第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

地震動と津波ハザード強度の空間相関を考慮した橋梁・道路ネットワークの途絶確率算定手法の提案

青木　康貴[1]・鈴木　乃亜[2]・秋山　充良[3]・越村　俊一[4]

[1]学生会員　修（工）早稲田大学大学院　創造理工学研究科建設工学専攻・日本学術振興会特別研究員DC（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[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（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[3]正会員　博（工）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）
[4]正会員　博（工）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）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では，地震動や津波を受けた橋梁の損傷や損壊に伴う道路ネットワークの寸断が広範囲で発生した．道路ネットワークは，被災者の救助や被災地への緊急支援物資の搬送，あるいは復旧・復興活動において極めて重要な役割を果たす．2011年東北地方太平洋沖地震をはじめ，過去の震災においては橋梁が道路ネットワークの弱部となる例が多く報告されており，その機能性は，橋梁の構造性能に強く依存していると言える．

新設橋梁の耐震設計[1)]では，1995年兵庫県南部地震などによる被災を踏まえて規定されたレベル2地震動に対して，修復性や安全性の観点から定められた橋の限界状態を超えないようにしており，また，津波については，架橋位置や構造形式に配慮する一方で，津波作用を考慮した構造設計は現在，我が国では行われていない．一方，地震動と津波を連続して受ける可能性のある地域に位置する既存橋梁の全てについて，新規橋梁に求めているのと同じ修復性や安全性のレベルを確保する耐震補強を施したり，津波の影響を小さくできる構造形式に改めたりすることは，時間・予算などの制約から極めて難しい．

このため，地震動と津波の影響を連続して受ける既存橋梁を含む道路ネットワークの発災後の機能性の低下を防ぐためには，各橋梁位置で起こり得る地震動や津波高さとその発生頻度（ハザード），および橋梁の脆弱性（フラジリティ）から算定される損傷可能性を考慮した上で，個別橋梁の被災が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響を推定し，それを判断指標とした補強優先度の立案などを行うことが合理的である．

個別橋梁ではなく，道路ネットワークを俯瞰した補強戦略を考える上で最も重要になるのは，橋梁間の損傷の相関性の評価である．例えば，隣接する橋梁は，当然，作用する地震動強度や津波強度が同程度となり，同時に損壊する，あるいは同時に安全性を確保できる可能性が高くなるため，この影響を考慮した接続性の評価が重要となる．既往研究において，マルチハザード（地震と津波）を対象に，その強度の空間的な変動（空間相関）を考えた橋梁群の信頼性や道路ネットワークの接続性評価は行われていない．この背景のもと，本稿では，地震動・津波ハザード強度の空間相関，およびそれに伴う橋梁の同時損傷確率を考慮した道路ネットワークの途絶確率算定手法を提案する．

2. 橋梁・道路ネットワークの途絶確率

地震動と津波ハザード強度の空間相関を考慮した橋梁・道路ネットワークの途絶確率の算定フローを**図−1**に示す．提案手法では，着目地点（OD: Origin-Destination）間を結ぶパスが確保できない確率である途絶確率を評価する．

(1) 橋梁・道路ネットワークのモデル化

対象地域に影響を及ぼす強震断層および津波断層モデルを設定し，その地域にある道路ネットワークおよびODを選定する．グラフ理論[2)]を用いて，橋梁，

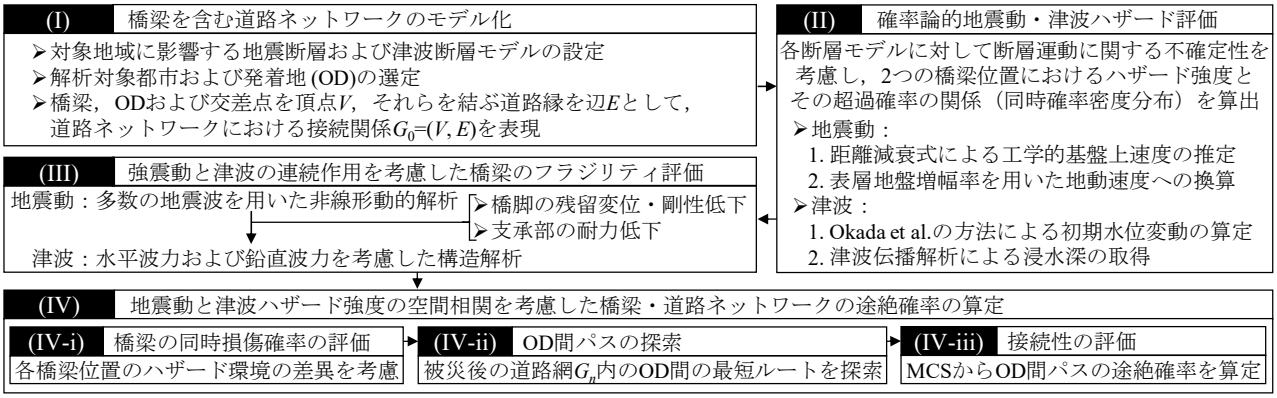


図-1 地震動と津波ハザード強度の空間相関を考慮した橋梁・道路ネットワークの途絶確率算定フロー

表-1 橋梁の損傷度の定義 [1), 7)]

部材	損傷形式	小破	大破
橋脚	曲げ破壊	最大応答変位が降伏以上	最大応答変位が終局変位以上
	せん断破壊	―	最大作用せん断力がせん断耐力以上
	残留変位	―	残留変位が許容残留変位以上
支承	せん断破壊	最大せん断力が橋軸あるいは橋軸直角方向の降伏耐力以上	最大せん断力が橋軸あるいは橋軸直角方向の終局耐力以上
	桁の浮き上がり	鉛直波力が鉛直方向の降伏耐力以上	鉛直波力が鉛直方向の終局耐力以上

OD，および結節点を頂点の集合E，道路縁を辺の集合Vとして被災前の道路ネットワークG_0を定量化し，全要素の接続関係を表現する（**図-1** (I)）．これにより，個別橋梁の損傷がOD間パスの途絶に及ぼす影響を評価できる．

(2) 空間相関を考慮した地震動・津波ハザード評価

空間相関を考慮した地震動ハザード評価では，地震断層モデルの平均応力降下量を確率変数として，司・翠川の距離減衰式[3)]から得られる工学的基盤上の速度に表層地盤増幅率[4)]を乗じ，2つの橋梁位置で任意の地動最大速度（PGV）を同時に超過する確率（同時確率密度分布）を算定する．

また，空間相関を考慮した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て，断層モデルからOkadaの方法[5)]により初期水位を計算し，非線形長波理論を用いた津波伝播解析[6)]を行うことで，2つの橋梁位置における浸水深（ID）の同時確率密度分布を算定する．

このように，2つの橋梁位置でのハザード強度の違いを同時確率密度関数（ハザード曲面）として評価することで，各橋梁位置での地震動および津波ハザードの空間相関が橋梁・道路ネットワークの接続性に及ぼす影響を算定できる（**図-1** (II)）．

(3) 橋梁のフラジリティ評価

橋梁の損傷度は，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，強震動と津波の連続作用を考慮した橋梁のフラジリティ評価を行う[7)]．損傷度は，車両の通行性に着目し，橋脚と支承の限界状態をそれぞれ**表-1**のように定めた．地震動に対する橋梁のフラジリティ評価では，周波数特性の異なる100波の地震波形を用いて非線形動的解析を行う．津波に対するフラジリティ評価では，伝播解析から得た津波波形から橋梁に作用する水平波力と鉛直波力を算定し，プッシュオーバー解析および桁の浮き上がり照査をそれぞれ行う．その際，地震動による橋脚の残留変位と剛性劣化，および支承部の耐力低下を津波作用時の初期条件として引き継ぐことで，地震動による損傷を考慮した津波フラジリティが評価できる．最終的に，地動最大速度と浸水深が与えられたときに小破あるいは大破となる条件付確率（フラジリティ曲面）が算定される（**図-1** (III)）．

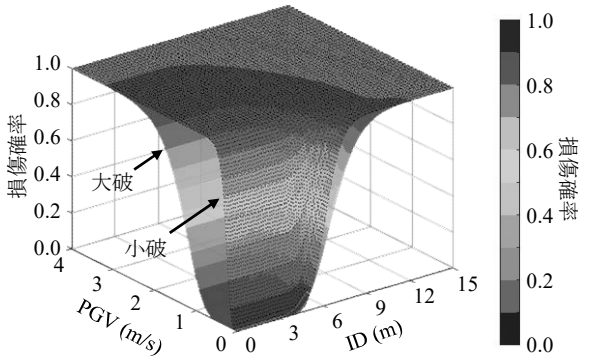
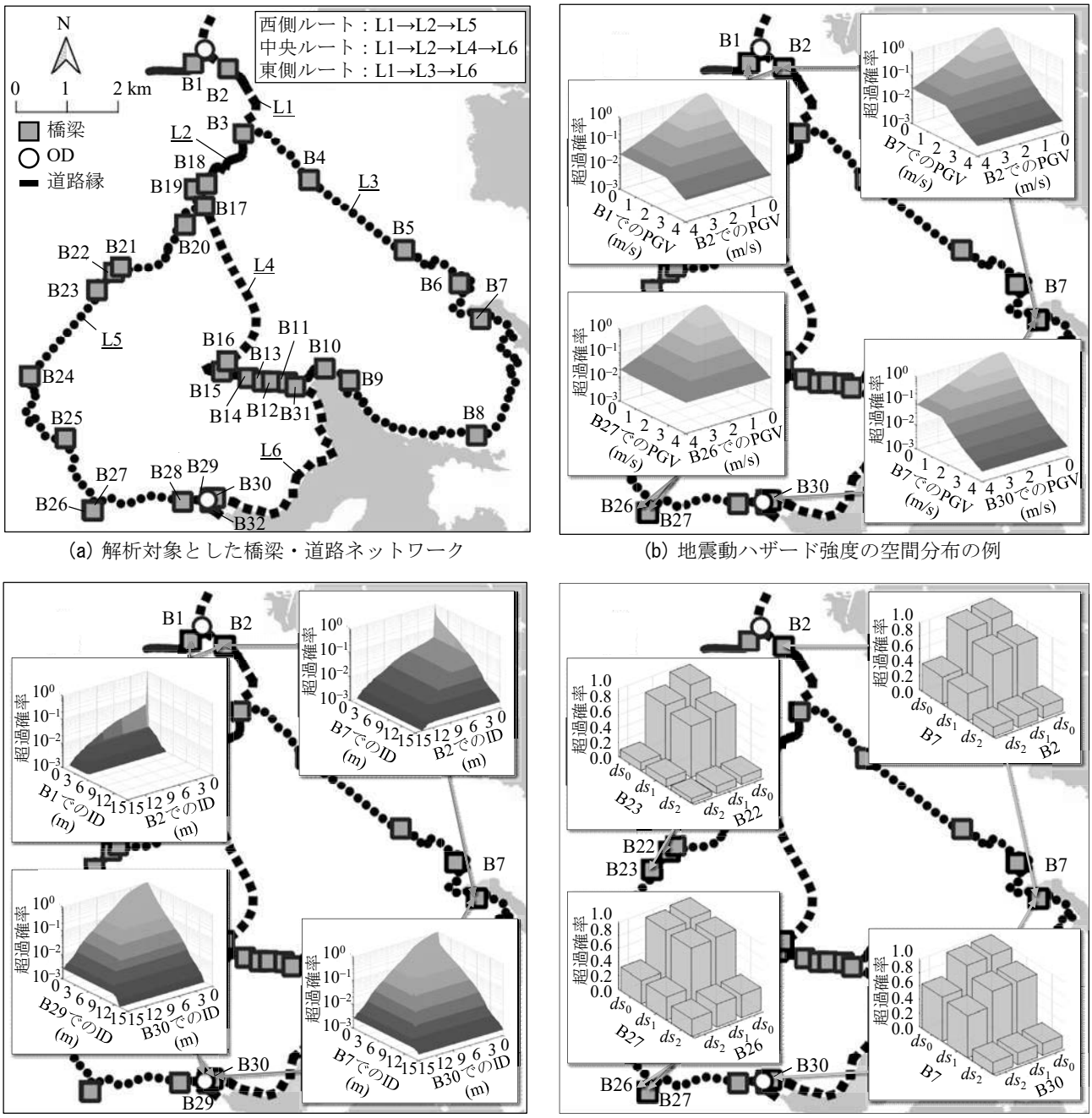


図-2 橋梁のフラジリティ曲面

本研究では，仮想の橋梁を用いた接続性の評価を行うものとし，道路橋示方書[1)]の基準を満たす桁橋（地盤種別：I種，橋脚高さ：6m）を試設計した．対象橋梁のフラジリティ曲面を**図-2**に示す．**図-2**より，地震動と津波の双方の影響を橋梁が受ける場合，同じ強度の地震動・津波がそれぞれ単独で作用する場合よりも高い損傷確率となることが確認できる．



(a) 解析対象とした橋梁・道路ネットワーク　(b) 地震動ハザード強度の空間分布の例

(c) 津波ハザード強度の空間分布の例　(d) 橋梁の同時損傷確率

図-3 空間相関性を有する地震動と津波を受ける橋梁・道路ネットワーク（三重県尾鷲市）

(4) 橋梁・道路ネットワークの途絶確率の算定

道路ネットワークの途絶確率は，個別橋梁の損傷確率により算定される．モンテカルロ法により，各橋梁位置における地震動強度と津波強度の相関性をそれぞれ考慮することで，橋梁群の同時損傷確率を算定する（**図-1** (IV-i)）．損傷度が ds_i 以上になると，その橋梁は通行が妨げられると仮定する．このとき，地震動と津波作用後の道路ネットワークは次式により表現される（**図-1** (IV-ii)）．

$$G_n = \left(V - \left\{v_b \in V \mid DS_{v_b,n} \geq ds_i\right\},\ E - \left\{uv_b \in E, u \in V\right\}\right) \quad (1)$$

ここに，G_n はモンテカルロ法の n 試行目における発災直後の道路ネットワーク，$DS_{v_b,n}$ は n 試行目における橋梁 v_b の損傷度，u は結節点である．

通行不可能と判定された橋梁を取り除いた道路ネットワークモデル（式(1)）に対して，OD 間を結ぶルートの探索をダイクストラ法 [8]により行い，OD 間パスの途絶確率を算定する（**図-1** (IV-iii)）．これにより，道路ネットワークの接続関係と橋梁位置，地震動と津波ハザード強度の空間相関，橋梁のマルチハザードに対するフラジリティ，および橋梁の同時損傷確率を考慮した道路ネットワークの途絶確率が算定される．

3. 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

南海トラフ地震の発生を仮定し（発生確率は1.0），**図-3(a)**に示す三重県尾鷲市に位置する仮想の橋梁・道路ネットワークを対象にOD間パスの途絶確率を**図-1**に示した提案フローに基づき算定する．道路ネットワークは，国土数値情報[9]が公開する緊急輸送道路を参考に作成した．橋梁は，道路と河川の交点に位置すると仮定し，**図-3(a)**に示す全32橋梁を対象とした．本研究では，全32橋は**図-2**に示すフラジリティ曲面に従うと仮定している．位置毎に橋梁の耐荷性能が異なることによるネットワークの途絶確率への影響評価は今後の課題である．

図-3(b)および**図-3(c)**に示すハザード評価では，強震動生成域が異なる2つの地震動断層モデル，および大すべり域の異なる7つの津波断層モデルを使用した[10]．なお，各断層モデルの生起確率は互いに等しいものとした．**図-3(b)**と**(c)**より，対象道路ネットワークの東側に位置する橋梁は，地震動と津波がともに大きなハザード強度を有している．さらに，**図-3(b)**に示されるように，近い位置にある橋梁群は，地震ハザード環境が概ね等しく，ユークリッド距離に応じて相関の程度が変化するのに対して，津波ハザードは，**図-3(c)**に示されるように，海岸線から等しい距離にある橋梁群の津波ハザードに高い相関が生じることになる．

空間相関を考慮した地震動・津波ハザードを受ける橋梁の同時損傷確率を**図-3(d)**に示す．**図-3(d)**に示されるように，B30が大破となる確率は大きいものの，B7およびB30が同時に大破となる確率は，B26およびB27のものと比較して小さい．これは，B7とB30の橋梁位置が互いに離れており，同時に作用するハザード強度の大きさや，その種類が大きく異なるためである．

式(1)において，大破となる橋梁位置で道路ネットワークが遮断すると仮定し，**図-3(a)**に示す3つのルート，およびその全てのルートを考慮したOD間パスの途絶確率を算定した．結果を**表-2**に示す．**表-2**より，沿岸部を通るルート（中央および東側ルート）では，地震動および津波ハザードを考慮しないとOD間パスの途絶確率が過小評価されることが確認できる．また，全てのルートを考慮したOD間パスの途絶確率は，津波ハザードの影響が小さい西側ルートと概ね等しくなっている．震災後の接続性確保の観点では，西側ルートに位置する橋梁の耐震補強が重要であるといえる．

表-2 OD間パスの途絶確率（大破）

対象ルート（**図-3(a)**）	地震動のみ	津波のみ	地震動と津波
西側ルート	0.52	0.02	0.53
中央ルート	0.74	0.21	0.79
東側ルート	0.73	0.21	0.79
全ルート	0.52	0.02	0.52

4. まとめ

本稿では，確率論的アプローチに基づく，地震動と津波ハザード強度の空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの途絶確率の算定法を提案し，南海トラフ地震の影響を受ける三重県尾鷲市に適用した．提案手法を用いることで，橋梁の損傷確率の相関性を考慮したネットワークの途絶確率の評価が可能である．これらの評価結果を用いることで，マルチハザードを受けるネットワークに対して，効果的にその接続性を高めるための補強戦略などの立案が可能となる．

参考文献

1) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，丸善，2017.
2) 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.
3) 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.
4) 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.
5) 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.
6) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IUGG/IOC Time Project*, 1997.
7) 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.
8) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, pp.269-271, 1959.
9) 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/
10) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2015.