

塩害による鉄筋腐食の影響を受けたRC桁の終局耐力に関する解析的研究

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 学生会員 村戸伸行
九州大学 フェロー会員 彦坂 照

1. 緒言

構造物のライフサイクルコストを最小限に抑えるためには、構造物の劣化の進展に伴う耐力の経年変化を正確に把握し、適切な維持・補修を行う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

損傷力学は、材料内部に生じる損傷の発生・進展を評価する一手法である。本研究では、化学的要因により生じる損傷度 D_{chem} と荷重履歴による損傷度 D_{mech} を同時に考慮し、式(1)に示すように両者の影響が個々に剛性低下を招くと仮定した。

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

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

環境的要因(塩害)に伴う損傷(鉄筋腐食)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(2)の二次元拡散方程式を用いて、鉄筋位置における塩化物イオン濃度を算出し、式(3)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} ($=\omega$)とした。

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

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

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

なお、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と考えられるため、膨張圧も荷重の一部とみなした。

材料の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相違を考慮した以下の式(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($k=1$ とあれば、ミーゼスの降伏条件に帰着することから、鉄筋要素に対しても適用した。)、 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)

なお、損傷度を表すスカラー変数 D_{mech} は、以下の式(6)を用いて評価した。

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

ここに、 α 、 β は材料定数で、 κ_0 は損傷発生時の相当ひずみの値である。

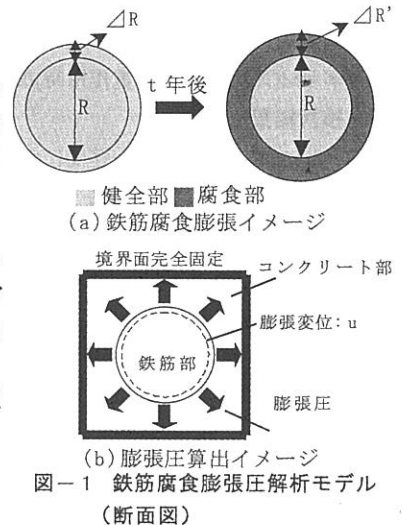


図-1 鉄筋腐食膨張圧解析モデル (断面図)

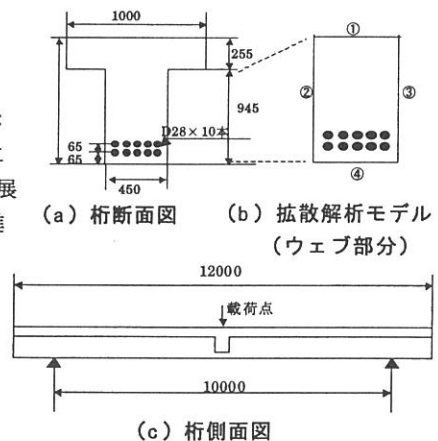


図-2 RC桁解析モデル(単位mm)

2.2 鉄筋腐食膨張圧のモデル化

ここでは、図-1(a)に示す鉄筋腐食イメージのもと、式(3)で得られる鉄筋断面減少率から、 t 年後腐食すると想定される鉄筋層厚 ΔR を求め、式(7)により、腐食後膨張した鉄筋層厚 $\Delta R'$ 、式(8)により腐食膨張による鉄筋径の増加長(強制変位) u を求めた。これを図-1(b)に示すように鉄筋周囲に強制変位として与え、鉄筋周囲の領域に作用する膨張圧を算出し、部材に作用する荷重の一部とみなすことで、周囲のコンクリートに与える影響を考慮した。

$$\Delta R' = \alpha \Delta R \quad (7)$$

$$u = (\alpha - 1) \Delta R \quad (8)$$

ここで、 α ：膨張率($\alpha = 2.5$)とした)

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解析については、図-2(b)のRC桁の2次元モデルを用い、表-1に示すように桁表面に一定の塩化物イオン濃度を仮定し、拡散シミュレーションを行った。終局耐力の解析は、図-2(a)(c)の単純支持されたRC桁に対して、支間中央に一定の増分荷重を与え、破壊試験のシミュレーションを行った。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は経年変化に伴う塩化物イオン濃度分布を示す。鉄筋表面の不導体皮膜が破壊され、腐食が進展すると考えられている塩化物イオン濃度($=1.2\text{kg/m}^3$)に、最下部鉄筋では約10年で到達する結果が得られた。図-4は鉄筋腐食による膨張圧がコンクリートに及ぼす損傷状況を、図-5は塩害による損傷を考慮したRC桁の荷重-変位曲線を示す。これらの図より、本手法を用いて鉄筋腐食が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。今回は、塩化物イオン濃度に伴う腐食速度の変化、コンクリートひび割れがもたらす拡散係数の変化等を考慮していないが、今後はこれらの影響も含めた検討を基礎的レベルから行う予定である。

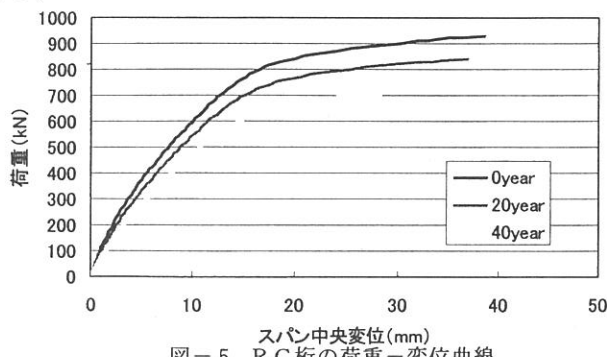


図-5 RC桁の荷重-変位曲線

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%
拡散係数K	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(①、②、③)塩化物イオン濃度	0.0(kg/m ³)
境界面(④)塩化物イオン濃度	13.0(kg/m ³)

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}

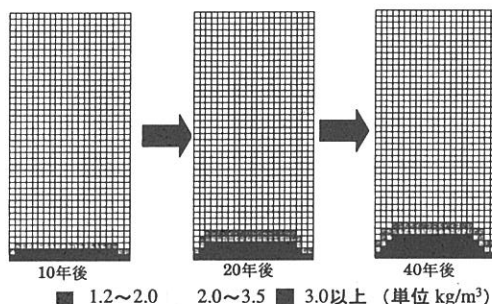


図-3 RC桁(ウェブ部分)の塩化物イオン濃度分布

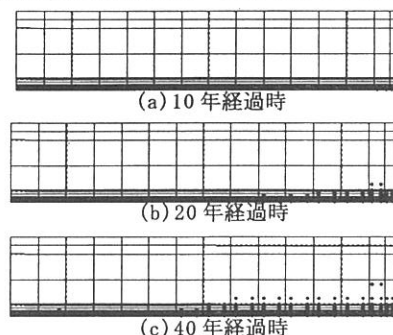


図-4 膨張圧を受けた時の損傷分布図
(黒点は損傷を生じた要素積分点)

参考文献1) Qi Lukuan 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