

鉄筋腐食の空間変動性を考慮した RC はりの有限要素解析と曲げ耐力評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○西谷 直樹, 福島 広之, 櫻井 絢子

早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物では, コンクリートの品質, あるいはかぶり不足などが原因となり, 中性化や塩害による鉄筋腐食が生じている場合がある. このような鉄筋腐食が生じた RC 構造物の曲げ耐力やせん断耐力, あるいは靱性能評価を行う際には, 構造物の各位置で空間的に変動する鉄筋腐食の影響を考慮する必要がある. X 線装置を用いて鉄筋腐食の成長過程を連続的に撮影した既往の研究¹⁾を見る限り, 鉄筋腐食の空間変動性はランダムな現象ながらも, 確率場のパラメータを適切に定めることにより, 確率統計的に再現可能である. つまり, 例えば, 平均質量減少率が 10% の RC 部材の曲げ耐力を予測する場合, 部材内に生じ得る鉄筋腐食分布は, ある規則に従っており, その規則を満足する平均質量減少率 10% の鉄筋腐食分布を多数作成することにより, この RC 部材が発現し得る曲げ耐力分布 (確率密度分布) を算定できると期待される.

一方, 現状では, 鉄筋腐食の空間変動性を考慮した劣化 RC 部材の有限要素解析において, どの程度の要素幅を用いて解析する必要があるのかの議論は十分になされていない. 部材耐力の確率密度分布を正しく評価するために必要な要素幅の設定について検証が必要である. そこで本研究では, まず, 電食実験により腐食 RC はりを作製し, 4 点曲げ載荷実験から荷重-変位関係を得る. そして 3 パターンの要素幅で再現解析を行い, 実験結果と比較する. 次に, 鉄筋腐食の空間変動性を Monte Carlo Simulation との連動が容易な Spectral Representation Method (SRM)²⁾を用いて表現する. そして, SRM により RC はりの鉄筋腐食分布を再現し, 曲げ耐力の確率密度分布を求める.

2. 電食により腐食した RC はりの曲げ載荷実験

自然環境での塩害腐食を擬似的に再現するため, RC はりの電食実験を行った. まず, RC はり供試体を食塩水に浸け, 直流電流を流すことで腐食を促した. 次に X 線装置を用いて RC はり内部で鉄筋の断面欠損が進展する様子を連続的に撮影した. この X 線撮影から, RC 供試体内の鉄筋腐食分布が求められる. 最後に腐食劣化 RC はりに対し, 4 点曲げ実験を行い, 荷重-変位関係を得る. 図-1 に RC はり供試体諸元および曲げ実験の概要を示す. 図-2 と図-3 に X 線撮影から得られた腐食分布の一例を示す.

3. 有限要素解析による曲げ実験の再現

腐食劣化 RC はりに対して行われた 4 点曲げ実験の結果を有限要素解析により再現することを試みた. 要素幅の違いが解析結果に及ぼす影響を検討するため, 要素幅 10 mm, 20 mm, 100 mm の 3 パターンで解析を行い, 荷重-変位関係を得る. 腐食劣化 RC はりの曲げ挙動を再現する際に用いたコンクリートや鉄筋, あるいは付着の各非線形構成則は, 既往の研究³⁾を参考に定めた. 鉄筋断面積は, X 線撮影により得られた腐食分布に従い, 変化させている. 各要素位置の鉄筋断面積の平均値を用いている. 要素幅が大きくなるほど, 局所的に大きくなっている鉄筋腐食量 (例えば, 図-3 の 490 mm 地点) は平均化されるため, 各要素が持つ鉄筋断面積の差は相対的に小さくなる.

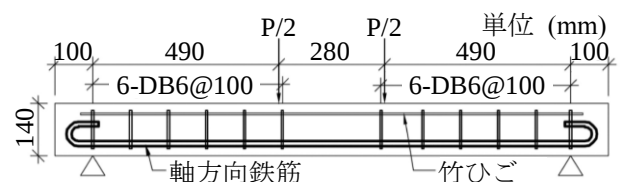


図-1 RC はり供試体諸元

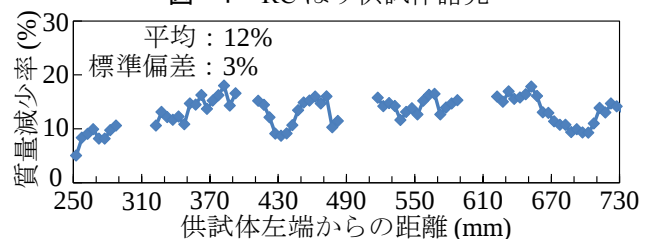


図-2 供試体 A の腐食分布

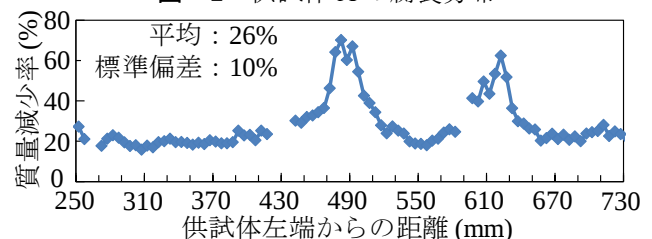


図-3 供試体 B の腐食分布

キーワード 鉄筋腐食, 空間変動性, 有限要素解析, Spectral Representation Method

連絡先 〒169-0853 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 Tel: 03-5286-2694

部材全長に対する平均として、約 10%と約 30%の鉄筋腐食量が生じた供試体 A と B の実験結果と解析結果の比較をそれぞれ図-4 と図-5 に示す。両図に示されるように、鉄筋腐食量が小さいと要素幅が解析精度に及ぼす影響は小さいのに対して、腐食量が大きい場合には、要素幅は相当に小さく設定する必要がある。

4. 劣化 RC はりの曲げ耐力分布の予測

SRM を用いて擬似的に再現した腐食分布を有する劣化 RC はりの曲げ耐力分布を予測する。SRM は、鉄筋平均質量減少率が同じでも無数の異なる分布を再現できる手法である²⁾。SRM を用いて異なる腐食分布を作成し、要素幅 10 mm, 20 mm, そして 100 mm を持つ FEM モデルをそれぞれ 1000 個作成した。部材全長に対する平均として、鉄筋腐食量 10%および 30%の場合の曲げ耐力分布(確率密度分布)をそれぞれ図-6 および図-7 に示す。

図-6 および図-7 から、平均質量減少率が 10%の場合は、得られた曲げ耐力の分布は要素幅の大小による違いは小さくなく、分布の広がり(標準偏差)はどの場合も小さい。一方、平均質量減少率が大きくなると、要素幅 100 mm を用いた場合には、曲げ耐力の分布の広がり小さくなっていくのに対して、要素幅を小さくするほど、分布の広がり大きくなっていく。つまり、質量減少率が大きくなるほど、極端に小さい(あるいは大きい)鉄筋断面積が生じ易くなるが、要素幅を大きくしていると、各要素内で平均化された鉄筋断面積を用いることになるため、この変化を捉えることができず、曲げ耐力分布の広がり小さくなる。

5. まとめ

本稿では、まず、電食実験にて作製した劣化 RC 部材の曲げ実験とその解析結果の比較から、この種の部材の構造性能評価に必要な FEM モデルと、その際の要素幅の設定について基礎検討を行った。また、SRM を用いることにより、劣化 RC はりの曲げ耐力分布を解析的に評価した。

鉄筋腐食量が大きくなると、鉄筋断面積が極端に小さくなる場合があり、その場所によっては部材耐力も小さくなる。劣化 RC 部材が発現し得る曲げ耐力分布を正しく評価するためには、特にその鉄筋腐食量が大きい場合に、要素幅の設定に注意する必要がある。

参考文献

- 1) 秋山充良, 中嶋啓太, 小森谷隆: X 線撮影を用いた RC 部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.35-45, 2011.
- 2) Shinozuka, M., Deodatis, G.: Simulation of stochastic processes by spectral representation, Applied Mechanics Reviews, ASME, 44, pp. 191-204, 1991.
- 3) Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, Engineering Structures, 127, pp.189-205, 2016.

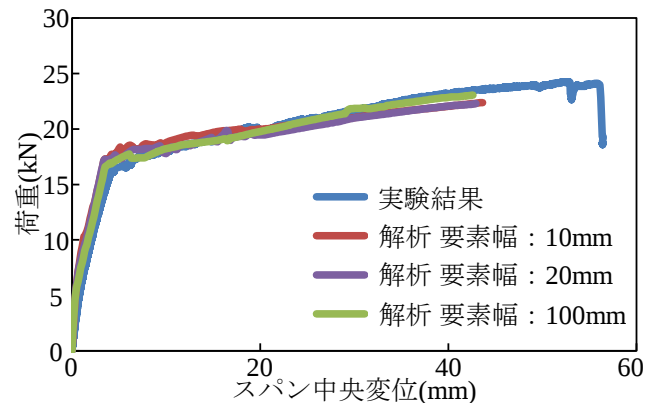


図-4 供試体 A の荷重-変位関係

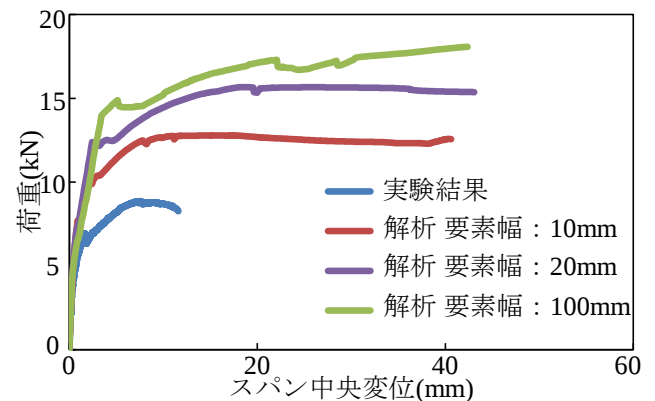


図-5 供試体 B の荷重-変位関係

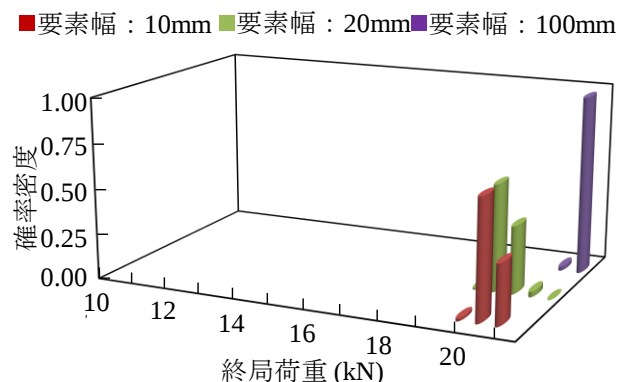


図-6 鉄筋平均質量減少率 10%の場合の終局荷重

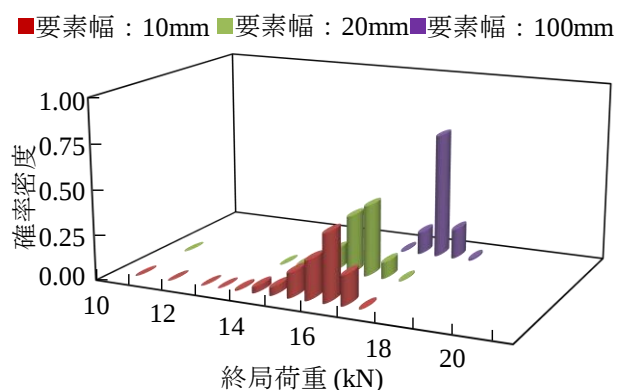


図-7 鉄筋平均質量減少率 30%の場合の終局荷重