

論文 塩害を受けるコンクリート構造物の劣化予測

松島 学*1・関 博*2・横田 優*3

要旨：塩害を受けたコンクリート構造物の維持管理業務では、構造物の劣化程度の将来予測が必要である。本研究では、塩害を受ける RC 部材の劣化過程のモデル化をコンクリート中に塩化物イオンが浸透し、その塩化物イオンが鉄筋位置で限界塩化物イオン濃度に達し、鉄筋の腐食が開始し、その後、鉄筋の腐食膨張圧によりコンクリート表面の鉄筋に沿ったひび割れが発生し、劣化が最終形態に移行すると仮定した。発生するひび割れは、鉄筋間隔、かぶり、鉄筋径によりひびわれモードが異なることが実際の現場で観察されており、本研究でも鉄筋に沿ったひび割れ、水平ひび割れ、はく離ひび割れの3つのモードを考慮している。
 キーワード：塩害劣化, 劣化予測, 鉄筋腐食, ひび割れモード

1. はじめに

コンクリート構造物は、一般に耐久性が優れているために、従来メンテナンスフリーと考えられ、維持管理のための配慮がなされない場合が多かった。しかし、近年日本各地でコンクリート構造物の劣化、特に早期劣化現象が指摘されはじめ、コンクリート構造物が劣化していることが認識され、維持管理業務の重要性が再認識されている¹⁾。

塩害を受けたコンクリート構造物の維持管理業務をするため、劣化程度の将来予測が必要である。本研究では、塩害を受ける RC 部材の劣化を図 - 1 に示すようにコンクリート中に塩化物イオンが浸透し、その塩化物イオンが鉄筋位置で限界塩化物イオン濃度に達し、鉄筋の腐食

が開始する。その後、鉄筋の腐食膨張圧によりコンクリート表面の鉄筋に沿ったひび割れが発生し、劣化が進展すると仮定した。

2. 劣化モデル

2.1 潜伏期のモデル

塩害環境下でのコンクリート部材の劣化は、塩化物イオンの浸透による鉄筋の不動態被膜の破壊が発端と考えられ、浸透は式(1)の Fick の一次元拡散式で表される。

$$C_c(X_t, t) = C_0 \left\{ 1.0 - \operatorname{erf} \left(\frac{X_t}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $C_c(X_t, t)$ はコンクリート表面から深さ X_t における表面の塩化物イオンの浸透開始からの経過時間 t における塩化物イオン濃度である。 D_c は等価拡散係数⁴⁾であり、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。 C_0 は表面塩化物イオン濃度である。この塩化物イオン濃度が鉄筋の酸化被膜を破壊する限界値を鉄筋の腐食開始とすると、腐食開始時期 t_{cr} は、式(2)のように表される。

$$t_{cr} = t \quad \text{when} \quad C_c(X_t, t) = C_{Limit} \quad (2)$$

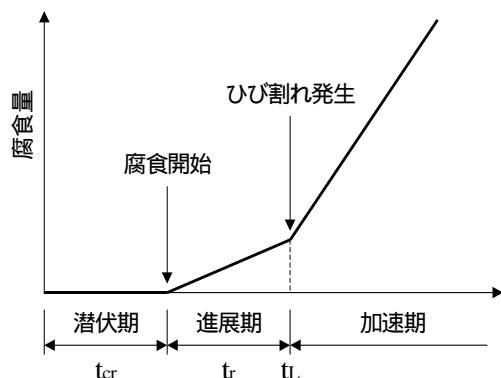


図 - 1 塩害劣化モデル

ここで、 C_{Limit} は塩化物イオン濃度の限界値で

*1 香川大学工学部安全システム建設工学科 教授 工博 (正会員)

*2 早稲田大学理工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

*3 四国総合研究所土木技術部 主席研究員 工博 (正会員)

ある。限界塩化物イオン濃度は不動態被膜を破壊し、鉄筋腐食を開始させる塩化物の限界値であり、構造物の設置環境条件等により異なるが、平均的な値として 1.2kg/m^3 と設定した²⁾。

2.2 進展期のモデル³⁾

酸素の拡散により鉄筋腐食が進行し、腐食生成物の膨張圧によりひび割れが生じる。その力学モデルを図 - 2 に示す。図に見られるように、膨張した腐食生成物により腐食していない鉄筋に生じる膨張圧 q_0 とかぶり部に生じる圧力 q_1 が発生する。この圧力 q_1 によりコンクリート表面にひび割れが生じると仮定した。腐食膨張圧によるひび割れ発生モデルとして厚肉円筒モデルを採用し(図 - 2(c)参照)、コンクリート表面のひび割れ発生条件として、平均応力説に基づいて、かぶり部のコンクリートの平均引張応力 σ_t を計算し、この応力がコンクリートの引張強度を超えると、腐食ひび割れが発生するとした。腐食生成物の体積膨張率は、平均的な値とされている 2.5 を採用した。ひび割れ発生前の腐食速度 r_1 は、 $0.05\%/yr.$ (D25 で換算すると $2.5\text{mg/cm}^2/yr.$)⁶⁾ と仮定した。コンクリートが腐食生成物の膨張による内圧を受けることにより、

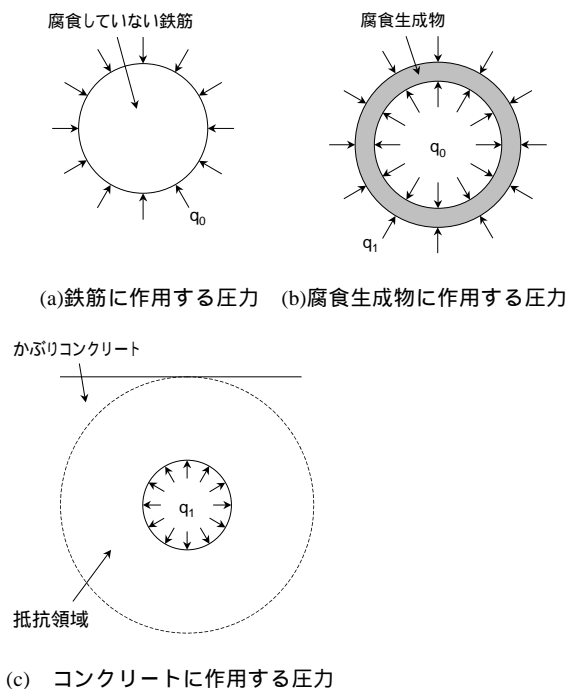


図 - 2 ひび割れ発生モデル

発生する引張応力 σ_t が、コンクリートの引張強度 f_{tu} を超えるとひび割れが生じる。すなわち、ひび割れ発生時期 t_L は、式(3)のように求められる。

$$t_L = t \quad \text{when} \quad f_{tu} - \sigma_t = 0 \quad (3)$$

2.3 加速期のモデル

ひび割れ発生後の腐食速度は、既往の調査結果から求めた。ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度は、式(4)で定義される鉄筋の断面減少率を腐食開始からの経過年数 t_c で除した平均腐食速度 r_2 で評価した。

$$\Delta_{r_2} = \frac{\Delta_r}{t_c} = \frac{(1 - A_d/A_s) \times 100}{t_c} \quad (4)$$

ここで、 Δ_r は鉄筋の断面減少率(%), A_d はノギスで測定した鉄筋径から得られる腐食した鉄筋の断面積(cm^2), A_s は鉄筋の公称断面積(cm^2), t_c は経過年数である。経過年数と断面減少率の関係を図 - 3 に示す。各経過年数のデータを一つのグループとして扱い、その平均値を求めた⁴⁾。図中の数字はデータ数である。同図に示す回帰直線と経過年数との交点を腐食開始時期とし、勾配を腐食速度と仮定した。その結果、ひび割れ発生後の腐食速度は、平均的な値である $0.35\%/yr.$ (D25 で換算すると $17.5\text{mg/cm}^2/yr.$)⁴⁾ とした。

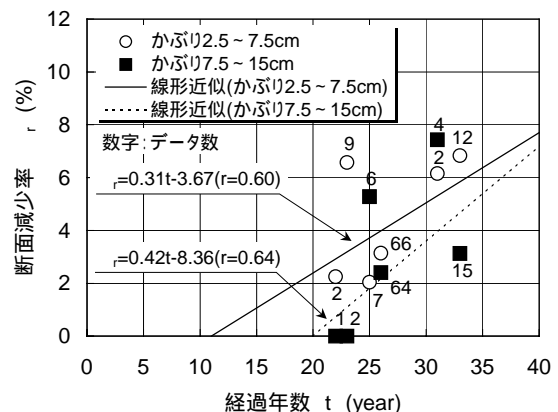


図 - 3 経過年数と断面減少率の関係⁴⁾

3. 劣化モデルの適用

3.1 調査構造物

調査対象は、塩害環境下にある RC 構造物の柱部材と壁部材である。供用年数は 11 年である。供用期間中の補修経歴はない。柱部材は、常時海水飛沫を被るとともに湿気がこもりやすい場所であり、過酷な塩害環境下にあると言える。ひび割れが目視で明瞭に認められるほど劣化が進んでいた。一方、壁部材も同様に海水飛沫を被るとともに湿気がこもりやすい環境に位置するが、塩害劣化による腐食ひび割れ等は、認められなかった。柱部材の劣化状況を写真 - 1 および図 - 4 に示す。



写真 - 1 柱部材の劣化状況

3.2 劣化モデルの適用

調査した構造物に RC 構造物の劣化モデルを適用した。表面塩化物イオン濃度 C_0 、等価拡散係数 D_c 、かぶり X_t 、鉄筋径 およびコンクリートの引張強度 f_{tu} は、本調査から得られたデータを用いた。表 - 1 に計算条件を示す。得られた拡散係数は、場所によりばらつきを持っているが、その平均値を採用した。本劣化モデルにより求めた腐食量と経過時間の関係を図 - 5 に示す。図中に実測値を \circ で、平均値を \bullet で示した。計算結果に見られるように設定した表面塩化物イオン濃度、等価拡散係数および鉄筋の腐食速度のばらつきを考慮すると、得られた柱部のコンクリート部材内の鉄筋腐食量は実現象を概ね良く説明している。

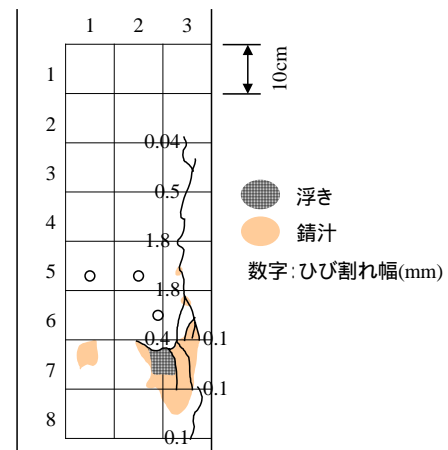


図 - 4 柱部材の劣化状況

表 - 1 計算条件

項目	値
表面塩化物イオン濃度 C_0	14.0kg/m ³
等価拡散係数 D_c	2.81×10 ⁻⁸ cm ² /sec
コンクリート引張強度 f_{tu}	2.0N/mm ²
鉄筋の腐食速度 ひび割れ発生前 ⁶⁾ r_1	0.05%/yr.
鉄筋の腐食速度 ひび割れ発生後 ⁴⁾ r_2	0.35%/yr.
限界塩化物イオン濃度 ²⁾ C_{cr}	1.2kg/m ³

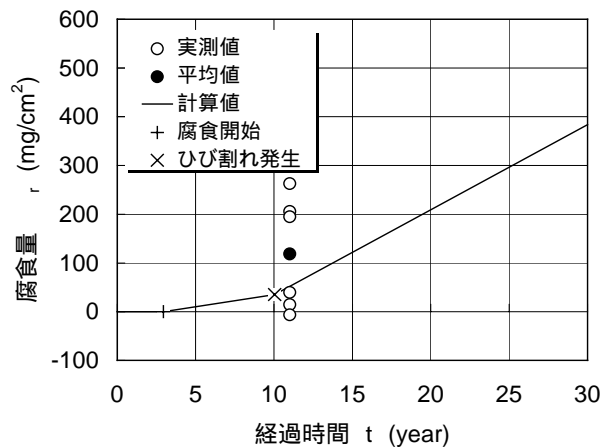


図 - 5 実構造物と解析結果の比較

4. ひび割れ発生モデル

前述したひび割れは、主鉄筋に沿ったひび割れが生じる場合を考えたが、今までの現場観測から鉄筋間隔が密に配筋された場合や鉄筋のかぶり厚が薄い場合は、図-2のようなひび割れモードにならないと言える。主鉄筋が密に配筋された梁のような場合は図-6に示すように水平のひび割れ（水平はく離ひび割れ）が卓越することがわかっている。かぶり厚さが薄い場合は図-7の右のようなはく離ひび割れとなることが明らかである。本研究では、実用的な観点から鉄筋の種類とひび割れモードの関係を表-2のように鉄筋の種類別に区分した。

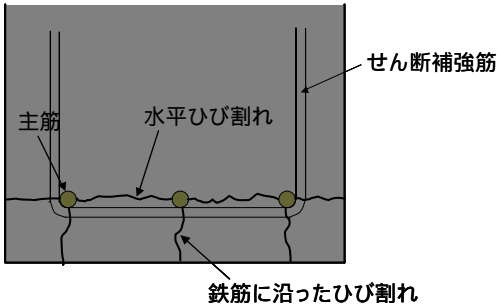


図-6 水平と鉄筋に沿ったひび割れ

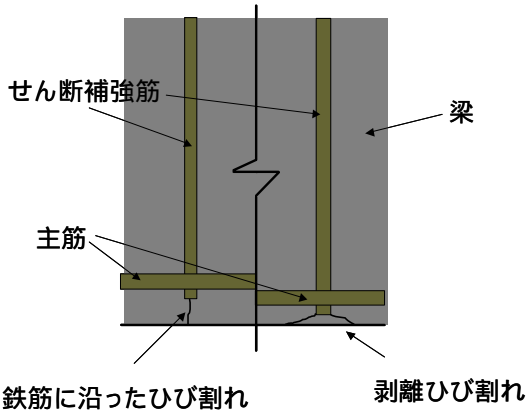


図-7 表面はく離と鉄筋に沿ったひび割れ

表-2 ひび割れと鉄筋の種類

	鉄筋に沿ったひび割れ	表面はく離ひび割れ	水平はく離ひび割れ
柱・梁(主筋)		×	
柱・梁(せん断補強筋)			×
スラブ			×

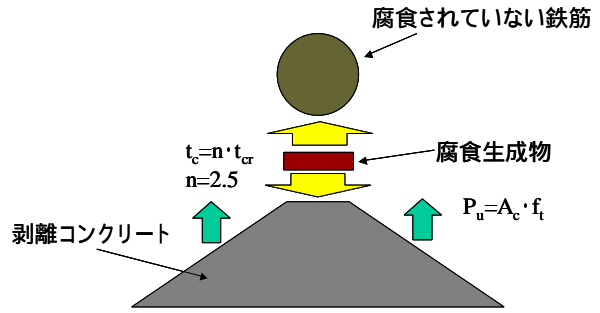


図-8 表面はく離ひび割れの力学モデル

4.1 表面はく離ひび割れ

かぶり厚が小さい場合、鉄筋腐食による膨張ひび割れによって表面コンクリートがはく離する。筆者の一人は、既往の調査と理論解から表面から鉄筋中心までの距離Dを鉄筋径で除した値D/φが1.5以下であれば、はく離が卓越し、それ以上であれば鉄筋に沿ったひび割れが発生することを示した⁵⁾。本研究でも、表面コンクリートのはく離ひび割れは、図-8のように45°方向に生じると仮定し、次のように力学モデルを構築した。

はく離ひび割れが発生するコンクリート部に働く単位長さあたりの力P_c(N/mm)は、式(5)のように表される。

$$P_c = \frac{\phi \cdot E_c}{t_c} u_c \quad (5)$$

ここで、φ：鉄筋径(mm)，E_c：コンクリートのヤング率(N/mm²)，t_c：かぶり(mm)，u_c：はく離ひび割れが生じるために必要なコンクリート部の変位(mm)である。

腐食鉄筋の膨張圧によるコンクリートに生じる引張力P_{cr}(N/mm)は、式(6)のように表される。

$$P_{cr} = \frac{\phi \cdot E_{cr}}{2n \cdot t_{cr}} u_{cr} \quad (6)$$

ここで、E_{cr}：腐食生成物のヤング率³⁾(N/mm²)，n：腐食生成物の膨張率(=2.5と仮定した)，t_{cr}：腐食した鉄筋の厚さ(mm)で腐食減量r(%)と式(7)のような関係がある。

$$t_{cr} = \frac{1}{2} \phi \left(1 - \sqrt{1 - \Delta_r / 100} \right) \quad (7)$$

u_{cr}：はく離ひび割れが生じるために必要な腐食

膨張による鉄筋の変位(mm)である。

式(5),式(6)と式(8)に示す変位の適合性と $P_{cr}=P_c$ の釣り合いからはく離ひび割れ発生時の腐食減量厚さ t_{cr} とはく離ひび割れ時の荷重 P_{cr} (N/mm)の関係は式(9)のように表される。

$$u_c + u_{cr} = (n-1)2t_{cr} \quad (8)$$

$$P_c = \frac{2n \cdot t_{cr} \cdot t_{cr} \cdot E_c \cdot E_{cr}}{n(2n \cdot t_{cr} \cdot E_c + t_c \cdot E_{cr})} \quad (9)$$

式(9)の引張力 P_c が式(10)のひび割れ面の引張力 P_f (N/mm)に達した時にはく離ひび割れが発生するものと考えた。

$$P_f = 2t_c \cdot f_{cu} \quad (10)$$

ここで、 f_{cu} : コンクリートの引張強度(N/mm²)である。

4.2 水平はく離ひび割れ

鉄筋が密に配筋された梁などでは、ひび割れは鉄筋に沿ったひび割れよりも主筋同士を結ぶような水平のはく離ひび割れが発生することが多い。図-9に水平はく離ひび割れの力学モデルを示す。図に見られるように、腐食した鉄筋は、強制変位によりコンクリートに引張応力を生じさせ、せん断補強筋とコンクリートの引張力により抵抗している。

水平はく離ひび割れ面のコンクリート部に生じる単位長さあたりの引張力 P_c (N/mm)は、式(11)で表される。

$$P_c = K_c \cdot u_c = \frac{\{n\phi - 1\}(\ell_\phi - \phi) + 2t_c\} E_c}{t_c} u_c \quad (11)$$

ここで、 n : 鉄筋の本数、 ℓ_ϕ : 鉄筋間隔(mm)、 u_c : 水平はく離ひび割れが生じた時のひび割れ面の変位(mm)である。

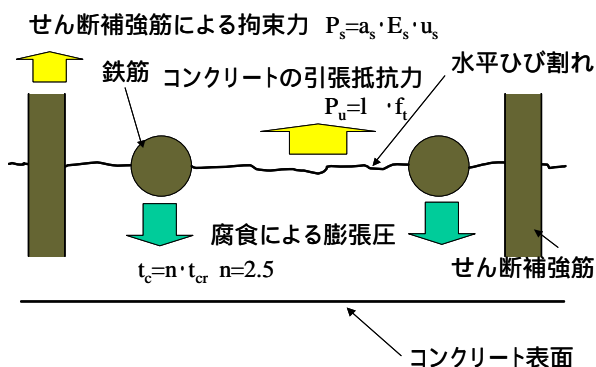


図-9 水平はく離ひび割れの力学モデル

各鉄筋の腐食鉄筋の膨張圧によるコンクリートに生じる引張力 P_{cr} (N/mm)は、式(12)のように表される。

$$P_{cr} = K_{cr} \cdot u_{cr} = \frac{n\phi \cdot \phi \cdot E_{cr}}{2n \cdot t_{cr}} u_{cr} \quad (12)$$

せん断補強筋に生じる引張力 P_s (N/mm)は、式(13)のように表される。

$$P_s = K_s \cdot u_s = \frac{2a_s \cdot E_s}{\ell_B} u_s \quad (13)$$

ここで、 ℓ_B は定着長さで、ひずみを三角形分布とし、分布長さを 2 とすると、 $\ell_B =$ となる。 a_s : せん断補強筋の断面積(mm²)である。

力と変位の適合条件は、式(14.a)、式(14.b)のとおりである。

$$u_c + u_{cr} = u_s + u_{cr} = (n-1)2t_{cr} \quad (14.a)$$

$$P_s + P_c = P_{cr} \quad (14.b)$$

したがって、コンクリート部に生じる引張力 P_c (N/mm)は、式(15)のようになる。

$$P_c = K_c \frac{2(n-1)t_{cr}}{1 + \frac{K_s + K_c}{K_{cr}}} \quad (15)$$

式(15)の引張力 P_c が式(16)の水平はく離ひび割れ面の引張力 P_f (N/mm)に達した時にはく離ひび割れが発生するものと考えた。

$$P_f = 2\alpha \{n\phi - 1\}(\ell_\phi - \phi) + 2t_c\} \cdot f_{ct} \quad (16)$$

ここで、 α はコンクリートの引張応力の分布を等価に置きかえるための係数で、 $\alpha = 1/1.5$ とする。

4.3 試算例

かぶり厚さによる表面はく離と鉄筋に沿ったひび割れの発生状況を本モデルによって計算した。計算した対象部材は、梁のせん断補強筋で、実際にはく離が良く観察される部位である。計算条件は、表面塩化物イオン濃度 $C_0=20\text{kg/m}^3$ 、等価拡散係数 $D_c=1.7 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$ と平均的な既往の調査結果⁴⁾を与え、他は表-1の値を採用した。鉄筋径は $\phi=16\text{mm}$ である。図-10にかぶり厚さとひび割れ発生年数の計算結果を示す。図中で S ははく離ひび割れを、 C は鉄筋に沿った

ひび割れを示す。同図に見られるように発生年数は、かぶり厚さとともに線形に増加する。ひび割れモードは、かぶりが 3.0cm、つまり $D/t_c=1.9$ 程度の値が境界値となった。

梁の主筋の鉄筋間隔 L とひび割れ発生年数の関係を計算した結果を図 - 11 に示す。計算条件は、鉄筋径 $\phi=22\text{mm}$ であること以外、図 - 10 の計算条件と同じである。鉄筋のかぶり厚さは $t_c=6.0\text{cm}$ である。鉄筋間隔が大きくなるにつれて発生年数は若干大きくなるが、わずか 2~3 年の違いである。本試算の場合、 $L=12\text{cm}$ 、 $L/t_c=2.0$ 以上であれば、鉄筋に沿ったひび割れが卓越する。

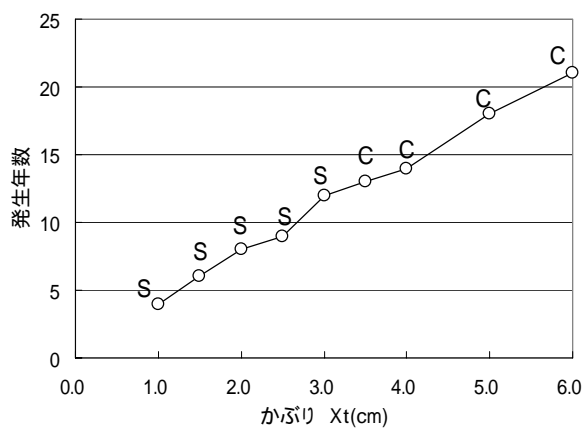


図 - 10 かぶりと発生年数

(S : はく離ひび割れ, C:鉄筋に沿ったひび割れ)

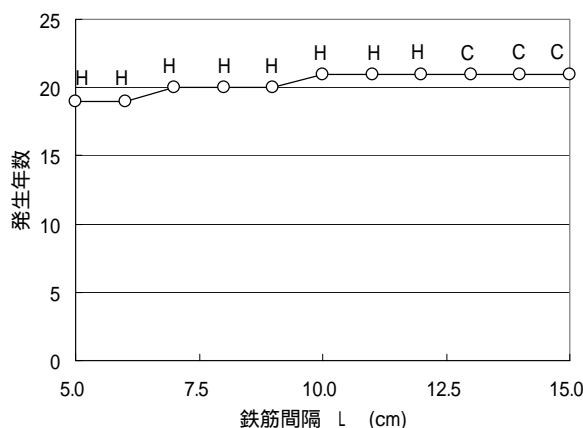


図 - 11 鉄筋間隔と発生年数

(H : 水平ひび割れ, C:鉄筋に沿ったひび割れ)

5. まとめ

本研究では、塩害劣化を受ける構造物の劣化

予測システムを開発した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 塩害による鉄筋の腐食進展を潜伏期、進展期、加速期の3つの線形式で表す劣化予測システムを開発した。
- (2) 既往の塩害劣化した構造物でシステムの妥当性を検証した。その結果、設定した表面塩化物イオン濃度、等価拡散係数および鉄筋の腐食速度のばらつきを考慮すると、計算で得られたコンクリート部材内の鉄筋の腐食量は実現象を概ね良く説明している。
- (3) 鉄筋間隔が密である場合、かぶりコンクリートが薄い場合の水平ひび割れ、はく離ひび割れの発生モデルを開発した。試算結果から、表面から鉄筋中心までの距離 D を鉄筋径 ϕ で除した値 D/ϕ が 1.9 以下であればはく離ひび割れとなること、鉄筋間隔 L をかぶり厚さ t_c で除した値 L/t_c が 2.0 以下であれば水平ひび割れとなることが得られた。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性，コンクリート工学，Vol.23，No.2，pp.4~12，Feb.1985.
- 2) 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete，京都大学学位論文，1985.2
- 3) Manabu Matsushima, Tomoaki Tsutsumi, Hiroshi Seki, Kunihito Matsui : A study of the application of reliability theory to the design of concrete cover, Magazine of Concrete Research, Volume 50, Number 1, pp.5-16, March, 1998
- 4) 堤 知明，白井伸一，安田 登，松島 学：塩害劣化に関する影響因子の実データに基づく定量評価，土木学会論文集，No.544/V-32,pp.33 ~ 41,1996.8
- 5) 堤 知明，松島 学，村上祐治，関 博：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，No.532/V-30,pp.159 ~ 166,1996.2
- 6) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ 26，p.131，1997.12