

高等院校土建类专业教材

混凝土结构基本原理

孙艳 杨翌 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等院校土建类专业教材

混凝土结构基本原理

主 编 孙 艳 杨 翌

副主编 吴晓春 万胜武



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/孙艳,杨墨主编. —武汉:武汉大学出版社,2015.9
高等院校土建类专业教材
ISBN 978-7-307-16579-3

I. 混… II. ①孙… ②杨… III. 混凝土结构—高等学校—教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 196622 号

责任编辑:邓 瑶 责任校对:李嘉琪 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:461千字

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16579-3 定价:35.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前言

本书是依据教育部职业教育与成人教育司发布的《高等职业学校专业教学标准(试行)》及全国高校土木工程专业指导委员会审定通过的教学大纲编写的,属于专业基础课教材。全书共 10 章,主要讲述混凝土结构设计的基本理论和基本构件。

编者在编写本书时,其理论部分以必需、够用为度,在讲述基本原理和概念的基础上,结合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和工程实际,同时注意与其他课程的衔接与综合应用。另外,除第 1 章外,每章都有一定数量的例题、思考题和习题,可使学生在学习理论知识的基础上提高实践能力;通过一系列工程实践案例及实际训练,提高学生各种必备的技术应用能力。

本书由武汉科技大学孙艳、杨翌担任主编,由武汉科技大学吴晓春、万胜武担任副主编。具体编写分工如下:孙艳(前言,第 1、2、8 章,附录);吴晓春(第 3~5 章);杨翌(第 6、7 章);万胜武(第 9、10 章)。全书由孙艳统稿。

本书可作为土木工程专业本科学生的专业基础课教材,同时被指定为土木工程专业自考专用教材。

由于编者水平有限,本书难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2015 年 7 月

目录

1 绪论	(1)
1.1 混凝土结构的一般概念	(2)
1.2 混凝土结构的发展概况及其工程应用	(3)
1.3 本课程的特点与学习方法	(6)
知识归纳	(7)
思考题与习题	(7)
2 混凝土结构材料的物理力学性能	(8)
2.1 混凝土的物理力学性能	(9)
2.2 钢筋的物理力学性能	(23)
2.3 钢筋与混凝土的黏结	(27)
知识归纳	(31)
思考题与习题	(32)
3 混凝土结构设计方法	(33)
3.1 结构的功能要求和极限状态	(34)
3.2 近似概率理论的极限状态设计法	(38)
3.3 实用设计表达式	(40)
知识归纳	(47)
思考题与习题	(48)
4 受弯构件正截面承载力计算	(49)
4.1 概述	(50)
4.2 正截面受弯性能的试验研究	(54)
4.3 正截面受弯承载力计算分析	(58)
4.4 单筋矩形截面受弯承载力计算	(62)
4.5 双筋矩形截面受弯承载力计算	(66)
4.6 T形截面受弯承载力计算	(71)
知识归纳	(77)
思考题与习题	(77)
5 受弯构件斜截面承载力计算	(80)
5.1 概述	(81)
5.2 无腹筋梁的受剪性能	(82)

5.3	有腹筋梁的斜截面受剪性能	(88)
5.4	受弯构件斜截面受剪承载力计算	(90)
5.5	受弯构件钢筋的构造要求	(99)
	知识归纳	(112)
	思考题与习题	(112)
6	受压构件承载力计算	(116)
6.1	受压构件的类型及一般构造要求	(117)
6.2	轴心受压构件承载力计算	(120)
6.3	偏心受压构件的受力性能分析	(127)
6.4	矩形截面偏心受压构件承载力计算的基本公式及其适用条件	(133)
6.5	不对称配筋矩形截面偏心受压构件承载力计算方法	(136)
6.6	对称配筋矩形截面偏心受压构件承载力计算方法	(144)
6.7	对称配筋 I 形截面偏心受压构件承载力计算	(148)
6.8	双向偏心受压构件承载力计算	(151)
6.9	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	(153)
	知识归纳	(154)
	思考题与习题	(154)
7	受拉构件承载力计算	(156)
7.1	轴心受拉构件正截面承载力计算	(157)
7.2	偏心受拉构件正截面承载力计算	(158)
7.3	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	(161)
	知识归纳	(162)
	思考题与习题	(162)
8	受扭构件的扭曲截面承载力计算	(163)
8.1	概述	(164)
8.2	构件的开裂扭矩	(164)
8.3	纯扭构件受扭承载力计算	(166)
8.4	弯剪扭构件受扭承载力计算	(171)
8.5	受扭构件配筋构造的要求	(176)
8.6	压弯剪扭构件的承载力计算	(179)
8.7	拉弯剪扭构件的承载力计算	(180)
	知识归纳	(180)
	思考题与习题	(181)
9	钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性	(182)
9.1	概述	(183)
9.2	裂缝宽度验算	(183)

9.3 受弯构件的挠度验算	(192)
9.4 混凝土结构的耐久性	(198)
知识归纳	(200)
思考题与习题	(201)
10 预应力混凝土构件	(203)
10.1 概述	(204)
10.2 预应力混凝土构件设计的一般规定	(210)
10.3 预应力损失	(212)
10.4 预应力钢筋的传递长度 l_{tr} 和构件端部锚固区局部受压承载力计算	(217)
10.5 轴心受拉构件各阶段应力分析	(220)
10.6 预应力混凝土轴心受拉构件计算	(224)
10.7 预应力混凝土受弯构件的计算	(228)
10.8 预应力混凝土构件的构造要求	(245)
10.9 部分预应力混凝土与无黏结预应力混凝土结构	(247)
知识归纳	(248)
思考题与习题	(249)
附录	(251)
参考文献	(260)

第1章 绪论

1 绪论

课前导读

内容提要

本章主要内容包括混凝土结构的一般概念，钢筋和混凝土这两种性质不同的材料能够组合在一起共同工作的条件，以及混凝土结构的优缺点；混凝土结构在房屋建筑工程、交通土建工程、水利工程及其他工程中的应用；混凝土结构的发展前景，包括在材料、结构、施工技术、计算理论等方面的发展；本课程的特点和学习方法。

能力要求

通过本章的学习，学生应对混凝土结构的一般概念，混凝土结构的发展概况及其工程应用，本课程的特点和学习方法等有一定的了解。

1.1 混凝土结构的一般概念

1.1.1 混凝土结构的定义与分类

以混凝土为主要材料制成的结构称为混凝土结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构,常用于路面和一些非承重结构;钢筋混凝土结构是指配置受力钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土结构;预应力混凝土结构是指配置受力预应力钢筋,通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井及水利、海港、核电等工程建设中。

1.1.2 配筋的作用与要求

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种不同的材料组成的。钢筋混凝土结构利用钢筋的抗拉能力很强,混凝土的抗压能力较强,但抗拉能力很弱的特点,用钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,使二者共同工作,以满足工程结构的使用要求。

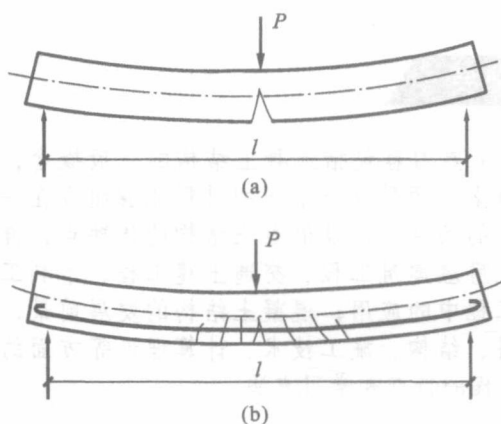


图 1-1 简支梁受力破坏示意图

图 1-1(a)、(b)分别为素混凝土简支梁和钢筋混凝土简支梁的破坏和受力情况。图 1-1(a)所示为素混凝土简支梁在外加集中力和梁的自身重力作用下,梁截面的上部受压,下部受拉。由试验可知,由于混凝土抗拉强度很低,在不大的荷载作用下,梁下部受拉区边缘的混凝土即出现裂缝,而受拉区混凝土一旦开裂,裂缝将迅速发展,梁瞬间断裂而破坏,破坏前变形很小,没有预兆,属于脆性破坏类型。如果在梁的底部受拉区配置适量的钢筋构成钢筋混凝土梁,如图 1-1(b)所示,则钢筋主要承受梁下部受拉区的拉力,混凝土主要承受上部受压区的压力。由于钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力都很强,即使受拉区混凝土开裂,梁还能继续承受相当大的荷载,直到钢筋的应力达到屈服强度,受压区混凝土被压碎,梁才破坏,且在破坏前,混凝土裂缝充分发展,梁的变形较大,有明显的破坏预兆,属于延性破坏类型。可见,与素混凝土梁相比,钢筋混凝土梁的承载能力和变形能力都有很大提高,并且钢筋与混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

在轴心受压的柱子中配置抗压强度较高的钢筋来协助混凝土承受压力,可提高柱子对压力的承受能力和变形能力。因为钢筋的抗压强度比混凝土的高,所以可减小柱子的截面尺寸。另外,配置了钢筋还能改善受压构件破坏时的脆性,并可以承受偶然因素产生的拉力。

为了使钢筋和混凝土能够协同工作,需要使混凝土硬化后与钢筋之间有良好的黏结力,从而可靠地结合在一起,共同变形,共同受力。由于钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数接近(钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,混凝土的线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),当温度变化时,钢筋和混凝土之间不会产生由温度引起的较大的相对变形造成的黏结破坏。

在设计和施工中,钢筋的端部要留有一定的锚固长度,有的还要做弯钩,以保证可靠锚固,防止钢筋受力后被拔出或产生较大的滑移;钢筋的布置和数量应由计算和构造要求确定。

1.1.3 钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构在土木工程结构中有广泛的应用,其主要优点如下。

(1) 材料利用合理
钢筋混凝土结构合理地发挥了两种材料的性能,与钢结构相比,可以降低造价。

(2) 耐久性好

在一般环境条件下,钢筋可以受到混凝土的保护而不易锈蚀,维修费用也很少,密实的混凝土有较高的强度,所以,钢筋混凝土结构的耐久性比较好。

(3) 耐火性好

混凝土是不良导热体,当发生火灾时,由于有混凝土作为保护层,混凝土内的钢筋不会很快升温达到软化温度而导致结构整体破坏。与裸露的木结构、钢结构相比,钢筋混凝土结构的耐火性更好。

(4) 可模性好

钢筋混凝土可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构,如空间结构、箱形结构等。

(5) 整体性好

现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好,对抗震、抗爆有利。

(6) 易于就地取材

混凝土所用的砂、石一般易于就地取材。另外,还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要是:自重较大,这对大跨度结构、高层建筑结构及抗震不利,也给运输和施工吊装带来困难;抗裂性较差,受拉和受弯等构件在正常使用时往往带裂缝工作,对一些不允许出现裂缝或对裂缝宽度有严格限制的结构,工程造价较高。此外,钢筋混凝土结构的隔热、隔声性能也较差。随着科学技术的发展,上述缺点已在一定程度上得到了克服和改善。例如,采用轻质混凝土,可以减轻结构自重;采用预应力混凝土,可以提高结构或构件的抗裂性能;采用植筋或粘钢等技术,可以较好地对发生局部损坏的混凝土结构或构件进行修复等。

1.2 混凝土结构的发展概况及其工程应用

1.2.1 混凝土结构的发展概况

混凝土结构使用至今已约有 160 年的历史。与砌体结构、木结构和钢结构相比,混凝土结构在材料性能、材料来源等方面有许多优点,故其发展速度很快,应用也最广泛。

1.2.1.1 混凝土结构发展的几个阶段

混凝土结构的发展,大体上可分为三个阶段:

第一阶段是从钢筋混凝土被发明至 20 世纪初。在这一阶段,所采用的钢筋和混凝土的强度都较低。混凝土结构主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。

第二阶段是从 20 世纪初到第二次世界大战前后。在这一阶段,混凝土和钢筋的强度有所提高,预应力混凝土结构的发明和应用,使钢筋混凝土被用于建造大跨度的空间结构。

第三阶段是从第二次世界大战以后至今。这一阶段混凝土结构的特点是:随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、泵送商品混凝土等工业化的生产,钢筋混凝土结构的应用范围不断扩大。

1.2.1.2 混凝土结构的发展

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一。中国更是广泛应用这一材料的国家之一。目前,我国水泥年产量已超过 10 亿吨,混凝土年用量已超过 20 亿立方米,钢筋年用量接近 1 亿吨。混凝土结构在各类工程结构中占有主导地位。

(1) 材料方面

混凝土材料的主要发展方向是高强、轻质、耐久、高抗裂性和易于成型,而钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的黏结锚固性能。

目前,国内常用的混凝土强度为 $20\sim 50\text{ N/mm}^2$,国外常用的混凝土强度为 60 N/mm^2 。在实验室内,我国已制成强度在 100 N/mm^2 以上的混凝土,美国已制成 200 N/mm^2 的混凝土。今后,常用的混凝土强度可达 100 N/mm^2 ,在特殊结构(如高耸、大跨度、薄壁空间结构等)的应用中,可配制出 400 N/mm^2 的混凝土。

为了减轻混凝土结构的自重,国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料,而轻质骨料主要有天然轻集料(浮石、凝灰岩等)、人造轻集料(页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)和工业废料(炉渣、矿渣、粉煤灰陶粒等)。轻质混凝土的容重一般为 $14\sim 18\text{ kN/m}^3$,可在预制或现浇混凝土结构中使用。目前,国外轻质混凝土的强度为 $30\sim 60\text{ N/mm}^2$,国内轻质混凝土的强度为 $20\sim 40\text{ N/mm}^2$ 。由轻质混凝土制成的结构自重可比普通混凝土结构减少 $20\%\sim 30\%$,在地震区采用轻质混凝土结构可有效地减小地震作用,节约材料,降低造价。利用建筑垃圾、工业废渣制作再生骨料的再生混凝土也已开始在工程中应用,这对实现资源的再生利用、保护环境有着重要的意义。

另外,为了提高混凝土的抗裂性和耐久性而掺入高分子化合物的混凝土,如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等,也将会得到发展和应用。实验室研究显示,这类混凝土不但抗压强度高,抗拉性能很好,而且耐磨、抗渗、抗冲击、耐冻等性能大大优于普通混凝土。纤维混凝土因改善了混凝土的抗裂性、耐磨性及延性,在一些有特殊要求的工程中已有较多应用。

外加剂的发明与应用对改善混凝土的性能起到了很大作用。目前的外加剂主要有四类:① 改善混凝土拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂、增塑剂等;② 调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;③ 改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂、阻锈剂等;④ 改善混凝土其他性能的外加剂,如加气剂、防冻剂、膨胀剂、着色剂等。可以预见,今后一段时间内,各种高性能的外加剂还会源源不断地被研制出来。

对于钢筋,主要是向高强并有较好延性、防腐蚀性、高黏结锚固性等方向发展。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 500 N/mm^2 ,在中等跨度的预应力构件中将采用强度为 $800\sim 1370\text{ N/mm}^2$ 的中强螺旋肋钢丝,在大跨度的预应力构件中采用强度为 $1570\sim 1960\text{ N/mm}^2$ 的高强钢丝和钢绞线。试验结果显示,中强和高强螺旋肋钢丝不但强度高、延性好,而且与混凝土的黏结锚固性能也优于其他钢筋。为了提高钢筋的防腐蚀性,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

(2) 结构类型

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一,现在已有先张法、后张法、无黏结预应力和体外张拉等技术,预应力技术将来还会有重大发展。在锚具方面,将发展高效而耐久的锚具和夹具;在施加预应力方面,也将有新的技术出现。近期,国内外已研究将预应力技术用于组合结构。例如,体外张拉预应力钢筋的技术初期只是用于结构的加固补强,因体外张拉预应力钢筋可以避免

制孔、穿筋、灌浆等工序,并且发现问题时易于更换预应力钢筋,所以,其目前已开始应用于新建结构。在预制构件方面,正在发展采用高强钢丝、钢绞线和高强度混凝土的大跨度高效预应力楼板,以适应大开间住宅的需要。

近年来,钢和混凝土组合结构的应用范围逐渐扩大,在约束混凝土概念的指导下,钢管混凝土柱、外包钢混凝土柱已在高层建筑、地下铁道、桥梁、火电厂厂房及石油化工企业构筑物中大量应用。钢-混凝土组合梁、钢骨混凝土(劲性钢筋混凝土)构件,由于具有强度高、截面小、延性好及施工简单等优点,今后也将得到更加广泛的应用。

(3) 计算理论

混凝土结构基本理论和设计方法也在不断发展中。早期,由于混凝土结构材料的性能及其内在规律尚未被人们完全认识,多数国家采用以弹性理论为基础的容许应力设计方法。实践证明,这种设计方法和结构的实际情况有较大出入,不能正确揭示混凝土结构或构件受力性能的内在规律,现在绝大多数国家已不再采用。

随着钢筋混凝土构件极限强度试验的发展,20世纪40年代出现了按破损阶段计算结构承载力的设计方法。这种方法考虑了混凝土和钢筋的塑性,更接近钢筋混凝土的实际情况,比容许应力设计方法前进了一步,但在总的安全系数的规定方面仍带有很大的经验性。

另外,通过对荷载和材料变异性的研究,人们逐渐认识到各种荷载对结构产生的效应及结构的抗力均非定值,并在20世纪50年代提出了按极限状态计算结构承载力的设计方法。这种设计方法指出,结构的极限状态是一种特定状态,当达到此状态时,结构或构件即丧失承载能力或不能正常使用,而计算系数则根据荷载及材料强度的变异性由统计规律分项确定,并考虑了影响结构构件承载力的非统计因素,因此,这种设计方法又称为半经验、半概率极限状态设计方法。由于这种方法概念较明确,比按破损阶段计算结构承载力的设计方法合理,因此,到了20世纪70年代已为多数国家所接受。

随着结构设计理论的进一步发展,为了合理规定结构及其构件的安全系数或分项系数,结构可靠度理论也得到发展,人们提出了以失效概率来度量结构安全性的、以概率理论为基础的极限状态设计方法。因为这种方法对各种荷载、材料强度的变异规律进行了大量的调查、统计和分析,各分项系数的确定比较合理,而且用失效概率和可靠度指标能够比较明确地说明结构“可靠”或“不可靠”的概念,所以到目前为止,已有许多国家采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法。

近年来,我国在混凝土基本理论与设计方法、结构可靠度与荷载分析、工业化建筑体系、结构抗震与有限元分析方法、现代化测试技术、低碳建筑等方面的研究也取得了许多新的成果,许多方面已达到或接近国际先进水平。混凝土结构的设计和研究向更完善、更科学的方向发展。先进的现代测试技术保证了试验研究更系统、更精确。基于可靠度理论的分析方法也在逐步完善,并用于对结构整体和使用全过程的分析。与此同时,计算机的普及和多功能化、CAD等软件系统的开发缩短了结构研发和设计的时间,减少了工作量,大大提高了经济效益。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中汇集了长期的工程实践经验和大量科研成果,把我国混凝土结构的设计方法提高到了国际水平,在工程设计中发挥了积极的指导作用。

1.2.2 混凝土结构的工程应用

我国是使用混凝土结构最多的国家,在高层建筑和多层框架中大多采用混凝土结构。在民用建筑中已较广泛地采用定型化、标准化的装配式钢筋混凝土构件。预应力混凝土多用于高层建筑、

桥隧建筑、海洋结构物、压力容器、飞机跑道及公路路面等。

目前,世界上最高的钢筋混凝土建筑是位于阿联酋迪拜的哈利法塔(高 828 m,163 层)。我国目前最高的钢筋混凝土建筑是上海的上海中心大厦(高 632 m,125 层)。沙特阿拉伯麦加的皇家钟塔酒店(高 601 m,101 层)、马来西亚吉隆坡的双子塔大厦(高 452 m,88 层)、中国香港中心大厦(高 374 m,78 层)等都采用了混凝土结构。

在大跨度和高耸结构方面,预应力混凝土屋架、薄腹梁、V 形折板、SP 板、钢筋混凝土拱、薄壳等已得到广泛应用。例如,加拿大多伦多电视塔高 549 m,是目前世界上最高的预应力混凝土构筑物;法国巴黎国家工业与发展技术展览中心大厅的平面为三角形,屋盖结构采用拱身为钢筋混凝土装配整体式薄壁结构的落地拱,跨度为 206 m;美国旧金山地下展厅采用钢筋混凝土拱 16 片,跨度为 83.8 m;意大利都灵展览馆拱顶由装配式混凝土构件组成,跨度达 95 m;澳大利亚悉尼歌剧院的主体结构由三组巨大的壳片组成,壳片曲率半径为 76 m,建筑呈白色,状如帆船,已成为世界著名的风光建筑。

在桥梁建设方面,很大一部分中小跨度桥梁采用钢筋混凝土建造,结构形式有梁、拱、桁架等。一些大跨度桥虽已采用钢悬索或钢斜拉索,但其桥面结构也有用混凝土结构的。例如,洛阳黄河大桥共 67 孔,由跨度为 50 m 的预应力混凝土简支梁组成。厦门集美跨海大桥的主跨为 46 m,桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。用钢筋混凝土建造拱桥有较大优势,目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克 1 号桥,形式为敞肩拱桥,跨度达 390 m。公路拱桥在我国应用也很广泛,1989 年建成的涪陵岛江桥全长 351.8 m,主跨为 200 m,为拱结构,矢跨比为 1/4,是我国跨度最大的拱桥之一。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上的永定河 7 号桥,跨度达 150 m。在我国西南交通干线上,有许多桥梁采用钢筋混凝土结构,如清水河大桥,主跨为 72 m+128 m+72 m,为预应力连续刚架结构,其 4 号桥墩高 100 m,是世界上最高的铁路桥墩。跨度超过 500 m 的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥,但目前也常与混凝土结构混合使用。如中国香港的青马大桥,跨度为 1377 m,桥体为悬索结构,其中支承悬索的两端立塔高 202 m,是混凝土结构;又如上海杨浦大桥,主跨为 602 m,为斜拉桥,其桥塔和桥面均为混凝土结构。

在水利工程中,因混凝土自重大,尤其是砂石比例大,易于就地取材,故常用来修建大坝。例如,瑞士狄克桑斯坝坝高 285 m,坝顶宽 15 m,坝底宽 225 m,坝长 695 m,库容量为 4 亿立方米,是目前世界上最高的重力坝。我国龙羊峡水电站拦河大坝为混凝土重力坝,坝高 178 m,坝顶宽 15 m,坝底宽 80 m,坝长 393.34 m。长江葛洲坝水利枢纽工程的发电能力为 271.5 万千瓦,库容量为 15.8 亿立方米,整个工程混凝土用量达 983 万立方米。长江三峡水利枢纽工程,大坝高 186 m,坝体混凝土用量达 1527 万立方米,是目前世界上最大的水利工程。

混凝土结构在其他特殊的工程结构中也有广泛的应用,如地下铁道的支护和站台工程、核电站的安全壳、机场的跑道、海上采油平台、填海造地工程等。

1.3 本课程的特点与学习方法

混凝土结构课程按内容的性质通常可分为混凝土结构基本原理和混凝土结构设计两部分。前者主要讲述各种混凝土构件的受力性能、截面设计计算方法及构造等混凝土结构的基本理论,如受弯构件正截面、斜截面承载力计算,受扭构件承载力计算,受压和受拉构件承载力计算,受弯构件变形和裂缝宽度验算,以及预应力混凝土构件的计算等属于专业基础课。后者主要讲述梁板结构、单层厂房、多层钢筋混凝土框架结构的设计方法。通过本课程的学习,以及课程设计和毕业设计等实

践性教学环节,学生应初步具有运用这些理论知识正确进行混凝土结构设计和解决实际技术问题的能力。

学习本课程时应注意以下特点:

① 混凝土结构基本原理中涉及的构件在材料性质上与材料力学中的构件有相似之处,又有不同之处,材料力学主要研究单一、匀质、连续和由弹性材料组成的构件,而混凝土结构基本原理中构件是由钢筋和混凝土组成的复合材料构件。由于钢筋和混凝土这两种材料的力学性能相差很大,混凝土又是非匀质、非连续、非弹性的材料,加之影响钢筋混凝土结构构件性能的因素很多,因此,材料力学中所介绍的公式在钢筋混凝土结构中可以直接应用的不多。混凝土结构设计理论和计算方法是建立在结构性能试验和工程实践基础上的,许多计算公式都是在大量试验资料的基础上用统计分析方法得出的半理论、半经验公式,其在这些方面与材料力学也是有区别的。

② 材料力学着重于构件的内力和变形分析,答案通常是唯一的。而混凝土结构基本原理除了要满足承载能力和变形计算外,还要解决综合性的“设计”问题。它不仅包括决定方案、材料选择、截面形式、配筋、构造措施等,还要考虑安全、适用、经济和施工等方面的合理性、可行性等。因此,同一个结构构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸和配筋,答案不是唯一的。所以,设计中需要对多种因素的影响进行综合分析和归纳,选择合理的方案。在学习过程中,要学会对多种因素进行综合分析的设计方法。

③ 本课程的实践性很强,因此要加强课程作业、课程设计和毕业设计等实践性教学环节的学习,并要逐步熟悉和正确运用我国颁布的一些设计规范和规程,如《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2002)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等。

④ 本课程的内容多、符号多、计算公式多、构造规定也多,学习时要遵循教学大纲的要求,突出重点内容的学习。要深刻理解教学大纲中要求掌握的一些重要概念,切忌死记硬背。另外,对构造规定要力求理解。

【知识归纳】

- (1) 混凝土结构的一般概念。
- (2) 混凝土结构的发展概况及其工程应用。
- (3) 本课程的特点与学习方法。

【思考题与习题】

- 1-1 钢筋混凝土结构的优缺点有哪些?其主要形式有哪些?
- 1-2 钢筋与混凝土是如何共同工作的?
- 1-3 本课程主要包括哪些内容?学习本课程要注意哪些问题?

混凝土结构材料物理力学性能

混凝土结构材料 的物理力学性能

2

课前导读

内容提要

钢筋与混凝土的物理力学性能及共同工作的特性直接影响混凝土结构和构件的性能，也是混凝土结构计算理论和设计方法的基础。本章主要介绍钢筋和混凝土的主要物理力学性能及混凝土与钢筋的黏结。

能力要求

通过本章的学习，学生应掌握钢筋和混凝土的主要物理力学性能及混凝土与钢筋的黏结，熟悉混凝土弹性模量、变形模量、徐变、收缩与膨胀的概念。

2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.1 混凝土的组成结构

普通混凝土是用水泥、砂(细骨料)、石材(粗骨料)、水拌和、硬化后形成的人工石材,是多相复合材料。混凝土的组成是一个广泛的综合概念,包括从组成混凝土组分的原子、分子结构到混凝土宏观结构在内的不同层次的材料结构。通常把混凝土的结构分为三种基本类型:微观结构(即水泥石结构),亚微观结构(即混凝土中的水泥砂浆结构),宏观结构(即砂浆和粗骨料两组分体系)。

微观结构(水泥石结构)由水泥凝胶、晶体骨架、未水化完的水泥颗粒和凝胶孔组成,其物理力学性能取决于水泥的化学矿物成分、粉磨细度、水灰比和凝结硬化条件等。混凝土的宏观结构和亚微观结构有许多的共同点,可以把水泥砂浆看作基相,粗骨料分布在砂浆中,砂浆与粗骨料的界面是结合的薄弱面。骨料的分布及骨料与基相在界面的结合强度也是混凝土物理力学性能重要的影响因素。

浇筑混凝土时的泌水作用会引起沉缩,硬化过程中由水泥浆水化造成的化学收缩和干缩受到骨料的限制,会在不同层次的界面引起结合破坏,形成随机分布的界面裂缝。

图 2-1 所示为混凝土内微裂缝情况,混凝土中的砂、石、水泥凝胶中的晶体、未水化的水泥颗粒组成了错综复杂的弹性骨架,主要依靠其来承受外力,并使混凝土具有弹性变形的特点。水泥胶体中的凝胶、孔隙和界面初始微裂缝等,是混凝土产生塑性变形的根源,并起着调整和扩散混凝土应力的作用。

在混凝土凝结初期,由于水泥胶块的收缩、泌水、骨料下沉等原因,在粗骨料与水泥胶块的接触面上及水泥胶块内部将形成微裂缝,也称黏结裂缝(图 2-1)。它是混凝土内最薄弱的环节。混凝土在受荷前存在的微裂缝在荷载作用下将继续发展,对混凝土的强度和变形将产生重要影响。

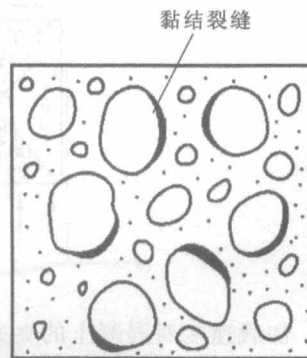


图 2-1 混凝土内微裂缝情况

2.1.2 混凝土的强度

实际工程中,混凝土结构和构件一般处于复合应力状态,但是单向受力状态下混凝土的强度是复合应力状态下强度的基础和重要参数。

混凝土各组成成分的数量比例、水泥的强度、骨料的性质及水与水泥凝胶材料的比例(水胶比)对混凝土的强度和变形影响很大。另外,在很大程度上,混凝土的性能还取决于搅拌质量、浇筑的密实性和养护条件等。此外,试件的大小和形状、试验方法和加载速率也影响混凝土强度的试验结果。因此,各国对各种单向受力状态下混凝土强度都规定了统一的标准试验方法。

2.1.2.1 混凝土的立方体抗压强度和强度等级

混凝土的立方体抗压强度(简称立方体强度)是衡量混凝土强度的基本指标,用 f_{cu} 表示。我国相关规范采用立方体抗压强度作为评定混凝土强度等级的标准。《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)以边长为 150 mm 的立方体标准试件在 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的温度和相对湿度为 90% 以上的潮湿空气中养护 28 d,按标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值(以 N/mm^2 计)作为

混凝土的立方体抗压强度。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定,混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值($f_{cu,k}$)确定,共有 14 个等级,分别为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80。符号“C”代表混凝土,后面的数字表示混凝土的立方体抗压强度的标准值(以 N/mm^2 计),如 C60 表示混凝土立方体抗压强度标准值为 $60 N/mm^2$ 。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定,钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20,采用 400 MPa 及以上的钢筋时,混凝土强度等级不应低于 C25;承受重复荷载的钢筋混凝土构件,混凝土强度等级不应低于 C30;预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40,且不应低于 C30。

试验方法对混凝土的立方体抗压强度有较大影响。一般情况下,试件受压时上下表面与试验机承压板之间将产生阻止试件向外横向变形的摩擦阻力,像两道套箍一样将试件上下两端套住,从而延缓裂缝的发展,提高试件的抗压强度;破坏时试件中部剥落,形成两个对顶的角锥形破坏面,如图 2-2(a)所示。如果在试件的上下表面涂一些润滑剂,试验时摩擦阻力就大大减小,试件将沿着平行力的作用方向产生几条裂缝而破坏,所测得的立方体抗压强度较低,其破坏形状如图 2-2(b)所示。我国规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

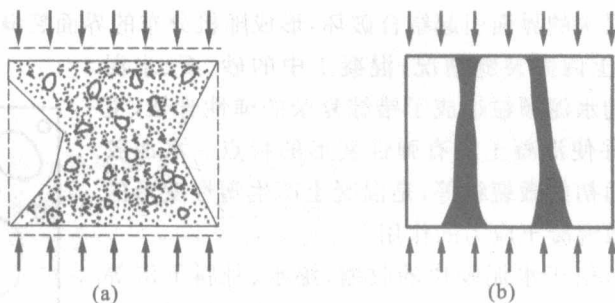


图 2-2 混凝土试块的破坏情况

加载速度对混凝土的立方体抗压强度也有影响。加载速度越大,测得的强度越高。通常规定的加载速度为:混凝土强度等级低于 C30 时,取 $0.3 \sim 0.5 N/(mm^2 \cdot s)$;混凝土强度等级高于或等于 C30 时,取 $0.5 \sim 0.8 N/(mm^2 \cdot s)$ 。

混凝土的立方体抗压强度还与养护条件和龄期有关。如图 2-3 所示,混凝土立方体抗压强度随混凝土的龄期逐渐增长,初期增长较快,以后增长逐渐缓慢;在潮湿环境中增长较快,而在干燥环境中增长较慢,甚至还有所下降。

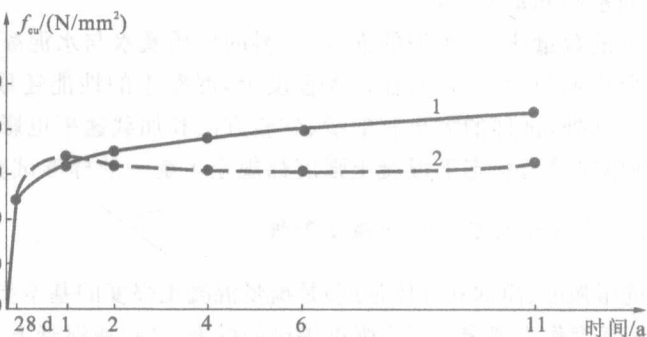


图 2-3 混凝土的立方体抗压强度随龄期的变化

1—在潮湿环境下;2—在干燥环境下