

南海トラフ地震による強震動・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と補強優先度判定への適用

布施 柚起¹・青木 康貴¹・石橋 寛樹²・秋山 充良³

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（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 博（工）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）

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）

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橋梁が被災し、道路ネットワークの寸断が広範囲で発生したり、橋梁は、被災者の救助・救急、さらには被災地の早期復興を実現するために重要な役割を果たすことから、旧規準で耐震設計された橋梁の耐震補強を着実に進める必要がある。

これまでに、道路ネットワークを俯瞰し、その中にある複数の橋梁に対して補強優先度をつける方法が提案されてきた。例えば、橋梁の置かれる場所の地震ハザードを評価し、適用設計規準に依存する橋梁の脆弱性を定め、ハザードと脆弱性から破壊可能性（破壊確率）を算定し、その値の大小に基づく方法や、さらには、橋梁の補強に要する費用と、それにより得られる便益の比から、補強を実施するか否かの意思決定を行う方法などが提案されている²⁾⁴⁾。昨今は、道路ネットワークの復旧性をレジリエンス指標として定量化し、それに基づいて耐震補強戦略を立案する研究も行われており、単に経済的損失額の大小ではなく、震災直後にネットワークの機能性が低下し、そこから震災前の状態に戻るのに要する時間が陽に考慮されている⁴⁾⁵⁾。

本研究は、これら既存研究に対して、震災直後のネットワーク使用性の可否を判断できる指標として、発着地（OD：Origin-Destination）間の通行可能性をOD間パスの存続確率として定量化し、それに基づく補強優先度判定法を提案する。提案手法では、強震動のみではなく、津波までも考慮したマルチハザードに対する検討が可能である。適用事例として、南海

トラフ地震による強震動と津波を連続して受ける可能性のある三重県紀北町に提案手法を適用する。強震動や津波ハザード強度の差異と橋梁の脆弱性を反映した通行可能性に基づき、補強を必要とする橋梁群の同定例を示すものである。

2. 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内にある橋梁の補強優先度判定フロー

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内にある橋梁の補強優先度判定フローを図-1に示す。グラフ理論を基に、道路縁を辺の集合 E 、橋梁、OD、および結節点を頂点の集合 V とする道路ネットワークモデル G を構築し、全要素の接続関係を表現することで、OD間パスが複数存在する道路ネットワークにおいて、各橋梁の損傷がOD間パスの存続に及ぼす影響を評価する。

(1) ハザード評価

内閣府「南海トラフ地震の巨大地震モデル検討会」⁶⁾（以下、検討会）が作成した強震・津波断層モデルを基に、断層パラメータにばらつきを与え、橋梁位置毎の地震および津波ハザードを評価する。地震ハザード評価では、平均応力降下量を確率変数として、司・翠川⁷⁾の距離減衰式および表層地盤増幅率^{8) 9)}を用いて地動最大速度に関する地震ハザード曲線を算出する。

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、断層モデルから初期水位を計算し、非線形長波理論¹⁰⁾を用いた津波伝播解析

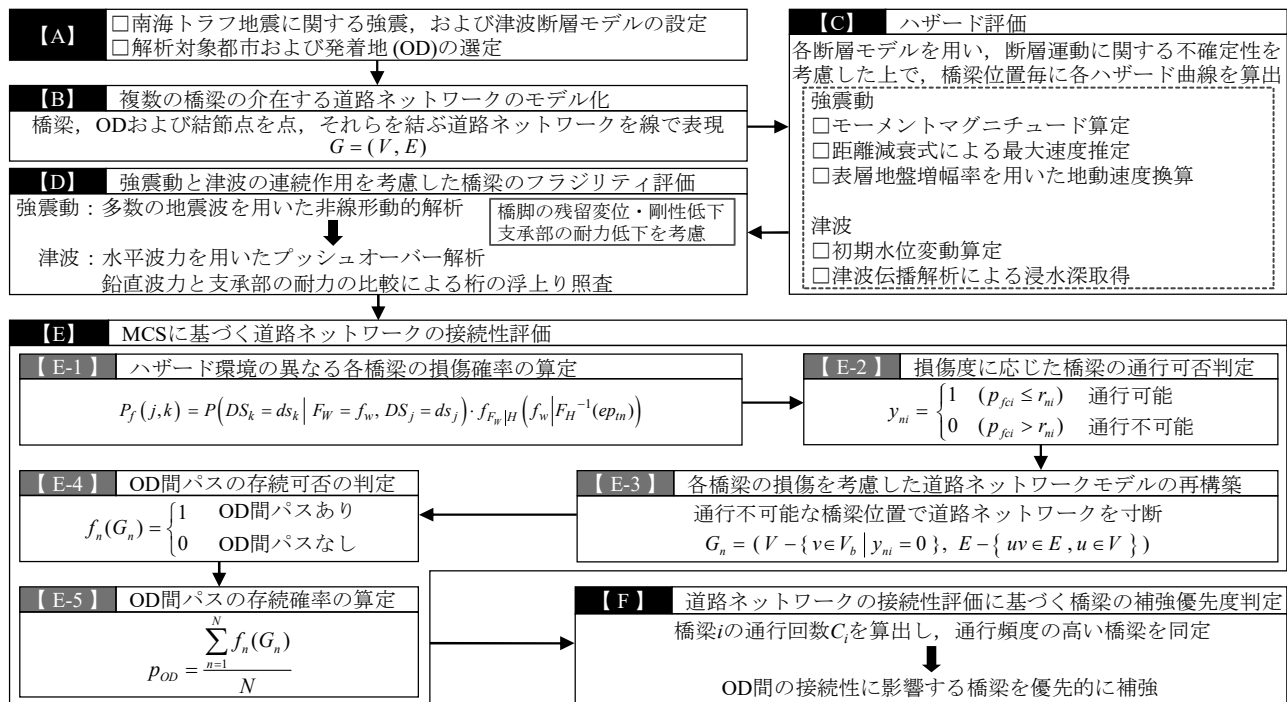


図-1 南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワーク内にある橋梁の補強優先度判定フロー

を行い，浸水深に関する津波ハザード曲線を算出する。

(2) 橋梁の fragility 評価

橋梁の損傷度は，無損傷，小破，および大破からなる3段階に設定し，強震動と津波を連続して受ける橋梁の fragility 評価を行う⁹⁾。損傷度は，車両の通行性に応じて定めており，橋脚および支承の限界状態を表-1で定義した^{11), 12)}。地震 fragility 評価では，検討会が公開する100波の地震波を振幅調整したものを用いて非線形動的解析を行う。津波 fragility 評価では，数値波動水槽¹³⁾を用いて，2. (1) で得た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，強震動と津波の連続作用を考慮する。また，津波の鉛直波力による桁の浮き上がり照査も行う。モンテカルロ法 (MCS) に基づき，地動最大速度と浸水深が与えられたときに各損傷度以上となる条件付確率を算定し，地震および津波 fragility 曲線を得る。

解析対象とする橋梁は，昭和55年および平成8年の道路橋示方書の基準を満たす1種地盤上に位置する橋脚高さ6mの桁橋（以下，それぞれS55橋梁およびH8橋梁）を想定し，米田ら¹⁴⁾を参考に試設計した。また，S55橋梁に鋼板巻立て補強¹⁵⁾を施したものをS55R橋梁とする。図-2に各橋梁の地震 fragility

曲線を示す。図-3には，強震動作用後に無損傷あるいは小破の状態であり，そこに津波が作用したときに大破となる橋梁の津波 fragility 曲線を示す。

(3) MCSに基づく道路ネットワークの接続性評価

橋梁のハザード曲線および fragility 曲線から算定される損傷確率を用いたMCSにおいて，損傷度が小破となる橋梁位置で道路ネットワークが寸断されると仮定したOD間パスの存続確率を算定する。

a) 橋梁の損傷確率の算定

図-1【E-1】に示す式を用いて，ハザード曲線に逆関数法を適用して推定した強震動・津波強度から，各橋梁の損傷確率を算定する。 $P_f(j, k)$ は，強震動によって損傷度 DS_j が ds_j となった橋梁が，連続して発生する津波によって最終的な損傷度 DS_k が ds_k となる損傷確率である。 $P(DS_k = ds_k | F_W = f_w, DS_j = ds_j)$ は，強震動と津波の連続作用を考慮した fragility 曲線であり， $f_{F_W|H}(f_w | F_H^{-1}(ep_m))$ は浸水深 H が $F_H^{-1}(ep_m)$ の津波波力 F_W が f_w となる確率密度関数である。 $F_H^{-1}(ep_m)$ は，津波ハザード曲線 F_H の逆関数と閉区間 $[0, 1]$ の乱数 ep_m から推定されるMCSにおける*n*試行目の浸水深である。

b) 橋梁の通行可否判定

図-1【E-2】で示すように，a)で算定した損傷確率と閉区間 $[0, 1]$ の乱数 r_{ni} を比較することで，各橋梁の損傷度判定を行い，大破となる橋梁を通行不可とする。【E-2】に示す y_{ni} は，橋梁*i*の通行可否を判定する関数であり， p_{fci} は，橋梁*i*が大破となる損傷確率である。

表-1 橋梁の損傷度の定義^{11), 12)}

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変位以上	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	最大作用せん断力が橋軸あるいは橋軸直角方向の降伏耐力以上	最大作用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

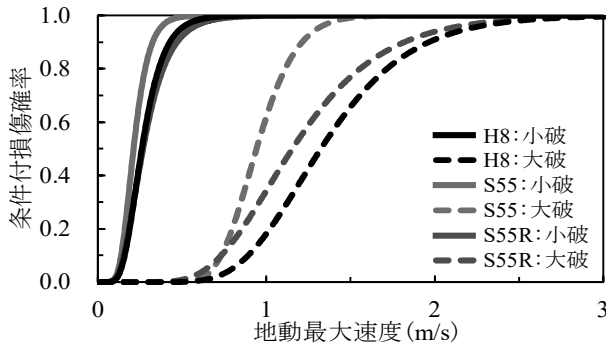


図-2 地震フラジリティ曲線

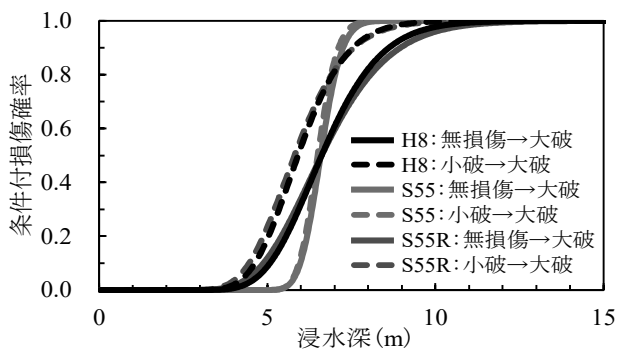


図-3 津波フラジリティ曲線

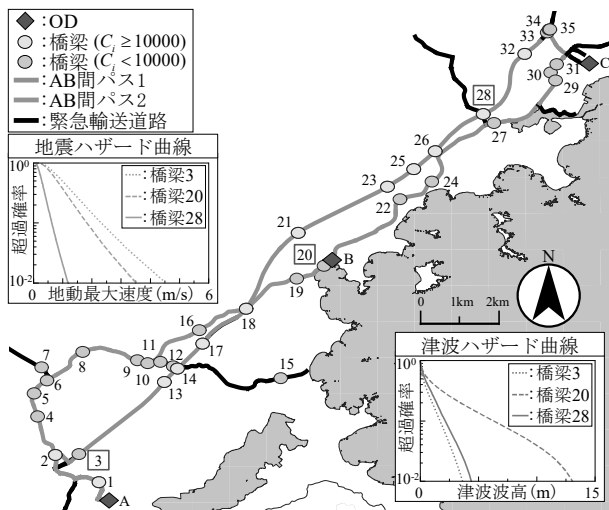


図-4 道路ネットワーク（三重県紀北町）

c) 道路ネットワークモデルの再構築およびOD間パスの存続可否の判定

通行不可となる橋梁位置で道路ネットワークの寸

断を想定して、道路ネットワークモデルの再構築を行う。図-1【E3】に示す G_n は、再構築後の道路ネットワークモデル、 V_b は橋梁を表す頂点の集合、 v は橋梁、 u は頂点、 uv は頂点 u と v を結ぶ辺である。再構築を行うことで、各橋梁の損傷を道路ネットワークの形状に反映させ、互いの接続関係を更新する。次に、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いて、OD間パスの存続可否を判定することで、各橋梁の損傷による道路ネットワークの寸断を考慮した上で、発災後にも存続しているOD間パスの中から最短経路を同定することが可能になる。

d) OD間パスの存続確率の算定

以上のa)からc)までの一連の流れをMCSに基づき、ハザードや橋梁の損傷度判定の乱数を変化させて繰り返すことで、OD間パスの存続確率 P_{od} が算定される。

(4) 橋梁の補強優先度判定

OD間パスが存在する場合に橋梁 i の通行回数 C_i を算出し、 C 値の大きい橋梁を補強対象とする。これにより、ハザード環境の違いや道路ネットワークの接続関係を勘案した上で、OD間のルート確保のために重要な橋梁を同定することができる。

3. ケーススタディ

南海トラフ地震の発生を想定し、図-4に示す三重県紀北町にある35橋梁が介在する道路ネットワークを対象として、AB間、およびAC間のパスの存続確率を算定し、AC間の接続性向上のための補強優先度判定を行った。道路は、国土数値情報¹⁶⁾が公開する緊急輸送道路を利用し、橋梁は、地点によらず同年度の耐震基準で設計されていると仮定した。また、MCSの試行回数 N は10万回とした。

図-4に、一例として橋梁3、橋梁20、および橋梁28の地震と津波ハザード曲線をそれぞれ示す。各橋梁が受ける地震および津波ハザードは場所により大きく異なり、これは各OD間パスの存続確率に反映される。ハザードを「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、AB間、お

表-2 OD間パスの存続確率 (S55橋梁)

ハザード	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

表-3 OD間パスの存続確率 (H8橋梁)

ハザード	AB間	AC間
強震動のみ	0.552	0.560
津波のみ	0.860	0.943
強震動と津波	0.405	0.496

表-4 S55橋梁の補強前後でのAC間パスの存続確率

ハザード	補強前	12本補強	35本補強
強震動のみ	0.421	0.455	0.456
津波のみ	0.943	0.943	0.944
強震動と津波	0.360	0.394	0.395

よびAC間にある橋梁が全てS55橋梁かH8橋梁である場合のOD間パスの存続確率をそれぞれ表-2と表-3に示す。これらの表より、いずれの橋梁モデルおよびハザードに対しても、AC間よりAB間のOD間パスの存続確率は小さい。これは、津波により大破となる確率が高い、20あるいは31の橋梁がAB間のルートに含まれるからである（図-4参照）。また、「強震動と津波」の場合、「強震動のみ」と比較して、各OD間パスの存続確率は小さく、強震動と津波の連続性を考慮しないと、OD間パスの存続確率を過大評価する結果となる。

AC間において、補強対象の橋梁が全体の約半数となるように C_i の閾値を1万回と設定した場合の橋梁区分を図-4に示す。 C_i が1万回以上の橋梁12本は線状に位置しており、これらのみを補強した場合と、全ての橋梁35本を補強した場合のOD間パスの存続確率の比較を表-4に示す。表-4より、ハザードによらず、両者の結果は概ね等しくなっており、通行可能性の高いルート上にある橋梁をまとめて補強することで、OD間パスの存続確率を効果的に向上できる。

4. まとめ

南海トラフ地震による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評価に基づく補強優先度判定法を提案した。ケーススタディでは、橋梁を線状に補強することの有用性を示した。南海トラフ地震により想定される強震動と津波強度は相当に大きく、想定した橋梁の補強のみでは、OD間の接続性を飛躍的に高めることは困難であった。今後は、道路ネットワークのリダンダンシーの改善（例えば、新経路の導入）などを検討したい。

参考文献

- 1) 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, pp.121-133, 2013.
- 2) 佐藤忠信, 吉田郁政, 増本みどり, 金治英貞: ライフサイクルコストを考慮した道路橋の補強戦略, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp. 125-138, 2005.
- 3) Padgett, J.E., Dennenmann, K. and Ghosh, J.: Risk-based seismic life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment. *Structural Safety*, Vol. 32, pp. 165-173, 2010.
- 4) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Ishibashi, H.: 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, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.16, No. 1, pp. 26-50, 2020.
- 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.
- 6) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2015.
- 7) 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.
- 8) 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: 2019年12月21日) .
- 9) 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.
- 10) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IUGG/IOC Time Project*, 1997.
- 11) 土木学会: 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書, 2015.
- 12) 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.
- 13) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 2010.
- 14) 米田慶太, 川島一彦, 庄司学, 藤田義人: 試設計に基づく耐震技術基準の改訂に伴うRC橋脚およびくい基礎の耐震性向上度に関する検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.751-762, 1999.
- 15) 前田友章, 岡本大, 谷村幸裕: 鋼板巻立て補強した鉄筋コンクリート柱の変形性能算定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1087-1092, 2009.
- 16) 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/>, アクセス: 2020年10月1日) .