随　筆

21世紀に向けた耐震設計

和田　　章

人類の歴史とともに，土木・建築の構造材料は，土，木，石，コンクリート，鉄，鋼，炭素繊維と1 000年，100年の単位でゆっくりと変化してきた。時代を経るに従い，構造材料を作るために大量のエネルギーを使うようになってきたことがわかる。地球が太陽系にできて約46億年，石油や石炭などの化石燃料を大量に使い始めて230年とすると，20,000,000倍もの長い間に降り注いだ太陽エネルギーを一度に使っていることになる。地球の誕生から今までを一年に縮めて計算すると，一年は31,536,000秒なので，一年間に降り注いだ太陽エネルギーを，最後の1.6秒で使ってしまうことと同じになる。この20世紀最後の50年に使う量はさらに多いはずである。地球を受け継ぐ後世の人達の幸せな生活を考えると，この50年にしてきたことは良かったことか悪かったことか考えさせられる。

進み過ぎていたことが遅れていることになる。数年前まで，ファーストフードの多くの店では発泡スチロールの使い捨て食器を使っていた。これを見て，アメリカのやりかたのすごさを感じ，憧れたりもしていた。上海の同済大学の食堂で，学生がステンレスの食器とスプーンをもって集まってくるのにすれ違ったことがある。食後は自分で洗って持ち帰る。遅れているように見えて，進んでいる方法と思う。宿舎の食堂でパンを頼むと，途中まで使ったジャムの瓶が出されてきた。何も問題はないが，何となく抵抗がある。欧米のホテルでは，ジャムは小瓶に入っていて，使い捨てにする。このほうが清潔な感じがして心地好い。でも，どちらが進んでいるのか分からない。

整っていて美しい状態があるとき，エントロピーが小さい状態と言う。この状態から雑然とした状態に至る過程があり，エントロピーが大きい状態に移る。このときに快感がある。このあと，また整っていて美しい状態に戻さなくてはならないが，そのとき，大量のエネルギーが使われる。このように，先進国の方法は裏側で大きくエネルギーを使う仕組みになっている。

石灰からセメントを作り，鉄鉱石から鉄筋や鋼材を作り，これらを固め，整然と組み合わせ，美しい建築や土木構造物を建設することは，エントロピーを小さくする過程のように見える。しかし，使われているエネルギーを含め，全体で考えるとそうとは言えない。

耐震設計を進めるとき，頻度が高く小さな地震には機能の維持を目指し，極めて頻度の小さな大地震には人命さえ助かれば壊れてしまってもよいとしてきた。地震の研究者，構造物の設計者，研究者も，この方針のもと，強すぎる建物を造るのは良くないし，弱すぎる建物を造ることも良くないと考え，ぎりぎりの線を狙ってきたように感じる。

今の技術でも，これだけの大きさを考えておけば問題ないという地震動と，このようにつくれば強さは十分という構造を用意できないはずはない。それでも，建築，土木構造物の設計では，経済性，美的な問題，機能上の使いやすさの問題も同時に解決しなければならない。構造物を十分強くできないのは，材料や構造の問題ではなく；構造以外の要求を重視し，構造的な弱さを認めてきたことに原因があると感じる。

兵庫県南部地震の際，古い建物でも耐震壁が合理的に配置されていて，問題なく残った建物がある。鉄筋コンクリート造建築の最も簡単な耐震設計法に，ラーメンの柱には 7 kg/cm^2 の強さ，耐震壁には 25 kg/cm^2 の強さがあるとし，その合計から水平耐力を求め，建物の全重量と比較する方法が使われている。同じコンクリートや鉄筋の資材を使うなら，壁の方が 3 倍以上効率が良いことが分かる。そして，よく言われているように，柱は X 方向，Y 方向の計算に二重に使われるが，壁はそれぞれの方向で独立に効かせている。その結果，地震動が平面的にいろいろな方向から作用するとき，耐震壁のある建物の方が抵抗力が大きいことになる。さらに，壁の方がラーメンの柱よりひび割れが先に入るので，その程度で地震が終われば，鉛直荷重を支えている柱を壊さなくて済む。

耐震設計法には，免震構造や制振構造の考え方が進んで用いれられ始めている。免震構造は積層ゴムを使って建物を地盤から浮かし，地震入力エネルギーを積層ゴムとダンパーでほとんど吸収し，上部の建物を救う考えである。制振構造は建物の各層に地震時のエネルギーを吸収するダンパーを設置し，柱・はりはなるべく弾性範囲で変形できるようにした構造である。これらの方法は従来から耐震壁を合理的に配置し，壁にひびが入ることで地震入力エネルギーを吸収し，柱やはりを助ける方法と共通点がある。

20 世紀にやってきたことは，先にも述べたように，後世の人々からやり過ぎだったと言われるかもしれない。せめて，地震の度に取り壊さずに再利用できる，修復までを考えに入れた構造法を確立しなければならない。このために，高強度コンクリートと高強度鉄筋を使った高弾性骨組が非常に役に立つ。一方，非常に小さな変形からひび割れなどを起こし，地震時のエネルギーを吸収するのに適した材料や仕組みの開発が必要である。

耐震設計を考えるとき，「入力」，「建物の揺れや破壊の挙動分析」，「応答結果の評価」の 3 段階があり，どの段階にもまだ分かっていないこと，これから研究しなければならないことがたくさんある。しかし，分かっていることも多い。現段階でも，新しい技術を取り入れる余地はたくさん残っていると思う。

（わだ・あきら／正会員
東京工業大学教授　工業材料研究所）