

中国水利教育协会

高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）



“十三五”江苏省高等学校重点教材

水工钢筋混凝土结构 学习指导

主编 汪基伟 夏友明



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利教育协会

共同组织

高等学校水利类专业教学指导委员会



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）



“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号 2017-2-011）

本书获江苏省品牌专业（PPZY2015B142）资助

水工钢筋混凝土结构 学习指导

主编 汪基伟 夏友明



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是高等学校水利学科专业规范核心课程教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材、全国水利行业规划教材、“十二五”江苏省高等学校重点教材《水工钢筋混凝土结构学》(第5版)的配套用书,全书共分12章。前10章的章节编排与教材一致,内容与教材对应,主要内容分为知识点讲解、综合练习与设计计算三个部分,其中综合练习附有参考答案;第11章介绍了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)与《水工混凝土结构设计规范》的主要区别;第12章为水工钢筋混凝土结构课程设计资料及设计任务书。

本书是“十三五”江苏省高等学校重点教材、全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育),除作为学生学习水工钢筋混凝土结构课程的辅助用书外,也可供任课老师参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢筋混凝土结构学习指导 / 汪基伟, 夏友明主
编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 4
全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育)
“十三五”江苏省高等学校重点教材
ISBN 978-7-5170-6359-9

I. ①水… II. ①汪… ②夏… III. ①水工结构—钢
筋混凝土结构—高等学校—教学参考资料 IV. ①TV332

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第056761号

书 名	全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育) “十三五”江苏省高等学校重点教材 水工钢筋混凝土结构学习指导 SHUIGONG GANGJIN HUNNINGTU JIEGOU XUEXI ZHIDAO
作 者	主编 汪基伟 夏友明
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.5印张 462千字
版 次	2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

由河海大学主编的《水工钢筋混凝土结构学》一直为高等学校水利类专业的统编教材，分别于1979年、1987年、1996年、2009年和2016年出版了1~5版，本书为其第5版的配套用书。

水工钢筋混凝土结构课程是水利类专业的主干专业基础课，一般在大三开设，往往是同学接触的第一门专业基础课。水工钢筋混凝土结构计算理论是在大量试验基础上经理论分析建立的，构造要求更是试验和工程经验的总结，同时又是一门结构设计课程，有很强的实践性，同学学习时往往觉得内容太多太散，不容易抓住重点和建立系统的概念。因此，需要有一本和教材配套的学习指导书来帮助理解和掌握钢筋混凝土结构的计算理论和设计方法，为此我们编写了这本学习指导。

本书共有12章，前10章的章节编排与《水工钢筋混凝土结构学》（第5版）完全一致，每章首先列出本章主要内容及学习要求，随后列有主要知识点、综合练习、设计计算3个单元。

知识点讲解是本书的特色，其目的是帮助同学抓住课程重点和系统建立钢筋混凝土结构的概念。对教材已详细介绍的知识点，侧重于归纳总结、厘清思路；对于教材限于篇幅或当时学生认知未能讲透的知识点，则以整章的角度来详细讲解，同时全书各章知识点前后呼应。

本书的知识点讲解还与本书主编主持建设的江苏省在线开放课程《水工钢筋混凝土结构学》MOOC视频（网址：<http://www.icourse163.org/course/HHU-1002090006>）相互配套，但又各有特点。MOOC是以教材顺序和学生当时的认知来讲解，用于课堂教学后紧随的复习；本书则以整章的角度来讲解，用于一章学完后系统的复习。

在“综合练习”单元中，附有大量的选择题、问答题。其中，选择题需作一些思考，经判别后才能给出正确答案；问答题则为了考查同学们分析问题及解决问题的能力。对于有一定难度的选择题及问答题，以“△”号表示。所有选择题和问答题在书中均附有参考答案，同学可以根据答题的情况判断自己掌握本门课程的程度。

设计计算题用于课后习题。我们有针对性地设计了不同题目，其中大部

分选自工程实例，有些带“△”号的题目则有一定难度，教师可根据教学要求，从中选取部分题目作为课后的作业。

水工钢筋混凝土结构是依据规范来设计的。各行业有其自身的特点，其规范规定有所不同，但钢筋混凝土结构又是一门以实验为基础，利用力学知识研究钢筋混凝土及预应力混凝土结构的科学，因此各行业之间的设计规范有共同的基础，它们之间的共性是主要的，差异是次要的。为了让同学了解这层关系，也为同学毕业后能尽快掌握其他行业的规范，本书专门列出第11章“DL规范与我国其他规范设计表达式的比较”，着重从实用设计表达式、受弯构件正截面及斜截面承载力计算、正常使用极限状态验算等几个方面，分析适用于民用建筑的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和适用于水运工程的《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)与《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)的不同之处。

需要说明的是，由于体制的原因，目前我国水利水电工程中，水利系统与电力系统分别有各自的《水工混凝土结构设计规范》。这两本规范的设计理论基本相同，但设计表达式却完全不同，构造规定也略有差异。《水工钢筋混凝土结构学》(第5版)教材是以电力系统的《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)为主线、水利系统的《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)为辅线编写的，所以本书各章节内容除特别说明外，也均以DL/T 5057—2009规范为主展开讨论。

钢筋混凝土结构课程还有一大特点是它的实践性。对于水利类专业而言，学完《水工钢筋混凝土结构学》后往往要进行1.5~2周的课程设计。为此我们从工程实例中挑选了一部分素材，编写了“钢筋混凝土肋形楼盖设计”“水工钢筋混凝土工作桥设计”等课程设计资料，列入第12章。使用时可根据不同专业、不同学时要求自由选取，以适应增强实践性教学环节的需要。

考虑到钢筋混凝土结构课程设计是同学们第一次绘制钢筋混凝土结构施工图，因此在12章还依据《水利水电工程制图标准 基础制图》(SL 73.1—2013)和《水利水电工程制图标准 水工建筑图》(SL 73.2—2013)等制图规范，给出与课程设计相关的制图要求。

参加本书编写的有河海大学汪基伟、冷飞、蒋勇、丁晓唐，扬州大学夏友明、许萍；全书由汪基伟、夏友明主编。郑州大学李平先教授主审。

在本书编写过程中，参考了已出版的相关的多种教学参考用书，从中吸收了他们的编写经验，在此谨表谢意。

本书的出版除得到江苏省“十三五”高等学校重点教材立项建设资助外，

还得到江苏省高校品牌专业建设工程一期 (PPZY2015B142) 的资助。

本书在编写过程中得到兄弟院校和中国水利水电出版社的大力支持, 在此一并表示感谢。对于书中存在的错误和缺点, 恳请读者批评指正。热忱希望有关院校在使用本书过程中将意见及时告知我们。

编者

2018年1月

第1章 混凝土结构材料性能与力学性能	1
1.1 主要知识点	1
1.2 综合练习	12
1.3 参考答案	15
第2章 钢筋混凝土结构设计计算原理	18
2.1 主要知识点	18
2.2 综合练习	24
2.3 设计计算	24
2.4 参考答案	35
第3章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	37
3.1 主要知识点	37
3.2 综合练习	52
3.3 设计计算	58
3.4 参考答案	61
第4章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	74
4.1 主要知识点	74
4.2 综合练习	81
4.3 设计计算	83
4.4 参考答案	90
第5章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	101
5.1 主要知识点	101
5.2 综合练习	116
5.3 设计计算	120
5.4 参考答案	132
第6章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	138
6.1 主要知识点	138
6.2 综合练习	140
6.3 设计计算	131
6.4 参考答案	132

目 录

前言

第 1 章 混凝土结构材料的物理力学性能	1
1.1 主要知识点	1
1.2 综合练习	12
1.3 参考答案	15
第 2 章 钢筋混凝土结构设计计算原理	19
2.1 主要知识点	19
2.2 综合练习	32
2.3 设计计算	34
2.4 参考答案	35
第 3 章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	37
3.1 主要知识点	37
3.2 综合练习	52
3.3 设计计算	58
3.4 参考答案	64
第 4 章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	74
4.1 主要知识点	74
4.2 综合练习	91
4.3 设计计算	94
4.4 参考答案	96
第 5 章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	101
5.1 主要知识点	101
5.2 综合练习	116
5.3 设计计算	120
5.4 参考答案	122
第 6 章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	128
6.1 主要知识点	128
6.2 综合练习	130
6.3 设计计算	131
6.4 参考答案	132

第7章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	133
7.1 主要知识点	133
7.2 综合练习	140
7.3 设计计算	141
7.4 参考答案	142
第8章 钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算	144
8.1 主要知识点	144
8.2 综合练习	163
8.3 设计计算	166
8.4 参考答案	167
第9章 钢筋混凝土肋形结构及刚架结构	170
9.1 主要知识点	170
9.2 综合练习	193
9.3 设计计算	196
9.4 参考答案	199
第10章 预应力混凝土结构	205
10.1 主要知识点	205
10.2 综合练习	231
10.3 设计计算	236
10.4 参考答案	238
第11章 DL规范与我国其他规范设计表达式的比较	248
11.1 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)	248
11.2 《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)	256
第12章 水工钢筋混凝土结构课程设计	260
12.1 肋形楼盖设计参考资料	260
12.2 水闸工作桥设计参考资料	266
12.3 施工图绘制	285
12.4 钢筋混凝土单向板整浇肋形楼盖课程设计任务书	294
12.5 水闸工作桥设计任务书	297
参考文献	301

第 1 章 混凝土结构材料的物理力学性能

钢筋混凝土结构是由混凝土和钢筋两种材料共同受力的结构，本章介绍钢筋和混凝土这两种材料的物理和力学性能以及两者之间的粘结作用。学习本章时，应着重理解这两种材料的特点和在钢筋混凝土结构中的作用，以及钢筋混凝土结构对这两种材料性能的相应要求。学习完本章后，应掌握混凝土和钢筋两种材料的力学性能、两种材料之间的粘结性能和保证粘结性能的措施，清楚常用的钢筋品种与常用的混凝土强度等级。本章主要学习内容如下：

- (1) 钢筋的品种。
- (2) 钢筋的力学性能。
- (3) 混凝土的单轴强度。
- (4) 混凝土在复合应力状态下的强度。
- (5) 混凝土的变形。
- (6) 钢筋与混凝土的粘结。
- (7) 钢筋的接头和锚固。

读者在学习本章时可参阅“工程材料”课程的有关内容。

1.1 主要知识点

1.1.1 钢筋的分类

钢筋按使用用途可分为普通钢筋和预应力筋两类。钢筋混凝土结构中的钢筋和预应力混凝土结构中的非预应力筋为普通钢筋；预应力混凝土结构中预先施加预应力的钢筋为预应力筋。

普通钢筋采用热轧钢筋，按表面形状可分为光圆和带肋两类。光圆钢筋的表面是光面的 [图 1.1 (a)]，与混凝土之间的粘结力较差；带肋钢筋亦称变形钢筋，与混凝土之间的粘结力较好，有螺旋纹、人字纹和月牙肋三种，目前常用的是月牙肋 [图 1.1 (b)]。

按力学性能钢筋可分为软钢和硬钢两类。用作普通钢筋的热轧钢筋为软钢，而用作预应力筋的钢丝、钢绞线、螺纹钢筋和钢棒为硬钢。

1.1.2 常用的热轧钢筋品种与钢筋的表示

本章学习时要熟练掌握用作普通钢筋的热轧钢筋的品种，弄清各品种钢筋的外形和符号表示；用作预应力筋的钢丝、钢绞线、螺纹钢筋和钢棒可以在第 10 章预应力混凝土结构学习时加强。

表 1.1 给出了常用热轧钢筋的种类、代表符号和直径范围。

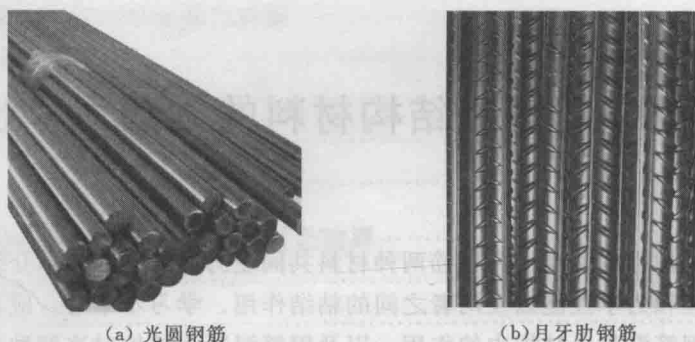


图 1.1 光圆钢筋和带肋钢筋

表 1.1

常用热轧钢筋

强度等级代号	钢种	符号	表面形状	力学性能	直径范围/mm
HPB300	低碳钢	Φ	光圆	软钢	6~22
HRB335	低合金钢	Φ	带肋	软钢	6~50
HRB400	低合金钢	Φ	带肋	软钢	6~50

HPB300 为光圆钢筋，强度较低，与混凝土的粘结锚固性能较差，控制裂缝开展的能力很弱，一般只用于受力不大的薄板或用作箍筋、架立筋和分布筋。用作受力钢筋时，若为绑扎骨架，为加强混凝土的锚固末端需要加弯钩，但在焊接骨架中则不需要；用作架立筋、分布筋时也不需要。HPB300 钢筋质量稳定，塑性及焊接性能良好，因而吊环采用 HPB300 钢筋制作。

HRB335 和 HRB400 钢筋的强度、塑性及可焊性都较好。由于强度比较高，为增加钢筋与混凝土之间的粘结力，保证两者能共同工作，钢筋表面轧制成月牙肋，为带肋钢筋。

在过去，HRB335 钢筋在水利工程中应用最为广泛，目前由于其强度较低，已渐趋淘汰，HRB400 将成为主导的钢筋品种。

因而，在钢筋混凝土结构中常用的钢筋有 HPB300 和 HRB400 两种，分别用符号 Φ 和 Φ 表示。

在设计图纸中，钢筋的表示方法有两种。当钢筋根数不多时，如梁中纵向钢筋，用“根数+钢筋等级+钢筋直径”表示，如 $3\Phi 22$ 表示 3 根直径为 22mm，强度等级为 HRB400 的钢筋；当钢筋根数较多时，如宽度较大的板中钢筋、梁中箍筋等，如果仍用“根数+钢筋等级+钢筋直径”表示的话，钢筋根数太多，工人不方便将每根钢筋的间距排列均匀，故用“钢筋等级+钢筋直径+@+钢筋间距”表示，如 $\Phi 8@200$ 表示强度等级为 HPB300，直径为 8mm 的钢筋以 200mm 间距间隔布置。直接标出间距，工人就可直接根据间距布置钢筋，方便工人操作。

1.1.3 钢筋的力学性能与受拉强度限值

钢筋按其力学性能可分为软钢和硬钢。

1. 软钢

软钢的应力-应变曲线如图 1.2 (a) 所示, 从开始加载到拉断可分 4 个阶段: 线弹性阶段 ($0a$ 段)、屈服阶段 (bc 段)、强化阶段 (cd 段)、破坏阶段 (de 段)。软钢的特点是有明显的屈服阶段 (bc 段)。

图 1.2 (a) 中的 b 点、 d 点应力为软钢的屈服强度和抗拉强度, 是软钢的两个强度指标。由于软钢具有屈服平台 (bc 段), 当应力达到屈服强度 (b 点) 后, 荷载不增加, 应变会继续增大, 使得混凝土裂缝开展过宽, 构件变形过大, 结构构件不能正常使用, 所以软钢的受拉强度限值以屈服强度为准, 其强化阶段只作为一种安全储备考虑。也就是说, 设计钢筋混凝土结构时钢筋受拉强度采用的是屈服强度, 而不是抗拉强度。

图 1.2 (a) 中的 e 点所对应的横坐标称为伸长率, 它体现钢筋的塑性。伸长率越大, 表示塑性越好。

钢材中含碳量越高, 屈服强度和抗拉强度就越高, 但伸长率就越小, 流幅也相应缩短。也就是说, 钢筋强度越高塑性越差。

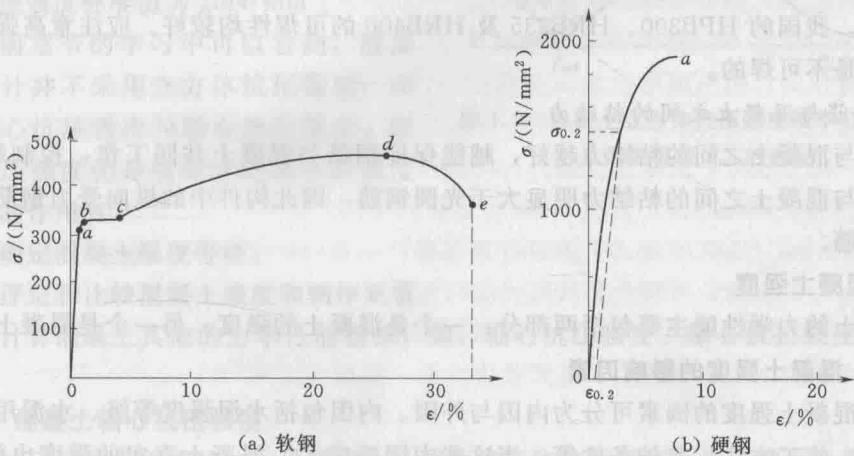


图 1.2 钢筋应力-应变曲线

2. 硬钢

硬钢强度高, 但塑性差, 脆性大, 应力-应变曲线如图 1.2 (b) 所示, 基本上不存在屈服阶段 (流幅)。

图 1.2 (b) 的 a 点应力与 $\sigma_{0.2}$ 分别称为硬钢的极限抗拉强度和协定流限。所谓协定流限是指经过加载及卸载后尚存有 0.2% 永久残余变形时的应力, 也称“条件屈服强度”。和设计时软钢采用屈服强度而不是抗拉强度相似, 设计时硬钢受拉强度采用的是条件屈服强度, 而不是极限抗拉强度。条件屈服强度一般相当于极限抗拉强度的 70%~90%。对钢丝、钢绞线和钢棒, 规范取极限抗拉强度的 85% 作为条件屈服强度; 对预应力螺纹钢筋, 规范取极限抗拉强度的 80% 作为条件屈服强度。

1.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求

混凝土结构对钢筋性能的要求包括强度、塑性、可焊性, 以及与混凝土之间的粘结力 4 个方面。

1. 钢筋的强度

钢筋强度越高,所需钢筋面积越少,节约钢材,但混凝土结构中钢筋的强度并非越高越好。在普通混凝土结构中,若要高强受拉钢筋充分发挥其强度,势必要求混凝土结构有过大的变形和裂缝宽度,以使钢筋达到发挥其强度所需的应变。因此,在普通混凝土结构中不宜采用高强钢筋,钢筋的设计强度限值宜在 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 左右,以HRB400和HRB335钢筋为宜。

预应力混凝土结构能应用高强钢筋,但受控于锚固、混凝土与钢筋受力协调的问题,也不能采用过高强度的钢筋,目前预应力钢筋的最高强度限值约为 $2000\text{N}/\text{mm}^2$ 左右。

2. 钢筋的塑性

为了使钢筋在断裂前有足够的变形,给出构件裂缝开展过宽将要破坏的预兆信号,要求钢筋有一定的塑性。

3. 钢筋的可焊性

出厂的直条钢筋长度为9m或12m,在很多情况下钢筋需通过焊接来接长,所以要求可焊性好。我国的HPB300、HRB335及HRB400的可焊性均较好。应注意高强钢丝、钢绞线等则是不可焊的。

4. 钢筋与混凝土之间的粘结力

钢筋与混凝土之间的粘结力越好,越能保证钢筋与混凝土共同工作,控制裂缝宽度。带肋钢筋与混凝土之间的粘结力明显大于光圆钢筋,因此构件中的纵向受力钢筋应优先选用带肋钢筋。

1.1.5 混凝土强度

混凝土的力学性能主要包括两部分:一个是混凝土的强度;另一个是混凝土的变形。

1.1.5.1 混凝土强度的影响因素

影响混凝土强度的因素可分为内因与外因。内因包括水泥强度等级、水泥用量、水灰比、龄期、施工方法、养护条件等,当这些内因确定了,混凝土真实的强度也就确定了。但当采用试验的方法去获得混凝土的强度值时,所获得的强度值就和我们采用的方法有关,采用的方法不同就会得到不同的强度值,即所谓的外因。这些外因包括试验方法、试件尺寸、加载速度等。

1. 试验方法

进行受压强度试验时,混凝土试块上下表面与承压板之间的摩擦力越小,试件的横向膨胀越容易,试块越容易破坏,所测得的强度值就越低。因而,当试块上下表面涂有油脂或填以塑料薄片以减少摩擦力时,所测得的抗压强度就较不涂油脂者为小,减小的程度与摩擦力减少的程度有关,而摩擦力减少的程度又与采用减摩措施有关,实际操作时不容易掌握。为了统一标准,且为简单方便,规定在试验中均采用不涂油脂、不填塑料薄片的试块。

2. 试块尺寸

当采用不涂油脂、不填塑料薄片的试块进行受压试验时,试块尺寸越大,试块中部受试块上下表面承压板摩擦力的约束就越小,测得强度就越低。

3. 加载速度

试验时加载速度越快,试块的变形越来不及发生,测得的强度就越高,即加载速度越快强度越高。

1.1.5.2 混凝土立方体抗压强度和强度等级

我国混凝土结构设计规范规定以边长为150mm的立方体,在温度为 $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不小于95%的条件下养护28d,表面不涂油测得的强度为立方体抗压强度,用 f_{cu} 表示。当采用边长不是150mm的非标准试块进行试验时,其结果应进行换算。

立方体抗压强度 f_{cu} 是随机变量,将具有95%保证率的立方体抗压强度值称为标准值,用 f_{cuk} 表示。强度标准值具有95%保证率,也就是说实际强度小于标准值的可能性只有5%,见图1.3。

规范将立方体抗压强度标准值 f_{cuk} 作为混凝土强度等级,以符号C表示,单位为 N/mm^2 。例如C25混凝土,就表示混凝土立方体抗压强度标准值为 $25\text{N}/\text{mm}^2$ 。

在后面章节的学习中可以看到,混凝土结构设计并不采用立方体抗压强度,而是采用轴心抗压强度和轴心抗拉强度,但立方体抗压强度仍是混凝土最基本的强度指标。它的作用有:

- (1) 确定混凝土强度等级。
- (2) 评定和比较混凝土强度和制作质量。

(3) 计算混凝土其他的力学性能指标,如:轴心抗压强度、轴心抗拉强度和弹性模量等。

1.1.5.3 混凝土轴心抗压强度

轴心抗压强度采用棱柱体试件测得,又称为棱柱体抗压强度,为单轴受力条件下得到的受压强度,用 f_c 表示。

在实际结构中,混凝土很少处于单向受压或单向受拉状态。工程上经常遇到的都是一些双向或三向受力的复合应力状态,但由于复合应力状态下强度问题的复杂性,现行规范仍以单轴强度进行设计计算。因而,轴心抗压强度 f_c 是承载力计算的一个重要参数。

f_c 随试件高度与宽度之比 h/b 增大而减小,当 $h/b > 3$ 时 f_c 趋于稳定。我国混凝土结构设计规范规定棱柱体标准试件的尺寸为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 。 f_c 与 f_{cu} 大致呈线性关系,按下列公式进行换算:

$$f_c = 0.76 f_{cu} \quad (1.1a)$$

$$f_c = 0.88 \times 0.76 f_{cu} = 0.67 f_{cu} \quad (1.1b)$$

在上两式中, f_{cu} 都为试验室测得的立方体抗压强度;式(1.1a)中的 f_c 也表示试验室测得的轴心抗压强度,而式(1.1b)中的 f_c 表示实际结构的轴心抗压强度。考虑到实际工程中的结构构件与试验室试件之间,制作及养护条件、尺寸大小及加载速度等因素的差异,试验室测得的 f_c 要乘0.88折减系数才能表示实际结构的 f_c 。

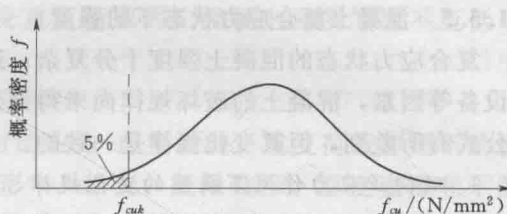


图1.3 混凝土立方体抗压强度概率分布曲线及强度等级 f_{cuk} 的确定

1.1.5.4 混凝土轴心抗拉强度

混凝土抗拉强度用 f_t 表示, f_t 远低于立方体抗压强度 f_{cu} , f_t 仅相当于 f_{cu} 的 $1/9 \sim 1/18$, 所以混凝土十分容易开裂。各国测定混凝土抗拉强度的方法不尽相同, 主要有直接受拉法和劈裂法, 我国近年来采用的是直接受拉法。

f_t 也是一种单轴强度, 是混凝土构件抗裂验算的一个重要指标, 它和 f_{cu} 的关系为

$$f_t = 0.26 f_{cu}^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1.2a)$$

$$f_t = 0.88 \times 0.26 f_{cu}^{2/3} = 0.23 f_{cu}^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1.2b)$$

和轴心抗压强度相同, 在上两式中, f_{cu} 都为试验室测得的立方体抗压强度; 式 (1.2a) 中的 f_t 也表示试验室测得的轴心抗拉强度, 而式 (1.2b) 中的 f_t 表示实际结构的轴心抗拉强度。实际结构的 f_t 和试验室测得的 f_t 差 0.88 的折减系数。

1.1.5.5 混凝土复合应力状态下的强度

复合应力状态的混凝土强度十分复杂, 远未完善解决。对于三向受力状态, 受制于试验设备等因素, 混凝土的破坏规律尚未得到公认。对于二向受力状态, 虽然各家提出的强度公式有所差别, 但其变化规律是一致的。

1. 双向正应力作用下强度的变化规律

双向受压时, 抗压强度比单向受压的强度为高, 最大抗压强度为 $(1.25 \sim 1.60) f_c$, 发生在应力比 σ_1/σ_2 在 $0.3 \sim 0.6$ 之间; 双向受拉时, 抗拉强度与单向受拉强度基本相同; 一向受拉一向受压时, 抗压强度随另一向的拉应力的增加而降低, 或者说抗拉强度随另一向的压应力的增加而降低, 见图 1.4。

2. 单向正应力 σ 及剪应力 τ 共同作用下强度的变化规律

有压应力存在时, 混凝土的抗剪强度有所提高, 但当压应力过大时, 混凝土的抗剪强度反而有所降低; 有拉应力存在时, 混凝土的抗剪强度随拉应力的增大而降低。

剪应力的存在使抗压强度和抗拉强度降低, 见图 1.5。

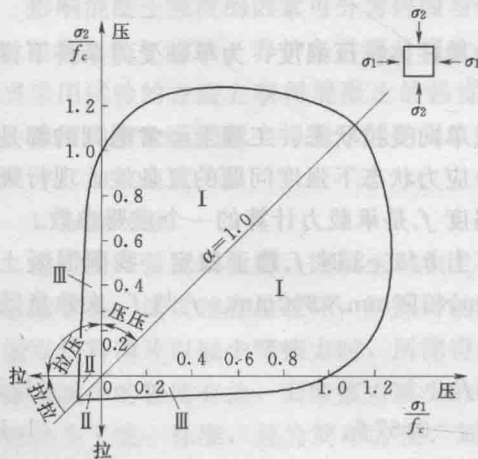


图 1.4 混凝土双向应力下的强度曲线

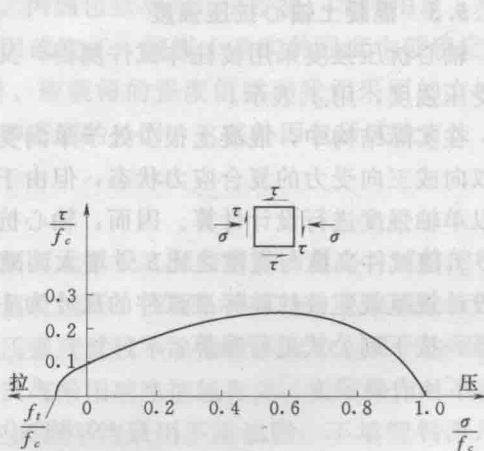


图 1.5 混凝土的复合受力强度曲线

1.1.6 混凝土结构对混凝土强度等级的要求

水利水电工程中所采用的混凝土强度等级分为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、

C45、C50、C55、C60，共10个等级。

混凝土结构对混凝土强度等级的要求和钢筋的强度等级有关。所采用的钢筋强度等级越高，要求混凝土强度等级也越高。具体有：

(1) 钢筋混凝土结构构件的混凝土强度等级不应低于C15；当采用HRB335钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C20；当采用HRB400、RRB400钢筋或承受重复荷载时，混凝土强度等级不应低于C20。

(2) 预应力混凝土结构构件的混凝土强度等级不应低于C30；当采用钢绞线、钢丝作预应力筋时，混凝土强度等级不宜低于C40。

这里顺便提一下规范的用词，“应”是“应该这样做”，“宜”是指“希望这样做”。如“当采用HRB335钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C20”是指不希望采用低于C20的混凝土；“当采用HRB400、RRB400钢筋或承受重复荷载时，混凝土强度等级不应低于C20”是指不能采用低于C20的混凝土。

1.1.7 混凝土变形——应力-应变曲线

混凝土应力-应变曲线包括一次短期加载时的应力-应变曲线、重复荷载作用下的应力-应变曲线、混凝土在长期荷载作用下的变形——徐变、极限变形、温度变形和干湿变形。

1.1.7.1 一次短期加载时的混凝土应力-应变曲线

1. 曲线形状与特征点

混凝土一次短期加载时变形性能一般采用棱柱体试件测定，由试验得出的一次短期加载的应力-应变曲线如图1.6所示。由于采用棱柱体试件测定，所以峰值应力 σ_0 就为轴心抗压强度 f_c 。

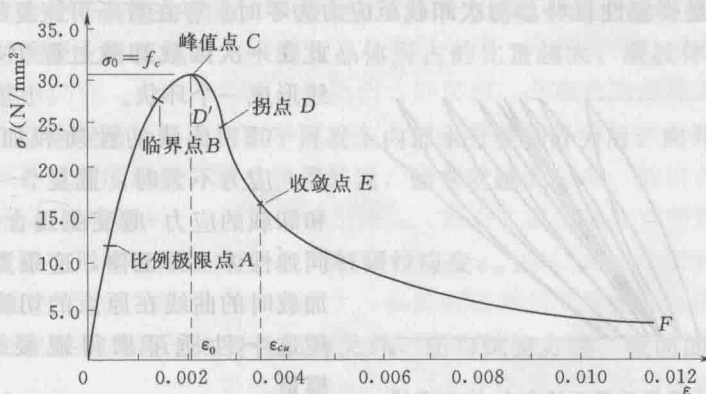


图1.6 混凝土棱柱体受压应力-应变曲线

在图1.6中，A点为比例极限点，应力值约为 $(0.3\sim 0.4)f_c$ ，OA段接近于直线，应力-应变关系为线性；AB段向下弯曲，呈现出塑性性质，接近B点应变增长得更快，B点称为临界点，应力值约为 $0.8f_c$ ；C点为峰值点，相应的应变称为峰值应变 ϵ_0 ， ϵ_0 一般为0.002左右，到达C点后试件表面出现与加压方向平行的纵向裂缝，试件开始破坏。C点以前曲线称为上升段，C点以后曲线称为下降段。过D点后，曲线从凹向应变轴变为

凸向应变轴，故 D 点称为曲线的拐点； E 点称为“收敛点”， E 点以后试件中的主裂缝已很宽，内聚力已几乎耗尽，对于无侧向约束的混凝土已失去了结构的意义，故 E 点应变也就是极限压应变 ϵ_{cu} 。

应力-应变曲线中应力峰值 σ_0 与其相应的应变值 ϵ_0 ，以及破坏时的极限压应变 ϵ_{cu} 是曲线的三大特征值，控制着曲线的形状。 ϵ_{cu} 越大，表示混凝土的塑性变形能力越大，也就是延性（指构件最终破坏之前经受非弹性变形的能力）越好。

2. 影响曲线形状的因素

随着混凝土强度的提高，曲线上升段和峰值应变 ϵ_0 的变化不是很显著，而下降段形状有较大的差异。强度越高，下降段越陡，材料的延性越差。

3. 曲线的用途与表达式

混凝土的应力-应变曲线是钢筋混凝土结构学科中的一个基本问题，在许多理论问题中都要用到它，如：①混凝土结构非线性数值计算；②正截面承载力计算。在今后章节的学习中可以看到，正截面承载力计算都需要已知构件截面在破坏时的应力分布，而试验无法直接测到应力，只能测到构件截面的应变分布，这时就需通过应力-应变曲线由截面应变求得截面的应力分布。

应力-应变曲线需要用公式来表达，也就是所谓的应力-应变曲线表达式。由于影响因素复杂，所提出的表达式各种各样。一般来说，曲线的上升段比较相近，而曲线的下降段则相差很大，有的假定为一直线段，有的假定为曲线或折线。

1.1.7.2 重复荷载下的混凝土应力-应变曲线

比较图 1.7 和图 1.6 可知，混凝土在多次重复荷载作用下，其应力-应变的性质与短期一次加载有显著不同，其原因有：

(1) 混凝土是弹塑性材料。初次卸载至应力为零时，存在着不可恢复的塑性应变，因此

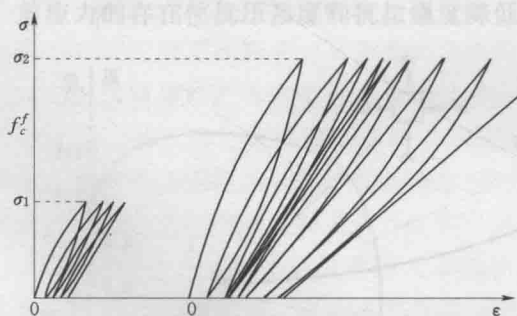


图 1.7 混凝土重复荷载下的应力-应变曲线

在一次加载卸载过程中，应力-应变曲线形成一个环状。

(2) 曲线的性质和加载应力水平有关。应力不大时，重复 5~10 次后，加载和卸载的应力-应变曲线合并接近一直线，同弹性体一样工作，这条直线与一次短期加载时的曲线在原点的切线基本平行。利用这一性质可求得混凝土的初始弹性模量。

应力超过某一限值，经多次循环，应力-应变关系成为直线后，重新变弯，试件很快破坏。该限值为混凝土的疲劳强度。

1.1.7.3 长期荷载作用下的混凝土变形——徐变

徐变在钢筋混凝土结构设计中是一个很重要的概念，在后面的裂缝宽度、挠度、预应力损失等的计算中都要用到徐变的概念。

1. 徐变的定义

徐变与松弛是一种事物的两种表现形式。混凝土在荷载的长期作用下，应力不变，变

形也会随着时间而增长,这种现象称为徐变;如果结构受外界约束而无法变形,结构的应力会随时间的增长而降低,这种现象称为应力松弛。

2. 徐变产生的原因

混凝土产生徐变的原因主要有两个:一是水泥石中的凝胶体产生的粘性流动;二是混凝土内部的微裂缝在荷载长期作用下不断发展。在应力较小时,徐变以第一种原因为主;应力较大时,以第二种原因为主。

3. 徐变的特点

徐变在较小的应力时就能发生,且可部分可恢复,见图 1.8,这与塑性变形不同。塑性变形主要是混凝土中结合面裂缝的扩展延伸引起的,只有当应力超过了材料的弹性极限后才会发生,而且是不可恢复的。

4. 徐变的影响因素

影响徐变的因素主要有:应力水平、龄期与环境湿度等。

(1) 应力低于 $0.5f_c$ 时,徐变与应力为线性关系;应力在 $(0.5 \sim 0.8)f_c$ 范围内时,徐变与应力不成线性关系,徐变比应力增长要快,这种徐变称为非线性徐变,但徐变仍能收敛。

当应力大于 $0.8f_c$ 时,徐变不能收敛,最终将导致混凝土破坏。因此,在正常使用时混凝土应避免经常处于高应力状态,一般取 $0.8f_c$ 作为混凝土的长期抗压强度。

(2) 加载时混凝土龄期越长,水泥石晶体所占的比重越大,凝胶体的粘性流动就越少,徐变也就越小。

(3) 由于在总徐变值中还包括由于混凝土内部水分受到外力后,向外逸出而造成的徐变在内,因而,外界湿度越低,水分越易外逸,徐变就越大。

1.1.7.4 混凝土极限变形

混凝土的极限变形有极限压应变 ϵ_{cu} 与极限拉应变 ϵ_{tu} 。

1. 极限压应变

极限压应变 ϵ_{cu} 除与混凝土本身性质有关外,还与试验方法、截面的应变梯度等因素有关。

(1) 加载速度较快时,测得的极限压应变将减小。

(2) 当截面存在应变梯度时,应变小的纤维会帮助附近应变大的纤维受力,因而应变梯度越大 ϵ_{cu} 越大。

(3) 均匀受压的 ϵ_{cu} 一般可取为 0.002。偏心受压边缘的 ϵ_{cu} 大多在 $0.0025 \sim 0.005$ 范围内,计算取为 0.0033。

2. 极限拉应变

极限拉应变 ϵ_{tu} 比极限压应变 ϵ_{cu} 小得多,实测值也极为分散,约在 $0.5 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times$

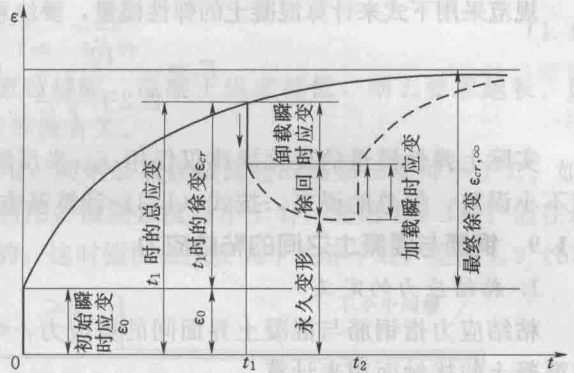


图 1.8 混凝土的徐变 (应变与时间增长的关系)