

塩害と中性化の影響を考慮した RC 橋脚の耐久信頼性設計の試み

東北大学 学生会員 ○崔 日洙
 東北大学 正会員 秋山 充良
 東北大学 フェロー 鈴木 基行

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下,RC)構造物は耐久性にすぐれており,メンテナンスフリーと考えられてきたが,1990年代から劣化問題が生じはじめ,コンクリート構造物の耐久性が注目されるようになった.一方,土木学会「コンクリート標準示方書」は,性能照査型設計法へ全面的に移行するための準備が進められ,耐久性照査も仕様規定型から性能規定型への改編が急務の課題となっている.

しかし,RC 構造物の劣化現象は非常に複雑な物理・化学現象であり,その解析や評価に伴う不確定性は非常に大きい.さらに,従来の耐久性に関する研究は劣化要因別に行われており,それらすべての要因を考慮した包括的な耐久設計の手法は確立されていない.

そこで,本研究は「耐久信頼性」をキーワードとして,信頼性理論に基づき,劣化要因に関わるパラメータの不確定性を確率的に考慮すると同時に,コスト最小化を図る耐久信頼性設計フローを提示する.そして,提示するフローに従った RC 橋脚の耐久信頼性設計を実施し,その適用性を検討する.

2. 耐久信頼性設計フローの提案

提案する耐久信頼性設計フローでは,設計対象構造物の目標性能の設定を第一に行う.目標性能とは,対象構造物の環境条件から特定される劣化作用に対し,ある限界状態に到達する設計耐用期間内の危険度(破壊確率)を所定の許容レベル(目標破壊確率)以下に抑えることである.ここで言うある限界状態とは,耐荷力,使用性,あるいは美観などの観点から定められるもので,例えば鉄筋の腐食の影響を考慮した曲げ・せん断耐力,ひび割れ幅,中性化深さなどを用いて定義される.

このようにして定められた目標性能を実現する RC 構造物の耐久信頼性設計の基本手順を以下で説明する.
 (手順1) RC 構造物の耐久信頼性評価で対象とする劣化作用を特定する.

設計対象構造物の所在地近傍で測定される二酸化炭素の濃度,塩化物イオンの濃度,化学物質の種類・濃度などから各劣化作用のレベル(強さ)を判断し,耐久信頼性評価で対象とする劣化作用を特定する.

(手順2) 目標性能の設定を行う.

設計対象構造物の目標耐用年数や重要度などから目標性能を設定する.

(手順3) 限界状態式を定義する.

特定した劣化作用や設計対象構造物の目標性能から限界状態式 $g_i(X_1, X_2, \dots, X_m)$ ($i=1, 2, \dots, n$) を定義する.ここで,限界状態は,各劣化作用による限界状態と複合劣化による限界状態を対象とする.また, n は考慮する限界状態の総数であり, $X_1, X_2, \dots, X_m$ は対象とする限界状態に関わるパラメータ(総数 m)である.

(手順4) 耐久信頼性解析を行う.

限界状態式 g_i から破壊確率 P_{fi} (P_{fi} は $g_i < 0$ となる確率)を算定する手法には種々のものが考えられるが,ここではガウス1次近似法¹⁾により, P_{fi} の算定を行う.さらに,著者らが提案した構造系信頼性評価法²⁾を用いることにより,全ての限界状態式 g_i ($i=1, 2, \dots, n$)を同時に考慮して算定されるシステムとしての破壊確率 $P_{f,sys}$ を求める.ここで, $P_{f,sys}$ は,限界状態式のうち何れか一つの g_i が $g_i < 0$ となる確率である.

(手順5) 遺伝的アルゴリズム(GA)³⁾を用いて,トータルコストの最小化を図る.なお,計画耐用期間におけるトータルコストは,初期建設コストの他に補修方法や補修回数を考慮し算定する.

Key Words: 耐久信頼性設計, 塩害, 中性化, 遺伝的アルゴリズム, RC 橋脚, システム信頼性

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06 Tel: 022-217-7449 Fax: 022-217-7448

3. RC 橋脚の耐久信頼性設計例

3.1 解析対象 RC 橋脚

平成8年制定の道路橋示方書の基準を満足するように耐震設計された単柱式 RC 橋脚²⁾を解析対象とし、提案フローを用いた耐久信頼性設計を試みる。解析対象 RC 橋脚の諸元は表-1 に示す。耐久信頼性解析で対象とする劣化作用は、中性化と塩害劣化作用である。また、この劣化作用に対する限界状態は、コンクリート内部の鉄筋の腐食開始点とした。中性化と塩害に関わる各パラメータに仮定した平均値、標準偏差および確率分布形の一覧を表-2 に示す。

3.2 解析結果

図-1 には目標安全性指標とトータルコスト(初期費用+補修費用+破壊費用)の関係を示した。ここで、表面塩化物濃度は 5kg/m^3 、目標耐用年数は 100 年を想定した。目標安全性指標の増加とともに初期投資と補修費用は大きくなるが、破壊に伴う費用は小さくなる。トータルコストは、目標安全性指標 1.0 から 3.0 の間では、目標安全性指標の増加とともに小さくなるが、目標安全性指標が 3.0 を超えると逆に大きくなる傾向が確認された。目標安全性指標の設定法には、種々のものが提案されているが、経済性最適化の観点から定める場合、本研究の範囲内では目標安全性指標 3.0 が最適と判断される。

次に、表-1 の RC 橋脚が保有する耐震信頼性($\beta=1.41$)と同等の安全性を保有するように耐久信頼性設計を行い、かぶりコンクリート厚さを決定する。表面塩化物濃度は、それぞれ 5, 10, 15, 20kg/m^3 を想定し、目標耐用年数は 100 年を仮定した。目標安全性指標($\beta_t=1.41$)に対して、各表面塩化物濃度から得られるコスト、かぶり厚さおよび補修回数を図-2 に示す。ここで、図中のトータルコスト曲線につけた数字はかぶりコンクリート厚さ(cm) を、括弧内の数字は補修回数を表す。表面塩化物濃度が 5kg/m^3 のとき、補修を 1 回も行わない条件がトータルコストの最小化をもたらす結果となった。しかし、この塩化物濃度でも、かぶりコンクリート厚さを耐震設計の要件から決定される 12.5cm よりも大きくしなければならない。

4. まとめ

著者らが提案した構造系信頼性評価法と遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる最適化手法を統合させることにより、RC 構造物の耐久信頼性設計フローの一例を提示した。

本フローは、RC 構造物の性能照査型の耐久設計を実現し、目標耐用期間内に確保する耐久および耐震安全性レベルを等しくするなどの設計を可能にする。

参考文献：1)星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版社，1986．2)秋山充良，土井充，松中亮治，鈴木基行：構造系の信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算，土木学会論文集，Vo. 718/V-57, pp. 1-17, 2002．3)北野弘明：遺伝的アルゴリズム 2，産業図書株式会社，1995．

表-1 解析対象 RC 橋脚²⁾

	橋軸方向	橋軸直角方向
断面寸法(cm)	300	300
躯体高さ(cm)	900	
かぶり(cm)	12.5	
耐震信頼性指標	1.41	

表-2 確率変数の分布形及びパラメータ

変数	平均値(標準偏差)	確率分布
中性化環境係数	1.0 ~ 2.0 (0.0)	—
仕上げ材係数	1.0 (0.0)	—
締固め条件	1.0 ~ 2.0 (0.0)	—
水セメント比	40% ~ 65% (0.0)	—
かぶり厚さ	設計値(0.5 ~ 1.5cm)	正規分布
鉄筋腐食限界濃度	1.0 ~ 3.0 (0.2 ~ 0.6 kg/m^3)	正規分布
表面塩化物濃度	2.0 ~ 20.0 (0.4 ~ 4.0 kg/m^3)	正規分布

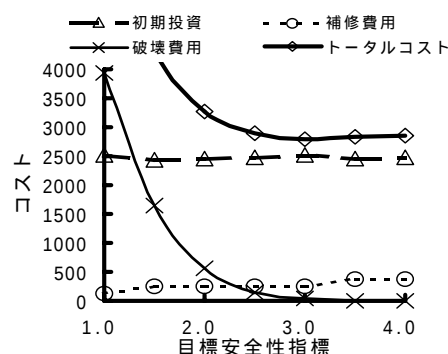


図-1 目標安全性指標とコストの関係

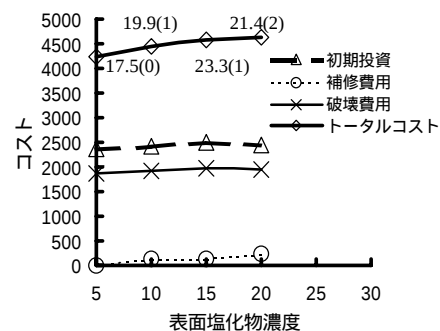


図-2 表面塩化物濃度とコストの関係