

東電設計 正会員 中川貴之 東電設計 正会員 松島 学
東京電力 正会員 堤 知明 ハザマ 正会員 村上祐治

1. はじめに

本研究は、コンクリート構造物の表面塩化物イオン量が得られている場合、鉄筋近傍の塩化物イオン量を求め、その塩化物イオン量と限界値の関係から腐食開始時間を求める。その後、鉄筋の腐食膨張圧によりコンクリート表面にひび割れが発生し、鉄筋の腐食速度が促進されるとして、鉄筋の劣化モデルを構築した。さらに、実データを提案したシステムに適用し、本モデルの妥当性を検証した。

2. 鉄筋の劣化モデル¹⁾

(1) 劣化過程

塩害による鉄筋の劣化モデルの概略を図-1 に示す。塩害劣化過程は、表面の塩化物イオン量がコンクリート表面から浸透し、鉄筋の不動態皮膜を破壊し、腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始後、鉄筋の腐食膨張圧によりかぶり部のコンクリートにひび割れが発生する進展期、その後、外部と直接鉄筋が水や外気と接触することができ、鉄筋の腐食速度は加速度的に速くなる加速期に区分した。

(2) 鉄筋の腐食開始モデル

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皮膜の破壊が発端と考えられる。本研究では、潜伏期の挙動を式(2)に示す Fick の拡散式で求められた塩化物イオン量が鉄筋の不動態皮膜を破壊する限界値を越えた時を鉄筋の腐食開始とする。したがって、式(1)のような性能関数が設定される。

$$J_{cr}(t) = C_{Limit} - C_c(X_t, t) \quad (1)$$

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

ここで、 t : 経過時間、 X_t : かぶり、 C_0 : 表面塩化物イオン量、 D_c : 等価拡散係数である。 C_{limit} は塩化物イオン量の限界値で既往の研究²⁾から 1.2kg/m^3 とした。性能関数 $J_{cr}(t)$ がゼロになるときが、鉄筋腐食開始を意味する。

(3) ひび割れ発生モデル

酸素の拡散により鉄筋腐食が進行し、その鉄筋腐食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

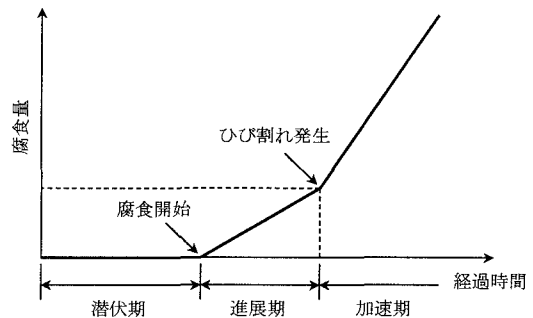


図-1 劣化の概略図

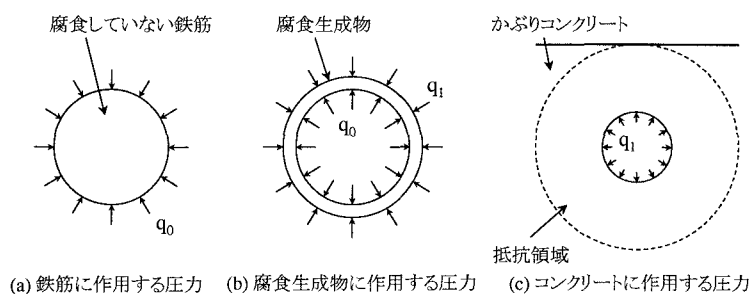


図-2 ひび割れ発生モデル

キーワード：塩害劣化、現場調査、劣化モデル、鉄筋腐食、塩化物イオン、ひび割れ
連絡先：〒110-0014 東京都台東区東上野 3-3-3 TEL03-5818-7605 FAX03-5818-7608

リート表面にひび割れが生じると仮定した。鉄筋の腐食速度は、既往の調査研究³⁾から $10\text{mg}/\text{cm}^2/\text{yr}$ とした。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発生する引張応力 σ_t が、コンクリートの引張強度 f_m を越えるとひび割れが生じる。すなわち、式(3)のような性能関数 $J_r(t)$ が設定される。

$$J_r(t) = f_m - \sigma_t \quad (3)$$

性能関数 $J_r(t)$ がゼロになるときが、ひび割れ発生時間と仮定できる。

（４）ひび割れ発生後のモデル

ひび割れ発生後、外部と直接鉄筋が水や外気と接触することができ、鉄筋の腐食速度は加速度的に速くなると考え、ひび割れ発生以降の鉄筋腐食速度と以前の腐食速度とを区分し、ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度は、既往の文献⁴⁾から、特に厳しい腐食環境を対象として $70\text{mg}/\text{cm}^2/\text{yr}$ とした。

３．劣化現場調査

調査対象は、飛沫帯に位置する RC 構造物のスラブ部である。供用年数は 20 年である。構造物の設置場所は過酷な塩害環境下であり、当該調査面は、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。対象構造物に使用されている鉄筋径は D16 であった。本調査結果では、ひび割れ幅は $0.1 \sim 0.5\text{mm}$ 程度の範囲であり、保守管理規定⁵⁾に記載されている基準値を超えるひびわれ幅も含まれている。また、かぶりは 6cm 程度であり、現行のコンクリート標準示方書に規定されている海岸構造物のかぶり厚さと比較すると同程度である。測定した鉄筋腐食量は $40 \sim 700\text{mg}/\text{cm}^2$ であった。ただし、腐食量は、測定された鉄筋径から腐食減量を求めたものである。コア採取調査から、表面塩化物イオン量は $1.0 \sim 14.0\text{kg}/\text{m}^3$ 、等価拡散係数は $0.5 \sim 1.5 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$ 、圧縮強度は $186 \sim 368\text{kg}/\text{cm}^2$ の範囲であった。

４．劣化モデルの適用

対象構造物の劣化調査データを本研究で提案した鉄筋の劣化モデルに適用した。劣化モデルの計算条件を表-1 に示す。表面塩化物イオン量と等価拡散係数から本環境条件を考慮し、3 ケースの計算モデルを設定した。表面塩化物イオン量は、本調査結果の最大値と平均値を考慮し、 $14.0\text{kg}/\text{m}^3$ と $7.0\text{kg}/\text{m}^3$ とした。等価拡散係数は、本調査結果の平均値と既往の調査結果³⁾のばらつきを考慮し、 $1.22 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$ と $2.81 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$ とした。かぶり、鉄筋径およびコンクリートの引張強度は、本調査結果からそれぞれ 6cm 、 1.6mm 、 $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ とした。

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-3 に示す。同図に測定された腐食量も示す。計算に用いた表面塩化物イオン量および等価拡散係数は、ばらつきを持っていることを考慮すると、得られた腐食量は実現現象を概ね良く捉えていると言え、モデルの妥当性が明らかとなった。

参考文献

- 1) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人: 塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり, 土木学会論文集 No.490/V-23, pp.41~49, 1994.5
- 2) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.2
- 3) 堤知明: 海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の健全度診断に関する研究, 東京都立大学博士論文, 1997.2
- 4) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断, 森林出版, pp.194~195, 1993
- 5) 保守管理規定—火力・原子力発電所土木関係設備—, 東京電力株式会社, 1998.3

表-1 計算条件

項目	CASE-1	CASE-2	CASE-3
表面塩化物イオン量(kg/m^3)	14.0	7.0	14.0
等価拡散係数($\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$)	1.22	1.22	2.81
かぶり(cm)	6.0		
鉄筋径(mm)	16.0		
コンクリート引張強度(kgf/cm^2)	20.0		
腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{yr}$)	ひび割れ発生前 10 ひび割れ発生後 70		
限界塩化物イオン量(kg/m^3)	1.2		

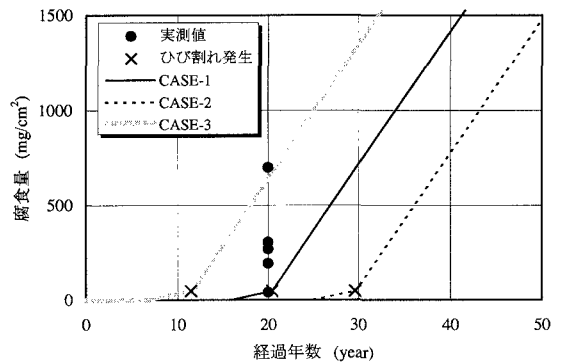


図-3 経過時間と腐食量の関係