

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686030

研究課題名 (和文) 現場位置の情報を活用した作用・構造性能の確率統計量の改善と劣化構造物の余寿命評価

研究課題名 (英文) Updating of random variables associated with demand and capacity using observation information and estimates of remaining lifetime of deteriorated structures

研究代表者

秋山 充良 (AKIYAMA MITSUYOSHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00302191

研究成果の概要 (和文)：

海洋環境にある鉄筋コンクリート構造物から得られる点検・検査情報（目視検査によるひび割れ性状や塩化物イオン濃度）を活用することで、構造物の劣化予測に係る確率変数を Sequential Monte Carlo Simulation により更新し、それらを用いて確率論的に残存寿命を評価する一連のフレームワークを構築した。残存寿命の予測には、部材内で生じる鉄筋腐食の空間分布モデルが必要になるため、X線技術を適用し、実験的にそのモデル化に必要な基礎情報も得ている。

研究成果の概要 (英文)：

This study presents a framework for estimating the remaining lifetime of reinforced concrete structures in a marine environment based on the observation information such as visual inspection of corrosion cracks and chloride concentration distributions. Random variables used in the prediction of corrosion process of concrete component could be updated by Sequential Monte Carlo Simulation. In addition, growth process of steel corrosion was visualized by X-ray photography in order to understand the spatial distribution of corroded steel used in the proposed framework.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	20,000,000	6,000,000	26,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：信頼性理論, Sequential Monte Carlo Simulation, X線, 鉄筋コンクリート, 塩害, 余寿命評価, ライフサイクル解析

1. 研究開始当初の背景

安全・安心な社会基盤構造物（インフラ構造）の整備により、我が国の各都市はこれまで持続的な発展を遂げてきた。インフラ構造

の代表である橋梁は、国道・地方道に限っても橋長 15m 以上のものがおよそ 15 万橋もある。一方、橋の年齢を意味する橋齢が寿命の目安とされる 50 年を超える割合は、現在は

10%に満たないものの、20年後には約半数に達し、インフラ構造を安全かつ効率的に長期間使い続けるためのライフサイクルマネジメント (LCM) 手法が求められている。高度経済成長期を終え、我が国が少子高齢化社会を本格的に迎える中で、膨大なインフラ構造のストックを効率的かつ経済的にマネジメントすることは、今後の都市の持続的発展を可能にするために必要不可欠な要素である。LCM では、構造性能劣化曲線を与え、劣化予測変数を仮定し、コスト情報が入手されれば、インフラ構造の LCM は実現できる。しかし、現状では、個々の要素技術は LCM を実現できるレベルにない。例えば、飛来塩分の作用を受け、鉄筋腐食が発生し、その腐食生成物の膨張圧によりコンクリート表面に多くのひび割れが見られる鉄筋コンクリート橋脚があったとする。この橋脚について、(a) 構造安全性の初期状態に対する低下量、(b) 外観的な調査から内部の劣化状態を空間分布まで再現、(c) 今後の使用可能な期間 (余寿命評価)、(d) 長寿命化を可能にする補修・補強の実施時期、等々の質問に現状の技術レベルでは答えられない。これに対する明確な回答を持たなければ、インフラ構造の LCM や長寿命化は実現できない。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、塩害により劣化したコンクリート構造物を対象にして、現場位置の情報を活用することで劣化予測に係わる環境作用や構造性能の確率統計量を改善し、それを信頼性解析に取り入れることで構造物の破壊可能性を破壊確率として定量化し、余寿命を判断する材料を提供する。具体的には、(i) X線透過により腐食進展の様子をモニターすることで、簡易的な点検・検査により得られる腐食ひび割れ性状から構造性能の低下程度や部材内部の腐食の空間分布を推定することを可能にする。(ii) 構造物周辺の腐食環境の厳しさを定量化する技術を確立する。(iii) 腐食ひび割れ性状や飛来塩分量などの環境計測、また、コンクリートの品質 (拡散係数等) などの情報が現場位置で得られると、これを与条件とした逆解析の問題を解くことで、劣化進展予測に係わる作用や構造性能の確率統計量を更新する。最終的に、(iv) これらの要素技術をリンクすることで、現場位置で得られた情報から劣化構造物の破壊確率が算定され、本指標に基づくことで補修・補強の必要性や供用停止の判断などが可能となる。

3. 研究の方法

(1) X線技術の活用

X線技術により、RC 部材内の鉄筋腐食状態を可視化できれば、鉄筋腐食の成長過程を連

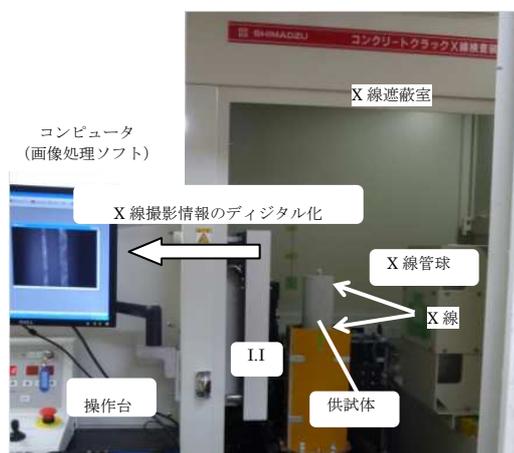


図-1 X線撮影装置の概要

続的に観察することが可能となり、鉄筋腐食の空間分布をモデル化するための情報、さらには、鉄筋腐食とコンクリート表面に表れる腐食ひび割れ幅・密度の関係等について、有用な情報を得ることができると期待される。ただし、健全時から、例えば、10%程度の断面欠損が生じたコンクリート内の鉄筋の状態を X線により定量的に評価可能であるのかは明らかでなく、このような研究目的の達成に X線技術が適用できるのかをまず確認する必要がある。そこで、X線によりコンクリート内の鉄筋腐食の状態を撮影し、鉄筋の非腐食域の境界を捉えるためのデジタル画像処理方法などを検討した。具体的には、電食にて予め腐食量と腐食の分布が既知の鉄筋をコンクリート中に埋め込み、その状態を X線撮影し、デジタル画像処理方法の違いが X線撮影画像から予測される鉄筋腐食量の精度に及ぼす影響などを検証した。次いで、電食にて劣化させた RC はり部材の X線撮影を行い、鉄筋質量減少率の不均一さの程度や形成過程を観察した。また、鉄筋質量減少率とコンクリート表面に表れる腐食ひび割れ幅の関係、さらには、部材内部の鉄筋質量減少率の空間的な変動と曲げ耐力の関係などに関する基礎資料を得た。若手研究 (A) の予算を使い購入した X線撮影装置のシステムを図-1に示す。

(2) 環境ハザード評価

海洋環境作用を表す因子には、飛来塩分量、海風比率、気温や湿度などがあげられる。既往の文献調査に基づき、これらと表面塩化物イオン濃度や鉄筋腐食速度の関係式を構築する。現状では、関係式自体が非常に大きなバラツキを有することになると思われ、さらには、環境作用因子の時間的・空間的な変動に対処するため、地震ハザード解析などで用いられてきた数理手法を本問題に応用し、ある表面塩化物イオン濃度や鉄筋腐食速度が生じる超過確率 (海洋環境ハザード曲線) の算定フローを提示する。

(3) SMCS の活用

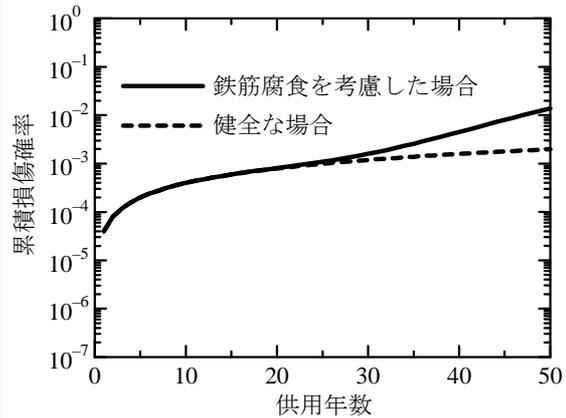
例えば、見かけの拡散係数の計算値と実測値の違いを表現するモデル不確実性がある。このモデル不確実性の確率変数は、(実測値)/(計算値)からその統計量が得られるが、変動係数 100%を超えるほどの大きなバラツキを持つ。設計時には、水セメント比とセメント種類のみから見かけの拡散係数を予測するため、この大きなバラツキが存在することを考慮した対応が必要になる。一方、既存構造物では、構造物サイトで詳細調査(点検・検査)を実施し、その情報を活用することで、このバラツキの低減が可能である。例えば、建設後 t 年で目視点検により腐食ひび割れ幅 w_{cr} が得られたとする。このとき、 w_{cr} の大きさに合致するように劣化予測に係る変数を逆解析により同定することで、対象とする既存構造物の調査時の状態に整合させた見かけの拡散係数などを得ることができる。他の劣化予測パラメータも同様に同定することで、設計時の情報のみから劣化予測を行っていた場合に比べ、相当に精度良くコンクリート構造物の調査時点の安全性や、あるいは将来的な安全性の経時的な変化を推定できるようになる。

ただし、詳細調査の情報として腐食ひび割れ幅が与えられたとしても、これに関係する確率変数は多数あり、しかも、腐食ひび割れ幅とそれら確率変数の関係は非線形である。例えば、30年目に腐食ひび割れ幅が w_{cr} の大きさとなるように見かけの拡散係数を同定することは簡単ではない。さらに、確率変数の中には非正規変数も含まれることがある。この場合、詳細調査の情報(腐食ひび割れ幅)に合致するような各確率変数の更新(逆解析)を、従来広く使用されてきたカルマンフィルタなどの手法に基づいて行うことは不可能になる。このような非線形・非ガウスを含む逆問題に適用可能な数理手法として Sequential Monte Carlo Simulation (SMCS) がある。本研究では、SMCSにより、詳細調査の結果に基づいて、劣化予測や保有性能評価に関係するパラメータを更新し、さらに、外力との比較から性能照査を行う。

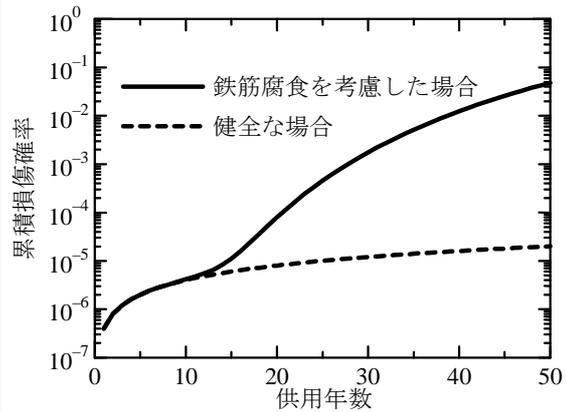
4. 研究成果

(1) 塩害・地震環境下にある鉄筋コンクリート構造物の信頼性評価

地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を考慮した耐震信頼性(累積損傷確率)の経時変化を予測した。解析結果の一例を図-2に示す。供用開始直後は、地震危険度により RC 橋脚の耐震信頼性の大きさが決定されるが、その後は、RC 橋脚が置かれる塩害環境の厳しさの程度を反映して累積損傷確率は変化する。我が国の沿岸部に建設される RC 橋脚の安全性に影響を与える主たるハザード



(a) 都市 A (地震危険度：大、塩害危険度：小)



(b) 都市 B (地震危険度：小、塩害危険度：大)

図-2 供用年数と累積損傷確率の関係

は、地震と塩害であるが、本研究で提示した手法を用いることで、その両者を同時に考慮した安全性評価が実現される。また、今回の耐震信頼性の評価例では、相対的に地震危険度が低い地点ほど、鉄筋腐食を考慮しない場合に対する鉄筋腐食に伴う累積損傷確率の増加割合が大きくなっている。このことは、鉄筋腐食の影響を考慮すると、それが RC 橋脚の耐震性能やじん性を低下させ、引いては構造物の安全性に及ぼす影響が、地震危険度の低い地域でより顕在化することを意味している。本研究で提示した手法を用いることで、例えば、かぶりやコンクリートの品質(水セメント比など)が RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性に及ぼす影響を種々の不確実性の存在を陽に考慮した上で定量的に明示できる。また、既存構造物を対象とする場合には、許容される損傷確率の大きさと比較することで、補修・補強の実施時期を決定するための判断材料となる。このように、地域毎の地震危険度と塩害環境の厳しさに応じた RC 構造物の設計や維持管理を本手法は可能にする。

(2) SMCS を用いた信頼性評価

腐食ひび割れ幅、および塩化物イオン濃度の分布が点検・検査により得られた場合を想

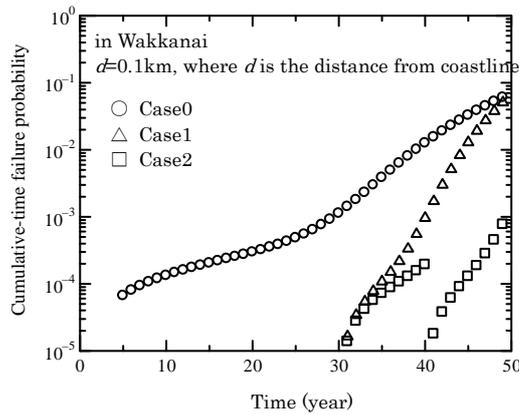


図-3 SMCS を用いた信頼性評価の一例

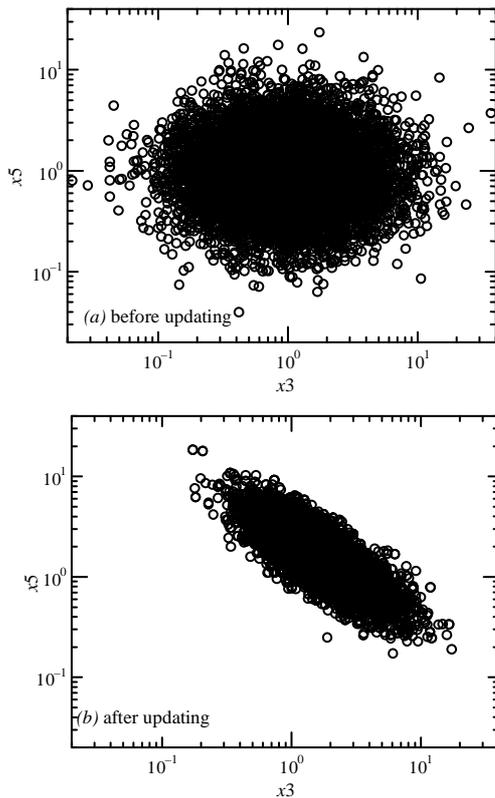


図-4 SMCS による確率変数の更新

定したケーススタディを実施した。SMCS により、劣化予測に係る確率変数を更新し、それらを用いた信頼性評価例を示している。

図-3 に解析結果の一例を示す。図中、Case 1 は、30 年目に目視検査でカテゴリーII の腐食ひび割れ幅が見つかり、かつ、塩化物イオン濃度分布が与えられた場合である。Case 2 は、30 年目に目視検査でカテゴリーI の腐食ひび割れ幅と塩化物イオン濃度分布が与えられ、さらに、40 年目にカテゴリーII の腐食ひび割れ幅が確認された場合を想定している。Case 0 は、比較のため、一切の詳細調査が行われないうちを想定している。確率変数 x_3 (飛来塩分量から表面塩化物イオン濃度を求める際のモデル不確定性) と x_5 (Fick の拡散方程式により鉄筋位置の塩化物イオン

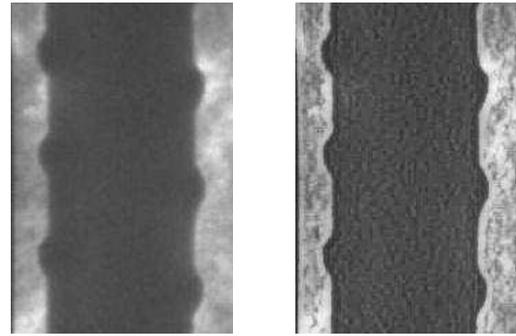


図-5 コンクリート中の鉄筋

濃度を予測するのに伴うモデル不確定性) について、SMCS を実施する前後の関係を図-4 に示す。図-4(a) は、過去の実験データや既存構造物の調査から定めた統計量より単純に発生させたサンプル群である。この各サンプルを SMCS により、調査結果に整合するように更新した後のものが図-4(b) である。設計時の情報のみでは、相当に大きな変動係数を仮定せざるを得ないが、詳細調査により、対象構造物の情報を与えることで、構造物の調査時点の状態に整合するように確率変数が更新される。その結果として、大幅にバラツキが低減されることが図-4(b) より確認される。これが 30 年目で、詳細調査の実施後に損傷確率が大幅に小さくなった理由である(図-3)。また、Case 2 の結果に示されるように、ここで示すアプローチは、ある時間間隔で実施される複数の詳細調査にも対応できる。過去の調査結果に、新しい調査結果を追加し、それら全てに基づいて確率変数の更新を行うことで、モデル不確定性のバラツキを大幅に低減することが可能となる。

(3) X線撮影による鉄筋腐食成長過程の観察
 コンクリート中にある腐食鉄筋について、X線技術によりその腐食状態の可視化を行うとともに、X線画像から面積の減少量を推定するための画像処理方法を検討した。さらに、本手法を電食により鉄筋を腐食させた RC はりに適用し、鉄筋腐食成長過程の観察に関する基礎検討を行った。主な結論を以下に示す。
 ① X線技術と、デジタル画像処理方法を工夫することで、コンクリート中にある鉄筋の非腐食域を抽出することが可能である。画像処理方法として、モード法とエッジ検出を用いたが、コンクリート中の鉄筋を撮影する目的に対しては、エッジ検出の方が適している。エッジ検出による場合には、本研究で用いた空間フィルタのオペレータが有効である。エッジ検出による画像処理後のコンクリート中の鉄筋の様子を図-5 に示す。図の左側が画像処理前、右側が画像処理後の結果である。
 ② 今後、電食と実環境や乾湿繰り返し環境に暴露される RC はりで生じる鉄筋腐食の成

長過程の違いや、せん断補強鉄筋が腐食ひび割れ幅の成長に及ぼす影響など、本研究で検討できていない内容についての継続的な研究が必要である。しかし、本研究で実施した基礎検討から、RCはりを用いたX線撮影することで、部材内の鉄筋腐食成長過程の観察、鉄筋腐食の不均一さの形成過程と不均一さの程度のモデル化に必要な情報の入手、鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅の関係、また、鉄筋腐食の分布と曲げ耐力の関係などの考察が可能であることを確認した。

なお、若手研究 (A) の期間内に、鉄筋腐食の空間分布をモデル化するまでの実験データを蓄積することができなかった。これは、前記の SMCS による信頼性評価における大変に重要な情報となる。前記の SMCS による信頼性評価は、空間分布を無視し、鉄筋腐食は均一に発生すると仮定したものである。この X 線技術を用いた研究の継続により、このモデル化は十分に可能であることを実証したのは、若手研究 (A) の大きな成果である。実験データを蓄積し、鉄筋腐食の不均一性を表現するモデルを提案した後、それを用いた信頼性評価を今後、実施したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

1. Akiyama, M., Frangopol, DM., Matsuzaki, H.: Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011. 査読有 (印刷中)
2. Akiyama, M., Matsuzaki, M., Dang, D.H. and Suzuki, M.: Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011. 査読有 (印刷中)
3. Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Suzuki, M.: Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of R/C structures in a marine environment, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011. 査読有 (印刷中)
4. 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, 2010. 査読有
5. M. Akiyama, M. Suzuki, and D.M. Frangopol: Stress-Averaged Strain Model for Confined High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 107, No. 2, pp. 179-188, 2010. 査読有
6. 松崎裕, 秋山充良, 鈴木基行: 部分係数を用いた海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性設計, *構造工学論文集*, Vol. 56A, pp. 733-741, 2010. 査読有
7. 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. 147-165, 2010. 査読有
8. 吉田郁政, 鈴木修一, 秋山充良: SMCS を用いた RC 構造物劣化度逆推定のための塩化物イオン濃度計測誤差のモデル化, *応用力学論文集*, Vol. 13, pp. 79-88, 2010. 査読有
9. 吉田郁政, 秋山充良, 鈴木修一, 山上雅人: Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, *土木学会論文集 A*, Vol. 65, No. 3, pp. 758-775, 2009. 査読有
10. 吉田郁政, 本城勇介, 秋山充良: SMCS を用いた既設構造物のための信頼性解析の問題点と精度評価, *応用力学論文集*, Vol. 12, pp. 79-88, 2009. 査読有
11. 秋山充良, 松崎裕, 佐藤広和, 内藤英樹, 鈴木基行: 塩害環境下にある RC 橋脚の耐震安全性確保の観点から定めた限界鉄筋腐食量とその耐久設計法に関する確率論的考察, *土木学会論文集 E*, Vol. 64, No. 4, pp. 541-559, 2008. 査読有

[学会発表] (計 18 件)

1. M. Akiyama, DM. Frangopol, I. Yoshida. Probabilistic Approach to Service Life Prediction of Concrete Structures Subjected to Load and Environmental Actions. Joint Fib-RILEM Workshop on Modelling of Corrosion Concrete Structures, スペインマドリッド市, 2010年11月23日.
2. M. Akiyama and DM. Frangopol: On life-cycle reliability under earthquake excitations of corroded structures, IALCCE (International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering) 2010, 台湾台北市, 2010年10月30日 (Keynote Lecture)
3. M. Akiyama, D.M. Frangopol, I. Yoshida. Service life of RC structures in a marine environment: A probabilistic approach. 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure. オランダ・デルフト大学, 2010年10月4日.
4. 小森谷隆, 萩原聡子, 秋山充良, 鈴木基行, 中嶋啓太: X線撮影を用いた RC 部材内の鉄

- 筋腐食状態の可視化に関する基礎的研究，土木学会第65回年次学術講演会，札幌，2010年9月3日
5. 阿部遼太，秋山充良，鈴木基行，猪股右樹：公開地震ハザードを用いた各種橋梁構造の耐震信頼性の比較，土木学会第65回年次学術講演会，札幌，2010年9月2日
 6. 中嶋啓太，小森谷隆，秋山充良，鈴木基行，吉田郁政：ヘルスマニタリングから得られる情報を活用したコンクリート構造物のライフタイムにわたる構造信頼性評価法に関する基礎的研究，土木学会第65回年次学術講演会，札幌，2010年9月1日
 7. M. Akiyama, DM. Frangopol and I. Yoshida: Long-term performance prediction of RC bridge slabs in a marine environment, The Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, アメリカ・フィラデルフィア, 2010年7月14日
 8. I. Yoshida, M. Akiyama and S. Suzuki: Reliability Analysis of an Existing RC Structure Updated by Inspection Data, The Tenth International Conference on Structural Safety and Reliability, 大阪, 2009年9月13日
 9. M. Akiyama, M. Suzuki, H. Matsuzaki and T. H. Dang: Reliability-Based Capacity Design of RC Bridge System, The Tenth International Conference on Structural Safety and Reliability, 大阪, 2009年9月13日
 10. 中嶋啓太，秋山充良，鈴木基行，吉田郁政，鈴木修一，猪股右樹，山口恭平：腐食ひび割れの観察結果を活用した既存鉄筋コンクリート桁の耐久信頼性評価に関する基礎的研究，土木学会第64回年次学術講演会，福岡，2009年9月3日
 11. 小森谷隆，秋山充良，鈴木基行，吉田郁政：塩害による劣化進展の空間分布を考慮した既存鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性評価に関する基礎的研究，土木学会第64回年次学術講演会，福岡，2009年9月3日
 12. 阿部遼太，秋山充良，鈴木基行，猪股右樹：地震後の使用性確保に着目した橋梁構造の開発に関する基礎的研究，土木学会第64回年次学術講演会，福岡，2009年9月2日
 13. 松崎裕，秋山充良，佐藤広和，内藤英樹，鈴木基行：塩害環境下にあるRC橋脚の耐震安全性を考慮した鉄筋腐食の限界状態設定に関する研究，土木学会第64回年次学術講演会，福岡，2009年9月2日
 14. DM. Frangopol and M. Akiyama: Seismic Reliability Analysis of Corroded Reinforced Concrete Bridge Piers in a Life-Cycle Perspective, COMPDYN 2009, ギリシャ, 2009年6月23日 (Plenary Lecture)
 15. 猪股右樹，秋山充良，鈴木基行，内藤英樹，松崎裕：塩害による鉄筋腐食が生じたRC橋脚の耐震信頼性評価，土木学会第63回年次学術講演会，仙台，2008年9月13日
 16. 松崎裕，秋山充良，鈴木基行：腐食ひび割れ発生点を限界状態とした海洋環境下にあるRC構造物の耐久信頼性設計法，土木学会第63回年次学術講演会，仙台，2008年9月12日
 17. 中嶋啓太，秋山充良，鈴木基行，大木文宏：塩害環境下にあるコンクリート桁橋の構造性能劣化曲線と構造信頼性評価への応用，土木学会第63回年次学術講演会，仙台，2008年9月11日
 18. 林弘，秋山充良，鈴木基行，猪股右樹：公開地震ハザードを用いたRC橋脚の地震時破壊確率の簡易算定法，土木学会第63回年次学術講演会，仙台，2008年9月10日
- 〔図書〕(計1件)
1. Dan M. Frangopol, M. Akiyama: Lifetime Seismic Reliability Analysis of Corroded Reinforced Concrete Bridge Piers, Chapter in Computational Methods in Earthquake Engineering (Edited by M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, and N. D. Lagaros), Book published by Springer in the Computational Methods in Applied Sciences 21, 2010, 527-537.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
秋山充良 (AKIYAMA MITSUYOSHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00302191
 - (2) 研究分担者
()
研究者番号：
 - (3) 連携研究者
()
研究者番号：