

10 回 耐震技術を知る

(1) 構造物の安全性

地震が発生すると、構造物へ地震動が入力し、構造体が応答し、場合により損傷が発生することは 7 章にて学んだ。それでは、想定される地震動に対して、損傷や応答のレベルを許容以下に抑える設計では、安全性の目標をどのように決めるのであろうか。

それは、構造物の目的により各々取り決められるものであり、例えば、建物では、図 1 に示す考え方がある。まず建物の崩壊や倒壊などの致命的な損壊により人的被害を生じさせない「人命を守る」ことが第一の安全性の目標となる。次に、建物の損壊や、内部の什器・備品等の資産の損害を出来るだけ生じさせない「財産・資産を守る」ことや、病院や役所などの災害時の拠点となる建物では、大地震時にも機能を損なうことなく運用ができる「機能を守る」などが安全性の目標となる。

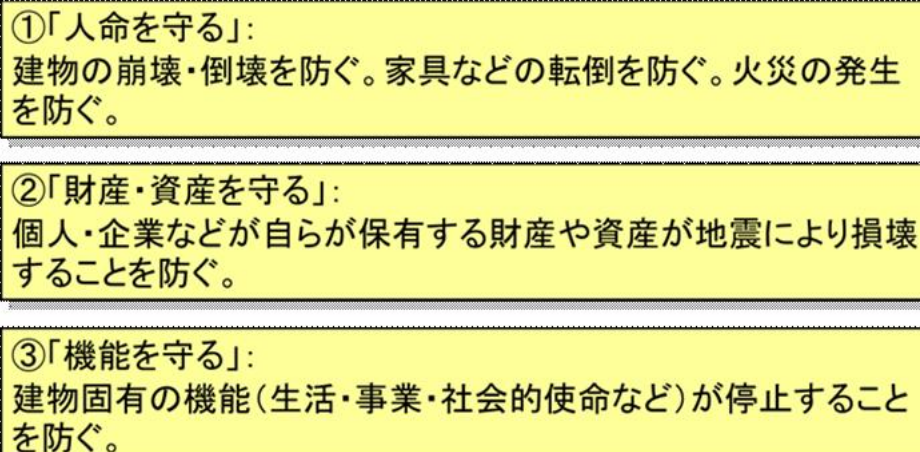
- 
- ①「人命を守る」:
建物の崩壊・倒壊を防ぐ。家具などの転倒を防ぐ。火災の発生を防ぐ。
 - ②「財産・資産を守る」:
個人・企業などが自らが保有する財産や資産が地震により損壊することを防ぐ。
 - ③「機能を守る」:
建物固有の機能(生活・事業・社会的使命など)が停止することを防ぐ。

図 1 構造物の安全性の目標

(2) 安全性確保のための耐震技術

前述した構造物の安全性を確保するため、現在では様々な耐震技術がある。

代表的なものに、地震動に対して構造体自らで耐える「耐震構造」や、地震時の構造物の応答を低減させる「制震構造」、地震動の構造物への入力を低減させる「免震構造」が上げられる。

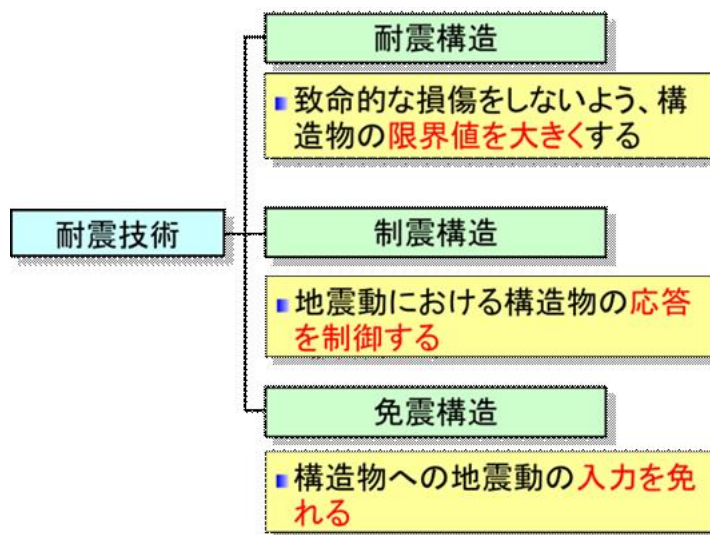


図2 代表的な耐震技術

これらは、地震動に対して耐える、制する、免れるなどにより耐震の安全性を確保することを示し、地震動をエネルギーとして捉えたと、各構造は、そのエネルギーを以下の方法により消費することとなる。

耐震構造： あらかじめ想定した部材に、ある程度の損傷を許容してエネルギー吸収させ、地震力に耐える構造とする

制震構造： 構造体の内部や頂部に取り付けた制振装置によってエネルギーを吸収し、応答を小さくして損傷を抑える構造

免震構造： 免震装置（復元材）を用いて構造物を長周期化させ、地震動の構造体への入力を減らす。また（減衰材）によりエネルギーを吸収する。

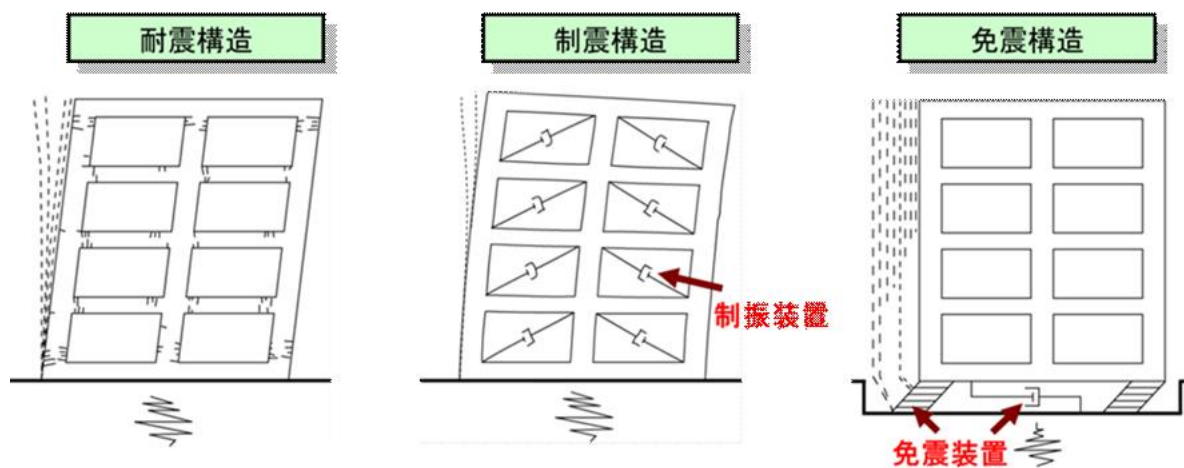


図3 耐震構造、制震構造、免震構造のイメージ

（３）耐震構造の考え方

耐震構造は、自ら（構造体）で地震動に耐えて、安全性を確保することであるが、耐える方法について、二つの考え方がある。一つは、地震動/応答から作用する地震力に対して、それを上回る剛強な構造体を構築する「強度型（剛構造）」であり、もう一方は、ある程度の部材損傷を認めた柔軟な構造体として、作用する地震力の影響を小さくしたうえで、構造体の変形能力以内に収める「じん性型（柔構造）」である。

「強度型」、「じん性型」は、その耐震性を実現するため、採用する構造の形式に違いがあり、代表的なものに図４に示す「壁式構造形式」、「ラーメン構造形式」などがある。

「壁式構造形式」は、バランスよく配置された耐震壁が地震力へ抵抗し、耐震壁内に発生する応力が、部材の強度以下となるように考慮する。これにより構造体が損傷することなく、地震時の耐震性を確保することができる。しかしながら、構造物の重量が重く、大きな地震力が作用する場合は、必要な壁量が増大し、構造物の空間を確保することが困難となる。また、想定外の作用力により一旦、壁の損傷が始まると、脆性的で致命的な崩壊を生じる特徴がある。

「ラーメン構造形式」は、床の重量を支える梁と、その重量を地盤に伝える柱で構成される構造形式で、地震力へ柱・梁部材が抵抗する。一般的に中小地震では、部材に発生する応力を損傷レベル以下に抑え、大地震時には、ある程度の損傷を許容して耐えることを想定している。なお、柱の損傷は構造体の崩壊につながる可能性が高いため、梁の損傷を許容する場合が多い。

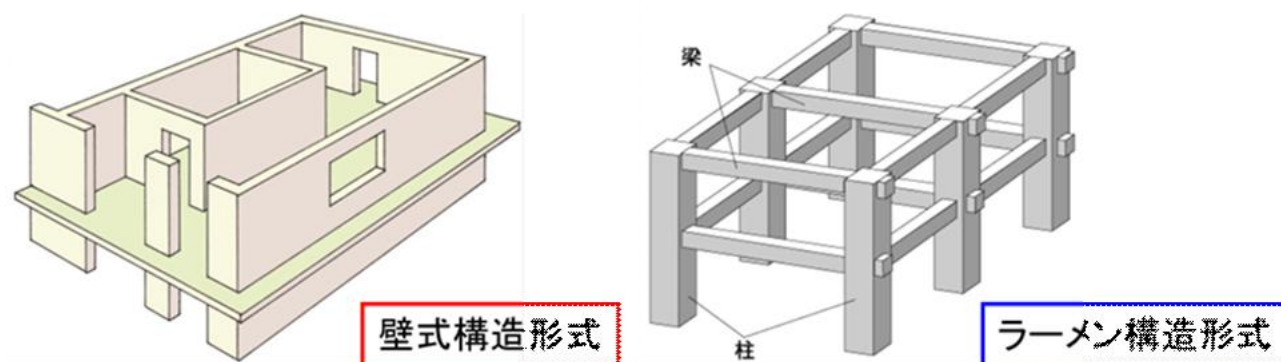


図４ 壁式構造とラーメン構造形式

耐震構造の強さを工学的に表現する方法として、復元力特性がある。これは、構造物に作用する地震力を段階的に大きくした場合の構造物の変形の関係を示しものであり、図 5 の概念となる。強度型とじん性型の復元力特性の違いは、青で示した「強度型」は、地震力に比例して変形が生じるが、変形能力は大きくなく、ある強度で崩壊を迎える。一方、赤で示した「じん性型」は、ある段階で部材の損傷が発生するため、地震力の負担の上限があるが、変形性能が高いため、すぐに崩壊は迎えない。

このように復元力特性は、耐える強度と変形能力を示したものであり、構造物の耐震性能を評価に用いることができる。また耐震性能の比較を行う場合、地震動の入力エネルギーに対して構造物の強度×変形が負担可能なエネルギーと捉え、復元力特性図の面積の大きさにより評価する方法などがある。

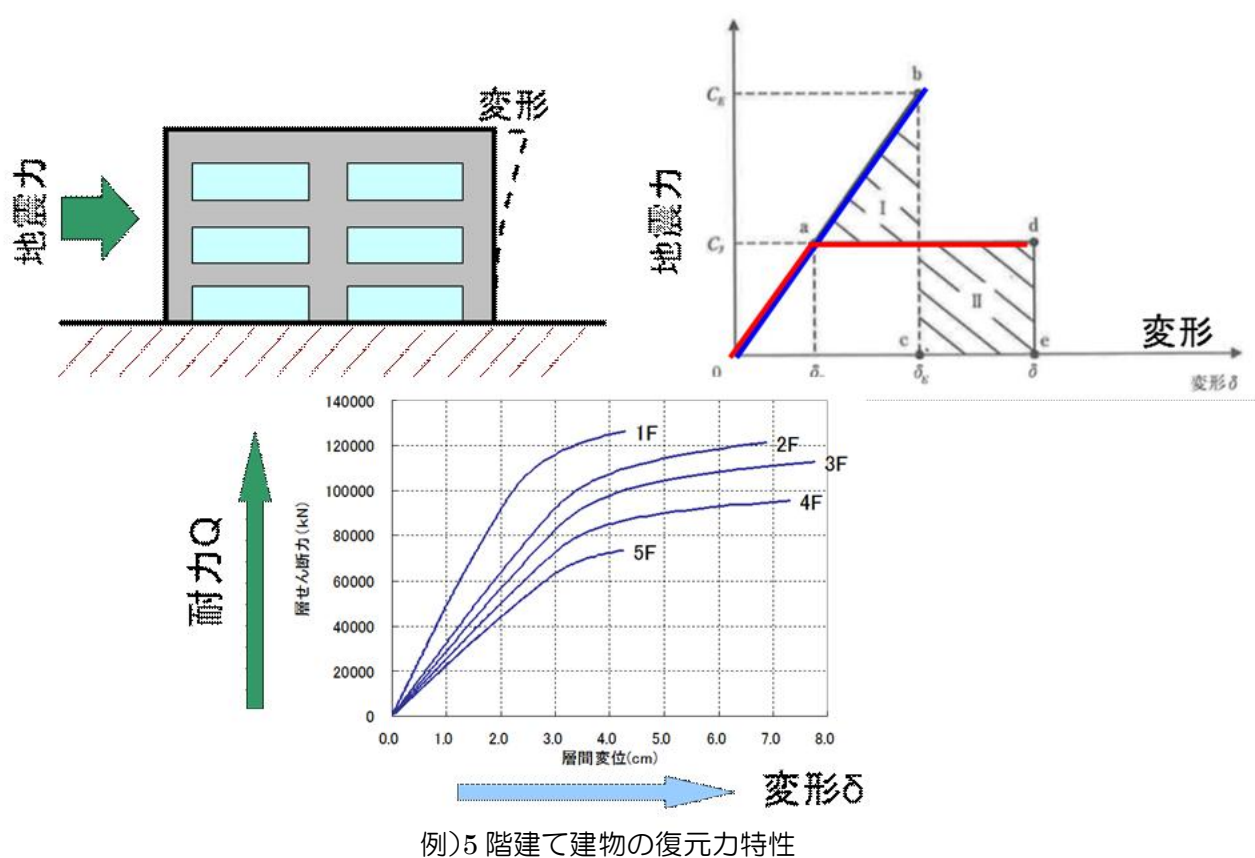


図 5 復元力特性の概念

以上の耐震構造の特性は、後述する制震構造や免震構造で地震力をすべて制す、免することは不可能で、ある程度の地震力が構造物へ作用するため、その部分については、同様の考え方で耐震性能を確保する。

（４）制震構造の考え方

制震構造は、制振装置のエネルギー吸収により構造物に発生する応答を抑え、作用する地震力を減じ、安全性を確保する構造である。これは、前述した地震の入力エネルギーを制振装置へ積極的に負担させ、構造体への入力エネルギーを軽減し、変形や損傷を抑える考え方に基づく。図 6 に制振装置である粘弾性ダンパーの履歴特性を示す。ダンパーへ変位（伸縮）が与えられると、非線形の履歴曲線を描き、変位/抵抗関係のエネルギー吸収が図られていることが分かる。このエネルギー吸収は、構造物の最大応答値の低減だけでなく、揺れの収束を早める減衰の効果としても働く。

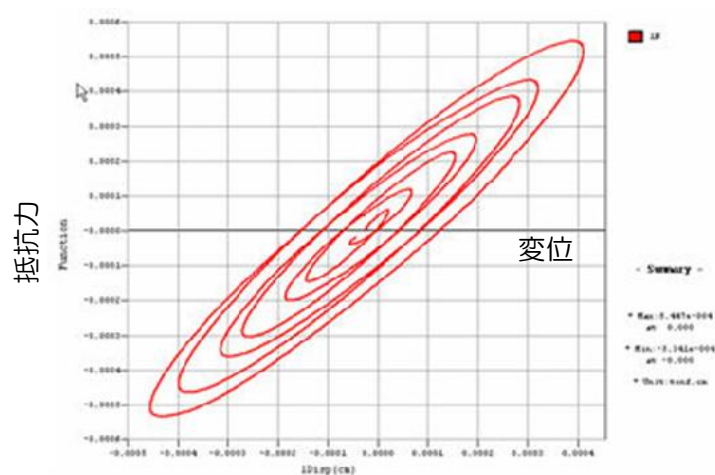


図 6 粘弾性ダンパーの履歴特性

制震構造は、その制震効果を得るための制御方法や設置方法、装置の種類など様々な方式がある。以下に代表的な方式を説明する。

制御方式

構造物に入力された地震動に対し、制震装置が受動的（パッシブ）に制御する場合と、能動的（アクティブ）に制御する違いがある。

パッシブ型： 構造体内に粘性体・摩擦・低強度鋼材などの材料で構成された制震装置を設置し、地震力により構造物が変形した場合、装置間に伸縮が生じ、材料の特性によりエネルギーを吸収する

アクティブ型： 地震時の構造物の揺れをセンサーにより感知し、これを制御するよう重鎮などのマスを機械的に作動する

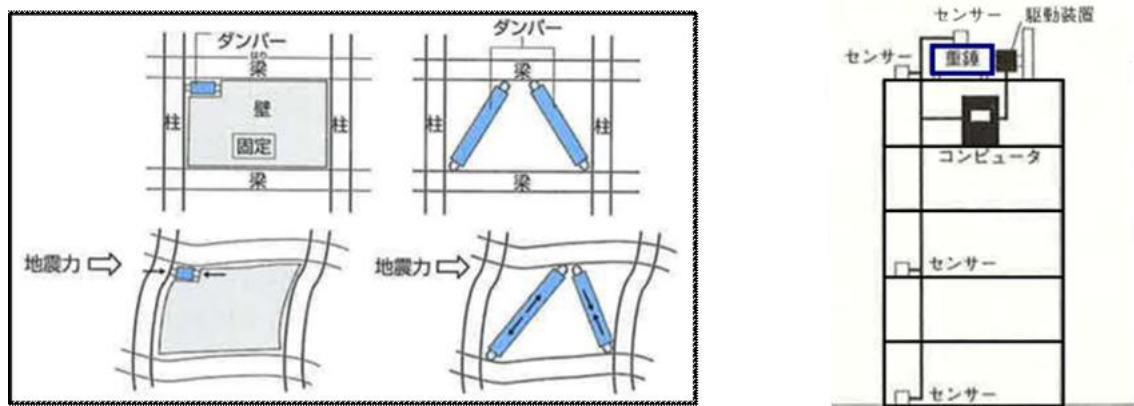


図7 パッシブ型（左）とアクティブ型（右）

その機構からアクティブ型は高価でかつメンテナンスが必要であるため、制震構造では、一般的にパッシブ型が採用されることが多い。

設置方法

制振装置の設置方法は、制御方式や装置の特性により以下の方式がある。

層間設置型： 構造物の各層（階）に配置し、分散配置ともいわれる。パッシブ型制振装置で採用されることが多い

頂部設置型： 構造物の揺れが最大となる頂部に配置するもので、アクティブ型制震装置で採用されることが多い

架構間設置型： 互いに独立した構造体の挙動が異なることを利用し、架構間にパッシブ型装置を設置する

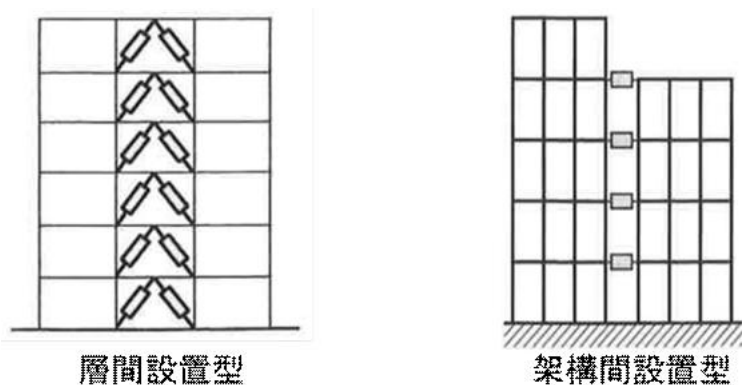


図8 制振装置の設置方法

パッシブ型の制振は、装置間の伸縮によりエネルギー吸収するダンパーと呼ばれる装置を設置する。そのため、無制振の場合に揺れが大きくなり、相対変位が発生する節点間に設置することが、効果的な配置となる。

装置の種類

ここでは、パッシブ型のダンパーと呼ばれる制振装置について記述する。

ダンパーには、大きく分けて履歴系ダンパーと粘性系ダンパーがある。

履歴ダンパー：ダンパーに発生する変形（伸縮）により、鋼材や鉛などの材料が弾性領域を超えての塑性化や、摩擦材の負担力がすべり摩擦力を超えて非線形化などから、荷重/変形関係で弾塑性のエネルギー負担を実現する。

粘性系ダンパー：充填された粘性材がダンパー内のピストン運動により可塑性を持ち、熱エネルギーとしてエネルギー吸収を実現する。

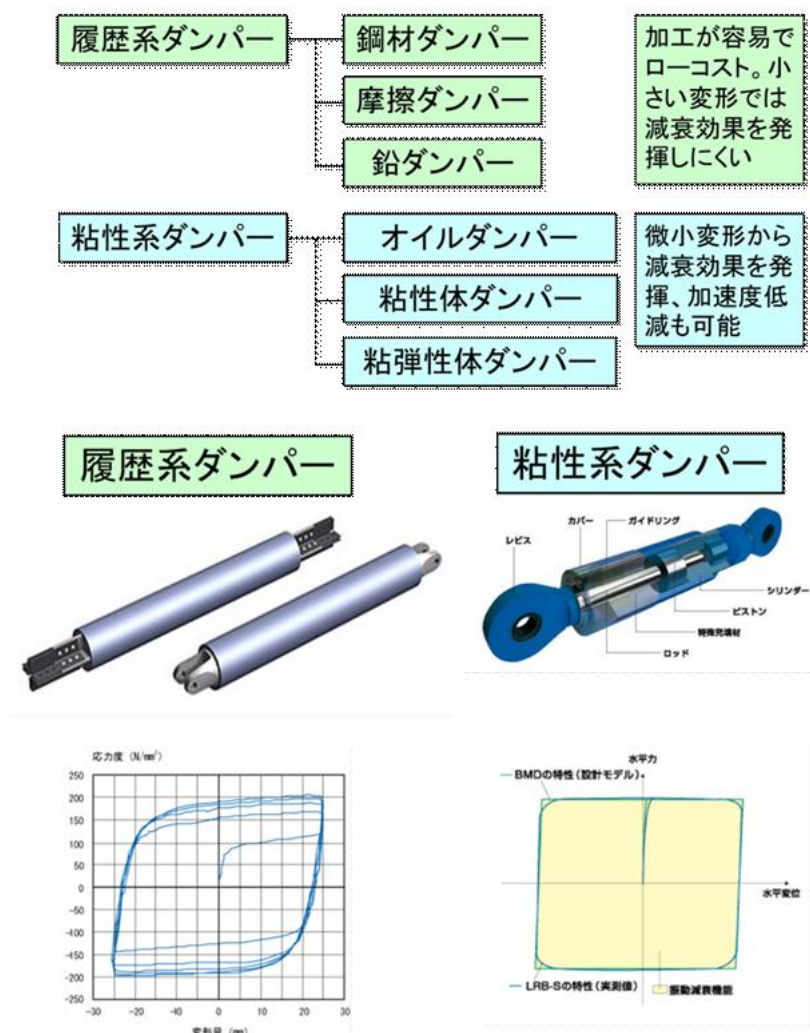


図9 パッシブ型装置の種類

(5) 免震構造の考え方

免震構造は、免震装置を構造物の基礎や中間層に設けて免震層とし、免震層上部の揺れを軽減し、地震時の損傷や応答加速度を抑え、人命の安全確保や構造物の機能維持を実現する構造である。免震層は、構造物の重量を支持する「支承材」、変形した際に元の位置に戻そうとする「復元材」、地震のエネルギーを吸収し揺れを低減する「減衰材」の3つに大別される免震装置により構成される。

以上は、水平剛性が低い復元材により構造物と免震層全体の系の固有周期を長周期化して地震動の入力エネルギーを小さくし、さらに減衰材によりエネルギー吸収を図ること、構造体の負担エネルギーが大幅に軽減され、変形や損傷を抑える考え方に基づく。

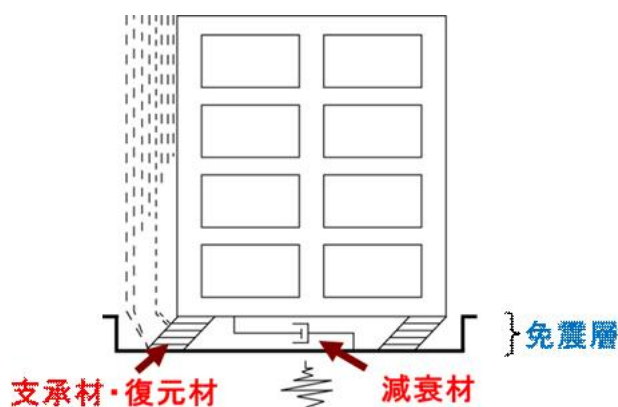


図 10 免震構造の構成

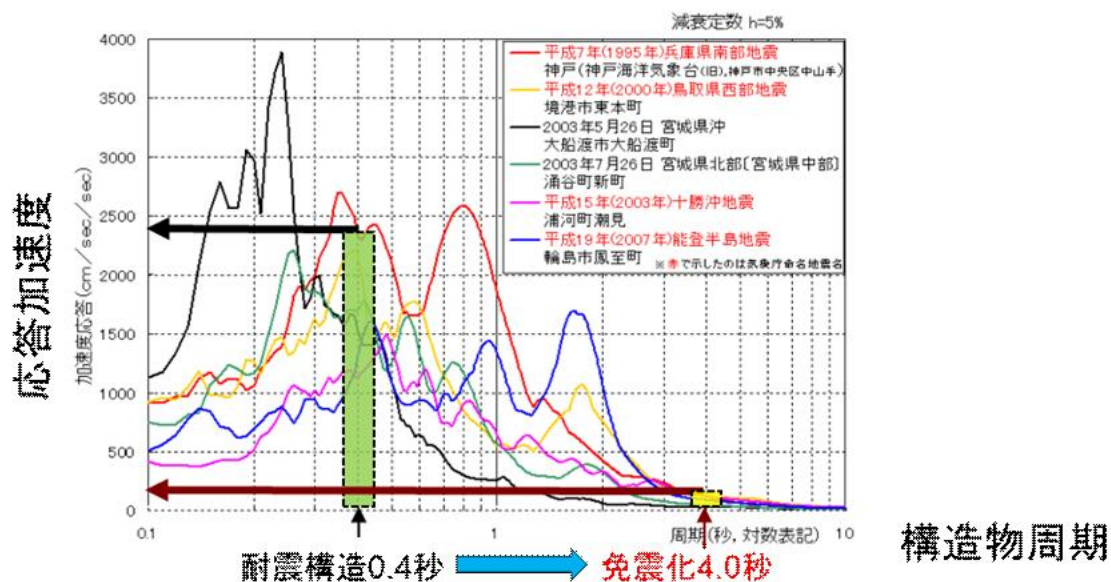


図 11 実地震動と長周期化との関係

免震構造は、免震層を設ける形式と、各種の特性を持つ免震装置の組み合わせにより、それぞれの特徴を持つ。以下に一般的な免震構造について記載する。

免震構造の形式

免震層を設ける層は、構造物全体を免震化する基礎免震と、構造物の中間層に免震層を設ける中間層免震に大別される。地震時には、免震層より上部の応答は低減されるが、免震効果を得るため意図的に剛性を低くしている免震層は、大きく変形する。そのため地下に免震層を設けた場合は、免震層の可動範囲を確保したスペースが必要となる。

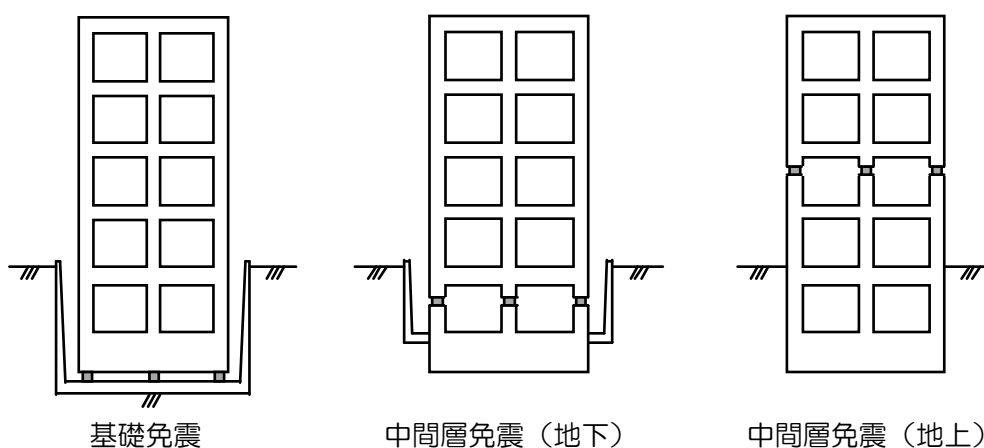


図 12 免震構造の形式

免震装置の種類

免震装置は、前述した「支承材」、「復元材」、「減衰材」の各機能を独立して受け持つ装置も存在するが、一般的に使用されている免震装置の多くは前述の各機能を併せ持っている。図 12 に一般的な免震装置の分類を示す。

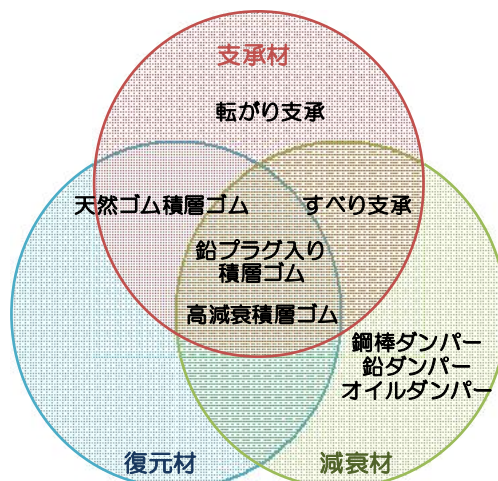
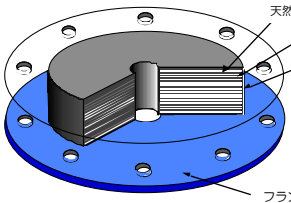
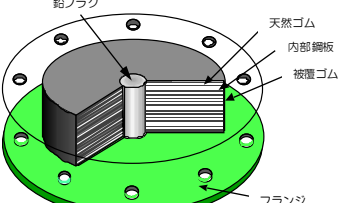
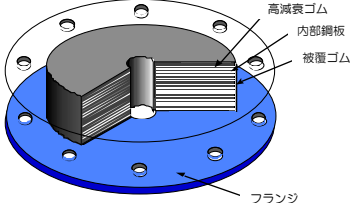


図 12 免震装置の種類と特性区分

a) 積層ゴム系装置

積層ゴム系装置は薄いゴムと鋼板を交互に積層したもので水平方向には剛性が低く、高い水平変形性能を保持しつつ鉛直方向には高い剛性を持つ装置である。積層ゴム系装置には「天然ゴム系積層ゴム」、「鉛プラグ入り積層ゴム」、「高減衰積層ゴム」の3種類が一般的である。表1に各積層ゴム系装置の姿図と特徴を示す。

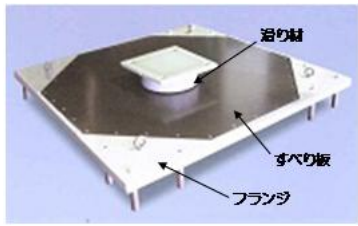
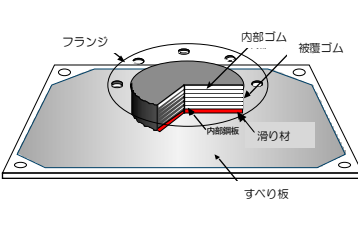
表1 積層ゴム系装置

	天然ゴム系積層ゴム	鉛プラグ入り積層ゴム	高減衰積層ゴム
姿図			
特徴	ゴム材料として安定した天然ゴムを採用。減衰機能をもたず支承と復元の役割を担う。	天然ゴム系積層ゴムの中心に鉛プラグを挿入し地震時にエネルギー吸収を図る減衰機能を付与したもの。	ゴム材料として高減衰ゴムと呼ばれる特殊なゴムを採用し、地震時にエネルギー吸収を図る減衰機能を持っている。

b) すべり支承系装置

すべり支承系装置の基本的な特性は滑らかなすべり板の上にすべり材が配置されているものである。地震時には構造体がすべり材を介して滑り板の上を滑らかにすべり地震による揺れを低減する。水平方向に動き易く鉛直方向に剛い性能を持っているのは積層ゴム系装置と同様である。すべり支承系装置として一般的に使用されている「剛すべり支承」、「弾性すべり支承」、「転がり支承」について表2に示す。

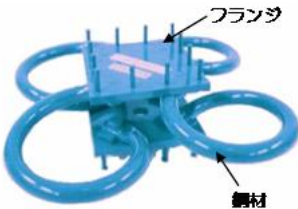
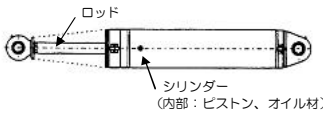
表2 すべり支承系装置

	剛すべり支承	弾性すべり支承	転がり支承
姿図			
特徴	すべり板の上に剛いすべり材を配置し地震時に滑り材がすべり板の上を移動する。すべり板の大きさにより変形性能が決まる。すべり面に生じる摩擦力によりエネルギー吸収を行う。装置自身が復元力を持たないため残留変位が生じ易く、小さい地震には効果が小さい傾向にある。	剛すべりと積層ゴムを組み合わせた装置。中地震に対しては積層ゴムが機能し、大地震に対しては剛すべり支承が機能することにより中地震から大地震まで性能を発揮する。	滑らかに動く転がり機構により建物を支承する装置。転がり機構によるため水平抵抗力がほとんどなく変形する。レールタイプのものは浮上力に対しても抵抗できる為、引抜防止装置として使用可能。水平抵抗がほとんどないため減衰効果はなく支承機能のみ。

c) ダンパー系装置

ダンパーは免震装置の 3 機能のうち「減衰材」のみを意図する装置であり積層ゴム系装置やすべり支承系装置に付加的に使用されることが多い。ダンパーについても多くの装置が製品化されているがここでは代表的な例として「鋼棒ダンパー」、「鉛ダンパー」、「オイルダンパー」について表 3 に示す。

表 3 ダンパー系装置

	鋼棒ダンパー	鉛ダンパー	オイルダンパー
姿図			
特徴	地震時の変形に追従できる鋼棒を配置し鋼材が塑性変形を受けることによりエネルギー吸収を行う。弾性範囲内はエネルギー吸収を行えない為、小さい地震には効果が出にくい。	地震時の変形に追従できる鉛体を配置し鉛の塑性挙動によりエネルギー吸収を行う。弾性範囲がほとんどないため小さい地震にも効果を発揮する。	地震時の変形に追従できる筒型の装置を配置し振動エネルギーを熱エネルギーに変換しエネルギー吸収を行う。小変形から大変形まで安定した性能を発揮する。速度に対して抵抗力を発揮するため風などの荷重に対して抵抗力を発揮しない。

d) 免震装置の組合せ

構造物を免震化するためにはいずれかの層に「免震層」を構成する必要がある。免震層は前述の免震装置の組合せにより構成される。同じ免震構造形式であっても構成する装置の種類が異なると免震構造としての性能も異なる。図 13 に免震層の組合せと性能の模式図を示す。免震性能の基本的な考え方として「どの程度の変形を許容するか？」と「どの程度の免震効果を見込むか？」が挙げられる。両者は必ずしも相反するものではないが、一般的な傾向として相関関係がある。なおここで掲げる「免震効果」とは地震力の低減具合を表すものである。

■ 水平変形を大きくした免震構造

地震時に生じる水平変形を大きく確保することで構造部は大きくゆっくり揺れる構造となり、地震による揺れ（応答加速度）の低減効果は大きくなることが期待される。水

平変形を大きく確保しなければならないため、免震層の水平クリアランスも大きくなり掘削土量が多くなることが予想される。また装置の組合せによっては地震後に元の位置に戻ってこない残留変位が生じる可能性が高い。

■ 水平変形を小さくした免震構造

地震時に生じる水平変形を小さくすることで免震層のクリアランスを小さくすることができ、掘削土量も低減することが期待できる。また水平変形を小さくすることで地震時に生じる付加的な応力も小さくすることができる。変形を抑制するために別途ダンパーなどの装置が多数必要となり、地震時の応答低減効果は変形を大きくした場合に比べ低い。

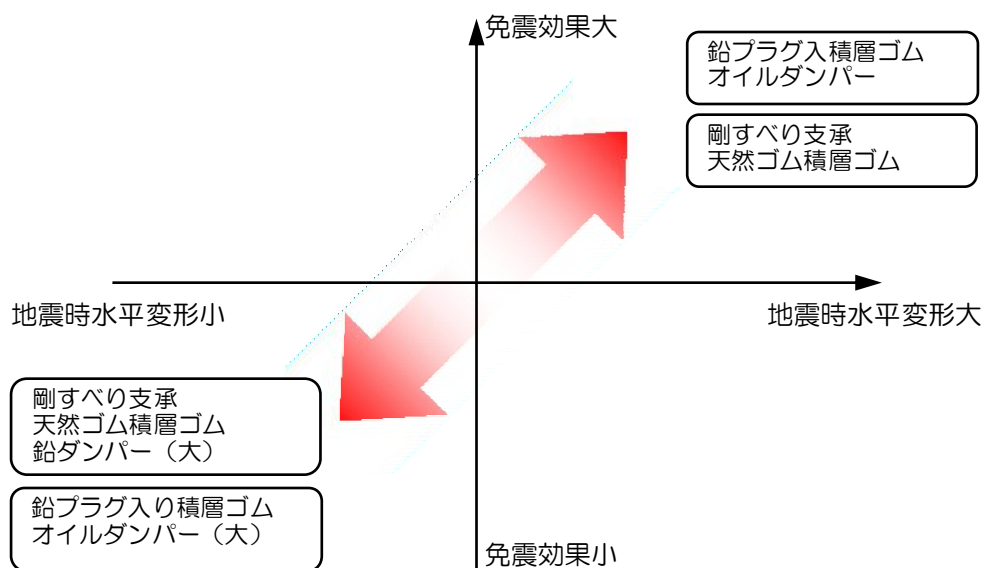


図 13 免震層の組合せと性能の模式図

10 章 耐震技術を知る

➤ 耐震技術に係るキーワード（重要語）を 10 個程度書き出せ

➤ 課題

1. 耐震構造における「強度型」と「じん性型」の違いについて記載せよ。
2. 免震構造の効果として、地震入力エネルギーの低減と、装置のエネルギー吸収が挙げられる。
どのような装置の種類により、実現されるか記載せよ。
3. 免震構造における「免震効果」と「免震層の水平変形」の関係について記載せよ。