

## 第 8 章 受扭构件扭曲截面的受扭承载力

凡在构件截面中有扭矩作用的构件，习惯上都叫做受扭构件。在实际工程中，单独受扭作用的纯扭构件很少见，一般都是扭转和弯曲同时发生的复合受扭构件，图 8-11 是几种常见的受扭构件，一般来说，吊车梁、雨篷梁、平面曲梁或折梁以及与其它梁整浇的现浇框架边梁、螺旋楼梯等都是复合受扭构件。

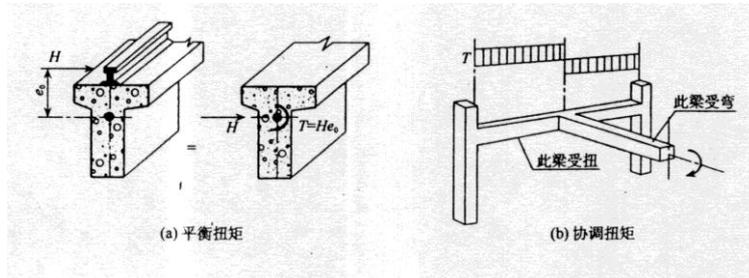


图 8—1 受扭构件示例

受扭构件按照产生扭矩的不同，分为两类。如图 8-19 (a) 所示，构件承受的扭矩是由静力平衡条件确定的叫做平衡扭转。图 8-1 (b) 中，边框架主梁的扭矩是由次梁在其支承点处的转动所引起，扭矩的大小由边框架主梁扭转角的变形协调条件所决定，这种扭转叫做协调扭转。边框架主梁或次梁开裂，会使主梁的抗扭刚度和次梁的抗弯刚度发生相对变化，主梁的扭矩随着发生变化。

### 8.1 纯扭构件的试验研究

#### 8.1.1 裂缝出现前的性能

钢筋混凝土构件在扭矩作用时，由材料力学公式可知：构件的正截面上仅有剪应力作用，截面形心处剪应力值等于零，截面边缘处剪应力值较大，其中长边中点处剪应力值最大。在裂缝出现以前，构件的受力性能大体符合圣维南弹性扭转理论。在扭矩较小时，其扭矩—扭转角曲线为直线，扭转刚度与弹性理论的计算值十分接近，纵筋和箍筋的应力都很小，随着扭矩的增大，混凝土的塑性能逐渐显现，扭矩—扭转角 ( $T-\theta$ ) 曲

线偏离弹性理论直线，当扭矩接近开裂扭矩时，偏离程度加大。如图 8-2 所示。

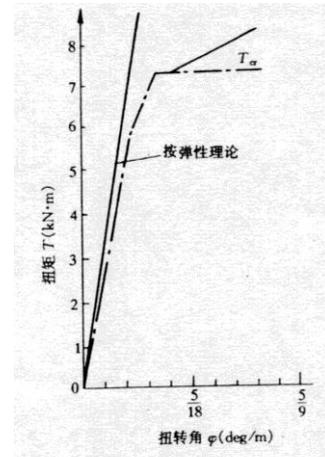


图 8-2 钢筋混凝土矩形截面纯扭构件  $T-\theta$  曲线

### 8.1.2 裂缝出现后的性能

试验表明：当构件截面的主拉应力大于混凝土的抗拉强度时，出现与构件轴线呈  $45^\circ$  方向的斜裂缝。初始裂缝一般发生在剪应力最大处，即截面长边中点。此后，这条初始裂缝逐渐向两端延伸至短边截面形成螺旋状裂缝并相继出现许多新的螺旋状裂缝。

裂缝出现时，部分混凝土退出工作，受扭钢筋应力明显增加，扭转角显著增大。原有的截面受力平衡状态被打破，带有裂缝的混凝土和受扭钢筋组成新的受力体系，构成新的平衡状态。此时，构件截面的抗扭刚度显著降低，受扭钢筋用量愈少，抗扭刚度降低愈多。如图 8-4 所示。随着扭矩不断加大，混凝土和钢筋的应力不断增长，直至构件破坏。

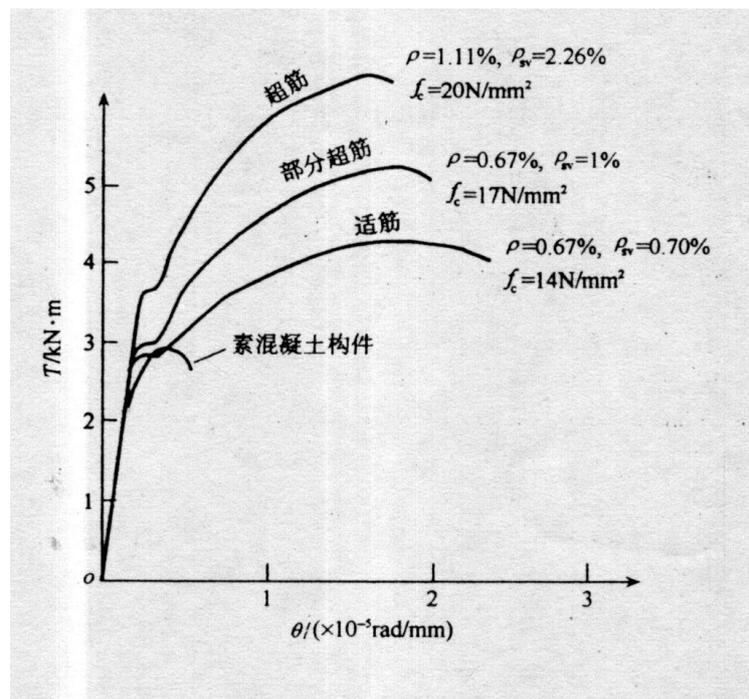


图 8-4 矩形截面纯扭构件实测  $T-\theta$  曲线

试验还表明，受扭构件的破坏形态与受扭纵筋和受扭箍筋的配筋率大小有关，可以分为少筋破坏、适筋破坏、部分超筋破坏和超筋破坏四类。

#### 1. 少筋破坏

当构件的抗扭纵筋和抗扭箍筋配置数量均过少时，一旦裂缝出现，纵筋和箍筋即刻达到屈服强度而且可能进入强化阶段、甚至拉断，构件立即发生破坏，其破坏特征类似于受弯构件的少筋梁破坏，属于脆性破坏，在设计中应予以避免。

#### 2. 适筋破坏

当构件的抗扭纵筋和抗扭箍筋配置数量适当时，裂缝出现后，纵筋和箍筋的应力随着扭矩增大而不断增加，先后达到屈服强度，而后混凝土被压碎，构件破坏，其破坏特征类似于受弯构件的适筋梁破坏，属于延性破坏，这种破坏形态作为设计的依据。

#### 3. 部分超筋破坏

当构件的抗扭纵筋和抗扭箍筋配置数量比率相差较大时，构件发生破坏会出现抗扭纵筋或抗扭箍筋的其中一种钢筋屈服，哪种钢筋配筋率小，哪种钢筋屈服。破坏时具有一定的延性，但较适筋破坏时小。

#### 4. 超筋破坏

当构件的抗扭纵筋和抗扭箍筋配置数量均过多时，裂缝出现后，纵筋和箍筋的应力也随着

扭矩增大而不断增加，由于数量较多，应力增长的速度较慢，到混凝土压碎时，纵筋和箍筋都不会达到屈服。这种破坏类似于受弯构件的超筋梁，属于脆性破坏，在设计中应予以避免。

## 8.2 矩形截面纯扭构件的扭曲截面受扭承载力计算

矩形截面是受扭构件最常用的截面形式。纯扭构件扭曲截面计算包括两个方面的内容：一为构件受扭的开裂扭矩计算；二为构件受扭的承载力计算。如果构件承受的扭矩大于开裂扭矩，应按计算配置受扭纵筋和箍筋来满足承载力要求，同时还应满足受扭构造要求。否则，应按构造要求配置受扭纵筋和箍筋。

### 8.2.1 开裂扭矩的计算

钢筋混凝土纯扭构件在裂缝出现以前，钢筋应力很小，对构件开裂扭矩影响不大，可以忽略钢筋的影响。

若混凝土为理想的弹性材料，在扭矩作用下，截面内将产生剪应力 $\tau$ ，由材料力学可知，弹性材料矩形截面内剪应力的分布如图8-5(a)所示。

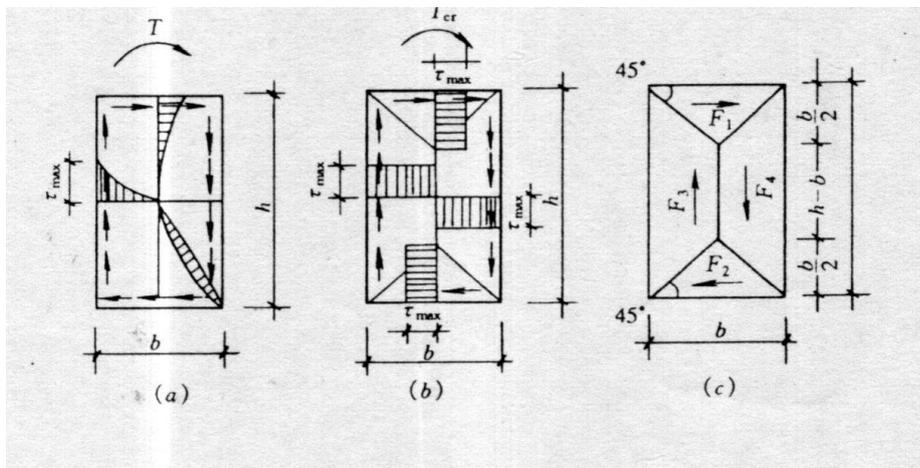


图8—5 矩形截面扭转剪应力分布

截面上 $\tau_{max}$ 出现在截面长边的中点处，与该点剪应力作用相对应的主拉应力 $\sigma_{pt}$ 和主压应力 $\sigma_{pt}$ 分别与构件轴线成 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ ，其值大小为 $\tau_{max}$ 。当主拉应力达到混凝土抗拉强度 $f_t$ 时，构件即将开裂，此时构件截面的扭矩为开裂扭矩 $T_{cr}$ 。

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

式中 $\alpha$ 为与比值 $h/b$ 有关的系数，当 $h/b = 1 \sim 10$ 时， $\alpha = 0.208 \sim 0.313$ 。

若混凝土为理想的弹塑性材料，则构件受扭承载力达到极限时，截面上各点的剪应力全部达到混凝土抗拉强度 $f_t$ ，如图8-5(b)所示。若把剪力分布近似划成图8.5(c)中的四个部分，并分块计算各个部分剪应力的合力和相应的力偶，可得截面的开裂扭矩为

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

式中： $W_t$ ——截面受扭塑性抵抗矩。对于矩形截面， $W_t = \frac{b^2}{6}(3h-b)$ ， $b$ 和 $h$ 分别为

矩形截面的短边边长和长边边长。

实际上，混凝土是介于弹性材料和塑性材料之间的非理想弹塑性材料，因此，截面的开裂扭矩也介于公式(8—1)、(8—2)的计算值之间。为实用计算方便，对于钢筋混凝土纯扭构件的开裂扭矩，近似采用理想弹塑性材料的应力分布图形进行计算，但混凝土抗拉强度要适当降低。试验表明，对于低强度等级混凝土，降低系数为0.8；对于高强度等级混凝土，降低系数为0.7。

《混凝土结构设计规范》取混凝土抗拉强度降低系数为0.7。因此，开裂扭矩的计算公式为：

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

### 8.2.2 扭曲截面受扭承载力计算

实验研究表明，矩形截面纯扭构件在裂缝充分发展且钢筋应力接近屈服强度时，截面核心混凝土部分退出工作，所以，实心截面的钢筋混凝土受扭构件可以比拟为一箱形截面构件。此时，具有螺旋形箱壁与抗扭纵筋和箍筋共同组成空间桁架来抵抗扭矩。可以应用变角度空间桁架模型进行受扭承载力计算。

变角度空间桁架模型的基本假定有：

(1) 混凝土只承受压力，具有螺旋形裂缝的混凝土箱壁构成空间桁架的斜压杆，其倾角为 $\alpha$ ；

(2) 纵筋和箍筋只承受拉力，构成空间桁架的弦杆和腹杆；

(3) 忽略核心混凝土的抗扭作用及钢筋的销栓作用。

根据弹性薄壁管理论，按照此模型，由平衡条件可以导出矩形截面纯扭构件的受扭承载力 $T_u$ 。

$$T_u = 2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv}A_{stl}}{s} A_{cor} \quad (8-4)$$

$$\zeta = \frac{f_y A_{stl} / u_{cor}}{f_{yv} A_{stl} / s} = \frac{f_y A_{stl} s}{f_{yv} A_{stl} u_{cor}} \quad (8-5)$$

式中： $\zeta$ ——沿截面核心周长单位长度内的抗扭纵筋强度与沿构件长度方向单位长度内的单侧抗扭箍筋强度之间的比值，受扭构件表面斜裂缝的倾角 $\alpha$ 随 $\zeta$ 值的变化而改变，故上述空间桁架模型称为变角度空间桁架模型。当 $\zeta = 1$ 时，为古典空间桁架模型；

$A_{stl}$ ——受扭计算中取对称布置的全部纵向钢筋截面面积；

$A_{st1}$ ——受扭计算中沿截面周边配置的箍筋单肢截面面积；

$f_y$ 、 $f_{yv}$ ——受扭纵筋和受扭箍筋的抗拉强度设计值；

$s$ ——受扭箍筋的间距；

$u_{cor}$ ——截面核心部分的周长， $u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ ；

$A_{cor}$ ——截面核心部分的面积， $A_{cor} = b_{cor} \cdot h_{cor}$ 。

截面核心部分指截面中抗扭纵筋外表面连线范围内部分。 $b_{cor}$ 为截面短边尺寸减去2倍保护层厚度， $h_{cor}$ 为截面长边尺寸减去2倍保护层厚度。

### 8.2.3 配筋计算方法、步骤

公式(8—4)是按理想化的空间桁架模型导出的计算公式，由于构件的实际受力机理比较复杂，因此，该公式的计算结果与试验结果存在一定差异。根据试验资料统计分析，《混凝土结构设计规范》规定，对于弯矩、剪力和扭矩共同作用下的受扭构件的扭曲截面承载力，在构件截面形式不同时，采用不同的计算方法。

#### 1. $h_w/b \leq 6$ 的矩形截面纯扭构件

钢筋混凝土纯扭构件的受扭承载力 $T_u$ 由混凝土的抗扭作用 $T_c$ 和箍筋与纵筋的抗扭作用 $T_s$ 共同组成，即： $T_u = T_c + T_s$

其中 $T_c$ 可以写成 
$$T_c = \alpha_1 f_t W_t \quad (8-6)$$

$T_s$ 可以用变角度空间桁架模型的计算公式(8.4)表示

$$T_s = \alpha_2 \sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{s} A_{cor} \quad (8-7)$$

于是 
$$T_u = \alpha_1 f_t W_t + \alpha_2 \sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{s} A_{cor} \quad (8-8)$$

上式可以写成 
$$\frac{T_u}{f_t W_t} = \alpha_1 + \alpha \sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{f_t W_t s} A_{cor} \quad (8-9)$$

对配置不同数量抗扭钢筋的钢筋混凝土纯扭构件进行受扭承载力试验，将试验结果标注在以 $\frac{T_u}{f_t W_t}$ 为纵坐标、以 $\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{f_t W_t s} A_{cor}$ 为横坐标的平面上。

根据对试验结果的回归统计，考虑可靠指标 $\beta$ 值的要求，得到系数 $\alpha_1 = 0.35$ ， $\alpha_2 = 1.2$ 。这样即可得到钢筋混凝土矩形截面纯扭构件扭曲截面承载力的计算公式

$$T_u = 0.35f_tW_t + 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv}A_{st1}}{s} A_{cor} \quad (8-10)$$

计算公式(8—10)右侧第一项表示开裂混凝土的抗扭能力,取开裂扭矩的50%。因为钢筋混凝土纯扭构件开裂以后,抗扭钢筋对斜裂缝的开展有一定的限制作用,从而使开裂面混凝土骨料之间存在咬合作用;同时,扭转斜裂缝并未贯通全部截面。因此,混凝土仍具有一定的抗扭能力。

计算公式(8—10)右侧第二项中用 $\zeta$ 考虑了抗扭纵筋与抗扭钢筋之间不同配筋比对受扭承载力的影响。试验表明:当 $0.5 \leq \zeta \leq 2.0$ 时,构件破坏时,纵筋和箍筋都能达到屈服强度;当 $\zeta=1.2$ 左右时,纵筋和箍筋基本上能够同时达到屈服强度。为了稳妥起见,《混凝土结构设计规范》规定: $0.6 \leq \zeta \leq 1.7$ 。当 $\zeta > 1.7$ 时,取 $\zeta=1.7$ 。结构构件设计中一般取 $\zeta=1.2$ 。

## 2. T形截面和I形截面纯扭构件

对于T形和I字形截面纯扭构件,可将其截面划分为几个矩形截面,见图8-9,分别计算各个矩形截面的受扭塑性抵抗矩,然后将总扭矩按各个矩形截面受扭塑性抵抗矩的比例分配到各个矩形截面上,最后按计算公式(8—10)分别进行受扭承载力计算。各个矩形截面的扭矩设计值可按下列规定计算:

$$\text{腹板} \quad T_w = \frac{W_{tw}}{W_t} T \quad (8-11 a)$$

$$\text{受压翼缘} \quad T'_f = \frac{W'_{tf}}{W_t} T \quad (8-11 b)$$

$$\text{受拉翼缘} \quad T_f = \frac{W_{tf}}{W_t} T \quad (8-11 c)$$

式中  $T$ ——构件截面所承受的扭矩设计值;

$T_w$ ——腹板所承受的扭矩设计值;

$T'_f$ 、 $T_f$ ——受压翼缘、受拉翼缘所承受的扭矩设计值;

$W_{tw}$ ——腹板的受扭塑性抵抗矩;  $W_{tw} = \frac{b^2}{6}(3h-b)$

$W'_{tf}$ ——受压翼缘的受扭塑性抵抗矩;  $W'_{tf} = \frac{h_f'^2}{2}(b'_f - b)$

$W_{tf}$ ——受拉翼缘的受扭塑性抵抗矩； $W_{tf} = \frac{h_f^2}{2}(b_f - b)$

$W_t$ ——截面总的受扭塑性抵抗矩； $W_t = W_{tw} + W_{tf}' + W_{tf}$

### 3. 箱形截面纯扭构件

试验及理论研究表明，箱形截面钢筋混凝土纯扭构件的扭曲截面承载力在箱壁具有一定厚度时（ $t_w \geq 0.4b_h$ ），与实心截面基本相同；当壁厚较薄时，小于实心截面。因此，对于箱形截面纯扭构件，其受扭承载力的计算公式与矩形截面计算公式相似，仅在混凝土抗扭项中考虑了与截面相对壁厚有关的折减系数 $\alpha_h$ ，即

$$T_u = 0.35\alpha_h f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{S} A_{cor} \quad (8-12)$$

式中： $W_t$ ——箱形截面受扭塑性抵抗矩；

$$W_t = \frac{b_h^2}{6}(3h_h - b_h) - \frac{(b_h - 2t_w)^2}{6}[3h_w - (b_h - 2t_w)] \quad (8-13)$$

$\alpha_h$ ——箱形截面壁厚影响系数， $\alpha_h = 2.5t_w/b_h$ ，当 $\alpha_h > 1$ 时，取 $\alpha_h = 1$ ；

$b_h$ 、 $h_h$ ——箱形截面的宽度和高度；

$h_w$ ——箱形截面的腹板净高；

$t_w$ ——箱形截面壁厚，其值不应小于 $b_h/7$ 。

按照计算公式（8—12）进行箱形截面纯扭构件扭曲截面承载力计算时， $\zeta$ 值的计算和要求同矩形截面纯扭构件。

## 8.3 弯剪扭构件的承载力计算

### 8.3.1 试验研究与计算模型

处于弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土构件，其受力状态是非常复杂的，构件的荷载条件及构件的内在因素影响构件的破坏特征及其承载力。对于荷载条件，通常以扭弯比 $\psi(= \frac{T}{M})$ 和扭剪比 $\chi(= \frac{T}{Vb})$ 表示。构件的内在因素是指构件的截面尺寸、配筋情况及材料强度。

试验表明：构件在适当内在因素条件下，不同荷载条件会导致构件出现弯型破坏、扭型破坏或剪扭型破坏。

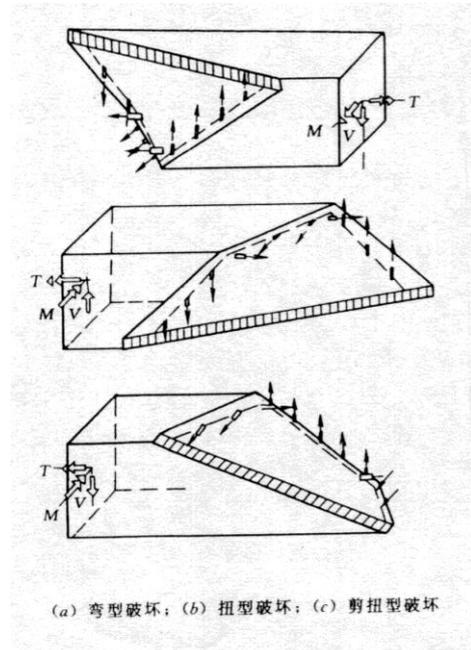
若构件的扭弯比 $\psi$ 较小时，裂缝首先在弯曲受拉底面出现，然后发展到两侧面。三个面上的螺旋形裂缝形成一个扭曲破坏面，而第四面即弯曲受压顶面无裂缝。构件破坏时与螺旋形裂缝相交的纵筋及箍筋均受拉并达到屈服强度，构件顶部受压，形成如图8-10（a）所示的弯型破坏。

若构件的扭矩作用显著即扭转比 $\psi$ 及扭剪比 $\chi$ 均较大,而构件顶部纵筋少于底部纵筋时,可能形成如图8-10(b)所示的受压区在构件底部的扭型破坏。这种现象出现的原因是,虽然由于弯矩作用使顶部钢筋受压,但由于弯矩较小,从而压应力较小。又由于顶部纵筋少于底部纵筋,故扭矩产生的拉应力就有可能抵消弯矩产生的压应力并使顶部纵筋先期达到屈服强度,最后促使构件底部受压而破坏。

若剪力和扭矩起控制作用,则裂缝首先在构件侧面出现(在这个侧面上,剪力和扭矩产生的主应力方向一致),然后向顶面和底面扩展,这三个面上的螺旋形裂缝构成扭曲破坏面,破坏时与螺旋形裂缝相交的纵筋和箍筋受拉并达到屈服强度,而受压区则靠近另一侧面(在这个侧面上,剪力和扭矩产生的主应力方向相反),形成如图8-10(c)所示的剪扭型破坏。

试验还表明,对于弯剪扭构件,构件的受扭承载力与其受弯、受剪承载力是相互影响的,即构件的受扭承载力随着同时作用的弯矩、剪力的大小而变化;同样构件的受弯、受剪承载力也随着同时作用的扭矩大小而发生变化。我们把构件各种承载力相互影响的性质称为各承载力之间的相关性。

弯剪扭共同作用下钢筋混凝土构件扭曲截面承载力计算,主要有变角度空间桁架模型和斜弯理论(扭曲破坏面极限平衡理论)两种计算方法。



(a) 弯型破坏; (b) 扭型破坏; (c) 剪扭型破坏

图8—10 弯剪扭构件的破坏类型

### 8.3.2 配筋计算方法、步骤

由于构件弯、剪、扭承载力之间的相互影响非常复杂,要完全考虑它们之间的相关性,并采用统一的相关方程进行计算将难以实现。因此,我国的《混凝土结构设计规范》对复合受扭构件的承载力计算采用了部分相关、部分叠加的计算方法。即:在构件剪扭承载力计算时,仅考虑混凝土部分承载力之间的相关性,箍筋部分承载力直接叠加;在构件弯扭承载力计算时,不再考虑二者之间的相关性,分别按受弯、受扭单独计算抗弯纵筋和抗扭纵筋,配置在需要位置,对截面同一位置处的两种纵筋,可将二者面积叠加后选择钢筋。

#### 一. 剪扭构件的承载力

试验结果表明,当剪力与扭矩共同作用时,剪力的存在会使混凝土的抗扭承载力降低,而扭矩的存在也将使混凝土的抗剪承载力降低,二者之间的相关关系大致符合1/4圆的规律,如图8-11所示,其表达式为

$$\left(\frac{V_c}{V_{co}}\right)^2 + \left(\frac{T_c}{T_{co}}\right)^2 = 1 \quad (8-14)$$

式中:  $V_c$ 、 $T_c$ ——剪扭共同作用下的受剪及受扭承载力;

$V_{co}$ ——纯剪构件混凝土的受剪承载力,  $V_{co} = 0.7 f_t b h_0$ ;

$T_{co}$ ——纯扭构件混凝土的受扭承载力,  $T_{co} = 0.35 f_t W_t$ 。

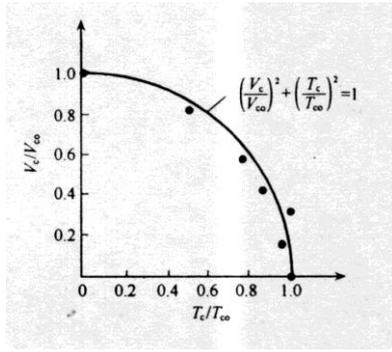


图 8—11 混凝土剪扭承载力相关关系

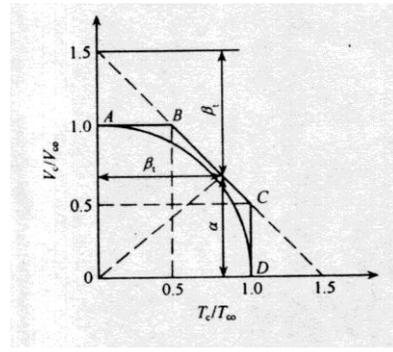


图 8—12 混凝土剪扭承载力相关的计算模式

将 1/4 圆简化为如图 8-12 所示的三段折线，则有

$$\frac{V_c}{V_{co}} \leq 0.5 \text{ 时, } \frac{T_c}{T_{co}} = 1.0 \quad (8-15)$$

$$\frac{T_c}{T_{co}} \leq 0.5 \text{ 时, } \frac{V_c}{V_{co}} = 1.0 \quad (8-16)$$

$$\frac{V_c}{V_{co}}, \frac{T_c}{T_{co}} > 0.5 \text{ 时, } \frac{V_c}{V_{co}} + \frac{T_c}{T_{co}} = 1.5 \quad (8-17)$$

$$\text{令 } \frac{T_c}{T_{co}} = \beta_t \quad \text{则有 } \frac{V_c}{V_{co}} = 1.5 - \beta_t \quad (8-18)$$

$$\text{因为 } \frac{V_c/V_{co}}{T_c/T_{co}} = \frac{V_c}{T_c} \cdot \frac{0.35 f_t W_t}{0.7 f_t b h_0} = 0.5 \frac{V_c}{T_c} \cdot \frac{W_t}{b h_0} = 0.5 \frac{V}{T} \cdot \frac{W_t}{b h_0} \quad (8-19)$$

$$\text{即 } \frac{V_c}{V_{co}} = 0.5 \beta_t \frac{V}{T} \cdot \frac{W_t}{b h_0} \quad \text{代入式 (8-18) 得}$$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V}{T} \cdot \frac{W_t}{b h_0}} \quad (8-20)$$

式中  $\beta_t$  称为剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数；相应的把  $(1.5 - \beta_t)$  称为剪扭构件混凝土受剪承载力降低系数。

1. 矩形截面剪扭构件的截面受剪、受扭承载力

对于一般构件：

(1) 受剪承载力

$$V_u = 0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-21)$$

(2) 受扭承载力

$$T_u = 0.35 \beta_t f_t W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{st1} A_{cor}}{s} \quad (8-22)$$

对于集中荷载作用下（多种荷载作用、其中集中荷载对支座截面或节点边缘产生的剪力值占总剪力值的 75% 以上）的独立剪扭构件，受扭承载力仍按式（8—21）计算，受剪承载力改用下式计算

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} (1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-23)$$

此时，受扭承载力降低系数  $\beta_t$  按式（8—23）计算

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{V}{T} \cdot \frac{W_t}{b h_0}} \quad (8-24)$$

式中  $\lambda$  为计算截面的剪跨比。

2. 箱形截面剪扭构件的截面受剪、受扭承载力

箱形截面剪扭构件的受扭性能与矩形截面受扭构件相似，但应考虑相对壁厚的影响。

对于一般构件：

(1) 受剪承载力

$$V_u = 0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8-25)$$

(2) 受扭承载力

$$T_u = 0.35 \alpha_h \beta_t f_t W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{st1} A_{cor}}{s} \quad (8-26)$$

式中： $\alpha_h$ ——箱形截面壁厚影响系数，按纯扭构件计算规定取用；

$\beta_t$ ——受扭承载力降低系数，按式（8—20）计算时以  $\alpha_h W_t$  代替  $W_t$ ；截面宽度  $b$  取箱形截面两个侧壁总厚度。

对于集中荷载作用下（多种荷载作用、其中集中荷载对支座截面或节点边缘产生的剪力值占总剪力值的 75% 以上）的独立剪扭构件，受扭承载力仍按式（8—26）计算，受剪承载力仍按式（8—23）计算。

3. T 形和 I 形截面剪扭构件的受剪、受扭承载力

(1) 受剪承载力

T 形和 I 形截面剪扭构件的受剪承载力可以按矩形截面的计算公式进行计算，但在计算中应以  $T_w$ 、 $W_{tw}$  分别代替  $T$ 、 $W_t$ 。

(2) 受扭承载力

T 形和 I 形截面剪扭构件的受扭承载力可以按纯扭构件的计算方法，将截面划分成几个矩

形截面进行计算。其中腹板按矩形截面计算公式进行计算，但在计算中应以 $T_w$ 、 $W_{tw}$ 分别代替 $T$ 、 $W_t$ ；受压翼缘和受拉翼缘按矩形截面纯扭构件的规定进行计算，但在计算中应以 $T_f'$ 、 $T_f$ 和 $W_{tf}'$ 、 $W_{tf}$ 分别代替 $T$ 、 $W_t$ 。

## 二. 弯剪扭构件配筋计算

矩形、T形、I形和箱形截面钢筋混凝土弯剪扭构件配筋计算的一般原则是：纵向钢筋应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分别所需的钢筋截面面积和相应的位置进行配置；箍筋应按剪扭构件的受剪承载力和受扭承载力分别按所需的箍筋截面面积和相应位置进行配置。

《混凝土结构设计规范》规定：在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的矩形、T形、I形和箱形截面的弯剪扭构件，可按下列规定进行承载力计算：

(1) 当 $V \leq 0.35f_tbh_0$ 或 $V \leq 0.875f_tbh_0/(\lambda+1)$ 时，可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 $T \leq 0.175f_tW_t$ 或 $T \leq 0.175\alpha_h f_tW_t$ 时，可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。

当已知弯剪扭构件的内力设计值，初步选定截面尺寸和材料强度等级后，按下列步骤进行配筋计算：

### 1. 验算截面尺寸限制条件

为了保证弯剪扭构件在破坏时混凝土不首先被压碎，对 $h_w/b \leq 6$ 的矩形、T形、I形和 $h_w/t_w \leq 6$ 的箱形截面构件，其截面尺寸应符合下列要求：

$$\text{当 } h_w/b \text{ (或 } h_w/t_w \text{) } \leq 4 \text{ 时} \quad \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.25\beta_c f_c \quad (8-27)$$

$$\text{当 } h_w/b \text{ (或 } h_w/t_w \text{) } \geq 6 \text{ 时} \quad \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.2\beta_c f_c \quad (8-28)$$

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

上述规定中，

$V$ 、 $T$ ——剪力、扭矩设计值；

$b$ ——矩形截面宽度；T形、I形截面腹板宽度；箱形截面侧壁总厚度 $2t_w$ ；

$h_0$ ——截面有效高度；

$h_w$ ——截面腹板高度，矩形截面取有效高度；T形截面有效高度减去翼缘高度；I形和箱形截面取腹板净高度；

$t_w$ ——箱形截面壁厚，其值不应小于箱形截面宽度的1/7。

若不满足上述条件，一般应加大截面尺寸或提高混凝土强度等级。

#### 2. 验算是否应按计算配置剪扭钢筋

在弯矩、剪力和扭矩共同作用下，当矩形、T形、I形和箱形截面构件的截面尺寸符合下列要求时，可不进行截面剪扭承载力计算。但为了防止构件开裂后产生脆性破坏，必须按构造要求配置钢筋。

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t \quad (8-29)$$

或

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.07 \frac{N}{bh_0} \quad (8-30)$$

当  $N > 0.3f_c A$  时，取  $N = 0.3f_c A$ 。

3. 判别配筋计算是否可忽略剪力  $V$  或者扭矩  $T$ 。

#### 4. 计算箍筋数量

当不可忽略剪力  $V$  或者扭矩  $T$  时，分别计算受剪和受扭所需的单肢箍筋数量，将二者叠加得到单肢箍筋总用量，据此确定箍筋的直径和间距。箍筋的直径和间距必须符合构造要求。

#### 5. 计算纵筋数量

抗弯纵筋和抗扭纵筋应分别计算，分别配置在相应位置，将相同位置的两种钢筋数量叠加得到该位置纵筋总用量，然后确定钢筋的直径和根数。所配的纵筋应满足构造要求。

### 8.4 受扭构件的配筋构造要求

#### 8.4.1 箍筋的构造要求

为防止构件发生少筋性质的脆性破坏，在受扭构件中，箍筋的配筋率应满足下列要求：

$$\rho_{sv} = \frac{nA_{sv1}}{bs} \geq \rho_{sv,\min} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} \quad (8-31)$$

在受扭构件中，箍筋在整个周长中均受拉力。因此，抗扭箍筋必须采用封闭式。当采用绑扎骨架时，应将箍筋末端做成  $135^\circ$  弯钩，弯钩的端头平直段长度不应小于  $10d$  ( $d$  为箍筋直径)。

受扭箍筋的间距不应超过受弯构件抗剪要求的箍筋最大间距，考虑协调扭转而配置的箍筋，其间距且不宜大于  $0.75b$  ( $b$  为矩形截面的宽度；T形或I形截面腹板宽度；箱形截面的宽度)。

#### 8.4.2 纵筋的构造要求

在受扭构件中，纵筋的配筋率应满足下列要求：

$$\rho_{tl} = \frac{A_{stl}}{bh} \geq \rho_{stl,\min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} \quad (8-32)$$

受扭纵筋在构件截面四角必须设置，并沿截面周边均匀对称布置，受扭纵向受力钢筋的间距不应大于  $200\text{mm}$  和截面宽度  $b$ 。当支座边缘作用有较大扭矩时，受扭纵筋在支座内的锚固长度要满足充分受拉要求。

[例 8.1] 某雨篷如图 8-13 所示，雨篷板上承受均布荷载设计值  $q = 4.8\text{kN/m}$ ，板端沿板宽方向每米承受可变荷载设计值  $p = 1.0\text{kN}$ ，雨篷梁截面尺寸  $b = 360\text{mm}$ ， $h = 240\text{mm}$ ，其

净跨度  $l_n = 1.8m$ 。经计算雨篷梁弯矩设计值  $M = 25kN \cdot m$ ，剪力设计值  $V = 46kN$ 。采用 C25 混凝土，HPB335 钢筋。试确定雨篷梁的配筋。

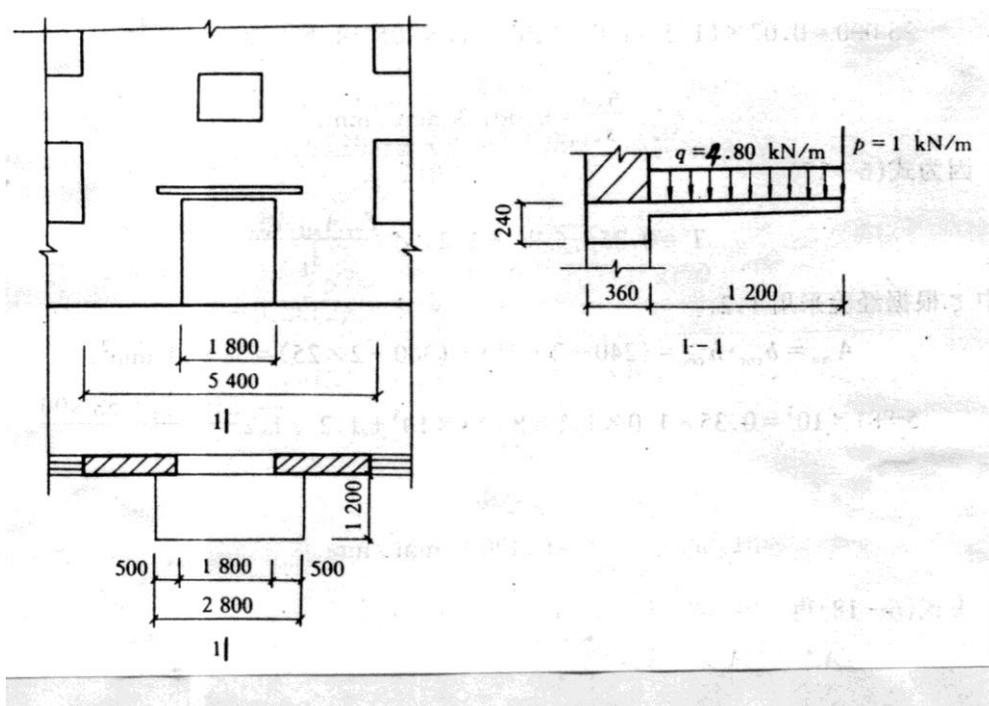


图 8—13 [例 8.1]附图

【解】：查表可得： $f_c = 11.9 N/mm^2$ ， $f_t = 1.27 N/mm^2$ ； $f_y = 300 N/mm^2$ 。

注意到受扭构件  $b$  与  $h$  的规定，可知受扭计算时， $b = 240mm$ ， $h = 360mm$ 。受剪计算时， $b = 360mm$ ， $h = 240mm$ 。

(1) 计算雨篷梁的最大扭矩设计值

由板面荷载  $q$  和板端荷载  $p$  沿雨篷梁单位长度上产生的力偶分别如下：

$$m_q = 4800 \times 1.2 \times \left( \frac{1.20 + 0.36}{2} \right) = 4493 N \cdot m / m;$$

$$m_p = 1000 \times \left( 1.2 + \frac{0.36}{2} \right) = 1380 N \cdot m / m;$$

作用在雨篷梁单位长度上的总力偶为

$$m = m_q + m_p = 4493 + 1380 = 5873 N \cdot m / m;$$

雨篷梁支座截面边缘扭矩最大，其值为

$$T = \frac{1}{2} m l_n = \frac{1}{2} \times 5873 \times 1.8 = 5286 N \cdot m = 5286 \times 10^3 N \cdot mm$$

(2) 验算雨篷梁截面尺寸是否符合要求

雨篷梁截面受扭塑性抵抗矩

$$W_t = \frac{b^2}{6}(3h-b) = \frac{240^2}{6}(3 \times 360 - 240) = 8064 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

由式 (8.27) 得

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} = \frac{46 \times 10^3}{360 \times 205} + \frac{5286 \times 10^3}{0.8 \times 8064 \times 10^3} = 1.44 \text{ N/mm}^2$$

$$< 0.25\beta_c f_c = 0.25 \times 1.0 \times 11.9 = 2.98 \text{ N/mm}^2$$

截面尺寸满足要求。

(3) 验算是否考虑剪力

$$\text{因为 } V = 46 \times 10^3 \text{ N} > 0.35 f_t b h_0 = 0.35 \times 1.27 \times 360 \times 205 = 32.8 \times 10^3 \text{ N}$$

不能忽略剪力的影响。

(4) 验算是否考虑扭矩

$$\text{因为 } T = 5286 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm} > 0.175 f_t W_t = 0.175 \times 1.27 \times 8064 \times 10^3$$

$$= 1792 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

不能忽略扭矩影响。

(5) 验算是否进行剪扭承载力计算

$$\text{因为 } \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} = \frac{46 \times 10^3}{360 \times 205} + \frac{5286 \times 10^3}{8064 \times 10^3} = 1.28 \text{ N/mm}^2$$

$$> 0.7 f_t = 0.7 \times 1.27 = 0.89 \text{ N/mm}^2$$

需进行剪扭承载力计算

(6) 计算箍筋数量

由式 (8—20) 得

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V}{T} \cdot \frac{W_t}{bh_0}} = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{46 \times 10^3 \times 8064 \times 10^3}{5286 \times 10^3 \times 360 \times 205}} = 1.02 > 1.0$$

故取  $\beta_t = 1.0$

由式 (8—21) 计算单肢受剪箍筋数量, 即

$$V = 0.7 f_t b h_0 (1.5 - \beta_t) + 1.25 f_{yv} \frac{n A_{sv1}}{s} h_0$$

$$46 \times 10^3 = 0.7 \times (1.5 - 1.0) \times 1.27 \times 360 \times 205 + 1.25 \times 300 \times \frac{2 \times A_{sv1}}{s} \times 205$$

则 
$$\frac{A_{sv1}}{s} = 0.086 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

由式(8—22)计算单肢受扭箍筋数量, 即

$$T = 0.35\beta_t f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{stl} A_{cor}}{s}, \text{ 其中 } \zeta \text{ 根据经验采用 } 1.2.$$

$$A_{cor} = b_{cor} \cdot h_{cor} = 190 \times 310 = 58900 \text{ mm}^2$$

$$5286 \times 10^3 = 0.35 \times 1.0 \times 1.27 \times 8064 \times 10^3 + 1.2\sqrt{1.2} \frac{300 A_{stl} \times 58900}{s}$$

则 
$$\frac{A_{stl}}{s} = 0.073 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

剪、扭箍筋总用量

$$\frac{A_{svl}^*}{s} = \frac{A_{svl}}{s} + \frac{A_{stl}}{s} = 0.086 + 0.073 = 0.159 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

选用箍筋 $\Phi 6$ ,  $A_{svl}^* = 28.3 \text{ mm}^2$ , 箍筋间距为

$$s = \frac{28.3}{0.159} = 178 \text{ mm}$$

取  $s = 150 \text{ mm}$

(7) 验算箍筋配筋率

$$\rho_{sv} = \frac{nA_{svl}}{bs} = \frac{2 \times 28.3}{360 \times 150} = 0.00105 > \rho_{sv, \min} = 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} = 0.28 \times \frac{1.1}{300} = 0.00103$$

满足要求。

(8) 求受扭纵筋数量

由式(8—5)得 
$$A_{stl} = \frac{\zeta f_{yv} A_{stl} u_{cor}}{f_y s}$$

$$u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor}) = 2 \times (310 + 190) = 1000 \text{ mm}$$

$$A_{stl} = \frac{1.2 \times 300 \times 0.073 \times 1000}{300} = 88 \text{ mm}^2$$

(9) 验算受扭纵筋配筋率

由式(8—32)得 
$$\rho_{t1} = \frac{A_{stl}}{bh} = \frac{88}{360 \times 240} = 0.001 <$$

$$\rho_{t1, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} = 0.6 \sqrt{\frac{5286 \times 10^3}{46 \times 10^3 \times 240}} \times \frac{1.27}{300} = 0.0018$$

不满足要求, 故受扭纵筋面积要增大,  $A_{stl, \min} = 0.0018 \times 360 \times 240 = 156 \text{ mm}^2$ ,

根据受扭纵筋间距要求, 选用  $6\Phi 8$ , 分上下两层配置。

$$A_{srl} = 302\text{mm}^2 > 156\text{mm}^2$$

满足要求。

(10) 求受弯纵向钢筋截面面积

按正截面受弯承载力计算，雨篷梁跨中钢筋截面面积为  $A_s = 433\text{mm}^2$ ，计算从略。

$$\text{故梁下部钢筋面积为 } A_s + \frac{A_{srl}}{2} = 433 + \frac{156}{2} = 511\text{mm}^2$$

下部配筋选用  $2\Phi 16+1\Phi 14$ ， $A_s = 556\text{mm}^2$ ；上部配筋选用  $3\Phi 8$ ， $A_s = 151\text{mm}^2$ 。

## 思考题

- 1 在实际工程中那些构件属于受扭构件？
- 2 平衡扭转与协调扭转是如何区分的？
- 3 钢筋混凝土矩形截面纯扭构件有哪几种破坏形态？各在什么条件下发生？
- 4 什么是配筋强度比？配筋强度比的范围为什么要加以限制？
5. 矩形截面受扭塑性抵抗矩  $W_t$  是如何导出的？对 T 形和 I 形截面如何计算  $W_t$ ？
6. 剪扭共同作用时，构件的剪扭承载力之间具有怎样的相关性？弯扭共同作用时，构件的弯扭承载力之间的相关性如何？《混凝土结构设计规范》是如何考虑这些相关性的？
- 7 简述受扭构件的计算步骤？
- 8 受扭构件中纵筋和箍筋的配置应注意那些问题？

## 习题

8.1 有一钢筋混凝土梁，截面尺寸  $b = 250\text{mm}$ ， $h = 400\text{mm}$ ，经内力计算，支座处截面承受扭矩设计值  $T = 8\text{kN}\cdot\text{m}$ ，弯矩设计值  $M = 48\text{kN}\cdot\text{m}$  及剪力设计值  $V = 50\text{kN}$ 。采用 C20 混凝土和 HRB335 钢筋，试计算截面配筋。

8.2 雨篷剖面见图 8-14，雨篷板上承受均布荷载（已包括板自重）设计值  $q = 3.6\text{kN}/\text{m}^2$ ，在雨篷自由端沿板宽方向每米承受可变荷载设计值  $p = 1.4\text{kN}/\text{m}$ ，雨篷梁截面尺寸  $b = 240\text{mm}$ ， $h = 240\text{mm}$ ，计算跨度  $2.4\text{m}$ 。采用 C25 混凝土和 HPB335 钢筋。经计算已知雨篷梁弯矩设计值  $M = 15\text{kN}\cdot\text{m}$ ，剪力设计值  $V = 18\text{kN}$ 。试确定雨篷梁的配筋数量。

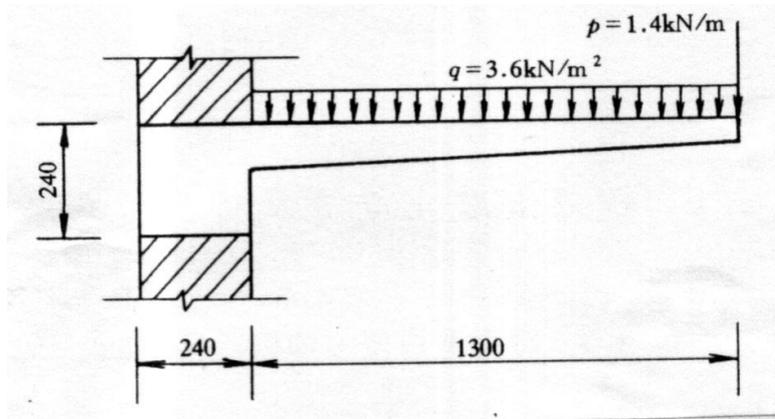


图 8—14 习题 8.2 附图