

## 終局崩壊性能設計—自己組織的臨界状態をベースとして—

河村 廣

### まえがき

1995年阪神大震災では数100年振りの大規模な都市直下型地震で多くの建物が崩壊し、鉄道、高速、港湾等の破壊から都市機能も喪失した。2011年東日本大震災では1000年振りの大規模な海溝型地震による大津波に襲われ、広域の建物の流失だけでなく原発の水素爆発やメルトダウンが生じ、子孫にも膨大な付けを残した。

要するに、数10年から100年程度の寿命の建造物を、数100年から1000年程度の再来期間の大地震に備えさせることの是非や可否が問われたのである。

本稿はこのような問題意識から出発しており、現行の設計法では想定外の地震入力で建物は崩壊するであろうことから、その崩壊現象を直視し、崩壊時の地震入力や崩壊の様相についてクライアントの了解を得る終局崩壊性能設計法について考えて見たい。

但し、地震入力の評価においては、極値分布やポアソン過程などの難しい理論は用いず、複雑系科学の原理の一つで自然や社会に多く見られる単純なべき乗分布[2][3][4]に準拠することを先に断っておきたい。

### 地震発生におけるべき乗法則

建築の地震対策を講じる際、先ず外敵である地震について知ることが先決問題であることは兵法の常識である。

ある一定の地域と期間において、地震の規模マグニチュード  $M$  が大きいほど地震の発生回数が少ないことは経験的によく知られているが、それを指数関数として定量的に提示したのが、ゲーテンベルグとリヒターである。頻度分布  $n$ ,  $M$  を片対数グラフで描くと図1のように右下がりの直線となる。 $M$  より大きな地震の頻度即ち累積頻度  $N$  についても、指数関数であるから微積の関係で、図2のように勾配は  $n$  の場合と変わらず右下がりの直線となる。[1]

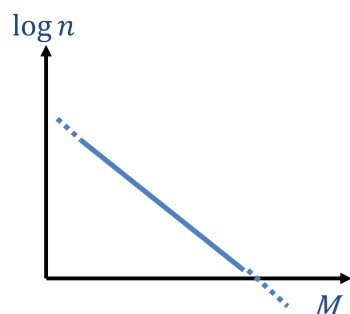


図1  $\log n - M$  関係

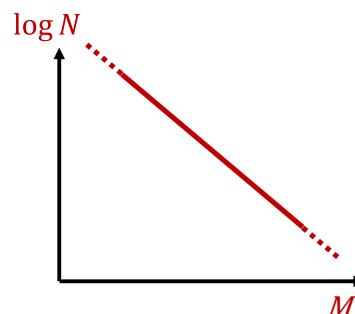


図2  $\log N - M$  関係

地震は地殻の断層のずり破壊から生じる波動であり、 $M$  は波動の振幅（或いは断層のスケール、エネルギー等） $A$  の対数の一次式によって近似的に与えられる。更に、同じ震央距離ならば、震度  $I$  も同様の傾向を示す。従って、累積頻度分布  $N, A$  は両対数グラフで図 3 のように右下がりの直線となる。頻度分布  $n, A$  についても図 4 のように両対数で右下がりの直線となるが、微積の関係で勾配は  $N$  の場合よりも負勾配が 1 だけ急になる。[1]

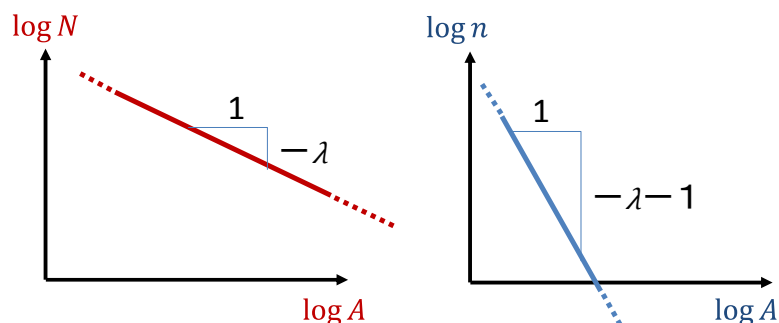


図 3  $\log N - \log A$  関係      図 4  $\log n - \log A$  関係

地震のように(累積)頻度と現象のスケールとが両対数グラフで負勾配の直線関係を有する場合、(累積)頻度はスケールのべき乗( $\alpha A^{-\lambda}$ )で表されることからべき乗法則に従うと言われている。[2][3][4]

一般に自然や社会においてはべき乗法則に従う現象が多く見られる。上記の地震をはじめ雪崩、森林火災、月面クレータ、株価変動、ネットワーク結合、等々である。それらは自然や社会における多数の要素の相互作用により自ずと到達するある秩序、即ち“自己組織的臨界状態”である、という説明が最も有力な仮説である。本仮説に従えば、地震の場合は一定のプレート間の圧力の下で地殻の破壊が生じるが、その破壊の様相が自己組織的臨界状態として説明できる。[3][4]

これ以上の議論は複雑系の科学に譲ることとして、ここで注意すべきは、自然や社会で観測されるべき乗分布では、現象の(累積)頻度はスケールのべき乗に反比例するという関係がスケールの大小に関わらず変わらないということである。スケールフリー、自己相似性、フラクタル次元等も関連する類似の現象に対応する。[2][3][4]

我々の親しんできた頻度分布が正規分布に代表される釣鐘型の場合では、生起し易い現象のスケールの変動域は平均値や標準偏差によりある程度予想はつくが、両対数グラフで負勾配の直線のべき乗分布ではその変動域を事前に評価する目安がない。[4]

数学的には、べき乗分布はサンプルの数が増すと分散も大きくなり発散する傾向を示すことから、物理的ではないと見做され注目されてこなかった経緯があり[2]、社会でも余り顧みられることはなかったようである。

## 地震の再来期間

耐震設計では、対象建物の寿命との比較で、対象地震の設定を地震の再来期間  $T$  を評価の目安にすることが出来る。

話を簡単にするため、累積頻度分布  $N(A)$  が例えば 100 年間の観測結果で得られたものとする、 $A$  以上の地震発生の再来期間  $T$  は  $100/N(A)$  年となる[1]。従って、地震入力  $A$  を設計対象とすれば、 $100/N(A)$  年の間に  $A$  以上の地震が 1 回は生じるため、建物は危険に晒されることになる。

ここで言いたいことは、設計時に地震の再来期間と入力を設定しても、それ以上の入力が生じる可能性が必ずあることである。その場合想定外とされた大きな地震入力により受ける社会的損失が甚大な場合、その影響は計り知れない。1995 年兵庫県南部地震（阪神大震災）、2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）などはその典型例であろう。

社会的損失といえば、個々の建物の寿命よりも都市や地域の寿命は遥かに長いので、都市や地域の耐震設計としてはそれに相応しい地震の再来期間  $T$  と  $A$  への配慮も必要となる。しかし現実には不可能であるから、都市や地域の寿命に対応した大きな地震入力が生じた場合、建物の大部分は崩壊し、都市や地域もほぼ全滅することになるからである。しかしこれは行政にはそういう全滅も生じることを覚悟しておく必要があり、たとえそのような場合でも都市や地域の機能が最低限保つことができかつ復旧にも対処できるように対策を講じておく必要があることを意味している。

しかしここで誤解のないように付言すると、地震入力には上限がないので各クライアントは建物が崩壊することも覚悟しておく必要があり、万が一崩壊しても人身は損なわれずかつ建物の復旧または建て直し等にすぐ着手できるよう対策を講じておく必要があることを意味している。

## 終局崩壊性能設計

上記の考察を前提とすれば、建物や更に都市や地域の耐震設計においては相当大きな地震を対象としなければならなくなるが、如何なる大きさの地震にも耐えられるような建物の設計は不可能であるから、実社会において個々の建物の耐震設計において実行可能な対策の基本事項として以下の 3 点を挙げたい。

- (1) 設計者は建物の終局的な崩壊性状を対象としそれをもたらす地震入力について、種々の選択肢の形でクライアントに示す。
- (2) 設計者はクライアントとの話し合いの結果、クライアントの了解を得て設計を行う。
- (3) 設計時に想定された地震入力と建物の崩壊モードの組み合わせにおいて、人身の損傷は最小限にそして人命の損失はゼロとする。

(1)、(2)、(3) をまとめてここでは“終局崩壊性能設計”と称することとする。

“崩壊”が主たるキーワードであるが、それ以上の崩壊性状は進行しないという意味で“終局”を、クライアントの了解を得ることと人命確保を図ることから“性能”を付した。

ここで一例として筆者が提唱する終局崩壊性能設計のフローチャートを図5に示す。

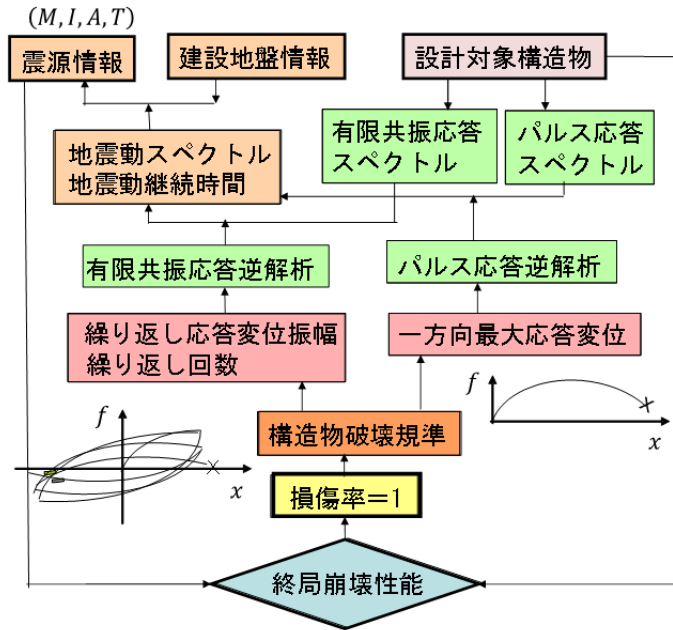


図5 終局崩壊性能設計のフローチャート

かつて筆者は建物にある地震入力作用した時の建物の受ける損傷率を求めることにより、損傷率=1即ち建物の崩壊時に対する損傷の程度を推定する極限耐震性能評価法を提案した。その骨子のフローは図6に示される。[5][6]

図6

しかし本稿で提示した上記の“終局崩壊性能設計”では、ある建物において崩壊即ち損傷率=1に至らしめる地震入力を求めることになり、その骨子のフローは図7に示される。

図7

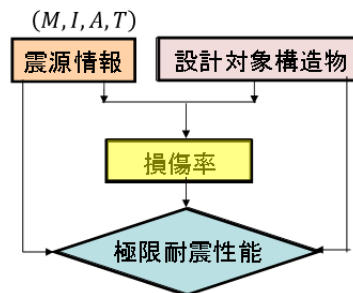


図6 損傷率の評価

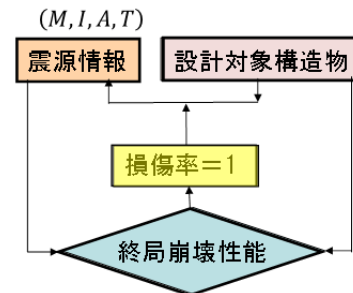


図7 崩壊時地震入力の評価

簡単に言えば、図7は図6の逆解析のプロセスである。図7の損傷率=1と震源情報の間に、筆者提唱の構造物の破壊基準と極限地震応答逆解析を挿入したのが図5である。図6の最下部の「極限耐震性能」は建物の崩壊に対する現行想定地震入力による損傷の程度の評価を示し[5][6]、他方図7及び5の「終局崩壊性能」は建物に崩壊をもたらす地震入力と建物の崩壊性状の評価を意味する。しかしクライアントと共に設計全般をフローとフィードバックを含めて総合的に判断する性能型設計を指向するところは共通している。

本稿では“終局崩壊性能設計”の基本的な考え方について説明することを目的としており、破壊基準や極限地震応答(逆)解析については次ページに改めて説明をしたい。[5][6]

### パラダイムの転換

ここで付言すると、現行の耐震一次設計と二次設計では法律で与えられた基準値をクリアすることのみが求められており、それに並行する形で本終局崩壊性能設計では崩壊性状の推定、人命確保、クライアントの了解などの新しい課題に取り組むことになるため、超法規的な異次元へのパラダイムの転換が必要である。

パラダイムの転換を要約すると以下の3点である。

#### ① 一元管理システム⇒自律分散システム：

自己組織的臨界状態を容認すれば、地震発生については上限がないことの認識、そして建物・都市・地域の耐震性については現行よりもロバストにすること。

#### ② 入力・損傷の想定内対策⇒崩壊を起点とする復旧・再生対策

建物、都市、地域のハードの部分については崩壊をも覚悟すること、そしてたとえ崩壊しても人身に損傷は無く復旧、再建に直ちに着手可能なこと。

#### ③ 無責任クライアント⇒分担責任クライアント

クライアントは崩壊も生じることを覚悟し、崩壊の様態やその後の復旧、再生への対策を自主的に講じざるを得ない状況に至ること。

現行の法規は最低限を与えるに過ぎないとされているが、確認制度によりいつの間にか目標値となり経済性優先社会では思考停止をもたらしている。しかし法規が原因で損傷が生じても国が責任をとる訳ではなく、技術者も国も対幻想に浸っているのが現実である。

現行法規には一種のフェールセーフとしての価値があることは認めるが、更なるフェールセーフとして可能性が否定できないハードな崩壊に対しても再生に向けて何らかの対策を自主的に講じることの必要性をここでは強調したい。

この自発的な対応は個々の建物のクライアントだけでなく住民、自治体、国にも要請されることになる。

自己組織的臨界状態の観点からみると、上記の変革によれば、建築・インフラ・都市・地域における耐震性の分布も自己組織的臨界状態に近づき、地震災害に対しマクロなロバスト性が飛躍的に向上するという効果も期待できるのである。

## あとがき

地震や地震被害の発生において自己組織的臨界状態を認めるならば、行政は都市や地域のインフラの全壊も視野に入れ住民の生命や都市地域の機能の維持のため何らかの対策を講じておく必要があることは先に述べた。昨今注目を集めている減災という手段もその一法であろうが、更なる創造的な手法の開発が急がれる。

建物の各クライアントも地震の入力に上限はなく万が一には崩壊ということも覚悟しておく必要があることは先に述べた。その際に構造設計者が建物の崩壊モードを推定しかつ人命の損失をゼロとするべく創意工夫を凝らすことは、構造設計活動の創造性の幅を広げることとなり、自己組織的臨界状態への対応にプラスの方向で作用することも想像に難くない。

その例の一端を示すならば、個々の建物内に耐震シェルターやそれに類する仕組みを組み込むことが社会的には耐震セーフティネットを構築することになるが[7]、それをべき乗法則に適応すれば建物の崩壊時における人命確保に資する空間のスケールの分布の幅を広げることに対応する。更に、筆者は既にリカレント建築を提唱しており[7][8]、それは構造部材を再利用可能な基本要素とし、建物の組み建て解体が容易で環境適応型の建物の構工法である。従って地震への対応としても、設計、構築、崩壊時には、要素である構造部材の相互作用の結果として、自己組織的臨界状態の創出を目指すことが可能ではなかろうか。

自己組織的臨界状態については地震や建物などのハードの側面に重点をおいて考察を加えたが、最悪の場合においても人身の損傷の軽減や人命救助、そして復旧、再生などのソフトの側面を含めた総合的な対策が不可欠であることも示した。後者の課題については好著[9]があるので参照されたい。

本稿では終局崩壊性能設計に関する基本構想とその概要を述べたもので、その実現化への道程には幾多のハードルがあることは十分承知しているが、一考の価値があることを確信している。

## 参考文献

- [1]宇津徳治：地震学、共立全書、昭和53年1月、初版3刷。
- [2]高安秀樹：フラクタル、朝倉書店、1986年7月、初版3刷。
- [3]井庭崇、福原義久：複雑系入門、NTT出版、1998年7月、初版2刷。
- [4]マーク・ブキャナン(原著)、水谷淳(訳)：歴史は「べき乗則」で動く、2009年8月。
- [5]河村廣：地震時構造物応答の極限解析－構造物の極限耐震性評価の基礎理論－、第27回構造工学シンポジウム講演集、1981年2月、pp.95～102。
- [6]西川孝夫、稲田達夫、岩原昭次、河村廣、堤和敏：性能型構造設計入門、6.4節 極限地震応答解析法(執筆、河村)、培風館、2003年4月、pp.136～154。

[7] 檜原健一、河村廣：木造住宅の耐震設計ーリカレントな建築をめざしてー、技報堂出版、2007年3月、1版1刷。

[8] URL: <http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a2/recurrent/recurrent.html>

リカレント建築・都市研究会ニュースレター、No. 1、1999年1月～No. 10、2004年12月、神戸大学河村研究室発行。

[9] 檜原健一：震災復考、安全な住まいは可能か、新建新聞社、2015年3月、初版第一刷

#### **謝辞：**

本稿は檜原健一様のご要請により立ち上げたもので、その準備や構想の段階で檜原健一様並びに野島千里様から有益なご議論やご助言を頂きました。

更に武貞健二様からは本質的な問題点のご指摘を頂き、対応は不十分ではありますが参考にさせて頂きました。

篤く御礼申し上げます。