

塩害の影響を受けた既設 RC 桁の終局耐力評価法に関する一考察

九州大学大学院

学生会員 ○池島 傑 正会員 園田 佳巨

フェロー会員 彦坂 熙 正会員 森谷 晋 学生会員 加島 敏博

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の低減を図る為には、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事が不可欠である。そこで本研究では、そ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 桁の終局耐力の経年変化について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

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、荷重履歴による力学的損傷度 D_{mech} と塩害による化学的損傷度 D_{chem} の2種類を考慮し、式(1)に示すように両者が独立し、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事ができると仮定するものである。

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

E_{ijkl} : 初期弾性係数, σ_{ij} : 応力テンソル, ε_{kl} : ひずみテンソル

2.2 荷重履歴に伴う損傷度評価

材料の力学的損傷については、部材内部の相当ひずみを式(2)を用いて評価し、式(3)を満足するときに損傷が発生もしくは進展するものと仮定し、式(4)により力学的損傷度 D_{mech} を求めた。

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

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa_i = 0 \quad \dots (3)$$

$$D_{mech} = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left[(1-\alpha) + \alpha e^{-\beta(\kappa-\kappa_0)} \right] \quad \dots (4)$$

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・引張強度比, α, β, κ_i : 損傷進展条件パラメータ

無損傷時 κ_0 : 損傷発生時の相当ひずみ

損傷進展時 κ_i : 過去の最大相当ひずみ

2.3 環境要因(塩害)に伴う損傷度評価

塩害に伴う損傷については、塩化物イオンのコンクリート内部への浸透度を把握する為に、式(5)の三次元拡散方程式を用いて各鉄筋位置における塩化物イオン濃度を算出し、式(6)により鉄筋断面減少率を求め、腐食がもたらす鉄筋の化学的損傷度 D_{chem} ($=\omega/100$) を求めた。

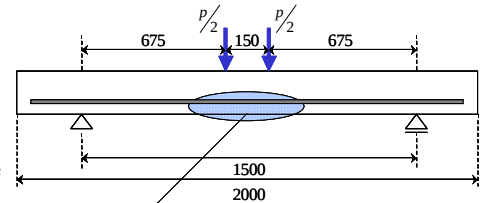


図-1 塩害を考慮した RC はりモデル(mm)

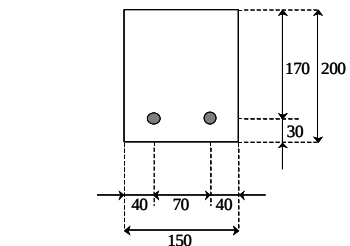


図-2 桁中央部拡散解析イメージ

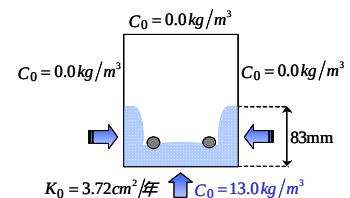


図-3 要素分割図

節点数	2349
要素数	1792

表-1 拡散解析に用いた定数及び解析条件

水セメント比	45%
初期拡散係数 K_0	3.72 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
周辺環境	飛沫帯
初期含有塩化物イオン濃度	0.0 (kg/m^3)
境界面塩化物イオン濃度	13.0 (kg/m^3)
計算サイクル年数 Δt	5年

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^2)	26.5	205.8
ポアソン比	0.18	0.29
圧縮強度 (N/mm^2)	35.6	-
降伏強度 (N/mm^2)	-	541.9
圧縮・引張強度比	11.0	1.0

表-3 解析に用いた損傷進展パラメータ

	コンクリート		鉄筋
	引張	圧縮	引張・圧縮
α	0.96	0.96	0.96
β	10000	4500	4500
K_0	6.6×10^{-5}	4.7×10^{-5}	1.35×10^{-5}

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad \dots (5)$$

$$\omega = 0.02(0.33C_s + 3.7) \quad \dots (6)$$

$$\left[\begin{array}{l} K: \text{塩化物イオンの拡散係数, } C: \text{塩化物イオン濃度} \\ C_s: \text{鉄筋位置における塩化物イオン濃度の積算} \end{array} \right]$$

その後、図-4 に示す鉄筋腐食モデルを用い、鉄筋断面減少率 ω と体積膨張率 γ から、式(7)により腐食膨張変位量 u を求めた。

$$u = \frac{1}{2} R \left(\sqrt{\gamma} - 1 \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\omega}{100}} \right) \quad \dots (7)$$

なお、本研究では γ をパラメータとして取り扱い、ここで求めた u を鉄筋周囲のコンクリートに強制変位として与えた。また、コンクリートの損傷の発生・進展に応じて、ひび割れが生じ、塩化物イオンの拡散係数に影響を与えと考えられる。そこで、本研究では主ひずみとひび割れ幅の関係を式(8)のように定め、コンクリート示方書の式(9)と式(10)から拡散係数を求め、ひび割れの進展に伴う拡散係数の更新を試みた。

$$w = 16.004 \varepsilon_p - 0.0011 \quad \dots (8)$$

$$K_d = \gamma_c K_0 + \left(\frac{w}{l} \right) \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 K_i \quad \dots (9)$$

$$\log K_0 = \left[4.5 \left(\frac{w}{c} \right)^2 + 0.14 \left(\frac{w}{c} \right) - 8.47 \right] + \log(3.15 \times 10^7) \quad \dots (10)$$

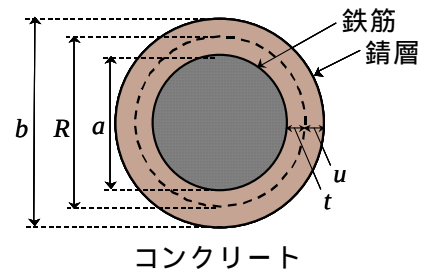
$$\left[\begin{array}{l} w: \text{ひび割れ幅, } \varepsilon_p: \text{主ひずみの最大値, } \gamma_c: \text{安全率}(=1.3) \\ K_d: \text{ひび割れの影響を考慮した拡散係数, } w/c: \text{水セメント比} \\ K_0: \text{ひび割れ部以外の拡散係数, } l: \text{ひび割れ間隔}(=7.5\text{cm}) \\ w_a: \text{許容ひび割れ幅, } K_i: \text{ひび割れ部における拡散係数} \end{array} \right]$$

3. 解析モデル

本研究で解析対象としたのは図-1 に示すような単鉄筋 RC はりの実験供試体である。表-1 に拡散解析に用いた定数及び解析条件を、表-2 に材料定数を、表-3 には損傷進展パラメータを示す。今回の解析では図-3 に示す解析モデルを用い、図-2 に示す境界条件を設定して三次元拡散解析を行い、鉄筋腐食による強制変位量を求めた。その後、鉄筋腐食膨張によって発生する周辺コンクリートの損傷について解析を行い、次ステップにおける拡散係数を更新した。続いて、鉄筋腐食がもたらす化学的損傷度 D_{chem} 及び鉄筋腐食膨張の影響を考慮し、スパン中央に一定の増分荷重を与える事で単鉄筋 RC はりの残存耐力のシミュレーションを行った。

4. 解析結果及び考察

鉄筋の体積膨張率 $\gamma = 3.5$ の時の荷重 - 変位関係を図-5 に、また、終局耐力の経年変化を図-6 に示す。体積膨張率 γ をそれぞれ 1.5, 3.5, 5.5 とした場合において、40 年経過時でそれぞれ、約 1.6, 3.1, 3.6% の終局耐力の低下が予測された。 $\gamma = 1.5$ とした場合、終局耐力は経過年数にともない、ほぼ線形的に低下しているのに対して、 $\gamma = 3.5, 5.5$ とした場合、終局耐力の変動が非線形的な傾向を示すことが認められる。この原因として、経過年数 20 年で鉄筋周辺コンクリートの大部分で塑性化が起こり、更なる腐食膨張の影響（主ひずみの増加にともなう耐力の変動）が小さくなっているためと考えられる。それに加え、解析モデルに与えた塩分濃度の境界条件等にも解析結果は依存していると考えられるため、今後種々の境界条件設定のもとで考察を行う必要があると考えられる。



R: 腐食前の鉄筋径
t: 腐食によって失われた鉄筋の厚さ
 γ : 腐食生成物の体積膨張率
u: 膨張変位量

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

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

図-4 鉄筋腐食モデル

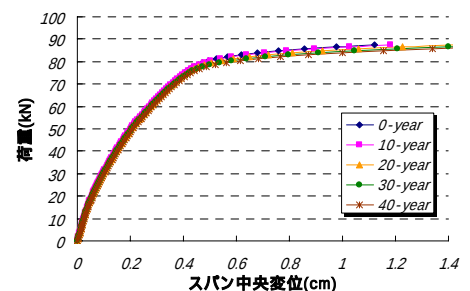


図-5 荷重 - 変位関係 ($\gamma = 3.5$)

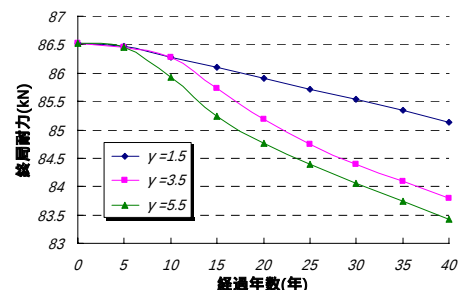


図-6 終局耐力の経年変化