m 程度となる。18 ラインは評価メッシュすべてに回路が存在することを意味する。また，**図－5** の b)の W タイプは，凹の字であり，未検知等がなければ，W タイプ 3 ラインは S タイプ 6 ラインの検知精度と同値である。以降は S タイプで検討し，データは平均値で評価した。

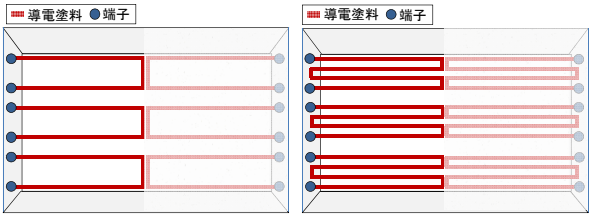
## 3.　検討結果および考察

### 3.1　中性化の設定モデルの差異

中性化の設定モデルの相違が中間スラブ内の中性化分布に及ぼす影響を検討した。**図－6** に示すように，従属モデルで設定した方が乱数モデルと比べ，局所的な進行はあまり見られず，より平滑的な中性化の進行を表現できることを確認した。

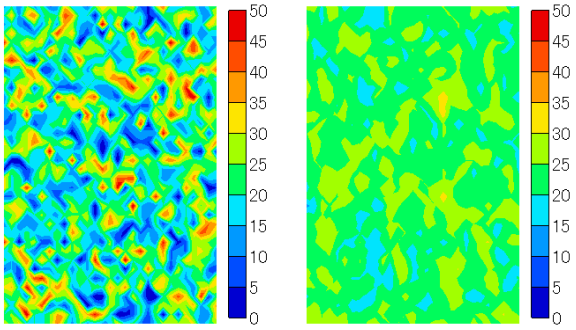
**表－1　シミュレーションパラメータ**

| パラメータ | 検討ケース | |
|---|---|---|
| 中性化 | 乱数モデル | 従属モデル |
| 鉄筋かぶり | 乱数モデル | CP 制御モデル |
| 変状予測モデル | 腐食速度 2 段階 | 小：0.001mm/年<br>大：0.002mm/年 |
| ブリッジ現象 | あり（25%※1） | なし |
| 表面被覆材 | なし | あり |



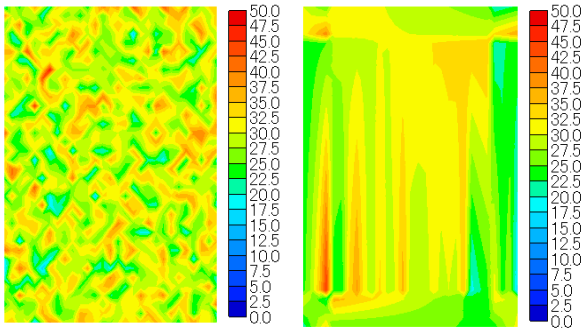

a)S タイプ 3 ライン　　b)W タイプ 3 ライン

**図－5　下面からみたスラブ半面の塗布パターン**




a)乱数発生　　b)従属

**図－6　中性化の設定モデルの差異の例（単位 mm）**




a)乱数発生　　b)CP 制御

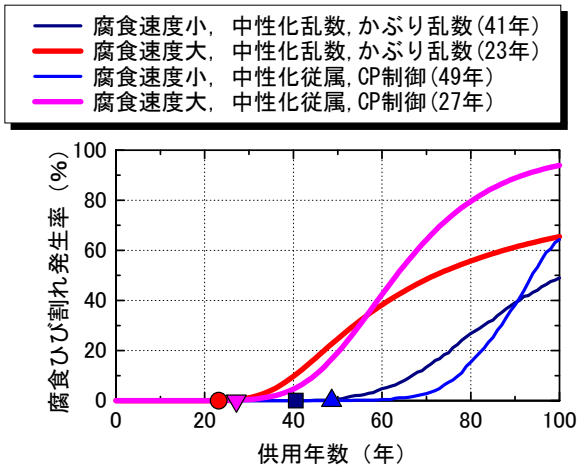
**図－7　鉄筋かぶりの設定モデルの差異の例（単位 mm）**

### 3.2　鉄筋かぶりの設定モデルの差異

鉄筋かぶりのモデルの相違が中間スラブの鉄筋かぶりの分布に及ぼす影響を検討した。**図－7** に示すように，乱数モデルで設定した場合，主鉄筋方向でかぶり値に大きな差異がみられるのは，各評価メッシュが独立しているためである。一方，CP 制御モデルの場合，主鉄筋方向に対し連続的にかぶり値を表現できることを確認した。

### 3.3　設定モデルが変状発生状態に及ぼす影響

**図－8** に 1000 回試行のモンテカルロシュミレーションによる検討結果を示す。中性化乱数・かぶり乱数モデ




図－8　変状予測の検討結果

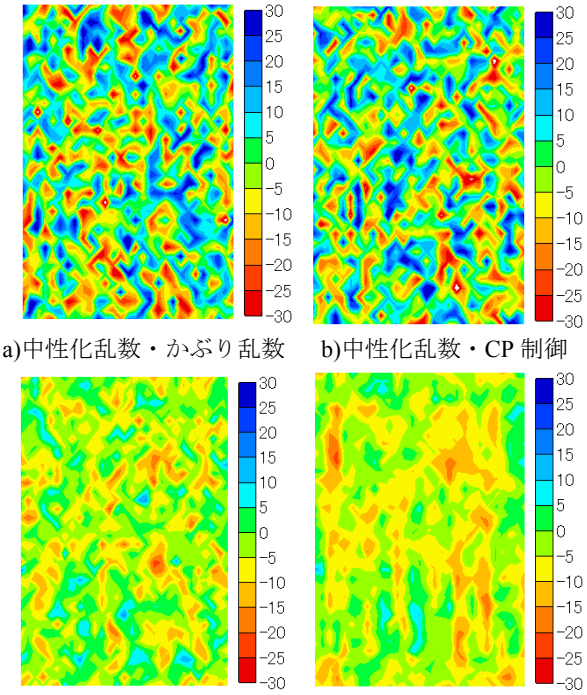
ルに比べ，中性化従属・CP 制御モデルは，初変状の発生が遅くなり，ひび割れ発生率は供用年数が増加するにつれて大きくなった。これは，乱数モデルの場合，局所的な変状を算出する傾向にあることに起因する。

次に，設定モデルの相違が中性化残りの分布に及ぼす影響について検討した。**図－9** に検討結果の例を示す，中性化を従属モデルにした場合，隣接メッシュの影響を受ける。かぶりを CP 制御モデルにした場合，主鉄筋方向に従属関係となる。その結果，図の d)が最も主鉄筋のかぶりに沿った中性化残りが算出されることとなった。

変状発生位置についても検討した，**図－10** に検討結果を示す。図内の淡色は変状なし，濃色は維持管理標準[4)]のはく離・はく落のしきい値以上の鋼材腐食深さ箇所である。中性化乱数・かぶり乱数モデルの場合，局所的に鋼材腐食が進行し，はく離・はく落判定箇所が局所的に発生している。一方，中性化従属・CP 制御モデルにした場合，図の d)に示すように，主鉄筋方向へ概ね線状に変状が発生していることがわかる。既往の変状予測に関する検討[例えば 5)]では，図の a)により変状予測をしていた。そのため，平均値から乖離の大きい諸数値をもち，隣接メッシュと無関係の数値をもつ評価メッシュ箇所が最初に変状判定されていた。一方，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していることが多い。これを考慮すると，主鉄筋方向に進行性を有する図の d)のモデルでの検討がより有効であると考えられる。

### 3.4　検知ライン数が検知精度に及ぼす影響

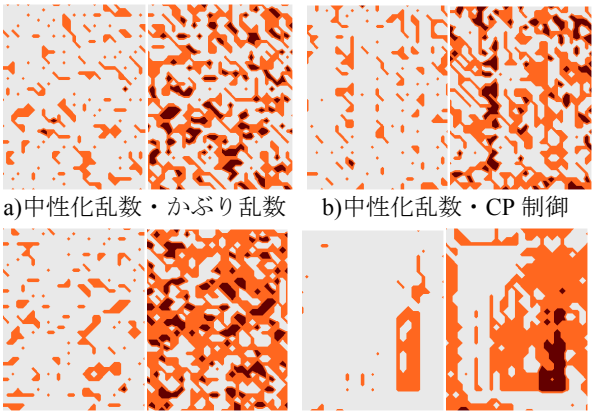
**図－11** に中性化乱数・かぶり乱数，**図－12** に中性化従属・CP 制御モデルの検知ライン数と変状検知率の関係を腐食ひび割れ発生率と共に示す。図内の検知率 100%は検知ラインが全て破断したことを意味する。また，18 ラインは全ての評価メッシュ上に導電回路が構成されていることを意味する。定性的な評価ではあるが，**図－12** のほうが，変状検知率の増加が緩やかになり，検知ラインが少ないと検知年差異が小さくなる傾向が見られた。




a)中性化乱数・かぶり乱数　b)中性化乱数・CP 制御

c)中性化従属・かぶり乱数　d)中性化従属・CP 制御

**図－9　中性化残りの設定モデルの差異の例**



a)中性化乱数・かぶり乱数　b)中性化乱数・CP 制御

c)中性化従属・かぶり乱数　d)中性化従属・CP 制御

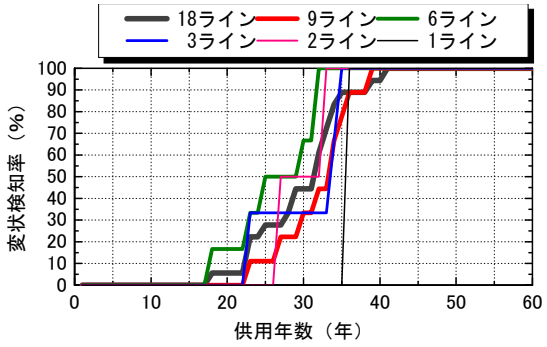
**図－10　設定モデルが変状発生状態に及ぼす影響**
**（腐食速度大，左図:供用 50 年，右図:供用 75 年の例）**

これは，**図－10** に示すように，**図－11** が局所的に，**図－12** が概ね線状に変状発生していることに起因する。

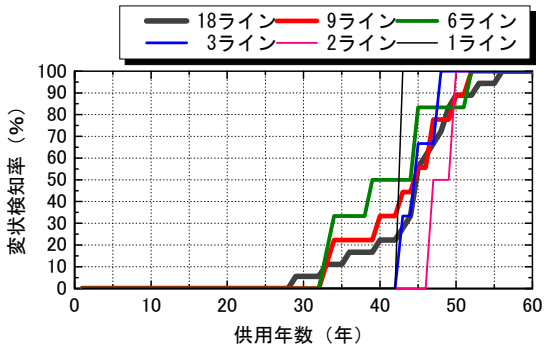
**図－13** に腐食速度小モデル，**図－14** に腐食速度大モデルによる検知ライン数と検知年の関係を示す。中性化従属・CP 制御モデルは，中性化乱数・かぶり乱数モデルと比べ，ライン数が多いと検知年差異が大きくなり，ライン数が少ないと差異が小さくなる傾向がみられた。しかしながら，検知ライン 3 本と 6 本で比較すると殆ど差異は生じず，腐食速度小モデルで前者が 7 年程度，後者は 4 年程度となり，腐食速度大モデルで前者が 5 年程度，後者が 3 年程度となった。これは，多数評価メッシュが存在している（本検討では 60 点程度）検知ラインの形状の影響を受けているものと考えられる。

### 3.5　ブリッジ現象が検知精度に及ぼす影響

これまでの検討結果を踏まえ，中性化従属・CP 制御




図－11　検知ライン数と変状検知率の関係の例
（中性化乱数，かぶり乱数，腐食速度大）




図－12　検知ライン数と変状検知率の関係の例
（中性化従属，CP 制御，腐食速度大）

モデルで検討した。図－15 に検討結果を示す。腐食速度が異なっても，検知年差異はほとんど生じなかった。検知精度が最も低い検知ライン 1 本の場合であっても，検知年差異が 1 年程度であった。このことは，最大 25%のブリッジ現象発生率であれば，検知年差異にほとんど影響を及ぼさないことを意味している。これは，3.4 と同様に，評価メッシュが多数（本検討では 60 点程度）存在することに起因する。このことは，実構造物において，検知回路長が長ければ非検知となるブリッジ現象の影響を小さく出来ることを示唆している。

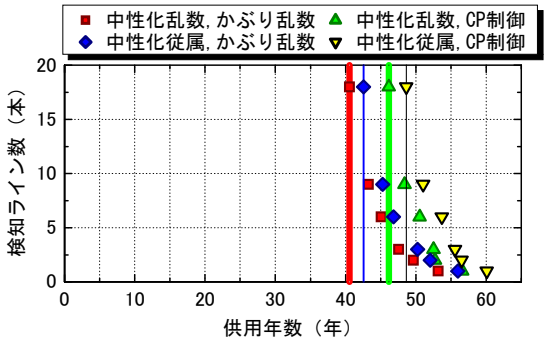
次に，検知時におけるスラブ表面の変状状態について検討した。図－16 に検討結果を示す。両モデルともに検知時のスラブ面全体のひび割れ発生率は検知ライン 6 本で 0.5%程度，3 本で 1.0%程度，1 本で 2.5%程度となった。このことは，本モニタリング手法により，中間スラブに大規模な範囲に腐食ひび割れ等の変状が発生する時期以前に検出できることを意味しているものと考える。

### 3.6　表面被覆材の有無が検知精度に及ぼす影響

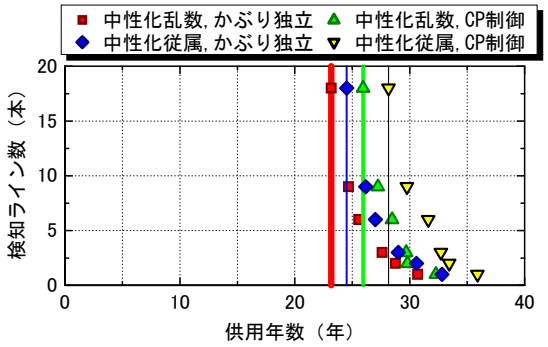
表面被覆材の有無が検知精度に及ぼす影響について，3.5 と同様に，中性化従属・CP 制御モデルで検討した。図－17 に検討結果を示す。表面被覆材を施した場合と初変状年が遅くなり，検知年差異が大きくなった。そのため，表面被覆材がない場合よりもライン数を増やす等の対応が必要となることを示唆する結果となった。

### 3.7　適切な塗布回路の構築に関する考察

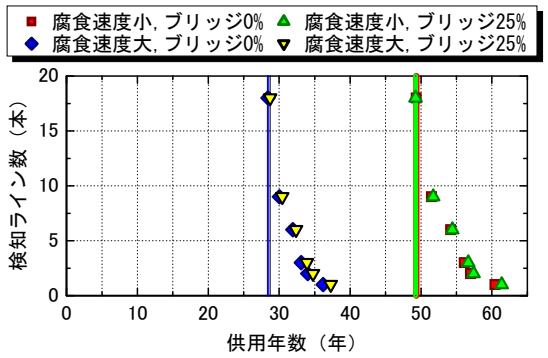
図－18 に，検知ライン本数と S タイプ 1 ライン（ラ



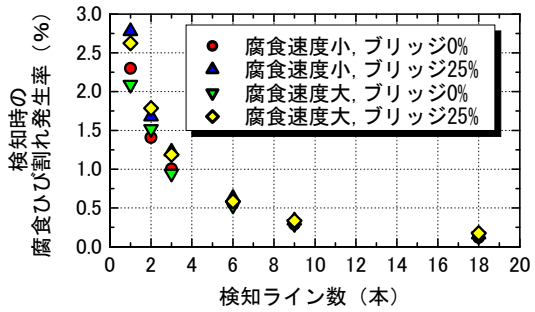

図－13　検知ライン数と検知年の関係
（腐食速度小，ブリッジ現象なし，被覆材なし）




図－14　検知ライン数と検知年の関係
（腐食速度大，ブリッジ現象なし，被覆材なし）




図－15　ブリッジ現象を考慮した検知ライン数と検知年の関係（中性化従属，CP 制御，被覆材なし）




図－16 ブリッジ現象と検知時の腐食ひび割れ率の関係
（中性化従属，CP 制御，被覆材なし）

イン全長 10m）に対する施工費の割合を示す。一般的な RC ラーメン高架橋を対象に，端子から計測に必要な有線を柱に沿わせて測定機器を地上付近に設置することを想定して，材料費と人工 [7]のみを考慮した。足場代等は含んでいない。導電塗料の標準的な乾燥時間を考慮して，

2 人工で S タイプ 3 ライン/日，W タイプ 1.5 ライン/日で構築するとした。なお，導電塗料の塗布はスプレーガンにより同一箇所を 2 回吹きつけるものとした．図によると，材料費は塗料関係と端子関係に分類され，検知ライン数が増加するにつれて，塗料関係の費用の割合が増加すること，人工は 60%程度となることが分かった。

鉄道 RC 構造物は 2 年に 1 回の周期で全般検査を実施している。全般検査時に変状を検知することを想定すると，検知年差異が 2 年以内であることが理想である。本検討結果より，検知年差異 2 年程度を確保するためには，スラブ半面で 9 ライン必要となる。この場合，評価メッシュの 50%を塗布することとなり，**図－18** に示すように，S タイプ 1 ラインに対し施工費が 250%程度となる。一方，スラブ半面に 1 ラインの場合，腐食ひび割れ発生率 2.5%程度で検知し，検知年差異が 10 年以上となる。この場合，仮に端子の不具合が発生する等した際に，モニタリングを有効に実施できないリスクが内包する。そのため，複数本の検知ラインを構築する必要があると考える。

検知ライン数を増加させれば，変状箇所を特定しやすくなり，不具合等によるリスクをある程度低減できるものと考える。一方，ライン数が増加するにつれて，施工日の増加に伴い足場代等の増加が想定される。これらを考慮すると，半スラブに 3 ライン程度が実務上妥当であると考える。なお，W タイプはより高い精度を有する。例えば，表面被覆材で覆われ目視による変状の確認が困難な場合や，スイッチ数が機材代に影響する無線タイプの場合等で，より有効であると考える。

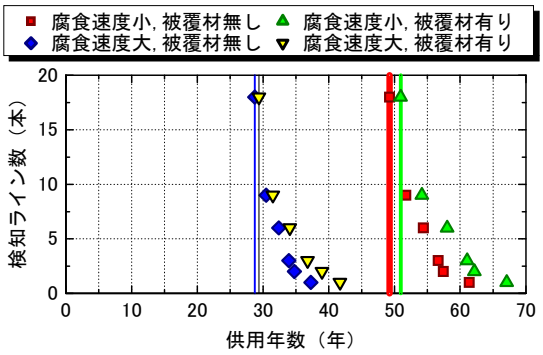
## 4. まとめ

本論文の範囲内において，以下の知見が得られた。

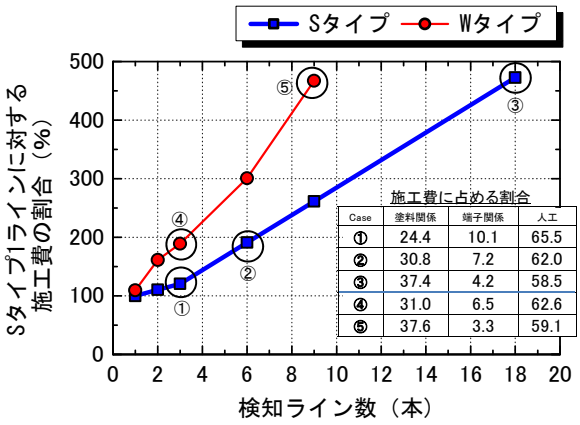
（1）線路直角方向からみて，横梁からスパン中央付近までコの字に導電塗料を塗布すれば，未破断による非検知ブリッジ現象による検知精度の低下はほとんどない。

（2）スラブ半面に検知ラインを 3 本設置すれば，検知年差異が 5～7 年程度，検知時の腐食ひび割れ発生率が 1.0%程度の精度を有するモニタリングが可能となる。

なお，これらは限られた範囲での数値解析で得られた結論であり，当該システムの可能性について論じたものである。実用化には更なる検討が必要であると考える。




**図－17　表面被覆材の有無が検知年に及ぼす影響**
**（中性化従属，CP 制御，ブリッジ現象発生率 25%）**




**図－18　S タイプ 1 ラインに対する施工費の割合**

## 参考文献


1) 大石健太郎，仁平達也，曽我部正道，谷村幸裕：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，コンクリー工学論文集，Vol.34，No.1，pp.1642-1647，2013

2) Chikara Kawamura, Yukihiro Tanimura, Masamichi Sogabe, Koji Matsuhashi, Tsutomu Sato and Tamon Ueda: A Study on Factors Affecting the Carbonation of Railway Rigid-Frame Viaducts, Journal of Advanced Concrete Technology,Vol.4, No.2,pp.285-300,2006

3) 川村力，谷村幸裕，曽我部正道，佐藤勉：実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.253-266，2004

4) 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

5) 曽我部正道、谷村幸裕，松橋宏治，宇野匡和：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

6) 松橋宏治，宇野匡和，谷村幸裕，曽我部正道：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

7) 国土交通省：平成 25 年度公共工事設計労務単価について，http://www.mlit.go.jp/common/000993048.pdf，2013