

論文 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

大石 健太郎^{*1}・仁平 達也^{*2}・曾我部 正道^{*3}・谷村 幸裕^{*4}

要旨: 本研究は、表面被覆状態を含めた RC 構造物の変状モニタリングシステムの開発について論じたものである。要素実験により、導電塗料の塗布幅が広い場合、塗布回数が少ない場合および表面被覆材を塗布した場合にブリッジ現象の発生率が高くなること、表面被覆材がない場合の検知幅の平均値が 0.51mm となること、表面被覆材を塗布すると検知幅の平均値が増加しばらつきが大きくなる傾向がみられることを明らかにした。また数値解析により、ラーメン高架橋の中間スラブの場合、配筋状態を考慮して 4~6 測線程度を設けておけば実用的な検知回路が構成できることを示した。

キーワード: 導電塗料, モニタリング, 表面被覆, 鉄道高架橋, 中性化, 劣化予測

1. はじめに

高度経済成長期前後に建設された多数の鉄筋コンクリート（以下、RC という）構造物では、材料不適合、初期欠陥、中性化、内的塩害、およびこれらの複合により変状が散見される。特に、鋼材の腐食に伴うはく離・はく落は、第三者に被害を及ぼす可能性があるため、的確な対処が求められている。

筆者らは既に鉄道構造物に関する鉄筋のかぶり¹⁾、中性化²⁾、内的塩害³⁾、外的塩害⁴⁾に関する統計的な分析を実施し、そのばらつきを定量的に明らかにするとともに、劣化予測手法等を提案³⁾してきた。

一方で、ばらつきの大きい変状に対して、RC 構造物を効率的に維持管理していくためには、変状検知のための効率的なモニタリングシステムが重要となると考える。特に、鉄道 RC 高架橋では、劣化に対する予防保全、鋼材腐食によって生じるひび割れ、はく離、はく落対策を目的として、表面被覆が施される場合があるが、コンクリート表面を被覆すると目視での変状の把握が困難となり、表面被覆裏側のひび割れが検知できなくなる等、維持管理上問題となる場合があり、この点も含めた取り組みが必要である。

以上のような背景から、本研究では、表面被覆状態も含めた RC 構造物の変状モニタリングシステムの開発を目的として、導電塗料に着目した要素実験を行うとともに、これを用いた検知回路の構成について検討した。

よりひび割れの有無を検知する手法である。導電塗料を用いたひび割れ検知は、トンネル等の比較的ひび割れ幅の広い箇所の検知に既に提案されている⁵⁾。トンネルでは、無筋あるいは低密度配筋の場合が多く、検知するひび割れ幅も比較的大きなものが多いが、本研究では、この手法をよりひび割れ幅の小さい鉄道 RC 高架橋に適用することを目的に、更に精度確認に関する深度化を図ることとした。また、前述のように RC 高架橋において表面被覆が施される場合には、目視での変状の把握が困難となるため、これに対応するモニタリング手法についても新たに検討を行うこととした。

表-1 に導電塗料の品質を示す。本システムでは、ひび割れ発生前後の電気抵抗値の差を明確にするため、導

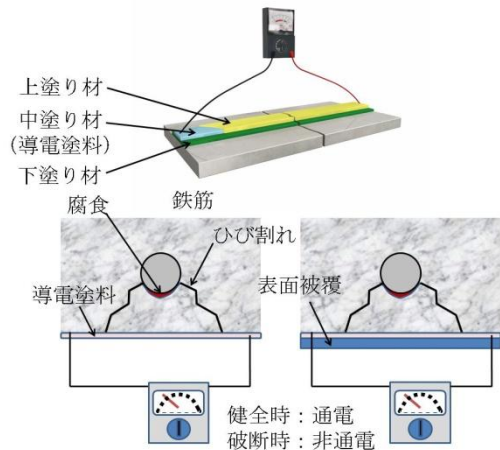


図-1 導電塗料を用いた検知システムの概念図

表-1 導電塗料の品質

種類	機能	材質
下塗り材	微弱な通電性を有するコンクリートとの絶縁	エポキシ材
中塗り材 (導電塗料)	銀の高い導電性を用いたひび割れ検知	銀含有 ポリエステル樹脂
上塗り材	環境作用からの保護	アクリル樹脂

2. モニタリングシステムの基本性能の実験的検討

2.1 実験方法

図-1 に導電塗料を用いた検知システムの概念図を示す。導電塗料は、コンクリート表面に低抵抗の電気回路を設置し、各回路端子に通電センサーを設置することに

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 修士 (正会員)

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博 (工) (正会員)

*4 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 博 (工) (正会員)

電性の高い銀含有ポリエステル樹脂を用いている⁵⁾。

図-2 に性能確認実験の概要を示す。試験体は100×100×400mm の鉄筋コンクリート（圧縮強度：31.6N/mm²（28 日強度）、鉄筋（D16（SD345））とした。図に示すように、試験体 1 体あたり 3 面に対して検知ひび割れ幅を測定できるように設定し、一軸引張試験を実施した。本試験において、検知ひび割れ幅は、ひび割れにより導電塗料が通電しなくなった時の π ゲージの値とした。

図-3 に試験体表面の状況を示す。表面被覆材の有無の影響を検討する場合は、導電塗料の上塗り材の上から塗布した。表面被覆材（エポキシ系、セメント系）を塗布しても、導電塗料の溶解はほとんどみられず、抵抗値にも変化はみられなかった。

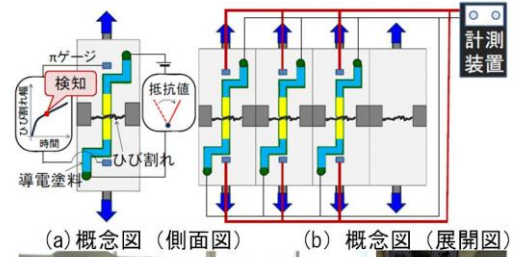
表-2 に試験体一覧表を示す。検討項目は、導電塗料の塗布回数（1 回：平均塗布厚 0.07mm, 2 回：平均塗布厚 0.14mm）、塗布幅（5, 10, 15mm）及び表面被覆材の有無ならびにその種類（なし、A：エポキシ系、B：セメント系、上塗り材はアクリル系）とした。各ケースの測定数は9（塗布回数 1 回、表面被覆材なしの場合は 18）である。

2.2 実験結果

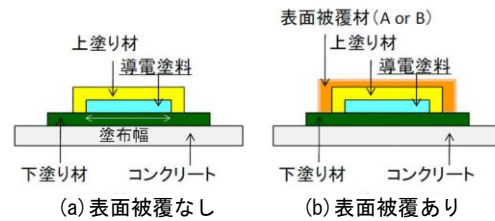
図-4 に実験後の表面状態及び通電状況の例を示す。図では 3 面の内、2 面はそれぞれ 0.7mm, 0.8mm でひび割れを生じているが、1 面は検知性能が 3.0mm まで低下している。これは、図-4 (b) に示すように、ひび割れが生じて導電塗料の一部が破断されずに通電回路が残存する現象で、ブリッジ現象と呼ばれている⁶⁾。このブリッジ現象が発生した場合、他のケースにおいても数 mm 程度のひび割れ幅まで検知しない結果が確認された。

図-5 にブリッジ現象の発生率を示す。表面被覆材 A については、導電塗料の塗布幅が広い場合、塗布回数が少ない場合、表面被覆材を塗布した場合に発生率が高くなる傾向がみられた。しかしながら、本実験結果程度の発生率であれば、実施工においては導電塗料を並列に複数本塗布することにより検知性能を発揮できるものと考えられる。ブリッジ現象が発生した場合であっても、並列塗布箇所のうち最初の検知をもって、当該箇所の検知とすることが可能であると考えられる。そこで、以降は、ブリッジ現象を除外したデータを用いて性能評価について論じる。

図-6 に検知ひび割れ幅の度数分布を示す。表面被覆材がない場合、平均値は 0.51mm（標準偏差：0.24mm）、表面被覆材 A 塗布の場合、平均値は 0.74mm（標準偏差：0.36mm）、表面被覆材 B 塗布の場合、平均値は 0.63mm（標準偏差：0.31mm）となった。表面被覆材を塗布すると検知幅の平均値が増加し、ばらつきが大きくなる傾向



(c) 実験状況 (d) 実験体拡大図
図-2 性能確認実験の概要



(a) 表面被覆なし (b) 表面被覆あり
図-3 実験体表面の状態

表-2 実験条件一覧

試験体	塗布回数	塗布幅(mm)	表面被覆材	測定数
Case 1	1	5	なし	18
Case 2			A	9
Case 3			B	9
Case 4		10	なし	18
Case 5			A	9
Case 6			B	9
Case 7		15	なし	18
Case 8			A	9
Case 9			B	9
Case 10	2	5	なし	18
Case 11			A	9
Case 12			B	9
Case 13		10	なし	18
Case 14			A	9
Case 15			B	9
Case 16		15	なし	18
Case 17			A	9
Case 18			B	9

表面被覆材 A エポキシ系, B:セメント系

がみられた。

図-7 に項目ごとに整理した検知ひび割れ幅の平均値を示す。塗布回数で大きな差異はみられず、塗布幅が広くなるにつれて検知幅が大きくなる傾向がみられた。エポキシ系の表面被覆材 A は被覆材がない場合に比べ 0.2mm 程度検知幅が大きくなった。セメント系の表面被覆材 B は 2 回塗りの場合、性能低下はあまり見られなかったが、1 回塗り場合は 0.2mm 程度性能が低下した。表面被覆材はひび割れ追従性があり、導電塗料に作用する引張力に対して補強効果があるため、導電塗料破断時のひび割れ幅が大きくなったと推測される。実施工においては、厚塗りした幅 5mm 程度の導電塗料を塗布するのがよいと考える。

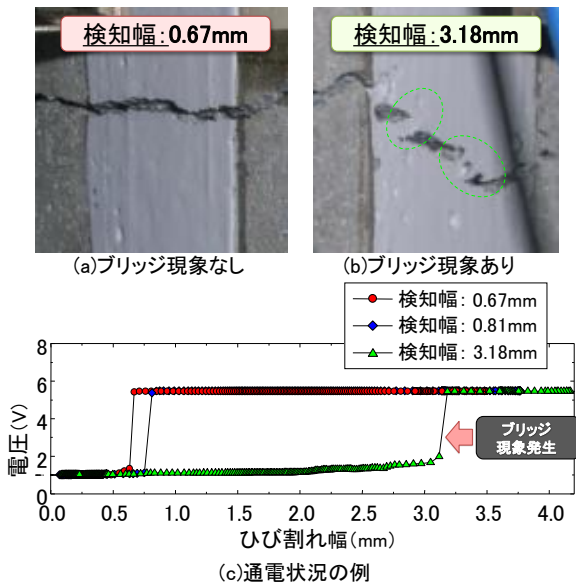


図-4 実験後の表面状態及び通電状況の例

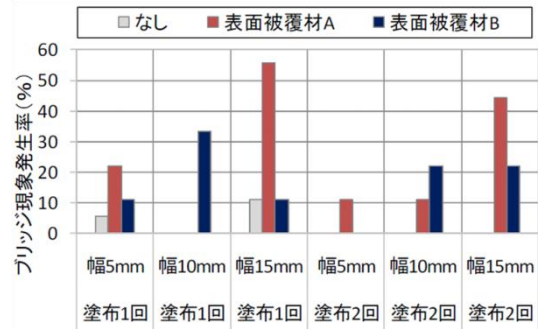


図-5 ブリッジ現象の発生率

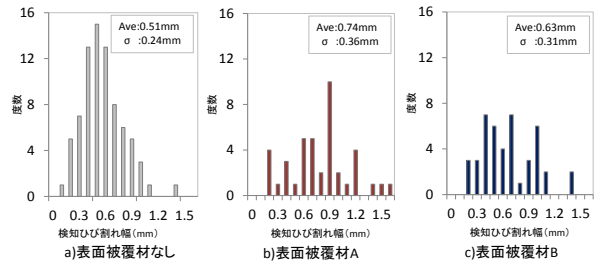


図-6 試験体表面の状態

3. モニタリングシステムの全体性能の解析的検討

3.1 解析方法

前章で開発した検知手法を、実構造物に適用するためには、変状を検知するための最適な回路構成が必要となる。既にトンネルに関しては様々な回路案が提案されているが⁵⁾、ここでは RC 高架橋の中間スラブを例として取り上げ、所要の検知回路について考察することとした。

変状検知に当たりどの程度の検知回路が必要となるかについては、検討の前例がなく、また実構造物や試験体での再現も容易ではない。そこで、コンクリート構造物の変状予測を応用した、モンテカルロシミュレーション^{3), 8)}により所要検知回路数の概算を試みた。

図-8 にシミュレーション手法の概念図を示す。解析では、中間スラブ表面の変状を評価するためのメッシュに分割し、このメッシュ単位で劣化予測する手法を用いている。シミュレーションでは、①中性化深さと鉄筋かぶりをそれぞれ正規分布に準じる独立変数として、メッシュ単位で乱数発生させたモデル、②中性化深さは正規分布に準じる独立変数、鉄筋かぶりは配筋制御点を設けて鉄筋配置を考慮したモデル（各制御点は正規分布、制御点間は直線補間）の2種類を用いた。鉄筋の配置では、主筋とハンチ筋は分けて考慮した。メッシュの大きさは鉄筋の配置状況から 125×125 mm に設定した。

表-3 にシミュレーション条件を示す。中性化深さの平均値、標準偏差は、既往の測定結果を参考に、経年 10 年の値として設定した。この時点で、表面被覆がモニタリングシステムとともに施工されると仮定し、検討を行った。

図-9 に鉄道構造物維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物（以下、維持管理標準という）⁷⁾に

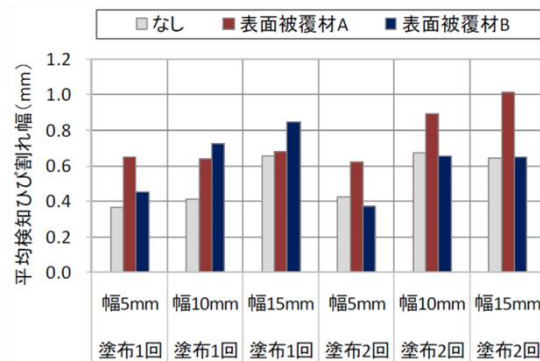


図-7 実験後の表面状態及び通電状況の例

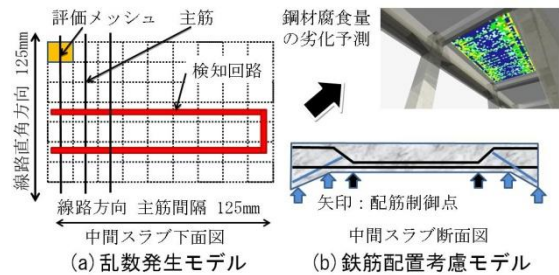


図-8 シミュレーション手法の概念図

表-3 シミュレーション条件

項目	単位	値
中性化深さの平均値	mm	10
中性化深さの標準偏差	mm	5
経年	年	10
表面被覆寿命	年	10
鉄筋かぶりの平均値	mm	30
鉄筋かぶりの標準偏差	mm	5
鉄筋腐食速度	mm/年	0.0015

おける劣化予測モデルの概念図を示す。維持管理標準では、変状の過程を「潜伏期」、「進展期」、「加速期（前期、後期に区分）」、「劣化期」に区分している⁵⁾。それぞれの劣化期の閾値となるひび割れ発生、はく離、はく落発生

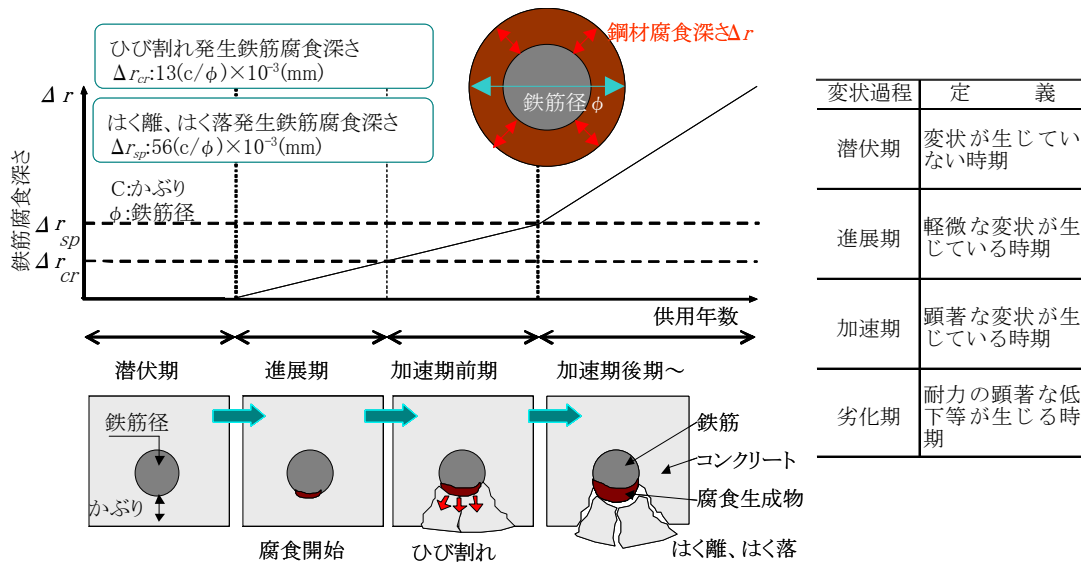


図-9 変状予測モデルの概念図

表-4 鉄筋の腐食モデル

変状原因	各期終了時の閾値		鉄筋の腐食速度 dr/dt (mm/年)
	潜伏期	中性化残り 10mm	
中性化	進展期 (ひび割れ発生)	鉄筋腐食深さ $\Delta r_{cr}=26(c/\phi)\times 10^{-3}$	1.5×10^{-3}
	加速期前期 (はく離, はく落)	鉄筋腐食深さ $\Delta r_{sp}=56(c/\phi)\times 10^{-3}$	

ここに、 c : かぶり(mm), ϕ : 鉄筋径(mm) dr/dt : 鉄筋の腐食速度(mm/年)
 下線部 維持管理標準からの変更値

を鉄筋の腐食深さで判定している。またその鋼材の腐食深さは、鉄筋のかぶり c と鉄筋径 ϕ で定められている。

表-4 に変状の劣化予測モデルの定義を示す。本論文では中性化を検討対象とした。

中性化深さは、経年 10 年の設定値から中性化速度係数を算出し、予測値 \sqrt{t} 則により算出した。

このモデルにおいて重要なファクターとなるのは、鋼材の腐食速度 dr/dt である。ここでは既往の検討例^{3), 9)}を参考に、腐食速度を維持管理標準の 1/2 となる 1.5×10^{-3} mm/年とした。また、ひび割れ発生時の鋼材腐食深さについても、これまでの分析傾向を踏まえ、 $\Delta r_{cr}=26(c/\phi)\times 10^{-3}$ とした。また、鋼材腐食量が閾値 Δr_{cr} を超えた場合には、導電塗料も破断するものとして仮定している。

3.2 解析結果

図-10 に鉄筋かぶりのシミュレーション結果を示す。図は、5 本毎に鉄筋を抜き出し重ね書きしたものである。乱数発生モデルには、実際には発生しないと考えられる局所的な鉄筋変形も現れるが、安全側の検討を行っているといえる。導電塗料による回路本数が減るとこのような局所的な鉄筋変形が検知精度に影響を及ぼすことは容易に想像できる。鉄筋配置考慮モデルでは、ハンチ筋と主筋がそれぞれ配筋制御点に支配されて配されていることが分かる。自明のことであるが、このような配筋制御点が明らかであれば、その位置に回路を設けること

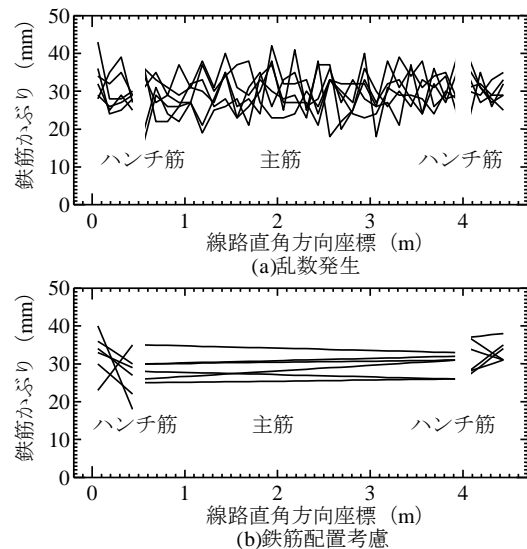


図-10 鉄筋かぶりのシミュレーション結果

が効率的であるが、実務では、直行鉄筋との結節、スベーサ位置等の条件が複合するため、配筋制御点を把握することは難しい。

図-11 に鋼材腐食状況のシミュレーション結果を示す。図の縦方向が線路直角方向、図の横方向は線路方向である (線路方向はスパン 1/2 までの範囲を表示)。図のコンター図は、各メッシュの鋼材腐食量を各メッシュのひび割れ発生鋼材腐食量で除した無次元化鋼材腐食量とした。この値が 1.0 の場合にひび割れが発生する。図から、鉄筋配置を考慮した場合、その配置状況の影響が明確に読み取れる。維持管理標準に基づく劣化予測では、

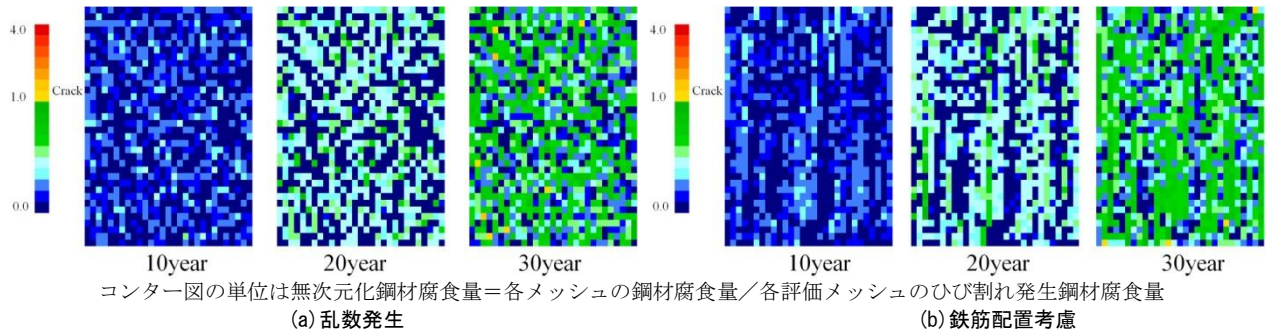


図-11 鋼材腐食状況のシミュレーション結果

鉄筋のかぶりは、ひび割れ発生の閾値と鋼材腐食開始の指標となる中性化残りの両面から影響を及ぼすため、この種の劣化予測では鉄筋のかぶりがしばしば鋼材腐食の支配的な要因となる。

図-12に測線数が変状検知に及ぼす影響を示す。線路方向に36のメッシュを設けているため、36測線で回路を構成した場合が最もひび割れ検知精度が高い。ただし、回路は2測線ずつ組み合わせて構成するため36測線であっても必ずしも解析値と一致はしていない。導電塗料による測線数を減じた場合、ひび割れの検知精度が低下すること、乱数発生モデルは配筋考慮モデルに比べてその傾向が大きくなるなどが分かる。実際の変状とその検知精度の傾向は、乱数発生モデルと鉄筋配置考慮モデルの中間に存在すると考えられるが、全体の傾向から定性的に6測線程度は必要であることが伺える。

初変状の検知に着目した場合、乱数発生では、6測線で+2year、2測線では+10yearとなった。一方、鉄筋配置考慮モデルでは、6測線で+2year、2測線では+3yearとなった。

図-13に初変状の検知に関する検討結果を示す。初変状を検知するタイミングに着目して、図-12と同様の検討を、表-3の解析条件で1000回検討するモンテカルロシミュレーションを実施して分析した。図から乱数発生モデルによれば、初変状の検知遅れを全般検査の周期である2年以内に抑えようとするれば、12測線程度が必要となる結果となる。一方で、鉄筋配置を考慮した場合、局所的な検知ミスが低減されるため、4測線でも検知遅れは2年以下となっている。4測線よりも6測線の方が初変状の検知が遅れているのは、4測線の場合の方が、測線が配筋制御点に近接していたためであると考えられる。

以上の数値解析結果を定性的に俯瞰すると、ラーメン高架橋の中間スラブの場合、配筋状態を考慮して4~6測線程度を設けておけば実用的な検知が行えることが推察される。これらの傾向は、当然のことながら部材、配筋、変状のばらつきの程度により大きくことなるが、本研究で示した手法であれば、必要な回路構成の概要を

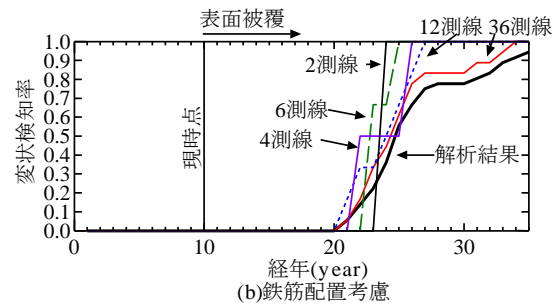
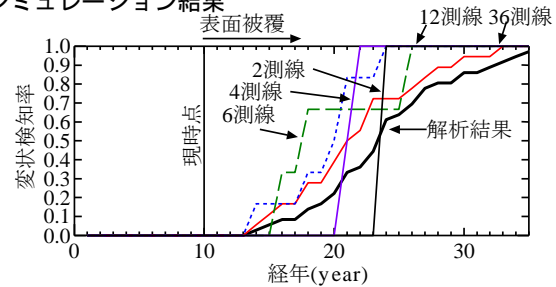
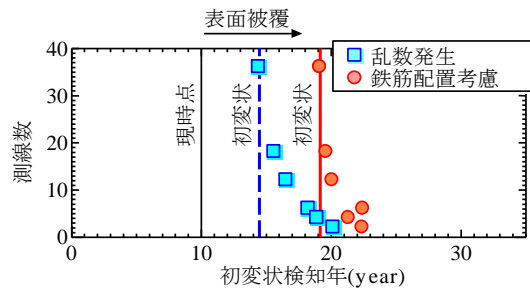


図-12 測線数が変状検知に及ぼす影響



知ることができるであろう。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) 導電塗料の塗布幅が広い場合、塗布回数が少ない場合および表面被覆材を塗布した場合にブリッジ現象の発生率が高くなる傾向みられた。
- (2) 表面被覆材がない場合の検知幅の平均値は 0.51mm となり、表面被覆材を塗布すると検知幅の平均値が増加し、ばらつきが大きくなる傾向がみられた。
- (3) 検知回路としては、ラーメン高架橋の中間スラブの場合、配筋状態を考慮して4~6測線程度を設けてお

けば実用的な検知が行えると推察される。

本研究の一部は国庫補助金を受けて実施された。本研究を進めるに当たり、藤倉化成基部株式会社の西村 司氏、公益財団法人 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室の仲山貴司研究員の協力を頂いた。

参考文献

- 1) 川村力・谷村幸裕・曾我部正道・佐藤勉・長谷川雅志：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
- 2) 谷村幸裕・長谷川雅志・曾我部正道・佐藤勉：鉄道RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.147-157，2004
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），2006
- 4) 川村力・谷村幸裕・曾我部正道・鳥取誠一・長谷川雅志・東川考治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.193-204，2005
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所，株式会社檜崎製作所，藤倉化成株式会社：導電塗料を用いたひび割れ検知適用マニュアル，2007.
- 6) 大屋戸理明，仁平達也，橋直毅，仲山貴司：導電塗料を用いた鉄筋腐食ひび割れの検知に関する基礎試験，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，2008.
- 7) 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
- 8) SANCHAROEN, P. and UOMOTO, T. : Life Cycle Repairing Cost Considering Uncertainties of Deterioration Prediction Model, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.2, pp.1639-1644, 2006
- 9) 松橋宏治，轟俊太郎，曾我部正道，谷村幸裕：実構造物の中性化による劣化の定量分析に基づいた鉄筋腐食速度に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.1477-1482, 2010