

複数の地点を対象とした同時地震危険度評価

奥村 俊彦¹・石川 裕²

¹正会員 工修 清水建設(株) 和泉研究室 (〒100 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F)

²正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)

ライフラインの基幹施設や企業のコンピュータセンターなどは、複数の地点に存在する施設のうち1箇所が被害を受けてもシステム全体の機能を維持することができるが、これらが同時に被害を受けることで全体の機能を喪失する。このような場合、システム全体の耐震安全性の検討には、複数の地点で同時にあるレベル以上の地震動となる可能性を評価する必要がある。本研究では、従来単一地点を対象として実施されてきた確率論的な地震危険度評価手法を拡張することにより、複数地点の「同時の」地震危険度評価の方法を定式化した。さらに、適用例をもとに、複数の地点に対して同時にあるレベル以上の地震動をもたらすような地震像についても検討を加えた。

Key Words: *probabilistic seismic hazard analysis, plural sites, simultaneous event, uncertainty of attenuation law*

1. はじめに

従来実施されてきた地震危険度評価は、基本的に単一の地点を対象としたものであった。たとえば、地震危険度マップの作成においては、多数の地点を対象とした地震危険度評価が実施されるが、各地点はそれぞれ独立に扱われている。

一方、個々の構造物ではなく、複数の施設から構成されるシステムを考える場合には、異なる地点に存在する施設のうち1箇所が被害を受けてもシステム全体の機能を維持することができるが、これらが同時に被害を受けることで全体の機能を喪失する場合が多々存在する。このような例としては、電力施設の発電所や変電所などのライフラインの基幹施設、企業のコンピュータセンターや工場群などを挙げることができる。このような場合、システム全体の耐震安全性の検討には、複数の地点で同時に(同一の地震によって)あるレベル以上の地震動となる可能性を評価する必要がある。

本研究では、従来単一地点を対象として実施されてきた確率論的な地震危険度評価手法を拡張することにより、複数地点の「同時の」地震危険度評価の方法を定式化した。また、計算例に基づき複数地点の同時地震危険度の特徴を考察するとともに、複数の地点に対して同時にあるレベル以上の地震動をもたらすような地震像についても検討を加えた。

2. 複数地点の同時地震危険度評価の定式化

複数地点の同時地震危険度評価では、 m 個の地点において同一の地震によってもたらされる地震動の強さが $A_1 \geq a_1 \cap \dots \cap A_m \geq a_m$ 、すなわち $\bigcap_{n=1}^m A_n \geq a_n$ となる事象が対象となる。そこには、距離減衰式のばらつきの取り扱いなど、複数の地点を対象にするがゆえの固有の問題も含まれるが、基本的には、従来の単一地点を対象とした地震危険度評価の方法を拡張することができる。以下では、距離減衰式のばらつきの取り扱い方法も含めてその定式化を示す。なお、本報ではポアソン型モデルを仮定した場合について扱っているが、地震発生の非定常性を考慮した非ポアソン型モデルの場合にも拡張が可能である。

(1) 複数地点の同時ハザード曲線の定式化

複数地点の同時地震危険度評価の結果は、 t 年間のうちに m 個の地点において同時に地震動の強さが $\bigcap_{n=1}^m A_n \geq a_n$ となる確率、すなわち「複数地点の同時ハザード曲線」で表現される。複数地点の同時ハザード曲線は、以下のようにして算定することができる。

まず、活動域 k で発生する規模 m_i 、発生位置 e_j (地点 n までの距離は r_{jn}) の地震を与条件とした場合に $\bigcap A_n \geq a_n$ となる確率を

$$P_{k(ij)}(\bigcap A_n \geq a_n) = P_k(\bigcap A_n \geq a_n | m_i, e_j) \quad (1)$$

と表記すると、地震活動域 k で地震が発生した条件下で $\cap A_n \geq a_n$ となる確率は

$$P_k(\cap A_n \geq a_n) = \sum_i \sum_j P_{k(ij)}(\cap A_n \geq a_n) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(e_j) \quad (2)$$

となり、地震活動域 k における地震の発生頻度を v_k とすると地震活動域 k の地震により 1 年間に $\cap A_n \geq a_n$ となる事象の発生頻度は

$$w_k(\cap A_n \geq a_n) = v_k \cdot P_k(\cap A_n \geq a_n) \quad (3)$$

となる。地震の発生をポアソン過程でモデル化すると、 t 年間に少なくとも 1 回 $\cap A_n \geq a_n$ となる確率は

$$P(\cap A_n \geq a_n; t) = 1 - \exp\{-t \cdot \sum_k w_k(\cap A_n \geq a_n)\} \quad (4)$$

で表される。これが複数地点を対象とした場合の同時ハザード曲線である。

(2) 複数地点を対象とした地震活動域の貢献度

地震活動域の貢献度とは、特定のリスクレベルに対応する地震動強さに対して、それを上回るような地震動が生じた際にそれがどの地震活動域で発生した地震によるものかを表す指標であり、亀田・石川らによる「確率論的想定地震」の根幹となるものである。

複数地点を対象とした場合の地震活動域の貢献度 $c_k(\cap A_n \geq a_n)$ は、単一地点の場合の拡張として、次式で定義することができる。

$$c_k(\cap A_n \geq a_n) = \frac{w_k(\cap A_n \geq a_n)}{\sum_k w_k(\cap A_n \geq a_n)} \quad (5)$$

ただし、 $w_k(\cap A_n \geq a_n)$ は式(3)で表される頻度である。

(3) 複数地点を対象とした場合のばらつきの扱い

実際に複数地点の同時地震危険度を評価するためには、距離減衰式のばらつきの取り扱いに工夫が必要となる。これは、通常地震危険度解析では、地点 n の地震動強さ A_n を距離減衰式などで推定される中央値 $\hat{A}_n$ とそのばらつき U_n を用いて

$$A_n = U_n \hat{A}_n \quad (6)$$

と表現するが、複数の地点を対象とする場合には、ばらつき U_n の中に各地点で独立な成分と従属する成分が混在し、事象 $A_n \geq a_n$ が地点間で互いに独立ではないからである。各地点で従属する成分としては、例えば震源特性に起因するばらつきが考えられる。そこで、距離減衰式のばらつきを地点ごとに独立に変動する成分 $U_{1,n}$ と各地点に同様に作用する成分 U_2 に

分け、地点 n の地震動強さ A_n を

$$A_n = U_{1,n} U_2 \hat{A}_n \quad (7)$$

で表し、地点間で独立した成分と従属した成分を分離することにより、式(1)は以下のようにして算定することができる。

$$\begin{aligned} P_{k(ij)}(\cap A_n \geq a_n) &= P_{k(ij)}(\cap U_{1,n} \geq \frac{a_n}{U_2 \hat{A}_n}) \\ &= \int_0^\infty P_{k(ij)}(\cap U_{1,n} \geq \frac{a_n}{u_2 \hat{A}_n} \mid U_2 = u_2) f_{U_2}(u_2) du_2 \\ &= \int_0^\infty P_{k(ij)}(U_{1,1} \geq \frac{a_1}{u_2 \hat{A}_1} \mid U_2 = u_2) \times \cdots \\ &\quad \cdots \times P_{k(ij)}(U_{1,m} \geq \frac{a_m}{u_2 \hat{A}_m} \mid U_2 = u_2) f_{U_2}(u_2) du_2 \quad (8) \end{aligned}$$

ただし、上式の積分区間は、 U_2 が対数正規分布など非負の分布であることを前提にしている。

3. 計算例と考察

(1) 解析条件

以下の計算例で用いる地震危険度解析は、過去に発生した地震データと活断層データを組み合わせたもので、地震活動域のモデルは文献2)で用いたものに準じている。ただし、活断層のデータは、松田の起震断層³⁾に、新編日本の活断層⁴⁾で追加・修正されたデータを反映させたものとしている。また、活断層の平均活動間隔は活動度クラスごとに平均的な変位速度を仮定して算定しており、兵庫県南部地震以後の活断層の調査結果等は反映していない。また、地震の発生はポアソンモデルとしている。

対象地点は神戸と大阪とし、両地点の最大加速度はともに福島・田中式⁵⁾で算定する。また、距離減衰式のばらつきは対数標準偏差が0.5の対数正規分布でモデル化し、各地点で独立に変動するばらつき U_1 と共通に変動するばらつき U_2 の割合は、文献6)を参考に1:1 (対数標準偏差0.354) とする。図-1に対象地点と周辺の活断層の分布を、また表-1に主な地震活動域の諸元をそれぞれ示す。

(2) 解析結果と考察

1) 単一地点と複数地点の地震危険度の比較

まず、神戸と大阪を対象に単一地点を対象とした地震危険度解析を実施し、2地点の同時地震危険度解析の結果と比較する。図-2は、これらのハザード曲線を示したものであり、2地点の同時ハザード曲線

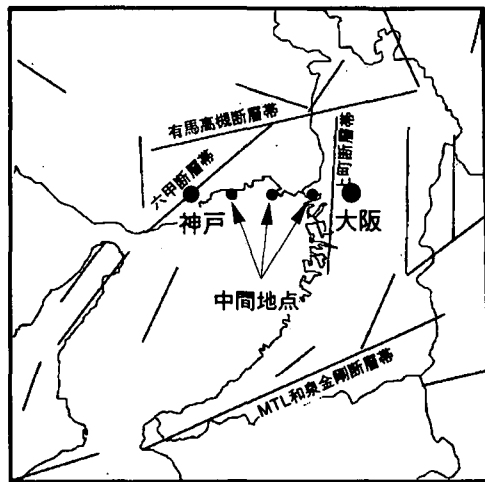


図-1 対象地点周辺の活断層の分布

表-1 主な地震活動域のパラメータ

地震活動域	発生頻度 (1/年)	M	神戸からの 距離 (km)	大阪からの 距離 (km)
近傍の 内陸地震	1.8×10^{-5}	$5.0 \sim 7.5$ $b=0.95$	0~	0~
六甲断層帯	3.2×10^{-4}	7.3	0.6	20.4
有馬高槻 断層帯	1.2×10^{-4}	7.7	10.2	16.7
MTL和泉金剛 断層帯	9.9×10^{-4}	7.8	39.6	27.5
上町断層帯	2.1×10^{-4}	7.3	26.6	3.9

注) 近傍の内陸地震の発生頻度は、 1km^2 あたりのもの

は、1年間に少なくとも1回ある最大加速度を2地点で同時に超過する確率を表示している。神戸と大阪の単独の地震危険度は概ね同レベルにあり、例えば最大加速度が500galの年超過確率はいずれの地点も 10^{-3} 程度である。これに対して、2地点の同時ハザード曲線は、各地点単独のものよりもかなり小さく、年超過確率の値は200galで1/2、500galで1/4、1000galでは1/10程度となる。

図-3および図-4は、これら3ケースにおける地震活動域の貢献度を示したものである。神戸では、近傍の内陸地震（面的な広がり考えた地震活動域）と六甲断層帯の貢献度が大きく、大阪では近傍の内陸地震、MTL和泉金剛断層帯および上町断層の貢献度が大きい。2地点同時の場合には、低加速度レベルで近傍の内陸地震の貢献度が大きいことは同様であるが、400gal前後ではMTL和泉金剛断層帯、600gal以上で六甲断層

帯の貢献度が最大となる。また、MTL和泉金剛断層帯と有馬高槻断層帯の貢献度は、各地点単独の時よりも大きくなっていることが特徴的である。

これらの貢献度は、式(5)の定義から各活動域での地震の発生頻度が反映された指標であるが、各活動域で地震が発生した条件下で複数地点で同時にある

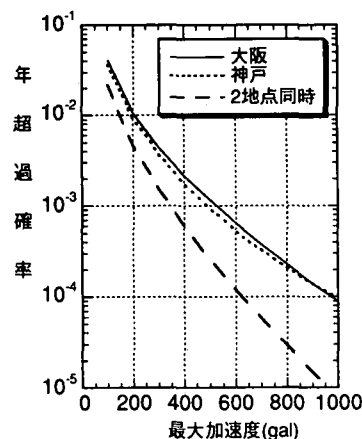


図-2 ハザード曲線

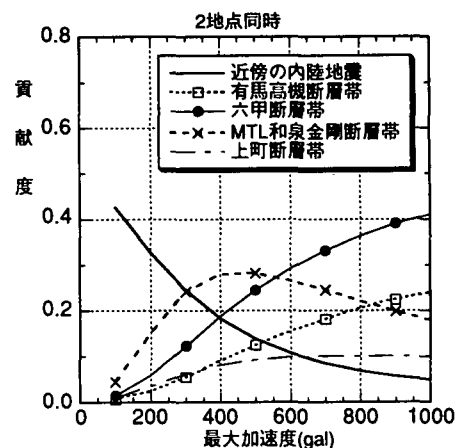
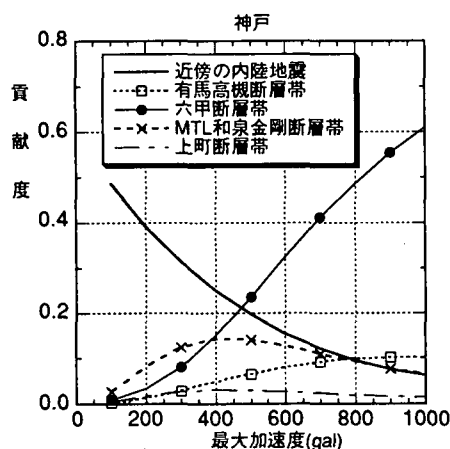
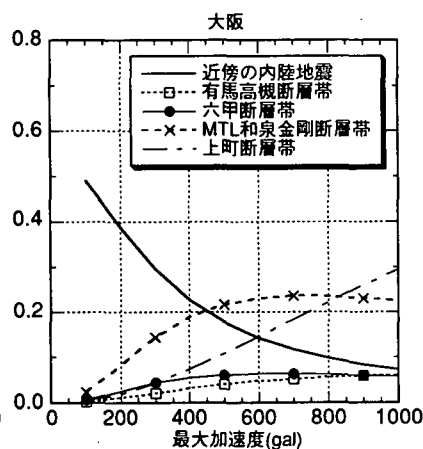


図-3 同時地震危険度に対する地震活動域の貢献度



(a) 神戸



(b) 大阪

図-4 単一地点を対象とした場合の地震活動域の貢献度

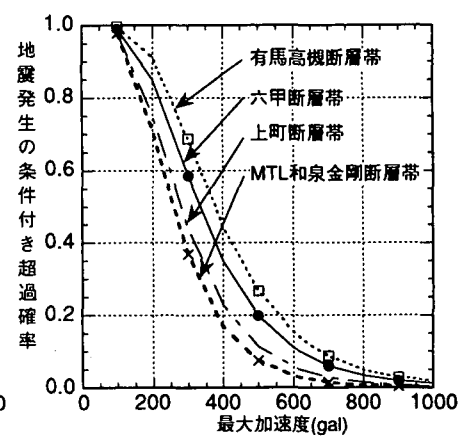
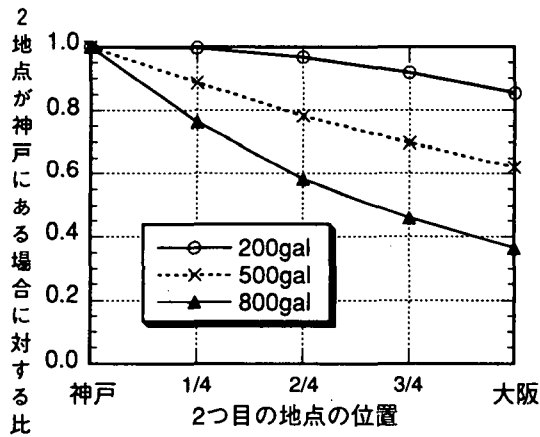
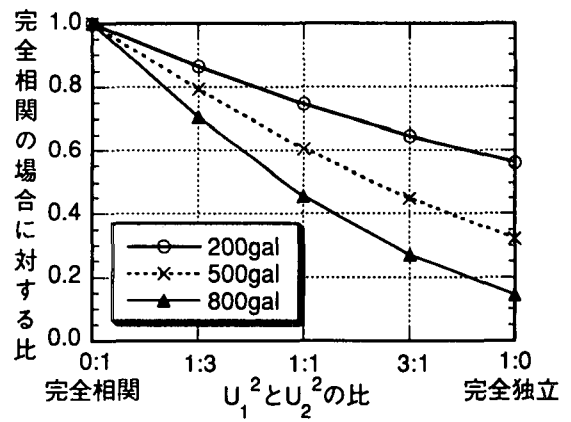


図-5 地震発生条件下で両地点同時に最大加速度を超過する確率



図一6 2地点間の距離の違いによる同時地震危険度の変化



図一7 距離減衰式のばらつきのうち地点間で独立な成分と従属する成分の割合の影響

加速度を超える確率(式(2))も、別の視点で地震活動域の影響度を見る指標となる。図一5は、主要な4本の断層で地震が発生したと仮定したときに神戸と大阪で同時にある加速度を超える確率を表している。これによると、万一地震が発生した場合に両地点に対して最も危険な断層は有馬高槻断層帯であり、次いで六甲断層帯となる。両地点からの距離があるMTL和泉金剛断層帯の確率は最も小さい。これらの活断層の活動により2地点で同時に200galを超える確率は0.7~0.9と高い値を示すが、500galになると有馬高槻断層帯で0.3程度、MTL和泉金剛断層帯では0.1以下の確率にとどまっている。

2) 2地点間の距離の影響の検討

2地点間の距離の違いによる影響を見るために、1つの地点を神戸に固定し、もう1つの地点を神戸から大阪まで両地点の距離の1/4ずつ離散的に変化させた場合について同時地震危険度を算定した。なお、ばらつき U_1 と U_2 の割合は2地点間の距離によらず1:1に固定した。図一6は、両地点がともに神戸にある場合に対する同時地震危険度の比であり、最大加速度が200、500、および800galについて示してある。2地点間の距離が離れるほど同時の地震危険度は低下するが、その度合いは加速度レベルが大きいほど顕著であることがわかる。

3) U_1 と U_2 の割合の影響の検討

距離減衰式のばらつきのうち地点間で独立に変動する成分 U_1 と従属する成分 U_2 の割合を変化させ、神戸と大阪の同時地震危険度に対する影響を検討した。この際、全体のばらつきは対数標準偏差で0.5に固定している。図一7は、2地点のばらつきが完全に相関

していると仮定した場合に対する同時地震危険度の比を示したものである。当然のことながら、地点ごとに独立に変動する U_1 の割合が多いほど同時確率は低下するが、その度合いは加速度が大きくなるほど顕著である。

4. おわりに

本研究では、複数の地点を対象とした同時地震危険度評価手法を新たに提案・定式化するとともに、適用例を通じて同時地震危険度の基本的な特徴を示した。都市防災や企業のリスクマネジメントなど、同時地震危険度の概念が不可欠となる対象は多々存在しており、ここで提案した方法が役立つものと考えている。

参考文献

- 1) 亀田弘行・石川裕・奥村俊彦・中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集（投稿中）。
- 2) 石川裕・奥村俊彦・亀田弘行：活断層を考慮した神戸における地震危険度評価，土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 61-68, 1996.1。
- 3) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図，地震研究所彙報，Vol. 65, pp. 289-319, 1990。
- 4) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会，1991。
- 5) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991。
- 6) 奥村俊彦：応答スペクトルの距離減衰式に含まれるばらつきの分析，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部(B), I-B566, pp. 1132-1133, 1995.9。