

# 弁類の耐震設計について

株式会社プラント耐震設計システムズ  
池 田 雅 俊

## 1. まえがき

兵庫県南部地震で多くの配管の被害を受けたことから、配管に関する安全性・健全性に対する地震対策の見直しが行われた。弁体等の強度の確保と共に配管系被害の拡大防止のためにバルブの機能維持の必要性が認識された。

弁類の地震動の主たる影響は次の(a)から(g)のように挙げることができる

- (a) 地震荷重により配管と弁の継手部（フランジ継手・溶接継手等）に損傷・変形が生じ配管内容物が漏えい
- (b) 地震荷重により弁体に亀裂・損傷等が生じ配管内容物が漏えい
- (c) 地震荷重により弁棒のボンネット貫通部で変形等が生じ配管内容物が漏えい
- (d) 地震荷重により弁座部に変形等が生じ弁機能が喪失
- (e) 地震荷重によりヨーク部・ボンネットに損傷・変形が生じ弁棒の移動が阻害
- (f) 地震荷重により駆動部・弁棒・連結機構が損傷して駆動動作が阻害
- (g) 弁が揺れてその反力が配管に作用して配管系に損傷が生じ配管内容物が漏えい

これらの影響に対してそれぞれ対策が必要である。しかしながら、弁類は汎用製品であり、本来、地震に対して十分な強度をもっているため、いくつかの配慮をすることにより最低限の確認で耐震性を確保できる。

## 2. 地震時の弁類の挙動

弁類の耐震設計で次のような場合に分けて考えることにする。

- ① 配管を通して支持されている弁のうち、手動弁のように弁の重心が管軸から離れていない弁
- ② 配管を通して支持されている弁のうち、駆動弁のように弁の重心が管軸より離れている弁（偏心弁という。）
- ③ 外部より駆動部が直接支持されている弁

### 2.1. 配管を通して支持されている弁のうち、手動弁のように弁の重心が管軸から離れていない弁

手動弁のような通常の弁は、固有振動数が十分高く地震動に対して加速度が大きく増幅するようなことはなく通常、弁そのものに対しては耐震強度計算は行わない。

配管系に対しては、このような弁類は配管断面の中心点にある質点とみなして設計震度×弁類全重量の地震力が作用すると考えればよい。

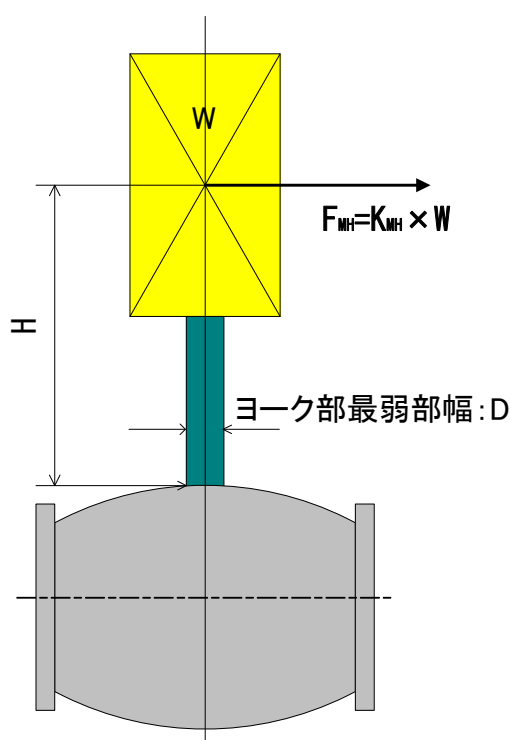
## 2.2. 配管を通して支持されている弁のうち、駆動弁のように弁の重心が管軸より離れている偏心弁

制御弁や緊急遮断弁などのように駆動部の重量が大きく、かつ、当該駆動部の重心が配管の軸心から遠く離れているような場合は、固有振動数が比較的低下するため、地震に際して駆動部に大きな慣性力が生じ、弁類や関連配管に大きな応力が発生する。このため弁単体としてできるだけ地震動による揺れが励起されないよう固有振動数を高く（通常 20Hz 以上に）することにより耐震強度計算は省略できる。（一般に固有周期が 20Hz 以上ではかなり剛性の高い構造物と見なすことができ、当該構造物は、ほとんど地震動により励振されない。）

逆に固有振動数が 20Hz 未満の弁にあつては、地震動による慣性力に対し、弁本体と配管軸心より偏心した位置にある重量部（以下「駆動部等偏心重量部」という）との間の最弱部の応力を算定し、耐震強度計算を行う。強度が確保されれば、弁類の機能は確保されるものとみなすことができる。

一般に、ボンネットフランジ面から上部の駆動部等偏心重量部の重心高さが  $40\sqrt{D}$  (mm) 以下の場合、当該弁の固有振動数は 20 Hz 以上であると見なすことができる。ここで、D (mm)は、ボンネットフランジ面から上部の部品の最小幅とする。

この 20 Hz に関する判定式の根拠は、次のとおりである。



弁類の振動モデルは図-1 に示すように、駆動部分の重量を  $W$  とし、弁のボンネットフランジ面から駆動部等偏心重量部の重心までの高さを  $H$  とするとき、固有振動数の算定のため弁を、断面 2 次モーメント  $I$  で長さ  $H$  の片持ち梁に  $W/g$  の質量が付加された 1 質点系ばねマスにモデル化する。

このとき、固有振動数  $f$  は  $(2\pi f)^2 = \frac{g}{W} k$ 、

ばね定数  $k$  は  $k = \frac{3EI}{H^3}$  であり、自重（1 g の地震力）が水平方向に作用するときの応力

$\sigma$  は、安全に評価して、高々  $\sigma = \frac{WH}{2I/D}$  とす

ることができる。

図-1 弁類の振動モデル

これらの式から、 $f = \sqrt{\frac{3Eg}{8\pi^2\sigma} \cdot \frac{\sqrt{D}}{H}}$  と算定できる。この式で、 $\sigma$  は、偏心重量を応力の単

位で代表したものと考えられ、駆動弁の固有振動数に関する実績データを考慮して、低振動数がわに算定されるよう、 $\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$  とすると、 $f = 800 \frac{\sqrt{D}}{H}$  と定式化でき、20Hz 以上は、 $H \leq 40\sqrt{D}$  と言い換えることができる。

配管系に対して、このような弁類は、弁本体重量（弁体及びボンネット等の重量）が配管断面中心の質点と駆動部、ヨーク、弁棒などの重量がそれらの重心の位置の質点と見なし両質点は剛性 EI の梁で結ばれていると考えればよい。

### 2.3. 外部より駆動部が直接支持されている弁

頭部が直接支持されている弁の場合、駆動部そのものは揺れたりして移動しないが、配管側が揺れたり熱移動や地盤変状による移動のために駆動部と弁体の間に相対強制変位が発生して損傷したり機能の喪失が生じるので注意が必要である。

駆動部を外部より支持する場合は、駆動部を固定点としヨーク部を駆動部と配管を結ぶ梁にモデル化して配管系の応答解析を行い、このときにヨーク部（梁部）に発生する応力に対して配管支持構造物としての応力評価を行なう必要がある。

## 3. 弁類周り配管系の耐震設計

弁類に係る耐震設計は、弁類が加振源として配管の応答に与える影響の評価と配管の揺れに伴う弁類が揺れの影響の評価がある。ここでは、前者について耐震設計上配慮すべきことがらを述べる。

### (1) 重量弁に対する配慮

配管の途中に支持点なしに重量の大きい弁があると、配管系としての固有周期は長くなり、配管は大きく揺れて、配管に大きな曲げ応力が発生し損傷したり、他の構造物に接触して思わぬ事故につながることもある。

重量の大きい弁については、弁類近傍に支持点を設けたり、構造物から直接弁体を支持することが望ましい。このような対策が困難な時には配管に関する強度計算で確認する。

### (2) 偏心重量弁に対する配慮

口径が比較的大きく、かつ偏心荷重の大きい制御弁、緊急遮断弁などの弁類は揺れやすく、配管にねじれモーメントを生じさせるとともに、ねじれに伴う加速度の増幅によって、弁自身に作用する地震荷重を増大させることになる。たとえば、図-2 のように偏心部を適切に支持する等により、これらを防ぐこと

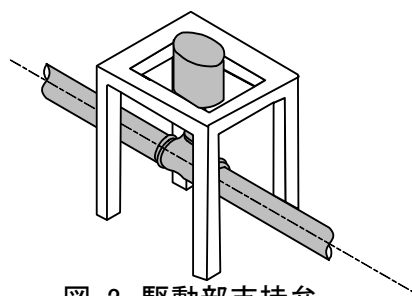


図-2 駆動部支持弁

ができる。

このような対策が困難な時には配管及び弁に関する強度計算で確認する。

### (3) 頭部支持弁に対する配慮

偏心弁の頭部を支持する場合、配管が揺れたり、熱移動や地盤変状に伴う移動があったりすると配管と偏心弁頭部の間に強制相対変位が生じ、配管や弁体・駆動部（ヨーク・ボンネット部などに大きな応力が発生することになる。近傍に配管サポートを設け配管の移動を拘束したりして、頭部支持部と配管に相対変位のない様に配慮することが望ましい。このような対策が困難な時には配管及び弁に関する強度計算で確認する。

### (4) ノズル近傍の弁類に対する配慮

緊急遮断弁、元弁が揺れることによりノズルに過大な応力が発生するので、緊急遮断弁、元弁を貯槽本体から直接支持する等を考慮する。このような対策が困難な時には地震時に貯槽ノズルに作用する反力に対して強度が十分かを確認する。

### (5) 地盤変状に対する配慮

地盤の変状に基づく配管の大きな変形又は支持構造物の沈下、移動、傾斜等により、駆動部（計測系ケーブルや計器等一や駆動ガスのチュービング等を含む）が他の構造物に接触し機能に支障が出るようなことがある。地盤変状量を予測して十分間隙を設けるようにすることが望ましい。

## 4. 弁類単体としての耐震計算

手動弁のような通常の弁は、固有振動数が十分高く地震動に対して加速度が大きく増幅するようなことはない。駆動部の重量が大きく、かつ、当該駆動部の重心が配管の軸心から遠く離れているような弁の場合は、固有振動数が比較的低下するため、地震に際して駆動部に大きな慣性力が生じる。

駆動部の重量が大きく、かつ、当該駆動部の重心が配管の軸心から遠く離れているような固有振動数が 20Hz 未満 ( $H > 40\sqrt{D}$  の場合) の弁にあっては、地震動による慣性力に対し、弁本体と配管軸心より偏心した位置にある重量部（以下「駆動部等偏心重量部」という）との間の最弱部の応力を算定し、耐震性を評価することが一般に行われている。強度が確保されれば、弁の遮断性能は確保されるものとみなしている。

駆動部偏心重量部を外部より支持する場合には、配管系の計算ではバルブ及び当該駆動部重量支持構造を配管系モデルに組み込みその応答計算結果（力及び変位等）から、駆動部偏心重量部の支持構造及びヨーク弁棒等の通常の構造物としての評価を行う。

### 4.1. 弁類の地震力の計算

設計修正水平地震力

弁に作用するの設計地震力は次式により計算できる。

$$f_H = \beta_s \mu K_{MH} W_H$$

$$f_v = \beta_9 K_{MV} W_H$$

ここで、

$f_H$  : 弁の設計修正水平地震力 (N)

$f_v$  : 弁の設計修正鉛直地震力 (N)

$\beta_8$  : 弁の配管支持構造物に対する水平方向の応答倍率である。配管の応答倍率の値 (不明の場合は 2.0 とする。) に当該弁の構造, 支持方法等に応じて下表の値を乗じた値 (配管に対する駆動部の応答倍率) とする。

表-1 構造, 支持方法等に応じた修正係数

$\frac{H}{\sqrt{D}}$	乗数
4.0 以下	1.0 (但し、評価を省略出来る)
4.0 超 6.0 以下	$0.1 \frac{H}{\sqrt{D}} - 3$
6.0 を越える	3.0

ここで、H : 弁のボンネットフランジ面から駆動部等偏心重量部の重心までの距離 (mm)

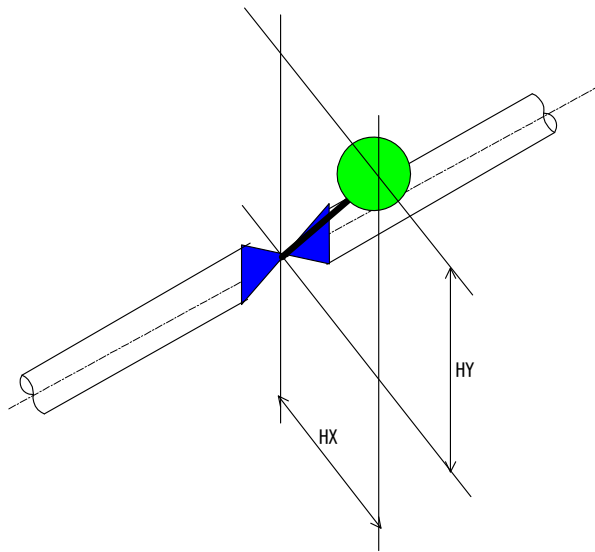
D : 弁のボンネットフランジ面と駆動部等偏心重量部間の部材の最小幅 (mm)

$\beta_9$  : 弁の鉛直方向の応答倍率であって、 $\beta_8$  に等しい値とする。

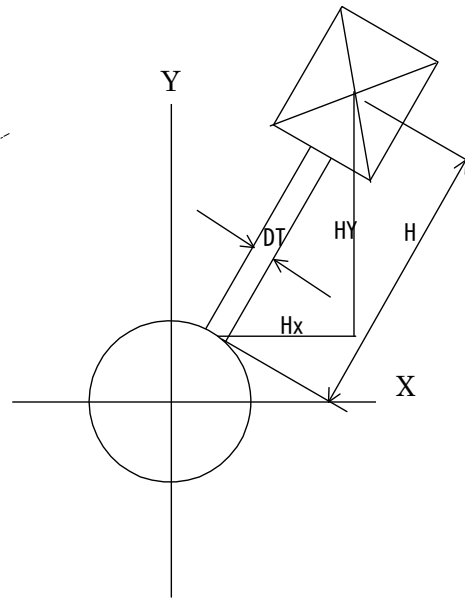
$\mu K_{MH}$ ,  $K_{MV}$  : 配管支持点の位置における設計震度

$W_H$  : 弁の駆動部等偏心重量部の重量 (N)

配管の設置方向や駆動軸の方向によって適切にヨークに作用する曲げモーメントを計算する必要がある。たとえば、水平配管に弁が (図-3 及び 4) のように傾いて取り付けられているとき、次のように計算できる。なお、ヨーク軸方向の地震動は検討は不要である。



(図-3)



(図-4)

- $D_T$  : 弁のボンネットフランジ面から駆動部等偏心重量部の部材の管軸直角方向の最小の幅
- $D_L$  : 弁のボンネットフランジ面から駆動部等偏心重量部の部材の管軸方向の最小の幅
- $H$  : 弁のボンネットフランジ面から駆動部等偏心重量部の重心までの距離
- $H_X$  :  $H$  の  $X$  方向成分
- $H_Y$  :  $H$  の  $Y$  方向成分

管軸直角方向の地震力は斜め方向で鉛直力と水平方向力の合成力で次式で算出します。

$$F_{M1} = \left( \frac{H_Y}{H} \right) f_H + \left( \frac{H_X}{H} \right) f_V$$

管軸方向地震力は水平方向であるので次式で算出する。

$$F_{M2} = f_H$$

#### 4.2. 応力の計算及び評価

弁の本体と駆動部等偏心重量部との間の部材断面に生じる応力を次の算式により計算する。

$$\sigma_n = \frac{F_M \cdot L_b}{Z} + \sigma_L$$

ここで

$\sigma_n$  : 弁本体と駆動部等偏心重量部との間の部材断面に生じる最も大きな応力  
( $N/mm^2$ )

$F_M$  : 弁の設計地震力で  $F_{M1}$ 、 $F_{M2}$  いずれか大きいほうの値 (N)

$L_b$  : 弁本体と駆動部等偏心重量部との間の当該部材断面から駆動部等偏心重量部の重心までの距離 (mm)

$Z$  : 当該部材断面の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$\sigma_L$  : 内圧及び駆動力による当該部材断面に生じる応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_L$ については、構造により応力の発生機構が異なる為、適切な方法により求めること。ここでは一例をあげる。当該部材断面が円筒形であり、その部分に弁本体の内圧力  $F_p$  がかかり、且つ弁棒が弁棒の軸方向に駆動し、駆動部力  $F_m$  が弁棒の軸方向に加わる場合、 $\sigma_L$ は次の式による

$$\sigma_L = (F_p + F_m) \cdot \frac{4}{\pi(D_o^2 - D_i^2)}$$

耐震性能評価は、 $\sigma_n \leq \sigma_a$ により行うことができる。ここで、 $\sigma_a$ は許容応力である。

なお、次の2点については注意が必要である。

- (1) 高圧ガス耐震設計基準では、重要度の高い地震防災遮断弁（緊急遮断弁）は、通常の耐震設計用許容応力に0.5を乗じた値を許容応力としている。これは、レベル2地震動（レベル1地震動の2倍の地震動）であっても弾性範囲であることを要請しているものである。
- (2) バタフライ弁にあっては、駆動力は弁棒を振じる形で与えられる構造となっている場合がある。

このとき、弁棒に関して、曲げモーメント  $F_M \cdot L_b$  にかえて、 $\sqrt{(F_M L_b)^2 + M_T^2}$ により応力を算出する。ここで  $M_T$  は地震時にヨーク部に作用する振りモーメントである。

## 5. おわりに

今回は、弁類に関する耐震設計を解説した。基本的に通常、弁類はヨーク取り付け部が最弱断面となるが、十分な強度が確保され、作動時間、弁座漏れなどの機能面でも耐震性能は確保されていることが多い。

唯一、問題となるのは、緊急遮断弁等のように強い駆動力が必要な弁である。弁体から大きく偏心した重たい駆動部を有するため、配管に大きな振り応力を生じることや、ヨーク部に対して過大な応力が発生する可能性があるため必要である。