

[8]耐震設計



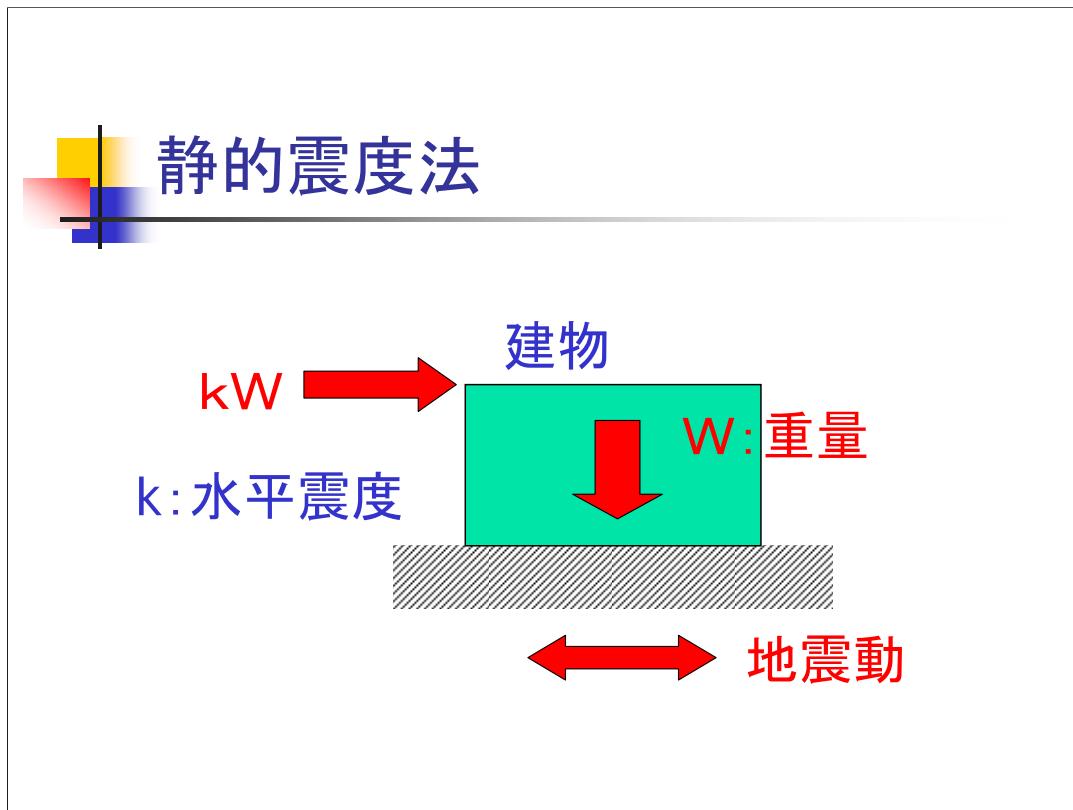
皆さんは、構造設計の手法として、許容応力度設計を学んできましたね。

この許容応力度設計は、どこから生まれたのでしょうか。

また、許容応力度設計はわかりやすく、構造設計者にとっては便利な設計法ですが、この設計法には欠点はないのでしょうか。

許容応力度設計に欠点があるとすれば、建物の耐震設計は、どのように考えるべきなのでしょうか。

ここでは、耐震設計の考え方と構造計画の重要性についてお話します。



許容応力度設計のももとの考え方は、静的震度法という耐震設計法から生まれました。静的震度法は、建物重量(W)の何割かの重さ(kW)が水平力(つまり地震力)として作用するというものです。

この割合(k)を水平震度と呼んでいます。

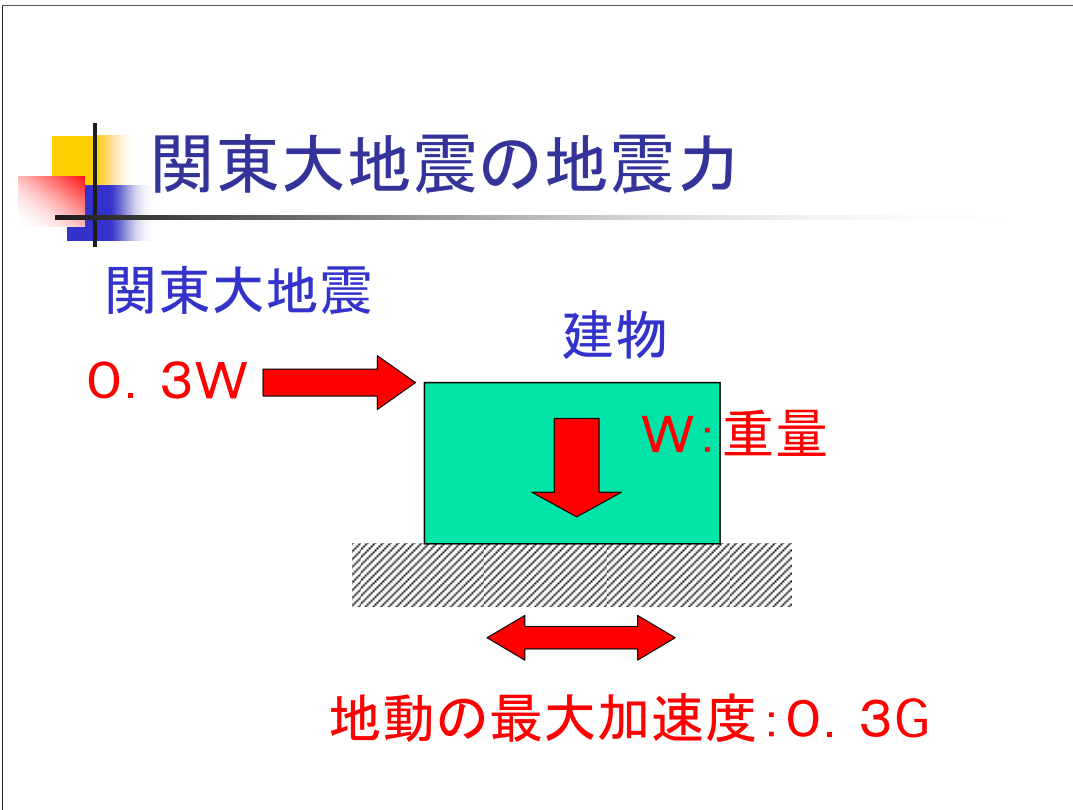
水平震度について、もう少し詳しく説明しましょう。

建物重量(W)は建物の質量(m)と重力加速度(g)の積で与えられます。

言い換えれば、建物の質量は建物重量を重力加速度で割ったものです。

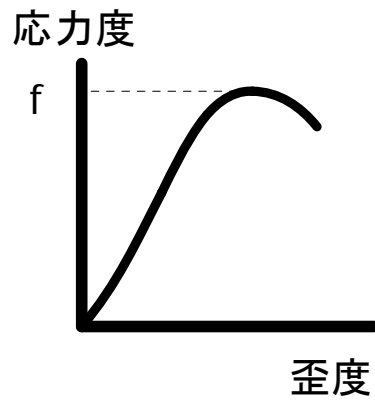
慣性力は質量(m)と加速度(a)の積ですから、水平外力(P)は、 $P=a/g \times W$ で表されます。

ここで、 $k=a/g$ とおくと、 $P=kW$ となります。つまり、水平震度は、重力加速度に対する建物の最大応答加速度の比を表しています。



関東大地震(大正12年、1923)では、地動の最大加速度が $0.3G$ であると言われてい
ます(実際の計測記録はなく、当時の偉い学者が決めたということのようですが)。
そうすると、水平震度は、 $k=0.3$ ということになります。

材料の破壊強度

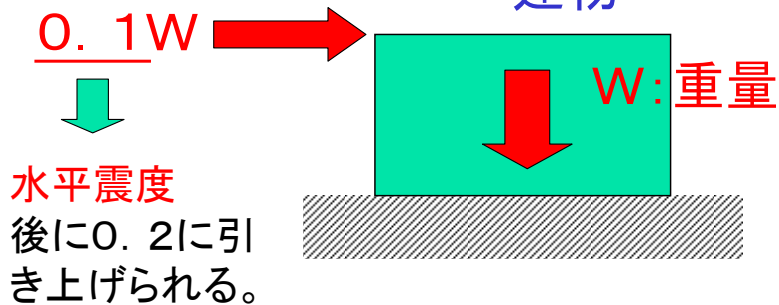


最大加速度0.3Gの地震動のときに、材料の破壊強度内に収まるように設計すれば良い。

従って、関東大震災の地動の最大加速度を0.3Gと考え、この極めて大きい地震動に対して、建物の主要構造部材は、その破壊強度を超えないように設計してやれば良いということになります。

しかし、関東大地震級の地震はめったに襲来しないので。

中地震動レベルを1/3と考えて
建物



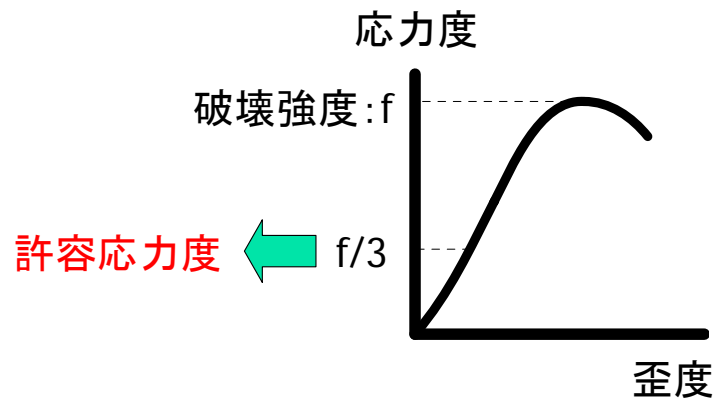
しかし、関東大震災のような非常に大きな地震は頻繁には起きません。そこで、比較的頻繁に起きるであろう地震動を関東大地震動の3分の1とを考えて、設計することにしました。

つまり3分の1の大きさの地震動に対して、主要部材の応力は、その破壊強度の3分の1を超えないように設計すればよいことになります。

関東大地震動の3分の1の大きさは、水平震度では0.1になります。これは後に、0.2に引き上げられました。また、現在では、水平震度のことを標準層せん断力係数と呼んでいます。

材料の許容応力度

地震動レベルを1/3にしたので



一方、破壊強度の3分の1の応力度のことを許容応力度と呼んでいます(現在の許容応力度は法令や規準書で細かく決められています)。

すなわち、許容応力度設計とは、部材(はりや柱)の(最大曲げモーメントや最大せん断力を生じる)危険断面での最大応力度が材料の許容応力度を超えないように設計するという手法なのです。



許容応力度とは、



- **部材を構成する材料の破壊強度を安全率で除した応力度を許容応力度という。**
- **許容応力度には、長期と短期とがある。長期は常時荷重に対して、短期は地震時、暴風時、積雪時に対して検討を行うための許容応力度である。**
- **具体的な許容応力度の値は、行政や学会から示されている。**

破壊強度に対する許容応力度の比を安全率といいます。

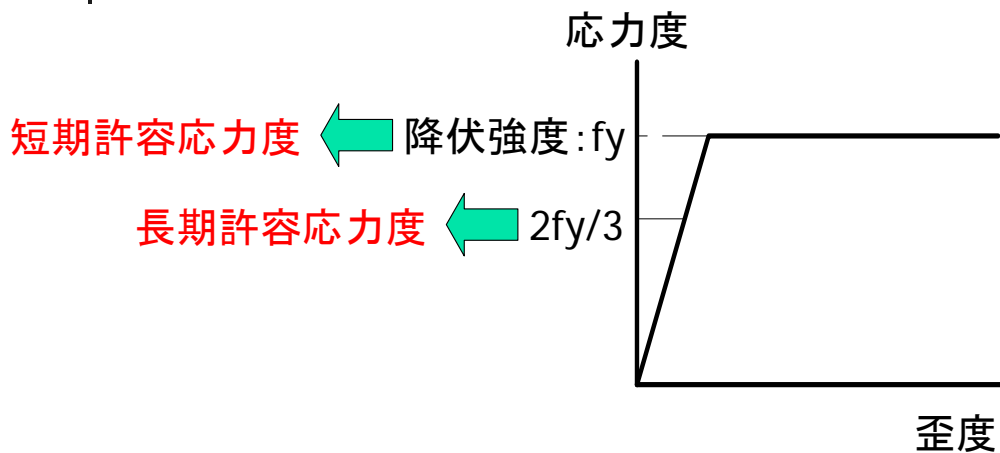
言い換えれば、許容応力度は、破壊強度を安全率で割った応力度とも言えます。

現行の許容応力度は、材料と応力度の種類によって、行政や学会からきめ細かく決められています。

また、許容応力度には、長期と短期があります。長期許容応力度は、常時の鉛直荷重に対して、また、短期許容応力度は、地震時や暴風時、積雪時に対して、検討を行うための応力度です。

次に、代表的な材料の許容応力度を紹介しましょう。

鋼の許容引張応力度

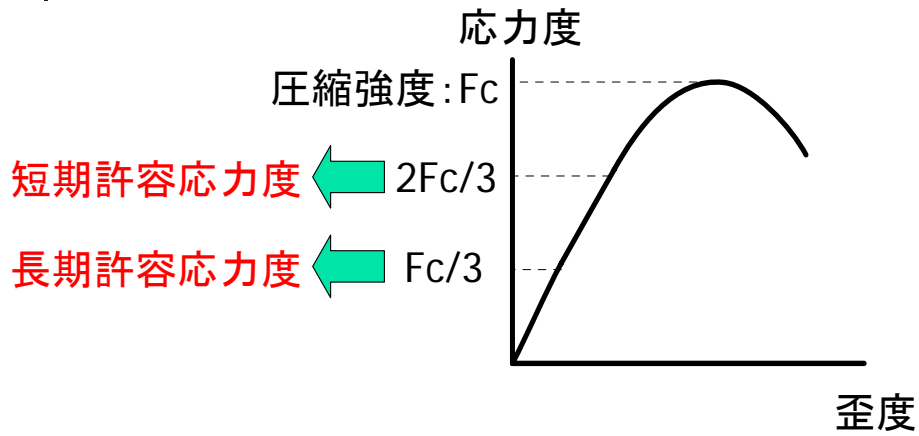


鋼材の破壊強度は、降伏強度になります。

鋼材の長期許容引張応力度は、降伏強度の3分の2です。安全率は1.5になります。

また、鋼材の短期許容引張応力度は、長期の1.5倍。すなわち、降伏強度と同値です。この場合の安全率は、1.0です。

コンクリートの許容圧縮応力度



コンクリートの破壊強度は圧縮強度、すなわち、最大圧縮応力度になります。

コンクリートの長期許容圧縮応力度は、圧縮強度の3分の1です。このときの安全率は3.0です。

また、コンクリートの短期許容圧縮応力度は、長期の2倍です。すなわち、圧縮強度の3分の2です。このときの安全率は1.5になります。



許容応力度設計

- 荷重を支える主要構造部材を抽出して、適切なモデル化を行う。
- 構造力学や材料力学の力を借りて、部材内部に働く抵抗力(応力)を求める。
- 各部材に予想される最大の応力に耐えられるだけの部材断面を決める。

許容応力度設計は、予想される荷重を骨組みに作用させて、構造力学のテクニックや材料力学の知識を使って、各部材内部に働く応力を求め、危険断面での最大応力度が材料の許容応力度を超えないように、部材断面を決めていく設計法でした。

しかし、本当にこれで大丈夫なのでしょうか。

しかし、これで本当に大丈夫？



建物は、ある程度までは、弾性的な挙動をします。

弾性的な挙動とは、フックの法則が成り立つ範囲です。つまり、荷重が除かれると建物はもとの状態に戻ります。

しかし、建物は、荷重を徐々に増大させていくと、少しずつ損傷を起こしていきます。コンクリート系の建物では、コンクリートの表面にひび割れが生じてきます。

さらに荷重を増大させると、鉄骨構造では、はりや柱の一部が塑性域に入ってきます。塑性域とは、降伏点を超えて歪みが進行する領域です。

一方、鉄筋コンクリート構造では、はりや柱の主筋の一部が降伏してきます。

鋼材は降伏点を過ぎると応力度の増大は小さくなり、歪みが急激に伸びます。

多くの部材が降伏すると、荷重の増大は小さくなり、代わりに変位の伸びが大きくなってきます。

最後は、建物が倒壊してしまいます。この倒壊する直前の状態を終局状態と呼んでいます。このときの荷重が崩壊荷重です。また、建物のどの部分が損傷を起こして崩壊していくのかを表したメカニズムを崩壊機構と呼んでいます。

許容応力度法の最大の欠点は、建物の終局状態、すなわち、崩壊機構がどのように形成されていくのかを設計の段階で考えていないことにあります。

壊れない建物を設計するには？

- **構造計画**をたてる。
- 常時荷重に対して**許容応力度設計**を行う。
- 中地震動に対して、建物に損傷が起こらないことを確かめる(**損傷限界設計**)。
- 大地震動に対して、建物が危険な崩壊を招かず、人命を確保できることを確かめる(**安全限界設計**)。



倒壊しない建物を設計するには、まず最初に構造計画をきちんと立てることで。

構造計画には、いくつかのポイントがあります。授業では、構造計画と深い関係にある、剛性率、偏心率および保有水平耐力を取り上げ、後ほど解説します。

次に、常時荷重に対して、許容応力度設計を行います。このときの許容応力度には長期許容応力度を用います。

中小地震動に対しては、建物に損傷が起こらないことを確かめます。これも許容応力度設計ですが、このときは短期の許容応力度を用います。

最後に、大地震動に対して、建物が危険な崩壊を招かず、人命を確保できることを確かめます。ここでは許容応力度設計ではなく、保有水平耐力の確認をします。

ここで大事なことは、ねばりのある建物を設計をすることに心がけるべきです。

構造計画について、もう少し説明しましょう。



構造計画では、



- 耐震要素の高さ方向のバランスをとる。
→剛性率
- 耐震要素の平面的なバランスをとる。
→偏心率
- 粘りのある崩壊メカニズムを形成させる。
→保有水平耐力

構造計画にはいくつかのポイントがあります。ここでは特に重要な次の3点を紹介します。

一つは、耐震要素の高さ方向のバランスをとることに心がけましょう。

2番目に、耐震要素の平面的なバランスをとることに心がけましょう。

最後に、粘りのある崩壊機構を形成させるように、部材断面の大きさを決めるように心がけましょう。

ここで、耐震要素とは、柱やはり、耐震壁やブレースなど地震力を受け止める主要構造部材を言います。

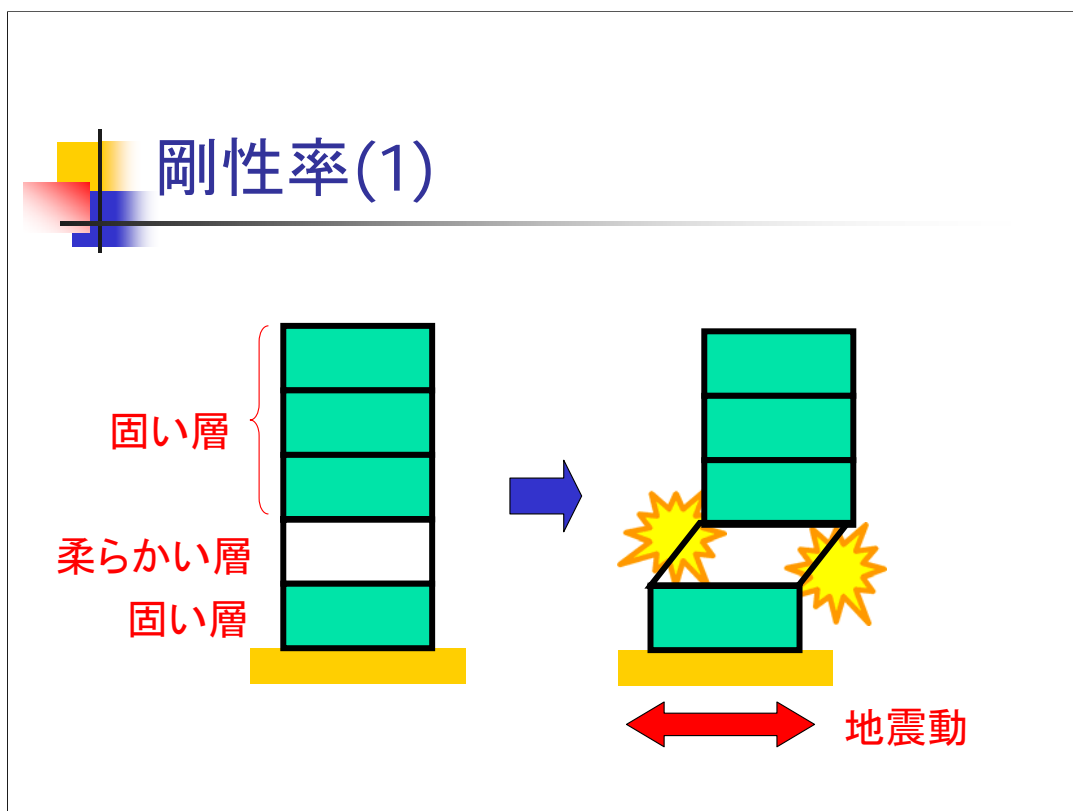
構造計画は、基本的な平面計画ができたころに、具体的な骨組みを構築していく段階で考えていくことになります。

従って、この段階では、具体的な計算によって上記の3点をチェックすることはできません。しかし、これらのことを十分考慮されていない建物を設計してしまいますとあとあと不都合を生じます。

建物の基本設計ができれば、構造設計によって建物の安全性を検討していくこととなります。このとき、上記の3点についても具体的に検討がなされます。

それが、剛性率、偏心率および保有水平耐力の確認です。

次に、これらを説明しましょう。



建物のある層に損傷が生じると、地震力は損傷を起こした箇所に集中して作用する性質があります。

地震力は、弱いものいじめなのです。

たとえば、上の図に示すように、剛い層の途中に柔らかい層があると、建物が地震力を受けると、柔らかい層に変形が集中しやすく、その層が破壊を起こしがちになります。

これを防ぐためには、各層の剛性のバランスを考えてやらなければなりません。

剛性率は、そのような各層の剛性のバランスを表す指標なのです。

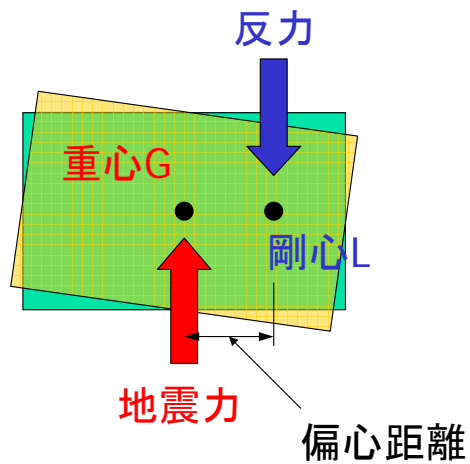


剛性率(2)

- 地震エネルギーは、建物の弱いところに集中する傾向がある。
- 剛性率は、各層の剛性のバランスの程度を示す指標。
- 剛性率は1.0に近いほど良い。
- 設計では、各階の剛性率が0.6以上であることを確認する。

剛性率は、1.0に近いほどバランスが良いことを示しています。
設計では、各階の剛性率が0.6以上あることを確認します。

偏心率(1)



次に、ねじれ振動についてお話ししましょう。

建物は、ねじれ振動を起こすと大変もろい崩壊を起こしてしまいます。

従って、構造計画の段階で、建物がねじれ振動を起こさないように十分考慮されていなければなりません。

ねじれ振動は、地震力(層せん断力)の合力の作用線と反力の合力の作用線との偏心距離が大きければ大きいほど起こしやすくなります。



偏心率(2)

- **重心**: 建物の質量中心位置
- **剛心**: 層せん断力に対する反力の作用位置。反力は、層せん断力と同じ大きさで、反対向きに、水平剛性の中心位置に働く。
- **ねじれ振動は、建物の重心位置と剛心位置が離れていて偏心していると起きる。**

地震力(層せん断力)は、建物の質量とそこに働く加速度との積の和になります。

建物の質量が床位置レベルに集まっているとすれば、その床位置での加速度はどの部分でも同じと考えて良いので、地震力(層せん断力)はその層の全質量と加速度との積になります。また、この地震力(層せん断力)の作用点は、建物の質量中心位置になります。

この建物の質量中心位置を重心と言います。

一方、地震力(層せん断力)に対して、各耐震要素は反力を生じます。

その層内のすべての耐震要素に生じる反力の合力が作用する点を剛心と言います。従って、剛心には、層せん断力と同じ大きさで反対向きの反力が作用します。

建物の重心位置と剛心位置との距離を偏心距離と言います。

ねじれ振動は、建物の重心位置と剛心位置が離れていると起こりやすくなります。



偏心率(3)

- 偏心率は、耐震要素の配置について、平面的なバランスを示す指標である。
- 偏心率は、0に近いほど耐震要素の平面的なバランスが良い。
- 設計では、各階の偏心率が0.15以下であることを確認しなければならない。

偏心率は、耐震要素の配置について、平面的なバランスを示す指標を表しています。
偏心率は、0に近いほど耐震要素の平面的なバランスが良いこととなります。
設計では、各階の偏心率が0.15以下であることを確認しなければなりません。

保有水平耐力



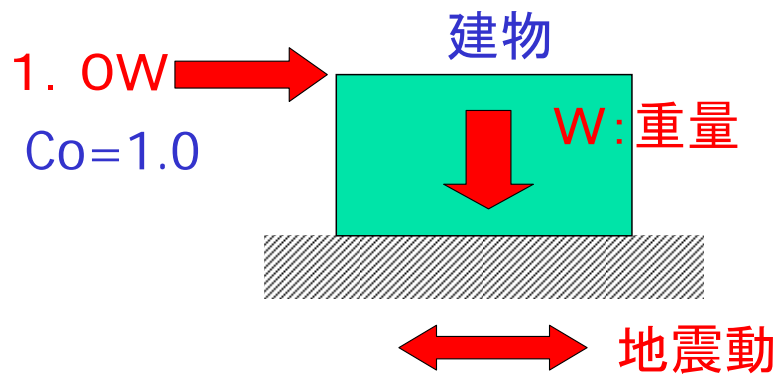
さて、この講義読本も終わりが近づいてまいりました。後少しですのでがんばって最後までおつき合ってください。

最後に、保有水平耐力について説明します。

ここでは、保有水平耐力のほかに、必要保有水平耐力や形状係数(せん断応力度のところで登場する形状係数とは違います)、構造特性係数といった用語を学ぶことになります。



地震荷重(大地震時)

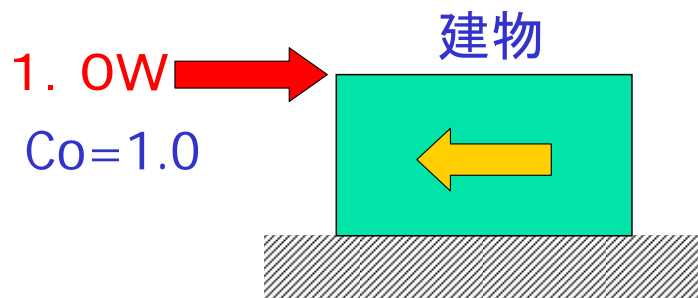


大地震動時の標準層せん断力は、1.0です。

すなわち、設計では、大地震動時に建物に重力加速度と等しい加速度が生じると考えます。

つまり、層せん断力は、建物重量と同じ大きさの水平力になります。

必要保有水平耐力



大地震時に建物が保有していなければならない水平耐力＝地震力(層せん断力)

この層せん断力に対して、建物自体が保有していなければならない水平耐力のことを、必要保有水平耐力と呼んでいます。



保有水平耐力

- 保有水平耐力とは、建物自身が実際に保有している水平耐力
- 保有水平耐力(Q_u) ≤ 必要保有水平耐力(Q_{un})

$$Q_u > Q_{un} = F_{es} \times D_s \times Q_{ud}$$

F_{es} : 形状係数

D_s : 構造特性係数

Q_{ud} : $C_o \geq 1.0$ としたときの層せん断力

一方、建物自体が実際に保有している水平耐力のことを保有水平耐力と呼んでいます。よく似ているので、紛らわしいですね。

保有水平耐力は、建物自体が保有する水平耐力ですから、通常、この耐力は建物の崩壊荷重として、崩壊機構を考えて計算することになります。

崩壊荷重の計算の仕方は、不静定力学Ⅱの第6課題で学びますが、ここでもう一度復習しておきましょう。

一方、必要保有水平耐力は、基本的には標準層せん断力係数を1.0としたときの層せん断力ですが、これに形状係数と構造特性係数をかけて求めます。

最初に、形状係数と構造特性係数を説明しましょう。

それから、崩壊荷重の計算の仕方を復習し、保有水平耐力を説明します。



形状係数: F_{es}

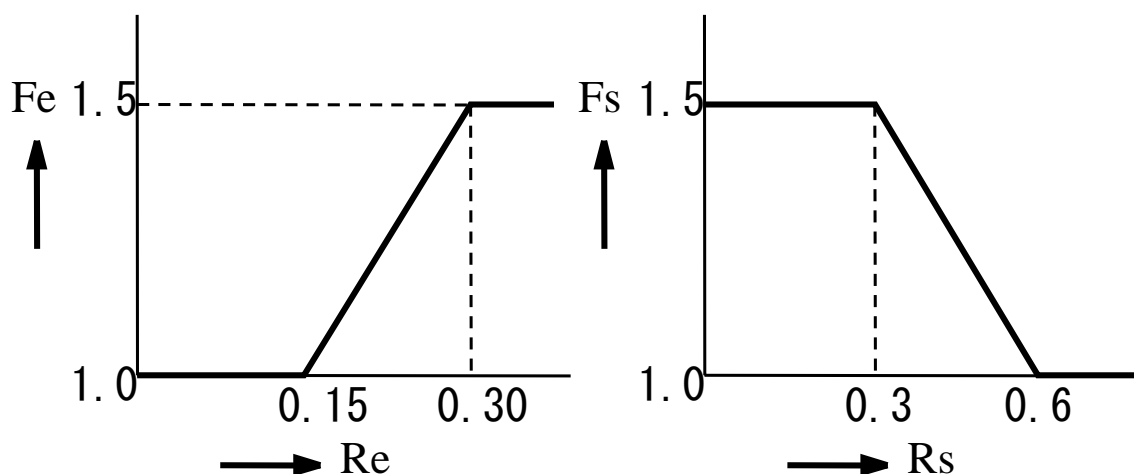
- 各階の形状特性を表すものとして、偏心率 R_e に応じた $F_e = 1.0 \sim 1.5$ 、剛性率 R_s に応じた $F_s = 1.0 \sim 1.5$ を乗じたもので $F_{es} = 1.0 \sim 2.25$ の範囲の割り増し係数
- $F_{es} = F_e \cdot F_s$

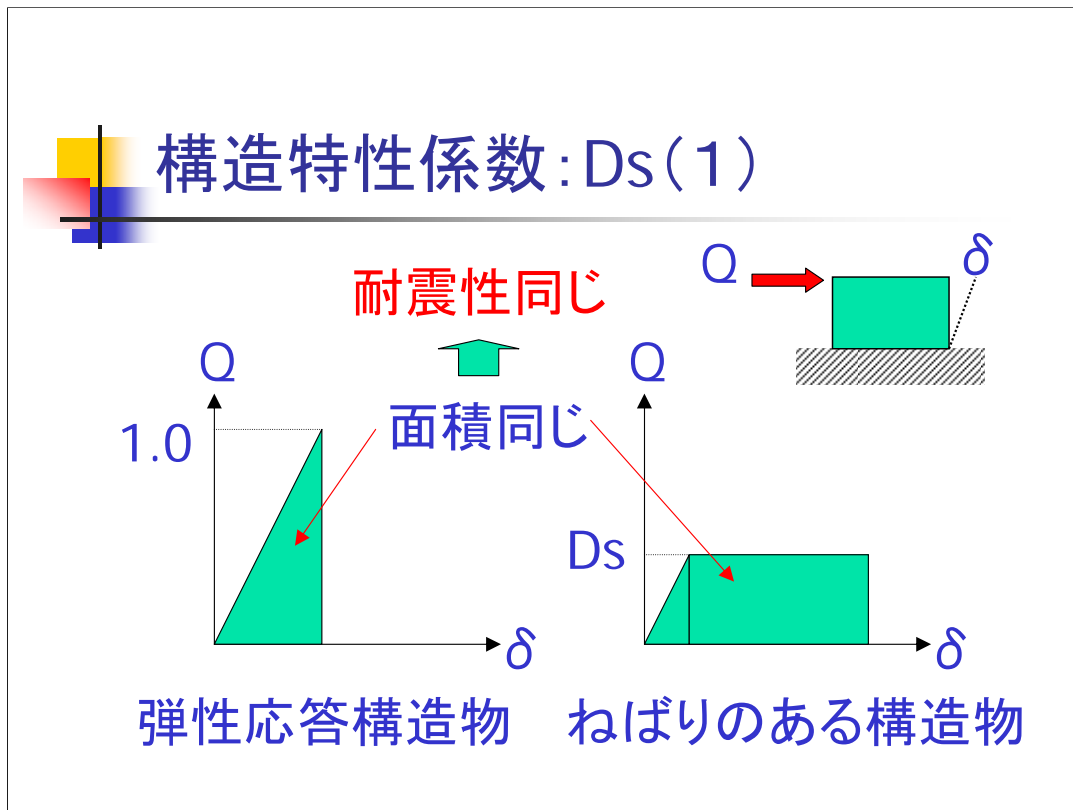
最初に、形状係数を説明します。

形状係数は、偏心率に応じた割り増し係数と剛性率に応じた割り増し係数とを掛け合わせた割り増し係数です。

つまり、剛性率や偏心率の悪い建物では、層せん断力を割りまして、建物の安全性を確保します。

しかし、最初から形状係数による層せん断力の割り増しを期待するのではなく、構造計画の段階で建物の高さ方向にバランスの良い耐震要素を配置したり、建物の平面計画上もバランスの良い耐震要素を配置することを心がけるべきです。





構造特性係数について説明しましょう。

層せん断力と層変位との関係は、建物が損傷が起これなければ比例関係にあります。このような建物を弾性応答構造物と言います(上の左側の図)。

一方、実際の建物は、層せん断力が大きくなると次第に損傷を起こしていきます。このときねばりのある構造物であれば、上の右側の図に示すように、層せん断力を保持しながら、層変位が伸びていきます。

このとき、弾性応答構造物では上の左側の図に示すような三角形で囲まれる面積や、ねばりのある構造物では上の右側の図に示すような台形面積は、地震時の入力エネルギーを消散(消費)する能力を表していると考えられています。そこで、もし両者の面積が同じであれば、同じ耐震性を持っている構造物であるとみなすことができます。

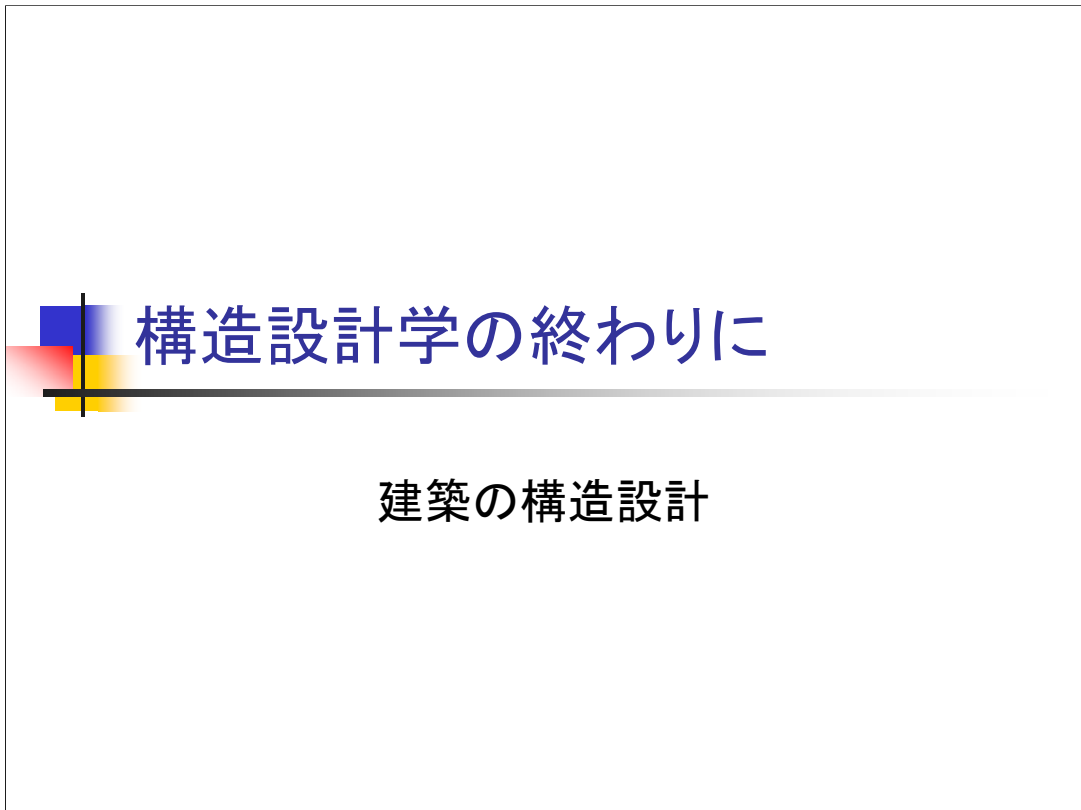
大地震動時に、弾性構造物が受ける最大応答層せん断力を基準にして、ねばりのある構造物が受ける最大応答層せん断力の比を構造特性係数と称し、通常 D_s 値と呼んでいます。



構造特性係数: $D_s(2)$

- 各階の減衰性および靱性を考慮して、柱、はり、耐力壁、筋交いの種別を判別した0.25~0.55の範囲の低減係数

構造特性係数は層せん断力の低減係数です。ねばりのある構造物であれば、層せん断力の低減率を大きく、すなわち、構造特性係数を小さくすることができます。通常、鉄骨造では $D_s=0.25\sim0.5$ 、鉄筋コンクリート造では $D_s=0.3\sim0.55$ です。



長い旅も終わりにになりました。

皆さんの中で、将来、建築の構造設計に携わる人はそんなに多くはいないと思います。しかし、建築の構造設計は、人々の安全を守る大事な役目を担っています。

従って、構造設計に直接携わらない人も、建築の構造設計はどうあるべきか、どのような考えで構造設計がなされているのか、その根本をぜひとも知っておいてほしいと思います。

そのために、講義内容はかなり難しかったと思います。

これだけの内容をしっかりと理解するためには、皆さんにはもっと時間と経験が必要かもしれません。

その意味では、本当の旅の始まりはこれからかもしれません。

将来、建築の構造設計に携わる人はもちろんこと、建築という分野で活躍する人にこの講義読本を少しでも役に立てていただければ幸甚です。