

中等职业教育国家规划教材

员蔡智强社匀欣火碧卸德允蔡煥志

## 钢筋混凝土结构

(公路与桥梁专业)

主摇摇编摇摇柴金义

责任主审摇摇胡大琳

审摇摇稿摇摇白青侠

摇摇郭摇摇梅

人民交通出版社

摇摇为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的“职业教育课程改革和教材建设规划”,教育部全面启动了中等职业教育国家规划教材建设工作。交通职业教育教学指导委员会路桥工程学科委员会组织全国交通职业学校(院)的教师,根据教育部最新颁布的公路与桥梁专业的主干课程教学基本要求,编写了中等职业教育公路与桥梁专业国家规划教材共 8 册,并通过了全国中等职业教育教材审定委员会的审定。

本套教材的编写融入了全国各交通职业学校(院)公路与桥梁专业的教学改革成果,并结合了最新的技术标准、规范以及公路科技进步等情况,具有较强的针对性。新教材较好地贯彻了素质教育的思想,力求体现以人为本的现代理念,从交通行业岗位群的知识 and 技能要求出发,并结合对培养学生创新能力、职业道德方面的要求,提出教学目标并组织教学内容,在教材的理论体系、组织结构、内容描述上与传统教材有了明显的区别。

《钢筋混凝土结构》是中等职业教育公路与桥梁专业国家规划教材之一,内容包括:绪论,混凝土和钢筋材料性能,极限状态设计法,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件应力、变形和裂缝宽度计算,钢筋混凝土受压构件承载力计算,预应力混凝土结构设计共 8 章。

参加本书编写工作的有:内蒙古大学职业技术学院柴金义(编写第一、二、三、四、五、六章)、广西交通职业技术学院黎群(编写第七章)、云南交通职业技术学院张力孙(编写第八章),全书由内蒙古大学职业技术学院柴金义担任主编,云南交通职业技术学院张力孙担任责任编委。人民交通出版社聘请湖南交通职业技术学院文德云高级讲师担任本套教材的总统稿人。

本书由长安大学胡大琳教授担任责任主审,长安大学白青侠、郭梅副教授审稿。他们对书稿提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

# 前 摇 言

摇摇限于编者经历及水平,教材内容很难覆盖全国各地的实际情况,希望各教学单位在积极选用和推广国家规划教材的同时,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,以便再版修订时改正。

交通职业教育教学指导委员会  
路桥工程学科委员会  
二〇〇二年五月

|                           |   |
|---------------------------|---|
| 第一章 绪论                    | 员 |
| 第一节 钢筋混凝土结构的概念            | 员 |
| 第二节 钢筋混凝土在公路桥涵结构中的应用      | 圆 |
| 第三节 公路钢筋混凝土桥梁结构发展简况       | 圆 |
| 第四节 钢筋混凝土结构的学习方法          | 猿 |
| 第二章 混凝土和钢筋材料性能            | 缘 |
| 第一节 混凝土                   | 缘 |
| 第二节 钢筋                    | 苑 |
| 第三章 极限状态设计法               | 愿 |
| 第一节 极限状态的概念               | 愿 |
| 第二节 公路桥梁结构上的作用            | 缘 |
| 第三节 概率极限状态设计法             | 愿 |
| 第四章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算     | 愿 |
| 第一节 钢筋混凝土受弯构件的应用及其构造特点    | 愿 |
| 第二节 钢筋混凝土梁的正截面破坏状态        | 猿 |
| 第三节 单筋矩形截面正截面承载力计算        | 猿 |
| 第四节 双筋矩形截面正截面承载力计算        | 源 |
| 第五节 单筋 T 形截面正截面承载力计算      | 缘 |
| 第五章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算     | 远 |
| 第一节 概述                    | 远 |
| 第二节 斜截面受剪承载力计算            | 远 |
| 第三节 全梁承载力的校核              | 苑 |
| 第六章 钢筋混凝土受弯构件应力、变形和裂缝宽度计算 | 苑 |
| 第一节 施工阶段的应力计算             | 苑 |
| 第二节 变形计算                  | 苑 |
| 第三节 裂缝宽度计算                | 苑 |
| 第七章 钢筋混凝土受压构件承载力计算        | 愿 |
| 第一节 概述                    | 愿 |
| 第二节 轴心受压构件承载力计算           | 愿 |
| 第三节 矩形截面偏心受压构件承载力计算       | 愿 |
| 第四节 圆形截面偏心受压构件承载力计算       | 愿 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第八章摇预应力混凝土结构设计.....       | 页源 |
| 摇第一节摇预应力混凝土的基本概念.....     | 页源 |
| 摇第二节摇预应力混凝土结构材料.....      | 页苑 |
| 摇第三节摇预应力损失.....           | 页园 |
| 摇第四节摇预应力混凝土梁的受力阶段.....    | 页愿 |
| 摇第五节摇预应力混凝土梁的构造要求.....    | 页园 |
| 摇第六节摇预应力混凝土受弯构件承载力计算..... | 页源 |
| 摇第七节摇预加应力和使用阶段的应力验算.....  | 页缘 |
| 摇第八节摇部分预应力混凝土结构简介.....    | 页愿 |
| 参考文献.....                 | 页源 |

# 第一章 绪论

## 第一节 钢筋混凝土结构的概念

将水泥、集料(砂、砾石、碎石)和水按适当的比例拌和在一起,硬化后可获得坚固的类似岩石的材料,称为混凝土。混凝土的密度取决于形成混凝土的各种材料,普通混凝土的容重约为 $24\text{ kN/m}^3$ 。在混凝土组成中,粗、细集料占总体积的 $70\% \sim 80\%$ ,细集料由天然砂或成品砂组成,粗集料由碎石、砾石或铁矿渣构成。

混凝土的抗压强度很高,但抗拉强度却较低。为此,若要混凝土构件承受拉应力,就需要用抗拉强度很高的材料予以“加强”。通常的做法是在构件受拉部位放置适量的钢筋。在构件里设置钢筋的主要目的是加强构件的抗拉能力。此外,钢筋也可以用来加强混凝土构件受压区的抗压能力。因此,钢筋混凝土具备了既受压又受拉的性能,因而成为工程上广泛应用的建筑材料。

以混凝土材料为主制成的结构,称为混凝土结构。其中包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。混凝土结构中不配置钢筋或根据某些规定配置构造钢筋的混凝土结构称为素混凝土结构。根据受力要求把钢筋以合理的形式浇注在混凝土中而形成的混凝土结构称为钢筋混凝土结构。如果在混凝土结构中,通过张拉钢筋而对混凝土施加预压应力,就形成了预应力混凝土结构。混凝土的预压应力用以抵消荷载引起的拉应力,从而提高了结构的抗裂性。

钢筋和混凝土组成的材料在受到各种作用效应时具有两种材料的特点。例如,在钢筋混凝土受弯构件(梁、板)中,可以用钢筋来承受弯矩引起的全部拉应力,而受压区的混凝土承受压应力。在受拉为主的构件中,可以用钢筋来承受全部拉力,混凝土则对钢筋起保护作用,使钢筋免受腐蚀。在受压为主的构件中,为减小构件截面尺寸和改善构件的受力性能,可以配置一定数量的钢筋来分担构件所承受的压力。

钢筋和混凝土两种材料能够共同工作的原因是:

(1) 钢筋与混凝土之间的粘结面具有可靠的粘结力。混凝土的凝结作用、混凝土与表面粗糙或表面带肋纹的钢筋之间的机械咬合作用而在界面处形成了一定程度的粘结力,从而使钢筋和混凝土之间的粘结面具有一定的受剪承载力。这种粘结作用能够保证钢筋和混凝土协调变形、共同工作直至破坏。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数很接近(钢材为 $1.2 \times 10^{-5}$ ;混凝土为 $1.0 \times 10^{-5}$ )。因此,当外部温度发生变化时,在两种材料内不会因为收缩或膨胀而破坏两种材料之间的粘结强度。

(3) 钢筋外面的混凝土(指由钢筋表面到构件表面的混凝土保护层)的碱性性质对钢筋起到长期保护作用,使钢筋免遭腐蚀。

## 第二节 钢筋混凝土在公路桥涵结构中的应用

钢筋混凝土在公路工程中的应用非常广泛,用来建造公路桥梁的结构构件,其中包括受弯构件、轴心受力(受压和受拉)构件、偏心受力(受压和受拉)构件、受扭构件及复合受力构件等。板和梁作为受弯构件,柱式桥墩台、钻孔灌注桩作为偏心受压构件,桁架桥中的拉杆和系杆拱桥中的系杆作为偏心受拉构件,均是桥梁工程中应用很广的钢筋混凝土构件。

钢筋混凝土如此广泛的应用在于其具备下列主要优点:

(1) 强度高 钢筋混凝土的抗压强度很高,适合制作各类承重构件。

(2) 耐久性好 钢筋混凝土的强度是随时间的增长而增长的,同时钢筋混凝土对于遭受自然气候的干湿和冷热变化,以及化学侵蚀等均具有较强的抵抗力,又包住钢筋不使其生锈。

(3) 抗震性能好 钢筋混凝土结构因为整体性较好,具有一定的延性,故具有较好的抗震性能。

(4) 耐热性好 与钢结构相比,钢筋混凝土结构具有较好的耐火性。

(5) 可塑性好 可根据需要,浇注成各种形状和尺寸的结构。

(6) 可就地取材 钢筋混凝土结构构件所用的材料中,砂石材料所占比重较大,易于就地取材。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点如结构自重大,施工质量不易控制、抗裂性能较差等,从而使其应用范围受到一定限制。然而,随着生产和科技进步,钢筋混凝土的缺点已经或正在得以逐步克服,例如,采用轻质人工骨料代替天然骨料,大力发展装配式结构和应力结构,改进结构形式等。

## 第三节 公路钢筋混凝土桥梁结构发展简况

自古希腊和古罗马时代以来,混凝土及其胶结材料(如火山灰等)就一直在应用。19世纪中叶到20世纪初是钢筋混凝土结构发展的初期,那时已有一些简单的钢筋混凝土板、梁、柱、桁架和拱构件应用。1825年,英国人开开创了钢筋混凝土的应用。1845年,英国人辛普森和沃森对钢筋混凝土梁进行了一系列试验研究。1851年,英国人在英国的埃文斯顿镇跨辛普森河上修建了世界上第一座16m跨径的混凝土桥。随后,于1853年在美国旧金山金门公园修建了21m跨径的拱桥,1854年在法国建造了梁式桥。1856年,法国人又在比利时列日(比利时)建造了一座16m单跨桥。1857年,瑞士人在瑞士的莱茵河上修建了一座跨莱茵河的实腹式箱形三铰拱桥,该桥成为以后19年中同类结构的典范。1858年,法国人研制了第一块无梁混凝土板。钢筋混凝土在任何建筑形式上的适用性以及随着混凝土施工效率的提高,使其广泛地应用于桥梁建筑上。

1859年,沃森公布了混凝土结构理论与设计的第一份手稿。之后,1860年德国钢筋混凝土委员会、奥地利混凝土委员会、美国混凝土学会在该领域里的研究取得了相当的进展。到1865年,已修建了许多钢筋混凝土结构物,其中包括钢筋混凝土桥梁。1868年在前苏联,1870年在英国和美国先后有人提出了极限强度理论,大大推动了钢筋混凝土结构设计理论及其应用技术的发展。

在19世纪末期,法国人和英国人于1890年和1895年正式提出了预应力混凝土的概念。

念。但是,由于混凝土收缩和徐变引起的预应力损失很大,其应用没有获得成功。直到1948~1950年当云鹏等发明用高强钢材控制了预应力损失值,人们才认为预加应力法是可行的。自1950年以来,预加应力法在混凝土设计中的应用开创了混凝土应用的新境界。二次世界大战后,由于钢材的短缺,预应力混凝土成为大跨径桥梁结构的最流行的选择方案。如今,先张法和后张法预应力混凝土结构构件成功地应用于大型桥梁上。

随着生产力水平的提高,试验技术、计算理论研究、材料工艺的发展以及新型结构的开发应用,使钢筋混凝土成为现代工程中应用最广泛的建筑材料。目前,我国常用的混凝土强度已达到C40~C60,国外常用的混凝土抗压强度已达到C60以上。在20世纪70年代初,美国联邦公路管理局(云鹏)开始了高性能混凝土(匀质)在公路桥梁上的应用试验研究。高性能混凝土是指能满足各种特殊性能要求而采用非常规成分并经拌和、浇注和养护而成的混凝土。其突出的特性是强度高、渗透性低,比普通混凝土更耐久和强度更高。

近10年来,我国在钢筋混凝土基本理论与计算方法、可靠度与作用分析、检测技术以及电子技术在钢筋混凝土结构中的应用等方面取得了很多成果,为制定和修订有关规范、规程提供了大量的数据和科学依据。

我国的公路钢筋混凝土桥梁结构理论和对混凝土变形性能分析研究进步很快。在结构可靠度方面,已从单一安全系数法过渡到概率极限状态法。交通部颁布了《公路钢筋混凝土和预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-1985)等行业规范。国家先后颁布了《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB17351-1988)和《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010),这必将促进公路混凝土结构设计的技术应用。

## 第四节 钢筋混凝土结构的学习方法

“钢筋混凝土结构”课程是公路与桥梁专业的主干课程之一,主要学习桥梁规范规定的钢筋混凝土结构构件承载力的计算基本原理,其中包括构件的受力性能、承载力和变形计算方法等。这也是学习钢筋混凝土桥梁和涵洞等构造物的基础知识。

(1)在学习钢筋混凝土结构时,要着重从它与力学不同的方面来掌握钢筋混凝土的特点。由于混凝土是非匀质、非连续、非弹性的材料,钢筋混凝土结构构件的受力性能与力学中所讨论的材料不同。因此,力学中的计算公式可直接应用的情况不多。但是,在学习钢筋混凝土结构时可借鉴力学中解决问题的一般方法,如通过几何、物理和平衡关系建立基本方程的途径,只要在每一种关系的具体内容上考虑钢筋混凝土性能上的特点即可。由于钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种性能很不相同的材料所组成的,二者之间在受力和变形上存在着相互协调、相互制约的问题。这是钢筋混凝土结构的一个比较基本而又具有实际意义的问题。既然钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种材料组成的,则这两种材料在强度和数量上存在一个的配合比问题。如果材料强度的搭配或配筋的比值超过了一定的范围和界限,就会引起构件受力性能的改变。这是钢筋混凝土构件的特点,也是匀质材料构件所没有的。

(2)在学习和运用钢筋混凝土构件的计算公式时,要特别注意其适用范围和条件。钢筋混凝土构件的计算方法是建立在试验的基础上的。由于混凝土受力性能的复杂性,又没有非常完善的强度理论,有关混凝土的强度和变形规律在很大程度上是根据试验资料的统计分析给出的经验关系。

(3)在学习钢筋混凝土结构课程时,要注意学习对多种因素进行综合分析的方法。力学

课程侧重于构件的应力分析和变形计算,其解答往往是惟一的。钢筋混凝土结构课程所要解决的问题不仅仅是应力和变形问题,而主要问题是结构构件的设计,包括方案、截面形式和材料的选择以及配筋构造等。结构设计是一个综合性问题,需要考虑安全、适用、经济和施工的可行性等各个方面的因素。在给定的作用条件下,同一个构件可以有不同的截面形式和尺寸、配筋数量等多种答案,往往需要进行适用性、材料用量、造价、施工等各项指标的综合分析和比较才能合理地选择。

(源要学会运用规范。钢筋混凝土结构课程在很多方面与规范有关。为了贯彻国家的技术经济政策、保证设计与施工质量,达到设计方法上的统一化、标准化,国家颁布了钢筋混凝土结构的设计规范。这是工程技术人员必须遵守的规定,应该熟悉其内容并学会应用。

# 第二章 混凝土和钢筋材料性能

## 第一节 混凝土

### 一、混凝土的强度

强度是混凝土的最重要的力学性质。这是因为任何混凝土结构物主要用以承受荷载或抵抗各种作用力的。在一定情况下,在工程上还要求混凝土具有其他性能,如不透水性、抗冻性等。但是,这些性质与混凝土强度之间存在着密切的联系。一般说来,混凝土的强度愈高,其刚性、不透水性、抵抗风化和某些侵蚀介质的能力愈高。另一方面,其强度愈高,往往干缩也较大,同时较脆易裂。因此,通常用混凝土强度来评定和控制混凝土的质量以及评价各种因素(如原材料、配合比、制造方法和养护条件等)影响程度的指标。

#### 混凝土的抗压强度

在钢筋混凝土结构中,混凝土主要用来承受压力,因而研究其抗压强度是十分必要的。试验表明,混凝土的抗压强度除受组成材料的性质、配合比、养护环境、施工方法等影响外,还与试验方法及试件尺寸、形状有关。

#### 混凝土的强度等级

混凝土的强度等级应按立方体抗压强度标准值来划分。按照标准制作养护方法,以边长为150mm的立方尺寸标准试件(图2-1a)在温度为20℃及相对湿度不低于95%的环境中养护,做抗压试验时所测得的具有95%保证率的抗压强度值,单位以MPa计,称为混凝土的强度等级。混凝土强度等级采用符号C与立方体抗压强度标准值表示。例如,强度等级C25指立方体抗压强度标准值为25MPa。

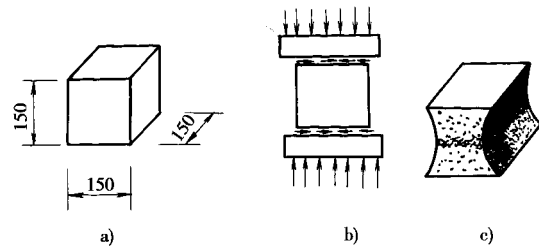


图2-1 混凝土的抗压强度试验(尺寸单位:毫米)

《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)(以下简称《规范》)规定,混凝土按强度等级可分为C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75和C80共十四个等级。钢筋混凝土结构的强度等级不应低于C20;当采用HRB335级钢筋时,混凝土强度等级不宜低于C25;当采用HRB400级和HRB500级钢筋以及承受重复荷载的构件,混凝土强度等级不得低于C25。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C30;当采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋作预应力钢筋时,混凝土强度等级不宜低于C35。

当试件受力后,纵向压缩,横向扩张,由于压力机垫板与试件上下表面之间的摩擦力影响,试件在横向不可能自由扩张,从而形成约束作用,提高了试件的抗压能力(图2-1c)。立方体试件尺寸愈小,这种影响愈大。

当采用非标准试件时,应将其抗压强度折算为标准试件抗压强度。对边长为 150mm 和 100mm 的立方体试件,折算系数分别采用 0.95 和 0.75

需要指出,立方体的受力情况并不能代表混凝土构件中的受力情况,它只是作为一种在给定的统一试验方法下衡量混凝土强度的基本方法。因为这种试件的制作和试验均比较简便,而且离散性较小。

### 圆轴心抗压强度 参图 图 10.1.1

用 标准试件的棱柱体试件按照与制作立方体试件相同的标准制作养护方法和标准试验方法。所测得的抗压强度,称为轴心抗压强度(或称为棱柱体抗压强度)。轴心抗压强度 是混凝土结构的最基本的强度指标。在实际工程结构中,绝大多数受压构件其高度比其支承面的边长要大得多,所以用棱柱体强度比立方体强度更好地反映混凝土的实际抗压能力。

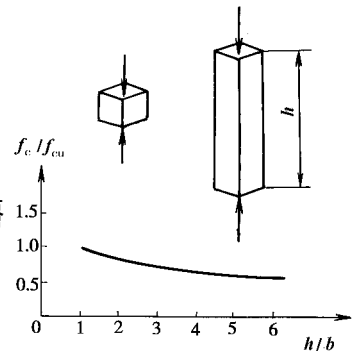


图 10.1.1 混凝土的轴心抗压强度试验

### 圆混凝土的抗拉强度 参

混凝土的抗拉强度很小,一般约为其抗压强度的 1/10~1/15。在钢筋混凝土结构构件的承载力计算中一般不考虑混凝土承受拉力,因此用不到这个强度指标。但在进行混凝土结构的抗裂性、抗剪、抗扭承载力等验算时均与抗拉强度有关。

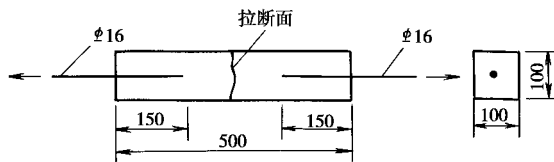


图 10.1.2 混凝土轴心抗拉强度试验(尺寸单位: mm)

混凝土抗拉强度的常用的测试方法如图

所示。用钢模浇筑成型的 圆柱体试件,通过预埋在试件轴线两端的肋纹钢筋(埋入长度为 150mm),对试件施加拉力,试件破坏时的平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度

### 圆强度标准值和强度设计值

按照极限状态设计法,材料强度的取值是在数理统计的基础上,根据结构的安全和经济条件,选取某一个具有保证率的强度值作为设计指标。在分析大量试验结果的基础上,认为混凝土在各种受力状态下(立方体受压、棱柱体受压及轴心受拉)的强度变化规律,均符合正态分布。

混凝土立方体强度的标准值相当于立方体抗压强度的统计平均值减去 1.645 倍均方差,即具有 95% 保证率的立方体抗压强度。与这个值相对应的各项强度指标(如轴心抗压强度、轴心抗拉强度等)就称为混凝土的各项“强度标准值”。

不同强度等级混凝土的轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值是由立方体抗压强度标准值推算出来的,其中假定混凝土的各种强度的概率分布具有相同的变异系数  $\delta$ (见表 10.1.3)。

混凝土的变异系数

表 10.1.3

| 混凝土强度等级       | C15  | C20  | C25  | C30  | C35  | C40  | C45  | C50  | C55  | C60  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 变异系数 $\delta$ | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |

混凝土的轴心抗压强度标准值

$$f_{ck} = \alpha_{cc} f_{cu,k} - \alpha_{cc} \sigma_{cu,k}$$

(10.1.4)

式中:  $\alpha_{cc}$ ——棱柱强度与立方强度之比值,《规范》规定,对于 C15 及以下混凝土取  $\alpha_{cc} = 0.8$



混凝土的收缩过程很长,但在结硬初期和前六个月中,可以完成全部收缩量的 80%~90%。在浇注后的几天内收缩变形最为强烈。

造成混凝土收缩的原因很多,主要因素有水泥用量、强度等级、品种、集料的物理性能、施工过程中振捣、养护、构件的体表比。混凝土收缩的结果会使钢筋混凝土结构产生裂缝,预应力混凝土结构产生预应力损失等,故应当设法减小。减少混凝土收缩的措施有:在浇筑混凝土时认真振捣,混凝土密度愈大,孔隙率愈小,收缩愈小;在混凝土浇筑的最初几天里,注意浇水养护(或蒸汽养护),避免混凝土中的水分过快地蒸发,可以比较有效地减少收缩和收缩裂缝;在满足强度等级要求的前提下,尽量减少用灰量,也可以减少混凝土的收缩。此外,还可以用增设伸缩缝来解决,对于较厚的和体积较大的混凝土板,在靠近上下表面的部位配置防止收缩裂缝展开的钢筋(常用  $\phi_{12}$ ~ $\phi_{16}$ ,间距 100~150mm)。

### 混凝土的徐变

在荷载的长期作用下(即压应力不变的情况下),混凝土的变形(即应变)随时间继续增长的现象称为混凝土的徐变(图 9-10)。

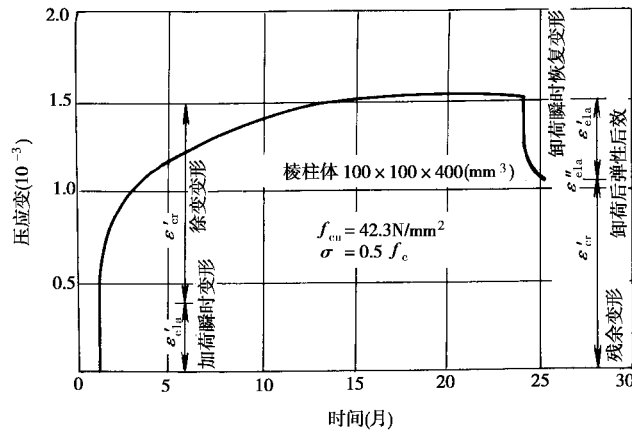


图 9-10 混凝土的徐变

在钢筋混凝土板、梁中,混凝土的徐变会降低板、梁的刚度,导致板、梁变形(挠度)的增加,故在计算板、梁的挠度时应考虑长期荷载作用下混凝土产生的徐变影响。

在预应力混凝土结构中,混凝土徐变会造成预应力钢筋中的应力损失。因此,在设计预应力混凝土结构时,必须考虑混凝土的徐变的影响。

试验表明,徐变变形具有如下特征:

(1) 在不变更力作用下,徐变开始增长较快,然后逐渐减慢,直至接近水平渐近线。

(2) 在荷载作用下,混凝土的应力愈大,徐变愈大。

(3) 加荷载时,混凝土龄期愈长,徐变就愈小。

(4) 混凝土强度愈大,徐变愈小。

(5) 混凝土的组成成分对徐变影响很大,水泥用量愈大,水灰比愈大,徐变亦愈大;增加集料的含量,集料越坚硬,弹性模量越大,对徐变的约束作用越大,混凝土徐变就减小。

(6) 混凝土的制作方法、养护条件对徐变也有重要影响,养护条件好,养护时温度高、湿度大、水泥水化作用充分,徐变就减小。

徐变分为线性徐变和非线性徐变。试验表明,当应力较小时(如  $\sigma_{ct} < 0.5 f_c$ ),徐变变形与

应力可近似看作成正比关系,曲线接近等间距分布,这种情形称为线性徐变。其特点是加荷初期徐变增长较快,六个月时一般已完成大部分,之后徐变增长逐渐减小并趋于稳定。当混凝土应力较大时(如 $\sigma_{\text{预}} > 0.5 f_c$ )时,徐变变形增量与应力增量不成正比,徐变比应力增长更快,故称此为非线性徐变。非线性徐变的特点是徐变变形急剧增加且呈现非稳定现象。

应该指出,混凝土的徐变和收缩具有本质上的不同,收缩是混凝土本身在结硬过程中的物理化学现象,它与外力无关,而徐变是在静力荷载长期作用下,发生在力的作用方向的塑性变形。

### 混凝土的变形模量

变形模量是指材料产生单位应变所需要的应力,它是衡量材料刚度性能的重要指标。

在进行结构设计时,计算钢筋混凝土构件的变形或抗裂性能以及预应力混凝土构件的截面应力时,均需要混凝土的弹性模量。

对于弹性材料,应力和应变之间的关系符合线性规律,其弹性模量 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ 是一个常量。

混凝土不是弹性材料,而是弹塑性材料,应力-应变图呈曲线状态(图 10-10),即应力与应变之间不存在线性关系。因此,混凝土的变形模量不是弹性模量,而应该是包括塑性变形(即不可恢复原状的变形)在内的弹塑性模量。

为消除混凝土的塑性变形影响,求得有代表性的弹性模量,规范采用棱柱体试件在应力 $\sigma$  越 $\sigma_{\text{预}}$ 之间反复加荷 $n$ 次的方法,从大量的试验数据中来确定混凝土的弹性模量(图 10-11)。每次卸荷至应力为零,都要残存一部分塑性变形,随着加荷次数增加,塑性变形逐渐减小,当重复加荷 $n$ 次后,应力-应变曲线接近于直线,此时求得的直线斜率即为规范所决定的弹性模量值 $E_{\text{弹}}$ ,即:

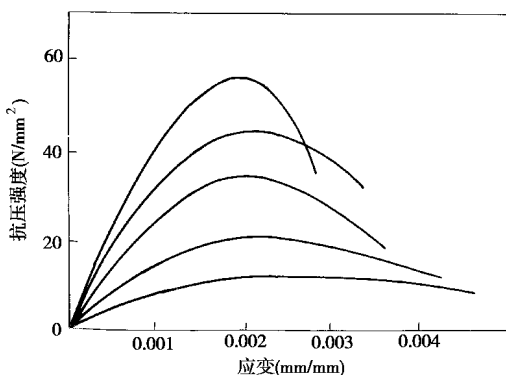


图 10-10 混凝土的应力-应变图

图

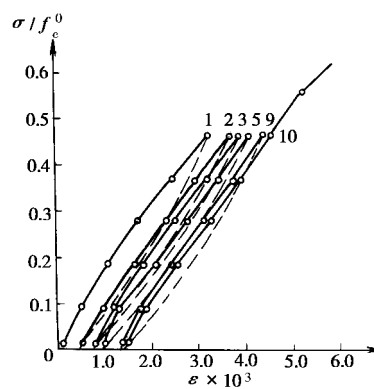


图 10-11 混凝土反复加荷受压时应力-应变图

$$E_{\text{弹}} = \frac{\sigma_{\text{预}}}{\epsilon_{\text{弹}}} \quad (10-10)$$

利用上述测定的结果及通过回归分析,即可求得混凝土的弹性模量与其主要影响参数立方体抗压强度 $f_c$ 之间的关系表达式为:

$$E_{\text{弹}} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{f_c}{f_{c0}} \right)^{\beta} \quad (10-11)$$

式中 $f_c$ 以混凝土强度等级值(按 $f_{cu}$ 计)代入,即可求得与立方体抗压强度标准值相对应

怨



## 二、钢筋的力学性能

在钢筋混凝土结构中,所用的钢筋分为有屈服点钢筋和无屈服点钢筋。

钢筋混凝土结构中采用的热轧钢筋其含碳量低,均属于有屈服点钢筋之列,其应力应变曲线的特点是有明显的屈服台阶,屈服强度是软钢的主要强度指标。钢绞线、钢丝和热处理钢筋均属于无屈服点钢筋之列,其应力应变曲线的特点是明显的屈服台阶。

图 2-1 为有屈服点钢筋的应力应变曲线。如图所示,在应力达到  $a$  点以前,应力与应变成正比, $a$  点称为比例极限。在比例极限稍稍往上的地方是弹性极限。在到达弹性极限之前,钢筋的变形是弹性的。超过弹性极限之后,钢的塑性变形明显加快,应力达到  $b$  点,钢筋开始流动,即应力不再增加而应变在增加, $b$  点称为屈服上限。 $b$  点是不稳定的从  $b$  点降到  $c$  点(屈服下限),这时应力水平基本不变而应变急剧增加。 $c$  点以后在应力应变曲线上出现一个水平段( $cd$ 段)称为屈服台阶(或称为流幅)。在屈服台阶上,钢筋几乎完全按塑性体工作。超过屈服台阶( $d$ 点)之后,钢筋进入强化阶段,应力应变曲线又表现为上升的趋势,一直持续到  $e$  点( $e$ 点的应力称为钢筋的极限强度)。这时钢筋具有弹性和塑性两重性质。经过  $e$  点,钢筋产生颈缩现象,应力应变曲线开始下降,到  $f$  点钢筋被拉断。

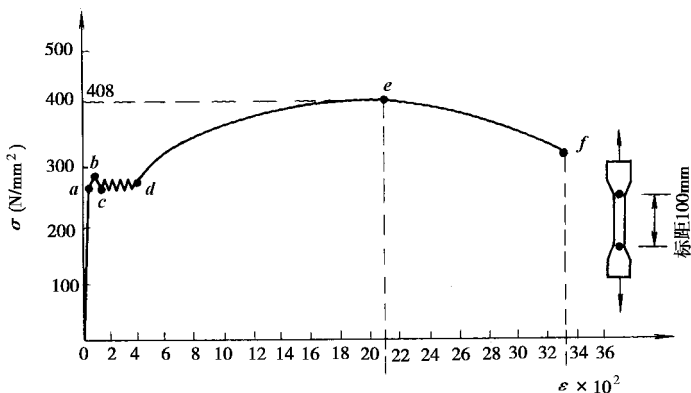


图 2-1 有屈服点钢筋的应力—应变曲线

在钢筋混凝土结构构件计算中,对有屈服点的钢筋,均取屈服强度作为强度限值。这是因为构件中的钢筋应力达到屈服点后会产生很大的塑性变形,使钢筋混凝土构件出现很大和不可闭合的裂缝,从而不能继续正常使用。因此,钢筋强度到达  $c$  点后,只能作为安全储备,而不能作为计算依据。

钢筋屈服台阶的大小随着钢筋的品种而异,屈服台阶大的钢筋,相对变形值大,塑性性能好。

钢绞线、钢丝和热处理钢筋的应力、应变曲线没有明显的屈服台阶(图 2-2),通常根据国家标准极限抗拉强度  $\sigma_{\text{断}}$  来确定。采用图 2-3 的钢筋应力作为条件屈服点,即取加载至  $\sigma_{\text{断}}$  再卸载后所观测得的塑性变形为图 2-4 时对应的应力。

## 三、钢筋的种类和级别

目前,在钢筋混凝土和预应力混凝土结构中,常用的钢筋和钢丝按其生产工艺和力学性能的不同,可以分为热轧钢筋、冷拉钢筋、钢丝和热处理钢筋。其中热轧钢筋和冷拉钢筋属于有屈服点钢筋,而钢丝和热处理钢筋属于无屈服点钢筋。

## 热轧钢筋

热轧钢筋按其强度大小分为四级,即:

Ⅰ级钢筋(Ⅰ级)——圆钢

Ⅱ级钢筋(Ⅱ级)——圆钢

Ⅲ级钢筋(Ⅲ级)——圆钢

Ⅳ级钢筋——圆钢

图 1-10 为各级热轧钢筋典型的应力—应变曲线。随着钢筋等级的提高,钢筋的屈服强度和极限抗拉强度都在逐级增长,但延伸率则逐级减少。

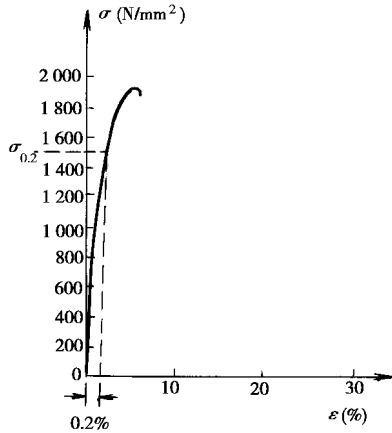


图 1-10 无屈服点钢筋的应力—应变曲线

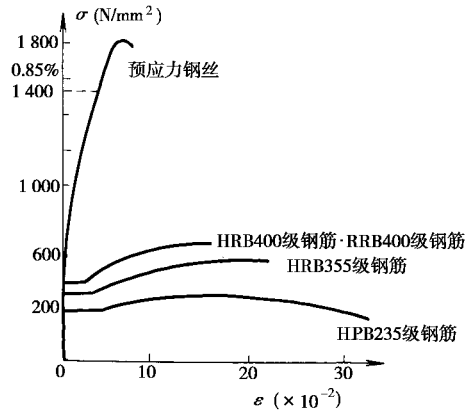


图 1-11 各级热轧钢筋应力—应变曲线

考虑到各种类型钢筋的使用条件,并从外观上加以区别,Ⅰ级钢筋为光面圆钢筋,Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级钢筋都在表面上轧有肋纹(包括两条纵肋和一系列与纵肋以不小于 45° 的角度相交的横肋)如图 1-12 所示。

Ⅰ级光面圆钢筋主要用于小型钢筋混凝土结构构件中的受力主筋以及钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构中的箍筋和构造钢筋。其强度在结构构件中能够得到充分的利用。

Ⅱ级钢筋强度比Ⅰ级钢筋高且表面轧有肋纹与混凝土的粘结强度好,用于钢筋混凝土结构中,可以比较有效地节约钢材。

Ⅲ级钢筋强度较高,具有较好的粘结性能,用途与Ⅱ级钢筋相同。

Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级热轧钢筋均具有良好的可焊性能,可以采用电弧焊或闪光对焊。

## 冷拉钢筋

冷拉是把钢筋应力拉到超过屈服点强度但小于抗拉极限强度,然后放松钢筋,则钢筋在恢复其变形的过程中,由于已经产生了较大的塑性变形,应力—应变曲线(图 1-13)不能回到原点,将沿着平行于原点的直线回到原点,这时如果立即重新施加拉应力,则应力—应变曲线将沿着原曲线进行,屈服点则相应从  $\sigma_s$  提高到  $\sigma_s'$ 。如果放松钢筋后,停留一段时间后再进行张拉

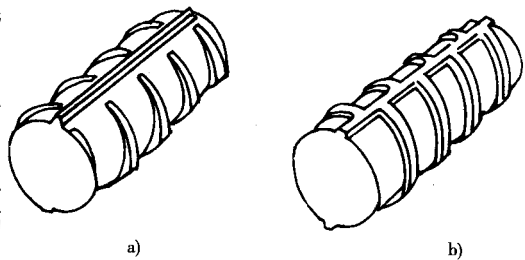


图 1-12 变形钢筋的外形  
月牙纹钢筋、带螺纹钢筋