

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
 中央大学 学生会員 倪 稚茗
 長岡技術科学大学 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。そして、既往の実験的研究との比較を行い、その適用性評価の検討を行った。

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。

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

ここで、 $u^{\text{left}}, u^{\text{right}}$ 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、 $u_{\text{obs.}}^{\text{left}}, u_{\text{obs.}}^{\text{right}}$ 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。

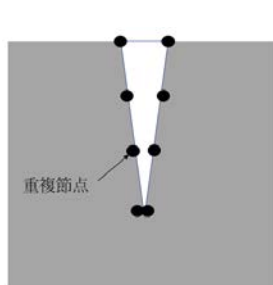


図-1 ひび割れ面

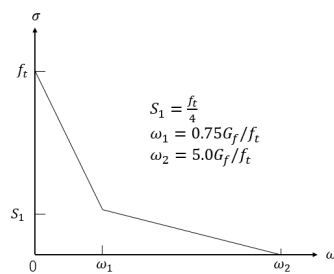


図-2 軟化曲線

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)-(4)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。

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

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

$$\text{第1 勾配 } E_1 = \frac{\frac{f_t}{4} - f_t}{\varepsilon_{cr1}}$$

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

$$\text{第2 勾配 } E_2 = \frac{\frac{f_t}{4}}{\varepsilon_{cr2}}$$

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

2.4 停留条件

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。

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

解析フローは、勾配法に基づき式(5)、式(8)を繰り返して解くことになり、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. 適用性評価

3.1 鉄筋 1 本

山崎ら¹⁾の実験に対して本手法を適用し、ひび割れ面における解析を行った。モデルは、図-3 に示すように山崎らの実験で用いた試験体と同一であり、鉄筋周りの腐食厚さは一様と仮定した。

図-4 より、引張軟化特性を考慮することで実測値に近い腐食率を示す結果となる。しかしながら、ひび割れ幅による腐食率の差異がなく、ほぼ同一の値となっている。

3.2 鉄筋 3 本

村上ら²⁾の実験に対して本手法を適用し、引張軟化勾配の場合での解析を行った。村上らの実験で用いた試験体を図-5 に示す。外側鉄筋に発生するひび割れは2本とも同様に発生したと仮定した。

解析結果は、表-6 に示すようにひび割れが発生していない中心鉄筋の腐食も評価可能であることが示され

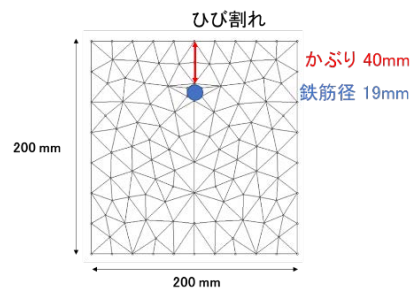


図-3 解析モデル（鉄筋 1 本）

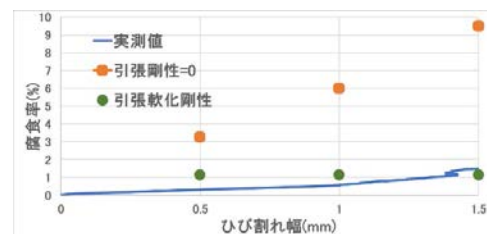


図-4 解析結果（鉄筋 1 本）

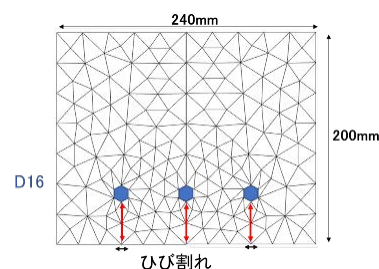


図-5 解析モデル（鉄筋 3 本）

表-6 解析結果（鉄筋 3 本）

	ひび割れ幅 (mm)	鉄筋腐食率(%)	
		外側(L)	中心(M)
実験	0.9	10.5	9.5
解析(引張軟化)		19.9	20.9

た。しかしながら、解析値は実験値の2倍ほど大きく評価された。これは腐食生成物の力学的性質を考慮していないことが原因である。

4. まとめ

- (1) 鉄筋 1 本の場合において、腐食率が実測値に類似しているため本手法の有用性が示された。
- (2) 鉄筋 3 本の場合において、ひび割れが発生しない中心鉄筋の腐食の評価が可能である。

5. 参考文献

- 1) 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, pp.1150-1155, 2014
- 2) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本幸成, 大下英吉: 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.61-74, 2006.1