

スペシャルセッション 災害から地域社会を守るインフラネットワーク*
Infrastructure Network System for Prevention of Disasters

南 正昭** 喜多秀行*** 上田孝行**** 横松宗太*****

by Masaaki MINAMI, Taka UEDA, Hideyuki KITA and Muneta YOKOMATU

大震災による物的ならびに人的被害の発生に対し、インフラを通じた多様な自律的な活動によって、それらを回避し、人命を守り、経済を復興する力を、地域社会は有している。これらの救急・消防等の緊急活動、水や食料の確保、物資搬送等の災害時あるいは災害後の対応を速やかに実行するためには、事前に社会基盤施設の計画と整備を適切に実施しておくことが必要である。

しかし、どのようなインフラの整備が、災害に対処するための機能的要件を、より適切に満足するかは明らかでなく、さまざまな解決すべき課題が残されている。

特にネットワーク構造を有するインフラの場合、同じ投資額でもシステムとしての耐震性能の向上効果は異なってくる。防災計画上の目標として、費用制約の下、もっとも効果的に全体システムの機能を保持するための計画案を提示することが望まれる。そのためには部分システムへの投資とその耐震性能の向上効果の関係をどのように把握するか、部分システムの機能低下あるいは補強がネットワークシステム全体に及ぼす影響をいかに評価するか、部分システムと全体システムの要求される性能水準の設定や配分の決定等の具体的な諸問題を検討する必要がある。ここではネットワークを形成するインフラとして、主として道路網を対象にこれらの課題を考察する。

なお、本スペシャルセッションは、土木学会災害リスク研究小委員会第2部会(部会長:小林潔司(京都大学))の活動の一環として実施するものである。

* キーワード: 災害リスク, リダンダンシー

**正員 博士(工学) 山口大学工学部(宇部市常盤台2丁目16-1 e-mail minami@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp)

***正員 工博 鳥取大学工学部(鳥取市湖山町南4丁目101 e-mail kita@sse.tottori-u.ac.jp)

****正員 工博 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1 緑が丘1号館206A室 email tueda@cv.titech.ac.jp)

*****学生員 工修 京都大学大学院工学研究科(京都市左京区吉田本町 e-mail m-yoko@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

具体的なセッションの構成は以下のようである。

1) ネットワーク全体で見た設計地震動の決め方について(喜多秀行)

カタストロフィが生じないようなシステムの残存機能に着目し、耐震投資とそれ以外の財への投資配分の観点から、レベルII地震動の設定法について計画論的に考察を加える。

2) ネットワークのリダンダンシー便益に関する一考察(横松宗太)

ネットワーク整備はリダンダンシー便益をもたらす。現段階ではリダンダンシーの概念の基礎的な考察や科学的な定義付けが不十分である。リダンダンシー便益には、主体の選択機会を維持する便益が含まれている。そこで本稿は Option Value の基本的な考え方を紹介し、リダンダンシー便益に関する議論の一助にすることを目標とする。

3) MPECによる設計問題の定式化(上田孝行)

多様な課題を含む設計問題がどのように定式化されるか。また各々の議論が、全体としての設計問題のなかのどこに位置するかを明らかにすることで、課題ならびに議論を整理することを試みる。

4) ネットワーク構造におけるシステム要素の機能水準とシステムの機能水準について(南 正昭)

全体システムとしての機能水準を確保するためには、個別構造物の有する機能水準をどのように設定するかが課題となる。あるシステム要素は耐えるが、ある要素は耐えなくてよいといった配分が必要となってくる。ここでは個別構造物への落とし込み方について考察する。

以上の考察と提言をもとに、インフラネットワークの機能評価の考え方を中心に討議を進める。災害時や災害後において、インフラネットワークが有する機能は救急医療、消防、物物資送等多様である。具体的な機能の保持の観点から、どのような評価の観点が必要かを議論する。

防災計画における設計地震動に関する 計画論的考察

喜多秀行

1. はじめに

先の阪神淡路大震災以降、従来の設計震度を大きく超え都市がほぼ壊滅してしまうような強い地震動が襲来する可能性を無視し得ないということが明らかになり、このような地震動をも念頭に置いて壊滅的な被害を避けるようにすべきであるとの考え方が支配的になってきた。しかし、その設定法については多くの議論が残されている。そこで本稿では、システムの残存機能に着目し、レベルII地震動の設定法について計画論的観点から考察を加える。

2. 計画問題として見たレベルII地震動

冗長性を有するシステムの場合、単一ユニットが破壊しても冗長機能が働くため、機能の喪失は当該部分のみに留まりシステムそのものは機能を発揮する。しかし、冗長性を構成するユニットの全てが破壊された場合は、システム全体の機能が喪失する。

“システムの破壊”とは、それを構成する構造物の破壊によって当該システムが一定水準以上の機能低下（機能喪失）に陥ることである。

地域社会はそれ自身を維持するための救援・修復機能を保有しており、住民や施設事故や災害が生じた際にはこの機能を発揮させて救援・修復を行う。この場合、救援・修復システムは健全に機能していることが前提となる。しかし事故や災害の規模が甚大かつ広範囲に及び、救援・修復システムそのものまでもが被災してしまうと救援や修復ができず地域社会を維持することが困難な状況に陥る。このように、地域社会が大きく被災してそれ自身を維持することができなくなる状況を“カタストロフィ”という。

地域社会が被災しても、それ自身を維持しうる状態である限りいずれは復興することができる。しかし、カタストロフィが生起すると地域社会そのものが崩壊するという非可逆的な過程をたどる。したがって、われわれがまず回避すべきものはカタストロフィの生起であり、できうるならばどのような地震動に対してもカタストロフィが生じない程度の損傷に留まるような耐震性を構造物に付与することが理想的である。しかし、耐震性には限度があり無限大の地震動に対応することは現実的でないため、何らかの限界値を設定せざるを得ない。これがレベルII地震動の概念である。

3. レベルII地震動の決定モデル

3.1 基本モデル(Model-1)

ある地域を想定する。簡単のため住民は1人とする。1期のみを考え、期中に地震（強度 F ）が必ず1回生起する。地震保険は考えない。

当該地域が保有している富を W 、合成財 I_1 、耐震投資 I_2 に分割して消費する。

$$I_1 + I_2 = W \quad (1)$$

当該地域社会を維持するために最低限必要な合成財の消費水準 I_0 が存在し、それを下回ると地域社会が崩壊する（カタストロフィが発生する）。

$$I_1 \geq I_0 \quad (2)$$

地震による損害額 $D = D(F, I_2)$ は地震強度 F と耐震投資 I_2 に依存して定まり、被災後にカタストロフィが生じないためには、

$$W - I_2 - D(F, I_2) \geq I_0 \quad (3)$$

でなければならない。したがって、耐震投資 I_2 の下でこの地域がカタストロフィに陥ることなく耐えることができる地震の最大強度 F_s は、

$$D(F_s, I_2) = W - I_2 - I_0 \quad (4)$$

を満たす F_s 、

$$F_s = F_s(I_2) = D^{-1}(W - I_2 - I_0, I_2) \quad (5)$$

である。これがレベルII地震動である。

$$F_{II} = F_s \quad (6)$$

3.2 地震発生確率を考慮したモデル(Model-2)

Model-1 の設定条件の内、“期中に地震（強度 F ）が必ず1回のみ生起する”を“期中に強度 F の地震が確率密度 $p_E(F)$ で1回のみ生起する”とする。

富 W を合成財 I_1 、耐震投資 I_2 に分割消費する。強度 F の地震により被る損害 D は $D = D(F, I_2)$ 。カタストロフィが生じるような地震、

$$W - I_2 - D(F, I_2) < I_0 \quad (7)$$

の生起確率 p_C 、

$$p_C = \int_{F_s}^{\infty} p_E(F) dF \quad (8)$$

を δp_C 下げることに対する支払い意思額 δW は小林¹⁾より次式で与えられる。

$$\delta W = m(p_C) \cdot \delta p_C \quad (9)$$

$$m(p_C) = \frac{U}{(1 - p_C) \partial U(W) / \partial W}$$

ここに、 $U(W)$ は住民の基数的効用関数である。

他方、生起確率が

$$p(F'_s) = p_C - \delta p_C \quad (10)$$

であるような地震強度

$$F'_s = F_s + \delta F \quad (11)$$

に耐えられるようにするために必要な耐震投資の限界費用 $\delta I_2(F_s)$ を、

$$\delta I_2(F_s) = I_2(F'_s) - I_2(F_s) \quad (12)$$

とする。ここに、 $I_2(F)$ は強度 F の地震動に耐えるための耐震投資額である。

耐震投資に対する支払い意思額 δW が限界費用 δI_2 を上回る、すなわち、

$$\delta W = m(p_C(F_s)) \cdot \delta p_C(F_s) \geq \delta I_2(F_s) \quad (13)$$

であれば耐震投資がなされ、 $\delta W = \delta I_2$ となるまで耐震投資が行われる。すなわち、

$$m(p_c(F_s^*)) \cdot \delta p_c(F_s^*) = \delta I_2(F_s^*) \quad (14)$$

を満たす F_s^* がカタストロフィの発生を防ぐべき地震強度の上限となる。これがレベルII地震動である。

$$F_{II} = F_s^* \quad (15)$$

3.3 地震保険を考慮したモデル(Model-3)

Model-2 の設定条件に地震保険（地域間の相互保険でリスクの発生に関する相関性と引き受け可能額の上限は無い）を加える。

富 W を合成財 I_1 、耐震投資 I_2 、地震保険の保険料 I_3 に分割して消費する。

$$I_1 + I_2 + I_3 = W \quad (16)$$

地震保険の保険金は損害額 $D(F, I_2)$ 、 I_2 の耐震投資がなされているという条件下で強度 F までの地震による損害額を担保する地震保険の保険料 $I_3(F)$ は当該地震により生じる期待損害額、

$$I_3(F, I_2) = \int_0^F p_E(F') \cdot D(F', I_2) dF' \quad (17)$$

に等しいとする。ただし、

$$D(F', I_2) \begin{cases} > 0 & \text{for } F' > F(I_2) \\ = 0 & \text{for } F' \leq F(I_2) \end{cases} \quad (18)$$

ここで、耐震投資と地震保険を組み合わせることで強度 F の地震に対応することを考える。

$$I_2 + I_3(F, I_2) = I' = W - I_1 \quad (19)$$

を F に関して解いたものを、

$$F_P(I') = F_P(I_2, I_3) = F_P(W, I_1, I_2) \quad (20)$$

とすると、

$$\max_{I_2, I_3} F_P(I_2, I_3) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } I_2 + I_3 = I'$$

の解 (I_2^*, I_3^*) が最も経済的な耐震投資と地震保険の組み合わせとなり、その下でカタストロフィの発生を防ぐことのできる地震強度の上限は $F_P(I_2^*, I_3^*; I')$ となる。

Model-2 の $I_2(F)$ を $I'(F_P)$ 、 $\delta I_2(F_s)$ を $\delta I'(F_2)$ と読み替え、上記を用いると、Model-2 と同様のプロセスを経て、地震保険が存在する場合対応可能な地震動の上限 F_s^* を求めることができる。その際の I_2^* に対応する $F(I_2^*)$ がレベルII地震動（耐震投資によってカタストロフィの発生を防ぐべき地震動の上限値） $F_{II} = F(I_2^*)$ である。

費用関数や保険料の設定により一概には言えないが、一般に、地震保険を適切に利用することにより、利用できない場合に比べて同一の富で地域社会が対応できる地震強度の上限値 F_s^* は上昇し、レベルII地震動 F_{II} の大きさは低下すると予想される。

4. おわりに

以上、計画的観点から地域の耐震防災を考える際に考慮すべき設計地震動の上限を設定する一つの考え方を提案した。もとより極めて単純化したものであり、現時点ではカタストロフィの回避に関する地域住民の効用関数や巨大地震に対する耐震投資の費用構造等に関する知見の蓄積も十分ではない。今後はこの種の研究を推進することが重要であろう。

なお、本稿をとりまとめる上で土木学会耐震設計基準特別委員会WG6に設けられた小林潔司（京都大学）主査のグループにおける討議が有用であった。記して感謝したい。

【参考文献】

- 小林潔司：社会リスクの計測と評価—研究系譜と今後の展望—, 鳥取大学工学部研究報告, Vol.22, No.1, pp.307-314, 1991.

(Keywords: レベルII地震動, 耐震防災計画, カタストロフィ回避, 決定問題)

ネットワークのリダンダンシー—便益 に関する一考察

—Option Value と不確実性下の投資機会便益—

横松宗太

1. はじめに

ネットワークの機能やシステムの頑健性を高めるための整備を行う際には、リダンダンシーの増大に対する評価が本質的に重要である。しかし、リダンダンシー—便益の客観的・科学的な定義に関しては、現段階では研究者の間で一致した見解は存在しない。著者はOption Valueの考え方が最もリダンダンシーの概念に近いものと考え、土木計画の分野において不確実性下のプロジェクトを評価する際に、静的な状況下では既にオプション価格が有効な指標として定着している。また、多々納(1998)¹⁾は静学モデルで定義されるオプション価格から、動的な状況下におけるオプションの理論まで一貫した議論を展開している。動学モデルでは部分的に情報が増加する過程のQuasi-optionの価値の変化を分析することができる。本稿では多々納(1998)と同様に時間軸上の視点が不可欠な状況下のプロジェクトの投資機会の便益評価方法を紹介する。以下に述べるように、非可逆性をもつ投資に関する意思決定を留保する効用を導出することは、意思決定機会のリダンダンシー—便益を議論することに通じると考える。

2. プロジェクト投資とReal Option

プロジェクトの投資決定問題は第一に、投資に大きな初期費用を要し、かつひとたび投下した費用は回収不可能である点に特徴をもつ。すなわち固定費用の存在と投資の非可逆性が戦略に最大の影響を及ぼす。次に、プロジェクトがもたらすキャッシュフロー（以下CF）が投資の意思決定時点において不確実であり、また不確実な将来のCFの期待が時々刻々と追加される情報によって更新されるという過程が挙げられる。ここに、現時点では投資の決定を留保して将来のより確かな情報を持つことの効用、換言すると<投資、待機>の選択権（オプション）を保有し続けることの効用が存在する。しかし一方で、「待機」することは現時点で投資することによって得られる確実なCFを放棄することを意味する。<投資、待機>の決定にはトレードオフが介在し、将来フローの価値を見積もるための主観的ないし一般化割引率の大きさが本質的な影響力をもつことになる。

以上のような意思決定環境は、金融の分野におけるオプションの行使の意思決定環境に酷似している。投資機会を与えられた企業は、コールオプションを保有する主体と相似の構造の意思決定問題に直面している。この類似性を強調して、プロジェクトの投資機会は実物資産の獲得機会として“Real Option”と呼ばれる。本稿は、金融理論のプロジェクトの投資問題への適用に関する先駆的研究であるDixit and Pindyck (1994)²⁾による“Real Options Approach”の基本的な考え方を紹介する。

3. 動的計画法による最適投資決定問題

Net Present Value (以下NPV)に基づいたプロジェクトの投資機会の評価方法は、投資の非可逆性と主体に与えられた投資の留保権(ability to wait)を看過している。あるいは暗に、プロジェクトのCFの悪化に応じて任意の時点において投資の撤回が可能であるものと仮定し、また一方で投資の意思決定の機会を現在時点に限定している(now-or-never basis)。本章では単純な投資決定問題を動的計画法を用いて定式化する。とりわけ投資の機会費用の構造に着目する。

いま、民間企業が有料道路を整備する問題を考えよう。費用 I を投入してプロジェクトを遂行すれば、以後の全ての期 i でキャッシュフロー $P_i (i=0,1,\dots)$ を得ることができる。 $P_i (i=0,1,\dots)$ は社会状況や交通量等に依存した確率変数である。企業は i 期に P_i を確認してから投資行動を決定することができる。いま、最も単

純なケースを考える。 P_0 は0期から1期に移行するときのみ確率的に変化する。すなわち確率 q で $(1-u)P_0$ に増加し、確率 $(1-q)$ で $(1-d)P_0$ に減少し、その後は不確実性は解消して $P_i = P_1 (i=2,3,\dots)$ のフローが継続すると仮定する。利子率 r は一定とする。各期において企業の行動は「投資」か「待機」かのいずれかであり、簡単化のため投資費用 I は定数であり、投資後に操業費用、維持管理費用等はいかからないと仮定する。よって本例では操業しているプロジェクトの一時的な営業停止や撤退といった問題は生じない。 V_i を i 期以降のCFの現在価値の和とする。はじめにNPVによって企業の投資機会を評価しよう。

$$V_0 = P_0 + [q(1+u)P_0 + (1-q)(1-d)P_0] \left[\frac{1}{1+r} + \frac{1}{(1+r)^2} + \dots \right] \\ = P_0 [1+r+q(u+d)-d] / r$$

NPVは $\Omega_0 = \max[V_0 - I, 0]$ と表される。NPVは $V_0 - I$ が正のときに0期において投資を行うことを指示する。それに対してReal Options Approachは以下のような可能性を考慮する。いま企業が0期で投資の決定を留保して、1期に P_1 の実現値を確認する。1期以降のCFの1期における価値は次式で与えられる。

$$V_1 = P_1 + P_1 / (1+r) + P_1 / (1+r)^2 + \dots = P_1 (1+r) / r$$

1期における投資機会の価値は $F_1 = \max[V_1 - I, 0]$ である。そして投資の条件 $V_1(P_1) - I \geq 0$ に対応する $P_1 \geq P_1^*$ を成立させるcritical price P_1^* が存在する。ところで0期においては P_0, V_0, F_0 はいずれも確率変数である。よって0期で評価した1期の期待・当該期価値は、

$$E_0[F_1] = q \max[(1+u)P_0(1+r) / r - I, 0] \\ + (1-q) \max[(1-d)P_0(1+r) / r - I, 0]$$

$E_i[\cdot]$ は i 期における期待値操作を表す。ここで0期の決定環境に立ち返ると、0期における当該プロジェクトの投資機会の価値は次式によって表される。

$$F_0 = \max\{V_0 - I, E_0[F_1] / (1+r)\}$$

右の項の方が大きい場合に0期の段階では投資を留保して1期に P_1 が確定することを待つことが合理的となる。1期と同様にcritical price P_0^* を導出して、 $P_0 \geq P_0^*$ のときに投資をする、と表現することもできる。以上の意思決定プロセスは、オプションの行使価格を I 、 i 期の金融資産の市場価格を V_i で表した、アメリカン・コールオプションの行使問題と同一の構造を有している。さらに、先のNPV Ω_0 のようなnow-or-never basisの投資機会の評価 Ω_i は満期日のオプションの価値に相当する。よって各期における差 $F_i - \Omega_i$ が留保効用、すなわちability to waitの価値を表している。そ

してプロジェクトの投資機会の価値 F_i が、 i 期におけるコールオプションの保有価値ないし市場価値に対応する。各期の CF に対応した状況依存的な決定が認められていることによって、投資機会の価値 F_i は非線形形の構造をもつ。

4. 多段階投資計画の便益評価

多くの状況でプロジェクト投資は sequential に行われる。前章のモデルを単純に2段階投資の問題に拡張しよう。2段階投資は Compound Options に対応する。第1段階の投資は第2段階の投資機会の価値が投資費用を上回るときに行われる。 i 期の第1段階の投資機会の価値は $F_i^1 = \max[F_i^2 - I_1, 0]$ に相当する。第2段階の投資の価値は $F_i^2 = \max[V_i - I_2, 0]$ で与えられる。すなわち第1段階のオプションは、第2段階のオプションを購入するオプションである。この問題も backward に解かれる。すると両段階の critical price について $P_i^{1*} \geq P_i^{2*}$ の関係が導かれる。このことはキャッシュフロー P_i が P_i^* を上回ったときに第1段階の投資を行い、終わるや否や第2段階の投資を行うことを意味する。よってこのモデルの枠組みで多段階投資を議論する意味はない。例えば以下のような問題で意味をもつ。まず、投資に時間がかかり、その間に $P_i < P_i^{2*}$ になり得るような場合である。企業は P_i が回復するまで第2段階の投資を留保する。また、多くの R&D に見られるように、小さな企業が第1段階の開発を行い、その後自ら第2段階の投資を行うよりも、むしろ特許権等の第2段階の投資の権利を他の企業に売るような行動も考えられる。

5. おわりに

多くのプロジェクトは、その投資時点の決定について主体の選択が認められるものの、ひとたび投資すればその固定費用は回収不可能である。本稿ではそのような環境下での投資戦略の決定に関して、Real Options Approach が有効であることを指摘した。

【参考文献】

- 1) 多々納裕一: 不確実性下のプロジェクト評価: 課題と展望, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp. 19-30, 1998.
- 2) Dixit, K., Pindyck, S.: Investment under Uncertainty, Princeton University Press, 1994.

(Keywords; 不確実性, 投資, Real Option)

均衡制約付き最適化問題(MPEC) モデルから見た防災性能設計問題

上田孝行

1 均衡制約付き最適化問題(MPEC)モデル

均衡制約付き最適化問題(MPEC: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints)としてみた防災性能設計案の策定問題(Luo, Pang and Ralph (1996)を参照)は以下のように定式化される。

【基本問題 P-0】

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha, \tau} W(V) && (1): \text{社会的厚生(貨幣尺度)} \\ & \text{s.t.} && \\ & V^j = \max_{\alpha, \tau} E^j(v_i^j(\omega_i^j, \alpha_i^j, Q_i^j, S)) \text{ for all } j \in J && (2): \text{経済主体の期待効用最大化} \\ & \text{s.t. } K^j(\alpha^j, Q, p, S, \tau) \leq 0 && (3): \text{経済主体の行動への制約} \\ & M(\alpha, p) \leq 0 && (4): \text{市場清算条件} \\ & N(\alpha, Q) \leq 0 && (5): \text{外部性} \\ & H(e, R, \tau, p) \leq 0 && (6): \text{財政制約} \\ & S - S(\alpha, Q, e) \leq 0 && (7): \text{システムの性能} \\ & e - e(\alpha, \beta) \leq 0 && (8): \text{構造物(構成要素)の性能} \end{aligned}$$

各変数は以下のように説明される。

$W(\cdot)$: 社会的厚生関数, $V = (\dots, V^j, \dots)$: 期待間接効用関数, $\alpha = (\dots, \alpha_g, \dots)$: 構造物(構成要素)の設計案, $\tau = (\dots, \tau_p, \dots)$: 財政手段(税等), $e = (\dots, e_g, \dots)$: 構造物(構成要素)の性能, $e(\alpha, \beta) = (\dots, r(\alpha_g, \beta_g), \dots)$: 設計案と局地的な物理的条件の関数として定義される構造物の性能, $\alpha^j = (\dots, \alpha_i^j, \dots)$: 経済主体 j の状態毎の行動からなるベクトル, $a = (\dots, a^j, \dots)$: 各主体の行動からなるベクトル, $\omega^j = (\dots, \omega_i^j, \dots)$: 経済主体 j の状態別の賦存資源量からなるベクトル, $Q = (\dots, Q_i, \dots)$: 状態別の外部(不)経済, $p = (\dots, p_i, \dots)$: 状態別の価格変数からなるベクトル, $i \in I$: 自然災害の生起状態に対応した社会経済システムの状態のラベル, $j \in J$: 経済主体のラベル, $E(\cdot)$: 期待値のオペレータ

個々の構造物の設計案 α と財政手段 τ が与えられた環境において、個々の経済主体が各自の期待効用を最大化するように行動し、その結果、各主体の期待間接効用関数の組み合わせで表された市場均衡 V に到達する。それぞれの政策 (α, τ) の下での V を、効率・衡平・安定など社会の価値規範を反映した社会厚生関数 $W(V)$ で評価する。それによって、 V を通じて最大の W を与える (α, τ) や財政手段 τ を最適な政策変数として選ぶことが出来る。この政策決定の最後のステップを(式(1))と同値であるが)明示的に表すと以下のようになる。

$$\alpha^*, \tau^* = \arg \max W$$

また、下位問題にあたる市場均衡への到達の過程で、自己救済、地域内相互扶助、外部支援との関係するシナリオは式(2)から式(8)の均衡制約を特定化する際に反映される。例えば自発的な自己救済、市場保険などは経済主体の行動を表わす制約式(2)と式(3)、市場システムを表わす式(4)に反映されることになる。

地域レベルの広域防災計画であれ、個々の構造物の防災性能設計であれ、いずれのレベルであっても計画・設計論は論理的には以上の MPEC で捉えられる。以下、この理論的枠組みを実用にするための方策に話を進めていく。

まず、現実の計算の可能性に関して、個々の構造物 (element) の単位が小さく詳細である場合、防災性能設計を実際に MPEC を解いていくことは非効率であろう。ただし地域レベルの広域防災計画であれば、element がある程度大きな単位で捉えられ、計画・設計変数が少なければ MPEC を解くことも可能といえる。

上の可能性に留意しつつ、MPEC により最適な防災性能設計案・計画案を策定するプロセスを Iterative に行う方法を提案しよう。次のようなフローチャートが有用である。

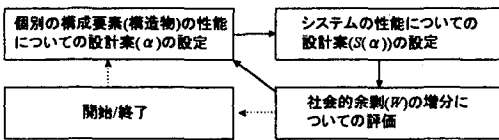


図-1 Iterative な最適設計案の求め方

ところで、社会厚生関数の存在や成立可能性に関しては決して自明とはいえない。小林・秀島(1997)は、社会的厚生関数に資源配分の効率性(期待被害の最小化)、公平性(匿名性)、そしてカストロフの最小化(最大被害の最小化)を同時に目的として反映させることはできない、とする「災害リスクの同時評価の不可能性定理」を提唱している。一方、Chichilnisky and Heal(1998)、小林・横松(2000)によると、カストロフ・リスクの分散が Arrow-Debreu-Malinvaud 型の証券・保険市場の混合一般均衡システムにより可能であれば、前二者の目的を一定の価値規範のタイプについて社会的厚生関数に反映することが可能となる。

さらに政策の評価に対して社会厚生関数 W を採用するにあたっては、その価値観に関する社会の合意が前提となる。そのような政治的プロセス等の考慮を回避して、あくまで経済学的評価の範疇で防災性能設計案・計画案を策定する場合には、伝統的な CBA(費用便益分析)を用いる方が便利である。換言すれば、MPEC の枠組みで、CBA を用いて防災性能性能を社会経済的に評価しようとする作業は、1)社会的厚生関数 W を次のような社会的純便益関数 SNB に特定化して、2)一つの防災性能設計案に対して社会的厚生の変化分を計測することに他ならない。

$$SNB = \sum_{j \in J} \{\sigma(\omega^j, p^a, Q^a, S^a, w^j(\alpha^j, \tau^j)) - \sigma(\omega^j, p^a, Q^a, S^a, w^j(\alpha^a, \tau^a))\}$$

:社会的純便益

ここで、 $w^j(\alpha, \tau)$: 均衡における経済主体 j の期待効用、 a, b : 新たに導入される設計案の無と有を意味するラベル、 $\sigma(\cdot)$: オプション価格としての等価的所得関数である。

CBA による防災性能設計案の性能評価は次のプロセスとして表わされる。この場合はフローがループしないことに注意されたい。

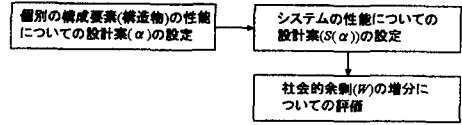


図-2 防災性能設計への費用便益分析の適用

また、カストロフ回避に対しては社会的厚生関数・CBA に対応することは困難である。そこで社会的厚生関数とは別の価値判断として、シビルミニマム (\bar{v}) を設定する。これは MPEC の基本問題に次の制約を加えることになる。

$$\min_{i \in I} \{\dots, v_i^j(\cdot), \dots\} \geq \bar{v} \quad \text{for all } j \in J$$

(9): シビルミニマム基準

2 多段階計画・設計としての解釈

MPEC を 1)システムの性能 S を制御変数とした決定問題を解く最適問題と、2)その最適な防災性能設計案 S^* を規定できる R の集合から費用最小化の基準で決定による構造物の設計案の決定問題とに分解して考える。1)は「地域防災計画レベル」の計画案の決定問題として捉えられる。また 2)は個々の構造物レベルでの防災性能設計案の決定問題として捉えられる。1)と2)はそれぞれ先の基本問題に対する部分問題として次のように表わせる。

【部分問題 P-1】

$$\max_{S, \tau} W(V) \tag{1'}$$

s.t.

$$V^j = \max_{R, \tau} E^j(v_i^j(\omega_i^j, a_i^j, Q_i^j, S)) \quad \text{for all } j \in J \tag{2'}$$

$$\text{s.t. } K^j(a^j, Q, p, S, \tau) \leq 0 \tag{3'}$$

$$M(a, p) \leq 0 \tag{4'}$$

$$N(a, Q) \leq 0 \tag{5'}$$

$$H^j(S, \tau, p) \leq 0 \tag{6'}$$

$$S - S^*(a, Q) \leq 0 \tag{7'}$$

$$\min_{i \in I} \{\dots, v_i^j(\cdot), \dots\} \geq \bar{v} \quad \text{for all } j \in J \tag{9}$$

【部分問題 P-2】

$$\max_{\alpha, \tau} H(e, \alpha, \tau, p) \tag{1''}$$

s.t.

$$S^* - S(e, \alpha, Q) \leq 0 \tag{7''}$$

$$e - e(\alpha, \beta) \leq 0 \tag{8''}$$

1)の「地域防災計画」の計画案については、カストロフ回避は式(9)で考慮されていることを前提として、MPECのフレームで決定するには、図-1のようなプロセスで考える。その際に可能な限り多数の計画代替案を作成して、その中での最善案を選択する。

2)の個々の構造物についての防災性能設計あるいは、部分問題 P-2 の目的関数が社会的純便益の一部を構成しているものと見なして、費用便益分析で対応する。個々の構造物について CBA を行うのが困難であれば、目的関数 H の値を一定値の基準値として α を決定する。ただし、システムの性能と目的関数の値 (S, H) から個別の構造物の性能や設計案への対応は一意に決まらない (ill-posed inverse problem) であるので、Inverse Problem のように他の criteria を追加して一意的な問題に修正する必要がある。

【付記】

本資料は土木学会耐震設計基準特別委員会 WG6 に設けられた小林潔司(京都大学)主査のグループで議論した内容に基づいている。同主査をはじめメンバーから貴重な示唆を頂いた。また、横松宗太氏(京都大学大学院)には、本資料の元となった資料をまとめるのに協力を得ている。ここに記して感謝する。

【参考文献】

- 1) Luo, Z.-Q., Pang, J.-S. and Ralph, D. (1996), *Mathematical Programs with Equilibrium Constraints*, Cambridge University Press
- 2) 秀島栄三, 小林潔司, (1997), 耐震投資に関する費用便益分析, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.193-196, 1997.
- 3) Chichilnisky, G. and Heal, G. (1998), *Financial Markets for Unknown Risks, in Sustainability: Dynamics and Uncertainty*, Chichilnisky, G., Heal, G., and Vercelli eds., pp.277-294, Kluwer Academic Publisher, 1998
- 4) 小林潔司, 横松宗太 (2000), カストロフ・リスクと防災投資経済評価, 土木学会論文集, No.639/IV-46, pp.39-52, 2000

(Keywords; MPEC, 費用便益分析, 防災性能)

防災道路網計画における 個別構造物の整備水準に関する考察

南 正昭

1. はじめに

災害の発生時において、避難経路が多重化されていること、あるいは救急病院が複数存在すること等、交通施設を含む都市施設がリダンダンシーを有することは、被災時の人命の確保に決定的な影響を与える。しかし、平常時の維持管理や初期投資に膨大な費用負担を伴うため、施設の多重化には限界がある。そこで、どこにどのように施設を配置しておけば、予算制約下でネットワークとしての機能を保持できるかが課題と

なる。

道路網がネットワークとして有する機能は、人命救助、避難、消防・救急活動、物資輸送、平常時交通需要の確保等多様である。これらの機能の発現は、ネットワークを構成する個別構造物に関する位置、容量、設計強度、防災対策工の有無等の性質に左右される。そこで防災道路網計画の立案において、予算制約を考慮し、ネットワークとしての機能評価項目・評価基準に基づき、個別構造物への適切な投資配分を決定することが求められる。

具体的には、各個別構造物の機能水準ならびにそれを達成するための費用を明らかにする必要がある。

2. 代替ルートの有無と個別道路リンクの整備水準

たとえば都市間を連結する経路が複数存在する場合と、1経路しか存在しない場合では、連結を保持するという観点からは、経路を構成する個別道路リンクの重要度は異なるものと考えられる。また、たとえ2経路が存在する場合でも、1経路を確実に保持すべく整備を行うか、代替ルートの存在を重視して整備水準を比較的低く設定してよいかが課題となる。

以下では、都市間を連結する経路において、代替ルートの有する道路リンクと有さない道路リンクについて、道路防災対策に関する整備水準に差を付けることを想定し、その整備水準の達成に要する対策工費を具体的に算出する。山口県の緊急輸送道路網を対象に、防災総点検データに基づき防災道路網計画を立案するプロセスにおいて、道路網の機能と個別構造物の整備水準について考察する。

3. 事例

ここでは山口県緊急輸送道路網を対象に、経路上の各個別道路リンクに関する代替ルートの有無に応じて、その道路リンクの整備水準を増減させた場合の、経路防災対策費用の変化を道路防災総点検データに基づいて算出した事例を示す。

計算事例に用いた入出力データおよび設定パラメータの表記は、以下のようである。なお、本稿において費用のオーダーは明示していない。

- m; 評価対象経路の構成リンク途絶時に、代替ルートとして機能する経路の所要時間比の上限
- Ln; 評価対象経路を構成する道路リンク番号
- T_{Ln, l}; 評価対象経路の Ln 番目構成リンク途絶時の代替ルート所要時間
- FC_{max}; 防災対策実施後、評価対象経路内に存在する点検対象箇所安定度評点の上限

FC_{max1} ; 防災対策実施後、代替ルートが存在する道路リンク内に存在する点検対象箇所の安定度評点の上限
 FC_{max2} ; 防災対策実施後、代替ルートが存在しない道路リンク内に存在する点検対象箇所の安定度評点の上限
 Ca ; 点検対象項目 d に関するリンク内安定度評点を FC_{max} 以下に抑えるのに要するリンク防災対策工費
 C_{route} ; 点検対象項目 d に関する代替ルートの有無を考慮した経路防災対策工費 (代替ルートの有るリンクの安定度評点を FC_{max1} 以下、かつ代替ルートの無いリンクの安定度評点を FC_{max2} 以下に抑えるのに要する対策工費)

図2は、設定した都市間の主要経路 (ここでは最短経路) について、経路内の最大安定度評点を FC_{max} 以下に抑えるのに要する経路防災対策工費を算出し、点検評価項目「岩石・崩壊」について例示したものである。

表1は、図1に示した美祢-長門間について、主要経路上の各道路リンクに関して、代替ルートが有る場合は安定度評点が最大で 60(=FC_{max1})、代替ルートが無い場合は最大で 10(=FC_{max2})となるように整備水準を設定し、経路防災対策工費の算出プロセスならびに計算結果を、m=2.0 の場合と m=3.0 の場合で比較して示したものである。比較的迂回の大い経路を代替ルートとして機能するものとするとき、経路費用が低下する様子を示している。

表2は、図1に示した2つの都市間主要経路について、FC_{max1} および FC_{max2} を所与とし、m をパラメータとしたときの、経路防災対策工費の算出結果である。山口-萩間では、全ての m について代替ルートが存在するため経路防災対策工費は一定である。一方、美祢-長門間は、mによって経路防災対策工費が異なっている。

表3は、m を所与とし、FC_{max1} および FC_{max2} をパラメータとしたときの経路防災対策工費の算出結果を示したものである。FC_{max1} と FC_{max2} の組み合わせにより対策工費に差が生じる様子を示している。

評価対象経路を明確に選定するとき、予算制約をみたす m, FC_{max1} および FC_{max2} から、代替ルートの存在を考慮した上で、個別道路リンクの整備水準と防災対策工費を具体的に議論することができる。

4. おわりに

3章の分析フレームにおいて、個別道路リンクの整備水準およびその達成に要する対策工費より、経路防災対策工費が算出できることから、逆に予算制約下で、ネットワーク上の個別道路リンクへの費用配分を検討することが可能である。

リダンダンシーを具体的にインフラネットワークに

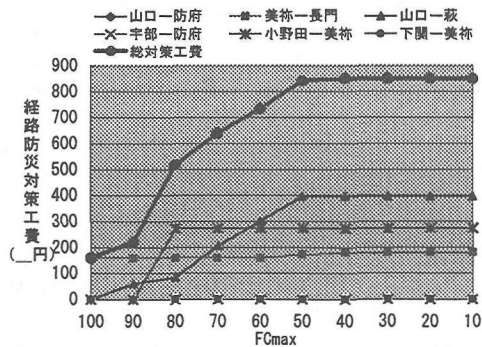


図1 経路の整備水準と経路概算防災対策工費の関係

表1 代替ルートの存在を考慮した経路防災対策工費計算例 (美祢-長門間)

点検対象項目: 岩石・崩壊
 計算条件: FC_{max1}=60, FC_{max2}=10

Ln	T _{Ln,1} (min)		Link cost (万円)	
	m=2.0	m=3.0	FC _{max1} =60	FC _{max2} =10
1	-	64	0.0 ^{a)}	12.0 ^{b)}
2	-	60	0.0 ^{b)}	7.5 ^{b)}
3	46	46	160.0 ^{a)}	160.0
m=2.0 のとき, C _{route} = a+b+e=179.5 m=3.0 のとき, C _{route} = c+d+e=160.0				

主要経路所要時間=29(min)

表2 代替ルートの有無と経路防災対策工費 (万円)

点検対象項目: 岩石・崩壊
 計算条件: FC_{max1}=60, FC_{max2}=30

	m			
	1.5	2.0	2.5	3.0
山口-萩	301.4	301.4	301.4	301.4
美祢-長門	179.5	179.5	160.0	160.0

表3 道路リンクの整備水準と経路防災対策工費 (万円)

点検対象項目: 岩石・崩壊
 計算条件: m=3.0

	FC _{max1} , FC _{max2}			
	10, 10	80, 80	80, 10	60, 30
山口-萩	396.4	84.4	84.4	301.4
美祢-長門	179.5	160.0	160.0	160.0

織り込むには、ネットワークの機能水準の評価手法とともに、個別構造物の要求機能水準と費用あるいは個別構造物間の機能分担について研究をより深める必要があるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 土木学会災害リスクマネジメント研究小委員会: 災害リスク研究の最前線と社会への提言, 2000
- 2) 南 正昭: 防災点検データを用いた道路網整備計画の一評価技法, 土木計画学研究・論文集 No.17, 2000
- 3) Minami, M.: The Highway Network Structural Design Assuring the Connectivity between Origin and Destination, 16th Congress of IABSE "Urban Transportation Challenges", 2000

(Keywords: リダンダンシー, 防災道路網計画)