

## 自己組織的臨界状態の観点からの考察

河村 廣

### はじめ

前々ページでは終局崩壊性能設計が自己組織的臨界状態に則していることを述べた。

地震の発生現象然りであり、建物の耐震性の分布もそれに準じることを目標とするものである。(但し、建物の安全性については社会的秩序を維持するために、その最低限度を行政的に強制することの必要性は論を俟たない。

都市や地域における地震時の損傷(建物の全壊・半壊率、死傷者・重症者率、インフラ損傷率など)や自治体などによる応急対応、応急対応継続時間などの諸量は、統計資料によれば対数をとると震度の一次関数で近似できる傾向を示すことが分かっている。これもべき乗法則に準じることを意味しており、崩壊過程においても復旧過程においても、マクロには自己組織的臨界状態を示していると考えられる。[1]

前ページの極限地震応答(逆)解析は最大入力エネルギー原理に基づいており、一種の自己組織化現象と見ることが出来る。エネルギーの拡散時にはエントロピーの増大則に相当しシステム全体の衰退をもたらし、偶発的にエネルギーが集中する場合は渦巻や生命の誕生などの新しいシステムの形成をもたらすこともある。

極限地震応答(逆)解析に用いる地震動スペクトルについては、周知のように最大振幅と周期との関係がニューマークによって両対数グラフで台形に近似されたが、これはべき乗法則を近似的に適用していることになる。

最終的な構造物の崩壊条件としては、繰り返し荷重における変位振幅と破壊サイクル数関係が両対数グラフで負勾配の直線の傾向を示す場合が多く、これもべき乗法則に従っていることを意味している。素材レベルでは負勾配が-1になることは殆どなく、累積変形や累積エネルギーで破壊条件が与えられるというのは解析上の単なる願望に過ぎないことに注意したい。

複雑系の科学によれば、ものの本質は分解し要素に分けて考える要素還元型により認識されるのではなく、性質の分かっている要素の相互作用で自己組織的に形成される過程を辿る構成的手法により解明されるとされている。更にその過程は継続的であり、進化し続けるのも自己組織化の自己組織化たる所以である。

本 HP で紹介した終局崩壊性能設計は一夜にして構築されたものではなく、思えば筆者が神戸大学の4年生の時、山田稔先生のゼミに所属してからスタートし、それから半世紀の間、多くの方々のご指導、ご協力、ご助言、ご批判等を得て今日の姿に至ったものである。筆者の創発的研究の一部としてその概要が文献[2]に記されているので参照されたい。

これまでに種々のヒントやアイデアを学ばせて頂いた方々については、敬意をこめて以下にまとめてみた。但し、関連文献を引用すると数が膨大となり却って実態が見えにくく

なるので、以下の解説では簡潔を旨として省略した。

#### 一方向荷重と繰り返し曲げ：

山田研究室では先生のご指導で構造物の一方向荷重と繰り返し曲げ実験が数多く行われた。この四半世紀にも及ぶ実験経験と山田先生のお供で実際の地震被害調査体験(1975年大分県中部地震、1978年宮城県沖地震)などで、地震時に一方向荷重で崩壊に至る場合と繰り返し荷重で塑性疲労破壊を生じる場合への分類の手本となった。

当時の実験は、繰り返し荷重も手動ジャッキ、変位計測もダイヤルゲージ、つまり人海戦術で行われた。しかしお蔭で構造物の弾塑性変形及び崩壊への過程を逐一この目と手と体を使って観測及び記録できたことは極めて貴重な経験であった。山田先生から頂いたこの財産は実験に参画した山田研究室同窓生全員のもので、筆者には何としても耐震安全性に結び付けたいという気持ちが強かった。

#### 塑性疲労破壊条件と損傷率：

山田研究室の実験は構造物の崩壊まで行うことが鉄則で、復元力を喪失するか或いは柱材では定軸力が保持できなくなる時点を崩壊と定義されていた。このような実験手法は我が国はもとより国際的にも先駆的なものであった。

素材レベルではヤヲ・マンセ仮説で有名なジェームズ T.P.ヤヲ先生の研究を参考にしつつ、構造物の劣化損傷評価法や損傷率の考え方を学んだ。山田先生も既に RC の曲げ梁の塑性疲労曲線を実験的に求めておられたが、今にして思えばべき乗法則に従っており、塑性変形のべき乗に比例して累積損傷が与えられるところは鋼素材のヤヲ・マンセ仮説と同じであった。(理論学者が好んで用いる総累積変形一定則は、そのべき乗指数が 1 の場合に成り立つが、多くの場合は 1 以上となることは先に述べた。)

客員研究員としてお世話になったアメリカのテキサス A&M 大学では、ヤヲ先生から損傷評価法としてファジィ理論やエキスパートシステムへの応用性について多くのヒントを頂いた。

#### 耐震安全性：

筆者は一時期山下設計のお世話になり、当時構造部長の故風間壮一郎様に一般建物の構造設計から高層の動的設計の指導を受けたが、同時に耐震安全性とは何かということについて常によく考えるよう助言があった。

大学に帰って研究活動を再開しても、耐震安全性を研究の目標とし、研究と設計を繋ぐブリッジにもしようとの決意を新たにした。

#### パルス応答と有限共振応答解析：

山田研究室での実験体験と山下設計での動的耐震設計経験とが融合して、地震時におけ

るパルス的な荷重による一方向破壊と共振的な応答による繰り返し破壊の対応関係が生まれ、破壊条件と相俟って極限耐震性評価の統合的なフローが創出された。

パルス応答解析の着想には、剛体の回転振動や地震時の墓石の転倒例なども大いに参考になった。

#### **地震動スペクトル：**

耐震安全性を論じるには地震学の知識が不可欠と痛感し、宇津徳治先生の地震学をテキストに地震自主ミニゼミを谷明勲先生(当時助手、現在教授)のご協力も得て開いたが、その成果が地震動スペクトルとなり、極限耐震性評価フローの完成に至った。単純極まりない断層モデルであるが、地震マグニチュード  $M$  と震源諸パラメータの関係式を導き、内陸性地震や海洋性地震による建物の害震分布のシミュレーションも可能になった。

#### **阪神大震災、パルス応答解析による中層崩壊の検証：**

1995年兵庫県南部地震は都市直下型地震で甚大なる阪神・淡路大震災を起こし、老朽化住宅の倒壊やビルの中層崩壊を生じた。

地震後山田研究室 OB の榎原健一様から連絡があり、地震学者によれば内陸性地震で断層近傍ではパルス的な速度波が卓越するようで、1年前のアメリカのノースリッジ地震も同様のタイプでS造中層部の破壊が生じたそうである、と貴重な情報を頂いた。

早速彼との共同研究に着手し、パルス応答解析の応用として直接せん断波動モデルによる解析を行いビルの中層崩壊の検証を行った。

昨今になって、著者より若い大学の研究者によりキラーパルスやパルス考慮の応答スペクトルの提案が行われるようになり大変結構なことである。しかし一般に建築系の研究者や技術者は保守的なせいか地震学に関する反応も遅くれがちになることも否めない。

#### **木構造建築の多様性：**

木構造建築は周知のように地域性、歴史性を内包しており、工法、材料共に多様性に富んでいる。同様に地震時の地震被害様相も種々様々である。本質的には有機物からなるもので、その厳密な定量化や分析は困難であり、我が国では最もポピュラーな建物であるにも拘らず、研究レベルでは相当遅れていた。

1995年阪神・淡路大震災を契機に新しい設計法や補強法の開発機運も高まり、上述の榎原健一様は全国をまたにかけて縦横無尽の活躍をしておられ、著書も多い。漏れ承るところ、我が国特有の中央からの一元的、画一的な統制や押し付けが多様性に富む地方には馴染まないようである。

見方を変えれば、木構造建物は自己組織的臨界状態として各地域、各時代に存在して来ており、現在に繋がっているのではなからうか。メンテナンスや品質も様々であることから、崩壊ということも常に視野に入れておく必要があるように思われる。

### 建物倒壊による人的損傷：

阪神大震災では住宅倒壊のみならず人的犠牲者の数も突出していた。

地震及び防災学者の太田裕先生からは、死因のうち 8 割は圧死で、その様相は凄惨なものであったので、構造技術者が構造物の崩壊現象に無関心なのは如何なものかとの、きついお叱りがあった。

原発事故でも同様であるが、想定外で済むのならば専門家は要らない、とまで巷では技術者は酷評されているのである。

クライアントを含めた性能型設計に移行することが焦眉の急である。

太田先生主宰の東濃地震科学研究所での研究会でお世話になった際には、上記を含めて計画系の防災学について多くのことを教わった。複雑系の科学を応用することで防災学を防災科学にすることが出来るのではないか、との示唆を頂いたのも太田先生からであった。

### 複雑系科学（自己組織的臨界状態）：

構造物の極限や崩壊と声を大にして言っても、所詮神戸からの情報発信、中央からは無視されてきた。

そこで筆者は、ハードではだめなのでソフト路線に切り替え、ソフトな構造学を目指すこととし、ファジィ理論、人工知能、人工生命などの情報システムの分野に舵を切り、諸理論の活用を図った。そして最終的には 21 世紀の科学、複雑系の科学としてその普遍性や応用性が高いことが分かった。そのキーワードは、自律分散システム、自己組織化システム、フラクタル、スケールフリー(べき乗法則)、カオス、などなどである。

本 HP で提示した終局崩壊性能設計が上記のようにその成り立ちからシステムの各要素まで自己組織的臨界状態をベースとして説明できることは、構造物の耐震安全性の評価に複雑系の科学を応用したことによる成果といえよう。

それは単なる自己満足ではないかと思える向きがあるかも知れないので最後に付言したい。

崩壊というのは限界状態であり極限状態であることは明らかであり、崩壊に至らしめる各種の要因やそれらの構成も自己組織的臨界状態として記述することによってのみ、最終的な崩壊をも真の自己組織的臨界状態として捉えることが出来るのではなからうか。これは単なる思い付きや恣意的な操作を排除しようとの努力の現れと解して欲しい。

勿論自己組織的臨界状態というのは仮説であり、仮説である以上、反証、反論は可能であり大歓迎である。必要があれば修正を重ねより完成度の高いものを目指して行くことが出来る。そのようなフィードバックを経て進化し続けるのも自己組織的臨界状態の特色である。

自己組織的臨界状態をベースとする本設計法の提示が 21 世紀の防災科学の確立の一助と

もなれば幸いである。

**参考文献：**

- [1]河村廣：地震防災学の定量的グランドスキームー複雑系への逆システム学的アプローチ、日本建築学会近畿支部研究報告集、計画系、平成19年6月、pp. 537~540.
- [2]河村廣：建築学研究の創発的方法、建築の試験・研究情報誌、GBRC、随想、日本建築総合試験所、Vol.36,No.2, 2011,4(144)、pp.1-3.