

# 論文 実構造物の劣化状況に基づく鉄筋コンクリートの内的塩害劣化予測モデルに関する研究

松橋 宏治\*1・宇野 匡和\*2・谷村 幸裕\*3・曾我部 正道\*4

**要旨:** 本研究では、内的塩害を受ける既設 RC 高欄に対する調査結果から、ひび割れおよび剥離・剥落の発生率と、かぶり、塩化物イオン濃度および中性化速度との関係を整理した。その結果、かぶりの減少に伴い変状発生率が増加する明確な傾向が得られた一方で、その他項目と変状発生率との関連は得られなかった。また、劣化予測において、既往の予測モデルの鋼材の腐食速度を 0.5 倍に修正した結果、剥離・剥落に対しては、かぶり 15mm 以上の範囲の変状発生率について、更に複合劣化に移行する中性化残りの閾値を 15mm とすることで、腐食ひび割れが顕在化し始めるかぶりについて、それぞれ調査結果に近い結果を得た。

**キーワード:** 内的塩害、実構造物調査、かぶり、初期塩化物イオン、中性化速度係数、劣化予測モデル

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物と言う）の維持管理においては、LCC 縮減等を目的とした予防保全の観点から、劣化予測が重要視されるようになっており、鉄道構造物等維持管理標準<sup>1)</sup>には、幾つかの劣化機構に関する劣化予測モデルが示されている。しかし、鉄筋コンクリートの劣化はばらつきの大い現象で、対象構造物における各種影響要因のばらつき程度とその影響を把握することや、実構造物の状況に応じて適宜、予測モデルを修正することが、より精度の高い劣化予測を行う上では重要となる。

この観点から、著者らは既報<sup>2) 3)</sup>において、内的塩害を受ける実構造物における塩化物イオン濃度のばらつきに着目した調査、および文献 1) の予測モデルに統計的手法を適用し、調査で得られた塩化物イオン濃度等のばらつきを考慮した劣化予測を実施している。これらの中で、塩化物イオン濃度の部位によるばらつきは変動係数で 0.20 程度以下であり、この程度のばらつきは予測結果にほとんど影響しないこと<sup>2)</sup>、予測モデルによる現状評価の結果は実構造物の劣化状況を適切に評価しているとは言い難いこと<sup>3)</sup>を報告した。しかし、これらの研究では、塩化物イオン濃度等が実構造物の劣化の進行に及ぼす影響や、実際の劣化状況との比較による劣化予測モデルの修正に関する具体的な検討は行われていない。

そこで本研究は、まず内的塩害劣化が顕在化した実構造物に対する詳細な調査結果から、ひび割れおよび剥離・剥落と言った劣化状況と、かぶり、初期塩化物イオン濃度、および中性化速度との関係を整理した。更に、調査で得られた実際の劣化状況に基づき、内的塩害劣化

予測モデルに関する検討を行った。

## 2. 構造物調査

### 2.1 対象構造物

構造物調査は、既設鉄道 RC 高架橋の場所打ち RC 高欄（以下、高欄と略称）を対象に、線区 A および線区 B の 2 線区で実施した。供用開始からの経過年数は、線区 A が 27 年、線区 B が 25 年とほぼ等しい。

図-1 に、調査した高架橋と高欄の概略形状・寸法を示す。調査した何れの高欄も構造条件はほぼ同一で、高さ 1700mm、厚さ 200mm 程度、幅は線路方向の柱間隔に当たる 8000mm を 1 ブロックとして築造されている。設計図により確認した配筋は、D10 (SD345) が格子状に配

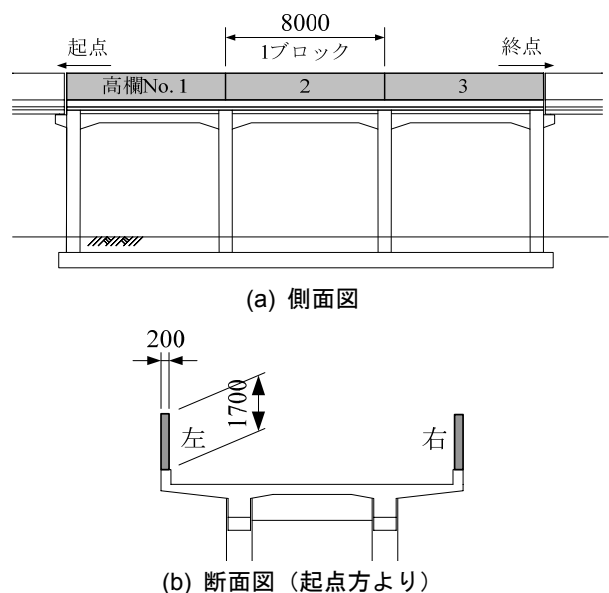


図-1 対象構造物の概略形状・寸法(単位 mm)

*1 パシフィックコンサルタンツ(株)	交通技術本部	鉄道部	工修	(正会員)
*2 四国旅客鉄道(株)	工務部	工事課	工修	(正会員)
*3 (財)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)
*4 (財)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)

置されており、最外縁に配置された鉛直方向鉄筋の間隔は 250mm、水平方向鉄筋の間隔は 300mm となっている。使用されたコンクリート材料に関する資料は現存しておらず、設計基準強度や水セメント比などは不明である。

調査は、線区 A, B ともに数百 m の範囲内で行い、また、両線区の調査箇所間の距離は 3km 程度である。したがって、気温、湿度および降雨量等、構造物の置かれた環境条件は調査範囲でほぼ一定と考えられる。また、調査箇所は海岸線から 1km 以上離れた位置に立地しており、対象高欄は飛来塩分の影響は受けないと考えられる。

## 2.2 調査の項目および方法

### (1) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の分析用試料には、ドリル削孔粉<sup>4)</sup>を用いた。本研究は、コンクリートの練混ぜ時に混入された初期塩化物イオンを対象とするため、試料は中性化による濃縮等の影響を受けない位置から採取する必要がある。そこで、試料の採取深さは、内的塩害を受ける実構造物における塩化物イオン濃度の深さ方向分布を調査した既往の研究<sup>5)</sup>を参考に、事前に確認した中性化深さの 5 倍程度以上となる表面からの深さ 70~100mm 位置とした。試料採取は、集塵装置付きドリル（ビット径 20mm）を用いて行い、採取した試料に対し、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法（JIS A1154）により全塩化物イオン濃度の分析を行った。

高欄 1 ブロックに対する試料採取箇所数は、塩化物イオン濃度の部位によるばらつきを確認する目的で 8 試料を採取する詳細調査と、2 試料を採取する簡易調査の 2 通りを実施した。

### (2) 中性化深さ

中性化深さは、初期塩化物イオン濃度の分析用試料を採取したドリル削孔跡に、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧し、赤色に変化する位置の表面からの深さをノギスにより測定した。測定は、孔 1 箇所につき上下左右 4 点で行った。

### (3) かぶり

鉄筋のかぶりは、まず電磁波レーダーにより高欄に配置された鉛直方向鉄筋全て（高欄 1 ブロックあたり 30~35 本）の位置を特定した後、これら全てに対し電磁誘導法による鉄筋探査機を用いて測定した。鉛直方向鉄筋 1 本につき、図-2 に示すように高欄の上下端から 300mm 高さ位置、および中央位置の 3 箇所を測定した。

### (4) 劣化状況

劣化状況については、ひび割れや剥離・剥落の変状の有無を目視・打音により調査した。調査では、図-2 に示すように高欄を高さ方向に 100mm 間隔で区切り、鉛直方向鉄筋と交差する位置に変状がある場合に 1 箇所の変

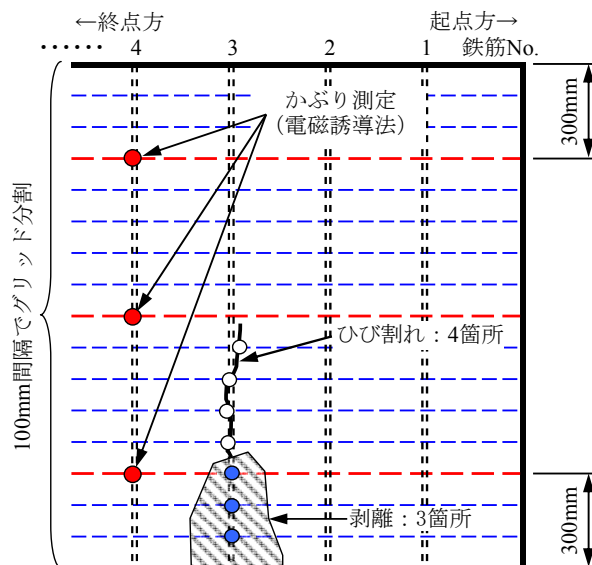


図-2 かぶりおよび劣化状況の調査要領

表-1 各種調査を実施した高欄ブロック数

線区		A	B	計
塩化物イオン	詳細	3 (91)	0 (0)	3 (91)
中性化深さ	簡易	6 (196)	4 (127)	10 (323)
かぶり, 劣化状況		18 (582)	7 (229)	25 (1393)

※ ( ) 数値は鉄筋本数

状とカウントし、これの全体に対する割合（以下、変状発生率という）として整理した。なお、高欄 1 ブロックあたりの調査箇所数は 450~500 箇所である。

## 2.3 調査箇所数

各種調査を実施した高欄のブロック数を表-1 に示す。

## 3. 調査結果

### 3.1 塩化物イオン濃度

表-2 に、塩化物イオン濃度の調査結果を示す。なお、詳細調査として 1 ブロックにつき 8 試料を採取した高欄については、調査結果の標準偏差を平均値で除した変動係数についても示した。また、同表において高架橋 No. と示す数字は、線路方向の順序に従っており、A1, A2... のように数字が連続する場合は高架橋が隣り合うことを示し、高欄 No. とは図-1 に示すように高架橋毎に起点方から順に付した番号である。表-2 より、高欄毎の塩化物イオン濃度の平均値は 1.15~2.21kg/m<sup>3</sup> で、全体の平均値は 1.57kg/m<sup>3</sup> であった。また、ばらつきの程度を示す変動係数は、高欄あたりでは 0.14~0.18 (平均 0.16) で、全体の変動係数は 0.21 であった。

### 3.2 中性化深さ

高欄毎の中性化深さの平均値を表-2 に示す。詳細調査を実施した高欄については、変動係数についても示している。表-2 より、高欄毎の中性化深さの平均値は 6.7~

表-2 調査結果のまとめ

高架橋 No.	高欄 No.	塩化物イオン濃度 $Cl^-$		中性化深さ $y$		かぶり $c$		変状発生率 (%)		
		平均 ( $kg/m^3$ )	変動係数	平均 (mm)	変動係数	平均 (mm)	変動係数	ひび割れ	剥離剥落	合計
A1	1 右	---	---	---	---	28.0	0.26	0.0	2.5	2.5
	2 右	1.29	---	6.8	---	32.2	0.27	0.4	0.2	0.6
A2	2 右	1.25	---	8.8	---	37.0	0.29	0.0	0.6	0.6
A3	1 右	1.71	0.18	12.0	0.25	42.5	0.23	0.0	0.2	0.2
	2 右	1.58	0.15	9.2	0.23	39.5	0.39	0.5	6.2	6.7
	2 左	1.21	0.14	9.9	0.36	27.2	0.26	12.5	8.1	20.6
A4	1 右	---	---	---	---	18.1	0.33	13.8	9.4	23.2
	2 右	1.60	---	10.8	---	20.1	0.39	15.8	10.8	26.7
	3 右	---	---	---	---	28.8	0.34	0.6	2.9	3.5
A5	1 右	---	---	---	---	29.6	0.31	15.8	14.6	30.4
	2 右	1.74	---	15.0	---	30.4	0.29	1.5	10.6	12.1
	3 右	---	---	---	---	30.3	0.16	0.0	2.1	2.1
A6	1 右	---	---	---	---	38.0	0.23	0.0	0.6	0.6
A11	1 右	---	---	---	---	25.0	0.23	1.5	5.0	6.5
	2 右	1.22	---	6.7	---	26.0	0.25	4.6	2.9	7.5
	3 右	---	---	---	---	26.4	0.19	4.0	7.3	11.3
A12	1 右	---	---	---	---	25.9	0.33	0.0	22.3	22.3
	2 右	1.15	---	11.5	---	20.1	0.36	2.8	29.7	32.5
B1	2 右	2.21	---	9.3	---	21.8	0.26	4.0	10.4	14.4
B2	1 右	---	---	---	---	26.7	0.28	7.7	10.4	18.1
	2 右	1.60	---	12.3	---	23.8	0.20	14.4	6.5	20.8
B5	1 右	---	---	---	---	34.3	0.30	1.2	2.0	3.2
	2 右	2.08	---	13.7	---	30.1	0.23	0.0	2.5	2.5
B6	1 右	---	---	---	---	28.0	0.37	1.1	15.2	16.4
	2 左	1.71	---	11.8	---	31.7	0.23	3.6	3.1	6.7
平均		1.57	0.16	10.6	0.28	28.9	0.28	---	---	---
変動係数		0.21	---	0.23	---	0.21	---	---	---	---

15.0mm, 全体の平均値は 10.6mm であった。調査で得られた中性化深さの平均値から  $\sqrt{t}$  則により求めた中性化速度係数は、高欄毎の平均値は 1.29~2.89mm/ $\sqrt{\text{年}}$ , 全体の平均値は 2.04mm/ $\sqrt{\text{年}}$  である。また、変動係数は高欄あたりでは 0.23~0.36 (平均 0.28) で、全体の変動係数は 0.23 であった。

### 3.3 かぶり

高欄毎のかぶりの平均値および変動係数を表-2 に示す。表-2 より、高欄毎のかぶりの平均値は 18.1mm~42.5mm で、変動係数は 0.16~0.39 であった。

### 3.4 劣化状況

劣化状況の調査結果として、ひび割れ、剥離・剥落およびそれらを合計した変状発生率を表-2 に示す。表-2 に示す変状は全て、最外縁の鉛直方向鉄筋に沿って生じていたものである。表-2 より、ひび割れ発生率は 0.0~15.8%, 剥離・剥落発生率は 0.2~29.7%, ひび割れおよび剥離・剥落発生率の合計は 0.2~32.5% であった。

## 4. 劣化状況と各種要因との関係

### 4.1 かぶりとの関係

図-3 には、調査した全高欄に対し、変状の有無および種類と、その位置におけるかぶりを集計し、かぶり 5mm 毎に変状発生率を整理した結果を示す。ここで、電磁誘導法による測定を行っていない箇所のかぶりは、図-2 に示す 3 点の測定値を用い、鉄筋がこの 3 点を通る放物線形状をなすと仮定して推定した。図-3 より、ひび割れはかぶり 35mm 程度、剥離・剥落はかぶり 30mm 程度以下

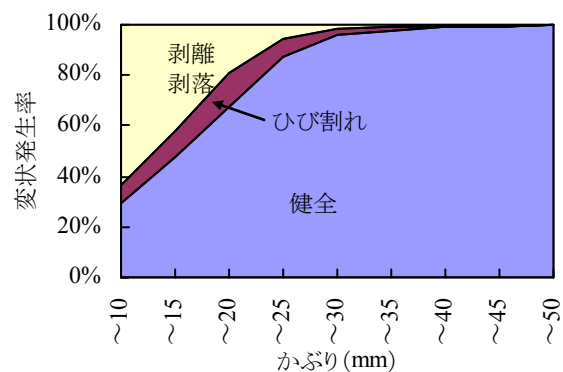


図-3 かぶり毎の変状発生率 (全調査結果の集計)

から生じている。また、かぶりの低下に伴い変状発生率が大きくなる明確な傾向が見られ、ひび割れおよび剥離・剥落を合計した変状発生率では、かぶり 15~20mm で40%程度、10~15mm で50%程度、10mm 以下で70%程度となっている。

次に、表-3では、高欄毎にかぶりと変状発生率（ひび割れ、剥離・剥落の合計）の関係を整理した。表-3より、何れの高欄もかぶりの低下に伴い変状発生率が大きくなる傾向が確認される。しかし、変状が顕在化し始めるかぶりは高欄により大きく異なり、また、各高欄の変状発生率から算定したかぶり毎の標準偏差は、平均値に比べ大きな値となっていることから、同程度のかぶりでも変状の発生状況は大きくばらついていると言える。

#### 4.2 塩化物イオン濃度との関係

塩化物イオン濃度の調査を実施した高欄に対し、表-2に示す塩化物イオン濃度の平均値と、表-3に示すかぶり毎の変状発生率との関係について整理する。図-4には、かぶりが比較的小さい範囲である10mm以下、10~15mm、15~20mmの結果を示したが、何れのかぶりにおいても変状発生率と塩化物イオン濃度との間に相関は見られない。この結果は、その他のかぶりが比較的大きな範囲

においても同様であった。

#### 4.3 中性化速度係数との関係

塩化物イオン濃度の場合と同様に、中性化速度係数の平均値と、かぶり毎の変状発生率の関係について整理した結果を図-5に示す。図-5より、何れのかぶりにおいても変状発生率と中性化速度係数との間に相関は見られない。この結果は、その他のかぶりが比較的大きな範囲においても同様であった。

### 5. 劣化予測モデルに関する検討

#### 5.1 検討の概要

ここでは、調査時点の劣化状況を劣化予測モデルにより評価し、これと調査結果を比較することにより、予測モデルの修正について検討を行う。

劣化予測は、鋼材腐食速度に基づき算定した腐食量から変状を判定する方法を用いることとし、文献1)に示されるモデルを基本として行った。本検討では、内的塩害劣化、および中性化との複合劣化の劣化機構を考慮した。文献1)では鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度を1.2kg/m<sup>3</sup>とし、初期塩化物イオン濃度がこれを超える場合は、中性化残りに応じて内的塩害または複合劣化の予

表-3 かぶり毎の変状発生率(%) (ひび割れ、剥離・剥落の合計)

高架橋	高欄 No.	かぶり (mm)							
		~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40	~45
A1	1 右	25.0	9.1	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2 右	33.3	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A2	2 右	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1 右	75.0	38.9	23.8	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0
A3	2 右	100.0	92.9	63.9	25.7	11.0	5.6	0.0	0.0
	2 左	76.9	39.1	21.0	4.2	0.0	0.0	---	---
A4	1 右	63.6	46.1	34.1	4.6	4.3	14.0	0.0	0.0
	2 右	31.3	20.8	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3 右	100.0	94.1	78.4	72.3	23.1	14.9	1.8	0.0
A5	1 右	100.0	73.3	51.3	28.8	0.8	0.0	0.0	1.4
	2 右	0.0	0.0	0.0	10.0	1.9	1.3	0.0	0.0
	3 右	---	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.8	1.4
A6	1 右	66.7	60.0	13.8	3.9	0.0	0.0	0.0	---
	1 右	33.3	50.0	23.2	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0
A11	2 右	---	50.0	66.0	12.1	2.3	0.0	0.0	0.0
	3 右	100.0	76.5	38.2	17.2	9.9	6.5	13.9	8.3
	1 右	83.3	66.7	41.4	15.1	2.1	0.0	0.0	0.0
A12	2 右	75.0	53.7	24.8	1.7	1.0	0.0	0.0	---
	2 右	60.0	65.2	43.6	30.4	7.4	2.8	0.0	0.0
B2	1 右	66.7	48.0	48.0	23.1	7.9	0.0	---	---
	2 右	100.0	58.3	8.0	0.0	0.0	0.0	1.2	5.8
B5	1 右	66.7	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2 右	62.5	41.9	41.7	18.8	11.8	3.8	0.0	0.0
B6	1 右	100.0	75.0	16.7	33.3	20.0	3.8	0.0	0.0
	2 左	25.0	9.1	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均		69.1	45.9	26.8	13.0	4.3	2.2	0.8	0.8
標準偏差		28.5	27.5	23.2	16.4	6.4	4.1	2.9	2.2

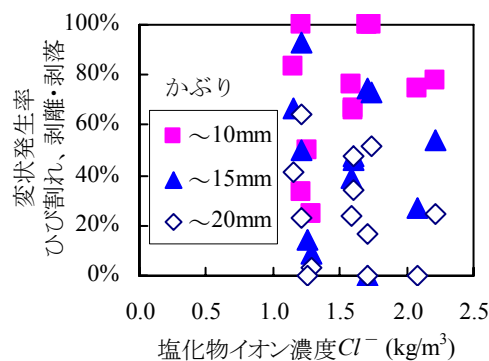


図-4 塩化物イオン濃度と変状発生率の関係

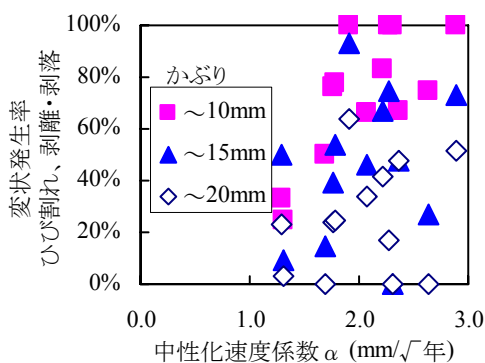


図-5 中性化速度係数と変状発生率の関係

測モデルを使い分けることとしている。

また、本検討では劣化予測式のパラメータにばらつきを与え、モンテカルロ法により調査時点の経年における変状発生率を算定した。具体的には、初期塩化物イオン濃度と中性化速度係数を独立変数とし、これらに調査結果に基づく正規分布を仮定し、乱数により 3000 個の組み合わせを発生させ劣化予測計算を行う。この計算をかぶり毎に実施し、かぶり毎の変状発生率を算定する。

## 5.2 劣化予測の基本モデル<sup>1)</sup>

### (1) 潜伏期

構造物の供用開始から、鋼材の腐食開始までの期間として定義される。各劣化機構における潜伏期終了の閾値を以下に示す。

- ・複合劣化：中性化残り 25 mm (ただし、塩化物イオン濃度が 0.6~1.2kg/m<sup>3</sup> の場合)
- ・内的塩害：潜伏期なし

### (2) 進展期

鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間として定義される。各劣化機構とも、進展期終了は式(1)で算定される鋼材の腐食深さ  $\Delta r_{cr}$  に達した時点とする。

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (1)$$

また、各劣化機構における鋼材の腐食速度  $dr/dt$  は式(2)~(3)により算定する。

- ・複合劣化 (中性化残り 25mm 以下)

$$dr/dt = \frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4) \quad (2)$$

ただし、 $3.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$

- ・内的塩害 (中性化残り 25mm 以上)

$$dr/dt = \frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6) \quad (3)$$

ただし、 $1.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$

ここに、 $dr/dt$ : 鋼材の腐食速度(mm/年),  $c$ : かぶり(mm),  $\phi$ : 鉄筋径(mm),  $Cl^-$ : 初期塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>),  $W/C$ : 水セメント比(%)

### (3) 加速期前期

腐食ひび割れの発生から剥離・剥落発生までの期間として定義される。各劣化機構とも、加速期前期終了は、式(4)で算定される鋼材の腐食深さ  $\Delta r_{sp}$  に達した時点とする。

$$\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (4)$$

また、各劣化機構における鋼材の腐食速度  $dr/dt$  は式(2)~(3)により算定する。

## 5.3 劣化予測に用いるパラメータ

本検討で用いた劣化予測の各種パラメータを表-4 に示す。初期塩化物イオン濃度と中性化速度係数には、表-2 に示す全高欄の平均値および変動係数を用いた。また、水セメント比  $W/C$  は式(5)を用い、中性化速度係数  $\alpha$  に

表-4 劣化予測に用いるパラメータ

		使用値
初期塩化物イオン濃度 $Cl^-$ (kg/m <sup>3</sup> )	平均値	1.57
	変動係数	0.21
中性化速度係数 $\alpha$ (mm/√年)	平均値	2.04
	変動係数	0.23
水セメント比 $W/C$ (式(5)から求まる値)	平均値	62%
	変動係数	0.08
かぶり $c$ (mm)		5~45
鉄筋径 $\phi$		D10

表-5 予測モデル修正の検討ケース

Case No.	複合劣化に移行する 中性化残りの閾値	腐食速度の基本モデル に対する低減率
1	25 mm (基本モデル)	1.0 倍(基本モデル)
2		0.5 倍
3		0.3 倍
4	15 mm	1.0 倍(基本モデル)
5		0.5 倍
6		0.3 倍

応じた値を用いた。

$$W/C = (\alpha + 3.57) / 9.0 \times 100 \quad (5)$$

## 5.4 劣化予測モデルの修正

本検討では、前述した基本の劣化予測モデルに対し、複合劣化に移行する中性化残りの閾値 (以下、中性化残りの閾値と略称) および鋼材の腐食速度を修正した表-5 に示す 6 ケースについて検討した。鋼材腐食開始の限界塩化物イオン濃度や、ひび割れや剥離・剥落発生時点の腐食深さについても修正を検討する余地はあると思われるが、本検討ではこれらの不確定性の影響も鋼材の腐食速度に包含させ修正を行うこととした。また、中性化残りの閾値については、土木学会コンクリート標準示方書 (維持管理編)<sup>6)</sup> に示された参考値を用いている。

## 5.5 検討結果

図-6 および図-7 に、劣化予測モデルにより算定した調査時点までの期間における変状発生率と、調査結果の変状発生率を示す。図-6 は腐食ひび割れの発生率で、この場合、比較対象の調査結果は、図-3 に示すひび割れおよび剥離・剥落発生率の合計である。ここで、調査結果の変状は全て鉄筋腐食によるものとしている。また、調査結果の剥離・剥落には、ひび割れを伴うものと、伴わないものがあり、ひび割れを伴わない剥離・剥落については、予測モデルの変状過程を経ていないと考えられる。しかし、この場合についても、鋼材の腐食量は式(1)に示す腐食量以上に達していると考え、腐食ひび割れ発生率に含めた。また、図-7 は剥離・剥落の発生率である。腐食ひび割れ発生率の検討結果について、図-6(a)に示

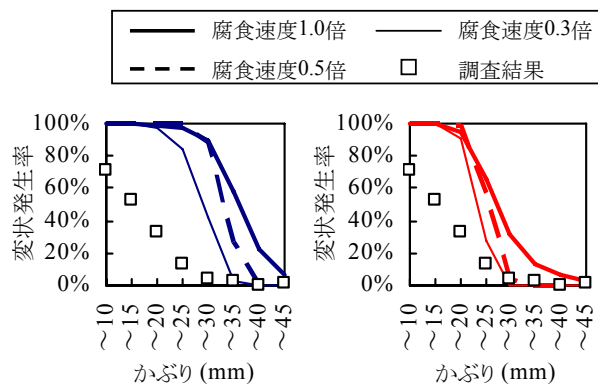
す基本モデルの算定結果は、調査結果を過大評価している。図-6(b)において中性化残りの閾値を 15mm とし、更に腐食速度を低減することで、傾向的にはかぶり 25～30mm 程度で変状が顕在化し始める調査結果に近い結果が得られた。しかしこの場合でも、かぶり 25mm 以下の範囲で調査結果を過大評価しており、今後、本検討で修正した以外の項目も含めて検討を行う必要がある。

剥離・剥落発生率の検討結果についても、図-7(a)に示す基本モデルによる算定結果は、調査結果を過大評価している。これに対し、腐食速度を基本モデルの 0.5 倍とした場合の予測モデルの計算結果は、何れの中性化残りの閾値においても、かぶり 15mm 以上の範囲で調査結果と良い一致を示した。一方で、腐食速度を基本モデルの 0.3 倍とした場合には、何れの中性化残りの閾値においても調査結果を過小評価する傾向にある。

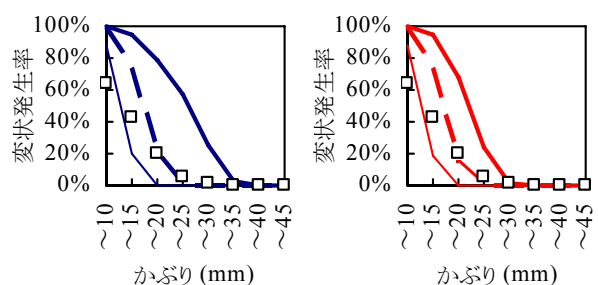
## 6. まとめ

本研究では、供用開始から 25～27 年が経過し、内的塩害による劣化が進行した RC 高欄の調査結果から、ひび割れや剥離・剥落の変状発生率と、かぶり、塩化物イオン濃度および中性化速度係数との関係を整理した。また、文献 1) に示される予測モデルを基本とし、これにより算定される現時点の変状発生率と調査結果とを比較することにより、内的塩害劣化予測モデルについて検討を行った。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) ひび割れおよび剥離・剥落を合計した変状発生率は、かぶり 15～20mm で 40% 程度、10～15mm で 50% 程度、10mm 以下で 70% 程度と、かぶりの低下に伴い変状発生率が大きくなる明確な傾向が得られた。
- (2) 調査で得られた  $1.15\sim 2.21\text{kg/m}^3$  程度の塩化物イオン濃度、および  $1.29\sim 2.89\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$  程度の中性化速度係数と変状発生率に相関は得られなかった。
- (3) 劣化予測モデルによるひび割れおよび剥離・剥落の合計発生率の算定結果は、複合劣化に移行する中性化残りの閾値を 15mm に、鋼材の腐食速度を基本モデルの 0.3～0.5 倍に修正することで、かぶり 25～30mm で変状が顕在化し始める調査結果と傾向的には近い結果を得た。しかし、この場合でもかぶり 25mm 以下の範囲では調査結果を過大評価しており、今後、本検討で修正した以外の項目も含めて検討を行う必要がある。
- (4) 劣化予測モデルによる剥離・剥落発生率の算定結果は、複合劣化に移行する中性化残りの閾値によらず、鋼材の腐食速度を基本モデルの 0.5 倍に修正することで、かぶり 15mm 以上の範囲で調査結果と良い一致を示した。



(a) 中性化残り 25mm (b) 中性化残り 15mm  
図-6 腐食ひび割れ発生率の算定結果



(a) 中性化残り 25mm (b) 中性化残り 15mm  
図-7 剥離・剥落発生率の算定結果

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：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，pp.222-231，2007.1
- 2) 松橋宏治，宇野匡和，曾我部正道，谷村幸裕：内的塩害を受ける既設鉄道 RC 高架橋の初期塩化物イオン濃度のばらつきと劣化予測に関する調査・研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1669-1674，2007.7
- 3) 宇野匡和，松橋宏治，曾我部正道，谷村幸裕：初期塩化物イオンの影響を受ける RC 高欄の変状予測に関する調査・研究，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集[CD-ROM]，5-055，pp.109-110，2007.9
- 4) 湯浅昇ほか：ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオン量の現場試験方法の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1303-1308，1999.6
- 5) 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.181-196，2005.11
- 6) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.94～95，2008