

自然災害とリスクファイナンス

～ライフサイクルコストに基づく地震リスクファイナンス設計～

An application of risk finance for natural disaster

～Seismic Risk Financing Design based on Life Cycle Cost～

矢代晴実

Harumi YASHIRO

工博 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-2-1)

Following the amendment of Japanese building standard, the concept of performance-based design was introduced. The previous design standard is still employed as the basic one though it may bring the insufficient seismic performance, if buildings are designed just to reduce the initial cost. In this paper, the seismic performance of buildings was determined from the viewpoint of minimizing the life cycle cost, considering the risk transfer by insurance or other financial techniques. A portfolio consisting of 25 buildings in the Kanto district was employed in the analysis. Through the application, the following findings were obtained; combination of risk control and risk finance reduces the life cycle cost significantly, life time has a large effect on the selection of risk management scheme, and the ratio of loss to the initial cost has also a effect on the selection of risk transfer techniques.

Key Words: *Seismic risk management, Risk control, Risk Financing, Seismic performance level, Life cycle cost*

1. はじめに

企業は地震や風水災等の自然災害、火災・爆発等の事故、環境問題等多くのリスクに囲まれている。特に、日本では地震によるリスクが大きく、企業にとっては経営上無視できない。また近年では、このような巨大リスクへの取り組みの姿勢についても、企業価値を計る指標となりつつある。

リスクへの取り組み方であるが、評価の客観性及び説明性の確保という観点からは、リスクマネジメント手法を用いることが合理的であり、その中で、リスクの発見、リスクの定量化、リスクの処理、処理後のリスクの再評価、という一連の手順を追うこととなる¹⁾。リスクの処理は、リスクコントロールとリスクファイナンスに大別される。前者は耐震基準の引き上げや耐震補強といった施策であり、発生する損失そのものを低減させるものである。一方、後者は損害保険等により、発生した損失に対して経済的な補填を行うものである。

地震リスクは極めて巨大な損失を与えるものであり、予測の精度も必ずしも十分ではないため、その対処の方法としてリスクコントロールのみを用いることは非現実的である。また、リスクファイナンスのみを用いることは、損失の低減や人命の確保に繋がらず、やはり非現実的である。したがって、実際のリスクマネジメントにおいては、リスクコントロールとリスクファイナンスを併用し、前者により極大損失を低減し、それでもなお発生する損失については後者により補填する、という立場をとることが合理的であると考えられる²⁾。

ところで、このようなリスクコントロールとリスクファイナンスを併用したリスクマネジメントでは、その組合せ方が課題であり、企業経営者の立場では、費用対効果の観点から両者の組合せを考えることが必要になる。

本研究では、費用対効果を表す指標として所与の供用

年間のライフサイクルコスト（以下、LCC）に着目し、LCC 最小化の原理³⁾に則ったリスクコントロールとリスクファイナンスの組合せ最適化を検討し、リスクファイナンス設計の枠組みを構築する。

2. リスクコントロールとリスクファイナンスの組合せ最適化

(1) LCC 評価の枠組み

本研究では、リスクコントロール施策として設計水準の割増を、リスクファイナンス施策として地震保険ならびに地震リスクの証券化を考える。

LCC の評価においては、建物の建設から撤去に至るまでの全ての費用と便益を考慮することが原則である。ただし、本研究では議論を単純にするため、維持管理費用、撤去費用、便益はリスクコントロール及びリスクファイナンスに独立であると仮定し、LCC 評価の枠組みから除外する。このとき、LCC は次式で与えられる。

$$C_L(x, t) = C_I(x) + C_R(x, t) + C_T(x, t) \quad (1)$$

ここで、 C_L は LCC、 C_I は初期建設費用、 C_R は地震リスク、 C_T はリスクファイナンスに要する費用である。なお、リスクコントロールに要する費用は C_I に含まれている。また、 x は設計水準で、具体的には 1 次設計用標準せん断力係数を表す。 t は供用期間である。(1)式右边第 2 項は次式で求める。

$$C_R(x, t) = t \cdot \alpha \cdot C_R^*(x) \quad (2)$$

ここで、 C_R^* は年間の地震リスクで、リスク回避者のリスクカーブより求めることができる。また、 α は係数で、建物の損失に対する総損失の比を表す。これにより営業損失等を LCC 評価に反映する。

一方、(1)式右边第 3 項は次式で求める。

$$C_T(x, t) = t \cdot [\beta \cdot C_{T1}^*(x) + C_{T2}^*] \quad (3)$$

ここで、 C_{T1}^* は年間期待地震保険支払額で、リスク引受者のリスクカーブから求めることができる。 β はプレミアムである。 C_{T2}^* は証券化に係る費用であるが、証券化の場合には元本と配当利率から移転費用が設定されるため、ここでは定数とした。

なお、リスク回避者、リスク引受者のリスクカーブの評価手法については文献 4) を参照されたい。

(2) リスクコントロールとリスクファイナンスの組合せ

(1) 式は所与のリスクファイナンススキームに対する LCC を与えるものである。LCC は設計水準 x の関数として表すことができる。すなわち、リスクコントロールについては連続量としての扱いが可能である。一方、リスクファイナンスに関しては、離散的にスキームを設定せざるを得ない。

そこで本研究では、予め設定したリスクファイナンススキームについて x と C_L の関係（一般には下に凸の関数として与えられる）を評価する。さらに、これを全スキームについて求めることで、 C_L が最小となるようなリスクファイナンススキームと、そのときの x を得ることができる。これが最適なリスクコントロールとリスクファイナンスの組合せである。

以上を模式的に示すのが図 1 である。同図では、採るべきリスクファイナンススキームとして、スキーム 2 が選択されている。

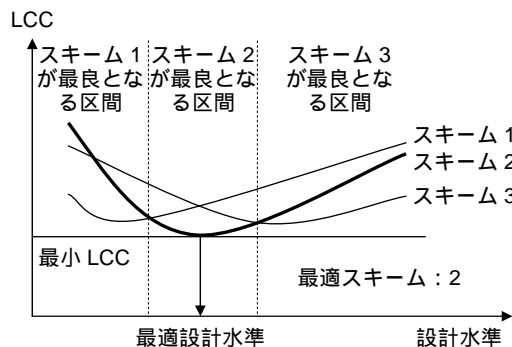


図 1 最適なリスク処理施策の組合せ

3. 手法の適用

(1) 対象建物群

関東地方に配置された 25 の建物からなる建物群（以下、ポートフォリオ）を設定した。建物の再調達価額は全棟共通で 100 とした。対象ポートフォリオを図 2 に示す。なお、破線で囲んだ領域内の 10 建物は、設計水準向上の対象となるものである。

各建物は同一の耐震性能を有するものとし、文献 4) に従い、表 1 に示すような fragility curves の特性値を被害程度毎に設定した。fragility curves の中央値は建物 1 階位置での入力加速度に相当するが、ここでは、表層地盤の応答倍率を 1.5⁵⁾、地表の応答に対する建物基礎の応答の比を 0.7⁶⁾ と仮定することで、同表の値を工学的基盤上のものと読み替えた。なお、同表の値は、 $x=0.2$ とした場合のものであり、fragility curves の中央値は x に比例すると仮定した。また、同表には、各被害程度に対する被害額も併せて示している。

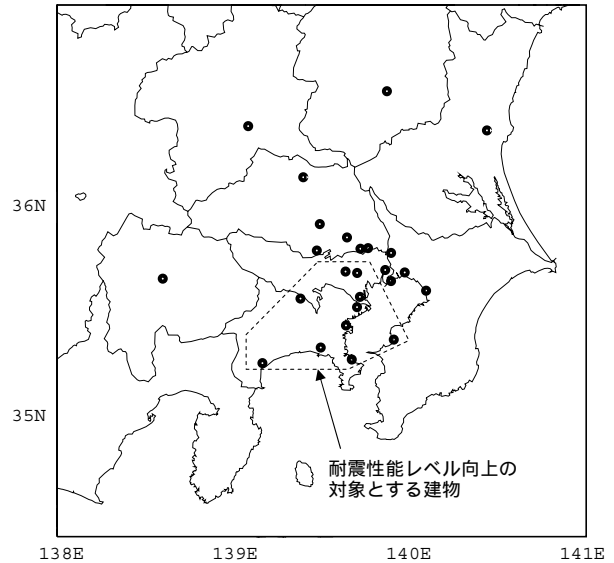


図 2 建物群の配置

表 1 被害程度別の fragility と被害率

| 被害程度 | fragility curves の特性値 | | 被害額 |
|------|-----------------------|--------|-----|
| | 中央値(Gal) | 対数標準偏差 | |
| 小破 | 160 | 0.4 | 5 |
| 中破 | 480 | 0.4 | 10 |
| 大破 | 800 | 0.4 | 30 |
| 倒壊 | 1120 | 0.4 | 100 |

(2) 地震環境

地震環境については、文献 7) のものを採用した。また、距離減衰式についても同文献と同様、以下に示す安中式を採用した。

$$\log A = 0.61M + 0.00501h - 2.203 \log(d) + 1.377 \quad (4)$$

$$d = (\Delta^2 + 0.45h^2)^{0.5} + 0.22 \exp(0.699M)$$

ここで、 A は最大加速度、 Δ は震央距離、 h は震源深さ、 M はマグニチュードである。距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、自然対数で 0.5 と設定した。

(3) 地震保険の条件設定

前項までに示した条件を用いて、リスク移転がない場合の PML を求めた。地震保険の引受限度額は PML に依存するため、ここでは、複数の耐震性能を有するポートフォリオを設定した。

解析ケース 1 は、表 1 に示した fragility を全建物に与えた場合である。解析ケース 2 と 3 は、図 2 に示した建物の内、破線で囲まれている建物について中央加速度耐力をそれぞれ 1.25 倍、1.5 倍にしたものである。ここで選定された地点は、関東地震が支配的となる地点であり、現実的な施策と考えられる。

得られたリスクカーブを図 3 に示す。また、PML の値はそれぞれ、344、256、213 と得られた。PML を引受限度額の上限值として、表 2 に示すような地震保険の諸元を設定した。なお免責額については、総資産（2500）の 2% とした。

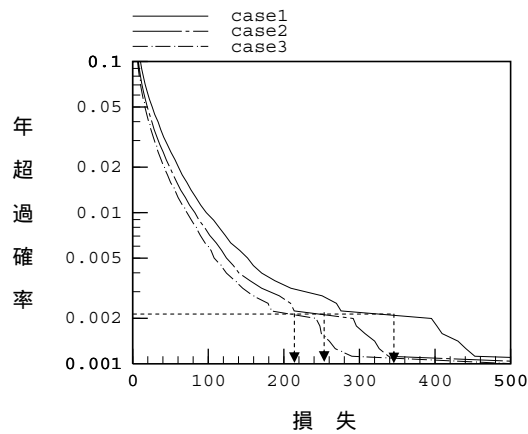


図3 リスクファイナンスが無い場合のリスクカーブ

表2 地震保険に関する諸元

| 諸定数 | 耐震性能レベルの向上（解析ケース） | | |
|-------|-------------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| 免責額 | 50 | 50 | 50 |
| 引受限度額 | 350 | 250 | 200 |

(4) 証券化の条件設定

証券化において必要な諸元は、元本、元本没収率、グリッドである⁴⁾。元本は前述したように定数とし、解析ケース1における地震保険の支払限度額（引受限度額 - 免責額）を基に300と設定した。

グリッドについては、ポートフォリオの損失に寄与が大きいと考えられる南関東地域に位置する建物を含むように、図4に示すような4角形を設定した。

元本没収については、M7.0で元本没収を開始し、M8.0で全額が没収されるような元本没収率を設定した。

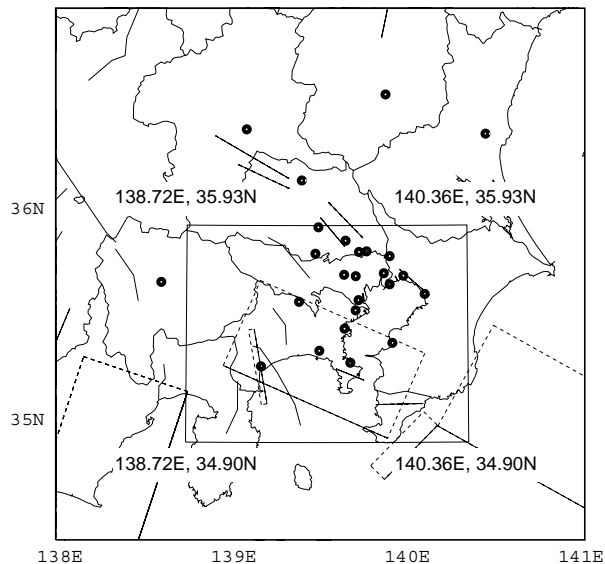


図4 証券化で用いるグリッド

(5) リスクファイナンススキーム

本研究では、免責額から引受限度額までの部分についてリスクファイナンスによりリスクを移転する。リスク移転を行わないスキームをスキーム0とし、その他に、地震保険と証券化の組合せに応じて、図5に示すような

リスクファイナンススキームを設定した。

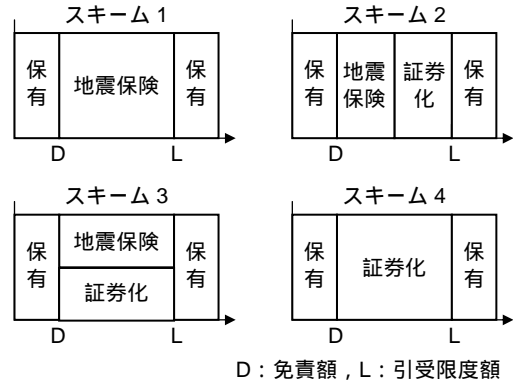


図5 設定したリスクファイナンススキーム

(6) 初期建設費用

新建築構造体系の開発⁵⁾によれば、建設費と標準せん断力係数はほぼ線形関係であること、標準せん断力係数が0.2から0.4になれば建設費は約20%上昇すること、が示されている⁸⁾。また、耐震性能レベル x の増加を考慮する建物棟数は10である。これより、ポートフォリオとしての初期建設費用は以下となる。

$$C_I(x) = 10 \times (80 + 100x) + 15 \times 100 = 2300 + 1000x \quad (5)$$

(7) 地震リスク

設計水準を違えた3ケースについてポートフォリオのリスク解析を行い、その結果から年間地震リスク C_R^* を設計水準 x の関数として求めた。得られた結果を以下に示す。

$$C_R^* = 1.11x^{-1.043} \quad (\text{スキーム0}) \quad (6a)$$

$$C_R^* = 1.16x^{-0.846} \quad (\text{スキーム1}) \quad (6b)$$

$$C_R^* = 1.26x^{-0.726} \quad (\text{スキーム2}) \quad (6c)$$

$$C_R^* = 1.21x^{-0.744} \quad (\text{スキーム3}) \quad (6d)$$

$$C_R^* = 1.20x^{-0.671} \quad (\text{スキーム4}) \quad (6e)$$

(8) リスクファイナンスに要する費用

地震保険に係る年間期待費用 C_{T1}^* は、地震リスクの場合と同様に、ポートフォリオのリスク解析結果から、設計水準 x の関数として求めた。得られた結果を以下に示す。

$$C_{T1}^* = 0.0965x^{-1.707} \quad (\text{スキーム1}) \quad (7a)$$

$$C_{T1}^* = 0.0650x^{-1.834} \quad (\text{スキーム2}) \quad (7b)$$

$$C_{T1}^* = 0.0483x^{-1.707} \quad (\text{スキーム3}) \quad (7c)$$

なお、リスクプレミアム β に関しては米国の事例に基づき $\beta=6$ と設定した。

一方、証券化については、元本没収額の最大値を元本と考え、それに利率 γ を乗じた。証券化に係る年間期待費用 C_{T2}^* は次式で求めた。

$$C_{T2}^* = 150 \cdot \gamma \quad (\text{スキーム2}) \quad (7a)$$

$$C_{T2}^* = 150 \cdot \gamma \quad (\text{スキーム3}) \quad (7b)$$

$$C_{T2}^* = 300 \cdot \gamma \quad (\text{スキーム4}) \quad (7c)$$

利率 γ に関してはLIBOR（London Inter-Bank Offered Rate：ロンドン銀行間取引利率）+3%とし、LIBORにつ

いては2.5%を採用した。

(9) 解析結果

設計水準 x の現実的と考えられる範囲を 0.2~0.3 とした上で、係数 α と供用期間 t を変数とした場合の最適ナリスクファイナンススキームと最適設計水準を求めた。なお、 α と t の範囲として、それぞれ 1~50 を設定した。

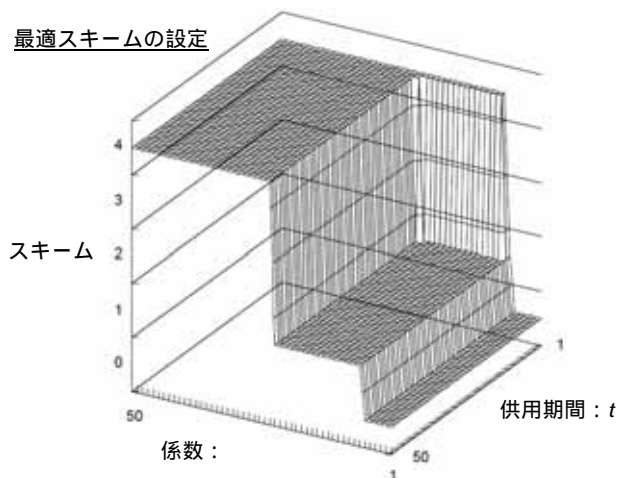
図 6 に解析結果を示す。 α と t の組合せに応じて採るべきナリスクファイナンススキームや設計水準が異なる事がわかる。

今回設定した変数の範囲では、最適スキームとして現れたものはスキーム 0、スキーム 1、スキーム 4 の 3 つであった。供用期間が数年以上であるならば、最適スキームの選定に与える供用期間の影響は小さくなく、係数 α によってスキームが決定される。一方、設計水準 x に関しては、 α と t が大きくなるに従い x も増大する。

ナリスクコントロールとナリスクファイナンスの関係で言えば、供用期間が長い場合には、 α の増大に対してナリスクコントロールが先行し、後に、ナリスクファイナンスを援用することになる。供用期間が短い場合には反対に、ナリスクファイナンスが先行し、ナリスクコントロールが続くことになる。これは、供用年数が長いほど、1 年あたりに換算した初期投資費用が少なくなり、設計水準の向上が LCC 最小化に対して有利になるからである。

反対に、供用年数の短い期限付き建物の設計や残存期間が短い既存建物の耐震補強に関しては、単に補強するのではなく、ナリスクファイナンスが合理的な施策である。

最適スキームの設定



最適設計水準の設定

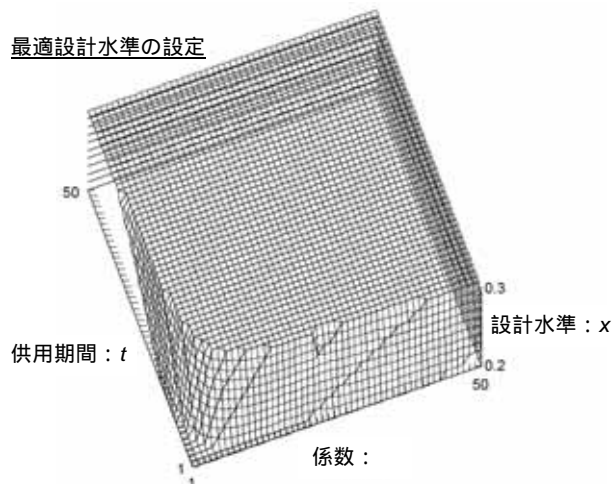


図 6 解析結果

4. まとめ

本研究では企業の地震ナリスクマネジメントを対象に、その施策としてのナリスクコントロールとナリスクファイナンスの組合せ方法について、LCC 最小化の観点から検討を行った。さらに、関東地域に複数の建物を有する仮想の企業を設定し、ナリスクファイナンススキームの選択や設計水準の設定に関する検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 供用年数により採るべきナリスクマネジメント手法が異なり、供用年数が長いほどナリスクコントロール（設計水準の向上）が有利となり、短いほどナリスクファイナンス（ナリスク移転）が有利となる。
- 2) 企業経営者の構造被害による損失に対する全損失の比 α によっても採るべき手法は異なり、 α が小さければナリスクコントロールのみで十分であるが、 α が大きくなるに従い、地震保険との併用、証券化との併用へと手法が切り替わる。なお、供用年数によっては、地震保険が採択されない場合もある。
- 3) 今回の検討範囲内では、地震保険と証券化の組合せは合理的な結果を与えなかった。

本研究で示した例は単純なものであるが、これを現実的な問題に展開することは容易であると考えている。今後は、より現実的な組み合わせや組み合わせの最適化について検討を行う予定である。

なお、本研究では現在の支出である初期建設費用と将来の支出である地震ナリスクやナリスク移転費用を足し合わせているが、後者については将来の価値を現在の価値に変換することが必要である。価値の割引率によっては結果が変わることも予想されることから、割引率の値やその不確実性が与える影響については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 福島誠一郎、矢代晴実：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のナリスク評価、日本建築学会計画系論文集、No.552, pp.169-176, 2002.2
- 2) 福島誠一郎、矢代晴実：ナリスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方、日本建築学会構造系論文集、No.567, pp.197-204, 2003.5
- 3) 例えば、中村紀吉、成川匡文、岸野泰章、福島誠一郎、岩田衛、和田章：特殊用途建築物に適用可能な機能に基づく耐震設計の考え方、日本建築学会構造系論文集、No.511, pp.149-156, 1998.9
- 4) 福島誠一郎、矢代晴実：地震ナリスクの証券化における条件設定に関する解析、日本建築学会計画系論文集、No.555, pp.295-302, 2002.5
- 5) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会
- 6) 林他：兵庫県南部地震による被害率曲線、1998 年度日本建築学会災害部門 PD 資料, pp15-20, 1998
- 7) T.Annaka and H.Yashiro : A seismic source model with temporal dependence of large earthquake occurrence for probabilistic seismic hazard analysis in Japan, Risk Analysis, WIT PRESS, pp.233-242, 1998
- 8) 新建築構造体系の開発 目標水準分科会報告書、建設省建築研究所, 1998.3