

鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計法に関する基礎的研究

DURABILITY DESIGN METHODOLOGY OF
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON RELIABILITY THEORY

崔日洙*・秋山充良**・鈴木基行***

Rizhu CUI, Mitsuyoshi AKIYAMA and Motoyuki SUZUKI

*工修 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06）

**博（工） 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06）

***工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06）

In this paper, a durability design methodology of reinforced concrete structures based on reliability theory is presented. This design method makes it possible to assure the prescribed safety level and minimize the life cycle cost of reinforced concrete structures. This method is applied to durability design of reinforced concrete piers designed according to the current Japanese specifications for highway. The valuable information from this analysis was obtained to establish the performance-based durability design of reinforced concrete structures.

Key Words: durability design methodology, system reliability theory, Genetic Algorithm, RC structure

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来たが、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べく準備が進められ、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、鉄筋コンクリート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・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性設計手法は確立されてない。

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鉄筋コンクリート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決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フローを図-1 に示し、その概要を以下で説明する。

（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。

目標耐用年数や重要度などから設計対象構造物の目標性能を設定する。

（手順 3） 限界状態式を定義する。

設計劣化作用および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、限界状態としては、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 $P_{f,i}$ ($P_{f,i}$ 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、 $P_{f,i}$ の算定を行う。さらに、

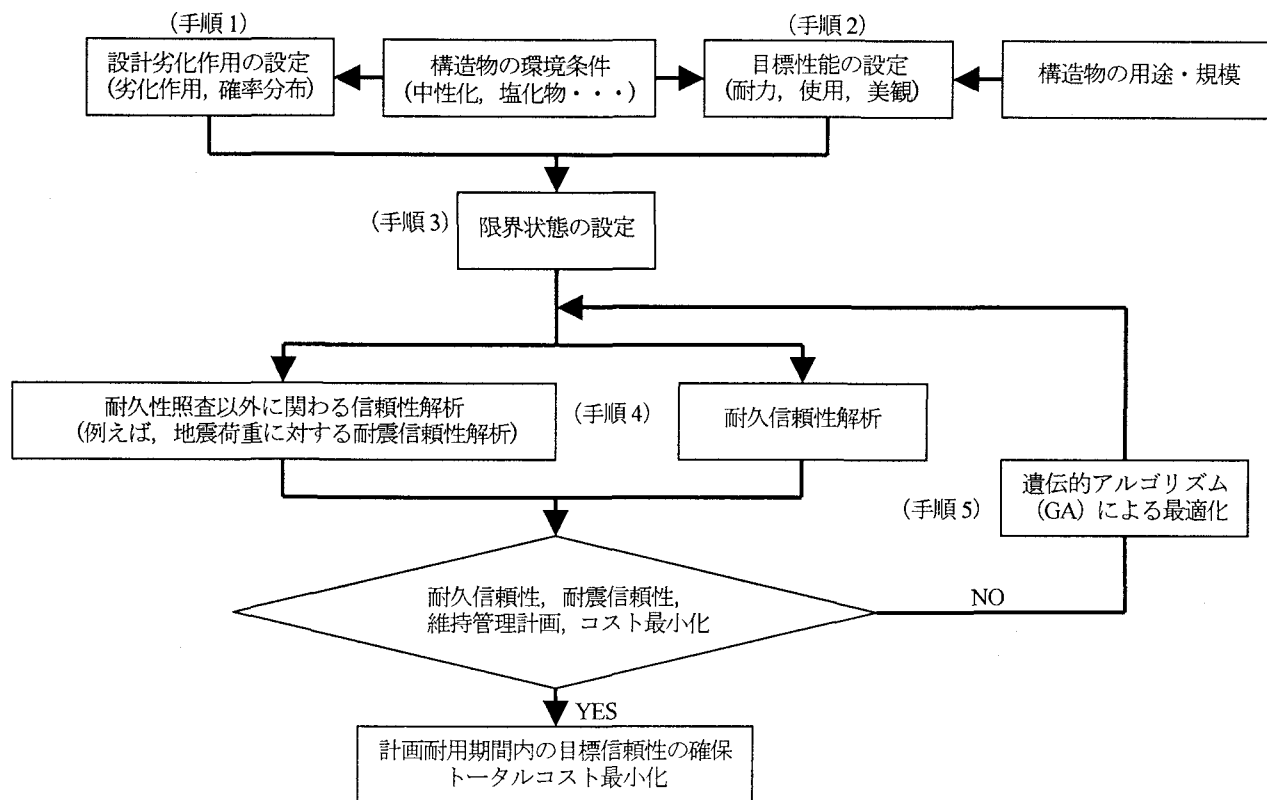


図-1 提案する耐久信頼性設計基本フロー

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。

(手順5) 遺伝的アルゴリズム(GA)^{3),4)}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。

(手順1)～(手順5)の中では、耐久信頼性解析および耐久性照査以外に関わる信頼性解析(例えば、地震荷重に対する耐震信頼性解析)により設計対象構造物の構造信頼性が評価され、この他に、最適な維持管理計画(補修回数・方法)の策定やトータルコストの最小化が図られる。

3. RC橋脚を対象とした耐久信頼性設計の一例

3.1 解析対象 RC橋脚

解析対象としたのは、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橋脚である。橋脚の構造諸元を表-1に示す。著者らは、このRC橋脚を対象としたレベル2地震動作用時の耐震信頼性評価を行っている⁵⁾。この信頼性解析では、橋軸および橋軸直角方向に対し、せん断破壊、変形性能、および残留変位に対する照査を行い、6つある限界状態式のう

ち何れの一つが負になる確率(破壊確率)を求めている。求められた破壊確率を安全性指標に変換したところ、1.41となった。以降では、このRC橋脚を対象に、提示した図-1のフローを用いた耐久信頼性設計を試みる。

3.2 解析条件

(1) 設計条件

構造物の目標耐用年数は、それぞれ65年、100年、130年とする。耐久信頼性解析で対象とする劣化作用には、中性化と塩害劣化作用を選択した。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を表-2に示す。

(2) 限界状態式の設定

限界状態式を設定する。ここで、複合劣化の限界状態も考慮すべきであるが、これまでの研究ではまだ複合劣化のメカニズムが解明されていないため、本解析では中性化と塩害による劣化を個別に考慮し、複合劣化は対象としない。中性化と塩害に対する限界状態式を式(1)～(6)で定義する^{6),7)}。

$$g_1 = t \text{cov} - X \quad (1)$$

$$g_2 = C_{Lim} - C(t \text{cov}, t) \quad (2)$$

$$X = \alpha \gamma \sqrt{t} \quad (3)$$

表-1 解析対象 RC 橋脚⁵⁾

	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	
軸方向鉄筋比	0.81% (D32)	
横拘束筋体積比	0.80% (D19)	
耐震信頼性指標	1.41	

$$\gamma = \frac{(w-0.25)}{\sqrt{0.3(1.15+3w)}} \quad (w \geq 0.6) \quad (4)$$

$$\gamma = 0.37(4.6w-1.76) \quad (w \leq 0.6)$$

$$C(x,t) = C_0(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (5)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (6)$$

ここで、 t_{cov} はかぶりコンクリート厚さ、 X は予測される中性化深さで、式(3)の和泉式⁶⁾により算出される。 α は中性化環境係数、 κ は仕上げ材の影響を表す係数、 γ は水セメント比によるコンクリート品質係数、 w は水セメント比を表す。 C_{Lm} はコンクリート内部鉄筋腐食限界濃度であり、 $C(t_{cov},t)$ は鉄筋周囲の塩化物イオンの濃度で、式(5)の塩化物浸透予測式⁷⁾により算出される。 D と C_0 はそれぞれ塩化物イオンの浸透係数および表面塩化物濃度を表し、 erf は誤差関数を表す。

(3) 目的関数の設定

構造物の計画耐用期間内におけるトータルコストは構造物の建設初期投資、点検補修費用、および破壊費用の和で表す。ここで、補修費用と破壊費用は、補修による実費用と構造物の破壊により発生する諸費用をそれぞれ考慮すべきである。しかしながら、これら費用に関するデータ不足のため、本解析ではそれぞれ補修費用および破壊費用に関わる係数を初期投資に掛けることにより補修費用と破壊費用を算出することにした⁸⁾。式で表すと以下のようになる。

$$C_T = C_I + n_{rep}\gamma_{rep}C_I + \gamma_{fai}P_{f,sys}C_I \quad (7)$$

ここで、 C_I は建設初期投資、 n_{rep} は計画耐用年数における補修回数、 $P_{f,sys}$ は計画耐用期間内の構造物の破壊確率、 γ_{rep} 、 γ_{fai} は補修費用と破壊費用に関わる係数で、本研究ではそれぞれ 0.03 と 10.0 と仮定した。

式(7)によるトータルコストの最小化を図る際には、信頼性解析結果より算出される破壊確率と目標破壊確率の比較を制約条件に加える。このとき、表-1の RC 橋脚の耐久信頼性設計は、式(8)で定式化される。なお、本解析での最適化変数は、かぶりコンクリート厚さと補修時間間隔（計画耐用期間内の補修回数）とする。

$$\text{Minimize } C_T \quad (8)$$

$$\text{subject to } P_f \leq P_{\beta_i} \quad (9)$$

$$P_{\beta_i} = \phi(-\beta_i) \quad (10)$$

表-2 各確率変数の分布形およびパラメータ^{6),7)}

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)	—
中性化深さ	式(3)の計算値 (0.3X~0.5X)	正規分布
かぶり厚さ	設計値(0.5~1.5cm)	正規分布
鉄筋腐食の 限界濃度値	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

ここで、 β_i は目標安全性指標である。

3.3 解析結果

中性化と塩害に関わるパラメータが RC 橋脚の耐久信頼性（破壊確率 $P_{f,sys}$ ）に与える影響を感度解析により評価した。中性化環境係数およびコンクリート表面塩化物濃度と安全性指標の関係を図-2 に示す。ここで、塩化物濃度が存在しない場合には中性化環境係数の増加とともに構造物の安全性が明らかに低くなるが、表面塩化物濃度が 4.0kg/m³ になると構造物の安全性が塩害劣化に完全に支配されることが確認される。ここで、表面塩化物濃度 4.0kg/m³ は、飛沫帯で暴露 17 年間の橋脚表面の塩化物濃度に相当する⁹⁾。

図-3 には目標安全性指標とトータルコストの関係を示した。ここで、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、安全性指標が 1.0 から 3.0 の間では、安全性指標の増加とともに小さくなるが、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。目標安全性の設定法には、種々のものが提案されているが¹⁾、経済性最適化の観点から定める場合、本研究の範囲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、5, 10, 15, 20kg/m³ を想定し、計画耐用期間は 100 年を仮定した。 $\beta_i=1.41$ とした式(10)に対し、各表面塩化物濃度から得られるかぶりコンクリート厚さを表-3 に、コスト C_T を図-4 にそれぞれ示す。表面塩化物濃度が 5kg/m³ 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ことなどが表-3 より確認される。しかし、この表面塩化物濃度でも、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た 12.5cm よりも大きくしなければならない。

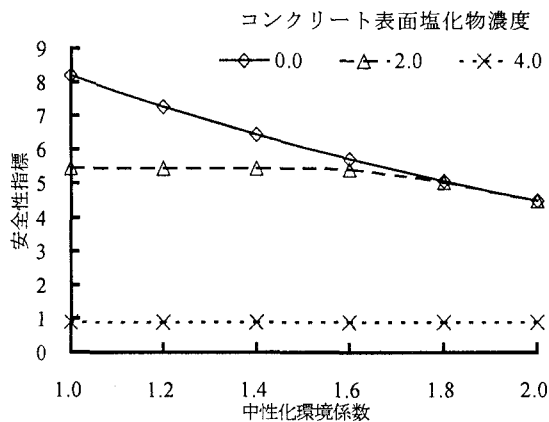


図-2 中性化環境係数と安全性指標の関係

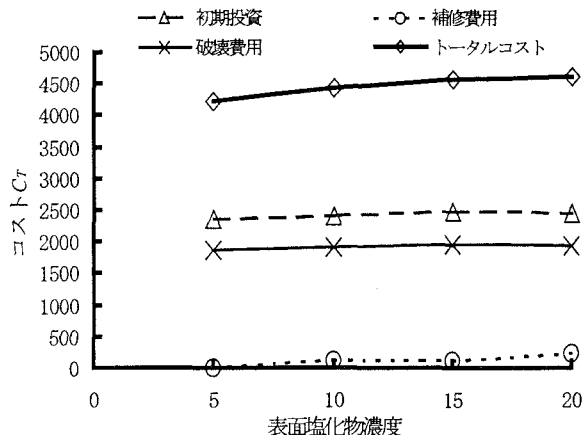


図-4 表面塩化物濃度とコストの関係

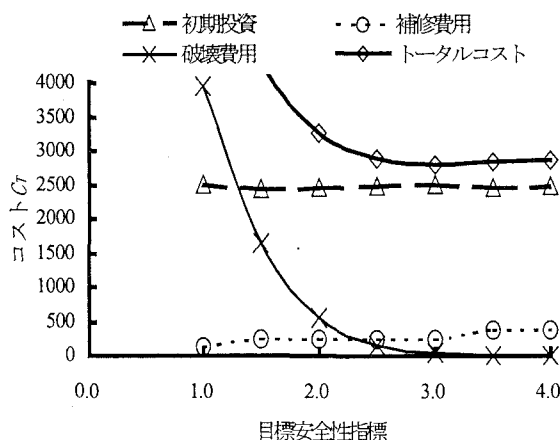


図-3 目標安全性指標とコストの関係

以上に提示した解析結果は、今回用いた種々の仮定の基に得られたものであり、今後詳細な検討を必要とする箇所が多々ある。しかしながら、提示した耐久信頼性設計によれば、安全性レベルを安全性指標（破壊確率）により定量化するため、耐久性照査以外の限界状態に対して確保されている安全性レベルとの比較が容易であり、従来慣用的に決められてきた構造細目などの見直し、設計時における維持管理計画の考慮、などが可能となる。

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、鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計フローを提示した。提示したフローは、従来の仕様規定型の耐久性照査からの脱却を可能にするものであり、性能照査型の耐久設計が実現される。

今後は、関係するパラメータの確率分布形などの情報、コスト算出方法、補修により得られる効果の定量化、複合劣化の考慮等に関し、さらなる研究が必要である。

表-3 耐久信頼性設計結果

表面塩化物濃度 (kg/m ³)	耐震設計かぶり 厚さ (cm)	耐久設計かぶり 厚さ (cm)
5.0	12.5	17.5 (0)
10.0	12.5	19.9 (1)
15.0	12.5	23.3 (1)
20.0	12.5	21.4 (2)

注) 表中の () 内の数字は補修回数を表す。

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) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の信頼性評価法およびRC橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No. 578/V-37, pp. 71-87, 1997.
- 3) 古田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版社, 1997.
- 4) 北野弘明: 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書株式会社, 1995.
- 5) 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 No. 718/V-57, pp. 1-17, 2002.
- 6) 中山隆弘, 松原多孝: 信頼性設計法によるRC構造物のかぶり厚さの算定, 構造工学論文集, Vol. 38. A, pp. 509-516, 1992.
- 7) 土木学会: コンクリートライブラリー109「コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案」, 2002.
- 8) 横田弘: 港湾構造物のリハビリテーション, コンクリート工学, Vol. 36, No. 7, pp. 19-20, 1998. 7.
- 9) 丸屋剛, 宇治公隆: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告書, Vol. 11, No. 1, 1989.