

変状発生因子のばらつきを考慮した RC 高欄の劣化予測

轟 俊太郎* 曾我部 正道** 谷村 幸裕*

Deterioration Prediction of RC Handrails Considering the Variety of Damage Factor

Shuntaro TODOROKI Masamichi SOGABE Yukihiro TANIMURA

The various kinds of deterioration factors caused by environment have affected the behavior of RC structures. This study investigated the RC handrails having been used for 25 years or more to obtain the statistical data: the cover depth of reinforcement bar, quantities of carbonation and initially-induced chloride ion. We performed "the Monte Carlo simulation" as the deterioration prediction in order to overcome the problem of the variety in damage factors. The investigation indicated that a predominant factor on the deterioration rate of RC handrails was the cover depth. The simulation predicted that approximately 10-30% of the cover in the RC handrail would be spall within ten years. The corrosion rate predicted by using "the Monte Carlo simulation" was mostly 50% less than that of in "the Maintenance Standards for Railway Structures and Commentary."

キーワード：鉄道高架橋，RC 高欄，塩害，中性化，劣化予測，モンテカルロシミュレーション

1. はじめに

海砂の除塩不足に起因した内的塩害は、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート（以下 RC という）構造物の代表的な変状原因の一つとなっている。また、内的塩害は、しばしば中性化と複合して構造物に影響を及ぼすことが多い。特に、この複合劣化による鉄道高架橋の場所打ち RC 高欄の変状は、側道や交差道路上において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の統計的な分析¹⁾、中性化²⁾ や外的塩害³⁾ 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してきたが、RC 高欄の鉄筋のかぶりや内的塩害の実態については、必ずしも十分な定量的なデータが収集されていない。

一方で、高度経済成長期に建設された多数の構造物を効率的に維持管理していくためには、補修・補強の判断等を可能とする実用的な劣化予測手法が不可欠である。しかし、実 RC 構造物の変状の発生と進行は、ばらつきの大い現象であるため、その評価と予測手法の一般化には、非常に大きな困難が伴う。

2006 年制定の鉄道構造物等維持管理標準・同解説（コンクリート構造物）（以下、維持管理標準という）⁴⁾ では、時間の経過に伴う変状の過程を「潜伏期」、「進展期」、「加速期」、「劣化期」に区分して、目視等のグレーディングに

よる半定量的な評価を中心とした手法が採用された。コンクリート構造物の維持管理の実務では、経験を積んだ検査員の目視のみで、健全度の判定までが可能な場合も多く、過去の経験や知識、周囲の類似構造物の変状の状態に基づき、ある程度の判断は行い得ると判断されたためである。

一方で近年、定量的な劣化予測への要望も強く、ライフサイクルコストや予防保全の観点からも、こうした手法の確立が望まれている。このため、維持管理標準では、その付属資料において、鋼材の腐食速度を用いた定量的な劣化予測手法が新たに提案された^{5) 6) 7)}。これらの予測モデルは、あくまで安全側の仮定に基づき設定されており、実務においては、定期的な調査等により予測結果、即ち現象のばらつきを適宜補正することを前提に構築されている。今後、精度の高い劣化予測を行っていくためには、この劣化予測モデルを用いた場合の系統的な実績データの蓄積が不可欠であると考えられる。

このような背景から、本論文では、経年25年以上の鉄道高架橋の場所打ち RC 高欄を検討対象として、以下の事項について検討した。

- 1) 鉄道高架橋の場所打ち RC 高欄に対して詳細な調査を実施し、変状に関する定量的なデータを収集するとともに、劣化予測におけるばらつき of 支配的な要因を明らかにする。
- 2) 維持管理標準に基づき、1) の結果を用いて劣化予測及び予測の修正を行い、将来的な劣化状況について考察する。併せて維持管理標準における劣化予測モデルの検証を試みる。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 鉄道力学研究部 構造力学研究室

特集：構造物技術

表1 構造物の概況

構造物名称	しゅん功	経年(年)	調査数量(枚)	周辺環境
A 高架橋	1979年(昭和44年)	27	18	市街地
B 高架橋	1980年(昭和45年)	26	7	市街地



図1 3径間ラーメン高架橋の状況

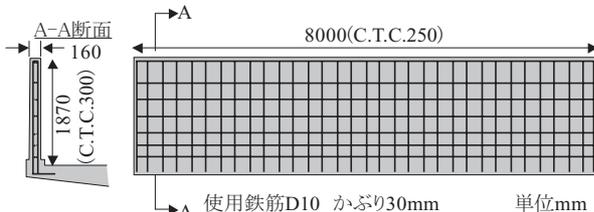


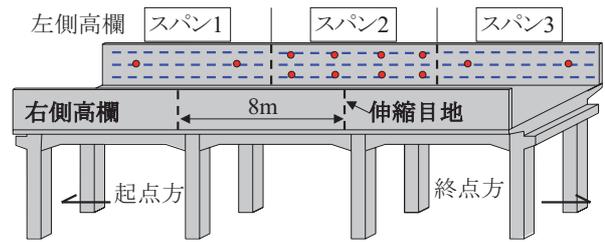
図2 対象構造物の配筋図

2. 現地調査方法

2.1 調査対象

表1に対象構造物の概況を、図1に高架橋の状況を示す。本論文では、経年が異なる2つの高架橋を対象に調査を行った。対象構造物は鉄道構造物等設計標準・同解説⁸⁾に定めるS2地域(最も影響の少ない地域)に区分され海岸線からの距離も2.5kmあることから、飛来塩分の影響は無視できると考えられる。調査区間の延長は、A高架橋が約490mでB高架橋が約200mである。両高架橋は直線距離で約3kmの距離がある。高架橋は、調整桁形式の3又は2径間ラーメン高架橋で、調整桁及びラーメン高架橋のスパンはいずれも8mを基本長としている。調査対象の高欄は、このスパンに合わせて8mに1箇所伸縮目地が設けられている。本報告では、この8m間隔で区切られた高欄ごとに評価を行うこととした。

図2に対象構造物の配筋図を示す。高欄の伸縮目地間の長さは前述のように標準8mで、高さは1.7m~1.9m、厚さは160mmである。使用鉄筋は主鉄筋(図中の鉛直方向)、配力鉄筋(図中の水平方向)ともにD10である。主鉄筋の配置間隔は250mm、配力鉄筋の配置間隔は300mmである。主鉄筋が外側に配置されており、設計かぶり(設計)は30mmである。鉄道高架橋のRC高欄としては一般的な構造である。事前の予備調査からA高架橋から18枚、B高架橋から7枚の変状が顕在化している高欄を選定した。



●: 塩化物イオン濃度分析用試料採取および中性化深さ測定(φ20mmドリル法)
 ---: かぶり測定(電磁誘導法)

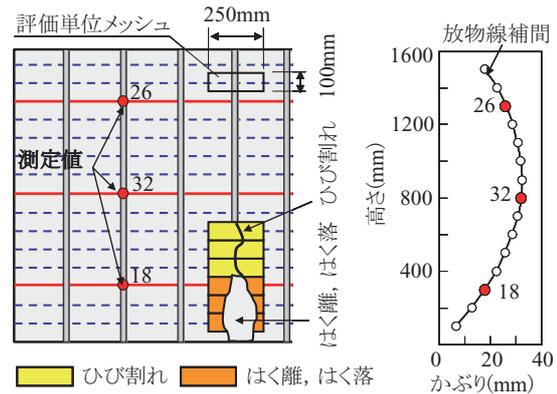


図3 対象構造物の調査概要

2.2 調査方法

図3に対象構造物の調査概要を示す。本報告では、図に示すように鉛直方向の主鉄筋を基準に幅250mm、高さ100mmの評価単位メッシュを設けて、統計的な評価を実施した。

目視調査は、点検ハンマーを併用しながら、メッシュ毎にひび割れ、はく離、はく落の有無を整理した。また、高欄の劣化の程度を定量的に表現するため、変状箇所の比率を変状率と定義し、これを指標として用いることとした。

鉄筋のかぶりは、まず電磁波法(レーダー法)により各主鉄筋の位置出しを行い、続いて電磁誘導法により各主鉄筋について高さ方向に3側線のかぶり測定を実施した。図に示すように、これら3側線の測定結果から各メッシュにおける主鉄筋かぶりを放物線補間により算出した。

中性化深さ測定は、ビット径φ20mmの集塵装置付きドリルを用いて削孔を行い、孔内に1%フェノール溶液を噴霧して1孔につき4箇所を測定し、その測定値の平均を中性化深さとした。

塩化物イオン濃度分析用試料は、中性化による濃縮の影響を受けていないと考えられる深さ(表面から70mm~100mm)から、集塵装置付きドリル(ビット径φ20mm)を用いて採取した。試料から、電位差滴定法(JIS A1154)により全塩化物イオン濃度を算出した。

中性化深さ測定と塩化物イオン濃度分析用試料の採取は高欄1枚につき8箇所又は2箇所とした。中性化深さと塩化物イオン濃度の測定を、全てのメッシュに対して

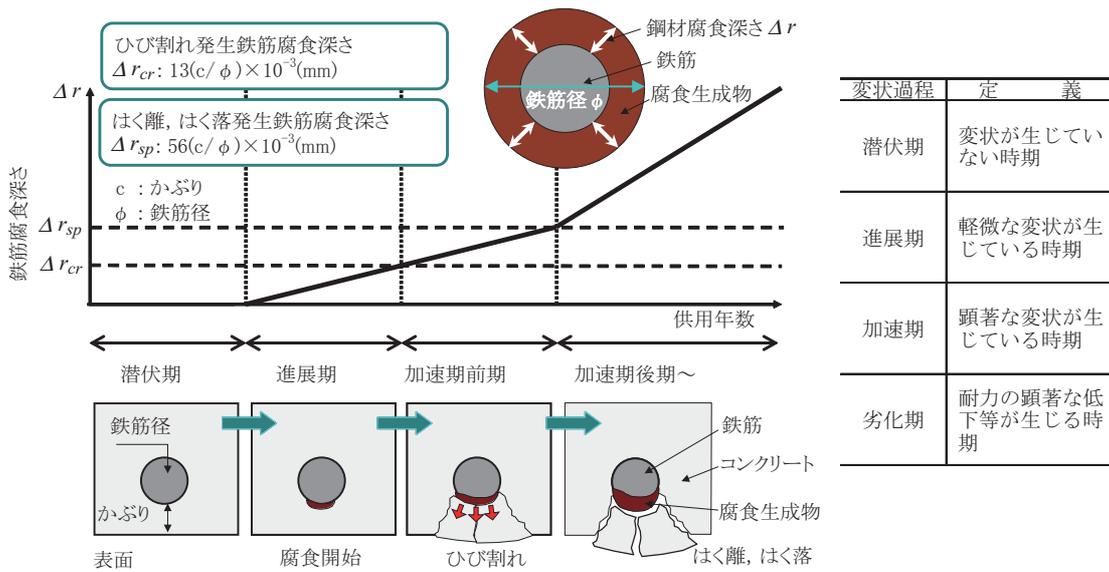


図4 変状予測モデルの概念図

表2 変状予測モデル

変状原因	各期終了時の鉄筋腐食深さ Δr (mm)	鉄筋の腐食速度 dr/dt (mm/年)
中性化	進展期 Δr _{cr} =13 (c/φ) × 10 ⁻³	3.0 × 10 ⁻³
	加速期前期 Δr _{sp} =56 (c/φ) × 10 ⁻³	
内的塩害	進展期 Δr _{cr} =13 (c/φ) × 10 ⁻³	$\frac{dr}{dt} = 10^{-3} \sqrt{\frac{7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6}{c}}$ $1.0 \times 10^{-3} \leq \frac{dr}{dt} \leq 8.0 \times 10^{-3}$
	加速期前期 Δr _{sp} =56 (c/φ) × 10 ⁻³	
複合劣化	進展期 Δr _{cr} =13 (c/φ) × 10 ⁻³	【中性化残り > 25mm かつ Cl ⁻ ≥ 1.2kg/m ³ 】 $\frac{dr}{dt} = 10^{-3} \sqrt{\frac{7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6}{c}}$ $1.0 \times 10^{-3} \leq \frac{dr}{dt} \leq 8.0 \times 10^{-3}$ 【中性化残り ≤ 25mm かつ Cl ⁻ ≥ 0.6kg/m ³ 】 $\frac{dr}{dt} = 10^{-3} \sqrt{\frac{19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4}{c}}$ $3.0 \times 10^{-3} \leq \frac{dr}{dt} \leq 8.0 \times 10^{-3}$
	加速期前期 Δr _{sp} =56 (c/φ) × 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) W/C：水セメント比 Cl⁻：初期塩化物イオン濃度 (kg/m³)

実施することは実務的には困難であるので、測定を実施しなかった箇所については測定値から推定した。

水セメント比 W/C については、本論文で用いた劣化予測式では、それほど大きな感度を有していないことから、ここでは簡易に中性化深さから式(1)により推定した⁴⁾。

$$W/C = (\alpha_p + 3.57) / 9.0 \quad (1)$$

ここに、α_p は中性化速度係数の予測値 (= α_k / γ_p) (mm / √年), α_k は中性化速度係数の特性値 (= y / √t) (mm / √年) y は中性化深さ (本劣化予測では、実測値) (mm), t は供用開始からの経過年数 (年), γ_p は α_p の精度に関する係数 (= 1.10) である。

現地調査による変状率、鉄筋かぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度は、各高欄ごとに平均値、変動係数を算出して整理した。

高欄名称 R の後の数字は、3 又は 2 径間ラーメン高架橋のブロック番号を示す。枝番号は図3に示すスパン番号で起点側より付与している。左右については、慣例に従い起点を背に定義した。

2.3 劣化予測方法

図4に維持管理標準に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⁴⁾。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2に維持管理標準における変状予測モデルを示す。本論文で検討した変状の原因は、中性化と内的塩害、及び両者の複合劣化であるが、その適用区分は、中性化残り (かぶりから中性化深さを減じた値) と初期塩化物イオン濃度で区分される。

このモデルにおいて特に問題となるのは、鋼材の腐食速度 dr/dt である。本モデルは、前述のようにばらつきを適宜調査により補正することを前提に構築されているが、本論文でも現地調査結果を基本に劣化予測を行う。

ところで、現地調査の結果から腐食速度を推定するこ

特集：構造物技術

とは、必ずしも容易なことではない。コンクリート構造物における鉄筋の腐食速度は、少なくとも10年単位で評価すべきものであり、短期間の調査から腐食速度を評価する場合には、何らかの工学的な工夫が必要となる。

本論文では、メッシュ単位で集計した目視による変状率と、腐食速度をパラメータとした劣化予測による変状率を比較することにより、マクロに腐食速度を推定する手法を用いた。劣化予測による変状率は、モンテカルロシミュレーションにより求めた⁹⁾。モンテカルロシミュレーションに用いる独立変数は、鉄筋のかぶり、初期塩化物イオン濃度、中性化深さの3種類とし、それぞれを正規分布と仮定した乱数により3000個の組み合わせを発生させ検討した。各変数の平均値、変動係数は実測値に基づき定めた。

3. 現地調査結果

3.1 個々の高欄の劣化状況

まず高欄個々における劣化状況についてA高架橋R3ブロックの高欄に着目して示す。図5に高欄の目視調査の結果を示す。高欄の表面に貝殻の露出が多々見られ、海砂の使用が推察された。

図6にA高架橋R3ブロックにおける高欄個別のかぶり、中性化深さ、初期塩化物イオン濃度の分布を示す。鉄筋かぶりについては、各高欄内において、長さ方向、高さ方向にかぶりがばらついていることが分かる。とくにR3-2右では、鉄筋籠が全体として傾いていることが伺える。

中性化に関しては図6からは、線路方向や高さ方向に対して特に特徴的な傾向は読み取れない。柱ではブリーディングの影響で中性化の進行に差が生じるのが一般的であるが、高欄においては高さの傾向はみられなかった。高欄個々における中性化深さのばらつきは変動係数で23～36%程度となった。同じR-3ブロック内の各高欄の平均中性化深さを比較するとR3-2右高欄の中性化深さが他よりも3mm大きい傾向を示している。

初期塩化物イオン濃度に関しても、図6からは線路方向や高さ方向に対して特に特徴的な傾向は読み取れない。高欄個々における初期塩化物イオン濃度のばらつきは変動係数で14～18%程度で大きな差はみられない。同じR-3ブロック内の各高欄の平均初期塩化物イオン濃度を比較すると、R3-2左が最も小さく1.21kg/m³、R3-1右が最も大きく1.71kg/m³であった。これらから、同一構造物の高欄であっても、伸縮目地を境界として異なる傾向を示す場合があることが分かる。高欄個々における劣化状況については以上の通りである。同様の検討を他の高欄に対しても実施した。

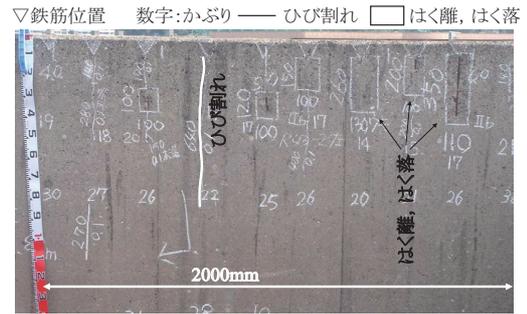


図5 高欄の目視調査結果例 (R3-2右の一部)

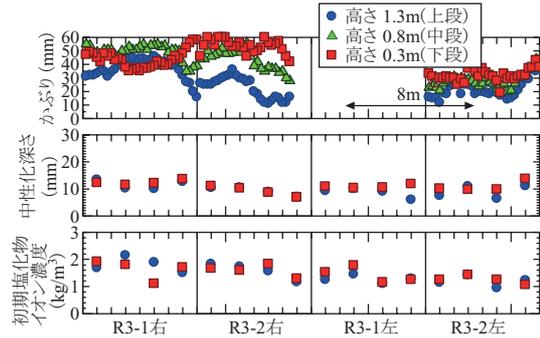


図6 高欄の各変状因子の測定例 (R3)

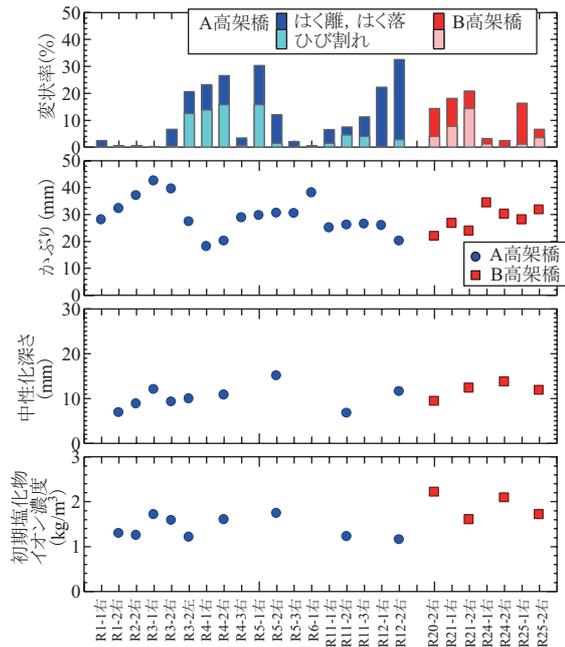


図7 高欄の各劣化因子, 変状率

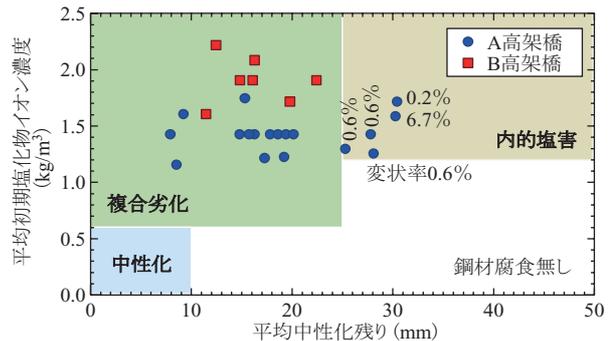


図8 変状原因の区分

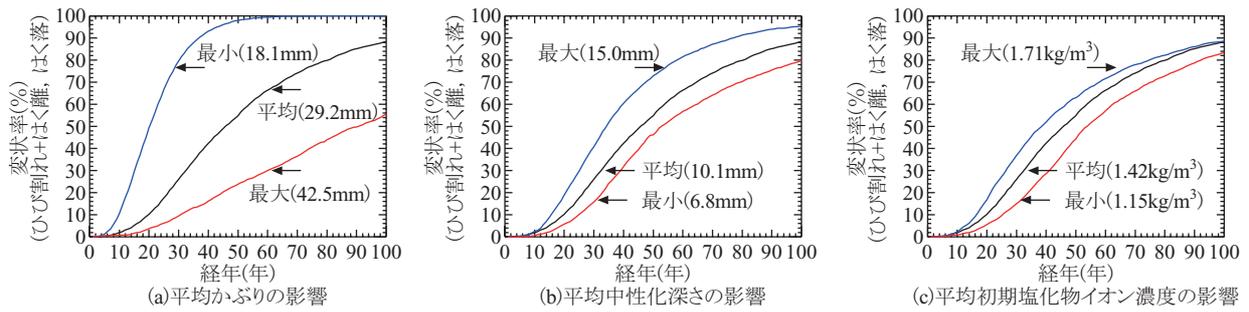


図9 劣化予測モデルにおける各劣化因子が変状率に及ぼす影響 (A高架橋)

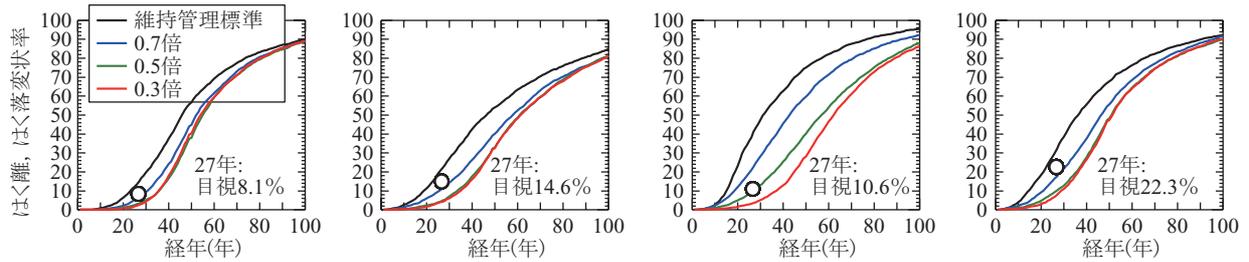


図10 はく離、はく落に関する劣化予測結果例

表3 各調査項目の平均値、変動係数、最大値、最小値

調査項目		高架橋名	
		A	B
目視による 変状率 (%)	平均	11.7	11.7
	変動係数	0.96	0.64
	最大値	32.0	20.8
	最小値	0.0	2.5
かぶり (mm)	平均	29	28
	変動係数	0.23	0.16
	最大値	43	34
中性化深さ (mm)	平均	10.1	11.8
	変動係数	0.26	0.16
	最大値	15.0	13.7
初期塩化物イ オン濃度 (kg/m ³)	平均	1.42	1.90
	変動係数	0.17	0.15
	最大値	1.74	2.21
	最小値	1.15	1.60

3.2 線区全体の劣化状況

図7に変状率、かぶり、中性化深さ、初期塩化物イオン濃度を示す。また、表3に各調査項目の平均値、変動係数、最大値、最小値を示す。ここでは、全ての高欄の全ての調査項目を正規分布と仮定して統計処理を実施した。

図8に変状原因の区分を示す。維持管理標準では、中性化残りと初期塩化物イオン濃度から、変状の原因を区分することとしている。横軸に示す平均中性化残りとは平均かぶりから平均中性化深さを引いた値である。なお、中性化深さ及び初期塩化物イオン濃度未測定の高欄については、各高架橋の平均値を各高欄に用いた。図から検討対象の全高欄を分類すると、大半が中性化と内的塩害の複合劣化となっていることが分かる。また、内的塩害単

独と判定された高欄が5つあるが、個々の評価単位メッシュで見ると、当該箇所は、極端なかぶり不足となっており、メッシュ単位では複合劣化となっている。内的塩害単独と判定された5つの高欄は図中に示すように、変状率が0.2%～6.7%と小さい。以上から、目視で観察された変状の大半が複合劣化が原因であることが分かる。

3.3 支配的な劣化因子の推定

図9に劣化予測モデルにおける各劣化因子が変状率に及ぼす影響を示す。図4、表2に示した劣化予測モデルに対してA高架橋全体の平均値を用いてモンテカルロシミュレーションを実施し、変状率を算出した。ここで正規分布の諸元は、かぶりの平均29.2mm、変動係数0.23、中性化深さの平均10.1mm、変動係数0.26、初期塩化物イオン濃度の平均1.42kg/m³、変動係数0.17を基準とした。これらの諸元の平均値をそれぞれ、A高架橋の最小値、最大値に変化させて影響を考察した。これらの図から、劣化因子の中でかぶりが最も影響が大きいことが分かる。

以上の結果は、当該高架橋区間の高欄の維持管理の実務面からすれば、かぶりの小さい高欄に留意した維持管理が合理的であるということを示しており、中性化深さや初期塩化物イオン濃度よりも優先すべき評価指標となることを示している。対策等については、この結果を見るとかぶり不足のものを優先すべきであると判断される。

3.4 劣化予測

図10にはく離、はく落に関する劣化予測結果を示す。各高欄について、表2に示した平均値及び変動係数を用いてモンテカルロシミュレーションを行い、変状率を算出した。中性化深さと初期塩化物イオン濃度が不明の高

特集：構造物技術

欄については、それぞれA高架橋、B高架橋の平均値及び変動係数を用いた。また、劣化予測モデルを用いる際的前提条件となっている劣化予測の補正については、表2に示した腐食速度を0.7倍、0.5倍、0.3倍に変化させて推定することとした（以下、腐食速度補正係数という）。図より今後、10年、20年後に各高欄に生じるはく離、はく落の変状率を予測することができる。例えば今後10年で、はく離、はく落箇所は、評価単位メッシュに換算して全体の10%～30%増加することが予測される。また、図より腐食速度補正係数は0.3～0.7程度までばらついていることが分かる。

図11に腐食速度補正係数に関する全高欄の検討結果を示す。図10に示したモンテカルロシミュレーションを全高欄に対して実施し、腐食速度補正係数を逆算した。即ち腐食速度を維持管理標準値、その0.7倍、0.5倍、0.3倍としたシミュレーションを行いその間の線形補間により腐食速度補正係数とした。腐食速度補正係数は、全体としてばらつきが大きい結果となっており、劣化因子による定量的な説明は困難であった。強いて言えば、初期塩化物イオン濃度でやや右下がりの傾向が見られ、腐食速度補正係数が大きな値となったものは、初期塩化物イオン濃度が低い高欄に集中していることが分かる。腐食速度補正係数の頻度分布としては、0.5以下となるもので70%の比率を占めるが、0.7以上の値も5高欄（20%）で算定された。維持管理標準の腐食速度を超えるものは無かった。

これらの傾向は、構造物の種類や配筋、コンクリートの材質などによって大きく異なると考えられるが、今後、同様の検討を進め、劣化予測の精度向上に活用して行きたいと考えている。

4. 結論

経年25年以上の鉄道高架橋の場所打ちRC高欄を検討対象として、その変状原因について分析するとともに劣化予測を行った。本報告で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 現地調査を行い鉄道高架橋の場所打ちRC高欄における、かぶり、中性化、初期塩化物イオン濃度に関するデータを得た。
- 2) 当該高欄の劣化原因が中性化と内的塩害による複合劣化であることを示した。また当該高欄においては、変状率に支配的な劣化因子が、かぶりであることを示した。
- 3) モンテカルロシミュレーションによりはく離、はく落に関する変状率を予測した。今後10年で、はく離、はく落箇所は、全体の10%～30%増加することが推定された。
- 4) モンテカルロシミュレーションにより鉄筋の腐食速度を逆算した。その結果、維持管理標準で示す腐食

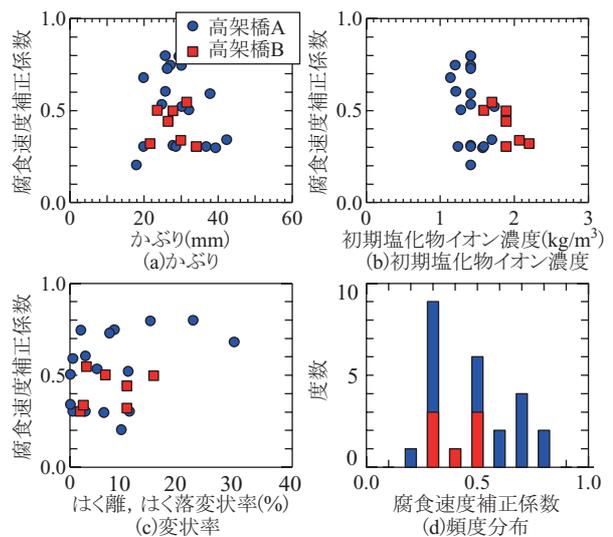


図11 腐食速度補正係数に関する検討結果

速度を超えるものは無く、維持管理標準で示す腐食速度の50%以下となる高欄は70%程度となった。

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) 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
- 4) 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) 鳥取誠一・宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.35-46，2004
- 6) 鳥取誠一・宮川豊章：初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.157-170，2005
- 7) 鳥取誠一・宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.181-195，2005
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説－コンクリート構造物，丸善，2004
- 9) SANCHAOEN, 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.