

人の被害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

*Fundamental Study of Required Anti-quake Performance of Infrastructure Facilities based on
Perceived Cost-Benefit Analysis and Network Analysis**

家田 仁**・村上 迅***

*By Hitoshi IEDA** and Jin MURAKAMI****

1.はじめに

近年、発生する確率は極めて低いが激しい地震動をレベル 2 地震動とし、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てきた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。しかし、その「重要度」自身をどのようにして合理的に決定すべきかは依然として課題である。また、発生確率の希少性に起因する投資効率の低さと地震動の大きさに起因する被害の甚大さとの間にトレードオフが存在することから、インフラ施設の要求耐震性能を決定することは一般に容易ではない。差し迫ったニーズから実務者が経験的にインフラ施設の重要度及び要求耐震性能を定めざるをえないのが現状である。こうした経験的なクライテリアの見直しの意味も含めて、何らかの客観的かつ合理的な分析に基づいた要求耐震性能決定法の開発が今や強く求められている。

2.将来の要求耐震性能決定法と本研究の手順

(1) 将来の要求耐震性能決定法のあり方

要求耐震性能は、対象とするインフラ施設が置かれている使用環境、具体的には周辺人口・周辺土地利用・利用量・地盤条件等、また対象施設がネットワーク性を有するものであれば、ネットワーク密度・ネットワーク形状・上記の諸条件の分布状況等によって決定されるべきものであろう。こうした決定は経済分析に基づいてなされることが望ましいが、現実の個々の施設に対してその都度分析をおこない要求耐震性能を決定することは、検討作業コスト、分析精度等の点を考慮すると、もちろん現実的ではない。

従って、交通、ライフラインなど施設別や橋梁、トンネルなど構造物別に、前述の使用条件が異なる多数のモデルケースを設定し、経済分析から要求耐震性能を決定し、その結果を積み重ね、例えばカリフォルニアにおいて用いられているような実用的な設計資料²⁾を作成しておくという方法が妥当であろう。これにより、施設の置かれている使用環境から直ちに要求耐震性能を判定することが可能となる。

(2) 本研究のポイントと手順

本研究は、将来の要求耐震性能決定法を確立するための分析法の基礎を開発することを目的とする。

基礎的方法論としては、耐震対策による追加投資費用とそれによって得られる被害軽減便益、及び地震発生確率を判断材料とした CBA (費用便益分析) を用いて、最も適切な耐震性能レベルを決定するものとする。具体的には

$$\text{期待純便益 } NPV = \left[\sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+r)^t} \right] \cdot p \cdot \Delta D - \Delta C \quad \dots\dots\dots (1)$$

p : 地震発生確率 ΔD : 被害軽減便益 ΔC : 耐震強化の追加投資額 r : 社会的割引率 N : 供用期間

を用いて評価を行うものとする。ここで ΔD 、 ΔC は、耐震性能レベルの任意のデフォルト値を基準として定める。

なお、上記の考え方は、施設設置の可否は別途 CBA 等により可と判定されたという前提の上で、それをどれほどに耐震強化すべきか判定するというプロセスが必要となる。

耐震投資における CBA に関しては、地震被害に対する人の「認知特性」を考慮に入れる必要がある。例えば、人的被害を保険算定法等によって貨幣換算した値と同額の物的被害とでは深刻さに少なからぬ差が生じるといった「被害アイテムに関する認知特性」、被害額が個人又は社会が被害を補償する能力に及ぶような不可逆的甚大性(カタストロフィックロス)を持つ時には実際の被害額が増幅される「被害規模に関する認知特性」、地震の活動周期である $10^{-2} \sim 10^{-5}$ オーダーの希少発生確率に対する過大(又

*キーワード: 防災計画、耐震設計論、費用便益分析、ネットワーク分析

**正会員、工博、東京大学大学院社会基盤工学専攻

***正会員、工修、前東京大学大学院社会基盤工学専攻、横浜市道路局横浜環状道路調整部事業調整課

113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学系研究科

社会基盤工学専攻 交通/都市基盤計画研究室

Tel 03-5841-6119 Fax 03-5841-8506

e-mail ieda@trip.t.u-tokyo.ac.jp

は過小)に感じる「発生確率に関する認知特性」の三つが挙げられる³⁾。これら人の認知特性については、社会的選択問題として国民のプリファレンスに応じて決定されることを想定し、その前段階として本研究では地震被害に関する認識調査を行って認知特性を計測した。

また、従来は施設を単体として取扱い耐震性能の検討を行ってきたが、施設の有するネットワーク性を考慮した検討も必要である。

本研究では、交通施設のRC道路高架橋構造物を例にとり以下の手順に従って分析した。

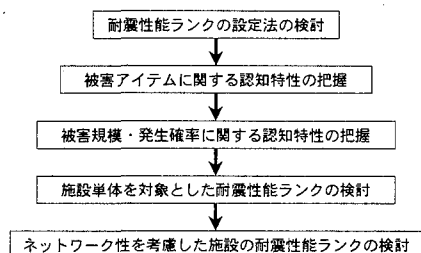


図1.本研究のフロー

このような手順を多くのケースについて実施し、その結果をストックすることによって、耐震性能決定のための実用的な設計資料が得られよう。

3.耐震性能ランクの設定法の検討

標準的な鉄筋コンクリート製道路高架橋としてPC連続箱桁 span50m(上下4車線)を想定し、兵庫県南部地震の被害状況を参考に、耐震性能「重要度ランクを崩壊・機能喪失・機能維持・無損傷・パッシブ制震の5段階に設定し、それぞれをGRADE I~GRADE Vとした。また設定された5段階のランクそれぞれの建設コスト・復旧方法・復旧コスト・復旧日数については、阪神高速道路公団、日本道路公団、日本技術開発、オイレス工業、カヤバ工業等の専門機関へのヒヤリング調査及び庄司らの研究⁴⁾に基づいて想定した。なお、ここでGRADE IVとVの違いは、走行面の動揺に基づく走行自動

車の物的・人的被害を念頭においている。以上を表1にまとめた。

4.地震被害に関する認知特性

本研究では、橋梁や耐震投資についての知識を十分に有する大学・鉄道会社・公団・建設コンサルの専門家を対象に実験的なアンケート調査を実施し、その認知特性の計測をおこなった。

(1)被害アイテムに関する認知特性

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項目を想定した。各被害アイテムについて既存の事例^{5),6)}からそれぞれ貨幣換算をおこなった。特に貨幣換算が難しいとされる、人的被害に関しては保険算定で用いられているホフマン式を採用し死亡4000万円/人、負傷100万円/人とし、時間価値に関しては国土庁が用いている2600円/hとした。次に貨幣タームで表現した地震被害のシナリオを20ケース準備し、一対比較法により相対的な深刻さを被験者である専門家8名に判定してもらった。この選択結果を二肢選択ロジットモデルに当てはめ、下記の認知被害関数を潜在的モデルとして認知パラメータ $\alpha_1 \sim \alpha_8$ を推定した。ただしここでは時間損失の重みを1として基準においている。

$$\text{認知被害関数 } D = \sum_{i=1}^8 \alpha_i d_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

α_i : 被害内容*i*の重みづけパラメータ

d_i : 被害内容*i*の被害額(貨幣ターム)

推定結果を表2にまとめる。今回の調査では、物的被害よりも人的被害が、人的被害の中でも、とりわけ道路交通サービスと直接的には切り離された近隣住民被害が重要視されるという認知特性が観察された。

(2)被害規模・発生確率に関する認知特性

まず地震発生確率や被災度が異なるシナリオを10ケース準備する。次に各ケースについて5段階

表1.耐震性能ランクの設定

記号	状態	建設コスト	修復方法	修復コスト	修復日数
GRADE I	崩壊	760万円/m	撤去・新設	860万円/m	125日
GRADE II	機能喪失	830万円/m	損傷部へのコンクリート打設・RC巻立て	27万円/m	25日
GRADE III	機能維持	920万円/m	亀裂部へのエポキシ樹脂注入	7万円/m	5日
GRADE IV	無損傷	1010万円/m	なし	0円/m	0日
GRADE V	パッシブ制震	1070万円/m	なし	0円/m	0日

表 2. 認知パラメータ推定結果①

人的被害	利用者死亡	α_1	19.19
	近隣住民死亡	α_2	34.16
	利用者負傷	α_3	4.19
	近隣住民負傷	α_4	7.46
物的被害	高架橋損傷	α_5	2.05
	近隣建築物損傷	α_6	1.10
	車両損傷	α_7	1.12
	時間損失	α_8	1.00

の耐震性能ランク毎に、被害額、追加投資費用を用意する。各ケース毎に被験者である専門家 4 名に、提示された判断材料から適切な耐震性能ランクを 5 つの中から選択してもらう形式で調査をおこなった。なお変数の変域は発生確率 (300~1000 年)、被害額 (0~1 兆円)、建設単価 (0~200 億円) である。この選択結果に式(1)を修正した認知期待純便益 NPV の多肢選択ロジットモデルに当てはめ、認知パラメータ $\beta_1 \sim \beta_3$ を推定した。

認知期待純便益

$$NPV' = \left[\sum_{j=1}^{40} \frac{1}{(1+0.04)^j} \right] \cdot \beta_1 p \beta_2 \Delta D \beta_3 - \Delta C \quad \dots\dots\dots(3)$$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: 認知パラメータ

推定結果を図 2 にまとめる。

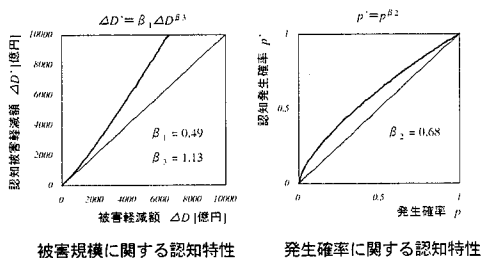


図 2. 認知パラメータ推定結果②

今回の調査では、被害規模については被害軽減便益を実被害額より大きく評価するという認知特性が、発生確率については、特に希少確率領域で増幅して評価するという認知特性が観察された。

5. 単体施設を対象とした要求耐震性能ランクの検討

(1) 計算対象事例

想定地震動については兵庫県南部地震を参考にし発生確率は 1 年あたり 1/1000、水平加速度 1000Gal 程度とする。また表 3 の入力条件を例として用い、想定地震動に対して 5 段階の耐震性能ランク別に被害額を算出する。

表 3. 入力条件 (例：阪神高速湾岸線一東灘)

リンク名	阪神高速湾岸線 東灘
交通量	39361 [台/日]
リンク長	0.635 [km]
近隣人口密度	13449 [人/km ²]
近隣土地利用	第二種低層住居専用
迂回時間	0.5 [時間]

耐震性能ランク別の被害額は、入力条件から被災時に被災箇所が存在する人間、車両、建築物等を貨幣換算し、これに既往の研究⁷⁾や兵庫県南部地震⁸⁾の被災状況を参考に設定した被害アイテム別被害率をかけることで簡易的に算出を行った。

(2) 計算結果と考察

計算結果を表 4 にまとめる。

表 4. 単体施設に関する計算結果

	GI	GII	GIII	GIV	GV
利用者死亡	34.75	17.37	3.47	0.35	0.00
近隣住民死亡	178.60	95.85	4.50	0.00	0.00
利用者負傷	3.79	0.95	0.09	0.02	0.00
近隣住民負傷	8.83	4.90	0.25	0.00	0.00
高架橋損傷	112.47	3.49	0.96	0.00	0.00
車両損傷	2.12	0.39	0.16	0.08	0.00
近隣建築物損傷	8.38	1.32	0.13	0.00	0.00
時間損失	177.46	20.43	3.50	0.00	0.00
総被害額	526.40	144.70	13.06	0.45	0.00
ΔD	0.00	381.70	513.34	525.95	526.40
ΔC	0.00	4.83	10.16	15.88	19.88
NPV'	0.00	68.29	92.04	89.16	85.27

単位: 億円

耐震性能ランク別に総被害額を算出し、最も低い耐震性能ランク GRADE I (崩壊) を基準にして被害軽減便益、追加投資費用を算出し、式(3)を用いて NPV' (認知期待純便益) を算出した。その結果このケースでは GRADE III (機能維持) が NPV' を最大とする要求耐震性能ランクとなることがわかる。

さらに上記の①被害アイテム②被害規模③発生確率の 3 項目に関する人の認知特性を考慮した NPV' の算出とともに 1) 機械的な CBA 計算、2) ①のみを用いた計算方法、3) ②③のみを用いた計算方法、と比較した (図 3)。機械的な方法の場合、要求耐震性能は最低ランクの GRADE I に決定され、また認知特性のうち被害アイテムのみもしくは被害規模・発生確率のみを考慮した場合、GRADE II に決定される、言ったように、人間の認知特性の考慮程度によって要求耐震性能が大きく異なることが確認された。

6. ネットワーク性を考慮した施設の要求耐震性能ランクの検討

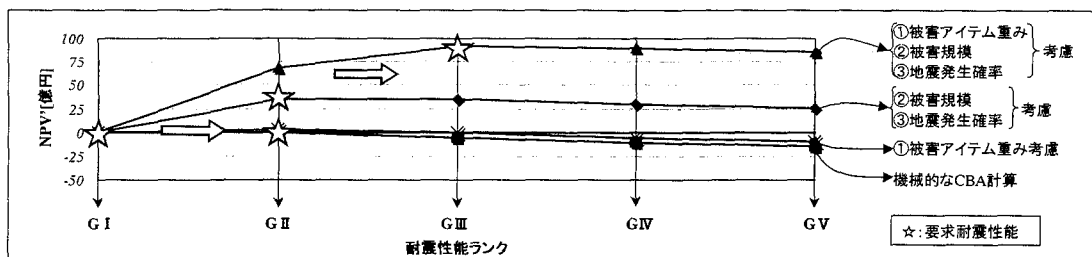


図 3. 認知特性の考慮程度による要求耐震性能の違い

(1) 計算方法

高架橋施設においては、ネットワーク性を考慮する必要がある被害アイテムとしては時間損失が挙げられる。そこで本研究では、発着ノード数 16・リンク数 24 の基本的な道路高架橋ネットワークについて要求耐震性能ランクの最適な組合せを検討する。なお、道路高架橋の損傷時には高架橋下の一般道が利用可能となる二層式ネットワークを想定する (図 4)。

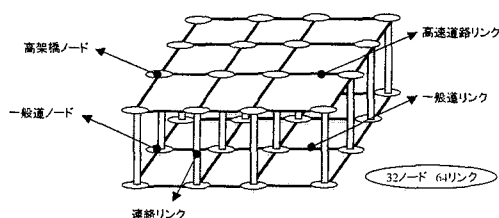


図 4. 想定ネットワーク

具体的には、高架橋リンクの損傷・途絶により発生する迂回・混雑による時間損失額をネットワーク上に流したフロー (分割配分) から算出し、4 章で挙げた①～⑦の直接被害を各リンク毎に算出した額を加えて総被害額とし、耐震性能ランクの組合せの検討を行う。ところがこのような単純なネットワークでも耐震性能ランクの組合せは、リンク数 24、耐震性能ランク 5 段階の場合、 5^{24} 通りにも及ぶことから、計算時間短縮のため GA (遺伝的アルゴリズム) を用いてヒューリスティックに解を求めた。GA の計算上、個体数 30、エリート選択、一点交叉・交叉確率 80%、突然変異確率 3%、世代交代数 500 世代と設定した。

(2) 計算結果と考察

ネットワークのサイズ・密度・形、需要の密度・パターン、土地利用のパターン等の条件を変えて得られる要求耐震性能パターンの比較を行った。出力結果の例を以下に示す (図 5)。入力条件に対して

リーズナブルな要求耐震性能パターンが出力されていることがわかる。

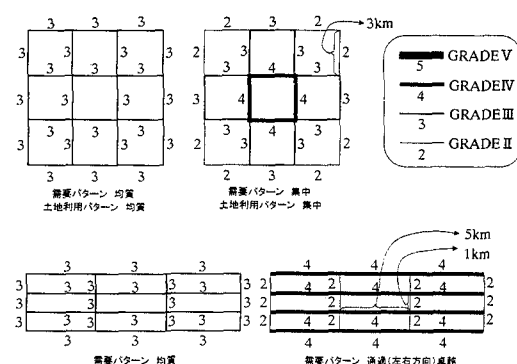


図 5. 要求耐震性能パターン出力結果

7. まとめと今後の研究課題

以上、現時点では非常にプリミティブなものではあるが、要求耐震性能決定法の確立に必要な基礎的手法としては概ね妥当な結果を得ることができるものと言えよう。今後は、手法の妥当性確認、より現実的なネットワーク形状に適用可能な手法の開発、人間の認知特性把握の深度化を図ることにより、モデルケース分析を積み重ねを通じて状況に応じて適切な要求耐震性能を得るためのより合理的でなおかつ現実的な方法論が得られるものと考えている。

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) SEAOC「Vision 2000」1995
- 3) 岡本浩一「リスク心理学入門ーヒューマン・エラーとリスク・イメージー」サイエンス社 1992
- 4) 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 No.563/I-39, pp79-pp94 1997
- 5) 加藤一郎「自動車事故の法律相談」有斐閣 1985
- 6) 国土庁「交通システムの信頼性向上に関する調査」1996
- 7) 中村武蔵、毛利雄「重大事故に起因した交通機関の特性分析」土木計画部研究・講演集 No.21(2)pp933-936 1998
- 8) 阪神高速道路公団「大震災を乗り越えてー震災復興誌ー」1997