



交通高等职业技术教育教材

结构设计 原理



● 孙元桃 主编
郭发忠 主审

● 人民交通出版社

8.142.5

619

61108.04 8

198
1

交通高等职业技术教育教材

Jiegou Sheji Yuanli

结构设计原理

孙元桃 主编
郭发忠 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为面向 21 世纪交通版高等职业技术教育教材,主要介绍钢筋混凝土、预应力混凝土、砖石与混凝土及钢、木结构构件的设计原理,包括如何合理选择构件截面尺寸及其联结方式,力学计算图式的拟定,构件强度、稳定性、刚度和裂缝的计算等。

本书可作为高职路桥、监理、检测、养护等专业教材,也可供中职有关专业师生学习使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

结构设计原理 / 孙元桃主编. — 北京:人民交通出版社, 2002. 8

ISBN 7-114-04388-0

I. 结... II. 孙... III. 建筑结构—结构设计
IV. TU318

中国版本图书馆CIP数据核字 (2002) 第051433号

交通高等职业技术教育教材

结构设计原理

孙元桃 主编

郭发忠 主审

正文设计:彭小秋 责任校对:刘晓方 责任印制:张恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京平谷大华山印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:14 字数:344千

2002年8月 第1版

2002年8月 第1版 第1次印刷

印数:0001~6000册 定价:23.00元

ISBN 7-114-04388-0

U · 03235

前 言

本教材依据全国“路桥工程学科委员会高职教材建设联络组”2001年昆明会议的决议编写而成。

高等职业教育培养的是一线岗位的应用型技术人才。随着我国社会主义市场经济的飞速发展,培养能很快适应社会需要的理论功底扎实、实践动手能力强、具有较强创新意识的高素质实用型人才是职业技术学院的任务。交通高等职业技术教育路桥专业教学研究与教材建设联络组在2001年7月的昆明会议上,对高职教材提出了具体的要求:(1)针对性与先进性;(2)实用性与可靠操作性;(3)综合性与科学性。本书由宁夏交通职业技术学院孙元桃主编,新疆交通职业技术学院郭发忠主审。具体编写分工如下:总论、第五章、第六章、第七章、第八章由宁夏交通职业技术学院孙元桃编写;第一章、第二章、第三章、第四章由烟台师范学院交通学院刘智儒编写;第九章、第十章由安徽交通职业技术学院李玉红编写;第十一章、第十二章、第十三章由安徽交通职业技术学院吴跃梓编写。

本书于2002年5月下旬在宁夏银川审稿会上审定,参加审稿会的有人民交通出版社卢仲贤,新疆交通职业技术学院郭发忠,宁夏交通职业技术学院孙元桃、李艳东,烟台师范学院交通学院刘智儒,甘肃交通职业技术学院陈彪来等6人。

本教材在编写过程中,力求符合“路桥专业高职教材编审原则”规定,体现高职教材的特点;采用国家及行业最新技术标准和技术规范,选编最新材料、工艺;理论部分以“必需、够用”为原则,注重讲清概念、基本原理和基本方法。理论内容的深度和广度高于中等职业教育的水平,但又不同于本科教材。全书在讲清基本概念和基本原理的基础上,介绍了工程设计中实用的计算方法,并列举了较多的计算实例。编写内容密切结合我国的工程实际和研究成果,力求文字简练、深入浅出以及理论联系实际。

本书在编写过程中,得到了人民交通出版社卢仲贤、甘肃交通职业技术学院陈彪来、宁夏交通职业技术学院李艳东、王家桂、牛永彪的指导和帮助,及附于书末的参考文献作者们对本书的完成给予了巨大的支持,在此一并衷心致谢。

鉴于编者的水平及能力有限,书中错误和不足在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年5月

目 录

总论	(1)
第一章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料的物理力学性能	(4)
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念	(4)
第二节 混凝土	(5)
第三节 钢筋	(11)
第四节 钢筋与混凝土之间的粘结	(18)
第二章 结构按极限状态法设计的原则	(21)
第一节 极限状态法设计的基本概念	(21)
第二节 我国公路桥涵设计规范的计算原则	(22)
第三节 荷载效应组合	(24)
第三章 受弯构件正截面强度计算	(27)
第一节 钢筋混凝土受弯构件的构造要求	(27)
第二节 受弯构件正截面受力全过程和破坏特征	(31)
第三节 单筋矩形截面受弯构件计算	(35)
第四节 双筋矩形截面受弯构件计算	(45)
第五节 单筋 T 形截面受弯构件计算	(52)
第四章 受弯构件斜截面强度计算	(60)
第一节 受弯构件斜截面的受力特点及破坏形态	(60)
第二节 影响受弯构件斜截面抗剪能力的主要因素	(62)
第三节 受弯构件斜截面抗剪强度	(63)
第四节 受弯构件斜截面抗弯强度	(69)
第五节 全梁承载能力校核与构造要求	(70)
第五章 钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算	(81)
第一节 换算截面	(81)
第二节 受弯构件在施工阶段的应力计算	(85)
第六章 钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝宽度计算	(90)
第一节 受弯构件的变形(挠度)计算	(90)
第二节 受弯构件的裂缝宽度计算	(93)
第七章 轴心受压构件的强度计算	(97)
第一节 概述	(97)
第二节 配有纵向受力钢筋和普通箍筋的轴心受压构件	(97)
第三节 配有纵向受力钢筋和螺旋箍筋的轴心受压构件	(102)
第八章 偏心受压构件的强度计算	(107)
第一节 偏心受压构件正截面受力特点和破坏形态	(108)

第二节	偏心受压构件的纵向弯曲·····	(112)
第三节	矩形截面偏心受压构件·····	(114)
第四节	圆形截面偏心受压构件·····	(131)
第九章	预应力混凝土结构的基本概念及材料·····	(141)
第一节	概述·····	(141)
第二节	预加应力的方法与设备·····	(143)
第三节	预应力混凝土结构的材料·····	(149)
第十章	预应力混凝土受弯构件的设计与计算·····	(151)
第一节	概述·····	(151)
第二节	预加力的计算与预应力损失的估算·····	(153)
第三节	预应力混凝土受弯构件的应力计算·····	(159)
第四节	预应力混凝土受弯构件的强度计算·····	(163)
第五节	端部锚固区计算·····	(167)
第六节	变形计算·····	(171)
第七节	预应力混凝土受弯构件的基本构造及计算示例·····	(173)
第十一章	部分预应力混凝土与其它预应力混凝土简介·····	(185)
第一节	部分预应力混凝土·····	(185)
第二节	无粘结预应力混凝土·····	(187)
第三节	双预应力混凝土梁·····	(190)
第十二章	砖、石及混凝土结构的基本概念与材料·····	(194)
第一节	概述·····	(194)
第二节	砖、石及混凝土结构的材料·····	(194)
第三节	砌体的强度与变形·····	(198)
第十三章	砖、石及混凝土构件的强度计算·····	(205)
第一节	设计原则·····	(205)
第二节	轴心受压构件正截面强度计算·····	(206)
第三节	偏心受压构件正截面强度计算·····	(207)
第四节	受弯、受剪和局部承压的强度计算·····	(212)
主要参考文献	·····	(215)

总 论

一、本课程的任务及与其它课程的关系

《结构设计原理》主要是研究钢筋混凝土、预应力混凝土、砖石及混凝土(通称圬工)、钢和木结构的构件设计原理。其主要内容包括如何合理选择构件截面尺寸及其联结方式,并根据承受荷载的情况验算构件的强度、稳定性、刚度和裂缝等问题,且为今后学习桥梁工程和其它道路人工构造物的设计计算奠定理论基础。本课程是属“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,例如车辆荷载、人群荷载、风荷载以及桥跨结构各部分自重等的作用。建筑物中承受荷载和传递荷载的各个部件的总和统称为结构,因而结构是由若干基本构件,如以上所述的板、梁、拱圈等所组成。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几种最基本的受力图式。在工程实际中,有些构件的受力和变形比较简单,但有些构件的受力和变形则比较复杂,常有可能是几种受力状态的组合。

在外荷载作用下,构件有可能由于强度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强度破坏和抵抗变形等的的能力,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、构造特点以及施工质量等因素有关。当其它条件已经确定,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,或因材料抵抗强度不够而导致结构的破坏。为此,研究如何正确地处理好荷载与承载能力之间的关系,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我国现行的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—85)、《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)。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,才能确切地应用规范的公式和条文,以充分发挥设计者的主动性和创造性。

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的实际材性有着紧密的关系,而各种建筑材料(钢、木、混凝土、砖、石等)的材性是各不相同的,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,经常地要在计算公式中引进一些半理论半经验的修正系数。此外,学习本课程的另一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,答案常常不是惟一的,而且,设计计算工作也不是一次就可以获得成功的。以上这些特点,都是

同学们在已学课程中所未曾遇到过的问题,因此必须很好地认识它,并通过不断实践才能较好地掌握本课程的内容。

根据所选用材料的不同,结构可分为:钢筋混凝土结构;预应力混凝土结构;砖、石及混凝土结构(圬工结构);钢结构和木结构等。当然,也可以是采用各种材料所组成的复合结构。本书主要介绍钢筋混凝土、预应力混凝土、砖、石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,对于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. 结构重量:为了达到增大结构跨径的目的,应力求使构件能做成薄壁、轻型和高强。钢材的单位体积重量(容重)虽大,但其强度却很高;木材的强度虽很低,但其容重却很小。如果以材料容重 γ 与容许应力 $[\sigma]$ 之比($\gamma/[\sigma]$)作为比较标准,且以钢结构重量为 1.0,则其它结构的相对重量 $[\sigma]/\gamma$ 大致为,受压构件:木—1.5~2.4;钢筋混凝土—3.8~11;砖石—9.2~28。受弯构件:木—1.5~2.4;钢筋混凝土—3~10;预应力混凝土—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,但其结构延性则不如钢筋混凝土结构好。

3. 建筑速度:砖石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场进行工业化成批生产,但建筑工期仍比钢、木结构要长。

(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。它具有易于就地取材、耐久性好、刚度大、具有可模性(亦即可以根据工程需要浇筑成各种几何形状)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、水工结构物和房屋建筑等。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,钢筋混凝土结构具有较好的延性,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:构件受荷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,且可使高强度钢材和高标号混凝土的“高强”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正在快速的发展。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. 砖、石及混凝土结构(圬工结构):是用胶结材料将砖、天然石料、混凝土预制块等块材

按一定规则砌筑而成的整体结构。砖、石及混凝土结构在我国使用甚广,常用于拱圈、墩台、基础和挡土墙等结构中。

4. 钢结构:一般是由钢厂轧制的型钢或钢板通过焊接或螺栓等连接组成的结构。由于钢材的材性均匀、力学性能稳定、强度高、结构重量轻,故跨越能力最大,适用于修建高、大建筑物。由于钢结构可预制成定型杆件,装拆十分方便,故在临时性的辅助工程中应用最多。

5. 木结构:以木材为主的结构,应用于临时性抢险急修工程,以及施工过程中的辅助性工程(便桥、工棚、支架模板等)中。

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、经济、安全和美观的原则进行设计。也需要根据因地制宜、就地取材、便于施工和养护的原则,合理地选用适当结构形式。同时,应尽可能地节省木材、钢材和水泥的用量,其中尤应注意贯彻节省木材的精神。

在设计结构物时,应全面地进行综合考虑,严格地遵照有关的技术标准和设计规范进行设计(包括各种技术标准和技术规范的附录条文)。但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。

桥涵结构在使用期限内应有适当的可靠度,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强度、稳定性、刚度和耐久性。强度要求是指桥涵结构物在使用期间,它的各个部件及其联结的各个细部,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正常的使用期限内,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过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,桥涵结构物的所有构件和联结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,正确地处理好结构构造问题是十分重要的,这与处理好计算问题是同等地重要。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,尔后采取合理的构造措施,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强度、刚度和稳定性要求外,还应满足制造、运输和安装过程中的强度、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时当地情况的新材料、新工艺和新技术。

第一章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料的物理力学性能

第一节 钢筋混凝土结构的基本概念

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料结合成整体,共同发挥作用的一种建筑材料。

混凝土是一种人造石料,其抗压强度很高,而抗拉强度很低(约为抗压强度的 $1/8 \sim 1/18$)。采用素混凝土做成的构件,例如素混凝土梁,当它承受竖向荷载作用时,在梁的垂直截面(正截面)上受到弯矩作用,中性轴以上受压,以下受拉。当荷载达到某一数值 P 时,梁的受拉区边缘混凝土的拉应变达到极限拉应变,即出现竖向弯曲裂缝,这时,裂缝截面处的受拉区混凝土退出工作,该截面处的受压区高度减小,即使荷载不增加,竖向弯曲裂缝也会急速向上发展,导致梁骤然断裂。这种破坏是很突然的。也就是说,当荷载达到 P 的瞬间,梁立即发生破坏。 P 为素混凝土梁受拉区出现裂缝时的荷载,一般称为素混凝土梁的抗裂荷载,也是素混凝土梁的破坏荷载。由此可见,素混凝土梁的承载能力是由混凝土的抗拉强度控制的,而受压区混凝土的抗压强度远未被充分利用。在制造混凝土梁时,倘若在梁的受拉区配置适量的抗拉强度高的纵向钢筋,就构成钢筋混凝土梁。试验表明,和素混凝土梁有相同截面尺寸的钢筋混凝土梁承受竖向荷载作用时,荷载略大于 P 时梁的受拉区仍会出现裂缝。在出现裂缝的截面处,受拉区混凝土虽退出工作,但配置在受拉区的钢筋几乎承担了全部的拉力。这时,钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样立即断裂,仍能继续承受荷载作用,直至受拉钢筋的应力达到屈服强度,继而受压区的混凝土也被压碎,梁才被破坏。因此,钢筋混凝土梁中混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都能得到充分的利用,承载能力可较素混凝土梁提高很多。

混凝土的抗压强度高,常用于受压构件。若在构件中配置抗压强度高的钢筋来构成钢筋混凝土受压构件,试验表明,和素混凝土受压构件截面尺寸及长细比相同的钢筋混凝土受压构件,不仅承载能力大为提高,而且受力性能得到改善。在这种情况下,钢筋的作用主要是协助混凝土来共同承受压力。

综上所述可见,根据构件受力状况配置钢筋构成钢筋混凝土构件后,可以充分发挥钢筋和混凝土各自的材料力学特性,把它们有机地结合在一起共同工作,提高了构件的承载能力,改善了构件的受力性能。钢筋的作用是代替混凝土受拉(拉区混凝土出现裂缝后)或协助混凝土受压。

钢筋和混凝土这两种受力力学性能不同的材料之所以能有效地结合在一起共同工作,主要机理是:

(1) 混凝土和钢筋之间有良好的粘结力,使两者能可靠地结合成一个整体,在荷载作用下能够很好地共同变形,完成其结构功能。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数也较为接近(钢筋为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $1.0 \times$

$10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$), 因此, 当温度变化时, 不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的粘结。

(3) 混凝土包裹在钢筋的外围, 可以防止钢筋的锈蚀, 保证了钢筋与混凝土的共同作用。

钢筋混凝土除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外, 还有下述一些优点:

(1) 在钢筋混凝土结构中, 混凝土的强度是随时间而不断增长的, 同时, 钢筋被混凝土所包裹而不致锈蚀, 所以, 钢筋混凝土结构的耐久性是比较好的。钢筋混凝土结构的刚度较大, 在使用荷载作用下的变形较小, 故可有效地用于对变形要求较严格的建筑物中。

(2) 钢筋混凝土结构既可以整体现浇也可以预制装配, 并且可以根据需要浇制成各种形状和截面尺寸的构件。

(3) 钢筋混凝土结构所用的原材料中, 砂、石所占的比重较大, 而砂、石易于就地取材, 可以降低工程造价。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点, 如: 钢筋混凝土结构的截面尺寸一般较相应的钢结构大, 因而自重较大, 这对于大跨度结构是不利的; 抗裂性能较差, 在正常使用时往往是带裂缝工作的; 施工受气候条件影响较大, 并且施工中需耗用较多木材; 修补或拆除较困难等。

钢筋混凝土结构虽有缺点, 但毕竟有其独特的优点, 所以广泛应用于桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、铁路工程, 以及水工结构工程、海洋结构工程等。随着钢筋混凝土结构的不断发展, 上述缺点已经或正在逐步加以改善。

第二节 混 凝 土

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料所组成。为了正确合理地进行钢筋混凝土结构的设计, 必须深入了解钢筋混凝土结构及其构件的受力性能和特点。而对于混凝土和钢筋材料的物理力学性能(强度和变形的变化规律)的了解, 则是掌握钢筋混凝土结构的构件性能、分析和设计的基础。

一、混凝土的强度

1. 混凝土的立方体强度

混凝土的立方体抗压强度是一种在规定的统一试验方法下衡量混凝土强度的基本指标。我国标准试件取用边长相等的混凝土立方体。这种试件的制作和试验均比较简便, 而且离散性较小。

我国《桥规》(JTJ 023—85)规定以每边边长为 20cm 的立方体试件, 在 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 28d, 依照标准制作方法和试验方法测得的抗压极限强度值(以 MPa 计)作为混凝土的立方体抗压强度, 用符号 R 表示。按这样的规定, 就可以排除不同制作方法、养护环境等因素对混凝土立方体强度的影响。

混凝土立方体抗压强度与试验方法有密切关系。在通常情况下, 试验机承压板与试件之间将产生阻止试件向外自由变形的摩阻力, 阻滞了裂缝的发展, 从而提高了试块的抗压强度。如果在承压板与试件之间涂油脂润滑剂, 则实验加压时摩阻力将大为减小。规范上规定采用的是不加润滑剂的试验方法。

混凝土的立方体抗压强度还与试件尺寸有关。试验表明, 立方体试件尺寸愈小, 摩阻力的影响愈大, 测得的强度也愈高。在实际工程中也有采用边长为 15cm 和边长为 10cm 的混凝土立方体试件, 则所测得的立方体强度应分别乘以换算系数 0.95 和 0.90 来折算成边长为 20cm

的混凝土立方体抗压强度。本规范规定的标准立方体与国际标准是不同的。

混凝土的立方体抗压强度又被称为混凝土的标号。用于公路桥梁承重部分的混凝土标号分为 15、20、25、30、40、50 和 60 号等 7 个等级。钢筋混凝土构件的混凝土标号不宜低于 15；当采用 II、III 级钢筋时，混凝土标号不宜低于 20；在预应力混凝土组合梁中，钢筋混凝土部分的混凝土标号不宜低于 25。

2. 混凝土轴心抗压强度(棱柱体强度)

通常钢筋混凝土构件的长度比它的截面边长要大得多，因此棱柱体试件(高度大于截面边长的试件)的受力状态更接近于实际构件中混凝土的受力情况。工程中通常用高宽比为 3~4 的棱柱体，按照与立方体试件相同条件下制作和试验方法测得的棱柱体试件的极限抗压强度值，作为混凝土轴心抗压强度，用 R_a 表示。

试验表明，棱柱体试件的抗压强度较立方体试块的抗压强度低。混凝土的轴心抗压强度试验以 15cm × 15cm × 30cm 的试件为标准试件。

通过大量棱柱体抗压实验结果发现， R_a 与 \bar{R} 的关系大致呈一直线，见图 1-1。

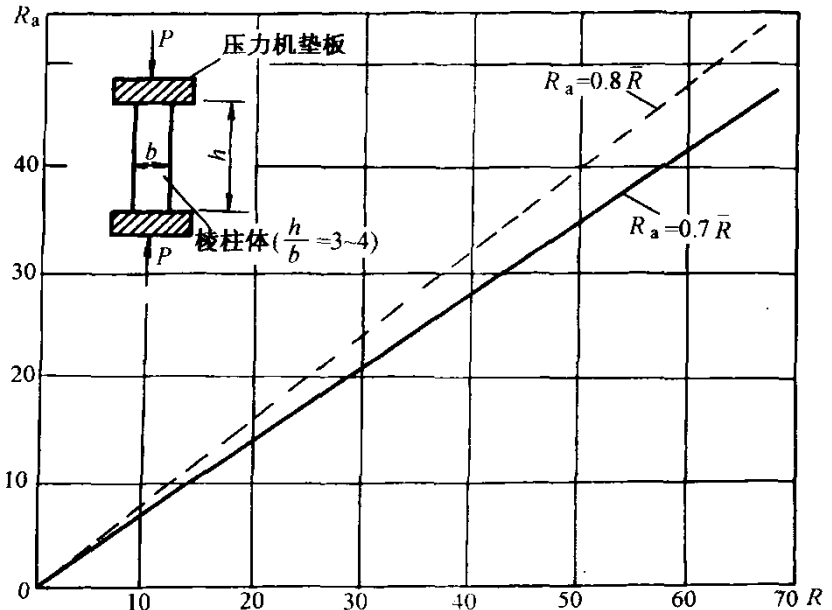


图 1-1 混凝土棱柱体强度 R_a 与立方强度 R 的关系

考虑到实验与实际结构受力情况的差异所造成的误差及多年来所采用的经验数值等因素，混凝土轴心抗压强度平均值与立方体平均抗压强度之间近似的关系为：

$$\bar{R}_a = 0.7\bar{R} \quad (1-1)$$

3. 混凝土的轴心抗拉强度 R_L

混凝土的抗拉强度和抗压强度一样，都是混凝土的基本强度指标。但是混凝土的轴心抗拉强度很低，一般约为立方体强度的 1/8~1/18。为此，在进行钢筋混凝土结构强度计算时，总是考虑受拉区混凝土开裂后退出工作，拉应力全部由钢筋来承受，这时，混凝土的抗拉强度没有实际意义。但是，对于不容许出现裂缝的结构，就应考虑混凝土的抗拉能力，并以混凝土的轴心抗拉极限强度作为混凝土抗裂强度的重要指标。

测定混凝土轴心抗拉强度的方法有两种：一种是直接测试方法，如图 1-2 所示，对两端预埋钢筋的长方体试件(钢筋位于试件轴线上)施加拉力，试件破坏时的平均拉应力，即为混凝土的轴心抗拉强度。这种测试对试件尺寸及钢筋位置要求较严。

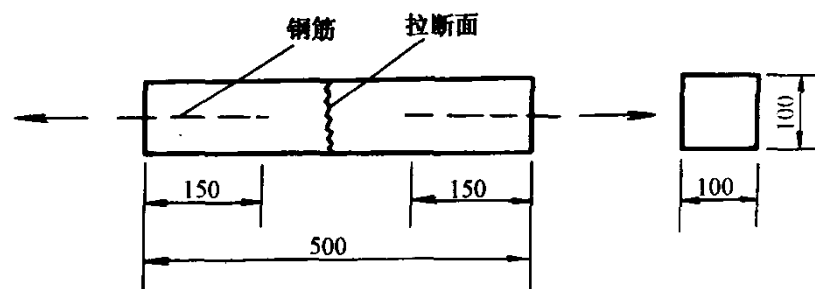


图 1-2 混凝土轴心抗拉强度直接测试试件(尺寸单位:cm)

另一种为间接测试方法,如劈裂试验(图 1-3),试件采用立方体或圆柱体,试件平放在压力机上,通过垫条施加线集中力 P ,试件破坏时,在破裂面上产生与该面垂直且均匀分布的拉应力,当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件即被劈裂成两半。

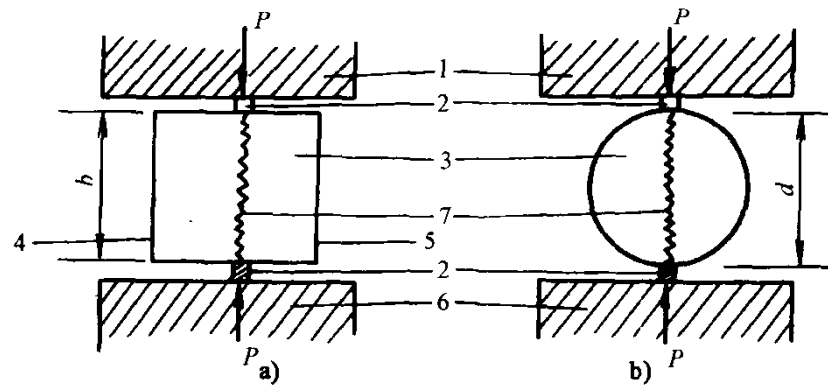


图 1-3 用劈裂法试验混凝土抗拉强度示意图

a)用立方体进行劈裂试验; b)用圆柱进行劈裂试验

1-压力机上压板;2-垫条;3-试件;4-浇模顶面;5-浇模底面;
6-压力机下压板;7-试件破裂线

根据国内对轴心抗拉强度的分析,同时考虑实验误差以及实验室数据的差异,混凝土轴心抗拉强度与标准立方强度的关系以下式表达:

$$\bar{R}_L = 0.232 \bar{R}^{2/3} \quad (1-2)$$

4. 混凝土的标准强度和设计强度

材料的标准强度是考虑到同一批材料实际强度有时大有时小的这种离散性,为了统一材料质量要求而规定的材料极限强度的标准值。对于混凝土,原国家建委有关单位,根据正常混凝土施工质量的统计,同批混凝土立方试块的强度平均值一般高于其标号一个均方差值,考虑到《公路桥涵施工技术规范》对混凝土施工质量的要求与原国家建委有关规范相同,《桥规》(JTJ 023—85)采用的混凝土标准强度是混凝土试件的强度平均值减去 1 倍均方差,其保证率为 84.13%。

材料的设计强度是结构设计时所取材料的强度指标。在结构设计中,材料强度保证率通常要求不小于 95%,而混凝土试件的强度平均值减去 2 倍均方差,其保证率为 97.73%,满足要求。因此,《桥规》取这个数值作为混凝土的设计强度。这个混凝土设计强度值约为 0.8~0.86 倍混凝土标准强度值。

不同标号混凝土的设计强度与标准强度取值见表 1-1。

混凝土的设计强度和标准强度(MPa)

表 1-1

强度种类		符号	混凝土标号						
			15	20	25	30	40	50	60
设计强度	轴心抗压	R_a	8.5	11.0	14.5	17.5	23.0	28.5	32.5
	抗拉	R_l	1.05	1.30	1.55	1.75	2.15	2.45	2.65
标准强度	轴心抗压	R_a^b	10.5	14.0	17.5	21.0	28.0	35.0	42.0
	抗拉	R_l^b	1.30	1.60	1.90	2.10	2.60	3.00	3.40

注:计算现浇钢筋混凝土轴心受压及偏心受压构件时,如截面的长边或直径小于 30cm,表中混凝土的强度应乘以系数 0.8。

二、混凝土的变形

钢筋混凝土结构的计算理论与混凝土的变形性能相关,所以研究混凝土的变形,对于掌握钢筋混凝土结构设计计算方法是很重要的。

混凝土的变形可分为混凝土的受力变形与混凝土的体积变形。

(一) 混凝土的受力变形

1. 混凝土在一次短期荷载作用下的变形

研究混凝土在一次短期加荷时的变形性能,也就是要研究混凝土受压时的应力—应变曲

线形状、曲线中的最大应力值及其对应的应变值和破坏时的极限应变值三个特征。

据实验资料可得图 1-4 所示的混凝土棱柱体一次短期加荷轴心受压的应力—应变曲线。

在曲线开始部分,即 $\sigma_h \leq 0.2\sigma_{max}$ 时应力与应变曲线近似呈线性关系,此时混凝土的变形主要取决于集料和水泥在受压后的弹性变形。当应力超过 $0.2\sigma_{max}$ 后,塑性变形渐趋明显,应力—应变曲线的曲率随应力的增长而增大,且应变的增长较应力为快。这是由于除水泥凝胶体的粘性流动外,混凝土中已产生微裂缝并开始扩展所致。当 $\sigma_h \geq 0.75\sigma_{max}$ 时,微裂缝继续扩展并互相贯通,使塑性变形急剧增长,最后在 σ_h 接近 σ_{max} 时,混凝土内部微裂缝转变为明显的纵向裂缝,试件的抗力开始减小。此时混凝土试件所承受的最大应力 σ_{max} 即为棱柱体强度 R_a ,其相应的应变值 $\epsilon_a = 0.0008 \sim 0.003$ (计算时取 $\epsilon_a = 0.002$)。曲线 $0-\sigma_{max}$ 段称为此应力—应变曲线的“上升段”。

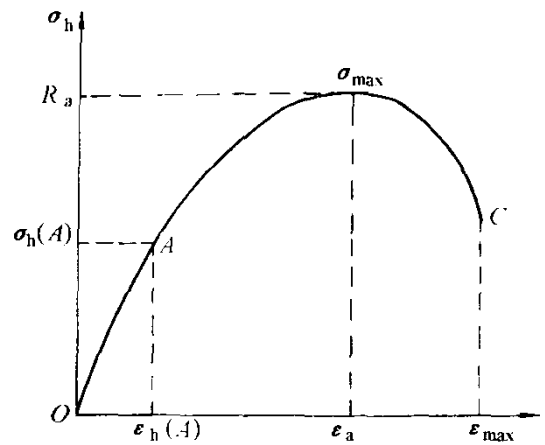


图 1-4 混凝土一次短期加荷(压)时的应力—应变曲线

由于加荷,试验机本身变形而积存了弹性应变能。早期的试验机刚度较小,它所积存的弹性应变能就较大,当试件加荷到 σ_{max} 后,试验机因混凝土抗力减小,而一下子把能量释放出来,对试件施加了附加应变,使试件发生急速的崩坏,所测得的应力—应变曲线只有上升段;现在的试验机采用了先进技术,其刚度大,它所积存的弹性变形能较小,当试件加荷到 σ_{max} 时,试件还不会立即破坏。如果试验机不再加荷而是缓慢地卸荷,试件应力逐渐减小,但是试验机还在释放能量,致使试件仍在持续地变形,使应力—应变曲线形成“下降段”,直至下降段末端 C,试件才完全破坏。C 点相应的应变即为受压极限应变 ϵ_{max} 。一般情况下, $\epsilon_{max} = 0.002 \sim 0.006$,有时甚至可达 0.008。对高标号(如 50 号和 60 号)混凝土由于其脆性性质,没有这种下降段或很不明显。

试验证明,混凝土塑性变形的大小与加荷速度及荷载持续时间有密切关系。在瞬时荷载作用下,比如,当每级荷载持续时间少于 0.001s 时,所记录的变形完全为弹性变形,应力—应变呈直线关系。这时荷载持续时间愈长,试件变形愈大,应力—应变曲线的曲率也就愈大。

混凝土的一次短期加荷轴心受拉应力—应变曲线与轴心受压类似,但比受压应力—应变曲线的曲率变化小,受拉极限应变 $\epsilon_1 = 0.0001 \sim 0.00015$,仅为受压极限应变的 $1/15 \sim 1/20$,这也是混凝土受拉时容易开裂的原因。

2. 混凝土在多次重复荷载作用下的变形

图 1-5a)表示混凝土棱柱体在一次加荷卸荷时的应力—应变曲线,加荷曲线 \widehat{OA} 凹向 ϵ 轴,而卸荷曲线 \widehat{AB} 凸向 ϵ 轴,当荷载全部卸完一瞬间,卸荷曲线 \widehat{AB} 的末端为 B 点,如果停留一段时间再量测试件应变,则发现还有很小的变形可以恢复,也即由 B 点到 B' 点,则 BB' 的恢复应变称为混凝土的弹性后效, $B'O$ 称为试件残余应变。如图 1-5b)表示混凝土棱柱体多次重复荷载作用下的应力—应变曲线,当受压重复荷载引起的最大应力[图 1-5b)]中的 σ_1 或 σ_2 不超过 $0.5R_a$ 时,随着反复加、卸荷次数的增加,加荷曲线的曲率亦逐渐减小。经 4~10 次循环后,塑性变形基本完成,而只有弹性变形,混凝土的应力—应变曲线逐渐接近于直线,并大致平行于通过原点的切线。当应力如图 1-5b)中的 σ_3 超过 $0.5R_a$ 时,开始也是经若干次循环后,应力—应变关系变成直线。但若继续循环下去,将重复出现塑性变形,且应力—应变曲线向相

反方向弯曲,直至循环到一定次数,由于塑性变形的不断扩展,导致构件破坏。这种情况称为疲劳破坏。试验证明,重复荷载引起的应力愈大,试验达到疲劳所需的循环次数则愈少。

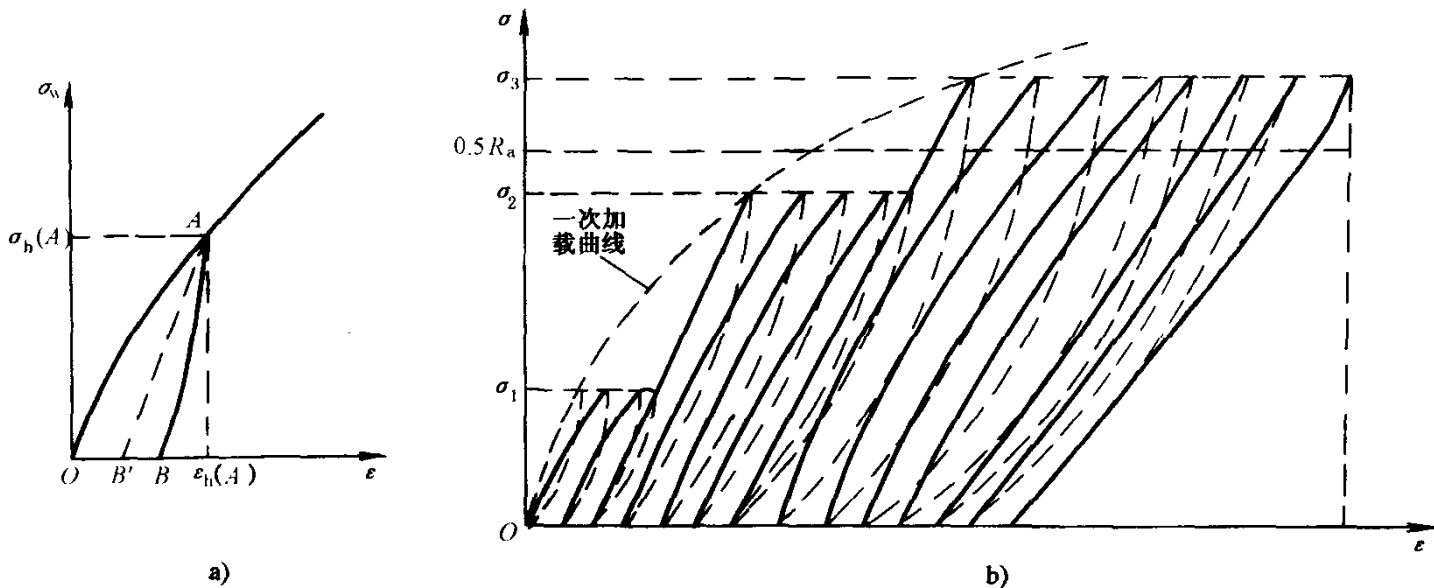


图 1-5 混凝土在重复荷载下的应力—应变曲线

a)一次加荷卸荷; b)多次加荷卸荷

对于由混凝土组成的桥涵结构,通常要求能承受两百万次的反复荷载作用。经受两百万次反复变形而破坏的应力即称为混凝土的疲劳强度(R_p)。混凝土的疲劳强度约为其棱柱体强度的 50%,即 $R_p \approx 0.5R_a$ 。

3. 混凝土在长期荷载作用下的变形

在混凝土棱柱体试件上加荷,试件产生压应变,如果维持荷载不变,若干时间后,混凝土的应变还在继续增加。混凝土在荷载长期作用下(即压力不变的情况下),应变随时间继续增长的现象称为混凝土的徐变。

混凝土的徐变具有如下规律:

(1) 混凝土的徐变与混凝土的应力大小有着密切的关系,应力愈大,徐变也愈大。当应力较小($\sigma_h < 0.5R_a$)时,徐变与应力成正比,这种情况称为线性徐变。

(2) 混凝土的徐变与时间参数有关。图 1-6 为混凝土试件的应变—时间关系曲线,图中纵标 A 为加荷过程中完成的变形,称为瞬变;纵标 B 为荷载不变情况下产生的徐变,纵标 C 为试件产生的总变形。试件在受荷后的前 3~4 个月,徐变发展最快,可达徐变总值的 45%~50%。当长期荷载引起的应力 $\sigma_h < (0.5 \sim 0.55)R_a$ 时,徐变的发展符合渐进线规律。徐变全部完成则需 4~5 年。当长期荷载卸去后,变形一部分恢复,如图 1-6 中的 D,另一部分如图 1-6 中的 E,则在相当长的时间内逐渐恢复,这又称弹性后效。图 1-6 中的 F 为最后的残余变形。

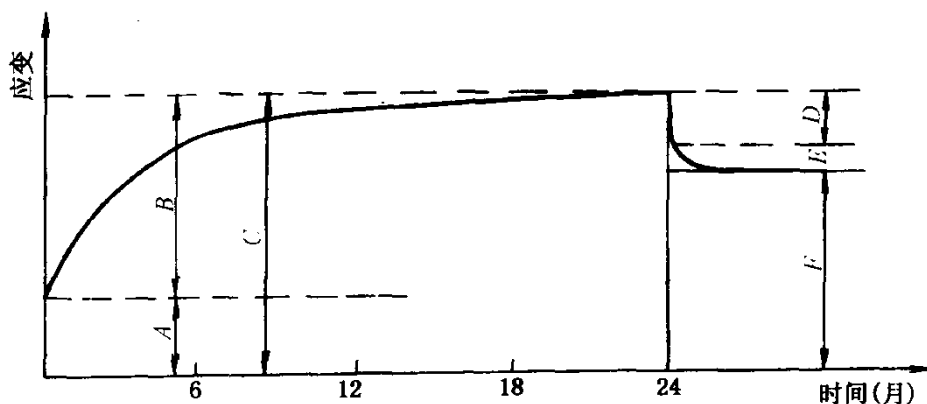


图 1-6 混凝土在长期不变荷载作用下应变随时间的增长图

(3) 加荷龄期对徐变也有重要影响。混凝土加荷龄期愈短,即混凝土愈“年轻”,徐变愈大(图 1-7)。

(4) 水泥用量愈多,水灰比愈大,徐变愈大。

(5) 混凝土集料愈坚硬、养护时相对湿度愈高,徐变愈小。

混凝土的徐变对混凝土和钢筋混凝土结构有很大的影响。在某些情况下,徐变有利于防止结构物的裂缝形成,同时还有利于结构或构件的内力重分布。但在预应力混凝土结构中,徐变则引起预应力损失。徐变变形还可能超过弹性变形,甚至达到弹性变形的2~4倍,这就要改变超静定结构的应力状态。所以,混凝土的徐变已被大家所重视。

4. 混凝土的弹性模量 E_h

在计算超静定结构的内力、钢筋混凝土结构的变形和预应力混凝土构件截面的预压应力时,将要用到混凝土的弹性模量。

作为弹塑性材料的混凝土,其应力与应变的关系是一条曲线,其应力增量与应变增量的比值,即为混凝土的变形模量。它不是常数,随混凝土的应力变化而变化。显然,混凝土的变形模量在使用上很不方便。为了在工程上较实用,人们近似地取用应力—应变曲线在原点 O 的切线斜率作为混凝土的弹性模量,并用 E_h 表示。而混凝土应力—应变曲线原点 O 的切线斜率的准确值不易从一次加荷的应力—应变曲线上求得,我国工程上所取用的混凝土受压弹性模量 E_h 数值是在重复加荷的应力—应变曲线上求得的。试验采用棱柱体试件,加荷产生的最大压应力选取 $\sigma_h = (0.4 \sim 0.5)R_a$,反复加荷卸荷 5~10 次后,混凝土受压应力—应变关系曲线基本上接近直线,并大致平行于相应的原点切线,则取该直线的斜率作为混凝土受压弹性模量 E_h 的数值。

根据试验资料,混凝土受压弹性模量的经验公式为

$$E_h = \frac{10^5}{2.2 + \frac{33}{R}} \quad (1-3)$$

式中: R ——混凝土的立方强度(MPa)。

试验结果表明,混凝土的受拉弹性模量与受压弹性模量十分相近,其比值平均为 0.995。实用时可取受拉弹性模量等于受压弹性模量。混凝土弹性模量 E_h 按表 1-2 取用。

混凝土的弹性模量(MPa)

表 1-2

混凝土标号	15	20	25	30	40	50	60
弹性模量	2.3×10^4	2.6×10^4	2.85×10^4	3.0×10^4	3.3×10^4	3.5×10^4	3.65×10^4

混凝土受剪模量 G_h 可由弹性理论求得:

$$G_h = \frac{E_h}{2(1 + \mu)} \quad (1-4)$$

式中: μ ——混凝土的横向变形系数(即泊松比),根据试验资料 $\mu = 0.08 \sim 0.18$,计算时可取

$$\mu = \frac{1}{6}, \text{ 因此可求得 } G_h = 0.425E_h, \text{ 取用 } G_h = 0.43E_h。$$

(二) 混凝土的体积变形

混凝土的收缩与膨胀属于混凝土的体积变形。

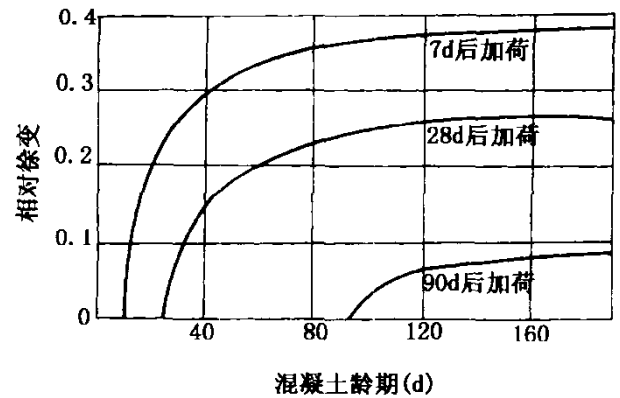


图 1-7 加荷时混凝土龄期与相对徐变的关系

混凝土在空气中结硬时体积减小的现象称为混凝土的收缩。产生收缩的原因主要是混凝土在凝结硬化过程中的化学反应所产生的“凝缩”和混凝土自由水分的蒸发所产生的“干缩”两部分所引起的混凝土体积变化。

混凝土的收缩与许多因素有关。混凝土中的水泥用量愈多、水泥标号愈高、水灰比愈大，混凝土的收缩就愈大；混凝土中的集料质量愈好、浇捣混凝土愈密实、在养生结硬过程中周围湿度愈高，混凝土收缩就愈小。

实践证明，混凝土从开始凝结起就产生收缩，有时它可延续一二十年，一般在最初半年内收缩量最大，可完成全部收缩量的80%~90%。

混凝土的收缩对钢筋混凝土结构会产生有害影响，常造成收缩裂缝。特别是一些长度大但截面尺寸小的构件或薄壁结构，如果在制作和养护时不采取预防措施，严重的会在交付使用前就因收缩裂缝而破坏。为此，在施工时应控制混凝土材料的水灰比和水泥用量等各项指标并加强养护。必要时应设置变形缝和防收缩钢筋，以防止和限制因混凝土收缩而引起的裂缝开展。

混凝土在水中结硬时，体积则膨胀。膨胀值一般比收缩值小得多，且常起有利作用，因此在计算中不予考虑。

第三节 钢 筋

钢筋混凝土结构使用的钢筋，不仅要强度高，而且要具有良好的塑性和可焊性，同时还要与混凝土有较好的粘结性。

一、钢筋的种类

工程中所用钢筋按其外形可分为光面圆钢筋、变形钢筋(多为螺旋纹与人字纹)(见图1-8)、钢丝及钢绞线。

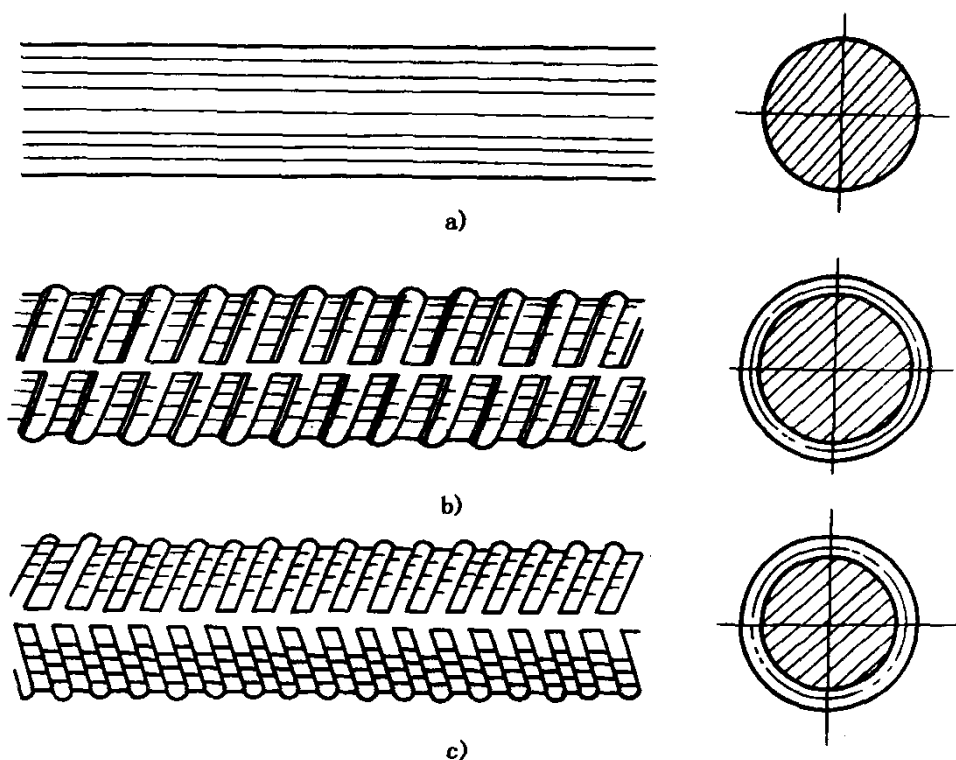


图 1-8 钢筋的形状

a)光面圆钢筋； b)螺旋形螺纹钢； c)人字形螺纹钢