第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

南海トラフ地震の影響を受ける沿岸域の津波避難路に位置する橋梁の耐震性能と津波人的被害の関係に関する基礎的研究

鈴木　乃亜[1]・秋山　充良[2]・布施　柚起[1]・青木　康貴[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（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[2]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）
[3]学生会員　修（工）早稲田大学大学院　創造理工学研究科建設工学専攻・日本学術振興会特別研究員DC
（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[4]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による津波により，岩手県・宮城県・福島県の太平洋沿岸部を中心に甚大な人的被害が生じた．この被害を受け，南海トラフ地震の影響が懸念される沿岸域では，津波人的被害の想定を基に津波避難計画が策定され，緊急避難先として津波避難タワーの新設などが進められている．この設置場所は，避難路として機能する道路ネットワークとの接続関係や，人口密集地域，既存の津波避難施設等の位置を勘案して決定されている[1)]．一方，津波が来襲する前に地震動により橋梁が損壊すると，道路ネットワークの寸断により避難が妨げられ，甚大な津波人的被害につながる可能性がある．津波による人的被害を最小化するためには，避難タワーの建設などによる津波対策とあわせ，地震動による道路ネットワークの機能性の低下，特に橋梁の地震損傷についての検討が不可欠であり，マルチハザードの視点を持った対応が求められる．

なお，このような津波人的被害の軽減を図る際，現在は，考えられる最大津波を想定した対応が行われている．しかし，例えば，その条件で決めた津波避難タワーの配置場所は，その想定と異なる津波の作用に対して，人的被害を最小化できるとは限らない．現在の技術レベルでは，地震動や津波の評価に大きな不確定性が介在することは避けられず，さらに，防災対策に使うことのできる費用の制限の中で，津波タワーの設置場所やその数，あるいは，耐震補強を行う橋梁の架橋位置や補強程度を検討する必要がある．これに係る費用と人的被害の関係はトレードオフであり，この問題は，マルチハザード下にある沿岸地域の人的被害を最小化するための対策を不確定性存在下で同定する最適化問題となる．この種の問題を解くにはリスクアプローチが有効である．

本稿では，特に，地震動による橋梁の損傷が津波避難タワーに至る避難路の寸断に及ぼす影響を考慮した上で，人的被害のリスクを推定し，その低減を目的とする最適化問題を解くことで，津波避難タワーの配置および耐震補強を実施すべき橋梁位置を同定する手法を提案する．

2. 津波人的被害リスクの軽減を目的とした道路橋の耐震補強戦略

橋梁の損傷により生じる避難路の寸断を考慮した津波人的被害のリスク評価およびその低減を目的とした橋梁の耐震補強位置の同定手順を**図-1** に示す．

(1) グラフ理論による対象地域のモデル化

道路ネットワークをグラフ理論[2)]を用いて，建築物，津波避難施設，および橋梁を頂点とし，それらを結ぶ道路縁の集合として扱い，地震により損傷した橋梁位置での道路途絶を考慮した津波避難シミュレーションを行う．また，対象地域内での津波ハザード強度および避難所要時間の空間的な差異を考慮するため，対象地域を分解能が30 mのメッシュで細分化し，各メッシュ内の人口を取得する．

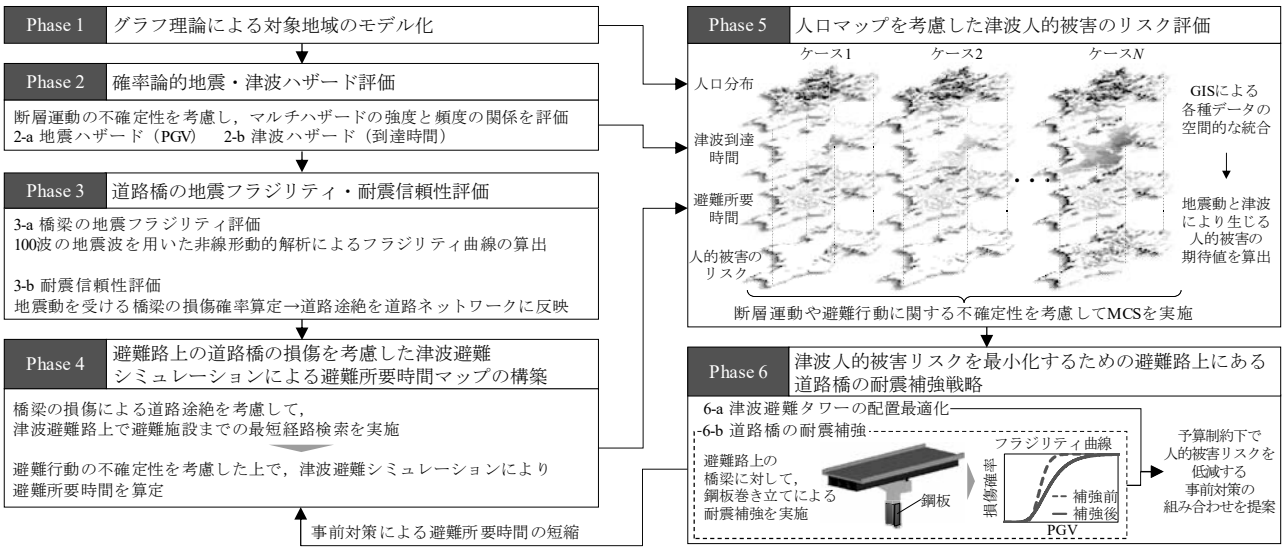


図-1 地震動による橋梁損傷を考慮した津波人的被害のリスク評価およびその低減に向けた橋梁の耐震補強位置の同定

(2) 確率論的地震・津波ハザード評価

「南海トラフ地震の巨大地震モデル検討会」[3), 4)]の断層モデルを基に，断層パラメータにばらつきを与えて地震および津波ハザードを評価し，地動最大速度（PGV）および津波到達時間とその発生確率の関係を推定する．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，距離減衰式および表層地盤増幅率 [5)]を用いる．津波ハザード評価では，断層パラメータから初期水位を計算し，平面二次元津波解析モデル [5)]に基づく津波伝播解析を行う．

(3) 道路橋の地震フラジリティ・耐震信頼性評価

地震動に対する橋梁の脆弱性をハザード強度（PGV）に対する構造物の損傷確率（地震フラジリティ曲線）として表現する [5)]．損傷度は無損傷および大破とし，100 波の地震波 [3)]を振幅調整したものを入力する非線形動的解析を行い，モンテカルロ法（以下，MCS）より，条件付損傷確率を算出し，耐震補強前後での 2 種類の地震フラジリティ曲線を得る．地震ハザード曲線とフラジリティ曲線より各橋梁の損傷確率が算定される．橋梁の損傷による道路途絶の影響で，避難者がいずれの避難施設へも避難不可能となる確率（孤立確率）を算出できる．

(4) 避難路上の橋梁の損傷を考慮した津波避難シミュレーションと避難所要時間マップの構築

グラフ理論によりモデル化した道路ネットワークに対して，地震動により大破と判定された道路橋を排除することで，ネットワークの機能性（接続性）の低下を考慮する．津波避難シミュレーションでは，避難所要時間として，30 mメッシュ毎にそこから最も近い津波避難施設への移動に要する時間を Dijkstra法[6)]により算定する．これを避難者の避難開始時間および歩行速度に関する不確定性，および避難路上にある全ての道路橋の損傷状態を考慮した MCSを実施することで，沿岸域に住む人々の津波からの避難の完了に要する時間が避難所用時間マップとして可視化される．

(5) 津波人的被害のリスク評価

30 mメッシュごとに津波到達時間と避難所要時間を比較することにより，人的被害のリスク評価を行う．具体的には，全確率の定理の考えに基づき，断層運動，道路橋梁の損傷，および避難行動に係る不確定性を全て考慮した上で，各メッシュ内に位置する避難者の避難失敗確率が算定される．なお，本研究では，この30 mメッシュ内でのハザード環境は一様と見なしていることから，そのメッシュ内の全員が避難に成功する，あるいは失敗することになる．そして，面的に算定した避難失敗確率とメッシュ内の人口を乗ずることで，メッシュ毎に津波人的被害リスクの期待値を算定し，その総和から対象地域における人的被害とその発生確率の関係（津波人的被害のリスクカーブ）を得る．

(6) 津波人的被害リスクを最小化するための避難路上にある道路橋の耐震補強戦略

防災予算の制約下における人的被害リスクの低減を目的とした最適化問題を解くことで，耐震補強を実施すべき避難路上にある道路橋および津波避難タワーの適切な新設位置を同定する．なお，避難タワーの配置により，そこに至る避難路に位置する橋梁

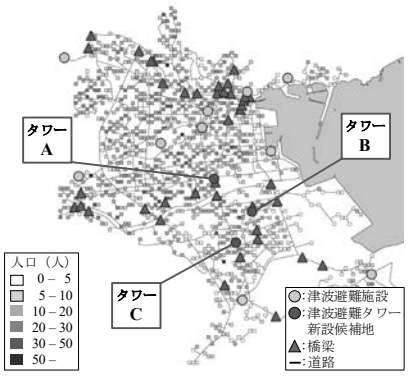


図-2 尾鷲市の解析モデル

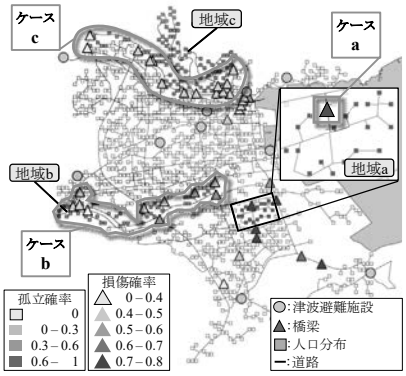


図-3 橋梁の大破となる確率と孤立確率

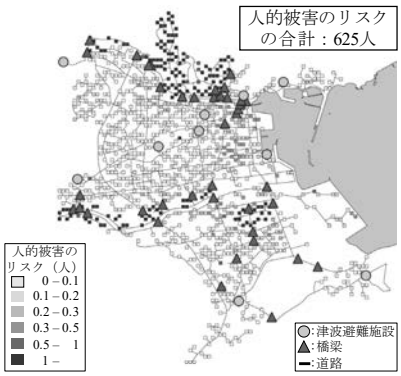


図-4 人的被害のリスクの期待値

の最適な補強位置も変化するため，津波避難タワーの新設位置および橋梁の耐震補強を実施する箇所の選定は，同時に行わなければならず，この最適化問題を解くのは容易ではない．本研究では，簡単化のため，新設する津波避難タワーや補強対象橋梁の候補をあらかじめ定め，その中での最適な組み合わせを最適化問題の解とする仮定を設けた．

防災予算の制約条件下において，対策による純便益の最大化を目的とした最適化問題は以下の式(1)～(4)で表せられる．

$$l_t, l_b = \arg \max_{l_t, l_b \in L_t, L_b} \{N_B(l_t, l_b)\} \tag{1}$$

$$N_B = v_l \times r_{vic}(l_t, l_b) - C \tag{2}$$

$$C = c_t \times n_t + c_b \times n_b \tag{3}$$

$$subject\ to \quad B \geq C \tag{4}$$

ここに，l_tは最適な津波避難タワーの配置，l_bは最適な橋梁の補強配置，N_Bは純便益，v_lは1人あたりの統計的生命価値，r_{vic}は事前対策による人的被害者の減少量，Cは事前対策に要する総費用，c_tは津波避難タワー1本あたりの建設費，n_tは新設する津波避難タワー数，c_bは橋梁1本あたりの耐震補強費，n_bは耐震補強する橋梁数，Bは防災予算である．

3. ケーススタディ

南海トラフ地震の発生を前提として（その発生確率は1.0），**図-2**の三重県尾鷲市の沿岸部を対象に提案手法を適用する．ただし，本ケーススタディに用いる橋梁は架空のものであり，道路ネットワークについても実際のものを一部，簡単化している．**図-1**に示す提案手法は，断層運動の不確定性を考慮するため，各メッシュで生じる地震や津波のハザード強度は確率的に変動する（以降，確率論ケース）．一方，比較のため，最大の地震動と津波が作用する場合の解析も併せて実施する（以降，最大ケース）．この条件では，各メッシュで生じる地震動と津波強度の値は確定値となる．避難所要時間を算定する津波避難シミュレーションでは，避難者の避難開始時間は地震発生後，平均600秒，標準偏差100秒，また，歩行速度は平均1.34 m/s，標準偏差0.26 m/sの正規分布にそれぞれ従うとした[7]．

(1) 道路橋の損傷が津波人的被害に及ぼす影響

図-3に，地震動により各橋梁が大破となる確率と，各メッシュに位置する避難者の孤立確率を示す．孤立する恐れがある地域は，地域a～cであり，避難者は橋梁の損傷により避難施設への移動が妨げられ，津波到達までに避難が完了できない．多くの人的被害が生じる恐れがあり，これらの地域につながる橋梁は耐震補強の優先度が高いと言える．

図-4に津波人的被害リスクの期待値を示す．孤立しやすい地域a～cでは，海岸から等距離にある周辺地域と比較して人的被害リスクが大きい．**図-5**に津波人的被害のリスクカーブを示す．地震動による橋梁の損傷を考慮しない場合，津波人的被害リスクを大きく過小評価することが分かる．

(2) 事前対策の最適化

津波避難タワーの新設候補地は**図-2**に示す3地点とした．また，橋梁の耐震補強に関しては，孤立しやすい地域a，b，およびcと隣接地域を結ぶ橋梁群として，**図-3**に示すケースa（1本），ケースb（10本），およびケースc（14本），および南海トラフ地震が発生するとの条件下で地震損傷確率が0.6以上となる橋梁のケースd（11本）を候補とした．津波避難タワーの各設置数に対する配置の全組み合わせ

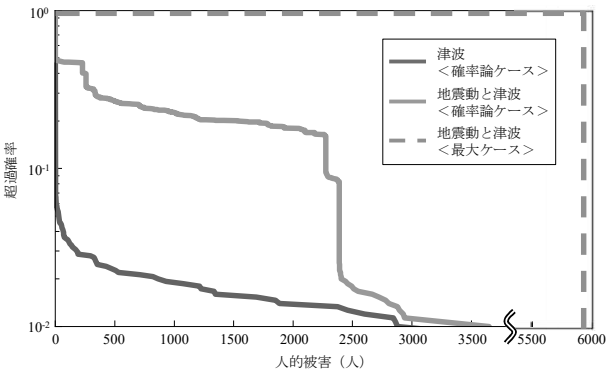


図-5　津波人的被害のリスクカーブ

表-1　想定するハザードの規模が最適解に与える影響

		与条件である防災予算（億円）				
		1.75~2	2~2.25	2.25~2.5	2.5~2.75	2.75~3
確率論ケース	最適解	B-a	B-a	B-a	B-b	B-c
	純便益（億円）	614.1	614.1	614.1	692.0	785.1
	人的被害リスク（人）	457.9	457.9	457.9	398.8	386.8
最大ケース	最適解	C-a	C-a	C-a	C-b	C-c
	純便益（億円）	1730	1730	1730	1742	1976
	人的被害（人）	5169	5169	5169	5169	4976

7通りと，耐震補強候補の橋梁群4通りの計28通りの組み合わせに対して津波人的被害リスクを計算し，純便益が最大となる組み合わせが最適解となる．

式(3)における津波避難タワー1本あたりの建設費c_tを1.52億円[8]，橋梁の耐震補強は，橋脚への鋼板巻き立てを想定し，鋼板とフーチングはアンカー筋を介して一体化されるとした．橋脚1本あたりの耐震補強費c_bは1,000万円[9]とした．式(2)における統計的生命価値v_lは1人あたり2.13億円[10]とする．

表-1に，各防災予算の制約下における橋梁の耐震補強位置，および津波避難タワーの設置場所の最適な組み合わせを示す．**表-1**において，最適解の欄の記号は，初めの大文字が津波避難タワーの配置で，次の小文字が補強対象の橋梁群ケースを示す．**表-1**より，防災予算の額が大きくなるのに伴い人的被害リスクは減少することが確認できる．確率論ケースの場合，津波避難タワー配置は，最も海岸線近くに位置するBが最適であり，補強橋梁群は，予算増額に伴いa，b，そしてcと補強する橋梁本数が増加するように変化する．多くの橋梁を耐震補強することで，道路ネットワークの接続性が保たれ，津波人的被害のリスクが低減されることが示された．さらに，確率論ケースの最適解B-cに対し，最大ケースでは津波が陸域に遡上するまでに要する時間が短いため，より内陸部に位置するCが津波避難タワーの最適位置となり，両者で異なる結果となった．これは，従来の最大規模のハザードを想定する検討に対し，断層運動の不確定性を考慮した確率論的ハザード評価では，限られた予算制約下において発生可能性の高い津波に対する対策が優先される結果である．

4. まとめ

本研究では，南海トラフ地震の影響地域において，津波避難タワーに至る避難路上にある道路橋の地震動による損傷を考慮した上で，津波人的被害リスクを推定し，その低減に向けて耐震補強すべき橋梁位置を同定する手法を提案した．

提案手法のケーススタディから，道路橋の耐震補強は，単に地震後のネットワークの機能性を維持するばかりでなく，地域住民の津波避難において重要な役割を果たしており，その観点からの耐震補強戦略が求められることを示した．

参考文献

1) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン，2005.
2) Bondy, J. A. and Murty, U. S. R.: *Graph theory with applications*, Palgrave Macmillan Press, 1977.
3) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：強震断層モデル編－地震断層モデルと震度分布について－，2012.
4) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：津波断層モデル編－津波断層モデルと津波高・浸水域等について－，2012.
5) 青木康貴，布施柚起，石橋寛樹，秋山充良，越村俊一：地震動と津波を受ける橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響の確率論的評価手法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.78，No.4，I_127-I_137，2022.
6) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, pp.269-271, 1959.
7) 牧野嶋文泰，今村文彦，安倍祥：多数シナリオ津波避難シミュレーションによる確率論的避難安全性の評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73，No.2，I_1513-I_1518，2017.
8) 高知県黒潮町：黒潮町防災子ども安全まちづくりの推進（重点）（防災・安全），2021.
9) 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.
10) 内閣府政策統括官：平成 23 年度交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書，2012.