

鉄筋腐食の影響を受けた RC 桁の終局耐力の評価に関する基礎的研究

○九州大学 学生会員 結城 洋一

九州大学 正会員 園田 佳巨

九州大学 フェロー会員 彦坂 熙

1. 目的

構造物の劣化損傷に対する適切な維持・補修を行うためには、耐荷力の経年変化を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 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検討した。

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作用すると仮定した。

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

ここに、 E_{ijkl} ：初期の弾性係数、 σ_{ij} ：応力テンソル、 ε_{kl} ：ひずみテンソル

塩害に伴う損傷（鉄筋腐食）を評価するにあたり、塩化物イオンのコンクリート内部への浸透度を式(2)に示す二次元拡散方程式を用いて算出し、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 ω 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。

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

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

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

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。

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

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa_i = 0 \quad (5)$$

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、 κ_i ：損傷進展条件パラメータ（無損傷時 κ_0 ：損傷開始時の相当ひずみ、損傷進展時 κ_i ：過去の最大相当ひずみ）

以上の考えに基づき、力学的損傷変数 D_{mech} は式(6)を用い、力学的損傷（ひびわれの進展）に伴う塩化物イオンの浸透促進の影響についても、式(7)による塩化物イオンの拡散係数の変化を考慮することで評価した。

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

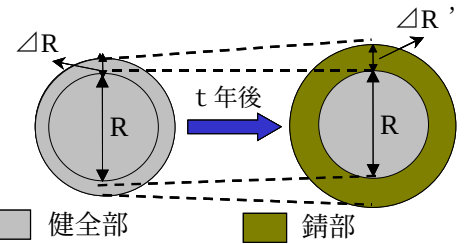


図-1 鉄筋腐食膨張イメージ（断面図）

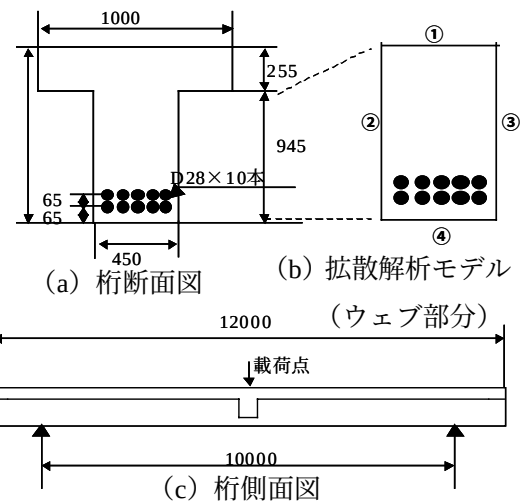


図-2 RC 桁解析モデル(単位 mm)

キーワード 損傷力学、塩害、有限要素法

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

$$K = 19.0 \times D_{mech} + K_0 \tag{7}$$

ここに、 α 、 β ：材料定数、 K_0 ：初期の塩化物イオン拡散係数

2.2 鉄筋腐食の影響のモデル化

図－1 に示すような鉄筋腐食のイメージより、式（3）で得られる鉄筋断面減少率から、 t 年後に腐食すると想定される鉄筋層厚 ΔR を求め、式（8）により腐食膨張した鉄筋層厚 $\Delta R'$ を、式(9)により腐食膨張による鉄筋径の増加量 u を求めた。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鉄筋周囲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。

$$\Delta R' = \gamma \Delta R \tag{8}$$

$$u = (\gamma - 1) \Delta R \tag{9}$$

γ ：膨張率(参考文献より $\gamma = 2.5$)

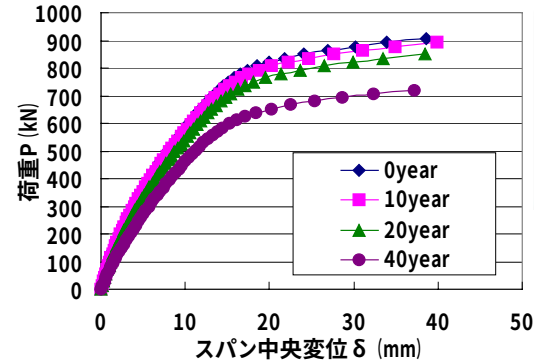
3. 解析結果及び考察

3.1 解析モデル

鉄筋位置の塩化物イオン濃度の解析は、図－2(b)の RC 桁 2 次元モデルを用い、初期条件として表－1 に示すような桁表面の塩化物イオン濃度を仮定して行った。終局耐力の解析は、図－2 (a) (c) のような単純支持された RC 桁の支間中央に一定の増分荷重を与えて行った。終局耐力の計算に用いた諸定数を表－2、表－3 に示す。

3.2 数値計算結果及び考察

図－3 は、鉄筋腐食による膨張圧がコンクリートに与える損傷を、図－4 は、塩化物イオン濃度分布の経年変化を示す。今回の解析は、桁表面の塩化物イオン濃度を均一な値としたため、特に支間中央部において力学的損傷の進展により塩化物イオンの浸透が促進される傾向が認められ、この相互作用の影響によって支間中央部と桁端部で塩化物イオン濃度に大きな差が生じる結果が得られた。図－5 は、本手法を用いて予測した RC 桁の荷重－変位曲線を示したもので、本手法により鉄筋腐食が 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。



図－5 RC 桁の荷重－変位曲線

参考文献) Qi 他：鉄筋腐食領域によるコンクリートひび割れ発生時の腐食量への影響について、土木学会第 53 回年次学術講演会、平成 10 年 10 月

表－1 拡散解析に用いた定数及び解析条件

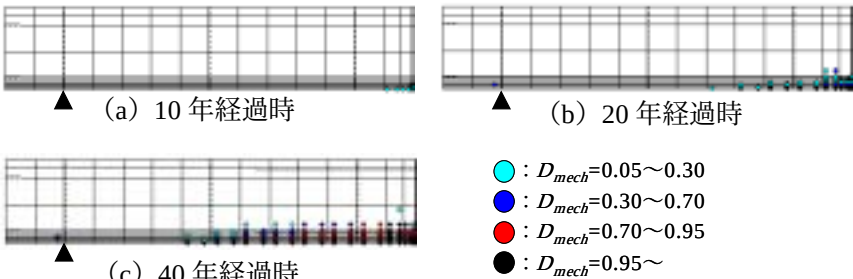
セメント種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比	45%
初期拡散係数 K_0	1.01 (cm ² /年)
周辺環境	飛沫帯
初期含有塩化物イオン濃度	0.0 (kg/m ³)
境界面塩化物イオン濃度 ①②③	0.0 (kg/m ³)
境界面塩化物イオン濃度 ④	13.0 (kg/m ³)
計算サイクル年数 Δt	5年

表－2 終局耐力の解析で用いた材料定数

	コンクリート		鉄筋
	床版部	桁部	
E:ヤング係数 (kN/mm ²)	26.0	13.0	200
ν :ポアソン比	0.20	0.20	0.29
圧縮強度 (N/mm ²)	40.0	23.0	410
降伏強度 (N/mm ²)	-	-	274
圧縮・引張強度比	15	15	1

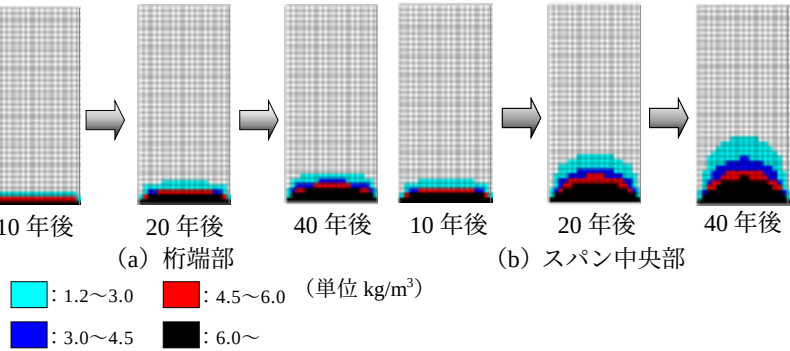
表－3 損傷進展式に用いたパラメータ

	コンクリート				鉄筋
	床版部		桁部		
	引張	圧縮	引張	圧縮	
α	0.99	0.96	0.99	0.96	0.99
β	21000	100	21000	100	3000
κ_0	1.0×10^{-4}	6.5×10^{-5}	7.7×10^{-5}	2.5×10^{-5}	8.5×10^{-4}



図－3 膨張圧・死荷重を受けた時の損傷分布

(黒点は損傷を生じた要素積分点)



図－4 RC 桁の塩化物イオン濃度分布