

## リスク・レジリエンス指標に基づく 南海トラフ地震を受ける道路ネットワークの 補強優先度判定に関する基礎的研究

石橋 寛樹<sup>1</sup>・小島 貴之<sup>1</sup>・秋山 充良<sup>2</sup>・越村 俊一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>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）

<sup>3</sup>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、沿岸部を中心に、橋梁や盛土など多くの道路構造物が強震動と津波により被災し、各地の道路ネットワークで通行規制の措置が余儀なくされた。こうした事例は、道路構造物をネットワークの一構成要素として扱い、交通機能の低下など、各構造物が被災することで生じる影響度を適切に考慮した防災・減災対策が必要であることを示している。また、近年、その切迫性が指摘されている南海トラフ地震では、2011年東北地方太平洋沖地震と比較し、より広域で、かつ、大きな被害をもたらす可能性のある強震動と津波の発生が懸念されている<sup>1), 2)</sup>。南海トラフ地震が発生するまでの限られた時間の中で、その影響を受けると思われる地域にある構造物や構造物を含むネットワークのリスクやレジリエンスを評価し、リスクの低減とレジリエンスの改善を効果的、かつ合理的に進める補強優先度判定法を構築する必要がある。

そこで本研究では、南海トラフ地震発生時に想定される強震動と津波により道路ネットワークが被災することで生じる経済的損失をリスクの指標、道路ネットワークの機能低下と回復時間をレジリエンスの指標と定義し、それらを定量化する手法を提示する。なお、本稿では、橋梁および盛土から構成される道路ネットワークを対象とする。提案手法により、各個別構造物の損傷が道路ネットワークに及ぼす影響の差異を比較できるようになり、経済的損失額、あるいは復旧に要する日数を最小化するための補強戦略などを立案することが可能になる。

### 2. 強震動・津波ハザード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順

#### (1) 南海トラフ地震による強震動・津波ハザード

南海トラフ地震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順を図-1に示す。南海トラフ地震の生起を前提とした強震動と津波の確率論的ハザード評価を行い、Monte Carlo法に基づき求めたフラジリティカーブから橋梁と盛土の耐震・耐津波信頼性を算定する。本研究では、地震ハザード強度として地動最大加速度、津波ハザード強度として津波波高を扱う。津波波高は、各構造物位置の地表面を基準とする津波水位と定義する。

南海トラフ地震を引き起こす断層をモデル化する際、内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会（以降、検討会）」<sup>1)</sup>の手法に基づき断層パラメータを設定する。本研究では平均応力降下量とすべり角にばらつきを与えることでハザード解析を行う。地震ハザードについては、モーメントマグニチュードを平均応力降下量の不確定性を考慮して計算し、これを司・翠川<sup>3)</sup>が提案する距離減衰式に代入することで地動最大加速度を算出する。津波ハザードに関しては、平均応力降下量からすべり量を算出し、また、すべり角にもばらつきを与えることで断層パラメータの不確定性を考慮する。これらの断層パラメータを用いて海底地盤変動解析<sup>4)</sup>を行うことで津波の初期水位を算出し、得られた初期水位を入力条件とする、非線形長波理論に基づく平面2次元津波解析モデル<sup>5)</sup>を使用した津波伝播計算により、各構造物位置における最大津波波高を取得する。

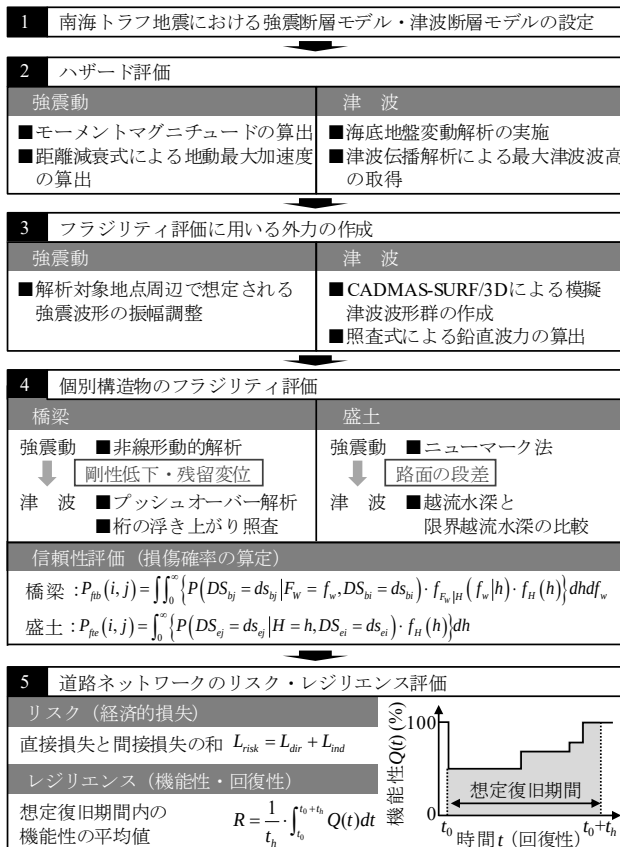


図-1 道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手順

## (2) 橋梁および盛土のフラジリティ評価

地震フラジリティ解析では、検討会<sup>1)</sup>が公開している解析対象地域周辺の強震波形（100波）を使用する。地動最大加速度を100 gal刻みで2000 galまで振幅調整することで得られる多数の地震波を用いて、橋梁では非線形動的解析、盛土ではニューマーク法により地震フラジリティ曲線を算出する。

地震時に橋梁に生じる橋脚部の剛性低下と残留変位、および盛土に生じる路面の段差を津波解析に引き継ぐことで、地震時の損傷の影響を考慮した津波フラジリティカーブを得る。

津波による橋梁への作用力は、水平成分と鉛直成分に分解して考える。水平成分に関しては、多数の模擬津波波形を作成し、数値波動水槽CADMAS-SURF/3D<sup>6)</sup>に順次入力することで、各津波波高に対応する水平波力を評価する。そして、この水平波力を用いたプッシュオーバー解析により橋梁の津波応答値を求めている。

鉛直成分については、津波による桁の浮き上がり照査を行う。鉛直波力 $F_z$ は式(1)を用いて算出する<sup>7)</sup>。

$$F_z = \rho g V + \rho g (\beta \eta'_H) A_v \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ は海水の密度、 $g$ は重力加速度、 $V$ は上部構造の体積、 $\beta$ は係数(= 0.53)、 $\eta'_H$ は擾乱高さ、 $A_v$

は有効水平投影面積である。なお、擾乱高さ $\eta'_H$ を確率変数として扱うことで、鉛直波力の評価に関する不確定性を考慮する。

本研究では、橋梁および盛土の通行機能に着目し、損傷度を無損傷、小破、大破の3段階に区分する。橋梁に関しては、橋脚部の最大応答変位が降伏変位以上となる場合を小破とする。さらに、残留変位、せん断破壊、および曲げ破壊に関する照査を行い、応答値がそれぞれの限界値<sup>8), 9)</sup>を上回る場合を大破と定義する。

桁の浮き上がり照査では、鉛直波力が支承部の耐力を上回る場合を大破とする。津波高さが各橋梁の支承部にまで到達するとの条件下において、式(1)から計算される鉛直波力が支承耐力を上回る確率は、支承耐力および擾乱高さの評価に伴う不確定性を考慮し、0.484としている。

盛土の損傷判定は、常田ら<sup>10)</sup>の研究を参考に、強震動により路面の段差が30 mm以上となる場合を小破、200 mm以上の場合を大破と定義する。さらに、津波による盛土の越流水深が破壊判定基準<sup>11)</sup>から得られる限界越流水深以上となる場合、盛土は小破、あるいは大破するものと仮定する。

## (3) 損傷確率

強震動による損傷を考慮した耐津波信頼性評価を実施することで、南海トラフ地震により生じる強震動と津波を連続して受ける構造物の安全性評価が可能になる。図-1に示される $P_{fb}(i, j)$ および $P_{fte}(i, j)$ は、強震動作用後に損傷度が $ds_{bi}$ あるいは $ds_{ei}$ となった構造物が、連続して発生する津波により損傷度が $ds_{bj}$ あるいは $ds_{ej}$ となる橋梁および盛土の確率をそれぞれ示す。なお、 $f_H(h)$ は津波波高 $H$ に関する確率密度関数であり、 $f_{W|H}(f_w|h)$ は $H$ が $h$ となるときの津波波力 $F_w$ の確率密度関数である。

## (4) リスク・レジリエンス評価

リスクは、構造物の補修・再構築費用を表す直接損失 $L_{dir}$ と、道路の機能低下による車両の走行時間および走行距離の増加に伴う損失を表す間接損失 $L_{ind}$ の和とする。直接損失 $L_{dir}$ は、各構造物の損傷確率と復旧費用を掛け合わせることで算出される。間接損失 $L_{ind}$ は、国土交通省の費用便益分析マニュアル<sup>12)</sup>を参考に、走行時間と距離の増加分をコストに換算することで求められる。なお、補強優先度判定は、補強前後に低減したリスクを便益、補強費を費用として計算される費用便益比BCRに基づいて行う。

レジリエンスは、想定復旧期間 $t_h$ （本研究では180日）における道路ネットワークの機能性 $Q(t)$ の平均

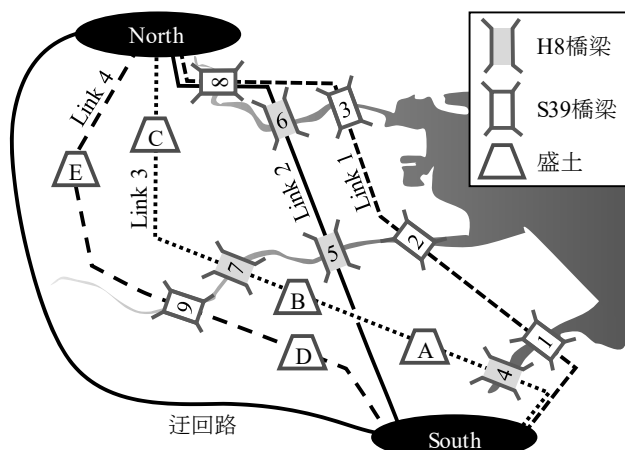


図-2 道路ネットワーク図（三重県尾鷲市）

表-1 道路構造物の復旧日数

|    | 小破  | 大破   |
|----|-----|------|
| 橋梁 | 30日 | 180日 |
| 盛土 | 5日  | 60日  |

値とする。値が大きいリンクほど機能性・回復性に優れていることを示す（図-1参照）<sup>13)</sup>。機能性 $Q(t)$ は、構造物の被災に伴う移動時間および距離の増加量から算出され、道路ネットワーク内の構造物の損傷度や復旧に要する時間に応じて変動する<sup>14)</sup>。

### 3. ケーススタディ

#### (1) 解析対象の道路ネットワーク

本研究では、南海トラフ地震の被害が大きいと予想されている、三重県尾鷲市に位置する道路ネットワークを対象に、図-1の評価手法を適用した。想定した道路ネットワークを図-2に示す。迂回路については、通常時は利用されず、地震により通常利用される道路（リンク）の機能が低下した場合にのみ利用されるものとした。各リンクおよび迂回路の延長は、リンク1は5.5 km、リンク2は4.1 km、リンク3は5.0 km、リンク4は3.5 km、迂回路は9.0 kmとした。

道路ネットワークに位置する道路構造物として、橋梁（桁橋）および盛土を扱う。橋梁は、昭和39年と平成8年の耐震設計基準に準じる2種の桁橋を設定した。橋脚高は6 mとし、橋梁の支承部は炭村らの方法<sup>15)</sup>に従い設計した。全ての橋梁は、I種地盤上に置かれると仮定した。本稿では以降、それぞれの耐震基準で設計した橋梁をS39橋梁およびH8橋梁と称する。盛土に関しては、盛土高4 m、延長100 mの補強被覆のない盛土を想定した。設計パラメータは篠田ら<sup>16)</sup>を参考に設定した。

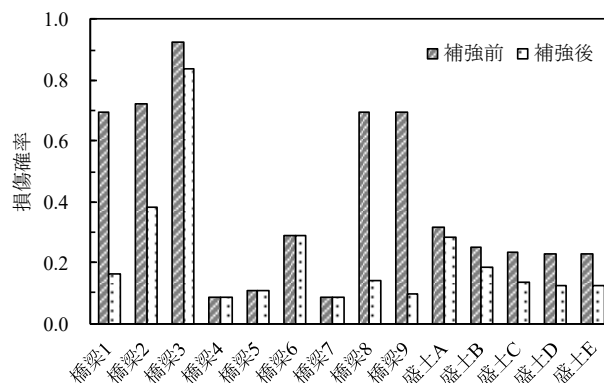


図-3 補強前後の損傷確率（大破）

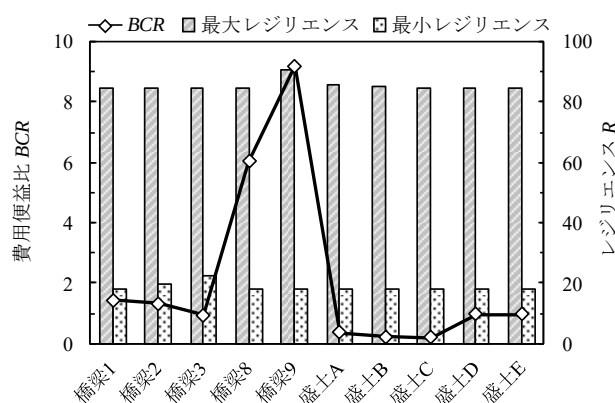


図-4 リスク・レジリエンス評価結果

#### (2) 解析条件

リスク評価を行う上で、橋梁の復旧費は庄司ら<sup>17)</sup>を参考に6700万円、盛土の復旧費は篠田ら<sup>16)</sup>を参考に1 mあたり13.6万円とした。また、各構造物の復旧日数については、構造物種別と損傷度に応じて設定した（表-1参照）。各リンクの機能性（交通容量と車両の走行速度）に関しては、国土交通省による道路交通センサスの調査結果<sup>18)</sup>を参考に設定した。

強震動および津波による道路ネットワークの機能低下は、Chang et al.<sup>19)</sup>およびGuo et al.<sup>14)</sup>を参考に、各リンクに位置する構造物の損傷確率を用いて、そのリンクにおける残存交通容量および残存自由流速の割合を定めることで評価した。これにより、各リンク内の速度低下に伴う時間増加分および迂回路利用による距離・時間増加分を算定できる。

本研究では、S39橋梁と盛土を補強対象とし、構造物の一つのみ補強した場合の費用便益比およびレジリエンスを算定し、補強優先度判定を行った。補強方法として、橋梁ではアンカー筋によりフーチング固定した鋼板巻立て工法を採用し、橋脚部のせん断耐力および曲げ耐力の向上を図った。盛土に関しては、全層敷補強材を1.5 m間隔で配置することで補強した。補強費は、橋梁では2000万円、盛土では1 mあたり10万円を想定し、費用便益比を算定した。

### (3) リスク・レジリエンス評価と補強優先度判定

各構造物が南海トラフ地震により大破となる損傷確率を図-3に示す。本研究では、H8橋梁（橋梁4～7）は補強対象としないため、図-3では補強後の損傷確率は補強前と同じ値となっている。

補強後のリスク・レジリエンス評価結果を図-4に示す。最大および最小レジリエンスは、それぞれ補強後におけるリンク1～4のレジリエンスの最大値と最小値を表している。図-4では、補強する構造物の種類・位置に関係なく、最小レジリエンスに大きな差はみられない。一方で、費用便益比と最大レジリエンスは、リンク4に位置する橋梁9を補強した場合に最も高くなった。これは、橋梁9は補強による損傷確率の低減効果が大きく、リンク4には他に損傷確率が大きい構造物が存在しないためである。橋梁9を優先的に補強することで、効率的なリスクの低減、およびレジリエンスの強化が可能である。

## 4. まとめ

南海トラフ地震による強震動と津波の両者の影響を受ける地域にある道路ネットワークを対象に、リスク（経済的損失）およびレジリエンス（機能低下と回復時間）の算定手順を示した。各構造物位置のハザード強度と構造物種別の違いにより、構造物の損傷確率は異なり、結果として生じる各リンクのリスク・レジリエンスの差が定量化され、補強を優先すべき構造物を同定できる。

**謝辞：**本研究を進める上で、産業技術総合研究所活断層・火山研究部門の吉見雅行博士より断層パラメータ設定方法に関する貴重なご助言を賜りました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2012.
- 2) 内閣府：中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ，2013.
- 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) Okada, Y.: SURFACE 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.
- 5) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC Time Project, 1997.
- 6) 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，沿岸技術ライブラリー No.39，2010.
- 7) 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.
- 8) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚に生じる残留変位の評価，地震時保有耐力に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集，Vol. 5，pp. 399-404，2002.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999.
- 10) 常田賢一，小田和広，中平明憲：道路機能に基づく道路盛土の経済的な耐震補強・耐震技術に関する研究開発，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート，No.17-4，2008.
- 11) 首藤伸夫：津波による海岸堤防・護岸の防災－昭和8年三陸大津波から昭和35年チリ津波まで－，津波工学研究報告，Vol.16，pp.1-37，1999.
- 12) 国土交通省道路局都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル，2008.
- 13) Bocchini, P. and Frangopol, D. M.: Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization, *Earthquake Spectra*, pp.427-455, 2012.
- 14) Guo, A., Liu, Z., Li, S. and Li, H.: Seismic performance assessment of highway bridge networks considering post-disaster traffic demand of a transportation system in emergency conditions, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 1523-1537, 2017.
- 15) 炭村透，張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波によって橋に生じる作用に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4，pp.102-110，2013.
- 16) 篠田晶弘・宮田喜壽・米澤豊司・弘中淳市：無補強盛土と補強盛土のレベルII地震時ライフサイクルコストの算定，ジオシンセティックス論文集，No.25，pp.189-196，2010.
- 17) 庄司学，藤野陽三，阿部雅人：高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み，土木学会論文集，Vol.39，No.563，pp.79-94，1997.
- 18) 国土交通省：箇所別基本表及び時間帯別交通量表に関する説明資料，平成22年度全国道路・街路交通情勢調査（道路交通センサス）一般交通量調査集計表，<http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>，2018年1月16日
- 19) 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, 2002.