特集　「リニューアル」

建物の地震リスク評価法の開発

－各部位別の地震損傷度に基づいた評価－

諏　訪　　　仁　　石　井　雄　輔　　野　畑　有　秀　　関　　　松太郎　　金　光　陽　子
（本社情報ｿﾘｭｰｼｮﾝ部）

Seismic Risk Analysis for Buildings

－Evaluation through Seismic Fragility of Each Building Element－

Hitoshi Suwa　　Yusuke Ishii　　Arihide Nobata　　Matsutaro Seki　　Yoko Kanamitsu

Abstract

An analytical method is developed for evaluating the seismic risk of multiple buildings located at various construction sites as well as of a single building. This system makes it possible to calculate the probable maximum loss (PML) generally used in the due diligence. The PML is defined such that the exceedance probability of seismic loss is 0.1 on condition that the annual cumulative probability of earthquake occurrence is 1/475. Moreover, the seismic life-cycle cost of a single building obtained by summing the initial cost and annual expected loss can be calculated through this system.

概　　要

建設地において将来起こりうる地震の大きさと建物の損傷度を確率論的に評価することにより，主として新築建物を対象とした地震リスク評価法を開発した。つぎに，得られた評価法をソフト化し，地震リスク評価システムを開発した。評価システムを用いることにより，個別建物の地震予想最大損失額(以下，PMLと呼ぶ)ならびに複数建物群(ポートフォリオ)のPMLが容易に計算できる。PMLとは，再現期間475年相当の大地震が発生したとき，その場合の９０％非超過確率に相当する損失額の新築費用に対する割合である。さらに，個別建物の地震ライフサイクルコスト（＝新築費用＋年期待損失額）も評価可能である。

1.　はじめに

近年，不動産証券化に伴い，デューデリジェンス業務が広く行われている。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，いくつか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の大きさと地震時における建物の損傷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。不動産証券化に伴うデューデリジェンスでは，地震リスクの指標として，地震予想最大損失額(以下，ＰＭＬと呼ぶ)が用いられる。文献1)に従い，ＰＭＬの定義は，「対象施設あるいは施設群に対して最大の損失をもたらす再現期間４７５年相当の地震が発生し，その場合の９０％非超過確率に相当する物的損失額の再調達価格に対する割合」となる。このため，既に，主として中低層の既存建物を対象に，構造耐震指標を用いてPMLを評価できるソフトを開発した[2)]。しかしながら，最近は，いわゆる開発型証券化の普及に伴い，既存建物のみならず新築建物を対象に，より詳細な地震リスク評価が要求され始めている。

このような背景を踏まえ，建物モデルを用いて地震応答解析を行い，各層および部位別の損傷度に基づいた地震リスク評価法を開発した。このとき，地震時における損傷評価は，躯体のみならず，仕上げならびに建築設備に区別して行う。上部建物の損傷評価に併せて，表層地盤の液状化危険度に応じて，基礎の損傷評価も同時に行う。さらに，この地震リスク評価法をソフト化し，個別建物のPML，複数建物群(ポートフォリオ)のPML，個別建物の地震ライフサイクルコストを評価可能とした。

2.　建物の地震リスク評価法

2.1　地震リスク評価フロー

建物の地震リスクは，建設地において将来発生し得る地震動強さと，建物の地震損傷度とその補修費用から設定される地震損失の両者に基づいて評価される。このとき，本研究で開発した地震リスク評価フローを，Ｆｉｇ．１に示す。各評価項目の詳細を，以下に述べる。

2.2　建設地の地震動強さの評価

2.2.1　シナリオ地震データセット　建設地周辺の地震

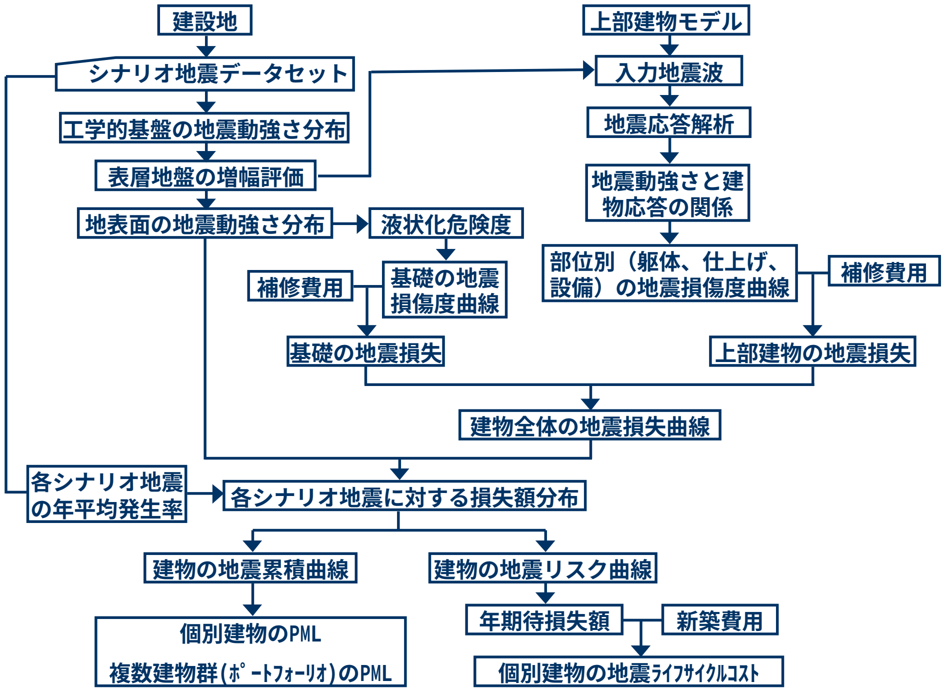

Fig. 1　地震リスクの評価フロー
Evaluation of Seismic Risk

環境を，文献3）の手法に基づき作成されたシナリオ地震データセットを用いて評価する。震源モデルとしては，日本全国を対象に，プレート境界，内陸の活断層ならびに背景地震の３タイプを設定する。プレート境界は，太平洋プレートの沈み込み，フィリピン海プレートの相模トラフでの潜り込み，南海トラフでの潜り込みを３次元曲面でモデル化した。内陸の活断層は，主要な活断層帯と，これ以外の松田の起震断層(1990)を線状の震源としてモデル化した。背景地震は，プレート境界および内陸の活断層以外の地震発生を考慮するために設定したもので，萩原の地震地帯構造区分(1991)に基づいて深さ10kmの平面的な震源領域としてモデル化した。このとき，これらの震源モデルに基づいて，日本全国を対象としたシナリオ地震データセットを作成した。

2.2.2　工学的基盤の地震動強さ　シナリオ地震データセットから選択された個々のシナリオ地震に対して，建設地の工学的基盤（表層地盤の増幅効果を受けにくい基盤を指し，せん断波速度で約400m/s程度を想定）における地震動強さを，距離減衰式を用いて計算する。このとき，工学的基盤における地震動強さの指標として，地震動強さに対する建物応答のバラツキ（誤差）が小さく，建物応答を最も精度よく説明できる最大速度を選択する。工学的基盤での最大速度を計算する際，その推定誤差を対数標準偏差λ_{V0}を有する対数正規分布を用いてモデル化する。

2.2.3　表層地盤の増幅評価　表層地盤の影響による最大速度の増幅評価法として，工学的基盤における地震波を用いて地盤応答解析を行う場合[4)]（以下，手法１と呼ぶ）と建設地周辺の地形分類に基づいて設定された増幅率[5)]を用いる場合（以下，手法２と呼ぶ）を想定する。

手法１では，工学的基盤におけるスペクトル形状を設定し，このスペクトルをターゲットにした模擬地震波を作成する。つぎに，一次元重複反射理論に基づき，工学的基盤での模擬地震波に対して表層地盤の等価線形解析を行い，地表面での模擬地震波を評価する。この際，工学的基盤での最大速度の大きさを数種類設定して同様の計算を行い，工学的基盤での最大速度V_0と地表面最大速度Vの関係を連続的に求める。このとき，両者の関係を，以下の累乗式を用いて回帰する。

$$V = a_1 \times {V_0}^{a_2} \qquad (1)$$

ここで，a_1とa_2は回帰係数である。工学的基盤での最大速度のバラツキが対数標準偏差ζ_{V0}の対数正規分布で与えられているので，（１）式の回帰式より，地表面最大速度のバラツキも対数正規分布となり，地表面最大速度の対数平均値λ_Vと対数標準偏差ζ_Vは以下のように求められる。

$$\lambda_V = \ln a_1 + a_2 \times \lambda_{V0} \qquad (2)$$

$$\zeta_V = a_2 \times \zeta_{V0} \qquad (3)$$

手法２では，地形分類（山地，谷底平野，埋立地など）の情報を用いて，松岡・翠川の手法[5)](1994)に基づき最大速度の増幅率を計算する。本研究では，500mメッシュ内の代表点の地形分類を用いて，この手法に基づき作成された最大速度の増幅率に関するデータベース[6)]を利用する。このとき，(2)式と(3)式において，回帰係数a_1に増幅率を，回帰係数a_2に１を代入する。

2.3　上部建物の地震損傷度評価

2.3.1　地震動強さと建物応答の関係　上部建物を，基礎

固定の等価せん断型モデルに縮約して地震応答解析を行い，地表面最大速度と各層の応答の関係を求める。このとき，最大速度の値を変化させて複数の地震応答解析を行い，地表面最大速度と応答の関係を累乗式などを用いて回帰する。例えば，応答指標として，層間変位δを選択すると，回帰式は以下となる。

$$\delta = d_1 \times V^{d2} \tag{4}$$

ここで，d_1とd_2は回帰係数である。評価部位に応じて，最適な応答指標を選択することにより，（４）式のような回帰式を求める。

2.3.2　部位別の地震損傷度曲線　上部建物を，躯体，仕上げ，建築設備の部位に区分して，地震損傷度曲線を部位別ならびに各層ごとに評価する。ここで，地震損傷度曲線とは，ある大きさの地震動が生じたとき，建物にある損傷レベル（小破，中破など）の被害が発生する確率を，地震動の大きさに対して連続的に表現したものである。このとき，各部位の地震損傷度曲線を，対数正規分布を用いてモデル化する。地震動強さと建物応答の関係が(4)式で与えられているので，(4)式をＶについて解き，被災度ごとの損傷クライテイリアを適宜設定すると，地震損傷度曲線の対数平均値λ_R　と対数標準偏差ζ_Rが求められる。

$$\lambda_R = \frac{1}{d_2} \times \left(\lambda_\delta - \ln d_1\right) \tag{5}$$

$$\zeta_R = \frac{1}{d_2} \times \zeta_\delta \tag{6}$$

ここで，λ_δとζ_δは，損傷クライテリアの対数平均値と対数標準偏差である。

2.4　基礎の地震損傷度評価

2.4.1　液状化危険度の評価　液状化発生の評価法としては，Ｎ値などの土質情報を用いて液状化抵抗比と等価な繰り返しせん断応力比を計算して液状化発生に対する安全率F_l値を求める手法（以下，手法１と呼ぶ）と地形分類と地表面最大速度の関係から液状化発生を簡便に予測する手法（以下，手法２と呼ぶ）が考えられる。

手法１による液状化危険度の予測法として，文献7）の手法を用いる。Ｎ値と地表面最大加速度などの情報から液状化発生に対する安全率F_l値を計算し，F_l値が１よりも大きくなる土層では液状化発生の可能性は無いと判定し，逆にF_l値が１以下の土層では液状化危険度が高いと判断する。つぎに，液状化危険度が高いと判定された土層を対象に，補正Ｎ値と等価な繰り返しせん断応力比の関係から繰り返しせん断ひずみγ_{cy}を求める。地震時にγ_{cy}が同一方向に発生すると仮定して，これを鉛直方向に積分して地表変位D_{cy}を計算する。地表変位D_{cy}を液状化程度の指標とし，地表変位D_{cy}と液状化程度の関係をTable１のように設定する。従って，地表面最大加速度の大きさに応じて地表変位D_{cy}を計算し，Table １から液状化危険度を判定する。

Table 1　地表変位と液状化程度の関係
Relation between Displacement of Ground Surface and Liquefaction

地表変位(cm)	液状化程度
0	無し
～5	軽微
5～10	小
10～20	中
20～40	大
40～	甚大

Table 2　地形分類と基準最大速度の関係
Relation between Topography and Reference Peak Ground Velocity

地形分類	基準最大速度
山地，台地，扇状地	液状化は起こらない
砂州	35cm/s
自然堤防，谷底平野，三角州	25cm/s
旧河道，埋立地	15cm/s

Table 3　液状化程度と地表面最大速度の関係
Relation between Liquefaction and Peak Ground Velocity

液状化程度	地表面最大速度の値
液状化危険度が高い	基準最大速度の1.25倍以上
液状化危険度がやや高い	基準最大速度の1～1.25倍
液状化危険度がやや低い	基準最大速度の0.75～1倍
液状化危険度無し	基準最大速度の0.75倍未満

手法２として，文献8）の地震被害想定支援マニュアルで採用されている手法を用いる。この手法は，松岡・翠川・若松の手法[9](1993)に基づき，地震被害想定に合うように地形分類を読み替えて液状化危険度を求めるものである。地形分類ごとに基準となる最大速度をTable 2のように定め，これを地表面最大速度と比較することにより液状化危険度をTable3のように判定する。

2.4.2　基礎の地震損傷度曲線　基礎の地震損傷度を，Table 4に示すパラメータを考慮して評価する。まず，対象地盤の液状化判定を2.4.1節の手法により行い，液状化の有無に応じて地震損傷度曲線を作成する際の損傷指標を決定する。液状化危険度が有る場合は護岸からの距離を，一方，液状化危険度が無い場合は地盤種別を別途考慮する。つぎに，基礎形式を，直接基礎と杭基礎に大別し，直接基礎では上部建物のアスペクト比を，杭基礎では杭種および設計年を考慮する。このとき，兵庫県南部地震における基礎被害事例などを参考に，Table 4のパラメータを考慮した地震損傷度曲線を評価する。一例として，液状化危険度無しの軟弱地盤と液状化危険度有りで護岸からの距離が30m以上の場合に対して，杭基礎の地震損傷度曲線をFig. 2に示す。

2.5　補修費用の設定

2.5.1　補修費用データベース　地震時に生じる損失額を評価するとき，建物の各被災度に応じた補修費用の設定が重要となる。このため，兵庫県南部地震において被害を受けて補修工事を行った２７棟の建物を対象に，補修費用の調査を行った[10]。地震時における補修費用を決定するうえで最も重要となる建物の被災度として，日本建

Table 4　基礎の地震損傷度曲線のパラメータ
Parameters of Seismic Fragility Curve of Foundation

		液状化危険度無し	液状化危険度有り
損傷指標		地表面最大加速度	地表変位
護岸からの距離		区別なし	30m以上 30m未満
地盤の種類		硬質地盤 軟弱地盤	区別なし
直接基礎	アスペクト比	0.5以上 0.5未満	
杭基礎	杭種	既製コンクリート杭（PHC，PC，RC） 場所打ちコンクリート杭	
	設計年	1984年以前 1984年以降	

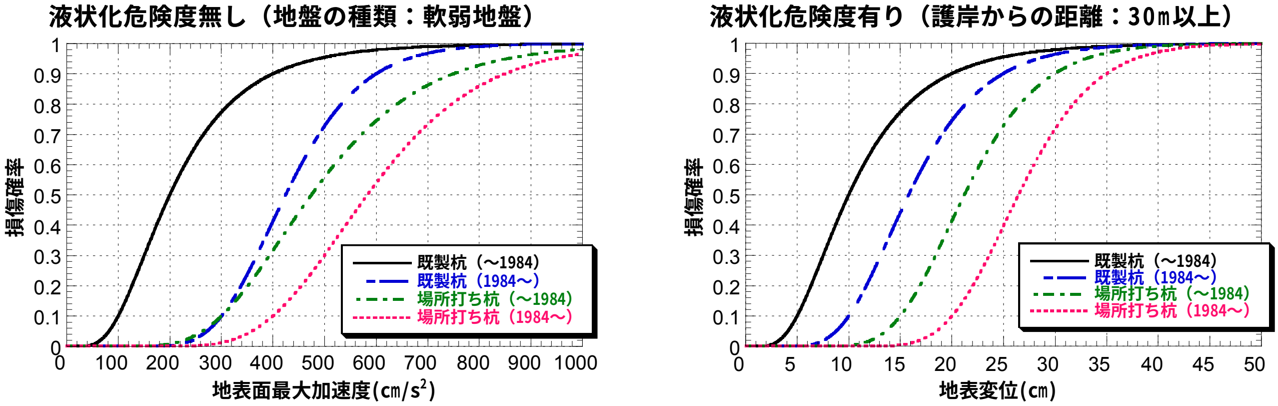

Fig. 2　杭基礎の地震損傷度曲線
Seismic Fragility Curve of Pile Foundation

築防災協会の被災度判定基準[11]に従い，小破，中破および大破を設定した。ここで，小破は軽微な被害を含んでおり，また大破の建物は取り壊さずに補修をして再使用した建物を対象とした。小破ならびに中破の棟数は1０棟以上あるが，大破の場合にはもともとの母集団の棟数が少ないこともあり，ここではデータが入手可能な３棟についてのみ調査した。構造形式別では，ＲＣ造が９棟，SRC造が10棟ならびにS造が８棟である。建物階数別では，６～９階の建物の棟数が15棟で最も多く，10階以上の建物は３棟である。

2.5.2　補修費用の調査項目　補修費用の項目として，総工事費（以下に記す全ての工事費の合計）のほかに，仮設工事費，解体工事費，躯体工事費，仕上げ工事費，設備工事費，その他の６項目の工事に対して補修費用の調査を行った。ここで，仮設工事費は，主に共通仮設工事費と直接仮設工事費から構成されている。共通仮設工事費は現場の仮囲いや現場経費など直接工事に関係しない費用を指し，また直接仮設工事費は足場架設や安全設備費など建築や設備工事をする際の費用を指している。躯体工事費は，柱，梁，壁などの構造部材に対する補修費用を指し，具体的にはエポキシ樹脂の注入や鉄板補強などの工事費用である。仕上げ工事費は，内装工事や外装工事などに要する費用である。設備工事費は，電気工事，衛生工事，空調工事，昇降機工事などの合計である。その他は，外構費，諸経費，設計費などである。

2.5.3　補修費用の平均値　個別建物の補修費用を，その延べ床面積で基準化した単位面積当たりの補修費用（＝建物の補修費用／延べ床面積）を計算して，同一の被災度に分類された建物の補修費用を用いて統計的検討を行う。各被災度ごとに，工事別の補修費用の平均値を総工事費の平均値で基準化した値を，Fig. 3に示す。全体的に見ると，建物の被災度にほぼ関係なく，総工事費に対して仕上げ工事費の占める割合が約 0.3程度で最も大きく，次いで設備工事費の約0.2，躯体工事費の約 0.1の順になっていることがわかる。従って，地震時に生じる損失額を低減させるためには，躯体の耐震グレードを高めることはもちろん必要であるが，これだけでは不十分で仕上げおよび建築設備の耐震性能を高めておくことが重要となる。また，躯体工事費では，小破から大破へと被害レベルが甚大になるに従い総工事費に占める割合が大きくなっているが，仕上げおよび設備工事費では大破での割合が小さくなる傾向がある。この原因として，仮設および解体工事費の占める割合が小破などの場合と比較して大きくなることが考えられる。もちろん，この現象は総工事費に占める割合が減少しているだけであり，仕上げおよび設備工事費の平均値は，被害程度が甚大になるに従い大きくなっている。

2.5.4　補修費用の変動係数　各被災度ごとに，工事別の補修費用の変動係数を，Fig. 4に示す。小破および中破では設備工事費の変動係数が最も大きく，それぞれ約

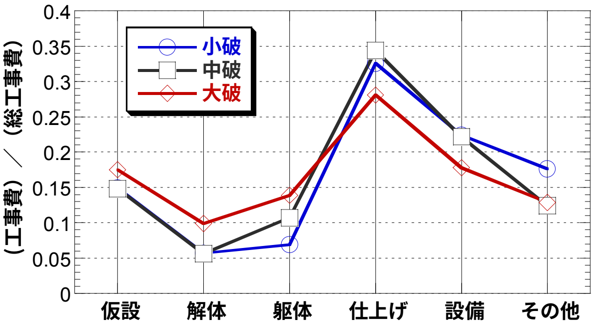

Fig. 3　補修費用の平均値
Expectation of Repair Costs

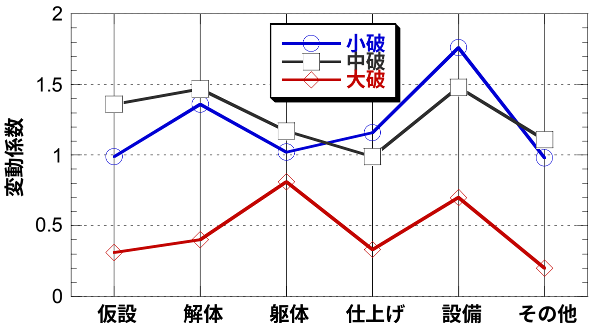

Fig. 4　補修費用の変動係数
Coefficient of Variation of Repair Costs

1.8，約 1.5程度となっている。この原因として，被害発生が電気工事などの単独被害なのかあるいは他の設備も含んだ複合被害なのかに大きく左右されることが考えられる。全体的に見ると，工事種類に関係なく，大破の工事費の変動係数が小破および中破と比較して小さいことがわかる。このため，小破や中破と判定された建物では，大破と比較してその損傷程度にかなりの幅があると推察できる。

2.6　建物の地震損失評価

上部建物ならびに基礎の地震損傷度曲線と補修費用が求められたので，これらの結果を用いて建物の地震損失評価を行う。ある地震動強さに対する建物の損失額の平均値μcと標準偏差σcが，以下のように求められる。

$$\mu_C = \sum_{k=1}^{K} (P_k \times C_k) \tag{7}$$

$$\sigma_C = \sqrt{\sum_{k=1}^{K} \left\{ P_k \times (C_k - \mu_C)^2 \right\}} \tag{8}$$

ここで，P_Kはある損傷モードの発生確率を，C_Kは損傷モードに対する補修費用である。

つぎに，損失額の分布形状であるが，損失額の下限値は０でかつ上限値は新築費用となるので，上下限値の設定できる分布形を用いる必要がある。このため，パラメータを適切に選択することにより，さまざまな分布形状を表現できるベータ分布を採用する[12)]。ある大きさの最大速度Ｖに対するベータ分布の確率密度関数は，損失額の平均値μcと標準偏差σcを用いて求められる。

$$f(c|V) = \frac{1}{B(q,r)} \times \frac{C^{q-1} \times (C_M - C)^{r-1}}{{C_M}^{q+r-1}} \tag{9}$$

ここで，C_Mは新築費用，ｑとｒは分布形のパラメータであり平均値と標準偏差から求められる。また，Ｂ(ｑ,ｒ)はベータ関数である。

あるシナリオ地震Ｅに対する建設地の最大速度の分布が対数正規分布でモデル化され，その対数平均値と対数標準偏差が(2)式と(3)式で与えられている。従って，あるシナリオ地震Ｅに対する損失額の分布ｆ(ｃ｜Ｅ)は，最大速度の分布ｆ(Ｖ｜Ｅ)で(9)式を重み付け積分することで求められる。

$$f(c|E) = \int \{ f(c|V) \times f(V|E) \} dv \tag{10}$$

2.7　個別建物の地震リスク評価

建設地周辺において選択された全てのシナリオ地震に対して，(10)式の損失額の分布を計算する。これらの分布を用いて，建物のＰＭＬならびに地震ライフサイクルコストを求める。

2.7.1　ＰＭＬの評価　全てのシナリオ地震を対象に計算された損失額の分布を，この値が大きい順にシナリオ地震の順番を並び替える。それぞれのシナリオ地震の発生が定常ポアソン過程に従うと仮定すると，再現期間４７５年相当のシナリオ地震E_{475}は，次式を満足するN_{475}番目のシナリオ地震となる。

$$1 - \prod_{i=1}^{N_{PML}} \{ \exp(-\nu_i) \} = \frac{1}{475} \tag{11}$$

ここで，νはシナリオ地震の年平均発生率である。シナリオ地震E_{475}に対する損失額の分布をｆ(ｃ｜E_{475})とすると，PMLは90%非超過確率に相当する損失額で定義されるので，次式を満足することにより求められる。

$$\int_{PML}^{C_M} f(c|E_{475}) dc = 0.1 \tag{12}$$

2.7.2　地震ライフサイクルコストの評価　PMLは再現期間４７５年相当の地震のみを対象に，建物の損失額を求めた。しかし，建物の供用期間中には，設定された再現期間よりも長い地震あるいは短い地震も発生する可能性がある。このため，地震ライフサイクルコストを計算する際には，全てのシナリオ地震に対する損失額を適切に考慮しなければならない。Ｎ個のシナリオ地震を対象にしたとき，地震リスク曲線P(C>c)は次式から求められる。

$$P(C > c) = 1 - \prod_{i=1}^{N} \left[1 - \{ 1 - \exp(-\nu_i) \} \times \left\{ 1 - \int_0^c f(c|E_i) dc \right\} \right] \tag{13}$$

このとき，地震リスク曲線の確率密度関数をｆ(c)とすると，年期待損失額AELは次式から計算できる。

$$AEL = \int_0^{C_M} \{ f(c) \times c \} dc \tag{14}$$

ここでは，それぞれのシナリオ地震の発生が定常ポアソン過程に従う，と仮定しているので，建物の供用期間T年の地震ライフサイクルコストSLCCは，次式から評価できる。

$$SLCC = C_I + (T \times AEL) \tag{15}$$

ここで，C_Iは建物の新築費用を示している。

2.8　複数建物群(ﾎﾟｰﾄﾌｫﾘｵ)の地震リスク評価

個別建物の地震リスクが評価できたので，互いに異なる複数地点に存在する建物群の地震リスクについて考える。複数建物群を対象とした地震リスクは，建物の分散配置によるリスク分散効果および大数の弱法則の成立により，地震リスクを効果的に低減できる可能性がある。このとき，リスク分散とは，建物を分散配置すると，仮に大地震が発生しても被害を受ける建物数が集中配置の場合よりも少なくなり，結果的に地震リスクを低減できる，というものである。一方，大数の弱法則は，個々の建物の損失額の分布が互いに独立であるとき，同じような分布形状をもつ損失額の和をとると，損失額のバラツキに相当する変動係数の値が徐々に小さくなり，最終的に損失額の変動係数が０となり，損失額の分布が期待値に収束する，ということである。とくに，ＰＭＬでは，損失額を求める際に参照される確率の値が小さいので，上記の効果により，地震リスクを効率的に低減できる。

複数建物群の地震リスクを計算する際には，１つの地震が複数建物に対して何らかの損失を与える可能性があるので，個々の建設地を対象に作成された地震ハザード曲線を用いることはできない。このため，個々の建設地の地震ハザードを等価に表現したシナリオ地震データセット[3]を用いて，複数建物群の地震リスクを評価する。このとき，シナリオ地震データセットから１つのシナリオ地震を選択し，この地震に対して個々の建物の損失額の分布Cを2.2～2.6節で説明した手法により計算して，複数建物群を対象とした損失額の分布C_Tを次式から求める。

$$C_T = \sum_{j=1}^{M} C_j \tag{16}$$

ここで，Mは評価建物の総数である。(16)式において，個々の建物の損失額の和を計算するとき，損失額の相関性が重要となる場合がある。とくに，複数建物群を分散配置させることが不可能で，同じような地点に配置する際には，損失額の相関性により地震リスクの値がかなり異なることも有り得る[13]ので注意を要する。

ある１つのシナリオ地震に対して，複数建物群を対象とした損失額の分布が(16)式から求められたので，複数建物群のPMLが2.7.1節の手法により評価できる。

2.9　地震リスク評価システムの開発

2.1節～2.8節で述べた地震リスク評価法をプログラム化し，EXCELシートを用いて，データの入力ならびに評価結果の図化処理を行う地震リスク評価システムを開発した。このとき，地震リスク評価システムにおいて，各プログラムの起動の流れを，Fig. 5に示す。

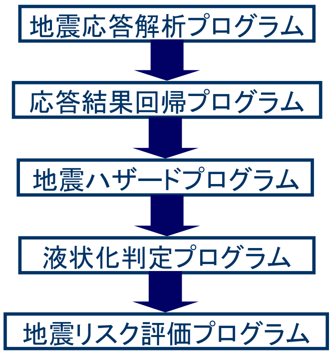

Fig. 5　地震リスク評価システム
Evaluation System of Seismic Risk

3.　個別建物の評価例

建設地に東京を想定したとき，10階建てRC造建物を対象に，２章で作成された地震リスク評価システムを用いて計算する。

3.1　解析条件

3.1.1　工学的基盤の地震動強さ　地震動指標として最大速度を選択し，工学的基盤の最大速度を安中の距離減衰式[15]を用いて評価する。最大速度の推定誤差は，対数標準偏差0.5の対数正規分布を用いてモデル化する。

3.1.2　表層地盤のモデル化　工学的基盤における加速度応答スペクトルを，第１種地盤のスペクトル[14]を用いてモデル化する。つぎに，地震のマグニチュードを6.5，7，8に設定してJennings型包絡関数を用意し，工学的基盤での模擬地震波を作成した。表層地盤の物性値をTable 5のように設定し，建設省告示（平12建告第1457号）に示された剛性低下率および等価減衰定数を用いて表層地盤の等価線形解析を行い，地表面での模擬地震波を作成した。工学的基盤ならびに地表面での加速度波形を時間積分して，それぞれの最大速度を求めた。

3.1.3　建物モデル　上部建物モデルとして，弾性周期0.7secのRC造10階建てを設定した。降伏ベースシアー係数を0.3として高さ方向の降伏層せん断力係数をAi分布で与え，また各層の降伏変位は層間変形角で1/150を設定した。ここで，各層の入力パラメータを，Table 6に示す。なお，各層の復元力特性としてTakedaモデルを設定し，建物の減衰は１次の減衰定数が３％の剛性比例型で与えた。

本検討では，上部建物（躯体，仕上げならびに設備を対象）の損傷状態を，躯体の損傷状態を用いて評価する。ここで，躯体の損傷指標として層間変位を採用したとき，RC造ラーメン架構を想定し躯体の損傷クライテリアをTable 7のように設定する。また，建物の補修費用は，2.5節の検

Table 5　表層地盤の物性値
Soil Profile for Surface Layer

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	単位体積重量 (kN／m^3)	地盤の分類
5	120	14.0	粘性土
1	180	18.0	粘性土
6	260	20.0	砂質土
10	395	20.0	砂質土

Table 7　限界層間変形角の設定
Parameters of Limit Drift Angle

	小破	中破	大破	倒壊
中央値	1/250	1/150	1/75	1/50
対数標準偏差	0.4	0.4	0.4	0.4

Table8　補修費用の設定（円／m^2）
Repair Cost

小破	中破	大破	倒壊
38,800	87,400	119,000	200,000

Table 6　建物モデル
Analytical Model

層	階高 (m)	床面積 (m^2)	重量 (kN)	ひび割れ耐力 (kN)	降伏耐力 (kN)	降伏変位 (m)	第２剛性比	第３剛性比
10	3.2	1000	11760	2767.9	8303.8	0.021	0.22	0.01
9	3.2	1000	11760	4468.9	13406.7	0.021	0.22	0.01
8	3.2	1000	11760	5907.5	17722.4	0.021	0.22	0.01
7	3.2	1000	11760	7160.1	21480.2	0.021	0.22	0.01
6	3.2	1000	11760	8256.3	24768.8	0.021	0.22	0.01
5	3.2	1000	11760	9211.3	27633.8	0.021	0.22	0.01
4	3.2	1000	11760	10034.1	30102.3	0.021	0.22	0.01
3	3.2	1000	11760	10730.6	32191.9	0.021	0.22	0.01
2	3.2	1000	11760	11304.9	33914.8	0.021	0.22	0.01
1	4.0	1000	11760	11760.0	35280.0	0.027	0.22	0.01

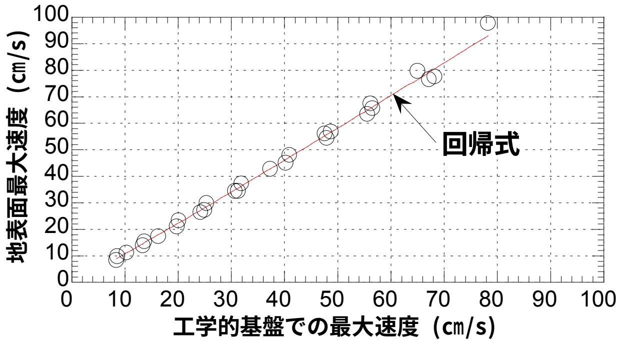

Fig. 6　工学的基盤と地表面の最大速度の関係
Relation between Peak Velocity at Engineering Bedrock and Peak Ground Velocity

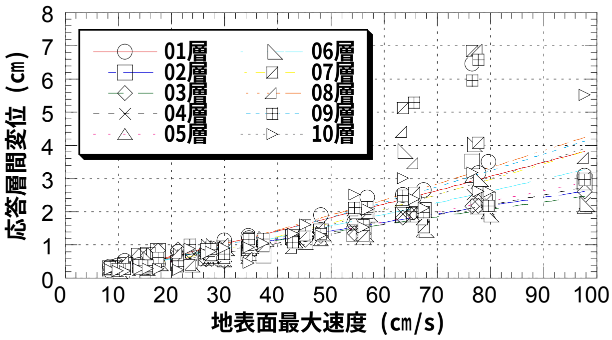

Fig. 7　地表面最大速度と応答層間変位の関係
Relation berween Peak Ground Velocity and Response Relative Story Displacement

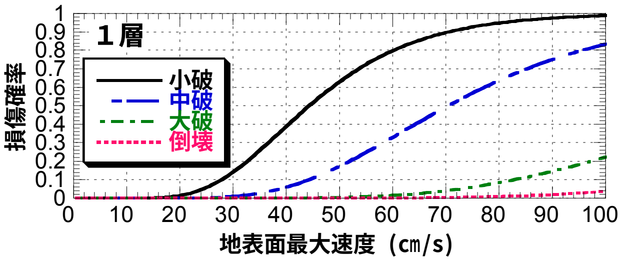

Fig. 8　建物の地震損傷度曲線（１層）
Seismic Fragility Curve

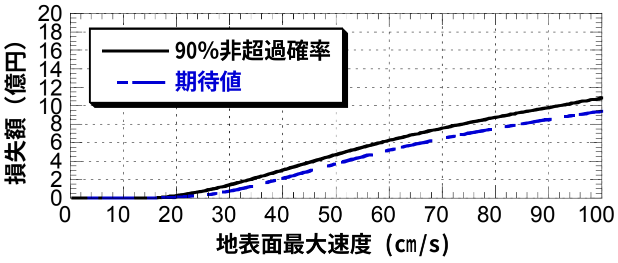

Fig. 9　建物の地震損失曲線
Seismic Loss Curve

討に基づいてTable 8のように設定する。

3.2　評価結果

工学的基盤と地表面の最大速度の関係を，Fig. 6に示す。ここで，解析に用いた模擬地震波の総数は，27波である。表層地盤の増幅を考慮した地表面での模擬地震波に対して建物の地震応答解析を行い，地表面最大速度と各層の応答層間変位の関係を，Fig. 7のように求めた。

つぎに，2.3節の手法に従い，各層の地震損傷度曲線を作成する。例えば，１層の地震損傷度曲線は，Fig. 8となる。これらの結果に基づき，建物の地震損失曲線を作成するとFig. 9となる。図中，(12)式から計算される90%非超過確率の損失曲線ならびに期待値のそれを表示している。このとき，建物の地震累積曲線はFig. 10となり，PMLは約13.9%であることがわかる。一方，(15)式より建物の地震ライフサイクルコストを求めると，Fig. 11となる。

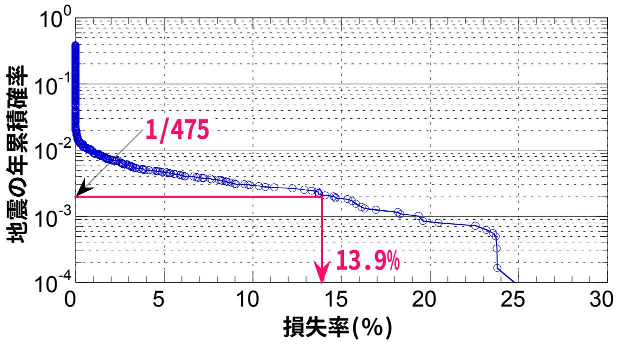

Fig. 10　建物の地震累積曲線
Seismic Risk Curve

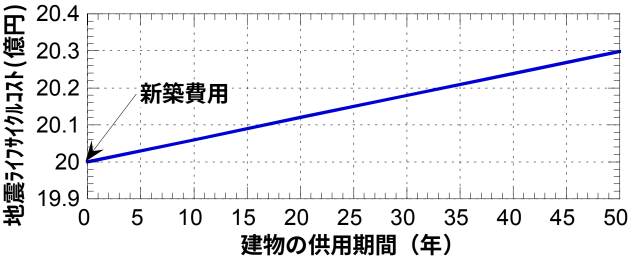

Fig. 11　建物の地震ライフサイクル曲線
Seismic Life Cycle Cost

4.　複数建物群の評価例

建物３棟を，東京，仙台，大阪に分散配置したとき，複数建物群（ポートフォリオ）に対する地震累積曲線を計算すると，Fig. 12となる。ただし，建物３棟の解析条件は，3.1節で述べたものと同一とする。ポートフォリオのPMLは約6.9%であり，東京および大阪に建物を集中配置する場合と比較して，ポートフォリオの地震リスクが低減されていることがわかる。

5.　おわりに

建物の地震リスク評価法を開発し，個別建物のＰＭＬ，複数建物群のＰＭＬならびに個別建物の地震ライフサイクルコストの評価ソフトを作成した。

今後，このような地震リスク定量化技術を活用し，リスク低減（耐震補強など），リスク転嫁（地震保険など）ならびにリスク保有（準備金の積み立てなど）を適切に組み合わせた地震リスクマネジメント手法の検討をする必要がある。

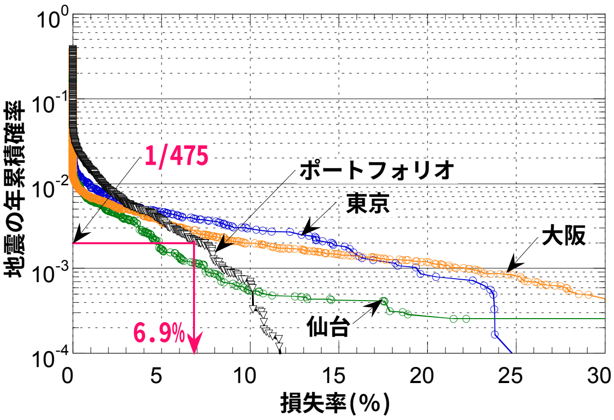

Fig. 12　ポートフォリオの地震累積曲線
Portfolio Seismic Risk Curve

参考文献

1）社団法人 建築・設備維持保全推進協会(BELCA)：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係わるガイドライン，(2001)

2）諏訪 仁，野畑 有秀，関 松太郎，若松 邦夫，鈴木直子，三橋　英二：建物の地震リスク評価法の開発－予想最大損失額(PML)評価ソフトの開発－，大林組技術研究所報 Vol.63，(2001)

3）吉田 伸一，今塚 善勝，水谷 守：広域に散在する施設群に対する地震リスク評価(Part2：地震ハザード評価)，日本建築学会大会梗概集，(2001)

4）諏訪 仁，吉田 伸一，野畑 有秀，関 松太郎：複数建物の地震リスク特性に関する検討，第11回日本地震工学シンポジウム，(2002)

5）松岡 昌志，翠川 三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング，日本建築学会　第22回地盤震動シンポジウム，(1994)

6）久保 智弘，久田 嘉章，柴山 明寛，大井 昌弘，石田 瑞穂，藤原 広行，中山 圭子：全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化および面的な早期地震動推定への適用，地震　第２輯　第56巻，(2003)

7）日本建築学会：建築基礎構造設計指針，(2001)

8）内閣府　防災担当：地震被害想定支援マニュアル，(http:www.bousai.go.jp/manual/manual.html)

9）松岡　昌志，翠川　三郎，若松　加寿江：国土数値情報を利用した広域的液状化危険度予測，日本建築学会構造系論文報告集，No.452，(1993)

10）諏訪 仁，関 松太郎：兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価，構造工学論文集，Vol.50B，(2004)

11）日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針，(1991)

12）篠塚 正宣，中村 孝明，望月 智也：極値統計理論を用いた地震時最大予想損失額の評価手法の提案，JCOSSAR論文集，(2000)

13）H.Suwa,A.Nobata and M.Seki:Evaluation of Portfolio Seismic Risk due to Different Allocations of Multiple Buildings, First International Conference of Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering(CUEE)，(2004)

14）日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，(1993)

15）T.Annaka and Y.Nozawa:Probabilistic model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, Proc.9th WCEE，(1988)