

建物の地震リスク評価法の開発

- 予想最大損失額 (P M L) 評価ソフトの開発 -

諏訪 仁 野畑 有秀 関 松太郎
若松 邦夫 鈴木 直子 三橋 英二
(本社 情報ネットワーク部) (本社 エン지니어リング 本部
企画部)

Seismic Risk Analysis for Buildings

- Development of Software for Evaluating Probable Maximum Loss (PML) -

Hitoshi Suwa Arihide Nobata Matsutaro Seki
Kunio Wakamatsu Naoko Suzuki Eiji Mitsuhashi

Abstract

An analytical method has been developed for evaluating the seismic risk of plural buildings located at multi construction sites, as well as of single buildings. This method is based on both probable seismic intensity at the construction site and damage level of the buildings due to earthquake, calculated by probabilistic methods. A software is developed that evaluates probable maximum loss (PML). The probable maximum loss is defined such that the annual exceedance probability of seismic loss is equal to 1/475. For example, the probable maximum loss is calculated under the following condition. A mid-rise R/C building, with seismic index of structure 0.6 and newly-built cost of one billion yen, may be located in Tokyo, Nagoya or Osaka. The probable maximum loss is about two hundred eighty million yen for Tokyo, about two hundred fifty million yen for Nagoya and about two hundred million yen for Osaka. Moreover, it is verified that the seismic risk for dispersed building locations becomes lower than for concentrated building locations.

概要

建設地において将来起こりうる地震と建物の損傷程度を確率論的に評価することにより、個別建物および面的な広がりを持つ複数建物の地震リスク評価法を開発し、地震予想最大損失額(PML)評価ソフトを作成した。地震予想最大損失額とは、損失額の年超過確率を示す超過リスク曲線において、年超過確率が1/475となる損失額である。例えば、構造耐震指標0.6で新築費用10億円の中層RC造建物が東京、名古屋、大阪に存在する場合の地震予想最大損失額を計算すると、東京で約2.8億円、名古屋で約2.5億円、大阪で約2.0億円という結果が得られた。一方、東京、名古屋、大阪の三地点に分散配置した複数建物の地震リスク評価を行うと、参照する損失額の年超過確率の大きさにもよるが、建物を一地点に集中配置するよりも三地点に分散配置することで地震リスクが低減できることを定量的に示した。

1. はじめに

近年、不動産の証券化に伴い、デューデリジェンス業務が広く行われ始めている。デューデリジェンスとは、不動産の資産価値を将来の収支予測とリスク判定に基づいて適切に評価する一連の手続きを指し、数ある評価項目の中でも建物の地震リスクが重要視されている。地震リスクとは、建設地において将来起こりうる地震と建物の損傷程度を確率論的に評価することにより得られる建物の損失額である。

このような背景を踏まえ、中低層建物を対象に、構造耐震指標を用いて地震予想最大損失額(PML)を評価するソフトを開発した。一般的に、地震予想最大損失額とは、対象建物に対して最大の損失をもたらす可能性のあ

る再現期間475年相当の地震が発生したとき、90%信頼水準に相当する建物の損失額を意味する。しかし、建物の地震リスクを評価する際には、地震の発生頻度だけでなく建設サイトにおける地震動強さの不確実性も同時に考慮する必要がある。従って、再現期間475年の地震のみに着目し地震動強さの不確実性を考慮して90%信頼水準の損失額を求めると、対象とする全ての地震に対して地震動強さの不確実性を考慮して得られた損失額よりも過小評価になると考えられる。このため、本研究では、損失額の年超過確率が1/475に相当するものを地震予想最大損失額として定義する。

一方、建物の分散配置による地震リスク低減効果を検討するため、面的な広がりを持つ複数建物の地震予想最大損失額も併せて評価する。

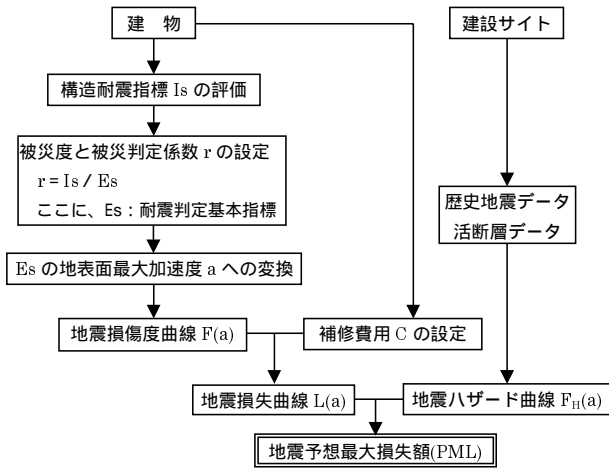


Fig.1 地震予想最大損失額の評価フロー
Flowchart on evaluating PML

2. 個別建物の地震リスク評価法

2.1 地震ハザード評価

歴史地震データと活断層データを用いて、建設地の地震ハザード曲線を計算する。対象とする歴史地震と活断層は建設地から半径300km以内とし、歴史地震についてはマグニチュード5以上とした。

歴史地震カタログは地震の発生時期に対して、～1885は被害地震総覧¹⁾、1885～1925は宇津リスト²⁾、1926～は気象庁月報³⁾を用いた。マグニチュードに対する統計期間として、マグニチュード5～6は1926～、マグニチュード6～7は1885～、マグニチュード7以上は全てとした。

活断層は、松田⁴⁾がある尺度に従いグルーピングまたはセグメンテーションした起震断層を基本とした。地震の発生は、断層から特定の大きさの地震がある繰り返し期間をもって起こるとする固有地震説に従い発生すると仮定した。

マグニチュードm、震源距離dの地震に対する建設地の地表面最大加速度の中央値a(m,d)をJoyner & Booreの距離減衰式⁵⁾を用いて推定し、a(m,d)のパラツキを対数標準偏差 = 0.5の対数正規分布で仮定する。

考慮する歴史地震の個数をNsとすると、地表面最大加速度aの年超過頻度Hs(a)は次式となる。

$$H_S(a) = \sum_{i=1}^{N_S} \left\{ \frac{1}{T_i} \times \Phi \left(-\frac{\ln a - \ln a(m_i, d_i)}{\beta} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Tiはマグニチュードに対応した統計期間であり、Φ(・)は平均0、標準偏差1の標準正規分布関数である。同様に、考慮する活断層の個数をNAとすると、地表面最大加速度aの年超過頻度HA(a)は次式となる。

$$H_A(a) = \sum_{i=1}^{N_A} \left\{ \frac{1}{T_{di}} \times \Phi \left(-\frac{\ln a - \ln a(m_i, d_i)}{\beta} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Tdiは活断層の再現期間である。従って、歴史地震と活断層を合計した地震の年超過頻度H(a)は、(1)式と(2)式から求められる。

$$H(a) = H_S(a) + H_A(a) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、歴史地震と活断層の地震発生が定常ポアソン過

Table1 被災度と被災判定係数の関係
Relationship between Damage Level and Damage Judgement Factor

ランク	条件	判定	被災度	被災判定係数 r
ランク	Is < Er の場合	補強の対象としない		
ランク	Er > Is 2/3Er の場合	原則として補強の対象としない。ただし、想定した強さの地震動に対して被害の生じる可能性があるため、破壊形式を検討し、崩壊の危険性がある場合には補強が必要である。	小破	1.0
ランク	2/3 Er > Is 1/3 Er かつ Is < 0.3 の場合	原則として補強の対象とする。ただし、より精密な診断により崩壊の危険性がないと予想される場合には補強の対象としない。	中破	0.7
ランク	Is < 1/3Er または Is < 0.3 の場合	補強または改築の対象とする。	大破	0.4

程に基づくと仮定すると、地表面最大加速度a に対する年超過確率FH(a)が算定できる。

$$F_H(a) = 1 - \exp[-H(a)] \dots\dots\dots (4)$$

2.2 建物の地震損失評価

2.2.1 被災度と被災判定係数rの設定 構造耐震指標Isを耐震判定基本指標Esで除した値で被災判定係数rを定義する。

$$r = \frac{I_s}{E_s} \dots\dots\dots (5)$$

このとき、建物の地震応答に相当するEsが次第に大きくなりrが1以下になると、建物に対して被害が発生する可能性が出てくる。そこで、rを建物の被災度と対応付けるため、第2次または第3次診断による補強建物の判定基準⁶⁾を準用し、rがそれぞれの被災度のほぼ上限値(すなわち安全側)に対応するようにTable1のように設定した。表中のErは耐震判定指標値である。

2.2.2 耐震判定基本指標と地表面最大加速度の関係 地震動強さの指標として地表面最大加速度を用いるので、建物の応答に相当する耐震判定基本指標と地表面最大加速度の関係を予め求める必要がある。本研究では、村上の手法⁷⁾に従い算定する。

構造耐震指標を計算するとき用いられる保有性能基本指標E0は、降伏せん断力係数kyと限界塑性率μの関係を、kyと等しい強度指標Cとμから定まるじん性指標Fの積で評価し、地震の最大地動震度と一対一に対応させたものである。従って、μを決めて特定のμとkyの関係からE0を求めると、この値がE0に対応したEsとなる。

建物の破壊形式を、曲げ破壊形式とせん断破壊形式に大別し、曲げ破壊形式の復元力特性を剛性低下型トリリニア型で、せん断破壊形式の復元力特性を原点指向型でモデル化し、地盤の卓越周期T0が0.4秒の平均最大地動震度T0gに対する応答倍率指標スペクトルを地震応答解析により求めると、EsとT0gの関係が得られる。

$$\text{曲げ破壊形式: } E_s = 4.4 \times \sqrt{\frac{1}{10 \times T_1}} \times \alpha_{TG} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{せん断破壊形式: } E_s = 4.1 \times \sqrt{\frac{1}{10 \times T_1}} \times \alpha_{TG} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、T1は建物の設計用1次固有周期である。(6)式と

Table2 地震損傷度曲線の平均値と変動係数
Expectation and Coefficient of Variation on
Seismic Fragility Curve

	小破	中破	大破
平均値	Is/1.0	Is/0.7	Is/0.4
変動係数	0.47	0.49	0.49

Table3 単位平米当たりの補修費用
Repair Cost per One Square Meter

	小破	中破	大破
平均値(円/m ²)	29000	60000	新築費用

(7)式を τ_0 について解くと、耐震判定基本指標 E_s は地表面最大加速度 a に対応付けられる。

2.2.3 地震損傷度曲線の作成 地震損傷度曲線とは、建物の被災度を設定したとき、ある大きさの地表面最大加速度における建物の損傷確率を表現した曲線である。地表面最大加速度の大きさを連続的に変化させることにより、地表面最大加速度と建物の損傷確率の関係が評価できる。

静岡県内に存在するRC造公共建物を対象とした耐震診断の結果、個々の建物の構造耐震指標を頻度分布で表現すると対数正規分布が最も精度良く回帰できたこと⁸⁾や、兵庫県南部地震に対する建物被害データベースを用いて地震損傷度曲線を推定する場合にも対数正規分布が一般的に用いられていること⁹⁾などを考慮し、構造耐震指標に基づいた地震損傷度曲線の分布形も対数正規分布を仮定した。

地震損傷度曲線の平均値は、それぞれの被災度に応じて、構造耐震指標をTable1の被災判定係数 r で除した値とする。一方、変動係数は、兵庫県南部地震に対する建物群としての地震損傷度曲線¹⁰⁾を参考に定めた。以上をまとめると、Table2のようになる。

対象建物の構造耐震指標 I_s をTable2に代入して地震損傷度曲線の平均値 μ を求め、この値を建物の破壊形式に応じて(6)式または(7)式に代入して地表面最大加速度の平均値 μa を求める。以上により、地震損傷度曲線の対数平均値 λ_R と対数標準偏差 ζ_R が、 μa とTable2の変動係数 V を用いて計算できる。

$$\lambda_R = \ln \mu a - \frac{1}{2} \zeta_R^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\zeta_R = \sqrt{\ln(1+V^2)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

従って、ある大きさの地表面最大加速度 a に対する建物の損傷確率 $F(a)$ を次式で評価する。

$$F(a) = \Phi \left(\frac{\ln a - \lambda_R}{\zeta_R} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

2.2.4 補修費用の設定 兵庫県南部地震において被害を受け当社が補修を行った107棟の建物を対象に、被災度と補修費用の関係を調査した¹⁰⁾。ここで、構造形式別の棟数は、RC造またはSRC造が75棟、S造が32棟であり、被災度別の棟数は、小破が77棟、中破が22棟、大破が8棟である。

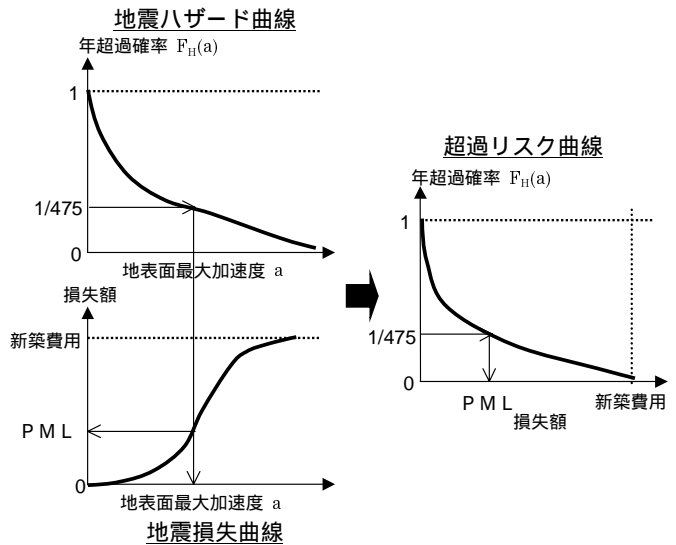


Fig.2 地震予想最大損失額の評価
Schematic Diagram on Evaluating PML

この検討結果に基づき、被災度に対応した補修費用をTable3のように設定した。ただし、補修費用として建物群の統計データを用いているためバラツキを有するが、ここではその平均値を用いることにした。

2.2.5 地震損失曲線の作成 ある大きさの地表面最大加速度 a に対する建物の地震損失額を表現した地震損失曲線 $L(a)$ は、(10)式の地震損傷度曲線 $F(a)$ にTable3の補修費用 C を掛け合わせることで得られる。

$$L(a) = \{F_1(a) - F_2(a)\} \times C_1 + \{F_2(a) - F_3(a)\} \times C_2 + F_3(a) \times C_3 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $F_1(a)$ は小破以上の損傷確率、 $F_2(a)$ は中破以上の損傷確率、 $F_3(a)$ は大破の損傷確率、 C_1 は小破の補修費用、 C_2 は中破の補修費用、 C_3 は大破の補修費用である。

2.3 地震予想最大損失額の評価

Fig.2に示すように、地表面最大加速度を介して地震ハザード曲線と地震損失曲線を結びつけると、損失額の年超過確率を示す超過リスク曲線が得られる。再現期間475年に相当する地表面最大加速度 a_p を(4)式から求め、 a_p を(11)式に代入して損失額 $L(a_p)$ を計算すると、 $L(a_p)$ が地震予想最大損失額となる。

3. 個別建物の地震予想最大損失額の検討例

3.1 解析条件

建物モデルとしてRC造建物を設定し、構造耐震指標 I_s が0.6で設計用1次固有周期が0.35秒、破壊形式はせん断型とする。建物の延べ床面積を4000m²、単位平米当たりの新築費用を250000円/m²とすると、建物の新築費用は10億円となる。ただし、Joyner & Booreの距離減衰式を用いる際には、地盤種別として第2種地盤を設定する。

このとき、建設地の地震危険度が建物の地震リスクに及ぼす影響を検討するため、同一の地盤に同一の耐震性能を有する建物が東京、名古屋、大阪に存在する場合に

ついて地震予想最大損失額を評価する。

3.2 解析結果

3.2.1 地震ハザード曲線 地表面最大加速度と年超過確率の関係を、Fig.3に示す。年超過確率1/475に相当する地表面最大加速度は、東京で381cm/s²、名古屋で361cm/s²、大阪で323cm/s²である。

3.2.2 地震損傷度曲線 地表面最大加速度と建物の損傷確率の関係を、Fig.4に示す。例えば、地表面最大加速度が400cm/s²に着目すると、無被害の損傷確率が約0.15、小破の損傷確率が約0.25、中破の損傷確率が約0.45、大破の損傷確率が約0.15であり、全ての被災モードの損傷確率を合計すると1となる。

3.2.3 地震損失曲線 地表面最大加速度と建物の損失額の関係を示す。例えば、地表面最大加速度が400cm/s²に着目すると、建物の損失額は約3億円であることがわかる。

3.2.4 超過リスク曲線 建物の損失額と年超過確率の関係を、Fig.6に示す。建物の地震予想最大損失額（年超過確率1/475に相当する建物の損失額を参照する）は、東京で約2.8億円、名古屋で約2.5億円、大阪で約2.0億円である。従って、建物の耐震性能が同一であるので、地震危険度の高い建設地に存在する建物の損失額が当然ながら大きくなる。

4. 複数建物の地震リスク評価法

2章では個別建物の地震リスク評価法を示したが、本章では地震リスク低減を目的とした複数建物の地震リスク評価法について述べる。

複数建物の地震リスクを評価する際に、地震ハザード曲線と地震損失曲線を建物ごとに個別に評価すると、震源位置と建物間に存在する地理的相関が適切に考慮できなくなるので、想定地震に基づいた評価手法¹⁾が提案されている。一般的に、複数建物を対象に地震リスクを評価すると、大数の法則と建物の分散配置効果により地震リスク低減が効率的に実現できる。しかし、建物間の地震損失曲線が独立でも建設地での地震動強さが何らかの相関を有すると、建物の損失額の独立性を前提とした大数の法則が成立しない可能性もある。このため、本研究では、建物間の損失額が正の完全相関（すなわち、相関係数が1の場合）を有する場合を仮定し、複数建物の地震リスクを評価する。

4.1 複数建物を対象とした地震リスクの概念

例えば、東京と大阪に存在する2棟の建物に対する地震リスクを考える。仮に、東京で大地震が発生して建物が被害を受けたとしても、大阪は東京に対して十分に距離があるためこの地震で大阪の建物が同時に被害を受ける可能性は極めて低く、逆に大阪で大地震が発生しても東京の建物が同時に被害を受ける可能性は極めて低いと考えられる。従って、個々の建物を対象に地震リスクを

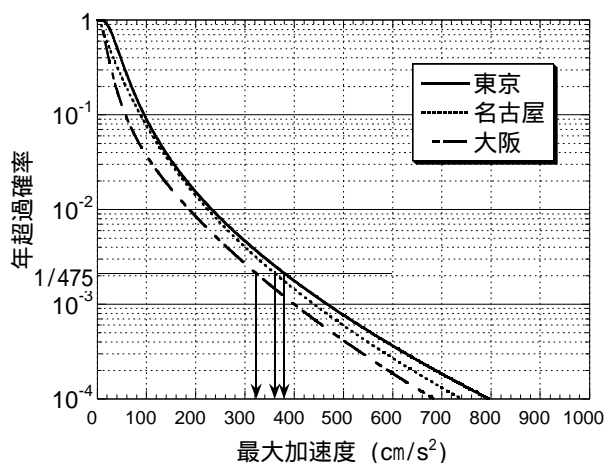


Fig.3 地震ハザード曲線
Seismic Hazard Curve

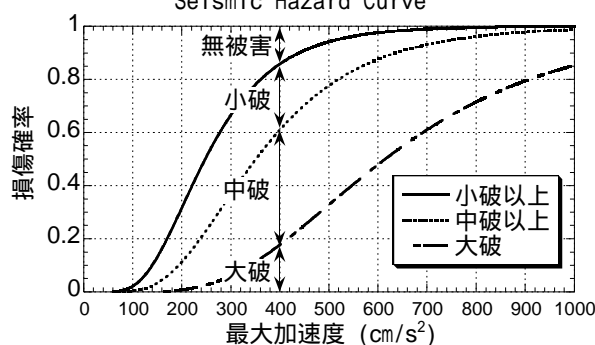


Fig.4 地震損傷度曲線
Seismic Fragility Curve

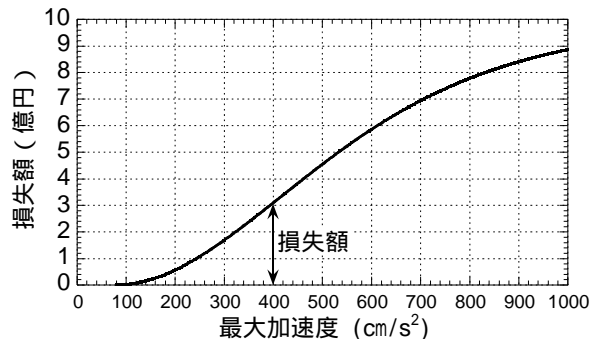


Fig.5 地震損失曲線
Seismic Loss Curve

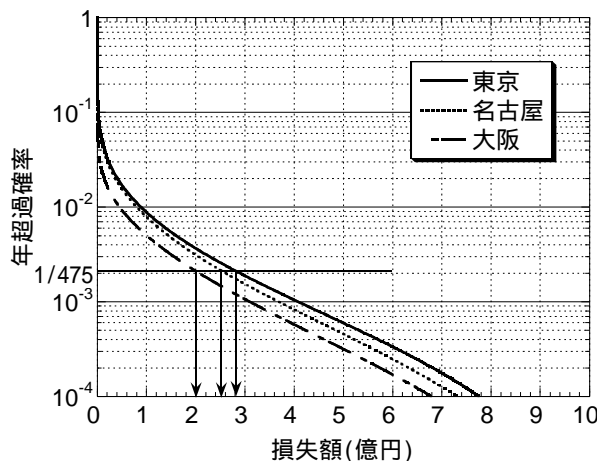


Fig.6 超過リスク曲線
Annual Exceedance Risk Curve

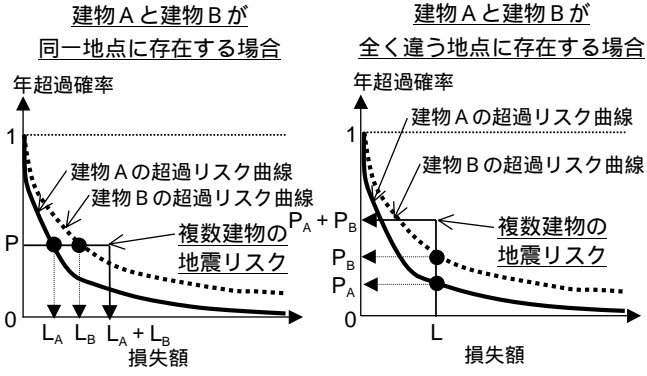


Fig. 7 複数建物に対する地震リスクの概念
Conceptual Diagram of Seismic Risk on Plural Building

個別に評価するよりも、複数建物を対象とした方が地震リスクを低減できる可能性があるといえる。

ここで、Fig. 7に示す超過リスク曲線のように、1) 建物Aと建物Bが同一地点に存在する場合と2) 建物Aと建物Bが十分に距離をおいた地点に存在する場合について複数建物の地震リスクを考える。1)では、2棟の建物への影響地震が完全に相関しているの、年超過確率Pに対する建物Aの損失額 L_A と建物Bの損失額 L_B を合計した $L_A + L_B$ が年超過確率Pに対応した損失額となる。一方、2)では、2棟の建物への影響地震が完全に独立しているの、損失額Lに対する建物Aの年超過確率 P_A と建物Bの年超過確率 P_B を合計した $P_A + P_B$ が損失額Lに対応した年超過確率となる。従って、1)と2)の損失額を比較するときには、2)において $P_A + P_B$ がPとなる損失額を求める必要がある。

4.2 複数建物の地震リスク評価フロー

Fig. 8に示すように、震源として地震1と地震2を、建物として建物Aと建物Bを設定した場合、複数建物の地震リスク評価フローを以下に示す。

1) ある地震に対する建設地の地表面最大加速度の中央値 $a(m, d)$ を距離減衰式から計算し、推定誤差を対数標準偏差をもつ対数正規分布で仮定する。地表面最大加速度 a の超過確率 $Q(a)$ が次式から求まる。

$$Q(a) = \Phi \left[-\frac{\ln a - \ln a(m, d)}{\beta} \right] \dots\dots\dots (12)$$

地表面最大加速度 a と超過確率 $Q(a)$ の関係を、地震1と地震2に対して模式的にFig. 9に示す。

2) 超過確率 Q_0 に相当する地表面最大加速度 a_0 を、(12)式を a について解くことで逆算する。

$$a_0 = \exp \left[\ln a(m, d) - \beta \times \Phi^{-1}(Q_0) \right] \dots\dots\dots (13)$$

Fig. 9に示すように、地震1と地震2に対する建設地Aと建設地Bの地表面最大加速度を求める。ここで、

- a_{A1} : 地震1に対する建設地Aでの地表面最大加速度
- a_{B1} : 地震1に対する建設地Bでの地表面最大加速度
- a_{A2} : 地震2に対する建設地Aでの地表面最大加速度
- a_{B2} : 地震2に対する建設地Bでの地表面最大加速度

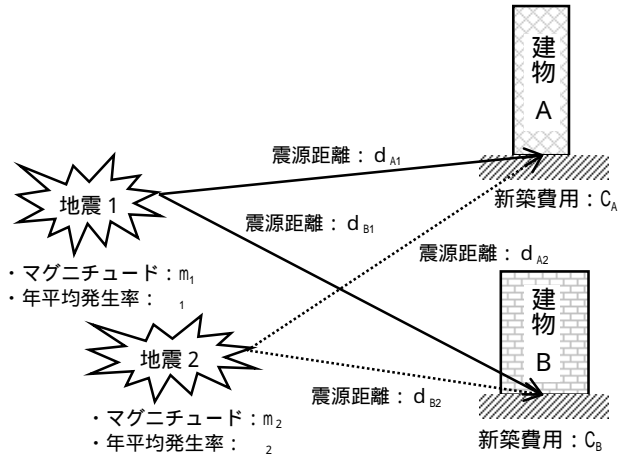


Fig. 8 複数建物の設定
Setting Plural Building

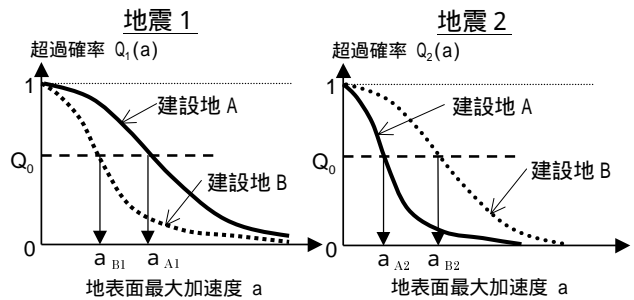


Fig. 9 超過確率に対応した地表面最大加速度の算定
Calculation of Peak Ground Acceleration in terms of Exceedance Probability

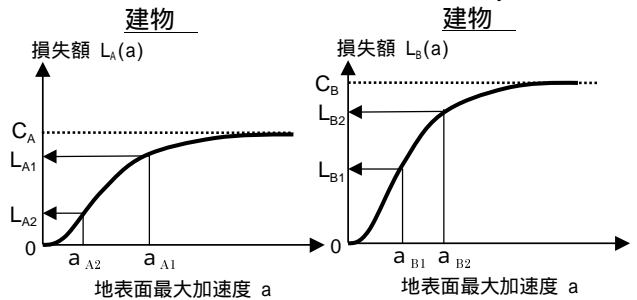


Fig. 10 地表面最大加速度に対応した損失額の算定
Calculation of Seismic Loss in terms of Peak Ground Acceleration

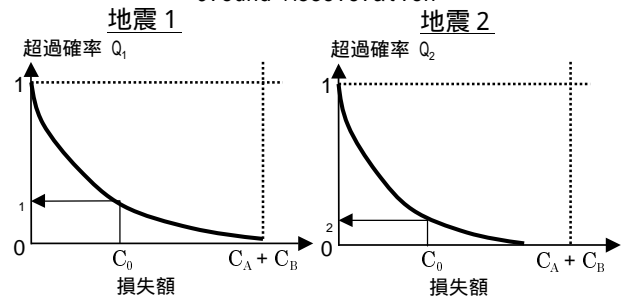


Fig. 11 損失額に対応した超過確率の算定
Calculation of Exceedance Probability in terms of Seismic Loss

3) それぞれの地表面最大加速度に対する損失額を、Fig. 10に示す建物Aと建物Bの地震損失曲線を用いて計算する。地震1に対する建物Aと建物Bの損失額の合計 L_1 と、地震2に対する建物Aと建物Bの損失額の合計 L_2

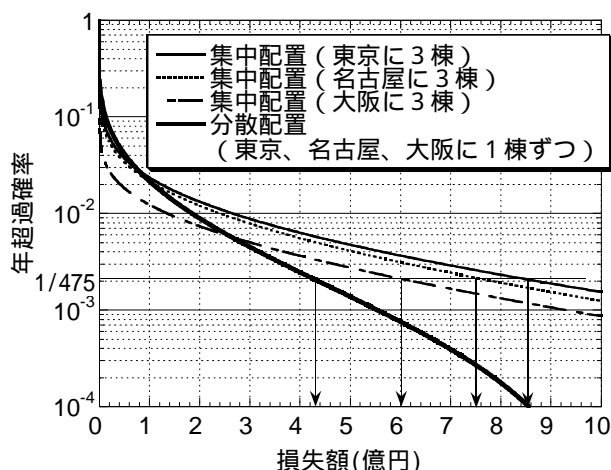


Fig.12 複数建物に対する超過リスク曲線
Annual Exceedance Risk Curve on Plural Building
は次式となる。

地震 1 : $L_1 = L_{A1} + L_{B1}$ (14)

地震 2 : $L_2 = L_{A2} + L_{B2}$ (15)

4) 地表面最大加速度の超過確率 Q を 0 ~ 1 の範囲でパラメトリックに変化させて 1) ~ 3) の計算を順次行い, Fig. 11 に示すようにそれぞれの地震に対して損失額と超過確率の関係を連続的に求める。

5) ある損失額 C_0 に対応した地震 1 と地震 2 の超過確率 Q_1 と Q_2 を, Fig. 11 から求める。複数建物の損失額 C_0 に対する年超過頻度 v_0 は, Q_1 を地震 1 の年平均発生率 v_1 で Q_2 を地震 2 の年平均発生率 v_2 で重み付けし合計することで計算できる。

$v_0 = v_1 \times Q_1 + v_2 \times Q_2$ (16)

ここで, 地震発生を定常ポアソン過程でモデル化すると, 損失額 C_0 に対する年超過確率 P_0 が得られる。

$P_0 = 1 - \exp(-v_0)$ (17)

6) 損失額を 0 ~ ($C_A + C_B$) の範囲でパラメトリックに変化させて 5) の計算を順次行い損失額と年超過確率の関係を連続的に求め, 複数建物の超過リスク曲線を作成する。

5. 複数建物の地震予想最大損失額の検討例

5.1 解析条件

建物の分散配置による地震リスク低減効果を検討するため, 3.1 節で扱った建物を 3 棟設定する。このとき, 1) 東京に 3 棟の建物を集中配置した場合, 2) 名古屋に 3 棟の建物を集中配置した場合, 3) 大阪に 3 棟の建物を集中配置した場合, 4) 東京, 名古屋, 大阪の 3 地点に建物を 1 棟ずつ分散配置した場合の 4 ケースについて損失額を比較する。ただし, 複数建物全体の新築費用は, 10 億円の建物が 3 棟あるので, 全てのケースについて 30 億円となる。

5.2 解析結果

建物の損失額と年超過確率の関係を, Fig. 12 に示す。損失額の年超過確率が小さくなるに従い, 1) ~ 3) が小さ

くなり, 地震リスク低減効果が大きくなる傾向がある。ちなみに, 複数建物の地震予想最大損失額 (年超過確率 1/475 に相当する建物の損失額を参照する) は, 1) で約 8.4 億円, 2) で約 7.5 億円, 3) で約 6.0 億円, 4) で約 4.3 億円であり, 4) の分散配置による損失額が最も小さい。

6. おわりに

個別建物および面的な広がりを持つ複数建物の地震リスク評価法を開発し, 地震予想最大損失額 (PML) 評価ソフトを作成した。

このような地震リスク評価法は, 既存建物を対象とした不動産証券化に伴うデューデリジェンス業務のみでなく, 新築費用に地震損失額を加えた地震総費用最小化を実現する耐震グレードの設定や許容される地震損失額を目標とした設計などにも応用できると考えられる。

参考文献

- 1) 宇佐見 龍夫: 新編 日本被害地震総覧, 東京大学出版会, (1996)
- 2) 宇津 徳治: 日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表: 1885-1980, 地震研究所彙報 Vol. 57, pp.401 ~ 463, (1982)
- 3) 気象庁: 地震月報 ~ 1996 年
- 4) 松田 時彦: 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研究所彙報 Vol. 65, pp.289 ~ 319, (1990)
- 5) Joyner W.B. & Boore D.M.: Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion including Records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soci of AM., Vol.171 No.6, pp.2011 ~ 2038, (1981)
- 6) 岡田 恒男, 村上 雅也, 関 松太郎, 久保 哲夫: 既存鉄筋コンクリート造建物の耐震性能の分布, 大会梗概集 (北陸), pp.1601 ~ 1602, (1983)
- 7) 村上 雅也: 耐震性能の評価法と判定値の設定, 建築雑誌, No.1170, pp.32 ~ 39, (1980)
- 8) 中埜 良昭, 岡田 恒男: 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.406, pp.37 ~ 43, (1989)
- 9) 林 康裕, 宮腰 淳一, 田村 和夫: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会論文報告集, No.502, pp.61 ~ 68, (1997)
- 10) 諏訪 仁, 野畑 有秀, 関 松太郎: 兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建築物の地震リスク評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 12 号, pp.41 ~ 46, (2001)
- 11) 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, pp.69 ~ 76, (2000)