

損失の増幅効果を考慮した都市内高速道路高架橋における要求耐震性能の試算

Anti-quake Performance of Elevated Roads of Urban Expressways considering the Progressive Effect of Loss

家田 仁*, 柴崎隆一**, 加藤 渉***, 斎藤功次****

By IEDA Hitoshi*, SHIBASAKI Ryuichi**, KATO Wataru***, SAITO Koji****

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災を契機に、発生する確率は極めて低いが大きな強度をもつ地震動をレベル2地震動と定義し、インフラ施設の耐震基準の想定地震動とするようになった¹⁾。レベル2地震動に関しては、インフラ施設の置かれている使用環境から決定される「重要度」に応じて耐震性能を要求することが必要である。ここで、その「重要度」をどのようにして合理的に決定すべきかという問題に対しては、施設の置かれた環境に依存して発生しうる損害およびその確率とそれを軽減するための費用との比較考量によって、費用便益分析的な方法を用いるのが客観的かつ合理的であろう²⁾。しかし、大地震のように甚大な被害をもたらす災害においては、限られた資源しか持たない個人や国家にとっての損失がカタストロフィックな効果をもつものと考えられ、単純に金銭的な単位で代表された損害の積み上げによるのでは、損失の過小評価となるおそれがある。

そこで筆者らは、こうした実質的な損失の増幅を損失の増幅効果と呼び、この損失の増幅効果を考慮した費用便益分析の枠組を示し、簡単な仮想ネットワーク上で耐震性能の試算を行うことによって、損失の増幅効果とネットワーク性の考慮が道路高架橋の耐震性能の合理的な決定に資することを示した³⁾。しかし既存の研究においては、少人数の専門家に対して簡単なアンケート調査を行うという便宜的な損失の増幅効果の計測であった。また、仮想ネットワーク上ででのみの試算であったために、現実の道路ネットワークに本手法を適用しても妥当な結果が得られるかどうかは確認されていない。そこで本稿では、専門家等に対してより本格的なアンケート調査を行うことによって損失の増幅効果を計測し、また、筆者らの提案する手法を、東京・福岡といった実際の都市高速道路網における高架橋の最適耐震性能の試算に適用することによって、本手法の妥当性を確認することとする。

2. 損失の増幅効果を考慮した道路高架橋の要求耐震性能決定法

本研究で提案する道路高架橋の要求耐震性能決定方法は、道路高架橋の耐震性能が向上することによる被害軽減便益と、耐震性能を向上させるために必要な耐震強化費用との比較を行う費用便益分析を基本としている。ここで、損失の増幅効果を考慮した被害額関数についての理論的な考察は別稿に譲る。また、本研究では地震発生確率を固定してアンケート調査や試算を行うため、災害リスクの生起頻度に関する認知特性は考慮しないで議論を進める。

(1) 道路高架橋の耐震性能の設定

道路高架橋の耐震性能としては、既存の研究³⁾と同様に、PC連続箱桁が兵庫県南部地震クラスの地震動（最大水平加速度1000gal程度）によって受ける損傷の度合いを基準に、崩壊・機能喪失・機能維持・無損傷・パッシブ制震の5段階の耐震性能グレードを設定し、それぞれのグレードごとの建設コスト・復旧方法・復旧費用・復旧日数等を、既存の研究⁴⁾や専門家ヒアリング等によって推定した。(表1参照)

(2) 最適要求耐震性能の決定方法

すべてのリンクの耐震性能をグレード0とする場合を基準として、高架橋リンク j ($j=1\sim N$)の耐震性能をグレード i に向上する行為の実質的純便益NPVは、(1)式のように表される。

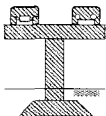
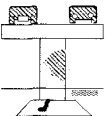
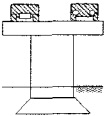
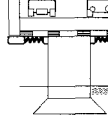
$$NPV = \sum_{t=1}^{T_e} \frac{P}{(1+r)^t} \left\{ g \left(\sum_{j=1}^N D_j(G_0) \right) - g \left(\sum_{j=1}^N D_j(G_i) \right) \right\} - \left(\sum_{j=1}^N C_j(G_i) - \sum_{j=1}^N C_j(G_0) \right) \quad (1)$$

ここで、 P : 地震発生確率、 T_e : 高架橋の供用期間(50年)、 r : 社会的割引率(4%)、 N : 被災する高架橋数、 $D_j(G_i)$: 高架橋 j の耐震レベルをGRADE i に設定した場合の被害額、 $C_j(G_i)$: 高架橋 j の耐震レベルをGRADE i に設定した場合の耐震強化費用、 $g(\cdot)$: 増幅効果を考慮した被害額認知関数。

意思決定者は、(1)式で表されるNPVが最大となるように各高架橋リンクの耐震性能グレードを決定するものとする。

Keywords: 防災計画, ネットワーク交通流, 経路選択, 損失の増幅効果 *正会員, 工修, 東京大学社会基盤工学専攻交通研究室教授 **正会員, 工博, 東京大学社会基盤工学専攻助手 ***学生会員, 東京大学社会基盤工学専攻交通研究室 ****正会員, 工修, 元東京大学社会基盤工学専攻交通研究室 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, TEL:03-5841-6116, FAX:03-5841-8507, shiba@trip.tu-tokyo.ac.jp)

表 1 道路高架橋の耐震性能の設定

耐震性能	GRADE 0 崩壊	GRADE 1 機能損傷	GRADE 2 機能維持	GRADE 3 無損傷	GRADE 4 制震
被災時の状態					
設計水平加速度	800gal以下	800～1000gal	1000～1200gal	1200gal以上	1200gal以上 +制震構造
建設費(億円/km)	76	84	92	101	107
復旧費(億円/km)	91	8.9	1.5	0	0
復旧期間(日)	196	78	13	0	0
利用者の死亡率(%)	100%	50%	10%	5%	0%

(3) 被害額の評価方法

道路高架橋の損傷により発生する被害アイテムとして、①利用者死亡、②近隣住民死亡、③利用者負傷、④近隣住民負傷、⑤高架橋損傷、⑥近隣建築物損傷、⑦車両損傷、⑧迂回による時間損失の 8 項目を想定し、各被害アイテムについて、周辺人口密度や土地利用状況、生命保険統計、高架橋損傷の既存事例等に基づき貨幣換算をおこなった。詳しくは文献 5) を参照されたい。また、迂回による時間損失については、高速道路高架橋や一般道を含む道路ネットワーク上で、高架橋の損傷を考慮して OD 交通量の配分を行い、地震発生前の配分交通量と比較することにより得る。

3. 損失の増幅効果の計測

(1) 計測方法

本研究では、高架橋の耐震性能に関するアンケートを作成し、実際に道路の政策決定に携わる道路行政職員や、道路の運営を行う公団職員、あるいは橋梁・防災・社会基盤計画を専攻する大学教授および学生(計 65 名)を被験者として調査を行った。この調査では、まず地震発生確率や被災程度が異なるシナリオを 16 ケース用意し、各ケースについて 5 段階の耐震性能ごとに被害額と耐震強化費用を示し、適切だと思われる耐震性能ランクを被験者を選択させる。このようにして得られた結果を多肢選択型ロジットモデルに当てはめ、最尤法を用いて増幅効果関数のパラメータを推定した。なお、道路の運営主体が補償できる被害額の上限を一意に決定することは困難なため、ここでは道路の運営主体が「国家」であることを明示し、その財政規模の大きさは被験者の判断にゆだねることとした。また、損失の増幅効果関数については、いくつかの関数形を仮定してパラメータ推定を試みたが、その中でも最も説明力が高い (2) 式で示すべき乗関数を採用した。

$$g(D) = D + \gamma_1 D^{\gamma_2} \quad (2)$$

ここで、 γ_1, γ_2 : 未知パラメータ、 D : 金銭的被害額 (億円)。

(2) 計測結果

パラメータ推定結果を図 1 に示す。ここで得られた関数は、金銭的被害額に対して、実質損失額は増増し、その増幅効果の程度は、金銭的被害額が 1～5 兆円の範囲では、約 3 倍～6 倍となった。

また、相互扶助システムの存在が損害の増幅効果の大小に与える影響を考察するために、アンケートの前提条件における道路の運営主体を、「国家」よりも期待できる相互扶助が小さいと考えられる「首都高速道路公団」として同様の調査を行った。この結果推定された増幅効果関数も図 1 中に示す。これより、相互扶助システムが相対的に小さい場合に増幅効果が大きくなることが確認できた。

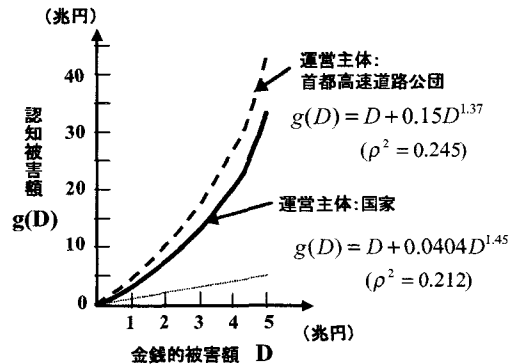


図 1 損失の増幅効果を考慮した被害額認知関数

4. 福岡市都市高速道路ネットワークに対する本手法の適用結果

はじめに、福岡市の都市高速ネットワーク (図 2 参照) に本手法を適用した例を示す。都市高速道路はすべて高架橋リンクとし、一般道は主要な国道・県道のみを選んで、道路ネットワークを簡略化 (ノード数 39, リンク数 122) した。このとき本研究は、

(1) 式で求められる NPV を最大にする各高架橋リンクの GRADE の組み合わせを求める離散的最適化問題となる。ここでは、遺伝的アルゴリズム（個体数 10、世代数 50、交叉確率 80%、突然変異率 10%）を用いてこの問題を解くことを試みた。また OD 交通量としては、平成 6 年度の道路交通センサスを市区単位でまとめたものを用い、利用者均衡原理に基づいて配分した。地震の発生確率、損失の増幅効果の考慮の有無別の試算結果を図 2 に示す。

地震の発生確率を 1000 年に一度と仮定した場合には、損失の増幅効果の考慮の有無にかかわらず、すべての高架橋において最適な耐震性能が GRADE 0（崩壊）となった。また、地震の発生確率を 100 年に一度と仮定した場合には、損失の増幅効果の考慮の有無にかかわらず、すべての高架橋において最適な耐震性能が GRADE 1（機能喪失）となった。さらに、地震の発生確率を 50 年に一度と仮定したときには、損失の増幅効果を考慮しない場合は、すべての高架橋において最適な耐震性能が GRADE 1（機能喪失）となり地震発生確率が 100 年に一度の場合と変

わらなかったが、増幅効果を考慮した場合は、14 リンク中 8 リンクにおいて耐震性能が GARDE 2（機能維持）に設定される結果となった。特に、九州自動車道と福岡市の中心である博多・天神地区を結ぶ 2 号線がすべて GRADE 2 となり、その他の路線よりも重要とされる結果となった。ここで、阪神淡路大震災後の福岡都市高速道路における実際の耐震投資は、高架橋の 7 割を GRADE 2、3 割を GRADE 1 とする補強に相当するため³⁾、この計算結果が現状に最も近いといえる。しかし、福岡市における阪神大震災級の地震発生確率は、東京などに比べると非常に小さく、約 1400 年に一度との試算結果⁷⁾も得られている。このような現状と計算結果の乖離の説明として次の 2 点が考えられる。①地震発生確率についての認知効果が存在し、耐震補強投資の意思決定者が現実の地震発生確率を過大評価している。②運営主体である福岡・北九州都市高速道路公団は財政規模が首都高速や国家よりも小さいため、地震による損害を被った場合に期待できる相互扶助（内部補填）が小さく、今回の試算で用いた国家による運営を仮定した被害額認知関数よりも損失の増幅効果が大きいことが考えられる。

5. 首都高速道路ネットワークに対する本手法の適用結果

次に、首都高速道路ネットワーク（外郭環状道路を含み、横浜地域を除く。図 3 参照）に本手法を適用した例を示す。この場合の道路ネットワークはノード数 305、リンク数 1068、高架橋リンクだけでも 97 となり、遺伝的アルゴリズム（個体数 20、世代数 100、交叉確率 80%、突然変異率 3%）によっても安定した解を得ることができないため、計算を 10 回行い、得た解の平均値によって便宜的に各高架橋リンクの最適耐震性能とした。その試算結果を図 3 に示す。

地震の発生確率を 1000 年に一度と仮定したとき、損失の増幅効果を考慮した場合には、GRADE 2（機能維持）と GRADE 1（機能喪失）がほぼ半数ずつとなり、全高架橋の平均 GRADE は 1.50 であった。一方、損失の増幅効果を考慮しなかった場合には、1/3 の高架橋において GARDE 1、残り 2/3 が GRADE 0（崩壊）となり、全高架橋の平均 GRADE は 0.33 であった。また、地震の発生確率を 100 年に一度と仮定したとき、損失の増幅効果を考慮した場合は、約 1/4 の高架橋において GRADE 3（無

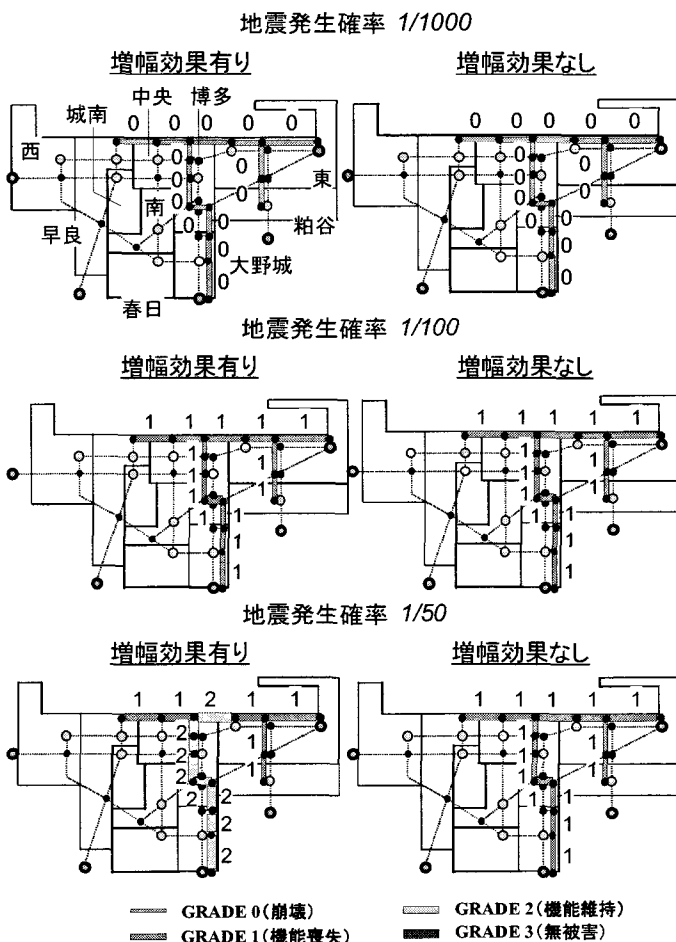


図 2 福岡都市高速道路において要求される高架橋の耐震性能

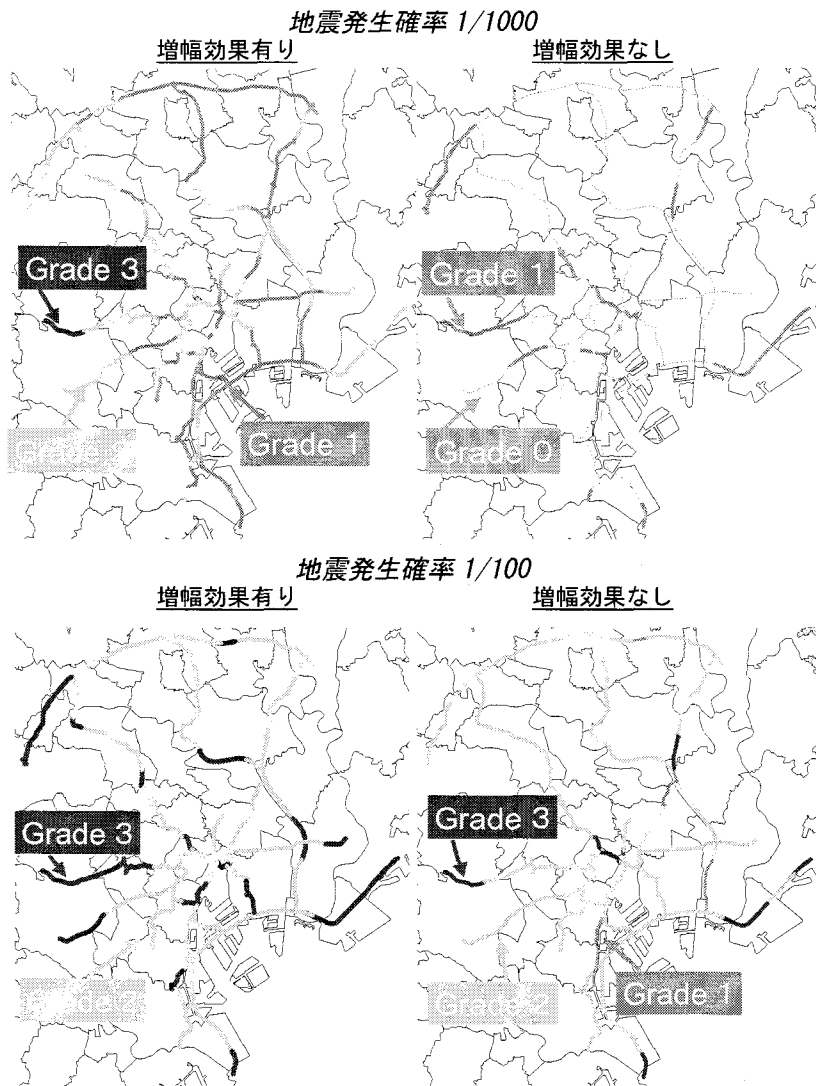


図3 首都高速道路において要求される高架橋の耐震性能

被害), 残り 3/4 が GRADE 2 となり, 全高架橋の平均 GRADE は 2.25 であった。一方, 損失の増幅効果を考慮しなかった場合には, 85% の高架橋において GRADE 2 で, 残りは GRADE 3 と GRADE 1 が半々となり, 全高架橋の平均 GRADE は 1.99 であった。実際のところ首都高速道路公団では, 阪神淡路大震災後にすべての高架橋を GRADE 2 とする耐震補強投資を行った。首都圏は, 歴史的に見ると約 100 年に一度の周期で大きな地震に見舞われているため, この地震発生確率を前提とすれば, 増幅効果を考慮しない場合の計算結果のほうが現状に近い。また, 地震発生確率を 1000 年に一度とした場合のほうが増幅効果の考慮の有無による要求耐震性能の差が大きかった。いずれにせよ, 地震発生確率が計算結果に与える影響が大きいことがわかる。

多く残されている。

参考文献

- 1) 土木学会, 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996.
- 2) 土木学会耐震設計法特別委員会 WG6 報告書, 1999.
- 3) 家田・村上・斎藤, 人の認知特性を考慮した費用便益分析とネットワーク分析に基づくインフラ施設の要求耐震性能決定法の基礎研究, 土木計画論文集・講演集, No.22(1) p543-546 1999.10.
- 4) 例えば, 庄司・藤野・阿部, 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, No.563/I-39, pp.79-94, 1997.
- 5) 斎藤, 損失の増幅効果を考慮した費用便益分析に基づく道路高架橋の要求耐震性能決定方法, 東京大学修士論文, 2000.
- 6) 柴崎・家田, 稀少確率・甚大被害現象を対象としたリスク評価における認知バイアスの計測, 土木計画学研究・論文集 2000.
- 7) Ieda, H. and Gong, L. et al., A Time-Discounting Quake Exposure Model for Network-Based Hazard Evaluation, TSSP Journal (CD-ROM), 1999.

また, 要求耐震性能を地域別に見ると, 最も要求耐震性能が高いのは, 3 号線・4 号線や湾岸線などの周辺高速道路に接続している箇所, ついで都心環状線などの都心部であり, 都心部と周辺部の中間部分が最も要求耐震性能が低い地域となった。これは, 周辺部においては災害時の代替ルートが少なくいうえに, 並行する主要国道が高架橋の直下にあることが多く高架橋の損傷により容量が大きく制約を受けるが, それよりやや都心に近い地域では, 複数の環状道路が存在するなど代替ルートが確保できるためと考えられる。

6. まとめ

本研究では, 実際に都市高速道路の要求耐震性能を計算することにより, 損失の増幅効果の考慮の有無が, 最適とされる耐震性能の差に影響を及ぼす場合があることを示した。しかし, 地震発生確率の扱い(地震の規模別の発生確率の考慮や発生確率に関する認知効果の考慮)や, 運営主体の財政規模の大小による損失の増幅効果の違いの考慮など, 今後の課題も