

有限要素解析による鉄筋の腐食ひび割れ発生モードの再現解析

名古屋工業大学 学生会員 ○久野 純伶
名古屋工業大学 正会員 武田 健太

1. はじめに

鉄筋腐食が生じた RC 構造物の残存性能を評価するためには、内部の鉄筋の腐食状況を精緻に把握する必要がある。構造物外観のひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定する手法があるが、かぶりや鉄筋径によっては、同じひび割れ幅でも腐食量のばらつきが大きくなるのが課題である。また、腐食ひび割れ発生後に、腐食速度が増加することで、かぶりや鉄筋径がひび割れ進展方向および、ひび割れ発生モード（図-1 参照）に影響を与えるため、これらは鉄筋腐食量を精緻に推定する際の重要な指標といえる。本研究では、構造物外観の腐食ひび割れから内部の鉄筋腐食量を同定する解析的手法の確立を最終的な目標に据える。その前段として、既往の鉄筋腐食促進試験より得られた腐食ひび割れ発生モード¹⁾を対象とし、有限要素解析を用いて再現を試みた。

2. 解析対象供試体の概要

本研究では、中川らが実施した鉄筋腐食促進試験結果¹⁾を解析対象とした。供試体は図-2 に示すように、 $200 \times 200 \times 140$ mm のコンクリートブロックに、D16 の異形鉄筋が 4 本配筋されている。計測項目は、鉄筋腐食量と供試体表面の腐食ひび割れ幅である。表-1 に、実験ケースと実験による腐食ひび割れ発生モードの一例を示す。実験因子は、芯かぶり C_{ce} と鉄筋径 ϕ の比 (C_{ce} / ϕ) であり、 $C_{ce} = 20$ mm 程度で、ひび割れ発生モードが変化していることがわかる。

3. 解析方法

本研究で用いた解析プログラムは、ATENA 2D である。図-3 に、鉄筋近傍の要素分割図を示す。鉄筋近傍 (50×50 mm) の範囲において、要素長を 1 mm とし、要素形状として三角形を採用した。鉄筋に相当する要素は弾性体（弾性係数：200 kN/mm²）とした。コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側の上昇曲線は CEB-FIP Model code 1990 に準拠し、圧縮、引張軟化はそれぞれ直線、指数関数とした。コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm²、弾性係数は 28 kN/mm² とし、引張強度と引張破壊エネルギーはコンクリート標準示方書²⁾に準拠し、圧縮強度から求めた。鉄筋に相当する要素全体に初期ひずみを導入することで、腐食生成物の膨張を表現した。なお、本解析では、

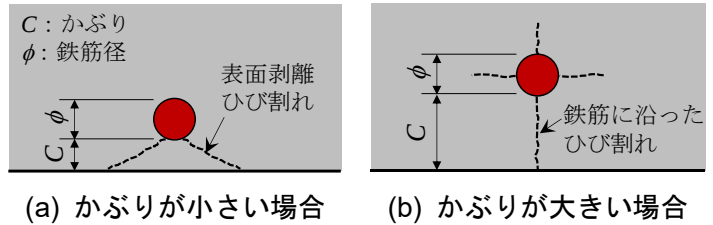


図-1 鉄筋の腐食ひび割れ発生モード

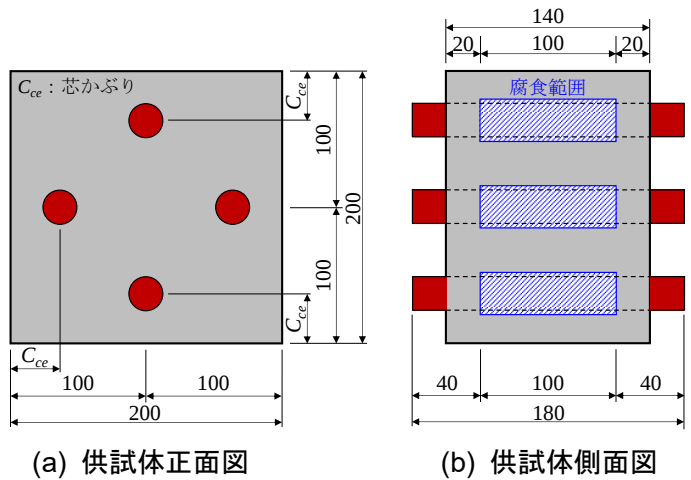


図-2 解析対象供試体の諸元（単位：mm）

表-1 実験ケースと腐食ひび割れ発生モードの一例

実験ケース	鉄筋の配筋位置	芯かぶり C_{ce} (mm)	芯かぶり指標 C_{ce} / ϕ	ひび割れ発生モード
CS15 (Case 1)	下	15	0.94	表面剥離
CS20 (Case 2)	下	20	1.25	判定不可
CS25 (Case 3)	下	25	1.56	鉄筋に沿った
CS30 (Case 4)	上	30	1.88	鉄筋に沿った
CS40 (Case 5)	上	40	2.50	鉄筋に沿った

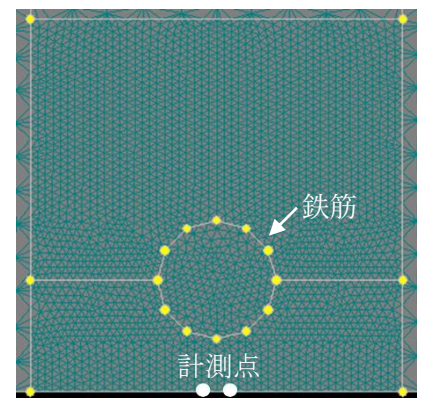


図-3 鉄筋近傍の要素分割図

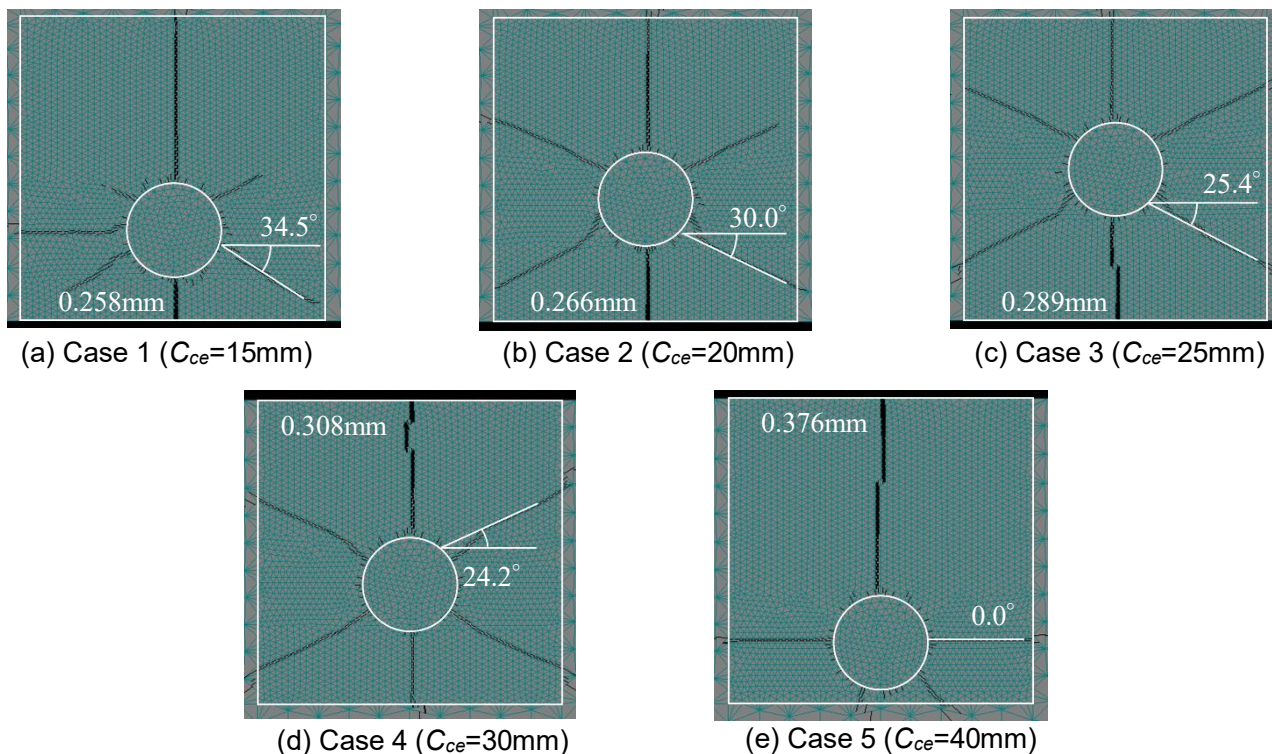


図-4 ひび割れ発生状況（初期ひずみ 10000μ 導入時）

微視的なひび割れ進展を確認するため、修正圧縮場理論による圧縮強度の低下は考慮していない。

4. 解析結果

図-4 に初期ひずみ 10000μ を導入したときのひび割れの発生状況、表-2 に水平方向から斜方へのひび割れ進展角度と表面におけるひび割れ幅、ひび割れ発生モードを示す。なお、図-4 中のひび割れは 0.01mm 以上のひび割れ幅となるものを示している。表-2 中のひび割れ幅は、図-3 に示す計測点間（ 4mm ）の相対変位とした。

表-2 解析結果一覧

Case No.	水平方向からの角度	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ発生モード
Case 1	34.5	0.258	鉄筋に沿った
Case 2	30.0	0.266	鉄筋に沿った
Case 3	25.4	0.289	鉄筋に沿った
Case 4	24.2	0.308	鉄筋に沿った
Case 5	0.0	0.376	鉄筋に沿った

図-4、表-2 より、解析におけるひび割れ発生モードは実験結果と異なり、すべてのケースにおいて鉄筋に沿ったひび割れが卓越する結果となった。しかし、斜方へのひび割れはかぶりが大きくなるにつれて水平方向へ進展するように発生しているため、かぶりが小さいほど表面が剥離するようにひび割れが進展する可能性が高くなることが分かる。解析ではコンクリートを均一な材料として扱うが、実際には骨材のばらつきなどがひび割れ進展に影響を及ぼすと考えられる。したがって、既往の鉄筋腐食促進試験結果について、有限要素解析を用いて概ね再現することができたといえる。また表-2 より、表面に発生するひび割れ幅は、かぶりの増大に伴い大きくなった。一般的に、かぶりが大きくなるとひび割れ幅も大きくなるため、同様な傾向が確認できた。

5. まとめ

本研究では、鉄筋腐食促進試験より得られた腐食ひび割れ発生モードを対象とし、有限要素解析による再現を試みた。その結果、かぶりが小さいほど、鉄筋からコンクリート表面に向かう斜方ひび割れ進展の可能性が高くなり、有限要素解析によりひび割れ発生モードを概ね再現可能なことが明らかとなった。また、かぶりが大きいほど、表面のひび割れ幅が大きくなり、既往の結果と同様な傾向が示された。

参考文献

1) 中川ら：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2, 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3