

地震リスクマネジメントのための集約型・非集約型リスク評価モデル

能島 暢呂 (岐阜大学工学部)

1. はじめに

阪神淡路大震災の被害は、わが国の地震防災体制や危機管理のあり方に大きなインパクトを与えた。とりわけ、内陸直下型地震や海洋性巨大地震がもたらす「低頻度巨大災害」に対する取り組み方に関しては、構造物の耐震設計から防災投資に至るまで、従来の地震防災対策の枠組みを根本的に変革する必要性に迫られつつある。

こうした中で、土木構造物の耐震設計基準の改訂作業は、荷重レベルと構造物や施設の重要度レベルの組み合わせに応じて、適切な耐震性能レベルを規定することを基本理念とする「性能規定型設計」¹⁾への移行を前面に押し出しながら進められてきた^{2),3)}。これは、「被害もしくは損失」を「許容」するか「回避」するかの選択を、耐震設計基準の段階で規定しようとする傾向にあることを意味しており、建築分野においても、おおむね同様の趨勢である⁴⁾。

本来であれば、このような許容・回避の判断を下す場合には、蓋然性を考慮して、「リスク許容」および「リスク回避」の形で行われるのが適当であり、地震リスクマネジメントの枠組みに基づいて、合理的に耐震対策を検討することが望ましい。地震リスクマネジメント手法は、地震災害発生の時間・規模・場所に関する不確定性を確率的に扱い、「発生確率×被害の大きさ」で定義される地震リスク（期待損失）を基本的な評価尺度として、地震対策のための意思決定支援を合理的に行うことを狙いとしている。ところが現状では、

- ・ 荷重レベルと発生頻度の対応付け
- ・ 損失評価における不確定要因の定量化

の2点において十分な検討が行われているとはいえないために、設計体系としての「性能規定型設計」と、意思決定支援体系としての「地震リスクマネジメント」の整合を図りながら取り扱うことは困難である。

以上のような状況を背景として、ここでは、性能規定型設計への移行を視野に入れた地震リスクマネジメント手法の開発を目指して、地震リスク評価の基本的

なフローを再整理するとともに、地震リスク評価における情報の集約方法や代表値の表現方法に着目して、「集約型」および「非集約型」の地震リスク評価モデルについて定式化を行う。

2. 集約型リスク評価モデルの定式化

図1のように、ある構造物に対して、荷重レベル S と損失レベル L のなす確率空間を考え、荷重と損失の同時確率密度関数 $f(s, \ell)$ が与えられている場合、期待損失 \bar{L} は次式で求められる。

$$\bar{L} = \int_S \int_L \ell f(s, \ell) d\ell ds \quad (1)$$

$$= \int_S \int_L \ell f(\ell|s) h(s) d\ell ds \quad (2)$$

ここで $f(\ell|s)$ は、荷重レベル S を条件とする損失レベル L の条件付確率密度関数であり、統計的・実験的・解析的手法を用いたフラジリティ解析により求められる。また $h(s)$ は、荷重レベル S の確率密度関数（ハザード密度関数）であり、確率論的地震ハザード解析 (PSHA) により求められる。すなわち、荷重レベル S が s を超過する確率を表わすハザード・カーブ

$$H(s) = P[S > s] \quad (3)$$

を用いれば、ハザード密度関数は次式で与えられる。

$$h(s) = -\frac{dH(s)}{ds} \quad (4)$$

一方、 $f(\ell|s)$ を用いて荷重レベル S ごとに ℓ を平均化した

$$L(s) = \int_L \ell f(\ell|s) d\ell \quad (5)$$

を期待損失関数と定義すると、期待損失 \bar{L} は、

$$\bar{L} = \int_S L(s) h(s) ds \quad (6)$$

となり、 $L(s)h(s)$ （リスク密度関数と定義する）の面積で表わされる。

さらに、損失 L の非超過確率を表わす損失分布関数

$$\begin{aligned} F_L(\ell) &= P[L \leq \ell] = 1 - P[L > \ell] \\ &= 1 - H[L^{-1}(\ell)] \end{aligned} \quad (7)$$

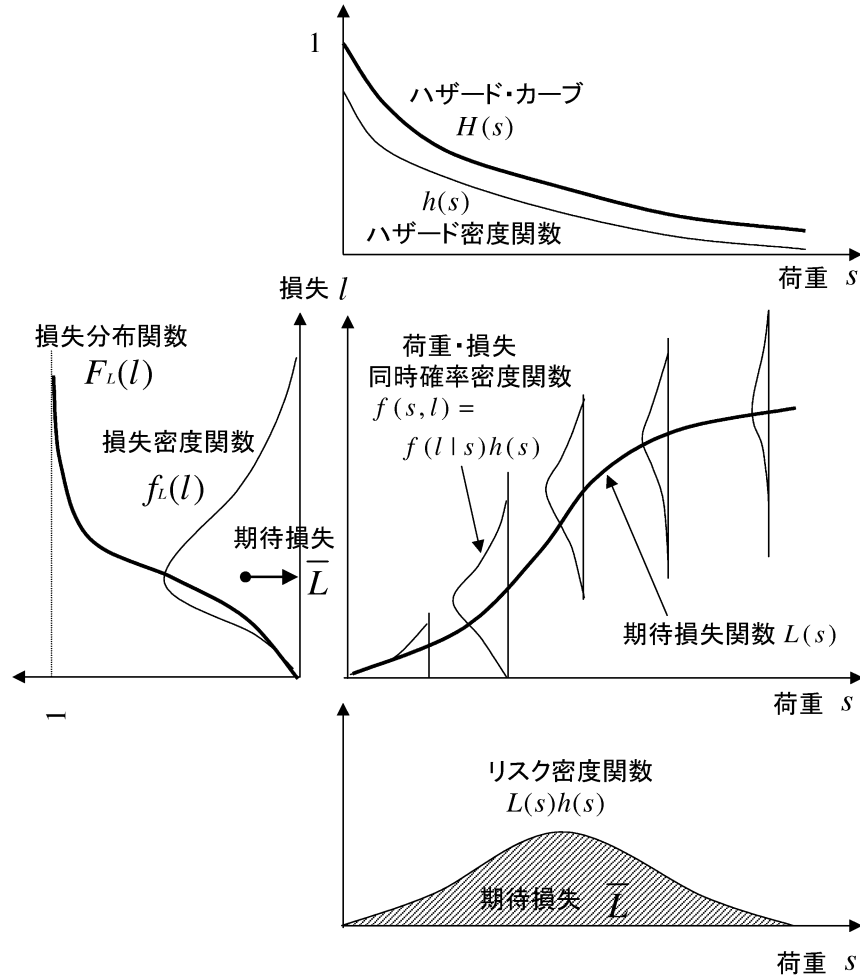


図1 集約型リスク評価モデルの概念

と、その一次導関数である損失密度関数

$$f_L(\ell) = \frac{dF_L(\ell)}{d\ell} = -\frac{dH[L^{-1}(\ell)]}{d\ell} \quad (8)$$

の関係式を用いて式(6)を変形すれば、期待損失 \bar{L} を損失密度関数の期待値として表現できる。

$$\begin{aligned} \bar{L} &= \int L(s)\{-dH(s)\} \\ &= \int L(s)\{-dH[L^{-1}(\ell)]\} \\ &= \int L(s)dF_L(\ell) \\ &= \int_L \ell f_L(\ell)d\ell \end{aligned} \quad (9)$$

損失 L の超過確率 $P[L > \ell] = 1 - F_L(\ell)$ は、式(3)の「ハザード・カーブ」と対比させて、「リスク・カーブ」と呼ばれることがあり、超過確率 p に対応した損失の代表値 L_p を定義することもできる。

$$L_p = F_L^{-1}(1 - p) \quad (10)$$

以上のように、期待損失などのリスク指標を求める過程において、発生頻度レベル・荷重レベル・損失レベルに関する情報を、いったん、 S 軸上あるいは L 軸上で集約することから、この評価方法を「集約型リスク評価モデル」と呼ぶこととする。単一のリスク指標で地震リスクを表現できる利点を持つ反面、リスクの内部構造まで立ち入って、地震対策の狙いやその効果を立体的に表現することが困難であるため、性能規定型設計における目標性能（あるいは要求性能）との関連付けを明示することができない。具体的には例えば、「想定外の過大な外力が作用した場合には、ある程度の被害を許容することが現実的であるが、人命喪失や構造物の完全崩壊という被害レベルは回避したい」といったリスク回避・許容の傾向を、柔軟に取り入れることが難しい。

3. 非集約型リスク評価モデルの定式化

集約型リスク評価モデルとは対照的に、発生頻度レベル・荷重レベル・損失レベルに関する情報を集約することなく、リスク評価とリスクマネジメントの一貫性を重視した「非集約型リスク評価モデル」を定義する。その狙いは、リスク回避のための防災対策（具体的には、構造物の強化による $f(l|s)$ の低減の形をとる）が地震リスクの内部構造をどのように変化させるか詳細な検討を行いながら、対策の正当性や妥当性を評価し、リスク回避およびリスク許容の意思決定を支援することにある。

いま図2に示すように、荷重レベルごとに許容される損失の大きさを規定する許容損失関数

$$\ell^* = \ell^*(s) \quad (11)$$

を導入すると、荷重レベル S と損失レベル L のなす平面は、許容損失関数 ℓ^* を境界線として、許容領域と非許容領域に分割される。このとき、損失が ℓ^* を超過する確率は、非許容領域のみを用いて、

$$P[L > \ell^*] = \int_S \int_{L > \ell^*} f(l|s)h(s)dl ds \quad (12)$$

で表される。また、期待損失 \bar{L} は、同じく損失関数 ℓ^* を境界線として、許容リスク (acceptable risk) $L_a(\ell^*)$ と非許容リスク (unacceptable risk) $L_u(\ell^*)$ に分解される。

$$\bar{L} = L_a(\ell^*) + L_u(\ell^*) \quad (13)$$

ただし、

$$L_a(\ell^*) = \int_S \int_{L \leq \ell^*} \ell f(l|s)h(s)dl ds \quad (14)$$

$$L_u(\ell^*) = \int_S \int_{L > \ell^*} \ell f(l|s)h(s)dl ds \quad (15)$$

このようにして分解された2つの項に、リスク受容度を表わす重み係数 w_a と w_u を乗じて足し合わせることで、ペナルティー付き期待損失

$$\overline{L_w(\ell^*)} = w_a L_a(\ell^*) + w_u L_u(\ell^*) \quad (16)$$

を得ることができる。ただし、 $0 < w_a \leq 1 \leq w_u$ であり、 $w_a = w_u = 1$ とした場合には、 $\overline{L_w(\ell^*)} = \bar{L}$ となり、集約型リスク評価モデルを用いた場合と変わりなく、リスク許容・リスク回避に何ら特徴的な傾向

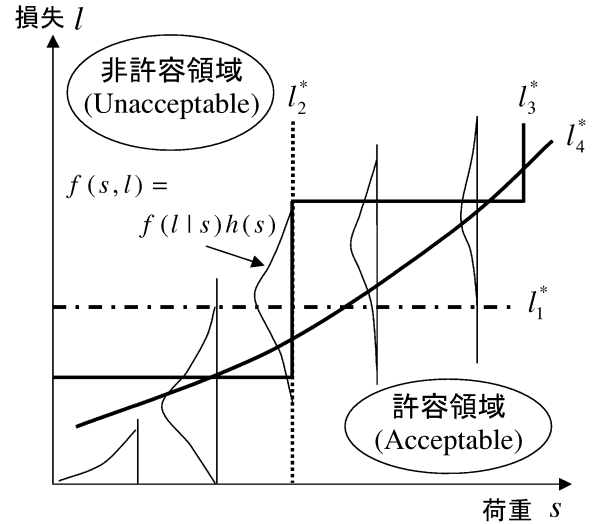


図2 非集約型リスク評価モデルの概念

がないことに相当する。逆に、 $w_u = \infty$ とした場合には、非許容領域内にリスクが残存することを絶対に認めず、完全回避を要求していることに相当する。

このような重み係数は、そもそも意思決定者の主観性を多分に反映するものであるが、許容リスクについての社会的合意⁵⁾を得たうえで、いったんルールを定めてしまえば、防災対策を客観的に相対評価するための手がかりとなる。

4. 地震リスクマネジメントへの適用に向けて

以上のように、「非集約型モデル」を導入することによって、許容領域内外に存在するリスクを定量化し、リスク許容とリスク回避というリスク対策の基本的姿勢を明確にすることが可能となる。

性能規定型設計の枠組みに照らして、図2に示す4種類の許容損失関数の意味を考察してみると、それぞれ次のように解釈される。

- ℓ_1^* : 一定レベル以上の損失は決して許容しない。
- ℓ_2^* : 一定レベル以上の荷重によって引き起こされる損失については、いかなる損失も許容する。
- ℓ_3^* : 2段階の荷重レベルにより、それぞれの許容損失レベルを規定する。
- ℓ_4^* : 上記3ケースを含むあらゆるケースの一般化表現であり、連続型許容損失関数を用いて許容損失レベルを規定する。

このうち、 l_1^* と l_2^* は極端なケースであると感じられるかも知れないが、実際に「集約型モデル」を用いて、リスクを L 軸上に集約する場合には l_1^* を、 S 軸上に集約する場合には l_2^* を、それぞれ判断の根拠として採用することになるわけである。

土木構造物の耐震基準における性能規定法の多くは、 l_3^* に類する扱いを基本としており、「レベル1地震動」と「レベル2地震動」の2段階の外力区分に対して、構造物や施設の重要度に応じて、要求される耐震性能を規定する方式をとっているが³⁾、耐震設計の実務において、荷重レベルや重要度レベルのランク分けが細分化されれば、 l_4^* に近い許容損失関数を用いることとなる。

構造物が規定された耐震性能水準を満足するかどうかは、耐震性能照査により確認されることである。近年、より高精度な照査方法を確立することを目指して、阪神淡路大震災の被災状況を踏まえた実証的な研究が、活発に進められつつある⁶⁾。一方、将来、発生するであろう外力とそれによる構造物損傷の両者には、種々の不確定要因が付随することから、必然的に、リスク下で判断することが避けられないことも事実である。従って、規定した耐震性能の充足性を、客観的・定量的に保証するための基準をあわせて整備する必要が生じるといってよい。

性能規定型の設計体系における要求性能あるいは目標性能を、単なる「精神目標」に留めないためにも、「非集約型モデル」に基づく地震リスクマネジメントの手法を有効活用されることが期待される。

5. おわりに

本稿では、地震リスクマネジメントにおけるリスク評価手法を、データの集約方法と代表値の表現方法の違いに注目し「集約型モデル」と「非集約型評価モデル」に分類して、それぞれの定式化を行なった。さらに、今後、性能規定型設計への移行に伴って、地震リスクマネジメント手法の必要性が高まるとともに、「非集約型評価モデル」の適用範囲が広がるであろうことを指摘した。

内陸活断層や海洋性巨大地震に起因する地震ハザード評価の信頼性^{3),7)}、微小な確率と巨大な被害の積で

評価される地震リスクの不安定性 ($0 \times \infty$ ジレンマ)、さらに、リスク認知における種々のバイアスやギャップの存在など、様々な段階で、解決すべき課題は多々残されている。地震リスクマネジメントの全体像を論じる際には不可欠の項目であるが、ここでは詳しく触れることができなかつたので、別の機会に譲りたい。

なお、カタストロフィック・リスクへの社会経済的側面からのアプローチについては、土木計画学の分野を始めとする異分野での取り組みが活発化しており⁸⁾、耐震設計水準の合理的設定を目的とした費用便益分析の導入や、地震保険や証券化といったリスク・ファイナンスに関する研究が進められていることを付記しておく。

参考文献

- 1) SEAOC Vision 2000 Committee : Vision 2000 - A Framework for Performance Based Engineering of Buildings, 地震工学振興会ニュース, No.146, pp.42-50, 1996年.
- 2) 土木学会：耐震基準等に関する提言集, 1996年5月.
- 3) 土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会：レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書, 2000年3月.
- 4) 建築学会：建築および都市の防災性向上に関する提言 - 阪神・淡路大震災に鑑みて - (第三次提言), 建築雑誌, Vol.113, No.1418, 1998年2月.
- 5) Kameda, H. and Shinozuka, M. (eds.) : Workshop on Consensus on Acceptable Risk in Urban Seismic Hazard, Kyoto, Japan, Oct. 1996.
- 6) 例えば, 土木学会コンクリート委員会阪神淡路大震災被害分析小委員会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検討 - 検討課題と将来像 -, 2000年5月.
- 7) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会：長期的な地震発生確率の評価手法について (改訂試案), 1999年1月.
- 8) 土木学会土木計画学研究委員会災害リスク研究小委員会：土木計画学シンポジウム - 災害リスク研究の最前線と社会への提言 -, 2000年7月.