

耐震 One point アドバイス

## 地震危険度解析 -地震ハザード曲線と複数震源モデル-

地震ハザード解析 (seismic hazard analysis) は、対象施設の建設サイトにおける地震規模と発生頻度 (発生確率) を予測/解析するもので、地震危険度解析とも呼ばれ、耐震設計の基本情報である。地震危険度解析の研究は、Cornell(1968)[1]による研究に遡り、その後、多くの研究成果が得られている。ここでは、地震ハザード曲線および複数震源モデル (マルチイベントモデル) について、算定手順とシミュレーション例も含め概説したい。

地震危険度解析は、地震源そのものの調査から確率論的手法の援用など、多方面の研究からアプローチがなされている。より高度な理論/手法については、最新の研究報告を参照されたい (例えば、[11])。

### 1. 地震ハザード曲線の算定 :

地震ハザード曲線 (seismic hazard curve) は、地震動強さ (横軸) に対する超過確率 (縦軸) を表すもので、右下がりの曲線 (確率分布曲線の補数) となる。ここでは、CRCソリューションズによる文献[2], [3]による資料をもとに地震ハザード曲線算定の一般的な手順を示すものである。なお、柴田による近著 (文献[10])、では確率的手法による地震危険度解析が体系的に詳述されており、記述の参考としている。

① 地震源情報 (データベース) : 地震ハザード曲線の算定に際しては、通例、歴史地震と活断層地震の両者を個別に解析する。前者には、歴史地震カタログ (宇津カタログ、気象庁カタログ etc.)、後者に対しては、活断層データベース (活断層研究会による活断層分布図) からの地震情報を根拠とする。

② 距離減衰 : このようにして震源特性が得られると、今度は、距離減衰式 (attenuation law) によって、建設サイトでの地震規模 (最大加速度、最大速度) に変換される。距離減衰式は、震源の規模 (マグニチュード) と震央距離 (または震源距離) により、建設地点 (工学的基盤または地表面) の最大加速度を与えるもので、地震学や耐震工学の立場から、多く研究/提案されている。ここで、一例として、水平最大加速  $\alpha_{\max}$  (gal) を与える、福島・田中による式(1)[4]、および土木研究所による式(2) (I種地盤) を示す。

$$\alpha_{\max} = 10^x, x = 0.51M - \log(r + 0.006 \cdot 10^{0.51M}) - 0.0034r + 0.59 \quad (1)$$

$$\alpha_{\max} = 1073 \cdot 10^{0.221M} (\Delta + 30)^{-1.25} \quad (2)$$

ここで、 $M$  : マグニチュード、 $r$  : 震源距離(km)、 $\Delta$  : 震央距離(km)

③ 地震の再来期間 (年超過確率) : 以上の手順にて、建設サイトでの大小様々な規模 (通例最大加速度) の地震が予測され、これらをその再現期間 (再来期間) によって整理する。

歴史地震の場合、河角の方法が夙によく知られ、これは抽出期間とその期間中に発生した地震数とそれぞれの最大加速度を統計的に整理するものである。一方、建築荷重指針の推奨法など、観測値のデータ処理法として、Hazen 法、Thomas 法、Gringorten 法などが多く用いられる。例えば、Hazen 法を用いた場合、その非超過確率は次式にて表現される（超過関数は補関係にある）。

$$\text{Hazen 法: } F_x(x_i) = 1 - \frac{2i-1}{2N}, \quad (3)$$

ここで  $i$ : 地震の大きい方から順位 ( $i=1\sim N$ )、 $x_i$ : 地震規模、 $N$ : 地震総数

一方、活断層地震については、例えば、年平均変位速度を断層すべり量で割ることにより、年平均地震発生回数を求め（河角の方法）、年超過確率に換算することができる。

④ 年超過確率（分布関数）の回帰法：以上までの作業から、大小多数の地震規模に対する発生確率（または、再来期間）が得られ、これを関数近似により回帰すると、地震ハザード曲線が得られる。このときの近似法については、以下のように整理できる。

・河角の方法では、多くの場合、以下のような整関数を用いられる（各係数は、最小自乗法により求める）：

$$\text{2次関数: } Y = aX^2 + bX + c、$$

$$\text{片対数1次式: } Y = ax + b$$

$$\text{両対数1次式: } Y = aX + b \quad (4)$$

$$X = \log x \quad (x: \text{最大加速度}), Y = \log y \quad (y: \text{再来期間})$$

・確率論における極値分布も援用され、Gumbel 分布、Frechet 分布、Weibull 分布などが用いられる。例えば、Gumbel 分布（第 I 型極値分布）では次式で表される。

$$F_x(x) = \exp[-\exp\{-a(x-b)\}], \quad -\infty < x < \infty \quad (5)$$

ここで、係数  $a, b$  は、十分な観測値から回帰される。

さて、以上までに概説した手法による解析例を図 1 と図 2 に示した（単年度あたりの超過確率として示している）が、いずれも地震規模として最大加速度を用い、これを年超過確率として示したハザード曲線である。図 1 では、歴史地震からの解析と活断層地震からの解析が上記に基づき個別になされ、合算により地震ハザード曲線となる。図 2 では、縦軸を対数表示とし、左縦軸：年超過確率、右縦軸：再来期間（年）としている（両者が逆数関係になっていることに注意されたい）。

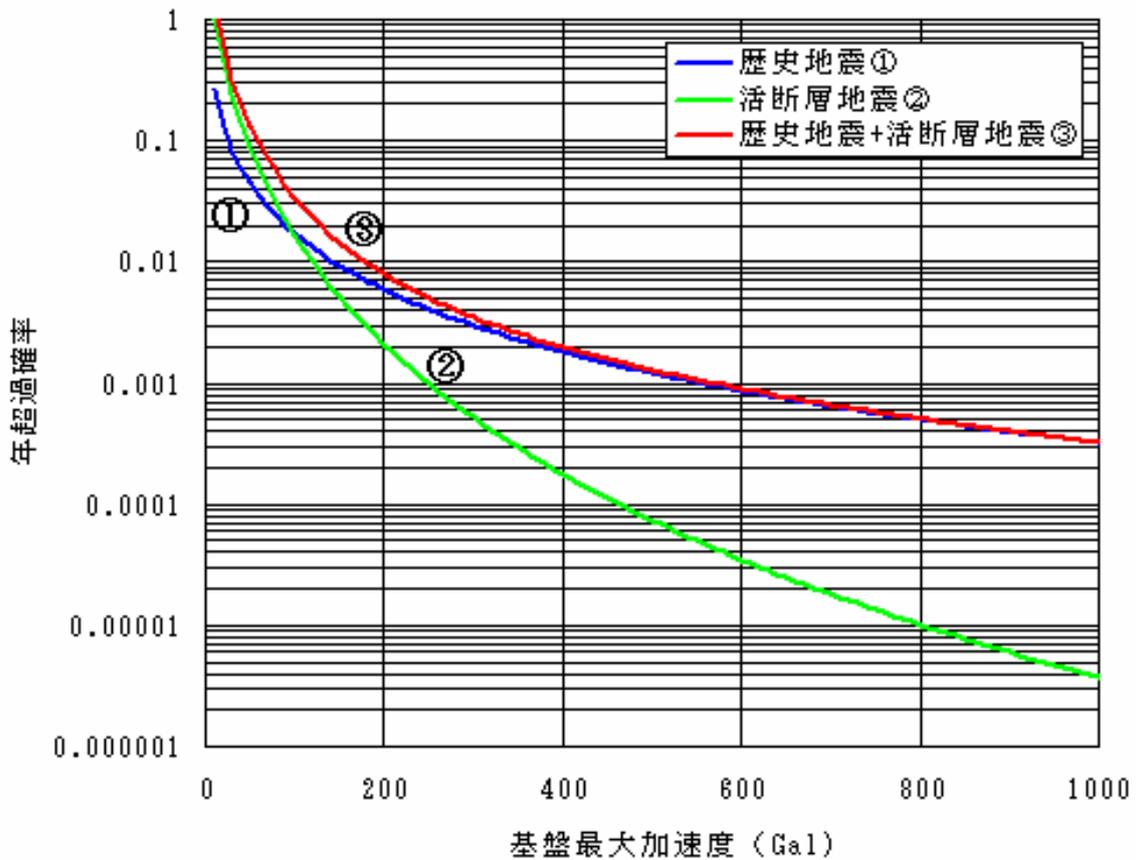


図1 地震ハザード曲線の解析例：その1  
 (武蔵工業大学世田谷キャンパス)

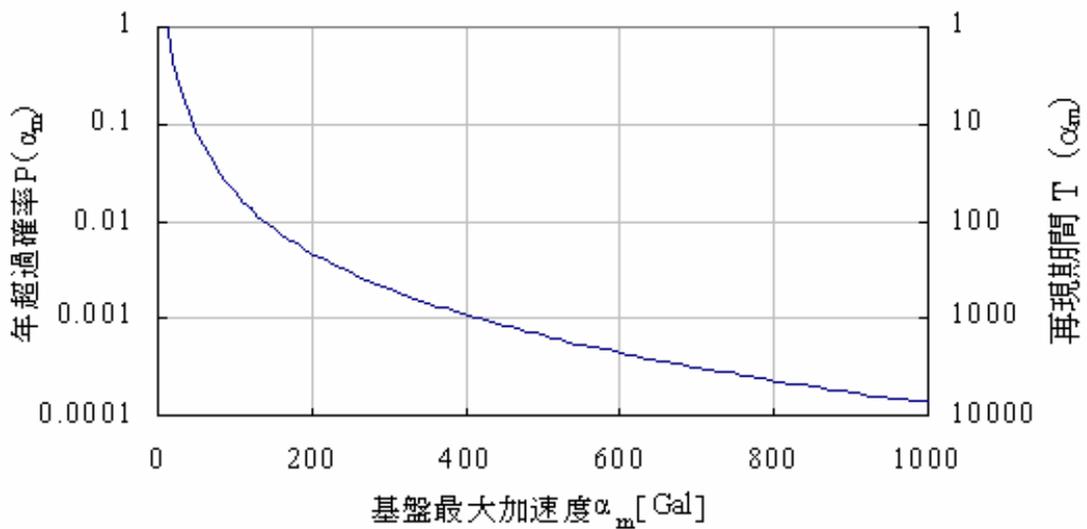


図2 地震ハザード曲線の解析例：その2  
 —左縦軸/年超過確率、右縦軸/再来期間(年)、横軸/最大加速度—

## 2. 複数震源モデルによる解析

### ① 複数震源モデルの概要

複数震源モデル（マルチイベントモデル/Multi Event Model）は、想定される様々な地震の位置、規模、発生確率などのデータベースを基に、対象施設に作用するシナリオ地震（想定地震）を評価する地震危険度評価モデルである。ここでは、文献[6]に基づく複数震源モデルを文献[5]をもとに説明するものである。

複数震源モデルは、Cornell[1]を起源とするこれまでの地震危険度解析法に比べ、具体的な地震源と地震動との関連を明示的に把握できること、散在する施設群と線状施設など多様な施設の地震リスク評価に利用できること、などの特徴がある。シナリオ地震[6]は、規模や発生頻度を確率・統計的な方法に基づいて評価することから、確率論的シナリオ地震とも呼ばれる。

### ② 地震種別：地震の発生源として、つぎのような4種類に類別して考える。

- ・ 海溝付近で発生する大規模なプレート境界地震：ユーラシアプレートに太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む付近で発生する大規模地震。プレートの移動速度と密接に関連しており、一定の周期を伴って発生する地震として評価する
- ・ 活断層による大規模な地殻内地震：断層が地表に現れ、その長さや位置が明確な、いわゆる活断層地震である。過去の地震歴や断層の滑り量等から、周期性を伴う地震として評価することができる。
- ・ 地表に断層として現れない地殻内地震：空間的/時間的にランダムに起こり得るとの仮定から、Gutenberg-Richter 式に基づき評価する（このため、地震の経時的な発生はポアソン過程に基づく）。また、空間的には、全国をメッシュ分割し、各メッシュがそれぞれの震源に相当すると考える（これは、バックグラウンド地震と呼ばれることが多い）。各メッシュが含まれる地震域を『実用的地体構造マップ』[7]に基づき設定し、地域によって異なる地震発生頻度を反映する。
- ・ 活断層と関連しない地殻内地震：大規模な地殻内地震であっても地表面に断層として現れないものもあり、認定された活断層地震とは関連しない震源データをもとに評価する。

### ③ 距離減衰と地盤増幅

上記のシナリオ地震が発生した場合、対象施設直下の工学的基盤（ $V_s=300\sim 600\text{m/s}$ ）位置での地震規模を距離減衰式により評価する。一般に、距離減衰式は、最大速度、最大加速度、応答スペクトル等、対象施設や解析目的に応じ使い分けられる。

さらに、工学的基盤から表層地盤まで地震動（振幅）の増幅については、地盤増幅率により簡易的に評価する。全国を町丁字に分割した上でその中心を代表点とし、翠川ら[9]の方法により、合理的に評価することができる。

### ④ 複数震源モデルのグラフ化

地震危険度の記述は、対象施設の位置情報が入力され、その位置で観測されるであろう

シナリオ地震による地表面最大速度を大きい順に並べる。次に、各シナリオ地震の発生確率  $P_j$  をその順に累積して、累積発生確率  $Q_j$  としてグラフ化する。すなわち、

$$Q_j = 1 - (1 - P_j)(1 - Q_{j-1}) \quad (6)$$

ここで、 $Q_j$ :  $j$  番目まで地震の累積発生確率、 $P_j$ :  $j$  番目の地震の発生確率、 $j$ : 地震規模の大きい方からの地震からの順序。ただし、 $Q_1 = P_1$  とする。通例、シナリオ地震として概ね上位 100 程度 ( $j=1\sim 100$ ) を採用すれば十分である。

ここで、図 3 に、複数震源モデルによる地震危険度の解析例を示した。ここでは、距離減衰式として、最大加速度 (図中: PBA) を対象とした、Annaka/Nozawa による提案手法[8] を用いている。なお、同図では、採用したシナリオ地震 100 個のうち規模上位 10 個を一覧している。複数震源モデルは、大小の地震源を、回帰することなくダイレクトにプロットするものであり、折れ線状の曲線を呈することが特徴である。

地震番号	震源番号	震源名称	マグニチュード	PBA (gal)	発生確率P	累積発生確率Q
1	5359	( 139.70 , 35.70 )	M6.5	313.85	0.000328	0.000328
2	260	1703,1923 KANTO	M8.0	270.05	0.001914	0.002241
3	5358	( 139.70 , 35.70 )	M6.0	252.25	0.000835	0.003075
4	5554	( 139.90 , 35.70 )	M6.5	245.8	0.000328	0.003401
5	5158	( 139.50 , 35.70 )	M6.5	244.75	0.000328	0.003728
6	5356	( 139.70 , 35.50 )	M6.5	237.5	0.000329	0.004056
7	44	ARAKAWA	M7.0	220.8	0	0.004056
8	5362	( 139.70 , 35.90 )	M6.5	209.7	0.000327	0.004382
9	5551	( 139.90 , 35.50 )	M6.5	202.15	0.000329	0.004709
10	5155	( 139.50 , 35.50 )	M6.5	201.55	0.000329	0.005037
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	4962	( 139.30 , 36.10 )	M6.0	36.55	0.000831	0.126218

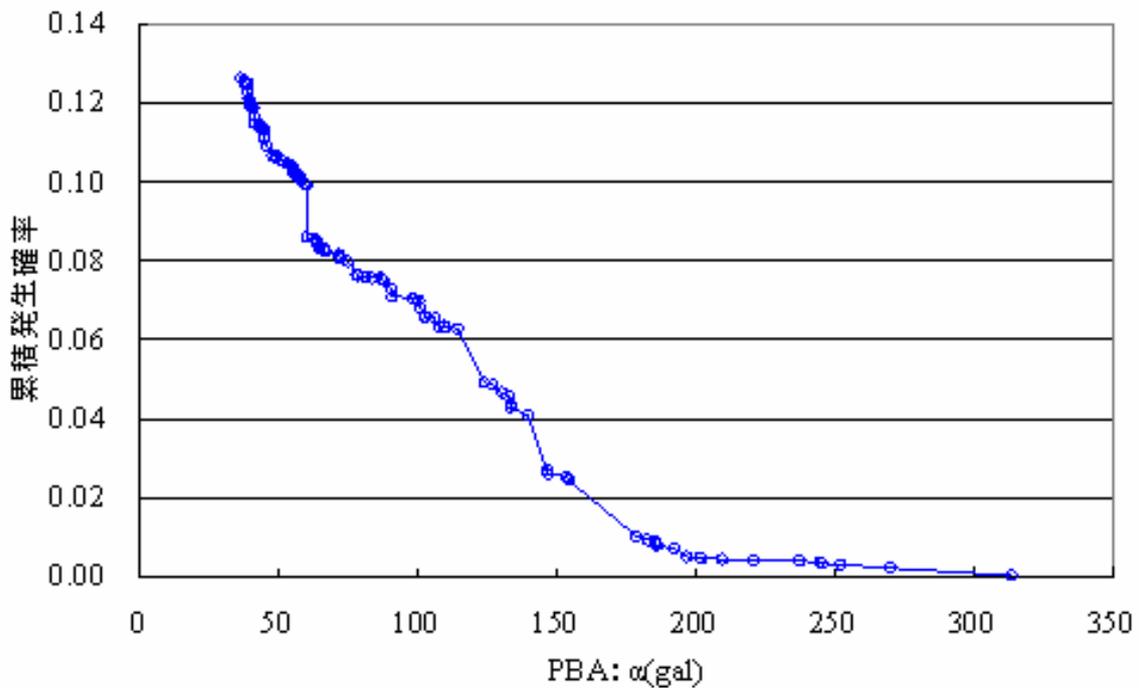


図3 複数震源モデルによる地震危険度の解析例

さて、このような地震ハザード曲線や複数震源モデルによる地震危険度解析は、設計地震動の設定（供用期間から地震動規模の算出）に用いられるが、第5講第4章の地震リスク解析にも必要とする技術である（例えば、第5講第4章の、図6, 9, 12, 13に着目されたい）。

参考文献

- [1] Cornell, C.A. :Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.58, No5, pp.1583-1606, 1968
- [2] ㈱CRC ソリューションズ：地震ハザード説明書、2005.7.8.

- [3] 株式会社CRCソリューションズ:地震危険度・基盤加速度予測システム: D-SEIS  
[http://www.civil-eye.com/software/taishin/d-seis/d-seis\\_top.htm](http://www.civil-eye.com/software/taishin/d-seis/d-seis_top.htm)
- [4] 福島美光:地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測、ORI 研究報告 93-07, 1994.3, 清水建設㈱
- [5] 中村孝明:マルチイベントモデルの概明、2006.8.11
- [6] 宇賀田健:シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.95-104, 2001.
- [7] 萩原尊禮:日本列島の地震、鹿島出版会、1991.
- [8] Annaka,T.and Y. Nozawa : A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in Kanto District, Proc.9th World Conf. Earthquake Engineering 2, pp.107-112, 1988.
- [9] 翠川三郎, 松岡昌志:国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査 48 巻, 第 6 号, pp.519-529, 1995.
- [10] 柴田明徳:確率的手法による構造安全の解析 –確率の基礎から地震被害予測まで-, 森北出版㈱、2005.
- [11] 杉野、小森、鬼沢、鈴木:原子力機器の構造信頼性評価のための地震動評価コード(技術報告)、日本原子力学会和文論文集、Vol.5, No.2, p.118-124, 2006.