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の信頼性・リスク・レジリエンス評価

早稲田大学大学院　学生会員　○石橋　寛樹，河合　祐美，小島　貴之
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，多数の道路構造物が強震動と津波により被災し，各地で道路ネットワークが寸断される事態となった．今後発生が懸念される南海トラフ地震では，その被害規模は国難レベルに達するとされており，道路構造物の補強対策を進め，道路ネットワークの機能低下を最小限に抑えることが求められる．そこで本研究では，南海トラフ地震に附随する強震動および津波を受ける，橋梁と盛土からなる道路ネットワークを対象に，信頼性・リスク・レジリエンスに基づく構造物の補強優先度判定手法を提案する．

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

南海トラフ地震の発生によって想定される強震動・津波ハザードを受ける道路ネットワークの信頼性・リスク・レジリエンス評価手順を**図－1**に示す．本研究では，南海トラフ地震の発生を前提とするため，その発生確率は 1.0 である．

内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会（以降，検討会）」[1]が公表する平均応力降下量およびすべり角にばらつきを与え，断層運動の不確定性を考慮することでハザード評価を行う．

強震動に対する応答評価では，南海トラフ地震発生時に三重県尾鷲市周辺で推定される強震波形（計 100 波）を使用する [1]．各強震波形の最大加速度を 100 gal 刻みで 2000 gal まで振幅調整し順次解析を行うことで得られる地震フラジリティ曲線を地震ハザード曲線と積分的に掛け合わせることで，強震動による損傷確率を算出する．

図－1　道路ネットワークの性能評価手順

橋梁の津波に対する応答評価では，原子力規制庁・東北大学 [2]の手法に基づいて模擬津波波形群を作成し，数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D[3]による数値計算から水平波力を取得し，プッシュオーバー解析を行うことで損傷度を判定する．桁の浮き上がり照査に用いる鉛直波力は，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」[4]により提案されている簡易照査式に従い算出する．また，盛土の津波に対する損傷度判定は，津波波高と盛土高の差から求められる越流水深と，盛土高に応じて決定される限界越流水深の比較により行う．

本研究では，強震動による損傷を初期条件として津波の構造解析を行う．**図－1** 中の $P_{fb}(i,j)$および $P_{fe}(i,j)$は，強震動により損傷度が ds_i となった橋梁あるいは盛土が，津波により損傷度 ds_j となる確率である．$f_H(h)$は津波波高 H の確率密度関数であり，$f_{F_W|H}(f_w|h)$ は津波波高 H に対する津波波力 F_W の確率密度関数である．

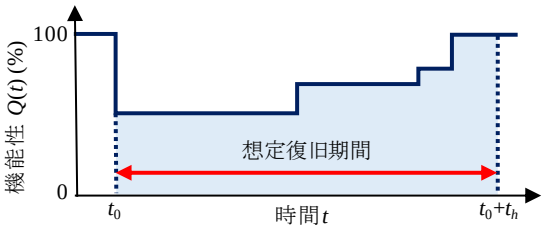
キーワード　強震動，津波，道路ネットワーク，信頼性，リスク，レジリエンス
連絡先　〒169-8555　東京都新宿区大久保 3-4-1　早稲田大学創造理工学部社会環境工学科　ＴＥＬ03-5286-2694

© Japan Society of Civil Engineers

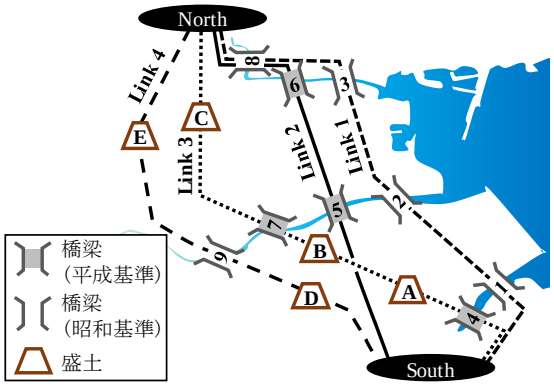
$P\ (DS_j = ds_j\ |F_W = f_w, DS_i = ds_i)$は，強震動による損傷度が ds_i であり，津波波力 f_w を連続して受けることで損傷度が ds_j となる条件付確率である．また，h_{limit} は盛土の限界越流水深を表している．

リスクは，各構造物の損傷確率と復旧費用から算出される直接損失 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．補強優先度判定は，補強前後に低減したリスクを便益，補強費を費用とすることで計算される費用便益比 BCR に基づいて行う．

レジリエンスに関しては，想定復旧期間内における道路ネットワークの機能性 $Q(t)$の平均値と定義する（**図－2** 参照）[5]．機能性 $Q(t)$は，構造物が被災することで生じる移動時間および距離の増加量から算出され，ネットワークに位置する各構造物の損傷度や復旧に要する時間に応じて変動する．



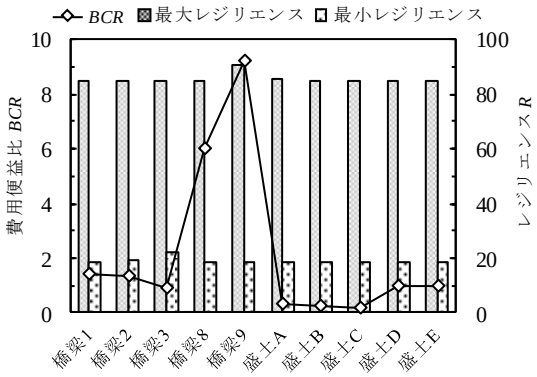
図－2　レジリエンスの概念図



図－3　想定する道路ネットワーク図

３．ケーススタディ

図－1 の性能評価手順を用いて，三重県尾鷲市を想定した道路ネットワーク（**図－3** 参照）を対象にケーススタディを実施し，構造物の補強優先度判定を行った．道路構造物として，昭和 39 年および平成 8 年の耐震基準を満たす橋梁（それぞれ昭和基準および平成基準と称す）と，篠田らの論文[6]を参考に設計した，一般的な諸元の盛土を扱った．橋梁の損傷確率は，モンテカルロ法に基づく繰り返し計算により得られる地震および津波フラジリティ曲線から算出した．盛土の損傷確率は，ニューマーク法を用いて地震フラジリティ曲線を算出し，強震動による路面の段差高を考慮した盛土高と越流水深の比較から算出した．



図－4　リスク・レジリエンス評価結果

本研究では昭和基準の橋梁と盛土を補強対象とし，構造物を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た．**図－4** に，各補強対象構造物を補強した際のリスク・レジリエンス評価結果を示す．最大および最小レジリエンスは，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** より，最小レジリエンスに差はないものの，リンク 4 に位置する橋梁 9 を補強した場合，費用便益比と最大レジリエンスが最も高くなることが明らかとなった．このことから，橋梁 9 を補強することが経済的に最も良く，道路の機能性の維持，回復に効果的である．

４．まとめ

南海トラフ地震に附随する強震動と津波を併せて受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価を行い，構造物の補強優先度の判定例を示した．今後，解析都市や構造物種別を追加した検討を進めていきたい．

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の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，2015.　2) 原子力規制委員会原子力規制庁，東北大学：平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（構造物への作用波力評価手法の整備）事業 業務成果報告書，2016.　3) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，2001.　4) 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.　5) Bocchini, P. and Frangopol, D. M.: Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization, *Earthquake Spectra*, pp.427-455, 2012.　6) 篠田昌弘，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，Vol.25，pp.189-196，2010.

© Japan Society of Civil Engineers