

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04403

研究課題名(和文) 材料劣化の空間変動の確率・統計的表現とその既存構造物の性能照査への応用

研究課題名(英文) Reproduction of spatial variability associated with material corrosion and its application to performance assessment of existing structures

研究代表者

秋山 充良 (Akiyama, Mitsuyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00302191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：腐食環境にあるRC部材の信頼性解析では、特に、鉄筋腐食が空間的に変動する影響を解析に反映することが重要である。Spectral Representation Method (SRM) による確率場の結果は、Monte Carlo法との連動が容易であり、空間変動性を考慮した劣化RC部材の信頼性解析が実施できる。本研究では、SRMによりRC構造物内で生じる鉄筋腐食の空間変動性を再現する手法を提示した。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、などの現象を再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋腐食により鉄筋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します。この低下の様子を表現する際、既存研究では通常、鉄筋腐食はRC構造物内に一様に生じていると仮定しています。RC構造物内の場所に関係なく、全ての鉄筋が同じ腐食量を持つとの条件で、劣化RC構造物の耐荷力や塑性変形能が計算されているのです。実際には、様々な理由で、鉄筋の腐食量は構造物内の場所ごとに異なり、それは空間変動性を有する現象です。本研究では、これを計算機の中で再現するための手法を提案し、実験結果との比較から、手法の妥当性を示しています。

研究成果の概要(英文)：In this study, the spatial variability associated with longitudinal rebar in reinforced concrete (RC) beam subjected to chloride attack is reproduced by Spectral Representation Method (SRM). The parameters used in SRM to represent the 1D random field are determined based on the previous experimental results of visualization of spatially distributed steel corrosion over RC beam by X-ray technology. Once the stochastic random field is defined, random variables are generated using Monte Carlo Simulation (MCS) and probabilistic density function (PDF) associated with flexural capacity of corroded RC beams could be estimated. Comparing with the experimental results of bending test of corroded RC beams in the literature, effectiveness of proposed method is demonstrated.

研究分野：構造工学

キーワード：鉄筋コンクリート 維持管理 塩害 鉄筋腐食 ガウス確率場 ライフサイクル解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

既存構造物を対象とした性能照査法の整備に関する議論が国内外で進められている。例えば、欧州の統一的な設計基準である Eurocode でも、既存構造物の安全性や使用性に関する照査を専門的に扱う編が用意されようとしている。新設構造物の設計と既存構造物の性能照査の大きな違いは、既存構造物では、点検や検査を実施することで、構造物の劣化程度に関する情報が入手可能であり、荷重や作用も対象構造物位置で測定することにより、その予測に係る不確かさを新設構造物の設計段階に比べて大幅に低減することができる。一方で、既存 RC 構造物では、鉄筋腐食などの材料劣化が生じているため、設計で用いられている断面解析などの簡易な構造解析法ではその保有耐力や変形能を正しく評価できない難しさがある。



材料劣化が生じた RC 構造物の構造性能評価に関する実験的・解析的な研究が行われている。これら一連の活動の中でチャレンジとなっているのは、既存 RC 構造物に生じる材料劣化の程度が空間的に大きく変動することに起因している (左図参照)。

材料劣化の不均一さを考慮して構造解析を行わなければ、その構造性能は正しく評価できないが、現状では、部材全体で平均化した (一様腐食を仮定した) 鉄筋腐食量を用いた構造解析が一般的に行われている。

本申請研究では、この現状を改めるため、確率場の考えを導入し、また、それに必要なパラメータを実験的に定めることにより、対象 RC 構造物から得られる数点の点検・検査結果から部材全体に広がる材料劣化の空間変動を予測する手法を構築し、それを用いた既存構造物の合理的な性能照査法を提示することになった。

2. 研究の目的

統計的手法である Kriging モデル¹⁾など、空間的なパラメータの変動を表現する数理手法は既に幾つか提案されており様々な工学分野の問題に応用されている。本研究では、将来的に、材料劣化の生じた RC 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)^{2),3)}を用いて RC 構造物内に生じる鉄筋腐食の空間変動性の表現を試みる。本研究では、まず、塩害により腐食した鉄筋を SRM で表現するために必要なパラメータを既往の Lim ら⁴⁾の実験結果に基づき同定する。Lim ら⁴⁾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することに成功している。この実験結果を用いることにより、鉄筋腐食分布を数理的に表現するための基礎パラメータを得ることができる。SRM では乱数を用いて確率場を再現するため、平均値としては、ある同じ鉄筋腐食量を持ちながら、個々には異なる鉄筋腐食分布を持つ RC はりのサンプルを多数得ることができる。

この RC はりのサンプルが、実際に鉄筋腐食が生じた RC はりの性能を統計的に再現できていれば、今後、本手法に従い多数の劣化 RC 構造物を計算機の中で作成し、MCS により空間変動性を考慮した信頼性解析などが容易に実施できる。土木学会において、コンクリートの配合や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⁵⁾。この試験結果は、同程度の鉄筋腐食量であっても、鉄筋腐食量が空間的に変動することから、得られる曲げ耐力の実験値は大きくばらつくことが示されている。そこで、SRM で作成された RC はりから計算により得られる曲げ耐力のサンプルごとのばらつきと、このベンチマークテストの実験値のばらつきの程度を比較することで、本研究で示す手法の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

鉄筋腐食が生じた RC 構造物の曲げやせん断耐力、あるいは塑性変形能評価を行う際には、構造物内の各場所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。本研究では、鉄筋腐食の空間変動性を SRM を用いて表現する。

SRM は篠塚ら^{2),3)}によって提案された、乱数を用いて空間変動性を表現する手法である。ここでは、本研究に関する部分の概要を示す。まず、SRM 乱数列を発生させる 1次元の正規分布確率場 $f_0(x)$ を考える。

$$\begin{aligned} E[f_0(x)] &= 0 \\ E[f_0(x+\xi)f_0(x)] &= R_{f_0f_0}(\xi) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $R_{f_0f_0}(\xi)$ は自己相関関数、 $E[-]$ は期待値を表す。

今、 $f_0(x)$ のパワースペクトル密度関数を $S_{f_0f_0}(\xi)$ とすると、Wiener-Khintchine の定理より次式が導ける。

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

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

1次元1変数の乱数を用いると、ガウス型確率場は以下により表現される。

$$I(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N c_k \cos(\omega_k t + \Phi_k) \quad (4)$$

$$c_k = \sqrt{2S_H(\omega_k)\Delta\omega}$$

ここで、 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$ 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、中心極限定理により正規分布に漸近する。

ここで、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変数の正規分布 $f(x)$ は次式で表される。

$$f(x) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j) \quad (5)$$

ただし、

$$c_j = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_j)\Delta\kappa} \quad (6)$$

$$\kappa_j = j\Delta\kappa \quad (7)$$

である。ここで、 $\Delta\kappa$ は数値解析におけるパワースペクトル密度関数の分割幅である。また、上限波数は、

$$\kappa_u = N\Delta\kappa \quad (8)$$

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。

このガウス型確率場を L 個発生させる場合には、

$$f^{(i)}(x)|_{i=1 \sim L} = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j^{(i)}|_{i=1 \sim L}) \quad (9)$$

を用いる。式(9)の平均値は 0 のため、平均値を μ とする場合には式(10)を用いることになる。

$$f^{(i)}(x)|_{i=1 \sim L} = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N c_j \cos(\kappa_j x + \Phi_j^{(i)}|_{i=1 \sim L}) + \mu \quad (10)$$

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次式で表される。

$$S_{ff}^T(\kappa) = \frac{\sigma^2 b}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b^2 \kappa^2}{4}\right) \quad (11)$$

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、エイリアシングを防ぐためにパワースペクトル密度関数の要素数 M は次式を満足させる。

$$N \geq 2M \quad (12)$$

これにより、式(10)は次のように表される。

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

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

本研究では、鉄筋の腐食量は距離 x のみに依存する 1次元問題で表せると仮定し、式(10)および式(13)を用いて鉄筋腐食の空間変動性をモデル化する。

SRM で用いる平均値 μ 、標準偏差 σ 、自己相関距離パラメータ b は、Lim らの行った RC はりの鉄筋腐食分布の X 線撮影結果⁴⁾に基づき同定した。

4. 研究成果

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、質量減少率の平均値 μ が 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 10,000 個の RC はり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⁴⁾で用いられたはりと同じものを想定する。そして、

質量減少率の平均値 μ は同じながら、鉄筋腐食分布の異なる RC はりから純曲げ区間の α_{area} をそれぞれ求め、コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏強度の材料試験結果を用いて曲げ耐力（最大荷重 P_u ）を計算する。

最大荷重 P_u は、健全 RC はりから計算される最大荷重 P_{u0} で除して無次元化した。サンプル数 10,000 の MCS により得られた P_u/P_{u0} （最大荷重比）の確率密度関数を Fig. 1 に示す。また、各分布から求められる平均値、標準偏差、および変動係数を Table. 1 にまとめて示した。また、Fig. 2 には、各サンプルの算定結果を示す。

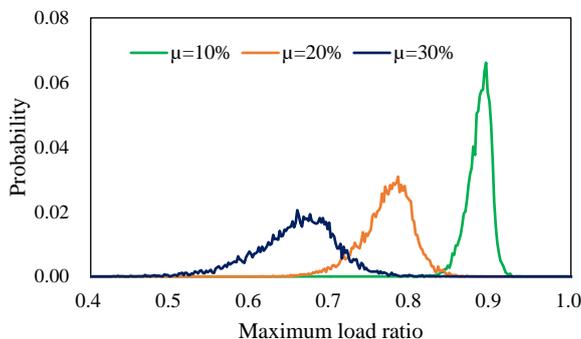


Fig. 1 最大荷重比の確率密度関数

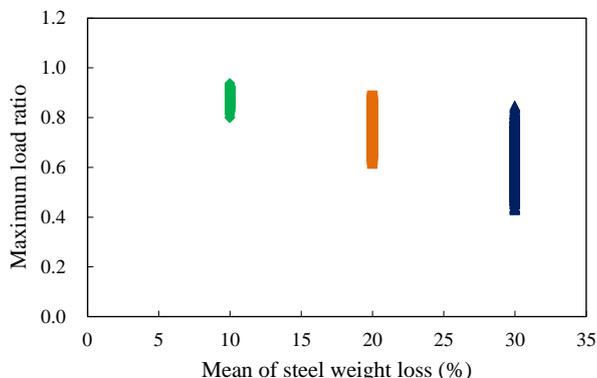


Fig. 2 平均質量減少率と最大荷重比（計算）の関係

Table. 1 推定された曲げ耐力の統計量

Assumed steel weight loss	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
10%	0.892	0.020	2.23
20%	0.790	0.047	5.93
30%	0.692	0.076	11.0

参考文献 4) 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全く同じである。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 Fig. 3 に示す。Fig. 1 と Fig. 2 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、などを再現できている。ただし、実験結果に比べて、質量減少率が小さい領域で、最大荷重比のばらつきを過大に評価する傾向にある。

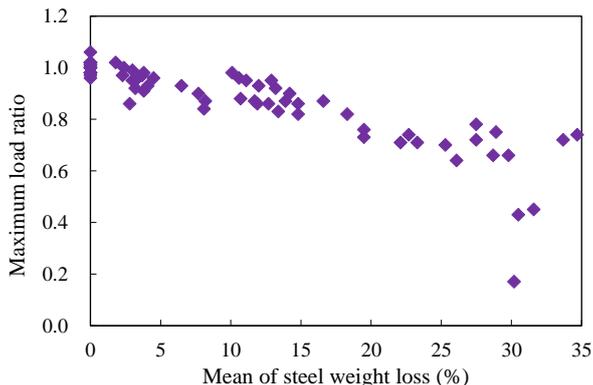


Fig. 3 平均質量減少率と最大荷重比（実験）の関係

腐食環境にある RC 部材の信頼性解析では、特に、鉄筋腐食が空間的に変動する影響を解析に反映することが重要である。Spectral Representation Method (SRM) による確率場の結果は、Monte Carlo Simulation との連動が容易であり、空間変動性を考慮した劣化 RC 部材の信頼性解析が実施できるようになる。本研究では、SRM により RC 構造物内で生じる鉄筋腐食の空間変動性を再現する手法を提示した。まず、既往の研究で報告されている、RC はりの鉄筋腐食分布に基づき SRM に用いるパラメータを同定した。パラメータは、鉄筋質量減少率の大きさの関数として与えている。

そして、同一条件で製作し、また曲げ載荷された多数の劣化 RC はりの実験結果と、提案手法により計算される最大荷重の計算値を比較した。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、などの現象を再現できることを示した。ただし、限られた実験結果を用いての比較であり、SRM に用いるパラメータの同定も数体の供試体を根拠としていることから、今後も継続した実験的・解析的な検証が必要である。

<引用文献>

- 1) 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
- 2) Shinozuka, M. and Deodatis, G.: Simulation of stochastic processes by spectral representation, Applied Mechanics Reviews, ASME, 44, pp. 29-53, 1991.
- 3) Shinozuka, M. and Deotatis, G.: Simulation of multi- dimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation, Applied Mechanics Reviews, ASME, 49, pp.29-53, 1996
- 4) 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 third International Symposium of Life-Cycle Civil Engineering, 2014.
- 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

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Akiyama, M., Frangopol, D.M., and Ishibashi, H.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2019.1604770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Brito Miguel B., Ishibashi Hiroki, Akiyama Mitsuyoshi	4. 巻 48
2. 論文標題 Shaking table tests of a reinforced concrete bridge pier with a low cost sliding pendulum system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 366 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 He Zheng-Shu, Akiyama Mitsuyoshi, He Chuan, Frangopol Dan M., Liu Si-Jin	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Life-cycle reliability analysis of shield tunnels in coastal regions: emphasis on flexural performance of deteriorating segmental linings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2019.1578381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yanweerasak Thanapol, Kea Theang, Ishibashi Hiroki, Akiyama Mitsuyoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of Recycled Aggregate Quality on the Bond Behavior and Shear Strength of RC Members	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2054 ~ 2054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app8112054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 He, Z., and Akiyama, M.	4. 巻 40
2. 論文標題 Time-dependent reliability assessment of shield tunnels under chloride and hydraulic pressure hazards	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1387-1392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hasan, M., Yan, K., Shi, Q., and Akiyama, M.	4. 巻 40
2. 論文標題 Effect of rebar types on the life-cycle cost of RC structures in a marine environment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1397-1398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 須田郁慧, 熊崎達郎, 西山聡一郎, 塩田啓介, 櫻井有哉, 萩原健一, 秋山充良	4. 巻 64A
2. 論文標題 鋼製座屈拘束ダンパーを有するRC柱の正負交番載荷実験と復旧時間・地震リスクを考慮したその耐震補強設計法に関する基礎検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 262-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lim, S., Raju, R.A., Matsuda, M., Okamoto, T. and Akiyama, M.	4. 巻 170
2. 論文標題 Structural behavior prediction of SFRC beams by a novel integrated approach of X-ray imaging and finite element method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 347-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yanweerasak Thanapol, Pansuk Withit, Akiyama Mitsuyoshi, Frangopol Dan M.	4. 巻 14
2. 論文標題 Life-cycle reliability assessment of reinforced concrete bridges under multiple hazards	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2018.1437640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 須田郁慧, 萩原健一, 塩田啓介, 秋山充良	4. 巻 39
2. 論文標題 鋼製座屈拘束ダンパー付き単柱式RC柱の正負交番載荷実験	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 901-906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木一成, 野村敏雄, 田中翔, 秋山充良	4. 巻 39
2. 論文標題 超高強度繊維補強コンクリート供試体のX線撮影と鋼繊維の分散・配向を考慮した曲げ強度評価に関する基礎的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1093-1098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lim, S., Matsuda, M., Raju, R., Akiyama, M.	4. 巻 39
2. 論文標題 Flexural behavior prediction of SFRC beams using finite element method and X-ray image	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1099-1104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 He, Z., Liu, S., He, C., Akiyama, M.	4. 巻 39
2. 論文標題 Structural damage process of an underwater shield tunnel in an aggressive environment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1333-1338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Takenaka, K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Reliability-based durability design and service life assessment of reinforced concrete deck slab of jetty structures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 468-477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Jiang, H.	4. 巻 13
2. 論文標題 Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of RC members: Novel X-ray and digital image processing techniques	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 118-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yanweerasak, T., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.	4. 巻 21(7)
2. 論文標題 Updating the seismic reliability of existing RC structures in a marine environment by incorporating the spatial steel corrosion distribution: application to bridge piers	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 04016031-1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000889	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 福島広之, 櫻井絢子, 宮本祥平, 秋山充良	4. 巻 38(2)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1561-1566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 名波健吾, 磯辺弘司, 秋山充良, 越村俊一	4. 巻 38(2)
2. 論文標題 南海トラフ地震の影響を受けるRCラーメン高架橋の強震動および津波による損傷確率の比較	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 877-882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lim, S., Okamoto, T., Matsuda, M., Akiyama, M.	4. 巻 38(2)
2. 論文標題 Flexural behavior prediction of SFRC beams: A novel X-ray technique	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1351-1356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宇野州彦, 稲場友也, 小林將志, 秋山充良	4. 巻 72(4)
2. 論文標題 東北地方太平洋沖地震により損傷した鉄道RCラーメン高架橋の3次元非線形動的解析による被害分析	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_506-I_514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆	4. 巻 72(4)
2. 論文標題 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系 試案構築にむけての考察	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_459-I_472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋良和, 秋山充良, 片岡正次郎, 本田利器	4. 巻 72(4)
2. 論文標題 国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_821-I_830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ghosn, M., Dueñas-Osorio, L., Frangopol, D. M., McAllister, T. P., Bocchini, P., Manuel, L., Ellingwood, B., Arangio, S., Bontempi, F., Shah, M., Akiyama, M., Biondini, F., Hernandez, S., and Tsiatas, G.	4. 巻 In press
2. 論文標題 Performance indicators for structural systems and infrastructure networks	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 In press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.	4. 巻 127
2. 論文標題 Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 189-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akiyama, M., Takahashi, Y., Hata, Y. and Honda, R.	4. 巻 1(3)
2. 論文標題 Lessons from the 2016 Kumamoto earthquake based on field investigations of damage to bridges	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Earthquake and Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 225-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hata, Y., Yabe, M., Kasai, A., Matsuzaki, H., Takahashi, Y. and Akiyama, M.	4. 巻 In press
2. 論文標題 Ground motion estimation for the elevated bridges of the Kyushu Shinkansen derailment caused by the foreshock of the 2016 Kumamoto earthquake based on the site-effect substitution method	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 In press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-016-0573-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Jiang, H.	4. 巻 13(1)
2. 論文標題 Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of RC members: Novel X-ray and digital image processing techniques	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 118-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Takenaka, K.	4. 巻 13(4)
2. 論文標題 Reliability-based durability design and service life assessment of reinforced concrete deck slab of jetty structures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 468-177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 松田充弘, 岡本健弘, Lim Sopokhem, 秋山充良	4. 巻 63A
2. 論文標題 鋼繊維のX線撮影結果を用いたSFRCはりの曲げ挙動解析に関する基礎的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 847-858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 脊戸鉄太, 服部琳太郎, 石垣直光, 末崎将司, 秋山充良	4. 巻 63A
2. 論文標題 水平二方向入力を受ける摩擦振子型免震機構付き柱の震動実験	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 385-396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 熊崎達郎, 七澤利明, 河野哲也, 秋山充良	4. 巻 63A
2. 論文標題 リダンダンシーを考慮した橋梁杭基礎の耐震信頼性設計法に関する基礎的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 134-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 名波健吾, 磯辺弘司, 竹本梨香, 秋山充良, 越村俊一	4. 巻 63A
2. 論文標題 南海トラフ地震の影響を受ける橋梁・盛土構造物の耐震・耐津波信頼性評価法に関する基礎的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 123-133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秦吉弥, 矢部正明, 野津厚, 葛西昭, 高橋良和, 松崎裕, 秋山充良	4. 巻 63A
2. 論文標題 臨時余震観測に基づく 2016 年熊本地震における西原村および南阿蘇村の被災橋梁に作用した地震動の評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 265-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秦吉弥, 矢部正明, 柎木正喜, 高橋良和, 葛西昭, 松崎裕, 秋山充良	4. 巻 63A
2. 論文標題 臨時余震観測に基づく 2016 年熊本地震における九州自動車道沿いの被災橋梁に作用した地震動の評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 251-264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 Akiyama, M. and Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Risk and Resilience of Civil Infrastructure Systems under Extreme Events
3. 学会等名 Proceedings of IABSE Symposium 2019, Guimaraes, Portugal (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akiyama, M. and Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Life-cycle reliability of bridges under independent and interacting hazards
3. 学会等名 Proceedings of 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 He, Z., Akiyama, M., He, C. and Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Time-dependent structural reliability analysis of shield tunnels in coastal regions
3. 学会等名 Proceeding of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lim, S., Song, H., Akiyama, M., Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Effects of Current Density on the Spatial Variability associated with Steel Corrosion and Flexural Behaviour of Corroded RC Beams
3. 学会等名 Proceeding of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nishiya, N., Fukushima, H., Sakurai, A., Akiyama, M., Bocchini, P., Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Effect of Different Steel Weight Loss Distributions on the Life-Cycle Reliability of PC Girders
3. 学会等名 Proceeding of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田啓佑, 西谷直樹, 福島弘之, 秋山充良
2. 発表標題 塩害環境下にあるRC スラブに生じる材料劣化の2次元非ガウス確率場によるモデル化とその構造性能評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 平成30年度全国大会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Akiyama, M.
2 . 発表標題 Lessons from recent major earthquakes in Japan: Emphasis on reliability assessment of structures under multiple hazards
3 . 学会等名 18th ASEP International Convention (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Raju, R.A., Lim, S., Matsuda, M., and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Mechanical Behavior Estimation of SFRC Beams Considering the Variability of Steel Fiber Dispersion
3 . 学会等名 Proceeding of the 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-15) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Lim, S., Song, H., Nie, L., and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Structural Performance Assessment of Aging RC Beams Considering the Spatial Variability of Steel Corrosion: Experimental Study and Probabilistic Model
3 . 学会等名 Proceeding of the 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-15) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Nishiya, N., Sakurai, A., Fukushima, H., and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Time-Dependent Reliability of Corroded PC Bridge Girders by Incorporating the Spatial Steel Corrosion Distribution
3 . 学会等名 Proceeding of the 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-15) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawai, Y., Isobe, K., Nanami, K., Akiyama, M., and Koshimura S.
2. 発表標題 Bridge Reliability in Mie and Kochi Prefectures Subjected to Seismic and Tsunami Effects Caused by the Anticipated Nankai Trough Earthquake
3. 学会等名 Proceeding of the 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-15) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Brito, B., Seto, T., Ichikawa, Y., Ishigaki, N., Suezaki, M., and Akiyama, M.
2. 発表標題 Bidirectional Shaking Table Test of Concrete Bridge Pier with Friction Pendulum Isolation System
3. 学会等名 Proceeding of the 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-15) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西谷直樹, 福島広之, 櫻井絢子, 秋山充良
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Lim, S., Song, H., Nie, L., and Akiyama, M.
2. 発表標題 Effect of Spatial Variability Associated with Steel Corrosion on the Reliability of Corroded RC Beams
3. 学会等名 Proceeding of the 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Brito, B., Seto, T., Ichikawa, Y., Ishigaki, N., Suezaki, M., and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Shaking Table Test of RC Columns with Sliding Pendulum System
3 . 学会等名 Proceeding of the 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Raju, R. A., Lim, S., Matsuda, M., and Akiyama, M.
2 . 発表標題 FE-Analysis of SFRC Beams Using the X-ray Images
3 . 学会等名 Proceeding of the 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 He, Z., Lui, S., He, C., and and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Performance Assessment of Shield Segments under Coupling Effects of Environmental Agent and Loading
3 . 学会等名 Proceeding of the 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Fukushima, H., Sakurai, A., Akiyama, M., and Frangopol, D.M.
2 . 発表標題 Life-Cycle Reliability Assessment of Deteriorating RC Bridge Girders Considering Spatial Variability
3 . 学会等名 Proceeding of the 12th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Nanami, K., Sthapit, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M., Iwabuchi, Y., Sugino, H., and Koshimura, S.
2. 発表標題 Probabilistic Tsunami Fragility Assessment Considering the Tsunami Pressure Fluctuations and Model Uncertainties
3. 学会等名 Proceeding of the 12th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yanweerasak, T., Pansuk, W., Akiyama, M., and Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Updating Life-Cycle Reliability of Corroded RC Bridges under Multiple Hazards Based on Inspection Data
3. 学会等名 Proceeding of the 12th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akiyama, M.
2. 発表標題 Lessons from the recent earthquakes in Japan based on field investigations of damage to bridge
3. 学会等名 MPSS (Ministry of Public Safety and Security) Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akiyama, M.
2. 発表標題 Long term performance of concrete bridges under multiple hazards
3. 学会等名 TU1406 COST Action Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 Akiyama, M. and Frangopol, D.M.
2 . 発表標題 Probabilistic approach for road network retrofitting prioritization under seismic and tsunami hazards
3 . 学会等名 Proceedings of 5th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2016) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Frangopol, D.M. and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Reliability of aging structures under multiple hazards: Emphasis on highway bridges under earthquake and tsunami
3 . 学会等名 The International Workshop on Engineering Reliability and Stochastic Mechanics (IWERSM2016) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Kano, K., Odake, Y., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.
2 . 発表標題 Partial factors for reliability-based durability assessment of RC bridges using observational data
3 . 学会等名 Proceedings of the Ninth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Takemoto, R. and Akiyama, M.
2 . 発表標題 Risk assessment of RC bridges belonging to a transportation network under multiple hazards
3 . 学会等名 5th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 Yanweerasak, T., Takemoto, R., Akiyama, M., and Frangopol, D.M.
2. 発表標題 Life-cycle reliability assessment of corroded bridges under multiple hazards
3. 学会等名 Proceeding of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Engineering (IALCCE2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Lim, S., Akiyama, M., and Frangopol, D.M
2. 発表標題 Assessment of the structural behavior of corrosion-affected RC beams: Experimental study and modeling
3. 学会等名 Proceeding of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Engineering (IALCCE2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Isobe, K., Akiyama, M., Frangopol, D.M., and Koshimura, S.
2. 発表標題 Seismic and tsunami reliability analysis of bridges subjected to the anticipated Nankai trough earthquake
3. 学会等名 Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 秋山 充良、石橋 寛樹	4. 発行年 2019年
2. 出版社 早稲田大学出版部	5. 総ページ数 152
3. 書名 南海トラフ地震	

1. 著者名 Akiyama, M., Soliman, M., Biondini, F. and Frangopol, D.M.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 American Society of Civil Engineers	5. 総ページ数 31
3. 書名 Chapter 1 "Structural Deterioration Mechanisms" in Life-Cycle Assessment, Design, and Maintenance of Structures and Infrastructure System (Edited by Biondini, F. and Frangopol D.M.)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	斉藤 成彦 (Saito Shigehiko) (00324179)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	高橋 良和 (Takahashi Yoshikazu) (10283623)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	吉田 郁政 (Yoshida Ikumasa) (60409373)	東京都市大学・工学部・教授 (32678)	