

不均一な鉄筋腐食を有する RC 部材への適用を想定した 付着－すべり関係のモデル化に関する基礎的研究

早稲田大学大学院 学生会員 ○島田俊作, 川俣永遠, 賈澤傑, Abdul Kadir Alhamid

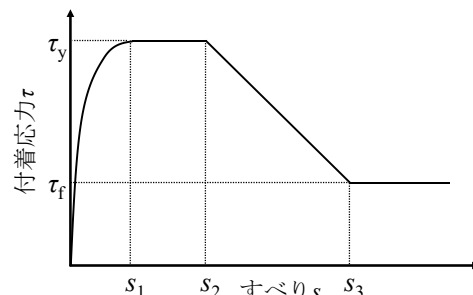
早稲田大学 正会員 秋山充良

防衛大学校 正会員 松崎 裕

1. はじめに

塩害による鉄筋腐食が生じた RC 部材は、腐食の無い場合に比べてその耐力および塑性変形能が低下する。既往研究において、鉄筋腐食が RC 部材の構造性能に及ぼす研究が実験的、あるいは解析的に行われてきたが、耐力評価に比べ、劣化 RC 部材の塑性変形能の評価精度は著しく低い状況にある。劣化 RC 部材では、鉄筋腐食は部材全体で一様には生じておらず、部材内、あるいは断面内で極めて不均一に変化しており（以下、鉄筋腐食の空間変動性）、これを解析モデルに反映することの難しさが影響していると思われる。特に、塑性変形能に影響を与える鉄筋の付着－すべり関係に、鉄筋腐食の空間変動性を考慮して局所的な付着劣化を反映することは難しい。

将来的には、何らかの方法で実験的な測定を行い、RC 部材内部で生じている局所的な鉄筋腐食量を考慮できるモデルが必要であるが、本研究では、その予備検討として、fib model code 2010¹⁾に記載されている付着－すべり関係（以降、fib モデルと称する）を基に、既往研究で用いられた鉄筋腐食が生じた RC はりの曲げ載荷実験結果を対象に、その荷重－変位関係を再現できる付着－すべり関係のモデルを逆解析のアプローチにより同定する。



図－1 fib モデル

2. 付着－すべり関係¹⁾

本研究で対象とした fib モデルの概形を図－1 に示す。fib モデルは健全（鉄筋腐食が生じていない）供試体の引抜実験の結果に基づき実験的に構築されたものである。表－1 に fib モデルのパラメータを示す。本研究では、これに局所的に生じる鉄筋腐食の影響を反映し、腐食した RC はりが曲げやせん断を受ける場合の非線形有限要素解析（以降、FEM）に適用できるモデルを構築する。

表－1 fib モデルのパラメータ

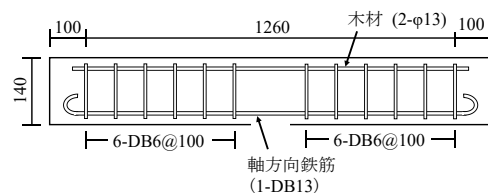
$\tau_{\max}$ (N/mm ²)	s_1 (mm)	s_2 (mm)	s_3 (mm)	τ_f (N/mm ²)
$2.5(f'_c)^{0.5}$	1.0	2.0	7.8	$0.4 \cdot \tau_{\max}$

表－2 各供試体の構造諸元

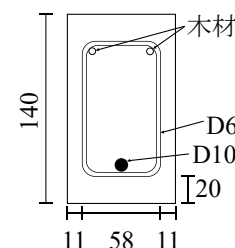
供試体名	供試体寸法 幅×高さ×全長 (mm)	かぶり (mm)	軸方向鉄筋	スターラップ	圧縮強度 (MPa)
Song1-1	80×140×1460	20	D13	D6	48.3
C-1					51.4
C-0					45.3

3. 劣化 RC 供試体に生じる鉄筋腐食率分布と曲げ載荷実験の概要

参考文献 2) と 3) にある劣化 RC 供試体、および健全 RC 供試体を使用し、その曲げ載荷実験により得られた荷重－変位関係を再現できる付着－すべり関係を同定する。対象とした供試体は、Song1-1、C-1 および C-0 の計 3 体である。各供試体の構造諸元を表－2 に示す。コンクリート圧縮強度を除き、3 体の供試体は何れも同じ寸法と諸元を有しており、引張鉄筋は 1 本のみが配筋されている。Song1-1 は電食実験、そして C-1 は乾湿繰返し実験によって腐食を生じさせ、その後、曲げ載荷実験が行われている。C-0 供試体は腐食させていない。Song1-1 と C-1 供試体から得られた鉄筋腐食率の分布をそれぞれ図－4 と図－5 に示す。両図に示されるように、鉄筋腐食は、極めて不均一に部材軸方向に分布していることが確認できる。参考文献 2) や 3) で指摘されているように、鉄筋腐食率分布は、電食実験では、



図－2 供試体側面図



図－3 供試体断面図

電流密度が大きいと一様な分布に近づくこと、電流密度が小さいと、電食実験と乾湿繰返し実験で得られる鉄

キーワード 鉄筋腐食, 付着－すべり関係, RC はり, 4 点曲げ載荷実験, 塑性変形能

筋腐食分布は、局所的に大きな腐食が生じる極めて不均一性の高い分布となること、および乾湿繰返し実験では、腐食生成物が鉄筋断面内に一様に生じること、などが確認されている。

4. 曲げ載荷実験を用いた逆解析による付着－すべり関係の同定

対象とする RC 供試体の 3 次元有限要素モデルは、DIANA10.6 を用いて作成した。その際、Song1-1 と C-1 供試体では、それぞれ図-4 と図-5 に示す鉄筋腐食率分布にあわせて各要素内の鉄筋断面積を減じている。一方、付着－すべり関係も、鉄筋腐食率分布と同様に、鉄筋位置毎に異なるものになっていると思われるが、現在、それを表現できるモデルが存在しない。そこで、各供試体の曲げ載荷実験で得られた荷重－変位関係を再現できるように、各要素の付着－すべり関係をそれぞれの位置の鉄筋腐食量に応じて変化させる。図-6 に付着－すべり関係の修正フローを示す。

まず、FEM 解析による塑性変形能を実験値に近づけるため、表-1 にある fib モデルの 5 つのパラメータ ($\tau_{\max}$, τ_f , S_1 , S_2 , および S_3) から塑性変形能に影響を及ぼすものを選定した。その結果、対象とする実験供試体に対しては、 $\tau_{\max}$ と S_1 が塑性変形能に対する感度が大きかった。そこで、この 2 つのパラメータに、腐食率 R_w と係数 k_1 と k_2 を組み合わせた値を乗じ、係数 k_1 と k_2 を変化させたときの塑性変形能を計算した。そして、この計算結果に基づいて応答曲面を作成し、その後に実験値と解析値の差の 2 乗の値が最も小さくなる時の係数 k_1 と k_2 を決定したところ、それぞれ 0.479 と 0.935 となった。このときの実験および解析で得られた荷重－変位関係の比較を図-7 および図-8 に示す。両図に示されるように、このような補正を行うことにより、実験値に近い解析値が得られるようになる。ただし、C-1 供試体では、小さくない誤差が生じているなど、より多くの劣化 RC 供試体を用いた検証と精度の改善が必要であり、また、局所的な腐食が生じた RC 供試体で生じている付着－すべり関係を実験的に測定し、これらの係数の妥当性を検証しなければならない。

5. まとめ

本研究では、逆解析のアプローチにより、鉄筋腐食が生じた RC はりの曲げ載荷実験で得られた荷重－変位関係に基づき、コンクリートと鉄筋要素間に与える付着モデルをその位置の鉄筋腐食量に応じて変化させた付着－すべり関係の同定を試みた。得られた結果は、電食実験と乾湿繰返し実験における腐食生成物の違いなどを反映したものとなっており、各鉄筋位置で変化する付着特性を考慮したモデルの必要性を示すものとなった。

参考文献 1) fib. fib Model Code for Concrete Structures 2010, 1st edition, International Federation for Structural Concrete, 2013. 2) Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M., and Frangopol, D.M.: Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method, *Engineering Structures*, Vol. 192, pp. 30-52, 2019. 3) Xin, J., Akiyama, M., Miyazato, S., Frangopol, D.M., Lim, S., Xu, Z., and Li, A.: Effects of galvanostatic and artificial chloride environment methods on the steel corrosion spatial variability and probabilistic flexural capacity of RC beams, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 18, No. 10-11, pp. 1506-1525, 2022.

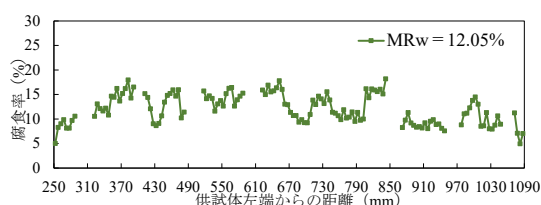


図-4 腐食分布（電食実験）

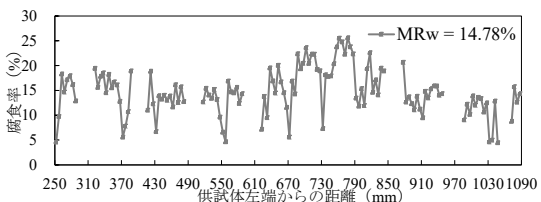


図-5 腐食分布（乾湿繰返し実験）

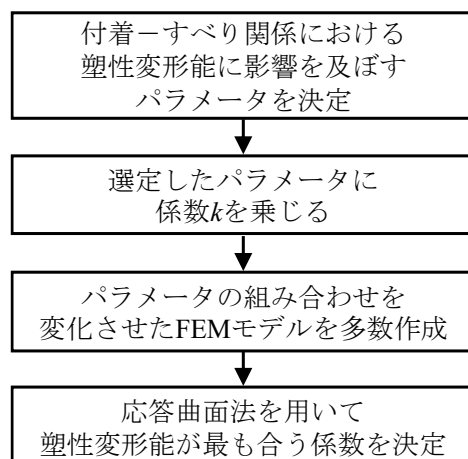


図-6 付着－すべり関係の修正フロー

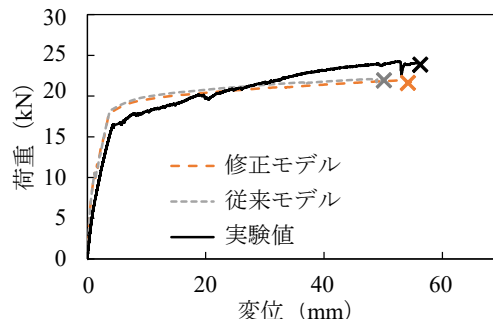


図-7 修正した Song1-1 の P-δ 関係

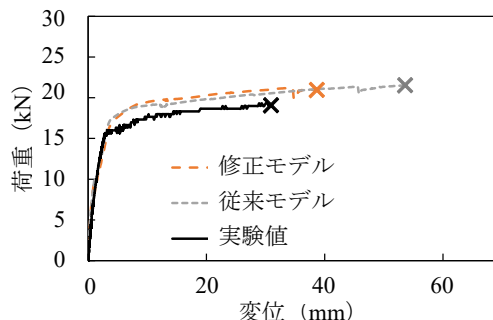


図-8 修正した C-1 の P-δ 関係