塩害環境下における構造物の劣化進行予測手法に関する検討

鹿児島大学大学院　学生会員　○小郷　亜紀子　　鹿児島大学大学院　正会員　武若　耕司
鹿児島大学大学院　学生会員　　劉　姁　　鹿児島大学大学院　正会員　山口　明伸

1.はじめに

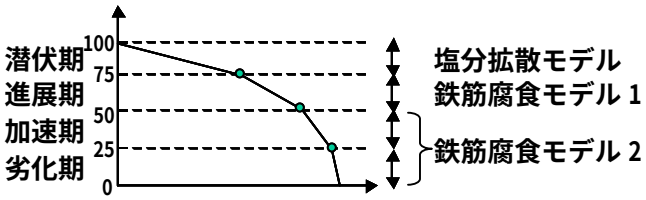
日本の橋梁などの社会資本は高度経済成長期に建設されたものが多く，構造物の寿命を考慮すると，間もなく更新時期のピークを迎えると言われている。一方，国や地方公共団体は逼迫した財政状況にある。このような状況に対し，社会資本を資産とみなし，構造物の生涯費用であるライフサイクルコストを考慮した効率的な資産管理方法としてアセットマネジメントが注目されている。ただし，アセットマネジメントの構築においては，精度の高い劣化予測が不可欠である。本研究では，塩害環境下の構造物に着目し，塩分拡散モデルおよび鉄筋腐食モデルに基づいた構造物の劣化進行予測モデルを構築した。さらに，鹿児島市が実施した点検結果を基に，劣化予測結果との整合性とその補正方法を検討した。

表－1　各劣化過程の定義

劣化過程	定義
潜伏期	鋼材表面における塩化物イオン濃度が，鋼材腐食発生限界濃度に達するまでの期間
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
加速期	腐食ひび割れの発生により，腐食速度が増大する期間
劣化期	腐食量の増加により，耐荷力の低下が顕著な期間

2.劣化モデルの構築

塩害による構造物の劣化過程は潜伏期，進展期，加速期，劣化期に分けられる。各劣化過程の定義を**表－1**に，劣化モデルの概念図を**図－1**に示す。構造物の健全な状態を健全度 100 とし，目視点検による健全度評価結果と劣化過程との対応は，潜伏期：100～75，進展期：75～50，加速期：50～25，劣化期：25～0 となると仮定してモデル化した。各劣化過程の期間は塩害環境条件，配合条件，構造条件を考慮し，以下の各劣化モデルにより算出した。

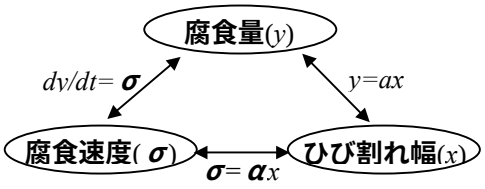


図－1　劣化モデルの概念図

(1)潜伏期の劣化モデル

潜伏期は式(1)の拡散係数方程式を用いて，腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2(kg/m^3)に達するまでの期間を算出する。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} C_0 (1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \qquad (1)$$



図－2　鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅と腐食速度の関係式

ここで，$C(x,t)$：深さ $x(cm)$，時刻 t(年)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)，γ_{cl}：予測の精度に関する安全係数 C_0：表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)，erf：誤差関数，D：塩化物イオンの見かけの拡散係数 $(cm^2/年)$

(2)進展期の劣化モデル

進展期は，松林による提案式を用い，例えば水セメント比が 50%から 55%の場合，式(2)により腐食量を算出し，式(3)により設定される腐食ひび割れ発生限界腐食量に達するまでの期間を算出する[1)2)]。

$$q_s = 1.95 \cdot d \cdot \frac{1}{\sqrt{c}} \cdot 0.092 \exp\{(0.0423 \cdot W/C - 1.5091) Cl^-\} \qquad (2)$$

$$y = 10 \cdot c/d \qquad (3)$$

ここで，q_s：腐食速度(mg/cm^2/年)，W/C：水セメント比(%)，Cl^-：塩化物イオン量(kg/m^3)，c：かぶり厚さ(mm)
d：鉄筋直径(mm)，y：経験式によるひび割れ発生腐食量（mg/cm^2）

(3)加速期および劣化期の劣化モデル

加速期および劣化期については，**図－2**に示す鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅と腐食速度の関係を用いて腐食量を算出する[3)]。構造性能に対する安全率の観点から，割増し係数を考慮し，式(4)により計算された鉄筋腐食減量率が

10%，20%に達するまでの期間をそれぞれ加速期，劣化期と設定した。

$$\Delta wp = \frac{4y}{\phi\Gamma} \cdot 100 \qquad (4)$$

ここで，Δwp ：鉄筋腐食減量率(%)，y：腐食量（mg/mm^2），ϕ：鉄筋径(mm)，Γ ：鉄筋の単位体積質量（mg/mm^3）

表－2　9 橋梁の立地環境

橋梁	A	B	C	D	E	F	G	H	I
海岸からの距離(m)	0	0	0	20	50	100	120	200	1200

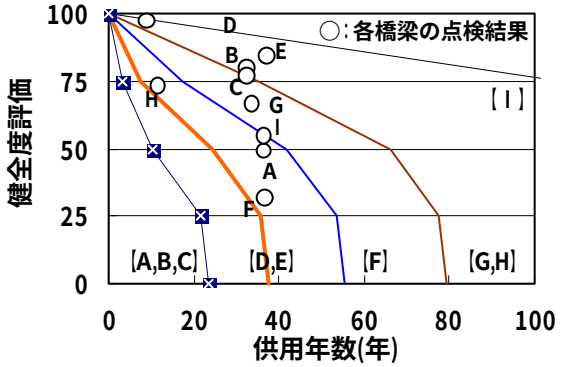
表－3　各立地環境での表面塩化物イオン濃度と各環境下の橋梁

立地環境と表面塩化物イオン濃度	飛沫帯	汀線付近	海岸からの距離(km)		
			0.1	0.1～0.25	0.5以上
	13.0	4.5	2.5	1.9	1.5
9橋梁の区分	A･B･C	D･E	F	G･H	I

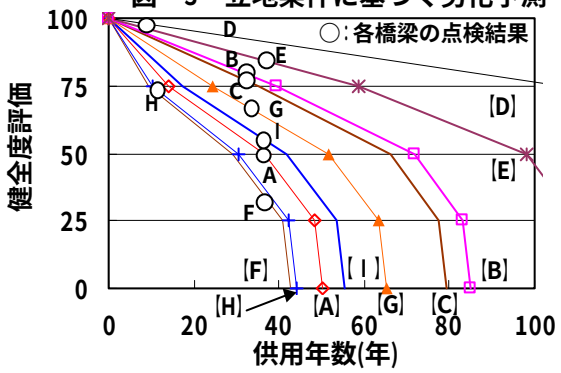
3.実際の橋梁への適用例とその補正

(1)立地条件に基づく劣化予測

上記の劣化モデルを用いて，鹿児島市の**表－2** の立地環境で実際に供用中の 9 橋梁に対して劣化予測を行い，その結果を**図－3** に示す。これらの橋梁の材料および設計条件を普通ポルトランドセメント，水セメント比 50%，かぶり 5cm，鉄筋径 19mm と仮定し，劣化の進行を予測した。予測に際しては，各橋梁の立地条件を考慮し，それぞれの環境を**表－3** に示すような 5 つの区分に当てはめた。すなわち，海岸に近い橋梁ほど，表面塩化物イオン濃度が高く設定されるため，劣化の進行速度も速くなる。ただし，図中に併せて示した 9 橋梁に対する鹿児島市の概略点検評価結果と比較すると，その健全度にかなり差異が生じていることが分かる。特に A，B，C の橋梁のように同じ飛沫帯環境であってもその劣化進行が大きく異なる場合や，I のように海岸から 1000m 以上離れている位置で予想外に劣化が進行している場合など，仮定した材料や設計条件の誤差のみでは説明できないケースが目立つ。つまりこれらの結果は，実際の橋梁の環境条件が，単純に海岸からの距離だけではなく，周辺環境，遮蔽物，気象条件等により大きく左右される可能性があることを示唆している。

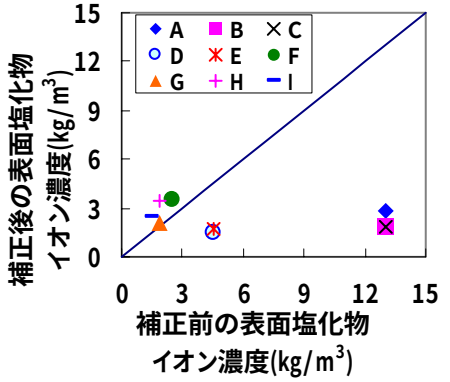


図－3　立地条件に基づく劣化予測



図－4　点検結果に基づく劣化予測

そこで，各橋梁の点検結果と劣化予測結果が一致するように，逆算により表面塩化物イオン濃度を再設定し，劣化予測結果を修正した。**図－4** は修正した各橋梁の劣化曲線であり，実際の橋梁点検結果を反映し，各橋梁の実状を踏まえた上での劣化予測となっていることが分かる。また，修正前後における表面塩化物イオン濃度の違いを**図－5** に示す。塩害劣化予測の主要因である表面塩化物イオン濃度は，その設定値が劣化進行予測に大きな影響を与えるため，個々の橋梁の環境を十分考慮して適切に設定し，必要に応じてその妥当性を確認することが重要である。



図－5　補正前後での各橋梁の表面塩化物イオン濃度の比較

4．まとめ

本研究で構築した劣化予測モデルの妥当性を確認した。ただし，橋梁の劣化予測には個々の環境条件を適切に把握することが重要であり，実際の点検結果を活用することで高精度の劣化予測が可能であることが確認できた。

【参考文献】
1)コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，委員会報告書，日本コンクリート工学協会,2004.10.8
2)コンクリート構造物のアセットマネジメントに関するシンポジウム委員会：報告書，日本コンクリート工学協会,pp311-312，2006.12
3)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，日本コンクリート工学協会，1998.10