

ポートフォリオの地震リスクに基づく建物の耐震性能の設定

SEISMIC PERFORMANCE LEVEL OF BUILDINGS BASED ON
THE EARTHQUAKE RISK OF PORTFOLIO

福島 誠一郎*, 矢代 晴実**

Sei'ichiro FUKUSHIMA and Harumi YASHIRO

In the seismic risk management for enterprises, risk control measures such as an increment of seismic capacity, are essential, since they reduce both direct losses and recovery costs. On the other hand, risk control measures require the costs for implementation, so that the adequacy of the measure must be examined from the viewpoint of the accountability. Therefore, when considering the risk management of portfolio of buildings, the methodology to determine the seismic performance of each building consisting of the portfolio is required in order to utilize the cost beneficial counter measure. In this paper, proposed is the methodology to determine the optimal seismic performance of buildings based on the contribution to the portfolio loss. The efficiency of the proposed methodology is also demonstrated using the model portfolio consisting of 20 buildings in Kanto district.

Keywords: Risk management, Seismic risk, Risk control, Seismic performance, Contribution ratio

リスクマネジメント, 地震リスク, リスクコントロール, 耐震性能, 寄与率

1. まえがき

筆者らは複数建物を有する企業のリスクマネジメントを目的に、建物群（以下、ポートフォリオ）のリスク評価手法を構築してきた¹⁾。ポートフォリオのリスクは、損失とその年超過確率の関係を表すリスクカーブにより定量化され、このリスクカーブを基に、耐震補強や地震保険の購入といった具体的なリスクマネジメント施策が実施される。また、リスクマネジメント施策実施前後のリスクカーブを比較することにより、年期待損失（以下、AEL: Annual Expected Loss）や予想最大損失（以下、PML: Probable Maximum Loss）の低減量を求め、当該施策の妥当性を検討することができる¹⁾。

なお、リスクマネジメント施策の実施は、一般に費用を伴うため、企業経営者の立場からは効率的な施策の実施が求められる。これは、限られた予算内で最大のリスク低減を行うことであり、自社のリスク回避という本来の目的とともに、株主等への説明責任を果たす上でも必要になってくる。

リスクマネジメント施策の内、被災の軽減及び被災後対応に要する負荷の軽減に効果的である耐震性の向上に着目した場合、従来は個別の建物毎に必要な耐震性能を付与してきた。企業においては、経営上の要となる施設については、他の建物よりも大きな耐震性を与えるといった施策が採られている。このような施策は前述のように費用を伴

うもので、例えば、中村らはこの費用増の妥当性をライフサイクルコスト（以下、LCC）最小化の観点から説明している²⁾。

LCC評価における地震リスクは、前出のAELと供用年数から求められるが、このAELは、高頻度・低損害のリスクから低頻度・高損害のリスクまで、全てのリスクを含んでいる。したがって、LCCを最小化する、あるいは地震リスクのAELを低減するといった視点では、どのリスクを低減しているのかは明らかにならない。リスクマネジメントの施策は、頻度と損害という2つの側面から検討されるものであるため、リスクカーブの変化をリスクマネジメント施策の効果と捉えて、施策の妥当性を確認する必要がある³⁾。

ところで、ポートフォリオのリスクカーブは、構成する建物全体の損失を指標としており、当該損失に対して各建物の損失がどの程度寄与しているのかは明確ではない。また、この寄与も損失の程度に応じて変化すると考えられる。そのため、ポートフォリオのリスクカーブが与えられたとしても、それだけでは具体的にどの建物にリスクマネジメント施策を実施するかを判断することができない。

本研究では以上を鑑み、ポートフォリオのリスクカーブへの各建物の寄与を明らかにする。さらに、リスクマネジメント施策として耐震性能向上を採用した場合に、対象となる建物の選定と耐震性向上の程度の設定について、企業経営者の観点から検討を行う。

* 東電設計(株) 博士(工学)

** 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 博士(工学)

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

Tokyo Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

2. ポートフォリオリスクへの寄与

2.1 ポートフォリオ解析

筆者らが提案してきたポートフォリオの地震リスク評価手法(以下、ポートフォリオ解析)は、地震ハザード解析をベースとしたものである。その多数の地震源による多数建物のリスク評価であるポートフォリオ解析の概念を図1に示す。同図で、 $x_j(i), j=1, \dots, n$ はイベント i (地震ハザード解析で用いる個々の要素地震を本研究ではイベントと称する) による建物 j の損失を示す。 n は建物総数である。また、 $x_p(i)$ はイベント i によるポートフォリオの損失である。

各イベントには年間発生確率が与えられている。所与の損失レベルを超過するイベントの年間発生確率を足し合わせたものが年超過確率であり、損失レベルと年超過確率との関係がリスクカーブである。ところで、距離減衰式による地震動推定値やロスカーブによる損失の推定値にはばらつきがあるため、これを適切に評価しなくてはならない。本手法では、これらのばらつきに基づくサンプルを発生させ、モンテカルロシミュレーション(以下、MCS)によりリスクカーブ群を評価し、所定の非超過値を結んだものを当該ポートフォリオのリスクカーブとする。これを示すのが図2である。

なお、リスク回避の観点から、実際のリスク評価では90%非超過値が一般的に用いられている。本研究でも、特に言及しない限り、90%非超過値を結んだものをリスクカーブとして用いる。

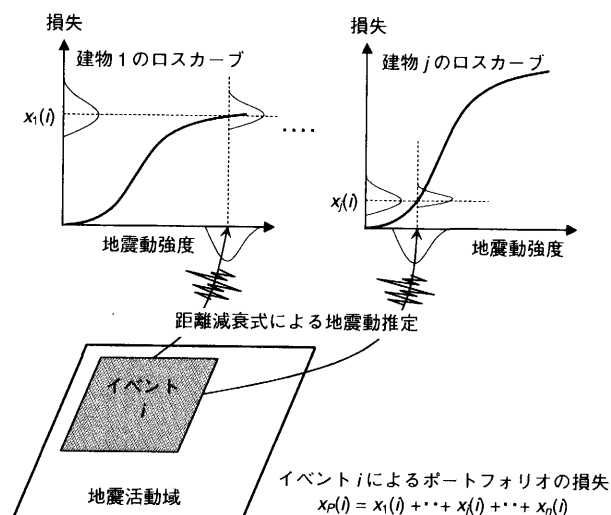


図1 ポートフォリオ解析の概念

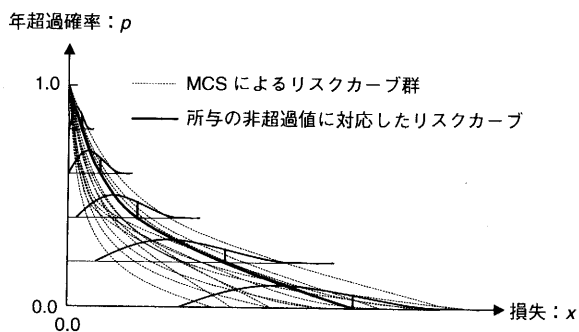


図2 リスクカーブの評価

2.2 リスクカーブへの寄与の評価

各建物のリスクのポートフォリオリスクへの寄与は、以下の条件を満たすように求める。

- ① 同一のイベントについての寄与とする
- ② 寄与の平均像を評価する

図1に示したポートフォリオ解析手法によれば、ポートフォリオのリスクカーブと同様、個別建物のリスクカーブを評価することができる。ただし、所定の年超過確率の損失を与えるようなイベントが必ずしも同一ではないため、個別建物のリスクカーブから寄与を評価することは不適切である。このことを規定するのが条件①である。

また、図2に示したように、本研究ではMCSによる損失評価を行っているため、ただ1つのサンプルから寄与を求めることは適切ではなく、当該損失を与えるような複数のサンプルについて寄与を検討する必要がある。このことを示すのが条件②である。

本研究では以上を考慮して、図3に示す手順で寄与率(総和が1.0となるように寄与を正規化したもの)を評価する。

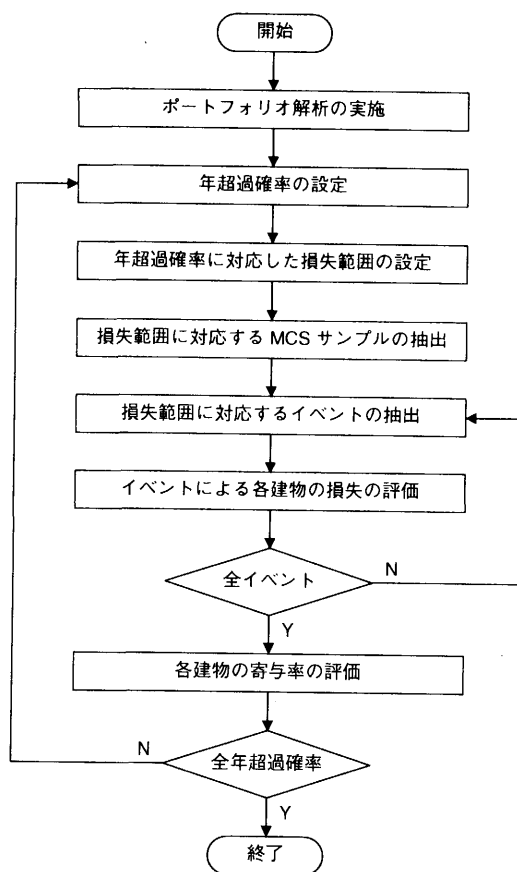


図3 リスクカーブへの寄与の評価手順

図3において、年超過確率 p に対応する損失範囲を $x(p) \pm \Delta x(p)$ とする。 $x(p)$ はリスクカーブの値であり、 $\Delta x(p)$ は損失範囲内にある程度のMCSサンプルが入るように設定する。このときのサンプル数を $ns(p)$ とする。

次に、サンプル $k: k=1, \dots, ns(p)$ について、当該損失範囲内の損失を与えるイベントを (i, k, p) で表記し、イベント数を $ne(k, p)$ とする。このときの建物 j の損失を $x_j(i, k, p)$ 、その年間発生頻度を $\lambda(i, k, p)$

とし、サンプル k における建物 j の期待損失 $\bar{x}_{j,k}(p)$ を次式で与える。

$$\bar{x}_{j,k}(p) = \sum_{i=1}^{ne(k,p)} \lambda(i,k,p) \cdot x_j(i,k,p) / \sum_{i=1}^{ne(k,p)} \lambda(i,k,p) \quad (1)$$

さらに、MCS サンプルについて $\bar{x}_{j,k}(p)$ の平均を取り、 $\bar{x}_j(p)$ とする。

$$\bar{x}_j(p) = \frac{1}{ns(p)} \sum_{k=1}^{ns(p)} \bar{x}_{j,k}(p) \quad (2)$$

このようにして求めた $\bar{x}_j(p)$ を全建物について正規化したものを、当該年超過確率 p における寄与率 $\alpha(p, j)$ とする。これを次式に示す。

$$\alpha(p, j) = \bar{x}_j(p) / \sum_{j=1}^n \bar{x}_j(p) \quad (3)$$

以上の手順を各年超過確率について実施することで、年超過確率毎の寄与率を求めることができる。

なお、(2)式の両辺を全建物について総和すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \bar{x}_j(p) &= \sum_{j=1}^n \frac{1}{ns(p)} \sum_{k=1}^{ns(p)} \bar{x}_{j,k}(p) \\ &= \frac{1}{ns(p)} \sum_{k=1}^{ns(p)} \sum_{j=1}^n \bar{x}_{j,k}(p) \end{aligned} \quad (4)$$

これは、 $\bar{x}_{j,k}(p)$ のサンプル平均の総和と $\bar{x}_j(p)$ の総和のサンプル平均、すなわち、ポートフォリオの損失のサンプル平均が等しいことを示しており、(3)式における正規化が、ポートフォリオの損失のサンプル平均に対する各建物の損失のサンプル平均の寄与率を求めることであることを表している。

3. モデルポートフォリオにおける寄与の試算

3.1 諸条件の設定

(1) 対象ポートフォリオ

関東地方に配置された 20 の建物からなるポートフォリオを設定した。建物群の配置を図 4 に示す。

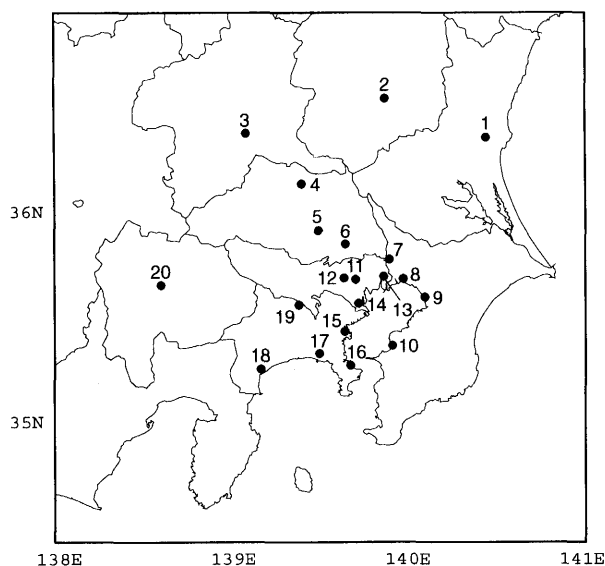


図 4 建物群の配置

(2) 建物のフラジリティと被害率

建物のフラジリティカーブは対数正規分布であると仮定し、ばらつきを表す対数標準偏差とフラジリティカーブ上の 1 点を定めることで、その中央加速度耐力を設定した。なお、フラジリティと被害率は、小破、中破、大破、倒壊の各被害程度について設定した。

フラジリティカーブの対数標準偏差については中村ら⁴⁾のものを採用した。フラジリティカーブ上の 1 点であるが、現行の 1 次設計と 2 次設計がそれぞれ小破、大破に相当し、標準せん断力係数に対応した最大加速度 ($C_0=0.2$ に対して 80gal, $C_0=1.0$ に対して 400gal) が入力した場合に 1% の損傷確率になると仮定した。中破と倒壊に関しては、加速度耐力値が等間隔になるように値を設定した。

なお、このように求めた加速度耐力値は建物 1 階の応答に対応するものであるが、表層の増幅特性を 1.5 とし⁵⁾、また、表層の最大加速度に対する建物応答加速度の最大値の比を 0.7 と仮定することで⁶⁾、表 1 に示した値を工学的基盤位置のものと読み替えることとした。

被害率は、建物資産に対する損失の比と定義し、中村ら⁴⁾を参照し、小破 5%、中破 10%、大破 30%、倒壊 100% とした。建物のフラジリティカーブの特性値及び被害率を表 1 にまとめる。

表 1 被害程度別のフラジリティ特性値と被害率

被害程度	フラジリティカーブの特性値		被害率 (%)
	中央値 (Gal)	対数標準偏差	
小破	200	0.4	5
中破	600	0.4	10
大破	1000	0.4	30
倒壊	1400	0.4	100

(3) 建物の資産

建物のポートフォリオリスクへの寄与は、建物の耐震性、地震環境、建物資産(営業利益を含む)の 3 項目が影響する。耐震性が低いほど、地震危険度が高いほど、また、建物資産が大きいほど寄与率が高いことが予想される。これらの項目の内、建物資産は、法規制や経営上の制約を受けずに、企業経営者あるいは設計者が任意に設定できるものである。

そこで、資産の配置がポートフォリオリスクに与える影響を検討することとし、表 2 に示すような 3 ケースの資産配置を設定した。ケース 1 は建物資産を一律に 100 としたものの、ケース 2 は地震危険度の高い 4 地域から低い 4 地域に資産を移動したものの、ケース 3 は地震危険度の低い 4 地域から高い 4 地域に資産を移動したものである。ただし、全資産の総和はケースによらず同一とした。また、地震危険度の高低の判断は、福島・矢代⁷⁾に基づいて行った。

表 2 ポートフォリオの資産配置

検討ケース	資産配置の方針	設定した建物資産 (括弧内は対応建物番号)
1	一様に資産を配置	100×20 棟 (1~20)
2	地震危険度の高い地域から低い地域に資産を移動	175×4 棟 (1, 2, 3, 4) 25×4 棟 (15, 16, 17, 18) 100×12 棟 (5~14, 19, 20)
3	地震危険度の低い地域から高い地域に資産を移動	25×4 棟 (1, 2, 3, 4) 175×4 棟 (15, 16, 17, 18) 100×12 棟 (5~14, 19, 20)

(4) 地震環境

地震活動域モデルについては Annaka & Yashiro⁸⁾を用いて設定した。大地震発生活動域は、海域ではマグニチュード7.5程度以上、陸域ではマグニチュード7.0以上の地震が繰り返し発生する領域とし、固有地震モデルを用いた。中小地震発生活動域についてはゲーテンベルグ・リヒターモデルを用い、1885年1月～1997年7月のマグニチュード6以上の地震数を求め、それに基づき b 値を仮定して A 値を求めた。なお、マグニチュード6以上の地震が発生していない場合は、1926年1月～1997年7月のマグニチュード5以上の地震数に基づいた。図5に設定した地震活動域を、表3に地震活動域の諸元を示す。距離減衰式についても同文献に従い、以下の安中式を採用した⁸⁾。

$$\log a = 0.61M + 0.00501h - 2.203\log(d) + 1.377$$

$$d = \sqrt{\Delta^2 + 0.45h^2} + 0.22\exp(0.699M) \quad (5)$$

ここに、 a は最大加速度 (cm/s/s), Δ は震央距離 (km), h は震源深さ (km), 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。

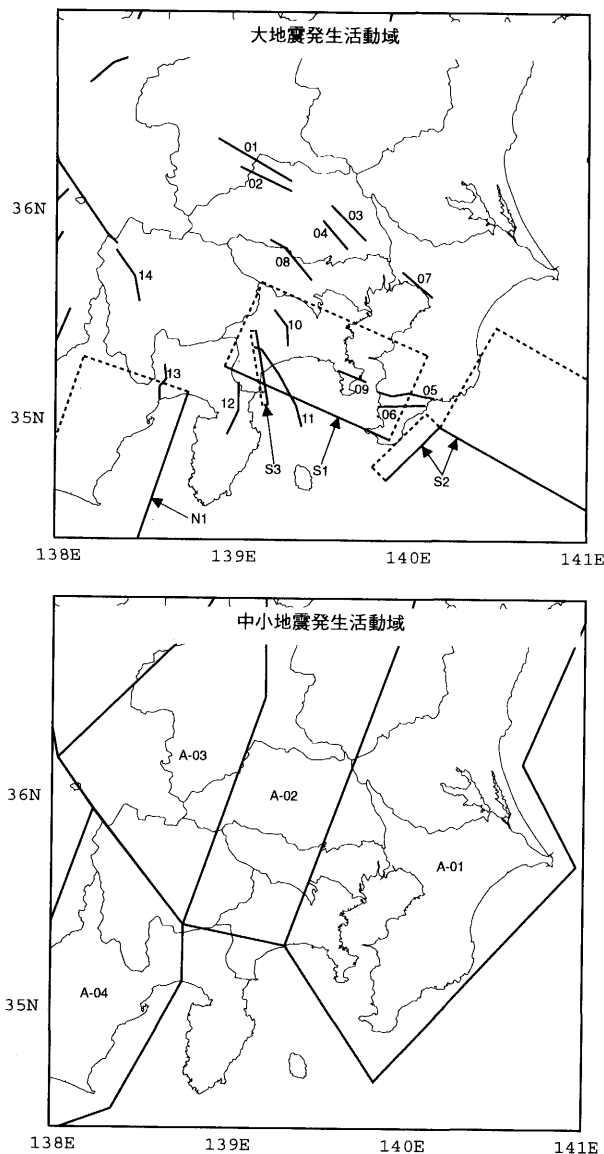


図5 ポートフォリオ周辺の地震発生活動域

表3 地震発生活動域の諸元

活動域番号	M の範囲	発生間隔(年)	活動域番号	M の範囲	発生間隔(年)
01	7.0-7.6	1182	02	6.9-7.3	5212
03	7.0-7.4	79283	04	6.8-7.2	5931
05	7.1-7.5	2842	06	7.0-7.4	2639
07	6.8-7.2	5676	08	7.1-7.5	8710
09	6.6-7.0	1365	10	6.9-7.3	7239
11	7.5-7.9	1625	12	7.1-7.5	877
13	6.8-7.2	1917	14	7.1-7.5	2851
S1	7.8-8.2	200	S2	7.8-8.2	1000
S3	6.8-7.2	73	N1	7.6-8.0	130
活動域番号	M の範囲	A 値	活動域番号	M の範囲	A 値
A-01	5.0-7.0	2.344	A-02	5.0-7.0	4.235
A-03	5.0-7.0	1.645	A-04	5.0-7.0	2.344

中小地震発生活動域の b 値は一律に0.9と設定

3.2 寄与率の算定

図6に、各検討ケースの寄与率を示す。なお、参照する年超過確率は、1/50～1/1000を対数軸上で4等分した値とした。

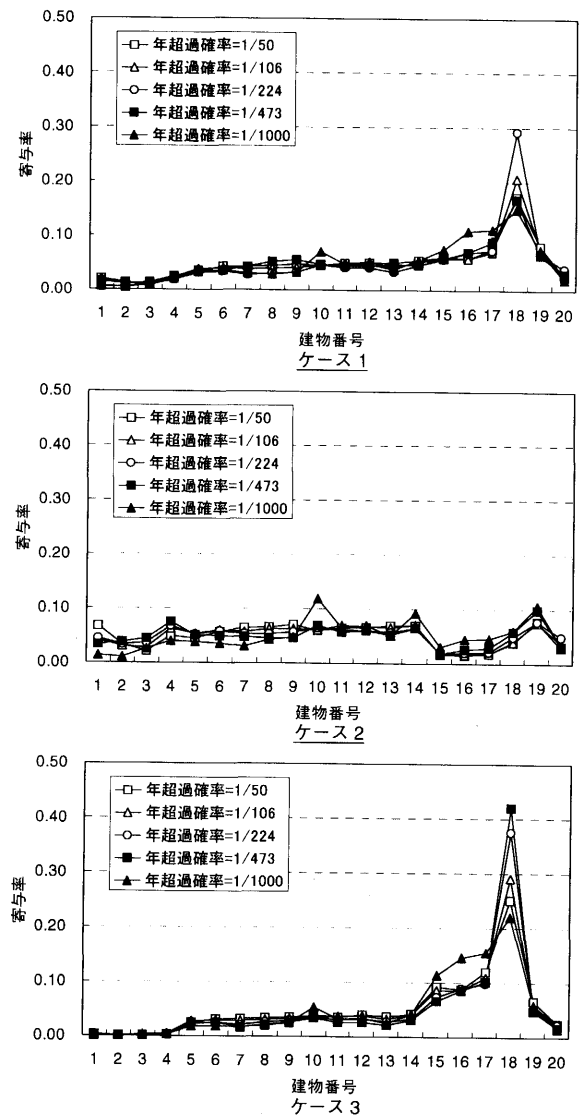


図6 建物のポートフォリオリスクへの寄与

図6から明らかなように、地震危険度¹²⁾の大きさと資産の配置により、各建物の寄与率は大きく変動する。

ケース1は、資産配置が一樣であるため、地震危険度の差異が直接現れており、地震危険度の高い建物18が最も大きな寄与率を示している。建物18の寄与率は、年超過確率が小さくなるに従い増加し、その後減少するという傾向を示している。建物が南関東に比較集中していることから、ポートフォリオリスクに支配的な震源は関東地震（震源番号：S1）である。年超過確率が小さくなるほど、当該震源の影響が大きくなり、その結果、震源近傍の建物18の寄与率が大きくなる。さらに年超過確率が小さくなると、建物18の被害額はほぼ上限に達し、周辺の建物（建物10、16、17）の影響が増大するため、相対的に寄与率が低下することとなる。

ケース2では、地震危険度の大きい地域から小さい地域へ資産を移動したことにより、全建物ではほぼ均一の寄与率が得られている。年超過確率が小さくなると、建物10、14～19の寄与率が大きくなるが、これは前述したように、ポートフォリオリスクに支配的な関東地震によるものと考えられる。

ケース3はケース2とは反対に、地震危険度の小さい地域から大きい地域へ資産を移動したものである。寄与率の傾向は、ケース1の傾向をさらに強調したものとなっており、建物18の寄与率の減少、及び周辺建物の寄与率の増大が、より明確になっている。建物1～4の寄与率は無視しうる程度である。

3.3 寄与率とリスクカーブの関係

図7に各ケースのリスクカーブの比較を示す。同図から明らかなように、寄与率が平準化しているものほど、リスクが小さいことがわかる。ポートフォリオを構築することによるリスク低減効果は、個々の損失の同時発生を抑止することで得られることから、寄与率の平準度合いはポートフォリオのリスク低減効果を間接的に表す指標と見なすことができる。

また、このことは、寄与率を平準にするような対策を講じることで、より効果的なリスク低減が可能であることを示している。例えば、前出の図6のケース1が与えられた場合に、その寄与率を平準化するような施策として資産の移動を取り上げ、それを建物15～18に対して行ったものがケース2であると捉えることができる。

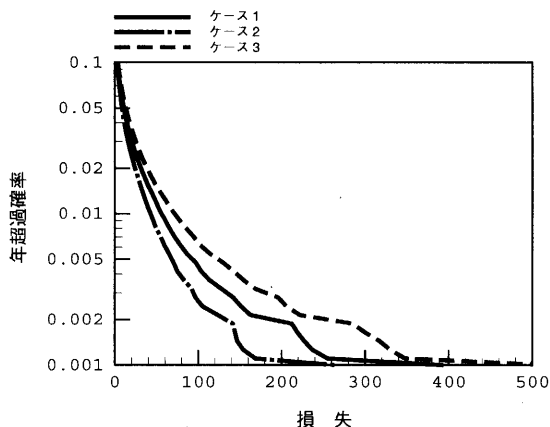


図7 リスクカーブの比較

4. リスク低減に基づく耐震性能

4.1 耐震性能の定義

リスクを低減させる施策の1つに、設計地震力の割増が挙げられる。設計地震力の割増方法としては、建物建設地点の地震危険度を反映した地域係数の導入、あるいは、建物が内包する財産・機能の重要性を反映した重要度係数の導入がある。

これらは個々の建物の健全性確保という立場をとり、ポートフォリオリスクの観点からは考えられていないため、企業経営という立場からは必ずしも十分ではない。企業経営がポートフォリオリスクを考える場合には、ポートフォリオリスクを効率的に低減させるような施策が必要となってくる。

本研究では、ポートフォリオリスクを低減するような設計地震力の割増をもって各建物が保有すべき耐震性能と定義する。設計地震力の割増の程度が大きいほど、耐震性能が高いことになる。

4.2 最適耐震性能とその実現手順

(1) 最適耐震性能の考え方

耐震性能の与え方には、①所定の耐震目標を満たすような最小投資による耐震性能、②投資可能な範囲内での最大の耐震性能、の2つの方法が考えられる。個々の建物が保有すべき最低耐震性能が建築基準法等で規定されていると条件で、上記の2つの考え方はともに最大の投資効果を求めるというものである。

本研究では、最大の投資効果を与えるような耐震性能の配分をもって、ポートフォリオの最適耐震性能とする。

(2) 最適耐震性能の実現手順

最適耐震性能の実現の基本的な考え方は、投資可能額を細分化し、所定の条件に達するまで、細分化された投資額（投資額の増分）をポートフォリオを構成する各建物に投入する、というものである。

最適耐震性能実現の手順を図8に示す。

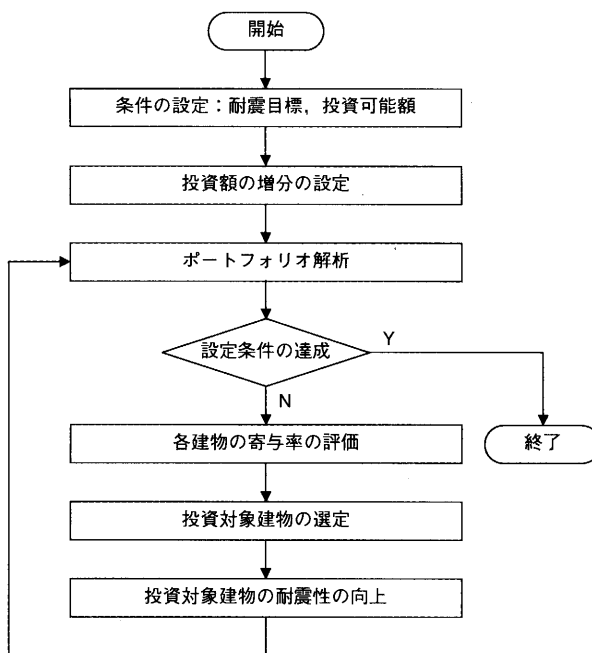


図8 最適耐震性能の実現手順

図8においては、投資額の増分を離散的に与えるため、現実的な意味では「最適耐震性能」とはならないが、増分を十分小さくすることで、実用上は不足のない解が得られると考えられる。

また、本来であるなら各ステップにおいてポートフォリオの損失低減が最大となるように投資対象建物を選定することが直接的であるが、そのためには、各建物に単位の耐震投資を行った場合の損失低減額を求める必要が生じる。ポートフォリオの損失が陽な形で与えられないため、数値解析を用いて上記の値を求めることとなるが、これはポートフォリオを構成する建物数のポートフォリオ解析を実施することを必要とし、現実的ではない。そこで間接的ではあるが、ポートフォリオによる損失低減の効果が寄与率の平準化で表されることを利用し、寄与率の大きな建物を投資対象建物として選定する。

4.3 耐震投資額とリスク低減の関係評価

(1) 条件の設定

図4に示したポートフォリオを対象に、耐震投資額とリスク低減量との関係を求める。耐震対策前の建物の性能は表1の値とし、建物資産の配置は表2に示したケース1とした。図7に示したように、資産の初期配置によりリスクは異なるが、ここでは、耐震対策の影響を議論することが目的であることから、1ケースについての検討でも結果の本質は維持されると判断した。

表1に示したフラジリティカーブの中央値は、標準せん断力係数に比例すると仮定した。また、建物内財産や営業利益を含む建物資産に占める躯体コストの割合が一般には低いことを理由として、建物資産は標準せん断力係数によらず一定とした。

リスク低減量として考慮する値は、不動産の証券化等で用いられている年超過確率 1/475 に対応した PML とする。投資額については、耐震性能の増分（設計用標準せん断力係数の増分）と初期建設費用の増分がほぼ線形関係で表されることを利用して²⁾、標準せん断力の増分をもって投資額の増分に代えることとした。

(2) 耐震投資施策

耐震投資施策として、表4に示す4ケースの方法を採用した。いずれのケースにおいても標準せん断力係数の増分の総和の最大値は2.0とした。これは、全ての建物について標準せん断力係数を1.5倍することに相当する対策費用を企業経営者が有していることを表す。

ケース1-3と1-4は企業経営者が地震活動度を定性的に評価しながら耐震性能を付与することに対応しており、ケース1-4は「地震危険度に大きな差異がある」という判断を一層反映したものである。

表4 耐震投資施策一覧

ケース	耐震性能向上の方針	標準せん断力の増分 [増分/step×step数]
1-1	図8に示した手順により、耐震性能向上対象建物を逐次探索	1棟あたり 0.05 [0.05/step×40step]
1-2	全建物について一律に耐震性能を向上	1棟あたり 0.05 [1.0/step×2step]
1-3	PMLに対する寄与の大きい10建物(8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19)について一律に耐震性能を向上	1棟あたり 0.05 [0.5/step×4step]
1-4	PMLに対する寄与の大きい神奈川県内の5建物(15, 16, 17, 18, 19)について一律に耐震性能を向上	1棟あたり 0.05 [0.25/step×8step]

(3) 耐震投資とPMLとの関係

図9に標準せん断力係数の増分の総和とポートフォリオのPMLの低減量との関係を示す。同図からは、耐震投資額の大きさによらず、ケース1-1が最も大きくPMLを低減することがわかる。

寄与率に関係なく、主観的な判断で耐震投資を実施した場合（ケース1-2～1-4）、標準せん断力係数の増分が小さい場合には、PMLに支配的な建物に投資をすること（ケース1-4）が効果的であり、全体に投資すること（ケース1-2）は非効率である。一方、標準せん断力係数の増分が大きい場合には、ケース1-4は、既にPMLを支配しないまでに耐震性が高まった建物に耐震投資を行うこととなり、効率が著しく低下する。このような場合にはある程度全体的に耐震投資を行うケース1-2あるいはケース1-3が望ましい。

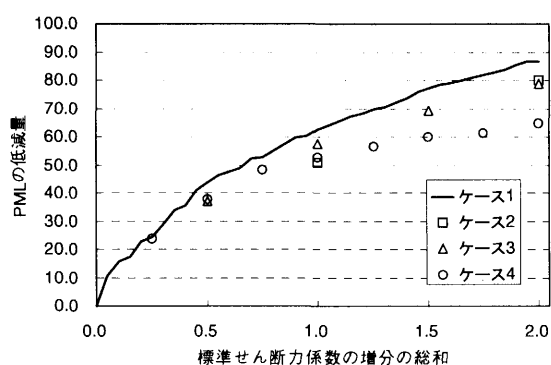


図9 耐震投資とPMLの低減量との関係

(4) 耐震投資と耐震投資施策との関係

ケース1-1の耐震投資額と耐震投資施策の関係を、ポートフォリオを構成する建物について図10に整理した。耐震投資額が少ない場合、適切な投資は、建物18を中心とした地域の建物に限られる。これは、ケース1-4に近い施策であり、図9に示されるように、両ケースのPML低減量には大きな差は現れない。一方、耐震投資額が多い場合には、東京・神奈川・千葉・埼玉・山梨の1都4県に存在する建物について施策が行われる。これは表4のケース1-2あるいはケース1-3に近い施策である。これらの傾向は図9と調和的である。

図10で示されるような耐震投資施策を、経営者の主観的な判断のみから設定することは難しく、また、説明性にも乏しい。図8に示した手順は、客観的かつ系統的な方法で効率的な耐震投資施策を与えるものである。

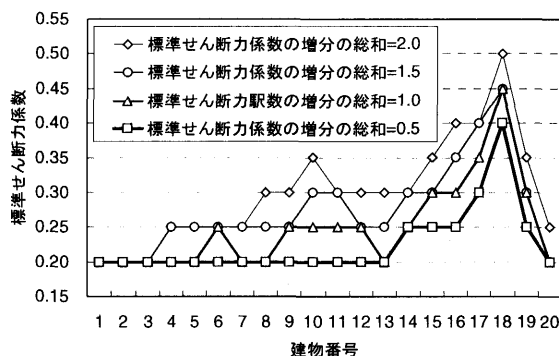


図10 耐震投資と耐震施策の関係（ケース1-1）

(5) 耐震投資施策が建物の寄与率に与える影響

図 11 に、耐震投資額と寄与率の関係をケース毎に示す。

ケース 1-1 では、耐震投資額がそれほど多くない場合でも寄与率はある程度平準化されている。また、耐震投資額の増加に伴い、寄与率がさらに平準化される様子が見られる。

ケース 1-2 では、1 棟についての耐震性能の向上が小さい。その結果、各建物の損失低減に頭打ちが現れず、均等に低減されたため、寄与率も耐震施策の程度によらず、同一の分布形状を保持している。

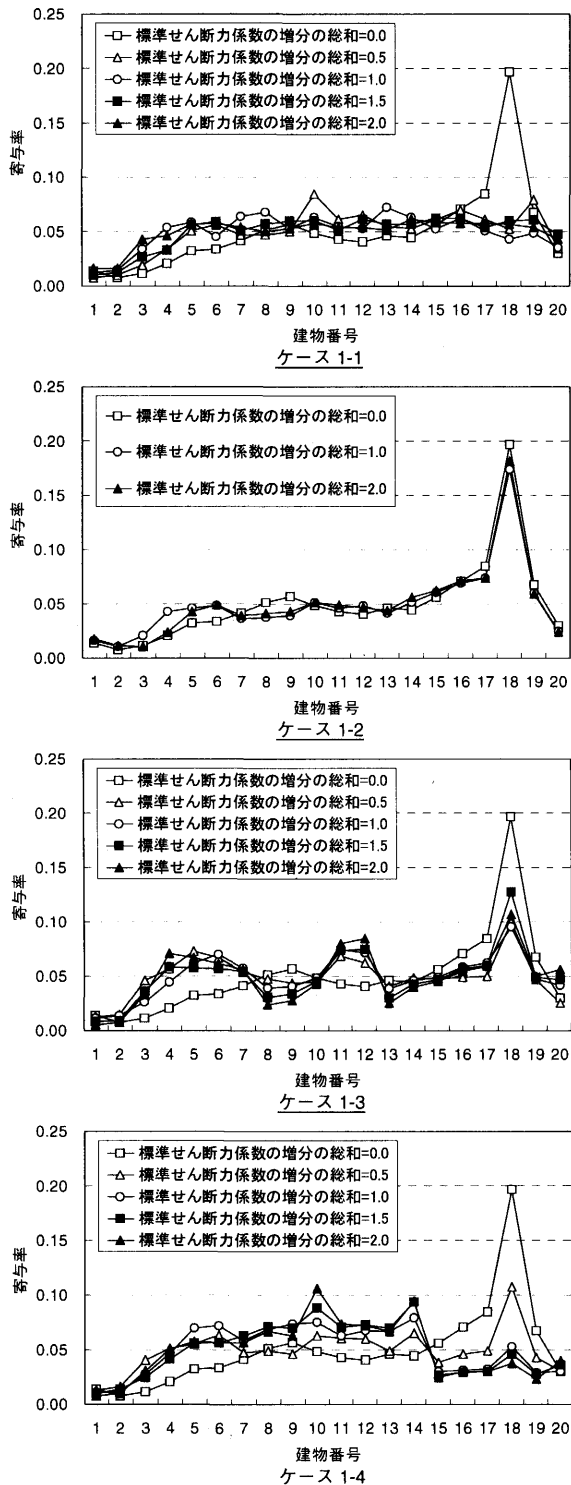


図 11 耐震施策が寄与率に与える影響

ケース 1-3 と 1-4 では、耐震投資額が上昇するに従い、耐震施策の対象ではない建物の寄与率が大きくなってきている。特にケース 1-4 では、標準せん断力係数の増分の総和が 1.0 を超えた場合、耐震施策の対象建物の寄与率は変わらず、対象外の建物の寄与率のみが増加するという傾向が現れている。これは、耐震性能向上が過度になっていることであり、図 9 に示したような PML 低減効果の頭打ちに繋がるものと考えられる。

以上より、資産配分の場合と同様、耐震性の向上についても、寄与率の平準化がポートフォリオのリスク低減に繋がることが明らかになった。図 12 は、ケース 1-1 について、標準せん断力係数の増分の総和と寄与率の標準偏差との関係を示したものである。せん断力係数の増分が離散的であることから、必ずしも単調減少にはなっていないが、図 8 に示した手順を踏むことで、標準せん断力係数の増加に伴い寄与率の標準偏差が小さくなるのがわかる。

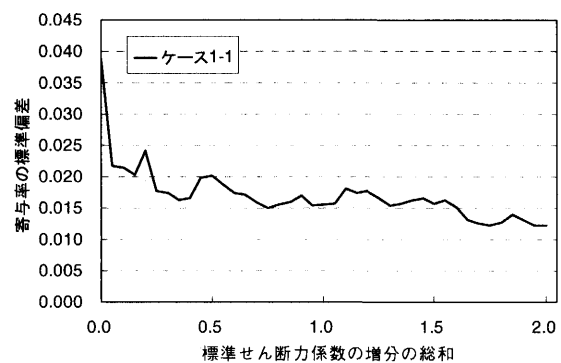


図 12 耐震投資と寄与率の標準偏差との関係 (ケース 1-1)

4.4 耐震性能の設定

前述したように、図 8 に示した手順に従えば、ポートフォリオを構成する建物が保有すべき耐震性能を系統的に求めることができる。提案手法の特徴は、経営者が設定する耐震投資額あるいはリスク低減量に応じて耐震性能を設定できる点にある。

図 10 を基に耐震投資額に応じた建物の耐震性能を整理したものが表 5 である。なお、同表では耐震性能として、個々の建物の標準せん断力係数を用いている。同表より、企業経営者は投入可能な耐震投資額に応じた施策 ($C_0=0.2$ 以上の設計標準せん断力の適用) を求めることができる。

表 5 耐震投資額に応じた建物の耐震性能の設定

建物 番号	標準せん断力係数の 増分の総和				建物 番号	標準せん断力係数の 増分の総和			
	0.5	1.0	1.5	2.0		0.5	1.0	1.5	2.0
1	0.20	0.20	0.20	0.20	11	0.20	0.25	0.30	0.30
2	0.20	0.20	0.20	0.20	12	0.20	0.25	0.25	0.30
3	0.20	0.20	0.20	0.20	13	0.20	0.20	0.25	0.30
4	0.20	0.20	0.25	0.25	14	0.25	0.25	0.30	0.30
5	0.20	0.20	0.25	0.25	15	0.25	0.30	0.30	0.35
6	0.20	0.25	0.25	0.25	16	0.25	0.30	0.35	0.40
7	0.20	0.20	0.25	0.25	17	0.30	0.35	0.40	0.40
8	0.20	0.20	0.25	0.30	18	0.40	0.45	0.45	0.50
9	0.20	0.25	0.25	0.30	19	0.25	0.30	0.30	0.35
10	0.20	0.25	0.30	0.35	20	0.20	0.20	0.20	0.25

5. まとめ

本研究では、リスクマネジメント施策としてリスクコントロールに着目し、企業経営者の立場から、施策の対象となる建物の選定と耐震性向上の程度の設定方法を示した。さらに、関東地域にモデルポートフォリオを設定し、ポートフォリオのリスクに与える資産配置の影響を各建物の寄与率として比較検討した。

また、各建物の寄与率に着目して、これを平準化するような耐震性向上施策を実施した場合、経営者の定性的な判断に基づく施策を実施した場合のPMLの低減量を評価・比較した。

これらの検討により、以下の結論を得た。

- 1) ポートフォリオのリスク低減効果を寄与率の観点から定性的に評価することが可能であり、建物の寄与率の差が小さいほど（寄与率が平準であるほど）リスク低減効果が高い。
- 2) 地震危険度の高い地点の資産を地震危険度の低い地点に移転する、といったリスクコントロール施策の妥当性は寄与率の平準化として表すことができる。
- 3) PMLの算出に用いる年超過確率により寄与率は変化し、特に年超過確率が小さい場合には、個々の建物の損失に頭打ちが現れるために、寄与率分布の傾向が大きく異なることになる。
- 4) 寄与率を平準化するように耐震施策対象建物と対策程度を決定することで効率的な耐震施策を求めることができ、PMLの低減量が与えられた場合には最小の耐震投資額を、投資額が与えられた場合には最大のPMLの低減量を得ることができる。

本研究では、ポートフォリオのPMLに対する個々の建物の寄与率を基に効果的なリスクマネジメント施策を求める手法を提案し、その有用性を確認した。今回の検討範囲では耐震性能の向上を施策として取り上げたが、企業経営の観点からは、人命確保を前提とした上での耐震性能の低減も考慮する事項であると考えられる。

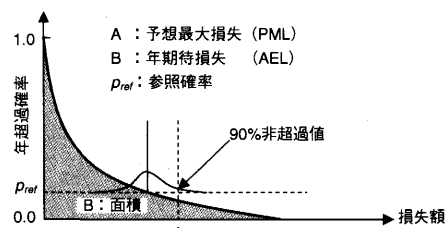
また、資産の再配置もリスクマネジメント施策として効果的であるが、単位の資産移動を寄与の大きい建物から寄与の小さな建物に移転させることで効率的な資産移動施策を求めることができる。このような施策においても本提案手法は有効であると考えられる。

なお、リスクマネジメント施策は単独で用いることは少なく、複数の手法を組み合わせることが实际的である。したがって、耐震性能の向上と資産の移動の組み合わせの合理的な設定法の検討が必要である。さらに、耐震性能の向上や資産の移動には、各々現実的な制約もあるため、この制約条件を加味した上での最適施策の策定が必要である。これらに関しては今後の課題とし、検討を行う予定である。

注記

[1] リスクカーブによる損失評価

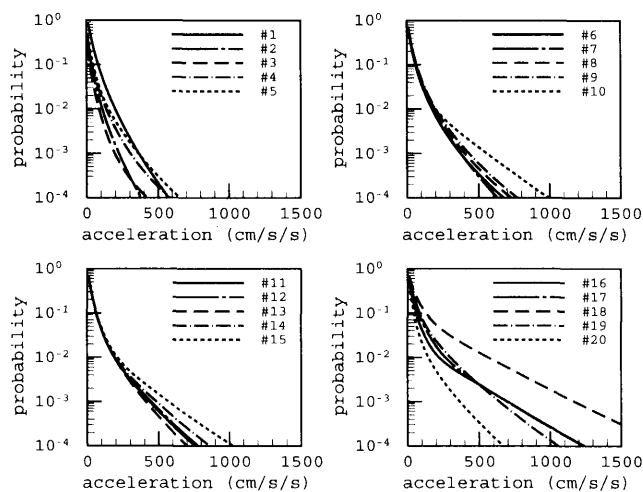
多数のイベントによる損失をその大きさに従って順位付け、所与の損失レベルを超過する発生確率を求める。この関係を示したものがリスクカーブである。所与の年超過確率 p_{ref} とし、 p_{ref} に対応する損失の90%非超過値からPMLが求められる。図A1のA点がPMLに対応する。一方、AELは50%非超過値を結んだリスクカーブと、X軸、Y軸で囲まれた面積として求められる。



図A1 リスクカーブと損失の関係

[2] 各建物位置での地震危険度

ポートフォリオを構成する建物位置の地震ハザード曲線を図A2に示す。算出の条件は、参考文献8)による。



図A2 各建物位置の地震ハザード曲線

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) 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
- 3) 福島誠一郎：地震リスク評価の立場から、2004年度日本建築学会大会構造部門PD資料、pp52-61, 2004.8
- 4) 中村孝明、中村敏治：ポートフォリオ地震予想最大損失額（PML）評価、日本リスク研究学会誌12(2), pp.69-76, 2000
- 5) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、1993
- 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) 福島誠一郎、矢代晴実：地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置、日本建築学会環境系論文集、No.575, pp.91-98, 2004.1
- 8) 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.
- 9) 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

(2004年10月4日原稿受理、2005年4月12日採用決定)