

最大加速度と最大速度を地震動指標に用いた確率論的地震ハザード評価

A PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS USING PGA AND PGV AS GROUND MOTION INTENSITY MEASURES

林 孝幸*, 福島誠一郎**, 矢代晴実***

Takayuki HAYASHI, Sei'ichiro FUKUSHIMA and Harumi YASHIRO

In order to improve the accuracy of risk analysis, authors propose a seismic hazard analysis method using two ground motion intensity measures; peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV). Since the seismic hazard is expressed by the joint probability of exceedance for given PGA and PGV, it is necessary to evaluate a correlation between these intensity measures. Recently large amounts of earthquake observation data have been utilized by K-NET and KiK-net databases, so that the above correlation can be calculated. In this paper, the correlation in the Kanto district is evaluated, and is applied to seven reference sites, followed by the conclusion that North-Kanto area and South-Kanto area possess different seismic hazard in the aspects of the shape of hazard plane, and the inclusion of dependency of correlation on seismic magnitude or on the focal distance has a large effect on the hazard estimation.

Keywords: *Probabilistic seismic hazard analysis, Ground motion intensity, Correlation, K-NET, KiK-net*
確率論的地震動評価, 地震動強度, 相関, 強震ネットワーク, 基盤強震観測網

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降, 地震被害の低減を目的とした地震被害想定が, 国や地方自治体などで活発に実施されている。これは対象とするエリアに大きな被害を及ぼすようなシナリオ地震を選定して, 構造物やライフラインの被害, また経済的な影響などを定量化しようとするものである。昨今では, 大地震時の事業継続性の検討の立場から, 一般企業においてもこのような評価が実施されている。一方, 不特定の地震を対象とした確率論的地震リスク評価もまた, 不動産投資のデューデリジェンスや, 地震調査研究推進本部の確率論的地震動予測地図の公開などにより, 社会的に認知されつつある。

上記のような地震リスク評価において構造物の被害予測を行う過程は, ある震源を仮定した際の評価地点における地震動の評価とその地震動強度を用いた構造物の損傷度評価に分割できる。この地震動強度の表現においては, 最近では地震動波形を利用するケースも見られるようになってきているが, 一つの地震動強度指標を用いて表すことが, その利便性の観点から多いのが現状である。その場合, 地震動の評価と構造物の損傷度評価は, 地震動強度を示す一つの物理量のみを介して評価の連続性が保たれることから, 地震動の強度としての有用な情報が欠落し, 損傷度評価の精度を犠牲にすることになる。そのため, 地震動強度を表現する際に構造物の被害により相関が高い指標を

採用することが望まれ, そのような指標を明確にするための多くの研究が実施されてきた。

佐藤¹⁾らは, 人工地震波によるモンテカルロシミュレーションを行い, 複数の地震動指標について損傷表現性を検討し, 構造物の応答の周期に対する入力エネルギーが損傷表現に優れていることを示している。境²⁾らは, 1999年台湾集集地震の観測と実被害記録から, 地震動の破壊力指標について検討を行い, 構造物の塑性化を考慮した等価周期における弾性応答スペクトルが被害と相関が高いことを示している。ただし, これらの研究は, ある程度固有周期の特定された固有の建物を対象としており, 不特定の複数の建物からなる建物群への適用は困難である。

建物群に対する事例としては増田³⁾らが, 基盤における地動最大加速度 (PGA), 地動最大速度 (PGV), PGA×PGV, 震度などを指標として構造物の被害関数を作成し, 実被害との相関から PGA×PGV あるいは計測震度を指標として用いることが適切としている。計測震度は加速度と速度の中間的な指標である⁴⁾ことが知られており, 結局のところ, 加速度と速度の二つの指標を同時に考慮したものが損傷度予測に適していると考えられる。これは, 地震動の短周期成分が支配的な PGA と比較的長周期成分が支配的な PGV を組み合わせることにより, 地震動強度としての情報を補える効果があり, 建物群の損傷度

* 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 修士(工学)

** 東電設計(株) 博士(工学)

*** 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 博士(工学)

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., M. Eng.

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

評価においては、両指標の採用が合理的と考えられるためと推察される。しかしながら、最終的に一つに集約されたこの指標による評価は、まだ実被害と乖離があり、推定に限界が見られる。

一方で、一つの地震動強度指標だけでは不十分という立場から、複数の地震動指標を採用した確率論的地震リスク評価について研究がなされている。Bazzurro⁵⁾らは、複数の地震動指標を用いた地震ハザード解析手法 (VPSHA) の構築を行い、例として構造物の1次と2次の固有周期に対応したスペクトル加速度を指標に用いて建物の損傷度評価を行った。このような評価の際には、複数指標間の相関関係が必要となることが示されており、例題では、Inoue⁶⁾らによる各周期の応答スペクトルの相関関係を採用している。他の複数指標の相関関係に関する研究として、Shimomura⁷⁾らは、最大速度と継続時間を指標として採用し、観測記録からその相関性について検討し、両指標の同時確率密度関数を構築している。

以上から、地震動指標としてPGAとPGVを同時に採用することにより、建物群を対象とした精度の高い地震リスク評価を実施することが可能となる。そのため、本研究では、PGAとPGVの二つを地震動指標として用いた場合の確率論的な地震ハザード評価手法を構築する。手法の構築においては、まず防災科学技術研究所が運営するK-NET、KiK-netの観測記録を用いて、PGAとPGVの相関について検討を行い、PGAとPGVの同時確率分布を明らかにする。次に代表地点の両指標による確率論的地震動評価を実施し、地震動強度の相関が地震ハザードに与える影響を検討する。

2. 最大加速度と最大速度による確率論的地震動評価

2.1 最大加速度と最大速度を用いた地震ハザードの記述

PGAとPGVの二指標を用いる地震ハザードは、PGAとPGVが同時に所与の閾値 a 及び v を超過する年間確率(年超過確率) $P(a,v)$ で表す。地震発生をポアソン過程とする場合には、 $P(a,v)$ は次式で求められる。

$$P(a,v) = 1 - \exp[-\nu(a,v)] \quad (1)$$

ここに、 $\nu(a,v)$ はPGAとPGVが同時に a 及び v を超過する年間頻度(年超過頻度)である。 $\nu(a,v)$ は、活動域毎のマグニチュード、震源深さ、震源距離、あるいは距離減衰式のばらつき等を確率変数として、次式で表される。

$$\nu(a,v) = \sum_{k=1}^n \nu_k^* \sum_{i=1}^{n_{mk}} p_k(m_i) \frac{1}{n_{ek}(m_i)} \sum_{j=1}^{n_{aj}(m_i)} p(a,v | m_i, x_j, h_j) \quad (2)$$

ここに、

ν_k^* : 活動域 k での地震の年発生頻度

$p_k(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生する相対頻度

$p(a,v | m_i, x_j, h_j)$: マグニチュード m_i 、距離 x_j 、深さ h_j の地震が発生した場合に、PGAとPGVが同時に a 及び v を超過する確率

n : 活動域の個数

n_{mk} : 活動域 k で考慮するマグニチュードの分割数

$n_{ek}(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生した場合の破壊面数(イベント数)

である。

2.2 最大加速度と最大速度による同時評価モデル

PGAとPGVが同時に a 及び v を超過する確率 $p(a,v)$ は、PGAとPGVの同時確率密度関数を、 $a < A \leq \infty, v < V \leq \infty$ の範囲で積分することで得られる。ここに、 A と V はPGAとPGVを表す確率変数である。なお、表記を簡単にするため、条件付記号 $(\cdot | m_i, x_j, h_j)$ は省いている。 A と V の同時確率密度関数を $f_{A,V}(a,v)$ とするならば、 $p(a,v)$ は次式で与えられる⁸⁾。

$$p(a,v) = \int_a^\infty \int_v^\infty f_{A,V}(a,v) da dv \quad (3)$$

A と V の確率特性としては、対数正規分布を仮定することが一般的である。そこで、 A の対数平均と対数標準偏差を λ_A と ζ_A とし、 V についても同様に λ_V と ζ_V を定義する。このとき、 $f_{A,V}(a,v)$ は次式で与えられる⁸⁾。

$$f_{A,V}(a,v) = \frac{1}{2\pi\zeta_A\zeta_V\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[\frac{-1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{\ln a - \lambda_A}{\zeta_A}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln a - \lambda_A}{\zeta_A}\right)\left(\frac{\ln v - \lambda_V}{\zeta_V}\right) + \left(\frac{\ln v - \lambda_V}{\zeta_V}\right)^2\right\}\right] \quad (4)$$

ここに、 ρ は A と V の相関係数である。 ρ の算出については2.3に記載する。(3)式は、次式のように書き直すことができる。

$$f_{A,V}(a,v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_A} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln a - \lambda_A}{\zeta_A}\right)^2\right] \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_V\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln v - \lambda_V - \rho(\zeta_V/\zeta_A)(\ln a - \lambda_A)}{\zeta_V\sqrt{1-\rho^2}}\right\}^2\right] \quad (5)$$

ところで、

$$f_{A,V}(a,v) = f_{V|A}(v|a)f_A(a) \quad (6)$$

$$f_A(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_A} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln a - \lambda_A}{\zeta_A}\right)^2\right] \quad (7)$$

であるから、 $A=a$ の場合の V の条件付確率密度関数は、

$$f_{V|A}(v|a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_V\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln v - \lambda_V - \rho(\zeta_V/\zeta_A)(\ln a - \lambda_A)}{\zeta_V\sqrt{1-\rho^2}}\right\}^2\right] \quad (8)$$

となる。すなわち、以下のような対数平均と対数標準偏差を有する対数正規分布となる。

$$E(V|A=a) = \lambda_V + \rho(\zeta_V/\zeta_A)(\ln a - \lambda_A) \quad (9a)$$

$$s.d.(V|A=a) = \zeta_V\sqrt{1-\rho^2} \quad (9b)$$

したがって、所与の a 及び v を超過する確率 $p(a,v)$ は図1に示すように次式で与えられる。

$$p(a,v) = \int_a^\infty \int_v^\infty f_{V|A=a}(v)f_A(a) da dv = \int_a^\infty [1 - F_{V|A=a}(v)]f_A(a) da \quad (10)$$

ここに、 $F_{V|A=a}(v)$ は、 $A=a$ の場合の V の条件付確率分布関数である。

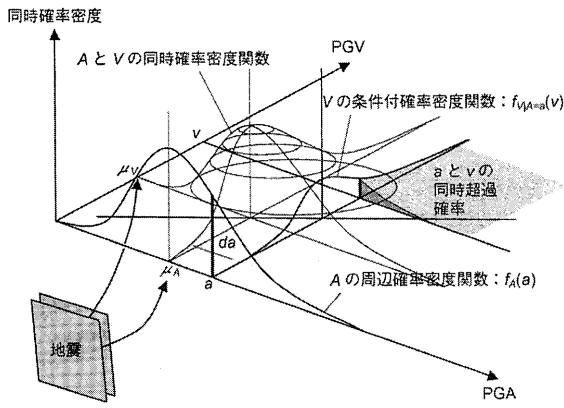


図1 PGAとPGVの同時超過確率

2.3 最大加速度と最大速度の相関係数の評価モデル

地震動の推定誤差は、経験的距離減衰式による推定値と観測値との比の対数で表され、その確率分布は、正規分布と見なすことが多い。本評価で地震動指標として採用するPGAとPGVについては、地震*i*における*j*地点の推定誤差 ϵ_{ij} を推定値と観測値の比の常用対数を用いて次式で表す。

$$\epsilon_{Aij} = \log(o_{Aij} / c_{Aij}) \quad (11a)$$

$$\epsilon_{Vij} = \log(o_{Vij} / c_{Vij}) \quad (11b)$$

ここに、*o*は観測値、*c*は距離減衰式による推定値である。また、添え字の*A*はPGAを、*V*はPGVをそれぞれ表すものとし、以降の式においても同様とする。

PGAとPGVの推定誤差間の相関係数 ρ は、推定誤差 ϵ を用いて、次式で算定される。

$$\rho = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_{Ai} - \mu_A)(\epsilon_{Vi} - \mu_V)}{\sigma_A \sigma_V} \quad (12)$$

ここに、*n*は観測記録数である。 μ_A と σ_A は、それぞれ加速度の推定誤差の平均と標準偏差、 μ_V と σ_V は、速度の推定誤差の平均と標準偏差を表す。

ところで、一般的に地震動のばらつきは、地震内と地震間のばらつきに分離できる(例えば⁹⁾ことを考えると、(11)式で表される推定誤差は次式のように表すことができる。

$$\epsilon_{Aij} = \epsilon_{Ac} + \epsilon_{Aei} + \epsilon_{Asij} \quad (13a)$$

$$\epsilon_{Vij} = \epsilon_{Vc} + \epsilon_{Vei} + \epsilon_{Vsij} \quad (13b)$$

ここに、 ϵ_{Ac} はPGAにおいて距離減衰式の回帰に用いられたデータセットの平均と本評価で用いるデータセットの平均との差で表される補正誤差を表す。また、 ϵ_{Aei} はPGAにおける地震*i*の推定誤差で、地震*i*における距離減衰式の中央値補正項であり、その標準偏差 σ_{Ac} は地震間のばらつきを表す。地震内の推定誤差 ϵ_{Asij} は残余の誤差であり観測地点の地盤特性や伝播経路のばらつきが主に大きく影響していると考えられ、その標準偏差 σ_{As} は地震内のばらつきを表す。これは、PGVにおいても同様に(13b)式の形で表される。

各推定誤差に関して、地震間のばらつきと地点間のばらつきは独立

なので、次式を得る。

$$\sigma_A^2 = \sigma_{Ac}^2 + \sigma_{As}^2 \quad (14a)$$

$$\sigma_V^2 = \sigma_{Vc}^2 + \sigma_{Vs}^2 \quad (14b)$$

次に、 $\epsilon_e = \epsilon_{Ac} + \epsilon_{Vc}$ 、 $\epsilon_s = \epsilon_{As} + \epsilon_{Vs}$ で与えられる推定誤差を考える。PGAとPGVは相関を有するため、それぞれの標準偏差 σ_e 、 σ_s は、

$$\sigma_e^2 = \sigma_{Ac}^2 + \sigma_{Vc}^2 + 2\rho_c \sigma_{Ac} \sigma_{Vc} \quad (15a)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_{As}^2 + \sigma_{Vs}^2 + 2\rho_s \sigma_{As} \sigma_{Vs} \quad (15b)$$

となる。ここに、 ρ_c と ρ_s は、地震間及び地点間のPGAとPGVの相関係数である。さらに、 $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_s$ で与えられる推定誤差を考える。 ϵ_e と ϵ_s は独立なので、その標準偏差 σ に関して

$$\sigma^2 = \sigma_e^2 + \sigma_s^2 = \sigma_{Ac}^2 + \sigma_{Vc}^2 + \sigma_{As}^2 + \sigma_{Vs}^2 + 2\rho_c \sigma_{Ac} \sigma_{Vc} + 2\rho_s \sigma_{As} \sigma_{Vs} \quad (16)$$

を得る。また、 ϵ_A と ϵ_V の相関係数を ρ' とするならば、

$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_V^2 + 2\rho' \sigma_A \sigma_V = \sigma_{Ac}^2 + \sigma_{As}^2 + \sigma_{Vc}^2 + \sigma_{Vs}^2 + 2\rho' \sigma_A \sigma_V \quad (17)$$

となり、(16),(17)式より

$$\rho' = \frac{\rho_c \sigma_{Ac} \sigma_{Vc} + \rho_s \sigma_{As} \sigma_{Vs}}{\sigma_A \sigma_V} \quad (18)$$

を得る。以上より、全体の推定誤差を用いて評価した相関係数は地震内と地震間についてそれぞれ求めた相関係数の加重平均として求めることができる。

3. 最大加速度と最大速度の相関係数の評価

3.1 相関係数の評価に用いるデータセット

PGAとPGVの相関係数は、K-NET¹⁰⁾とKiK-net¹¹⁾の実観測記録を用いて評価した。推定誤差を算定するための距離減衰式は、安中¹²⁾らによる次式を採用した。

$$\begin{aligned} \log a &= 0.606M + 0.00459h - 2.136\log(d) + 1.730 \\ \log v &= 0.725M + 0.00318h - 1.918\log(d) - 0.519 \\ d &= \Delta + 0.334\exp(0.653M) \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、*a*は最大加速度 (cm/s²)、*v*は最大速度 (cm/s)、 Δ は断層面からの最短距離 (km)、*h*は震源深さ (km)、*M*はマグニチュードである。

対象地震は、この距離減衰式のデータセットに倣い関東平野で観測記録の得られている地震とし、以下の条件で抽出した。

- ① 範囲：東経 137~142°、北緯 34~38°、200km 以内
- ② 地震規模：M5.0 以上
- ③ 観測期間：1996年9月~2006年7月

図2に以上の条件を満たす地震の震央分布(全158地震)を示す。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以下で全体の約90%を占める。観測地点は、図3に示すように1都6県内の地点とした。

以上の条件の観測記録は、全部で10882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とするため、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。なお、安中¹²⁾らによれば、工学的基盤のせん断波速度は、 $V_s=300\sim600$ m/sとなっているが、

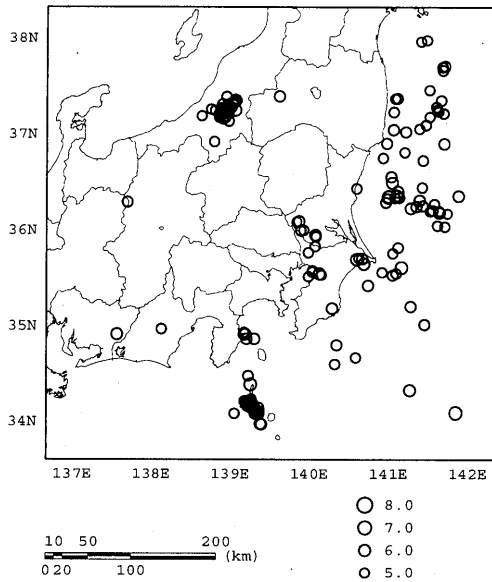


図2 観測地震の震央分布

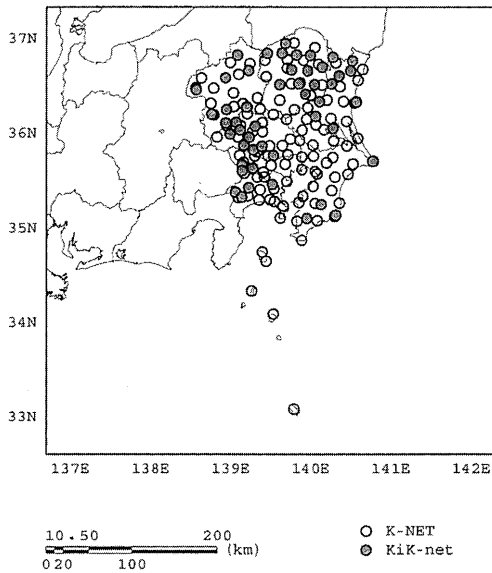


図3 観測地点の分布

ここでは同様の式を採用している文献¹³⁾を参考に、 $V_s=400\text{m/s}$ とした。その際、地盤モデルはK-NET, KiK-netの公開している地盤情報^{14),15)}から林¹⁶⁾らと同様の手法を用いて設定した。なお、地盤の非線形性は、抽出された観測記録(地表)のPGAとPGVが、それぞれ 473.0cm/s^2 , 19.0cm/s であることから、考慮しなかった。

PGAとPGVは、工学的基盤波形から評価した。PGAについては、NS方向とEW方向の最大値の幾何平均とした。なお、地震動波形を確認してノイズの大きいと思われる記録については取り除いた。また、NS, EW方向それぞれの加速度波形について、0.1~10Hzのバンドパスフィルタを掛けた後に積分処理することで速度波形を評価し、その最大振幅値の幾何平均をPGVとした。

最終的なデータセットは、安中¹²⁾らの回帰式のデータセットの条件に合わせてPGAが2成分とも 1.0cm/s^2 以上のものとした。また、観測記録から、地盤モデルが公開されていない地点と地盤モデルが適

切に設定できなかった地点の記録を除いた。さらに、地震内と地震間でそれぞればらつきを考慮するために、まず10地震以上の記録が得られている観測点での記録という条件でデータを抽出した。次に上記で抽出された観測点の10点以上で記録が得られている地震という条件で記録を限定した。最終的なデータセットのサンプル数は、8615となった。以下にデータセットの概要を示す。

- ① 地震数：158
- ② 観測点数(観測記録数)：186(計8615記録)
- ③ M：5.0~6.8
- ④ 震源距離：18.1~448.4km

3.2 評価データセットにおける加速度と速度の関係

3.1で構築したデータセットにおけるPGAは、地表において $1.0\sim 473.0\text{cm/s}^2$ の範囲、PGVは $0.02\sim 19.00\text{cm/s}$ の範囲に分布している。また、工学的基盤においては、PGAは $0.4\sim 202.0\text{cm/s}^2$ の範囲、PGVは $0.02\sim 13.40\text{cm/sec}$ の範囲に分布している。PGAとPGVの分布を、図4に示す。図中には合わせて回帰式を示した。工学的基盤波形のサンプル値は地表よりも小さくなっているが、回帰式としては大きな差異は見られなかった。

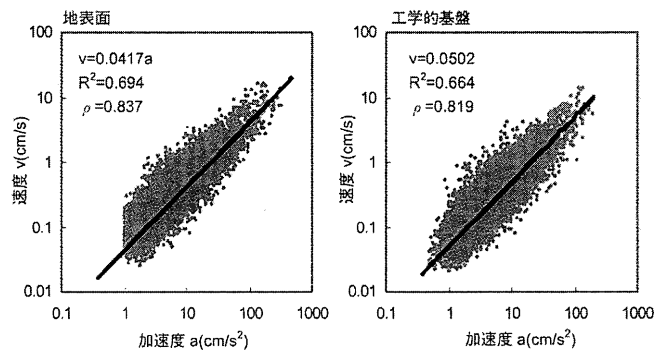


図4 PGAとPGVの分布

3.3 PGAとPGVの相関係数の算定

PGAとPGVの相関係数を(18)式により算定する。

まず、推定誤差 $\varepsilon_{Aij} (= \log(o_{Aij}/c_{Aij}))$, $\varepsilon_{Vij} (= \log(o_{Vij}/c_{Vij}))$ について、次式を最も満たすような回帰係数 α, β, γ を算出した。

$$\begin{cases} \log(o_{Aij}/c_{Aij}) - \alpha_{Ai} - \beta_{Aj} - \gamma_A = 0 \\ \log(o_{Vij}/c_{Vij}) - \alpha_{Vi} - \beta_{Vj} - \gamma_V = 0 \end{cases} \quad (20)$$

ここに、 α_i は地震*i*における地震補正係数、 β_j は地点*j*における地点補正係数であり、各記録において共通の値である。また γ は距離減衰式の回帰に用いたデータセットと本評価で用いたデータセットの平均の差であり、中央値補正項となる。なお、PGAとPGVを表す添え字のA, Vは省略している。ここで回帰した α_i は、(13)式における ε_{ei} に、 γ は ε_c に対応する。また、全体の誤差 ε から α と γ を引いたものを地震内の誤差 ε_e とする。

得られた地震補正係数 α と地点補正係数 β の分布を図5に示す。これらの標準偏差から、地震内と地震間のばらつき σ_E, σ_S は表1のようにまとめられる。また、同表にはPGAとPGVの相関係数も示した。地震間のばらつきは、PGAとPGVの両指標において、地震内

のばらつきよりも小さい。したがって、相関係数は、地震間の方が地震内より大きい。

なお、(12)式により地震内と地震間の誤差を分離せずに求めた場合の相関係数は、0.740 となり、表中の値とほぼ同値である。

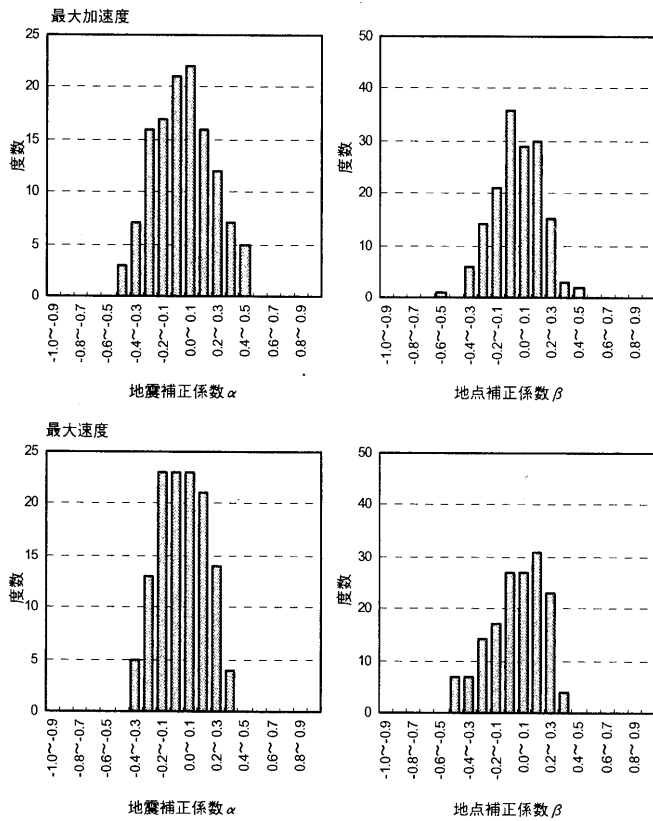


図5 地震補正係数と地点補正係数の分布

表1 地震係数と地点係数の標準偏差と相関係数

地震動強度指標	σ_a	σ_s	σ_{ALL}
PGA	0.192	0.251	0.317
PGV	0.155	0.263	0.305
ρ	0.873	0.705	0.748

数値は常用対数で表す。データセットは、水平2成分の幾何平均による。
: (18)式より算定

3.4 最大加速度と最大速度の相関に与える諸変数の影響

地震観測記録を特徴づける変数として、地震規模と観測地点における震源距離を取り上げ、これらがPGAとPGVの相関に与える影響について評価した。なお、地震規模ごとや震源距離ごとにデータセットを分割すると、区間内で同一の地震や観測点が多くなり、十分なサンプル数が与えられないため、地震間と地震内の推定誤差のばらつきを適切に評価することができなかった。そこで、本検討では(12)式を用いて全体の推定誤差の相関係数による評価を行った。

図6にデータセットの地震規模と震源距離の分布を示す。地震規模によらず、震源距離は同様の範囲に分布していることがわかる。また、同図に示した同一の地震規模におけるデータの震源距離の平均は、僅かながら地震規模の増加とともに大きくなっている。

データセットを地震規模0.2刻みの区間に分け、各区間でPGAとPGVの相関係数を求めた。各区間の中央値に対する分布を図7に示

す。相関係数は、地震規模M5.0~5.2の間では0.771程度であるが、M6.6~6.8程度になると0.546となり、地震規模が大きくなるにつれて、小さくなる傾向が見られる。この相関係数の分布傾向から、地震規模が大きくなるにつれて相関係数が線形的に減少するような式を用いてモデル化を行った。回帰結果を下式に示す。

$$\rho(M) = -0.22M + 1.95 \quad (21)$$

次に、データセットを震源距離20kmごとの区間に分け、各区間においてPGAとPGVの相関係数を評価した。各区間の中央値に対する相関係数の分布を図8に示す。相関係数は、震源距離30~40kmの区間では0.846であるが、150~160kmの区間では、0.749となり、震源距離が大きくなるにつれて、相関係数が小さくなる傾向が見られた。震源距離に関しても、距離の増加とともに相関係数が線形的に減少するモデルを採用し、下式のように評価した。

$$\rho(\Delta) = -0.00098\Delta + 0.87 \quad (22)$$

地震規模による依存性の評価では、Mが大きくなるにつれて、相関係数を算出する区間内のデータセットは、より遠距離の観測記録を含むようになる。また、震源距離の依存性の評価では、震源距離の遠い区間において相関係数が小さくなっている。よって、遠距離の観測記録が相関係数を低減させていることがわかる。図7ではM6.2を境に相関係数が不連続に減少している傾向が見られるが、これはM6.2以上の地震で震源距離70km程度以下のデータが少ないことから、同様に推察される。これは、震源距離が遠くなるほど、継続時間が長

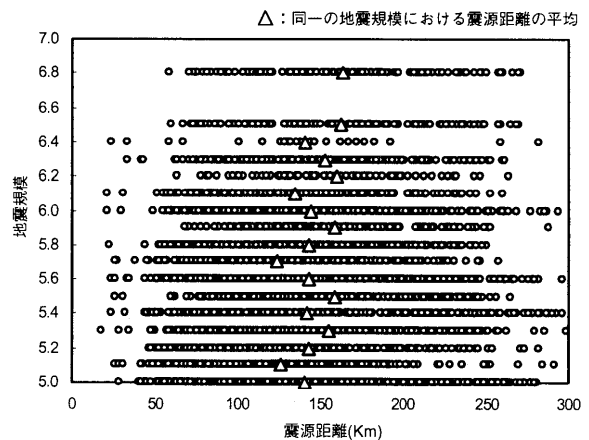


図6 地震規模と震源距離の分布

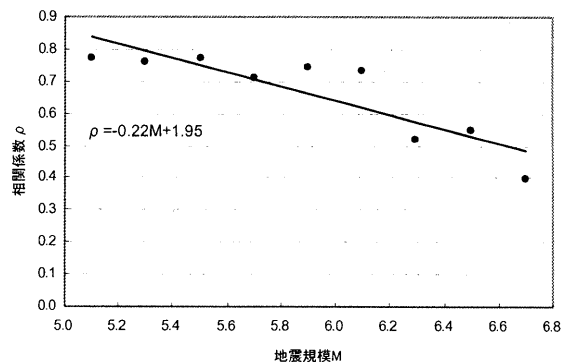


図7 地震規模が相関に与える影響

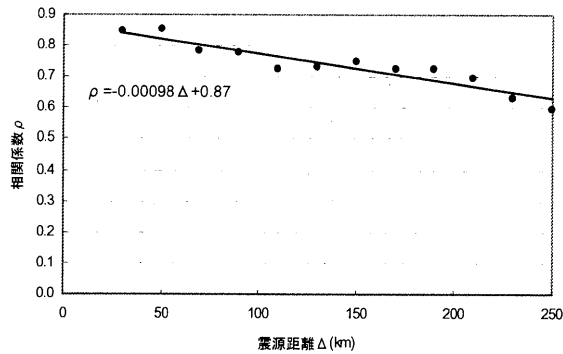


図8 震源距離が相関に与える影響

くなり、また、地震動の伝播経路の速度構造や減衰構造が多様化することで、PGA と PGV の関係がばらつくためと考えられるが、詳細な要因については今後の課題としたい。これらの回帰モデルについては、4章にて解析例に適用し、その影響について調べる。

4. 適用試算

4.1 諸条件の設定

対象地点は、図9に示す1都6県の都県庁所在地とした。

地震活動域モデルについては文献13)を参照して、大地震発生域と中小地震発生域を設定した。なお、詳細な諸元については文献13)を参照されたい。また、距離減衰式は、(19)式の安中式を採用し、距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、表1に基づきPGAについては0.317(常用対数)、PGVについては0.305(常用対数)とした。また、PGAとPGVの相関係数は、0.748を採用した。

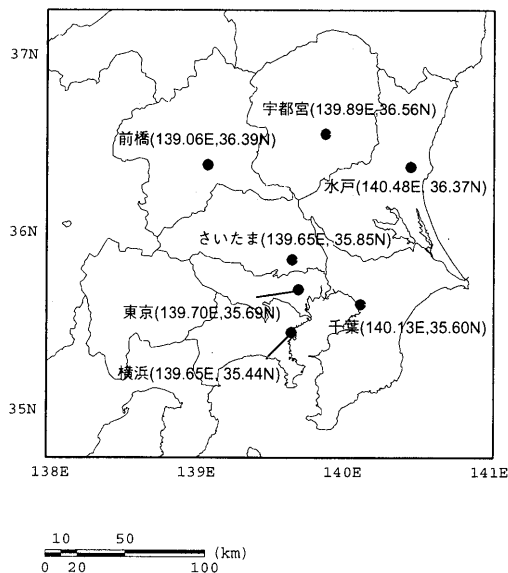


図9 評価地点

4.2 解析結果

(1) 評価地点ごとの地震ハザード

図10に評価地点の地震ハザード評価結果を示す。評価結果は、横軸にPGA、縦軸にPGVをとると、2指標の閾値に対応する年同時超過確率により表される地震ハザード曲面となり、ここでは等確率線で

結ぶコンターとして表現した。PGV=0cm/sにおけるPGAの周辺確率分布曲線は、PGAのみを指標とした場合の地震ハザードカーブに対応する。また、同様にPGA=0cm/s²における周辺確率分布曲線はPGVの地震ハザード曲線となる。図に示したコンターは、PGAとPGVの相関が高くなるとより右上に凸になり、相関が低くなると左下に凸になる傾向となる。また、同図には、所与のPGAとPGVに対する年同時超過確率とPGA、PGVそれぞれ一指標とした場合の年超過確率を示した。加速度1000cm/s²に対する年超過確率と、加速度1000cm/s²および速度50cm/sに対する年同時超過確率を比較すると、年同時超過確率の方が小さくなっている。これは、加速度振幅に対する年超過確率を、さらに速度で条件づけたためである。

同図によれば、地震動強度の大きさは、北関東に比べて南関東の方が大きい。これは、規模の大きい地震を引き起こす震源が南関東地域に多いことによる。また、同図において、同一の年超過確率に着目すると、地域的な差異が見られる。北関東と南関東では、コンターの形状に、明瞭な差異があり、PGAについて観察される北関東と南関東の差異よりも、PGVについての差異の方が顕著である。これは、PGVが比較的長周期成分の影響を受けやすく、そのような成分が卓越する海溝型の大きな地震が、南関東において大きな影響を及ぼすためと考えられる。

(2) 相関の依存性が地震ハザードに与える影響

北関東と南関東を代表する地点として、宇都宮と東京、横浜を対象に、(21)、(22)式で評価された地震規模と震源距離に依存した相関性を考慮して評価を行った。ただし、地震規模と震源距離による相関は、それぞれ上限を0.858、0.846、下限を0.500、0.600とした。

図11にPGAとPGVの相関が地震規模に依存する場合の地震ハザード評価結果を示す。それぞれ図10の結果と比較すると周辺確率分布は変わらないが、地震規模ごとに相関が異なるため、コンターの形状が異なっている。全地点に共通の特徴として、小規模の地震が支配的な高確率の領域では、コンターの形状に大きな差異は見られないが、大規模地震が支配的な低確率の領域では、PGAとPGVの相関の減少による影響が表れている。

図12にPGAとPGVの相関が震源距離に依存する場合の地震ハザード評価結果を示す。内陸の小さな地震が支配的な栃木では、図10の結果と比べて大きな差異は見られない。これは、地震ハザードに寄与する大きな地震が近くに見られないためである。一方、南関東地震の震源に近い東京や神奈川では、年超過確率10⁻⁵の領域で差異が見られ、より相関が高くなっていることが分かる。

表2に以上の検討の年同時超過確率を比較して示す。参照点は、図10に示したものと同様に、PGV=0.05・PGAとした。同表のCASE-1は一定の相関係数によるもの、CASE-2は相関係数に地震規模依存性を考慮したもの、CASE-3は距離依存性を考慮したものである。表中のCASE-2は、CASE-1に比べ小さくなっている。また、CASE-3は、CASE-1に比べ大きくなっていることが確認された。

5. まとめ

本研究では、PGAとPGVの二指標を地震動指標として用いた場合の、確率論的地震ハザード評価手法の構築を行った。構築に際しては、同二指標を用いた所与の地震動強度に対する年超過確率の評価モデ

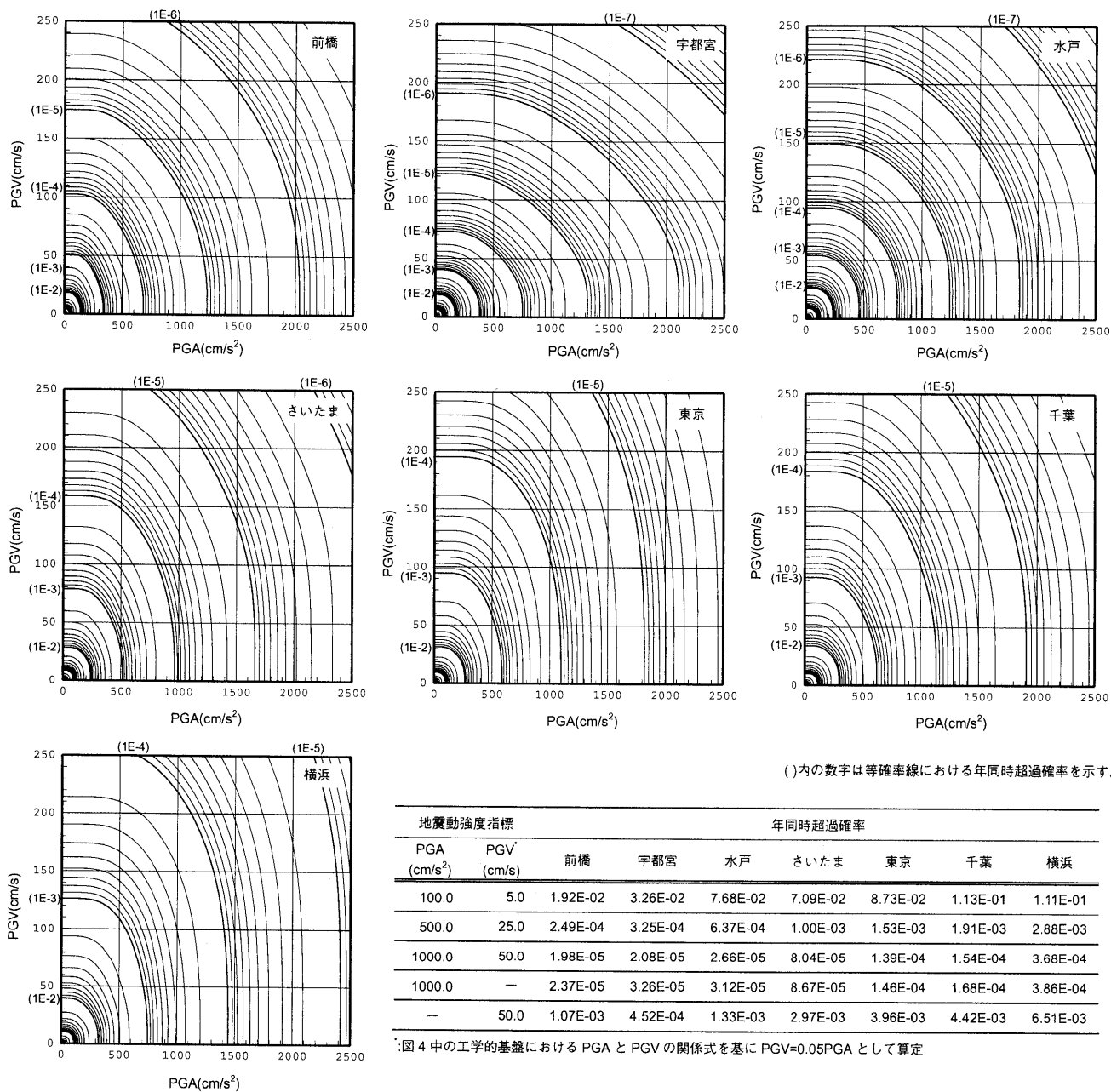


図10 PGAとPGVによる地震ハザード評価結果

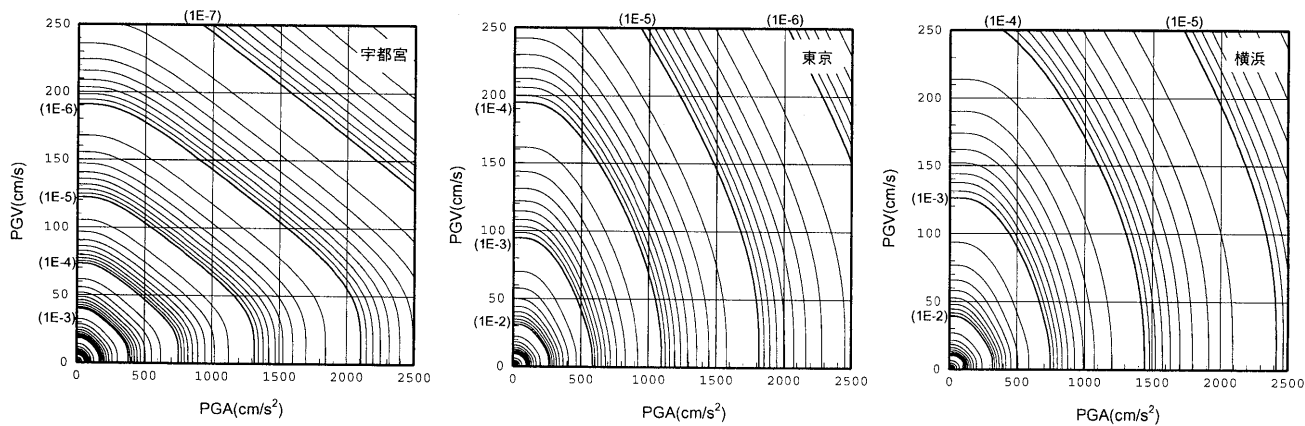


図11 地震規模に依存した相関を考慮したPGAとPGVの地震ハザード評価

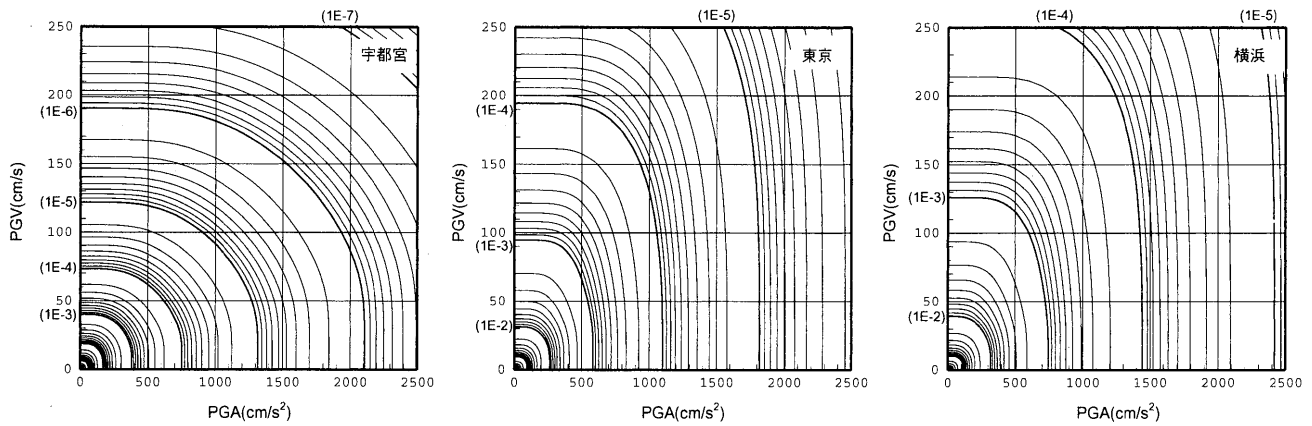


図 12 震源距離に依存した相関を考慮した PGA と PGV の地震ハザード評価

表 2 年同時超過確率の比較

地震動強度指標		年同時超過確率			
PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	CASE	宇都宮	東京	横浜
100.0	5.0	1	3.26E-02	8.73E-02	1.11E-01
		2	3.01E-02	8.29E-02	1.08E-01
		3	3.35E-02	9.08E-02	1.16E-01
500.0	25.0	1	3.25E-04	1.53E-03	2.88E-03
		2	2.76E-04	1.34E-03	2.60E-03
		3	3.57E-04	1.59E-03	3.00E-03
1000.0	50.0	1	2.08E-05	1.39E-04	3.68E-04
		2	1.63E-05	1.20E-04	3.33E-04
		3	2.45E-05	1.43E-04	3.78E-04

CASE: 1-相関係数を一定した場合 ($\rho=0.748$)
 2-地震規模による相関係数を考慮
 3-震源規模による相関係数を考慮

ルを設定した。次に K-NET と KiK-net の観測記録を用いて、工学的基盤位置における PGA と PGV の推定誤差の相関関係の評価を行い、その地震規模依存性や震源距離依存性についても検討した。さらに、関東地域の複数の地点を例題に、PGA と PGV の二指標による確率論的地震動評価を行った。以上の検討を通じ、以下の知見を得た。

- 1) PGA と PGV の推定誤差の相関は、約 0.75 程度で、比較的強い相関関係が認められる。
- 2) 地震規模が大きくなるにつれて、その相関は小さくなる傾向が見られる。また、震源距離が大きくなることによっても相関関係は小さくなる傾向が見られた。これについては、今後さらなる検討を行い、原因を明らかにしたい。
- 3) 北関東と南関東では、地震ハザード曲面の形状を表すコンターに明瞭な違いが認められた。

本研究では、データセットの作成において観測記録を関東地域に限定したため、強震観測記録が必ずしも十分でなかった。本研究で得られた結果の極めて大きな地震への適用性については、一層の検討が必要である。また同様に、推定誤差の標準偏差も、本データセットにおける評価結果であり、その利用にあたっては留意する必要がある。

地震規模と震源距離が相関に与える影響については、それぞれ独立に検討したが、両者の差異は顕著でなかった。そのため、一方の影響のみを考慮するだけでは不十分で、地震規模と震源距離の影響を同時に評価する必要があると考えられる。本評価では、このような検討のための十分なサンプル数がなかったため、それぞれ独立の評価とし

たが、今後のデータの蓄積に期待し検討を実施したい。

謝辞

本研究の実施に際し、防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の強震記録を使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤吉之, 田中英朗, 福島誠一郎: 損傷度評価における地震動指標に関する研究, JCROSSAR '95, pp.403-208, 1995.
- 2) 境有紀, 吉岡伸悟, 瀬藤一起, 壁谷澤寿海: 1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 建築学会構造系論文集, 第 549 号, pp.43-50, 2001.11.
- 3) 増田有周, 長戸健一郎, 川瀬博: RC 建造物の地震応答解析結果に基づく被害関数構築に関する研究, 建築学会構造系論文集, 第 558 号, pp.101-107, 2002.8.
- 4) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.
- 5) Bazzurro, P., Cornell, C.A.: Vector-valued probabilistic seismic hazard analysis(VPSHA), Proceedings 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, MA, 2002.7.
- 6) Inoue, T.: Seismic Hazard Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Structures, Report No. RMS-8, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Reliability of Marine Structures Program, Stanford University, Stanford, CA, 1990.7.
- 7) Shimomura, T., Takada, T.: Joint pdf of ground motion intensity and duration time based on PSHA, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1233, 2004.8.
- 8) Ang, A.H-S. and Tang, W.H., 伊藤学, 亀田弘行訳: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 1977.
- 9) 翠川三郎, 大竹雄: 地震動強さの距離減衰式にみられるパラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, 第 3 巻, 第 1 号, pp.59-70, 2003.2.
- 10) K-NET: 観測記録, 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>), (参照 2006-07-30)
- 11) KiK-net: 観測記録, 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>), (参照 2006-07-30)
- 12) 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, pp.161-164, 土木学会, 1997.7.
- 13) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2004), 日本建築学会, 2004.9.
- 14) K-NET: 観測点一覧 (土質データ), 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/db/>), (参照 2006-07-30)
- 15) KiK-net: 観測点コード一覧 (地質図), 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>), (参照 2006-07-30)
- 16) 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, 建築学会構造系論文集, 第 600 号, pp.203-210, 2006.2.

(2006年9月10日原稿受理, 2007年3月7日採用決定)