【カテゴリーIII】

日本建築学会構造系論文集　第583号, 23-30, 2004年9月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 583, 23-30, Sep., 2004

地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルに基づく建築構造物の地震リスク評価手法

SEISMIC RISK EVALUATION METHOD FOR BUILDING STRUCTURES BASED ON UNIFORM HAZARD RESPONSE SPECTRA CONSIDERING AMPLIFICATION OF SUBSURFACE STRUCTURE

石田　寛*, 源栄正人**
Hiroshi ISHIDA and Masato MOTOSAKA

This paper proposes a new method of evaluating the uniform hazard response spectra on the ground surface and estimating the seismic risk of a building structure based on the equivalent linearization method. The method is useful to examine the seismic risk management of a building structure, because it gives quantitatively the seismic risk of the building structure considering the seismic environment of the adjacent area, the amplification characteristics of the subsurface structure of the site and the restoring force characteristics of the building structure. Applying the method to a case study, it is found that in the seismic risk management of a building structure it is important to control the building parameters such as the yield shear coefficient according to the amplification characteristics of the subsurface structure.

Keywords: *Seismic hazard, Uniform hazard response spectrum, Amplification of subsurface structure, Seismic risk, Restoring force characteristics, Equivalent linearization method*
地震ハザード、一様ハザードスペクトル、地盤増幅、地震リスク、復元力特性、等価線形化法

1. はじめに

社会のいろいろな側面でリスク管理が問われている。地震防災対策や構造物の耐震設計も地震リスクを管理しようとするものに他ならない。ところで、リスク管理はリスクの存在を認知し、リスクを正しく評価することが前提である。建築構造物の地震リスクについて言えば、周辺地域の地震環境、敷地の地盤増幅および構造物の復元力特性を的確に把握して初めてその評価が可能となる。

従来の地震リスク評価では最大地動の確率論的評価結果、すなわち地震ハザード曲線を入力として、個々の建物の被害程度を求めるための地震損傷度曲線あるいは地域の被害率を評価するための地震被害率曲線を用いた評価が一般的である[たとえば1)]。これらの曲線は過去の地震被害データや専門家による工学的判断に基づくものであり、構造種別、用途、建設年代などの属性により層別されている。対象構造物の特性はこれらの曲線の中から適切なものを選択することにより反映させることになる。この手法は簡易であるが、考慮できる入力地震動特性や構造物特性に限界がある。また、対象構造物をモデル化し、地震動波形を用いた非線形応答解析を繰り返して地震損傷度曲線を評価する方法がある[たとえば2)]。この地震損傷度曲線を用いれば構造物特性を反映させた地震リスクが評価されるが、非線形応答解析に用いる地震動波形の選択に任意性があり、計算もやや煩雑となる。

本論文では、まず地震環境および地盤増幅を考慮して地表における応答スペクトルを確率論的に評価する手法を示し、次に地表の一様ハザードスペクトルを入力として応答スペクトル法による建築構造物の地震リスク評価手法を示す。

地表応答スペクトルの評価では、応答スペクトルの地盤増幅の評価が問題となる。地盤構造が既知の場合は、応答スペクトルとパワースペクトルの相互変換を利用する手法[3)]や地盤の多質点系モデルの低次モード定数を用いた手法[4)]などにより基盤応答スペクトルから地表応答スペクトルが評価される。本論文では地震ハザード評価における多数の繰り返し計算に耐え、かつ十分な精度を有する新たな手法を示す。この手法では、対象地盤とその地表に固定した一質点系からなる仮想の系を設定し、モード解析によりこの質点の最大応答値すなわち地表応答スペクトル値を評価する。地盤の非線形性は等価線形化法により考慮する。

また、構造物の復元力特性に基づく応答評価は等価線形化法に基づいて行う。確率論的に評価された応答スペクトルを入力とする場合には、構造物の等価固有周期が変化するため、この周期範囲における応答スペクトルの確率構造を考慮する必要がある。本論文では、最大応答値の確率論的評価に関する新たな手法を試み、最終的には応答変形角の50年超過確率を示す地震リスク曲線を求める。提案手法全体の概略フローを図1に示す。

この手法の特長の一つは、応答スペクトルで表された入力に対して

* 鹿島技術研究所　上席研究員・工修
** 東北大学大学院工学研究科　教授・工博

Supervisory Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Eng.
Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

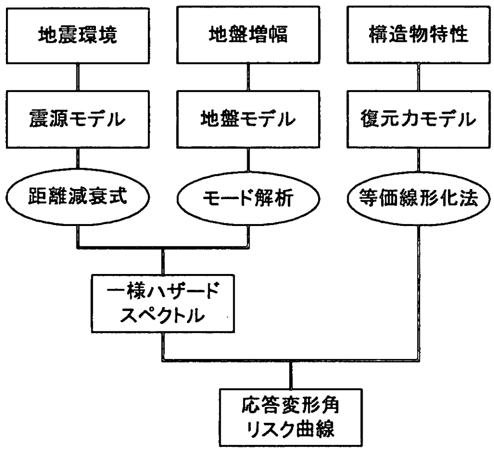

図1　提案手法の概略フロー

等価線形化法により構造物の応答を評価しているため、現行設計法と整合していることである。したがって、ここで提案する手法による結果は設計にフィードバックすることが容易である。また、震源から構造物に至るまでの対象構造物固有の条件を具体的に考慮することができるため、地震リスク低減の観点から最適な地震対策を計画するために有効である。たとえば、ある構造物の地震リスクを低減するためにはどのような耐震補強を行うべきかを周辺の地震環境と敷地の地盤構造に基づいて定量的に検討することができる。なお、本論文では構造物の応答値とその超過確率の関係を地震リスクと呼ぶ。

適用例では、仮想のケースについて地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルおよびそれを入力とするRC造建物の地震リスク評価を行い、地震環境、地盤増幅および構造物特性が地震リスクに与える影響について検討する。また、その結果に基づき、地震リスク管理の観点から地盤増幅特性に応じた構造物特性の制御について考察する。

2. 地表応答スペクトルの確率論的評価

(1) 確率論的震源モデル

建物の地震リスク評価を行うため、一般的な震源モデルとして活断層と背景的地震活動を考慮する。活断層は定常ポアソン過程、固有のマグニチュードおよび確定した等価震源距離[5]により規定する。背景的地震活動は地震活動域（地震活動特性が一様と見なされる領域）において空間的には一様ランダムに、時間的には定常ポアソン過程に従って発生する点震源の集合としてモデル化する。マグニチュードの発生頻度はグーテンベルグ・リヒターの式に従うと仮定する。

(2) 応答スペクトルに対する地盤増幅特性

都市周辺地域においては深い地下構造および表層地盤に関する情報が蓄積されつつある。また、入力地震動を有効に評価するためには対象建物の敷地の実際の地盤構造を用いることが重要である。したがって、本論文では地震基盤以浅の地盤構造は既知のものとして確定的に取り扱う。

1) 地表応答スペクトルの算定

地表地震動の応答スペクトルは、地表に固定した一質点系の最大応答値をこの一質点系の固有周期を動かして求め、プロットしたものと解釈できる。したがって、基盤地震動が応答スペクトルで与えられるとき、地盤とその地表に固定した一質点系からなる系を多質点系によりモデル化し、応答スペクトル法によりこの系の頂部の最大応答値を求めれば、その一質点系の固有周期と減衰定数に対応する地表地震動の応答スペクトル値が得られることになる。地表に固定した一質点系と成層地盤からなる全体系およびその多質点系モデルを図2に示す。地表に固定した一質点系の固有周期 T_0 と減衰定数 h_0 は求めようとする応答スペクトル値に応じて設定する。ここで、質量 m_0 は地盤系に影響を与えない程度に小さくする必要がある。

地盤系のモデル化では、源栄ら[6]の方法に基づき、入力地震動が基盤露頭で与えられることを想定し、粘性境界により成層地盤を基盤と連結した。また、地盤剛性はモード解析が可能となるように複素剛性により表した。このモデルに対して複素固有値解析を行えば、複素固有値 λ_s （ s はモード次数を示す）と複素固有ベクトル $\{u_s\}$ が求められ、さらに λ_s より固有円振動数 ω_s およびモード減衰定数 h_s が得られる。このとき、基盤露頭での加速度波形 $\ddot{x}(t)$ に対する各質点の応答は

$$\{y\}=\sum_s \beta_s\{u_s\}q_s(t) \tag{1}$$

と展開できる[7]。ここに、β_s は s 次の複素刺激係数であり、

$$\beta_s=\frac{\{u_s\}^T[M]\{1\}}{2\{u_s\}^T[M]\{u_s\}}\circ\frac{1}{1+i(\varepsilon_s-\varepsilon'_s)} \tag{2a}$$

$$\varepsilon_s=\frac{h_s}{\sqrt{1-h_s^2}},\quad \varepsilon'_s=\frac{\{u_s\}^T[C]\{1\}}{2\omega'_s\{u_s\}^T[M]\{u_s\}} \tag{2b}$$

$$\omega'_s=\omega_s\sqrt{1-h_s^2} \tag{2c}$$

と書ける。ここに、$[M]$ および $[C]$ はそれぞれ多質点系モデルの質量マトリクスおよび減衰マトリクスである。また、$q_s(t)$ は複素時刻関数であり、

$$q_s(t)=-\frac{1}{\omega'_s}\int_0^t\ddot{x}(\tau)\exp\left[-h_s\omega_s(t-\tau)\right]\left(\sin\omega'_s(t-\tau)\mp i\cos\omega'_s(t-\tau)\right)d\tau \tag{3}$$

と書ける。上式の複号は共役を表すものではなく、固有値の虚部の符号により異なる符号になることを表す。ここで、式(3)を実部と虚部に分けて、

$$q_s(t)=q_{sR}(t)\mp iq_{sI}(t)=q_{sR}(t)\mp\frac{i}{\omega'_s}\left[\dot{q}_{sR}(t)+h_s\omega_s q_{sR}(t)\right] \tag{4}$$

と展開し[8]、両辺をフーリエ変換すれば、

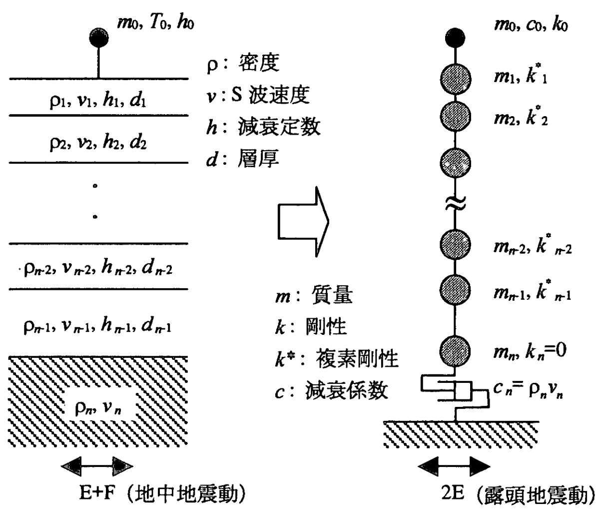

図2　地表に一質点系をもつ成層地盤のモデル化

$$Q_s(\omega)=Q_{sR}(\omega)\mp\frac{i}{\omega_s'}\left[i\omega Q_{sR}(\omega)+h_s\omega_s Q_{sR}(\omega)\right]\approx\kappa_s Q_{sR}(\omega) \tag{5a}$$

$$\kappa_s=\begin{cases}2-i\dfrac{h_s}{\sqrt{1-h_s^2}}, & \text{if } \lambda_{sI}>0\\ i\dfrac{h_s}{\sqrt{1-h_s^2}}, & \text{if } \lambda_{sI}<0\end{cases} \tag{5b}$$

と近似できる。ここに、λ_{sI} はs次固有値の虚部である。なお、式(5a)では $\omega Q_{sR}=\omega_s Q_{sR}$ とおいた。以上より、

$$q_s(t)=\kappa_s q_{sR}(t) \tag{6}$$

が得られる。ここで、文献8)を参考に、$\{u_s\}$ が複素ベクトルであることを考慮して、式(1)による応答加速度最大値の評価式を誘導すると

$$|\ddot{y}_0+\ddot{x}_0|_{\max}=\left[\sum_s\sum_r\gamma_{sr}|b_s||b_r|s_A(T_s,h_s)s_A(T_r,h_r)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{7a}$$

$$\gamma_{sr}=\frac{\int_0^\infty\mathrm{Re}\left[b_s b_r^*(\omega)H_s(\omega)H_r^*(\omega)\right]d\omega}{\left(\int_0^\infty|b_s|^2|H_s(\omega)|^2d\omega\int_0^\infty|b_r|^2|H_r(\omega)|^2d\omega\right)^{\frac{1}{2}}} \tag{7b}$$

$$H_s(\omega)=\frac{1}{\omega_s^2-\omega^2+2ih_s\omega_s\omega} \tag{7c}$$

$$b_s=\beta_s u_{s0}\kappa_s \tag{7d}$$

を得る。ここに、u_{s0} は地表面に固定された一質点系に対応する固有モードの成分、$s_A(T,h)$ は固有周期 T および減衰定数 h の基盤での加速度応答スペクトル値、* は共役を表す。

しかし、式(7a)の計算が煩雑であるため、仮に $b_s b_r^*$ を実数と見なせば、文献8)より近似式

$$|\ddot{y}_0+\ddot{x}|_{\max}=\left|\sum_s\sum_r b_s b_r^*\rho_{sr}s_A(T_s,h_s)s_A(T_r,h_r)\right|^{\frac{1}{2}} \tag{8a}$$

$$\rho_{sr}=\frac{8\sqrt{h_s h_r}(h_s+th_r)t^{3/2}}{(1-t^2)^2+4h_s h_r t(1+t^2)+4(h_s^2+h_r^2)t^2},\quad t=\frac{\omega_r}{\omega_s} \tag{8b}$$

が得られ、計算がかなり容易になる。ただし、式(8a)の右辺は絶対値を取って実数化してある。この近似の有効性は後述の適用例で示す。なお、式(8b)はCQCによるモード間の相関係数である[9]。

以上より、地表面に固定された一質点系の最大応答加速度、すなわち固有周期 T_0、減衰定数 h_0 の地表応答スペクトル値が求められ、これらをパラメトリックに変化させれば、求めようとする地表応答スペクトルが得られる。

2) 非線形応答の考慮

表層地盤における非線形応答時の等価な地盤定数（S波速度、減衰定数）は上記の地表応答スペクトルの評価と同様の手法により求めることができる[6]。図2に示したモデルから地表面の一質点系を除いた多質点系モデルを作成し、各層における変位を

$$|\delta_i|_{\max}=\left|\sum_s\sum_r(b_{si}-b_{si+1})(b_{ri}-b_{ri+1})^*\rho_{sr}s_D(T_s,h_s)s_D(T_r,h_r)\right|^{\frac{1}{2}},\ i=1,\cdots,n-1 \tag{9}$$

により求める。ここに、$s_D(T,h)$ は基盤での変位応答スペクトル、

$$b_{si}=\beta_s u_{si}\kappa_s \tag{10}$$

であり、u_{si} はs次モードの第 i 層の成分である。これを層厚 d_i で除して最大歪を求め、その65%を有効歪とする。さらに、各層の有効歪に対応するせん断剛性比および減衰定数を動的変形特性曲線より求め、新たな等価せん断剛性と等価減衰定数により質点系を更新する。この操作を有効歪が安定するまで繰り返し、最終的な等価せん断波速度と等価減衰定数を得る。以上のようにして求められた等価な地盤モデルに対して上記の手法を適用すれば、地盤の非線形応答を考慮した地表応答スペクトルが求められる。

(3) 地表における一様ハザードスペクトル

マグニチュード $M=m$、等価震源距離 $X=x$ の地震が発生したとき、ある周期の地表応答スペクトル値 s の確率密度関数は、対数正規分布を仮定すれば、

$$f_{SM,X}(s\,|\,m,x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta s}\exp\left[-\frac{\left(\ln s-\ln\tilde{s}(m,x)\right)^2}{2\beta^2}\right] \tag{11}$$

と表される。ここに、$\tilde{s}(m,x)$ は中央値であり、β は対数標準偏差である。中央値 $\tilde{s}(m,x)$ は $(M=m,X=x)$ の地震による $s_A(T,h)$ を用いて、式(7a)あるいは式(8a)により与えられる。したがって、ある M 以上の地震が年平均発生頻度 ν_0 の定常ポアソン過程に従って発生するとき、t 年間における地表応答スペクトル値 S の超過確率は

$$P\{S>s\,|\,t\}=1-\exp\left[-\nu_S(s)t\right] \tag{12a}$$

$$\nu_S(s)=\nu_0\iint\int_s^\infty f_{SM,X}(y\,|\,m,x)f_{M,X}(m,x)\,dydmdx \tag{12b}$$

と求められる。ここに、$f_{M,X}(m,x)$ は活断層と地震活動域を統合した M と X の結合確率密度関数である。また、ある超過確率 p_0 を指定し、各周期でこの超過確率になる s を求めれば、超過確率 p_0 に対する一様ハザードスペクトルが得られる。

3. 構造物の応答値の確率論的評価

(1) 等価線形化法による最大応答変位

ある復元力特性をもつ一質点系にある地震動が入力したとき、等価線形化法を用いれば、最大応答変位 d は

$$s(T_e(d),h_e(d))=\left(\frac{2\pi}{T_e(d)}\right)^2 d \tag{13}$$

を解いて求められる。ここに、$T_e(d)$ および $h_e(d)$ はそれぞれ等価固有周期および等価減衰定数であり、d の関数として表される。等価固有周期 $T_e(d)$ は復元力特性により異なるが、$h_e(d)$ は一般に

$$h_e(d)=\alpha\left(1-\sqrt{\frac{\delta_Y}{d}}\right)+h_Y,\quad d\ge\delta_Y \tag{14}$$

と表される[7]。ここに、δ_Y は降伏変位、h_Y は降伏時の減衰定数、α は適当な係数である。

本論文では簡単のため、図3 に示すような完全弾塑性型の復元力特性をもつ一質点系を考える。この場合の等価固有周期は

$$T_e(d)=\sqrt{\frac{d}{\delta_Y}}T_Y,\quad d\ge\delta_Y \tag{15}$$

と表される。ここに、T_Y は降伏時の固有周期である。入力地震動が減衰定数5%の応答スペクトルで与えられることを想定し、さらに降伏せん断力係数 c_Y を用いて書き換えると、式(13)は

$$s(T_e(d),0.05)=\left(\frac{2\pi}{T_e(d)}\right)^2\frac{d}{F_h(h_e(d))}=\frac{gc_Y}{F_h(h_e(d))} \tag{16a}$$

$$F_h(h_e)=\frac{1.5}{1+10h_e} \tag{16b}$$

と書ける。ここに、g は重力加速度、$F_h(h)$ は減衰定数の変換係数[7]である。式(16a)は $T_e(d)$ および $h_e(d)$ の代わりに T_Y と h_Y を用いれば、降伏変位以下の d に対しても成り立つ。そこで、式(16a)右辺を

$$a(d)=\begin{cases}\dfrac{2}{3}gc_Y\left[1+10h_Y\right]\dfrac{d}{\delta_Y}, & \text{if } d\le\delta_Y\\ \dfrac{2}{3}gc_Y\left[1+10\left\{\alpha\left(1-\sqrt{\dfrac{\delta_Y}{d}}\right)+h_Y\right\}\right], & \text{if } d>\delta_Y\end{cases}\tag{17}$$

と展開すると、式(16a)を満足する d は減衰定数5%の加速度応答スペクトル $s(T,0.05)$ と弾塑性応答を規定する関数 $a(d)$ の交点により求められる。自然界の地震動の加速度応答スペクトル値は d の増大、すなわち T_e の増大とともに大局的には減少するのに対し、関数 $a(d)$ は d の増大とともに単調に増大するため、必ず両者の交点が存在する。図4に $s(T,0.05)$ と関数 $a(d)$ の交点により d が求められる様子を示す。図4の左図は横軸に減衰定数5%のときの応答変位をとったものであり、右図は等価固有周期をとったものである。それぞれ弾塑性応答による変位および周期の変化を見る場合に適している。

ここで、問題となるのは交点が複数存在する可能性があるということである。地盤増幅等により凹凸をもつ応答スペクトルではその可能性がある。その場合は、複数の交点のうち最も変位の小さい（周期の短い）交点が建物の最大応答変位を与えると仮定する。なぜなら、最初の交点から次の交点までの周期帯域では $s(T,0.05)<a(d)$ となり、地震動にはそれ以上の塑性化を実現するだけのエネルギーがないと見なされるからである。ただし、この点についてはより詳細な検討が必要であると考えられる。

(2) 最大応答変位の超過確率

マグニチュード m と等価震源距離 x が与えられたときの入力地震動の応答スペクトルを確率変数 $S(T,0.05;m,x)$、最大応答変位を確率変数 D で表す。確率変数 D がある値 d を超える確率は、

$$P\{D>d\mid m,x\}=\begin{cases}P\{S(T_Y,0.05;m,x)>a(d)\}, & \text{if } d\le\delta_Y\\ P\{S(T,0.05;m,x)>a(d);T\le T_e(d)\}, & \text{if } d>\delta_Y\end{cases}\tag{18}$$

と表される。式(18)右辺 $d>\delta_Y$ の場合は周期領域 $T\le T_Y\sqrt{d/\delta_Y}$ において常に $S(T,0.05;m,x)>a(d)$ が成り立つ確率を表す。これは変位最小の交点が最大応答変位 d を超える確率であり、言い換えれば等価固有周期が $T_Y\sqrt{d/\delta_Y}$ を超える確率である。そこで、周期を $T_Y\le T_1<\cdots<T_n\le T_Y\sqrt{d/\delta_Y}$ と離散化すると

$$P\{D>d\mid m,x\}=P\{S_1>a_1,\cdots,S_n>a_n\},\quad d>\delta_Y\tag{19a}$$

$$S(T_i,0.05;m,x)=S_i,\quad a\left(\delta_Y\left(\frac{T_i}{T_Y}\right)^2\right)=a_i,\quad i=1,\cdots,n\tag{19b}$$

と書ける。式(19a)の確率を評価するためには、各周期の加速度応答スペクトル値の結合確率密度関数が必要となる。

ここで、マグニチュード m と等価震源距離 x が与えられたとき、各周期の応答スペクトル値の結合確率は対数正規であると仮定すれば、この条件下における最大応答変位の超過確率は

$$P(D>d\mid m,x)=\int_{a_n}^{\infty}\cdots\int_{a_1}^{\infty}f_{\ln SM,X}(\ln \mathrm{s}\mid m,x)\,ds_1\cdots ds_n,\quad d>\delta_Y\tag{20a}$$

$$f_{\ln SM,X}(\ln \mathrm{s}\mid m,x)=\frac{1}{(2\pi)^{\frac{n+1}{2}}|C|^{\frac{1}{2}}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\ln \mathrm{s}-\ln\tilde{\mathrm{s}}(m,x)\right)^T C^{-1}\left(\ln \mathrm{s}-\ln\tilde{\mathrm{s}}(m,x)\right)\right]\tag{20b}$$

と求められる[10]。ここに、$\ln \mathrm{s}$ は $\ln S_i\ (i=1,\cdots,n)$ の実現値を要素とするベクトル、$\ln\tilde{\mathrm{s}}(m,x)$ は $(M=m,X=x)$ のときの $\ln S_i$ の期待値を要素とするベクトル、C は $\ln S_i$ の共分散行列である。

最後に、地震の発生時系列は年平均発生頻度 ν_0 の定常ポアソン過程に従うと仮定すると、t 年間における最大応答変位の超過確率は、式(18)を用いて

$$P\{D>d;t\}=1-\exp\left[-\nu_D(d)t\right]\tag{21a}$$

$$\nu_D(d)=\nu_0\iint P\{D>d\mid m,x\}f_{M,X}(m,x)\,dmdx\tag{21b}$$

と求められる。

(3) 応答スペクトル値の相関性の単純化

石田[11] は $(M=m,X=x)$ の地震による岩盤上における応答スペクトル値について、異なる周期間の相関性を検討している。図5にこの検討による周期比と相関係数の関係を示す。これによれば、周期 T_i と T_j における応答スペクトル値の対数の相関係数は、これらの周期が 0.1s より長く、周期比が概ね 0.1 から 10 までの範囲では

$$r_{ij}=1-\theta\left|\log\frac{T_i}{T_j}\right|\tag{22}$$

とモデル化できる。ここに、θ は比例係数である。図5に示したように $\theta=0.7$ とおき、降伏時の周期が塑性化により2倍になる場合を想定して周期比を2とおくと相関係数は約0.8となり、かなり大きい相関性を有することがわかる。そこで、本論文では簡単のため正の完全相関（$r_{ij}=1$）を仮定する。このとき、式(19a)は

$$P\{D>d\mid m,x\}=\min_i P\{S_i>a_i\},\quad d>\delta_Y\tag{23}$$

により求められる。したがって、式(21a)および式(21b)は

$$P\{D>d;t\}=\min_i\left(1-\exp\left[-\nu_{S_i}(a_i)t\right]\right),\quad d>\delta_Y\tag{24a}$$

$$\nu_{S_i}(a_i)=\nu_0\iint P\{S_i>a_i\}f_{M,X}(m,x)\,dmdx\tag{24b}$$

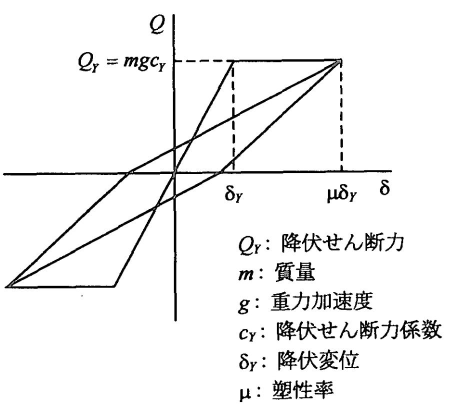

図３　建物の復元力特性

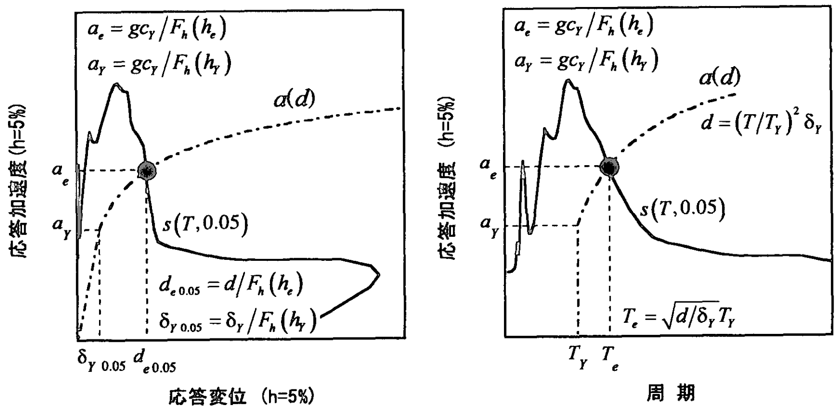

図４　入力地震動の応答スペクトルと最大応答変位の関係

と書ける。式(24a)の右辺は各周期の応答スペクトル値のハザード曲線あるいは一様ハザードスペクトルから直接求めることができる。なお、正の完全相関を仮定すると超過確率は大きめに評価される。

ここで、一質点系の高さを H とおくと、t 年間における応答変形角 R の超過確率は

$$P\{R>r;t\}=P\{D>rH;t\} \qquad (25)$$

により求められる。横軸に応答変形角、縦軸に超過確率をとり、式(25)をプロットすれば応答変形角に関するリスク曲線が得られる。

4. 適用例

(1) 地表での一様ハザードスペクトル

適用例における震源モデル、地盤モデルおよび建物モデルの模式的な位置関係を図6に示す。

震源は対象地点近傍の活断層および直下に広がる地震活動域を想定する。震源モデルの諸元を表1に示す。地震の規模と等価震源距離が与えられたとき、地震基盤における各周期の加速度応答スペクトル値の中央値は Noda et al.[12]による距離減衰式により求めた。また、式(11)における対数標準偏差 β は、地盤の非線形応答の影響を考慮して設定すべきであるが、ここでは文献12)による基盤での値を参考に各周期において 0.5 を仮定した。

地震基盤以浅の地盤構造は表2に示すS-1からS-5までの層厚のみが異なる5つのモデルを想定する。非線形応答はNo.1の層に対してのみ考慮する。仮定した剛性と減衰定数のひずみ依存性を図7に示す[13]。

まず、提案する評価手法による地表応答スペクトルと一次元重複反射理論に基づく結果を比較する。入力は、内陸で発生した M6.4 およびプレート境界で発生した M8.0 の地震の際に表層地盤の影響が比較的小さいと考えられる観測地点で得られた記録を用いた。これらの記録を地震基盤露頭の地震動として表 2 に示す No.4 の層に入力し、地表加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を求めた。地盤モデル S-1、S-3 および S-5 について式(7a)および式(8a)による推定結果を入力の加速度応答スペクトルとともに図 8 に示す。これらの例では、2 種類の式による推定結果の違いは非常に小さく、またいずれも一次元重複反射理論に基づく地表応答スペクトルを概ね再現していることが分かる。したがって、これ以降は計算が簡易な式(8a)を用いる。

表1の震源モデルおよび表2の地盤モデルに対して提案手法を適用し、地表での一様ハザードスペクトルを算定した。地盤のモデル化では少なくとも 0.1s の成分は考慮できるように層を分割した。各地盤モデルの地表における一様ハザードスペクトルを図9に示す。地盤モデルS-3については参考のために非線形応答を考慮しない場合も示す。地盤モデルS-2およびS-3の結果を見ると、非線形応答の影響により小さな超過確率に対して応答が比較的小さく抑えられると同時に、ピークの周期が延びていることがわかる。

(2) RC 造建物の地震リスク曲線

建物モデルは文献14)および15)を参考に新耐震設計法以前のRC造建物を想定して3種類を設定した。さらに、降伏せん断力係数 c_Y については上記文献による設定値を中央値としてそれぞれ2つのケースを追加し、同一規模の建物に対して3種類の c_Y を考慮した。したがって、設定した建物モデルは計9つである。表3にこれらのモデルの諸元を示す。中低層RC造建物の c_Y の分布を検討した文献16)によれば、表3の c_Y の値は全体的にやや小さめであるが、建物階数ごとの c_Y のばらつきが 0.5 程度とかなり大きく、表3における c_Y の設定値はいずれも十分あり得るケースと考えられる。また、減衰に関しては式(14)において $\alpha=0.25$ 、$h_Y=0.05$ とおく。以上の条件で各地盤モデルにおける9つ

表 1　震源モデル

震源	発生頻度	規模	距離／広がり	発生過程
活断層	5×10^{-4}/年	M 7.5	$x=15$km	ポアソン過程
地震活動域	1×10^{-5}/km^2/年	b 値 = 1.0 5.0≦M≦7.2	半径 100km 深さ 7.5km	ポアソン過程

表 2　地盤モデル

No.	Vs (m/s)	ρ (g/cm^3)	h	非線形	d(m) S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
1	200	1.7	0.02	○	0	10	40	0	0
2	500	1.9	0.01	—	40	40	40	80	160
3	1300	2.1	0.005	—	100	100	100	200	200
4	2200	2.5	—	—	—	—	—	—	—

表 3　建物モデル

諸元	B-1			B-2			B-3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
階数	2-5F			6-7F			8-12F		
代表高さ (m)	7			13			20		
降伏変形角	1/200			1/150			1/150		
降伏せん断力係数	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2
初期固有周期 (s)	0.40	0.45	0.53	0.71	0.84	1.1	1.2	1.3	1.6

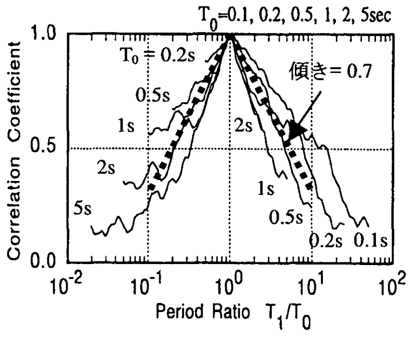

図 5　周期間の応答スペクトル値の相関性

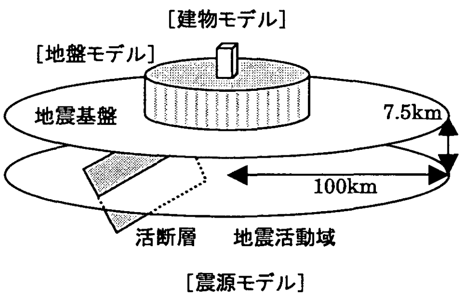

図 6　適用例における震源・地盤・建物

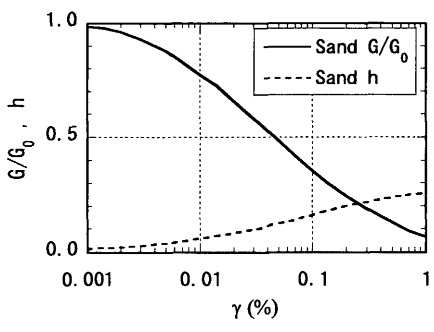

図 7　剛性と減衰定数のひずみ依存性

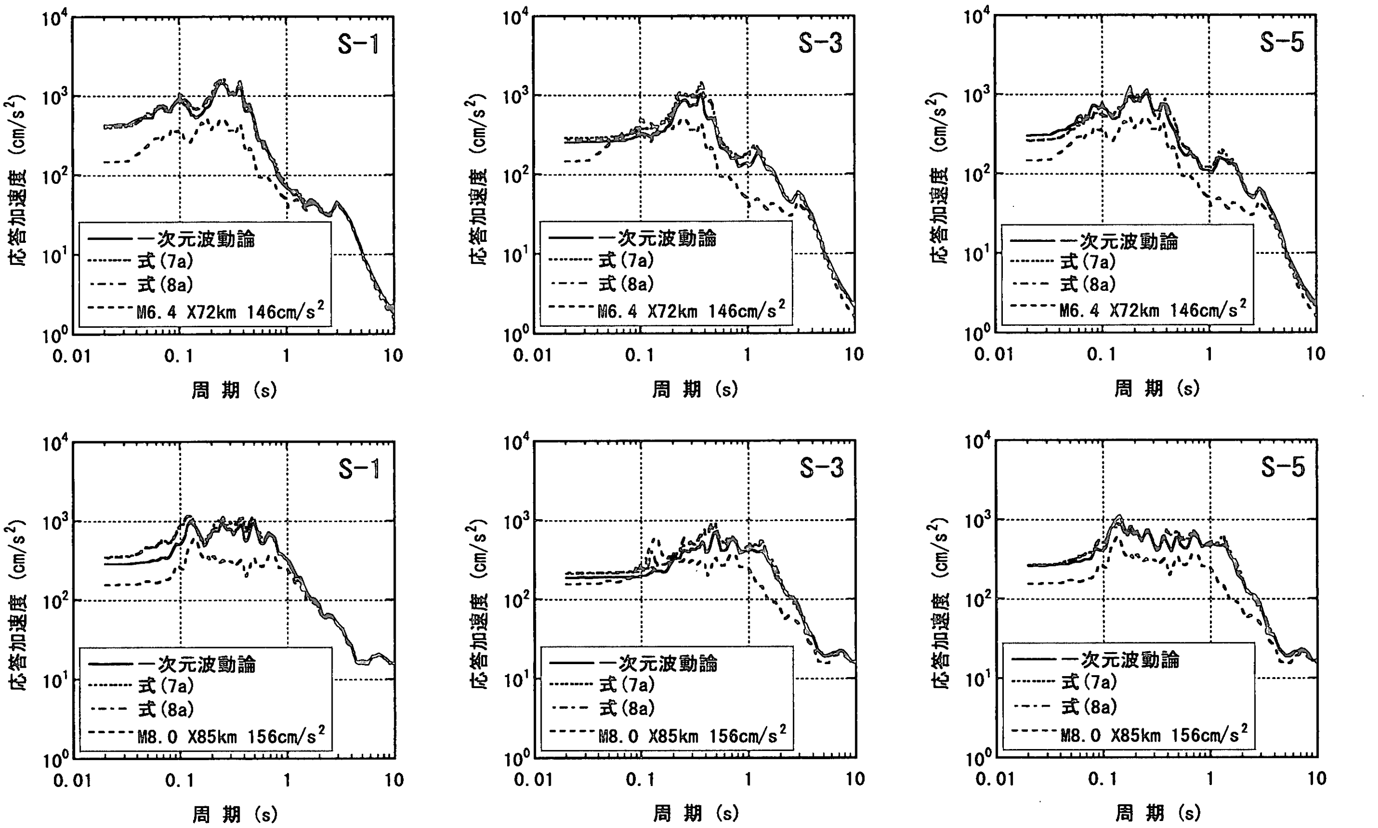

図8　一次元波動論および提案手法により推定された地表応答スペクトルの比較（凡例最下段は入力を示す）

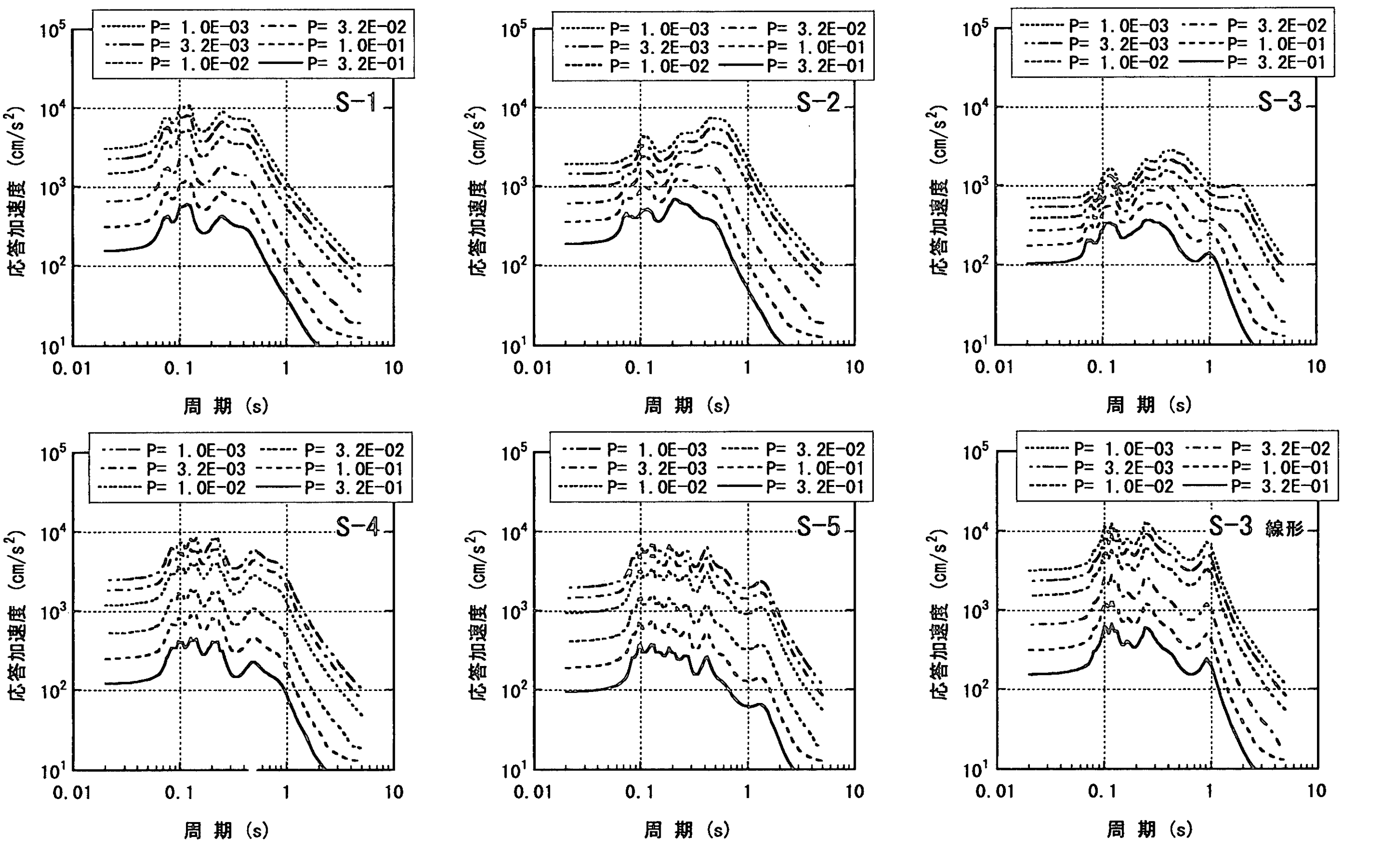

図9　各地盤モデルの地表における一様ハザードスペクトル
（凡例におけるPは50年超過確率、3.2は対数軸で1と10の中央値。）

の建物モデルの応答変形角に対する50年超過確率を求め、図10に示す。

図10より建物の復元力特性と一様ハザードスペクトルの関係に応じて建物の地震リスクが複雑に変動することがわかる。たとえば、地盤S-1、S-2およびS-4では概ね建物のB-1系列、B-2系列、B-3系列の順で地震リスクが大きいが、同一系列における降伏せん断力係数の影響は小さい。逆に、地盤S-3では各系列の間の違いは明瞭ではなく、むしろB-2系列の3つのモデルの間の違いが大きく、降伏せん断力係数 c_Y が大きいものほどリスクが小さくなっている。地盤S-5ではB-1系列について同様の現象が見られる。さらに、地盤S-3の結果を、参考例として示した地盤S-3の線形応答のケースと比較すると、B-1系列に関してはリスクが大きく減少しているが、B-2系列およびB-3系列に関しては同程度から増大の傾向にある。

これらの現象を理解するために、地盤S-2およびS-5における一様ハザードスペクトルと建物B-1系列およびB-3系列に関する関数 $a(d)$ を応答変位に対して重ね書きし、図11に示す。これより、地盤S-2では3つの建物B-1a、B-1bおよびB-1cの関数 $a(d)$ はいずれも一様ハザードスペクトルがほぼ応答変位一定となっている範囲で交差しているため、これらの建物の応答変位、すなわち応答変形角の50年超過確率がほぼ等しくなり、c_Y の違いによる影響が出なかったことがわかる。一方、地盤S-5では50年超過確率が10^{-2}のあたりから一様ハザードスペクトルとB-1系列の関数 $a(d)$ がほぼ平行になるため、少しの c_Y の違いにより同じ応答変位に対する50年超過確率が大きく異なってくる。また、建物B-3系列に対しては地盤S-2およびS-5のいずれにおいても一様ハザードスペクトルがほぼ応答変位一定となる範囲で交差しているためいずれの地盤でも c_Y の違いによる影響が小さかったことがわかる。

したがって、たとえば建物B-1bの耐震補強を行って建物B-1aと同じ特性となるように c_Y を0.2だけ増大させたとき、地盤がS-2のときはほとんど地震リスクの低減に寄与しないが、地盤がS-5のときは効果が大きく、図10からわかるように、たとえば応答変形角が50年間で0.03以上となるリスクは半減することがわかる。

また、個々の地震リスク曲線の形状について見ると、たとえば図10における地盤S-1上での建物B-1系列およびB-2系列の地震リスク曲線は応答変形角が0.01に至るまでに2つの変曲点を持っていることがわかる。上に凸となっている2番目の変曲点は降伏変形角と対応しており、その影響であることは明らかである。しかし、下に凸となっている最初の変曲点は地震ハザードの構造を理解してはじめて解釈できる。すなわち、最初の変曲点は50年超過確率が10^{-2}から10^{-3}へ変わる範囲においてハザードを支配する震源が表1に示した地震活動域から活断層に交代していることにより出現している。また、地盤S-3から地盤S-5に至るモデルでは地震リスク曲線が応答変形角のある範囲で一定となる現象が見られる。これについては図11でも見たように、地表応答スペクトルの形状と建物特性の相互関係により起こる現象である。

次に、同一建物の地震リスクが地盤の違いによりどのように変化するかを建物B-2bを例にとり、図12に示す。また、応答変形角と被害ランクの関係を文献15)と同様に設定し、これらの境界も図に示した。これらより、建物B-2bは地盤によって地震リスクが大きさだけでなく曲線の形状も変化するため、小破以上の被害を最も受けやすい地盤はS-4であるのに対し、大破以上の被害を最も受けやすい地盤はS-5であることがわかる。したがって、たとえば地震防災上の目標として50年間における大破以上の確率を10^{-2}以下と設定する場合には、地盤S-5上の建

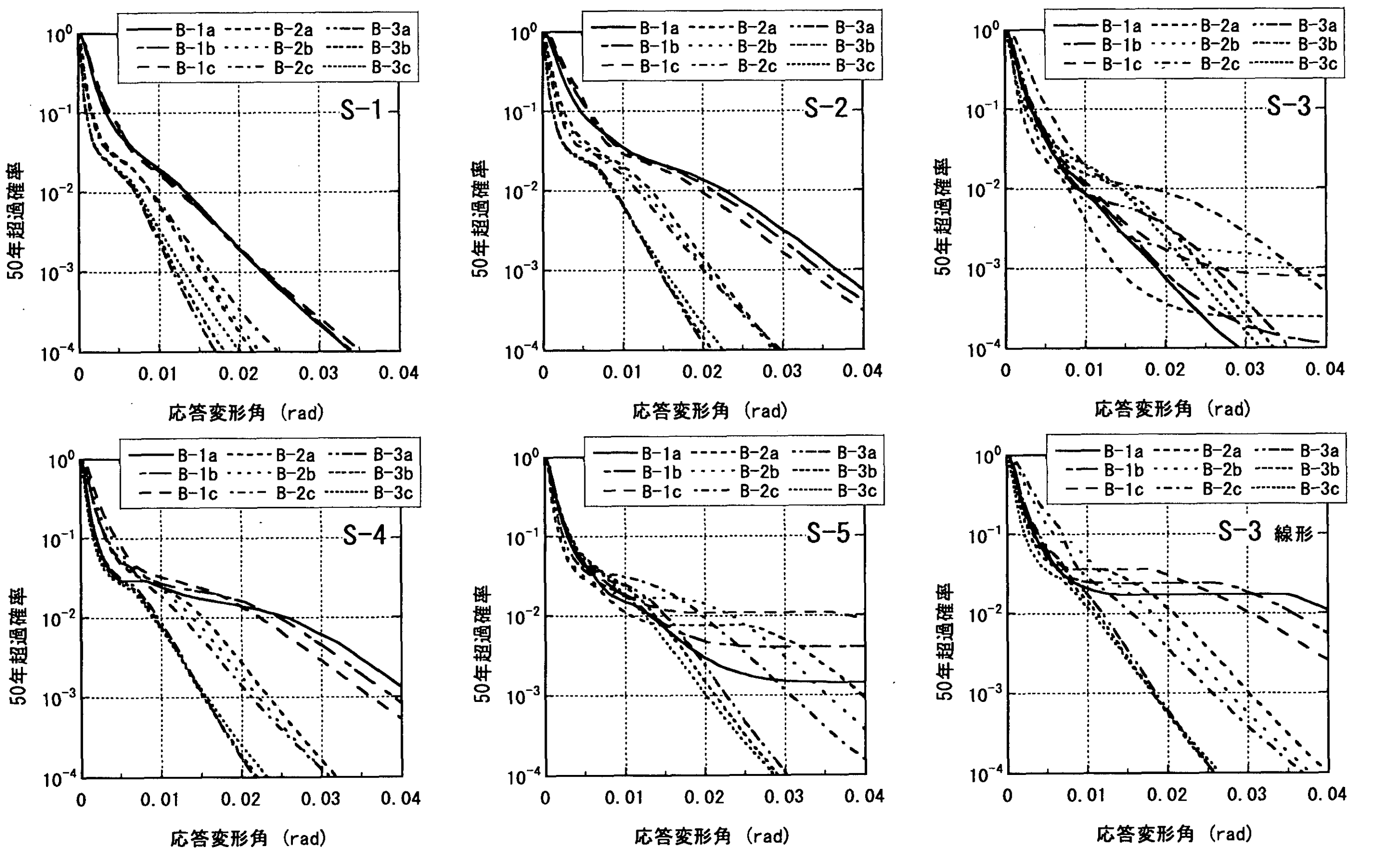

図 10　各地盤モデルにおける建物の地震リスク曲線（応答変形角－50 年超過確率）の比較

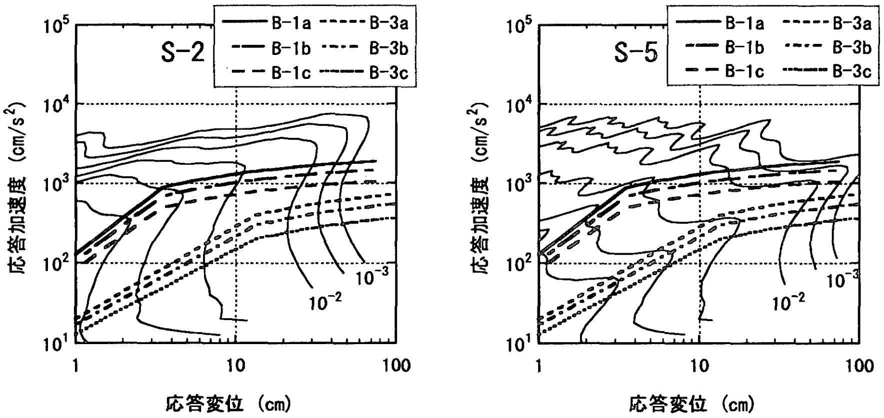

図11　一様ハザードスペクトルと建物の弾塑性応答を規定する関数の重ね書き

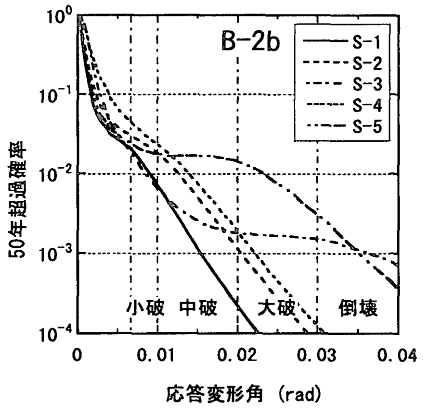

図12　建物B-2bの地震リスク曲線

物を最優先すべきであることがわかる。

なお、上記の考察では地震リスク管理を想定したケースとしてはかなり小さい超過確率にも言及している。それは、適用例のモデルと提案手法による結果の関係についての考察を主な目的としているためである。実際に、超過確率の大きさに基づいて建物の地震リスクを管理するためには、地震リスクの評価とともに建物や所有者の種々の条件を考慮した管理基準の設定が必要となる。これについては、地震リスク評価とは別に検討する必要がある。

5. まとめ

地震リスク評価では地震環境、地盤増幅および建物特性をできるだけきめ細かく反映させることが重要である。本論文では、地震基盤での地震ハザードおよび地盤増幅を考慮して地表での一様ハザードスペクトルを求め、建物の復元力特性に基づく応答変形角の地震リスク曲線を評価する手法とその適用例を示した。その結果、地盤構造によっては降伏せん断力係数を大きくするだけでは必ずしも地震リスクの低減に結びつかないことがあり、地震リスク低減のためには地盤増幅特性を十分に考慮した対策が必要であることが示された。適用例では実際の地域や建物を対象としていないので、本手法の適用結果に関する考察は限られるが、用いたモデルは現実的であり、上記のような指摘は地震リスク低減の考え方に資するところがあると考えられる。

なお、本論文は幅広い分野を対象としているため、検討が不十分なままに残されているところも存在する。たとえば、地表における地震動のばらつきは非線形応答の影響により基盤地震動より小さく設定できる可能性がある。また、入力地震動の応答スペクトルにおける周期間の相関性を積極的に考慮すれば、地震リスクは減少する。今後は、このような課題を含めて、本手法の適用性に関する検討を進める必要があると考えている。

謝辞

本論文ではK-NETの地震観測記録を使用した。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 星谷勝、中村孝明： 地震リスクマネジメント、山海堂、2002.
2) Singhal, A. and S. Kiremidjian : Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage, Journal of Structural Engineering, 1459-1467, December 1996.
3) 尾崎隆司、高田毅士：初通過理論を用いたパワースペクトル密度関数と応答スペクトルの相互変換 日本建築学会・荷重指針（案）に関して、構造工学論文集、Vol.49B、pp.343-349、2003.3
4) 三浦賢治、古山田耕司、飯場正紀：応答スペクトル法による表層地盤の非線形増幅特性の解析法、日本建築学会構造系論文集、第 539 号、PP.57-62、2001.1
5) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura and M. Takemura : Revision of Attenuation Formula Considering the Effect of Fault Size to Evaluate Strong Motion Spectra in Near Field, Tectonophisics, Vol.218, pp.69-81, 1993.
6) 源栄正人、岩崎智哉、山内寿明、渡辺哲史：モーダル解析に基づく地震動の非線形地盤増幅特性の簡易推定手法、東北地域災害科学研究、第 38 巻、pp.29-34、2002.
7) 柴田明徳：最新耐震構造解析、最新建築学シリーズ9、森北出版、1981.
8) Der Kiureghian, A. : A Response Spectrum Method for Random Vibration Analysis of MDF Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, pp.419-435, 1981.
9) Wilson, E.L., A. Der Kiureghian and P. Bayo : A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, pp.187-194, 1981.
10) R.A.ジョンソン、D.W.ウィッチャン：多変量解析の徹底研究、現代数学社、1992.
11) 石田寛：地震動スペクトルの分布特性に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.59-60、1994.
12) Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, T. Watanabe : Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, Proc. of the OECD-NEA Workshop on the Relation between Seismological Data and Seismic Engineering Analyses, Istanbul, 16-18 October 2002.
13) 大崎順彦、原昭夫、清田芳治：地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例、第5回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.697-704, 1978.
14) 仙台市：平成14年度仙台市地震被害想定調査報告書、平成14年
15) 清水友香子、源栄正人、山本優：地域の地盤環境を考慮した最適な耐震設計手法に関する研究、構造工学論文集、Vol.50B、pp.251-258、2004.3
16) 小野瀬順一：鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.2081-2088、1982.

(2004年4月9日原稿受理，2004年6月1日採用決定)