

1. まえがき

劣化が顕在化したコンクリート構造物において、維持管理上の重要な判断を下す上で本来最も必要な情報は、現状の構造物の性能がどうであるかということと、将来これらの性能がどのように低下していくかということである。ところが、現実には、劣化状況調査結果を基に構造物の性能や機能を評価する手法が確立されていないため、結局、構造物の性能に見合った適材適所の補修・補強がなされていない状況がかなり見受けられる。さらに、劣化現象と構造物の性能低下の関係の的確な把握は、維持管理の観点からだけではなく、構造物の設計においてその長期性能を照査する際にも極めて重要である。著者は、上記のことを念頭において、鉄筋腐食により劣化した鉄筋コンクリート部材の力学的特性の評価手法について検討を行うことを試みている。そのうち、ここでは特に梁部材の曲げ疲労特性の観点からの一検討結果について示す。

2. 曲げ疲労特性評価の考え方

釣合鉄筋比以下の鉄筋コンクリート梁では、低サイクル疲労の場合を除いては、鉄筋の疲労に対する影響が梁の耐疲労性を支配すると考えて差し支えないものと思われる。土木学会コンクリート標準示方書では、異形鉄筋の設計疲労強度 f_{srd} として以下の式を与えている¹⁾。

$$f_{srd} = 190 \frac{10^{\frac{\alpha}{k}}}{N^{\frac{1}{k}}} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s \quad (1)$$

ここに、 N : 疲労寿命 ($N \leq 2 \times 10^6$)、 σ_{sp} : 永久荷重による鉄筋応力度、 f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度、 γ_s : 鉄筋の材料係数、 α : $k_0(0.81 - 0.003 \phi)$ 、 k : 0.12

一方、守分らは、モデル鉄筋の疲労実験と、解析によって求めたき裂伝播寿命さらには孔食半径(深さ)を考慮した応力集中率を用いて、破壊確率が5%におけるき裂発生寿命として以下の式を提示している²⁾。

$$\left[2 + \left(\frac{D-r}{D}\right)^3\right] \times \left(\frac{D}{D-r}\right) \times \Delta\sigma = \frac{3.09 \times 10^3}{N^{0.117}} \quad (2)$$

(ただし、 $\Delta\sigma = \Delta F/A$)

ここで、 D : 腐食による断面減少を考慮した鉄筋の換算直径、 r : 孔食半径(深さ)、 $\Delta\sigma$: 応力範囲 ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$)、 ΔF : 鉄筋に作用する軸力の変動範囲、 A : 鉄筋の実質断面積

(1)式と(2)式の整合性については、腐食の無い異形鉄筋におけるフシ部の応力集中が(2)式における孔食半径1mmの場合に相当すると考えることによって、両者の値は概ね一致することが確認されている。そこで、先ず、永久荷重による応力を無視して、(2)式から健全な鉄筋の疲労強度 σ_{srd} を求めると

$$\sigma_{srd} = \Delta\sigma_0 = \frac{1.03 \times 10^3}{N^{0.117}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_0$: σ_{min} を0と仮定した場合の応力範囲である。この(3)式が(1)式に相当すると考えた場合、健全な鉄筋における疲労強度式を腐食鉄筋における場合に拡張させるための補正係数 K は、(2)および(3)式より、

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = \left\{ \frac{1}{\left[2 + \left(\frac{D-r}{D}\right)^3\right]} \right\} \times \left(\frac{D-r}{D}\right) / 3.01 \quad (4)$$

よって、(1)を基にした鉄筋が腐食した場合の疲労強度式は以下になる。

$$f_{srd}^* = \frac{T_{srd}}{A^*} = 190 K \frac{10^{\frac{\alpha}{k}}}{N^{\frac{1}{k}}} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) \quad (5)$$

キーワード: コンクリート構造物、曲げ疲労特性、鉄筋腐食、性能評価

連絡先: 〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 TEL099-285-8479

ここで、 f_{srd}^* ：腐食した鉄筋の疲労強度、 T_{srd} ：疲労破壊時の鉄筋作用軸力、 A^* ：腐食後鉄筋断面積
一方、構造物の設計時に予め鉄筋の腐食も見込んで鉄筋の設計疲労強度を考える場合には、（５）式における鉄筋の疲労強度は、公称断面積を有する疲労強度で考えた方が利用し易い。この場合、腐食による断面積の減少を補正係数の中に含ませて、鉄筋腐食も考慮した見かけの鉄筋の設計疲労強度として（６）式が与えられる。この式は、曲げ疲労に対する安全性を部材の疲労曲げ耐力で照査する場合に利用できる。

$$f_{srd}^* = 190 K' \frac{10^{\frac{a}{k}}}{N^{\frac{1}{k}}} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) \quad (6)$$

$$K' = K \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \quad (7)$$

ここで、 D ：腐食減量を考慮した鉄筋の換算直径、 D_0 ：鉄筋公称直径

また、鉄筋腐食量の調査や推定においては、鉄筋腐食量を鉄筋単位面積当たりの腐食量（ ΔC ）として表すことが多い。その場合、換算直径および断面積比は以下のように表される。

$$D = \sqrt{D_0^2 - 0.51 \times \Delta C \times D_0} \quad (8)$$

$$\frac{A^*}{A_0} = \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 = 1 - 0.51 \times \frac{\Delta C}{D_0} \quad (9)$$

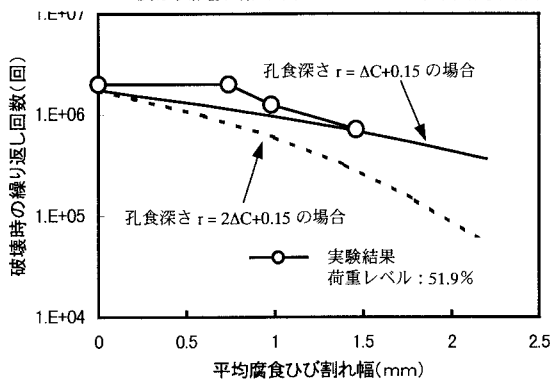
３．評価結果の一例

図－１には、見かけの鉄筋設計疲労強度に用いる補正係数 K' を腐食量との関係で試算した結果について示す。図－２には、ちょうど 200 万回で鉄筋の疲労破断を起す部材において鉄筋腐食が生じた場合に鉄筋破断までの繰返し回数がどのように変化するかについて試算した結果の一例を示す。なお、この場合の孔食半径（深さ）は、鉄筋腐食量に比例するものと考えて、次式を用いた。

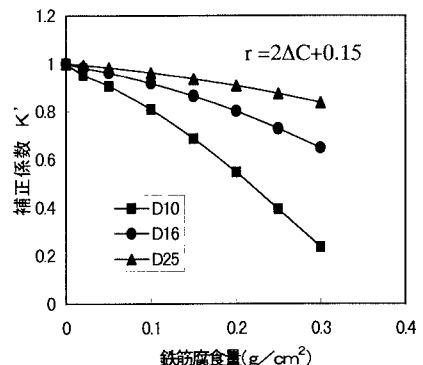
$$r = a \times \Delta C + b \quad (10)$$

図－３は、上記図－２で示した腐食量と破断時繰返し回数との関係を、著者らの実験から得られた腐食量と腐食ひび割れ幅の関係³⁾を用いて腐食ひび割れ－破断時繰返し回数の関係に置き換えたものである。また、図中には本研究の一環として実施した電食により鉄筋腐食させた RC 梁（鉄筋は D16）の疲労試験結果の例も示した。この結果から、孔食深さをどのように設定するかによって部材の疲労特性はかなり異なるが、少なくとも鉄筋腐食劣化が生じた部材の曲げ疲労特性については、腐食ひび割れの影響を腐食による鉄筋の疲労特性の低下に置き換えて評価しても大きな問題はないようである。

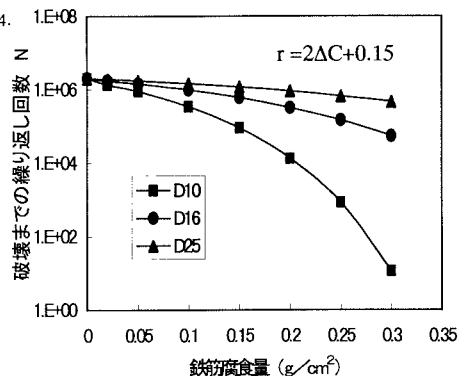
- <参考文献> 1) 土木学会編：コンクリート標準示方書「設計編」平成 8 年
2) 守分他：塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の疲労寿命の推定法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No.2、1996。
3) 武若他：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的特性に及ぼす影響、第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集、1984。



図－３ 梁破壊時の繰返し回数と腐食ひび割れ幅の関係



図－１ 補正係数 K' と鉄筋腐食量の関係に及ぼす鉄筋径の影響



図－２ 破壊までの繰返し回数に及ぼす腐食の影響