

道路ネットワークの地震後の機能低下を 考慮した橋梁の耐震設計法に関する基礎的研究

野上雄介¹・秋山充良²

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）

1. はじめに

近年、参考文献^{1), 2)}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。構造物が損傷することにより発生する影響度は、直接的には構造物を改めて再構築するための設計・建設費用、間接的には構造物が使用できないことにより発生する負の影響などをコスト換算する。そして、このようにして求めた地震リスクと、構造物の初期建設費用、あるいは維持管理费用や廃棄費用などを足したトータルコストを最小化できる橋梁の設計が検討されている。

一方で、対象を構造物単体からそれを含むネットワークの問題に拡張すると、特に影響度の評価が難しくなる。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困難である。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。負の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。

そこで本研究では、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。この目的のため、簡単な道路ネットワークを想定し、提案する設計フローを用いることで得られる設計解と、図-1に示すような従来の設計解（地震リスク最小化を実現する設計解）との比較を行う。なお、道

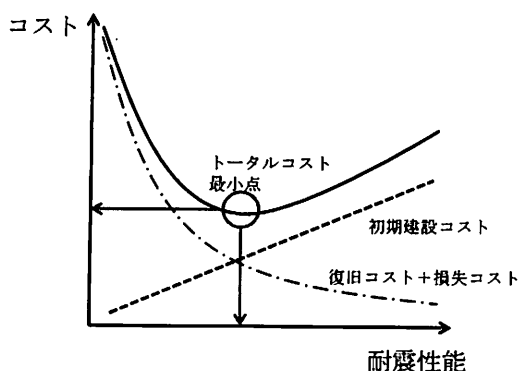


図-1 トータルコスト最小化に基づく最適解の探索

路ネットワークの機能の大小は、本研究では、地震後に確保できる交通容量の大きさとして表現する。

2. 道路ネットワークと解析条件

本研究では、地震リスクを含めたトータルコスト TC を式(1)で定義する。

$$TC = C_{INS} + \sum P_{fi} \times C_{RE} \quad (1)$$

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_{RE} は損失コストである。本検討では、簡単化のため、 C_{RE} は C_{INS} の10倍と仮定した。

式(1)では、地震に対して脆弱性の高い構造物を設計すると、 P_{fi} が増加する一方で、 C_{INS} は減少する。さらに式(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量を制限する制約条件を加える。後述の例題では、地震後も地震前の交通容量の80%を確保することを制約条件とした。

本研究では、基礎検討のため、図-2と図-3に示すように、地域A・地域Bから構成される仮想の道路ネットワークIとII（以下、それぞれタイプIとII）を対象にする。この道路ネットワークはそれぞれに4つの橋梁を含んでいる。各橋梁の地震前に確保して

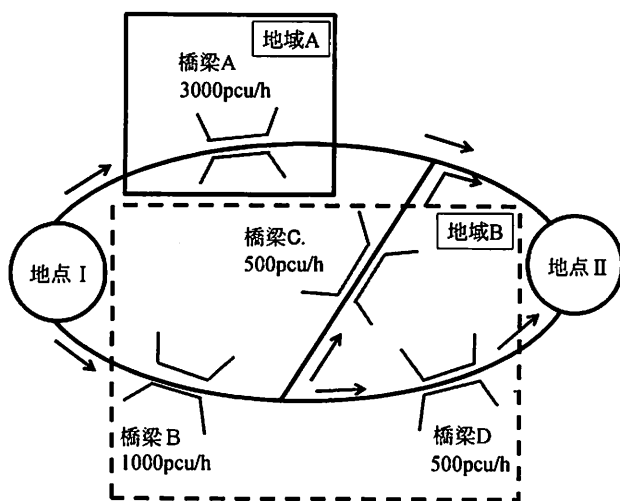


図-2 道路ネットワーク I

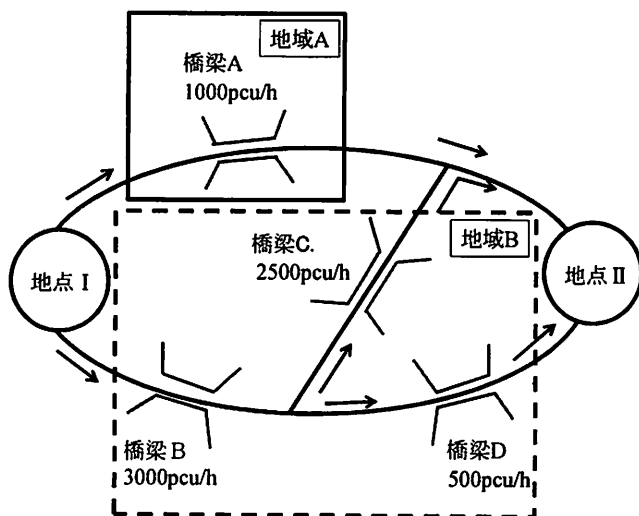


図-3 道路ネットワーク II

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橋脚を有し、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 と固有周期 T の2つとする。降伏震度 K は、 $K=0.1, 0.4, 0.7, 1.0$ 、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に対して、地震後の交通容量の低下を地震前の20%以下に抑え、かつ式(1)を最小にする最適な K と T の組み合わせを探索する。具体的な計算フローを図-4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 と固有周期 T の関数とした近似式を作成している。地震後の交通容量は、図-5に示すように、RC橋脚の応答の

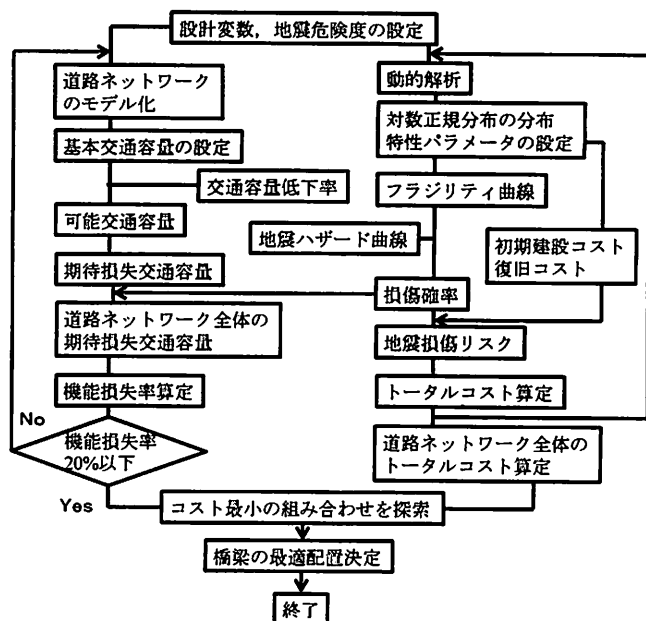


図-4 計算フロー

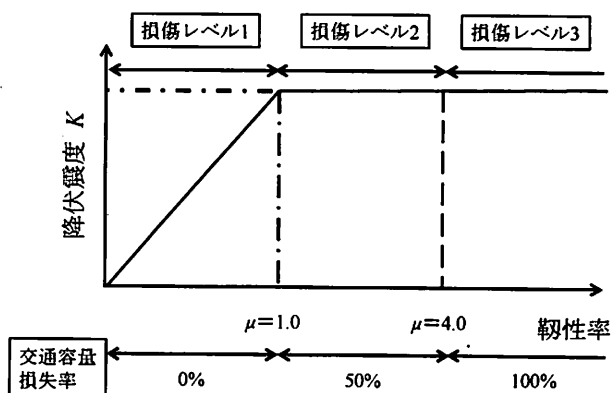
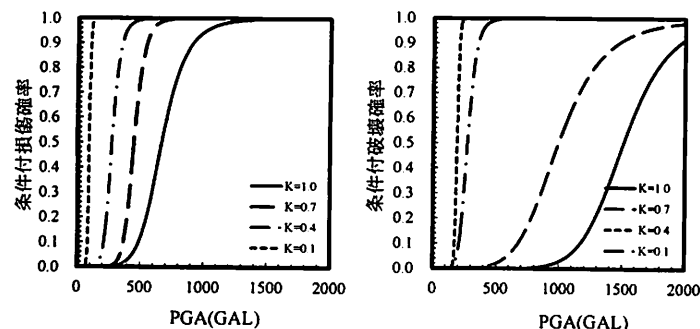


図-5 損傷レベルや機能損失率の定義

大きさに応じて減少させる。RC橋脚の地震時の応答が部材降伏点に達しない損傷レベル1の場合には、地震後に確保できる交通容量は地震前の100%とする。塑性率1～4の地震時応答が生じた場合には、地震前の50%の交通容量が確保できるとし、塑性率4を超える地震時応答が生じた場合には、橋梁は供用できない状態になると仮定した。本検討で用いる8パターンの橋梁から得られるフラジリティ曲線を図-5(a)～(d)に示す。これらを基に、期待損失交通容量は、地震後に損傷レベル1～3となる確率、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、地震後に確保できる交通容量は、RC橋脚に生じる塑性率の大きさだけではなく、本来は、例えば、支承の損傷の程度にも大きく影響される^{4)～6)}。

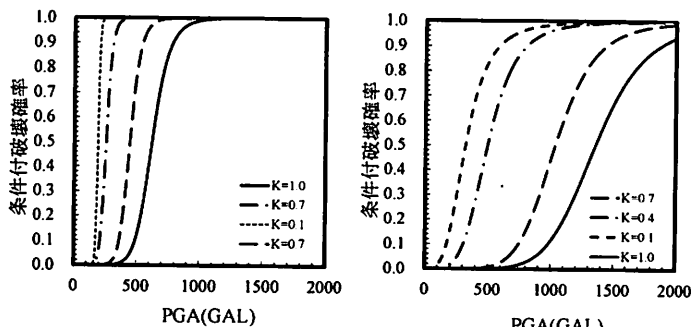


(b) $T=0.5$

限界状態：
損傷レベル1と2の境界

(a) $T=0.5$

限界状態：
損傷レベル2と3の境界



(c) $T=1.0$

限界状態：
損傷レベル1と2の境界

(d) $T=1.0$

限界状態：
損傷レベル2と3の境界

図-6 フラジリティ曲線の比較

今後、橋梁の損傷の程度と地震後に確保できる交通容量の関係についてのより詳細な検討が必要である。さらに、橋梁以外、例えば盛土部分の損傷などを道路ネットワークで確保できる交通容量の推定時に考慮する必要がある。

3. 解析結果

式(1)のトータルコスト、および図-4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-7に示すように、地震危険度が高い場合と低い場合の2つを想定した。まず、道路タイプI・IIについて、地域Aと地域Bの地震危険度がともに高い、あるいは低いと仮定したときのトータルコストをそれぞれ算定した。結果を図-8に示す。

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、地震危険度が高い場合には、下に凸の形状が得られ、今回の試算条件では、降伏震度 $K=0.4$ 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、地震危険度が低い場合には、降伏震度 K に対して単調にトータルコストが増加

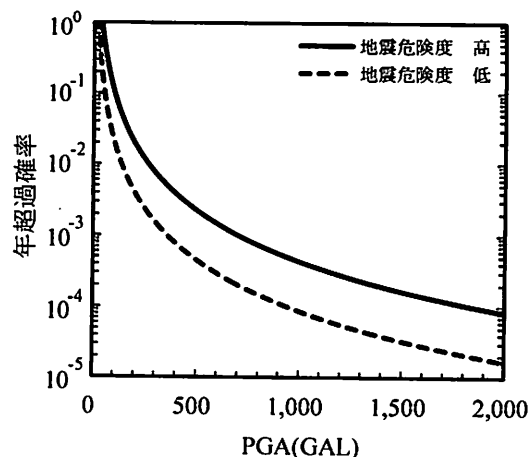


図-7 地震ハザード曲線

表-1 交通容量等の定義

基本交通容量 (pcu/h)	橋梁の常時損失交通容量
可能交通容量 (pcu/h)	基本交通容量 (pcu/h) $\times$ 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) / 基本交通容量 (pcu/h) $\times$ 100

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、今回の試算では、最小の降伏震度である $K=0.1$ 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、道路タイプI・IIにおいて、地域Aと地域Bの地震危険度が高い、あるいは低い、となる計8種類の組合せのもとで検討を行った。そして、それぞれの組合せにおいて、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下において、トータルコストの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。結果の一覧を表-2および表-3に示す。

表-2および表-3より、図-2のネットワークでは、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、一方で交通容量が小さく、かつ橋梁Cで代用できる橋梁Dには小さな降伏震度が与えられるなど、道路ネットワーク内にある橋梁の耐震性能に差別化がなされている。つまり、地震危険度の高い地域において橋梁の耐震設計を行う際には、道路のネットワーク特性を考慮して耐震設計を行うことの必要性が示唆されている。

また図-3のネットワークにおいては、大きな交通容量を持つ橋梁Aにおいて最も大きな降伏震度が必要となり、交通容量が小さい橋梁B～橋梁Dには小さな降伏震度が割り当てられるなど、この場合も各橋

梁が負担する交通容量に応じた設計解となっている。

次に、表-2および表-3の条件で得られるトータルコストと、単純にコスト最小化のみを考え、機能低下を考慮しない場合に得られるトータルコストの比較を行う。比較結果の一例として、道路タイプIにおいて、地域A・Bが共に地震危険度が低い/高い場合における算定結果を図-9に示す。

地震危険度が低い場合には、耐震性能の最も低い降伏震度0.1の橋梁が設計解となり、単純なコスト最小化の場合と同等の解になるため、コスト優先で橋梁の耐震設計を行うことが出来る。

一方、地震危険度が高い場合には、単純にコスト最小化だけを目的と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が相当に小さくなるリスクを背負うため、ネットワークの状態（損傷状態や交通容量の低下量）に配慮した橋梁の耐震設計が求められる。

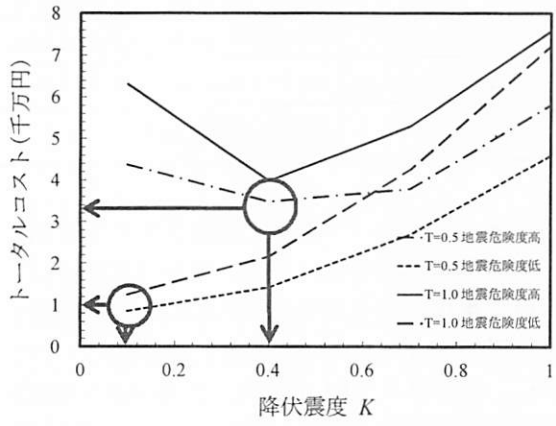


図-8 トータルコストと降伏震度の関係

表-2 道路タイプIにある各橋梁の最適解の一覧

		地震危険度（地域A・地域B）			
		（高・高）	（低・高）	（高・低）	（低・低）
橋梁A	K	0.7	0.1	0.4	0.1
	T	0.5	0.5	1.0	0.5
橋梁B	K	1.0	0.7	0.4	0.1
	T	0.5	0.5	0.5	0.5
橋梁C	K	0.7	0.7	0.4	0.1
	T	1.0	0.5	0.5	0.5
橋梁D	K	0.4	0.7	0.1	0.1
	T	0.5	0.5	1.0	0.5

表-3 道路タイプIIにある各橋梁の最適解の一覧

		地震危険度（地域A・地域B）			
		（高・高）	（低・高）	（高・低）	（低・低）
橋梁A	K	0.7	0.1	0.7	0.1
	T	1.0	0.5	0.5	0.5
橋梁B	K	0.4	0.7	0.1	0.1
	T	1.0	0.5	0.5	0.5
橋梁C	K	0.4	0.7	0.1	0.1
	T	1.0	0.5	0.5	0.5
橋梁D	K	0.4	0.7	0.1	0.1
	T	1.0	0.5	0.5	0.5

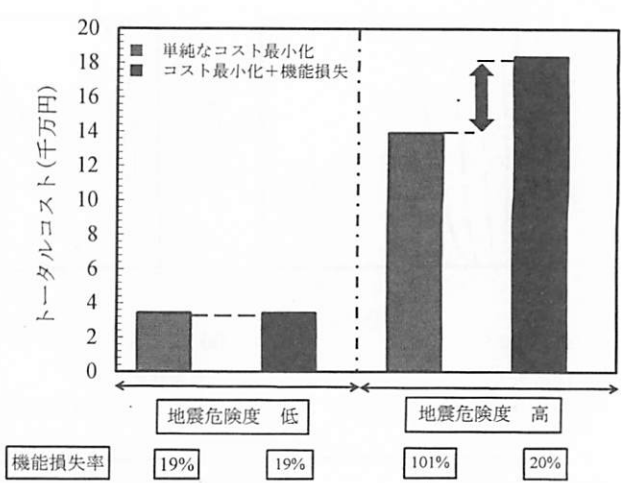


図-9 トータルコスト比較結果

4. まとめ

橋梁の耐震設計では、地震後の構造物の状態と、それによって生じるネットワークの機能低下に配慮する必要がある。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容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、本手法をより複雑な道路ネットワークに応用し、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、実際の問題に適用していきたい。

参考文献

- 1) 岡本大, 坂井公俊, 室野剛隆: トータルコストを照査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, Vol. 25, No. 2, pp. 25-30, 2011.
- 2) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: ライフサイクルコストを用いた鉄道施設の耐震補強優先度判定法, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 2, pp. 5-10, 2011.
- 3) (社)日本道路協会: 道路の交通容量, 2003.
- 4) Kawashima, K., Kosa, K., Takahashi, Y., Akiyama, M., Nishioka, T., Watanabe G., Koga, H. and MatsuzakiH.: Damage of Bridges during 2011 Great East Japan Earthquake, Proc. 43rd Joint Meeting, US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, Tsukuba Science City, Japan, 2011.
- 5) Padgett, J.E. and DesRoches, R.: Retrofitted bridge fragility analysis for typical classes of multispan bridges, Earthquake Spectra, Vol. 25, No.1, 117-141, 2009.
- 6) 山田善一, 野田茂, 五十嵐晃: 震後の道路交通機能の実用的な復旧予測シミュレーション, 土木学会論文集, I-9/392, pp. 385-394, 1988.