

# 論文 内的塩害と中性化の複合劣化を対象とした劣化予測に関する検討

松本 光矢<sup>\*1</sup>・曾我部 正道<sup>\*2</sup>・轟 俊太郎<sup>\*1</sup>・谷村 幸裕<sup>\*3</sup>

要旨：RC 構造物の劣化要因はさまざまであるが，その中には建設当初から内在する塩分が引き起こす内的塩害と中性化による複合劣化がある。本研究では，この内的塩害と中性化による複合劣化と見られる構造物を対象とし，メッシュ分割法による劣化予測を行い，現地調査結果と比較することで鉄筋腐食速度の予測モデルの妥当性について検討を行った。その結果，予測モデルに用いている鉄筋の腐食速度に対する補正係数は，平均で 0.45 程度であった。また，補正係数が 0.5 以下となる割合は 80% 以上であり，全ケースにおいて予測モデルに用いている腐食速度を超える鉄筋の腐食は見られなかった。

キーワード：内的塩害，中性化，複合劣化，メッシュ分割法，かぶり，鉄筋腐食速度

## 1. はじめに

海砂の除塩不足に起因する内的塩害は，鉄筋コンクリート（以下 RC という）構造物の代表的な変状の原因となっている。また，内的塩害は中性化と複合して構造物に影響を与えることが多い。

著者らは既に鉄道構造物に関する鉄筋のかぶり<sup>1)</sup>や中性化<sup>2)</sup>，外的塩害（飛来塩分による塩害）<sup>3)</sup>，内的塩害（内在塩分による塩害）<sup>4)</sup>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。

一方，近年ではライフサイクルコストや予防保全の観点から，定量的な劣化予測への要望が高まってきている。このため，2006 年制定の鉄道構造物等維持管理標準・同解説<sup>5)</sup>（以下，鉄道維持管理標準という）では鉄筋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。これらの予測モデルは，あくまで安全側に評価する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，つまり現象のばらつきを適宜補

正することを前提として構築されている。今後，精度の高い劣化予測を行っていくためには，調査データと予測データの蓄積が必要であると考えられる。

このような背景から，本研究では，内的塩害と中性化による複合劣化に着目し，既往の研究<sup>4)</sup>に示される現地調査の結果を元に，メッシュ分割法による劣化予測を実施し，鉄筋の腐食速度に関する検討を行った。

## 2. 現地調査

まず，本検討で行った劣化予測に用いた現地調査の結果について，以下に説明する。

### 2.1 調査対象構造物

表 - 1 に調査対象構造物の諸元を示す。図 - 1 に調査対象構造物である RC ラーメン高架橋と RC 門型橋脚の概略図を示す。対象構造物は全て 1976 年にしゅん工した構造物である。軸方向鉄筋は全て  $\phi 22$ mm で，あきは

表 - 1 調査対象構造物の諸元

構造物名		1R1 (高架橋)	1P2 (橋脚)	1R2 (高架橋)	2R1 (高架橋)
構造形式	接続形式	両張	-	片張	片張
	層・柱・径間数	1・2・3	1・2・-	1・2・3	2・2・3
高架橋延長L(m)		40.0	-	32.0	32.0
高架橋幅B(m)		8.0	-	8.0	8.0
高さ(m)		10.5	9.2	10.5	12.0
柱寸法 (mm)	線路方向	750	1200	750	750
	線路直角方向	750	800	750	750
鉄筋径 (mm)	軸方向鉄筋	22			
	帯鉄筋	10			
設計かぶり(mm)		54			
設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )		24			
最大粗骨材寸法(mm)		25			

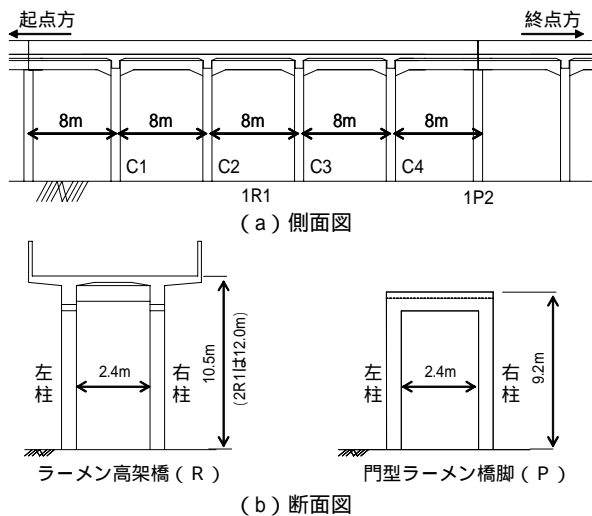


図 - 1 調査対象構造物の概略図

\*1 (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 工修 (正会員)

\*2 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 工博 (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 室長 工博 (正会員)

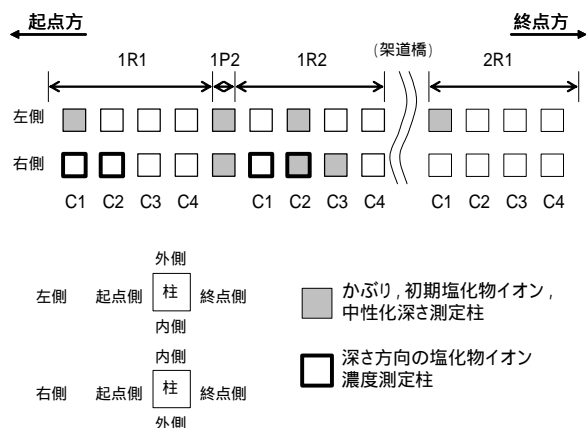


図 - 2 調査対象概略平面図

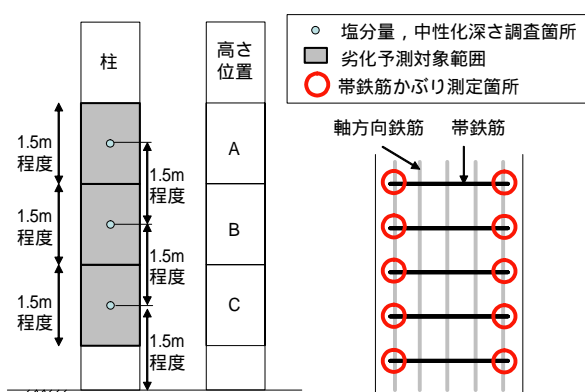


図 - 3 調査箇所概略図

78～138mm である。帯鉄筋は全て  $\phi$ 10mm, 300mm ピッチで配置されている。また、設計図面より、帯鉄筋の設計かぶり量は 54mm であった。調査時のしゅん工後経過年数は 32 年であった。調査対象構造物は、海岸からの距離が 10km 以上であり、飛沫塩分の影響はない場所に位置している。また温暖な気候な土地であり、田畑に囲まれた日当たりのよい山間部に位置している。

図 - 2 に調査箇所概略平面図を示す。図 - 3 に調査箇所概略図を示す。本稿で実施するメッシュ分割法の詳細については後述するが、調査結果を用いて劣化予測を実施するため、調査および劣化予測を行う対象箇所を同じ範囲としている。調査および劣化予測の対象箇所の 1 箇所ごとの範囲は、柱の幅  $\times$  高さ 1.5m 程度をとっている。劣化予測対象箇所の高さ位置は上から A, B, C と示すこととする。

調査および劣化予測対象箇所は、はく離・はく落が見受けられた箇所とした。同一構造物でも、劣化予測対象箇所以外の柱では、ほとんど変状が見られないものも多数存在し、劣化の進行状態のばらつきが見られた。

## 2.2 調査項目および調査方法

本調査で実施した調査項目と調査方法は以下のとおりである。

表 - 2 調査結果

No.	構造物名	断面	柱位置	側面	塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	中性化深さ (mm)	高さ位置
1	1R1	C1	左	終点側	2,231	23.4	C
2	1P2	-	左	内側	1,886	36.3	A
3	1P2	-	左	内側	2,093	40.4	B
4	1P2	-	左	内側	2,484	39.3	C
5	1P2	-	左	起点側	1,886	28.4	A
6	1P2	-	左	起点側	2,093	28.4	B
7	1P2	-	左	起点側	2,484	28.4	C
8	1P2	-	右	内側	2,438	31.3	C
9	1R2	C2	左	内側	2,047	28.5	C
10	1R2	C2	右	内側	2,070	39.4	C
11	1R2	C3	左	内側	1,357	32.3	C
12	2R1	C1	左	外側	1,656	34.4	C

### (1)かぶり

かぶりは、電磁誘導法を用いて計測した。帯鉄筋を対象とし、柱の左右両端でのかぶりを測定している。

### (2)塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度は、建設時に混入したと考えられる塩化物イオン濃度（以下、初期塩化物イオン濃度）を測定するため、集塵装置付きドリルを用いて、中性化による濃縮の影響を受けないコンクリート表面から 80～100mm の試料採取し、電位差滴定法 (JIS A1154) により分析した。また、構造物表面から深さ方向の塩化物イオン濃度分布を測定するため、4 箇所て長さ 100mm の小径コア (直径 25mm) を採取し、20mm ごとにスライスしたものを粉砕し、同様な分析を行った。

### (3)中性化深さ

中性化深さは、塩分調査で削孔した孔を利用し、フェノールフタレイン 1% 溶液を孔の内側に噴霧して、コンクリート表面から着色位置までの距離を上下左右の 4 面で測定し、その平均により求めた。

## 2.3 調査結果

表 - 2 に初期塩化物イオン濃度と中性化深さの調査結果を示す。なお、現地調査の都合上、1P2 起点側の中性化深さの調査は高さ C でしか実施することができなかったため、高さ A, B の中性化深さの結果は高さ C と同じ結果としている。また、塩化物イオン濃度については、1P2 内側の面の調査結果と同様としている。

初期塩化物イオン濃度は、最小値でも 1.357kg/m<sup>3</sup> となっていた。土木学会のコンクリート標準示方書 (維持管理編)<sup>6)</sup> (以下、維持管理標準とする) に示される鋼材の腐食発生限界濃度 1.2kg/m<sup>3</sup> をいずれも超えている。つまり、建設当初から内的塩害が進行している可能性が十分に考えられる。

図 - 4 にコンクリート表面から深さ方向の塩化物イオン濃度分布を示す。同図に各箇所の中性化深さも示す。

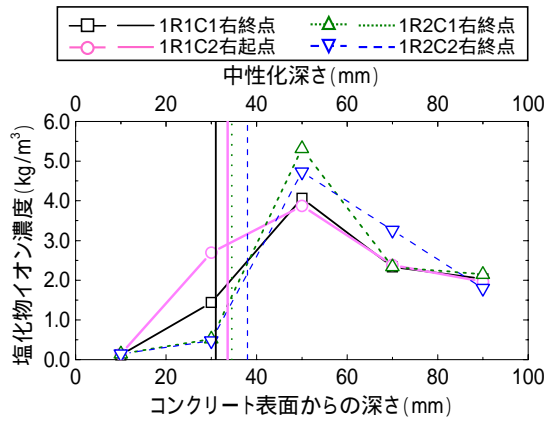


図 - 4 深さ方向の塩化物イオン濃度分布

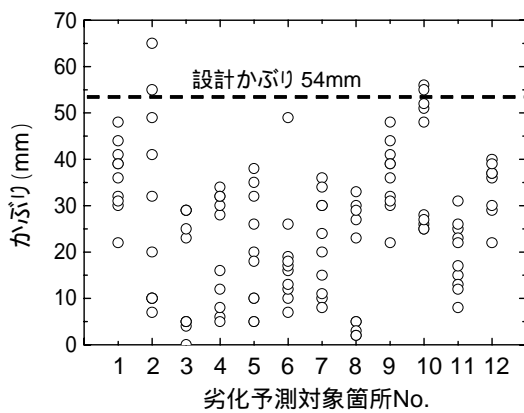


図 - 5 帯鉄筋のかぶり

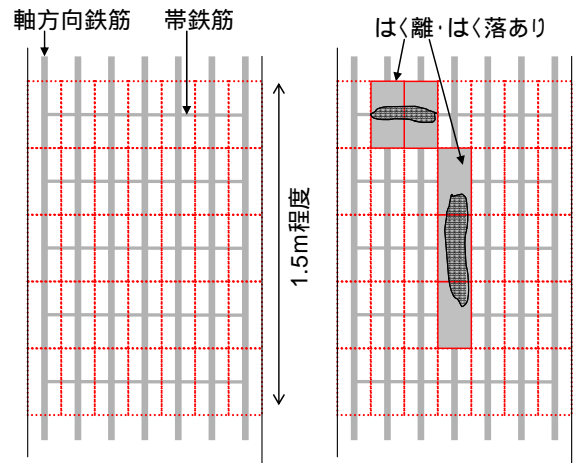
中性化による塩化物イオン濃度の濃縮が顕著に見受けられ、全ての箇所でも 40～60mm の位置で濃度が最も大きくなっており、80～100mm での濃度に対して 2.0～2.7 倍となっていた。既往の研究<sup>7),8)</sup>では、中性化によって濃縮を受けた塩化物イオンは、ピーク値で初期塩化物イオン濃度の 2.0～3.0 倍程度となるとされており、それとほぼ同程度の値となっていた。

図 - 5 に帯鉄筋のかぶりの測定結果を示す。はく離・はく落が見受けられた箇所としているため、かぶりの値が平均で 25.5mm 程度と小さい値となっていた。維持管理標準には、内的塩害と中性化の複合劣化による鉄筋の腐食発生開始の目安の値として中性化残りが 25mm という値が示されている。あくまでも安全側に設定されている値であるが、時間の経過とともに中性化が進行することを考えると、ほとんどの箇所でも内的塩害、もしくは内的塩害と中性化の複合劣化が進行していると考えられる。

### 3.劣化予測

#### 3.1 メッシュ分割法

図 - 6 に劣化予測に用いるメッシュ分割と変状評価の



(a) 分割メッシュ (b) 変状評価  
図 - 6 メッシュ分割と変状評価方法

表 - 3 変状の予測モデル  
(中性化と初期塩化物イオンによる複合劣化)

各期終了時の鉄筋腐食深さ $r$ (mm)	鉄筋の腐食速度 $dr/dt$ (mm/年)
進展期 ひび割れ発生 $r_{cr}=13(c/ ) \times 10^{-3}$	【中性化残り > 25mm かつ $Cl^-$ 1.2kg/m <sup>3</sup> 】 $dr/dt = 10^{-3} / \sqrt{c} (7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6)$ $1.0 \times 10^{-3} \quad dr/dt \quad 8.0 \times 10^{-3}$
加速期前期 はく離、はく落発生 $r_{sp}=56(c/ ) \times 10^{-3}$	【中性化残り 25mm かつ $Cl^-$ 0.6kg/m <sup>3</sup> 】 $dr/dt = 10^{-3} / \sqrt{c} (19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4)$ $3.0 \times 10^{-3} \quad dr/dt \quad 8.0 \times 10^{-3}$

c:かぶり, r:鉄筋径, Cl<sup>-</sup>:塩化物イオン濃度, W/C:水セメント比

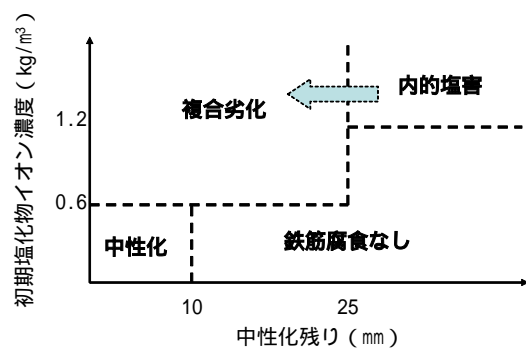


図 - 7 複合劣化の予測モデルの範囲

方法について示す。本論では、コンクリート表面を軸方向鉄筋と帯鉄筋を含むメッシュに分割し、メッシュ毎にはく離・はく落を判定する手法を用いた。また、はく離・はく落発生メッシュ数の全メッシュ数に対する割合をはく離・はく落発生率と定義した。なお、メッシュ分割法における劣化予測対象範囲の高さは 1.5m 程度としている。

表 - 3 に鉄道維持管理標準に示されている中性化と初期塩化物イオンによる複合劣化の劣化予測モデルを示す。

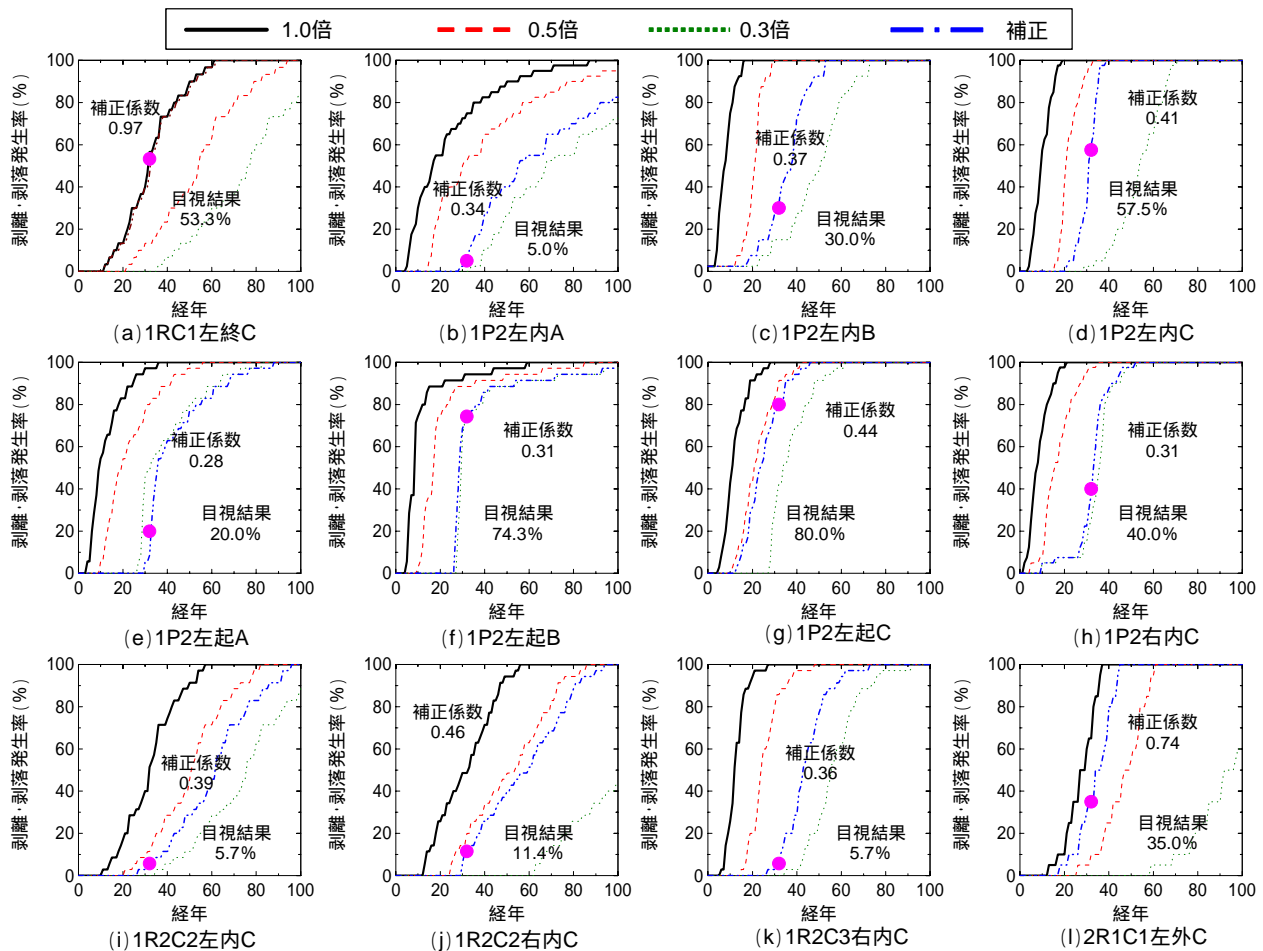


図 - 8 はく離・はく落発生予測結果

図 - 7 に同標準に示される複合劣化の予測モデルの範囲を示す。このモデルは、既往の研究<sup>8)</sup>などにに基づき定められた式となっている。内的塩害が進行している構造物でも、中性化の進行により、中性化残り（かぶりの値から中性化深さを引いた値）が 25mm を下回った時点で内的塩害と中性化による複合劣化に移行すると考えられる。なお、中性化と初期塩化物イオンによる複合劣化における鉄筋腐食速度の式は、中性化による塩化物イオンの濃縮を考慮した式となっている。

既出の表 - 3 に示すとおり、ひび割れの発生限界も設定されている。しかしながら、ひび割れについてはその発生原因が塩分や中性化以外の可能性が十分に考えられる。そこで本検討においては、はく離・はく落のみを対象としている。

コンクリートのはく離・はく落の発生限界については、鉄筋の腐食深さで  $56 (c/ ) \times 10^{-3} (mm)$  と設定されている。既出の表 - 3 に示す劣化予測モデルを用いて鉄筋の腐食深さを計算し、腐食深さが上記の値を上回った時点で、そのメッシュは、はく離・はく落が発生したと評価している。

本検討における劣化予測対象箇所においては、全箇所

で塩化物イオン濃度が  $1.2kg/m^3$  を上回っている。各メッシュの中性化残りが 25mm 以上である場合は、内的塩害の劣化予測モデルで鉄筋腐食量を計算し、中性化残りが 25mm を下回った時点で、内的塩害と中性化による複合劣化の予測モデルを用いて鉄筋の腐食量を計算している。ただし、さらに中性化が進行し、鉄筋位置まで到達した場合、その位置の塩分量は小さくなると考えられる。そこで、中性化残りが 0mm に到達した時点で、塩分の影響がなくなり、中性化による鉄筋の腐食が進行すると考え、鉄筋の腐食速度は、既往の研究<sup>9)</sup>などに示されている平均的な値として  $3.0 \times 10^{-3} (mm/年)$  を採用することとした。また、各メッシュに軸方向鉄筋と帯鉄筋があるため、各鉄筋の径とかぶりをを用いて劣化予測を行い、変状が進展している場合の結果を採用している。

### 3.2 劣化予測の詳細

本検討における劣化予測には、かぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度、水セメント比（以下、W/C という）の値が必要である。各値の扱いについて以下に述べる。

かぶりは、各面において帯鉄筋両端で測定している。つまり、劣化予測対象箇所の左右両端のメッシュにおいてはかぶりが測定されるが、それ以外のメッシュではか

ぶりを測定していないこととなる。そこで、各メッシュのかぶりは直線補間によって求めた値とした。また、軸方向鉄筋のかぶりも劣化予測に必要であるが、軸方向鉄筋のかぶりは、帯鉄筋のかぶりから帯鉄筋の直径を引いた値としている。

中性化深さと塩化物イオン濃度について、既往の研究<sup>10)</sup>では、鉄道高架橋の高欄の劣化予測において、モンテカルロシミュレーションを用い、ばらつきを考慮した劣化予測を行っているものもある。しかしながら、本研究においては、調査データ数が少ないことや、劣化予測を簡易に行うことも重要であると考え、両者の値については、劣化予測対象面につき1つの測定結果を用いて劣化予測を行っている。なお、中性化深さは、供用年数の平方根に比例することが知られているため<sup>6)</sup>、経年による中性化の進行を考慮している。各メッシュのかぶりから中性化深さを引いた中性化残り25mmを境界とし、内的塩害または内的塩害と中性化による複合劣化、さらには中性化による劣化として鉄筋の腐食量を計算している。

また、W/Cについては、設計図面には55%と表記されていた。しかしながら、中性化深さの測定値から考えると、55%より大きい値となっていたことが推測される。W/Cは維持管理標準<sup>5)</sup>などに示されるとおり、中性化深さから求めることできる。そこで簡易に中性化深さから式(1)、(2)、(3)を用いて推定した。

$$y = \alpha \sqrt{t} \quad (1)$$

$$\alpha = \gamma_{cb} \alpha_k \beta_e \gamma \quad (2)$$

$$W/C = (\alpha_k / 1.1 + 3.57) / 9.0 \quad (3)$$

ここに、 $y$ は中性化深さ(mm)、 $t$ は供用開始からの経過年数(年)、 $\alpha$ は中性化速度係数(mm/年)、 $\gamma_{cb}$ は推定値のばらつきを考慮する係数(=1.15)、 $\alpha_k$ は有効水結合材比から定まる中性化速度係数(mm/年)、 $\beta_e$ は環境の影響の程度を表す係数(=1.6)、 $\gamma_c$ はコンクリートの材料係数(=1.0)である。各係数は既往の研究<sup>2)</sup>に示されている値とした。

上式からW/Cを求めると平均で約71%となった。そこで、本検討においては、W/Cを一律に70%とし劣化予測を行うこととした。設計図面に示されるW/Cの値とは乖離があるが、使用されたセメントの種類など建設当時の施工記録がないため、算出されたW/Cを採用することとした。

### 3.3 予測結果

図-8にははく離・はく落発生率の予測結果を示す。前述のとおり、メッシュ毎に劣化予測を行い、鉄筋の腐食量が、はく離・はく落の発生限界 $56(c'/) \times 10^{-3}$ (mm)を超えた場合、そのメッシュは、はく離・はく落が発生したと評価している。はく離・はく落が発生したと評価されたメッシュの数を積み上げていったものがはく離・

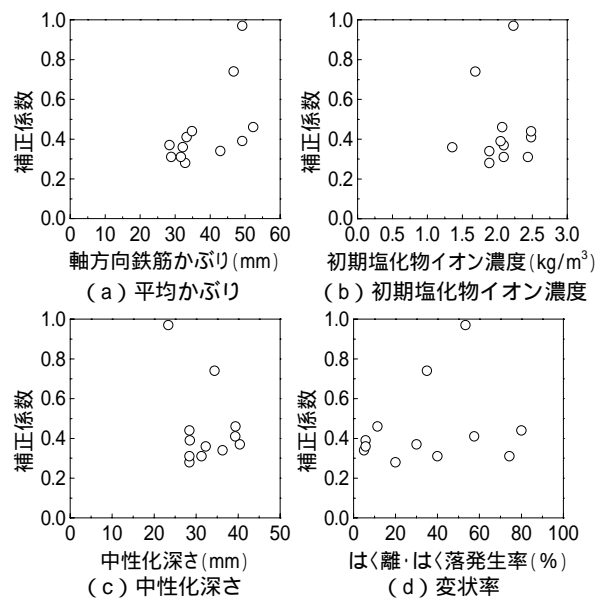


図-9 各種変状の割合

はく落発生率となっている。計算の結果、はく離・はく落については、ほとんどのメッシュで、帯鉄筋に起因するものより、軸方向鉄筋に起因するものが先行して発生する結果となっていた。劣化予測については、既出の表-3の腐食速度式をそのまま用いた場合(1.0倍)と、全て項に補正係数0.5, 0.3を乗じた場合を示した。同図に目視結果によるはく離・はく落発生率も示す。全ての箇所において補正係数1.0の予測値以下となっていた。

鉄道維持管理標準に示される鉄筋腐食速度は、あくまで安全側の仮定に基づき設定されているものであり、定期的な調査等により予測結果を適宜補正することを前提に構築されている。そのため、ここで鉄筋腐食速度の補正を試みることにした。

劣化予測における経年32年のはく離・はく落発生率が、目視におけるはく離・はく落発生率と同程度となるように腐食速度の補正を行った。その結果、補正係数は、0.28~0.97、平均0.45程度となった。この腐食速度補正係数は、メッシュ毎のかぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度、W/Cの測定、推定誤差などを包含したものである。ばらつきの原因を特定することは困難であると考えられるが、今後も調査数量を増やしていくなどして、劣化予測モデルの精度の向上を図る必要があると考えられる。

図-9に軸方向鉄筋の平均かぶり、初期塩化物イオン濃度、中性化深さ、はく離・はく落発生率と腐食速度補正係数との関係をそれぞれ示す。前述のとおり、劣化予測の結果、はく離・はく落については、ほとんどの箇所では軸方向鉄筋に起因するものが先行する結果となっていたため、平均かぶりは軸方向鉄筋のみを対象とした。強



いて言えば、いずれの場合も右上がりの傾向が若干見受けられるが、特徴的な傾向は見られなかった。

図 - 10 に補正係数の度数分布図を示す。データ数が 12 個と少ないが、0.25 ~ 0.5 に集中していることがわかる。本検討においては、補正係数が 0.5 以下になる割合は 80% 以上であった。補正係数は全て 1.0 を下回っており、鉄道維持管理標準に示される腐食速度を超えるものはなく、安全側に評価していることがわかる。

## 5. まとめ

RC 高架橋柱における内的塩害と中性化による複合劣化を対象とし、既往の研究<sup>4)</sup>に示される現地調査の結果を基に、メッシュ分割法による変状予測を実施し、鉄筋腐食速度について検討を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 変状予測から得られるはく離・はく落発生率が、目視結果によるはく離・はく落発生率と同程度となるように鉄筋腐食の予測モデルの補正を行った。その結果、鉄筋の腐食速度に対する補正係数が 0.28 ~ 0.97、平均 0.45 程度であった。
- (2) 平均かぶり、初期塩化物イオン濃度、中性化深さ、はく離・はく落発生率の値と腐食速度補正係数の間には、明確な相関は見られなかった。
- (3) 腐食速度の補正係数が 0.5 以下となる割合は 80% を超えており、劣化予測モデルに用いている鉄筋腐食速度を超える鉄筋の腐食は見られなかった。

## 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) 川村力，谷村幸裕，曾我部正道，鳥取誠一，長谷川雅司，東川孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンク

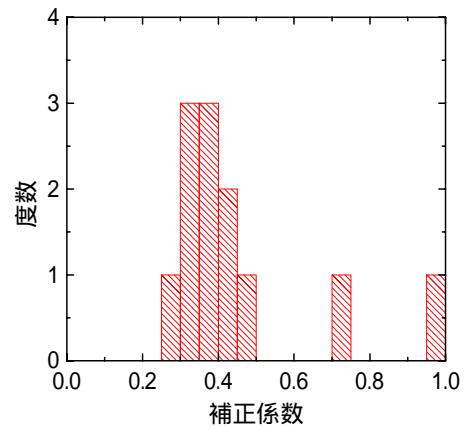


図 - 10 補正係数度数分布

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) 轟俊太郎，曾我部正道，谷村幸裕，松橋宏治：実構造物を対象とした複合劣化に関する影響因子の定量評価，コンクリート工学年次論報告文集，Vol.31，No.2，pp.1519-1524，2009
- 5) 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，丸善，2007
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編 [2007年制定]，2007
- 7) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1-14，1991.8
- 8) 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.181-169，2005
- 9) 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.35-46，2001
- 10) 曾我部正道，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.16-24，2009.8