

RC 部材内に生じる鉄筋腐食分布の確率・統計的表現とその構造的評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○櫻井 絢子
 早稲田大学 学生会員 宮本 祥平
 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 構造物の曲げやせん断耐力、あるいは靱性能評価を行う際には、構造物内の各地点で変動する鉄筋腐食の影響を考慮する必要がある。この鉄筋腐食の空間的なばらつきは空間変動性として表現され、ランダムな現象ながらも、X 線撮影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),2)}を見る限り、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ことが示唆されている。

そこで本論文では、鉄筋腐食の空間変動性を SRM (Spectral Representation Method)^{3),4)}を用いて表現することを試みた。そして、SRM により RC はりの引張鉄筋の腐食を再現し、曲げ耐力の分布を求め、実験的に得られる劣化 RC はりの曲げ耐力のばらつきと比較することで、本手法の妥当性を検証した。

2. SRM を用いた鉄筋腐食分布の空間変動性の再現

SRM は篠塚ら^{3),4)}によって提唱された、乱数を用いて空間変動性を表現する手法である。ある地点からの距離を x として表すと、平均値 0 の 1 次元 1 変数の乱数分布は次式で表される。

$$f(x) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j) \quad (1)$$

$$c_j = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_j) \Delta \kappa}$$

$$\kappa_j = j \Delta \kappa, \quad \kappa_u = N \Delta \kappa$$

ここで $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_j$ は $[0, 2\pi]$ の標準一様分布の乱数であり、周期は $T_0 = 2\pi / \Delta \omega$ である。 N を十分に大きくすると、中心極限定理より正規分布に漸近する。

発生させる分布が正規分布である場合、パワースペクトル密度関数は以下のように表される²⁾。

$$S_{ff}^T(\kappa_k) = \frac{\sigma^2 b}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b^2 \kappa_k^2}{4}\right) \quad (2)$$

$$k=1, 2, \dots, M, \quad N \geq 2M$$

本研究では、鉄筋の断面減少率は距離 x のみに依存する 1 次元問題で表れると仮定し、式(1)および式(2)を用いて鉄筋腐食の空間変動性をモデル化した。

SRM に用いられるパラメータである平均値 μ 、標準偏差 σ 、自己相関距離 b は、参考文献²⁾に示される鉄筋断面減少率の測定値から同定した。Lim らは RC はり内の引張鉄筋を電食にて断面減少させ、その値を部材軸方向 5mm 間隔で X 線画像に基づき測定している。図-1 に鉄筋断面減少率の測定例を示した²⁾。

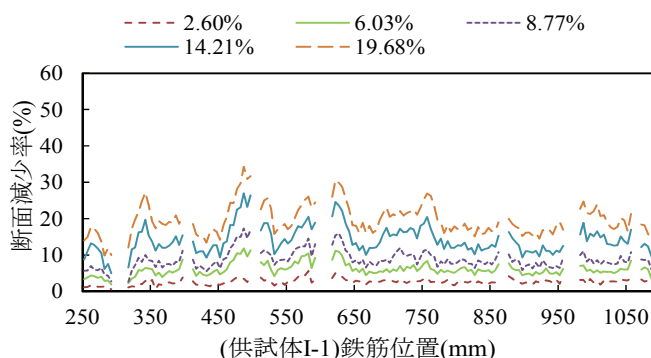


図-1 引張鉄筋の断面減少率の分布の例²⁾

5mm 毎の断面減少率の各測定値から平均値 (平均断面減少率 μ) を求めたところ、平均断面減少率が大きくなるにつれて、その標準偏差 σ も大きくなる傾向にあることが確認された。そこで、平均断面減少率と標準偏差の関係として式(3)を誘導し、式(3)により標準偏差 σ を定めることにした。

$$\sigma_i = 0.2865\mu \times \Phi_i + 0.1163\mu \quad (3)$$

ここで Φ は $[0,1]$ の標準一様分布の乱数である。

また、自己相関距離 b も標準偏差と同様に、平均断面減少率の増加によってそのばらつきが増加する傾向を示した。そこで、平均断面減少率 μ と自己相

関距離の関係として式(4)を誘導し、式(4)により自己相関距離 b を定めることにした。

$$b_i = (0.4\mu + 6) \times \Phi_i \times \Delta x \quad (4)$$

なお、自己相関距離に関しては、 b と μ の相関性が低く、最低値も小さいことからその下限値を 0 とした。

3. RC はりの曲げ最大荷重解析

前記の方法により、RC はりの引張鉄筋の腐食を数値シミュレーションにより再現した。本手法では乱数を用いることから、RC はりに平均断面減少率 10%、20%、および 30%が生じたときを仮定し、それぞれの μ の値に対して 10000 個のサンプルを作成する。RC はりとしては、Lim らが行った実験²⁾と同様のものを想定する。そして、各鉄筋腐食量を持った RC はりについて、コンクリートの圧縮強度 45.2 (N/mm²)、鉄筋の降伏強度 388(N/mm²)のもとで曲げ耐力を計算する。SRM を用いる際に必要なその他のパラメータを以下にまとめて示す。

$$M = 84, \quad N = 168, \quad \Delta x = 0.05\text{m}, \quad L = 10000$$

$$\Delta \kappa = 0.74799 \text{ rad/m}, \quad \kappa_u = 125.66 \text{ rad/m}$$

4. 解析結果

平均断面減少率と最大荷重比（計算で得られた最大荷重を断面減少率が 0%の RC はりから計算される最大荷重で除したもの）の関係を図-2 に示す。平均断面減少率が同じであっても、サンプルの違いにより、最大荷重比は異なる値となる。

参考文献 3)に示される RC はりの諸元は、参考文献 5)で実施された劣化 RC はりの曲げ耐力のベンチマークテストで用いられた供試体と同じである。参考文献 5)では、同じ諸元を持つ複数の供試体に同一

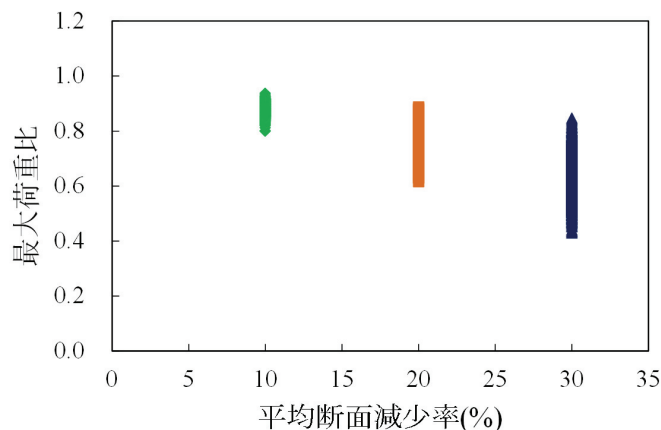


図-2 提案手法により得られた最大荷重の分布

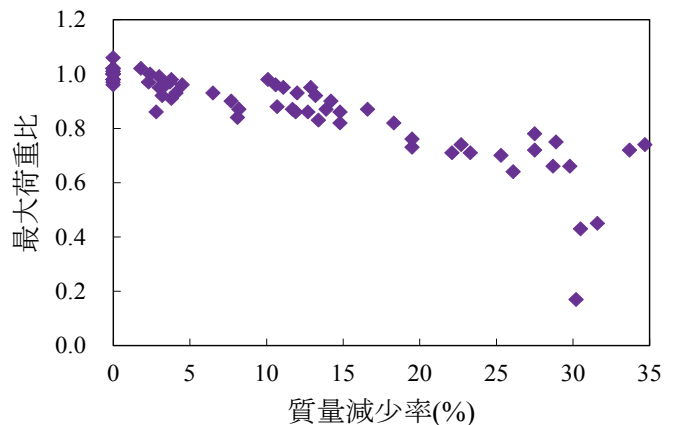


図-3 既往の実験結果⁵⁾

条件下で電食を施し、引張鉄筋を腐食させ、実験的に得られる曲げ耐力のばらつきを求めている。結果を図-3 に示す。図-2 と図-3 は概ね傾向が等しく、提案手法により、鉄筋腐食量が同程度の値であっても、実際に得られる曲げ耐力は大きくばらつくこと、さらにそれは鉄筋腐食量の増加により大きくなること、などを再現できることが示された。

5. 結論

本稿では、SRM により鉄筋腐食の空間変動性を再現する手法を提示した。既往の実験結果との比較から、本手法を用いることで、鉄筋腐食量が同程度の値であっても、実験的に得られる曲げ耐力がばらつく現象を再現できることを示した。

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) Lim, S, Jiang, H, Akiyama, M, Frangopol, D.M.: Experimental investigation on the relationship between the spatial variation of steel weight loss and the cracking width of RC members using X-ray photograms, *Proceedings of IALCCE 2014*, 2014
- 3) Shinozuka, M, Deodatis, G: Simulation of stochastic processes by spectral representation, *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 44, pp. 191-204, 1991.
- 4) Deodatis, G, Micaletti, R. C: Simulation of highly skewed non-Gaussian stochastic processes, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 127, pp.1284-1295, 2001.
- 5) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 71, 2006