

論文 塩害環境下にある PC 桁に生じる鋼材腐食の空間変動性の確率・統計的表現とそのライフサイクル信頼性解析に関する基礎的研究

福島 広之^{*1}・櫻井 絢子^{*2}・宮本 祥平^{*3}・秋山 充良^{*4}

要旨：塩害環境下にあるコンクリート構造物に生じる鋼材腐食量は一樣ではなく、空間的に不均一に変動している。本研究では、Spectral Representation Method を用いることで鋼材腐食の空間変動性を確率・統計的に表現することを試みた。プレストレストコンクリート（PC）桁を対象として、橋軸方向の鋼材腐食の分布を 1 次元ガウス確率場でモデル化し、塩害による曲げ耐力の低下を考慮した PC 桁のライフサイクル信頼性解析を実施した。鋼材腐食が一樣に進展すると仮定した場合に比べ、鋼材腐食の不均一さを SRM により考慮すると大きな腐食の生じる箇所が部材内にできるため、算定される PC 桁の損傷確率が大きくなることを示した。

キーワード：塩害, Spectral Representation Method, 信頼性解析, 損傷確率, ライフサイクル解析

1. はじめに

海洋や凍結防止剤から供給される塩化物イオンがコンクリート内に浸透し、鋼材腐食を生じさせ、構造性能が低下するまでには一般的に長い時間を要する。現状の技術レベルでは、この一連の材料劣化の過程の予測に非常に大きな不確定性を伴うことは避けられない。この不確定性を信頼性の考えに基づいて処理し、腐食環境にあるコンクリート構造物のライフサイクルにわたる安全性を確率的に評価する研究が国内外で行われている^{例え1), 2), 3)}。

しかしながら、既往の研究 1)~3)を含めて、鋼材腐食によりコンクリート構造物の安全性が供用期間の経過とともに低下する様子を表現する際、既存研究では鋼材腐食は鉄筋コンクリート（RC）やプレストレストコンクリート（PC）構造物内に一樣に生じると仮定している。コンクリート構造物内の位置に関係なく、全ての鋼材が同じ腐食量を持つとの条件で、劣化コンクリート構造物の耐荷力や塑性変形能力が計算されている。実際には、様々な理由で、鋼材の腐食量は構造物内の位置ごとに異なり、それは空間変動性を有する現象である。例えば、かぶりやコンクリートの品質はコンクリート構造物内の位置毎に異なっている⁴⁾。表面塩化物イオン量も、同じ構造物内であっても、その位置により異なる値となる⁵⁾。結果として、コンクリート構造物内に生じる鋼材腐食量は部位毎、あるいは同じ部材内でも空間的に大きくばらついた値となる^{6), 7)}。腐食環境にあるコンクリート構造物のライフサイクル信頼性解析は、各パラメータの空間変動性を考慮した上で実施する必要がある。

これまでのところ、材料劣化の生じたコンクリート構造物を対象にして、劣化に関わるパラメータの空間変動

性を考慮して確率場を定義し、その信頼性評価やライフサイクル解析を行った既存研究は極めて少ない。

一方で、統計的手法である Kriging モデル⁸⁾など、パラメータの空間的な変動を表現する数理手法は既に幾つか提案されている。本研究では、材料劣化の生じたコンクリート構造物のライフサイクル解析を信頼性ベースで行うことを念頭に、Monte Carlo Simulation（MCS）との連動が容易な Spectral Representation Method（SRM）^{9), 10)}を用いてコンクリート構造物内に生じる鋼材腐食の空間変動性の確率・統計的表現を試みる。そして、SRM による鋼材腐食の空間変動性の表現を松崎らの研究³⁾に示される PC 桁の信頼性評価フローに組み入れることで、鋼材腐食の空間変動性を考慮した PC 桁のライフサイクル信頼性解析を可能にする。図-1 に本研究の全体フローを示す。

2. SRM による空間変動性の表現

2.1 SRM の概要

SRM は、Shinozuka and Deodatis^{9), 10)}によって提案された空間変動性を表現する手法である。コンクリート構造物に生じる材料劣化を念頭に提案されたものではないが、これまでに地震工学をはじめ、様々な分野に応用されてきた。SRM の特徴は、近隣の値と相関性を有する乱数列を限定されたパラメータで数理的に作成できる点にある。本節では、SRM を鋼材腐食の空間変動性の表現に応用することを念頭に、その概要を示す。

今、1 次元のガウス確率場 $f_0(x)$ を考える。

$$E[f_0(x)] = 0 \quad (1)$$

$$E[f_0(x+\xi)f_0(x)] = R_{f_0}(\xi) \quad (2)$$

*1 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科（学生会員）

*2 早稲田大学 大学院創造理工学研究科建設工学専攻

*3 早稲田大学 大学院創造理工学研究科建設工学専攻

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博（工）（正会員）

ここで、 $R_{f_0 f_0}(\xi)$ は自己相関関数で $E[-]$ は期待値を表す。
また、パワースペクトル密度関数を $S_{f_0 f_0}(\kappa)$ すると、Wiener
-Khinchine の定理より、式(3)と式(4)が得られる。

$$S_{f_0 f_0}(\kappa) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{f_0 f_0}(\xi) e^{-i\kappa \xi} d\xi \quad (3)$$

$$R_{f_0 f_0}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{f_0 f_0}(\kappa) e^{i\kappa \xi} d\kappa \quad (4)$$

Rice¹¹⁾は、真空管の陽極からランダムに飛ばされた電子により発生した電流 $I(t)$ を 1 次元 1 変数の乱数を用いてガウス確率場により以下の式(5)と式(6)で表現した。

$$I(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N c_k \cos(\omega_k t + \Phi_k) \quad (5)$$

$$c_k = \sqrt{2S_{II}(\omega_k)\Delta\omega} \quad (6)$$

ここで、 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$ は乱数部分で $[0, 2\pi]$ の一様分布の乱数である。また、周期 $T_0 = 2\pi/\Delta\omega$ である。 N を十分に大きくすると、中心極限定理により $I(t)$ は正規分布に漸近する。よって、平均 0 の 1 次元 1 変数の正規分布 $f(x)$ は以下の式(7)で表される。

$$f(x) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j) \quad (7)$$

ただし、

$$c_j = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_j)\Delta\kappa} \quad (8)$$

$$\kappa_j = j\Delta\kappa \quad (9)$$

である。また、上限波数は

$$\kappa_u = N\Delta\kappa \quad (10)$$

であり、 κ_u より大きい波数でのパワースペクトル密度関数は0として計算する。これはエイリアシング(折り返し雑音)を防ぐために行う処理である。

このガウス確率場を L 個発生させる場合には

$$f^{(i)}(x)|_{i=1 \sim L} = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j^{(i)}|_{i=1 \sim L}) \quad (11)$$

となる。この式(11)の平均値は0であるため、平均値を μ とする場合には、式(12)を用いることになる。

$$f^{(i)}(x)|_{i=1 \sim L} = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j^{(i)}|_{i=1 \sim L}) + \mu \quad (12)$$

今、発生させる分布は正規分布であるので、パワースペクトル密度関数 $S_{f_0 f_0}(\kappa)$ は以下となる¹²⁾。

$$S_{f_0 f_0}(\kappa) = \frac{\sigma^2 b}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b^2 \kappa^2}{4}\right) \quad (13)$$

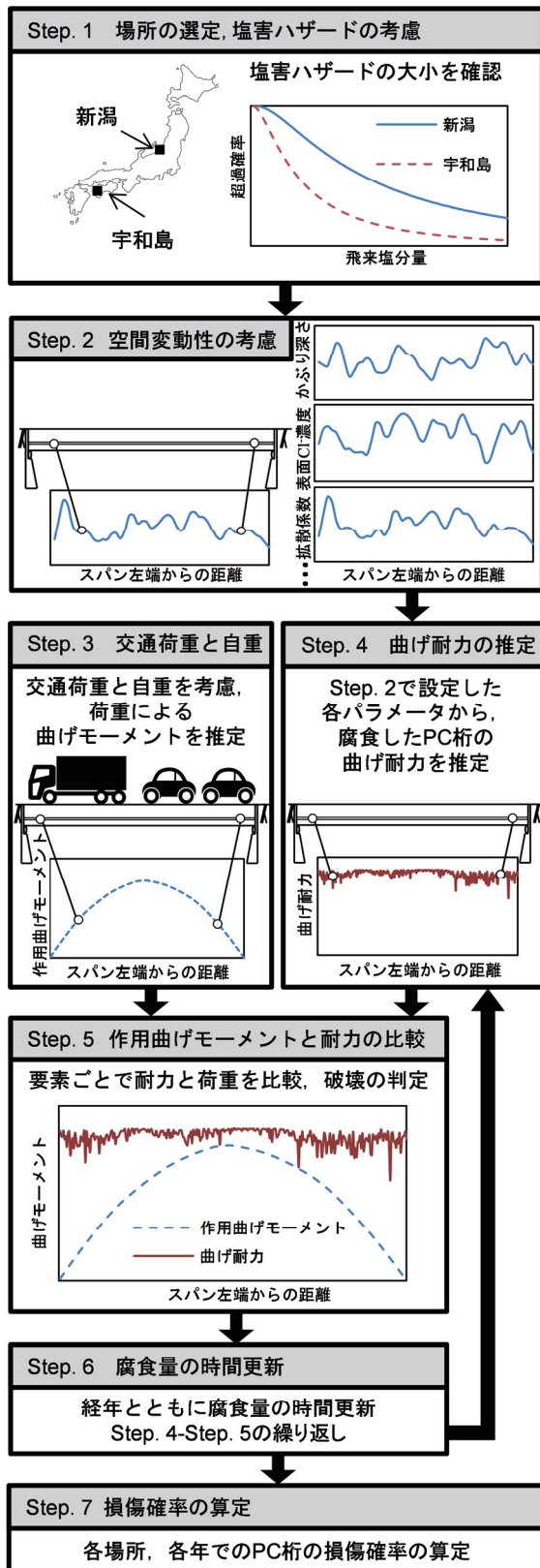
ここで、 σ は発生させる分布の標準偏差、 b は自己相関距離に比例するパラメータである。

また、パワースペクトル密度関数を $f(x)$ に代入する際にも、エイリアシングを防ぐためパワースペクトル密度関数の要素 M は、

$$N \geq 2M \quad (14)$$

を満足させる。これにより式(13)は次のように表される。

$$S_{f_0 f_0}(\kappa_k) = \frac{\sigma^2 b}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b^2 \kappa_k^2}{4}\right) \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$



図ー1 塩害を考慮した既存 PC 橋梁の
交通ハザードの評価フロー

本研究では、式(12)と式(15)を用いて鋼材腐食の空間変動性を表現する。これは図-1のStep.2にあたる。図-2にSRMで作成した1次元ガウス確率場の一例を示す。

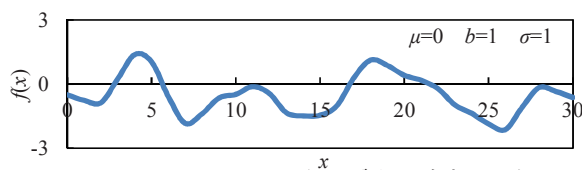


図-2 SRMによる1次元ガウス確率場の例

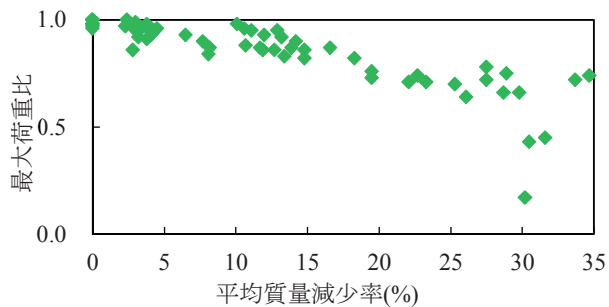


図-3 実験的に求めた平均質量減少率と最大荷重比の関係¹³⁾

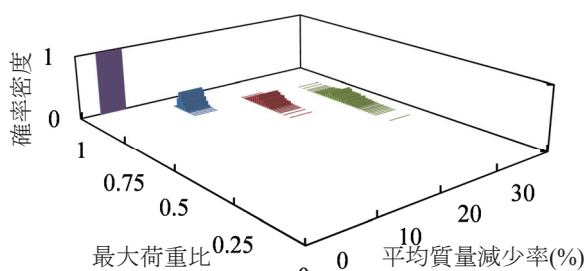


図-4 SRMと断面解析から求められた平均質量減少率と最大荷重比の関係

2.2 SRMの劣化コンクリート構造物への適用

ここでは、材料劣化が生じたコンクリート構造物へのSRMの適用性を検証するため、土木学会331委員会報告書¹³⁾にある実験結果の再現を試みる。ここでは、コンクリートの配合やRCはりの構造諸元を全く同じにして、複数の研究機関において単鉄筋RCはり（RC断面幅：80mm、高さ：140mm、はり全長：1460mm）を多数作製し、さらに、同一条件で電食にて鉄筋を腐食させ、実験的に曲げ耐力と鉄筋の平均腐食量の関係を得たベンチマークテストが行われている。図-3の実験結果¹³⁾に示されるように、部材全体で評価される平均質量減少率が同じであっても、鉄筋腐食量は空間的に変動するため、曲げ耐力の実験値はばらついている。

一方、SRMの解析で必要となるパラメータは、Limらの研究¹⁴⁾に基づき定めた。Limら¹⁴⁾は、X線撮影とデジタル画像処理技術を用いることで、RCはり内で腐食が進展する引張鉄筋を連続的に観察している。この実験

結果を用いて標準偏差と自己相関距離パラメータを定め、初期乱数を変更することで、部材全長にわたる平均質量減少率の平均値が10%、20%、そして30%のときの鋼材腐食分布をSRMによりそれぞれ1000個作成した。RC断面の曲げ耐力の算定は、実験結果との比較に基づき、純曲げ区間内の質量減少率が平均値よりも連続して大きくなっている区間の平均値 A_{sc} を用いた断面解析から算定した。結果を図-4に示す。ここで、 σ 、 b はLimら¹⁴⁾の実験結果から導いた以下の回帰式を用いて算出した。

$$\sigma_i = 0.287\mu \times \Phi_i + 0.116\mu \quad (16)$$

$$b_i = (0.4\mu + 6) \times \Phi_i \times \Delta x \quad (17)$$

ここで Φ_i は[0,1]の標準一様分布の乱数である。 Δx は要素間の距離である。

本研究では、圧縮縁ひずみがコンクリートの終局ひずみに達したときを曲げ破壊と仮定した簡易なRC断面解析を用いている。今後、図-3にみられたような引張鉄筋の破断や A_{sc} の定め方の検証が必要であるが、SRMによる計算は、腐食の進展に伴い最大荷重比のばらつきが大きくなる傾向と、そのばらつきの幅を概ね再現している。より多くの実験結果を用いた検証が必要であるが、以降、このSRMの手法をライフサイクル信頼性解析に組み入れ、それをPC桁に適用した例を示す。

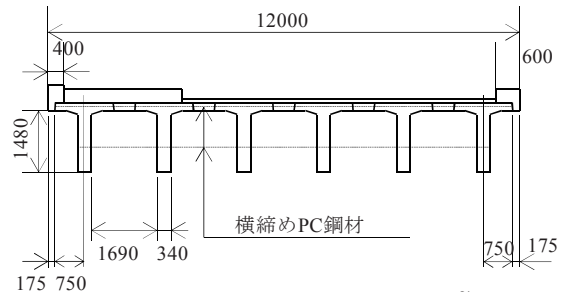


図-5 対象PC桁の断面図³⁾ [mm]

3. 鋼材腐食の空間変動性を考慮したPC桁のライフサイクル信頼性解析

3.1 概説

松崎ら³⁾では、活荷重ハザードおよび塩害環境ハザードを受けるプレテンションPC桁を対象としたライフサイクル信頼性解析が行われている。鋼材腐食進展評価および構造的な性能評価に介在する種々の不確定性を考慮した上で、塩害環境の違いなどがPC桁の構造安全性に及ぼす影響が議論されている。

本研究では、松崎ら³⁾と同じ断面で、図-5に示すスパン50mのPC桁（解析対象は、左端の桁）を対象として、SRMによる鋼材腐食の空間変動性を考慮したライフサイクル信頼性解析を実施し、その考慮の有無による安全性評価結果の違いを示す。なお、PC鋼材の径は38.83mmのものを想定し、各桁に4本ずつ配筋している。

3.2 海洋環境にある PC 桁に生じる材料劣化のモデル化

(1) 鋼材腐食の発生

本研究では、新潟と宇和島を解析対象地点として選定し、解析対象橋梁は、海岸線からの距離 $d = 0.1 \text{ km}$ に位置すると仮定した。PC 桁に到達する飛来塩分量 C_{air} (mdd)は式(18)により求められる⁵⁾。

$$C_{air} = x_1 1.29 r (x_2 u)^{0.386} d^{-0.952} \tag{18}$$

ここで、 x_1 は飛来塩分量の距離減衰式が持つモデル誤差、 r は海風比率、 u は平均風速(m/s)、 x_2 は u のばらつきを示している。新潟と宇和島にある PC 桁に式(18)を適用する際のパラメータを表-1に示す。表-1に示されるように、新潟にある PC 桁により大きな塩分量が飛来する。

表-1 塩害ハザードパラメータ (新潟・宇和島)			
地域	平均風速 u (m/s)	u の変動係数 x_2	海風比率 r
新潟	3.69	0.072	0.344
宇和島	2.38	0.167	0.169

コンクリート表面に付着する塩化物イオン濃度は、式(19)で求める⁵⁾。

$$C_0 = x_3 0.988 C_{air}^{0.379} \tag{19}$$

ただし、 C_0 は表面塩化物イオン濃度(kg/m³)、 x_3 は $C_0 - C_{air}$ 変換式が持つモデル誤差である。

式(18)と式(19)に含まれる確率変数のパラメータの一覧を表-2に示した。塩化物イオンの浸透はFickの第2法則により推定した。

表-2 塩害ハザード係数				
	説明	確率分布	平均	変動係数
x_1	距離減衰式	対数正規	1.06	1.25
x_2	u の変動係数	正規	1.00	表-1 参照
x_3	$C_0 - C_{air}$ 変換式	対数正規	1.43	1.08

$$C_x = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{av}t}} \right) \right] \tag{20}$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-s^2) ds \tag{21}$$

ここで、 C_x (kg/m³)は深さ x (m) での塩化物イオン濃度である。また、 D_{av} (m²/s)は供用開始後 t 年における塩化物イオンの拡散係数であり、式(22)を用いる¹⁵⁾。

$$D_{av} = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \tag{22}$$

ここで、 D_{ref} は参照時間 t_{ref} (本研究では $t_{ref} = 28$ 日)での拡散係数であり、 m はコンクリートの配合に応じた係数である。温度 T が D_{ref} に与える影響はPapakonstantinouらの研究¹⁵⁾に従い評価した。

式(20)において、 $x = X_{cov}$ (X_{cov} はかぶり)における塩化物イオン濃度が限界塩化物イオン濃度 C_{cr} を上回ったときを鋼材腐食の開始点とする。

(2) 腐食ひびわれの発生

鋼材腐食が発生すると、腐食生成物の体積膨張によりコンクリート表面に引張応力 P_t が発生する。 P_t がコンクリート引張強度 f_{cr} を上回ったときを腐食ひび割れの発生点とした。 P_t や f_{cr} あるいは腐食ひび割れ発生前後の鋼材腐食量は既往の研究¹⁵⁾に基づき算定した。

(3) SRM の計算に用いるパラメータ

PC 桁を橋軸方向に 500 分割し、各要素位置で上記の材料劣化の進展を計算する。本研究では、既往の研究¹⁾、⁵⁾、および¹⁵⁾から、この計算に必要となる各確率変数のパラメータを表-3に示すように定めた。なお、要素内ではパラメータの値は同じであり、腐食は一樣であると仮定している。分割幅は既往の研究¹⁵⁾を参考にして設定した。自己相関距離パラメータ b は、すべてのパラメータにおいて $b = 1$ とした。

本研究の目的は、既往の研究³⁾などで一樣腐食が生じると仮定し、信頼性解析が行われていた状況に対し、実際のコンクリート構造物で生じる鋼材腐食などの材料劣

表-3 塩害による材料劣化の予測に用いるパラメータの一覧

パラメータ	説明	確率分布	平均	標準偏差	空間変動性の考慮
D_{ref} (m ² /s)	基準の時間における拡散係数	正規	3.87×10^{-12}	0.774	有
X_{cov} (m)	コンクリートのかぶり	正規	0.07	0.0166	有
C_0 (kg/m ³)	コンクリート表面の塩化物イオン濃度	正規	各地域に依存	0.103 (変動係数)	有
C_{cr} (kg/m ³)	腐食限界塩化物イオン濃度	正規	1.20	0.24	有
m	配合係数	正規	0.20	0.04	有
f_{cr} (MPa)	コンクリートの引張強度	正規	3.2276	0.6455	有
T (°C)	温度	正規	$11.2 + 0.0252t$	0.5472	無

化の空間変動性を確率・統計的に表現する数理手法を提示することにある。一方、現状では、表-3 に示すパラメータの空間的な変動量に関する情報は十分ではない。今後、より多くの実験値や実測値に基づいて表-3 のパラメータを見直したり、あるいは SRM で予測した鋼材腐食量の部材内の分布と実構造物で観察されるそれとを比較するなどの検証が必要である。

また、本研究では、橋軸直角方向に生じる鋼材腐食の空間変動性は考慮せず、1 次元確率場によるモデル化となっている。つまり、全ての鋼材は同じ腐食分布を橋軸方向に持つと仮定し、曲げ耐力を算定している。今後、2 次元、あるいは 3 次元確率場への拡張を図る必要がある。

3.3 活荷重のモデル化

図-1 の Step. 3 では、交通荷重により生じる PC 桁の作用曲げモーメントの確率分布が必要となる。本研究では、車種別混入率や車間距離の不確定性を考慮して、朝夕、1 日 2 回の渋滞列を作成した。MCS によりこれを 365 日繰り返し、計算される曲げモーメントの中の最大値をその 1 年間の交通荷重の代表値とした。なお、使用した車種別混入率および車間距離の値をそれぞれ表-4 および表-5 に示した。

この活荷重シミュレーションの結果に PC 桁の自重を付加することで、作用曲げモーメントの確率分布が得られる。本研究における損傷確率は、対象 PC 桁の曲げ耐力を超える曲げモーメントが作用する確率となる。

表-4 本研究で使用了車種別混入率

2 軸車	3 軸車	4 軸車	5 軸車	6 軸車
27.9%	68.6%	2.6%	0.9%	0.0%

表-5 本研究で使用了車間距離

走行形態	平均値	標準偏差	上限値	下限値	確率分布
渋滞走行	2.71m	2.22m	11.0m	1.0m	対数正規
通常走行	6.38m	15.05m	22.0m	1.0m	対数正規

3.4 PC 桁のライフサイクル信頼性解析

新潟、宇和島において、供用年数の増加による PC 桁の曲げ耐力の低下を計算した結果をそれぞれ図-6 および図-7 に示す。両図の縦軸は、各供用年数における最も腐食が進行している部分での曲げ耐力を健全時の曲げ耐力で除した比の確率密度を示している。新潟の塩害環境ハザード⁵⁾が厳しいため、宇和島に比べて供用年数の経過に対する曲げ耐力の低下が大きい。また、経過年数が増すにつれて、計算される曲げ耐力のばらつきは増す。

図-8 および図-9 には、新潟および宇和島にある PC 桁のライフサイクル信頼性解析結果を示す。両図には、

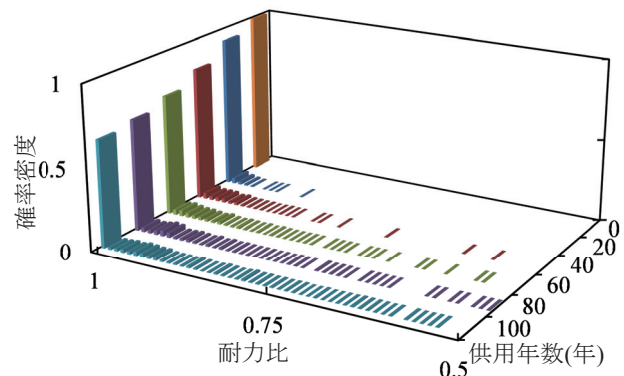


図-6 新潟における最も腐食している部分の耐力と健全時の耐力の比

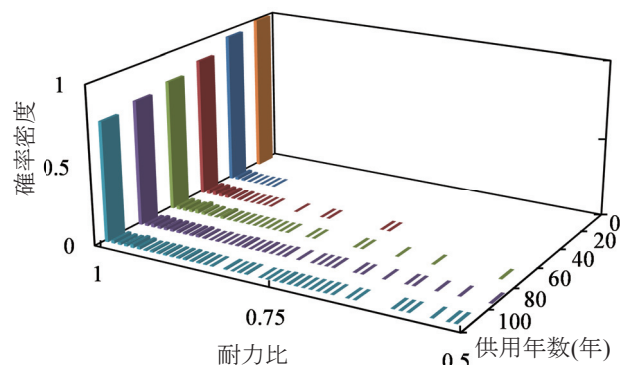


図-7 宇和島における最も腐食している部分の耐力と健全時の耐力の比

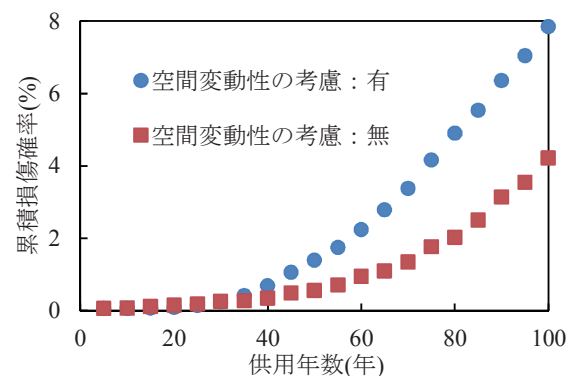


図-8 新潟における交通荷重での損傷確率

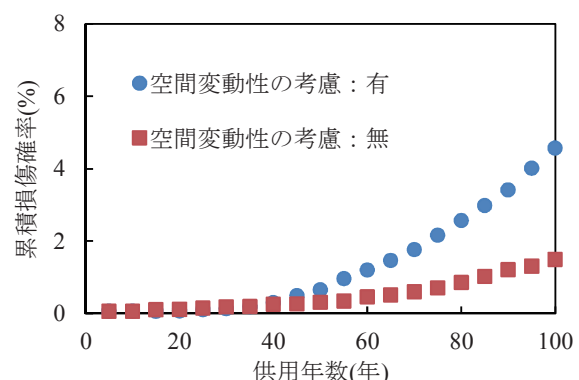


図-9 宇和島における交通荷重での損傷確率

松崎ら³⁾と同じく、劣化予測に関わるパラメータの空間変動性を考慮しなかった場合の結果も示している。

空間変動性の考慮の有無による損傷確率の差は、鋼材腐食量が小さい供用年数 30 年目までは顕著でない。しかし、供用年数 30 年を超えると、鋼材腐食量が大きくなり、両者の差が大きくなる。スパン全長で生じている鋼材腐食量の平均値に対して、空間変動性の考慮により、部材内の場所によっては平均値を超える大きな腐食量が生じるため、空間変動性を考慮することでより大きな損傷確率が算定されている。

4. まとめ

現状の技術レベルでも、数十年先にコンクリート構造物に生じる鋼材腐食量を精緻に予測することは困難である。使用するコンクリートや周辺環境の予測には、大きな不確実性が存在する。信頼性の考えは、このような不確実性を合理的に扱える。ただし、従来の信頼性解析は、部材内で材料劣化は一樣に進展すると仮定していた。そこで本研究では、信頼性解析に Spectral Representation Method (SRM) を組み入れることで、鋼材腐食量の空間変動性を考慮した損傷確率の計算を可能にした。ケーススタディでは、一樣腐食を仮定した信頼性解析結果に対して、空間変動性を考慮することで有意な差が生じることを示した。

当然のことながら、SRM を用いた信頼性解析の結果は、入力する確率変数のパラメータの情報に依存する。今後、実験値や観測値の充実を図ることでパラメータを更新したり、SRM により作成される材料劣化の空間変動性と長期間供用された実構造物で生じている劣化程度の比較などを行い、その精度を高めたい。

参考文献

- 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Yoshida, I.: Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides. *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 11, pp. 3768-3779, Nov. 2010
- 2) Frangopol, D.M., Saydam, D. and Kim, S.: Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: A brief review, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-25, Jan. 2012
- 3) 松崎裕, 秋山充良, 大木文宏, 中嶋啓太, 鈴木基行: 塩害環境下にあるコンクリート桁の設計耐用期間にわたる構造安全性評価手法とそのプレテンション PC 桁への適用, *土木学会論文集 E*, Vol.66, No.2, pp.147-166, 2010.4
- 4) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 佐藤勉, 長谷川雅志: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, *土木学会論文集*, No.767/V-64, pp.253-266, 2004.8
- 5) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Suzuki, M.: Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment. *Structure and Infrastructure Engineering*, No. 8, No. 2, pp. 125-134, Feb. 2012
- 6) 親本俊憲, 横関康祐, 宮里心一, 長谷川裕介: ひび割れを有するモルタル中の鉄筋腐食測定度解析, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.1089-1094, 2004.
- 7) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛: 塩害による腐食劣化予測に対する構造・鋼材腐食連成解析手法, *大成建設技術センター報*, 第 46 号, 2003
- 8) 間瀬茂: 地球統計学とクリギング法-R と geoR によるデータ解析, (株)オーム社, 2000
- 9) Shinozuka, M. and Deodatis, G.: Simulation of stochastic processes by spectral representation, *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 44, pp. 29-53, 1991
- 10) Shinozuka, M. and Deotatis, G.: Simulation of multi-dimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation, *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 49, pp.29-53, 1996
- 11) Rice, S. O: Mathematical analysis of random noise, *Bell System Technical Journal*, Vol. 23 No. 3, pp. 282-332, Jul. 1944
- 12) Deodatis, G and Micaletti, R.C: Simulation of highly skewed non-Gaussian stochastic processes, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.127 No.12, pp. 1284-1295, Dec. 2001
- 13) 土木学会コンクリート委員会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能 (331 委員会), *コンクリート技術シリーズ* 71, 2006.9
- 14) 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 photographs, *Proceedings of the Fourth International Symposium of Life-Cycle Civil Engineering*, Nov. 2014.
- 15) Papakonstantinou, K. G. and Shinozuka, M.: Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects, *Engineer Structures*, Vol. 57, No. 28, pp. 306-326, Dec. 2013