

南海トラフ地震による強震動・津波を受ける 橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性と 経済損失リスクに及ぼす影響の評価

青木 康貴¹・布施 柚起²・石橋 寛樹³・秋山 充良⁴・越村 俊一⁵

¹ 学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: mo09ca12@toki.waseda.jp

² 学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: yuzu21@uri.waseda.jp

³ 正会員 日本大学助教 工学部 土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)
E-mail: ishibashi.hiroki@nihon-u.ac.jp

⁴ 正会員 早稲田大学教授 創造理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: akiyama617@waseda.jp (Corresponding Author)

⁵ 正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

強震動と津波を受ける橋梁の損傷に伴う道路ネットワークの接続性の低下、およびそれに伴う経済損失リスクの算定手法を提示する。地理情報システムとグラフ理論を援用することで、地震・津波ハザード評価、道路ネットワークに介在する橋梁の脆弱性（脆弱性）評価、およびリスク評価に用いる交通流解析を陽に関連付けている。道路ネットワークの接続性を反映したリスク評価では、Monte Carlo 法を用いた確率計算により、地震と津波ハザード強度の空間的な変動、および各橋梁の脆弱性とその損傷度の推定に伴う一連の不確定性を考慮した。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響域にある三重県内の道路ネットワークを対象に提案手法を適用し、橋梁位置毎の地震や津波ハザードの違いや、橋梁間の損傷の相関性が道路ネットワークの接続性や経済損失リスクに及ぼす影響などを考察した。

Key Words: Nankai Trough earthquake, multiple hazards, bridge network, connectivity reliability, risk

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、強震動と津波を受けた橋梁の損傷に伴い¹⁾、道路ネットワークの寸断が広範囲で発生し²⁾、橋梁を含む道路のストック被害額は宮城県だけでも約 248 億円に及んだ³⁾。2016 年熊本地震では、道路の被災により迂回を余儀なくされ、移動時間等が増加したことで、九州全域で約 300 億円の経済損失が生じたと推計されている⁴⁾。今後 30 年以内の発生確率が 70%以上と推定されている南海トラフ地震⁵⁾では、強震動と津波により道路ネットワークの遮断および機能低下が生じ、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震を上回る経済損失の発生が予測されている⁶⁾。南海トラフ地震の影響地域では、防災・減災対策が急がれるも

の、考えられる最大級の強震動と津波高さを想定し、被災する恐れのある全ての道路構造物に対して補強を施すことは時間や予算の制約上難しい。被害を合理的に低減させるためには、断層運動に関する不確定性を考慮した上で、個別の道路構造物の被災が道路ネットワークの交通機能の低下に及ぼす影響、およびそれにより生じる経済損失のリスクを算定し、それらに基づいた防災・減災戦略を立案することが求められる。

橋梁の地震被害が道路ネットワークに及ぼす影響の既往研究として、Chang et al.⁷⁾は、強震動を受ける個別橋梁の耐震信頼性評価手法を拡張し、それらを構成要素とする道路ネットワークの性能指標を定量化している。Zhou et al.⁸⁾は、個別橋梁の耐震補強が強震動を受ける道路ネットワークのリスク低減に及ぼす効果を算定した。

Bocchini and Frangopol⁹⁾は、強震動を受ける道路ネットワーク内にある橋梁の損傷を確率場の理論を用いて評価し、橋梁の損傷が地点間の移動時間の増加に及ぼす影響を交通流解析を用いたリスクアプローチにより定量化している。国内では、土木学会地震工学委員会耐震基準委員会¹⁰⁾により、強震動を受けて被災する道路ネットワークを対象に、橋梁の復旧費用と補強費用、および交通流解析により推定される被災前後の交通に係る費用の増加量の和としてライフサイクルコストを定義し、それを最小化する耐震補強戦略を提案している。これら強震動のみのシングルハザードを扱った既往研究に対して、Ishibashi et al.¹¹⁾は、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、それらの各指標に基づき構造物の補強優先度を判定している。しかしながら、この手法は、結節点のない単純な道路ネットワークを対象とし、地震直後にも必ず迂回路が存続することを仮定しているなど、マルチハザードを受ける橋梁の損傷と、それが道路ネットワークの接続性や機能性の低下に及ぼす影響を定量化するリスク算定手法の一段の高度化が必要である。

道路ネットワークのリスク評価に関する研究は、構造物の信頼性理論を基に交通工学のアプローチを援用することで発展してきたものの、マルチハザードと構造物の脆弱性（脆弱性）を反映した道路の性能評価、およびその結果を用いた交通流解析による経済損失の算定手法を確立する必要がある。近年は、道路ネットワークだけでなく、他のライフライン、例えば、上下水道や電力、あるいは情報通信等についても、耐用期間内に起こり得るあらゆるハザードに対するリスクの低減とレジリエンス強化が求められている¹²⁾。つまり、単に橋梁が強震動で損傷する、しない、の評価にとどまらず、マルチハザード下にある構造物の損傷がネットワークの機能性に及ぼす影響を、各評価段階に付随する不確定性を陽に考慮しながら定量化する必要がある。

この背景のもと、本研究では、地理情報システム（以下、GIS）とグラフ理論¹³⁾を援用し、南海トラフ地震に伴う強震動と津波を連続的に受ける橋梁の被災が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響、および接続性の低下により生じる移動時間等の増加や橋梁の復旧に掛る費用を勘定した経済損失のリスク評価手法を提案する。具体的には、対象地域を細分化した各メッシュに対し、断層運動の不確かさと地理的条件を考慮した地震・津波の確率論的ハザード評価を行い、GISを用いることで道路ネットワークに介在する橋梁の各位置とハザード強度を空間的に対応させる。道路ネットワークの起終点（OD：Origin-Destination）間を対象として、Monte Carlo 法（以下、MCS）を用いた確率計算により、地震と津波ハザードの空間的な差異、および各橋梁の脆弱性とその損傷度の

推定に係る不確定性を考慮し、道路ネットワークの接続性が確保できない確率（以降、途絶確率）を算定する。グラフ理論に基づき複数の結節点を有する道路ネットワークをモデル化し、橋梁の損傷をその接続関係に反映することで、途絶確率は算定される。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響を受けることが予想される三重県内の道路ネットワークを対象に提案手法を適用し、強震動と津波を受ける個別橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性および経済損失リスクに与える影響を考察する。

なお、本研究の実施にあたり設けた仮定を以下に示す。

- 1) 南海トラフ地震を想定したケーススタディで実施する地震と津波ハザード評価では、南海トラフ地震の巨大地震モデル検討会^{14,15)}に従いそれぞれ異なる断層モデルを用いる。そのため、両ハザードの相関性は、地震規模に関わる平均応力降下量を共通の不確定性として扱うことで考慮される。また、南海トラフ地震の切迫性を鑑み、地震の発生を前提とする条件下で、強震動と津波の強度推定に伴う不確定性を考慮した確率論的ハザード解析を行う。地震および津波ハザードの推定精度は、構造物の信頼性評価結果に大きく影響する¹⁶⁾ため、断層モデルの設定や対象とする不確定性等に関する継続した検討が求められる。
- 2) 道路ネットワークは、橋梁や盛土、トンネル等の複数の構造物により構成されるが、本研究では、橋梁のみを対象とする⁹⁾。すなわち、道路ネットワークの交通機能は、橋梁の損傷状態のみに依存するものとして、接続性およびリスクを評価する。
- 3) 被災に伴う道路ネットワークの交通行動の変化を交通流解析を用いて推定する際、地震後の人的被害（死者数や負傷者数など）による地震発生前後の交通需要の変化は生じないと仮定する。

2. 南海トラフ地震による強震動・津波を受ける道路ネットワークの接続性とその機能低下に伴う経済損失のリスク評価手順

(1) 概説

南海トラフ地震による強震動・津波を受ける道路ネットワークの接続性とその機能低下により生じる経済損失のリスク評価手順の概要を図-1に示す。計算手順は4つのプロセスから構成されており、I. 解析対象の道路ネットワークのグラフ理論に基づいたモデル化、II. 断層運動に関する不確定性および解析モデルの誤差を考慮した地震と津波の確率論的ハザード評価、III. 強震動と津波の連続作用を考慮した橋梁の脆弱性評価、およびIV. MCSに基づく道路ネットワークの接続性とその機能

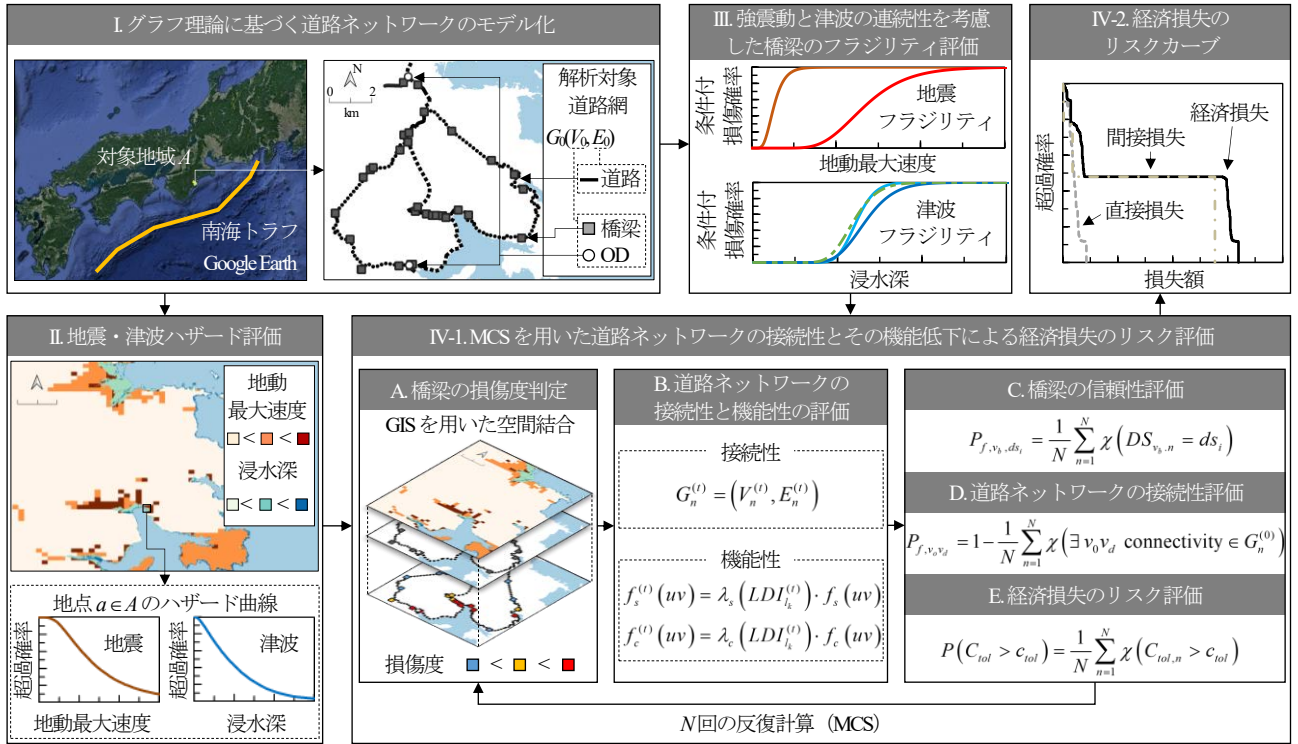


図-1 南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワークの接続性とその機能低下に伴う経済損失のリスク評価手順

低下に伴う経済損失のリスクカーブの算定，である．次節以降，各プロセスの内容を詳述する．

(2) グラフ理論を用いた道路ネットワークのモデル化

グラフ理論^{13),17)}を用いて，橋梁，OD，および結節点を結ぶ線として道路ネットワークをモデル化することで，各橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響と，その機能低下による経済損失リスクが算定される．グラフ理論では，多数の頂点間の接続関係を集合論を基に定式化するため，OD間を結ぶ経路が複数存在する道路ネットワークのリスク評価に必要な交通流解析を行うことができる．

地震発生前（平常時）の道路ネットワーク G_0 は，次式の重み付き有向グラフでモデル化される¹⁷⁾．

$$G_0 = (V_0, E_0), \quad E_0 \subseteq \{uv \mid u, v \in V_0, u \neq v\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f_l: E_0 &\rightarrow L_l, & f_s: E_0 &\rightarrow L_s, & f_c: E_0 &\rightarrow L_c, \\ f_A: V_0, E_0 &\rightarrow L_A, & f_{link}: V_0, E_0 &\rightarrow L_{link} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに， u ，および v は，橋梁，OD，および結節点から成る頂点の集合 V_0 の要素， E_0 は，頂点を結ぶ道路縁の集合， f_l ， f_s ，および f_c は，道路縁に対して延長，車両速度，および交通容量をそれぞれ関連付ける写像， f_A ，および f_{link} は，それぞれ頂点あるいは道路縁の対象地域 A 内の地点 $a \in A$ ，およびそれらが属する道路の名称（リンク番号）を表す写像である．

次節以降で示すように，橋梁位置のハザード強度，および脆弱性曲線から推定される各橋梁の損傷度を反映し，道路ネットワークの接続関係，および道路縁の

交通機能を更新することで，地震・津波作用後の道路ネットワークの接続性とその機能低下が評価される．

(3) 地震・津波ハザード評価

対象地域 A を区分した地点（メッシュ） $a \in A$ に対して，断層運動に関する不確定性，およびアテニュエーション式などのモデル誤差を考慮し，地震および津波のハザード強度として選定した地動最大速度および浸水深をそれぞれ推定する．

a) 地震ハザード評価

地震ハザード評価では，司・翠川の距離減衰式¹⁸⁾および地盤増幅度^{19),20)}を用いて，平均応力降下量の不確実性とモデル誤差を考慮し，分解能を 250 m メッシュとした地点 a 位置の地動最大速度を算出する．強震断層モデルの平均応力降下量 $\Delta\sigma_s$ とモーメントマグニチュード M_w の関係は，次式で表される²¹⁾．

$$M_w = \frac{1}{1.5} \left(\log \left(\frac{16}{7\pi^{1.5}} \Delta\sigma_s S^{1.5} \right) - 9.1 \right) \quad (3)$$

ここに， S は震源断層の面積である．

式(3)より推定されるモーメントマグニチュードから地点 a における工学的基盤（平均 S 波速度 600 m/s の地盤）面の最大速度 V_{600a} を司・翠川の距離減衰式¹⁸⁾を用いて算出し，地盤増幅度を考慮して地点 a における地動最大速度 Γ_a を得る．本研究で用いる確率論的ハザード曲線の算定手順は，参考文献 22) に詳述されている．

最終的に，地点 a における地震ハザード曲線は，地動最大速度 Γ_a が γ_a より大きい確率 $P(\Gamma_a > \gamma_a)$ として算定され

る。着目地点と想定震源までの距離、および地盤増幅度の差異を反映し、地震ハザード曲線は位置により異なる。

b) 津波ハザード評価

津波ハザード評価では、平均応力降下量、およびすべり角を確率変数とし、RBF ネットワークによる津波伝播解析の近似関数を用いて、地点 a における浸水深を算定する。RBF ネットワークによる近似関数は、実験計画法による Λ 回の津波伝播解析結果を内挿することで、対象地域を区分した 30 m メッシュの中央位置毎に作成される。津波伝播解析の代わりに、作成した近似関数を用いることで、平均応力降下量およびすべり角に応じて強い非線形性を持って変動する浸水深を高速に推定できる。

津波断層モデルの平均応力降下量のばらつき $\Delta\sigma_i$ がすべり量 D に及ぼす影響は次式により評価する²⁰⁾。

$$D = \frac{16}{7\pi^{1.5}\mu} \Delta\sigma_i S^{0.5} \quad (8)$$

ここに、 μ は剛性率である。

すべり量とすべり角に変動を与えた Λ 個の津波断層モデルを用いて、Okada の方法²⁰⁾により地殻変動解析を行い、津波の初期水位を計算する。初期水位、標高データおよび粗度データを入力条件とし、非線形 2 次元長波理論²⁰⁾に基づく津波伝播解析を行い、30m メッシュの中央位置の浸水深を算定する。したがって、平均応力降下量とすべり角の J 個の組み合わせ $\mathbf{x}_\lambda (\lambda=1, \dots, \Lambda)$ 、 λ およびそれらを入力条件とした地点 a における Λ 個の津波伝播解析結果 $y_{a\lambda} (\lambda=1, \dots, \Lambda)$ を得る。最終的に、津波伝播解析における入出力関係のサンプル $\mathbf{x}_\lambda$ および $y_{a\lambda}$ を非負条件付きの RBF ネットワークを用いて内挿した次式を用いて、平均応力降下量 (すべり量) およびすべり角の任意の組み合わせ $\mathbf{x}$ を有する断層運動が生じた際の地点 a における浸水深 $h_a(\mathbf{x})$ を算定する。

$$h_a(\mathbf{x}) = \max \left\{ \left(\Phi^{-1} \cdot \mathbf{y}_a \right)^T \cdot \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), 0 \right\} \quad (9)$$

ここに、

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1(\mathbf{x}_1) & \cdots & \varphi_\Lambda(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(\mathbf{x}_\Lambda) & \cdots & \varphi_\Lambda(\mathbf{x}_\Lambda) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_m = \begin{pmatrix} y_{a,1} \\ \vdots \\ y_{a,\Lambda} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \varphi_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \varphi_\Lambda(\mathbf{x}) \end{pmatrix}, \quad \varphi_\lambda(\mathbf{x}) = \exp \left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_\lambda\|^2}{r_\lambda^2} \right)$$

ここに、 r_λ は λ 番目の基底関数 φ_λ の半径であり、 $K=2$ の K -近傍法により算定する²⁰⁾。

最終的に、平均応力降下量、およびすべり角のばらつき (確率分布) を入力条件とし、MCS に基づき式(9)を繰り返し用いることで、津波ハザード曲線を算定する。津波ハザード曲線には、地点 a の沿岸部からの距離や標高などの地理的条件が反映される。

(4) 強震動と津波の連続性を考慮した橋梁のフラジリティ評価

橋梁 v_b の損傷度 DS_{v_b} は、無損傷 ds_0 、小破 ds_1 、および大破 ds_2 からなる 3 段階に設定し、強震動と津波を連続して受ける橋梁のフラジリティ評価を行う¹¹⁾。地震フラジリティ評価では、地動最大速度 Γ を持つ多数の地震波を用いた非線形動的解析を行い、各損傷度以上となる条件付損傷確率を算出する。例えば、小破以上および大破となる地震フラジリティ曲線は次式で表される。

$$P_{s,v_b}(ds_i, \gamma_{v_b}) = P_{s,v_b}(DS_{v_b} \geq ds_i | \Gamma = \gamma_{v_b}) \quad i \in \{1, 2\} \quad (11)$$

ここに、 P_{s,v_b} は地動最大速度 $\Gamma = \gamma_{v_b}$ のとき橋梁 v_b が損傷度 $DS_{v_b} = ds_i$ 以上となる条件付確率である。

津波フラジリティ評価では、数値波動水槽を用いて、最大浸水深 H の津波波形から橋梁に作用する水平波力を算定し、プッシュオーバー解析を行う。このとき、強震動による橋脚の残留変位と剛性劣化、および支承の耐力低下を津波作用時の橋梁の状態として引き継ぐことで、強震動と津波の連続作用を考慮する¹¹⁾。また、津波の鉛直波力による桁の浮き上がりに関する照査も行う。最終的に、津波フラジリティ曲線は次式で表される。

$$P_{t,v_b}(ds_j, h_{v_b}, ds_i) = P_{t,v_b}(DS_{v_b} \geq ds_j | H = h_{v_b}, DS_{v_b} = ds_i) \quad (12)$$

$$(i, j) \in \{(0,1), (0,2), (1,2)\}$$

ここに、 P_{t,v_b} は強震動によって損傷度 $DS_{v_b} = ds_i$ となった橋梁 v_b が浸水深 $H = h_{v_b}$ の津波により損傷度が ds_j 以上となる条件付確率である。

式(12)は、地震作用後に無損傷の橋梁が連続して作用する津波により小破以上あるいは大破、および地震により小破の状態から津波によって大破となるフラジリティ曲線を表す。式(11)と式(12)を用いることで、強震動と津波による連続作用を考慮し橋梁の損傷確率を算定できる。

(5) MCS を用いた道路ネットワークの接続性の評価と機能低下に伴う経済損失のリスク評価

地震と津波ハザード強度の空間的な変動、および橋梁の脆弱性を考慮した MCS を用いて、各橋梁の損傷による道路ネットワークの接続性を評価し、最終的に、接続性の低下により生じる経済損失リスクを算定する。

a) 橋梁の損傷度判定

前述のハザード評価手法とフラジリティ曲線を用いて、強震動と津波を受ける道路ネットワーク内にある各橋梁の損傷度を判定する。まず、GIS を援用し、対象地域 A の地震・津波ハザード、および各橋梁の位置を空間的に対応させる。MCS の n 試行目における橋梁 v_b 位置の地動最大速度 $\gamma_{b,n}$ 、および浸水深 $h_{b,n}$ は以下の式により表される。

$$\gamma_{v_b,n} = \{\gamma_{a,n} \mid a = f_A(v_b)\} \quad (13)$$

$$h_{v_b,n} = \{h_{a,n} \mid a = f_A(v_b)\} \quad (14)$$

ここに、 $\gamma_{a,n}$ および $h_{a,n}$ は、それぞれMCSの n 試行目における地点 a の地動最大速度および浸水深である。

MCSにおける n 試行目の強震動を受ける橋梁 v_b の損傷度 $DS_{s,v_b,n}$ を次式により推定する。

$$DS_{s,v_b,n} = \begin{cases} ds_0, & \text{if } P_{s,v_b}(ds_1, \gamma_{v_b,n}) < q_{v_b,n} \\ ds_1, & \text{if } P_{s,v_b}(ds_2, \gamma_{v_b,n}) < q_{v_b,n} \leq P_{s,v_b}(ds_1, \gamma_{v_b,n}) \\ ds_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

ここに、 $\gamma_{v_b,n}$ は橋梁 v_b に対する n 試行目の地動最大速度、 $q_{v_b,n}$ は強震動を受ける橋梁 v_b の損傷度を判定するための区間 $[0, 1)$ の一樣乱数^{8),26),27)}である。

MCSにおける n 試行目の強震動と津波を連続して受ける橋梁 v_b の最終的な損傷度 $DS_{v_b,n}$ を次式により評価する。

$$DS_{v_b,n} = \begin{cases} ds_0, & \text{if } DS_{s,v_b,n} = ds_0 \text{ and } P_{t,v_b}(ds_1, h_{v_b,n}, ds_0) < r_{v_b,n} \\ ds_1, & \text{if } DS_{s,v_b,n} = ds_0 \text{ and } P_{t,v_b}(ds_2, h_{v_b,n}, ds_0) < r_{v_b,n} \leq P_{t,v_b}(ds_1, h_{v_b,n}, ds_0) \\ ds_2, & \text{if } DS_{s,v_b,n} = ds_0 \text{ and } r_{v_b,n} \leq P_{t,v_b}(ds_2, h_{v_b,n}, ds_0) \\ ds_1, & \text{if } DS_{s,v_b,n} = ds_1 \text{ and } P_{t,v_b}(ds_2, h_{v_b,n}, ds_1) < r_{v_b,n} \\ ds_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

ここに、 $h_{v_b,n}$ は橋梁 v_b に対する n 試行目の浸水深、 $r_{v_b,n}$ は強震動と津波が連続的に作用する橋梁 v_b の最終的な損傷度判定に用いる区間 $[0, 1)$ の一樣乱数である。

損傷度判定のための乱数 $q_{v_b,n}$ および $r_{v_b,n}$ を対象地域 A 内で配分するには、強震波形の周期特性や津波の流速等、前述のハザード解析で考慮できていないハザード強度の変化、あるいは建設年度や維持管理の程度に依存した橋梁の脆弱性の相関を考慮する必要がある。 $q_{v_b,n}$ および $r_{v_b,n}$ により、各橋梁の損傷度に差異が生じるため、道路ネットワークの接続性とリスクの評価結果に大きく影響する。ケーススタディでは、損傷度判定用の乱数の空間的な相関性として完全相関と独立を仮定し、それが接続性およびリスクに与える影響を検証する。詳細は次章で述べる。

b) 道路ネットワークの接続性と機能性の評価

強震動と津波により小破あるいは大破となった橋梁 v_b は、その損傷度 $DS_{v_b,n}$ に応じた復旧日数 $RT_{v_b}(DS_{v_b,n})$ が経過した後に無損傷状態に回復すると仮定する。地震発生からの経過日数 t における道路ネットワークの接続性とその機能低下を評価する。橋梁の通行性能が失われる損傷

表-1 リンクの損傷指標と残存交通性能の関係²⁸⁾

リンクの損傷指標 LDI	残存車両速度 λ_s	残存交通容量 λ_c
$0 \leq LDI < 0.5$	1.00	1.00
$0.5 \leq LDI < 1.0$	0.75	1.00
$1.0 \leq LDI < 1.5$	0.75	0.75
$1.5 \leq LDI$	0.50	0.50

度を大破と設定し、その位置で道路ネットワークが寸断されるとする。MCSの n 試行目において、大破 ds_2 となる橋梁位置での通行不能を考慮した道路ネットワーク $G_n^{(t)}$ は、グラフ演算¹⁷⁾を用いて次式により表される。

$$G_n^{(t)} = (V_n^{(t)}, E_n^{(t)}) \\ = (V_0 - \{v_b \in V_0 \mid DS_{v_b,n} = ds_2, t < RT_{v_b}(ds_2)\}, E_0 - \{uv_b \in E_0, u \in V_0\}) \quad (17)$$

ここに、 $V_n^{(t)}$ および $E_n^{(t)}$ は、それぞれ地震発生前の道路ネットワーク G_0 から t において大破である橋梁 v_b を除いた頂点の集合、およびそれに接続する道路縁 uv_b を取り除いた道路縁の集合である。

被災後の道路ネットワークの交通機能は、介在する橋梁の損傷度に応じて変化する。Chang et al.⁷⁾は、地震発生後の各リンク（道路ネットワーク内の結節点をつなぐ道路）の残存交通機能をその内にある橋梁の損傷度に応じて推定している。本研究においても同様に、地震発生後の各リンクの車両速度および交通容量をそれぞれ次式により算定する⁷⁾。

$$f_s^{(t)}(uv \in E_n^{(t)} \mid l_k = f_{link}(uv)) = \lambda_s(LDI_{l_k}^{(t)}) \cdot f_s(uv) \quad (18)$$

$$f_c^{(t)}(uv \in E_n^{(t)} \mid l_k = f_{link}(uv)) = \lambda_c(LDI_{l_k}^{(t)}) \cdot f_c(uv) \quad (19)$$

ここに、 $f_s^{(t)}$ と $f_c^{(t)}$ は、それぞれ式(17)に示す道路ネットワーク $G_n^{(t)}$ の内にあるリンク $l_k \in L_{link}$ 上の道路縁 uv の車両速度および交通容量、 $\lambda_s(LDI_{l_k}^{(t)})$ と $\lambda_c(LDI_{l_k}^{(t)})$ は、それぞれ次式により算定される地震発生から t 日経過後のリンク l_k の損傷指標 $LDI_{l_k}^{(t)}$ に応じた残存車両速度および残存交通容量の割合であり、表-1に示す値である²⁸⁾。

$$LDI_{l_k}^{(t)} = \sqrt{\sum_{v_b \in V_k^{(t)}} (BDI(DS_{v_b,n}))^2} \quad (20)$$

$$BDI(DS_{v_b,n}) = \begin{cases} 0.3 & DS_{v_b,n} = ds_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

$$V_k^{(t)} = \{v_b \in V_n^{(t)} \mid l_k = f_{link}(v_b), t < RT_{v_b}(DS_{v_b,n})\} \quad (22)$$

ここに、 $BDI(DS_{v_b,n})$ は、橋梁の損傷度 $DS_{v_b,n}$ に応じた損傷指標⁷⁾、 $V_k^{(t)}$ は、リンク l_k 上の地震発生から t 日後に損傷度 $DS_{v_b,n}$ である橋梁 $v_b \in V_n^{(t)}$ の集合である。

強震動と津波を受ける道路ネットワークを対象としてグラフ理論を用いることで、ネットワーク内の橋梁の各損傷程度に応じた接続性の変化や機能低下を容易に定量化することが可能となる。

c) 橋梁の信頼性評価

橋梁 v_b が強震動と津波を連続して受けることで最終的に損傷度 ds_i となる損傷確率 P_{f,v_b,ds_i} は次式で与えられる。

$$P_{f,v_b,ds_i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \chi(DS_{v_b,n} = ds_i) \quad (23)$$

$$\chi(R) = \begin{cases} 1, & \text{if } R \text{ is true} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

ここに、 N は MCS の総試行回数、 R は命題である。

d) 道路ネットワークの接続性評価

強震動と津波を連続的に受けて大破となる橋梁位置で遮断される道路ネットワークにおいて、起点 v_o と終点 v_d の間の途絶確率 P_{f,v_o,v_d} は、次式により算定される。

$$P_{f,v_o,v_d} = 1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \chi(\exists v_o v_d \text{ connectivity} \in G_n^{(0)}) \quad (25)$$

ここに、 $\exists v_o v_d \text{ connectivity} \in G_n^{(0)}$ は、地震発生直後 $t=0$ の道路ネットワーク $G_n^{(0)}$ において OD 間 $v_o v_d$ を結ぶ経路が存在するという主張の命題である。ネットワーク内にある2点を結ぶ経路の有無を判定する方法は、グラフ理論において確立されている¹³⁾。本研究では、一般的に用いられる Dijkstra 法²⁰⁾を用いて式(25)を計算する。

式(17)と式(25)に示されるように、道路ネットワークの接続性は、その接続関係と介在する橋梁の位置、および種々の不確定性を考慮した強震動と津波ハザード強度の差異に基づいた各橋梁の損傷度を考慮して算出される。

e) 道路ネットワークの機能低下に伴う経済損失リスク

本研究では、損傷した橋梁の復旧に要する費用を直接損失、被災した道路ネットワークの交通機能の低下により生じる損失を間接損失としてそれぞれ定義し、これらの和を経済損失とする。MCS における n 試行目の強震動と津波の作用を受けた道路ネットワークにおける経済損失 $C_{tol,n}$ は次式で表される。

$$C_{tol,n} = C_{dir,n} + \sum_{t=1}^{\max\{RT_{v_b}\}} (C_{ind,G_n^{(t)}} - C_{ind,G_0}) \quad (26)$$

ここに、 $C_{dir,n}$ は直接損失、 C_{dir,G_0} と $C_{dir,G_n^{(0)}}$ は、それぞれ地震発生前後の道路ネットワークにおける交通の総移動時間および総走行距離を貨幣価値に換算したもの（総走行費用）である。

直接損失 $C_{dir,n}$ は、橋梁の損傷度に応じた復旧費用の総和であり、次式により算出される。

$$C_{dir,n} = \sum_{v_b \in V_0} C_{ds,v_b} (DS_{v_b,n}) \quad (27)$$

ここに、 $C_{ds,v_b}(DS_{v_b,n})$ は、損傷度 $DS_{v_b,n}$ の橋梁 v_b の復旧に掛

る費用である。

間接損失は、道路ネットワークの被災による交通の移動時間と走行距離の増加量、および OD 間の遮断に伴う移動の取り止めによる機会損失を貨幣価値に換算することで算出する。道路ネットワーク $G = (V, E)$ における交通の総走行費用 $C_{ind,G}$ は、道路縁の交通量 $\mathbf{z}$ を未知とする以下のシステム最適化配分問題¹³⁾の解として算定される。

$$\text{minimize } C_{ind,G}(\mathbf{z}) = \sum_{u \in V'} \sum_{v \in V'} f_{cost}(uv \in E_{cost}) \cdot z_{uv} \quad (28)$$

$$\text{subject to } \sum_v z_{vu} - \sum_w z_{uw} = \begin{cases} -Q, & u = v_o \\ Q, & u = v_d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

$$0 \leq z_{uv} \leq f'_c(uv), \forall uv \in E_{cost} \quad (30)$$

ここに、 z_{uv} は道路縁 uv の交通量、 Q は OD 間の交通需要、 E_{cost} 、 $f_{cost}(uv)$ および $f'_c(uv)$ は、それぞれ次式で表される。

$$E_{cost} = E + \{v_o v_d\} \quad (31)$$

$$f_{cost}(uv) = \begin{cases} C_{loss}, & uv = v_o v_d \\ f_i(uv) \cdot \left(C_{run} + \frac{C_{time}}{f_s(uv)} \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (32)$$

$$f'_c(uv) = \begin{cases} \infty, & uv = v_o v_d \\ f_c(uv), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

ここに、 E_{cost} は、道路縁の集合 E に OD 間の遮断により生じる機会損失 C_{loss} を考慮するための仮想リンク $v_o v_d$ を加えた集合¹³⁾、 f_{cost} および f'_c は、それぞれ仮想リンクを考慮した集合 E_{cost} に一般化費用¹³⁾および交通容量を対応させる写像、 C_{run} および C_{time} は、それぞれ単位走行距離、および単位移動時間あたりの運行費用である。

被災前後の道路ネットワーク、すなわち C_{dir,G_0} および $C_{dir,G_n^{(0)}}$ の総走行費用を式(28)より算定し、式(26)に示されるように、その差を地震発生後から全ての橋梁が復旧する時点 $\max\{RT_{v_b}\}$ まで足し合わせることで、MCS における n 試行目の間接損失を算出する。なお、式(28)は線形計画問題であるため、simplex 法を用いて容易に解ける³⁰⁾。

最終的に、式(26)で算定される経済損失 $C_{tol,n}$ が C_{tol} より大きい確率から経済損失 C_{tol} のリスクカーブ $P(C_{tol} > c_{tol})$ を次式により算定する。

$$P(C_{tol} > c_{tol}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \chi(C_{tol,n} > c_{tol}) \quad (34)$$

なお、本研究では、交通容量が交通需要を上回る道路ネットワークを対象とし、渋滞に伴う一般化費用の増加を表すリンクコスト関数^{13), 31), 32)}を考慮せずに間接損失を推定する。なお、リンクコスト関数を考慮すると、式(28)は一般化費用 f_{cost} が交通量 z_{uv} に依存することから非線形計画問題となり、その解法となる Incremental Assignment

法³³⁾やFrank-Wolfe法³⁴⁾等を用いた反復計算により多大な計算時間を要することになる。対象とする道路ネットワークの交通容量と需要の大小に関わらず式(34)を算定するための一般化は今後の課題である。また、災害発生後の交通行動を評価することは難しく^{35),36)}、その状況を予測するための交通配分モデルに関しても、継続した検討が求められる。

3. ケーススタディ

(1) 解析対象の道路ネットワーク

南海トラフ地震の発生を想定し、図-2に示す三重県尾鷲市にある道路ネットワークを対象に提案手法を適用する。道路は、国土数値情報³⁷⁾が公開する情報を参考に設定し、橋梁は、それと河川³⁸⁾の交点に位置すると仮定した。想定した橋梁数は32であり、後述するように、これらは実橋梁ではなく、ある条件下で設計された仮想の橋梁である。

図-2に示される各リンクの交通機能に関するパラメータ、すなわち、式(2)で表される道路と延長、自由流速度、および交通容量の関係を表-2に、各橋梁の位置する微地形区分²⁰⁾とリンクを表-3にそれぞれまとめて示す。

(2) ハザード評価

南海トラフ地震の巨大地震モデル検討会^{14),15)}(以下、検討会)が作成した強震・津波断層モデルを基に、図-3に示される上下限付きの対数正規分布に平均応力降下量は従うと仮定し、対象地域内の各地点における地震および津波ハザードを推定した。地震マグニチュードと発生する津波の規模には強い相関³⁹⁾があることから、強震および津波断層モデルに対し、等しい超過確率に相当する

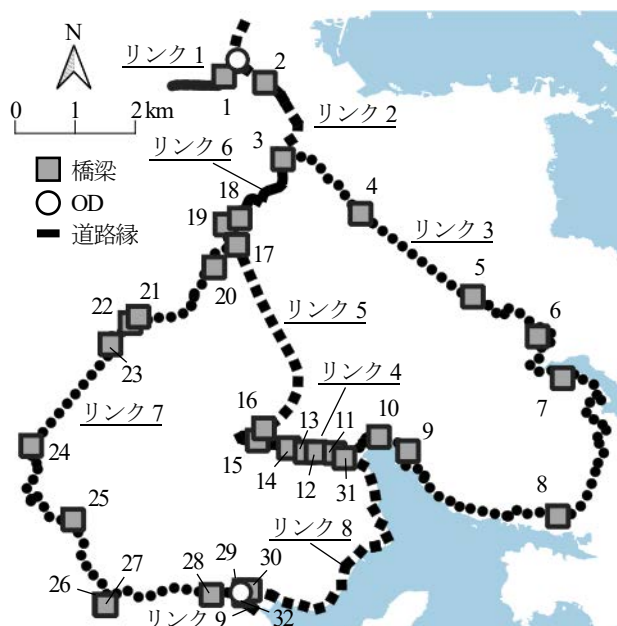


図-2 解析対象の道路ネットワーク

表-2 リンクの交通機能に関するパラメータ³⁸⁾

リンク番号 L_{link}	延長 L_l (km)	車両速度 L_s (km/h)	交通容量 L_c (台/日)
1	1.4	40	60000
2	3.2	60	105600
3	17.8	40	60000
4	1.9		
5	5.3	100	
6	1.5	40	
7	14.4		
8	5.5		
9	0.4		

表-3 橋梁の位置に関するパラメータおよび損傷確率

橋梁番号	微地形区分 ²⁰⁾	位置するリンク	強震動のみ		津波のみ		強震動・津波	
			小破	大破	小破	大破	小破	大破
1	砂礫質台地	1	0.69	0.23	0.00	0.03	0.67	0.25
2	谷底低地	2	0.57	0.40	0.01	0.13	0.50	0.47
3	山地	3	0.72	0.11	0.00	0.01	0.71	0.12
4	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
5	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
6	谷底低地		0.54	0.44	0.00	0.03	0.53	0.45
7	山地		0.72	0.13	0.03	0.32	0.46	0.43
8	山地		0.72	0.13	-	-	0.72	0.13
9	埋立地		0.50	0.48	0.04	0.29	0.35	0.63
10	谷底低地		0.53	0.45	0.02	0.19	0.43	0.55
11	三角州・海岸低地	4	0.43	0.56	0.02	0.14	0.38	0.61
12	山地		0.72	0.13	0.02	0.15	0.60	0.27
13	山地		0.71	0.13	0.01	0.08	0.65	0.20
14	山麓地		0.67	0.27	0.00	0.05	0.64	0.30
15	山麓地	5	0.67	0.27	-	-	0.67	0.27
16	山麓地		0.67	0.27	-	-	0.67	0.27
17	山地		0.71	0.12	-	-	0.71	0.12
18	山地	7	0.71	0.12	-	-	0.71	0.12
19	山地		0.72	0.11	-	-	0.72	0.11
20	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
21	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
22	山地		0.71	0.12	-	-	0.71	0.12
23	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
24	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
25	山地		0.72	0.12	-	-	0.72	0.12
26	谷底低地		0.61	0.35	-	-	0.61	0.35
27	谷底低地		0.62	0.34	-	-	0.62	0.34
28	砂礫質台地		0.65	0.28	0.01	0.12	0.58	0.37
29	三角州・海岸低地	8	0.42	0.57	0.03	0.22	0.33	0.66
30	三角州・海岸低地		0.42	0.57	0.06	0.47	0.22	0.78
31	三角州・海岸低地		0.42	0.57	0.05	0.45	0.23	0.76
32	三角州・海岸低地	9	0.42	0.57	0.03	0.28	0.30	0.69

平均応力降下量をそれぞれ MCS の中で与えることで、両ハザードの相関性を考慮した。さらに、津波断層モデルには、検討会の公開するすべり角に対して平均 0° 、標準偏差 10° の正規分布に従うばらつきを与えた¹⁴⁾。

強震断層モデルは、検討会の公開する強震動生成域のそれぞれ異なる基本および陸域ケースを使用した¹⁴⁾。津波ハザード評価では、大すべり域の異なる 15 ケースを想定し、検討会が想定する 11 ケース¹⁵⁾と筆者らが独自に設定した 4 ケースの津波断層モデル¹¹⁾を用いた。なお、強震および津波断層モデルの各ケースは互いに等しい確率で発生すると仮定した。MCS の総試行回数 N は、1 万回とした。この条件下では、各橋梁の損傷確率、および道路ネットワークの途絶確率の推定精度は、1%程度の範囲に収まることを確認している。

津波ハザード評価に用いる津波伝播解析の近似関数を作成するため、不確定性を考慮する各パラメータの変動範囲を網羅するように、平均応力降下量は、0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 MPa の 6 パターン、すべり角に関しては、検討会が公開しているすべり角から -30° , -20° , -10° , 0° , 10° , 20° , 30° を加減した 7 パターンの計 42 の津波伝播解析を行った。大すべり域が異なる各ケースに対してそれぞれ近似関数を作成するため、津波伝播解析の総数は 630 となる。式(9)により作成される津波伝播解析の近似関数の例、および地震・津波の空間的なハザード強度の分布と道路ネットワークを図-4 に示す。図-4(b)には、図-3 に示す平均応力降下量の超過確率 0.5, 0.1, 0.01 に対応する地震・津波ハザード強度の空間分布をそれぞれ示している。なお、図-4 では、地動最大速度を

PGV と表記した。図-4(b)より、強震動は、対象とする 32 橋梁全てに影響を及ぼすのに対し、津波ハザードは、沿岸部に位置する橋梁位置でのみ大きくなっていることが確認できる。また、両ハザードの正の相関を考慮したため、地動最大速度の増加に伴い、浸水深も大きくなっている。

尾鷲市の道路ネットワーク内の橋梁位置における地震および津波ハザード曲線を図-5 に示す。地震ハザードは、多くの橋梁で同様な傾向を示している。これは、橋梁位置毎の震源距離には大きな差がなく、表-3 に示す微地形区分の影響を強く受けるためである。三角州・海岸低地に位置する橋梁 11, 橋梁 29, 橋梁 30, 橋梁 31, および橋梁 32 は地震ハザードが大きい。津波ハザード曲線は、沿岸部からの距離や地理的条件の違いが反映され、橋梁位置毎に明確な差異が生じている。対象地域の南側および沿岸部に近いほど、津波ハザードは大きくなる傾向があり、特に橋梁 30 と 31 は厳しい津波ハザードに曝され

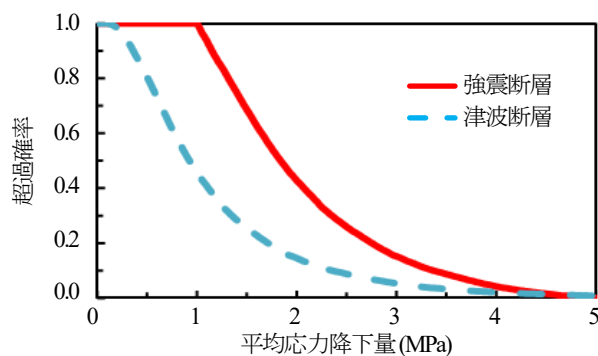


図-3 断層モデルの平均応力降下量に関する不確定性

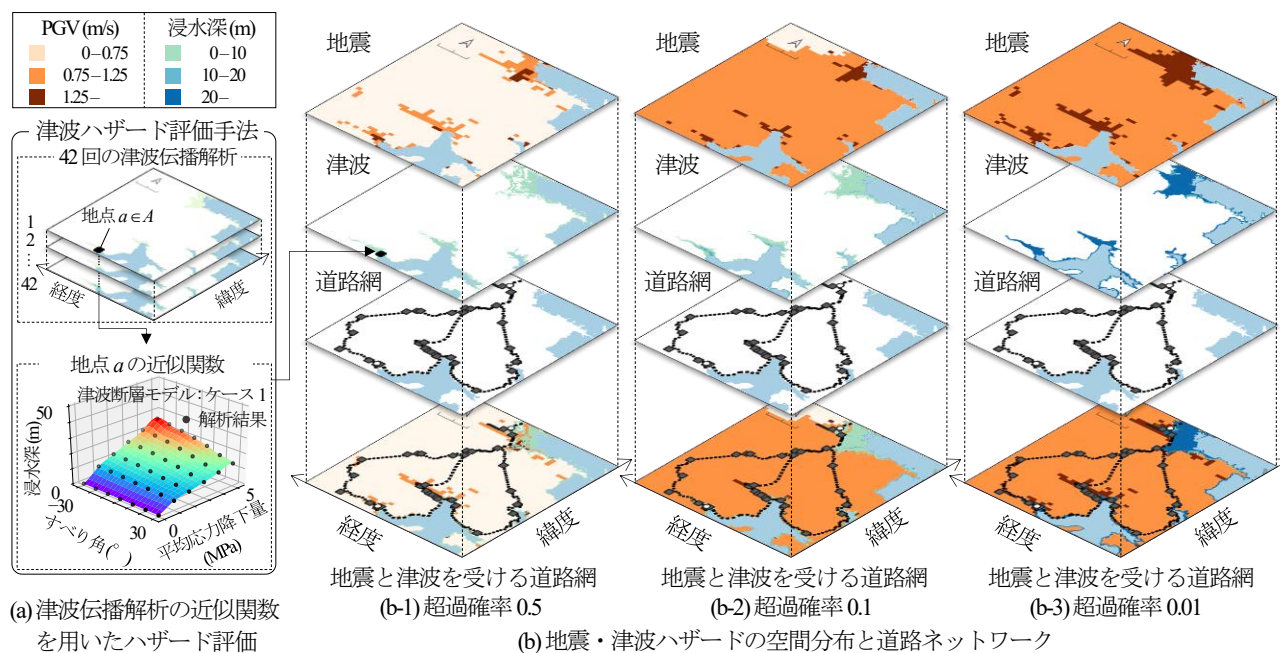
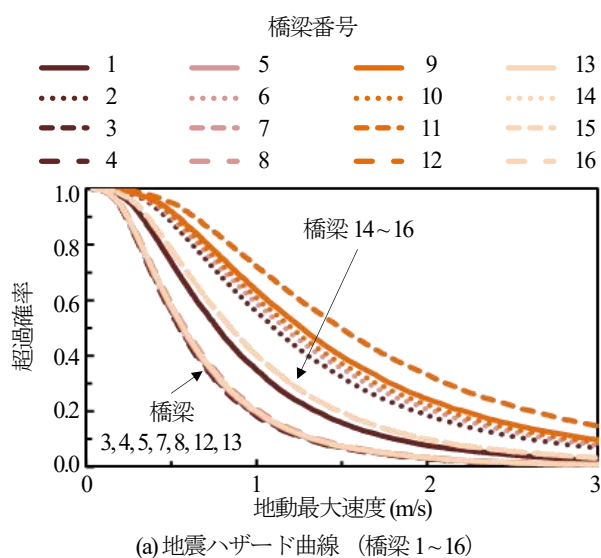
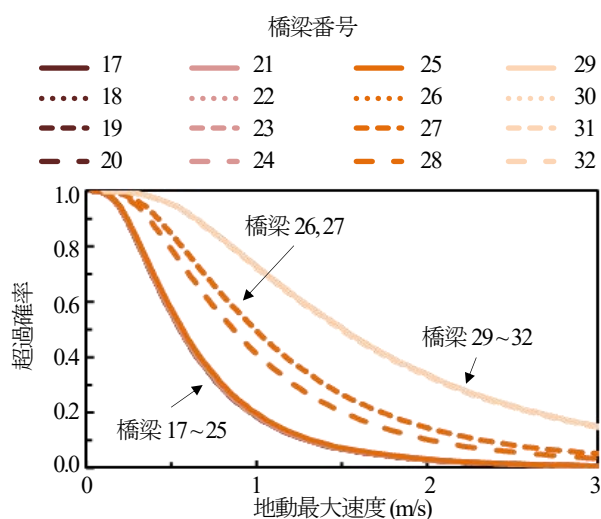


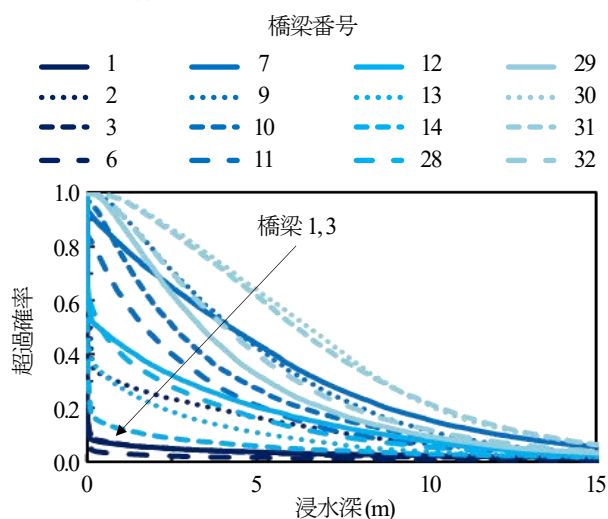
図-4 津波伝播解析の近似関数を用いたハザード評価および強震動と津波を受ける道路ネットワーク



(a) 地震ハザード曲線 (橋梁 1~16)



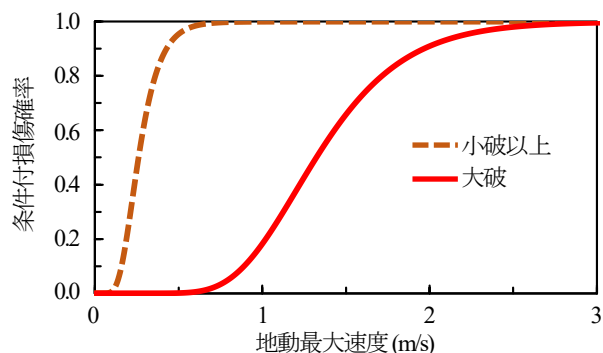
(b) 地震ハザード曲線 (橋梁 17~32)



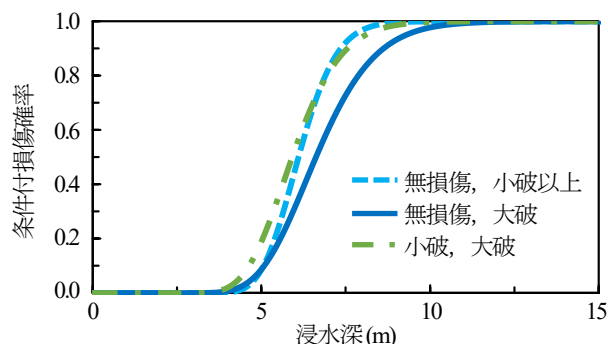
(c) 津波ハザード曲線

図-5 橋梁位置毎のハザード曲線

ている。なお、図-5に示される津波ハザード曲線は、平均応力降下量 $\Delta\sigma = 5 \text{ MPa}$ を設定した津波断層モデルを用いた津波伝播解析において津波の到達が確認された橋梁位置に対してのみの結果である。以降の検討では、この



(a) 地震 fragility 曲線



(b) 津波 fragility 曲線

図-6 橋梁の fragility 曲線

16 橋梁に対して津波による損傷を考慮する。

(3) 橋梁の fragility 評価

Ishibashi et al.¹⁰⁾の手法により、平成 8 年度の道路橋示方書⁴⁰⁾の基準を満たす I 種地盤上に位置する橋脚高さ 6 m の桁橋を解析対象とし、図-6に示す地震および津波に対する fragility 曲線を作成した。なお、図-2に示される道路ネットワーク内にある 32 橋梁は、地点によらず平成 8 年度の耐震基準で設計されていると仮定し、次節以降の解析を行う。各橋梁の位置情報、橋梁形式、橋長、および建設年度等に関する実際のデータの収集、およびそれに基づく地震および津波に対する fragility 評価は今後の課題である。

(4) 橋梁の信頼性評価

各橋梁の信頼性評価結果として、各橋梁が小破あるいは大破となる損傷確率を表-3にまとめて示す。図-5に示すように地点間のハザード曲線が異なることから、同じ橋梁モデルを仮定した場合でも損傷確率に差異が生じる。表-3より、地震により大破となる損傷確率は、微地形区分²⁰⁾が谷底低地や三角州・海岸低地等の地盤に位置する橋梁で顕著に大きい。津波による損傷は、小破に比べて大破となる確率が極めて大きく、強震動による損傷の傾向とは異なる。また、強震動と津波の連続性を考慮しないと、沿岸部の橋梁の損傷確率を過小評価する結果となった。橋梁 30 と 31 は、沿岸部の軟弱な地盤に位置するため、強震動および津波による損傷確率がともに大きく、

両ハザードに備えた対策が望まれる。

このように、地盤特性や地理的条件を考慮した強震動および津波ハザード評価を行うことで、各橋梁に対して支配的なハザードを同定できる。一方で、補強等を実施する際には、各橋梁の損傷が道路ネットワークの経済損失に及ぼす影響を踏まえた検討が必要となる。

(5) 道路ネットワークの接続性評価

式(15)および式(16)に示される損傷度判定用の乱数 $q_{b,n}$ および $r_{b,n}$ の値の橋梁間における差異は、各橋梁の損傷とその位置関係の推定結果に関わるため、道路ネットワークの接続性に顕著な影響を及ぼす。本研究では、損傷度判定用の乱数として、各橋梁に対して等しい値を用いる完全相関ケース、および独立に異なる値を与える独立ケースの2ケースを仮定し、道路ネットワークの接続性およびリスクを評価する。

道路ネットワークの途絶確率を表-4に示す。また、MCSの反復計算における道路ネットワーク内にある各

橋梁の損傷度の15サンプルを図-7に示す。MCSにおける n 試行目のハザード強度は、完全相関および独立ケースで等しくなるように設定しているため、各橋梁の損傷度の相関性が地震後の道路ネットワークの様相に大きく影響を及ぼすことが図-7より確認できる。

表-4より、津波よりも強震動による影響が卓越し、道路ネットワークの接続性を低下させていることが分かる。これは、図-2と図-7に示されるように、津波による損傷は沿岸部にある橋梁を中心に生じるため、図-2のリンク2、リンク6、およびリンク7から成る西側のルートが存続する可能性が高いのに比べ、強震動の影響は対象とする32橋梁全てに及ぶためである。沿岸部に位置する橋梁の損傷確率と同様に、地震と津波の両ハザードの影響を考慮しないと、道路ネットワークの接続性は過大に評価されると言える。

また、表-4より、完全相関ケースに比べて、独立ケースのOD間の途絶確率は大い。これは、図-7に示されるように、完全相関ケースではいずれの橋梁也大破とならない事象が生じるのに対し、独立ケースでは比較的小さなハザード強度により大破となる橋梁が点在する傾向にあり、結果として道路ネットワークの遮断が生じやすいためである。既往研究^{40,42)}に報告されているように、直列システムでは、橋梁間の損傷の相関が大きいほど、

表-4 道路ネットワークの途絶確率

ケース	強震動のみ	津波のみ	強震動・津波
完全相関	0.40	0.13	0.48
独立	0.51	0.14	0.58

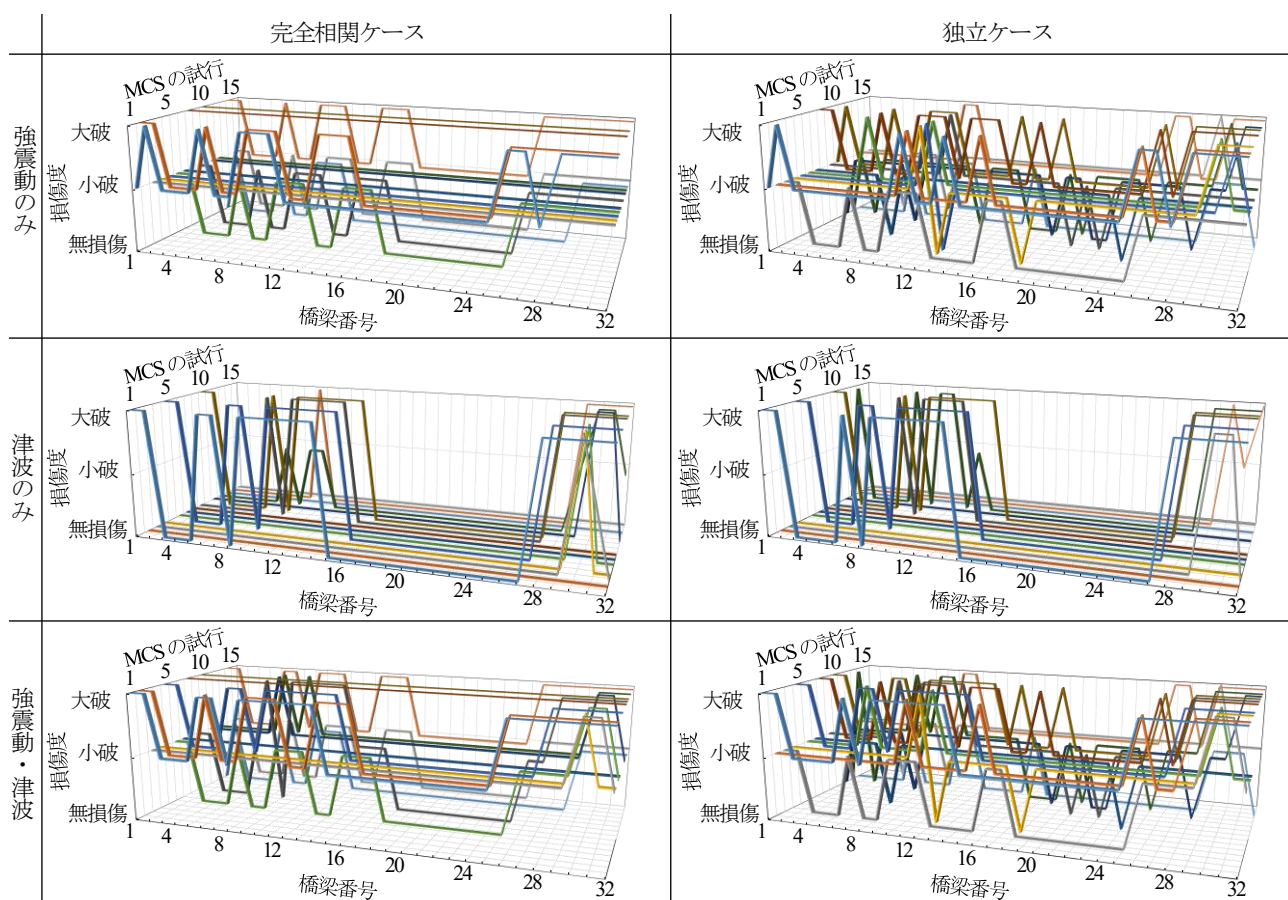


図-7 道路ネットワーク内にある各橋梁の損傷度の15サンプル

システム内の全ての橋梁が無損傷、あるいは損傷となる極端なケースが生じやすくなる結果として、途絶確率は小さくなる。本研究で対象とした図-2の道路ネットワークでは、直列システムと同様な傾向が表れている。また、表-4より、橋梁の損傷の相関性の影響度合いは、対象の道路ネットワークの接続関係だけでなく、ハザードの種類によっても異なることが確認できる。

表-3および表-4より、橋梁2の大破となる損傷確率および完全相関ケースにおける道路ネットワークの途絶確率は、ほぼ等しいことが分かる。これは、最も頑健なルートである図-2のリンク2、リンク6、およびリンク7に位置する橋梁の中で橋梁2が一番脆弱であり、その大破が道路ネットワークの遮断に直結するためである。橋梁2は、道路ネットワークの接続性の観点から最も重要な橋梁であり、優先的に補強等の対策を施すべきであると言える。

(6) 経済損失のリスク評価

表-2に示す道路ネットワークの交通機能、表-5の橋梁が小破あるいは大破となった際の復旧日数と復旧費用、

表-5 リンクの交通機能に関するパラメータ

橋梁の損傷度 $DS_{b,n}$	復旧日数 $RT_{b,n}$ (日)	復旧費用 $C_{d,b,n}$ (万円)
無損傷	0	0
小破	30	2010
大破	180	6700

OD 間の交通需要、単位走行距離と単位移動時間あたりの運行費用、および道路ネットワークの遮断による機会損失を設定し、道路ネットワークの機能低下に伴う経済損失のリスク評価を行った。被災した橋梁の復旧に要する時間と費用は、その損傷度や資材運搬の容易さ等によって大きく変動する。しかしながら、各橋梁の周辺環境を考慮しながら復旧日数、および復旧費用の関係を定量的に評価するための情報が得られていないことから、本研究では、参考文献 11)を参考に地点によらず表-5 に示す値を用いることにした。式(29)に示される OD 間の交通需要 Q は、全国道路・街路交通情勢調査 43)の 24 時間自動車類交通量を参考に 12000(台/日)と設定した。式(32)における単位走行距離と移動時間あたりの運行費用 C_{nm} および C_{me} は、費用便益分析マニュアル 44)を参考にそれぞれ 14.70(円/km/台)、および 45.15(円/km/台)とした。式(32)に示される機会損失 C_{loss} は、本研究では、被災前の OD 間の迂回路の移動時間を基準として 7500(円/台)と設定した。

道路ネットワークの機能低下により生じる経済損失のリスクカーブを図-8に示す。大きな超過確率では橋梁の復旧に要する費用が大きいのに対し、表-4に示す OD 間の途絶確率より小さい超過確率では道路ネットワークの分断により間接損失が急激に大きくなる。このため、地震発生後の道路ネットワークの接続性の維持はリスクの低減に大きく貢献し、また、経済損失の期待値では道路ネットワークの遮断に伴うリスクの変動を適切に評価で

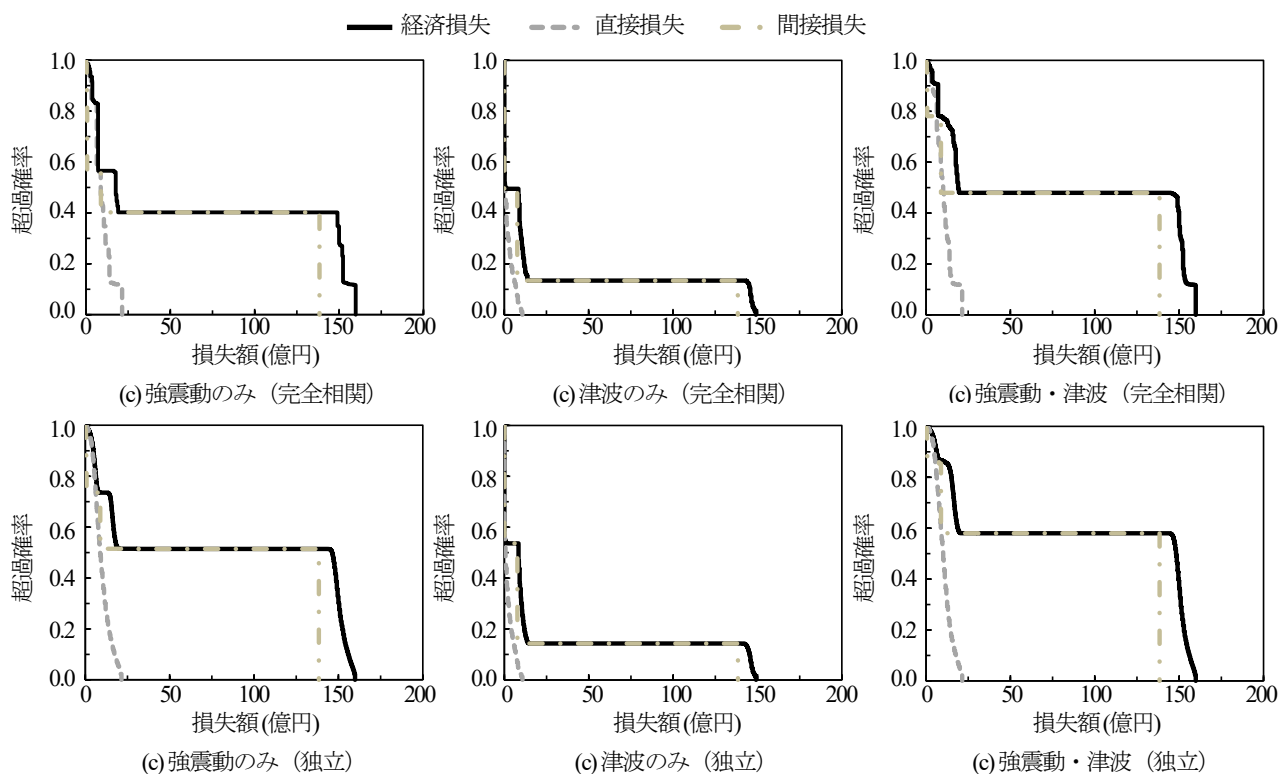


図-8 強震動と津波を受ける道路ネットワークの機能低下により生じる経済損失のリスクカーブ

きないことが示唆される。前項の結果と同様に、本研究で想定したケーススタディでは、津波と比較して地震が主たるハザードであり、また、両ハザードの連続性を考慮しないとリスクを過小評価する結果となった。

4. 結論

南海トラフ地震による強震動と津波を連続して受ける橋梁の被災に伴う道路ネットワークの遮断および交通機能の低下を推定し、それにより生じる経済損失のリスク評価手法を提示した。ケーススタディでは、南海トラフ地震の影響を受けることが予想される三重県尾鷲市の道路ネットワークを対象に提案手法を適用した。本研究により得られた知見を以下に示す。

1. 複数の橋梁と結節点を有する道路ネットワークをグラフ理論に基づき定式化し、これに地震・津波の各ハザード評価、および地震と津波を連続して受ける脆弱性評価と一体化することで、マルチハザードを受ける道路ネットワークの確率論的接続性評価法を構築した。各橋梁の置かれる地理的条件（地盤や海岸線からの距離）や脆弱性の違いがネットワークの接続性、あるいは、経済損失リスクに及ぼす影響を定量化することが可能である。
2. 地震と津波ハザード評価では、断層運動に関する不確定性、両ハザードの相関性、および地盤特性と地理的条件を考慮してハザード強度を確率論的に推定した。微地形区分として三角州・海岸低地に位置する橋梁は、地震と津波の双方の影響が同時に大きくなる傾向にあり、両ハザードに備えた対策が求められる。
3. MCS を用いることで、各橋梁の損傷確率に加えて、地震と津波ハザード、および橋梁毎の損傷度の相関性とそれらの推定に関わる不確定性を考慮し、道路ネットワークの接続性を評価できる。ケーススタディで対象とした三重県尾鷲市の道路ネットワークでは、地震が支配的なハザードであり、また、各橋梁の損傷が独立に生起すると仮定するときに道路ネットワークの接続性が確保されない確率が大きくなることが示された。
4. 道路ネットワークのリスクを損傷した橋梁の復旧費用（直接損失）、および地震後の道路ネットワークの交通機能の低下に伴う損失（間接損失）の和である経済損失として算定した。ケーススタディの条件下では、大きな超過確率の際には直接損失が卓越し、OD 間の接続性が確保されない確率と等しい超過確率以下においては道路ネットワーク

の遮断により間接損失が急増した。

本研究で提示した手法には、種々の仮定が含まれており、その精緻化には課題が残されている。特に、災害時の交通データや交通工学の知見等を活用し、地震発生後の交通行動を精緻に評価・予測できる交通配分モデル、および道路ネットワークの遮断による交通行動の取り止めに伴う機会損失の推定方法の確立が必要である。また、本研究では、橋梁の損傷に伴う道路ネットワークの機能低下、およびそれにより生じる経済損失の推定にとどまっており、リスクを低減するための具体的な対策の提示には至っていない。今後は、ハザード毎の損傷形式（強震動による橋脚の塑性化や、津波による桁の流失等）の違いを勘案した上で、道路ネットワークのリスク最小化を目的とする最適化問題を定式化し、その解として各橋梁に施す補強レベルを決定する手法を確立したい。

参考文献

- 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M., Arai, M., and Koshimura, S.: Reliability of bridges under tsunami hazard: Emphasis on the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.29, No.1_suppl, pp.S295–S314, 2013.
- 2) 能島暢呂, 加藤宏紀: 自動車交通量にみる高速道路機能の時空間的分析—東日本大震災と阪神・淡路大震災の事例比較—, 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 121-I 133, 2013.
- 3) 宮城県総務部危機対策課: 東日本大震災: 宮城県の発災後 1 年間の災害対応の記録とその検証, 宮城県, 2015.
- 4) 胡雨吟, 新垣孝宗, 外井哲志, 大枝良直: 熊本地震における通行止めが九州の広域道路網の機能低下に及ぼした影響とその回復過程に関する研究, 都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.852-858, 2018.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 南海トラフ地震の地震活動の長期評価 (第二版) について, 地震調査研究推進本部, 2013.
- 6) 土木学会平成 29 年度会長特別委員会レジリエンス確保に関する技術検討委員会, 土木学会, 2018.
- 7) Chang, S.E., Shinozuka, M. and Moore J.E.: Probabilistic Earthquake Scenarios: Extending Risk Analysis Methodologies to Spatially Distributed Systems. *Earthquake Spectra*. Vol.16, No.3, pp.557-572, 2000.
- 8) Zhou, Y., Banerjee, S. and Shinozuka, M.: Socio-economic effect of seismic retrofit of bridges for highway transportation networks: a pilot study, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.6, NO.1-2, pp.145-157, 2010.
- 9) Bocchini, P. and Frangopol D.M.: A stochastic computational framework for the joint transportation network fragility analysis and traffic flow distribution under extreme events, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.26, No.2, 2011.
- 10) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会: 経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討 - 経済性照査ワーキング活動報告書 -, 土木学会, 2008.

- 11) Ishibashi, H., Akiyama, M., Frangopol, D.M., Koshimura, S., Kojima, T. and Nanami, K.: Framework for estimating the risk and resilience of road networks with bridges and embankments under both seismic and tsunami hazards, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.17, No.4, pp.494-514, 2020.
- 12) 内閣官房国土強靱化推進室：国土強靱化基本計画，内閣官房，2018.
- 13) 土木学会土木計画学研究委員会：交通ネットワークの均衡分析 - 最新の数理と解法 -，土木学会，1998.
- 14) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：（第二次報告）強震断層モデル編ー強震断層モデルと震度分布についてー，2012.
- 15) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：（第二次報告）津波断層モデル編ー津波断層モデルと津波高・浸水域についてー，2012.
- 16) 秋山充良，丸山大輔，鈴木基：RC 構造物の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1177-1182，2003.
- 17) Bondy, J.A. and Murty U.S.R.: Graph theory with applications, *Palgrave Macmillan Press*, 1977.
- 18) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.63-70，1999.
- 19) 藤本一雄，翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係，日本地震工学会論文集，Vol.6，No.1，pp.11-22，2006.
- 20) 防災科学研究所：地震ハザードステーション (J-SHIS)，<http://www.jshis.bosai.go.jp/map/>，2021 年 5 月 11 日閲覧.
- 21) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2020.
- 22) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：「全国地震動予測地図」作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料第 336 号，pp.1-415，2009.
- 23) Okada, Y.: Surfaces deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 24) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IUGG/IOC Time Project*, 1997.
- 25) Moradi, M.J., Roshani, M.M., Shabani, A., Kioumars, M.: Prediction of the Load-Bearing Behavior of SPSW with Rectangular Opening by RBF Network, *Applied Sciences*, Vol.10, No.3, pp.1-12, 2020.
- 26) Chen, M., Mangalathu, S. and Jeon, J.S.: Bridge fragilities to network fragilities in seismic scenarios: An integrated approach, *Engineering Structures*, Vol.237, 2021.
- 27) 小野祐輔，日比慧慎：地震時斜面崩壊による道路閉塞を考慮した中山間地の孤立リスク評価：2004 年新潟県中越地震と 2016 年熊本地震への適用，日本地震工学会論文集，Vol.19，No.6（特集号），pp.6_232-6_243，2019.
- 28) Chang, S.E., Shinozuka, M. and Moore J.E.: Probabilistic earthquake scenarios: Extending risk analysis methodologies to spatially distributed systems, *Earthquake Spectra*, Vol.16, No.3, pp.557-572, 2000.
- 29) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, pp.269-271, 1959.
- 30) Dantzig, G.B.: Linear programming and extensions, *Princeton University Press*, 1963.
- 31) Bureau of Public Roads: Traffic assignment manual, Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington DC, 1964.
- 32) Davidson, K.B.: A flow travel time relationship for use in transportation planning, *Proceedings 3rd of Australian Road Research Board Conference*, Vol.3, No.1, pp.183-194, 1966.
- 33) Martin, B.V. and Manheim, M.L.: A research program for comparison of traffic assignment techniques, *Highway Research Record*, No.88, pp.69-84, 1965.
- 34) Frank, M. and Wolfe, P.: An algorithm for quadratic programming, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.3, No.1-2, pp.95-110, 1956.
- 35) 中村大，小林寛：大都市における震災時の交通対応策に関する研究 阪神淡路大震災の教訓と課題，土木学会論文集 D，Vol.62，No.1，pp.187-206，2006.
- 36) 東海集中豪雨下における自動車帰宅交通状況と走行経路解析，土木学会論文集，Vol.751，No.IV-62，pp.127-137，2004.
- 37) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報ダウンロード，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，2021 年 5 月 11 日閲覧.
- 38) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用(令和 3 年 3 月版)，丸善，2021.
- 39) Suppasri, A., Fukutani, Y., Abe, Y. and Imamura, F.: Relationship between earthquake magnitude and tsunami height along the Tohoku coast based on historical tsunami trace database and the 2011 Great East Japan Tsunami, 津波工学研究報告，Vol.30，pp.37-49，東北大学災害科学国際研究所，2013.
- 40) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1996.
- 41) 能島暢呂：要素破壊の相関性を考慮したネットワークの最大フロー評価のシミュレーション，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.65，No.1（地震工学論文集第 30 巻），pp.776-788，2009.
- 42) 吉川弘道，静間俊郎，高澤尚子，中村孝明：線状施設の震災後機能停止期間に関するシステムリスク解析，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.67，No.2，pp.92-108，2011.
- 43) 国土交通省：平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査（道路交通センサス）一般交通量調査実施要綱，国土交通省，2015.
- 44) 国土交通省道路局都市局：費用便益分析マニュアル，国土交通省，2018.

EFFECT OF DAMAGE TO BRIDGES UNDER SEISMIC AND TSUNAMI HAZARDS CAUSED BY THE ANTICIPATED NANKAI TROUGH EARTHQUAKE ON CONNECTIVITY OF ROAD NETWORKS AND RISK IN TERMS OF ECONOMIC LOSS

Koki AOKI, Yuzuki FUSE, Hiroki ISHIBASHI,
Mitsuyoshi AKIYAMA and Shunichi KOSHIMURA

This paper presents a methodology for estimating a connectivity of road networks and risk in terms of economic loss considering the vulnerability of bridges under seismic and tsunami hazards. With the aid of a geographic information system and graph theory, the risk of economic loss due to the deterioration of the bridge network's connectivity can be easily estimated based on seismic and tsunami hazard assessments, structural fragility estimation, and traffic flow analysis. Both uncertainties associated with fault movement estimations, spatial distribution of hazard intensities and structural vulnerability, and damage correlation among bridges are considered when estimating the probabilistic connectivity and risk in Monte Carlo simulation. In an illustrative example, the bridge network affected by the anticipated Nankai Trough earthquake is analysed. Computational results demonstrate that the risk depends highly on spatial distribution of hazard intensities and the correlation among damage states of bridges.