

# 構造物のリスクマネジメント

星谷 勝

Ph.D 武蔵工業大学教授

工学部都市基盤工学科

## 前提

1. リスクは損失を伴う蓋然事象
2. リスクは利得を含めて拡張できる。
3. 地震リスクマネジメントはハード・ソフト技術の総合化

### 1. 蓋然性

- ( 1 ) 確定事象はリスクといえない！
  - 「 経営が順調で今年は法人税が心配」
  - 「 協定を履行して危険地帯へ自衛隊派遣」
  - 「 来年は定年、長男の授業料納入をどうしよう」
- ( 2 ) 蓋然事象はリスク！
  - 「 明日は、集中豪雨で崖崩れが発生か」
  - 「 砂地盤で液状化が心配」

## 2. リスク概念の拡張

「 虎穴に入らずんば、虎子を得ず」  
ネガティブな損失もあるがポジティブな  
利得がある。

### LCC から LCR へ

会社経営、不動産運用、金融、証券投資分野へ  
も応用可能である。

## 3. ハード・ソフト技術の総合化

「 住民向け自然災害危険度の対話的情報共有化システム」

- ( 1) 信頼性解析技術
- ( 2) コンピューターソフト技術
- ( 3) データ観測・モニタリング技術

# リスクを受け止める

## 1. 設計法の国際化

informed consent  
disclosure

リスクの存在を認め、リスク情報を共有し、リスク発生  
の理由を説明する責任を認め、結果に対して責任を  
とる。  
accountability  
liability

## 2. 1995年阪神淡路大地震

## 3. Due Diligence 調査業務

### リスク(RISK)とは

1. 事故や災害の危険事象 - Peril 潜在的な可能性 - 危険
2. 地震、台風、火災、交通事故 - Hazard
3. 損失発生確率の大小 - Probability of Loss
4. 発生は考慮せず損失のみ - Loss
5. 結果が期待値から乖離する確率 予想外の99% バランス幅が大きい  
(不動産証券では収益・損失を考慮した  
キャッシュフロー(収益)に関して)

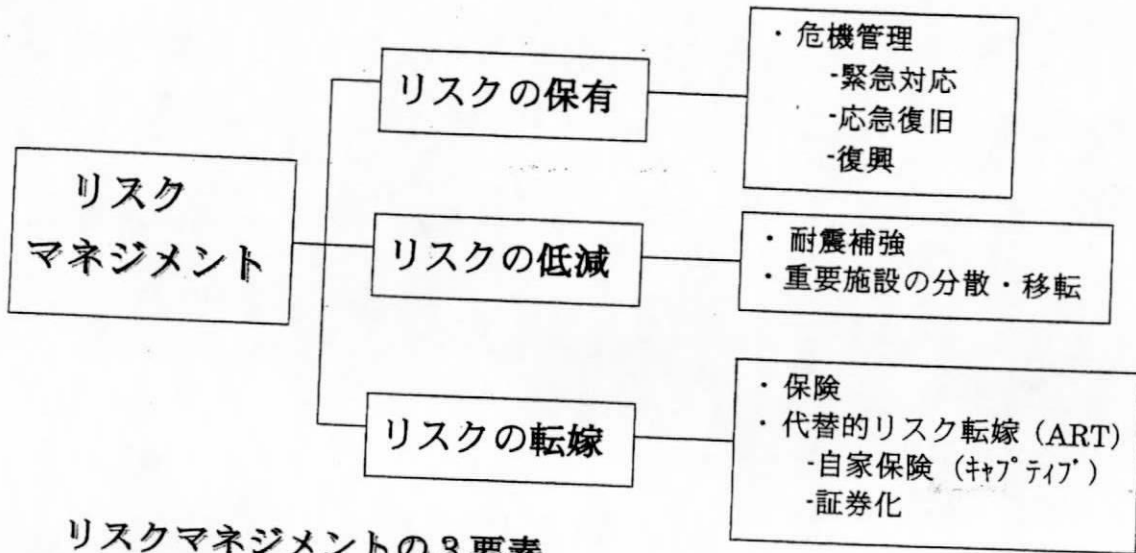
6. 発生確率を敷衍した損失 - 広義リスク
7. 発生確率と損失の積 - 狭義リスク

リスクの主体者の視点

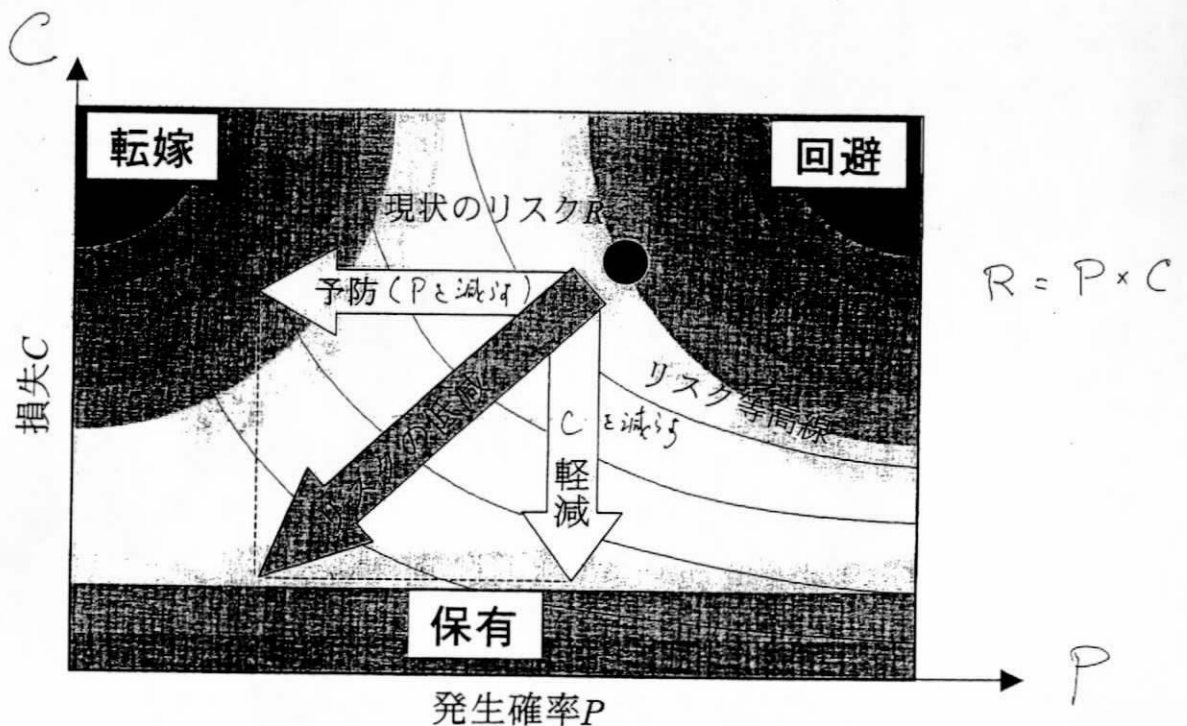
マンション住民: 人命・財産  
マンション所有者: 収益・管理費  
近隣施設管理者: 設備・管理費  
(口、国許): 設備・管理費  
近隣住民: 設備・管理費  
主体者の視点

リスク・マネジメントとは  
 できるだけ少ないコストで、組織に与える偶発的損失の不利益な  
 影響を最小化するため、組織の資産ならびに活動を  
 計画・組織・指揮・統制する過程（プロセス）である。

費用対効果  
 → cost minim.



リスクマネジメントの3要素



# 地震リスクマネジメントの必要性

これまでは

仕様設計による規制、画一的な情報

→ 不明確な責任の所在

これからは

規制緩和、情報公開 → 性能設計:

(原則: disclosure, accountability, liability)

→ 自己責任の明確化と

裁量(discretion)の拡大

→ リスク認知 → リスクの定量化

→ 費用効率 → リスクマネジメント

性能安全は  
あてにならない。

性能・安全基準  
と設計 (わかり易く)  
↓  
設計は大やむを得ない  
↓  
情報公開  
説明責任  
自己責任

# 地震災害リスクマネジメント

ほし 谷 勝\*

## 1. はじめに

土木施設は公共物であることから特に合目的性が問われる。ただ建設すればいいわけではなく国民の福祉に役立つと同時に環境にやさしく、かつ環境と調和のとれたものであることが強く求められる。現在、ダム建設計画、道路建設計画などの土木施設の見直しをはじめとして諸施設の建設計画の是非が国全体の話題として議論されている。このような状況下において、すでに建設された施設に対しては、少なくともそれらを効率的にかつ効果的に維持管理することが求められる。また、長期間にわたり使用していくものであるから、その間にいろいろな自然災害の危険にさらされるので既存、新設にかかわらず危険を最小限に抑える方策を立てることが必要である。そして、限られた財源を用いて効果的に防災管理をしていくにはハード技術一辺倒では解決できない。GIS や信頼性理論などの先端技術を駆使するソフト技術の展開が求められる。リスクマネジメントはソフト技術を用いてリスクを評価し、費用対効果を考慮した最適防災計画を立案し実施するマネジメント技術である。

本稿は、リスクとは何か、を明確に定義する。そして、地震災害に対するリスクマネジメントの基本技術を解説する。次いで、リスクの一部を地震保険に転嫁する場合のライフサイクルコストを最小化する方法を示す。最後に、リスクマネジメントの適用例を示す。

なお、リスクマネジメントは土木施設に限らず、ライフライン諸施設、農業水利システム、建築構造物、電子機器工場、石油精製プラントなどを対象に広く適用されるものである。

## 2. ソフト技術の必要性

リスクは、不安を連想するネガティブな言葉として受け止められているようである。ところが、最近では政治、経済、金融、環境問題など、さまざまな分野で耳にするようになった。土木建築分野でもリスクは頻繁に使われるようにな

った。ネガティブな言葉でありながら、使われるようになったのは、リスクを正面から見ずえる土壤が醸成されてきたからである。そのきっかけは、1995年の兵庫県南部地震である。多くの建設技術者は、自分たちがつくった構造物が壊れる姿を想像だにしなかった。ところが、多くの住宅やビルそして道路などが破壊される様を目の当たりにして「絶対はありえない」といった視点から構造物を見られるようになった。過去には、大きな地震のたびに新たな課題が示され、多くの研究は構造物をより丈夫にすることに注力された。つまり、壊れないようにすることであった。

ところが、兵庫県南部地震を機に、稀に起きる大地震では多少の被害は容認する、いわゆるリスクの存在を肯定する方向へと移り変わった。この進歩により、リスクを前提とした議論ができるようになり、合理的な耐震性能の評価、あるいは効率的な耐震対策のあり方について、利用者との共通な認識のうえに建設的な議論ができるようになってきた。いわゆる合意形成である。このような背景は、地震リスクを効率的にかつ効果的に管理するソフト技術、いわゆるリスクマネジメントを普及するうえで、大きな原動力となっている。

リスクマネジメントは、地震リスクを定量的な情報として記述し、費用効率の高い対策を選定するための支援ツールといえる。その基礎理論は、確率・統計学であり、GIS やエキスパートシステムなどの先端技術である。そして、地震工学、地震学、構造工学などのさまざまな分野の工学技術に肉づけされた実用的なツールとして体系化されたものである。

地震防災で問われるのは、新工法、新材料、あるいは構造挙動のモニタリングセンサーといったハード技術の開発だけでなく、それらを上手に使いこなすリスクを管理できるソフト技術である。

## 3. リスクとは

まず、「リスクとは何か」ということを定義することにした。ここでは、リスクを管理することが目的であるから、リスクを定量的に表現できるものでなければならない。漠然ととらえるのでは、対策の効果によりリスクがどの程度

\* Ph. D. 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科

低減されたのかを定量化できないからである。日頃よく使われる“リスク”あるいは“危険”という意味には、証券投資のように利得あるいは損失の両方が生じる可能性、自然災害のように損失だけが一方的に生じる可能性等に見られる不確定な事象の大きさを言うこともあれば、事故や災害の事象そのものを示すこともある。ここでは、リスクを定量的に扱うために、(1)広義のリスクとして、発生確率を伴う損失の大きさ、(2)狭義のリスクとして、発生確率と損失の積、すなわち、損失期待値と定義する。

図1は、住宅1件当たりの出火による損失を示すイベントツリーである。火災発生確率が0.001であり、発生した場合にそれが小火にとどまる確率が0.2である。半焼になる確率は0.3、全焼になる確率は0.5である。火災が発生しない確率は0.999である。この場合には、小火の発生確率は、火災が発生したという条件(確率0.001)で小火(確率0.2)だから、 $0.001 \times 0.2 = 0.0002$ となる。そして小火による損失が20万円である。同様に、それぞれの損失発生確率と損失額が示されている。

この例で言えば、広義のリスクは、発生確率を伴うそれぞれの損失20万円、500万円等々である。狭義のリスクは、平均された値、すなわち損失期待値の1.154万円である。リスクマネジメントでは損失期待値に注目し、防災対策によりこの数値の低減を目指すことになる。しかしながら、損失の大きさの分布特性はこの数値からでは推察できない。

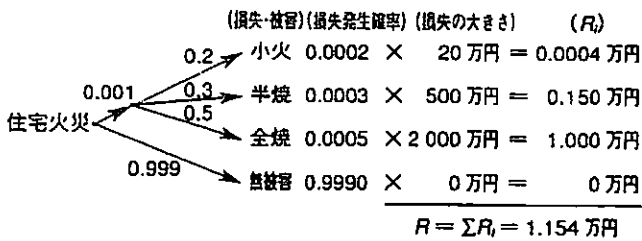


図1 損失発生確率と損失 (住宅火災)

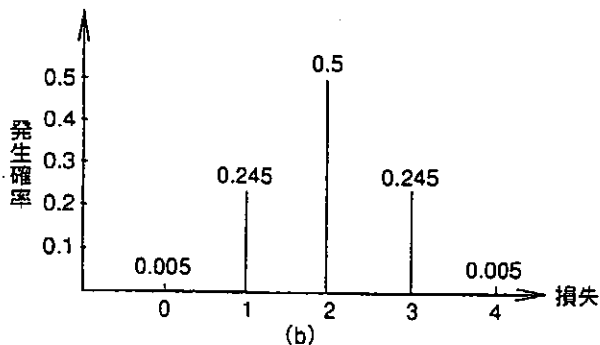
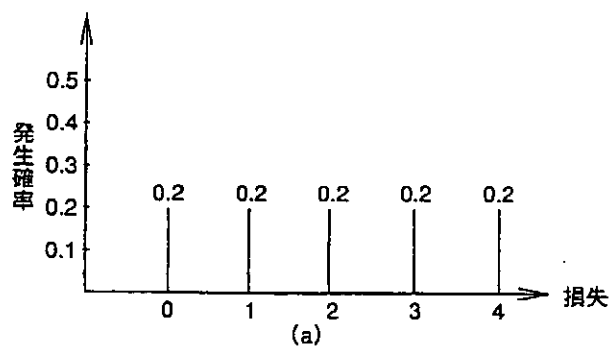


図2 損失の確率分布

い。発生確率は小さいが全焼による2000万円の損失が起こり得るし、一方、高い確率で無被害である。細かくリスクを検討する際には広義のリスクを用いることが必要である。図2は、二つのリスクを比較したものであるが、両者は狭義のリスクが0.2で同じだが、広義のリスクでは、損失の分布特性に見られるように大きな違いがある。〔(注)筆者は、損失の分布特性を定量化し、かつ損失の大きさを表現できるリスクとして、損失期待値に情報エントロピーを併用することを考えている。〕

#### 4. 地震災害リスクマネジメント

地震リスクマネジメントは、図3に示すように、(1)リスクの識別と分析を行い、損失の大きさと発生確率を評価する。(2)リスクを低減する方策を検討し、リスク低減の未処理分に対して、保有か、転嫁か、それとも回避かの方針を立てる。(3)方策の実行、の三つの段階から構成される。この方策をどの時点に対応させるかによって、リスクマネジメントはクライシスマネジメントとリスクマネジメントに分類される。

クライシスマネジメントは、地震発生事後の行動のために、事前に具体的な方策を立てておき、地震時には“被害やそれがもたらす損失をいかに拡散させず迅速に解消するか”を目指すものである。

一方、リスクマネジメントは、“被害や損失が発生する前に、科学的にそれらを分析して、損失を未然に最小に抑え

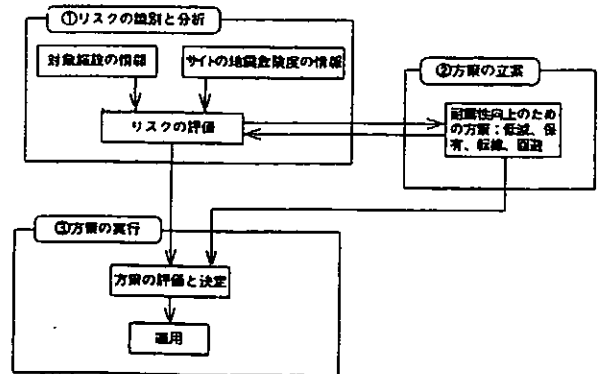


図3 地震リスクアセスメント

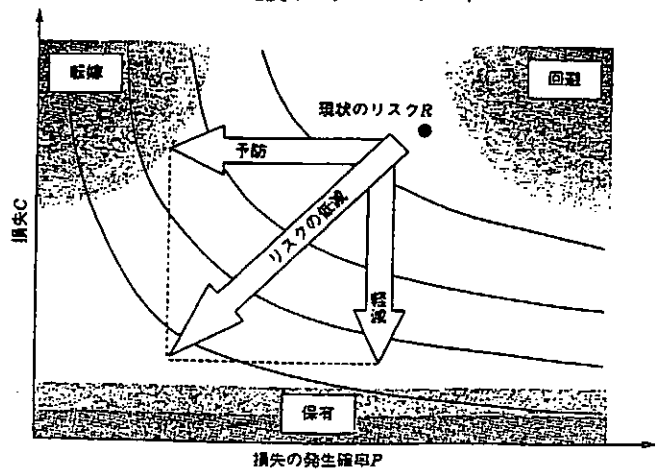


図4 リスクの概念



る”という危機管理である。

これは、1927年の世界恐慌を機にアメリカの保険分野から発し、1950年代には保険分野から原子力分野に至る広範囲にわたる包括的な危機管理へとその考え方が展開されたものである。二つの危機管理は、まったく別のものではなく互いに深く関連しているが、本稿では後者の事前対策を対象とする。

さて、リスクを低減する方策を図4で説明する。同図には現状のリスク  $R$  が  $P$ - $C$  座標上にプロットされている。リスクマネジメントとは、損失を未然に最小に抑えるための危機管理であるから、現状のリスクの位置を何らかの方策により左下の位置へ移動させることである。すなわちリスクの低減である。移動させるには、リスクが損失の発生確率  $P$  と損失  $C$  の積であることから、 $P$  を左へ移動させる対策と  $C$  を下へ移動させる対策を組み合わせることである。左へ移動させるとは損失の発生確率を小さくさせることであるから予防対策である。下へ移動させることは損失を小さくさせることであるから軽減対策である。

予防は、地震自体の発生を阻止できないが、損失要因を低減させるために地盤を改良し、あるいは構造を強化することにより可能である。つまり、オフィスビルならば、柱、はり、壁を耐震的に強化することや基礎構造の補強などである。水道ライフラインならば、地盤を改良したり、管路を鋼管に変えたり、フレキシブル継手に更新することである。したがって、予防は多くの構造物や施設に求められる最も基本的な対策ではあるが、ある程度まで損失の発生確率を小さくするためには膨大な費用を必要とする。

軽減は、損失を小さくすることであるから、危機管理の教育や、緊急時の人材確保による復旧作業の早期回復や、緊急資材の確保などにより可能である。また、オフィス機能を複数の拠点へ分散させておくことも軽減対策である。水道システムならばネットワークの冗長性を高めておくことなどである。

同図には、リスクを保有する領域が示されている。リスクが損失の小さい保有領域にあれば、発生確率の大小にかかわらずリスクを低減することを試みずにリスクを保有しておくことが経済的に得策である。つまり、リスクを低減するための対策費がリスクに比べて非常に大きくなる場合には一切費用を使わず、相当額の対策費を緊急対応、応急復旧などの別の対策につぎ込む方が有効な場合である。

リスクが低頻度・大損失の転嫁の領域にあれば、共済、補償、保険、証券化といったリスクファイナンスにより万一の損失を転嫁するという対処が行える。つまり、この領域では損失が重大であるのに発生確率が小さいために、事業者が単独ではリスクに対応しきれない、あるいは費用便益的にみて対応しない方が有利な場合である。近年、政府や保険会社、学会などにおいても地震損害保険について議論されている。また、証券化とは、資産リスクを担保条件として社債を発行するものである。高利回りだが、損失が発生したときには一部または全部を投資家が負担することになる。しかし、これらの手段では事業者の金銭的損失は免れるが、リスクそのものを低減したことはない。

転嫁という手段に依存する前に、認識されているリスクを低減していくことは事業者の義務であろう。あるいはこの領域のリスクに対しては部分的にリスクを転嫁することを併用した低減策が好ましい。

リスクが大頻度・大損失の回避の領域にあれば、経営型リスクマネジメントの原則に従えばリスク対策を放棄、断念することになる。本来なら、この領域にプロットされるリスクを有するような施設は建設されてはおかしいはずである。

リスク  $R$  を算定するには、損失の発生確率  $P$  と損失  $C$  の値が必要である。 $P$  の値を推定するには、実際には被害形態を軽微あるいは大破・倒壊などと定義したうえで、それぞれの結果として生じる損失の発生確率を評価することになる。その手法は信頼性理論による。 $C$  の値を推定するには、建物の倒壊や設備の被害を推定することによる。さらに、施設の使用が停止することによる営業損失や、水道供給停止による迷惑量や、水が得られないことによる心理的影響や、人命の喪失など諸々の損失を含めなければならない。損失の値は、事業主体自身、すなわち、リスクを管理しようとする者が決定することである。最適な方策は、現状のリスクと対策後のリスクを評価することにより選択される。その際、対策に要する費用も考慮する。

## 5. リスク解析

リスクを定量化するには、各損失モードと損失の大きさ  $C_i$  と発生確率  $P_i$  の値が必要である。

$C_i$  は、施設や建物が被害を被ることの重大さを示す量である。そのためは、被害が起きたら何が困るのかを明確にしておかなければならない。損失には、施設が被害を受けたときの復旧費が考えられる。これは物理的な被害額だから評価は比較的容易である。しかし、損失には、機能低下による損失、派生被害による損失、人命喪失による損失も考えられる。さらに、同じ地震被害であっても、主体者が誰であるかによっても異なる。たとえば、道路施設の場合、主体者が道路を管理する自治体とすれば、利用者の生命、道路が不通になることによる経済的影響、利用料金の未収、施設修復費などが損失に計上される。一方、主体者が道路を利用する市民とすれば、自身の生命と道路が利用できなくなる不便さが損失である。企業の場合、主体者が企業を運営管理する側とすれば、物理的な被害による損失と機能低下による損失である。主体者を従業員とすれば、自身の生命と雇用問題が損失にかかわることになる。このように、人や立場によりリスク評価の内容は異なることになる。

$P_i$  を求めるには、まず、図1に示したようなイベントツリーを作成することからはじめる。このイベントツリーの分岐点に張り付く確率は地震損傷度解析（詳しくは、文献1))により求められる。これらの確率は地震動の大きさと与えたときの条件付確率である。イベントツリーが完成すれば、狭義のリスク、すなわち、損失期待値  $R$  が求められる。地震動の大きさを変化させて  $R$  を求めると、図5に示

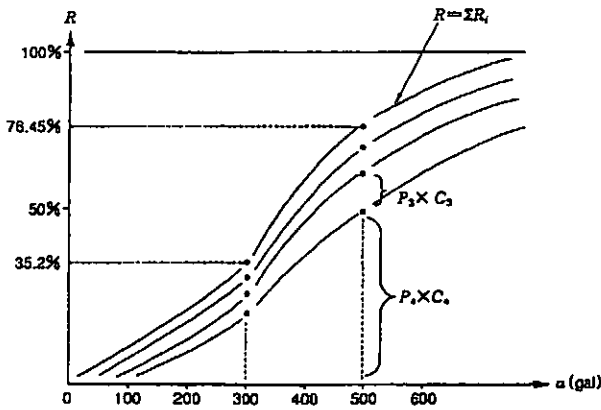


図5 地震ロス関数 (seismic loss function)

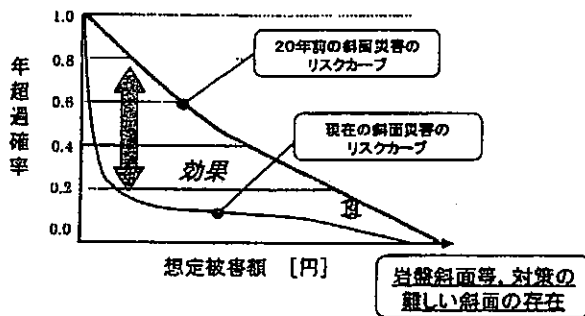


図6 リスクカーブの概念 (文献2)

す地震ロス関数が得られる。

一方、地震危険度の情報は、サイトに影響を及ぼす可能性のある過去の地震データ、活断層資料、地質構造、地球物理学の知見から得られ、その結果は地震ハザード曲線に集約される。

施設の脆弱性を示す地震ロス関数と、入力地震動の不確定性を示す地震ハザード曲線から、共通のパラメータの地震動の大きさを消去して  $R$  とリスク超過確率の関係を求めると地震リスクカーブが得られる。図6は斜面災害におけるリスクカーブの概念図を示すが、対策後のリスクカーブとそれ以前のリスクカーブとの差が対策の効果といえる(文献2))。

## 6. 保険によるリスクの金銭的転嫁とLCC

ライフサイクルコスト (LCC) は、初期建設費、維持管理費、自然劣化による不具合の補修費、さらに、自然災害による損失などさまざまな費用を累積したものであり、施工期間および供用期間中に生じる総費用である。この総費用を最小にするように、設計、施工、維持管理を実行することは費用対効果の原則から合理的である。ここでは、一般土木施設、建築物を対象として、LCCに含まれる諸費用のうち自然災害による損失の影響に着目し、施工期間と完成後の供用期間における自然災害による損失を考慮したLCCの最適化問題を構築する。なお、簡単に扱うために、維持管理費、補修費は対象外としている。そして、損失の一部を損害保険 (以下、保険) により転嫁することを考慮した場合のLCCの最適化を考えてみる。過去のLCC最適

化問題では、LCCの中で保険料の支出は考慮されているものの、保険により軽減されたリスクは評価されていない。ここでは、損失に効用の概念を導入することにより、建設会社あるいは施設所有者にとって保険に加入することの意味を明確にし、軽減されたリスク、および保険の効果を定量的に評価する。なお、本稿のLCCに補修費などの諸々の費用を加算しても、モデルの骨格構造は本質的には不変である。

発生確率は低い、損失が大きいリスクに対しては、リスクの一部を保険により金銭的に転嫁することが考えられる。保険料は損失期待値に対する損害保険会社 (以下、保険会社) の負担分 (純保険料) に手数料 (付加保険料) を加算したものであるから、保険に加入すれば付加保険料の分だけ余計な支出となり、この分だけLCCは増加する。したがって、保険に加入することは期待値という確率概念から考えると意味をなさない。また、たとえ付加保険料が無い場合でも、“若しも”という事態の発生に対する人々の危険に対する態度によって保険加入は左右されることもある。保険加入が意味をなす理由は、効用理論から説明されることになる。効用は実際の金額に対する個人の満足感 (損失に対しては、失望感) を表わし、保険加入の意思決定は損失に対する効用を用いて行われる。保険に加入した場合の損失期待値 (自己負担+保険料) が、効用の価値を認識しているにもかかわらず、保険に加入しなかった場合の損失期待値より小さければ保険加入が選好される。被保険者に許容される保険料の決定には効用を考慮したうえで、適切な免責限度額  $l_0$  と支払い限度額  $u_p$  の設定が必要である。文献3)では、以上の原則に基づき、年間当たりの地震ハザードを用いて土木施設・建築物の損失を評価し、同時に被保険者にとっての最適な保険料を算定する手法を提案している。

ここでは、文献3)の手法を拡張してLCCの最適化問題を検討してみる。そして、供用期間  $T$  年におけるLCCを最小化するように、施設の要求機能水準パラメータ  $x$ 、仮設工法パラメータ  $y$ 、リスクの建設工事保険 (以下、工事保険) への転嫁パラメータ  $z_1 = \{u_p, l_0\}_1$ 、供用期間中のリスクの地震保険への転嫁パラメータ  $z_2 = \{u_p, l_0\}_2$  を選択するための数理モデルを構築する。

LCCは、初期建設費と供用期間中に発生する地震被害による損失期待値から構成され次式で与えられるものとする。

$$LCC(x, y, z_1, z_2, r, T) = C(x, y, z_1) + \{E_0[L(x, z_2)] + (1+k)E_1[L(x, z_2)]\}h(r, T) \quad (1)$$

ここで、 $C(x, y, z_1)$ =初期建設費、 $E_0[L(x, z_2)]$ =施設所有者が自己負担する年間リスク、 $E_1[L(x, z_2)]$ =保険会社へ転嫁する年間リスク、すなわち、純保険料、 $kE_1[L(x, z_2)]$ =付加保険料、 $h(r, T)$ =現在価値への変換関数、 $r$ =変換率である。

現在価値への変換関数は

$$h(r, T) = 1 + (1+r)^{-1} + (1+r)^{-2} + \dots + (1+r)^{-T+1} \\ = [1 - (1+r)^{-T}] / [1 - (1+r)^{-1}] \quad (2)$$

式(1)で与えられるライフサイクルコストLCC

$(x, y, z_1, z_2, r, T)$  は、右辺第1項の初期建設費  $C(x, y, z_1)$  と第2項の損失期待値から構成されている。損失期待値は、式(1)により施設所有者が自己負担する損失期待値  $E_0[L(x, z_2)]$  と、地震保険へ転嫁され保険会社が負担する損失期待値  $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$  に分けられる。後者には保険会社が要求する付加保険料が含まれる。保険は単年度契約として、毎年想定される損失期待値は、変換関数  $h(r, T)$  を用いて現在価値へ変換される。保険料  $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$  は、施設所有者の損失期待値の中で保険会社の負担に相当する純保険料に付加保険料(手数料)を加算したものであり、施設所有者の支出としてLCCに含まれている。なお、手数料は運営費や営業利益として保険会社が要求するものである。付加保険料は純保険料に一定の比率  $k$  を乗じたもので与えられるとする。

一般に、保険では小さな損失は自己責任とし、大きな損失には最大支払い額が設定されているが、これと同様に地震保険では免責限度額  $l_0$  と支払い限度額  $u_p$  が設定される。これらの限度額により、式(1)に示すように損失期待値の分担が施設所有者と保険会社へ振り分けられる。

## 7. LCCの最小化

式(1)に基づき、LCCを最小化することの意味を考察してみる。もし設計において要求機能水準(パラメータ  $x$ )を高く設定すれば初期建設費  $C(x, y, z_1)$  は高くなるが、その分だけ安全性が向上するから、第2項の損失期待値は小さくなる。逆に、建設費が安ければ、第2項は大きくなる。したがって、中間に最小値が存在することになる。一方、式(1)の第2項のみに注目し、仮に  $x$  を固定して  $z_2$  のみを変化させてみる。 $u_p$  を無限大に近づければ、保険会社の負担、すなわち保険料  $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$  が増大し、施設所有者の負担する損失期待値  $E_0[L(x, z_2)]$  はゼロに漸近する。逆に、 $u_p$  を小さく設定すれば、 $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$  は小さいが、 $E_0[L(x, z_2)]$  が増大する。しかし、両者の和は、振り分け前の損失期待値に付加保険料(手数料)を加算したものとなるから一定である。一方、施設所有者のリスクに効用を考慮すれば、後述のように第2項は、これらの中間に最小値が存在することになる。以上の考察から明白なことは、式(1)の最適化は第2項の最適化を内蔵した最適化問題となっている。実際には、右辺の第1項と第2項は共通に  $x$  の関数であり、さらに第2項は変数  $x, u_p, l_0, T$  の多変量関数となっているから、両者を区別して、別々に最適化することはできない。両者を一体としてLCCを最小化することにより、(1)最適な要求機能水準パラメータ  $x$  と(2)施設所有者にとっての最適な保険料  $u_p$  を決定することができる。

ところで、初期建設費  $C(x, y, z_1)$  は、設計に要する諸費用および建設費が合算されたものだが、後者の建設費には、建設中のリスクが考えられる。すなわち、工事によっては数年を要し、その間に台風による自然災害や人為的災害などが考えられる。これらのリスクに対して工事保険を利用して工事を実施するものとする。この場合には、第1項の

$C(x, y, z_1)$  は、第2項と同様にブレイクダウンされ、それ自体が最適化問題を内蔵することになる。

施工期間は供用期間に比べて短いので、現在価値への変換を考えないとすれば、初期建設費は次式で表わせる。

$$C(x, y, z_1) = C(x, y) + G(x, y, z_1) + CI(x, y, z_1) \quad (3)$$

ここで、 $C$ =建設工事費、 $G$ =建設会社が負担するリスク、 $CI$ =保険会社へ転嫁するリスク、である。

この式においても、仮設工法パラメータ  $y$  によって、右辺第1項と第2項以下との間にトレードオフの関係が存在する。さらに、工事保険へ転嫁するパラメータ  $z_1$  により  $G(x, y, z_1)$  と  $CI(x, y, z_1)$  との間にトレードオフが行われ、最適化問題を構成する。

式(1)の右辺における施設所有者の負担する年間リスクは次式で与えられる。

$$E_0[L(x, z_2)] = \int_0^{\infty} E_0(x, u_p, l_0|a) f(a) da \quad (4)$$

ここで  $f(a)$  は、サイトに発生する年間地震最大加速度  $a$  の確率密度関数であり、地震ハザード曲線を用いてサイトごとに求められる。 $E_0(x, u_p, l_0|a)$  は施設所有者の負担する条件付損失期待値であり、損失  $L$  の効用関数  $u = U(L(x))$  を用いて次式で計算される。

$$E_0(x, u_p, l_0|a) = \int_0^{l_0} u p(u|a) du + \int_{l_0}^{u_p} (u - l_0) p(u|a) du \quad (5)$$

式(5)をグラフで示すと図7のようなになる。右辺第1項は免責限度額以下の損失に対応し、第2項は支払い限度額を越えた損失の差額分に対応したものである。 $l_0$  と  $u_p$  間の損失は施設所有者の免責となる。損失がある程度大きいと、実感される損失、すなわち効用はさらに大きなものとなる。言い換えると、損失の効用関数は被保険者に導入され、不確実な損失よりも確実に損失を回避したく考えるから、危険回避的な行動に対応した効用関数となり一般に下に凸の不等式  $U\{L(x)\} \geq L(x)$  を満足するものである。 $p(u|a)$  は効用の条件付確率密度関数である。 $p(u|a)$  を求めるには、地震加速度  $a$  を条件として損失  $l = L(x)$  を介した効用  $u = U\{L(x)\}$  の確率密度関数を求めることになる。それを求めるにはすでに述べたようにイベントツリー解析が有効である。

式(1)の右辺第2項の保険会社へ転嫁する年間リスク(保険料)は次式で与えられる。

$$(1+k)E_1[L(x, z_2)] = (1+k) \int_0^{\infty} E_1(x, u_p, l_0|a) f(a) da \quad (6)$$

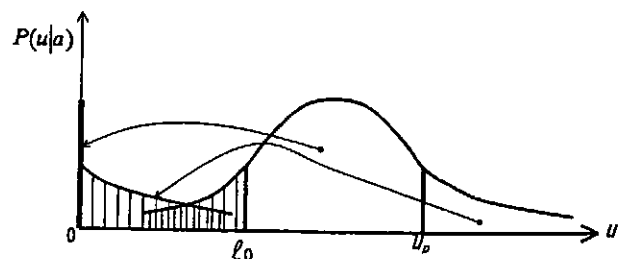


図7 施設所有者の条件付損失の確率密度関数

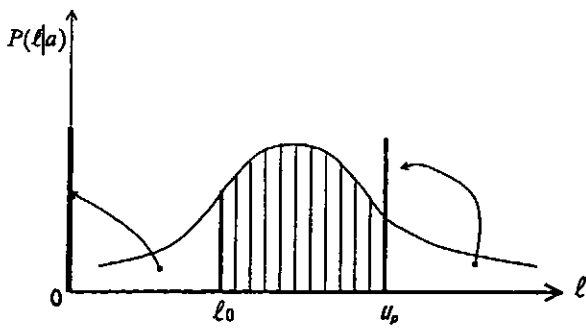


図8 保険会社の条件付損失の確率密度関数

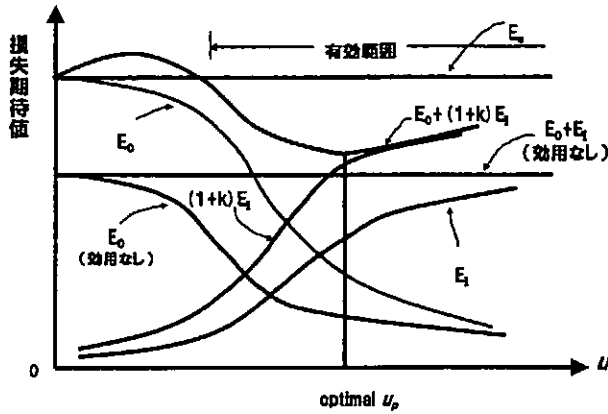


図9  $u_p$  の最適値

ここで、 $E_l(x, u_p, l_0|a)$  は保険会社が負担する条件付損失期待値であり、損失  $l=L(x)$  を用いて次式で計算される。保険会社は危険中立的であるから、当然ながら損失に対して効用を考えない。

$$E_l(x, u_p, l_0|a) = \int_0^{u_p} l p(l|a) dl + u_p \int_{u_p}^{\infty} p(l|a) dl \quad (7)$$

式(7)をグラフで示すと図8のようになる。ここで、右辺第1項は損失の全額負担分、第2項は支払い上限額の分担分である。

さて、施設所有者に保険が選好される条件は、保険によりリスクの一部を転嫁した場合の損失期待値が、保険加入を避けた場合の損失期待値を下回ることであるから、

$$E_u \leq \int_0^{\infty} E(u|a) f(a) da \quad (8)$$

$$E(u|a) = \int_0^{\infty} u_p(u|a) du \quad (9)$$

として、

$$E_u \geq E_0[L(x, z_0)] + (1+k)E_1[L(x, z_0)] \quad (10)$$

図9は式(10)の関係を図示したものである。この図は、保険加入が意味をなす式(10)の条件のもとで、保険料の支払い限度額  $u_p$  の最適値を示している。効用を考慮しない場合、施設所有者の自己負担分の年間リスク  $E_0[L(x, z_0)]$  と純保険料  $E_1[L(x, z_0)]$  の和は  $u_p$  に独立で一定値となっている。したがって、この限りでは最適な  $u_p$  は存在しない。一方、効用を考慮すると、 $E_0[L(x, z_0)]$  と保険料  $(1+k)E_1[L(x, z_0)]$  の和は式(10)の条件を満足する範囲内で最小値を示している。この最小値に対応する  $u_p$  の値が施設所有者にとって保険の最適支払い限度額である。

## 8. 適用例

ここでは、適用例の結果を示すに留めるが詳しくは参考

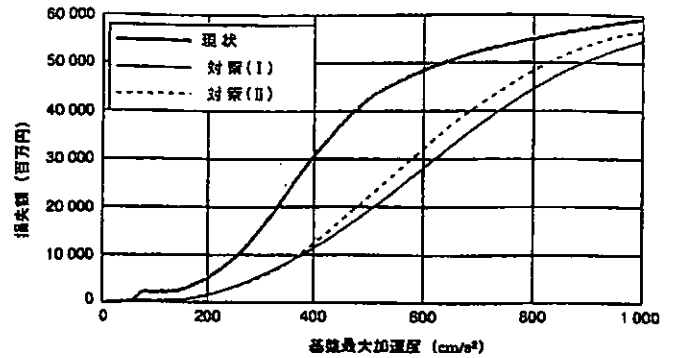


図10 地震ロス関数で見た耐震対策の効果

表1 年間当たりの損失期待値の比較

項目	年間当たりの損失期待値		
	物理的な損失	営業損失	トータル
現状	36.63	461.25	497.88
対策(I)	31.03	87.66	118.69
対策(II)	31.13	93.24	124.37

(単位は百万円)

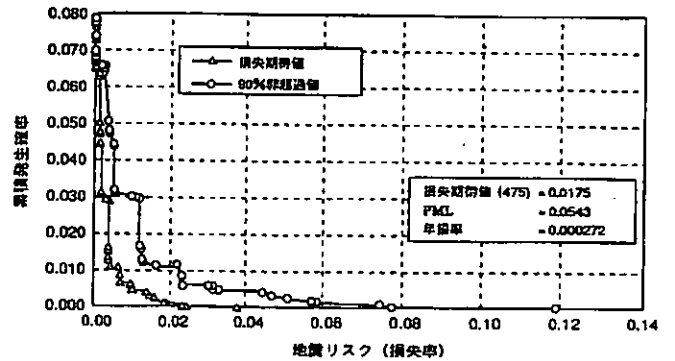


図11 リスクカーブ

文献1)に示されている。

### (1) 電子機器工場のリスクマネジメント

クリーンルームを持ち、精密な電子部品を生産するA棟とB棟から構成された工場があり、建物に比べ製造機器が高価であることが特徴である。地震リスクとして、年間の損失期待値を指標とし、この値を用いて費用効率の高い対策を検討している。地震被害の要因として地盤被害、振動被害、火災・爆発が考えられたが、これらによって引き起こされる損失の程度を推定した結果、大規模な液状化による損失のみを考慮している。この場合、各種機器の転倒、滑動被害、天井落下による製造機器と仕掛品の損傷を考慮している。以上より、物理的損失と生産停止に伴う損失の確率をイベントツリーにより算出している。そして、二つの対策による費用効率を検討している。対策(I)は、A棟とB棟を補強した場合、対策(II)は屋上機器を含め生産機器類の固定度を強化した場合である。図10は地震ロス関数で見た耐震対策の効果を示し、表1は損失期待値を比較したものである。

### (2) オフィスビルリスク

不動産の証券化に伴い、一般投資家は原資である不動産

からの収益を得る権利と同時に自然災害によるリスクを負うことになる。このため、投資家は金融商品としてのリスク情報を知る権利を有し、そのための調査業務、いわゆる「デューデリジェンス」が必要になっている。ここでは、オフィスビルのリスク評価の結果を示す。図 11 は、地下 2 階、地上 20 階の鉄骨ビルの、シナリオ地震によるリスクカーブである。記号△は損失期待値、および記号○は 90%非超過値であり、それぞれの累積発生確率を示している。なお、PML 値は 90%非超過値に相当する損失率である。

## 9. まとめ

地震災害リスクマネジメントの方法を解説したが、これは、あくまで意思決定のための支援ツールである。また、個々の施設を対象としているのか、所有施設群を対象にし

ているのか、主体者が個人か、公共機関か、利用者か、などにより損失の内容は異なることに留意し、さらに、適用範疇を定めて定量的にリスクを算定することが大事である。

本稿は、主として参考文献 1) の内容を要約したものである。

## 参考文献

- 1) 星谷 勝・中村孝明：構造物のリスクマネジメント, 山海堂, 2002 年 4 月.
- 2) 三木博史：岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術の開発, 土木学会誌, Vol. 7, 37-40, 2002 年 5 月.
- 3) 望月智也・中村孝明・木村正彦・星谷 勝：損失に対する主観金額を考慮した地震保険の最適化, 土木学会論文集, No. 703/I-59, 203-210, 2002 年 4 月.