

インフラ耐震構造計画におけるマクロ合意形成のファジィ化 —最小期待損失最適解の不安定性と想定外の恣意性—

○河村 廣*1

キーワード：インフラストラクチャー，耐震構造計画，最小期待損失，ハザード関数，ファジィ集合，想定外

1. 序

1911.3.11.の東日本大地震では大規模インフラ構造の設計外力や被害が「想定外」の大きさであったということで、全てが免責されている。その再設計において、残念ながら現在のところ未だ、関係者間での合意形成がうまく機能していないようである。「想定外」の意味も含めて意思決定システムの確立は喫緊の課題である。

筆者は当初、総論的なマクロ合意形成場モデルを提示し¹⁾、次いで、コスト最小化モデルに具体化した(図1)²⁾。

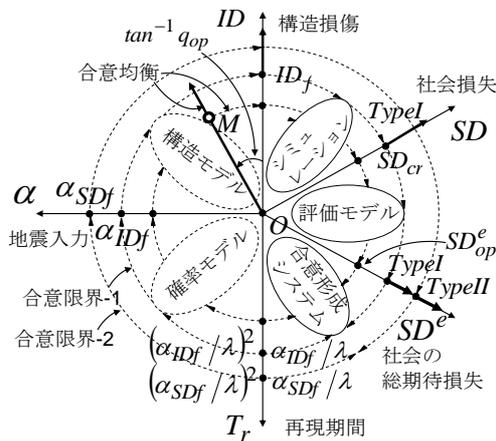


図1 マクロ合意形成場モデル (最適化手法)²⁾

更に既報³⁾では、不確実で主観的な因子をファジィ化し、最適解の存在性について考察を加えた。

本報では 0.5 レベルファジィ意思決定法を新たに定義、導入し、最適解や想定外の存在性について、更に精細に検討を加えようとするものである。

2. 最適計画の定式化^{2,3)}

既報^{2,3)}では、最適計画の目的関数として社会の総期待損失 SD^e を次式で与え、その最小化を目指した。

$$SD^e = X + Y + Z \quad (1)$$

ここに

$$X = C_i + C_m + C_a + (-C_v)^* \\ = iq + mqT_l + aq + (-vT_l)^* \quad (2)$$

$$Y = (\alpha/rq)p \quad (3), \quad Z = SD^d p \quad (4)$$

但し、 q はインフラの頑健性 (剛性)、 T_l はインフラの寿命、 α は地震再現期間中の最大地震入力、 r は社会の頑健性 (剛性)、 p は T_l 中の地震発生確率、 SD^d は地震による

直接の社会損失、 i, m, a, v は、それぞれ初期コスト (C_i)、維持管理コスト (C_m)、廃棄コスト (C_a)、社会的メリット (C_v) に関する係数である。尚、ここでは議論を簡単にするため、 T_l 及び r は一定とし、式2の*項を無視する。 X はインフラコスト、 Y はインフラ損傷による社会損傷コストであり、社会の地震による直接損傷特性を剛塑性とし、式4の Z も無視することとする。更なる詳細については既報²⁾を参照されたい。

地震入力 α は文献⁴⁾より次式のハザード関数を仮定する。

$$\alpha = \lambda T_r^n \quad (5)$$

但し、 T_r は地震再現期間、 λ は係数、 n はべき乗指数。

以上より式1~5は下式となる。但し、 A, B は常係数。

$$SD^e = X + Y = Aq + B(T_r^n/q)p \quad (6)$$

最適計画問題として、 q と T_r を設計変数とし、 n と p は環境変数とする。 n はハザード関数を規定するもので、地震学的な知見に基づき、 p には専門的な知見だけでなく個人の主観性によっても影響を受けるものであり、 n と p はファジィ化し、次章で示す 0.5 レベルファジィ意思決定法により合意形成されるものとする。

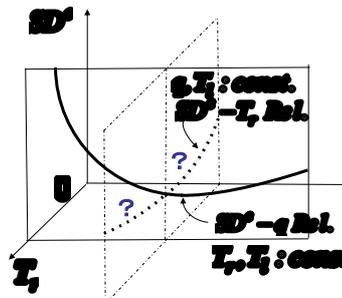


図2 $SD^e - q - T_r$ 関係

(q 及び T_r が各々一定の場合)

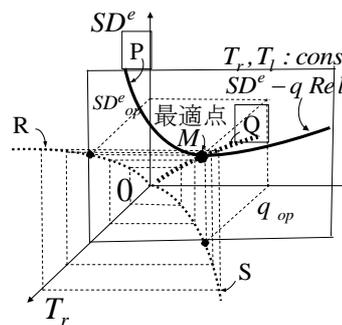


図3 最適点 (SD^e_{op}, q_{op}) の軌跡

q と T_r を設計変数とする SD^e の空間曲面の概形は、図2のように q 及び T_r が各々一定の場合の直交曲線によってイメージできる。

T_r が一定の場合は、式6より最小コストの最適点 M が存在するので、点 M の q 及び T_r に関する下式から、図3のように空間曲線 Q を描くことができる。

$$q_{op} = \left(\frac{B}{A}\right)^{1/2} T_r^{n/2} p^{1/2} \quad (7)$$

$$SD^e_{op} = 2(AB)^{1/2} T_r^{n/2} p^{1/2} \quad (8)$$

式7, 8は図3中の曲線 S, R に対応する。

3. 0.5 レベルファジィ意思決定法

ここでは民主的な原理を尊重し、0.5 レベルファジィ意思決定法を図 4,5 のように定義、導入した。

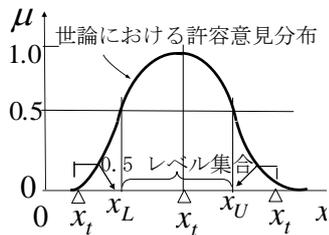


図 4 0.5 レベルファジィ意思決定法

図 4 の μ 分布は世論における設計変数 x に関する許容意見分布を示す。メンバシップ値 0.5 のレベル集合⁵⁾は x_L, x_U の下及び上限値を有する。行政又は施主などの意思決定 (の権限を有する) 者が x_t の腹案を持ちそれが 0.5

レベル集合内にあれば、世論の 50% 以上の支持を得ているので問題なく採用するが、外にあるときは近いほうの上下限値を選ぶことになる。図 4 では単峰性の μ 分布を例示しているが、多峰性では 0.5 レベル集合が複数生じるため、最終決定では意思決定者にとって最も好都合な (近い) 0.5 レベル集合の上下限値が採用されることになる。

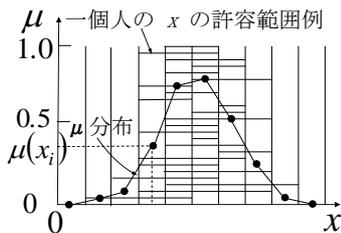


図 5 許容意見分布の求め方

図 5 は図 2 の μ 分布の求め方の概要を示しており、例えば複数の回答者に対して x の許容範囲を尋ね、各 x についてその回答者数を総和で除したものである。従って、0.5 レベル集合の x については、

半数以上の許容者が存在することになる。

ファジィ変数 n については以下のように考える³⁾。

地震の再現期間 T_r 年に対する最大加速度 α の年超過確率を p_l とすれば、日本建築学会荷重指針⁴⁾(p.524)や神田⁶⁾により示されているように、以下の関係式が成り立つ。

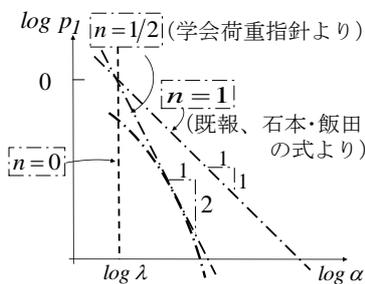


図 6 地震ハザード関数³⁾

$$p_l = 1/T_r \quad (9)$$

式 5.9 より p_l と α の関係として求めた地震ハザード関数は、 n をパラメータとして、図 6 のように単純化される³⁾。日本建築学会荷重指針⁴⁾(pp.479-481) では

図 6 の実曲線が右下がりの実直線に概略近似されている。しかし、先の東日本大震災特に原発の事故以来、海洋型の巨大地震における震源の連動性から内陸型の活断層の評価に至るサイズシティの評価では、地震科学者間でさえ大きく分かれている。

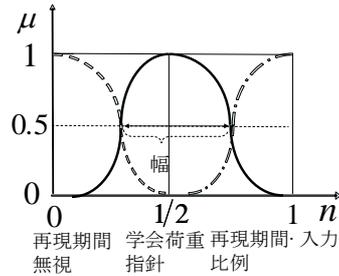


図 7 地震再現期間のべき指数 n のメンバシップ関数例³⁾

既報³⁾では n の設定幅の 0 ~ 1 への拡大を提唱し、図 6 による学会荷重指針との比較を行い、図 7 のようにメンバシップ関数を例示した。0 の場合は再現期間を

考えない、即ち、地震活動を問わずに地震入力を設定し、1/2 の場合は、学会荷重指針⁴⁾に概略準拠し、そして 1 の場合は、再現期間と入力

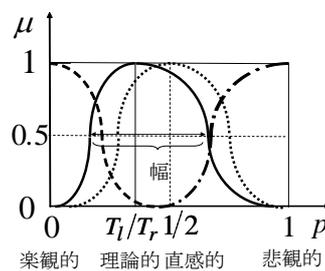


図 8 最適計画における地震発生確率のメンバシップ関数例

分布としては過大な入力を設定していることになる。ファジィ変数 p については、図 8 のようなメンバシップ関数を例示したい。0 の場合は極めて楽観的な、 T_l/T_r の場合は T_l を T_r で除す理論的な、1/2 の場合は常数的に中庸を行く、そして 1 の場合は極めて悲観的な、発想に基づくものである。

図 2 の空間認識への参考として、上記の p, n の組み合わせによる社会期待損失 Y を表 1^{2,3)} に示す。(但し $C = \lambda/rq$)

表 1 社会期待損失 Y を与える p, α の組み合わせ^{2,3)}

$p \backslash n$	(Case 0) 0	(Case A) 1/2	(Case B) 1
(Case 0) 0	(Case 0-0) 0	(Case 0-A) 0	(Case 0-B) 0
(Case 1) T_l/T_r	(Case 1-0) CT_l/T_r	(Case 1-A) $CT_l/T_r^{1/2}$	(Case 1-B) CT_l
(Case 2) 1	(Case 2-0) C	(Case 2-A) $CT_r^{1/2}$	(Case 2-B) CT_r

図 3 の空間認識への参考として、上記の p, n の組み合わせによる $SD_{op}^{e'} - T_r$ 関係を表 2 に示す。

$$\text{但し、} SD_{op}^{e'}/2(AB)^{1/2} = T_r^{n/2} p^{1/2} \Rightarrow SD_{op}^{e'} \quad (10)$$

表 2 p, α の組み合わせによる $SD_{op}^{e'} - T_r$ 関係

$p \backslash n$	(Case 0) 0	(Case A) 1/2	(Case B) 1
(Case 0) 0	(Case 0-0) 0	(Case 0-A) 0	(Case 0-B) 0
(Case 1) T_l/T_r	(Case 1-0) $T_l^{1/2}/T_r^{1/2}$	(Case 1-A) $T_l^{1/2}/T_r^{1/4}$	(Case 1-B) $T_l^{1/2}$
(Case M) 0.5	(Case M-0) $0.5^{1/2}$	(Case M-A) $0.5^{1/2} T_r^{1/4}$	(Case M-B) $0.5^{1/2} T_r^{1/2}$
(Case 2) 1	(Case 2-0) 1	(Case 2-A) $T_r^{1/4}$	(Case 2-B) $T_r^{1/2}$

4. 社会層期待損失の定性的性質

式6及び図2より、表1の n, p の組み合わせの下で、 q 一定での SD^e を T_r 軸について描いたのが図9である。図

9の一部は既報²⁾において既に描いたものであるが、既報³⁾により n, p を拡張したものである。

図9では、単調減少、一定、単調増大の変化が混在し、

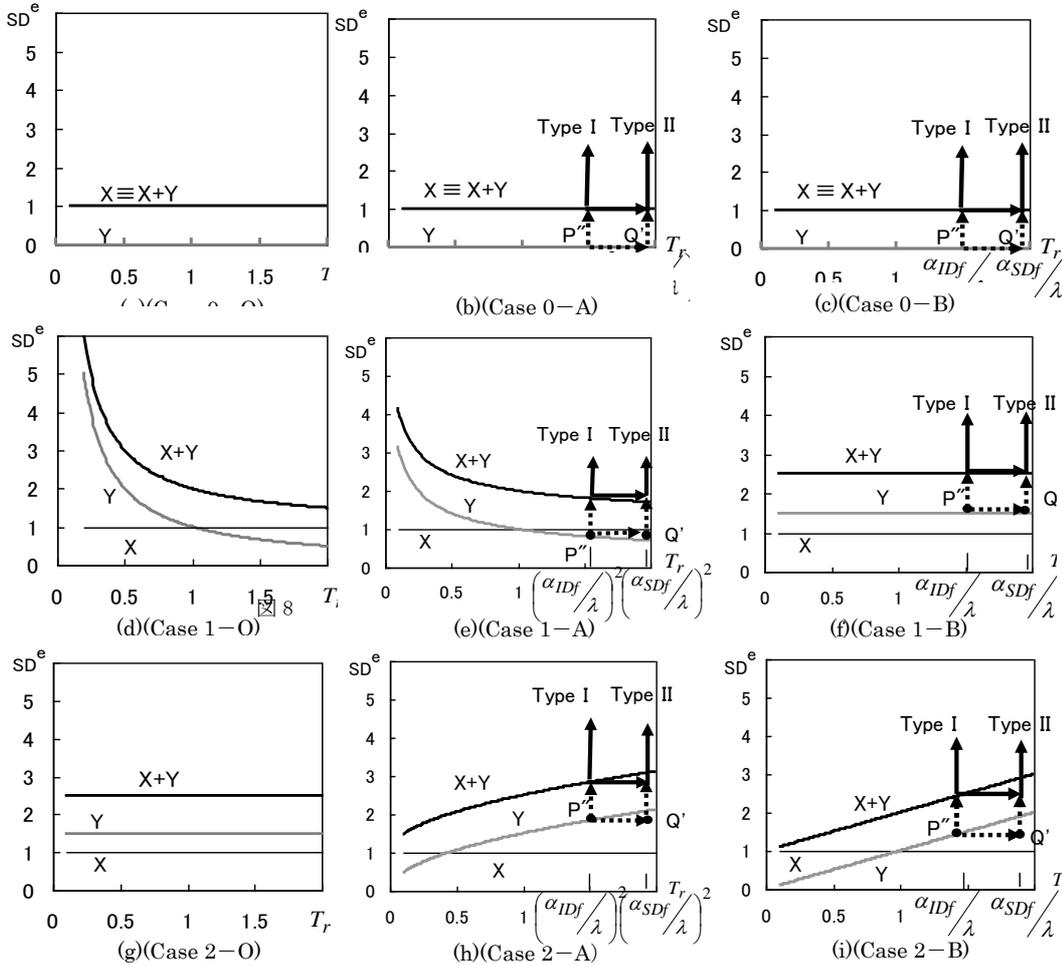


図9 社会総期待損失-再現期間の関係 (一部は既報²⁾)

最適解が存在しないのが大きな特色である。既報²⁾では、入力と損傷の関係について、インフラ(地震入力-損傷)及び社会(インフラ損傷-社会損傷)においては完全弾塑性型を、地震入力による社会の直接損傷については剛塑性型を仮定しており、式5より降伏時の地震入力 α に対応する T_r によりType I, IIの社会降伏(崩壊)が生じることを説明している。更に補足すると、Type Iはインフラの降伏(崩壊)が即社会の崩壊をもたらす場合に、Type IIはインフラとは別に地震入力により直接に崩壊に至る場合に対応する。

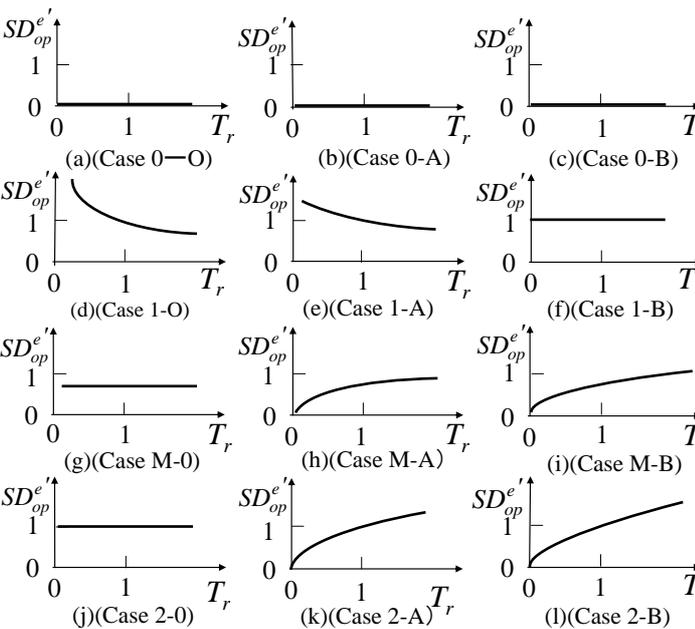


図11 最適(最小)社会総期待損失-再現期間の関係

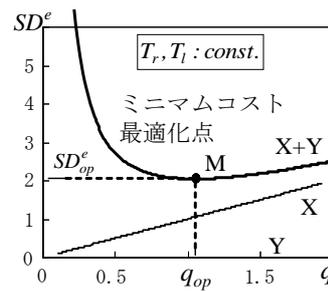


図10 社会総期待損失-インフラ頑健性の関係及び最適点²⁾

図10は T_r が一定の時の q 軸に関する SD^e 曲線であるが、式6より最適点Mが存在する²⁾。

最適点Mの存在性を調べるために、図3及び式8,10(式7は8と同型)により表2の n, p の組み合わせの下で SD^e_{op} を T_r 軸について描いたのが図11である。定性的には図9と差異がない。総じて T_r 軸に対して極値は存在せず、更に図8で設定した p として T_i/T_r 及び1/2が併用される場合には、単調増加と減少が混在することになる。

5. ファジィ化及び最適化による合意形成モデル

図 12 に本報で採用したファジィ化及び最適化された合意形成モデルの概略を示す。左下から世論、専門家、行政などによるファジィ化された意見分布を入力し、右下から最小化社会期待損失、インフラ頑健性、地震再現期間などが出力される。

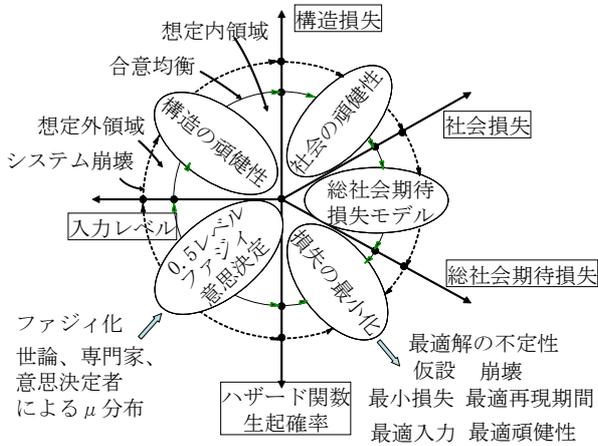


図 12 ファジィ意思決定及び最適化による合意形成モデル

6. 最適解に関する考察

6.1 最適解のファジィ不安定性及び不定性

図 9, 11 より最適解における T_r は、 n, p の組み合わせ下において図 13(b), (c), (d) のように、「長ければ長いほど良い」、「どの長さでも良い」、「短ければ短いほど良い」の 3 ケースが生じる。一方、第 2 章で述べたように、意思決

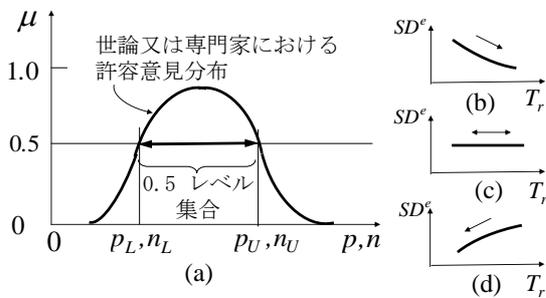


図 13 最適解の不安定性

定は図 13(a)の世論又は専門家における許容意見分布の 0.5 レベル集合の範囲内でなされるが、その中に同図 (b), (c), (d) のケースが混在する可能性がある。ここでは、最適解のファジィ不安定性と称する。

もしも図 13(c)が選ばれた場合は、 T_r は任意に選ぶことが可能となる。式 11 の p を式 10 に代入して式 12 を得、

$$p = KT_r^{-n} \quad (11), \quad SD_{op}^e = K^{1/2} \quad (12)$$

T_r は任意に選ぶことが可能となる。但し、 K は定数。これはハザード関数の確率的考慮を式 11 が相殺したものと思われる。現実には近視眼的にインフラの初期コストやインフラ寿命 T_r などの別の因子の多寡で決められる可能性がある。ここでは、最適解の不定性と称する。

6.2 再現期間範囲の上下限界性

図 13(b), (c), (d) の各ケースにおいては、図 6 のハザード関数や図 9 などから図 14 に示されるような T_r の上下限

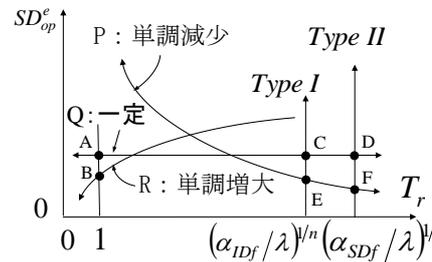


図 14 再現期間の存在範囲

値が存在することになる。具体的には、単調減少の P 及び一定の Q においては、インフラや社会の崩壊に対応する C, D, E, F 点である。一定の Q 及び単調増大の R に対しては T_r の最短期間 (例えば 1 年) の A, B 点である。現実には、A, B 点では仮想的な構造が選ばれるであろうが、インフラや社会の極限状況に至る C, D, E, F 点でコストが合わない場合には、その直前の T_r に留める必要がある。後者の場合は所謂「想定外」が存在することになる。

7. 結

本報では社会的にも甚大な被害をもたらす大規模インフラの耐震構造計画における合意形成のメカニズムに考察を加え、問題点を明らかにした。

手法としては、図 1 を修正し、新たに導入した図 12 の合意形成モデルを採用した。

その結果、最適解の不安定性や不定性、再現期間の上下限界性などを明らかにし、先の東日本大震災後の「想定外」を含む社会的迷走の要因に関する有益な知見を得た。

今後は実社会現象を踏まえたより精細な検証が必要と思われる。

【参考文献】

- 1) 河村廣：インフラ構造計画における想定外と社会的合意形成ー自然災害に対するマクロ合意形成場モデルー、日本建築学会、第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、2011. 12, pp. 147-150.
- 2) 河村廣：インフラ構造計画のマクロ合意形成場モデルにおける合意均衡と合意限界、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 52 号・構造系、2012.6, pp.5-8.
- 3) 河村廣：インフラ耐震構造計画におけるマクロ合意形成のファジィ最適化ー地震発生確率と地震ハザード関数の拡張とファジィ化ー、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)2012.9, pp.85.86.
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)、日本建築学会 2011. 6, 15.
- 5) Zadeh, L.A.: Similarity Relations and Fuzzy Orderings, Information Sciences. 3, 1971, pp.177-200.
- 6) 神田順：地震動の再現周期と超過確率、技術手帳、土と基礎、53-6 (569), 2005.6, pp.38-40.

*1 神戸大学 名誉教授 工博