

地震動・津波ハザードの空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの確率論的接続性評価
およびその南海トラフ地震影響域への適用

早稲田大学大学院 日本学術振興会特別研究員 学生会員 ○青木 康貴
早稲田大学大学院 Abdul K. Alhamid
早稲田大学 正会員 秋山 充良
東北大学 正会員 越村 俊一

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、地震動と津波により多くの橋梁が損傷・流出し、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の復旧活動を迅速に行うのに重要な役割を果たす。将来の災害に対する道路ネットワークの接続性を事前に評価することで、災害後の復旧計画までを勘案した合理的な防災・減災対策が可能になる。道路ネットワークの接続性は、橋梁が置かれる場所のハザードの種類やその強度、および橋梁の脆弱性から算定される損傷確率に強く依存する。

本研究では、地震動・津波ハザードの空間的な変動（空間相関性）、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確率論的接続性評価手法を提案する。ケーススタディでは、南海トラフ地震の発生を想定し、三重県尾鷲市内にある仮想の橋梁・道路ネットワークを対象とした試算を行う。

2. 地震動・津波ハザードの空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの確率論的接続性評価手順

地震動と津波の空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの確率論的接続性の評価手順を図-1 に示す。提案手法では、着目地点（OD: Origin-Destination）間の通行可能性を存続確率（OD 間を結ぶルートが少なくとも 1 つは確保される確率）として評価する。まず、グラフ理論を用いて、橋梁、OD、および結節点を頂点の集合、道路縁を辺の集合として道路ネットワークを定量化し、全要素の接続関係を表現する（図-1(II)）。これにより、各橋梁の損傷が OD 間パスの存続に及ぼす影響を評価できる。



図-1 橋梁・道路ネットワークの確率論的接続性の評価手順

空間相関性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¹⁾から得られる工学的基盤上の速度に表層地盤増幅率²⁾を乗じ、2つの橋梁位置で任意の地動最大速度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、空間相関性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³⁾により初期水位を計算し、非線形長波理論⁴⁾を用いた津波伝播解析を行うことで、2つの橋梁位置における浸水深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性が橋梁・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(III)）。橋梁の脆弱性（脆弱性）評価では地震動と津波の連続作用を考慮し⁵⁾、地動最大速度と浸水深が与えられたときに通行不可能となる条件付確率（脆弱性曲面）を算定する（図-1(IV)）。

キーワード マルチハザード、道路ネットワーク、確率論的接続性、空間相関、脆弱性曲面

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL 03-5286-2694

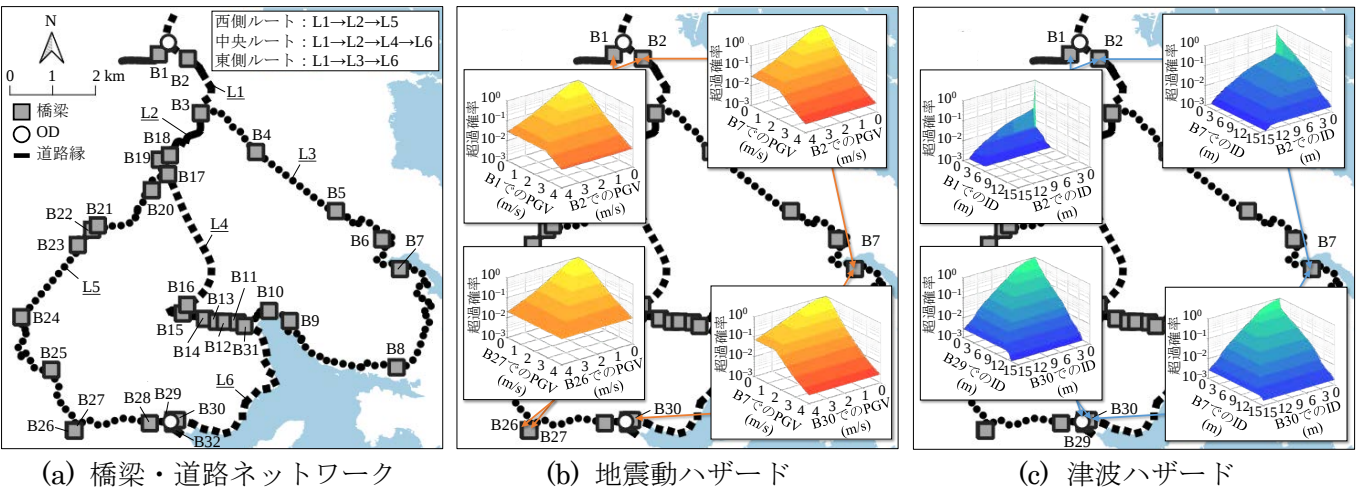


図-2 空間相関性を有する地震動と津波を受ける橋梁・道路ネットワーク

地震動および津波ハザード曲面、および脆弱性曲面から橋梁の通行可能性を判定し、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に対して、ダイクストラ法によるルート探索を行い、OD 間パスの存続確率を算定する (図-1(V))。このとき、道路ネットワークの接続性評価に適した橋梁の通行可否判定を行うために、モンテカルロ法により、各橋梁位置における地震動強度または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。

3. ケーススタディ

前章で提示したフローを用いて、図-2(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としたケーススタディを行い、OD 間パスの存続確率を算定する。図-2(b)と(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。南海トラフ地震の発生確率は1.0とし、各断層モデルの生起確率は互いに等しいものとした。図-2(c)より、津波ハザードは、海岸線から等しい距離にある橋梁位置で同時に大きくなる傾向がある。

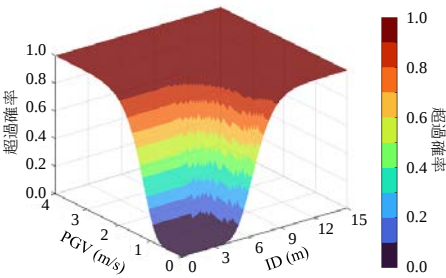


図-3 橋梁の脆弱性曲面

表-1 OD 間パスの存続確率

対象ルート (図-2)	地震動のみ	津波のみ	地震動と津波
西側ルート	0.48	0.98	0.47
中央ルート	0.26	0.79	0.21
東側ルート	0.27	0.79	0.21
全ルート	0.48	0.98	0.48

図-2 中の32橋梁は、平成8年の耐震基準を満たすRC橋脚を有する桁橋を想定し、図-3に示す脆弱性に従うと仮定した。図-2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 間パスの存続確率を表-1にまとめて示す。表-1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(マルチハザード)を考慮しないとOD 間パスの存続確率が過大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 間パスの存続確率は、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ることから、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。

4. まとめ

本稿では、確率論的アプローチに基づく、地震動と津波の空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの接続性評価法を提案し、南海トラフ地震の発生を想定したケーススタディを行った。提案手法を用いることで、各橋梁位置での地震動と津波ハザードの空間的な変動がネットワークの接続性に及ぼす影響を評価できる。

参考文献 1) 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, Vol.64, No.523, pp.63-70, 1999. 2) 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. 3) 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. 4) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IUGG/IOC Time Project*, 1997. 5) 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.