

IV

地震防災は建物の耐震から

－耐震・免震・制震（振）の原理－

京都大学防災研究所
地震防災研究部門 教授

池田 芳樹氏



1 なぜ、建物の耐震化は重要か

なぜ、建物の耐震化は重要か。これは、よく考えれば当然のことです。防災や減災の3要素は、被害の抑止力を高める、被害に上手に対応する、適切な復旧、復興を行う、の3つです。そして、被害の抑止力を高めるその一つが、建物の耐震化なのです。

今、日本は、地震学的に見ると非常に活動度の高い時期になっており、都市化も進んでいるため、大地震、場合によっては中規模の地震でも、被害総額は膨大なものになると想定されます。だからこそ、地震対策、防災対策は非常に重要なのです。行政だけではなく、一般市民の役割、自助努力も大切なのです。

耐震化にもいろいろあり、耐震補強も含まれます。建て替えるという方法もありますが、家具の転倒防止をするだけでも、命を救うという点では、すごく役立つということも留意しておくべきです。これらの対策は、実のところ、地震直後の建物の被害や死者数を大変大きく左右するもので、結果的には復旧、復興の様々な問題に大きく影響します。ですから、個人が努力するということが、結果的に町全体、国全体を維持していくということに結びつくわけです。耐震技術への理解は、自分の命や家族、財産を守るための第一歩なのです。

大地震は過去に多く起こりましたが、二十数年前の兵庫県南部地震（図1）は、初めて経験した近代大都市の直下を震源とするものでした。気象庁の震度階の7が適用されたのも初めてのことでした。死者数、行方不明者数が約6,500

人、住居も半壊を含めるとかなりの数が壊れました。また、犠牲者の90%近くが地震直後の約15分間で亡くなっており、その多くは建物の倒壊、火災が原因です。2011年の東北の大地震では、同じ9割でも津波で亡くなっています。大地震と言っても、簡単に同じようには扱えないということです。

建物の耐震化は、非常に根本的な問題です。兵庫県南部地震では建物が倒れ、道を塞いでしまいました。これでは火災が起きて消火に行くのも、行方不明者を探すのも大変困難になりますし、必要な物資も運べません。ですから、建物の耐震化は、実は非常に身近な問題であると同時に、地震の災害を最小限に食い止めるという意味では、一番基本的な問題であるということです。

2 建物の揺れ方を知る基礎知識

耐震を知る基礎知識として、建物の強さと粘りについて紹介します（図2）。耐震は、基本的には、建物に強さと粘り強さを与えるということです。耐力が大きく、強度も高い建物というのは、強く大きな地震を受けると、変形できずに崩壊する可能性があります。また、変形能力が高く、粘り強くしてしなやかな建物は、変形が進み過ぎて、重量を支え切れない可能性が出てきます。建物の耐力と変形能力、強さと粘りのバランスが重要なのです。例えば、変形能力があまりないなら耐力を高くし、逆に変形能力があるなら少し耐力を下げることもできる、これが耐震の基本的な考え方です。

1995年1月17日の兵庫県南部地震

- 初めて経験した近代大都市の直下を震源とする地震
- 1995年1月17日 5時46分
- 気象庁マグニチュード:7.3
- 気象庁震度階7の初めての適用
- 死者・行方不明者:6,437人、負傷者:43,792人
- 住家全壊:104,906棟、住家半壊:144,274棟、全半壊:7,132棟
- 犠牲者の約90%が地震発生直後の約15分間で死亡、その多くは建物の下敷き、焼死者の多くも建物の下敷きが原因
- まず、地震直後に生き残ることが重要⇒自衛隊・消防隊の対応以前に、建物倒壊防止が本質的問題
- 生き残った後の復旧を考えると、建物の倒壊を逃れる（＝人命救助）だけでなく、建物の機能回復・継続利用も重要
- 耐震・免震・制震は自助努力すべき技術の一つ

図1

耐震を知る基礎知識:建物の強さと粘り

- 建物A
耐力(大)、強度(高)、強い大きな地震を受けると変形できずに崩壊する可能性
- 建物B
変形能力(高)、粘り強い、しなやか
変形が進み過ぎて、重量を支え切れない可能性
- 曲線と横軸で囲まれた面積が地震エネルギー吸収能力(AとBで同じ)
- 強さと粘りのバランスが重要

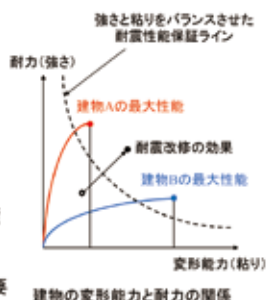


図2

耐震設計の典型的考え方: 剛構造と柔構造

- 自由に選択できない。超高層建物を剛構造に設計できない。
- 剛構造 ⇒ 静的設計法
 - 柱・梁を太く、耐震壁を多くして、変形し難くする。力尽くで地震に対抗
 - 鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート造
- 柔構造 ⇒ 動的設計法
 - 自ら柔らかくなり、地震で受ける力を低減
 - 高層建物、展望塔、五重塔

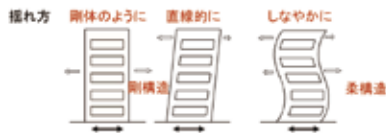


図3

3 耐震

耐震にも様々な考え方があり、代表的な考え方が剛構造と柔構造です(図3)。ただし、これは自由には選択できません。例えば、超高層ビルを剛構造に設計できません。剛構造は、柱、梁を太く、壁を多くして、変形しにくくします。力づくで地震に対抗するという考え方で、実際、鉄筋コンクリート造と鉄骨鉄筋コンクリート造の大体10階建てくらいまでの建物は、剛構造で設計します。一方、柔構造は、力を受けても揺れることによって、地震で受ける力を低減する設計法で、これによって設計するのは高層建物や展望塔等です。

建物の能力を知る意味では、層せん断力と層間変形角が重要です。同じ断面の柱でも、下の階にいく程、多くの力を負担します。この一番下の階が負担する最大水平力を最大層せん断力と言い、この負担する力が建物の重量に対してどれくらいの割合かというのが層せん断力係数です。

力だけでなく、変形の観点も見ないといけません。それで重要なのが層間変形角という概念です(図4)。これは、層間変位と階高で計算します。例えば、4mの高さのある2階が4cm揺れていたとすると、それは4cmを4mで割り、層間変形角は100分の1となります。高層建物や振動解析をする建物では、大地震を受けても100分の1以上、層間変形角が出ないような設計をしないと建物建設の許可が得られません。なぜ100分の1かというと、窓ガラス等も100分の1ぐらいまでは、変形が許容できるようになっているのです。層間変形角は、変形

層せん断力と層間変形角

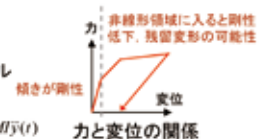
- 層せん断力: 各層が負担する水平力の総和
 - 層せん断力係数: 各層の負担水平力/支える重量
- 層重量 地震力
-
- 層間変形角(無次元量)
- 層間変位/階高
建物の損傷と相関性が高い

図4

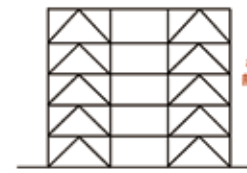
建物の揺れ方を知る基礎知識: 振動解析モデル

- 重量、剛性、減衰
- 線形、非線形
- フレームモデル、質点系モデル
- 建物の運動方程式

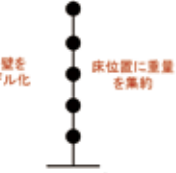
$$M\ddot{x}(t) + C(t)\dot{x}(t) + K(t)x(t) = -M\ddot{y}(t)$$



力と変位の関係



2次元フレームモデル



質点系モデル

図5

がどの程度進むかの割合で、建物の様々な部分がどれくらい壊れるかということに直接影響します。層間変形角は、建物の損傷と相関性が高いと言われています。

建物の揺れ方を知るにはまず、振動解析モデルを作らなければいけません(図5)。それはどういうことかというと、建物の重量、剛性、減衰の情報を入れ、ニュートンが考え出した運動の原理を使ってモデルを作ることです。このモデルにもいろいろあり、柱と梁のフレームで丁寧に作る場合もありますし、建物の重量はほとんど床の位置に集中しているので、串だんごのようなモデルを作る場合もあります。そして、この下に地震動を入れ、振動解析をするということになります。

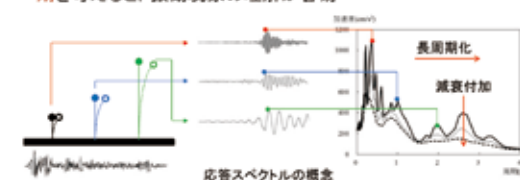
ある程度の地震までは、変形しても元の状態に戻ります。ところが、ある程度大きくなると、元に戻らず変形は残ります。これがいわゆる残留変形と言われるものです。

どんな大地震が来ても、建物が元の状態に戻るためには、相当大的な柱や梁がいるわけで、それを何十年に一回しか、しかも来るか来ないかもわからない地震のために設計したら、非常に不経済な物を作ってしまうわけです。ですから、その建物がきわめて稀に経験するであろう地震では、少し損傷を認めても崩壊しないというような建物の設計を行い、設計が二段構えになっているということが重要です。

地震というのは元々振動現象ですから、建物の振動の性質を知る必要があります(図6)。建物の振動の性質というのは、それが固有にもつ固有周期で、固有周期の逆数が固有振動数となります。建物の情報として重要な

モード情報の重要性和応答スペクトル

- 建物の耐震性能を調べる基本情報
- 揺れは固有周期、減衰、位置(モード形)で異なる。
- 構造評定資料の概要に記載する重要情報
- 建物の地震被害の原因の1つに共振現象
- 大地震時に建物は非線形振動するが、レベルに応じた固有周期を考えると、振動現象の理解が容易



応答スペクトルの概念

図6

「新」耐震設計法 1981年

- 日本の耐震規定に振動論的な考え方を導入
- 建物に粘り強さを与えて、構造部材に部分的に損傷が生じても倒壊を回避(=人命保護)。兵庫県南部地震では、「新」耐震設計法の想定を超えて地表が揺れた地域もあったが、新耐震設計法による建物に大きな被害は少なく、設計法は実証
- 地震力の強さは原則2段階、最近3段階も
 - 1次設計: 建物の耐用年限中に数度は遭遇する程度の中地震に対して、建物の再使用を意図
 - 2次設計: 耐用年限以内に一度遭遇するかもしれない程度の大地震に対して、終局耐震性の確認
- 建物の構造安全性の確認は構造設計作業。設計手順は建築基準法が提示。法律上は、建築主・設計者・施工者は「最低基準」を守れば差支えないが、基準以上の質の建築物を創る努力が必要。この法令は、建物の安全ならびに国民の生命・健康・財産の保護を「完全に」保証しない。

図7

は、固有周期と位置（モード形）と減衰です。減衰が小さいと、揺れは時間が経過してもなかなか収まりませんが、減衰が大きいと、振動は収まっていきます。

応答スペクトルという概念、これは建物と地震の関係を調べる基本的な情報です。建物の揺れ方は、先程触れたように、周期と減衰と位置で異なります。同じ地震を受けても、11階と1階では、揺れが違うわけです。

また、建物によっても揺れ方が違ってきます。高い建物は周期が長くゆっくり揺れますが、低い建物は周期が短いので、速く揺れます。

建物の耐震性を判断する上では新耐震設計法（図7）というものが非常に重要です。かつて日本は、そんなに高い建物はなかったの、静的設計法で設計できたのですが、だんだん高い建物が必要になり、かつ、学術的な知見が得られるようになると、振動論的な考え方を設計に入れようということになりました。それを入れたのが新耐震設計法です。建物に粘り強さを与え、建物の柱や梁等が部分的に損傷しても倒壊を回避し、人の命を守ろうということです。兵庫県南部地震では、実際、新耐震設計法の想定を超えて、大きく揺れた地域もありましたが、新耐震設計法によった建物には大きな被害が少なく、設計法が実証されたというのが日本建築学会の正式な見解です。

地震力の強さは原則2段階、最近3段階もあります。まず1次設計は、建物の耐用年限以内に数度は遭遇する程度の中地震に対して、建物の再使用を意図しており、2次設計は、耐用年限以内に一度は遭遇するかもしれない程度の大地震に対して、終局耐震性を確認するという、2段階構えになっています。

建物の安全性の確認は、構造設計の作業として行い、設計手順は、建築基準法が提示しています。この建築基準法は最低の基準であり、建築主、設計者、施工者は、それを守れば法律的な問題はないのですが、基準以上の質の建物を創る努力をすることは必要です。なお、この法律は、建物の安全や生命、財産を完全に保護することは保障していません。基本的に、建物、生命等は自分で守らなければならないということです。兵庫県南部地震では、新耐震設計法の妥当性が検証されたのですが、旧

鉄筋コンクリート系建物の耐震診断

- 1次診断: 壁式鉄筋コンクリート造など壁が多い建物を対象とした簡便な方法。各階の柱と壁の断面積とその階が支えている重量から診断。設計図面が残っていれば、現地調査は不要。補強設計を的確に行うことは不可能で、耐震補強を行う可能性がある建物には推奨されない。
- 2次診断: 主に柱や壁の破壊で耐震性能が決まる建物を対象。各階の柱と壁のコンクリートと鉄筋の寸法から終局耐力を計算して、その階が支えている建物重量と比較。コンクリートの圧縮強度や中性化などの試験。ひび割れ・漏水・鉄筋錆・コンクリート爆裂といった建物の劣化状態の調査が必要。1次診断より信頼性は高く、学校・庁舎といった公共建築物で多用。2次診断結果から耐震補強を提案
- 3次診断: 主に梁の破壊や壁の回転で耐震性能が決まる建物を対象。2次診断の柱と壁に加えて梁も考慮。現行の建築基準法と同程度のレベルで建物の終局耐力を評価

図8

耐震設計法で設計された建物が被害地域に結構多く存在していました。また、地震が来ない地域でも旧耐震設計法によるものが多く残っています。今の法律では既存不適格で、明らかに耐震性が不足しているとされる建物があるというのが現状です。これは建築基準法の重要な点ですが、法律が変わっても、その法律の前の建物には効力を発揮しません。

耐震診断では、既存の建物の安全性を調査し、どの程度の地震で壊れるかを推定します。耐震診断には様々な手法があり、例えば、鉄筋コンクリート系の耐震診断（図8）には、1次診断、2次診断、3次診断があります。

1次診断は、殆ど壁が多い建物で、図面で柱と壁の断面積を計算し、断面積が重量に対してどのぐらいの割合かというのを調べるだけです。現地に行かなくても診断ができます。ただし、補強が最初から必要だという建物には適用できません。2次診断は、主に柱や壁の破壊で壊れそうな建物を調べる方法で、これは学校や庁舎等公共建築物によく用いられます。一般には、この2次診断は耐震補強をする前提になっている建物を診断します。そして、3次診断では、主に梁の破壊や壁の回転で耐震性能が決まる建物を対象とし、2次診断の柱と壁に加えて梁も考慮されます。

既存建物の耐震補強（図9）では、耐震診断の結果、ある階だけ耐震性が不足していても、基本的には全体で耐震補強が必要です。また、耐震部材の垂直方向や水平方向のバランスの良い配置は、耐震補強でも重視します。耐震性が不足していた層や方向だけ補強部材を配置する

既存建物の耐震補強

- 耐震診断の結果、一つの階のある水平方向だけが耐震性が不足していても、基本的には耐震補強は必要
- 耐震部材の高さ方向や平面的なバランス良い配置は耐震補強でも重視。耐震性が不足していた層や方向に補強部材を配置するだけで、補強工事が終わらない可能性あり
- 建物を使用しながら工事を進めることが多く、都市部の建物過密地域では選択できる施工法に制約
- 効果の大きい補強部材を配置して、補強部材数を減らすことが原則。施工が難しいために効果が小さい部材を多数用いる場合あり
- ダンバなどの機械的要素を利用した耐震補強は制震補強とも、免震改修は建物基礎部の工事となるため大掛かり
- 水平力に対する建物耐力を増すために、耐震壁・筋交の追加や柱の補強が一般的。付随して梁の補強も必要の可能性あり

図9

耐震対策 地盤と基礎

- 建物の耐震対策では、地盤調査がまず重要
- 「砂上の楼閣」は、見かけは立派そうな事がしっかりしていない基礎のために壊れ易い例え
- 地盤調査に基づいて建物と地盤に相応しい基礎構造を選択することは、建物の耐震性を向上させる最初の手順
- 建物完成後の地盤改良や基礎構造の補強は大変面倒で、多大な工事費



図10

だけで、補強工事が終わらない可能性があります。現実には、建物を使用しながら工事を進めることが多いので、選択できる施工法はかなり限られてきます。効果の大きい補強部材を配置して工事の負担を少なくしたいのですが、施工が難しいため、効果が少ない部材を多数用いる場合もあります。それから1990年代からは、元々建築部材としては用いられなかったダンパ等の機械的要素を用いた補強も行われています。

耐震では地盤も非常に重要で、耐震対策では、まず地盤調査が必要です（図10）。「砂上の楼閣」という諺がありますが、見かけは立派そうなものがしっかりしない基礎のために壊れ易い例えです。そこで、地盤調査に基づいて、建物と地盤に相応しい基礎構造を選択することは、新しい建物を建てる場合の最初の手順になります。

次に、地盤の液状化（図11と図12）を説明します。地下水位が高く、緩く堆積した砂や砂質土で比較的大きな地震時に見られます。日本の大都市というのは殆どが海に面した湾岸地域にあり、砂等が堆積することによって平らな街になっています。液状化する可能性が高いのです。液状化という現象は、古くからありますが、研究され始めたのは1960年代で、日本では新潟地震以降です。2011年の東北の地震では、東京圏はかなり震源から離れていたにも拘らず、液状化が起きました。必ずしも大きな地震でなくても、繰り返し長時間揺れると、液状化するということも、新たにわかりました。また、液状化対策をした地盤では、被害が少ないということもわかっています。それから、近接する埋立地でも年代や埋土の

地盤の液状化

- 地下水位が高く、緩く堆積した砂や砂質土で比較的大きな地震時に観察。三角州、湾岸地域の埋立地、旧河川や池の跡地、水田跡などで発生
- 1964年新潟地震で、新潟市内で落橋、RC造建物の転倒、下水管などの地中埋設物の浮き上がりを確認。その後は多数
- 東北地方太平洋沖地震後の被害調査では、液状化が同じ場所でも繰り返し起きていることや、地表面の加速度がそれほど大きくなくても揺れの時間が長いと生じ易いことを確認
- 一方、液状化対策を施していた地盤の被害が少ない。近接する埋立地でも埋立年代、埋土の種類、埋立方法によって被害に大きな違い。精度が高い液状化判定法の研究を推進
- 海辺や河口付近で発展した日本の大都市では、液状化による被害が懸念。液状化の発生危険箇所をとりまとめたハザードマップも公表されている。

図11

地盤の液状化 原理と被害例

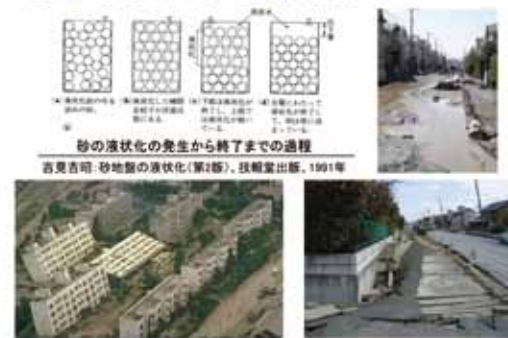


図12

種類、埋立方法によって、大きな違いがあるということもわかっていて、今、研究的には精度が高い液状化の判定法を、確立するというのも重要なテーマです。

次に、構造部材の耐震対策です。横からの力には、地震だけではなく、当然、強風もあるので、地震に強くするというのは、基本的に、風にもある程度建物の強度を増すということになります。そして、一番重要なのは、地盤と基礎がしっかりしているということです。

構造部材やダンパは、単独ではなく骨組、架構として水平力に対抗するので、接合方法が適切な場合に、各部材が一体となって初めて機能するのです。さらに剛性の適切な分布で建物耐震性は向上します。例えば、建物の2階の部分が非常に柔らかいとします。そうすると、2階だけ集中的に変形し、階上の荷重を支えられなくなって倒壊してしまいます。また、マンション等で1階の駐車場の壁が少なかったりすると、その部分だけ変形してしまって、上の荷重を支えられなくなり、上の階が落ちてしまったというのは、神戸の地震でも多く見かけられた現象です。高さ方向のバランスだけではなく、平面方向に強度がバランス良く設置されているということも非常に重要です。

建物の構造設計について述べます。まずは、最低限、建物は自分の重量を支えなければなりません。それから、地震や風に対して水平方向に抵抗しなければなりません。これには静的設計法と動的設計法があり、かつてはどちらがいいかという柔剛論争がありました。建物を硬くして変形を抑える剛構造の考え方と、柔らかくして地震との共振を避け、エネルギーを吸収して揺れを抑える柔構造の考え方が、学会でもずっと対立していました。この対立は、建物が吸収するエネルギーが重要であり、ポテンシャルエネルギーという共通の考え方で両構造が耐震評価できるということを京都大学の棚橋先生が提案し、歴史的に収まりました。これが今の耐震や制震、免震の考え方に及んでいます。

4 免震

兵庫県南部地震では免震の効果は実証され、近年、機械分野も進んで信頼できる装置が出てきました。また、耐震の研究も進み、どのようにエネルギー吸収をすると建物が壊れにくいという知見も出ました。それらが全て、耐震や免震、制震の技術に結びつけられています。更に情報技術によって、建物の振動計測結果を建物の揺れの軽減に活かそうという取組もあります。ただし、このような性能が高度な装置は高額であるため、高額な費用がかかっても、その分建物が長持ちするという、ライフサイクルコストという考え方を持ち込んで、重要な建物では新しい技術が入ってきています。

日経関係の会社が、2011年の東北地震の後に、テナントの意識調査を行いました（図13）。重視する建物選びの視点について、免震や制震といった高い防災性能が83%、新耐震以降の設計が62%となっており、耐震性に対して非常に意識が高まってきているということです。

免震は基本的に基礎の部分にゴムや、ダンパを置いています。ゴムというのは力と変形に比例関係があるため、ダンパが効いて、トータルとしてエネルギーを吸収する能力となります。免震装置は最低限、鉛直荷重、重量は支えなければならず、地震後に、また元に戻らないといけなくて、復元力特性という機能が必要になります。それから当然、長時間、何年、何十年も使うので、耐久性も要求されます。装置の特性は、面圧等にいろいろ依存するものもあるので、それを上手に使うのが設計のポイントです。

免震の効果というのは、加速度の応答スペクトルで言うと、建物の周期を延ばすことによって地震による揺れを抑えるという効果と、ダンパをつけて同じ周期でも揺れを落とすという効果が混ざっています（図14）。

免震装置は大きく分けて、機能分離型と複合型があります（図15）。例えば、積層ゴムというのは、薄いゴムを何層も合わせています。そうすると、非常に柔らかくなるのですが、かなり変形しても元に戻ります。その積層ゴムとダンパを別々に置くというのが機能分離型なのです。ダンパの設置場所を確保できない場合、積層ゴムの中にダンパを入れ、機能を複合するという装置があります。外から見

免震の原理 減衰と非共振の効果

- 建物近傍で起きる地震では、加速度で効果は大きい
- 免震層の変形は大きい、上部構造物の変形は小さい
- 免震層を揺らして、集中的にダンパでエネルギーを吸収する

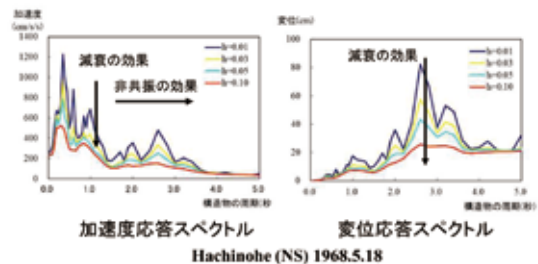


図14

るとわからないのですが、直径の2割位の大きさの鉛等が入っていて、これがダンパの役割を果たします。また、いろいろな装置を混合して用いる方法もありますし、ダンパをわざわざ入れなくても、ゴムに減衰の要素を持たせた高減衰ゴムというものもあります。

装置や部材は、性能が安定している領域で使用するのが原則です。実際のは、材質の経年劣化や環境の違い、想定外の地震等、不確実性を含んだ状況で使われます、それらの事象を想定して設計を行うのですが、全てのことは完全には考慮できません。ですから実際には、ある程度の余裕をもって設計しています。

免震構造では、免震層の設計が建物の主な設計になります。免震装置はものすごく変形するため、設備の機器等も全部その変形に追従できるような工夫をしなければなりません。免震層は必ず変形するので、クリアランスがいります。これは変形したときに擁壁、地盤に当たらないクリアランスです。免震の建物には80cm～60cmぐらいは確保するようになっています。ここで重要なのは、免震装置も揺れるということです。変形するのです。ただし、ゆっくり変形するので、家具が転倒したりすることはないですし、加速度という応答量はものすごく小さくなります。大切なことは、制震や免震、耐震も含めてですが、建物は維持管理をしっかりとしないとけないということです。免震装置の場合、通常点検として建物管理者が半年に1回程度、行います。また、専門技術者による定期点検も行いますし、ある程度大きな地震を受ければ、臨時点検も行います。もし残留変形が5cm以上あると、元に戻すように行政指導があります。

免震・制震に対する地震後の事務所建物テナントの意識調査

- 日経不動産マーケット情報「3.11以降の事務所建物テナントのニーズ」、日経BP社、2012.8(2011.4-5に実施)
- 東京都内の延床10,000㎡以上の事務所
- 有効回答数315社／調査票送付4516社
- 回答建物数は225
- 地震後に重視する建物選びの視点
 1. 免震・制震といった高い防災性能 83%
 2. 新耐震(1981)以降の設計 62%
 3. 非常用電源58%
 4. 非常用備蓄35%、エネルギーコスト32%

図13

免震システムの分類

- 機能分離型 天然ゴム系積層ゴム+鋼棒・鉛ダンパ
- 機能複合型 鉛プラグ挿入型積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム
- アイソレータ混用型 鉛プラグ型+高減衰ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承
積層ゴム+転がり支承+ダンパ など

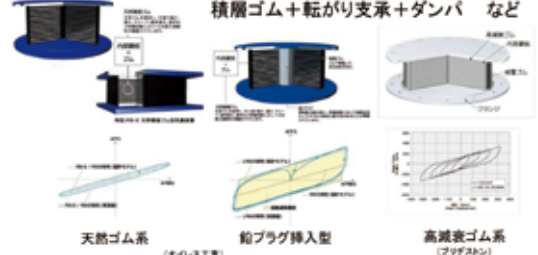


図15

制震(振)技術の30年を振り返ると

- 1980年代に研究開発が本格化
- 1990年代に適用が本格化
- 適用例が1995年兵庫県南部地震以降に急増
- 鉄骨造、特に中高層建物の標準的構造技術に成長。鉄骨造建物は制震との相性良し
- 木造戸建住宅への適用も増加
- 制震機構によっては設計法が確立
- 基本的な制震方法は出揃った印象
- 常に免震と比較されるが、効果の表現に難しさ
- 日本の強みは先進技術をすぐに適用すること。普及が進み、もはや先進ではない

図16

5 制震(振)

制震の技術の適用数も兵庫県南部地震後から急激に伸び、この30年間位で、制震建物の累積数も急増しています。国際的に見ると、先進技術をすぐに適用するというのが日本の強みです(図16)。

制震にも様々な技術(図17)があるのですが、重要なことは耐震構造のエネルギーを吸収することと、どこかで原理が必ず結び付いていて、耐震、免震、制震というのもエネルギーを吸収するという意味では一体だということです。制震技術は大きく分けて、パッシブ制御とアクティブ制御があり、アクティブ制御は、装置を電力等で強制的に動かすというものです。これは非常に効果はあるのですが、電源等が必要だったりするので、現実には大地震のときは制御をしない可能性があります。そこで電力をほとんど使わないセミアクティブ制御が提案されました。

制震の装置というのはいろいろあるのですが、最近は少し傾向が変わっています。オイルダンパや粘性ダンパと言って、大地震でなくても、中小地震とか少し小さめの地震でも効くような装置がだんだん適用されるようになり、その割合が大きくなっています。これは、防災意識の高まりであったり、せつかくダンパを取り付けているのだから、大地震だけではなくて、中小地震のときでも効かそうという考えからだと思われます。オイルダンパは油が入っていて、その油が小さな穴を通過することによって、地震に対して抵抗力を発生させます、これは実際に高級乗用車や新幹線のグリーン車等にも取り付けられています。連結ダン

パは、周期の違う建物同士をくっつけることによって、2つの相乗効果でエネルギーを吸収しようという取組です。高さの違う建物の連絡橋の部分にダンパを付けて、エネルギーを吸収するというようなこともされています。

制震技術の研究や適用の特徴というのは、装置は非常に多様なのですが、制震と耐震の区別が非常に分かりにくいという点です。免震のように明らかに加速度を下げるというようなことがないからです。制震は非常に理解しにくく、制震構造をしたから、被害が全くないというようなものではないのです。制震構造というのは、多少被害はあっても、すぐに補強し、使い易くしようという考え方が入っています。免震のように、無被害を狙ったわけではないのです。ではなぜ、制震が必要かということ、高層ビル等、免震が出来ない建物は沢山ありますから、そういうところでは制震を選択せざるを得ないのです。制震にしたからといって、完全に壊れないというわけではないのですが、それによって、地震の被害がかなり少なくなり、地震後に使い易くなるということがあります。重要なのは、免震や制震というのは絶対に万能ではないということです。どれも、変形しながら建物の振動エネルギーを吸収するため、装置が揺れないとエネルギー吸収ができません。ですから、神戸の地震のように突然大きな揺れがきてしまうと、そのエネルギーを全て一瞬のうちに吸収はできないのです。

機械にはどうしても不具合と誤動作があります。それらを予想して、被害を最小限にする必要があります。要は、防災等に100%の安全はないということです。免震、制震装置の場合は、やはり装置を壊さないというのが重要なので、装置に過剰な力が入らないように、力を逃がすような方法が取られていますので、本当に大きな地震になると、最後はやはり耐震性能というのが重要です。高度な技術を過信しないということは、この分野でも非常に重要です。

最後にまとめになりますが、まず、建物の耐震化は、防災、減災にとって重要な努力で、しかも自分で努力しなければなりません。また、身近に使っている建物を、劣化していないか等点検することも必要です。それから地震災害をイメージするというのが、非常に大切です。例えば、今ここで地震が起きたら、自分はどのような行動をとるかというのを、イメージしておかないと行動できません。耐震設計、耐震補強をしなくても、イメージするだけで、実は結構効果があるのです。重要なのは、どんな技術でも苦手なものがあり、100%の安全はないので過信しないということです。耐震補強全てに言えることですが、現実社会として、安ければ良いというのはありません。少子高齢化や人口減少で、物を簡単に買い替えたりできない環境ですが、やはり良い場所に良い家を建てて、既に建てている場合は良く維持管理して、長く使うということが非常に重要です。

耐震・免震・制震(振)と振動制御の基本策

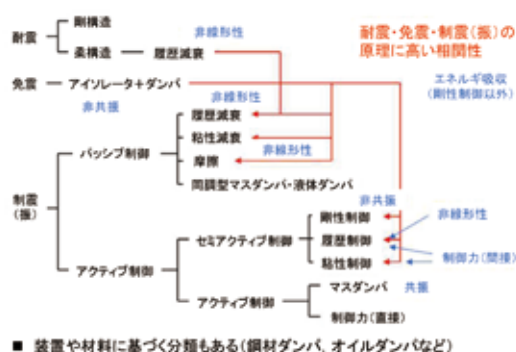


図17