

環境要因により劣化した既設 RC 構造物の耐荷性能評価法に関する研究

九州大学大学院 学生会員 ○加島 敏博 正会員 園田 佳巨
フェロー会員 彦坂 熙

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。そこで本研究では、その基礎的な研究として、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、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、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した。その際、式(1)を用いて部材の剛性低下を評価した。

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

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を求めた。

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

$$f(\epsilon_{eq}, k) = \epsilon_{eq} - k_i = 0 \quad (3)$$

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

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

α, β, κ_i : 損傷進展条件パラメータ

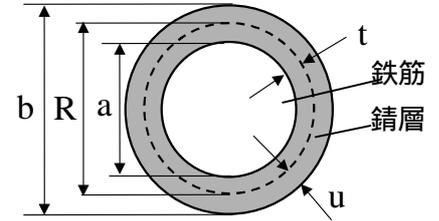
(無損傷時 κ_0 : 損傷発生時の相当ひずみ、損傷進展時 κ_i : 過去の最大相当ひずみ)

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ために、式(5)の二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。

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

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



R : 腐食前の鉄筋径

t : 腐食によって失われた鉄筋の厚さ

α : 腐食生成物の体積膨張率

u : 膨張変位量

$a = \frac{R}{2} - t$: 腐食後の鉄筋径

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

図-1 鉄筋腐食モデル

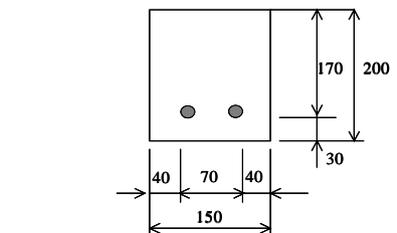
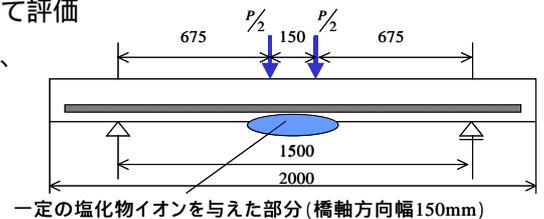
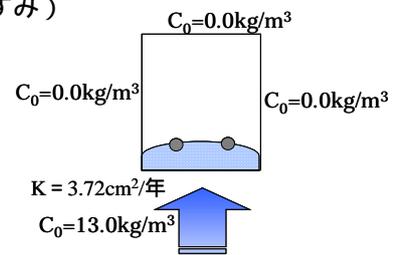


図-2 塩害を考慮したモデル (mm)



C_0 : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

K : 拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

図-3 桁中央部拡散解析イメージ

キーワード 損傷力学、塩害、耐荷性能評価

連絡先 〒812-8581 東区箱崎 6-10-1 九州大学工学部建設システム TEL 092-641-1101

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 ：鉄筋位置における積算塩化物イオン濃度

その後、図-1 に示す鉄筋腐食モデルを用いて、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。

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

なお、本研究では γ をパラメータとして取り扱った。

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、コンクリートに損傷が発生するとそれに応じてコンクリートの引張領域にひび割れが生じ、塩化物イオンの拡散係数に影響を与えられ考えられる。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、コンクリート標準示方書の式(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。

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

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

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

ここに、 w ：ひび割れ幅、 ε_p ：主ひずみの最大値

K_d ：ひび割れの影響を考慮した拡散係数、 γ_c ：安全率(=1.3)

K_0 ：ひび割れ部以外の拡散係数、 l ：ひび割れ間隔(=7.5 cm)

w_a ：許容ひび割れ幅、 K_i ：ひび割れ部における拡散係数、

w/c ：水セメント比

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 ばりの実験供試体である。表-1 に材料定数を、表-2 には損傷進展パラメータを示す。今回の解析では図-4 に示すような各要素断面ごとに、図-3 に示すような境界条件を設定して二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、鉄筋の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て鉄筋コンクリート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

図-5 に a-a' 断面内部の拡散係数の変化を示す。最大で約 9.3 倍の拡散係数の変化が見られ、ひび割れ幅の増加により拡散係数の値に大きな変動が生じる可能性が高く、ひび割れ幅を考慮する必要性が認められた。図-6 に塩害の影響を考慮した終局耐力の経年変化を示す。 $\gamma = 3.5$ 、 $\gamma = 5.5$ において、経過年数 5 年までの耐荷力の低下に比べ、それ以降の低下が小さいという結果が得られた。この原因として、経過年数 5 年で鉄筋周辺コンクリートの大部分で塑性化が起り、さらなる腐食による膨張圧の影響が伝達しにくくなっていることが考えられる。なお、この傾向の定量的な妥当性については、解析モデルに与えた塩分濃度の境界条件(はり下面のみに塩分濃度を設定)などにも依存していると考えられるので、今後、種々の境界条件の設定のもとで考察を行う必要があると考えられる。

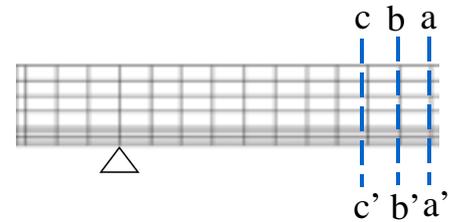


図-4 要素分割図(1/2 モデル)

表-1 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	11.1	1

表-2 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・圧縮同じ
	0.96	0.96	0.96
	20000	100	3000
α	8.4×10^{-5}	3.2×10^{-3}	1.5×10^{-5}

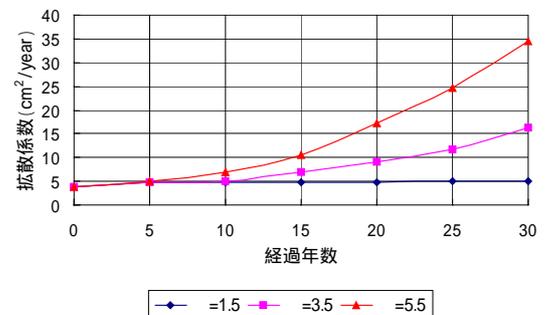


図-5 a-a'断面の拡散係数の経年変化

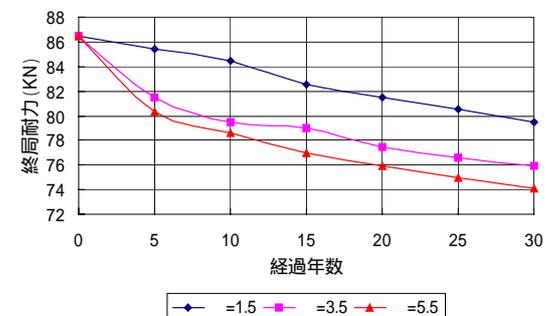


図-6 終局耐力の経年変化