



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

# 结构设计原理

吴清伟 主 编  
张 辉 主 审



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

# 结构设计原理

---

|   |   |     |     |
|---|---|-----|-----|
| 主 | 编 | 吴清伟 |     |
| 编 | 写 | 唐玉勃 | 桑海军 |
| 主 | 审 | 张 辉 |     |



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育），主要包括钢筋混凝土结构的力学性能、钢筋混凝土结构的基本计算原则、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在施工阶段的应力计算、钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝宽度计算、轴心受压构件承载力计算、偏心受压构件承载力计算、预应力混凝土结构的基本概念及材料、预应力混凝土受弯构件按承载能力极限状态设计计算、预应力混凝土受弯构件按正常使用极限状态设计计算、预应力混凝土简支梁设计、圬工结构的基本概念与材料。

本书依据交通部颁布的最新行业标准编写，在编写过程中，严格执行新标准、新规范，注意收集新材料、新技术、新工艺。理论部分本着“必须、够用”的原则，注重讲清概念、基本原理和基本方法。计算部分多是实际工程中的例子。

本书主要作为道路桥梁工程技术、公路监理、高等级公路维护与管理专业的教材，也可供相关专业的技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

结构设计原理/吴清伟主编. —北京：中国电力出版社，  
2015.8

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育  
ISBN 978-7-5123-7932-9

I. ①结… II. ①吴… III. ①建筑结构-结构设计-高等职业教育-教材 IV. ①TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 141164 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2015 年 8 月第一版      2015 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米    16 开本    14 印张    336 千字  
定价 28.00 元

## 敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有    翻 印 必 究

# 前 言

随着交通事业的飞速发展,公路建设中的新工艺、新材料、新技术广泛普及和应用,急需更新教材内容,以适应人才培养需求。根据专业教学计划的要求,本着教学与生产相结合的原则,编写本教材。

本教材依据《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)、《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTGD61—2005)编写。

本教材在编写过程中,严格执行新标准、新规范,注意收集新材料、新技术、新工艺,尽量体现高等职业教育的特色,密切结合生产实际。理论部分本着“必须、够用”的原则,注重讲清概念、基本原理和基本方法。计算部分多是实际工程中的例子。

本书共分十三章,绪论、第一章~第五章由辽宁省交通高等专科学校吴清伟编写;第六章~第八章、第十三章由辽宁省交通高等专科学校唐玉勃编写;第九章~第十二章由辽宁省交通高等专科学校桑海军编写。全书由张辉主审。

由于编者水平和能力所限,书中错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者  
2015 年 1 月

## 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 前言                      |    |
| 绪论                      | 1  |
| 第一章 钢筋混凝土结构的力学性能        | 4  |
| 第一节 钢筋混凝土结构的基本概念        | 4  |
| 第二节 钢筋的力学性能             | 6  |
| 第三节 混凝土的力学性能            | 9  |
| 第四节 钢筋与混凝土的黏结           | 13 |
| 思考题                     | 16 |
| 第二章 钢筋混凝土结构的基本计算原则      | 17 |
| 第一节 极限状态设计的基本概念         | 17 |
| 第二节 作用效应组合              | 22 |
| 第三节 极限状态设计原则            | 24 |
| 第四节 材料强度的标准值与设计值        | 25 |
| 思考题                     | 29 |
| 第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算   | 30 |
| 第一节 受弯构件的截面形式与构造        | 30 |
| 第二节 受弯构件的受力分析           | 37 |
| 第三节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算  | 40 |
| 第四节 双筋矩形梁正截面承载力计算       | 47 |
| 第五节 T形截面承载力计算           | 50 |
| 思考题                     | 58 |
| 习题                      | 59 |
| 第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算   | 60 |
| 第一节 概述                  | 60 |
| 第二节 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态   | 60 |
| 第三节 受弯构件斜截面抗剪承载力计算      | 62 |
| 第四节 受弯构件斜截面抗弯承载力计算      | 67 |
| 第五节 全梁承载力校核             | 68 |
| 思考题                     | 78 |
| 习题                      | 79 |
| 第五章 钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算 | 80 |
| 第一节 换算截面                | 80 |
| 第二节 受弯构件在施工阶段的应力计算      | 84 |
| 思考题                     | 89 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 习题 .....                                  | 90         |
| <b>第六章 钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝宽度计算 .....</b>       | <b>91</b>  |
| 第一节 受弯构件的变形(挠度)计算 .....                   | 91         |
| 第二节 受弯构件裂缝宽度计算 .....                      | 93         |
| 思考题 .....                                 | 98         |
| 习题 .....                                  | 98         |
| <b>第七章 轴心受压构件承载力计算 .....</b>              | <b>100</b> |
| 第一节 概述 .....                              | 100        |
| 第二节 普通箍筋柱 .....                           | 100        |
| 第三节 螺旋箍筋柱 .....                           | 106        |
| 思考题 .....                                 | 109        |
| 习题 .....                                  | 109        |
| <b>第八章 偏心受压构件承载力计算 .....</b>              | <b>111</b> |
| 第一节 概述 .....                              | 111        |
| 第二节 偏心受压构件的纵向弯曲 .....                     | 115        |
| 第三节 矩形截面偏心受压构件 .....                      | 118        |
| 第四节 圆形截面偏心受压构件 .....                      | 128        |
| 思考题 .....                                 | 136        |
| 习题 .....                                  | 137        |
| <b>第九章 预应力混凝土结构的基本概念及材料 .....</b>         | <b>138</b> |
| 第一节 概述 .....                              | 138        |
| 第二节 部分预应力混凝土与无黏结预应力混凝土 .....              | 140        |
| 第三节 预加应力的方法与设备 .....                      | 142        |
| 第四节 预应力混凝土结构的材料 .....                     | 147        |
| 思考题 .....                                 | 148        |
| <b>第十章 预应力混凝土受弯构件按承载能力极限状态设计计算 .....</b>  | <b>150</b> |
| 第一节 概述 .....                              | 150        |
| 第二节 预加应力的计算与预应力损失的估算 .....                | 152        |
| 第三节 预应力混凝土受弯构件的承载力计算 .....                | 159        |
| 思考题 .....                                 | 165        |
| <b>第十一章 预应力混凝土受弯构件按正常使用极限状态设计计算 .....</b> | <b>167</b> |
| 第一节 预应力混凝土受弯构件的应力计算 .....                 | 167        |
| 第二节 端部锚固区计算 .....                         | 174        |
| 第三节 使用阶段正截面和斜截面抗裂验算 .....                 | 178        |
| 第四节 变形计算 .....                            | 180        |
| 思考题 .....                                 | 182        |
| <b>第十二章 预应力混凝土简支梁设计 .....</b>             | <b>183</b> |
| 第一节 预应力混凝土受弯构件的基本构造 .....                 | 183        |
| 第二节 预应力混凝土简支梁设计计算示例 .....                 | 189        |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 思考题.....               | 196 |
| 第十三章 圬工结构的基本概念与材料..... | 197 |
| 第一节 概述.....            | 197 |
| 第二节 圬工结构的材料.....       | 197 |
| 第三节 砌体的强度与变形.....      | 201 |
| 第四节 圬工结构的承载力计算.....    | 207 |
| 思考题.....               | 214 |
| 习题.....                | 214 |
| 参考文献.....              | 215 |

## 绪 论

### 一、本课程的任务及与其他课程的关系

结构设计原理主要是研究钢筋混凝土、预应力混凝土、石材及混凝土(通称圬工)结构构件的设计原理。其主要内容包括如何合理选择构件截面尺寸及其连接方式,并根据承受作用的情况验算构件的承载力、稳定性、刚度和裂缝等问题,且为今后学习桥梁工程和其他道路人工构造物的设计计算奠定理论基础。本课程是介于“基础课和专业课之间的技术基础课”。

各种桥梁结构都是由桥面板、横梁、主梁、桥墩(台)、拱、索等基本构件所组成。桥梁或道路人工构造物都要受到各种外力,如车辆荷载、人群荷载、风荷载及桥跨结构各部分自重等作用。建筑物中承受作用和传递作用的各个部件的总和统称为结构,因而结构是由各个基本构件,如板、梁、拱、索等组成。由这些基本构件可以组合成各种各样的桥梁及道路人工构造物。结构设计原理课程就是以这些基本构件为主要研究对象的一门学科。

根据构件受力特点,可将基本构件归纳为受拉构件、受压构件、受弯构件和受扭构件等最基本的受力图式。在工程实际中,有些构件的受力和变形比较简单,有些构件的受力和变形则比较复杂,常用的可能是几种受力状态的组合。

在外荷载的作用下,构件有可能由于承载力不足而破坏或变形过大而不能正常使用。因而,在设计基本构件时,要求构件本身必须具有一定的抵抗破坏和抵抗变形等能力,即“承载能力”。构件承载能力的大小与构件的材料性质、几何形状、截面尺寸、受力特点、工作条件、构造特点及施工质量等因素有关。当其他条件已确定,如果构件的尺寸过小,则结构将有可能因产生过大的变形而不能正常使用,或材料强度不够而导致结构的破坏。为此,如何正确地处理好作用与承载力之间的关系,就是本课程所讨论的主要内容。

结构设计原理是一门重要的技术基础课。它是在学习材料力学、道路建筑材料等先修课程的基础上,结合桥梁工程中实际构件的工作特点,来研究结构构件设计的一门学科。

本教材的主要内容取材于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)。这些设计规范是我国公路桥涵结构物设计的主要依据。在学习过程中,应熟悉上述规范。只有对上述规范条文的概念、实质有了正确的理解,并能准确地应用规范中的公式和条文,才有可能设计出优秀的桥涵及其他人工构造物。

在学习本课程时,应着重了解构件的受力特点和变形特点,以及在此基础上建立起来的符合实际受力情况的力学计算图式。由于本课程与建筑材料有着紧密的关系,而各种建筑材料(钢、木、混凝土、石材等)的性质是各不相同的,故本课程往往要依赖于科学实验的结果。因此,在进行理论推导时,经常要在计算公式中引进一些半经验半理论的修正系数。此外,学习本课程的另一个特点是设计的多方案性。只要在保证结构设计要求的前提下,答案常常不是唯一的,而且,设计计算工作也不是一次就可以获得成功的。

根据所选用的材料不同,结构可分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、石材及混凝土

土结构（圬工结构）、钢结构和木结构等。当然，也可以是采用各种材料组成的组合结构。本课程主要介绍钢筋混凝土、预应力混凝土、石材及混凝土结构的材料特点及基本构件受力性能、设计计算方法和构造。

## 二、各种材料结构的特点及使用范围

目前国内外桥梁的发展总趋势是轻型化、标准化和机械化。因而，对基本构件的设计也应符合上述要求。

### （一）各种材料结构的特点

#### 1. 结构质量

为了达到增大结构跨径的目的，应力求使构件能作成薄壁、轻型和高强。钢材的单位体积质量（重力密度）虽大，但其强度却很高；木材的强度虽很低，但其重力密度却很小。如果以材料重力密度  $\gamma$  与容许应力  $[\sigma]$  之比（以  $\gamma/[\sigma]$ ）作为比较标准，且以钢质量为 1.0，则其他结构的相对质量  $\gamma/[\sigma]$  大致为：①受压构件：木材取 1.5~2.4，钢筋混凝土取 3.8~11，砖石取 9.2~28；②受弯构件：木材取 1.5~2.4，钢筋混凝土取 3~10，预应力混凝土取 2~3。从以上比较可以看出，在跨径较大的永久性桥梁结构中，采用预应力混凝土结构是十分合理和经济的。

#### 2. 使用性能

从结构抵抗变形的能力（即刚度）、结构的延性、耐久性和耐火性等方面来说，则以钢筋混凝土结构和圬工结构较好；钢结构和木结构则都需要采取适当的防护措施和定期进行保养维修。预应力混凝土结构的耐久性比钢筋混凝土结构更好，但其延性则不如钢筋混凝土结构好。

#### 3. 建筑速度

石材及混凝土结构和钢筋混凝土结构较易就地取材；钢、木结构则易于快速施工。由于混凝土工程需要有一段时间的结硬过程，因而施工工期一般较长。尽管装配式钢筋混凝土结构可以在预制工厂进行工业化成批生产，但建筑工期要比钢、木结构稍长。

### （二）各种结构的使用范围

#### 1. 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种材料组成的，具有易于就地取材、耐久性好、刚度大、可模性（也可以根据工程需要浇筑成各种几何形状）好等优点。钢筋混凝土结构的应用范围非常广泛，如各种桥梁、涵洞、挡土墙、路面、水工结构和房屋建筑等。当采用标准化、装配化的预制构件，更能保证工程质量和加快施工进度。相对于预应力混凝土结构而言，钢筋混凝土结构有较好的延性，对抗震结构更为有利。但是，钢筋混凝土结构也有结构自重较大、抗裂性能差、修补困难等缺点。

#### 2. 预应力混凝土结构

结构在承受作用之前预先对混凝土受拉区施以适当压应力的结构称为“预应力混凝土结构”，因而在正常使用条件下，可以人为地控制截面上只出现很小的拉应力或不出现拉应力，从而延缓了裂缝的发生和发展，且可以使用高强度钢筋和高等级混凝土的“高强度”在结构中得到充分利用，降低了结构的自重，增大了跨越能力。目前，预应力混凝土结构在国内外得到了迅速发展，是现今桥梁工程中应用较广泛的一种结构。近年来，部分预应力混凝土结构也在快速发展。它是介于普通钢筋混凝土结构与全预应力混凝土结构之间的一种中间状态

的混凝土结构。它可以人为地根据结构的使用要求,控制混凝土裂缝的开裂程度和拉应力大小。

### 3. 石材及混凝土结构(圬工结构)

用胶结材料将天然石料、混凝土预制块等块材按一定规则砌筑而成整体结构即为圬工结构。石料及混凝土结构在我国使用广泛,常用于拱圈、墩台、基础和挡土墙等结构中。

本书主要讲述的是钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构,对钢结构、木结构不作重点介绍。

## 三、工程结构设计的基本要求

公路桥梁应根据所在公路的使用任务、性质和将来的发展需要,按照适用、安全、经济 and 美观的原则进行设计,也要考虑因地制宜、就地取材、便于施工和养护的原则,合理地选择适当的结构形式,同时,应尽可能地节省木材、钢材和水泥。

在设计结构物时,应进行全面综合考虑,严格遵照有关的技术标准和设计规范进行设计。对于一些特殊结构或创新结构,则可参照国家批准的专门规范或有关的先进技术资料进行设计,同时,还应进行必要的科学实验。

桥涵结构在设计基准期内应有一定的可靠度,这就要求桥涵结构的整体及其各个组成部分的构件在使用荷载作用下具有足够的承载力、稳定性、刚度和耐久性。承载力要求是指桥涵结构物在设计基准期内,它的各个部件及连接的各个细部都符合规定的要求或具有足够的安全储备。稳定要求是指整个结构物及其各个部件在计算荷载作用下都处于稳定的平衡状态。桥涵结构物的刚度要求是指在计算荷载作用下,桥涵结构物的变形必须控制在容许范围以内。桥涵结构物的耐久性是指桥涵结构物在设计基准期内不得过早地发生破坏而影响正常使用。

值得注意的是,不可片面地强调结构的经济性指标而降低对结构物耐久性的要求,从而影响桥涵结构物的使用寿命或更多地增加桥涵及道路人工构造物的维修、养护、加固的费用。

因此,桥涵结构物的所有结构和连接细部都必须进行设计和验算。同时,每个工程技术人员都必须清楚地懂得,正确处理好结构构造问题是十分重要的,这与处理好设计计算问题同等重要。因而,在进行结构设计时,首先应根据材料的性质、受力特点、使用条件和施工要求等情况,慎重地进行综合性分析,然后采取合理的结构措施,确定构件的几何形状和各部尺寸,并进行验算和修正。

另外,每个结构构件除应满足使用期间的承载力、刚度和稳定性要求外,还应满足制造、运输和安装过程中的承载力、刚度和稳定性要求。桥涵结构物的结构形式必须受力明确、构造简单、施工方便和易于养护等,设计时必须充分考虑当时、当地的施工条件和施工的可能性。设计时应充分注意我国的国情,应尽可能地采用适合当地情况的新材料、新工艺和新技术。

# 第一章 钢筋混凝土结构的力学性能

## 第一节 钢筋混凝土结构的基本概念

### 一、混凝土结构的一般概念

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指不配置任何钢材的混凝土结构；钢筋混凝土结构是指用普通钢筋作为配筋的普通混凝土结构；预应力混凝土结构是指在结构构件制作时，在其受拉部位预先施加压应力的混凝土结构。

混凝土是土木建筑工程中广泛应用的一种建筑材料。混凝土材料的抗压强度较高，抗拉强度却很低（抗拉强度仅是抗压强度的  $1/18 \sim 1/8$ ）。因此，素混凝土构件的应用范围非常有限，主要用于受压构件，如柱、墩、基础等。如果将它用作受弯构件，如图 1.1.1(a) 所示的素混凝土梁，由于混凝土的抗拉能力很小，在相对较小的荷载下，受拉区就会开裂，导致梁的瞬间脆断破坏。梁的开裂荷载即为其破坏荷载  $P=14\text{kN}$ ，这时受压区混凝土的抗压强度还远远没有充分利用。钢材的抗拉强度和抗压强度都很高，如果在梁的受拉区配置一定

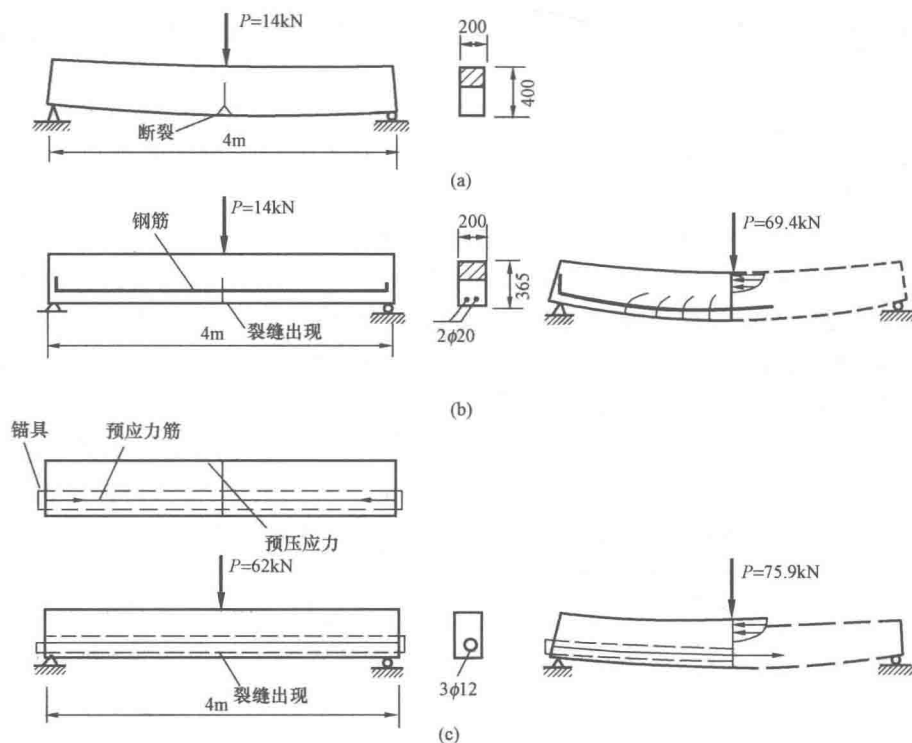


图 1.1.1 简支梁的受力图 (单位: mm)

(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁; (c) 预应力混凝土梁

数量的钢筋,形成钢筋混凝土梁,可以使钢筋和混凝土这两种物理-力学性能不同的材料在共同工作中发挥各自的优点。如图 1.1.1(b) 所示,当荷载  $P=14\text{kN}$  作用下,虽然受拉区混凝土还会开裂,但钢筋可以替代开裂的混凝土承受拉力,因而可继续加载,直到钢筋达到屈服后,梁才达到破坏荷载  $P=69.4\text{kN}$ 。可见,钢筋混凝土梁的承载能力比素混凝土梁有很大提高。破坏时,钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度均得到了充分利用,虽然梁过早开裂的问题没有解决,但却收到下列效果:

- (1) 结构承载能力有很大提高。
- (2) 结构的受力性能得到显著改善。

如果在混凝土梁受荷载以前先在梁中建立起预压应力,就形成预应力混凝土梁,如图 1.1.1(c) 所示。由于外荷载要先抵消预压应力才能使梁产生拉应力,因此预应力混凝土梁开裂荷载 ( $P=62\text{kN}$ ) 比钢筋混凝土有较大的提高,从而防止了梁的过早开裂。破坏时 ( $P=75.9\text{kN}$ ),混凝土梁与钢筋混凝土梁相似,钢筋和混凝土这两种材料的强度均得以充分利用。

## 二、钢筋混凝土的特点

钢筋和混凝土是两种性质不同的材料,它们之所以能有效地结合在一起共同工作,主要是由于:

(1) 钢筋和混凝土之间有着可靠的黏结力,能相互牢固地结成整体,在外荷载作用下,钢筋与相邻混凝土能够协调变形,共同受力。

(2) 钢筋与混凝土的温度线膨胀系数相近 [钢为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],因此,当温度发生变化时,钢筋混凝土构件内只产生较小的温度应力,不致破坏钢筋和相邻混凝土之间的黏结力。

(3) 钢筋被混凝土包裹,从而防止钢筋锈蚀,保证了结构的耐久性。

钢筋混凝土结构除了能合理利用钢材和混凝土两种材料的特性外,还具有下述优点:

(1) 合理地利用了钢筋和混凝土这两种材料的受力特点,可以形成具有较高承载能力的结构构件。

(2) 由于混凝土的强度是随着时间的增长而增长,在正常养护下,混凝土 1 年龄期的强度约是 28d 强度的 1.5 倍,因而,钢筋混凝土结构的使用寿命可以很长,耐久性较好。相对于钢、木结构而言,几乎不需要经常性地维修和养护,耐火性较好。

(3) 钢筋混凝土结构的构件种类较多,施工方法的适应性很强,既可以整体式现场浇筑,也可以预制装配,并且可以根据需要浇筑成各种形状的结构。

(4) 现浇钢筋混凝土结构的整体性好,抗震性较好。

(5) 混凝土中占比例较大的砂、石等材料,大多数可就地取材,节省运费,降低建筑成本。

钢筋混凝土结构也存在以下一些缺点:

(1) 由于钢筋混凝土结构的自重较大,因此当达到一定跨径时,其承受活荷载的能力就会显著降低。

(2) 抗裂性差,混凝土的抗拉强度非常低,因此,普通钢筋混凝土结构经常带裂缝工作,裂缝的存在会影响结构的耐久性和美观。

(3) 浇筑混凝土时需要模板支撑。

(4) 户外施工受到季节条件限制；在雨期和冬期进行混凝土施工时，必须对混凝土浇筑、振捣和养生等工艺采取相应的措施，这样才能确保施工质量。

钢筋混凝土结构虽然有缺点，但毕竟有其独特的优点，所以在桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、路面工程等方面都得到了广泛应用。

第二节 钢筋的力学性能

钢筋混凝土结构中使用的钢筋，不仅要强度高，而且要具有良好的塑性和可焊性，同时还要求与混凝土有较好的黏结性能。

一、钢材的分类

钢筋混凝土结构用的钢材，按直径粗细可分为钢筋和钢丝两类。凡是直径  $d \geq 6\text{mm}$  者，称钢筋；直径  $d < 6\text{mm}$  者，称为钢丝。钢筋根据生产工艺和加工条件可分为热轧钢筋、冷拉钢筋和热处理钢筋三种。将钢筋在高于再结晶温度状态下，用机械方法轧制成的不同外形的钢筋，称为热轧钢筋。热轧钢筋按照外形特征可分为光圆钢筋 [见图 1.2.1(a)] 和变形钢筋 [见图 1.2.1(b)、(c)、(d)]。

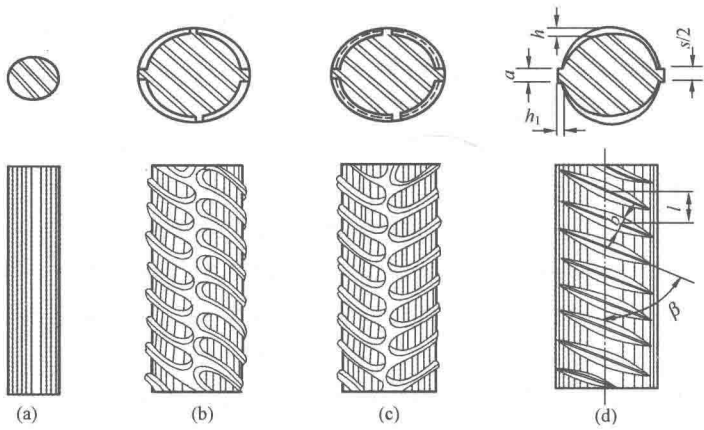


图 1.2.1 热轧钢筋的外形

变形钢筋表面有两条纵向凸缘（纵肋），两侧有等距离的斜向凸缘（横肋）。其中横肋斜向一个方向而呈螺旋形的称为螺旋钢筋 [见图 1.2.1(b)]；横肋斜向不同方向而呈“人”字形的，称为人字形钢筋 [见图 1.2.1(c)]。纵肋与横肋不相交且横肋为月牙形状的，称为月牙纹钢筋 [见图 1.2.1(d)]。

钢丝根据加工方法和组成形式，可分为碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝四种；按照钢材的化学成分，可分为碳素钢和普通低合金钢两大类。

二、钢筋的力学性能

1. 钢筋的应力-应变关系

钢筋的力学性能有强度和变形（包括弹性变形和塑性变形）等。单向拉伸试验是确定钢筋力学性能的主要手段。通过试验可以看到，钢筋的拉伸应力-应变关系曲线可分为两大类，

即有明显流幅的曲线（见图 1.2.2）和无明显流幅的曲线（见图 1.2.3）。

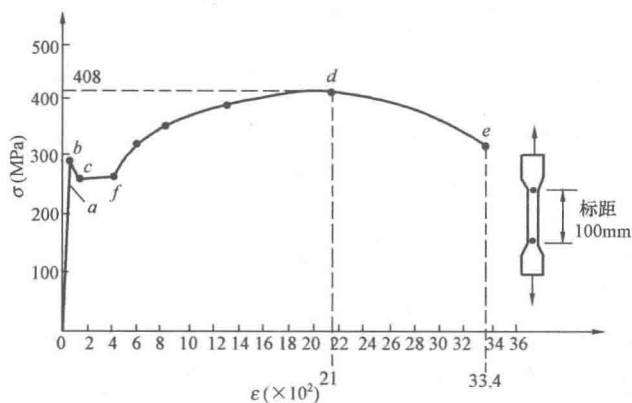


图 1.2.2 有明显流幅的钢筋  
应力-应变曲线

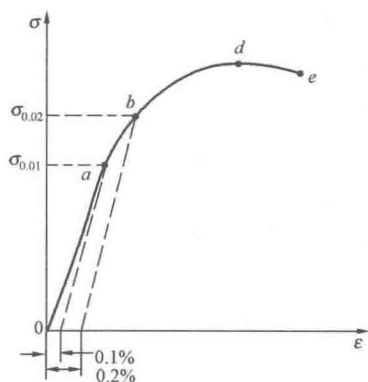


图 1.2.3 无明显流幅的钢筋  
应力-应变曲线

图 1.2.2 表示一条有明显流幅的钢筋应力-应变曲线。在达到比例极限  $a$  点之前，材料处于弹性阶段，应力与应变的比值为常数，即为钢筋的弹性模量  $E_s$ 。此后应变比应力增加快，到达  $b$  点进入屈服阶段，即应力不增加，应变却继续增加很多，应力-应变曲线图形接近水平线，称为屈服台阶（或流幅）。对于有屈服台阶的钢筋来讲，有两个屈服点，即屈服上限（ $b$  点）和屈服下限（ $c$  点）。屈服上限受试验加载速度、表面粗糙度等因素影响而波动；屈服下限则较稳定，故一般以屈服下限为依据，称为屈服强度。过了  $f$  点后，材料又恢复部分弹性进入强化阶段，应力-应变关系表现为上升的曲线，到达曲线最高点  $d$ ， $d$  点的应力称为极限强度。过了  $d$  点后，试件的薄弱处发生局部“颈缩”现象，应力开始下降，应变仍继续增加，到  $e$  点后发生断裂， $e$  点所对应的应变（用百分数表示）称为延伸率，用  $\delta_{10}$  或  $\delta_5$  表示（分别对应于量测标距为  $10d$  和  $5d$ ，其中  $d$  为钢筋直径）。

有明显流幅的钢筋拉伸时的应力-应变曲线显示了钢筋主要物理力学指标，即屈服强度、抗拉极限强度和延伸率。屈服强度是钢筋混凝土结构设计计算中钢筋强度取值的主要依据。屈服强度与抗拉极限强度的比值称为屈强比，它可以代表材料的强度储备，一般屈强比要求不大于 0.8。延伸率是衡量钢筋拉伸时的塑性指标。

拉伸试验中没有明显流幅的钢筋，其应力-应变曲线如图 1.2.3 所示。这类钢的比例极限大约相当于其极限强度的 65%。硬钢一般取其极限强度的 80%，即残余应变为 0.2% 时的应力  $\sigma_{0.2}$  为协定的屈服点，又称条件屈服强度，取残余应变的 0.1% 处应力作为弹性极限强度。

钢筋混凝土结构中的纵向钢筋一般应采用 HPB235、HPB300、HRB400、HRB500 及 KL400 级钢筋。HPB235、HPB300、HRB400、HRB500 中的 HRB、HPB 为钢筋牌号，其中尾部数字为强度等级，HRB400 相当于原标准的Ⅲ级钢筋，该钢筋公称直径  $d=6\sim 50\text{mm}$ ，其中  $d=22\text{mm}$  以下以 2mm 递减， $d=22\text{mm}$  以上为 25、28、32、36、40、50mm；KL400 为余热处理钢筋的强度等级代号，钢筋级别相当于原标准的Ⅲ级钢筋，公称直径  $d=8\sim 40\text{mm}$ ，尺寸进级情况与 HRB 相同。

## 2. 钢筋的强度指标

(1) 屈服强度。钢材的受拉、受压及受剪屈服强度是钢材的主要强度指标。由于比例极限、弹性极限和屈服点比较接近，而在屈服点之前的应变又很小，因此在计算时一般近似地认为钢材的弹性工作阶段是以屈服点为上限。当应力小于屈服强度时，材料的变形是弹性的，卸载后可以完全恢复，而当应力达到屈服点后，材料将产生很大且卸载后不能恢复的变形。因此，在结构设计时，一般取屈服强度为钢材允许达到的最大应力。

(2) 极限强度。钢材的极限强度（包括抗拉强度、抗压强度和抗剪强度）是材料能承受的最大应力。当材料达到或接近极限强度时，材料已经产生了非常大的塑性变形，此时的结构已经无法正常使用。尽管如此，极限强度仍是材料强度的一个主要指标，与屈服强度相比，极限强度越高，材料的安全储备就越大。通常以屈强比（屈服强度/抗拉极限强度）来衡量钢材强度的这种储备，显然，屈强比越小，钢材的强度储备就越大。

## 3. 钢筋的塑性指标

(1) 伸长率。钢材的伸长率等于试件被拉断后原标距长度的伸长值与原标距比值的百分率，是反映材料塑性变形能力的一个指标，以符号  $\delta$  表示。伸长率  $\delta$  与试件原标距长度  $l_0$  和试件的直径  $d_0$  的比值有关，当  $l_0/d_0 = 10$  时，记作  $\delta_{10}$ ；当  $l_0/d_0 = 5$  时，记作  $\delta_5$ ，可以按照下式计算

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \% \quad (1.2.1)$$

式中  $l_0$  ——试件原标距长度；  
 $l_1$  ——试件拉断后标距间的长度。

(2) 截面收缩率。截面收缩率是反映材料塑性变形能力的另一个指标，等于试件被拉断后颈缩区的断面面积缩小值与原断面面积比值的百分率，以符号  $\psi$  表示。截面收缩率  $\psi$  可以按照下式计算

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad (1.2.2)$$

式中  $A_0$  ——试件受力前的断面面积；  
 $A_1$  ——拉断后颈缩区的断面面积。

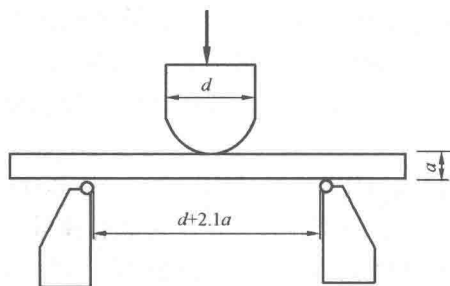


图 1.2.4 冷弯试验示意图

指标。

(3) 冷弯性能。冷弯性能由常温下的冷弯试验来检验。试验装置如图 1.2.4 所示，试验时按照规定直径的弯心角把试件弯曲，当试件表面出现裂纹或分层时即为破坏。冷弯性能以冷弯的角度来衡量，当冷弯角度达到  $180^\circ$  时，钢材的冷弯性能合格。冷弯试验不仅检验了钢材是否具有构件制作过程中冷加工所要求的弯曲变形能力，还能够显示其内部的缺陷，鉴定钢材的质量，因此它是判别钢材塑性变形能力和质量的一个综合

### 第三节 混凝土的力学性能

#### 一、混凝土的强度

混凝土强度是混凝土的重要力学性能，是设计钢筋混凝土结构的重要依据，它直接影响结构的安全性和耐久性。影响混凝土强度的因素是多方面的，除了受组成材料的性质、配合比、养护环境、施工方法等因素影响外，在进行试验时还与试件的形状、大小、试验方法、加载方法、加载速度等因素有关。

##### (一) 立方体抗压强度

混凝土立方体抗压强度是混凝土最基本的强度指标，它是用来确定混凝土强度等级、评定和比较混凝土强度及质量的最主要指标，也是推算其他力学性能的基础。JTG D62—2004 规定的立方体抗压强度是指边长为 150mm 的立方体试块，在  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  的温度和相对湿度为 90% 以上的潮湿空气中养护 28d 后，用标准的试验方法测得的抗压强度 (MPa)，用符号  $f_{\text{cu}}$  表示。

混凝土强度等级是按照边长为 150mm 的立方体抗压强度标准值确定的。混凝土立方体抗压强度标准值是按照上述立方体抗压强度试验方法得到的具有 95% 保证率的抗压强度值，以符号  $f_{\text{cu,k}}$  表示。JTG D62—2004 按照混凝土立方体抗压强度标准值，把混凝土结构中混凝土的强度等级分为 14 级，以“C+立方体抗压强度标准值”表示，即 C15、C20、…、C70、C80。公路桥涵钢筋混凝土构件的混凝土强度等级可采用 C20~C80，中间以 5MPa 晋级。C50 以下为普通强度混凝土，C50 以上为高强度混凝土。当用 HRB335、HRB400 级钢筋配筋时，混凝土强度等级不应低于 C25。

混凝土的抗压强度与试验方法有着密切的关系，如果在试件表面和压力机压盘之间涂一层油脂，则抗压强度要比未加油脂时低很多，破坏形状也不相同，如图 1.3.1 所示，这是由于未加油脂的试件表面与压力机压盘之间有向内的摩阻力存在，摩阻力好像箍圈一样阻止混凝土的横向变形，因而提高了试件的抗压强度。破坏时试件侧面碎裂成锥形，这种破坏是由沿斜面作用的剪力所引起的。而表面加油脂的试件，摩阻力大大减小，试件强度因而下降，同时破坏的性质也改变了，此时，试件由于形成了与压力方向平行的裂缝而破坏。JTG D62—2004 所规定的标准试验方法是不加油脂等润滑剂的。

混凝土强度是设计钢筋混凝土结构时选择混凝土材料的主要指标，应该根据结构物的用途、尺寸、使用条件及经济和技术等原因综合考虑。

混凝土抗压试验的加载速度对立方体抗压强度也有影响，加载速度越快，测得的强度越高。通常规定的加载速度：混凝土的强度等级低于 C30 时，取每秒钟  $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ ；混凝土的强度等级等于或高于 C30 时，取每秒钟  $0.5 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2$ 。

试验时随着混凝土龄期的增长，混凝土的极限抗压强度逐渐增大，开始时强度增长速度较快，然后逐渐减缓，这个强度增长的过程往往要延续几年，在潮湿环境中延续的时间更长。混凝土任何龄期的立方体强度，可按下列经验推算

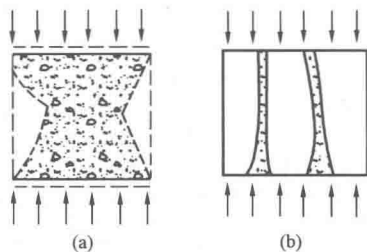


图 1.3.1 混凝土立方体的破坏情况  
(a) 不涂润滑剂；(b) 涂润滑剂

$$f_{\text{cu},n} = f_{\text{cu},k} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (1.3.1)$$

式中  $f_{\text{cu},n}$  —— $n$  天龄期混凝土立方体强度,  $n$  必须大于 3;

$f_{\text{cu},k}$  ——28 天龄期混凝土立方体强度标准值;

$\lg n$ 、 $\lg 28$  ——混凝土龄期  $n$  天和 28 天的常用对数。

试件尺寸对混凝土  $f_{\text{cu},k}$  也有影响, 试验结果证明, 立方体尺寸越小则试验测出的抗压强度越高, 这个现象称为尺寸效应。

## (二) 混凝土的轴心抗压强度

混凝土的抗压强度不仅与试件尺寸有关, 还与它的形状有关。在实际工程结构中, 受压构件不是立方体而是棱柱体, 所以, 采用棱柱体试件 (高度大于边长的试件称为棱柱体) 比采用立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。用棱柱体试件测得的抗压强度称为棱柱体抗压强度, 或者称为轴心抗压强度。

棱柱体试件是在与立方体试件相同的条件下制作的, 试件表面不涂润滑剂, 实测所得的棱柱体抗压强度比立方体抗压强度低。混凝土轴心抗压强度随着混凝土强度等级的提高而增加, 总的趋势是混凝土轴心抗压强度与混凝土强度成正比。

## (三) 混凝土的轴心抗拉强度

混凝土试件在轴心拉伸下的极限抗拉强度, 在结构计算中是确定混凝土抗裂度的重要指标, 有时还可以通过混凝土轴心抗拉强度间接地作为衡量混凝土其他力学性能的指标, 如混凝土与钢筋之间的黏结强度等。

混凝土轴心抗拉强度比抗压强度低得多, 它与同龄期混凝土抗压强度的比值为  $1/18 \sim 1/8$ 。混凝土强度等级越高, 混凝土的轴心抗拉强度与抗压强度之比越小, 也即混凝土的强度等级提高后, 其相应的抗拉强度却提高得不多。

轴心受拉构件如图 1.3.2(a) 所示, 试件为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$  的柱体, 两端预埋钢筋。试验机夹紧两端伸出的钢筋, 使试件受拉, 构件破坏时, 中部产生横向裂缝, 其平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度。

由于轴心受拉试件试验时对中比较困难, 故国内外多采用立方体或圆柱体的劈裂试验 [见图 1.3.2(b)] 测定混凝土的抗拉强度。这种试件与混凝土立方体试件相同, 劈裂试验是通过  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  的方钢垫条, 且在试件与垫条之间夹一层马粪纸, 施加压力  $F$ , 试件中间截面除加力点附近很小的范围外, 有均匀分布的拉应力。

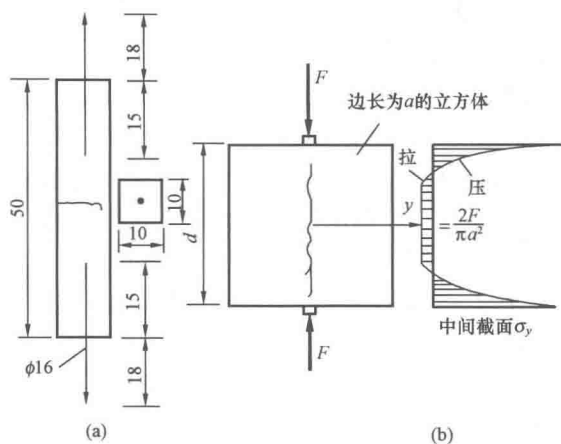


图 1.3.2 轴心受拉构件

(a) 轴心受拉试件; (b) 劈裂试件

力。当拉应力达到混凝土抗拉强度时, 试件劈裂成两半。《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ 053—1994) 规定: 采用  $150\text{mm}$  立方体试件作为标准试件进行混凝土劈裂抗拉强度测定, 按照规定的试验方法操作, 则混凝土的劈裂抗拉强度  $f_t^p$  可按下列公式算