# 論文 経時的な点検に基づいた塩害劣化 RC 橋の劣化予測

内海 卓也\*1·森川 英典\*2

要旨:RC 構造物の劣化の中でも塩害は加速期,劣化期において劣化速度の増大による著しい性能低下が起こ ることが確認されている。また,すでに加速期に入っている橋に対して,劣化の進行を一時点での点検によ り把握することは困難であり,劣化予測も危険側の予測になりかねない。本研究では加速期に入っている塩 害劣化 RC 橋に対し経時的な点検により,劣化の進行の特徴を捉えた劣化予測として,浮き・はく落を考慮 した劣化予測を行い,現状に即した劣化予測手法の構築を行った。

キーワード: 点検, 塩害, RC 橋, 劣化予測

# 1. はじめに

近年コンクリート構造物の劣化が深刻化しており、そ れらの構造物に対して適切な点検により劣化の状態を 的確に把握・予測し、性能評価を行うことが重要とされ ている。そうすることにより, 適切な時期に必要なだけ の対策を実施することが可能となり、合理的な維持管理 を行うことができる。また、各種ある劣化機構の中でも 塩害による劣化において,進行過程として加速期,劣化 期において劣化速度の増大により著しい性能低下が起 こることが確認されており、それらの劣化の進行は環境 条件、材料条件によって大きく影響を受けることが確認 されている。そのため、一時点での点検によって加速期、 劣化期の劣化の進行を捉えることは困難であり,また一 時点の点検結果による劣化予測においては危険側の予 測になる可能性があることが考えられる。そのため経年 での点検データを反映した劣化予測を行うことが重要 であると考えられる。

既往の研究<sup>1)</sup>では,実際に供用されている RC 橋梁に 対し一時点での現場試験を行い,それら種々の点検デー タを劣化因子の不確定性を考慮した確率論的シミュレ ーションにフィードバックした劣化予測を行ってきた。

本研究では,既往の研究<sup>1)</sup>で行ってきた劣化予測手法 をもとに,既設橋梁に対し,2006年,2007年,2008年 の3年において点検を行い,経年での点検データを考察 し,対象橋梁の劣化の進行の特徴を捉え,特徴を反映し た劣化予測手法の構築を行った。

# 2. 現場実橋試験

本研究では2006年,2007年,2008年において,現場 試験を行った。対象橋梁概要および現場試験内容を表-1および表-2に示す。対象橋梁は2008年点検時点にお いて橋齢46年,また海岸線からの距離が約15mという 厳しい塩害劣化環境下にある橋梁である。海岸線に近い

\*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 博士前期課程 (正会員) \*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 (正会員)

桁からA, B, C, D桁と設定を行った。各桁の劣化状況 としては、A 桁においては広範囲に渡り腐食ひび割れ、 浮きが進展し、かぶりのはく落している箇所も確認でき た。また, B, C, D 桁に関しては端部において腐食ひび 割れや浮き、局所的なはく落が確認できたものの、比較 的健全であると考えられる。この結果より B, C, D 桁 に関しては経年での劣化の進行があまり確認できない ため、本研究においては A 桁のみを対象として行った。 経年で行った現場試験としては、ひび割れ・浮き調査, 鉄筋腐食モニタリングがあり、これらの経年での変化に ついて考察を行った。ひび割れ、浮き調査より得られた、 2008年A桁における浮き,はく落分布図を図-1に示す。 この図は図-2のように桁をメッシュ分けし、展開した 図となっている。この図のように、各年において浮きの 増加が顕著に現れており,下流側,上流側において劣化 の進行の度合いが異なっていることが確認できる。この ことより、マクロセル腐食が形成されていることが考え られ、経年での劣化の進行度合いより、一本の鉄筋内に マクロセル腐食を形成しているのみではなく、他の離れ た鉄筋とマクロセル腐食を形成していることが考えら れる。現在の浮き・はく落発生の状況から考えると、上 段下段鉄筋1においてアノード領域が、下段鉄筋4,5 においてカソード領域が発生していることが考えられ る。それらを考慮に入れると今後の浮きの進展としては

表-1 対象橋梁概要

橋梁形式	RC単純T桁橋
架設年	1962
2008年調査時の橋齢(年)	46
支間長(m)	10.6
主桁数	4主桁
海岸線からの距離(m)	約15

表-2 現場試験内容

現場試験内容	2006	2007	2008
ひび割れ・浮き調査	0	0	0
鉄筋腐食モニタリング	0	0	0
コア採取	0	_	-



図-2 メッシュ分けおよび鉄筋配置図

下流側,特に上段,下段鉄筋1において進行していくこ とが予測される。

鉄筋腐食モニタリングでは、 2006年, 2007年, 2008 年ともに同一の測定箇所にて分極抵抗の測定を行った。 2008年においては同一の測定箇所に加え,新たな箇所に おいても測定を行った。鉄筋腐食モニタリングにおける, 分極抵抗の測定結果を図-3に示す。その際に、2007年 下流側においては、測定において不備があったため、今 回の結果には載せていない。結果より,2006~2008年に おいては下段鉄筋1の右岸側において分極抵抗の増加が 確認でき、2008年測定点においては、下段鉄筋1、下段 鉄筋5において分極抵抗が大きくなっている。下段鉄筋 1の右岸側においては浮きなど劣化が顕著であることか ら,2006年から2008年の間で浮きが進展してかぶりコ ンクリートと鉄筋との間の空隙が拡大し、この浮きによ る空隙が分極抵抗の計測値に影響を与えて値が大きく なったと考えられる<sup>2)</sup>。また、下段鉄筋5においては他 の鉄筋に比べ、劣化の進行が進んでおらず、その影響に より分極抵抗が増加したことが考えられる。

また,2006年においては、コンクリートコアの採取を 行い、次節の劣化因子の初期設定の際に必要となる表面 塩化物量,初期含有塩化物量,拡散係数の推定を行った。

# 3. 劣化予測

本研究では,劣化区分を潜伏期,進展期,加速期,劣 化期の4つに分け,劣化区分ごとに劣化予測手法を構築



図-4 加速期における関係 3)

し、劣化評価に関わるパラメータの不確定性を考慮して、 供用開始時からの経時的な劣化予測を, モンテカルロシ ミュレーション(試行回数:1000回)により行った。また その際に、各劣化区分は連続であると考え、連続性を考 慮した劣化予測を行った。劣化予測において用いる劣化 因子の初期設定を表-3に示す。潜伏期ではFickの拡散 方程式<sup>3)</sup>を用いてコンクリート中の塩分量が鋼材位置に おける塩化物イオンの鉄筋腐食発生限界濃度 Clim=1.2(kg/m<sup>3</sup>)に至る時点として評価を行い,進展期では 加速期との連続性を考慮し、加速期初期の腐食速度を進 展期の腐食速度と仮定し劣化予測を行い、加速期以降で は図-4の関係<sup>3)</sup>を用い劣化予測を行った。これらの予 測式より得られる劣化曲線の概要を図-5に示す。また, これらより得られた劣化曲線を、点検結果をフィードバ ックすることにより、現状に即した劣化曲線へと補正を 行った。

# 3.1 現場試験結果をフィードバックした劣化曲線の補正

既往の研究においては、図-6に示すフローのように、



現場試験より得られた,腐食ひび割れ面積/メッシュ面積 で定義される腐食ひび割れ面積密度と分極抵抗値から 推定される腐食速度を図-4の関係より腐食量に換算し, 腐食ひび割れ面積密度との関係を算出し,点検時点にお ける桁全域の腐食量の算出を行っている。現場試験で得 られた分極抵抗から腐食速度を求める方法として以下 の式(1),(2)がある<sup>4)</sup>。これにより腐食速度 $\sigma$ が既知とな る。

$$I_{corr} = K_v / R_p \tag{1}$$

$$\sigma = 2.5 \cdot 365 \cdot 10^{-4} \cdot I_{corr} \tag{2}$$

- ここで, *I<sub>corr</sub>*: 腐食電流密度(A/cm<sup>2</sup>)
  - K<sub>v</sub>:換算係数(V)(ここでは 0.026)
  - $R_P$ : 分極抵抗( $\Omega$ cm)
  - $\sigma$ :腐食速度(mg/mm<sup>2</sup>/year)

しかし、電気化学的な手法による腐食量推定はかぶり コンクリートに腐食ひび割れがない状態(劣化区分の潜 伏期~進展期にあたる)で適用することが有効とされて いる。同様にこの手法で用いられる Kv 値の標準値(0.026 ~0.052(V))も潜伏期~進展期においてのみ適用可能と判 断できる。また、前述したように既往の研究<sup>2)</sup>では,鉄 筋とコンクリートの間に空隙を設けた供試体ではコン クリート抵抗の値が大きくなるという結果が出ており, また分極抵抗とコンクリート抵抗との間には高い相関 性があることから,腐食ひび割れの発生によりできた空 隙の影響を受け、本来計測されるべき値よりも分極抵抗 の値が大きくなることが懸念される。そこで本研究では 山本らの研究 5において行われていた考えをもとに、加 速期以降の劣化状態を反映する環境係数λによる腐食 速度の推定を行った。加速期以降の劣化状態を反映する 環境係数をんとし、環境係数んを導入した分極抵抗から の腐食速度推定式を以下に示す。



$$T_{corr} = \lambda \cdot (K_v / R_p) \tag{3}$$

1

$$\sigma = 2.5 \cdot 365 \cdot 10^{-4} \cdot I_{corr} \tag{4}$$

環境係数んの設定については、次のように検討した。 進展期に比べ加速期においては、腐食によるひび割れを 介して劣化因子が直接鉄筋に供給され、鉄筋腐食を加速 させる。したがって、環境係数λを設定する上でひび割 れの情報は非常に重要である。そこで本研究においては 腐食ひび割れ面積密度を用いて環境係数んを設定した。 図-7 に環境係数 λ の設定方法の概略を示す。分極抵抗 測定箇所におけるひび割れ面積密度データを表-4の腐 食レベル A, B, C に分割してレベルごとに環境係数 λ を設定した。まずレベルAではひび割れ面積密度がゼロ であるものとそうでないものが混在するため、ゼロであ る箇所の最大腐食速度をゼロでない箇所の最小腐食速 度が下回らないように環境係数 λ を設定した。ここで, ひび割れ面積密度がゼロである箇所の Kv 値には標準値 が適用できるため、0.026Vとし、環境係数 λ<sub>0</sub>は 1.0 に設 定した。その後レベル B の最小腐食速度が環境係数 λ<sub>A</sub> 導入後のレベルAの最大腐食速度を下回らないように係 数 La を設定した。さらにレベル C の最小腐食速度が環境 係数  $\lambda_B$  導入後のレベル B の最大腐食速度を下回らない ように環境係数 λc を設定した。以上のように環境係数 λ を設定した結果,各腐食レベルでのλ・Kv値を表-4に 示す。このように加速期以降の λ・Kv 値は Kv 値の標準 値の 0.026~0.052(V)を大きく上回る結果となったが,前 述したように、加速期以降のひび割れが入っている状態 においては妥当な結果であることが考えられる.この結 果を用いて, 改めて腐食ひび割れ面積密度と腐食量の関



腐食ひび割れ面積密度(mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>)

図-8 腐食ひび割れ面積密度と腐食量の関係

係を求めた。結果を図-8に示す。

この関係式を用い,図-6に示すフローに基づき,主 桁全域の腐食量の算出を行い,各領域において劣化曲線 の補正を行った。その際現場試験結果より,上流側,下 流側によって劣化の進行の程度が異なることが確認さ れた。そのため,劣化曲線の補正を行う際に,主桁を橋 軸方向に左岸,中央,右岸の3領域に,橋軸直角方向を, 上流側側面,底面,下流側側面の3領域に分け,合計9 領域に主桁を分割し,各領域において劣化曲線の補正を 行った。

# 3.2 浮き・はく落を考慮した劣化予測

3.1 において現場試験結果をフィードバックした劣化 曲線の算出を行った。この結果を用い,今後劣化の進行 において支配的になると考えられる,浮き・はく落を考 慮した劣化予測を行った。浮き・はく落劣化予測フロー を図-9に示す。

この劣化予測では浮き,はく落が全領域において発生 するという仮定の下,3.1において得られた劣化予測結果 を用い,以下の劣化予測を行った。

まず初めに, 浮き, はく落発生腐食量の設定を行った。 2006~2008年現場試験より、浮き増加箇所における腐食 ひび割れ面積密度のデータが得られている。そこで、今 回劣化予測を行うにあたって、図-1に示す,2007年度 浮き増加箇所における,2006年の腐食ひび割れ面積密度 を,2008 年度浮き増加箇所における,2007 年度の腐食 ひび割れ面積密度を, 浮き発生腐食ひび割れ面積密度と 仮定し、図-8の関係より腐食量に換算し、浮き発生腐 食量の設定を行った。その際に、平均値および標準偏差 を算出し、それにより正規分布でばらつかせ、不確定性 を考慮した。同様に、はく落発生腐食量では、かぶりが はく落する時期を現状の腐食状況より判断するのは困 難であるため、2008年度において主桁全域における最大 腐食ひび割れ面積密度をはく落発生腐食ひび割れ面積 密度とし腐食量の設定を行った。表-5 に設定した腐食 量を示す。

次に、はく落発生後の腐食速度は、限界腐食速度で腐 食が進行することとした。腐食速度はある値まで増加し た後は一定の値となると考えられており<sup>6)</sup>、その限界腐 食速度を変動させることとし、その変動条件として、海 水中における腐食速度 1.02(mg/mm<sup>2</sup>/year)<sup>7)</sup>を 5%の特性 上限値に、大気中における腐食速度 0.313(mg/mm<sup>2</sup>/year)<sup>8)</sup> を 5%の特性下限値に設定し、正規分布に従って変動す ると仮定した。また、浮き発生後の腐食速度においては、 浮き発生後はある傾きをもって腐食速度が増加すると いう仮定の下、設定を行った。浮き発生後腐食速度の設 定のイメージ図を図-10に示す。まず、浮きの発生腐食 量より浮き発生年を、劣化予測結果より算出し(**表-6**)、

浮き、はく落発生腐食量
月2,13、洛先生後の腐良速度の設定
└────
浮き、はく落発生年次の算出
劣化予測シミュレーションに浮き, はく落の 情報を追加
浮き、はく落発生を考慮した
劣化予測シミュレーション
図-9 浮き・はく落を考慮した
劣化予測フロー

表-5 浮き・はく落発生腐食量

	浮き発生腐食量 (mg/mm <sup>2</sup> )	はく落発生腐食量 (mg/mm2)
平均	0.491	3.608
標準偏差	0.016	-

次に 2006-2007 年, 2007-2008 年での各領域での増加 腐食量の算出を行った。1 年での増加腐食量は腐食速度 と同等であるので、これを点検時点における浮き発生後 の腐食速度と仮定した。ここで、劣化予測より得られた 浮き発生年が一番遅い中央での浮き発生年を基準とし, それ以前に浮きが発生した左岸、右岸での浮き発生年と の差を、左岸、右岸での浮き発生からの期間とし、その 期間の間,ある一定の傾きをもって腐食速度が増加し, での腐食速度になったと仮定した。そこで得られた傾き を腐食速度の傾きとし設定を行った。設定した浮き・は く落発生後の腐食速度を表-7に示す。

これらの設定を,現場試験結果をフィードバックした



図-11 腐食減量率の経年変化

劣化予測に追加し、浮き・はく落発生を考慮した劣化予 測を行った。図-11に浮き・はく落発生を考慮した場合 と考慮しなかった場合の結果について、特徴的であった 底面領域と、下流側側面領域について、腐食減量率の経 年変化について示す。

このように、浮き・はく落発生の有無により特徴的な 結果を得ることとなった。底面領域においては、図-2 に示すように、2008年において浮き・はく落発生箇所が 少ないため、浮き・はく落発生を考慮しない場合、経年 での腐食量の増加が小さい結果となっている。また、浮 き・はく落を考慮した場合,右岸,左岸領域においては, 経年での腐食量の増加が確認でき、中央領域では浮き・

表-6 浮き発生年

	左岸		中央			
	上流	底面	下流	上流	底面	下流
平均	38.6	45.6	20.6	49.5	61.1	28.8
標準偏差	3.8	3.4	2.3	4.7	4.3	2.9
	右岸					
	上流	底面	下流			
平均	36.7	50.0	25.2			
標準偏差	36	36	26			

表-7 浮き・はく落発生後腐食速度

	浮き発生後腐食速度の傾き			はく落発生後	
	上流側側面	底面	下流側側面	腐食速度 (mg/mm2/year)	
平均	0.0027	0.0020	0.0187	0.646	
標準偏差	_	-	_	0.216	

10%

9%

8% 箑

7%

6%

5% 率

4%

3%

2%

1%

0%

25%

20% 搬

15%

10%

5% 篱

0%

90年

100年

Ē

標準(

食減量率()

90年

100年

標準偏決

食減量

巀

-1517-

(左:浮き・はく落考慮無し 右:浮き・はく落考慮)

はく落考慮の有無に関わらず,同様な経年変化をする結 果となった。これは,点検時における浮き・はく落の情 報により影響を受けていることがわかる。点検時に浮 き・はく落が発生している箇所においては,今後劣化の 進行が大きく進むことが予測される。そのため浮き・は く落を考慮した場合,浮き・はく落の今後の進行が反映 され,このような結果になったと考えられる。

また、下流側側面領域においては左岸では、浮き・は く落の考慮の有無に関わらず、同様の経年変化をしてお り、右岸、中央においては浮き・はく落を考慮した方が、 経年での腐食量の増加が確認できる結果となった。こち らも同様に、点検時点における浮き・はく落の情報によ り影響を受けていることがわかる。左岸においては全範 囲にわたり浮き・はく落が発生している。そのため、浮 き・はく落を考慮しない場合においても、点検時点の浮 き・はく落の情報が反映されているため、浮きはく落を 考慮した場合と同様の経年変化を示したと考えられる。

このように今回行った劣化予測においては,点検時点 において,浮き・はく落の情報が大きく影響する結果と なった。また,中央においては,現場試験結果よりカソ ード領域であることが推測された。今回の劣化予測結果 においては,カソード領域的な劣化の進行を表現するこ とができていると考えられる。

しかし,今回の劣化予測では,領域全域において浮 き・はく落が発生するという設定の下行っており,領域 内の浮き・はく落の進行,および周りの領域の影響につ いては表現できていない。現段階において明確な浮き・ はく落の進展の予測というものは困難であり,今後も点 検を重ねることにより,浮き・はく落の進行を考察し, 浮き・はく落の進行を表現した劣化予測手法の構築を行 っていく必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 腐食ひび割れ面積密度の情報を用いて腐食ひび割 れが発生し、腐食が進行する加速期以降における劣 化条件を反映させる係数 λ の導入によって加速期以 降の劣化に対しても電気化学的手法を適用する提 案を行った。その結果、既往の研究の考察結果を踏 まえ、加速期以降の λ・Kv 値は Kv 値の標準値 0.026 ~0.052(V)を大きく上回る値として評価を行った。
- 2) 浮き・はく落発生を考慮した劣化予測を行う際、点 検結果に基づき、浮き・はく落発生腐食量、浮き・ はく落発生後腐食速度の設定を行った。それらの設

定を用い劣化予測を行った結果、点検時点の劣化の 情報が反映された劣化予測結果が得られた。

- 3) 浮き・はく落発生を考慮する場合、点検時点の浮き・はく落の情報が大きく影響する結果となった。 また、現場試験結果よりカソード領域であると推測された底面中央領域においては、カソード的な劣化の進行を表現することができた。
- 4) 本研究においては、領域内全域において浮き・はく 落が発生するという設定の下、劣化予測を行った。 そのため、領域内における浮き・はく落の進行、周 りの領域の影響というものは考慮しておらず、今後 は点検を重ねるとともに、浮き・はく落の進行につ いて考察を行い、浮き・はく落の進行を表現した劣 化予測手法の構築を行っていく必要があると考え られる。

#### (謝辞)

現場試験でご協力を頂きました兵庫県県土整備部,神 戸大学・小林秀惠技術職員に感謝いたします。

# 参考文献

- 森川英典,森田祐介,小島大祐:不確定性を考慮した塩害劣化 RC 橋における劣化および安全性の評価, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.145-158, 2006.2
- 2) 森川英典,山本尚樹,小林秀惠,古田久人:電気化 学的手法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食モニ タリング,建設工学研究所論文報告集, Vol.47, pp.39-49, 2005.11
- 社会法人 土木学会:コンクリート標準示方書「施 工編」,2002.3
- 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の リハビリテーション研究委員会報告書,1998.10
- 5) 山本尚樹, 森川英典, 小島大祐, 権明直: 分極抵抗 に基づく RC 部材の鉄筋腐食速度推定に関する一考 察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレ ード論文報告集, 第6巻, pp.401-406, 2006.10
- 6) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の 構造・耐久設計協会問題研究委員会報告書,1998.7
- 建設コンサルタンツ協会:コンクリート構造物の高 性能化研究委員会報告書,2001.4
- 鳥取誠一,土田伸冶,宮川豊章:ひび割れと鉄筋腐 食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造 物の劣化予測,コンクリート工学論文集,Vol.10, No.3, pp. 1-15, 1999.9