

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0152

研究課題名（和文）マルチハザードを受ける道路ネットワークのライフサイクルレジリエンスと対策優先度（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Life-cycle resilience based approach for road network retrofitting prioritization under multiple hazards(Fostering Joint International Research)

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） 10,800,000円

渡航期間： 10ヶ月

研究成果の概要（和文）：南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手法を提案し、構造物の補強優先度判定への適用例を提示した。道路構造物の被災により生じる経済的損失からリスク、地震後の交通機能の低下と回復時間からレジリエンスをそれぞれ定量化した。信頼性評価では、Monte Carlo法に基づく確率計算の中で、断層運動の予測からハザード強度の推定、さらには構造物の脆弱性評価に伴う一連の不確実性を考慮した。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響域にある道路ネットワークを対象に提案手法を適用することで、リスク・レジリエンスを判断指標として構造物の補強優先度を同定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

米国にあるLehigh大学・Frangopol教授およびBocchini准教授との共同研究を実施いたしました。対象は、地震や津波などの複数のハザードを受ける道路ネットワークです。これが災害により、どれほどの機能低下に陥り、そして、そこから回復するのにどれほどの日数を必要とするのかを定量化する手法を構築いたしました。そして、構築した手法を南海トラフ地震の影響を受ける三重県や高知県の道路ネットワークに適用し、リスクの最小化、そしてレジリエンスを最大化するための補強戦略などを検討しております。今後の我が国の防災・減災力の向上に資する成果が得られたと考えております。

研究成果の概要（英文）：A procedure for estimating the risk and resilience of a road network including bridges and embankments under the seismic and subsequent tsunami caused by the anticipated Nankai Trough earthquake is presented. Probabilistic approach for road network retrofitting prioritization is the topic of this paper. Risk and resilience are quantified by the economical loss due to the damage to individual structures and post-disaster functionality of road network, respectively. Uncertainties associated with the estimations of fault movement, hazard intensity, and structural vulnerability are considered when estimating the failure probability in the Monte Carlo simulation. In an illustrative example, the retrofitting priority of bridges and embankments in the road networks subjected to the anticipated Nankai Trough earthquake is determined based on the proposed performance indicators (i.e. risk and resilience).

研究分野：構造工学

キーワード：レジリエンス マルチハザード 南海トラフ 道路ネットワーク 橋梁 盛土 リスク 信頼性

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

過去の地震被害をみると、強震動だけでなく複数のハザード（マルチハザード）の影響を併せて受けたことによる構造物の被害が報告されている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震では、小泉大橋において、津波による上部工の流出が確認されている<sup>1)</sup>。また、2016年熊本地震の際に落橋した阿蘇大橋では、崩落に至った決定的な要因は未だ調査中ではあるものの、強震動により引き起こされた地すべりの影響が大きいとされている<sup>2)</sup>。小泉大橋や阿蘇大橋を含め、耐震補強が施されていた構造物が強震動作用後の津波や地すべりの影響を大きく受けたことで被災しており、これらの構造物被害は、強震動を主たるハザードとするこれまでの対策（耐震設計）に加えて、マルチハザードの影響を考慮した対策（耐津波設計や構造計画の充実など）が必要であることを示している。つまり、従前のシングルハザードの想定から、マルチハザードを対象とする安全性やリスクの評価法が必要であり、それらに大きな影響を及ぼすハザードの同定と、それに基づいた最適な対策方法および対策優先度を設定することが重要である。例えば、強震動が支配的なハザードとなる地域では、信頼性の低い構造物から優先的に耐震補強を施し、津波ハザードが主となる地域では、構造物の損壊・流出をあらかじめ想定した復興施策を拡充するなど、マルチハザードを考慮することでハードとソフトの両面から効果的な対策が可能になる。

マルチハザードを考慮した信頼性評価に関する研究として、Li and Ellingwood<sup>3)</sup>は、地震とハリケーンを扱い、それぞれのハザードが住宅に与える影響を比較評価している。また、Banerjee and Prasad<sup>4)</sup>は、地震と洪水による洗掘を受ける橋梁のリスク評価を行っている。これらの場合、その生起に相関性がないと考えられる複数のハザード（independent hazards）を比較対象としているため、各ハザードの外力による構造物の損傷は相互に影響しないと仮定されている。しかしながら、本震と余震、あるいは強震動と津波など、連続的に発生するハザード（interacting hazards）を扱う場合、最初のハザードの作用により生じる損傷のレベルを考慮した構造物の脆弱性評価（フラジリティ評価）が次のハザードの作用時に必要となる。強震動と津波ハザードを対象とした既往研究として、Chock et al.<sup>5),6)</sup>は、ASCE（米国土木学会）の荷重評価法（ASCE 7）<sup>7)</sup>に基づいて強震動と津波の確率論的ハザード評価を行い、構造物の損傷確率を算定することで主たるハザードの同定を試みている。しかし、津波による損傷確率の算定時に強震動による損傷は考慮されておらず、構造物の津波に対する安全性を過大に評価しているといえる。名波ら<sup>8)</sup>も同様に、強震動と津波ハザードに着目した構造物の信頼性評価を行っているが、それぞれのハザードを独立として扱っており、強震動と津波の連続作用を考慮した構造物の安全性を評価するには至っていない。Carey et al.<sup>9)</sup>は、ある仮定した強さを持つ強震動と津波が連続して作用する橋梁の解析例を提示しているが、極めて単純化したモデル化が行われている。つまり、本研究の開始当初では、不確定性を考慮したハザード評価やフラジリティ評価などは全く行われておらず、マルチハザードを受ける信頼性やリスクの評価法の構築には至っていなかった。さらには、構造物単位ではなく、マルチハザード下にある道路ネットワーク全体における機能性や回復性の定量化を可能とする評価法が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

南海トラフ地震の道路ネットワークへの影響を定量化する上で、リスクおよびレジリエンスは有用な指標になり得るが、現状、次の課題が指摘される。(i) 連続的に発生するハザードの影響を考慮した道路構造物の信頼性評価、(ii) 異種構造物を含んだ道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価、および、(iii) リスク・レジリエンスを指標とする構造物の補強優先度判定、である。本研究では経済的損失をリスク、交通機能の低下と回復時間をレジリエンスとしてそれぞれ定義し、南海トラフ地震による強震動と津波を連続して受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手法を提示する。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響域にある道路ネットワークを対象に提案手法を適用し、リスク・レジリエンスに基づく構造物の補強優先度判定の一例を示す。

(i) について、本研究では、強震動により損傷した構造物がその後津波を受けるときの信頼性評価を行う。従来、津波ハザード下にある信頼性評価では、強震動により生じた構造物の損傷は考慮されておらず、無損傷状態にある構造物が津波を受けると仮定した脆弱性評価に基づき、信頼性が定量化されている。本研究では、強震動による構造物の損傷を津波に対する構造解析に引き継ぐことで、ハザードの連続性を考慮した信頼性評価を行う。

(ii) に関して、構造物種別に応じて復旧に必要な費用や時間は異なる。そこで本研究では、道路ネットワークが異種構造物から構成される場合のリスク・レジリエンス評価手法を提示する。ケーススタディでは、橋梁と盛土構造物を持つ道路ネットワークを対象として、リスク・レジリエンスを試算する。

(iii) として、ケーススタディでは、三重県尾鷲市および高知県幡多郡黒潮町に位置する道路ネットワーク内の構造物を対象に、南海トラフ地震を想定した耐震・耐津波信頼性評価を行い、補強の有無によるリスクやレジリエンスの差異から、合理的なリスクの低減とレジリエンスの改善が期待できる構造物の同定を試みる。

### 3. 研究の方法

地震ハザード評価では、平均応力降下量から地震モーメントを算出し、距離減衰式に代入することで地動最大加速度を算出する。距離減衰式の計算値にはモデル誤差が含まれるため、検討会が公開している統計的グリーン関数法を用いた強震波形計算結果との差から計算値を補正する。以上の手順に従い、平均応力降下量を確率変数として扱うことで地動最大加速度の超過確率（地震ハザード曲線）を得る。

津波に関しては、対象構造物の地表面を基準とする津波水位を津波波高と定義し、ハザード曲線を算出する。平均応力降下量とすべり角を確率変数として扱い、海底地盤変動解析により初期水位を求める。次に、初期水位を入力条件とした非線形長波理論に基づく平面2次元モデルの津波伝播解析により、解析対象構造物位置の最大津波波高を取得する。最大津波波高に対して補正を行うことで、各解析に含まれるモデル誤差を考慮した津波波高の超過確率（津波ハザード曲線）を算出する。

地震フラジリティ曲線は、地震動強度  $\Gamma$  を持つ多数の地震波を作成し、Monte Carlo 法に基づき地震応答解析を繰り返し行うことで、地震動強度  $\Gamma$  の入力地震波に対する構造物の最大応答値を算出する。一方、津波フラジリティ解析では、強震動による残留変位や剛性低下、あるいは水平荷重の低下を初期条件として考慮することで、強震動と津波の連続性を考慮した構造物の損傷度判定を可能にする。

本研究では、応答値に基づき無損傷、小破、大破の3段階からなる損傷度判定を行う。損傷度判定基準は、損傷に伴う車両の通行機能の低下度を基に設定する。このとき、強震動に対する構造物の条件付損傷確率は式(1)より算出できる。

$$P_{fs}(i) = \int_0^{\infty} \left\{ P(DS_i = ds_i | \Gamma = \gamma) \cdot \left| -\frac{dF_{\Gamma}(\gamma)}{d\gamma} \right| \right\} d\gamma \quad (1)$$

ここに、 $P_{fs}(i)$ は強震動によって損傷度が  $ds_i$  となる確率である。 $F_{\Gamma}(\gamma)$ は地震ハザード曲線であり、 $P(DS_i = ds_i | \Gamma = \gamma)$ は地震動強度  $\Gamma = \gamma$  の際に損傷度  $DS_i$  が  $ds_i$  となる確率を示している。

強震動による損傷を考慮した、津波波高  $H$  に対する構造物の条件付損傷確率は式(2)で与えられる。

$$P_{ft}(i, j) = \int_0^{\infty} \left\{ P(DS_j = ds_j | H = h, DS_i = ds_i) \cdot \left| -\frac{dF_H(h)}{dh} \right| \right\} dh \quad (2)$$

ここに、 $P_{ft}(i, j)$ は強震動によって損傷度が  $ds_i$  となった構造物が、津波により損傷度が  $ds_j$  となる確率を表す。 $F_H(h)$ は津波ハザード曲線であり、 $P(DS_j = ds_j | H = h, DS_i = ds_i)$ は、強震動による損傷度  $DS_i$  が  $ds_i$  であり、津波波高  $H = h$  の際に、損傷度  $DS_j$  が  $ds_j$  となる確率である。

最終的に、強震動と津波の連続作用により損傷度  $DS$  が  $ds_j$  となる損傷確率  $P_f(DS = ds_j)$  は式(3)で表される。式(3)より得られる個別構造物の損傷確率を基に、リスクおよびレジリエンスを算定する。

$$P_f(DS = ds_j) = \sum_{i=1}^j P_{fs}(i) \cdot P_{ft}(i, j) \quad (3)$$

地震後の各リンクの交通機能は、介在する構造物の損傷度に応じて変化する。既存研究では、橋梁に対して損傷度に応じた損傷指標を設定し、構造物単位の損傷指標を用いてリンク単位の損傷指標を評価している。そこで、本研究においても、構造物の損傷度に応じて損傷指標  $SDI$  (Structural Damage Index) を定義することにした。具体的には、式(4)より、地震発生から時間  $t$  が経過した際のリンクの損傷指標  $LDI$  (Link Damage Index) を算出している。

$$LDI(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (SDI_k(t))^2} \quad (4)$$

ここに、 $n$  は対象のリンクに属する構造物数である。

提案するリスク・レジリエンス評価手法では、道路構造物として異種構造物を同時に扱うことができる点が特徴の一つである。本研究では、車両の通行機能の低下度を基に構造物の損傷度を設定することで、異種構造物が介在するリンクの交通機能を定量評価する。

既存研究では、地震発生前の交通容量と自由流速度に対して、リンクの損傷指標に応じて設定される割合を乗じることで、地震後の各リンクの残存交通容量および残存自由流速度が算出されてきた。本研究においても、式(4)から得られるリンクの損傷指標  $LDI$  を基に、地震後の残存交通容量の割合を  $RPC$ 、残存自由流速度の割合を  $RPS$  として定義する。なお、地震後の残存交通容量、および残存自由流速度は、道路構造物の損傷状態に大きく依存すると考えられる。例えば、人的被害（死者数や負傷者数）による地震発生前後の交通量の変化などの影響も受けることが予想される。本研究では、地震後の道路ネットワークの交通機能は、構造物の損傷状態のみに依存するものとしてリスク・レジリエンス評価を行うが、他の影響を踏まえた地震後の交通機能の評価に関して、今後も継続した検証が必要である。

本研究では、対象とする道路ネットワークに対して迂回路を設定し、リンクが被災した場合には、リンクの交通量の一部を迂回路が負担すると仮定する。Bocchini and Frangopol<sup>10)</sup>の方法を参考に、BPR 関数<sup>23)</sup>を用いて地震発生後のリンクおよび迂回路の通行時間を算出する。

本研究では、地震で被災した構造物の復旧に要する費用を直接損失、構造物の被災による交通機能の低下から生じる損失を間接損失としてそれぞれ定義し、これらの和をリスクとする。

Bocchini and Frangopol<sup>10)</sup>の手法に基づき、性能指標  $PI(t)$  を式(5)により定義する。

$$PI(t) = \frac{1}{\gamma_T \cdot TTT(t) + \gamma_D \cdot TTD(t)} \quad (5)$$

ここに、 $TTT(t)$  は時間  $t$  における全利用者の総移動時間、 $TTD(t)$  は時間  $t$  における全利用者の総移動距離、 $\gamma_T$  は利用者の時間損失を金銭的損失に変換する係数、 $\gamma_D$  は利用者の距離損失を金銭的損失に変換する係数である。

性能指標  $PI(t)$  に基づき、時点  $t$  におけるリンクの機能性  $Q(t)$  を式(6)により定義する。

$$Q(t) = \frac{PI(t) - PI^0}{PI^{100} - PI^0} \quad (6)$$

ここに、 $PI^0$  はリンク内の構造物が全て供用不能となる場合の性能指標、 $PI^{100}$  はリンク内の構造物が全て無損傷である場合の性能指標である。

以上より算出されるリンクの機能性  $Q(t)$  を想定復旧期間内で積分し、得られる値を想定復旧期間  $t_h$  で除することでレジリエンス  $R$  を得る。算出されるレジリエンスは、想定復旧期間  $t_h$  で正規化されているため、 $t_h$  の値に関係なく、その値は常に 0~100% の範囲で評価される。

$$R = \frac{1}{t_h} \int_{t_0}^{t_0+t_h} Q(t) dt \quad (7)$$

さらに、各リンクのレジリエンスを比較し、道路ネットワーク内の最大レジリエンス  $R_{max}$  を抽出する。

$$R_{max} = \max(R_{Link1}, R_{Link2}, \dots, R_{LinkN}) \quad (8)$$

ここに、 $R_{LinkN}$  はリンク  $N$  のレジリエンスである。

最大レジリエンス  $R_{max}$  の値が大きいくほど、地震発生後から想定復旧期間  $t_h$  内における道路ネットワークの交通量の維持が期待できる。

#### 4. 研究成果

構造物が被災することで生じる影響度を指標とすることで合理的な防災・減災施策の立案が可能になる。ケーススタディとして南海トラフ地震による被害が懸念されている三重県尾鷲市および高知県幡多郡黒潮町に位置する道路ネットワーク(図-1 および図-2 参照)を対象に提案手法を適用し、その有用性を確認する。

前章で説明したリスク・レジリエンス評価手法は、複数の結節点を結ぶリンクにより構成される道路ネットワークに対して適用可能であるが、図-1 および図-2 に示されるように、ケーススタディで対象とする道路ネットワークは、結節点のない南北をつなぐ道路(ルート)で構成されている。そのため、ケーススタディでは各道路をルートと称する。

図-3 に、各道路ネットワークに位置する、昭和 39 年基準で耐震設計された橋梁(以下、S39 橋梁)、および盛土を 1 つのみ補強した場合のリスク・レジリエンス評価結果を示す。図-3 より、尾鷲市および黒潮町ともに、その位置に関係なく S39 橋梁を補強した場合は経済的効果が期待できる。特に、尾鷲市では橋梁 8 および橋梁 9、黒潮町では橋梁 2 および橋梁 11 を優先的に補強することで効果的なリスク低減が可能である。この理由として、これらの橋梁では補強による損傷確率の低下量が大きく、補強により直接損失を大きく抑えられることが挙げられる。また、各構造物の位置関係と損傷確率をみると、これらの橋梁が介在するルートを構成する構造物の損傷確率が全体的に低いことが確認できる。例えば、黒潮町内の橋梁 7 と橋梁 11 では、補強前後ともに損傷確率に大きな差はないものの、ルートに位置する他の構造物の損傷確率の差異により、補強した際の BCR に明確な差が生じている。提案手法を活用することで、ルート内で弱部となる構造物を特定できるだけでなく、ルート全体での交通機能の低

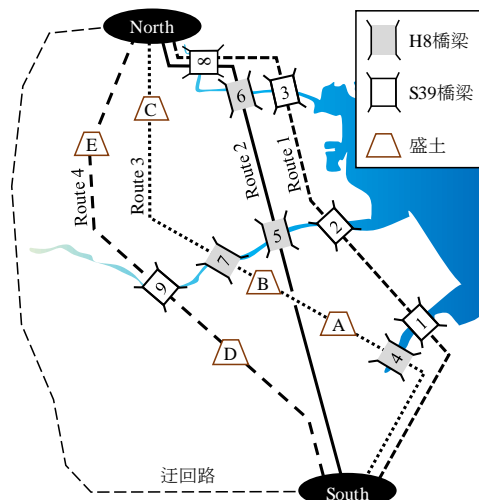


図-1 三重県尾鷲市の道路ネットワーク図

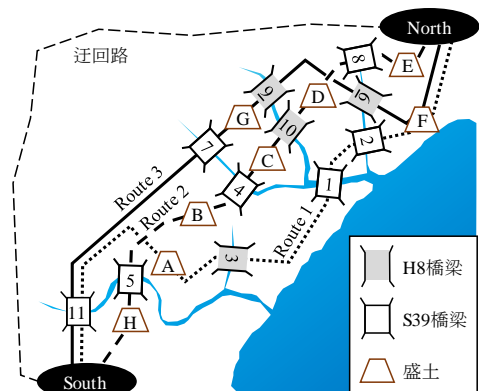


図-2 高知県幡多郡黒潮町の道路ネットワーク図



下を考慮したリスク評価が可能であり、補強を施すことで期待できるリスクの低減量を定量的に比較できる。

一方、盛土については、どの地点においてもBCRは1.0以下となり、経済的な効果が見込まれない結果となった。盛土はS39橋梁に比べて

損傷確率が小さくなる傾向があり、補強を施した場合でも損傷確率の低下量は小さい。また、橋梁と比較すると被災時の復旧日数および復旧費用は小さく、一方で補強費用は高くなっている。このことから、ケーススタディの条件下では、盛土を補強することで構造物自体の安全性の向上は期待できるが、経済性を考えた場合、補強計画における優先度は低いといえる。

図-3より、道路ネットワークの最大レジリエンスは、尾鷲市では橋梁9、黒潮町では橋梁7および橋梁11を補強した場合に最も大きくなることが示された。これらの橋梁は、各都市で最も内陸側のルート（尾鷲市の橋梁9はルート4、黒潮町の橋梁7および橋梁11はルート3）に位置している。内陸側のルートでは、沿岸部にあるルートに比べて津波ハザード強度が小さく、結果としてレジリエンスが高くなる傾向がある。一方で、沿岸部にあるルートに位置する構造物を補強した場合、津波ハザード強度が大きいいため、ルート内の他の構造物の損傷確率が高く、ルート全体の交通機能の低下に対する補強効果は小さくなり、レジリエンスの向上効果も小さい。また、内陸側のルートに位置する盛土では、補強による損傷確率の低下量が小さく、さらには、内陸側のルートにある無補強のS39橋梁、すなわち尾鷲市では橋梁9、黒潮町では橋梁7および橋梁11がルート内の弱部となるため、レジリエンスの観点から評価される補強効果は小さい。以上より、尾鷲市では橋梁9、黒潮町では橋梁7および橋梁11を補強することで、地震後の交通機能の低下を効率的に抑えることができ、ネットワーク内の最大レジリエンスを高めることが可能である。

なお、ケーススタディでは、地震発生前の補強対象を構造物一つのみに限定したリスク・レジリエンス評価を行い、補強優先度を判定した。実際の補強対策では、予算等の制約条件のもと、複数の構造物を逐次的、あるいは同時に補強すると思われる。最適化手法を取り入れるなどして、リスク・レジリエンスに基づく耐震補強優先度判定法の高度化が必要である。

#### <引用文献>

- 1) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏, 運上茂樹: 上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4 (地震工学論文集第 32 巻), pp. I\_932-941, 2013.
- 2) Akiyama, M. and Frangopol, D. M.: Risk and resilience of civil infrastructure systems under extreme events, Proceedings of IABSE Symposium 2019, Guimaraes, Portugal, 2019.
- 3) Li, Y. and Ellingwood, B.: Framework for multihazard risk assessment and mitigation for wood-frame residential construction, Journal of Structural Engineering, Vol. 135, pp. 159-168, 2009.
- 4) Banerjee, S. and Prasad, G. G.: Seismic risk assessment of reinforced concrete bridges in flood-prone regions, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 952-968, 2013.
- 5) Chock, G., Yu, G., Thio, H. K. and Lynett, P.: Target structural reliability analysis for tsunami hydrodynamic loads of the ASCE 7 standard, Journal of Structural Engineering, Vol. 142, No. 11, pp. 04016092-1-12, 2016.
- 6) Chock, G.: Design for Tsunami loads and effects in the ASCE 7-16 standard, Journal of Structural Engineering, Vol. 142, No. 11, pp. 04016093-1-12, 2016.
- 7) American Society of Civil Engineering (ASCE): ASCE/SEI 7 Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures, 2016.
- 8) 名波健吾, 磯辺弘司, 竹本梨香, 秋山充良, 越村俊一: 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, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 123-133, 2017.
- 9) Carey, T., Mason, H. B., Barbosa, A. and Scott, M.: Multihazard earthquake and tsunami effects on soil-foundation-bridge systems, Journal of Bridge Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 04019004-1-9, 2014.
- 10) Bocchini, P. and Frangopol, D. M.: Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization, Earthquake Spectra, Vol.28, No.2, pp.427-455, 2012.

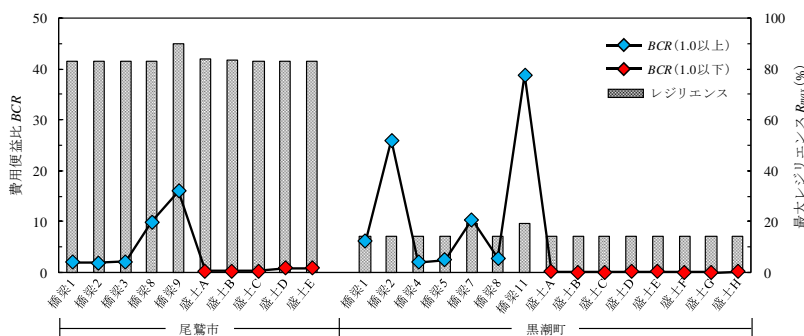


図-3 道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 1. 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 2. Brito, M.B, Ishibashi, H. and Akiyama, M.	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 2019年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering and 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 3. He, Z.S., Akiyama, M., He, C., Frangopol, D.M., and Liu, S.J.	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 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2019.1578381	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, T., Kea, T.M., Ishibashi, H. and Akiyama, M.	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 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1-23
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 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 Zhang, M., Wang, W., and Akiyama, M.	4. 巻 40
2. 論文標題 Stress-strain modeling of confined concrete using artificial neural networks	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 121-126
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 Effect of rebar types on the life-cycle cost of RC structures in a marine environment	4. 巻 40
2. 論文標題 Hasan, M., Yan, K., Shi, Q., and Akiyama, M.	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 1393-1398
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 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 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 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柱の正負交番荷重実験	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 901-902
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 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 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 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 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 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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 17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 (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 (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 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 小島貴之, 名波健吾, 河合祐美, 秋山充良, 越村俊一
2. 発表標題 南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワークの性能評価と橋梁および盛土構造物の補強優先度判定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 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

〔図書〕 計1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	

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	フランゴポール ダン  (Frangopol Dan)	リーハイ大学・ATLSS Center・Professor	
その他の研究協力者	パオロ ボッチーニ  (Paolo Bocchini)	リーハイ大学・ATLSS Center・Associate Professor	