

高职高专建筑工程技术专业“十一五”规划教材

混凝土

与砌体结构

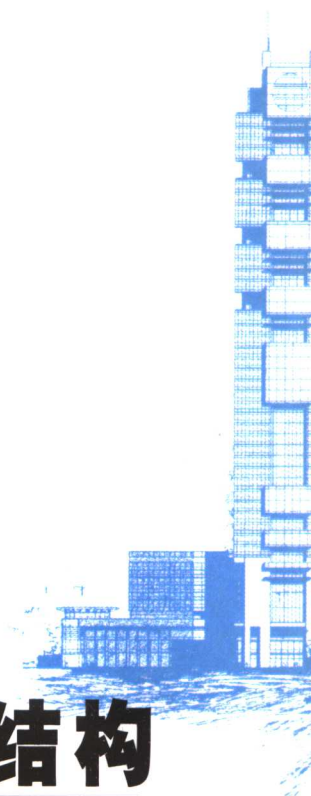


Yu Qi Ti Jie Gou

Gaozhigaozhuan
Jianzhu Gongcheng
Jishu Zhuanye
“Shiyiwu” Guihua
Jiaocai

主编 侯元恒

Huanningtu



郑州大学出版社

混凝土

与砌体结构

Jian
ZHU

yu Qiti Jiegou

Gaozhigaozhuan
Jianzhu Gongcheng
Jishu Zhuanye
“Shiyiwu” Guihua
Jiaocai

主编 侯元恒

Junmingtu

郑州大学出版社



内容简介

本书共 14 章,内容包括:绪论,钢筋混凝土结构的设计方法,钢筋和混凝土材料的力学性能,钢筋混凝土受弯构件承载力计算,钢筋混凝土受压构件承载力计算,钢筋混凝土受拉构件承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度和变形验算,钢筋混凝土梁板结构,预应力混凝土构件的基本知识,单层厂房结构,多层框架结构,砌体结构,混凝土与砌体结构抗震设计。本教材不仅可以作为高职高专建筑工程技术、工程监理、工程造价、房地产经营与估价等土建类专业的教学教材,而且也可用于土木建筑类函授、自学考试、在职培训教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土与砌体结构/侯元恒主编. —郑州:郑州大学出版社,2007.9
高职高专建筑工程技术专业“十一五”规划教材
ISBN 978-7-81106-370-7

I. 混… II. 侯… III. ①混凝土结构-高等学校:技术
学校-教材②砌体结构-高等学校:技术学校-教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118594 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

郑州新魏印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:25.875

字数:632 千字

版次:2007 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

1/16

印次:2007 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-81106-370-7

定价:39.00 元

序

近年来,我国高等教育事业快速发展,取得了举世瞩目的成就。随着高等教育改革的不断深入,高等教育工作重心正在由规模发展向提高质量转移,教育部实施了高等学校教学质量与教学改革工程,进一步确立了人才培养是高等学校的根本任务,质量是高等学校的生命线,教学工作是高等学校各项工作的中心的指导思想,把深化教育教学改革,全面提高高等教育教学质量放在了更加突出的位置。

教材是体现教学内容和教学要求的知识载体,是进行教学的基本工具,是提高教学质量的重要保证。教材建设是教学质量与教学改革工程的重要组成部分。为加强教材建设,教育部提倡和鼓励学术水平高、教学经验丰富的教师,根据教学需要编写适应不同层次、不同类型院校,具有不同风格和特点的高质量教材。郑州大学出版社按照这样的要求和精神,组织土建学科专家,在全国范围内,对土木工程、建筑工程技术等专业的培养目标、规格标准、培养模式、课程体系、教学内容、教学大纲等,进行了广泛而深入的调研,在此基础上,分专业召开了教育教学研讨会、教材编写论证会、教学大纲审定会和主编人会议,确定了教材编写的指导思想、原则和要求。按照以培养目标和就业为导向,以素质教育和能力培养为根本的编写指导思想,科学性、先进性、系统性和适用性的编写原则,组织包括郑州大学在内的五十余所学校的学术水平高、教学经验丰富的一线教师,吸收了近年来土建教育教学经验和成果,编写了本、专科系列教材。

教育教学改革是一个不断深化的过程,教材建设是一个不断推陈出新、反复锤炼的过程,希望这些教材的出版对土建教育教学改革和提高教育教学质量起到积极的推动作用,也希望使用教材的师生多提意见和建议,以便及时修订、不断完善。

王发之

2006年7月

本教材是高职高专建筑工程技术专业“十一五”规划教材。本书是以全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高等职业教育建筑工程技术专业教育标准和培养方案及主干课程教学大纲》为依据,结合国家对工程建设人才的需求和教学实际,以就业为指导,以能力培养为根本,遵循科学性、先进性和教与学实用性的原则来编写。

本教材主要特点:符合教学大纲要求,教学内容以够用为度,概念清晰,内容精练;通过本教材的学习,可使学生具备一般房屋结构设计的基本知识,正确指导施工现场;突出应用能力和创新能力的培养,满足应用型人才需要;同时,全部采用国家最新颁布的规范、标准和规程。

本书由平顶山工学院侯元恒老师担任主编,安阳工学院张玲老师担任副主编。参加编写的有:洛阳工业高等专科学校的虞皓影老师、黄淮学院的邵连芬老师、开封大学的常莉老师、平原大学的冯红卫老师、焦作大学的和燕老师、鹤壁职业技术学院的高海虎老师。具体分工为侯元恒编写第1章、第4章及附表,张玲编写第5章、第6章,虞皓影编写第2章、第3章、第7章,邵连芬编写第8章、第9章,常莉编写第10章、第11章,冯红卫编写第12章,和燕编写第13章,高海虎编写第14章。

本书由平顶山工学院李玉老师主审,并提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。由于水平有限,书中有不妥或错误之处,恳请读者指正。

编者

2007年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 混凝土与砌体结构的发展	4
1.3 学习本课程要注意的问题	6
第 2 章 钢筋混凝土结构的设计方法	7
2.1 结构的作用、作用效应和结构的抗力	7
2.2 概率极限状态设计法	8
第 3 章 钢筋和混凝土材料的力学性能	15
3.1 钢筋	15
3.2 混凝土	18
3.3 钢筋与混凝土之间的黏结力	24
第 4 章 钢筋混凝土受弯构件承载力计算	27
4.1 受弯构件正截面的承载力计算	27
4.2 受弯构件斜截面抗剪承载力计算	52
4.3 受弯构件构造要求	62
第 5 章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	75
5.1 概述	75
5.2 轴心受压构件承载力计算	76
5.3 偏心受压正截面承载力计算	84
5.4 偏心受压构件的斜截面受剪承载力	106
5.5 受压构件的一般构造要求	107
第 6 章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	113
6.1 概述	113
6.2 轴心受拉构件正截面承载力计算	114
6.3 偏心受拉构件正截面承载力计算	116
6.4 偏心受拉构件的斜截面承载力计算	120
第 7 章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	122
7.1 纯扭构件承载力计算	122
7.2 弯剪扭构件的承载力计算	125

第 8 章 钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度和变形验算	135
8.1 概述	135
8.2 钢筋混凝土构件裂缝宽度验算	136
8.3 受弯构件的变形验算	140
第 9 章 钢筋混凝土梁板结构	148
9.1 概述	148
9.2 现浇整体式单向板肋梁楼盖	149
9.3 现浇整体式双向板肋梁楼盖	191
9.4 现浇钢筋混凝土楼梯	206
第 10 章 预应力混凝土构件的基本知识	215
10.1 概述	215
10.2 施加预应力的方法	217
10.3 张拉控制应力和预应力损失	219
10.4 预应力混凝土构件的构造	225
第 11 章 单层厂房结构	230
11.1 概述	230
11.2 单层厂房结构的组成和布置	231
11.3 排架内力计算	245
11.4 单层厂房柱	254
第 12 章 多层框架结构	267
12.1 概述	267
12.2 多层框架结构荷载及内力计算	274
12.3 多层框架结构构件设计	288
第 13 章 砌体结构	294
13.1 砌体结构的材料及其力学性能	297
13.2 无筋砌体构件承载力计算	306
13.3 配筋砌体结构构件的承载力计算	316
13.4 混合结构房屋的墙、柱设计	327
13.5 混合结构房屋其他构件设计	338
第 14 章 混凝土与砌体结构抗震设计	347
14.1 建筑抗震基本知识及术语	347
14.2 结构抗震计算	350
14.3 多层钢筋混凝土框架结构的抗震设计	358
14.4 砌体结构房屋抗震设计	375
附表	391
附录	401
参考文献	404

第1章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 混凝土结构的概念及分类

混凝土结构广泛应用于土木工程建设中,我们把以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构。它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构和预应力混凝土结构等。

素混凝土结构是指由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构。它由于承载力低、抗裂差、性质脆等缺点,很少用在土木工程的受力结构中。

钢筋混凝土结构是指由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构。在混凝土结构中,利用混凝土的抗压能力较强而抗拉能力很弱,钢筋的抗拉和抗压能力均强的特点,根据结构构件的形式和受力特点,将钢筋和混凝土二者很好地结合起来。用混凝土主要承担压力,用钢筋主要承担拉力,使它们共同工作,提高了结构承载力和受力性能,以满足工程结构的使用要求。图 1.1(a) 是一根未配置受力钢筋的素混凝土简支梁,跨度 4 m,截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,混凝土等级为 C20,梁的跨中作用一个集中荷载。对其进行破坏试验可知,当荷载较小时,截面上的应变如同弹性材料的梁一样,沿截面高度呈直线分布;当荷载增大到受拉区边缘混凝土开裂时,裂缝沿截面高度迅速开展,梁发生没有预兆的断裂破坏,这种破坏属于脆性破坏。尽管混凝土的抗压强度比其抗拉强度高几倍或十几倍,但得不到充分利用,因为梁的承载力是由混凝土的抗拉强度控制,所以梁的破坏荷载值很小,只有 8 kN 左右。图 1.1(b) 是一根与图 1.1(a) 条件相同的钢筋混凝土简支梁,在该梁的受拉区配置三根直径为 16 mm、等级为 HPB235 级的纵向受力钢筋,并在受压区配置两根直径为 10 mm 的架立钢筋和适量的箍筋,再进行同样的破坏试验可以看到,当荷载加到受拉区边缘混凝土开裂后,试件不会发生随即断裂,裂缝截面处混凝土的拉应力由纵向受拉钢筋来承担,故荷载可进一步增加,直到纵向受拉钢筋达到屈服强度以后,荷载可以继续增加,直到受压区混凝土被压碎,梁宣告破坏。破坏时裂缝开展较宽、梁的变形较大,有明显的预兆,属于塑性破坏或叫延性破坏。同时,我

们可以看到,梁的承载力有很大的提高,其值达到 36 kN,受力性能得到显著的改善。

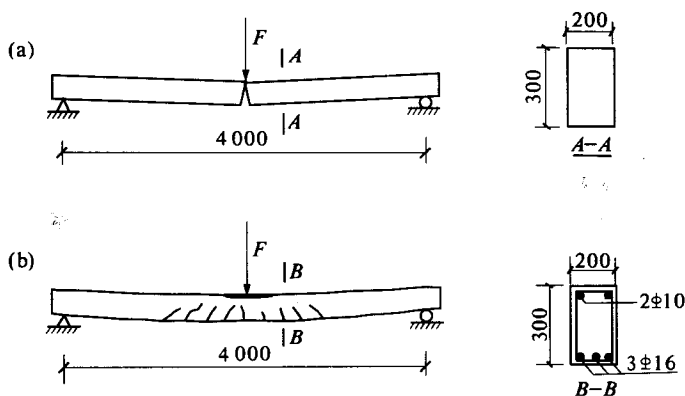


图 1.1 素混凝土简支梁与钢筋混凝土简支梁破坏情况对比

钢筋混凝土结构除了比素混凝土结构具有较高的承载力和较好的受力性能外,与其他结构相比还有以下优点:

(1)就地取材 钢筋混凝土所用材料中比例很大的砂、石一般易于就近取材,可以显著降低工程造价。

(2)节约钢材 钢筋混凝土结构中合理地利用钢筋及混凝土各自的良好性能,在多数情况下可以替代钢结构,节约钢材,降低工程造价。

(3)整体性 现浇钢筋混凝土结构整体性好,有利于抗震。

(4)可模性 钢筋混凝土根据工程需要,可以较容易地浇筑成各种形状、各种尺寸的结构。

(5)耐久性 混凝土有较高的密实度和强度,同时混凝土包裹在钢筋的外围,对钢筋起保护作用,钢筋不易锈蚀,使用其耐久性较好。

(6)耐火性 由传热性差的混凝土作为钢筋的保护层,当发生火灾时,比钢结构、木结构耐火性好。

钢筋混凝土结构也有以下主要缺点:

(1)自重大 不利于建造大跨度建筑以及超高层建筑。

(2)抗裂性差 由于混凝土的抗拉强度较低,普通钢筋混凝土结构经常带裂缝工作。尽管裂缝的存在结构不一定破坏,但是当裂缝数量较多、裂缝较宽时,影响结构的耐久性和美观,还给人造成不安全感。同时,影响结构的使用。

此外,混凝土结构还有隔热、隔声较差,结构补强维修、施工受季节和气候的限制等缺点。

型钢混凝土结构又称为钢骨混凝土结构或劲性钢筋混凝土结构。它是指用型钢或钢板焊成的钢骨架作为配筋的混凝土结构。其承载力高、抗震性能好,但是耗钢量多,可在高层、大跨度或者抗震要求较高的结构中使用,梁的截面形式见图 1.2,柱的截面形式见图 1.3。

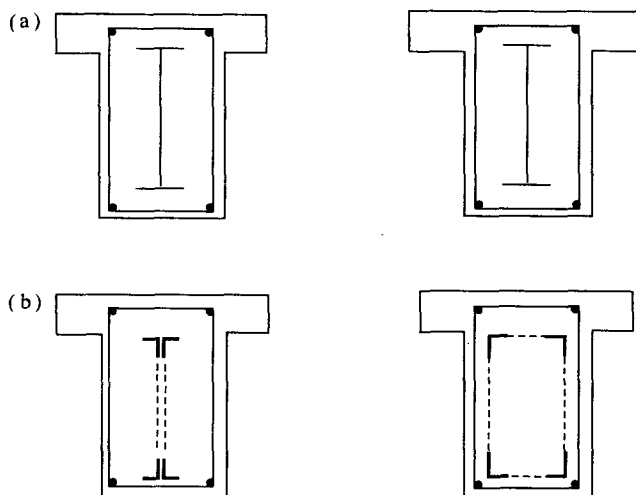


图 1.2 型钢混凝土梁截面形式

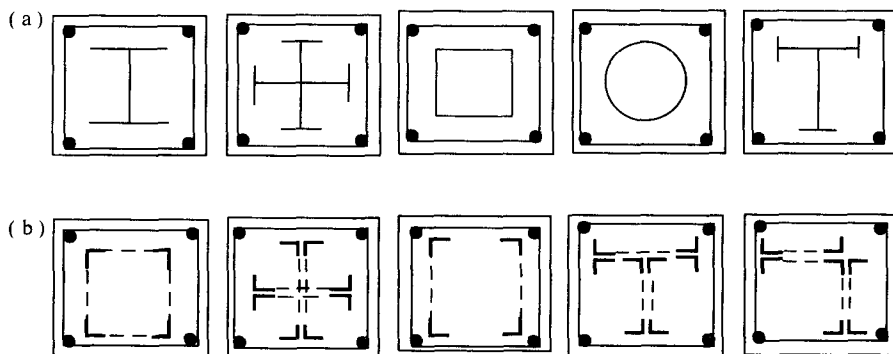


图 1.3 型钢混凝土柱截面形式

钢管混凝土结构是指在钢管内浇筑混凝土制成的结构。虽然其承载力高,但是构件的连接复杂,维护费用高。

预应力混凝土结构是指由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预应力混凝土的结构。由于克服了普通钢筋混凝土结构抗裂性能差、自重大的特点,因此可以广泛应用在大跨度结构中,应用在对裂缝抗震较高的结构中。

综上所述,在混凝土结构部分中,我们重点讲述钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构,其他内容在以后的学习中再作介绍。

1.1.2 砌体结构的分类

砌体结构是指由块体和砂浆砌筑而成的墙、柱作为建筑物主要受力构件的结构。根据砌体的受力性能分为无筋砌体结构和配筋砌体结构。

无筋砌体是指不配钢筋仅由块材和砂浆组成的砌体,称为无筋砌体。根据块材种类不同,可分为无筋砖砌体、无筋石砌体和无筋砌块砌体结构。



(1) 砖砌体结构是由砖砌体制成的结构,视砖的不同分为烧结普通砖、烧结多孔砖和非烧结硅酸盐砖砌体结构。它使用面广,根据我国墙体材料改革的要求,随着烧结黏土砖的禁用,其他新型材料的烧结砖和非烧结砖逐步得到广泛的应用。

(2) 砌块砌体结构是由砌块砌体制成的结构。我国主要采用普通混凝土小型空心砌块砌体和轻骨料混凝土小型空心砌块砌体,是替代黏土实心砖的主要承重砌体材料,当采用混凝土灌孔后,又称为灌孔混凝土砌块砌体,在我国有较大的应用空间和发展前景。

(3) 石砌体结构是由石砌体制成的结构,根据石才的规格和砌体施工方法的不同分为料石砌体、毛石砌体和毛石混凝土砌体。它主要用在石才资源丰富的地区采用。

配筋砌体结构是指由配置钢筋的砌体作为建筑物主要受力构件的结构。主要分为横向配筋砖砌体、组合砖砌体和配筋砌块砌体结构。见图 1.4。

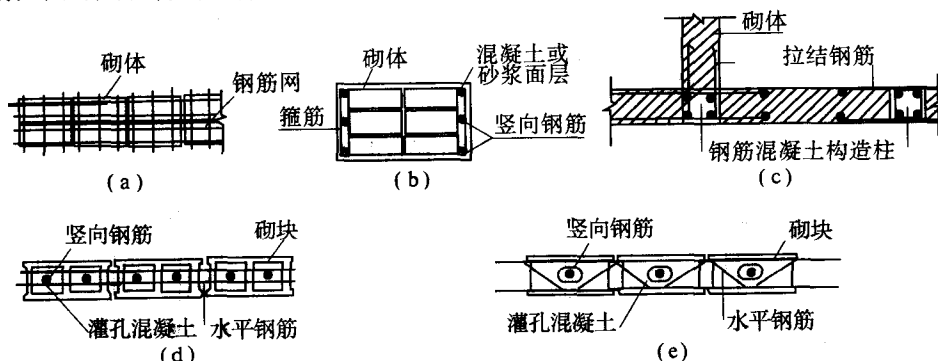


图 1.4 配筋砌体结构类型

(1) 横向配筋砖砌体是指在砖砌体的水平灰缝内配置钢筋网片或水平钢筋的砌体。它可以提高砌体的抗压承载力,一般在轴心受压和偏心距较小的受压构件中应用,习惯上称为网状配筋砌体,见图 1.4(a)。

(2) 组合砖砌体是由砖砌体和钢筋混凝土或钢筋砂浆组成的砌体结构,见图 1.4(b)、(c)。

(3) 配筋混凝土砌块砌体是指在混凝土空心砌块的竖向孔洞和横向勒槽中均配制钢筋浇注混凝土或在竖向配筋浇混凝土,且在水平灰缝配水平筋的砌体结构,简称配筋砌块砌体。见图 1.4(d)、(e)。

1.2 混凝土与砌体结构的发展

1.2.1 混凝土结构的发展

混凝土结构的应用虽然只有 150 年左右的历史,但它比砖石、钢木结构具有更多的优点。目前我国,每年混凝土用量约 9 亿立方米。钢筋用量 2000 万吨,经测算,我国每年仅混凝土结构耗资 2000 亿元以上,生产上用量之大,耗资之巨,居世界前列。可以预见,混凝土结构将是我国今后相当长时期内一种重要的结构形式。混凝土结构的发展大致划



分为四个阶段。

从 1850 ~ 1920 年为第一阶段。这个时期由于钢筋和混凝土的强度都很低,仅能建造一些小的梁、板、柱、基础等构件,钢筋混凝土本身的计算理论尚未建立,按照弹性理论进行结构设计。从 1920 ~ 1950 年为第二阶段。这个时期已经建成各种空间结构,发明了预应力混凝土并应用于实际工程,开始按照破损阶段结构构件截面设计。从 1950 ~ 1980 年为第三阶段。由于材料强度的提高,混凝土单层房屋和桥梁结构的跨度不断增大,混凝土结构高层建筑的高度已达 262 米,混凝土的应用范围进一步扩大。各种现代化施工方法普遍采用,同时广泛采用预制构件,结构构件设计已经过渡到极限状态设计法。从 1980 年起,混凝土结构发展进入第四阶段,尤其是近十余年来,随着建设速度加快,对材料性能和施工技术提出更高要求,出现装配式混凝土结构,泵送商品混凝土等工业化施工技术。高强混凝土和高强钢筋的发展、计算机的采用和先进施工机械设备的发明,建造了一批超高层建筑、大跨度桥梁、特长跨海隧道、高耸结构等大型工程,成为现代土木工程标志。在设计理论方面,非线性有限元分析方法的广泛应用,推动了混凝土结构关系的研究,结构可靠度的计算引入了概率论,结构的设计理论已经发展到以概率论为基础的极限状态设计法。现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)积累了半个世纪以来丰富的工程实践经验和当今最新的科研成果,把我国混凝土结构设计方法提高到当前国际水平。而新型混凝土材料及复合结构形式的出现又不断提出新的课题,并不断促进混凝土结构的飞速发展。

近几年来,随着高强度钢筋、高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的使用,高强度混凝土的应用范围不断扩大,钢纤维混凝土和聚合物混凝土的研究和应用都有了很大的发展。另外,轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土及利用工业废料的“绿色混凝土”等不但改善了混凝土的性能,而且对节能和保护环境具有重要的意义。

用钢筋混凝土结构建造的国外著名工程有:马来西亚吉隆坡 88 层 450 米高的石油双塔大厦,朝鲜平壤市 105 层 319.8 米高的柳京饭店,加拿大和苏联分别建成高度为 549 米及 533 米的预应力混凝土电视塔。大跨度的预应力混凝土桥有跨度 530 米的挪威特隆赫姆预应力混凝土斜拉桥,跨度 390 米克罗地亚克尔克 II 号拱桥等。

我国用钢筋混凝土结构建造的大型建筑有:广州 321.9 米高的中天广场大厦,上海 88 层 420.5 米的金茂大厦,上海 468 米的东方明珠电视塔,香港 374 米高的中心广场大厦,台北 101 层 508 米高 101 大厦。大跨度的桥梁有:跨度 444 米的重庆预应力混凝土斜拉长江二桥,主跨为 602 米的上海杨浦大桥等,都是具有世界水平的结构工程。

1.2.2 砌体结构的发展

砖和石是两种古老的土木工程材料,砖石结构在我国有着悠久的历史,我国早在 5000 年前已建造石砌祭坛和石砌围墙,公元 595 ~ 605 年建造的河北赵县安济桥,秦代修建闻名于世的万里长城等。20 世纪上半叶,我国砌体发展缓慢,从过去砖石建造低矮的民房,发展到大量多层民用建筑和小型工业建筑。20 世纪 60 年代以来,我国小型砌块和多孔砖的生产及应用有较大的发展,由于混凝土小型砌块有诸多优点,它已经成为替代传统黏土砖最有竞争力的墙体材料,现已建成数幢配筋混凝土砌块剪力墙结构的高层建筑。



如1997年建成的辽宁盘锦国税局15层住宅,1998年建成的上海园南四街坊18层住宅等。目前,国外砌体结构同样有很大的发展,材料的强度有很大的提高,如黏土砖的强度高达 70 N/m^2 ,砂浆的强度高达 20 N/m^2 ,砌体的抗压强度达到 35 N/m^2 。事实上,在一些国家如美国、新西兰等采用配筋砌体在地震区建造高层建筑,达13~20层。如美国丹佛市17层的“五月市场”公寓和20层的派克兰姆塔楼,瑞士用高强度空心砖在苏黎世建造19层塔式建筑等。

1.3 学习本课程要注意的问题

混凝土与砌体结构主要讲述基本受力构件的受力性能、截面设计和构造等方面的基本知识,由于该课程内容多、学时少、实践性强,因此,在学习时,建议注意以下几个问题:

(1)本课程内容多、符号多、公式多以及构造多,学习时注意难点的学习,突出重点。如第4、5、9、12、14章的学习。

(2)本课程基本构件的破坏特征、一些公式的建立、构造措施都是以试验为基础,实践性较强。因此,除课堂学习以外,要加强试验、实践教学环节的学习。

(3)构件和结构的设计是一个综合而又复杂的过程,设计过程包括结构方案、构件选型、材料选择、截面设计、配筋构造和施工等诸多方面,在满足安全、适用、经济的前提下,可能有多个设计方案,综合考虑,选择最优方案。

(4)结构设计严格按照国家颁布的规范、标准、规程以及法规等进行,规范不断更新和完善。另一方面,设计是一项创造性工作,只有深刻理解广泛的理论依据,才能充分发挥设计者的主动性和创造性。因此,要不断加强规范的学习。

思考题

1. 混凝土结构的分类有哪些?
2. 什么是素混凝土结构?
3. 什么是钢筋混凝土结构?
4. 什么是型钢混凝土结构?
5. 什么是预应力混凝土结构?
6. 什么是无筋砌体?它的分类有哪些?
7. 什么是配筋砌体?它的分类有哪些?
8. 学习本课程时应注意哪些问题?

第2章 钢筋混凝土结构的设计方法

2.1 结构的作用、作用效应和结构的抗力

2.1.1 结构的功能要求

结构设计的目的,是使所设计的结构能满足各种预定的功能要求。对建筑结构应具备的功能要求是:

(1)安全性 建筑结构在正常施工和正常使用时应能承受可能出现的各种荷载、外加变形、约束变形的作用,以及在偶然事件发生时和发生后能保持结构必需的整体稳定性,不发生倒塌。

(2)适用性 建筑结构在正常使用时,应能满足预定的使用要求,如不发生影响正常使用的变形和裂缝宽度。

(3)耐久性 建筑结构在正常维护下,材料性能虽随时间变化,但仍能满足预定的功能要求,混凝土不发生严重锈蚀和风化而影响结构的使用寿命。

上述功能要求概括起来称为结构的可靠性。即结构在规定的时间内(设计基准期为50年)内,在规定的条件(正常设计、正常施工、正常使用和正常维护)下,完成预定功能的能力。

结构的计算可靠度采用的设计基准期为50年。尚需说明,设计基准期与结构的寿命虽有一定的联系,但不等同。因为当使用年限达到或超过设计基准期后并不意味着结构立即就要报废,不能再使用了,而只是指它的可靠度在逐渐降低。

2.1.2 结构的作用与作用效应

结构上的作用,是指施加在结构上的集中荷载或分布荷载,以及引起结构外加变形或约束变形的原因。前者称为直接作用(习惯上称荷载),后者称间接作用(如地基变形、混凝土收缩、温度变化或地震等引起的作用)。



《建筑结构荷载规范》(以下简称《规范》)将结构上的荷载分为三类:

(1)永久荷载(恒荷载) 在结构设计基准期内其值不随时间变化,或其变化与平均值相比可以忽略不计。例如:结构自重、土压力、预加应力等。

(2)可变荷载(活荷载) 在结构设计基准期内其值随时间变化,或其变化与平均值相比不可以忽略。例如:楼面活荷载、风荷载、雪荷载、吊车荷载、积灰荷载等。

(3)偶然荷载 在设计基准期内不一定出现,一旦出现,其值很大且持续时间很短的荷载。例如:地震、爆炸、撞击等。

这些作用使结构产生的内力和变形(如轴力、弯矩、剪力、扭矩、裂缝和挠度等)称为作用效应,用 S 表示。当作用为荷载时,其效应也称为“荷载效应”。荷载与荷载效应在线弹性结构中是线性关系,因而荷载效应可用荷载值乘以荷载效应系数来表达。由于荷载是随机变量,故荷载效应也为随机变量,宜采用概率论等方法予以描述。

2.1.3 结构的抗力

结构或结构构件承受内力或变形的能力(如构件的承载能力、刚度等)称为结构抗力 R 。影响结构构件抗力的主要因素都是不确定的随机变量。原因在于材料性能(材质、强度、弹性模量)受工艺与环境等影响,几何参数受制作偏差和安装误差的影响,计算所采用的基本假设和计算公式的不够精确导致的计算模式精确性的不确定性等,由这些因素综合而成的结构抗力也是随机变量。

2.2 概率极限状态设计法

2.2.1 结构的极限状态

结构满足功能要求,称结构“可靠”或“有效”;否则称结构“不可靠”或“失效”。区分结构工作状态的“可靠”与“失效”的界限是极限状态。极限状态是结构或其构件能满足前述某一功能要求的临界状态。超过这一界限,结构或其构件就不能满足设计规定的该项功能要求,而进入失效状态。

结构极限状态分为两类,它们均有明确的标志或限值。

2.2.1.1 承载能力极限状态

这种极限状态对应于结构或其构件达到最大承载能力或者达到不适于继续承载的过大变形。当结构或其构件出现下列状态之一时,即认为超过了承载能力极限状态:

- (1)结构整体或其中一部分作为刚体失去平衡(如倾覆、滑移);
- (2)结构构件或连接因材料强度破坏(包括疲劳强度被超过的破坏),或因过度的塑性变形而不适于继续承载;
- (3)结构转变为机动体系;
- (4)结构或构件丧失稳定(如压屈等)。

2.2.1.2 正常使用极限状态

这种极限状态对应于结构或其构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。当结

构或其构件出现下列状态之一时,即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;
- (2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括裂缝);
- (3) 影响正常使用的振动;
- (4) 影响正常使用的其他特定状态。

2.2.2 功能函数与极限状态方程

以概率理论为基础的极限状态设计方法,简称为概率极限状态设计法,又称为近似概率法。此法是以结构的失效概率或可靠指标来度量结构的可靠度。

结构构件完成预定功能的工作状态,可用下列结构功能函数 Z 来描述:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

式中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 称为“基本变量”,如荷载、材料性能、几何参数、计算公式精确性等因素。

当 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 时,则称其为“极限状态方程”。

若功能函数 Z 仅于两个基本变量:荷载效应 S 和结构抗力 R 有关时,且极限状态呈线性方程,则结构的功能函数为

$$Z = g(S, R) = R - S \quad (2.2)$$

由此可知:

当 $Z > 0$ 时,即 $R > S$,结构完成预定功能,处于可靠状态;

当 $Z = 0$ 时,即 $R = S$,结构处于极限状态,此时, $Z = R - S = 0$,为极限状态方程;

当 $Z < 0$ 时,即 $R < S$,结构不能完成预定功能,结构处于失效状态。

2.2.3 结构可靠度与失效概率

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率,称为结构的可靠度。可见,可靠度是对结构可靠性的一种定量描述,亦即概率度量。

结构能够完成预定功能的概率也称为“可靠概率”(p_s);相对地,结构不能完成预定功能的概率称为“失效概率”(p_f)。两者互补,即

$$p_s + p_f = 1$$

因此,也可以采用可靠概率 p_s 或失效概率 p_f 来度量结构的可靠性,而一般习惯采用失效概率 p_f 。

设基本变量 R, S 均为正态分布,则结构的功能函数

$$Z = R - S$$

亦为正态分布,见图 2.1 所示。

在图 2.1 中, $Z < 0$ 部分的面积即为失效概率 p_f 。用失效概率来度量结构的可靠性具有明确的物理意义,能够较好地反映问题实质,因而已为工程界所公认。但是,计算失效概率 p_f 数学处理上

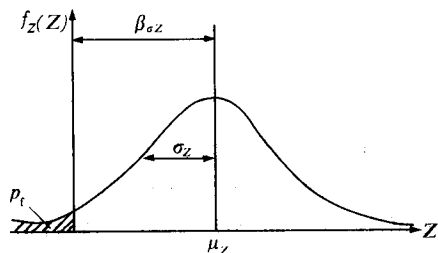


图 2.1 Z 的概率密度函数



比较复杂,因此《建筑结构可靠度设计统一标准》(以下简称《统一标准》)采用可靠指标来度量结构的可靠性,计算较为简便。

2.2.4 结构构件的可靠指标 β

可靠指标 β 是度量结构可靠性的一种量化的指标,它与 p_f 具有数值上一一对应的关系。现说明如下:

已知 $Z = R - S$, 现设 μ_z, μ_R, μ_S 分别为 Z, R, S 的平均值; $\sigma_z, \sigma_R, \sigma_S$ 分别为 Z, R, S 的标准值; R 与 S 相互独立。则有

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \tag{2.3}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{2.4}$$

设 $\mu_z = \beta \sigma_z$, 则有

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{2.5}$$

由此可看出, β 值越大, 失效概率 p_f 越小, 可靠指标越大, 表明结构越可靠。因此可代替失效概率来衡量结构的可靠度。可靠指标与失效概率之间的对应关系见表 2.1。

表 2.1 可靠指标与失效概率的对应关系

β	2.7	3.2	3.7	4.2
p_f	3.5×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}

2.2.5 目标可靠指标与安全等级

由上述可知, 在正常条件下, 失效概率尽管很小, 但总是存在, 所谓“绝对可靠” ($p_f = 0$) 是不可能的。因此要确定一个适当的可靠度指标, 使结构的失效概率降低到人们可以接受的程度, 即做到既安全可靠又经济合理。于是《统一标准》规定 $\beta \geq [\beta]$ 。其中 $[\beta]$ 为目标可靠指标, 见表 2.2。

表 2.2 不同安全等级的目标可靠指标

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

目标可靠指标的大小, 主要取决于构件的破坏类型以及建筑物的重要性程度。

当结构构件属延性破坏时, 由于破坏之前有明显的变形或其他预兆, 目标可靠指标可取略小一些; 而当结构构件属脆性破坏时, 破坏前无明显变形或其他预兆, 目标可靠指标可取略大一些。

此外, 根据建筑物的重要性不同, 《统一标准》建筑结构分为三个安全等级: