

ライフサイクルコストにおけるリスクカーブ の評価とその利活用

RISK CURVE FORMULATION AND UTILIZATION ON THE LIFE CYCLE COST

中村孝明
Takaaki NAKAMURA

正会員 工博 (株) 篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1)

In the Life Cycle Cost model considering seismic risk, the method of accumulation of the annual loss expectation is almost adopted. The expectation value isn't suitable as an index of a decision making, because it's different from the actual amount of a loss. In this paper, the method of taking seismic risk probability density function into the LCC directly is proposed. In the evaluation of the probability density function, the seismic risk curve during the service time of the structure is calculated, that is discounted in the present value. The office building is adopted for example, and the cost-effectiveness of the aseismic reinforcement and the insurance are discussed for applicability of proposed method.

Key Words : Life cycle cost, Seismic risk Curve, Discount present value, Insurance

1. はじめに

ライフサイクルコスト(以下LCC)は, 設計や施工に関する初期建設費, 光熱費や修繕・更新に伴う維持管理費用に加え, 期せずして発生する火災や事故, 自然災害による損失なども考慮される。構造物の供用期間を通じて掛かる総費用に相当し, 施設管理者にとっては, 総費用が少ない程経済的であると判断でき, 施設の更新や修繕などの維持管理, あるいは効果的な工法や効率的な耐震補強策などの意志決定に利用することができる。初期建設費や維持管理費用はほぼ確実な費用であるが, 自然災害による損失は確率事象による損失であり, 蓋然性を前提としたリスクに相当する。リスクを含めたLCCの多くは年当たりの損失期待値を累積する方法^{1,2)}が採られているが, 自然災害などの低頻度重大事象は, 損失期待値と実際の損失額との乖離が大きく, リスクの大きさを直感的に把握することが難しい。このため, 防災対策の費用対効果の検討において, 実感に適合した金銭価値で優劣を比較することができないという盲点がある。JISでは, リスクは「事態の確からしさとその結果の組合せ, あるいは事態の発生確率とその結果の組み合わせ(JIS Q 2001:2001)」と定義される。平易には将来における不確かな損失あるいは不利益とその発生確率の組み合わせと解釈される。つまり損失期待値からのブレを含めた

確率分布そのものを意味している。

一方, 現在から見た場合, 収支の発生時期によってその価値は異なることから, 将来の支出を累積するLCCを意思決定の支援情報として利用する場合, 現在の価値に割引く必要がある。これにより, 収入はできるだけ早く, 支出はできるだけ遅く, といった時間選考に基づいた経済理念が取り込まれ, より合理的な意思決定が可能になる。これまでの地震リスクの割引は, 損失期待値あるいは損失事象は一度しか発生しないことを前提とした簡便な方法³⁾に限られていた。

本論は, 地震による物的損失を採り上げ, LCCにおける地震リスクの確率分布の評価方法を示すと共に, これを現在価値に割引く方法を提示する。利活用の例として, 耐震補強ならびに地震保険の費用対効果について示す。具体的には, ①LCCにおける割引の考え方を一般的に示し, 本論のモデルを示す。②供用期間の地震リスクの確率関数, いわゆるリスクカーブを誘導し, ③リスクカーブの割引方法を提示する。④補強対策や保険等の対策による費用対効果について考察する。

2. LCCの割引と耐震対策の費用対効果の記述

施設のLCCを式で表すと次ようになる。

$$LCC = c_0 + \sum_{i=1}^n (c_i + E(S_i)) \quad (1)$$

ここに、 n は施設の供用期間、 c_0 は初期建設費、 c_i は修繕・更新に伴う維持管理費用など毎期の費用、 c_n は施設の最終処理費用である。 S は火災や事故、自然災害などによる損失の確率変数であり、 $E(S_i)$ は損失期待値（基本的に年当たり）である。(1)式は構造物の供用期間を通じて掛かる総費用である。これを現在価値に割り引くと、以下ようになる。

$$LCC_d = c_0 + \sum_{i=1}^n (c_i + E(S_i)) d_i \quad (2)$$

ここに、 d_i は割引因子であり、割引率 r を使い以下のようになる。

$$d_i = (1+r)^{-i} \quad (3)$$

(2)式は、供用期間を通じて掛かる総費用を現在価値に換算したものであり、(1)式で評価される総費用とは異質である。

(2)式中の損失期待値を確率変数に置き換え、左辺を X と置く。

$$X^{(n)} = \sum_{i=0}^n c_i d_i + \sum_{i=1}^n S_i d_i \quad (4)$$

ここに、 $X^{(n)}$ は n 年間の割引LCCの確率変数である。また(4)式右辺第2項は、 n 年間のリスクを現在価値に割り引いた確率変数である。これは n 年間の割引リスクカーブの導関数に相当する。次に、(4)式を超過確率関数に置き換える。 $X^{(n)}$ の確率密度を $f_X^{(n)}(x)$ と置くと、超過確率関数は以下となる。

$$G_X^{(n)}(x) = \int_x^{1.0} f_X^{(n)}(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

超過確率として記述することで、LCCが実現する確率を直接読み取ることができ、リスクの大きさを踏まえた意思決定が可能となる。

本論では、地震対策の費用対効果の検討を目的とすることから、初期建設費、修繕・更新に伴う維持管理費用、最終処理費用等は含めず、地震リスクと対策費用のみを考慮する。従って、(4)式は以下のようになる。

$$X^{(n)} = \sum_{i=0}^n h_i d_i + \sum_{i=1}^n S_i d_i \quad (6)$$

ここに、 h_i は対策費用である。(6)式を(5)式に代入すると、

$$G_X^{(n)}(x) = \sum_{i=0}^n h_i d_i + G_S^{(n)}(s) \quad (7)$$

となる。(7)式右辺第2項は、 n 年間の割引リスクカーブである。つまり、対策費用と対策前後の割引リスクカーブが求められれば、供用期間のリスクを踏まえた費用対効果の検討ができる。以下では割引を考慮した n 年間のリスクカーブの評価方法を示す。

3. 供用期間のリスクカーブ³⁴⁾

地震危険度については、Cornell³⁵⁾の方法ではなく、震源やマグニチュードを特定するマルチイベントモデル³⁶⁾による方法を用いる。理由は、散々する施設群、いわゆるポートフォリオの地震リスク評価から個別資産の評価に至る広い範囲をカバーできるからである。これを前提に、施設に被害を及ぼす地震環境として m 個のシナリオ地震を考え、それぞれの地震と n 年間に遭遇する確率を $P_i^{(n)}$ ； $i = 1 \sim m$ とする。シナリオ地震との遭遇確率については後述する。地震が発生した場合、施設あるいは施設群の損失額はそれぞれのシナリオ地震 i の発生を条件に損失密度関数 $f_S(s|i)$ として記述する。シナリオ地震 i が発生した際の損失密度関数 $f_{Si}(s)$ は、 n 年間に地震が発生しない、という事象を含め以下のようになる。

$$f_{S_i}^{(n)}(s_i) = \begin{cases} 1 - P_i^{(n)} & ; s = 0 \\ P_i^{(n)} \cdot f_{Si}(s|i) & ; 0 < s \leq s_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 $s_{\max}$ は施設の再調達価格である。そして、建物が n 年間に被る損失額の確率変数 $S^{(n)}$ は、損失密度関数 $f_{S_i}^{(n)}(s_i)$ の確率変数を $S_i^{(n)}$ と置き、それぞれの線形和として以下のように表される。

$$S^{(n)} = S_1^{(n)} + S_2^{(n)} + \dots + S_m^{(n)} \quad (9)$$

損失の確率関数 $F_S^{(n)}$ は、地震活動は互いに独立とすると確率関数の教えるところにより以下のように表すことができる。

$$F_S^{(n)}(s) = \int_0^s \dots \int_0^s f_{S_1}^{(n)}(\zeta - s_2 - \dots - s_m) \cdot f_{S_2}^{(n)}(s_2) \dots f_{S_m}^{(n)}(s_m) d\zeta ds_2 \dots ds_m \quad (10)$$

(9)式では n 年の間には震源を異にする様々な地震と遭遇し損失額は累計されると考えるため、損失額は施設の再調達価格以上に及ぶ可能性がある。これは必ずしも間違いではなくむしろ統計学的には正しい。しかしながら、一般的には、被害を伴うような大地震の発生は生涯に一度あるかないか程度の非常に稀な事象として受け止められている。このため、施設の供用期間（例えば50年）程度の時間スケールでは、再調達価格以上の損失額を被ることは考えにくく、また壊れてしまえば堅牢な施設を再建することも考えられる。つまり、再調達価格以上の損失を累計するのは、統計学的には正しいものの、現存する施設のリスク評価や対策の判断という観点からは、必ずしも妥当な解釈ではない。

そこで、 n 年間に複数の地震イベントが発生した場合、それぞれのイベント発生時に予想される損失額の最大値が選ばれりと仮定する。例えば、 n 年間に地震Aと地震Bに遭遇した際、AとBの損失額の和ではなく、分布の要素の大きい方の額を選択する。つまり、被害地震に複数回見舞われても損失額は累計するのではなく最も甚大な損失となる要素の損失額を計上する。この考え方では、

再調達価格以上の損失は計上されず、また極値統計論を利用することができ計算上の扱いも容易である。以下ではこの定式化を行う。各イベントの損失額の組み合わせの最大値が選ばれることを考慮すると、 n 年間の損失額の確率変数 $S^{(n)}$ は以下のように表すことができる。

$$S^{(n)} = \max(S_1^{(n)}, S_2^{(n)}, \dots, S_m^{(n)}) \quad (11)$$

$S^{(n)}$ の確率関数は極値の確率分布の教えるところにより以下のように表現できる。

$$F_S^{(n)}(s) = P(S_1^{(n)} \leq s, S_2^{(n)} \leq s, \dots, S_m^{(n)} \leq s) \quad (12)$$

$S_i^{(n)}$ の独立を仮定することで以下のようになる。

$$\begin{aligned} F_S^{(n)}(s) &= \int_0^s \dots \int_0^s f_{S_1}^{(n)}(s_1) \dots f_{S_m}^{(n)}(s_m) ds_1 \dots ds_m \\ &= F_{S_1}^{(n)}(s) \dots F_{S_m}^{(n)}(s) \\ &= \prod_{i=1}^m F_{S_i}^{(n)}(s) \quad ; 0 < s \leq s_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式を超過確率関数に置き換え、(8)式を代入すると、

$$\begin{aligned} G_S^{(n)}(s) &= 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - P_i^{(n)} + P_i^{(n)} \int_0^s f_{S_i}(\xi | i) d\xi \right\} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - P_i^{(n)} \int_s^{s_{\max}} f_{S_i}(\xi | i) d\xi \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

となり、リスクカーブが求められる。これは、 n 年間の間に予想される損失の極値の分布を示していることになる。

4. 割引を考慮したリスクカーブ

割引は条件付地震損失密度関数 $f_{S_i}(s|i)$ の変数に考慮され、各期によって異なる。図-1は損失密度関数の割引の様子を概念的に示したものである。図より条件付地震損失密度関数は、割引を考慮することでばらつきの減少と共に低下することになる。これは、(14)式中の条件付地震損失密度関数の積分変数に割引率を乗じた変数変換に他ならない。そして、変数変換による現在価値への割引を行った上で、積分範囲を変えずに積分すればよいことが分かる。まず、(14)式の期間 n を、添字 j を使い各年に離散化する。

$$G_S^{(n)}(s) = 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \sum_{j=1}^n P_{ij} \int_s^{s_{\max}} f_{S_{ij}}(\xi | i) d\xi \right\} \quad (15)$$

ここに、 $f_{S_{ij}}(s|i)$ は j 年目の条件付地震損失密度関数、 P_{ij} は地震イベント i の j 年目（ $j-1$ 年から j 年の1年間）の発生確率である。また、 P_{ij} の $j=1-n$ は互いに重複しない事象の集合であり、

$$P_i^{(n)} = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (16)$$

である。次に、(15)式の積分変数を以下のように変換する。

$$\xi_j = \xi d_j \quad (17)$$

ここに、 d_j は割引因子である。(15)式中の積分のみ採り上げると、変数変換後の積分は以下のようになる。

$$\int_s^{s_{\max}} f_{S_{ij}}(\xi | i) d\xi = \int_{sd_j}^{s_{\max}d_j} f_{S_{ij}}\left(\frac{\xi_j}{d_j} | i\right) \frac{1}{d_j} d\xi_j \quad (18)$$

そして、積分範囲を変えずに(18)式を(15)式に適用すると、以下のようになる。

$$G_S^{(n)}(s) = 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \sum_{j=1}^n P_{ij} \int_s^{s_{\max}} f_{S_{ij}}\left(\frac{\xi_j}{d_j} | i\right) \frac{1}{d_j} d\xi_j \right\} \quad (19)$$

なお、実際の計算では、積分範囲の上限値は $s_{\max}d_j$ としている。被積分関数に割引による上限が設けられていることが理由である。

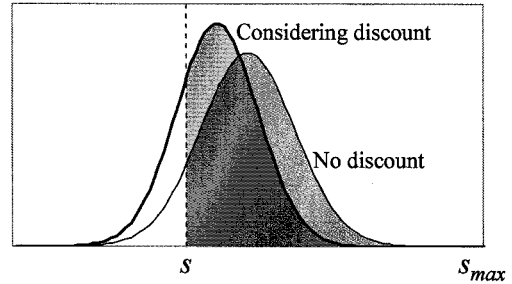


図-1 地震損失密度関数の割引

5. 地震イベントの発生確率

地震イベント i の j 年目の発生確率の評価方法について示す。その際、イベントの発生がポアソン過程に近似できる場合と長周期の更新過程では異なるので、以下ではそれぞれ別途示す。

(1) ポアソン過程

ポアソン過程に近似できる地震イベントの場合、期間を長く取るとその間にイベントが2回以上発生する確率は無視できない程大きくなる。そこで、発生回数に応じ地震と遭遇する可能性が増加すると考える。 t 時間の間にイベント i と遭遇する確率はポアソン分布に発生回数を乗じ、以下のように求められる。

$$p_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k(v_i t)}{k!} \exp(-v_i t) = v_i t \quad (20)$$

ここに、 k は発生回数、 v_i はイベント i の年当りの発生率である。 t_0 を現在として t_n までの地震発生確率は下式となる。

$$P_i^{(t_n - t_0)} = v_i (t_n - t_0) \quad (21)$$

時間を離散的に記述すると n 年間の発生確率は以下のよう
に表すことができる。

$$P_i^{(n)} = \nu_i n \quad (22)$$

右辺からも知るように、同式は確率1.0以上が計算され
る可能性を持つ。これは震源 i による2回以上の発生を遭
遇確率の増加として評価したこと起因しており、厳密
には確率とはならない。そこで、有限時間の範囲におい
て以下のような条件を課す必要がある。

$$P_i^{(n)} = \begin{cases} \nu_i n & , \nu_i n < 1.0 \\ 1.0 & , \nu_i n \geq 1.0 \end{cases} \quad (23)$$

そして、イベント i の j 年目の発生確率は毎年同じ値とし
て以下ようになる。

$$P_{ij} = \nu_i \quad (24)$$

(2) 長周期の更新過程

プレート境界型地震や活断層など、周期性が明瞭な地
震の発生は時間を確率変数とした関数として記述され、
その分布形はBPT (Brownian Passage Time) 分布が良い
とされている⁷⁾。 t_0 (現在) から t_n までの地震発生確率は、
前回の地震発生から現在まで発生していない、という条
件付として以下のように求められる。

$$P_i^{(t_n - t_0)} = \frac{\int_{t_0}^{t_n} f(t | T_i, \alpha_i) dt}{1 - \int_0^{t_0} f(t | T_i, \alpha_i) dt} \quad (25)$$

ここに、 $f(t | T_i, \alpha_i)$ はBPT分布の密度関数、 T_i 、 α_i はイ
ベント i の平均発生周期ならびにその変動係数である。式
中の分母は当該イベントが最後に発生した時間を0とし、
その時点から t_0 (現在) まで発生していない、という条
件付を意味する。 j 年目の地震発生確率は、前回の地震
発生から現在まで発生していない、という条件の下に再
構成された標本空間において、互いに重複しない事象の
集合として求められる。式は以下ようになる。

$$P_{ij} = \frac{\int_{t_{j-1}}^{t_j} f(t | T_i, \alpha_i) dt}{1 - \int_0^{t_0} f(t | T_i, \alpha_i) dt} \quad (26)$$

ポアソン過程のイベントは(24)式を、更新性が予測でき
るイベントは(26)式をそれぞれ(19)式に適用する。

6. 防災対策の費用対効果の検討

防災対策として、地震保険ならびに耐震補強を取り上

げ、対策を実施したリスクカーブの評価方法を示す。ま
ず、地震保険を付保した場合、支払い保険金には免責と
支払い限度が設けられていることから、実際の損失が免
責額以下では被保険者が保有し免責額以上支払い限度以
下では実際の損失額から免責を差し引いた額が支払われ
る。支払い限度以上の損失では、支払い限度額から免責
額を差し引いた額が一律支払われる。この仕組みでは、
被保険者のリスクカーブは免責額 a 、支払い限度額 b と置
き、以下のように表される。

$$G_s^{(n)}(s) = \begin{cases} G_s^{(n)}(s) & , 0 \leq s \leq a \\ G_s^{(n)}(s + b - a) & , a \leq s \end{cases} \quad (27)$$

(27)式は割引を考慮する、しないに関らず成立する。

一方、耐震補強を実施した場合は、地震イベント i の
発生を条件とした損失密度関数 $f_{sp}(s|i)$ が補強により改
善され、結果としてリスクカーブは低下する。

耐震補強の費用や毎期保険料の支出については、(7)
式の第1項に取り込む。

7. 事例評価

静岡に所在し、1960年築、SRC造、地下2階、地上9階、
再調達価格25億円のオフィスビルを対象にリスクカーブ
の割引について示し、(7)式を利用した耐震補強ならび
に地震保険の費用対効果について検討する。表-1に当該
建物のFragility 情報を示す。それぞれ各被害モードの発
生限界を基盤最大加速度(PBA)に換算した値として示し
ている。PBAへの換算方法は文献8)による。これらのば
らつきは構造躯体については対数標準偏差0.4、設備は
0.45とした。なお、後述する耐震補強後の情報について
も併記している。補強後の設備耐力が低下しているのは、
躯体の剛性増加により建物の振動性状が変化したことが
原因である。図-2に、建物の位置とシナリオ地震の断層
位置を示す。

表-1 Fragility 情報

Damage Factor	Mode	Peak Baserock Acceleration (cm/s ²)		Value (Million Yen)
		Current	Reinforced	
Structural Damage	minor	182	253	125
	moderate	487	623	250
	major	741	941	750
	collapse	987	1255	2500
Exterior Damage	minor	939	1268	38
	major	2072	2735	375
Electric Damage	major	999	978	273
Ventilation Damage	major	961	938	340
Sanitary Damage	major	956	930	103
Elevator Damage	major	782	738	100

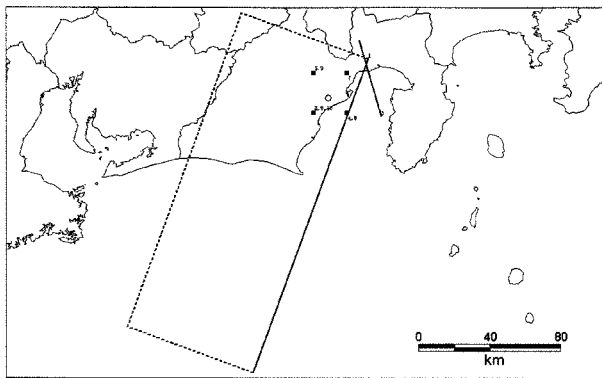


図-2 建物位置とシナリオ地震

表-2 シナリオ地震の諸元

	Scenario earthquake	Magnitude	Peak baserock acceleration (Gal)	Occurrence probability a year
1	1854 安政東海地震	M8.3	491.9	4.8380E-03
2	(138.30, 34.90)	M6.5	344.1	3.0713E-04
3	富士川河口断層帯	M8.0	318.0	1.8889E-03
4	(138.50, 34.90)	M6.5	313.0	8.1078E-04
5	(138.30, 35.10)	M6.5	300.7	3.0636E-04
6	(138.30, 34.90)	M6.0	285.3	7.1504E-04
7	(138.50, 35.10)	M6.5	279.7	3.0636E-04
8	(138.50, 34.90)	M6.0	253.1	2.1948E-03
9	(138.30, 35.10)	M6.0	240.7	7.1323E-04
10	(138.30, 34.90)	M5.5	225.6	1.6647E-03
11	(138.50, 35.10)	M6.0	219.9	7.1323E-04
12	(138.10, 34.90)	M6.5	202.6	3.0713E-04
13	(138.50, 34.90)	M5.5	194.4	5.9416E-03
14	(138.10, 35.10)	M6.5	191.9	3.0636E-04
15	(138.30, 35.10)	M5.5	182.8	1.6605E-03
16	(138.50, 34.70)	M6.5	169.5	8.1265E-04
17	(138.50, 35.10)	M5.5	163.7	1.6605E-03
18	(138.10, 34.90)	M6.0	148.2	7.1504E-04
19	(138.10, 35.10)	M6.0	138.9	7.1323E-04
20	(138.10, 34.70)	M6.5	138.8	3.0791E-04

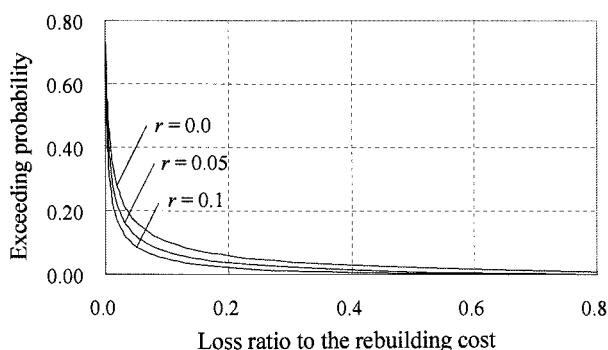


図-3 リスクカーブの割引

図-2のシナリオ地震は建物に最悪の被害を与える上位10の地震を示し、黒点はバックグラウンド地震⁹⁾を表している。表-2にシナリオ地震上位20の諸元（地震名、位置、規模、PBA、年発生確率）を示す。表中の緯度経度で示されている地震はバックグラウンド地震である。

(1) リスクカーブの割引

割引率5%ならびに10%を考慮したリスクカーブを図-3に比較して示す。リスクカーブの評価期間は20年とし、再調達価格で規準化した損失率で示している。図より割引を考慮することでリスクカーブは低下し、例えば20年間で0.1の確率で遭遇する地震損失の現在価値は、割引を考慮しないケースでは、図-3の値に再調達価格25億円を乗じ2.53億円、割引率5%で1.71億円、割引率10%で1.17億円となる。割引により損失額が小さくなるのは、地震との遭遇時期が遅れることで、その間便益あるいは収入を得る機会が多くなることが理由である。また高い割引率は、期待される便益あるいは収入が高いことを意味しており、遭遇時期が遅れることのメリットはより大きくなる。

(2) 防災対策の費用対効果の検討

防災対策として、耐震補強ならびに地震保険の付保を想定し、対策の費用対効果を検討する。補強は耐震壁の増設とし、被害モードの発生限界は表-1のように改善する。補強費用は1億円とする。保険は再調達価格に対する比率で免責2%、支払い限度20%とし、保険料は毎年0.1億円とする。評価期間は5年、10年、20年とし、現状、耐震補強、保険付保の各ケースを図-4に比較して示す。図の横軸は、評価期間における地震損失額に対策費用の現在価値を考慮したものである。以下では横軸をlossと記す。縦軸は、評価期間の間にlossを超える確率であり、平易にはlossが実現する確度、換言すれば安全性の尺度と解釈できる。

最初に、耐震補強と現状を比較すると、超過確率の高い領域では現状の方がlossは小さいが、超過確率の低い領域では補強対策の方が小さくなる。これは、補強によりリスクカーブは全体として低下するものの、補強費用の出費により図の右側にシフトすることによる。双方のカーブは必ず1点で交差し、この点の超過確率より低い確率、つまり高い安全性を期待するのであれば、補強対策の費用対効果はあると判断でき、対策は説明される。

次に、年当たり0.01回程度の稀な事象に対して安全性を確保したい場合、これを図の縦軸の確率に換算すると5年間では約5%、10年では9.5%、20年では18%に相当する。これら確率を対応する図から読み取ると、5年間では補強対策が最もlossが大きくなるが、20年間では保険の方がlossは大きい。これは、長期になると毎期支払われる保険料の費用負担が大きくなることが理由である。この点から、長期に渡って利用するのであれば、初期投資は嵩むものの補強策の方が有利となる。但し、保険契約は毎期更新されることから、保険を更新しないという選択肢には対応できない。

一方、20年以上の供用期間を想定し、且つ高い安全性（例えば20年で5%以下）を期待する場合、図-4(c)より、現状のままではlossが大きく、いずれの対策も説明できる。対策の優劣を比較すると、保険が勝っていることが分かる。ただし、安全性に対する過度な期待を持たな

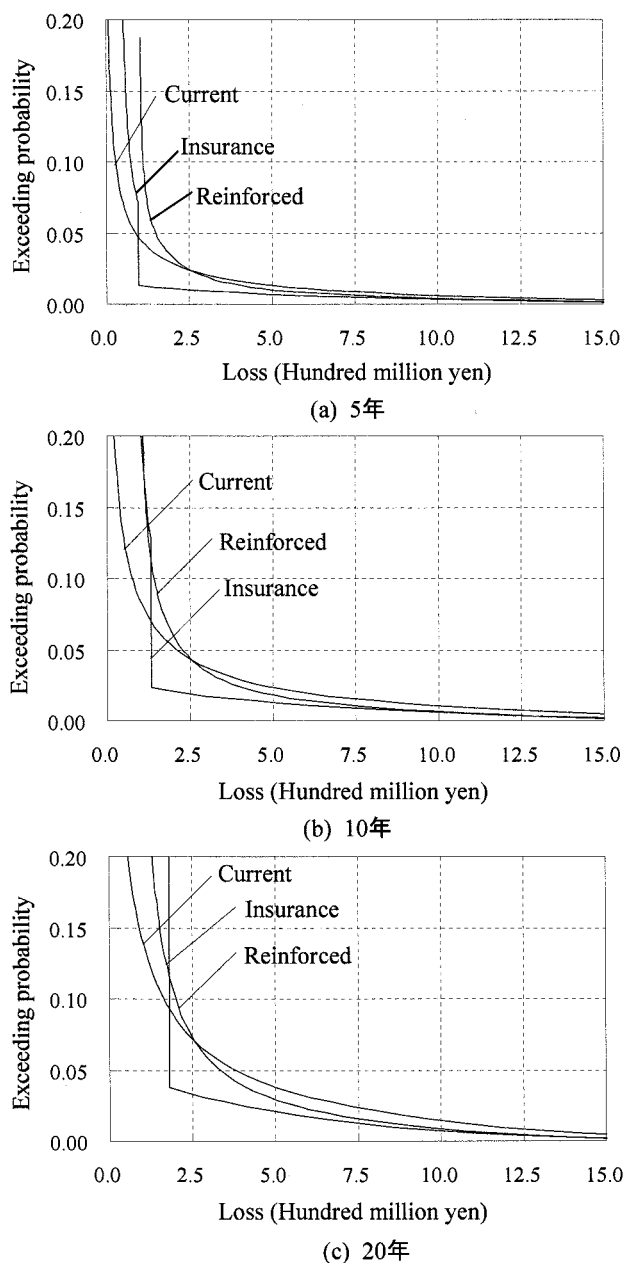


図-4 防災対策の費用対効果の比較

い（例えば20年で10%以上），つまりある程度リスクを受容するのであれば，現状のまま利用するのがlossは小さく効率的であると判断できる。

本提案手法の特徴は，施設の所有者あるいは管理者の安全への期待，つまりリスク受容度を考慮した判断ができることである。施設の用途や規模，被害が発生した場

合の影響度などによって，施設の安全性のレベルは異なるはずである。この安全性のレベルの違いを防災投資の判断に反映できることは大きな利点である。なお，本検討では物的損失のみを対象としたが，実利用では事業損失や派生的な損失も考慮する必要がある。

8. おわりに

地震による物的損失を採り上げ，LCCにおける地震リスクの確率分布の評価方法を示すと共に，これを現在価値に割り引く方法を提示した。そして，静岡に所在するオフィスビルを対象に，防災対策の費用対効果の検討を行った。

提案手法の利点は，施設の所有者あるいは管理者のリスク受容度，あるいは保持すべき安全性のレベルの違いを意思決定に反映できること，収入はできるだけ早く，支出はできるだけ遅く，といった時間選考が取り込まれること，などである。

参考文献

- 1) S. E. Chang, M. Shinozuka: Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk, Journal of Infrastructure Syst., Vol.2, No.3, Sep., pp.118-126, 1996.
- 2) 塚田康夫・木村雄一・河村壮一：SRMによる免震建物のライフサイクルコスト評価，第10回地震工学シンポジウム論文集，Vol.1, pp.241-246, 1998.
- 3) Hoshiya, M., T. Nakamura, and T. Mochizuki; Stochastic Asset Pricing with Seismic Hazard Risk, Jour. of Engi. Mech. Div., ASCE, Vol.130, Number7, pp.780-785, 2004.
- 4) 中村孝明, 川上洋介：地震リスクカーブと損失の総和確率関数，建築学会大会学術講演梗概集B-I, 2006.9.
- 5) Cornell, C.A. : Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.58, No5, pp.1583-1606, 1968
- 6) 宇賀田健：シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価，日本建築学会構造系論文集，第541号，pp.95-104, 2001.
- 7) 地震調査研究会 長期評価部会：長期的な地震発生確率についての解説，地震調査研究推進本部 地震調査研究会, 2001.
- 8) 吉川弘道，中村孝明：土木/建築施設の地震リスク評価とコンクリート構造物への適用，コンクリート工学会誌，テクニカルレポート，Vol.45, No.4, pp.16-22, 2007.4