

## 【講演録 27】

# 阪神・淡路大震災における建築物の被災状況 と大地震に備える制震・免震構造

鹿島建設株式会社小堀研究室次長

兼制震構造研究部長

坂本 光雄

### 1. 講演内容について

まず、本日のお話のテーマについて紹介いたします。最初は、阪神・淡路大震災について、主に建築を中心にした被災状況等についてお話をさせていただきます。震災発生後だいぶ時間も経過しましたが、今回の災害は決して忘れてはならない、そして反省しておくことが多くあると思います。

次に、建築分野における、防災技術として、いわゆる制震、免震という技術が、いずれ耐震構造並みに普及し、災害を防ぐには非常に大きな技術として貢献するだろうと考えておりますので、その技術をお話させていただきます。

皆様は、「既存不適格」という用語を聞かれたことがあると思います。いわゆる耐震構造の技術というものは、地震が起きるたびに新たな知見が得られ、基準というものはそれを反映する形で改定されていきます。しかし今回は改定以前の建物が、かなりの被害を受けているのです。そこで、最後にどの様に被災状況を診断し、安全な形に持っていくことができるのかということにも触れることといたします。

### 2. 阪神・淡路大震災における建築物の被災状況

それでは最初に、地震の被害について、もう一度振り返ってみたいと思います。先日発表された、厚生省の集計による阪神大震災における死者についての分析結果では、過去の関東地震、あるいは福井地震において、非常に大きな災害をもたらした地震は、死亡者で見ますと、家屋の倒壊、あるいは家具の転倒等を直接な原因とする圧死に近い状態、あるいは圧死の比率は非常に少なかったのです。つまり関東地震で14万人亡くなった内、直接的な原因が火災によるものが10万人を超えており、比率的には火災による死亡者数が

相当大きかったのです。

それに対して、今回の地震で最も特徴的なのは、一次被害と呼ばれる、家屋の倒壊、家具の転倒に起因する圧死等が非常に多く、8割から9割の比率であったこと、さらに、災害弱者と言われる、ご老人、女性の死亡が多かったということです。直接的な被害が圧死等による要因が多いということに対して、建築構造物を今後どうするかということを考える点で、非常に大きな意味を持つと思います。

厚生省の発表以前に国土庁から発表された資料でも、死亡者数の全体が5,502人と発表されており、その内4,831人、約9割の死因が、家屋・家具などの倒壊による圧死と発表されています。また新聞で発表されたデータも、死亡の時刻が、まさに震災発生日の午前中、あるいはその日の内に亡くなった方が多いことから推測できました

地域的な分布については、東灘区、西宮市での死亡者が多く、地域の割に比較的死亡者が少なかったのが中央区でした。これは、都市部の中心部ということで、昼間人口が多く、夜間人口は少ないことが影響しています。今回の地震の発生が早朝であったことからこういった結果になっているのです。西宮市で死亡者が多く発生したのは、市の中央を流れる武庫川という大きな川の三角州に当たる地域が軟弱地盤であり、その地盤の液状化という問題が大きく影響したのです。

さらに長田区、灘区、東灘区、西宮市等の被災状況の激しい地区は建設時期の古い住宅が多かった事が要因と思われます。地震後の現地調査でも、土台回り、基礎回りが腐っている、また筋交いが無い等の状況の木造建築物が多く見られました。

次に木造以外の建築物の被害状況についてご紹介します。顕著に被害状況が現れたのは、ピロティー方式を採用した鉄筋コンクリート造のオフィス、集合住宅です。

また我々がテレビ等で目にする機会が多かったのは、大型ビルの中間層の位置の崩壊です。これについては、諸説紛々いろいろな理由がありますが、中でも大きな要因として過去の基準が、中間層辺りについてはもう少し地震力を与えた設計をしなくてはいけないところ、それを下回っていることが挙げられます。

また、中間層が崩壊したビルの中には、低層階の柱は鉄筋コンクリートの中に鉄骨が入っているのですが、崩壊した層から上層階については鉄骨が抜かれているというケースもありました。この設計をした当時はそれでよかったということですが、そういった不連続な骨組みのビルを造ると、応力が集中するという現象が起きてしまうのです。

ある病院では耐震診断の結果耐震補強が必要であると判断され、耐震補強の工事をして

いる最中に地震が発生し、工事中の階で崩壊しました。この件などは非常に不運な状況を招いたケースと言えると思います。

我々構造技術者にとって、ショッキングだった事実は、震が関ビルと同時期に設計された、鉄骨構造の超高層集合住宅で、上からの荷重をすべて背負う鉄骨の柱に100円玉が挟まるようなクラック、破断という状況を呈したということです。この件については、まだ十分に分析が済んでいませんが、設計法なのか、材料の問題なのか、いずれ明らかにされるだろうと思います。現在、既存の鉄骨構造のビルでも、同様の構造、規模の建物が多くあり、今後どう対処すべきかという議論が至る所で進められています。

低層のビルにおいても、脆性的な破断、あるいは柱脚のアンカーボルトがひきちぎられていて、柱が元あった位置から柱の寸法以上ずれているというような状況が散見されます。こういった低層のビルは、非常に間口が狭く、用途的には雑居、あるいは飲食店が入居しているものです。これは設計の問題、あるいは基準の問題というよりは、製作、施工の問題に大きく起因することであろうと考えられます。

日本全体をとってみても、このような建物の件数が圧倒的に多いのです。これは一民間会社、設計事務所のレベルではなく、国を挙げて対策を分析する事が急務であると思われるます。

次に被災の割合についてお話をしたいと思います。20～30年の単位で過去を振り返ってみると、海外では、メキシコが大震災に遭遇しています。その当日にマスコミ各社からの情報から調査に入ったのですが、通常地震の被害のケースはいろいろ分類しますが、6ランクに分類する場合、崩壊、大破と言われる上2つに分類される建物は、このメキシコ地震の市の中心部辺りをとってみても、全体の5%から多くても10%ぐらいであり、他の過去の海外の大地震での被害調査においても同じような状況でした。ですので今回の阪神・淡路大地震についても、被災当日の午前中にはメキシコの大地震と同じ程度の規模であると想像したのですが、その日のうちにメキシコの大地震の時の数字は超えていったのです。

建築構造の面から考えて、ここまで被害を大きくした原因は、既存不適格という問題が大きく関与しています。1981年、昭和56年に現在の建築基準法の耐震規定が施行されたのですが、この施行以前の建物と施行以降の建物を比較すると被害の違いが顕著に表れているのです。1971年以前に遡って建築された鉄筋コンクリート構造のものは、半分以上が崩壊・大破という被害を受けています。ところが1981年以降に建築された鉄

筋コンクリート構造のものは、崩壊・大破の被害は5%程度しか受けていません。もちろん、古い建物は同じような傾向なのですが、ここで鉄筋コンクリート構造と鉄骨構造とを分けておりますのは、鉄骨構造の場合は、必ずしもここまでの顕著な傾向は出ていないからです。特にこの新しい基準以降の建物についても、鉄骨構造では、こういった崩壊・大破の被害率が高いということです。

また、小規模なビルについては、新築でも、鉄骨構造の場合、柱脚、柱と梁を接合する接合の仕方、特に溶接、材料の問題、ファブリケーション、すなわち製作、施工等が一貫した状態で設計の管理がされてなく、その性能が発揮されないケースが散見されました。つまり中小の鉄骨構造の建物軒数の割合は非常に多いですから、今後特に注意が必要であると思われれます。

続いて、今回の震災により修復不可能な状態に至った建物の、こういった部分が大きな崩壊現象につながったかをご説明します。

建築物の崩壊した位置を件数で分析してみますと、やはり1階、次いで2階の被害が大半を占めています。具体的な事例としては、ピロティー形式の建築物が挙げられます。つまり1階に駐車場が必要ということで壁を抜くことが、そこに上と下の大きな剛性、固さの違いが生じ、そこにエネルギーが集中することで崩壊を招くというような現象が起きるのです。

次に、神戸の中心部にあのような被災を起こした地震について、どれ程の規模の地震であったかというのを建物の被害から推定してみます。ある8階建ての鉄骨構造のビルでは、修復は不可能と思われるほど、梁、柱の接合部の周りに座屈現象が見られました。

この建物をこのような状態にした地震の規模は、距離的には2キロぐらいしか離れていない神戸の海洋気象台の記録をもとにシュミレーション解析を行い、実際の被害状況と比較したところ、南北方向については821ガル、東西方向につきましては、495ガルという最大加速度がこの建物の基礎部に作用したと推定されます。

ここで、耐震設計が、どのように変遷して現在の設計基準になっているのかをお話します。

まず最初は関東地震後に制定されたのですが、その後1950年に建築基準法として制定され、1971年に改定され、1981年に「新耐震設計法」を含む現行の建築基準法が制定されたのです。しかし60mを超える建築物については、建築基準法に規定されている耐震設計基準によらず、「建築基準法の特例による建設大臣の認定」により認可を受

けることとなります。この場合の耐震設計は、動的な地震の波を建物の足下に入力して、建物がどう揺れるかを再現し、その再現された揺れに対して、建物が座屈、崩壊したりしないような動的設計と呼ばれる方法に基づいています。

通常用いられます1981年以降の耐震基準は、1次設計と2次設計に分けられます。1次設計とは、建築物の耐用年限中に数度は遭遇する程度の地震に対しては、建築物の機能を保持するもので、2次設計とは、建築物の耐用年限中に1度遭遇するかもしれない程度の地震に対し、建築物の架構に部分的なひび割れ等の損傷が生じて最終的に崩壊から人命の保護を図る限度をいいます。ここでは主に2次設計についてお話ししますと、建物が崩壊しないレベル、500年に一遍ぐらいの巨大な地震が来ても、多少の残留変形は残りますが壊れないというクライテリアについて、この地震以降さらに議論が起きているのです。一応、その概略に相当する地震の大きさは、現在の基準では一応300から400ガルです。これは関東地震並みの地震の大きさと言われております。

ここで問題は、1981年以前には、崩壊に対しての規定はなかったことです。建物が元に戻る、すなわち弾性状態を保つレベルについては、東京でも5、6年に一遍起きる地震というもので考えられていましたが、それ以上の地震に対する設計方法は示されていなかったということです。

それに対して、高層建築物は1つ1つ個別の動的な設計をするわけです。500年から1000年に1度来るような地震というものを想定して、耐震設計をする。また、弾性状態に保ちなさいという一次設計を100ガルで設計しておけば、結果として400ガルぐらいまで崩壊しないこととなります。崩壊に対しては、弾性設計のレベルの大体4倍ぐらいは安全であると想定すれば良いのです。

以上の件を整理してみますと、建物が崩壊に対して安全であると考えられる地震の大きさのレベルは、古い基準では、結果的にはたぶん200から300ガルしかなかったと思われま。つまり、今回の地震で崩壊を避けられなかったことはうなずけると思います。

それに対して新しい基準は、関東大震災レベルを基準にして、1次設計で80から100ガル、崩壊に対しては、400から500ガル、さらに高層建築では、崩壊・大破に至る地震の大きさは800から1,000ガルであったと推定できます。

今回の地震を振り返ると、見当で800ガルから1,000ガルというものが推定されております。つまり2次設計の基本となるクライテリアが、果たしてこれでよかったのか、超高層ビルでは満足されていましたが、構造物そのものは崩壊しなかったということによ

かったのか、地震直後の状況を考えたときに、構造物が安全だったからほぼよかったですという評価で果たして我々の義務は果たせたかと言うことが、さらに議論されております。

もちろん、耐震設計で安全を大きく見て設計すれば十分なのですが、色々な点から限界があるのです。また、仮に過大な耐力を与えた設計をしても、耐震設計というのは、受けた地震に対して耐えるという設計ですから、揺れを減らすということはできないのです。そして耐力を増すために壁を足したり、筋交いを足したりしますと建物が固くなります。固くなると、また余計大きな力を受けるという傾向にもなります。そういったことから、根本的に考え方を変えた構法が考えられなくてはいけないということで、以前から研究されている制震・免震構造の必要性が出てくるわけです。

### 3. 制震・免震構造

地震に対して激しく揺れながら耐えるという耐震構造に対して、作用する地震力による建物の揺れを抑制してより大きな安全性を確保するのが制震構造です。機能を維持するための揺れの低減については、耐震構造では限界を超えているわけです。

それでは、そういった制震・免震構造というのはどういうものなのかということをお話したいと思います。制震・免震構造で現在適用可能なシステムは大きく分けるとアクティブ制震とパッシブ制震という2種類があります。

アクティブ制震とは、センサー、制御コンピューターにより地震時の建物の揺れを検知して揺れを抑えるシステムで、建物上部に設置したおもりを駆動してその慣性力で制御するタイプと、建物自身の剛性や減衰といった構造特性を可変にして建物への入力エネルギーを小さくするタイプがあります。

また、ダンパーと呼ばれる減衰装置を建物の構造部材に組み込んでコンピューター等を使用せずに地震時の揺れを低減しようとする方法を、パッシブ制震といいます。つまり、厳密には違いますが、自動車でブレーキを踏むというような動作、ストロークを与えることで、自動車を減速させるということです。また、建物が震動することによって、その震動の結果出るフロアとフロアの差の変形を利用して、減衰装置を自然に働かせるという方法です。簡単に言うと、受け身な制震構造です。

さらに制震構造の1つに、積層ゴムと呼ばれるもので支持することで建物の振動周期を長くし、建物が本来持っている揺れよりも非常に柔らかい揺れを発生させることで、建物と地震を共振させないようにする免震構造があります。この非共振化させて大きく周期を

ずらすという方法は比較的使いやすい工法ですが、採用するうえでの注意があります。免震構造の使い方は、建物の高さが一つの問題になるのです。つまり水平方向に揺れるゴムの周期は長いわけですが、その長い周期を持つゴムの上に乗せる建物もゆっくりとした揺れのものに乗せてしまいますと、ゴムの揺れと建物の揺れが合い、共振現象を起こします。したがって、高さ45m辺りまでが限界になるのです。

さらに引っ張られる側が、地震によって自分の軸力以上に引っ張られる力を受けてしまうと、そこが引き抜かれる状態になりますが、そのような場合鉄などは耐力がありますが、免震ゴムでは、引っ張りを持たせると危険であるということからの限界もあります。また地盤の問題もあります。例えば神戸のポートアイランド地区等の埋め立て層が40m、50m、軟弱地盤が40m、50mという地層は、地盤そのものが非常にゆったりとした揺れですので、ゴムとの周期が近くなって共振し破断する可能性もあるのです。

それに対して、パッシブ制震のダンパーは、基礎の位置では地盤と接していますから、基礎位置では、周辺の地盤と同じような揺れを起こしますが、装置を組み込んだ上の建物は減衰していきます。そういう意味では、比較的高層ビルのほうが効果は大きいということです。

既にアクティブ系、パッシブ系の制震構造としてのダンパー、アクティブのシステムを適用した建物が各地にあり、古いものでは、1989年に竣工している建物もあります。

耐震構造として設計されたものに付加してみたり、あるいは当初から制震構造として、減衰効果を取り込んで設計しているものもあります。

それに対して、免震構造というのは、効果を狙うレベルを自由に選べるというよりは、免震構造としての要である積層ゴムは、特殊な条件下で使うケースが多くなっています。例えば、設計で考慮する地震の大きさとして神戸の大地震の規模は考えず、免震構造で建築基準法並みの地震の規模(300~400ガル)をベースに設計すればいいと言っても、神戸の大地震クラスの地震が来る可能性があるのです。クライアントから大地震クラス以下の設計でいいと要望があっても、それ以上の地震が来たときに免震ゴムがやられてしまったり、転倒が大きくなるときには、免震構造の場合は対応できないのです。ですから、免震構造を考える場合には、必ず大地震に対応しうる動的な設計をしなくてはならないということになります。低層建築では、いまの基準法では想定されている地震のレベルは低いので、免震構造にする場合には、特別な審査というものを受けて実施することになります。

それでも、最近では工夫をして経済性を高めながら、共同住宅に利用することをすすめています。というのも共同住宅が崩壊・大破に至った場合、その後に抱える大きな問題と  
いうのがあり、財産の保全が非常に大きな問題になっているからです。

また、制震構造・免震構造の各デバイスは、中小地震では特に効果は期待しないのですが、大地震だけ経済的なダンパーで抑えればよいというような場合に、鉄骨をうまく加工したダンパーを組み込むケースもあります。

それから、「JDS」と呼ばれる、性状が違う隣接した建物をダンパーでつないで、大地震の揺れを抑える方法もあります。具体的には、鋼材の荷重は上がらずに変形だけ進む降伏現象という特性を使います。

さらに超高層ビル、今後出てくるであろう超々高層ビルには、大地震に対する揺れだけではなく、強風による揺れにも対応することが必要になります。つまり1年とか5年という再現期間の非常に頻度の高い揺れというものが、設計上のクライテリアとしてクローズアップされてきます。そういった揺れは、非常に小さな振幅レベルになりますので、ダンパー類では対応できないことから、今度はアクティブのシステムが効果を発揮するということになります。具体的にいうと、建物の上に建物の重さの1%から0.5%ぐらいの重りを乗せ、その上にAMDと呼ばれる動力で動かす装置を乗せます。簡単にいうと振り子です。この振子の揺れの周期が建物の周期と合うと、この振子が建物の揺れを小さくする方向に働きますが、それだけでは非常に効果が小さいため、その効果を大きくするためにアクチュエーターで駆動します。さらにこの揺れを大きくするために、建物の信号をコンピューターに取り込み、どう動かすかという指令をアクティブ装置に与えるのです。これが作動することにより、非常に大きな動きになります。このようなシステムが実際に開発されて、実施されているのです。

現在、こういうような使い分けで、制震構造・免震構造が利用されています。

また先程から、頻繁にでてくる、ダンパーというものについてご説明しますと、シリンダー状のもので、ピストンが内蔵されていて、そのシリンダーに油が封入されており、この油がシリンダー内の穴を通過するときに大きな抵抗、つまり粘性抵抗が発生し、左右の変形差が生じたときに、そこでブレーキをかけるようになります。大型のものは直径で35cm、長さで1m20cmぐらいあります。建物の中にこういったものを組み入れるわけです。

次に鋼材を使用したダンパーですが、穴の開いた鋼材を、柱とか梁の立ち下がった壁と



の間に挟む。あるいは梁との接合部に使用します。そうしますと、地震発生時に上下の階の変形差が生じたとき、この穴の開いた鋼材が柱とか梁よりも先に降伏し、その部分でエネルギーを吸収するのです。吸収されたエネルギーはどこで消費されるかと言うと、熱になって消費されます。ですから、地震を受けてダンパーがエネルギーを吸収すると、ダンパーの温度が上がるのです。その温度は、せいぜい60度程度です。

以上が、制震・免震構造とその利用方法です。

#### 4. 耐震補強と制震補強

次に、最初に少しお話した既存不適格建物について少し補足しますと、耐震上問題のある不適格建物についての安全性の向上が問題になり、10月27日に学校、病院、百貨店、オフィス、賃貸マンションなど、多くの人が集まる一定規模以上のビルについては、耐震診断を義務付ける法律が来年早々には施行されることになってきています。ただし、その中でも一般の事務所、個人の住宅等は努力義務となります。

一方では、過去の宮城県沖地震、十勝沖地震の発生後に、避難の場所として活用される、学校建築の安全性を向上するため診断等が実施されましたが、診断後、危険だと指摘しても資金面での問題があり、なかなか実施に移されていないというのがこれまでの実状です。既存不適格の建築物が、実際に地震を受けた場合、古い建物では、地震を受けて建物に力が作用すると、あるレベルまでしか耐力が無く、補強しないと崩壊の可能性があります。鉄筋コンクリート系の建物で頑強な、壁だけでできているような建物は、非常に固くて強度を持っていますが、一遍ヒビ割れが大きく入り出しますと、そのまますぐ倒壊に至るといった脆性的な破壊を示します。

それに対して、柱と梁だけで構成され、壁がないような構造では、適切に設計されれば崩壊に至るまでは粘り強く耐えていくという変形能力があるのです。要するに、壁を入れて強度を上げたり、柱、梁を補強して粘り強くしたりして、古い、強度の低い建物を補強するのです。

具体的には、壁のようなもので補強する場合は、柱と梁の間に、新たに開口付きとか、開口なしの壁を追加していったり、鉄板の壁に孔を開けた状態で耐力を出す等の方法で対処する。また、柱、梁を補強する方法としては鉄板を巻くというやり方があります。

しかし、耐震診断、耐震補強でも限界があります。ここで、先ほどからご説明している方法、つまり強度を若干与えながら、さらに減衰を与えるという構法を使うのです。これが耐震補強です。いままでは減衰という概念はなかったわけですが、この概念により同じ

安全性を確保する上でも、新たに取り付ける壁なり筋交いの量を約半分に減らすことが可能なのです。

具体的には、ダンパーを利用するのです。既存の柱と壁にスリットを入れて、その間にダンパーを挟み込むわけです。ダンパーを挟み込むことで、耐震補強で問題となっていた、外壁、内外装、天井の落下というものに対しても安全性が上がってくるのです。

このような補強が、いずれ実施に移されていくような状況に今あるのです。

以上制震・免震構造から、その応用についてご紹介してきましたが、今後もさらに技術が実用化され、安全な、揺れない建物が造られることになると思われます。

時間がまいりましたので、これで終わらせていただきます。ご静聴ありがとうございました。

◆ 第27回講演会 1995年12月 8日 於：プラザホール