

## 1. 建築物の地震被害

1995年阪神淡路大震災の直後では、死者の90%が建物の崩壊によるものであるとされた。地震工学は、大きな災害をもたらせた地震後に、災害の状況および構造物の地震被害を詳細に調査し、その原因を分析することにより、将来起こるであろう地震により同じ原因による災害を繰り返さないための方法を研究し、その成果を耐震設計規定に反映させるとともに、その知見および技術を構造設計あるいは施工の実務に普及させることによって、将来の地震災害を軽減することに貢献してきた。地震による構造物の被害を調査することは、計算機を用いた解析的な研究あるいは実験室における実験的な研究と同様に、あるいはそれら以上に、将来の地震災害を軽減するのに重要な役割を果たしてきた。

地震被害調査によれば、建築物の安全性は、地震による振動によって構造物に生じる水平方向の慣性力に耐える水平強度を確保すればよいという単純なものではないことが明らかである。構造物が受ける地震動は、地震の発生機構、規模、位置、建設地の地盤条件などによって大きく影響を受ける。構造物の地震応答は、構造物の形状、動的特性（周期および減衰）、保有水平耐力、柱・梁・耐震壁などの構成部材の強度と変形能、基礎、地盤と構造物の連成作用、施工の良し悪し、構造材料の材齢とひび割れなどの劣化の状態、建物の維持管理状況、過去の被災状況などによって影響を受ける。また、これらの因子による建物の応答の良し悪しを評価するとき、人命を保護するための崩壊防止だけでよいのか、あるいは建築物を地震直後にも継続使用しなければならないかなど、建築物の有する社会的な重要性（災害復旧センターなど）あるいは機能（医療施設など）、建築主が建築物に期待する性能なども考慮する必要がある。

ここでは、まず、鉄筋コンクリート造建築物を取り上げて、その崩壊・倒壊について例を示し、その破壊を防止するのに留意すべき構造計画、配筋詳細、維持管理などについて述べる。技術が未熟であったところに建設された鉄筋コンクリート造建築物では、構造設計で構造物に要求される強度を確保することしか考えなかったため、地震時に生じる慣性力が建物の強度を超えると、比較的小さい変形で、建物の重量を支持する鉛直部材に脆性破壊（例えばせん断破壊など）が起こり、上階の重量を支持する能力を失うと構造が崩壊することが多かった。これらの変形の小さい構造物の破壊を防止するためには、構造物に大きな変形が生じないように、耐震壁あるいはブレースを設置するなどにより剛性を高める補強をするか、部材の強度に達した後にも塑性変形できる粘り強さを付与する補強を行うことが重要である。さらに、構造物の中で、損傷に伴う塑性変形が数少ない部材に集中することを避けることが望ましいし、鉛直荷重を支持する部材の脆性破壊を防止することが肝要である。

### (1) 水平強度と変形性能

最近、話題になっている建築物の性能基盤型設計では、

(a) 極めて稀に発生する事象（地震あるいは暴風など）に対して、人命を保護する安全性を確保するとともに、

(b) 比較的発生確率が高い事象に対して、財産を保全するために構造物に生じる損傷を防止するとともに、建築の機能を維持すること。  
を目標としている。

強震動を受ける構造物では、構成部材が耐力に達して塑性変形が生じ、構造物全体が不安定な崩壊機構（メカニズム）を形成し、大きな水平変形のあとに鉛直荷重による2次的なモーメントによる不安定現象（P-デルタ効果）で倒壊することは極めて稀である。その前に鉛直荷重を支持する部材（主として柱部材あるいは壁部材）が破壊して、建物の重量を支持できなくなってしまったり崩壊することがほとんどである。

構造物が地震動に耐える性能は、構造物を構成する部材の剛性と強度によって決まる構造物全体としての水平耐力および崩壊に至る塑性変形性能（損傷が生じてからの破壊するまでの粘り強さ）に依存する。構造設計あるいは耐震診断では、小さな水平変形で脆性崩壊してしまう変形性能が小さい構造物（強度抵抗型構造）では高い強度を確保しなければならないし、大きな塑性変

形まで崩壊しない靱性が大きい構造物（靱性抵抗型構造）では水平耐力が低くても大変形まで崩壊しない、という簡単な経験則に基づいて、崩壊に対する安全性を判断している（図 1.1）。すなわち、強度抵抗型構造では、地震力が水平耐力を超えなければ崩壊しないし、靱性抵抗型構造では、地震時の水平変形が崩壊時変形を超えなければ崩壊しない。人命の安全を設計目標とするならば、強度型の設計をしても、靱性型の設計をしてもよい。一般的に言えば、水平耐力（剛性と強度）が高い建築物の方が水平耐力の小さい建築物に比べて、地震動による変形が小さくなるので、構造物が崩壊するときの変形性能に関わらず、構造物の損傷が小さいといえる。そのため、比較的良好に発生する事象に対して高度な性能を要求する建物では、最低の水平剛性と耐力を確保しておくことが重要である。

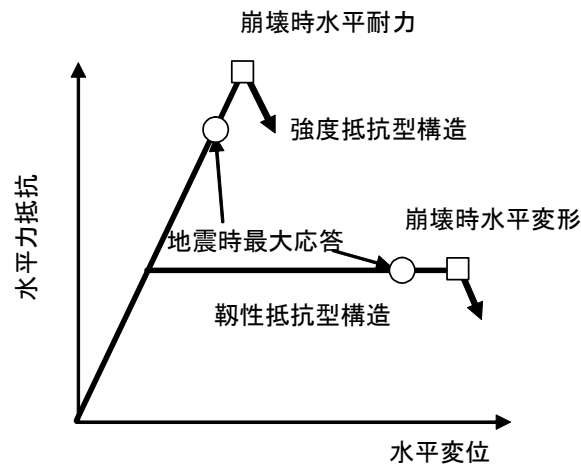


図 1.1：強度抵抗型構造物と靱性抵抗型構造物

写真 1.1 は 1995 年兵庫県南部地震で 1 つの層で崩壊した共同住宅建物である。この建物は、1981 年改正された建築基準法施行令（新耐震設計法）以前の古い設計基準で設計されており、設計で要求される構造物及び部材の強度を確保する設計しか行われていなかった。そのため、地震時に柱に作用するせん断力がせん断強度に達すると、小さな変形で脆性的にせん断破壊して、水平力および鉛直荷重に抵抗する構造性能を失ってしまった。たまたま 1 本の柱がせん断破壊して、水平力を負担することができなくなると、その柱に作用していた水平力は他の柱が負担しなければならなくなるため、次の柱も同じようなせん断強度しか有しないならば、その柱もせん断破壊してしまう。このように、次々に同じ階の柱がせん断破壊して、1 つの層全体が崩壊したと考えられる。



写真 1.1：1995 年兵庫県南部自身で層崩壊した共同住宅。

柱に作用する水平力が強度に達した後も、その水平力に抵抗する耐力を維持しながら変形する

粘り強さがあれば、このような崩壊は起こらなかった。地震により建物に作用する水平力は、常に一方向から静的に作用するのではなく、建物の振動によって慣性力を生じさせる。すなわち、慣性力の向きは時間と共に変わるわけで、そのときまでに水平耐力を維持して崩壊しなければよい。その点で、人命の安全を確保する崩壊防止のためには、損傷しても、水平耐力を維持できる粘り強さが重要である。

また、部材の局所的な損傷に対して骨組の鉛直荷重支持能力が失われるか否かを検討しなければならない。崩壊した柱が支持していた鉛直荷重は、破壊する要素の上下に隣接する構造壁、隣接する柱へつなぐ梁、スラブなどのによって周辺の柱あるいは壁に伝達されることを確認しなければならない。

## (2) 鉛直方向の不整形性

建築物によく見られる問題として、構造物の高さ方向で、他の階に比べてある階の剛性および強度が極端に小さくなっている場合がある。構造物が地震動を受けると、そのような極端に変形しやすいあるいは強度が低い階に大きな変形が集中する傾向がある。特に、そのような階の柱が小さい変形で脆性破壊すると、その階で崩壊してしまう。

都市に見られる中高層共同住宅では、1階が商業施設や駐車場として利用されることが多く、1階に壁がないために、1階の水平強度が小さく、大きな変形が起こりやすい構造となっている。上階の住戸部分では住戸を分ける構造要素としての戸境壁が設けられており、上階では水平強度と剛性が高くなっているが、1階では用途の都合上、これらの壁が連続して設けられておらず、1階のみが水平強度が極端に弱く、変形に対する剛性も低い構造となっている。商業建築でも、1階に大きな空間を必要としており、同様な状況が生じていることが多い。強い地震動を受けると、1階の柱には建物全体に作用する大きな水平力（層せん断力）が作用し、大きな水平変形が生じる。これらの柱に鉄筋が正しくせん断補強筋が配筋されていない場合あるいは柱の軸力が大きい場合には、柱は大きな変形に追従できずに脆性破壊してしまう。さらに、建物の外柱は作用する水平力による転倒モーメントによって大きな変動軸力を受ける。この付加的な軸力により柱の変形能力が低減してしまう。

写真 1.2 は、1971 年にカリフォルニアのロスアンゼルス郊外で生じた San Fernando 地震で被害を受けた Olive View 病院である。上階で連続する壁が1階に設けられていなかったために、大きな水平変形が1階に集中した。このほかにも、1995 年の兵庫県南部地震の被害例を写真 1.3 に示す。上階には戸境の耐震壁があり、水平耐力が大きいのが、駐車場として使用する1階には耐震壁がなく、水平耐力が極端に小さくなっているため、1階が崩壊した例である。



写真 1.2: 1971 年 San Fernando(カリフォルニア)地震で被災した Olive View 病院



写真 1.3 : 1995 年兵庫県南部地震で1階が崩壊した六甲ビル

建物の上階で建物の幅あるいは奥行きが減少するセットバックによっても、鉛直方向の不整形が生じる。このように上部で細くなると地震動によって高次モード振動が励起され、セットバック階のすぐ直上で大きな変形が生じる。また、セットバックより上階に作用する水平力が床面を通して下階の骨組に伝達しなければならないから、床に大きなせん断力が作用する。

### (3) 水平方向の不整形

慣性力が作用する平面の重心と剛心（水平剛性の中心）がずれを表わす偏心がある場合には、地震時に剛心を通る鉛直な軸に関するねじれ振動を生じさせ、剛心から離れた側の部材に大きな変形およびそれに伴う損傷を生じさせる。このような建物は角にある建物でよく見られ、後方に配置される壁が大きな水平抵抗と剛性を生じさせるのに対して、道路側は入り口などで開放的になっており、部材の強度と剛性は小さい。

事務所ビルにおいても、構造的な壁で囲まれたエレベーターホールが建物の一方の隅に配置され、他の部分は大きなオープンスペースとなっている（写真 1.4）。建物の左側には階段室があり耐震壁があるが、建物の右側の 1 階では柱のみしかなく、建物左側に比べて剛性が極端に小さくなっている。そこで、地震時に建物の左側を回転中心とするねじれ振動を起こし、建物右側にある柱に大きな水平変形が生じたと考えられる。このような建物を補強するときには、重心と剛心の位置を考慮して、偶発的なねじれ振動に対しても十分な耐力を確保すると共に、変形が大きくなる部材の靱性を確保することが重要である。



写真 1.4: 外壁が 1 階で途切れている右端で大きな被害が生じた。左側では壁が 1 階まで連続しており、剛性が高い。（1978 年宮城県沖地震）

### (4) ダイアフラム効果の不足

構造物に作用する水平力は、すべての部材に均等に作用するのではなく、例えば弾性時には、部材剛性に比例して鉛直部材に作用する。耐震壁の水平剛性は柱に比べてはるかに大きいので、大きな地震力が作用する。耐震壁を主水平力抵抗部材とする構造物では、床に作用する慣性力は床スラブによって耐震壁まで伝達しなければならない。このように水平力を伝達する床スラブをダイアフラムと呼ぶ。ダイアフラムに損傷が生じて塑性域に入ってしまうと、床に作用する慣性力が主耐震抵抗要素まで伝達されないことになり、主耐震要素の役割が果たせないことになる。構造設計あるいは耐震補強では、床に作用する慣性力がダイアフラムにより主耐震要素に伝達できることを確認する必要がある。

上部構造で平面が小さくなるセットバックした建物では、水平力に抵抗する鉛直部材が上部で減るために、上部の構造物に作用する水平力をダイアフラムを通して下層の骨組に伝達しなければならないことは既に(3)で述べた通りである。

### (5) 2 次的な骨組

構造設計によっては、主水平力抵抗要素を指定し、他の 2 次的水平力抵抗要素と区別すること

がある。極端な場合、ほんのわずかな部材（例えば、外周に設けた大きな柱など）を耐震部材として設計し、ほとんどの部材が鉛直荷重支持部材（2次部材）として設計されることがある。しかし、鉛直指示部材として設計されても、構造物の水平変位を受けるので、これらの2次部材は地震時に構造物に生じる水平変形に追従できるように配筋しなければならない。

#### (6) 非構造要素と構造部材の相互作用

構造設計では、構造的な役割を期待していない間仕切りなどの非構造部材が全く存在しないとして、構造解析を行い、構造部材の設計をする。しかし、実際には非構造部材と言っても力学的には無視できないものであり、非構造部材が存在する場合と存在しない場合では、隣接する構造部材に作用する応力が異なる。非構造部材が存在することにより、構造物全体あるいは部材に対して、設計では想定しない問題を生じさせることがある。

コンクリートあるいは組積造の間仕切壁あるいは階段は、非構造部材として、水平剛性を無視することが多い。これらの部材は、非構造部材とは言うものの、構造内に存在すれば、骨組に大きな剛性を与える。この付加剛性を無視すると、構造物に対して予期せぬ悪い影響を与える可能性がある。例えば、防火壁が外周に沿って建設され、道路側は開放的な骨組では、平面に偏って設けられる防火壁が構造物全体の剛性と質量の偏心を生じさせる。あるいは、間仕切壁は、水平力が小さく、損傷がないときには剛性が高いが、水平変形が大きくなるに従い脆性破壊すると、鉛直荷重の支持能力が失われて、層崩壊を起こす。そのほかにも見られる例として、建物の上層に間仕切壁が使用され、1階が弱く変形しやすくなると、過大な層間変形が生じて破壊に至ることある。

#### (7) 既往の改修と損傷

既存の建築物を調査する場合には、過去における構造物の改修を考慮して構造物の耐震性を評価しなければならない。建築物の所有者あるいは使用者が機能上の理由により改修していることもあるし、その結果耐震性が低下することがある。構造要素あるいは非構造要素を加えたり、除去したりすることは改修でよく見られる。建物の用途変更あるいは構造的な変更が加えられれば、固定荷重と積載荷重が大きく変化するし、水平剛性あるいは強度などの構造物の耐震性能に影響する。

経年および過酷な環境条件により、建築物の耐震性能が劣化する効果が生じることがある。この範疇に入るものとして、既往の地震被害があり、構造的な損傷を修理せずに放置されている例もある。例えば、既存のひび割れ、過大な変形、基礎の変形による不同沈下、コンクリートの劣化あるいは鉄筋の腐食などがある。



写真 1.5 : 1948 年福井地震における大和デパートの崩壊。地震前に火災と地盤の不同沈下と鉄筋の配筋不良が破壊に寄与している。



写真 1.6 : 1985 年メキシコ地震における隣接建物の衝突

過去の改修、損傷あるいは劣化がある場合には、耐震補強をする前に、建物の現場調査により

状況を把握しなければならない。材料の強度を調べるには破壊検査あるいは非破壊検査を用いるのがよい。現場調査は施工の質に関する情報を提供するし、特に、多くの古い建物では問題になるコンクリートの品質も明らかになる。既存建築物の耐震性能を判断する場合には、構造図面だけによる調査では不十分である。

写真 1.5 は、1948 年福井地震における百貨店の崩壊である。この崩壊は地震前の火災と不同沈下が 1 つの原因となっている。

#### (8) 隣接建物との衝突

隣接する建物との間隔が狭いと、地震時の水平変形によって隣接する建物が衝突を生じる。特に、床スラブの高さが同じレベルにないときには衝突の問題が大きく、低い方の建物のスラブの上面が隣接する建物の柱をひどく損傷させることがある。写真 1.6 は 1985 年メキシコ地震の例である。

日本では、建築基準法で最小の隣棟間隔が規定されているが、建物所有者が合意すれば、規定の隣棟間隔を守らなくてもよい。

また、衝突の問題として、構造的に切り離してエキスパンション・ジョイントを設けている場合に、この間隔が不足して、エキスパンション・ジョイントに損傷が生じることがよく見られる。

#### (9) パンケーキ破壊

部屋の空間を大きく取るために、梁を用いずに、柱が床スラブを直接支持するフラットスラブあるいはワッフルスラブ構造が持ちいられることがある。このような構造では、梁がないために、水平剛性が低く、大きな水平変形が生じやすいのと、柱の周辺で床スラブが破壊してスラブに作用する鉛直荷重を支持できなくなり、スラブが落下してパンケーキ状に崩壊することがある(写真 1.6)。



写真 1.6 : 1985 年メキシコ地震における学校建物の崩壊。多くの建物がこのようなパンケーキ状に崩壊した。

このような構造が崩壊するときには、梁がないために、上下のスラブが直接接触するような崩壊形式となり、上下のスラブの間には人間が生き残る空間が残らない。人命保護の立場から、この種の崩壊を起こさせてはならない。せいの高い梁あるいは腰壁を用いれば、建物が崩壊した後にも上下階の床の間に人間が生き残る空間が残される。

#### (10) 構造物の剛性不足による非構造要素の損傷

比較的よく起こる中小地震において、建築物の機能を維持することは重要な性能目標である。建築物の機能を維持するためには、構造物に加えて非構造部材に十分な性能を確保しなければならない。これまでの経験によれば、建物の居住者は、間仕切り、窓、ドア、機械設備などの非構造部材の損傷で恐怖を感じるものである(写真 1.7 の左)。このような場合には、非構造要素の損

傷が修復されるか置き換えるまで、建物を使用することができない。建物の補修費用は、構造部材の補修費よりも非構造要素の補修費によって決まることが多い。建物の所有者の経済的な負担を減らすためには、非構造要素を損傷させないように保護しなければならない。

非構造要素の損傷を起こさずにはならないもう一つの理由は、損傷した要素が落下して建物の中で、あるいは建物から避難しようとする人々の上に落下すれば、極めて危険である（写真 1.7 右側）。さらに、損傷した非構造部材が避難路を閉ざしてしまうことがある。また、構造物の大きな変形により、ドアのような非構造要素が、地震後に開かなくなってしまわないように、構造物の水平剛性を高くするか、非構造物が変形に追随できるように、周辺に軟らかい緩衝材料を使用するのがよい。

構造部材と非構造部材の損傷レベルは、建物の層間変形と高い相関があることが知られている。数多くの地震被害調査報告では、耐震壁が構造部材および非構造部材の損傷を抑えるのに有効である。耐震壁を用いることにより層間変形を制御し、あるいは大きな層間変形まで追随できるように非構造要素の取り付けを改良することにより、非構造要素の挙動を向上させることができる。

もしも変形しやすい細い部材でできた骨組に、剛性が高いが脆性破壊する煉瓦壁が組み込まれた場合には、中小地震でもまず煉瓦壁が破壊してしまう。柱と壁の間に少しの隙間をあけておき、面外方向に転倒しないように支持しておけば、このような煉瓦壁の損傷を低減することができる。

また、重い家具や設備が床で転倒しないようにするため、あるいは重い設備が棚から落下しないようにするためには、建物の応答（加速度あるいは速度）を小さく抑えなければならない。



写真 1.7 : (左)入り口扉の被害とコンクリートの間仕切壁の破壊（1995 年兵庫県南部地震）。  
(右)プレキャストコンクリートカーテンウォールの落下（1995 年兵庫県南部地震）。

#### (11) 基礎および地盤の問題

基礎の破壊は、(a)地盤の液状化（写真 1.8）による支持力あるいは引張力の喪失、(b)地盤の液状化と側方流動、(c)断層のずれ、(d)地盤の圧密、(e)切り土と埋め土の境界における不同沈下、などによって生じる。



写真 1.8 : (左)1964 年新潟地震において砂質地盤の液状化による共同住宅の転倒。

(右)1985年メキシコ地震における建物の沈下

地盤の液状化は杭基礎に大きな変形を生じさせる。杭基礎の被害は1978年宮城県沖地震および1995年兵庫県南部地震で見られた。基礎で損傷が生じると、その補修費は極めて高価である。しかし、基礎の破壊は人命を損なうことは少ないが、例外的に、地盤の液状化により構造物が転倒して、隣接する建物を破壊する場合がある。



## 2. 部材の破壊

部材の破壊モードは、作用する応力の種類およびそれらの応力の組み合わせによって異なったものとなる。鉄筋コンクリート部材では、コンクリートの引張強度はきわめて低く、地震力のように極めて稀に作用する力に対してひび割れが生じることを起こさせないようにすることは難しい。鉄筋コンクリートの曲げモーメントに対する設計では、コンクリートが負担していた引張力を鉄筋が代わりに抵抗して、鉄筋が引張降伏した後も、鉄筋の靱性により曲げ耐力を維持できるようにする。設計で想定する変形を超える大変形になると、圧縮力を受けるコンクリートが強度に達して、鉄筋コンクリート部材が破壊する。

柱、梁、耐震壁などの構造部材がいろいろなモードで破壊するが、その破壊モードが建物全体の挙動に及ぼす影響を考慮することが重要である。通常は、梁はその階の床の荷重を支持して、柱に伝達する役割を負うが、柱あるいは耐震壁は、その階よりも上の建物のすべての重さを支持する役割があり、柱あるいは耐震壁が破壊すると、その階より上の建物重量を支持できなくなり、建物が部分的に崩壊する。ここでは、建物の倒壊に影響する柱部材に重点をおき、部材の破壊を破壊モードに分けて説明する。

柱部材には、建物重量という軸方向力が作用して、その軸方向力は主としてコンクリートの圧縮によって抵抗されるので、軸力が大きく作用する柱では比較的小さい変形で、コンクリートの圧縮破壊により破壊する。また、軸方向力に曲げモーメントが同時に作用する場合には、曲げモーメントによって圧縮を受ける断面部分の圧縮応力度が大きくなる。コンクリートが圧縮破壊すると、内部にひび割れが沢山生じて、体積が膨張するので、コンクリートの体積膨張を拘束する横補強筋（帯筋）を配筋することにより、コンクリートがばらばらなる圧縮破壊を遅らせることができる。そこで、コンクリートが圧縮破壊すると予想される、曲げモーメントの大きな領域に帯筋を密に配筋してコンクリートを拘束することが変形能を大きくするのに有効である。

建物に作用する水平力に抵抗するのは、柱および耐震壁であり、地震力はこれらの部材のせん断力として作用する。せん断力は、部材斜め方向のコンクリートの圧縮力と水平方向の帯筋の引っ張り力で抵抗するが、帯筋の量が少ないと、鉄筋が破断して、圧縮を受けるコンクリートを拘束するができず、小さい変形で柱部材が脆性的にせん断破壊してしまう。通常は、柱のせん断破壊は、同時に、柱の鉛直荷重支持能力も喪失してしまうため、設計では柱のせん断破壊が生じないように、必要な帯筋量を配筋する。

### (1) 柱の曲げ破壊

曲げを受ける柱の変形能は、柱に作用する軸力の大きさおよび塑性ヒンジ領域における横補強筋量に影響される。一般に、大きな軸力が作用すると、曲げモーメントとの相乗効果により圧縮を受けるコンクリートが破壊してばらばらになり、破壊に至る。ここで、コンクリートが破壊した後にばらばらにならないように水平の拘束筋を配筋すると、コンクリートの圧縮による破壊を遅らせることができる。

外柱、特に隅柱は建物に作用する転倒モーメントに伴う大きな変動軸力を受ける。これらの柱の軸力レベルは極めて大きな圧縮力が生じて、曲げ圧縮破壊が生じた後、軸力保持能力を失うことがある。通常は、柱の上端あるいは下端に生じ、コンクリートの圧壊を伴うせん断圧縮破壊と曲げ圧縮破壊を区別することは難しい（写真 2.1）。この柱には細かい間隔で帯筋が配筋されていたが、帯筋は外周だけにしか配筋されておらず、内部のコンクリートが圧壊して外に広がろうとするとき、帯筋は外側に膨らんでコンクリートを拘束する効果が十分ではなかった。

建物は大変形後の P-Δ 効果によって倒壊することは稀である。この種の崩壊は柱部材が細く、脆性的なせん断破壊ではなく、変形能が大きい曲げ降伏する場合に起こる。

写真 2.2 では、柱の頂部で柱主筋が柱梁接合部から抜け出して破壊しているが、大きな水平変形が生じている極めて稀な例である。



写真 2.1 : 1995 年兵庫県南部地震で曲げ圧縮破壊した柱。外周に 100 mm 間隔の帯筋で拘束。



写真 2.2 : 1997 年 Qayen(イラン)地震で大きな水平変形で倒壊した骨組。柱梁接合部から柱主筋が抜け出して破壊した。.

## (2) 柱のせん断破壊

部材の破壊で最も脆性的なものが柱のせん断破壊である。せん断ひび割れが生じる前にコンクリートが負担していた引張力はせん断ひび割れが開いてしまうと、せん断補強筋では抵抗できなく、斜張力破壊に至る。せん断破壊は、横補強筋が不足（せん断補強筋の太さ、間隔、強度）していることにより生じる。写真 2.3 は、せん断補強筋が細く、補強筋間隔が荒いことによってせん断破壊が生じた。



写真 2.3 : 1990 年 Luzon (フィリッピン) 地震でせん断補強筋が細く、間隔が粗いためにせん断破壊した柱。

せん断補強筋間隔は十分に狭く、部材軸にほぼ 45 度方向に生じるせん断ひび割れを少なくとも 1 本あるいは 2 本のせん断補強筋が横切るようにしなければならない (写真 2.4)。大きなせん断力が作用する部材では、コンクリートが負担していた引張力をせん断補強筋に負担させるためおよび大きな圧縮力を受けるコンクリートを拘束して変形能を増すために、せん断補強筋間隔を密にしなければならない。

長方形の横補強筋の端部は 135 度に折り曲げて、コンクリートのコアの内部に定着あるいは閉鎖形に溶接しなければならない。古い施工では横補強筋の端部が適正に 135 度に折り曲げておらず、せん断補強筋に作用する引張力により横補強筋が定着部分から抜け出し、柱のせん断破壊を

生じさせている（写真 2.5）。



写真 2.4 : 柱のせん断破壊。1995 年 Mexico 地震の Lazaro Cardenas の学校建物。太径の横補強筋の間隔は柱幅程度に粗い。柱の主筋に沿ったコンクリートの剥落。



写真 2.5 : 1995 年兵庫県南部地震における柱のせん断破壊。(左)90 度折り曲げ部分が開いた例。(右)柱の角で横補強筋が破断した例。



写真 2.6 : 1978 年宮城県沖地震における鉄道学園。鉄筋コンクリート造非構造壁が細い柱の変形

を拘束し、短い長さに変形が集中してせん断破壊した。

鉄筋が折り曲げられるときには、折り曲げ部に塑性変形が生じており、その部分の変形能は劣化する。破壊前に粘り強さを示さない補強筋では、角のところで鉄筋が破断することがある（写真 2.5 右図）。

構造計算では、モデル化あるいは解析で、非構造要素を無視することが多いが、間仕切壁のよう、建築物の用途に伴って設置される。構造要素と接するように剛性も強度も高い非構造要素が設置されると、非構造要素と構造要素が影響しあって損傷が生じる。写真 2.6 はコンクリート製の非構造壁が柱の変形長さを短くして、短柱のせん断破壊の原因となっている。

### (3) 付着割裂破壊

異形鉄筋に作用する付着応力度により、周辺のコンクリートに円形の引張力を生じさせる。部材の曲げモーメント勾配が大きい場合には部材に曲げ付着応力度が生じる。梁あるいは柱の主筋が密に配筋されたあばら筋あるいは帯筋に支持されていない場合には、特にコンクリート強度が弱い、高強度の太径鉄筋主筋を用いるか、異形鉄筋のかぶりコンクリート厚さが薄い場合には、主筋に沿って割裂ひび割れが生じる（写真 2.7）。この割裂ひび割れにより付着応力度が失われ、柱の耐力を低下させ、層崩壊に関係する構造物の崩壊に至ることがある。



写真 2.7 : 1983 年日本海中部地震における浪岡病院では、柱の異形鉄筋の主筋に沿って付着割裂ひび割れが見られた。コンクリート強度が低く、粗骨材の品質不良。

### (4) 主筋継ぎ手の破壊

工場で生産され建設現場まで運搬される鉄筋の長さには制限があり、鉄筋の長さが十分でなければ、建設現場で鉄筋を接合しなければならない。主筋は、重ね継ぎ手、機械式継ぎ手、溶接継ぎ手、など、いろいろな方法で接合される。重ね継ぎ手は、鉄筋を並べて配置し、鉄筋に作用する応力をコンクリートとの付着を介して隣の鉄筋に伝えるものである。機械式継ぎ手は、鉄筋と鉄筋をつなぐ特別な継手材料を使用する。

継ぎ手は、手筋の引張応力度が小さい領域に設けるのが望ましい。しかし、古い建物では、地震時の挙動が十分に理解されなかったため、施工の都合により応力度が高い領域に継ぎ手を設けることがあった。

溶接継ぎ手と重ね継ぎ手の破壊の例を写真 2.8 に示す。右の溶接継ぎ手は、鉄筋端部をガスで熱して軟らかくしてから治具を用いて圧縮力を加えて圧接するもので、施工管理が悪いと写真のように圧接部で破断する。



写真 2.8 : (左)1995 年兵庫県南部地震におけるガス圧接溶接継ぎ手の破断。(右)1990 年 Luzon(フィリッピン)地震における重ね継ぎ手の破壊。

#### (5) 定着破壊

梁あるいは柱の主筋の応力は、柱梁接合部でコンクリートの伝えて、定着されなければならない。古い建物では、柱梁接合部に横補強筋が配筋されていないものがあり、柱と梁の主筋は鉄筋で補強されていないコンクリート部分に定着される。このため、定着部で主筋に沿って作用する大きな付着応力度により付着割裂破壊が生じて、外側のコンクリートが剥落してしまう。

梁の主筋が、例えば短部折り曲げなどにより、柱梁接合部に完全に定着されない場合には、主筋が接合部から抜け出してしまう（写真 2.9）。定着長さの不足は、梁の下端筋が柱梁接合部に短い長さしか定着されない場合などに見られる。

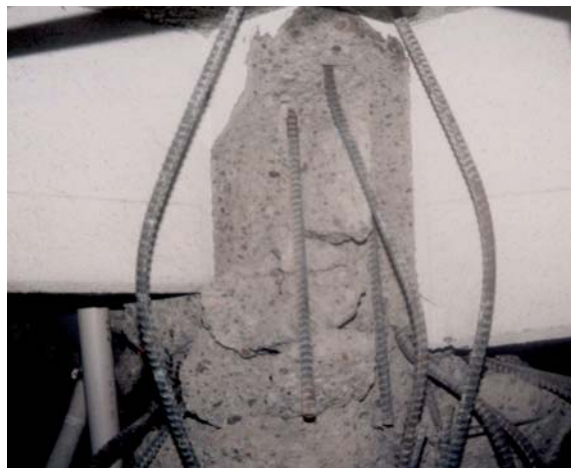


写真 2.9 : 柱梁接合部に横補強筋が配筋されていないため、柱主筋に沿う付着割裂ひび割れが生じたコンクリートが剥落。

#### (6) 柱梁接合部の破壊

骨組が梁降伏先行型に設計されると、梁降伏後、柱梁接合部に大きな応力度が発生し、柱梁接合部に斜めのひび割れが生じる（写真 2.10）。このようなせん断ひび割れにより骨組の剛性が低下する。また、梁端には、梁主筋が柱梁接合部からの抜け出しなどにより、大きな曲げひび割れが生じる。内柱梁接合部の破壊による構造物の崩壊は見られない。それに対して、外柱梁接合部では、損傷が著しくなり、コンクリートの圧壊により柱の鉛直力を支持することができなくなると、外柱梁接合部の破壊により建物が崩壊することがある。



写真 2.10 : 1995 年兵庫県南部地震で梁曲げ降伏先行型骨組の柱梁接合部にせん断ひび割れ。

#### (7) プレキャストおよびプレスとレスト部材の破壊

プレキャストコンクリートの建物の地震被害の経験は少ないが、プレキャスト部材の接合部が構造物の弱点になることが多い。これまで、高地震帯で、耐震性に十分な配慮をせずに、プレキャストコンクリート部材からできた建築物を建ててきた。1988 年アルメニアの Spitak 地震では、耐震安全性に関する検証が行われていない技術を用いたことにより、大きな被害と倒壊が生じた(写真 2.11)。



写真 2.11 : 1988 年 Spitak (アルメニア) 地震におけるプレキャストコンクリート建物の崩壊。(左) 建設中の建物の崩壊。(中)場所打ちコンクリート接合による壁式構造の崩壊。(右)プレキャストコンクリートと場所打ち煉瓦壁建物の崩壊

1994 年の Northridge 地震でも、プレキャストコンクリート造駐車場建物が倒壊した。水平力抵抗要素の不足により、場所打ちの表面コンクリートが大きな応力を受けた。その他の場合でも、柱の過大な水平変形により柱が破壊し、次々に柱が破壊して建物全体がほぼ倒壊した。もしも大きな水平力が作用したり、変形が大きくなれば、梁が支持台から落ちたりすることも起こりうる。予想される水平変形にともなう接合部の回転が生じた後に、梁に十分な支持幅があることを確認しなければならない。

テイルトアップ工法は、プレキャスト工法の特別な例であり、その性能は接合部の性能によって決まる。最も弱い部分は、通常、プレキャストの壁と屋根版の接合部であり、壁の面外方向の破壊と屋根の鉛直支持が失われることにより、屋根が落下する。

#### (8) 杭の破壊

建物に作用する慣性力は基礎構造によって抵抗されなければならない。杭の頂部に作用する軸力と大きな曲げの組み合わせにより、コンクリートの圧壊が生じる。そのような破壊が 1978 年宮城県沖地震と 1995 年兵庫県南部地震で見られた(写真 2.12)。このような基礎構造の損傷は、地震後に見つけるのが難しく、永久的な基礎の変形の結果として、建物の傾斜が明らかになることが多い。



写真 2.12 : 1995 年兵庫県南部地震における被害。(左)埋立地における杭の破壊。(右)液状化に伴う側方流動による杭の破壊。

### 3. 耐震補強の方針

この二・三十年の間に耐震構造技術は大きく発展した。地震の被害調査をすると、遅れた技術で建設された古い建物の性能が十分ではないことが明らかである。しかし、大地震のあとの被害調査による統計では、損傷が大きかった建物の割合は極めて小さい（1985年メキシコ地震、フィリピンの1990年ルソン島北部地震、トルコの1992年Erzincan地震、1995年兵庫県南部地震後の被害が大きかった地域においても、5～25%程度）。そのため、古い建物をすべて耐震補強するのではなく、効率のよい、簡単な方法を用いて損傷を受ける可能性のある建物を見つけ出し、耐震性に危惧がある建物について詳細な耐震診断を行うのがよい。そして、建物に期待される性能、重要性、安全性と経済性を考慮しながら耐震補強をする必要があるか否かを決めるのがよい。

どんな設計の行為でも、最初に一般的な考え方あるいは方針により性能目標を設定し、設計方針に適した構造計画を決め、最も適した構造部材の配置および断面と詳細を決める。耐震補強の方針は、強度を増やす、変形性能を向上させる、要求変形を低減するなど、地震時の挙動を改良するために最も適した基本方針を決める。

以下に、耐震補強の考え方を説明する。実際の耐震補強では、要求性能を満たすために、2つか3つの考え方を組み合わせて用いることが多い。

#### (1) 地震による要求応答の低減

古い規準などで設計された既存建築物は、多くの場合、部材が曲げ降伏をする前に、あるいは曲げ降伏した後でも小さな変形で脆性的な破壊に至り、建物に大きな損傷が生じる。このような小さい変形で脆性破壊する既存建物の補強の基本的な考え方は、補強することにより、地震時に既存建物の部材に生じる応答を小さく抑えることである。

#### (a) 水平剛性および耐力の付加

構造物の応答を低減する方法は、既存建物に耐震壁あるいはブレースなどを設置することにより水平剛性を付加して、地震時に脆性破壊する部材に生じる変形あるいは応力を制限するか、あるいは既存建物の水平耐力を大きくして、地震時の構造物の変形を小さくすることである。このように既存建物に耐震壁あるいはブレースを設置する補強をしても、既存の部材には何も補強しなければ同じ変形で破壊してしまうが、構造物全体の水平剛性あるいは耐力を大きくすることにより、補強した建物に生じる水平変形を小さくすることができる。そのような考え方を図3.1に示す。

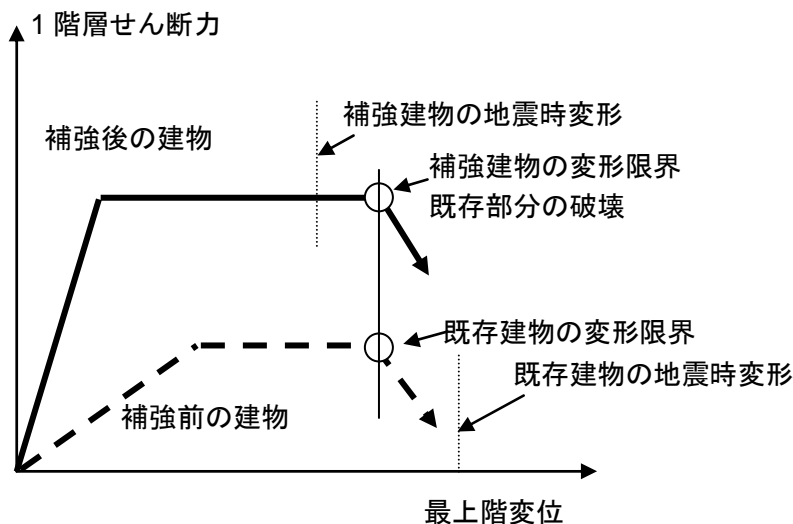


図 3.1：剛性を高め水平変形を減らす耐震補強の考え方

建築物の水平剛性は、耐震壁、鋼材のブレース、あるいは新しい骨組を増設することにより増



すことができる。この方法は、既存の柱が小変形でせん断破壊してしまう場合のように、小さい変形で脆性破壊する部材が多い構造物に有効な方法である。変形性能が小さい柱を鋼板巻きにより変形能を改善する方法もあるが、これらの工法は比較的値段が高く、工事中の騒音あるいはほこりのために施工中は建物を継続使用することができない。その点、建物の周辺に水平耐力を補剛する方法（例えば外付け耐震壁）を用いれば、建物の内部に手を加えなくてもすむ。この方法は、また、構造物の地震時の変形をおさえることができるから、隣接建物との衝突を回避するにもよいし、変形に影響を受けやすい構造部材あるいは非構造部材がある場合に、建物の機能維持にも役に立つ。

既存建築物に水平耐力の補剛設計する際に、平面的にも高さ方向にも構造のバランスが取れた設計とすることに注意しなければならない。実際、新しい補剛部材を増設する利点は、既存の平面的あるいは高さ方向の不整形性を是正できることである。建物によっては、建築計画あるいは機能的な理由から、増設する補剛部材の位置が制限されることが多い。施主と構造設計者が十分に話し合いをして、建築の使用上の要求と構造の要求を共に満足するようにしなければならない。もしも、経済的な理由あるいは建物の使用上の理由により、改修工事を複数の工期に分けて行う場合には、補剛部材の配置を注意して計画し、改修工事中のあらゆる時点で、建物の平面的な剛性の偏心あるいは高さ方向の剛性・水平耐力の不連続を最小にするように注意する。

一般に、新しい補剛部材を建築内に設置すると、建築物の重量をすこぶる増加させる。改修に伴う固定荷重の増加に対して、基礎に過大な応力度が発生しないことを確認する必要がある。基礎工事は経済的負担を大きくする。そこで重量の点からは、鉄筋コンクリート造の耐震壁を設置するよりは、鋼材のブレースを使用する方がよいことが多い。

補剛部材を増設して構造物の水平剛性を大きくする方法は、地震時に建物に作用する水平力を大きくすることがあるが、この補強方法は構造物の水平耐力も大きくするし、水平力の増分は補強部材で抵抗するので問題が少ない。

改修した建物に作用する水平力が新しく増設された補剛要素まで、そして基礎まで伝達する力の流れを確認しなければならない。既存の水平力伝達要素は、水平力抵抗要素を増設することにより補強が必要になることが多い。

既存の柱を新しく設置された壁の側柱とする場合には、既存の重ね継ぎ手の耐力などを確認しなければならない。また、新しく増設した部材によって導入されるせん断力、特に転倒モーメントに対する基礎の耐力も検討しなければならない。場合によると、杭の増設あるいはフーチングを補強しなければならない。別な方法として、大きな基礎梁を増設して、その重さにより大きな転倒モーメントに抵抗させる方法もある。

## (b) 免震構造

免震構造は、建物のある層に柔らかい支承あるいは摩擦の小さい滑り支承を挿入するもので、基礎に設けることが多いが、位置は必ずしも基礎に限定されない。免震層に水平抵抗の小さい支承を用いることにより、建物全体の水平剛性を低下させ、構造物の周期を地震動の卓越周期域よりも長くすることにより、構造物に入る水平力を小さく抑える。上部構造に入力する地震力が小さくなるので、脆性破壊する部材に生じる応力ならびに変形も小さくすることができ、破壊を防ぐことができる。床の水平加速度に弱い建物の家具・設備などの内容物を保護するのに有効である。

構造物の変形は固有周期が長くなるにしたがって大きくなるが、その変形は免震層に集中しており、変形によって壊れやすい部材あるいは設備の安全性には影響を与えない。免震構造は、歴史的な建造物によく用いられているが、その理由は免震装置を基礎部に設置することにより地震時の構造安全性を高め、建築物内の品物を保護するばかりではなく、免震工法による耐震改修が歴史的な建築物の基礎部分以外には手を加えないので、その歴史的価値を損なうことなく実施できることにもよる。

免震装置が有効に働くためには、最大応答加速度が周期とともに減少する領域まで、構造物の周期を長くしなければならない。建物の周期は、建物の重さ大きいほど、剛性が小さいほど、長くなる。そのため、低層の住宅のように軽量の建物では免震装置による耐震改修には向かないことが多い。一般に入手できる免震装置（特に積層ゴム支承あるいは滑り支承）は引張力に対し

て弱いという欠点がある。そのため免震装置は、地震動により転倒モーメントが大きくなる細高い建物にはあまり適さないと言われている。

既存建築物に免震装置を設置する工事中は、建物の重さを別に支持しなければならないから、免震装置を改修工事の計画を注意深くする必要がある。免震装置を基礎レベルに設置するときには、構造物と免震装置の接合部分に大きな工事を要することがある。また、配管系およびエレベーターが、免震層に生じる大変形に追従できるように工夫しなければならない。

地震時には免震層に大きな水平変形が生じるから、免震層の周囲の擁壁との間には十分な間隙を確保しておかなければならない。

#### (c) エネルギー消費装置

エネルギー消費装置を既存建築物に設置して、地震により入力する振動エネルギーを速く消費して、構造物の地震応答を低減することができる。粘弾性液体ダンパー、粘弾性固体ダンパー、履歴エネルギー消費ダンパー、摩擦ダンパーなど、いろいろな種類のエネルギー消費装置が耐震改修に用いられてきた。これらの装置は変形が生じないと有効にエネルギー消費を行わないので、微小応答の地震動には効きがよくない。

履歴エネルギー消費型の装置は、装置が降伏変形を超える変形を受けて初めてエネルギー消費が生じるということを考えておかなければならない。もしも、既存建築物の部材が小さい変形で脆性破壊する場合には、このようなエネルギー消費装置を使用することはできない。

#### (d) 質量低減

ある種の既存建築物では、構造物の重量を低減する耐震改修も有効である。質量を低減することにより、構造物の固有周期は短くなるが、慣性力が低減されるので、構造物に生じる変形が小さくなる。構造物の質量低減は、重量の大きい非構造部材（外装仕上げ、水槽、設備や倉庫などの重いもの、屋上などに用いられる園芸用の土など）を除去すればよい。極端な場合、構造物の1層あるいは2層分を取り除いてしまうことも考えられる。

#### (2) 構造部材の変形能の向上

既存建築物の挙動は比較的古い構造物の変形能の欠如によって決まることが多い。そこで、脆性破壊する部材の変形性能を向上させて、破壊を防止する方法が使用される。図 3.2 に変形能を向上させるやり方が示されている。そこに示した例では、構造物全体の剛性あるいは強度をあまり変化させていない。そのため、地震時に生じる変形は変わらないが、構造物の変形能を高めることにより、地震時の変形では破壊しないようにしている。変形能を向上させるとともに、地震時に生じる変形も低減する工夫も併用するとよい。

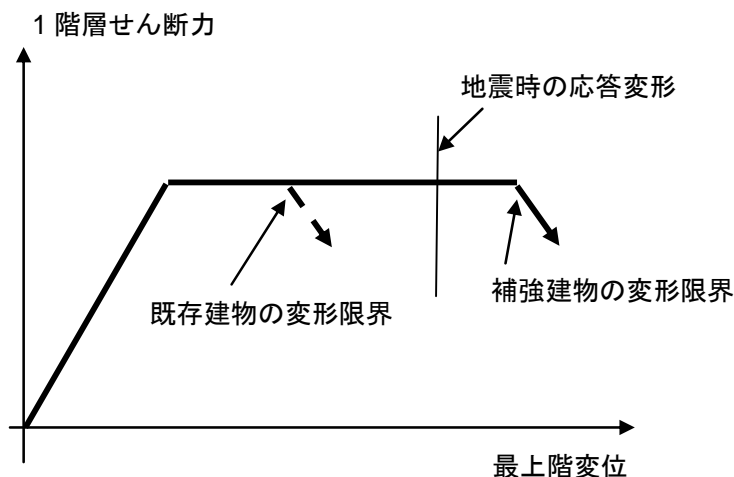


図 3.2 : 変形性能を向上させる補強の考え方

構造部材はいろいろなモードで破壊するが、そのうちで最も小さい強度の破壊モードで破壊す

る。通常、望ましくない破壊が生じないように、その破壊モードの耐力を大きくする補強をする。その逆に、ある望ましい破壊の耐力を低くして、その破壊モードに誘導することもできる。

構造部材の変形能は、せん断による脆性破壊の耐力を大きくして靱性のある曲げ破壊モードが先に起こるようするものが多い。その例として、柱の中間部のコンクリート断面を増す、鋼板を巻く、炭素繊維を巻くなどが挙げられる。

靱性のある破壊モードに誘導する方法として、例えば、両側に腰壁がつく短柱では、剛性が高い短柱に水平力が集中して、曲げ降伏が生じる前に短い部分でせん断破壊という脆性破壊が生じる可能性が高い。腰壁の鉄筋を切断するとか、腰壁と柱の間にスリットを設けるなどにより、破壊モードを変形の富む柱の曲げ降伏に変えることができる。

### (3) 水平力の伝達システム

既存建物には、鉛直方向の補剛材、床面における水平力伝達要素、十分な変形能を有する鉛直力支持部材など、水平力伝達に必要な要素が十分に備わっているものがあるが、しかし、その中には地震時の水平力が基礎まで伝達する経路がきちんとできていないものがある。これらの場合には、耐震改修において、欠けている経路を補うか、応力伝達が十分に行えるようにする。応力伝達経路あるいは応力伝達の強度と他の欠陥が組み合わされている場合もあるが、その場合にはもっと総合的な耐震改修計画が必要となる。

既存建築物に共通な問題点は、床レベルにおける水平力の伝達（ダイアフラム）である。床梁やスラブを補強、既存の床梁あるいは床スラブを鋼板巻きなどで補強するのがよい。

プレキャストコンクリート造建物では、往々にして、プレキャスト部材相互の接合部を改善する必要がある。

耐震壁が途中でなくなるように、建物高さ方向に構造的に整形ではない建物では、連続する耐震壁を支持する柱に転倒モーメントによる大きな軸力が生じるので、曲げ圧壊後の靱性を高めるために鋼板巻きのような補強をするとか、不連続を解消するために新しい耐震壁を増設するなどの大規模な改修を行う必要がある。

#### 4. 耐震補強の性能と目標

最近の計算機プログラムおよび計算機の発達により、地震の危険度および構造物の挙動に関する新しい情報あるいは地震時の挙動に関する新しい考え方ができるようになり、性能基盤型の耐震診断あるいは改修方法が奨励されるようになってきた。これらの手法は、設計における予想される挙動に基づき、また、改修することによって期待される効果と改修による短期にかかる経費と事業の中断を秤にかけて、設計の判断資料を提供することを目的としている。仕様規定は今後とも有用であるが、性能基盤型の方法は耐震改修に関する判断をよりよくできるし、さらに信頼でき経済的な改修の決定をすることができるようになるだろう。

性能基盤型耐震工学では、性能レベルというのは建物の構造的な状態、建築物として機能し、居住者と内容物を保護できる能力、機能の喪失、補修、取替えなどにかかる費用を意味する。性能目標というのは、ある特殊な事象が発生したとき、あるいはある期間を指定したときに、期待される性能レベルを意味する。例えば、建物の所有者は、極めて稀な地震が発生したときに、構造的に大きな被害を受けても、崩壊しないという性能目標を選ぶかもしれない。

強い地震動に対して、建物が被害を受けないように設計することは経済的に難しいと、長い間考えられてきた。そのため、技術者は強い地震動では損傷が生じることを許容する性能目標を採用してきた。1960年代から、よく起こる地震動では建物に損傷が起らず、中程度の地震動では構造的な損傷が無いが、非構造部材には損傷が起こっても仕方ない、過去に生じた最大あるいは建設地に予想される最大の地震動に対して、構造部材および非構造部材には損傷が生じて、建物が倒壊することないことを性能目標としてきた。

##### (1) 性能レベル

建物の性能は、想定する事象の際あるいはその後の建物居住者の安全性に関する影響、地震前の状態に建物を復旧する費用と可能性、補修する間に建物が使用することができない期間、社会に対する経済的、建築的、歴史的な影響などを、建物が受ける損傷の程度で表わすことができる。建物の性能は、構造物、非構造物、建物全体、内容物の性能の組み合わせで表わされる。通常は、建物の崩壊が及ぼす居住者の安全性に影響を考慮して、耐震改修では構造性能が種対照となる。別な方法によれば、構造物について生命の安全性能レベルを選択し、非構造部材については、重量物を落下・転倒に対して安全なように取り付けるように災害防止を考える。重要な施設あるいは事業の継続が財政的に最も重要な施設のような特別な場合には、構造物および非構造物を高い性能を達成するように耐震補強することも配慮する。

建物の耐震改修設計では、性能の目標は損傷の発生から倒壊までの広い範囲から選ぶことができる。性能基盤型設計では、この両極端の間にある機能維持、直後の建物利用、修復あるいは生命の安全性などの性能レベルが選択される。これらの性能は、建物の構造部材と非構造部材で派生したものを選んでよいし、構造部材と非構造部材の性能レベルを組み合わせることで建物の性能レベルを表わすこともできる。

図 4.1 は、強度が強いが脆性破壊する建物と強度は高くないが粘り強い建物を例として、建物の性能レベルの概略を示している。これらの点は例示であり、個々の建物の性能を示す実際の点は、建物の詳細などによって異なる。これらの性能を示す点において、構造部材および非構造部材の挙動を以下に述べる。

性能レベルを6つに分けて以下に定義する；

A. 損傷発生レベル：構造部材あるいは非構造部材に補修を必要とする損傷が始まる性能レベルである。この段階までは損傷は許容できるが、美的、機能的あるいは安全の理由から補修を必要としない。粘り強い構造物では、この種の損傷は構造物としての降伏の前後に生じ、ひび割れが残るので分かりやすい。より脆性破壊する構造物では、この種の損傷は大きな外力のレベルで発生し、地震により生じる加速度により非構造部材に発生することが多い。

B. 機能維持レベル：この性能レベルにおける建物は、構造部材あるいは非構造部材に殆ど損傷が生じないと思われる。建物は、補修あるいは復旧のために中断することは殆ど無く、そのまま使用しても問題がない。この性能レベルでは、建物の外においても電力、水道、交通手段に問題が無く、建物の機能を維持することができ、建物内部でも補助的な電力などが使用できる。こ

の性能レベルでは、また、設備の使用を中断するような補修をも必要としない。ただし、子の性能レベルを考える上で、時間外に補修作業をすることは考えてもよい。粘り強さのある建物では、構造物全体の降伏点を越えており、構造部材あるいは非構造部材の補修を必要とするかもしれない。強度型の建物では、この性能レベルは非構造部材あるいは内容物の性能で決まることになる。

C. 建物の継続使用レベル：この性能レベルの建物では、構造部材には殆ど損傷が無いが、軽微な損傷が生じ、非構造部材あるいは建物全体には軽い損傷が生じている。この建物は地震後にすぐに居住が可能であるが、清掃が済み、電力などが復旧するまでその機能は損なわれるかもしれない。構造部材の損傷は補修可能な範囲にあり、余震あるいは将来の地震の耐力は失われていないことが期待される。地震時に人命の安全に関わる危険性は殆ど無いとしてよい。別な言い方をすれば、建物は使用するのに安全であり、損傷の程度は余震あるいは将来の地震に対する耐力に問題がない。

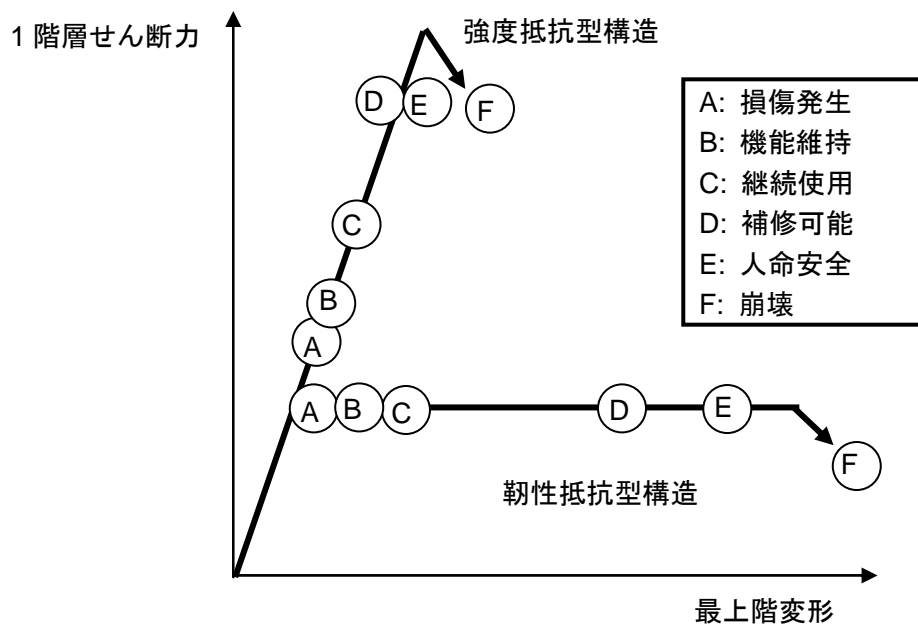


図 4.1：建物ごとの性能レベルの選択

D. 補修可能レベル：この性能レベルにある靱性型の建物は損傷を受け、将来の安全性、居住性、機能を保障するためには補修を必要とする。この補修は、経済的にも、実施工でも可能である。この性能レベルは人命の安全性について言及しないが、このレベルでは人命の安全性には十分な余裕があるものとする。強度型の建物は、大きな損傷あるいは補修不可能な損傷の直前には殆ど塑性域の変形が生じないので、この点は構造物の強度よりも低い位置にある。補修可能性能レベルは改修設計においては重要な限界状態である。比較的好く起こる地震動で補修あるいは構造部材の改修の費用は建物を建て替えるのに必要な費用になってしまうことがある。構造技術者は、建物の所有者に対して、補修作業中に事業を中断することによる費用あるいは建物を使用することができないことによって生じる損失についても説明することが望まれる。現在の施工技術をすれば、かなり大きな損傷でも技術的に修理することが可能であることは知っておく必要がある。技術的に復旧が可能なレベルは、損傷のレベルとは必ずしも対応しないことがあり、むしろ建物の所有者の要求の強さによることもある。

E. 生命の安全性維持レベル：この性能レベルにある建物は、建物の居住者に対して生命の危険に関わる怪我をおこす危険はきわめて低い。予想される建築物の応答および地震の不確実性に対して、建物の倒壊に対しては十分な余裕がある。非構造部材の落下による危険も配慮しなければならない。構造部材および非構造部材の損傷レベルはひどく、補修費は極めて高く、補修は実用的ではなく、建物は破棄することになる。

F. 倒壊防止レベル：建物を倒壊限界状態に対して設計することは少ないが、倒壊の手前の状

態で設計することはよく行なわれる。そのため、この性能レベルは倒壊防止レベルあるいは構造的安定限界レベルと呼ぶことが多い。この限界状態における建物は倒壊の寸前であり、人命の安全に対して必ずしも十分な余裕がない。落下物による危険性はあるだろう。補修による復旧は可能ともいえるし、難しいともいえる。この性能レベルは、部分崩壊の始まりと、全体崩壊の始まりに分けることができる。部分崩壊は、鉛直荷重支持部材のあるものが失われて、建物の一部のある階が部分的に崩壊することである。全体崩壊は、複数の部材が同時に破壊して、あるいは1つあるいは複数の部材の破壊に起因して次々に崩壊が進む破壊により、建物の殆どの部分が崩壊するものである。この崩壊は、1つの弱い階だけが崩壊する場合もあり、建物全体が崩壊する場合もある。崩壊限界状態に近い状態にある建物は、大きな構造的な損傷があり、剛性および水平力抵抗が劣化し、構造物に大きな残留変形が生じる。建物は、再使用には安全ではなく、余震により倒壊することもある。

## (2) 地震危険度レベル

地震危険度レベルは、建物の機能、その目標性能および建物に期待される使用期間などを考慮して定める。地震危険度レベルは、設定した期間に特定の振動レベルを超える確率により定義する。一般的に使用される規定期間として、建物の使用期間あるいは居住者や投資家の寿命、すなわち建物の危険度と生命の危険度に関係が深い50年という期間が用いられることが多い。

地震直後に建物も使用するような高い性能を提供することを狙った性能目標では、例えば、平均再現期間25年、すなわち、50年に対する超過確率が87%などのようなものに対して定義される。人命の安全性に関わる通常の建物の設計では、50年間に10%の超過確率あるいは約475年の再現期間を考慮する。

活断層に近い地震活動が高い場所では、50年に超過確率10%で表わされる地震動が、その建設地における最大の地震動を合理的に表わすといえる。地震活動が中くらいか低い場所では、50年に超過確率10%の地震動は、期待される最大地震動に対して比較的小さいことになろうから、倒壊に対する安全性は十分ではない。そのような地域における耐震改修設計では、もっと長い再現期間の振動を考慮しなければならない。

## (3) 耐震改修目標

耐震改修あるいは補強の目標性能は、与えられた強さの地震動にさらされたときに、改修された建物の性能を表わす。そのような目標レベルは、施工の費用、損害の評価、安全性の向上や財産の損失が少なくなることや地震後の継続使用できることなどの耐震改修によって改善される点を考慮して選定する。

国によって地震危険度が異なり、地震危険度に対する耐えられるレベル、経済的な状況、技術的な背景がことなるので、建物の改修目標は国あるいは社会によって異なる。ある地域においては、新築の建物に対する設計基準と同等な最低性能目標を規定するが、場所によっては耐震改修目標の方が低いレベルにしている。耐震改修の促進をはかる地域においては、耐震補強工事により将来の性能が低下しない限り、どのような性能レベルを使用してもよいとしている。このような手法も、耐震性能目標を向上させるといって有効である。

さらに、耐震改修の目標は、建物の重要度あるいは機能とも深く関わっており、重要度の高い建物あるいは居住者の多い建物では性能目標を高くしている。重要度の高い建物としては、病院、緊急情報センター、防災管理センター、警察、消防設備などがある。このような建物あるいは施設では、免震構造、エネルギー消費装置、高知能材料などの新しい高度な技術を活用して、耐震改修においてより高度な性能目標を達成することが望まれる。

## 5. 耐震改修における社会経済的な配慮

### (1) 技術者の責任と保障への配慮

国の設計者および施工者の責任と保障に関する法的な規定によっては、将来の地震による損失・人的な損害に対する元の建物と改修建物の設計者および施工者の責任・保障の分担が大きな問題となる。予算、建築的な形態、使用による改修工事の制限などがあるため、元の建築物の問題点を全て解決することはできないし、将来の地震における性能に関する問題を全て取り除くこともできない。同様に、既存の建築物の調査を完全に行い、報告書を完成する時間的な余裕と経費が不十分で、元の構造物の材料の欠陥あるいは配筋不足、配筋不良などの重要な欠陥を見つけることができないことも生じる。その結果、改修工事の設計者および施工者は、将来の損失に対して、仕事に対して受け取る経費以上の保証を求められていると感じるであろう。これは、比較的古い建物の場合に特にそうであるが、もとの建築物の設計者や施工業者が分からないとか、保障を分担する相談に乗れないこともある。このような事情により、技術者が改修工事に取り組むのを躊躇させる要因であり、もし引き受けるとすれば、自己の負担を軽減するために、既存建築物をより詳細に調査し、より安全側に設計するなど、改修工事の費用を不必要に増額することにつながる。改修工事における設計者と施工者の責任に関する公平で実効のある法規制をすることが、地方あるいは国のレベルのけるあらゆる耐震改修プログラムの目標を実現するための前提になる。

性能基盤型設計を用いることにより、さらなる責任の問題が生じる。性能基盤型地震工学という考え方および言葉は技術者および建物の投資者にとって新しい。すべての関係者は、性能目標は目標であり、それを保障するものではないことを理解すべきである。地震、現存する条件、耐震構造解析、設計方法に関する知識が十分ではなく、性能を保証することは不可能であり、無責任な状態にある。建物の所有者と技術者は、性能基盤型地震工学の本質を十分に理解するように話し合わなければならないし、将来の性能に関して何も保障するものではないことを理解しなければならない。

### (2) 耐震改修期間中の経営への打撃と継続使用

改修工事は、騒音、振動、埃、その他の汚れあるいは障害を生じさせる。耐震改修の間の不都合は仕事によって異なる。床の補強や柱の鋼板巻きのような内装工事が伴う耐震改修工事では障害が多く、居住者が建物の中に残ることはできない。耐震壁あるいは鉄骨ブレースを増設するなどの建物の外装工事では、居ながらに工事を行うことができることもある。特別な改修工法では、執務時間外に工事を行い、構造体に手を加えることを最小にする工夫がされている。

コンクリートの柱を改修するときには、コンクリートを効果よく拘束するために、コンクリートの表面からモルタル仕上げとその他の仕上げを除去しなければならない。多くの場合、その他の準備をするために工期が長くなり、工費が高くなる。そのため、既存の仕上げを除去せずに行なえる工法が望ましい。

改修工事の計画に当たって、建物の所有者および使用者と十分に打ち合わせ、全体計画に使用できない期間の経費も配慮するようにしなければならない。

### (3) 建設費用

耐震診断および改修は、構造部材の仕上げを取り除いて、構造材料を露出させることが多い。このような工事をすれば、初期に想定した以上の工費がかかることになる。さらに、取り除いた仕上げを新しくすれば、改修工事に伴い、電気工事あるいは防火の施設をよくするとか、身体障害者の出入り口を増やすなどの新しい工事をするようになる。建物を使用できない居住者は、建物の契約を解除してしまうかもしれないので、建物の所有者の負担が重くなる。移動させられる居住者は、臨時の設備を必要とするかもしれない、建物の所有者の負担が増える。改修工事は設備の更新を促すことが多いので、これによって家賃が高くなることもあるだろう。そのため、改修工事では、建物の所有者の収入が減ることについても配慮しなければならない。

### (4) 歴史的建造物に対する配慮

地域によっては、歴史的な建造物に対して、特別な規定を設けている。そのような場合、既存の法律は耐震改修において建物の歴史的な価値を配慮することを要求する。建物の設備の建築的な特性を維持するように規定している。これらの規定は、改修する方法に特定の制限を設けて、建築物を完全な形で保存するだけでなく、将来の地震に際しても歴史的な構造を保存するために性能目標にも制約を設けている。耐震改修は新しい部分を既存の建築部分の見えないところに隠し、歴史的な建築物そっくりにするために、既存の建築要素を建て替えるか置き換えてもよいし、元の建物に新しく足したことが明白になるような形で新しい要素を見えるようにしてもよい。特に、最後の方法は、歴史的な部分に手を加えないで、新しく追加したものを将来において修正したり、やり直したりすることができる点で、望ましいといえる。