

地震リスクマネジメントの必要性と課題

－ 保険によるリスク転嫁と LCC 最小 －

星谷 勝¹

¹正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

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。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の最適化を議論している。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。本研究では、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義を明確にし、軽減されたリスク、および保険の効果を定量的に評価している。

Key Words: *risk management, building, earthquake insurance, utility, life cycle cost, optimization*

1. はじめに

ライフサイクルコスト(life cycle cost; 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¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。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の最適化を議論している。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⁶⁾。本研究では、損失に効用の概念⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾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義を明確にし、軽減されたリスク、および保険の効果を定量的に評価している。なお、本論の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。

2. LCCモデル

まず、‘リスクとは何か’ということを定義することにしたい。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。

リスクマネジメントでは、リスクの特性により保有するか、低減するか、転嫁するかを検討することになる。発生確率は低いが、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⁸⁾、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^{7),8),9),10),11),13),14),18)}。効用 (utility) 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 (自己負担分+保険料) が、効用を考慮し、なおかつ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上で、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。中村ら⁹⁾、および望月ら⁸⁾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、中村ら⁹⁾、および望月ら⁸⁾の手法を拡張してLCCの最適化問題を検討している。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 (premium)、 $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$ は、施設所有者の損失期待値の中で保険会社負担分に相当する純保険料 (net premium) に付加保険料 (手数料)

(loading) 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 (deduction limit) l_0 と支払い限度額 (maximum payment limit) 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。

3. 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、建設費が低ければ、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、両者を区別してそれぞれに対して最適化することは出来ない。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。

4. 損失期待値の振り分け理論

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。

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

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毎に求められる。 $E_0(x, u_p, \ell_{oi} | a)$ 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。

$$E_0(x, u_p, \ell_{oi} | a) = \int_0^{\ell_0} u p(u | a) du + \int_{\ell_0}^{u_p} u p(u + u_p | a) du \quad (5)$$

式(5)をグラフで示すと図 1 のようになる。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(risk averse)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 $\ell = L(x)$ を介した効用 $u = U\{L(x)\}$ の密度関数を求めることになる。それを求める方法として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。

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

ここで、 $E_1(x, u_p, \ell_{oi} | a)$ は保険会社が負担する条件付損失期待値であり、損失 $\ell = L(x)$ を用いて次式で計算される。保険会社は危険中立的(risk neutral)であるから、当然ながら損失に対して効用を考えない。

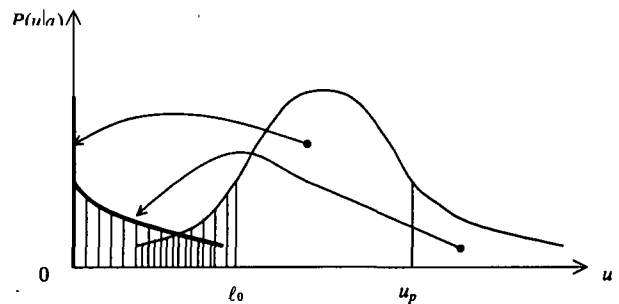


図 1 施設所有者の条件付損失の確率密度関数

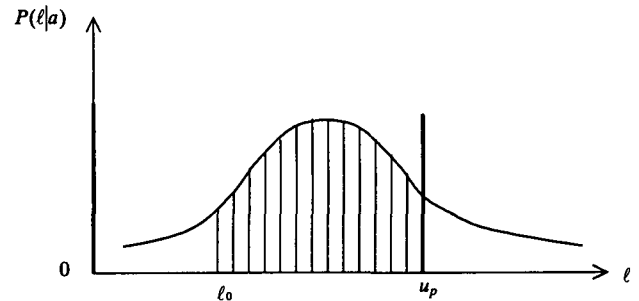


図 2 保険会社の条件付損失の確率密度関数

$$E_1(x, u_p, \ell_{oi} | a)$$

$$= \int_{\ell_0}^{u_p} \ell p(\ell | a) d\ell + u_p \int_{u_p}^{\infty} p(\ell | a) d\ell \quad (7)$$

式(7)をグラフで示すと図 2 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、

$$E_0 \leq E_1 \quad (8)$$

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

として、

$$E_0 \geq E_0[L(x, z_2)] + (1+k)E_1[L(x, z_2)] \quad (10)$$

図 3 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 $E_0[L(x, z_2)]$ と純保険料 $E_1[L(x, z_2)]$ 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、 $E_0[L(x, z_2)]$ と保険料 $(1+k)E_1[L(x, z_2)]$ 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。

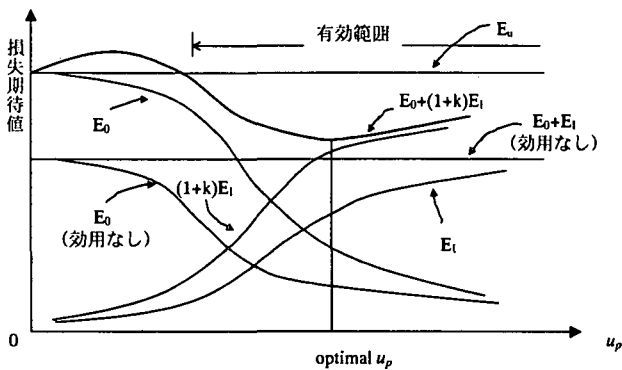


図3 u_p の最適値

5. 今後の課題・展望

本研究では、施工期間、供用期間を通して生じるリスクを保険により転嫁することを考慮したライフサイクルコストの最適化問題を議論した。ここでは、施工期間では建設会社、供用期間では施設所有者にとって受け入れることのできる保険料算定基準を考察している。そして、保険によるリスク転嫁の条件のもとで、施設に要求される最適な機能水準、仮設工法、工事保険、そして地震保険を選択するための数理モデルを構築している。

このモデルにより求められる支払い限度額が保険会社の論理や再保険の仕組みから決められる限度額と整合することが必要であろう。保険の自由化（新保険業法、1996年4月、料団法の改正、1998年7月¹⁹⁾に伴い、これまで一律に決められてきた保険料は保険商品の多様化と共に低価格化が進むと思われる。顧客側も保険の基礎知識をもって納得のいく保険料を逆提案する時代になるものと思われる。

今後の課題は、

- (1) 地震災害のような巨大リスクに対する、損保会社の支払い限度額決定プロセスや国の再保険制度を学習し、顧客側と保険会社側の論理の整合性を求める検討が必要である。
- (2) 一般住宅の地震保険は、家計保険における火災保険の特約として扱われる。地震保険の保険料率は non-loss, non-profit の原則に基づいて決められるので付加保険料はない。すなわち、社会政策的意味から収益（手数料）を得ることもないが、損失も受けない仕組みになっている。しかし、土木施設や建築物に対しては付加保険料が加算されるとして、付加保険料の決定にはどのような原則が適用されるべきであろうか。
- (3) 保険によるリスクの転嫁が意味をなすためには、顧客側のリスクに効用を導入する必要がある。そうで

なければ、損失期待値に付加保険料を上乗せした保険料を支払うことになるから損になる。故に、保険は選好されない。実際には、損失に直面した時の失望感、言い換えれば保険に加入していることによる安心感があるから保険は選好されるのである。したがって、実感を伴うリスクの計量化を適切に行うことが必要である。本論では十分な議論をしていない。

- (4) 施工期間における初期建設費のLCC最適化問題（式(3)）は、安全性とコスト管理の見地からの検討が必要である。また、この場合は、主体者が建設会社である。施工技術者からは、リスクを工事保険で補填するには、損失期待値が保険料と比べて著しく大きくないこと、施工期間中で構造物の耐力が不足すると思われる工程の施工日数と自然災害の発生確率の高い日数が共に短いことが望まれている^{16),17)}。これは、土木工事の利益率が1%程度と低く、保険料率が一般に0.3~0.5%と保険料が高い現実があり、工事現場の独立採算制による運営が成り立たないからである。工事保険に関しては、保険会社側の論理だけでなく、建設会社側からの突っ込んだ議論が必要である。
- (5) 土木施設のような公共施設に対して、どのような保険が存在するのであろうか、また民間施設の保険と特別な相違点があるのか否かは、筆者には不明である。
- (6) 本研究では、不確実性として損失のみを考慮したが、ライフスパンには施設の運用によるキャッシュフロー（利得）がある。LCCの最適化に賃貸収入や転売価格の増加を考慮した収益の増加項を含めた最適化問題は興味ある今後のテーマである¹⁹⁾。

参考文献

- 1) Ang, A.H.-S. and De Leon, D.: Development of risk-based cost-effective criteria for design and upgrading of structures, *Proc. Int. Symp. on Public Infrastructure Sys. Research*, Techno-Press, Seoul, Korea, 1995, pp.370-390.
- 2) Chang, S. E. and Shinozuka, M.: Life-cycle cost analysis with natural hazard risk, *Jour. Infrastructure Sys.*, Vol. 2, No. 3, ASCE, Sept. 1996, pp.118-126.
- 3) Frangopol, M., Lin, Kai-Yung and Estes, A. C.: Life cycle cost design of deteriorating structures, *Jour. Struct. Engrg.*, Vol. 123, No. 10, ASCE, Oct., 1997, pp.1390-1401.
- 4) (社)日本ファシリテイマネジメント推進協会編：ビル管理におけるわかり易いライフサイクルコスト、LCCマニュアル、Ver.1, 2000.6.
- 5) 中村孝明, 中村敏治, 望月智也：不確実性を考慮した地震リスク移転と自己負担, 日本リスク研究学会 第13回研究発

- 表会論文集, Vol.13, 2000, pp.1-7.
- 6) 塚田康夫, 木村雄一, 河村壯一: SRM による免震建築物のライフサイクルコスト評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998, pp.241-246.
- 7) P.C.ヨハンソン, 金沢哲夫訳: 現在厚生経済学入門, 劉草書房, 1998年, pp.174.
- 8) 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 2002年4月号掲載決定
- 9) 田村坦之他, 効用分析の数理と応用: (社)計測自動制御学会編, コロナ社, 1997, pp.182.
- 10) 柴崎隆一, 家田仁: 世帯の保険加入行動を対象とした人間のリスク認知特性の計測, 日本リスク研究学会, 第13回研究発表会論文集, Vol.13, 2000, pp.31-36.
- 11) Chernoff, H. and Moses, L. E.: Elementary Decision Theory, *John Wiley and Sons, Inc.*, 1959, pp.79-83, pp.113.
- 12) Benjamin, J. and Cornell, C.A.: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, *McGraw-Hill Com.*, New York, 1970, pp.524-544.
- 13) Ang, H-S. A and Tang, W.H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II, *John Wiley and Sons Inc.*, 1984, pp.57-82.
- 14) 山口光恒: 現在のリスクと保険, 岩波書店, 1998年, pp.133-230.
- 15) 森宮康: 保険の基本, 日経文庫 675, 日本経済新聞社, 1999年6月, pp.100.
- 16) 隈元力: 土木工事における建設生産管理技術の適用に関する研究, 武蔵工業大学工学博士論文, 平成2年8月, pp.134.
- 17) 保険毎日新聞社: 建設工事保険の解説, 1978年.
- 18) Keeney, R. L. and Raiffa, H.: Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Value Tradeoffs, *John Wiley and Sons*, 1976.
- 19) 中村孝明: 不動産証券化のリスクマネジメント, 山海堂, 2001年11月, pp.13.

RISK TRANSFER BY INSURANCE AND OPTIMIZATION OF LCC

Masaru HOSHIYA

Optimization of life cycle cost (LCC) of business buildings and public work structures is discussed from a point of view of cost effectiveness. Here, risk /loss due to natural hazards such as earthquake or strong wind turbulence are included in the LCC. Special attention is paid to a measure of risk aversion by insurance during construction and for life span use. First, the role of insurance in risk management is discussed and a condition required for admissible premium for building owners is derived in terms of expected loss of insurant and premium which is the part of expected loss transferred to insurance company, plus loading which is the commission of the company. Second, a methodology is proposed to determine an optimal premium such that the expected annual loss of insurant becomes minimum. Third, optimization of life cycle cost is discussed taking into account the insurance cost. Finally, future issues and perspectives are stated.