

## 環境要因により劣化した既設 RC 柄の終局耐力に関する研究

九州大学大学院 学生会員 加島 敏博  
フェロー会員 彦坂 熙

正会員 園田 佳臣  
学生会員 結城 洋一

## 1. 目的

既設構造物に対して合理的な維持、補修計画を立て、ライフサイクルコストにおけるトータルコストを最小限に抑えるためには、構造物の劣化に伴う耐荷力の経年変化を正確に把握することが不可欠である。本研究では、そのための基礎的な考察として、塩害による鉄筋腐食の影響を受けた既設 RC 柄の経年的終局耐力を、連続体損傷力学を用いて評価する方法について考察を行った。

## 2. 解析手法の概要

## 2.1 損傷力学の導入

本研究では、構造物の耐荷力低下を招く損傷要因として、塩害による鉄筋腐食の損傷度  $D_{chem}$  と荷重履歴による損傷度  $D_{mech}$  の 2 種類を考慮し、式(1)に示すように両者が独立して部材の剛性低下を招くと仮定した。この仮定は RC 部材に力学的な損傷により強度劣化した領域が別々に存在し、その影響を個々に求めて重ね合わせることができると仮定するものである。

$$\sigma_{ij} = (1 - D_{chem})(1 - D_{mech})E_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (1)$$

$E_{ijkl}$  : 初期弾性係数、 $\sigma_{ij}$  : 応力テンソル、 $\varepsilon_{kl}$  : ひずみテンソル

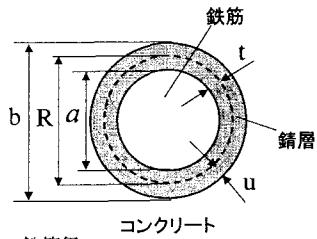
一般に、塩害を受けた RC 部材の耐荷性能の低下は、鉄筋の腐食によって生じると考えられている。鉄筋の腐食度を評価するためには、その原因となる塩化物イオンの構造部材中への拡散・浸透状況について予め解析し、腐食の発生と進展状況を明らかにする必要がある。そこで、腐食の進展状況を以下の手順で評価した。まず、塩化物イオンのコンクリート内部への浸透度を式(2)に示す 2 次元拡散方程式を用いて算出し、次に鉄筋位置における塩化物イオン濃度をもとに式(3)を用いて鉄筋断面減少率  $\omega$  を求め、これを腐食による鉄筋の化学的損傷度  $D_{chem}$  ( $= \omega / 100$ ) と定義した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\omega = 0.02(0.33C_s + 3.7) \quad (3)$$

ここに、 $K$  : 塩化物イオンの拡散係数、 $C$  : 塩化物イオン濃度、 $C_s$  : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の積算

さらに、鉄筋腐食に伴う膨張圧が周辺コンクリートのひび割れを促進することが予想されるため、鉄筋の腐食膨張圧も荷重の一部とみなした。一方、力学的損傷については、部材内部の相当ひずみを圧縮強度と引張強度の影響の相違を考慮した式(4)を用いて評価し、式(5)を満足するときに損傷の発生もしくは進展が生じるものとし、式(6)により力学的損傷度を求めた。



R: 腐食前の鉄筋径  
t: 腐食によって失われた鉄筋の厚さ  
 $\alpha$ : 腐食生成物の体積膨張率 (周囲に拘束在り)  
u: 膨張変位量

$$a = \frac{R}{2} - t: \text{腐食後の鉄筋径}$$

$$b = \frac{R}{2} + t(\alpha - 1): a + \text{錆層}$$

図-1 鉄筋腐食モデル

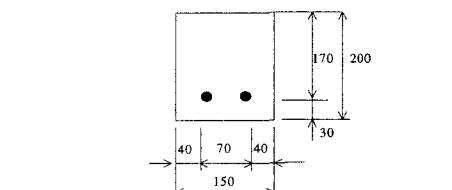
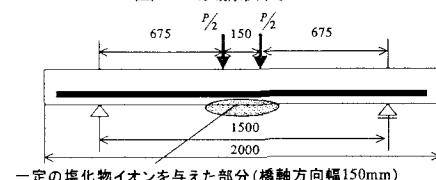
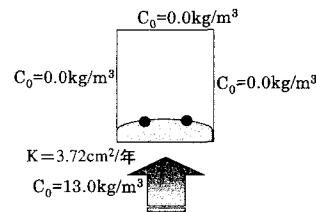


図-2 塩害を考慮した RC はりモデル (mm)



$C_0 = 0.0 \text{ kg/m}^3$   
 $C_0 = 0.0 \text{ kg/m}^3$   
 $C_0 = 0.0 \text{ kg/m}^3$

$$K = 3.72 \text{ cm}^2/\text{年}$$

$$C_0: \text{初期塩化物イオン濃度 } (\text{kg/m}^3)$$

$$K: \text{拡散係数 } (\text{cm}^2/\text{年})$$

図-3 柄中央部拡散解析イメージ

表-1 解析に用いた損傷進展パラメータ

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{6k}{(1+\nu)^2} 2J_2} \quad (4)$$

$$f(\varepsilon_{eq}, k) = \varepsilon_{eq} - k_i = 0 \quad (5)$$

$$D_{mech} = I - \frac{\kappa_0}{\kappa} [(1-\alpha) + \alpha e^{-\beta(\kappa-\kappa_0)}] \quad (6)$$

ここに、 $I_1$ ：ひずみの1次不変量、 $J_2$ ：偏差ひずみ2次不変量、 $k$ ：圧縮強度と引張強度の比、 $\alpha, \beta, \kappa_i$ ：損傷進展条件パラメータ（無損傷時 $\kappa_0$ ：損傷発生時の相当ひずみ、損傷進展時 $\kappa_i$ ：過去の最大相当ひずみ）

## 2.2 鉄筋腐食の影響のモデル化

図-1に示す鉄筋腐食生成物の膨張モデルを用い、鉄筋表面が一様に腐食するものと仮定し、鉄筋の断面減少率 $\omega$ と体積膨張率 $\alpha$ より膨張変位量 $u$ を式(7)によって求めた。

$$u = \frac{1}{2} R \left( \sqrt[3]{\alpha} - 1 \right) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\omega}{100}} \right) \quad (7)$$

なお、鉄筋径の増加量を周囲のコンクリートに強制変位として与えたときに作用する膨張圧を予め算出し、部材に作用する荷重の一部とみなすことで、その影響を考慮した。

## 3. 解析モデル

解析対象とするのは、図-2に示すような単鉄筋RCばかりの実験供試体である。表-1に損傷進展式に用いたパラメータを、表-2には材料試験結果から得られた材料定数を示す。図-2、図-3に示すように、この供試体下面中央部に一定の塩化物イオン濃度を与え、桁中央部の断面において二次元拡散解析を行い塩化物イオンが桁中央部の部材の損傷に及ぼす影響を検討した。また力学的損傷解析においては拡散解析により算出された膨張圧を荷重として桁中央部鉄筋要素下面に与え、その後図-2に示すように桁中央部2箇所に対し一定の増分荷重を与えた。

## 4. 解析結果および考察

鉄筋の体積膨張率 $\alpha$ をパラメータとして塩害による鉄筋腐食の影響を考慮した場合の荷重-変位関係を図-4、図-5に、また経年変化に伴う終局耐力の変化を図-6に示す。

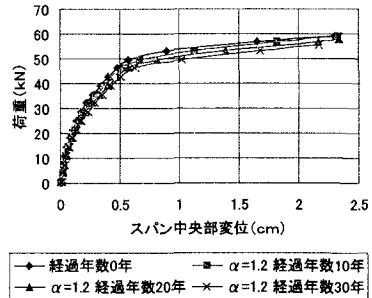
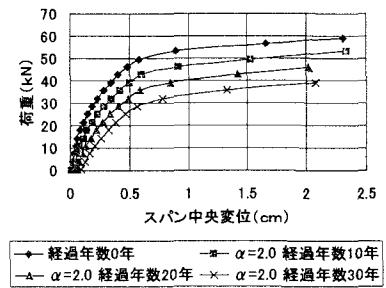
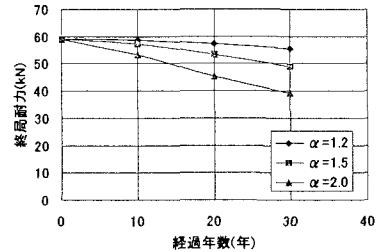
$\alpha=1.2$ とした場合においては10年経過時で約5.9%、30年経過時で約6.5%の終局耐力の低下が予測されたのに対し、 $\alpha=2.0$ とした場合においては10年経過時で約10.1%、30年経過時で約33.9%もの大幅な終局耐力の低下が予測された。コンクリート中の鉄筋の体積膨張率は明確ではないが、現実の終局耐力の値は本解析で設定した条件 $\alpha=2.0$ （大気中に置かれた無拘束の状態に対応し、体積膨張率の上限に近いと考えられる）とした場合ほどに低下するとは考えられないが、慎重に検討する必要があると考えられる。

以上の結果より、本手法を用いて塩害による鉄筋腐食がRC桁の終局耐力低下に及ぼす影響を評価できることが認められた。

	コンクリート		鉄筋
	引張	圧縮	引張・圧縮同じ
$\alpha$	0.96	0.96	0.96
$\beta$	20000	100	3000
$\kappa_0$	$8.4 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-5}$

表-2 解析に用いた材料定数

	コンクリート	鉄筋
ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	26.5	205.8
ボアソン比	0.18	0.29
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	35.6	-
降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	-	541.9
圧縮・引張強度比	11.1	1

図-4 荷重-変位関係( $\alpha=1.2$ )図-5 荷重-変位関係( $\alpha=2.0$ )図-6  $\alpha$ が終局耐力に与える影響