

# 耐震・免震・制振

和田 章

## 地震災害と都市

兵庫県南部地震のあった直後、18日は片付けをして、19日に関西国際空港へ飛んだ。出来たばかりのガラス張りの空港施設が対岸で起きた地震で壊れてはいないかと心配しつつ、空港内を見渡した。ほとんど何もなかったことを確認して、きちんと設計された建物は違うものだと感心しつつ、動きだした水中翼船に乗ってポートアイランドに向かった。ポートアイランドの中は臨時バスで移動し、海岸施設、道路、新交通システムなどには被害があったものの、建物そのものに大きな被害がないのを不思議に思いつつ、橋を渡り、被害の中心地の一つ神戸市役所の近くまで歩いた。

最近になって聞いたことであるが、埋立地の建築では、杭に多くの被害があったそうである。液状化した地盤においては杭に被害が集中したため、上部構造の被害は軽微であった。このことを、液状化免震と読んでいる人もいる。

多くの被災された方が市役所に集まっていた。フラワー通りを山手へ、沢山の建築が大きな被害を受けているのを見て歩いているうちに、街は夜になってきた。道路に横倒しになったビルの撤去作業を見ながら、三宮駅まで進んだ。ガードをくぐっても、まだ大きな被害を受けた建物が沢山あったが、新神戸駅の方に上がっていくに従い、被害はまた軽微になり、オリエンタルホテルに着いた。ホテルから西に向かう坂道を歩いてみて、被害が非常に少ないのに驚かされた。地盤条件が良いと、ここまで被害は違ってくるものかと考えさせられた。次の日には、高速道路の甚大な被害、芦屋浜の高層住宅の柱の破断、木造住宅の被害を目の当たりにして、伊丹空港から自宅に戻った。

後になってはっきりしたことではあるが、初日には震度7の横長の被災地域を縦によぎるようにして、見たことになっていた。被害は局所的ではなく、大震災であった。帯状に被害がつながったのは、断層の走った線に関係するのか、地盤条件によるのか、深い地盤の形状なのか、地表の揺れ方は場所によってかなり違うのであろう。震源地からの距離だけでは説明がつかないことは確かである。

もう一つの問題は、六甲山を越えればあいている土地はいくらでもあるにもかかわらず、海と山に挟まれた狭い土地に、なぜ多くの人々が住もうとするのかということである。六甲を越えてさらに北へ行ったところに、三田という町がある。東京で考えれば、十分通勤可能圏である。人の住み方を考え直した方がよい。地震災害は、構造力学ではなく、都市計画の問題である。

この三田に郵政省の建てた免震建築があり、免震構造としての性能を十分に発揮した。これをきっかけに、日本の免震建築は社会に

認められ、98年秋の時点で竣工または施工中の免震建築の総数は、600棟近い。年間工事総床面積のうち、免震建築の年間工事床面積は現状で0.5%程度だそうである。この比が1%を超えると、一つの構造形式として認められることになるそうである。もう一度大きな地震が起き、再度免震構造の良さが発揮される際には、10%を超えることになるだろう。

古い木造建築の被害、1970年以前に設計された鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造の被害、各種の土木構造の被害、中小の鉄骨構造の被害などに比べて、神戸市役所の高層棟、三田の免震構造が地震後も機能を発揮しているのを見ると、遅々として進んでいないように見える耐震工学にも日々の進歩があったことが実感できる。

もう一つ重要なことは、過密都市における地震災害の問題である。野原の一軒家と密度の高い都市の中の建物では、個々の建物の耐震性は同じで良いとは言えない。都市の機能が一つひとつの建物の健全さによって保たれているからである。

## 設計用地震力

1月17日は忘れられない日になり、もうすぐ4年になる。建築基準法の改正が行われ、2年後に施行される。設計用地震力として、昭和56年までは各階の重量に震度を乗じて水平力を計算していた。昭和56年6月から新耐震設計法が施行され、設計用地震力は当該層が支える重量に層せん断力係数を乗じ、層せん断力を求める方式に変わった。前者は応答加速度に質量を乗じ、慣性力としての作用水平力を直接求めようとするものである。後者は建物に地震動が作用したときの応答層せん断力を直接に求めようとする方法である。

新しい基準法・同施行令の改正では、「工学的基盤において地震動スペクトルを定義し、建設地の表層地盤の影響を考慮して、設計用の地震動を考える」ことになる話がある。要するに、設計用地震力を、建物に作用する力ではなく、地面の揺れ方で定義しようとする試みである。

兵庫県南部地震の被害状況を見て感じたことから考えれば、このように地盤条件を正しく取り入れ、その地震動で考える方法を用いるべきであろう。しかし、工学的基盤において定義される地震動スペクトルの信憑性、表層地盤の影響を考慮して地表の地震動を求める方法の持つ問題点、建物と地盤と杭の連成振動問題、これらは当然3次元の問題であるが、一般の設計者が安心して使える理論、ソフト、さらに地盤のパラメータの設定方法が確立されているとは思えない。法規には理想を描き、一般の技術が後からついていくという考えであろうが、至難の業であろう。

個々の建物を工業製品のように考え、建設地の地震危険度、地盤条件が大きく変わっても設計の内容はあまり変更しないという考え方もありうる。

## 損傷部位限定設計

この100年の期間に、建築構造物の耐震設計に関して多くの研究がなされた。わが国においても、米国においても、極めてまれに来る大地震に対して、構造骨組本体を塑性化させ、そのエネルギー吸収能力に期待して大地震動に耐えるという考え方が用いられている。ここには人命保護の考え方は入っているものの、建築構造本体の損傷を始めから覚悟した考え方であり、財産保全、機能維持の考えは含まれていない。

わが国の場合、この考え方に基づいて1981年に改正された建築基準法施行令に基づく新耐震設計法が使われるようになって、骨組に靱性を持たせ構造特性係数  $D_s$  を小さく設計することが耐震設計の目標になってきた。地震災害のたびにその重要性が言われている鉄筋コンクリート構造の耐震壁を省く設計が多く行われ、筋かいが耐震性の向上に有効なことが分かっている鋼構造においても、純ラーメン構造の建物が目立つようになった。この傾向は建築の平面計画を自由にできるため、建築家にも好まれ、壁や筋かいを計画的に配置する習慣はなくなってしまった。

都市の耐震性、経済活動の継続性を考えると、大きな地震を受けた後の補修性を考えた耐震設計法の確立が必要である。天変地異と呼ばれるように極めてまれに起こる地震に対しては、従来と同じように、再利用はあきらめるとしても、一般の設計で考えているレベルの大地震動に対しては、柱、梁などの主体構造を弾性範囲の挙動に抑え、エネルギー吸収を意図して組み込んだ弾塑性ダンパーなどに損傷を集中させる考え方が有効である。このような設計を損傷部位限定設計と呼ぶことができ、一般には制振構造と呼ばれている。

地震時のエネルギー吸収を意図して組み込むダンパーは、できる限り早期に降伏を開始したほうが、その制振効果は大きい。そのために、降伏点の低い鋼材の利用、ダンパーの局部に塑性変形を集中させる方法などが用いられている。これらのダンパーの塑性化する部分には大きな塑性変形能力が要求されるため、座屈現象によって耐力の劣化が起きないようにすると同時に、塑性疲労の問題にも注意したディテール設計が必要である。

## 免震構造と制振構造

地球環境問題と建築の寿命の問題が注目されているが、建設に相当のエネルギーを使う建築物を30年から40年の間隔で建て直すことはやめるべきである。竣工直後の時点で最適な状態を作り上げることに注目して設計は行われがちである。数十年から数百年の長い期間にわたって使用可能な建築を考えたとき、竣工時点の最適解がLife Cycleとして考えたときの最適解にはなりえない。内装の寿命、空調など設備機器の寿命の違いを考え、のちに部分的な取り換えのできる設計が必要になる。このような点に早くから気付き、スケルトンとインフィルを分離した設計、設備の配管と構造の占める

空間を明確に分けた設計が行われている。

耐震設計にもこの考え方を取り入れる必要がある。もっとも極端にこの考えを推し進めたのが免震構造である。これは、地震時の変形、エネルギー吸収の要求をほとんど免震層の積層ゴムとダンパーに期待し、上部構造には鉛直荷重の支持と剛性を期待する方法である。制振構造にも同じことが言える。従来の構造は、鉛直荷重の支持のために設けられた柱、梁に地震荷重、塑性変形能力を付加しようとした考えであるが、ノースリッジ地震、兵庫県南部地震の鉄筋コンクリートラーメン構造、鋼構造純ラーメン骨組の被害はこの問題を顕在化させた。制振構造は、鉛直荷重を支持する骨組は地震時においても弾性挙動を示し、かつ制振ダンパーのみに地震時のエネルギー吸収を期待する構造である。要求及び機能の異なる鉛直荷重支持機構と、地震エネルギー吸収機構を分離したことに重要な意味がある。このような耐震設計法を実際のプロジェクトに適用するためには、建物の中に制振ダンパーを組み込む空間の確保が必要である。平面計画の段階から、建築家の理解が必要である。

わが国に限らず、建築を建てる場合には行政の審査を受けなければならない。被害レベル制御設計の場合、制振ダンパーに特殊な鋼材が使われること、基準法施行令で決められている1次設計では、鋼構造建築は許容応力度設計が要求されているのに対し、制振ダンパーはこのレベルの地震力に対しても降伏するなどの点で、一般の構造としては扱われない。建築基準法が改正されようとしているので問題はないのかもしれないが、このような新しい考えによる建築構造が間違いなく普及できるような環境が望まれる。

## 力強い理解者

昭和8年に寺田寅彦は「鎖骨」という随筆を書いている。この中で、鎖骨は人間の骨の中では折れやすくできていて、肋骨などのさらに重要な骨が折れるのを救っていると解説している。この随筆の中で、建築の耐震設計にも同じ考えが適用できるのではないかと書いている。この提案に当時の構造学者が耳を傾けないと嘆いている。要するに、わざと折れやすい部分を作っておいて、建物本体を救い、壊れた部分を簡単に直しやすくしておけば良いというアイデアである。今の言葉に置き換えれば、損傷部位限定設計、Damage Tolerant Structures、損傷制御設計となろう。免震構造についても、地震時の変形を免震層に集中させ上部構造を助けるという考えであるから、この考えに含められる。

耐震設計に限らず、設計は理論的に明快なのが良い。構造設計に限って考えても、その構造物の挙動が読み切れる設計が良い。免震構造、制振構造の理解者が増え、多くの設計に応用されることを期待する。

最近のニュースによると、来年度から施工の始まる首相官邸に免震構造が使われることになったそうである。免震構造の研究者の一員として、このような賢明な判断をされた建設省の方々に感謝したい。

(わだ あきら 東京工業大学建築物物理研究センター長・教授)