

添付書類 8-3 トラニオンの強度に関する計算書

添付書類 8-3-1 トラニオンの応力解析の方針

目次

| | |
|-----------------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 2. 適用基準 | 2 |
| 3. 記号 | 3 |
| 4. 設計条件 | 7 |
| 4.1 基本条件 | 7 |
| 4.2 設計事象 | 9 |
| 4.3 荷重の種類とその組合せ | 10 |
| 5. 評価条件 | 11 |
| 5.1 評価対象とする事象 | 11 |
| 5.2 形状及び寸法 | 12 |
| 5.3 物性値 | 12 |
| 5.4 許容応力 | 12 |
| 6. 応力評価の手順 | 13 |
| 6.1 評価手順の概要 | 13 |
| 6.2 荷重条件の選定 | 14 |
| 6.3 応力計算と評価 | 14 |
| 6.3.1 応力計算の方法 | 14 |
| 6.3.2 応力の評価 | 14 |
| 6.3.3 数値の丸め方 | 17 |
| 7. 引用文献 | 18 |

図表目次

| | | |
|---------|--|----|
| 第 3-1 表 | 応力評価に関する記号..... | 3 |
| 第 4-1 表 | トラニオンに関する応力計算の基本条件..... | 7 |
| 第 4-2 表 | 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象..... | 9 |
| 第 4-3 表 | トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ..... | 10 |
| 第 5-1 表 | 代表事象..... | 11 |
| 第 5-2 表 | 応力計算に使用する材料の物性値及び最高使用温度に対応する機械的強度..... | 12 |
| 第 6-1 表 | トラニオン用材料の許容応力値..... | 15 |
| 第 6-2 表 | 数値の丸め方一覧表..... | 17 |
| 第 4-1 図 | トラニオン構造..... | 8 |
| 第 6-1 図 | トラニオンの応力評価フロー..... | 13 |

1. 概要

本書は、MSF-21P 型のトラニオンに関する応力評価の方針を述べるものである。

2. 適用基準

トラニオンの強度評価については、使用済燃料貯蔵施設規格（金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007）（日本機械学会 2007 年 12 月）（以下「構造規格」という。）を適用する。

3. 記号

本書及び「添付書類 8-3-2 トラニオンの応力計算書」（以下「応力計算書」という。）において、第 3-1 表に示す応力評価に関する記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

第 3-1 表 応力評価に関する記号 (1/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------|-------------------------------------|---------------|
| A_1 | 評価位置①の断面積 | mm^2 |
| A_2 | 評価位置②の断面積 | mm^2 |
| A_3 | 評価位置③の断面積 | mm^2 |
| A_4 | 評価位置④の断面積 | mm^2 |
| A_5 | 評価位置⑤の断面積 | mm^2 |
| a_1 | 地震時の回転支点 O_c から下部トラニオン固縛部端部までの距離 | mm |
| a_2 | 地震時の回転支点 O_c から MSF-21P 型の中心までの距離 | mm |
| C_H | 水平方向設計震度 | — |
| C_V | 鉛直方向設計震度 | — |
| D_{i1} | 評価位置①におけるトラニオン内径 | mm |
| D_{i2} | 評価位置②におけるトラニオン内径 | mm |
| D_{i3} | 評価位置③におけるトラニオン内径 | mm |
| D_{i4} | 評価位置④におけるトラニオン内径 | mm |
| D_{i5} | 評価位置⑤におけるトラニオン内径 | mm |
| D_{o1} | 評価位置①におけるトラニオン外径 | mm |
| D_{o2} | 評価位置②におけるトラニオン外径 | mm |
| D_{o3} | 評価位置③におけるトラニオン外径 | mm |
| D_{o4} | 評価位置④におけるトラニオン外径 | mm |
| D_{o5} | 評価位置⑤におけるトラニオン外径 | mm |
| E | 上部トラニオンの縦弾性係数 | MPa |
| E_0 | ASME に示されている縦弾性係数 | MPa |
| F_{m1} | 貯蔵時において下部トラニオンに作用する荷重 | N |
| F_{m2} | 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 | N |
| F_{m3} | たて起こし架台への衝突時において下部トラニオンに作用する荷重 | N |

第 3-1 表 応力評価に関する記号 (2/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------|--|---------|
| F_{m4} | 地震力により下部トラニオンに作用する荷重 | N |
| F_1 | 下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 | N |
| f_t | 許容引張応力 | MPa |
| f_s | 許容せん断応力 | MPa |
| f_c | 許容圧縮応力 | MPa |
| f_b | 許容曲げ応力 | MPa |
| f_p | 許容支圧応力 | MPa |
| f_t^* | 許容引張応力 (注1) | MPa |
| f_s^* | 許容せん断応力 (注1) | MPa |
| f_c^* | 許容圧縮応力 (注1) | MPa |
| f_b^* | 許容曲げ応力 (注1) | MPa |
| f_p^* | 許容支圧応力 (注1) | MPa |
| g | 重力加速度 | m/s^2 |
| G_1 | 水平方向加速度 | m/s^2 |
| G_{22} | 鉛直方向加速度 (吊上げ時) | m/s^2 |
| G_{23} | 鉛直方向加速度 (たて起こし架台への衝突時) | m/s^2 |
| G_{25} | 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | m/s^2 |
| h_{CG} | MSF-21P 型の底面から重心までの高さ | mm |
| K_t | 評価位置 (段付き部) の応力集中係数 | — |
| K_r | ASME に示されている表面粗さ係数 | — |
| L_1 | 評価位置①と荷重作用位置との距離 | mm |
| L_2 | 評価位置②と荷重作用位置との距離 | mm |
| L_3 | 評価位置③と荷重作用位置との距離 | mm |
| L_{41} | 評価位置④と荷重作用位置との距離 (貯蔵時又は貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | mm |
| L_{42} | 評価位置④と荷重作用位置との距離 (たて起こし架台への衝突時) | mm |
| L_{51} | 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (貯蔵時又は貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | mm |
| L_{52} | 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (たて起こし架台への衝突時) | mm |

(注1) f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際に「構造規格」 MCD-3311.1 (1) a. の本文中 S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値

第 3-1 表 応力評価に関する記号 (3/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------------|---|-----------------|
| M_1 | 評価位置①の曲げモーメント | N・mm |
| M_2 | 評価位置②の曲げモーメント | N・mm |
| M_3 | 評価位置③の曲げモーメント | N・mm |
| M_4 | 評価位置④の曲げモーメント | N・mm |
| M_5 | 評価位置⑤の曲げモーメント | N・mm |
| m_1 | 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 | Kg |
| m_2 | 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 | Kg |
| N_a | 許容繰返し回数 | — |
| N_c | 吊上げ事象の繰返し回数 | — |
| S | 応力強さ | MPa |
| S_d^* | 弾性設計用地震動 S_d に相当する地震力又は静的地震力のいずれか大きい方 | — |
| S_s | 基準地震動 S_s に相当する地震力 | — |
| S_y | 設計降伏点 | MPa |
| S_u | 設計引張強さ | MPa |
| S_d | 繰返しピーク応力強さ | MPa |
| U_f | 疲労累積係数 | — |
| Z_1 | 評価位置①の断面係数 | mm ³ |
| Z_2 | 評価位置②の断面係数 | mm ³ |
| Z_3 | 評価位置③の断面係数 | mm ³ |
| Z_4 | 評価位置④の断面係数 | mm ³ |
| Z_5 | 評価位置⑤の断面係数 | mm ³ |
| σ | トラニオンの評価断面に垂直な方向の応力 | MPa |
| σ_{b1} | 評価位置①に発生する曲げ応力 | MPa |
| σ_{b2} | 評価位置②に発生する曲げ応力 | MPa |
| σ_{b3} | 評価位置③に発生する曲げ応力 | MPa |
| σ_{b4} | 評価位置④に発生する曲げ応力 | MPa |
| σ_{b5} | 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | MPa |
| σ_{b41} | 評価位置④に発生する曲げ応力 (一次応力) | MPa |
| σ_{b42} | 評価位置④に発生する曲げ応力 (一次+二次応力) | MPa |
| σ_{b51} | 評価位置⑤に発生する曲げ応力 (一次応力) | MPa |
| σ_{b52} | 評価位置⑤に発生する曲げ応力 (一次+二次応力) | MPa |

第3-1表 応力評価に関する記号 (4/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|---------------|---------------------------|-----|
| $c\sigma_b$ | トラニオンの圧縮側曲げ応力の絶対値 | MPa |
| $t\sigma_b$ | トラニオンの引張側曲げ応力の絶対値 | MPa |
| σ_c | トラニオンの圧縮応力の絶対値 | MPa |
| σ_T | トラニオンの組合せ応力 | MPa |
| σ_{T1} | 評価位置①に発生する組合せ応力 | MPa |
| σ_{T2} | 評価位置②に発生する組合せ応力 | MPa |
| σ_{T3} | 評価位置③に発生する組合せ応力 | MPa |
| σ_{T4} | 評価位置④に発生する組合せ応力 | MPa |
| σ_{T5} | 評価位置⑤に発生する組合せ応力 | MPa |
| σ_1 | トラニオンの引張応力 | MPa |
| τ | トラニオンのせん断応力 | MPa |
| τ_1 | 評価位置①に発生するせん断応力 | MPa |
| τ_2 | 評価位置②に発生するせん断応力 | MPa |
| τ_3 | 評価位置③に発生するせん断応力 | MPa |
| τ_4 | 評価位置④に発生するせん断応力 | MPa |
| τ_5 | 評価位置⑤に発生するせん断応力 | MPa |
| τ_{41} | 評価位置④に発生するせん断応力 (一次応力) | MPa |
| τ_{42} | 評価位置④に発生するせん断応力 (一次+二次応力) | MPa |
| τ_{51} | 評価位置⑤に発生するせん断応力 (一次応力) | MPa |
| τ_{52} | 評価位置⑤に発生するせん断応力 (一次+二次応力) | MPa |

4. 設計条件

トラニオンは以下の荷重条件に耐えるように設計する。

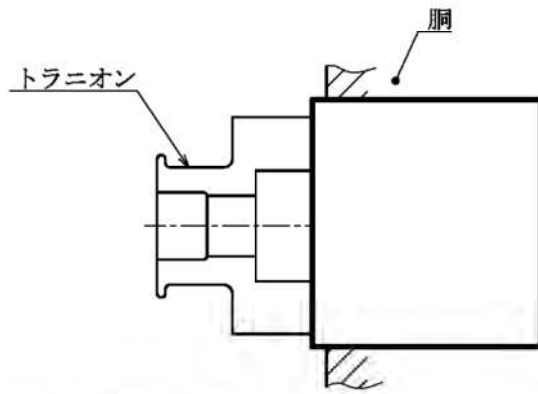
4.1 基本条件

MSF-21P 型には、上部に 2 対、下部に 2 対のトラニオンが取り付けられている。トラニオン構造を第 4-1 図に示す。また、トラニオンに関する応力計算の基本条件を第 4-1 表に示す。

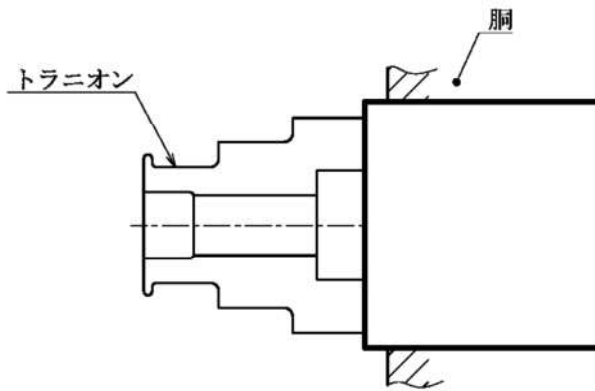
第 4-1 表 トラニオンに関する応力計算の基本条件

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| 最高使用温度 | 135 °C (注1) |
| トラニオンの材質 | 析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630 H1150) |
| 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 | 116500 kg |
| 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 | 113000 kg |

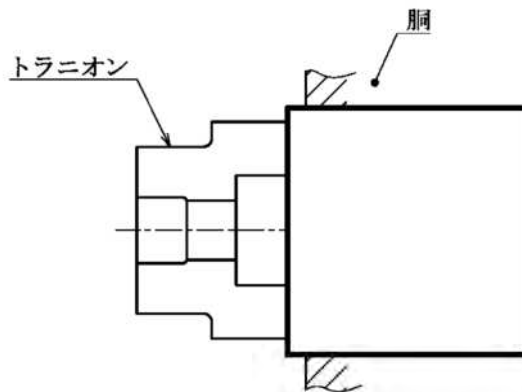
(注1) トラニオンの最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す温度を保守側に設定した値である。



(a) 上部トラニオン (0°、180°) (注1)



(b) 上部トラニオン (90°、270°) 及び
下部トラニオン (90°、270°) (注1)



(c) 下部トラニオン (0°、180°) (注1)

(注1) トラニオンは、しまり嵌めにより胴に取り付けられる。

第4-1図 トラニオン構造

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を第 4-2 表に示す。

第 4-2 表 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象

| 設計事象 | 供用状態 | 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象 ^(注1) |
|-------------|------|---|
| I | A | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵（貯蔵時） ・金属キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時） ・搬送台車による搬送（台車搬送時） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時） |
| II | B | <ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスクのたて起こし架台への衝突（たて起こし架台への衝突時） ・金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時） ・搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時） |
| $I + S_d^*$ | C | <ul style="list-style-type: none"> ・S_d^*相当地震時（貯蔵時（S_d^*相当地震力が作用する場合）） |
| $I + S_s$ | D | <ul style="list-style-type: none"> ・S_s相当地震時（貯蔵時（S_s相当地震力が作用する場合）） |

（注1）本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

第4-3表 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

| 設計事象 | 供用状態 | 評価事象 | 荷 重 | | | | | | |
|-------------|------|----------------------|-----------|------|-------|------|-------------|------------|------|
| | | | 自重による荷重 | 固縛荷重 | 吊上げ荷重 | 衝撃荷重 | 熱荷重 (注1) | しまり嵌めによる荷重 | 地震荷重 |
| I | A | 貯蔵時 | ○ | ○ | — | — | ○ | ○ | — |
| | | 吊上げ時 | — (注2) | — | ○ | — | ○ | ○ | — |
| II | B | 衝撃荷重作用時 | — (注2) | — | — | ○ | ○ | ○ | — |
| $I + S_d^*$ | C | S_d^* 相当地震力が作用する場合 | ○ | ○ | — | — | — | — | ○ |
| $I + S_s$ | D | S_s 相当地震力が作用する場合 | ○ | ○ | — | — | — | — | ○ |

(注1) 密封容器の熱膨張により生じる荷重に限る。

(注2) 本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

5. 評価条件

5.1 評価対象とする事象

4.2節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち、第5-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、応力評価を実施する。

第5-1表 代表事象

| 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 荷重条件 | 備考 |
|-------------|------|-----------------------------|---|--|-------------------------------|
| I | A | 貯蔵時 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備作業時 ・台車搬送時 | <ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 ・熱荷重 ・しまり嵌めによる荷重 | — |
| | | 吊上げ時 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・吊上げ荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：1.3 g（自重考慮） ・熱荷重 ・しまり嵌めによる荷重 | — |
| II | B | たて起こし架台への衝突時 | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵架台への衝突時 ・搬送中の急停止時 | <ul style="list-style-type: none"> ・衝撃荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：3 g（自重考慮） ・熱荷重 ・しまり嵌めによる荷重 | 荷重条件が最も厳しいのは、たて起こし架台への衝突時である。 |
| $I + S_d^*$ | C | 貯蔵時 S_d^* 相当地震力が作用する場合 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 ・地震力 水平方向：1.5 g 鉛直方向：1.0 g | — |
| $I + S_s$ | D | 貯蔵時 S_s 相当地震力が作用する場合 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 ・地震力 水平方向：1.5 g 鉛直方向：1.0 g | — |

5.2 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.3 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。応力計算に使用する物性値及び最高使用温度に対応する機械的強度を第 5-2 表に示す。

第 5-2 表 応力計算に使用する材料の物性値及び最高使用温度に対応する機械的強度

| 部 位 | 材 料 | 最高使用 温度 (°C) | 縦弾性 係数 E (MPa) | 設計 降伏点 S _y (MPa) | 設計 引張強さ S _u (MPa) |
|-------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| トラニオン | 析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630 H1150) | 135 | 187000 | 647 | 845 |

5.4 許容応力

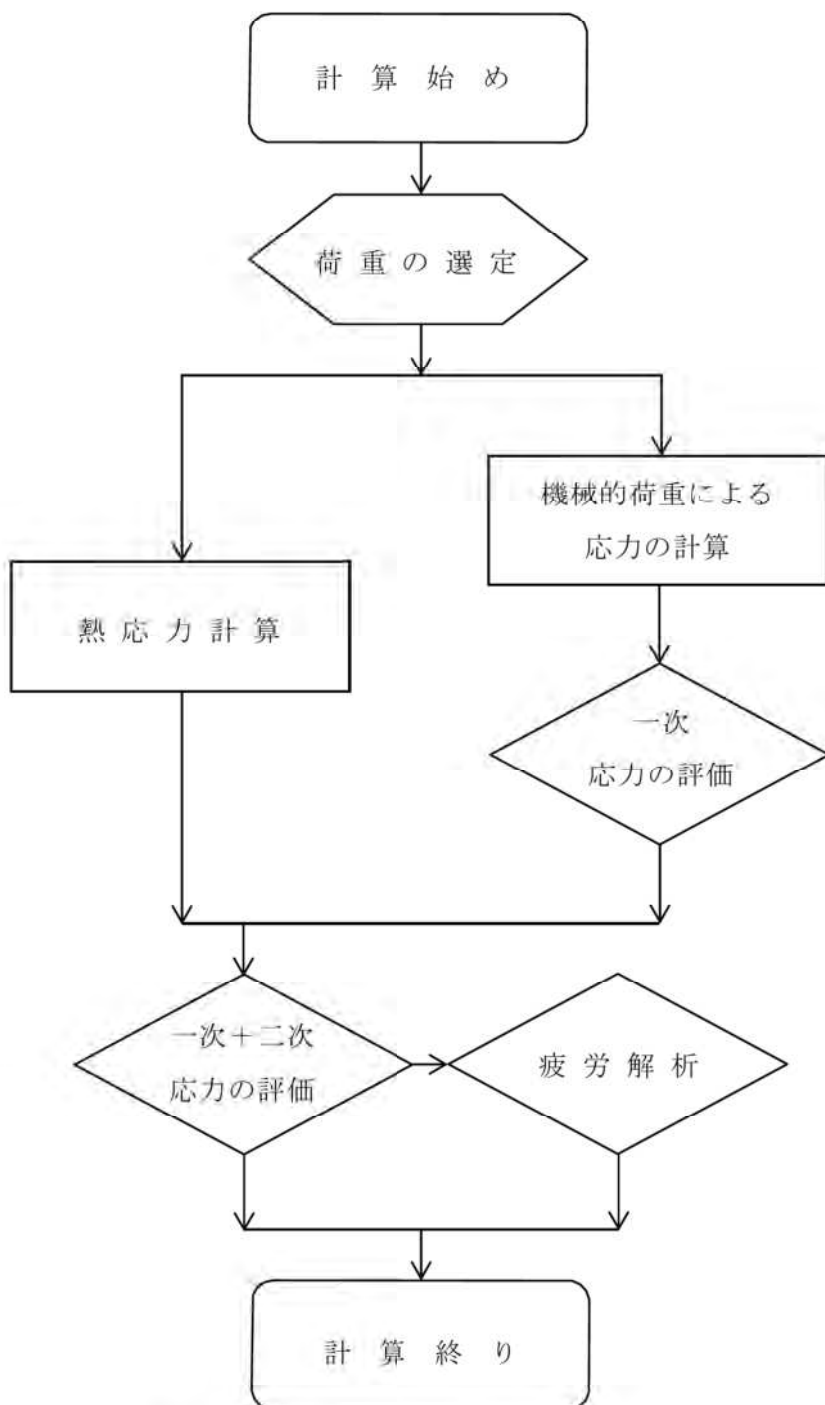
各供用状態におけるトラニオンの許容基準は、「構造規格」MCD-3300 による。許容応力は、第 5-2 表に示す最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力評価の手順

6.1 評価手順の概要

トラニオンの応力評価フローを第6-1図に示す。

トラニオンの応力評価は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。



第6-1図 トラニオンの応力評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示しているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む MSF-21P 型（吊上げ時、たて起こし架台への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

(2) 上部トラニオン 2 個には、吊上げ時において吊上げ荷重が作用する。また、下部トラニオン 2 個には、たて起こし架台への衝突時において鉛直方向加速度による荷重が作用する。下部トラニオン 4 個には、貯蔵時において地震力が作用する場合の鉛直方向荷重及び水平方向荷重が作用する。

なお、荷重作用点は荷重支持面の中央部とする。ただし、貯蔵時において地震力が作用する場合の荷重作用点は固縛部端部とする。

(3) 応力評価位置は、構造の不連続性を考慮して設定する。

6.3.2 応力の評価

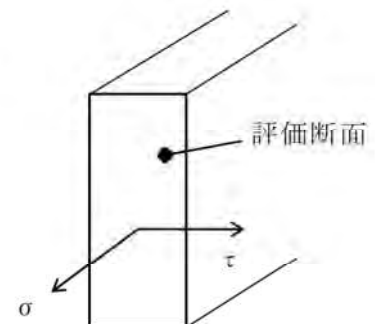
応力の計算結果は、「構造規格」MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力

トラニオン用材料の許容応力値を第 6-1 表 に示す。



(1) トラニオンの応力評価

トラニオンの応力評価は、「構造規格」MCD-3310 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力
- b. 一次+二次応力
- c. 繰返し荷重の評価

(2) ボルトの応力評価

トラニオンの構造強度部材にボルトを使用していないので、ボルトの応力評価は不要である。

第 6-1 表 トラニオン用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|----------------|---------------------|---------|-------|------------------------|
| 供用状態 A 及び B | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 394 | f_t |
| | | 圧縮応力 | — | f_c |
| | | せん断応力 | 227 | f_s |
| | | 曲げ応力 | 394 | f_b |
| | | 支圧応力 | — | f_p |
| | 一次 + 二次 応力 | 引張・圧縮応力 | — | $3 f_t$ |
| | | せん断応力 | 681 | $3 f_s$ |
| | | 曲げ応力 | 1182 | $3 f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5 f_p$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$ |

(注1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c + c \sigma_b}{f_c} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t \sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t \sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c \sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

第 6-1 表 トラニオン用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|-----------|---------------------|--------------|-------|------------------------------------|
| 供用状態 C | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 591 | $1.5 f_t$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5 f_c$ |
| | | せん断応力 | 341 | $1.5 f_s$ |
| | | 曲げ応力 | 591 | $1.5 f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5 f_p$ |
| | 一次 + 二次 応力 | 引張・圧縮応力 (注2) | — | $3 f_t$ |
| | | せん断応力 (注2) | 681 | $3 f_s$ |
| | | 曲げ応力 (注2) | 1182 | $3 f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5 f_p$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5 f_b$ 、 $1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$ |
| 供用状態 D | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 591 | $1.5 f_t^*$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5 f_c^*$ |
| | | せん断応力 | 340 | $1.5 f_s^*$ |
| | | 曲げ応力 | 591 | $1.5 f_b^*$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5 f_p^*$ |
| | 一次 + 二次 応力 | 引張・圧縮応力 (注2) | — | $3 f_t$ |
| | | せん断応力 (注2) | 681 | $3 f_s$ |
| | | 曲げ応力 (注2) | 1182 | $3 f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5 f_p^*$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5 f_b$ 、 $1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$ |

(注 1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組み合わせた応力 (σ_τ) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{1.5f_c} + \frac{c\sigma_b}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、供用状態 C の一次応力については上式による。

供用状態 D の一次応力の場合、分母の $1.5 f_c$ 、 $1.5 f_b$ 、 $1.5 f_t$ は $1.5 f_c^*$ 、 $1.5 f_b^*$ 、 $1.5 f_t^*$ とする。

(注 2) 地震力のみによる全振幅について評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を第 6-2 表に示す。

第 6-2 表 数値の丸め方一覧表

| 数値の種類 | 単位 | 処理桁 | 処理法 | 表示桁 |
|--------|------------------|------------|------|----------|
| 最高使用温度 | ℃ | — | — | 設計値 |
| 縦弾性係数 | MPa | 有効数字 4 桁目 | 四捨五入 | 有効数字 3 桁 |
| 許容応力値 | MPa | 小数点以下第 1 位 | 切捨て | 整数位 |
| 計算応力値 | MPa | 小数点以下第 1 位 | 切上げ | 整数位 |
| 長さ | mm | — | — | 設計値 |
| 加速度 | m/s ² | — | — | 設計値 |
| 面積 | mm ² | 有効数字 5 桁目 | 切捨て | 有効数字 4 桁 |
| 断面係数 | mm ³ | 有効数字 5 桁目 | 切捨て | 有効数字 4 桁 |
| 質量 | kg | — | — | 設計値 |
| 力 | N | 有効数字 5 桁目 | 切上げ | 有効数字 4 桁 |

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, Section VIII Division 3, (2015)
- (2) 西田正孝、「応力集中 増補版」、森北出版(株)、(1973)

添付書類 8-3-2 トラニオンの応力計算書

目次

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 1.1 形状・寸法・材料 | 1 |
| 1.2 計算結果 | 1 |
| 2. 応力計算 | 2 |
| 2.1 応力評価位置 | 2 |
| 2.2 貯蔵時 | 5 |
| 2.2.1 荷重条件 | 5 |
| 2.2.2 応力計算 | 5 |
| 2.3 吊上げ時 | 9 |
| 2.3.1 荷重条件 | 9 |
| 2.3.2 応力計算 | 10 |
| 2.4 たて起こし架台への衝突時 | 15 |
| 2.4.1 荷重条件 | 15 |
| 2.4.2 応力計算 | 15 |
| 2.5 貯蔵時 (S_d^* 相当地震力が作用する場合) | 19 |
| 2.5.1 荷重条件 | 19 |
| 2.5.2 応力計算 | 19 |
| 2.6 貯蔵時 (S_s 相当地震力が作用する場合) | 25 |
| 2.6.1 荷重条件 | 25 |
| 2.6.2 応力計算 | 25 |
| 3. 応力の評価 | 26 |
| 3.1 一次応力の評価 | 26 |
| 3.2 一次+二次応力の評価 | 26 |
| 4. 繰返し荷重の評価 | 29 |

図表目次

| | | |
|--------|--|----|
| 第2-1表 | 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時） | 6 |
| 第2-2表 | 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時） | 9 |
| 第2-3表 | 上部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時） | 11 |
| 第2-4表 | 上部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時） | 13 |
| 第2-5表 | 上部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果（吊上げ時） | 14 |
| 第2-6表 | 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 （たて起こし架台への衝突時） | 16 |
| 第2-7表 | 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果 （たて起こし架台への衝突時） | 17 |
| 第2-8表 | 下部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果（たて起こし架台への衝突時） | 18 |
| 第2-9表 | 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *相当地震力が作用する場合）） | 20 |
| 第2-10表 | 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *相当地震力が作用する場合）） | 23 |
| 第2-11表 | 下部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果 （貯蔵時（ S_d *相当地震力が作用する場合）） | 24 |
| 第2-12表 | 下部トラニオンに発生するせん断応力（一次＋二次応力）の計算結果 （貯蔵時（ S_d *相当地震力が作用する場合）） | 24 |
| 第2-13表 | 下部トラニオンに発生する曲げ応力（一次＋二次応力）の計算結果 （貯蔵時（ S_d *相当地震力が作用する場合）） | 25 |
| 第3-1表 | トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）（下部トラニオン） | 26 |
| 第3-2表 | トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）（上部トラニオン） | 27 |
| 第3-3表 | トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態C及びD）（下部トラニオン） | 28 |
| 第4-1表 | 上部トラニオンの評価位置①に生じる繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果 | 32 |
| 第4-2表 | トラニオンの疲労累積係数 | 33 |
| 第2-1図 | トラニオン構造 | 3 |
| 第2-2図 | トラニオンの解析モデル及び応力評価位置 | 4 |
| 第2-3図 | 下部トラニオン固縛装置の構造図 | 7 |
| 第2-4図 | 地震時に作用する荷重の解析モデル | 21 |
| 第4-1図 | 表面粗さ係数と表面粗さの関係 | 30 |
| 第4-2図 | 析出硬化系ステンレス鋼の設計疲労線図 | 31 |

1. 概要

本書は、MSF-21P 型のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価するトラニオンの形状・寸法・材料を第 2-2 図に示す。

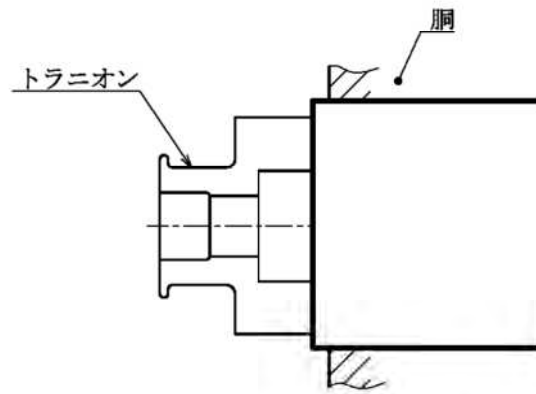
1.2 計算結果

計算結果を第 3-1 表、第 3-2 表及び第 3-3 表に示す。なお、応力評価位置については、評価上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。表中の「-」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため評価を省略している。

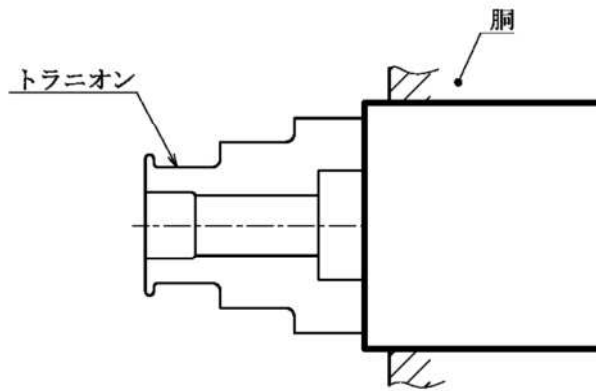
2. 応力計算

2.1 応力評価位置

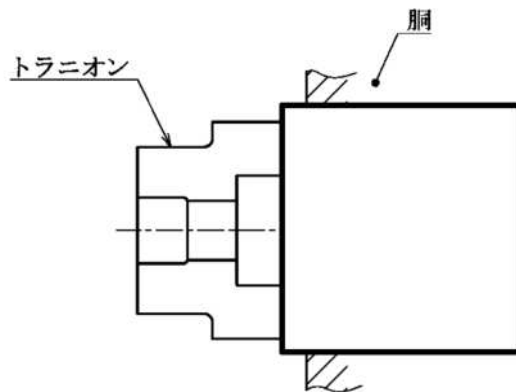
トラニオン構造を第 2-1 図に、解析モデル及び応力評価位置を第 2-2 図に示す。上部トラニオン形状は第 2-1 図に示すとおり 2 種類あるが、吊上げ時の応力が大きい上部トラニオン (90° 、 270°) を評価する。また、下部トラニオン形状は第 2-1 図に示すとおり 2 種類あるが、貯蔵架台の固縛装置により固定される位置又はたて起こし架台からの荷重が作用する位置から胴との接続部までの形状は同じであるため、応力評価位置は共通である。



(a) 上部トランニオン (0°、180°) (注1)



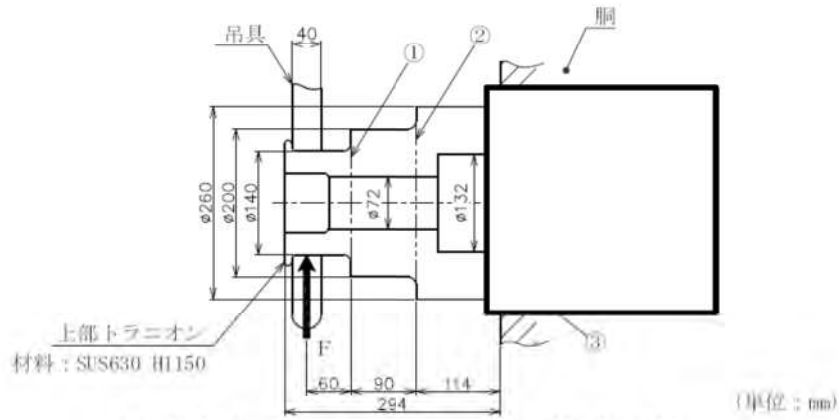
(b) 上部トランニオン (90°、270°) 及び
下部トランニオン (90°、270°) (注1)



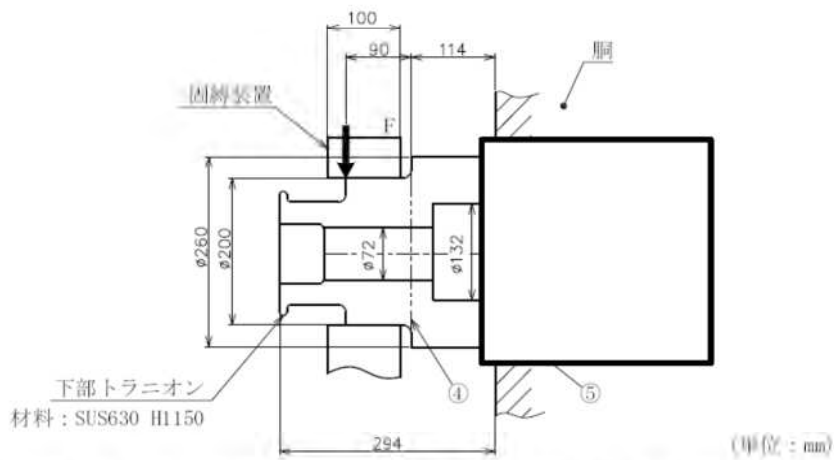
(c) 下部トランニオン (0°、180°) (注1)

(注1) トランニオンは、しまり嵌めにより胴に取り付けられる。

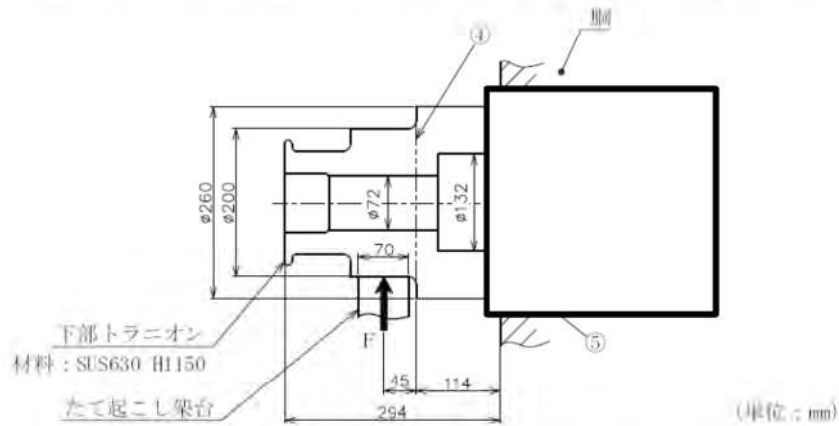
第2-1図 トランニオン構造



(a) 上部トラニオンの解析モデル (吊上げ時)



(b) 下部トラニオンの解析モデル (貯蔵時及び貯蔵時 (地震力が作用する場合))



(c) 下部トラニオンの解析モデル (たて起こし架台への衝突時)

①～⑤: 応力評価位置

第2-2図 トラニオンの解析モデル及び応力評価位置

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・下部トラニオン固縛装置の初期締付け力
- ・熱荷重
- ・しまり嵌めによる荷重

2.2.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

一次応力として評価すべき荷重（自重）の影響は無視できるため、一次応力の評価において、自重の考慮は不要である。

b. 一次+二次応力第 2-2 図(b)の評価位置④及び⑤において、密封容器の熱膨張による応力及びしまり嵌めによる応力は無視できるので、一次+二次応力の評価において、熱荷重及びしまり嵌めによる荷重の考慮は不要である。

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(b)に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。下部トラニオン固縛装置の初期締付け力により発生するせん断応力 ($\tau_{4,5}$) は、次式で計算される。(第 2-3 図参照)

$$\left. \begin{aligned} \tau_{4,5} &= \frac{F_{m1}}{A_{4,5}} \\ F_{m1} &= F_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

F_{m1} : 貯蔵時において下部トラニオンに作用する荷重 (N)

F_1 : 下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 (1.288×10^6 N)

A_4 : 評価位置④の断面積

$$\begin{aligned} A_4 &= \frac{\pi}{4} (D_{o4}^2 - D_{i4}^2) \\ &= 2.734 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

D_{o4} : 評価位置④におけるトラニオン外径 (200 mm)

D_{i4} : 評価位置④におけるトラニオン内径 (72 mm)

A_5 : 評価位置⑤の断面積

$$A_5 = \frac{\pi}{4} (D_{o5}^2 - D_{i5}^2)$$

$$= 3.940 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

D_{o5} : 評価位置⑤におけるトラニオン外径 (260 mm)

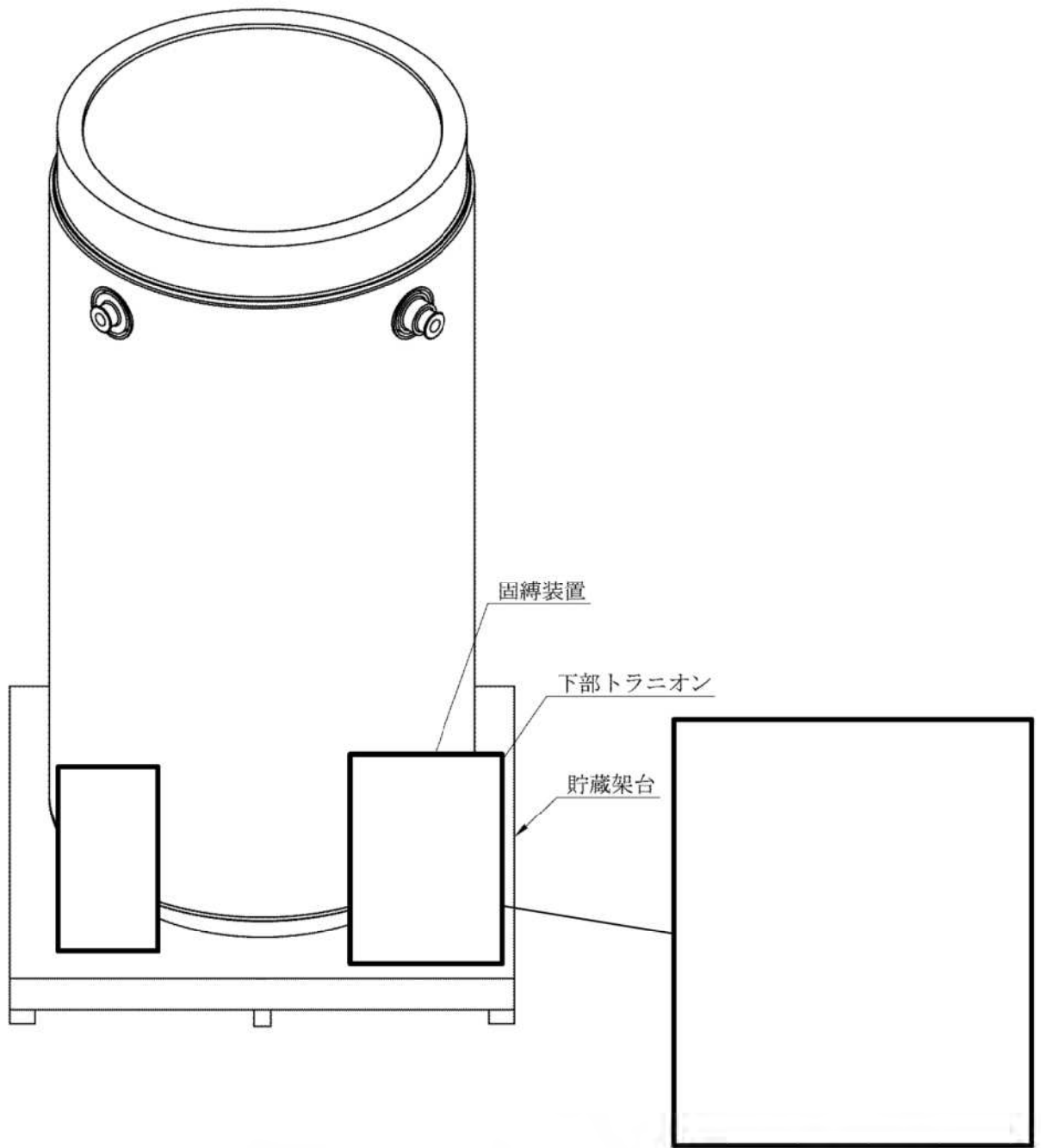
D_{i5} : 評価位置⑤におけるトラニオン内径 (132 mm)

計算条件及び計算結果を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時)

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------------|----------|--------------------------|---------------|
| 貯蔵時において下部トラニオンに作用する荷重 | F_{m1} | 1.288×10^6 (注1) | N |
| 下部トラニオン固縛装置の初期締付け力 | F_1 | 1.288×10^6 (注1) | N |
| 評価位置④の断面積 | A_4 | 2.734×10^4 | mm^2 |
| 評価位置④におけるトラニオン外径 | D_{o4} | 200 | mm |
| 評価位置④におけるトラニオン内径 | D_{i4} | 72 | mm |
| 評価位置⑤の断面積 | A_5 | 3.940×10^4 | mm^2 |
| 評価位置⑤におけるトラニオン外径 | D_{o5} | 260 | mm |
| 評価位置⑤におけるトラニオン内径 | D_{i5} | 132 | mm |
| 評価位置④に発生するせん断応力 | τ_4 | 48 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 | τ_5 | 33 | MPa |

(注 1) 表中では有効数字 4 桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。



第 2-3 図 下部トラニオン固縛装置の構造図

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図 (b) に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。下部トラニオン固縛装置の初期締付け力により発生する曲げ応力 ($\sigma_{b4, b5}$) は、トラニオンを片持ち梁としてモデル化し、次式で計算される。(第 2-3 図参照)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{b4, b5} &= \frac{M_{4, 5}}{Z_{4, 5}} \\ M_{4, 5} &= F_{m1} \cdot L_{41, 51} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

$M_{4, 5}$: 曲げモーメント (N・mm)

Z_4 : 評価位置④の断面係数

$$\begin{aligned} Z_4 &= \frac{\pi}{32D_{o4}} (D_{o4}^4 - D_{i4}^4) \\ &= 7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

D_{o4} : 評価位置④におけるトラニオン外径 (200 mm)

D_{i4} : 評価位置④におけるトラニオン内径 (72 mm)

Z_5 : 評価位置⑤の断面係数

$$\begin{aligned} Z_5 &= \frac{\pi}{32D_{o5}} (D_{o5}^4 - D_{i5}^4) \\ &= 1.610 \times 10^6 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

D_{o5} : 評価位置⑤におけるトラニオン外径 (260 mm)

D_{i5} : 評価位置⑤におけるトラニオン内径 (132 mm)

F_{m1} : 貯蔵時において下部トラニオンに作用する荷重 (1.288×10^6 N)

L_{41} : 評価位置④と荷重作用位置との距離 (90 mm)

L_{51} : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (204 mm)

計算条件及び計算結果を第 2-2 表に示す。

第2-2表 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時）

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------------|---------------|--------------------------|-----------------|
| 評価位置④の曲げモーメント | M_4 | 1.159×10^8 (注1) | N・mm |
| 評価位置⑤の曲げモーメント | M_5 | 2.626×10^8 (注1) | N・mm |
| 評価位置④の断面係数 | Z_4 | 7.722×10^5 | mm ³ |
| 評価位置④におけるトラニオン外径 | D_{o4} | 200 | mm |
| 評価位置④におけるトラニオン内径 | D_{i4} | 72 | mm |
| 評価位置⑤の断面係数 | Z_5 | 1.610×10^6 | mm ³ |
| 評価位置⑤におけるトラニオン外径 | D_{o5} | 260 | mm |
| 評価位置⑤におけるトラニオン内径 | D_{i5} | 132 | mm |
| 貯蔵時において下部トラニオンに作用する荷重 | F_{m1} | 1.288×10^6 (注1) | N |
| 評価位置④と荷重作用位置との距離 | L_{41} | 90 | mm |
| 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 | L_{51} | 204 | mm |
| 評価位置④に発生する曲げ応力 | σ_{b4} | 151 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | σ_{b5} | 164 | MPa |

(注1) 表中では有効数字4桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

2.3 吊上げ時

2.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・吊上げ荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重
- ・しまり嵌めによる荷重

2.3.2 応力計算

(1) 上部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(a)に示す上部トラニオンの評価位置①、②又は③である。吊上げ荷重により発生するせん断応力 ($\tau_{1, 2, 3}$) は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{1, 2, 3} &= \frac{F_{m2}}{A_{1, 2, 3}} \\ F_{m2} &= \frac{m_1}{2} \cdot G_{22} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

F_{m2} : 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 (N)

m_1 : 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 (116500 kg)

A_1 : 評価位置①の断面積

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\pi}{4} (D_{o1}^2 - D_{i1}^2) \\ &= 1.132 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

D_{o1} : 評価位置①におけるトラニオン外径 (140 mm)

D_{i1} : 評価位置①におけるトラニオン内径 (72 mm)

A_2 : 評価位置②の断面積

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\pi}{4} (D_{o2}^2 - D_{i2}^2) \\ &= 2.734 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

D_{o2} : 評価位置②におけるトラニオン外径 (200 mm)

D_{i2} : 評価位置②におけるトラニオン内径 (72 mm)

A_3 : 評価位置③の断面積

$$\begin{aligned} A_3 &= \frac{\pi}{4} (D_{o3}^2 - D_{i3}^2) \\ &= 3.940 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

D_{o3} : 評価位置③におけるトラニオン外径 (260mm)

D_{i3} : 評価位置③におけるトラニオン内径 (132mm)

G_{22} : 鉛直方向加速度 (吊上げ時) (1.3 g) (m/s^2)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-3 表に示す。

第 2-3 表 上部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|------------------------|----------|--------------------------|----------------|
| 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 | F_{m2} | 7.426×10^5 (注1) | N |
| 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 | m_1 | 116500 | kg |
| 評価位置①の断面積 | A_1 | 1.132×10^4 | mm^2 |
| 評価位置①におけるトラニオン外径 | D_{o1} | 140 | mm |
| 評価位置①におけるトラニオン内径 | D_{i1} | 72 | mm |
| 評価位置②の断面積 | A_2 | 2.734×10^4 | mm^2 |
| 評価位置②におけるトラニオン外径 | D_{o2} | 200 | mm |
| 評価位置②におけるトラニオン内径 | D_{i2} | 72 | mm |
| 評価位置③の断面積 | A_3 | 3.940×10^4 | mm^2 |
| 評価位置③におけるトラニオン外径 | D_{o3} | 260 | mm |
| 評価位置③におけるトラニオン内径 | D_{i3} | 132 | mm |
| 鉛直方向加速度（吊上げ時） | G_{22} | 1.3 g | m/s^2 |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s^2 |
| 評価位置①に発生するせん断応力 | τ_1 | 66 | MPa |
| 評価位置②に発生するせん断応力 | τ_2 | 28 | MPa |
| 評価位置③に発生するせん断応力 | τ_3 | 19 | MPa |

(注 1) 表中では有効数字 4 桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(a)に示す上部トラニオンの評価位置①、②又は③である。吊上げ荷重により発生する曲げ応力 ($\sigma_{b1}, \sigma_{b2}, \sigma_{b3}$) は、トラニオンを片持ち梁としてモデル化し、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{b1, b2, b3} &= \frac{M_{1, 2, 3}}{Z_{1, 2, 3}} \\ M_{1, 2, 3} &= F_{m2} \cdot L_{1, 2, 3} \\ F_{m2} &= \frac{m_1}{2} \cdot G_{22} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

$M_{1, 2, 3}$: 曲げモーメント (N・mm)

Z_1 : 評価位置①の断面係数

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{\pi}{32D_{o1}} (D_{o1}^4 - D_{i1}^4) \\ &= 2.505 \times 10^5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

D_{o1} : 評価位置①におけるトラニオン外径 (140 mm)

D_{i1} : 評価位置①におけるトラニオン内径 (72 mm)

L_1 : 評価位置①と荷重作用位置との距離 (60 mm)

Z_2 : 評価位置②の断面係数

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{\pi}{32D_{o2}} (D_{o2}^4 - D_{i2}^4) \\ &= 7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

D_{o2} : 評価位置②におけるトラニオン外径 (200 mm)

D_{i2} : 評価位置②におけるトラニオン内径 (72 mm)

L_2 : 評価位置②と荷重作用位置との距離 (150 mm)

Z_3 : 評価位置③の断面係数

$$\begin{aligned} Z_3 &= \frac{\pi}{32D_{o3}} (D_{o3}^4 - D_{i3}^4) \\ &= 1.610 \times 10^6 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

D_{o3} : 評価位置③におけるトラニオン外径 (260 mm)

D_{i3} : 評価位置③におけるトラニオン内径 (132 mm)

L_3 : 評価位置③と荷重作用位置との距離 (264mm)

F_{m2} : 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 (N)

m_1 : 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 (116500 kg)

G_{22} : 鉛直方向加速度 (吊上げ時) (1.3 g) (m/s^2)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-4 表に示す。

第2-4表 上部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|------------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| 評価位置①の曲げモーメント | M_1 | 4.456×10^7 (注1) | N・mm |
| 評価位置②の曲げモーメント | M_2 | 1.114×10^8 (注1) | N・mm |
| 評価位置③の曲げモーメント | M_3 | 1.961×10^8 (注1) | N・mm |
| 評価位置①の断面係数 | Z_1 | 2.505×10^5 | mm ³ |
| 評価位置①におけるトラニオン外径 | D_{o1} | 140 | mm |
| 評価位置①におけるトラニオン内径 | D_{i1} | 72 | mm |
| 評価位置②の断面係数 | Z_2 | 7.722×10^5 | mm ³ |
| 評価位置②におけるトラニオン外径 | D_{o2} | 200 | mm |
| 評価位置②におけるトラニオン内径 | D_{i2} | 72 | mm |
| 評価位置③の断面係数 | Z_3 | 1.610×10^6 | mm ³ |
| 評価位置③におけるトラニオン外径 | D_{o3} | 260 | mm |
| 評価位置③におけるトラニオン内径 | D_{i3} | 132 | mm |
| 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 | F_{m2} | 7.426×10^5 (注1) | N |
| 評価位置①と荷重作用位置との距離 | L_1 | 60 | mm |
| 評価位置②と荷重作用位置との距離 | L_2 | 150 | mm |
| 評価位置③と荷重作用位置との距離 | L_3 | 264 | mm |
| 吊上げ時におけるMSF-21P型の質量 | m_1 | 116500 | kg |
| 鉛直方向加速度（吊上げ時） | G_{22} | 1.3g | m/s ² |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s ² |
| 評価位置①に発生する曲げ応力 | σ_{b1} | 178 | MPa |
| 評価位置②に発生する曲げ応力 | σ_{b2} | 145 | MPa |
| 評価位置③に発生する曲げ応力 | σ_{b3} | 122 | MPa |

(注1) 表中では有効数字4桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

(c) 組合せ応力（曲げ応力とせん断応力）

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図 (a) に示す上部トラニオンの評価位置①、②又は③である。曲げ応力（ $\sigma_{b1, b2, b3}$ ）とせん断応力（ $\tau_{1, 2, 3}$ ）との組合せ応力（ $\sigma_{T1, T2, T3}$ ）は、次式で計算される。

$$\sigma_{T1, T2, T3} = \sqrt{\sigma_{b1, b2, b3}^2 + 3 \cdot \tau_{1, 2, 3}^2} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- $\sigma_{b1, b2, b3}$: (2.4) 式で計算される値
- $\tau_{1, 2, 3}$: (2.3) 式で計算される値

計算結果を第 2-5 表に示す。

第 2-5 表 上部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果（吊上げ時）

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------|---------------|-----|-----|
| 評価位置①に発生する曲げ応力 | σ_{b1} | 178 | MPa |
| 評価位置①に発生するせん断応力 | τ_1 | 66 | MPa |
| 評価位置①に発生する組合せ応力 | σ_{T1} | 212 | MPa |
| 評価位置②に発生する曲げ応力 | σ_{b2} | 145 | MPa |
| 評価位置②に発生するせん断応力 | τ_2 | 28 | MPa |
| 評価位置②に発生する組合せ応力 | σ_{T2} | 153 | MPa |
| 評価位置③に発生する曲げ応力 | σ_{b3} | 122 | MPa |
| 評価位置③に発生するせん断応力 | τ_3 | 19 | MPa |
| 評価位置③に発生する組合せ応力 | σ_{T3} | 127 | MPa |

b. 一次＋二次応力

第 2-2 図 (a) の評価位置①、②及び③において、密封容器の熱膨張による応力及びしまり嵌めによる応力は無視できるので、一次＋二次応力の評価において、熱荷重及びしまり嵌めによる荷重の考慮は不要である。したがって、上部トラニオンに発生する一次＋二次応力は、2.3.2(1)a. と同様である。

2.4 たて起こし架台への衝突時

2.4.1 荷重条件

たて起こし架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・衝撃荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重
- ・しまり嵌めによる荷重

2.4.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(c)に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。衝撃荷重により発生するせん断応力 ($\tau_{4, 5}$) は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{4, 5} &= \frac{F_{m3}}{A_{4, 5}} \\ F_{m3} &= \frac{m_1}{2} \cdot G_{23} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

F_{m3} : たて起こし架台への衝突時において下部トラニオンに作用する荷重 (N)

m_1 : 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 (116500 kg)

A_4 : 評価位置④の断面積 ($2.734 \times 10^4 \text{ mm}^2$)

A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($3.940 \times 10^4 \text{ mm}^2$)

G_{23} : 鉛直方向加速度 (たて起こし架台への衝突時) (3 g) (m/s^2)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-6 表に示す。

第2-6表 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果
(たて起こし架台への衝突時)

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|--------------------------------|----------|--------------------------|----------------|
| たて起こし架台への衝突時において下部トラニオンに作用する荷重 | F_{m3} | 1.714×10^6 (注1) | N |
| 吊上げ時におけるMSF-21P型の質量 | m_1 | 116500 | kg |
| 評価位置④の断面積 | A_4 | 2.734×10^4 | mm^2 |
| 評価位置⑤の断面積 | A_5 | 3.940×10^4 | mm^2 |
| 鉛直方向加速度 (たて起こし架台への衝突時) | G_{23} | 3 g | m/s^2 |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s^2 |
| 評価位置④に発生するせん断応力 | τ_4 | 63 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 | τ_5 | 44 | MPa |

(注1) 表中では有効数字4桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は第2-2図(c)に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。衝撃荷重により発生する曲げ応力 ($\sigma_{b4, b5}$) は、トラニオンを片持ち梁としてモデル化し、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{b4, b5} &= \frac{M_{4, 5}}{Z_{4, 5}} \\ M_{4, 5} &= F_{m3} \cdot L_{42, 52} \\ F_{m3} &= \frac{m_1}{2} \cdot G_{23} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.7)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- $M_{4, 5}$: 曲げモーメント (N・mm)
- Z_4 : 評価位置④の断面係数 ($7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3$)
- Z_5 : 評価位置⑤の断面係数 ($1.610 \times 10^6 \text{ mm}^3$)
- F_{m3} : たて起こし架台への衝突時において下部トラニオンに作用する荷重 (N)
- L_{42} : 評価位置④と荷重作用位置との距離 (45 mm)
- L_{52} : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (159 mm)

m_1 : 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 (116500 kg)

G_{23} : 鉛直方向加速度 (たて起こし架台への衝突時) (3 g) (m/s^2)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-7 表に示す。

第 2-7 表 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果
(たて起こし架台への衝突時)

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|------------------------------------|---------------|--------------------------|---------|
| 評価位置④の曲げモーメント | M_4 | 7.712×10^7 (注1) | N・mm |
| 評価位置⑤の曲げモーメント | M_5 | 2.725×10^8 (注1) | N・mm |
| 評価位置④の断面係数 | Z_4 | 7.722×10^5 | mm^3 |
| 評価位置⑤の断面係数 | Z_5 | 1.610×10^6 | mm^3 |
| たて起こし架台への衝突時において 下部トラニオンに作用する荷重 | F_{m3} | 1.714×10^6 (注1) | N |
| 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 | m_1 | 116500 | kg |
| 鉛直方向加速度 (たて起こし架台への衝突時) | G_{23} | 3 g | m/s^2 |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s^2 |
| 評価位置④と荷重作用位置との距離 | L_{42} | 45 | mm |
| 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 | L_{52} | 159 | mm |
| 評価位置④に発生する曲げ応力 | σ_{b4} | 100 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | σ_{b5} | 170 | MPa |

(注 1) 表中では有効数字 4 桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

(c) 組合せ応力 (曲げ応力とせん断応力)

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(c)に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。曲げ応力 (σ_{b4} , σ_{b5}) とせん断応力 (τ_4 , τ_5) との組合せ応力 (σ_{T4} , τ_5) は、次式で計算される。

$$\sigma_{T4, T5} = \sqrt{\sigma_{b4, b5}^2 + 3 \cdot \tau_{4, 5}^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

$\sigma_{b4, b5}$: (2.7) 式で計算される値

$\tau_{4, 5}$: (2.6) 式で計算される値

計算結果を第 2-8 表に示す。

第 2-8 表 下部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果
(たて起こし架台への衝突時)

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------|---------------|-----|-----|
| 評価位置④に発生する曲げ応力 | σ_{b4} | 100 | MPa |
| 評価位置④に発生するせん断応力 | τ_4 | 63 | MPa |
| 評価位置④に発生する組合せ応力 | σ_{T4} | 149 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | σ_{b5} | 170 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 | τ_5 | 44 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する組合せ応力 | σ_{T5} | 187 | MPa |

b. 一次+二次応力

第 2-2 図(c)の評価位置④及び⑤において、密封容器の熱膨張による応力及びしまり嵌めによる応力は無視できるので、一次+二次応力の評価において、熱荷重及びしまり嵌めによる荷重の考慮は不要である。したがって、下部トラニオンに発生する一次+二次応力は、2.4.2(1)a.と同様である。

2.5 貯蔵時 (S_d^* 相当地震力が作用する場合)

2.5.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 相当地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

- ・地震力
- ・自重
- ・下部トラニオン固縛装置の初期締付け力

なお、「構造規格」において、供用状態 C・D における一次＋二次応力の評価では、短期繰返し荷重による応力振幅についてのみ評価する。したがって、下部トラニオン固縛装置の初期締付け力は、2.5.2 項に示す応力計算において荷重として考慮していない。

2.5.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図 (b) に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力 ($\tau_{41, 51}$) は、次式で計算される。また、地震力により下部トラニオンに作用する荷重 (F_{m4}) は、地震時に MSF-21P 型へ作用する回転モーメントのつり合いより、次式のとおり計算される。(第 2-4 図参照)

$$\tau_{41, 51} = \frac{F_{m4}}{A_{4, 5}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$
$$F_{m4} = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_{25} \cdot a_2)}{\left(a_1 + 2 \cdot \frac{a_2^2}{a_1} \right)}$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

$$G_1 = C_H \cdot g$$

G_{25} : 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) (m/s^2)

$$G_{25} = (1 - C_V) \cdot g$$

C_H : 水平方向設計震度 (1.5)

C_V : 鉛直方向設計震度 (1.0)

h_{CG} : MSF-21P 型の底面から重心までの高さ (2630 mm)

a_1 : 回転支点 O_c から下部トラニオン固縛部端部までの距離 (2440 mm)

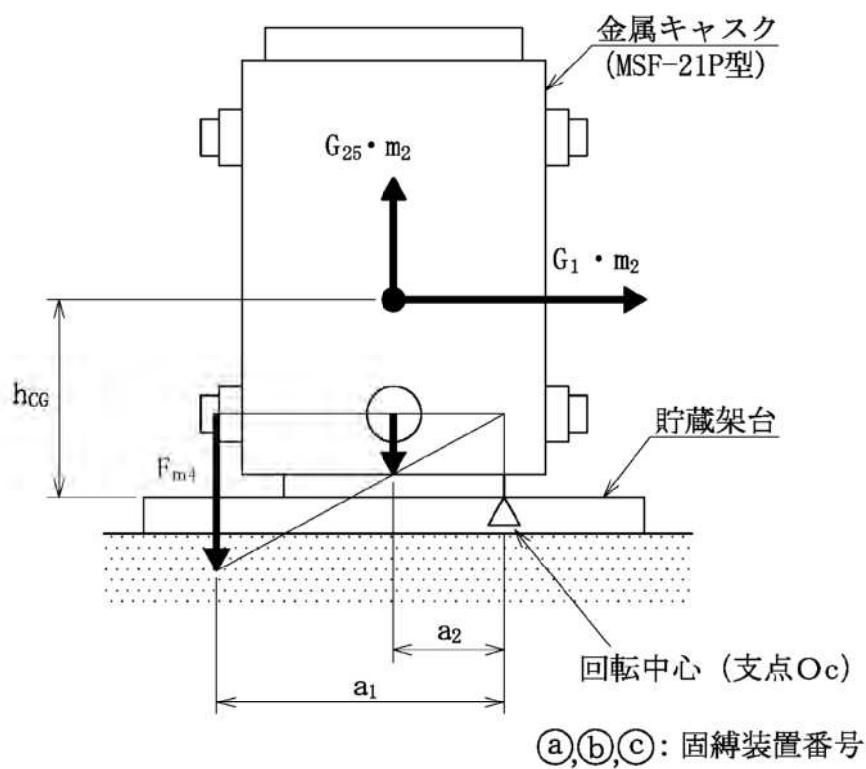
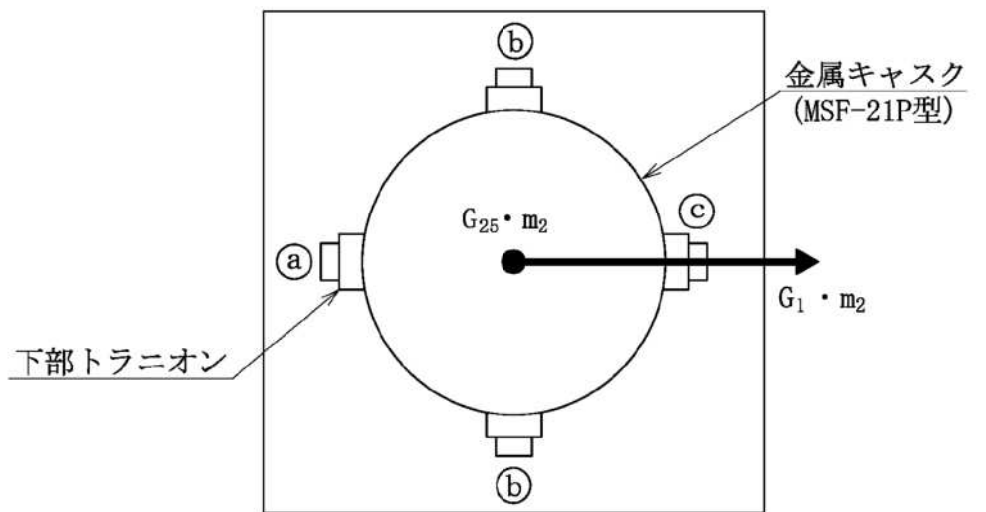
- a_2 : 回転支点 O_c から MSF-21P 型の中心までの距離 (1080 mm)
- F_{m4} : 地震力により下部トラニオンに作用する荷重 (N)
- m_2 : 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 (113000 kg)
- A_4 : 評価位置④の断面積 ($2.734 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
- A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($3.940 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-9 表に示す。

第 2-9 表 下部トラニオンに発生するせん断応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d *相当地震力が作用する場合))

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|
| 水平方向加速度 | G_H | 1.5 g | m/s^2 |
| 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | G_{25} | 0.0 g | m/s^2 |
| 水平方向設計震度 | C_H | 1.5 | — |
| 鉛直方向設計震度 | C_V | 1.0 | — |
| MSF-21P 型の底面から重心までの高さ | h_{CG} | 2630 | mm |
| 回転支点 O_c から下部トラニオン 固縛部端部までの距離 | a_1 | 2440 | mm |
| 回転支点 O_c から MSF-21P 型の 中心までの距離 | a_2 | 1080 | mm |
| 地震力により下部トラニオンに 作用する荷重 | F_{m4} | 1.288×10^6 (注1) | N |
| 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 | m_2 | 113000 | kg |
| 評価位置④の断面積 | A_4 | 2.734×10^4 | mm^2 |
| 評価位置⑤の断面積 | A_5 | 3.940×10^4 | mm^2 |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s^2 |
| 評価位置④に発生するせん断応力 | τ_{41} | 48 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 | τ_{51} | 33 | MPa |

(注 1) 表中では有効数字 4 桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。



第2-4図 地震時に作用する荷重の解析モデル^(注1)

(注1) 貯蔵架台とトラニオンの方位は、地震力により下部トラニオンに作用する荷重 F_{m4} が最大となる関係としている。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図 (b) に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力 ($\sigma_{b41, b51}$) は、トラニオンを片持ち梁としてモデル化し、次式で計算される。また、地震力により下部トラニオンに作用する荷重 (F_{m4}) は、地震時に MSF-21P 型へ作用する回転モーメントのつり合いより、次式のとおり計算される (第 2-4 図参照)。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{b41, b51} &= \frac{M_{4, 5}}{Z_{4, 5}} \\ M_{4, 5} &= F_{m4} \cdot L_{41, 51} \\ F_{m4} &= \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_{25} \cdot a_2)}{\left(a_1 + 2 \cdot \frac{a_2^2}{a_1} \right)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.10)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

$M_{4, 5}$: 曲げモーメント (N・mm)

F_{m4} : 地震力により下部トラニオンに作用する荷重 (N)

Z_4 : 評価位置④の断面係数 ($7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

Z_5 : 評価位置⑤の断面係数 ($1.610 \times 10^6 \text{ mm}^3$)

L_{41} : 評価位置④と荷重作用位置との距離 (90 mm)

L_{51} : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (204 mm)

m_2 : 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 (113000 kg)

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

$$G_1 = C_H \cdot g$$

G_{25} : 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) (m/s^2)

$$G_{25} = (1 - C_V) \cdot g$$

C_H : 水平方向設計震度 (1.5)

C_V : 鉛直方向設計震度 (1.0)

h_{CG} : MSF-21P 型の底面から重心までの高さ (2630 mm)

a_1 : 回転支点 O_c から下部トラニオン固縛部端部までの距離 (2440 mm)

a_2 : 回転支点 O_c から MSF-21P 型の中心までの距離 (1080 mm)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を第 2-10 表に示す。

第 2-10 表 下部トラニオンに発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果

(貯蔵時 (S_d*相当地震力が作用する場合))

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|---|------------------|----------------------------|------------------|
| 評価位置④の曲げモーメント | M ₄ | 1.159×10 ⁸ (注1) | N・mm |
| 評価位置⑤の曲げモーメント | M ₅ | 2.626×10 ⁸ (注1) | N・mm |
| 水平方向加速度 | G ₁ | 1.5 g | m/s ² |
| 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | G _{2.5} | 0.0 g | m/s ² |
| 水平方向設計震度 | C _H | 1.5 | — |
| 鉛直方向設計震度 | C _V | 1.0 | — |
| MSF-21P 型の底面から重心までの高さ | h _{CG} | 2630 | mm |
| 回転支点O _c から下部トラニオン 固縛部端部までの距離 | a ₁ | 2440 | mm |
| 回転支点O _c から MSF-21P 型の 中心までの距離 | a ₂ | 1080 | mm |
| 地震力により下部トラニオンに 作用する荷重 | F _{m4} | 1.288×10 ⁶ (注1) | N |
| 貯蔵時における MSF-21P 型の質量 | m ₂ | 113000 | kg |
| 評価位置④の断面係数 | Z ₄ | 7.722×10 ⁵ | mm ³ |
| 評価位置⑤の断面係数 | Z ₅ | 1.610×10 ⁶ | mm ³ |
| 評価位置④と荷重作用位置との距離 | L ₄₁ | 90 | mm |
| 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 | L ₅₁ | 204 | mm |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s ² |
| 評価位置④に発生する曲げ応力 | σ _{b41} | 151 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | σ _{b51} | 164 | MPa |

(注1) 表中では有効数字4桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

(c) 組合せ応力 (曲げ応力とせん断応力)

最大応力が発生する箇所は第 2-2 図(b)に示す下部トラニオンの評価位置④又は⑤である。曲げ応力 (σ_{b41}, σ_{b51}) とせん断応力 (τ₄₁, τ₅₁) との組合せ応力 (σ_{T4}, σ_{T5}) は、次式で計算される。

$$\sigma_{T4, T5} = \sqrt{\sigma_{b41, b51}^2 + 3 \cdot \tau_{41, 51}^2} \dots \dots \dots (2.11)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

$\sigma_{b41, b51}$: (2.10) 式で計算される値

$\tau_{41, 51}$: (2.9) 式で計算される値

計算結果を第 2-11 表に示す。

第 2-11 表 下部トラニオンに発生する組合せ応力の計算結果
(貯蔵時 (S_d*相当地震力が作用する場合))

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------|----------------|-----|-----|
| 評価位置④に発生する曲げ応力 | σ_{b41} | 151 | MPa |
| 評価位置④に発生するせん断応力 | τ_{41} | 48 | MPa |
| 評価位置④に発生する組合せ応力 | σ_{T4} | 173 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 | σ_{b51} | 164 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 | τ_{51} | 33 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する組合せ応力 | σ_{T5} | 174 | MPa |

b. 一次+二次応力

(a) せん断応力

地震力によるせん断応力 ($\tau_{42, 52}$) の全振幅は、(2.9) 式で求めたせん断応力 ($\tau_{41, 51}$) の 2 倍とする。計算結果を第 2-12 表に示す。

第 2-12 表 下部トラニオンに発生するせん断応力 (一次+二次応力) の計算結果
(貯蔵時 (S_d*相当地震力が作用する場合))

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|------------------------------|-------------|----|-----|
| 評価位置④に発生するせん断応力 (一次応力) | τ_{41} | 48 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 (一次応力) | τ_{51} | 33 | MPa |
| 評価位置④に発生するせん断応力 (一次+二次応力) | τ_{42} | 96 | MPa |
| 評価位置⑤に発生するせん断応力 (一次+二次応力) | τ_{52} | 66 | MPa |

(b) 曲げ応力

地震力による曲げ応力 ($\sigma_{b42, b52}$) の全振幅は、(2.10) 式で求めた曲げ応力 ($\sigma_{b41, b51}$) の2倍とする。計算結果を第2-13表に示す。

第2-13表 下部トラニオンに発生する曲げ応力（一次＋二次応力）の計算結果
（貯蔵時（ S_d^* 相当地震力が作用する場合））

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|-----------------------------|----------------|-----|-----|
| 評価位置④に発生する曲げ応力 （一次応力） | σ_{b41} | 151 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 （一次応力） | σ_{b51} | 164 | MPa |
| 評価位置④に発生する曲げ応力 （一次＋二次応力） | σ_{b42} | 302 | MPa |
| 評価位置⑤に発生する曲げ応力 （一次＋二次応力） | σ_{b52} | 328 | MPa |

2.6

2.7 貯蔵時（ S_s 相当地震力が作用する場合）

2.7.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 相当地震力が作用する場合の荷重条件は、 S_s 相当地震力と S_d^* 相当地震力を同じ値としているため、2.5.1項と同様である。

2.7.2 応力計算

下部トラニオンの計算条件及び計算結果は、2.5.2項と同様である。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を第3-1表、第3-2表及び第3-3表に示す。
各供用状態の一次応力は「構造規格」MCD-3311の規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を第3-1表、第3-2表及び第3-3表に示す。
各供用状態の一次+二次応力は「構造規格」MCD-3312の規定を満足する。

第3-1表 トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）
（下部トラニオン）

（単位：MPa）

| 部位 | 応力の種類 | 貯蔵時 | | 吊上げ時 | | たて起こし架台への衝突時 | | 許容 応力値 | | | |
|-------------|------------------------|-------|----------|------|----------|--------------|----------|-----------|-----|---|------|
| | | 計算値 | 評価 位置 | 計算値 | 評価 位置 | 計算値 | 評価 位置 | | | | |
| 下部 トラニオン | 一次 応力 | せん断応力 | — | — | — | — | 63 | ④ | 227 | | |
| | | | | | | | 44 | ⑤ | | | |
| | 曲げ応力 | — | — | — | — | — | 100 | ④ | 394 | | |
| | | | | | | | 170 | ⑤ | | | |
| | 曲げ応力と せん断応力 の組合せ | — | — | — | — | — | 149 | ④ | 394 | | |
| | | | | | | | 187 | ⑤ | | | |
| | 一次+ 二次 応力 | せん断応力 | 48 | ④ | — | — | — | — | 63 | ④ | 681 |
| | | | | | | | | | 33 | ⑤ | |
| 曲げ応力 | | 151 | ④ | — | — | — | — | — | 100 | ④ | 1182 |
| | | | | | | | | | 164 | ⑤ | |

第3-2表 トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）

（上部トラニオン）

（単位：MPa）

| 部位 | 応力の種類 | | 貯蔵時 | | 吊上げ時 | | たて起こし架台への衝突時 | | 許容 応力値 |
|-------------|------------------------|-------|-----|----------|------|----------|--------------|----------|-----------|
| | | | 計算値 | 評価 位置 | 計算値 | 評価 位置 | 計算値 | 評価 位置 | |
| 上部 トラニオン | せん断応力 | — | — | 66 | ① | — | — | 227 | |
| | | | | 28 | ② | | | | |
| | | | | 19 | ③ | | | | |
| | 曲げ応力 | — | — | 178 | ① | — | — | 394 | |
| | | | | 145 | ② | | | | |
| | | | | 122 | ③ | | | | |
| | 曲げ応力と せん断応力 の組合せ | — | — | 212 | ① | — | — | 394 | |
| | | | | 153 | ② | | | | |
| | | | | 127 | ③ | | | | |
| | 一次 + 二次 応力 | せん断応力 | — | — | 66 | ① | — | — | 681 |
| | | | | | 28 | ② | | | |
| | | | | | 19 | ③ | | | |
| 曲げ応力 | | — | — | 178 | ① | — | — | 1182 | |
| | | | | 145 | ② | | | | |
| | | | | 122 | ③ | | | | |

第3-3表 トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態C及びD）

（下部トラニオン）

（単位：MPa）

| 部位 | 応力の種類 | 供用状態C | | | 供用状態D | | | |
|---------|-----------------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| | | 計算値 | 評価位置 | 許容応力値 | 計算値 | 評価位置 | 許容応力値 | |
| 下部トラニオン | せん断応力 | 48 | ④ | 340 | 48 | ④ | 340 | |
| | | 33 | ⑤ | | 33 | ⑤ | | |
| | 曲げ応力 | 151 | ④ | 591 | 151 | ④ | 591 | |
| | | 164 | ⑤ | | 164 | ⑤ | | |
| | 曲げ応力とせん断応力の組合せ | 173 | ④ | 591 | 173 | ④ | 591 | |
| | | 174 | ⑤ | | 174 | ⑤ | | |
| | 一次十二次応力 (注1) | せん断応力 | 96 | ④ | 681 | 96 | ④ | 681 |
| | | | 66 | ⑤ | | 66 | ⑤ | |
| | | 曲げ応力 | 302 | ④ | 1182 | 302 | ④ | 1182 |
| | | | 328 | ⑤ | | 328 | ⑤ | |

（注1）地震力のみによる全振幅について評価する。

4. 繰返し荷重の評価

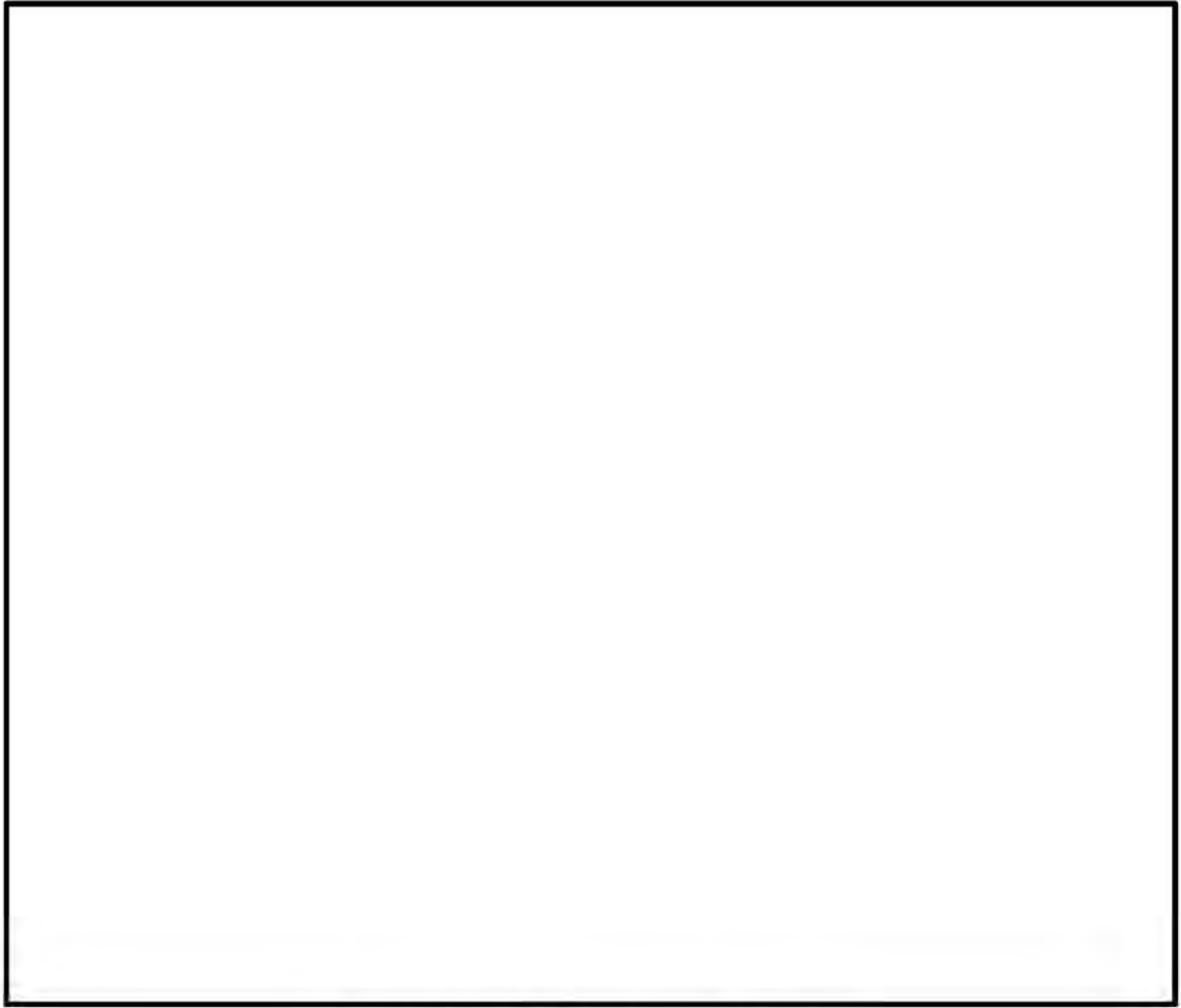
「構造規格」MCD-3313 に従い、吊上げ時における疲労評価を行う。なお、設計疲労線図は、“ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 3”⁽¹⁾（以下「ASME」という。）を適用する。吊上げ事象の繰返し回数は200回とする。

第2-2図(a)に示す上部トラニオンの評価位置①に生じる繰返しピーク応力強さ (S_e) は、応力強さ (S) に評価位置 (段付き部) の応力集中係数 (K_t) 及び表面粗さ係数 (K_r) を考慮し、さらに ASME に示される縦弾性係数 (E_0) と上部トラニオンの縦弾性係数 (E) との比を考慮し補正することで計算される。

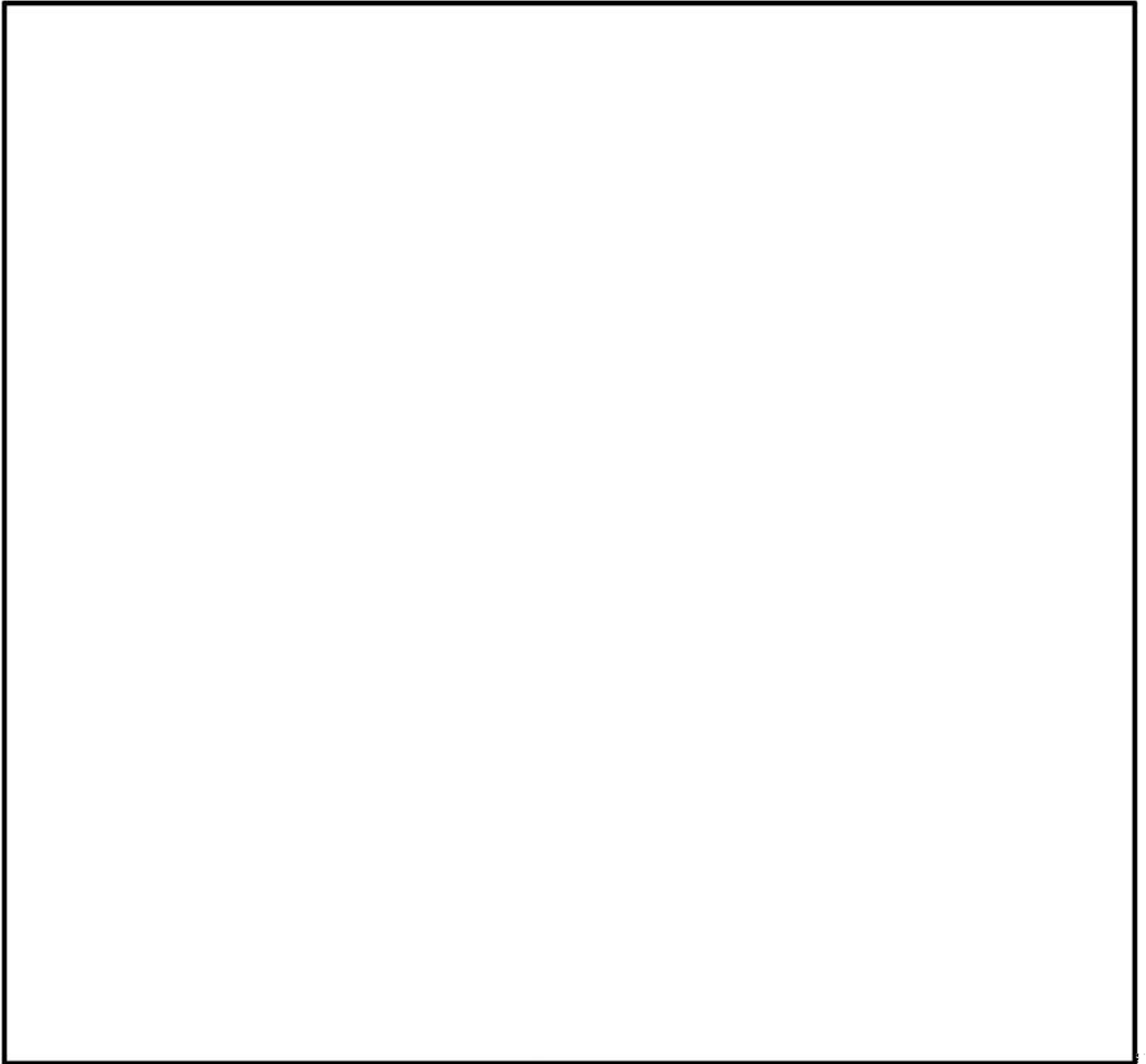
$$\left. \begin{aligned} S_e &= \frac{1}{2} \cdot K_t \cdot K_r \cdot S \cdot \frac{E_0}{E} \\ S &= \sqrt{\sigma_{b1}^2 + 4 \cdot \tau_1^2} \\ \tau_1 &= \frac{F_{m2}}{A_1} \\ F_{m2} &= \frac{m_1}{2} \cdot G_{22} \\ \sigma_{b1} &= \frac{M_1}{Z_1} \\ M_1 &= F_{m2} \cdot L_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- K_t : 評価位置 (段付き部) の応力集中係数 (2.0⁽²⁾)
- K_r : ASME に示されている表面粗さ係数 (1.24⁽¹⁾) (第4-1図参照)
- E_0 : ASME に示されている縦弾性係数 (200000 MPa⁽¹⁾) (第4-2図参照)
- E : 上部トラニオンの縦弾性係数 (187000 MPa)
- S : 応力強さ (MPa)
- τ_1 : 評価位置①に発生するせん断応力 (MPa)
- σ_{b1} : 評価位置①に発生する曲げ応力 (MPa)
- F_{m2} : 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 (N)
- A_1 : 評価位置①の断面積 ($1.132 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
- m_1 : 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 (116500 kg)
- G_{22} : 鉛直方向加速度 (吊上げ時) (1.3 g) (m/s^2)
- M_1 : 評価位置①の曲げモーメント (N・mm)
- Z_1 : 評価位置①の断面係数 ($2.505 \times 10^5 \text{ mm}^3$)
- L_1 : 評価位置①と荷重作用位置との距離 (60 mm)
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)



第 4-1 図 表面粗さ係数と表面粗さの関係⁽²⁾



第 4-2 図 析出硬化系ステンレス鋼の設計疲労線図⁽²⁾

計算条件及び計算結果を第 4-1 表に示す。

第 4-1 表 上部トラニオンの評価位置①に生じる繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 数値 | 単位 |
|------------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| 評価位置 (段付き部) の応力集中係数 | K_t | 2.0 | — |
| ASME に示されている表面粗さ係数 | K_r | 1.24 | — |
| ASME に示されている縦弾性係数 | E_0 | 200000 | MPa |
| 上部トラニオンの縦弾性係数 | E | 187000 | MPa |
| 応力強さ | S | 222 | MPa |
| 評価位置①に発生するせん断応力 | τ_1 | 66 | MPa |
| 評価位置①に発生する曲げ応力 | σ_{b1} | 178 | MPa |
| 吊上げ時において上部トラニオンに作用する荷重 | F_{m2} | 7.426×10^5 (注1) | N |
| 評価位置①の断面積 | A_1 | 1.132×10^4 | mm ² |
| 吊上げ時における MSF-21P 型の質量 | m_1 | 116500 | kg |
| 鉛直方向加速度 (吊上げ時) | G_{22} | 1.3 g | m/s ² |
| 評価位置①の曲げモーメント | M_1 | 4.456×10^7 (注1) | N・mm |
| 評価位置①の断面係数 | Z_1 | 2.505×10^5 | mm ³ |
| 評価位置①と荷重作用位置との距離 | L_1 | 60 | mm |
| 重力加速度 | g | 9.80665 | m/s ² |
| 繰返しピーク応力強さ | S_e | 295 | MPa |

(注 1) 表中では有効数字 4 桁表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用。

次に、ASME に示される設計疲労線図より、繰返しピーク応力強さ (S_d) に対する許容繰返し回数 (N_a) が求められる。吊上げ事象の繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は第 4-2 表に示すとおりとなり、吊上げ時における疲労累積係数 (U_f) は 1.0 以下となるため、「構造規格」MCD-3313 の規定を満足する。

第 4-2 表 トラニオンの疲労累積係数

| No. | S_d (MPa) | N_a | N_c | N_c / N_a |
|------------------------|-------------|--------------------|-------|-------------|
| 1 | 295 | 1.00×10^6 | 200 | 0.00020 |
| 疲労累積係数 $U_f = 0.00020$ | | | | |

添付書類 8-4 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの
強度に関する説明書

添付書類 8-4-1 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの
応力解析の方針

目次

| | |
|-----------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 2. 適用基準 | 2 |
| 3. 記号 | 3 |
| 4. 設計条件 | 7 |
| 4.1 基本仕様 | 7 |
| 4.2 設計事象 | 9 |
| 4.3 荷重の種類とその組合せ | 10 |
| 5. 評価条件 | 11 |
| 5.1 評価対象とする事象 | 11 |
| 5.2 形状及び寸法 | 12 |
| 5.3 物性値 | 12 |
| 5.4 許容応力 | 12 |
| 6. 応力評価の手順 | 14 |
| 6.1 評価手順の概要 | 14 |
| 6.2 荷重条件の選定 | 15 |
| 6.3 応力計算と評価 | 15 |
| 6.3.1 応力計算の方法 | 15 |
| 6.3.2 応力の評価 | 15 |
| 6.3.3 数値の丸め方 | 20 |
| 7. 参考文献 | 21 |

図表目次

| | | |
|---------|---|----|
| 第 3-1 表 | 応力評価に関する記号 | 3 |
| 第 4-1 表 | 基本仕様 | 7 |
| 第 4-2 表 | 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象 | 9 |
| 第 4-3 表 | 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ | 10 |
| 第 5-1 表 | 代表事象 | 11 |
| 第 5-2 表 | 応力計算に使用する材料の物性値 | 12 |
| 第 5-3 表 | 物性値及び許容応力値を定める温度 | 13 |
| 第 6-1 表 | 外筒用材料の許容応力値 | 16 |
| 第 6-2 表 | 下部端板用材料の許容応力値 | 17 |
| 第 6-3 表 | 蓋部中性子遮蔽材カバー用材料の許容応力値 | 18 |
| 第 6-4 表 | 底部中性子遮蔽材カバー用材料の許容応力値 | 19 |
| 第 6-5 表 | 数値の丸め方一覧表 | 20 |
| 第 4-1 図 | 外筒、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーの構造図 | 8 |
| 第 4-2 図 | 蓋部中性子遮蔽材カバーの構造図 | 8 |
| 第 6-1 図 | 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの応力評価フロー | 14 |

1. 概要

本書は、MSF-21P 型の外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーに関する応力評価の方針を述べるものである。

2. 適用基準

MSF-21P 型の外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの主な機能は、中性子遮蔽材を保持することであり、放射性物質を含む流体を直接内部に保持しない。そのため、これらの構成部材は、使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則の第 11 条の容器に該当しない。

また、これらの構成部材は、胴又は一次蓋（使用済燃料貯蔵施設規格（金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007）（日本機械学会 2007 年 12 月）（以下「構造規格」という。）で定められる密封容器）へ直接取り付けられる非耐圧部材であり、ブラケットに相当するものである。しかしながら、構造規格では密封容器へ直接取り付けられるブラケットの設計に関する規定が無いため、外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーとして求められる機能、すなわち中性子遮蔽材を保持する構造物であることを考慮し、対象物を保持するための部材という点で機能が近い、発電用原子力設備規格（設計・建設規格 <第 I 編 軽水炉規格> JSME S NC1-2005）（日本機械学会 2005 年 9 月）（2007 年追補版含む）（以下「設計・建設規格」という。）の支持構造物とみなして設計を行う。したがって、MSF-21P 型の外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの設計においては、クラス 1 支持構造物の規定を準用する。

3. 記号

本書及び「添付書類 8-4-2 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの応力計算書」(以下「応力計算書」という。)において、第 3-1 表に示す応力評価に関する記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

第 3-1 表 応力評価に関する記号 (1/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------|--------------------------------------|-----------------|
| a_b | 蓋部中性子遮蔽材カバー外半径 | mm |
| a_1 | 蓋部中性子遮蔽材カバー支持半径 | mm |
| a_i | 外筒内半径 | mm |
| a_{b0} | 胴(底部)外半径 | mm |
| A_1 | 胴の断面積 | mm ² |
| A_2 | 外筒の断面積 | mm ² |
| b_b | 底部中性子遮蔽材カバー外半径 | mm |
| b_1 | 底部中性子遮蔽材カバー支持半径 | mm |
| b_i | 下部端板内半径 | mm |
| C_i | 内外比率係数 (i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) | — |
| C_H | 水平方向設計震度 | — |
| C_V | 鉛直方向設計震度 | — |
| D_1 | 蓋部中性子遮蔽材カバーの曲げ剛性 | N・mm |
| D_2 | 底部中性子遮蔽材カバーの曲げ剛性 | N・mm |
| E_1 | 蓋部中性子遮蔽材カバーの縦弾性係数 | MPa |
| E_2 | 底部中性子遮蔽材カバーの縦弾性係数 | MPa |
| E_3 | 胴の縦弾性係数 | MPa |
| E_4 | 外筒の縦弾性係数 | MPa |
| E_5 | 下部端板の縦弾性係数 | MPa |
| f_t | 許容引張応力 | MPa |
| f_s | 許容せん断応力 | MPa |
| f_c | 許容圧縮応力 | MPa |
| f_b | 許容曲げ応力 | MPa |
| f_D | 許容支圧応力 | MPa |

第3-1表 応力評価に関する記号 (2/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------------|------------------------------------|-----------------|
| f_t^* | 許容引張応力 (注1) | MPa |
| f_s^* | 許容せん断応力 (注1) | MPa |
| f_c^* | 許容圧縮応力 (注1) | MPa |
| f_b^* | 許容曲げ応力 (注1) | MPa |
| f_D^* | 許容支圧応力 (注1) | MPa |
| g | 重力加速度 | m/s^2 |
| G_1 | 水平方向加速度 | m/s^2 |
| $G_{2.4}$ | 鉛直方向加速度 (貯蔵架台への衝突時) | m/s^2 |
| $G_{2.5}$ | 鉛直方向加速度 (貯蔵時 (地震力が作用する場合)) | m/s^2 |
| h_1 | 側部中性子遮蔽材水平方向高さ | mm |
| h_2 | 側部中性子遮蔽材鉛直方向高さ | mm |
| $K_{Mc b}$ | 曲げモーメント係数 | — |
| K_{Qb} | せん断力係数 | — |
| $K_{\theta b}$ | たわみ係数 | — |
| L_i | 負荷荷重内外比率係数 ($i=11, 14, 17$) | — |
| m_1 | 蓋部中性子遮蔽材カバーの単位面積当たりの質量 | kg/mm^2 |
| m_b | 底部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材カバーの単位面積当たりの質量 | kg/mm^2 |
| m_f | 伝熱フィンの質量 | kg |
| m_0 | 外筒の質量 | kg |
| M_c | 蓋部又は底部中性子遮蔽材カバー中央部の単位長さ当たりの曲げモーメント | $N \cdot mm/mm$ |
| $M_{r a}$ | 蓋部又は底部中性子遮蔽材カバー外周部の単位長さ当たりの曲げモーメント | $N \cdot mm/mm$ |
| $M_{r b}$ | 下部端板の単位長さ当たりの曲げモーメント | $N \cdot mm/mm$ |
| p_r | 鉛直方向加速度により作用する側部中性子遮蔽材自重による負荷圧力 | MPa |
| p_t | 鉛直方向加速度により作用する下部端板自重による圧力 | MPa |
| p_f | 鉛直方向加速度により作用する伝熱フィン及び外筒自重による負荷圧力 | MPa |
| $p_{i r}$ | 蓋部中性子遮蔽材充填部圧力 | MPaG |
| $p_{b r}$ | 底部中性子遮蔽材充填部圧力 | MPaG |

(注1) f_t , f_s , f_c , f_b , f_D の値を算出する際に「設計・建設規格」SSB-3121.1 (1) a. の本文中 S_y 及び $S_y (RT)$ とあるのを $1.2S_y$ 及び $1.2S_y (RT)$ と読み替えて算出した値。

第3-1表 応力評価に関する記号 (3/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|-----------|---|--------------------|
| P_{Pg} | 側部中性子遮蔽材充填部圧力（軸方向） | MPaG |
| P_{PGA} | 側部中性子遮蔽材充填部圧力（径方向） | MPaG |
| p_1 | 水平方向加速度により作用する側部中性子遮蔽材の面圧 | MPa |
| P | 外筒の軸方向熱膨張による下部端板への負荷荷重 | N |
| q | 等分布荷重 | MPa |
| q_b | 等分布荷重 | MPa |
| q_l | 等分布荷重 | MPa |
| Q_a | 蓋部又は底部中性子遮蔽材カバー外周部に作用する単位長さ当たりのせん断力 | N/mm |
| Q_b | 単位長さ当たりのせん断力 | N/mm |
| r_i | 胴内半径 | mm |
| r_o | 胴外半径 | mm |
| r_m | 外筒平均半径 | mm |
| S_d^* | 弾性設計用地震動 S_d に相当する地震力又は静的地震力のいずれか大きい方 | — |
| S_s | 基準地震動 S_s に相当する地震力 | — |
| S_y | 設計降伏点 | MPa |
| S_u | 設計引張強さ | MPa |
| t_2 | 底部中性子遮蔽材カバーの設定温度と常温との差 | °C |
| t_3 | 胴の設定温度と常温との差 | °C |
| t_4 | 外筒の設定温度と常温との差 | °C |
| t_5 | 下部端板の設定温度と常温との差 | °C |
| t | 外筒板厚 | mm |
| t_l | 蓋部中性子遮蔽材カバー板厚 | mm |
| t_b | 底部中性子遮蔽材カバー板厚 | mm |
| t_t | 底部中性子遮蔽材板厚 | mm |
| t_r | 下部端板板厚 | mm |
| w | 下部端板に負荷される単位面積当たりの質量 | kg/mm ² |
| W | 下部端板の単位長さ当たりの負荷荷重 | N/mm |
| ρ_l | 蓋部中性子遮蔽材カバー密度 | kg/mm ³ |
| ρ_f | 中性子遮蔽材密度 | kg/mm ³ |
| ρ_s | 底部中性子遮蔽材カバー密度 | kg/mm ³ |
| ρ_t | 下部端板密度 | kg/mm ³ |

第3-1表 応力評価に関する記号 (4/4)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|---------------------|-------------------|--------------|
| σ | 評価断面に垂直な方向の応力 | MPa |
| σ_{b1} | 曲げ応力 (一次応力) | MPa |
| σ_{b2} | 曲げ応力 (二次応力) | MPa |
| σ_{b12} | 曲げ応力 (一次+二次応力) | MPa |
| $c\sigma_b$ | 圧縮側曲げ応力の絶対値 | MPa |
| $i\sigma_b$ | 引張側曲げ応力の絶対値 | MPa |
| σ_c | 圧縮応力の絶対値 | MPa |
| σ_t | 引張応力の絶対値 | MPa |
| σ_T | 組合せ応力 | MPa |
| σ_{T1} | 組合せ応力 (一次応力) | MPa |
| σ_{T12} | 組合せ応力 (一次+二次応力) | MPa |
| σ_x | 評価断面に垂直な方向の応力 | MPa |
| σ_y | 評価断面に垂直な方向の応力 | MPa |
| σ_{r2} | 径方向応力 (二次応力) | MPa |
| σ_{z2} | 軸方向応力 (二次応力) | MPa |
| $\sigma_{\theta 1}$ | 周方向応力 (一次応力) | MPa |
| τ | せん断応力 | MPa |
| τ_1 | せん断応力 (一次応力) | MPa |
| τ_2 | せん断応力 (二次応力) | MPa |
| τ_{12} | せん断応力 (一次+二次応力) | MPa |
| τ_{xy} | せん断応力 | MPa |
| ν | ポアソン比 | — |
| α_2 | 底部中性子遮蔽材カバーの熱膨張係数 | mm / (mm・°C) |
| α_3 | 胴の熱膨張係数 | mm / (mm・°C) |
| α_4 | 外筒の熱膨張係数 | mm / (mm・°C) |
| α_5 | 下部端板の熱膨張係数 | mm / (mm・°C) |
| $\Delta\delta$ | 変位の差 | mm |
| δ_1 | 胴の変位 | mm |
| δ_2 | 下部端板の変位 | mm |
| δ_3 | 底部中性子遮蔽材カバーの変位 | mm |
| δ_4 | 胴の変位 | mm |
| θ_b | 曲げモーメント係数 | — |

4. 設計条件

外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

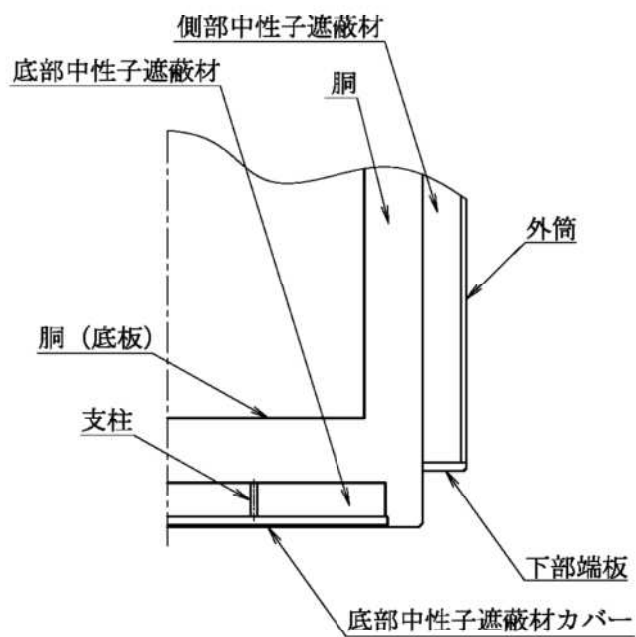
各部位の基本仕様を第 4-1 表に、各部位の構造図を第 4-1 図及び第 4-2 図に示す。

第 4-1 表 基本仕様

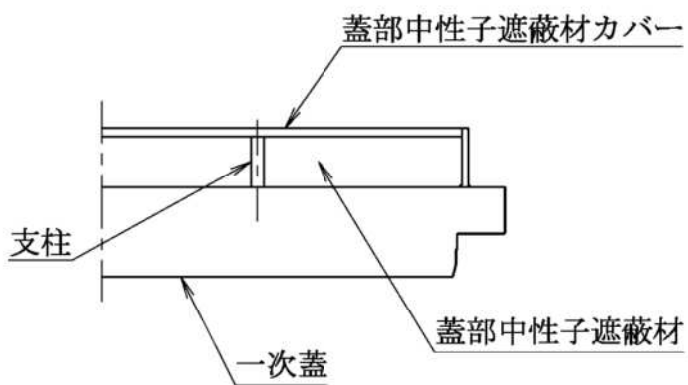
| 部位 | 最高使用圧力 (MPaG) | 最高使用温度 (°C) | 材質 |
|-------------|------------------|-------------------------------------|--------|
| 外筒 | 0.38 | 125 ^(注1) | SGV480 |
| 下部端板 | 0.18 | 125 ^(注1) ^(注2) | SUS304 |
| 蓋部中性子遮蔽材カバー | 0.23 | 110 ^(注1) ^(注2) | SGV480 |
| 底部中性子遮蔽材カバー | 0.28 | 150 ^(注1) ^(注2) | SUS304 |

(注 1) 各部位の最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す温度を保守側に設定した値である。

(注 2) 下部端板は外筒を、蓋部中性子遮蔽材カバーは一次蓋を、底部中性子遮蔽材カバーは胴（底板）の温度を参照した。



第 4-1 図 外筒、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーの構造図



第 4-2 図 蓋部中性子遮蔽材カバーの構造図

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を第4-2表に示す。

第4-2表 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象

| 設計事象 | 供用状態 | 使用済燃料貯蔵施設内における選定事象 ^(注1) |
|-------------|------|--|
| I | A | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵（貯蔵時） ・金属キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時） ・搬送台車による搬送（台車搬送時） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時） |
| II | B | <ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスクのたて起こし架台への衝突 （たて起こし架台への衝突時） ・金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時） ・搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時） |
| $I + S_d^*$ | C | <ul style="list-style-type: none"> ・S_d^*相当地震時（貯蔵時（S_d^*相当地震力が作用する場合）） |
| $I + S_s$ | D | <ul style="list-style-type: none"> ・S_s相当地震時（貯蔵時（S_s相当地震力が作用する場合）） |

（注1）本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

4.3 荷重の種類とその組合せ

各部位の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

第4-3表 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

| 荷 重 | | | 自重による荷重 | 吊上げ荷重 | 衝撃荷重 | 熱荷重 | 地震荷重 |
|-------------|------|----------------------|-----------|-------|------|-----|------|
| 設計事象 | 供用状態 | 評価事象 | | | | | |
| I | A | 貯蔵時 | ○ | — | — | ○ | — |
| | | 吊上げ時 | — (注1) | ○ | — | ○ | — |
| II | B | 衝撃荷重作用時 | — (注1) | — | ○ | ○ | — |
| $I + S_d^*$ | C | S_d^* 相当地震力が作用する場合 | ○ | — | — | — | ○ |
| $I + S_s$ | D | S_s 相当地震力が作用する場合 | ○ | — | — | — | ○ |

(注1) 本状態での自重による荷重は、吊上げ荷重又は衝撃荷重の慣性力による荷重に含まれる。

5. 評価条件

5.1 評価対象とする事象

4.2 節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち、第5-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象

| 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 荷重条件 | 備考 |
|----------------------|--------------|---|---|--|-----------------------------|
| I 及び II | A 及び B | 貯蔵架台への衝突時 | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時 ・吊上げ時 ・台車搬送時 ・準備作業時 ・たて起こし架台への衝突時 ・搬送中の急停止時 | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：5 g（自重考慮） ・熱荷重 | 荷重条件が最も厳しいのは貯蔵架台への衝突時荷重である。 |
| I + S _d * | C | 貯蔵時 S _d *相当 地震力が作用 する場合 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・地震力 水平方向：1.5 g 鉛直方向：1.0 g | — |
| I + S _s | D | 貯蔵時 S _s 相当 地震力が作用 する場合 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・地震力 水平方向：1.5 g 鉛直方向：1.0 g | — |

5.2 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.3 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。応力計算に使用する物性値及び許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第 5-2 表に示す。物性値を定める温度を第 5-3 表に示す。

5.4 許容応力

各供用状態における許容応力は、「設計・建設規格」SSB-3100 による。許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。許容応力値を定める温度を第 5-3 表に示す。

第 5-2 表 応力計算に使用する材料の物性値

| 部 位 | 材 料 | 温度 (°C) | 縦弾性 係数 (MPa) | 平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm \cdot °C)) | ポアソン比 (-) | 設計 降伏点 S_y (MPa) | 設計 引張強さ S_u (MPa) |
|---------------------|--------------------|------------|--------------------|--|--------------|-----------------------------|------------------------------|
| 胴 | 炭素鋼 (GLF1) | 135 | 196000 | 11.11 | 0.3 | — | — |
| 外筒 | 炭素鋼 (SGV480) | 125 | 196000 | 11.00 | 0.3 | 235 | 427 |
| 蓋部中性子 遮蔽材 カバー | 炭素鋼 (SGV480) | 110 | 197000 | 10.81 | 0.3 | 236 | 429 |
| 下部端板 | ステンレス鋼 (SUS304) | 125 | 188000 | 16.05 | 0.3 | 163 (205) (注1) | 431 |
| 底部中性子 遮蔽材 カバー | ステンレス鋼 (SUS304) | 150 | 186000 | 16.21 | 0.3 | 155 (205) (注1) | 422 |

(注1) 40°Cにおける設計降伏点

第 5-3 表 物性値及び許容応力値を定める温度

| 部位 | 除熱解析温度 (°C) | 物性値及び許容応力値を 定める温度 (°C) |
|-------------|----------------|------------------------------|
| 外筒 | 116 | 125 |
| 下部端板 | 116 (注1) | 125 |
| 胴 | 129 | 135 |
| 胴 (底板) | 141 | 150 |
| 底部中性子遮蔽材カバー | 141 (注2) | 150 |
| 一次蓋 | 104 | 110 |
| 蓋部中性子遮蔽材カバー | 104 (注3) | 110 |

(注1) 下部端板は外筒の除熱解析温度を引用する。

(注2) 底部中性子遮蔽材カバーは胴 (底板) の除熱解析温度を引用する。

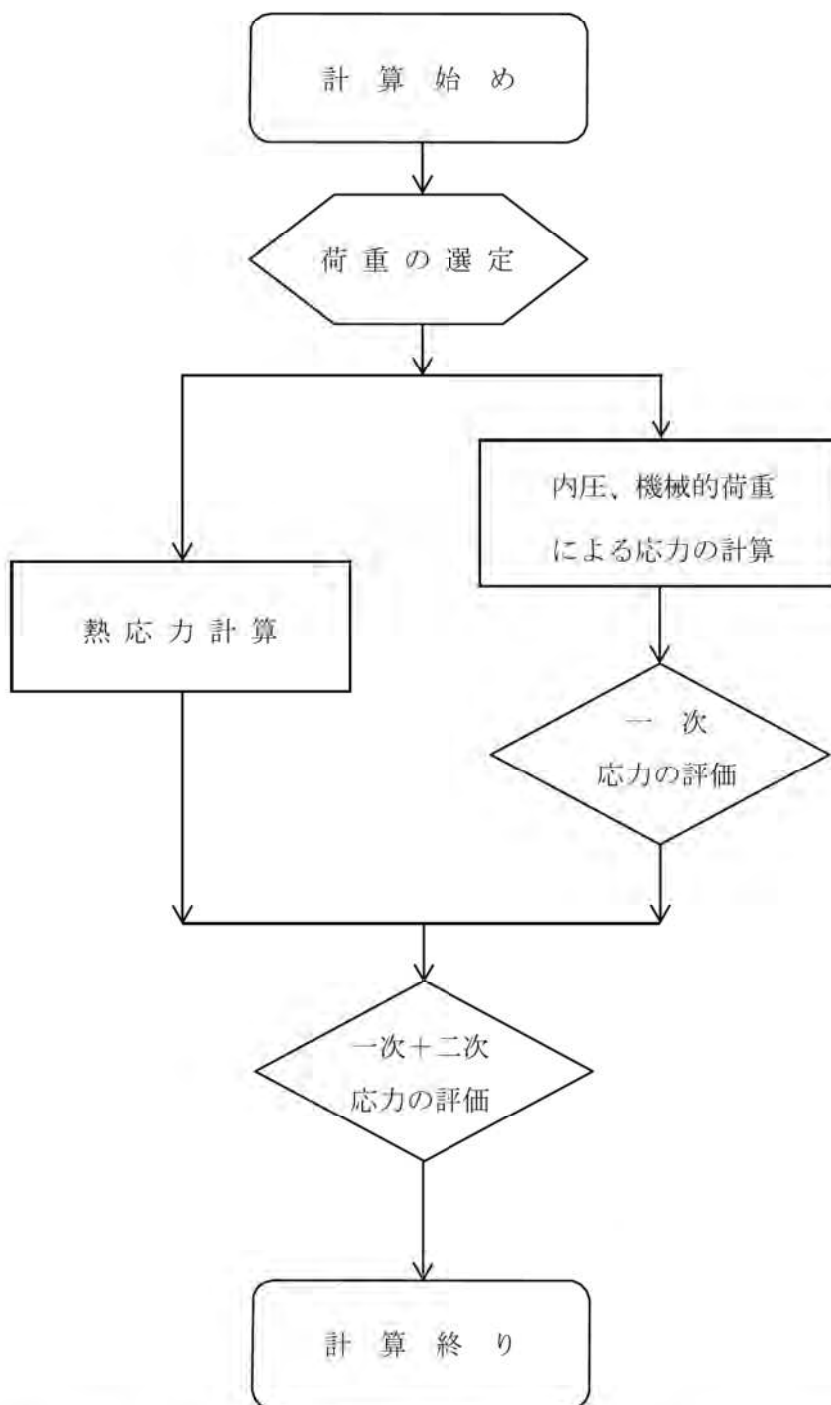
(注3) 蓋部中性子遮蔽材カバーは一次蓋の除熱解析温度を引用する。

6. 応力評価の手順

6.1 評価手順の概要

各部位の応力評価フローを第6-1図に示す。

各部位の応力評価は、想定される内圧、機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。



第6-1図 外筒、下部端板及び蓋部・底部中性子遮蔽材カバーの応力評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部位の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の3つである。

a. 内圧

b. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含むMSF-21P型の貯蔵時の設計質量を用いる）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

c. 熱荷重

熱荷重は、各部位に生じる温度変化、温度勾配による荷重であって、「添付書類5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に記載する除熱解析で得られた温度の結果から得られるものをいう。

6.3.2 応力の評価

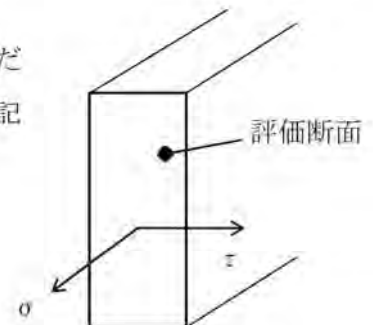
応力の計算結果は、「設計・建設規格」GNR-2130による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力

各部位の許容応力値を第6-1表から第6-4表に示す。



第 6-1 表 外筒用材料の許容応力値

(単位：MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|---------------------|------------------|-------|----------------------|------------|
| 供用状態 A及びB | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 156 | f_t |
| | | せん断応力 | — | f_s |
| 圧縮応力 | | — | f_c | |
| 曲げ応力 | | — | f_b | |
| 支圧応力 | | — | f_p | |
| 一次 + 二次 応力 | 引張・圧縮応力 | 468 | $3f_t$ | |
| | せん断応力 | — | $3f_s$ | |
| | 曲げ応力 | — | $3f_b$ | |
| | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ | |
| | 座屈応力 | — | $1.5f_s$ 又は $1.5f_c$ | |
| 供用状態 C | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 234 | $1.5f_t$ |
| せん断応力 | | — | $1.5f_s$ | |
| 圧縮応力 | | — | $1.5f_c$ | |
| 曲げ応力 | | — | $1.5f_b$ | |
| 支圧応力 | | — | $1.5f_p$ | |
| 供用状態 D | 一次 応力 (注1) | 引張応力 | 282 | $1.5f_t^*$ |
| せん断応力 | | — | $1.5f_s^*$ | |
| 圧縮応力 | | — | $1.5f_c^*$ | |
| 曲げ応力 | | — | $1.5f_b^*$ | |
| 支圧応力 | | — | $1.5f_p^*$ | |

(注1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ_x 、 σ_y) とせん断応力 (τ_{xy}) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c + f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{\tau \sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ここで、②及び③において、供用状態A及びBの一次応力については上式による。供用状態Cの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t$ 、 $1.5f_c$ 、 $1.5f_b$ とする。供用状態Dの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t^*$ 、 $1.5f_c^*$ 、 $1.5f_b^*$ とする。

第 6-2 表 下部端板用材料の許容応力値

(単位：MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|--------------|-----------------|---------|-------|----------------------|
| 供用状態 A及びB | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 136 | f_t |
| | | せん断応力 | 78 | f_s |
| | | 圧縮応力 | — | f_c |
| | | 曲げ応力 | 136 | f_b |
| | | 支圧応力 | — | f_p |
| | 一次 + 二次応力 | 引張・圧縮応力 | 408 | $3f_t$ |
| | | せん断応力 | 234 | $3f_s$ |
| | | 曲げ応力 | 408 | $3f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5f_s$ 又は $1.5f_c$ |
| 供用状態 C | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 204 | $1.5f_t$ |
| | | せん断応力 | 117 | $1.5f_s$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c$ |
| | | 曲げ応力 | 204 | $1.5f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| 供用状態 D | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 220 | $1.5f_t^*$ |
| | | せん断応力 | 127 | $1.5f_s^*$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c^*$ |
| | | 曲げ応力 | 220 | $1.5f_b^*$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p^*$ |

(注1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ_x 、 σ_y) とせん断応力 (τ_{xy}) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ここで、②及び③において、供用状態A及びBの一次応力については上式による。供用状態Cの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t$ 、 $1.5f_c$ 、 $1.5f_b$ とする。供用状態Dの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t^*$ 、 $1.5f_c^*$ 、 $1.5f_b^*$ とする。

第 6-3 表 蓋部中性子遮蔽材カバー用材料の許容応力値

(単位 : MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|--------------|-----------------|---------|-------|----------------------|
| 供用状態 A及びB | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 157 | f_t |
| | | せん断応力 | 90 | f_s |
| | | 圧縮応力 | — | f_c |
| | | 曲げ応力 | 157 | f_b |
| | | 支圧応力 | — | f_p |
| | 一次 + 二次応力 | 引張・圧縮応力 | — | $3f_t$ |
| | | せん断応力 | 270 | $3f_s$ |
| | | 曲げ応力 | 471 | $3f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5f_s$ 又は $1.5f_c$ |
| 供用状態 C | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 235 | $1.5f_t$ |
| | | せん断応力 | 135 | $1.5f_s$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c$ |
| | | 曲げ応力 | 235 | $1.5f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| 供用状態 D | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 283 | $1.5f_t^*$ |
| | | せん断応力 | 163 | $1.5f_s^*$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c^*$ |
| | | 曲げ応力 | 283 | $1.5f_b^*$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p^*$ |

(注 1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ_x 、 σ_y) とせん断応力 (τ_{xy}) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ここで、②及び③において、供用状態A及びBの一次応力については上式による。供用状態Cの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t$ 、 $1.5f_c$ 、 $1.5f_b$ とする。供用状態Dの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t^*$ 、 $1.5f_c^*$ 、 $1.5f_b^*$ とする。

第 6-4 表 底部中性子遮蔽材カバー用材料の許容応力値

(単位 : MPa)

| 許容応力区分 | 応力の種類 | | 許容応力値 | 許容応力 |
|--------------|--------------|---------|-------|----------------------|
| 供用状態 A及びB | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 136 | f_t |
| | | せん断応力 | 78 | f_s |
| | | 圧縮応力 | — | f_c |
| | | 曲げ応力 | 136 | f_b |
| | | 支圧応力 | — | f_p |
| | 一次+二次応力 | 引張・圧縮応力 | 408 | $3f_t$ |
| | | せん断応力 | 234 | $3f_s$ |
| | | 曲げ応力 | 408 | $3f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| | | 座屈応力 | — | $1.5f_s$ 又は $1.5f_c$ |
| 供用状態 C | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 204 | $1.5f_t$ |
| | | せん断応力 | 117 | $1.5f_s$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c$ |
| | | 曲げ応力 | 204 | $1.5f_b$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p$ |
| 供用状態 D | 一次応力 (注1) | 引張応力 | 209 | $1.5f_t^*$ |
| | | せん断応力 | 120 | $1.5f_s^*$ |
| | | 圧縮応力 | — | $1.5f_c^*$ |
| | | 曲げ応力 | 209 | $1.5f_b^*$ |
| | | 支圧応力 | — | $1.5f_p^*$ |

(注1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ_x 、 σ_y) とせん断応力 (τ_{xy}) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ここで、②及び③において、供用状態A及びBの一次応力については上式による。
 供用状態Cの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t$ 、 $1.5f_c$ 、 $1.5f_b$ とする。
 供用状態Dの一次応力の場合、分母の f_t 、 f_c 、 f_b は $1.5f_t^*$ 、 $1.5f_c^*$ 、 $1.5f_b^*$ とする。

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を第6-5表に示す。

第6-5表 数値の丸め方一覧表

| 数値の種類 | 単位 | 処理桁 | 処理法 | 表示桁 |
|---------|----------------------------|----------|------|--------|
| 最高使用圧力 | MPa | — | — | 設計値 |
| 最高使用温度 | ℃ | — | — | 設計値 |
| 縦弾性係数 | MPa | 有効数字4桁目 | 四捨五入 | 有効数字3桁 |
| 平均熱膨張係数 | $\times 10^{-6}$ mm/(mm・℃) | 有効数字5桁目 | 四捨五入 | 有効数字4桁 |
| 許容応力値 | MPa | 小数点以下第1位 | 切捨て | 整数位 |
| 計算応力値 | MPa | 小数点以下第1位 | 切上げ | 整数位 |
| 長さ | mm | — | — | 設計値 |
| 加速度 | m/s ² | — | — | 設計値 |
| 面積 | mm ² | 有効数字5桁目 | 切捨て | 有効数字4桁 |
| 質量 | kg | — | — | 設計値 |
| 力 | N | 有効数字5桁目 | 切上げ | 有効数字4桁 |

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) (一社) 日本機械学会、「機械工学便覧 新版」、(1987)
- (2) Warren C. Young , Richard G . Budynas , Ali M . Sadegh , “ Roark's Formulas For Stress and Strain Eighth edition ” , the McGraw-Hill Companies, (2011)
- (3) 平 修二 監修、「現代 材料力学」、(株) オーム社、(1970)