

香川大学大学院 学生会員 ○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

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クローズアップされている。本研究は、耐久性上問題のある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。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する。実構造物を考え、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。地震時の構造物の耐荷モデルは、大地震を対象に弾塑性を考慮した大変形問題と考える。これらの複合モデルを信頼性理論により破壊確率と経年評価の関係を求め、最適補修時期を決める手法を提案する。

2. 塩害劣化モデル

(1) 腐食減量のモデル¹⁾

鉄筋の腐食減量の進行モデルは図-1のように表される。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。潜伏期では鉄筋は腐食しない。鉄筋が腐食を始めると進展期になる。鉄筋の腐食が進むとかぶりコンクリートにひび割れが発生して加速期になる。加速期では進展期から加速的に腐食が進み、構造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(1)を用いる。

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

ここで、 $C_c(X_t, t)$ はコンクリート表面から X_t の位置における経過時間 t での塩化物イオン濃度である。 C_0 はコンクリート表面の初期塩化物イオン濃度、 D_c は拡散係数であり、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。 C_c が限界塩化物イオン濃度 C_{limit} を越えた時期が鉄筋の腐食開始年 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、コンクリート部とに分けて考えると図-2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。

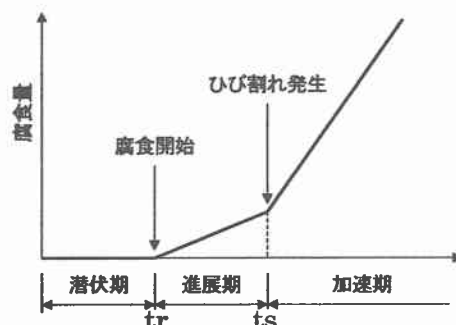


図-1 塩害を受ける構造物の劣化モデル

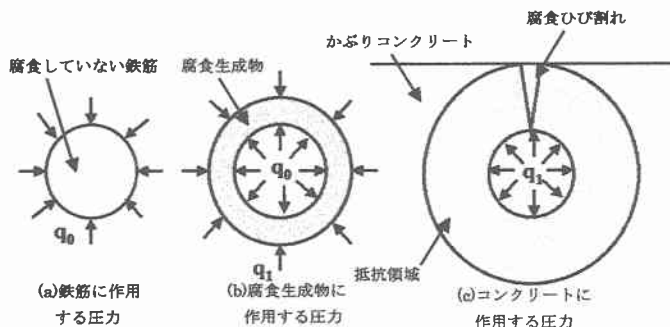


図-2 ひび割れの発生モデル¹⁾

(2) 部材のじん性低下モデル

鉄筋の腐食により、鉄筋に沿った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。じん性率の低下は式(2)のような指数関数モデルで仮定した。

$$\tilde{\mu}(t) = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_r)} \quad \text{when } t_r \leq t \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{\mu}(t)$ は経過年数 t 年でのじん性率、 μ_0 は初期じん性率、 λ は低下係数、 t_r は鉄筋の腐食開始時間である。 λ は鉄筋腐食のばらつきを考慮して平均値 0.02、変動係数 0.5 の対数正規分布を仮定した。

エネルギー一定則を用いることで地震時の等価な静的耐力が式(3)で求められる。

$$P_s = P_y \sqrt{2\mu - 1} \quad (3)$$

ここで、 P_s は地震時の等価な静的耐力、 P_y は降伏耐力、 μ はじん性率である。

3. 性能関数

信頼性理論に基づいて、破壊確率を求めた。モンテカルロ法を用いて、試行回数は10000回とした。構造物の安全性は、式(4)に示す性能関数で表される。

$$Z = P_s - P_w \quad (4)$$

ここで、 P_s は地震時の等価な静的耐力、 P_w は地震による外力であり、式(5)で表される。この性能関数 Z が 0 を下回ると破壊となる。

$$P_w = G_{\max} \times \frac{W}{g} \quad (5)$$

ここで、 G_{\max} は地震により入力される最大応答加速度の特性値(gal)、 W は構造物の重量、 g は重力加速度である。本研究では、入力される地震は、構造物の耐用期間中に生じる可能性が低い大型地震を考え、 G_{\max} を600galと設定した。構造物の耐久性に関するパラメータは、表-1²⁾のように確率変量として取り扱った。

表-1 確率変量としたパラメータ²⁾

期間	因子	平均値	標準偏差	分布形状
潜伏期	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 $C_{\max}(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.1	0.058	R
	かぶりの誤差 $X_s(\text{cm})$	0.35	0.52	L
進展期	腐食速度 $ds1(\%/year)$	0.05	0.025	L
	コンクリートの引張り強度 $f_c(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	30.0	3.0	L
加速期	腐食速度 $ds2(\%/year)$	0.35	0.175	L
	じん性の低下に関する係数 λ	0.02	0.01	L

注：L：対数正規分布，R：一様分布

4. 期待費用最少のモデル

経過時間 t 年までに得られる構造物の便益 C_{By} から期待損失費用 C_{Ly} を除いた値が、総期待便益 C_T となる。 C_T が最大となる t 年で補修すれば、総期待便益が最大となる。

構造物の t 年での便益を C_{By} 、破壊時の損失費用を C_{Ly} 、建設費を C_c とすると式(6)のように表される。

$$C_{By}(t) = \frac{1}{a} \times C_c \times C(t), \quad C_{Ly} = b \times C_c \quad (6)$$

ここで、 a は構造物の償還年数、 b は被害係数で、構造物が地震により崩壊した時に受ける損失費用で、構造物の重要度、社会的な損失費用なども含まれる。 $C(t)$ は建設時の費用に割りもどすための係数で、式(7)で表される。

$$C(t) = \frac{(1+j)^t}{(1+k)^t} \quad (7)$$

ここで、 j は物価上昇率で0.03、 k は金利で0.05と設定した。構造物の t 年までの便益を C_B 、 t 年での破壊時の期待損失費用を C_L とすると式(8)のように表される。

$$C_B = \sum_{t=1}^n C_{By}(t), \quad C_L = P_f(t) \times C_{Ly} \quad (8)$$

したがって、総期待便益を C_T とすると、 C_T は式(9)で表される。

$$C_T = C_B - C_L = \sum_{t=1}^n \left(\frac{1}{a} \times C_c \times \frac{(1+j)^t}{(1+k)^t} \right) - P_f(t) \times b \times C_c \quad (9)$$

最適補修時期を求めた計算結果を図-4に示す。構造物の便益は、建設時の現存価値に割りもどしているために、構造物の便益 C_B は、20年を経過するとあまり上昇しなくなる。構造物の破壊時の期待損失費用 C_L は、20年を超えた時点から破壊確率が指数的に増加するため、それに対応して増大する。総期待便益 C_T は、期待費用が最大値となる経過年数 t が最適補修時期 t_{opt} となり、建設後18年が得られる。

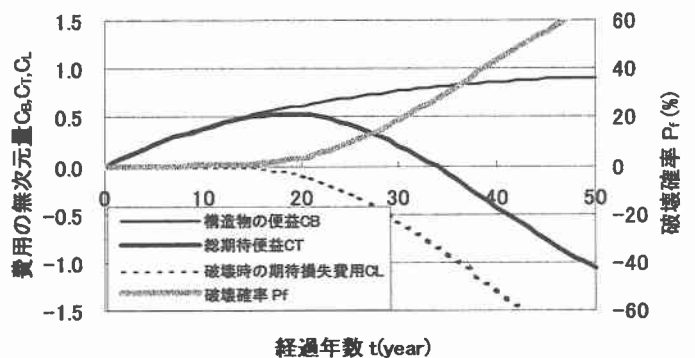


図-3 経過年数と総期待便益

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年5月.
- 2) 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.514/V-32, pp.55~64, 1996年8月.