

高等学校教材

Jiegou Sheji Yuanli

结构设计原理

(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

叶见曙 主编

袁国干 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书根据 1994 年全国高等学校路、桥及交通工程专业教学指导委员会会议审定通过的《结构设计原理》课程编写大纲编写的。并按照 1985 年我国交通部颁布的公路桥涵设计规范系列,对钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砌体结构和钢结构的各种基本构件设计计算原理作了详尽的介绍,并附有一定数量的计算示例。本书还介绍了钢筋混凝土深梁、无粘结预应力混凝土梁、双预应力混凝土梁、钢-混凝土组合构件等的结构受力特点及计算原理。

本书作为高等学校公路与城市道路专业、桥梁工程专业用教材,也可供公路和城市建设部门从事桥梁设计、研究、施工和管理的专业技术人员参考。

高等学校教材

结构设计原理

(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

叶见曙 主编

袁国干 主审

插图设计: 正文设计:崔凤莲 责任校对:梁秀青

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:32 字数:816 千

1997 年 4 月 第 1 版

1997 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001— 册 定价: 元

ISBN 7-114-02484-3

U · 01744

前 言

本书根据 1994 年全国高等院校路、桥及交通工程专业教学指导委员会会议审定通过的《结构设计原理》课程编写大纲编写的。

本书共分五篇。第一篇至第四篇分别介绍钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砌体结构和钢结构的设计原理和计算方法。第五篇介绍的内容是钢-混凝土组合结构构件。

本书编写的主要依据为我国交通部部颁标准《公路桥涵设计通用规范》(JT J 021—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JT J 023—85)、《公路砖、石及混凝土桥涵设计规范》(JT J 022—85)和《公路桥涵钢结构和木结构设计规范》(JT J 025—86)。

全书主要内容按照高等学校公路与城市道路专业、桥梁工程专业的结构设计原理课程教学大纲和教学基本要求编写。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。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示例。

根据国内外结构工程的发展,本书还编写了钢-混凝土组合构件、双预应力混凝土梁、深梁等内容,以扩大学生的知识面。对于这些内容,可根据不同的教学要求和学时安排,作为选学和自学内容。

本书的单位,均采用国家法定计量单位。

全书由叶见曙主编,同济大学袁国干教授主审。

本书编写人员及分工为:总论、第一、三、四、六、七、十、十一、二十四章由叶见曙(东南大学)编写;第二章由张建仁(长沙交通学院)编写;第五、十五章由朱征平、叶见曙(东南大学)编写;第八、九章由刘其伟、叶见曙(东南大学)编写;第十二、十三章由赖国麟(东南大学)编写;第十四章由田仲初(长沙交通学院)编写;第十六、十七章由张克波(长沙交通学院)编写;第十八、十九、二十、二十一、二十二章由毛瑞祥(西安公路交通大学)编写;第二十三章由毛瑞祥、叶见曙编写。

在本书编写过程中,邵容光教授给予热情指导,在此表示衷心感谢。

限于编者的水平,本书一定存在不少缺点,请使用本书的学校和个人提出批评指正,有关意见可径寄东南大学交通学院桥梁工程教研室(邮编:210096),以便改进。

编 者

1996 年 4 月

目 录

总论.....	1
---------	---

第一篇 钢筋混凝土结构

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.....	1
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念.....	1
第二节 混凝土.....	3
第三节 钢筋.....	12
第四节 钢筋与混凝土之间的粘结.....	15
第二章 结构按极限状态法设计的原则.....	19
第一节 极限状态法设计的基本概念.....	19
第二节 我国现行公路桥涵设计规范(JT J 023—85)的计算原则.....	22
第三节 材料的设计强度与荷载效应组合.....	24
第三章 受弯构件正截面强度计算.....	29
第一节 受弯构件的截面型式与构造.....	29
第二节 受弯构件正截面受力全过程和破坏特征.....	33
第三节 受弯构件正截面承载能力计算的基本原则.....	37
第四节 单筋矩形截面受弯构件.....	42
第五节 双筋矩形截面受弯构件.....	49
第六节 T形截面受弯构件.....	55
第四章 受弯构件斜截面强度计算.....	63
第一节 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态.....	63
第二节 影响受弯构件斜截面抗剪能力的主要因素.....	67
第三节 受弯构件的斜截面抗剪强度.....	69
第四节 受弯构件的斜截面抗弯强度.....	72
第五节 全梁承载能力校核与构造要求.....	76
第六节 连续梁的斜截面抗剪强度.....	88
第五章 受扭构件强度计算.....	91
第一节 纯扭构件的破坏特征和强度计算.....	91
第二节 在弯、剪、扭共同作用下矩形截面构件的强度计算.....	99
第三节 T形截面受扭构件.....	101
第四节 箱形截面受扭构件.....	102
第五节 构造要求.....	103
第六章 轴心受压构件的强度计算.....	106

第一节	配有纵向钢筋和普通箍筋的轴心受压构件.....	106
第二节	配有纵向钢筋和螺旋箍筋的轴心受压构件.....	112
第七章	偏心受压构件的强度计算.....	116
第一节	偏心受压构件正截面受力特点和破坏形态.....	117
第二节	偏心受压构件的纵向弯曲.....	121
第三节	矩形截面偏心受压构件.....	124
第四节	工字形和 T 形截面偏心受压构件	152
第五节	圆形截面偏心受压构件.....	165
第八章	受拉构件的强度计算.....	172
第一节	概述.....	172
第二节	轴心受拉构件的强度计算.....	172
第三节	偏心受拉构件的强度计算.....	173
第九章	钢筋混凝土受弯构件的应力、裂缝和变形计算	178
第一节	概述.....	178
第二节	换算截面.....	178
第三节	应力计算.....	181
第四节	受弯构件的裂缝及最大裂缝宽度验算.....	183
第五节	受弯构件的变形(挠度)验算.....	188
第十章	局部承压.....	195
第一节	局部承压的破坏形态和破坏机理.....	196
第二节	混凝土局部承压强度提高系数.....	198
第三节	局部承压区的计算.....	200
第十一章	深梁.....	205
第一节	深梁的破坏形态.....	205
第二节	深梁的配筋及构造要求.....	206
第三节	深梁的计算.....	208

第二篇 预应力混凝土结构

第十二章	预应力混凝土结构的基本概念及其材料.....	211
第一节	概述.....	211
第二节	预加应力的方法与设备.....	215
第三节	预应力混凝土结构的材料.....	223
第十三章	预应力混凝土受弯构件的设计与计算.....	230
第一节	概述.....	230
第二节	预加力的计算与预应力损失的估算.....	232
第三节	预应力混凝土受弯构件的应力计算.....	242
第四节	预应力混凝土受弯构件的强度计算.....	248
第五节	端部锚固区计算.....	254
第六节	变形计算.....	256

第七节	预应力混凝土简支梁设计.....	259
第八节	预应力混凝土简支梁计算示例.....	267
第十四章	部分预应力混凝土受弯构件.....	290
第一节	部分预应力混凝土结构的受力特性.....	290
第二节	部分预应力混凝土结构的发展与特点.....	291
第三节	部分预应力混凝土受弯构件的计算.....	293
第四节	部分预应力混凝土受弯构件的设计.....	299
第五节	构造要求.....	301
第十五章	其它预应力混凝土结构简介.....	312
第一节	无粘结预应力混凝土受弯构件.....	312
第二节	双预应力混凝土梁.....	321

第三篇 砖、石及混凝土结构

第十六章	砖、石及混凝土结构的基本概念与材料	328
第一节	概述.....	328
第二节	材料种类.....	328
第三节	砌体的强度与变形.....	332
第十七章	砖、石及混凝土构件的强度计算	337
第一节	计算原则.....	337
第二节	轴心受压构件正截面强度计算.....	338
第三节	偏心受压构件正截面强度计算.....	339
第四节	受弯、直接受剪和局部承压的强度计算	345

第四篇 钢 结 构

第十八章	钢结构的基本概念.....	347
第一节	钢结构特点及其在工程中的应用.....	347
第二节	钢结构计算基本原则.....	348
第十九章	钢结构的材料.....	351
第一节	钢材的主要机械性能.....	351
第二节	影响钢材性能的主要因素.....	354
第三节	钢材种类及其选用.....	358
第二十章	钢结构的连接.....	362
第一节	概述.....	362
第二节	焊缝连接.....	362
第三节	普通螺栓和铆钉连接.....	376
第四节	高强螺栓连接.....	390
第二十一章	钢桁架构件.....	396
第一节	钢桁架构造及其联结系.....	396

第二节	钢桁架构件截面型式.....	398
第三节	实腹式轴心受拉构件.....	401
第四节	实腹式轴心受压构件.....	404
第五节	组合式受压构件.....	410
第六节	偏心受力构件.....	418
第七节	钢桁架节点设计.....	424
第二十二章	钢板梁.....	431
第一节	钢板梁构造.....	431
第二节	钢板梁截面设计.....	432
第三节	钢板梁截面沿跨长的变化.....	439
第四节	焊接钢板梁翼板和腹板的连接焊缝.....	441
第五节	钢板梁的局部稳定性和腹板加劲肋的布置.....	442
第六节	钢板梁的支承加劲肋.....	445

第五篇 钢-混凝土组合构件

第二十三章	钢-混凝土组合梁	450
第一节	钢-混凝土组合梁的基本概念	450
第二节	计算原理及一般规定.....	452
第三节	组合梁的截面设计.....	456
第四节	抗剪连接件设计.....	458
第五节	设计计算示例.....	461
第二十四章	钢管混凝土构件.....	466
第一节	钢管混凝土的基本概念.....	466
第二节	钢管混凝土受压构件的工作性能.....	467
第三节	受压构件的计算.....	471
第四节	构造要求.....	476
附表	478
主要参考文献	503

总 论

《结构设计原理》主要讨论各种工程结构的基本构件受力性能、计算方法和构造设计原理,它是学习和掌握桥梁工程和其它道路人工构造物设计的基础。

桥、涵洞、隧道、挡土墙等都是公路及城市道路工程中的构造物,作为单项工程实体,必须由它的承重骨架来承受各种外荷载的作用。一般把构造物的承重骨架组成部分统称为结构。例如,桥的桥跨、墩(台)及基础组成了桥的承重体系,它们就被称为结构。

构造物的结构都是由若干基本构件连接而成的。这些构件的形式虽然多种多样,但按其主要受力特点可分为受弯构件(梁和板)、受压构件、受拉构件、受扭构件等典型的基本构件。

在实际工程中,结构及基本构件都是由建筑材料制作成的。根据所使用的建筑材料种类,作为总称,常用的结构一般可分为:

1. 混凝土结构 以混凝土为主制作的结构。它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。

2. 钢结构 以钢材为主制作的结构。

3. 砌体结构 以砌体为主制作的结构,它包括砖结构、石结构和混凝土砌块结构。

4. 木结构 以木材为主制作的结构。

本书将介绍钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砌体结构和钢结构等的材料特点及基本构件受力性能、设计计算方法和构造。

一、各种工程结构的特点及使用范围

由于各种工程结构采用的建筑材料的性质不同,形成了不同的特点,从而决定了它们在实际工程中的使用范围。

1. 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的。钢筋是一种抗拉性能很好的材料;混凝土材料具有较高的抗压强度,而抗拉强度很低。根据构件的受力情况,合理地配置钢筋可形成承载能力较高、刚度较大的结构构件。

钢筋混凝土结构中所用的混凝土材料占比例较大的是砂、石材料,便于就地取材;混凝土可模性较好,结构造型灵活,可以根据需要浇筑成各种形状的构件;同时,钢筋混凝土合理地利用了钢筋和混凝土这两种材料的受力性能特点,形成的结构整体性、耐久性较好。因而,钢筋混凝土结构广泛用于房屋建筑、地下结构、桥、隧道、水利、港口等工程中。但是,钢筋混凝土结构也有自重较大、抗裂性较差、修补困难的缺点。

在公路与城市道路工程、桥梁工程中,钢筋混凝土结构主要用于中小跨径桥、涵洞、挡土墙以及形状复杂的中、小型构件等。

2. 预应力混凝土结构

预应力混凝土结构是为解决钢筋混凝土结构在使用阶段容易开裂问题而发展起来的结构。它采用的是高强度钢筋和高强度混凝土材料,并采用相应张拉钢筋的施工工艺在结构构件

中建立预加应力的结构。

预应力混凝土结构由于采用了高强度材料和预应力工艺,节省了材料,减小了构件截面尺寸,进而减轻了构件自重,因而预应力混凝土构件比钢筋混凝土构件轻巧,特别适合于建造由恒载控制设计的大跨径桥梁。

全预应力混凝土结构由于在使用阶段不出现拉应力,在腐蚀性环境下可保护钢筋免受侵蚀,因此可用于海洋工程结构和有防渗透要求的结构。

预应力技术可作为装配的一种可靠手段,能很好地将部件装配成整体结构,形成悬臂浇筑和悬臂拼装等不采用支架、不影响通航的施工方法,在大跨径桥梁施工中获得广泛应用。

必须指出,尽管预应力混凝土结构有上述优点,但也不能在所有的情况下都用它。由于高强度材料的单价高,施工的工序多,要求有经验的、熟练的技术人员和技术工人施工,且要求较多的严格的现场技术监督和检查,因此,不是在任何场合都可以用预应力混凝土来代替普通钢筋混凝土的,而是两者各有合理应用的范围。

3. 砌体结构

砌体结构是人类社会使用最早的结构。它是用胶结材料将砖、天然石料等块材按一定规则砌筑而成整体的结构,其特点是材料易于就地取材。当块材采用天然石料时,则具有良好的耐久性。但是,砌体结构的自重一般较大,施工中机械化程度较低。

在公路与城市道路工程和桥梁工程中,砌体结构多用于中小跨径的拱桥、桥墩(台)、挡土墙、涵洞、道路护坡等工程中。

4. 钢结构

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。钢结构由于钢材的强度很高,构件所需的截面积很小,故钢结构与其它结构相比,尽管其容重很大,却是自重较轻的结构。钢材的组织均匀,最接近于各向同性体,弹性模量高,是理想的弹塑性材料,故钢结构工作的可靠性高。钢结构的基本构件可以在工厂中加工制作,机械化程度高,同时已预制的构件可以在施工现场较快地装配连接,故施工效率较高。

钢结构的应用范围很广,例如,大跨径的钢桥、城市人行天桥、高层建筑、钢闸门、海洋钻井采油平台、钢屋架等。同时,钢结构还常用于钢支架、钢模板、钢围堰、钢挂篮等施工临时结构中。

此外,随着科学研究和生产的发展,在工程中还出现多种组合结构的构件,例如,预应力混凝土组合梁、钢-混凝土组合梁和钢管混凝土构件等。组合结构的构件是利用具有各自材料特点的部件,通过可靠的措施使之形成整体受力的构件,从而获得更好的工程效果。它日益得到广泛应用。一些工程结构技术的相互渗透,也产生了新的结构构件,例如,将预应力技术引入钢结构,产生了预应力钢结构,在大跨度钢屋架上获得成功应用。同时,有些工程结构也在不断深入发展,例如,预应力混凝土结构已由最初的全预应力混凝土,发展出现了部分预应力混凝土结构及无粘结预应力混凝土结构,等等。

工程结构的科学研究及在工程中的发展已经形成了完整的一门学科——结构工程学科。它以现代力学、数学和材料科学为基础,包括了工程结构基本理论、工程结构与施工技术,以及工程结构维护修理等内容。结构工程学科是土木工程中最活跃的学科之一,同时,它在基本建设中占有重要的地位。因而要成为从事公路与城市道路工程和桥梁与隧道工程的专门技术人员,一定要学好结构工程的课程并在工程实践中应用和发展。

二、学习本课程应注意的问题

《结构设计原理》课程的任务,是按照公路与城市道路专业、桥梁工程专业的要求介绍钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砌体结构和钢结构的基本构件设计计算原理、方法以及构造。通过本课程的学习,要具备工程结构的基本知识,掌握各种基本构件的受力性能及其强度、变形的规律,并能根据有关设计规范和资料进行构件的设计。

1.《结构设计原理》课程是一门重要的专业技术基础课,其主要先修课程有材料力学、结构力学和建筑材料,并为学习《桥梁工程》课程奠定基础。

《结构设计原理》在性质上与材料力学有不少相似之处,但也有很多不同的地方。

材料力学主要研究单一、匀质、连续、弹性(或理想弹塑性)材料的构件,而《结构设计原理》研究的是工程结构的构件。工程结构的某些材料(如混凝土)不一定是匀质、弹性和连续的材料,因此,直接使用材料力学公式的情况并不多。但是,材料力学通过几何条件、物理条件和平衡关系建立基本方程的方法,对《结构设计原理》是普遍适用的,而在每一种关系的具体内容上则需考虑工程结构的材料性能特点。

2. 由于各种工程结构的材料受力性能各异。例如混凝土材料、砌体材料等,本身的物理力学性能就复杂,加之还有其它很多影响因素,目前还没有建立起比较完整的强度理论,因此,关于一些材料的强度和变形规律,在很大程度上是依靠大量的试验资料分析给出的经验关系。这样,在《结构设计原理》中,构件的某些计算公式是根据试验研究及理论分析得到的半经验半理论公式。在学习和运用这些公式时,要正确理解公式的本质,特别注意公式的使用条件及适用范围。

3.《结构设计原理》课程的重要内容是结构构件设计。结构设计应遵循适用、经济、安全和美观的原则,它涉及到方案比较、材料选择、构件选型及合理布置等多方面,是一个多因素的综合性问题。对于构件设计,不仅仅是构件强度和变形的计算,同一构件在给定的材料和同样的荷载作用下,即使截面型式相同,设计结果的截面尺寸和截面布置也不是唯一的。设计结果是否满足要求主要看是否符合设计规范要求,并且满足经济性和施工可行性等。

4. 在学习本课程中要学会应用设计规范。设计规范是国家颁布的关于设计计算和构造要求的技术规定和标准,是具有一定约束性和法规性的文件。它是贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量,达到设计方法上必要的统一和标准,也是校核工程结构设计的依据。

我国交通部颁布的公路桥涵设计规范有:《公路桥涵通用规范》(JT J 021—89)、《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JT J 022—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JT J 023—85)、《公路桥涵钢结构和木结构设计规范》(JT J 025—86)。本课程中关于基本构件的设计原则、计算公式、计算方法及构造要求均以上述设计规范为依据。为了表达方便,在本书中将上述设计规范统称为《公路桥规》,而对引用的其它设计规范、标准和规程等,将给以全称,以免混淆。

由于科学技术水平和工程实践经验是不断发展和积累的,设计规范也必然要不断进行修改和增订,才能适应指导设计工作的需要。因此,在学习本课程时,应掌握各种基本构件的受力性能、强度和变形的变化规律,从而能对目前设计规范的条文概念和实质有正确理解、对计算方法正确应用,同时也能适应今后设计规范的发展,不断提高设计水平。

第一篇 钢筋混凝土结构

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

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料——钢筋和混凝土——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[图 1-1a)],在梁的垂直截面(正截面)上受到弯矩作用,中和轴以上受压,以下受拉。当荷载达到某一数值 P_0 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

图 1-1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁

急速向上发展,导致梁骤然断裂[图 1-1b)]。这种破坏是很突然的。也就是说,当荷载达到 P_0 的瞬间,梁立即发生破坏。 P_0 为素混凝土梁受拉区出现裂缝的荷载,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_c 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将可承担几乎全部的拉力。这时,钢筋混凝土梁不会象素混凝土梁那样立即裂断,而能继续承受荷载作用[图 1-1c)],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(图 1-2)。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。

图 1-2 素混凝土和钢筋混凝土轴心受压构件的受力性能比较

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,可以充分利用钢筋和混凝土各自的材料特点,把它们有机地结合在一起共同工作,从而提高构件的承载能力,改善构件的受力性能。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而共同工作,主要是由于:(1)混凝土和钢筋之间有着良好的粘结力,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)混凝土包围在钢筋的外围,起着保护钢筋免遭锈蚀的作用,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很小,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构件形状和截面尺寸。

(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

降低建筑成本。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点,诸如: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,并且施工中需耗用相当数量的木材;修补或拆除较困难等等。

钢筋混凝土结构虽有缺点,但毕竟有其独特的优点,所以,它的应用极为广泛,无论是桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、铁路工程,还是水工结构工程、海洋结构工程等都已广泛采用。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《公路桥规》规定以每边边长为 200mm 的立方体试件,在 20 ± 3 的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 28 天,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着密切的关系。在通常情况下,试件的上下表面与试验机承压板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[图 1-3a)],从而提高了试块的抗压强度。破坏时,远离承压板的试件中部混凝土所受的约束最少,混凝土也剥落得最多,形成两个对顶叠置的截头方锥体[图 1-3b)]。要是在承压板和试件上下表面之间涂以油脂润滑剂,则试验加压时摩阻力将大为减少,所测得的抗压强度较低,其破坏形态如图 1-3c) 所示的纵裂破坏。规范上规定采用的是不加油脂润滑剂的

图 1-3 立方体抗压强度试件

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 150mm 和边长为 100mm 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 200mm 的混凝土立方体抗压强度。

混凝土立方体抗压强度又被称为混凝土标号。《公路桥规》中规定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 号;当采用 II、III 级钢筋时,混凝土标号不宜低于 20 号;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 号。

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。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,称为混凝土轴心抗压强度,用符号 R_a^0 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。棱柱体试件高度 h 与边长 b 之比愈大,则强度愈低。当 h/b 由 1 增至 2 时,混凝土强度降低很快。但是当 h/b 由 2 增至 4 时,其抗压强度变化不大(图 1-4)。这是因为在此范围内,既可消除垫板与试件接触面间摩阻力对抗压强度的影响,又可避免试件因纵向初弯曲而产生的附加偏心距对抗压强度的影响,故所测得的棱柱体抗压强度较稳定。因此,国家标准《普通钢筋混凝土力学性能试验方法》(GBJ 81—85)规定,混凝土的轴心抗压强度试验以 150mm×150mm×300mm 的试件为标准试件。

图 1-4 h/b 对抗压强度的影响

混凝土轴心抗压强度 R_a^0 与立方体抗压强度 R 之间近似的关系为

$$R_a^0 = 0.7R \quad (1-1)$$

3. 混凝土抗拉强度

混凝土抗拉强度(用符号 R_t^0 表示)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大约在 1/8~1/18。这项比值随混凝土的标号的增大而减少,即混凝土抗拉强度的增加慢于抗压强度的增加。

混凝土轴心受拉试验的试件可采用在两端预埋钢筋的混凝土棱柱体(图 1-5)。试验时用试验机的夹具夹紧试件两端外伸的钢筋施加拉力,破坏时试件在没有钢筋的中部

图 1-5 混凝土抗拉强度试验试件

截面被拉断,其平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度。

根据国内 72 组试件所得到混凝土抗拉强度的试验结果的分析,同时考虑试验误差以及实

上角码 0 表示试件试验的实际值。

际施工与试验室数据的差异,在实际应用中,混凝土抗拉强度 R_i^0 与混凝土立方体抗压强度 R 近似的关系为

$$R_i^0 = 0.23R^{2/3} \quad (1-2)$$

在用上述方法测定混凝土的轴心抗拉强度时,保持试件轴心受拉是很重要的,也是不容易完全做到的。因为混凝土内部结构不均匀,钢筋的预埋和试件的安装都难以对中,而偏心又对抗拉强度测试有很大的干扰,因此,目前国内外常采用立方体或圆柱体的劈裂试件来测定混凝土的轴心抗拉强度。

劈裂试验是在卧置的立方体(或圆柱体)试件与压力机压板之间放置钢垫条及三合板(或纤维板)垫层(图 1-6),用压力机通过垫条对试件中心面施加均匀的条形分布荷载。这样,除垫

图 1-6 劈裂试验

条附近外,在试件中间垂直面上就产生了拉应力,它的方向与加载方向垂直,并且基本上是均匀的。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件即被劈裂成两半。我国交通部颁标准《公路工程水泥混凝土试验规程》(JT J 053—94)规定,采用 150mm 立方块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,则混凝土劈裂抗拉强度 R_{pl}^0 按下式计算

$$R_{pl}^0 = \frac{2P}{F} \quad (1-3)$$

式中:P —— 劈裂破坏时的荷载值;

F —— 试件劈裂面的面积。

采用上述试验方法测得的劈裂抗拉强度值,换算成轴心抗拉强度时,应乘以换算系数 0.9,即 $R_i^0 = 0.9R_{pl}^0$ 。

4. 复合应力状态下的混凝土强度

在钢筋混凝土结构中,构件通常受到轴力、弯矩、剪力及扭矩等不同组合情况的作用,因此,混凝土更多的是处于双向或三向受力状态。在复合应力状态下,混凝土的强度有明显变化。

对于双向应力状态,如,在两个互相垂直的平面上,作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 ,第三个平面上应力为零,双向应力状态下混凝土强度的变化曲线如图 1-7 所示,其强度变化特点如下:

图 1-7 双向应力状态下混凝土强度变化曲线

(1)当双向受压时(图 1-7 中第三象限),一向的混凝土强度随着另一向压应力的增加而增加,当 σ_1/σ_2 约等于 2 或 0.5 时,其强度比单向抗压强度增加约为 25% 左右,而在 $\sigma_1/\sigma_2=1$ 时,其强度增加仅为 16% 左右。

(2)当双向受拉时(图 1-7 中第一象限),无论应力比值 σ_1/σ_2 如何,实测破坏强度基本不变,双向受拉强度均接近于单向抗拉强度。

(3)当一向受拉、一向受压时(图 1-7 中第二、四象限),混凝土的强度均低于单向受力(压或拉)的强度。

图 1-8 为法向应力(拉或压)和剪应力形成压剪或拉剪复合应力状态下的混凝土强度曲线

图 1-8 法向应力与剪应力组合时的强度曲线

图。图 1-8 中的曲线表明,混凝土的抗压强度由于剪应力的存在而降低;当 $\sigma/R_a^0 < 0.5 \sim 0.7$ 时,抗剪强度随压应力的增大而增大;当 $\sigma/R_a^0 > 0.5 \sim 0.7$ 时,抗剪强度随压应力的增大而减小。

当混凝土圆柱体三向受压时,混凝土的轴向抗压强度随另外两向压应力的增加而增加(图 1-9)。混凝土圆柱体三向受压的轴心抗压强度 f_{∞}^0 与侧压应力 σ_2 之间的关系,可以用下列线性经验公式表达:

$$f_{\infty}^0 = f_c^0 + 4 \sigma_2 \quad (1-4)$$

式中: f_{∞}^0 ——三向受压时圆柱体的混凝土轴心抗压强度;

f_c^0 ——混凝土圆柱体抗压强度,计算时可近似以混凝土轴心抗压强度 R_a^0 代之;

σ_2 ——侧压应力值。

二、混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类。一类是在荷载作用下的受力变形,如单调短期加载的变形、荷载长期作用下的变形以及多次重复加载的变形。另一类与受力无关,称为体积变形,如混凝土收缩以及温度变化引起的变形。

图 1-9 三向受压状态下混凝土强度

采用直径 $d=150\text{mm}$,高度 $h=300\text{mm}$ 的圆柱体试件的抗压强度。在美国、日本和欧洲混凝土协会(CEB)采用圆柱体抗压试件。混凝土圆柱体抗压强度 f_c^0 与我国 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 立方体抗压强度 R 之间换算关系为 $f_c^0=0.85R$ 。

(一) 混凝土在单调、短期加载作用下的变形性能

1. 混凝土的应力应变曲线

混凝土的应力应变关系是混凝土力学性能的一个重要方面,它是研究钢筋混凝土构件的截面应力分析、建立强度和变形计算理论所必不可少的依据。特别是近代在采用计算机对钢筋混凝土结构进行有限元非线性分析时,混凝土的应力应变关系已成了数学物理模型研究的重要依据。

一般取棱柱体试件来测试混凝土的应力应变曲线。在试验时,需使用刚度较大的试验机,或者在试验中用控制应变速度的特殊装置来等应变速度加载,或者在普通压力机上用高强弹簧(或油压千斤顶)与试件共同受压,测得混凝土试件受压时典型的应力应变曲线形状如图 1-10。

图 1-10 混凝土受压时应力应变曲线形状

完整的混凝土轴心受压应力应变曲线由上升段 OC、下降段 CD 和收敛段 DE 三个阶段组成。

在上升段:当应力 $< 0.3R_a^0$ 时,应力应变关系接近直线变化(OA 段),混凝土处于弹性阶段工作。在应力 $> 0.3R_a^0$ 后,随着应力的增大,应力应变关系愈来愈偏离直线,任一点的应变可分为弹性应变 ϵ_e 和塑性应变 ϵ_p 两部分。原有的混凝土内部微裂缝发展,并在孔隙等薄弱处产生新的个别的微裂缝。当应力达到 $0.8R_a^0$ (B 点)后,混凝土塑性变形显著增大,内部裂缝不断延伸扩展,并有几条贯通,应力应变曲线斜率急剧减小,如果不继续加载,裂缝也会发展,即内部裂缝处于非稳定发展阶段。当应力达到最大应力 $= R_a^0$ 时(C 点),应力应变曲线的斜率已接近于水平,试件表面出现不连续的可见裂缝。

在下降段:到达峰值应力点 C 后,混凝土的强度并不完全消失,随着应力 σ 的减少(卸载),应变仍然增加,曲线下降坡度较陡,混凝土表面裂缝逐渐贯通。

在收敛段:在反弯点 D 之后,应力下降的速率减慢,趋向于稳定的残余应力。表面纵向裂缝把混凝土棱柱体分成若干个小柱,荷载由裂缝处的摩擦咬合力及小柱体的残余强度所承受。

对于没有侧向约束的混凝土,收敛段没有实际意义,所以通常只注意混凝土轴心受压应力应变曲线的上升段 OC 和下降段 CD,而最大应力值 R_a^0 及相应的应变值 ϵ_c 以及 D 点的应变值(称为极限压应变值 $\epsilon_{hm\max}$)成为曲线的三个特征值。对于均匀受压的棱柱体试件,其压应力达到 R_a^0 时,混凝土就不能承受更大的压力,成为结构构件计算时混凝土强度的主要指标。与 R_a^0 相对应的应变 ϵ_c 随混凝土强度等级而异,约在 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}$ 间变动,通常取其平均值为 $\epsilon_c = 2.0 \times 10^{-3}$ 。应力应变曲线中相应于 D 点的极限压应变 $\epsilon_{hm\max}$ 约为 $3.0 \sim 5.0 \times 10^{-3}$ 。

影响混凝土轴心受压应力应变曲线的主要因素是:

(1)混凝土强度。试验表明,混凝土强度对其应力应变曲线有一定影响,如图 1-11 所示,对于上升段,混凝土强度的影响较小,与应力峰值点相应的应变大致为 0.002。随着混凝土强度增大,则峰值点处的应变也稍大些。对于下降段,混凝土强度则有较大影响。混凝土强度愈高,