

## 強震動と津波を受ける橋梁の損傷を考慮した道路ネットワークの接続性に関する 確率論的評価手法の提案：南海トラフ地震への適用

早稲田大学 学生会員 ○布施 柚起, 青木 康貴  
 日本大学 正会員 石橋 寛樹  
 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、強震動と津波により多くの道路橋が被災し、道路ネットワークの寸断が広範囲で発生した。防災拠点間を結ぶ道路ネットワークは、被災者の救助や復旧活動に対して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視野に入れた合理的な防災・減災対策、すなわち、レジリエンス強化が可能になる。

本研究では、強震動と津波による橋梁の損傷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。ハザード評価、およびフラジリティ評価に関する不確定性をモンテカルロ法（MCS）により考慮する。ケーススタディとして、南海トラフ地震の発生を想定し、三重県紀北町を対象に提案手法を適用する。

### 2. 強震動と津波を受ける橋梁の損傷を考慮した道路ネットワークの確率論的接続性評価フロー

強震動と津波を受ける橋梁の損傷を考慮した道路ネットワークの確率論的接続性評価フローを図-1に示す。道路ネットワークにおける始点と終点を結ぶパスを以降ではOD (Origin-Destination)間パスと称す。図中の $n$ は総試行回数 $N$ のMCSにおける $n$ 回目の試行を表す。 $r_{ni}$ は閉区間 $[0, 1]$ の一様乱数、 $y_{ni}$ は $y_{ni} = 1$ のとき橋梁 $i$ が通行可能、 $y_{ni} = 0$ のとき通行不可能であることを示す関数、 $G_n$ は通行不可能と判定された橋梁位置で道路が寸断されるものとした道路ネットワークモデル、 $V_b$ は橋梁を表す頂点の集合、 $u$ および $v$ は橋梁、交差点または端点を表す頂点、 $E$ は道路を表す辺の集合、 $uv$ は頂点 $u, v$ を結んで得られる辺である。提案手法では、橋梁位置毎のハザード評価、橋梁のフラジリティ評価、橋梁の損傷確率の算定、および道路ネットワーク

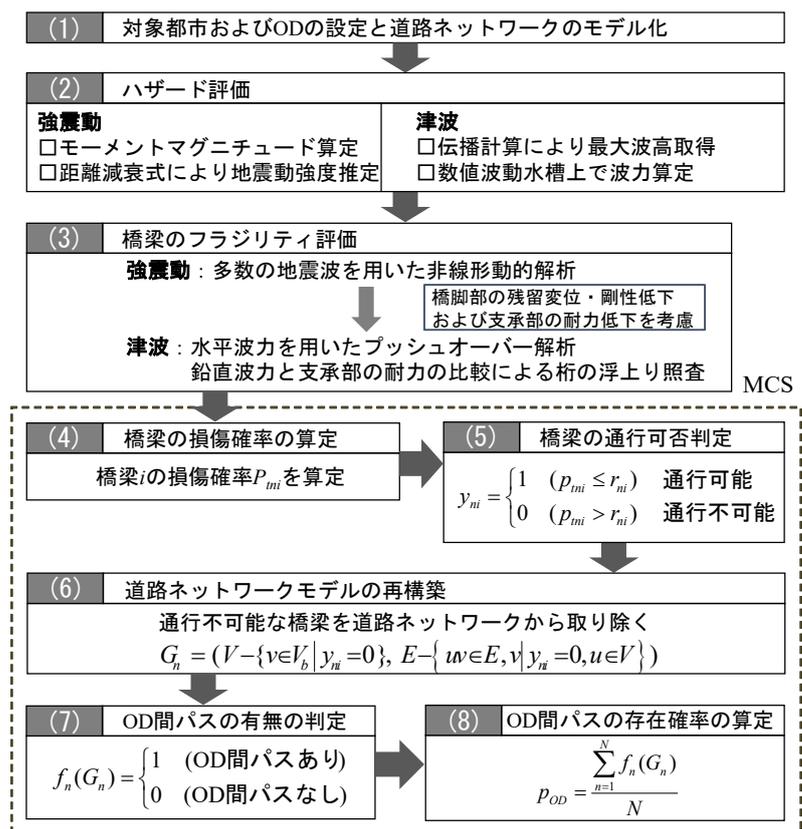


図-1 道路ネットワークの確率論的接続性評価フロー

の接続性評価までを一貫して行うことで、ハザード強度や橋梁の脆弱性（フラジリティ）に関する不確定性を統合的に評価して、OD間パスの存在確率を算定することが可能である。

司・翠川<sup>1)</sup>の距離減衰式を用いて工学的基盤面上の最大速度を算出し、表層地盤増幅率<sup>2),3)</sup>を乗ずることで地動最大速度に関する地震ハザード曲線を算出した。また、断層パラメータから初期水位を計算し、非線形

キーワード 確率論的評価, マルチハザード, 南海トラフ地震, 橋梁, 道路ネットワーク, 接続性

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

長波理論を用いた平面二次元津波解析モデル<sup>4)</sup>による津波伝播計算を繰り返し行うことで検討対象地点の最大波高に関する津波ハザード曲線を得た。橋梁のフラジリティ曲線は Ishibashi et al<sup>5)</sup>を参考に評価した。

ハザード曲線、およびフラジリティ曲線から算出される橋梁の損傷確率を基に橋梁の通行可否を判定し、通行不可能と判定された橋梁を道路ネットワークモデルから取り除くことで、強震動と津波を受ける橋梁の損傷を考慮した道路ネットワークモデルを再構築する。ダイクストラ法を用いて、再構築した道路ネットワークモデルにおける OD 間パスの有無を判定する。図-1 における「橋梁の損傷確率の算定」から「OD 間パスの有無の判定」までの一連の流れに MCS を適用し、最終的に OD 間パスの存在確率  $P_{OD}$  を算定する。

### 3. ケーススタディ

図-2 に示す三重県紀北町内の道路ネットワークを対象にケーススタディを行い、AB 間と AC 間の OD 間パスの存在確率を算定する。道路は国土数値情報<sup>6)</sup>が公開する緊急輸送道路のデータを参考にし、そこに位置する橋梁を抽出して利用した。断層モデルは、強震動生成域が異なる 2 ケースの強震断層モデル、および大すべり域の異なる 15 ケースの津波断層モデルを使用した<sup>7)</sup>。平均応力降下量、およびすべり角の値にばらつきを与えることで断層運動の不確定性を考慮した。なお、南海トラフ地震の生起確率は 1.0 とし、各断層モデルの発生確率は互いに等しいものとした。橋梁モデルは昭和 55 年の耐震基準を満たす RC 橋脚を有する桁橋を想定し、道路ネットワークを構成する橋梁は全て同一と仮定した。

各 OD 間パスの存在確率を表-1 に示す。道路ネットワークが受けるハザードは「強震動のみ」、「津波のみ」および「強震動と津波」の 3 種類を想定した。表-1 より、いずれのハザードに対しても、AC 間よりも AB 間の OD 間パスの存在確率の方が小さくなった。また、「強震動と津波」の場合、「強震動のみ」の場合と比較して、各 OD 間パスの存在確率は低下し、マルチハザードを考慮しないと OD 間パスの存在確率を過大評価することが分かった。

### 4. まとめ

本研究では、確率論的アプローチに基づく、強震動と津波による橋梁の損傷を考慮した道路ネットワークの接続性評価手法を提案し、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。今後は、多種の土木構造物（盛土やトンネル等）などを含んだ広域の道路ネットワークを対象に検討を行いたい。

**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, No.523, pp.63-70, 1999. 2) 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/>, アクセス日: 2019 年12 月21 日). 3) 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. 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*, 2020. DOI: 10.1080/15732479.2020.1843503 6) 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サービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, アクセス日: 2020年10月1日). 7) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2015.

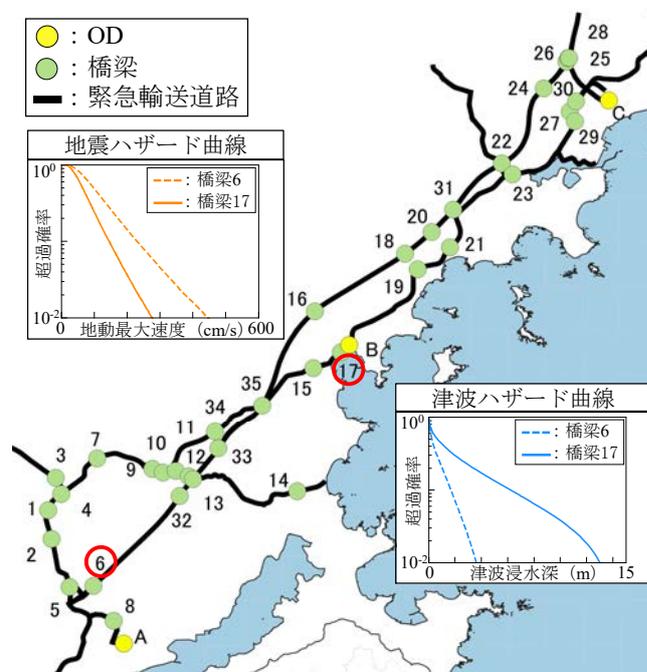


図-2 解析対象道路ネットワーク (三重県紀北町)

表-1 OD 間パスの存在確率

ハザードの種類	AB 間	AC 間
強震動のみ	0.419	0.421
津波のみ	0.850	0.943
強震動と津波	0.282	0.360