

鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の曲げ耐荷性能に関する解析的研究

九州大学大学院 学生会員 ○桑原 功旺
九州大学大学院 正会員 玉井 宏樹
九州大学大学院 フェロー会員 園田 佳巨

1. はじめに

塩害によって鉄筋腐食した RC 構造物の残存耐荷性能を適切に評価することは、構造性能の評価、補修・補強工法の選定、構造物の劣化予測などにおいて非常に重要であるとともに、持続可能で合理的な維持管理技術の構築には必要不可欠である。このような背景の下、関連の研究は実験を主体として数多く実施されてきており、著者らも、静的荷重や衝撃荷重が载荷した際の劣化 RC 梁部材の耐荷性能を実験的に明らかにしてきた。本研究は、鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材を対象に、FEM による劣化のモデリングを検討した上で、既往の実験をシミュレーションすることでモデリングの妥当性を検証したものである。

2. FEM による鉄筋腐食した RC 梁部材のモデリング

鉄筋腐食により劣化した RC 梁を適切にモデル化するためには、鉄筋の有効断面積減少による力学性能の低下、鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下、腐食生成物の膨張による周辺コンクリートのひび割れといった 3 つの事象を考慮しなければならない。本研究ではこの 3 つの事象について以下のように表現することとした。

2.1 鉄筋の有効断面積の減少

腐食鉄筋はその有効断面積が減少することがわかっている。そのモデル化としては、直接的に断面積を減少させた鉄筋を用いる方法もあるが、本研究においては、鉄筋の有効断面積減少率に応じて力学性能を低下させ、見かけ上の断面積は初期状態と同じとすることとした。(図-1 参照) また、既往の研究においては、鉄筋の腐食率(質量減少率)をパラメータとして、腐食した鉄筋の降伏強度および弾性係数の算出式が提案されているが、弾性係数の低下率は非常に小さいため、本研究では弾性係数の低下は考慮せず、降伏強度 σ'_y に関してのみ一様腐食を仮定し、式(1)に示すように腐食率 w (%)と等しい低下率を仮定した。

$$\sigma'_y = \left(1 - \frac{w}{100}\right) \sigma_y \quad (1)$$

2.2 付着強度の低下

錆などの腐食生成物により、鉄筋とコンクリート間

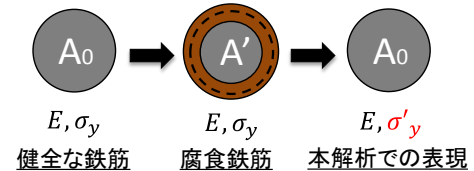
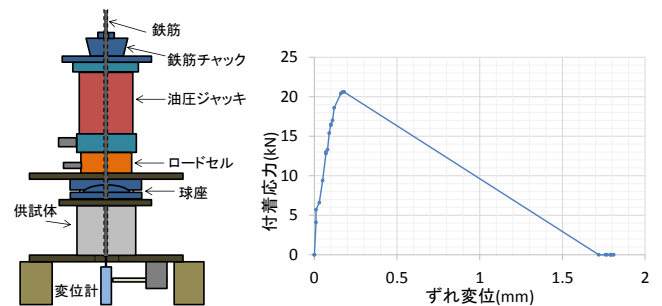


図-1 腐食鉄筋のモデル化



(a) 実験概要図 (b) 付着応力-ずれ変位関係

図-2 鉄筋の引き抜き試験

の付着強度は低下することがわかっている。そのモデル化としては、鉄筋とコンクリートの境界に付着要素を配置することで表現した。付着要素は圧縮に対してはコンクリートと同様に抵抗し、せん断に対しては、せん断力とずれ変位関係を導入する必要があるが、著者らが以前実施した、図-2 に示すような腐食鉄筋の引き抜き試験における付着応力-ずれ変位関係を導入し、腐食率に応じた付着強度の低下をモデル化した。

2.3 錆膨張によるコンクリートのひび割れ

錆などの腐食生成物の膨張圧の影響により、鉄筋周辺のコンクリートにひび割れが生じ、一様腐食の場合、RC 梁のかぶり部に鉄筋に沿ったひび割れが生じることが実験からわかっている。そのモデル化としては、鉄筋周辺に直接強制変位を与える方法と、鉄筋に熱膨張を与える方法があるが、いずれの方法も腐食率に応じた膨張圧の関係が明らかにされていないと入力する強制変位量や熱を決定できない。本研究においては、熱膨張を与え、ひび割れを生じさせることで力学的に等価な損傷状態を再現することとした。

3. 鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の静的載荷解析

3.1 解析対象及びモデル

著者らが以前実施した実験を解析対象とする。実験

で用いた供試体の寸法および配筋を図-3 に示す。また、図-4 に解析モデルを示す。本研究では汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc を用いた。コンクリートおよび引張鉄筋は 8 節点 3 次元ソリッド要素，せん断補強筋および圧縮鉄筋は 2 節点トラス要素，鉄筋とコンクリートの界面には上述の通り付着要素を用いた。材料特性として，コンクリートは圧縮側には実験時に実施した一軸圧縮強度試験で得られた応力-ひずみ関係を用い，引張側は引張強度に達すると線形軟化するモデルを仮定した。引張軟化勾配は式(2)で算出することとし，メッシュ依存性を考慮して要素サイズごとに異なる勾配を与えることとした。また，鉄筋に関してはバイリニア型の応力-ひずみ関係で，1/100 硬化を仮定した。なお，コンクリート，鉄筋ともに von Mises の降伏条件に従うこととした。

$$E_s = \left(\frac{1}{E} - \frac{2G_F}{f_t^2 h} \right)^{-1} \quad (2)$$

3.2 解析ケース

解析ケースは表-1 に示す通り，腐食無し，レベル 1（腐食率 6.13%），レベル 2（腐食率 11.71%），レベル 3（腐食率 20%）の 4 ケースであり，レベル 3 以外は全て実験結果を有する。なお，表-1 には上述の劣化のモデリングで入力した鉄筋の降伏強度と最大付着強度も併せて示している。また，本解析では 2.3 節で示した錆膨張による周辺コンクリートのひび割れは考慮していない。

3.3 解析結果及び考察

まず，図-5 に各ケースにおける荷重-変位関係を示す。図からわかるように腐食レベルが上がるにつれて，付着劣化に起因した勾配の低下や，降伏荷重と最大荷重の低下が確認でき，鉄筋腐食の劣化による耐荷性能の低下を定性的に再現できていることがわかる。次に，図-6 に腐食無しとレベル 2 における実験結果と解析結果を示す。図より，鉄筋降伏以降の挙動は実験値を概ね再現できていることが確認できるが，初期の勾配や曲げひび割れ発生以降の勾配が適切に再現できていないことがわかる。これはコンクリートのひび割れを考慮していないことが原因であると考えられる。

4. まとめ

FEMによって鉄筋腐食により劣化したRC梁のモデル化に関して検討し，本研究で仮定したモデルによって腐食率に伴う最大荷重の低下を評価可能であることが確認できた。しかし，錆膨張によるコンクリートのひび割れを考慮していないため，今後，この点を考慮するとともに，衝撃解析に適用できる劣化のモデル化を検討していく予定である。

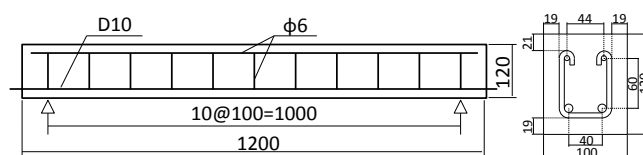


図-3 供試体寸法および配筋 (単位 : mm)

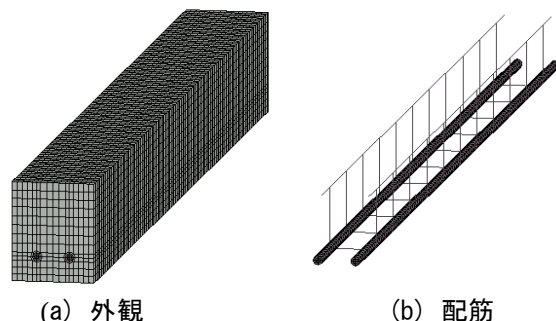


図-4 解析モデル

表-1 解析ケース

解析ケース	腐食率(%)	降伏強度 (N/mm ²)	最大付着強度 (N/mm ²)
腐食無し	0	340	18.0
レベル 1	6.13	319.16	11.00
レベル 2	11.71	300.19	4.64
レベル 3	20	272	0.1 (*)

* 腐食率 20%での付着強度は 0(N/mm²)であるが，解析の便宜上 0.1 とする。

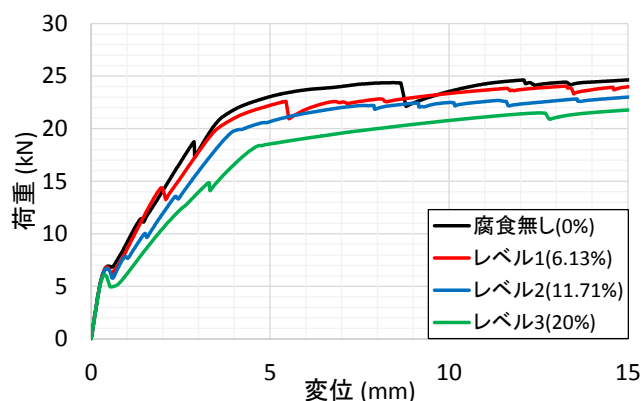


図-5 各ケースの荷重-変位関係

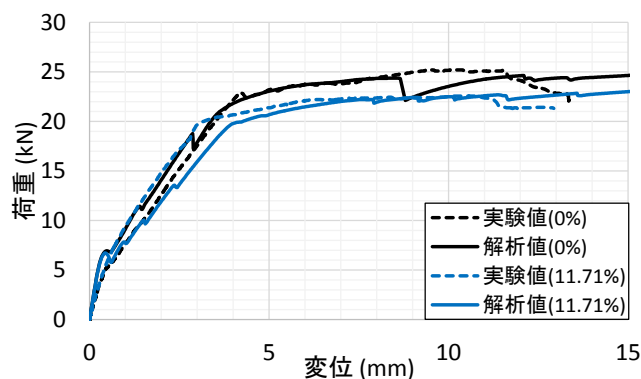


図-6 解析結果と実験結果の比較