

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)

邵容光 主编

人 民 交 通 出 版 社

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)

邵容光 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分五篇：钢筋混凝土结构，预应力混凝土结构，砖、石及混凝土结构，钢结构，木结构。其中钢筋混凝土，预应力混凝土与砖、石及混凝土结构以1985年我国交通部标准《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)与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)为主要依据；钢、木结构及钢筋混凝土结构中之第十章“按容许应力法计算基本构件”则仍以1975年我国交通部标准《公路桥涵设计规范》为主要依据。

本书作为高等学校《公路与城市道路》及《公路桥梁与隧道》专业教材，亦可供公路交通部门有关专业工作人员或业余学习者参考。

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)

邵容光 主编

责任编辑：王应荣

封面设计：彭小秋

技术设计：张义华

插图设计：赵耀华

责任校对：张捷

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：28.25 字数：710 千

1987年6月 第1版

1987年6月 第1版 第1次印刷

印数：0001—15,000册 定价：4.60元

前言

本教材根据1983年3月在南京召开的《结构设计原理》教学大纲审订会所确定的编写大纲编写,为《公路与城市道路》及《公路桥梁与隧道》专业所必修。全书共有五篇。鉴于学时数的限制,其中第五篇木结构部分各校可根据实际情况酌情处理。

第一篇至第三篇以1985年我国交通部部标准《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)与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)(以后统一简称为《公桥规》)为主要依据,分别介绍了钢筋混凝土结构,预应力混凝土结构与砖、石及混凝土结构的设计计算原理。鉴于钢、木结构设计新规范尚未出版发行,故本教材的第四、五两篇仍以1975年我国交通部部标准《公路桥涵设计规范》(以后简称为《原桥规》)为依据,介绍了钢、木结构的设计计算原理。

总论部分介绍了本课程的任务及与其它课程的关系,并一般性地论述了各种材料结构的特点、适用范围以及工程结构设计的基本要求与结构计算方法。

第一篇《钢筋混凝土结构》,在阐述各有关材料力学性能的基础上,较深入地论述了极限状态的基本概念和按极限状态法的计算原理,书中系统地介绍了钢筋混凝土受弯、受扭、轴心受压、偏心受压、受拉构件等的强度计算原理和受弯构件的裂缝、变形计算方法。由于公路桥涵设计规范有一个新、老交替的过程,以及与预应力混凝土结构计算的衔接,本篇安排了第十章“按容许应力法计算基本构件”,其中主要介绍了受弯构件及矩形截面偏心受压构件的计算方法。

第二篇《预应力混凝土结构》,在阐述预应力的基本概念及预应力混凝土材料性能等基础上,主要介绍了预应力混凝土受弯构件的设计计算原理,并简要地介绍了部分预应力混凝土,其中包括无粘结预应力混凝土受弯构件的基本概念及其计算要点。

第三篇《砖、石及混凝土结构》,主要介绍了砖、石及混凝土材料的力学性能以及构件的计算方法。

第四篇《钢结构》,主要介绍了钢材的物理—力学性能、钢结构的联接及基本构件的计算方法。本篇内容在教学中不应过于削弱。对《公路桥梁与隧道》专业亦可考虑将钢结构部分与钢桥合并讲授。

第五篇《木结构》,在阐述木材的构造和力学性能的基础上,主要介绍了木基本构件及其结合的设计计算。

本教材由南京工学院邵容光教授主编。本书的总论、第一、二、五、六、八章由邵容光编写;第三、四、十、十四、十五章由南京工学院郭永琛编写;第十一、十二、十三章由南京工学院赖国麟编写;第七章由邵容光、赖国麟编写;第九章由邵容光、郭永琛编写;第十六、十七、十八、十九章由西安公路学院毛瑞祥编写;第二十、二十一、二十二章由东北林业大学王厚天编写。全书由湖南大学刘孝平教授主审。

由于作者水平有限,加之对1985年新公路桥涵设计规范理解不深,教材中不可避免地存在一定缺点和错误,敬请使用本教材的单位和个人给予批评指正。有关意见可径寄南京工学院道路教研组,以便修正。

编者

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力学性能	6
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念	6
第二节 混凝土	7
第三节 钢筋	22
第四节 钢筋与混凝土的共同工作	26
第二章 钢筋混凝土结构的基本计算原则	28
第一节 极限状态的基本概念	28
第二节 极限状态法计算原则	29
第三节 材料强度的取值标准	33
第三章 受弯构件正截面强度计算	37
第一节 构造	37
第二节 试验研究分析	42
第三节 单筋矩形截面梁正截面强度计算	51
第四节 双筋矩形截面梁正截面强度计算	57
第五节 T 形截面梁正截面强度计算	63
第四章 受弯构件斜截面强度计算	71
第一节 钢筋混凝土梁的剪应力及主应力	71
第二节 钢筋混凝土梁斜截面破坏的主要形态及影响斜截面抗剪强度的主要因素	74
第三节 钢筋混凝土梁的斜截面强度计算	78
第四节 全梁承载力校核及构造要求	86
第五章 受扭及弯扭构件的强度计算	93
第一节 试验研究分析	93
第二节 矩形截面受扭及弯扭构件的强度计算	94
第三节 矩形截面受扭构件的构造要求	103
第四节 T 形、箱形截面受扭构件的计算特点	104
第六章 轴心受压构件的强度计算	105
第一节 普通箍筋柱的强度计算	105
第二节 螺旋箍筋柱的强度计算	110
第七章 偏心受压构件强度计算	113
第一节 偏心受压构件的构造及受力特点	113

第二节 矩形截面偏心受压构件的强度计算	119
第三节 I 形截面偏心受压构件的强度计算	133
第四节 圆形截面偏心受压构件的强度计算	135
第八章 受拉构件的强度计算	142
第一节 轴心受拉构件的强度计算	142
第二节 偏心受拉构件的强度计算	143
第九章 受弯构件的裂缝及变形验算	145
第一节 裂缝的特性分析	145
第二节 最大裂缝宽度验算	147
第三节 受弯构件的变形(挠度)计算	150
第十章 按容许应力法计算基本构件	156
第一节 容许应力法的基本概念	156
第二节 受弯构件的抗弯计算	158
第三节 受弯构件的抗剪计算	176
第四节 组合梁的计算特点	185
第五节 偏心受压构件计算	187
主要参考书	199

第二篇 预应力混凝土结构

第十一章 预应力混凝土的基本概念及其材料	200
第一节 概述	200
第二节 预应力混凝土构件施加预应力的方法	203
第三节 预应力混凝土的材料	208
第十二章 预应力混凝土受弯构件的设计与计算	215
第一节 预应力混凝土受弯构件各受力阶段的特点及其计算方法	215
第二节 预加力的计算与预应力损失的估算	217
第三节 预应力混凝土受弯构件的强度计算	230
第四节 预应力混凝土受弯构件在施工和使用阶段的应力验算	237
第五节 局部承压计算	246
第六节 变形计算	255
第七节 预应力混凝土受弯构件的设计	258
第八节 预应力混凝土简支梁计算示例	266
第十三章 部分预应力混凝土受弯构件	292
第一节 部分预应力混凝土结构的基本概念	292
第二节 部分预应力混凝土受弯构件的设计计算要点	296
第三节 无粘结预应力混凝土简介	312
第四节 加筋混凝土结构系列小结	314
主要参考书	315

第三篇 砖、石及混凝土结构

第十四章	砖、石及混凝土的力学性能	316
第一节	材料.....	316
第二节	砌体的强度.....	319
第三节	砌体的变形.....	321
第十五章	砖、石及混凝土构件的计算	325
第一节	轴心受压.....	326
第二节	偏心受压.....	327
第三节	直接抗剪.....	330

第四篇 钢 结 构

第十六章	钢材	331
第一节	钢的种类及钢材的规格.....	331
第二节	钢材的物理—力学性能.....	333
第三节	计算数据的取值.....	339
第十七章	钢结构的连接	340
第一节	焊接.....	341
第二节	铆钉（螺栓）连接.....	352
第三节	高强螺栓连接.....	365
第十八章	轴向受力构件的计算	371
第一节	概述.....	371
第二节	轴心受拉构件.....	374
第三节	轴心受压构件.....	376
第四节	组合式受压构件.....	382
第五节	偏心受拉及偏心受压构件.....	390
第十九章	简易钢桁架节点及钢板梁简介	394
第一节	简易钢桁架的节点.....	394
第二节	钢板梁.....	398
主要参考书		416

第五篇 木 结 构

第二十章	木材	417
第一节	木材的构造及结构用木材的分类与选择.....	417
第二节	木材的力学性能.....	419
第三节	计算用的基本数据.....	424
第二十一章	基本构件计算	427

第一节 轴心受拉构件.....	427
第二节 轴心受压构件.....	427
第三节 受弯构件.....	429
第四节 偏心受拉构件.....	432
第五节 偏心受压构件.....	433
第二十二章 杆件的连接.....	434
第一节 连接的对连接的基本要求.....	434
第二节 齿连接.....	435
第三节 螺栓连接和钉连接.....	439
主要参考书.....	444

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的作用，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。建筑物中承受荷载和传递荷载的各个部件的总合统称为结构。因而结构是由若干基本构件所组成，如以上所述的板、梁、拱圈等。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—门学科。

根据构件受力与变形的特点，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复合。

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物的崩塌。反之，如果截面尺寸过大，则构件的承载能力又将过分富裕，从而造成人力、物力上的过大耗费。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。

本教材以交通部标准《公路桥涵设计规范》为主要依据。由于“新桥规”已采用按极限状态法进行设计，故本教材在编写过程中均以按极限状态设计法为主，同时，适当地编入了一定篇幅按容许应力法设计的内容。

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，答案常常不是唯一的，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，因而必须很好地认识它，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，显然，也可以是采用各种材料结构所组成的复合结构。其中钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和圬工结构是目前我国公路桥涵与道路人工构造物中广泛采用的结构，而钢、木结构则相对地用得较少。我国目前虽然修建的钢桥甚少，但是钢结构作为辅助性的临时性工程，在道路桥梁工程中用得十分广泛，同时，随着我国钢铁工业的不断发展，钢结构在道路工程中的应用必将日益增多。再从学科的完整性和相互渗透性方面来说，学好钢结构也是十分必要的。关于木结构方面，由于我国目前的木材资源严重不足，故《公桥规》规定：除抢险急修的临时性便道外，不得采用木桥涵。故本课程对于木结构方面的内容只作一般性介绍。

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虽大，但其强度却很高；木材的强度虽很低，但其单位体积重量却很小。如果以材料单位体积重量 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，则其他结构的重量相对地大致为，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。从以上情况可以看出，在大跨径永久性桥梁结构中，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的耐久性较好；钢结构和木结构则都需采取适当的防护措施和定期地进行保养维修。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，因而施工工期一般总是较长，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：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，由于混凝土材料的抗拉强度甚低（约是其抗压强度的

1/8~1/12), 因而, 受力后在受拉区一般都将产生裂缝(在容许范围内), 不利于高强钢材的利用, 因而也限制了高强混凝土的采用, 从而使结构构件的截面尺寸偏大, 自重也相应地有所增大。

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都得到了迅速发展, 并必将成为今后桥梁工程中应用最广泛的一种结构。近年来, 部分预应力混凝土结构也正在快速地向发展。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, 控制裂缝的开裂程度和拉应力大小。因而, 今后的发展趋势是不再区分为钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构, 而将统称为“混凝土结构工程”(或者称为“加筋混凝土结构系列”), 并采用一个“预应力度”的技术指标控制钢筋混凝土结构、部分预应力混凝土结构和全预应力混凝土结构的各种受力特征。当预应力度等于零($\lambda=0$)时, 即为普通钢筋混凝土结构; 当预应力度等于1.0($\lambda=1$)时, 即为全预应力混凝土结构; 当 $1>\lambda>0$ 时, 即为部分预应力混凝土结构。

3. 砖、石及混凝土结构(即圬工结构): 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: 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: 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(如便桥、工棚、支架模板等)中。在林区的开发采伐过程中, 也常有可能采用木结构桥涵, 但我国木材资源不足, 应该力求不用或少用。

三、工程结构设计的基本要求

桥梁及道路人工构造物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型式。同时, 应尽可能地节省三大材(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。

结构物在使用期限内应有适当的可靠度, 这就要求结构物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。结构物的刚度要求是指在计算荷载作用下, 结构物的变形必须控制在容许范围以内。结构物的耐久性是

指结构物在正常的使用年限内，不得过早地发生破坏而影响正常使用。值得注意者，切不可片面地强调结构的经济指标（一般指基建投资）而降低对结构物耐久性的要求，从而影响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、加固的工作量。

为此，结构物的所有构件和联结细部都必须进行设计和验算。但是，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等情况，慎重地进行综合性的分析，而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。

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。结构物的结构型式必须受力明确（传力路线合理和清晰）、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。

四、结构计算方法简介

工程结构的计算问题可以概括为三个基本要素：（1）荷载；（2）结构物的抵抗能力；（3）安全度。

最早的结构计算都是以弹性理论为基础的容许应力法。在规定的标准荷载作用下，按弹性理论计算得到的构件截面应力应不大于规定的材料容许应力。例如，对于钢结构来说，以往都是以钢材的屈服强度作为破坏标准的，也即认为在某一部位达到材料的屈服强度后，整个结构即已到达破坏的临界状态。大多数的法规和规范都是用材料的屈服强度作为破坏标准的，然后再除以适当的经验系数（安全系数）而定出“容许应力”。

显然，当结构物的某个局部尽管已经达到材料的屈服强度，但并不一定意味着结构构件或有关联结，都已整个地遭致破坏。例如，对于一根两端固接梁来说，当在跨中截面达到屈服后（出现塑性铰），这并不意味着整个固端梁的破坏和倒塌，它必将引起结构内力重分布；又如在一根梁的某一个截面上，其某一边缘纤维即使应力已达到了屈服强度，但也并不意味着全截面的屈服，它必将引起全截面上的应力重分布。又如公路桥梁中常用的双向板或单向板，如果支承约束条件十分可靠的话（固端），常会得到支承处“附加推力”的帮助，而使极限承载能力大为提高（如微弯板结构）。以上这些现象，都必须通过塑性理论分析后才能进行解释。

从本世纪四十年代开始，出现了考虑材料塑性按破坏阶段计算的规范。它是以结构构件破坏时的承载能力为基准，使按材料计算强度计算所得到的承载能力必须大于计算荷载所产生的内力，同时，采用了单一的安全系数（经验系数）进行设计控制，这就是按“破坏阶段”法进行结构设计的基本方法。

随着概率统计理论的引入，于是对荷载、材料强度的变异性进行了系统的研究，进而在五十年代又提出了按极限状态计算的方法，并把单一的安全系数修改为分项安全系数，也即荷载系数、材料系数（材料匀质系数）和工作条件系数。从而把不同的外荷载、不同的材料等都用不同的安全系数区别开来，使不同的构件具有相对地比较一致的安全可靠度。目前我国《公桥规》中所采用的计算方法即是采用三系数法表达的极限状态设计法。

所谓“极限状态”：一般是指一个结构或结构的一部分达到一个使它不适合使用的特殊状态。

国际上许多国家都将结构的极限状态分为两类：一类为承载能力极限状态。另一类为正常使用的极限状态。

有的国家除按上述分类外，还提出了“条件极限状态”的规定。这种极限状态是由于偶然作用力（如爆炸、地震、车辆的意外冲击等）的作用而造成的。

我国《公桥规》已正式采用极限状态设计法，并规定所有桥涵结构均应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算。同时，在构造上和工艺上都要得到保证和满足。

目前，国际上仅有少数国家尚继续按容许应力法进行设计。从总体而言，按极限状态法设计必然地要代替按容许应力法设计，尽管极限状态法目前有很多问题还有待于进一步研究，但从理论上来说，必竟比容许应力法前进了一大步。

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力学性能

第一节 钢筋混凝土结构的基本概念

钢筋混凝土结构系由钢筋和混凝土两种物理—力学性能不同的材料所组成。其目的是使它们在共同工作中能发挥各自的优点。

混凝土材料的抗压强度较高，而抗拉强度却很低（混凝土的抗拉强度仅为其抗压强度的 $1/8 \sim 1/12$ ）。钢材则抗拉强度和抗压强度都很高。

当采用素混凝土梁时，在荷载作用下，受拉区由于混凝土的抗拉能力很小，故当外荷载很小的情况下就会导致开裂；同时，当受拉边缘的混凝土一旦开裂，梁瞬即脆断而破坏。此时，截面中性轴以上的受压区混凝土的强度却远未用足。

为了提高梁的承载能力，可以在梁的受拉区配置适量的钢筋，以代替混凝土承受拉力（图1-1），这种由两种材料（钢筋和混凝土）复合而成的受力结构即为钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构可以充分利用混凝土的抗压强度

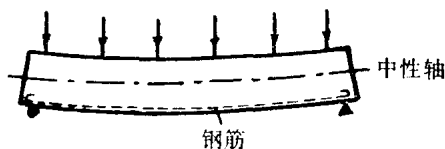


图1-1 钢筋混凝土受弯构件

和钢筋的抗拉强度，从而使钢筋混凝土梁的承载能力远远超过素混凝土梁的承载能力。

钢筋和混凝土是两种性质不相同的材料，其所以能有效地共同工作，是由于：

1. 钢筋和混凝土之间有着可靠的粘结力，能相互牢固地结成整体。亦即在外荷载作用下，钢筋与相邻混凝土能协调地共同变形，共同受力。同时，由于加筋的弹性模量一般均远大于混凝土的弹性模量（5倍~10倍），因而，能使加筋充分地发挥其强度。换句话说，如果采用其他低弹性模量的加筋措施，则其效果就远不如钢筋了。

2. 钢筋和混凝土的温度膨胀系数大致相同（钢约为 1.2×10^{-5} ；混凝土约为 $0.7 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5}$ ）。因此，当温度变化时，在钢筋混凝土构件内只产生较小的温度应力，因而不致破坏钢筋和相邻混凝土之间的粘结力。

3. 钢筋被混凝土所包裹，从而防止了钢筋的锈蚀，保证了结构的耐久性。

钢筋混凝土除了能合理利用钢筋和混凝土两种材料的性能外，尚有下列优点：

1. 就地取材——钢筋混凝土除钢筋和水泥外，其他组合材料（如砂、石、水等），大多数都可就地取材，节省运费，降低建筑成本。在工业废料丰富的地区，还可利用工业废料（如矿渣、粉煤灰等）制成人工骨料，以降低造价，减少环境污染。与钢结构相比，可节约大量钢材。

2. 耐久性好——由于混凝土的强度是随着时间的增长而增长的。在正常养护下，混凝土龄期一年的强度约为28天强度的1.5倍。因而，钢筋混凝土材料的使用寿命可以很长。相对于钢、木结构而言，几乎是不需要经常性的维修与养护。

3. 适应性强——钢筋混凝土结构的构件品类和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制成各种构件形状和截面尺寸, 所以, 从造型艺术方面来说, 也比较容易处理。

4. 其他如耐火性好、整体性好、抗地震力较好等都是在一定条件下采用钢筋混凝土结构的理由。

钢筋混凝土结构的缺点主要有:

1. 自重大——由于钢筋混凝土结构的自重大, 所以当达到一定跨径时, 其承受活荷载的能力就会显著降低。目前, 为了减少钢筋混凝土结构的自重内力, 在结构型式上常常采用桁架式杆件体系和箱型截面等, 以增大结构的挖空率(箱型截面的挖空率可达50~70%), 或者也可采用轻质骨料, 将混凝土的单位重量降低(可达 $1.4 \sim 1.8 \text{ t/m}^3$)。当然, 提高混凝土的强度(近年来已可做到100MPa)也是降低结构自重的一种有效方法, 从而, 有效地增大了结构物的跨越能力。

2. 需耗用相当数量的木料——浇筑混凝土必须采用一定数量的模板和支架, 因而, 当采用木模和木支架时, 就会耗用相当数量的木料和人工。多年来, 在公路桥梁建设中, 对于小构件经常因地制宜地采用土模预制的施工工艺, 同时已逐渐地推广采用钢模板和钢支架以代替木模板和木支架。

3. 施工受季节性影响较大——在雨天和冬季进行混凝土施工时, 则对于混凝土浇筑、振捣和养生等工艺都必须采取相应的措施, 才能确保质量。

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、路面工程、水工结构等都广泛采用。随着人们对钢筋混凝土这门学科认识的不断提高, 上述缺点目前已经或正在逐步地加以改善。

第二节 混 凝 土

混凝土是用水泥、砂子和石子三种材料, 用水拌和经过凝固硬化后制成的人工石材。但是, 近年来已把混凝土的外加剂看成为构成混凝土的第五种成分了。目前, 国外不使用外加剂的混凝土已不多见。常用的外加剂有: 减水剂、早强剂、缓凝剂、促凝剂、发泡剂等等。关于混凝土中的水泥、骨料和水的品质要求, 以及如何正确选择它们之间的配合比等问题已在《道路建筑材料》课程中作了介绍。

对于混凝土的品质要求, 归纳起来主要有以下四个方面:

1. 和易性要好;
2. 强度要高;
3. 耐久性要好;
4. 经济上要节省。

在通常情况下, 都用混凝土的强度和耐久性作为评定混凝土品质的主要指标, 其他如徐变性质、收缩性质、弹性模量、耐磨性及耐火性等也都属混凝土的重要性质, 但混凝土的最主要品质必竟是强度和耐久性。

影响混凝土强度的因素是多方面的, 最重要的因素是所用的水灰比。在振捣设备较好的工地上, 可以采用水灰比为0.3~0.4的干硬性混凝土, 在一般情况下可以采用水灰比为0.5~0.7的塑性混凝土。

一、混凝土的强度

影响混凝土强度的因素是多方面的，包括水泥的标号、骨料的性质、水灰比的大小、级配设计时各种材料的比例、制作的方法、凝固时的环境条件、混凝土的龄期等等。同时，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。因此，各项试验都要规定一个“标准”作为依据。

1. 立方体抗压强度 (R)

我国规范规定以 20cm 的立方体强度值作为混凝土的基本强度指标，因为，这种试件的强度指标比较稳定。规范中所规定的立方体强度值就是混凝土的标号。它以每边边长为 20cm 的立方体，在 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 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， $1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2$ ），用符号 R 表示。

混凝土立方体强度的试验方法。当试件在试验机上受压时，纵向要缩短，横向要膨胀，亦即在横向要产生变形。以上所指的标准试验方法，规定在试件表面与压力机盘面之间不涂润滑剂（如油脂）时所测得的混凝土抗压极限强度。由于试件与盘面之间无润滑剂，因而在接触面上将产生一定的摩阻力，此摩阻力限制了混凝土试件的侧向膨胀，这就虚拟似地在试件的上、下端各加了一个“套箍”，亦即限制了试件的横向变形，延缓了裂缝的开展，从而提高了混凝土的抗压极限强度。当压力达到极限强度时，试件将沿着斜向面破裂，继而四周的混凝土脱落。如果在试件的上、下端面上涂抹润滑剂（或粘有润滑剂），则试件的横向变形就比较自由，这时量测所得的抗压极限强度就较低，其破坏时的裂缝方向几乎与压力的作用方向相平行。我国规范所规定的试验方法是不加润滑剂的。

当试件上、下表面不加润滑剂时，量测所得的抗压极限强度与试件的尺寸大小有关。根据我国的试验资料，建议 15cm 或 10cm 边长的立方体试块强度可乘以下列换算系数以折算成 20cm 边长的立方体试块强度 R ：

边长为 10cm 的立方体试块——0.9；

边长为 15cm 的立方体试块——0.95。

亦即立方体试块愈小，则由量测所得的强度愈高。对此现象的理论解释各有不同，一种认为这是材料自身的原因，如材料内部缺陷（裂纹）分布的影响，材料内摩擦角的影响等；另一种认为这是由于试验方法的原因，例如试件承压面之间摩擦力的影响等。目前仍在争议中，总之，这种现象习惯上常称为“尺寸效应”。

混凝土标号是设计钢筋混凝土结构时选择混凝土材料的主要指标，应根据结构物的用途、尺寸、使用条件以及经济和技术等因素综合考虑。

2. 棱柱体抗压强度（轴心抗压强度）(R_s)

混凝土的抗压强度不仅与试件的尺寸有关，也同它的形状有关。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 R_s 。

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，从实测所得的棱柱体抗压强度 R_s 比立方体抗压强度 R 小。同时，棱柱体试件的高宽比 (h/b) 越大则强度越小（图 1-2）。出现这种现象是因为试件的高度越大，则试验机盘面与试件之间的摩

阻力对试件横向变形的约束影响就越小，所测得的强度也就越小，但当 h/b 达到一定值后，这种影响就不大了。

在确定棱柱体试件尺寸时，宜注意到试件的强度要不受试验机压板和试件承压面间摩擦力的影响，因而，要求试件应有足够的高度，使试件的中间区段足以形成纯压状态；同时，试件又不宜太高，以避免在破坏前产生较大的偏心而降低抗压强度。目前国内的棱柱体试件 $h/b \approx 3 \sim 4$ ，但具体尺寸尚无统一规定，一般采用 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ ； $15 \times 15 \times 45\text{cm}$ 两种。棱柱体试件在抗压试验时的破坏情况示于图1-3。

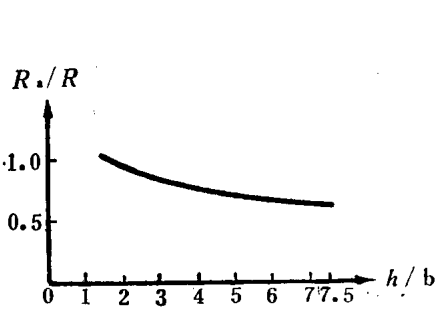


图1-2 棱柱体高宽比对抗压强度的影响

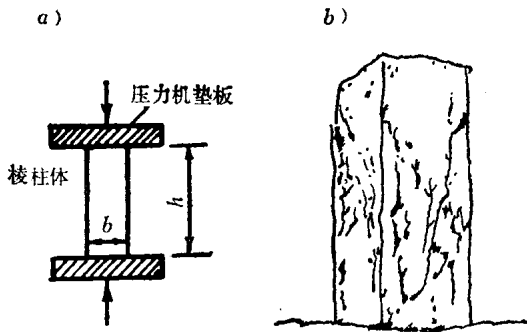


图1-3 混凝土棱柱体抗压试验

根据我国近年来394组棱柱体抗压强度的试验，其中 $15 \times 15 \times 45\text{cm}$ 的棱柱体共 122 组，试验结果如图1-4所示，由图可以看出， R_a 和 R 的关系大致地呈一条直线，由统计所得的经验公式近似地可取为： $R_a = 0.8R$ ，但考虑到试验误差，并考虑到多年来我国的取值习惯，目前规范中取用式1-1，这显然是偏于安全的。

$$R_a = 0.7R \tag{1-1}$$

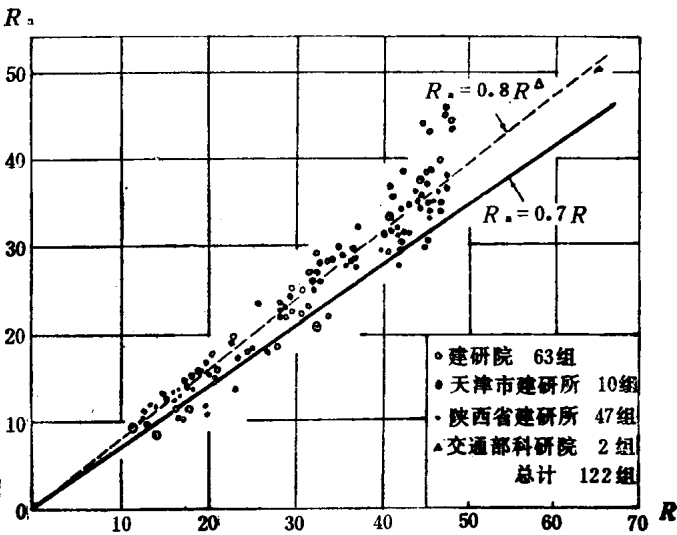


图1-4 混凝土棱柱体抗压强度 R_a 与立方体抗压强度 R 的关系

关于 R_a 与 R 的关系，从早期的试验结果来看，大多是采用非线性关系的表达式（大多是低标号混凝土试件），而近期的试验结果大多趋向于采用简单的线性关系表达式（当前的试件大多采用较高标号的混凝土）。各国资料所得的比例关系各有差异。例如 1955 年