

# 建物の地震リスク評価における損失発生の影響

諏訪 仁 萩原 由 訓

## Evaluation of Seismic Risk of Buildings Through the Influence of Seismic Loss Correlation

Hitoshi Suwa Yoshinori Hagiwara

### Abstract

The seismic risk of buildings has been evaluated in the as part of Due Diligence, and we have devised the Probable Maximum Loss (PML) as an index of seismic risk. Because the PML is defined as the point at which the exceedance probability of seismic loss is 0.1, the shape of the seismic loss distribution becomes the critical factor. As a result, the correlation coefficient of the occurrence of seismic loss can be calculated using the correlation coefficient of response and that of strength. An analytical method is developed for evaluating the seismic risk of buildings considering the correlation of seismic loss at each building elements. In comparison with conventional methods, this method provides more accurate evaluations of the PML.

### 概 要

近年、不動産証券化などに伴いデュー・デリジェンスが広く行われるようになり、地震に対する建物の損失予測を目的に地震リスクが評価されている。地震リスクの指標としてPML（地震予想最大損失率）が用いられているが、PMLはシナリオ地震発生による対象建物の90%非超過確率に相当する損失と定義されるので、損失のバラツキの設定が重要になる。このため、建物各層に存在する各部位を対象に、異なる部位間において損失発生の影響の強さを示す相関係数を定式化し、建物の損失分布を各部位間における損失発生の影響係数を用いて評価する手法を開発した。建物の損失発生に影響が生じた場合には、提案手法を用いることでより現実的に即した地震リスク評価が可能になった。

### 1. はじめに

近年、建物の地震リスク評価が広く行われ、地震リスクの指標としてPML（地震予想最大損失率）が用いられるようになった。PML<sup>1)</sup>は、シナリオ地震発生による対象建物の90%非超過確率に相当する損失率と定義されるため、損失の平均値のみならず、損失のバラツキを示す標準偏差の設定が重要になる。建物の損失は、各層に存在する各部位（躯体、仕上げ、建築設備など）を対象に、各部位の被害要因を組み合わせる様々な被害状態を合成し、各被害状態に対する損傷確率と復旧費用を用いて評価される。また、各部位の被害発生の有無は、応答値が耐力値を超過する損傷確率を用いて求められるが、従来手法では異なる部位間において損失発生の影響の強さを示す相関係数を、独立に設定して計算される場合が多かった。しかし、各部位に対して共通の応答指標（例えば、応答層間変形角など）、材料、強度評価式などを用いて応答値や耐力値を評価すると、異なる部位間においても応答値や耐力値に線形関係が生じ、損失発生にも影響が発生することになる。この場合、従来手法のように損失発生の影響を考慮しないで独立に設定して建物の損失を計算すると、損失のバラツキが損失発生の影響を考慮した場合よりも小さくなり、PMLを過少評価することになる。従って、最近の研究においても、応答

値の影響を考慮した建物の機能停止期間の評価<sup>2)</sup>や、地震動のバラツキの周期間影響が建物応答やフラジリティ評価に及ぼす影響などが検討され始めている。

本研究では、まず、建物各層に存在する各部位を対象に、異なる部位間において損失発生の影響の強さを示す相関係数を定式化し、建物の損失分布を各部位間における損失発生の影響係数を用いて評価する手法を開発した。つぎに、RC造10階建物を対象に、応答値と耐力値に任意の影響が生じたときに、提案手法のPML値と、損失発生の影響を独立または完全影響に設定した従来手法のPML値との比較を行い、提案手法の有意性について検討する。

### 2. 建物の地震リスク評価法

#### 2.1 地震リスクの評価フロー

建物の地震リスクは、建設地の地震危険度と建物の地震損失に基づき算定されるが、評価項目に存在する不確実性を考慮するため確率論的手法が採用されている。ここに、損失発生の影響を考慮した地震リスク評価フローをFig. 1に示す。Fig. 1において、速度距離減衰式は地震動の振幅が震源から遠ざかるにつれて小さくなる様子を強震記録を用いて定式化したもの、速度増幅率は基準地盤に対する地表面の速度振幅の増加率、モンテカルロシ

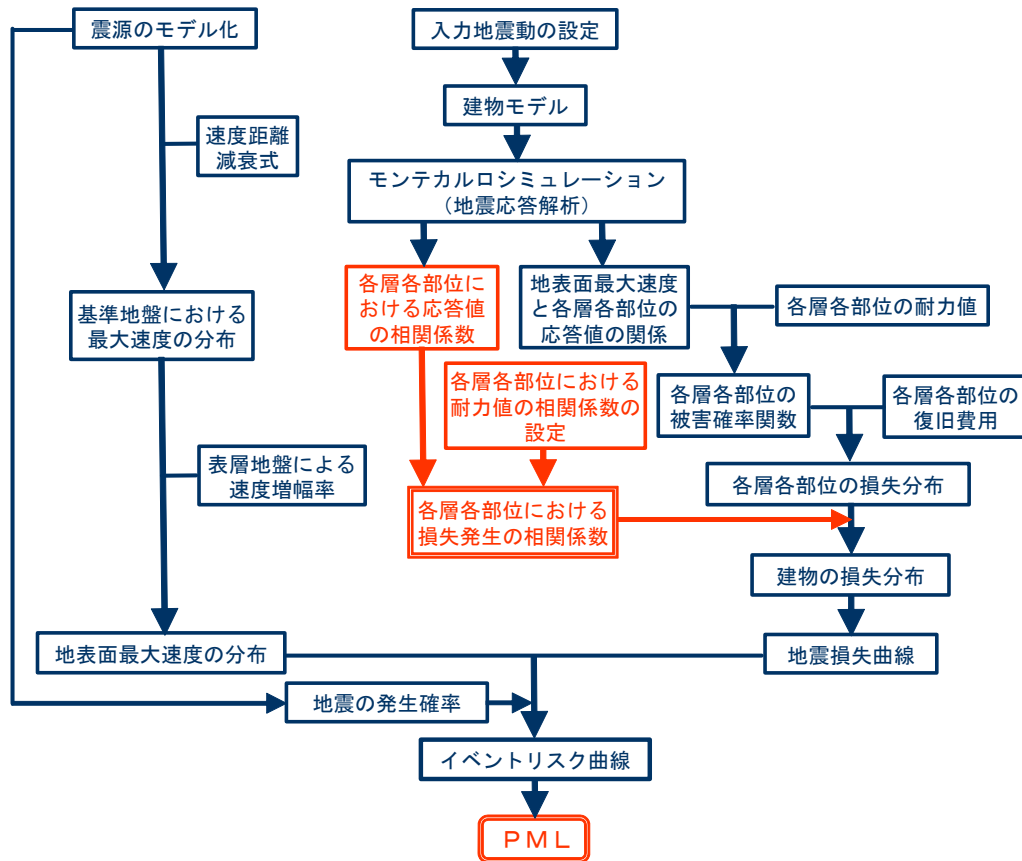


Fig. 1 地震リスクの評価フロー  
Flowchart on Evaluation of Seismic Risk

シミュレーションは与えられた確率分布に従う乱数を多数抽出して行う数値実験をそれぞれ示している。以下、それぞれの評価項目について説明する。

## 2.2 建設地における地表面最大速度

地震危険度を評価するときの震源モデル及び地震の発生確率を、「確率論的地震動予測地図」<sup>4)</sup>の手法に準拠して評価する。震源モデルは、主要活断層帯や海溝で発生する固有地震と、その他の地震（長期評価の対象となっていない地震）により構成されている。また、地震の発生確率は、活動間隔の確率分布としてBPT分布<sup>4)</sup>を用いるが、活動間隔が不明な地震はポアソン過程<sup>4)</sup>に基づき算定する。このとき、地震に対する基準地盤（S波速度で600m/s相当）における最大速度の中央値 $V_b$ を、司・翠川の速度距離減衰式<sup>5)</sup>を用いて計算し、工学的基盤（S波速度で400m/s相当）における最大速度 $V_0$ は、基準地盤における最大速度 $V_b$ に1.31を乗じて求める<sup>4)</sup>。

$$V_0 = 1.31 \times V_b \quad (1)$$

つぎに、工学的基盤における加速度応答スペクトルを設定し、地震動の位相特性を与えて目標スペクトルに適合するように模擬地震動を作成する。次元重複反射理論に基づき、工学的基盤の模擬地震動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動を作成する。このとき、工学的基盤での最大速度の大きさをパラ

メトリックに変化させて、工学的基盤の最大速度 $V_0$ と地表面での模擬地震動の最大速度 $V$ の関係を求め、両者の関係を累乗式を用いて回帰する。

$$V = a_1 \times V_0^{a_2} \quad (2)$$

ここに、 $a_1$ と $a_2$ は回帰係数である。

ところで、地表面最大速度を評価する際の不確定要因として、震源特性、伝播特性、地盤特性が存在する。このため、これらの不確定要因によるバラツキを対数正規分布でモデル化し、地表面最大速度の対数標準偏差 $\zeta_V$ として0.46を設定する<sup>4)</sup>。なお、基準地盤における最大速度の中央値 $V_b$ が25cm/s以上の領域では、最大速度に応じて対数標準偏差を0.345まで減少させる<sup>4)</sup>。このとき、地表面最大速度の対数平均値 $\lambda_V$ は、(1)式を(2)式に代入することで求められる。

$$\lambda_V = \ln a_1 + a_2 \times (\ln V_b + \ln 1.31) \quad (3)$$

## 2.3 各層各部位の被害確率関数

建物を、基礎固定の多質点等価せん断型にモデル化して地震応答解析を行い、建物各層の応答値を計算する。このとき、建物の降伏耐力と地震動特性のバラツキを反映して応答値を評価するため、建物の降伏耐力と地震動のサンプル値を抽出してモンテカルロシミュレーションを行う。降伏耐力のサンプル総数を $n_y$ 、地震動のサン

ブル総数を  $n_g$  とし、応答値を対数正規分布でモデル化して、地震動  $g$  (地表面最大速度を  $v_g$  とする) に対する応答値の中央値  $M_S(v_g)$  と応答値の対数標準偏差  $\zeta(v_g)$  を計算する。同様に、他の地震動  $g (g=1 \sim n_g)$  に対しても地表面最大速度  $v_g$  と応答値の中央値  $M_S(v_g)$  の関係ならびに地表面最大速度  $v_g$  と応答値の対数標準偏差  $\zeta(v_g)$  の関係を求め、両者の関係を次式を用いて回帰する。なお、応答値の対数標準偏差  $\zeta_S$  は、地表面最大速度  $V$  によらず一定値に設定する。

$$M_S = d_1 \times v^{d_2} \quad (4)$$

$$\zeta_S = c \quad (5)$$

ここに、 $v$  : 地表面最大速度

$d_1, d_2$  : 中央値の回帰係数

$c$  : 対数標準偏差の回帰係数

つぎに、限界値も対数正規分布でモデル化し、各層各部位ごとに地表面最大速度  $V$  に対する損傷確率  $P$  を評価する。応答値  $S$  が限界値  $R$  を超過すると被害が発生するため、限界状態関数  $Z$  は、限界値  $R$  から応答値  $S$  を減じることで求められる。ここに、 $Z \geq 0$  のとき被害無し、 $Z < 0$  のとき被害有りとなる。

$$Z = R - S \quad (6)$$

応答値と限界値が対数正規分布でモデル化されているので、(6)式の限界状態関数に対する信頼性指標  $\beta$ <sup>6)</sup> は次式で評価される。

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}} \quad (7)$$

ここに、 $\lambda_S, \zeta_S$  : 応答値の対数平均値, 対数標準偏差

$\lambda_R, \zeta_R$  : 限界値の対数平均値, 対数標準偏差

応答値の対数平均値  $\lambda_S$  は、(4)式の応答値の中央値  $M_S$  の自然対数をとることで求められる。

$$\lambda_S = \ln d_1 + d_2 \times \ln V \quad (8)$$

(8)式の応答値の対数平均値  $\lambda_S$  と、(5)式の応答値の対数標準偏差  $\zeta_S$  を(7)式に代入すると信頼性指標  $\beta$  が計算できる。従って、被災度 (例えば、小破、中破など) に対応した限界値の対数平均値  $\lambda_R$  と対数標準偏差  $\zeta_R$  を設定すると、被害確率関数  $P(v)$  は次式より評価できる。

$$P(v) = \Phi \left[ -\frac{\lambda_R - (\ln d_1 + d_2 \times \ln v)}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}} \right] \quad (9)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$  : 標準正規分布関数

## 2.4 各層各部位の損失分布

$i$  層  $k$  部位において、被災度  $L (L=1 \sim n_{ik})$  に対する損傷確率を  $P_{L,ik}(v)$ 、復旧費用を  $C_{L,ik}$  とすると、 $i$  層  $k$  部位における損失の平均値  $\mu_{ik}(v)$  と標準偏差  $\sigma_{ik}(v)$  は、(9)式の被害確率関数  $P(v)$  を用いて求められる。

$$\mu_{ik}(v) = \sum_{L=1}^{n_{ik}} \{ \Delta P_{L,ik}(v) \times C_{L,ik} \} \quad (10)$$

$$\sigma_{ik}(v) = \sqrt{\sum_{L=1}^{n_{ik}} \{ \Delta P_{L,ik}(v) \times (C_{L,ik} - \mu_{ik}(v))^2 \}} \quad (11)$$

ここに、 $C_{L,ik}$  は  $i$  層  $k$  部位の被災度  $L$  の復旧費用である。

また、 $\Delta P_{L,ik}(v)$  は、被災度  $L$  に応じて次式より求める。

$$\Delta P_{L,ik}(v) = P_{L,ik}(v) - P_{L+1,ik}(v) \quad (1 \leq L \leq n_{ik} - 1) \quad (12)$$

$$\Delta P_{L,ik}(v) = P_{L,ik}(v) \quad (L = n_{ik}) \quad (13)$$

## 2.5 建物の損失分布

建物全体の損失は、各層各部位の損失の和で評価されるので、地表面最大速度  $v$  に対する建物の損失の平均値  $\mu_c(v)$  と標準偏差  $\sigma_c(v)$  は次式より求められる。

$$\mu_c(v) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{m(i)} \mu_{ik}(v) \quad (14)$$

$$\sigma_c(v) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{m(i)} \sum_{l=1}^{m(j)} \{ \rho_{ik,jl} \times \sigma_{ik}(v) \times \sigma_{jl}(v) \}} \quad (15)$$

ここに、 $N$  : 建物の階数

$m(i)$  :  $i$  層における部位数の合計値

(15)式において、 $\rho_{ik,jl}$  は  $i$  層  $k$  部位と  $j$  層  $l$  部位の損失発生時の相関係数であり、予め設定された限界値の相関係数  $\rho_{R,ik,jl}$  と応答値の相関係数  $\rho_{S,ik,jl}$  を用いて評価できる。応答値と限界値がともに対数正規分布でモデル化され、正規変換された相関係数<sup>7)</sup> が応答値と限界値の相関係数を用いてそれぞれ求められるので、損失発生時の相関係数  $\rho_{ik,jl}$  は次式から評価できる。

$$\rho_{ik,jl} = \frac{\ln(1 + \rho_{R,ik,jl} \times V_{R,ik} \times V_{R,jl}) + \ln(1 + \rho_{S,ik,jl} \times V_{S,ik} \times V_{S,jl})}{\sqrt{\zeta_{R,ik}^2 + \zeta_{S,ik}^2} \times \sqrt{\zeta_{R,jl}^2 + \zeta_{S,jl}^2}} \quad (16)$$

ここに、 $\rho_{R,ik,jl}$  : 限界値の相関係数

$V_{R,ik}, V_{R,jl}$  : 限界値の変動係数

$\zeta_{R,ik}, \zeta_{R,jl}$  : 限界値の対数標準偏差

$\rho_{S,ik,jl}$  : 応答値の相関係数

$V_{S,ik}, V_{S,jl}$  : 応答値の変動係数

$\zeta_{S,ik}, \zeta_{S,jl}$  : 応答値の対数標準偏差

応答値の相関係数  $\rho_{S,ik,jl}$  は、地震動  $g (g=1 \sim n_g)$  ごとに計算された応答値の相関係数  $\rho_{S,ik,jl}(v_g)$  の平均値を用いて設定する。

$$\rho_{S,ik,jl} = \frac{1}{n_g} \sum_{g=1}^{n_g} \rho_{S,ik,jl}(v_g) \quad (17)$$

(17)式において、地震動  $g$  に対する応答値の相関係数  $\rho_{S,ik,jl}(v_g)$  は次式より計算される。

$$\rho_{S,ik,jl}(v_g) = \frac{E[(S_{ik} - \mu_{S,ik}(v_g)) \times (S_{jl} - \mu_{S,jl}(v_g))]}{\sigma_{S,ik}(v_g) \times \sigma_{S,jl}(v_g)} \quad (18)$$

ここに、 $\mu_{S,ik}(v_g), \mu_{S,jl}(v_g)$  : 応答値の平均値

$\sigma_{S,ik}(v_g), \sigma_{S,jl}(v_g)$  : 応答値の標準偏差

つぎに、地表面最大速度  $V$  に対する建物の損失の確率密度関数  $f(c|v)$  を、ベータ分布を用いてモデル化する。

$$f(c|v) = \frac{1}{B(q,r)} \times \frac{c^{q-1} \times (C_B - c)^{r-1}}{C_B^{q+r-1}} \quad (19)$$

ここに、 $C_B$  : 新築費用  
 $B(q,r)$  : ベータ関数

(19)式において、パラメータ  $q$  と  $r$  は、建物の損失の平均値  $\mu_c(v)$  と標準偏差  $\sigma_c(v)$  を用いて求められる。

$$q = \frac{(\mu_c(v) - C_B)}{C_B} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_c(v) \times (\mu_c(v) - C_B)}{\sigma_c(v)^2} \right\} \quad (20)$$

$$r = -\frac{\mu_c(v)}{C_B} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_c(v) \times (\mu_c(v) - C_B)}{\sigma_c(v)^2} \right\} \quad (21)$$

地表面最大速度  $V$  の条件付き損失の期待値  $E[C|v]$  は、地表面最大速度  $V$  の条件付き損失の確率密度関数  $f(c|v)$  を用いて求められる。

$$E[C|v] = \int_0^{C_B} \{c \times f(c|v)\} dc \quad (22)$$

一方、90%非超過確率に相当する損失  $C_M(v)$  は、次式を満足するように求められる。

$$\int_0^{C_M(v)} f(c|v) dc = 0.9 \quad (23)$$

このとき、期待値に相当する地震損失曲線  $SL_E(v)$  は、地表面最大速度を変化させて損失の期待値  $E[C|v]$  を連続的に計算することで評価できる。

$$SL_E(v) = E[C|v] \quad (24)$$

また、90%非超過確率に相当する地震損失曲線  $SL_M(v)$  は、地表面最大速度を変化させて損失の90%非超過確率に相当する  $C_M(v)$  を連続的に計算することにより評価される。

### 2.6 イベントリスク曲線

地震  $E$  の条件付き損失の確率密度関数  $f(c|E)$  は、地震  $E$  の条件付き地表面最大速度の確率密度関数  $f(v|E)$  で、地表面最大速度  $V$  の条件付き損失の確率密度関数  $f(c|v)$  を重み付け積分することで求められる。ここで、地震  $E$  の条件付き地表面最大速度の確率密度関数  $f(v|E)$  は、(3)式対数平均値  $\lambda_v$  と対数標準偏差  $\zeta_v$  を用いた対数正規分布でモデル化する。

$$f(c|E) = \int_0^\infty \{f(c|v) \times f(v|E)\} dv \quad (25)$$

地震  $E_i$  に対して、90%非超過確率に相当する損失  $C_M(E_i)$  は、次式を満足するように求める。

$$\int_0^{C_M(E_i)} f(c|E_i) dc = 0.9 \quad (26)$$

全ての地震  $E_i$  ( $i = 1 \sim M$ ) を対象に、90%非超過確率に相当する損失  $C_M(E_i)$  を計算し、 $C_M(E_i)$  を大きい順に並べ替える。このとき、損失  $C_M(E_m)$  の年超過確率  $P_m$  は、 $C_M(E_m)$  以上の損失が生じる全ての地震  $E_i$  ( $i = 1 \sim m$ ) の和事象として評価される。ここで、地震  $E_i$  の発生が互いに独立であると仮定すると、年超過確率  $P_m$  は次式から求められる。

Table1 表層地盤の地盤図  
 Soil Profile for Surface Layer

GL- (m)	土質区分	N値
0~6.3	埋土	1~6
6.3~11.6	砂混じりシルト	0~2
11.6~13.65	シルト混じり細砂	11~27
13.65~15.9	砂質シルト	9~11
15.9~16.4	細砂	38
16.4~19.3	砂礫	50以上
19.3~	固結シルト	50以上

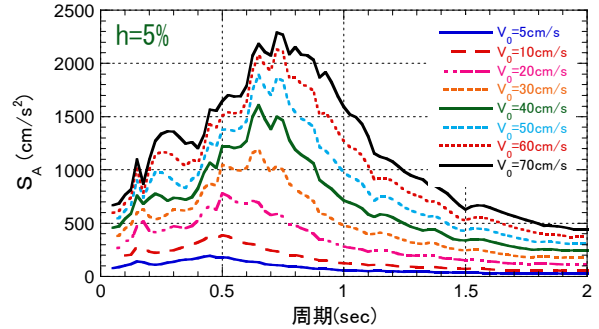


Fig.2 模擬地震動の加速度応答スペクトル  
 Acceleration Response Spectrum of Simulated Seismic Wave

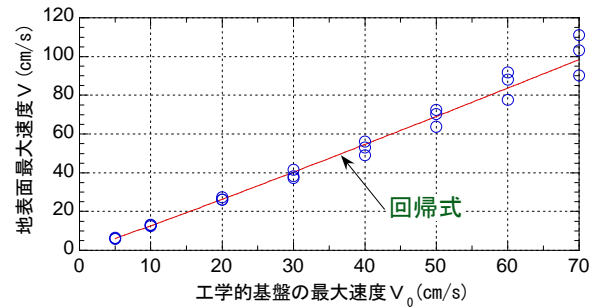


Fig.3 工学的基盤の最大速度と地表面最大速度の関係  
 Relationship between Peak Velocity at Bedrock and Peak Ground Velocity

$$P_m = 1 - \prod_{i=1}^m \{1 - P[E_i]\} \quad (27)$$

ここに、 $P[E_i]$  : 地震  $E_i$  の年発生確率

同様に、考慮する全ての地震  $E_i$  ( $i = 1 \sim M$ ) に対して、損失  $C_M(E_i)$  と年超過確率  $P_i$  を計算すると、イベントリスク曲線が評価できる。このとき、PMLは、イベントリスク曲線において、年超過確率  $P_k$  が  $1/475$  となる地震  $E_k$  に対する 90%非超過確率の損失率  $C_M(E_k)$  で評価できる。

### 3. 建物の地震リスクの評価例

提案手法と従来手法による地震リスク結果を比較するため、損失発生に相関係数を独立とした従来手法（独立）と、損失発生に相関係数を完全相関とした従来手法（完

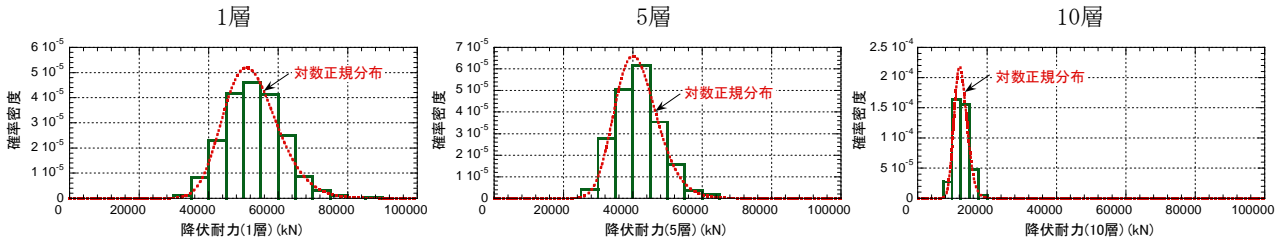


Fig. 4 降伏耐力の確率分布  
Distribution of Yield Strength at each story

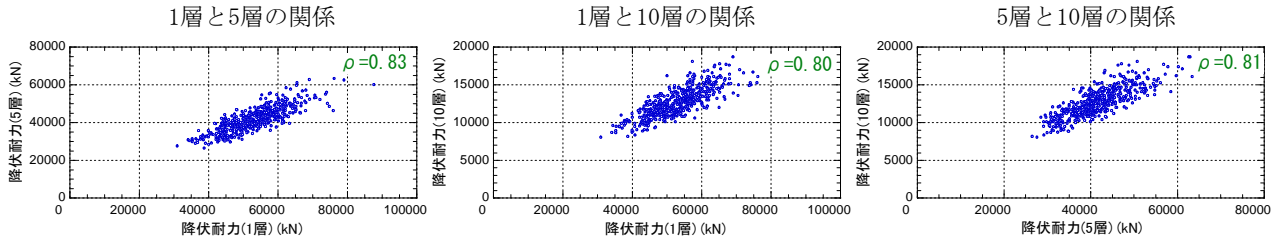


Fig. 5 降伏耐力の相関図  
Correlation of Yield Strength at each story

全相関)を設定する。このとき、各層の降伏耐力の間に相関が生じたとき、提案手法と従来手法による地震リスク結果を比較し、提案手法の有意性について検討する。

### 3.1 解析条件

3.1.1 工学的基盤の最大速度 建設地は、品川駅周辺(緯度: 35.625, 経度: 139.742)に設定し、工学的基盤(S波速度で400m/s相当)における最大速度 $V_0$ を、2.2節の手法により求める。

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として告示スペクトルを設定し、地震動の位相特性を与えて目標応答スペクトルに適合するように模擬地震動を作成する。ここで、地震動の位相特性として、乱数、エルセントロNS波、神戸海洋気象台NS波の3タイプを設定する。建設地の地盤データとしてTable1を設定し、N値、時代区分、土質区分のデータを用いてS波速度を推定する<sup>8)</sup>。つぎに、S波速度と地盤材料に応じて設定した剛性低下率と等価減衰定数<sup>9)</sup>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動を作成する。工学的基盤における最大速度 $V_0$ として、 $V_0 = 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ cm/sの8レベルを設定し、地震動の位相特性の3タイプと合わせ、地震動のサンプル総数 $n_g$ は24ケースとなる。地震動の位相特性がエルセントロNS波のとき、地表面での模擬地震動に対する加速度応答スペクトルはFig.2となる。このとき、工学的基盤の最大速度 $V_0$ と地表面最大速度 $V$ の関係はFig.3となり、両者の関係を累乗式により回帰すると次式となる。

$$V = 1.12 \times V_0^{1.05} \quad (28)$$

3.1.3 建物モデルの設定 建物モデルは、RC造10階とし、各層の階高は3.5m、各層の重量は17640kNとする。1階の降伏せん断力係数を0.3に設定して高さ方向

Table2 限界層間変形角の中央値と対数標準偏差  
Median and Lognormal Standard Deviation of Limit Story Deformation Angle

	小破	中破	大破	倒壊
中央値	1/150	1/75	1/50	1/30
対数標準偏差	0.2	0.2	0.2	0.2

Table3 新築費用に対する復旧費用の比率  
Ratio of Repair Cost with respect to Newly Built Cost

小破	中破	大破	倒壊
0.1	0.2	0.5	1.0

の降伏せん断力係数は $A_i$ 分布で与え、各層の降伏耐力 $Q_y$ を求める。復元力特性は、ひび割れ耐力 $Q_c$ を降伏耐力 $Q_y$ の1/3に、ひび割れ変形角を1/1500、降伏変形角を1/150に設定し、復元力特性はTakedaモデルで与える。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。

つぎに、降伏耐力を対数正規分布でモデル化し、降伏耐力の変動係数 $V_Q$ は、材料強度による変動係数0.02~0.03、曲げ降伏強度の評価式による変動係数0.12、実構造物に対する変動係数0.05を考慮し<sup>6)</sup>、 $V_Q = 0.15$ を設定する。各層間における降伏耐力の相関係数 $\rho_Q$ を0.8に設定し、対数正規分布に従い相互に相関を持つ複数の乱数をコレスキー分解を用いた手法<sup>10)</sup>により抽出する。ここで、降伏耐力のサンプル総数 $n_y$ は500ケースに設定する。このとき、1層、5層、10層の降伏耐力を対象に、抽出された乱数の確率分布をFig.4に示す。図中には、目標とした対数正規分布も示しているが、両者は良好な対応関係を示しており、目標とした対数正規分布に従う乱数が抽出されていることがわかる。つぎに、各層

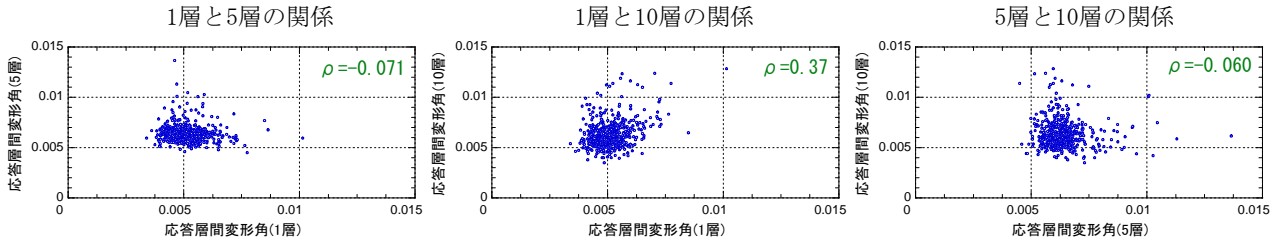


Fig. 6 応答層間変形角の相関図  
Correlation of Response Story Deformation Angle at each story

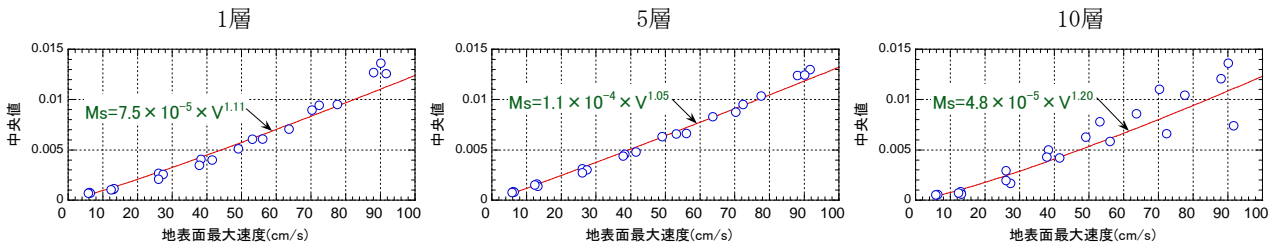


Fig. 7 応答層間変形角の中央値  
Median of Response Story Deformation Angle at each story

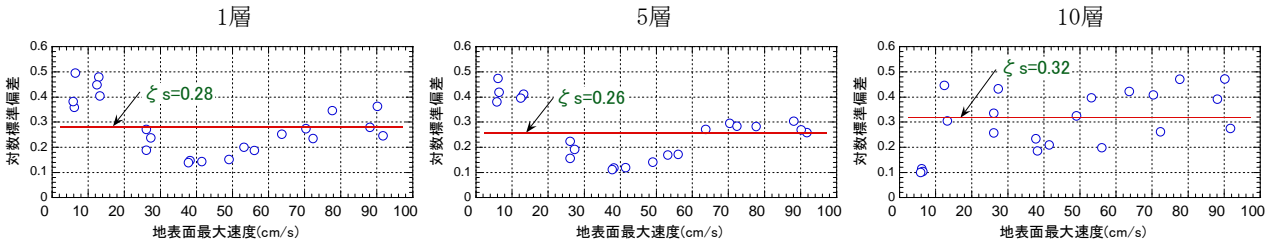


Fig. 8 応答層間変形角の対数標準偏差  
Lognormal Standard Deviation of Response Story Deformation Angle at each story

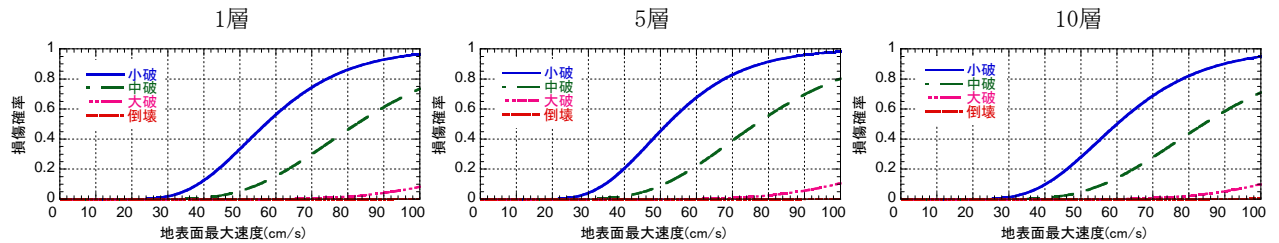


Fig.9 被害確率関数  
Seismic Fragility Functions at each story

間における降伏耐力の相関図として、1層と5層の関係、1層と10層の関係、5層と10層の関係をFig.5に示す。各層間における降伏耐力の相関係数はほぼ0.8となっており、目標とした相関係数 $\rho_Q = 0.8$ を満足していることがわかる。

一方、限界値の指標として限界層間変形角を採用し、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差をTable2で設定する。また、被災度に応じた新築費用に対する復旧費用の比率は、兵庫県南部地震における復旧費用データ<sup>11)</sup>を参考にTable3で設定する。

### 3.2 モンテカルロシミュレーション

地震動のサンプル総数 $n_g$ が24ケース、降伏耐力のサンプル総数 $n_y$ が500ケースなので、両者を組み合わせると計 $24 \times 500 = 12000$ ケースの地震応答解析を行い、各層の応答層間変形角の分布を求める。地震動の位相特性がエルセントロNS波で地表面最大速度が49.1cm/sのとき、応答層間変形角の相関図として、1層と5層の関係、1層と10層の関係、5層と10層の関係をFig.6に示す。1層と5層および5層と10層の相関係数はほぼゼロであるが、1層と10層の相関係数は0.37であり、1層と5層および5層と10層の場合と比較して相関係数の値が大きくなっていることがわかる。つぎに、地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係と、地表面最大速度と応答

Table4 損失発生の相関係数の設定  
Correlation Coefficient of Seismic Loss

提案手法	従来手法 (独立)	従来手法 (完全相関)
$\begin{bmatrix} 1 & 0.390 & \dots & 0.343 \\ 0.390 & 1 & \dots & 0.294 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.343 & 0.294 & \dots & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$

層間変形角の対数標準偏差の関係を計算し、両者の関係を(4)式と(5)式を用いて回帰する。1層、5層、10層を対象に、地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係をFig. 7に、地表面最大速度と応答層間変形角の対数標準偏差の関係をFig. 8に示す。応答層間変形角の対数標準偏差は、地表面最大速度の大きさによりバラツキがあるが、Fig. 7の地表面最大速度と中央値の関係のように規則性が見られないため、対数標準偏差は地表面最大速度によらず一定値で回帰する。

### 3.3 被害確率関数

各層の被害確率関数  $P(V)$  は、(9)式を用いて計算される。一例として、1層、5層、10層の被害確率関数を、Fig. 9に示す。Fig. 7の応答層間変形角の中央値とFig. 8の応答層間変形角の対数標準偏差が各層ともほぼ同一であり、かつTable2の限界層間変形角の中央値と対数標準偏差の設定が同一であるため、各層間における被害確率関数の差異は小さくなっていることがわかる。

### 3.4 損失発生の相関係数の設定

3.4.1 提案手法 応答層間変形角の相関係数を(18)式を用いて計算すると、応答層間変形角の相関係数行列  $[\rho_S]$  は(29)式となり、限界層間変形角の相関係数行列  $[\rho_R]$  は(30)式で設定する。

$$[\rho_S] = \begin{bmatrix} 1 & 0.169 & \dots & 0.134 \\ 0.169 & 1 & \dots & 0.061 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.134 & 0.061 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[\rho_R] = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & \dots & 0.8 \\ 0.8 & 1 & \dots & 0.8 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.8 & 0.8 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

このとき、損失発生相関係数を、(29)式と(30)式を(16)式に代入して計算すると、損失発生相関係数行列がTable4のように求められる。

3.4.2 従来手法 従来手法(独立)では、各層間における損失発生相関を独立に設定しているため、損失発生相関係数行列はTable4で与えられる。一方、従来手法(完全相関)では、各層間における損失発生相関を完全相関に設定しているため、損失発生相関係数行列

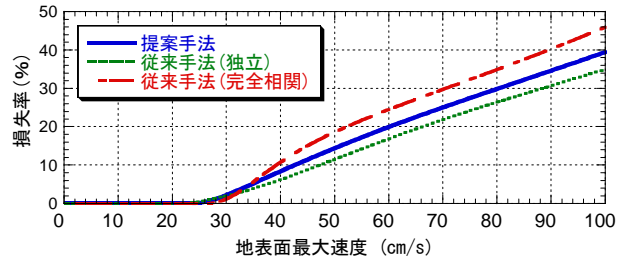


Fig. 10 地震損失曲線の比較  
Comparison of Seismic Loss Curves

はTable4で与えられる。

### 3.5 評価結果の比較

3.5.1 地震損失曲線の比較 提案手法と従来手法による地震損失曲線を、Fig. 10に示す。被害確率関数の設定が、Fig. 9のように同一であるにもかかわらず、損失発生相関係数の設定法により、地震損失曲線の形状が異なることがわかる。提案手法と比較して、地表面最大速度が約35cm/sよりも大きい領域において、従来手法(独立)は損失率を過少に、逆に従来手法(完全相関)は損失率を過大に評価しているといえる。

3.5.2 イベントリスク曲線の比較 提案手法と従来手法のイベントリスク曲線の比較をFig. 11に示す。年超過確率が小さくなるにつれて、提案手法と従来手法による損失率の差異が大きくなることがわかる。従って、損失発生に相関が生じた場合は、提案手法を用いることでより現実に即した地震リスク評価が可能になる。

3.5.3 リスク曲線の比較 建物の地震リスクを評価するとき、地震の発生確率を考慮して計算された損失の年超過確率を示すリスク曲線<sup>12)</sup>も用いられている。ここに、提案手法と従来手法のリスク曲線の比較をFig. 12に示す。年超過確率が約 $10^{-2}$ 以下の領域では、従来手法(独立)は提案手法と比較して損失率を過少に、従来手法(完全相関)は損失率を過大に評価しており、年超過確率が小さくなるに従い提案手法と従来手法の損失率の差異が大きくなることがわかる。さらに、Fig. 11のイベントリスク曲線と比較すると、リスク曲線の方が提案手法と従来手法の損失率の差異が大きくなる傾向にある。この原因として、リスク曲線の縦軸は損失の年超過確率で定義されるので、個々のシナリオ地震による損失の差異が累積されることが考えられる。

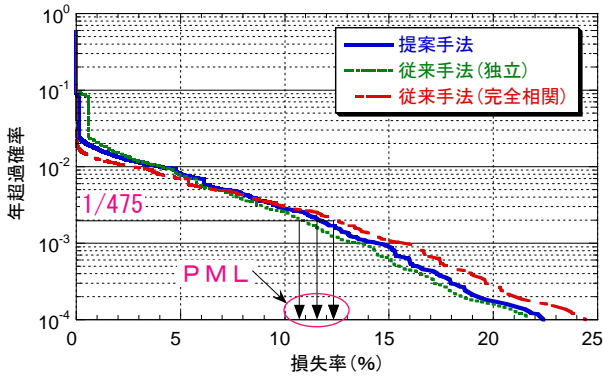


Fig. 11 イベントリスク曲線の比較  
Comparison of Event Risk Curves

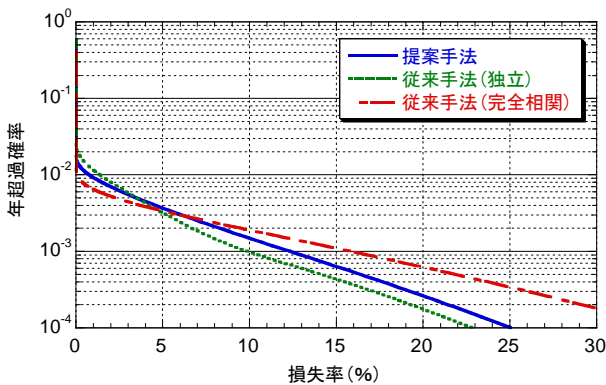


Fig. 12 リスク曲線の比較  
Comparison of Risk Curves

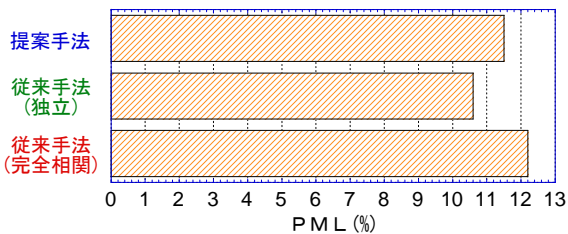


Fig. 13 PMLの比較  
Comparison of PML

3.5.4 PMLの比較 PMLは、年超過確率  $P_k$  が  $1/475$  となる地震  $E_k$  に対する損失  $C_M(E_k)$  で定義される。PML値を、Fig. 11のイベントリスク曲線より求め、提案手法と従来手法を比較してFig. 13に示す。提案手法と比較して、従来手法(独立)はPMLを約0.9%過少に、従来手法(完全相関)はPMLを約0.7%過大に評価しており、提案手法と従来手法のPMLに差異が生じていることがわかる。従って、損失発生に相関が生じた場合は、相関による影響を考慮した提案手法を用いて建物の地震リスクを評価する必要がある。

#### 4. まとめ

建物の地震リスクを、異なる部位間における損失発生の影響係数を用いて評価する手法を開発し、RC造10階建物を対象に提案手法と従来手法を用いて計算された地震損失曲線、イベントリスク曲線、リスク曲線の比較検討を行った。その結果、部位間に損失発生の影響が生じた場合は、従来手法(独立)は提案手法と比較してPMLを過少に、従来手法(完全相関)はPMLを過大に評価することが示された。このため、損失発生に相関が生じた場合は、相関を適切に考慮した提案手法を用いることでより現実に即した地震リスク評価が可能になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 建築・設備維持保全推進協会：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン(2007年版)，(2007)
- 2) 中村孝明，遠藤透：BCPへの貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，日本建築学会総合論文集 No. 7，pp. 87-92，(2009)
- 3) 坂本成弘，高木政美：地震動ばらつきが建物応答に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 247-248，(2009)
- 4) 防災科学技術研究所：全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，(2005)
- 5) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp. 63-70，(1999)
- 6) 日本建築学会：建築物の限界状態設計指針，(2002)
- 7) Armen Der Kiureghian and Pei-Ling Liu：Structural Reliability Under Incomplete Probability Information，Journal of Engineering Mechanics，Vol. 112，No. 1，ASCE，pp. 85-104，(1986)
- 8) 太田裕，後藤典俊：横波速度を推定するための実験式とその物理的背景，物理探査 第31巻 第1号，pp. 8-16，(1978)
- 9) 今津雅紀，福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第21回土質工学研究発表会講演集，pp. 509-512，(1986)
- 10) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，(1986)
- 11) 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，pp. 149-156，(2004)
- 12) 日本建築学会 建築物の安全性評価ガイドライン小委員会：地震リスク評価とリスクコミュニケーション，日本建築学会大会（東北）PD資料，(2009)