

石油化工设备设计参考资料

JPL-7R-35-78

日本带裙座塔类的强度计算标准

~纺织部设计院译~

化学工业部设备设计技术中心站

说 明



本资料为日本石油学会标准 JPI-7R-35-78《带裙座塔类的强度计算》，为日本石油学会 1978 年 2 月 24 日修订。考虑到目前自日本引进的技术装置较多，这本标准有一定参考价值，故予以油印出版，供内部参考。

本资料由纺织部设计院四室张苑等同志翻译。由于水平关系可能有错误，如涉及到有关方面的责任交涉则请以原版为准。

化工部设备设计技术中心站

一九七九年二月

带裙座塔类的强度计算指南审议会组成表：

装置部会 委员 3 4 名

(部会长) 野口浩作 与亚石油株式会社

机器分科 委员 2 1 名

(委员长) 伊藤 满 三菱石油株式会社

带裙座塔类的强度计算重新评价专门委员会：

(主查) 岸 俊太郎 日挥株式会社

上村晋平 出光与产株式会社

日下启补 株式会社、新潟铁工所

古角禧武 日本钢管株式会社

小山利夫 石川岛播磨重工业株式会社

坂本秀士 三井造船株式会社

铃木英昭 与亚石油株式会社

田中一宏 三菱重工业株式会社

长岛利行 千代田化工建设株式会社

藤谷让 日立造船株式会社

丸山茂治 东洋エンジニアリング株式会社

安田喜有 日本石油株式会社

(事務局) 大森 猛 社团法人石油学会

带裙座塔 类的强度计算目录

1. 适用范围.....	1
2. 适用法定标准及标准.....	1
3. 应考虑载荷种类.....	1
4. 风载符.....	1
5. 地震载荷.....	2
6. 载荷条件.....	2
7. 仅与压力条件有关的筒体及封头强度计算.....	3
8. 承受组合载荷的筒体及封头的强度计算.....	3
9. 裙座地脚螺栓、基础环板的强度计算.....	6

说 明

带裙座的塔 类强度计算说明

目 录

1. 绪 言	9
2. 制定经过	9
3. 重新审议中的问题要点	9
4. 标准的内容	10
4.1 适用范围	10
4.2 适用的法定标准和标准	11
4.3 应考虑载荷种类	11
4.4 风载荷	11
4.5 地震载荷	15
4.6 载荷条件	16
4.7 承受组合载荷的筒体计算和许用应力	16
4.8 裙座的计算	17
4.9 地脚螺栓和基础环的计算	17
5. 法兰的计算	23
6. 由风引起塔的振动	24
参考文件 1 塔 类的一次自振周期计算	27
参考文件 2 受组合载荷的塔 类强度计算书	31
参考文件 3 地脚螺栓和螺栓座强度计算	40
参考文件 4 塔 类的抗震设计	47
1. 前 言	47
2. 解析方法	47
3. 动态解析的模拟法	52
4. 衰减系数	56
5. 应力评定	58
参考文件 5 垂直于风方向的风载荷	60

带裙座塔类的强度计算

1. 适用范围

本标准指出的主要是石油工业中（包括石油精制、天然气和石油化学工业）所使用的“带裙座的自立式塔类”（以下简称塔类）的强度计算的规则。

2. 适用的法定标准及标准

塔类的强度计算适用的法定标准以及应根据的标准如下：

日本工业标准：JIS B 8243 压力容器结构。

与劳动省有关的：劳动卫生安全法

锅炉及压力容器安全规则

压力容器结构标准

与通产省有关的：高压气体管理法

一般高压气体保安规则

特种设备检查规则

ASME：锅炉和压力容器规范第Ⅳ篇

压力容器第一分篇。

3. 应考虑载荷种类

3.1 长期载荷

3.1.1 内压或者外压

3.1.2 自重（包括物料以及附件的重量）

3.1.3 偏心载荷

3.2 短期载荷

3.2.1 风载荷

3.2.2 地震载荷

备 注：

1. 由于强度或压力的急剧变化引起的冲击载荷在设计中另行研究。

2. 以风载荷、地震载荷之中的大者作为最大的短期载荷。

4. 风载荷

4.1 风载荷由形状系数和有效面积乘以风压值得：

$$F_w = q \cdot C \cdot A$$

式中： F_w ：风载荷 (kg f) {N}

q ：风压值 (kg f / m²) {Pa}

C ：形状系数 (对圆筒取 0.7)

A ：有效面积 (m²)

备注：{ } 中表示为国际单位制。(下同)

4.2 风压值按下计算：

塔类的高度 16 m 以下的部分

$$q = 60 \sqrt{h}$$

塔类的高度超过 16 m 的部分

$$q = 120 \sqrt{h}$$

式中： h ：距地面的高度 (m)

5. 地震载荷

5.1 地震载荷由地震系数乘以塔的各部分重量求得：

$$F_e = \sum K_i \cdot W_i$$

式中： F_e ：地震载荷 (kg f) {N}

K_i ：地震系数

W_i ：塔的各部分重量 (kg f) {N}

5.2 地震系数对于塔类的高度在 16 M 以下的部分取 0.2，高度超过 16 M 的部分，以高度每增加 4 M，将上述的数值加上 0.01 作为标准值。

6. 载荷条件

6.1 塔类在遇到的所有情况下必须安全。各种情况下应考虑载荷，种类为表 2 中标有符号“O”的载荷。

表 2

载 荷 \ 状 态	安 装 状 态	水 压 试 验 和 装 满 水 状 态	正 常 操 作 状 态	停 工 状 态
自重 (包括附件、保温材料等)	0 (1)	0 (2)	0	0
偏 心 载 荷	/	0	0	0
内压或者外压	/	/	0 (3)	/ (4)
试验时的压力 (水压时或装满水时)	/	0	/	/
操作时的物料重量	/	/	0	/ (5)
试验时的水重量	/	0	/	/
风载荷或地震载荷	0	/	0	0

表注：(1)不包括附件、保温材料等。

(2)不包括保温材料。

(3)在操作状态中有压力变化的时，对于低的操作压力必须核算。

(4)可能出现真空状态时要考虑外压。

(5)有残留液时，要考虑残留液重量。

6.2 上述的载荷条件中，原则上是对正常操作状态和停工状态进行强度计算。但是，在各种状态中如果有比较苛刻的条件，那末对该状态要进行强度计算。

7. 仅与压力有关的筒体及封头的强度计算：

根据承受内压或者承受外压的壳体和封头的强度计算所适用的法定标准和标准进行计算。

8. 承受组合载荷的筒体和封头的强度计算：

8.1 塔类的筒体按第7项进行基本的环向应力计算后，进行组合载荷的应力计算。

8.2 载荷叠加方向根据表3。以拉应力为正(+)，压应力为负(-)，

组合载荷由它们相加而得。

表 3

载 荷 种 类	载 荷 方 向
压 力	内压拉伸(+), 外压压缩(-)
自 重	压 缩(-)
力 矩 载 荷	筒体的一侧是拉伸(+), 另一侧是压缩(-)

备注：力矩载荷是由载荷，地震载荷，偏心载荷引起的。

8.3 组合拉应力和组合压应力

$$\sigma_a = \pm \frac{P \cdot D_m}{400(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi D_m(t-\alpha)} \pm \frac{4000M}{\pi D_m^2(t-\alpha)}$$

$$\left\{ \sigma_a = \pm \frac{P \cdot D_m}{4(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi D_m(t-\alpha)} \pm \frac{4000M}{\pi D_m^2(t-\alpha)} \right\}$$

式中： σ_a ：作用在筒体上的最大组合拉应力和组合压应力
(kgf/mm²) {N/mm²} 须分别满足以下条件：

$|\sigma_a| \leq \sigma_{all} \cdot \eta$ 不考虑风载荷、地震载荷时

$|\sigma_a| \leq 1.5 \sigma_{all} \cdot \eta$ 或者 $\sigma_y \cdot \eta$ 两者中的较小值.....

考虑风载荷、地震载荷时

σ_{all} ：由 7 项所适用的法定标注和标准规定的许用应力 (kgf/mm²) {N/mm²}

P：设计压力 (kgf/cm²) {MPa}

t：筒体壁厚 (mm)

D_m ：扣除腐蚀裕量的筒体平均直径 (mm)

M：计算截面上的弯矩 (kgf·m) {N·m}

W：计算截面上的总重量 (kgf) {N}

α ：筒体的腐蚀裕度 (mm)

η : 法定标准或标准中规定的焊缝系数。但对压应力 $\eta=1.0$ 。
 σ_y : 设计温度或常温下材料的屈服极限或 0.2% 残余变形时的屈服极限 (kg f/mm^2) (N/mm^2)。

8.4 组合剪切应力：

对作用在筒体上的环向应力和纵向应力，只在它们的符号不同时校核剪切应力。

$$\sigma_{\theta} = \pm \frac{(P+P_H) \cdot D_m}{200(t-\alpha)}$$

$$\left\{ \sigma_{\theta} = \pm \frac{(P+P_H) \cdot D_m}{2(t-\alpha)} \right\}$$

$$\sigma_l = \pm \frac{P \cdot D_m}{400(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi \cdot D_m(t-\alpha)} \pm \frac{4000M}{\pi D_m^2(t-\alpha)}$$

$$\left\{ \sigma_l = \pm \frac{P \cdot D_m}{4(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi \cdot D_m(t-\alpha)} \pm \frac{4000M}{\pi \cdot D_m^2(t-\alpha)} \right\}$$

式中： σ_{θ} ：作用在筒体上的环向应力 (kg f/mm^2) (N/mm^2)

σ_l ：作用在筒体上的纵向应力 (kg f/mm^2) (N/mm^2)

σ_{θ} 、 σ_l 须满足以下条件：

$|\sigma_{\theta} - \sigma_l| \leq \frac{1}{2} \sigma_y$ 不考虑风载荷，地震载荷时，

$|\sigma_{\theta} - \sigma_l| \leq 1.5 \times \frac{1}{2} \sigma_y$ 考虑风载荷、地震载荷时。

P_H ：液柱压力 (kg f/cm^2) (MPa)

8.5 对于纵向弯曲的组合压应力：

$$\sigma_b = \pm \frac{P \cdot D_m}{400(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi \cdot D_m(t-\alpha)} - \frac{4000M}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D_m^2(t-\alpha)}$$

$$\sigma_b = \pm \frac{P \cdot D_m}{4(t-\alpha)} - \frac{W}{\pi \cdot D_m(t-\alpha)} - \frac{4000M}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D_m^2(t-\alpha)}$$

式中： σ_b ：作用在筒体上的纵向弯曲应力（ kgf/mm^2 ）{ N/mm^2 }
须满足以下的条件：

$|\sigma_b| \leq \sigma_{all}$ ，……不考虑风载荷，地震载荷时，

$|\sigma_b| \leq 1.5 \sigma_{all}$ ，……考虑风载荷、地震载荷时，

σ_{all} ：许用纵向弯曲应力（ kgf/mm^2 ）

按下式计算：

$$\sigma_{all} = \frac{0.3E(t-\alpha)}{D_m(1+0.004E/\sigma_y)}$$

式中： E ：设计温度或常温下材料的纵弹性模数（ kgf/mm^2 ）{ N/mm^2 }

8.6 在结构上承受组合载荷的封头，直边部分的应力按筒体计算。

9 裙座、地脚栓、基础环的强度计算

9.1 作用在裙座上的应力

塔类承受组合载荷时，对于裙座的强度计算用下述式子。

9.1.1 合成压缩应力

$$\sigma_s = \frac{-4000M}{(\pi \cdot D_m^2 - 2Y \cdot D_m) \cdot t_s} - \frac{W}{(\pi D_m - Y) \cdot t_s}$$

式中： σ_s ：作用在裙座上的压应力（ kgf/mm^2 ）{ N/mm^2 } 须满足
以下条件：

$|\sigma_s| \leq \sigma_{all}$ ，……不考虑风载荷、地震载荷时。

$|\sigma_s| \leq 1.5 \sigma_{all}$ 或 σ_y 两者中的较小值……考虑风载荷、地震载荷

σ_{all} ：适用于塔体的法定标准或标准中所示的许用应力
（ kgf/mm^2 ）{ N/mm^2 }

σ_y ：计算截面上，对应温度下材料的屈服极限（ kgf/mm^2 ）
{ N/mm^2 }

t_s : 裙座厚度 (mm)

M : 计算截面上的弯矩 (kgf·m) { N·m }

W : 计算截面上的总重量 (kgf) { N }

D_m : 计算截面上裙座的平均直径 (mm)

Y : 裙座开孔部分的水平截面的最大圆周长度 (mm)

9.1.2 对应于纵向弯曲的组合压应力

$$\sigma_{sb} = \frac{-4000M}{\sqrt{2}(\pi D_m^2 - 2Y \cdot D_m) \cdot t_s} - \frac{W}{(\pi D_m - Y) \cdot t_s}$$

式中： σ_{sb} : 作用在裙座上对应于纵向弯曲的压应力 (kgf/mm²)

{ N/mm² } σ_{sb} 须满足以下条件：

$|\sigma_{sb}| \leq \sigma_{all}$, 不考虑风载荷，地震载荷时，

$|\sigma_{sb}| \leq 1.5\sigma_{all}$, 考虑风载荷、地震载荷时

σ_{all} : 许用纵向弯曲应力 (kgf/mm²) { N/mm² } 用下式计算：

$$\sigma_{all} = \frac{0.3E \cdot t_s}{D_m (1 + 0.004E/\sigma_y)}$$

E : 计算截面上，对应温度下材料的纵弹性模数 (kgf/mm²)

{ N/mm² }

9.2 作用在地脚螺栓上的拉应力

$$\sigma_B = \frac{1}{A_s \cdot N} \left(\frac{4000M}{D} - W \right)$$

式中： σ_B : 作用在地脚螺栓上的拉应力 (kgf/mm²) { N/mm² },

σ_B 为小于材料抗拉强度的 $\frac{1}{4} \times 1.5$

A_s : 一个地脚螺栓的有效截面积 (mm²)

N : 地脚螺栓个数

D : 螺栓中心圆直径 (mm)

9.3 作用在基础上的弯曲应力

$$B = \frac{1000M}{Z} + \frac{W}{A}$$

$$\sigma_s = \frac{3 a^2 \cdot B}{t_b^2}$$

式中： σ_s ：作用在基础环上的弯曲应力（ kg f/mm^2 ）（ N/mm^2 ），

σ_s 应低于材料的屈服极限。

B ：加于基础环上的压缩载荷（ kg f/mm^2 ）（ N/mm^2 ）， B

应低于混凝土基础的许用承载力。

Z ：基础环板的断面模数由下式计算。（ mm^3 ）

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_1}$$

D_1 ：为基础环板的外径（ mm ）。

D_2 ：为基础环板的内径（ mm ）。

A ：基础环板的截面积由下式计算。（ mm^2 ）

$$A = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2)$$

t_b ：基础环板的厚度（ mm ）

a ：从裙座外径到基础环板外径的长度，和从裙座内径到基础环板的内径的长度，取其中的较大值。（ mm ）

带裙座的塔 类的强度计算说明

1. 绪 言

本标准主要是对石油工业（包括石油精制天然气和石油化学工业）中使用的带裙座的自立塔 类 强度计算方法的统一规定。

2. 制定经过

在我国（日本）带裙座的自立塔 类，由各种载荷引起的组合应力的计算方法从来没有过明确的规定。1964年1月，在石油学会塔类专门委员会上开始审议，JIS B 8243（非火压力容器结构）中规定的部分就按JIS规范，把没有规定的自立塔强度的部分提出来进行研究，参考测定结果和内外技术论文，于1965年制定了自立塔类强度计算标准。

以后，因为欧美各国对这类问题作了规定，并编入一部分压力容器的规定中。JIS B 8243（非火压力容器结构）在重新修订审议时，已采纳了这些标准的一些部分。

1973年以来，石油学会第7部会（现装置部会），机械分科会，有关塔类重新修订专门委员会，进行此标准的重新修订审议，充实其内容，于1973年6月修订完毕。

更进一步是从1976年7月12日到1977年12月23日，由带裙座塔 类的强度计算规范重新修订专门委员会进行12次重新修订审议，经过1977年12月7日的机械分科会以及1978年1月30日的装置部会的审议，于1978年2月24日修订完毕。

3. 重新修订审议中的主要问题

3.1 采用国际单位制（SI）

JIS B 8243（压力容器结构）（1977年2月修订和公布）中已同时采用国际单位制，因此，本指南中也同时采用SI单位制。但是对于说明部分为了避免复杂化只用MKS单位制。

3.2 删掉附录，钢铁材料的强度表（1972）：

JIS B 8243中规定了各种金属材料的强度。而且，JIS标准还定期重新修订。因此，为了避免出现混乱，将本标准中与JIS标准

所刊登的相同的材料强度表删去。

3.3 地震载荷和抗震设计

石油联合企业大地震时的措施由各种组织提出，考虑抗震设计的方法和结构物的振动特征的工作就可以进行了。

因此，在参考文件4中刊登了塔类的抗震设计。

对于地震载荷，有建筑基准法实施条例第88条，JIS B 8243，联合企业保安防定技术指南等。因各不相同以及近期现行的建筑基准法不修改，所以根据建筑基准法本指南的地震系数，取其标准数值就不改变了。

3.4 垂直于风方向的风载荷：

在旧标准的说明中，回避了对垂直于风方向的风载荷的共振领域的叙述。但是，实际上这是不能回避的，就设置对共振风速的限制来说，因为定量的规定有困难，故允许采用日本建筑学会的标准（钢制烟囱结构计算标准）。增加了关于塔类的衰减系数，用来计算垂直于风方向的风载荷，其计算方法刊登于参考文件5中。

3.5 地脚螺栓的有效截面积：

在旧标准中，地脚螺栓的有效截面积是由螺栓的根径计算，因为地脚螺栓仅校核拉力强度，故采用按JIS B 0101（螺纹术语）的有效截面积。

3.6 螺栓座的强度计算的补充

参考文件3。地脚螺栓和螺栓座的强度计算中，对应地脚螺栓拉力的裙座必要厚度校核项目中，补充了焊于裙座上的环形压板的计算方法。

4 标准的内容

4.1 适用范围

在决定筒体厚度时，必须考虑地震和风载荷等外力的塔类中的多数，因为是采用裙座支承故称为“带裙座的塔类”。因为塔类紧挨着构筑物，或者中部用拉牵支承，或者在结构上以数种办法得持强度上的结合者，它们与自立塔的计算是有区别的，故明确指出适用于“自立塔”。同样，对于用于石油工业以外的自立塔本标准仍然适用。

4.2 适用的法定标准和标准

对自立塔的法令性规定，有关压力容器部分是明确的，有关外力部分没有规定。但是，在JIS B 8243中规定了其中的一部分。同样，BS (British standard) 5500中也有规定。

本文指出的法定标准适用于接此指南的仅与压力有关的强度计算。

4.3 应考虑载荷种类：

(1) 指出了与自立塔有关的各种载荷。其中偏心载荷是安有与塔类直接连接的再沸器和冷凝器的载荷，称为在静止状态的塔类上附加力矩载荷。

(2) 对于自重计算须包括接管、梯子平台、支架以及内部结构的重量。

平台的重量可以按 130 kg f/m^2 近似计算，梯子重量可以按 25 kg f/m^2 近似计算。接管的重量考虑为从和塔的连接处到接管支承处的部分，以此来断定附加于塔类上的重量。

(3) 计算风载荷时，考虑到平台，附带的接管等，对有保温的塔体以增加外径的20%或者增加0.6m作为直径来计算。

(4) 对建设在其它积雪多的地区的雪载荷，当作短期载荷进行计算。

4.4 风载荷

4.4.1 风压由伯努力 (Bernoulli) 方程约：

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots(1)$$

式中：q：风压 (kg f/m^2)

ρ ：空气密度 ($\text{kg f} \cdot \text{Sec}^2/\text{m}^4$)

V：风速 (m/Sec)

空气密度 ρ ，在标准状态下为 $\rho = 0.125 \text{ kg f} \cdot \text{Sec}^2/\text{m}^4$ ，考虑到台风时的气压降低，

设 $\rho = 0.115 \text{ kg f} \cdot \text{Sec}^2/\text{m}^4$

则 $q = 0.058 V^2 \dots\dots\dots(2)$

取决于地面高度的风速变化公式有各种实验公式，在建筑基准法中采用道格拉斯·阿其培德 (Douglas Archibad) 的公式：

$$V = V_0 (h/h_0)^{1/4} \dots\dots\dots(3)$$

另一方面，美国结构计算标准和日本建筑学会的铁塔结构计算标准中是：

$$V = V_0 (h/h_0)^{1/7} \dots\dots\dots(4)$$

用(3)，(4)式，设 $V_0 = 63\text{m/Sec}$ ， $h_0 = 15\text{m}$ 求 V ，然后由(2)式就得(5)，(6)式：

$$q = 60 \sqrt{h} \dots\dots\dots(5)$$

$$q = 120 \sqrt[4]{h} \dots\dots\dots(6)$$

(5)式是以 30m 以下的低建筑物为对象的，用于高的塔类与实际情况相差太大。

(5)式和(6)式有相同的 16m 高度，因此，本指南中对超过 16m 的塔类采用(6)式，16m 以下的塔类采用(5)式。见附图 1。

附 图 1

