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リスク・レジリエンス評価 手法の提案と構造物の補強優先度判定への適用

石橋 寛樹1・小島 貴之2・秋山 充良3・越村 俊一4

 ¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻博士後期課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
 E-mail: hirokiishibashi@toki.waseda.jp

 ²学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
 E-mail: t-koji.h080077ms@asagi.waseda.jp

³正会員 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) E-mail: akiyama617@waseda.jp

⁴正会員 東北大学大学院教授 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) E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

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リスク・レジリエンス評価手法を提案 し、構造物の補強優先度判定への適用例を提示する.道路構造物の被災により生じる経済的損失からリス ク、そして、地震後の交通機能(ネットワーク)の低下と回復時間からレジリエンスをそれぞれ定量化し た.それらの指標を算定する際の核となる信頼性評価では、Monte Carlo 法に基づく確率計算の中で、断層 運動の予測からハザード強度の推定、さらには構造物の脆弱性評価に伴う一連の不確定性を考慮した.ケ ーススタディでは、南海トラフ地震の影響域にある道路ネットワークを対象に提案手法を適用することで、 リスク・レジリエンスを判断指標として構造物の補強優先度を同定できることを示した.

Key Words: multiple hazards, reliability, risk, resilience, road network, Nankai Trough earthquake

1. はじめに

地震による道路構造物の被災は、大きな経済的損失を もたらすだけでなく、道路の交通機能の低下とそれに伴 う復旧・復興活動の遅延に直結する.例えば、2011年東 北地方太平洋沖地震では、多くの道路構造物が強震動と 津波を受けたことで損壊し、約 2300km に及ぶ道路ネッ トワークで通行規制の措置が余儀なくされた¹⁾. 2016 年 熊本地震の際には、強震動と地すべりの影響により各地 の道路ネットワークが通行不能となった²⁾.

近年,その切迫性が指摘されている南海トラフ地震では、広域にわたり強震動と津波による被害が懸念されており、その被害想定は2011年東北地方太平洋沖地震を大きく上回る³⁻⁵。南海トラフ地震の影響を受けることが予想される地域では、防災・減災対策が急がれるものの被災する恐れのある全ての構造物に対して補強を施す

ことは時間や予算の制約上困難である。被害を最小限に 抑えるためには、構造物を道路ネットワークの一構成要 素として扱い、経済的損失や交通機能の低下など、個別 構造物の被災に伴う影響度を評価した、合理的な防災・ 減災計画を策定する必要がある。

構造物の被災による影響度まで考慮した性能指標にリ スクがある. Stewart and Deng[®]は,気候変動に伴う構造物 のリスク評価式を提案している. Yilmaz et al.[®]は,洗堀 と強震動を受ける実橋梁を対象に復旧費用を横軸とする リスク曲線を得ている.また,Shiraki et al.[®]は,多数の橋 梁が介在する道路ネットワークを対象に,橋梁の被災に 伴う移動時間の増加量に着目したシステムリスク解析を 行っている.しかしながら,これらの既往研究では,既 存構造物の具体的な補強工法を想定したリスクの低減効 果は検証されておらず,解析対象の構造物種別も限定的 である.また,強震動と津波といった連続的に作用する マルチハザードの影響は考慮されておらず,リスク評価の基礎となる信頼性評価法に関しても発展の余地がある.

また近年では、道路ネットワークの性能指標としてレ ジリエンス^{9,10}が注目されている.古田ら¹¹は、ネット ワークを構成する各リンクの信頼性評価結果を基に、地 震後におけるネットワークの継続性と復旧性を検討して いる.Bocchini and Frangopol¹²は、橋梁を含む道路ネット ワークをモデル化し、地震後の移動時間および移動距離 の増加量に基づき、道路ネットワークの機能低下と回復 時間を表す指標としてレジリエンスを評価している.

南海トラフ地震の道路ネットワークへの影響を定量化 する上で、リスクおよびレジリエンスは有用な指標にな り得るが、現状、次の課題が指摘される.(i)連続的に発 生するハザードの影響を考慮した道路構造物の信頼性評 価、(ii) 異種構造物を含んだ道路ネットワークのリス ク・レジリエンス評価、および、(iii) 定量化されたリス ク・レジリエンスを用いた補強優先度判定、である.

本研究では、経済的損失をリスク、そして、交通機能 の低下と回復時間をレジリエンスとしてそれぞれ定義し、 南海トラフ地震発生時に想定される強震動と津波を連続 して受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評 価手法を提示する。ケーススタディでは、南海トラフ地 震の影響域にある都市の道路ネットワークを対象に提案 手法を適用し、リスク・レジリエンスに基づく構造物の 補強優先度判定の一例を示す。

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リスク・レジリエンス評価手順

(1) 概説

本研究の特徴は、南海トラフ地震を受ける道路ネット ワークに対して、種々の不確定性を考慮し、断層運動か らハザード強度の予測、そして、強震動と津波の連続性 を考慮した道路構造物の損傷可能性の把握、さらにはそ れに伴う影響度としてリスク(経済的損失)とレジリエ ンス(道路の機能低下と回復時間)を一貫して評価する 点にある.なお、本研究の対象は南海トラフ地震に限定 しており、その切迫性の高さから地震発生確率は考慮せ ず、地震発生の条件下での信頼性・リスク・レジリエン ス評価を行う.

(2) 個別構造物の信頼性評価および構造物の損傷レベ ルと道路ネットワークの機能に関する仮定

a) ハザード評価

地震ハザード評価では、平均応力降下量から地震モー メントを算出し¹³、司・翠川¹⁴の距離減衰式に代入する ことで地動最大加速度を推定する.距離減衰式の計算値 には大きなモデル誤差が含まれるため¹⁵,詳細な強震波 形算定結果との差から計算値を補正する.以上の手順に 従い,平均応力降下量を確率変数として扱うことで地動 最大加速度の超過確率(地震ハザード曲線)を得る.

津波に関しては、対象構造物の地表面を基準とする津 波水位を津波波高と定義し、ハザード曲線を算出する. 平均応力降下量とすべり角を確率変数として扱い、海底 地盤変動解析¹⁰により初期水位を求める.次に、初期水 位を入力条件とした非線形長波理論に基づく平面2次元 モデル¹⁷の津波伝播解析により、解析対象構造物位置の 最大津波波高を取得する.最大津波波高に対して補正を 行うことで、都市周辺の年間最大潮位を考慮した津波波 高の超過確率(津波ハザード曲線)を算出する.

b) 構造物の脆弱性評価

地震フラジリティ曲線を算出する際,地震動強度 Γを 持つ多数の地震波を作成し, Monte Carlo 法に基づき地震 応答解析を繰り返し行うことで,地震動強度 Γの入力地 震波に対する構造物の最大応答値を算出する¹⁸.

津波フラジリティ解析では、津波波力に対する構造物 の脆弱性評価を行う.このとき、強震動による残留変位 や剛性劣化、あるいは水平荷重の低下を初期条件として 考慮することで、強震動と津波の連続性を考慮した構造 物の損傷度判定を可能にする.

本研究では、対象構造物に対して、応答値に基づき無 損傷、小破、大破の3段階からなる損傷度判定を行う. 損傷度判定基準は、損傷に伴う車両の通行機能の低下度 を基に設定する.

c) 構造物の信頼性評価

強震動に対する構造物の条件付損傷確率は式(1)より 算出できる.

$$P_{fs}(i) = \int_0^\infty \left\{ P(DS_i = ds_i \mid \Gamma = \gamma) \cdot \left| -\frac{dF_{\Gamma}(\gamma)}{d\gamma} \right| \right\} d\gamma \quad (1)$$

ここに、 $P_{fs}(i)$ は強震動によって損傷度が ds_i となる確率 である. $F_{\Gamma}(\gamma)$ は地震ハザード曲線であり、 $P(DS_i = ds_i | \Gamma = \gamma)$ は地震動強度 $\Gamma = \gamma$ の際に損傷度 DS_i が ds_i となる 確率を示している.

強震動による損傷を考慮した,津波波高Hに対する構造物の条件付損傷確率は式(2)で与えられる.

$$P_{fi}(i,j) = \int_0^\infty \left\{ P(DS_j = ds_j \mid H = h, DS_i = ds_i) \cdot \left| -\frac{dF_H(h)}{dh} \right| \right\} dh \quad (2)$$

ここに、 $P_{ft}(i, j)$ は強震動によって損傷度が ds_i となった 構造物が、津波により損傷度が ds_j となる確率を表す. $F_{H}(h)$ は津波ハザード曲線であり、 $P(DS_j = ds_j | H = h, DS_i$ = ds_i)は、強震動による損傷度 DS_i が ds_i であり、津波波

表-1 構造物の損傷度と損傷指標の関係

損傷度 DS (Damage State)	構造物の損傷指標 SDI (Structural Damage Index)
無損傷	0.0
小破	0.3
大破	1.0

高H=hの際に、損傷度 DS_j が ds_j となる確率である.

最終的に, 強震動と津波の連続作用により損傷度 DS が ds_j となる損傷確率 $P_f(DS = ds_j)$ は式(3)で表される.

$$P_f(DS = ds_j) = \sum_{i=1}^{j} P_{fs}(i) \cdot P_{fi}(i, j)$$
(3)

式(3)により算出される個別構造物の損傷確率を基に、 リスクおよびレジリエンスを算定する.

d) 構造物の損傷度とリンクの交通機能

地震後のリンク(道路ネットワークを構成する各道路) の交通機能は、介在する構造物の損傷度に応じて変化す る. Chang et al.¹⁹は、道路ネットワーク内の橋梁に対して 損傷度に応じた損傷指標を設定し、構造物単位の損傷指 標を用いてリンク単位の損傷指標を評価している.本研 究においても同様に、構造物の損傷度に応じて損傷指標 *SDI* (Structural Damage Index)を定義する(表-1 参照). さ らに、式(4)より地震発生から時間 t が経過した際のリン クの損傷指標 *LDI* (Link Damage Index)を算出する.

$$LDI(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (SDI_k(t))^2}$$
(4)

ここに、nは対象のリンクに属する構造物数である.

Guo et al.²⁰は, 地震発生前の交通容量と自由流速度に 対して, リンクの損傷指標に応じて設定される割合を乗 じることで, 地震後の各リンクの残存交通容量および残 存自由流速度を算出している.本研究においても,式 (4)から得られるリンクの損傷指標 *LDI*を基に, 地震後の 残存交通容量および残存自由流速度を設定する.

(3) 道路ネットワークのリスク評価

a) リスク評価の基本式

本研究では、地震で被災した構造物の復旧に要する費 用を直接損失、構造物の被災による交通機能の低下から 生じる損失を間接損失としてそれぞれ定義し、これらの 和をリスクとする.リスク*Crisk*は式(5)で表される.

$$C_{risk} = C_{dir} + (C_{run} + C_{time})$$
⁽⁵⁾

ここに、*C*_{dir}は直接損失、*C*_{run}および*C*_{time}はそれぞれ移動距離および移動時間の増加に伴う間接損失である.

b) 構造物の被災に伴う直接損失



直接損失 Cdir は各構造物の損傷指標の期待値に復旧費 用を掛け合わせることで算出される.

$$C_{dir} = \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_f \left(DS = DS_j \right) \cdot SDI_{k,j} \cdot C_r \tag{6}$$

ここに, mは損傷度であり, 無損傷, 小破, 大破の3段 階を表す. Cr は個別構造物の復旧費用であり, 構造物 種別に応じて設定される.

c) 構造物の被災に伴う間接損失

間接損失は、迂回により生じる移動距離および移動時 間の増加量を貨幣価値に換算することで算出する.本研 究では、対象とする道路ネットワークに対して迂回路を 設定し、リンクが被災した場合には、リンクの交通量の 一部を迂回路が負担すると仮定する.

国土交通省の費用便益分析マニュアル(以下,マニュ アル)²¹⁾および Dong and Frangopol²⁰⁾を参考に,迂回によ る移動距離の増加に伴う燃料消費の増加量から,移動距 離の増加に伴う損失 *Crun* を算出した.

移動時間の増加により発生する損失 C_{time} に関しては、 マニュアル²¹⁾および Dong and Frangopol²²⁾の手法に基づき、 車両の運転者が迂回により必要となった時間を貨幣価値 に換算することで計算した.

(4) 道路ネットワークのレジリエンス評価

本研究におけるレジリエンスの概念図を図-1に示す¹²⁾. Bocchini and Frangopol¹²⁾の手法に基づき,各リンクの性能 指標 $\Gamma(t)$ を式(6)により定義する.

$$\Gamma(t) = \frac{1}{\gamma_T \cdot TTT(t) + \gamma_D \cdot TTD(t)}$$
(6)

ここに, *TTT(t)*は時点 t における全利用者の総移動時間, *TTD(t)*は時点 t における全利用者の総移動距離, yr は利 用者の時間損失を金銭的損失に変換する係数, yo は利 用者の距離損失を金銭的損失に変換する係数である.

性能指標 $\Gamma(t)$ に基づき,時点 tにおけるリンクの機能性 Q(t)を以下の式(7)により定義する.



$$Q(t) = \frac{\Gamma(t) - \Gamma^{0}}{\Gamma^{100} - \Gamma^{0}}$$
(7)

ここに、 Γ^0 はリンク内の構造物が全て供用不能となる 場合の性能指標、 Γ^{100} はリンク内の構造物が全て無損傷 である場合の性能指標である.

以上より算出されるリンクの機能性 Q(t)を想定復 旧期間内で積分し,得られる値を想定復旧期間 thで 除することでレジリエンス R を得る¹².

$$R = \frac{1}{t_h} \int_{t_0}^{t_0 + t_h} Q(t) dt$$
 (8)

さらに、各リンクのレジリエンスを比較し、道路ネットワーク内の最大レジリエンス *Rmax* を抽出する.

$$R_{\max} = \max(R_{Link1}, R_{Link2}, \dots, R_{LinkN})$$
(9)

ここに, *R_{LinkN}* はリンク *N*のレジリエンスである.最大 レジリエンス *R_{max}* が大きいほど,地震後の道路ネット ワークの利用が期待できる.

3. ケーススタディ

(1) 解析対象の道路ネットワーク

構造物が被災することで生じる影響度を考慮すること で合理的な防災・減災施策の立案が可能になる.そこで、 提案手法の有用性を確認するために、ケーススタディと して南海トラフ地震による被害が懸念されている三 重県尾鷲市に位置する道路ネットワーク(図-2参照) を対象にリスク・レジリエンス評価を実施する.さ

表-2 リンクの交通機能に関するパラメータ

リンク	延長	自由 流速度	交通容量 (台/日)	交通量 (台/日)	
	(km)	(km/h)		普通	大型
リンク1	5.5	40	60000	6000	600
リンク2	4.1	40	60000	4000	400
リンク3	5.0	40	60000	6000	600
リンク4	3.5	40	112800	12000	3600
迂回路	9.0	40	60000	_	—





らに、構造物の補強を想定し、影響度を効率的に抑 制可能な構造物の補強優先度を同定する.図-2の各 リンクの交通機能に関するパラメータを表-2に示す.

(2) 道路構造物の信頼性評価

a) ハザード評価

内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」⁴(以下,検討会)では、過去に観測された地震データを集約し、強震動を発生させる強震断層モデルと、津波を引き起こす津波断層モデルをそれぞれ作成している.本研究では、検討会の公開情報を基に、平均応力降下量を図-3に示される上下限付きの正規分布として扱い、確率論的ハザード解析を行った.また、津波断層モデルでは、すべり角を平均値0度、標準偏差10度の正規分布として仮定することで、断層運動の不確定性を考慮した.

強震断層モデルとして、検討会が公開している強震動 生成域のそれぞれ異なる基本ケースと陸側ケースを使用 した.平均応力降下量を確率変数として扱い、距離減衰 式を使用した経験的手法により各ケースにおける地動最 大加速度の確率分布を算出した.また、検討会では経験 的手法に加えて、強震波形計算手法(統計的グリーン関 数法)を用いて震度分布を推定している.距離減衰式か ら得られる計算値のばらつきを考慮するため、検討会の 推定値と本研究の計算値との比をモデル誤差として扱い、 モデル誤差を正規分布に近似し計算値に乗じることで補



図-4 解析対象都市の地震ハザード曲線

表-3	津波断層モデルにおける大すべり域の場所
10	

ケース	大すべり域の場所	
ケース1	駿河湾~紀伊半島沖	
ケース2	紀伊半島沖	
ケース3	紀伊半島沖~四国沖	
ケース4	四国沖	
ケース5	四国沖~九州沖	
ケース6	駿河湾~紀伊半島沖	
ケース7	紀伊半島沖	
ケース8	駿河湾~愛知県東部沖,三重県南部沖~徳島県沖	
ケース9	愛知県沖~三重県沖, 室戸岬沖	
ケース 10	三重県南部沖~徳島県沖,足摺岬沖	
ケース 11	室戸岬沖,日向灘	
ケース 12	ケース1・ケース2間(独自設定)	
ケース 13	ケース2・ケース3間(独自設定)	
ケース 14	ケース3・ケース4間(独自設定)	
ケース 15	ケース4・ケース5間(独自設定)	

正を行った. 図-4に、各ケースの地震ハザード曲線を示 す. 基本および陸側ケースでは解析地点に対する等価震 源距離が異なるため、地震ハザード曲線に差異が生じる. ケーススタディでは、各道路構造物の等価震源距離に大 きな差はないことから、地点によらず地震ハザード強度 は同じであると仮定した.

津波断層モデルとして,表-3に示される大すべり域の 異なる 15 ケースを想定した.検討会が想定する 11 ケー スに加え,ケース 1~ケース 5 の中間位置が大すべり域 となるように著者らが独自に設定した 4 ケースを用いた. 平均応力降下量からすべり量を算出し,表-3 の 15 ケー ス全てに対して Monte Carlo 法を適用することで,各ケー スにつき 100 通りのすべり量およびすべり角を入力した 海底地盤変動解析および津波伝播解析を行い,各道路構 造物位置に対して合計 1500 通りの最大津波波高を取得



図-5 道路構造物位置の津波ハザード曲線



図-6 各橋梁形式の水平荷重-水平変位関係

した. 津波伝播解析を行う際,土地利用区分に応じた粗 度係数²³⁾を設定することで,地理的条件が津波の伝播あ るいは遡上に与える影響を考慮した.さらに,年間最高 潮位を考慮するために,得られた最大津波波高の解析値 と検討会の公表値との比を解析値に乗じることで補正を 行った.最終的に,補正した 1500 通りの最大津波波高 から各地点の津波ハザード曲線を算出した.

各解析対象構造物位置の津波ハザード曲線を図-5に示 す.図-5より,沿岸部からの距離や地理的条件の違いが 津波伝播解析結果に反映されることで,道路構造物の地 点毎に津波ハザード曲線に明確な差異が生じている.

なお、強震断層モデルにおける基本ケースと陸側ケース、津波断層モデルにおける 15 ケースの発生確率には 重みづけを行わず、等しい確率で発生すると仮定した.

b) 解析対象の道路構造物

ケーススタディでは、道路構造物として橋梁と盛土を 扱った.橋梁は、米田ら²⁴⁾を参考に 1964 年および 1996 年の耐震設計基準^{25,20)}に準拠する 2 種の桁橋(以下、そ れぞれ S39 橋梁および H8 橋梁)を想定した.各橋梁は 高さ 6m の RC 橋脚で構成されており、材料特性のばら つきを考慮して設計した²⁷⁾.図-6 に、橋軸方向における 水平荷重-水平変位関係を示す.図-6 には、後述する補

構造物 損傷形式 小破		小破	大破	
橋梁	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	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	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
盛 土		路面の段差	地震時変形量が小破となる限界変形量以上	地震時変形量が大破となる限界変形量以上
		越流水深	越流水深が小破となる限界越流水深以上	越流水深が大破となる限界越流水深以上

表-4 構造物の損傷度定義

表-5 構造物の復旧日数

	損傷度		
(用)旦初	小破	大破	
橋梁	30	180	
盛土	5	60	

強後の S39 橋梁における水平荷重-水平変位関係を併せ て示す.桁橋の支承部に関しては、阿部ら^{28,29}を参考に 設計された、SS400 を材料とする固定支承が 4 基設置さ れているものとした.また、盛土は、盛土高 4m、法面 勾配 1:1.5、延長 100mを想定し、篠田ら³⁰⁾を参考に設計 パラメータを設定した.なお、解析対象とする道路構造 物は全てI種地盤上にあると仮定した.

本研究では S39 橋梁および盛土を補強対象として補強 優先度判定を行う. S39 橋梁には鋼板巻立て補強³¹⁾を行 い,盛土では全層敷補強材を用いた補強³⁰⁾を想定した.

c) 道路構造物の脆弱性評価

橋梁および盛土に対して,無損傷,小破,および大破 からなる3段階の損傷度を設定し,強震動と津波を受け た際に各損傷度となる条件付損傷確率を算出した.各構 造物の損傷度の定義を表-4に示す.盛土の損傷度判定基 準に関して,強震動による限界変形量は常田ら³³を参考 に,小破と大破の基準をそれぞれ 30mm および 200mm とした.津波の限界越流水深は,過去の被災データから 作成された破壊判定基準図³³に基づき,小破および大破 の基準をそれぞれ 176mm および 480mm と設定した.

表-5に、橋梁および盛土が小破あるいは大破となった際の復旧日数を示す.ケーススタディでは地震後の仮復旧作業は想定せず、構造物が強震動と津波により小破あるいは大破となった場合、表-5に示される復旧日数が経過した後は無損傷状態に回復すると仮定した.また、構造物が被災した際、構造物の損傷度や作業ヤードの広さ、資材運搬の容易さ等によって復旧に要する時間は大きく変動する.しかしながら、構造物の周辺環境と復旧日数



図-7 地震フラジリティ曲線

の関係を定量的に評価することは困難なことから、本研 究では過去の橋梁および盛土の被災事例^{34,39}を参考に、 地点によらず復旧日数は同じものとした.

検討会は基本ケースと陸側ケースのそれぞれで推定される地震波を公開している.地震フラジリティ解析で用いた入力地震動は、各ケースに対して尾鷲市周辺で推定される計 50 地点の地震波を基に、地動最大加速度 Γ を100 gal 刻みで 2000 gal まで振幅調整することで作成した. 橋梁では材料特性のばらつきと耐力評価に伴う種々のモデル誤差^{27,30-38)}を、盛士では設計パラメータの不確定性を考慮した.非線形動的解析およびニューマーク法をMonte Carlo 法に基づいてそれぞれ繰り返し行い、各地動最大加速度 Γ に対する条件付損傷確率を算出した.

図-7 に、H8 橋梁および補強前後の S39 橋梁の地震フ ラジリティ曲線を示す.ケーススタディでは、橋梁の材 料特性や耐力評価のばらつきを考慮しない場合,H8 橋 梁および補強後の S39 橋梁は曲げ破壊先行型である.一 方で、補強前の S39 橋梁はせん断破壊先行型となるため、 小破と大破のフラジリティ曲線には大きな差が生じない. 橋梁の津波フラジリティ解析では、作用する津波波力



図-8 津波フラジリティ曲線

を水平成分と鉛直成分に分解し、それぞれの方向に対し て脆弱性評価を行った.原子力規制庁・東北大学³⁹の手 法を参考に、津波波高Hとなる模擬津波波形群を作成し、 数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D⁴⁰に順次入力すること で、津波波高に対応する水平波力を取得した.

さらに、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」⁴⁰により報告されている計 15 体の実験結 果に基づいて、CADMAS-SURF/3D のモデル誤差を考慮 した.最終的に、モデル誤差を考慮して得られた水平波 力を用いてプッシュオーバー解析を行った.

鉛直成分に関しては、津波波高が橋脚高さ以上となる際、支承部の鉛直耐力と鉛直波力を比較することで桁の浮き上がり照査を行った。鉛直波力は式(10)より計算した⁴⁹.

$$F_z = \rho g V + \rho g(\beta \eta'_H) A_v \tag{10}$$

ここに、 F_z は津波による作用鉛直波力、 ρ は海水の密度、 gは重力加速度、Vは上部構造の体積、 β は係数(=0.53)、 η'_H は擾乱高さ、 A_v は有効水平投影面積である。

水平波力と同様に,式(10)の照査式に含まれるモデル 誤差も既往の水理実験結果⁴⁰との比較から定量化し,信 頼性評価の際に考慮した.

強震動作用後は無損傷あるいは小破の状態で,津波に よって大破となる橋梁の津波フラジリティ曲線を図-8に 示す.強震動により小破となった状態で津波波力が作用 した場合は,無損傷状態から津波波力を受ける場合より も損傷確率が大きくなる.この結果は,強震動と津波を 受ける構造物の安全性を正確に推定するためには,ハザ ードの連続性を考慮する必要があることを示している.

盛土の津波に対する脆弱性評価では,強震動による変 形量を路面の段差として盛土高から差し引くことで各ハ

表-6 構造物の復旧費用と補強費用

構造物	復旧費用 (万円)	補強費用(万円)	
橋梁	6700	1000	
盛土	1960	1640	

ザードの連続性を考慮した.津波波高Hと強震動作用後の盛土高の差から計算される越流水深と限界越流水深を 比較することで損傷度を判定した.

d) 道路構造物の信頼性評価結果

以上の手順で得られた各構造物の強震動および津波に 対する条件付損傷確率を式(3)に代入することで、南海 トラフ地震による構造物の損傷確率を算出した.各構造 物の損傷確率の差異、および補強効果の大小に基づいて 算定されるリスク・レジリエンス評価結果を比較するこ とで、構造物の損傷により生じる影響度を定量的に比較 でき、補強優先度の高い構造物を同定することができる.

(3) 道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価

ケーススタディでは、S39橋梁あるいは盛土を1つの み補強した場合のリスク・レジリエンス評価を行うこと で、優先的に補強することが望まれる構造物を同定する.

本研究では、リスクの指標として費用便益比 (Benefit Cost Ratio, BCR)を用いることで、経済的に優れた補強効 果が見込まれる構造物を同定する.ここでは、補強によ る経済的損失額の低減量を便益 (Benefit)、補強費用を費 用 (Cost)として扱った. BCR が 1.0 以上の場合、補強に よる経済効果が期待できる.表-6 に、補強対象である S39 橋梁と盛土の復旧費用および補強費用を示す^{30,42}.

本研究で想定する構造物の補強は、地震後に道路ネットワーク内の南北地点の移動経路を確保することを目的とする.本研究では、式(9)より算定される最大レジリエンス *Rmax* が最も大きくなるものが道路ネットワークの交通機能と回復時間の観点から補強優先度の高い構造物と判断される.

なお、ケーススタディでは、表-5に示されるように、 橋梁が大破となった場合の復旧期間は180日であり、180 日が経過した際は全ての構造物の復旧が完了し、道路ネ ットワークの交通機能は地震発生前の状態に戻ることを 想定している.そこで本研究では、想定復旧期間 th を 180日としてレジリエンスを算定した.

(4) 道路構造物の補強優先度判定

a) リスク評価結果

図-9に、各道路ネットワークに位置する S39 橋梁およ び盛土を1つのみ補強した場合のリスク・レジリエンス 評価結果を示す. S39 橋梁では位置によらず BCR は 1.0 以上となる.特に、橋梁 8 および橋梁 9 を補強すること



図-9 道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価結果

で効率的なリスク低減が可能である.これらの橋梁では 補強による損傷確率の低下量が大きいため,直接損失を 大きく抑えられる.また,リンクを構成する構造物の損 傷確率が全体的に低く,交通機能の低下を効果的に抑制 できる.

一方で盛土については、その位置によらず BCR は 1.0 以下となり、経済的な効果が見込まれない結果となった. 盛土は S39 橋梁に比べて損傷確率が小さくなる傾向があ り、補強を施した場合でも損傷確率の低下量は小さい. また、表-5 および表-6 に示されるように、橋梁と比較す ると被災時の復旧日数および復旧費用は小さく、一方で 補強費用は高くなっている.以上より、ケーススタディ の条件下では、盛土を補強することで安全性の向上は期 待できるが、経済性を考えた場合の補強優先度は低い.

b) レジリエンス評価結果

橋梁9を補強することで,道路ネットワークの最大レジリエンスを高められることが明らかになった.上述したリスク評価結果と同様に,橋梁9を補強することで,式(4)より算出される,橋梁9が位置するリンク(リンク4)の損傷指標 LDI が小さくなり,地震後の交通機能の低下を効率的に抑えられるためである.

c) リスク・レジリエンスに基づく補強優先度判定

ケーススタディの条件下では、効率的にリスクの低減 とレジリエンスの改善を図るには橋梁9を補強すること が望ましい.提案手法を活用することで、リスクおよび レジリエンスの観点から、補強による地震後の道路ネッ トワークの経済性・機能性・回復性を評価することがで き、構造物の補強対策の優先度を同定することができる.

4. 結論

道路構造物の被災に伴う経済的損失をリスク,そして, 地震後の交通機能と回復時間をレジリエンスとしてそれ ぞれ定量化し,南海トラフ地震による強震動と津波を連 続して受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス 評価手法を提示した.ケーススタディでは、南海トラフ 地震の影響を受けることが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提案手法を適用し、 道路構造物を補強した場合のリスクおよびレジリエンス を比較することで、構造物の補強優先度判定を行った.

本研究により得られた知見を以下に示す.

- 津波作用時の構造物の状態として、無損傷状態を 想定した場合と、強震動によって損傷が生じた場 合では、得られる津波フラジリティ曲線に差が生 じる、津波に対する脆弱性評価を正確に行うため には、強震動による損傷を考慮する必要がある。
- リスクの指標として費用便益比 BCR を活用することで、経済的な観点から優先した補強対策が望まれる構造物を同定することができる.地震後における構造物の損傷と、それによるリンク毎の交通機能の違いから BCR に差異が生じるため、明確な補強優先度が可能である.
- 道路ネットワーク内の最大レジリエンスを指標と することで、道路ネットワークの交通機能と回復 時間の観点から、地震後の道路の機能維持に効果 的な補強対象を同定可能である。

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.ここに記し て謝意を表します.

参考文献

- 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(地震工学論文集第32巻), I_121-133, 2013.
- 2) 大澤脩司,中山晶一朗,藤生慎,高山純一,溝上章志:アクセシビリティ指標を用いた自然災害時の道路網の復旧順位設定手法に関する研究,土木学会論文集D3(土木計画学),Vol.73,No.5(土木計画学研究・論文集第34巻),I 281-289,2017.
- 地震調査研究推進本部事務局:南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について、2013.
- 4) 内閣府:南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2012.
- 5) 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.
- 6) Stewart, M.G. and Deng, X.: Climate Impact Risks and Climate Adaptation Engineering for Built Infrastructure, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A : Civil Engineering, Vol.1, No.1, pp.04014001-1-12, 2015.
- Yilmaz, T., Banerjee, S. and Johnson, P. A.: Performance of Two Real-Life California Bridges under Regional Natural Hazards, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.21(3), pp.04015063-1-15, 2016.

- Shiraki, N., Shinozuka, M., Moore, J. E., Chang, S. E., Kameda, H. and Tanaka, S.: System Risk Curves: Probabilistic Performance Scenarios for Highway Networks Subject to Earthquake Damage, *Journal of Infrastructure systems*, Vol.13, No.1, pp.43-54, 2007.
- 9) Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallance, W. A. and von Winterfeldt, D.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- Rose, A.: Definingand measuring economic resilience to disasters, *Disaster Prevention and Management*, Vol.13, No.4, pp.307-314, 2004.
- 古田均,中津功一朗,高橋亨輔,石橋健,香川圭 明:地域レジリエンスを考慮した道路網の信頼性解 析に基づく地震対策の評価,土木学会論文集 F6(安 全問題), Vol.70, No.2, pp.I_73-80, 2014.
- 12) Bocchini, P. and Frangopol, D. M.: Restoration of Bridge Networks after an Earthquake: Multicriteria Intervention Optimization, *Earthquake Spectra*, Vol.28, No.2, pp.427-455, 2012.
- 13) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会:震源断層を 特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), pp.1-19, 2017.
- 14) 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.
- 15) 翠川三郎,大竹雄:地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析,日本地震工学会 論文集,Vol.3, No.1, pp.59-70, 2003.
- 16) 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.
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC Time Project, 1997.
- 18) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Mizuno, K.: Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, No.9, pp.1228-1247, 2014.
- 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, 2000.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) Dong, Y. and Frangopol, D. M.: Probabilistic Time Dependent Multihazard Life Cycle Assessment and Resilience of Bridges Considering Climate Change, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.30, No.5, pp.04016034-1-12, 2016.

- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津 波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, Vol.45, No. 2, pp.356-360, 1998.
- 24)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.
- 25) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1964.
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1996.
- 27) 秋山充良,土井充,松中亮治,鈴木基行:構造系の 信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全 係数の試算,土木学会論文集,No.718,V-57, pp.83-101,2001.
- 28) 阿部雅人,柳野和也,藤野陽三,橋本哲子:1995年 兵庫県南部地震における3径間連続高架橋の被害分 析,土木学会論文集,No.668, I-54, pp.1-17, 2002.
- 29) 阿部雅人,吉田純司,藤野陽三,森重行雄,鵜野禎 史,宇佐美哲:金属支承の水平終局挙動,土木学会 論文集,No.773, I-69, pp.63-78, 2004.
- 30) 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.
- 31)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.
- 32)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.
- 33) 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.
- 34) 国土交通省国土技術政策総合研究所:被害復旧状況の設定,国総研資料 0357020 号,http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0357pdf/ks0357020.pdf, アクセス日:2019年6月25日
- 35) 森芳徳,宮武裕昭,久保哲也,井上玄己:大規模土 砂災害に対応した新しい災害復旧技術に関する研究, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.72, No.4, pp.77-87, 2016.
- 36) 足立幸郎,運上茂樹:部材耐力・剛性のばらつきが 免震橋梁の地震応答特性に及ぼす影響,土木学会55 回年次学術講演会講演概要集第1部,I-B223,2000.
- 37) 秋山充良, 王衛侖, 前田直己, 鈴木基行: コンクリ ート圧縮強度 130N/mm2・せん断補強鉄筋降伏強度 1200N/mm2 までを用いた RC はりのせん断耐力算定 式, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.907-917, 2004.
- 38) 松崎裕, DANG Tuan Hai, 秋山充良, 鈴木基行: RC 橋脚・杭基礎間に必要な耐力格差に関する確率論的 考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.853-858, 2007.
- 39) 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.

- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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

ROAD NETWORK RETROFITTING PRIORITIZATION UNDER SEISMIC AND TSUNAMI HAZARDS CAUSED BY THE ANTICIPATED NANKAI TROUGH EARTHQUAKE BASED ON THE PROBABILISTIC RISK AND RESILIENSE

Hiroki ISHIBASHI, Takayuki KOJIMA, Mitsuyoshi AKIYAMA and Shunichi KOSHIMURA

A procedure for estimating the risk and resilience of a road network including bridges and embankments under the seismic and subsequent tsunami caused by the anticipated Nankai Trough earthquake is presented. Probabilistic approach for road network retrofitting prioritization is the topic of this paper. Risk and resilience are quantified by the economical loss due to the damage to individual structures and post-disaster functionality of road network, respectively. Uncertainties associated with the estimations of fault movement, hazard intensity, and structural vulnerability are considered when estimating the failure probability by the Monte Carlo simulation. In an illustrative example, the retrofitting priority of bridges and embankments in the road network subjected to the anticipated Nankai Trough earthquake is determined based on the proposed performance indicators (i.e. risk and resilience).

論文集, Vol.39, No.563, pp.79-94, 1997.

(Received July 1, 2009?) (Accepted November 1, 2009?)