

地盤増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法

SEISMIC RISK EVALUATION FOR BUILDING PORTFOLIO CONSIDERING AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION DUE TO SUBSURFACE STRUCTURE

清水 友香子*, 石田 寛**
Yukako SHIMIZU and Hiroshi ISHIDA

This paper proposes a methodology for seismic risk evaluation of a building portfolio considering the amplification characteristics of earthquake ground motions due to subsurface structure. The main features of the methodology are the following: (1) The response spectrum method is used to calculate the maximum responses of buildings such that the period characteristics of both ground motion and building can be considered for seismic risk evaluation. (2) Considering that the variability of ground motions on the bedrock is not great, a probabilistic response spectral model with spatial correlation on the bedrock of each site is developed such that the amplification of ground motions at each site due to subsurface structure can be reflected into the seismic risk for a building portfolio. This paper also presents a case study for a building portfolio composed of twenty imaginary buildings in Sendai area to verify the features of the methodology.

Keywords: Amplification characteristics of subsurface structure, Response spectrum method, Seismic risk, Spatial correlation, Building portfolio

地盤増幅特性, 応答スペクトル法, 地震リスク, 空間相関性, 建築物ポートフォリオ

1. はじめに

企業のリスク管理や地方自治体の防災計画では複数の建築物を総合的に扱う地震リスク評価が重要となる。複数建築物全体（以下、建築物ポートフォリオと呼ぶ）の地震リスクを評価する場合、個々の建築物における地震リスク評価の精度に加えて、各建築物に作用する入力地震動の相関性、或いは発生する損失や応答の相関性を設定する必要がある。

従来の建築物ポートフォリオの地震リスク評価に関する研究^{例えば}^{1)~4)}においては、石川ら¹⁾は最大地動のばらつきに関しては完全相関を仮定し、福島ら³⁾は最大地動のばらつきを無相関と仮定するなど、地震動の空間相関性の与え方は様々であった。しかし、地震動の空間相関性の設定が評価結果を左右する重要な課題であるとの視点から、近年これに関する研究が増加傾向にある。例えば、高田ら⁵⁾は台湾集集地震の観測記録を用いて、地表における最大地動の相関係数を地点間距離の関数として評価している。また、林ら⁶⁾はK-NET, KiK-netによる観測記録に基づいて最大地動の相関係数を地点間距離の関数として評価し、地震内ばらつきにこの相関性を考慮して建築物ポートフォリオの地震リスク評価を行っている。西嶋ら⁷⁾は地震動強さにおける距離減衰式の誤差の相関性に関する種々の仮定が地震ハザード評価に与える影響について論じている。

一般には地震リスク分散を考慮し広域に分布する建築物群を想

定することが多いため、地点間距離によるマクロな空間相関モデルで評価することは自然の流れと考えられる。しかし、地震動の空間相関性に地盤の増幅特性の空間的な分布も影響すると考えられ、従来手法においてはこの点に関する検討は不十分であるため、地盤増幅特性を考慮した評価手法を提案することで、地震動の空間相関性、つまりは建築物の応答や損失の相関性に関して、よりきめ細かい評価が可能になると考えられる。

地盤増幅特性を反映させた評価は、個々の建築物における地震リスク評価の精度向上の観点からも同様に重要である。兵庫県南部地震などの過去の地震災害において、各地点における地震動の卓越周期と建築物の固有周期との関係が地震被害に大きな影響を与える要因として広く認識されている。しかし、従来の地震リスク評価では、一般的に最大地動を地震動の指標として用いており簡便な評価が可能である反面、各建築物への入力地震動の周期特性を十分に表現しているとは限らない。一方、周期特性を考慮した地震リスク評価として、高橋ら⁸⁾はモンテカルロシミュレーションにより地震動の時刻歴波形を用いた評価を提案しているが、ここでは多数に渡る震源パラメータの確率モデルの設定が必要となる。また、著者ら⁹⁾は工学的基盤で浅の地盤増幅を考慮した地表応答スペクトルを評価し、その地表応答スペクトルを中央値としてばらつきを与えることで一様ハザードスペクトルを評価しているが、より合理的な地震リ

* 鹿島技術研究所 研究員・工修

** 鹿島技術研究所 上席研究員・工博

Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Eng.

Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

スク評価を行うためには、地盤の非線形性に応じて大きく変化する地表応答スペクトルのばらつきを求めることが必要である。

本論文では、以上の背景の下、地盤増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法を提案する。また、仙台地域の地盤モデルを用いた適用例を示し、手法の特徴を考察する。本提案手法では、同時発生する地表地震動の関係を直接設定するのではなく、地盤増幅特性の影響が少ない地震基盤において地震動の相関性を与え、さらに深部地盤及び浅部地盤の増幅特性を考慮することで地盤増幅によって決定される関係を評価することを意図している。

なお、建築物ポートフォリオの地震リスク評価では、伝播経路特性、地盤構造モデル、地盤応答解析、建築物モデル、建築物応答解析及び損失評価等の不確定性の評価も重要であるが、本論文ではこれらについては確定的に評価することで、地盤増幅特性を考慮した入力地震動の関係を絞って考察する。さらに、地盤増幅特性を考慮する場合には、液状化の影響も考慮すべき要素であるが、今回は液状化地盤については評価対象外とする。

2. 建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法

2.1 考え方

今ある震源で地震が発生した場合を考える。この場合でも地震動は確率論的に発生するため、建築物ポートフォリオの損失 Z 及び建築物ポートフォリオを構成する N 棟の建築物それぞれの損失 W_i ($i=1, \dots, N$) は何れも確率変数となる。この時、次式が成り立つ。

$$Z = \sum_{i=1}^N W_i \quad (1)$$

本提案手法では、各建築物の立地地点それぞれにおいて地盤増幅特性を考慮した地表応答スペクトルを評価し、それを入力とした建築物応答解析により各建築物の応答を求め、得られた応答を換算することで、各建築物の損失 W_i を評価する。

各建築物で同時発生する損失 W_i を求める場合、各建築物に同時に入力する地表応答スペクトルを評価する必要がある。しかし、地表応答スペクトルは地盤構造の違いで周期特性や振幅のばらつきが異なるため、各建築物への入力地震動に対する応答スペクトルの空間相関性を評価することは困難である。そこで、本提案手法では地盤増幅特性の影響が少ない地震基盤において応答スペクトルの空間相関性を設定し、それに各地点特有の地盤増幅特性を与えることで、同時発生する地表応答スペクトルを評価する。

(1) 地震基盤応答スペクトルの算定

ある地震が発生したという条件の下で、任意の地点における解放された地震基盤上の応答スペクトル値 ($2E$) は、各周期で対数正規分布に従うと仮定する。また、その中央値は距離減衰式で評価する。ここで、応答スペクトルの各周期間の相関係数 ρ_T は周期の間隔が大きくなる程低減すると考えられるが、本論文では簡単のために各周期間で応答スペクトル値は完全相関 ($\rho_T = 1.0$) と仮定する。以上から、ある地震により地点 i で発生する地震基盤応答スペクトル $B_i(T)$ は次のように表現できる。

$$B_i(T) = A_i b_M^{(i)}(T) \quad (2)$$

ここに、 A_i は対数正規分布に従う中央値1の確率変数、 $b_M^{(i)}(T)$ は地震基盤応答スペクトルの中央値である。つまり、各地点の $B_i(T)$

のスペクトル形状は距離減衰式で確定的に与えられることになる。

次に、各地点で同時発生する地震基盤応答スペクトル $B_i(T)$ の相関について考える。地震動特性は、震源特性、伝播経路特性及び地盤増幅特性によって相違するが、地盤増幅特性の影響が少ない地震基盤において各地点の $B_i(T)$ の相関を与えることで、ラディエーションパターンの影響が比較的大きい長周期帯域を除けば、同一震源による $B_i(T)$ の相関係数、即ち確率変数 A_i の相関係数 ρ_L は、完全相関 ($\rho_L = 1.0$) と仮定できる。即ち、次式の関係が成り立つ。

$$A_i = A \quad (i=1, \dots, N) \quad (3)$$

次に、各地点の地震基盤応答スペクトルを入力とした非線形地盤応答解析を行うため、連続量として確率分布する地震基盤応答スペクトルの離散化を行う。具体的には、対数正規分布に従いゼロから正の無限大まで分布する A を、設定した有限の範囲において離散化することで A の確率関数 $p(a)$ を設定する。離散化した応答スペクトル値の数を K とすると、(2)及び(3)式から、ある地震における任意の地点 i の地震基盤応答スペクトルは K 個の離散化応答スペクトル $b_{ik}(T) = a_k b_M^{(i)}(T)$ ($k=1, \dots, K$) とその確率関数 $p_k(a_k) = p_k$ により規定されることとなる。ここで、文献10)によると50年間の超過確率5%程度のレベルまでを対象とする場合、結果に相当の影響を及ぼすと考えられる範囲は、対数標準偏差を β として $+2\beta$ 程度以内である。本論文では、以上に基づき、対数正規分布の裾の打ち切りを $\pm 2\beta$ と設定し、その範囲内で離散化することとする。なお、打ち切り範囲内の全確率は1.0になるよう調整する。また、この地震基盤においては震源特性に起因するばらつきを主に考慮しているため、 β は地震間ばらつきに相当する値を設定する。

(2) 地表応答スペクトルの算定

地点 i において確率 p_k で発生する地震基盤応答スペクトル $b_{ik}(T)$ から、非線形地盤増幅特性を考慮した応答スペクトル法に基づき地表応答スペクトル $s_{ik}(T)$ を評価する。なお、本論文では地盤構造モデルのばらつきを考慮しないため、ある p_k に対応する $s_{ik}(T)$ は $b_{ik}(T)$ から確定的に求められる。つまり、 p_k の確率で同時発生する各地点の $s_{ik}(T)$ ($i=1, \dots, N$) は一対一対応で関係付けられているが、それぞれの地盤増幅特性を考慮して評価されるため、その空間相関性は地震基盤で設定した完全相関とは異なる関係となる。図1に本手法における応答スペクトルの確率モデルを示す。

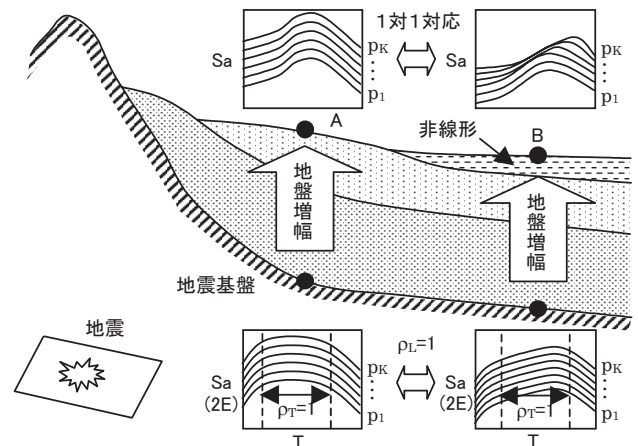


図1 本手法における応答スペクトルの確率モデル

(3) 建築物ポートフォリオの地震リスク評価

各建築物において、 $s_{i,k}(T)$ を入力とした建築物応答解析に基づき建築物応答をそれぞれ算定し、得られた建築物応答を損失に換算することで、各建築物の損失 w_{ik} を評価する。算出した w_{ik} から、確率関数 p_k で発生する建築物ポートフォリオの損失は(1)式を書き改めて次式で評価できる。

z_k = \sum_{i=1}^N w_{ik} \tag{4}

この時、震源を j 、 t 年間の震源の発生確率を $p_E^{(j)}(t)$ とすると、 t 年間に複数回地震が発生することを無視すれば、損失の t 年超過確率は次式で評価される。

P_j[Z > z; t] = p_E^{(j)}(t) \sum_{z_k > z} p_k \tag{5}

ここに、右辺の総和は全ての $z_k > z$ となる z_k の p_k の和を示す。

最後に、想定する全震源は独立に発生すると仮定すると、全震源を考慮した t 年間における建築物ポートフォリオの損失の超過確率（地震リスク）曲線は、次式で評価される。

P[Z > z; t] = 1 - \prod_j [1 - P_j[Z > z; t]] \tag{6}

2.2 計算手順

前節で示した提案手法の評価手順を纏めて図2に示す。図中の各ステップの内容は大略下記の通りである。

- 1) 対象期間と確率論的震源モデルを設定し、個々の震源の地震発生確率を算定する。
- 2) ポートフォリオを構成する建築物の立地地点それぞれについて

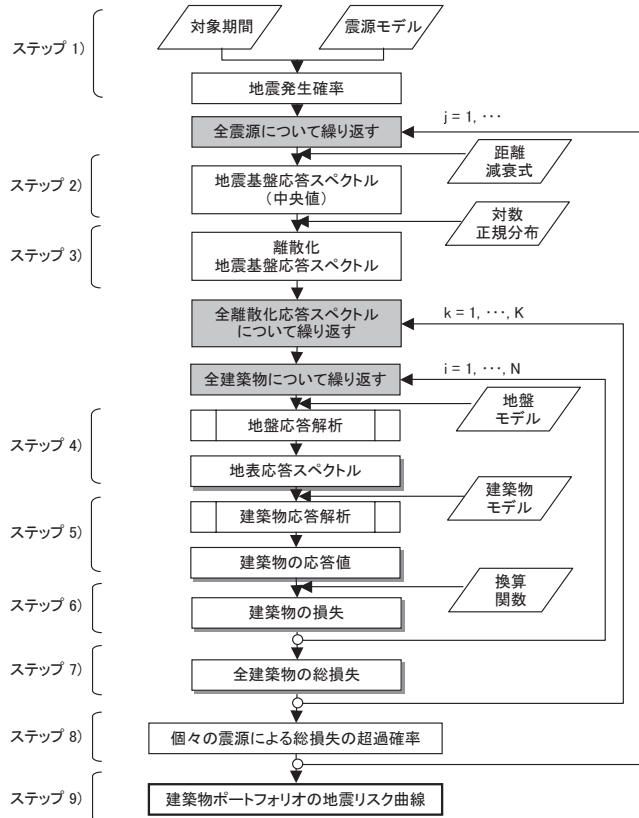


図2 提案手法の計算手順

て、距離減衰式により地震基盤応答スペクトルの中央値を与え、対数標準偏差を設定する。

- 3) 対数正規分布に従う各周期における応答スペクトル値をある範囲で離散化し、地震が発生した場合の条件付確率を有する複数の地震基盤応答スペクトル（以下、離散化応答スペクトルと呼ぶ）を設定する。
- 4) 各地点で同時に発生する離散化応答スペクトルを入力として、非線形性を含む地盤増幅特性を考慮した地盤応答解析に基づき、地表応答スペクトルを評価する。
- 5) ステップ4)で評価した地表応答スペクトルと建築物の復元力特性に基づき建築物応答解析を行い、最大応答値を算定する。
- 6) 得られた応答値から換算関数により損失を算定する。
- 7) ステップ6)で評価した各建築物で同時発生する損失の総和をとることで、建築物ポートフォリオの総損失を算定する。
- 8) ステップ4)～7)を全離散化応答スペクトルについて繰り返し、各震源による地震リスクを評価する。
- 9) ステップ2)～8)を全震源について行い、各震源の地震リスクを統合することで、建築物ポートフォリオの地震リスク曲線を評価する。

3. 適用例

地盤増幅特性が空間相関性に与える影響を検討するため、その影響が顕著な比較的狭い範囲における適用例を示す。ここでは仙台市街を含む約20km四方の領域に分布する仮想建築物群の評価を行う。

3.1 評価条件

(1) 地震基盤応答スペクトルの算定

震源モデル

仙台地域に及ぼす影響が大きい宮城県沖地震及び長町ー利府線断層帯を想定した検討を行う。文献11)及び12)に基づき設定した震源モデルを表1に、各震源の位置及び対象建築物が分布する範囲を図3にそれぞれ示す。なお、断層面上のすべりは一様であると仮定する。

表1 震源モデル

	長町ー利府線断層帯	宮城県沖地震
地震規模	7.5	7.5
平均発生間隔	3000年	37.1年
30年発生確率	1%	99%
上端深さ	1 km	20 km
断層長さ	40 km	40 km
断層幅	20 km	80 km
傾斜角	40 °	20 °

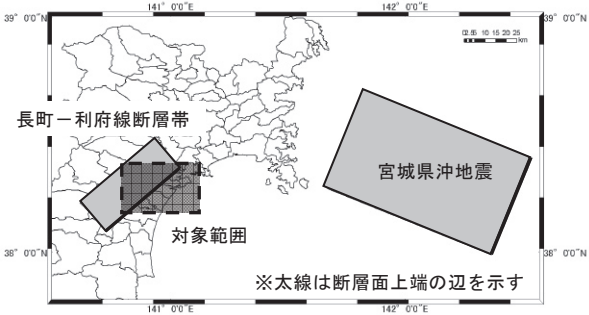


図3 震源位置及び対象範囲

地震動伝播モデル

地震基盤応答スペクトルの中央値は、長町ー利府線断層帯については、Noda et al.¹³⁾の距離減衰式に基づき評価する。宮城県沖地震については文献14)と同様に観測記録に適合するような距離減衰の修正を考慮し、Noda et al.¹³⁾の距離減衰式に補正係数2.0を乗じて評価する。対数標準偏差は $\beta=0.5$ を与える。地震基盤における離散化応答スペクトルは、対数正規分布上で $\pm 2\beta$ の範囲を21個に等分割して発生させる。

(2) 地表応答スペクトルの算定

地盤モデル

地盤構造モデルとして、第四系の浅部地盤及び第四系基底面から地震基盤までの深部地盤から成るモデルを設定する。浅部地盤は文献15)を参考に最上部層、上部層及び下部層の3層に区分したデータを作成し、地盤定数は文献12)を参考に設定する。深部地盤は文献16)に基づき $V_s=700\text{m/s}$ 、 1300m/s 及び 2000m/s の3層と $V_s=3000\text{m/s}$ の地震基盤を設定する。また、地盤モデルは第3次メッシュを経緯度それぞれ8等分したメッシュごとに作成する。設定した地盤モデルの地表面におけるS波速度分布と長町ー利府線断層帯の露頭位置を図4に、図4におけるA-A'断面を図5にそれぞれ示す。なお、図5では地表の標高を無視し、地表からの深度を示している。図4から対象範囲の表層地盤は長町ー利府線断層帯を境に、概ね西側は硬質地盤、東側は軟弱地盤となっている。また、図5から浅部地盤の厚さは東側の方が厚く、最も深い地点で約80mとなっている。深部地盤は断層西側の方が深く、海に向かう方向に浅くなっている。

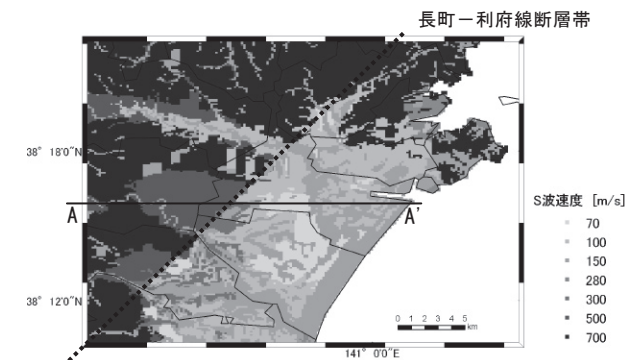


図4 地表におけるS波速度分布

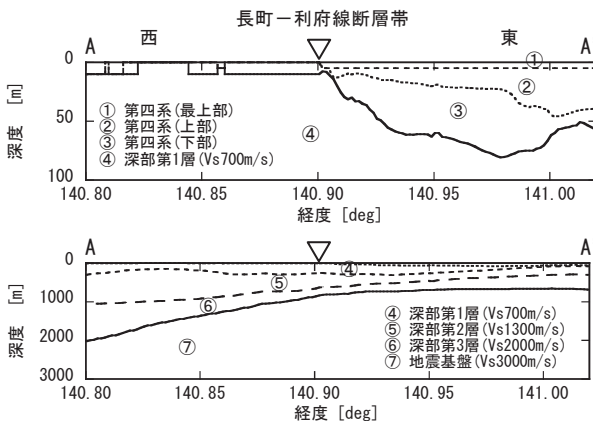


図5 A-A'断面図(上:浅部地盤, 下:深部地盤)

地盤応答解析

非線形地盤増幅特性を考慮した応答スペクトル法である石田・源栄⁹⁾の手法を用いる。なお、対象周期範囲は0.05sから5sまでとする。

(3) 損失の算定

建築物モデル

20棟の仮想建築物それぞれについて、3階、6階又は9階を想定したRC建築物モデルを設定する。各建築物の位置及び階数を図6に示す。建築物モデルは一質点系モデルを仮定し、復元力特性はTri-linear型、復元力特性の第2折点に対応するせん断力係数 C_y 及び応答変形角 R_y 、また終局変形角 R_u は表2の通りである。各建築物モデルの復元力特性を図7に示す。なお、表2には一質点系モデルの有効高さ及び延べ床面積も示した。

建築物応答解析

建築物応答解析の部分は限界耐力計算法と同様に、等価線形化法を用いて行う。

損失への換算

応答から損失への換算は文献17)を参考に R_y に応じて設定した2種類の換算関数で評価する。応答変形角と損失の関係を図8に示す。ここで、図8は兵庫県南部地震における被災度に対応した補修費用の調査結果¹⁸⁾に基づき設定しており、補修費用を損失と読み替え、被災度と応答変形角を関係付けることで設定している。具体的には、応答変形角が R_y 以下では軽微以下、 R_u 以上では崩壊になるものとし、軽微以下に対応する損失は補修しないものとして0円を、崩壊については25万円/ m^2 を仮定して設定する。なお、本解析では全て

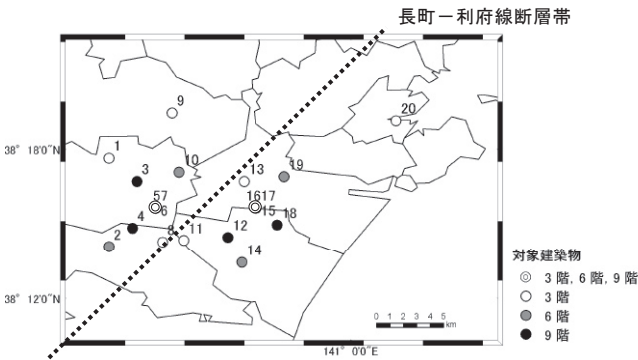


図6 建築物位置と階数

表2 建築物モデル

階数	3階	6階	9階
降伏せん断力係数 C_y	1.0	0.7	0.5
第2折点変形角 R_y	1/200	1/150	1/150
終局変形角 R_u	3/200	1/20	1/20
有効高さ	7 m	14 m	21 m
延べ床面積	2025 m^2	2025 m^2	2025 m^2

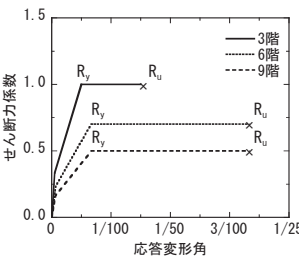


図7 復元力特性

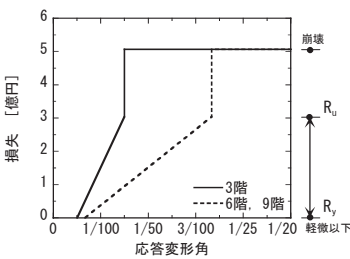


図8 応答変形角から損失への換算

の建築物で延べ床面積が等しいため、崩壊時の再調達価格は全ての建築物で約5億円となる。応答解析によって得られた応答変形角から図8の関数により対応する損失を読み取ることで損失換算を行う。

3.2 評価結果

今後30年における20棟の建築物ポートフォリオの地震リスク曲線を図9に示す。同図には宮城県沖地震のみ及び長町ー利府線断層帯のみによる結果もそれぞれ示した。ここで、図8で示したように、各建築物の再調達価格はどれも約5億円と設定しているため、全20棟が全壊した場合の損失は約100億円である。図9から、30年超過確率 10^{-2} 以上（損失10億円以下）の領域では宮城県沖地震の影響力が大きく、30年超過確率 10^{-2} 以下（損失10億円以上）では長町ー利府線断層帯による影響が支配的であることが分かる。

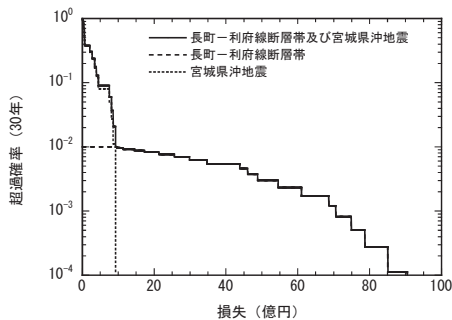


図9 建築物ポートフォリオの地震リスク曲線

4. 考察

4.1 適用結果に関する考察

(1) 仙台地域の地震動分布による検討

図10(1)及び(2)に、宮城県沖地震及び長町ー利府線断層帯について、中央値の地震基盤応答スペクトルに対する周期0.5sにおける地表加速度応答スペクトル値の分布を示す。また、図10には建築物の位置を白丸で示した。図10から、30年発生確率が99%の宮城県沖地震に比べ30年発生確率1%の長町ー利府線断層帯の方が圧倒的に大きな地震動強さとなっていることが分かる。また、他の周期帯域においても図10と同様の傾向となった。以上の傾向からも、図9で見られた宮城県沖地震と長町ー利府線断層帯との地震リスク曲線の違いは概ね説明できる結果と考えられる。また、場所によって応答スペクトル値に違いが生じており、その違いは特に断層を境として顕著であることに気づく。この理由は、地盤増幅の影響と震源距離に震源断層面の拡がりの効果を考慮した等価震源距離¹⁹⁾とに着目して考察すると次の通りである。軟弱地盤は断層線を挟んで東側に分布しているため、宮城県沖地震の場合は等価震源距離の違いが相対的に小さく地盤増幅の影響が空間分布を決定しており、長町ー利府線断層帯の場合は断層西側の方が等価震源距離は近いが、それ以上に地盤増幅の影響の方が強かったためと考えられる。

(2) 個々の建築物の地震リスク評価による検討

建築物ポートフォリオを構成する個別建築物の地震リスク曲線を震源ごとに図11に示す。図11から、宮城県沖地震では発生確率は非常に高いが損失を受ける建築物は選択的に生じているのに対し、長町ー利府線断層帯では発生確率は低いものの多数の建築物で大損

失が生じている。長町ー利府線断層帯による地震リスク曲線の中には損失が再調達価格になる確率と地震の発生確率とがほぼ等しい建築物も見られるが、これは地震が発生すれば即全壊する可能性が高いことを示している。次に、図11の各建築物の地震リスク曲線において、30年超過確率 10^{-1} 及び 10^{-3} に対応する損失を比較した結果を図12に示す。図12から、宮城県沖地震は特に30年超過確率 10^{-1} のレベルに影響を及ぼしており、長町ー利府線断層帯は 10^{-3} のレベルに対し支配的であることが分かる。また、図10において述べたように、

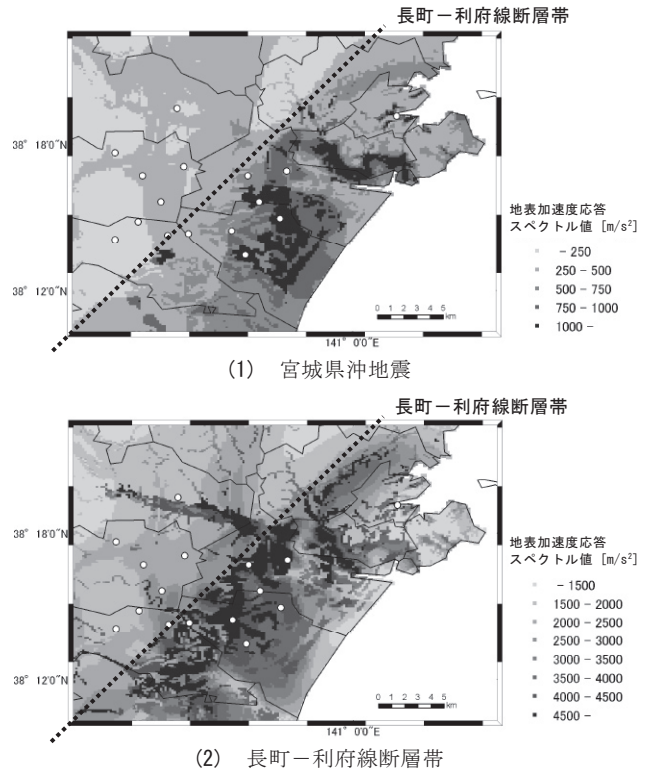


図10 地表応答スペクトル値（周期0.5s）の分布

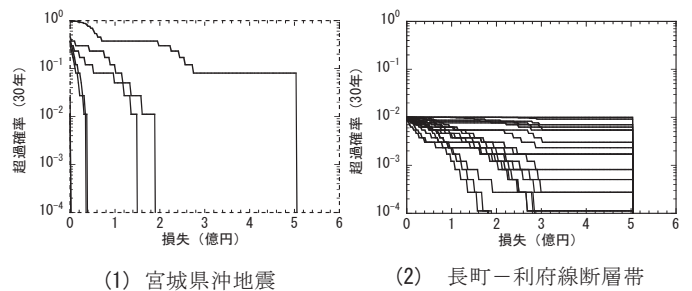


図11 個別建築物の地震リスク曲線

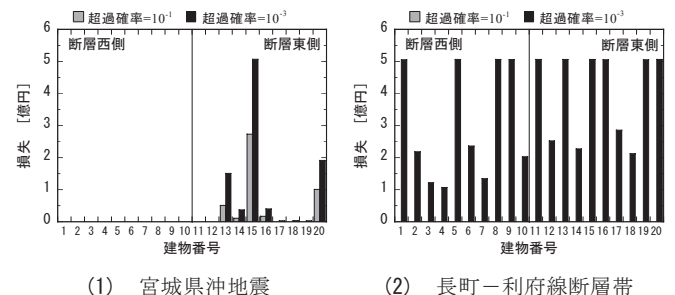


図12 30年超過確率 10^{-1} 及び 10^{-3} における損失比較

宮城県沖地震では主に地盤増幅の影響が空間分布を決定しているため、軟弱地盤が広く分布する断層の東側（建築物11～20）のみ損失が発生していることが分かる。一方、長町ー利府線断層帯については地盤の硬軟及び等価震源距離の影響で地震動の空間分布が決定しているため、断層の東西に関わらず全体的に生じる損失は大きい。

以上の考察は、地震リスク低減対策を検討する際の判断材料に成り得る。例えば、30年超過確率の高いレベルでは断層東側の軟弱地盤に立地する特定の建築物に対して対策を行うことが効果的であるのに対し、30年超過確率の低いレベルでは耐震対策を講じるための優先順位付けを行うことは難しいということが分かる。

(3) 断層の西側及び東側における地震リスク評価

断層の西側に立地する10棟及び東側に立地する10棟をそれぞれサブポートフォリオと見なし、地震リスクを評価する。なお、西側の10棟及び東側の10棟の建物構成は同じであり、3階建4棟、6階建3棟、9階建3棟となっている。地震リスク曲線の比較を図13に示す。図13から、東側と西側のサブポートフォリオを比較すると、東側の方が全体的に地震リスクが大きく、特に宮城県沖地震の影響が大きい30年超過確率 10^{-2} 以上のレベルでその傾向は顕著である。これに対し、長町ー利府線断層帯の影響が強い30年超過確率 10^{-2} 以下のレベルでは、東側と西側共に大きな損失が発生することが分かる。

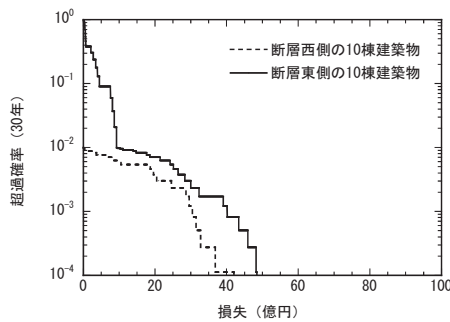


図13 断層西側及び東側のサブポートフォリオの地震リスク曲線

4.2 手法の特徴に関する検討

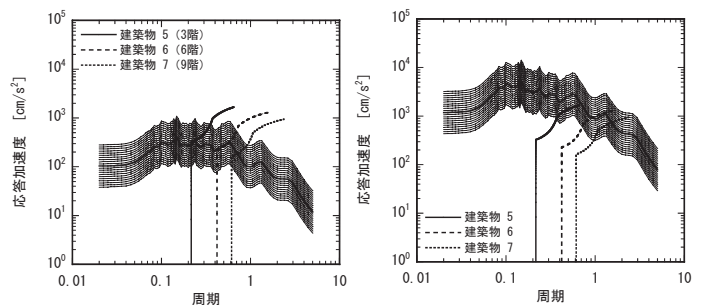
(1) 地盤増幅特性と復元力特性の影響

想定した20棟の建築物のうち、断層の西側に位置する建築物5、6、7及び断層の東側に位置する建築物15、16、17に注目して地盤増幅と建築物応答の関係について検討する。なお、建築物5、6、7は同じ敷地（以下、地盤A）に3棟立地しており、同様に建築物15、16、17も同じ敷地（以下、地盤B）に位置している。また、建築物5、15は3階建て、建築物6、16は6階建て、建築物7、17は9階建てである。地盤A及び地盤Bの地盤構造モデルを表3に示す。なお、地盤Bの動的変形曲線は文献12)において腐食土及び砂質土に対応する曲線を設定している。評価した地表応答スペクトルを図14に示す。また同図には、林²⁰⁾の方法と同様に建築物の復元力特性を等価減衰定数5%の加速度応答スペクトルに換算した曲線を併せて示す。図14の離散化応答スペクトルと復元力特性を示す曲線の交点の周期が建築物応答の等価周期、応答の振幅は減衰定数5%に換算した振幅を示している。図14から、線形地盤である地盤Aの地表応答スペクトルは、地震基盤におけるばらつきの特性が維持されているのに対し、地盤Bでは地盤の非線形性の影響で、周期によって離散化応答

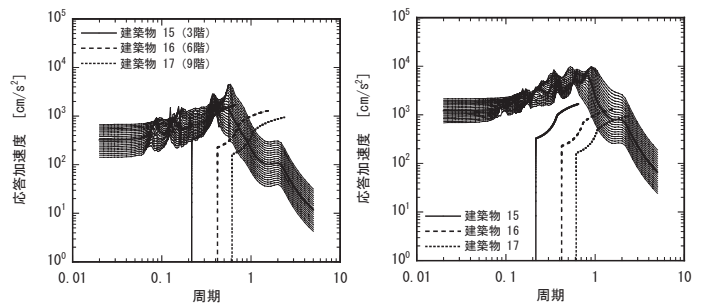
スペクトル値のばらつきが異なっていることが分かる。因みに、地盤Bの非線形性の程度を確認するため、地盤応答解析による有効せん断歪（最大せん断歪の0.65倍）を評価した結果、離散化応答スペクトルの中央値については宮城県沖地震で最大0.25%程度、長町ー利府線断層帯では最大1%を越えていた。次に、復元力特性との関係を図14の(1)及び(2)それぞれで見ると、地盤が同じでも建築物特性が異なると応答の生じ方が異なることが分かる。特に地盤B上の建築物15は応答スペクトルの卓越周期の影響を大きく受け大損失が生じる可能性が高い。図12における建築物15、16、17の損失の違いはこのような要因により生じたものと言える。同様に、図14から同じ建築物であっても、地盤が異なれば応答の等価周期や応答振幅が異なっている。特に3階建の建築物5及び15では違いが顕著である。

表3 地盤構造モデル（地盤A、地盤B）

Vs [m/s]	密度 [g/cm ³]	初期減衰	動的 地盤特性	層厚 [m]	
				地盤A	地盤B
70	1.2	0.020	腐食土 ¹²⁾	—	5
250	1.8	0.008	砂質土 ¹²⁾	—	12
500	2.1	0.015	—	10	43
700	2.0	0.011	—	281	242
1300	2.3	0.006	—	508	214
2000	2.4	0.004	—	356	217
3000	2.6	0.003	—	—	—



(1) 地盤A（建築物5、6、7）



(2) 地盤B（建築物15、16、17）

図14 地表応答スペクトルと建築物特性の関係

（左：宮城県沖地震、右：長町ー利府線断層帯）

次に、地盤増幅の違いによる応答の関係を考察する。図15に宮城県沖地震を想定した場合の地盤A及び地盤Bにおける地震動強さの関係を、図16にA地盤に立地する建築物5、6、7とB地盤に立地する建築物15、16、17の塑性率の関係をそれぞれ示す。ここで、地震動強さは、周期0.2s、0.5s、1.0s及び2.0sのそれぞれにおける地表応答スペクトル値を中央値で基準化した値とする。なお、図中同じマークで示されている各点は、 p_k （ $k=1, \dots, 21$ ）に対応する地震動強さ及び塑性率である。図15を見ると周期によって異なる関係が評価

されている。周期1.0s及び2.0sの応答スペクトル値は完全相関に近い関係が得られているが、これは図14で示したように長周期域ほど非線形性の影響が少ないためと考えられる。一方、短周期域の応答スペクトル値の関係は、特に周期0.5sで見られるように地盤増幅の非線形性の影響で比例関係ではない複雑な関係となっている。また、図16からは、地盤A上の建築物は地盤B上の建築物と比較して応答が小さく、特に3階の建築物で違いが大きいことが分かる。

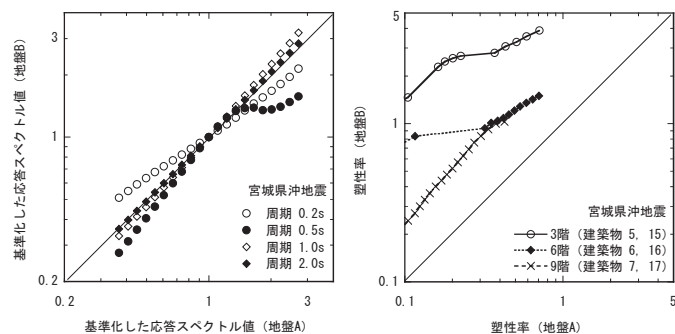


図 15 地盤 A 及び B における 応答スペクトル値の関係

図 16 地盤 A 及び B における 各建築物の塑性率の関係

以上を踏まえ、図17に宮城県沖地震における周期0.5s及び1.0sの応答スペクトル値の超過確率曲線、図18に建築物応答（応答変形角）の超過確率曲線を示す。図17から、地震ハザードは全体的に地盤Bの方が大きくその傾向は図18にも反映されているが、地震動強さの影響の度合いは建築物特性によって異なる。つまり、同じ地盤でも建築物特性によって生じる応答は異なり、地盤Aでは6階建が、地盤Bでは3階建が相対的に最も大きくなっている。

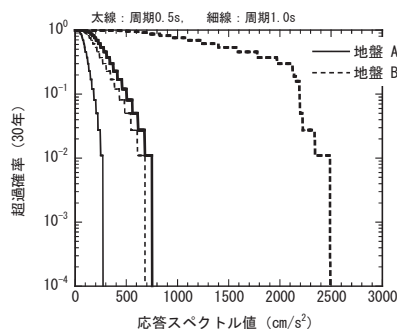
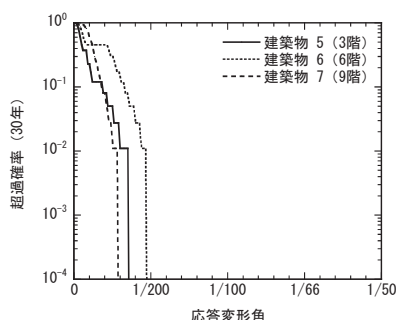
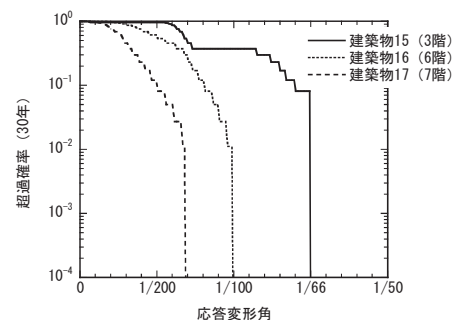


図 17 宮城県沖地震による応答スペクトル値の 超過確率曲線 (周期 0.5s, 1.0s)

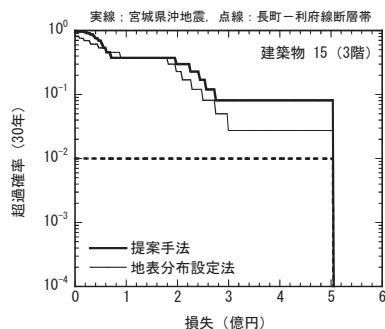


(1) 地盤 A (建築物 5, 6, 7)

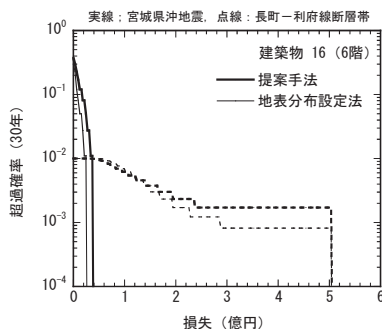


(2) 地盤 B (建築物 15, 16, 17)

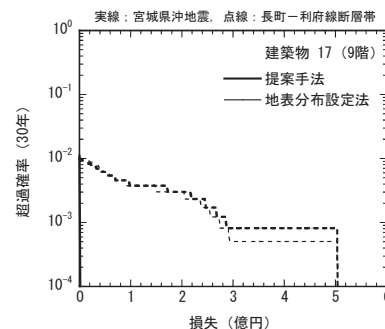
図 18 地盤による応答変形角の超過確率曲線の違い (宮城県沖地震)



(1) 3 階



(2) 6 階



(3) 9 階

図 19 応答スペクトル値の確率分布の設定による個別建築物の地震リスク曲線の違い

(2) 相関性の与え方による効果

従来の建築物ポートフォリオの地震リスク評価では、地表で各地点の最大地動の相関性を仮定して評価することが多い。本手法は応答スペクトル法に基づくものであり、従来手法との直接的な比較は困難であるが、各地点の地表応答スペクトルが完全相関或いは独立と仮定した場合と、地震基盤応答スペクトルが完全相関とした本手法による評価結果を比較する。なお、比較用の地表応答スペクトルは、本手法と同様に地盤増幅を考慮して評価した中央値に対し、地表で確率分布を与えて離散化することで発生させる。

まず、地震基盤において確率分布を設定した場合（本提案手法）及び地表で確率分布を与えた場合（以下、地表分布設定法）の個々の建築物に対する地震リスク評価結果を比較する。図19に地盤B上に立地する建築物の結果を示す。図19から本提案手法と地表分布設定法では建築物応答の超過確率曲線が異なっている。これは、本提案手法では非線形応答の影響により離散化応答スペクトルごとに地盤増幅が変化するためと考えられ、建築物の階数によって差が異なるのは、さらに建築物の復元力特性によって違いが生ずることを示している。なお、線形地盤である地盤A上の建築物については、当然ながら本提案手法による評価結果と全く同じとなった。

次に、20棟の建築物ポートフォリオの地震リスク曲線を比較する。本提案手法による評価結果と、地表分布設定法で評価した地表応答スペクトルが各地点で完全相関及び独立と仮定した場合の評価結果を図20に示す。なお、各地点の地表応答スペクトルが独立である場合の評価は、各建築物の損失 W_i が独立に発生し、それらの総和の確率密度関数が各損失 W_i の確率密度関数の合積で表され、合積のフーリエ変換は各密度関数のフーリエ変換の総積に等しくなることを利用して求める。因みに、損失が互いに完全相関或いは独立とし

た場合のある震源による超過確率曲線（Y軸は対数軸）は、一般に図21に示す傾向が見られる。即ち、損失が小さい領域の超過確率は独立の方が高く、ある損失を境に独立と完全相関の超過確率は逆転する。また、各建築物における崩壊時の損失の総和で頭打ちとなる。

図20から、本手法と地表で完全相関とした場合の結果を比較すると、長町一利府線断層帯の影響が支配的な30年超過確率 10^{-2} 以下の領域では両者の結果は近いのに対し、宮城県沖地震の影響が支配的な30年超過確率 10^{-2} 以上の領域では、結果の違いが比較的顕著に見られる。これは、30年超過確率 10^{-2} 以下の領域の場合、本解析では同一震源により影響を受ける比較的狭い範囲の建築物群を対象としていること以外にも、図14で示したように長町一利府線断層帯による応答スペクトルと建築物の復元力特性とが交わる周期帯域においては、地盤の非線形性による効果が小さく線形に近いばらつきとなっていたことが要因として挙げられる。一方、宮城県沖地震による結果の違いは、地盤の非線形性によりスペクトル形状及び振幅のばらつきが変化することで大きな損失が発生したことに対応する。以上から、仮に建築物特性が関係する周期帯域において地盤の非線形性の影響を受けにくい場合は、地盤増幅特性を考慮して評価した地表応答スペクトルに対し、地表で完全相関と仮定する簡易評価もある程度妥当であると示唆される。一方で、地盤増幅特性を考慮した空間相関性を評価することで、図21の独立とも完全相関とも異なる結果が得られ、よりきめ細かい建築物ポートフォリオの地震リスク評価が可能となる。

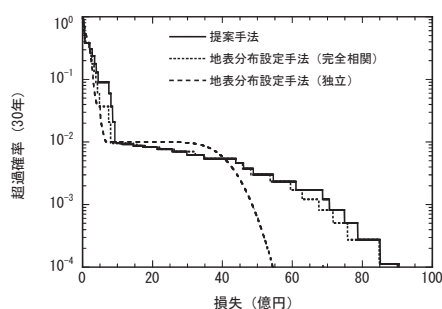
5. 結び

本論文では、非線形地盤増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法の提案を行った。提案手法では、各地点で同時発生する地表応答スペクトルを評価する際に、地盤増幅の影響が少ない地震基盤応答スペクトルに対してばらつき及び空間相関性を設定することで、地震基盤に浅い地盤増幅特性を考慮した空間相関性を評価した。また、仙台地域に立地する20棟の仮想建築物における適用例を示し、手法の特徴を検討した。

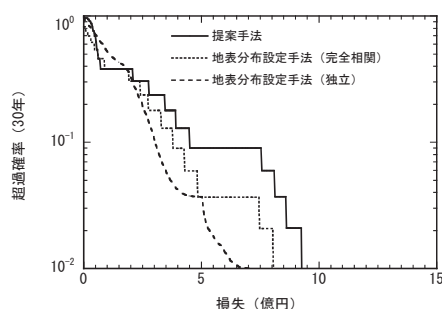
本提案手法を実際の建築物群に適用することで、各建築物の地盤増幅特性及び建築物特性を反映した地震リスクの低減対策に繋がると期待できる。提案手法の改良点としては、地震基盤における応答スペクトル値の確率モデルをより現実的にすること、つまり地震基盤においても周期間及び地点間の応答スペクトルの相関性を考慮することが挙げられる。また、地盤構造モデル及び建築物モデルの不確定性を考慮した評価を行うこと等も今後の課題である。

参考文献

- 1) 石川裕, 武田正紀, 奥村俊彦, 林康裕, 掛川秀史: 建物の地震リスクの評価方法, 日本建築学会技術報告集, 第11号, pp.275-278, 2000.12.
- 2) M. Achiwa, M. Sato and M. Mizutani: Seismic Risk Assessment Procedures for a System consisting of Distributed Facilities – Part three – Insurance Portfolio Analysis, Structural Safety and Reliability ICOSSAR '01, 2001.
- 3) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, 第552号, pp.169-176, 2002.02
- 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, pp.2349-2354, 2002.
- 5) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, No.565, pp.41-48, 2003.03.
- 6) 林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp.203-210, 2006.02.
- 7) 西嶋一欽, 神田順: 地震動強さの空間相関を考慮した2地点確率論的地震危険度解析の試み, 構造工学論文集, No.49B, pp.1-8, 2003.03.
- 8) 高橋雄司, 正木信男, 穴原一範, 五十田博: 地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント, 日本建築学会構造系論文集, No.591, pp.25-33, 2005.05.
- 9) 石田寛, 源栄正人: 地盤増幅特性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, 日本建築学会構造系論文集, No.583, pp.23-30, 2004.09.
- 10) 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, 防災科学技術研究所研究資料, 第275号, 2005.08.
- 11) 地震調査研究推進本部: 全国を概観した地震動予測地図, 2007.
- 12) 仙台市: 平成14年仙台市地震被害想定調査報告書, 2002.
- 13) Noda, S., et al.: 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, pp.16-18, October 2002.
- 14) 阿部雅史, 山本優, 大野晋, 源栄正人: 仙台地域における表層地盤の非線形増幅特性を考慮した地震ハザード評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), B-2, pp.539-540, 2005.09.
- 15) 宮城県: 宮城県地震地盤図作成調査報告書, 昭和60年
- 16) 宮城県: 宮城県地震被害想定調査に関する報告書, 平成16年
- 17) 清水友香子: 地震動のスペクトル特性を考慮した既存建築物の最適な耐震補強に関する研究, 東北大学修士論文, 2005.02.
- 18) 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.149-154, 2004.
- 19) Ohno, S., et al.: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics, Vol.218, pp.69-81, 1993.
- 20) 林康裕: 性能等価応答スペクトルに基づく建築物の地震荷重評価, 2002年日本地震工学シンポジウム, pp.651-656, 2002.11.



(1) 全体



(2) 30年超過確率 10^{-2} 以上のレベルの拡大図

図20 空間相関性の設定による地震リスク曲線の違い

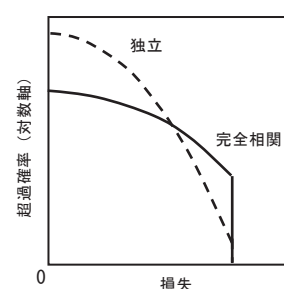


図21 完全相関と独立の場合の一般的な関係

(2007年6月6日原稿受理, 2008年1月8日採用決定)