

コンクリート構造物の長期活用評価技術を踏まえた余寿命診断に関する研究 (その2)

(株)四国総合研究所 土木技術部 野村 悠太
四国電力(株) 土木建築部 (現: 経営企画部) 廣瀬 文明

キーワード: 塩害劣化
劣化進行予測
鉄筋腐食
限界鉄筋断面減少率

Key Words: Salt damage deterioration
Deterioration progression prediction
Rebar corrosion
Critical rebar area reduction rate

Research on remaining life diagnosis based on long-term utilization evaluation technology for concrete structures (Part 2)

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuta Nomura

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil Engineering And Architecture Department

Fumiaki Hirose

Abstract

This paper confirms the applicability of the previously reported method for predicting the progression of salt damage to actual structures, and reports on a method for assessing remaining life and determining the timing of repairs based on bending strength taking into account the reduction in cross-sectional area of reinforcing bars.

In order to apply the previously reported salt damage deterioration progression prediction method to actual structures, the variations in surface chloride ion concentration, rebar cover, and apparent diffusion coefficient that affect rebar corrosion are taken into account, and the deterioration progression is calculated to determine the variation in the amount of rebar corrosion after a specified period of time. The results of this method were generally consistent with the survey results of actual structures, and therefore the effectiveness of this method was confirmed.

In order to contribute to the remaining life diagnosis of actual structures, the relationship between the rebar area reduction rate and bending strength was confirmed through experiments, and the critical rebar area reduction rate was set at 15% as the repair decision threshold in the salt damage deterioration prediction method. The estimated repair times indicated were generally consistent with the actual repair records, suggesting that it may be possible to predict the repair times of structures from the reduction in cross-sectional area of reinforcing bars.

1. はじめに

我が国の沿岸部コンクリート構造物の多くは、高経年化しており、一部では塩害劣化が顕在化している。沿岸部コンクリート構造物を長期にわたり有効活用していくためには、塩害劣化進行の正確な予測や予測結果に基づく余寿命診断、適切な補修時期の判断が必要である。

そこで、既報では、これらのうち、コンクリート構造物の塩害劣化進行予測手法について報告した(図1、図2、式(1))。

本稿では、既報の塩害劣化進行予測手法の実構造物への適用性を確認するとともに、本予測手法の実用性を考慮し、鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)を考慮した曲げ耐力に基づく余寿命診断、ならびにこれらを用いた補修時期の判断手法等について報告する。

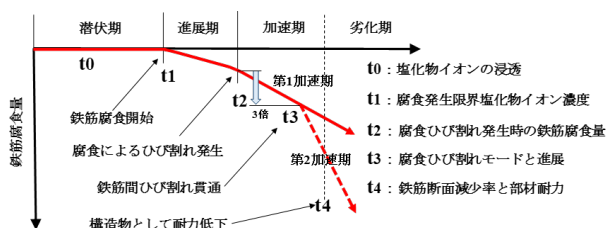


図1 塩害劣化進行過程

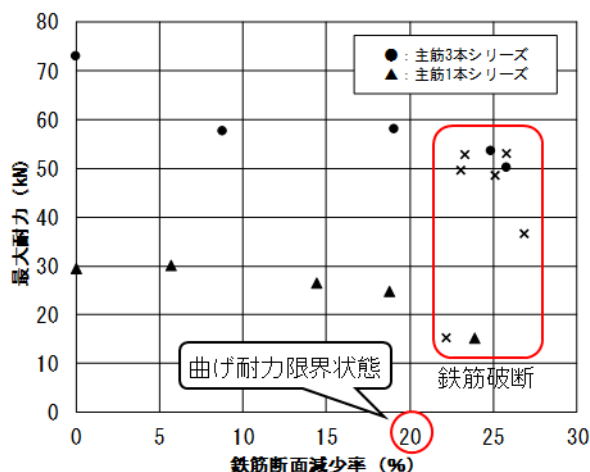


図2 鉄筋断面減少率と最大耐力の関係性

$$R(T, C, D) = R_0 \cdot C_T(T) \cdot C_C(C) \cdot C_D(D) \quad \cdots \text{式(1)}$$

ここで、 $R(T, C, D)$: コンクリート温度と塩化物イオン濃度とコンクリート品質の影響を考慮した腐食速度 (mg/cm²/年)

2. 実構造物への適用性に関する検討

2.1 ばらつきを考慮した評価の必要性

実構造物の鉄筋腐食量は、既報の通りばらつきが大きい。塩害劣化に伴う鉄筋腐食量を画一的に設定するのではなく、ばらつきを考慮して評価することが考えられる。

例えば、図3に示すように、鉄筋腐食量に影響する因子のばらつきを評価し、劣化進行予測を考慮することによって鉄筋腐食量のばらつきを合理的に評価することが考えられる。

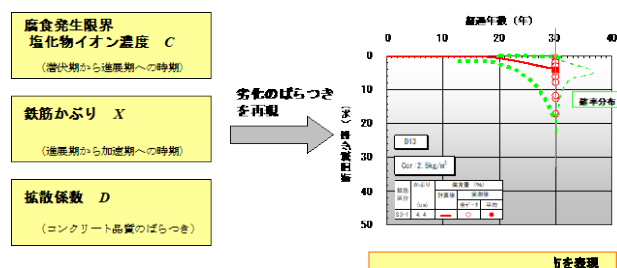


図3 ばらつきを考慮した塩害劣化進行予測のイメージ

ばらつきを考慮した塩害劣化進行予測手法の一つとしては、表1に示すように塩害劣化の各影響因子について、調査結果などから平均値、標準偏差を算定するとともに(対数)正規分布を仮定し、この条件で乱数を発生させて発生値の組合せ分だけ鉄筋腐食予測計算を行い鉄筋腐食量のばらつきを求める方法(モンテカルロシミュレーション)が考えられる(図4)。しかしながら、図5のように、各影響因子の数値のばらつきは正規分布から乖離している場合も少なくないことや実務面からは簡易な計算・評価手法の構築が望まれることから、本稿では、ばらつきの評価方法について検討するとともに、モンテカルロシミュレーションではなく各影響因子のばらつき値の最大値と最小値の組合せから鉄筋腐食量のばらつきを予測し、実構造物の調査結果との比較により、その有効性を検証することとした。

表1 影響因子の統計量の例

腐食発生限界 塩化物イオン濃度 C_{cr} (kg/m ³)	平均	3.07
	標準偏差	1.26
	分布形状	対数正規分布
かぶり X (cm)	平均	4.4
	標準偏差	1.0
	分布形状	正規分布
調査時点の 見かけの拡散係数 D_t (cm ² /sec)	平均	1.610×10^{-8}
	標準偏差	0.483×10^{-8}
	分布形状	対数正規分布

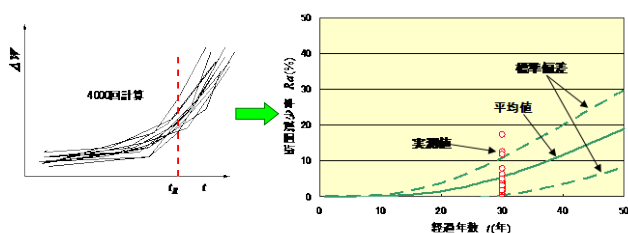


図4 モンテカルロシミュレーションによる鉄筋腐食量のばらつき

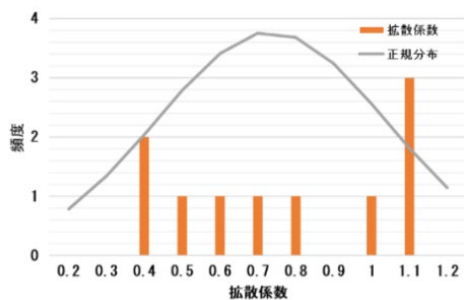


図5 コンクリートの見掛けの拡散係数の調査結果分布

2.2 塩害劣化の影響因子のばらつきの検討

(1)対象設備

ここでは、1969年(昭和44年)に竣工し、これまでに複数回の塩害補修が行われている平面形状約32m×26mの荷揚栈橋を対象に、塩害劣化の各影響因子のばらつきの評価方法について検討した。

梁部の主筋はD22が125mmピッチ、純かぶりが39mm、スラブの主筋はD16が200mmピッチ、純かぶりが42mmである。

鉄筋腐食量のばらつきに影響する因子としては、3因子(表面塩化物イオン濃度、鉄筋かぶり、コンクリートの見掛けの拡散係数)を設定する。

(2)コンクリートの見掛けの拡散係数

コンクリートの見掛けの拡散係数は、コンクリートの品質を表す指標と考えられる。本拡散係数は、新規構造物の場合には一般的に水セメント比W/Cより設定されるが、供用開始から相当の期間が経過した構造物については、施工当時のW/Cを確認することが困難な場合もある。

そこで、本研究では、コアサンプリングにより得られる奥行き方向の塩化物イオン濃度分布から求められるコンクリートの見掛けの拡散係数を採用し、本栈橋の複数の調査結果から平均値と標準偏差を求めることとした。

また、見掛けの拡散係数の頻度分布は、図5の調査結果より、正規分布ではなく矩形分布でモデル化した。なお、矩形分布については、矩形分布の簡易モデル化に関する手法であるRossen blue法を採用し、矩形分布をその分布の重心位置に集中させて、矩形分布と同等の状態にモデル化した(図6)。

上記モデル化した分布状態から、見掛けの拡散係数の統計量は以下になる。

- ・平均値： $0.75 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$
- ・標準(重心)偏差： $0.175 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$
($0.525 \sim 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$)

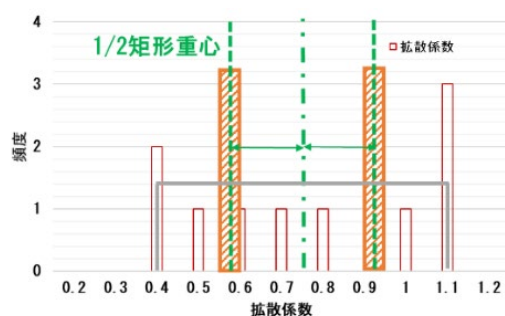


図6 Rossen blue法による矩形分布モデル化

(3)鉄筋かぶり

鉄筋かぶりは、施工品質を表す指標と考えられる。図7は、東京湾の栈橋の梁部材の鉄筋かぶりについて、設計値からの不足値(ΔX)の分布を示したものである。

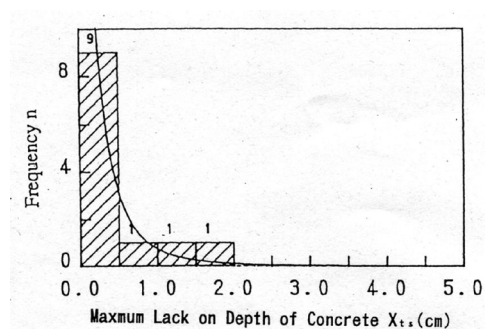


図7 栈橋実構造物の梁部材におけるかぶり不足値の分布

予測に用いるかぶり： $X^* = X_d - \Delta X$

(ここに、 X_d : 設計かぶり = 3.9cm)

ΔX は、上記の既往調査結果から、対数正規分布として以下の通りとした。

平均値：0.35cm、標準偏差値：0.52cm

よって、かぶりモデル値の範囲は、
 $3.9 - (0.35 + 0.52) \sim 3.9 - (0.35 - 0.52)$
 $= 3.03 \sim 4.07 \text{ cm}$

(4) 表面塩化物イオン濃度

図8に示す塩化物イオン濃度分布から回帰分析した結果より求められた表面塩化物イオン濃度は、1.424wt%であった。しかし、コンクリート単位重量を $2,300 \text{ kg/m}^3$ と仮定すると、コンクリート表面塩化物イオン濃度は特に飛来塩分の多い飛沫帯の 13.0 kg/m^3 (表2参照)に対し 32.7 kg/m^3 と相当大的な値となる。そこで、栈橋端部(比較的厳しい環境)の現地調査分析結果を参照したところ、コンクリートの表面部分(深度0~2cm)の塩化物イオン濃度は0.410wt%~0.483 wt%であったことから、表面塩化物イオン濃度については、 $(0.410 + 0.483) \times 1/2 = 0.445 \text{ wt\%}$ より 10.3 kg/m^3 程度となるため、現地条件を採用し 10.0 kg/m^3 とした。

また、飛沫帯から遠く汀線近傍である栈橋中央の比較的緩やかな環境における表面塩化物イオン濃度は、比較的厳しい環境と同様に現地調査分析結果を採用することとし、 5.0 kg/m^3 とした。

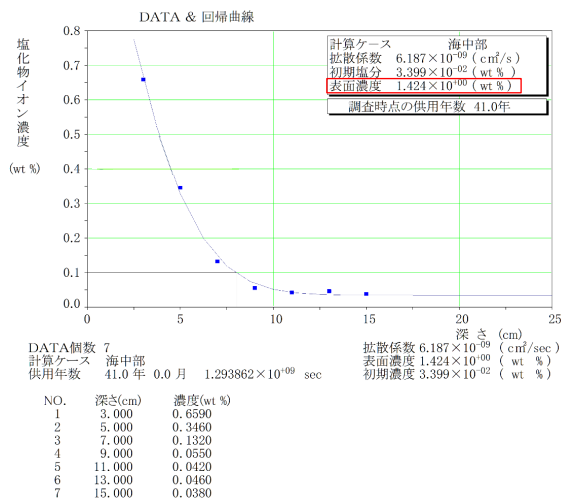


図8 回帰分析結果

表2 コンクリート表面イオン濃度

コンクリート表面塩化物イオン濃度 $\text{Co (kg/m}^3\text{)}$		海岸からの距離 (km)				
飛沫帯	汀線付近	0.10	0.25	0.50	1.00	
		9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、四国、九州					

2.3 荷揚栈橋への適用性検討

荷揚栈橋を対象に、前述したモデル化の適用性について検討する。

塩害劣化進行計算は、先に考慮した3因子のばらつきを以下に示すような組合せで考慮する。

図9に示すように、まず3因子の内、表面塩化物イオン濃度について、栈橋構造物が置かれている環境因子が比較的緩やかな環境として 5.0 kg/m^3 、比較的厳しい環境として 10.0 kg/m^3 を設定する。

設定した各々の環境下において、残りの2因子である見掛けの拡散係数と鉄筋かぶりの各ばらつきにおける最大値と最小値を図のように4通りに組合せ、各組合せにおいて劣化進行予測計算を行うことにより鉄筋腐食量のばらつきを再現する。

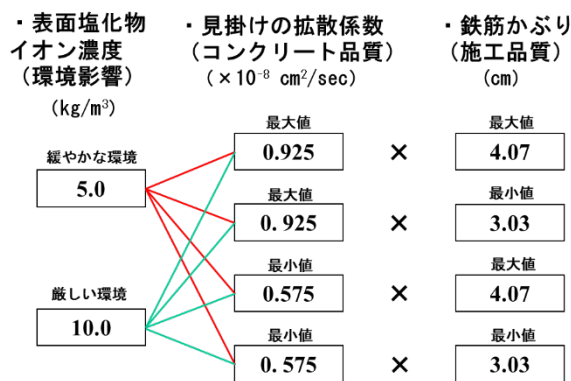


図9 影響3因子の組合せ

(1) 比較的緩やかな環境

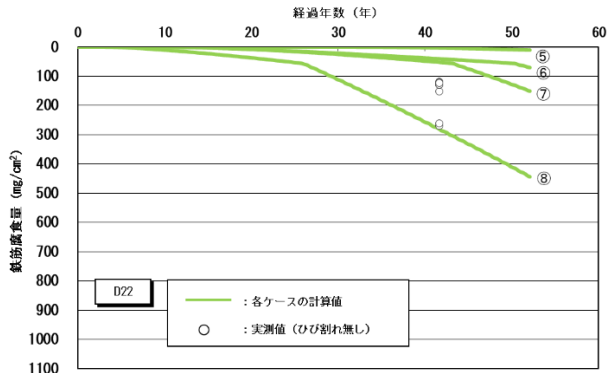
先の設定条件下での試算結果を図10に示す。計算は、既報の研究成果である塩害劣化進行評価計算式で実施した(式(1)参照)。緑線が見掛けの拡散係数と鉄筋かぶり条件の組合せによる4線である。3因子の組合せによる計算値に対し、現地調査を実施した設備設置後41年経過時点のひび割れが生じていない場合の鉄筋腐食量の実測値がほぼ含まれていることがわかる。本検討におけるモデル化によって、鉄筋腐食量実測値の腐食ひび割れが生じていない範囲のばらつきについて上手く再現できている。

(2) 比較的厳しい環境

先の設定条件下での試算結果を図11に示す。サンプル数は少ないものの、3因子の組合せによる計算値範囲内に現地調査を実施した設備設置後

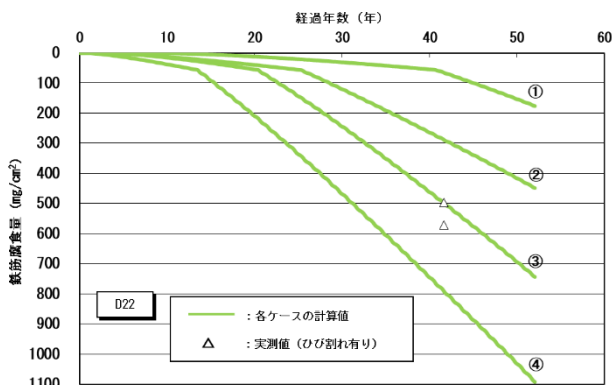
41 年経過時点の鉄筋腐食量の実測値がほぼ含まれていることがわかる。

以上の検討より、本研究のばらつきを考慮した予測手法によって、精度良く荷揚棧橋での鉄筋腐食量のばらつきを再現できていた。



No.	拡散係数	設計かぶり	表面塩化物イオン濃度
⑤	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	$5.0\text{kg}/\text{m}^3$
⑥	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	
⑦	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	
⑧	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	

図 10 塩害劣化進行曲線（緩やかな環境）



No.	拡散係数	設計かぶり	表面塩化物イオン濃度
①	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	$10\text{kg}/\text{m}^3$
②	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	
③	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	
④	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	

図 11 塩害劣化進行曲線（厳しい環境）

2.4 荷揚棧橋の余寿命検討

荷揚棧橋へのモデル化の適用性について確認できたことから、本棧橋の鉄筋腐食量の予測結果をもとに余寿命診断および補修時期の目安について検討を実施した。

なお、鉄筋腐食量で余寿命を評価するにあたり、鉄筋の平均断面減少率と曲げ耐力の関係性について実験を行った（図 12）。



図 12 曲げ载荷試験

図 13 は、電食により鉄筋の腐食を促進させたコンクリート梁の曲げ载荷試験を行い、破壊後に調査した主筋の平均断面減少率、曲げ耐力および破壊モードをプロットしたものである。この実験結果から、塩害劣化期の限界状態として、鉄筋腐食によってコンクリート圧壊モードから鉄筋破断モードへ移行する平均断面減少率は 20%程度と考えられる。

一方、本試験体のコンクリートの圧壊あるいは主筋の破断が生じる際の荷重から曲げ耐力を計算したところ、計算により求められる曲げ耐力は、载荷実験による曲げ耐力に比べて小さくなっていた。

そこで、算定された鉄筋破断時のコンクリート応力から、部材上端部の圧縮ひずみを求め、鉄筋が破断するより前に部材上端がコンクリート圧壊ひずみに達する鉄筋断面減少率を求めたところ、コンクリート圧壊モードから鉄筋破断モードへ移行する鉄筋断面減少率は、15%程度であることがわかった。

この結果より、余寿命診断における限界鉄筋断面減少率は安全側に $\Delta_s = 15\%$ とし、鉄筋腐食量がこの平均断面減少率を上回ると鉄筋破断のリスクが伴うこととした。

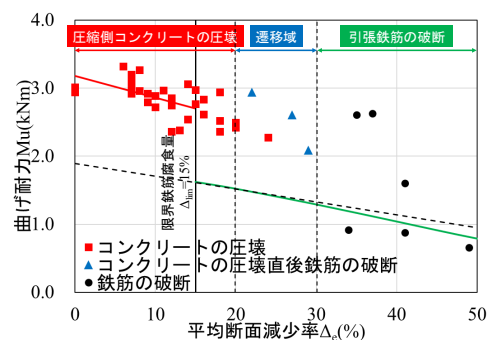
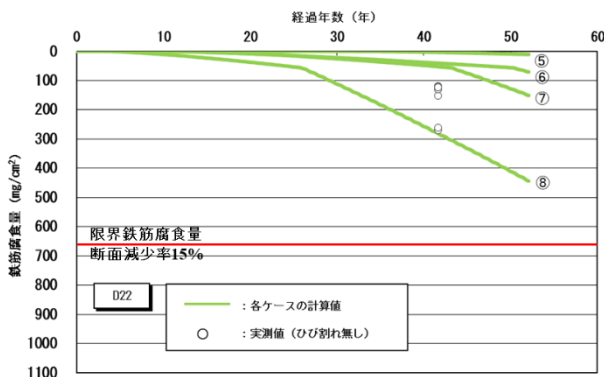


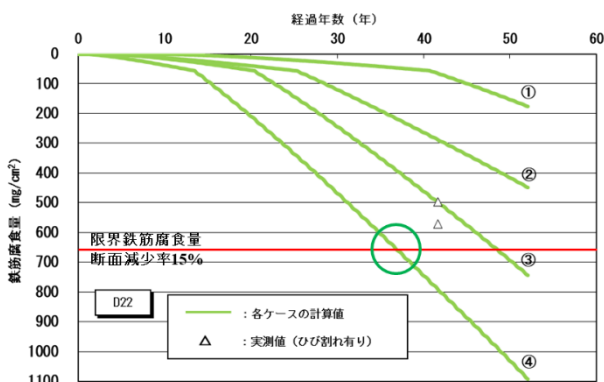
図 13 コンクリート梁の鉄筋平均断面減少率と曲げ耐力の試験結果

図 14 は図 10、図 11 に前述の限界鉄筋断面減少率を補修判断の閾値として設定した上で、想定補修時期を示したものである。

塩害劣化進行曲線(緩やかな環境)については、50 年以上経過した現在において限界鉄筋断面減少率 15%に概ね到達しておらず、健全性が保持されていると評価される。塩害劣化進行曲線(厳しい環境)については、約 15 年前に限界鉄筋断面減少率に達しており、事実、本荷揚栈橋は過去に塩害劣化に対する補修工事が数回行われている。このことから、限界鉄筋腐食量に到達または接近している設備については、健全性を有しているか点検することが望ましく、必要に応じて補修する必要があると考えられる。



(緩やかな環境)



(厳しい環境)

図 14 塩害劣化進行曲線 (想定補修時期)

3. まとめ

本研究においては以下のとおり、実構造物へのばらつきを考慮した塩害劣化進行予測手法の適用性を確認するとともに、鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)を考慮した曲げ耐力に基づく余寿命診断、ならびにこれらを用いた補修時期の判断手法等について検討を行った。

- (1) 実構造物のばらつきを考慮した鉄筋腐食量を予測するため、表面塩化物イオン濃度、鉄筋かぶり、見掛けの拡散係数を影響因子とし、調査結果などをもとに各因子のばらつきを評価して最大値および最小値の組合せより鉄筋腐食量を予測した結果、実構造物の調査結果と概ね整合する結果が得られたことから、本手法の有効性が確認できた。
- (2) 鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)と曲げ耐力の関係性を実験により確認し、限界鉄筋断面減少率に基づく余寿命評価基準を設けることで、構造物の補修時期が予測できる可能性が得られた。

これらの検討結果の総括を図 15 に示す。本検討結果を今後の修繕計画の目安として活用していくことを期待する。

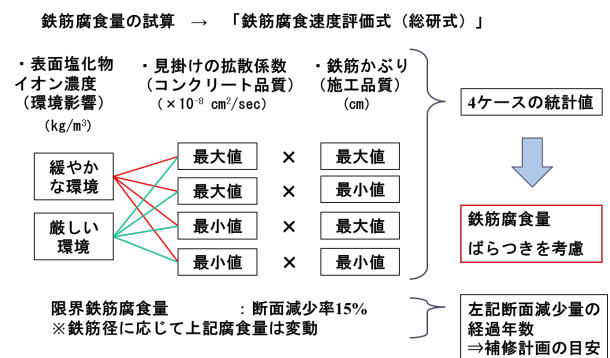


図 15 塩害劣化進行予測手法および補修判断時期の目安

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書
- 2) コンクリート標準示方書【維持管理編】
- 3) 荒木 弘祐, 服部 篤史, 宮川 豊章: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.209-222, 2005.11.
- 4) コンクリート標準示方書【設計編】
- 5) 竹田 宣典, 十河 茂幸, 迫田 恵三, 出光 隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に考えられる実験的研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.91-104, 1998.8.
- 6) 宮川 豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学学位論文, 1985.2.
- 7) Stratfull, R.F.: Corrosion autopsy of a structurally unsound bridge deck, HRR433, pp.1-11, 1973.12.
- 8) Stewart, C.E.: Consideration for repairing salt damaged bridge decks, ACI journal Vol.72, No.12, pp.685-713, 1975.12.
- 9) 山路 徹, 横田 弘, 中野 松二, 濱田 秀則: 実構造物調査および長期暴露試験結果も基づいた港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.335-347, 2008.5.
- 10) 堤 知明, 本橋 賢一, Misra Sudhir, 山本 明雄: 若材齢で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.651-656, 1991.
- 11) 片脇 清士: 最新のコンクリート防食と補修技術, 山海堂, 2000.10.
- 12) 中川 裕之, 松崎 康晴, 横田 優, 松島 学: 確率論に基づいた塩害劣化を受けるコンクリート構造物の劣化予測システムの開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 8 巻, pp.139-144, 2008.10.
- 13) Manabu Matsushima, Masaru Yokota, Hiroyuki Nakagawa: Study on Prediction of Deteriorated RC Structures Received Chloride Induced Damage Based on Reliability Theory, Advances in Concrete Structural Durability, Proceedings of the International Conference Durability of Concrete Structure, Vol.2, pp.1026-1031, 2008.11.
- 14) 松崎 康晴, 松島 学, 横田 優, 中川 裕之: 外部塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測モデル, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.363-364, 2008.9.
- 15) 横田 優, 中川 裕之, 松島 学: 曝露試験結果に基づいた外部塩害を受けるコンクリート構造物の鉄筋腐食進行予測法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 6 巻, pp.67-74, 2006.10.
- 16) 横田 優: 埋設電極によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.333-338, 2002.
- 17) 梶田 佳寛, 安田 正雪, 花榮 浩, 松林 裕二: 塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp. 569-574, 1990.
- 18) 松村 卓郎, 金津 努, 西内 達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.303-314, 1999.11.
- 19) 森永 繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学博士論文, 1986.
- 20) 竹田 宣典, 十河 茂幸, 迫田 恵三, 出光 隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に考えられる実験的研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.91-104, 1998.8.
- 21) 中川 貴之, 堤 知明, 松島 学: 塩害劣化を受ける RC 構造物の劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.419-420, 2000.
- 22) 松村 卓郎, 西内 達雄: 海岸での暴露実験によるひび割れ発生後の鉄筋腐食評価, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.583-584, 2006.
- 23) 堀口 賢一, 武田 均, 丸屋 剛: 自然電位を

- 用いた鉄筋腐食の定量的評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1065-1070, 2004.
- 24) H.H.ユースリック, R.W.レヴィー: 腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, pp.97, 1989.
- 25) Takahiro Nishida : Influence of Temperature on Deterioration Process of Reinforced Concrete Members Due to Steel Corrosion, 東京工業大学博士論文, 2006.1.
- 26) 松村 卓郎, 金津 努, 西内 達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価方法, 電力中央研究所報告, 1999.3.
- 27) セメント協会 コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告 F-18, セメント協会, 1967.9.
- 28) セメント協会 コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告 (その 2) F-23, セメント協会, 1971.3
- 29) 佐藤 和郎, 茂村 達也, 永井 文雄: ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響, 日本機化学会論文集 (A 編), Vol. 45, No.391, pp.220-226, 1979.3.
- 30) 原田 哲夫, 出光 隆, 渡辺 明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360, V-3, pp. 61-70, 1985.8.