

# 第8章

## 受扭构件的受力性能与设计

**教学提示：**本章主要介绍纯扭构件、剪扭构件、弯剪扭构件和压弯剪扭构件的受力性能与承载力计算方法。通过试验研究和变角空间桁架模型的分析，揭示纯扭构件受扭的工作机理，建立纯扭构件的承载力计算公式。构件受扭、受弯与受剪承载力之间的相互影响十分复杂，为简化计算，对于剪扭构件和弯剪扭构件的承载力计算，仅考虑剪扭相互影响时混凝土部分抗力的相关性，对于钢筋提供的抗力直接采用叠加的方法。对于压弯剪扭构件的承载力计算，考虑了轴向压力对受扭和受剪承载力的有利作用。

**学习要求：**通过本章学习，学生应了解受扭构件的分类，熟悉钢筋混凝土纯扭构件的破坏形态和变角空间桁架模型，掌握钢筋混凝土纯扭构件的承载力计算方法。了解弯剪扭构件的破坏形态，掌握矩形截面剪扭构件和弯剪扭构件的承载力计算方法，熟悉T形、I形和箱形截面剪扭构件和弯剪扭构件的承载力计算方法，熟悉矩形截面压弯剪扭构件的承载力计算方法。掌握受扭构件的截面限制条件、构造配筋条件和配筋构造。

### 8.1 概 述

扭转是结构构件受力的基本形式之一，受扭构件是指截面上作用有扭矩的构件。

根据扭转形成的原因不同，受扭构件可以分为平衡扭转和协调扭转两类。平衡扭转又称静定扭转，是由荷载作用直接引起的，其截面扭矩可由平衡条件求得，即构件所受到扭矩的大小与构件扭转刚度的大小无关，图 8.1(a)所示的雨篷梁为平衡扭转构件。协调扭转又称超静定扭转，是由超静定结构中相邻构件间的变形协调引起的，其截面扭矩须由静力平衡条件和变形协调条件才能求得，即构件所受到扭矩的大小与构件扭转刚度的大小有关。图 8.1(b)所示的框架边梁为协调扭转构件，楼板次梁的支座负弯矩即为作用在框架边梁上的外扭矩，该外扭矩的大小由支承点处楼板次梁的转角与框架边梁的扭转角的变形协调条件所决定。

根据截面上的内力情况，受扭构件可分为纯扭、剪扭、弯扭、弯剪扭和压弯剪扭等多种受力情况。在实际工程中，纯扭情况很少，大多为剪扭、弯扭、弯剪扭和压弯剪扭等复合受扭情况，其中又以弯剪扭和压弯剪扭最为常见。例如，工程中常用的雨篷梁、吊车梁、框架边梁、曲梁、螺旋楼梯和框架结构的角柱等均属于弯剪扭或压弯剪扭构件。

因为纯扭构件的受力性能和承载力计算是复合受扭构件的基础，所以本章首先介绍纯扭构件的受力性能和承载力计算，然后介绍复合受扭构件的受力性能和承载力计算。

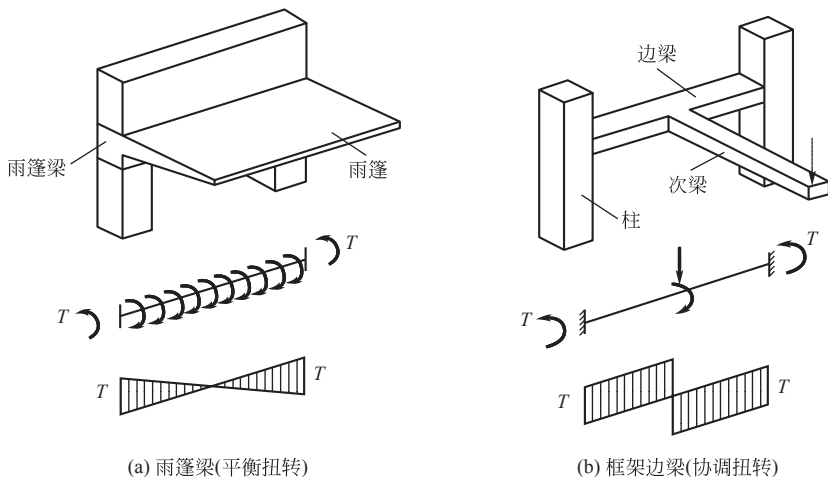


图 8.1 受扭构件实例

## 8.2 纯扭构件的受力性能与承载力计算

### 8.2.1 纯扭构件的受力性能

#### 1. 素混凝土纯扭构件的受力性能

以图 8.2(a)所示的矩形截面素混凝土纯扭构件为例，来阐述其在扭矩作用下的受力性能。

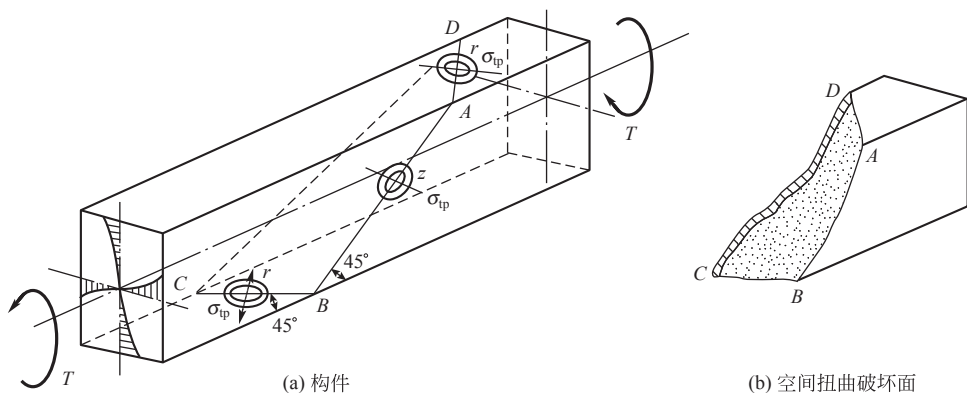


图 8.2 素混凝土纯扭构件

构件受到扭矩  $T$  作用后，构件截面上将产生剪应力  $\tau$ ，剪应力在构件截面长边的中点达到最大[见图 8.7(a)]。相应地在与构件纵轴成  $45^\circ$  方向产生主拉应力  $\sigma_{tp}$  和主压应力  $\sigma_{cp}$ ，且  $\sigma_{tp} = \sigma_{cp} = \tau$ ，如图 8.2(a)所示。

随着扭矩  $T$  的增大，当主拉应力达到混凝土的抗拉强度时，构件开裂。试验表明，首

先在构件长边侧面中点附近垂直于主拉应力方向被拉裂，裂缝与构件纵轴大致成  $45^\circ$ 。然后裂缝迅速向该边的上下边缘延伸，并以螺旋形向上下两个相邻面延伸，很快就形成三面开裂、一面受压的空间扭曲破坏面，如图 8.2(b) 所示。最后构件断裂成两半而破坏，具有典型的脆性破坏性质。

## 2. 钢筋混凝土纯扭构件的受力性能

为避免素混凝土构件一裂就坏的缺陷，在构件中配置受扭钢筋。受扭钢筋由沿构件表面内侧布置的受扭箍筋和沿构件周边均匀对称布置的受扭纵向钢筋组成(见图 8.3)，其与构件中受弯纵向钢筋和受剪箍筋的布置方式相协调。

当构件中的受扭箍筋和受扭纵筋配置适量时，受力全过程的扭矩  $T$  和扭转角  $\theta$  的关系曲线见图 8.4 中的适筋曲线。加载初期，由于钢筋应力很小，所以受力性能与素混凝土构件相似， $T-\theta$  曲线近似成线性关系。当加载至构件开裂后，裂缝截面的混凝土退出工作，钢筋应力突然增大，但没有屈服，构件的抗扭刚度明显降低，扭转角增大， $T-\theta$  曲线出现水平段。随着扭矩继续增大，逐渐在构件表面形成螺旋形裂缝，如图 8.5 所示。当接近极限扭矩时，构件长边上的某一条裂缝发展为临界斜裂缝，随之与临界斜裂缝相交的纵筋和箍筋相继屈服。最后当空间扭曲破坏面上受压边的混凝土被压碎，构件破坏，如图 8.6 所示。由于钢筋配置适量，所以称之为“适筋破坏”。破坏前，构件的变形和裂缝有明显的发展过程，属延性破坏。

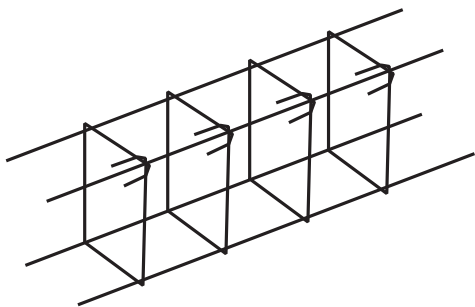


图 8.3 受扭钢筋骨架

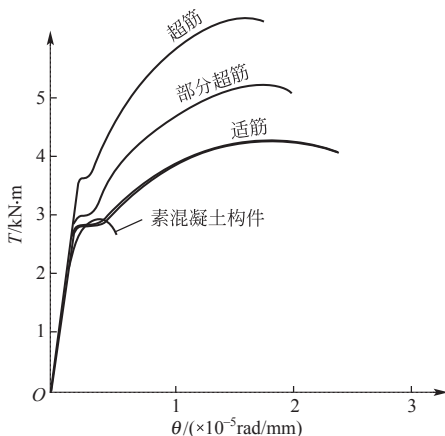


图 8.4 纯扭构件的  $T-\theta$  曲线

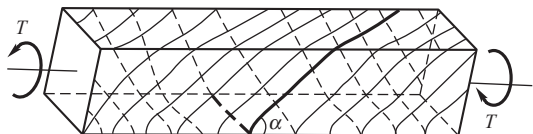


图 8.5 纯扭构件表面的螺旋裂缝

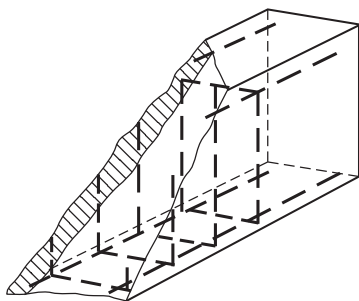


图 8.6 钢筋混凝土纯扭适筋构件的空间扭曲破坏面

钢筋混凝土纯扭构件除上述的“适筋破坏”外，还有下述三种破坏形态。

(1) 少筋破坏。当箍筋和纵筋或者其中之一配置过少时，混凝土一旦开裂，与裂缝相交的钢筋立即屈服甚至被拉断，构件破坏，属脆性破坏，在工程设计中应予避免。

(2) 部分超筋破坏。在箍筋和纵筋中，一种配置合适而另一种配置过多时，构件破坏时，只有配置合适的那种钢筋屈服，配置过多的那种钢筋未屈服，受压区混凝土被压碎，破坏具有一定的延性，但在工程设计中仍宜予避免。

(3) 超筋破坏。当箍筋和纵筋配置均过多时，破坏前构件表面的螺旋裂缝虽然根数多但宽度小。构件破坏时，纵筋和箍筋均未屈服，受压区混凝土被压碎，属于脆性破坏，在工程设计中应予避免。

如上所述，在钢筋混凝土纯扭构件的四种破坏形态中，只有适筋破坏是“箍筋和纵筋先屈服，混凝土后压碎”，即破坏时，钢筋和混凝土的强度都得到充分利用，而且是延性破坏，故工程设计中，应采用适筋构件。

## 8.2.2 纯扭构件开裂扭矩的计算

由于混凝土开裂时的极限拉应变很小，所以此时钢筋的应力也很小，它对结构受扭的开裂荷载影响不大，因此在计算开裂扭矩时忽略钢筋的影响。

### 1. 按弹性理论计算

假定混凝土为理想弹性材料，在扭矩  $T$  作用下，矩形截面弹性剪应力分布如图 8.7(a) 所示，当截面长边中点的最大剪应力  $\tau_{\max}$  达到混凝土的抗拉强度  $f_t$  时，截面处于开裂的临界状态，按弹性理论可得到矩形截面纯扭构件的弹性开裂扭矩计算公式

$$T_{cr} = \alpha b^2 h f_t \quad (8-1)$$

式中  $\alpha$ ——与截面长短边之比  $h/b$  有关的系数，当  $h/b=1\sim 10$  时， $\alpha=0.208\sim 0.313$ 。

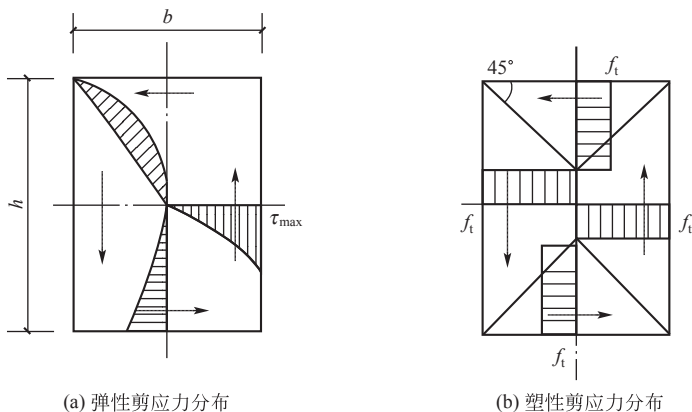


图 8.7 矩形截面纯扭构件的剪应力分布

### 2. 按塑性理论计算

假定混凝土为理想塑性材料，在扭矩  $T$  作用下，矩形截面塑性剪应力分布如图 8.7(b) 所示，即假定截面上任意一点的剪应力均达到混凝土的抗拉强度  $f_t$  时，截面处于开裂的

临界状态。根据开裂扭矩  $T_{cr}$  等于图 8.7(b) 所示的剪应力所组成的力偶, 可推得矩形截面纯扭构件的塑性开裂扭矩计算公式

$$T_{cr} = f_t \frac{b^2}{6} (3h - b) = f_t W_t \quad (8-2)$$

式中  $W_t$ ——截面受扭塑性抵抗矩, 对于矩形截面按下式计算

$$W_t = \frac{b^2}{6} (3h - b) \quad (8-2a)$$

式中  $b$ 、 $h$ ——矩形截面的短边尺寸、长边尺寸。

### 3. 钢筋混凝土纯扭构件开裂扭矩的计算

实际上, 混凝土既非理想的弹性材料, 又非理想的塑性材料。所以试验得到的开裂扭矩比式(8-1)的计算值大, 又比式(8-2)的计算值小。

因此, 《规范》GB 50010 以塑性理论的计算公式(8-2)为基础, 根据试验结果乘以一个修正系数后, 得到钢筋混凝土纯扭构件开裂扭矩的计算公式。试验表明: 对于中低强度混凝土的修正系数为 0.8, 对于高强度混凝土的修正系数近似为 0.7。因此, 为方便工程应用, 并满足可靠度的要求, 对于矩形、T 形、I 形和箱形截面的钢筋混凝土纯扭构件的开裂扭矩应按下式计算

$$T_{cr} = 0.7 f_t W_t \quad (8-3)$$

式中  $W_t$ ——截面受扭塑性抵抗矩。

## 8.2.3 受扭构件的截面受扭塑性抵抗矩计算

### 1. 矩形截面

矩形截面的受扭塑性抵抗矩应按式(8-2a)计算。

### 2. T 形、I 形截面

按照“优先保证宽度较大的矩形分块完整性”的分块原则, 《规范》GB 50010 首先按图 8.8 所示方法将 T 形和 I 形截面分别划分为两个和三个矩形分块; 然后按式(8-4)计算 T 形和 I 形截面的受扭塑性抵抗矩  $W_t$ 。

$$W_t = W_{tw} + W'_{tf} + W_{tf} \quad (8-4)$$

式中  $W_{tw}$ 、 $W'_{tf}$ 、 $W_{tf}$ ——分别为腹板、受压翼缘和受拉翼缘矩形分块的截面受扭塑性抵抗矩, 应分别按式(8-4a)~式(8-4c)计算。

腹板为

$$W_{tw} = \frac{b^2}{6} (3h - b) \quad (8-4a)$$

受压翼缘为

$$W'_{tf} = \frac{h_f'^2}{2} (b_f' - b); \quad (8-4b)$$

受拉翼缘为

$$W_{tf} = \frac{h_f^2}{2} (b_f - b) \quad (8-4c)$$

式中的翼缘宽度应满足  $b'_f \leq b + 6h'_f$ ,  $b_f \leq b + 6h_f$ 。

### 3. 箱形截面

对于图 8.9 所示的箱形截面的受扭塑性抵抗矩应按式(8-5)计算, 即

$$W_t = \frac{b_h^2}{6} (3h_h - b_h) - \frac{(b_h - 2t_w)^2}{6} [3h_w - (b_h - 2t_w)] \quad (8-5)$$

式中  $b_h$ 、 $h_h$ ——箱形截面的短边尺寸、长边尺寸。其余符号意义如图 8.9 所示。

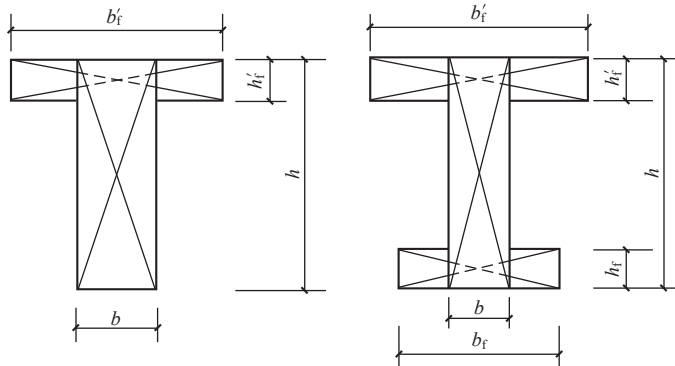


图 8.8 T 形及 I 形截面划分矩形分块

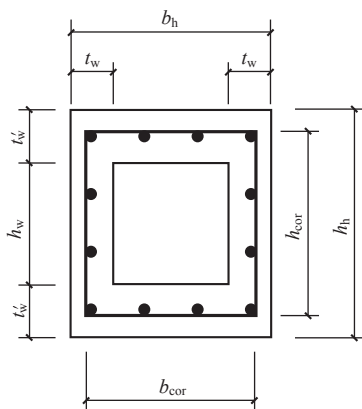


图 8.9 箱形截面

## 8.2.4 纯扭构件的受扭承载力计算

### 1. 构件受扭的工作机理

试验研究表明, 矩形截面纯扭构件在接近承载能力极限状态时, 核心部分混凝土起的作用很小, 可忽略不计。因此, 可将实心截面的钢筋混凝土受扭构件比拟为一个箱形截面构件。此时, 具有螺旋裂缝的混凝土箱壁与受扭钢筋一起形成一个变角空间桁架模型(见图 8.10)。在该模型中, 纵筋相当于桁架的受拉弦杆, 箍筋相当于桁架的受拉腹杆, 斜裂缝间的混凝土相当于桁架的斜压腹杆, 斜裂缝的倾角  $\alpha$  随受扭纵筋与箍筋的配筋强度比值  $\zeta$  而变化, 一般在  $30^\circ \sim 60^\circ$  之间变化。

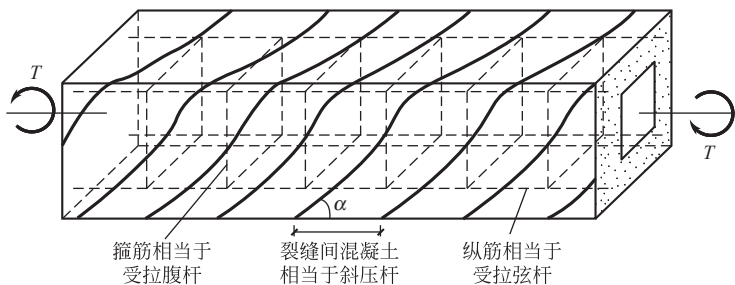


图 8.10 变角空间桁架模型

按此模型，由平衡条件可得矩形截面纯扭构件的受扭承载力  $T_u$  为

$$T_u = 2\sqrt{\zeta}f_{yv}\frac{A_{stl}A_{cor}}{s} \quad (8-6)$$

式中  $\zeta$ ——受扭纵筋与箍筋的配筋强度比值，见式(8-8a)。

式(8-6)仅反映了受扭钢筋的作用，而没有反映构件的受扭承载力随混凝土强度的提高而提高的规律，所以式(8-6)的计算值也就必然与试验结果有一定的差距。因此，变角空间桁架模型主要不是用于受扭承载力计算，其意义主要在于：一是揭示了纯扭构件受扭的工作机理；二是通过分析得到了由钢筋分担的受扭承载力的基本变量。

## 2. 矩形截面纯扭构件的受扭承载力计算

根据构件受扭的工作机理，《规范》GB 50010 取钢筋混凝土纯扭构件的受扭承载力  $T_u$ ，由混凝土的受扭作用  $T_c$  和箍筋与纵筋的受扭作用  $T_s$  两部分组成，且取混凝土受扭作用  $T_c$  的基本变量为  $f_t W_t$ ，取箍筋与纵筋受扭作用  $T_s$  的基本变量为  $\sqrt{\zeta}f_{yv}A_{stl}A_{cor}/s$ ，即钢筋混凝土纯扭构件的受扭承载力  $T_u$  可用下式表示

$$T_u = \alpha_1 f_t W_t + \alpha_2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-7)$$

根据试验结果的回归分析可得  $\alpha_1 = 0.35$ ， $\alpha_2 = 1.2$ ，如图 8.11 所示。

因此，《规范》GB 50010 规定，矩形截面钢筋混凝土纯扭构件的受扭承载力应符合下列规定

$$T \leq 0.35 f_t W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-8)$$

$$\zeta = \frac{f_y A_{stl} s}{f_{yv} A_{stl} u_{cor}} \quad (8-8a)$$

式中  $T$ ——扭矩设计值；

$\zeta$ ——受扭纵筋与箍筋的配筋强度比值，对钢筋混凝土纯扭构件， $\zeta$  值应符合  $0.6 \leq \zeta \leq 1.7$  的要求，当  $\zeta > 1.7$  时取  $\zeta = 1.7$ ，设计计算时常取  $\zeta = 1.2$ ；

$f_{yv}$ ——受扭箍筋的抗拉强度设计值；

$A_{stl}$ ——箍筋单肢截面面积；

$A_{cor}$ ——截面核心部分的面积， $A_{cor} = b_{cor} h_{cor}$ ，此处  $b_{cor}$ 、 $h_{cor}$  为箍筋内表面范围内截面核心部分的短边尺寸、长边尺寸，如图 8.12 所示；

$s$ ——箍筋的间距；

$f_y$ ——受扭纵筋的抗拉强度设计值；

$A_{stl}$ ——受扭计算中取对称布置的全部纵向钢筋截面面积；

$u_{cor}$ ——截面核芯部分周长， $u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ 。

## 3. T形和I形截面纯扭构件的受扭承载力计算

T形和I形截面纯扭构件的扭矩由腹板、受压翼缘和受拉翼缘共同承担，并按各矩形分块的截面受扭塑性抵抗矩分配截面所承受的扭矩设计值  $T$ ，即按下列公式计算腹板、受压翼缘和受拉翼缘所承担的扭矩设计值，即

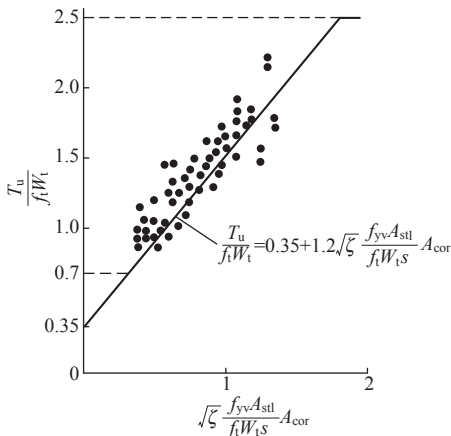


图 8.11 试验实测值与公式计算值的比较

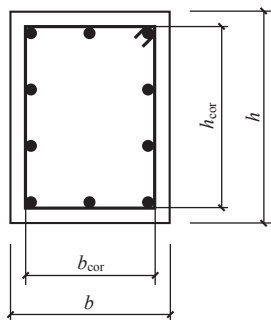


图 8.12 矩形截面受扭构件

腹板为

$$T_w = \frac{W_{tw}}{W_t} T \quad (8-9-1)$$

受压翼缘为

$$T'_f = \frac{W'_{tf}}{W_t} T \quad (8-9-2)$$

受拉翼缘为

$$T_f = \frac{W_{tf}}{W_t} T \quad (8-9-3)$$

式中  $W_t$ 、 $W_{tw}$ 、 $W'_{tf}$ 、 $W_{tf}$ ——截面受扭塑性抵抗矩，应按式(8-4)计算。

求得各矩形分块所承担的扭矩后，然后按式(8-8)分别计算腹板、受压翼缘和受拉翼缘的受扭承载力，求得各自承载力所需的受扭纵向钢筋和受扭箍筋。

在腹板、受压翼缘和受拉翼缘的受扭承载力计算时，式(8-8)中的  $T$  及  $W_t$  应分别以  $T_w$  及  $W_{tw}$ (腹板)、 $T'_f$  及  $W'_{tf}$ (受压翼缘)和  $T_f$  及  $W_{tf}$ (受拉翼缘)代替。

#### 4. 箱形截面纯扭构件的受扭承载力计算

对于图 8.9 所示的箱形截面，试验表明：当壁厚较大时(如  $t_w \geq 0.4b_h$ )，其受扭承载力与实心截面  $b_h \times h_h$  的基本相同；当壁厚较薄时，其受扭承载力则比实心截面的小。因此，《规范》GB 50010 以矩形截面的受扭承载力计算公式为基础，并对该公式的第一项(即混凝土项)乘以壁厚影响系数  $\alpha_h$ ，得到箱形截面的受扭承载力计算公式，即

$$T \leq 0.35\alpha_h f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-10)$$

式中  $\alpha_h$ ——箱形截面壁厚影响系数， $\alpha_h = 2.5t_w/b_h$ ，当  $\alpha_h > 1.0$  时，取  $\alpha_h = 1.0$ ；

$W_t$ ——箱形截面的受扭塑性抵抗矩，按式(8-5)计算。



## 8.3 弯剪扭构件的受力性能与承载力计算

### 8.3.1 弯剪扭构件的受力性能

在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土构件的受力性能十分复杂，其破坏形态主要与弯矩、剪力和扭矩的比例关系，以及配筋情况有关。主要有弯型破坏、扭型破坏和剪扭型破坏三种。

#### 1. 弯型破坏

当弯矩较大、剪力较小，且构件底部纵筋不是很多时，由于底部纵筋同时受到弯矩和扭矩所产生的拉应力作用，随着荷载的增大，底部纵筋首先受拉屈服，而后顶部混凝土压碎，构件破坏(见图 8.13a)，称为“弯型破坏”。弯型破坏构件的承载力由底部纵筋控制，且构件的受弯承载力随着扭矩的增大而降低(见图 8.14)。

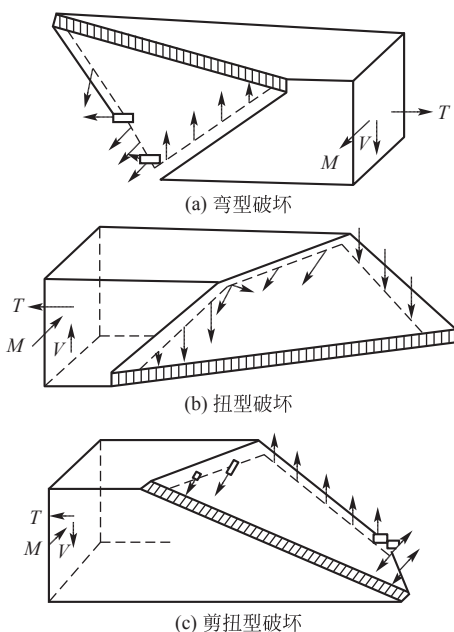


图 8.13 弯剪扭构件的破坏形态

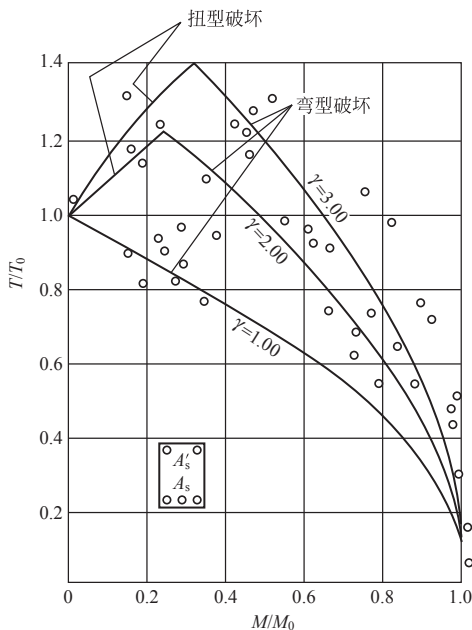


图 8.14 弯扭相关曲线

#### 2. 扭型破坏

当扭矩较大、弯矩和剪力较小，且构件顶部纵筋少于底部纵筋，即  $\gamma = f_y A_s / (f'_y A'_s) > 1$  时，由于扭矩在顶部纵筋中所产生的拉应力很大，而弯矩在其中引起的压应力较小，随着荷载的增大，顶部纵筋首先受拉屈服，而后底部混凝土压碎，构件破坏(见图 8.13b)，称为“扭型破坏”。扭型破坏构件的承载力由顶部纵筋控制，且在扭型破坏范围内，构件的受扭承载力随着弯矩的增大而提高(见图 8.14)。

### 3. 剪扭型破坏

当剪力和扭矩较大、弯矩较小，且剪力和扭矩引起剪应力方向一致的侧面配筋不是很多时，随着荷载的增大，该侧面中部首先开裂，若配筋合适，与斜裂缝相交的箍筋和纵筋首先受拉屈服，而后另一侧面的混凝土压碎，构件破坏(见图 8.13c)，称之为“剪扭型破坏”。剪扭型破坏构件的承载力由与斜裂缝相交的箍筋和纵筋控制；且当扭矩较大时，以受扭破坏为主；当剪力较大时，以受剪破坏为主。由于剪力和扭矩引起的剪应力总会在一个侧面产生叠加，因此其承载力总是小于剪力和扭矩单独作用时的承载力，两者承载力的相关曲线接近 1/4 圆，如图 8.15 所示。

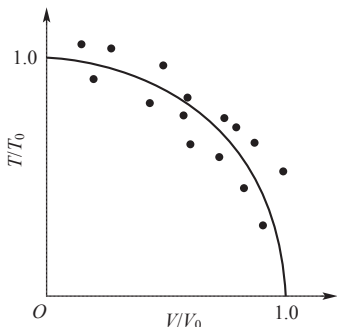


图 8.15 有腹筋构件的剪扭相关曲线

图 8.15 中， $V_0$  为有腹筋纯剪构件的受剪承载力； $T_0$  为有腹筋纯扭构件的受扭承载力。 $V$ 、 $T$  分别为有腹筋剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力。

## 8.3.2 剪扭构件的承载力计算

### 1. 剪扭相关性

试验表明：对于剪扭构件，剪力的存在，使构件的受扭承载力降低；同样，扭矩的存在，使构件的受剪承载力降低，两者大致符合 1/4 圆的规律，这便是剪力和扭矩的相关性，简称剪扭相关性。有腹筋构件的剪扭相关性如图 8.15 所示，无腹筋构件的剪扭相关性如图 8.16 所示。

图 8.16 中， $V_{c0} = 0.7f_t b h_0$  或  $1.75f_t b h_0 / (\lambda + 1)$ ，为纯剪构件混凝土的受剪承载力； $T_{c0} = 0.35f_t W_t$ ，为纯扭构件混凝土的受扭承载力。 $V_c$ 、 $T_c$  分别为无腹筋剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力。

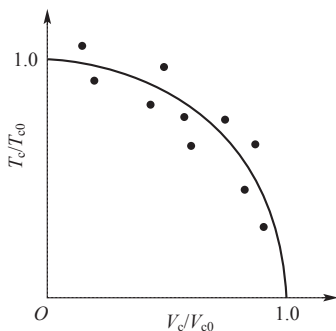


图 8.16 无腹筋构件的剪扭相关曲线

### 2. 受扭承载力降低系数 $\beta_t$

#### 1) 矩形截面剪扭构件

为简化剪扭相关的计算，对于图 8.16 所示的 1/4 圆，《规范》GB 50010 采用图 8.17 所示的三段折线(AB、BC、CD)来近似代替。

由图 8.17 可知。

(1) 当  $V_c/V_{c0} \leq 0.5$  时，取  $T_c/T_{c0} = 1.0$ ，即当  $V_c \leq 0.35f_t b h_0$  或  $0.875f_t b h_0 / (\lambda + 1)$  时，取  $T_c = 0.35f_t W_t$ ，如图 8.17 的线段 AB 所示。此时，可忽略剪力对受扭承载力的影响。

(2) 当  $T_c/T_{c0} \leq 0.5$  时，取  $V_c/V_{c0} = 1.0$ ，即当  $T_c \leq 0.175f_t W_t$  时，取  $V_c = 0.7f_t b h_0$  或  $1.75f_t b h_0 / (\lambda + 1)$ ，如图 8.17 的线段 CD 所示。此时，可忽略扭矩对受剪承载力的影响。

(3) 当  $0.5 < T_c/T_{c0} \leq 1.0$  且  $0.5 < V_c/V_{c0} \leq 1.0$  时, 需考虑剪扭相关性, 如图 8.17 的线段 BC 所示。当定义线段 BC 上任意一点 M 的纵坐标为“受扭承载力降低系数  $\beta_t$ ”时, 由该图的几何关系可得 M 点的横坐标为“ $1.5 - \beta_t$ ”, 则

$$\begin{cases} \beta_t = \frac{T_c}{T_{c0}} & (8-11-1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1.5 - \beta_t = \frac{V_c}{V_{c0}} & (8-11-2) \end{cases}$$

联立上式可得

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + \frac{V_c T_{c0}}{T_c V_{c0}}} \quad (8-12)$$

以  $V/T$  近似地代替式(8-12)中的  $V_c/T_c$ 、并将  $T_{c0} = 0.35f_t W_t$ 、 $V_{c0} = 0.7f_t b h_0$  或  $1.75f_t b h_0 / (\lambda + 1)$  代入式(8-12)后, 得到矩形截面剪扭构件受扭承载力降低系数  $\beta_t$  的计算公式

一般剪扭构件为

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{VW_t}{Tbh_0}} \quad (8-13-1)$$

集中荷载作用下的独立剪扭构件为

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{VW_t}{Tbh_0}} \quad (8-13-2)$$

2) T形和I形截面剪扭构件

以  $T_w$ 、 $W_{tw}$  代替式(8-13)中的  $T$ 、 $W_t$ , 即可得到 T形和 I形截面剪扭构件“腹板部分的受扭承载力降低系数  $\beta_t$ ”的计算公式

一般剪扭构件为

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{VW_{tw}}{T_w b h_0}} \quad (8-14-1)$$

集中荷载作用下的独立剪扭构件为

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{VW_{tw}}{T_w b h_0}} \quad (8-14-2)$$

3) 箱形截面剪扭构件

以  $\alpha_h W_t$  代替式(8-13)中的  $W_t$ , 即可得到箱形截面剪扭构件的受扭承载力降低系数  $\beta_t$  的计算公式

一般剪扭构件为

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V\alpha_h W_t}{Tbh_0}} \quad (8-15-1)$$

集中荷载作用下的独立剪扭构件为

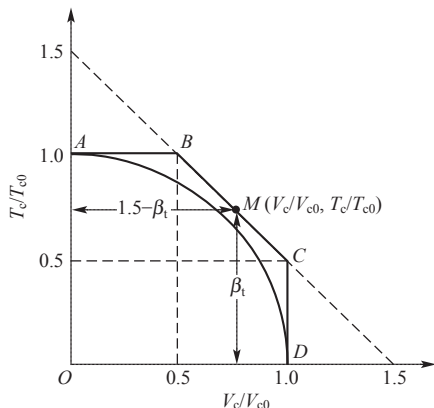


图 8.17 剪扭相关性的简化计算方法与受扭承载力降低系数  $\beta_t$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{V\alpha_h W_t}{Tbh_0}} \quad (8-15-2)$$

式中  $\alpha_h$ ——箱形截面壁厚影响系数,  $\alpha_h = 2.5t_w/b_h$ , 当  $\alpha_h > 1.0$  时, 取  $\alpha_h = 1.0$ ;  
 $b$ ——箱形截面的腹板宽度, 取  $b = 2t_w$ ,  $t_w$  如图 8.9 所示。

#### 4) $\beta_t$ 的取值范围

由图 8.17 所示可知:  $\beta_t$  的取值范围是 0.5~1.0。因此, 当按式(8-13)~式(8-15)计算得到的  $\beta_t < 0.5$  时, 取  $\beta_t = 0.5$ ;  $\beta_t > 1$  时, 取  $\beta_t = 1$ 。

### 3. 剪扭构件的承载力计算

#### 1) 剪扭构件的承载力计算方法

钢筋混凝土剪扭构件的承载力有受剪承载力和受扭承载力两个方面, 两者均由混凝土的承载力和钢筋的承载力组成, 即

剪扭构件的受剪承载力为

$$V_u = V_c + V_s \quad (8-16-1)$$

剪扭构件的受扭承载力为

$$T_u = T_c + T_s \quad (8-16-2)$$

式中  $V_c$ 、 $T_c$ ——剪扭构件中混凝土的受剪承载力和受扭承载力;

$V_s$ 、 $T_s$ ——剪扭构件中钢筋的受剪承载力和受扭承载力。

对于剪扭构件的承载力计算, 《规范》GB 50010 采取混凝土部分相关、钢筋部分不相关的原则。并假设有腹筋剪扭构件混凝土部分对剪扭承载力的贡献与无腹筋剪扭构件一样, 即有腹筋剪扭构件混凝土部分的剪扭相关性也符合图 8.16 所示的 1/4 圆的规律, 且在承载力计算时采用图 8.17 所示的剪扭相关性简化计算方法与受扭承载力降低系数  $\beta_t$ 。因此, 式(8-16)中的  $V_s$ 、 $T_s$  直接采用纯剪构件受剪承载力计算公式和纯扭构件受扭承载力计算公式中的相应项。式(8-16-1)中的  $V_c$  则应在纯剪构件受剪承载力计算公式相应项的基础上, 乘以系数  $(1.5 - \beta_t)$ ; 式(8-16-2)中的  $T_c$  则应在纯扭构件受扭承载力计算公式相应项的基础上, 乘以系数  $\beta_t$ 。

#### 2) 矩形截面剪扭构件的承载力计算

由“剪扭构件的承载力计算方法”可知, 矩形截面剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力应按下式计算。

##### (1) 一般剪扭构件。

受剪承载力为

$$V \leq 0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-17-1)$$

受扭承载力为

$$T \leq 0.35 \beta_t f_t W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-17-2)$$

##### (2) 集中荷载作用下的独立剪扭构件。

受剪承载力为

$$V \leq (1.5 - \beta_t) \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-17-3)$$

受扭承载力仍按式(8-17-2)计算。式(8-17)中的 $\beta_t$ 应按式(8-13)计算。

### 3) T形和I形截面剪扭构件的承载力计算

T形和I形截面剪扭构件承载力的计算方法是：截面所承受的扭矩设计值 $T$ 由腹板和翼缘共同承担，并按式(8-9)进行分配；截面所承受的剪力设计值 $V$ 仅由腹板承担。

因此，腹板在剪力设计值 $V$ 和扭矩设计值 $T_w$ 的作用下按矩形截面剪扭构件的式(8-17)进行计算；计算时，式(8-17)中的 $T$ 及 $W_t$ 分别以 $T_w$ 及 $W_{tw}$ 代替；且其受扭承载力降低系数 $\beta_t$ 应按式(8-14)计算。受压翼缘和受拉翼缘分别在扭矩设计值 $T'_t$ 和 $T_t$ 作用下按纯扭构件进行计算；计算时，式(8-8)中的 $T$ 及 $W_t$ 应分别以 $T'_t$ 及 $W'_{tf}$ (受压翼缘)或 $T_t$ 及 $W_{tf}$ (受拉翼缘)代替。

### 4) 箱形截面剪扭构件的承载力计算

箱形截面剪扭构件的受力性能与矩形截面的相似，但其受扭承载力应考虑箱形截面壁厚影响。因此，箱形截面剪扭构件的受剪承载力计算公式与矩形截面的相同，即按式(8-17-1)或式(8-17-3)计算；计算时，取式(8-17-1)或式(8-17-3)中 $b=2t_w$ 。箱形截面剪扭构件的受扭承载力计算公式是以矩形截面的计算公式为基础，引入箱形截面壁厚影响系数 $\alpha_h$ ，即得到箱形截面剪扭构件的受扭承载力计算公式

$$T \leq 0.35\alpha_h\beta_t f_t W_t + 1.2\sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-18)$$

式中  $\alpha_h$ ——箱形截面壁厚影响系数， $\alpha_h=2.5t_w/b_h$ ，当 $\alpha_h>1.0$ 时取 $\alpha_h=1.0$ ；

$\beta_t$ ——受扭承载力降低系数，对于箱形截面，应按式(8-15)计算。

## 8.3.3 弯扭构件的承载力计算

弯扭构件的受弯承载力与受扭承载力的相关关系比较复杂(见图8.14)。为了简化设计，《规范》GB 50010对于弯扭构件的承载力计算直接采用叠加的方法。也就是说在弯矩 $M$ 作用下，按受弯构件的正截面受弯承载力计算受弯所需的纵筋；在扭矩 $T$ 作用下，按纯扭构件计算受扭所需的纵筋和箍筋；然后将相应的钢筋进行叠加。即弯扭构件的纵筋用量为受弯所需的纵筋和受扭所需的纵筋之和，箍筋用量仅为受扭所需的箍筋。

## 8.3.4 弯剪扭构件的承载力计算

在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的弯剪扭构件承载力的相关关系更为复杂。为了简化设计，《规范》GB 50010以剪扭构件和受弯构件的承载力计算方法为基础，建立了弯剪扭构件的承载力计算方法：对于矩形、T形、I形和箱形截面弯剪扭构件，其纵向钢筋截面面积应分别按受弯构件的正截面受弯承载力和剪扭构件的受扭承载力计算确定，并应配置在相应的位置；箍筋截面面积应分别按剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力计算确定，并应配置在相应的位置。

具体计算方法如下。

(1) 在剪力 $V$ 和扭矩 $T$ 作用下，按剪扭构件的受剪承载力计算受剪所需的箍筋 $nA_{svl}/s$ ，如图8.18(a)所示。

(2) 在剪力 $V$ 和扭矩 $T$ 作用下，按剪扭构件的受扭承载力计算受扭所需的箍筋 $A_{stl}/s$ ，

如图 8.18(b)所示。

(3) 在剪力  $V$  和扭矩  $T$  作用下, 按剪扭构件的受扭承载力计算受扭所需的纵筋  $A_{stl}$ , 如图 8.18(c)所示。

(4) 在弯矩  $M$  作用下, 按第 4 章受弯构件的正截面受弯承载力计算受弯所需的纵筋  $A'_s$ 、 $A_s$ , 如图 8.18(d)所示。

最后, 弯剪扭构件的箍筋用量为(1)和(2)计算结果的叠加, 纵筋用量为(3)和(4)计算结果的叠加, 如图 8.18 所示。

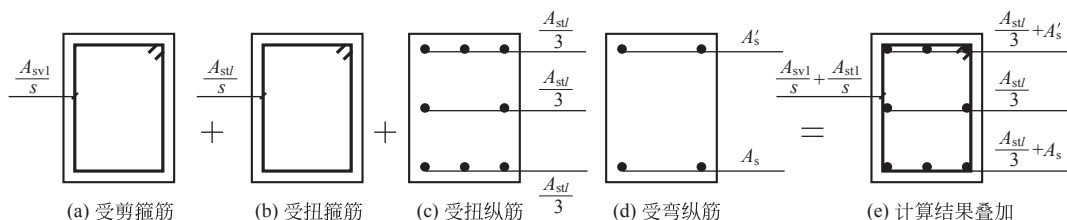


图 8.18 弯剪扭构件钢筋的叠加

对于矩形、T形、I形和箱形截面的弯剪扭构件, 当其内力设计值满足下列条件时可不考虑剪力或扭矩对构件承载力的影响。

(1) 当  $V \leq 0.35f_t b h_0$  或  $V \leq 0.875f_t b h_0 / (\lambda + 1)$  时, 可忽略剪力的影响, 仅按受弯构件的正截面受弯承载力和纯扭构件的受扭承载力分别进行计算。

(2) 当  $T \leq 0.175f_t W_t$  或  $T \leq 0.175\alpha_h f_t W_t$  时, 可忽略扭矩的影响, 仅按受弯构件的正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力分别进行计算。

## 8.4 矩形截面压弯剪扭构件的受力性能与承载力计算

### 8.4.1 轴向压力对受扭承载力的影响

试验研究表明, 轴向压力的存在, 可减小纵向钢筋的拉应变, 抑制斜裂缝的出现和开展, 可增加混凝土的咬合作用和纵筋的销栓作用, 因而可提高构件的受扭承载力。但当轴向压力大于  $0.65f_c A$  时, 随着轴向压力的增加, 构件的受扭承载力将会逐步下降。

### 8.4.2 压扭构件的承载力计算

考虑到轴向压力的有利影响, 《规范》GB 50010 以纯扭构件的承载力计算公式为基础, 给出了矩形截面钢筋混凝土压扭构件的受扭承载力计算公式, 即

$$T \leq 0.35f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta}f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} + 0.07 \frac{N}{A} W_t \quad (8-19)$$

式中  $N$ ——与扭矩设计值  $T$  相应的轴向压力设计值, 当  $N > 0.3f_c A$  时, 取  $N = 0.3f_c A$ ;  
 $A$ ——构件截面面积。

### 8.4.3 压弯剪扭构件的承载力计算

考虑到轴向压力对受剪和受扭承载力的有利作用,《规范》GB 50010 规定:在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土矩形截面框架柱,其受剪扭承载力按下式计算。

(1) 受剪承载力为

$$V \leq (1.5 - \beta_t) \left( \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.07 N \right) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-20-1)$$

(2) 受扭承载力为

$$T \leq \beta_t \left( 0.35 f_t + 0.07 \frac{N}{A} \right) W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (8-20-2)$$

式中  $\lambda$ ——计算截面的剪跨比,与第6章式(6-54)中  $\lambda$  的取值相同。

在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土矩形截面框架柱,其纵向钢筋截面面积应分别按偏心受压构件的正截面受压承载力和剪扭构件的受扭承载力计算确定,并应配置在相应的位置;箍筋截面面积应分别按剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力计算确定,并应配置在相应的位置。具体计算方法如下。

(1) 在剪力  $V$  和扭矩  $T$  作用下,按压弯剪扭构件的受剪承载力计算公式式(8-20-1)计算受剪所需的箍筋  $nA_{svl}/s$ ,如图 8.18(a)所示。

(2) 在剪力  $V$  和扭矩  $T$  作用下,按压弯剪扭构件的受扭承载力计算公式式(8-20-2)计算受扭所需的箍筋  $A_{stl}/s$ ,如图 8.18(b)所示。

(3) 在剪力  $V$  和扭矩  $T$  作用下,按受扭构件的受扭承载力计算公式式((8-17-2)计算受扭所需的纵筋  $A_{stl}$ ,如图 8.18(c)所示。

(4) 在轴向压力  $N$  和弯矩  $M$  作用下,按第6章偏心受压构件的正截面受压承载力计算受压所需的纵筋  $A'_s$ 、 $A_s$ ,如图 8.18(d)所示。

最后,压弯剪扭构件的箍筋用量为(1)和(2)计算结果的叠加;纵筋用量为(3)和(4)计算结果的叠加;钢筋的叠加方式与弯剪扭构件的相同,如图 8.18 所示。

在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土矩形截面框架柱,当  $T \leq (0.175 f_t + 0.035 N/A) W_t$  时,可仅按偏心受压构件的正截面受压承载力和框架柱斜截面受剪承载力分别进行计算。

## 8.5 受扭构件承载力计算公式的适用条件与钢筋的构造要求

### 8.5.1 计算公式的适用条件

#### 1. 截面限制条件

为保证受扭构件在破坏时混凝土不首先被压碎(即避免超筋破坏),《规范》GB 50010 规定,在弯矩、剪力和扭矩共同作用下,对  $h_w/b \leq 6$  的矩形、T形、I形截面和  $h_w/t_w \leq 6$  的箱形截面构件,其截面应符合下列条件。

$$\text{当 } h_w/b \text{ (或 } h_w/t_w) \leq 4 \text{ 时, } \quad \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.25\beta_c f_c \quad (8-21-1)$$

$$\text{当 } h_w/b \text{ (或 } h_w/t_w) = 6 \text{ 时, } \quad \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.2\beta_c f_c \quad (8-21-2)$$

当  $4 < h_w/b$  (或  $h_w/t_w$ )  $< 6$  时, 按线性内插法确定。

式中  $V$ ——剪力设计值;

$T$ ——扭矩设计值;

$b$ ——矩形截面的宽度, T形或I形截面的腹板宽度, 箱形截面的侧壁总厚度  $2t_w$ ;

$h_0$ ——截面的有效高度;

$h_w$ ——截面的腹板高度, 对矩形截面, 取有效高度  $h_0$ , 对T形截面, 取有效高度减去翼缘高度, 对I形和箱形截面, 取腹板净高, 分别见第5章的图5.18和本章的图8.9;

$t_w$ ——箱形截面壁厚, 其值不应小于  $b_h/7$ , 此处,  $b_h$  为箱形截面的宽度。

对于式(8-21-1)和式(8-21-2), 当  $T=0$  时, 为纯剪构件的截面限制条件, 与第5章的式(5-20)和式(5-21)衔接; 当  $V=0$  时, 为纯扭构件的截面限制条件。当式(8-21-1)和式(8-21-2)的条件不能满足时, 一般应加大构件截面尺寸, 也可提高混凝土强度等级。

## 2. 构造配筋条件

在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的矩形、T形、I形和箱形截面构件, 当符合下列要求时

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t \quad (8-22-1)$$

$$\text{或} \quad \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.07 \frac{N}{bh_0} \quad (8-22-2)$$

可不进行构件受剪扭承载力计算, 但为了防止构件开裂后发生突然的脆性破坏, 必须按构造要求配置纵向钢筋和箍筋。

式(8-22-2)中的  $N$  是与剪力设计值  $V$ 、扭矩设计值  $T$  相应的轴向压力设计值, 当  $N > 0.3f_c A$  时, 取  $N = 0.3f_c A$ , 此处,  $A$  为构件的截面面积。

## 8.5.2 受扭构件钢筋的构造要求

### 1. 最小配筋率要求

为了防止受扭构件发生“一裂就坏”的少筋脆性破坏, 受扭构件的箍筋和纵筋应满足最小配筋率的要求。

(1) 箍筋的最小配筋率要求为

$$\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{bs} \geq \rho_{sv, \min} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} \quad (8-23-1)$$

对于箱形截面构件, 式(8-23-1)中的  $b$  应以  $b_h$  代替,  $b_h$  如图8.9所示。

(2) 受扭纵向钢筋的最小配筋率要求为

$$\rho_{tl} = \frac{A_{stl}}{bh} \geq \rho_{tl, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} \quad (8-23-2)$$



当  $T/(Vb) > 2.0$  时, 取  $T/(Vb) = 2.0$ 。式(8-23-2)中  $b$  的取值与式(8-21)的相同。

对于纯扭和弯扭构件,  $V=0$ , 那么  $T/(Vb) > 2.0$ , 取  $T/(Vb) = 2.0$ , 式(8-23-2)可变为式(8-23-3), 即

$$\rho_{st} = \frac{A_{stl}}{bh} \geq \rho_{st, \min} = 0.85 \frac{f_t}{f_y} \quad (8-23-3)$$

## 2. 纵向钢筋的构造要求

沿截面周边布置的受扭纵向钢筋的间距不应大于 200mm 和梁截面短边长度; 除应在梁截面四角设置受扭纵向钢筋外, 其余受扭纵向钢筋宜沿截面周边均匀对称布置。受扭纵向钢筋应按受拉钢筋锚固在支座内。

在弯剪扭构件中, 配置在截面弯曲受拉边的纵向受力钢筋, 其截面面积不应小于“按受弯构件受拉钢筋最小配筋率计算出的钢筋截面面积”与“按受扭纵向钢筋最小配筋率计算并分配到弯曲受拉边的钢筋截面面积”之和。

## 3. 箍筋的构造要求

弯剪扭构件中, 箍筋的间距和直径应符合第 5 章表 5-1 的规定, 其中受扭所需的箍筋应做成封闭式, 且应沿截面周边布置; 当采用复合箍筋时, 位于截面内部的箍筋不应计入受扭所需的箍筋面积; 受扭所需箍筋的末端应做成  $135^\circ$  弯钩, 弯钩端头平直段长度不应小于  $10d$  ( $d$  为箍筋直径)。

# 8.6 受扭构件承载力计算流程图与例题

矩形截面纯扭构件的截面设计可按下列流程图进行(见图 8.19)。

矩形截面弯剪扭构件的截面设计可按下列流程图进行(见图 8.20)。

**【例 8.1】** 已知某钢筋混凝土矩形截面纯扭构件, 处于一类环境, 安全等级二级, 截面尺寸  $b \times h = 250\text{mm} \times 600\text{mm}$ , 承受的扭矩设计值  $T = 22.26\text{kN} \cdot \text{m}$ 。混凝土强度等级为 C30, 纵筋采用 HRB335 级钢筋, 箍筋采用 HPB235 级钢筋。求配筋。

### 【解】

(1) 确定基本参数。

查附表 1-2 和附表 1-7 可知, C30 混凝土  $f_c = 14.3\text{MPa}$ ,  $f_t = 1.43\text{MPa}$ ,  $\beta_c = 1.0$ ;

HRB335 级钢筋  $f_y = 300\text{MPa}$ , HPB235 级钢筋  $f_{yv} = 210\text{MPa}$

查附表 1-14, 一类环境,  $c = 25\text{mm}$ ,  $b_{\text{cor}} = b - 2c = 200\text{mm}$ ,  $h_{\text{cor}} = h - 2c = 550\text{mm}$ ,

$$A_{\text{cor}} = 200 \times 550\text{mm}^2 = 110000\text{mm}^2$$

(2) 验算截面限制条件和构造配筋条件。

$$W_t = \frac{b^2}{6}(3h - b) = \frac{250^2}{6}(3 \times 600 - 250)\text{mm}^3 = 16.15 \times 10^6 \text{mm}^3$$

$$h_w/b = (600 - 35)/250 = 2.26 \leq 4$$

$$\frac{T}{0.8W_t} = \frac{22.26 \times 10^6}{0.8 \times 16.15 \times 10^6} \text{MPa} = 1.72 \text{MPa} < 0.25\beta_c f_c = 3.58 \text{MPa} \text{ (截面符合要求)}$$

$$\frac{T}{W_t} = \frac{22.26 \times 10^6}{16.15 \times 10^6} \text{MPa} = 1.38 \text{MPa} > 0.7f_t = 1.00 \text{MPa} \text{ (应按计算配筋)}$$

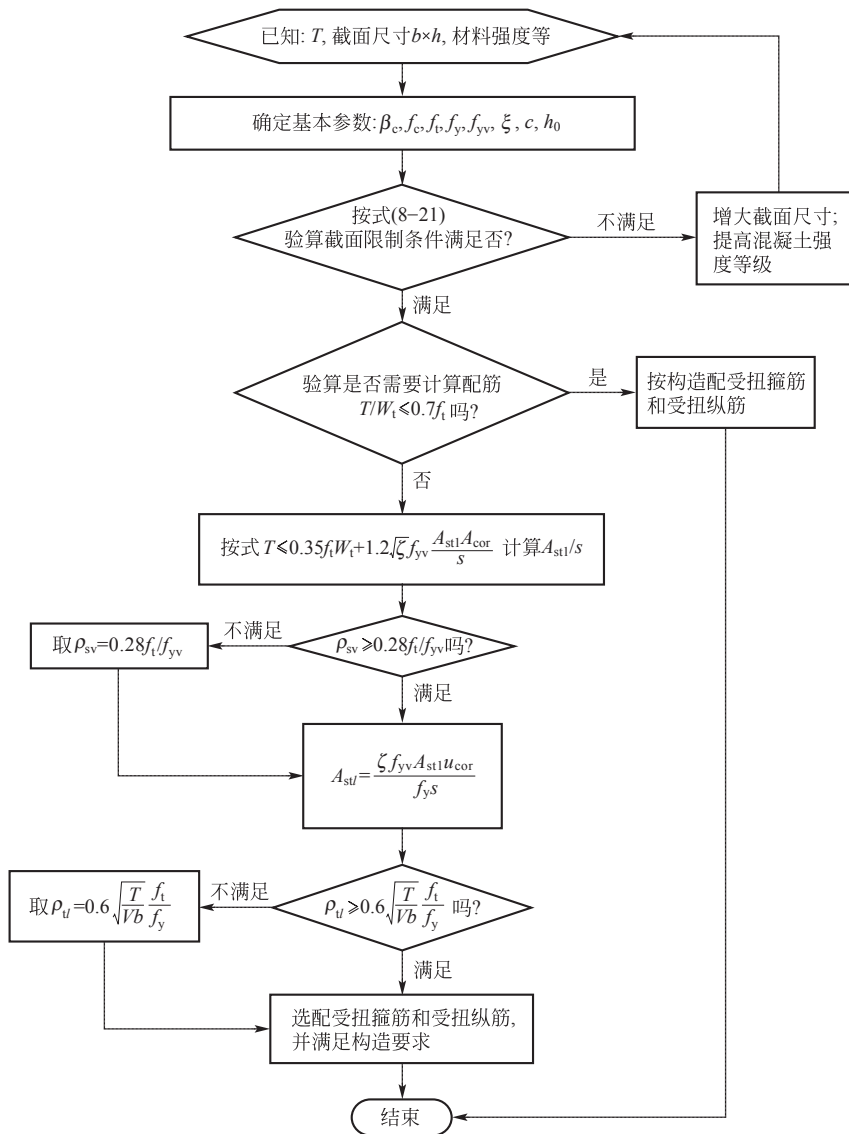


图 8.19 矩形截面纯扭构件的截面设计流程图

(3) 计算箍筋。取  $\zeta=1.2$ ，代入式(8-8)求  $A_{stl}/s$ ，即

$$\frac{A_{stl}}{s} = \frac{T - 0.35f_t W_t}{1.2\sqrt{\xi}f_{yv}A_{cor}} = \frac{22.26 \times 10^6 - 0.35 \times 1.43 \times 16.15 \times 10^6}{1.2\sqrt{1.2} \times 210 \times 110000} = 0.47$$

$$\text{验算配箍率: } \rho_{sv} = \frac{2A_{stl}}{bs} = \frac{2 \times 0.47}{250} = 0.00376 > \rho_{sv,\min} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} = \frac{0.28 \times 1.43}{210} =$$

0.00191(满足要求)

(4) 计算纵筋。

$$u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor}) = 2(550 + 200)\text{mm} = 1500\text{mm}$$

按式(8-8a)计算  $A_{stl}$

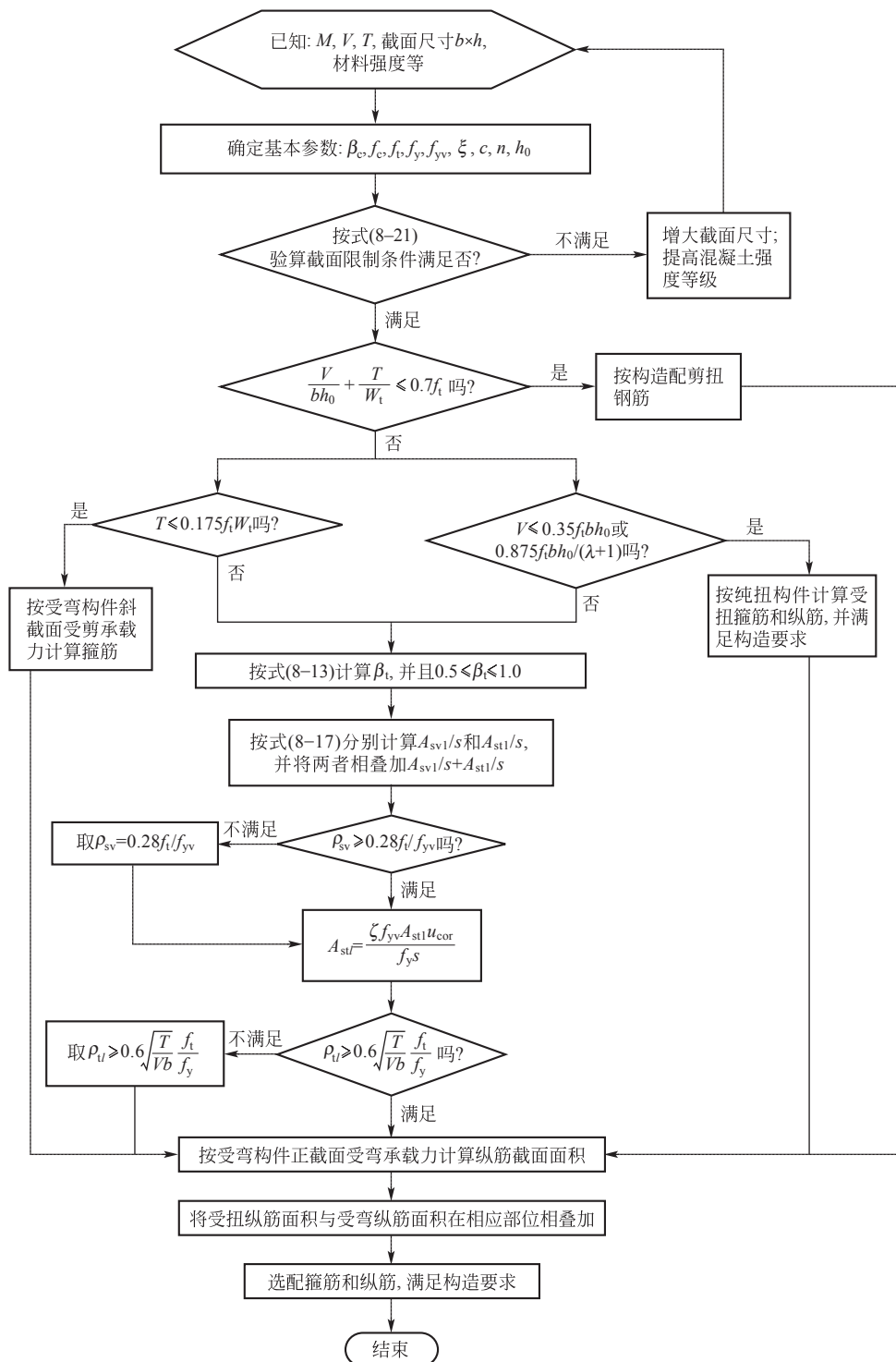


图 8.20 矩形截面弯剪扭构件的截面设计流程图

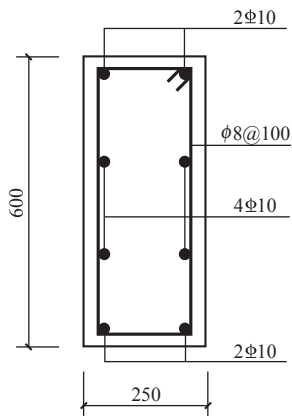


图 8.21 例 8.1 截面配筋图

$$A_{stl} = \frac{\zeta f_{yv} A_{stl} u_{cor}}{f_{ys}} = \frac{1.2 \times 210 \times 0.47 \times 1500}{300} \text{mm}^2 = 592 \text{mm}^2$$

$$\rho_{tl} = \frac{A_{stl}}{bh} = \frac{592}{250 \times 600} = 0.395\% < \rho_{tl, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \cdot \frac{f_t}{f_y} = 0.6 \times$$

$$\sqrt{2} \times \frac{f_t}{f_y} = 0.85 \frac{f_t}{f_y} = \frac{0.85 \times 1.43}{300} = 0.405\%$$

$$\text{取 } A_{stl} = \rho_{tl, \min} bh = 0.405\% \times 250 \times 600 \text{mm}^2 = 608 \text{mm}^2$$

(5) 选配钢筋。

$$\text{受扭箍筋: 选用双肢 } \phi 8 \text{ 箍筋 } A_{stl} = 50.3 \text{mm}^2, s = \frac{50.3}{0.47} =$$

107mm, 取  $s = 100 \text{mm}$ 。

$$\text{受扭纵筋: 选用 } 8 \phi 10, A_{stl} = 628 \text{mm}^2。$$

截面配筋如图 8.21 所示。

**【例 8.2】** 已知均布荷载作用下的某钢筋混凝土 T 形截面梁, 处于一类环境, 安全等级二级, 截面尺寸为  $b = 200 \text{mm}$ ,  $h = 500 \text{mm}$ ,  $h'_f = 100 \text{mm}$ ,  $b'_f = 400 \text{mm}$ , 如图 8.22 所示。承受扭矩设计值  $T = 10 \text{kN} \cdot \text{m}$ , 剪力设计值  $V = 50 \text{kN}$ , 采用 C25 混凝土, 钢筋采用 HPB235 级钢筋, 试计算其配筋。

**【解】**

(1) 确定基本参数。

查附表 1-2 和附表 1-7 可知, C25 混凝土  $f_c = 11.9 \text{MPa}$ ,  $f_t = 1.27 \text{MPa}$ ,  $\beta_c = 1.0$ ; HPB235 级钢筋  $f_y = f_{yv} = 210 \text{MPa}$ 。

查附表 1-14, 一类环境,  $c = 25 \text{mm}$ , 则  $b_{cor} = 150 \text{mm}$ ,  $h_{cor} = 450 \text{mm}$ ,  $b'_{fcor} = 150 \text{mm}$ ,  $h'_{fcor} = 50 \text{mm}$

$$A_{cor} = b_{cor} h_{cor} = 150 \times 450 \text{mm}^2 = 6.75 \times 10^4 \text{mm}^2$$

$$u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor}) = 2 \times (150 + 450) \text{mm} = 1200 \text{mm}$$

$$A'_{fcor} = b'_{fcor} h'_{fcor} = 150 \times 50 \text{mm}^2 = 7500 \text{mm}^2$$

$$u'_{fcor} = 2(b'_{fcor} + h'_{fcor}) = 2 \times (150 + 50) \text{mm} = 400 \text{mm}$$

取  $a_s = 35 \text{mm}$ , 则  $h_0 = (h - 35) \text{mm} = 465 \text{mm}$

$$W'_{tf} = \frac{h_f'^2}{2} (b'_f - b) = \frac{100^2}{2} (400 - 200) \text{mm}^3 = 1.0 \times 10^6 \text{mm}^3$$

$$W_{tw} = \frac{b^2}{6} (3h - b) = \frac{200^2}{6} (3 \times 500 - 200) \text{mm}^3 = 8.67 \times 10^6 \text{mm}^3$$

$$W_t = W'_{tf} + W_{tw} = 9.67 \times 10^6 \text{mm}^3$$

(2) 验算截面限制条件和构造配筋条件:

$$h_w/b = (500 - 35 - 100)/200 = 1.825 \leq 4, b'_f \leq b + 6h'_f = 200 \text{mm} + 6 \times 100 \text{mm} = 800 \text{mm}$$

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} = \frac{50000}{200 \times 465} \text{MPa} + \frac{10 \times 10^6}{0.8 \times 9.67 \times 10^6} \text{MPa} = 1.83 \text{MPa} < 0.25\beta_c f_c = 2.98 \text{MPa}$$

(截面符合要求)

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} = \frac{50000}{200 \times 465} \text{MPa} + \frac{10 \times 10^6}{9.67 \times 10^6} \text{MPa} = 1.57 \text{MPa} > 0.7f_t = 0.89 \text{MPa} (\text{应按计算配筋})$$

(3) 扭矩分配。

$$\text{腹板: } T_w = \frac{W_{tw}}{W_t} T = \frac{8.67 \times 10^6}{9.67 \times 10^6} \times 10 \text{ kN} \cdot \text{m} = 8.97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{翼缘: } T'_f = \frac{W'_{tf}}{W_t} T = \frac{1.0 \times 10^6}{9.67 \times 10^6} \times 10 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1.03 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(4) 判别腹板是否可忽略扭矩  $T$  或剪力  $V$ 。

$$T_w > 0.175 f W_{tw} = 0.175 \times 1.27 \times 8.67 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1.93 \text{ kN} \cdot \text{m}, \text{ 需考虑扭矩。}$$

$$V > 0.35 f_t b h_0 = 0.35 \times 1.27 \times 200 \times 465 \times 10^{-3} \text{ kN} = 41.34 \text{ kN}, \text{ 需考虑剪力。}$$

(5) 计算剪扭构件的受扭承载力降低系数。

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V W_{tw}}{T_w b h_0}} = \frac{1.5}{1 + 0.5 \times \frac{50 \times 10^3 \times 8.67 \times 10^6}{8.97 \times 10^6 \times 200 \times 465}} = 1.19 > 1.0$$

取  $\beta_t = 1.0$

(6) 计算腹板剪扭钢筋。

① 计算抗剪箍筋。由式(8-17-1)得

$$\frac{n A_{svl}}{s} \geq \frac{V - 0.5 \times 0.7 f_t b h_0}{1.25 f_{yv} h_0} = \frac{50000 - 0.5 \times 0.7 \times 1.27 \times 200 \times 465}{1.25 \times 210 \times 465} \text{ mm}^2 / \text{mm} = 0.071 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

采用双肢箍,  $n=2$ , 则  $\frac{A_{svl}}{s} \geq 0.036 \text{ mm}^2 / \text{mm}$

② 计算腹板抗扭钢筋。取配筋强度比  $\zeta=1.2$ , 由式(8-17-2)得

$$\frac{A_{stl}}{s} \geq \frac{T_w - 0.35 \beta_t f_t W_{tw}}{1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} A_{cor}} = \frac{8.97 \times 10^6 - 0.35 \times 1.0 \times 1.27 \times 8.67 \times 10^6}{1.2 \sqrt{1.2} \times 210 \times 67500} \text{ mm}^2 / \text{mm} = 0.275 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

所需抗扭纵筋的面积为

$$A_{stl} = \zeta \frac{A_{stl}}{s} \cdot \frac{u_{cor} f_{yv}}{f_y} = 1.2 \times 0.275 \times \frac{1200 \times 210}{210} \text{ mm}^2 = 396 \text{ mm}^2$$

$$\frac{T_w}{V b} = \frac{8.97 \times 10^6}{50 \times 10^3 \times 200} = 0.897 < 2, \text{ 则}$$

$$\rho_{u, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T_w}{V b}} \cdot \frac{f_t}{f_y} = 0.6 \times \sqrt{0.897} \times \frac{1.27}{210} = 0.00344 = 0.344 \%$$

$$A_{stl} > \rho_{u, \min} b h = 0.00344 \times 200 \times 500 \text{ mm}^2 = 344 \text{ mm}^2$$

(7) 计算受压翼缘抗扭钢筋。按纯扭构件计算, 仍取配筋强度比  $\zeta=1.2$ , 则

$$\frac{A'_{stl}}{s} \geq \frac{T'_f - 0.35 f_t W'_{tf}}{1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} A'_{fcor}} = \frac{1.03 \times 10^6 - 0.35 \times 1.0 \times 1.27 \times 1.0 \times 10^6}{1.2 \times \sqrt{1.2} \times 210 \times 7500} \text{ mm}^2 / \text{mm} = 0.283 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

$$A'_{stl} = \zeta \frac{A'_{stl}}{s} \cdot \frac{u'_{fcor} f_{yv}}{f_y} = 1.2 \times 0.283 \times \frac{400 \times 210}{210} \text{ mm}^2 = 136 \text{ mm}^2$$

(8) 选配钢筋。

① 腹板。抗剪扭箍筋为

$$\frac{A_{svl}}{s} + \frac{A_{stl}}{s} \geq 0.036 + 0.275 \text{ mm}^2 / \text{mm} = 0.311 \text{ mm}^2 / \text{mm} > \rho_{sv, \min} \frac{b}{n} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} \frac{b}{2}$$

$$= 0.28 \times \frac{1.27}{210} \times \frac{200}{2} \text{ mm}^2 / \text{mm} = 0.169 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

选  $\phi 8$ , 单肢面积为  $50.3 \text{ mm}^2$ , 则

$$s \leq \frac{50.3}{0.311} \text{mm} = 162 \text{mm}, \text{ 实取 } s = 160 \text{mm}$$

抗扭纵筋：根据构造要求，抗扭纵筋不少于 6 根，所以选用  $6\phi 10 (A_{stl} = 471 \text{mm}^2)$ 。

② 受压翼缘。箍筋选  $\phi 8$ ，单肢面积为  $50.3 \text{mm}^2$ ，则  $s \leq \frac{50.3}{0.283} \text{mm} = 178 \text{mm}$ ，实取  $s =$

160mm

抗扭纵筋选用  $4\phi 8 (A'_{stl} = 201 \text{mm}^2)$ 。

截面配筋如图 8.22 所示。

**【例 8.3】** 已知均布荷载作用下的某钢筋混凝土 T 形截面，承受扭矩设计值  $T = 10 \text{kN} \cdot \text{m}$ ，弯矩设计值  $M = 100 \text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力设计值  $V = 50 \text{kN}$ ，其他条件同例【8.2】。试计算其配筋。

**【解】**

(1) 抗剪扭钢筋。由【例 8.2】可知

① 受压翼缘：抗扭箍筋为  $\phi 8 @ 160$

抗扭纵筋选用  $4\phi 8 (A'_{stl} = 201 \text{mm}^2)$ 。

② 腹板：抗剪扭箍筋为  $\phi 8 @ 160$

抗扭纵筋  $A_{stl} = 396 \text{mm}^2$

(2) 抗弯纵筋。经计算，抗弯纵筋  $A_s = 966 \text{mm}^2$ 。

(3) 选配腹板的抗扭和抗弯纵筋。

将抗扭纵筋分上、中、下三排布置，每排面积为  $\frac{A_{stl}}{3} = 132 \text{mm}^2$

则上、中部可以选用  $2\phi 10 (157 \text{mm}^2)$ 。

下部所需钢筋面积为  $A_s + \frac{A_{stl}}{3} = 1098 \text{mm}^2$ ，可以选用  $3\phi 22 (1140 \text{mm}^2)$ 。

截面配筋如图 8.23 所示。

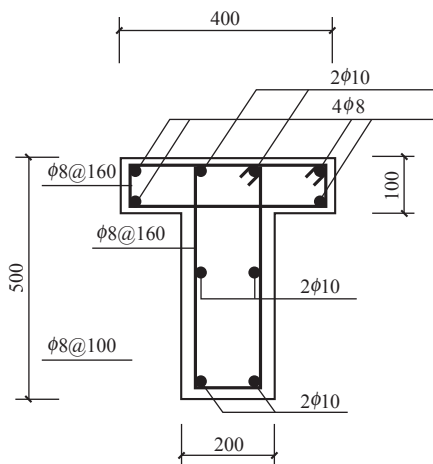


图 8.22 例 8.2 截面配筋图

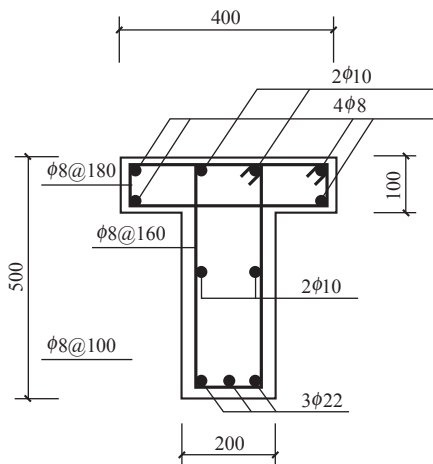


图 8.23 例 8.3 截面配筋图

**【例 8.4】** 已知某钢筋混凝土矩形截面纯扭构件，处于一类环境，安全等级二级，截

面尺寸为  $b \times h = 300\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，混凝土采用 C25，纵筋为用  $4 \Phi 14$  的 HRB335 级钢筋，箍筋为  $\Phi 8 @ 100$  的 HPB235 钢筋，求该截面能承受的扭矩值。

【解】

(1) 确定基本参数。

查附表 1-2 和附表 1-7 可知，C25 混凝土  $f_c = 11.9\text{MPa}$ ， $f_t = 1.27\text{MPa}$ ， $\beta_c = 1.0$ ；HRB335 级钢筋  $f_y = 300\text{MPa}$ ，HPB235 级钢筋  $f_y = f_{yv} = 210\text{MPa}$

查附表 1-14，一类环境， $c = 25\text{mm}$ ，则  $u_{\text{cor}} = 2(b_{\text{cor}} + h_{\text{cor}}) = 2 \times (300 + 500 - 25 \times 4)\text{mm} = 1400\text{mm}$ ， $A_{\text{cor}} = b_{\text{cor}} h_{\text{cor}} = 250 \times 450\text{mm}^2 = 112500\text{mm}^2$

(2) 复核最小配筋率。

$$\rho_{\text{sv}} = \frac{A_{\text{sv}}}{b_s} = \frac{2 \times 50.3}{300 \times 100} = 0.0034 \geq \rho_{\text{sv}, \text{min}} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} = 0.0017 \text{ (满足要求)}$$

对于纯扭构件： $\rho_{\text{tl}} = \frac{A_{\text{stl}}}{bh} = \frac{615}{300 \times 500} = 0.0041 \geq \rho_{\text{tl}, \text{min}} = 0.85 \frac{f_t}{f_y} = 0.0036 \text{ (满足要求)}$

(3) 抗扭纵筋与箍筋的配筋强度比。

$$\zeta = \frac{f_y A_{\text{stl}} s}{f_{yv} A_{\text{stl}} u_{\text{cor}}} = \frac{300 \times 615 \times 100}{210 \times 50.3 \times 1400} = 1.248, \text{ 满足 } 0.6 \leq \zeta \leq 1.7 \text{ 的要求。}$$

(4) 该截面能承受的最大扭矩值。

$$W_t = \frac{b^2}{6} (3h - b) = \frac{300^2}{6} (3 \times 500 - 300)\text{mm}^3 = 1.8 \times 10^7 \text{mm}^3$$

$$T \leq 0.35 f_t W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{\text{stl}} A_{\text{cor}}}{s} = 0.35 \times 1.27 \times 1.8 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm} + 1.2 \times$$

$$\sqrt{1.248} \times 210 \times \frac{50.3 \times 1.125 \times 10^5}{100} \text{N} \cdot \text{mm} = 2.39 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm} = 23.9 \text{kN} \cdot \text{m}$$

(5) 由截面限制条件所控制的最大扭矩。

$$T_u = 0.8 W_t \times 0.25 \beta_c f_c = 0.8 \times 1.8 \times 10^7 \times 0.25 \times 1.0 \times 11.9 \text{N} \cdot \text{mm} = 42.84 \text{kN} \cdot \text{m} > 23.9 \text{kN} \cdot \text{m} \text{ (截面符合要求)}$$

所以该截面能承受的最大扭矩值为  $23.9 \text{kN} \cdot \text{m}$ 。

## 8.7 公路桥涵工程受扭构件的设计

公路桥涵工程中，受扭构件承载力计算与建筑工程中的受扭构件有很多相同之处，以下主要阐述《规范》JTG D62 与《规范》GB 50010 在受扭构件设计计算方面的差异。

### 8.7.1 矩形和箱形截面纯扭构件承载力计算

矩形和箱形截面钢筋混凝土纯扭构件，截面形式如图 8.24 所示，其抗扭承载力应按下列式计算

$$\gamma_0 T_d \leq 0.35\beta_a f_{td} W_t + 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{sv} A_{sv1} A_{cor}}{s_v} \quad (8-24)$$

$$\zeta = \frac{f_{sd} A_{st} s_v}{f_{sv} A_{sv1} U_{cor}} \quad (8-24a)$$

式中  $T_d$ ——扭矩组合设计值；

$\zeta$ ——纯扭构件纵向钢筋与箍筋的配筋强度比，应符合  $0.6 \leq \zeta \leq 1.7$  的要求；

$\beta_a$ ——箱形截面有效壁厚折减系数，当  $0.1b \leq t_2 \leq 0.25b$  或  $0.1h \leq t_1 \leq 0.25h$  时，取  $\beta_a = 4t_2/b$  或  $\beta_a = 4t_1/h$  二者较小值，当  $t_2 > 0.25b$  和  $t_1 > 0.25h$  时，取  $\beta_a = 1.0$  (此  $t_1, t_2, b, h$  见图 8.24，对矩形截面  $\beta_a = 1.0$ )；

$W_t$ ——矩形截面或箱形截面的抗扭塑性抵抗矩，按式(8-4)或式(8-5)计算；

$f_{td}$ ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

$f_{sv}$ ——箍筋的抗拉强度设计值；

$A_{sv1}$ ——纯扭计算中箍筋单肢截面面积；

$A_{st}$ ——纯扭计算中沿截面周边对称布置的全部纵向钢筋截面面积；

$f_{sd}$ ——纵向钢筋的抗拉强度设计值；

$s_v$ ——箍筋的间距；

$A_{cor}$ ——由箍筋内表面包围的截面核心部分的面积， $A_{cor} = b_{cor} h_{cor}$  (此处  $b_{cor}$ 、 $h_{cor}$  为箍筋内表面范围内截面核心部分的短边、长边尺寸)；

$U_{cor}$ ——截面核心面积周长， $U_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ 。

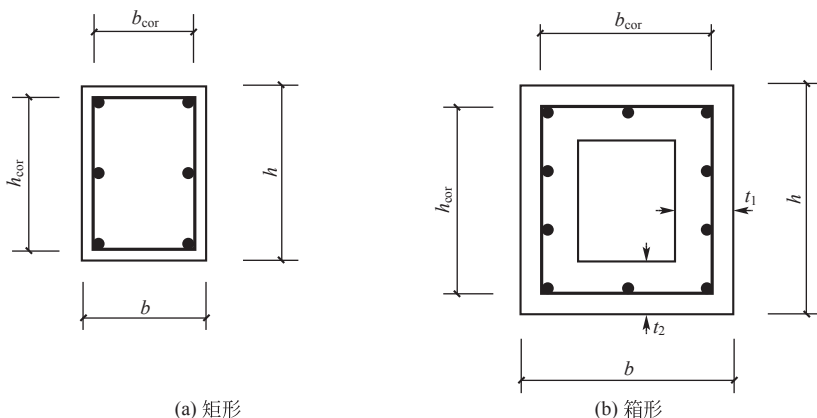


图 8.24 矩形和箱形受扭构件截面

### 8.7.2 矩形和箱形截面剪扭构件承载力计算

《规范》JTG D62 在试验的基础上，对在剪、扭共同作用下矩形和箱形截面钢筋混凝土剪力和扭矩分别采用下列计算公式。

(1) 抗剪承载力按下式计算。

$$\gamma_0 V_d \leq \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{(10-2\beta_1)}{20} b h_0 \sqrt{(2+0.6P)\sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}} \quad (8-25)$$



$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V_d W_t}{T_d b h_0}} \quad (8-25a)$$

式中  $a_1$ ——异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近边支点梁段的抗剪承载力时  $a_1 = 1.0$ ，计算连续梁和悬臂梁近中间支点梁段的抗剪承载力时  $a_1 = 0.9$ ；

$a_2$ ——预应力提高系数，对钢筋混凝土受弯构件， $a_2 = 1.0$ ，对预应力混凝土受弯构件  $a_2 = 1.25$ ，但当由钢筋合力引起的截面弯矩与外弯矩的方向相同时，或允许出现裂缝的预应力混凝土受弯构件，取  $a_2 = 1.0$ ；

$a_3$ ——受压翼缘的影响系数，取  $a_3 = 1.1$ ；

$f_{sv}$ ——箍筋抗拉强度设计值；

$\rho_{sv}$ ——斜截面内箍筋配筋率， $\rho_{sv} = A_{sv} / (s_v b)$ ；

$P$ ——斜截面内纵向受拉钢筋的配筋百分率， $P = 100\rho$ ，当  $P > 2.5$  时，取  $P = 2.5$ 。

(2) 抗扭承载力按下式计算。

$$\gamma_0 T_d \leq 0.35 \beta_a \beta_t f_{td} W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} \frac{f_{sv} A_{sv1} A_{cor}}{s_v} \quad (8-26)$$

式中  $\beta_t$ ——剪扭构件混凝土抗扭承载力降低系数，当  $\beta_t < 0.5$  时取  $\beta_t = 0.5$ ，当  $\beta_t > 1$  时取  $\beta_t = 1$ ；

$\beta_a$ ——箱形截面有效壁厚折减系数，当  $0.1b \leq t_2 \leq 0.25b$  或  $0.1h \leq t_1 \leq 0.25h$  时取  $\beta_a = 4t_2/b$  或  $\beta_a = 4t_1/h$  两者较小值，当  $t_2 > 0.25b$  和  $t_1 > 0.25h$  时，取  $\beta_a = 1.0$ ，对矩形截面取  $\beta_a = 1.0$ 。

T形、I形和带翼缘的箱形截面钢筋混凝土受扭构件，可将其划分为几个矩形截面(矩形箱体也作为矩形截面)按下列规定进行抗扭承载力计算。

(1) 腹板或矩形箱体、受压翼缘和受拉翼缘的扭矩设计值按下式计算。

$$\text{受压翼缘为} \quad T'_{fd} = \frac{W'_{tf}}{W_t} T_d \quad (8-27-1)$$

$$\text{腹板为} \quad T_{wd} = \frac{W_{tw}}{W_t} T_d \quad (8-27-2)$$

$$\text{受拉翼缘为} \quad T_{fd} = \frac{W_{tf}}{W_t} T_d \quad (8-27-3)$$

式中  $T'_{fd}$ 、 $T_{wd}$ 、 $T_{fd}$ ——分别为受压翼缘、腹板及受拉翼缘需承担的扭矩设计值；

$W'_{tf}$ 、 $W_{tw}$ 、 $W_{tf}$ ——分别为受压翼缘、腹板及受拉翼缘的抗扭塑性抵抗矩；

$W_{tw}$ ——整个截面的抗扭塑性抵抗矩， $W_t = W'_{tf} + W_{tw} + W_{tf}$

(2) 各种截面的受扭塑性抵抗矩按式(8-4)和式(8-5)计算。

(3) T形、I形和带翼缘箱形截面的腹板或矩形箱体作为剪扭构件，其承载力按式(8-25)和式(8-25a)计算，但式中  $T_d$  和  $W_t$  应以  $T_{wd}$  和  $W_{tw}$  代替；受压翼缘和受拉翼缘作为纯扭构件考虑，其抗扭承载力按式(8-24)计算，但式中的  $T_d$  和  $W_t$  应以  $T'_{fd}$  和  $W'_{tf}$  或  $T_{fd}$  和  $W_{tf}$  代替。

### 8.7.3 矩形、T形、I形和箱形截面弯剪扭配筋的上下限

#### 1. 抗剪扭配筋的上限

当构件抗扭配筋量过大时, 构件将由于混凝土首先被压碎而破坏, 因此必须规定截面的限制条件, 以防止这种破坏。

《规范》JTG D62 规定, 在弯、剪、扭共同作用下, 矩形和箱形截面截面尺寸应符合下式要求

$$\frac{\gamma_0 V_d}{bh_0} + \frac{\gamma_0 T_d}{W_t} \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} \quad (8-28)$$

#### 2. 抗剪扭配筋的下限

《规范》JTG D62 规定, 剪扭构件箍筋配筋率应满足

$$\rho_{sv} \geq \rho_{sv, \min} = \left[ (2\beta_t - 1) \left( 0.055 \frac{f_{cd}}{f_{sv}} - c \right) + c \right] \quad (8-29)$$

式中 当采用 R235(Q235) 钢筋时,  $c=0.0018$ ; 当采用 HRB335 钢筋时,  $c=0.0012$ 。

《规范》JTG D62 规定, 在弯、剪、扭共同作用下的矩形和箱形截面截面, 当符合下列条件时, 可不进行构件的抗扭承载力计算, 仅需配置构造钢筋, 即

$$\frac{\gamma_0 V_d}{bh_0} + \frac{\gamma_0 T_d}{W_t} \leq 0.5 \times 10^{-3} f_{td} \quad (8-30)$$

式中  $V_d$ ——剪力组合设计值(kN);

$T_d$ ——扭矩组合设计值(kN·m);

$b$ ——垂直于弯矩作用平面的矩形或箱形截面宽度(mm);

$h_0$ ——平行于弯矩作用平面的矩形或箱形截面的有效高度(mm);

$W_t$ ——截面受扭塑性抵抗矩( $\text{mm}^3$ )。

对带有受压翼缘的 T 形截面、I 形截面和箱形截面构件, 式(8-30)右边限值应乘以系数 1.1。

### 8.7.4 矩形、T形、I形和箱形截面弯剪扭配筋计算

矩形、T形、I形和带翼缘箱形截面的钢筋混凝土弯剪扭构件, 其纵向钢筋和箍筋应按下列规定计算, 并分别进行钢筋配置。

(1) 按受弯构件正截面抗弯承载力计算所需的钢筋截面面积, 配置纵向钢筋。

(2) 矩形截面、T形截面和 I 形截面的腹板、带翼缘箱形截面的箱体, 应按剪扭构件计算其纵筋和箍筋。

① 按抗扭承载力计算公式(8-26)计算所需要的纵向钢筋截面面积, 并沿周边均匀对称布置。

② 按斜截面抗剪承载力和抗扭承载力计算箍筋的截面面积, 并按所需数量布置。

(3) T形截面、I形截面和带翼缘箱形截面的受压翼缘和受拉翼缘, 应按纯扭构件抗扭承载力计算公式(8-24)计算所需纵向钢筋和箍筋截面面积, 其中纵向钢筋应沿周边对称布置。

**【例 8.5】** 已知某箱形截面弯剪扭构件，截面尺寸如图 8.25 所示，近边支点梁段承受的剪力设计值为 300kN，弯矩设计值为 1090kN·m，扭矩设计值为 200kN·m，混凝土为 C25 ( $f_{cd} = 11.5\text{MPa}$ ,  $f_{td} = 1.23\text{MPa}$ )，纵筋和箍筋为 HRB335 级钢筋 ( $f_{sd} = 280\text{MPa}$ ,  $f_{sv} = 280\text{MPa}$ )， $\gamma_0$  取 1.0，环境类别为一类，安全等级为二级， $a_s = 40\text{mm}$ ，试设计该截面。

**【解】**

(1) 抗弯承载力计算。

$$h_0 = h - a_s = 1200\text{mm} - 40\text{mm} = 1160\text{mm}$$

$$\alpha_s = \frac{\gamma_0 M_d}{f_{cd} b h_0^2} = \frac{1.0 \times 1090 \times 10^6}{11.5 \times 600 \times 1160^2} = 0.117$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} = 0.125, \quad x = \xi h_0 = 0.125 \times 1160\text{mm} = 145\text{mm} < t_2 = 150\text{mm}$$

$$A_s = \xi b h_0 \frac{f_{cd}}{f_{sd}} = 0.125 \times 600 \times 1160 \times \frac{11.5}{280} \text{mm}^2 = 3573.2 \text{mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b h_0} = \frac{3573.2}{600 \times 1160} = 0.513\% > \rho_{\min} = 0.2\% > 0.45 \frac{f_{td}}{f_{sd}} = 0.198\%$$

(2) 验算是否进行抗扭承载力计算。

$$\begin{aligned} W_t &= \frac{b^2}{6}(3h-b) - \frac{(b-2t_1)^2}{6}[3(h-2t_2) - (b-2t_1)] \\ &= \frac{600^2}{6}(3 \times 1200 - 600)\text{mm}^3 - \frac{(600-300)^2}{6}[3 \times (1200-300) - (600-300)]\text{mm}^3 \\ &= 144 \times 10^6 \text{mm}^3 \end{aligned}$$

$$\frac{\gamma_0 V_d}{b h_0} + \frac{\gamma_0 T_d}{W_t} = \frac{1.0 \times 300 \times 10^3}{600 \times 1160} \text{MPa} + \frac{1.0 \times 200 \times 10^6}{144 \times 10^6} \text{MPa}$$

$$= 0.431\text{MPa} + 1.389\text{MPa} = 1.820\text{MPa} > 0.5 \times 10^{-3} f_{td} = 0.615 \times 10^{-3} \text{MPa}$$

需进行抗扭承载力验算。

(3) 抗剪承载力计算。

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V_d W_t}{T_d b h_0}} = \frac{1.5}{1 + 0.5 \times \frac{300 \times 10^3 \times 144 \times 10^6}{200 \times 10^6 \times 600 \times 1160}} = \frac{1.5}{1.155} = 1.299 > 1.0$$

取  $\beta_t = 1.0$ ,  $a_1 = 1.0$ ,  $a_2 = 1.0$ ,  $a_3 = 1.1$ ,  $P = 100$ ,  $\rho = 0.513$

$$\gamma_0 V_d \leq \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{10 - 2\beta_t}{20} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}}$$

$$\rho_{sv} = \left( \frac{\gamma_0 V_d}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{10 - 2\beta_t}{20} b h_0} \right)^2 \times \frac{1}{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k} f_{sv}}}$$

$$= \left( \frac{1.0 \times 300 \times 10^3}{1.1 \times \frac{10 - 2 \times 1.0}{20} \times 600 \times 1160} \right)^2 \times \frac{1}{(2 + 0.6 \times 0.513) \sqrt{25 \times 280}}$$

$$= 0.297 \times 10^{-3}$$

选用双肢箍， $n = 2$

由  $\rho_{sv} = \frac{n A_{sv1}}{s_v b}$ ，得

$$\frac{A_{svl}}{s_v} = \frac{\rho_{sv} b}{2} = \frac{0.297 \times 10^{-3} \times 600}{2} \text{mm} = 0.089 \text{mm}$$

(4) 抗扭承载力计算。

$$A_{cor} = (600 - 100) \times (1200 - 100) \text{mm}^2 = 5.5 \times 10^5 \text{mm}^2$$

取  $\zeta = 1.2$ ，则

$$\beta_a = 4 \frac{t_1}{h} = 4 \times \frac{150}{1200} = 0.5$$

由  $\gamma_0 T_d \leq 0.35 \beta_a \beta_t f_{td} W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} \frac{f_{sv} A_{svl} A_{cor}}{s_v}$ ，得

$$\begin{aligned} \frac{A_{svl}}{s_v} &= (\gamma_0 T_d - 0.35 \beta_a \beta_t f_{td} W_t) \times \frac{1}{1.2 \sqrt{\zeta} f_{sv} A_{cor}} \\ &= (1.0 \times 200 \times 10^6 - 0.35 \times 0.5 \times 1.0 \times 1.23 \times 144 \times 10^6) \times \frac{1}{1.2 \sqrt{1.2} \times 280 \times 5.5 \times 10^5} \text{mm}^2 / \text{mm} \\ &= 0.835 \text{mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

抗扭纵筋计算

$$U_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor}) = 2 \times (500 + 1100) \text{mm} = 3200 \text{mm}$$

$$A_{st} = \frac{\zeta f_{sv} A_{svl} U_{cor}}{f_{sd} s_v} = \frac{1.2 \times 280 \times 3200 \times 0.835}{280} \text{mm}^2 = 3206.4 \text{mm}^2$$

根据受扭纵筋的要求，选择  $12 \Phi 20$ ， $A_{st} = 3770.4 \text{mm}^2$ 。

(5) 抗剪及抗扭箍筋用量。

$$\frac{A_{svl}}{s_v} + \frac{A_{svl}}{s_v} = 0.089 \text{mm} + 0.835 \text{mm} = 0.924 \text{mm}$$

取箍筋直径为  $\phi 14$ ， $A_{svl} = A_{sv} = 153.9 \text{mm}^2$ ， $s_v = \frac{153.9}{0.924} \text{mm} = 166.6 \text{mm}$ ，取  $s_v = 160 \text{mm}$ 。

验算箍筋的配筋率

$$\rho_{sv, \min} = (2\beta_t - 1) \left( 0.05 \frac{f_{cd}}{f_{sv}} - c \right) + c = (2 \times 1.0 - 1) \times \left( 0.05 \times \frac{11.5}{280} - 0.0012 \right) + 0.0012 = 0.00226$$

$$\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{s_v b} = \frac{2 \times 153.9}{160 \times 600} = 0.00321 > \rho_{sv, \min}$$
，满足要求。

(6) 选择钢筋。受拉钢筋  $A_s = 3573.2 \text{mm}^2$ ，受扭钢筋沿截面四周均匀配置，因此，截面下部配置的钢筋为  $3573.2 \text{mm}^2 + 3 \times 3206.4 / 12 \text{mm}^2 = 4374.8 \text{mm}^2$ ，选配  $6 \Phi 28 + 1 \Phi 32$ ， $A_s = 4499 \text{mm}^2$ 。

全截面总配筋量为  $A_s + A_{st} = 2827 \text{mm}^2 + 4499 \text{mm}^2 = 7326 \text{mm}^2$

$$\begin{aligned} \rho_{st, \min} &= 0.08(2\beta_t - 1) f_{cd} / f_{sd} \\ &= 0.08 \times (2 \times 1.0 - 1) \times \frac{11.5}{280} = 0.0033 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{s+st} &= \frac{A_s + A_{st}}{bh_0} = \frac{7326}{600 \times 1160} = 1.05\% > \rho_{\min} + \rho_{st, \min} \\ &= 0.2\% + 0.33\% = 0.53\% \end{aligned}$$

截面配筋如图 8.25 所示

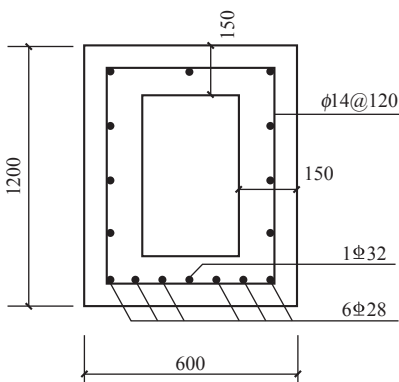


图 8.25 例 8.5 截面配筋图

注：除底部纵筋外，其他纵筋均为  $\Phi$

### 8.7.5 构造要求

承受弯剪扭的构件应满足以下构造要求。

(1) 在保证必要的保护层的前提下, 箍筋和纵筋均应尽可能布置在构件的周边的表面处, 以增大抗扭效果。此外, 由于位于角隅、棱边处的纵筋受到压力作用, 易发生平面外弯曲, 使混凝土保护层向外侧推出而剥落, 因此纵筋必须布置在箍筋的内侧。

(2) 承受扭矩的纵向钢筋, 应沿截面周边均匀对称布置, 其间距不应大于 300mm, 直径不应小于 8mm, 数量不少于 4 根, 布置在矩形截面的四个角隅处; 纵筋末端应留有足够的锚固长度; 架立钢筋和梁肋两侧纵向分布筋若有可靠的锚固, 可以起抗扭钢筋的作用; 在受弯钢筋一边, 可选用较大直径的钢筋来满足抵抗弯矩和扭矩的需要。

(3) 箍筋的直径和间距应符合一般梁中箍筋的要求, 且需采用封闭式, 箍筋末端应做成  $135^\circ$  弯钩, 弯钩端头平直段长度不应小于  $10d$  ( $d$  为箍筋直径)。弯钩应箍牢纵向钢筋, 相邻两根箍筋的接头应交替布置。为防止箍筋间纵筋向外屈曲而导致保护层剥落, 箍筋间距不宜过大, 箍筋最大间距按抗扭要求不宜大于梁高的  $1/2$  且不大于 400mm, 也不宜大于抗剪箍筋最大间距。箍筋的直径不小于 8mm, 且不小于  $1/4$  主钢筋直径。

(3) 箍筋的配筋率  $\rho_{sv}$  应满足式 (8-29) 的要求, 对纯扭构件 (梁的翼缘)  $\rho_{sv}$  不应小于  $0.055f_{cd}/f_{sd}$ 。

(4) 纵向钢筋的配筋率, 不应小于受弯构件纵向受力钢筋的最小配筋率与受扭构件纵向受力箍筋的最小配筋率之和。其纵向受力钢筋的最小配筋率 ( $A_{st, \min}/bh_0$ ): 当受剪扭时可取  $0.08(2\beta_1 - 1)f_{cd}/f_{sd}$ ; 当受纯扭时可取  $0.08f_{cd}/f_{sd}$ , 此处  $A_{st, \min}$  为纯扭构件全部纵向钢筋的最小截面面积,  $h$  为矩形截面基本单元长边长度。

## 本章小结

(1) 本章主要介绍受扭构件的受力性能、承载力计算方法以及相应的构造措施。

(2) 受扭构件可分为纯扭、剪扭、弯扭、弯剪扭、压扭和压弯剪扭等多种受力情况。实际工程中以弯剪扭构件和压弯剪扭构件最为常见。

(3) 根据箍筋和纵筋配置数量的多少, 钢筋混凝土纯扭构件有少筋破坏、适筋破坏、部分超筋破坏和超筋破坏四种破坏形态。其中, 只有适筋构件破坏时, 钢筋和混凝土的强度都得到充分利用, 而且是延性破坏, 故工程设计中, 应采用适筋构件。

(4) 矩形截面钢筋混凝土纯扭构件在接近承载能力极限状态时, 核心部分混凝土起的作用很小。此时, 具有螺旋裂缝的混凝土箱壁与受扭钢筋一起形成一个变角空间桁架模型。纵筋相当于桁架的受拉弦杆, 箍筋相当于桁架的受拉腹杆, 斜裂缝间的混凝土相当于桁架的斜压腹杆, 斜裂缝的倾角  $\alpha$  随受扭纵筋与箍筋的配筋强度比值  $\zeta$  而变化。

(5) 钢筋混凝土纯扭构件的破坏面是一个空间扭曲面, 其受力性能已相当复杂。在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的弯剪扭构件的受力性能则更为复杂, 其破坏形态主要有弯型破坏、扭型破坏和剪扭型破坏三种。

(6) 对于剪扭构件的承载力计算,《规范》GB 50010 采取混凝土部分相关、钢筋部分不相关的原则。先按剪扭构件的受剪承载力计算受剪箍筋,按剪扭构件的受扭承载力计算受扭箍筋,最后将两者叠加,得到剪扭构件的箍筋用量;并按剪扭构件的受扭承载力计算受扭纵向钢筋。

(7) 对于弯扭构件的承载力计算,《规范》GB 50010 直接采用叠加的方法,即对于抗弯纵筋、抗扭箍筋和抗扭纵筋采取首先分别计算而后叠加的方法。

(8) 对于弯剪扭构件的承载力计算,《规范》GB 50010 也只考虑混凝土部分抗力的剪扭相关性,对于抗弯纵筋与抗扭纵筋、以及抗剪箍筋与抗扭箍筋也采取首先分别计算而后叠加的方法。

(9) 对于压扭构件、压弯剪扭构件的承载力计算,《规范》GB 50010 考虑了轴向压力对受扭和受剪承载力的有利作用。

(10) 受扭构件承载力计算涉及的截面类型主要有矩形、T形、I形和箱形截面,其中矩形截面受扭构件的承载力计算公式是最为基本的,是T形、I形和箱形截面受扭构件承载力计算的基础。T形和I形截面应首先划分为腹板、受压翼缘和受拉翼缘三个矩形分块,然后按截面受扭塑性抵抗矩的比例分配扭矩,剪力全部由腹板承担;最后套用矩形截面受扭构件的承载力计算公式进行计算。以矩形截面受扭构件的计算公式为基础,考虑箱形截面壁厚影响后,得到箱形截面受扭构件的承载力计算公式。

(11) 弯剪扭构件的截面限制条件是为了保证受扭构件在破坏时混凝土不首先被压碎(即避免超筋破坏),最小配筋率和钢筋的构造要求主要是为了防止受扭构件发生“一裂就坏”的少筋脆性破坏。

(12) 《规范》GB 50010 和《规范》JTG D62 有关受扭构件的计算方法的异同之处有:两本《规范》关于纯扭构件的计算方法和剪扭构件的受扭承载力计算方法相同;关于剪扭构件的受剪承载力计算方法、截面限制条件、构造配筋条件和最小配筋率的计算公式有较大区别。

(13) 两本规范有关受扭构件承载力计算公式的比较

类型	《规范》GB 50010	《规范》JTG D62
开裂扭矩	$T_{cr}=0.7f_tW_t$	$T_{cr}=0.7f_{td}W_t$
纯扭构件	$T \leq 0.35f_tW_t + 1.2\sqrt{\xi}f_{yv}\frac{A_{st1}A_{cor}}{s}$ $\xi = \frac{f_y A_{st1} S}{f_{yv} A_{st1} u_{cor}}$	$\gamma_0 T_d \leq 0.35f_{td}W_t + 1.2\sqrt{\xi}f_{sv}\frac{A_{sv1}A_{cor}}{s_v}$ $\xi = \frac{f_{sd}A_{st}S_v}{f_{sv}A_{sv1}u_{cor}}$
$\beta_t$	一般剪扭构件: $\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{VW_t}{Tbh_0}}$ 集中荷载作用下的独立剪扭构件: $\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{VW_t}{Tbh_0}}$	$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V_d W_t}{T_d b h_0}}$

(续)

类型	《规范》GB 50010	《规范》JTG D62
剪扭构件	受剪承载力: $V \leq 0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ $V \leq (1.5 - \beta_t) \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 受扭承载力: $T \leq 0.35 \beta_t f_t W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s}$	抗剪承载力: $\gamma_0 V_d \leq \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{10 - 2\beta_t}{20} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}}$ 抗扭承载力: $\gamma_0 T_d \leq 0.35 \beta_t f_{td} W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{sv} \frac{A_{svl} A_{cor}}{s_v}$
截面限制条件	$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq (0.2 \sim 0.25) \beta_c f_c$	$\frac{\gamma_0 V_d}{bh_0} + \frac{\gamma_0 T_d}{W_t} \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}}$
构造配箍条件	$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7 f_t$	$\frac{\gamma_0 V_d}{bh_0} + \frac{\gamma_0 T_d}{W_t} \leq 0.50 \times 10^{-3} \alpha_2 f_{td}$
最小配筋率	$\rho_{sv, \min} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}}$ $\rho_{st, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y}$	$\rho_{sv, \min} = \left[ (2\beta_t - 1) \left( 0.055 \frac{f_{cd}}{f_{sv}} - c \right) + c \right]$ $\rho_{st, \min} = 0.08 (2\beta_t - 1) \frac{f_{cd}}{f_{sd}}$

注: 上表仅列出矩形截面情况。

## 思 考 题

- 8.1 什么是平衡扭转? 什么是协调扭转? 并各举一个工程实例。
- 8.2 受扭钢筋由哪两种钢筋组成?
- 8.3 钢筋混凝土纯扭构件有哪几种破坏形态? 各自发生的条件和破坏特征是什么?
- 8.4 试述 I 形截面的截面受扭塑性抵抗矩的计算方法。
- 8.5 什么是变角空间桁架模型?
- 8.6 纵向钢筋与箍筋的配筋强度比  $\zeta$  的意义是什么? 为什么要对  $\zeta$  的取值进行限制? 为什么设计计算时, 常取  $\zeta = 1.2$ ?
- 8.7 钢筋混凝土弯剪扭构件的破坏形态有哪三种?
- 8.8 什么是剪扭相关性? 《规范》GB 50010 又是如何处理剪扭相关性的?
- 8.9 试述《规范》GB 50010 中弯剪扭构件的承载力计算方法。
- 8.10 试述轴向压力对受扭承载力的影响。
- 8.11 受扭构件的截面限制条件是什么? 截面限制条件的作用是什么? 若截面限制条件不满足, 又该如何解决?
- 8.12 受扭构件的钢筋应满足哪些构造要求? 为什么需要满足这些构造要求?

## 习 题

- 8.1 已知某钢筋混凝土矩形截面纯扭构件, 处于一类环境, 安全等级二级, 截面尺

寸  $b \times h = 200\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，承受的扭矩设计值  $T = 10\text{kN} \cdot \text{m}$ 。混凝土强度等级为 C30，纵筋采用 HRB335 级钢筋，箍筋采用 HPB235 级钢筋。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.2 已知某均布荷载作用下的钢筋混凝土矩形截面剪扭构件，处于一类环境，安全等级二级，截面尺寸  $b \times h = 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，承受扭矩设计值为  $T = 5\text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力设计值为  $V = 60\text{kN}$ 。选用 C25 混凝土，箍筋采用 HPB235 级钢筋，纵向钢筋采用 HRB335 级钢筋。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.3 已知某钢筋混凝土矩形截面弯扭构件，处于一类环境，安全等级为二级，截面尺寸  $b \times h = 250\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，承受扭矩设计值为  $T = 5\text{kN} \cdot \text{m}$ ，弯矩设计值为  $M = 55\text{kN} \cdot \text{m}$ ，混凝土强度等级为 C25，纵筋采用 HRB335，箍筋采用 HPB235。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.4 已知某均布荷载作用下的钢筋混凝土矩形截面弯剪扭构件，处于一类环境，安全等级为二级，截面尺寸  $b \times h = 250\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，承受弯矩设计值为  $M = 105\text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力设计值为  $V = 90\text{kN}$ ，扭矩设计值为  $T = 10\text{kN} \cdot \text{m}$ ，混凝土强度等级为 C25，纵向钢筋采用 HRB335 级钢筋，箍筋采用 HPB235 级钢筋。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.5 已知某均布荷载作用下的钢筋混凝土 T 形截面剪扭构件，处于一类环境，安全等级二级，截面尺寸为  $b = 250\text{mm}$ ， $h = 600\text{mm}$ ， $h'_f = 100\text{mm}$ ， $b'_f = 500\text{mm}$ ，如图 8.26 所示。承受扭矩设计值为  $T = 20\text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力设计值为  $V = 150\text{kN}$ 。选用 C30 混凝土，纵向钢筋采用 HRB400 级钢筋，箍筋采用 HPB235 级钢筋。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.6 已知某均布荷载作用下的钢筋混凝土 T 形截面弯剪扭构件，处于一类环境，安全等级为二级，截面尺寸为  $b = 250\text{mm}$ ， $h = 700\text{mm}$ ， $h'_f = 100\text{mm}$ ， $b'_f = 400\text{mm}$ ，承受扭矩设计值为  $T = 20\text{kN} \cdot \text{m}$ ，弯矩设计值为  $M = 270\text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力设计值为  $V = 180\text{kN}$ 。混凝土强度等级为 C25，纵向钢筋采用 HRB335 级钢筋，箍筋采用 HPB235 级钢筋。试计算构件截面的配筋，并绘制截面配筋图。

8.7 某承受均布荷载的钢筋混凝土 T 形截面弯剪扭构件，处于一类环境，安全等级二级，截面尺寸及配筋如图 8.27 所示，承受的扭矩设计值为  $T = 10\text{kN} \cdot \text{m}$ ，跨中弯矩设计值为  $M = 75\text{kN} \cdot \text{m}$ ，最大剪力设计值为  $V = 90\text{kN}$ ，混凝土采用 C25，纵筋采用 HRB335 级，箍筋级别为 HPB235，试验算该构件的安全性。

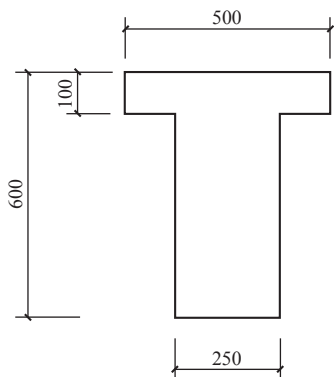


图 8.26 习题 8.5 图

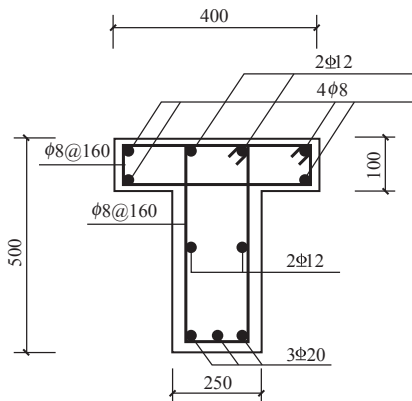


图 8.27 习题 8.7 图