

# 地震動のスペクトル強度の空間的な相関に関する研究

## A Study on Spatial Correlation Between Spectral Acceleration

○林 孝幸<sup>1</sup>, 福島誠一郎<sup>2</sup>, 矢代晴実<sup>1</sup>  
Takayuki HAYASHI<sup>1</sup>, Sei'ichiro FUKUSHIMA<sup>2</sup> and Harumi YASHIRO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京海上日動リスクコンサルティング株式会社

Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co. Ltd.

<sup>2</sup>東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.

Authors have proposed the risk quantification method for a portfolio buildings, in which the risk reduction effect by diversifying the building is given assuming that the variability in the ground motion intensity in each site is fully correlated. Since this assumption gives the conservative results, in previous work, spatial correlation of acceleration is obtained by regression analysis using observation records in Kanto district of K-net and KiK-net. Meanwhile, Response spectral values in various period is often used as ground motion intensity measures in seismic risk assesment. In this study, abovementioned correlation of response spectral values is calculated, and considered the difference between periods.

**Key Words** : Seismic risk assessment, Ground motion intensity, Spatial correlation, K-NET, KiK-net

### 1. はじめに

昨今、企業経営や不動産金融ビジネスにおいても地震リスクが認知され、確率論的手法に基づく地震リスクの定量化は、その概念が社会的に一般化しつつある。そのような動向の中で、筆者らは地震環境が異なるような複数地点に配置された建物群（以下、ポートフォリオ）を対象とした地震リスク解析手法を構築し、建物を複数地点に配置することによるリスクの低減効果を定量化してきた<sup>1)</sup>。このリスクの低減効果は、複数建物の地震被害が同時に発生しないことによるものであり、建物が互いに離れている場合ほどその効果は大きくなることが示されている。

ポートフォリオを構成する建物の地震被害リスクの定量化においては、このような各建物の配置状況の他に、地震動強度の空間的な相関が影響を及ぼすと考えられる。距離減衰式を用いた経験的な手法では、地震動強度は地震規模、深さ、震源までの距離を変数とした確率量として与えられる。この確率量は対数正規分布で記述され、その変動の要因としては震源過程によるものと伝播・地点特性によるものなどがある<sup>2)</sup>。地震動強度の空間的な相関は後者に関わるもので、地点間の地震動強度の偏差の相関として求めることができる。筆者らは、この相関を従来から完全相関として取り扱ってきたが、この仮定はポートフォリオの損失の変動を過大に評価することに繋がっていた。そこで、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を定量化するために、地震動の強度指標として加速度を用いて、その空間的な相関の評価を行った<sup>3)</sup>。

一方、最近の地震ハザード解析においては、経験的な応答スペクトル距離減衰式を用いて地震リスクを評価する試みも行われている<sup>4)</sup>。応答スペクトルを指標とする評価においても空間的な相関がポートフォリオに与える影響は大きいことが予想され、そのような相関を考慮するために、取り扱う周期ごとにそれらを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、既報と同様に手法に基づき、様々な周期における応答スペクトルを指標とした場合の空間的な相関について検討する。

### 2. 検討に用いる地震観測記録

#### 2.1 地震の選定

地震は、既報と同様の地震とした。即ち、K-NET、KiK-netで観測された地震の内、以下の条件により抽出されたものである。

①範囲：東経 137°~142°，北緯 34°~38°，200km 以浅

②地震規模：M5.0 以上

③観測期間：1996年9月~2005年3月

図1に抽出された地震の震央分布（全221地震）を示す。地震は主に太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みによるものだが、2004年新潟県中越地震のよ

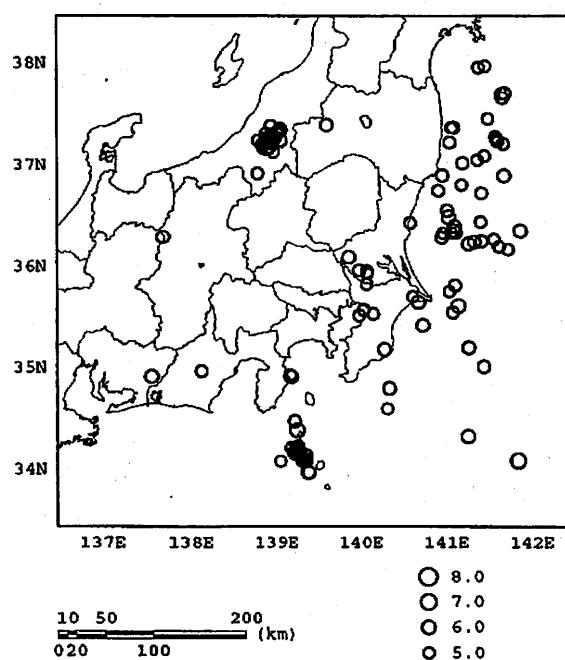


図1 対象地震の震央分布

うな内陸の地震もいくつか含まれている。これらの地震のマグニチュードは、M5.0~6.8 に分布しており、M6.0 以下が全体の 90% を占めている。

### 2. 2 観測点

地震観測点は、関東地域（一都六県）の K-NET, KiK-net の観測点とした。観測点の分布を図 2 に示す。観測点数は 186 点で、異なる 2 地点の組み合わせは 17766 通りとなる。この 2 地点の離間距離は、約 0.3km~430km の間に分布しており、60~70km 付近が最も多い。

### 2. 3 地震観測記録の整理

上記の地震における関東地域の観測点の記録は、全部で 7045 記録であった。本研究では、地震動の定義位置を工学的基盤 ( $V_s = 400$  m/s) とするため、一次元波動論を用いて地表の観測波形を基盤波形 (2E) に変換した。観測点の地盤モデルについては、公開データを用い当該せん断波速度 ( $V_s = 400$  m/s) が得られる深さまでをモデル化した。せん断波速度が所定の値に達しない場合には、最深位置を工学的基盤とし、その下方に  $V_s = 400$  m/s の地盤が存在すると仮定した。なお、そのように仮定したモデルは、186 地点中 30 地点であり、本評価に与える影響は小さいと判断した。

減衰  $h$  については、 $h = 1/2Q$  により設定した。なお、 $Q$  値についてはせん断波速度を基に、 $Q = V_s/15$  により設定した。ところで、KiK-net 観測点の地盤モデルについては単位体積重量が記載されていないため、ここでは、既報と同様に K-NET 観測点の地盤モデルの単位体積重量を統計処理した値を基に設定した。

表層の観測記録の NS/EW 方向について、それぞれ計算を行った結果、工学的基盤の地震動の最大加速度は約  $0 \sim 210 \text{ cm/sec}^2$  の範囲に分布していた。この内、最大加速度が小さい記録を取り除いた上で、地震波のデータセットを構築した。

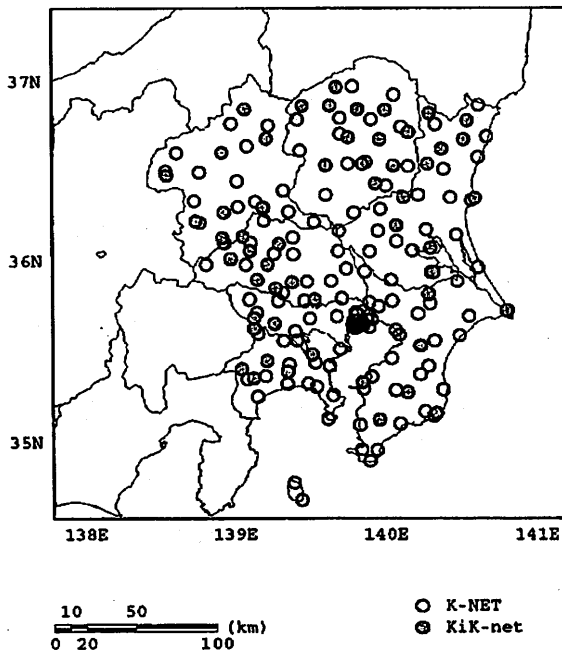


図 2 観測点の分布

### 2. 4 応答スペクトルの算定

工学的基盤における地震動波形の応答スペクトルを減衰定数  $h = 0.05$  として算出した。なお、計算周期点は、0.04, 0.09, 0.13, 0.30, 0.60, 1.00, 2.00, 4.00 秒の 8 点とした。検討に用いる最大値は、後述の距離減衰式のデータセットと同様の定義とするため、NS/EW 方向についてそれぞれ計算し、その幾何平均とした。

### 3. 応答スペクトルの空間的な相関の評価

#### 3. 1 空間的な相関の評価手法

本研究では、既報と同様に、地震動強度の空間的な相関を論じる指標として、観測記録の最大応答スペクトル値と経験的な応答スペクトル距離減衰式による推定値との残差  $\varepsilon(T)$  を用いる。  $T$  は応答スペクトルを計算する周期を表し、残差は各周期において算定される。ところで、この推定残差  $\varepsilon(T)$  には、地震の影響と地点の影響の両方が含まれている。そこで、両者を取り除いたものとして、推定残差  $\varepsilon(T)$  を次式で算定する。

$$\varepsilon_j(T) = \log(o_j(T)/c_j(T)) - \alpha_i(T) - \beta_j(T) \quad (1a)$$

$$\varepsilon_k(T) = \log(o_k(T)/c_k(T)) - \alpha_i(T) - \beta_k(T) \quad (1b)$$

ここで、 $o(T)$  は周期  $T$  における観測記録の応答スペクトル値、 $c(T)$  は経験的な距離減衰式による応答スペクトル推定値、 $\alpha(T)$  は地震補正係数、 $\beta(T)$  は地点補正係数である。添え字の  $i$  は地震を、 $j$  と  $k$  は地点をそれぞれ表す。

地点  $j$  と地点  $k$  の空間的な相関係数  $\rho_{jk}(T)$  は、推定残差  $\varepsilon(T)$  を用いて、次式で算定する。

$$\rho_{jk}(T) = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_j(T) - \mu_j(T))(\varepsilon_k(T) - \mu_k(T))}{\sigma_j(T)\sigma_k(T)} \quad (2)$$

ここで、 $n$  は地点  $j$  と地点  $k$  において共通に観測された地震数である。  $\mu_j(T)$  と  $\sigma_j(T)$  は  $\varepsilon_j(T)$  の周期  $T$  における平均と標準偏差、  $\mu_k(T)$  と  $\sigma_k(T)$  は  $\varepsilon_k(T)$  の平均と標準偏差である。

なお、(1)式の  $\alpha(T)$  と  $\beta(T)$  については、次式を最小化するような回帰係数として算定する。

$$\alpha_i(T) + \beta_j(T) = \log(o_j(T)/c_j(T)) \quad (3)$$

ここで、 $i$  は地震を、 $j$  は地点をそれぞれ表す。また、 $\alpha_i$  と  $\beta_j$  の概念は図 3 のように表される。

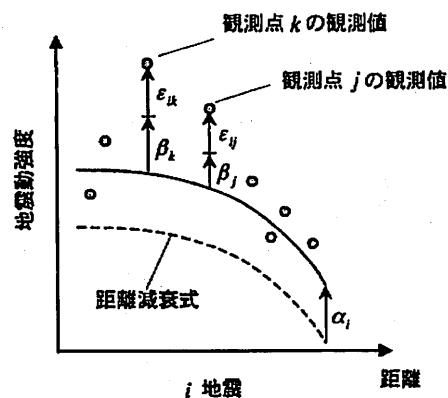


図 3 推定残差の評価

### 3. 2 距離減衰式

地点*i*と地震*j*に対応する応答スペクトル値 $c_{ij}(T)$ は次式に示す距離減衰式<sup>2)</sup>により算定した。

$$\log c_{ij}(T) = C_m \cdot M + C_h \cdot h - C_d \cdot \log(d) + C_0 \quad (4)$$

$$d = R + 0.334 \exp(0.653M)$$

ここで、*M*はマグニチュード、*R*は断層最短距離、*h*は震源深さ(km)、 $C_m$ 、 $C_h$ 、 $C_d$ 、 $C_0$ は周期ごとに決定された回帰係数である。

### 3. 3 地震補正係数と地点補正係数の分布

(3)式により算定された地震補正係数 $\alpha(T)$ と地点補正係数 $\beta(T)$ の平均と標準偏差を表1に示す。 $\alpha(T)$ と $\beta(T)$ の平均はどちらも、周期によらず0となっている。 $\alpha(T)$ の標準偏差は、周期が長くなるにつれて小さくなる傾向が見られる。それに対して $\beta(T)$ は周期が長くなるにつれて大きくなる傾向となった。 $\alpha$ と $\beta$ の標準偏差は、地震間のばらつきと地震内のばらつきに相当するものと考えられるが、安中ら<sup>2)</sup>によれば地震間のばらつきと地震内のばらつきは、0.1~0.2秒付近まで増加しその後減少する傾向が報告されており、今回の評価結果は異なる傾向となった。また、 $\alpha$ と $\beta$ の二乗和平方根は、0.307~0.374の範囲であり、これを距離減衰式の全体のばらつきと捉えたと、一般的に言われている0.22~0.3<sup>3)</sup>と比べて若干大きめになっている。このデータセットの差異の原因については今後の検討とし、今回はこのデータセットを用いて検討を進めることとした。

### 3. 4 空間的な相関の評価結果

(2)式を用いて地点間の偏差の相関と変動係数の相関の評価を行った。同じ地震の観測記録が存在する地点ペアの組み合わせについて、その離間距離と相関の関係を求めたものを図4に示す。相関係数は、2km区間ごとに平均化を行った。また、その区間内の標準偏差を算定し図中に変動の幅として示した。図より以下の傾向が見られる。

- ・ 離間距離の大きさに対して相関の大きさは、どの周期についても遞減的な傾向が見られる。また、若干であるが、離間距離が大きくなるにつれて、標準偏差が小さくなる傾向が見られる。
- ・ どの周期も、離間距離が10km以下では、0.5以上の相関があり、約70km付近でどの周期も相関0(無相関)になっている。離間距離10km以下について平均値がばらついているのは、サンプル数が少ないためである。

表1 地震補正係数と地点補正係数

周期 (s)	地震補正係数		地点補正係数	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
0.04	0.000	0.264	0.000	0.205
0.09	0.001	0.290	0.001	0.237
0.13	0.000	0.278	0.000	0.218
0.30	-0.001	0.249	-0.001	0.235
0.60	-0.001	0.237	-0.001	0.247
1.00	-0.001	0.228	-0.001	0.270
2.00	0.000	0.200	0.000	0.282
4.00	0.001	0.156	0.000	0.264

- ・ 相関係数の変動の幅は、周期が長くなるにつれて若干小さくなる傾向が見られる。
- ・ どの周期においても離間距離70km以上で負の相関が見られる。本来、このような空間的な相関は、離間距離の増大に伴い0に漸近すると考えられ、このような負の相関が算定されることについては、今後検討の余地がある。

以上のことから、ここでは、離間距離が0kmで完全相関( $\rho=1$ )、無限大で無相関( $\rho=0$ )となるような式を用いてこれらを近似することが適当であると考え、近似モデルとして次式を設定した。

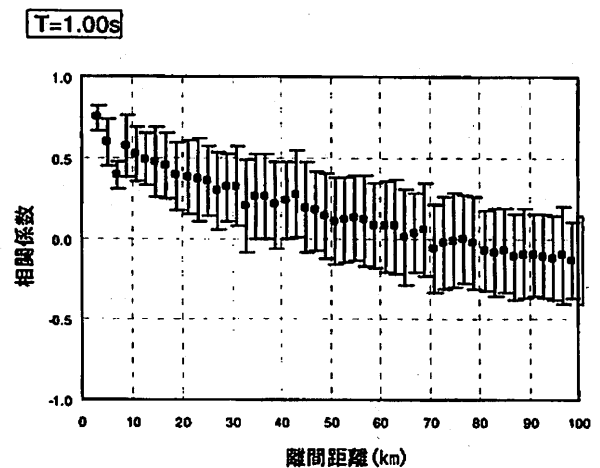
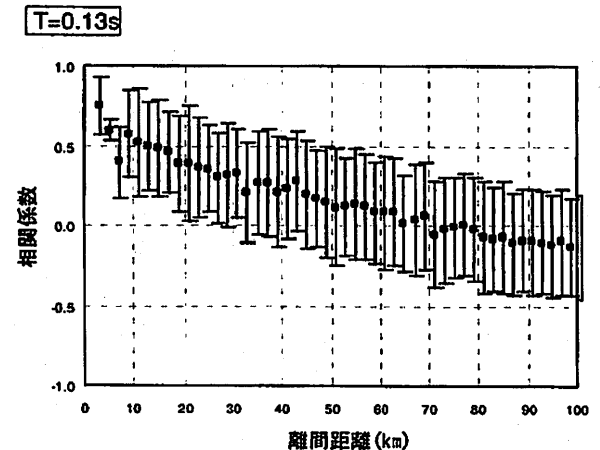
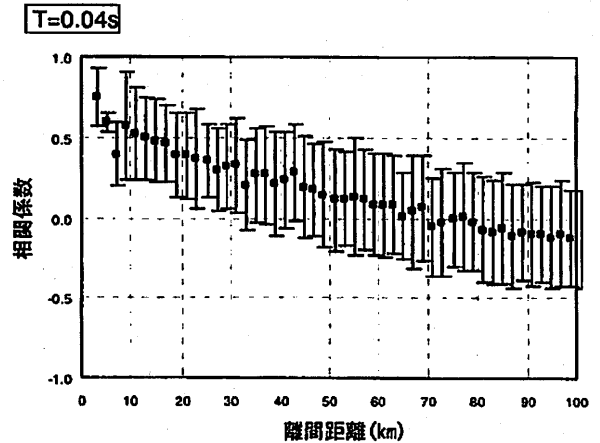


図4 離間距離と相関の関係

$$\rho = \exp(-\gamma \cdot z^\delta) \quad (5)$$

ここで、 $z$ は離間距離 (km)、 $\rho$ は相関係数、 $\gamma$ と $\delta$ は関数の形状を規定する定数である。回帰には遺伝的アルゴリズムを用い、負側の相関値も含めて回帰した。各周期における回帰結果を表2と図5に示す。回帰係数はどの周期においても似たような値になっており、周期間の差異は小さい。どの周期についても、離間距離が約10kmで相関係数が約0.7、50kmで約0.1程度になっており、100kmを過ぎるとほぼ0になり無相関となる。このような空間的な相関を考慮することでより現実的な地震リスクが評価可能であると考えられる。

表2 空間的な相関の回帰結果

周期 (s)	回帰係数	
	$\gamma$	$\delta$
0.04	0.025	1.170
0.09	0.020	1.223
0.13	0.023	1.178
0.30	0.028	1.142
0.60	0.020	1.202
1.00	0.025	1.141
2.00	0.024	1.141
4.00	0.024	1.161

#### 4. まとめ

地震動強度として加速度応答スペクトルを採用した場合の空間的な相関を評価した。各周期における空間的な相関は大きな差異がないことが分かった。しかしながら、データセットの品質の問題や、地震動強度において十分な範囲のデータが得られていないことから、今後、観測記録の蓄積を待つとともに、より広範な地域のデータを

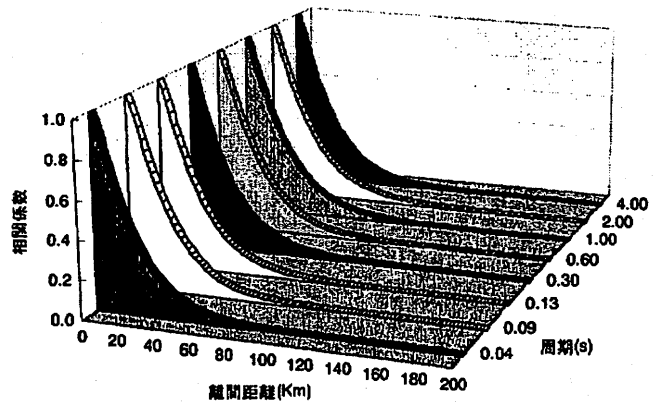


図5 応答スペクトルの空間的な相関のモデル化

対象に、地震動強度の空間的な相関に関する評価精度の向上を図っていく。また、これらの空間的な相関の要因を明らかにすべく検討を実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.7
- 3) 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, 日本建築学会計画系論文集, 第600号, pp.203-210, 2006
- 4) Frankel, A. D., Peterson, M. D., Mueller, C. S., Haller, K. M., et al.: Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps, Open-File Report 02-420, USGS, 2002
- 5) 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