

## 2章 ボイラー・圧力容器の耐震設計

### 2.1 設計手法

耐震設計法は、ボイラー・圧力容器の各部位に応じて、耐震強度の検討及び耐震設計チェックポイントの検討を行う。

#### 2.1.1 耐震強度の検討

ボイラー・圧力容器の据付及び支持部を主対象として、動的解析が行われていない通常の構造物の場合、局部震度法による地震力により耐震強度計算を実施する。

#### 2.1.2 耐震設計チェックポイントの検討

ボイラー・圧力容器本体、接続配管、附属設備等、上記 2.1.1 以外の部位を対象に、耐震措置を施すため、耐震設計上注意すべき事項のチェックを実施する。

### 【解説】

#### [2.1.1]

耐震強度の検討のための計算方法では、以下の(a)から(d)の地震力が用いられ、「建築設備耐震設計・施工指針 1997 年版」以降において、その算出方法が掲載されている。

- (a) 局部震度法による地震力(動的解析が行われていない通常の構造物の場合)
- (b) 修正震度法による地震力(最も簡単な動的解析手法であり、構造物の応答に最も大きな影響を与える1次固有振動モードのみを考慮して、応答スペクトルを用いて応力を求める方法で従来「ボイラー・圧力容器地震対策の手引」で採用されていた。)
- (c) 建築物の動的解析が行われているが時刻歴応答解析が行われていない場合の地震力
- (d) 建築物の動的解析と時刻歴応答解析の両方が行われている場合の地震力

本手引の耐震強度の検討のための計算方法では、(a)局部震度法による地震力を使用する。

なお、動的解析や応答解析がなされた場合は、その地震力を使用しても差し支えない。

検討部位は、アンカーボルト、台座、架台、耐震ストッパ、レグ及びラグとする。

参考として、上記(b)～(d)の地震力の計算方法を紹介する。

#### (b) 修正震度法の地震力

修正震度法の地震力は、震度 0.3 を基に重要度係数、地域係数、建物応答倍率及び機器の応答倍率を考慮に入れ、以下の式によって求める。

$$K_h = 0.3 \cdot I \cdot Z \cdot K_1 \cdot K_2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$I$  : 重要度係数(解説表 2.1)

$Z$  : 地域係数(0.7～1.0)

$K_1$  : 建物応答倍率(1～3.33)

$K_2$  : 機器の応答倍率(1～2)

$K_h$  は、0.2～2.0 の範囲となる。

## 重要度係数(I)

ボイラー並びに飽和水や温水を扱う圧力容器にあつては、ボイラー・圧力容器の重要性、容量、ガスの性質によって解説表 2.1 を参考にして重要度係数を定める。

解説表 2.1 重要度係数(I)

| 設備の重要度         | 適用                    | Iの数值 |
|----------------|-----------------------|------|
| I <sub>a</sub> | 保安用ボイラー及び<br>PV ≥ 100 | 1.0  |
| I              | 10 ≤ PV < 100         | 0.8  |
| II             | 1 ≤ PV < 10           | 0.65 |
| III            | PV < 1                | 0.5  |

(注)1. P, V は、次のとおりとする。

P: 圧力(MPa), V: 全内容量(m<sup>3</sup>)

2. 圧力容器のうち、毒性ガス・可燃性ガス等を保有する場合は、それぞれの特性を考慮し、圧力・容量の点で上記分類によらない場合もあるが、重要度係数の数值は 0.5～1.0 の範囲で別途定める。

## 建物の床応答倍率 (K<sub>1</sub>)

建物の床応答倍率を表す係数は次式から求める。

屋外に設置されるボイラー・圧力容器では、

$$K_1 = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

とする。

屋内では、

$$\text{地上階} \quad : K_1 = 1 + (A_B - 1)(h/H) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$1 \text{ 階及び地下階} \quad : K_1 = 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

H : 建物の地上高さ(m)

h : ボイラー・圧力容器の設置される階の地上高さ(m)

A<sub>B</sub> : 建物の頂部における応答倍率を表す係数で、建物の一次固有周期 T<sub>B</sub>(s) から、次式を用いて求める。

$$T_B < 0.6 : A_B = \frac{10}{3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$0.6 \leq T_B < 1.2 : A_B = \frac{10}{3} - \frac{2}{3} \left[ \frac{T_B}{0.6} - 1 \right]^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$T_B \geq 1.2 : A_B = \frac{3.2}{T_B} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、T<sub>B</sub>: 建物の一次固有周期(s)

建物の一次固有周期  $T_B$ (s)は、実測による方法や起振機による共振などで算定する方法があるが、簡単には次の式によって求めてもよい。

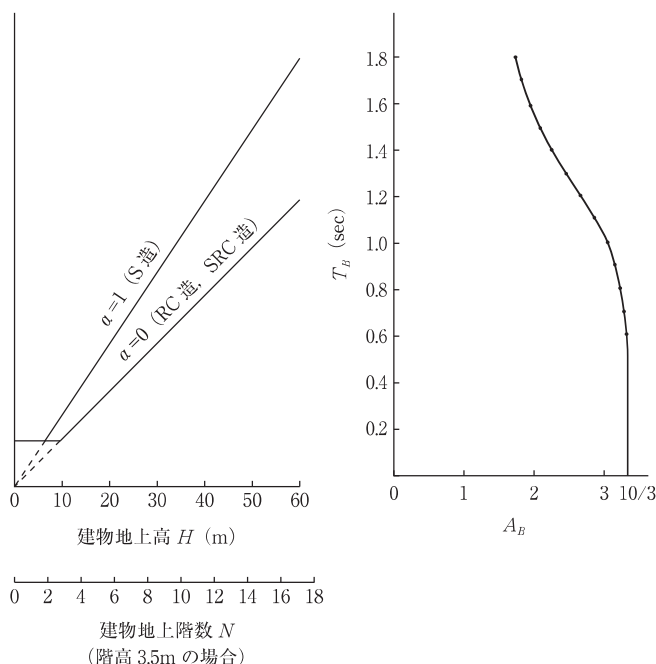
$$T_B = (0.02 + 0.01 \alpha)H \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $T_B < 0.2$  のとき、 $T_B = 0.2$  とする。

ここに  $\alpha$  は、建物のうち、鉄骨造の構造部分によって柱及びはりの大部分が構成されている階(地階を除く)の高さの合計の  $H$  に対する比を示す。

地上階のすべてが鉄骨造の場合は  $\alpha = 1$ 、地上階のすべてが鉄筋コンクリート造又は鉄骨鉄筋コンクリート造の場合は  $\alpha = 0$  である。

このほか、 $T_B$  及び  $A_B$  の簡易計算図表を解説図 2.1 に示す



〈算出式〉

$$T_B = (0.02 + 0.01 \alpha)H$$

( $T_B < 0.2$  のとき、 $T_B = 0.2$  とする)

$$A_B = \begin{cases} \frac{10}{3} & : T_B < 0.6 \\ \frac{10}{3} - \frac{2}{3} \left( \frac{T_B}{0.6} - 1 \right)^2 & : 0.6 \leq T_B < 1.2 \\ \frac{3.2}{T_B} & : 1.2 \leq T_B < \end{cases}$$

〈記号〉

- $T_B$ : 建物の一次固有周期(s)
- $H$ : 建物の地上高(m)
- $\alpha$ : 建物のうち鉄骨造の構造部分によって柱及びはりの大部分が構成される階(地階を除く)の高さの合計の  $H$  に対する比
  - $\alpha = 1$ : すべてS造
  - $\alpha = 0$ : すべてRC造, SRC造
- $A_B$ : 建物頂部における応答倍率を表す係数
  - S造: 鉄骨造
  - RC造: 鉄筋コンクリート造
  - SRC造: 鉄骨鉄筋コンクリート造

解説図 2.1  $T_B$  及び  $A_B$  の値の簡易計算図表

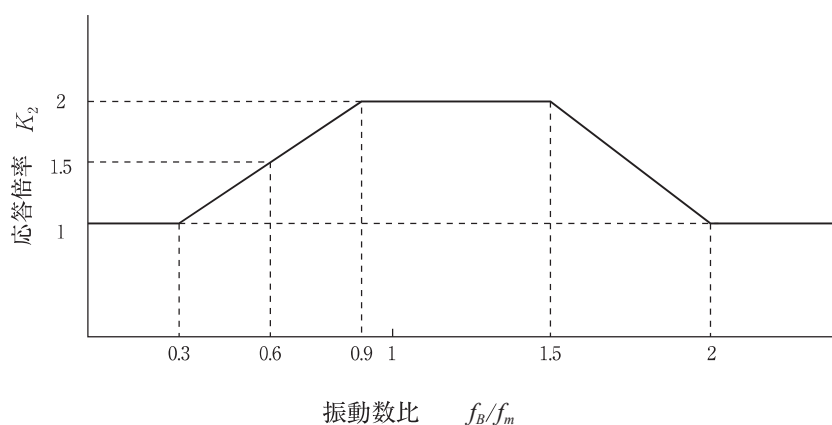
## ボイラー・圧力容器の応答倍率 ( $K_2$ )

建物内及び屋外に設置されたボイラー・圧力容器の応答倍率は、ボイラー・圧力容器の一次固有振動数に応じ、解説表 2.2 から求める。ただし、ボイラー・圧力容器の一次固有振動数が分からない場合又は測定を省略する場合は  $K_2=2$  とする。

解説表 2.2 ボイラー・圧力容器の応答倍率 ( $K_2$ )

| 設置場所 | ボイラー・圧力容器の一次固有振動数     |   |
|------|-----------------------|---|
|      | $f_m > 15 \text{ Hz}$ | $15 \text{ Hz} \geq f_m$                      |
| 屋外   | $K_2=1$               | $K_2=1\sim 2$ とし、地盤の状況に応じて定める。                |
| 建物内  | $K_2=1$               | 解説図 2.2 による(ただし、 $K_1 \cdot K_2 \geq 2$ とする)。 |

ここに、 $f_m$ :ボイラー・圧力容器の一次固有振動数(Hz)



$$\left[ \begin{array}{l} f_B: \text{建物の一次固有振動数} = 1/T_B \\ f_m: \text{ボイラー・圧力容器の一次固有振動数} \end{array} \right]$$

解説図 2.2 振動数比  $f_B/f_m$  に対する  $K_2$  の値

ボイラー・圧力容器は、一般に形が複雑で一次固有振動数が求めにくい。

そこで、起振機や加振機による共振測定、打撃による共振波計算等によって一次固有振動数を求める方法もある。

ボイラー・圧力容器の一次固有振動数が  $f_m > 15 \text{ Hz}$  の範囲では、ボイラー・圧力容器の剛性がかなり高いことを示しているので、地盤や建物床と同じ挙動をするものと考え  $K_2=1$  とした。

また、一次固有振動数が  $f_m \leq 15 \text{ Hz}$  の範囲で地盤上に建つ場合は、地盤との共振を考え、 $K_2=1\sim 2$  の間の値を定めることとした。この場合、地盤の状態について詳細に検討し、共振倍率の整合性のある値を定めてもよいが、地盤の調査を行わない場合、一例として次に示すような値を採用してよい。

15 Hz  $\geq f_m > 5$  Hz の範囲では、 $f_m$  が 15 Hz より 1 Hz 減るごとに  $K_2=1$  に 0.1 を加える。

5 Hz  $\geq f_m > 1$  Hz の範囲では、 $K_2=2$  とする。

1 Hz  $\geq f_m > 0.5$  Hz の範囲では、 $f_m$  が 1 Hz から 0.1 Hz 減るごとに  $K_2=2$  から 0.2 減らす。

0.5 Hz  $\geq f_m$  の範囲では、 $K_2=1$  とする。

この値は高圧ガスや危険物に関する関連法規等から地域係数の差、地盤係数の差を考慮して一例を示したものであって、詳細計算を行う場合はこの値によらなくてよい。

- (c) 建築物の動的解析が行われているが時刻歴応答解析が行われていない場合の地震力  
 建築物については、予備計算による設計用基準震度  $K_s$  を耐震クラスと建築物内部の床位置に応じて、下式によって地震力を求める。

$$K_s = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z \cdot D_{ss} \cdot I_s \cdot I_k \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $K_0$  : 応答解析が行われていない際の基準震度 = 0.4

$K_1$  : 応答解析が行われていない際の基準震度に対する建築物の想定各階床振動  
 応答倍率 (1.0 ~ 2.5)

$K_2$  : 設備機器の応答倍率 (防振支持 = 2.0, 頑固に据付 = 1.5)

$Z$  : 地域係数 (0.7 ~ 1.0)

$D_{ss}$  : 振動応答解析が行われていない場合、 $D_{ss} = 2/3$

$I_s$  : 設備機器の用途係数 (1.0 ~ 1.5)

$I_k$  : 建築物の用途係数 (1.0 ~ 1.5)

耐震クラスを S・A・B のいずれかに設定して、設置階により、 $K_s$  の値を丸めると解説表 2.3 のようになる。

**解説表 2.3 設計用標準震度の策定(一般の設備機器用, Z=1.0 の場合)**

|         | 床位置 | $K_0$ | $K_1$ | $K_2$ | $D_{ss}$ | $I_s \cdot I_k$ | $K_s$       |
|---------|-----|-------|-------|-------|----------|-----------------|-------------|
| 耐震クラス S | 上層部 | 0.4   | 2.5   | 1.5   | 2/3      | 2.0             | 2.0         |
|         | 中間部 |       | 1.5   |       |          |                 | (1.2) → 1.5 |
|         | 1階  |       | 1.0   |       |          |                 | (0.8) → 1.0 |
| 耐震クラス A | 上層部 | 0.4   | 2.5   | 1.5   | 2/3      | 1.5             | 1.5         |
|         | 中間部 |       | 1.5   |       |          |                 | (0.9) → 1.0 |
|         | 1階  |       | 1.0   |       |          |                 | 0.6         |
| 耐震クラス B | 上層部 | 0.4   | 2.5   | 1.5   | 2/3      | 1.0             | 1.0         |
|         | 中間部 |       | 1.5   |       |          |                 | 0.6         |
|         | 1階  |       | 1.0   |       |          |                 | 0.4         |

- (d) 建築物の動的解析と応答解析の両方が行われている場合の地震力  
 時刻歴応答解析が行われている建築物については、各階の応答加速度  $G_r$  (cm/s<sup>2</sup>) が与え

られることとなる。時刻歴応答解析結果がある場合の予備計算による震度  $K_H'$  を下式によって求め、耐震クラスを S・A・B のいずれかに設定して、解説表 2.7 を適用して  $K_H$  の値を定める。

$$K_H' = (G_f/G) \cdot K_2 \cdot D_{ss} \cdot I_s \quad \cdots \text{設備機器の場合} \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$= (G_f/G) \cdot \beta \cdot I \quad \cdots \text{水槽(受水槽, 高置水槽など)の場合} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここに、 $G_f$  : 床の応答加速度値(cm/s<sup>2</sup>)で、地震入力、建物内の揺れ増幅特性、地域係数、重要度係数等は含んでいる。

$G$  : 重力加速度値 980(cm/s<sup>2</sup>)

$K_2$  : 機器の応答倍率で、設備機器自体の変形特性や防振支持された設備機器支持部の増幅特性を考慮して、指針によるものとしている(解説表 2.5)。

$D_{ss}$  : 設備機器据付け用構造特性係数で、振動応答解析が行われていない設備機器の据付・取付の場合、ある程度の変形特性を見込んで  $D_{ss}=2/3$  と設定している。

$I_s$  : 設備機器の用途係数で、 $I_s=1.0\sim 1.5$  としている。

$\beta$  : 水槽の設置場所に応じた応答倍率で、指針による(解説表 2.6)。

$I$  : 水槽の用途係数で指針による(解説表 2.4)。

この場合あるいは他の方法の設計用水平震度  $K_H$  により、設計用鉛直震度  $K_V$  は次のようになる。

$$K_V = 1/2 \cdot K_H \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

ここで、 $K_H$  は、解説表 2.7 から求めた設計用水平震度である。

ただし、免震構造の建物において、設計用鉛直震度が、特に解析されていない場合には、修正震度法に従って設計用鉛直震度を定める。従って、上記(c)、(d)については、 $K_H$  を求めるために予備計算値  $K_S$ 、 $K_H'$  を算出する指針が与えられている。この  $K_H'$  の値により、 $K_H$  は解説表 2.7 のように 0.4、0.6、1.0、1.5、2.0 に分類されている。従って、これらの指針は、修正震度法や局部震度法による地震力に比べ、設計用水平震度の下限値が大きくなっている。

**解説表 2.4 水槽の用途係数  $I$**

| 用途           | 用途係数: $I$ |
|--------------|-----------|
| 耐震性を特に重視する用途 | 1.5       |
| 耐震性を重視する用途等  | 1.0       |
| その他          | 0.7       |

**解説表 2.5 設備機器の応答倍率  $K_2$**

| 設備機器の取り付け状態 | 応答倍率: $K_2$ |
|-------------|-------------|
| 防振支持された設備機器 | 2.0         |
| 耐震支持された設備機器 | 1.5         |

解説表 2.6 設備機器の応答倍率  $\beta$

| 場所            | 応答倍率: $\beta$ |
|---------------|---------------|
| 1階, 地階, 地上    | 2.0           |
| 中間層, 上層階, 屋上等 | 1.5           |

解説表 2.7 建物の時刻歴応答解析が行われている際の設計用水平震度  $K_H$

| $K_H$ の値       | 設計用水平震度 $K_H$ |         |         |
|----------------|---------------|---------|---------|
|                | 耐震クラス S       | 耐震クラス A | 耐震クラス B |
| 1.65 超         | 2.0           | 2.0     | 2.0     |
| 1.10 超～1.65 以下 | 1.5           | 1.5     | 1.5     |
| 0.63 超～1.10 以下 | 1.0           | 1.0     | 1.0     |
| 0.42 超～0.63 以下 |               | 0.6     | 0.6     |
| 0.42 以下        |               |         | 0.4     |

**【解説】**

**[2.1.2]**

耐震設計チェックポイントの検討は、設計する際の便宜を考慮して、リストアップした耐震性向上策の検討項目チェックによることとする。チェックポイントの部位は、ボイラー及び圧力容器の本体、配管、バルブ及びダクト、地盤及び基礎、タンク類、回転機器類、煙突及び煙道、電気計装類等である。

ボイラー・圧力容器の耐震設計は、原則として次の手順で行う。

(a) 耐震強度の検討

- ① ボイラー・圧力容器の仕様及び耐震設計上必要な諸元の確認を行う。
- ② ボイラー・圧力容器の重要度を考慮し、重要度別に分類する。
- ③ 据付け方法による分類
- ④ 設計用地震力を決定する。
- ⑤ 据付け及び支持部に対する各部位の応力を算定する。
- ⑥ 据付け及び支持部の構造を決定する。

(b) 耐震設計チェックポイントの検討

- ① 据付け及び支持部以外の部位について、チェックポイントを検討する。
- ② ボイラー・圧力容器本体、付属設備等の耐震性を確認する。
- ③ ボイラー・圧力容器の設備全体を含めた耐震性能を確認する。