

ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食形状の最適化手法に関する研究

中央大学 学生会員 ○遠藤 久子
 長岡技術科学大学 正会員 倉橋 貴彦 中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、既存の RC 構造物において経年劣化による構造性能および耐久性能の低下が深刻な問題となっている。各種劣化要因のうち、特に鉄筋の腐食はそれらの性能を急激に低下させることになり、鉄筋の腐食性状を定量的に評価可能とする手法の確立が急務となっている。

現在の非破壊検査手法としては、自然電位法や分極抵抗法が挙げられるが、鉄筋腐食の有無の可能性の把握に留まっている。さらに、鉄筋を露出させるためにコンクリートを切り出す必要がある。そのため、コンクリート表面の変状のうち、定期点検で必ず計測される指標である、ひび割れの有無やその幅を利用した非破壊かつ非接触で定量的に鉄筋の腐食性状を推定する検査方法の確立が望まれている。

本研究においては、RC 構造物内部の鉄筋腐食を対象とし、コンクリート表面のひび割れ幅から最適制御理論を導入した数値解析により鉄筋腐食最適形状を評価する手法を構築することを目的とした。ひび割れ面での引張剛性がない場合と引張軟化特性を考慮する場合とで数値実験を実施し、山崎ら³⁾の実測値との比較を行った。

2. 随伴変数法による定式化

2.1 評価関数

本研究において、コンクリート表面のひび割れ幅を決める2つの節点の変位に対し、観測値と計算値（解析によって求まる値）の差の二乗和により以下の評価関数を定義する。

$$J = \frac{1}{2} \left((u^{left} - u_{obs}^{left})^2 + (u^{right} - u_{obs}^{right})^2 \right) \quad (1)$$

ここで、 u^{left}, u^{right} はひび割れ幅を表す左側、右側の節点における観測値を示し、 $u_{obs}^{left}, u_{obs}^{right}$ はひび割れ幅を表す左側、右側の節点における計算値を示す。

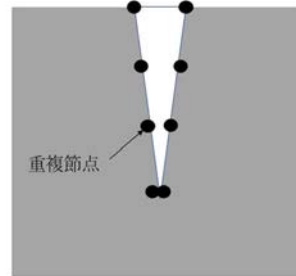


図-1 ひび割れ面

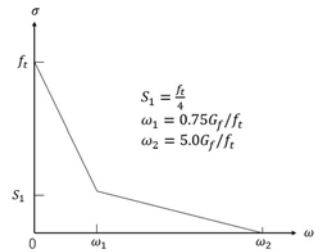


図-2 軟化曲線

2.2 有限要素方程式

式(2)-(4)に示す弾性方程式を導入する。

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{ij,j}$, D_{ijkl} , ε_{kl} は応力成分、弾性係数行列、変位成分を示している。計算においては平面応力状態を仮定し、コンクリートの物性値には、弾性係数 E を $2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 ν を 0.167 とした。

そして、式(2)-(5)を有限要素に離散化すると、式(5)に示す剛性方程式を得ることができる。

$$f = Kx \quad (5)$$

本研究では、図-1 に示すようにコンクリートには離散ひび割れモデルを導入することでひび割れ面での応力伝達を表現した。

2.3 引張軟化モデル

本研究では、引張軟化特性に図-2 に示すバイリニア型の軟化曲線を仮定し、ヤング係数はひび割れの進展に伴って以下の4つの状態に分類した。なお、それぞれの状態におけるヤング係数は、ジョイント要素における主応力方向のひずみから決定されるものである。

キーワード ひび割れ, 鉄筋腐食, 随伴方程式, 引張軟化

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL : 03-3817-1711 E-mail : a19.r4fb@g.chuo-u.ac.jp

$$(1) \text{ 弾性状態} \quad k_n = E_c, \quad k_s = G$$

$$(2) \text{ 引張軟化状態} \quad k_n = \frac{E_1 \cdot E_c}{E_1 + E_c}, \quad k_s = \frac{G}{1000}$$

$$\text{第1 勾配} \quad E_1 = \frac{f_t - f_t}{\varepsilon_{cr1}}$$

$$(3) \text{ 引張軟化状態} \quad k_n = \frac{E_2 \cdot E_c}{E_2 + E_c}, \quad k_s = \frac{G}{1000}$$

$$\text{第2 勾配} \quad E_2 = \frac{f_t}{\varepsilon_{cr2}}$$

$$(4) \text{ 限界開口以降} \quad k_n = 10^{-3}, \quad k_s = \frac{G}{1000}$$

2.4 停留条件

本研究では、式(1)に示した評価関数の最小化問題を解くことにより鉄筋周りの座標値を推定することになる。この評価関数は、式(5)に示す制約条件のもとで解かれるため、式(6)のラグランジュ関数を定義する。

$$L = J + \mathbf{P}^T (\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{f}) \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{P} は随伴変数ベクトルである。ラグランジュ関数に対する停留条件を導くと式(7)のようになる。

$$\delta L = \delta \mathbf{P}^T \frac{\partial L}{\partial \mathbf{P}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \delta \mathbf{x} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{f}} \right)^T \delta \mathbf{f} = 0 \quad (7)$$

停留条件($\delta L = 0$)より、式(8)に示す随伴方程式が得られる。

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} \right) = \mathbf{K}^T \mathbf{P} + \left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right) = 0 \quad (8)$$

2.5 解析フロー

解析フローは、勾配法に基づき式(5)、式(8)を繰り返し解くことになる。すなわち、コンクリート表面におけるひび割れ幅の計算値が観測値に一致するまで、繰り返し計算が行われることにより、最終的に、鉄筋の腐食による膨張量(鉄筋周りの強制変位量)が算定されることになる。

3. 本手法による腐食率の推定

山崎ら³⁾の実験に対して本手法を適用し、ひび割れ面の引張剛性がない場合と引張軟化勾配の場合とで解析を行った。山崎ら³⁾の実験で用いた試験体概要を図-3に示し、この試験体と同等な解析モデルとして図-4の要素分割図を示す。鉄筋周りの腐食厚さは一様と仮定した。

図-5より、引張軟化特性を考慮した場合の方がより実測値に近い腐食率を示す結果となった。

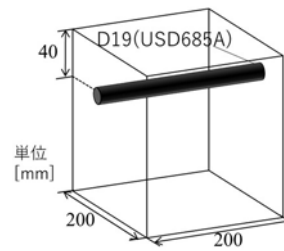


図-3 試験体概要図

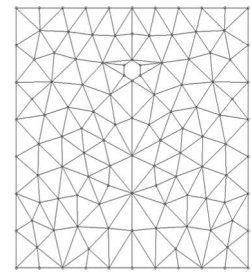


図-4 要素分割図

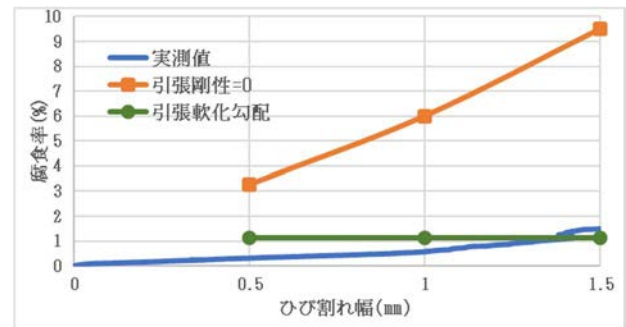


図-5 解析結果

また、引張軟化特性を考慮した場合、ひび割れ幅の増加に対して腐食率に大きな変化が見られなかった。この点について、強制変位の更新量は随伴方程式の勾配と重み係数に依存しており、解析ステップ数が引張剛性のない場合よりも多くなったことで、重み係数が増加し、更新量の差が小さくなってしまったことが影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、最適制御理論を導入した数値解析により表面ひび割れ幅から鉄筋腐食最適形状を評価可能な手法を構築したものである。

構築した引張軟化特性を考慮したモデルの腐食率は実測値に類似しており、本手法の有用性が示された。

5. 参考文献

- (1) 伊良波繁雄, 富山潤: トラス要素およびはり要素を用いたコンクリートの引張軟化の簡易解析法, 土木学会論文集, Vol.2003, No.739, 137-151, 2003
- (2) 永井啓一, 中谷三男: 不連続面へのジョイント要素の導入について, 農業土木学会論文集, Vol.1980, No.86, 57-63, 198
- (3) 山崎理美, 大下英吉: 鉄筋腐食が腐食ひび割れおよび拘束圧に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, 2014