

KHKS



超高圧ガス設備に関する基準

KHKS 0220 (2020)

案

令和2年 月 日 改正

高圧ガス保安協会

2020

案

目 次

1	適用範囲	1
2	引用規格	1
3	用語の意味	2
4	材料	4
4.1	材料一般	4
4.2	製造方法及び熱処理	4
4.2.1	鍛鋼品の製造方法及び熱処理	4
4.2.2	管の製造方法及び熱処理	4
4.3	化学成分	4
4.4	機械的性質	5
4.4.1	材料強度の設定値	5
4.4.2	伸び及び絞り	6
4.4.3	衝撃試験	6
4.4.4	要求吸収エネルギー値	6
4.5	機械試験の種類、試験片形状及び採取位置	8
4.5.1	機械試験の種類及び試験片形状	8
4.5.2	機械試験片の採取位置	8
4.5.3	再試験	9
4.6	鍛鋼品の非破壊試験	9
4.6.1	鍛鋼品の超音波探傷試験	9
4.6.2	鍛鋼品の磁粉探傷試験	10
4.6.3	鍛鋼品の浸透探傷試験	10
4.7	管の非破壊試験	10
4.7.1	管の超音波探傷試験	10
4.7.2	管の渦流探傷試験	10
4.7.3	管の磁粉探傷試験	10
4.7.4	管の浸透探傷試験	11
4.8	その他の部材の非破壊試験	11
4.9	欠陥の除去	11
5	設計	12
5.1	設計一般	12
5.1.1	設計仕様書の記載事項	12
5.1.2	設計で考慮する荷重	12
5.2	設計の基本事項	12
5.3	円筒胴及び関連部位の強度解析	13

5.3.1	単肉円筒胴	13
5.3.2	多層円筒胴	14
5.3.3	円筒胴の穴	15
5.3.4	円筒胴の内面の段差	15
5.3.5	ねじ構造	18
5.3.6	平ふた板及び平鏡板	19
5.3.7	高圧管及び高圧配管要素	19
5.3.8	はめ合い部	20
5.3.9	フランジ継手	20
6	疲労解析	21
6.1	疲労解析の前提	21
6.2	記号の意味	23
6.3	疲労解析の方法	24
6.4	最適疲労曲線	25
6.4.1	最適疲労曲線の式	25
6.4.2	最適疲労曲線に用いる材料の引張強さ	27
6.4.3	設計係数	27
6.4.4	許容値算定の手順	28
6.4.5	変動応力の場合への適用	29
6.5	設計疲労曲線	30
6.6	累積使用係数	30
6.7	疲労強度の実験的評価	30
7	破裂前漏洩解析	34
7.1	一般	34
7.2	解析方法	34
8	き裂進展解析	36
8.1	一般	36
8.2	円筒胴内面のき裂進展解析	36
8.3	円筒胴外面のき裂進展解析	42
8.4	その他の部位のき裂進展解析	43
8.5	応力分布が一つの多項式で近似できない場合のき裂進展解析	43
8.6	応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析	43
9	工作及び検査	45
9.1	材料の確認	45
9.2	表面仕上げ及び検査	45
9.2.1	表面仕上げ	45
9.2.2	耐圧部の検査	45

9.3	管の曲げ加工	45
9.3.1	管の曲げ加工による外径変化率及び減肉率	45
9.3.2	管の冷間曲げ加工後の熱処理	46
9.3.3	管の曲げ加工後の検査	46
9.4	自緊処理	46
9.5	溶接	47
9.6	ねじ加工	47
10	耐圧試験	48
10.1	一般	48
10.2	水圧試験	48
10.3	気圧試験	49
10.4	気液併用耐圧試験	50
11	気密試験	51

附属書 A	（規定）多層円筒胴の塑性不安定解析法	55
附属書 B	（規定）材料の強度低下係数	59
附属書 C	（規定）材料の基準縦弾性係数 E 、及び基準縦弾性係数 E と運転温度 における縦弾性係数 E_d の比	65
附属書 D	（規定）き裂進展解析に用いる自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$	67
附属書 E	（規定）圧縮水素用の設備に適用する場合の追加事項	71
附属書 F	（参考）き裂進展解析による許容繰返し回数の決定	83
附属書 G	（参考）計算例及び評価例	85
附属書 H	（参考）超高圧ガス設備の脈動圧力の疲労解析例	99
附属書 I	（参考）各種部位のき裂進展解析法	107
附属書 J	（参考）耐圧部の材料の破壊靱性	127
附属書 K	（参考）単肉円筒胴の周方向応力の半径方向分布の近似	131
附属書 L	（参考）応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析例	133
附属書 M	（参考）交差穴部の破裂前漏洩解析	139

解説

案

1 適用範囲

この基準は、高圧ガス保安法の適用を受ける圧力容器、圧縮機、配管等の超高压設備の耐圧部の材料、設計、工作、試験及び検査に適用する。ただし、次の **a)**、**b)**及び **c)**の設備には適用しない。

- a) 火気を直接受ける設備及び溶接構造の設備
- b) 設計圧力が 350 MPa 以上の設備
- c) 設計温度が材料のクリープ温度域にある設備

なお、この基準に規定のない項目については、**JIS B 8266** の規定に準拠する。

2 引用規格

次に掲げる規格は、この基準に引用されることによって、この基準の規定の一部を構成する。

JIS B 0209-1 (2001) 一般用メートルねじ—公差—第 1 部：原則及び基礎データ

JIS B 0209-2 (2001) 一般用メートルねじ—公差—第 2 部

：一般用おねじおよびめねじの許容限界寸法—中（はめあい部分）

JIS B 0209-3 (2001) 一般用メートルねじ—公差—第 3 部：構造体用ねじの寸法許容差

JIS B 0601 (2013) 製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状

：輪郭曲線方式—用語、定義及び表面性状パラメータ

JIS B 8265 (2017) 圧力容器の構造—一般事項

JIS B 8266 (2003) （追補 1：2006）圧力容器の構造—特定規格

JIS B 8267 (2015) 圧力容器の設計

JIS B 8284 (2003) 圧力容器の急速開閉ふた装置

JIS B 8285 (2010) 圧力容器の溶接施工方法の確認試験

JIS G 0306 (1988) （追補 1：2009）鍛鋼品の製造、試験及び検査の通則

JIS G 0416 (2014) 鋼及び鋼製品—機械試験用供試材及び試験片の採取位置並びに調製

JIS G 0567 (2012) 鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法

JIS G 0582 (2012) （追補 1：2015）鋼管の超音波探傷検査方法

JIS G 0583 (2012) 鋼管の渦流探傷検査方法

JIS G 0587 (2007) 炭素鋼及び低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法

JIS G 3441 (2015) 機械構造用合金鋼鋼管

JIS G 3459 (2016) 配管用ステンレス鋼鋼管

JIS G 4053 (2016) 機械構造用合金鋼鋼材

JIS G 4107 (2007) （追補 1：2010）高温用合金鋼ボルト材

JIS G 4303 (2012) ステンレス鋼棒

JIS G 4311 (2019) 耐熱鋼棒及び線材

JIS H 4000 (2014) アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条

JIS H 4040 (2015) アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線

JIS Z 2241 (2011) 金属材料引張試験方法

JIS Z 2242 (2005) 金属材料のシャルピー衝撃試験方法

JIS Z 2320-1 (2017) 非破壊試験—磁粉探傷試験—第 1 部：一般通則

JIS Z 2320-2 (2017) 非破壊試験—磁粉探傷試験—第 2 部：検出媒体

JIS Z 2320-3 (2017) 非破壊試験－磁粉探傷試験－第3部：装置

JIS Z 2343-1 (2017) 非破壊試験－浸透探傷試験－第1部：一般通則

：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の分類

JIS Z 2343-2 (2017) 非破壊試験－浸透探傷試験－第2部：浸透探傷剤の試験

JIS Z 2343-3 (2017) 非破壊試験－浸透探傷試験－第3部：対比試験片

JIS Z 2343-4 (2001) 非破壊試験－浸透探傷試験－第4部：装置

KHKS 1222 (2016) ねじ構造の強度設計指針

ASME Section II Part A SA-312 (2019) Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes

ASME Section II Part A SA-372 (2019) Specification for Carbon and Alloy Steel Forgings for Thin-walled Pressure Vessels

ASME Section II Part A SA-479 (2019) Specification for Stainless Steel Bars and Shapes for use in Boilers and other Pressure Vessels

ASME Section II Part A SA-723 (2019) Specification for Alloy Steel Forgings for High-Strength Pressure Component Application

ASTM E 399 (2017) Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials

ASTM E 647 (2015) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates

ASTM E 1820 (2017) Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

ASTM G 142 (1998) Standard Test Method for Determination of Susceptibility of Metals to Embrittlement in Hydrogen Containing Environments at High Pressure, High Temperature, or Both

3 用語の意味

この基準で用いる主な用語の意味は、次の a)～s)による。

a) 圧力

特に明示されていない場合は、ゲージ圧力。

b) 設計圧力

最高運転圧力又はそれ以上の圧力で、対応する温度とともに設計荷重の条件に使用し、かつ、安全装置の設定圧力の基礎となる圧力。

c) 設計温度

対象とする部分において、対応する圧力との関連から最も厳しい条件に対して定める運転温度又はそれ以上の温度で、設計に使用する温度。

備考 1. 最も厳しい条件に対して定める運転温度とは、材料強度に最も厳しくなる金属温度をいう。

2. 金属温度は必要に応じて、伝熱過程から計算するか、又は同様の構造で同様の運転条件の設備に熱電対を取り付け、金属温度を実測して求める。

3. 設備の各部分の温度が異なる場合は、それぞれの部分について設計温度を定めることができる。

4. 設計温度は通常、高温側の最高設計温度であるが、低温側の使用限界の意味

で最低設計金属温度（**l**参照）の用語を用いる。

- d) 計算厚さ**
この基準により算定される厚さで、腐れしろを含まない厚さをいう。
- e) 運転圧力**
設備が正常に稼働している場合の圧力。
- f) 運転温度**
設備が正常に稼働している場合の温度。
- g) 内外径比**
円筒胴の外径と内径の比($=D_o/D_i$)。
- h) 最適疲労曲線**
ひずみ制御又は荷重制御の疲労試験の結果に最も適合するように、最小二乗法などによって定めた S-N 曲線をいう。縦軸はひずみ振幅に縦弾性係数の基準値を乗じた仮想弾性応力振幅又は実際の応力振幅を示し、横軸は破壊に至るまでの繰返し回数を示す。
- i) 設計疲労曲線**
最適疲労曲線を基準として、応力振幅及び破壊に至るまでの繰返し回数に適正な設計係数を考慮して定めた、許容応力振幅と許容繰返し回数の関係を与える S-N 曲線をいう。
- j) ラッチェティング**
構造部材でシェークダウンが成立しない場合に、例えば圧力による一定応力に熱応力が繰り返されると、一定応力の方向に進行性の非弾性変形（塑性変形又はクリープ変形）を生じる現象をいう。
- k) 最低設計金属温度**
低温側の使用限界の最低の金属温度で、高圧ガス設備を使用する場合の低温状態の温度（運転開始時又は停止時の温度、最低運転温度、運転時の異常状態での温度、他の冷却源による温度及び大気温度を含む。）から求める。
- l) 破裂前漏洩**
圧力容器又は配管の表面き裂が肉厚内を安定的に進展し、不安定破壊を生じる前に貫通して内部流体が漏洩する事象をいう。
- m) 一次応力 (P_m 、 P_L 及び P_b)**
圧力又は他の機械的負荷によって生じる、断面内で平均化された膜応力及び断面内で線形化された曲げ応力（公称の膜応力及び曲げ応力）をいう。一次一般膜応力 P_m 、一次局部膜応力 P_L 及び一次曲げ応力 P_b に分類される。また、一次応力は弾性状態に制限される。
- n) 二次応力 (Q)**
構造の連続性を保つために生じる自己平衡応力をいう。機械的負荷及び熱的負荷によって生じる応力で、局部的応力集中を除く。二次応力は、膜成分と曲げ成分を区別する必要はない。
- o) シェークダウン**
構造部材が一次応力と二次応力の和の負荷を受けて降伏し、塑性変形しても、除荷で逆降伏しなければ、その後の同じ応力の繰返しで弾性状態になること。シェークダウンが成立しなければ、部材の応力-ひずみ関係はヒステリシスループを示し、ラッチェティングと疲労の原因となる。

p) ピーク応力 (F)

非線形の応力分布、局部的構造不連続による応力集中又は局部熱応力により、一次応力と二次応力の和に付加される応力の増加分をいう。

q) 応力強さ (S)

一次応力、二次応力、ピーク応力、又はそれらを組合せた和を対象として、6つの応力成分から主応力 σ_1 、 σ_2 及び σ_3 を求める。3つの主応力差 $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$ 、 $S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$ 、 $S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$ のうち、絶対値の最大値をいう。

r) 設計応力強さ (S_m)

材料と設計温度によって定められる応力強さの許容値をいう。

s) 繰返し応力強さの振幅 (S_{alt}) 及び平均 (S_{mean})

ピーク応力を含む応力強さの1サイクル中の変動の最大値及び最小値を求める。最大値と最小値から得られる振幅及び平均をいう。

4 材料

4.1 材料一般

- a) 超高压ガス設備の耐圧部に使用する材料には、運転条件（圧力、温度、負荷条件、使用環境等）に対して適した特性を持つことが要求される。
- b) 使用する材料の降伏比（降伏点又は0.2%耐力/引張強さ）は、0.936以下とする。
- c) 冷間加工によって強度を高めたオーステナイト系ステンレス鋼は、設計温度の上限を300℃とする。
- d) 圧縮水素用の設備に使用する材料は、**附属書 E** による。

4.2 製造方法及び熱処理

4.2.1 鍛鋼品の製造方法及び熱処理

鍛鋼品の製造方法及び熱処理は、次の a)、b) 及び c) による。

- a) 鍛鋼品製造者は鍛鋼品の部品毎に鍛造方法、鍛錬成形比、熱処理条件等を定めなければならない。
- b) 鍛鋼品の熱間加工及び鍛錬成形比は、**JIS G 0306** の **3.2** による。
- c) 鍛鋼品は焼ならし、焼ならし焼戻し、又は焼入れ焼戻しのいずれかの熱処理を施す。熱処理を施した鍛鋼品を熱間加工した後は、再び所定の熱処理を施す。

4.2.2 管の製造方法及び熱処理

管の製造方法及び熱処理は、次の a) 及び b) による。

- a) 管は継目なく製造する。
- b) 冷間引抜きによって強度を高めた管又は固溶化熱処理後、時効処理（析出硬化熱処理を含む。）によって強度を高めた管は、冷間加工の度合を示す記号又は熱処理の種類を示す記号を表示する。

4.3 化学成分

化学成分は、次の a) 及び b) による。

- a) 材料の化学成分は、溶鋼分析値による。

- b) 材料規格に規定されていない元素を添加する場合は、材料試験成績書に添加元素の含有率を付記する。

4.4 機械的性質

4.4.1 材料強度の設定値

使用する材料の設計温度における材料強度（引張強さ、降伏点又は 0.2%耐力）の設定値及び製作時に要求される引張試験の個数は、表 1 による。

なお、引張試験においては熱処理をシミュレートする必要がある。

表 1 材料強度の設定値及び引張試験の個数

材 料 分 類	区分Ⅰ 製造時に要求される 引張試験の数		区分Ⅱ(注1) 温度による材料の強度 低下曲線を作成する場 合の引張試験の数		材料強度の設定値
	常温 (注2)(注3)	設計温度 (注3)(注7)	常温	設計温度 (注6)	
A.規格に常温及び設計温度における強度規定(S_u 、 S_y)がある場合(注4)	1個	—	—	—	常温及び設計温度における材料強度は規格値とする。
B.規格に常温における強度規定(S_u 、 S_y)のみがある場合(注4)	1個	1個	3個	各3個	常温における材料強度は規格値とする。設計温度における材料強度は引張試験の設定値とする。
C.社内規格であって実績が3回以上ある場合(注5)	1個	1個	3個	各3個	常温及び設計温度における材料強度は引張試験の設定値とする。
D.規格に強度規定が参考となっている場合又は規格値を下げる場合	1個	1個	3個	各3個	
E.新しく開発した材料で実績のない場合	3個	3個	9個以上 (3ヒート以上、各ヒート3個以上)	各9個以上	

注 1：区分Ⅱの試験により強度低下曲線を作成した場合でも、強度低下曲線作成時と同一チャージでないため、製造時に区分Ⅰによる試験が必要である。

注 2：製造時に要求される常温での引張試験は、引張試験結果を含む材料試験成績書で代替できる。

注 3：試験片は製品と同一溶鋼（チャージ）、同一熱処理の必要がある。

注 4： S_u 、 S_y はそれぞれ引張強さ、降伏点又は 0.2%耐力である。

注 5：社内規格とは材料製造者又は設備の製造者が独自に定めた規格である。

注 6：常温から設計温度+50℃の範囲で、最大 100℃間隔で試験温度を設定する。

注 7：附属書 B の材料は、区分 I の設計温度での引張試験は不要である。

附属書 B の材料の設計温度における材料強度の設定値は、常温における材料強度に附属書 B の材料の強度低下係数を乗じた値である。

4.4.2 伸び及び絞り

材料の常温における伸び及び絞りの値は、次の a)～c)による。

a) 規格値による場合

材料規格による場合は、規格最小値とする。

b) 規格参考値による場合

規格材料ではあるが材料の伸び及び絞りが参考値となっている場合は、その値以上とすることができる。

c) その他の場合

規格材料ではあるが材料の伸び及び絞りの値が規格に示されていない場合、使用実績のある製造者の社内規格による場合、又は新しく開発した材料の場合は、伸びは 12 %以上、絞りは 30 %以上とする。

4.4.3 衝撃試験

材料の衝撃試験は、次の a)～c)による。

a) 超高压ガス設備に使用する材料は、シャルピー衝撃試験を実施する。ただし、溶体化処理したままのオーステナイト系ステンレス鋼及び冷間加工によって強度を高めたオーステナイト系ステンレス鋼は除く。

b) 衝撃試験は、最低設計金属温度又は 20℃のいずれか低い温度以下で実施し、4.4.4 に示す要求吸収エネルギー値を満足しなければならない。ただし、要求吸収エネルギー値として表 4 の値を確認する場合の試験温度は 0℃以下とする。

c) 衝撃試験温度に対する耐圧試験時の試験温度（金属温度）は、10.2 b)1)又は 10.3 b)1)による。

4.4.4 要求吸収エネルギー値

衝撃試験の吸収エネルギーの値は、次の a)～d)に規定する要求吸収エネルギー値以上でなければならない。

a) 低合金鋼を円筒胴に使用する場合は、次の 1)～3)のいずれかによる。

1) 使用する材料の強度と円筒胴の内外径比が、次の①又は②の関係を満足する場合、表 2 によることができる。

$$\textcircled{1} \quad t \leq 50.8 \quad \text{かつ} \quad K \leq 7.84 - 9.5 \times 10^{-3} S_y + 3.55 \times 10^{-6} S_y^2$$

$$\textcircled{2} \quad t > 50.8 \quad \text{かつ} \quad K \leq 5.43 - 6.02 \times 10^{-3} S_y + 2.11 \times 10^{-6} S_y^2$$

ここで、 t 、 K 及び S_y は、次による。

t : 実際の肉厚 (mm)

K : 円筒胴の内外径比

S_y : 材料の常温における降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)

表2 要求吸収エネルギー値

3個の平均値	最小値
40 J	32 J

- 2) 1)の関係を満足しない場合、又は計算により要求吸収エネルギー値を求める場合、式(4.1)中の K_{lc} と式(4.2)の K_I とを等置して、要求吸収エネルギー値 CVN を求める。ただし、**表 4** に示す試験温度での値以上でなければならない。

吸収エネルギー値と破壊靱性の換算式

$$CVN = 84 + 66 \tanh[1.527 \ln(K_{lc} - 22) - 6.297] \quad \text{----- (4.1)}$$

耐圧試験時の応力拡大係数

$$K_I = (\sigma + P_t) \sqrt{\pi a_r} \quad \text{----- (4.2)}$$

ここで、 CVN 、 K_{lc} 、 K_I 、 σ 、 K 、 P_t 及び a_r は、次による。

CVN : 要求吸収エネルギー値 (J)

K_{lc} : 平面ひずみ破壊靱性 (MPa√m)

K_I : 耐圧試験時の応力拡大係数 (MPa√m)

σ : 耐圧試験時の円筒胴内面の円周方向応力 (N/mm²)

$$\sigma = \frac{(K^2 + 1)P_t}{(K^2 - 1)} \quad \text{----- (4.3)}$$

K : 円筒胴の内外径比

P_t : 耐圧試験圧力 (MPa)

a_r : 想定き裂の相当深さで **表 3** による。 (m)

表3 想定き裂の相当深さ a_r

肉厚 t (mm)	a_r (m)
$t \leq 16$	0.328×10^{-3}
$16 < t < 51$	0.723×10^{-3}
$51 \leq t$	1.048×10^{-3}

3) 妥当性が示せるならば、2)において式(3.1)の代替の換算式を用いることができる。
ただし、2)と同様に、*CVN* は表 4 に示す値以上でなければならない。

- b) 低合金鋼以外の材料を円筒胴に用いる場合は、耐圧試験時の試験温度（金属温度）において脆性破壊が起きないことを確認しなければならない。
- c) 円筒胴以外に使用する材料に対する要求吸収エネルギー値は、表 4 による。
- d) 材料規格に衝撃試験の規定（U ノッチ試験片による衝撃試験は除く。）があり、試験温度が 4.4.3 b) を満足する場合で、材料規格の要求吸収エネルギー値が表 2 又は表 4 の値と異なる場合は、材料規格とこの基準のいずれか大きい方の値を要求吸収エネルギー値とする。

表4 要求吸収エネルギー値

試験温度	3個の平均値	最小値
0 °C	27 J	21 J

4.5 機械試験の種類、試験片形状及び採取位置

4.5.1 機械試験の種類及び試験片形状

- a) 引張試験は、次の 1) 及び 2) による。
 - 1) 試験片は JIS Z 2241 による。
 - 2) 試験方法は JIS Z 2241 による。
 高温引張試験方法は JIS G 0567 による。
- b) 衝撃試験は、次の 1) 及び 2) による。
 - 1) 試験片は JIS Z 2242 に規定する V ノッチ試験片とする。
 - 2) 試験方法は JIS Z 2242 による。

4.5.2 機械試験片の採取位置

機械試験片の採取位置は、次の a)～c) による。

- a) 試験片は鍛鋼品、管又はこれらの余長部から採取する。
- b) 試験片の採取方向は原則として円周方向とする。ただし、円周方向から試験片を採取できない場合は、軸方向とすることができる。この場合、断面のマクロ写真、硬さ試験等を実施し、異方性の程度と組織の健全性を確認する。

シャルピー衝撃試験の標準試験片が円周、軸のいずれの方向からも採取できない場合は、サブサイズ試験片を軸方向から採取することができる。この場合には、試験温度を表 5 に示す温度だけ低減させる。サブサイズ試験片の幅が 2.5mm 未満になる場合には、衝撃試験を省略してもよい。

なお、サブサイズ試験片を使用した場合の要求吸収エネルギー値は 4.4.4 (表 2 及び表 4) の要求吸収エネルギー値に標準試験片との断面積の比を乗じて求める。

- c) 試験片の採取位置は、JIS G 0306 の 4.2.2 (1) 又は JIS G 0416 附属書 A による。

4.5.3 再試験

鍛鋼品及び管の機械試験の結果が規定に適合しない場合は、再熱処理した後、再び試験することができる。この場合の試験片の数は所定の試験片の数の2倍とし、試験の結果がすべて規定に適合した場合に合格とする。

表5 シャルピー衝撃試験の温度低減量[†]

実際の材料厚さ又は試験片の幅 (mm)	温度低減量 (°C)
10 (標準試験片)	0
9	0
8	0
7.5	3
7	4
6	8
5	11
4	16
3	22
2.5	28

注：中間値については補間法による。

試験片の幅はノッチに沿う長さである。

試験片の高さは10mmとする。

4.6 鍛鋼品の非破壊試験

超高压ガス設備の耐圧部に使用する鍛鋼品は、超音波探傷試験及び磁粉探傷試験（又は浸透探傷試験）を行う。

4.6.1 鍛鋼品の超音波探傷試験

鍛鋼品の超音波探傷試験は、JIS G 0587 に準じる他は、次の a) 及び b) による。

a) 試験方法

鍛鋼品は全体積について垂直法による超音波探傷試験を実施する。ただし、リング状又は円筒状の鍛鋼品で内外径比が1.4以下の場合は、JIS G 0587 附属書 A に規定する斜角法の探傷も行う。

b) 分類

きずの分類は JIS G 0587 附属書 B の表 B.1 に規定する1類以上とする。斜角法の探傷の場合は、対比きずからの信号と同等以上の信号が発生しない結果を合格とする。

4.6.2 鍛鋼品の磁粉探傷試験

鍛鋼品は機械加工後、磁粉探傷試験を行う。磁粉探傷試験が実施できない場合又は特別な理由がある場合には、浸透探傷試験に替えることができる。

a) 試験方法

鍛鋼品の磁粉探傷試験は **JIS Z 2320-1~3** の規定に準じるほか、次の **1)~3)** による。

- 1) 標準試験片は、A2-30/100 とする。
- 2) 磁化方法は、交流極間法とする。
- 3) 磁粉の適用は、蛍光湿式磁粉とする。

b) 合否判定

磁粉模様は、次の **1)~5)** のすべてを満足する場合に合格とする。

- 1) 表面に割れによる磁粉模様がない。
- 2) 線状磁粉模様の最大長さが 1.6 mm 以下である。
- 3) 円形状磁粉模様の長径が 3.2 mm 以下である。
- 4) 4 個以上の円形状磁粉模様が一行に並ぶ場合には、隣り合う円形状磁粉模様の端間の距離が 1.6 mm 以上である。
- 5) 面積が 3,870 mm² の任意の長方形（長辺の長さは、150 mm 以下とする。）内に長径が 1.6 mm を超える円形状磁粉模様が 10 個以上含まれない。

4.6.3 鍛鋼品の浸透探傷試験

オーステナイト系ステンレス鋼の鍛鋼品は機械加工後、**JIS Z 2343-1~4** により浸透探傷試験を行う。浸透指示模様の合否判定は、**4.6.2 b)** の磁粉探傷試験の合否判定において、磁粉模様を浸透指示模様に読み替える。

4.7 管の非破壊試験

超高压ガス設備の耐圧部に使用する管は、超音波探傷試験（又は渦流探傷試験）及び磁粉探傷試験（又は浸透探傷試験）を行う。

4.7.1 管の超音波探傷試験

管の超音波探傷試験は **JIS G 0582** による。

超音波探傷試験が実施できない場合又は特別な理由がある場合には、渦流探傷試験に替えることができる。

4.7.2 管の渦流探傷試験

管の渦流探傷試験は **JIS G 0583** による。

4.7.3 管の磁粉探傷試験

管の磁粉探傷試験は **JIS Z 2320-1~3** による。探傷範囲は原則として外面とする。磁化方法は軸通電法、コイル法又はプロッド法とし、これらを組み合わせて軸方向及び円周方向の探傷を

行う。磁粉模様の合否判定は **4.6.2 b)** による。

磁粉探傷試験が実施できない場合又は特別な理由がある場合には、浸透探傷試験に替えることができる。

4.7.4 管の浸透探傷試験

管の浸透探傷試験は **JIS Z 2343-1~4** による。

探傷範囲は原則として外面とする。浸透指示模様の合否判定は、**4.6.2 b)** の磁粉探傷試験の合否判定において、磁粉模様を浸透指示模様に読み替える。

4.8 その他の部材の非破壊試験

ボルト材、棒材等は呼び径が 50 mm を超える場合には、機械加工前に垂直法による超音波探傷試験 (**JIS G 0587**) を実施し、最終機械加工後に磁粉探傷試験 (**JIS Z 2320-1~3**) 又は浸透探傷試験 (**JIS Z 2343-1~4**) を実施する。試験の分類と合否判定基準は、**4.6** の鍛鋼品の非破壊試験に同じとする。また、ねじ構造のねじ部においては、浸透探傷試験又は適切な方法により、割れ、へこみ、しわ、重なり、すじきず等の有害な欠陥がないことを確認する。

4.9 欠陥の除去

非破壊試験で有害な欠陥が検出された鍛鋼品及び管は、欠陥の原因が明らかで、次の **a)**、**b)** 及び **c)** の処置を行う場合には使用することができる。

- a) 欠陥部分を除去し、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い、これに合格する。
- b) 除去した欠陥部分のリガメント厚さが計算厚さ以上であり、かつ、除去した欠陥部分の表面と周囲の除去しない表面との勾配は 1/3 以下とし、なだらかに仕上げる。
- c) 溶接補修は行わない。

5 設計

5.1 設計一般

超高压ガス設備の設計に際して、使用環境、運転条件等の設計仕様を定める。

5.1.1 設計仕様書の記載事項

設計仕様書の記載事項及び添付する図書は、次の a)～h)による。

- a) 設備の系統図（フローシート）
- b) 全体組立図、耐圧部詳細図及び使用材料名
- c) 高压ガスの種類及び腐食性の有無
- d) 設計圧力、設計温度、運転圧力及び運転温度
- e) 最低設計金属温度
- f) 圧力変動（圧縮機の脈動を含む。）及び使用繰返し回数
- g) 昇温降温条件（温度変動）
- h) その他の運転経験によるデータ等で参考にすべき事項

5.1.2 設計で考慮する負荷

設計で考慮する負荷は、次の a)～f)による。

- a) 内圧、外圧、設備の自重及び運転時と試験時における内容物重量
- b) 他の設備により生じる自重及び機械負荷
- c) 風負荷及び地震により生じる負荷
- d) 温度変動、温度勾配により生じる熱負荷
- e) 急激な圧力変化を含む衝撃負荷
- f) 焼きばめ、圧入、自緊による負荷

5.2 設計の基本事項

超高压ガス設備の設計の基本事項は、次の a)～f)による。

- a) 円筒胴及び関連部位の強度解析は、5.3 による。
- b) 疲労解析は、6 による。
- c) 公称応力の高い部位は、7 に従って破裂前漏洩解析を実施する。
ただし、次の①及び②を除く。
 - ① 5.3.6 の平ふた板及び平鏡板
 - ② 5.3.9 のフランジ継手に示すフランジ及びクランプ
- d) 破裂前漏洩が成立しない部位は、8 のき裂進展解析を実施し、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。
- e) き裂進展解析を行う場合でも 6 の疲労解析は実施し、許容繰返し回数は両者（6 と 8）のいずれか低い値とする。
- f) 圧縮水素用の設備への適用は、附属書 E による。

5.3 円筒胴及び関連部位の強度解析

5.3.1 単肉円筒胴

内圧を保持する単肉円筒胴は、**a)**による強度解析を行うとともに、**b)～d)**により繰返し応力強さの振幅及び平均を求め、**6**の疲労解析を行う。

a) 単肉円筒胴の計算厚さ

単肉円筒胴の計算厚さ t_r 及び最大許容圧力 P_{all} は、次の式(5.1)及び式(5.2)による。

$$t_r = \left(\frac{D_i}{2} \right) \left[\exp \left\{ \frac{\sqrt{3}fP}{(S_y + S_u)} \right\} - 1 \right] \quad \text{----- (5.1)}$$

$$P_{all} = \frac{2}{\sqrt{3}f} \frac{(S_y + S_u)}{2} \ln K \quad \text{----- (5.2)}$$

設計圧力 P は最大許容圧力 P_{all} 以下とする。ただし、次の式(5.3)により、設計圧力とシェークダウン限界圧力の比 M_D の値を求め、 M_D の値は 1.0 以下とする。

$$M_D = \frac{2K^2}{(K^2-1)} \frac{1}{S_u} P \quad \text{----- (5.3)}$$

M_D の値が 1.0 を超える場合には、弾塑性解析により次の条件 **1)**、**2)** 及び **3)** のすべてが満足されることを確認する。

- 1)** 運転条件（運転圧力、運転温度等）でシェークダウンが成立し、ラチェット変形が進行しない。
- 2)** シェークダウンが成立するまでに生じる変形が、指定の限界（要求がある場合）を超えない。
- 3)** シェークダウン成立後に繰り返される応力（試験圧力、運転圧力、熱負荷等の変動を含めて）が疲労に対する許容限界内にある。

ここで、 P 、 D_i 、 D_o 、 K 、 f 、 S_y 及び S_u は、次による。

P : 設計圧力 (MPa)

D_i : 円筒胴の内径 (mm)

D_o : 円筒胴の外径 (mm)

K : 円筒胴の内外径比 D_o/D_i

f : 設計係数で、2.4 とする。

S_y : 設計温度における 材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)

(4.4.1 参照)

S_u : 設計温度における材料の引張強さの設定値 (N/mm²) (4.4.1 参照)

b) 円筒胴内面の応力強さ

単肉円筒胴の内面で、穴、段差等の構造不連続部以外の平滑部に生じる内圧による応力強さ S は、次の式(5.4)による。

$$S = \left| \frac{2K^2}{K^2-1} P \right| \quad \text{-----} \quad (5.4)$$

ここで、 P 及び K は、次による。

P : 運転圧力 (MPa)

K : 円筒胴の内外径比

c) 繰返し応力強さの振幅

円筒胴の内面の平滑部に生じる内圧による繰返し応力強さの振幅 S_{alt} は、次の式(5.5)による。

$$S_{alt} = \left| \frac{K^2}{K^2-1} (P_u - P_l) \right| \quad \text{-----} \quad (5.5)$$

ここで、 P_u 及び P_l は、次による。

P_u : 運転圧力変動の最大値 (MPa)

P_l : 運転圧力変動の最小値 (MPa)

d) 繰返し応力強さの平均

円筒胴の内面の平滑部に生じる内圧による繰返し応力強さの平均 S_{mean} は、次の式(5.6)による。

$$S_{mean} = \frac{K^2}{K^2-1} (P_u + P_l) \quad \text{-----} \quad (5.6)$$

5.3.2 多層円筒胴

内圧を保持する多層円筒胴は、**a)**による強度解析を行うとともに、**b)**により繰返し応力強さの振幅と平均を求め、**6**の疲労解析を行う。

a) 多層円筒胴の計算厚さ

異種材料で構成される多層円筒胴の最大許容圧力は、次の **1)** 及び **2)** による。

- 1) 附属書 A** に示す手順に従って破壊圧 P_B を求め、安全率 $f=2.4$ で除した最大許容圧力 P_{all} は、次の式(5.7)による。

$$P_{all} = \frac{P_B}{f} \quad \text{-----} \quad (5.7)$$

設計圧力 P は、最大許容圧力以下とする。

- 2) 1)**で求めた P_{all} の値が次の式(5.8)で計算する値を超える場合、又は十分な実績を有する場合は、**1)**の代わりに、最大許容圧力 P_{all} を次の式(5.8)で求めることができる。

$$P_{all} = \frac{2}{\sqrt{3}f} \sum_{R=1}^N \left[\frac{(S_{y,R} + S_{u,R})}{2} \ln K_R \right] \quad \text{-----} \quad (5.8)$$

ここで、 $S_{y,R}$ 、 $S_{u,R}$ 、 N 及び K_R は、次による。

$S_{y,R}$: 設計温度における第 R 層の材料の降伏点又は 0.2% 耐力の設定値 (N/mm²)

$S_{u,R}$: 設計温度における第 R 層の材料の引張強さの設定値 (N/mm²)

N : 多層円筒胴の層の数

K_R ：第 R 層の円筒胴の内外径比 $D_{o,R} / D_{i,R}$

b) 多層円筒胴の繰返し応力強さの振幅と平均

多層円筒胴の最内層内面で、穴、段差等の構造不連続部以外の平滑部に生じる内圧による応力強さ S は式(5.4)に、繰返し応力強さの振幅は式(5.5)による。多層円筒胴の最内層内面に円周方向の残留応力がある場合、最内層内面の平滑部に生じる内圧による繰返し応力強さの平均 S_{mean} は、次の式(5.9)による。

$$S_{mean} = \frac{K^2}{K^2 - 1} (P_u + P_l) + \sigma_{\theta, res} \quad \text{----- (5.9)}$$

ここで、 P_u 、 P_l 、 $\sigma_{\theta, res}$ 及び K は、次による。

P_u ：運転圧力変動の最大値（MPa）

P_l ：運転圧力変動の最小値（MPa）

$\sigma_{\theta, res}$ ：円周方向の残留応力（N/mm²）

K ：多層円筒胴の内外径比

5.3.3 円筒胴の穴

円筒胴に穴を設ける場合には、有限要素法等の適切な方法による応力解析を行い、これに基づいて穴部の強度解析及び疲労解析を行う。なお、多層円筒胴の最内層の内面には穴を設けてはならない。

5.3.4 円筒胴の内面の段差

内圧を保持する円筒胴の内面に図 1 に示すような段差を設ける必要がある場合には、段差の内側コーナー部に内圧により生じる応力を解析し、6 の疲労解析を行う。疲労解析に際しては、次の簡便法によることができる。ただし、簡便法の適用範囲は、円筒胴の内外径比が 2.5 以下の範囲とする。

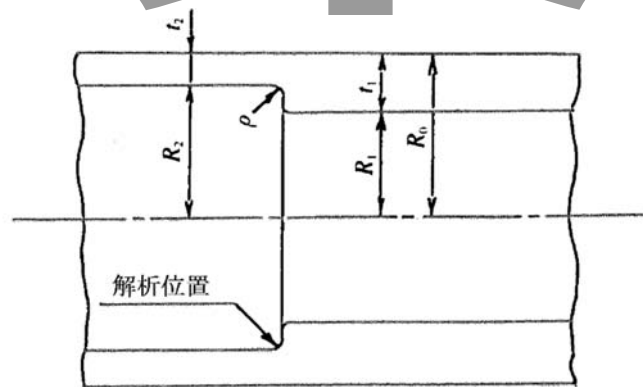


図 1 円筒胴の内面の段差

ここで、図 1 に示す t_1 、 t_2 、 R_0 、 R_1 、 R_2 及び ρ は、次による。

t_1 ：段差部における肉厚の大きい側の円筒胴の肉厚（mm）

t_2 ：段差部における肉厚の小さい側の円筒胴の肉厚（mm）

R_0 : 円筒胴の外半径 (mm)

R_1 : 段差部における肉厚の大きい側の円筒胴の内半径 (mm)

R_2 : 段差部における肉厚の小さい側の円筒胴の内半径 (mm)

ρ : 段差の内側コーナ一部の丸み半径 (mm)

段差の内側コーナ一部が他の構造不連続部からの影響が及ばない距離にある場合の応力強さの最大値 S は、次の式(5.10)による。

$$S = \max[|\sigma_r - \sigma_\theta|, |\sigma_\theta - \sigma_{z,max}|, |\sigma_{z,max} - \sigma_r|] \quad \text{-----} \quad (5.10)$$

ここで、 σ_θ 、 $\sigma_{z,max}$ 及び σ_r は、次による。

σ_θ : 内圧により生じる円周方向応力 (N/mm²)

$\sigma_{z,max}$: 段差の内側コーナ一部に内圧により生じる軸方向応力の最大値 (N/mm²)

σ_r : 内圧により生じる半径方向応力 (N/mm²)

a) 内圧による円周方向応力 σ_θ は、次の式(5.11)による。

$$\sigma_\theta = \frac{K_2^2 + 1}{K_2^2 - 1} P \quad \text{-----} \quad (5.11)$$

ここで、 K_2 及び P は、次による。

K_2 : 段差部における肉厚の小さい側の円筒胴の内外径比 R_0/R_2

P : 運転圧力 (MPa)

b) 内圧による半径方向応力 σ_r は、次の式(5.12)による。

$$\sigma_r = -P \quad \text{-----} \quad (5.12)$$

c) 段差の内側コーナ一部に内圧により生じる軸方向応力の最大値 $\sigma_{z,max}$ は、次の式(5.13)から式(5.17)による。

$$\sigma_{z,max} = \alpha_t \sigma_{zt} + \alpha_b \sigma_{zb} \quad \text{-----} \quad (5.13)$$

$$\sigma_{zt} = \frac{1}{K_2^2 - 1} P \quad \text{-----} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{zb} = \frac{6M_2}{t_2^2} \quad \text{-----} \quad (5.15)$$

$$\alpha_t = 0.6 \left\{ 2 + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 \right\} \left[1 + \frac{2}{3} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{t_2}{t_1} \right)^{1.6} \right\} \left(\sqrt{\frac{t_1 - t_2}{\rho}} - 1 \right) \right] \quad \text{-----} \quad (5.16)$$

$$\alpha_b = 1 + 0.19 \left(\frac{t_2}{\rho} \right)^{0.69} \coth \left(1 + \frac{3\rho}{t_2} \right) \tanh \left\{ \frac{100(t_1 - t_2)}{t_2} \right\} \quad \text{-----} \quad (5.17)$$

ここで、 σ_{zt} 、 σ_{zb} 、 α_t 及び α_b は、次による。

σ_{zt} : 肉厚の小さい側において、内圧により生じる軸方向引張応力（一次応力）

σ_{zb} : 肉厚の小さい側において、内圧により生じる軸方向曲げ応力（一次応力）

α_t : 軸方向引張応力に対する段差の内側コーナ一部の応力集中係数

α_b : 軸方向曲げ応力に対する段差の内側コーナ一部の応力集中係数

式(5.15)における M_2 は、内圧により生じる曲げモーメントで、次の式(5.18)から式(5.28)による。

$$M_2 = \frac{\xi_{1P} + \xi_{1Q} - \xi_{2P} - \xi_{2Q} - A + 2\beta_1 AB}{\frac{1}{2\beta_2^2 D_2} - \frac{1}{2\beta_1^2 D_1} + \frac{B}{\beta_1 D_1} + \frac{B}{\beta_2 D_2}} \quad (5.18)$$

$$\xi_{1P} = \frac{PR_1}{2E} \frac{K_1 + 1}{K_1 - 1} \quad (5.19)$$

$$\xi_{2P} = \frac{PR_2}{2E} \frac{K_2 + 1}{K_2 - 1} \quad (5.20)$$

$$\xi_{1Q} = -\frac{\nu PR_1}{2E} \frac{1}{K_1 - 1} \quad (5.21)$$

$$\xi_{2Q} = -\frac{\nu PR_2}{2E} \frac{1}{K_2 - 1} \quad (5.22)$$

$$A = \frac{PR_2^2}{4\beta_1^2 D_1} \frac{1}{K_1 + 1} \left\{ (K_1 - 1) - \frac{K_2}{K_1} (K_2 - 1) \right\} \quad (5.23)$$

$$B = \frac{\left(\frac{1}{\beta_1^3 D_1} + \frac{1}{\beta_2^3 D_2} \right)}{\left(\frac{1}{\beta_1^2 D_1} - \frac{1}{\beta_2^2 D_2} \right)} \quad (5.24)$$

$$\beta_1 = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{(K_1 + 1)R_1 t_1 / 2}} \quad (5.25)$$

$$\beta_2 = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{(K_2 + 1)R_2 t_2 / 2}} \quad (5.26)$$

$$D_1 = \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5.27)$$

$$D_2 = \frac{Et_2^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5.28)$$

ここで、 K_1 、 K_2 、 ξ_{1P} 、 ξ_{2P} 、 ξ_{1Q} 、 ξ_{2Q} 、 A 、 B 、 β_1 、 β_2 、 D_1 、 D_2 、 E 及び ν は、次による。

K_1 ：段差部における肉厚の大きい側の円筒胴の内外径比 R_0/R_1

K_2 ：段差部における肉厚の小さい側の円筒胴の内外径比 R_0/R_2

ξ_{1P} 、 ξ_{2P} ：段差部両側における内圧による半径方向変位（mm）

ξ_{1Q} 、 ξ_{2Q} ：段差部両側における軸方向引張りによる半径方向変位（mm）

A 、 B ：段差部両側における軸方向曲げによる半径方向変位（mm）

β_1 、 β_2 ：段差部両側における軸方向曲げによる半径方向変位 A 、 B に
係る係数（1/mm）

D_1 、 D_2 ：段差部両側における円筒胴の曲げ剛性（N・mm）

E ：縦弾性係数（N/mm²）

ν ：ポアソン比

5.3.5 ねじ構造

円筒胴のふた板（図 2 参照）、高圧管のねじ込みフランジ管継手（図 3 参照）、高圧配管要素（管、高圧弁、エルボ、ティー、管継手等）等を使用するねじ構造の設計は、KHKS 1222 によるか、又は有限要素法等の適切な方法によって応力解析を行い、ねじ構造の強度解析及び疲労解析を行う。

ねじ構造の疲労解析においては、KHKS 1222 の代わりに、6 の疲労解析を行うことができる。ねじ構造が脈動圧力の影響を受ける場合には、その影響を考慮する（附属書 H 参照）。

円筒胴のふた板のねじ構造については、6 の疲労解析に加え、8 のき裂進展解析を実施して、使用繰返し回数が両者の許容繰返し回数以下であることを確認する。

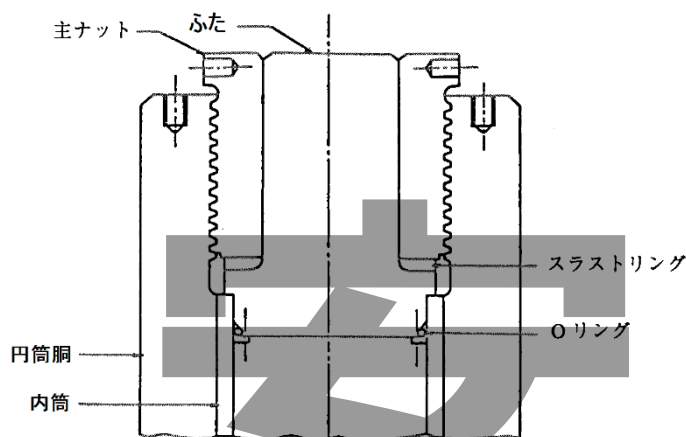


図 2 ねじ込みナット固定式のふた付き円筒胴

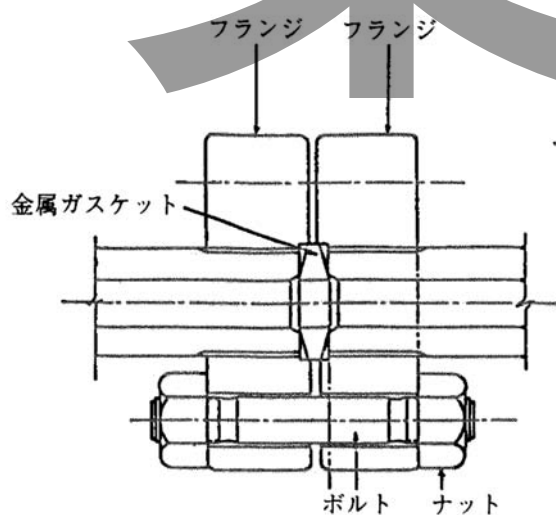


図 3 ねじ込みフランジ管継手

5.3.6 平ふた板及び平鏡板

- a) 内圧を保持する円筒胴の平鏡板及び平ふた板の計算厚さは、**JIS B 8265 附属書 L の L.3** 又は **JIS B 8267 附属書 L の L.3**、**JIS B 8284 の 7.1、7.2** 及び **9** に規定する算式、又は有限要素法等の適切な方法による。計算に用いる許容引張応力は **JIS B 8265** 又は **JIS B 8267** による。

ただし、有限要素法による場合又は **JIS B 8284 の 9** による場合は、**JIS B 8266 附属書 9** に規定する設計応力強さによることができる。

- b) 平ふた板に穴、みぞ等の切欠きがある場合には、切欠きの部位における最大応力を求め、**6** の疲労解析を行う。
- c) 穴のある平ふた板が内圧により曲げを受ける場合に、穴のコーナー部における応力強さ S は、次の式(5.29)による。なお、式中の $\pm$ の符号はふた板の外側の穴コーナー部及び内側の穴コーナー部に対応する。

$$S = |2P \pm \alpha \sigma_b| \text{----- (5.29)}$$

ここで、 P 、 σ_b 及び α は、次による。

P : 運転圧力 (MPa)

σ_b : 穴のない平ふた板の穴中心相当部における板表面の曲げ応力 (N/mm²)

α : 穴のコーナー部における曲げ応力に対する応力集中係数で、2.0 とする。

5.3.7 高圧管及び高圧配管要素

- a) 内圧を保持する高圧管及びそれに用いる高圧弁、エルボ、ティー、管継手等の高圧配管要素における耐圧部の計算厚さは **5.3.1** の規定を準用し、かつ、**6** の疲労解析を行う。
- b) 高圧配管要素にある穴の交差部 (**図 4** 参照) における応力強さ S は、次の式 (5.30) による。

$$S = \left| \left(\alpha \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + 1 \right) P \right| \text{----- (5.30)}$$

ここで、 K 及び α は、次による。

K : 高圧配管要素の内外径比で、高圧配管要素の外郭が円筒形以外の場合の外径は、穴と外郭間の厚さが最小となる部分の外郭の幅をとる (**図 4** では $K = W/D$) 。

α : 穴の交差部の応力集中係数で、**図 5** により求めてもよい。

- c) 高圧配管要素にあるねじ構造は、疲労解析に加え、**8** のき裂進展解析を実施して使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。
- d) 高圧配管要素の穴の交差部は、**8** のき裂進展解析を実施して使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。

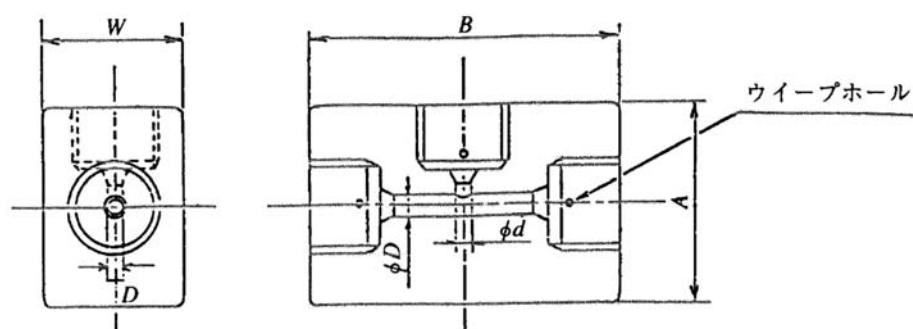


図 4 高圧配管要素の穴の交差部

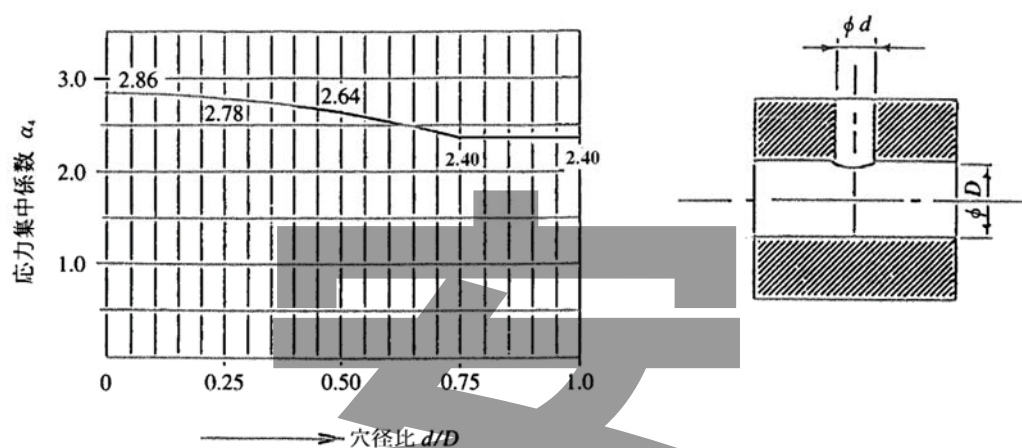


図 5 穴の交差部の応力集中係数

5.3.8 はめあい部

円筒胴又は高圧管の外側にジャケット閉鎖部等に用いる外環を焼きばめ等により取付ける構造では、圧力を負荷する前後において、はめ合い部に生じる応力を解析し、内外部材の応力が降伏点又は 0.2%耐力の設定値を超えないことを確認する。

もし内外部材の一方又は両方で設定値を超える場合には、降伏後のはめ合い圧力を求め、はめ合いによる緊締の健全性を評価するとともに、はめ合い応力を含めた運転時の応力に対して、6 の疲労解析を行う。

また、7 の破裂前漏洩解析を行い、破裂前漏洩が成立しない場合には、8 のき裂進展解析を行い、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。

5.3.9 フランジ継手

円筒胴又は高圧管と一体構造のフランジの応力は、JIS B 8265 附属書 G の G.4.3 又は JIS B 8267 附属書 G の G.4.3、JIS B 8284 の 7.2、又は有限要素法等の適切な計算方法による。ただし、JIS B 8284 の 7.2 の場合は、フランジの内外径比は 1.5 以下とする。

なお、ねじ込み式のフランジの計算厚さは、JIS B 8265 附属書 G の G.4.3 又は JIS B 8267 附属書 G の G.4.3 において、ルーズフランジとみなして求めてもよい。

6 疲労解析

超高压ガス設備の疲労解析に、統計的手法に基づく設計係数を最適疲労曲線に適用する方法及び設計疲労曲線を適用する方法を規定する。

6.1 疲労解析の前提

疲労解析を行う前提を、次の a)～e)に示す。

a) 応力解析

- 1) 疲労解析に用いる応力の算定は、原則として弾性解析により行う。
- 2) 疲労解析で考慮する負荷には、設備の運転の起動及び停止に伴う運転圧力の繰返し、圧縮機等による圧力の脈動を含む運転中の圧力変動、熱（温度）の変動、耐圧試験圧力及び気密試験圧力の繰返し等の必要な負荷を含める。
- 3) 一次応力と二次応力の和の応力強さの変動範囲は、シェークダウンする範囲内とする（5.3.1 参照）。弾性解析でこの条件が満たされない場合は、簡易弾塑性解析として、弾性解析で得られた応力強さの変動範囲に係数 K_e を乗じた値を応力強さの変動範囲とする。
- 4) ピーク応力のうち、局部的構造不連続による応力集中の影響は、必要に応じて、得られた応力振幅に応力集中係数（若しくはひずみ集中係数）又は切欠き係数（若しくは疲労強度減少係数）を乗じて評価する。ただし、表面粗さによる応力集中（9.2.1 参照）は、局部的構造不連続による応力集中の一種とみなせるため、局部的構造不連続による応力集中と表面粗さによる応力集中の両方が存在する場合には、両方の係数を重畳して評価する必要はない。
- 5) 焼ばめ、圧入又は外圧支持等により、部位に塑性変形を伴わずに弾性的に導入された初期残留応力の取扱いは 6.3 c)2) に、自緊等により塑性変形を伴って導入された残留応力の取扱いは 6.3 c)3) に、耐圧試験において部位に降伏が生じる場合の取扱いは 6.3 c)4) に、実験的評価の取扱いは 6.8 に準じる。

b) 最適疲労曲線の位置付け

従来、疲労解析には、主として設計疲労曲線が用いられてきた。設計疲労曲線は、最適疲労曲線に設計係数（安全係数ともいう）を設定している。設計係数は、最適疲労曲線の信頼性（標準偏差）に基づく設計係数と、最適疲労曲線に及ぼす影響因子に基づく設計係数に分離できる（信頼性設計における部分安全係数の考え方）。従来の設計疲労曲線に設定されている設計係数には、上記の 2 つの設計係数が経験的に包含されている。

本基準では、最適疲労曲線とその標準偏差を定量的に示し、的確な設計係数を設定できるようにした。最適疲労曲線に及ぼす影響因子に基づく設計係数は、設計仕様（使用環境、運転条件等）として、別に考慮する。

最適疲労曲線は、軸荷重又は軸ひずみ制御両振疲労試験による小型平滑丸棒試験片の結果である。一方、疲労解析の対象は設備の大型部材であり、試験片と寸法が異なる。従来の設計疲労曲線に設定されている設計係数には、この寸法効果が大きな比率を占めていた。本基準では、次の 1) 及び 2) の理由により、寸法効果は考慮しない。

- 1) 疲労寿命は、き裂発生寿命とき裂進展寿命の和である。応力条件とき裂検出方法が同

じであれば、き裂発生寿命は小型試験片と大型部材で等しい。一方、き裂進展寿命は、大型部材が小型試験片よりも長くなる。従って、大型部材のき裂発生寿命は、小型試験片の疲労寿命から保守的に予測できる。

- 2) 大型部材の実際の疲労寿命には、き裂進展寿命の裕度がある。き裂進展寿命の裕度は、使用期間中の検査を実施した後に、8のき裂進展解析により余寿命として算定できる。

c) 最適疲労曲線及び設計疲労曲線が与えられている材料

- 1) 最適疲労曲線が与えられている材料を表 6 に、平均応力の補正をした設計疲労曲線が与えられている材料を表 7 に示す。

表 6 最適疲労曲線が与えられている材料

材料の種類	グループ
・炭素鋼及び低合金鋼 ・高ニッケル合金（インコネル 600）	A
・オーステナイト系ステンレス鋼（冷間加工材を含む）	B
・SUS630（熱処理 H900、H1075、H1150）	C
・2.25Cr-1Mo 改良鋼	D
・高ニッケル合金（インコネル 718）	E

表 7 設計疲労曲線が与えられている材料（平均応力は補正済み）

材料の種類	図
・炭素鋼、低合金鋼及びフェライト系ステンレス鋼	図 6
・オーステナイト系ステンレス鋼（冷間加工材を含む）	図 7
・高強度鋼ボルト	図 8

- 2) 1)に示す材料以外の材料に対しては、材料製造者又は設備の製造者が保証する最適疲労曲線を用い、寿命に対しては 20、応力振幅に対しては 2 の設計係数を考慮し、6.3 に準じて疲労解析を行ってもよい。また、公的機関で認められた設計疲労曲線があり、設計係数及び平均応力の扱いが明らかな場合には、その設計疲労曲線を使用することができる。

d) 適用する温度範囲

疲労解析の温度は運転温度とする。過小評価とならないことが検証できる場合は、運転温度の代わりに設計温度を用いることができる。疲労曲線（最適疲労曲線及び設計疲労曲線）を適用する温度範囲の上限温度を以下に示す。下限温度は、最低設計金属温度とする。一般に、低温側では材料強度の上昇に伴って疲労強度も上昇するため、常温における疲労曲線を低温側に適用することは、保守的な評価となる。

- 1) 炭素鋼、低合金鋼、フェライト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金： +350℃
- 2) オーステナイト系ステンレス鋼： +425℃
- 3) SUS630： +300℃
- 4) 2.25Cr-1Mo 改良鋼： +400℃から+500℃

5) 高強度ボルト： +350℃

e) 適用する疲労寿命範囲

最適疲労曲線を適用する疲労寿命範囲の下限は 10 回、上限は 10^8 回とする。ただし、グループ E の最適疲労曲線は、上限を 10^6 回とする。設計疲労曲線を適用する疲労寿命範囲の下限は 10 回、上限は 10^6 回とする。ただし、**図 7** の設計疲労曲線は、上限を 10^{11} 回とする。

6.2 記号の意味

6 の疲労解析で用いる記号の意味は、次による。

E : 材料の基準縦弾性係数（常温における値）(N/mm²)

E_d : 運転温度における材料の縦弾性係数 (N/mm²)

K_e : 応力の変動範囲が塑性ひずみを生じる場合に考慮する係数で、次の値とする。

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m \quad \text{の場合：} \quad K_e = 1$$

$$3S_m < P_L + P_b + Q < 3mS_m \quad \text{の場合：} \quad K_e = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left(\frac{P_L + P_b + Q}{3S_m} - 1 \right)$$

$$P_L + P_b + Q \geq 3mS_m \quad \text{の場合：} \quad K_e = 1/n$$

ここで、 S_m 、 m 及び n は、次による。

S_m : 材料の設計応力強さで、超高压ガス設備に適用する技術基準（例えば、特定設備検査規則 特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈の許容引張応力）による (N/mm²)。

m 及び n : **JIS B 8266 附属書 8 の表 4** に規定する次表の材料定数

材料	m	n	上限温度(℃)
炭素鋼	3.0	0.2	350
低合金鋼	2.0	0.2	350
オーステナイト系ステンレス鋼	1.7	0.3	425
ニッケル・クロム・鉄合金	1.7	0.3	425

σ : 最適疲労曲線の標準偏差

α : 応力に対する設計係数

β : 繰返し回数に対する設計係数

N_1 : 手順 1（応力振幅 S_a に対する設計係数を用いる場合。以下同じ。）における S_{eq} に対応する繰返し回数の許容値

N_2 : 手順 2（疲労寿命 N_f に対する設計係数を用いる場合。以下同じ。）における S_{eq} に対応する繰返し回数の許容値

n : 使用繰返し回数

n_i : 複数の使用繰返し回数

N_f : 疲労寿命

- N_a : 繰返し回数の許容値
 N_{ai} : 複数の繰返し回数の許容値
 S : 応力強さ (N/mm²)
 S_a : 応力振幅 (N/mm²)
 S_{alt} : 繰返し応力強さの振幅 (N/mm²)
 S_{eq} : 平均応力の補正をした等価応力振幅 (N/mm²)
 S_{max} : 応力強さの 1 サイクル中の変動範囲における最大値 (N/mm²)
 S_{min} : 応力強さの 1 サイクル中の変動範囲における最小値 (N/mm²)
 S_{mean} : 繰返し応力強さの平均 (N/mm²)
 S_{mean1} : 手順 1 及び手順 2 における修正平均応力 (N/mm²)
 S_u : 材料規格の引張強さ (N/mm²)
 σ_u : 運転温度における材料の引張強さ (N/mm²)
 S_y : 平均応力の補正に用いる繰返し降伏強度 (N/mm²)
 σ_y : 運転温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力 (N/mm²)
 U : 累積使用係数

6.3 疲労解析の方法

a) 疲労解析の手順

疲労解析の手順は、最適疲労曲線を適用する場合及び設計疲労曲線を適用する場合ともに、**JIS B 8266 附属書 8 の 3.2 及び次の 1)～7)**による。

- 1) 繰返し応力強さの振幅 S_{alt} を **b)** により、繰返し応力強さの平均 S_{mean} を **c)** により算出する。
- 2) ピーク応力として、局部的構造不連続による応力集中を考慮する場合は、必要に応じて、弾性解析で得られた公称の応力に構造不連続による応力集中係数（若しくはひずみ集中係数）、切欠き係数（若しくは疲労強度減少係数）又は表面粗さによる応力集中係数（**9.2.1 参照**）を乗じて、繰返し応力強さの振幅及び平均を算出する。
- 3) 簡易弾塑性解析を適用する場合は、弾性解析で得られた応力強さに係数 K_e を乗じて、繰返し応力強さの振幅及び平均とする。
- 4) 最適疲労曲線を適用する場合は、**d)** により平均応力の補正をし、等価応力振幅 S_{eq} を算定する。設計疲労曲線は、平均応力の補正が行われている。
- 5) 運転温度における材料の縦弾性係数 E_d が、最適疲労曲線及び設計疲労曲線を適用する材料の基準縦弾性係数 E と異なる場合は、**4)** で得られた等価応力振幅 S_{eq} に、縦弾性係数の比 E/E_d （**附属書 C 参照**）を乗じ、等価応力振幅 S_{eq} を補正する。
- 6) **4)** 又は **5)** で得られた等価応力振幅 S_{eq} を用いて、対象とする材料の最適疲労曲線又は設計疲労曲線から、許容繰返し回数 N_a を求める。使用繰返し回数 n は繰返し回数の許容値 N_a を超えてはならない。
- 7) 一定振幅の応力サイクルが複数ある場合は、応力サイクルごとに S_{eq} を算出し、各 S_{eq} の値に対応する許容繰返し回数を最適疲労曲線又は設計疲労曲線より求め、**6.7** により累積使用係数 U を算定する。 U の値は 1.0 を超えてはならない。

b) 繰返し応力強さの振幅 S_{alt}

繰返し応力強さの振幅 S_{alt} は、次の式(6.1)による。

$$S_{alt} = \left| \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \right| \quad \text{----- (6.1)}$$

主応力の方向が変化する場合には、JIS B 8266 附属書 8 の 3.2.1 a) 2) 又は 3.2.2 の手順に従って、各応力成分の 1 サイクル中の変動を求める。

c) 繰返し応力強さの平均 S_{mean}

最適疲労曲線を適用する場合、繰返し応力強さの平均 S_{mean} は、次の式(6.2)及び 1)～4)による。

$$S_{mean} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad \text{----- (6.2)}$$

- 1) $S_{mean} < 0$ の場合は、 $S_{mean} = 0$ とする。
- 2) 焼ばめ、圧入及び外圧支持等により部位に塑性変形を伴わずに弾性的に導入された初期残留応力は、 S_{max} 、 S_{min} 及び S_{mean} の値に算入してもよい。
- 3) 自緊等により塑性変形を伴って導入された残留応力は、繰返し応力のもとでの挙動が実体又は実体に準じた試験体により検証されている場合にのみ、 S_{max} 、 S_{min} 及び S_{mean} の値に算入してもよい。
- 4) 耐圧試験において部位に降伏が生じる場合には、弾性的に導入された初期残留応力をそのまま S_{max} 、 S_{min} 及び S_{mean} の値に算入できない。この場合は 3) と同様の扱いとする。

d) 平均応力の補正

繰返し応力強さの振幅 S_{alt} に対して平均応力の補正をした等価応力振幅 S_{eq} は、次の式(6.3)による。

$$S_{eq} = \{ S_{alt} (S_{alt} + S_{mean}) \}^{0.5} \quad \text{----- (6.3)}$$

平均応力は、最大の効果となるように $S_{mean} = S_y - S_{alt}$ としてよい。平均応力の補正に用いる S_y は、次の式(6.4)又は式(6.5)による。ただし、 σ_y 及び σ_u は運転温度における値を用いる。

炭素鋼、低合金鋼及び高ニッケル合金： $S_y = \max. (\sigma_y, 0.615 \sigma_u) \quad \text{----- (6.4)}$

オーステナイト系ステンレス鋼： $S_y = \max. (\sigma_y, 0.252 \sigma_u + 112) \quad \text{---- (6.5)}$

6.4 最適疲労曲線

6.4.1 最適疲労曲線の式

表 6 に示す各グループの最適疲労曲線は、次の式(6.6)から式(6.21)による。

a) グループ A

$$S_a = (1.2 \times 10^5 - 28 \sigma_u) N_f^{-0.58} + 0.45 \sigma_u + 36 \quad \text{----- (6.6)}$$

式(6.6)の炭素鋼及び低合金鋼に対する適用範囲は、常温における引張強さの規定値が 300N/mm² 以上、1,200N/mm² 未満である。

b) グループ B

$$S_a = (5.09 \times 10^4) N_f^{-0.485} + 0.4\sigma_u \quad \text{-----} \quad (6.7)$$

式(6.7)のオーステナイト系ステンレス鋼（冷間加工材を含む）に対する適用範囲は、常温における引張強さの規定値が 390N/mm² 以上、900N/mm² 未満である。

c) グループ C

1) 疲労寿命 $N_f \leq 1.6 \times 10^2$ の場合

$$S_a = 34,095 N_f^{-0.56} + 1,853 N_f^{-0.09} \quad \text{-----} \quad (6.8)$$

2) 疲労寿命 $N_f > 1.6 \times 10^2$ の場合

$$S_a = 174,000 N_f^{-0.870} + 1,700 N_f^{-0.0764} + A \quad \text{-----} \quad (6.9)$$

式(6.8)及び式(6.9)の SUS630 に対する適用範囲は、次の①から③による。

- ① 熱負荷を除いて、繰返し応力強さの振幅の最大値を縦弾性係数で除した値が、0.01 未満。
- ② 熱負荷を含めて、繰返し応力強さの振幅の最大値を縦弾性係数で除した値が、0.02 未満。
- ③ H900 は、ライニング又は破裂前漏洩が成立することが確認されている多層円筒胴の圧縮応力をうける最内層の材料にのみ適用する。

A: 材料の種類ごとに N_f によって決まる値（SUS630H1075 の値を基本とした他の種類に対する調整値）で、表 8 又は表 9 による。

表 8 A の値 ($N_f \geq 10^3$)

疲労寿命 N_f	$1.6 \times 10^2 \sim 10^3$	10^4	10^5	10^6	10^7
SUS630H900	0	88	90	78	66
SUS630H1075	0	0	0	0	0
SUS630H1150	0	-54	-54	-46	-38

注：疲労寿命 N_f の中間における応力振幅の値は、 N_f の対数比例法によって補間する。

表 9 A の値の定式化 ($B = \log N_f$)

疲労寿命 N_f	$N_f \leq 10^3$	$N_f > 10^3$
SUS630H900	$A=0$	$A = -2.4167B^4 + 55.5B^3 - 474.58B^2 + 1779.5B - 2370$
SUS630H1075	$A=0$	$A=0$
SUS630H1150	$A=0$	$A = 1.5833B^4 - 36.167B^3 + 307.42B^2 - 1144.8B + 1516$

d) グループ D（低サイクル側と高サイクル側の区分は、 $5 \times 10^4 \sim 10^5$ 回）

1) 常温（参考）

$$\text{低サイクル側： } S_a = 826.8 N_f^{-0.071} + 76,403 N_f^{-0.5615} \quad \text{-----} \quad (6.10)$$

$$\text{高サイクル側： } S_a = 522.9 N_f^{-0.0133} \quad \text{-----} \quad (6.11)$$

2) 400°C

$$\text{低サイクル側: } S_a = 185,000 (0.025 N_f^{-0.0262} + 0.1602 N_f^{-0.5529}) \text{ ----- (6.12)}$$

$$\text{高サイクル側: } S_a = 610.57 N_f^{-0.0447} \text{ ----- (6.13)}$$

3) 450°C

$$\text{低サイクル側: } S_a = 180,000 (0.0025 N_f^{-0.0297} + 0.2356 N_f^{-0.6137}) \text{ ---- (6.14)}$$

$$\text{高サイクル側: } S_a = 603.02 N_f^{-0.0459} \text{ ----- (6.15)}$$

4) 500°C

$$\text{低サイクル側: } S_a = 176,000 (0.0025 N_f^{-0.0355} + 0.3824 N_f^{-0.7089}) \text{ ---- (6.16)}$$

$$\text{高サイクル側: } S_a = 624.17 N_f^{-0.0518} \text{ ----- (6.17)}$$

e) グループ E (疲労寿命 10^6 回以下)

1) 疲労寿命 $N_f \leq 3.5 \times 10^4$ の場合

応力振幅 S_a 、全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_t$ 及び破断ひずみ ε_f は、次の式(6.18)から式(6.21)による。

$$S_a = 0.5E\Delta \varepsilon_t \text{ ----- (6.18)}$$

$$\Delta \varepsilon_t = 0.0266 \varepsilon_f^{0.155} (\sigma_u / E)^{-0.53} N_f^{-0.56} + 1.17 (\sigma_u / E)^{0.832} N_f^{-0.09} \text{ ----- (6.19)}$$

$$\varepsilon_f = -\ln(1-\Phi) \text{ ----- (6.20)}$$

ここで、材料の絞り Φ 、材料の引張強さ σ_u 及び材料の縦弾性係数 E は、次による。

$$\Phi=0.23, \sigma_u=1408\text{N/mm}^2, E=2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$$

2) 疲労寿命 $N_f > 3.5 \times 10^4$ の場合

$$\log N_f = 8.18 - 2.07 \log(S_a / 6.89 - 63.0) \text{ ----- (6.21)}$$

6.4.2 最適疲労曲線に用いる材料の引張強さ

常温における最適疲労曲線を運転温度に適用する場合に、最適疲労曲線に用いる材料の引張強さ σ_u は、次の a)～d) による。

a) グループ A (インコネル 600 を除く。)

運転温度が 200°C 以下の場合は、 σ_u には常温における材料規格の引張強さ S_u を用い、200°C を超える場合は、寿命側に温度による減少率を考慮し、**表 10** の β の 1.4 倍を用いる。

b) グループ A (インコネル 600)

最適疲労曲線に、運転温度における σ_u を用いる。

c) グループ B

最適疲労曲線に、運転温度における σ_u を用いる。

d) グループ C 及びグループ D

最適疲労曲線に σ_u は用いない。

e) グループ E

最適疲労曲線に、運転温度における σ_u を用いる。

6.4.3 設計係数

最適疲労曲線を適用する場合、最適疲労曲線の標準偏差に基づく設計係数を選択し、許容値を設定する。応力振幅 S_a に対する設計係数 α を用いる手順 1 の場合は、 S_a に α を乗じて許容値を設定する。疲労寿命 N_f に対する設計係数 β を用いる手順 2 の場合は、疲労寿命 N_f に $1/\beta$ を乗じて許容値を設定する。 α 及び β の値は表 10 による。グループ D は β が過度に保守側となるため、 α のみを与える。グループ E は標準偏差のデータはないが、 β はグループ B と同じと見なす。

表 10 最適疲労曲線の設計係数 α 及び β (σ : 標準偏差)

グループ	材料の種類	α		β	
		2σ	3σ	2σ	3σ
A	炭素鋼、低合金鋼、 高ニッケル合金（インコネル 600）	1.23	1.37	2.32	3.42
B	オーステナイト系ステンレス鋼	1.45	1.72	2.72	4.43
C	SUS630	1.45	1.72	2.72	4.43
D	2.25Cr-1Mo 改良鋼	1.45	1.72	—	—
E	高ニッケル合金（インコネル 718）	—	—	2.72	4.43

6.4.4 許容値算定の手順

繰返し回数の許容値を算出する手順は、次の a)～d) による。

a) 等価応力振幅

等価応力振幅 S_{eq} を求める場合の修正平均応力 S_{meanI} は、次の①～④による。

- | | | |
|--|---|-----------------------------|
| ① $S_{mean} < 0$ | : | $S_{meanI} = 0$ |
| ② $S_{alt} + S_{mean} \leq S_y$ | : | $S_{meanI} = S_{mean}$ |
| ③ $S_{alt} + S_{mean} > S_y$ 、 $S_{alt} < S_y$ | : | $S_{meanI} = S_y - S_{alt}$ |
| ④ $S_{alt} > S_y$ | : | $S_{meanI} = 0$ |

等価応力振幅 S_{eq} は、次の式(6.22)による。

$$S_{eq} = \{S_{alt} (S_{alt} + S_{meanI})\}^{0.5} \quad \text{----- (6.22)}$$

b) 手順 1（応力振幅 S_a に対する設計係数 α を用いる場合）

対象とする材料の最適疲労曲線の式の S_a に α を乗じた S_{eq} を代入し、繰返し回数の許容値 N_I を求める。

c) 手順2（疲労寿命 N_f に対する設計係数 β を用いる場合）

対象とする材料の最適疲労曲線の式の S_a に S_{eq} を代入し、疲労寿命を求め、 β で除して N_2 とする。

d) 繰返し回数の許容値の算出

繰返し回数の許容値 N_a は、次の式(6.23)による。

$$N_a = \min. (N_1, N_2) \quad \text{----- (6.23)}$$

6.4.5 変動応力の場合への適用

疲労解析を行う場合、設備に作用する繰返し応力の頻度分布を設定する必要がある。一般に、一定の振幅と平均の繰返し応力（「一定応力振幅」という。）に対して、振幅と平均が変動する繰返し応力という意味で、変動応力^{注1}という用語が使用される。しかし、変動応力と繰返し回数は、応力波形の解析により、振幅と平均が異なる複数の一定応力振幅と繰返し回数の組合せに置き換えることができる。従って、繰返し応力の頻度分布とは、上述した広義の一定応力振幅と繰返し回数の頻度分布である。

注1：例えば、起動停止を伴う圧力設備は、大気圧から運転圧力に昇圧して使用後に大気圧まで降圧する運転一回ごとに（大波一回）、昇圧時に圧縮機の作動により、上限圧力及び下限圧力が直線的に増加する圧力の脈動を重畳して受ける（小波多数回）。このような応力を変動応力として、一定振幅応力と区別する。

繰返し応力の頻度分布を材料の最適疲労曲線と比較すれば、次の **1)** 及び **2)** の場合が想定される。

- 1) 繰返し応力の頻度分布の大半（又は繰返し応力の中央値）が、最適疲労曲線の 10^8 回の疲労強度を超える場合。
- 2) 繰返し応力の頻度分布の大半（又は繰返し応力の中央値）が、最適疲労曲線の 10^8 回の疲労強度未満の場合。

1) の場合には、**6.7** の累積使用係数を適用できる。しかし、**2)** の場合は、最適疲労曲線の実体がないので累積使用係数は適用できず^{注2}、 10^8 回の疲労強度未満の応力振幅に対応する疲労寿命の繰返し回数も明示されていない。**2)** の場合に適用する最適疲労曲線の修正を、次の **a)**、**b)** 及び **c)** に示す。

注2：**2)** の場合に、 10^8 回の疲労強度を超える過大応力振幅の少数回繰返しと、 10^8 回の疲労強度未満の過小応力振幅の多数回繰返しの組合せで、疲労破壊する事例が多数報告されている。

a) 最適疲労曲線の修正

疲労寿命 N_f が 2×10^6 回を超える最適疲労曲線は、**6.4.1** の最適疲労曲線の式(6.6)、式(6.7)、式(6.9)、式(6.13)、式(6.15)及び式(6.17)を修正して、次の式(6.24)による。

$$S_a = C \cdot N_f^{-0.1} \quad \text{----- (6.24)}$$

ここで、 S_a 、 N_f 及び C は、次による。

S_a ：応力振幅（N/mm²）

N_f ：疲労寿命（ただし、 2×10^6 回 $< N_f \leq 10^8$ 回）

C ：最適疲労曲線において、疲労寿命 $N_f = 2 \times 10^6$ 回とそれに対応する応力振幅 S_a で定まる値（ $C = S_a (2 \times 10^6)^{0.1}$ ）

b) 繰返し回数の許容値の制限

応力振幅が、式(6.24)から得られる 10^8 回の疲労強度の $1/2$ 以上で、 10^8 回の疲労強度未満の場合は、繰返し回数の許容値を 10^8 回に制限する。また、応力振幅が、式(6.24)から得られる 10^8 回の疲労強度の $1/2$ 未満の場合は、その応力振幅は疲労解析の対象外として、繰返し回数の許容値を無限大とする。

c) 疲労解析の手順

式(6.24)を用いて最適疲労曲線を補正した場合の疲労解析の方法は、**6.4.1**の最適疲労曲線に代えて式(6.24)を用いる以外は、**6.3**及び**6.4**に従う。

6.5 設計疲労曲線

疲労解析には、最適疲労曲線の代わりに、平均応力の補正をして設計係数を予め設定した設計疲労曲線を適用してもよい。与えられている設計疲労曲線の図を、次の **a)**、**b)**及び **c)**に示す。

a) 炭素鋼、低合金鋼及びフェライト系ステンレス鋼（図 6）

図 6 は、材料の引張強さの設定値が 895N/mm^2 未満、運転温度が $+350^\circ\text{C}$ 以下の場合に適用する。疲労寿命が 10^6 回を超える場合は、**6.4.4** 及び **6.4.5** の最適疲労曲線（グループ A の場合）による。

b) オーステナイト系ステンレス鋼（図 7）

図 7 は、繰返し回数が 10^{11} 回以下、運転温度が $+425^\circ\text{C}$ 以下の場合に適用する。

なお、図 7 は、冷間加工によって強度を高めたオーステナイト系ステンレス鋼にも適用できる。

c) 高強度鋼ボルト（図 8）

適用する材料は **JIS G 4107** の **SNB7** と **SNB16**、又はその同等材料で、いずれも熱処理を施した材料とする。ボルトの応力解析及び疲労解析に用いる設計応力強さ S_m の値は、**JIS B 8266 附属書 9** の **3.1** による。

なお、図 8 の使用に際しては、**JIS B 8266 附属書 8** の **3.5** の **b)**及び **c)**による。

6.6 累積使用係数

疲労解析を行う部位において、圧力変動、熱（温度）の変動等により生じる複数の繰返し応力強さの振幅及び平均を **6.3** により算出し、**6.4** の最適疲労曲線又は **6.5** の設計疲労曲線を用い

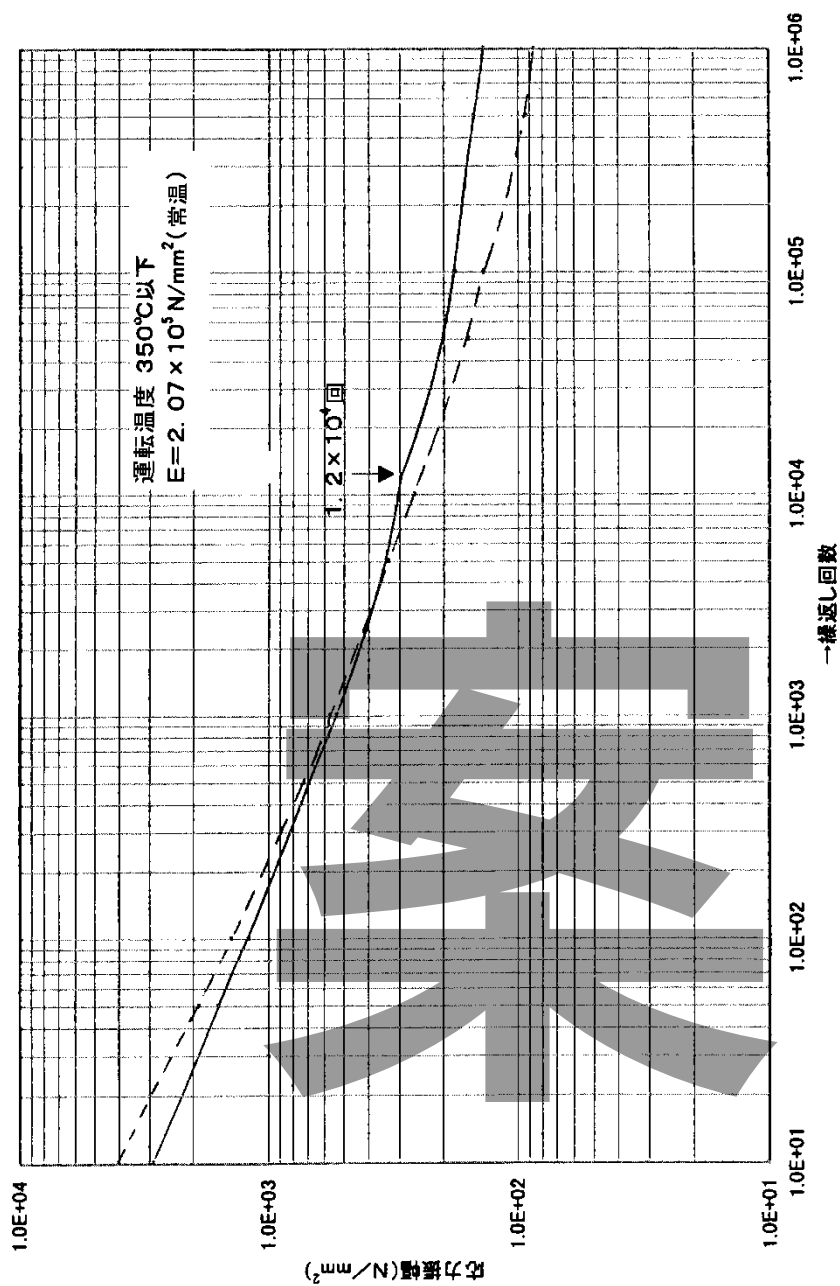
て、対応する複数の許容繰返し回数 N_i を求め、複数の使用繰返し回数 n_i との比の総和として、式(6.25)により算出した累積使用係数 U の値は、1.0 以下とする。

$$U = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad \text{-----} \quad (6.25)$$

6.7 疲労強度の実験的評価

6.4 に示す最適疲労曲線又は 6.5 に示す設計疲労曲線による疲労解析は、設備の応力解析を行うことを前提としている。設備の応力解析の結果がない場合には、設備の実体と同等の形状の試験体を用いて、JIS B 8266 附属書 8 の 6.3 により疲労強度の実験的評価を行って検証すれば、実験した負荷条件とそれに対応する繰返し回数を許容することができる。

案



備考 1. 点線は、常温における引張強さの設定値が 550N/mm^2 以下の材料に使用する。
 2. 実線は、常温における引張強さの設定値が 790N/mm^2 以上 895N/mm^2 未満の材料に使用する。
 3. 平均応力の補正済み

図 6 炭素鋼、低合金鋼及びフェライト系ステンレス鋼の設計疲労曲線[†]
 (材料の常温における引張強さ設定値が 895N/mm^2 未満の場合)

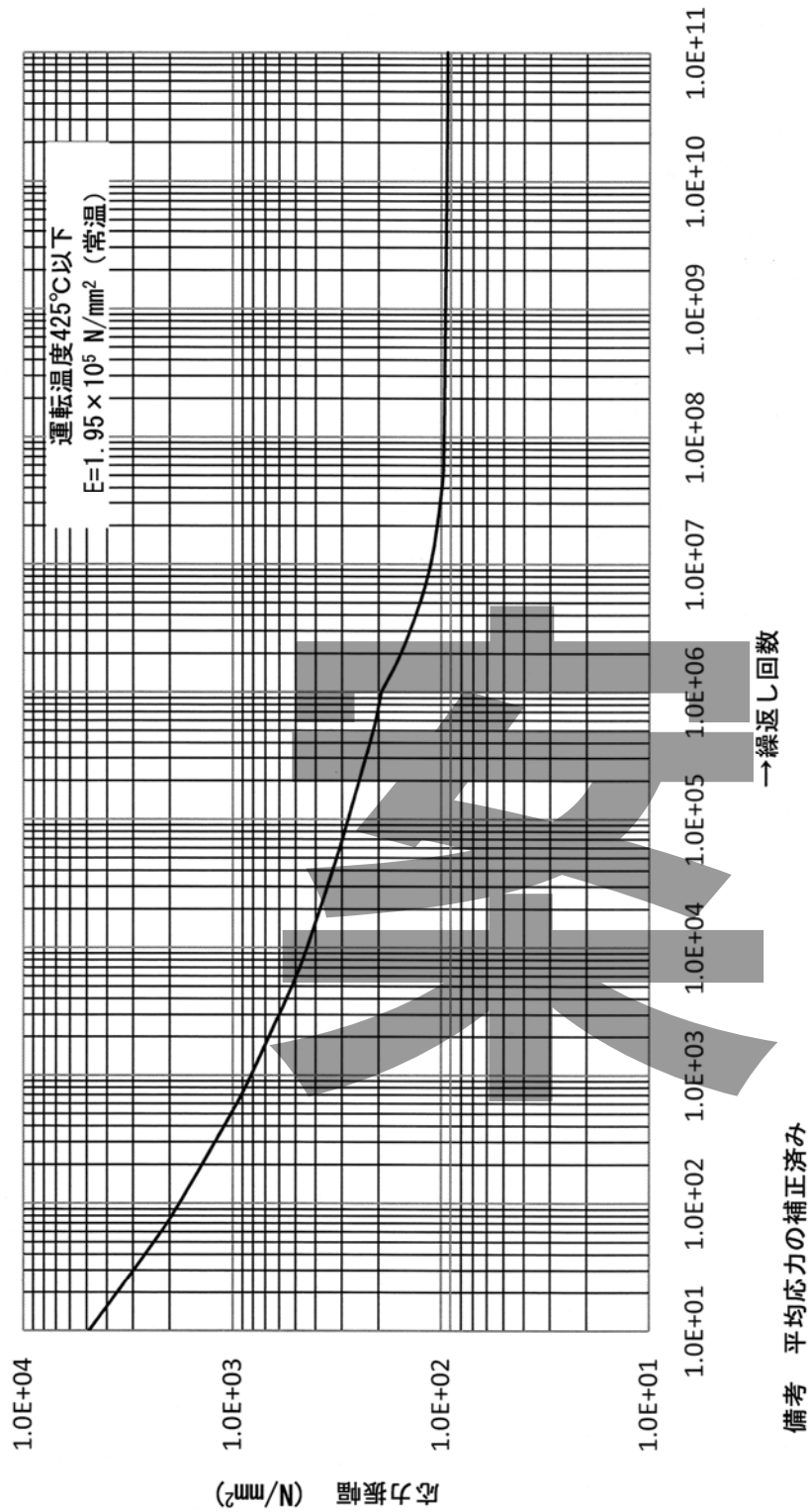
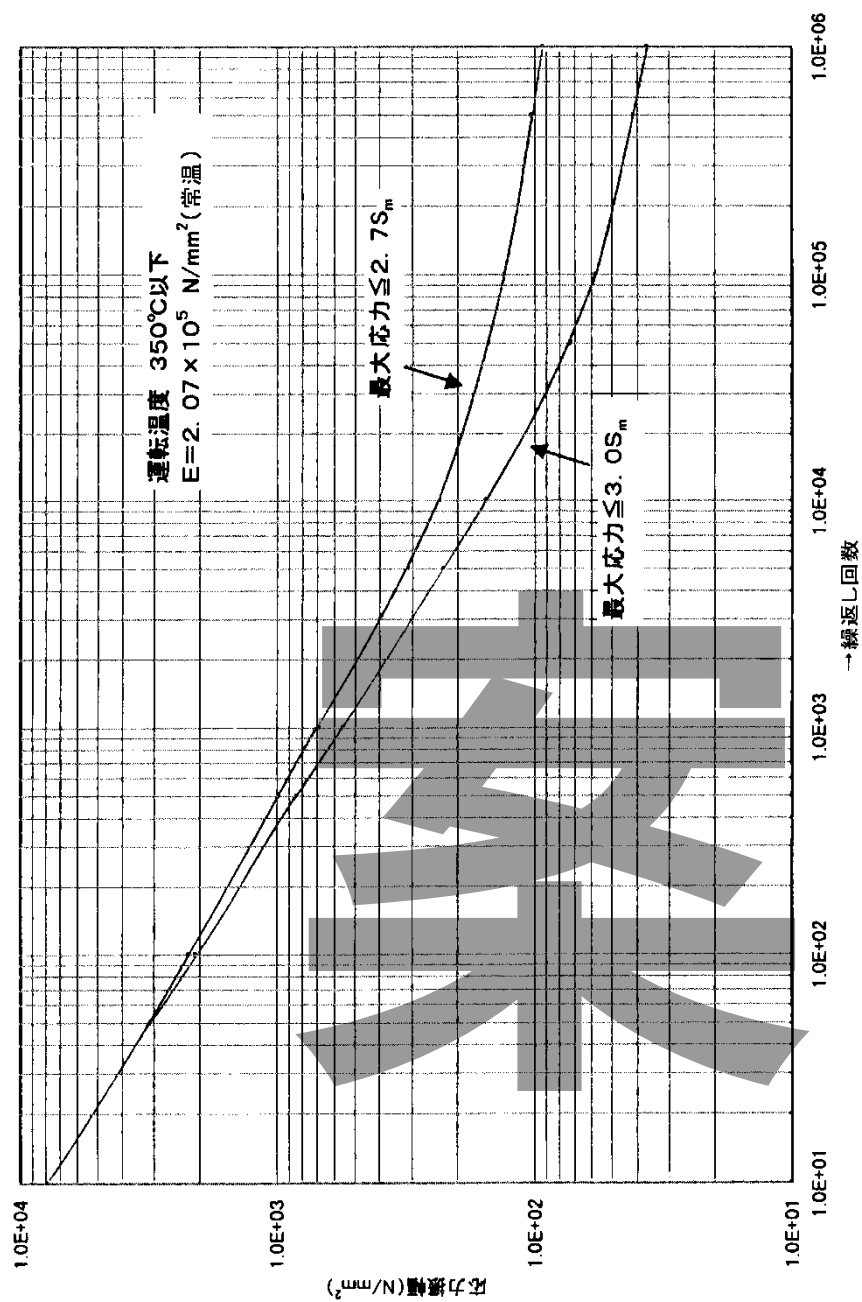


図7 オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線
(繰返し回数が 10¹¹ 以下、運転温度が 425℃ 以下の場合)



備考 1. 最大応力及び設計応力強さ S_m は、JIS B 8266の附属書8及び附属書9による。

2. 平均応力の補正済み

図 8 高強度ボルトの設計疲労曲線

7 破裂前漏洩解析

7.1 一般

公称応力の高い部位について、**6.1 a)2)**及び**6.1 d)**の疲労解析で考慮すべき負荷と温度を用いて破裂前漏洩解析を実施する。ただし、**5.3.6** の平ふた板及び平鏡板、**5.3.9** のフランジ継手に示すフランジ及びクランプを除く。

7.2 解析方法

次の **a)～c)**のいずれかに該当する場合は、破裂前漏洩の成立である。

a) 単肉円筒胴の場合

表面き裂の最深点で、き裂進展方向の部位の肉厚 t の 0.8 倍のき裂深さにおいて、次の式(7.1)及び式(7.2)の両式を満足する場合。

$$K_I < K_{Ic} \quad \text{----- (7.1)}$$

$$0.2t < (K_{Ic} / S_y)^2 \quad \text{----- (7.2)}$$

ここで、 K_I 、 K_{Ic} 、 S_y 及び t は、次による。

K_I ：応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) で、円筒胴の内面にある軸方向き裂の場合は **8.2 f)** による。なお、 K_I の計算に用いるき裂の形状は、次の①及び②による。

- ① 円筒胴の内面及び外面の軸方向表面き裂（構造不連続部は除く）
----- アスペクト比（き裂深さ/き裂長さ）が 1/3 の半楕円形き裂
- ② 円筒胴の外面の円周方向表面き裂
----- 半楕円形き裂または環状き裂

K_{Ic} ：運転温度における材料の平面ひずみ破壊靱性で、使用材料について規格の平面ひずみ破壊靱性試験を行い求める。

平面ひずみ破壊靱性のデータがない場合は、**8.2 a)1)②**の式(8.1)の換算式を用いることができる。又は、妥当性を示すことができれば **8.2 a)1)②**の式(8.1)とは異なる換算式を用いることができる。 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

S_y ：運転温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm^2)

t ：き裂進展方向の部位の肉厚 (m)

b) 多層円筒胴の場合（線巻き容器を含む。）

最内層が急速に破損しても部品と破片が外へ飛び出すことなく、外側の層がふた部も含めて健全な場合で、かつ、最内層を除く外側の層の破壊圧が設計圧力の 120% 以上である場合。

ここで、最内層を除く外側の層の破壊圧 P_B は次式による。

$$P_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sum_{R=2}^N \left(\frac{S_{y,R} + S_{u,R}}{2} \ln K_R \right) \quad \text{----- (7.3)}$$

ここで、 P_B 、 $S_{y,R}$ 、 $S_{u,R}$ 、 N 及び K_R は、次による。

P_B : 最内層を除く外側の層の破壊圧 (MPa)

$S_{y,R}$: 運転温度における第 R 層の材料の降伏点又は 0.2% 耐力の設定値 (N/mm²)

$S_{u,R}$: 運転温度における第 R 層の材料の引張強さの設定値 (N/mm²)

N : 多層円筒胴の層の数（最内層も含む）

K_R : 第 R 層の円筒胴の内外径比 $D_{o,R} / D_{i,R}$

c) 類似の設計、寸法、材料強度、運転条件等についての過去の経験から破裂前漏洩が成立することを立証できる場合。

d) 5.3.5 に示す円筒胴のふた板のねじ構造 (5.3.7 c) に示す高压配管要素にあるねじ構造を含む。) 及びふたと一体構造の円筒胴のコーナー接続部については、き裂が環状に進展する可能性が大きく破裂前漏洩が成立することの立証が難しいので、8 のき裂進展解析を実施して、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。（附属書 I 参照）

e) 5.3.7 d) に示す高压配管要素の穴の交差部については、応力集中の影響で破裂前漏洩が成立することの立証が難しいので、8 のき裂進展解析を実施して、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを立証する。ただし、き裂進展解析を実施する代わりに、き裂形状を 1/4 円又は半円（アスペクト比（き裂深さ/き裂長さ）= 0.5）とし、穴周りの実際の応力分布に基づいて破裂前漏洩解析を実施し、成立を確認してもよい。（附属書 I 及び附属書 M 参照）

8 き裂進展解析

8.1 一般

- a) 破裂前漏洩が成立しない部位に対しては、**6.1 a)2)**及び**6.1 e)**の疲労解析で考慮すべき荷重と温度を用いてき裂進展解析を実施し、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。この場合には **6** の疲労解析も実施し、許容繰返し回数は疲労解析とき裂進展解析のいずれか低い方の回数を採用する。
- b) き裂進展解析における許容繰返し回数は以下による。ここで、限界き裂深さの定義は **8.2 i)**による。

1) 単肉円筒胴の場合

許容繰返し回数は、次の①又は②のいずれか低い方の回数とする。

- ① き裂が、限界き裂深さに達するまでの回数の 1/2
② き裂が、限界き裂深さの 1/4 に達するまでの回数

2) 多層円筒胴の場合

許容繰返し回数は、**8.2 j)2)**による。

8.2 円筒胴内面のき裂進展解析

設定するき裂が円筒胴内面の軸方向き裂の場合、許容繰返し回数の決定手順は、以下による。

a) 破壊靱性 K_{Ic} の決定（手順 1）

1) 低合金鋼の場合

き裂進展解析に用いる材料の破壊靱性 K_{Ic} は、次の①～③のいずれかによる。

- ① 破壊靱性 K_{Ic} が試験により得られている場合は、その値を使用する。
② シャルピー衝撃試験を実施して得られた値（3 個の平均値）から、**図 9** 又は次式により K_{Ic} の値を求めることができる。ただし、 $K_{Ic} \leq 200$ とする。

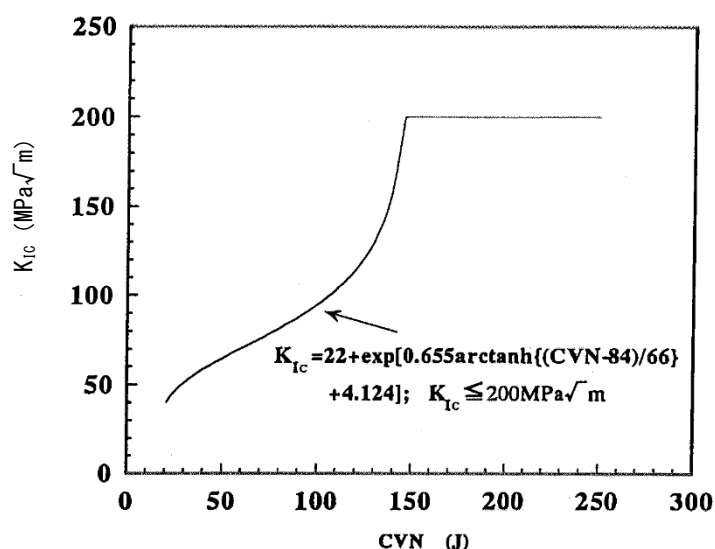
$$K_{Ic} = 22 + \exp[0.655 \arctan\{(CVN - 84)/66\} + 4.124] \quad \text{----- (8.1)}$$

ここで、 K_{Ic} 及び CVN は、次による。

K_{Ic} : 平面ひずみ破壊靱性 (MPa $\sqrt{m}$)

CVN : 吸収エネルギー (J)

- ③ 妥当性を示すことができれば、式(8.1)とは別の代替の換算式を用いることができる。
(**附属書 J** 参照)

図9 K_{Ic} とCVNの換算図

2) 低合金鋼以外の場合

適切な方法により破壊靱性 K_{Ic} を求める。

b) き裂の設定（手順2）

1) き裂面は軸方向と半径方向を含む面とする。

2) き裂の形状は、アスペクト比（き裂深さ/き裂長さ）= 1/3 の半楕円形とする。

3) き裂進展解析を行う場合に初期き裂として設定するき裂深さ a_s は表11による。

ただし、表11の値より小さい値を設定してもよい。その場合には、非破壊検査によって設定するき裂の寸法を確実に検出できることを検証する必要がある。

表11 設定き裂深さ

肉厚 t (mm)	設定き裂深さ a_s (m)
$t \leq 16$	0.5×10^{-3}
$16 < t < 51$	1.1×10^{-3}
$51 \leq t$	1.6×10^{-3}

c) 応力分布の設定（手順3）

応力分布としては、次の①～⑤を考慮する。き裂がない場合について応力分布を設定する（e）参照）。

- ① 圧力による応力
- ② き裂面に作用する圧力
- ③ 熱応力
- ④ 残留応力
- ⑤ 集中応力

④の残留応力は、焼きばめ、圧入、線巻き等の機械的方法により塑性変形を伴わずに弾性的に導入された残留応力、自緊等により塑性変形を伴って導入された残留応力である。自緊の場合、円筒胴内面では圧縮応力、円筒胴外面では引張応力の自己平衡応力となる。

⑤の集中応力は、表面形状の不連続、局所的な負荷等により生じる応力である。

d) き裂寸法の微小増分量の設定（手順 4）

g)のき裂進展速度を計算する際、き裂寸法の増分に伴い応力拡大係数 K_I が一定とみなせるき裂寸法の微小増分量を設定する。

き裂の深さ方向と長さ方向（表面に沿う方向）の二方向に対して、微小増分量 Δa 及び Δc を設定する。

e) 応力分布の多項式近似（手順 5）

き裂がない場合の応力分布を用いて、き裂がある場合にき裂面に垂直に作用する応力分布を次の多項式で近似して、係数 $A_0 \sim A_3$ を決定する。

き裂深さ a の増大に伴い近似式を設定し直し、係数 $A_0 \sim A_3$ の値を決定し直す。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad \text{----- (8.2)}$$

ここで、 σ 、 a 及び x は、次による。

σ : 応力分布 (MPa)

a : き裂深さ (m)

x : 内面からの距離 ($0 \leq x \leq a$) (m)

なお、全き裂深さにわたる応力分布が一つの式で近似できる場合は、次式又は厚肉円筒の解析結果によることができる。

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3 \quad \text{----- (8.3)}$$

ここで、 t 及び x は、次による。

t : 肉厚 (m)

x : 内面からの距離 ($0 \leq x \leq t$) (m)

f) 応力拡大係数 K_I の計算（手順 6）

式(8.2)を用いて表面き裂の応力拡大係数を求める場合の基本式は、次による。

応力拡大係数は表面き裂の最深点と表面点に対して求める。

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\pi a / Q} \quad \text{----- (8.4)}$$

ここで、 K_I 、 A_p 、 Q 、 $A_0 \sim A_3$ 、 $G_0 \sim G_3$ 、 a 、 l 及び c は、次による。

K_I : 表面き裂の応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

A_p : き裂面に作用する圧力 (MPa)

Q : き裂形状パラメータで、次による。

アスペクト比 a/l の値は、き裂の進展に伴い変化させる。

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} \quad \text{----- (8.5)}$$

$A_0 \sim A_3$: **e)**で多項式で近似して得られた係数 (MPa)

$G_0 \sim G_3$: 自由表面補正係数で、き裂の最深点の場合と表面点の場合について、

a/l 及び a/t の関数として**附属書 D**に示す。

ただし、 $0 \leq a/l \leq 0.5$ である。

a : き裂深さ (m)

l : き裂長さ ($=2c$) (m)

c : き裂の半長 (m)

なお、全き裂深さにわたる応力分布が、**e)**の式(8.3)で近似できる場合、以下により K_I を求めることができる。

K_I は式(8.4)を用い、係数 $A_0 \sim A_3$ は次の換算式より求める。

$$A_0 = A'_0 \quad \text{----- (8.6)}$$

$$A_1 = A'_1(a/t) \quad \text{----- (8.7)}$$

$$A_2 = A'_2(a/t)^2 \quad \text{----- (8.8)}$$

$$A_3 = A'_3(a/t)^3 \quad \text{----- (8.9)}$$

単肉円筒胴で圧力による応力の場合、 $A'_0 \sim A'_3$ は次式で与えられる。

ただし、内外径比 K の範囲は $1.2 \leq K \leq 3$ とする。

$$A'_0 / P = (K^2 + 1) / (K^2 - 1) \quad \text{----- (8.10)}$$

$$A'_1 / P = 1.051 - 2.318K + 0.3036K^2 - 0.004417K^3 \quad \text{----- (8.11)}$$

$$A'_2 / P = -1.7678 + 0.9497K + 0.9399K^2 - 0.2056K^3 \quad \text{----- (8.12)}$$

$$A'_3 / P = -0.2798 + 1.3831K - 1.2603K^2 + 0.2138K^3 \quad \text{----- (8.13)}$$

内外径比 K が 3 を超える場合 ($K > 3$) 及び応力が圧力以外の荷重を含む場合は、全き裂深さにわたる応力分布を **e)**の式(8.3)で近似し、係数 $A'_0 \sim A'_3$ を求める。(附属書 K 参照)

e)の応力分布で設定した応力の変動を考慮し、最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ 及び最小応力拡大係数 $K_{I\min}$ を計算する。

最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ は、応力変動の最大値に対応する応力拡大係数、最小応力拡大係数

K_{Imin} は、応力変動の最小値に対応する応力拡大係数である。

複数の応力変動 (応力サイクル) がある場合は、それぞれの応力変動で K_{Imax} 及び K_{Imin} を計算する (8.6 参照)。なお、残留応力は変動しない。

g) き裂進展速度の計算 (手順 7)

き裂進展速度の計算は次による。最深点におけるき裂進展速度 da/dN を式(8.14)に示す。表面点におけるき裂進展速度 dc/dN は、式(8.14)の da/dN を dc/dN に読み替える。ただし、 dc/dN は、き裂半長のき裂進展速度であることに注意を要する。

$$da/dN = Cf(R)\Delta K_I^m \quad \text{----- (8.14)}$$

ただし、 ΔK_I の値が次の式(8.15)に示す下限界値 ΔK_{Ith} より小さい場合には、 da/dN の値はゼロとする。なお、 ΔK_{Ith} は $2.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上とする。

$$\Delta K_{Ith} = \min[G(1 - HR), I] \quad \text{----- (8.15)}$$

ここで、 ΔK_I 、 R 及び $f(R)$ は、次による。

ΔK_I : 応力拡大係数範囲で、 K_{Imin} に応じて次による。

$$K_{Imin} > 0 \text{ の場合 } \Delta K_I = K_{Imax} - K_{Imin} \quad \text{----- (8.16)}$$

$$K_{Imin} \leq 0 \text{ の場合 } \Delta K_I = K_{Imax} \quad \text{----- (8.17)}$$

R : 応力比で、次による。

$$R = K_{Imin} / K_{Imax} \quad \text{----- (8.18)}$$

$f(R)$: 材料及び R に応じて、次の 1)~3) による。

1) 炭素鋼及び中強度低合金鋼 ($S_y \leq 620 \text{ MPa}$)

$$\textcircled{1} \quad 0 < R < 1 \text{ の場合 } f(R) = [2.88 / (2.88 - R)]^m \quad \text{----- (8.19)}$$

$$\textcircled{2} \quad R \leq 0 \text{ の場合 } f(R) = 1 \quad \text{----- (8.20)}$$

2) 高強度低合金鋼 ($S_y > 620 \text{ MPa}$)

$$\textcircled{1} \quad 0 < R < 1 \text{ の場合 } f(R) = 1 + 3.53R \quad \text{----- (8.21)}$$

$$\textcircled{2} \quad R \leq 0 \text{ の場合 } f(R) = 1 \quad \text{----- (8.22)}$$

3) SUS630

$$\textcircled{1} \quad 0.67 \leq R < 1 \text{ の場合 } f(R) = 30.53R - 17.0 \quad \text{----- (8.23)}$$

$$\textcircled{2} \quad 0 < R < 0.67 \text{ の場合 } f(R) = 1 + 3.48R \quad \text{----- (8.24)}$$

$$\textcircled{3} \quad R \leq 0 \text{ の場合 } f(R) = 1 \quad \text{----- (8.25)}$$

C, m, G, H, I : 材料定数で、材料に応じて表 12 による。

なお、常用の温度が室温（20℃）より高い場合、 C は次の式により補正した C_d とする。

$$C_d = C(E/E_d)^m$$

ここで、 C_d 及び E/E_d は、次による。

C_d : C を補正した材料定数 (m/cycle(MPa $\sqrt{m}$)^{-m})

E/E_d : 材料の基準の縦弾性係数の運転温度における縦弾性係数に対する比で、附属書 C による。

表 12 き裂進展速度の計算に用いる材料定数

材料定数 \ 材料	炭素鋼及び 中強度低合金鋼 ($S_y \leq 620\text{MPa}$)	高強度 低合金鋼 ($S_y > 620\text{MPa}$)	SUS630
C m/cycle(MPa $\sqrt{m}$) ^{-m}	3.80×10^{-12}	3.64×10^{-12}	4.49×10^{-12}
m	3.07	3.26	3.15
G MPa $\sqrt{m}$	5.5	7.0	7.0
H	0.8	0.85	0.85
I MPa $\sqrt{m}$	5.5	6.0	6.0

h) き裂寸法と繰返し回数の関係の計算（手順 8）

d) のき裂寸法の微小増分量 Δa 及び Δc の設定に基づき、微小増分量だけき裂が進展するのに要する繰返し回数 ΔN を求める。

ΔN がき裂の深さ方向と長さ方向で大きく異なる場合には d) に戻って、両方向の繰返し回数が同じになるようにどちらかの微小増分量を設定し直す。

式(8.14)に従い、 ΔN 毎に進展したき裂寸法に微小増分量を加算する。

この手順の繰返しにより、き裂寸法と繰返し回数の関係を計算する。

i) 限界き裂深さ a_c の決定（手順 9）

き裂の最深点又は表面点において、 $K_I = K_{Ic}$ になる場合又は $a = 0.8t$ となる場合のいずれか小さいき裂深さ a の値を、限界き裂深さ a_c とする。

この場合、 K_I の計算は式(8.4)によるが、 Q の計算は式(8.5)によらず次の式(8.26)による。

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y \quad \text{-----} \quad (8.26)$$

ここで、 q_y は、次による。

$$q_y = \left[\{(A_0 + A_P)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3\} / S_y \right]^2 / 6 \quad \text{-----} \quad (8.27)$$

j) 許容繰返し回数 N_a の決定（手順 10）

1) 単肉円筒胴の場合

許容繰返し回数 N_a は、次式による。

$$N_a = \min [N_c / 2, N_q] \quad \text{-----} \quad (8.28)$$

ここで、 N_c 及び N_q は、次による。

N_c : き裂深さが限界き裂深さに達する場合の繰返し回数

N_q : き裂深さが限界き裂深さ a_c の 1/4 に達する場合の繰返し回数

2) 多層円筒胴の場合

各層毎にき裂進展解析を実施し、その結果を用いて許容繰返し回数 N_a は、次式による。

$$N_a = \min [N_1 \text{ 又は } N_2, N_3, N_4] \quad \text{-----} \quad (8.29)$$

ここで、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 及び P_B は、次による。

N_1 : 最内層を除く外側の層の破壊圧 P_B が設計圧力の 1.2 倍以上の場合に、最内層内面のき裂が最内層の肉厚を貫通するまでの繰返し回数

N_2 : 最内層を除く外側の層の破壊圧 P_B が設計圧力の 1.2 倍未満の場合に、最内層内面のき裂が最内層の肉厚の 1/4 まで進展するのに要する繰返し回数

N_3 : 第 R 層内面のき裂が第 R 層の肉厚の 1/4 まで進展するのに要する繰返し回数。複数の第 R 層の結果のうちの最小の繰返し回数

N_4 : 最外層内面のき裂が限界き裂深さ a_c (i)参照) の 1/4 に達するまでの繰返し回数

P_B : 最内層を除く外側の層の破壊圧 (7.2 b)参照)

8.3 円筒胴外面のき裂進展解析

想定するき裂が円筒胴外面の軸方向き裂の場合、許容繰返し回数の決定手順は 8.2 の場合と基本的に同じである。ただし、8.2 c)、e)、f)及び g)については次を考慮する。

8.2 c) 応力分布の設定

応力分布としては、次の①及び③～⑤を考慮する。

- ① 圧力による応力
- ③ 熱応力
- ④ 残留応力
- ⑤ 集中応力

8.2 e) 応力分布の多項式近似

8.2 e)の応力分布の多項式近似は、適用できない。

き裂がない場合の応力分布を用いて、外面にき裂がある場合にき裂面に垂直に作用する応

力分布を、多項式で近似して係数を計算する必要がある。

8.2 f) 応力拡大係数 K_I の計算

8.2 f) の応力拡大係数 K_I を求める式は、適用できない。

外面にき裂を設定して、応力拡大係数 K_I を求める式を作成する必要がある。

8.2 g) き裂進展速度の計算

8.2 g) のき裂進展速度の計算において、外面が水等の流体に接触している場合には、環境の影響を考慮する。

8.4 その他の部位のき裂進展解析

設定するき裂が 8.2、8.3 以外の場合、適切なき裂進展解析により許容繰返し回数を求める。
(附属書 I 参照)

8.5 応力分布が一つの多項式で近似できない場合のき裂進展解析

円筒胴の穴等の部位で応力集中等によって急激な応力変化があり、限界き裂深さに至るまでの応力分布を一つの多項式で正確に近似できない場合、き裂進展解析は次の a) 又は b) による。
ただし、8.2 に準じてき裂進展解析が実施できる部位に限る。(附属書 I の 1.3 参照)

- a) 実際の応力分布を複数の区間に分けて、区間毎に多項式で近似する。この場合、区間の境界で二つの区間の多項式を用いた K_I の値が不連続になるので、 i 区間と $(i+1)$ 区間の境界における K_I の差 ΔK_I を $(i+1)$ 区間以降のすべての K_I に加算し、 K_I の不連続を修正する必要がある。
- b) 応力分布をより高次の多項式で正確に近似し、高次の多項式に対応した K_I の計算式を用いる。この場合、高次の多項式の妥当性を示す必要がある。

8.6 応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析

応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析及び許容繰返し回数の決定は次による。
(附属書 L 参照)

- a) 複数の応力サイクルのき裂進展解析を順次行う。解析する応力サイクルの順番は問わない。
- b) 最初の解析を行う応力サイクルでの初期き裂として設定するき裂深さは表 11 による。
続いて行う応力サイクルの解析に用いる初期き裂深さは、その前の応力サイクルの解析で得られた最終き裂深さとする。
- c) 複数の応力サイクルのうちの最大の応力条件において、 $K_I=K_{Ic}$ となるき裂深さを限界き裂深さ a_c (肉厚 t の 0.8 倍の値より大きい場合は $0.8t$) とする。
- d) 許容繰返し回数の決定は、8.2 j) に準じて、次の①及び②による。
 - ① 複数の応力サイクルの使用繰返し回数に基づくき裂進展解析で求めたき裂深さが、限界き裂深さ a_c の 1/4 を超えない。

② 複数の応力サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数（それぞれの応力サイクルの回数を 2 倍）に基づくき裂進展解析で求めたき裂深さが、限界き裂深さ a_c を超えない。

①及び②を満足する場合に、複数の応力サイクルの使用繰返し回数は許容繰返し回数以下である。

案

9 工作及び検査

9.1 材料の確認

超高压設備の耐圧部に使用する材料は、4 の規定要求を満足することが証明され、かつ満足する材料であることを示す記号が確認できるようにする。材料を切断又は機械加工する場合は、記号を移し替えることができる。

9.2 表面仕上げ及び検査

9.2.1 表面仕上げ

耐圧部の表面の仕上げは、原則として円周方向、長手方向ともに JIS B 0601 による $3.2\mu\text{m } R_z$ 以上の精密仕上げとする。ただし、低合金鋼、SUS630 系ステンレス鋼、インコネル 718 の場合は、6.3 a) の疲労解析の手順で図 10 に示す表面粗さによる応力集中係数を考慮する。

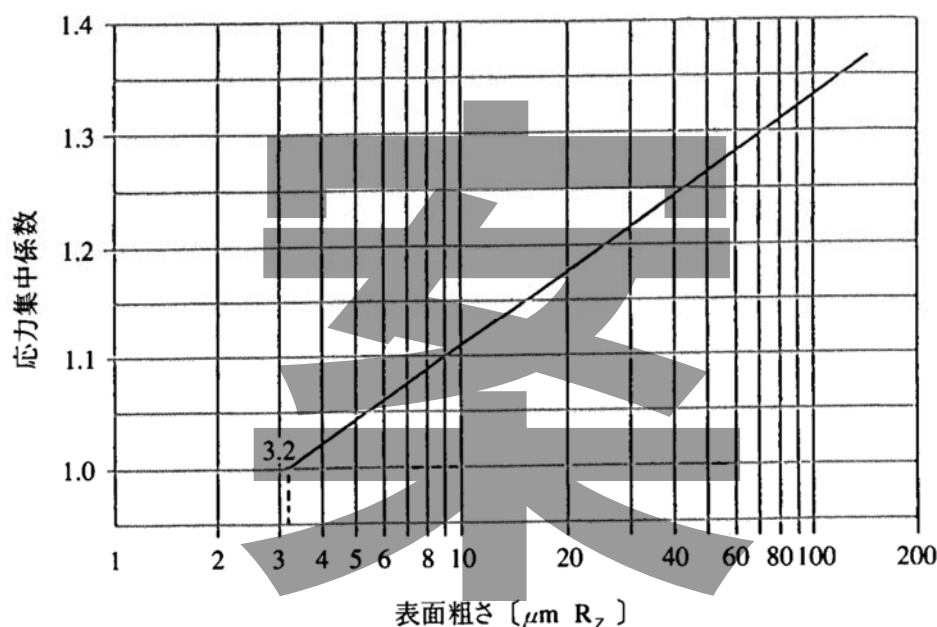


図 10 表面粗さによる応力集中係数

9.2.2 耐圧部の検査

耐圧部は機械加工後、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を実施し、有害な欠陥がないことを確認する。

9.3 管の曲げ加工

9.3.1 管の曲げ加工による外径変化率及び減肉率

高压管を冷間曲げ加工する場合、外径変化率及び減肉率は表 13 に示す値とする。ただし、外径変化率及び減肉率は次式による。

$$\text{外径変化率} = \frac{100(D_{\max} - D_0)}{D_0} \text{ 又は } \frac{100(D_0 - D_{\min})}{D_0}$$

のいずれか大きい値 (%) ----- (9.1)

$$\text{減肉率} = \frac{100(t_0 - t_f)}{t_0} \quad (\%) \quad \text{-----} \quad (9.2)$$

ここで、 D_0 、 $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 、 t_0 及び t_f は、次による。

D_0 : 曲げ加工前の管の外径 (mm)

$D_{\max}$: 曲げ加工後の管の最大外径 (mm)

$D_{\min}$: 曲げ加工後の管の最小外径 (mm)

t_0 : 曲げ加工前の管の厚さ (mm)

t_f : 曲げ加工後の管の厚さ (mm)

表13 高圧管の曲げ加工による外径変化率及び減肉率

	自緊加工あり	自緊加工なし
曲げ半径	6 D_0 以上	4 D_0 以上
外径変化率	4 % 以下	8 % 以下
減 肉 率	6 % 以下	10 % 以下

9.3.2 管の冷間曲げ加工後の熱処理

冷間曲げ加工により管に生じる伸び率の最大値が 5% を超える場合は、曲げ加工後に適切な熱処理を施す。ただし、伸び率の最大値は次による。

$$\varepsilon = 100 \left(\frac{t_0}{t_f} - 1 \right) \quad (\%) \quad \text{-----} \quad (9.3)$$

9.3.3 管の曲げ加工後の検査

曲げ加工後の管は、外面の目視検査を全数行うとともに、必要により磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い、有害な欠陥がないことを確認する。

9.4 自緊処理

超高压ガス設備の円筒胴内面耐圧部で引張応力の高い部位に、圧縮の初期残留応力を生じさせるために行う自緊処理は、次による。

- 自緊処理を行うために用いる圧力は、除荷後に圧縮残留応力により圧縮降伏を生じる値を超えないようにする。
- 自緊処理後は原則として機械加工を行わない。
- 自緊処理によって生じた残留応力の値を確認するとともに、残留応力が疲労強度に与える影響を評価する。

9.5 溶接

超高压ガス設備の耐圧部には、原則として溶接の施工を避ける。やむを得ず耐圧部に溶接を施工する場合には、**JIS B 8285** に従って溶接施工法の確認試験を行い、合格する必要がある。

9.6 ねじ加工

超高压ガス設備の耐圧部に使用するねじは、高い精度の加工が要求され、次の **a)**、**b)** 及び **c)** による。

- a) 製品ねじの加工条件と同一条件で、ある程度長い見本ねじを切削又は転造し、全長にわたる累積ピッチ誤差等を検査して、ねじ加工の精度を確認する。
- b) 製品ねじは限界ねじゲージ検査及び外観検査を全数行う。
- c) ねじの許容限界寸法及び公差は**表 14** による。

表 14 ねじの許容限界寸法及び公差

対象		はめあい 区分	公差域のクラス		表面仕上げ $\mu\text{m } R_z$
			メートルネジ ^{a)}	ユニファイネジ ^{b)}	
円筒胴の両端	めねじ	1 級 (精)	4H、5H	3B	3.2～6.3
	おねじ				
同上両端ねじふた	めねじ	1 級 (精)			3.2～6.3
	おねじ		4h	3A	
ガス圧縮機の 高压シリンダー	めねじ	1 級 (精)	5H	3B	3.2～6.3
	おねじ				
同上ねじ蓋	めねじ	1 級 (精)			3.2～6.3
	おねじ		4h	3A	
管及び管継手端	めねじ	2 級 (中)			6.3 以下
	おねじ		6h、6g	2A	
カラー及び袋ナット	めねじ	2 級 (中)	6H	2B	6.3 以下
	おねじ				
その他の構造要素で フランジ用ボルト及び 圧力を受けない部位の 取付ボルト	めねじ	2 級 (中)	6H	2B	6.3 以下
	おねじ	2 級 (中)	6h、6g	2A	

注：ねじの許容限界寸法及び公差は **JIS B 0209-1～3** による。

メートルネジ、ユニファイネジ以外のねじも本表に準じて使用することができる。

10 耐圧試験

10.1 一般

超高压ガス設備の完成後に行う耐圧試験は、次の a)～f)による。

- a) 耐圧試験は 10.2 の水圧試験によって行う。ただし、構造により水を満たすことができない場合、又は水の残存が許容されず、水の残存の確認ができない場合は、10.3 の気圧試験で水圧試験に替えることができる。
なお、底部にだけ水頭圧がかかる高い塔等で、水圧試験又は気圧試験のいずれも不適当な場合には、10.4 の気液併用耐圧試験によることができる。
- b) 耐圧試験の方法は、JIS B 8265 附属書 P 又は JIS B 8267 附属書 P による。
- c) 耐圧試験で設備に局部的なふくらみ又は変形、漏れ等の異常が生じない場合に、合格とする。
- d) 耐圧試験に使用する水等の温度は、設備の脆性破壊に対して十分な安全余裕のある温度とし、耐圧試験は設備の各部位の温度が均一に安定した後に行う。
- e) 耐圧試験の試験圧力は、10.2～10.4 の規定による。
- f) 試験圧力を保持する時間は、設備の構造、大きさ等に応じて 10～30 分とする。

10.2 水圧試験

a) 水圧試験圧力

水圧試験の試験圧力は、次の 1) 又は 2) による。ただし、設計圧力の 1.5 倍を超えない圧力とする。

1) 単肉円筒胴の場合

$$P_{wt} = 1.25P \frac{S_{yt}}{S_y} \quad \text{----- (10.1)}$$

ここで、 P_{wt} 、 P 、 S_{yt} 及び S_y は、次による。

P_{wt} : 水圧試験圧力 (MPa)

P : 設計圧力 (MPa)

S_{yt} : 試験温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)

S_y : 設計温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)

ただし、設計温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力 S_y の設定値が、低温側の試験温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力 S_{yt} の設定値よりも高くなる場合は、水圧試験圧力は次による。

$$P_{wt} = 1.25P \quad \text{----- (10.2)}$$

2) 多層円筒胴の場合

$$P_{wt} = 1.25P \sum_{R=1}^N [(S_{yt,R} + S_{ut,R}) \ln K_R] / \sum_{R=1}^N [(S_{y,R} + S_{u,R}) \ln K_R] \quad (10.3)$$

ここで、 P_{wt} 、 P 、 $S_{y,R}$ 、 $S_{u,R}$ 、 $S_{yt,R}$ 、 $S_{ut,R}$ 、 N 及び K_R は、次による。

P_{wt} : 水圧試験圧力 (MPa)

P : 設計圧力 (MPa)

$S_{y,R}$: 設計温度における第 R 層の材料の降伏点又は 0.2% 耐力の設定値 (N/mm²)

$S_{u,R}$: 設計温度における第 R 層の材料の引張強さの設定値 (N/mm²)

$S_{yt,R}$: 試験温度における第 R 層の材料の降伏点又は 0.2% 耐力の設定値 (N/mm²)

$S_{ut,R}$: 試験温度における第 R 層の材料の引張強さの設定値 (N/mm²)

N : 多層円筒胴の層の数 (最内層も含む)

K_R : 第 R 層の多層円筒胴の内外径比 $D_{o,R} / D_{i,R}$

ただし、設計温度における材料強度（降伏点又は 0.2% 耐力、及び引張強さ）の設定値が、低温側の試験温度における材料強度の設定値よりも高くなる場合は、水圧試験圧力は式(10.2)による。

b) 水圧試験の方法

水圧試験の方法は JIS B 8265 附属書 P 又は JIS B 8267 附属書 P による他は、次の 1)～3)による。

- 1) 水圧試験において、耐圧部の金属温度は衝撃試験温度より 17℃以上高くする。
- 2) 水圧試験は空気が残存しない方法によって行う。
- 3) 水圧試験圧力まで昇圧し圧力を 10 分間以上保持した後、試験圧力から降圧して、設備の局部的なふくらみ又は変形、漏れ等の異常が生じないことを確認する。

10.3 気圧試験

a) 気圧試験圧力

気圧試験の試験圧力は、次の 1)又は 2)による。ただし、設計圧力の 1.38 倍を超えない圧力とする。

1) 単肉円筒胴の場合

$$P_{at} = 1.15P \frac{S_{yt}}{S_y} \quad (10.4)$$

ここで、 P_{at} は気圧試験圧力 (MPa) であり、 P 、 S_{yt} 、 S_y は、10.2 a)1)による。

ただし、設計温度における材料の降伏点又は 0.2% 耐力の設定値 S_y が、低温側の

試験温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 S_{yt} よりも高くなる場合は、気圧試験圧力は次による。

$$P_{at} = 1.15P \text{ ----- (10.5)}$$

2) 多層円筒胴の場合

$$P_{at} = 1.15P \sum_{R=1}^N [(S_{yt,R} + S_{ut,R}) \ln K_R] / \sum_{R=1}^N [(S_{y,R} + S_{u,R}) \ln K_R] \text{ -- (10.6)}$$

6)

ここで、 P_{at} は気圧試験圧力（MPa）であり、 P 、 $S_{y,R}$ 、 $S_{yt,R}$ 、 $S_{u,R}$ 、 $S_{ut,R}$ 、 N 、 K_R は、10.2 a)2)による。

ただし、設計温度における材料強度（降伏点又は 0.2%耐力、及び引張強さ）の設定値が、低温側の試験温度における材料強度の設定値よりも高くなる場合は、気圧試験圧力は式(10.5)による。

b) 気圧試験の方法

気圧試験の方法は JIS B 8265 附属書 P 又は JIS B 8267 附属書 P による他は、次の 1)～5)による。

- 1) 気圧試験において、耐圧部の金属温度は衝撃試験温度より 17℃以上高くする。
- 2) 気圧試験の実施に際しては、試験設備、計装設備等の整備と事前の点検を特に入念に行うとともに、安全防護設備が十分であることを確認する。
- 3) 気圧試験は空気その他の燃焼、爆発等の危険性のない不活性気体を使用し、かつ、気体の露点以上の温度で行う。
- 4) 空気を使用する場合は、油脂類の残存と混入に注意する。
- 5) 気圧試験は試験設備から十分隔離された場所において試験操作を行う。まず圧力を設計圧力の 50%まで上げ、その後は 10%ずつ段階的に圧力を上昇させる。

気圧試験圧力まで昇圧し圧力を 10 分間以上保持した後、試験圧力から降圧して、設備の局部的なふくらみ又は変形、漏れ等の異常が生じないことを確認する。

10.4 気液併用耐圧試験

a) 気液併用耐圧試験圧力

気液併用耐圧試験における試験圧力は 10.3 a)の気圧試験圧力とする。

b) 気液併用耐圧試験の方法

- 1) 設計液頭圧に等しい水頭圧となるまで水を満たす。
- 2) その他は 10.3 b)による。

11 気密試験

超高压ガス設備の耐压試験に合格した後に行う気密試験は、次の **a)** 及び **b)** による。

a) 気密試験圧力

気密試験の試験圧力は設計圧力以上とする。

b) 気密試験の方法

気密試験は空気その他の燃焼、爆発等の危険性がない不活性気体を使用し、試験圧力に 10 分間以上保持して、適切な漏れ検出方法により検査し、漏れがないことを確認した場合に、合格とする。

ただし、特に高压ポリエチレン製造に係る高压ガス設備の場合には、試験設備、計装設備等の整備と事前の点検を特に入念に行うとともに、安全防護設備が十分であることを確認した上で、エチレンを使用して運転圧力で気密試験を行うことができる。

案

案

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 A（規定）多層円筒胴の塑性不安定解析法

附属書 B（規定）材料の強度低下係数

附属書 C（規定）材料の基準縦弾性係数 E 、及び基準縦弾性係数 E と運転温度における縦弾性係数 E_d の比

附属書 D（規定）き裂進展解析に用いる自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$

附属書 E（規定）圧縮水素用の設備に適用する場合の追加事項

附属書 F（参考）き裂進展解析による許容繰返し回数の決定

附属書 G（参考）計算例及び評価例

附属書 H（参考）超高压ガス設備の脈動圧力の疲労解析例

附属書 I（参考）各種部位のき裂進展解析法

附属書 J（参考）耐圧部の材料の破壊靱性

附属書 K（参考）単肉円筒胴の周方向応力の半径方向分布の近似

附属書 L（参考）応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析例

附属書 M（参考）交差穴部の破裂前漏洩解析

附属書（規定）は規定の一部であるが、附属書（参考）は基準の理解及び利用（選択肢の一部を含む。）を助けるための参考となる記載事項であって規定の一部ではない。

案

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 A（規定）多層円筒胴の塑性不安定解析法

A.1 適用範囲

超高压ガス設備では、強度上の要求から機械的性質の異なる異種材料を層成した構造の多層円筒胴が用いられることがある。この附属書では、この多層円筒胴を用いる場合の破壊圧（塑性不安定圧）を算出する方法を規定する。

破壊圧（塑性不安定圧）は、**A.2** に示す多層円筒胴の塑性不安定解析の手順に従って求めることができる。

A.2 多層円筒胴の塑性不安定解析

A.2.1 第 k 層の材料特性

第 k 層を構成する材料の真応力 σ －真ひずみ（対数ひずみ） ε の関係を単軸引張試験より求める。

$$\sigma_k = F_k(\varepsilon) \quad \text{----- (A.1)}$$

ここで、 F_k ：関数形

A.2.2 相当ひずみ

任意半径 r における相当ひずみは次による。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1 + \varepsilon_\theta) = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + \frac{C^2}{r^2} \right) \quad \text{----- (A.2)}$$

ここで、 $C^2 = u^2 + 2ur = r^2(\varepsilon_\theta^2 + 2\varepsilon_\theta)$ (r にかかわらず一定)

ε_θ ：周方向ひずみ u / r

u ： r における半径方向変位

A.2.3 相当応力

式(A.2)の相当ひずみを式(A.1)に代入した場合の値を、第 k 層の相当応力とする。

$$\sigma_{eqk} = F_k(\varepsilon_{eq}) \quad \text{----- (A.3)}$$

A.2.4 第 k 層における内外圧差

第 k 層における内外圧差は次による。

$$\Delta P_k = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{r_{k-1}}^{r_k} \sigma_{eqk} \frac{rdr}{C^2 + r^2} \quad \text{----- (A.4)}$$

ここで、 r_k ：第 k 層の外半径＝第 $(k+1)$ 層の内半径

A.2.5 多層円筒胴全体における内外圧差

内圧が加わって変形し、 $C^2 = r_0^2 (\varepsilon_{\theta\theta}^2 + 2\varepsilon_{\theta\theta})$ の場合に内外圧差は次による。

$$P = \sum_{k=1}^n \Delta P_k \quad \text{----- (A.5)}$$

この場合に P は C^2 の関数であり、 P を最大とする C^2 が破壊圧を与える。

A.2.6 計算のフローチャート

内層の内面の刻み幅 $\Delta\varepsilon_\theta$ を定めて、図 A.1 に示す計算フローチャートに従って計算する。

案

書面投票（パブコメ対応後）用

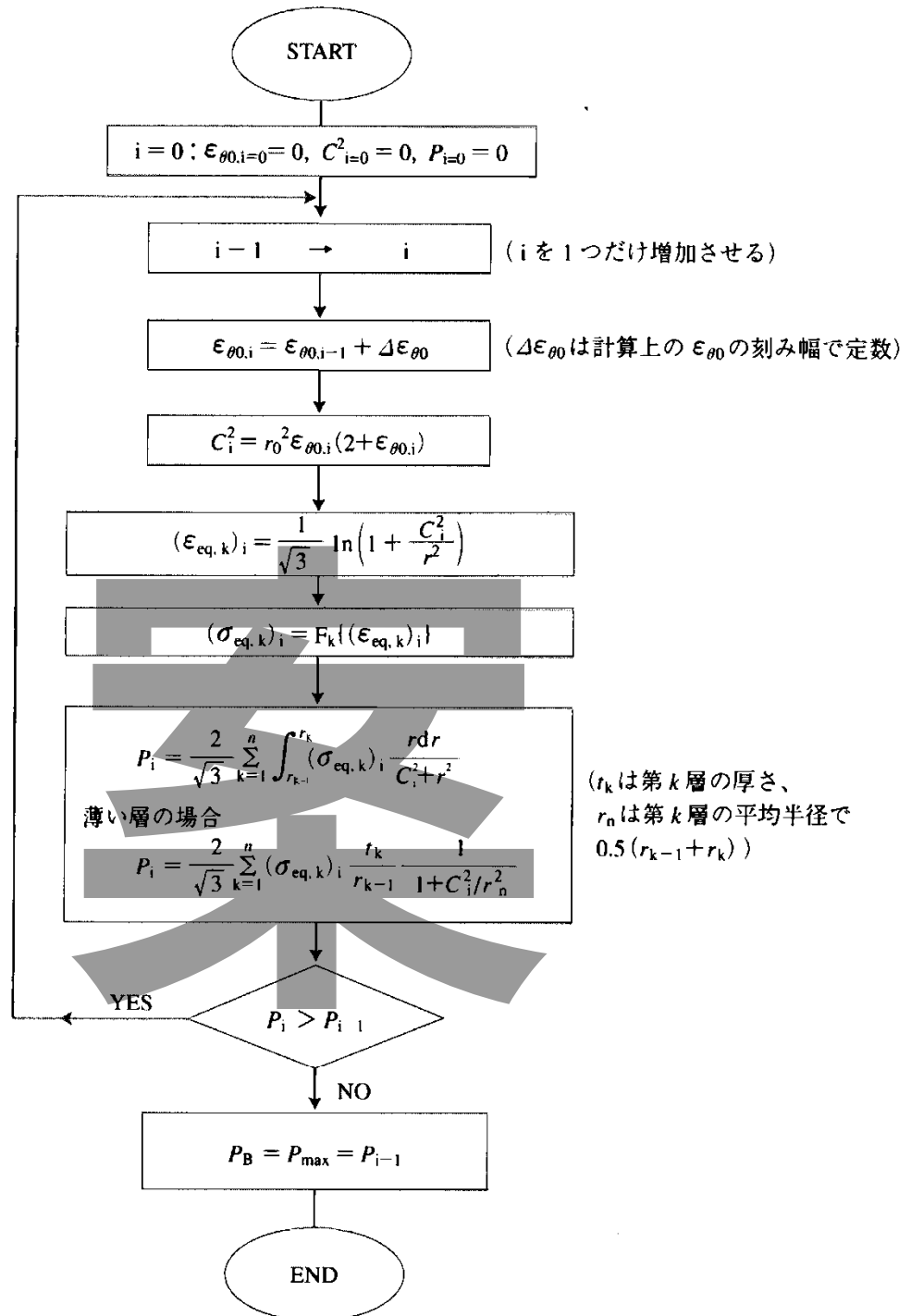
〔 $\sigma = F_k(\epsilon)$ は第 k 層の材料の単軸引張応力ひずみの関係、 i は計算の繰返し回数。〕

図 A.1 計算のフローチャート

案

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 B（規定）材料の強度低下係数

低合金鋼

SUS304 冷間加工材

SUS316 冷間加工材

SUS630

インコネル718

案

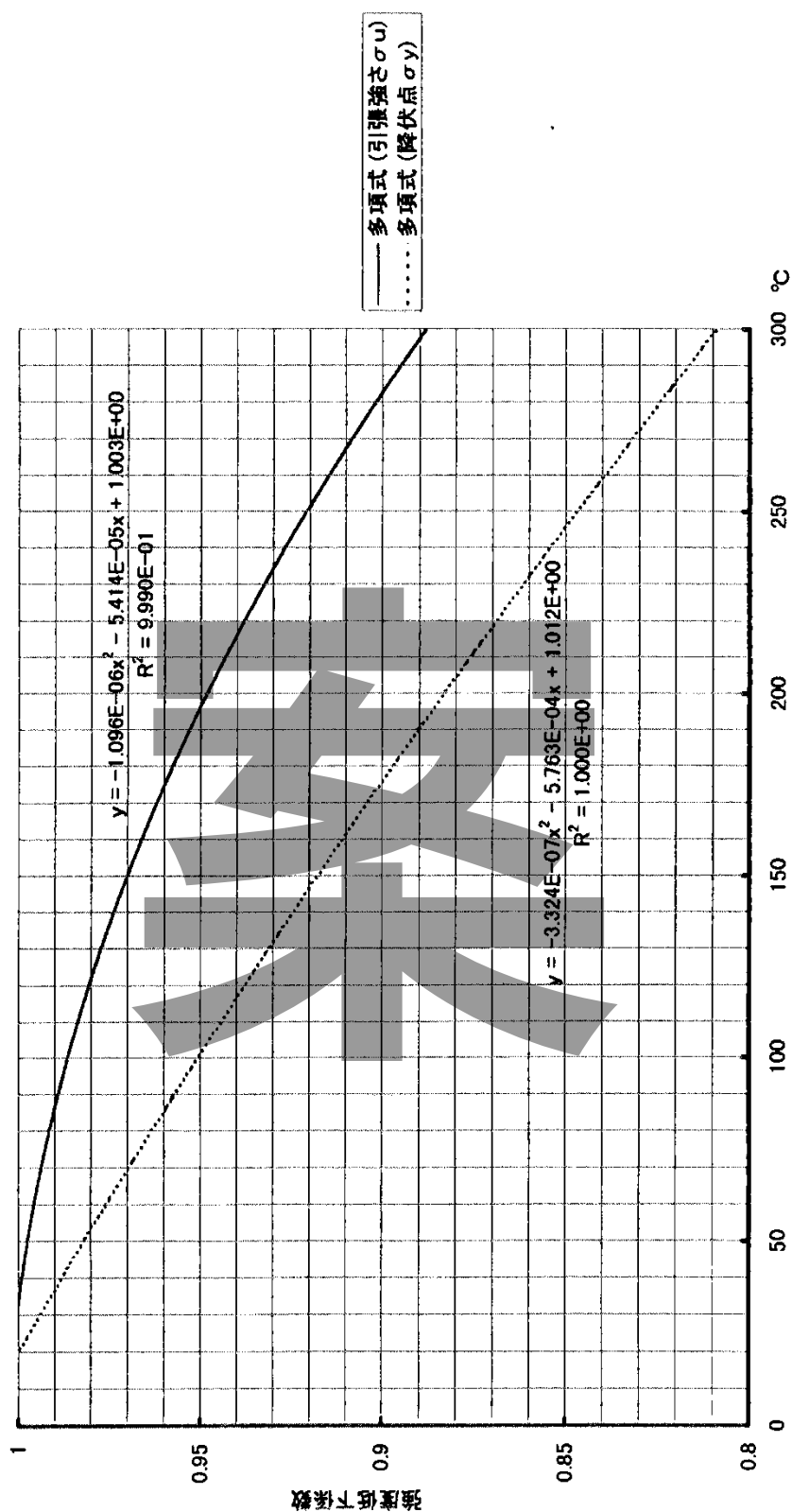


図 B.1 低合金鋼の強度低下係数

書面投票 (パブコメ対応後) 用

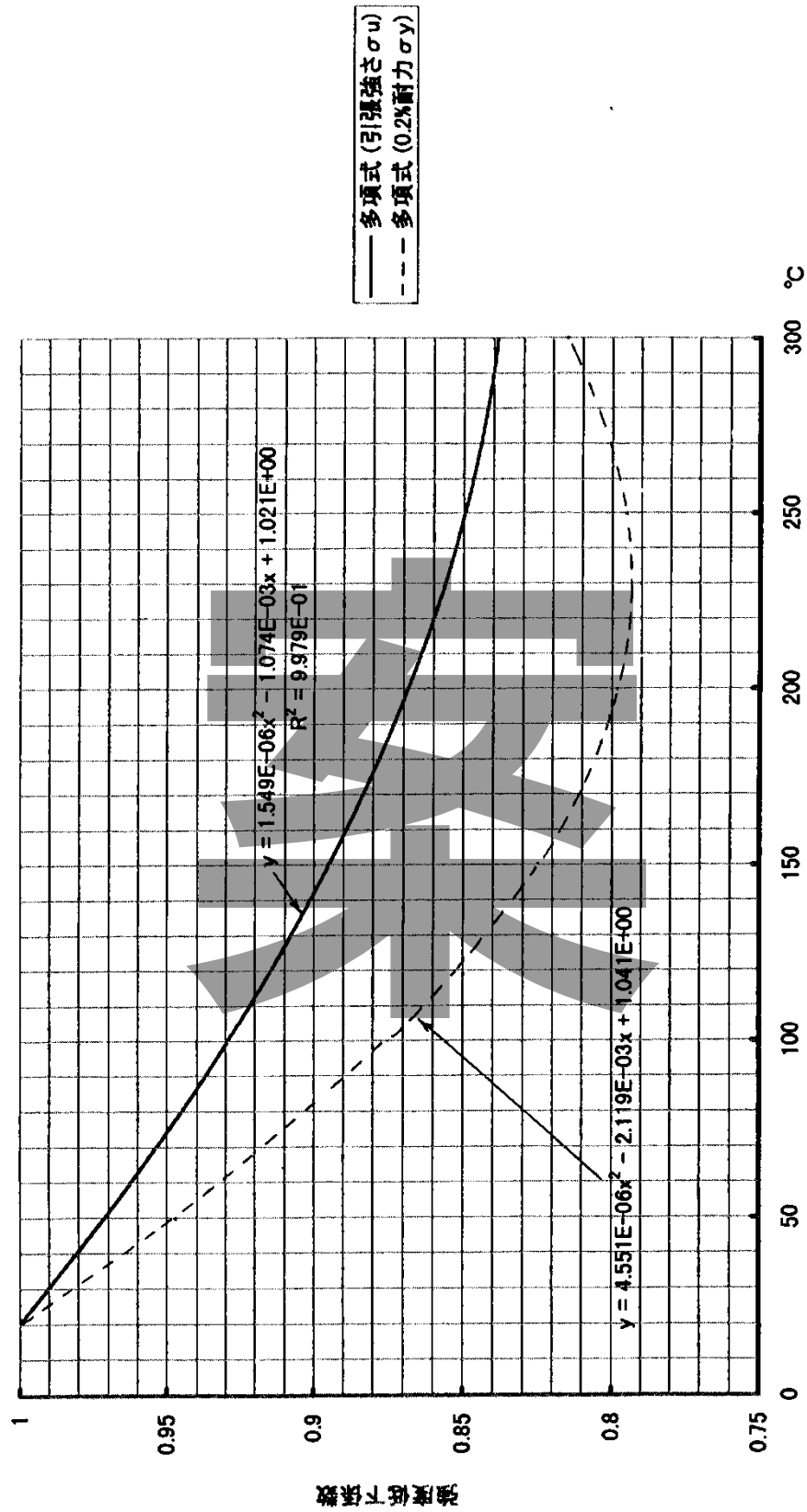
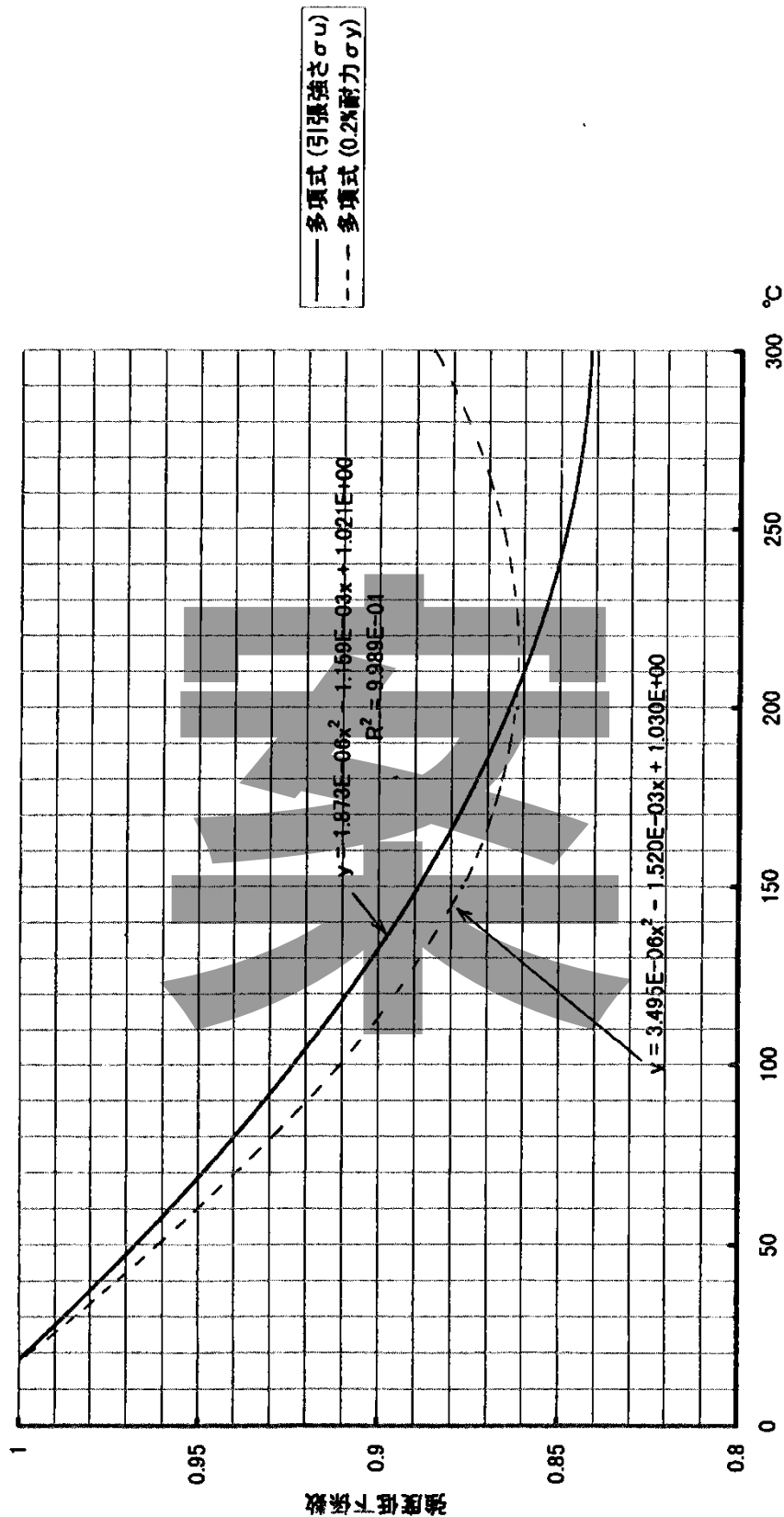


図 B.2 SUS304 冷間加工材の強度低下係数
(冷間加工度 30~50%)



備考：冷間加工度は、断面積の減少率を示す。

図 B.3 SUS316 冷間加工材の強度低下係数
(冷間加工度 20~50%)

書面投票 (パブコメ対応後) 用

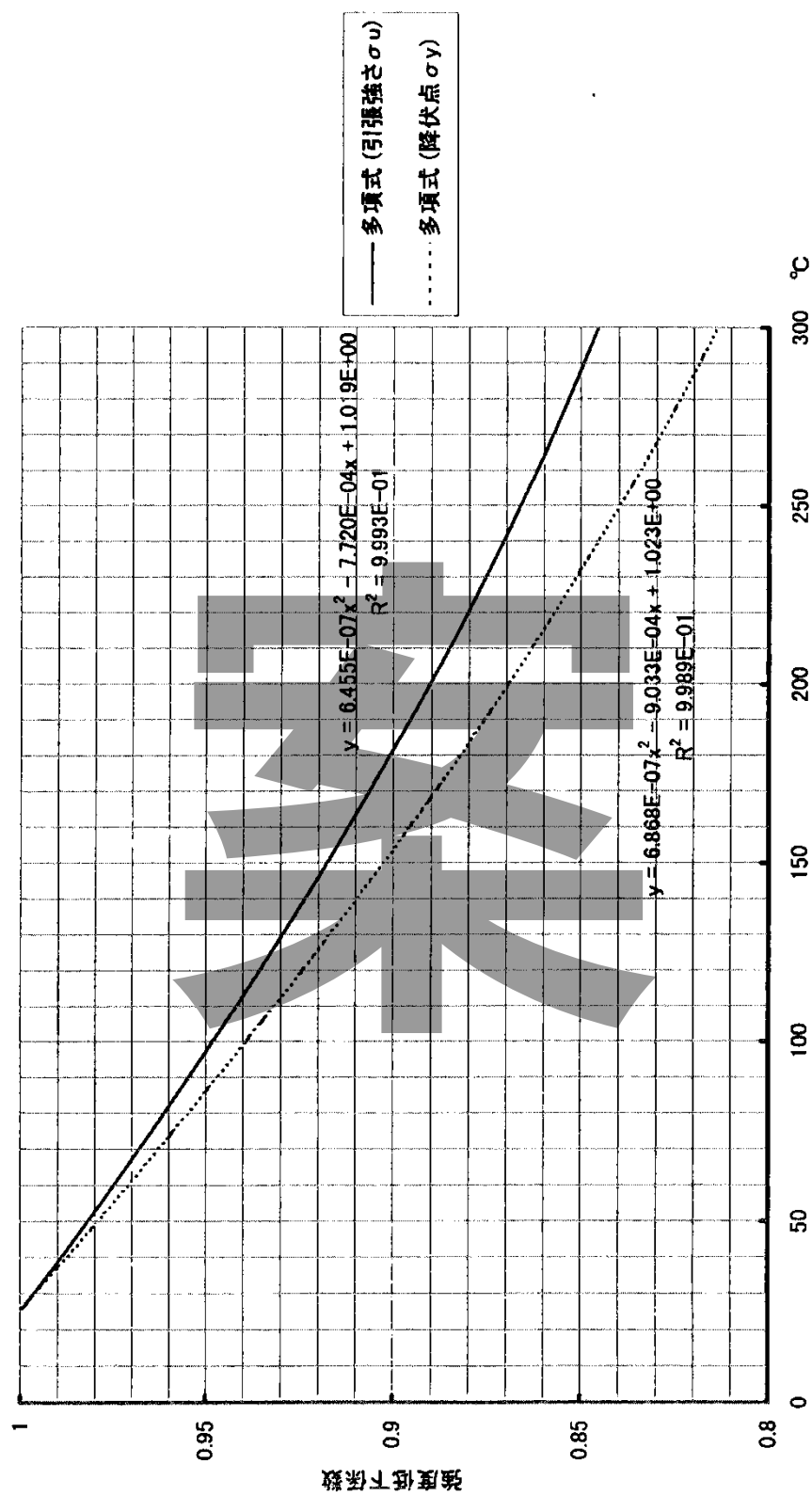


図 B.4 SUS630 の強度低下係数

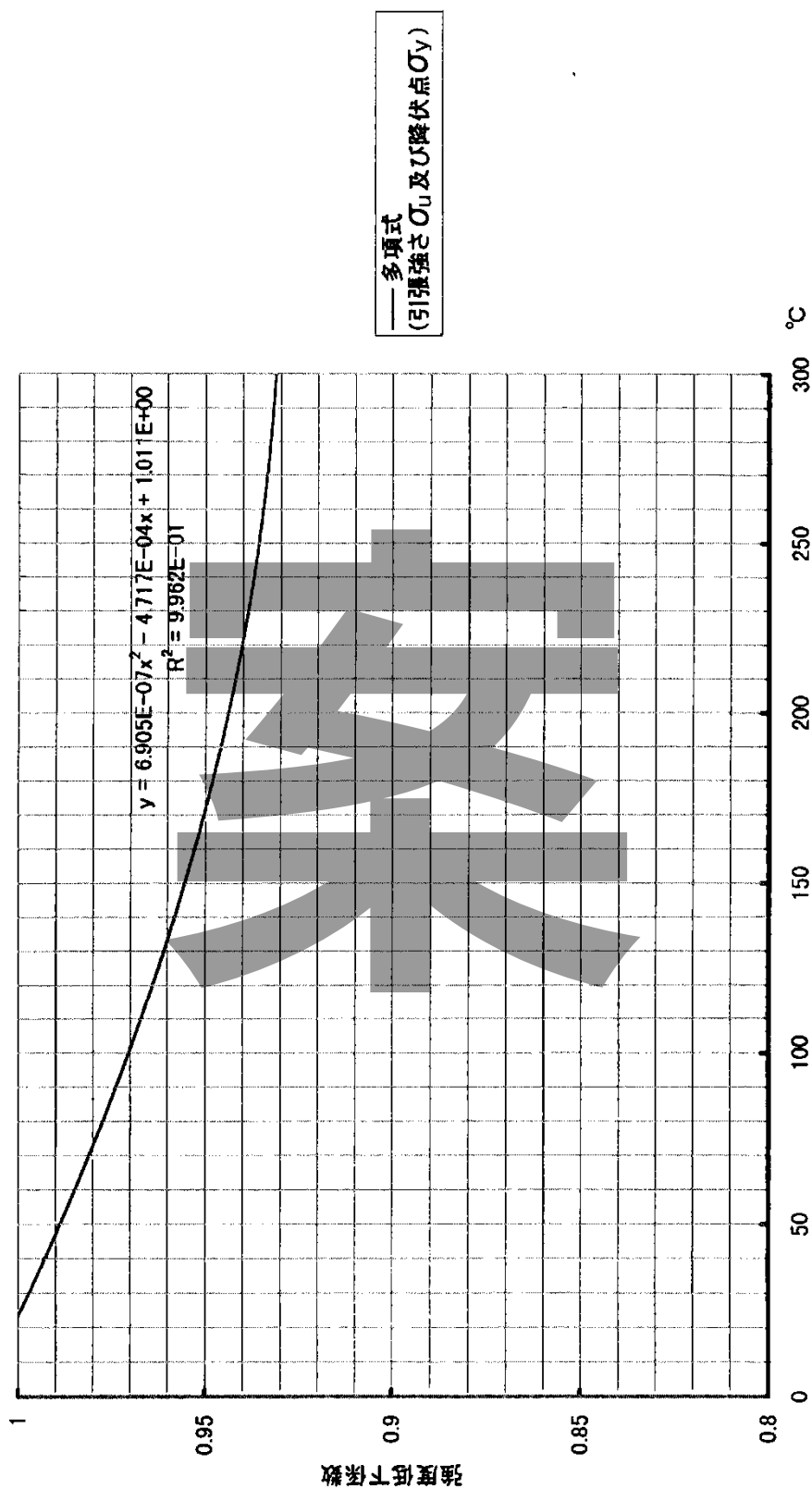


図 B.5 インコネル 718 の強度低下係数

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 C（規定）材料の基準縦弾性係数 E ，及び基準縦弾性係数 E と運転温度における縦弾性係数 E_d の比

案

表 C.1 材料の基準縦弾性係数 E ，及び基準縦弾性係数 E と運転温度における縦弾性係数 E_d の比 (E/E_d) (ペーパー用)

材料	材料の基準 縦弾性係数 E (N/mm ²) (20℃)	基準縦弾性係数 (E) の運転温度における縦弾性係数 (E_d) に対する比 (E/E_d)												備 考 S_u : 材料規格の引張強さ (N / mm ²)
		25℃	50℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃	400℃	425℃	450℃	500℃	
(最適疲労曲線)														
グループ A 炭素鋼 (C≦0.3%)	2.03×10 ⁵	1.000	1.005	1.025	1.041	1.063	1.074	1.091	1.134	—	—	—	—	$S_u \leq 895 \text{ N/mm}^2$
炭素鋼 (C>0.3%)	2.02×10 ⁵	1.000	1.005	1.025	1.041	1.063	1.080	1.098	1.135	—	—	—	—	$S_u \leq 895 \text{ N/mm}^2$
低合金鋼	2.14×10 ⁵	1.005	1.014	1.034	1.044	1.070	1.081	1.103	1.126	—	—	—	—	$S_u \leq 895 \text{ N/mm}^2$ (Cr≦3.0%)
高強度低合金鋼	1.92×10 ⁵	1.000	1.011	1.027	1.043	1.067	1.079	1.097	1.123	—	—	—	—	$895 < S_u \leq 1,200 \text{ N/mm}^2$ (Cr≦3.0%)
フェライト系ステンレス鋼	2.01×10 ⁵	1.000	1.010	1.026	1.047	1.063	1.086	1.110	1.129	—	—	—	—	
高ニッケル合金 (インコネル 600)	2.14×10 ⁵	1.000	1.014	1.029	1.039	1.049	1.065	1.075	1.092	—	—	—	—	
グループ B オーステナイト系 ステンレス鋼	1.95×10 ⁵	1.000	1.010	1.026	1.048	1.066	1.089	1.114	1.127	1.154	1.175	—	—	冷間加工材も含む
グループ C SUS630 (H900, H1075, H1150)	2.00×10 ⁵	1.019	1.033	1.055	1.086	1.106	1.128	1.160	—	—	—	—	—	
グループ D 2.25Cr-1Mo 鋼	2.11×10 ⁵	1.000	1.010	1.029	1.039	1.060	1.077	1.099	1.116	1.147	1.159	1.179	1.213	
グループ E 高ニッケル合金 (インコネル 718)	2.00×10 ⁵	1.000	1.010	1.026	1.042	1.047	1.064	1.081	1.087	—	—	—	—	
(設計疲労曲線) (図 7 及び図 8 は、最適疲労曲線と同じ値を用いる)														
高強度鋼ボルト (図 9)	2.05×10 ⁵	1.000	1.020	1.025	1.030	1.040	1.056	1.073	1.101	—	—	—	—	JIS の SNB7、SNB16 又は その同等材料 (Cr≦3.0%)

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 D（規定）き裂進展解析に用いる自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$ 表 D.1 表面き裂の自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$ （き裂最深点の場合）[†]

		き裂のアスペクト比 a/ℓ					
	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
G_0	0.00	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
	0.05	1.1461	1.1000	1.0879	1.0740	1.0575	1.0373
	0.10	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
	0.15	1.2670	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
	0.20	1.3654	1.1744	1.1210	1.0928	1.0739	1.0482
	0.25	1.4929	1.2170	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
	0.30	1.6539	1.2670	1.1621	1.1160	1.0960	1.0614
	0.40	2.1068	1.3840	1.2135	1.1448	1.1190	1.0772
	0.50	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
	0.60	4.0420	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
	0.70	6.3743	1.7373	1.3610	1.2237	1.1868	1.1112
	0.80	11.991	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045
G_1	0.00	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
	0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
	0.10	0.7732	0.6700	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
	0.15	0.7945	0.6780	0.6890	0.7046	0.7230	0.7426
	0.20	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.7420
	0.25	0.8706	0.7029	0.7000	0.7094	0.7260	0.7451
	0.30	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
	0.40	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
	0.50	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
	0.60	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.7520	0.7631
	0.70	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707
	0.80	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792
G_2	0.00	0.6009	0.5078	0.5310	0.5556	0.5815	0.6084
	0.05	0.5969	0.5086	0.5313	0.5557	0.5815	0.6084
	0.10	0.5996	0.5109	0.5323	0.5560	0.5815	0.6085
	0.15	0.6088	0.5148	0.5340	0.5564	0.5815	0.6087
	0.20	0.6247	0.5202	0.5364	0.5571	0.5815	0.6089
	0.25	0.6475	0.5269	0.5394	0.5580	0.5817	0.6093
	0.30	0.6775	0.5350	0.5430	0.5592	0.5820	0.6099
	0.40	0.7651	0.5545	0.5520	0.5627	0.5835	0.6115
	0.50	0.9048	0.5776	0.5632	0.5680	0.5869	0.6144
	0.60	1.1382	0.6027	0.5762	0.5760	0.5931	0.6188
	0.70	1.5757	0.6281	0.5907	0.5874	0.6037	0.6255
	0.80	2.5997	0.6513	0.6063	0.6031	0.6200	0.6351
G_3	0.00	0.5060	0.4246	0.4480	0.4735	0.5006	0.5290
	0.05	0.5012	0.4250	0.4482	0.4736	0.5006	0.5290
	0.10	0.5012	0.4264	0.4488	0.4736	0.5004	0.5290
	0.15	0.5059	0.4286	0.4498	0.4737	0.5001	0.5289
	0.20	0.5152	0.4317	0.4511	0.4738	0.4998	0.5289
	0.25	0.5292	0.4357	0.4528	0.4741	0.4994	0.5289
	0.30	0.5483	0.4404	0.4550	0.4746	0.4992	0.5291
	0.40	0.6045	0.4522	0.4605	0.4763	0.4993	0.5298
	0.50	0.6943	0.4665	0.4678	0.4795	0.5010	0.5316
	0.60	0.8435	0.4829	0.4769	0.4853	0.5054	0.5349
	0.70	1.1207	0.5007	0.4880	0.4945	0.5141	0.5407
	0.80	1.7614	0.5190	0.5013	0.5085	0.5286	0.5487

ここで、 a ：き裂深さ、 ℓ ：き裂長さ、 t ：肉厚注： a/t 、 a/ℓ については補間することができる。

表 D.2 表面き裂の自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$ （き裂表面点の場合）[†]

		き裂のアスペクト比 a/ℓ					
	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
G_0	0.00	...	0.5450	0.7492	0.9024	1.0297	1.1406
	0.05	...	0.5514	0.7549	0.9070	1.0330	1.1427
	0.10	...	0.5610	0.7636	0.9144	1.0391	1.1473
	0.15	...	0.5738	0.7756	0.9249	1.0479	1.1545
	0.20	...	0.5900	0.7908	0.9385	1.0596	1.1641
	0.25	...	0.6099	0.8095	0.9551	1.0740	1.1763
	0.30	...	0.6338	0.8318	0.9750	1.0913	1.1909
	0.40	...	0.6949	0.8881	1.0250	1.1347	1.2278
	0.50	...	0.7772	0.9619	1.0896	1.1902	1.2746
	0.60	...	0.8859	1.0560	1.1701	1.2585	1.3315
	0.70	...	1.0283	1.1740	1.2686	1.3401	1.3984
	0.80	...	1.2144	1.3208	1.3871	1.4361	1.4753
G_1	0.00	...	0.0725	0.1038	0.1280	0.1484	0.1665
	0.05	...	0.0744	0.1075	0.1331	0.1548	0.1740
	0.10	...	0.0771	0.1119	0.1387	0.1615	0.1816
	0.15	...	0.0807	0.1169	0.1449	0.1685	0.1893
	0.20	...	0.0852	0.1227	0.1515	0.1757	0.1971
	0.25	...	0.0907	0.1293	0.1587	0.1833	0.2049
	0.30	...	0.0973	0.1367	0.1664	0.1912	0.2128
	0.40	...	0.1141	0.1544	0.1839	0.2081	0.2289
	0.50	...	0.1373	0.1765	0.2042	0.2265	0.2453
	0.60	...	0.1689	0.2041	0.2280	0.2466	0.2620
	0.70	...	0.2121	0.2388	0.2558	0.2687	0.2791
	0.80	...	0.2714	0.2824	0.2887	0.2931	0.2965
G_2	0.00	...	0.0254	0.0344	0.0423	0.0495	0.0563
	0.05	...	0.0264	0.0367	0.0456	0.0538	0.0615
	0.10	...	0.0276	0.0392	0.0491	0.0582	0.0666
	0.15	...	0.0293	0.0419	0.0527	0.0625	0.0716
	0.20	...	0.0313	0.0450	0.0565	0.0669	0.0764
	0.25	...	0.0338	0.0484	0.0605	0.0713	0.0812
	0.30	...	0.0368	0.0521	0.0646	0.0757	0.0858
	0.40	...	0.0445	0.0607	0.0735	0.0846	0.0946
	0.50	...	0.0552	0.0712	0.0834	0.0938	0.1030
	0.60	...	0.0700	0.0842	0.0946	0.1033	0.1109
	0.70	...	0.0907	0.1005	0.1075	0.1132	0.1183
	0.80	...	0.1197	0.1212	0.1225	0.1238	0.1252
G_3	0.00	...	0.0125	0.0158	0.0192	0.0226	0.0261
	0.05	...	0.0131	0.0172	0.0214	0.0256	0.0297
	0.10	...	0.0138	0.0188	0.0237	0.0285	0.0332
	0.15	...	0.0147	0.0206	0.0261	0.0314	0.0365
	0.20	...	0.0159	0.0225	0.0285	0.0343	0.0398
	0.25	...	0.0173	0.0245	0.0310	0.0371	0.0429
	0.30	...	0.0190	0.0267	0.0336	0.0399	0.0459
	0.40	...	0.0234	0.0318	0.0390	0.0454	0.0515
	0.50	...	0.0295	0.0379	0.0448	0.0509	0.0565
	0.60	...	0.0380	0.0455	0.0513	0.0564	0.0611
	0.70	...	0.0501	0.0549	0.0587	0.0621	0.0652
	0.80	...	0.0673	0.0670	0.0672	0.0679	0.0687

ここで、 a ：き裂深さ、 ℓ ：き裂長さ、 t ：肉厚

注： a/t 、 a/ℓ については補間することができる。

書面投票（パブコメ対応後）用

き裂進展解析に用いる自由表面補正係数 $G_0 \sim G_3$ の式
(適用範囲： $0.1 \leq a/\ell \leq 0.5$)

表の計算に用いた式を以下に示す。

D.1 表D.1のき裂最深点の場合

$$G_0 = \left(2 + M_1 + \frac{2}{3}M_2 + \frac{1}{2}M_3 \right) \frac{(2Q)^{0.5}}{\pi}$$

$$G_1 = \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{2}M_1 + \frac{4}{15}M_2 + \frac{1}{6}M_3 \right) \frac{(2Q)^{0.5}}{\pi}$$

$$G_2 = \left(\frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \frac{(2Q)^{0.5}}{\pi}$$

$$G_3 = \left(\frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \frac{(2Q)^{0.5}}{\pi}$$

ここで、

$$Q = 1 + 4.593 \left(\frac{a}{\ell} \right)^{1.65}$$

$$M_1 = \frac{\pi}{(2Q)^{0.5}} (4Y_0 - 6Y_1) - 24/5$$

$$M_2 = 3.0$$

$$M_3 = 2 \frac{\pi}{(2Q)^{0.5}} Y_0 - 2M_1 - 8$$

$$Y_0 = B_0 + B_1 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + B_2 \left(\frac{a}{t} \right)^4$$

$$Y_1 = A_0 + A_1 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + A_2 \left(\frac{a}{t} \right)^4$$

$$B_0 = 1.10190 - 0.039726 \frac{a}{\ell} - 0.174352 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2$$

$$B_1 = 4.32489 - 29.8744 \frac{a}{\ell} + 77.7556 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 - 68.18544 \left(\frac{a}{\ell} \right)^3$$

$$B_2 = -3.03329 + 19.92166 \frac{a}{\ell} - 50.328 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 + 42.7696 \left(\frac{a}{\ell} \right)^3$$

$$A_0 = 0.456128 - 0.228412 \frac{a}{\ell} - 0.186092 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2$$

$$A_1 = 3.022 - 21.7358 \frac{a}{\ell} + 59.76 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 - 54.8296 \left(\frac{a}{\ell} \right)^3$$

$$A_2 = -2.28655 + 15.77542 \frac{a}{\ell} - 44.27 \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 + 41.30832 \left(\frac{a}{\ell} \right)^3$$

ただし、 $0 \leq a/\ell \leq 0.1$ の範囲は、表の値を補間して求める。

a ：き裂深さ

ℓ ：き裂長さ

t ：肉厚

D.2 表D.2のき裂表面点の場合

$$G_0 = \left(4 + 2N_1 + \frac{4}{3}N_2 + N_3 \right) \frac{Q^{0.5}}{\pi}$$

$$G_1 = \left(\frac{4}{3} + N_1 + \frac{4}{5}N_2 + \frac{2}{3}N_3 \right) \frac{Q^{0.5}}{\pi}$$

$$G_2 = \left(\frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \frac{Q^{0.5}}{\pi}$$

$$G_3 = \left(\frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \frac{Q^{0.5}}{\pi}$$

ここで、

$$Q = 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65}$$

$$N_1 = \frac{\pi}{(4Q)^{0.5}} (30F_1 - 18F_0) - 8$$

$$N_2 = \frac{\pi}{(4Q)^{0.5}} (60F_0 - 90F_1) + 15$$

$$N_3 = -(1 + N_1 + N_2)$$

$$F_0 = \alpha \left(\frac{2a}{\ell} \right)^\beta$$

$$F_1 = \gamma \left(\frac{2a}{\ell} \right)^\delta$$

$$\alpha = 1.14326 + 0.0175996 \frac{a}{t} + 0.501001 \left(\frac{a}{t} \right)^2$$

$$\beta = 0.458320 - 0.102985 \frac{a}{t} - 0.398175 \left(\frac{a}{t} \right)^2$$

$$\gamma = 0.976770 - 0.131975 \frac{a}{t} + 0.484875 \left(\frac{a}{t} \right)^2$$

$$\delta = 0.448863 - 0.173295 \frac{a}{t} - 0.267775 \left(\frac{a}{t} \right)^2$$

a ：き裂深さ

ℓ ：き裂長さ

t ：肉厚

書面投票（パブコメ対応後）用

附属書 E（規定）圧縮水素用の設備に適用する場合の追加事項

E.1 適用範囲

この附属書では、圧縮水素スタンド及び移動式圧縮水素スタンドに使用する蓄圧器、配管、管継手、弁などの高圧ガス設備（以下「圧縮水素用の設備」という。）について、本基準を適用する場合の追加事項を規定する。

E.2 圧縮水素用の設備の材料

E.2.1 適用材料

圧縮水素用の設備には、本体 4 の材料の規定を満足する材料で、水素適合性があると判定された材料を使用する。この場合に、材料の水素適合性の判定には、E.3.3 の判定基準を適用する。

ただし、次の a)～e)に規定する材料及びこれらの同等材料であって、本体 4 の材料の規定及び E.2.2 の材料特性の規定を満足する材料の場合は、上記の E.3.3 の材料の水素適合性の判定基準の適用の代わりに、E.3.4 の一般化された水素適合性の判定基準を適用し、材料に水素適合性があると判定することができる。

a) 低合金鋼の強度低減材

低合金鋼の強度低減材は、次の 1)及び 2)に規定する低合金鋼を表 E.1 に示す熱処理温度で焼入れ焼戻しを行い、所定の引張強さとした材料とする。

- 1) JIS G 3441（SCM435TK 及び SNCM439TK に限る。）
- 2) JIS G 4053（SCM435 及び SNCM439 に限る。）

表 E.1 低合金鋼の強度低減材の熱処理温度及び引張強さ

材料	熱処理温度（℃）		引張強さ（MPa）
	焼入れ温度	焼戻し温度	
SCM435, SCM435TK	830～920	600～680	800 ～900
SNCM439, SNCM439TK	820～870	630～680	840 ～900

b) ステンレス鋼

ステンレス鋼は、次の 1)～4)の規格に適合する材料とする。

- 1) JIS G 3459（SUS 316 TP-S 及び SUS 316 LTP-S に限る。）
- 2) JIS G 4303（SUS 316 及び SUS 316 L に限る。）
- 3) ASME SA- 312（TPXM-19 に限る。）
- 4) ASME SA- 479（XM-19 に限る。）

c) ステンレス鋼の冷間加工材

ステンレス鋼の冷間加工材は、b) 1)及び 2)に規定するステンレス鋼を冷間加工した材料（以下「冷間加工材」という。）とする。

d) 耐熱鋼

耐熱鋼は、次の規格に適合する材料とする。

JIS G 4311（SUH660 に限る。）

e) アルミニウム合金

アルミニウム合金は、次の **1)** 及び **2)** の規格に適合する材料とする。

1) JIS H 4000（A6061P-T6 に限る。）

2) JIS H 4040（A6061BE-T6 及び A6061BD-T6 に限る。）

E.2.2 材料特性

圧縮水素用の設備の材料の材料特性は、次の **a)**、**b)** 又は **c)** による。

a) 一般（共通の材料特性）

材料規格には、常温における引張試験の材料特性（降伏点又は **0.2%** 耐力（以下「降伏強度」という。）、引張強さ、伸び及び絞り）の規格値が規定されている。材料規格がない材料又は材料規格に材料特性の規定がない材料の場合は、材料特性の値を設定し、実際の引張試験により、材料特性の実測値が設定値以上であることを確認する。

圧縮水素用の設備の材料の材料特性は、上記の材料特性に加えて、次の **1)～4)** による。

- 1)** 降伏比は、本体 **4.1 b)** による。
- 2)** 伸びは、**12%** 以上とする。
- 3)** 絞りは、**30%** 以上とする。
- 4)** 要求吸収エネルギーは、本体 **4.4.4** による。

b) 低合金鋼の強度低減材

低合金鋼の強度低減材を使用する場合には、最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体から採取した試験片 3 個により、常温における引張試験の引張強さが表 **E.1** に示す強度低減材の引張強さの範囲内であることを確認する。引張試験の試験片の採取位置及び採取方向は、本体 **4.5** による。この場合に、**E.4.1 a)** の強度解析及び **E.4.1 b)** の疲労解析で使用する常温における引張強さの設定値は、表 **E.1** に示す強度低減材の引張強さの範囲の最小値とする。

c) ステンレス鋼の冷間加工材

冷間加工材を使用する場合には、材料の加工度及び材料特性は、次の **1)～4)** による。

- 1)** 冷間加工度は、**40%** 以下とする。
- 2)** 管を曲げ加工する場合の加工度は、**40%** 以下とする。
ここで、加工度は、冷間加工度に曲げ加工度を加算した値とする。
- 3)** 冷間加工材の引張強さは、**900MPa** 以下とする。
- 4)** 設計温度の上限は、**300℃** とする。

E.3 材料の水素適合性**E.3.1 材料の水素適合性の判定**

材料の水素適合性の判定は、**E.3.2** の SSRT（Slow Strain Rate Tensile Test）の試験結果に基づ

書面投票（パブコメ対応後）用

き、**E.3.3** により行う。

ただし、**E.2.1 a)～e)**に規定する材料及びこれらの同等材料の場合は、**E.3.4** の一般化された水素適合性の判定基準を適用することができる。

E.3.2 SSRT の試験方法

SSRT の試験方法は、次の **a)～c)**による。

a) 試験片

圧縮水素用の設備の最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から、設備の形状が円筒（管又は胴）の場合は、円筒の周方向と試験片の軸方向が一致するように、平滑円形断面試験片又は平滑矩形断面試験片を採取する。

なお、切欠き試験片は使用しない。

b) 試験方法

ASTM G 142 に規定する SSRT について、次の **1)～5)**の修正を行った試験条件及び試験環境に基づき、設計圧力及び最低設計金属温度において水素ガス環境及び不活性ガス環境で SSRT を行う（試験片の数はそれぞれ 3 個とする。）。

なお、不活性ガス環境は、大気環境（試験圧力は大気圧とする。）としてもよい。

1) 水素純度

水素純度は、**ASTM G 142** の **7** に規定する値に代えて、次の①又は②とする。

- ① 水素純度が 99.9999%以上
- ② 水素純度が 99.999%以上、かつ、 $\text{CO} < 1\text{ppm}$ 、 $\text{CO}_2 < 1\text{ppm}$ 、 $\text{H}_2\text{O} < 3\text{ppm}$ 、 $\text{O}_2 < 1\text{ppm}$

2) 水素圧力

水素圧力は、**ASTM G 142** の **8.3** に規定する値に代えて、設計圧力とする。

ただし、設計圧力が 40MPa 未満の場合は、40MPa 以上とする。

3) 試験片寸法

試験片寸法は、**ASTM G 142** の **10.2 Fig3(a)**に規定する直径（ $6\text{mm} \pm 0.13\text{mm}$ ）に代えて、次の①又は②とする。

- ① 平滑円形断面試験片を使用する場合は、試験片の直径を 4mm 以下とする。
ただし、低合金鋼の場合は 6mm としてもよい。
- ② 平滑矩形断面試験片を使用する場合は、試験片の断面積/外周長さを 1mm 以下とする。

4) 試験温度

試験温度は、**ASTM G 142** の **12.9** に規定する温度に代えて、最低設計金属温度とする。

5) 変位速度

変位速度は、**ASTM G 142** の **12.11** に規定する変位速度に代えて、0.002 mm/s 以下とする。

c) 材料の水素適合性の指標

b)の SSRT の試験結果から、水素ガス環境と不活性ガス環境の荷重－伸び曲線を作成し、次の①～④に示す材料の水素適合性の指標を算定する。（試験片数それぞれ 3 個の平均）

① 相対降伏強度（*RYS*）

$$RYS = \frac{\text{水素ガス環境の降伏強度}}{\text{不活性ガス環境の降伏強度}}$$

② 相対引張強さ（*RTS*）

$$RTS = \frac{\text{水素ガス環境の引張強さ}}{\text{不活性ガス環境の引張強さ}}$$

③ 相対伸び（*REL*）

$$REL = \frac{\text{水素ガス環境の伸び}}{\text{不活性ガス環境の伸び}}$$

④ 相対絞り（*RRA*）

$$RRA = \frac{\text{水素ガス環境の絞り}}{\text{不活性ガス環境の絞り}}$$

E.3.3 SSRT の試験結果による水素適合性の判定基準

E.3.2 の SSRT の試験結果による水素適合性の判定は、次の a)により材料の選定を行った後、次の b)による。

a) 材料の選定

材料の選定は、次の①及び②が成立することを確認した後、次の③による。次の③が成立する場合は、b)により水素適合性を判定する。

- ① 不活性ガス環境の SSRT の荷重－伸び曲線が、最大荷重点で延性不安定破壊を開始する形状を示す。
- ② 水素ガス環境の降伏強度が、不活性ガス環境の降伏強度と相違しない（ $RYS=1$ とみなせる。）。
- ③ 水素ガス環境の SSRT の荷重－伸び曲線が、不活性ガス環境の SSRT の最大荷重点に達する前の荷重又は伸びで、破壊によって打切られない（ $RTS=1$ 、 $RTS>REL$ 、 $RTS>RRA$ とみなせる。）。

b) 水素適合性の判定基準

水素適合性の判定基準は、次の 1)又は 2)による。

書面投票（パブコメ対応後）用

1) 絞りを指標とする判定基準

絞りを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

$$\varphi_T \times RRA \geq \varphi_S$$

ここで、 φ_T 、 φ_S 及び RRA は、次による。

φ_T : 常温における材料の引張試験の絞りの実測値 (%)

φ_S : 材料規格の絞りの規定値 (%)

RRA : E.3.2 c)④により SSRT の試験結果から算定する相対絞り

2) 伸びを指標とする判定基準

材料規格に絞りが規定されていない場合、又は設計及び製作に必要な材料特性として絞りが要求されない場合には、絞りに代えて、伸びを指標とする判定基準として、次の 2.1)又は 2.2)を適用してもよい。

2.1) 冷間加工なしの場合の判定基準

冷間加工なしの場合は、伸びを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

$$\delta_T \times REL \geq \delta_S$$

ここで、 δ_T 、 δ_S 及び REL は、次による。

δ_T : 常温における材料の引張試験の伸びの実測値 (%)

δ_S : 材料規格の伸びの規定値 (%)

REL : E.3.2 c)③により材料の SSRT の試験結果から算定する相対伸び

2.2) 冷間加工材の場合の判定基準

冷間加工材の場合は、伸びを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

$$(\delta_T + \delta_{CW}) \times REL \geq \delta_S$$

ここで、 δ_T 、 δ_{CW} 、 δ_S 及び REL は、次による。

δ_T : 常温における冷間加工材の引張試験の伸びの実測値 (%)

δ_{CW} : 冷間加工による伸びの相当値 (%)

δ_S : 材料規格の伸びの規定値 (%)

REL : E.3.2 c)③により冷間加工材の SSRT の試験結果から算定する相対伸び

E.3.4 一般化された水素適合性の判定基準

E.3.4.1 低合金鋼の強度低減材

E.2.1 a)に示す低合金鋼の強度低減材は、常温における水素適合性が確認されている。圧縮水素用の設備に低合金鋼の強度低減材を使用する場合は、E.4.1 a)の強度解析及びE.4.1 b)の疲労解析で使用する常温における引張強さの設定値を、E.2.1 a)の表 E.1 に規定する引張強さの範囲

の最小値としてもよい。

E.3.4.2 ステンレス鋼

E.2.1 b)に示すステンレス鋼及び**E.2.1 c)**に示す冷間加工材の一般化された水素適合性の判定基準は、次の**a)**及び**b)**による。

a) E.2.1 b) 1)及び**2)**に示すステンレス鋼及び**E.2.1 c)**に示す冷間加工材の場合は、**E.3.3**に示した SSRT の試験結果による水素適合性の判定基準に代えて、材料の Ni 当量をパラメータとして定式化した絞り又は伸びを指標とする水素適合性の判定基準を適用してもよい。

材料の Ni 当量をパラメータとして定式化した絞り又は伸びを指標とする水素適合性の判定基準は、次の**1)**又は**2)**による。

1) 絞りを指標とする判定基準

絞りを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

$$\varphi_T \times RRA \geq \varphi_S$$

ここで、 φ_T 、 φ_S 及び RRA は、次による。

φ_T : 常温における材料の引張試験の絞りの実測値 (%)

φ_S : 材料規格の絞りの規定値 (%)

RRA : 材料の Ni 当量 (Ni_{eq}) をパラメータとして定式化した相対絞りで、次の①又は②による。

① 温度が室温 (20℃) 以上の場合

$$RRA = 0.7 + 0.3 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 25.73}{1.512}\right)$$

② 温度が低温 (−123℃以上、+20℃未満) の場合

$$RRA = 0.6 + 0.4 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 27.76}{1.339}\right)$$

ここで、Ni 当量 (Ni_{eq}) は、次の式により算出する。

$$Ni_{eq} (\text{質量}\%) = 12.6 C + 0.35 Si + 1.05 Mn + Ni + 0.65 Cr + 0.98 Mo$$

なお、C は炭素、Si はケイ素、Mn はマンガン、Ni はニッケル、Cr はクロム及び Mo はモリブデンの各質量分率の値 (%) を示す。

2) 伸びを指標とする判定基準

材料規格に絞りが規定されていない場合、又は設計及び製作に必要な材料特性として絞りが要求されない場合には、絞りに代えて、伸びを指標とする判定基準として、次の**2.1)**又は**2.2)**を適用してもよい。

2.1) 冷間加工なしの場合の判定基準

冷間加工なしの場合は、伸びを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

書面投票（パブコメ対応後）用

$$\delta_T \times REL \geq \delta_S$$

ここで、 δ_T 、 δ_S 及び REL は、次による。

δ_T : 常温における材料の引張試験の伸びの実測値 (%)

δ_S : 材料規格の伸びの規定値 (%)

REL で、次の①又は②による。

① 温度が室温（20℃）以上の場合

$$REL = 0.7 + 0.3 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 24.49}{1.830}\right)$$

② 温度が低温（-123℃以上、+20℃未満）の場合

$$REL = 0.6 + 0.4 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 26.51}{1.490}\right)$$

ここで、Ni 当量 (Ni_{eq}) は、**1)**と同じ方法により算出する。

2.2) 冷間加工材の場合の判定基準

冷間加工材の場合は、伸びを指標とする次の判定式が成立する場合に、水素適合性があると判定する。

$$(\delta_T + \delta_{CW}) \times REL \geq \delta_S$$

ここで、 δ_T 、 δ_{CW} 、 δ_S 及び REL は、次による。

δ_T : 常温における冷間加工材の引張試験の伸びの実測値 (%)

δ_{CW} : 冷間加工による伸びの相当値 (%)

δ_S : 材料規格の伸びの規定値 (%)

REL : 冷間加工材の Ni 当量 (Ni_{eq}) をパラメータとして定式化した相対伸びで、**2)2.1)**

①又は②による。ここで、Ni 当量 (Ni_{eq}) は、**1)**と同じ方法により算出する。

b) E.2.1 b) 3)及び 4)に示すステンレス鋼は、温度が-253℃以上、+200℃以下の範囲において、水素適合性が確認されている。

E.3.4.3 耐熱鋼

E.2.1 d)に示す耐熱鋼は、温度が-253℃以上、+120℃以下の範囲において、水素適合性が確認されている。

E.3.4.4 アルミニウム合金

E.2.1 e)に示すアルミニウム合金は、水素適合性が確認されている。

E.4 圧縮水素用の設備の設計

E.4.1 基本事項

圧縮水素用の設備の設計の基本事項は、次の a)～e)による。

- a) 円筒胴及び関連部位の強度解析は、本体 5.3 による。
- b) 疲労解析は、E.4.2 による。
- c) 公称応力の高い部位は、本体 7 に従って破裂前漏洩解析を実施する。
ただし、次の①及び②を除く。
 - ① 本体 5.3.6 の平ふた板及び平鏡板
 - ② 本体 5.3.9 のフランジ継手に示すフランジ及びクランプ
- d) 破裂前漏洩が成立しない部位は、本体 8 及び次の 1)～3)によりき裂進展解析を実施し、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。
 - 1) 本体 8.2 a)の破壊靱性 K_{Ic} の決定では、同項に規定する K_{Ic} に代えて、E.5 に規定する水素誘起割れの下限界応力拡大係数 K_{IH} を適用してもよい。
 - 2) 本体 8.2 g)のき裂進展速度の計算では、同項に規定するき裂進展速度式に代えて、E.6 に規定する水素ガス環境の疲労き裂進展速度式を適用する。
 - 3) 本体 8.2 i)の限界き裂深さ a_c の決定では、同項に規定する「 $K_I=K_{Ic}$ になる場合」に代えて、「 $K_I=K_{IH}$ になる場合」を適用してもよい。
- e) き裂進展解析を行う場合でも E.4.2 の疲労解析は実施し、許容繰返し回数は両者（E.4.2 と本体 8）のいずれか低い値とする。

E.4.2 圧縮水素用の設備の疲労解析

圧縮水素用の設備の疲労解析は、次の a)の水素ガス環境の疲労特性を用いて、次の b)の方法により行う。

a) 水素ガス環境の疲労特性

一般に、水素ガス環境の疲労特性（応力振幅—繰返し回数の疲労曲線）は、不活性ガス環境の疲労特性と同じ応力振幅で比較すれば、繰返し回数（寿命）が低下する。寿命の低下は、応力振幅の増大に伴い顕著となる。また、繰返し速度の影響があり、繰返し速度の減少に伴い寿命は低下する。

現状の水素ガス環境の疲労試験は、高サイクル疲労（繰返し回数 10^5 回以上）を対象として荷重制御で実施され、低サイクル疲労（繰返し回数 10^5 回未満）を対象としたひずみ制御で実施した例はない。したがって、繰返し回数を対象とする水素適合性の判定は、現状ではできない。

ただし、E.3.4 の一般化された水素適合性の判定基準により、水素適合性があると判定された材料については、大気環境の疲労曲線の繰返し回数 10^7 回における疲労強度に限り、水素適合性が確認されている。

また、E.3.4.4 のアルミニウム合金は、大気環境における荷重制御の疲労曲線のすべての範囲で水素適合性が確認されている。

書面投票（パブコメ対応後）用

b) 圧縮水素用の設備の疲労解析の方法

圧縮水素用の設備の疲労解析の方法は、本体 **6** により行い、使用繰返し回数が許容繰返し回数以下であることを確認する。

現状では、水素ガス環境の材料の最適疲労曲線又は材料の設計疲労曲線はない。したがって、大気環境の材料の最適疲労曲線又は材料の設計疲労曲線に、設計係数として水素の影響を考慮する必要がある。

E.5 水素誘起割れの下限界応力拡大係数

E.5.1 水素誘起割れの下限界応力拡大係数の適用

本体 **7** の破裂前漏洩解析及び本体 **8** のき裂進展解析における限界き裂深さの決定には、材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} を適用する。高ひずみ速度の試験による材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} は水素適合性が確認されている。ただし、**E.5.2** に規定する低ひずみ速度のライジングロード試験による水素誘起割れの下限界応力拡大係数 K_{IH} の値を、材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} の値に代えて適用してもよい。

K_{IH} は、**E.5.2** に規定するライジングロード試験により測定する。ただし、**E.2.1 a)** に規定する低合金鋼の強度低減材の場合は、**E.5.3** に規定する K_{IH} の値を適用してもよい。

E.5.2 ライジングロード試験

ライジングロード試験は、**ASTM E 399** 及び **ASTM E 1820** に規定する K_{Ic} 試験を準用する。ライジングロード試験に特有な試験条件などは、次の **a)～d)** による。

a) 試験片

試験片は、次の **1)～4)** による。

- 1) 試験片は、圧縮水素用の設備の最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から採取する。
- 2) 試験片は、設備の形状が円筒（管又は胴）の場合は、円筒の周方向と試験片の負荷方向が一致するように採取する。
- 3) 試験片は、**ASTM E 399** の **Fig 4.1** 又は **ASTM E 1820** の **Fig 2.1** に規定するコンパクト試験片とする。試験片には、大気中で a_0/W （き裂長さ/試験片幅）= 0.5 ± 0.05 の範囲の疲労予き裂を導入する。
- 4) 試験片には、き裂開口変位を測定するために溝を加工し、クリップゲージを装着する。

b) 試験条件

試験条件は、次の **1)** 及び **2)** による。

1) 水素純度及び水素圧力

水素純度及び水素圧力は、**E.3.2 b)** の SSRT の水素純度及び水素圧力を適用する。

2) 試験温度及び試験環境

室温において、大気環境及び水素ガス環境の試験を行う。

試験片の数は、大気環境が 1 個、水素ガス環境が 3 個とする。

c) 試験方法

試験方法は、次の 1)～4)による。

1) 負荷方法

試験は、単調増加荷重（ライジングロード）を変位制御で負荷する。試験は、最終破断以前に徐荷し、途中で終了してもよい。

2) 負荷速度

負荷速度は、き裂開口変位速度で 0.0003mm/s 以下とする。

3) 荷重－き裂開口変位曲線

試験中に、荷重－き裂開口変位曲線を記録する。

4) 水素誘起割れの進展開始荷重

水素ガス環境と大気環境の荷重－き裂開口変位曲線を比較し、水素誘起割れの進展開始荷重を決定する。

d) 試験結果の表示

試験結果の表示は、次の 1)及び 2)による。

1) 破面での計測

破面（最終破断の破面又は試験を途中で終了した強制破断の破面）で疲労予き裂長さを計測し、水素誘起割れの破面の有無を確認する。

2) K_{IH} の算出

水素誘起割れの進展開始荷重と疲労予き裂長さから、水素誘起割れの下限界応力拡大係数 K_{IH} を算出する。応力拡大係数の式は、ASTM E 399 及び ASTM E 1820 による。

E.5.3 低合金鋼の強度低減材の K_{IH} の値

E.2.1 a)に規定する低合金鋼の強度低減材の場合、 K_{IH} の値は、次の表 E.2 の値を適用してもよい。

表 E.2 低合金鋼の強度低減材の K_{IH}

材料	K_{IH} (MPa $\sqrt{m}$)
SCM435, SCM435TK, SNCM439, SNCM439TK	40

E.6 水素ガス環境の疲労き裂進展速度

E.6.1 水素ガス環境の疲労き裂進展速度の適用

本体 8 のき裂進展解析に適用する材料の疲労き裂進展速度は、E.6.2 に規定する試験方法により得られた水素ガス環境の疲労き裂進展速度とする。

ただし、E.2.1 a)に規定する低合金鋼の強度低減材の場合は、E.6.3 に規定する疲労き裂進展速度を適用してもよい。

E.6.2 試験方法

疲労き裂進展速度の試験方法は、ASTM E 647 の規定に従い、次の a)～c)による。

書面投票（パブコメ対応後）用

a) 試験片

試験片は、次の 1) 及び 2) による。

- 1) 試験片は、圧縮水素用の設備の最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から採取する。
- 2) 試験片は、設備の形状が円筒（管又は胴）の場合は、円筒の周方向と試験片の負荷方向が一致するように採取する。
- 3) 試験片は、ASTM E 647 の Fig A1.1 に規定するコンパクト試験片とする。

b) 試験条件及び試験環境

試験条件及び試験環境は、E.5.2 b) 1) 及び 2) のライジングロード試験の試験条件及び試験環境を適用する。

c) 試験方法

ASTM E 647 に規定する手順により、試験を行う。

E.6.3 低合金鋼の強度低減材の疲労き裂進展速度

E.2.1 a) に規定する低合金鋼の強度低減材の室温における水素ガス環境の疲労き裂進展速度 da/dN は、次式による。

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{1+DR}{1-R} \right] \Delta K^m$$

ここで、 ΔK 及び R は、次による。

$$\Delta K = K_{I \max} - K_{I \min}$$

$K_{I \max}$: 最大応力拡大係数 ($K_{I \max} < 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

$K_{I \min}$: 最小応力拡大係数 ($K_{I \min} < 0$ の場合、 $K_{I \min} = 0$)

$$R = \frac{K_{I \min}}{K_{I \max}}$$

また、係数 m 、 C 及び D は、 ΔK と次の ΔK_0 の大小関係に応じて、表 E.3 による。

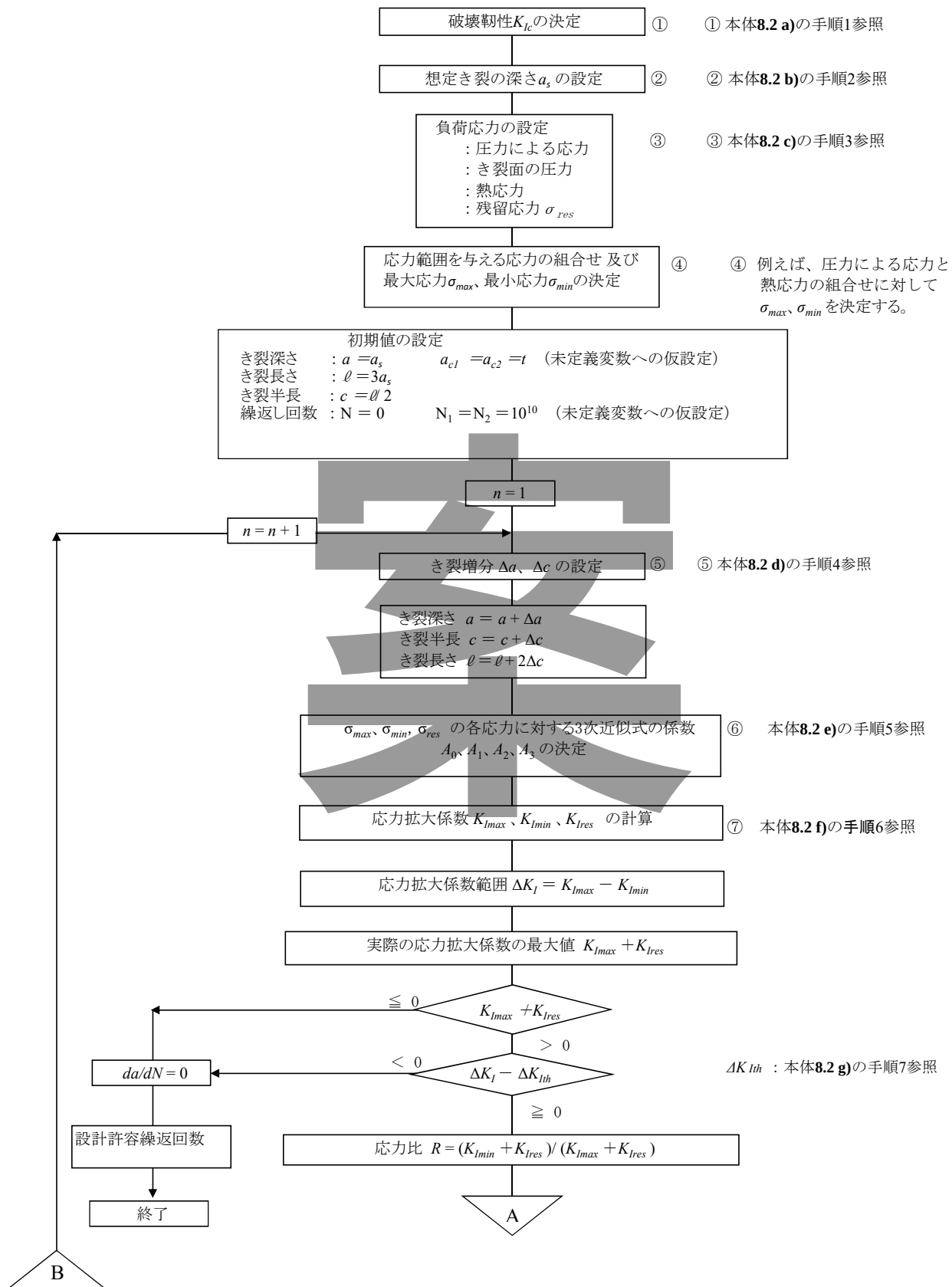
$$\Delta K_0 = 8.475 + 4.062 R - 1.696 R^2$$

表 E.3 低合金鋼の強度低減材の疲労き裂進展速度の係数

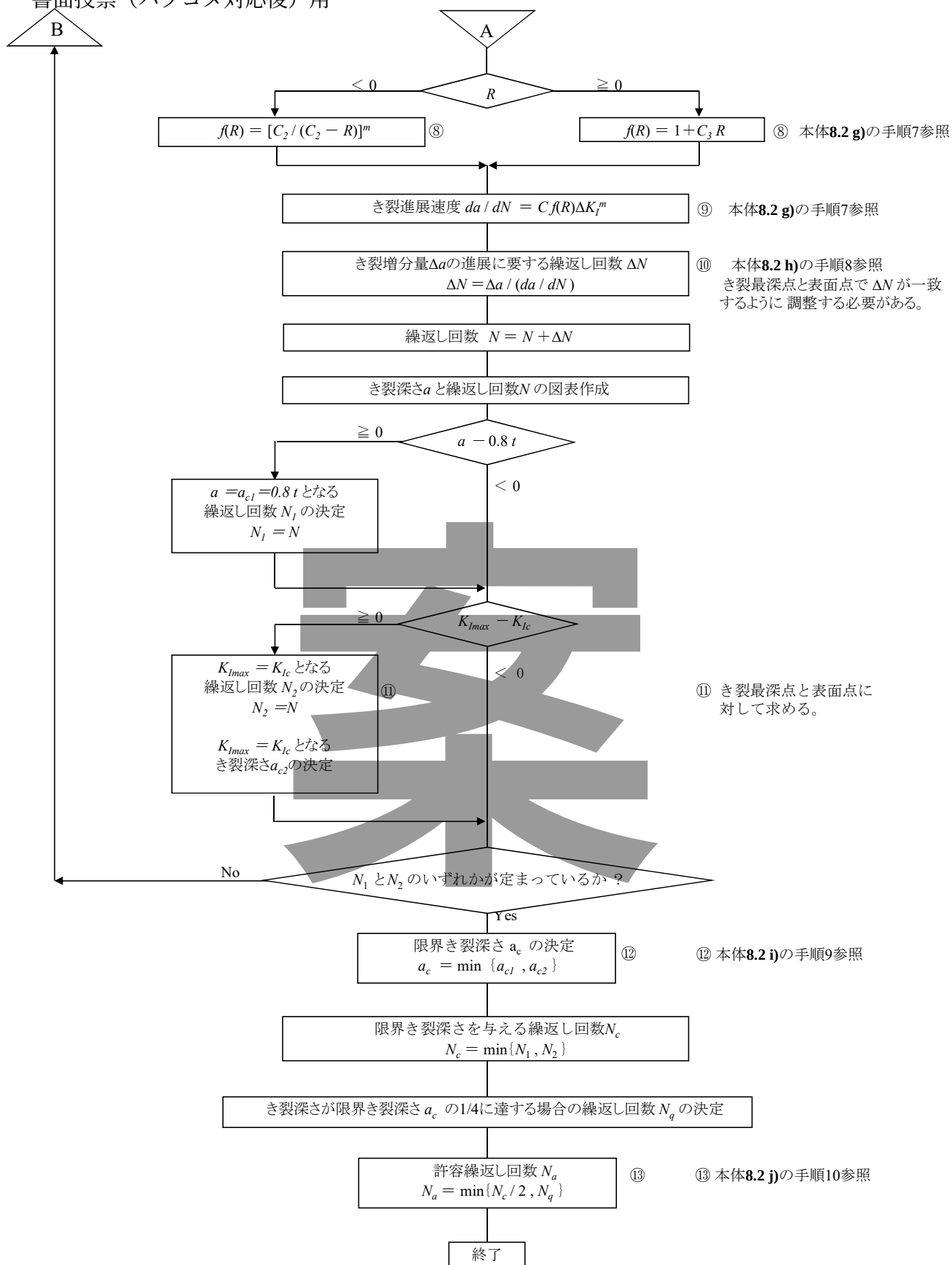
材料	係数	$\Delta K < \Delta K_0$ の場合	$\Delta K \geq \Delta K_0$ の場合
SCM435, SCM435TK, SNCM439, SNCM439TK	m	6.5	3.66
	C (m/cycle)	3.5×10^{-14}	1.5×10^{-11}
	D	0.43	2.0

附属書F（参考）き裂進展解析による許容繰返し回数の決定

適用範囲： 交差欠のない円筒胴の表面に軸方向き裂があり
かつ、応力範囲が一定の場合



書面投票（パブコメ対応後）用



附属書G（参考） 計算例及び評価例

G.1 適用範囲

本体の 5.3（円筒胴及び関連部位の強度解析）、6（疲労解析）、7（破裂前漏洩解析）及び 8（き裂進展解析）では、超高压ガス設備の強度解析、疲労解析、破裂前漏洩解析及びき裂進展解析の方法が規定されている。

この附属書では、単肉円筒胴に内圧が作用する場合について、次の①～⑤の計算例及び評価例を示す。円筒胴の寸法、材質、設計条件、運転条件等は共通にしている。

- ① 単肉円筒胴の強度解析（本体 5.3.1）
- ② 要求吸収エネルギー値の算定（本体 4.4.4）
- ③ 疲労解析（本体 6）
- ④ 破裂前漏洩解析（本体 7）
- ⑤ き裂進展解析（本体 8）

G.2 単肉円筒胴の強度解析

本体の 5.3.1 に基づく単肉円筒胴の強度解析は、次の a)～d) による。

a) 計算条件

単肉円筒胴の強度解析に使用する計算条件は、次の①～⑧による。

- | | |
|-------------------------------|---|
| ① 設計圧力 | $P = 260 \text{ MPa}$ |
| ② 設計温度 | 150°C |
| ③ 材料 | 低合金鋼 |
| ④ 引張強さ（常温） | $S_{uo} = 980 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑤ 引張強さ（ 150°C ） | $S_{ut} = 0.970 \times 980 = 950 \text{ N/mm}^2$
強度低下係数 0.970 は、附属書 B による。 |
| ⑥ 降伏点（常温） | $S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑦ 降伏点（ 150°C ） | $S_{yt} = 0.918 \times 755 = 693 \text{ N/mm}^2$
強度低下係数 0.918 は、附属書 B による。 |
| ⑧ 内径 | $D_i = 78 \text{ mm}$ |

b) 円筒胴の計算厚さ

本体の 5.3.1 の式(5.1)から、円筒胴の計算厚さ t_r は、次による。

$$\begin{aligned} t_r &= (D_i/2) \left[\exp\{\sqrt{3}fP/(S_{yt} + S_{ut})\} - 1 \right] \\ &= (78/2) \left[\exp\{\sqrt{3} \times 2.4 \times 260/(693 + 950)\} - 1 \right] \\ &= 36.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

設計上、外径 D_o を 205mm とすると（実際厚さ 63.5mm）、内外径比 K は、次による。

$$K = D_o/D_i = 205/78 = 2.628$$

c) 実際厚さの安全率

実際厚さの破壊圧力と設計圧力の比 f (安全率) は、本体の **5.3.1** の式(5.2)に基づき算定すると、次による。

$$\begin{aligned} f &= [2/(P\sqrt{3})] [(S_{yt} + S_{ut})/2] \ln K \\ &= [2/(260 \times \sqrt{3})] [(693 + 950)/2] \ln(2.628) \\ &= 3.527 > 2.4 \quad (\text{計算厚さの安全率以上}) \end{aligned}$$

d) シェークダウンの確認

設計圧力とシェークダウン限界圧力の比 M_D の値は、本体の **5.3.1** の式(5.3)から、次による。

$$\begin{aligned} M_D &= [2K^2/(K^2 - 1)] [1/S_{ut}] P \\ &= [2 \times 2.628^2/(2.628^2 - 1)] (1/950) \times 260 \\ &= 0.640 < 1 \quad (\text{シェークダウンする。}) \end{aligned}$$

G.3 要求吸収エネルギー値の算定

本体の **4.4.4** に基づくシャルピー衝撃試験の要求吸収エネルギー値の算定は、次の a)～c) による。

a) 計算条件

シャルピー衝撃試験の要求吸収エネルギー値の算定に使用する計算条件は、次の①～⑩による。

- | | |
|---------------|---|
| ① 設計圧力 | $P = 260 \text{ MPa}$ |
| ② 設計温度 | 150°C |
| ③ 材料 | 低合金鋼 |
| ④ 引張強さ (常温) | $S_{uo} = 980 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑤ 引張強さ (150℃) | $S_{ut} = 0.970 \times 980 = 950 \text{ N/mm}^2$
強度低下係数 0.970 は、附属書 B による。 |
| ⑥ 降伏点 (常温) | $S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑦ 降伏点 (150℃) | $S_{yt} = 0.918 \times 755 = 693 \text{ N/mm}^2$
強度低下係数 0.918 は、附属書 B による。 |
| ⑧ 内径 | $D_i = 78 \text{ mm}$ |
| ⑨ 外径 | $D_o = 205 \text{ mm}$ |
| ⑩ 実際厚さ | $t = 63.5 \text{ mm}$ |

b) 簡易評価法（本体 **4.4.4 a)1**）による場合）

$t > 50.8 \text{ mm}$ であるから、次式が成立するかを検討する。

$$K \leq 5.43 - 6.02 \times 10^{-3} S_{yo} + 2.11 \times 10^{-6} S_{yo}^2$$

左辺：内外径比 $K = 205/78 = 2.628$

$$\begin{aligned}\text{右辺} &: 5.43 - 6.02 \times 10^{-3} S_{yo} + 2.11 \times 10^{-6} S_{yo}^2 \\ &= 5.43 - 6.02 \times 10^{-3} \times 755 + 2.11 \times 10^{-6} \times 755^2 \\ &= 2.088\end{aligned}$$

左辺＞右辺となり上式は成立しない。このため、要求吸収エネルギー値の算定は、**c)**による。

c) 耐圧試験における評価法（本体 **4.4.4 a)2)**による場合）

耐圧試験圧力 P_t は、本体の **10.2** の式(10.1)から、次による。

$$P_t = 1.25P(S_{yo}/S_{yt}) = 1.25 \times 260 \times (755/693) = 1.362 \times 260 = 354.1$$

ここで、 P 、 S_{yo} 及び S_{yt} は、次による。

設計圧力	$P = 260 \text{ MPa}$
耐圧試験温度における降伏点	$S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$
設計温度における降伏点	$S_{yt} = 693 \text{ N/mm}^2$

耐圧試験における円筒胴内面の円周方向応力 σ は、本体の **4.4.4 a)2)**の式(4.3)から、次による。

$$\begin{aligned}\sigma &= [(K^2 + 1)/(K^2 - 1)]P_t = [(2.628^2 + 1)/(2.628^2 - 1)] \times 354.1 \\ &= 474.0 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

上記による応力拡大係数 K_I は、本体の **4.4.4 a)2)**の式(4.2)から、次による。

$$\begin{aligned}K_I &= (\sigma + P_t)\sqrt{\pi a_r} = (474.0 + 354.1)\sqrt{3.14 \times 1.048 \times 10^{-3}} \\ &= 47.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}\end{aligned}$$

ここで、 a_r は想定き裂の相当深さであり、本体の **4.4.4 a)2)**の表 3 から、

$$a_r = 1.048 \times 10^{-3} \text{ m}$$

上記に対し、要求吸収エネルギー値 CVN は、本体の **4.4.4 a)2)**の式(4.1)の右辺の K_{Ic} を K_I に置き換えることにより得られる。

$$\begin{aligned}CVN &= 84 + 66 \tanh[1.527 \ln(K_{Ic} - 22) - 6.297] \\ &= 84 + 66 \tanh[1.527 \ln(K_I - 22) - 6.297] \\ &= 84 + 66 \times \tanh[1.527 \ln(47.5 - 22) - 6.297] \\ &= 26.3 \text{ J}\end{aligned}$$

この値が、本体の **4.4.4 a)3)d)**の表 4 の要求吸収エネルギー値を下回る場合には、規定によりシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーは、試験温度 0℃において、3 個の平均値が 27J 以上、最小値が 21J 以上となる。

G.4 疲労解析

本体の **6** に基づく疲労解析は、次の **a)～d)** による。ただし、縦弾性係数の比 E/E_d ($E/E_d = 1.048$) は 2016 年版の値を使用している

a) 計算条件

円筒胴の内面が圧力 0 MPa→250 MPa→0 MPa の繰返し負荷を 20,000 回受ける。この場合の円筒胴内面の疲労解析を行う。ただし、自緊等による残留応力はないとする。疲労解析に使用する計算条件は、次の①～⑨による。

- | | |
|--------------------------------|---|
| ① 運転圧力 | $P = 250 \text{ MPa}$ |
| ② 運転温度 | $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| ③ 材料 | 低合金鋼 |
| ④ 引張強さ（常温） | $\sigma_u = 980 \text{ N/mm}^2$ （運転温度が 100°C なので常温の値を使用する） |
| ⑤ 降伏点（常温） | $S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑥ 降伏点（ 100°C ） | $S_{yr} = 0.951 \times 755 = 718 \text{ N/mm}^2 = S_y$
強度低下係数 0.951 は、附属書 B による。 |
| ⑦ 内径 | $D_i = 78 \text{ mm}$ |
| ⑧ 外径 | $D_o = 205 \text{ mm}$ |
| ⑨ 表面粗さ（内面） | $6.3 \mu\text{m Rz}$ （表面粗さによる応力集中係数 $\alpha_z = 1.065$ ） |

b) 繰返し応力強さの振幅 S_{alt} の計算

本体の **5.3.1 c)** の式(5.5)より、円筒胴内面の繰返し応力強さの振幅 S_{alt} は、

$$S_{alt} = \left| \frac{K^2}{K^2 - 1} (P_u - P_l) \right| = \left| \frac{2.628^2}{2.628^2 - 1} (250 - 0) \right| = 292.3 \text{ N/mm}^2$$

ここで、 P_u 及び P_l は、次による。

運転圧力変動の最大値 $P_u = 250 \text{ MPa}$

運転圧力変動の最小値 $P_l = 0 \text{ MPa}$

c) 繰返し応力強さの平均 S_{mean} の計算

本体の **5.3.1 d)** の式(5.6)より、円筒胴内面の繰返し応力強さの平均 S_{mean} は、

$$S_{mean} = \frac{K^2}{K^2 - 1} (P_u + P_l) = \frac{2.628^2}{2.628^2 - 1} (250 + 0) = 292.3 \text{ N/mm}^2$$

d) 最適疲労曲線による許容繰返し回数 N_a の決定

本体の **6.4** の最適疲労曲線を用いて許容繰返し回数 N_a を求める場合は、**b)** 及び **c)** で求めた繰返し応力強さの振幅 S_{alt} 及び平均 S_{mean} を、本体の **9.2.1** の図 10 による表面粗さによる応力集中係数を乗じて修正した後、本体の **6.4.4 a)** の手順に従って等価応力振幅 S_{eq} を算出する。求めた値に附属書 C から求めた縦弾性係数の比 E/E_d ($E/E_d = 1.048$) を乗じて等価応力振幅 S_{eq} を補正した後、

手順 1 及び手順 2 に従って繰返し回数の許容値 N_a を求める。

（共通）

$$S_{alt} \times (\text{表面粗さによる応力集中係数}) = 292.3 \times 1.065 = 311.3 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{mean} \times (\text{表面粗さによる応力集中係数}) = 292.3 \times 1.065 = 311.3 \text{ N/mm}^2$$

$$(S_{alt} + S_{mean}) \times (\text{表面粗さによる応力集中係数}) = 622.6 \text{ N/mm}^2 \leq S_y = 718 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{mean1} = S_{mean} = 311.3 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{eq} = \{S_{alt} (S_{alt} + S_{mean1})\}^{0.5} = \{311.3 \times (311.3 + 311.3)\}^{0.5} = 440.2 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{eq} \times (E/E_d) = 440.2 \times 1.048 = 461.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{一定振幅の場合の } 10^8 \text{ 回の応力振幅 } S_a : 479.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha \text{ (応力に対する設計係数)} : 1.23$$

$$\beta \text{ (繰返し回数に対する設計係数)} : 2.32$$

（手順1）

$$\alpha \times \{S_{eq} \times (E/E_d)\} = 1.23 \times 461.3 = 567.4 \text{ N/mm}^2 \geq 479.1 \text{ N/mm}^2$$

円筒胴の内面は0 MPa→250 MPa→0 MPaの繰返し負荷のみを受け（一定応力振幅）、温度補正した等価応力振幅 S_{eq} に設計係数 α を乗じた値は、一定振幅の場合の 10^8 回の応力振幅 S_a より大きいため、本体の式(6.6)をもとに繰返し回数の許容値 N_1 を求めると、 $N_1 = 154,489$ 回。

（手順2）

$$S_{eq} \times (E/E_d) = 461.3 \text{ N/mm}^2 \leq 479.1 \text{ N/mm}^2$$

温度補正した等価応力振幅 S_{eq} は、一定振幅の場合の 10^8 回の応力振幅 S_a よりも小さいため、疲労解析の対象外（繰返し回数の許容値 N_2 は ∞ ）。

許容繰返し回数 N_a は、

$$N_a = \text{Min} (N_1, N_2) = 154,489 \text{ 回}$$

累積使用係数 U は、

$$U = n/N_a = 20,000 / 154,489 = 0.129$$

となり、許容値1.0以下である。

G.5 破裂前漏洩解析

交差穴等の構造不連続部がない円筒胴の内面に軸方向き裂があり、内圧による応力のみが作用する場合を対象とする。この場合の本体の 7 に基づく破裂前漏洩解析は、次の a)～c)による。

a) 計算条件

破裂前漏洩解析に使用する計算条件は、次の①～⑩による。

- | | |
|-------------------------|--|
| ① 運転圧力 | $P = 250 \text{ MPa}$ |
| ② 運転温度 | $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| ③ 材料 | 低合金鋼 |
| ④ 降伏点 (常温) | $S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑤ 降伏点 (100℃) | $S_{yt} = 0.951 \times 755 = 718 \text{ N/mm}^2 = S_y$ |
| | 強度低下係数 0.951 は、附属書 B による。 |
| ⑥ シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー CVN | 58.7 J (常温における実測値の平均) |
| ⑦ 内径 | $D_i = 78 \text{ mm}$ |
| ⑧ 外径 | $D_o = 205 \text{ mm}$ |
| ⑨ 内外径比 | $K = 2.628$ |
| ⑩ 実際厚さ | $t = 63.5 \text{ mm}$ |

b) 破壊靱性 K_{Ic} の算定

低合金鋼の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} の試験データがない場合とし、 K_{Ic} の値は本体の 8.2 a) (破壊靱性 K_{Ic} の決定 (手順 1)) 1) の式(8.1)より求める。

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= 22 + \exp[0.655 \operatorname{arctanh}\{(CVN - 84)/66\} + 4.124] \\ &= 22 + \exp[0.655 \operatorname{arctanh}\{(58.7 - 84)/66\} + 4.124] = 69.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

c) 評価式及び応力拡大係数 K_I の計算

表面き裂の最深点で、き裂進展方向の部位の肉厚 t の 0.8 倍のき裂深さにおいて、本体の 7.2 a) の式(7.1)及び式(7.2)の両式が成立する場合に、破裂前漏洩が成立する。

$$K_I < K_{Ic}$$

$$0.2t < (K_{Ic} / S_{yt})^2$$

応力拡大係数 K_I は、本体の 8.2 f) の式(8.4)及び式(8.6)～式(8.13)を適用して求める。内圧による応力のみであり、内外径比 K が $1.2 \leq K \leq 3$ の範囲にあるので、すべての位置 (距離) x にわたる応力分布を 3 次式で近似できることから、式(8.6)～式(8.13)が適用できる。

$$K_I = \left[(A'_0 + A_p) G_0 + A'_1 (a/t) G_1 + A'_2 (a/t)^2 G_2 + A'_3 (a/t)^3 G_3 \right] \sqrt{\pi a / Q}$$

ここで、

表面き裂の最深部におけるき裂深さ a は、

$$a = 0.8t = 0.8 \times 0.0635 \text{ m} = 0.0508 \text{ m}$$

き裂形状パラメータ Q は、

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} = 1 + 4.593(1/3)^{1.65} = 1.75$$

a/l は、き裂のアスペクト比で、円筒胴内面の軸方向き裂の場合は、**7.2 a)①**から、

$$a/l = 1/3$$

き裂面に作用する圧力 A_p は、

$$A_p = 250 \text{ MPa} \quad (\text{運転圧力 } P \text{ に同じ})$$

$A'_0 \sim A'_3$ は、本体の**8.2 f)**の式(8.10)～式(8.13)から、

$$A'_0 = 334.6 \text{ MPa}$$

$$A'_1 = -756.1 \text{ MPa}$$

$$A'_2 = 872.0 \text{ MPa}$$

$$A'_3 = -367.2 \text{ MPa}$$

$G_0 \sim G_3$ は、 $a/t = 0.8$ 、 $a/l = 1/3$ の場合に対して、**附属書D**の表**D.1**又は $G_0 \sim G_3$ の計算式から、

$$G_0 = 1.213$$

$$G_1 = 0.7773$$

$$G_2 = 0.6091$$

$$G_3 = 0.5159$$

上記の数値から、

$$\begin{aligned} K_I &= [(336.4 + 250) \times 1.213 - 756.1 \times 0.8 \times 0.7773 + 872.0 \times 0.8^2 \times 0.6091 \\ &\quad - 367.2 \times 0.8^3 \times 0.5159] \times \sqrt{(\pi \times 0.0508 / 1.75)} \\ &= 145.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

d) 評価結果

評価式の式(7.1)及び式(7.2)による評価結果は、

$$K_I = 145.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} > K_{Ic} = 69.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (\text{LBB不成立})$$

$$0.2t = 0.0127 \text{ m} > (K_{Ic} / S_{yt})^2 = (69.4 / 718)^2 = 0.00934 \text{ m} \quad (\text{LBB 不成立})$$

評価式の式(7.1)及び式(7.2)の両者を満足しないため、破裂前漏洩は成立しない。

G.6 き裂進展解析

有限要素法を用いたき裂進展解析は汎用のソフトウェア等を使用するため、計算の過程を逐一示すことは困難である。**附属書 F**には、交差穴のない円筒胴の表面に軸方向き裂があり、一定応力振幅の場合のき裂進展解析のフローが与えられている。また、手順の詳細については本体の**8**に述べられている。円筒胴の場合について、本体の**8**に基づくき裂進展解析は、次の**a)～m)**による。

a) 計算条件

円筒胴の内面が圧力 0 MPa→250 MPa→0 MPa の繰返し負荷（一定応力振幅）を 20,000 回受ける。この場合の円筒胴内面に想定した軸方向き裂の進展解析を行う。ただし、自緊等による残留応力は存在しないとする。想定き裂の深さとして下記の 2 ケースを考える。

ケース 1：本体の 8.2 b)3) の表 11 に示す寸法を用いる場合

ケース 2：本体の 8.2 b)3) の表 11 に示す寸法より小さい寸法を用いる場合（この場合には、非破壊検査でこの寸法の欠陥を確実に検出できることを立証する必要がある。）

上記のほか、き裂進展解析に使用する計算条件は、次の①～⑩による。

- | | |
|-------------------------|---|
| ① 運転圧力 | $P = 250 \text{ MPa}$ |
| ② 運転温度 | $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| ③ 材料 | 低合金鋼 |
| ④ 降伏点（常温） | $S_{yo} = 755 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑤ 降伏点（100℃） | $S_{yt} = 0.951 \times 755 = 718 \text{ N/mm}^2 = S_y$
強度低下係数 0.951 は、附属書 B による。 |
| ⑥ シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー CVN | 58.7 J（常温における実測値の平均） |
| ⑦ 内径 | $D_i = 78 \text{ mm}$ |
| ⑧ 外径 | $D_o = 205 \text{ mm}$ |
| ⑨ 内外径比 | $K = 2.628$ |
| ⑩ 実際厚さ | $t = 63.5 \text{ mm}$ |

b) 破壊靱性 K_{Ic} の算定

低合金鋼の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} の試験データが得られていない場合とし、 K_{Ic} の値は本体の 8.2 a)1) の式(8.1)より求める。

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= 22 + \exp[0.655 \operatorname{arctanh}\{(CVN - 84)/66\} + 4.124] \\ &= 22 + \exp[0.655 \operatorname{arctanh}\{(58.7 - 84)/66\} + 4.124] = 69.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

c) 想定き裂の深さ a_s の設定

き裂面は軸方向と半径方向を含む面とし、想定き裂の初期形状は、き裂深さ a とき裂長さ ℓ (き裂半長 c の 2 倍) の比（アスペクト比）が 1/3 の半楕円形とする。

想定き裂の初期深さ a_s

ケース 1： $a_s = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ ($t > 51 \text{ mm}$ のため)

ケース 2： $a_s = 0.533 \times 10^{-3} \text{ m}$ (本体の 4.6.2 b)2) の線状欠陥磁粉模様の許容最大長さ 1.6 mm による場合)

d) 応力の設定

圧力以外の荷重はない。また、自緊等による残留応力も存在しないとする。したがって、最大応力は運転圧力 250 MPa が負荷される場合に生じ、最小応力は 0 である。

e) き裂寸法の増分 Δa 、 Δc の設定

き裂進展に伴う応力拡大係数 K_I の変化が一定とみなせるき裂寸法の増分 Δa 、 Δc を設定する (Δc はき裂半長の増分)。

f) き裂がない場合の応力分布の 3 次近似式表示

き裂がない場合について、内面からき裂深さ a までの区間にき裂を想定し、想定き裂面に垂直な応力の分布を本体の **8.2 e)** の式(8.2)により、3 次近似式で表示する。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3$$

ここで、 a 及び x は、次による。

a : き裂深さ

x : 表面からの距離 ($0 \leq x \leq a$)

内圧による応力分布の場合は、すべての位置 (距離) x ($0 \leq x \leq t$) にわたる応力分布を本体の **8.2 e)** の式(8.3)で表示できる。

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3$$

ここで、 t は、円筒胴の実際厚さとする。

係数 $A_0 \sim A_3$ と係数 $A'_0 \sim A'_3$ の間には、本体の **8.2 f)** の式(8.6)～式(8.9)の関係がある。

$$A_0 = A'_0$$

$$A_1 = A'_1(a/t)$$

$$A_2 = A'_2(a/t)^2$$

$$A_3 = A'_3(a/t)^3$$

また、本体の **8.2 f)** の式(8.10)～式(8.13)により、係数 $A'_0 \sim A'_3$ は、次式で与えられる。

$$A'_0 / P = (K^2 + 1) / (K^2 - 1)$$

$$A'_1 / P = 1.051 - 2.318K + 0.3036K^2 - 0.004417K^3$$

$$A'_2 / P = -1.7678 + 0.9497K + 0.9399K^2 - 0.2056K^3$$

$$A'_3 / P = -0.2798 + 1.3831K - 1.2603K^2 + 0.2138K^3$$

上式に内外径比 $K=2.628$, $P=250$ MPa を代入すると、係数 $A_0 \sim A_3$ は下記となる。

$$A'_0 = 334.6 \text{ MPa}$$

$$A'_1 = -756.1 \text{ MPa}$$

$$A'_2 = 872.0 \text{ MPa}$$

$$A'_3 = -367.2 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}A_0 &= A'_0 = 334.6 \text{ MPa} \\A_1 &= A'_1 (a/t) = -756.1 (a/t) \text{ MPa} \\A_2 &= A'_2 (a/t)^2 = 872.0 (a/t)^2 \text{ MPa} \\A_3 &= A'_3 (a/t)^3 = -367.2 (a/t)^3 \text{ MPa}\end{aligned}$$

増分区間ごとに係数 $A_0 \sim A_3$ を上式により求め直す。

g) 応力拡大係数 $K_{I\max}$, $K_{I\min}$ 及び応力拡大係数範囲 ΔK_I の計算

き裂の最深点と表面点のそれぞれに対して、本体の **8.2 f)** の式(8.4)に従い、応力拡大係数 K_I を求める。

$$K_I = \left[(A_0 + A_p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 \right] \sqrt{\pi a / Q}$$

ここで、 $A_0 \sim A_3$ 、 A_p 、 $G_0 \sim G_3$ 、 a 及び Q は、次による。

$A_0 \sim A_3$: **f)** で求めた係数

A_p : き裂面に作用する圧力（運転圧力 P に同じ）

$G_0 \sim G_3$: 自由表面補正項で、 a/ℓ 、 a/t の関数として、き裂の最深点の場合は**附属書D**の表**D.1**、き裂の表面点の場合は**附属書D**の表**D.2**で与えられる。

Q : き裂形状パラメータで、次式による。

$$Q = 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65}$$

最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ 、最小応力拡大係数 $K_{I\min}$ 及び応力拡大係数範囲 ΔK_I は、次式で与えられる。

$$K_{I\max} = K_I$$

$$K_{I\min} = 0$$

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min} = K_{I\max}$$

h) き裂進展速度 da/dN 及び dc/dN の計算

本体の **8.2 g)** の式(8.14)に従い、き裂最深点のき裂進展速度 da/dN を計算する。

$$da/dN = C f(R) \Delta K_I^m$$

ただし、 ΔK_I の値が本体の **8.2 g)** の式(8.15)で与えられる下限界値 ΔK_{Ith} より小さい場合には、 $da/dN=0$ とする。

$$\Delta K_{Ith} = \min[G(1 - HR), I]$$

ここで、 C 、 m 、 R 、 $f(R)$ 、 G 及び H は、次による。

$$C = 3.64 \times 10^{-12} \quad (\text{高強度低合金鋼の場合})$$

$$m = 3.26 \quad (\text{同上})$$

$$R = K_{I\min}/K_{I\max} = 0$$

$$\begin{aligned}f(R) &= 1 \\ G &= 7.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} && \text{(高強度低合金鋼の場合)} \\ H &= 0.85 && \text{(同上)}\end{aligned}$$

本体の **8.2 g)** の式(8.15)で与えられる下限界値 ΔK_{Ith} の値は、

$$\begin{aligned}G(1-HR) &= 7.0(1-0.85 \times 0) = 7.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \\ I &= 6.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} && \text{(高強度低合金鋼の場合)} \\ \Delta K_{Ith} &= \min[7.0, 6.0] = 6.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}\end{aligned}$$

da/dN は次式で与えられる。

$$da/dN = 3.64 \times 10^{-12} \Delta K_I^{3.26}$$

同様に、き裂表面点のき裂進展速度 dc/dN も次式で与えられる。

$$dc/dN = 3.64 \times 10^{-12} \Delta K_I^{3.26}$$

ただし、本体の **8.2 f)** の式(8.4)の係数 $G_0 \sim G_3$ は、**附属書 D の表 D.2** のき裂表面点に対する値を用いる。

i) き裂増分 Δa 、 Δc の進展に要する繰返し回数の計算

次式により Δa 、 Δc だけき裂が進展するのに要する繰返し回数 ΔN 、 $\Delta N'$ を求める。

$$\begin{aligned}\Delta N &= \Delta a / (da/dN) \\ \Delta N' &= \Delta c / (dc/dN)\end{aligned}$$

h) き裂増分 Δa 、 Δc を設定する場合に、き裂最深点とき裂表面点で繰返し回数が一致 ($\Delta N = \Delta N'$) するように、 ΔN と $\Delta N'$ を調整する必要がある。

j) き裂深さ a と繰返し回数 N の表作成

c) に示したケース 1 とケース 2 のき裂進展解析の結果を、**表 G.1** 及び **表 G.2** に示す。

k) 限界き裂深さ a_c の決定

$K_{I\max} = K_{Ic}$ になる場合のき裂深さ又は実際厚さ t の 0.8 倍の値 ($63.5 \times 0.8 = 50.8 \text{ mm}$) のいずれか小さい方を限界き裂深さ a_c とする。 $K_{I\max} = K_{Ic}$ の判定は、き裂最深点とき裂表面点の両方に対して実施する。

l) 許容繰返し回数 N_a の決定

許容繰返し回数 N_a は、限界き裂深さ a_c を与える繰返し回数の 1/2 又はき裂深さ a が限界き裂深さ a_c の 1/4 に達する場合の繰返し回数のいずれか小さい方の回数である。

m) 判定

使用繰返し回数 $\leq$ 許容繰返し回数 N_a を確認する。c)に示したケース1とケース2について、き裂進展解析により算定した許容繰返し回数 N_a を、次の1)及び2)に示す。

1) ケース1の結果

- ① 限界き裂深さ $a_c = 8.17 \text{ mm}$ に達する繰返し回数 $N_c = 7,015$ 回より、 $N_c/2 = 3,507$ 回
- ② 限界き裂深さ a_c の1/4 (=2.04 mm)に達する繰返し回数 = 1,232回

許容繰返し回数 N_a は、①又は②のいずれか小さい方の回数であるため、 $N_a = 1,232$ 回

2) ケース2の結果

- ① 限界き裂深さ $a_c = 8.17 \text{ mm}$ に達する繰返し回数 $N_c = 17,691$ 回より、 $N_c/2 = 8,845$ 回
- ② 限界き裂深さ a_c の1/4 (=2.04 mm)に達する繰返し回数 = 11,350回

許容繰返し回数 N_a は、①又は②のいずれか小さい方の回数であるため、 $N_a = 8,845$ 回

G.7 許容繰返し回数

本体8.1.a)の規定により、許容繰返し回数は、6)の疲労解析の結果と8)のき裂進展解析の結果のいずれか低い方の回数とする。想定き裂の初期深さ0.533mmが非破壊検査で検出できるとすると、G.4及びG.6より、

疲労解析の結果 154,489回

き裂進展解析の結果 8,845回

であるため、許容繰返し回数は8,845回となる。

表G.1 ケース1の場合のき裂進展解析結果 ($a_s = 1.6\text{mm}$, $l = 4.8\text{mm}$)

き裂深さ a (mm)	き裂長さ l (mm)	ΔK_I (き裂最深点) ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	ΔK_I (き裂表面点) ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	N (き裂最深点) (回)	N' (き裂表面点) (回)	アスペクト比	
						a/l	a/t
1.600	4.800	34.0	30.5	0	0	0.333	0.025
1.766	5.089	35.0	32.2	491	520	0.347	0.028
1.968	5.412	36.1	34.1	1,034	1,048	0.364	0.031
2.172	5.784	37.2	35.9	1,528	1,550	0.376	0.034
2.397	6.206	38.4	37.8	2,017	2,041	0.386	0.038
2.645	6.692	39.8	39.7	2,501	2,516	0.395	0.042
2.948	7.318	41.4	41.9	3,021	3,039	0.403	0.046
3.285	8.017	43.1	44.3	3,528	3,527	0.410	0.052
3.661	8.871	45.1	46.7	4,017	4,024	0.413	0.058
4.121	9.915	47.4	49.5	4,529	4,534	0.416	0.065
4.638	11.133	49.9	52.5	5,017	5,022	0.417	0.073
5.272	12.650	52.8	55.9	5,518	5,524	0.417	0.083
5.992	14.409	55.8	59.6	5,992	5,996	0.416	0.094
6.946	16.792	59.6	64.1	6,505	6,510	0.414	0.109
7.015	16.964	59.9	64.4	6,538	6,542	0.414	0.110
8.133	19.703	63.7	69.2	7,018	7,002	0.413	0.128
8.170	19.793	63.0	69.4	7,033	7,015	0.413	0.129

表G.2 ケース2の場合のき裂進展解析結果（ $a_s=0.533$ mm, $t=1.6$ mm）

き裂深さ a (mm)	き裂長さ l (mm)	ΔK_I (き裂最深点) (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_I (き裂表面点) (MPa $\sqrt{m}$)	N (き裂最深点) (回)	N' (き裂表面点) (回)	アスペクト比	
						a/l	a/t
0.533	1.600	19.9	17.7	0	0	0.333	0.008
0.594	1.699	20.6	18.7	1,032	1,069	0.350	0.009
0.656	1.796	21.2	19.8	1,972	2,000	0.365	0.010
0.731	1.913	21.8	20.9	3,008	2,950	0.382	0.012
0.814	2.076	22.7	22.1	4,030	4,032	0.392	0.013
0.907	2.255	23.6	23.4	5,030	5,038	0.402	0.014
1.011	2.467	24.7	24.7	5,999	6,029	0.410	0.016
1.138	2.723	25.9	26.2	7,021	7,031	0.418	0.018
1.281	3.029	27.2	27.8	8,001	8,009	0.423	0.020
1.456	3.411	28.8	29.6	9,006	9,015	0.427	0.023
1.672	3.882	30.6	31.7	10,026	10,012	0.431	0.026
1.938	4.487	32.8	34.1	11,044	11,031	0.432	0.031
2.247	5.188	35.1	36.7	11,988	11,961	0.433	0.035
2.683	6.236	38.3	40.1	13,023	13,025	0.430	0.042
3.235	7.574	41.9	44.0	14,006	14,042	0.427	0.051
3.979	9.377	46.1	48.7	14,979	15,039	0.424	0.063
5.040	11.949	51.4	54.7	15,972	16,036	0.422	0.079
6.641	15.830	58.1	62.7	16,998	17,031	0.420	0.105
7.699	18.427	61.9	67.4	17,500	17,503	0.418	0.121
8.170	19.864	63.6	69.4	17,691	17,693	0.416	0.130

附属書 H（参考）超高压ガス設備の脈動圧力の疲労解析例

H.1 適用範囲

本体の 5.3（円筒胴及び関連部位の強度解析）及び 6（疲労解析）では、超高压ガス設備の疲労解析の方法が規定されている。

この附属書では、疲労解析の具体的な例題として、HIP 用圧縮機高压側吐出弁に設けられた交差穴部の応力集中部位について、脈動圧力に対する疲労解析を示す。

H.2 設計諸元

脈動圧力に対する疲労解析の設計諸元は、次の①～⑧による。

- | | |
|--|---|
| ① 運転圧力 | 196.1 MPa |
| ② 運転温度 | 100 °C |
| ③ 材料 | 低合金鋼（SNCM439） |
| ④ 引張強さ（常温） | $\sigma_u = 980 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑤ 降伏点（100°C、常温の降伏点は 885 N/mm^2 ） | $\sigma_y = 885 \times 0.951 = 841.6 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑥ 平均応力の補正に用いる繰返し降伏強度 | $S_y = \max.(\sigma_y, 0.615\sigma_u) = 841.6 \text{ N/mm}^2$ |
| ⑦ 縦弾性係数の比（100°C） | $E/E_d = 1.048$ （2016 年版の値を使用） |
| ⑧ 昇圧から降圧までの繰返し回数（大波の回数） | 30 回/年 $\times$ 30 年 = 900 回 |

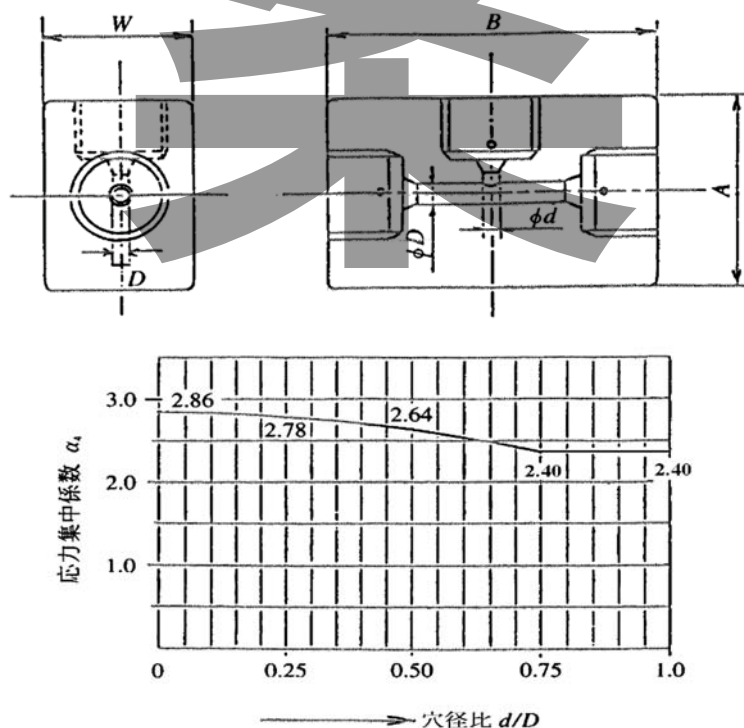


図 H.1 高压配管要素の交差穴部と応力集中係数

H.3 材料の最適疲労曲線

低合金鋼（SNCM439）には、次の式(H.1)（本体 **6.4.1a**）（グループ A）の最適疲労曲線を適用する。また繰返し応力の頻度分布の大半が、一定応力振幅の最適疲労曲線の 10^8 回の疲労強度未満の場合には、次の式(H.2)（本体の式(6.24)）を用いる。応力振幅 S_a と疲労寿命 N_f を計算した例を表 H.1 に示す。

$$S_a = (1.2 \times 10^5 - 28\sigma_u) N_f^{-0.58} + 0.45\sigma_u + 36 \quad \text{-----} \quad (\text{H.1})$$

ここで、 S_a 、 σ_u 、 N_f は、次による。

S_a : 応力振幅 (N/mm²)

σ_u : 材料の引張強さ (運転温度 100℃ より、常温の値 980 N/mm² を用いる) (N/mm²)

N_f : 疲労寿命 (回数)

$$S_a = C N_f^{-0.1} \quad \text{-----} \quad (\text{H.2})$$

ここで、 N_f 及び C は、次による。

N_f : 疲労寿命 (ただし、 2×10^6 回 $< N_f \leq 10^8$ 回)

C : 最適疲労曲線において、疲労寿命 $N_f = 2 \times 10^6$ 回とそれに対応する応力振幅 S_a で定まる値 ($C = S_a (2 \times 10^6)^{0.1}$)

表 H.1 グループ A の最適疲労曲線の応力振幅 S_a (N/mm²) と疲労寿命 N_f の計算例

N_f (回数)	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	2×10^6	10^7	10^8
S_a 式(H.1)	24,822.8	6,880.6	2,161.3	920.0	593.5	507.6	497.5	485.1	479.1
式(H.2)	—	—	—	—	—	—	497.5	423.5	336.4

H.4 脈動圧力の等価応力振幅の計算

脈動圧力に対する等価応力振幅の計算は、次の a)～d) による。

a) 脈動圧力

HIP は 196.1 MPa に昇圧して使用後、大気圧まで降圧する運転 1 回毎に図 H.2 に示す $0 \rightarrow 196.1 \rightarrow 0$ MPa の圧力変動（大波）を 30 年で 900 回受ける。昇圧過程において圧縮機の作動により、上限圧力 P_u が $14.7 \rightarrow 196.1$ MPa、下限圧力 P_l が $14.7 \rightarrow 73.5$ MPa に直線的に増加する脈動圧力の変動（小波）が大波 1 回当たり合計 900 回、30 年間で総計 810,000 回（900 回/大波 1 回当たり × 大波 900 回）繰返される。

b) 脈動圧力の階段状に変化する圧力変動への置き換え

a) に示す脈動圧力の疲労解析を行うため、計算の便宜上、大波 1 回当たり 900 回の脈動圧力の変動（小波）を、図 H.3 に示すように 180 回毎のステージ I～V に 5 分割し、直線的に増加する脈動応力の変動を各ステージで階段状に変化する圧力変動に置き換える。

c) 脈動圧力の繰返し応力強さ

圧力変動の大波及び脈動を置き換えた圧力変動の小波の各ステージ I～V における応力強さ S の変動範囲の最大値及び最小値を次の式(H.3)及び式(H.4)（本文の式(5.30)）、繰返し応力強さの振幅 S_{alt} を次の式(H.5)（本文の式(6.1)）並びに繰返し応力強さの平均 S_{mean} を次の式(H.6)

（本文の式(6.2)）によって計算する。得られた S_{alt} 及び S_{mean} の値を表 H.2 に示す。なお、交差穴部の応力集中係数 α_s を考慮しているため、本体の 6.1 a) 4) より、表面粗さによる応力集中係数は考慮しない。

$$S_{max} = | [\alpha_s \{ (K^2+1)/(K^2-1) \} + 1] P_u | \quad \text{-----} \quad (\text{H.3})$$

$$S_{min} = | [\alpha_s \{ (K^2+1)/(K^2-1) \} + 1] P_l | \quad \text{-----} \quad (\text{H.4})$$

$$S_{alt} = | (S_{max} - S_{min}) / 2 | \quad \text{-----} \quad (\text{H.5})$$

$$S_{mean} = (S_{max} + S_{min}) / 2 \quad \text{-----} \quad (\text{H.6})$$

ここで、 P_u 、 P_l 、 K 、 W 、 D 及び α_s は、次による。

P_u : 運転圧力変動の最大値 (MPa)

P_l : 運転圧力変動の最小値 (MPa)

K : 仮想内外径比

$$K = W/D = 12.5/5 = 2.5$$

W : 弁本体の外径

$$W = 12.5 \text{ mm}$$

D : 弁本体の内径 (= 交差穴部の内径 d)

$$D = 5 \text{ mm}$$

α_s : 内圧に対する応力集中係数

$$\alpha_s = 2.40$$

$$[\alpha_s \{ (K^2+1)/(K^2-1) \} + 1 = 2.40 \times \{ (2.5^2+1)/(2.5^2-1) \} + 1 = 4.314]$$

d) 平均応力の補正と許容値の算出

平均応力の補正をして繰返し回数の許容値を算出する手順は、次の 1)～4) による。手順 1 及び手順 2 の計算結果を表 H.3 に示す。

1) 等価応力振幅

等価応力振幅 S_{eq} を求める場合の修正平均応力 S_{mean1} は、次の①から④による。

- | | |
|--|-------------------------------|
| ① $S_{mean} < 0$ | : $S_{mean1} = 0$ |
| ② $S_{alt} + S_{mean} \leq S_y$ | : $S_{mean1} = S_{mean}$ |
| ③ $S_{alt} + S_{mean} > S_y$ 、 $S_{alt} < S_y$ | : $S_{mean1} = S_y - S_{alt}$ |
| ④ $S_{alt} > S_y$ | : $S_{mean1} = 0$ |

等価応力振幅 S_{eq} は、次の式(H.7)による。

$$S_{eq} = \{ S_{alt} (S_{alt} + S_{mean1}) \}^{0.5} \quad \text{-----} \quad (\text{H.7})$$

2) 手順 1（応力振幅 S_a に対する設計係数 α を用いる場合）

対象とする材料の最適疲労曲線の式の S_a に、縦弾性係数の比 E/E_d と α を乗じた S_{eq} を代入し、繰返し回数の許容値 N_1 を求める。

3) 手順 2（疲労寿命 N_f に対する設計係数 β を用いる場合）

対象とする材料の最適疲労曲線の式の S_a に、縦弾性係数の比 E/E_d を乗じた S_{eq} を代入し、疲労寿命を求め、 β で除して N_2 とする。

4) 繰返し回数の許容値の算出

繰返し回数の許容値 N_a は、次の式(H.8)による。

$$N_a = \min. (N_1, N_2) \quad \text{-----} \quad (\text{H.8})$$

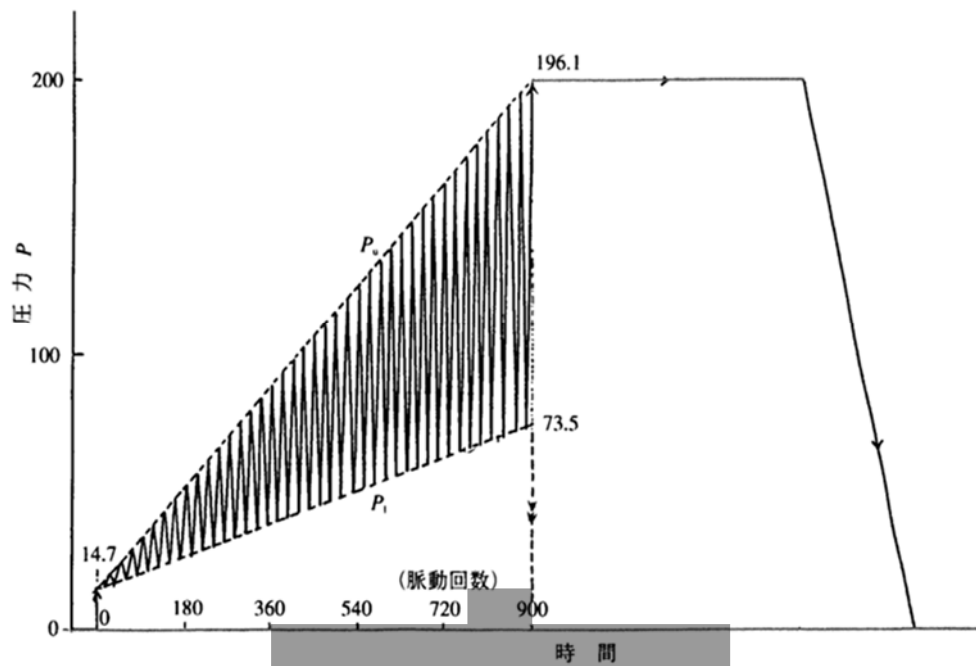


図 H.2 圧力変動

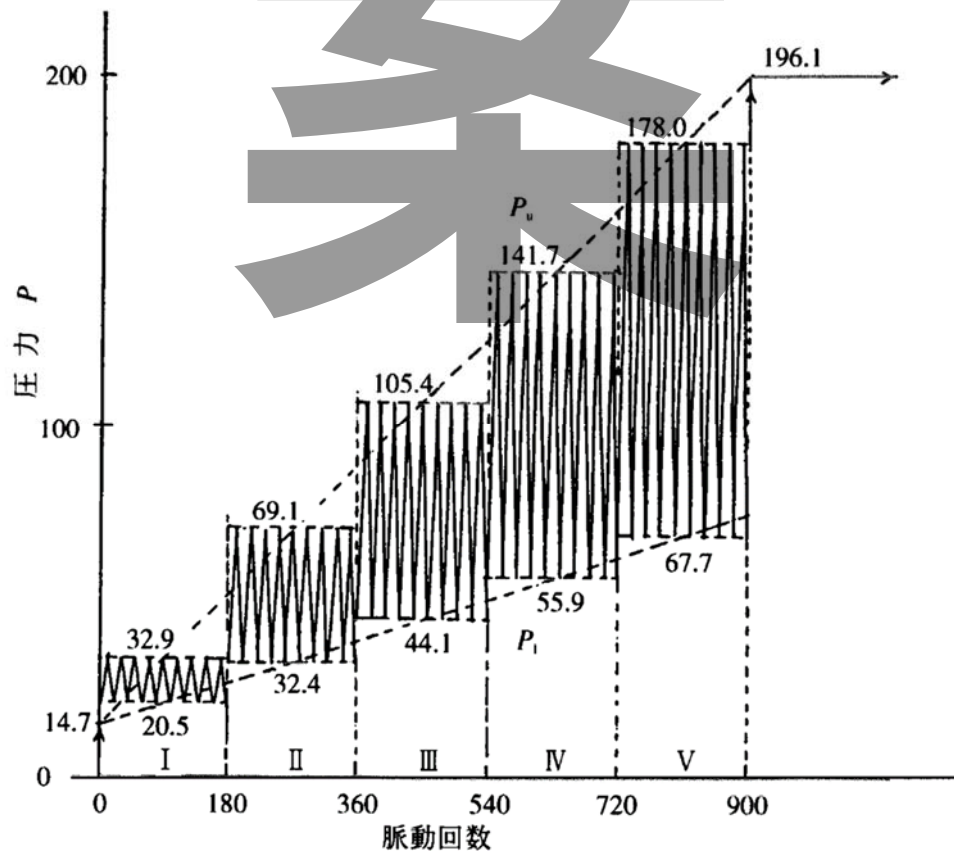


図 H.3 脈動を置き換えた圧力変動

表 H.2 応力強さ S の変動範囲の最大値及び最小値、繰返し応力強さの振幅 S_{alt}
並びに繰返し応力強さの平均 S_{mean}

圧力変動ステージ	大波	脈 動				
		I	II	III	IV	V
圧力変動繰返し回数 n	1	180	180	180	180	180
運転圧力変動の最大値 P_u (MPa)	196.1	32.9	69.1	105.4	141.7	178.0
運転圧力変動の最小値 P_l (MPa)	0	20.5	32.4	44.1	55.9	67.7
応力強さ S の変動範囲の最大値 S_{max} (N/mm ²)	846.0	141.9	298.1	454.7	611.3	767.9
応力強さ S の変動範囲の最小値 S_{min} (N/mm ²)	0.0	88.4	139.8	190.3	241.2	292.1
繰返し応力強さの振幅 S_{alt} (N/mm ²)	423.0	26.7	79.2	132.2	185.1	237.9
繰返し応力強さの平均 S_{mean} (N/mm ²)	423.0	115.2	219.0	322.5	426.3	530.0

表 H.3 平均応力の補正と繰返し回数の許容値算出

(手順1及び手順2で共通)

圧力変動ステージ	大波	脈 動				
		I	II	III	IV	V
修正平均応力 S_{mean1} (N/mm ²)	418.6	115.2	219.0	322.5	426.3	530.0
等価応力振幅 S_{eq} (N/mm ²)	596.7	61.6	153.6	245.2	336.4	427.5
$S_{eq}(E/E_d)$ (N/mm ²)	625.3	64.6	161.0	257.0	352.5	448.0

(手順1 $\alpha=1.23$)

$\alpha S_{eq}(E/E_d)$ (N/mm ²)	769.1	79.4	198.0	316.1	433.6	551.0
N_1 (回)	20,503	∞	1×10^8	1×10^8	7.909×10^6	218,727
n/N_1 (大波1回,小波各180回)	4.877×10^{-5}	0	1.800×10^{-6}	1.800×10^{-6}	2.276×10^{-5}	8.299×10^{-4}
n/N_1 (大波900回,小波各162,000回)	4.390×10^{-2}	0	1.620×10^{-3}	1.620×10^{-3}	2.048×10^{-2}	7.406×10^{-1}
$\Sigma n/N_1$	0.04390	0.7644				

(手順2 $\beta=2.32$)

$S_{eq}(E/E_d)$ (N/mm ²)	625.3	64.6	161.0	257.0	352.5	448.0
N_2 (回)	65,982	∞	∞	1×10^8	6.268×10^7	5.708×10^6
N_2/β (回)	28,440	∞	∞	4.310×10^7	2.702×10^7	2.460×10^6
$n/(N_2/\beta)$ (大波1回,小波各180回)	3.516×10^{-5}	0	0	4.176×10^{-6}	6.662×10^{-6}	7.316×10^{-5}
$n/(N_2/\beta)$ (大波900回,小波各162,000回)	3.165×10^{-2}	0	0	3.758×10^{-3}	5.996×10^{-3}	6.585×10^{-2}
$\Sigma (n/(N_2/\beta))$	0.03165	0.07560				

書面投票（パブコメ対応後）用

（注記）

1) 手順1 及び手順2 で共通

- ・低合金鋼（SNCM439）（6.4.1 a）グループA）において、
 - 一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅 S_a : 497.5 N/mm² （式（H.1））
 - 一定応力振幅の場合の 10^8 回の応力振幅 S_a : 479.1 N/mm² （式（H.1））
 - 変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅 S_a : 336.4 N/mm² （式（H.2））
 である。
- ・大波の修正平均応力 S_{meanI} は、 $S_{alt} + S_{mean}$ が S_y より大きい、 S_{alt} が S_y より小さいため、H.2 d)1)③より求める。
- ・ステージI～ステージVの修正平均応力 S_{meanI} は、 $S_{alt} + S_{mean}$ が S_y より小さいため、H.2 d)1)②より求める。
- ・等価応力振幅 S_{eq} は、式(H.6)の値に縦弾性係数の比 E/E_d を乗じて求める。

2) 手順1 ($\alpha = 1.23$)

- ・大波の $\alpha S_{eq}(E/E_d)$ の値は、一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅497.5 N/mm²より大きい、式(H.1)を適用して繰返し回数の許容値を求める。
- ・ステージIの $\alpha S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²の1/2より小さいため、本体の**6.4.5 b)**を適用して、繰返し回数の許容値を ∞ とする。
- ・ステージII及びIIIの $\alpha S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²の1/2より大きい、336.4 N/mm²より小さいため、本体の**6.4.5 b)**を適用して、繰返し回数の許容値を 10^8 回とする。
- ・ステージIVの $\alpha S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²より大きい、一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅497.5 N/mm²より小さいため、式(H.2)を適用して、繰返し回数の許容値を求める。
- ・ステージVの $\alpha S_{eq}(E/E_d)$ の値は、一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅497.5 N/mm²より大きい、式(H.1)を適用して繰返し回数の許容値を求める。

3) 手順2 ($\beta = 2.32$)

- ・大波の $S_{eq}(E/E_d)$ の値は、一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅497.5 N/mm²より大きい、式(H.1)を適用して疲労寿命を求め、設計係数 β で除して繰返し回数の許容値を求める。
- ・ステージI及びステージIIの $S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²の1/2より小さいため、本体の**6.4.5 b)**を適用して、繰返し回数の許容値を ∞ とする。
- ・ステージIIIの $S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²の1/2より大きい、336.4 N/mm²より小さいため、本体の**6.4.5 b)**を適用して疲労寿命を 10^8 回とし、設計係数 β で除して繰返し回数の許容値を求める。
- ・ステージIV及びVの $S_{eq}(E/E_d)$ の値は、変動応力の場合の 10^8 回の応力振幅336.4 N/mm²より大きい、一定応力振幅の場合の 2×10^6 回の応力振幅497.5 N/mm²より小さいため、式(H.2)を適用して疲労寿命を求め、設計係数 β で除して繰返し回数の許容値を求める。

H.5 疲労解析結果

手順 1 の場合（応力側に設計係数を設定）及び手順 2 の場合（寿命側に設計係数を設定）に、算出した大波 900 回及び小波 810,000 回の累積使用係数は、次の①及び②となる。累積使用係数は、手順 1 の場合が手順 2 よりも大きく、保守的な評価となる。

- | | |
|------------|---------------------------------------|
| ① 手順 1 の場合 | 累積使用係数 = $0.04390 + 0.7644 = 0.8083$ |
| ② 手順 2 の場合 | 累積使用係数 = $0.03165 + 0.07560 = 0.1073$ |

なお、最適疲労曲線に式(H.2)の修正を適用しない場合は、手順 1 は大波とステージV、手順 2 は大波のみが疲労解析の対象であり、累積使用係数は下記となる。

- | | |
|------------|--------------------------------------|
| ① 手順 1 の場合 | 累積使用係数 = $0.04390 + 0.7406 = 0.7845$ |
| ② 手順 2 の場合 | 累積使用係数 = 0.03165 |

案

案

附属書I（参考） 各種部位のき裂進展解析法

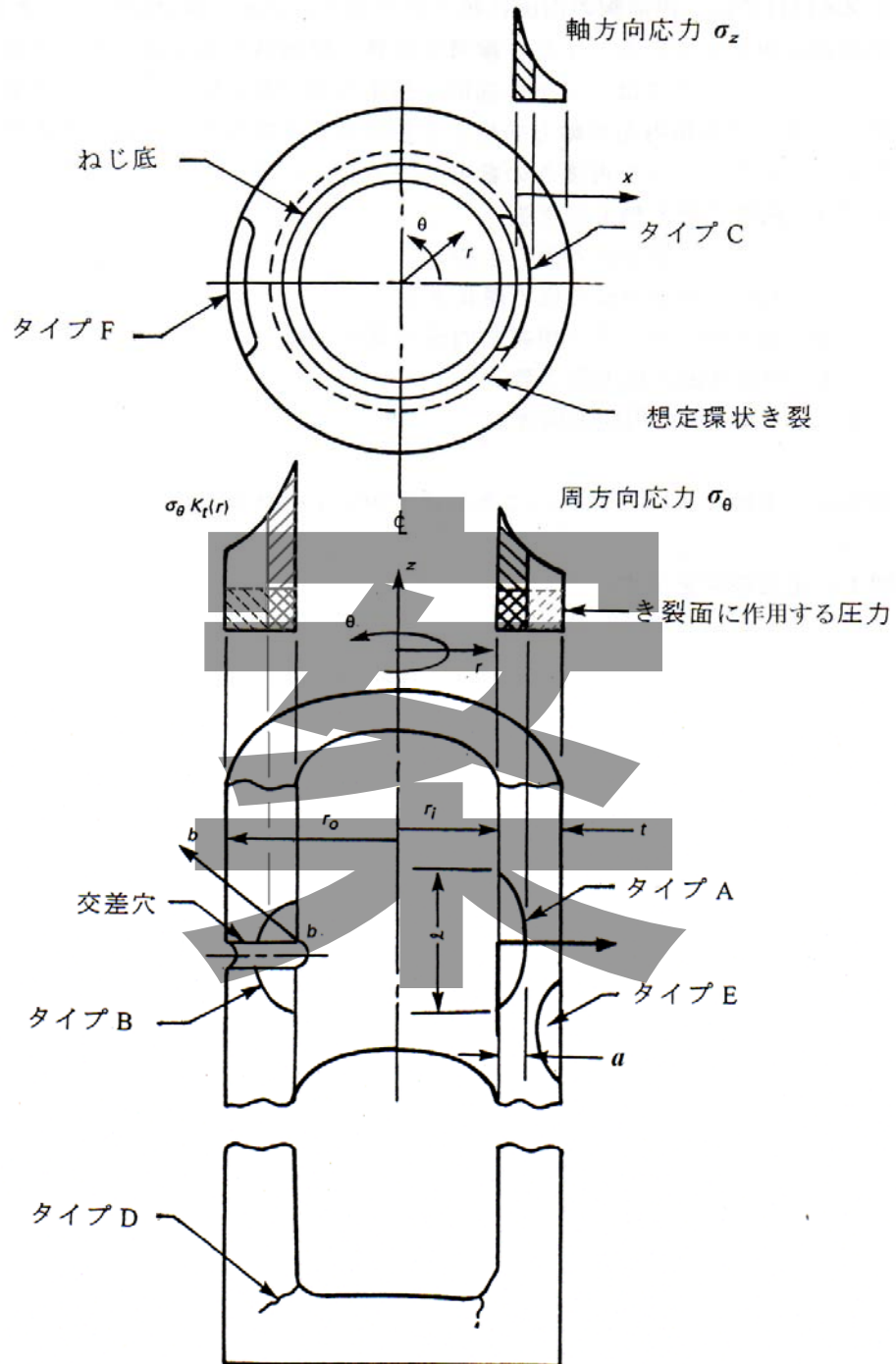
I.1 適用範囲

本体の **8.2** では、円筒胴の内面に軸方向き裂を想定した場合について、き裂進展解析法の詳細を規定している。また、**附属書 G** の **G.5** では、き裂進展解析例を示している。

この附属書では、**図 I.1** に示す次の①～⑥の部位にき裂を想定した場合について、き裂進展解析法の概要を示す。

円筒胴内面の軸方向き裂を想定したき裂進展解析法に示した内容がベースになるため、そのポイントを再度この附属書でも示している。

- ① タイプ A 円筒胴内面の軸方向き裂
- ② タイプ B 円筒胴の交差穴内面のき裂
- ③ タイプ C ねじ込み部のねじ底の環状き裂
- ④ タイプ D ふたと一体構造の円筒胴のコーナー接続部内面の環状き裂
- ⑤ タイプ E 円筒胴外面の軸方向き裂
- ⑥ タイプ F 円筒胴外面の周方向き裂



図I.1 円筒胴の部位とき裂のタイプ[†]

I.2 各種部位のき裂進展解析法の概要

I.2.1 タイプA 円筒胴内面の軸方向き裂

円筒胴内面の軸方向き裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の **a)～e)**による。

a) き裂面

軸方向と半径方向を含む面

b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比

き裂深さ a / き裂長さ $\ell = 1/3$ の半楕円形とする。

c) 考慮すべき応力

- 1) 運転圧力による応力
- 2) き裂面に作用する圧力
- 3) 熱応力
- 4) 残留応力
- 5) その他

d) 応力分布の計算式

本体の **8.2 e)**（応力分布の多項式近似（手順5））に示す応力分布の多項式近似の一般式を再録する。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.1})$$

ここで、 σ 、 a 及び x は、次による。

σ : 応力分布

a : き裂深さ

x : 内面からの距離 ($0 \leq x \leq a$)

き裂深さ a の増大に伴い近似式を設定し直し、係数 $A_0 \sim A_3$ の値を決定し直す。

なお、すべての位置（距離） x にわたる応力分布が以下の一つの式で近似できる場合は、次の式による。

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.2})$$

e) K_I の計算式

本体の **8.2 f)**（応力拡大係数 K_I の計算（手順6））に示す応力拡大係数の基本式を再録する。

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{(\pi a/Q)} \quad \text{-----} \quad (\text{I.3})$$

ここで、 A_p 、 Q 及び $G_0 \sim G_3$ は、次による。

A_p : き裂面に作用する圧力

Q : き裂形状パラメータ

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} \quad \text{-----} \quad (\text{I.4})$$

$G_0 \sim G_3$: 自由表面補正項で、 a/l と a/t の比の関数として**附属書D**から求める。
ただし、 $0 \leq a/l \leq 0.5$

なお、すべての位置（距離） x にわたる応力分布が **d)**の式(I.2)で近似できる場合、 K_I は式(I.3)を使用し、係数 $A_0 \sim A_3$ は次の換算式より求める。

$$A_0 = A'_0, A_1 = A'_1(a/t), A_2 = A'_2(a/t)^2, A_3 = A'_3(a/t)^3$$

応力が内圧による場合、不連続部から離れた円筒胴の位置での $A'_0 \sim A'_3$ は次式で与えられる。
ただし、内外径比 K の範囲は $1.2 \leq K \leq 3$ とする。

$$A'_0 / P = (K^2 + 1) / (K^2 - 1)$$

$$A'_1 / P = 1.051 - 2.318K + 0.3036K^2 - 0.004417K^3$$

$$A'_2 / P = -1.7678 + 0.9497K + 0.9399K^2 - 0.2056K^3$$

$$A'_3 / P = -0.2798 + 1.3831K - 1.2603K^2 + 0.2138K^3$$

I.2.2 タイプB 円筒胴の交差穴部内面のき裂

円筒胴の交差穴部内面のき裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の **a)～e)**による。

a) き裂面

軸方向と半径方向を含む面

b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比

1/4 円又は半円（アスペクト比 $a/t=0.5$ ）

c) 考慮すべき応力

- 1) 穴周りの応力分布
- 2) き裂面に作用する圧力

d) 応力の計算式

限界き裂深さに至るまでの応力分布を一つの3次式で近似することが難しい場合には、タイプAのように3次式で近似して K_I を求めることはできない（**I.3** 参照）。

円筒胴内面と穴の交差部の面取りの曲率半径 R が穴径の 1/4 以上の場合で、かつ、限界き裂深さに至るまでの応力分布を3次式で近似できる場合は以下による。

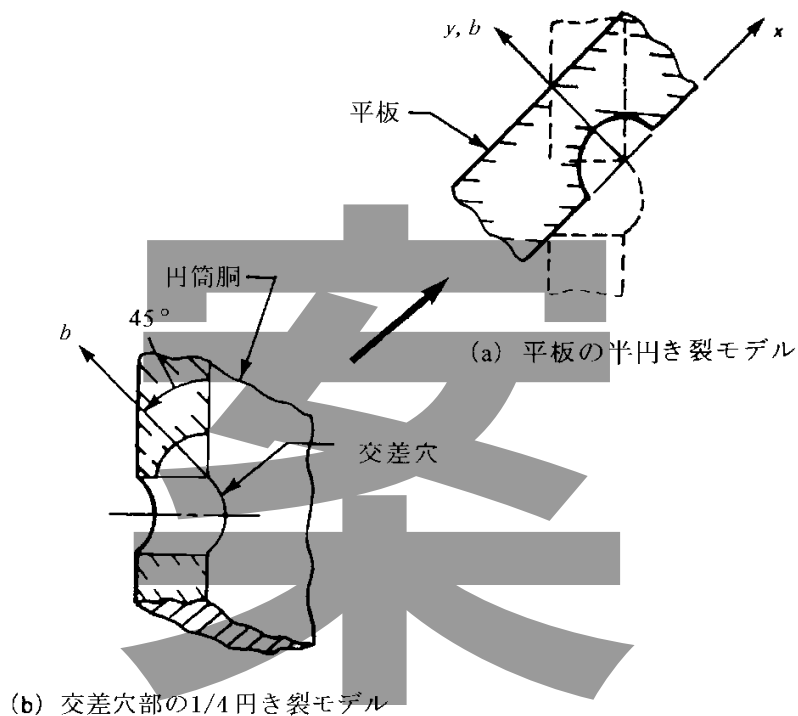
- 1) 穴周りの応力分布は応力解析によって求める。
- 2) 応力分布を前記タイプAの **d)**の式(I.1)を使って近似する場合には、**図 I.1** の直線 **b-b** に沿っ

て近似する。

- 3) き裂形状は、直線 **b-b** を対称軸とする半円($a/l=0.5$)とする（図 I.2 参照）。
- 4) 残留応力がある場合には、簡単のために円筒胴の円周方向残留応力が直線 **b-b** に沿って分布するとして前記タイプ A の **d)** の式(I.1)を使うことができる。

e) K_I の計算式

円筒胴内面と穴の交差部の R が穴径の 1/4 以上の場合、交差穴部の K_I は前記タイプ A の **e)** により求めることができる。



図I.2 交差穴部におけるき裂のモデル化[†]

I.2.3 タイプC ねじ込み部のねじ底の環状き裂

ねじ込み部のねじ底の環状き裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の **a)～e)** による。

- a) き裂面
円周方向と半径方向を含む面
- b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比
環状き裂（アスペクト比 $a/l=0$ ）
- c) 考慮すべき応力
ねじ底における軸方向応力の分布
- d) 応力の計算式

適用上の注意は、次の **1)** 及び **2)** による。

- 1)** き裂面に圧力は作用しない。
- 2)** 応力勾配が大きい場合、タイプ A のようにすべての位置(距離) x にわたる応力分布を一つの 3 次式で近似できない。

なお、3 次の近似式で不十分な場合には、複数の区間に分けて区間毎に 3 次式で近似してよい。区間の境界で K_I が不連続になる場合には、 K_I の差 ΔK_I を以降のすべての K_I に加算する。

軸方向応力分布を次式で近似する。

$$\sigma = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.5})$$

ここで、 x 及び $A_0 \sim A_3$ は、次による。

x : ねじ底からの半径方向距離

$A_0 \sim A_3$: タイプ A の **d)** の式 (I.1) とは異なる係数で、区間毎に定める。

e) K_I の計算式

K_I の計算は、次式による。

$$K_I = F \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} \quad (\text{I.6})$$

ここで、 F は、次による。

$$F = A_0 F_1 + 2a A_1 F_2 / \pi + a^2 A_2 F_3 / 2 + 4a^3 A_3 F_4 / (3\pi)$$

$$F_1 = 1.1259 + 0.2344(a/t) + 2.2018(a/t)^2 - 0.2083(a/t)^3$$

$$F_2 = 1.0732 + 0.2677(a/t) + 0.6661(a/t)^2 + 0.6354(a/t)^3$$

$$F_3 = 1.0528 + 0.1065(a/t) + 0.4429(a/t)^2 + 0.6042(a/t)^3$$

$$F_4 = 1.0387 - 0.0939(a/t) + 0.6018(a/t)^2 + 0.3750(a/t)^3$$

複数の区間に分けて 3 次式近似する場合の K_I の計算は、次式による。

$$K_I = F \sqrt{\pi a} + \Sigma \Delta K_I \quad \text{-----} \quad (\text{I.7})$$

I.2.4 タイプD ふたと一体構造の円筒胴のコーナー接続部内面の環状き裂

ふたと一体構造の円筒胴のコーナー接続部内面の環状き裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の a)～e)による。

a) き裂面

引張応力の変動範囲が最大になる面（応力解析により定める。）

b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比

環状き裂(アスペクト比 $a/l=0$)

c) 考慮すべき応力

- 1) 運転圧力による応力
- 2) き裂面に作用する圧力
- 3) 熱応力
- 4) 残留応力
- 5) その他

d) 応力の計算式

すべての位置（距離） x にわたる応力分布を一つの 3 次式で近似することが難しい場合には、タイプ A のように 3 次式で近似して K_I を求めることはできない（I.3 参照）。3 次式で近似できる場合は、次の 1) 及び 2) による。

- 1) 応力分布は応力解析により求める。
- 2) 応力分布をタイプ A の d) の式(I.1)を使って近似する。

e) K_I の計算式

タイプ A の e) の式(I.3)と式(I.4)を使って K_I を求める。この場合、 a/l は 0 とする（環状き裂）。

I.2.5 タイプE 円筒胴外面の軸方向き裂

円筒胴外面の軸方向き裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の a)～f)による。

a) き裂面

軸方向と半径方向を含む面

b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比

半楕円形（アスペクト比 $a/l=1/3$ ）

c) 考慮すべき応力

- 1) 運転圧力による応力
- 2) 熱応力
- 3) 残留応力
- 4) 応力集中
- 5) その他

d) 応力の計算式

すべての位置（距離） x にわたる応力分布を一つの 3 次式で近似することが難しい場合には、タイプ A のように 3 次式で近似して K_I を求めることはできない。3 次式で近似できる場合は、

次式による。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.8})$$

ここで、 a 、 x 及び $A_0 \sim A_3$ は、次による。

a : き裂深さ

x : 外表面からの距離 ($0 \leq x \leq a$)

$A_0 \sim A_3$: a の値が変わる毎に求め直す。

なお、すべての位置（距離） x にわたる応力分布が以下の一つの式で近似できる場合は、次式による。

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.9})$$

e) K_I の計算式

K_I の計算は、次式による。

$$K_I = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{(\pi a / Q)} \quad \text{-----} \quad (\text{I.10})$$

ここで、 Q 及び $G_0 \sim G_3$ は、次による。

Q : き裂形状パラメータ

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} \quad \text{-----} \quad (\text{I.11})$$

$G_0 \sim G_3$: 自由表面補正項で、 a/l と a/t の関数として **附属書 D** から求める。

ただし、 $0 \leq a/l \leq 0.5$

すべての位置（距離） x にわたる応力分布が上記 **d)** の式 (I.9) で近似できる場合は、 K_I は上記の式 (I.10) を使用し、係数 $A_0 \sim A_3$ は次の換算式より求める。

$$A_0 = A'_0, A_1 = A'_1(a/t), A_2 = A'_2(a/t)^2, A_3 = A'_3(a/t)^3$$

応力が内圧力のみによる場合、不連続部から離れた円筒胴の位置での $A'_0 \sim A'_3$ は次式で与えられる。ただし、内外径比 K の範囲は $1.2 \leq K \leq 3$ とする。

$$A'_0 / P = (K^2 + 1) / (K^2 - 1) - 0.9966 + 0.0148K - 0.0168K^2 + 0.003783K^3$$

$$A'_1 / P = 3.324 - 3.7307K + 1.5975K^2 - 0.22578K^3$$

$$A'_2 / P = -2.6072 + 5.099K - 2.841K^2 + 0.4358K^3$$

$$A'_3 / P = 0.2798 - 1.3831K + 1.2603K^2 - 0.2138K^3$$

f) 自緊による残留応力

交差穴等の構造不連続部のない単肉円筒胴が自緊される場合には、次の**1)**により弾塑性境界の直径を求め、**2)**により残留応力を求める。

1) 弾塑性境界の直径 D_p の計算

自緊圧力 P_A 、自緊時の外面の周方向ひずみ ε_m 又は自緊後の内面の周方向残留ひずみ ε_p のいずれかを計測し、次の**1.1)～1.3)**により弾塑性境界の直径 D_p を求める。

1.1) 外面の周方向ひずみ ε_m から求める場合

内圧による軸力の分担条件に応じ、次の①又は②による。

① 内圧による軸力のすべてを円筒胴が受ける場合

$$(D_p / D_o)^2 = \{E\varepsilon_m + \nu P_A / (K^2 - 1)\} / (1.15S_y) \quad \text{-----} \quad (\text{I.12})$$

② その他の条件の場合

$$(D_p / D_o)^2 = \{E\varepsilon_m + \nu(F_L / A)\} / (1.15S_y) \quad \text{-----} \quad (\text{I.13})$$

ここで、 ε_m 、 D_p 、 D_o 、 P_A 、 K 、 E 、 ν 、 S_y 、 F_L 及び A は、次による。

ε_m : 自緊時の外面の周方向ひずみ

D_p : 弾塑性境界の直径

D_o : 円筒胴の外径

P_A : 自緊圧力

K : 円筒胴の内外径比 D_o/D_i (D_i は円筒胴の内径)

E : 縦弾性係数

ν : ポアソン比

S_y : 常温における材料の降伏点又は0.2%耐力の設定値

F_L : 自緊時に胴に作用する軸力

A : 円筒胴の横断面積

1.2) 内面の周方向残留ひずみ ε_p から求める場合

反復計算により次式から D_p を求める。

$$\begin{aligned} 2E\varepsilon_p / (1.15S_y) = & (1 - 2\nu) \left[\ln(D_i^2 / D_p^2) - 1 \right] + (2 - \nu)(D_p / D_i)^2 + (1 - \nu)(D_p / D_o)^2 \\ & - \left[\ln(D_p^2 / D_i^2) + (D_o^2 - D_p^2) / D_o^2 \right] [1 - \nu + (1 + \nu)K^2] / (K^2 - 1) \quad \text{----} \quad (\text{I.14}) \end{aligned}$$

ここで、 ε_p は、内面の周方向残留ひずみとする。ただし、 $\varepsilon_p < 0.02$ とする。

1.3) 自緊圧力 P_A から求める場合

反復計算により次式から D_p を求める。

$$P_A = 1.15 S_y [\ln(D_p / D_i) + (D_o^2 - D_p^2) / (2D_o^2)] \quad \text{-----} \quad (\text{I.13})$$

ここで、 Φ は、塑性化率で、次式による。ただし、 $\Phi < 0.4$ とする。

$$\phi = (D_p - D_i) / (D_o - D_i)$$

2) 残留応力の計算

除荷時に圧縮側で再降伏しない条件が必要である。次の式(I.14)を満足する場合に適用する。

$$f = \max(f_1, f_2) > 1.0 \quad \text{-----} \quad (\text{I.14})$$

ここで、 f_1 及び f_2 は、次による。

$$f_1 = 1.0388 - 0.1651K - 0.7086(-0.89 + 2.6631\Phi - 2.7994\Phi^2 + 1.0296\Phi^3)$$

$$f_2 = -0.5484 + 1.8141K - 0.6502K^2 + 0.0791K^3$$

K : 円筒胴の内外径比 ($K = D_o / D_i$)

Φ : 塑性化率 [$\Phi = (D_p - D_i) / (D_o - D_i)$]

D_i : 胴の内径

D_o : 胴の外径

D_p : 弾塑性境界の直径

式(I.14)を満足する場合、塑性領域及び弾性領域における残留応力の計算は、次の 2.1) 及び 2.2) による。

2.1) 塑性領域 ($D_i \leq D \leq D_p$) における残留応力の計算

円周方向残留応力 σ_t 及び半径方向残留応力 σ_r を、次式により求める。

$$\sigma_t / S_y = (D_p^2 + D_o^2) / (2D_o^2) + \ln(D / D_p) - [(D_o^2 - D_p^2) / (2D_o^2) + \ln(D_p / D_i)] (1 + D_o^2 / D^2) / (K^2 - 1) \quad \text{-----} \quad (\text{I.15})$$

$$\sigma_r / S_y = (D_p^2 - D_o^2) / (2D_o^2) + \ln(D / D_p) - [(D_o^2 - D_p^2) / (2D_o^2) + \ln(D_p / D_i)] (1 - D_o^2 / D^2) / (K^2 - 1) \quad \text{-----} \quad (\text{I.16})$$

2.2) 弾性領域 ($D_p \leq D \leq D_o$) における残留応力の計算

円周方向応力分布 σ_t 及び半径方向応力分布 σ_r を、次式により求める。

$$\sigma_i / S_y = (D_p^2 + D_o^2) / (2D_o^2) + \ln(D / D_p) - [(D_o^2 - D_p^2) / (2D_o^2) + \ln(D_p / D_i)] (1 + D_o^2 / D^2) / (K^2 - 1)$$

----- (I.17)

$$\sigma_r / S_y = (1 - D_o^2 / D^2) [D_p^2 / (2D_o^2) + \{(D_p^2 - D_o^2) / (2D_o^2) - \ln(D_p / D_i)\} / (K^2 - 1)]$$

----- (I.18)

I.2.6 タイプF 円筒外面の周方向き裂

円筒外面の周方向き裂を想定した場合のき裂進展解析法の概要は、次の **a)～e)** による。

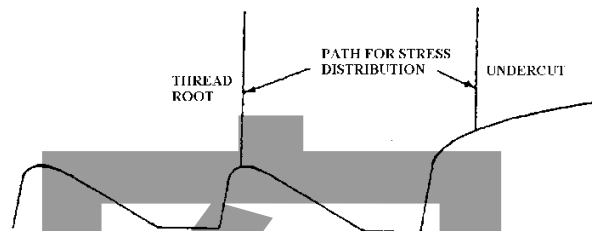
- a) き裂面**
周方向と半径方向を含む面
- b) 想定き裂の初期形状とアスペクト比**
半楕円形（アスペクト比 $a/l=1/3$ ）又は環状き裂（アスペクト比 $a/l=0$ ）
- c) 考慮すべき応力**
 - 1) 運転圧力による応力
 - 2) 熱応力
 - 3) 残留応力
 - 4) 応力集中
 - 5) その他
- d) 応力の計算式**
すべての位置（距離） x にわたる応力分布を一つの 3 次式で近似することが難しい場合には、タイプ A のように 3 次式で近似して K_I を求めることはできない。3 次式で近似できる場合は、次の **1)** 及び **2)** による。
 - 1) 応力分布は応力解析により求める。
 - 2) 応力分布をタイプ A の **d)** の式(I.1)を使って近似する。
- e) K_I の計算式**
タイプ A の **e)** の式(I.3)と式(I.4)を使って K_I を求める。

I.3 き裂進展解析法の計算例（タイプC ねじ込み部のねじ底の環状き裂）

I.3.1 緒言

ねじ蓋を有する高圧単肉円筒胴の胴端ねじ込み部のねじ底部とアンダーカット部のき裂進展解析例である。初期き裂を想定する位置は、圧力境界に一番近いねじ山と2番目のねじ山間のねじ底部及び1番目のねじ山の前方に設けたアンダーカット部である（図 I.3 参照）。これらの位置は耐圧試験圧力による高いねじ山荷重により引張降伏し、圧力の除荷により圧縮残留応力が生じる。一般に、圧縮残留応力は疲労寿命を延ばし、き裂進展速度を遅らせる効果がある。参照文献ではこの圧縮残留応力の効果を考慮してき裂進展解析をしているが、塑性変形により生じた圧縮残留応力は圧力の繰り返しにより急速に減衰するため、本計算例では圧縮残留応力の効果は考慮しない。

なお、本計算例では圧力シール部が想定き裂位置よりも前方にあるため、き裂面には圧力は作用しないとする。



図I.3 ねじとアンダーカット部の形状

I.3.2 計算条件

この計算例における計算条件は、次の①～⑱による。

- | | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| ① 設計圧力 | 27.5 ksi |
| ② 運転圧力 | 25 ksi |
| ③ 運転温度 | 常温 |
| ④ 材料 | 低合金鋼 |
| ⑤ 降伏点 | 120 ksi |
| ⑥ 円筒胴内径 | 36 inch |
| ⑦ 円筒胴外径 | 62 inch |
| ⑧ ねじピッチ径 | 37.815 inch |
| ⑨ めねじ谷径 | 38.5 inch |
| ⑩ ピッチ | 1.5 inch |
| ⑪ ねじ山数 | 12 |
| ⑫ ねじ形状 | のこ歯ねじ |
| ⑬ 圧力側フランク角 | 7° |
| ⑭ 遊び側フランク角 | 36° |
| ⑮ 平面ひずみ破壊靱性(K_{Ic}) | 120 ksi inch ^{0.5} |
| ⑯ き裂面 | 円周方向と半径方向を含む面 |
| ⑰ き裂形状 | 環状き裂 |
| ⑱ 想定き裂の初期深さ | 0.03125 inch (= 0.8mm) （欠陥検出能を考慮） |

I.3.3 考慮すべき応力

ねじ部を軸対称体とみなし、応力解析（有限要素法等）により応力分布を求める。なお、応力は便宜上、設計圧力（= 27.5 ksi）を用いて求めている。

I.3.4 応力分布

円筒胴内面の近傍での応力勾配が大きいので、軸方向応力をすべての位置（距離） x にわたる一つの 3 次式で表示することはできない。ねじ底部については半径方向に 4 つの区間を、アンダーカット部については 2 つの区間を設け、各区間の軸方向応力を次の 3 次式で表示する。

$$\sigma = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.19})$$

ここで、 σ 及び x は、次による。

σ : 軸方向応力 (psi)

x : ねじ底からの半径方向距離 (inch)

各区間の 3 次式の係数 $A_1 \sim A_3$ を、表 I.1 及び表 I.2 に示す。

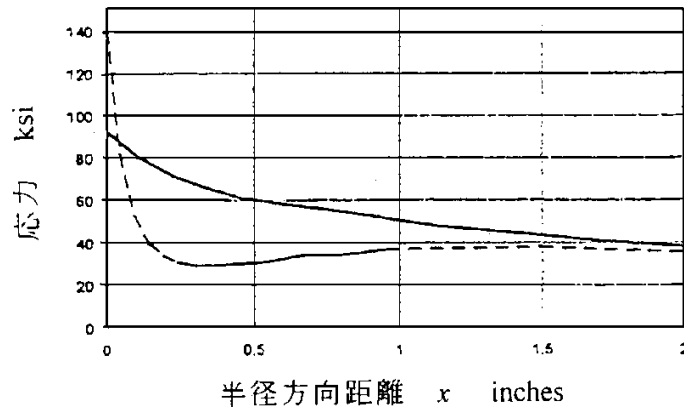
表I.1 ねじ底部の軸方向応力分布の3次近似式の係数

係数	ねじ底からの距離 x (inch)			
	0～0.237	0.237～0.670	0.670～3.12	3.12～11.75
A_0	148,900	46,515	17,030	57,786
A_1	-1,786,000	-110,430	34,906	-12,249
A_2	9,691,500	219,490	-17,630	1,092
A_3	-17,950,000	-123,700	2,451	-46.68

表I.2 アンダーカット部の軸方向応力分布の3次近似式の係数

係数	内表面からの距離 x (inch)	
	0～0.6829	0.6829～3.528
A_0	93,086	73,156
A_1	-128,043	-28,401
A_2	169,352	6,872
A_3	-87,447	-745.8

応力分布を図 I.4 に示す。なお、図 I.4 の点線はねじ底部、実線はアンダーカット部の応力分布を示す。



図I.4 軸方向応力の分布

I.3.5 応力拡大係数 K_I の計算

環状き裂に対する応力拡大係数 K_I は、次式で与えられる。

$$K = F\sqrt{\pi a} \quad \text{-----} \quad (\text{I.20})$$

ここで、 F 及び a は、次による。

$$F = A_0 F_1 + 2a A_1 F_2 / \pi + a^2 A_2 F_3 / 2 + 4a^3 A_3 F_4 / (3\pi) \quad \text{-----} \quad (\text{I.21})$$

$$F_1 = 1.1259 + 0.2344(a/t) + 2.2018(a/t)^2 - 0.2083(a/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.22})$$

$$F_2 = 1.0732 + 0.2677(a/t) + 0.6661(a/t)^2 + 0.6354(a/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.23})$$

$$F_3 = 1.0528 + 0.1065(a/t) + 0.4429(a/t)^2 + 0.6042(a/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.24})$$

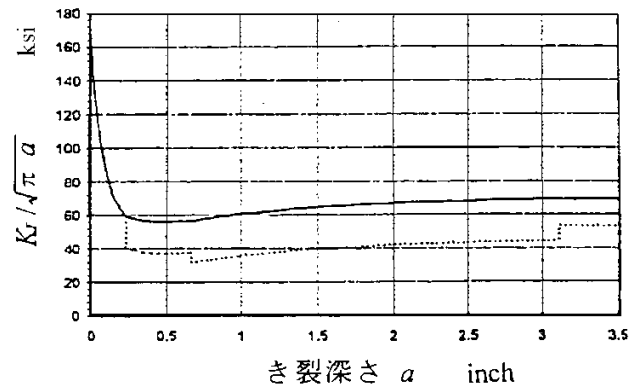
$$F_4 = 1.0387 - 0.0939(a/t) + 0.6018(a/t)^2 + 0.3750(a/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{I.25})$$

a : 環状き裂の深さ (inch)

t : 厚さ (inch)

$A_0 \sim A_3$: 各区間における軸方向応力分布の3次式の係数で、表I.1及び表I.2による。

複数の区間に分けて応力を 3 次式近似すると、応力拡大係数 K_I の分布曲線は一般に区間の境界で不連続になるため、次の区間の K_I の分布曲線は K_I の差 ΔK_I に等しい量だけ上下に平行移動し連続な曲線に調整する必要がある。図 I.5 は、この調整前後の基準化した応力拡大係数 $K_I / \sqrt{\pi a}$ の分布をねじ底部について示した。なお、図 I.5 の点線は計算値、実線は調整値を示す。



図I.5 応力拡大係数の分布（ねじ底部）

調整後の基準化した応力拡大係数 $K_I / \sqrt{\pi a}$ を以下の 3 次式で示す。

$$K_I / \sqrt{\pi a} = B_0 + B_1 a + B_2 a^2 + B_3 a^3 \quad (1.26)$$

ここで、 F 及び a は、次による。

K_I : 応力拡大係数 (ksi $\sqrt{\text{inch}}$)

a : き裂深さ (inch)

各区間の 3 次式の係数 $B_0 \sim B_3$ を表 I.3 及び表 I.4 に示す。

表I.3 ねじ底部き裂の応力拡大係数分布の3次近似式の係数（設計圧力27.5ksiベース）

係数	き裂深さ a (inch)			
	0～0.237	0.237～0.670	0.670～3.12	3.12～11.75
B_0	167.65	71.426	43.878	82.337
B_1	-1,217.6	-75.221	24.284	-7.8444
B_2	5,083	116.39	-8.5896	1.4236
B_3	-7,902	-55.385	1.1	-0.07452

表I.4 アンダーカット部き裂の応力拡大係数分布の3次近似式の係数（設計圧力27.5ksiベース）

係数	き裂深さ a (inch)	
	0～0.6829	0.6829～3.528
B_0	104.81	85.93
B_1	-85.615	-18.042
B_2	88.747	4.444
B_3	-38.252	-0.4053

図 I.6 はねじ底部とアンダーカット部について応力拡大係数 K_I の分布を示す。なお、図 I.6 の点線はねじ底部、実線はアンダーカット部の応力拡大係数の分布を示す。

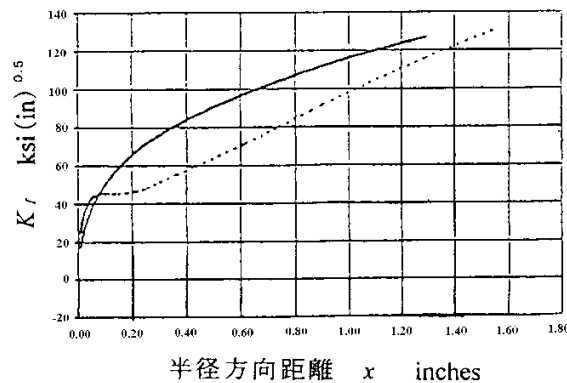


図 I.6 応力拡大係数の分布（設計圧力 27.5 ksi ベース）

I.3.6 き裂進展速度 da/dN の設定

き裂進展速度は本体の 8.2 g)（き裂進展速度の計算（手順 7））の式(8.14)を用いる。

$$da/dN = Cf(R)\Delta K_I^m \quad (I.27)$$

ここで、 C 、 m 及び ΔK_I は、次による。

$$C = 1.95 \times 10^{-10} \quad (I.28)$$

$$m = 3.26 \quad (I.29)$$

$$\Delta K_I = K_{I_{max}} - K_{I_{min}} \quad (\text{ksi}\sqrt{\text{inch}}) \quad (I.30)$$

最小圧力はゼロ（すなわち、 $K_{I_{min}} = 0$ ）であり、かつ、残留応力もない（すなわち、 $K_{I_{res}} = 0$ ）としているため、本体の 8.2 g)（き裂進展速度の計算（手順 7））より、応力比 $R=0$ 、したがって、 $f(R)=1$ 、 $\Delta K_I = K_{I_{max}}$ である。

き裂進展は運転圧力 25 ksi の繰り返しで起きるため、運転圧力ベースの応力拡大係数は設計圧力ベースの応力拡大係数 $K_{I_{max}}$ （表 I.3、表 I.4 及び図 I.6）に、圧力比 $25/27.5=1/1.1$ を乗じた値を使用する。

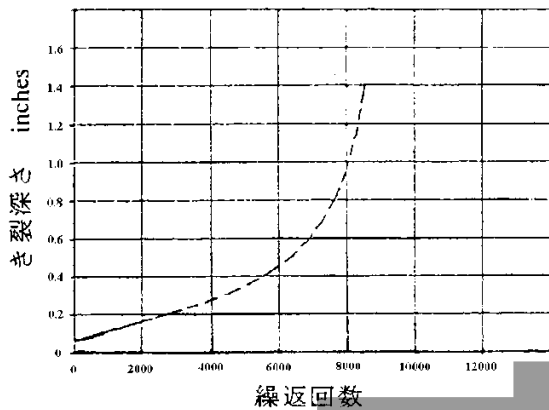
最終的に、次式が得られる。

$$da/dN = 1.95 \times 10^{-10} (K_{I_{max}}/1.1)^{3.26} \quad (I.31)$$

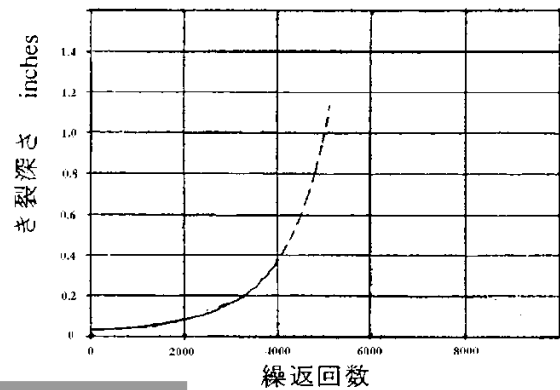
き裂が微小き裂進展量 Δa だけ進展している間は、 $K_{I_{max}}$ の値は一定と見なすことができるため、き裂進展量 Δa に費やされる繰り返し回数 ΔN は、次式で表される。

$$\Delta N = \Delta a / [1.95 \times 10^{-10} (K_{I_{max}}/1.1)^{3.26}] \quad (I.32)$$

表 I.3 又は表 I.4 に基づき、式(I.32)を積分することによりき裂進展量と繰返し回数の関係が得られる。得られたき裂進展曲線を図 I.7 及び図 I.8 に示す。



図I.7 ねじ底部のき裂進展曲線



図I.8 アンダーカット部のき裂進展曲線

I.3.7 限界き裂深さ a_c の計算

$K_I=K_{Ic}$ となるき裂深さ a_c を求める場合には、応力拡大係数 K_I は、式(I.20)ではなく、塑性域補正を考慮した次式を使用する必要がある。

$$K_I = F\sqrt{\pi a} / \sqrt{1 - (F/S_y)^2 / 6} \quad \text{-----} \quad (\text{I.33})$$

ここで、 S_y 、 K_I 、 F 及び a は、次による。

S_y : 運転温度における材料の降伏点又は0.2%耐力の設定値

K_I, F, a : I.3.6 参照

I.3.8 許容繰返し回数の決定

許容繰返し回数 N_a は、本体の 8.2 j)（許容繰返し回数 N_a の決定（手順 10））に基づき、次式により求める。

$$N_a = \min [N_c/2, N_q] \quad \text{-----} \quad (\text{I.33})$$

ここで、 N_c 及び N_q は、次による。

N_c : き裂が限界き裂深さ a_c に達する場合の繰返し回数

N_q : き裂が限界き裂深さの1/4に達する場合の繰返し回数

ねじ底部とアンダーカット部の許容繰返し回数 N_a は、表 I.5 のようになる。

表I.5 許容繰返し回数 N_a

	ねじ底部	アンダーカット部
N_c	8,569回	5,124回
$N_c/2$	4,285回	2,562回
N_q	5,000回	3,700回
N_a	4,285回	2,560回

図 I.4 によれば、ねじ底部の方がアンダーカット部よりも表面応力は高いが、き裂進展解析ではねじ底部の方が許容繰返し回数は大きくなる。これは、表面近くで応力が急に減少する応力分布に起因する。

I.4 応力勾配が急な場合のき裂進展解析

I.4.1 緒言

I.2.2 及び I.2.4 に示すタイプ B 及びタイプ D のように、円筒胴の穴部、ふたと円筒胴コーナー接続部等の部位で、応力集中によりき裂進展方向の応力分布が急に変化する（応力勾配が急な）場合には、すべての位置（距離） x にわたる応力分布を一つの 3 次式で正確に近似できない。

このような場合は、タイプ C (I.2.3 参照) と同様に、次の区間分割法によりき裂進展解析を行うことができる。

I.4.2 応力分布の区間分割

応力分布の区間分割は、次の a) 及び b) による。

- 応力解析（有限要素法等）により応力分布を求める。
- a) で求めた応力分布がすべての位置（距離） x にわたる一つの 3 次式で正確に近似できない場合は、図 I.9 a) に示すように応力分布を複数の区間に分けて、区間毎に 3 次式で近似する。

I.4.3 区間境界点における応力拡大係数の不連続の調整

区間境界点における応力拡大係数の不連続を調整する方法は、次の a) ～ d) による。

- 応力拡大係数 K_I は、本体 8.2 e)（応力分布の多項式近似（手順 5））及び f)（応力拡大係数 K_I の計算（手順 6））により、区間毎に応力分布の近似式を用いて計算する（タイプ B については I.2.2 を、タイプ D については I.2.4 を参照）。
- 区間毎に応力分布の 3 次式近似を行うため、それぞれの 3 次式の係数 $A'_0 \sim A'_3$ が異なる。
したがって、区間境界における応力拡大係数は、前の区間の値と後の区間の値が異なるので、二番目の区間以降の a) で求めた応力拡大係数を、次の式(I.34)及び式(I.35)によって調整する（図 I.9 b) 参照）。

$$\Delta K_{li} = K_{li} - K'_{li} \quad \text{-----} \quad (I.34)$$

ここで、 K_{li} 、 K'_{li} 及び ΔK_{li} は、次による。

K_{li} : 区間境界*i*における前の区間の応力分布近似式に基づく応力拡大係数 (MPa√m)

K'_{li} : 区間境界*i*における後の区間の応力分布近似式に基づく応力拡大係数 (MPa√m)

ΔK_{li} : 区間境界*i*における応力拡大係数の差 (MPa√m)

$$K_{Icorr} = K_{In} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta K_{li} \quad \text{-----} \quad (I.35)$$

ここで、 K_{In} 及び K_{Icorr} は、次による。

K_{In} : *n*番目の区間の応力分布近似式に基づく応力拡大係数 (MPa√m)

K_{Icorr} : *n*番目の区間の修正応力拡大係数 (MPa√m)

- c) き裂進展解析において前の区間から次の区間へ移行する場合には、前の区間の最終点（区間境界）で到達したき裂深さ及びアスペクト比を、次の区間の初期き裂深さ及び初期アスペクト比として、b)による調整した応力拡大係数を用いてき裂進展解析を行う。
- d) 区間分割法による場合のb)による応力拡大係数の調整は、き裂最深点及びき裂表面点の両方について行う。

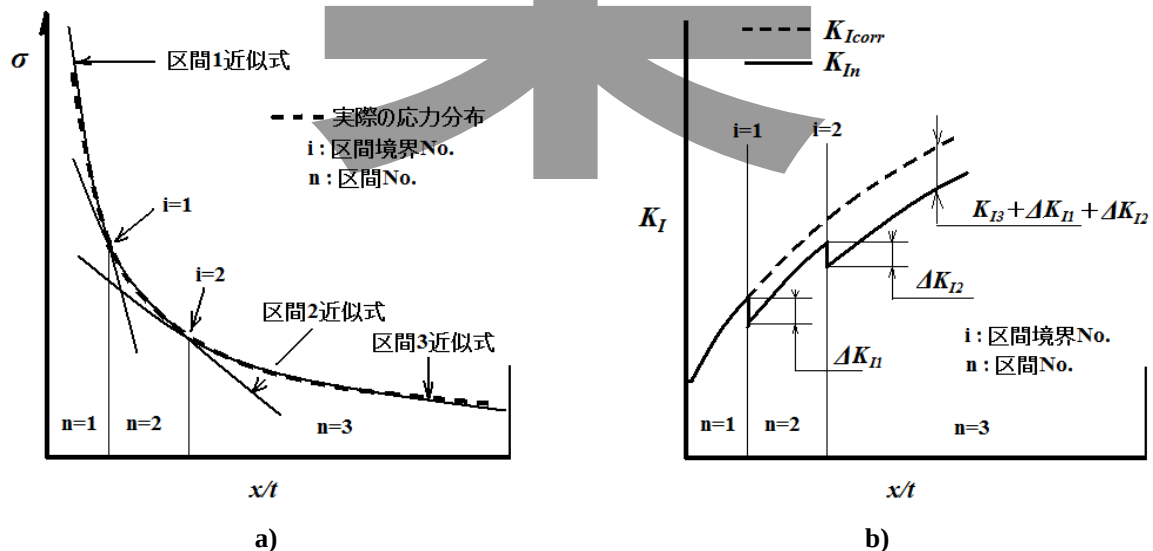


図 I.9 区間分割法によるき裂進展解析[†]

案

附属書J（参考）耐圧部の材料の破壊靱性

J.1 適用範囲

超高压ガス設備の耐圧部の材料に対して本体の **7**（破裂前漏洩の解析）及び **8**（き裂進展解析）による破壊力学評価を行う場合には、評価を行う部材の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} が必要となる。

この附属書では、破壊力学評価に使用する K_{Ic} の確認試験を行う場合の要求について記載する。

J.2 一般事項

K_{Ic} の確認試験を行う場合の要求の一般事項は、次の **a)～e)** による。

- a) 破壊力学評価に使用する K_{Ic} については、本体の **8.2 a)**（破壊靱性 K_{Ic} の決定（手順 1））に示す適切な方法によりそれが妥当であることを証明する。
- b) K_{Ic} の妥当性を証明するために、**J.3** に示す試験方法のうちでいずれの試験方法を適用したかを、またその試験方法より得られた結果から K_{Ic} を求めるために使用した換算式を明確にする。
- c) K_{Ic} の確認試験における試験片の数は、規定がある場合は関連の試験規格又は試験基準によるが（**J.3** 参照）、規定がない場合は少なくとも試験片の数 3 個以上に対して行う。
- d) K_{Ic} の確認試験における試験片の採取方位は、試験片のき裂進展方向が、本体の **8**（き裂進展解析）に従って行われた破壊力学解析で予測されるき裂進展方向と同じとなるようにする。
- e) K_{Ic} の確認試験における試験温度は、要求がある場合の試験温度を含め、最低設計金属温度又は 20℃のいずれか低い温度以下（衝撃試験温度に同じか、又はそれよりも低い温度）で実施する。

J.3 K_{Ic} の確認試験

K_{Ic} を確認するための試験には、次の **a)～d)** の試験がある。

a) CVN 衝撃試験

耐圧部の材料に要求される衝撃試験は、本体の **4.5**（機械試験の種類、試験片形状及び採取位置）、**4.4.3**（衝撃試験）及び **4.4.4**（要求吸収エネルギー値）による。

K_{Ic} を確認するための CVN（シャルピー V ノッチ）衝撃試験においては、要求される K_{Ic} を満足させるために、本体の **4.4.4**（要求吸収エネルギー値）に規定する値より大きい吸収エネルギーを要求できる。ただし、この場合には試験片 3 個の平均吸収エネルギーを用いて K_{Ic} を確認する。

なお、CVN と K_{Ic} の換算式は **J.5 a)** による。

b) CTOD 破壊靱性試験

CTOD（き裂先端開口変位）試験を行い、得られた CTOD の値から耐圧部の材料に要求される K_{Ic} の値を確認することができる。CTOD 試験を行う場合は **ASTM E1290** による。

なお、CTOD と K_{Ic} の換算式は **J.5 b)** による。

c) J_{Ic} 破壊靱性試験

J_{Ic} （弾塑性破壊靱性）試験を行い、得られた J_{Ic} の値から耐圧部の材料に要求される K_{Ic} の値を確認することができる。 J_{Ic} 試験を行う場合は **ASTM E813** 又は日本機械学会基準「弾塑性破壊靱

性 J_{IC} 試験方法」S001による。

なお、 J_{IC} と K_{IC} の換算式は J.5 c) による。

d) K_{IC} 破壊靱性試験

耐圧部の材料に要求される K_{IC} の値を確認するために、 K_{IC} （平面ひずみ破壊靱性）試験により直接 K_{IC} の値を求めることができる。 K_{IC} 試験を行う場合は ASTM E399 又は JIS G 0564（又は ISO 12737）による。

J.4 K_{IC} の確認試験結果

J.3 で得られた K_{IC} の平均値 (CVN 衝撃試験, CTOD 破壊靱性試験及び J_{IC} 破壊靱性試験は換算値) は、評価に使用する K_{IC} の値以上でなければならない。

なお、試験装置の故障、試験片の不適切な加工等により正常な試験結果が得られなかった場合の再試験については、規定がある場合はその規定によるが、規定が無い場合には当事者間の協議による。

J.5 破壊靱性の換算式

K_{IC} 破壊靱性試験以外の破壊靱性試験 (CVN 衝撃試験, CTOD 破壊靱性試験又は J_{IC} 破壊靱性試験) より得られた結果から K_{IC} の値を確認する場合の換算式は次の a)～c) による。

a) CVN と K_{IC} の換算式

CVN と K_{IC} の換算式は次による。

- 1) 本体の 8.2 a)（破壊靱性 K_{IC} の決定（手順 1））の 1)②の K_{IC} -CVN 換算式を用いる。
- 2) 最低設計金属温度が使用する材料の上部棚領域にある場合には、次の式を使用することができる。

$$\left(K_{IC}/S_y\right)^2 = 0.64(CVN/S_y - 0.01) \quad \text{-----} \quad (J.1)$$

ここで、 S_y 、CVN 及び K_{IC} は、次による。

S_y : 最低設計金属温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)

CVN : 吸収エネルギー (J)

K_{IC} : 平面ひずみ破壊靱性 (MPa√m)

なお、上記による他、妥当性を示すことができれば他の換算式でもよい。また、本体の 4.4.4（要求吸収エネルギー値）に規定する CVN の値を用いる場合は、3 個の平均値とする。

b) CTOD と K_{IC} の換算式

CTOD と K_{IC} の換算式は次による。

$$K_{Ic} = \sqrt{(CTOD)ES_y} \quad \text{-----} \quad \text{(J.2)}$$

ここで、 S_y 、 $CTOD$ 及び E は、次による。

S_y : 最低設計金属温度における材料の降伏点又は 0.2%耐力の設定値 (N/mm²)
 $CTOD$: き裂先端開口変位 (m)
 E : 縦弾性係数 (N/mm²)

c) J_{Ic} と K_{Ic} の換算式

J_{Ic} と K_{Ic} の換算式は次の 1) 及び 2) による。

1) 平面応力条件の場合

$$K_{Ic} = \sqrt{EJ_{Ic}} \quad \text{-----} \quad \text{(J.3)}$$

2) 平面ひずみ条件の場合

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{EJ_{Ic}}{(1-\nu^2)}} \quad \text{-----} \quad \text{(J.4)}$$

ここで、 J_{Ic} 、 E 及び ν は、次による。

J_{Ic} : 弾塑性破壊靱性 (kJ/m²)
 E : 縦弾性係数 (GPa)
 ν : ポアソン比

案

附属書 K（参考） 単肉円筒胴の周方向応力の半径方向分布の近似

K.1 適用範囲

本体の 7（破裂前漏洩の解析）及び 8（き裂進展解析）により破壊力学評価を行う場合の応力拡大係数の計算においては、限界き裂深さに至るまでの応力分布の多項式近似が必要となる。

本体の 8.2 e)（応力分布の多項式近似（手順 5））及び f)（応力拡大係数 K_I の計算（手順 6））のなお書きには、単肉円筒胴で圧力による周方向応力の半径方向分布の場合の内外径比 K の範囲を $1.2 \leq K \leq 3$ に限定した近似式を規定している。

この附属書では、上記の場合で、内外径比の制限を付けていない（K.3 a)参照）圧力による応力分布の一般化した多項式近似について記載する。

K.2 多項式近似の一般式

本体の 8.2 e)（応力分布の多項式近似（手順 5））に示す応力分布の多項式近似の一般式を再録する。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{K.1})$$

ここで、 σ 、 a 及び x は、次による。

σ : 応力分布

a : き裂深さ

x : 内面からの距離 ($0 \leq x \leq a$)

き裂深さ a の増大に伴い近似式を設定し直し、係数 $A_0 \sim A_3$ の値を決定し直す。

本体の 8.2 f)（応力拡大係数 K_I の計算（手順 6））に示す応力拡大係数の基本式を再録する。

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\pi a / Q} \quad \text{-----} \quad (\text{K.2})$$

ここで、 K_I 、 A_p 、 Q 、 $A_0 \sim A_3$ 、 $G_0 \sim G_3$ 及び a は、次による。

K_I : 表面き裂の応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

A_p : き裂面に作用する圧力 (MPa)

Q : き裂形状パラメータで、次による。

アスペクト比 a/l の値は、き裂の進展に伴い変化させる。

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65}$$

$A_0 \sim A_3$: 本体の 8.2 e)（応力分布の多項式近似（手順 5））で多項式で近似して得られた係数

$G_0 \sim G_3$: 自由表面補正係数で、き裂の最深点の場合と表面点の場合について、 a/l 及び a/t の関数として附属書 D に示す。ただし、 $0 \leq a/l \leq 0.5$ である。

a : き裂深さ (m)

l : き裂長さ (=2 c) (m)
 c : き裂の半長 (m)

K.3 別法による多項式近似

本体の 8.2 e) (応力分布の多項式近似 (手順 5)) のなお書きに示す応力分布の多項式近似を再録する。K.2 に示すとおり、一般式による場合はき裂深さ a の増大に伴い係数 $A_0 \sim A_3$ の値を決定し直す必要があるが、なお書きに示す方法による場合は、次に示す a を固定する方法により、全ての位置 (距離) x にわたって係数 A'_0, A'_1, A'_2, A'_3 の値を固定できる。なお、ここでは、 $a=t$ の場合を示す。

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{K.3})$$

ここで、 t 及び x は、次による。

t : 肉厚
 x : 内面からの距離 ($0 \leq x \leq t$)

a) 圧力による応力分布の場合

単肉円筒胴で圧力による応力分布の場合の式(K.3)の係数 $A'_0 \sim A'_3$ 及び式(K.1)の $A_0 \sim A_3$ は、次による。

$$\frac{A'_0}{P} = 16b_1 - 120b_2 + 240b_3 - 140b_4 \quad \text{-----} \quad (\text{K.4})$$

$$\frac{A'_1}{P} = -120b_1 + 1200b_2 - 2700b_3 + 1680b_4 \quad \text{-----} \quad (\text{K.5})$$

$$\frac{A'_2}{P} = 240b_1 - 2700b_2 + 6480b_3 - 4200b_4 \quad \text{-----} \quad (\text{K.6})$$

$$\frac{A'_3}{P} = -140b_1 + 1680b_2 - 4200b_3 + 2800b_4 \quad \text{-----} \quad (\text{K.7})$$

ここで、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 P 及び K は、次による。

$$b_1 = \frac{1}{K-1} \quad \text{-----} \quad (\text{K.8})$$

$$b_2 = \frac{1}{2(K^2-1)} + \frac{K}{(K^2-1)(K-1)^2} [K \ln K - (K-1)] \quad \text{-----} \quad (\text{K.9})$$

$$b_3 = \frac{1}{3(K^2-1)} + \frac{K}{(K^2-1)(K-1)^2} \left[K - \frac{2K}{K-1} \ln K + 1 \right] \quad \text{-----} \quad (\text{K.10})$$

$$b_4 = \frac{1}{4(K^2-1)} + \frac{K}{(K^2-1)(K-1)^2} \left[\frac{K}{2} - \frac{2K+1}{K-1} + \frac{3K}{(K-1)^2} \ln K \right] \quad \text{-----} \quad (\text{K.11})$$

P : 圧力 (MPa)

K : 内外径比（外径／内径）

係数 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 への変換は、次による。

$$A_0 = A'_0 \quad \text{-----} \quad (\text{K.12})$$

$$A_1 = A'_1(a/t) \quad \text{-----} \quad (\text{K.13})$$

$$A_2 = A'_2(a/t)^2 \quad \text{-----} \quad (\text{K.14})$$

$$A_3 = A'_3(a/t)^3 \quad \text{-----} \quad (\text{K.15})$$

上記の多項式近似は、内外径比が大きい場合には正解の応力分布とのずれが大きくなる。この場合の応力拡大係数 K_I の誤差は、評価点が $a=0.8t$ と深い破裂前漏洩の解析に比べ、き裂進展解析を行う場合は誤差が大きくなる。したがって、正解の応力分布とのずれの大きさによっては、次の **c)** の方法の使用や新たな多項式の設定等の検討が必要である。

b) 圧力に熱負荷、その他の荷重を考慮する場合

耐圧部の圧力に熱負荷、その他の荷重が作用する場合には、すべての負荷に対する応力分布を求め、適切な方法により式(K.3)による近似を行い、係数 $A'_0 \sim A'_3$ を決定する。

なお、式(K.3)による多項式近似が一つの式で精度よく近似できない場合は、次の **c)** による。

c) 交差穴部、ねじ底部等の応力集中を考慮する場合

交差穴部、ねじ底部等の部位で応力集中により急な応力勾配をもつ応力分布の場合は、式(K.3)による多項式近似が一つの式で精度よく近似できない。この場合は、本体の **8.5**（応力分布が一つの多項式で近似できない場合のき裂進展解析）及び**附属書 I** の **I.3** による。

案

附属書 L（参考）応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析例

L.1 適用範囲

本体の **8**（き裂進展解析）の **8.2**（応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析）では、応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析及び許容繰返し回数の決定の方法が規定されている。

この附属書では、円筒胴が複数の異なる圧力サイクルで運転される（応力サイクルが複数ある）場合について、円筒胴内面の軸方向表面き裂に対する疲労き裂進展解析例を示す。

L.2 解析条件

応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析の解析条件は、次の①～⑧による。

- ① 設計圧力 P : 250 MPa
設計温度 : 150℃
運転温度 : 100℃
- ② 材料 : 低合金鋼
引張強さ S_u : 990 N/mm² (室温)、977 N/mm² (100℃)
降伏点 S_y : 890 N/mm² (室温)、846 N/mm² (100℃)
- ③ 円筒胴寸法
胴外径 : 100mm, 胴内径 : 40mm, 肉厚 : 30mm
- ④ 材料の吸収エネルギー : 42 J
- ⑤ 運転サイクルの圧力範囲
P1 サイクル : 0～200 MPa
P2 サイクル : 0～172 MPa
- ⑥ 使用繰返し回数
P1 サイクル : 3000 回
P2 サイクル : 6000 回
- ⑦ 初期き裂深さ : 1.1 mm
- ⑧ き裂形状（アスペクト比） : 1/3

L.3 き裂進展解析の方法

応力サイクルが複数ある場合には、それぞれの応力サイクルの使用繰返し回数（例：P1 サイクル 3000 回、P2 サイクル 6000 回）が負荷される場合のき裂進展解析を、**附属書 I**（計算例については**附属書 G** の **G.5** 参照）に従って行う。

この場合、それぞれの応力サイクルの負荷の順序が時間の経過に対して不規則であっても、同じ応力範囲のサイクルがまとめて負荷される運転（例：P1 サイクル 3000 回の運転後、P2 サイクル 6000 回の運転、又はその逆の P2 サイクル 6000 回の運転後、P1 サイクル 3000 回の運転）として、き裂進展解析を行う。

なお、後のサイクルのき裂進展解析に使用する初期のき裂深さ及びアスペクト比は、前のサイクルのき裂進展解析で得られた最終のき裂深さ及びアスペクト比を使用する。

L.4 き裂進展解析の手順

応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析の手順は、次の a)～e)による。

a) 解析条件の設定（手順 1）

L.2 の解析条件に加えて、材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} 、疲労き裂進展速度式等の解析条件を設定する。

b) 最大応力条件に基づく限界き裂深さ a_c の設定（手順 2）

複数の応力サイクルのうちで最大の応力となる条件を用いて円筒胴内面の軸方向表面き裂に対するき裂進展解析を行い、 $K_I=K_{Ic}$ になる場合のき裂深さを求める。そのき裂深さと肉厚の 0.8 倍のき裂深さのいずれか小さい方を限界き裂深さ a_c とする。

c) 複数の応力サイクルの使用繰返し回数負荷後の到達き裂深さ a_n の計算（手順 3）

L.3 のき裂進展解析の方法及び L.4 a) の手順 1 の解析条件に従って円筒胴内面の軸方向表面き裂に対してき裂進展解析を行い、複数の応力サイクルの使用繰返し回数を負荷した場合に到達した最終き裂深さ a_n を求める。

d) 複数の応力サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数を負荷した場合の到達き裂深さ a_{2n} の計算（手順 4）

L.4 c) の手順 3 と同様に、複数の応力サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数（各応力サイクルの回数を 2 倍）を負荷した場合に到達した最終き裂深さ a_{2n} を求める。

e) 使用繰返し回数の評価（手順 5）

使用繰返し回数は下記の両式を満足しなければならない。

$$a_n \leq a_c/4 \quad \text{-----} \quad \text{(L.1)}$$

$$a_{2n} \leq a_c \quad \text{-----} \quad \text{(L.2)}$$

上記を満足しなければ、運転条件（運転圧力、使用繰返し回数等）変更等の対応策が必要となる。

L.5 解析例

応力サイクルが複数ある場合のき裂進展解析の解析例及び評価例は、次の **a)** 及び **b)** による。

a) き裂進展解析例

L.2 の解析条件に基づき、**L.3** の方法、**L.4** の手順に従ってき裂進展解析を行った結果を次に示す。

1) 最大応力条件に基づく限界き裂深さ a_c の設定（手順 2）

複数の応力サイクルのうちで最大の応力となる条件は P1 サイクルの 200MPa であり、この条件でき裂進展解析を行うと、き裂表面点で $K_I=K_{Ic}$ に達し、この場合のき裂深さを求めると 9.17mm となる。このき裂深さは $0.8t$ より小さいので限界き裂深さ a_c は 9.17mm となる。

なお、 K_{Ic} の値は、本体の **8.2 a)**（破壊靱性 K_{Ic} の決定（手順 1）**1)②**）の相関式を用いて吸収エネルギーの値より求めると、 $59.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

2) 複数の応力サイクルの使用繰返し回数負荷後の到達き裂深さ a_n の計算（手順 3）

P1 サイクル及び P2 サイクルの使用繰返し回数（P1 サイクル 3000 回、P2 サイクル 6000 回）を負荷した場合にき裂進展解析を行った結果を、**表 L.1** に示す。

3) 複数の応力サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数を負荷した場合の到達き裂深さ a_{2n} の計算（手順 4）

P1 サイクル及び P2 サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数（P1 サイクル 6000 回、P2 サイクル 12000 回）を負荷した場合にき裂進展解析を行った結果を、**表 L.2** に示す。

b) 評価例

a)1) より、限界き裂深さ a_c は 9.17mm である。

表 L.1 の結果から、複数の応力サイクルの使用繰返し回数で到達した最終き裂深さは $a_n=1.88 \text{ mm}$ であり、このき裂深さ a_n は限界き裂深さ a_c の $1/4$ である 2.29mm より小さい。

また、**表 L.2** の結果から、複数の応力サイクルの使用繰返し回数の 2 倍の回数で到達した最終き裂深さは $a_{2n}=3.27 \text{ mm}$ であり、限界き裂深さ a_c より小さい。

したがって、 $a_n \leq a_c/4$ ($1.88\text{mm} < 2.29\text{mm}$) 及び $a_{2n} \leq a_c$ ($3.27\text{mm} < 9.17\text{mm}$) が成立するので、使用繰返し回数は疲労破壊に対して十分な裕度がある。

表 L.1 き裂進展解析結果

(単位 mm)

P1 サイクル→P2 サイクル			P2 サイクル→P1 サイクル		
運転サイクル	き裂進展回数	き裂進展深さ	運転サイクル	き裂進展回数	き裂進展深さ
P1 サイクル	0	1.100	P2 サイクル	0	1.100
	600	1.154		1000	1.155
	1200	1.211		2000	1.213
	1800	1.270		3000	1.273
	2400	1.332		4000	1.337
	3000	1.397		5000	1.404
P2 サイクル	0	1.397	P1 サイクル	6000	1.474
	1000	1.467		0	1.474
	2000	1.540		600	1.546
	3000	1.618		1200	1.623
	4000	1.700		1800	1.703
	5000	1.787		2400	1.789
	6000	1.880		3000	1.880

表 L.2 き裂進展解析結果（2 倍の回数）

(単位 mm)

P1 サイクル→P2 サイクル			P2 サイクル→P1 サイクル		
運転サイクル	き裂進展回数	き裂進展深さ	運転サイクル	き裂進展回数	き裂進展深さ
P1 サイクル	0	1.100	P2 サイクル	0	1.100
	3000	1.379		3000	1.264
	6000	1.742		6000	1.456
P2 サイクル	0	1.742	P1 サイクル	12000	1.942
	3000	2.015		0	1.942
	6000	2.346		3000	2.489
	12000	3.265		6000	3.270

附属書 M（参考） 交差穴部の破裂前漏洩解析

M.1 適用範囲

本体の 8（き裂進展解析）の 8.4（その他の部位のき裂進展解析）に示すように、交差穴部のき裂進展解析は、き裂形状を 1/4 円又は半円[アスペクト比（き裂深さ／き裂長さ）=0.5]として、交差穴部の実際の応力分布に基づいて行う（附属書 I の 1.2.2（タイプ B 円筒胴の交差穴部内面のき裂）参照）。

この附属書では、附属書 I の 1.2.2 によるき裂進展解析の代わりに、超高压ガス設備の配管要素（エルボ、ティー等）の交差穴部に対する破裂前漏洩解析の簡易方法を示す。

なお、円筒胴の交差穴部に対して破裂前漏洩解析を行わない場合、及び破裂前漏洩が成立しない場合の配管要素の交差穴部のき裂進展解析は、附属書 I の 1.2.2 による。

M.2 破裂前漏洩解析の簡易方法

交差穴部の破裂前漏洩解析の簡易方法は、次の a) 及び b) による。

- a) 交差穴部にき裂を想定した場合に、き裂深さが部材の厚さ t の 0.8 倍において、次の式(M.1)及び式(M.2)の両式を満足するならば、破裂前漏洩が成立する。

$$K_I < K_{Ic} \quad \text{-----} \quad \text{(M.1)}$$

$$0.2t < (K_{Ic} / S_y)^2 \quad \text{-----} \quad \text{(M.2)}$$

ここで、 K_I 、 K_{Ic} 、 S_y 及び t は、次による。

K_I : 応力拡大係数で、本体の 8.2 f)（応力拡大係数 K_I の計算（手順 6））による。
(MPa $\sqrt{\text{m}}$)

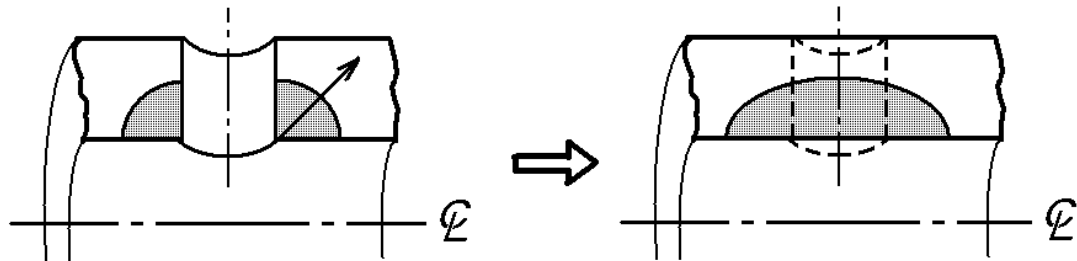
K_{Ic} : 平面ひずみ破壊靱性で、本体の 8.2 a)（破壊靱性 K_{Ic} の決定（手順 1））による。(MPa $\sqrt{\text{m}}$)

S_y : 材料の降伏点又は 0.2%耐力 (N/mm²)

t : 部材のき裂進展方向の厚さ (m)

- b) き裂深さが $0.8t$ における応力拡大係数 K_I の計算は、次の 1)～4)による。

- 1) 図 M.1 に示すように、穴のない円筒胴の軸方向表面き裂を設定する。
- 2) 部材の断面が円筒形ではなく矩形の場合は、交差穴部に設定する表面き裂が進展する方向の部材の厚さ t を定め、厚さ t を持つ円筒胴とみなして周方向応力の厚さ方向分布を求める。
- 3) 交差穴部（穴径 d ）に設定する表面き裂形状は、 $0.8t / (2 \times 0.8t + d)$ のアスペクト比（き裂深さ／き裂長さ）をもつ半楕円とする。ただし、アスペクト比は 1/3 以下とする。
- 4) 応力分布の多項式近似はき裂深さが $0.8t$ までを一つの式で求める（8.2 e）（応力分布の多項式近似（手順 5））及び f)（応力拡大係数 K_I の計算（手順 6））参照）。



a) 1/4 円き裂

b) 半楕円き裂

図 M.1 破裂前漏洩解析に用いる穴のない円筒胴の軸方向表面き裂

案