

# 绪论



## 知识目标

- (1) 了解建筑结构的分类及其应用。
- (2) 了解建筑结构的发展史。
- (3) 了解建筑结构课程的内容及学习要求。
- (4) 了解建筑结构课程的学习方法。

## 0.1 建筑结构的分类及其应用

建筑结构是指建筑物中由若干个基本构件按照一定的组成规则,通过符合规定的连接方式所组成的能够承受并传递各种作用的空间受力体系,又称为骨架。建筑结构按承重结构所用材料的不同可分为混凝土结构、砌体结构、钢结构和木结构等;按承重结构类型的不同可分为框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、筒体结构、排架结构、网架结构、悬索结构和壳体结构等。下面简单介绍混凝土结构、砌体结构和钢结构。

### 1. 混凝土结构

混凝土结构是指由混凝土和钢筋两种基本材料组成的一种能共同作用的结构材料。自从1824年发明了波特兰水泥、1850年出现了钢筋混凝土以来,混凝土结构已被广泛应用于工程建设,如各类建筑工程、构筑物、桥梁、港口码头、水利工程、特种结构等。采用混凝土作为建筑结构材料,主要是因为混凝土的原材料(砂、石子等)来源丰富,钢材用量较少,结构承载力和刚度较大,防火性能较好,造价低廉。钢筋混凝土技术于1903年传入我国,现在已成为我国发展高层建筑的主要材料。随着科学技术的进步,钢与混凝土的混合结构也得到了很大发展,并已应用到超高层建筑中。钢与混凝土的混合结构有型钢构件外包混凝土(简称刚性混凝土结构)和钢管内填混凝土(简称钢管混凝土结构),它们的主要优点是抗震性能比

混凝土结构好。

## 2. 砌体结构

砌体结构又称砖石结构,是砖砌体、砌块砌体、石砌体建造结构的统称。砌体结构是我国建造工程中最常用的结构形式,墙体结构中砖石砌体占 95% 以上,主要应用于多层住宅、办公楼等民用建筑的基础、内(外)墙身、门窗过梁、墙柱等构件(在抗震设防烈度 6 度区,烧结普通砖砌体住宅可高达 8 层),跨度小于 24 m 且高度较小的俱乐部、食堂及跨度在 15 m 以下的中小型工业厂房,60 m 以下的烟囱、料仓、地沟、管道支架和小型水池,等等。

## 3. 钢结构

主要承重构件全部由钢板或型钢制成的建筑结构称为钢结构。由于钢结构具有承载能力高、重量轻、钢材材质均匀、塑性和韧性好、制造和施工方便、工业化程度高、拆迁方便等优点,因而应用范围相当广泛。目前,钢结构多用于工业与民用建筑中的大跨度结构、高层和超高层建筑、重工业厂房、受动力荷载作用的厂房、高耸结构及一些构筑物等。

# 0.2 建筑结构的歷史及发展

我国应用最早的建筑结构是砖石结构和木结构。公元 595—605 年(隋代),由李春主持建造的河北赵县的赵州桥是世界上最早的空腹式单孔圆弧石拱桥。该桥净跨 37.37 m,拱高 7.2 m,宽 9 m;外形美观,受力合理,建造水平较高。山西五台山佛光寺大殿(建于公元 857 年)、66 m 高的应县木塔(建于公元 1056 年)均采用别具一格的梁、柱木结构承重体系。

我国也是世界上采用钢结构较早的国家之一。公元 60 年前后(汉明帝时代)使用铁索建桥(比欧洲早 70 多年)。我国用铁造房的历史也比较悠久,如现存的湖北荆州玉泉寺的 13 层铁塔建于宋代,已有 1 500 年的历史。

改革开放以来,我国的建设事业蓬勃发展,已建成的高层建筑有数万幢,其中超过 150 m 的有 200 多幢。我国香港特别行政区的中环大厦建成于 1992 年,73 层,高 301 m,是当时世界上最高的钢筋混凝土结构建筑。上海浦东的金茂大厦建成于 1998 年,88 层,高 420 m,属于钢与混凝土混合结构,是当时我国内地第一、世界第四高度的高层建筑。我国台湾地区的国际金融中心大厦建成于 2005 年,101 层,高 508 m,属于钢与混凝土混合结构,是当时世界第一高度的高层建筑。

# 0.3 建筑结构课程的内容及学习要求

建筑结构是建筑工程技术等专业的基础课,主要包括混凝土结构、砌体结构和钢结构三类结构体系,主要研究一般房屋建筑结构的特点、结构构件的布置原则、结构构件的受力特点及破坏形态、简单结构构件的设计原理和设计计算、整体结构的分析、建筑结构的有关构造要求及结构施工图等内容。

学习本课程,应了解建筑结构的基本设计原理;掌握钢筋、混凝土及砌体材料的力学性

能,以及由其组成的钢筋混凝土结构、砌体结构和各种基本构件的受力特点;掌握一般房屋建筑的结构布置、截面选型及基本构件的设计计算方法;正确理解国家建筑结构设计规范中的有关规定,并能正确进行截面设计;同时能处理建筑结构施工中的一般结构问题,逐步培养和提高理论联系实际的综合应用能力,为将来从事建筑工程设计、施工及项目管理工作打下良好的基础。

## 0.4 建筑结构课程的学习方法

在建筑结构课程的学习过程中,要注意运用相应的学习方法。

### 1. 正确理解和使用计算公式

建筑结构中的公式都是建立在科学或工程实践基础上的,因此,要理解公式的基本假定,注意公式的适用范围和限制条件。

### 2. 注意结构设计的综合性

建筑结构设计的任务是选择适用、经济的结构方案,并通过承载力计算、变形验算及其配筋构造等,确定结构的设计方案。在相同荷载的作用下,有多种可行的截面形式、尺寸和不同的材料选择及其不同的配筋方式与数量,即其方案具有多样性,因此需要综合考虑结构的安全性、经济性和施工方便等因素,以确定最合理的方案。同时,应满足设计规范的要求。设计规范是国家颁布的关于设计计算及构造要求的技术规定和标准,是具有约束性和立法性的文件,其目的是使工程结构在符合国家经济政策的条件下,保证设计的质量和工程项目的安全可靠。在本课程的学习中,有关基本理论的应用最终都要落实到规范的具体规定中。通过本课程的学习,应进一步熟悉、掌握和正确应用有关的现行结构设计规范和标准。

### 3. 在基础扎实的前提下注重实践

建筑结构跟力学、房屋建筑学、建筑材料等课程密切相关,它为建筑施工和建筑预算等提供依据。学习建筑结构课程不但需要具备扎实的基础,还要与实践相结合,结合教学去施工现场参观学习,真正做到理论联系实际。



## 学习评价

- (1)混凝土结构的优点是什么?
- (2)在建筑结构课程的学习中要注意什么?
- (3)建筑结构课程的主要学习方法有哪些?

# 模块 1

## 建筑结构的基本设计原则



### 知识目标

- (1) 了解建筑结构的功能要求。
- (2) 熟悉建筑结构的极限状态。
- (3) 掌握极限状态设计的计算方法。

## 1.1 建筑结构的功能要求和极限状态



### 1.1.1 建筑结构的功能要求

结构设计的目的是使所设计的结构能够完成由其用途所决定的全部功能要求。建筑结构的功能要求包括以下几个方面:

#### 1. 安全性

建筑结构在预定的使用期限内,应能承受正常施工、正常使用时可能出现的各种荷载、强迫变形(如超静定结构的支座不均匀沉降)、约束变形(如由于温度及收缩引起的构件变形受到约束时产生的变形)等的作用。在偶然荷载(如地震、强风)作用下或偶然事件(如火灾、爆炸)发生时和发生后,构件仅产生局部损坏,不会发生连续倒塌现象。

#### 2. 适用性

建筑结构在正常使用的荷载作用下应具有良好的工作性能,如不发生影响正常使用的过大挠度、永久变形和动力效应(过大的振幅和振动),就不会产生令使用者感到不安的裂缝。

#### 3. 耐久性

建筑结构在正常使用和正常维护的条件下,在规定的环境中,在预定的使用期限内应有



足够的耐久性,如不发生由于混凝土保护层碳化或氯离子的侵入而导致钢筋锈蚀,以致影响结构的使用寿命。

上述这些功能要求概括起来可以称为建筑结构的可靠性,即建筑结构在规定的时间内(如设计使用年限为 50 年)内、规定的条件(正常设计、正常施工、正常使用和维修,不考虑人为过失)下完成其预定功能的能力。

### 1.1.2 建筑结构的极限状态

建筑结构能够满足功能要求且能够良好地工作,称为结构“可靠”或“有效”;反之,则称为结构“不可靠”或“失效”。区分建筑结构工作状态可靠与失效的标志是极限状态。极限状态是结构或构件能够满足设计规定的某一功能要求的临界状态,具有明确的标志及限值。超过这一界限,结构或结构构件就不能再满足设计规定的该项功能要求,而进入失效状态。根据功能要求的不同,建筑结构的极限状态可分为以下两类:

#### 1. 承载能力极限状态

结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形的极限状态称为承载能力极限状态。当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了承载能力极限状态:

- (1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆、过大的滑移等)。
- (2) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏)。
- (3) 结构构件或连接因过度变形而不适于继续承载(如受弯构件中的少筋梁)。
- (4) 结构转变为机动体系(如超静定结构由于某些截面的屈服而形成塑性铰,使结构成为几何可变体系)。
- (5) 结构或结构构件丧失稳定(如细长柱达到临界荷载,发生压屈)。
- (6) 地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。

#### 2. 正常使用极限状态

结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的极限状态,称为正常使用极限状态。当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了正常使用极限状态:

- (1) 影响正常使用或外观的变形(如梁产生超过了挠度限值的过大的挠度)。
- (2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏(如不允许出现裂缝的构件开裂,或允许出现裂缝的构件的裂缝宽度超过了允许限值)。
- (3) 影响正常使用的振动。
- (4) 影响正常使用的其他特定状态(如由于钢筋锈蚀而产生的沿钢筋的纵向裂缝)。

## 1.2 极限状态设计法

在进行建筑结构设计时,应针对上述的两类极限状态,根据结构的特点和使用要求给出具体的标志及限值,以作为结构设计的依据。这种将对应于结构的各种功能要求的极限状态作为结构设计依据的设计方法,称为极限状态设计法。

## 1.2.1 承载力极限状态计算

(1)在极限状态设计法中,应采用式(1-1)和式(1-2)计算结构构件的承载力。

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-1)$$

$$R = R(f_c, f_s, a_k, \dots) / \gamma_{Rd} \quad (1-2)$$

式中,  $\gamma_0$  为结构重要性系数,在持久设计状况和短暂设计状况下,对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1,对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0,对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9,在地震设计状况下应取 1.0;  $S$  为承载力极限状态下作用组合的效应设计值;  $R$  为结构构件的抗力设计值;  $R(\cdot)$  为结构构件的抗力函数;  $\gamma_{Rd}$  为结构构件的抗力模型不定性系数;  $f_c$ 、 $f_s$  分别为混凝土、钢筋的强度设计值;  $a_k$  为几何参数的标准值,当几何参数的变异性对结构性能有明显的不利影响时,应增减一个附加值。

(2)由可变荷载控制的效应设计值,应按式(1-3)进行计算。

$$S = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_j,k} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} S_{Q_1,k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_{c_i} S_{Q_i,k} \quad (1-3)$$

式中,  $\gamma_{G_j}$  为第  $j$  个永久荷载的分项系数,应按表 1-1 采用;  $\gamma_{Q_i}$  为第  $i$  个可变荷载的分项系数,其中的  $\gamma_{Q_1}$  为主导可变荷载  $Q_1$  的分项系数,应按表 1-1 采用;  $\gamma_{L_i}$  为第  $i$  个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数,其中的  $\gamma_{L_1}$  为主导可变荷载  $Q_1$  考虑设计使用年限的调整系数;  $S_{G_j,k}$  为按第  $j$  个永久荷载标准值  $G_{j,k}$  计算的荷载效应值;  $S_{Q_i,k}$  为按第  $i$  个可变荷载标准值  $Q_{i,k}$  计算的荷载效应值,其中的  $S_{Q_1,k}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者;  $\psi_{c_i}$  为第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的组合值系数;  $m$  为参与组合的永久荷载数;  $n$  为参与组合的可变荷载数。

表 1-1 基本组合的荷载分项系数

项 目	规 定
永久荷载的分项系数	(1)当永久荷载效应对结构不利时,对由可变荷载效应控制的组合应取 1.2; 对由永久荷载效应控制的组合应取 1.35。 (2)当永久荷载效应对结构有利时,不应大于 1.0
可变荷载的分项系数	(1)对标准值大于 4 kN/m <sup>2</sup> 的工业房屋楼面结构的活荷载,应取 1.3。 (2)其他情况,应取 1.4

注:对于结构的倾覆、滑移或漂浮验算,荷载的分项系数应满足有关的建筑结构设计规范的规定。

(3)由永久荷载控制的效应设计值,应按式(1-4)进行计算。

$$S = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_j,k} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_{c_i} S_{Q_i,k} \quad (1-4)$$

基本组合中的效应设计值仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况。

当无法明确判断  $S_{Q_1,k}$  时,应轮次以各可变荷载效应作为  $S_{Q_1,k}$ ,并选取其中最不利的荷载组合的效应设计值。

## 1.2.2 正常使用极限状态计算

对于正常使用极限状态,应根据不同的设计要求,采用荷载的标准组合、频遇组合或准

永久组合,并按式(1-5)进行设计。

$$S \leq C \quad (1-5)$$

式中,  $C$  为结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值,如变形、裂缝、振幅、加速度、应力等的限值,应按各有关建筑结构设计规范的规定采用。

正常使用情况下,荷载效应和结构抗力的变异性已经在确定荷载标准值和结构抗力标准值时进行了一定程度的处理,并具有一定的安全储备。考虑到正常使用极限状态设计属于校核验算性质,所要求的安全储备可以略低一些,所以可采用荷载效应及结构抗力标准值进行计算。

### 1. 荷载标准组合的效应设计值计算

荷载标准组合的效应设计值  $S$  应按式(1-6)进行计算(组合中的设计值仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况)。

$$S = \sum_{j=1}^m S_{G_j,k} + S_{Q_1,k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Q_i,k} \quad (1-6)$$

标准组合是在设计基准期内根据正常使用条件可能出现最大可变荷载时的荷载标准值进行组合而确定的,在一般情况下均采用这种组合值进行正常使用极限状态的验算。

### 2. 荷载频遇组合的效应设计值计算

荷载频遇组合的效应设计值应按式(1-7)进行计算(组合中的设计值仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况)。

$$S = \sum_{j=1}^m S_{G_j,k} + \psi_{f_1} S_{Q_1,k} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} S_{Q_i,k} \quad (1-7)$$

式中,  $\psi_{f_1}$  为第 1 个可变荷载的频遇值系数;  $\psi_{qi}$  为第  $i$  个可变荷载的准永久值系数。

频遇组合是采用考虑时间影响的频遇值为主导进行组合而确定的。当结构或结构构件允许考虑荷载在较短的总持续时间或较少可能出现次数这种情况时,应按其相应的最大可变荷载的组合(频遇组合)进行正常使用极限状态的验算。例如,当结构构件考虑疲劳的破坏时,应按所需承受的疲劳次数相应的频遇组合值进行疲劳强度的验算,但如果采用较大的荷载标准组合值进行验算,则结构构件将会超过所需承受的疲劳次数,也即其实际设计使用年限超过了设计基准期,但该结构构件最终还是要随着设计使用年限仅为设计基准期的结构的其他构件而报废,可见按频遇组合值验算是较为经济合理的。

当结构振动涉及人的舒适性,影响非结构构件的性能和设备的使用功能时,应采用荷载频遇组合进行极限状态的验算。在《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中首次提出了频遇组合的计算条文,但由于当前所给出的频遇组合值系数和对结构构件达到正常使用要求的相应规定限值尚不够完善,因而也没有明确规定其具体应用场合,当有成熟经验时,可以采用这种组合进行极限状态的验算。

### 3. 荷载准永久组合的效应设计值计算

荷载准永久组合的效应设计值应按式(1-8)进行计算(组合中的设计值仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况)。

$$S = \sum_{j=1}^m S_{G_j,k} + \sum_{i=1}^n \psi_{q_i} S_{Q_i,k} \quad (1-8)$$

准永久组合是采用设计基准期内持久作用的准永久值进行组合而确定的。它是考虑可变荷载的长期作用并具有独立性的一种组合形式。但《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中对结构抗力(裂缝、变形)的试验研究结果多数是在荷载短期作用的情况下取得的,因此仅将荷载准永久组合值作为荷载长期作用会降低结构抗力(刚度)的影响因素之一来取用。

### 1.2.3 耐久性验算

材料的耐久性是指其暴露在使用环境中抵抗各种物理和化学作用的能力。对钢筋混凝土结构而言,钢筋被浇筑在混凝土内,混凝土对钢筋起到保护作用。如果能够根据使用条件对钢筋混凝土结构进行正确的设计和施工,在使用过程中又能对混凝土进行定期维护,那么其使用年限可达百年以上,因此,钢筋混凝土是一种很耐久的材料。

钢筋混凝土结构长期暴露在使用环境中,会使材料的耐久性降低。耐久性的影响因素主要有材料的质量、钢筋的锈蚀、混凝土的抗渗性及抗冻性、除冰盐对混凝土的破坏等。

设计使用年限为 50 年的混凝土结构,其混凝土材料宜符合表 1-2 的规定。

表 1-2 结构混凝土材料的耐久性基本要求

环境类别	最大水灰比	最低强度等级	最大氯离子含量/%	最大碱含量 /(kg·m <sup>-3</sup> )
一	0.60	C20	0.30	不限制
二 a	0.55	C25	0.20	3.0
二 b	0.50(0.55)	C30(C25)	0.15	
三 a	0.45(0.50)	C35(C30)	0.15	
三 b	0.40	C40	0.10	

注 1:氯离子含量是指其占胶凝材料总量的百分比。

注 2:预应力构件混凝土中的最大氯离子含量为 0.06%,其最低混凝土强度等级宜按表中的规定提高两个等级。

注 3:素混凝土构件的水灰比及最低强度等级的要求可适当放松。

注 4:当有可靠工程经验时,二类环境中的最低混凝土强度等级可降低一个等级。

注 5:处于严寒和寒冷地区二 b、三 a 类环境中的混凝土应使用引气剂,并可采用括号中的有关参数。

注 6:当使用非碱活性骨料时,对混凝土中的碱含量可不作限制。

设计使用年限为 100 年且处于一类环境中的混凝土结构应符合下列规定:

(1)钢筋混凝土结构的最低强度等级不应低于 C30,预应力混凝土结构的最低强度等级为 C40。

(2)混凝土中的最大氯离子含量为 0.06%。

(3)宜使用非碱活性骨料;当使用碱活性骨料时,混凝土中的最大碱含量为 3.0 kg/m<sup>3</sup>。

(4)混凝土保护层的厚度应符合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)第 8.2.1 条的规定;当采取有效的表面防护措施时,混凝土保护层的厚度可适当减小。

对于设计使用年限为 100 年且处于二、三类环境中的混凝土结构应采取专门的有效措施。



## 学习评价

- (1) 建筑结构的性能要求有哪些？
- (2) 什么是建筑结构的极限状态？结构极限状态主要包括哪两类？
- (3) 承载能力极限状态计算的表达式是什么？
- (4) 正常使用极限状态计算的表达式是什么？
- (5) 如何设计混凝土结构的耐久性？

# 模块 2

## 钢筋和混凝土的力学性能



### 知识目标

- (1) 了解钢筋的分类及性能。
- (2) 了解混凝土的变形、收缩及徐变。
- (3) 了解混凝土的力学性能。
- (4) 熟悉钢筋与混凝土之间的黏结作用。

## 2.1 钢筋的性能及要求



### 2.1.1 钢筋的分类

混凝土结构用钢筋按化学成分的不同可分为碳素钢和普通低合金钢。根据含碳量的不同,碳素钢分为低碳钢(碳质量分数小于 0.25%)、中碳钢(碳质量分数为 0.25%~0.60%)、高碳钢(碳质量分数大于 0.60%)。钢筋的含碳量越高,其强度越高,但塑性和可焊性会下降。工程中常用低碳钢。普通低合金钢是在碳素钢的基础上加入了微量的合金元素,如硅、锰、钒、钛、铌等,目的是提高钢材的强度,改善钢材的塑性性能。

钢筋按生产加工工艺和力学性能的不同分为普通钢筋和预应力筋。普通钢筋为低碳钢,由普通低合金钢在高温状态下轧制而成,如 HRB335 钢筋、HRB400 钢筋和 RRB400 钢筋。预应力筋可分为热处理钢筋和预应力钢丝。热处理钢筋由强度大致相当于 HRB400 钢筋的某些特定钢号的钢筋经淬火和回火处理后制成,其强度得到大幅度提高,塑性降低不大。预应力钢丝由高碳钢筋经多次冷拔而成,包括光面钢丝、刻痕钢丝和钢绞线(用光面钢丝绞织而成),钢筋直径越细,强度越高。

钢筋按其外形不同可分为光面钢筋和带肋钢筋。带肋钢筋有螺纹钢、人字纹钢筋和月牙纹钢筋。通常带肋钢筋的直径不小于 10 mm,光面钢筋的直径不小于 6 mm。目前常用的是月牙纹钢筋,如图 2-1 所示。

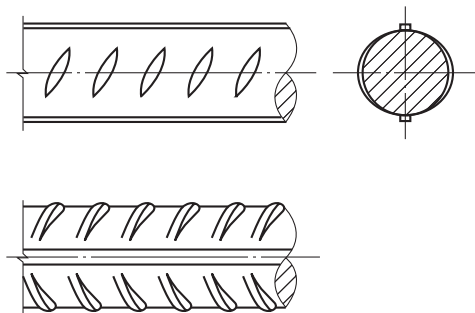


图 2-1 月牙纹钢筋

## 2.1.2 钢筋的强度和变形

钢筋的强度和变形方面的性能主要通过钢筋的应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线来表示。图 2-2 所示为有明显流幅的钢筋的应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线。图中, $B'$ 点为上屈服点,是不稳定的; $B$ 点为下屈服点; $BC$ 段为屈服平台; $CD$ 段为强化段,到达  $D$  点时,钢筋出现颈缩;到达  $E$  点时,钢筋被拉断。钢筋受压和受拉时的应力-应变曲线几乎相同。

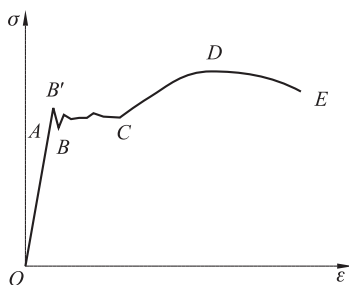


图 2-2 钢筋的应力-应变曲线

### 1. 强度指标

(1)对有明显流幅的钢筋,把下屈服点所对应的强度作为设计强度的依据。这是因为钢筋屈服后会产生较大的塑性变形,钢筋混凝土构件会产生不可恢复的变形和不可闭合的裂缝,以致不能使用。

(2)对无明显流幅的钢筋,把残余应变为 0.2%时所对应的应力作为条件屈服强度。

(3)强度指标的确定。根据统计资料,运用数理统计方法确定的具有一定保证率(钢筋为 97.73%)的统计特征值称为强度标准值。

$$\text{强度标准值} = \text{强度平均值} - 2 \times \text{均方差}$$



## 2. 变形指标

(1) 伸长率。钢筋拉断后的伸长与原长的比值,称为伸长率。

(2) 冷弯性能。将直径为  $d$  的钢筋绕直径为  $D$  的钢辊弯成一定的角度而不发生断裂。

(3) 弹性模量。对于抗震结构,钢筋应力在地震作用下可考虑进入强化阶段,为了保证结构在强震下裂而不倒,对钢筋的极限抗拉强度与屈服强度的比值有一定的要求,一般不小于 1.25。钢筋在弹性阶段应力与应变的比值,称为弹性模量,用  $E_s$  表示,即

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (2-1)$$

普通钢筋和预应力筋的弹性模量  $E_s$  应按表 2-1 采用。

表 2-1 钢筋的弹性模量 单位:  $\times 10^5 \text{ N/mm}^2$

牌号或种类	弹性模量 $E_s$
HPB300 钢筋	2.10
HRB335、HRB400、HRB500 钢筋 HRBF335、HRBF400、HRBF500 钢筋 RRB400 钢筋 预应力螺纹钢筋	2.00
消除应力钢丝、中强度预应力钢丝	2.05
钢绞线	1.95

### 2.1.3 钢筋的塑性性能

反映钢筋塑性性能的基本指标是钢筋的伸长率。钢筋的伸长率越大,塑性性能越好。将直径为  $d$  的钢筋绕直径为  $D$  的钢辊进行弯曲(见图 2-3),弯成一定的角度  $\alpha$  而不发生断裂,并且无裂纹、鳞落或断裂现象,即认为钢筋的弯曲性能符合要求。通常  $D$  值越小,  $\alpha$  值越大,钢筋的弯曲性能和塑性性能越好。

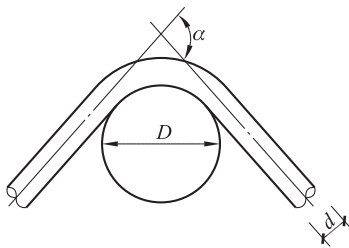


图 2-3 钢筋的冷弯

屈服强度、极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能是对有明显屈服点的钢筋进行质量检验的四项主要指标。表 2-2 列出了热轧钢筋的屈服强度、抗拉强度、伸长率、冷弯性能和弹性模量等力学性能指标。



表 2-2 热轧钢筋的力学性能指标

钢筋级别	钢 号	公称直径 $d/\text{mm}$	屈服强度 $/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	抗拉强度 $/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	伸长率 $\sigma_s$	冷弯性能 $\alpha$ (弯曲角度), $D$ (弯心直径)	弹性模量 $E_s$ $/(N \cdot \text{mm}^{-2})$
HRB335	20MnSi	6~25	335	490	16	$\alpha=180^\circ, D=3d$	$2.1 \times 10^5$
		28~50				$\alpha=180^\circ, D=4d$	
HRB400	20MnSiV	6~25	400	570	14	$\alpha=180^\circ, D=4d$	$2.1 \times 10^5$
	20MnSiNb	28~50				$\alpha=180^\circ, D=5d$	
	20MnTi						
RRB400	K20MnSi	8~25	400	600	14	$\alpha=90^\circ, D=3d$	$2.1 \times 10^5$
		28~40				$\alpha=90^\circ, D=4d$	

## 2.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求

混凝土结构对钢筋性能的要求主要有以下几点:

(1) 有较高的强度和适宜的屈强比。强度是指钢筋的屈服强度  $f_y$ 。 $f_y$  高,可减少结构的用钢量,节约钢材,提高经济效益。屈强比是指  $f_y$  与极限抗拉强度  $f_t$  之比,即  $f_y/f_t$ ,该值反映结构的可靠程度。钢筋的屈强比越小,结构越可靠,但钢材强度的利用率较低,不经济;屈强比太大,则结构不可靠。

(2) 有较好的塑性。钢筋的塑性好,则在破坏之前会产生较大的塑性变形(结构构件有明显的变形和裂缝),可避免突然的脆性破坏所带来的危害,所以应保证钢筋的伸长率和冷弯性能均合格。

(3) 具有较好的焊接性能。要求钢筋焊接后的接头的受力性能良好,不产生裂纹和过大的变形。

(4) 与混凝土之间有良好的黏结力。黏结力是保证钢筋和混凝土共同工作的基础,钢筋表面的形状对黏结力有着重要影响。为了加强钢筋与混凝土的黏结力,常用的 HRB335、HRB400 和 RRB400 钢筋均为表面带肋钢筋。

## 2.1.5 钢筋的选用

对于混凝土结构的钢筋,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定如下:

(1) 纵向受力普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋,也可采用 HPB300、HRB335、HRBF335、RRB400 钢筋。

(2) 梁、柱纵向受力普通钢筋应采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋。

(3) 箍筋宜采用 HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500 钢筋,也可采用 HRB335、HRBF335 钢筋。

(4) 预应力筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。

## 2.2 混凝土的力学性能

### 2.2.1 混凝土的强度

混凝土的强度与水泥、骨料的品种、级配、配合比、硬化条件和龄期等有关,主要包括立方体抗压强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度等。

#### 1. 混凝土立方体抗压强度及强度等级

立方体抗压强度是衡量混凝土强度高低的的基本指标值,是确定混凝土强度等级的依据。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定:将按照标准方法制作、养护的边长为 150 mm 的立方体试件,在 28 d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值作为混凝土立方体抗压强度标准值,用  $f_{cu,k}$  表示,单位为  $N/mm^2$  (MPa)。

试验表明,混凝土立方体抗压强度与试件的尺寸大小有关。立方体试件的尺寸越小,测得的抗压强度值越高。实际工程中如采用边长为 100 mm 或 200 mm 的非标准试件,则应将其立方体抗压强度实测值分别乘以换算系数 0.95 和 1.05,换算成标准试件的立方体抗压强度标准值。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)根据混凝土立方体抗压强度标准值,将混凝土划分为 14 个强度等级,分别以 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80 表示。一般将 C50 以上的混凝土称为高强度混凝土。

#### 2. 混凝土轴心抗压强度

在工程中,钢筋混凝土受压构件的尺寸往往是高度  $h$  比截面的边长  $b$  大很多,因而形成棱柱体。用棱柱体试件测得的抗压强度称为轴心抗压强度。试验时,棱柱体试件的高宽比  $h/b$  通常为 3~4,常用试件尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm、150 mm×150 mm×450 mm。

轴心抗压强度的试件是在与立方体试件相同的条件下制作的,经测试轴心抗压强度值要小于立方体抗压强度,根据我国所做的混凝土棱柱体与立方体抗压强度对比试验的结果,它们的比值在 0.70~0.92 的范围内变化,混凝土强度大的比值大一些,但考虑到实际结构构件的制作、养护和受力情况,以及实际构件强度与试件强度之间存在的差异,基于安全考虑建议取偏低值。轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$  与立方体抗压强度标准值  $f_{cu,k}$  之间的关系为

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-2)$$

式中, $\alpha_{c1}$  为棱柱体强度与立方体强度的比值,对 C50 及以下的普通混凝土,取  $\alpha_{c1} = 0.76$ ,对高强度混凝土 C80,取  $\alpha_{c1} = 0.82$ ,其间按线性内插法取值; $\alpha_{c2}$  为考虑 C40 以上混凝土的脆性折减系数,对 C40 及以下普通混凝土,取  $\alpha_{c2} = 1.00$ ,对高强度混凝土 C80,取  $\alpha_{c2} = 0.87$ ,其间按线性内插法取值;0.88 为考虑到结构构件与试件制作及养护条件的差异,尺寸效应及加荷速度影响,参照以往的设计经验所取得的经验系数。

#### 3. 混凝土轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度很低,与立方体抗压强度之间为非线性关系,一般只有其立方体抗压

强度的  $1/17 \sim 1/8$ 。中国建筑科学研究院等单位对混凝土的抗拉强度做了系统的测定,其用直接测试法或间接测试法对试件进行试验测得的抗拉强度称为轴心抗拉强度,经修正后,轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$  与立方体抗压强度标准值  $f_{cu,k}$  之间的关系为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_{c2} \quad (2-3)$$

式中,  $\delta$  为混凝土立方体强度变异系数,对 C60 以上的混凝土,取  $\delta = 0.1$ ; 系数 0.395 和系数 0.55 是根据试验数据统计分析所得的经验系数。

混凝土的强度标准值如表 2-3 所示。

表 2-3 混凝土的强度标准值

单位: N/mm<sup>2</sup>

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$f_{ck}$	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
$f_{tk}$	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.11

## 2.2.2 混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类:一是在荷载作用下的受力变形,如单调短期加荷、多次重复加荷及荷载长期作用下的变形;二是与受力无关,称为体积变形,如混凝土收缩、膨胀及由于温度变化所产生的变形等。

### 1. 混凝土在一次短期荷载作用下的变形

(1) 混凝土在单调短期加荷作用下的应力-应变曲线是其最基本的力学性能,曲线的特征是研究钢筋混凝土构件的强度、变形、延性(承受变形的能力)和进行受力全过程分析的依据。

图 2-4 为混凝土棱柱体试件在受压时的应力-应变曲线,曲线由上升段  $Oc$  和下降段  $ce$  两部分组成。

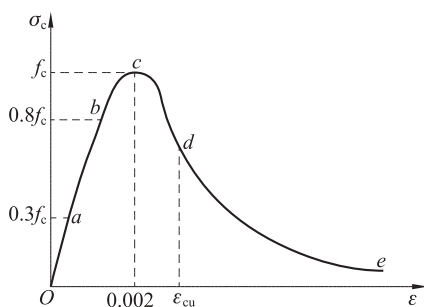


图 2-4 混凝土棱柱体试件在受压时的应力-应变曲线

①上升段  $Oc$ 。上升段  $Oc$  大致可分为以下三段:

- 曲线  $Oa$  段 ( $\sigma_c \leq 0.3f_c$ )。此时混凝土受到的压应力较小,基本处于弹性阶段,应力-应变关系呈直线,卸载后应变可恢复到零。

- 曲线  $ab$  段 ( $0.3f_c < \sigma_c \leq 0.8f_c$ )。随着混凝土受到的压应力继续增大,应变增加的速度比应力快,混凝土呈现塑性性质,应力-应变关系偏离直线;此阶段混凝土内部的微裂缝开

始延伸、扩展。

- 曲线  $bc$  段 ( $0.8f_c < \sigma_c \leq f_c$ )。混凝土的塑性变形显著增大,  $c$  点达到峰值应力 ( $\sigma_c = f_c$ ), 相应的峰值压应变  $\epsilon_0 \approx 0.002$ 。此阶段混凝土内部的裂缝不断扩展, 裂缝的数量及宽度急剧增加, 最后形成相互贯通并与压力方向平行的裂缝, 试件即将被破坏。

- ② 下降段  $ce$ 。当压应力达到  $c$  点峰值应力后, 曲线开始下降, 试件的承载力逐渐降低, 应变继续增大, 并在  $d$  点出现拐点,  $d$  点相应的应变称为混凝土的极限压应变  $\epsilon_{cu}$  (一般为  $0.0033$ )。  $\epsilon_{cu}$  值越大, 说明混凝土的塑性变形能力越强, 即材料的延性越好, 抗震性能越好。

(2) 混凝土的横向变形系数。混凝土试件在一次短期加压时, 其纵向产生压缩应变  $\epsilon_{cv}$ , 横向产生膨胀应变  $\epsilon_{ch}$ , 其比值  $\epsilon_{ch}/\epsilon_{cv}$  称为横向变形系数 (混凝土泊松比)  $\nu_c$ 。当混凝土应力  $\sigma_c \leq 0.5f_c$  时,  $\nu_c$  基本为常数, 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 规定, 取  $\nu_c = 0.2$ ; 当  $\sigma_c > 0.5f_c$  时, 横向变形突然增加, 表明混凝土内部的微裂缝开始迅速发展。

(3) 混凝土的弹性模量、变形模量和剪变模量。

① 混凝土的弹性模量。混凝土的应力与其弹性应变之比称为混凝土的弹性模量, 用符号  $E_c$  表示。根据大量试验统计结果, 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 采用经验公式计算混凝土的弹性模量, 即

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (2-4)$$

强度等级为 C15 的混凝土的弹性模量  $E_c = 2.20 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C20 的混凝土的弹性模量  $E_c = 2.55 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C25 的混凝土的弹性模量  $E_c = 2.80 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C30 的混凝土的弹性模量  $E_c = 3.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C35 的混凝土的弹性模量  $E_c = 3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C40 的混凝土的弹性模量  $E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ; 强度等级为 C45 的混凝土的弹性模量  $E_c = 3.35 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

② 混凝土的变形模量。混凝土的应力与其弹塑性总应变之比称为混凝土的变形模量, 用符号  $E'_c$  表示。该值小于混凝土的弹性模量  $E_c$ 。混凝土的变形模量  $E'_c$  与弹性模量  $E_c$  的关系为

$$E'_c = \nu E_c \quad (2-5)$$

式中,  $\nu$  为混凝土弹性特征系数, 当  $\sigma_c \leq 0.3f_c$  时,  $\nu = 1.0$ ; 当  $\sigma_c = 0.5f_c$  时,  $\nu = 0.8 \sim 0.9$ ; 当  $\sigma_c = 0.9f_c$  时,  $\nu = 0.4 \sim 0.7$ 。

③ 混凝土的剪变模量。混凝土的剪变模量是指剪应力和剪应变的比值, 用  $G_c$  表示。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 规定, 取  $G_c = 0.4E_c$ 。

## 2. 混凝土在多次重复加荷作用下的变形

工程中的某些构件, 如工业厂房中的吊车梁, 在其使用期限内要承受 200 万次以上的重复荷载作用, 在多次重复加荷作用的情况下, 混凝土的强度和变形性能都会出现重要变化, 混凝土将产生“疲劳”现象。混凝土由于荷载重复作用而引起的破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏的产生取决于加载时应力是否超过混凝土的疲劳强度  $f_c^f$ 。试验表明, 混凝土的疲劳强度  $f_c^f$  低于轴心抗压强度  $f_c$ , 为  $(0.4 \sim 0.5)f_c$ , 此值的大小与荷载重复作用的次数、应力的变化幅度及混凝土的强度等级有关。

通常情况下, 承受重复荷载作用且荷载循环次数不少于 200 万次的结构构件必须进行

疲劳验算。

### 3. 混凝土在荷载长期作用下的变形

混凝土在不变荷载的长期作用下,其应变随时间而继续增长的现象称为混凝土的徐变。

混凝土的徐变对混凝土结构和结构构件的工作性能有很大的影响。混凝土的徐变会使受弯构件的变形增大,使结构或结构构件产生内力重分布,在预应力混凝土结构中还会产生较大的预应力损失。试验表明,徐变的发展规律是先快后慢,通常在最初 6 个月内可完成最终徐变量的 70%~80%,第一年内可完成 90%左右,其余部分在以后几年内逐步完成,经过 2~5 年徐变基本结束。

通常认为徐变产生的原因有以下两点:一是混凝土中尚未形成水泥石结晶体的水泥石凝胶体的黏性流动;二是混凝土内部的微裂缝在长期荷载作用下不断发展和增长,从而导致应变的增长。

混凝土的徐变与初始加荷应力的大小有直接关系。当  $\sigma_c \leq 0.5f_c$  时,徐变与  $\sigma_c$  成正比,称为线性徐变;当  $\sigma_c > 0.5f_c$  时,徐变与  $\sigma_c$  已不再呈线性关系,徐变变形比应力增长要快,称为非线性徐变;当  $\sigma_c \approx 0.8f_c$  时,徐变变形急剧增长不再收敛,其增长会超出混凝土的变形能力而导致混凝土破坏。因此,一般取  $\sigma_c = 0.8f_c$  作为荷载长期作用下混凝土抗压强度的极限。因此,混凝土构件在使用期间,应当避免经常处于不变的高应力状态下。

影响混凝土徐变的因素很多,主要有以下几个方面:

(1) 应力条件。应力条件是指混凝土初始加荷应力和加载时混凝土的龄期,这是影响徐变的最主要因素。初始加荷应力越大,徐变越大;加载时混凝土的龄期越短,徐变越大。在实际工程中,应加强养护,使混凝土尽早结硬,减小徐变。

(2) 内在因素。内在因素是指混凝土的组成成分和配比。例如,骨料越坚硬,徐变越小;水灰比越大,水泥用量越多,徐变越大。

(3) 环境因素。环境因素是指养护和使用时的温度与湿度。受荷前,混凝土养护的温度越高、湿度越大,水泥水化作用就越充分,徐变就越小;加荷期间温度越高、湿度越小,徐变就越大。

### 4. 混凝土的收缩变形

混凝土在空气中结硬时体积减小的现象称为收缩;当混凝土在水中结硬时,其体积会产生膨胀。通常,收缩值的量值较大,对结构有明显的不良影响,因此要特别注意;而膨胀值的量值很小,对结构有利,一般可不予考虑。

混凝土的收缩变形先快后慢,1 个月可完成约 50%,3 个月后增长缓慢,一般两年后趋于稳定,最终收缩值为  $(2\sim 6) \times 10^{-4}$ 。

混凝土的收缩由凝缩和干缩两部分组成。凝缩是由水泥水化作用引起的本身体积的收缩,它是不可恢复的;干缩是由于混凝土内自由水分的蒸发而引起的收缩,当干缩后的混凝土再次吸水时,部分干缩变形可以恢复。

影响混凝土收缩的因素有内在因素和环境影响。

(1) 内在因素。水泥强度高、用量多、水灰比大,则收缩量大;骨料粒径大、级配好、弹性模量大,则收缩量小;混凝土越密实,收缩量就越小。

(2) 环境影响。混凝土在养护和使用期间的环境湿度大,则收缩量小;采用高温蒸汽养护时,收缩量减小。



此外,混凝土构件的表面面积与其体积的比值越大,收缩量越大。

混凝土收缩属于自发变形,当受到外部(支座)或内部(钢筋)的约束时,将使混凝土中产生拉应力,从而加速裂缝的出现和发展;在预应力混凝土结构中,收缩还会导致预应力损失。在工程中为尽量减小收缩,可采取的措施有:减小水泥用量和水灰比,选择粒径大、级配好的骨料,提高混凝土的密实度,加强混凝土的早期养护,设置施工缝、构造钢筋,等等。

### 5. 混凝土的温度变形

混凝土随温度的升降会产生胀缩,这种现象称为温度变形。混凝土的温度线膨胀系数 $\alpha_c$ 为 $(1.0\sim 1.5)\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)取为 $1.0\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,它与钢筋的线膨胀系数 $1.2\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 相近。因此,当温度发生变化时,在混凝土和钢筋之间引起的内应力很小,不会影响到钢筋与混凝土之间的黏结。但对结构构件来说,当温度应力过大时,则可能造成混凝土结构出现裂缝。

在工程中为防止混凝土出现收缩裂缝和温度裂缝,可根据工程的具体情况采取设置温度收缩缝、设置承受温度应力的构造钢筋、设置混凝土后浇带等措施。

## 2.3 钢筋与混凝土之间的黏结



### 2.3.1 黏结作用

在钢筋混凝土结构中,钢筋和混凝土这两种性质不同的材料之所以能有效地结合在一起共同工作,除了两者的温度线膨胀系数相近及混凝土对钢筋具有保护作用以外,主要的原因是两者之间具有良好的黏结作用。该作用可使黏结力承受黏结表面上的剪应力,抵抗钢筋与混凝土之间的相对滑动。

试验研究表明,钢筋与混凝土之间的黏结力由以下三部分组成:

- (1)胶结力。因水泥颗粒的水化作用形成的凝胶体对钢筋表面产生的胶结力。
- (2)摩擦力。因混凝土硬化时体积收缩,将钢筋紧紧握裹而产生的摩擦力。
- (3)机械咬合力。由于钢筋表面的凹凸不平而与混凝土之间产生的机械咬合力。

其中,胶结力作用最小,光面钢筋以摩擦力为主,带肋钢筋以机械咬合力为主。



### 2.3.2 黏结强度

钢筋与混凝土的黏结面上所能承受的平均剪应力的最大值称为黏结强度。黏结强度由拉拔试验测定,拉拔试件如图 2-5(a)所示。黏结锚固应力 $\tau$ 由拉拔力 $F$ 除以锚固面积 $\pi dl_a$ 求得,即

$$\tau = \frac{F}{\pi dl_a} \quad (2-6)$$

式中, $d$ 为钢筋直径; $l_a$ 为锚固长度。

设拉拔试验时测得的钢筋与混凝土之间的滑移为 $s$ ,则黏结锚固应力与滑移( $\tau$ - $s$ )曲线表达了钢筋与混凝土之间的黏结锚固性能。曲线的斜率表示锚固刚度(抵抗滑移的能力),曲线

的峰值  $\tau_u$  为锚固强度, 曲线下降段为锚固延性(大滑移时的锚固能力), 如图 2-5(b) 所示。

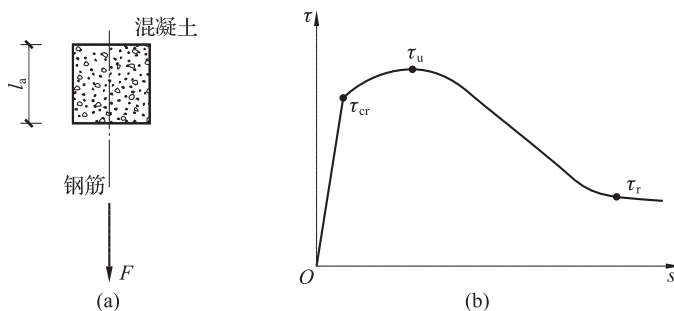


图 2-5 钢筋与混凝土的黏结锚固应力与滑移( $\tau$ - $s$ )曲线  
(a) 拉拔试件 (b)  $\tau$ - $s$  曲线

### 2.3.3 影响黏结强度的因素

由锚固试验确定的钢筋与混凝土的黏结强度和许多因素有关, 主要有保护层混凝土的强度、混凝土的保护层厚度、锚固钢筋的外形、对锚固区域混凝土的约束(如配箍)等。

(1) 保护层混凝土的强度。混凝土强度越高, 则伸入钢筋横肋间的混凝土咬合齿越强, 握裹层混凝土的劈裂就越不容易发生, 黏结锚固作用就越强。

(2) 混凝土保护层的厚度。混凝土保护层越厚, 则对锚固钢筋的约束越大, 咬合力对保护层混凝土的劈裂就越难以发生, 黏结锚固作用就越强。当保护层厚度达到一定程度时, 锚固强度增加的趋势会减缓。

(3) 锚固钢筋的外形。钢筋的外形决定了混凝土咬合齿的形状, 对锚固强度的影响很大。钢筋主要的外形参数为相对肋高和肋面积比、横肋的对称性及连续性。对于锚固性能, 光面钢筋及刻痕钢丝最差, 旋扭状的钢绞线次之, 间断型的月牙肋钢筋较好, 而连续的螺旋肋钢筋最好。

(4) 锚固区域的配箍。锚固长度范围内的配箍对锚固强度影响很大。不配箍的锚筋在保护层混凝土劈裂后即丧失锚固力; 而配箍较多时, 即便发生劈裂, 黏结锚固强度也还有一定程度的增长。

## 学习评价

- (1) 试述钢筋的分类。
- (2) 钢筋的应力-应变曲线中, 钢筋弹性阶段与塑性阶段的分界点是什么? 有什么特征?
- (3) 试述混凝土结构对钢筋性能的要求。
- (4) 如何确定混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度及轴心抗拉强度?
- (5) 混凝土的变形主要有哪些类型?
- (6) 简述混凝土在一次短期荷载作用下变形的过程。
- (7) 影响混凝土收缩的内在因素有哪些?
- (8) 影响钢筋与混凝土黏结强度的因素有哪些?

# 模块 3

## 钢筋混凝土基本构件



### 知识目标

- (1) 了解受弯构件正截面的受力性能及构造要求,熟悉受弯构件正截面承载力计算的依据及条件。
- (2) 掌握单筋矩形截面、双筋矩形截面、T形截面受弯构件正截面承载力的计算方法。
- (3) 了解受弯构件截面的工作性能,掌握受弯构件斜截面受剪承载力的计算方法。
- (4) 掌握构件裂缝宽度及变形的验算方法。
- (5) 掌握弯、剪、扭构件承载力的计算方法。
- (6) 了解受压构件的概念及种类,熟悉受压构件的构造要求。
- (7) 掌握轴心受压构件和偏心受压构件承载力的计算方法。
- (8) 熟悉轴心受拉构件计算的适用范围,掌握受拉构件承载力的计算方法。
- (9) 熟悉偏心受压构件的构造要求及计算适用范围,掌握偏心受拉构件承载力的计算方法。

## 3.1 受弯构件



### 3.1.1 受弯构件正截面承载力计算

在荷载作用下,同时承受弯矩和剪力作用的构件称为受弯构件。受弯构件在建筑工程中最为常见。在截面受拉区配置纵向受力钢筋的构件,称为单筋受弯构件;在截面受拉区和受压区都配置受力钢筋的构件,称为双筋受弯构件。受弯构件按构件截面形式的不同可分为单筋矩形梁、双筋矩形梁、T形梁、I形梁、环形梁、空心板、槽形板等,如图 3-1 和图 3-2 所示。



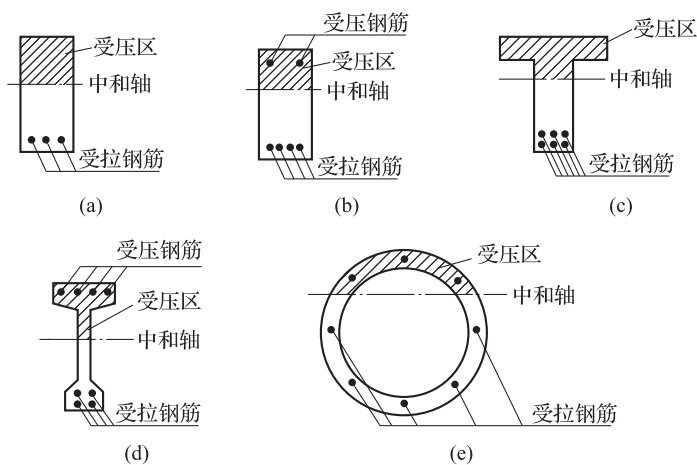


图 3-1 梁的种类

(a)单筋矩形梁 (b)双筋矩形梁 (c)T形梁 (d)I形梁 (e)环形梁

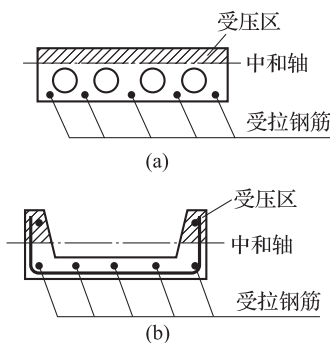


图 3-2 板的种类

(a)空心板 (b)槽形板

## 1. 受弯构件正截面的受力性能

(1)钢筋混凝土梁正截面工作的三个阶段。钢筋混凝土受弯构件的破坏有两种情况：一种是由弯矩引起的，破坏截面与构件的纵轴线垂直(正交)，称为沿正截面破坏；另一种是由弯矩和剪力共同引起的，破坏截面是倾斜的，称为沿斜截面破坏，如图 3-3 所示。本模块仅讨论受弯构件正截面的破坏机理及计算方法。

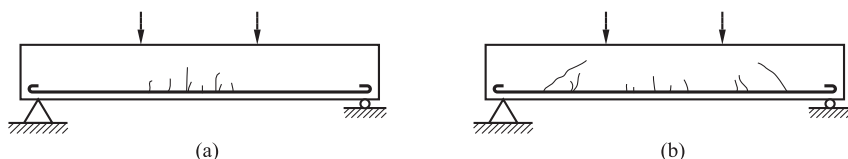


图 3-3 受弯构件的破坏形态

(a)沿正截面破坏 (b)沿斜截面破坏

试验研究表明：当钢筋混凝土受弯构件具有足够的抗剪能力且构造设计合理时，构件受力后将在弯矩较大的部位，或在图 3-3 中纯弯区段的正截面发生弯曲破坏。受弯构件自加

载至破坏的过程中,随着荷载的增加及混凝土塑性变形的发展,对于正常配筋的梁,其正截面上的应力及其分布和应变发展过程可分为以下三个阶段:

①第Ⅰ阶段——弹性工作阶段。开始增加荷载时,截面弯矩、截面应力及截面应变均很小,混凝土基本处于弹性工作阶段,截面应变变化符合平截面假定[见图 3-4(a)],梁截面应力的分布图形为三角形,中和轴以上受压,中和轴以下受拉。

随着  $M$  的增大,混凝土的抗拉能力远小于抗压能力,在受拉边缘处,混凝土产生塑性变形,当弯矩增加到使受拉边缘的应变达到混凝土的极限拉应变时,相应的边缘拉应力将达到混凝土的抗拉强度  $f_t$ ,拉应力图形接近矩形的曲线变化,压应力图形接近三角形,构件处于将裂未裂的极限状态,此即第Ⅰ阶段末,以  $I_a$  表示[见图 3-4(b)];相应构件所能承受的弯矩以  $M_{cr}$  表示。

②第Ⅱ阶段——带裂缝工作阶段。弯矩达到  $M_{cr}$  后,在纯弯区段内混凝土抗拉强度最弱的截面上将出现第一批裂缝。开裂部分混凝土承受的拉力将传给钢筋,使开裂截面的钢筋应力突然增大,截面的中和轴上移。随着弯矩的增大,截面应变增大;但截面应变分布基本符合平截面假定;而受压区混凝土则逐渐表现出塑性变形的特征,受压区的应力图形呈曲线形,如图 3-4(c)所示。

当荷载增加到某一数值时,纵向受拉钢筋开始屈服,钢筋应力达到其屈服强度  $f_y$ ,此即第Ⅱ阶段末,以  $II_a$  表示,如图 3-4(d)所示。

③第Ⅲ阶段——屈服阶段。当再继续增加荷载时,钢筋将继续变形而应力保持  $f_y$  数值不变。此时裂缝不断扩展且向上延伸,由于中和轴上升,受压区的高度很快减小,内力臂增大,截面弯矩仍然有所增长,但受压区混凝土的总压力  $D$  始终保持不变,与钢筋总拉力  $T$  保持平衡( $D=T$ )。此时受压混凝土边缘应变迅速增长,受压区的应力图形更趋丰满,如图 3-4(e)所示。

当弯矩增加到极限弯矩  $M_u$  时,称为第Ⅲ阶段末,以  $III_a$  表示。此时,由于钢筋塑性变形的发展,截面中和轴不断上升,混凝土受压区的高度不断减小。截面受压区边缘纤维应变增大到混凝土极限压应变  $\epsilon_{cu}$ ,构件即开始被破坏。其后,在试验时虽然构件仍可继续变形,但所承受的弯矩将有所降低,最后受压区混凝土被压碎甚至崩落而导致构件完全破坏,如图 3-4(f)所示。

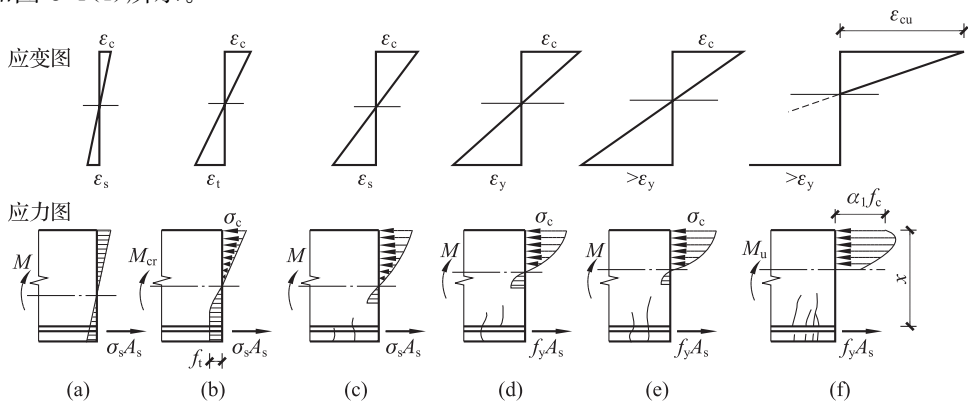


图 3-4 钢筋混凝土受弯构件工作的三个阶段  
(a)第Ⅰ阶段 (b)  $I_a$  (c)第Ⅱ阶段 (d)  $II_a$  (e)第Ⅲ阶段 (f)  $III_a$

在以上三个阶段中,第Ⅰ阶段末(I<sub>a</sub>),构件所能承受的抗裂弯矩  $M_{cr}$  是抗裂度计算的依据;第Ⅱ阶段是构件在荷载标准值作用下所处的阶段,它是构件正常使用极限状态中变形及裂缝宽度验算的依据;第Ⅲ阶段末(Ⅲ<sub>a</sub>),构件所能承受的破坏弯矩  $M_u$  是承载力极限状态计算的依据。

(2)钢筋混凝土梁正截面的破坏特征。在钢筋混凝土受弯构件中,钢筋用量的变化将影响构件的受力性能和破坏形态。钢筋用量的多少(配筋率  $\rho$ ),通过纵向受拉钢筋截面面积  $A_s$  与混凝土的有效截面面积  $A$  的比值来反映,即

$$\rho = \frac{A_s}{A} \quad (3-1)$$

①少筋梁的破坏特征。配筋率低于最小配筋率  $\rho_{\min}$  的梁称为少筋梁。这种梁的受拉区的混凝土一旦出现裂缝,受拉钢筋就会立即达到屈服强度,并可能进入强化阶段而破坏[见图 3-5(a)],这种少筋梁在破坏时,裂缝开展较宽,挠度增长较大,如图 3-6 中的曲线 A 所示。少筋梁破坏属于脆性破坏,而梁的承载力很低,所以设计时应避免采用少筋梁。

②适筋梁的破坏特征。适筋梁的破坏特征是受拉区的钢筋首先进入屈服阶段,再继续增加荷载后,受压区最外边缘的混凝土被压碎(达到其抗压极限强度),梁宣告破坏,其破坏形态如图 3-5(b)所示。在被压坏前,构件有显著的裂缝和挠度,即有明显的破坏预兆,这种破坏属于塑性破坏。在整个破坏过程中,挠度的增长相当大,如图 3-6 中的曲线 B 所示,此时钢筋和混凝土的材料性能基本上得到了充分利用,因而在设计中一般采用适筋梁。

③超筋梁的破坏特征。配筋率高于最大配筋率  $\rho_{\max}$  的梁称为超筋梁。若梁的配筋率过高,则在加载后,受拉钢筋的应力尚未达到屈服强度前,受压混凝土就已先达到极限压应变而被压坏,致使构件突然破坏[见图 3-5(c)]。超筋梁在破坏前没有明显预兆,如图 3-6 中的曲线 C 所示,这种破坏属于脆性破坏,虽然配置了很多受拉钢筋,但在超筋破坏中钢筋未能发挥应有的作用。因此,设计中必须避免采用超筋梁。

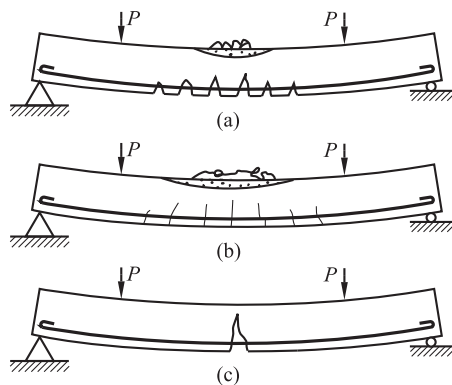


图 3-5 梁的破坏特征

(a)少筋梁 (b)适筋梁 (c)超筋梁

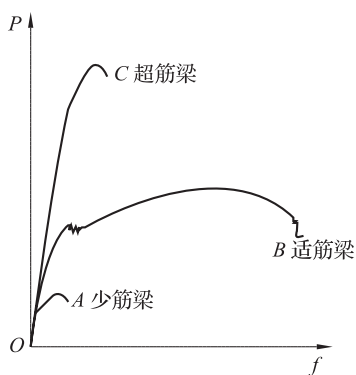


图 3-6 不同破坏形态下梁的  $P-f$  曲线

## 2. 受弯构件正截面的构造要求

(1)板的构造要求。板的构造要求包括板的厚度、板的支承长度和板的配筋要求。

①板的厚度。板的厚度应满足承载力、刚度和裂缝控制等方面的要求。一般板厚以 10 mm 为模数,按表 3-1 取值,同时不应小于表 3-2 规定的数值。

**表 3-1 板厚  $h$  的最小值**

板的支承情况	梁式板	双向板	悬臂板	无梁板	
				有柱帽	无柱帽
简支	$l/35$	$l/45$	$l/12$	$l/35$	$l/30$
连续	$l/40$	$l/50$			

注: $l$ 为板长。

**表 3-2 现浇钢筋混凝土板的最小厚度**

板的类别		最小厚度/mm
单向板	屋面板、民用建筑楼板	60
	工业建筑楼板	70
	行车道下的楼板	80
双向板		80
密肋楼盖	面板	50
	肋高	250
悬臂板(根部)	悬臂长度不大于 500 mm	60
	悬臂长度为 1 200 mm	100
无梁楼板		150
现浇空心楼盖		200

②板的支承长度。现浇板在砖墙上的支承长度一般不小于 120 mm,且应满足受力钢筋在支座内的锚固长度的要求。预制板的支承长度,在砖墙上不宜小于 100 mm,在钢筋混凝土梁上不宜小于 80 mm。

③板的配筋要求。板中受力钢筋的直径通常采用 6 mm、8 mm、10 mm 和 12 mm,其中现浇板的受力钢筋直径不宜小于 8 mm。板中受力钢筋的间距,当板厚不大于 150 mm 时,不宜大于 200 mm;当板厚大于 150 mm 时,不宜大于板厚的 1.5 倍,且不宜大于 250 mm。

分布钢筋的作用是将板面上的荷载更均匀地传给受力钢筋,同时在施工中可固定受力钢筋的位置。当按单向板设计时,应在垂直于受力的方向上布置分布钢筋,单位宽度上的配筋不宜小于单位宽度上的受力钢筋的 15%,且配筋率不宜小于 0.15%;分布钢筋的直径不宜小于 6 mm;间距不宜大于 250 mm;当集中荷载较大时,分布钢筋的配筋面积还应增加,且间距不宜大于 200 mm。

(2)梁的构造要求。梁的构造要求包括梁的截面要求和梁的配筋。

①梁的截面要求。梁有各种形状的截面,如矩形、T 形、倒 T 形、花篮形、I 形、空心形和双肢形等(见图 3-7)。梁的截面形式应根据不同的要求进行选择。在整体式结构中,为了便于施工,一般采用矩形截面和 T 形截面;在装配式楼盖中,为了搁置梁,可采用倒 T 形截面

或花篮形截面。

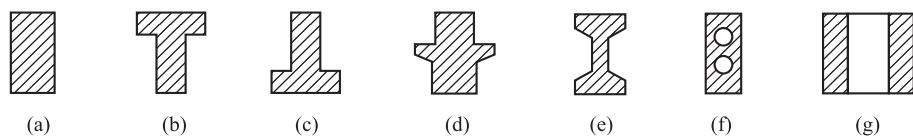


图 3-7 梁的截面形式

(a)矩形 (b)T形 (c)倒T形 (d)花篮形 (e)I形 (f)空心形 (g)双肢形

为了方便施工,在确定梁截面时应统一规格尺寸,一般按下列情况采用:

- 梁的截面宽度  $b$  一般宜采用 150 mm、180 mm、200 mm、220 mm、250 mm 和 330 mm。当  $b > 250$  mm 时,一般应以 50 mm 为模数。圈梁的截面宽度应按墙厚确定。
- 梁的截面高度  $h$  一般宜采用 250 mm、300 mm、350 mm、…、700 mm、800 mm、900 mm。当  $h > 800$  mm 时,一般应以 100 mm 为模数。梁的截面高度  $h$ ,如表 3-3 所示。

表 3-3 梁的截面高度  $h$

项次	构件种类	简支	两端连续	悬臂
1	整体肋形梁			
	次梁	$l/16$	$l/20$	$l/8$
	主梁	$l/12$	$l/15$	$l/6$
2	独立梁	$l/12$	$l/15$	$l/6$

注: $l$ 为梁的跨度。

在现浇钢筋混凝土结构中,主梁的截面宽度应不小于 220 mm,次梁的截面宽度应不小于 150 mm。当主梁下部钢筋为单层配置时,一般主梁至少应比次梁高出 50 mm,并将次梁下部的纵向钢筋设置在主梁下部纵向钢筋的上面,以保证将次梁的支座反力传给主梁。当主梁下部钢筋为双层配置,或附加横向钢筋采用吊筋时,主梁应比次梁高出 100 mm;当次梁的高度大于主梁时,应将次梁接近支座(主梁)附近设计成变截面,使主梁高出次梁不小于 50 mm;当主梁与次梁必须等高时,次梁底层钢筋应置于主梁底层钢筋上面并加强主梁在该处的箍筋或设置吊筋。

框架扁梁的截面高度除满足表 3-3 中规定的数值外,还应满足刚度要求,跨度较大时,截面高度  $h$  宜取较大值;跨度较小时,截面高度  $h$  宜取较小值。同时,框架扁梁的截面高度  $h$  不宜小于 2.5 倍板的厚度。

②梁的配筋。梁中一般布置四种钢筋,即纵向受力钢筋、架立钢筋、弯起钢筋和箍筋。

纵向受力钢筋用以承受弯矩,在梁的受拉区布置钢筋以承受拉力;有时由于弯矩较大,在梁的受压区也布置有钢筋,以协助混凝土共同承受压力。

架立钢筋布置于梁的受压区,与纵向受力钢筋平行,以将箍筋固定在正确的位置,承受混凝土收缩及温度变化所产生的拉力。当受压区有受压纵向钢筋时,受压钢筋可兼作架立钢筋,如图 3-8 所示。当梁的跨度  $l < 4$  m 时,架立钢筋的直径不宜小于 8 mm;当  $4 \text{ m} \leq l \leq 6 \text{ m}$  时,架立钢筋的直径不应小于 10 mm;当  $l > 6$  m 时,架立钢筋的直径不宜小于 12 mm。

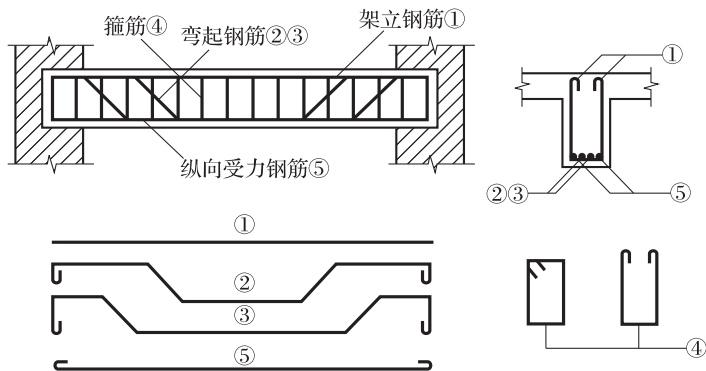


图 3-8 简支梁的钢筋布置

弯起钢筋是将纵向受力钢筋弯起而成型的,用以承受弯起区段截面的剪力。钢筋弯起后其顶部的水平段可以承受支座处的负弯矩。

箍筋用以承受梁的剪力,联系梁内的受拉及受压纵向钢筋并使其共同工作;此外,还能固定纵向钢筋的位置,便于浇筑混凝土。

箍筋的形式有开口式和封闭式两种,一般情况下均采用封闭式箍筋。为使箍筋更好地发挥作用,应将其端部锚固在受压区内,且端头应做成  $135^\circ$  弯钩,弯钩端部平直段的长度不应小于  $5d$  ( $d$  为箍筋直径)和  $50\text{ mm}$ 。

箍筋的肢数一般有单肢、双肢和四肢,通常采用双肢箍筋。当梁宽  $b \geq 400\text{ mm}$  且一层内纵向受压钢筋多于 3 根时,或当梁宽  $b < 400\text{ mm}$  但一层内纵向受压钢筋多于 4 根时,宜采用四肢箍筋。只有当梁宽  $b \leq 150\text{ mm}$  时,才采用单肢箍筋。

箍筋的直径与梁高  $h$  有关,为了保证钢筋骨架有足够的刚度,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定:当  $h > 800\text{ mm}$  时,梁的箍筋直径不宜小于  $8\text{ mm}$ ;当  $h \leq 800\text{ mm}$  时,梁的箍筋直径不宜小于  $6\text{ mm}$ 。梁中配有计算需要的纵向受压钢筋时,箍筋直径尚不应小于  $d/4$  ( $d$  为受压钢筋最大直径)。

支承在砌体结构上的钢筋混凝土独立梁,在纵向受力钢筋的锚固长度  $l_{as}$  范围内应设置不少于 2 个箍筋,当梁与混凝土梁或柱整体连接时,支座内可不设置箍筋。

梁中箍筋间距除应满足计算要求外,还应符合最大间距的要求。为防止箍筋间距过大,出现不与箍筋相交的斜裂缝,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定,梁中箍筋的最大间距宜符合表 3-4 的规定。

表 3-4 梁中箍筋的最大间距

单位: mm

梁高 $h$	$150 < h \leq 300$	$300 < h \leq 500$	$500 < h \leq 800$	$h > 800$
$V \leq 0.7f_tbh_0 + 0.05N_{p0}$	200	300	350	400
$V > 0.7f_tbh_0 + 0.05N_{p0}$	150	200	250	300

注:  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值;  $b$  为矩形截面宽度, T 形、I 形截面的腹板宽度;  $h_0$  为截面有效高度;  $N_{p0}$  为预应力构件混凝土法向预应力等于零时的预加力。

当梁中配有按计算需要的纵向受压钢筋时,箍筋应做成封闭式,箍筋的间距不应大于



15d( $d$ 为纵向受压钢筋的最小直径),并不应大于400mm。当一层内的纵向受压钢筋多于5根且直径大于18mm时,箍筋的间距不应大于10d。当梁的宽度 $b > 400$ mm且一层内的纵向受压钢筋多于3根,或当梁的宽度不大于400mm但一层内的纵向受压钢筋多于4根时,应设置复合箍筋。

(3)混凝土保护层及截面有效高度。为了保护钢筋免遭锈蚀,保证钢筋与混凝土间有足够的黏结强度及满足耐火、耐久性要求,受力钢筋的表面必须有足够厚度的混凝土保护层。设计使用年限为50年的混凝土结构,最外层钢筋的保护层厚度应符合表3-5的规定;设计使用年限为100年的混凝土结构,最外层钢筋的保护层厚度不应小于表3-5中数值的1.4倍。

表 3-5 混凝土保护层的最小厚度  $c$ 

单位: mm

环境类别	板、墙、壳	梁、柱、杆
一	15	20
二 a	20	25
二 b	25	35
三 a	30	40
三 b	40	50

注1:混凝土强度等级不大于C25时,表中保护层厚度数值应增加5mm。

注2:钢筋混凝土基础宜设置混凝土垫层,基础中钢筋的混凝土保护层厚度应从垫层顶面算起,且不应小于40mm。

为了便于浇筑混凝土,保证混凝土有良好的密实性,对采用绑扎骨架的钢筋混凝土梁,纵向钢筋的净间距(相邻钢筋之间水平方向的空间)应满足图3-9所示的要求,其中 $d$ 为钢筋直径。当截面下部的纵向钢筋配置为两排、三排时,钢筋必须上下对齐,第三排钢筋水平方向的中距(相邻钢筋形心之间的距离)应比下面两排的中距大一倍。

截面有效高度 $h_0$ 是指受拉钢筋的重心至混凝土受压边缘的垂直距离,即

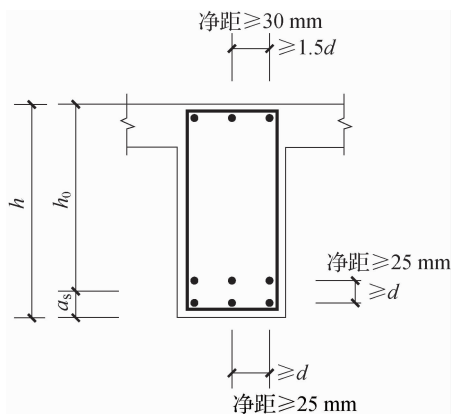


图 3-9 纵向受力钢筋的间距、保护层及有效高度

$$h_0 = h - a_s \quad (3-2)$$

式中, $a_s$ 为受拉钢筋重心至受拉混凝土边缘的垂直距离。在梁中,当混凝土强度等级不小于C25时,可近似取 $h_0 = h - 35$ mm(钢筋一排放置), $h_0 = h - 55$ mm(钢筋两排放置);在板中,取 $h_0 = h - 20$ mm。

### 3. 受弯构件正截面承载力计算的基本原则

(1)基本假定。

- ①截面应变保持平面。
- ②不考虑混凝土的抗拉强度。

③混凝土受压的应力与应变关系(见图 3-10)按下列规定取用:

当  $\epsilon_c \leq \epsilon_0$  时

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] \quad (3-3)$$

当  $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$  时

$$\sigma_c = f_c \quad (3-4)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50) \quad (3-5)$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (3-6)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (3-7)$$

式中,  $\sigma_c$  为混凝土压应变为  $\epsilon_c$  时的混凝土压应力;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $\epsilon_0$  为混凝土压应力刚达到  $f_c$  时的混凝土压应变, 当计算的  $\epsilon_0$  值小于 0.002 时, 取为 0.002;  $\epsilon_{cu}$  为正截面的混凝土极限压应变, 当处于非均匀受压且按式(3-7)计算的  $\epsilon_{cu}$  值大于 0.0033 时, 取为 0.0033, 当处于轴心受压时取为  $\epsilon_0$ ;  $f_{cu,k}$  为混凝土立方体抗压强度标准值;  $n$  为系数, 当计算的  $n$  值大于 2.0 时, 取为 2.0。

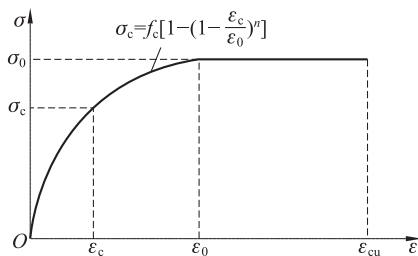


图 3-10 混凝土受压的应力-应变曲线

④纵向受拉钢筋的极限拉应变取为 0.01。

⑤纵向钢筋的应力取钢筋应变与其弹性模量的乘积, 但其值应符合下列要求:

$$-f'_y \leq \sigma_{si} \leq f_y \quad (3-8)$$

$$\sigma_{p0i} - f'_{py} \leq \sigma_{pi} \leq f_{py} \quad (3-9)$$

式中,  $\sigma_{si}$ 、 $\sigma_{pi}$  分别为第  $i$  层纵向普通钢筋、预应力筋的应力, 正值代表拉应力, 负值代表压应力;  $\sigma_{p0i}$  为第  $i$  层纵向预应力筋截面重心处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力;  $f_y$ 、 $f_{py}$  分别为普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值(见附表 1);  $f'_y$ 、 $f'_{py}$  分别为普通钢筋、预应力筋抗压强度设计值(见附表 1)。

(2) 等效矩形应力图。按上述假定, 在进行受弯构件正截面承载力计算时, 为简化计算, 受压区混凝土的曲线应力图形可采用等效矩形应力图形来代替, 如图 3-11 所示。其代换原则是: 保证受压区混凝土压应力合力的大小相等, 作用点的位置保持不变。

等效矩形应力图形的应力值取值为  $\alpha_1 f_c$ , 其换算受压区高度取值为  $x$ , 实际受压区高度为  $x_c$ , 令  $x = \beta_1 x_c$ 。根据等效原则, 通过计算统计分析, 系数  $\alpha_1$  和系数  $\beta_1$  按表 3-6 取值。



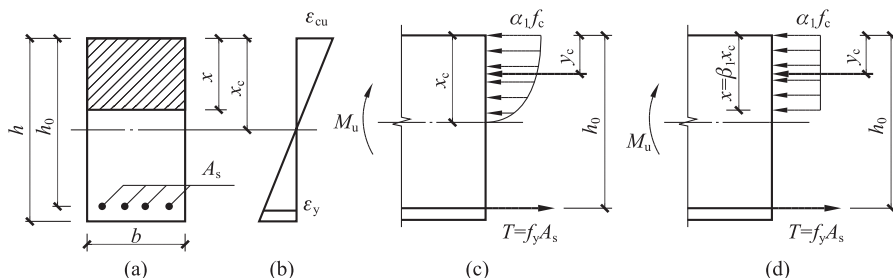


图 3-11 等效矩形应力图形代换曲线应力图形

(a) 截面 (b) 应变分布 (c) 曲线应力分布 (d) 等效矩形应力分布

 表 3-6 受压混凝土的简化应力图形系数  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  值

混凝土强度等级	≤C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$\alpha_1$	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94
$\beta_1$	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74

(3) 适筋梁的界限条件。

 ① 相对界限受压区高度  $\xi_b$  和最大配筋率  $\rho_{\max}$ 。

相对界限受压区高度  $\xi_b$  是指适筋梁在界限破坏时，等效压区高度与截面高度之比  $x/h_0$ 。界限破坏的特征是受拉钢筋屈服的同时，受压区混凝土边缘达到极限压应变。

破坏时的相对受压区高度  $\xi$  为

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{\beta_1 x_c}{h_0} \quad (3-10)$$

根据平截面假定，相对界限受压区高度  $\xi_b$  可用简单的几何关系求出。

对有屈服点普通钢筋有

$$\xi_b = \frac{x_b}{h_0} = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{\epsilon_{cu} E_s}} \quad (3-11)$$

对无屈服点普通钢筋有

$$\xi_b = \frac{x_b}{h_0} = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\epsilon_{cu}} + \frac{f_y}{\epsilon_{cu} E_s}} \quad (3-12)$$

式中， $x_b$  为界限受压区高度； $E_s$  为钢筋弹性模量；其他符号含义同前。

常用钢筋所对应的  $\xi_b$  值如表 3-7 所示。

 表 3-7 常用钢筋相对界限受压区高度  $\xi_b$  的取值

钢筋种类	混凝土强度等级			
	≤C50	C60	C70	C80
HRB335	0.550 (0.399)	0.531 (0.390)	0.512 (0.381)	0.493 (0.371)

(续表)

钢筋种类	混凝土强度等级			
	≤C50	C60	C70	C80
HRB400	0.518	0.499	0.481	0.463
RRB400	(0.384)	(0.374)	(0.365)	(0.356)

注:括号内数值为系数  $\alpha_{s,\max} \cdot \alpha_{s,\max} = \xi_b (1 - 0.5\xi_b)$ 。

如图 3-11 所示,根据截面上力的平衡条件,有  $\alpha_1 f_c b x = f_y A_s$ ,即

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{A_s}{bh_0} \frac{f_y}{\alpha_1 f_c} = \rho \frac{f_y}{\alpha_1 f_c} \quad (3-13)$$

$$\rho = \xi \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (3-14)$$

由式(3-13)可知,受压区高度  $x$  随  $\rho$  的增大而增大,即相对受压区高度  $\xi$  也在增大,当  $\xi$  达到适筋梁的  $\xi_b$  时,相应地  $\rho$  也达到界限配筋率  $\rho_b$ ,则

$$\rho_b = \rho_{\max} = \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (3-15)$$

由式(3-15)可知,最大配筋率  $\rho_{\max}$  与  $\xi_b$  有直接关系,其量值仅取决于结构构件材料的种类和强度等级。

②最小配筋率  $\rho_{\min}$ 。由于少筋梁属于“一裂即坏”的截面,因而在建筑结构中不允许采用少筋截面。原则上要求配有最小配筋率  $\rho_{\min}$  的钢筋混凝土梁在破坏时所能承担的弯矩  $M_u$  等同于相同截面的素混凝土受弯构件所能承担的弯矩  $M_{cr}$ ,即满足  $M_u = M_{cr}$ 。钢筋混凝土结构构件中纵向受力钢筋的最小配筋率  $\rho_{\min}$  不应小于表 3-8 规定的数值。

表 3-8 纵向受力钢筋的最小配筋率  $\rho_{\min}$

受力类型		最小配筋率 $\rho_{\min}/\%$	
受压构件	全部纵向钢筋	强度等级 500 MPa	0.50
		强度等级 400 MPa	0.55
		强度等级 300 MPa, 335 MPa	0.60
	一侧纵向钢筋	0.20	
受弯构件、偏心受拉、轴心受拉构件一侧的受拉钢筋		0.20 和 $45f_t/f_y$ 中的较大值	

注 1:受压构件全部纵向钢筋最小配筋率,当采用 C60 以上强度等级的混凝土时,应按表中规定增加 0.10。

注 2:板类受弯构件(不包括悬臂板)的受拉钢筋,当采用强度等级 400 MPa、500 MPa 的钢筋时,其最小配筋率应允许采用 0.15 和  $45f_t/f_y$  中的较大值。

注 3:偏心受拉构件中的受压钢筋,应按受压构件一侧纵向钢筋考虑。

注 4:受压构件的全部纵向钢筋和一侧纵向钢筋的配筋率及轴心受拉构件和小偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率均应按构件的全截面面积计算。

注 5:受弯构件、大偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按全截面面积扣除受压翼缘面积后的截面面积计算。

注 6:当钢筋沿构件截面周边布置时,“一侧纵向钢筋”是指沿受力方向两个对边中一边布置的纵向钢筋。

框架梁的纵向受拉钢筋的配筋率不应小于表 3-9 规定的数值。

表 3-9 框架梁纵向受拉钢筋最小配筋率  $\rho_{\min}$

单位: %

抗震等级	梁中位置	
	支 座	跨 中
一级	0.40 和 $80f_t/f_y$ 中的较大值	0.30 和 $65f_t/f_y$ 中的较大值
二级	0.30 和 $65f_t/f_y$ 中的较大值	0.25 和 $55f_t/f_y$ 中的较大值
三、四级	0.25 和 $55f_t/f_y$ 中的较大值	0.20 和 $45f_t/f_y$ 中的较大值

#### 4. 单筋矩形截面受弯构件正截面计算

(1) 基本公式及适用条件。

① 基本公式。按图 3-12 所示的计算应力图形建立平衡条件, 同时从满足承载力极限状态出发, 应满足  $M \leq M_u$ 。故单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算的基本公式为

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s \quad (3-16)$$

$$M \leq M_u = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-17)$$

或

$$M \leq M_u = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-18)$$

式中,  $M$  为作用在截面上的弯矩设计值;  $M_u$  为截面破坏时的极限弯矩;  $\alpha_1$  为系数, 当混凝土强度等级不大于 C50 时取 1.00, 当混凝土等级为 C80 时取 0.94, 中间按线性内插法取用;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $b$  为截面宽度;  $x$  为混凝土受压区高度;  $h_0$  为截面有效高度;  $f_y$  为钢筋抗拉强度设计值;  $A_s$  为纵向受拉钢筋截面面积。

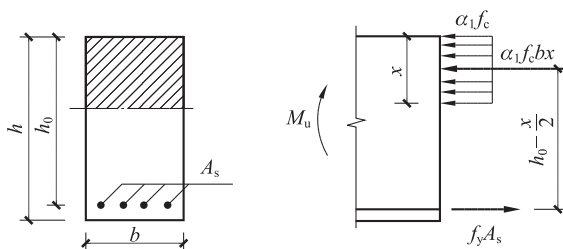


图 3-12 单筋矩形截面受弯构件正截面计算应力图形

② 适用条件。分为两种情况考虑。

- 为防止发生超筋脆性破坏, 应满足以下条件:

$$\rho \leq \rho_{\max} = \epsilon_b \alpha_1 \frac{f_c}{f_y} \quad (3-19)$$

或

$$x \leq x_b = \xi_b h_0 \quad (3-20)$$

或

$$M \leq M_{u, \max} = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b) \quad (3-21)$$

式中,  $M_{u, \max}$  是适筋梁所能承受的最大弯矩。



从式(3-21)可知,  $M_{u, \max}$  是一个定值, 只取决于截面尺寸、材料种类等因素, 与钢筋的数量无关。

- 为防止发生少筋脆性破坏, 应满足以下条件:

$$\rho \geq \rho_{\min} \quad (3-22)$$

或

$$45 \frac{f_t}{f_y} bh \geq A_s \geq \rho_{\min} bh \quad (3-23)$$

(2) 截面设计和截面复核。

① 截面设计。在进行截面设计时, 通常已知弯矩设计值  $M$ , 截面尺寸  $b, h$ , 材料强度设计值  $f_c$  和  $f_y$ , 要求计算截面所需配置的纵向受拉钢筋的截面面积  $A_s$ 。

一般现浇构件宜采用的混凝土强度等级为 C20、C25、C30, 对于预制构件, 为了减轻自重可适当提高混凝土强度等级。钢筋宜采用 HRB400 级和 HRB335 级。

关于截面尺寸的确定, 可按结构构件的高跨比来估计。

当材料的截面尺寸确定后, 基本公式中有两个未知数  $x$  和  $A_s$ , 通过解方程即可求得所需钢筋截面面积  $A_s$ 。

按基本公式求解, 一般必须解二次联立方程, 因此可根据基本公式编制计算表格。

由于相对受压区高度  $\xi = x/h_0$ , 则  $x = \xi h_0$ 。

由式(3-17)得

$$M = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - 0.5\xi)$$

令  $\alpha_s = \xi(1 - 0.5\xi)$ , 则

$$M = \alpha_s \alpha_1 f_c b h_0^2$$

由式(3-18)得

$$M = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = f_y A_s h_0 (1 - 0.5\xi)$$

令  $\gamma_s = 1 - 0.5\xi$ , 则

$$M = f_y A_s \gamma_s h_0 \quad (3-24)$$

由式(3-16)得

$$A_s = \frac{\alpha_1 f_c b x}{f_y} = \xi b h_0 \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (3-25)$$

由式(3-24)得

$$A_s = \frac{M}{f_y \gamma_s h_0} \quad (3-26)$$

式中,  $\alpha_s$  为截面抵抗矩系数(见附表 2), 反映截面抵抗矩的相对大小, 在适筋梁范围内,  $\rho$  越大,  $\alpha_s$  值越大,  $M_u$  值也越高;  $\gamma_s$  为截面内力臂系数(见附表 2), 是截面内力臂与有效高度的比值,  $\xi$  越大,  $\gamma_s$  越小。

显然,  $\alpha_s, \gamma_s$  均为相对受压区高度  $\xi$  的函数, 利用  $\alpha_s, \gamma_s$  与  $\xi$  的关系, 预先编制成计算表格(见附表 2)供设计时查用。当已知  $\alpha_s, \gamma_s, \xi$  中的某一个值时, 就可查出相对应的另外两个系数值, 也可以直接用式(3-27)和式(3-28)计算。

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} \quad (3-27)$$

$$\gamma_s = \frac{1 + \sqrt{1 - 2\alpha_s}}{2} \quad (3-28)$$

②截面复核。截面复核时,一般是在材料强度、截面尺寸及配筋都已知的情况下,计算截面的极限承载力设计值  $M_u$ ,并与截面所需承受的设计弯矩  $M$  进行比较。当  $M_u \geq M$  时,截面是安全的。

对于  $\xi > \xi_b$  的超筋构件,应取  $\xi = \xi_b$ ,  $M_{u,\max}$  的计算公式为

$$M_{u,\max} = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b) \quad (3-29)$$

(3)单筋矩形截面受弯构件正截面计算示例。

**【例 3-1】** 已知矩形截面所承受的弯矩设计值  $M = 165 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,混凝土采用 C25,钢筋选用 HRB400 级,环境类别为一类,试设计该矩形截面。

**【解】** 本题属于设计截面题,要求选用材料、确定截面尺寸及配置钢筋。

①选用材料。混凝土强度等级采用 C25,查附表 3 可知  $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2$ 。采用 HRB400 级钢筋,查附表 4 可知  $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$ 。

②确定截面尺寸。选取  $\rho = 1\%$ ,假定  $b = 250 \text{ mm}$ ,则

$$h_0 = 1.05 \sqrt{\frac{M}{\rho f_y b}} = 1.05 \times \sqrt{\frac{165 \times 10^6}{0.01 \times 360 \times 250}} = 450 (\text{mm})$$

因为  $\rho$  值不大,假定布置一层钢筋,混凝土保护层厚度  $c = 25 \text{ mm}$ ,  $a_s = 35 \text{ mm}$ ,则  $h = 450 + 35 = 485 \text{ mm}$ ,实际取  $h = 500 \text{ mm}$ ,此时  $b/h = 250/500 = 1/2$ ,合适。于是,截面实际有效高度  $h_0 = 500 - 35 = 465 \text{ mm}$ 。

③计算钢筋截面面积和选择钢筋。

$$M = \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2})$$

$$165 \times 10^6 = 1.0 \times 11.9 \times 250 x (465 - 0.5x)$$

$$x^2 - 930x + 110\,924 = 0$$

$$x = \frac{930}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{930}{2}\right)^2 - 110\,924} = 465 \pm 324.5 (\text{mm})$$

$$x = 140.5 \text{ mm 或 } x = 789.5 \text{ mm}$$

因为  $x$  不可能大于  $h$ ,所以不应取  $x = 789.5 \text{ mm}$ ,而应取  $x = 140.5 \text{ mm} < 0.518h_0 = 0.518 \times 465 = 241 \text{ mm}$ 。将  $x = 140.5 \text{ mm}$  代入式(3-16)得  $1.0 \times 11.9 \times 250 \times 140.5 = 360A_s$ ,求得  $A_s = 1\,161 \text{ mm}^2$ 。选用  $4\Phi 20$ ,查附表 5 得  $A_s = 1\,256 \text{ mm}^2$ 。查附表 6 可知  $f_t = 1.27 \text{ N/mm}^2$ 。

$$\rho_{\min} = 0.45 \frac{f_t}{f_y} \times 100\% = 0.45 \times \frac{1.27}{360} \times 100\% = 0.16\% < 0.20\%, \text{取 } \rho_{\min} = 0.20\%。$$

$$\rho_1 = \frac{1\,256}{250 \times 500} \times 100\% = 1.0\% > \rho_{\min} = 0.20\%$$

故所设计的矩形截面符合要求。钢筋布置如图 3-13 所示。

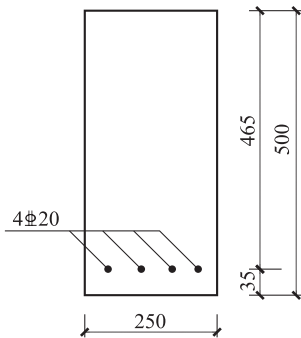


图 3-13 例 3-1 图

**【例 3-2】** 已知一截面尺寸为  $bh = 200 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$  的钢筋混凝土梁, 环境类别为二 a 类。采用 C25 混凝土和 HRB335 钢筋, 钢筋布置如图 3-14 所示, 该梁承受的弯矩设计值  $M = 62 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 试复核其正截面是否安全。

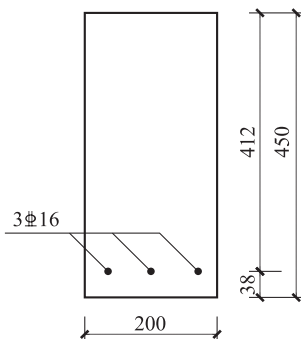


图 3-14 例 3-2 图

**【解】** 查附表 3 可知  $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2$ , 查附表 4 可知  $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ , 查附表 5 可知  $A_s = 603 \text{ mm}^2$ 。

混凝土保护层的厚度为 30 mm, 钢筋净间距  $s_n = \frac{200 - 2 \times 30 - 3 \times 16}{2} = 46 \text{ mm} > d = 16 \text{ mm}$  (符合要求)。  $h_0 = 450 - 30 - 16 \div 2 = 412 \text{ mm}$ 。

由式(3-16)可得

$$x = \frac{300 \times 603}{1.0 \times 11.9 \times 200} = 76 (\text{mm}) < 0.550h_0 = 0.550 \times 412 = 226.6 (\text{mm}), \text{符合要求。}$$

将  $x$  值代入式(3-17)得

$$\begin{aligned} M_u &= 1.0 \times 11.9 \times 200 \times 76 \times (412 - 0.5 \times 76) \\ &= 67.6 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm}) = 67.6 (\text{kN} \cdot \text{m}) > M = 62 (\text{kN} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

$M_u$  略大于  $M$ , 表明该梁正截面的设计是安全和经济的。

### 5. 双筋矩形截面受弯构件正截面计算

在梁的受拉区和受压区同时配置纵向受力钢筋的截面称为双筋截面。在正截面抗弯中, 利用钢筋承受压力是不经济的, 故应尽量少用双筋截面。

(1) 在下述情况下可采用双筋截面:

①弯矩很大,按单筋矩形截面计算所得的  $\xi > \xi_b$ ,而梁的截面尺寸和混凝土的强度又由于种种原因不能再增大和提高时。

②由于荷载有多种组合,截面可能承受变号弯矩时。

③在抗震结构中为提高截面的延性,要求框架梁必须配置一定比例的受压钢筋时。

(2)基本公式。双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算如图 3-15 所示,由平衡条件可得

$$\sum N = 0 \quad \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s = f_y A_s \quad (3-30)$$

$$\sum M = 0 \quad M \leq \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-31)$$

式中,  $f'_y$  为钢筋的抗压强度设计值;  $A'_s$  为受压钢筋的截面面积;  $a'_s$  为受压钢筋的合力点到截面受压区外边缘的距离;  $A_s$  为受拉钢筋的截面面积,  $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ ; 其余符号含义同前。

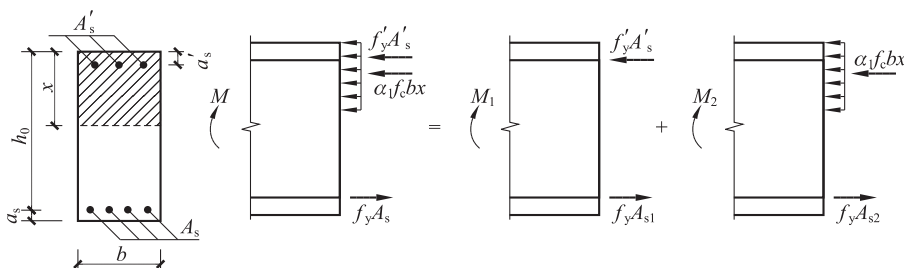


图 3-15 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算

式(3-31)中,若取

$$M_1 = f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-32)$$

$$M_2 = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-33)$$

则得

$$M \leq M_1 + M_2 \quad (3-34)$$

式中,  $M_1$  为由受压钢筋的压力  $f'_y A'_s$  和相应部分受拉钢筋的拉力  $f_y A_{s1}$  所组成的内力矩;  $M_2$  为由受压区混凝土的压力和余下的受拉钢筋的拉力  $f_y A_{s2}$  所组成的内力矩。

式(3-30)、式(3-31)必须满足下列适用条件:

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (3-35)$$

$$x \geq 2a'_s \quad (3-36)$$

满足式(3-35)的条件是为了防止双筋梁发生超筋破坏;满足式(3-36)的条件是为了保证受压钢筋在构件破坏时达到屈服强度。

(3)截面设计与截面复核。

①截面设计。在双筋截面配筋计算中,可能遇到下列两种情况:

情况一:已知弯矩设计值  $M$ ,材料强度  $f_y$ 、 $f'_y$ 、 $f_c$ ,截面尺寸  $b$ 、 $h$ ,求受拉钢筋截面面积  $A_s$  和受压钢筋截面面积  $A'_s$ 。

在此种情况下,两个基本公式[式(3-30)和式(3-31)]中有三个未知数  $x$ 、 $A_s$ 、 $A'_s$ ,需要增加一个条件才能求解。为节约钢材,应充分利用混凝土强度,故令  $x = \xi_b h_0$ ,代入式(3-31)解得

$$A'_s = \frac{M - \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b)}{f_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-37)$$

代入式(3-30)解得

$$A_s = \frac{\alpha_1 f_c b h_0 \xi_b + f'_y A'_s}{f_y} \quad (3-38)$$

情况二:已知弯矩设计值  $M$ ,材料强度值  $f_c$ 、 $f_y$ 、 $f'_y$ 、截面尺寸  $b$ 、 $h$  及受压钢筋截面面积  $A'_s$ ,求受拉钢筋截面面积  $A_s$ 。

在此种情况下,受压钢筋截面面积通常是根椐变号弯矩或构造上的需要来确定。因此,应充分利用受压钢筋的强度,以使总用钢量最小。这时,基本公式中只剩下  $A_s$  及  $x$  两个未知数,既可通过解方程求得,也可根据公式分解,用查表法求得,具体步骤如下:

- 查表,计算各类参数。
- 用式(3-32)求得  $M_1 = f'_y A'_s (h_0 - a'_s)$ 。
- $M_2 = M - M_1$ 。
- $\alpha_{s2} = \frac{M_2}{\alpha_1 f_c b h_0^2}$ 。
- 查附表 2 得  $\xi_s$ 。
- 若求得  $2a_s \leq x = \xi_s h_0 \leq \xi_b h_0$ ,则得

$$A_s = \frac{\alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s}{f_y}$$

若出现  $x < 2a_s$  的情况,则得

$$A_s = \frac{M}{f_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-39)$$

若求得的  $\xi > \xi_b$ ,则说明给定的  $A'_s$  太少,不符合要求,这时应将  $A'_s$  视为未知值,按情况一的方法计算  $A_s$  及  $A'_s$ 。

②截面复核。已知材料的强度设计值  $f_c$ 、 $f_y$ 、 $f'_y$ ,截面尺寸  $b$ 、 $h$ ,受力钢筋截面面积  $A_s$  及  $A'_s$ ,求该截面的受弯承载力。

双筋矩形截面的极限承载力  $M = M_1 + M_2$ ,其中受压钢筋的承载力  $M_1$  可由式(3-32)求出。然后可由式(3-30)求出受压区高度  $x$ ,并根据  $x$  求出单筋梁部分的极限承载力  $M_2$ 。

如果  $x > \xi_b h_0$ ,取  $x = \xi_b h_0$ ,则  $M_2 = \alpha_1 f_c b \xi_b h_0^2 (1 - 0.5 \xi_b)$ 。当  $x < 2a'_s$  时,应设  $x = 2a'_s$ ,由式(3-40)统一计算截面极限承载力。

$$M = f_y A_s (h_0 - a'_s) \quad (3-40)$$

(4)双筋矩形截面受弯构件正截面计算示例。

**【例 3-3】**某矩形截面  $bh = 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,承受弯矩设计值  $M = 180 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,混凝土强度等级为 C25 ( $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2$ ),用 HRB400 钢筋配筋 ( $f_y = f'_y = 360 \text{ N/mm}^2$ ),环境类别为二 a 类,求所需钢筋的截面面积。

**【解】**①检查是否需要采用双筋截面。假定受拉钢筋为两层,则  $h_0 = 400 - 65 = 335 \text{ mm}$ 。若为单筋截面,则其所能承受的最大弯矩设计值为

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \xi_b (1 - 0.5 \xi_b) \alpha_1 f_c b h_0^2 = 0.384 \times 1.0 \times 11.9 \times 200 \times 335^2 \\ &= 102.6 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm}) = 102.6 (\text{kN} \cdot \text{m}) < M = 180 (\text{kN} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

计算结果表明,必须设计成双筋截面。



②求  $A'_s$ 。假定受压钢筋为一层,则  $a'_s=40$  mm。

$$A'_s = \frac{M - 0.384\alpha_1 f_c b h_0^2}{f_y (h_0 - a'_s)} = \frac{180 \times 10^6 - 102.6 \times 10^6}{360 \times (335 - 40)} = 729 (\text{mm}^2)$$

③求  $A_s$ 。

$$\begin{aligned} A_s &= 0.518 \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} b h_0 + \frac{f_y'}{f_y} A'_s \\ &= 0.518 \times \frac{1.0 \times 11.9}{360} \times 200 \times 335 + \frac{360}{360} \times 729 = 1\ 876 (\text{mm}^2) \end{aligned}$$

④选择钢筋。受拉钢筋选用  $3\Phi 22 + 3\Phi 20$ ,  $A_s = 2\ 081$  mm<sup>2</sup>; 受压钢筋选用  $2\Phi 22$ ,  $A'_s = 760$  mm<sup>2</sup>。钢筋布置如图 3-16 所示。

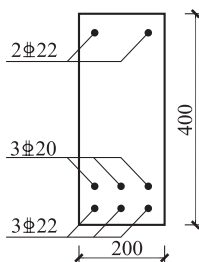


图 3-16 例 3-3 图

## 6. T 形截面受弯构件正截面计算

受弯构件产生裂缝后,受拉区混凝土因开裂而退出工作,因拉力全部由受拉钢筋承担,故可将受拉区混凝土的一部分挖去,并把原有的纵向受拉钢筋集中布置,形成图 3-17 所示的 T 形截面。该 T 形截面的正截面承载力不但与原有截面承载力相同,而且节约了混凝土并减轻了自重。

T 形截面由梁肋 ( $bh$ ) 和挑出翼缘 ( $b'_f - b$ )  $h'_f$  两部分组成。梁肋的宽度为  $b$ , 受压翼缘的宽度为  $b'_f$ , 受压翼缘高度为  $h'_f$ , 截面全高度为  $h$ 。

由于 T 形截面受力比矩形截面合理,因而在工程中应用十分广泛,一般用于独立的 T 形截面梁、工字形截面梁(如吊车梁、屋面梁等),整体现浇肋形楼盖中的主、次梁,槽形板、预制空心板等受弯构件。

T 形截面的受压翼缘的宽度越大,截面受弯承载力也越高,因为  $b'_f$  增大可使受压区高度  $x$  减小,内力臂增大。但试验表明,与肋部共同工作的翼缘宽度是有限的,沿翼缘宽度上的压应力分布是不均匀的,距肋部越远,翼缘的压应力越小,如图 3-18(a)、(c)所示。为简化计算,在设计中假定距肋部一定范围内的翼缘全部参与工作,且在此宽度范围内压应力分布均匀,此宽度称为翼缘的计算宽度  $b'_f$ ,如图 3-18(b)、(d)所示,其取值如表 3-10 所示。

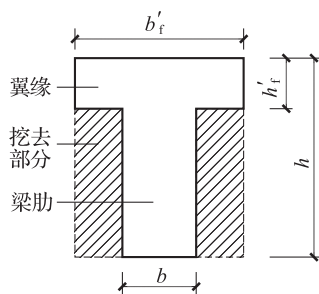


图 3-17 T 形截面

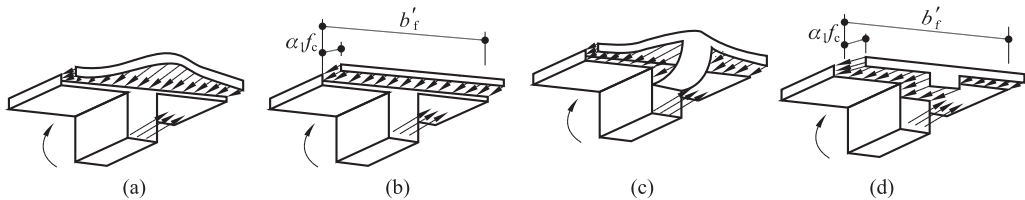


图 3-18 T 形截面应力分布和翼缘计算宽度  $b'_f$

表 3-10 受弯构件受压区有效翼缘计算宽度  $b'_f$

情 况	T 形、I 形截面		倒 L 形截面	
	肋形梁(板)	独立梁	肋形梁(板)	
1	按计算跨度 $l_0$ 考虑	$l_0/3$	$l_0/3$	$l_0/6$
2	按梁(肋)净距 $s_n$ 考虑	$b+s_n$	—	$b+s_n/2$
3	按翼缘高度 $h'_f$ 考虑	$b+12h'_f$	$b$	$b+5h'_f$

注 1:  $b$  为梁的腹板宽度。

注 2: 当肋形梁在梁跨内设有间距小于纵肋间距的横肋时, 可不考虑表中情况 3 的规定。

注 3: 加腋的 T 形、I 形和倒 L 形截面, 当受压区加腋的高度  $h_n \geq h'_f$  且加腋的宽度  $b_n \leq 3h_n$  时, 其翼缘计算宽度可按表中情况 3 的规定分别增加  $2b_n$  (T 形、I 形截面) 和  $b_n$  (倒 L 形截面)。

注 4: 独立梁受压区的翼缘板在荷载作用下经验算沿纵肋方向可能产生裂缝时, 其计算宽度应取腹板宽度  $b$ 。

(1) T 形截面的分类及其判别。T 形截面梁, 根据其受力后受压区高度  $x$  的大小, 可分为两类 T 形截面。

① 第一类 T 形截面,  $x \leq h'_f$ , 中和轴在翼缘内, 受压区的形状为矩形, 如图 3-19(a) 所示。

② 第二类 T 形截面,  $x > h'_f$ , 中和轴在梁肋内, 受压区的形状为 T 形, 如图 3-19(b) 所示。

两类 T 形截面的界限情况为  $x = h'_f$ , 按照图 3-20 所示, 由平衡条件可得

$$\alpha_1 f_c b'_f h'_f = f_y A_s^* \quad (3-41)$$

$$M_u^* = \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (3-42)$$

式中,  $A_s^*$  为当  $x = h'_f$  时, 受压翼缘相对应的受拉钢筋截面面积;  $M_u^*$  为当  $x = h'_f$  时, 截面所承受的弯矩设计值。

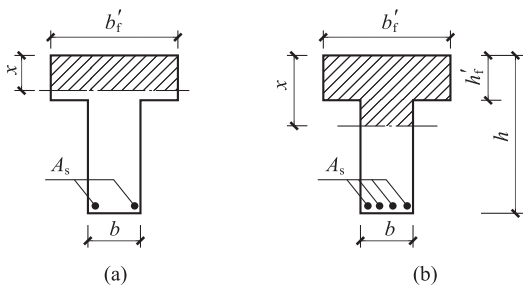


图 3-19 两类 T 形截面

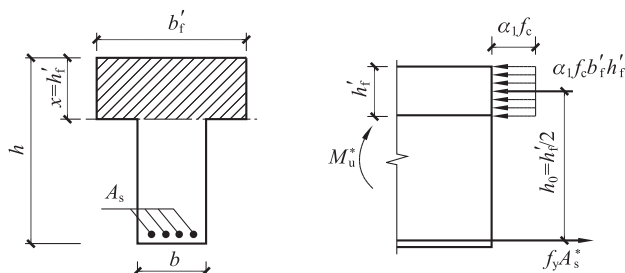


图 3-20 两类 T 形截面的界限

根据式(3-41)和式(3-42),可按下述方法进行 T 形截面类型的判别:

当满足下列条件之一时,属于第一类 T 形截面。

$$\left. \begin{aligned} x &\leq h'_f \\ A_s &\leq A_s^* = \frac{\alpha_1 f_c b'_f h'_f}{f_y} \\ M_u &\leq M_u^* = \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3-43)$$

当满足下列条件之一时,属于第二类 T 形截面。

$$\left. \begin{aligned} x &> h'_f \\ A_s &> A_s^* = \frac{\alpha_1 f_c b'_f h'_f}{f_y} \\ M_u &> M_u^* = \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

设计截面或复核强度时,可根据已知的设计弯矩  $M_u$  或受拉钢筋截面面积  $A_s$ ,用式(3-43)或式(3-44)判别 T 形截面的类型。

(2)基本公式及适用条件。

①第一类 T 形截面。由于受弯构件承载力主要取决于受压区的混凝土,而与受拉区混凝土的形状无关(不考虑混凝土的受拉作用),故受压区的形状为矩形;当仅配置受拉钢筋时,其承载力可按宽度为  $b'_f$  的单筋矩形截面进行计算。第一类 T 形截面的计算应力图形如图 3-21 所示。

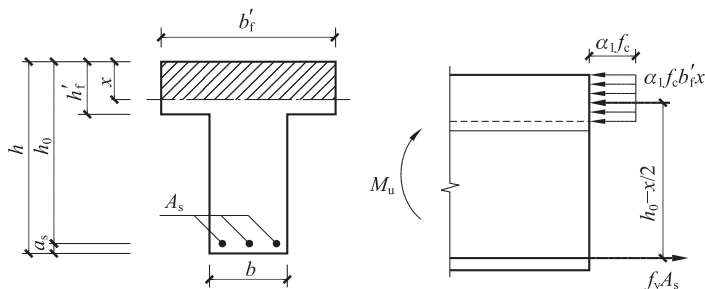


图 3-21 第一类 T 形截面的计算应力图形

根据平衡条件可得基本公式为

$$\alpha_1 f_c b'_f x = f_y A_s \quad (3-45)$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b'_f x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-46)$$

基本公式的适用条件如下:

- 防止超筋破坏的条件。

$$\xi < \xi_b \text{ 或 } M \leq \alpha_1 f_c b'_f h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b)$$

对于第一类 T 形截面, 由于受压区高度  $x$  较小, 相应的受拉钢筋不会太多, 故通常不必验算。

- 防止少筋破坏的条件。

$$\rho \geq \rho_{\min} \text{ 或 } A_s \geq \rho_{\min} b h$$

由于  $\rho_{\min}$  是由截面的开裂弯矩  $M_{cr}$  决定的, 而  $M_{cr}$  主要取决于受拉区混凝土的面积, 故  $\rho = A_s / b h$ 。

② 第二类 T 形截面。混凝土受压区的形状已由矩形变为 T 形, 其计算应力图形如图 3-22(a) 所示。根据平衡条件可得

$$\alpha_1 f_c b x + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f = f_y A_s \quad (3-47)$$

$$M_u = \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-48)$$

和双筋矩形截面一样, 可把第二类 T 形截面所承担的弯矩  $M_u$  分为两部分: 第一部分为  $b x$  的受压区混凝土与部分受拉钢筋  $A_{s1}$  组成的单筋矩形截面, 相应的受弯承载力为  $M_{u1}$ , 如图 3-22(b) 所示; 第二部分为翼缘挑出部分  $(b'_f - b) h'_f$  的混凝土与相应的其余部分受拉钢筋  $A_{s2}$  组成的截面, 其相应的受弯承载力为  $M_{u2}$ , 如图 3-22(c) 所示。总受拉钢筋截面面积  $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ , 总受弯承载力  $M_u = M_{u1} + M_{u2}$ 。

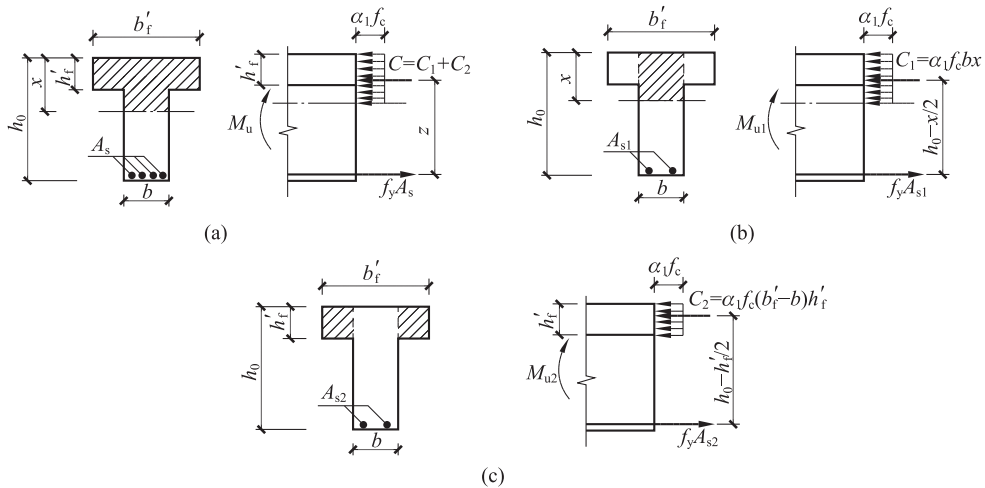


图 3-22 第二类 T 形截面的计算应力图形

(a) 计算应力图形 (b) 受弯承载力为  $M_{u1}$  时的应力图形 (c) 受弯承载力为  $M_{u2}$  时的应力图形

对第一部分, 由平衡条件可得基本公式为

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_{s1} \quad (3-49)$$

$$M_{u1} = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3-50)$$

对第二部分,由平衡条件可得基本公式为

$$\alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f = f_y A_{s2} \quad (3-51)$$

$$M_{u2} = \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (3-52)$$

基本公式的适用条件如下:

- 防止超筋破坏的条件。

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (3-53)$$

$$\rho = \frac{A_{s1}}{bh_0} \leq \rho_{\max} = \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (3-54)$$

- 防止少筋破坏的条件。

$$\rho \geq \rho_{\min} \quad (3-55)$$

第二类 T 形截面梁的受压区高度  $x$  较大,相应的受拉钢筋的配筋率较高,故通常不必验算。

(3) 截面设计计算方法。已知截面尺寸  $b, h, b'_f, h'_f$ , 材料强度设计值  $\alpha_1, f_c, f_y$ , 弯矩设计值  $M$ , 求纵向受拉钢筋截面面积  $A_s$ 。

① 第一类 T 形截面。当  $M \leq \alpha_1 f_c b'_f h'_f (h_0 - h'_f/2)$  时,属于第一类 T 形截面。其计算方法与  $hb'_f$  的单筋矩形截面完全相同。

② 第二类 T 形截面。当  $M > \alpha_1 f_c b'_f h'_f (h_0 - h'_f/2)$  时,属于第二类 T 形截面。其计算方法与双筋截面梁类似,计算步骤如下:

- 求  $A_{s2}$  和相应承担的弯矩  $M_{u2}$ 。

$$A_{s2} = \frac{\alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f}{f_y} \quad (3-56)$$

$$M_{u2} = \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right)$$

- 求  $M_{u1}$ 。

$$M_{u1} = M - M_{u2} = M - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \quad (3-57)$$

- 求  $A_{s1}$ , 先求  $\alpha_s$ 。

$$\alpha_s = \frac{M_{u1}}{\alpha_1 f_c b h_0^2} \quad (3-58)$$

由  $\alpha_s$  查出相对应的  $\xi$  和  $\gamma_s$ 。若  $\xi > \xi_b$ , 则表明梁的截面尺寸不够,应加大截面尺寸或改用双筋 T 形截面;若  $\xi \leq \xi_b$ , 表明梁处于适筋状态,截面尺寸满足要求,则

$$A_{s1} = \frac{M_{u1}}{f_y \gamma_s h_0} \quad (3-59)$$

或

$$A_{s1} = \xi b h_0 \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (3-60)$$

- 求总钢筋的截面面积,计算式为  $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ 。

(4) T 形截面受弯构件正截面计算示例。

**【例 3-4】** 某 T 形截面的截面尺寸为  $b = 250 \text{ mm}, h = 700 \text{ mm}, b'_f = 1000 \text{ mm}, h'_f = 80 \text{ mm}$ , 承受弯矩设计值  $M = 450 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 混凝土强度等级为 C25 ( $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2, f_t =$

1.27 N/mm<sup>2</sup>), 采用 HRB335 钢筋( $f_y=300$  N/mm<sup>2</sup>)配筋, 环境类别为一类, 试求所需钢筋的截面面积。

【解】 ①判别类型。

$$h_0=700-60=640(\text{mm})$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) &= 1.0 \times 11.9 \times 1\,000 \times 80 \times \left( 640 - \frac{80}{2} \right) \\ &= 571.2 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm}) = 571.2 (\text{kN} \cdot \text{m}) > M \end{aligned}$$

属于第一类 T 形截面, 按截面尺寸  $hb'_f=700$  mm $\times$ 1 000 mm 的矩形截面计算。

②计算  $A_s$ 。

$$\alpha_s = \frac{M}{\alpha_1 f_c b'_f h_0^2} = \frac{450 \times 10^6}{1.0 \times 11.9 \times 1\,000 \times 640^2} = 0.092$$

查附表 2 得  $\gamma_s=0.9515$ , 则

$$A_s = \frac{M}{f_y \gamma_s h_0} = \frac{450 \times 10^6}{300 \times 0.9515 \times 640} = 2\,463 (\text{mm}^2)$$

选用 7 $\Phi$ 22,  $A_s=2\,661$  mm<sup>2</sup>。钢筋配置如图 3-23 所示。

③验算适用条件。

$$0.45 \frac{f_t}{f_y} \times 100\% = 0.45 \times \frac{1.27}{300} \times 100\% = 0.19\% < 0.20\%, \text{取 } \rho_{\min} = 0.20\%。$$

计算结果符合要求。

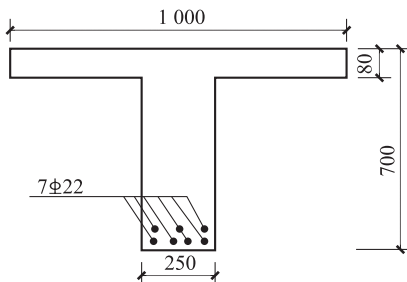


图 3-23 例 3-4 图

【例 3-5】 某 T 形截面的截面尺寸为  $b=300$  mm,  $h=800$  mm,  $b'_f=600$  mm,  $h'_f=100$  mm, 承受弯矩设计值  $M=650$  kN $\cdot$ m, 混凝土强度等级为 C25 ( $f_c=11.9$  N/mm<sup>2</sup>), 用 HRB400 钢筋 ( $f_y=360$  N/mm<sup>2</sup>) 配筋, 环境类别为一类, 求受拉钢筋的截面面积。

【解】 ①判别类型。

$$h_0=800-60=740(\text{mm})$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) &= 1.0 \times 11.9 \times 600 \times 100 \times \left( 740 - \frac{100}{2} \right) \\ &= 492.7 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm}) = 492.7 (\text{kN} \cdot \text{m}) < M \end{aligned}$$

属于第二类 T 形截面。

②计算  $A_{s2}$  和  $A_{s1}$ 。

$$A_{s2} = \frac{\alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f}{f_y} = \frac{1.0 \times 11.9 \times (600 - 300) \times 100}{360} = 992 (\text{mm}^2)$$

$$\begin{aligned}
 M_{u2} &= \alpha_1 f_c (b'_i - b) h'_i \left( h_0 - \frac{h'_i}{2} \right) \\
 &= 1.0 \times 11.9 \times (600 - 300) \times 100 \times \left( 740 - \frac{100}{2} \right) \\
 &= 246.3 \times 10^6 \text{ (N} \cdot \text{mm)} = 246.3 \text{ (kN} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned}
 M_{u1} &= M - M_{u2} = 650 - 246.3 = 403.7 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \\
 \alpha_s &= \frac{M_{u1}}{\alpha_1 f_c b h_0^2} = \frac{403.7 \times 10^6}{1.0 \times 11.9 \times 300 \times 740^2} = 0.207
 \end{aligned}$$

查附表 2 得  $\gamma_s = 0.8825$ ,  $\xi = 0.235$ , 因为  $\xi < \xi_b$  则

$$A_{s1} = \frac{M_{u1}}{f_y \gamma_s h_0} = \frac{403.7 \times 10^6}{360 \times 0.8825 \times 740} = 1717 \text{ (mm}^2\text{)}$$

③计算  $A_s$ 。

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 1717 + 992 = 2709 \text{ (mm}^2\text{)}$$

选用  $4\Phi 25 + 2\Phi 22$ ,  $A_s = 2724 \text{ mm}^2$ 。钢筋布置如图 3-24 所示。

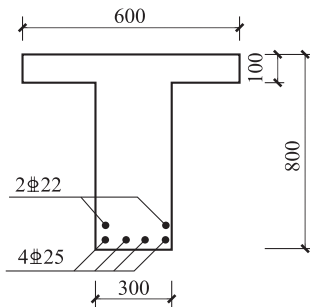


图 3-24 例 3-6 图

## 3.1.2 受弯构件斜截面承载力计算

### 1. 受弯构件斜截面的工作性能

钢筋混凝土受弯构件和预应力混凝土受弯构件,在其主要受弯区段内,将产生垂直裂缝并最终导致正截面受弯破坏。同时在其剪力和弯矩共同作用的剪跨区内,还会产生斜裂缝并可能沿斜裂缝发生斜截面受剪破坏。因此,对受弯构件除要进行正截面承载力计算外,还必须进行斜截面承载力计算。对于偏心受压构件及偏心受拉构件也同样要进行斜截面承载力计算。

根据斜裂缝出现部位的不同,斜裂缝可分为弯剪裂缝和腹剪裂缝两类。在弯矩和剪力共同作用下,构件先在梁底出现垂直的弯曲裂缝,然后斜向发展成的斜裂缝称为弯剪裂缝。弯剪裂缝的开展宽度在裂缝的底部最大,呈底宽顶尖的形状。当剪力较大时,在梁腹部出现的斜裂缝称为腹剪裂缝。腹剪裂缝在腹板的中和轴处宽度最大,然后沿斜向向两端延伸,呈两端尖、中间大的细长枣核形。腹剪裂缝在薄腹梁中更易发生。

在受弯构件中,除弯剪裂缝和腹剪裂缝两类主要的斜裂缝外,还可能出现一些次生裂

缝,如纵向钢筋与斜裂缝相交处,由于钢筋与混凝土黏结破坏而出现的黏结裂缝;当剪跨比较大时,构件临破坏前沿纵向钢筋出现的水平撕裂裂缝;等等。

## 2. 受弯构件斜截面破坏的主要形态

受弯构件的斜截面破坏主要有三种形态。

(1)斜拉破坏。斜拉破坏主要发生在剪跨比  $\lambda$  较大( $\lambda > 3$ )的无腹筋梁或腹筋配置过少的有腹筋梁中。这里的剪跨比是指集中荷载离支座或节点边缘的距离  $a$  与截面有效高度  $h_0$  的比值( $\lambda = a/h_0$ )。在荷载作用下,首先在梁的下边缘出现垂直的弯曲裂缝,然后其中一条弯曲裂缝迅速斜向(垂直于主拉应力方向)伸展到梁顶的集中荷载作用点处,形成临界斜裂缝,使梁沿斜向裂成两部分而破坏,这种破坏称为斜拉破坏,如图 3-25(a)所示。有时在斜裂缝的下端还会沿纵向钢筋的轴向发生撕裂裂缝。

斜拉破坏与临界斜裂缝的形成几乎同时发生,其承载力相对最低,破坏性质类似于正截面中的少筋破坏,脆性性质最为严重。在设计中应当避免发生斜拉破坏。

(2)剪压破坏。剪压破坏多发生在剪跨比  $1 < \lambda < 3$  时的无腹梁或腹筋配置适量的有腹筋梁中,是最常见的斜截面破坏形态。

在荷载作用下,首先在剪跨区出现数条短的弯剪裂缝。随着荷载的增加,在几条裂缝中将形成一条延伸最长、开展较宽的主要斜裂缝,即临界斜裂缝。此时的临界斜裂缝一般不贯通至梁顶,而在集中荷载作用点下面留有一定的受压区高度。临界斜裂缝发生后,梁仍能继续加载。最后,与临界斜裂缝相交的腹筋达到屈服强度;同时,临界斜裂缝末端上部的剪压区混凝土,在剪应力和压应力的共同作用下达到混凝土的复合应力状态下的极限强度而被剪压破碎,这种破坏称为剪压破坏,如图 3-25(b)所示。

(3)斜压破坏。斜压破坏一般发生在剪力较大、弯矩较小,即剪跨比较小( $\lambda < 1$ )的情况下。在剪跨比  $\lambda$  较大,但腹筋配置过多及梁的腹板很薄的薄腹梁中也会发生斜压破坏。

加载后,在梁腹中垂直于主拉应力的方向上先后出现若干条大致相互平行的腹剪裂缝,梁的腹部被分割成若干斜向的受压棱柱体。随着荷载的增大,混凝土棱柱体沿斜向最终被压坏[见图 3-25(c)],这种破坏称为斜压破坏。其相对的承载力是三种破坏形态中最大的。

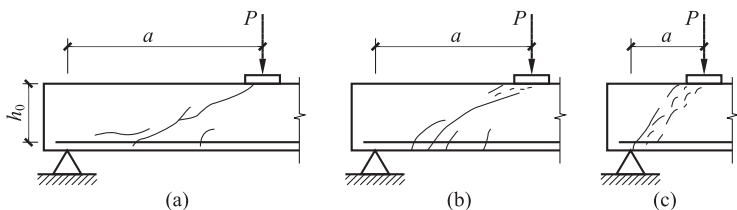


图 3-25 斜截面的破坏形态  
(a)斜拉破坏 (b)剪压破坏 (c)斜压破坏

发生斜压破坏时,箍筋应力达不到相应的屈服强度,承载力主要取决于混凝土的抗压强度,破坏的性质类似于正截面中的超筋破坏,属于脆性破坏,在设计时也应设法避免。

除了以上三种主要破坏形态外,也有可能出现其他一些破坏,如集中荷载离支座极近时可能发生纯剪破坏,荷载作用点及支座处可能发生局部承压破坏,以及纵向钢筋的锚固破坏,等等。



### 3. 受弯构件斜截面受剪承载力计算

(1) 不需要进行受剪承载力计算的条件。

一般受弯构件

$$V \leq 0.7 f_t b h_0 + 0.05 N_{p0} \quad (3-61)$$

以承重集中荷载为主的独立梁

$$V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.05 N_{p0} \quad (3-62)$$

(2) 仅配箍筋的斜截面受剪承载力计算。矩形、T形、I形截面的一般受弯构件

$$V \leq V_{cs} + V_p = V_c + V_{sv} + V_p \quad (3-63)$$

$$V_c = 0.7 f_t b h_0 \quad (3-64)$$

$$V_{sv} = 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-65)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (3-66)$$

式中,  $V$  为构件斜截面上的最大剪力设计值, 包含重要性系数  $\gamma_0$ ;  $V_{cs}$  为构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值,  $V_{cs} = V_c + V_{sv}$ ;  $V_c$  为混凝土的受剪承载力设计值;  $V_{sv}$  为箍筋的受剪承载力设计值;  $V_p$  为由预加力所提高的构件受剪承载力设计值;  $A_{sv}$  为配置在同一截面内的箍筋各肢的全部截面面积, 即  $n A_{sv1}$ , 其中,  $n$  为同一截面内箍筋的肢数,  $A_{sv1}$  为单肢箍筋的截面面积;  $s$  为沿构件长度方向的箍筋间距;  $f_{yv}$  为箍筋的抗拉强度设计值;  $N_{p0}$  为计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力。

(3) 对于集中荷载作用下(包括作用有多种荷载, 其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力值的 75% 以上的情况) 的独立梁计算斜截面受剪承载力时应考虑剪跨比的影响。当剪跨比  $\lambda < 1.5$  时, 取  $\lambda = 1.5$ ; 当  $\lambda > 3$  时, 取  $\lambda = 3$ 。

$$V_c \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 \quad (3-67)$$

$$V_{sv} = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-68)$$

计算  $V_p$  ( $V_p = 0.05 N_{p0}$ ) 时, 对合力  $N_{p0}$  引起的截面弯矩与外弯矩方向相同的情况, 以及预应力混凝土连续梁和允许出现裂缝的预应力混凝土简支梁, 均应取  $V_p = 0$ 。对先张法预应力构件计算合力  $V_{p0}$  时, 应考虑预应力筋传递长度  $l_{tr}$  的影响。

(4) 同时配有箍筋及弯起钢筋的受弯构件的受剪承载力计算。截面剪力设计值可按下列规定取用:

① 当计算第一排(对支座而言)弯起钢筋时, 取支座边缘处的剪力值。

② 当计算以后的每一排弯起钢筋时, 取前一排(对支座而言)弯起钢筋弯起点处的剪力值。

$$V \leq V_c + V_{sv} + V_p + 0.8 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s + 0.8 f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p \quad (3-69)$$

式中,  $V$  为配置弯起钢筋处的剪力设计值;  $V_p$  为由预加力所提高的构件受剪承载力设计值, 按公式  $V_p = 0.05 N_{p0}$  计算, 但计算  $N_{p0}$  时不考虑弯起预应力筋的作用;  $A_{sb}$ 、 $A_{pb}$  分别为同一平面内弯起普通钢筋、弯起预应力筋的截面面积;  $\alpha_s$ 、 $\alpha_p$  分别为斜截面上弯起普通钢筋、弯起预应力筋的切线与构件纵轴线的夹角。

(5) 计算公式的适用条件。

① 上限值——截面最小尺寸的控制。对矩形、T形和I形截面的受弯构件，其受剪截面应符合下列条件：

当  $h_w/b \leq 4$  时，

$$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (3-70)$$

当  $h_w/b \geq 6$  时，

$$V \leq 0.2\beta_c f_c b h_0 \quad (3-71)$$

当  $4 < h_w/b < 6$  时， $V$  按线性内插法确定。

式中， $V$  为构件斜截面上的最大剪力设计值； $\beta_c$  为混凝土强度影响系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，取  $\beta_c = 1.0$ ，当混凝土强度等级为 C80 时，取  $\beta_c = 0.8$ ，其间按线性内插法确定； $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值； $b$  为矩形截面的宽度，T形截面或I形截面的腹板宽度； $h_0$  为截面的有效高度； $h_w$  为截面的腹板高度，对矩形截面，取有效高度，对T形截面，取有效高度减去翼缘高度，对I形截面，取腹板净高。

对受拉边侧斜的构件，当有实践经验时，其受剪截面的控制条件可适当放宽；对T形或I形截面的简支受弯构件，当有实践经验时，式(3-70)中的系数可改用0.3。

② 下限值——箍筋的最小配筋率要求。

$$\rho_{sv} = \frac{nA_{sv1}}{b_s} \geq \rho_{sv, \min} = 0.24 \frac{f_t}{f_{yv}} \quad (3-72)$$

(6) 受拉边倾斜的矩形、T形和I形截面受弯构件，其斜截面受剪承载力应符合下列规定(见图3-26)：

$$V \leq V_{cs} + V_{sp} + 0.8f_y A_{sb} \sin \alpha_s \quad (3-73)$$

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-74)$$

$$V_{sp} = \frac{M - 0.8(\sum f_{yv} A_{sv} z_{sv} + \sum f_y A_{sb} z_{sb})}{z + c \tan \beta} \tan \beta \quad (3-75)$$

式中， $V_{cs}$  为构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值， $\alpha_{cv}$  为斜截面混凝土受剪承载力系数，对于一般受弯构件取0.7，对集中荷载作用下(包括作用有多种荷载，其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力的75%以上的情况)的独立梁，取  $\alpha_{cv} = 1.75/(\lambda + 1)$ ， $\lambda$  为计算截面的剪跨比，可取  $\lambda = a/h_0$ ，当  $\lambda < 1.5$  时，取1.5，当  $\lambda > 3$  时，取3， $a$  取集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离； $h_0$  为斜截面受拉区始端的垂直截面有效高度； $V_{sp}$  为构件截面上受拉边倾斜的纵向非预应力和预应力受拉钢筋的合力设计值在垂直方向的投影，对钢筋混凝土受弯构件，其值不应大于  $f_y A_s \sin \beta$ ，对预应力混凝土受弯构件，其值不应大于  $(f_{py} A_p + f_y A_s) \sin \beta$ ，且不应小于  $\sigma_{pe} A_p \sin \beta$ ； $M$  为构件斜截面受压区末端的弯矩设计值； $z_{sv}$  为同一截面内箍筋的合力至斜截面受压区合力点的距离； $z_{sb}$  为同一弯起平面内的弯起普通钢筋的合力至斜截面受压区合力点的距离； $z$  为斜截面受拉区始端处纵向受拉钢筋合力的水平分力至斜截面受压区合力点的距离，可近似取为  $0.9h_0$ ； $\beta$  为斜截面受拉区始端处倾斜的纵向受拉钢筋的倾角； $c$  为斜截面的水平投影长度，可近似取为  $h_0$ ；其他符号含义同前。

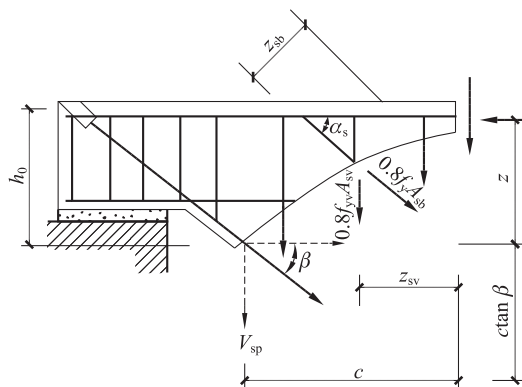


图 3-26 受拉边倾斜的受弯构件的斜截面受剪承载力计算

**【例 3-6】** 图 3-27 所示的矩形截面简支梁,截面尺寸  $h = 250 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ,混凝土强度等级为 C25 ( $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_t = 1.27 \text{ N/mm}^2$ ),纵向钢筋为 HRB400 钢筋 ( $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$ ),箍筋为 HPB300 钢筋 ( $f_{yv} = 210 \text{ N/mm}^2$ )。梁承受均布荷载设计值为  $80 \text{ kN/m}$  (包括梁自重)。根据正截面受弯承载力计算所配置的纵向钢筋为  $4\Phi 25$ ,试确定腹筋的数量。

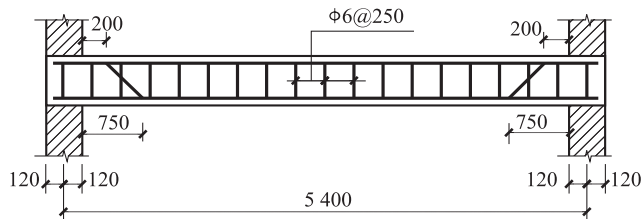


图 3-27 例 3-6 图

**【解】** ①计算剪力设计值。支座边缘截面的剪力设计值为

$$V = \frac{1}{2} \times 80 \times (5.4 - 0.24) = 206.4 \text{ (kN)}$$

②验算截面尺寸。 $h_w = h_0 = 565 \text{ mm}$ ,  $h_w/b = 565 \div 250 = 2.26 < 4$ ,应按式(3-70)验算;因为混凝土强度等级为 C25,低于 C50,故  $\beta_c = 1.0$ ,则

$0.25\beta_c f_c b h_0 = 0.25 \times 1.0 \times 11.9 \times 250 \times 565 = 420\,219 \text{ (N)} = 420.219 \text{ (kN)} > V$   
故截面尺寸满足要求。

③验算是否按计算配置腹筋。

$0.7f_t b h_0 = 0.7 \times 1.27 \times 250 \times 565 = 125\,571 \text{ (N)} = 125.571 \text{ (kN)} < V$   
故需按计算配置腹筋。

④计算腹筋数量。

• 若只配箍筋,则

$$\frac{A_{sv}}{s} \geq \frac{V - 0.7f_t b h_0}{1.25f_{yv} h_0} = \frac{206\,400 - 125\,571}{1.25 \times 210 \times 565} = 0.545$$

选用双肢  $\Phi 8$  箍筋,  $A_{sv} = 101 \text{ mm}^2$ , 则

$$s \leq \frac{A_{sv}}{0.545} = \frac{101}{0.545} = 185 \text{ (mm)}$$



取  $s=180\text{ mm}$ , 则相应的箍筋的配筋率为

$$\begin{aligned}\rho_{sv} &= \frac{A_{sv}}{b_s} = \frac{101}{250 \times 180} \times 100\% = 0.224\% > \rho_{sv, \min} = 0.24 \frac{f_t}{f_{yv}} \\ &= 0.24 \times \frac{1.27}{210} \times 100\% = 0.145\%\end{aligned}$$

故所配双肢  $\Phi 8@180$  箍筋满足要求。

- 若既配箍筋又配弯起钢筋。选用双肢  $\Phi 6@250$  箍筋(满足构造要求), 则

$$\begin{aligned}A_{sb} &\geq \frac{V - V_{cs}}{0.8 f_y \sin \alpha_s} \\ &= \frac{206\,400 - \left(125\,571 + 1.25 \times 210 \times \frac{57}{250} \times 565\right)}{0.8 \times 360 \times \sin 45^\circ} = 231(\text{mm}^2)\end{aligned}$$

将跨中抵抗正弯矩钢筋弯起  $1\Phi 25 (A_{sb} = 491\text{ mm}^2)$ 。钢筋弯起点至支座边缘的距离为  $200 + 550 = 750\text{ mm}$ , 如图 3-27 所示。

验算弯起点的斜截面。弯起点处对应的剪力设计值  $V_1$  和该截面的受剪承载力设计值  $V_{cs}$  计算如下:

$$V_1 = \frac{1}{2} \times 80 \times (5.4 - 0.24 - 1.5) = 146.4(\text{kN})$$

$$V_{cs} = 125\,571 + 1.25 \times 210 \times \frac{57}{250} \times 565 = 159\,386(\text{N}) = 159.386(\text{kN}) > V_1$$

该截面满足受剪承载力要求, 所以该梁只需配置一排弯起钢筋。



### 3.1.3 构件裂缝宽度及变形的验算

#### 1. 基本规定

钢筋混凝土构件除了可能由于承载能力不足而破坏外, 还有可能由于裂缝宽度或变形过大而使结构不能正常使用。结构构件正截面的受力裂缝控制等级如表 3-11 所示; 受弯构件的最大挠度应按荷载的准永久组合并考虑荷载长期作用的影响进行计算, 其计算值不应超过表 3-12 规定的挠度限值; 钢筋混凝土构件正截面的裂缝宽度应按荷载的准永久组合并考虑荷载长期作用的影响进行计算, 结构构件的最大裂缝宽度不应超过表 3-13 的限值。

表 3-11 裂缝控制等级

等级划分	构件类型	要 求
一级	严格要求不出现裂缝的构件	按荷载标准组合计算时, 构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力
二级	一般要求不出现裂缝的构件	按荷载标准组合计算时, 构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土轴心抗拉强度的标准值; 而按荷载效应准永久组合计算时, 构件受拉边缘混凝土不宜产生拉应力, 当有可靠经验时可适当放宽
三级	允许出现裂缝的构件	按荷载标准组合并考虑长期作用影响计算时, 构件的最大裂缝宽度不应超过表 3-13 规定的最大裂缝宽度限值

表 3-12 受弯构件的挠度限值

构件类型		挠度限值
吊车梁	手动吊车	$l_0/500$
	电动吊车	$l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯构件	当 $l_0 < 7$ m 时	$l_0/200(l_0/250)$
	当 $7 \text{ m} \leq l_0 \leq 9$ m 时	$l_0/250(l_0/300)$
	当 $l_0 > 9$ m 时	$l_0/300(l_0/400)$

注 1:表中  $l_0$  为构件的计算跨度,计算悬臂构件的挠度限值时,其计算跨度  $l_0$  按实际悬臂长度的 2 倍取用。

注 2:表中括号内的数值适用于使用上对挠度有较高要求的构件。

注 3:如果构件制作时预先起拱,且使用上也允许,则在验算挠度时,可将计算所得的挠度值减去起拱值;对预应力混凝土构件,还可减去预加力所产生的反拱值。

注 4:构件制作时的起拱值和预加力所产生的反拱值,不宜超过构件在相应荷载组合作用下的计算挠度值。

 表 3-13 结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值  $w_{lim}$  单位: mm

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	$w_{lim}$	裂缝控制等级	$w_{lim}$
—	三级	0.30(0.40)	三级	0.20
二 a		0.20		0.10
二 b			二级	—
三 a、三 b			一级	—

注 1:对处于年平均相对湿度小于 60% 地区一类环境下的受弯构件,其最大裂缝宽度限值可采用括号内的数值。

注 2:在一类环境下,对钢筋混凝土屋架、托架及需做疲劳验算的吊车梁,其最大裂缝宽度限值应取为 0.20 mm;对钢筋混凝土屋面梁和托梁,其最大裂缝宽度限值应取为 0.30 mm。

注 3:在一类环境下,对预应力混凝土屋架、托架及双向板体系,应按二级裂缝控制等级进行验算;对一类环境下的预应力混凝土屋面梁、托梁、单向板,应按表中二 a 级环境的要求进行验算;在一类和二 a 类环境下需做疲劳验算的预应力混凝土吊车梁,应按裂缝控制等级不低于二级的构件进行验算。

注 4:表中规定的预应力混凝土构件的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值仅适用于正截面的验算;预应力混凝土构件的斜截面裂缝控制验算应符合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的有关规定。

注 5:对于烟囱、筒仓和处于液体压力下的结构,其裂缝控制要求应符合专门标准的有关规定。

注 6:对于处于四、五类环境下的结构构件,其裂缝控制要求应符合专门标准的有关规定。

注 7:表中的最大裂缝宽度限值为用于验算荷载作用引起的最大裂缝宽度。

## 2. 裂缝宽度的验算

(1) 矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件,按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用的影响。

① 最大裂缝宽度  $w_{max}$  可按式(3-76)计算。

$$w_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (3-76)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (3-77)$$

$$d_{\text{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i} \quad (3-78)$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s + A_p}{A_{\text{te}}} \quad (3-79)$$

式中,  $\alpha_{\text{cr}}$  为构件受力特征系数, 按表 3-14 采用;  $\psi$  为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, 当  $\psi < 0.2$  时, 取  $\psi = 0.2$ , 当  $\psi > 1.0$  时, 取  $\psi = 1.0$ , 对直接承受重复荷载的构件, 取  $\psi = 1.0$ ;  $\sigma_s$  为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋的应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力;  $E_s$  为钢筋的弹性模量, 按表 2-1 采用;  $c_s$  为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离, 当  $c_s < 20$  时, 取  $c_s = 20$ , 当  $c_s > 65$  时, 取  $c_s = 65$ ;  $d_{\text{eq}}$  为受拉区纵向钢筋的等效直径;  $d_i$  为受拉区第  $i$  种纵向钢筋的公称直径;  $n_i$  为受拉区第  $i$  种纵向钢筋的根数;  $\nu_i$  为受拉区第  $i$  种纵向钢筋的相对黏结特征系数, 按表 3-15 采用;  $\rho_{\text{te}}$  为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, 当  $\rho_{\text{te}} < 0.01$  时, 取  $\rho_{\text{te}} = 0.01$ ;  $A_s$  为受拉区纵向普通钢筋截面面积;  $A_p$  为受拉区纵向预应力筋截面面积;  $A_{\text{te}}$  为有效受拉混凝土截面面积: 对轴心受拉构件, 取构件截面面积, 对受弯、偏心受压和偏心受拉构件, 取  $A_{\text{te}} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$ , 此处,  $b_f$ 、 $h_f$  分别为受拉翼缘的宽度和高度。

**表 3-14 构件受力特征系数**

类 型	$\alpha_{\text{cr}}$	
	钢筋混凝土构件	预应力混凝土构件
受弯、偏心受压	1.9	1.5
偏心受拉	2.4	—
轴心受拉	2.7	2.2

**表 3-15 钢筋的相对黏结特征系数**

钢筋类别	钢筋		先张法预应力筋			后张法预应力筋		
	光圆钢筋	带肋钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	钢绞线	带肋钢筋	钢绞线	光面钢丝
$\nu_i$	0.7	1.0	1.0	0.8	0.6	0.8	0.5	0.4

注: 对环氧树脂涂层带肋钢筋, 其相对黏结特性系数应按表中系数的 80% 取用。

② 平均裂缝宽度  $\omega_m$  可按式(3-80)计算。

$$\omega_m = 0.85\psi \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3-80)$$

③ 在荷载准永久组合或标准组合下, 钢筋混凝土构件受拉区纵向普通钢筋的应力计算。

• 轴心受拉构件。

$$\sigma_s = \frac{N_q}{A_s} \quad (3-81)$$

• 偏心受拉构件。

$$\sigma_s = \frac{N_q e'}{A_s (h_0 - a'_s)} \quad (3-82)$$

- 受弯构件。

$$\sigma_s = \frac{M_q}{0.87h_0A_s} \quad (3-83)$$

- 偏心受压构件。

$$\sigma_s = \frac{N_q(e-z)}{A_s z} \quad (3-84)$$

$$z = \left[ 0.87 - 0.12(1-\gamma'_f) \left( \frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (3-85)$$

$$e = \eta_s e_0 + y_s \quad (3-86)$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} \quad (3-87)$$

$$\eta_s = 1 + \frac{1}{4000e_0/h_0} \left( \frac{l_0}{h} \right)^2 \quad (3-88)$$

式中,  $A_s$  为受拉区纵向普通钢筋截面面积; 对轴心受拉构件, 取全部纵向普通钢筋截面面积, 对偏心受拉构件, 取受拉较大边的纵向普通钢筋截面面积, 对受弯、偏心受压构件, 取受拉区纵向普通钢筋截面面积;  $N_q$ 、 $M_q$  分别为按荷载准永久组合计算的轴向力值、弯矩值;  $e'$  为轴向拉力作用点至受压区或受拉较小边纵向普通钢筋合力点的距离;  $e$  为轴向压力作用点至纵向受拉普通钢筋合力点的距离;  $e_0$  为荷载准永久组合下的初始偏心距, 取为  $M_q/N_q$ ;  $z$  为纵向受拉普通钢筋合力点至截面受压区合力点的距离, 且不大于  $0.87h_0$ ;  $\eta_s$  为使用阶段的轴向压力偏心距增大系数, 当  $l_0/h \leq 14$  时, 取  $\eta_s = 1.0$ ;  $y_s$  为截面重心至纵向受拉普通钢筋合力点的距离;  $\gamma'_f$  为受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值;  $b'_f$ 、 $h'_f$  分别为受压区翼缘的宽度、高度; 在式(3-87)中, 当  $h'_f > 0.2h_0$  时, 取  $h'_f = 0.2h_0$ 。

(2) 横向裂缝宽度需通过验算予以保证, 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 对混凝土构件规定的最大裂缝宽度限值  $\omega_{\text{lim}}$  是针对荷载作用下产生的横向裂缝宽度而言的。

对于斜裂缝宽度, 当配置受剪承载力所需的腹筋后, 使用阶段的裂缝宽度一般小于  $0.2 \text{ mm}$ , 可不必验算。

(3) 最大裂缝宽度的验算应按式(3-89)进行。

$$\omega_{\text{max}} \leq \omega_{\text{lim}} \quad (3-89)$$

①按式(3-76)计算所得的最大裂缝宽度, 是指受拉钢筋合力位置高度处构件外表面的裂缝宽度, 一般适用于范围为  $20 \text{ mm} \leq c_s \leq 65 \text{ mm}$  的情况。

②按式(3-76)计算  $\omega_{\text{max}}$  值和按式(3-77)计算  $\psi$  值时, 需要确定  $\rho_{\text{te}}$  值, 当  $\rho_{\text{te}} < 0.01$  时, 取  $\rho_{\text{te}} = 0.01$ , 以限制计算最大裂缝宽度的应用范围。

③对直接承受吊车荷载而不需做疲劳验算的受弯构件, 可将计算求得的最大裂缝宽度乘以  $0.85$ ; 对  $e_0/h_0 < 0.55$  的偏心受压构件, 试验表明其最大裂缝宽度小于允许值, 因此可不用验算。

④为了减小裂缝宽度, 常采用减小钢筋直径的方法解决, 这样可以有效地使裂缝分散、细密。必要时也可适当增加配筋率。

⑤对于受拉及受弯构件, 有时会出现不能同时满足裂缝宽度或变形限值要求的情况, 此时应采取的有效措施是施加预应力。

**【例 3-7】** 某轴心受拉构件的截面尺寸为  $bh = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 按荷载标准组合计算的轴向拉力值  $N_q = 150 \text{ kN}$ , 混凝土强度等级为 C20 ( $f_{tk} = 1.54 \text{ N/mm}^2$ ), 根据承载力计算, 钢筋取用 HRB335 级, 配  $4\Phi 16 (A_s = 804 \text{ mm}^2)$ 。裂缝宽度限制  $w_{lim} = 0.3 \text{ mm}$ , 试验算最大裂缝宽度是否符合要求。

**【解】** 查表 2-1 得  $E_s = 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{bh} = \frac{804}{200 \times 200} = 0.0201$$

因为是轴心受拉构件, 故

$$\sigma_s = \frac{N_q}{A_s} = \frac{150 \times 10^3}{804} = 186.57 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} = 1.1 - \frac{0.65 \times 1.54}{0.0201 \times 186.57} = 0.833$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i} = \frac{4 \times 16^2}{4 \times 1.0 \times 16} = 16 \text{ (mm)}$$

$$\begin{aligned} w_{max} &= \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \\ &= 2.7 \times 0.833 \times \frac{186.57}{2.00 \times 10^5} \times \left( 1.9 \times 25 + 0.08 \times \frac{16}{0.0201} \right) \\ &= 0.233 \text{ (mm)} < w_{lim} = 0.3 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

计算结果表明满足要求。

**【例 3-8】** 矩形截面偏心受拉杆件的截面尺寸  $bh = 160 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 配置  $4\Phi 16$  钢筋 (钢筋总截面面积为  $804 \text{ mm}^2$ ), 混凝土强度等级为 C25 ( $f_{tk} = 1.78 \text{ N/mm}^2$ ), 混凝土保护层厚度  $c = 25 \text{ mm}$ , 按荷载标准组合计算的轴向拉力值  $N_q = 144 \text{ kN}$ , 偏心距  $e_0 = 30 \text{ mm}$ ,  $w_{lim} = 0.3 \text{ mm}$ , 试验算最大裂缝宽度是否符合要求。

**【解】**  $a_s = a'_s = c + d/2 = 25 + 16 \div 2 = 33 \text{ mm}$ ,  $h_0 = h - a_s = 200 - 33 = 167 \text{ mm}$ ,  $A_s = A'_s = 402 \text{ mm}^2$ ,  $e' = e_0 + y_c - a'_s = 30 + 0.5 \times 200 - 33 = 97 \text{ mm}$ 。

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{0.5bh} = \frac{402}{0.5 \times 160 \times 200} = 0.0251$$

$$\sigma_s = \frac{N_q e'}{A_s (h_0 - a'_s)} = \frac{144 \times 10^3 \times 97}{402 \times (167 - 33)} = 259 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65 f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} = 1.1 - \frac{0.65 \times 1.78}{0.0251 \times 259} = 0.922$$

$$\begin{aligned} w_{max} &= \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \\ &= 2.4 \times 0.922 \times \frac{259}{2.00 \times 10^5} \times \left( 1.9 \times 25 + 0.08 \times \frac{16}{0.0251} \right) \\ &= 0.282 \text{ (mm)} < w_{lim} = 0.3 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

计算结果表明满足要求。

### 3. 构件变形的验算

(1) 钢筋混凝土受弯构件的挠度验算。



短期刚度  $B_s$  为

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (3-90)$$

式中,  $\alpha_E$  为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值, 即  $E_s/E_c$ ;  $\rho$  为纵向受拉钢筋配筋率, 取为  $A_s/(bh_0)$ ; 其他符号含义同前。

受弯构件的挠度  $f$  为

$$f = \alpha \frac{(M_k - M_q) l_0^2}{B_s} + \alpha \frac{M_q l_0^2}{B_s} = \alpha \frac{M_k l_0^2}{B_s} \quad (3-91)$$

矩形、T形、倒T形和I形截面受弯构件考虑荷载长期作用影响的刚度  $B$  可按式(3-92)计算。

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (3-92)$$

$$\theta = 2.0 - 0.4 \frac{\rho'}{\rho} \quad \left( \rho' = \frac{A'_s}{bh_0}, \rho = \frac{A_s}{bh_0} \right) \quad (3-93)$$

式中,  $M_k$  为按荷载的标准组合计算的弯矩, 取计算区段内的最大弯矩值;  $M_q$  为按荷载的准永久组合计算的弯矩, 取计算区段内的最大弯矩值;  $\theta$  为考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数, 对钢筋混凝土受弯构件, 当  $\rho' = 0$  时, 取  $\theta = 2.0$ , 当  $\rho' = \rho$  时, 取  $\theta = 1.6$ , 当  $\rho'$  为中间数值时,  $\theta$  按线性内插法取用, 对翼缘位于受拉区的倒T形截面,  $\theta$  应增加 20%; 其他符号含义同前。

(2) 受弯构件的挠度应按荷载标准组合并考虑荷载长期作用影响的刚度  $B$  进行计算, 所求得的挠度值不应超过表 3-12 规定的限值。

① 对于简支梁, 根据最小刚度原则, 可按梁全跨范围内弯矩最大处的截面弯曲刚度(最小的截面弯曲刚度), 用结构力学中不考虑剪切变形影响的等截面梁公式来计算挠度。

② 对于等截面连续梁, 存在正、负弯矩, 可假定各同号弯矩区段内的刚度相等, 并取正、负弯矩区段内截面的最小刚度计算挠度。

③ 当计算跨度内的支座截面刚度不大于跨中截面刚度的 2 倍或不小于跨中截面刚度的 1/2 时, 该跨也可按等刚度构件进行计算, 其构件刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度。

## 3.2 受扭构件

截面上有扭矩作用, 且扭矩值不可忽略的构件称为受扭构件。

### 3.2.1 纯扭构件承载力计算

#### 1. 混凝土结构构件受到扭转的种类

混凝土结构构件除承受弯矩、轴力、剪力外, 还可能承受扭矩的作用。工程中, 混凝土结构构件受到的扭转有以下两类:

(1) 由外荷载直接作用产生的扭转。其扭矩可由静力平衡条件求得, 与构件的抗扭刚

度无关,一般也称为平衡扭转。图 3-28(a)、(b)所示的受檐口竖向荷载作用的挑檐梁和受水平制动力作用的吊车梁,其截面上承受的扭矩都属于平衡扭转。

(2)协调扭转。超静定结构中由于变形的协调使截面产生的扭转,称为协调扭转。如图 3-28(c)所示的现浇框架的边梁,次梁梁端的弯曲转动变形使边梁产生扭转,截面承受扭矩。边梁受扭开裂后,其抗扭刚度迅速降低,截面所承受的扭矩也会随之减少。扭矩在构件中引起的主拉应力轨迹线为一组与构件纵轴大致成  $45^\circ$  角,并绕四周面连续的螺旋线。因此,最合理的配筋应是沿  $45^\circ$  方向布置的螺旋箍筋。但在实际工程中,扭矩在构件全长上常常要改变方向。扭矩方向一旦改变,螺旋箍筋的旋角方向也要相应地加以改变,这在配筋构造措施上就会造成很大的困难。所以,在实际工程结构中都采用垂直构件纵轴的箍筋和沿截面周边布置的纵向钢筋组成的空间钢筋骨架来承担扭矩。

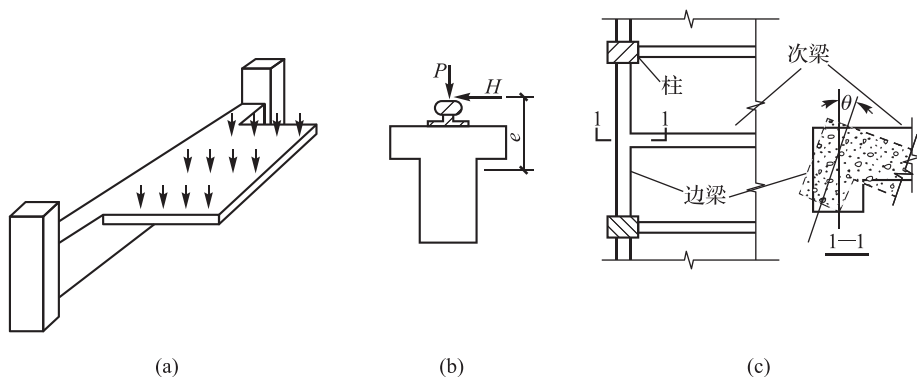


图 3-28 工程中常见的受扭构件  
(a)挑檐梁 (b)吊车梁 (c)现浇框架的边梁

## 2. 钢筋混凝土矩形截面受扭构件的破坏形态

试验表明,对于钢筋混凝土矩形截面受扭构件,其破坏形态与配置钢筋的数量多少有关,破坏形态可以分为以下三类:

(1)少筋破坏。当配筋(垂直纵轴的箍筋和沿周边的纵向钢筋)过少或配筋间距过大时,在扭矩作用下,构件截面长边的最薄弱处会先产生一条与纵轴成  $45^\circ$  左右的斜裂缝,构件一旦开裂,钢筋不足以承担由混凝土开裂后转移给钢筋承担的拉力,裂缝就迅速向相邻两侧面呈螺旋形延伸,形成三面开裂、一面受压的空间扭曲裂面,构件随即破坏。破坏过程急速而突然,属于脆性破坏。其破坏扭矩  $T_u$  基本上等于开裂扭矩  $T_{cr}$ 。这种破坏形态称为少筋破坏。为防止发生这类脆性破坏,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对受扭构件抗扭箍筋及抗扭纵向钢筋的下限(最小配筋率)和箍筋最大间距等都做出了严格规定。

(2)适筋破坏。当配筋适量时,在扭矩作用下,构件在出现首条斜裂缝后并不立即破坏;随着扭矩的增加,将陆续出现多条大体平行的、连续的螺旋形裂缝;与斜裂缝相交的纵向钢筋和箍筋先后达到屈服,斜裂缝进一步展开,最后受压面上的混凝土也被压碎,构件随之破坏。这种破坏称为适筋破坏,属于具有一定延性的破坏。

(3)超筋破坏。若配筋量过大,则在纵向钢筋和箍筋尚未达到屈服时,混凝土就因受压而被压碎,构件立告破坏。这种破坏称为超筋破坏,属于无预兆的脆性破坏。在设计中,应力求避免发生超筋破坏,因此在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中规定了配筋的上

限,即规定了最小的截面尺寸条件。如果抗扭纵向钢筋和抗扭箍筋的配筋强度(配筋量及钢筋强度值)的比例失调,则结构构件破坏发生时会出现一种钢筋达到屈服而另一种钢筋没有达到屈服的情况,这种破坏形态称为部分超筋破坏。此时的结构构件虽然也有一定的延性,但比适筋破坏时的延性小。为了防止出现这种破坏,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对受扭的纵向普通钢筋与箍筋的配筋强度比值 $\zeta$ 的范围进行了限定。

### 3. 矩形截面纯扭构件承载力计算

矩形截面纯扭构件的受扭承载力 $T$ 应符合下列规定:

$$T \leq 0.35 f_t W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (3-94)$$

$$W_t = \frac{b^2}{6} (3h - b) \quad (3-95)$$

$$\zeta = \frac{f_y A_{stl} s}{f_{yv} A_{stl} u_{cor}} \quad (3-96)$$

式中, $f_t$ 为混凝土抗拉强度设计值; $W_t$ 为受扭构件的截面受扭塑性抵抗矩; $b$ 、 $h$ 分别为矩形截面的短边尺寸、长边尺寸; $\zeta$ 为受扭的纵向普通钢筋与箍筋的配筋强度比值; $A_{stl}$ 为受扭计算中取对称布置的全部纵向普通钢筋截面面积; $s$ 为箍筋间距; $A_{stl}$ 为受扭计算中沿截面周边配置的箍筋单肢截面面积; $f_{yv}$ 为受扭箍筋的抗拉强度设计值; $u_{cor}$ 为截面核心部分的周长,取 $u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ ,此处, $b_{cor}$ 、 $h_{cor}$ 分别为箍筋内表面范围内截面核心部分的短边、长边尺寸; $A_{cor}$ 为截面核心部分的面积,取 $A_{cor} = b_{cor} h_{cor}$ 。

对钢筋混凝土结构构件,其 $\zeta$ 值应符合 $0.6 \leq \zeta \leq 1.7$ 的要求;当 $\zeta > 1.7$ 时,取 $\zeta = 1.7$ 。对偏心距 $e_{p0} \leq h/6$ 的预应力混凝土纯扭构件,当计算的 $\xi \geq 1.7$ 时,取 $\zeta = 1.7$ ,并可在式(3-94)的右边增加预加力影响项 $0.05 N_{p0} W_t / A_0$ ,此处, $N_{p0}$ 为计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力, $A_0$ 为构件的换算截面面积。当 $\zeta < 1.7$ 或 $e_{p0} > h/6$ 时,不应考虑预加力影响项,而应按钢筋混凝土纯扭构件计算。

### 4. T形和I形截面纯扭构件承载力计算

T形和I形截面纯扭构件可分为腹板、受压翼缘及受拉翼缘3个矩形块,其受扭承载力按式(3-94)计算,各矩形块的扭矩分别如下:

(1)腹板。

$$T_w = \frac{W_{tw}}{W_t} T \quad (3-97)$$

(2)受压翼缘。

$$T'_f = \frac{W'_{tf}}{W_t} T \quad (3-98)$$

(3)受拉翼缘。

$$T_f = \frac{W_{tf}}{W_t} T \quad (3-99)$$

$$W_t = W_{tw} + W'_{tf} + W_{tf} \quad (3-100)$$

式中, $T_w$ 为腹板所承受的扭矩设计值; $T'_f$ 、 $T_f$ 分别为受压翼缘、受拉翼缘所承受的扭矩设计值; $W_t$ 为T形和I形截面受扭塑性抵抗矩; $W_{tw}$ 、 $W'_{tf}$ 、 $W_{tf}$ 分别为T形和I形截面腹板、受压翼缘及受拉翼缘的矩形截面受扭塑性抵抗矩。

对 T 形和 I 形截面的腹板、受压翼缘及受拉翼缘部分的矩形截面受扭塑性抵抗矩  $W_{tw}$ 、 $W'_{tf}$  和  $W_{tf}$  应按下列规定计算：

(1) 腹板。

$$W_{tw} = \frac{b^2}{6}(3h - b) \quad (3-101)$$

(2) 受压翼缘。

$$W'_{tf} = \frac{h_f'^2}{2}(b_f' - b) \quad (3-102)$$

(3) 受拉翼缘。

$$W_{tf} = \frac{h_f^2}{2}(b_f - b) \quad (3-103)$$

式中,  $b$ 、 $h$  分别为截面的腹板宽度、截面高度;  $b_f'$ 、 $b_f$  分别为截面受压区、受拉区的翼缘宽度;  $h_f'$ 、 $h_f$  分别为截面受压区、受拉区的翼缘高度。

计算时取用的翼缘宽度还应符合  $b_f' \leq b + 6h_f'$  及  $b_f \leq b + 6h_f$  的规定。

### 5. 箱形截面钢筋混凝土纯扭构件受扭承载力计算

箱形截面钢筋混凝土纯扭构件的受扭承载力按式(3-104)计算。

$$T \leq 0.35\alpha_h f_t W_t + 1.2\sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{st1} A_{cor}}{s} \quad (3-104)$$

$$\alpha_h = \frac{2.5t_w}{b_h} \quad (3-105)$$

$$W_t = \frac{b_h^2}{6}(3h_h - b_h) - \frac{(b_h - 2t_w)^2}{6} [3h_w - (b_h - 2t_w)] \quad (3-106)$$

式中,  $\alpha_h$  为箱形截面壁厚影响系数, 当  $\alpha_h > 1.0$  时, 取  $\alpha_h = 1.0$ ;  $b_h$ 、 $h_h$  分别为箱形截面的短边尺寸、长边尺寸; 其他符号含义同前。

## 3.2.2 弯剪扭构件承载力计算

### 1. 弯剪扭构件截面限制条件

(1) 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(见图 3-29), 其截面应符合下列条件:

① 当  $h_w/b$  (或  $h_w/t_w$ )  $\leq 4$  时。

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.25\beta_c f_c \quad (3-107)$$

② 当  $h_w/b$  (或  $h_w/t_w$ ) = 6 时。

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.2\beta_c f_c \quad (3-108)$$

③ 当  $4 < h_w/b$  (或  $h_w/t_w$ )  $< 6$  时, 按线性内插法确定。

式中,  $b$  为矩形截面的宽度, T 形或 I 形截面取腹板宽度, 箱形截面取两侧壁总厚度  $2t_w$ ;  $h_w$  为截面的腹板高度; 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;  $t_w$  为箱形截面壁厚, 其值不应小于  $b_h/7$ , 此处,  $b_h$  为箱形截

面的宽度;其他符号含义同前。

④当  $h_w/b$ (或  $h_w/t_w$ ) $>6$  时,受扭构件的截面尺寸要求及扭曲截面承载力计算应符合专门规定。

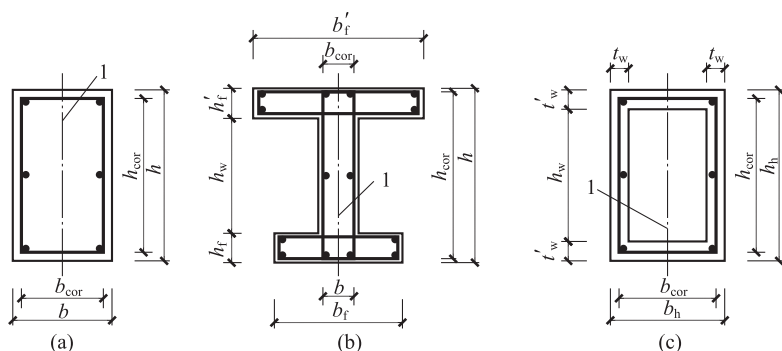


图 3-29 受扭构件截面

(a)矩形截面 (b)T形、I形截面 (c)箱形截面( $t_w \leq t_w'$ )

1—弯矩、剪力作用平面

(2)在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的构件,当符合式(3-109)和式(3-110)的要求时,可不进行构件受剪扭承载力计算,但应按构造要求配置纵向钢筋和箍筋。

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.05 \frac{N_{p0}}{bh_0} \quad (3-109)$$

或

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.07 \frac{N}{bh_0} \quad (3-110)$$

式中, $N_{p0}$ 为计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力,当  $N_{p0} > 0.3f_c A_0$  时,取  $N_{p0} = 0.3f_c A_0$ ,此处, $A_0$ 为构件的换算截面面积; $N$ 为与剪力、扭矩设计值  $V$ 、 $T$  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。

## 2. 矩形截面构件弯剪扭承载力计算

(1)在轴向压力和扭矩共同作用下。在轴向压力和扭矩共同作用下的矩形截面钢筋混凝土构件,其受扭承载力应符合下列规定:

$$T \leq \left(0.35f_t + 0.07 \frac{N}{A}\right) W_t + 1.2\sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{st1} A_{cor}}{s} \quad (3-111)$$

式中, $N$ 为与扭矩设计值  $T$  相应的轴向压力设计值,当  $N > 0.3f_c A$  时,取  $N = 0.3f_c A$ ;其他符号含义同前。

(2)在剪力和扭矩共同作用下。

①矩形截面一般剪扭构件的受剪扭承载力应符合下列规定:

- 受剪承载力。

$$V \leq (1.5 - \beta_t)(0.7f_t bh_0 + 0.05N_{p0}) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-112)$$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{VW_t}{Tbh_0}} \quad (3-113)$$



式中,  $A_{sv}$  为受剪承载力所需的箍筋截面面积;  $\beta_t$  为一般剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数, 当  $\beta_t < 0.5$  时, 取  $\beta_t = 0.5$ , 当  $\beta_t > 1.0$  时, 取  $\beta_t = 1.0$ ; 其他符号含义同前。

- 受扭承载力。

$$T \leq \beta_t \left( 0.35 f_t + 0.05 \frac{N_{p0}}{A_0} \right) W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (3-114)$$

② 矩形截面集中荷载作用下的独立剪扭构件的受剪扭承载力应符合下列规定:

- 受剪承载力。

$$V \leq (1.5 - \beta_t) \left( \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.05 N_{p0} \right) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-115)$$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) \frac{V W_t}{T b h_0}} \quad (3-116)$$

式中,  $\lambda$  为计算截面的剪跨比;  $\beta_t$  为集中荷载作用下剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数, 当  $\beta_t < 0.5$  时, 取  $\beta_t = 0.5$ , 当  $\beta_t > 1.0$  时, 取  $\beta_t = 1.0$ ; 其他符号含义同前。

- 受扭承载力按式(3-114)计算, 但式中的  $\beta_t$  应按式(3-116)计算。

(3) 在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下。

① 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, 其受剪扭承载力可按下列规定计算:

- 受剪承载力。

$$V \leq (1.5 - \beta_t) \left( \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.07 N \right) + f_{yv} \frac{A_{sv} h_0}{s} \quad (3-117)$$

- 受扭承载力。

$$T \leq \beta_t \left( 0.35 f_t + 0.07 \frac{N}{A} \right) W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (3-118)$$

式中,  $\beta_t$  应按集中荷载作用下的独立剪扭构件的相关规定计算。

② 在轴向压力、剪矩、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, 可仅计算偏心受压构件的正截面承载力和斜截面受剪承载力。

③ 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, 其纵向普通钢筋截面面积应分别按偏心受压构件的正截面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。

(4) 在弯矩、剪力和扭矩共同作用下。在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的矩形截面构件可按下列规定进行承载力计算:

① 当  $V \leq 0.35 f_t b h_0$  或  $V \leq 0.875 f_t b h_0 / (\lambda + 1)$  时, 可仅计算受弯构件的正截面受弯承载力和纯扭构件的受扭承载力。

② 当  $T \leq 0.175 f_t W_t$  或  $T \leq 0.175 \alpha_h f_t W_t$  时, 可仅验算受弯构件的正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力。

### 3. T形和I形截面剪扭构件受剪扭承载力计算

(1) T形和I形截面剪扭构件的受剪扭承载力应按下列规定计算:

①受剪承载力。受剪承载力可按式(3-112)和式(3-113)或式(3-115)和式(3-116)进行计算,但应将式中的  $T$ 、 $W_t$  分别以  $T_w$  及  $W_{tw}$  代替。

②受扭承载力。受扭承载力可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的规定划分为几个矩形截面分别进行计算。其中,腹板为剪扭构件,其受扭承载力按式(3-114)和式(3-113)进行计算,但应将式中的  $T$  及  $W_t$  分别以  $T_w$  及  $W_{tw}$  代替;受压翼缘和受拉翼缘不考虑其承受剪力,可按纯扭构件的规定进行计算,但应将  $T$ 、 $W_t$  分别以  $T'_f$  及  $W'_{tf}$  或  $T_f$  及  $W_{tf}$  代替。

(2) T形和 I形截面构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的承载力计算可参照矩形截面构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的承载力计算方法进行。

#### 4. 箱形截面钢筋混凝土剪扭构件的受剪扭承载力计算

(1)一般剪扭构件。

①受剪承载力。

$$V \leq 0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-119)$$

②受扭承载力。

$$T \leq 0.35 \alpha_h \beta_t f_t W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (3-120)$$

式中,  $\beta_t$  按式(3-113)计算,但式中的  $W_t$  应以  $\alpha_h W_t$  代替;其他符号含义同前。

(2)集中荷载作用下的独立剪扭构件。

①受剪承载力。

$$V \leq (1.5 - \beta_t) \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3-121)$$

式中,  $\beta_t$  按式(3-116)计算,但式中的  $W_t$  应以  $\alpha_h W_t$  代替。

②受扭承载力。受扭承载力应按式(3-120)计算,但式中的  $\beta_t$  应按式(3-116)计算。

(3)箱形截面构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的承载力计算可参照矩形截面构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的承载力计算方法进行。

#### 5. 弯剪扭构件配筋的构造要求

(1)最小配筋率要求。

①纯扭构件的最小配筋率应符合下列要求:

$$\rho_u \left( = \frac{A_{stl}}{bh} \right) \geq 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} \quad (3-122)$$

式中,  $\rho_u$  为梁内受扭纵向钢筋的配筋率;  $A_{stl}$  为沿截面周边布置的受扭纵向钢筋总截面面积;其他符号含义同前。

当  $T/Vb > 2.0$  时,取  $T/Vb = 2.0$ 。

②弯剪扭构件的最小配筋率应符合式(3-123)的要求。

$$\rho_{sv} \left( = \frac{A_{sv}}{bs} \right) \geq 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} \quad (3-123)$$

式中,  $\rho_{sv}$  为箍筋的配筋率。

式(3-122)和式(3-123)中的  $b$  均为受剪的截面宽度,对箱形截面构件,  $b$  应以  $b_h$  代替。

(2)受扭构件纵向钢筋的构造要求如表 3-16 所示,受扭构件箍筋的配置要求如表 3-17 所示。



表 3-16 受扭构件纵向钢筋的构造要求

构造类型	构造说明	示意图
抗扭钢筋配置	沿截面周边布置的受扭纵向钢筋的间距不应大于 200 mm 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。当梁支座边作用有较大扭矩时,受扭纵向钢筋应按受拉钢筋锚固在支座内	
纵向钢筋弯折	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规定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	

表 3-17 受扭构件箍筋的配置要求

配置类型	配置要求说明	示意图
箍筋间距、形式及弯折要求	<p>在弯剪扭构件中,箍筋间距应符合梁中箍筋最大间距的规定,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。</p> <p>受扭所需箍筋的末端应做成 135°弯钩,弯钩端头平直段长度不应小于 10d(d 为箍筋直径)</p>	



(续表)

配置类型	配置要求说明	示意图
矩形截面梁	当梁高不大于 800 mm 时,箍筋直径不宜小于 6 mm;当梁高大于 800 mm 时,箍筋直径不宜小于 8 mm;当梁中配有计算需要的纵向受压钢筋时,箍筋直径尚不应小于纵向受压钢筋最大直径的 0.25 倍	
T 形截面梁	其翼缘一般采用封闭箍;当翼缘较薄, $h'_f < 0.55b$ 及 100 mm 时,翼缘采用封闭箍筋的下肢拉应力极小,为上肢的 1/15~1/3,其受扭承载力与翼缘为开口箍的梁没有明显的差异,翼缘可以采用开口箍	
I 形截面梁	下翼缘箍筋的两端应满足锚固长度 $l_a$	
Γ 形截面梁	箍筋应沿全部周边设置,内拐角处的箍筋要交叉锚固	

(续表)

配置类型	配置要求说明	示意图
箱形截面梁	<p>当壁厚 <math>t \leq b/6</math> 时,可在壁的外侧和内侧配置横向钢筋及纵向钢筋。注意,壁内侧箍筋在角部要有足够的锚固;当承受的扭矩很大时,宜采用 <math>45^\circ</math> 和 <math>135^\circ</math> 的斜钢筋。当壁厚 <math>t &gt; b/6</math> 时,壁内侧钢筋不再承受扭矩,可仅按受剪配置内侧箍筋</p>	
边梁与楼面梁接头处的配筋	<p>楼面梁支承在框架边梁上,楼面梁支承点的弯曲转动,使边梁受扭。楼面梁和边梁的连接构造非常重要,与连续梁不同,这里没有支座反力产生的垂直压应力帮助抵抗推力;同时边梁跨中承受正弯矩,它的侧向拉应力进一步削弱了接头。因此,除在边梁的接头配置足够的附加箍筋 <math>a</math>,将楼面梁的反力全部传到边梁的受压区外,同时在接头区还必须加密配置楼面梁的箍筋 <math>b</math>,以抵抗斜裂缝间混凝土斜压杆施加在纵向钢筋上的压力</p>	

### 6. 弯剪扭构件承载力计算示例

**【例 3-9】** 承受均布荷载的 T 形梁的截面尺寸如图 3-30 所示,  $a_s = a'_s = 35 \text{ mm}$ ,  $h_0 = 415 \text{ mm}$ ; 承受弯矩设计值  $M = 127 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 剪力设计值  $V = 99.8 \text{ kN}$ , 扭矩设计值  $T = 8.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 采用 C30 混凝土 ( $\alpha_1 = 1.0, \beta_c = 1.0, f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2, f_t = 1.43 \text{ N/mm}^2$ ), 纵向钢筋为 HRB335 级 ( $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ ), 箍筋为 HPB300 级 ( $f_{yv} = 210 \text{ N/mm}^2$ ), 试配钢筋。

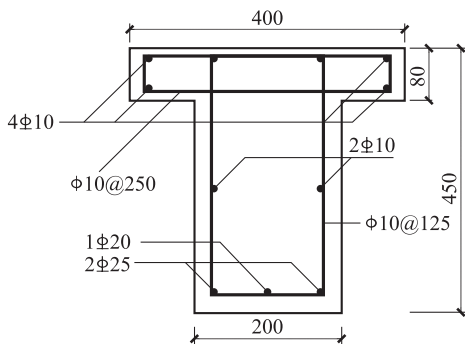


图 3-30 例 3-9 图

【解】(1) 验算截面尺寸。将 T 形截面划分成 2 个矩形截面, 计算受扭塑性抵抗矩。

① 腹板。

$$W_{tw} = \frac{b^2}{6}(3h - b) = \frac{200^2}{6} \times (3 \times 450 - 200) = 7.67 \times 10^6 (\text{mm}^3)$$

② 翼缘。

$$W'_{tf} = \frac{h'_f{}^2}{6}(h'_f - b) = \frac{80^2}{6} \times (400 - 200) = 0.64 \times 10^6 (\text{mm}^3)$$

③ 整个 T 形截面。

$$W_t = W_{tw} + W'_{tf} = 7.67 \times 10^6 + 0.64 \times 10^6 = 8.31 \times 10^6 (\text{mm}^3)$$

$h_w/b = (h_0 - h'_f)/b = (415 - 80) \div 200 = 1.68 < 4$ , 按式(3-107)得

$$\begin{aligned} \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} &= \frac{99.8 \times 10^3}{200 \times 415} + \frac{8.9 \times 10^6}{0.8 \times 8.31 \times 10^6} \\ &= 1.20 + 1.34 = 2.54 (\text{N/mm}^2) \\ &< 0.25\beta_c f_c = 0.25 \times 1.0 \times 14.3 = 3.58 (\text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

故截面尺寸满足要求。

(2) 验算是否可按构造配筋。取  $N_{p0} = 0$ 。

$$\begin{aligned} \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W} &= 1.20 + 1.34 \times 0.8 = 2.27 (\text{N/mm}^2) \\ &> 0.7f_t = 0.7 \times 1.43 = 1.0 (\text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

故必须按计算确定剪扭钢筋。

(3) 受弯纵向钢筋  $A_s$  的确定。

① 判别 T 形截面的类型。

$$\begin{aligned} \alpha_1 f_c b'_f h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) &= 1.0 \times 14.3 \times 400 \times 80 \times \left( 415 - \frac{80}{2} \right) \\ &= 171.6 \times 10^6 (\text{N/mm}^2) > M = 127 \times 10^6 (\text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

故属于第一类 T 形截面, 按  $b'_f h$  矩形截面计算。

② 求  $A_s$ 。

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \frac{M}{\alpha_1 f_c b'_f h_0^2} = \frac{127 \times 10^6}{1.0 \times 14.3 \times 400 \times 415^2} = 0.129 \\ \xi &= 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.129} = 0.139 \\ x &= \xi h_0 = 0.139 \times 415 = 57.7 (\text{mm}) < 2\alpha'_s = 2 \times 35 = 70 (\text{mm}) \end{aligned}$$

故

$$A_s = \frac{M}{f_y(h_0 - a'_s)} = \frac{127 \times 10^6}{300 \times (415 - 35)} = 1114 (\text{mm}^2)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bh} = \frac{1114}{200 \times 450} \times 100\% = 1.24\% > \rho_{\min} = 0.2\%$$

满足要求。

(4) 腹板抗剪扭钢筋的计算。

① 扭矩  $T$  的分配。

• 腹板。

$$T_w = \frac{W_{tw}}{W_t} T = \frac{7.67 \times 10^6}{8.31 \times 10^6} \times 8.9 = 8.21 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

• 翼缘。

$$T'_f = \frac{W'_f}{W_t} T = \frac{0.64 \times 10^6}{8.31 \times 10^6} \times 8.9 = 0.69 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

② 验算腹板配筋能否忽略  $V$  或  $T$ 。

$$0.35f_t b h_0 = 0.35 \times 1.43 \times 200 \times 415 = 41.5 \times 10^3 (\text{N}) < V = 99.8 \times 10^3 (\text{N})$$

故不能忽略剪力的作用。

$$0.175f_t W_t = 0.175 \times 1.43 \times 8.31 \times 10^6 = 2.08 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm}) < T = 8.9 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

故不能忽略扭矩的作用。腹板应按弯剪扭构件计算。

③  $\beta_t$  的计算。

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{VW_{tw}}{T_w b h_0}} = \frac{1.5}{1 + 0.5 \times \frac{99.8 \times 10^3 \times 7.67 \times 10^6}{8.21 \times 10^6 \times 200 \times 415}} = 0.96$$

④ 腹板受剪箍筋。

$$\begin{aligned} \frac{A_{sv}}{s} &= \frac{V - 0.7f_t b h_0 (1.5 - \beta_t)}{1.25f_{yv} h_0} \\ &= \frac{99.8 \times 10^3 - 0.7 \times 1.43 \times 200 \times 415 \times (1.5 - 0.96)}{1.25 \times 210 \times 415} \\ &= 0.50 (\text{mm}^2 / \text{mm}) \end{aligned}$$

⑤ 腹板受扭箍筋。取  $\zeta = 1.2$ 。

$$\begin{aligned} \frac{A_{stl}}{s} &= \frac{T_w - 0.35\beta_t f_t W_{tw}}{1.2\sqrt{\zeta} f_{yv} A_{cor}} \\ &= \frac{8.21 \times 10^6 - 0.35 \times 0.96 \times 1.43 \times 7.67 \times 10^6}{1.2 \times \sqrt{1.2} \times 210 \times 150 \times 400} \\ &= 0.273 (\text{mm}^2 / \text{mm}) \end{aligned}$$

⑥ 腹板箍筋配置。采用双肢箍筋 ( $n=2$ )，腹板上单肢箍筋所需截面面积为

$$\frac{A_{svl}}{s} + \frac{A_{stl}}{s} = \frac{A_{sv}}{ns} + \frac{A_{stl}}{s} = \frac{0.50}{2} + 0.273 = 0.523 (\text{mm}^2 / \text{mm})$$

选用箍筋直径为 10 mm ( $A_{svl} = 78.5 \text{ mm}^2$ )， $s = 78.5 \div 0.523 = 150 \text{ mm}$ ，取箍筋间距为 125 mm，即每米 8 个箍。

$$\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{b_s} = \frac{2 \times 78.5}{200 \times 125} \times 100\% = 0.63\% > 0.28 \frac{f_t}{f_{yv}} = \frac{0.28 \times 1.43}{210} \times 100\% = 0.19\%$$

满足要求。

⑦腹板纵向钢筋配置。

$$A_{stl} = \frac{\zeta f_{yv} A_{stl} u_{cor}}{f_y s} = \frac{1.2 \times 210 \times 0.273 \times 1\ 100}{300} = 252 (\text{mm}^2)$$

$$\rho_t = \frac{A_{stl}}{bh} = \frac{252}{200 \times 450} \times 100\% = 0.28\%$$

$$> \rho_{t, \min} = 0.6 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} = 0.6 \sqrt{\frac{8.9 \times 10^3}{99.8 \times 200}} \times \frac{1.43}{300} \times 100\% = 0.19\%$$

按构造要求,受扭纵向钢筋的间距不应大于 200 mm 和梁的宽度  $b$ ,故沿梁高分三层布置受扭纵向钢筋:

$$\text{顶层: } \frac{A_{stl}}{3} = \frac{252}{3} = 84 \text{ mm}^2, \text{ 选配 } 2\Phi 10 (\text{钢筋截面面积为 } 157 \text{ mm}^2)。$$

$$\text{中层: } \frac{A_{stl}}{3} = \frac{252}{3} = 84 \text{ mm}^2, \text{ 选配 } 2\Phi 10 (\text{钢筋截面面积为 } 157 \text{ mm}^2)。$$

$$\text{底层: } \frac{A_{stl}}{3} + A_s = 84 + 1\ 114 = 1\ 198 \text{ mm}^2, \text{ 选配 } 2\Phi 25 + 1\Phi 20 (\text{钢筋截面面积为 } 1\ 296.2 \text{ mm}^2)。$$

(5)翼缘受扭钢筋计算。翼缘可不计剪力的作用按纯扭构件计算。

①箍筋。

$$A_{cor} = (80 - 2 \times 25) \times (200 - 2 \times 25) = 4\ 500 (\text{mm}^2)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{stl}}{s} &= \frac{T'_t - 0.35 f_t W'_{tf}}{1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} A_{cor}} \\ &= \frac{0.69 \times 10^6 - 0.35 \times 1.43 \times 0.64 \times 10^6}{1.2 \times \sqrt{1.2} \times 210 \times 4\ 500} = 0.298 (\text{mm}^2 / \text{mm}) \end{aligned}$$

选取  $\Phi 10$ ,  $s = \frac{78.5}{0.298} = 263 \text{ mm}$ , 为与腹板箍筋协调,取  $s = 250 \text{ mm}$ 。

②纵向钢筋。

$$A_{stl} = \frac{\zeta f_{yv} A_{stl} u_{cor}}{f_y s} = \frac{1.2 \times 210 \times 0.298 \times 2 \times (30 + 150)}{300} = 90.1 (\text{mm}^2)$$

按构造选配  $4\Phi 10$  (钢筋截面面积为  $314 \text{ mm}^2$ )。截面配筋如图 3-30 所示。

## 3.3 受压构件

### 3.3.1 受压构件概述

以承受轴向压力为主的构件称为受压构件。受压构件在钢筋混凝土结构中应用非常广泛,如屋架的受压腹杆、框架柱,单层厂房的柱、拱等构件。

#### 1. 受压构件的概念和分类

受压构件按纵向压力作用线与构件截面形心是否重合,分为轴心受压构件和偏心受压构件。当纵向压力作用线与构件截面形心重合时,该构件为轴心受压构件,如图 3-31(a)所

示;当纵向压力作用线与构件截面形心不重合时,该构件为偏心受压构件,偏心受压构件又分为单向偏心受压构件[见图 3-31(b)]和双向偏心受压构件[见图 3-31(c)]。

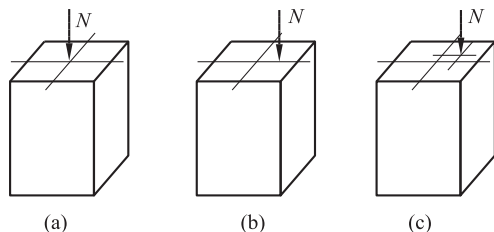


图 3-31 轴心受压构件和偏心受压构件  
(a)轴心受压构件 (b)单向偏心受压构件 (c)双向偏心受压构件

在实际工程中,由于混凝土材质不均匀、施工误差、荷载实际作用位置偏差等原因,真正的轴心受压构件是不存在的。但为了计算方便,对以恒荷载为主的多层建筑的内柱和屋架的受压腹杆等少数构件,可近似按轴心受压构件计算;而对框架结构柱、单层工业厂房柱、承受节间荷载的屋架上弦杆、拱等构件均按偏心受压构件计算。

## 2. 受压构件的构造要求

(1)材料强度要求。为充分发挥混凝土材料的抗压性能,减小构件的截面尺寸,减少钢筋用量,宜采用强度等级较高的混凝土,一般采用 C25、C30、C35、C40,必要时也可以采用强度等级更高的混凝土。

由于受到混凝土最大压应变的限制,高强度的钢筋不能充分发挥其作用,不宜采用。一般采用 HRB335、HRB400 和 RRB400 钢筋。箍筋一般采用 HRB335 钢筋,也可采用 HRB400 钢筋。

(2)截面形式和尺寸要求。轴心受压构件的截面多采用正方形或矩形,有时也采用圆形或多边形。柱的截面尺寸主要根据内力的大小、构件长度及构造要求等条件确定。现浇钢筋混凝土柱的截面尺寸不宜小于  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 。此外,柱的截面尺寸宜符合模数,800 mm 及以下的取 50 mm 的倍数,800 mm 以上的可取 100 mm 的倍数。对于工字形截面,翼缘的厚度不宜小于 120 mm,腹板的厚度不宜小于 100 mm。受压构件的长细比宜控制为  $l_0/b \leq 30$  或  $l_0/d \leq 25$ ,这里, $b$  为矩形截面的短边, $d$  为圆形截面的直径。

(3)纵向钢筋的配置要求。

①柱中纵向钢筋的直径不宜小于 12 mm,一般取 16~32 mm。为保证钢筋骨架的刚度、减少施工时可能产生的纵向弯曲和受压时的局部屈曲,纵向钢筋宜采用较粗直径的钢筋。

②轴心受压构件的纵向钢筋应沿截面四周均匀对称布置,矩形截面轴心受压构件的钢筋根数不得少于 4 根,圆形截面轴心受压构件的钢筋根数不应少于 6 根。偏心受压构件的纵向钢筋应布置在弯矩作用方向的两对边。当截面高度  $h \geq 600\text{ mm}$  时,应在受压构件侧面设置直径为 10~16 mm 的纵向构造钢筋,并相应设置附加箍筋或拉筋,如图 3-32 所示。

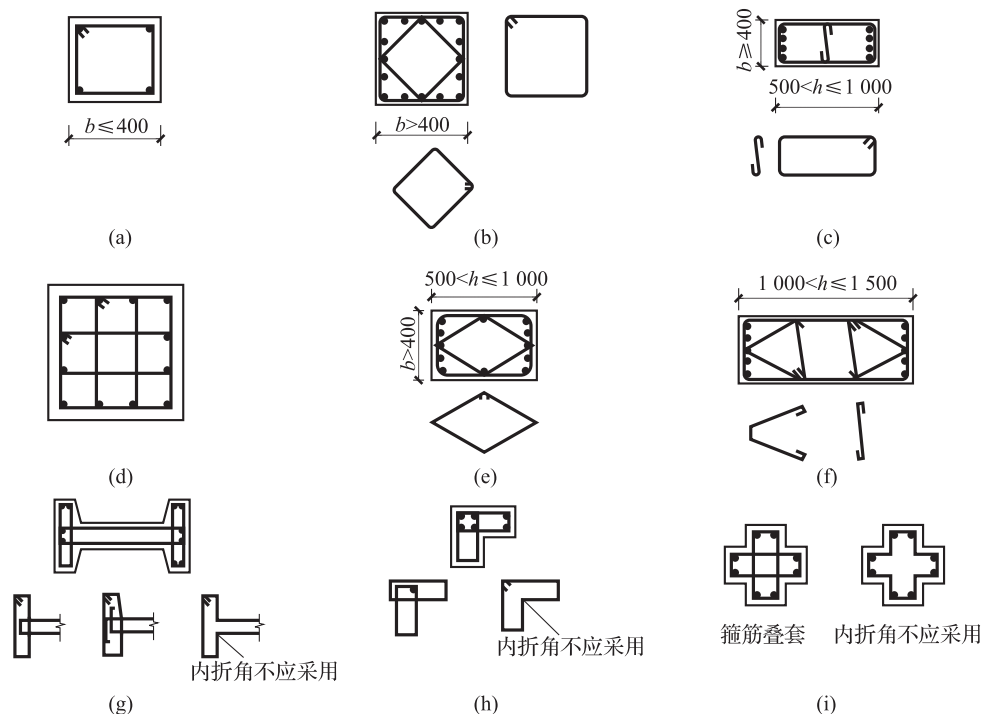


图 3-32 箍筋和拉筋的配置形式

③为提高受压构件的延性,保证构件的承载能力,全部纵向钢筋的配筋率不应小于 0.6%,同一侧纵向钢筋的配筋率不应小于 0.2%;为了施工方便,全部纵向钢筋的配筋率不宜大于 5%。通常受压钢筋的配筋率不超过 3%,一般为 0.6%~2%。

④柱中纵向钢筋的混凝土保护层最小厚度为 30 mm,且不小于纵向钢筋的直径。

⑤纵向钢筋的净距不应小于 50 mm;对处于水平位置浇筑的预制柱,其纵向钢筋的净距要求与梁相同。在偏心受压柱中,垂直于弯矩作用平面的侧面上的纵向钢筋和轴心受压柱中各边的纵向受力钢筋的中距不宜大于 300 mm。

⑥纵向受力钢筋的接头宜设置在受力较小处。钢筋接头宜优先采用机械连接接头,也可以采用焊接接头和搭接接头。对于直径大于 28 mm 的受拉钢筋和直径大于 32 mm 的受压钢筋,不宜采用绑扎的搭接接头。

(4)箍筋的配置要求。箍筋的间距不应大于 400 mm 及构件截面的短边尺寸,且不应大于  $15d$  ( $d$  为纵向钢筋的最小直径)。箍筋的直径不应小于  $d/4$ ,且不应小于 6 mm ( $d$  为纵向钢筋的最大直径)。当纵向钢筋的配筋率超过 3% 时,箍筋的直径不应小于 8 mm,其间距不应大于纵向钢筋最小直径的 10 倍,且不应大于 200 mm。箍筋的末端应做成  $135^\circ$  弯钩且弯钩末端平直段的长度不应小于箍筋直径的 10 倍;箍筋也可焊成封闭环式。当构件截面短边不大于 400 mm,且纵向钢筋不多于 4 根时,可不设置复合箍筋;当构件截面各边的纵向钢筋多于 3 根时,应设置复合箍筋。

在纵向钢筋搭接长度范围内,箍筋的直径不宜小于搭接钢筋直径的 0.25 倍;当搭接钢筋受拉时,其箍筋间距不应大于  $5d$  ( $d$  为受力钢筋中的最小直径),且不应大于 100 mm;当搭接钢筋受压时,其箍筋间距不应大于  $10d$ ,且不应大于 200 mm。当搭接的受压钢筋的直径

大于 25 mm 时,应在搭接接头两个端面外 100 mm 范围内各设置两根箍筋。

### 3.3.2 轴心受压构件承载力计算

在实际结构中,理想的轴心受压构件是不存在的。对初始偏心距较小的构件或单向偏心受压构件垂直弯矩平面的承载力一般可按轴心受压进行验算。

#### 1. 配置普通箍筋的轴心受压构件承载力计算

配置普通箍筋的轴心受压构件如图 3-33 所示,其正截面承载力计算公式为

$$N \leq 0.9\varphi(f_c A + f'_y A'_s) \quad (3-124)$$

式中, $N$  为轴向压力设计值; $\varphi$  为钢筋混凝土轴心受压构件的稳定系数,按表 3-18 采用; $A$  为构件截面面积,当纵向普通钢筋的配筋率大于 3% 时, $A$  应改用  $(A - A'_s)$  代替; $A'_s$  为全部纵向普通钢筋的截面面积;其他符号含义同前。

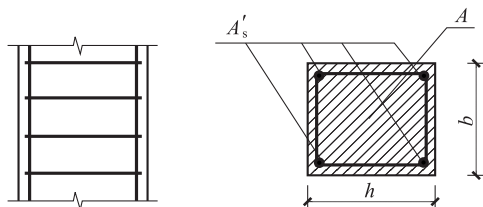


图 3-33 配置箍筋的钢筋混凝土轴心受压构件

表 3-18 钢筋混凝土轴心受压构件的稳定系数  $\varphi$

$l_0/b$	$\leq 8$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
$l_0/d$	$\leq 7$	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24
$l_0/i$	$\leq 28$	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97
$\varphi$	1.00	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56
$l_0/b$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
$l_0/d$	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
$l_0/i$	104	111	118	125	132	139	146	153	160	167	174
$\varphi$	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19

注: $l_0$  为构件的计算长度, $b$  为矩形截面的短边尺寸, $d$  为圆形截面的直径, $i$  为截面的最小回转半径。

(1) 截面设计。已知轴心压力设计值( $N$ )、材料强度设计值( $f_c$ 、 $f'_y$ )和构件的计算长度( $l_0$ ),求构件截面面积( $A$  或  $bh$ )及纵向受压钢筋的截面面积( $A'_s$ )。

由式(3-124)可知,仅有一个公式需求解三个未知量( $\varphi$ 、 $A$ 、 $A'_s$ ),无法求出,故必须增加或假设一些已知条件。一般可以先选定一个合适的配筋率  $\rho'$  (即  $A'_s/A$ ),通常可取  $\rho'$  为 1.0%~1.5%,再假定  $\varphi$  的值,然后代入式(3-124)求解  $A$ 。根据  $A$  来选定实际的构件截面尺寸( $bh$ )。由长细比  $l_0/b$  查表 3-18 确定  $\varphi$ ,再代入式(3-124)求实际的  $A'_s$ 。最后还应检查是否满足最小配筋率的要求。

(2) 截面复核。截面复核比较简单,只需将有关数据代入式(3-124)。如果式(3-124)成



立,则说明满足承载力要求。

## 2. 配置螺旋式或焊接环式间接钢筋的轴心受压构件承载力计算

一般采用配置有螺旋式间接钢筋或焊接环式间接钢筋的轴心受压构件以提高柱子的承载力(见图 3-34),其正截面受压承载力应符合下列规定:

$$N \leq 0.9(f_c A_{\text{cor}} + f'_y A'_s + 2\alpha f_{yv} A_{\text{ss0}}) \quad (3-125)$$

$$A_{\text{ss0}} = \frac{\pi d_{\text{cor}} A_{\text{ss1}}}{s} \quad (3-126)$$

式中,  $A_{\text{cor}}$  为构件的核心截面面积,取间接钢筋内表面范围内的混凝土截面面积;  $A_{\text{ss0}}$  为螺旋式或焊接环式间接钢筋的换算截面面积;  $d_{\text{cor}}$  为构件的核心截面直径,取间接钢筋内表面之间的距离;  $A_{\text{ss1}}$  为螺旋式或焊接环式单根间接钢筋的截面面积;  $s$  为间接钢筋沿构件轴线方向的间距;  $\alpha$  为间接钢筋对混凝土约束的折减系数:当混凝土强度等级不超过 C50 时,取 1.0,当混凝土强度等级为 C80 时,取 0.85,其间按线性内插法确定;其他符号含义同前。

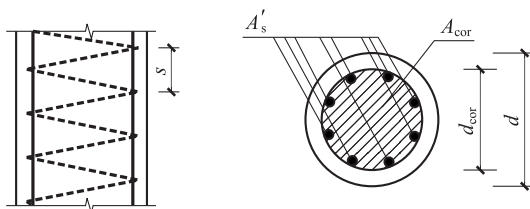


图 3-34 配置螺旋式间接钢筋的钢筋混凝土轴心受压构件

按式(3-125)算得的构件受压承载力设计值不应大于按式(3-124)算得的构件受压承载力设计值的 1.5 倍。

当遇到下列任意一种情况时,不应计入间接钢筋的影响,而应按式(3-124)进行计算:

- (1) 当  $l_0/d > 12$  时。
- (2) 当按式(3-125)算得的受压承载力小于按式(3-124)算得的受压承载力时。
- (3) 当间接钢筋的换算截面面积  $A_{\text{ss0}}$  小于纵向普通钢筋的全部截面面积的 25% 时。

### 3.3.3 偏心受压构件承载力计算

#### 1. 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算

(1) 偏心受压状态。当轴心压力  $N$  和弯矩  $M$  同时作用在某个构件截面上时,其作用效果与一个偏心距  $e_0 = M/N$  的轴向压力  $N$  相同。因此,把截面上同时作用有轴心压力  $N$ 、弯矩  $M$  和剪力  $V$  的构件称为偏心受压构件。

偏心受压短柱通常是指  $l_0/h < 8$  的偏心受压构件。由于构件在偏心压力下产生的侧向附加挠度很小,因而其中的附加弯矩可以忽略不计。所以,这种构件各个截面中的弯矩均可以认为等于  $Ne_0$ ,即弯矩与轴向压力成比例增长。当弯矩  $M$  达到极限值时,材料因达到极限强度而破坏,通常这种破坏为材料破坏。

偏心受压长柱通常是指  $8 \leq l_0/h < 30$  的偏心受压构件。长柱在偏心荷载作用下产生的侧向附加挠度不能忽视,由此而产生的附加弯矩在总弯矩中占有一定的比例,且随着轴向压

力  $N$  的增大,相应的弯矩  $M$  也增长得越来越快,最后仍因材料达到极限强度而破坏,即仍为材料破坏。不过此时长柱的轴向压力将低于同截面短柱的轴向压力。

偏心受压细长柱通常是指  $l_0/h \geq 30$  的偏心受压构件。此种构件的长细比很大,在较小的轴向压力的作用下,其受力性质与长柱类似,但当轴向压力达到某一临界值时,构件会因为丧失稳定而破坏。失稳破坏时,偏心受压细长柱截面中的压力将低于材料强度,其轴向压力低于同截面长柱的轴向压力。

(2) 两类偏心受压破坏的界限及设计判别。

① 大偏心受压:  $\xi \leq \xi_b$ , 当  $\eta e_i > 0.3h_0$  时,可能为大偏心受压,也可能为小偏心受压,可按大偏心受压设计。

② 小偏心受压:  $\xi > \xi_b$ , 当  $\eta e_i \leq 0.3h_0$  时,按小偏心受压设计。

(3) 基本计算公式及其适用条件。

① 大偏心受压。大偏心受压时,矩形截面的受力情况如图 3-35 所示。

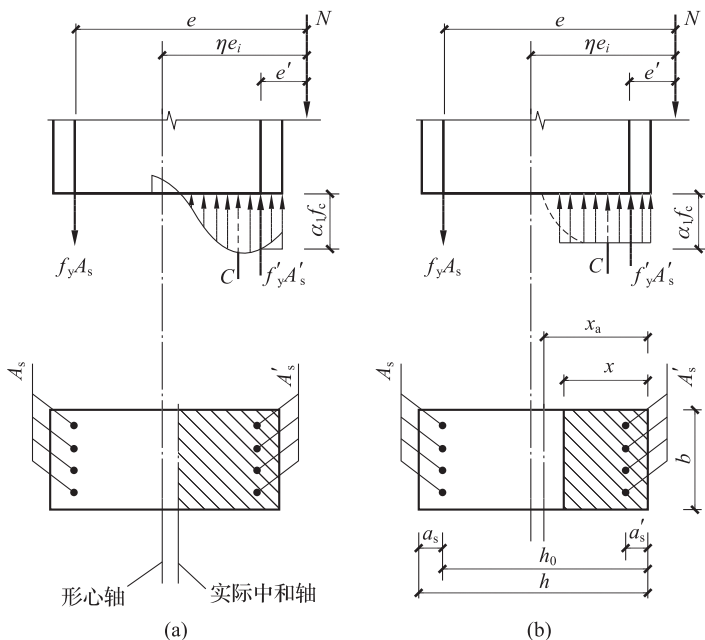


图 3-35 矩形截面大偏心受压时的受力情况

• 基本计算公式。

$$N = \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - f_y A_s \quad (3-127)$$

$$N e = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-128)$$

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a_s \quad (3-129)$$

式中,  $A_s, A'_s$  分别为受拉钢筋和受压钢筋的截面面积;  $a_s, a'_s$  分别为受拉钢筋和受压钢筋的截面重心到相邻混凝土边缘的距离;  $f_y, f'_y$  分别为受拉钢筋和受压钢筋的强度设计值;  $e$  为偏心压力  $N$  的作用点到受拉钢筋重心的距离;  $e_i$  为初始偏心距,  $e_i = e_0 + e_a$ , 其中,  $e_0$  为轴向力对截面重心的偏心距,  $e_a$  为附加偏心距,  $e_a$  取 20 mm 和  $h/30$  两者中的较大值,  $h$  为偏心方向截面最大尺寸;  $\eta$  为偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数; 其他符号含义同前。

• 适用条件。

a. 为了保证截面为大偏心受压破坏,应满足下列条件:

$$\xi \leq \xi_b \quad (3-130)$$

即

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (3-131)$$

b. 为了保证截面破坏时受压钢筋的应力能达到其抗压强度设计值,必须满足下列条件:

$$x \geq 2a'_s \quad (3-132)$$

当  $x < 2a'_s$  时,可偏安全地取  $z = h_0 - a'_s$ ,并对受压钢筋合力点取矩,则可得

$$N_u e' = f_y A_s (h_0 - a'_s) \quad (3-133)$$

式中,  $N_u$  为轴心受拉构件正截面承载力设计值;  $e'$  为轴向力作用点至受压钢筋  $A'_s$  合力点的距离,即  $e' = \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s$ 。

② 小偏心受压。小偏心受压时,矩形截面的受力情况如图 3-36 所示。

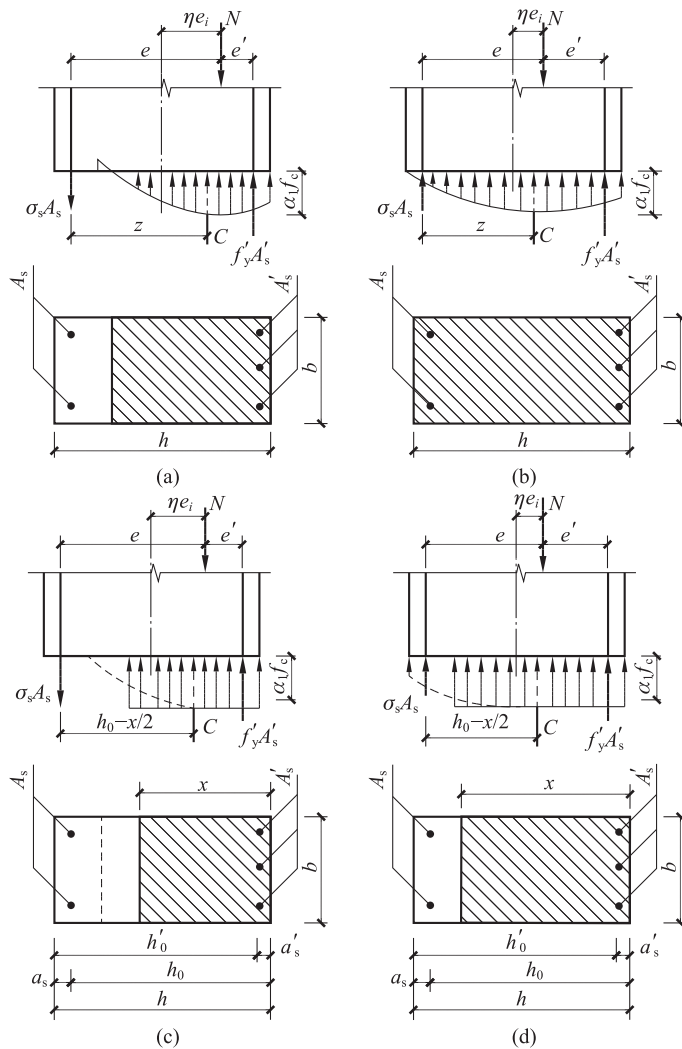


图 3-36 矩形截面小偏心受压时的受力情况

- 基本计算公式。按图 3-36 计算应力图形,根据平衡条件可得

$$N = \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (3-134)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-135)$$

或

$$Ne' = \alpha_1 f_c b x \left( \frac{x}{2} - a'_s \right) + \sigma_s A_s (h_0 - a'_s) \quad (3-136)$$

$$e' = \frac{h}{2} - \eta e_i - a'_s \quad (3-137)$$

$$\sigma_s = \frac{\xi - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} f_y \quad (3-138)$$

式中,  $\sigma_s$  为钢筋  $A_s$  的应力,当混凝土强度等级小于或等于 C50 时,

$$\sigma_s = \frac{\xi - 0.8}{\xi_b - 0.8} f_y \quad (3-139)$$

- 适用条件。

- 当靠近轴向力一侧的混凝土先被压碎时,必须满足下列条件:

$$\xi > \xi_b \quad (3-140)$$

$$\xi \leq 1 + \frac{a_s}{h_0} \quad (3-141)$$

当不满足式(3-141)的要求,即  $x > h$  时,在式(3-135)和式(3-136)中取  $x = h$ 。

- 当离轴向力较远一侧的混凝土先被压碎时,必须满足下列条件:

$$\xi \leq 1 + \frac{a'_s}{h_0} \quad (3-142)$$

(4) 偏心距增大系数的计算。

$$\eta = 1 + \frac{1}{1400 e_i / h_0} \left( \frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (3-143)$$

$$\zeta_1 = \frac{0.5 f_c A}{N} \quad (3-144)$$

当  $N$  未知时,近似取

$$\zeta_1 = 0.2 + 2.7 e_i / h_0 \quad (3-145)$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} \leq 1.0 \quad (3-146)$$

式中,  $A$  为构件的截面面积, T 形、I 形截面均取  $A = bh + 2(b'_1 - b)h'_1$ ;  $h$  为截面高度, 环形截面取外径  $d_2$ , 圆形截面取直径  $d$ ;  $h_0$  为截面的有效高度, 其中, 对环形截面, 取  $h_0 = r_2 + r_s$ , 对圆形截面, 取  $h_0 = r + r_s$ ,  $r$  为圆形截面半径,  $r_2$  为环形截面外半径,  $r_s$  为纵向钢筋所在圆周的半径;  $\zeta_1$  为小偏心受压构件考虑偏心距对截面曲率影响的修正系数, 当  $\zeta_1 > 1$  时, 取  $\zeta_1 = 1$ , 对大偏心受压, 可取  $\zeta_1 = 1.0$ , 对小偏心受压, 在常规配筋时, 可按式(3-144)计算;  $\zeta_2$  为考虑构件长细比对截面曲率的影响系数, 控制截面曲率随长细比  $l_0/h$  的增加而减小, 当  $l_0/h \leq 15$  时, 其影响甚小, 取  $\zeta_2 = 1$ , 当  $l_0/h = 15 \sim 30$  时, 按式(3-146)计算; 其他符号含义同前。

(5)非对称配筋矩形截面的计算方法。

①大、小偏心受压的实用判别方法。在非对称配筋条件下：

- 当  $\eta e_i \leq 0.3h_0$  时,按小偏心受压计算。
- 当  $\eta e_i > 0.3h_0$  时,按大偏心受压计算。如果  $A_s$  过大,也可能转为小偏心受压情况。

②大偏心受压破坏。

• 大偏心受压构件计算的基本公式。当  $\eta e_i > 0.3h_0$  时,属大偏心受压,其计算按式(3-127)和式(3-128)进行。

• 适用条件。

a. 为保证构件破坏时,受拉钢筋应力达到屈服强度,应满足

$$\left. \begin{aligned} \xi = \frac{x}{h_0} &\leq \xi_b \\ \rho = \frac{A_s}{bh_0} &\leq \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \end{aligned} \right\} \quad (3-147)$$

b. 为了保证构件破坏时,受压钢筋应力达到屈服强度,则应满足

$$\left. \begin{aligned} x &\geq 2a'_s \\ z &\leq h_0 - a'_s \end{aligned} \right\} \quad (3-148)$$

• 截面选择。已知截面尺寸、材料等级及内力( $M, N$ ),求  $A_s$  及  $A'_s$ 。两个方程、三个未知数( $A_s, A'_s$  及  $x$ ),需补充条件  $\xi = x/h_0 = \xi_b$ ,可充分发挥混凝土的抗压强度,使( $A_s + A'_s$ )最小。代入式(3-128)和式(3-127),得式(3-149)、式(3-150),则可求得  $A'_s$  和  $A_s$ 。

$$A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5\xi_b)}{f_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-149)$$

$$A_s = \frac{\alpha_1 f_c b h_0 \xi_b + f_y A'_s - N}{f_y} \quad (3-150)$$

且  $A_s \leq A_{s, \min} = \rho_{\min} b h_0$ 。

③小偏心受压破坏。

• 全截面受压( $\xi > \xi_b$ )。三个未知数、两个方程,需建立补充方程式,如图 3-37 所示。根据总用钢量最小的原则,使受拉钢筋屈服,即  $\sigma_s = -f_y$ ,则有  $\xi \geq 1.6 - \xi_b$ ,混凝土全截面充分发挥作用( $x=h$ ),有

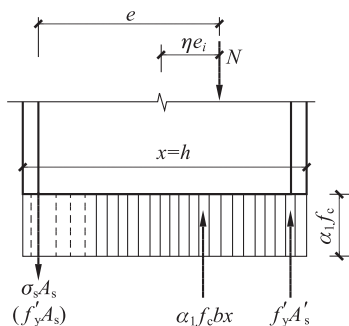


图 3-37 全截面受压

$$N \leq \alpha_1 f_c b h + f_y A'_s + f_y A_s \quad (3-151)$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b h (h_0 - 0.5h) + f_y A'_s (h'_0 - a_s) \quad (3-152)$$

$$A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c b h (h_0 - 0.5h)}{f_y (h'_0 - a'_s)} \quad (3-153)$$

$$A_s = \frac{N - \alpha_1 f_c b h_0}{f_y} - A'_s \quad (3-154)$$

当  $A'_s < A'_{s,\min}$  时, 取  $A'_s = A'_{s,\min} = 0.002bh$ 。

• 反向压屈的校核。当荷载很大 ( $N > \alpha_1 f_c b h_0$ ) 且偏心距很小 ( $e_0 \leq 0.15h_0$ ) 时, 应考虑附加偏心距的反向, 可能发生远离纵向力一侧的破坏, 如图 3-38 所示。此时还应按下列公式验算:

$$Ne' \leq \alpha_1 f_c b h \left( h'_0 - \frac{h}{2} \right) + f'_y A_s (h'_0 - a_s) \quad (3-155)$$

$$e' = \frac{h}{2} - a'_s - e'_i \quad (3-156)$$

$$e'_i = e_0 - e_a \quad (3-157)$$

$$A_s = \frac{N \left( \frac{h}{2} - a'_s - e'_i \right) - \alpha_1 f_c b h \left( h'_0 - \frac{h}{2} \right)}{f_y (h'_0 - a_s)} \quad (3-158)$$

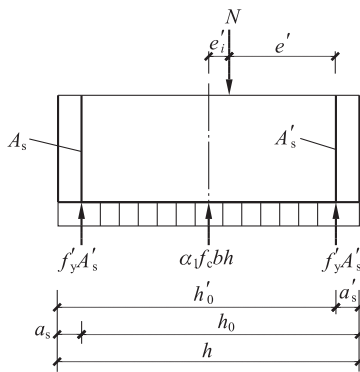


图 3-38 荷载很大而偏心距很小时的计算图式

• 受压区高度较大。若  $\xi_b h_0 < x < h$ , 受拉区的纵向钢筋处于受拉状态, 则

$$A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5x)}{f_y (h'_0 - a'_s)} \quad (3-159)$$

此时, 受拉钢筋应力较小, 可取  $A_s = 0.002bh$ 。

• 相对受压区高度  $\xi$  的计算。

$$\xi = \sqrt{\beta_2^2 + 2 \left( \frac{N}{\alpha_1 f_c b h_0} + 0.8\beta_1 \right) \left( 1 - \frac{\alpha'_s}{h_0} - \frac{2Ne}{\alpha_1 f_c b h_0^2} \right)} + \beta_2 \quad (3-160)$$

$$\beta_1 = \frac{A_s f_y}{(0.8 - \xi_b) \alpha_1 f_c b h_0} \quad (3-161)$$

$$\beta_2 = \frac{a'_s}{h_0} (1 + \beta_1) - \beta_1 \quad (3-162)$$

$$A'_s = \frac{N - \alpha_1 f_c \xi_b h_0}{f_y} + \frac{\xi - 0.8}{\xi_b - 0.8} A_s \geq 0.002bh \quad (3-163)$$

若  $A'_s < 0.002bh$ , 则可取  $A'_s = 0.002bh$ 。

④ 复核截面。在已知截面尺寸、计算长度  $l_0$ 、材料强度等级及截面配筋 ( $A_s$  和  $A'_s$ ) 的情况下, 确定截面承载能力 ( $N$  和  $M$ )。

· 大小偏心受压判别。按照给定的偏心距  $e_0$ , 可算得  $e_i$  及  $\eta$  值。当  $\eta e_i \leq 0.3h_0$  时, 属于小偏心受压; 当  $\eta e_i > 0.3h_0$  时, 可能属于大偏心受压, 当受拉钢筋  $A_s$  过大时, 可视为小偏心受压, 故必须求出  $x$  值后用标准判别式来判断。

对纵向力作用点取矩, 则

$$\sum M_N = 0 \quad \alpha_1 f_c b x \left( \eta e_i - h_0 + \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s e' = f_y A_s e \quad (3-164)$$

$$x = \left( \frac{h}{2} - \eta e_i \right) + \sqrt{\left( \frac{h}{2} - \eta e_i \right)^2 + \frac{2 \left[ f_y A_s \left( \eta e_i + \frac{h}{2} - a_s \right) - f'_y A'_s \left( \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s \right) \right]}{\alpha_1 f_c b}} \quad (3-165)$$

$$\xi = x/h_0$$

当  $\xi \leq \xi_b$  时, 为大偏心受压; 当  $\xi > \xi_b$  时, 为小偏心受压。

· 截面承载力复核。当为大偏心受压时, 按式(3-127)求得  $N$ , 则  $M = Ne_0$ 。当为小偏心受压时, 将式(3-127)中的  $f_y$  改为  $b_s = \frac{0.8 - (x - h_0)}{0.8 - \xi_b}$ , 重新算  $x$ , 求  $N$  及  $M = Ne_0$ 。

**【例 3-10】** 矩形截面偏心受压柱的截面尺寸  $bh = 300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 柱的计算长度  $l_0 = 2.8 \text{ m}$ ,  $a_s = a'_s = 40 \text{ mm}$ , 混凝土强度等级为 C30 ( $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$ ,  $\alpha_1 = 1.0$ ), 用 HRB400 钢筋配筋 ( $f_y = f'_y = 360 \text{ N/mm}^2$ ), 承受轴向压力设计值  $N = 300 \text{ kN}$ , 弯矩设计值  $M = 174 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 试计算所需的钢筋截面面积  $A_s$  和  $A'_s$ 。(属于大偏心受压构件截面设计)

**【解】** ① 计算  $\eta$  和  $e_i$ 。

$$\frac{l_0}{h} = \frac{2800}{400} = 7$$

$$h_0 = h - a_s = 400 - 40 = 360 \text{ (mm)}$$

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{174 \times 10^6}{300 \times 10^3} = 580 \text{ (mm)}$$

取  $e_a = 20 \text{ mm}$ , 则  $e_i = e_0 + e_a = 580 + 20 = 600 \text{ mm}$ 。

$$\zeta_1 = \frac{0.5 f_c b h}{N} = \frac{0.5 \times 14.3 \times 300 \times 400}{300 \times 10^3} = 2.86 > 1.0, \text{ 取 } \zeta_1 = 1.0.$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} = 1.15 - 0.01 \times 7 = 1.08 > 1.0, \text{ 取 } \zeta_2 = 1.0.$$

$$\eta = 1 + \frac{1}{1400} \frac{e_i}{h_0} \left( \frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 = 1 + \frac{1}{1400 \times \frac{600}{360}} \times 7^2 \times 1.0 \times 1.0 = 1.021$$

$$\eta e_i = 1.021 \times 600 = 613 \text{ (mm)} > 0.3h_0 = 0.3 \times 360 = 108 \text{ (mm)}$$

故可先按大偏心受压破坏计算。

② 计算  $A'_s$ 。

$$e = \frac{h}{2} + \eta e_i - a_s = \frac{400}{2} + 613 - 40 = 773 \text{ (mm)}$$

$$\begin{aligned} A'_s &= \frac{Ne - \xi_b (1 - 0.5 \xi_b) \alpha_1 f_c b h_0^2}{f'_y (h_0 - a'_s)} \\ &= \frac{300 \times 10^3 \times 773 - 0.518 \times (1 - 0.5 \times 0.518) \times 1.0 \times 14.3 \times 300 \times 360^2}{360 \times (360 - 40)} \\ &= 160.5 \text{ (mm}^2) < \rho'_{i, \min} b h = 0.002 \times 300 \times 400 = 240 \text{ (mm}^2) \end{aligned}$$

故按构造配筋。

③计算  $A_s$ 。

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{\alpha_1 f_c b h_0 \xi_b + f'_y A'_s - N}{f_y} \\ &= \frac{1.0 \times 14.3 \times 300 \times 360 \times 0.518 + 360 \times 160.5 - 300 \times 10^3}{360} \\ &= 1\,549.4 (\text{mm}^2) \end{aligned}$$

④选择钢筋。受拉钢筋选用 4 $\Phi$ 25,  $A_s = 1\,964 \text{ mm}^2$ , 受压钢筋选用 2 $\Phi$ 16,  $A'_s = 402 \text{ mm}^2$ 。

**【例 3-11】** 由于构造要求,在【例 3-10】中的截面上已配置受压钢筋 3 $\Phi$ 18( $A'_s = 763 \text{ mm}^2$ ),试计算所需的受拉钢筋截面面积  $A_s$ (属于大偏心受压构件截面设计)。

**【解】**  $\eta, e_i$  等的计算与【例 3-10】相同。 $A_s$  按下述方法计算:

①计算  $A_{s2}$ 。

$$M_{u1} = f'_y A'_s (h_0 - a'_s) = 360 \times 763 \times (360 - 40) = 87.9 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$M_{u2} = Ne - M_{u1} = 300 \times 10^3 \times 773 - 87.9 \times 10^6 = 144 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$\alpha_{s2} = \frac{M_{u2}}{\alpha_1 f_c b h_0^2} = \frac{144 \times 10^6}{1.0 \times 14.3 \times 300 \times 360^2} = 0.259$$

由附表 2 查得  $\gamma_s = 0.8469 < 1 - \frac{a'_s}{h_0} = 1 - \frac{40}{360} = 0.8889$ , 则

$$A_{s2} = \frac{M_{u2}}{f_y \gamma_s h_0} = \frac{144 \times 10^6}{360 \times 0.8469 \times 360} = 1\,312 (\text{mm}^2)$$

②计算  $A_s$ 。

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} - \frac{N}{f_y} = 763 + 1\,312 - \frac{300 \times 10^3}{360} = 1\,242 (\text{mm}^2)$$

选用 4 $\Phi$ 20,  $A_s = 1\,256 \text{ mm}^2$ 。

**【例 3-12】** 矩形截面偏心受压柱的截面尺寸  $bh = 400 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ,  $a_s = a'_s = 40 \text{ mm}$ , 混凝土强度等级为 C30 ( $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$ ,  $\alpha_1 = 1.0$ ), 用 HRB400 钢筋配筋,  $A_s = 1\,256 \text{ mm}^2$  (4 $\Phi$ 20),  $A'_s = 1\,520 \text{ mm}^2$  (4 $\Phi$ 22), 柱的计算长度  $l_0 = 7.2 \text{ m}$ , 承受轴向压力设计值  $N = 1\,000 \text{ kN}$ , 弯矩设计值  $M = 330 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。试复核该截面(属于偏心受压构件复核)。

**【解】** ①计算  $e_i$  和  $\eta$ 。

$$h_0 = h - a_s = 600 - 40 = 560 (\text{mm})$$

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{330 \times 10^6}{1\,000 \times 10^3} = 330 (\text{mm})$$

$$\frac{h}{30} = \frac{600}{30} = 20 (\text{mm}), \text{取 } e_a = 20 \text{ mm}。$$

$$e_i = e_0 + e_a = 330 + 20 = 350 (\text{mm})$$

$$\frac{l_0}{h} = \frac{7\,200}{600} = 12$$

$$\zeta_1 = \frac{0.5 f_c b h}{N} = \frac{0.5 \times 14.3 \times 400 \times 600}{1\,000 \times 10^3} = 1.716 > 1.0, \text{取 } \zeta_1 = 1.0。$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} = 1.15 - 0.01 \times 12 = 1.03 > 1.0, \text{取 } \zeta_2 = 1.0。$$



$$\eta = 1 + \frac{1}{1400} \frac{e_i}{h_0} \left( \frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 = 1 + \frac{12^2}{1400 \times \frac{350}{560}} \times 1.0 \times 1.0 = 1.165$$

$$\eta e_i = 1.165 \times 350 = 407.8 (\text{mm}) > 0.3h_0 = 0.3 \times 560 = 168 (\text{mm})$$

按大偏心受压破坏计算。

②计算  $\xi$ 。

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a_s = 407.8 + \frac{600}{2} - 40 = 667.8 (\text{mm})$$

$$e' = \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s = 407.8 - \frac{600}{2} + 40 = 147.8 (\text{mm})$$

$$\begin{aligned} \xi &= - \left( \frac{e}{h_0} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{e}{h_0} - 1 \right)^2 + \frac{2(f_y A_s e - f'_y A'_s e')}{\alpha_1 f_c b h_0^2}} \\ &= - \left( \frac{667.8}{560} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{667.8}{560} - 1 \right)^2 + \frac{2 \times (360 \times 1256 \times 667.8 - 360 \times 1520 \times 147.8)}{1.0 \times 14.3 \times 400 \times 560^2}} \\ &= 0.34 \end{aligned}$$

③计算  $N_u$ 。

$\xi < \xi_b = 0.518$ , 且  $\xi > 2 \frac{a'_s}{h_0} = 2 \times \frac{40}{560} = 0.143$ , 则

$$\begin{aligned} N_u &= \alpha_1 f_c b h_0 \xi + f'_y A'_s - f_y A_s \\ &= 1.0 \times 14.3 \times 400 \times 560 \times 0.34 + 360 \times 1520 - 360 \times 1256 \\ &= 1184 \times 10^3 (\text{N}) = 1184 (\text{kN}) > N = 1000 (\text{kN}) \end{aligned}$$

可见截面是安全、经济的。

(6) 对称配筋矩形截面的计算方法。

①大偏心受压。因  $f_y A_s = f'_y A'_s$ , 得

$$x = \frac{N}{\alpha_1 f_c b} \quad (3-166)$$

当  $\eta e_i > 0.3h_0$  且  $x \leq \xi_b h_0$  时, 为大偏心受压, 则

$$A_s = A'_s = \frac{N \left( \eta e_i - \frac{h}{2} + \frac{N}{2f_c b} \right)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-167)$$

当  $x < 2a'_s$  时, 取  $x = 2a'_s$ , 则

$$A_s = A'_s = \frac{N \left( \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s \right)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-168)$$

并满足  $A_s = A'_s \geq A'_{s,\min} = 0.002bh$  的要求。

②小偏心受压。当  $\eta e_i \leq 0.3h_0$  或  $\eta e_i > 0.3h_0$  且  $x > \xi_b h_0$  时, 为小偏心受压, 则  $A_s = A'_s$ ,  $f_y = f'_y$ 。

$$A_s = A'_s = \frac{Ne - \xi(1 - 0.5\xi)f_c b h_0^2}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-169)$$

其中

$$\xi = \frac{N - \xi_b f_c b h_0}{Ne - 0.45 f_c b h_0^2} + \xi_b \quad (3-170)$$

并应满足  $A_s = A'_s \geq 0.002bh$  的要求。

## 2. I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算

(1) 基本计算公式。

① 大偏心受压。

• 当中和轴通过受压翼缘时。

a. 计算公式。如图 3-39(a) 所示, 由力的平衡条件可得

$$N = \alpha_1 f_c b'_f x + f'_y A'_s - f_y A_s \quad (3-171)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b'_f x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-172)$$

式中,  $b'_f$  为 I 形截面受压翼缘的宽度。

b. 适用条件。

$$2a'_s \leq x \leq h'_f \quad (3-173)$$

式中,  $h'_f$  为 I 形截面受压翼缘的高度。

• 当中和轴通过腹板时。

a. 计算公式。如图 3-39(b) 所示, 翼缘和腹板的混凝土抗压强度均取  $\alpha_1 f_c$ , 由力的平衡条件可得

$$N = \alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] + f'_y A'_s - f_y A_s \quad (3-174)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c bx \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b)h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-175)$$

b. 适用条件。

$$h'_f < x \leq \xi_b h_0 \quad (3-176)$$

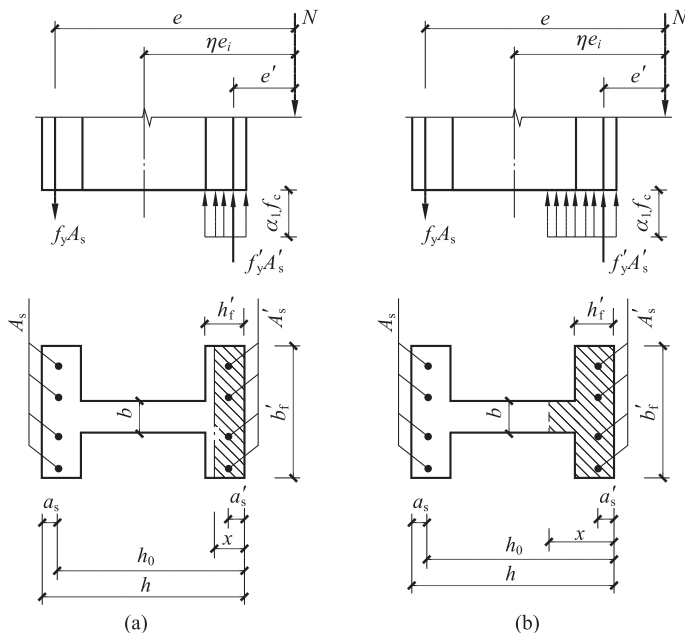


图 3-39 I 形截面大偏心受压计算

## ②小偏心受压。

- 当中和轴通过腹板时。

a. 计算公式。如图 3-40(a)所示,由力的平衡条件可得

$$N = \alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (3-177)$$

式中,

$$\sigma_s = \frac{\frac{x}{h_0} - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} f_y \quad \text{且} \quad -f'_y \leq \sigma_s \leq f_y$$

$$Ne = \alpha_1 f_c bx \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-178)$$

b. 适用条件。

$$\xi_b h_0 < x \leq h - h_f \quad (3-179)$$

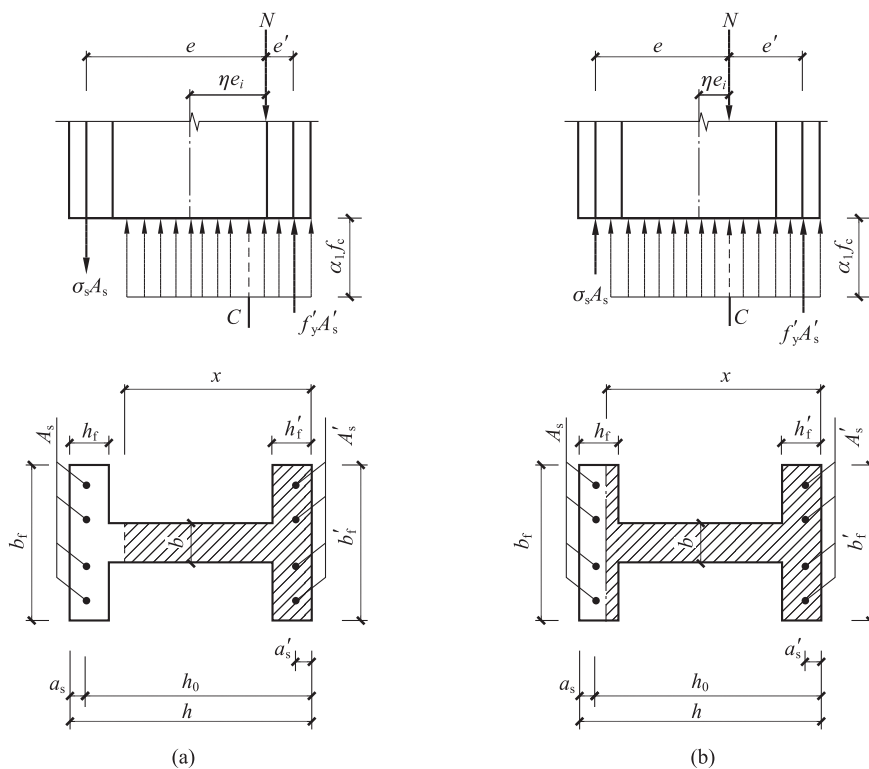


图 3-40 I形截面小偏心受压计算简图

- 当中和轴通过受压较小一侧的翼缘时。

a. 计算公式。如图 3-40(b)所示,由力的平衡条件可得

$$N = \alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f + (b_f - b)(x - h + h_f)] + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (3-180)$$

式中,

$$\sigma_s = \frac{\frac{x}{h_0} - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} f_y \quad \text{且} \quad -f'_y \leq \sigma_s \leq f_y$$



$$Ne = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b_f - b) (x - h + h_1)$$

$$= \left( \frac{h}{2} + \frac{h'_f}{2} - a_s - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-181)$$

b. 适用条件。

$$h - h_f < x \leq h \quad (3-182)$$

(2) 对称配筋 I 形截面的计算方法。由于采用对称配筋,  $A_s = A'_s, f_y = f'_y$ , 假定中和轴通过翼缘, 则由式(3-171)可得

$$x = \frac{N}{\alpha_1 f_c b'_f} \quad (3-183)$$

① 当  $x \leq h'_f$  时, 表明中和轴通过翼缘, 可按宽度为  $b'_f$  的矩形截面计算。

② 当  $2a'_s \leq x \leq h'_f$  时。

$$A_s = A'_s = \frac{Ne - N \left( h_0 - \frac{x}{2} \right)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-184)$$

③ 当  $x < 2a'_s$  时。

$$A_s = A'_s = \frac{Ne'}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-185)$$

式中,

$$e' = \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s \quad (3-186)$$

④ 当  $x > h'_f$  时, 表明中和轴通过腹板, 混凝土受压区高度  $x$  应按式(3-187)计算。

$$x = \frac{N - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f}{\alpha_1 f_c b} \quad (3-187)$$

当按式(3-187)求得的  $x \leq \xi_b h_0$ , 表明截面为大偏心受压破坏, 则

$$A_s = A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) - \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \quad (3-188)$$

当按式(3-187)求得的  $x > \xi_b h_0$ , 表明截面为小偏心受压。此时, 应按式(3-177)和式(3-178)或式(3-180)和式(3-181)联立求解。

**【例 3-13】** 对称配筋 I 形截面柱,  $b_f = b'_f = 400 \text{ mm}, b = 100 \text{ mm}, h_f = h'_f = 100 \text{ mm}, h = 600 \text{ mm}, a_s = a'_s = 40 \text{ mm}$ , 柱的计算长度  $l_0 = 4.5 \text{ m}$ 。混凝土强度等级为 C35 ( $f_c = 16.7 \text{ N/mm}^2, \alpha_1 = 1.0$ ), 采用 HRB400 钢筋 ( $f'_y = f_y = 360 \text{ N/mm}^2$ ) 配筋, 承受轴向压力设计值  $N = 713 \text{ kN}$ , 弯矩设计值  $M = 358.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。试计算所需的钢筋截面面积 ( $A_s = A'_s$ ) (属于 I 形截面柱设计)。

**【解】** ① 计算  $e_i$  和  $\eta$ 。

$$h_0 = h - a_s = 600 - 40 = 560 (\text{mm})$$

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{358.9 \times 10^6}{713 \times 10^3} = 503.4 (\text{mm})$$

$$\frac{h}{30} = \frac{600}{30} = 20 (\text{mm}), \text{取 } e_a = 20 \text{ mm}。$$

$$e_i = e_0 + e_a = 503.4 + 20 = 523.4 (\text{mm})$$

$$\frac{l_0}{h} = \frac{4\,500}{600} = 7.5$$

$$A = bh + 2(b'_f - b)h'_f = 100 \times 600 + 2 \times (400 - 100) \times 100 = 120 \times 10^3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\zeta_1 = \frac{0.5f_c A}{N} = \frac{0.5 \times 16.7 \times 120 \times 10^3}{713 \times 10^3} = 1.405 > 1.0, \text{取 } \zeta_1 = 1.0.$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} = 1.15 - 0.01 \times 7.5 = 1.075 > 1.0, \text{取 } \zeta_2 = 1.0.$$

$$\eta = 1 + \frac{1}{1\,400} \frac{e_i}{h_0} \left( \frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 = 1 + \frac{1}{1\,400 \times \frac{523.4}{560}} \times 7.5^2 \times 1.0 \times 1.0 = 1.043$$

$$\eta e_i = 1.043 \times 523.4 = 545.9 \text{ (mm)} > 0.3h_0 = 0.3 \times 560 = 168 \text{ (mm)}$$

可先按大偏心受压计算。

②计算  $A_s = A'_s$ 。

$$\frac{N}{\alpha_1 f_c b \xi} = \frac{713 \times 10^3}{1.0 \times 16.7 \times 400} = 106.7 \text{ (mm)} > h_f = 100 \text{ (mm)}$$

故中和轴通过腹板。

$$x = \frac{N - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f}{\alpha_1 f_c b} = \frac{713 \times 10^3 - 1.0 \times 16.7 \times (400 - 100) \times 100}{1.0 \times 16.7 \times 100} \\ = 126.9 \text{ (mm)} < \xi_b h_0 = 0.518 \times 560 = 290.1 \text{ (mm)}$$

故属于大偏心受压。

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a_s = 1.043 \times 523.4 + \frac{600}{2} - 40 = 805.9 \text{ (mm)}$$

$$A_s = A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) - \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \\ = \frac{713 \times 10^3 \times 805.9 - 1.0 \times 16.7 \times (400 - 100) \times 100 \times \left( 560 - \frac{100}{2} \right)}{360 \times (560 - 40)} \\ - \frac{1.0 \times 16.7 \times 100 \times 126.9 \times \left( 560 - \frac{126.9}{2} \right)}{360 \times (560 - 40)} \\ = 1\,142 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$A_s$  和  $A'_s$  都选用  $4\Phi 20$ ,  $A_s = A'_s = 1\,256 \text{ mm}^2$ 。

**【例 3-14】** 已知条件同【例 3-11】，按要求设计成对称配筋(属于偏心受压构件对称配筋设计)。

**【解】** ①计算  $e_i$  和  $\eta$ 。同【例 3-11】， $e_i = 600 \text{ mm}$ ,  $\eta = 1.021$ ,  $e = 773 \text{ mm}$ 。

②计算  $A_s = A'_s$ 。

$$x = \frac{N}{\alpha_1 f_c b} = \frac{300 \times 10^3}{1.0 \times 14.3 \times 300} = 69.9 \text{ (mm)}$$

$$x < \xi_b h_0 = 0.518 \times 360 = 186 \text{ (mm)}, x < 2a'_s = 2 \times 40 = 80 \text{ (mm)}$$

$$e' = \eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s = 1.021 \times 600 - \frac{400}{2} + 40 = 452.6 \text{ (mm)}$$

则



$$A_s = A'_s = \frac{Ne'}{f'_y(h_0 - a'_s)} = \frac{300 \times 10^3 \times 452.6}{360 \times (360 - 40)} = 1\,179 (\text{mm}^2)$$

$A_s$  和  $A'_s$  都选用  $4\Phi 20$ ,  $A_s = A'_s = 1\,256 \text{ mm}^2$ 。

### 3. 双向偏心受压构件正截面承载力计算

(1) 双向偏心受压构件的初始偏心距  $e_{ix}$ 、 $e_{iy}$  按式(3-189)和式(3-190)计算。

$$e_{ix} = e_{0x} + e_{ax} \quad (3-189)$$

$$e_{iy} = e_{0y} + e_{ay} \quad (3-190)$$

式中,  $e_{0x}$ 、 $e_{0y}$  分别为轴向压力对通过截面重心的  $y$  轴、 $x$  轴的偏心距,  $e_{0x} = M_{0x}/N$ ,  $e_{0y} = M_{0y}/N$ , 其中,  $M_{0x}$ 、 $M_{0y}$  分别为未考虑附加弯矩时轴向压力在  $x$  轴、 $y$  轴方向的弯矩设计值;  $e_{ax}$ 、 $e_{ay}$  分别为  $x$  轴、 $y$  轴方向上的附加偏心距。

(2) 构件的偏心受压承载力设计值  $N_{ux}$ 、 $N_{uy}$ , 当纵向钢筋沿截面两边配置时, 可按一般配筋单向偏心受压构件计算; 当纵向钢筋沿截面腹部均匀配置时, 可按式(3-189)和式(3-190)进行计算。

(3) 正截面受压承载力按式(3-191)计算。

$$N \leq \frac{1}{\frac{1}{N_{ux}} + \frac{1}{N_{uy}} - \frac{1}{N_{u0}}} \quad (3-191)$$

式中,  $N_{ux}$  为轴向压力作用于  $x$  轴并考虑相应的计算偏心距  $e_{ix}$  后, 按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值;  $N_{uy}$  为轴向压力作用于  $y$  轴并考虑相应的计算偏心距  $e_{iy}$  后, 按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值;  $N_{u0}$  为构件的截面轴心受压承载力设计值。

构件的截面轴心受压承载力设计值  $N_{u0}$  可按式(3-124)计算, 但应取等号, 将  $N$  以  $N_{u0}$  代替, 且不考虑稳定系数  $\varphi$  及系数 0.9。

## 3.4 受拉构件

钢筋混凝土受拉构件按纵向拉力作用位置的不同分为轴心受拉构件和偏心受拉构件两种类型。纵向拉力  $N$  作用在截面形心的构件, 称为轴心受拉构件, 如钢筋混凝土屋架下弦杆、高压圆形水管及圆形水池等。纵向拉力  $N$  作用在偏离截面形心, 或截面上既作用有纵向拉力  $N$ , 又作用有弯矩  $M$  的构件, 称为偏心受拉构件, 如钢筋混凝土矩形水池、工业厂房中双肢柱的肢杆等。



### 3.4.1 轴心受拉构件承载力计算

承受节点荷载的桁架或屋架的受拉弦杆和腹杆、刚架和拱的拉杆、受内压力作用的圆形储液池的环向池壁、承受内压力作用的环形截面管道的管壁等通常按轴心受拉构件计算。

钢筋混凝土轴心受拉构件在开裂以前, 混凝土与钢筋共同承担拉力; 开裂以后, 开裂截面处的混凝土退出工作, 全部拉力由钢筋承担。当钢筋应力达到其抗拉强度时, 截面达到受拉承载力极限状态。根据承载力极限状态设计法的基本原则及力的平衡条件, 轴心受拉构

件正截面承载力的计算公式为

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (3-192)$$

式中,  $N$  为轴向拉力设计值;  $f_y$  为钢筋抗拉强度设计值, 当  $f_y > 300 \text{ N/mm}^2$  时, 按  $300 \text{ N/mm}^2$  取值;  $A_s$  为截面上纵向普通钢筋的全部截面面积;  $f_{py}$  为预应力筋的抗拉强度设计值;  $A_p$  为截面上预应力筋的全部截面面积。

由式(3-192)可知, 轴心受拉构件正截面承载力只与纵向受拉钢筋有关, 与构件的截面尺寸及混凝土的强度等级等无关。

**【例 3-15】** 已知某钢筋混凝土屋架下弦的截面尺寸  $bh = 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 其所受的轴向拉力设计值为  $300 \text{ kN}$ , 钢筋为 HRB335 级 ( $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ ), 混凝土强度等级为 C30 ( $f_t = 1.43 \text{ N/mm}^2$ ), 求纵向受拉钢筋截面面积  $A_s$ , 并选配钢筋。

**【解】** 由题意可知, 此屋架下弦为轴心受拉构件, 由式(3-192)可得

$$A_s = \frac{N}{f_y} = \frac{300 \times 10^3}{300} = 1\,000 (\text{mm}^2)$$

纵向受拉钢筋的配筋率为

$$\rho = \frac{A_s}{A} = \frac{1\,000}{200 \times 150} \times 100\% = 3.3\% > \rho_{\min} = 0.9 \frac{f_t}{f_y} = 0.9 \times \frac{1.43}{300} \times 100\% = 0.429\%$$

因为  $\rho_{\min} = 0.429\% > 0.4\%$ , 所以配筋率取  $0.429\%$ 。故配筋率满足要求, 纵向受拉钢筋选用  $4\Phi 18$ ,  $A_s = 1\,017 \text{ mm}^2$ 。

### 3.4.2 偏心受拉构件承载力计算

矩形水池的池壁、工业厂房双肢柱的受拉肢杆、矩形剖面料仓的仓壁或煤斗的壁板、受地震作用的框架边柱、承受节间竖向荷载的悬臂式桁架拉杆及一般屋架承担节间荷载的下弦拉杆等均可按偏心受拉构件计算。

#### 1. 偏心受拉构件的构造要求

(1) 偏心受拉构件常采用矩形截面形式, 且矩形截面的长边宜和弯矩作用平面平行; 也可采用 T 形或 I 形截面。小偏心受拉构件破坏时, 拉力全部由钢筋承受, 在满足构造要求的前提下, 以采用较小的截面尺寸为宜; 大偏心受拉构件的受力特点类似于受弯构件, 宜采用较大的截面尺寸, 以利于抗弯和抗剪。

(2) 矩形截面偏心受拉构件的纵向钢筋应沿短边布置。

(3) 小偏心受拉构件的受力钢筋不得采用绑扎搭接接头。

(4) 矩形截面偏心受拉构件纵向钢筋配筋率应满足其最小配筋率的要求。

① 受拉一侧纵向钢筋的配筋率应满足  $\rho = \frac{A_s}{bh} \geq \rho_{\min} = \max\left\{0.45 \frac{f_t}{f_y}, 0.2\%\right\}$ 。

② 受压一侧纵向钢筋的配筋率应满足  $\rho' = \frac{A'_s}{bh} \geq \rho'_{\min} = 0.2\%$ 。

(5) 受拉构件的受力钢筋接头必须采用焊接; 在构件端部, 受力钢筋必须有可靠的锚固。

(6) 偏心受拉构件要进行抗剪承载力计算, 根据抗剪承载力计算确定配置的箍筋, 箍筋一般宜满足有关受弯构件箍筋的各项构造要求。

## 2. 偏心受拉构件的分类

当构件在拉力和弯矩的共同作用下时,可以用偏心距  $e_0 = M/N$  和轴向拉力  $N$  来表示其受力状态。受拉构件根据其偏心距  $e_0$  的大小,并以轴向拉力  $N$  的作用点在截面两侧纵向钢筋之间或在纵向钢筋之外作为区分界限,可分为以下两类:

(1)当轴向拉力  $N$  作用在纵向钢筋  $A_s$  合力点及  $A'_s$  合力点范围以外时,称为大偏心受拉构件。即当  $e_0 = M/N > h/2 - a_s$  时,为大偏心受拉。

(2)当轴向拉力  $N$  作用在纵向钢筋  $A_s$  合力点及  $A'_s$  合力点范围以内时,称为小偏心受拉构件。即当  $e_0 = M/N \leq h/2 - a_s$  时,为小偏心受拉。当偏心距  $e_0 = 0$  时为轴心受拉构件,这是小偏心受拉构件的一个特例。

## 3. 矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算

(1)矩形截面大偏心受拉构件正截面承载力计算。

①计算公式。矩形截面大偏心受拉构件正截面承载力计算简图如图 3-41 所示。

$$N \leq f_y A_s - f'_y A'_s - \alpha_1 f_c b x \quad (3-193)$$

$$N e \leq \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-194)$$

$$e = e_0 - \frac{h}{2} + a_s \quad (3-195)$$

将  $x = \xi_b h_0$  代入式(3-193)和式(3-194),可写成如下形式:

$$N \leq f_y A_s - f'_y A'_s - \alpha_1 f_c b \xi_b h_0 \quad (3-196)$$

$$N e \leq \alpha_1 f_c \xi_b b h_0^2 \left( 1 - \frac{\xi_b}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-197)$$

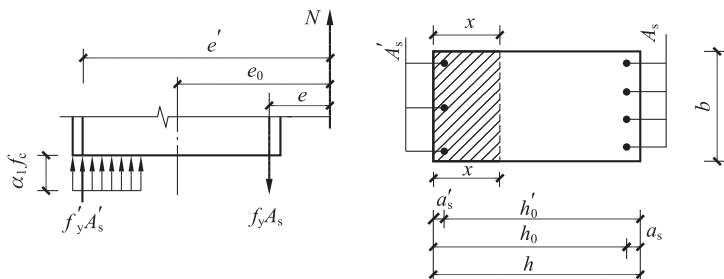


图 3-41 矩形截面大偏心受拉构件正截面承载力计算简图

②适用条件。当  $x \leq \xi_b h_0$  或  $\xi \leq \xi_b$  (防止发生超筋破坏),  $x \geq 2a'_s$  或  $\xi \geq 2a'_s/h_0$  (保证  $a'_s$  能够达到抗压强度  $f'_y$ ) 时采用。

如果  $x < 2a'_s$ , 仍按  $x = 2a'_s$  计算, 即

$$N e' \leq f_y A_s (h_0 - a'_s) \quad (3-198)$$

$$e' = e_0 + \frac{h}{2} - a'_s \quad (3-199)$$

(2)矩形截面小偏心受拉构件正截面承载力计算。矩形截面小偏心受拉构件正截面承载力计算简图,如图 3-42 所示。

$$N e \leq f_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3-200)$$



$$Ne' \leq f_y A_s (h_0' - a_s) \quad (3-201)$$

$$e = \frac{h}{2} - a_s - e_0 \quad (3-202)$$

$$e' = \frac{h}{2} - a_s' + e_0 \quad (3-203)$$

当  $f_y > 300 \text{ N/mm}^2$  时, 仍按  $300 \text{ N/mm}^2$  取用。

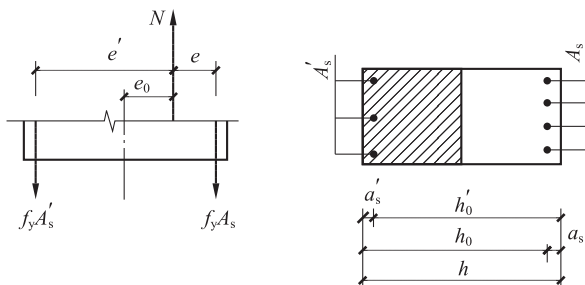


图 3-42 矩形截面小偏心受拉构件正截面承载力计算简图

**【例 3-16】** 偏心受拉构件的截面尺寸为  $bh = 300 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ ,  $a_s = a_s' = 40 \text{ mm}$ , 承受轴向拉力设计值  $N = 700 \text{ kN}$ , 弯矩设计值  $M = 73.45 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 混凝土强度等级为 C30, 用 HRB335 钢筋 ( $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ ) 配筋, 试求钢筋截面面积  $A_s$  和  $A_s'$  (属于偏心受拉构件截面设计)。

**【解】** ① 判别破坏类型。  $h_0 = h - a_s = 450 - 40 = 410 \text{ mm}$ 。  $e_0 = M/N = 73.45 \times 10^6 \div 700 \times 10^3 = 105 \text{ mm} < h/2 - a_s' = 450 \div 2 - 40 = 185 \text{ mm}$ , 为小偏心受拉破坏。

② 求  $A_s$  和  $A_s'$ 。

$$e = \frac{h}{2} - e_0 - a_s = \frac{450}{2} - 105 - 40 = 80 (\text{mm})$$

$$e' = \frac{h}{2} + e_0 - a_s' = \frac{450}{2} + 105 - 40 = 290 (\text{mm})$$

$$A_s = \frac{Ne'}{f_y (h_0' - a_s)} = \frac{700 \times 10^3 \times 290}{300 \times (450 - 40 - 40)} = 1\,829 (\text{mm}^2)$$

$$A_s' = \frac{Ne}{f_y (h_0 - a_s)} = \frac{700 \times 10^3 \times 80}{300 \times (410 - 40)} = 505 (\text{mm}^2)$$

$A_s$  选用  $4\Phi 25$ ,  $A_s = 1\,964 \text{ mm}^2$ ;  $A_s'$  选用  $2\Phi 20$ ,  $A_s' = 628 \text{ mm}^2$ 。

**【例 3-17】** 偏心受拉板的截面厚度  $h = 200 \text{ mm}$ ,  $a_s = a_s' = 25 \text{ mm}$ , 每米宽板承受拉力设计值  $N = 300 \text{ kN}$ , 弯矩设计值  $M = 80 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 混凝土强度等级为 C30 ( $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$ ), 用 HRB335 钢筋 ( $f_y = f_y' = 300 \text{ N/mm}^2$ ) 配筋。试求钢筋截面面积  $A_s$  和  $A_s'$  (属于偏心受拉板的截面设计)。

**【解】** ① 判断破坏类型。取  $b = 1\,000 \text{ mm}$  的板进行计算。  $h_0 = 200 - 25 = 175 \text{ mm}$ 。

$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{80 \times 10^6}{300 \times 10^3} = 267 \text{ mm} > \frac{h}{2} - a_s = \frac{200}{2} - 25 = 75 \text{ mm}$ , 属于大偏心受拉破坏。

② 计算  $A_s'$ 。

$$e = e_0 - \frac{h}{2} + a_s = 267 - \frac{200}{2} + 25 = 192 (\text{mm})$$



$$A'_s = \frac{Ne - \xi_b(1 - 0.5\xi_b)\alpha_1 f_c b h_0^2}{f_y (h_0 - a'_s)}$$

$$= \frac{300 \times 10^3 \times 192 - 0.55 \times (1 - 0.5 \times 0.55) \times 1.0 \times 14.3 \times 1\,000 \times 175^2}{300 \times (175 - 25)} < 0$$

按构造要求配置  $5\Phi 10$ ,  $A'_s = 393 \text{ mm}^2$ 。这时, 本题转化为已知  $A'_s$ , 求  $A_s$  的问题(计算方法与大偏心受压构件相似)。

③求  $A_s$ 。

$$M_{u1} = f'_y A'_s (h_0 - a'_s) = 300 \times 393 \times (175 - 25) = 17.685 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$M_{u2} = Ne - M_{u1} = 300 \times 10^3 \times 192 - 17.685 \times 10^6 = 39.92 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$\alpha_s = \frac{M_{u2}}{\alpha_1 f_c b h_0^2} = \frac{39.92 \times 10^6}{1.0 \times 14.3 \times 1\,000 \times 175^2} = 0.091$$

由附表 2 查得  $\gamma_s = 0.9520 > 1 - \frac{a'_s}{h_0} = 1 - \frac{25}{175} = 0.857$ , 表明  $x < 2a'_s$ , 则  $A_s$  按式(3-198)计算。

$$e' = e_0 + \frac{h}{2} - a'_s = 267 + \frac{200}{2} - 25 = 342 (\text{mm})$$

$$A_s = \frac{Ne'}{f_y (h_0 - a'_s)} = \frac{300 \times 10^3 \times 342}{300 \times (175 - 25)} = 2\,280 (\text{mm}^2)$$

若不考虑  $A'_s$  的作用, 即取  $a'_s = 0$ , 则  $A_{s1} = 0$ , 于是

$$\alpha_s = \frac{Ne}{\alpha_1 f_c b h_0^2} = \frac{300 \times 10^3 \times 192}{1.0 \times 14.3 \times 1\,000 \times 175^2} = 0.132$$

由附表 2 查得  $\gamma_s = 0.9289$ , 则

$$A_{s2} = \frac{Ne}{f_y \gamma_s h_0} = \frac{300 \times 10^3 \times 192}{300 \times 0.9289 \times 175} = 1\,181 (\text{mm}^2)$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} + \frac{N}{f_y}$$

$$= 0 + 1\,181 + \frac{300 \times 10^3}{300} = 2\,181 (\text{mm}^2)$$

计算表明, 应按不考虑受压钢筋作用的情况来配筋, 选用  $6\Phi 22$ ,  $A_s = 2\,281 \text{ mm}^2$ 。



## 学习评价

- (1) 钢筋混凝土正截面受弯全过程可划分为几个阶段? 各阶段的主要特点是什么?
- (2) 钢筋混凝土梁正截面有哪几种破坏形态? 各有何特点?
- (3) 受弯构件正截面的构造要求主要有哪些?
- (4) 受弯构件正截面承载力计算时有哪些基本假定?
- (5) 试述单筋矩形截面受弯构件正截面计算的基本公式及适用条件。
- (6) 什么是双筋截面? 在什么情况下才采用双筋截面?
- (7) 双筋矩形截面受弯构件的适用条件是什么?
- (8) 如何判别两类 T 形截面梁? 为何第一类 T 形梁可按  $b'_f x$  的矩形截面计算?
- (9) 受弯构件斜截面受剪破坏有哪几种形态? 各有什么特点?
- (10) 某现浇肋形楼盖中的次梁(见图 3-43)承受弯矩设计值  $M = 110 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 梁的计算

跨度  $l_0 = 6$  m, 混凝土强度等级为 C20, 钢筋采用 HRB335 级配筋。求该次梁所需纵向受拉钢筋截面面积  $A_s$ 。

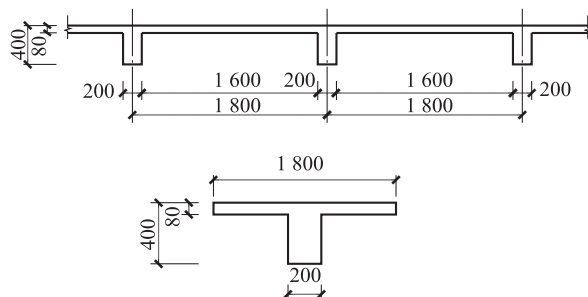


图 3-43 题(10)图

(11) 已知某梁的截面尺寸为  $bh = 200$  mm  $\times$  500 mm, 混凝土强度等级为 C30, 采用 HRB400 钢筋配筋。若该梁承受的弯矩设计值  $M = 250$  kN  $\cdot$  m。试求受压钢筋截面面积  $A'_s$  和受拉钢筋截面面积  $A_s$ 。

(12) 图 3-44 所示的钢筋混凝土简支梁的结构安全等级为 II 级, 承受的恒荷载标准值  $g_k = 6$  kN/m, 活荷载标准值  $q_k = 15$  kN/m, 混凝土强度等级为 C20, 采用 HRB335 钢筋, 梁的截面尺寸为  $bh = 250$  mm  $\times$  500 mm, 计算梁的纵向受拉钢筋截面面积  $A_s$ 。

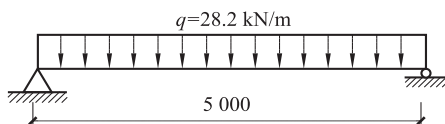


图 3-44 题(12)图

(13) 有一钢筋混凝土矩形截面梁的截面尺寸为  $bh = 200$  mm  $\times$  500 mm, 混凝土强度等级为 C20 ( $f_c = 9.6$  N/mm<sup>2</sup>,  $\alpha_1 = 1.0$ ), 采用 HRB335 钢筋配筋 ( $f'_y = f_y = 300$  N/mm<sup>2</sup>), 承受弯矩设计值  $M = 210$  kN  $\cdot$  m。试求所需钢筋截面面积。

(14) 已知一钢筋混凝土矩形梁的混凝土强度等级为 C20, 采用 HRB335 钢筋, 梁的截面尺寸为  $bh = 200$  mm  $\times$  400 mm,  $h_0 = 365$  mm, 受拉钢筋  $3\Phi 25$  ( $A_s = A'_s = 1473$  mm<sup>2</sup>), 受压钢筋  $2\Phi 16$  ( $A_s = A'_s = 402$  mm<sup>2</sup>)。要求承受弯矩设计值为  $M = 100$  kN  $\cdot$  m, 试验算此截面是否安全。

(15) 某钢筋混凝土矩形截面简支梁(见图 3-45)的截面尺寸为  $bh = 250$  mm  $\times$  600 mm, 混凝土强度等级为 C25, 纵向钢筋为 HRB400 级, 箍筋为 HPB300 级, 承受均布恒荷载标准值  $g_k = 25$  kN/m(包括自重), 均布活荷载标准值  $q_k = 40$  kN/m, 根据正截面受弯承载力计算配置纵向钢筋  $4\Phi 25$ 。试根据斜截面受剪承载力要求确定腹筋。

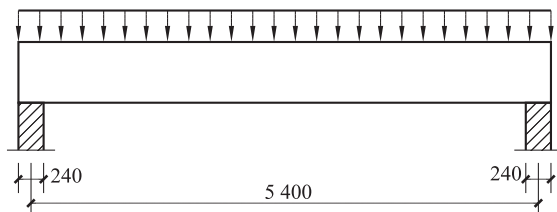


图 3-45 题(15)图



(16)某矩形截面简支梁的截面尺寸为 $bh=200\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ ,计算跨度 $l_0=5.2\text{ m}$ 。承受均布荷载,其中永久荷载标准值 $g_k=5\text{ kN/m}$ ,可变荷载标准值 $q_k=10\text{ kN/m}$ ,准永久值系数 $\psi_q=0.5$ 。配置 $4\Phi 12$ 钢筋,混凝土强度等级为C25,保护层厚度 $c=25\text{ mm}$ ,最大裂缝宽度限值 $w_{\text{lim}}=0.3\text{ mm}$ ,试验算最大裂缝宽度。

(17)已知矩形截面梁的截面尺寸为 $bh=200\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 、 $a_s=a'_s=40\text{ mm}$ 。该梁在不同荷载组合下受到变号弯矩作用,其设计值分别为 $M=-80\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $M=+140\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,采用C20混凝土,HRB400钢筋。试求:

①按单筋矩形截面计算在 $M=-80\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的作用下梁顶面需配置的受压钢筋截面面积 $A'_s$ 。

②按单筋矩形截面计算在 $M=+140\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的作用下梁底面需配置的受拉钢筋 $A_s$ 。

③将在 $M=-80\text{ kN}\cdot\text{m}$ 作用下梁顶面配置的钢筋 $A'_s$ 作为受压钢筋,按双筋矩形截面计算在 $M=+140\text{ kN}\cdot\text{m}$ 作用下梁底部需配置的受拉钢筋 $A_s$ 。

④比较②和③的总配筋面积。

(18)混凝土构件受到的扭转有哪几种?

(19)矩形截面钢筋混凝土纯扭构件的破坏形态与什么因素有关?有哪几种破坏形式?各有什么特点?

(20)试述 $\zeta$ 的意义和取值限制。

(21)矩形截面弯剪扭构件的受剪、受扭承载力如何计算?其纵向钢筋和箍筋如何配置?

(22)某钢筋混凝土矩形截面纯扭构件的截面尺寸为 $bh=250\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ ,承受的扭矩设计值 $T=15\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。混凝土强度等级为C20,纵向钢筋为HRB335级,箍筋为HPB300级,试配置该构件所需的抗扭钢筋。

(23)一钢筋混凝土矩形截面悬臂梁的截面尺寸为 $bh=200\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ ,混凝土强度等级为C25,纵向钢筋为HRB400级,箍筋为HPB300级,若在悬臂支座截面处作用设计弯矩 $M=56\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,设计剪力 $V=60\text{ kN}$ 和设计扭矩 $T=4\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,试确定该构件的配筋,并画出配筋图。

(24)什么是受压构件?受压构件可分为哪几种类型?

(25)试述受压构件的截面形式和尺寸要求。

(26)轴心受压构件计算中,稳定系数 $\varphi$ 的含义是什么?

(27)某钢筋混凝土轴心受压柱的计算长度 $l_0=4.9\text{ m}$ ,承受轴向力设计值 $N=1\ 580\text{ kN}$ ,采用C25混凝土和HRB400钢筋,求柱截面尺寸( $bh$ )及纵向钢筋截面面积( $A'_s$ )。

(28)钢筋混凝土框架柱的截面尺寸为 $bh=400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ ,承受轴向压力设计值 $N=2\ 500\text{ kN}$ ,柱的计算长度 $l_0=5.0\text{ m}$ ,混凝土强度等级为C30,钢筋采用HRB335级,试确定纵向钢筋截面面积 $A'_s$ 。

(29)某矩形截面钢筋混凝土柱的截面尺寸为 $bh=400\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ ,柱的计算长度 $l_0=3.0\text{ m}$ , $a_s=a'_s=40\text{ mm}$ 。控制截面上的轴向力设计值 $N=1\ 030\text{ kN}$ ,弯矩设计值 $M=425\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。混凝土强度等级为C25,纵向钢筋采用HRB335钢筋,对称配筋。试求钢筋截面面积 $A_s$ 和 $A'_s$ 。

(30)某建筑门厅处有现浇柱四根,其截面尺寸均为 $bh=250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 。由两端支承条件确定其计算高度 $l_0=3.2\text{ m}$ ,柱内配置 $4\Phi 20$ 钢筋( $A'_s=1\ 256\text{ mm}^2$ ),混凝土强度等级

为 C30。柱的轴向压力设计值  $N=950$  kN。试验算该柱截面是否安全。

(31) 轴心受拉构件承载力计算的适用范围是什么?

(32) 偏心受拉构件承载力计算的适用范围是什么?

(33) 试述偏心受拉构件的构造要求。

(34) 如何区分大、小偏心受拉构件? 如何计算它们的正截面承载力?

(35) 某矩形水池, 池壁厚 300 mm, 由内力计算得池壁某垂直截面弯矩设计值  $M=100$  kN·m, 轴向拉力设计值  $N=200$  kN(见图 3-46)。纵向钢筋为 HRB335 级, 混凝土强度等级为 C30, 试求垂直截面中沿池壁内侧和外侧所需钢筋截面面积  $A_s$  和  $A'_s$ 。

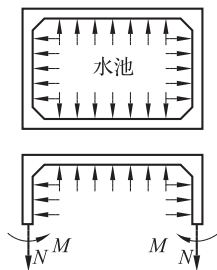


图 3-46 题(35)图

(36) 某偏心受拉构件的截面尺寸为  $bh=500$  mm $\times$ 300 mm, 轴向拉力设计值  $N=200$  kN, 弯矩设计值  $M=20$  kN·m。若钢筋为 HRB335 级, 混凝土强度等级为 C30, 试求截面所需的纵向受力钢筋截面面积并配筋。