

| | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------------|
| 【整番 SE-08-QA-001】 | 【標題】耐震応力評価に関するごく単純な疑問 | |
| 分類：構造(耐震強度)/種別：質疑応答 | 作成年月：H26.12/改訂：Ver.0.0(H27.1) | 作成者：N. Miyamoto |

全7枚

Q：配管系では、[内圧荷重+重量荷重+地震荷重+熱荷重]による応力の組み合わせについて評価は行わないのか？ 行わないのであれば、その理由を聞かせてほしい。

A：通常、この荷重の組み合わせから生じる応力の評価は行なっていません。その理由については以下のように考えています。

(1) KHK 発行の高圧ガス設備等耐震設計指針—レベル 1 耐震性能評価(配管編)の規定、すなわち

2.3.3 配管の算定応力(表 2.1) & 2.4 配管の耐震設計用許容応力(表 16.5)

によれば、地震に関する応力制限は次のようになっている。

- ① [流体圧力+運転重量+地震慣性力]による長手方向応力 $\sigma_L \leq$ 耐震設計用許容応力 S
- ② [地震慣性力+地震相対変位]による繰り返し応力範囲 $\sigma_E \leq$ 耐震設計用許容応力 $2S_y$

①は地震時に配管に作用している全ての機械荷重から生じる 1 次応力を抑えるもので、許容応力としては、**延性破断防止の観点**から降伏応力の 90%や引張強さの 60%といった比較的厳しい値が設定されている。

②は地震荷重のみを対象にして、地震時に繰り返される [地震慣性力による 1 次応力+地震相対変位による 2 次応力] の変動幅を抑えるもので、許容応力としては**疲労損傷防止**や過大変形の防止の観点から、降伏応力の 2 倍と比較的緩やかな値が設定されている。

配管の強度は、一般に延性破断防止と疲労損傷防止の観点から保たれていることを考えれば、上記①②の応力制限は理に適っているように見える。しかし②の場合、地震時も存在しているはずの流体圧力、運転重量及び熱膨張拘束荷重(→熱荷重)が見あたらない。即ち、

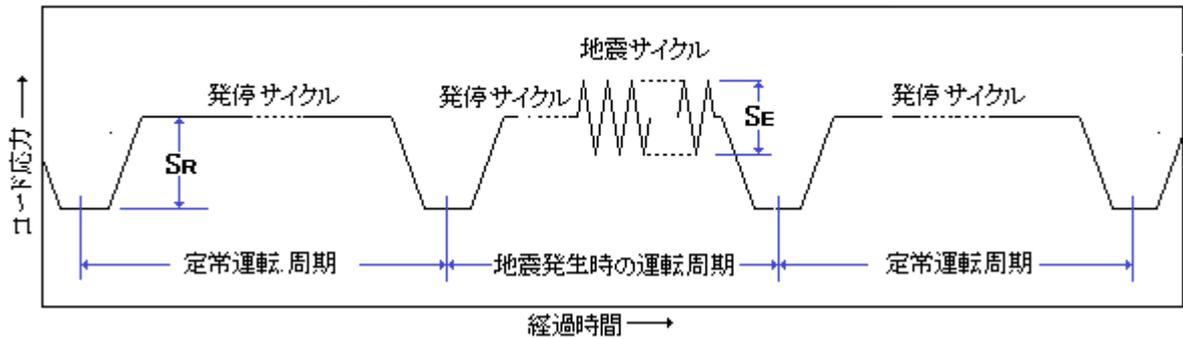
流体圧力+運転重量+地震荷重(慣性力+相対変位)+熱荷重

の組み合わせ(以下 **全荷重セット**)から生じる(1 次+2 次)応力の制限が欠如しているのでは？という疑問が湧いてくる(**ご指摘の通り**です)。

確かに、耐震設計指針(配管編)の第三章 配管系のレベル 1 耐震性能評価例(例題)では、応力評価は上記①②に限られている。耐震設計指針には、このように全荷重セットが無視されていることについての説明は含まれていない。そこで改めて**なぜ全荷重セットの応力評価が割愛されてしまったのか、疲労損傷防止の観点からその背景を考えてみたい。**

(2) 配管系で予想される応力変化を図 A に示す。この場合、横軸は運転経過を、縦軸は配管コードや基準類⁽¹⁾⁽²⁾で与えられる応力(→コード応力)を表示している。通常は**発停サイクル**(停止—運転—停止)が繰り返されているが、地震が発生すると地震サイクルが発停サイクルの上に重なってくる。

図A 配管系のコード応力ヒストリシス



図中のコード応力は次のように定義される。

S_R = 定常運転時の(1次応力+2次応力)範囲(= $S_L + S_E^*$) → S_E^* は熱膨張によるもの

S_E = 地震による(1次+2次応力)範囲

S_R はコードの種類によって式が異なっているが、おおむね類似の計算結果を与える。 S_E はKHKの耐震設計指針で定義されるものである。 S_R, S_E には次のような制限量(許容応力)が与えられている。

$$S_R \leq f(1.25S_c + 1.25S_h) \quad , \quad S_E \leq 2S_{yh} \quad (\text{なお係数 } f \leq 1)$$

ここでは、最も厳しい応力状態を想定して、次のように制限量ギリギリの値を用いる。

$$S_R = 1.25S_c + 1.25S_h \quad , \quad S_E = 2S_{yh}$$

- (3) さて図Aの応力ヒストリシスは、図Bに示すような3つのサイクルパターンから構成されている。

図B コード応力サイクルのパターン



この図の3つのコード応力範囲 S_R , $(S_R + 0.5S_E)$, S_E は、繰返し応力の規模を表わしているが、どれも公称的なもので、実際に配管構成要素や溶接部の局部に生じる応力範囲は、応力やひずみの集中によって拡幅されてもっとその範囲が広がる。この拡幅された応力範囲の1/2は応力振幅(片振幅) S_a として疲労損傷評価の際の決定的なパラメータになる。 S_a は次式で与えられる。

$$S_a = (1/2)(E_c/E_h)K_e S_p = (1/2)(E_c/E_h)K_e K_o S_r$$

ここで S_p = ピーク応力範囲、 S_r = コード準拠の(1次+2次応力)範囲、 K_o = 応力倍率、

K_e = ひずみ補正係数、 E_c = 常温の縦弾性係数、 E_h = 運転温度の縦弾性係数

(1次+2次応力)範囲 S_r は次式で求める。

パターン(a)の場合： $S_r = S_R = 1.25(S_c + S_h)$

パターン(b)の場合： $S_r = (S_R + 0.5S_E) = 1.25(S_c + S_h) + S_{yh}$

パターン(c)の場合： $S_r = S_E = 2S_{yh}$

ここで、 S_c = 常温における管材料の許容応力、 S_h = 運転温度における管材料の許容応力、

S_{yh} = 運転温度における管材料の降伏応力または0.2%耐力

応力倍率 K_o はいずれの場合も2.0をとる(補1参照のこと)。またひずみ補正係数 K_e は次の式で求める(補2参照のこと)。

炭素鋼の場合： $K_e = 1 + 0.8\{S_r/S_{ym} - 1\}$

SUS 鋼の場合： $K_e = 1 + 1.235\{S_r/S_{ym} - 1\}$

ここで、 S_{ym} ＝平均降伏応力、SUS 鋼→オーステナイト系ステンレス鋼

- (4) 応力サイクルパターンが単一な場合は、設計疲労曲線図(S-N 曲線図)から上記の S_a に対する疲労限界サイクル数(繰返し回数) N を読み取り、実際のサイクル数 n が N を越えるか否かによって疲労を判定するが、本ケースではサイクルパターンが 3 つなので、次の累積損傷則で判定する。

$$D_f = n_a/N_a + n_b/N_b + n_c/N_c \rightarrow D_f \geq 1 \text{ のとき疲労損傷あり、} D_f < 1 \text{ のとき疲労損傷なし}$$

通常の運転ではパターン(a)が繰り返されるが、地震が起きるとパターン(b)(c)が付加される。その場合、パターン(a)の類いについては、通念的なプラント設置条件を前提にして $\Sigma n_a/N_a < 1$ になる様に、予めコード応力 S_R を許容応力 $S_A [=f(1.25S_c + S_h)]$ 以下にしているので、 $[S_R \rightarrow S_p \rightarrow S_a \rightarrow N_a \rightarrow (n_a/N_a) < 1$ の確認] というような設計プロセスはとられていない。仮にこのプロセスがとられたとすれば、損傷度($\Sigma n_a/N_a$)の値は決して 1.0 ではなく、例えば 0.7 といった値で 0.2999 のマージン(裕度)を持っているはずである。このとき、もし地震によって生じる損傷度 $[n_b/N_b + n_c/N_c]$ が 0.2999 内に収まらなければ、その配管は設備的に成立しない(設計を変更するか改造する必要あり)。故に耐震設計指針に規定される次の制限に従う限りは、累積損傷度 $D_f < 1$ が満足されるはずである。

$$\textcircled{2} \text{ [地震慣性力+地震相対変位]による繰返し応力範囲 } \sigma_E \leq \text{耐震設計用許容応力 } 2S_y$$

以上の検証は代数処理で行えるが、わかりにくくなるので、以下、例題をあげて確認してみる。

- (5) 例題 1：管材料) STPG370 またはその相当、運転温度：250℃

許容応力) $S_c = 113 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_h = 113 \text{ N/mm}^2$

降伏応力) $S_{yc} = 215 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_{yh} = 169 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_{ym} = (215 + 169)/2 = 192 \text{ N/mm}^2$

(図 B(a)(b))、 169 N/mm^2 (図 B(c))

縦弾性係数) $E_c = 206000 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_h = 184400 \text{ N/mm}^2$

まず(1次+2次応力)範囲 S_r を求めると

パターン(a)： $S_r = 1.25(S_c + S_h) = 1.25 \times 2 \times 113 = 283 \text{ N/mm}^2$

パターン(b)： $S_r = 1.25(S_c + S_h) + S_{yh} = 283 + 169 = 452 \text{ N/mm}^2$

パターン(c)： $S_r = 2S_{yh} = 2 \times 169 = 338 \text{ N/mm}^2$

次にひずみ集中係数 K_e を求めると

パターン(a)： $K_e = 1 + 0.8\{S_r/S_{ym} - 1\} = 1 + 0.8 \times (283/192 - 1) = 1.379$

パターン(b)： $K_e = 1 + 0.8\{452/192 - 1\} = 2.08$

パターン(c)： $K_e = 1 + 0.8\{338/169 - 1\} = 1.8$

次に応力振幅 S_a を求めると

パターン(a)： $S_a = (1/2)(E_c/E_h)K_eK_0S_r$
 $= (1/2)(206000/184400) \times 1.379 \times 2 \times 283 = 436 \text{ N/mm}^2$

パターン(b)： $S_a = (1/2)(206000/184400) \times 2.08 \times 2 \times 452 = 1050 \text{ N/mm}^2$

パターン(c)： $S_a = (1/2)(206000/184400) \times 1.8 \times 2 \times 338 = 680 \text{ N/mm}^2$

JIS B8266「圧力容器の構造－特定規格」付属書 8 の図 1 より限界繰返し数 N は、

パターン(a)： $N_a = \sim 2000$ 回

パターン(b) : $N_b \sim 150$ 回

パターン(c) : $N_c \sim 600$ 回

設計地震動の発生を設備寿命中に 2 回とし、地震波のサイクル数を延べ 100 回とすれば、

$$\text{地震動による疲労損傷度 } [n_b/N_b + n_c/N_c] = 2/150 + 100/600 = 0.013 + 0.167 = 0.18$$

になる。従って設計地震動による損傷度は、設備の限界疲労損傷度の 1/5 弱になる。

この場合、当該配管系の発停サイクル数の限界値 n_a は、次式から得られる。

$$n_a/N_a + n_b/N_b + n_c/N_c = 1 \rightarrow n_a = N_a \{1 - (n_b/N_b + n_c/N_c)\}$$

N_a = 約 2000 回であるから、この限界値は $n_a = 2000 \times \{1 - 0.18\} = 1640$ 回になる。発停サイクルを 20 回/年としても 25 年寿命で 500 回、加圧・脱圧の繰り返し操作や緊急時の操作を 100 回相当としても合計 600 回なので、まだ 1040 回の発停サイクル数が残っている。恐らく 600 回/25 年はプラント設備の通念として安全側なので、設計地震動による損傷度が、設備の限界疲労損傷度の約 1/5 を占めるといふ事実は十分に受容できると思う。ただバッジ運転等によって発停サイクルが増加したり緊急操作などが頻繁に繰返されると、地震を含めた累積損傷が 1 を越えてしまうこともある(要注意)。

(6) 例題 2 : 管材料) SUS304TP、運転温度 : 350°C

許容応力) $S_c = 137 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_h = 111 \text{ N/mm}^2$

降伏応力) $S_{yc} = 205 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_{yh} = 124 \text{ N/mm}^2$ 、 $S_{ym} = (205 + 124)/2 = 165 \text{ N/mm}^2$

(図 B(a)(b))、 124 N/mm^2 (図 B(c))

縦弾性係数) $E_c = 195000 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_h = 172600 \text{ N/mm}^2$

まず(1 次+2 次応力)範囲 S_r を求めると

パターン(a) : $S_r = 1.25(S_c + S_h) = 1.25 \times (137 + 111) = 310 \text{ N/mm}^2$

パターン(b) : $S_r = 1.25(S_c + S_h) + S_{yh} = 310 + 124 = 434 \text{ N/mm}^2$

パターン(c) : $S_r = 2S_{yh} = 2 \times 124 = 248 \text{ N/mm}^2$

次にひずみ集中係数 K_e を求めると

パターン(a) : $K_e = 1 + 1.235\{S_r/S_{ym} - 1\} = 1 + 1.235 \times (310/165 - 1) = 2.09$

パターン(b) : $K_e = 1 + 1.235\{434/165 - 1\} = 3.01$

パターン(c) : $K_e = 1 + 1.235\{248/124 - 1\} = 2.235$

次に応力振幅 S_a を求めると

パターン(a) : $S_a = (1/2)(E_c/E_h)K_e K_o S_r$
 $= (1/2)(195000/172600) \times 2.09 \times 2 \times 310 = 732 \text{ N/mm}^2$

パターン(b) : $S_a = (1/2)(195000/172600) \times 3.01 \times 2 \times 434 = 1476 \text{ N/mm}^2$

パターン(c) : $S_a = (1/2)(195000/172600) \times 2.235 \times 2 \times 248 = 626 \text{ N/mm}^2$

JIS B8266 「圧力容器の構造—特定規格」 付属書 8 の図 1 より限界繰り返し数 N は、

パターン(a) : $N_a \sim 1300$ 回

パターン(b) : $N_b \sim 130$ 回

パターン(c) : $N_c \sim 2400$ 回

設計地震動の発生サイクルを例題 1 と同じように 2 回/延 100 サイクルとすれば、

$$\text{地震動による疲労損傷度 } [n_b/N_b + n_c/N_c] = 2/130 + 100/2400 = 0.015 + 0.042 = 0.057$$

になる。従って設計地震動による損傷度は、設備の限界疲労損傷度の**6%弱**になる。

この場合、当該配管系の発停サイクル数の限界値 n_a は、次式から得られる。

$$n_a = N_a \{1 - (n_b/N_b + n_c/N_c)\} = 1300 \times \{1 - 0.057\} = 1226 \text{ 回}$$

例題 1 と同様に、等価な発停サイクルを 600 回/25 年とすれば、マージンとして 626 回が残ることになる。十分だと思われる。

(7) さて全荷重セットによる(1次+2次)応力範囲は、パターン(b)の応力範囲に該当している。以上の結果から、パターン(b)の損傷度(n_a/N_a)は、例題 1 でも例題 2 でも 2%以下で、殆ど無視できるレベルであることがわかった。これは地震サイクルに対し②の規定[$S_E \leq 2S_{yH}$]を設けたことから派生したものである。従って全荷重セットから生じる(1次+2次)応力に対して特に制限を設ける必要はないということになる。

(5) 以上、例題を挙げて地震荷重が設備の疲労寿命に及ぼす影響を検討してみた。この 2 例だけで地震の影響を見切ってしまうのはもちろん僭越であり、もっと事例を検討する必要がある。しかし傾向としては、例題 1,2 に類似した結論になるのではないかと思われる。

< 補足説明 >

(補 1) コード応力(ここでは S_R, S_E, S_F)は、プラント配管に適用される指標的な応力で、応力係数 i を長手方向公称応力 σ に乗じたものである。然るに疲労評価では局部の応力集中を考慮したピーク応力 S_p が必要で、原子力のクラス 1 配管ではこれを次式でカウントしている。

$$S_p = CK\sigma \quad (C, K \rightarrow \text{応力指数})$$

応力係数 I と応力指数の積 $C \cdot K$ の関係は、公称的には $i = CK/2$ とされているので、

$$S_p = CK\sigma = 2i\sigma \rightarrow S_p = 2S_F$$

を疲労評価に使用することになる。従ってコード応力に乗じる応力倍率 K_0 は **2** になる。

(もちろん全ての配管要素で、正確に $S_p = 2S_F$ とは限らないが About としては成立する。)

(補 2) ある部分の応力範囲が塑性域にはいると、発生ひずみが増加し疲労しやすくなる。このひずみ集中の度合いを簡易的に見積る方法として簡易弾塑性解析という方法がある。JIS B8266 付属書 8 の規定によれば、簡易弾塑性解析は以下の通り。

(4) 簡易弾塑性解析による方法

1 次応力と 2 次応力の和の応力強さ($P_L + P_b + Q$)の変動範囲は、次の条件(a)~(e)を満足する場合には、3.3(4)の許容限界 $3S_m$ を越えてもよい。

(a) ($P_L + P_b + Q$)から熱による曲げ応力を除いた応力強さの変動範囲は $3S_m$ 以下である。

(b) 弾性計算で求めた繰り返し応力強さ振幅に次の係数 K_e を乗じた値を用いて 4. によって疲労解析を行う。ただし弾性計算する時、(1)(b)の修正ポアソン比をもちいなくてもよい。

ここに、 $S_n \leq 3S_m$ の場合、 $K_e = 1.0$

$$3S_m \leq S_n < 3mS_m \text{ の場合、 } K_e = 1.0 + \{(1-n)/n/(m-1)\} \{S_n/(3S_m) - 1\}$$

$$S_n \geq 3mS_m \text{ の場合、 } K_e = 1/n$$

ただし S_n : 1次応力と2次応力の和の応力強さの変動範囲(N/mm²)

m, n : 材料による定数で表4による。

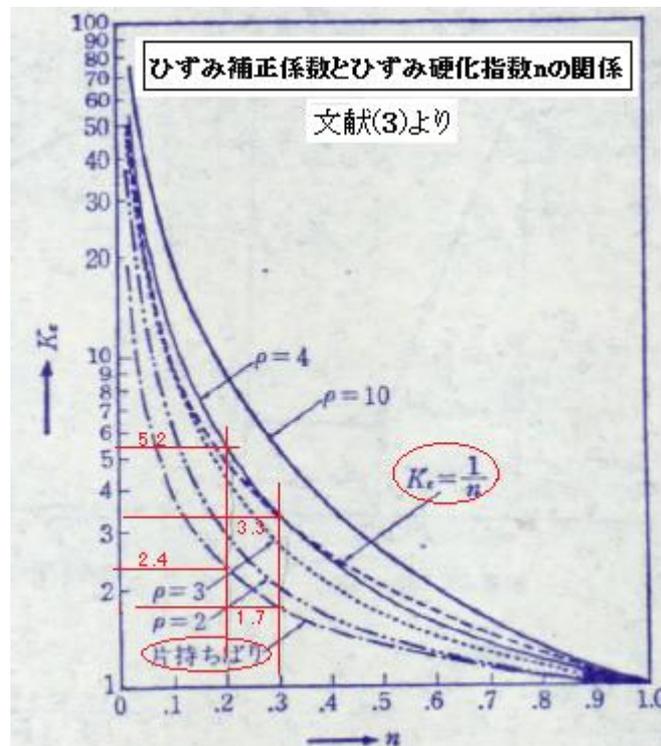
表4 材料定数 m, n

| 材料 | m | n | $T_{max} \text{℃}$ |
|----------------|-----|-----|--------------------|
| 炭素鋼 | 3.0 | 0.2 | 371 |
| 低合金鋼 | 2.0 | 0.2 | 371 |
| マルテンサイト系ステンレス鋼 | 2.0 | 0.2 | 371 |
| オーステナイト系ステンレス鋼 | 1.7 | 0.3 | 427 |
| ニッケル・クロム・鉄合金 | 1.7 | 0.3 | 427 |
| ニッケル・銅合金 | 1.7 | 0.3 | 427 |

以上の簡易弾塑性解析から得られるひずみ補正係数 K_e はかなり安全側になると云われている⁽³⁾。ひずみ補正係数は、切欠き材のひずみ量の解析から設定されているが、切欠きの度合いが強まるにつれて大きくなる。下図はこの関係を示したもので、図中の ρ は切欠きの度合いを表し、

点線 → 規格で与えられる最大ひずみ補正係数($K_e=1/n$)、

1点鎖線 → 片持ち梁の場合の最大ひずみ補正係数を表している。



炭素鋼の場合 $n=0.2$ 、オーステナイトステンレス鋼(SUS鋼)の場合 $n=0.3$ なので

炭素鋼の最大ひずみ係数值： 規格→5.0、片持ち梁→2.3

SUS鋼の最大ひずみ係数值： 規格→3.3、片持ち梁→1.7

なおこの図の片持ち梁は切欠き無し $\rho=1$ に近いので、平滑材とみていい。配管の場合 エルボやティで最大の応力が発生するが、これらはいずれも成形品で平滑材ないしこれに近いとみてもいいので、実際の K_e はかなり低下することになる。ここで、実際の最大ひずみ補正係数を

$$K_e = 1.0 + (1/X) \{ (1-n)/n / (m-1) \} \{ S_n / (3S_m) - 1 \}$$

$$= 1.0 + (1/X)\{(1-n)/n(m-1)\}\{3mS_m/(3S_m) - 1\} = 1.0 + (1/X)\{(1-n)/n\}$$

とすれば、炭素鋼の場合 $K_e = 1.0 + (1/X)\{(1-n)/n\} = 1 + 4/X = 2.3 \rightarrow X = 3.08$

$$\text{SUS 鋼の場合 } K_e = 1.0 + (1/X)\{(1-n)/n\} = 1 + 2.33/X = 1.7 \rightarrow X = 3.33$$

いずれも 25%程度の裕度をみれば

$$\text{炭素鋼の場合) } X = 3.08/1.25 = \sim 2.5, \quad \text{SUS 鋼の場合) } X = 3.33/1.25 = \sim 2.7$$

従って、それぞれの K_e 式は次のようになる。

$$\text{炭素鋼の場合: } K_e = 1.0 + (1/2.5)\{(0.8/0.2/2)\{S_n/(3S_m) - 1\}\} = 1 + 0.8\{S_n/(3S_m) - 1\}$$

$$\text{SUS 鋼の場合: } K_e = 1.0 + (1/2.7)\{(0.7/0.3/0.7)\{S_n/(3S_m) - 1\}\} = 1 + 1.235\{S_n/(3S_m) - 1\}$$

これらの式で S_n は(1次+2次)応力強さとされるが、これは(補 1)を引用して

$$S_n = C\sigma = (2i/K)\sigma = 2i\sigma/K = 2S_r/K$$

で表される。 K はピーク応力指数で、絞り効果すなわち局部の応力集中を表現するものであるから、ここで対象にしている平滑材相当の配管要素では $K=1$ とおける。故に $S_n = 2S_r$ とおける。また設計応力強さ S_m は平均降伏応力の 2 倍なので $3S_m = 2S_{ym}$ とおける。これらの関係を用いて、

$$\text{炭素鋼の場合: } K_e = 1 + 0.8(S_r/S_{ym} - 1) \quad \text{-----}(a_1)$$

$$\text{SUS 鋼の場合: } K_e = 1 + 1.235(S_r/S_{ym} - 1) \quad \text{-----}(a_2)$$

以上は、エルボ/ティなど断面に絞りがなく平滑材として扱える配管要素に適用できる。絞りがあって局部性の強い応力集中がある場合(例えば SW 継手やノズルティなど)は、 $X=1$ 即ちオリジナル式を使うことになる。すなわち

$$\text{炭素鋼の場合: } K_e = 1.0 + \{(0.8/0.2/2)\{S_n/(3S_m) - 1\}\} = 1 + 2\{S_n/(3S_m) - 1\}$$

$$\text{SUS 鋼の場合: } K_e = 1.0 + \{(0.7/0.3/0.7)\{S_n/(3S_m) - 1\}\} = 1 + 3.33\{S_n/(3S_m) - 1\}$$

これらの式で、 S_n は、 $K=1$ でないので $S_n = 2\sigma_r$ とはおけない。絞りの強い配管要素では K は 2 に近いか 2 を越える値であるので、仮に $K=2$ とすれば、 $S_n = 2i\sigma/2 = i\sigma = \sigma_r$ であるから

$$\text{炭素鋼の場合: } K_e = 1 + 2(S_r/(2S_{ym}) - 1) \quad \text{-----}(b_1)$$

$$\text{SUS 鋼の場合: } K_e = 1 + 3.33(S_r/(2S_{ym}) - 1) \quad \text{-----}(b_2)$$

(a₁)と(b₁)、(a₂)と(b₂)式をくらべると

$$(a_1) - (b_1) = 1.2\{1 - S_r/(6S_{ym})\}, \quad (a_2) - (b_2) = 2\{1 - S_r/(5S_{ym})\}$$

S_r は S_{ym} より大きい、せいぜい 2.7 倍程度なので上記はいずれもプラスになる。従って、(a₁),(a₂)の方が(b₁),(b₂)式より大きくなる。故にここではひずみ補正係数として(a₁),(a₂)を採用する。

引用文献)

- (1) JEAC 3706 圧力配管及び弁類規定 (日本電気協会)
- (2) KHK S-0801 高圧ガスの配管に関する基準 (高圧ガス保安協会)
- (3) 安藤,岡林「原子カプラントの構造設計」(東大出版会)