

# エネルギー評価の世紀へ

東京理科大学 寺本 隆幸



免震構造や制振構造が時代の脚光を浴びて大きく開花しようとしている。折しも世紀末に当たるこの時期に、免震構造を含む地震動を受ける構造物の設計手法の歴史を振り返り、次世代への課題となるものは何かを考えてみたい。

## (力の時代)

1900年代初期から耐震設計が行われるようになった。その時に用いられた手段は、「力」に対する設計であった。水平力を設計震度0.1と定めて、それに対して構造部材の強度が検討された。

( $\sigma = M/Z$ ) や ( $M = a \cdot t \cdot f \cdot t \cdot j$ ) の検討手法は、当時から存在していたようである。また、昭和初期に刊行された高等建築学の「耐震耐風論」において、免震構造の記述がおこなわれていることから、当時の技術レベルは既に高いものであったと思われるが、設計手法としては震度法が採用されていた。

1950年に施行された建築基準法により設計震度は0.2に上げられるが、本質的な変更は行われることなく力の時代が続いた。耐震設計に用いられたD値法は、変形に基づいた計算方法であるが、実務的には水平力分担係数として水平力を耐震要素に割り振るために用いられ、変形に関連づけて考えられることは少なかった。

## (力と変形の時代)

1960年代後半になると、力に加えて変形も計算できるようになった。コンピューターの出現とマトリクス法の開発により、容易に構造物の応力解

析が行えるようになり、変形量が計算されるようになった。「力と変形」の時代の到来である。同時期に超高層ビルの設計も始まり、骨組解析手法のD値法からマトリクス法への大変換が、主として超高層ビルを中心に行われた。従来のD値法では無視されていたせん断変形や柱の軸方向変形などが新たに考慮され、変形が評価されるようになった。

また、静的骨組解析に加えて振動応答解析が行われるようになり、振動現象に対する理解が普及した。

変形が計算されると言うことは、剛性評価が可能になることである。超高層建物の固有周期も容易に計算され、実測固有周期と照合されることにより、骨組解析や振動解析結果の計算精度も確認できるようになった。

大地震に対しては、許容応力度設計のみでは対処できず、構造物が塑性化するとした弾塑性設計が行われるようになり、超高層ビルで開発されたこの考え方が1981年に施行された「新耐震設計法」により、一般低層建物まで普及するようになった。

エネルギーは力と変形の積であり、この当時から「第3の力：粘り」などと言われるように、塑性変形要素を評価する習慣はあったが、概念的にエネルギーにつながるようなものではなかった。

## (エネルギーの時代)

次の世代、即ち1980年以降の現在は、「エネルギー」の時代であると考えられる。加藤・秋山により、構造物の地震時応答をエネルギー的に解釈す

るという考え方が、1975年の日本建築学会論文報告書に「強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷」として提唱された。一方、1983年に最初の免震構造である八千代台住宅、1984年に制振構造である日立本社ビル、1986年にはTMD（制振構造・質量効果機構）を採用した千葉ポートタワーなどの免震・制振構造が建設されはじめた。

これらは地震時の応答量を低減するという観点から使用されはじめたが、エネルギー応答量という概念により統一的解釈が行われるようになった。

すなわち、耐震構造・免震構造・制振構造を含めた地震動の作用を受ける構造物全体を、エネルギーの概念を用いることにより体系的に理解できるようになった訳である。

エネルギー吸収という概念の上から、構造部材の塑性履歴挙動もダンパーのエネルギー吸収能力も同じ土俵で議論できるようになり、免震デバイスは免震部材に昇格したと言える。さらに、兵庫県南部地震を契機として性能設計がクローズアップし、建物の地震時性能が議論されるようになった。

免震構造や制振構造は建築的性能の確保には有利な構造システムであり、一段とニーズが高まってきた。

#### （今後の課題）

今後の21世紀に科せられた問題は、いかに地震時のエネルギー応答量を定量的に評価していくかであろう。

まずは、建築構造物側でのエネルギー吸収能力の定量的評価の向上である。兵庫県南部地震での鋼構造物の梁端破断現象に示されたように、構造部材においても定量的な塑性変形能力の評価は難しく、エネルギー吸収能力自体も未だ充分には定量化されていない。次に、免震構造や制振構造に用いられるダンパーは、比較的評価しやすい機構を有し、実験などによっても性能確認が容易であるという利点を有している。免震構造に用いられるダンパーは、最終的にほとんどの地震入力エネルギーを消費しなければならない重要な部材である。

構造的な主要部材であるという認識を持ち、要求される地震時性能に十分対応できるエネルギー吸収能力をダンパーが有しているかの定量的な確認が大切であろう。ダンパー製造者は、各ダンパーの大変形・大速度時のエネルギー吸収性能を定量的に保証しなければならない。構造設計者は、設計時に期待したエネルギー吸収がどのような形で具体化されているかを、最後まで追求する必要がある。振動解析においてダンパーに吸収させたエネルギーの消費能力を、ダンパーの実大実験などにより定量的に確認しないで使用している場合も見られるので注意を要する。

一番難しい問題は、地震入力エネルギーの定量的評価である。構造物を破壊させるような実質的な地震入力とはどのようなものを慎重に決めていく必要がある。記録された地震動のエネルギーが、そのまま構造物に入力するとは必ずしも考えられない。実質的な建物の地震時挙動を考慮した評価が行われなければならない。実務的に多様される質点系基礎固定モデルは、入力したエネルギーを全て構造物にそそぎ込むモデルであり、構造物にとっては過酷なモデルである。一方、いたずらにモデルを複雑化させても、精解が得られるが正解に近づくとは限らない。

建築物が耐震性を得るための手段が多様性を増してきたことを認識して、これを自由に使いこなす要求される建物性能を確保できるような技術者が必要とされている。このためには、エネルギー応答の理解と知識が役に立つものと考えている。