

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360185

研究課題名(和文)地震と塩害の影響を受ける橋梁構造の耐震性能評価とライフサイクルマネジメント

研究課題名(英文)Life-cycle management of bridges under seismic and airborne chloride hazards

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) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海洋環境下にあるRC構造物を対象に、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮して、ライフタイムにわたる耐震信頼性を評価する枠組みを提示するものである。異なる地震危険度および塩害環境にある複数の地点を対象として、提案手法に基づく単柱式RC橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性評価例も併せて示している。検討の結果、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者がRC橋脚の耐震信頼性の経時変化特性に大きな影響を与えること、地震危険度が低い地域であっても、厳しい塩害環境下ではRC橋脚の耐荷力とじん性の低下が大きくなり、結果として耐震信頼性は顕著に減少することを示した。

研究成果の概要(英文)：The evaluation of the displacement ductility capacity based on the buckling model of longitudinal rebars in corroded RC bridge piers is established, and a novel computational procedure to integrate the probabilistic hazard associated with airborne chlorides into life-cycle seismic reliability assessment of these piers is proposed. Whereas the seismic demand depends on the results of seismic hazard assessment, the deterioration of seismic capacity depends on the hazard associated with airborne chlorides. In an illustrative example, a RC bridge pier was modeled as single degree of freedom. The longitudinal rebars buckling of this pier was considered as the sole limit state when estimating its failure probability. The findings show that the life-cycle reliability of RC bridge piers depends on both the seismic and airborne chloride hazards, and that the cumulative-time failure probabilities of RC bridge piers located in seismic zones can be affected by the effect of airborne chlorides.

研究分野：構造工学

キーワード：ライフサイクル解析 地震ハザード 塩害 鉄筋コンクリート構造 じん性評価

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、2009年6月ギリシャで開催された国際会議 COMPYDM2009 において、インフラ構造のライフサイクルマネジメント(LCM)の第一人者である Lehigh 大学の Dan M. Frangopol 教授とともに、塩害環境下にあるコンクリート構造物の耐震性能評価法に関する発表を行った。図1は、この発表で使用した LCM の概念図を示すものである。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 が実現できることを模式的に示している。

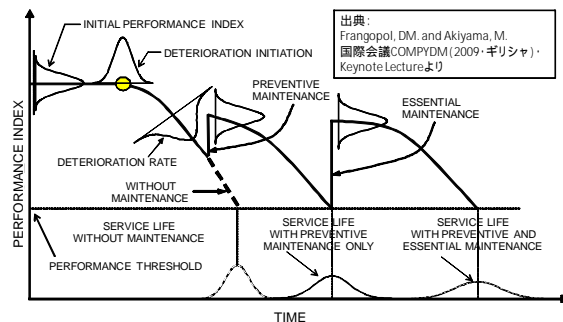


図1 性能劣化曲線の模式図

しかし、現状、個々の要素技術は LCM を実現できるレベルにない。この発表においても、主眼は海洋環境下で鉄筋腐食が生じた橋梁の耐震安全性の数値化にあり、LCM については、応用できる可能性のある周辺技術の紹介と課題を提示したに過ぎない。例えば、図2は、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腐食ひび割れが見られる RC 橋脚である。この写真を見て、(1)耐震安全性の初期状態に対する低下量、(2)外観的な調査から内部の劣化状態を空間分布まで再現、(3)今後の使用可能期間(余寿命評価)、(4)長寿命化を可能にする補修・補強の実施時期、等々の基本的な質問に現状の技術レベルでは答えられない。



図2 腐食ひび割れを有する RC 柱

本研究では、上記の状況に鑑み、腐食環境にある橋梁構造の耐震性能の低下度合いの定量化を試みる。

2. 研究の目的

構造物の設計は、その建設後に構造物に作用する荷重や環境の影響の予測に伴う非常に大きな不確実性存在下での意思決定問題と言える。また、特に厳しい環境作用下では、材料劣化に伴う構造性能の低下を考慮する必要があるが、材料劣化の進展予測や、材料劣化が生じた部材の構造性能評価のいずれにも、大きな不確実性の介在は避けられない。構造物のライフタイムにわたる安全性を確保するためには、こうした各種不確実性を適切に処理する必要があり、信頼性理論の適用はその有効な対処法の一つである。

近年、材料劣化が生じた RC 構造物が地震荷重を受ける場合の構造信頼性(耐震信頼性)評価に関する研究が精力的に行われている。特徴は、前記の不確実性を信頼性理論により処理することで、建設直後の構造物が有する耐震信頼性と、材料劣化が生じた場合のそれが年損傷確率の大きさにより比較されている点である。しかし、既存研究のいずれも、ある鉄筋腐食量が生じたとの条件下で算定された条件付年損傷確率となっており、さらに、鉄筋腐食の影響は鉄筋の断面減少としてのみモデル化されている。腐食量に応じて鉄筋断面積を減少させ、各種設計基準などで示される耐震解析手法を用いても、鉄筋腐食に伴う RC 部材のじん性の低下は表現できないことが既往の実験的研究から指摘されている。これに対して、研究代表者は、既往の実験事実に基づいて、鉄筋質量減少率が 20%までの範囲であれば、1) 現行の耐震基準で設計された橋脚は、十分な帯鉄筋量を有するため、鉄筋腐食が生じてても、破壊モードは曲げ破壊型からせん断破壊型に移行しない、2) 軸方向鉄筋の座屈発生前に、軸方向鉄筋および帯鉄筋の破断は生じない、3) 鉄筋腐食の空間的不均一分布は考慮しない、などの仮定を設け、鉄筋腐食に伴うじん性の低下を考慮できる耐震解析モデルを構築した。その上で、耐震性能評価に介在する各種不確実性を踏まえ、鉄筋腐食が RC 橋脚の耐震信頼性の減少に及ぼす影響を定量的に明らかにした。しかし、本手法も、ある鉄筋腐食量が生じたとの仮定の下での耐震信頼性評価となっており、その鉄筋腐食量の発生確率や、耐震信頼性の供用年数に対する経時変化、すなわちライフタイムにわたる耐震信頼性評価は実現できていない。

本研究では、まず、研究代表者が過去に提示した、鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震信頼性評価法の高度化を図る。具体的には、塩害環境ハザードを考慮した任意の鉄筋質量減少率に到達する確率を評価する、時系列の鉄筋腐食進展評価法を組み合わせる。これにより、海洋環境下にある RC 構造物を対象として、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮した、RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価が実現される。また、提案手法の適用例として、塩害環境や

地震危険度が異なる，複数の地点にある単柱式 RC 橋脚の耐震信頼性評価を実施し，荷重・環境作用の違いが RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性に及ぼす影響などを検討する．

3. 研究の方法

3.1 概説

鉄筋腐食の影響を考慮しない場合，地震により RC 構造物に生じる最大応答変位がその終局変位を超える 1 年当たりの確率(年損傷確率)は，供用年数に関わらず一定であり，式(1)により評価できる．

$$p_{fa0} = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dp_1}{d\gamma} \right) P[D \geq C | \Gamma = \gamma] d\gamma \quad (1)$$

ここに， γ は地震動強度， p_1 は地震動強度 γ の年超過確率， D は RC 部材の最大応答変位， C は RC 部材の終局変位である．

一方で，鉄筋腐食の影響を考慮する場合には，任意の供用年数 t_i 年における鉄筋質量減少率の確率分布を考慮して，次のように年損傷確率 $p_{fa}(t_i)$ が評価される．

$$p_{fa}(t_i) = \int_0^{100} p_{fa,c}(c_w(t_i)) f(c_w(t_i)) dc_w \quad (2)$$

$$p_{fa,c}(c_w) = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dp_1}{d\gamma} \right) P[D \geq C | \Gamma = \gamma, C_w = c_w] d\gamma \quad (3)$$

ここに， c_w は鉄筋質量減少率， f は鉄筋質量減少率の確率密度関数， $p_{fa,c}(c_w)$ は鉄筋質量減少率が c_w の条件下での RC 構造物の条件付年損傷確率である．式(3)は，特定の鉄筋質量減少率に対応する鉄筋腐食が生じた条件下での条件付年損傷確率の算定式である．

式(2)で算定された任意の供用年数 t_i 年における年損傷確率 $p_{fa}(t_i)$ を用いることで， t_i 年までに地震により RC 構造物が損傷する確率 $p_f(t_i)$ は，式(4)により評価される．

$$p_f(t_i) = 1 - \prod_{k=1}^i \{1 - p_{fa}(t_k)\} \quad (4)$$

本研究で提示する，地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮した RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法の概要を図 3 に示す．図 3 に示すように，提案手法は，1) 塩害環境ハザード曲線に基づいて，任意の供用年数における鉄筋質量減少率の確率分布を評価し，当該質量減少率に対応する RC 部材の終局変位 C および履歴復元力特性を評価する部分，2) 地震ハザード曲線に基づいて，1) で評価された履歴復元力特性を有する RC 構造物の動的解析により，RC 部材の最大応答変位 D を評価する部分，3) 1) と 2) で評価された RC 部材の最大応答変位 D と終局変位 C の大小関係から，RC 部材が限界状態に到達するか否かを判断し，任意の地震動強度に対する条件付損傷確率($D > C$ となる確率であり， D と C がともに供用年数に依存することから，この条件付損傷確率も時間依存

となる)としてフラジリティ曲線を作成する部分，4) 地震ハザード曲線と，フラジリティ曲線により，任意の供用年数までに一度でも RC 構造物が地震により損傷する確率を式(2)～式(4)に基づいて評価する部分，の各種要素技術を体系化することで構成されている．

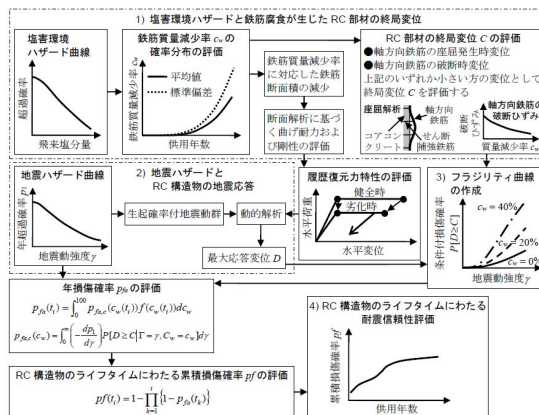


図 3 RC 構造物のライフタイム評価法

鉄筋質量減少率 20% 以下の特定の鉄筋質量減少率における耐震信頼性を議論していた既存研究とは異なり，式(2)に示したように，本手法では，任意の鉄筋質量減少率に対応する鉄筋腐食の可能性を考慮しなければならない．鉄筋質量減少率が大きくなると，鉄筋の伸びが低下し，軸方向鉄筋の座屈発生前に軸方向鉄筋の破断が生じる可能性がある．正負交番荷重を受ける，鉄筋腐食が生じた RC 部材の軸方向鉄筋の破断点を解析的に求めるためには，今後の実験事実の蓄積が必要である．本研究では，現在入手可能な既往の実験事実に基づいて，この軸方向鉄筋の破断を考慮した耐震信頼性評価を試みた．以下では，塩害環境ハザード曲線に基づいて鉄筋質量減少率の確率分布を評価する部分と，鉄筋腐食が生じた RC 部材の耐震解析法について詳述する．

3.2 鉄筋質量減少率の評価法

鉄筋質量減少率の評価は，1) 塩害環境ハザード曲線に基づいて，環境作用の厳しさを定量的に評価する部分，および 2) 環境作用に対する構造部材の応答，すなわち腐食進展を評価する部分の大きく 2 つに分けられる．

塩害環境ハザード曲線では，対象地点における平均風速や海風比率，海岸線からの距離に応じて，海洋からの飛来塩分量の超過確率として，塩害環境が定量的に評価される．ここでは，海岸線からの距離により減衰する飛来塩分量の予測や，解析対象地点の風速の予測に伴う不確実性が考慮される．解析対象構造物に塩分が飛来した後の塩化物イオンの浸透，あるいは鉄筋腐食発生や腐食ひび割れの発生，さらには，その後の鉄筋腐食進展については，それらの予測に伴う種々の不確実性を考慮し，既存研究で提示した手法に基づいて評価する．そして，任意の供用年数にお

ける鉄筋質量減少率 $c_w(t_i)$ の確率分布を得る。 $c_w(t_i)$ の大きさは、塩害環境、コンクリートの水セメント比やかぶり、また鉄筋径などに依存し、そのバラツキの程度は、 $c_w(t_i)$ の評価に関係する個々の確率変数が持つ変動係数(標準偏差)により決定される。

3.3 鉄筋腐食が生じた RC 部材の耐震解析

鉄筋腐食が進展するとともに、軸方向鉄筋の伸びが低下し、正負交番载荷を受ける RC 部材では、軸方向鉄筋の座屈発生前にその破断が生じる可能性がある。本研究では、この影響を考慮するため、過去の実験データに基づき、軸方向鉄筋の破断ひずみ ε_{rup} を質量減少率 c_w の関数として、式(5)のように与える。

$$\varepsilon_{rup} = 0.29 \exp(-0.091c_w) \quad (5)$$

引張側の最外縁軸方向鉄筋のひずみが式(5)で評価される破断ひずみに到達したとき、RC 部材の塑性ヒンジ部の曲率 $\phi_{u, rup}$ は、式(6)で表すことができる。

$$\phi_{u, rup} = \frac{\varepsilon_{rup}}{d - x_n} \quad (6)$$

ここに、 d は断面の有効高さ、 x_n は圧縮縁から中立軸までの距離である。

評価される軸方向鉄筋の座屈発生時曲率を $\phi_{u, buc}$ と表すと、終局曲率 ϕ_u は、軸方向鉄筋の破断時曲率および座屈発生時曲率のいずれか小さい方の曲率として、式(7)のように与えられる。

$$\phi_u = \min\{\phi_{u, buc}, \phi_{u, rup}\} \quad (7)$$

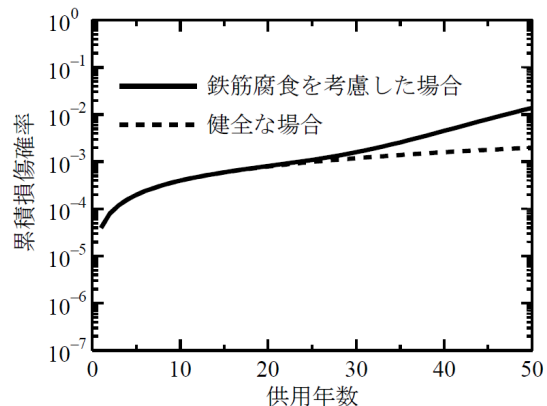
式(7)により与えられる終局曲率 ϕ_u を仮定した曲率分布に基づき終局変位へと変換し、鉄筋腐食が生じた RC 部材のじん性を評価する。RC 部材の履歴復元力特性を決定するために必要となる曲げ耐力や剛性の評価法は、既存研究と同様である。

なお、提案した耐震解析モデルの精度検証に用いた全供試体(供試体総数: 27 体、軸方向鉄筋の質量減少率: 0~21.5%、帯鉄筋の質量減少率: 0~74.9%)を対象として、軸方向鉄筋の破断時曲率 $\phi_{u, rup}$ を算定した。いずれの供試体においても、 $\phi_{u, rup}$ は軸方向鉄筋の座屈発生時曲率 $\phi_{u, buc}$ よりも大きく、実験事実と同様に、終局変位が軸方向鉄筋の座屈発生で決定されることを確認している。なお、後述の信頼性評価例に示されるように、塩害環境の厳しい地域では、 $\phi_{u, rup}$ の大きさが耐震信頼性の経時変化に影響を与える。本研究の第一の目的は、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮したライフタイムにわたる耐震信頼性評価法の構築にあるが、今後、そこで用いる耐震解析法、特に鉄筋質量減少率が大きい場合の付着劣化の影響を含む RC 部材の耐荷力やじん性評価法の高度化が必要である。

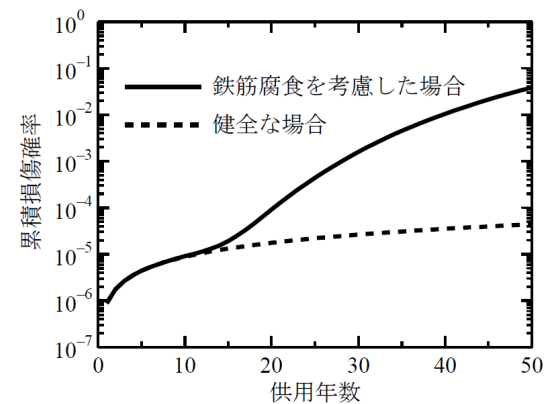
4. 研究成果

各解析対象地点において、任意の供用年数

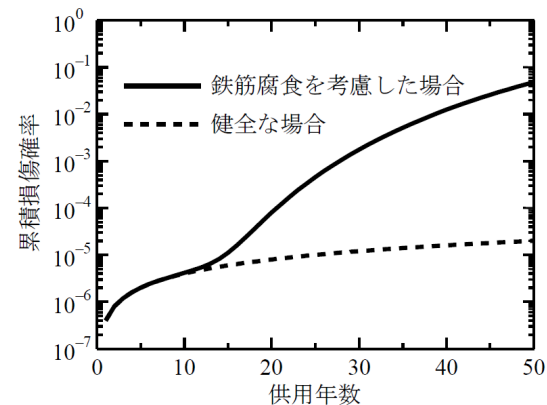
における鉄筋質量減少率の確率分布を考慮して式(2)により年損傷確率を評価し、それらを式(4)に代入して得られる累積損傷確率を図4に示す。



(a) 福岡, 海岸線からの距離 $d=1.0\text{km}$ の場合



(b) 舞鶴, 海岸線からの距離 $d=0.1\text{km}$ の場合



(c) 酒田, 海岸線からの距離 $d=0.1\text{km}$ の場合

図4 ライフサイクル解析の結果

なお、各図中には、式(8)より求められる、RC 橋脚のライフタイムにわたって鉄筋腐食が生じないと仮定した(式(1)により算定される p_{fa0} を用いた)場合の任意の供用年数 t_i 年における累積損傷確率 pf_s も併せて示している。

$$pf_s(t_i) = 1 - (1 - p_{fa0})^{t_i} \quad (8)$$

図4に示されるように、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)の経時変化を予測することができる。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は、地震と塩害であるが、本研究で提示したフローを用いることで、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 橋脚の耐荷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。この要因については、鉄筋腐食が進展して、地震フラジリティ曲線が左方へと移動することで、条件付年損傷確率に影響を与える地震動強度領域についても、より小さい方へと移動することに起因している。地震ハザード曲線からも明らかのように、フラジリティ曲線が左方へと同じだけ移動すれば、地震ハザード曲線の超過確率の変化幅としては、地震危険度が低い地点の方が相対的に大きくなるためである。

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定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。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

Lim, S., Jiang, H., Okamoto, T. and Akiyama, M.: Visualization of corroded steel bars in RC beams using digital image processing of X-ray photographs, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No.2, pp.1327-1332, 2015. 査読有

石橋寛樹, 秦吉弥, 秋山充良: サイト特性を考慮した強震動による RC ラーメン高架橋の地震被害分析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No. 2, pp.955-960, 2015. 査読有

Thanapol, Y., Akiyama, M. and Yoshida, I.: Life-cycle reliability of corroded existing RC structures in a marine environment and earthquake-prone region, 第 8 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(A 論文), pp.215-221, 2015. 査読有

櫻井絢子, 宮本祥平, 秋山充良:

SRM(Spectral Representation Method)を用いたコンクリート構造物内に生じる鉄筋腐食分布の空間変動性の再現, 第 8 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(A 論文), pp.208-214, 2015. 査読有

尾武佑亮, 狩野淳一, 秋山充良, 吉田郁政: 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数, 第 8 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(A 論文), pp.201-207, 2015. 査読有

秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 野津厚: 本震観測記録を利用した 2003 年三陸南地震における猪鼻高架橋および中曽根高架橋での地震動の推定, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp.174-187, 2015. 査読有

狩野淳一, 秋山充良, 吉田郁政: 点検・検査情報を活用した既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp.81-90, 2015. 査読有

安積恭子, 小野潔, 秋山充良: 径厚比パラメータが比較的大きい円形断面鋼製橋脚の耐震性能評価法, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, pp.612-615, 2015. 査読有

竹中孔信, 萩野統也, 秋山充良, 吉田郁政: 更新理論とマルコフ連鎖モデルを用いた鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1357-1362, 2014. 査読有

秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 一井康二: SPGA モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における長町高架橋での地震動とフラジリティカーブの評価, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp.214-227, 2014. 査読有

Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Long-term seismic performance of RC structures in an aggressive environment: emphasis on bridge piers, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 7, pp.865-879, 2014. 査読有

Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Mizuno, K.: Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 9, pp.1228-1247, 2014. 査読有

金井晴弘, 阿部遼太, 秋山充良, 小野潔: 摩擦振子免震機構を有するコンクリート橋脚に生じる地震後の残留変位に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.811-816, 2013. 査読有

Yoshida, I. and Akiyama, M.: Particle filter for model updating and reliability estimation of existing structures, Smart Structures & Systems, Vol.11, No.1, pp.103-122, 2013. 査読有
秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震による南三陸志津川での強震動の評価, 土木学会論文集 B3, Vol. 69, No.2, 1_161-166, 2013. 査読有

Akiyama, M., Frangopol, D.M., Arai, M. and Koshimura, S.: Reliability of bridges under tsunami hazards: Emphasis on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 29, No. S1, pp.S295-S314, 2013. 査読有
水野恵太, 秋山充良: 2011 年東北地方太平洋沖地震とフラジリティ解析による鉄道 RC1 層ラーメン橋脚の耐震補強効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.937-942, 2012. 査読有
Akiyama, M., Matsuzaki, M., Dang, D.H. and Suzuki, M.: Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures, Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, Vol.8, No.12, pp.1096-1107, 2012. 査読有

Akiyama, M., Abe, S., Aoki, N. and Suzuki, M.: Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section, Engineering Structures, No. 34, pp. 259-270, 2012. 査読有
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, Taylor & Francis, Vol.8, No.2, pp.125-134, 2012. 査読有

[学会発表](計6件)

Akiyama, M.: Reliability-based assessment of structures for extreme events. IABSE Summit 2016, Helsinki, Finland, (Keynote Lecture). 2016.3.10
Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Long term performance of concrete bridges under extreme events. Proceedings of 9th Austroads Bridge Conference, Sydney, New South Wales, Australia. (Invited Lecture). 2014.10.24
Frangopol, D.M. and Akiyama, M.: Bridge life-cycle performance and

lessons from infrastructure failures due to the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, Proceedings of 1st International Conference on Infrastructure Failures and Consequences, pp. 1-13, Melbourne, Australia. (Keynote Lecture). 2014.7.17
Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Life-cycle reliability of concrete bridges under both extreme events and hazard associated with continuous deterioration, IStructE Conference on Structural Engineering in Hazard Mitigation, Shanghai, China. (Invited Lecture). 2013.10.31

Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Life-cycle design of bridges under multiple hazards: Earthquake, tsunami and continuous deterioration, 11th ICOSSAR (International Conference of Structural Safety and Reliability), New York, USA. (Early Career Keynote Lecture). 2013.6.18

Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Lessons from the 2011 Great East Japan Earthquake: Emphasis on life-cycle structural performance, IALCCE (International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering), Vienna, Austria, 2012.10.6 (Keynote Lecture)

[図書](計1件)

Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Matsuzaki, H. Reliability-based durability design and service life assessment of concrete structures in an aggressive environment. Chapter 1 in Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (Edited by D.M. Frangopol and Y. Tsompanakis), CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, 2014, pp. 1-26. (全738頁)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

高橋 良和 (TAKAHASHI Yoshikazu)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 10283623

小野 潔 (ONO Kiyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 60324802