特別寄稿

これからの耐震設計

東京工業大学
建築物理研究センター長
教授　和田　章

はじめに

我国において建築構造を語るとき，耐震構造の話を後回しにすることはできません。濃尾地震から100余年，20世紀のはじめに起きたサンフランシスコ地震から，もうすぐ100年です。鉄筋コンクリート構造，鉄骨構造によって大規模な建築が建てられるようになってからも100年前後です。同じ地区に大きな地震が襲うのはさらに長い間隔です。たくさんの地震災害の経験をし，わかったように思っていても，まだまだでしょう。

地震被害と都市

兵庫県南部地震のあった翌々日，関西国際空港へ飛び，でき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はしなかったかと心配しつつ空港内を見渡し，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いました。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きました。最近になって聞いたことですが，埋め立て地の建築では，杭に多くの被害があったそうです。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した。このことを，液状化免震と呼んでいる人もいます。

多くの被災された方が市役所に集まっていました。ここまで来るのに，横浜の家を出てから4時間も過ぎてはいません。それから，フラワー通りを登り，たくさん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，町は夜になってきました。道路に横倒しになった柏井ビルの撤去作業を見ながら，三宮駅まで進みました。ガードをくぐってもまだ大きな被害を受けた建物がたくさんありましたが，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きました。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ました。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ました。

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，自宅に戻りました。

後になってはっきりしたことですが，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ました。被害は局所的ではなく，間違いなく大震災でした。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，表層地盤なのか，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しょう。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す。

もう一つの問題は，六甲山を越えれば，空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す。人の住み方を考え直したほうがよいと思います。地震災害は，構造力学ではなく都市計画の問題です。

この神戸市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ました。これをきっかけに，日本の免震構造は社会に認められ，1998年春の時点で竣工または施工中の免震建築の総数は500棟を越えました。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%程度だそうです。この比が1%を越えると一つの構造形式として認められるこ

とになるそうです。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た際には，10%を越えることになるでしょう。

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，神戸市役所の高層建築，三田の免震構造が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構造にも日々の進歩があったことが実感できます。

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す。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いえません。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す。同様に，情報技術によってシステムが成り立っている現代社会の高いポテンシャルを維持するために，日本の通信を担っているNTT，NTTファシリティーズの役割は大きいといえます。

設計用地震力

1月17日は忘れられない日になり，そして3年が過ぎました。建築基準法の改正が行われようとしています。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ました。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りました。前者は応答加速度に質量を乗じ，慣性力を直接求めようとするものです。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す。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」ことになる話があります。要するに，設計用地震力を地震動で定義しようとする試みです。

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，その地震動そのもので考える方法を用いるべきでしょう。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えて地表の地震動を求める方法のもつ問題点，建物と地盤と杭の連成振動問題，これらは当然3次元的問題ですが，一般の設計者が安心して使える理論，ソフト，さらに多くの地盤のパラメータの設定方法が完成しているとは思えません。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しょうが，至難の業でしょう。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得ます。

損傷部位限定設計

我国においても，米国においても，極めてまれにくる大地震に対して，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ます。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ません。特に，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，骨組に靱性をもたせ構造特性係数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ました。地震災害のたびに，その重要性がい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，筋違が耐震性の向上に有効なことがわ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りました。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，壁や筋違を計画的に配置する習慣がなくなってしまったのです。

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す。天変地異と呼ばれるように，極めて稀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押さえ，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す。このような設計を損傷部位限定設計と呼んでいます。

純ラーメン構造の弾性限変形を考えます。鋼構造骨組の場合，梁に生じる曲げ変形が構造物の変形の数十

パーセントを占めますから，梁の変形に注目して考えます。梁のスパン，成をそれぞれL，Dとして梁の端部が降伏点に達する変形角は（$\sigma y/3E$）・（L/D）で表せます。ヤング係数は一定値ですから，降伏点の高い鋼材，従来より小さな成の部材を用いることにより，骨組の弾性限変形を自由に大きくすることができます。骨組を弾性挙動におさめることは難しいことではありません。このようにして，減らした鋼材費用は，次に述べるダンパーを組込むための費用より大きいことが多いのです。

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，その制振効果が大きくなります。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ます。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す。

耐震設計の方向

地球環境問題と建築の寿命の問題が注目されていますが，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す。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す。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得ません。内装の寿命，空調などの設備機器等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ります。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ます。耐震設計にもこの考え方を取り入れる必要があります。

極端にこの考えを推し進めたのが免震構造です。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す。損傷部位限定設計にも同じことがいえます。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す。ノースリッジ地震，兵庫県南部地震の鋼構造純ラーメン骨組の被害はこの問題を顕在化させました。損傷部位限定設計は，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保証し，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方法です。要求およ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ります。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す。平面計画の段階から，建築家の理解が必要です。

我国に限らず，建物を建てる場合には行政の審査を受けなければなりません。損傷部位限定設計の場合，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ません。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ませんが，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ます。

おわりに

昭和8年に寺田寅彦は「鎖骨」という随筆を書いています。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ます。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ます。この提案に，当時の構造学者が耳を傾けないと嘆いています。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す。今の言葉に置き換えれば，損傷部位限定設計，Damage Tolerant Structures，被害レベル制御設計となるでしょう。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方ですから，この考えに含められます。

耐震設計に限らず，設計は理論的に明快なのが良いと思います。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でしょう。損傷部位限定設計の理解者が増え，多くの設計に応用されることを期待します。