

# 鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計の概要

和泉 信之<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

建築物の構造設計とは、建築物に求められる要求性能に基づき、適切な材料を選択（あるいは開発）して、想定される荷重・外力に対して安全で合理的な骨組を創造する行為である。耐震設計は、構造設計における骨組の耐震安全性を検証するプロセスであり、世界有数の地震国であり、大地震の発生が危惧される日本においては、耐震設計は社会的にもたいへん重要な役割を担っている。

本稿では、鉄筋コンクリート造建築物を対象として、建築物の構造特性に応じた耐震設計の流れを中心に、基本的な耐震設計の概要を述べる。鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計において重要と考えられる事項として、構造計算の区分、一次設計と二次設計、地震力の算定方法、耐震計算ルート、層間変形角の計算、剛性率・偏心率の計算、耐震計算ルートに応じた設計規定、保有水平耐力の計算、必要保有水平耐力の計算を取り上げて、具体的に順次述べることとする。

なお、鉄筋コンクリート造建築物の多くは、第二号建築物又は第三号建築物である。そのため、本稿では、「許容応力度等計算」又は「保有水平力計算」を行う第二号建築物、あるいは「許容応力度計算」を行う第三号建築物を主な対象として述べていきたい。

## 2. 建築物の構造計算の区分

### 2.1 建築物の安全性と区分

法 20 条では、建築物が耐えるべき各種の荷重及び外力として、自重、積載荷重、積雪荷重、風圧、土圧及び水圧並びに地震その他の震動及び衝撃が示されており、それらに対して安全な構造とするために、建築物を規模等に応じて区分し、それぞれ必要な基準に適合することが求められている。鉄筋コンクリート造建築物も他の構造種別の建築物と同様に、次の 4 つに区分されている。

- ・ 第一号建築物 高さが 60m を超える建築物で、いわゆる超高層建築物
- ・ 第二号建築物 高さが 60m 以下の建築物のうち、大規模な建築物
- ・ 第三号建築物 高さが 60m 以下の建築物のうち、中規模な建築物
- ・ 第四号建築物 上記の一号から三号以外の建築物で、小規模な建築物で構造計算が不要

第一号建築物は、いわゆる超高層建築物であり、鉄筋コンクリート造では現在 500 棟を超える超高層住宅が建設されている。高さが 60m 以下の建築物のうち、第二号建築物は、構造計算適合性判定（設計者とは別の構造専門家による基準等への適合の判断）が必要であり、第三号建築物と区分されている。第四号建築物は、構造計算が不要とされる小規模な建築物であり、鉄筋コンクリート造としては数少ない例外的な建築物である。

### 2.2 建築物の区分と構造計算

第一号建築物は、「荷重及び外力によって建築物の各部分に連続的に生じる力及び変形を把握するこ

---

\*1 千葉大学大学院工学研究科 教授，博士（工学），構造設計一級建築士，技術士（建設部門）

と」を原則とした構造計算を行う。具体的には、「時刻歴応答解析」を基本とする構造計算によって安全性を確かめる。

第二号建築物は、「地震力によって建築物の地上部分の各階に生じる水平方向の変形を把握すること」を原則とした構造計算を行う。具体的には、建築物の規模や構造特性、あるいは設計者の判断などにより、「許容応力度等計算」、「保有水平耐力計算」、「限界耐力計算」を行い、安全性を確かめる。

第三号建築物は、「構造耐力上主要な部分ごとに応力度が許容応力度を超えないことを確かめること」を原則とした構造計算を行う。具体的には、「許容応力度計算」を行い、安全性を確かめる。

第四号建築物は、仕様規定への適合のみ求められており、法規定上は構造計算を要求されていないが、鉄筋コンクリート造の場合には、「許容応力度計算」などにより安全性を確かめることが望ましい。

建築物の構造特性や構造設計者の判断などにより、例えば、第三号建築物に「保有水平耐力計算」を用いるなど、対象建築物の号数より小さい号数の建築物に要求されている基準を適用できる。

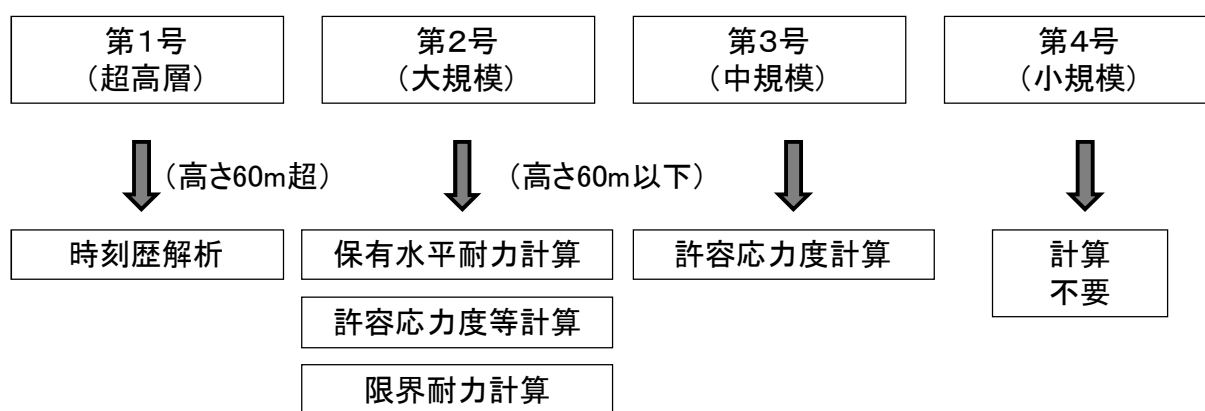


図1 建築物の区分と構造計算

### 3. 耐震設計の基本

#### 3.1 荷重及び外力に対する性能

一般に、鉄筋コンクリート造建築物では、荷重及び外力について3つのレベルに対して建築物あるいは構造耐力上主要な部分の状態を規定している。まず、日常的な荷重・外力に対しては、建築物の構造耐力上主要な部分に損傷が生じないこと及び建築物の機能上の支障を起こすような構造耐力上主要な部分の変形又は振動が生じないことが要求されている。次に、非日常時的な荷重・外力については、その生起頻度を考慮して、大きく2つのレベルを想定している。稀に発生する中程度の荷重・外力に対しては、構造耐力上主要な部分に損傷が生じないことを要求している。また、極めて稀に発生する最大級の荷重・外力に対しては、建築物が倒壊・崩壊しないことを要求している。

#### 3.2 設計用地震力の考え方

地震力は、過去の地震被害の経験などをもとにして工学的判断に基づき設定されている。耐震設計に用いる地震力は、上記で述べた他の荷重・外力と同様に、その生起頻度によって中程度の地震動による地震力及び最大級の地震動による地震力の2段階を考えている。

高さが60m以下の建築物の設計では、中程度の地震動による地震力は、標準せん断力係数(Co)として0.2以上、最大級の地震動による地震力はCoとして1.0以上としている。この地震力は、地震動に対する建築物の応答として生じる力であり、具体的には、建築物の耐震設計に用いる静的水平力で

ある。地震時に建築物が弾性的に挙動すれば、建築物の最大応答加速度は入力地震動の概ね 2.5～3.0 倍程度に増幅するといわれている。つまり、最大級の地震動による標準せん断力係数を 1.0 と規定していることは、水平方向に  $1G (=980\text{cm/s}^2)$  の弾性応答を仮定して、 $300\sim 400\text{ cm/s}^2$  程度の基礎入力地震動に対する設計を要求していることになる。このような基礎入力地震動に対して、建築物に必ずしも弾性設計を要求しているわけではなく、建築物の靱性に応じて、建築物が保有すべき水平耐力を要求している。

### 3.3 一次設計と二次設計

耐震計算は、稀に発生する中程度の荷重・外力に対する設計（一次設計）と極めて稀に発生する最大級の荷重・外力に対する設計（二次設計）に大別できる。

一次設計では、次に示す許容応力度設計のほかに、使用上の支障防止の確認及び屋根ふき材などの構造計算が行われる。

- ①一次設計用地震力を算定して、それにより構造耐力上主要な部分に生じる力を計算する。
- ②上記の力と他の荷重・外力により生じる力を組合せて、構造耐力上主要な部分に生じる短期の応力度を計算する。
- ③計算した短期の応力度が当該部分の短期に生じる力に対する許容応力度（短期許容応力度）を超えないことを確かめる。

二次設計では、耐震計算ルートに応じた構造計算が行われる。耐震計算ルートは、ルート 1 からルート 3 まで 3 つのルートに分かれている。耐震計算ルート 1 は「許容応力度計算」、耐震計算ルート 2 は「許容応力度等計算」、耐震計算ルート 3 は「保有水平耐力計算」に対応している。したがって、通常は、第三号建築物は耐震計算ルート 1、第二号建築物は耐震計算ルート 2、あるいは耐震計算ルート 3 により設計される。

耐震計算ルート 3 の「保有水平耐力計算」における二次設計では、大地震時の建築物の安全性を確認するため、建築物の塑性変形能力に応じた所要の耐震性能を保有しているか検討する。具体的には、次に示す項目について確認が求められる。

- ①各階の層間変形角が  $1/200$ （変形により建築物の部分に著しい損傷が生じるおそれがない場合は  $1/120$ ）以内である。
- ②各階の保有水平耐力が必要保有水平耐力以上である。

高さ 31m 以下の建築物では、建築物の構造特性に関する条件を満足した場合には、耐震計算ルート 3 の検討を簡略化した耐震計算ルート 2 により大地震時の安全性が確認される。さらに、中規模の建築物では、建築物の構造特性に関する条件を満足した場合には、耐震計算ルート 3 の検討を大幅に簡略化した耐震計算ルート 1 により大地震時の安全性が確認される。

耐震計算ルート 2 の「許容応力度等計算」における二次設計では、耐震計算ルート 3 に比べて構造計算内容が簡略化されており、次に示す項目について確認が求められる。

- ①各階の層間変形角が  $1/200$ （変形により建築物の部分に著しい損傷が生じるおそれがない場合は  $1/120$ ）以内である。
- ②各階の剛性率が 0.6 以上である。
- ③各階の偏心率が 0.15 以下である。
- ④建築物の塔状比が 4 以下であることなど、構造種別に応じた必要な耐力及び靱性などを確保するための基準への適合

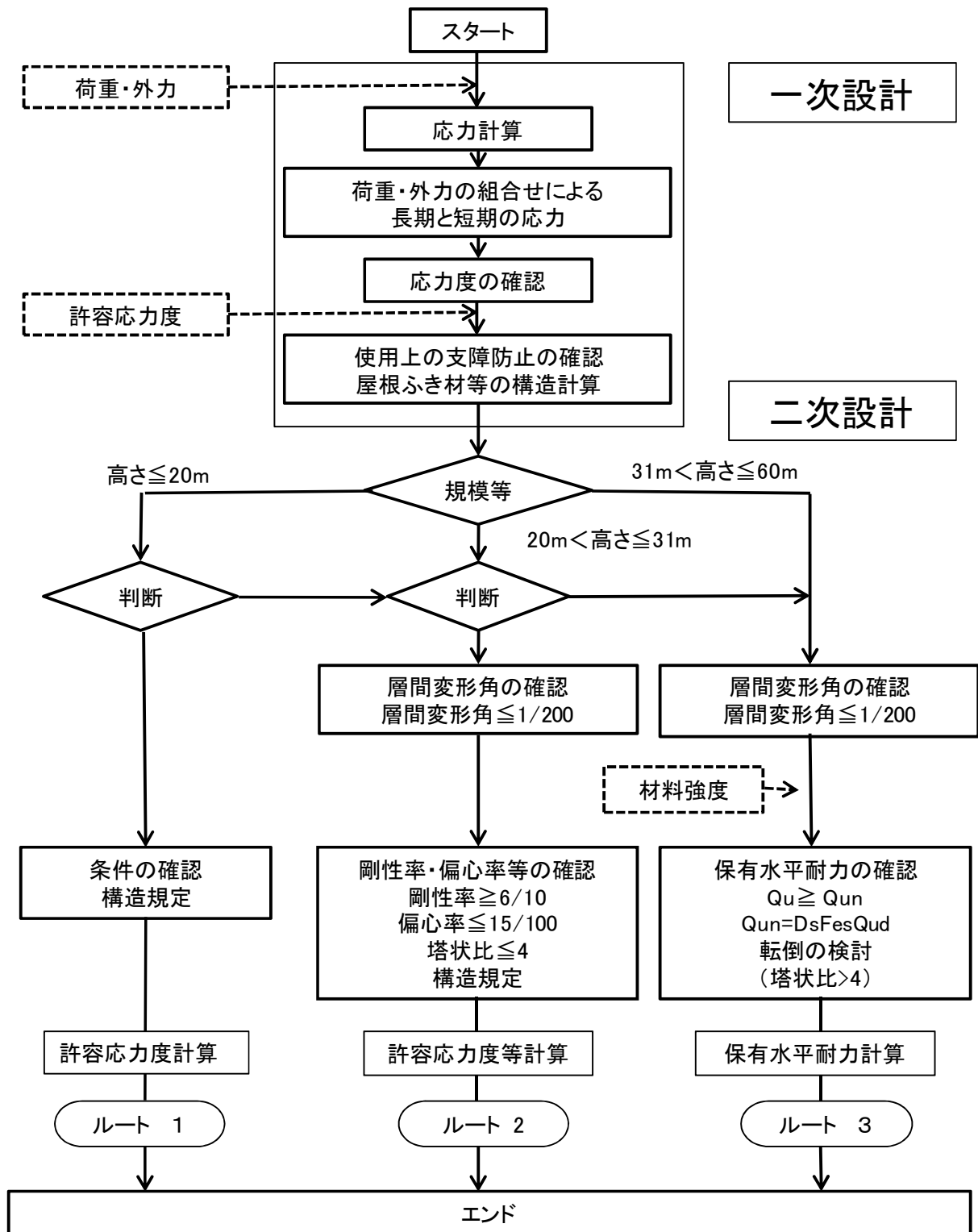


図2 鉄筋コンクリート造建築物の一次設計と二次設計

### 3.4 地震力の算定

#### (1) 地上部分の地震力の計算

地上部分の地震層せん断力は、次の式により計算する。

$$Q_i = C_i \cdot W_i$$

$$C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_o$$

ここで、

$Q_i$  :  $i$  層の地震層せん断力 (kN)

$C_i$  :  $i$  層の地震層せん断力係数

$W_i$  :  $i$  層以上の建物重量 (kN)

$Z$  : 地震地域係数

$R_t$  : 振動特性係数

$A_i$  :  $i$  層の地震層せん断力の高さ方向の分布を示す係数

$C_o$  : 標準せん断力係数で、一次設計では 0.2 以上、保有水平耐力計算では 1.0 以上

#### (2) 地下部分の地震力の計算

$$k = 0.1(1 - H/40) \cdot Z$$

ここで、

$k$  : 水平震度

$H$  : 地盤面からの深さ (20 を超えるときは 20 とする) (m)

$Z$  : 地震地域係数

#### (3) 各係数の規定及び計算方法

##### a) 地震地域係数 $Z$

地震地域係数  $Z$  は、過去の地震記録などにより得られた地震動の期待値の相対的な比を表す数値であり、0.7～1.0 の数値として各地域で規定されている。

##### b) 振動特性係数 $R_t$

$R_t$  は、建築物の弾性域における固有周期及び地盤の種別に応じた当該建築物の振動特性により、地震力の値を変化させる係数である。

$$T < T_c \quad \text{の場合} \quad R_t = 1$$

$$T_c \leq T < 2T_c \quad \text{の場合} \quad R_t = 1 - 0.2(T/T_c - 1)^2$$

$$2T_c \leq T \quad \text{の場合} \quad R_t = 1.6T_c / T$$

ここで、

$T$  : 次の式によって計算した建築物の設計用一次固有周期 (秒)

$$T = h \cdot (0.02 + 0.01 \alpha)$$

$h$  : 当該建築物の高さ (m)

$\alpha$  : 当該建築物のうち柱及びはりの大部分が木造又は鉄骨造である階の高さの合計の  $h$  に対する比 (鉄筋コンクリート造の場合、 $\alpha = 0$ )

Tc : 建築物の基礎の底部の直下の地盤の種別に応じて決まる数値 (秒)

第1種地盤 (硬質) 0.4 , 第2種地盤 (普通) 0.6 , 第3種地盤 (軟弱) 0.8

c) 地震層せん断力の高さ方向の分布を示す係数 Ai

Ai は、地震層せん断力係数の分布を示す係数である。建築物が高層になるにつれて、地震時には上層階が大きく揺れるので、Ai の数値は、建築物の上階になるほど大きくなり、かつ、建築物の設計用一次固有周期 T が長いほどその傾向が著しくなる。また、 $\alpha_i$  は、同じ高さの建築物であっても、高さ方向の重量分布により地震力の分布が変わることを考慮するものであり、当該階以上の階の重量を地上部分の全重量で除した値である。

$$A_i = 1 + (1/\sqrt{\alpha_i} - \alpha_i) \cdot 2T / (1+3T)$$

ここで、

$\alpha_i$  : 建築物の Ai を算出しようとする高さの部分が支える部分の固定荷重と積載荷重との和を当該建築物の地上部分の固定荷重と積載荷重との和で除した数値

T : Rt の算出に用いた T の数値 (秒)

#### 4. 鉄筋コンクリート造建築物の耐震計算ルート

##### 4.1 耐震計算ルート

鉄筋コンクリート造建築物の二次設計における耐震計算ルートは、前述した3つの計算ルートのうち、耐震計算ルート2が3つに細分化されており、合計5つの計算ルートがある。

耐震計算ルート3では、部材強度及び保有水平耐力の算定、さらに部材の変形能力の推定などの多くの計算過程を必要とするが、建築物の耐震性能を詳細に検討するため、より合理的で経済的な耐震設計が可能になる。

一般に、共同住宅のような壁の比較的多い中低層の鉄筋コンクリート造建築物では、機能上必要な壁を設けることにより、必要な耐震強度が確保されることが多い。このような壁が多い建築物については、柱や壁の断面積に基づき耐震強度を略算的に算定して必要強度を満足していることを確認することにより、大地震動に対する耐震安全性の検討が可能である。このような耐震計算ルートがルート1、ルート2-1及びルート2-2である。

一方、壁は多くないが、平面・立面的なバランスがよく構造的に明快な鉄筋コンクリート造建築物では、詳細な計算過程を簡略化しても、必要な耐震強度及び変形能力が確保できることがある。このような構造的にバランスのよい建築物では、全体崩壊メカニズムを確保するとともに、部材に塑性変形能力を与える靱性設計を行うことにより、大地震動に対する耐震安全性の検討が可能である。この耐震計算ルートがルート2-3である。

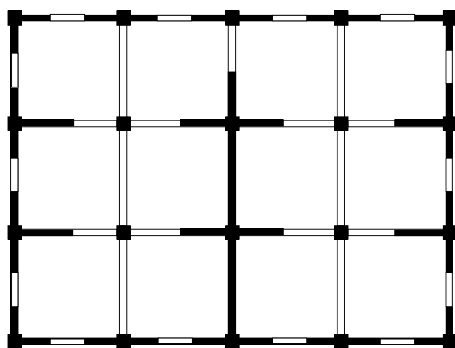
##### 4.2 各耐震計算ルートと鉄筋コンクリート造建築物の構造特性

構造設計者は、鉄筋コンクリート造建築物の規模、階数のほか、柱や壁の断面や配置などの構造特性に基づいて、適切な耐震計算ルートを選択する。耐震計算ルート3は、高さ60m以下のどのような建築物にも適用することができるが、他の4つの耐震計算ルートは、それぞれ規定された条件を満足

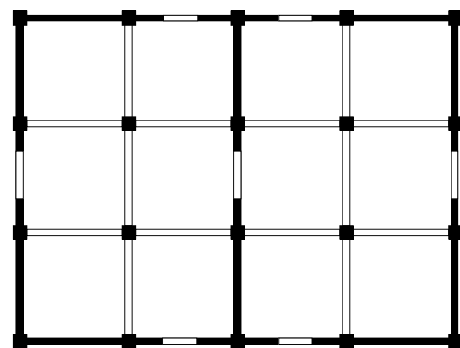
することが必要である。また、中低層の共同住宅では、壁が少ない桁行方向はルート 3、壁の多い張間方向はルート 1 を採用することがある。このように、1 つの建築物において検討方向別の構造特性に応じて異なる耐震計算ルートを採用することは可能である。

各耐震計算ルートに適した鉄筋コンクリート造建築物の構造特性は、次のように整理できる。

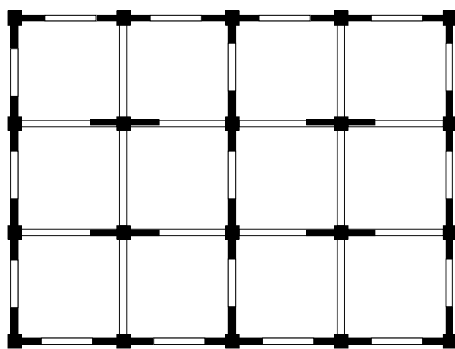
- ①ルート 1 耐力壁の多い建築物で、耐力壁及び柱により十分な耐力を保有する。
- ②ルート 2 剛性・重量の偏在が上下、水平方向とも少ない建築物
  - 2-1 耐力が大きく、やや靱性がある建築物で、耐力壁が地震力の多くを負担する。
  - 2-2 耐力が大きく、靱性がある建築物で、開口の大きな壁やそで壁付き柱が地震力の多くを負担する。
  - 2-3 部材の靱性に期待する建築物で、全体崩壊メカニズムが形成されるように、曲げ設計及び十分なせん断補強を行い、靱性を確保する。
- ③ルート 3 架構形式や耐力壁の負担などから必要な構造特性係数を設定して、それに応じた耐力及び靱性を確保する。



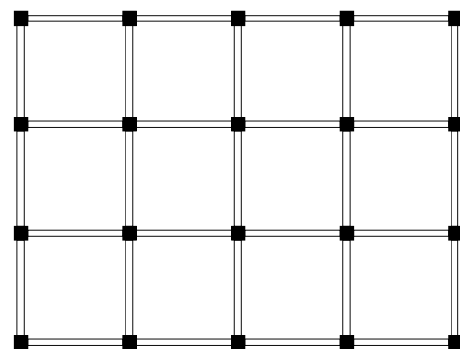
(a) 耐震計算ルート 1



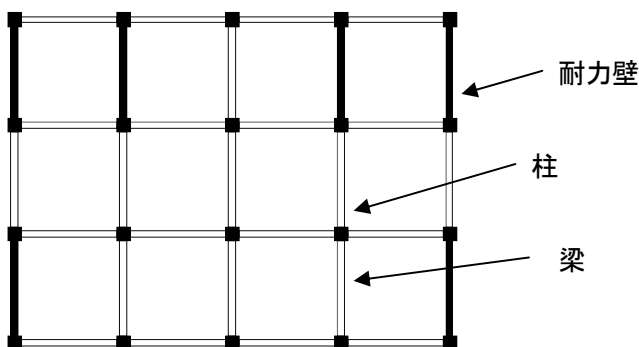
(b) 耐震計算ルート 2-1



(c) 耐震計算ルート 2-2



(d) 耐震計算ルート 2-3



(e) 耐震計算ルート 3

注：骨組の構造伏図を示す。

図 3 鉄筋コンクリート造建築物における各耐震計算ルートの骨組例

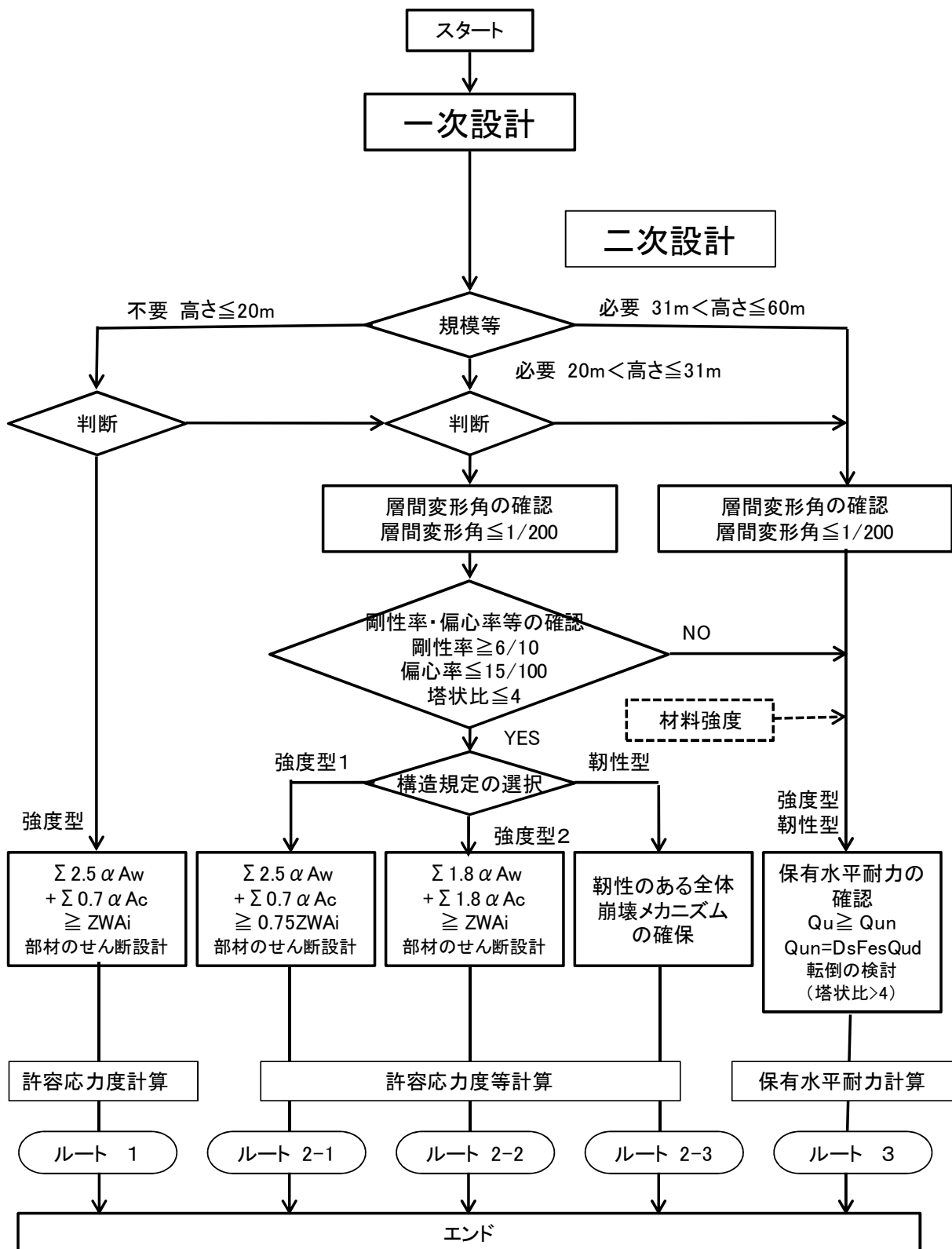


図4 鉄筋コンクリート造建築物の二次設計と耐震計算ルート



## 5. 鉄筋コンクリート造建築物の耐震計算ルート1による設計

### 5.1 耐震計算ルート1の設計

耐震計算ルート1では、高さ20m以下の中規模で耐力壁が多い建築物を対象としており、建築物の耐力を耐力壁及び柱などの水平断面積から略算的に算定して規定値を満足しているか検討を行い、十分な耐震強度を保有していることを確認する。ルート1の耐震設計では、一次設計のほか、ルート1の規定の検討を行うが、層間変形角や剛性率・偏心率、保有水平耐力などの検討は必要としない。

### 5.2 耐震計算ルート1の規定

#### (1) ルート1の規定

高さ20m以下の鉄筋コンクリート造建築物で、次に示す規定を満足する。

①地上部分の各階の耐力壁並びに柱及び耐力壁以外の壁の水平断面積に関する規定

$$\Sigma 2.5\alpha \cdot Aw + \Sigma 0.7\alpha \cdot Ac \geq Z \cdot W \cdot Ai$$

ここで、

$\alpha$  : コンクリートの設計基準強度による割り増し係数で、 $\alpha = \sqrt{(Fc/18)}$   $1 \leq \alpha \leq \sqrt{2}$

$Aw$  : 当該階の耐力壁のうち、検討方向の断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$Ac$  : 当該階の柱及び耐力壁以外のRC造壁のうち、検討方向の断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$Z, W, Ai$  : 前述した地震力の算定に用いる数値

②一次設計に用いる設計用せん断力に関する規定

$$Qd = \min(QL + n \cdot QE, Qo + Qy)$$

ここで、

$Qd$  : 短期許容応力度設計に用いる設計用せん断力 (N)

$QL$  : 長期荷重によるせん断力で、柱の場合には原則として零としてよい。(N)

$n$  : 1.5 (耐力壁では2.0) 以上の値とするが、4階建以下の場合には、2.0が望ましい。

$QE$  : 一次設計用地震力によるせん断力 (N)

$Qo$  : 単純支持とした場合の長期荷重によるせん断力で、柱では原則として零としてよい。(N)

$Qy$  : 当該柱又は梁の両側に曲げ降伏が生じた場合のせん断力で、柱の場合には柱頭に接続する梁の曲げ降伏を考慮した値としてもよい。(N)

#### (2) ルート1の規定の要点

鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性は、柱や耐力壁などの強度と靱性により確保されるが、耐力壁が多くて耐震強度が十分大きい場合には、靱性にはあまり期待することはない。ルート1の規定のうち、①の規定は耐力壁が多い建築物の耐震安全性を略算的に判別する手法である。式の左辺では、耐力壁や柱などのせん断強度を単位強度 ( $2.5\alpha, 0.7\alpha$  の値) と水平断面積から略算的に求めて、それらの和を建築物の保有強度としている。一方、式の右辺は、過去の地震被害や振動解析結果などに基づいて設定された大地震時の必要強度である。ルート1では、式の左辺で算定される建築物の保有強度が式の右辺による必要強度以上であることを確認する。また、②の規定は、部材に所定の靱性を確保するために必要な事項である。

## 6. 鉄筋コンクリート造建築物の耐震計算ルート2による設計

### 6.1 耐震計算ルート2の設計

耐震計算ルート2では、高さが31m以下である建築物のうち、剛性率及び偏心率で大きな問題の無い鉄筋コンクリート造建築物を対象としている。ルート2の耐震設計では、一次設計のほか、層間変形角の確認、剛性率及び偏心率の確認、塔状比の制限、ルート2-1、ルート2-2及びルート2-3の各規定に関する検討を行うが、保有水平耐力などの検討は必要としない。

耐震計算ルート2に関する規定では、ルート2-1及びルート2-2が耐力壁及び柱などの所要量を、ルート2-3が柱及び耐力壁の曲げ降伏に対する所要強さと柱及び耐力壁のせん断破壊に対する所要強さをそれぞれ定めている。したがって、構造設計者は、3つのルートの規定を十分に理解した上で、対象建築物の構造特性を考慮して適切なルートを選択する必要がある。

耐震計算ルート2-1は、耐力壁が比較的多い建築物を対象としている。耐震計算ルート1も同様に壁の多い建築物を対象としているが、ルート2-1は、高さが20mを超えて壁量が多い建築物、あるいは高さが20m以下で、柱・壁量がルート1の規定を満足しない建築物に適用される。大地震時に耐力壁及び柱の耐震強度のみで抵抗できるほど柱・壁量が多くないので、ある程度の靱性が求められる。

耐震計算ルート2-2は、そで壁や開口部の大きな壁が多い建築物を対象としている。ルート2-1と同様に、大地震時に耐力壁及び柱の耐震強度のみで抵抗できるほど柱・壁量が多くないので、ある程度の靱性を持たせることが必要になる。

耐震計算ルート2-3は、柱や耐力壁の配置が明快で構造計算上考慮していない壁が少ない建築物を対象としている。ルート2-1、ルート2-2のような柱・壁量の規定がないため、大地震時の耐震安全性は、柱より梁の降伏を先行させて層崩壊を防止するとともに、柱及び梁などに十分な変形能力を持たせることにより確保しようとするものである。ルート3のように直接的に保有水平耐力の計算を行わないが、建築物の全体崩壊メカニズムを確保するため、柱の曲げ耐力が梁の曲げ耐力に対して十分な余裕を持つように曲げ設計し、また、部材の変形能力を確保するために、部材がせん断破壊しないように十分余裕のあるせん断設計を行う。

### 6.2 層間変形角の確認

#### (1) 層間変形角の計算

建築物の地上部分について、一次設計用地震力によって生じる各階の層間変形角  $R$  が  $1/200$  (変形により建築物の部分に著しい損傷が生じるおそれがない場合には  $1/120$ ) 以内であることを確認する。

$$R = \delta / h$$

ここで、

$R$  : 層間変形角

$\delta$  : 一次設計用地震力により当該階に生じる層間変位 (m)

$h$  : 当該階の階高 (m)

#### (2) 層間変形角の制限

地震時に建築物の層間変形角が大きくなると、帳壁、外装材や内装材などの非構造部材、設備機器などが変形に追従できずに破損・脱落する危険性が増すので、層間変形角の最大値を制限している。

この変形制限は、一次設計用地震力に対するものであり、大地震時の変形に対する直接的な制限ではないので、地震後の機能維持に対する要求性能によっては大地震時の変形についても検討することが求められる。

各階の層間変形角は、当該層間変位の当該各階の高さに対する割合である。その際、層間変位は、地震力が作用する各階の上下の床版と壁又は柱とが接する部分の水平方向の変位差における計算方向の成分として求める。また、階の高さは、原則として層間変形角を計算する鉛直部材の当該階の床版上面位置から上階の床版上面位置までの鉛直距離とする。

### 6.3 剛性率の確認

#### (1) 剛性率の計算

建築物の地上部分について、次の式により剛性率を計算する。計算ルート2では、各階の剛性率が、0.6以上であることを確認する。

$$R_s = r_s / \overline{r_s}$$

ここで、

$R_s$  : 各階の剛性率

$r_s$  : 各階の層間変形角の逆数 ( $=h / \delta$ )

$\overline{r_s}$  : 当該建築物についての  $r_s$  の相加平均

$h$  : 当該階の階高 (m)

$\delta$  : 一次設計用地震力により当該階に生じる層間変位 (m)

#### (2) 剛性率の規定

立面的な剛性バランスが悪い建築物では、地震時に剛性の小さい階に変形や損傷が集中しやすい。そのため、剛性の立面的なアンバランスを避けるために、各階の剛性率を検討する。剛性率は、地震力の作用する方向ごと、各階の層間変形角の逆数  $r_s$  を求めて、当該階の  $r_s$  を地上部分の全階の  $r_s$  の相加平均で除した数値である。

剛性率は、当該階の水平剛性が地上部分の平均値に対して大きいか、小さいか、そのレベルを示している。剛性率が1.0より大きい階は、他の階に比べて相対的に剛性が大きい階であり、1.0より小さい階は相対的に剛性が小さく変形しやすい階である。

立面的な剛性バランスが悪い代表的な建築物としては、いわゆるピロティ階を持つ集合住宅があげられる。ピロティ階のような剛性率の小さい階には、地震のエネルギーが集中して過大な水平変形が生じる。そのため、耐震計算ルート2では、過去の地震被害などから、立面的な剛性バランスの制限値として剛性率を0.6以上としている。

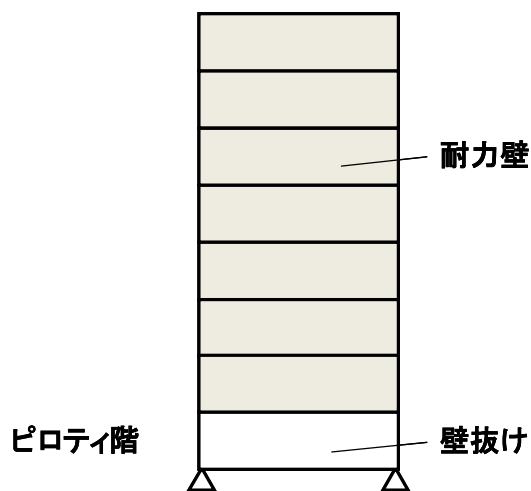


図5 立面的な剛性バランスが悪い骨組の軸組例

## 6.4 偏心率の確認

### (1) 偏心率の計算

建築物の地上部分について、次の式により偏心率を計算する。耐震計算ルート2では、各階の偏心率が、0.15以下であることを確認する。

$$Re=e/re$$

ここで、

Re : 各階の偏心率

e : 各階の構造耐力上主要な部分が支える固定荷重及び積載荷重の重心と当該剛心をそれぞれ同一水平面に投影させて結ぶ線を計算しようとする方向と直交する平面に投影させた線の長さ (cm)

re : 各階の剛心周りのねじり剛性の数値を当該各階の計算しようとする方向の水平剛性の数値で除した数値の平方根 (cm)

### (2) 偏心率の規定

平面的な剛性バランスが悪い建築物では、地震時にねじれ振動が生じて大きな損傷が生じやすい。そのため、剛性の平面的なアンバランスを避けるために、各階の偏心率を検討する。偏心率は、地震力の作用する方向ごとに、各階の偏心距離 e を弾力半径 re で除した数値である。

地震力は、当該階の重心に作用するため、重心と剛心の位置が異なる場合には、建築物は水平方向に変形するとともに、剛心周りに回転する。そのため、重心と剛心の距離（偏心距離）が大きい場合には、建築物の外周にある柱などは他の部材に比べて大きな変形が生じることになり、地震時には損傷が大きくなるのが危惧される。

偏心率は、重心と剛心の偏りのねじり抵抗に対する割合である。したがって、偏心率が小さい階は、剛心と重心が平面的に近いので、ねじれ変形が小さい階である。一方、偏心率が大きい階は、剛心と重心が平面的に離れているため、ねじれ変形が大きくなり、損傷が生じやすい階である。そのため、耐震計算ルート2では、過去の地震被害などから、平面的な剛性バランスの制限値として偏心率を0.15以下としている。

偏心率は、柱や耐震壁などの耐震要素への変形の集中度合を偏心距離と弾力半径の比率で評価する指標であるので、各階が剛床であるとの仮定に基づいている。したがって、平面的な吹抜けがある建築物では、偏心率により耐震要素への変形集中の影響を評価できない場合があるので注意する必要がある。

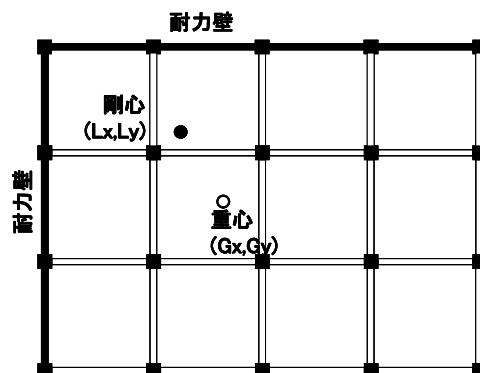


図6 平面的な剛性バランスが悪い骨組の伏図例

### (3) 偏心率の計算方法

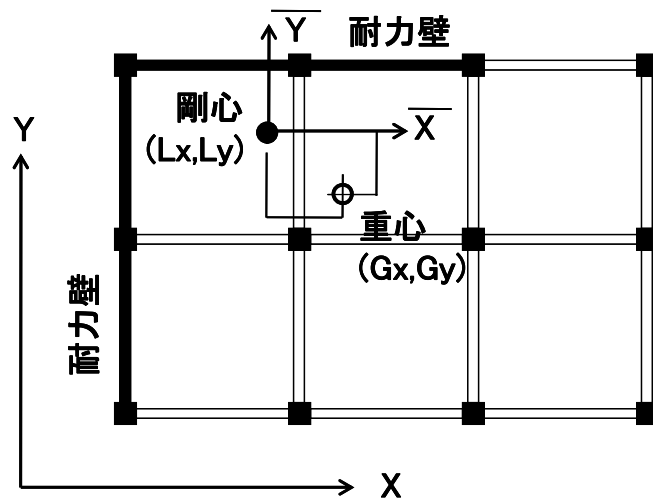


図7 偏心率の計算

#### ①重心座標の計算

重心は、地震時に作用する層せん断力の合力点である。略算的には、重心の座標は柱などの長期軸力から、次式により求めてよい。

$$G_x = \Sigma(N \cdot X) / W$$

$$G_y = \Sigma(N \cdot Y) / W$$

$$W = \Sigma N$$

ここで、

$G_x$  ,  $G_y$  : 重心の座標

$X$  ,  $Y$  : 柱などの座標

$N$  : 柱などの長期軸力

#### ②耐震要素の水平剛性の計算

柱や耐震壁などの耐震要素の水平剛性は、一次設計用地震力による応力解析結果から、次式により求めてよい。

$$K_x = Q_x / \delta x$$

$$K_y = Q_y / \delta y$$

ここで、

$K_x$  ,  $K_y$  : X方向, Y方向における柱や耐震壁などの耐震要素の水平剛性

$Q_x$  ,  $Q_y$  : X方向, Y方向における柱や耐震壁などの耐震要素の負担せん断力

$\delta x$  ,  $\delta y$  : X方向, Y方向における柱や耐震壁などの耐震要素の層間水平変位

#### ③剛心座標の計算

剛心の座標は、柱や耐震壁などの耐震要素の水平剛性から、次式により求める。

$$L_x = \Sigma(K_y \cdot X) / \Sigma K_y$$

$$L_y = \Sigma(K_x \cdot Y) / \Sigma K_x$$

ここで、

$L_x$  ,  $L_y$  : 剛心の座標

$X$  ,  $Y$  : 柱や耐震壁などの耐震要素の座標

#### ④偏心距離の計算

偏心距離は、重心と剛心の距離であり、次式により求める。

$$e_x = |L_x - G_x|$$

$$e_y = |L_y - G_y|$$

ここで、

$e_x$  ,  $e_y$  : 偏心距離

#### ⑤ねじり剛性の計算

各階の剛心周りのねじり剛性は、次式により求める。

$$K_R = \sum(K_x \cdot \overline{Y_g^2}) + \sum(K_y \cdot \overline{X_g^2})$$

ここで、

$K_R$  : 剛心周りのねじり剛性

$\overline{X_g}$  ,  $\overline{Y_g}$  : 剛心を座標原点とした柱や耐震壁などの耐震要素の座標

#### ⑥弾力半径の計算

方向別の弾力半径は、次式により求める。

$$r_{ex} = \sqrt{(K_R / \sum K_x)}$$

$$r_{ey} = \sqrt{(K_R / \sum K_y)}$$

ここで、

$r_{ex}$  ,  $r_{ey}$  : X方向, Y方向の弾力半径

#### ⑦偏心率の計算

各方向の偏心率は、次式により求める。なお、偏心距離は、検討方向に直交する方向の距離とすることに注意されたい。

$$R_{ex} = e_y / r_{ex}$$

$$R_{ey} = e_x / r_{ey}$$

ここで、

$R_{ex}$  ,  $R_{ey}$  : X方向, Y方向の偏心率

### 6.5 塔状比の制限

耐震計算ルート2では、建築物の地上部分の塔状比が4を超えないことを確認する。ここで、塔状比とは、計算方向における架構の幅に対する高さの比である。

### 6.6 耐震計算ルート2-1の規定

#### (1) ルート2-1の規定

高さ31m以下の鉄筋コンクリート造建築物で、次に示す規定を満足する。

①地上部分の各階の耐力壁並びに柱及び耐力壁以外の壁の水平断面積に関する規定

$$\sum 2.5 \alpha \cdot A_w + \sum 0.7 \alpha \cdot A_c \geq 0.75 \cdot Z \cdot W \cdot A_i$$

ここで、

$\alpha$  ,  $A_w$  ,  $A_c$  : 耐震計算ルート1で前述した値

$Z$  ,  $W$  ,  $A_i$  : 前述した地震力の算定に用いる数値

②一次設計に用いる設計用せん断力に関する規定

$$Q_d = \min(Q_L + n \cdot Q_E, Q_o + Q_y)$$

ここで、

$Q_d, Q_L, Q_E, Q_o, Q_y$  : 耐震計算ルート1で前述した値

$n$  : 2.0以上の値とするが、計算上無視した腰壁・垂れ壁が付いた柱では、2.0と階高を開口部の高さで除した数値のうち、いずれか大きい数値とする。

③塔状比が4を超えない。

## (2) ルート2-1の規定の要点

ルート2-1の規定のうち、①の規定は、ルート1の規定と同様の考え方により、耐力壁が比較的多い建築物の耐震安全性を略算的に判別する手法である。式の左辺はルート1と同等であるが、式の右辺には、0.75という係数が乗じられている。この係数0.75は、ルート2-1ではある程度の靱性の付与、剛性率及び偏心率の確認により必要強度を低減できる比率を示している。また、②の規定は、部材に所定の靱性を確保するために必要な事項である。さらに、柱や耐力壁では、せん断補強量の下限值が規定されている（柱：帯筋  $p_w \geq 0.3\%$ 、計算上無視した袖壁付き柱： $p_w \geq 0.4\%$ 、耐力壁： $p_w \geq 0.4\%$ ）。

## 6.7 耐震計算ルート2-2の規定

### (1) ルート2-2の規定

高さ31m以下の鉄筋コンクリート造建築物で、次に示す規定を満足する。

①地上部分の各階の耐力壁並びに柱及び耐力壁以外の壁の水平断面積に関する規定

$$\sum 1.8\alpha \cdot A_w + \sum 1.8\alpha \cdot A_c \geq Z \cdot W \cdot A_i$$

ここで、

$\alpha, A_w, A_c$  : 耐震計算ルート1で前述した値

$Z, W, A_i$  : 前述した地震力の算定に用いる数値

②一次設計に用いる設計用せん断力に関する規定

$$Q_d = \min(Q_L + n \cdot Q_E, Q_o + Q_y)$$

ここで、

$Q_d, Q_L, Q_E, Q_o, Q_y$  : 耐震計算ルート1で前述した値

$n$  : 2.0以上の値とするが、計算上無視した腰壁・垂れ壁が付いた柱では、2.0と階高を開口部の高さで除した数値のうち、いずれか大きい数値とする。

③塔状比が4を超えない。

## (2) ルート2-2の規定の要点

ルート2-2の規定のうち、①の規定は、そで壁を有する柱などが多い建築物の耐震安全性を略算的に判別する手法である。

本規定の①の式に0.75を乗じた式  $\sum 1.35\alpha \cdot A_w + \sum 1.35\alpha \cdot A_c \geq 0.75 \cdot Z \cdot W \cdot A_i$  について、次のように考えることができる。この式の左辺では、そで壁付き柱などのせん断強度を単位強度（ $1.35\alpha$ の値）と水平断面積から略算的に求めて、それらの和を建築物の保有強度としている。一方、式の右辺

は、過去の地震被害や振動解析結果などに基づいて設定された大地震時の必要強度である。この係数 0.75 は、ルート 2-2 ではある程度の靱性の付与、剛性率及び偏心率の確認により必要強度を低減できる比率を示している。また、②の規定は、部材に所定の靱性を確保するために必要な事項である。さらに、柱や耐力壁では、せん断補強量の下限值が規定されている（柱：帯筋  $p_w \geq 0.3\%$ ，耐力壁： $p_w \geq 0.4\%$ ，そで壁：厚さ 15cm 以上，複配筋， $p_w \geq 0.4\%$ ）。

## 6.8 耐震計算ルート 2-3 の規定

### (1) ルート 2-3 の規定

高さ 31m 以下の鉄筋コンクリート造建築物で、次に示す規定を満足する。

①柱，耐力壁は梁曲げ降伏先行とし，梁，柱，耐力壁はせん断破壊が生じない。

②一次設計に用いる設計用せん断力に関する規定

・柱，梁  $Q_d = Q_o + n \cdot Q_u$

ここで，

$Q_d$ ：短期許容応力度設計に用いる設計用せん断力 (N)

$Q_L$ ：長期荷重によるせん断力で，柱の場合には原則として零としてよい。(N)

$n$ ：原則として 1.1 以上の値とする。

$Q_o$ ：単純支持とした場合の長期荷重によるせん断力で，柱では原則として零としてよい。(N)

$Q_u$ ：原則として梁曲げ降伏時のせん断力 (N)

・耐力壁  $Q_d = n_1 \cdot Q_w$  及び  $M_d = n_2 \cdot M_w$

ここで，

$Q_d$ ， $M_d$ ：短期許容応力度設計に用いる設計用せん断力 (N)，曲げモーメント (N・mm)

$n_1$ ， $n_2$ ：1.5 以上とする。

$Q_w$ ， $M_w$ ：全体崩壊形時のせん断力 (N)，曲げモーメント (N・mm)

③塔状比が 4 を超えない。

### (3) ルート 2-3 の規定の要点

ルート 2-3 では、柱・壁量の規定がないため、大地震時における部材の降伏によるエネルギー吸収能力が十分でなければ耐震安全性の確保が難しい。そのため、①の規定に従って梁曲げ降伏先行型の全体崩壊メカニズムを形成するように、曲げ設計及びせん断設計を行う必要がある。その際、終局時には、床スラブの協力効果などにより梁の曲げ耐力が増加することを考慮して、柱の曲げ耐力を梁に比べて大きく設計することが重要である。また、柱、梁および耐力壁では、②で規定される設計用せん断力に対して短期許容応力度設計を行い、余裕のあるせん断強度を与える。そのほか、部材の靱性を確保するには、次のような点に留意することが必要である。まず、地震時に変動軸力が大きくなる外柱などは、一般に脆性破壊を生じやすいので、圧縮軸応力度が過大にならないようにする（コンクリートの設計基準強度の 0.35 倍以下）。また、付着割裂破壊は引張鉄筋比の大きな部材で生じやすいので、柱の引張鉄筋比は過大とならないようにする（引張鉄筋比 0.8%以下を推奨）。さらに、柱梁接合部についても十分な余裕を持つようにせん断設計を行い、せん断破壊を防止する。



## 7. 鉄筋コンクリート造建築物の耐震計算ルート3による設計

### 7.1 耐震計算ルート3の設計

#### (1) ルート3の規定

高さ 60m 以下の鉄筋コンクリート造建築物で、次に示す規定を満足する。

- ①建築物の地上部分については、保有水平耐力が必要保有水平耐力以上であることを確認する。
- ②規定する材料強度により保有水平耐力を計算する。
- ③地震力に対する各階の必要保有水平耐力は、次の式より計算する。

$$Q_{un} = D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud}$$

ここで、

$Q_{un}$  : 各階の必要保有水平耐力 (kN)

$D_s$  : 各階の構造特性係数

$F_{es}$  : 各階の形状係数

$Q_{ud}$  : 地震力によって各階に生じる水平力 (kN)

$$Q_{ud} = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_o \cdot W_i$$

$$C_o \geq 1.0$$

#### (2) ルート3の規定の要点

ルート3の①の規定では、各方向、各階ごとに、②の規定により求めた各階の保有水平耐力が③の規定による必要保有水平耐力以上であることを確認する。これは、建築物が終局状態に至るまでの性状を把握した上で、大地震時に崩壊に至らないよう安全性の検討を行うものである。

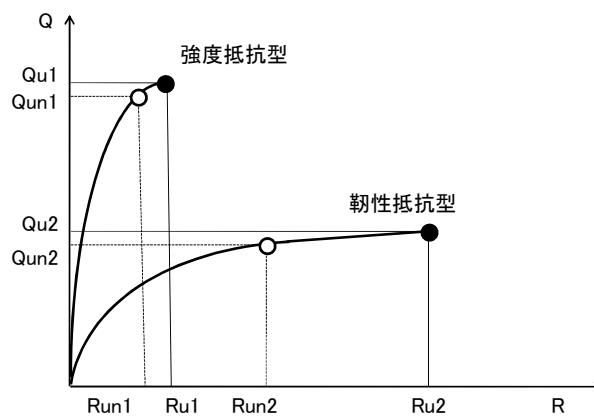


図8 建築物の荷重変形関係の概念

各階の保有水平耐力  $Q_u$  は、材料強度に基づき計算する。また、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  は、弾性応答 1G に相当する水平力  $Q_{ud}$  に、構造特性係数  $D_s$  及び形状係数  $F_{es}$  を乗じて算出する。変形能力に富んだ建築物では、塑性変形能力による地震エネルギー吸収能力などに応じて必要な水平抵抗力を低減することができる。この塑性変形能力などによる低減係数が構造特性係数である。一方、耐力壁などの立面的、あるいは平面的な偏りは、地震エネルギーの集中を招く。そのため、このような偏りが大きい階では、必要な水平抵抗力を割増して、地震エネルギーの各階への分散を図ることとする。この剛性の偏りによる割増し係数が形状係数である。この形状係数は、剛性率及び偏心率から規定されている。

## 7.2 保有水平耐力の計算

### (1) 保有水平耐力の計算方法

建築物の地上部分については、保有水平耐力は次の規定により計算する。

- ①保有水平耐力は、次の崩壊形に達する時における部材の水平力の和のうち、最小値とする。
- イ 全体崩壊形 梁端部、最上階柱頭、一階柱脚・壁脚に塑性ヒンジが生じ、建物全体が水平力に耐えられなくなる状態
  - ロ 部分崩壊形 特定の階における全ての柱頭や柱脚の塑性ヒンジ発生やせん断破壊等により、特定階が水平力に対して耐えられなくなる状態
  - ハ 局部崩壊形 いずれかの部材が破壊して常時荷重に対して架構が耐えられなくなる状態
- ②増分解析に用いる外力分布は、 $A_i$  分布に基づく地震力分布とする。ただし、下記のイ、ロ、ハの場合には必要保有水平耐力分布 ( $D_s \cdot F_{es} \cdot A_i$  分布) を用いてもよい。
- イ  $A_i$  分布により、全体崩壊形になる
  - ロ  $A_i$  分布により、部分崩壊形あるいは局部崩壊形になる場合、崩壊階以外の階では、全ての梁端部ならびに最上階の柱頭、最下階の柱脚に塑性ヒンジが生じる
  - ハ 特別な調査または研究による
- ③柱、梁及び耐力壁、又は接合部が架構の崩壊状態の確認に当たって、せん断破壊などによる急激な耐力低下が生じるおそれのないことを確かめる。
- ハ 下記の式により、部材がせん断破壊を生じないことを確かめる。
    - (イ) 部材の両端にヒンジが生じる状態  
梁  $Q_b \geq Q_0 + 1.1QM$  柱  $Q_c \geq 1.1QM$
    - (ロ) (イ) 欄に掲げる状態以外の状態  
梁  $Q_b \geq Q_0 + 1.2QM$  柱  $Q_c \geq 1.25QM$  耐力壁  $Q_w \geq 1.25QM$
- ここで、
- $Q_0$  : 長期せん断力 (N)
  - $QM$  : 保有水平耐力時せん断力 (N)
  - $Q_b$  : 梁のせん断耐力 ( $1 \leq M/(Qd) \leq 3$ ) (N)  
 $Q_b = (0.068pt^{0.23}(Fc+18) / (M/(Qd)+0.12) + 0.85\sqrt{(pw \sigma wy)}) b j$
  - $Q_c$  : 柱のせん断耐力 ( $\sigma_o$  平均軸応力度  $\leq 0.4Fc$ ) (N)  
 $Q_c = Q_b + 0.1 \sigma_o b j$
  - $Q_w$  : 耐力壁のせん断耐力 ( $t_e$  面積等価壁厚  $\leq$  壁厚さの 1.5 倍) (N)  
 $Q_w = (0.068pte^{0.23}(Fc+18) / (\sqrt{M/(QD)+0.12}) + 0.85\sqrt{(pwh \sigma wyh)} + 0.1 \sigma_o) t_e j$
- $Q_b, Q_c, Q_w$  の算定式の詳細は文献 1)による。
- ニ 一次設計に用いる設計用せん断力に関する規定 (ルート 1 の規定参照)  
 $QD = \min(QL + n \cdot QE, Q_0 + Q_y)$  の  $n$  は 1.5 (耐力壁 : 1.0) 以上とする。
- ④塔状比が 4 を超える建築物では、イまたはロの層せん断力が作用する場合に、地盤及び杭などが極限支持力を超えないことを確かめる。
- イ 標準せん断力係数を 0.3 以上とした層せん断力
  - ロ 保有水平耐力に相当する層せん断力

## (2) 保有水平耐力の計算方法の要点

### 1) 保有水平耐力の計算方法の原則

保有水平耐力は、①で規定するように、当該建築物の全体又は一部が地震力により崩壊メカニズム（全体崩壊形、部分崩壊形、局部崩壊形）を形成する場合において、各階の柱及び耐力壁などが負担する水平せん断力の和として求められる値である。

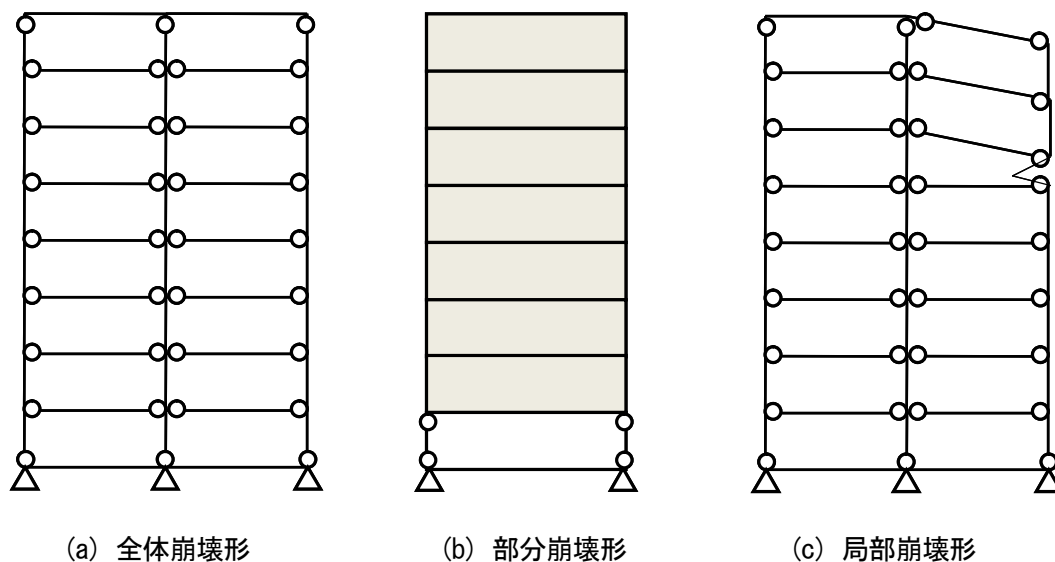


図9 建築物の崩壊メカニズムの例

保有水平耐力は原則として、増分解析法により計算する。その際、留意すべき事項（a～j）を以下に示す。なお、節点振り分け法、仮想仕事法、極限解析法などを用いることも可能であるが、各計算法の特徴を理解して適切に用いる必要がある。

- a) ②の規定により、 $A_i$  分布に基づく地震力分布を用いる。この場合、各層の保有水平耐力の分布は、 $A_i$  分布に基づく分布に比例した値となり、必要保有水平耐力の計算において各層ごとに  $D_s$  や  $F_{es}$  を求めていることと整合しない建築物もある。そのため、②の規定を満足する場合には、必要保有水平耐力分布に基づく外力分布を例外的に用いることも許容されるが、十分な検討が必要である。
- b) 地震力と部材応力は釣合い条件を満足する。なお、節点振り分け法ではかなり困難である。
- c) 部材応力は終局耐力を超えない。なお、仮想仕事法では崩壊形の仮定に注意が必要である。
- d) 建築物の一部又は全体が崩壊メカニズムの形成条件を満足する（全体崩壊形、部分崩壊形、局部崩壊形）。部分崩壊形又は局部崩壊形の場合には、該当階に崩壊メカニズムが形成された時点の層せん断力を保有水平耐力とする。
- e) 直交二方向について正負の地震力を対象とする。
- f) 一般に、上下方向の地震力は考慮しなくてもよい。なお、大スパン構造では別途考慮する。
- g) 地下・基礎構造も保有水平耐力の検討が望ましい。
- h) 通常、長期荷重の影響は考慮しなくてもよい。なお、ピロティ階や大スパン構造では別途考慮する。
- i) 脆性破壊する場合は、脆性部材が破壊する変形時において保有水平耐力を求める。ただし、脆性部材の鉛直力を代替部材が支持できる場合には、脆性部材を無視してもよい。なお、脆性破壊後は水平力を保持していると仮定してはならない。
- j) 耐力壁の境界梁や直交梁の効果は適切に考慮する。

## 2) 部材のせん断破壊の防止

建築物に靱性を期待する設計では、崩壊メカニズムを形成し、さらに大地震に期待される  $D_s$  値相当の塑性変形までせん断破壊を防止する必要がある。その際、ヒンジ以外の部分がせん断破壊することも防止しなければならない。そのため、高次モード、材料強度の上昇、計算上考慮していない部材等によるヒンジ以外の部分の応力増大、強度算定式の精度などを考慮する必要がある。そこで、③の規定では、保有水平耐力時の部材応力を適切に割り増した設計用応力を用いてせん断設計を行い、部材のせん断耐力の余裕を確保する。この割増し係数は、両端ヒンジとなる梁などでは 1.1 以上、それ以外の柱などでは 1.25 以上としており、 $D_s$  が小さいほど大きな値とすることが望ましい。なお、③のせん断耐力式と同等の安全性が確かめられる耐力式を用いる場合には、ヒンジ部材は靱性能の確保、非ヒンジ部材は崩壊メカニズム時の応力増大を考慮した上で、耐力式の余裕度などを勘案して、設計用応力の割増し係数を定めることができる。

一次設計に用いるせん断力の割増し係数  $n$  は、③のハの規定により柱や梁では 1.5 以上、耐力壁では 1.0 以上とする。

## 3) 転倒に対する検討

⑤の規定により、塔状比が 4 を越える建築物では、浮上りが生じないものとして崩壊形を求めるほかに、建築物全体の浮上りによる転倒防止の検討を行う。具体的には、標準せん断力係数を 0.3 以上とした層せん断力、あるいは保有水平耐力に相当する層せん断力により、全体転倒が生じないことを確認する。その際、地盤の圧壊は、進行性破壊に至る恐れがあるので避けなければならない。

## 7.3 必要保有水平耐力の計算

### (1) 構造特性係数の算出方法

鉄筋コンクリート造である階の構造特性係数  $D_s$  は、次の規定により算出する。

①柱、梁の種別 (FA~FD) を区分に応じて定める。ただし、梁崩壊形が明らかな柱の種別は梁の種別による。種別が異なる柱、梁が接合される柱は、塑性ヒンジが生じる部材の種別に応じて定める。FC 及び FD が存在しない場合は FB、FD が存在せず、FC が存在する場合は FC、FD が存在する場合は FD とする。

柱及び梁の区分は、破壊の形式及び各条件から決定する。

・破壊形式：FA~FC は、せん断破壊、付着割裂破壊、圧縮破壊等急激な耐力の低下のおそれのある破壊が生じない。FD は、それ以外とする。

・条件 柱 FA :  $h_o/D \geq 2.5$     $\sigma_o/F_c \leq 0.35$     $pt \leq 0.8\%$     $\tau_u/F_c \leq 0.1$

FB :  $h_o/D \geq 2.0$     $\sigma_o/F_c \leq 0.45$     $pt \leq 1.0\%$     $\tau_u/F_c \leq 0.125$

FC :  $h_o/D$  -    $\sigma_o/F_c \leq 0.55$     $pt$  -    $\tau_u/F_c \leq 0.15$

梁に塑性ヒンジが発生することが明らかな場合、 $h_o/D$  のかわりに  $2M/(QD)$  を用いることができる。

梁 FA :  $\tau_u/F_c \leq 0.15$    FB :  $\tau_u/F_c \leq 0.2$    FC : -

②耐力壁の種別 (WA~WD) を区分に応じて定める。

耐力壁の区分は、破壊の形式及び各条件から決定する。

・破壊形式：WA~WC は、せん断破壊その他の急激な耐力の低下のおそれのある破壊が生じない。WD は、それ以外とする。

・条件 耐力壁 WA :  $\tau u/Fc \leq 0.2$  WB :  $\tau u/Fc \leq 0.25$  WC : -

壁式構造の耐力壁 WA :  $\tau u/Fc \leq 0.1$  WB :  $\tau u/Fc \leq 0.125$  WC :  $\tau u/Fc \leq 0.15$

③柱及び梁，並びに耐力壁の部材群としての種別を部材の耐力の割合に応じて定める。ただし，FD，WD について，局部崩壊が生じる場合には，部材群は D とする。

部材群 A は  $\gamma A \geq 0.5$  かつ  $\gamma c \leq 0.2$ ，部材群 B は  $\gamma c < 0.5$ ，部材群 C は  $\gamma c \geq 0.5$  とする。

$\gamma A = FA/(FA+FB+FC)$ ， $WA/(WA+WB+WC)$ ， $\gamma c = FC/(FA+FB+FC)$ ， $WC/(WA+WB+WC)$

④各階の  $D_s$  はイからハまでのいずれかによって定める。

イ 耐力壁のない場合 FA : 0.3 FB : 0.35 FC : 0.4 FD : 0.45

ロ 壁式構造 WA : 0.45 WB : 0.50 WC : 0.55 WD : 0.55

ハ 耐力壁のある場合

柱及び梁の部材群としての種別，耐力壁の部材群としての種別，耐力壁の水平力負担率に応じて，0.30 から 0.55 までの間の数値が規定される。詳細は文献 1)による。

⑤増分解析では，地震層せん断力係数 ( $A_i$  分布による) を用いる。

なお，①と②の各条件の詳細は，文献 1)による。

## (2) 構造特性係数の算出方法の要点

鉄筋コンクリート造の構造特性係数  $D_s$  は，主として架構の塑性変形能力に依存するが，その塑性変形能力は，架構を構成する柱，梁及び耐力壁の塑性変形能力とその割合によって支配される。したがって，各部材の塑性変形能力の平均的な値によって分類させる架構の性状と耐力壁が負担する水平力の割合に基づき  $D_s$  が算出される。

各階の構造特性係数を求めるには，その階が崩壊形に達する場合の応力分布を求める必要がある。崩壊メカニズムが全体崩壊形の場合には，全ての階に十分なヒンジが生じているため，この応力を用いて①と②の規定により部材種別を判定し，③と④の規定により  $D_s$  の判定を行うことができる。一方，部分崩壊形，局部崩壊形の場合には，不安定となっていない部分架構が存在するので，別途適切に塑性ヒンジの発生を仮定するなど，不安定となる状態を想定し，部材の種別の判定， $D_s$  の判定を行う必要がある。具体的には，以下のような方法により判定する。

a) 部分崩壊メカニズム時の応力分布と部材耐力をもとに判定する方法で，応力比（応力/耐力）の大きい破壊形式が先に生じると判定する。なお，大半の階でヒンジが生じており，層間変形角が 1/50 以上である場合に用いる。

b) 崩壊層の耐力を大きく仮定して判定する方法で，増分解析を行い，未崩壊層の崩壊メカニズムを覚醒させ，その時点の応力状態から部材種別を判定する。

## (3) 部材の変形能力確保の留意事項

a) 柱及び梁

引張鉄筋比 ( $pt$ ) の上限値は付着割裂破壊，軸方向応力度 ( $\sigma_0$ ) の上限値はせん断圧縮破壊，その他はせん断破壊に関する制限である。付着割裂破壊やせん断破壊を避けるには，せん断スパン比 ( $M/(QD)$ ) が 1.5~3.0 の部材では， $pt$  は 1.0%以下としたい。 $\sigma_0$  が大きい部材はせん断圧縮破壊を生じやすいので， $0.4F_c$  ( $F_c$  : コンクリートの設計基準強度) 程度にとどめたい。短柱のようなせん断スパン比が 1.0 以下の部材は，せん断破壊を生じやすい。

## b) 柱梁接合部

架構の靱性を確保するため、原則として柱梁接合部は破壊させてはならない。柱梁接合部のせん断設計用せん断力の算定では、応力割増し係数を 1.1 以上考慮する。柱梁接合部のせん断補強筋比は 0.2% 以上、補強筋の間隔は 150mm 以下、隣接柱の帯筋間隔の 1.5 倍以下とする。また、柱梁接合部に折曲げ定着する梁主筋では、下端筋は上向きに折曲げ定着し、水平投影長さは柱せいの 3/4 倍以上とする。柱梁接合部に通し配筋した梁主筋が降伏する場合には、梁主筋の柱梁接合部内における付着劣化を抑制することが重要であり、柱せいに応じて梁主筋の径を制限すること等が求められる。

## c) 耐力壁

耐力壁の変形性能の改善には、主としてせん断破壊を防止することが重要である。最大耐力時の平均せん断応力度を小さく抑える（上限値の目安は  $0.2F_c$  程度、 $F_c$ ：コンクリートの設計基準強度）とともに、曲げ破壊型又は基礎回転型になるように設計することが必要である。また、耐力壁周辺柱の有無は、せん断圧縮破壊する時の変形限界に対して大きな影響を持つので注意されたい。

耐力壁の強度や変形能力の検討には、①周辺架構と耐力壁を一体とした検討、②直交梁の押さえ効果など立体的な挙動の評価、③有開口耐力壁における開口の位置、開口周りの補強筋量等に注意が必要である。

### (4) 部材の靱性の確保

$D_s$  に相当する適切な塑性変形能力を確保するには、各部材がせん断破壊や付着割裂破壊、圧縮破壊等の脆性的な破壊をせずに、さらに、ヒンジ部分については十分な塑性回転能力を有することが必要である。脆性的な破壊を避けるためには、部材には設計用応力に対して十分な強度を保有させる。設計用応力には通常考慮されない要因は、①地震動の特性の不確定さ、②材料特性に起因する復元力特性のばらつき、③解析モデルに起因する応力算定のばらつき、④高次モードの影響による静的応力と動的応力の違い、⑤地震力の二方向入力の影響、⑥施工性に起因する配筋量の変化 などがある。また、強度算定式は、部材の実際の強度の下限値をどの程度おさえているのか、強度算定式の精度と設計用応力の関係に注意する必要がある。

ヒンジ部分は、せん断破壊、付着割裂破壊が曲げ降伏に先行しないようにし、さらに、十分な塑性変形能力（曲げ靱性）を確保する。一般に、鉄筋コンクリート造では、圧縮側コンクリートが圧壊すると、靱性の確保が困難となる。梁では、圧縮鉄筋が適量配筋されていれば、かなり大きな靱性が期待できる。柱、耐力壁は、塑性回転能力（曲げ靱性）は、軸力の影響が大きく、二方向曲げ、繰返し曲げ、軸力変動等が重要な影響因子である。具体的には、曲げ靱性の検討は、コンクリートの圧縮ひずみがある一定限度内に抑えるなどの方法によっている。

### (5) 形状係数の算出方法

階の形状係数  $F_{es}$  は、次の規定により算出する。

①建築物の各階の  $F_{es}$  は、次の式により計算する。

$$F_{es} = F_s \cdot F_e$$

ここで、

$F_{es}$  : 各階の形状係数

$F_s$  : 各階の剛性率に応じた値

$F_e$  : 各階の偏心率に応じた値

②各階の剛性率に応じた値  $F_s$  は、次の式により計算する。

$$R_s \geq 0.6 \text{ の場合 } F_s = 1.0$$

$$R_s < 0.6 \text{ の場合 } F_s = 2.0 - R_s / 0.6$$

ここで、

$R_s$  : 各階の剛性率

③各階の偏心率に応じた値  $F_e$  は、次の式により計算する。

$$R_e \leq 0.15 \text{ の場合 } F_e = 1.0$$

$$0.15 < R_e < 0.3 \text{ の場合 } F_e = 1.0 + 0.5(R_e - 0.15) / 0.15$$

$$0.3 \leq R_e \text{ の場合 } F_e = 1.5$$

ここで、

$R_e$  : 各階の偏心率

## (6) 形状係数の算出方法の要点

形状係数  $F_{es}$  は、建築物の立面的及び平面的な剛性バランスによる必要保有水平耐力の割増し係数である。具体的には、 $F_{es}$  は①に規定したように、立面的な剛性バランスを表す剛性率  $R_s$  に応じた値  $F_s$  と平面的な剛性バランスを表す偏心率  $R_e$  に応じた値  $F_e$  の2つの値を乗じて計算される。 $F_s$  の値は②の規定により  $1.0 \leq F_s \leq 2.0$ 、 $F_e$  の値は③の規定により  $1.0 \leq F_e \leq 1.5$  をとるので、 $F_{es}$  の値は  $1.0 \leq F_s \leq 3.0$  となる。したがって、立面的にも平面的にも剛性バランスの悪い建築物では、必要保有水平耐力の割増し係数が最大 3.0 となり、極めて厳しいペナルティが課せられるので、実務設計的には、構造計画の見直し等、剛性バランスの改善が求められることになる。

形状係数の算定に用いられる剛性率や偏心率の算定には、部材の剛性の評価が重要である。特に、鉄筋コンクリート造建築物では、鉄筋コンクリート造の腰壁やそで壁等の非耐力壁に関する剛性評価が剛性率又は偏心率の算定結果に与える影響が大きい。そのため、非耐力壁の取り扱いには、十分に注意し、必要に応じて複数の剛性評価ケースについて検討する等、耐震的に安全側と判断できる剛性評価を行うような設計的な配慮が求められる。

## 8. まとめ

本稿では、鉄筋コンクリート造建築物を対象として、建築物の構造特性に応じた耐震設計の流れを中心に、基本的な耐震設計の概要を述べた。特に、鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計において重要と考えられる事項、即ち、構造計算の区分、一次設計と二次設計、地震力の算定方法、耐震計算ルート、層間変形角の計算、剛性率・偏心率の計算、耐震計算ルートに応じた設計規定、保有水平耐力の計算、必要保有水平耐力の計算について、その要点を述べた。

## 参考文献

1)2007年度版建築物の構造関係技術基準解説書：国土交通省住宅局建築指導課ほか監修，平成20年5月（第2版第1刷）

2)構造設計一級建築士資格取得講習テキスト：（財）建築技術教育普及センター，平成20年6月