



管单元强度计算技术规程

中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

目录

1.管单元强度设计	1
1.1 节点分类	1
2.管单元强度计算	3
2.1 轴向拉伸	3
2.2 轴向压缩	4
2.3 抗弯强度	6
2.4 剪切强度	8
2.5 静水压力下强度计算	11
2.6 环向屈曲	11
2.7 无静水压力下拉弯、压弯构件强度计算	13
2.8 拉弯、压弯构件和静水压力	14
2.9 轴向压缩、弯曲和静水压力	14
2.10 有效长度	15
2.11 锥形过渡热点应力	16

1.管单元强度设计

1.1 节点分类

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.2.5 节, 导管架结构可分为 Y、K 和 X 接头(也称为交叉接头)三种接头, 如下。

Y 型: 垂直于弦的支撑轴向力的分量由弦中的梁剪切平衡, 则支撑和弦构成 y 形接头。平行于弦的支撑件轴向力由弦中的轴向力来平衡。

K 型: 垂直于弦的支撑轴向力分量相互平衡在 10 % 以内, 则同一平面和弦同一侧的一对支撑构成 k 管节点。平行于弦的轴向支撑力的分量由弦中的轴向力来平衡。

X 型: 在弦的同一平面或结合弦两侧的其他结构组件, 如果轴向力通过弦传递到另一边, 则构成 X 形接头: 在弦中没有整体反应。

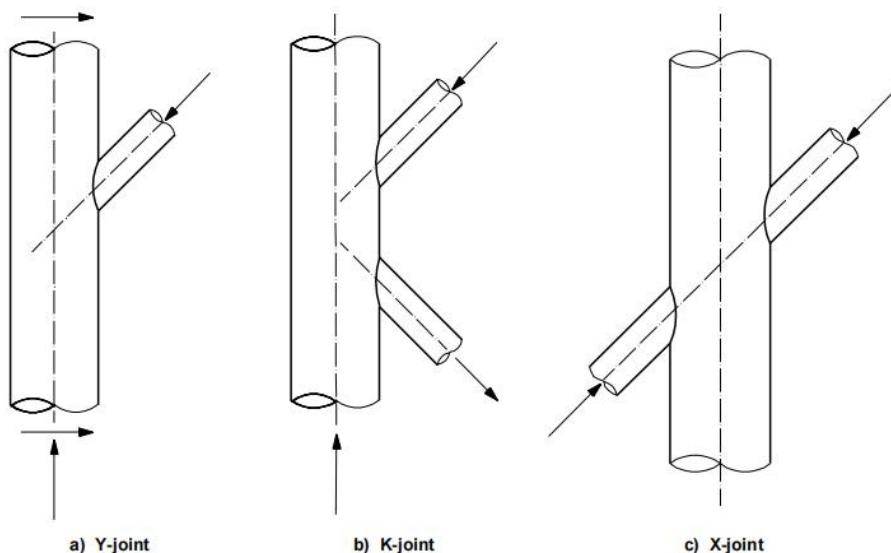


图 5.10.1 基本节点类型

海上固定钢结构通常是在一个平面或多个平面(多平面接头)中混合上述接头类型的空间框架。为了分类, $\pm 15^\circ$ 内平面内的所有杆件可视为在一个平面内。管节点分类仅基于考虑撑杆中的轴向力。

上述管节点类型的变体是 T 形接头, 即 Y 形管节点, 其中支撑和弦杆之间的夹角约为 90° 和双 T 形管节点, 它们看起来像 X 形管节点, 角度约为 90° , 但表现为两个 T 形管节点, 因为支撑轴向力传递到弦杆而不是相反的支撑。

分类应适用于带弦（Y接头）的单独撑杆的组合或带弦（K或X接头）的一对撑杆的组合，而不是根据每个载荷情况下的轴向力模式确定的整个接头。因此，例如，单个支撑可以构成K接头的一部分和Y接头的一部分，并应相应地分类为每个相关类型的比例，例如50%K接头和50%Y接头。这种分类与疲劳和强度的考虑有关。应根据评估接头首先为K型接头，其次为y型接头或x型接头进行分类。图5.10-2显示了支撑节点分类方案的一些简单示例。

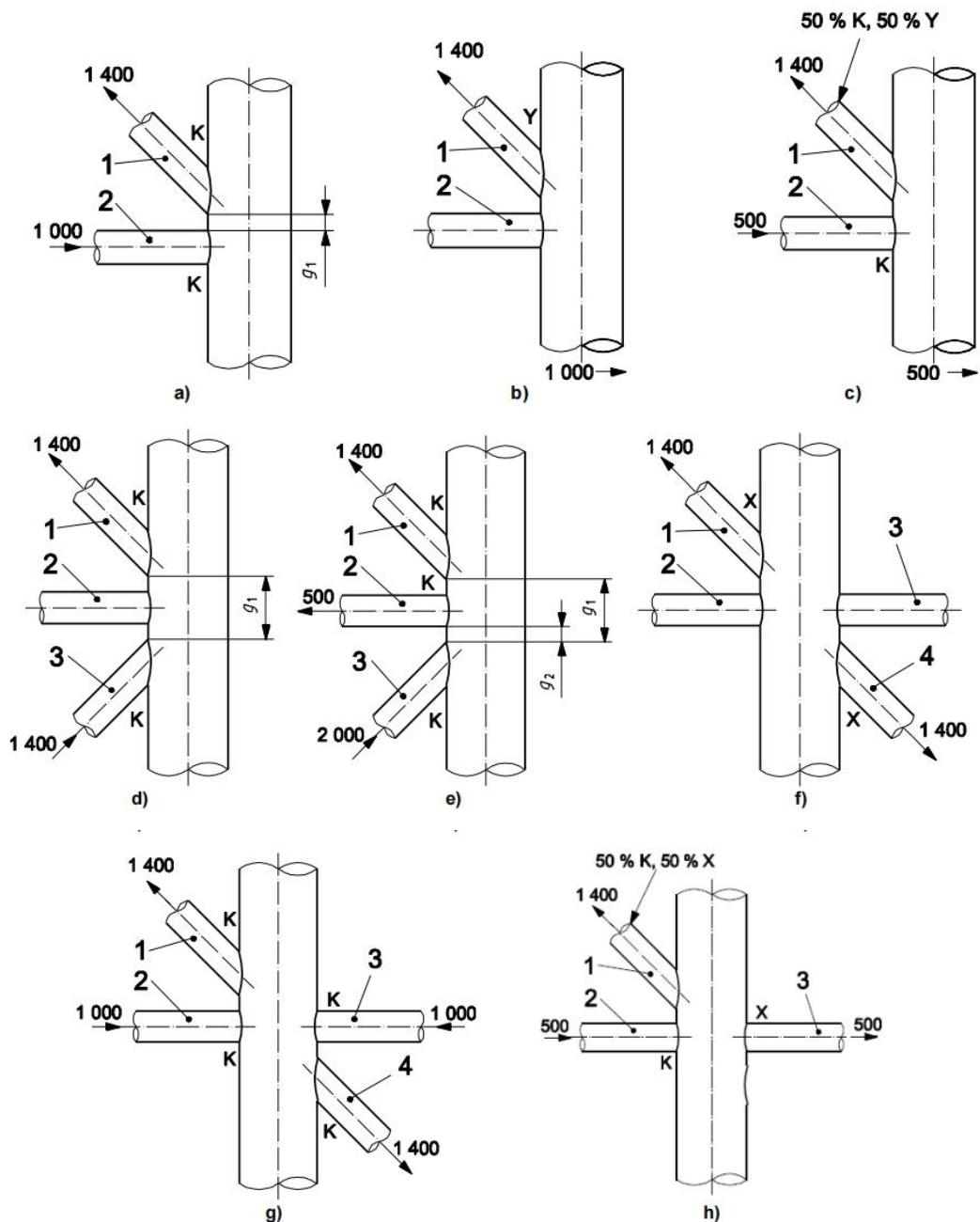


图5.10.2 节点分类示例

图 5.10-2 h)是轴向力流和分类层次的良好例子，应采用于管节点中撑杆的分类。弦左侧的支撑 1 和 2 作为 K 管节点，占对角支撑轴向力的 50%。支撑 1 中其他 50% 的轴向力与支撑 3 形成一个 x 形接头。不允许用张力和压缩力的组合来替换支撑件的轴向力，以产生相同的净力。如图 5.10-2 h 所示，不能用 1000 的压缩力和 500 的张力代替支撑 2 中的轴向力，因为这将导致不适当的水平支撑的 X 管节点分类和支撑 1 的完整 K 管节点分类。

应仔细考虑确定 K 管节点之间的正确间隙。在 图 5.10-2 a)，适当的间隙位于相邻的撑杆之间。但是，如果存在中间支撑，如图 5.10-2 d)，则作为 K 型接头的外部支撑之间存在适当的间隙。在这种情况下，由于间隙通常很大，k 型管节点的强度可以恢复到 y 型管节点的强度。图 5.10-2 e)具有指导意义，因为撑杆 2 的适当间隙是 g_2 ，而撑杆 1 的适当间隙是 g_1 。尽管支撑 3 完全分类为 K 管节点（和弦为 500 的支撑 2，支撑 3 的其余部分为支撑 1），通过加权 g_1 和 g_2 的轴向力平衡从支撑 1 和 2 的间隙的比例来确定强度。

节点分类汇总：

1.看垂直于弦的轴力是否能被平衡在百分之 10 之内，如果能平衡，就是 K 节点，如果不能平衡，就是 Y 节点。如果只能平衡百分之 50，那就是百分之 50 的 K 和百分之 50 的 Y。

2.X 节点是撑杆本身的力量完全由撑杆平衡掉，完全不需要弦杆进行平衡。

3.多撑杆结构，优先判断受力较小的杆件、优先确定 K 节点，然后才是 Y 和 X 型节点。

2.管单元强度计算

本节根据 APIRP2A-LRFD-2019 第 13 章的建议，针对厚度 $t \geq 6 \text{ mm}$ ，直径厚度比 $D/t \leq 120$ 管状单元的强度计算给出要求。管状单元屈服强度应小于 500 MPa，屈服强度与极限抗拉强度的比值不得超过 0.90。（以下内容全部参考自 APIRP2A-LRFD-2019 第 13 章）

2.1 轴向拉伸

受轴向拉力作用的管状构件的设计应满足以下条件：

$$\sigma_t \leq \frac{f_t}{\gamma_{R,t}}$$

其中， σ_t 是由分项荷载/作用的力引起的轴向拉伸应力；

f_t 为轴向抗拉强度代表值；

f_y 为屈服强度代表值，以应力单位为单位 (MPa)；

$\gamma_{R,t}$ 是轴向抗拉强度的局部阻力系数， $\gamma_{R,t} = 1.05$ 。

轴向拉伸利用率 U_m 计算如下：

$$U_m = \frac{\sigma_t}{f_t / \gamma_{R,t}}$$

13.2.2 Axial Tension

Tubular members subjected to axial tensile forces shall be designed to satisfy the following condition:

$$\sigma_t \leq \frac{f_t}{\gamma_{R,t}} \quad (13.2-1)$$

where

σ_t is the axial tensile stress due to forces from factored loads/actions;

f_t is the representative axial tensile strength, $f_t = f_y$;

f_y is the representative yield strength, in stress units;

$\gamma_{R,t}$ is the partial resistance factor for axial tensile strength, $\gamma_{R,t} = 1.05$.

The utilization of a member, U_m , under axial tension shall be calculated from Equation (13.2-2):

$$U_m = \frac{\sigma_t}{f_t / \gamma_{R,t}} \quad (13.2-2)$$

2.2 轴向压缩

受轴向压缩力作用的管状构件的设计应满足以下条件：

$$\sigma_c \leq \frac{f_c}{\gamma_{R,c}}$$

其中， σ_c 是由分项荷载/作用的力引起的轴向压缩应力；

f_c 为轴向抗压强度代表值；

$\gamma_{R,c}$ 是轴向抗压强度的局部阻力系数， $\gamma_{R,c} = 1.18$ 。

轴向压缩利用率 U_m 计算如下：

$$U_m = \frac{\sigma_c}{f_c / \gamma_{R,c}}$$

柱屈曲-在没有静水压力的情况下，管状构件代表性轴向抗压强度应小于平面内和由以下公式确定的面外屈曲强度：

$$f_c = (1.0 - 0.278\lambda^2)f_{yc} \quad (\text{for } \lambda \leq 1.34)$$

$$f_c = \frac{0.9}{\lambda^2} f_{yc} \quad (\text{for } \lambda > 1.34)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{yc}}{f_e}} = \frac{K L}{\pi r} \sqrt{\frac{f_{yc}}{E}}$$

其中，

f_c 为轴向抗压强度代表值，以应力单位为单位 (MPa)；

f_{yc} 为局部屈服强度代表值，以应力单位为单位 (MPa)；

λ 为管状构件的长细比参数；

f_e 为 y 和 z 方向欧拉屈曲强度中较小值，以应力单位 (见 13.3.3) (MPa)；

E 弹性模量；

K 为所选择的 y 或 z 方向上的有效长度因子，使 KL 在 y 和 z 方向上的值较大；

L 为在 y 方向或 z 方向上的未支撑长度；

r 为回转半径 $r=\sqrt{I/A}$ ；

I 是横截面的惯性矩；

A 是截面积。

代表性局部屈曲强度值 f_{yc} 应根据以下条件确定：(导管架 $D/T < 90\epsilon^2$ ，则不存在局部屈曲)，导管架一般取 $f_{yc}=f_y$ ，单桩取第二条。

$$f_{yc} = f_y \quad (\text{for } \frac{f_y}{f_{xe}} \leq 0.170)$$

$$f_{yc} = \left(1.047 - 0.274 \frac{f_y}{f_{xe}}\right) f_y \quad (\text{for } 0.170 < \frac{f_y}{f_{xe}})$$

and

$$f_{xe} = 2 C_x E t / D$$

其中，

f_y 为代表性屈服强度，以应力单位为单位 (MPa)；

f_{xe} 为代表性弹性局部屈曲强度，以应力单位为单位 (MPa)；

C_x 为弹性临界屈曲系数（见下文）；

E 是杨氏的弹性模量；

D 为管状构件的外径；

t 是构件的壁厚。

理想管状结构的 C_x 理论值为 0.6。然而，为了考虑公差范围内的初始几何缺陷的影响，在上式中应使用 $C_x=0.3$ 的简化值。

13.2.3 Axial Compression

13.2.3.1 General

Tubular members subjected to axial compressive forces shall be designed to satisfy the following condition:

$$\sigma_c \leq \frac{f_c}{\gamma_{R,c}} \quad (13.2-3)$$

where

σ_c is the axial compressive stress due to forces from factored loads/actions;

f_c is the representative axial compressive strength, in stress units (see 13.2.3.2);

$\gamma_{R,c}$ is the partial resistance factor for axial compressive strength, $\gamma_{R,c} = 1.18$.

The utilization of a member, U_m , under axial compression shall be calculated from Equation (13.2-4):

$$U_m = \frac{\sigma_c}{f_c / \gamma_{R,c}} \quad (13.2-4)$$

2.3 抗弯强度

受弯矩影响的管状构件的设计应满足以下条件：

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_e} \leq \frac{f_b}{\gamma_{R,b}}$$

其中，

σ_b —由分解载荷/作用产生的力引起的弯曲应力；当 $M > M_y$, σ_b 被视为等效弹性弯曲应力, $\sigma_b=M/Z_e$;

f_b —代表抗弯强度, 以应力为单位;

$\gamma_{R,b}$ —弯曲强度的局部阻力系数, $\gamma_{R,b} = 1.05$;

M —由分项载荷/作用引起的弯矩;

M_y —弹性屈服力矩;

$$Z_e = \frac{\pi}{64} \left(D^4 - (D - 2t)^4 \right) / \left(\frac{D}{2} \right).$$

Z_e—弹性截面模量，

在弯矩作用下，构件 U_m 的利用率应根据下式计算：

$$U_m = \frac{\sigma_b}{f_b / \gamma_{R,b}} = \frac{M/Z_e}{f_b / \gamma_{R,b}}$$

管状构件的代表性抗弯强度应从以下因素中确定：

$$f_b = \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } \frac{f_y D}{E t} \leq 0.0517) \quad (13.2-13)$$

$$f_b = \left[1.13 - 2.58 \left(\frac{f_y D}{E t} \right) \right] \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } 0.0517 < \frac{f_y D}{E t} \leq 0.1034) \quad (13.2-14)$$

$$f_b = \left[0.94 - 0.76 \left(\frac{f_y D}{E t} \right) \right] \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } 0.1034 < \frac{f_y D}{E t} \leq 120 \frac{f_y}{E}) \quad (13.2-15)$$

f_y 为具有代表性的屈服强度，以应力单位为单位；

D 为管单元的外径；

t 为的壁厚；

$$Z_p = \frac{1}{6} [D^3 - (D - 2t)^3].$$

Z_p 是塑性截面模量，

13.2.4 Bending

Tubular members subjected to bending moments shall be designed to satisfy the following condition:

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_e} \leq \frac{f_b}{\gamma_{R,b}} \quad (13.2-11)$$

where

σ_b is the bending stress due to forces from factored loads/actions; when $M > M_y$, σ_b is to be considered as an equivalent elastic bending stress, $\sigma_b = M/Z_e$;

f_b is the representative bending strength, in stress units [see Equations (13.2-13) to (13.2-15)];

$\gamma_{R,b}$ is the partial resistance factor for bending strength, $\gamma_{R,b} = 1.05$;

M is the bending moment due to factored loads/actions;

M_y is the elastic yield moment;

Z_e is the elastic section modulus, $Z_e = \frac{\pi}{64} \left(D^4 - (D - 2t)^4 \right) / \left(\frac{D}{2} \right)$.

The utilization of a member, U_m , under bending moments shall be calculated from Equation (13.2-12):

$$U_m = \frac{\sigma_b}{f_b / \gamma_{R,b}} = \frac{M / Z_e}{f_b / \gamma_{R,b}} \quad (13.2-12)$$

The representative bending strength for tubular members shall be determined from:

$$f_b = \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } \frac{f_y D}{E t} \leq 0.0517) \quad (13.2-13)$$

$$f_b = \left[1.13 - 2.58 \left(\frac{f_y D}{E t} \right) \right] \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } 0.0517 < \frac{f_y D}{E t} \leq 0.1034) \quad (13.2-14)$$

$$f_b = \left[0.94 - 0.76 \left(\frac{f_y D}{E t} \right) \right] \left(\frac{Z_p}{Z_e} \right) f_y \quad (\text{for } 0.1034 < \frac{f_y D}{E t} \leq 120 \frac{f_y}{E}) \quad (13.2-15)$$

where, additionally,

f_y is the representative yield strength, in stress units;

D is the outside diameter of the member;

t is the wall thickness of the member;

Z_p is the plastic section modulus, $Z_p = \frac{1}{6} [D^3 - (D - 2t)^3]$.

2.4 剪切强度

梁剪切-Beam Shear, 受梁剪切力作用的管状构件的设计应满足以下条件:

$$\tau_b = \frac{2V}{A} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}}$$

其中, τ_b 一由分项载荷/作用的力引起的最大梁剪应力;

f_v — 具有代表性的抗剪强度，以应力为单位， $f_v = f_y / \sqrt{3}$;

$\gamma_{R,v}$ — 剪切强度的局部阻力系数， $\gamma_{R,v} = 1.05$;

V — 因分解载荷/作用引起的梁剪切，以力为单位；

A — 横截面积。

梁剪作用下构件 U_m 的利用率应根据下式计算：

$$U_m = \frac{\tau_b}{f_v / \gamma_{R,v}} = \frac{2V/A}{f_v / \gamma_{R,v}}$$

扭转剪切-Torsional Shear，受扭转剪切力作用的管状构件的设计应满足以下条件：

$$\tau_t = \frac{M_{v,t}D}{2I_p} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}}$$

其中， τ_t 是由分解载荷/作用的力引起的扭转剪应力；

$M_{v,t}$ 是由分解载荷/作用引起的扭转力矩；

$$I_p = \frac{\pi}{32} [D^4 - (D - 2t)^4]$$

I_p 是极惯性矩，

剪力的局部阻力系数 γ_R, v 对于扭转剪力和梁剪力均相同 $\gamma_R, v = 1.05$ 。扭转剪切下构件 U_m 的利用率应根据下式计算：

$$U_m = \frac{\tau_t}{f_v / \gamma_{R,v}} = \frac{M_{v,t}D / 2I_p}{f_v / \gamma_{R,v}}$$

剪扭强度—Combined Beam Shear and Torsional Shear

对于受组合梁剪切力和扭转剪切力作用的管状构件，代表性抗剪强度 f_v 应降低为 $f_{v,t}$ ，以考虑扭转的存在：

$$f_{v,t} = \left(1 - \frac{\tau_t}{f_v / \gamma_{R,v}}\right) f_v$$

梁剪切作用下构件 U_m 的利用率应改为下式计算，扭转剪切的 U_m 计算方式任不改变（扭转加剪切）：

$$U_m = \frac{\tau_b}{f_{v,t} / \gamma_{R,v}} = \frac{2V/A}{f_{v,t} / \gamma_{R,v}}$$

13.2.5.1 Beam Shear

Tubular members subjected to beam shear forces shall be designed to satisfy the following condition:

$$\tau_b = \frac{2V}{A} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}} \quad (13.2-16)$$

where

- τ_b is the maximum beam shear stress due to forces from factored loads/actions;
- f_v is the representative shear strength, in stress units, $f_v = f_y / \sqrt{3}$;
- $\gamma_{R,v}$ is the partial resistance factor for shear strength, $\gamma_{R,v} = 1.05$;
- V is the beam shear due to factored loads/actions, in force units;
- A is the cross-sectional area.

The utilization of a member, U_m , under beam shear shall be calculated from Equation (13.2-17):

$$U_m = \frac{\tau_b}{f_v / \gamma_{R,v}} = \frac{2V/A}{f_v / \gamma_{R,v}} \quad (13.2-17)$$

13.2.5.2 Torsional Shear

Tubular members subjected to torsional shear forces shall be designed to satisfy the following condition:

$$\tau_t = \frac{M_{v,t}D}{2I_p} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}} \quad (13.2-18)$$

where, in addition to the definitions in 13.2.5.1,

- τ_t is the torsional shear stress due to forces from factored loads/actions;
- $M_{v,t}$ is the torsional moment due to factored loads/actions;
- I_p is the polar moment of inertia, $I_p = \frac{\pi}{32} [D^4 - (D - 2t)^4]$.

The partial resistance factor, $\gamma_{R,v}$, for shear, is the same for both torsional shear and beam shear (see 13.2.5.1).

The utilization of a member, U_m , under torsional shear shall be calculated from Equation (13.2-19):

$$U_m = \frac{\tau_t}{f_v / \gamma_{R,v}} = \frac{M_{v,t}D / 2I_p}{f_v / \gamma_{R,v}} \quad (13.2-19)$$

13.2.5.3 Combined Beam Shear and Torsional Shear

For tubular members subjected to combined beam shear forces and torsional shear forces, the representative shear strength, f_v , shall be reduced to $f_{v,t}$ to account for the presence of torsion using:

$$f_{v,t} = \left(1 - \frac{\tau_t}{f_v / \gamma_{R,v}}\right) f_v \quad (13.2-20)$$

The utilization of a member, U_m , under beam shear shall then be calculated from Equation (13.2-21):

$$U_m = \frac{\tau_b}{f_{v,t} / \gamma_{R,v}} = \frac{2V/A}{f_{v,t} / \gamma_{R,v}} \quad (13.2-21)$$

The utilization of the member, U_m , under torsional shear shall still be calculated from Equation (13.2-19).

2.5 静水压力下强度计算（表格中没有，单桩和导管架-桩不考虑）

带系数的静水压力 (ρ) 应根据下式计算：

$$p = \gamma_{f,G1} \rho_w g H_z$$

其中， $\gamma_{f,G1}$ 是永久负载/作用的部分负载/作用系数1；

ρ_w 是海水的密度 $\rho_w=1025 \text{ kg/m}^3$;

g 重力加速度(m/s^2);

H_z 有效静水头 (m);

$$H_z = -z + \frac{H_w}{2} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)}$$

其中， z 是构件相对于静止水位的深度（测量向上正）；

d 是到海底的静止水深；

H 波高；

k 波数， $k=2\pi/\lambda$ ， λ 是波长。

根据 APIRP2A-LRFD-2019 第 13.2.6.1 节对于安装工况， z 应为安装期间的最大淹没深度或者最大水头差，上式中的 $\gamma_{f,G1}$ 应改为 $\gamma_{f,T}$ （见 APIRP2A-LRFD-2019 第 8 章）。

2.6 环向屈曲（表格中没有，单桩和导管架-桩不考虑）

受外部压力的管状构件设计应满足以下条件：

$$\sigma_h = \frac{p D}{2 t} \leq \frac{f_h}{\gamma_{R,h}}$$

其中， σ_h 是分项静水压力产生的力引起的环向应力；

p 为分解后的静水压力（见 APIRP2A-LRFD-2019 第 13.2.6.1 章）；

D 为管状构件的外径；

t 为管状构件的壁厚；

f_h 为代表性的环向屈曲强度，以应力为单位；

$\gamma_{R,h}$ 取 1.25，是环向箍筋屈曲强度的部分阻力系数。

对于满足附件 E 中不圆公差的管状构件, f_h 应根据以下条件确定:

$$\begin{aligned} f_h &= f_y && (\text{for } f_{he} > 2.44 f_y) \\ f_h &= 0.7 \left(f_{he}/f_y \right)^{0.4} f_y \leq f_y && (\text{for } 0.55 f_y < f_{he} \leq 2.44 f_y) \\ f_h &= f_{he} && (\text{for } f_{he} \leq 0.55 f_y) \end{aligned}$$

其中, f_y 为具有代表性的屈服强度, 以应力单位为单位;

f_{he} 为具有代表性的弹性临界环屈曲强度, 以应力单位为单位;

$$f_{he} = 2C_h Et/D$$

其中, 弹性临界环向屈曲系数 C_h 为:

$$\begin{aligned} C_h &= 0.44 t/D && (\text{for } \mu \geq 1.6 D/t) \\ C_h &= 0.44 t/D + 0.21 (D/t)^3/\mu^4 && (\text{for } 0.825 D/t \leq \mu < 1.6 D/t) \\ C_h &= 0.737/(\mu - 0.579) && (\text{for } 1.5 \leq \mu < 0.825 D/t) \\ C_h &= 0.80 && (\text{for } \mu < 1.5) \end{aligned}$$

$$\mu \text{是一个几何参数, } \mu = \frac{L_r}{D} \sqrt{\frac{2D}{t}} ;$$

其中, L_r 是加强环、隔膜或末端连接之间的管状长度。

对于超出非圆度公差的管状构件, 见 API RP2A-LRFD-2019 第 A.13.2.6.2 节。

构件 U_m 在外部压力下的利用率应根据下式计算:

$$U_m = \frac{\sigma_h}{f_h/\gamma_{R,h}} = \frac{p D/2t}{f_h/\gamma_{R,h}}$$

注: 导管架腿及撑的截面选择原则。 $\mu = \frac{L_r}{D} \sqrt{\frac{2D}{t}}$ 小于 1.6D/T, 即减小 D,

增加 t。 (由于水深较浅, 不作为主要原则)

对于 $\mu \geq 1.6 D/t$, 弹性临界环向屈曲应力近似等于未加强管的应力。因此, 为了有效, 如果需要, 加强环应间隔为: (即管件长度小于 L_r 时不用加强)

$$L_r < 1.6 \sqrt{\frac{D^3}{2t}}$$

2.7 无静水压力下拉弯、压弯构件强度计算

拉弯构件：受轴向拉力和弯矩组合作用的管状构件应在其长度方向的所有横截面上满足以下条件：

$$\frac{\gamma_{R,t} \sigma_t}{f_t} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_b} \leq 1.0$$

其中，除 13.2.2 和 13.2.4 中的定义外，

$\sigma_{b,y}$ 是由于分项载荷/作用的力，围绕构件 y 轴（平面内）的弯曲应力；

$\sigma_{b,z}$ 是由分项载荷/作用力引起的构件 z 轴（平面外）的弯曲应力。

在轴向拉力和弯曲组合作用下，构件 U_m 的利用率应根据下式计算：

$$U_m = \frac{\gamma_{R,t} \sigma_t}{f_t} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_b}$$

压弯构件：受轴向压缩和弯曲力组合作用的管状构件应在其长度的所有横截面上满足以下条件：

$$\frac{\gamma_{R,c} \sigma_c}{f_c} + \frac{\gamma_{R,b} \left[\left(\frac{C_{m,y} \sigma_{b,y}}{1 - \sigma_c / f_{e,y}} \right)^2 + \left(\frac{C_{m,z} \sigma_{b,z}}{1 - \sigma_c / f_{e,z}} \right)^2 \right]^{0.5}}{f_b} \leq 1.0$$

$$\frac{\gamma_{R,c} \sigma_c}{f_{yc}} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_b} \leq 1.0$$

其中， $C_{m,y}$ 、 $C_{m,z}$ 分别为构件在 y 和 z 轴对应的弯矩折减系数，可直接取 0.85，（见 AAPIRP2A-LRFD-2019 第 13.5 节）； $f_{e,y}$ 、 $f_{e,z}$ 分别为构件 y 轴和 z 轴以应力单位对应的欧拉屈曲强度：

$$f_{e,y} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r)^2}$$

$$f_{e,z} = \frac{\pi^2 E}{(K_z L_z / r)^2}$$

其中， K_y 、 K_z 分别为 y 方向和 z 方向的有效长度因子（见 AAPIRP2A-LRFD-2019 第 13.5 节）； L_y 、 L_z 分别是 y 方向和 z 方向上的未支撑长度；在轴向压缩和弯曲条件下，构件 U_m 的利用率应为下面两式计算出的较大值：

$$U_m = \frac{\gamma_{R,c} \sigma_c}{f_c} + \frac{\gamma_{R,b}}{f_b} \left[\left(\frac{C_{m,y} \sigma_{b,y}}{1 - \sigma_c / f_{e,y}} \right)^2 + \left(\frac{C_{m,z} \sigma_{b,z}}{1 - \sigma_c / f_{e,z}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$U_m = \frac{\gamma_{R,c} \sigma_c}{f_{yc}} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_b}$$

2.8 拉弯、压弯构件和静水压力（单桩和导管架-桩不考虑）

1. 当构件纵向拉伸应力、弯曲应力和环向压缩应力同时发生时，应满足以下相互作用方程：

$$A^2 + B^2 + 2\nu|A|B \leq 1.0$$

$$A = \frac{\gamma_{R,t} \sigma_{t,c} + \gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_y}$$

其中， A 应能反应最大拉应力组合；

$$B = \frac{\gamma_{R,h} \sigma_h}{f_h};$$

$\nu=0.3$, 泊松比

轴向拉力、弯曲和静水压力下构件 U_m 的利用应根据下式计算：

$$U_m = A^2 + B^2 + 2\nu|A|B$$

注：在导管架使用范围内，静水压应力不超过 10Mpa, 静水压力 U_c 值大约为 0.1 左右，即 B 值较小，固考虑静水压力的组合下总体 U_c 值偏小，不作为结构控制条件。

2.9 轴向压缩、弯曲和静水压力（表格中没有，单桩和导管架-桩不考虑）

当构件纵向压缩应力、弯曲应力和环向压缩应力同时发生时，应满足以下公式：

$$\frac{\gamma_{R,c} \sigma_{c,c}}{f_{yc}} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_y} \leq 1.0 \quad (13.4-9)$$

上式应反映最大压缩应力组合。轴向项为 σ_c 时，还应满足 API 公式(13.3-3)。

如果最大组合压缩应力 $\sigma_x = \sigma_b + \sigma_{c,c}$ 超过以下给出的极限，则还应满足下式：

$$\begin{aligned}\sigma_x &> 0.5 \frac{f_{he}}{\gamma_{R,h}} \\ \frac{\sigma_x - 0.5 f_{he} / \gamma_{R,h}}{f_{xe} / \gamma_{R,c} - 0.5 f_{he} / \gamma_{R,h}} + \left(\frac{\gamma_{R,h} \sigma_h}{f_{he}} \right)^2 &\leq 1.0\end{aligned}\quad (13.4-10)$$

其中， f_{he} 为代表性弹性临界环向屈曲强度；

f_{xe} 为代表性弹性局部屈曲强度。

如果 $\sigma_b > \sigma_{c,c}$ ，则应同时满足上述两个式子。

轴向压缩、弯曲和静水压力下的利用率应为下式最大值：

$$U_m = \frac{\gamma_{R,c} \sigma_{c,c}}{f_{yc}} + \frac{\gamma_{R,b} \sqrt{\sigma_{b,y}^2 + \sigma_{b,z}^2}}{f_y} \quad \text{when Equation (13.4-9) applies}$$

$$U_m = \frac{\sigma_x - 0.5 f_{he} / \gamma_{R,h}}{f_{xe} / \gamma_{R,c} - 0.5 f_{he} / \gamma_{R,h}} + \left(\frac{\gamma_{R,h} \sigma_h}{f_{he}} \right)^2 \quad \text{when Equation (13.4-10) applies}$$

2.10 有效长度

根据 APIRP2A-LRFD-2019，表 13.5-1，有效长度和弯矩折减系数取值如下：

K 值：导管架支腿取 1.0， X 斜撑取 0.8。

C_m 取 0.85。

表 5.10.1 构件强度检查的有效长度和力矩减小系数（摘自 API-LRFD-2019 中表 13.5-1）

结构类型	K	C_m^a
最上层腿 (Topsides legs)		
斜撑 (Braced)	1.0	1)
门户 (无斜撑的) (Portal (unbraced))	K^b	1)
结构腿和打桩 (Structure legs and piling)		
灌浆复合截面 (Grouted composite section)	1.0	3)
非灌浆的腿 (Ungrouted legs)	1.0	3)
未灌浆打桩在垫片之间 (Ungrounded piling between shim points)	1.0	2)
结构斜撑单元 (Structure brace members)		
主对角线和水平线 (Primary diagonals and horizontals)	0.7	2) or 3)
K 斜撑 ^c (K brace)	0.7	2) or 3)
X 斜撑 (X brace)		
较长段长度 ^b (Longer segment length)		
全长度 ^d (Full length)		

二级水平线 (Secondary horizontals)	0.7	2) or 3)
^a 本表中定义的三种情况的 C _m 值如下:		
1) 0.85		
2) 对于没有横向载荷的构件,		
$C_m = 0.6 - 0.4 \times M_1/M_2$		
其中, M_1/M_2 为考虑的弯曲平面中构件未支撑部分末端的小矩与大矩之比;		
构件反向弯曲时 M_1/M_2 为正, 单曲率弯曲时为负;		
C _m 不应大于 0.85;		
3) 对于具有横向载荷的构件,		
$C_m = 1.0 - 0.4 \times (\sigma_c/f_e)$, or 0.85, 以较少者为准, 且视情况而定 ^b $f_e = f_{ey}$ or f_{ez}		
^b 详见第 A.13.5 节 (API-LRFD-2019) 中的有效长度对齐图。这可以进行修改, 以考虑到不同于在图表开发中假定的条件;		
^c 对于平面内或平面外有效长度, 如果接头未支撑在平面外, 至少一对框架成 K 或 x 接头的构件应处于张力状态;		
^d 当所有构件都处于压缩状态, 且接头未支撑在平面外时		

2.11 锥形过渡热点应力

根据 APIRP2A-LRFD-2019 第 13.6 节, 锥段中任何截面的标称轴向和弯曲应力近似由 $(\sigma_a + \sigma_b) / \cos\alpha$ 给出, 其中 α 等于锥投影顶点角的一半 (见下图)。 σ_a 和 σ_b 是使用锥直径和厚度截面特性计算的标称轴向和弯曲应力。

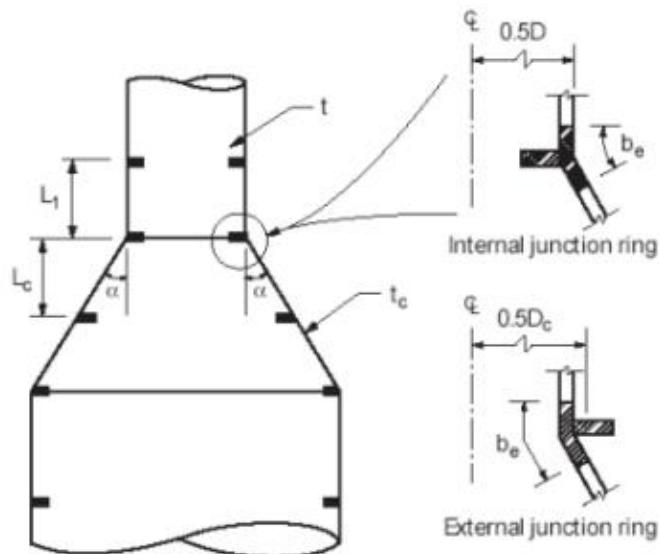


图 5.10.3 锥形过渡示例

锥段纵向应力:

在与在未加强的圆柱相连节点处的局部弯曲应力:

$$\sigma_{b,u}' = \frac{0.6t\sqrt{D(t+t_c)}}{t_e^2} (\sigma_{a,u} + \sigma_{b,u}) \tan \alpha \quad (13.6-1)$$

其中, D 为连接处的圆筒直径, 单位为米;

t 为圆筒厚度, 单位为米;

t_c 为圆锥体的厚度, 单位为米;

t_e 计算锥段为锥段壁厚, 计算圆柱段为圆柱段壁厚。

$\sigma_{a,u}$ 为连接处圆柱截面中未考虑的整体载荷引起的作用轴向应力, 单位为兆帕;

$\sigma_{b,u}$ 为连接处圆柱截面中未考虑的整体载荷引起的作用结果弯曲应力, 单位为兆帕;

α 是圆锥体顶端角度的一半, 单位是度。

对于强度要求, 总应力 ($\sigma_{a,u} + \sigma_{b,u} + \sigma_{b,u}'$) 应限制在圆锥体和圆筒体材料的最小抗拉强度范围内。对于疲劳考虑, 锥-圆柱结应满足 APIRP2A-LRFD-2019 中第 16 节的要求, 应力集中系数 (SCF) = $1 + \sigma_{b,u}' / (\sigma_{a,u} + \sigma_{b,u})$, 其中 $\sigma_{b,u}'$ 由上述公式给出。对于圆柱和锥壁厚度相等, SCF 等于 $1 + 0.6 \sqrt{2D/t} \tan \alpha$.

锥段环向应力:

由不平衡径向线载荷引起的分解整体载荷引起的环向应力可通过以下方法估算:

$$\sigma_{h,f}' = 0.45 \sqrt{\frac{D}{t}} (\sigma_{a,f} + \sigma_{b,f}) \tan \alpha \quad (13.6-2)$$

其中, $\sigma_{a,f}$ 为连接处圆柱截面的整体载荷引起的作用轴向应力, 单位为 MPa

$\sigma_{b,f}$ 是由连接处圆柱截面的整体载荷引起的作用结果弯曲应力, 单位为 MPa

对于环向拉力, $\sigma_{h,f}'$ 应限制在 $f_y / \gamma_{R,t}$ 。对于环向压缩, $\sigma_{h,f}'$ 应限制为 $f_h / \gamma_{R,h}$, 其中 f_h 根据前文公式计算, 并且 $f_{he}=0.4 Et/D$ 。