

塩害劣化を受ける RC 構造物の最適な補修サイクルに関する研究

日本電炉株式会社 正会員 ○牧野 誠太郎

香川大学工学部 正会員 松島 学

四国総合研究所 正会員 横田 優

1. はじめに

近年，塩害を受けたコンクリート構造物の劣化が顕在化し，社会資本の維持管理の問題が注目されている．本研究は，劣化したコンクリート構造物の耐震性能の評価を目的としている．塩害劣化により鉄筋の腐食が進行し，構造部材のじん性も低下し，地震時の等価な静的耐力が低下する．本研究では，塩害によるじん性率および耐力の低下と鉄筋の腐食量の関係を考えた劣化進行モデルを開発した．実構造物を対象に，各劣化因子のばらつきをモデル化するために信頼性理論を適用した．入力地震動は，レベルⅠ，レベルⅡの2種類を対象とし，構造物の重要度などを考慮し，最適な補修サイクルを求めた．

2. 地震動の確率モデル

道路橋示方書では，保有水平耐力照査でレベルⅡ地震動の下限値を $K_h=0.6$ としている．レベルⅠ地震動の設計水平震度を $K_h=0.25\sim0.3$ としている．本研究では，レベルⅠ地震の最大応答加速度 $\varepsilon_I=250\text{Gal}$ レベルⅡ地震の最大応答加速度 $\varepsilon_{II}=600\text{Gal}$ を規格値として設定し，確率モデルを構築した．構造物の耐用期間を50年と設定することで，Vision2000の性能マトリックスから再現期間をそれぞれ72年，475年とした．地震動の最大加速度分布を対数正規分布と仮定し，既往の研究等より変動係数 $\delta=0.3$ とした．これより，レベルⅠ地震動による応答加速度の平均値 $\mu=262.4\text{Gal}$ ，標準偏差 $\sigma=78.7\text{Gal}$ ，レベルⅡ地震動による応答加速度の平均値 $\mu=427.5\text{Gal}$ ，標準偏差 $\sigma=128.3\text{Gal}$ が求められる．

3. 塩害劣化モデル

(1) 腐食減量のモデル

塩害による劣化の過程は潜伏期，進展期，加速期の三つに区分される．潜伏期では鉄筋は腐食せず，塩化物イオンがコンクリートを浸透し，鉄筋付近に蓄積される．進展期では鉄筋の腐食が始まり，鉄筋の腐食が進むとかぶりにひび割れが発生して加速期になる．加速期では進展期と比べてより早く鉄筋の

腐食が進み，それに伴って RC 部材の耐力が低下する．

腐食開始時間 t_r を求めるために Fick の拡散方程式を用いる．鉄筋付近の塩化物イオン量が限界塩化物イオン量を超えた時間が腐食開始時間 t_r となる．

鉄筋の腐食が進行すると，腐食生成物の膨張圧により鉄筋に沿ってコンクリート部にひび割れが生じる．ひび割れ発生時に生じる応力をまだ腐食していない鉄筋，腐食生成物，コンクリート部に分けて考えると図-1のように仮定できる．図中のかぶりコンクリートに生じる応力 q_1 によりかぶりコンクリートにひび割れが生じると仮定した．腐食生成物の膨張によってコンクリートに発生する引張応力が，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考える．

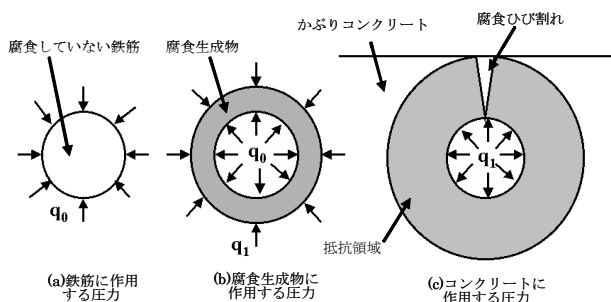


図-1 ひび割れの発生モデル

(2) 部材のじん性低下モデル

鉄筋の腐食によりコンクリートに膨張圧がかかりコンクリートにひび割れが発生する．ひび割れにより付着耐力が低下することで，部材のじん性率が低下する．じん性率の低下は既往の実験より式(1)のように仮定した．

$$\mu(\Delta_r) = \mu_0 \cdot (-0.022 \Delta_r + 0.95) \quad (1)$$

ここで， $\mu(\Delta_r)$ は腐食率 Δ_r でのじん性率， μ_0 は初期じん性率である．

エネルギー一定則より地震時の等価な静的耐力 P_s は塑性率 $\mu(t)$ を用いて式(2)で求められる．

$$P_s = P_y \cdot \sqrt{2\mu(t)-1} \quad (2)$$

ここで、 P_y は降伏耐力である。

4. 性能関数

構造物の安全性は式(3)の性能関数で表される。

$$Z_I = P_y - P_I, \quad Z_{II} = P_s - P_{II} \quad (3)$$

ここで、 P_s は地震時の等価な静的耐力、 P_I は地震による外力である。この性能関数 Z_i が 0 を下回ると破壊となる。確率変量とした因子の一覧を表-1 に示す。破壊確率を求めるためにモンテカルロシミュレーションを用い、計算回数は 10000 回とした。

表-1 ばらつきを持つ因子

因子	平均値	標準偏差	分布形状
拡散係数 $D_c(\text{cm}^2/\text{sec})$	1.73×10^{-8}	1.59×10^{-8}	L
限界塩化物イオン量 $C_{\max}(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.2	0.058	R
かぶりの誤差 $X_d(\text{cm})$	0.35	0.52	L
コンクリートの引張強度 $f_t(\text{N}/\text{mm}^2)$	3.0	0.3	L
進展期の腐食速度 $\Delta_{r1}(\%/ \text{year})$	0.15	0.075	L
加速期の腐食速度 $\Delta_{r2}(\%/ \text{year})$	0.35	0.175	L
初期じん性率 μ_0	5.42	1.1	L
レベル I 地震応答加速度 a_I	262.4	78.7	L
レベル II 地震応答加速度 a_{II}	427.5	128.3	L

分布形状 L：対数正規分布，R：一様分布

5. 最適な補修ひび割れ幅の評価

費用のモデルを構築し、補修に最適なひび割れ幅を評価することで、最適な補修サイクルを提案する。

構築した塩害劣化進行モデルにより腐食減量の増加をモデル化した。鉄筋の腐食量とひび割れ幅は線形の関係にあり、直線式で表すことができる。筆者らが行った電食試験により得られた腐食量とひび割れ幅との関係を式(4)に示す。

$$\Delta_r = 208.65 \cdot W + 44.45 \quad (4)$$

ここで、 Δ_r は単位腐食減量(mg/cm^2)、 W はひび割れ幅(mm)である。これにより、構造物の破壊確率をひび割れ幅に基づき評価することができる。各補修ひび割れ幅における地震動による期待損失費用を求める。

$$C_{LI} = \alpha \times P_{fI} \times C_0, \quad C_{LII} = \beta \times P_{fII} \times C_0 \quad (5)$$

ここで、 C_0 は初期建設費、 α 、 β はそれぞれレベル I、レベル II 地震動に対する損失係数である。レベル I 地震動では補修を必要とする程度の被害を想定しているため $\alpha=0.1 \sim 0.3$ 程度、レベル II 地震動では倒壊程度の被害を想定しているため $\beta=2.0 \sim 50.0$ 程度と仮定した。

補修を必要とするひび割れ幅の大きさにより、供

用期間中に必要となる補修回数は変化する。一定のひび割れ幅で補修を繰り返す場合の経過年数と補修ひび割れ幅との関係を図-2 に示す。小さなひび割れ幅で補修するほど、補修回数は多くなり、補修に必要な費用は増加する。逆に、大きな補修ひび割れ幅を採用すると大きな期待損失費用が必要となる。供用期間を 50 年と設定し、各補修ひび割れ幅における補修回数を求めた。各補修ひび割れ幅での期待補修費用 C_R を式(6)に示す。

$$C_R = n \times \gamma \times C_0 \quad (6)$$

ここで、 n は供用期間中に必要となる補修回数、 γ は補修費用の係数である。

式(5)、式(6)で表される期待損失費用の和 C_T が最小値を取るひび割れ幅 W が最適な補修ひび割れ幅 W_{opt} となる。費用とひび割れ幅との関係を図-3 に示す。図-3 では一般的な構造物を想定しており、ひび割れ幅 $W=0.41\text{mm}$ で総期待損失費用が最小となった。

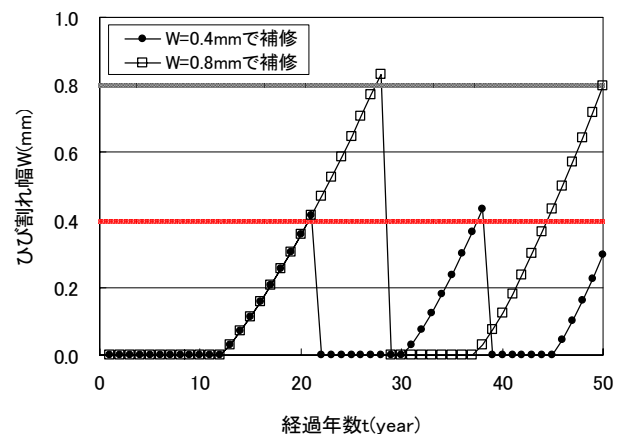


図-2 ひび割れ幅と経過年数

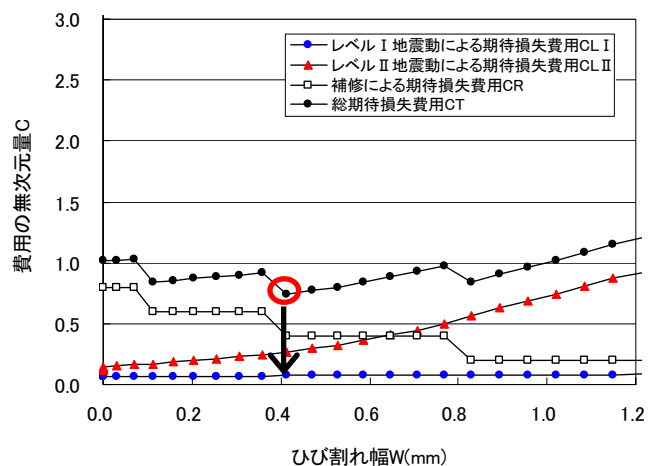


図-3 費用とひび割れ幅 ($\alpha=0.2, \beta=20.0, \gamma=0.2$)