

破壊力学に基づく損傷シミュレーションによる RC のひび割れの再現と性能評価に関する研究

香川大学大学院 学生会員 ○大熊千紗都 香川大学 正会員 岡崎慎一郎
香川大学 フェロー 吉田秀典, 松島学 茨城大学 正会員 車谷麻緒

1. はじめに

海洋沿岸部に位置する鉄筋コンクリート構造物は塩害による鉄筋腐食の影響を受ける。これらの維持管理を実施する上で、残存性能の評価は重要である。構造物の構造性能および耐久性能は鉄筋の腐食の有無と腐食減少量に強く依存している。劣化診断に必要な点検は、目視が標準であるため、コンクリート表面に呈した腐食ひび割れの開口幅でひび割れ部直下の鉄筋の腐食量の推定が可能であれば、高度な維持管理に資するものと考ええる。本研究は、近年開発された破壊力学に基づく損傷モデルを採用することで、コンクリートの微細なひび割れ進展を再現できる有限要素法により、鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ進展シミュレーションを行い、鉄筋の腐食膨張がひび割れ幅に与える影響を検討するものである。

2. 破壊力学に基づく損傷モデルによるひび割れ進展解析

本研究では、破壊力学に基づく有限要素法を利用する。コンクリートの塑性状態を考慮できる応力ひずみ関係を式(1)に、損傷を表現した式(2)に示す。式中に、 σ は Cauchy の応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は微小ひずみテンソル、 κ は損傷後の等価ひずみ、 κ_0 は損傷開始時の等価ひずみ、 E はヤング係数、 G_f は破壊エネルギー、 $h_e(\text{mm})$ は要素長さである。損傷の程度(Damage Index) はコンクリート中のひび割れ分布と近似的に等価である¹⁾。ひび割れ幅 $w(\text{mm})$ は、式(3) のようになる。

$$\sigma = (1 - D(\kappa)) c : \varepsilon \quad (1) \quad D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E \kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (2)$$

$$w = (\kappa - \kappa_0) h_e \quad (3) \quad W_r = \frac{\rho}{n-1} U \quad (4)$$

3. 腐食ひび割れに関する検証例題

本概要では既往の研究に示された鉄筋モルタル試験体を模した解析メッシュを作成し、Fig.1 に試験体概要を示す。Fig.1 に示すように異形鉄筋 D10 の中央 300mm の領域に鉄筋の断面に対する法線方向の変位を与え、その変位量を漸増させることで、鉄筋の腐食膨張を再現した。1 step あたり 0.001mm 相当の変位を与え、200 step まで載荷した。梁の底部に生じるひび割れの幅を検討対象とし、各要素のパラメータを Table 1 に示す。 Q と b は塑性効果を表すためのパラメータ、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比である。Fig.2 に断面のひび割れ様相の解析結果を示す。異形鉄筋の節から損傷が発生し、ステップが進むにつれて、損傷が広がっている。また試験体底部中央に相当する要素の等価ひずみを算出し、式(3)を用いて算出したひび割れ幅を求める。ここで、元ら²⁾によると鉄筋の単位長さあたりの腐食量は式(4)で表される。

W_r : 鉄筋の腐食量(mg/cm^2), ρ : 鉄の密度($7850 \text{ mg}/\text{cm}^3$), U : 鉄筋の変位量(cm), n : 腐食生成物の体積膨張率である。本解析における腐食生成物の体積膨張率は 2.1 倍を採用した³⁾。

Table 1 Parameters of each element of Specimen3

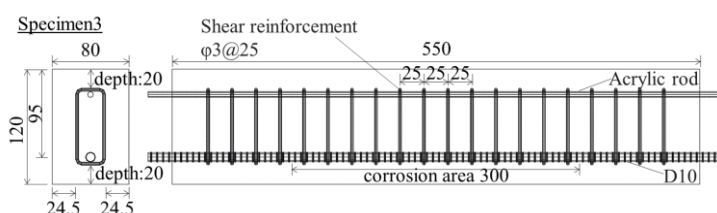


Fig. 1 Overview of Specimen3(unit:mm)

concrete				
E	ν	κ_0	G_f	k
20 GPa	0.2	0.0001	0.1 N/mm ²	10
steel				
E	ν	σ_{y0}	Q	b
200 GPa	0.3	300 MPa	200	20
acrylic				
E	ν	σ_{y0}	Q	b
3 GPa	0.3	0.08 MPa		

4. 種々の腐食量を与えた実験と再現解析とまとめ

本実験では Fig.1 を模した小型 RC 梁試験体を 10 体作製した. 使用したモルタル配合を Table 2 に示す. Table 3 に試験体名と通電時間を示す. 電食試験後, 試験体から腐食した鉄筋を採取し, 腐食生成物を除去した. 電食試験前の健全鉄筋の質量 $W_0(\text{mg})$ と, 錆取後の質量 $W(\text{mg})$ の差を腐食量とし, 切り出した鉄筋の長さ $L(\text{cm})$ と公称円周 $\varphi(\text{cm})$ から単位面積当たりの腐食量 $Wr(\text{mg}/\text{cm}^2)$ を, 式(5)を用いて算出した.

Table 2 Mix proportion of mortar

W/C	Water	Cement	Fine aggregate
(%)	Unit weight (kg/m^3)		
70	248	335	1350

Table 3 Time of current application

case number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
time(h)	48			161		355		403		

$$Wr = \frac{W_0 - W}{L \times \varphi} \quad (5)$$

ここで, 電食試験前の鉄筋の質量 W_0 は, 腐食していない鉄筋の長さおよび質量から単位長さ当りの質量を算出しておき, 切り出し鉄筋の長さに算出した単位長さ当りの質量を乗じることで求めた. また, モルタル試験体底部中央のひび割れ幅を測定した. その際のひび割れ幅と腐食量の関係を Fig.3 に示す. 解析におけるひび割れ幅と腐食量の関係を実線で示す. まず, 実験結果に関しては, いずれの断面であっても腐食量の増大に伴い, ばらつきは大きいもののひび割れ幅は大きくなる傾向にある. また, 解析値と実験値を比較すると, 解析値の腐食量と比べて, 実験値の腐食量は多い傾向にあることがわかる.

5. まとめ

本解析の試験体を模した小型 RC 梁試験体を作製し, 電食実験を行うことで, 鉄筋の腐食量とひび割れ幅の関係を取得し, 解析値との比較を行った. 実験値と解析値のひび割れ幅と腐食量の関係を比較したところ, 同一のひび割れ幅に対して, 解析値の腐食量は若干実験値を過小評価した. これは, 電食試験時における腐食生成物の外部への流出が要因であると考えられる.

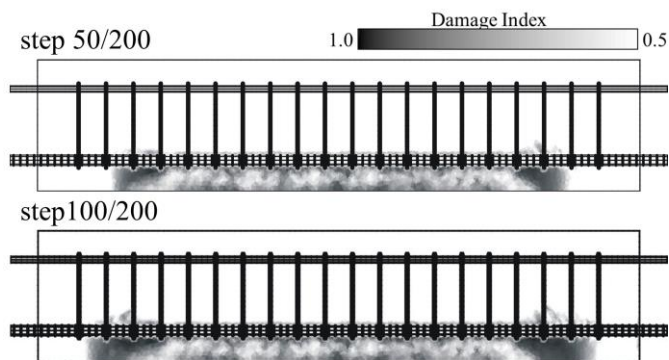


Fig. 2 Damage distribution of cross section

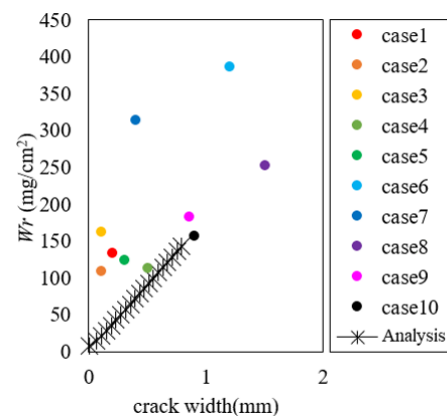


Fig. 3 Crack width and corrosion amount

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 樫山和男, コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2014.8.
- 2) 元路寛, 関博, 腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況およびひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, V-50, No.669, pp161-171, 2001.2
- 3) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛, ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく構造・耐久連成解析システムの高精度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp773-778, 2010