

【整番】 SE-18-TM-007	【標題】 トラニオンサポート接合部の強度評価
分類：構造(サポート)／種別：技術メモ	作成年月：R01.6／改訂：Ver.0.5 (R02.1)
	作成者：N. Miyamoto

2020.1.13(月) 誤記など修正 【 1/2 分冊 】

全 27 枚

## 1. はじめに

トラニオンサポートは配管の支持金具としてよく使用されている。パイプを使うのでシンプルで支持強度が高く見映えもいいが、配管に溶接され一体化されているため、配管の 1 部と見なされる。特に配管との接合部の強度については配管同様に評価する必要があると思われる。しかしその評価法はコードルール本文に記載されておらず、確実に強度チェックされているかどうかは不明である。ここではトラニオン配管の接合部の強度評価に関して次のような情報を紹介する。

直管支持トラニオン→ ① ASME CC N-392-3 による強度評価、② 応力指数法による強度評価

曲管支持トラニオン→ ③ EPRI の修正 CC N-392 による強度評価、④ 応力指数法による評価

直管支持トラニオンは配管固定アンカーなどによく使われている。曲管支持トラニオンいわゆるダミーサポート(あるいはトラニオンエルボ)は水撃対策用としてよく使用されている。

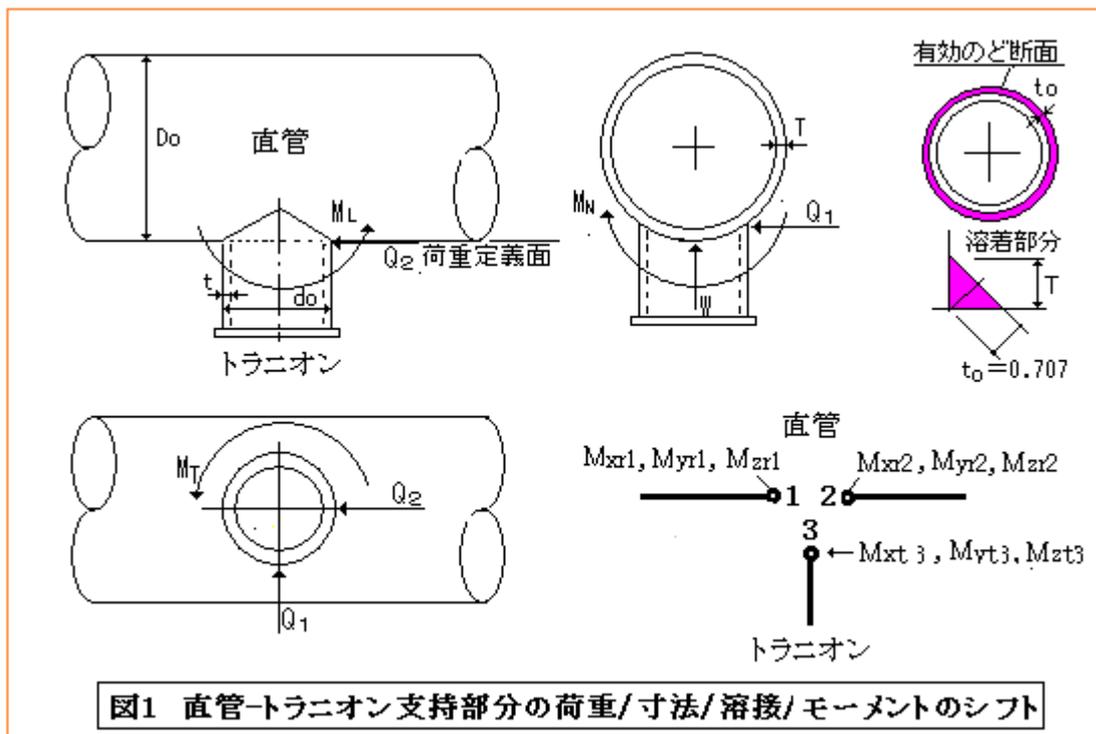


図1 直管-トラニオン支持部分の荷重/寸法/溶接/モーメントのシフト

## 2. 直管支持トラニオンに関する ASME CC-392-3 による強度評価

(1) 通常トラニオンは水平配管の直管部分に取り付けられる。ASME Sect.IIIはこのトラニオンの取付け部分(交叉部分)の強度について次の 2 つの Code Case を発行している。

① ASME Code Case N-391-2 :

Procedure for Evaluation of the Design of Hollow Circular Cross Section Welded Attachments on Class 1 piping Section III Division 1

② ASME Code Case N-392-3 :

Procedure for Evaluation of the Design of Hollow Circular Cross Section Welded Attachments on Class 2 and 3 piping Section III Division 1

基本的に交叉部分(耐圧部扱い)の応力を求める式は同じであり、単に配管クラスの評価式の違いに

よって異なるコードケースに別れている。クラス 1 配管はレアなのでここでは一般プラントのメイン配管と同等のクラス 2,3 配管を対象とした Code Case N-392-3 を取り上げる。

なお、本章では CC N-392-3 の規定内容とその運用のみを紹介する。CC N-392-3 規定の概念や背景に関しては補足 A を参照されたし。

通常、このコードケースは次のステップで運用される(原文の流れも然り)。

ステップ 1. CC N-392-3 の適用の可否を確認する。

ステップ 2. トラニオン側のモーメント・フォースから生じる応力を算定する。

ステップ 3. 結合節点の直管(主管)側応力に上記の応力を加算し交叉部の全応力を評価する。

また併せて同時作用最大荷重によるトラニオン側応力を評価する。

以下、ステップに従ってその規定内容を紹介する。

(2) まずステップ 1 について。CC N-392-3 の適用条件は次の通り。

- ① トラニオンは完全溶け込み溶接、隅肉溶接あるいは部分溶け込み溶接で主管に全周接合されていること。
- ② トラニオンと主管の縦弾性係数と線膨張係数は本質的に同じであること。
- ③ 下記の幾何形状であること。なおこの場合、トラニオン軸は主管軸に直交すること。

$$4.0 \leq \gamma \leq 50.0, \quad 0.2 \leq \tau \leq 1.0, \quad 0.3 \leq \beta \leq 1.0$$

但し、 $\gamma = R_o/T = (\text{直管の外半径})/(\text{直管の公称肉厚})$ 、

$\tau = t/T = (\text{トラニオンの公称肉厚})/(\text{直管の公称肉厚})$

$\beta = d_o/D_o = (\text{トラニオンの外径})/(\text{直管の外径})$

- ④ トラニオンはパイプで作られ、管との溶接の最寄端より他の溶接部や不連続部まで  $(R_m T)^{0.5}$  以上の距離を持つこと。  $(R_m T)^{0.5}$  以下の相互距離内にある複数のアタッチメントがあるときは個々の応力の影響を重ね合わせる。なお  $R_m = \text{直管の平均半径}$ 、 $T = \text{直管の公称肉厚}$

(3) 次にステップ 2 について。トラニオン側のモーメント・フォースによって直管-トラニオン交叉部分に生じる応力は次のようになる。

$$S_{MT} = B_W W_m / A_T + B_N M_{Nm} / Z_T + B_L M_{Lm} / Z_T + Q_{1m} / \bar{A} + Q_{2m} / \bar{A} + B_T M_{Tm} / j \quad \text{----- (1)}$$

$$S_{NT} = C_W W_d / A_T + C_N M_{Nd} / Z_T + C_L M_{Ld} / Z_T + Q_{1d} / \bar{A} + Q_{2d} / \bar{A} + C_T M_{Td} / j \quad \text{----- (2)}$$

$$S_{NT^{**}} = C_W W_i / A_T + C_N M_{Ni} / Z_T + C_L M_{Li} / Z_T + Q_{1i} / \bar{A} + Q_{2i} / \bar{A} + C_T M_{Ti} / j \quad \text{----- (3)}$$

$$S_{PT} = K_T S_{NT} \quad \text{----- (4)}$$

ここで  $S_{MT}$  = 機械荷重(自重、地震慣性力など)から生じる 1 次応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$S_{NT}$  = 変位荷重(熱膨張やアンカー変位など)から生じる 2 次応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$S_{PT}$  = 変位荷重(同上)によるピーク応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$S_{NT^{**}}$  = 同時作用の最大瞬間荷重による応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$C = A_o (2\gamma)^{n_1} \beta^{n_2} \tau^{n_3} \quad (\geq 1.0)$  ----- 計算値が 1 以下であれば  $C = 1$

ここで応力指数  $C$  は  $C_W$ 、 $C_L$ 、または  $C_N$  を表わす。それぞれの  $A_o$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  は下表の通り。なお  $C$  ( $C_W$ 、 $C_L$ 、 $C_N$ ) は直管側/トラニオン側のいずれか大きい方を探る。

	交叉部位	$\beta$ の範囲	$A_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$
$C_w$	直管側	0.3-1.0	1.40	0.81	(a)	1.33
	トラニオン側	0.3-1.0	4.00	0.55	(b)	1.00
$C_L$	直管側	0.3-1.0	0.46	0.60	-0.04	0.86
	トラニオン側	0.3-1.0	1.10	0.23	-0.38	0.38
$C_N$	直管側	0.3-0.55	0.51	1.01	0.79	0.89
	トラニオン側	0.3-0.55	0.84	0.85	0.80	0.54
	直管側	>0.55 - 1.0 (c)	0.23	1.01	-0.62	0.89
	トラニオン側	>0.55 - 1.0 (c)	0.44	0.85	-0.28	0.54

注(a) C式の $\beta^2$ 項を $\text{Exp}(-1.2\beta^3)$ に置き換えてCを計算する。

(b) C式の $\beta^2$ 項を $\text{Exp}(-1.35\beta^3)$ に置き換えてCを計算する。

(c) “>0.55”は0.55を越えて”の意。

$C_T = 1.0$  ( $\beta \leq 0.55$ の時)

= 1~ $C_N$ の内挿値 ( $0.55 < \beta < 1.0$ の時) 但し1以上

=  $C_N$  ( $\beta = 1$ の時) 但し1以上

$B_w = 0.5C_w$ 、 $B_L = 0.5C_L$ 、 $B_N = 0.5C_N$ 、 $B_T = 0.5C_T$  (但し、 $B_w$ 、 $B_L$ 、 $B_N$ 、 $B_T$ はいずれも1以上)

$\gamma = R_o/T$ 、 $\tau = t/T$ 、 $\beta = d_o/D_o$ 、(前項と同じ)

$R_o$ =直管の外半径(mm)、 $t$ =トラニオンの公称肉厚(mm)

$T$ =直管の公称肉厚(mm)、-----但し $t$ 、 $T$ では腐れ代を除く

$d_o$ =トラニオンの外径(mm)、 $D_o$ =直管の外径(mm)

$r_i$ =トラニオンの内半径(mm)、 $r_o$ =トラニオンの外半径(mm)

$K_T$ =ピーク応力係数。完全溶込み溶接の場合1.8、隅肉または部分溶接の場合2.0

$A_T$ =トラニオン断面積( $\text{mm}^2$ )= $\pi(r_o^2 - r_i^2)$

$Z_T$ =トラニオン断面係数( $\text{mm}^3$ )= $I_T/r_o$

$I_T$ =トラニオン断面2次モーメント( $\text{mm}^4$ )= $(\pi/4)(r_o^4 - r_i^4)$

$\bar{A} = (\pi/2)(r_o^2 - r_i^2)$

$\hat{J} = [\pi r_o^2 T, Z_T]$ の小さい方

$W$ =トラニオン-直管の接合面に作用するスラスト力(N)

$M_L$ =トラニオン-直管の接合面に作用する主管長手方向曲げモーメント(N-mm)

$M_N$ =トラニオン-直管の接合面に作用する主管周方向曲げモーメント(N-mm)

$M_T$ =トラニオン-直管の接合面に作用する振りモーメント(N-mm)

$Q_1$ 、 $Q_2$ =トラニオン-直管の接合面に作用する各せん断力(N) 図1参照

なお $W$ 、 $M_L$ 、 $M_N$ 、 $M_T$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$ につくサフィックスの意味は次の通り。

m---- 機械的荷重(自重/圧力/安全弁反力など)によるもの

d---- 変位荷重(熱膨張、アンカ変位など)によるもの

i---- 同時発生最大荷重(例えば自重+熱膨張/熱変位+大規模地震変位)

また、各荷重は結合節点のトラニオン側3でカウントされたものである。図1参照

また、上記荷重は全て絶対値とする。

(4) ステップ 3 について。完全溶込み溶接によるトラニオン取付け部の全応力の評価及びトラニオン側の同時作用最大荷重による応力の評価は次の通り。

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限

$$PD_o/(4T) + M_A/Z + S_{MT} \leq 1.5S_h \quad (\text{通常状態}) \quad \text{-----}(5)$$

$$P_{\max}D_o/(4T) + (M_A + M_B)/Z + S_{MT} \leq 1.8S_h \quad (\text{アップセット状態}) \quad \text{-----}(6)$$

(b) 長期変位荷重による 2 次応力の制限(次のいずれか)

$$S_E = iM_C/Z + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{-----}(7)$$

$$S_n = PD_o/(4T) + iM_A/Z + iM_C/Z + S_{MT} + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h \quad \text{-----}(7)$$

(c) トラニオン側の同時発生最大荷重による応力の制限

$$S_{NT^{**}} \leq 2S_y \quad \text{-----}(8)$$

$$Q_{1i}/\bar{A} + Q_{2i}/\bar{A} + M_{Ti}/j \leq S_y \quad \text{-----}(8')$$

ここで  $S_{MT}$ =直管/トラニオンにおける一次応力の大きい方(N/mm<sup>2</sup>)

$S_{PT}$ =直管/トラニオンにおけるピーク応力の大きい方(N/mm<sup>2</sup>)

$P$ =設計圧力(N/mm<sup>2</sup>)、 $P_{\max}$ =最大使用圧力、 $D_o$ =直管外径(mm)、 $D_i$ =直管内径(mm)

$A$ =直管断面積(mm<sup>2</sup>)=( $\pi/4$ )( $D_o^2 - D_i^2$ )、 $Z$ =直管の断面係数(mm<sup>3</sup>)=( $\pi/32$ )( $D_o^4 - D_i^4$ )/ $D_o$

$M_A$ =長期機械的荷重による直管の相当モーメント(N·mm)=[( $M_{xr}^2 + M_{yr}^2 + M_{zr}^2$ )<sup>0.5</sup>]

$M_B$ =アップセット時の短期機械荷重による直管の相当モーメント(N·mm) [=同上]

$M_C$ =長期変位荷重による直管の相当モーメント(N·mm) [=同上]、

$M_{xr}, M_{yr}, M_{zr}$ =直管側モーメントの 3 軸成分、 $i$ =応力増幅係数(-)(ここでは  $i=1$ )。

$S_h$ =使用温度における許容引張応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $S_c$ =室温における許容引張応力(N/mm<sup>2</sup>)、

$S_y$ =材料の設計温度における降伏点または 0.2%耐力(N/mm<sup>2</sup>)

注)  $S_h, S_c, S_y$  は直管/トラニオン材のいずれか低い方の値を採る。

なお  $M_{xr}, M_{yr}$  および  $M_{zr}$  については下記のように設定する。

もし  $M_{xr1}$  と  $M_{xr2}$  が正負同符号なら  $M_{xr}=0$ 、異符号ならば  $|M_{xr1}|, |M_{xr2}|$  いずれか小さい方のモーメント(符号付き)を  $M_{xr}$  に置き換える(補足 B 参照のこと)。

$M_{yr}, M_{zr}$  についてもこれと同じ方法で設定する。

(上記のサフィックス 1,2 は直管側の結合節点を表わしている(図 1 参照のこと)。

(5) 隅肉/部分溶け込み溶接で管に溶接されたトラニオン取付け部の全応力の評価は次の通り。

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限 →前項(4)の(a)に同じ。

(b) 長期変位荷重による 2 次応力の制限 →前項(4)の(b)に同じ。

(c) 同時作用の最大瞬間荷重による応力の制限 →前項(4)の(c)に同じ。

(d) 上記に加えて下記の制限を設ける。

$$|W_i|/A_w + |M_{Li}|/Z_{wl} + |M_{Ni}|/Z_{wn} + (Q_{1i}^2 + Q_{2i}^2)^{1/2}/A_w + |M_{Ti}|/Z_{wt} \leq 2S_y \quad \text{-----}(9)$$

$$[(W_i/A_w)^2 + 4\{(Q_{1i} + Q_{2i})/A_w + (M_{Ti}/Z_{wt})\}^2]^{0.5} \leq S_y \quad \text{-----}(9')$$

ここで  $A_w$ =全溶接有効断面積(mm<sup>2</sup>) =  $\pi(r_1^2 - r_2^2)$

$Z_{wl}$ =直管直交中立軸廻りの隅肉溶接/部分溶込み有効断面の断面係数(mm<sup>3</sup>)

$Z_{wn}$ =直管平行中立軸廻りの隅肉溶接/部分溶込み有効断面の断面係数(mm<sup>3</sup>)

$Z_{wt}$ =隅肉溶接/部分溶込み有効断面の振り断面係数(mm<sup>3</sup>)

(6) CC N-392-3はASME Sect. IIIのクラス 2,3配管をサポートするものである。前述のようにクラス 2,3は一般プラントの主要配管に引き当てられるが、例えばASME B31.3のような一般プラントの配管コードと必ずしもマッチしていないので、ここでは**B31.3系のJPI 7S-77規定と高圧ガス設備レベル1配管規定<sup>(9)</sup>への運用**を考えて前(4)(5)項を補正してみる。

(a) 長期機械荷重による1次応力の制限

$$S_L = PD_o/(4T) + |F_A/A| + M_A/Z + S_{MT} \leq S_h \quad \text{-----(10)}$$

(b) 長期変位荷重による2次応力の制限(次のいずれか)

$$S_E = |F_C/A| + iM_C + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{-----(11)}$$

$$S_n = S_L + |F_C/A| + iM_C + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h \quad \text{-----(11')}$$

(c) 地震荷重による1次応力、2次応力及びせん断/捩れ応力の制限

・長期機械荷重(内圧、自重など)+短期機械荷重(地震慣性力)による一次応力の制限

$$PD_o/(4T) + [ |F^*/A| + (M_i^{*2} + M_o^{*2})^{0.5}/Z ] + S_{MT}^* \leq S \quad \text{----- (12)}$$

・地震荷重(慣性力+変位)による(一次+二次)応力の制限

$$2[ |F^{**}/A| + (M_i^{**2} + M_o^{**2} + M_t^{**2})^{0.5}/Z ] + 2\{ S_{MT}^{**} + (1/2)S_{PT}^* \} \leq 2S_y \quad \text{----- (13)}$$

(d) 地震状態も含めて同時発生最大の荷重による応力の制限

完全溶込み溶接のとき → (8)(8)式、 隅肉/部分溶込み溶接のとき → (8)(8')(9)(9)式

ここで  $F_A$  = 長期機械荷重による直管軸方向フォース(N)、

$F_C$  = 長期変位荷重による直管軸方向フォース(N)

$F^*$  = (長期+短期)機械荷重に依る直管軸方向フォース(N)、

$F^{**}$  = 地震荷重(慣性力+変位)による直管軸方向フォース(N)、

$S_{MT}^*$  = (長期+短期)機械荷重に依るトラニオン側応力(N/mm<sup>2</sup>)、

$S_{MT}^{**}$  = 地震荷重(慣性力)に依るトラニオン側応力(N/mm<sup>2</sup>)、

$S_{PT}^*$  = 地震荷重(変位)に依るトラニオン側ピーク応力(N/mm<sup>2</sup>) =  $S_{NT}^*/2$

$S_{NT}^*$  = 地震荷重(変位)に依るトラニオン側応力(N/mm<sup>2</sup>)

$M_i^*, M_o^*$  = (長期+短期)機械荷重に依る直管面内/面外曲げモーメント(N・mm)、

$M_i^{**}, M_o^{**}, M_t^{**}$  = 地震荷重(慣性力+変位)による直管面内/面外/捩りモーメント(N・mm)

$A$  = 直管断面積(mm<sup>2</sup>)、 $S$  = 耐震設計用許容応力<sup>(9)</sup> (N/mm<sup>2</sup>)

[その他記号は前(1)~(5)項の定義と同じ。]

なお  $M_i, M_o, M_t$  (→  $M_i^*, M_o^*, M_i^{**}, M_o^{**}, M_t^{**}$ ) については下記のように設定する。

もし  $M_{i1}$  と  $M_{i2}$  が正負同符号なら  $M_i = 0$ 、異符号ならば  $|M_{i1}|, |M_{i2}|$  いずれか小さい方のモーメント(符号付き)を  $M_i$  に置き換える(補足 B 参照のこと)。

$M_o, M_t$  についてもこれと同じ方法で設定する。

(7) 以上の算定式では種々の荷重タイプが用いられているが、これらはいずれも配管系の線形構造解析から得られる。その場合、図 2(b)(c)のように2つの解析モデルがある。トラニオン-直管には図 2(a)のように交叉部と拘束部があるが、トラニオンを配管の1部とし拘束部に拘束点を設けたものが(b)モデルであり、直管との交叉部に拘束点を設けたものが(c)モデルである。(b)モデルの方が正しいが、モデルが煩雑になるので通常の配管解析では(c)モデルが採られることが多い(と思う)。

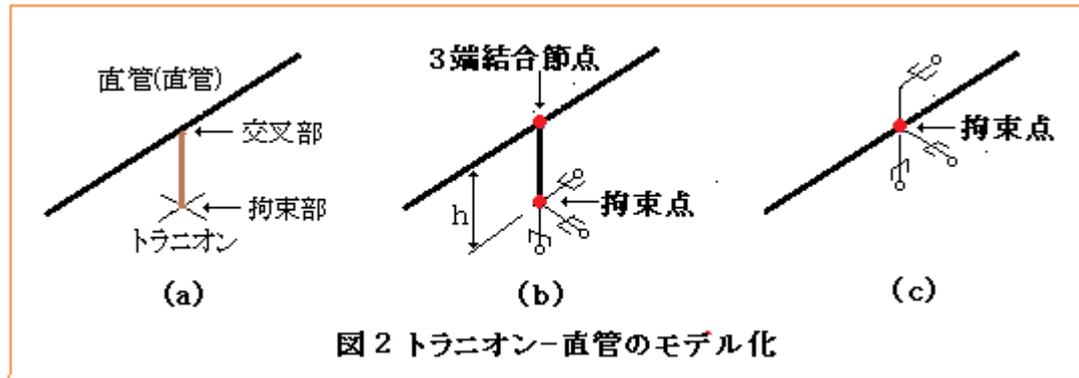


図2 トラニオン-直管のモデル化

(b)モデルと(c)モデルの違いはトラニオン脚長  $h$  の有無である。トラニオン底の拘束点に主管軸と並行するフォース(図1の  $Q_2$  に相当)あるいは直交するフォース(図1の  $Q_1$  に相当)が含まれているならば、脚長スパンから派生するモーメント  $Q_1h, Q_2h$  が、(c)モデルに欠落していることになる。従って (c)モデルを採る場合は、トラニオン側のモーメント成分  $M_L, M_N$  と主管側のモーメント成分  $M_x, M_y$  を次のように補正する(置き換える)必要がある( $x$  は主軸方向、 $y$  は水平軸直交方向の意)。

$$\begin{aligned} \text{トラニオン側) } & M_N + Q_1h \rightarrow M_N, \quad M_L + Q_2h \rightarrow M_L, \\ \text{主管(直管)側) } & M_{x1} - 0.5Q_1h \rightarrow M_{x1}, \quad M_{x2} - 0.5Q_1h \rightarrow M_{x2} \\ & M_{y1} - 0.5Q_2h \rightarrow M_{y1}, \quad M_{y2} - 0.5Q_2h \rightarrow M_{y2} \end{aligned}$$

(8) 以上のトラニオン応力と全応力の算定と評価プロセスには、多くのバリエーションが含まれており複雑でわかりにくい。そこで一連のプロセスをフローチャート化した(補足Cを参照のこと)。またトラニオンを用いた配管支持部の強度について、3つの計算例を補足Dに示す。

### 3. 直管支持トラニオンに関する応力指数による強度評価

(1) Sadd & Avent は下記レポートで ASME Class 1 配管への適用を前提に応力指数法による直管支持トラニオン強度評価法を提案している。

CEB-79-22 “Stress Index Development for Trunnion Support” by R.R.Avent & M.H.Sadd  
(Tennessee Authority Div. of Eng. Design Civil Eng. Branch)

このレポートの結論は決して Complete ではなく多少の不明もあるが、次のような内容に帰着すると思われる(\*1)。

- ① 1次応力強さ:  $S_1 = B_1\{P_0D/(2T)\} + B_{2t}(M_t/Z_t) + B_{2r}(M_r/Z_r)$
  - ② 1次+2次応力強さ範囲:  $S_n = C_1\{P_0D/(2T)\} + C_{2t}(M_t/Z_t) + C_{2r}(M_r/Z_r)$
  - ③ ピーク応力強さ範囲:  $S_p = K_1C_1\{P_0D/(2T)\} + K_{2t}C_{2t}(M_t/Z_t) + K_{2r}C_{2r}(M_r/Z_r)$
- ここで  $B_1 = 1.05(d/D)^{-0.23}(D/T)^{0.008}$ ,  $B_{2t} = 2.0(t/T)^{0.1}(d/D)^{-2}$ ,  $B_{2r} = 1.5$   
 $C_1 = 0.7 + 0.06(D/T)$ ,  $C_{2t} = 36.0(1.5 - d/D)^2 - 6.0$ ,  $C_{2r} = 1.7$   
 $K_1 = 1.5 + 0.268(d/D)^2(D/T)$ ,  
 $K_{2t}, K_{2r} = 1.3$ (研削仕上げ),  $2.0$ (仕上げ無し)  
 $M_t = (M_{xt}^2 + M_{yt}^2 + M_{zt}^2)^{0.5}$ ,  $M_r = (M_{xr}^2 + M_{yr}^2 + M_{zr}^2)^{0.5}$

ここで、 $P_0$  = 運転圧力(MPa)、

$M_t, M_r$  = トラニオン-直管の結合部におけるトラニオン側(t)と直管側(r)のモーメント

成分の合成値(N・mm)、ただし各ケースについて次の通り。

ケース①→ 機械的荷重によるモーメント

ケース②③→ 管の熱膨張や配管支持点変位および機械的荷重(自重を除く)によるモーメント

$M_{xt}, M_{yt}, M_{zt}$  = トラニオン側モーメントの x,y,z 方向の各成分(N・mm)

$M_{xr}, M_{yr}, M_{zr}$  = 直管側モーメントの x,y,z 方向の各成分(N・mm)、但し下記による。

もし  $M_{x1}$  と  $M_{x2}$  が正負同符号なら  $M_{xr}=0$ 、異符号ならば  $|M_{x1}|, |M_{x2}|$  いずれか小さい方のモーメント(符号付き)を  $M_{xr}$  に置き換える(補足 B 参照のこと)。

$M_{yr}, M_{zr}$  についてもこれと同じ方法で置き換える。

$D$  = 直管外径(mm)、 $T$  = 直管肉厚(mm)、 $Z_r$  = 直管断面係数(mm<sup>3</sup>)

$d$  = トラニオン外径(mm)、 $t$  = トラニオン肉厚(mm)、 $Z_t$  = トラニオン断面係数(mm<sup>3</sup>)

$B_1$  = 圧力に対する 1 次応力指数、 $B_{2t}$  = トラニオン側モーメントに対する 1 次応力指数

$B_{2r}$  = 直管側モーメントに対する 1 次応力指数、 $C_1$  = 圧力に対する応力指数、

$C_{2t}$  = トラニオン側モーメントに対する応力指数、

$C_{2r}$  = 直管側モーメントに対する応力指数、

各応力強さの評価は次の通り。

$S_1 \leq 1.5S_m$ 、 $S_n \leq 3S_m$ 、 $S_p \rightarrow S_{alt} = 0.5S_p \rightarrow$  設計疲労曲線による疲労損傷評価

$S_m$  は材料の設計応力強さ(一般に降伏応力強さ/1.5)。設計疲労曲線については JIS B8265 などを参照のこと。

(2) 以上は Nuclear の Class 1 配管を対象にしたものである(Sadd-Avent のオリジナルは然り)。しかし Class1 配管はレアケースなので一般プラントへの転用を考慮すると次の通り(\*2)(\*3)(\*4)。

① 1 次応力： $S_L = B_1(PD/4T) + B_w |F_t| / A_t$

$+ (B_{2t}^2 M_{it}^2 + B_{2t}^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t + (B_{2r}^2 M_{ir}^2 + B_{2r}^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r$

② 2 次応力範囲： $S_E = C_w |F_t| / A_t + (i_t^2 M_{it}^2 + i_t^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t$

$+ (i_r^2 M_{ir}^2 + i_r^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r$

ここで  $D$  = 直管外径(mm)、 $T$  = 直管肉厚(mm)、 $A_t$  = トラニオン断面積(mm<sup>2</sup>)、

$P$  = 運転圧力(MPa)、 $Z_r$  = 主管断面係数(mm<sup>3</sup>)、 $Z_t$  = トラニオン断面係数(mm<sup>3</sup>)、

$F_t$  = トラニオン側の軸方向フォース(N)

但しケース①→ 機械的荷重によるフォース

ケース②→ 配管の熱膨張や支持点変位によるフォース

$M_{it}, M_{ot}, M_{tt}$  = トラニオン側(t)の面内(i),面外(o),振り(t)の各モーメント成分(N・mm)

但しケース①→ 機械的荷重によるモーメント

ケース②→ 配管の熱膨張や支持点変位によるモーメント

$M_{ir}, M_{or}, M_{tr}$  = 主管側(t)の面内(i)、面外(o),振り(t)の各モーメント成分(N・mm)

但しケース①→ 機械的荷重によるモーメント

ケース②→ 配管の熱膨張や支持点変位によるモーメント

なお各モーメント成分は次の方法で設定する。

もし  $M_{i1}$  と  $M_{i2}$  が正負同符号なら  $M_{ir}=0$ 、異符号なら  $|M_{i1}|, |M_{i2}|$

いずれか小さい方のモーメントを  $M_{ir}$  に置き換える(補足 B 参照)。

$M_{or}$ 、 $M_{tr}$ についてもこれと同じ方法で置き換える。

$S_L=1$  次応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $S_E=2$  次応力範囲(N/mm<sup>2</sup>)、

$B_w, C_w$ =トラニオン軸フォースの応力係数(CC 392-3 で定義されるもの)

$i_t$ =トラニオン側の曲げ応力指数(= $K_2C_{2t}/2$ )、 $i_r$ =直管側の曲げ応力指数(= $K_2C_{2r}/2$ )

$B_{2t}, B_{2r}, K_2, C_{2t}, C_{2r}$ =前項(1)で定義された応力指数

各応力強さの評価は次の通り。

$$S_L \leq S_h, \quad S_E \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{または} \quad f(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h - S_L$$

ここで  $S_h$ =最高温度での基本許容応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $S_c$ =最低温度での基本許容応力(N/mm<sup>2</sup>)

$f$ =応力範囲減少係数  $S_h, S_c, f$ については JPI 7S-77 などを参照のこと。

(3) なお以上の Sadd-Avent の強度評価方法には下記の適用制限があるので注意すること。

$$0.5 \leq d/D \leq 1.0, \quad 1.0 \leq t/T \leq 2.0, \quad 10 \leq D/T \leq 40$$

注(\*1) 原文献 CEB-79-22 には  $B_1, B_2, C_1, C_2, K_1, K_2$  のみが与えられており、各応力強さの算定式は定義されていない。圧力荷重に関する応力指数については支障ないが、モーメント荷重に関する応力指数については類似形状の分岐ティについて次のような定義がある。

$$B_2(M_i D_o / 2I) = B_{2r}(M_r / Z_r) + B_{2t}(M_t / Z_t)$$

$$C_2(M_i D_o / 2I) = C_{2r}(M_r / Z_r) + C_{2t}(M_t / Z_t)$$

$$K_2 C_2(M_i D_o / 2I) = K_{2r} C_{2r}(M_r / Z_r) + K_{2t} C_{2t}(M_t / Z_t)$$

左辺は原文献が想定する仮定の応力項と思われるのでこれを右辺の分散形に変える必要がある。この場合、 $B_{2t}$  は原文献の  $B_2$  に、 $C_{2t}$  は原文献の  $C_2$ 、 $K_{2t}$  は原文献の  $K_2$  に比定できる。従ってトラニオン側の応力項には原文献の  $B_2, C_2, K_2$  を流用すればよい。一方、配管側の応力項は曲げ応力( $M_r/Z_r$ )に対し余り拡幅しないので低い指数を採るのが妥当である。故に原文献の Table 2 Stress Index result から、 $B_{2r} \rightarrow 1.5$ 、 $C_{2r} \rightarrow 1.7$  が安全側に設定できると思う。このように、提案の式ではモーメント項をトラニオン側+直管側として扱い原文献を補足している。

(\*2) 一般プラント配管は通常、ASME B31.3 系の設計概念で設計される。これは Nuclear の Class 2,3 配管に該当する。配管の 1 次/2 次応力を表わすのに、Class1 では応力指数が用いられるが、B31.3 では応力増加係数  $i$  が用いられる。その関係は  $i = K_2 C_2 / 2$  で近似される。ここでは原文献で得られた  $C_{2t}, K_{2t}$  及び  $C_{2r}, K_{2r}$  を用い  $i_t, i_r$  係数(応力増加係数)を定義する。

また Class1 配管では振りモーメント成分にも応力指数が掛かる形になっているが、ここでは一般配管の例に倣って振りモーメントには  $i$  係数が掛からないようにした。

なおここでは  $i$  指数は 2 次応力のみ適用する。1 次応力については  $B_{2t}, B_{2r}$  指数を用いる。これは  $i$  指数を転用すると無用に応力が高くなるからである。

(\*3) 一般プラント配管のティ分岐管では結合節点( $i$  端,  $j$  端,  $b$  端)の各端の相当モーメントに同じ  $i$  指数を適用してモーメントによる応力を求めている(評価点は 3ヶ所になる)。これは安全側の措置になると思うが、本来的ではないのでこのティ分岐の考えは採らず、Class1 配管のように主管側とトラニオン側のモーメント応力を単純合算する形すなわち(\*1)の分散形を採る(評価点は 1ヶ所になる)。

(\*4) ASME Sect.III のコード式は軸方向/せん断方向フォースはカウントしていない。実際、

多くの配管ではモーメントのみで応力を算定すれば十分であるが、トラニオンの場合その軸方向フォースから生じる交叉部の応力は大きくて無視できない。そこで提案の式では CC N-392-3 のトラニオン側の応力指数  $B_w, C_w$  を軸方向公称応力  $(F_i/A_0)$  に乗じて加算した。

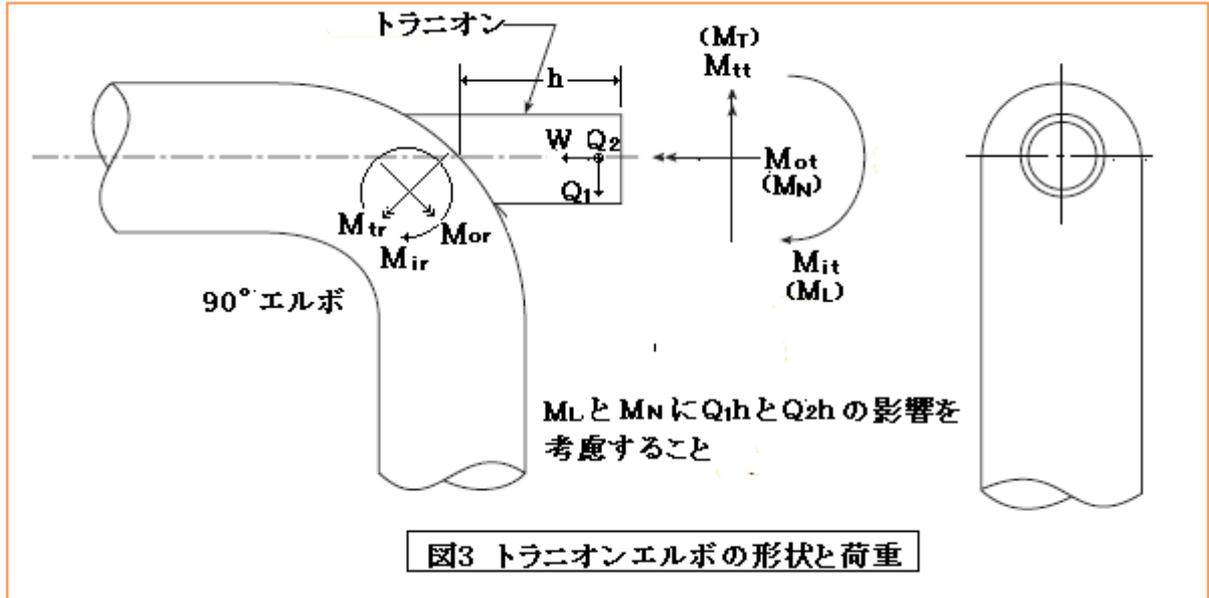


図3 トラニオンエルボの形状と荷重

4. 曲管支持トラニオンに関する EPRI の修正 CC N-392 による強度評価

(1) EPRI(米国電力研究所)は下記文献でトラニオンエルボ取り付け部の強度評価法を提案している。

EPRI TR-107453 “Stress Indices for Elbows with Trunnion Attachments “ (1998)

この強度評価法は前述の ASME CC N-392-3 と同じフォームでトラニオンエルボの強度評価を行うことを意図したものである。以下この内容を紹介しその運用を議論する。記号表示は特記以外、2.節の CC N-392-3 の強度評価法に準じる。

(2) まずステップ 1 について。適用条件は次の通り。

① 下記の幾何形状であること。トラニオン軸は片側エルボ軸に並行すること。

$$10 \leq \gamma \leq 30, \quad 0.2 \leq \tau \leq 2.0, \quad 0.3 \leq \beta \leq 0.8$$

② 接合溶接/ 材料物性/ 他の溶接部や不連続部との離隔などについては CC N-392-3 に同じ。

③ ショートエルボ(R=1.0D)、ロングエルボ(R=1.5D)のみを対象とすること。

(3) 次にステップ 2 について。トラニオン側のモーメント・フォースによって直管-トラニオン交叉部分に生じる応力は CC N-392-3 と同じく

$$S_{MT} = B_w W_m / A_T + B_N M_{Nm} / Z_T + B_L M_{Lm} / Z_T + Q_{1m} / \bar{A} + Q_{2m} / \bar{A} + B_T M_{Tm} / j \quad \text{----- (1)}$$

$$S_{NT} = C_w W_d / A_T + C_N M_{Nd} / Z_T + C_L M_{Ld} / Z_T + Q_{1d} / \bar{A} + Q_{2d} / \bar{A} + C_T M_{Td} / j \quad \text{----- (2)}$$

$$S_{NT^{**}} = C_w W_i / A_T + C_N M_{Ni} / Z_T + C_L M_{Li} / Z_T + Q_{1i} / \bar{A} + Q_{2i} / \bar{A} + C_T M_{Ti} / j \quad \text{----- (3)}$$

$$S_{PT} = K_T S_{NT} \quad \text{----- (4)}$$

記号は CC N-392-3 と同じ、

$$C = A_0 (2\gamma)^{n_1} \beta^{n_2} \tau^{n_3} \quad (\geq 1.0) \quad \text{----- 計算値が 1 以下であれば } C=1$$

ここで C は  $C_w, C_L$ , または  $C_N$  を表わす。それぞれの  $A_0, n_1, n_2, n_3$  は下表の通り。

	A <sub>o</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>
C <sub>w</sub>	0.75	0.229	-0.42	0.85
C <sub>L</sub>	1.68	0.0734	-0.01	0.769
C <sub>N</sub>	0.72	0.210	-0.355	0.84
C <sub>T</sub>	1.25	0.158	0.158	0.717

(4) ステップ 3 について。完全溶込み溶接によるトラニオン取付け部の全応力の評価及びトラニオン側の同時作用最大荷重による応力の評価は CC N-392-3 と同じく次の通り。

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限

$$PD_o/(4T) + M_A/Z + S_{MT} \leq 1.5S_h \quad \text{-----}(5')$$

$$P_{\max}D_o/(4T) + (M_A + M_B)/Z + S_{MT} \leq 1.8S_h \quad \text{-----}(6')$$

(b) 長期変位荷重による 2 次応力の制限(次のいずれか)

$$S_E = iM_C + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{-----}(7')$$

$$S_n = PD_o/(4T) + iM_A/Z + iM_C/Z + S_{MT} + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h \quad \text{-----}(7'')$$

(c) トラニオン側の同時発生最大荷重による応力の制限

$$S_{NT^{**}} \leq 2S_y \quad \text{-----}(8')$$

$$Q_{1i}/\bar{A} + Q_{2i}/\bar{A} + M_{Ti}/j \leq S_y \quad \text{-----}(8'')$$

ここで  $S_{MT}$  = トラニオン側の荷重で生じる交叉点の一次応力(N/mm<sup>2</sup>)

$S_{PT}$  = トラニオン側の荷重で生じる交叉点のピーク応力(N/mm<sup>2</sup>)

その他の記号は CC N-392-3 と同じ(但し”直管”は”エルボ”に読み替える)。

(5) 隅肉/部分溶け込み溶接で管に溶接されたトラニオン取付け部の全応力の評価は CC N-392-3 と同じく次の通り。

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限 →前項(4)の(a)に同じ。

(b) 長期変位荷重による 2 次応力の制限 →前項(4)の(b)に同じ。

(c) 同時作用の最大瞬間荷重による応力の制限 →前項(4)の(c)に同じ。

(d) 上記に加えて下記の制限を設ける。

$$|W_i|/A_w + |M_{Li}|/Z_{wl} + |M_{Ni}|/Z_{wn} + (Q_{1i}^2 + Q_{2i}^2)^{1/2}/A_w + |M_{Ti}|/Z_{wt} \leq 2S_y \quad \text{-----}(9')$$

$$[(W_i/A_w)^2 + 4\{(Q_{1i} + Q_{2i})/A_w + (M_{Ti}/Z_{wt})\}^2]^{0.5} \leq S_y \quad \text{-----}(9'')$$

記号は CC N-392-3 と同じ(但し”直管”は”エルボ”に読み替える)。

(6) B31.3 系の JPI 7S-77 規定と高圧ガス設備レベル 1 配管規定に運用する場合は CC N-392-3 と同じく次の通り。

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限

$$S_L = PD_o/(4T) + |F_A/A| + M_A/Z + S_{MT} \leq S_h \quad \text{-----}(10')$$

(b) 長期変位荷重による 2 次応力の制限(次のいずれか)

$$S_E = |F_C/A| + iM_C/Z + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{-----}(11')$$

$$S_n = S_L + |F_C/A| + iM_C/Z + S_{PT}/2 \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h \quad \text{-----}(11'')$$

(c) 地震荷重による 1 次応力、2 次応力及びせん断/捩れ応力の制限

・長期機械荷重(内圧、自重など)+短期機械荷重(地震慣性力)による一次応力の制限  

$$PD_o/(4T) + [ |F^*/A| + (M_i^{*2} + M_o^{*2})^{0.5}/Z ] + S_{MT}^* \leq S \quad \text{----- (12')}$$

・地震荷重(慣性力+変位)による(一次+二次)応力の制限  

$$2[ |F^{**}/A| + (M_i^{**2} + M_o^{**2} + M_t^{**2})^{0.5}/Z ] + 2\{S_{MT}^{**} + (1/2)S_{PT}^*\} \leq 2S_y \quad \text{----- (13')}$$

(d) 地震状態も含めて同時発生最大の荷重による応力の制限

完全溶込み溶接のとき → (8)(8')式、隅肉/部分溶込み溶接のとき → (8)(8')(9)(9')式  
 記号は CC N-392-3 と同じ(但し”直管”は”エルボ”に読み替える)。

(7) トラニオンエルボは、通常のエルボに較べトラニオンの付加によって応力が高くなる一方、撓み性係数(フレキシビリティ係数)は低下するので注意する必要がある。補足 E にトラニオンエルボの撓み性係数に関する情報を示すので参照されたい。

**5. 曲管支持トラニオンに関する応力指数による強度評価**

(1) **Williams & Lewis** は下記レポートで ASME Class 1 配管への適用を前提に、応力指数法によるトラニオンエルボ(ダミーサポート)取付け部の強度評価法を提案している。ただこの場合のエルボはロングエルボに限る。

“Development of B<sub>1</sub> and C<sub>1</sub> Stress indices for Trunnion Elbow Support”

by D. K. Williams & G. D. Lewis (Trans. of ASME Vol.106 May 1984)

“Development of Primary and Secondary Moment Load Stress Indices for Trunnion Elbow”

by D. K. Williams & G. D. Lewis (84-PVP-98 (1984))

その内容については不明もあるが、基本的には Sadd & Avent と同じ議論(前節(\*1))が成立すると考えれば、下記のトラニオンエルボ交叉部分の応力強さが得られるのではないかと思う(\*5)。

① 1次応力強さ:  $S_1 = B_1\{P_o D/(2t)\} + B_{2t}(M_t/Z_t) + B_{2r}(M_r/Z_r)$

② 1次+2次応力強さ範囲:  $S_n = C_1\{P_o D/(2t)\} + C_{2t}(M_t/Z_t) + C_{2r}(M_r/Z_r)$

③ ピーク応力強さ範囲:  $S_p = K_1 C_1\{P_o D/(2t)\} + K_{2t} C_{2t}(M_t/Z_t) + K_{2r} C_{2r}(M_r/Z_r)$

$B_1 = 1.257, B_{2t} = B_{2r} = \{-0.022(D/d) + 0.091\}(D/T) + 0.973(D/T)^{-0.528}$

$C_1 = \{8.75 \times 10^{-3}(D/T) + 1.18\}\{-19.81(D/d)^{-0.015} + 20.67\}$

$C_{2t} = C_{2r} = \{-0.071(D/d) + 0.271\}(D/T) + 4.913(D/T)^{-5.961}$

$K_1 = 1.5 + 0.268(d/D)^2(D/T), K_{2t} = K_{2r} = 1.3$ (研削仕上げ)、2.0(仕上げ無し)

$M_t = (M_{xt}^2 + M_{yt}^2 + M_{zt}^2)^{0.5}, M_r = (M_{xr}^2 + M_{yr}^2 + M_{zr}^2)^{0.5}$

ここで、P<sub>o</sub>=運転圧力(MPa)、

M<sub>t</sub>, M<sub>r</sub>=トラニオン・エルボの結合部におけるトラニオン側(t)とエルボ側(r)のモーメント成分の合成値(N・mm)、ただし①②③の各ケースについて次の通り。

ケース① → 機械的荷重による

ケース②③ → 管の熱膨張や配管支持点変位及び機械的荷重(自重を除く)によるモーメント

M<sub>xt</sub>, M<sub>yt</sub>, M<sub>zt</sub>=トラニオン側モーメント M<sub>t</sub> の x,y,z 方向の各成分(N・mm)

M<sub>xr</sub>, M<sub>yr</sub>, M<sub>zr</sub>=エルボ側モーメント M<sub>r</sub> の x,y,z 方向の各成分(N・mm)、但し下記による。

もし M<sub>x1</sub> と M<sub>x2</sub> が正負同符号なら M<sub>xr</sub>=0、異符号ならば |M<sub>x1</sub>|, |M<sub>x2</sub>| いずれか

小さい方のモーメント(符号付き)を  $M_{xr}$  に置き換える(補足 B 参照のこと)。  
 $M_{yr}$ 、 $M_{zr}$  についてもこれと同じ方法で置き換える。

$D$ =エルボ外径(mm)、 $T$ =エルボ肉厚(mm)、 $Z_r$ =エルボ断面係数(mm<sup>3</sup>)

$d$ =トラニオン外径(mm)、 $t$ =トラニオン肉厚(mm)、 $Z_t$ =トラニオン断面係数(mm<sup>3</sup>)

$B_1$ =圧力に対する 1 次応力指数、 $B_{2t}$ =トラニオン側モーメントに対する 1 次応力指数

$B_{2r}$ =エルボ側モーメントに対する 1 次応力指数、

$C_1$ =圧力荷重に対する応力指数、 $C_{2r}$ =エルボ側モーメントに対する応力指数、

$C_{2t}$ =トラニオン側モーメントに対する応力指数、

$K_1, K_{2t}, K_{2r}$ =圧力荷重,トラニオン/エルボに対するピーク応力指数、

各応力強さの評価は次の通り(ASME Sect.III NB3650 参照)。

$S_1 \leq 1.5S_m$ 、 $S_n \leq 3S_m$ 、 $S_p \rightarrow S_{alt} = 0.5S_p \rightarrow$  設計疲労曲線による疲労損傷評価

$S_m$  は材料の設計応力強さ(一般に降伏応力強さ/1.5)。設計疲労曲線については JIS B8265 など参照のこと。

(2) 以上は Nuclear の Class 1 配管を対象にした評価案であるが、Class1 配管はレアケースなので一般プラントへの転用を考慮すると次の結果の通り [前節の(\*2)(\*3)(\*4)参照]。

① 1 次応力： $S_L = B_1(PD/4T) + B_w |F_t| / A_t$

$$+ (B_{2t}^2 M_{it}^2 + B_{2t}^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t + (B_{2r}^2 M_{ir}^2 + B_{2r}^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r$$

② 2 次応力範囲： $S_E = C_w |F_t| / A_t + (i_t^2 M_{it}^2 + i_t^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t$

$$+ (i_r^2 M_{ir}^2 + i_r^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r$$

ここで  $P$ =運転圧力(MPa)、 $D$ =エルボ外径(mm)、 $T$ =エルボ肉厚(mm)

$Z_r$ =エルボ断面係数(mm<sup>3</sup>)、 $Z_t$ =トラニオン断面係数(mm<sup>3</sup>)

$F_t$ =トラニオン側の軸方向フォース(N)

但しケース①→ 機械的荷重によるフォース

ケース②→ 管の熱膨張や支持点変位によるフォース

$M_{it}$ 、 $M_{ot}$ 、 $M_{tt}$ =トラニオン側(t)の面内(i)、面外(o)、振り(t)の各モーメント成分(N・mm)

但しケース①→ 機械的荷重によるモーメント

ケース②→ 配管の熱膨張や支持点変位によるモーメント

$M_{ir}$ 、 $M_{or}$ 、 $M_{tr}$ =エルボ側(t)の面内(i)、面外(o)、振り(t)の各モーメント成分(N・mm)

但しケース①→ 機械的荷重によるモーメント

ケース②→ 配管の熱膨張や支持点変位によるモーメント

各モーメント成分は次の方法で設定する。

もし  $M_{i1}$  と  $M_{i2}$  が正負同符号なら  $M_{ir} = 0$ 、異符号なら  $|M_{i1}|$ 、 $|M_{i2}|$

いずれか小さい方のモーメントを  $M_{ir}$  に置き換える(補足 B 参照)。

$M_{or}$ 、 $M_{tr}$  についてもこれと同じ方法で置き換える。

$S_L$ =1 次応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $S_E$ =2 次応力範囲(N/mm<sup>2</sup>)、 $i_r$ =エルボ応力増幅係数(= $K_{2r} C_{2r} / 2$ )

$i_t$ =トラニオン応力増幅係数(= $K_{2t} C_{2t} / 2$ )、 $B_{2t}$ 、 $B_{2r}$ 、 $K_{2t}$ 、 $C_{2t}$ =前項(1)で定義された応力指数

$B_w$ 、 $C_w$ =トラニオン軸フォースの応力係数(前 4.節で定義されるもの)

各応力強さの評価は次の通り。

$$S_L \leq S_h, \quad S_E \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \text{ または } f\{(1.25S_c + 0.25S_h) + S_h - S_L\}$$

ここで  $S_h$ =最高温度での基本許容応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $S_c$ =最低温度での基本許容応力(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f$ =応力範囲減少係数  $S_h, S_c, f$ については JPI 7S-77などを参照のこと。

(3) なお以上の Williams-Lewis の強度評価法には下記の適用制限があるので注意すること。

$$0.5 \leq d/D \leq 1.0, \quad 0.5 \leq t/T \leq 1, \quad 10 \leq D/T \leq 70,$$

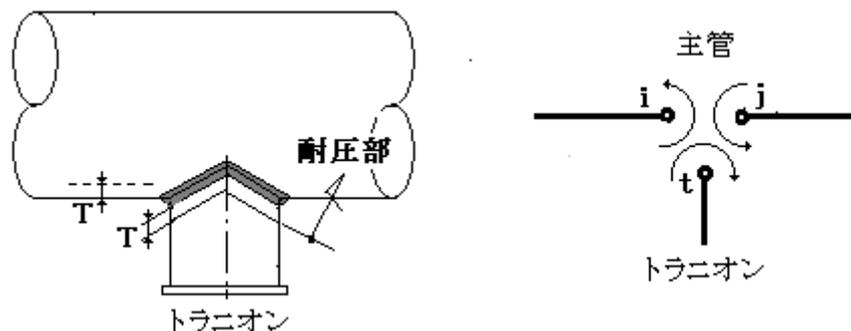
注(\*5) Williams らの原文献では  $B_1, B_2, C_1, C_2$  の4つの指数しか与えられていない。 $B_2$  と  $B_2$  についてはこれをトラニオン側とエルボ側に別ける必要がある。 $B_2, C_2$  指数は恐らく応力の高いトラニオン側でセットされたものではないかと思われるが、直管の場合と違ってエルボ側でもかなり応力指数が大きくなるのが予想されるのでここでは  $B_{2t} = B_{2r}, C_{2t} = C_{2r}$  と安全側にセットする。ピーク応力指数の  $K_1, K_{2t}$  と  $K_{2r}$  については原文献にないが、ここでは直管付きトラニオンのそれをそのまま転用する。多分  $K_{2r}, K_{2t}$  については問題ないと思うが  $K_1$  については多少? かも知れないが敢えて...

#### 補足 A. CC N-392-3 の概念とその背景

(1) Nuclear も含めて既存の配管コードは配管に溶着され一体化されたサポート部材に対し特に強度的な制限を設けていない。サポートは配管を外部から拘束しその動きをコントロールするものであるから大きなモーメント・フォースが発生することが多いが、通常のサポート構造には標準的荷重がセットされているか、実績によってその耐用性が保証されているから実質的な問題は少なく、仮に問題があっても配管に直接損傷を与えることは少ない。しかし配管と一体化された部分が万一損傷すると配管破損から内部流体の漏出に広がる恐れがある。

このため ASME は代表的な一体化サポートであるラグおよびトラニオンに対してコード補完規定としての Code Case を発行している。この Code Case は原子力/LNG/高温高圧/毒性流体など重要度の高い配管の拘束度の高いサポート構造(例えば配管アンカ)で運用されているようである。ただその知名度は低い、本 TS はこの Code Case に含まれる情報を開示しその運用について議論するものである。

(2) CC N-392-3 はトラニオンサポートの全ての強度をカバーするものではない。溶接によって配管と一体化された部位(交叉部)に限り強度評価法を提示している。一体化部分はいわゆる耐圧部として配管の一部として扱われ、設計・制作施工・試験上の要件を満たす必要がある。一方、耐圧部以外のトラニオン躯体/底板/据付ボルトなどは鋼構造設計規準ないしこれと同等の構造規格によって設計することとなり、本 Code Case の適用から外れる(注意されたし)。



(3) CC N-392-3 の強度評価はトラニオン側のモーメント・フォースによる応力配管(主管)側に派生

する応力を合算しその合算された応力を配管構成要素の観点から評価するものである。その場合、トラニオン側には独特の応力指数が定義されその応力算出は入念である。一方配管側の派生応力には応力指数が定義されることはなくその応力算出は簡素である。これは容器付きノズルの例からわかるようにノズルから伝達される荷重によって接合点近傍のノズルあるいはシェルに応力が集中する事実と類似する。即ちトラニオン側から伝達される荷重をノズル荷重のように扱っている。しかし容器付ノズルの場合、通常では容器側に有意なモーメント・フォースは存在しないので荷重伝達は一方的である。然るに配管の場合、トラニオンサポートでは配管側にもモーメント・フォースが存在する。もし配管を梁と見なせる場合はこれを **3 端付き管要素**として扱える。次項でその扱いを論じるが、要は主管側節点の i 点から j 点へのモーメント変化はトライオン側からのモーメントの付加によって誘起されたもので **(i 端モーメント) - (j 端モーメント) = t 端モーメント** と考えられる。もし交叉部廻りの応力集中を t 端に集中させるなら、主管側の(i 端-j 端)のモーメント差に応力集中を負担させる必要はない。この強度概念は、ASME Sect. III の Class 1 配管のティ分岐に限り明確に示されているが、Class 2,3 では曖昧である。そのためか、ASME B31.3 系では

分岐端 - 主管 i 端 - 主管 j 端

の各相当モーメントに対し一定の応力指数を用いて応力を求め、個別に評価するという方法を採用がとられている。これは Class 1 配管の方法に較べて安全側の結果を導くので保守的な評価としては妥当なのかも知れない。しかし、勢い応力集中度が高くなる一体型サポートにこのやり方を適用すると過度に安全側に陥る懸念がある。そこで、**本 TS では全般に Class 1 配管の考えを採用している。**即ち配管側モーメント  $M_A, M_B, M_C$  は、結合節点の(i 端-j 端)のモーメント差として扱う。

#### (4) CCN-392-3 の応力評価は次の 2 様になる。

トラニオン側と主管側の合計応力に対する評価 & 同時発生 of 最大荷重による応力制限

前者は通常配管の強度評価に準じて、

(a) 長期機械荷重による 1 次応力の制限、(b) 変位荷重による 2 次応力の制限

(a)(b)とも、トラニオン側の荷重から生じる応力と主管側の荷重から生じる応力を単純に合算している(多分、安全側になる)。(a)ではトラニオン側の応力指数 C を、(b)のその半分にしているのはたとえ機械的荷重であって 1 次応力としては部分的にしか寄与しないという ASME の考えによってようである。(b)ではトラニオン側の 2 次応力を  $S_{PT}/2$  即ちピーク応力の半分にしている。これは応力増幅係数  $i$  と応力指数  $C, K$  の関係  $i = CK/2$  に由来する。主管側に合わせるためトラニオン側に指数  $i_t$  を定義するとトラニオン側の評価応力( $i_t \sigma_n$ )は次のように表わせるからである。

$$i_t \sigma_n = \Sigma (C_j K_T / 2) \sigma_j = S_{PT} / 2 \rightarrow \text{ピーク応力の半分}$$

ここで  $C_j$  = 各応力指数( $C_W, C_L, C_N, C_T$ )、 $K_T$  = ピーク応力指数、 $\sigma_j$  = 各応力成分

後者はトラニオン側応力のみを対象としたもので、**応力制限としては特異なものになる。**即ち

$$\textcircled{1} S_{NT}^{**} = C_W |W_i| / \bar{A}_T + C_N |M_{Ni}| / Z_T + C_L |M_{Li}| / Z_T + |Q_{1i}| / \bar{A} + |Q_{2i}| / \bar{A} + C_T |M_{Ti}| / j \leq 2S_y$$

$$\textcircled{2} |Q_{1i}| / \bar{A} + |Q_{2i}| / \bar{A} + |M_{Ti}| / j \leq S_y$$

これら制限には主管側の応力は含まれておらず、トラニオン側の溶接部分のみを対象にしているようである。上記①②の評価式は

$$\textcircled{1} \text{一次応力} + \text{二次応力(範囲)} \leq \text{降伏応力}(S_y) \text{の} 2 \text{倍}$$

$$\textcircled{2} \text{一次応力相当と見做されるせん断応力相当} \leq \text{降伏応力}(S_y)$$

を意味すると思われる。①は事故時の大きな塑性サイクルの形成を回避したもの、②は限界荷重による破損を回避したものと解せられる。特に②は荷重タイプの属性によらずトラニオン付根に生じる

せん断応力/振り応力を全て一次応力相当とみなして制限したものと見ていい。これは本来の変位荷重がトラニオン-主管交叉部のような狭隘な局所形状ではほとんど吸収されないまま、あたかも機械荷重のように作用することを考慮したものではないかと思う。

上記①②は何れも同時発生の最大荷重から発生する応力であるが、そもそも同時発生の最大荷重はその定義が曖昧である。恐らくそれは、ある時点で機械荷重/変位荷重や長期荷重/短期荷重の如何を問わず存在する全荷重のピーク値を指しているのではないかと思う。具体的には安全弁等の作動/水撃に由る衝撃/大規模地震など偶発的な荷重がこれに該当する。何故イベント的な荷重まで問題にしなければならないか？ 配管という非自立の構造物を考えれば、自立を維持する支持構造物との接点が構造的に非常に重要であるという見解が、その根っこにあるような気がする。

なお 隅肉/部分溶込みの場合、完全溶け込み溶接の場合の規定の上に実際の溶着断面性能( $A_w, Z_w$ )に基づくダメ出し規定が加わっている。これは接合部廻りのトラニオン壁/配管壁のグロスな応力を確認した上で、溶着断面のローカルな応力を確認するという手順を踏んだものと解せられる。

(5) 日本は地震多発国であるから配管設備の耐震性は重要である。故に **KHK 耐震指針**<sup>(9)</sup>の趣旨、即ち

① 地震時の(長期+短期)機械荷重による一次応力(片振幅)を材料許容応力(S)以下に制限

② 地震時の慣性力/変位による(1次+2次)応力(全振幅)をシェークダウン限界( $2S_y$ )以下に制限を満たす必要がある。①は塑性崩壊防止を意図している。②は地震サイクルを対象に塑性サイクルの回避を意図している。ただ設備運転中に地震が起きることで生じる

運転荷重(内圧+(自重)+地震荷重(慣性力+変位)+(熱膨張+アンカー熱変位)

のオーバーオールな組み合わせは無視している(その場合の損傷度は軽微と見ている)。

(6) N-392-3では、トラニオンの主管への溶着法として、全周の隅肉&/or 部分溶け込み溶接を認めているが、基底に亀裂があり破壊力学的な不安が残る。「隅肉溶接+部分溶込み溶接」または「完全溶込み溶接」の何れかを選ぶのがベターではないかと思う。

#### 補足 B. 主管側モーメント $M_r$ の設定方法の背景

クラス 1 配管ではティ分岐(→3つの管端を持った配管要素)について次のような規定を設けている。

(3) 分岐管の場合  
主管と分岐管の中心線の交点に対してモーメントを求める。

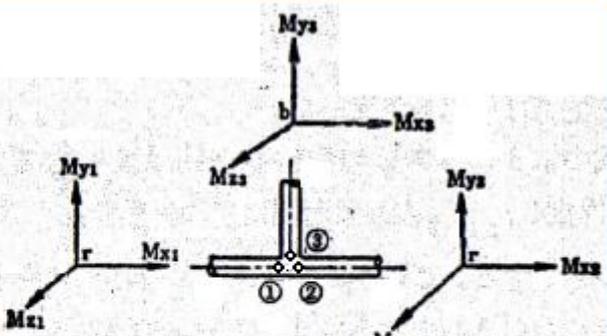
$M_{bp}$  は分岐管の合成モーメントで、  

$$M_{bp} = \sqrt{M_{x_3}^2 + M_{y_3}^2 + M_{z_3}^2}$$

$M_{rp}$  は主管の合成モーメントで、  

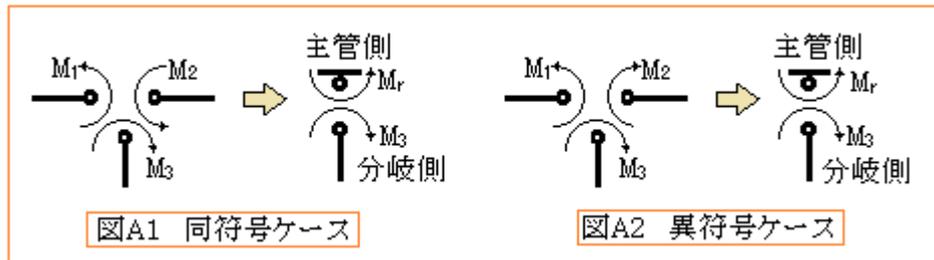
$$M_{rp} = \sqrt{M_{x_r}^2 + M_{y_r}^2 + M_{z_r}^2}$$

ここで、 $M_{x_r}$ 、 $M_{y_r}$  及び  $M_{z_r}$  は以下により求める。  
 $M_{i_1}$  と  $M_{i_2}$  の正負符号が同一なら  $M_{ir} = 0$ 、異符号なら  $M_{ir}$  は  $M_{i_1}$ 、 $M_{i_2}$  のうち絶対値の小さい方をとる。ここで  $i = x, y, z$



[テキスト(6)より引用]

この規定ではモーメント成分  $M_{xr}$ 、 $M_{yr}$ 、 $M_{zr}$  の値を、例えば主管側成分  $M_{x1}, M_{x2}$  の符号比較から設定するようになっている。その背景について確かな情報はないが、以下のように解釈できるのではないかと思う。なおここでは  $M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} \rightarrow M_1$ 、 $M_{x2}, M_{y2}, M_{z2} \rightarrow M_2$ 、 $M_{x3}, M_{y3}, M_{z3} \rightarrow M_3$  と表記する。



まず  **$M_1$  と  $M_2$  が同符号の場合** を考える。分岐側が右回り(正)の時の例を図 **A1** に示す。モーメントの均衡則から  $M_1 + M_2 + M_3 = 0$  であるが、 $M_1, M_2, M_3$  を正(絶対値)として表示すると

$$M_3 - M_1 - M_2 = 0 \rightarrow M_3 = M_1 + M_2 \quad \text{-----(1)}$$

また主管側モーメントを絡めて  $M_r$  にすると  $M_r = M_1 - M_2$  -----(2)

(1)(2)式を辺々差し引くと  $M_3 - M_r = 2M_2$  になる。図 A1 左の場合、 $M_3 + M_r = 0$  なので、代入して

$$-2M_r = 2M_2 \rightarrow 2(M_r + M_2) = 0 \quad \text{-----(3)}$$

(3)式では  $M_r, M_2 \geq 0$  なので、この場合、 $M_2 = 0$  でかつ  $M_r = 0$  でなければならない。即ち同符号ケースで分岐側が右廻り正の場合、 $M_r = 0$  とおける。

これは分岐側が左廻り(負)の場合も成立する。従って**同符号ケースは  $M_r = 0$**  となる。

次に  **$M_1, M_2$  が異符号の場合** を考える。分岐側が右回り(正)の時の例を図 **A2** に示す。モーメントの均衡則から  $M_1 + M_2 + M_3 = 0$  であるが、 $M_1, M_2, M_3$  を正(絶対値)として表示すると

$$M_3 - M_1 + M_2 = 0 \rightarrow M_3 = M_1 - M_2 \quad \text{-----(1)}$$

また主管側モーメントを絡めて  $M_r$  にすると  $M_r = M_1 + M_2$  -----(2)

(1)(2)式を辺々差し引くと  $M_3 - M_r = -2M_2$  になる。図 A2 左の場合、 $M_3 + M_r = 0$  なので代入して

$$-2M_r = -2M_2 \rightarrow M_r = M_2$$

$M_1$  と  $M_2$  の関係は、 $M_r$  と  $M_1$  が同じ左回転なので、右回転の  $M_1$  は必ず  $M_2$  よりも大きくなる必要があり、均衡を保つ上で  $M_1 > M_2$  でなければならない。即ち  $M_r$  には  $M_1, M_2$  の小さい方が割当られる。なお  $M_3$  を左廻りにするとこの関係は  $M_r = M_1$  &  $M_1 < M_2$  に変わる。いずれにしる  $M_r$  には  $M_1, M_2$  の小さい方が採られる。従って **$M_1, M_2$  が異符号ケースでは、 $M_1$  と  $M_2$  の絶対値が小さい方のモーメントを  $M_r$  に割当てればよい。**

以上の3管端配管要素の考えは直管付きトラニオンにも適用できると思われる。なお、主管側モーメント  $M_r$  と分岐側モーメント  $M_3$  は**接面で平行し近接する**ので発生する応力は重なりと見做して、ASME は  $M_r$  と  $M_3$  による応力を単純に合算しているように思う。

次ページに続く

【 2/2 分冊へ 】