

耐震・防災における数値的曖昧性

2016年8月15日

河村 廣

はじめ

前報の地震マクロスケッチ I, II, III では、地震や震災現象が対数関数で表現され、発生の頻度が規模について“べき乗則”を充たすことを示しました。日本列島を俯瞰すれば、これは地震現象が複雑系に属し、個々の現象の発生の日時を事前に特定することはできないことを意味しています。例えて言えば、べき乗則を充たすように細工されたサイコロを転がすようなものだということです。

これまでに国や学会が予告してきた発生確率や災害予想に反する地震現象が度々生じましたが、これはこのべき乗則への私たちの認識が不十分であることや、所与の諸数値への私たちの錯覚や誤解にも起因するところがあるのかも知れません。

本報では前報 I, II, III での考察を踏まえて、来るべき地震の最大加速度振幅を予想する最も簡単な略算法を示し(補1)、次いで建物の耐震設計や地域の防災計画の手法を提示しますが、その際に設定される諸数値の不確かさや曖昧性の意味についても考えて見たいと思います。

一口に曖昧性と言ってもいろいろな種類があります[1]。主なものとして、①正しい値があることは分かっているが情報不足ではっきりとしない状態、②準拠した原理や理論の真偽の度合い、③考慮すべき要因が多く相互作用も働きその実態が複雑過ぎて分からない場合、④実証できない主観的な評価、などを挙げることはできますが、このようなことも併せ考えると興味深いものがあるでしょう。

最大加速度振幅の累積度数分布 (べき乗則)

前報 III では最大加速度振幅 A 以上の地震の累積度数分布 $N(A)$ を下式のように導きました。

$$\log N(A) = c' - \frac{gd}{h} - \frac{d}{h} \log A \quad (1)$$

$$N(A) = 10^{c' - \frac{gd}{h}} \cdot A^{-\frac{d}{h}} \quad (2)$$

全国的にみて d, h は共に略 0.5 で与えられ、 c', g は地域や観測期間などで異なる常数ですから、次式のように簡潔に分かり易く書き改めることができます。

$$\log N(A) = K - \log A \quad (3)$$

$$N(A) = 10^K \cdot A^{-1} \quad (4)$$

上式は図 1 のように、両対数軸座標で -1 の負勾配を有し、べき乗則を充たすことが分かります。ここに、 K は常数です。

先ず、あるサイトにおいて Y 年間に観測されたデータを両対数軸座標系上にプロットし、回帰直線近似で式 3, 4 及び図 1 が得られたものとします。

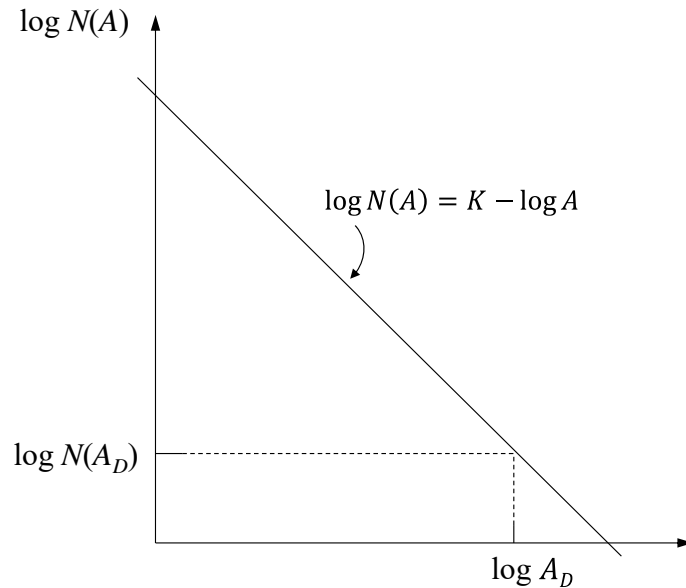


図1 最大加速度振幅の累積度数分布（べき乗則）

耐用年数における設計用加速度の発生確率(補1)

次いで、そのサイトで建てる建物の計画を行う場合を考えます。

建物の耐用年数を y 年、耐震設計用の最大加速度振幅を A_D として、耐用年数 y 年内において最大加速度振幅 A_D 以上の地震の生じる確率 $P(y, A_D)$ を求めてみます。

図1より Y 年間に最大加速度振幅 A_D 以上の地震の生じた度数は $N(A_D)$ ですから、その再来周期 $T_R(A_D)$ は単純平均値として式5で求め、耐用年数 y をその平均的再来周期で割れば、 $P(y, A_D)$ が式6で与えられます。

$$T_R(A_D) = Y / N(A_D) \quad (5)$$

$$P(y, A_D) = y / T_R(A_D) \quad (6)$$

建物の耐震設計

上記の確率的考察では、最大加速度振幅 A_D が地震入力の下限を意味することに注意を要します。

ところが、建物の耐震設計では地震入力は上限で与えられていると解されるのが一般的です。建築基準法でも性能設計が取り入れられるようになりましたが、建物の損傷の限界性能が××限界状態と定義されると、××状態の上限が与えられています。法律的には建物の損傷が限界値以下であればOKとされますから、経済原理が強く働く実務界で上限が目標とされるのは当然の成り行きです。

しかし式 6 の導出過程から考えると、地震入力は下限で与えられますので、建物の限界性能も××状態の下限でなければデータと理論との間の整合性が取れません。耐震設計の実務界では地震学から構造学に地震情報が受け渡しされる際に、日常語で言いますと、好いところ取りがされていることとなります。

整合性を重視する立場から下限主義で一貫させますと、先ず建物の崩壊状態をもたらす地震入力の下限値として最大加速度振幅 A_F が与えられた場合は、上記の式 5, 6 で $A_D \Rightarrow A_F$ の置き換えを行えばよいのです。そうすれば最大加速度振幅 A_F 以上の地震の生じる確率と建物が崩壊状態に至る確率が一致します。

議論を簡単にするため、建物の耐震設計を経済的な尺度に限定しておこなうものとしましょう。(補 2) その建物の崩壊状態により失われる経済的損失を C_F とすれば、式 6 の地震生起確率を乗じてその損失の期待値 C_{FE} が次式で与えられます。

$$C_{FE} = C_F P(y, A_F) \quad (7)$$

この値を建物の耐震設計にどのように使うかの判断は主として施主側に委ねられます。

建物の建設に係わる初期コスト、建物の維持費、建物の生み出す価値などを総合してどのような最適化を行うかについては種々の手法が考えられますが、本報の趣旨を超えますのでここでは省略します。

次いで、建物の崩壊は免れますが修復不可能な著しい損傷範囲を想定し、その下限即ち開始点に対応する最大加速度振幅を構造解析で逆算し A_{HD} が得られたとします。その損傷範囲は加速度振幅では $A_{HD} \sim A_F$ に対応し、 Y 年間の地震発生度数は $N(A_{HD}) - N(A_F)$ になりますから、平均の再来周期 $T_R(A_{HD} \sim A_F)$ 及び耐用年数 y 年内における生起確率 $P(y, A_{HD} \sim A_F)$ は式 5, 6 に準じて次式で与えられます。

$$T_R(A_{HD} \sim A_F) = Y / \{N(A_{HD}) - N(A_F)\} \quad (8)$$

$$P(y, A_{HD} \sim A_F) = y / T_R(A_{HD} \sim A_F) \quad (9)$$

上記の損傷範囲による経済的損失を $C_{HD \sim F}$ とすれば、式 9 の地震生起確率を乗じるとその損失の期待値 $C_{HD \sim F, E}$ が次式で与えられます。

$$C_{HD \sim F, E} = C_{HD \sim F} P(y, A_{HD} \sim A_F) \quad (10)$$

更に、軽微な損傷は生じるが修復が可能な損傷状態の下限を生じる最大加速度振幅を逆算し A_{LD} が得られれば、上記の式 8, 9, 10 で $A_{HD} \Rightarrow A_{LD}$, $A_F \Rightarrow A_{HD}$, $C_{HD \sim F} \Rightarrow C_{LD \sim HD}$, $C_{HD \sim F, E} \Rightarrow C_{LD \sim HD, E}$ のように、下付きサフィックスについて $HD \Rightarrow LD$, $F \Rightarrow HD$ と置き換えればよいこととなります。(HD, LD はそれぞれ修復不可能、可能な損傷を意味します。)

損傷が生じない場合は経済的損失もゼロですから、ここでは無視します。しかし損傷ゼロの領域の確率を知っておくことにも意味があると思います。

当該建物の全ての損傷範囲の経済的損失の期待値は $C_{FE} + C_{HD \sim F, E} + C_{LD \sim HD, E}$ となりますが、総和にしる個々の損傷範囲の経済的損失の期待値にしる、それらの取捨選択を合

めてそれらをどう扱うかは施主側の判断に委ねられます。

地域の防災計画

次いで、ある地域（市町村など）の防災計画について考えて見ますが、地域を構成しているインフラ全て（建物、橋、道路、鉄道、ライフラインなど）をまとめて捉え一棟の建物と同じようなものと見做せば、上記の建物の耐震設計の手法がそのまま適用できます。

但し、地域のインフラの耐用年数 y は建物よりも長く設定されるでしょうし、地震入力の最大加速度によるインフラ全体の損傷の解析やインフラの損傷による経済的損失の評価は建物の場合よりも遥かに複雑になり、建築、土木、行政、経済など多様な専門家の参画が必要になるでしょう。

図 2 は都市や地域における地震災害の連鎖ネットワークを思いつくままに描いたものですが、まさに複雑系と称すべきものです。同図はインフラなどハードの損傷に起因する災害連鎖を示しており、都市や地域ではボランティア、行政サービス、地域コミュニティなどのソフトの減災効果が大きく二重線楕円で附記しています。（補 3）

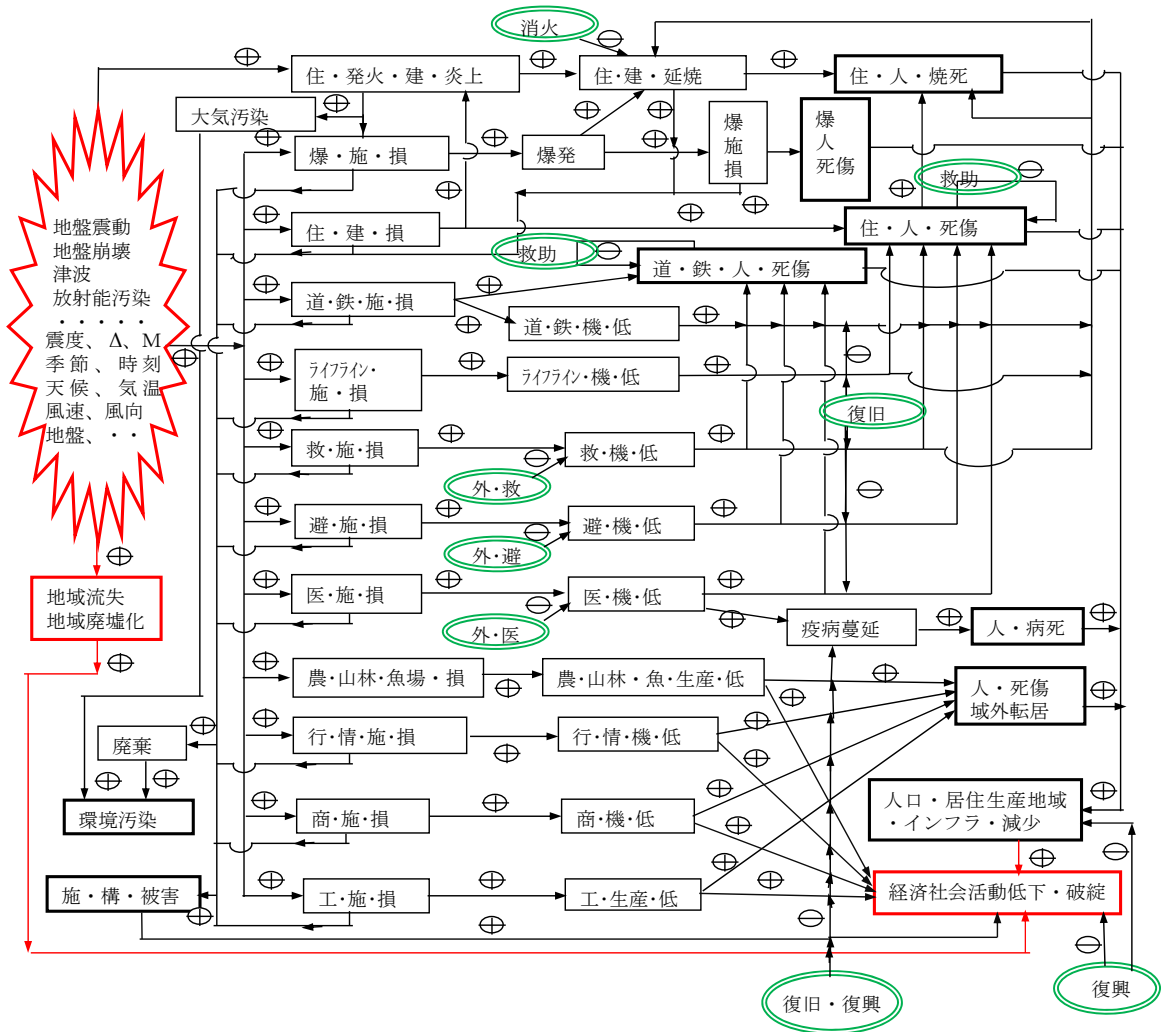


図 2 地震災害連鎖のネットワーク

最大加速度振幅の生起確率の曖昧性

確率統計的なアプローチで未来の現象を予想するには、一般に下記的前提が不可欠です。

- (1) 過去の観測データが正確であること
- (2) 過去の現象が将来に亘って同様に繰り返されること

本報では先ず図 1 の最大加速度振幅の累積度数分布を統計的に求めましたので、上記(2)を確認する意味でも観測年 Y は長ければ長いほどよいのですが、近代地震学の歴史からみて限度があります。加速度計の性能も日進月歩、設置場所数も阪神淡路大震災以後急速に増えてきましたが、観測精度が長期間一定という上記(1)の好条件はなかなか望めません。

(これは本報の“はじめ”で述べた曖昧性の①情報不足によるものに該当します。)

しかし図 1 のように近似的であってもべき乗則が成り立つという性質があり、上記(2)も充たすものと仮定すれば、負勾配は一定で累積度数分布 $N(A)$ は観測年 Y に比例して増減することが見込めます。とすれば、式 5, 6 は Y に拘らずほぼ成立するものと思われます。これはべき乗則の利点で、信頼できる観測値が得られる最長の Y で求めておくと、その Y を超える範囲においても式 5, 6 を仮想的に想定することも出来ます。しかしべき乗則自体への信頼性が下がる恐れはあります。

(これは②理論の信頼性に該当します。)

式 5, 6 が近似的に成り立つためには、地震の発生がランダムであることなど若干の前提条件が必要ですが、本報では余り細かい議論に立ち入ることは避けたいと思います。理論的に厳密な議論では更なる仮定や条件のチェックが必要となり、幾ら数値が厳密になっても肝心の大本でぐらつくと、砂上の楼閣になる恐れがあります。

(これは②べき乗則のみに基づく単純平均値という単純理論の信頼性に該当します。)

ここで強調したいのは、最大加速度振幅の生起確率を与える立場の専門家は、その根拠となるデータ及び仮定と理論なども併せて提示し、受身の立場の専門家がそれらの信頼性や不確実性などの曖昧性についても考察や評価ができるような環境設定が望まれます。これは、損傷の解析や評価に携わる建築技術者が損傷の期待値を施主に提示する際にも留意すべきものと思います。

耐震設計、防災計画における数値的曖昧性

本報では建物や地域(インフラ)の地震による損傷程度を以下の 3 種としました。

- ㉑ 崩壊している。
- ㉒ 崩壊はしないが、著しい損傷が生じ修復できない。
- ㉓ 軽微な損傷は生じるが、修復が可能である。

建物や地域の耐用年数 y において、上記のそれぞれの損傷領域の下限を生じる最大加速度振幅を下限とする地震の生起確率をべき乗則から求め、上から順に P_1, P_2, P_3 とすれば、㉑、㉒、㉓ の各損傷領域を生じる地震の生起確率は、式 6, 8, 9 を準用して、順に㉑ : P_1 、㉒ : $P_2 - P_1$ 、㉓ : $P_3 - P_2$ となります。

問題は、損傷領域の下限の決め方、及び、それを生じる最大加速度振幅の逆構造解析法ですが、それには工学的判断を要します。更に、その損傷領域によって生じる経済的損失ですが、想定するにはコストへの換算が必要です。

(逆構造解析法には②理論への信頼性が問われますし、損傷領域の経済的損失の評価には損傷領域における建物の壊れ方や人的災害も考慮する必要がありますから、本報“はじめ”の曖昧性では③複雑性によるものに属します。地域の防災計画になりますと、複雑性の程度は図2でも明らかなように、建物の比ではないでしょう。)

いずれも相当幅のある値になるでしょうから、最終的な判断は施主側の意思決定の問題になります。第3者には相当曖昧な値と思われるから、関係者にはそれなりの説明責任があります。

(最適設計法や最適計画法には各種ありますが、曖昧性の高い諸量を扱う場合は、曖昧性の④主観によるもののウェイトが大きくなります。)

考察

何度も繰り返すようですが、地震学と確率統計論から与えられる地震の生起確率は「ある規模以上の」という但し書き付きですが、建物の耐震設計や地域の防災計画の実務の段階では「最大規模の」に入れ替わります。入力の下限主義が設計では上限主義に替わるのです。

更に法規や行政になりますと、一般住民には「それを充たせば安心」という安心主義に落ち着きます。建築基準法を充たしているから大丈夫、防潮堤の高さが10メートルあるので大丈夫、世界一厳しい基準をクリアしているから原発は大丈夫、などなどです。

いささか正直過ぎることを覚悟で、本報では地震入力の下限主義に忠実に耐震設計や防災計画のシナリオを組み立てて見ましたが、大きな課題が2点残りました。

一つは、建物や地域のインフラの崩壊状態を想定しなければならないことです。現行の性能設計では安全限界と称して、崩壊しない損傷領域の上限が設定されていますが、その限界点を超えると崩壊するということが検証されておらず、余裕率に配慮してその上限が工学的に設定されているに過ぎないのが一般的でしょう。要するに設計時には崩壊は想定しないということで済ませていることになります。

もう一つは、上記に関連しますが、余裕をみて損傷領域の上限を工学的に設定する場合は、事実かどうかは別にして見かけ上は明確な値を適当に設定できるのですが、損傷領域の下限は通過する点ですから、設計時には正確に算出しなければなりません。その場合は損傷領域の定義や設定そのものが建物の目的、機能、そして技術者、施主などの考え方によって異なることがあり、従ってその合意点には③主観的な曖昧さが残ります。しかしそのために第3者への説明責任が問われるとすれば、社会的には好ましいことではないでしょうか。

結び

本報では、地震発生現象において、その規模と累積頻度分布がべき乗則を充たすことから、地震入力の高率論的想定値の下限性にに基づき、建物の耐震設計や地域の防災計画のシナリオを提示すると共に、実務界における設計や計画における現実と理論との矛盾点も指摘しました。

本報では曖昧さの程度を定量的に論じるには至りませんでした。少なくとも“はじめ”で述べた曖昧性の内どの種類に属するかについて例示と共に明らかにしました。更に補足すれば、各種の曖昧性の定量的な側面は各設計や計画事案に携わる専門家からコメントがあつて然るべきものと思われまふ。

補足 1 :

地震活動の高率論的考へ方の全般については文献[2]に詳しく解説されています。本報の単純略算法の考へ方も記述されていますが、そこでは河角廣博士による説明として引用されています。更に興味をお持ちの方は同文献をご参照頂ければと思ひます。

地震活動は既存の活断層の過去の活動性からも評価されますが、明確な既存活断層の直上に何かを計画する場合には、特別な配慮を払うことが一般住民の安心安全につながることは言うまでもありません。

補足 2 :

本報では経済的価値という尺度を用ひていますが、これは飽くまでも議論を単純化して分かり易く説明するためのものです。人命、心、文化などお金には替へられない価値が他にも沢山あります。しかし、曖昧性に考察を加える議論の端緒として、単純化を第一義的な手法として使ひます。

補足 3 :

本図の源は、筆者が定年前後に瑞浪市の地震科学研究所に所属し太田裕先生の御指導を頂いた際、同研究所の研究発表会の資料として準備したものです。都市や地域の地震災害の複雑系的な様相をイメージして直感的、定性的に構成しましたが、東日本大震災以前でしたので、本図では津波や原発事故の影響を応急的に書き足しました。従つて本図は極めて不完全ですので、感覚的に概観して頂ければと思ひます。

文献 :

- [1]古田均、河村廣 : 1.3 「あいまい」にもいろいろ、pp. 6, 7, 建築・土木技術者のためのフエジィ理論入門、講談社、1993年10月。
- [2]片山恒雄 : 地震活動度・危険度の高率論的考へ方、生産研究、27巻、5号、pp. 185~195, 5, 1975.