

道路ネットワークの地震リスク及び機能損失の
最小化を目的とした橋梁の耐震設計法に関する基礎的研究

○早稲田大学 学生会員 野上雄介 早稲田大学 正会員 秋山充良

1. はじめに

近年、参考文献1) に見られるように、地震リスクを含めたトータルコストの最小化を実現できる耐震設計法が検討されている。地震リスクの表現には、様々な計算方法が提案されているが、一次近似としては、地震時損傷確率と地震により構造物が損傷することにより発生する影響度の積とした期待値がある。ここで特に問題となるのは、対象を構造物単体からそれを含むネットワークに拡張すると、影響度の評価が困難となる点にある。構造物の損傷がネットワークに与える影響の大きさをコスト換算することは相当に難しい。そこで、例えば、道路ネットワークを対象にした場合、無理にコスト換算するのではなく、複数の目的関数や制約条件を設定し、構造物が置かれる状況に応じて最適解を見出す試みも行われている²⁾。影響の全てをコスト換算する場合に比べ、ネットワークに付与したい性能を直接的に考慮することが可能となる。

そこで本検討では、地震後の道路ネットワークの機能低下をある閾値以内に抑え、かつ、道路ネットワーク内にある橋梁の建設に係るコストを最小化できる橋梁の耐震設計法に関する基礎検討を行う。道路ネットワークの機能の大小は、地震後に確保できる交通容量として表現する。

2. 解析対象道路ネットワークと解析条件

本研究では、トータルコストTCを式(1)で定義する。

$$TC = C_{INS} + \sum P_{fi} \times C_{REi} \tag{1}$$

ここに、 C_{INS} は初期建設コスト、 P_{fi} は地震時の損傷確率、 C_{REi} は損失コストである。

式(1)の最小化問題を単独で解く場合に加え、地震後に道路ネットワークで確保できる交通容量の損失が地震前の20%以下とする制約条件を加える場合を検討する。本研究では、基礎検討のため、非常に簡単な図-1に示す道路ネットワークを対象にする。この道路ネットワークは4つの橋梁を含んでいる。各橋梁の地震前に確保している交通容量も図示している。交通の流れは、地点Iから地点IIの一方方向に限定する。4つの橋梁は、何れも単柱式RC橋脚を持ち、地震時の損傷はこの橋脚のみに発生すると仮定する。RC橋脚は一質点系にモデル化する。RC橋脚の設計変数は、降伏震度 K_y と固有周期 T の2つとする。降伏震度 K_y は、 $K_y=0.1, 0.4, 0.7, 1.0$ 、および固有周期 T は、 $T=0.5$ 秒、 1.0 秒の計8パターンを考え、橋梁A～D

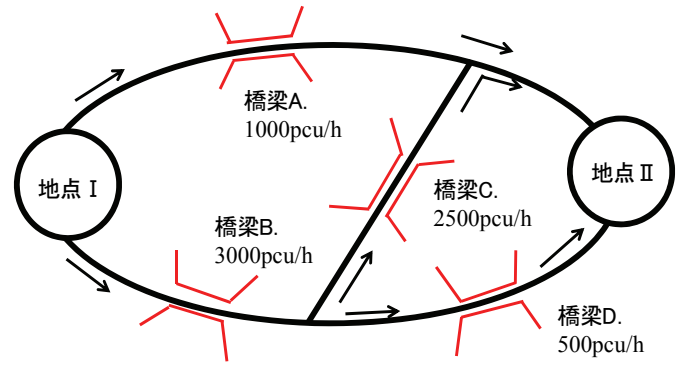


図-1 道路ネットワークモデル

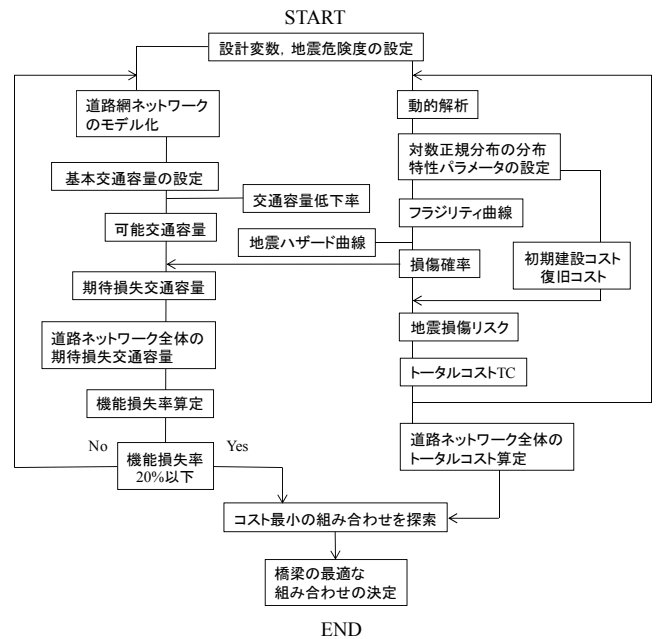


図-2 計算フロー

に対して、地震後の交通容量の低下が地震前の20%以下を確保でき、かつ式(1)を最小にする最適な K_y と T の組み合わせを探索する。具体的な計算フローを図-2に示す。また、図中に示す交通容量の定義を表-1にまとめて示す³⁾。なお、式(1)の C_{INS} は、過去の工事記録を参考に、降伏震度 K_y と固有周期 T の関数とした近似式を作成した。地震後の交通容量は、図-3に示すように、橋梁の応答の大きさに応じて減少させる。期待損失交通容量は、地震後に損傷レベル1～3とな

Key Words 地震リスク評価, 道路ネットワーク, 機能損失, 耐震設計, 橋梁

連絡先：〒169-85 55 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL：03 (5286) 2694

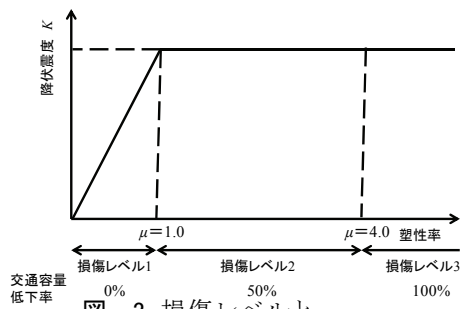


図-3 損傷レベルと交通容量低下率の定義

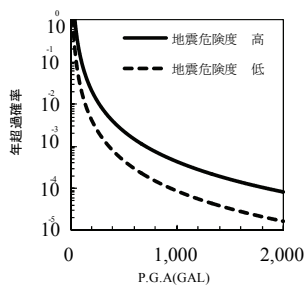


図-4 地震ハザード曲線

表-1 交通容量等の定義

基本交通容量(pcu/h)	橋梁の常時交通容量
可能交通容量(pcu/h)	基本交通容量(pcu/h) × 交通容量低下率(%) 100
損失交通容量(pcu/h)	基本交通容量(pcu/h) - 可能交通容量(pcu/h)
期待損失交通容量(pcu/h)	地震リスク評価に基づく損失交通容量
機能損失率(%)	期待損失交通容量(pcu/h) × 100 基本交通容量(pcu/h)

る確率、損傷レベル1～3に応じた交通容量低下率、そして地震前に確保している交通容量、の組み合わせにより算定される。なお、橋梁の地震後の損傷状態と確保できる交通容量の関係は、これほど簡単ではなく、今後、支承の影響も含めて詳細な検討が必要である。式(1)のトータルコスト、および図-2の期待損失交通容量の計算に必要な地震ハザード曲線は、図-4の2つを想定した。

3. 解析結果

図-5に、橋脚の降伏震度と固有周期による式(1)のトータルコストの算定結果を示す。地震危険度が高い場合には、地震リスクが大きくなり、結果としてトータルコストが大きくなる。また、地震危険度が大きい場合には、下に凸の形状が得られ、今回の試算条件では、降伏震度 $K_y=0.4$ と固有周期 $T=0.5$ の組み合わせのときにトータルコストが最小化される。一方、地震危険度が小さい場合には、降伏震度に対して単調にトータルコストが増加する結果となった。つまり、地震リスクが初期コストに対して非常に小さいため、今回の試算で最小の降伏震度である $K_y=0.1$ を与えれば既に地震リスクは無視できる大きさであることを意味している。次に、地震前に確保している交通容量からの損失を20%以内に抑える制約条件を加え、そのもとでコスト最小化を実現できる橋梁A～Dの降伏震度と固有周期の組み合わせを探索した。結果を表-2に示す。図-1のネットワークから想像されるように、分岐点前に位置し、かつ大きな交通容量を持つ橋梁Bが最も大きな降伏震度が必要となり、交通容量が小さく、かつ橋梁Cで代用できる橋梁Dには小さな降伏震度を与える差別化がなされている。つまり、地震危険度が大きい場合には、単にコスト最小化だけに配慮して橋梁を耐震設計すると、地震後に確保される交通容量は相対的に小さくなるリスクを背負うことを解析結果は示している。地震危険度が高い地域にある道路ネットワーク内の橋梁の耐震設計では、地震後のネットワークの状態への配慮が必要である。

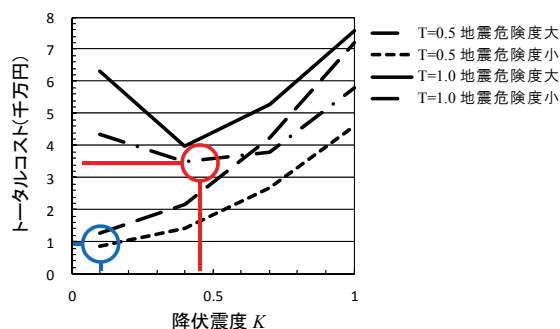


図-5 トータルコスト算定結果

表-2 橋梁の最適配置一覧

	地震危険度	
	低	高
橋梁A	$K=0.1$ $T=0.5$	$K=0.7$ $T=0.5$
橋梁B	$K=0.1$ $T=0.5$	$K=1.0$ $T=0.5$
橋梁C	$K=0.1$ $T=0.5$	$K=0.7$ $T=1.0$
橋梁D	$K=0.1$ $T=0.5$	$K=0.4$ $T=0.5$

4. まとめ

従来の地震リスク最小化問題に、地震後に確保できる交通量の制約条件を加えることで、地震後に道路ネットワークに求めたい性能を直接付与できる。既存の道路ネットワークを対象にする場合には、必要な補強の程度や、ネットワーク内の耐震補強の優先度の同定に役立つ。今後、本検討を、より複雑な道路ネットワークに拡張し、また計算過程で簡単化のために設けている仮定を見直す検討を続けることで、実際の問題に応用していきたい。

参考文献 1) 岡本大, 室野剛隆, 坂井公俊: トータルコストを照査指標とした鉄筋コンクリート構造物の復旧性照査法, 鉄道総研報告, Vol25, pp25-30, 2011. 2) Bocchini, P. and Frangopol, D.M.: Optimal Resilience- and cost-based post disaster intervention prioritization for bridges along a highway segment, Journal of Bridge Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 117-129, 2012. 3) 社団法人日本道路協会: 道路の交通容量, 平成15年11刷。