

既存 RC 橋梁に生じる材料劣化の空間変動性および 点検結果を反映した耐荷力評価に関する確率論的考察

早稲田大学 学生会員 ○福島 広之, 櫻井 絢子, 宮本 祥平

早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

近年, X線カメラとデジタル画像処理技術の進歩により, 鉄筋コンクリート(RC)部材内の鉄筋腐食の成長過程が可視化されている^{1), 2)}. これらの実験的研究によると, 鉄筋腐食の成長過程はランダムな現象ながらも, パラメータを適切に定めることで, 確率統計的に表現可能であることが示唆されている. このことは, 軸方向鉄筋の平均腐食量が同じであったとしても, これから計算される部材の曲げ耐力やせん断耐力, あるいは変形能は確定的に計算できないことを意味する. つまり, 平均腐食量よりも腐食量が大い, あるいは腐食量が小さい場所が空間的に変動しているため, その変動の仕方によって部材耐力や変形能の計算値もある幅(ばらつき)を持つことになる. 一方, 対象とする部材から, 離散的ながらも数点の点検や検査により鉄筋腐食量が観測情報として与えられたとすると, この情報を基に点検や検査を実施していない箇所の鉄筋腐食量の予測が可能になるため, これらの情報が全くない場合に比べて, 部材耐力や変形能の計算値のばらつきを小さくすることができると期待される.

本稿では, 塩害で腐食した RC 桁を例にして, 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 (以下 SRM)^{3), 4)}を用いて表現する. SRM では, 乱数を用いるため, 同じ平均腐食量であっても変動の仕方が異なる腐食の空間分布が無限に作成される. これに対し, 鉄筋の質量減少率が離散的に数点与えられると仮定し, 各点で与えられた質量減少率となる腐食分布の抽出(絞り込み)を行い, その後に RC はりの終局曲げモーメントを計算する. そして, RC はりの終局曲げモーメントの計算値のばらつきを小さくするために必要な点検数, あるいはその空間的な間隔などについて考察する.

2. 鉄筋腐食分布の空間変動性の再現と点検結果の活用

SRM は Shinozuka 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. SRM の特徴は, 近隣の値と相関性を有する乱数列を限定的なパラメータで数理的に表現できる点にある. 1次元 SRM は以下の式(1)~(3)を用いて表現される.

$$f^{(i)}(x)|_{i=1 \sim L} = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j^{(i)}|_{i=1 \sim L}) + \mu \quad (1)$$

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

$$S_{f_0 f_0}(\kappa_k) = \frac{\sigma^2 b}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b^2 \kappa_k^2}{4}\right) \quad (3)$$

$k=1, 2, \dots, M$

$$\sigma_i = 0.2865\mu \times \Phi_i + 0.1163\mu \quad (4)$$

$$b = 8.476 \times 10^{-4} \times \mu^{0.4544} \quad (5)$$

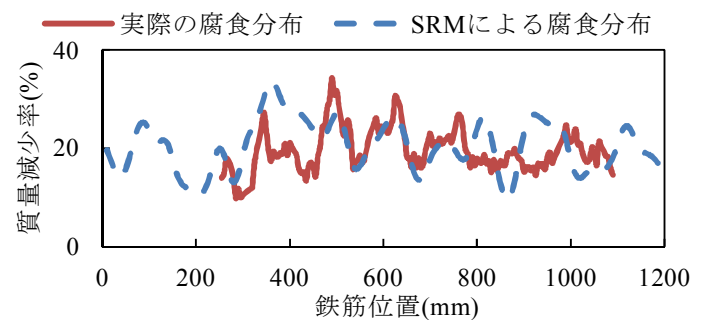


図-1 SRM による鉄筋の腐食分布の再現

ここに, Φ_j は $[0, 2\pi]$ の一様分布の乱数, $S_{f_0 f_0}(\kappa)$ はパワースペクトル密度関数, μ は発生させる分布の平均値, σ は標準偏差, b は自己相関距離に比例するパラメータを表す. 本研究において, μ は観測情報として得られる質量減少率の平均を用いた. また, μ と σ , μ と b の関係は式(4)と式(5)を仮定した. 式(4)の Φ_i は $[0, 1]$ の一様分布乱数である.

図-1 には, Lim ら²⁾の研究により得られた RC 部材中の鉄筋の腐食分布と, SRM により再現した計算値の一例の比較を示した. SRM で用いるパラメータを適切に設定することで, 鉄筋腐食量の空間変動性の再現が可能であることが確認される. 次に, 複数個所の点検により鉄筋の質量減少率が与えられたとする. SRM によって作成された鉄筋腐食分布から, 観測情報に適合するものを抽出することで, 点検結果を反映した腐食分布が同定される. そして, 終局曲げモーメントの計算を行い, 観測情報の有無による計算結果のばらつきを比較する.

キーワード Spectral Representation Method, 鉄筋腐食, 空間変動性, 点検結果

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

3. 既存 RC 桁の終局曲げモーメント解析

本研究では、図-2 に示すスパン 28m の RC 桁を解析対象とし、これを部材軸方向に 400 分割した。そして、RC 桁に等分布荷重を漸増载荷し、各要素の終局曲げモーメントと等分布荷重による作用曲げモーメントを比較した。何れかの要素で終局曲げモーメントを上回

る作用曲げモーメントが生じたときを RC 桁の終局と定義した。観測情報として用いる質量減少率は、表-1 に示す 5 通りとした。

表-1 観測情報の入手位置

観測点数	観測位置のスパン左端からの距離(m)								
1					14				
3	7				14				21
5	7		10.5		14		17.5		21
7	7	9.33		11.67	14	16.33		18.67	21
9	7	8.75	10.5	12.25	14	15.75	17.5	19.25	21

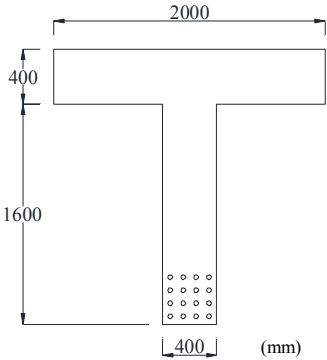


図-2 対象 RC 桁の断面図

4. 解析結果

表-1 に示す観測情報毎の終局曲げモーメントの計算値を図-3 に示す。また、観測点数と終局曲げモーメントの計算値の変動係数 (COV) の関係を図-4 に示す。図-3 に示されるように、鉄筋の質量減少率が与えられることで、観測情報が全くない状態で終局曲げモーメントを計算する場に比べ、終局曲げモーメントのばらつきは小さくなる。

一方、図-4 に示されるように、終局曲げモーメントの COV は観測点数の増加に対して減少傾向にあるがその変化量は小さい。これは、表-1 で想定した鉄筋腐食量の点検の距離に対して、鉄筋腐食分布の変動を表現する自己相関距離があまりに短いためである。例えば、2 点で鉄筋腐食量が測定されたとき、その 2 点の間で取り得る鉄筋腐食量の分布のパターンは、2 点間の距離と自己相関距離の関係によって決まる。自己相関距離が相対的に短い場合には、様々な鉄筋腐食量の分布を取り得るため、結果として、観測情報が耐力力の計算結果の精度向上に寄与しなくなる。

5. 結論

鉄筋は一樣に腐食せず、部材内で空間的に変動している。仮にある箇所の鉄筋腐食量が観測値として与えられたとしても、その点から離れるほど、観測値とは異なる値を取る可能性が高くなる。本研究では、既往の劣化 RC 部材内で生じた鉄筋腐食の分布からパラメータを同定することで、SRM により数的に鉄筋腐食の空間分布を作成した。その結果、一般的な橋梁で測定可能な鉄筋腐食量の観測間隔は、鉄筋腐食の空間分布を支配する自己相関距離に対して大きく、観測点数の増加が耐力力の計算精度の向上に寄与しない結果となった。今後は、この点を踏まえ、劣化 RC 構造物の性能照査法を構築していく必要がある。

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) Lim, S., Jiang, H., Akiyama, M and 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 the fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 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.

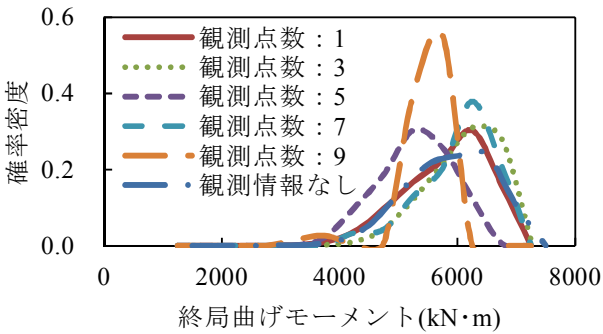


図-3 観測点数と終局曲げモーメント

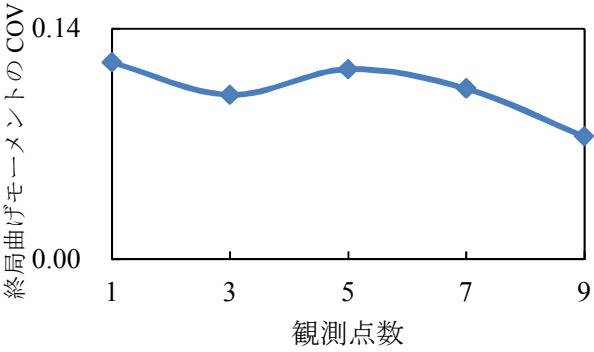


図-4 観測点数と終局曲げモーメントの COV