

予測困難な地震動と免震設計 —冗長性と頑強性—



京都大学 教授

竹脇 出

免震とは文字通り「地震動の作用から逃れる・免れる」ことを意味する。しかしそれは、言い換えれば、地震動の姿(今後発生するものも含めて)が明らかになって初めて真の免震が実現されるということになる。地震動の姿は必ずしも一意でなくてもよく、ある幅で与えられていてもよい。現時点で、地震動の姿が明らかになっていると言えるであろうか。正直に言って否である。では近い時期に明らかとなるであろうか。否であるというのが正直な答えではなかろうか。では免震建物を設計するにはどうすればよいのであろうか。私の考えを述べさせていただければ、今ある研究成果を総動員して、考えられ得る地震動や地震動群を想定し、それに対して免震建物を設計することである。現在、そのようなことが行われているであろうか。否というのが率直な答えである。

免震建物に限らず、建物や構造物の設計において、これまでにこのようなことは考えられてこなかったのであろうか。少なくとも1960年代に米国の研究者はこのようなことを考え、極限外乱法という方法を原子力施設や超高層建物などの重要構造物に適用しようと考えていた。極限外乱法の創始者であるDrenick博士やShinozuka博士である。私が以前、Drenick博士に聞いたところ、1965年に彼にヒントを与えたのは日本の技術者・行政官(Tokyo Building Licensing Bureau)であった。また極限外乱法(Critical excitation method)の命名者はカリフォルニア大学のPenzien博士であるとのことであった。Drenick博士は私との私信で、モデルフリー設計(Model-free Design)の必要性を熱心に説いた。モデルフリーという用語は馴染みが少ないと思われるが、制御工学の分野では最近、明示的なモデル特性を必要とするモデルベース制御器設計に代わって、モデル特性を必要とせずに入出力データから制御器

を設計するモデルフリー制御器設計が注目されている。構造物の設計段階では、通常すべてのパラメーターが決められないと設計が実施できないが、Drenick博士の提案は、これまでの研究成果からだけでは決められない場合には多くの不確定因子を残しておいて(モデルフリー状態)、最悪状態の想定からこれらのパラメーターを決めるべきだということである。ここで、「多くの不確定因子」というのがポイントである。一つか二つの設計パラメーターであれば、これまでも行われてきており、「最悪の状態を考慮して、この断面はこのサイズのものを選んでおこう」という設計判断はその一例であろう。特に、入力地震動においては不確定性のレベルが構造物に比して大きく、そのモデル化においては、このモデルフリー状態の設定を如何に的確に行えるかがその成否を決めることになる。例えば、地震の発生メカニズムや震源距離などから地震動が有するエネルギーがある範囲にあると確定できたとして、その卓越周期や位相特性、さらには継続時間や振動数特性の時間変化に不確定性を残しておくことなどが考えられる。

私が極限外乱法に出会ったのは大学院の学生時代である。私は修士論文(1982)で「建築構造物の性能設計(性能制御)」というテーマを扱った。性能設計という概念・フィロソフィーは現在ではポピュラーであるが、当時は性能設計という用語すら建築の世界では存在せず、高名な先生からは、「性能」とは自動車や飛行機などに対して用いる用語であり、建築物には相応しくないというご指摘をいただいたように記憶している。この修士論文で、上記のDrenick博士による極限外乱法を勉強した記憶がある。当時はモデルフリー設計の用語の意味についてそれほど深い理解をしていたわけではない。約20年後に再度それについて研究を再開

し、いくつかの成果を得た。私が大学で教えを受けた先生の一人は、晩年ご自身の著書で、「耐震研究にとって地震被害調査は生のデータが得られるという点で大変貴重ではあるが、それだけを行っているだけでよいのであろうか」という疑問を呈された。どのような地震にも対応できるシステムづくりに精力を注がれていたことにその考えの源があるように思われる。大地震時に発生する事象について想像力を逞しくして行かなければ、実のある建築構造研究は発展しないように思われる。そのような意味からも、これまでに発生した地震動だけでなく、少しでも発生が予想される地震動を表現できるモデルを作成して、それに対して免震建物を設計することが要請されているように思われる。E-ディフェンスにおける医療免震建物の長周期地震動に対する実験での機器・家具挙動の教訓はよい例であろう。このような要請に的確に対応するには、じっくりと腰を据えて考える余裕が必要であると思われる。昨今、評価という名の下に、すぐに成果が得られるものばかりに注目が集まる傾向がある。また、現実をあまりに重要視し過ぎてその根底に潜む原理や本質を見逃す傾向も見られる中で、現実の前に基礎的学問が沈黙を強いられる状況は避けねばならないと感じている。大学に身を置く者の一人として、心に銘じたいと考えている。

これまでは設計用地震動について述べたが、同時に、免震建物には冗長性(リダンダンシー)と頑強性(ロバスト性)が要求される。免震建物は免震層にその機能の大半を集約しているために、免震層の性能評価には特に注意深い検討が必要となる。冗長性は要素のつながりに着目したものでフェイルセーフとも密接に関係している。ダンパー損傷や擁壁への衝突などに対応するためのバックアップ機構の設置などはその代表的な例である。一方、頑強性は種々の不確定要素に対応する能力を意味しており、元来は振動制御の分野におけるロバスト制御(振動系が有する種々の不確定性を考慮した制御理論)に端を発していると思われる。免震建物で通常要求されるアイソレーターやダンパーに関する「ばらつき解析」はこれに対応している。高層建物などの設計で最近行われている所謂「あらかじめ検討」もこれに対応しているであろう。また、告示波において種々の位相特性を考慮することや、代表観測波やサイト波などの多数の地震波に対して安全性を検討することは

入力に対する頑強性(ロバスト性)を調べているともいえる。言い換えれば、前述のモデルフリー設計を実行しているとも考えられる。図1に冗長性と頑強性の関係の考え方の一例を示す。このような議論をさらに進めることが免震建物の安全性の向上にとって重要であると思われる。

免震建物は、現在までに、実験による検証や実際の地震動に対する経験を通じて、その理論的な妥当性が部分的に明らかにされている。ロサンゼルス近郊のUpland地震(1990)におけるLaw & Justice Center(米国における免震建物の初期のもの)や、Northridge地震(1994)、兵庫県南部地震(1995)、十勝沖地震(2003)、新潟県中越地震(2004)などにおけるいくつかの免震建物から貴重な資料が得られている。今後の研究課題としては、種々の荷重パターン・地震動タイプに対する安全率(余裕率)の定量化法などが重要であると思われる。また、安全率(余裕率)の検討では、荷重抵抗機構の冗長性指標などを的確に組み込む必要があると思われる。

構造研究者・構造技術者には、このような方向においても逞しい想像力・創造力を期待したい。

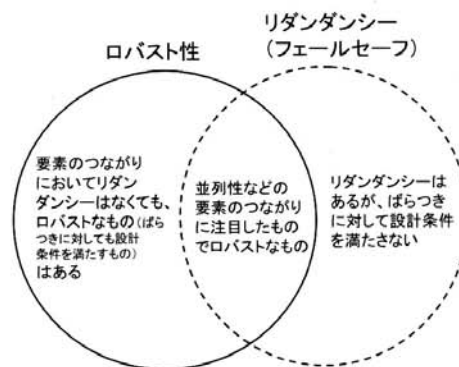


図1 冗長性(リダンダンシー)と頑強性(ロバスト性)の関係