

建築の地震対策 これまでの歩み

2004年から2005年にかけて、地震の被害が後を絶たない。2004年10月新潟県中越地震、2005年3月福岡県西方沖地震、海外では、未曾有の津波被害をもたらした2004年12月のスマトラ沖地震。阪神・淡路大震災から10年、あの地震で得た教訓は、建築物にどのように生かされているのだろうか。今回は建築物の地震対策の歴史を振り返り、鋼構造及び使用される鉄鋼材料のこれまでの進歩について紹介する。



Wコンフォートタワーズ（東京・東雲）の制震柱の構造。この制震柱は、RC柱の中間部に制震パネル（低降伏点鋼を使用）を組み込んでおり、地震時の建築物の揺れを低減し、建築物の損傷を制御する。（写真提供：三菱地所（株）、戸田建設（株））

建築は地震対策とともに進化する

日本は環太平洋地震帯に位置し、世界の中でも地殻変動が激しく、地震活動が活発な国である。当然のことながら、自分の住む家が地震に対して身の安全を守ってくれるかどうかということに、日本では昔から大きな関心が寄せられてきた。日本の建築は、地震対策とともに進化してきたといっても過言ではない。

日本で本格的な耐震建築の研究が始まったのは、1891（明治24）年の濃尾地震の後といわれている。その後、1923年関東大震災、1948年福井地震、1968年十勝沖地震などの地震では、建築物に大きな被害が出ている。

1981年、現行の建築基準法（新耐震設計法）がつくられた。これは、地震を中小規模（震度5強程度）と大規模（震度6以上）の2段階に設定し、中小規模では建築物に顕著な損傷がなく再使用に耐えられるように、また大規模では少なくとも人命に危害を及ぼすような倒壊が生じないように、という考え方に基づき、それらに対する構造計算の方法を建築物の種類や高さに応じて細かく

定め、建築物の強さ、変形などに配慮するように規定されたものである。この新耐震設計法が、現在の耐震基準の基本となっている。

大震災で明らかになった既存建築物の問題点

1995年1月17日、阪神・淡路大震災が起こり、震度7を記録した。阪神・淡路大震災では、地震規模がマグニチュード7.2と大規模だったこと、深さ20km程度の比較的浅い震源の真上に大都市があったことなどから、従来の地震では見られなかったような建築物の被害があった。木造では、在来軸組工法の比較的古い家屋に被害が集中した。RC造（鉄筋コンクリート造）では、中層あるいは低層建築物の最下層の破壊や、十数層の建築物で中間階の柱の破壊などが見られた。

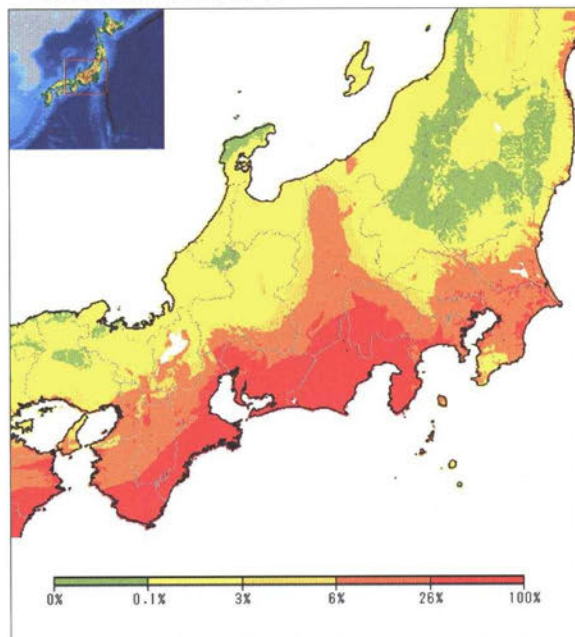
鉄骨造で大きな被害を受けたものは、築20～30年程度の古い建築物が多く、新しいものほど被害が小さかった。被害が目立ったのは、柱脚部や柱梁接合部の損傷である。被害の大きい建築物の多くでは溶接不良が見つかり、溶接部の管理の重要性が指

■地震の震度のめやす(気象庁)

震度 階級	人 間	屋内の状況	屋外の状況
0	人は揺れを感じない。		
1	屋内にいる人の一部が、わずかな揺れを感じる。		
2	屋内にいる人の多くが、揺れを感じる。眠っている人の一部が、目を覚ます。	電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。	
3	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。	棚にある食器類が、音を立てることがある。	電線が少し揺れる。
4	かなりの恐怖感があり、一部の人は、身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。	つり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。座りの悪い置物が、倒れることがある。	電線が大きく揺れる。歩いている人も揺れを感じる。自動車を運転していて、揺れに気付く人がいる。
5弱	多くの人が、身の安全を図ろうとする。一部の人は、行動に支障を感じる。	つり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。座りの悪い置物の多くが倒れ、家具が移動することがある。	窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのがわかる。補強されていないブロック塀が崩れることがある。
5強	非常に恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	棚にある食器類、書棚の本の多くが落ちる。テレビが台から落ちることがある。タンスなど重い家具が倒れることがある。変形によりドアが開かなくなることがある。一部の戸が外れる。	補強されていないブロック塀の多くが崩れる。据え付けが不十分な自動販売機が倒れることがある。多くの墓石が倒れる。自動車の運転が困難となり、停止する車が多い。
6弱	立っていることが困難になる。	固定していない重い家具の多くが移動、転倒する。開かなくなるドアが多い。	かなりの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。
6強	立っていることができず、はわないと動くことができない。	固定していない重い家具のほとんどが移動、転倒する。戸が外れて飛ぶことがある。	多くの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。
7	揺れにほんろうされ、自分の意志で行動できない。	ほとんどの家具が大きく移動し、飛ぶものもある。	ほとんどの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されているブロック塀も破損するものがある。

■「30年以内に震度6弱以上の地震動が発生する確率」を示す予測地図の部分(確率論的地震動予測地図)

関東地方から東海、近畿、四国まで広がっている赤い部分は「発生確率26%以上」と予測されている。



(資料提供:防災科学技術研究所J-SHIS)

摘された。また高層住宅で、鉄骨柱の脆性的破断なども発生した。

阪神・淡路大震災の鋼構造物への被害が明らかになると、すばやく対策が講じられた。この地震による鋼構造建築物の被害の特徴は、露出柱脚の破壊等の被害と、鋼構造建築物で一般的な構造形式である「柱に冷間成形角形鋼管、梁にH形鋼」というラーメン構造(剛接構造)の柱梁接合部における破断などの被害である。これらの部位の被害を軽減するための措置として、1995年10月に、現行耐震基準への補足として、アンカーボルトの伸び能力を考慮した露出柱脚の設計方法が提示された。また柱梁接合部に関しては、接合部を溶接接合する際に注意すべきポイント等が示された。

この後、冷間成形角形鋼管は、鋼材倶楽部(当時)規格によるBCR(ロールコラム)材が大臣認定を取得し、BCP(プレスコラム)材が日本建築センター評価を取得した。さらに、これらを使用する際に必要な設計・施工マニュアルが1996年に作成された。(なおBCR、BCPは2002年に改正建築基準法の大員認定を取得している)

建築基準法改正で性能設計を導入

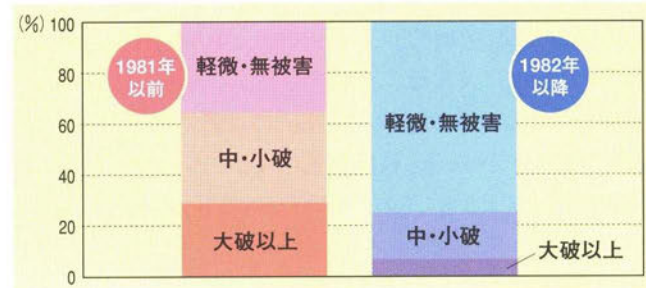
また、従来の設計想定では起こりえなかった高層住宅の鉄鋼柱や、中高層建築物の梁端部で脆性的破断が発生したことを受け、1996年から建設省(当時)の総合技術開発プロジェクト「次世代鋼材による構造物安全性向上技術の開発」が開始された。このプロジェクトは、主に、鋼構造建築物の梁端部に生じた脆性的破断の原因を究明するとともに、その対策技術に関する開発

研究を行ったものである。この成果は、その後、脆性的破断防止ガイドラインとしてまとめられている。

2000年に建築基準法が改正され、性能規定の考え方が取り入れられた。この改正では、建築主と設計者の間で、地震による建築物被害についての受け止め方が大きく異なっていたことが

■阪神・淡路大震災における建築物の建築年別の被害状況

1982年以降の建築物では、被害が軽微、または無被害なものが70%以上を占めている。



(阪神・淡路大震災建築震災調査委員会報告書(平成7年)より)



阪神・淡路大震災での建築物の被害例。柱の溶接接合部の破断(写真左)、柱脚と柱梁接合部の破壊(写真右)。

■既存建築物の耐震化の現状 (2003年)

耐震性が不十分と推計される割合は、住宅では4分の1、その他の建築物では3分の1以上にのぼる。



(国土交通省資料より作成)

認識され、建築物に対する要求性能に基づいて建築物性能を設定していくという、性能設計の考え方が導入された。また、限界耐力計算(建築物を一つの振り子と見て地盤や建築物の性状を踏まえて、建築物の変形や応力を把握して安全性を確認する計算方法)など構造計算の方法が拡大し、建築物の耐震安全性についての新たな枠組みがつけられた。このとき、柱脚部や柱梁接合部分の構造方法の詳細を定めた告示も改正されている。

阪神・淡路大震災から現在までを振り返ると、1990年代は、震災被害で顕著だった柱脚部、柱梁接合部などへの対策が講じられ、2000年の建築基準法改正以降は、一歩進んで性能規定の考え方を基にした具体的な取り組みの時期といえるだろう。

遅れている耐震診断・耐震改修

阪神・淡路大震災で、甚大な人的被害の直接の原因となったのは木造家屋の倒壊であった。神戸市の木造住宅では全壊約55,000棟、半壊約32,000棟であり、全壊の数は世帯数の10分の1程度に及んだ。これまで震度5、6程度の地震の木造全壊率はおおむね1%未満であり、この地震の破壊力がいかに激しかったかがわかる。負傷や死亡などの人的被害のうち、家屋倒壊が原因となったものの割合は80%を超えた。

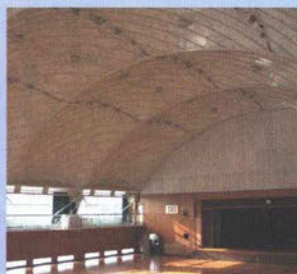
■新潟県中越地震による体育館の被害調査の例

地域内の体育館のうち、規模等が類似するAとBを比較すると、耐震改修済みのAは大きな被害を免れたことがわかった。

●体育館A (耐震改修済み)



ブレース設置状況



天井等の被害はとくになし

●体育館B



ブレース破断 (接合部)



天井木毛セメント板落下

集合住宅、事務所、店舗などの建築物の被害は、1981年の新耐震設計法以前の建築物に多く発生したことから、既存建築物について耐震診断や耐震改修を行うことが急務となった。これを踏まえ、1995年12月「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行された。このなかでは、耐震基準に適合しない建築に耐震診断、耐震改修の努力義務を課すこと、耐震改修を行う建築物について低利融資などの支援を行うことが定められた。

しかし実際には、耐震診断はそれほど進んでいない。国土交通省調査(2003年3月)によれば、住宅では総数約4,700万戸のうち約1,150万戸(約25%)、建築物では総数約340万棟のうち約120万棟(約35%)で、耐震性が不十分と見られている。

災害発生時に多くの人が利用する体育館などの公共建築物ではどうだろうか。国土交通省調査(2003年3月)では、現行の耐震基準に適合しないものは全国に93,300棟あり、このうち耐震改修や建て替えなどにより耐震性が確認されたものは24,700棟(約27%)に過ぎない。また耐震性が確認された割合は都道府県によって大きく差があり、低いところでは10%未満というところもある。十分というには程遠い現状である。

鉄骨ブレースによる耐震改修で被害を免れた体育館

2004年10月の新潟県中越地震後に、鉄骨造体育館の詳細被害調査が実施された(国土技術政策総合研究所、(独)建築研究所、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本鋼構造協会の共同調査)。この調査では、被災地にある体育館(小学校、中学校、高校、公立体育館)について、被害をほとんど受けていないものも含め63棟の被害状況の調査を行った。この調査対象の中に、震度7を記録した地域で1970年代に建設され、規模や構造形式がほとんど同じという体育館2棟が含まれていた。ただしこのうち1棟は1997年に耐震改修を実施していた。これは鉄骨ブレース*(φ101.6×4.2)8構面について耐震補強を行っていたものである。

*地震や風などの水平荷重中による軸組みの変形を防ぐために、軸組みの対角線方向に入れる部材をブレース(または筋かい)と呼ぶ。

地震後の被害には大きな差があった。耐震改修済みの体育館では、ブレース等の構造部材や天井等の非構造部材にほとんど被害は見られなかった。一方未改修の体育館では、建設時に設置されていたブレースが接合部で破断、ブレースの塑性化などが見られ、さらにかまぼこ状の曲面をした天井のセメント板が数多く脱落するなどの被害があった(写真参照)。

この調査全体では、旧基準の体育館ではブレース材等の破断被害が多く、現行基準ではわずかだったこと、屋根面水平ブレースの破断、床の沈下は建築年代に関係なく発生したこと、などが報告されている。残念ながら阪神・淡路大震災と同様に、旧基準の耐震性能では、新潟県中越地震でも被害を防ぐことはできなかったことが明らかになった。また、天井材やガラス窓などの非構造部材でも大きな被害があり、なかでもガラス窓では、たとえ構造部材の被害がわずかだった建築物でも多数破損が起こったことが報告され、今後解決すべき課題となっている。

耐震診断・改修の促進を図るための施策として、2004年に建築基準法の一部改正が行われ、2005年6月に施行された。これには、倒壊危険性のある建築物への勧告実施や、段階的な耐震改修を認めるなど、規定の合理化を図ることなどが含まれている。

■履歴型ダンパーの例



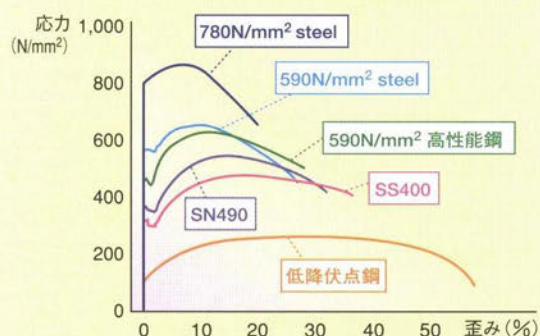
アンボンドブレース(写真提供:新日本製鐵(株))



せん断型の鋼材ダンパー
(写真提供:鹿島建設(株))

■低降伏点鋼と他鋼材との応力-ひすみ関係の比較

他鋼材に比べ、低降伏点鋼のグラフはラウンドハウス型と呼ばれる独特の形状となる。



(社)日本鉄鋼連盟資料より

需要拡大が期待される履歴型ダンパー

最近では、地震の被害を少なくする新技術の開発が進み、制震技術や免震技術を適用した建築物が増えている。

制震構造では、ダンパーと呼ばれる制震装置を建築物内部に配置して地震エネルギーを吸収させることによって、地震時の建築物の揺れを小さくする。鋼材ダンパーでは、鋼材が大きく変形する際にエネルギーを吸収するもので、軸方向に伸縮することによりエネルギーを吸収するブレース型や、せん断変形によってエネルギーを吸収するせん断型などがある。

今後、需要拡大が期待されているのは、低降伏点鋼を用いた履歴型ダンパーである。低降伏点鋼は添加元素を極力低減し、圧延後に軟化焼鈍などの熱処理により降伏点を下げている。従来の鋼材に比べて降伏点が低く(概ね100N/mm²程度)、伸び性能が大きい(概ね40~50%以上)という特徴を持つ。ダンパーでは低降伏点鋼部分が地震エネルギーを吸収する。主な種類には、低降伏点鋼を芯材に用いて鋼管やRCで座屈拘束したブレースタイプ、低降伏点鋼を普通鋼板と組み合わせた壁要素タイプ、せん断間柱に低降伏点鋼を使用した間柱タイプなどがある。履歴型ダンパーは、2005年6月のエネルギー法の告示の公布により、高さ60m以下の建築物において建築主事確認で使用できることになり、これまでより使いやすくなったことから、

■鋼材を使用した免震装置の例

キャピタルマークタワー(東京・芝浦)では、ウィンカー工法と呼ばれる新しい免震工法を採用した。これにより超高層(地上47階建)でもすぐれた免震性能を発揮することが期待される。



鉛プラグ入り積層ゴムアイソレーター。翼状の鋼板を介して下部基礎に連結され、鋼板の変形により、地震による引張変形を吸収する。
(写真提供:鹿島建設(株))



キャピタルマークタワーの完成予想図。
(写真提供:東急不動産(株))

地震の揺れを再現する世界最大の実大実験装置——E-ディフェンス

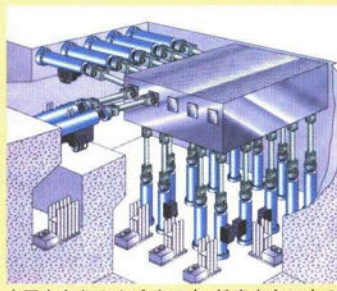
現実の地震の揺れをできるだけ忠実に再現し、建築の新技术の検証や確認を行なうために、実大実験装置への期待は大きい。2005年1月に完成したE-ディフェンス（兵庫・三木市）は、（独）防災科学技術研究所の実大三次元振動破壊実験施設である。阪神・淡路大震災の後、構造物の破壊を検討する施設の必要性を訴える声が高まったことから開発が始まった。

E-ディフェンスは、20×15mの振動台テーブル（総重量約800t）と、XおよびY方向の水平加震機各5台、Z方向の鉛直加震機14台（1台あたり最大加震力450t）で構成され、これらを作動させて三次元の振動を作り出すことができる。実験対象は、最大1,200tの実物大の建物であり、たとえば6階建てのビルを使った実験なども可能とされる。

今後は、2005年前半まで性能試験を

行い、以後「鉄筋コンクリート造建物実験」「地盤・基礎実験」「木造建物実験」などの実験研究を行う予定とされているが、鋼構造においても最新技術検証の場として、E-ディフェンスが活用されることが期待される。

■E-ディフェンスの作動の仕組み



水平方向（XおよびY）10台、鉛直方向14台の加震機を作動によって、地震の揺れを再現する。



E-ディフェンスの振動台（写真提供：（独）防災科学技術研究所）

今後は中低層ビルなどで多く採用されることが期待される。

免震構造とは、建築物の特定の部分を他に比べて極端にやわらかくし、建築物上階に入る地震エネルギーを低減し、地震エネルギーの大部分を吸収してしまう構造である。米国ノースリッジ地震（1994年）や阪神・淡路大震災において、免震構造による揺れの低減効果が認められ、これを契機に集合住宅や病院を中心に多くの免震建築物が建設されるようになった。免震構造では、積層ゴムと鋼板を重ね合わせた免震装置の柱を基礎部分などに設置し建築物を支えるものや、井桁に組まれた鋼製レールの上を建築物が滑るようにしたものなどいろいろな方法がある。

最近の高層ビルやマンションでは、このような新しい制震技術や免震技術に加え、各社が独自開発した技術を適用した例も多い。制振技術や免震技術は、安全と安心を支える建築の最新技術として、消費者への訴求力も大きいようである。

新しい建築システムを高性能鋼材が支える

2004年、中央防災会議・首都直下地震対策専門委員会は、首都直下地震の被害想定を公表した。18通りの首都直下地震を想定した結果、最悪の被害が出るのは、東京湾北部を震源にマグニチュード7.3の地震が冬の午後6時、風速15m/秒の時に発生した場合である。被害の内訳は、揺れによる全壊建築物15万棟、建築物倒壊による死者3,100人、火災による焼失65万棟、火災による死者6,200人、となっている。また地震調査研

究推進本部がまとめた「今後30年以内に発生する確率が50%以上の海溝型地震と、発生確率が高い活断層」資料によれば、日本中どこで大きな地震が起こっても不思議ではないことがわかる。このようなデータを目にすれば、早急に対策を講じなければならないことは明らかだ。

鋼構造および鉄鋼材料に関連して、新たな取り組みも行われている。たとえば、政府の総合科学技術会議が決定した府省連携プロジェクト「ナノテクノロジー・材料分野の産業発掘の推進」において「革新的構造材料」が取り上げられている。これを受け、国土交通省では、軽量、耐震、耐食、低コストな橋梁体のために、超鉄鋼材料を従来材料と置き換え、新構造設計が提案できるか検討を進めている。すでに超高強度ボルト接合構造要素モデルに適用するため1800MPa超高強度ボルトの耐食性・耐破壊安全性の検証、評価が進められており、さらに溶接構造要素モデルにおける安全性の検証、評価も進行している。また、国土交通省国土技術政策総合研究所でも、2005年から4年計画で総合技術開発プロジェクト「革新的構造材料の活用等による都市機能向上再生技術の開発」をスタートさせている。

日本が、高性能、高品質な鉄鋼材料の技術で世界をリードする存在であることはいうまでもない。地震に強く、安全で安心な社会を支えるために、材料や技術をどのように活用していくかは、日本の鉄鋼業が果たすべき重要な課題だと言えるだろう。

- 取材協力 （独）建築研究所、（独）物質・材料研究機構
- 取材・文 杉山 香里