

混凝土结构

设计原理

蓝宗建◎主编

东南大学出版社

HUNNINGTU
JIEGOU
SHEJIYUANLI

混凝土结构设计原理

蓝宗建 主编

蓝宗建 梁书亭 孟少平 编著

东南大学出版社

·南京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构构件在各种受力状态下的工作性能、破坏形态、计算和构造原理以及实用设计方法,并有较多的计算实例,以帮助读者深刻理解混凝土结构设计,尤其是现行《混凝土结构设计规范》有关内容的科学原理和设计方法,在工程设计、施工中能正确地应用和执行。

本书是以现行《混凝土结构设计规范》为依据而编写的,全书均采用该规范的符号和法定计量单位。

本书可作为土木工程学科研究生教材,也可供土木工程技术人员、科学研究人员和高等院校师生阅读、参考。

主 编 蓝宗建

参 审 平心孟 李许梁 蓝宗建

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/蓝宗建主编. —南京:东南大学出版社,2008.1

ISBN 978-7-5641-1042-0

I. 混… II. 蓝… III. 混凝土结构—结构设计
—高等学校—教材 IV. TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 195024 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼2号 邮编 210096)

出版人:江 汉

全国各地新华书店经销 大丰市科星印刷有限责任公司

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:28.25 字数:687千字

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5641-1042-0/TU·138

印数:1~3 000 京 定价:50.00元

(凡因印装质量问题,可直接向读者服务部调换。电话:025-83792328)

前 言

在 20 世纪 80 年代,根据最新的科学研究成果和工程经验,我国编制了《混凝土结构设计规范》GBJ 10-89,这对统一土木工程结构设计标准和保证工程质量等方面起了重要的作用。1997 年以来,根据建设部 97 建标字 108 文,中国建筑科学研究院组织了全国有关高等学校和科研、设计、企业等单位,对《混凝土结构设计规范》GBJ 10-89 进行了全面修订,编制了《混凝土结构设计规范》GB 50010-2002。本书主编自始至终参加了上述两本规范的编制工作,是上述两本规范的主要起草人之一。为了配合上述两本规范的实施,帮助读者全面地、深刻地理解上述两本规范的有关内容,从而能正确地应用于工程设计和施工中,我们曾先后编写了《钢筋混凝土结构》和《混凝土结构设计原理》两本书。

这两本书出版后,得到了高等院校师生和工程技术人员的好评,并被一些高等院校作为土木工程学科研究生的教学用书或参考书。十多年来,这两本书先后作为东南大学土木工程学院的研究生教材,后者还被评为优秀研究生教材。为了更好地适应研究生教学的需要和便于工程技术人员和有关高等院校师生的阅读和参考,故对《混凝土结构设计原理》进行了修订,重新出版。

本书内容包括五部分:钢筋和混凝土的物理力学性能和设计指标以及以概率论为基础的极限状态设计方法;钢筋混凝土结构构件在各种受力状态下的受力机理及按承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算;预应力混凝土结构构件在各种受力状态下的受力机理及按承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算;工程中较常

遇到的结构构件(如叠合式受弯构件、深受弯构件和牛腿等)的设计;混凝土结构构件(如梁、柱、节点和剪力墙等)的抗震设计。

本书内容密切结合我国的工程实际,充分反映最新的科研成果(尤其是我国的科研成果),力求文字简练、深入浅出以及理论与实践相结合。全书在阐明基本概念和计算原理的基础上,介绍了工程设计中的实用计算方法,并列举了较多的设计实例。

本书由蓝宗建主编,蓝宗建、梁书亭、孟少平等共同编写。第1至第5章由蓝宗建和郭恒宁编写,第6至第9章由蓝宗建和孙娟编写,第10章由蓝宗建、周鲁敏、陈鲤梁编写,第11章至第13章由孟少平、蓝宗建编写,第14章和第15章由蓝宗建编写,第16章至第18章由梁书亭编写。此外,田玉基、邹宏德、杨东升、王新德、张敏、房良、王志远、童兴和龚进等参加了部分工作。

由于我们水平所限,时间又较仓促,书中难免有不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

本书可作为土木工程学科研究生的教材,也可供土木工程技术人员、科研人员和高等院校师生阅读、参考。

蓝宗建

2007年9月

目 录

1 钢筋混凝土材料的物理和力学性能	(1)
1.1 混凝土	(1)
1.2 钢筋	(11)
1.3 钢筋和混凝土的相互作用——粘结力	(15)
1.4 钢筋的锚固和连接	(17)
2 混凝土结构设计的基本原则	(21)
2.1 混凝土结构设计理论发展简史	(21)
2.2 结构的功能要求和极限状态	(22)
2.3 结构的可靠度和极限状态方程	(23)
2.4 可靠指标和目标可靠指标	(26)
2.5 极限状态设计表达式	(27)
2.6 材料强度指标	(30)
2.7 荷载代表值	(32)
2.8 混凝土结构耐久性设计规定	(33)
3 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力	(35)
3.1 受弯构件的一般构造要求	(35)
3.2 受弯构件正截面受力全过程和破坏特征	(37)
3.3 受弯构件正截面承载力计算的基本原则	(40)
3.4 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(45)
3.5 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(51)
3.6 单筋 T 形截面受弯构件正截面承载力计算	(57)
3.7 双向受弯构件正截面承载力计算	(65)
4 钢筋混凝土受压构件正截面承载力	(68)
4.1 配有纵向钢筋和普通箍筋的轴心受压构件承载力计算	(68)
4.2 配有纵向钢筋和螺旋箍筋的轴心受压构件承载力计算	(72)
4.3 偏心受压构件正截面的受力特点和破坏特征	(75)
4.4 偏心受压构件的二阶效应	(77)
4.5 偏心受压构件正截面承载力计算的基本原则	(84)
4.6 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(84)
4.7 I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(101)

4.8	环形和圆形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(105)
4.9	矩形截面双向偏心受压构件正截面承载力计算	(111)
4.10	受压构件的一般构造要求	(120)
5	钢筋混凝土受拉构件正截面承载力	(123)
5.1	轴心受拉构件正截面承载力计算	(123)
5.2	偏心受拉构件正截面承载力计算	(123)
5.3	双向偏心受拉构件正截面承载力计算	(126)
6	钢筋混凝土受弯构件和偏心受力构件斜截面承载力	(128)
6.1	受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态	(128)
6.2	影响受弯构件斜截面受剪承载力的主要因素	(132)
6.3	受弯构件斜截面受剪承载力计算	(135)
6.4	按抗弯条件保证斜截面承载力	(145)
6.5	箍筋和弯起钢筋的一般构造要求	(150)
6.6	受弯构件斜截面受剪承载力的计算步骤	(152)
6.7	偏心受力构件斜截面受剪承载力计算	(155)
6.8	矩形截面双向受剪的钢筋混凝土框架柱斜截面受剪承载力计算	(157)
7	钢筋混凝土受扭构件扭曲截面承载力	(160)
7.1	受扭构件的分类	(160)
7.2	纯扭构件的破坏特征和受扭承载力计算	(160)
7.3	在弯矩、剪力和扭矩共同作用下矩形截面构件的承载力计算	(171)
7.4	在弯矩、剪力、扭矩共同作用下 T 形和 I 形截面构件的承载力计算	(180)
7.5	在弯矩、剪力和扭矩共同作用下箱形截面构件的承载力计算	(182)
7.6	在轴向压力和扭矩共同作用下矩形截面构件的承载力计算	(183)
7.7	在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下矩形截面构件的承载力计算	(184)
7.8	钢筋混凝土结构构件的协调扭转	(184)
7.9	受扭构件的一般构造要求	(185)
8	钢筋混凝土受冲切和局部受压承载力	(186)
8.1	受冲切承载力	(186)
8.2	局部受压承载力	(194)
9	钢筋混凝土受弯构件的疲劳验算	(201)
9.1	混凝土和钢筋的疲劳性能	(201)
9.2	钢筋混凝土受弯构件的疲劳验算	(203)

10	钢筋混凝土构件裂缝和变形计算	(213)
10.1	裂缝和变形的计算要求.....	(213)
10.2	钢筋混凝土构件的抗裂度.....	(213)
10.3	钢筋混凝土构件的裂缝宽度计算.....	(217)
10.4	受弯构件的刚度和挠度计算.....	(234)
11	预应力混凝土结构的基本原理与计算原则	(243)
11.1	预应力混凝土的基本原理.....	(243)
11.2	预应力混凝土的分类.....	(245)
11.3	预应力混凝土的材料.....	(249)
11.4	预应力钢筋张锚体系.....	(252)
11.5	预应力混凝土结构计算的基本原则.....	(257)
11.6	预应力混凝土的构造要求.....	(265)
12	预应力混凝土构件的计算	(270)
12.1	预应力混凝土轴心受拉构件的计算.....	(270)
12.2	预应力混凝土受弯构件的计算.....	(285)
13	超静定预应力混凝土结构的设计	(315)
13.1	概述.....	(315)
13.2	主弯矩、次弯矩和综合弯矩.....	(317)
13.3	次弯矩的计算方法.....	(319)
13.4	荷载平衡法.....	(324)
13.5	预应力混凝土连续梁、板的设计.....	(327)
14	钢筋混凝土和预应力混凝土叠合式受弯构件的设计和构造	(335)
14.1	概述.....	(335)
14.2	叠合式受弯构件正截面受力特点和破坏特征.....	(336)
14.3	钢筋混凝土叠合式受弯构件按承载能力极限状态的计算.....	(338)
14.4	钢筋混凝土叠合式受弯构件按正常使用极限状态的计算.....	(341)
14.5	预应力混凝土叠合式受弯构件按承载能力极限状态的计算.....	(350)
14.6	预应力混凝土叠合式受弯构件按正常使用极限状态的计算.....	(351)
14.7	叠合式受弯构件的构造要求.....	(353)
15	深受弯构件和牛腿的设计和构造	(355)
15.1	深受弯构件的受力特点和破坏特征.....	(355)
15.2	深受弯构件的抗裂度、承载力计算和构造要求.....	(358)
15.3	牛腿的受力特点和破坏特征.....	(369)
15.4	牛腿的抗裂计算和承载力计算及构造要求.....	(372)

16 混凝土结构构件抗震设计的一般规定	(376)
16.1 概述.....	(376)
16.2 一般规定.....	(377)
16.3 材料.....	(380)
17 钢筋混凝土框架结构构件的抗震设计	(383)
17.1 框架结构的震害及其分析.....	(383)
17.2 钢筋混凝土框架结构抗震设计的基本原则.....	(385)
17.3 框架梁的抗震设计.....	(386)
17.4 框架柱的抗震设计.....	(392)
17.5 铰接排架柱的抗震设计.....	(401)
17.6 框架节点的抗震设计.....	(403)
17.7 预应力混凝土结构构件的抗震设计.....	(412)
18 剪力墙的抗震设计	(414)
18.1 剪力墙的受力性能及其震害分析.....	(414)
18.2 剪力墙的抗震设计原则.....	(414)
18.3 剪力墙正截面承载力的计算.....	(415)
18.4 剪力墙斜截面受剪承载力的计算.....	(420)
18.5 剪力墙洞口处连梁的抗震验算.....	(423)
18.6 剪力墙的抗震构造措施.....	(424)
附 录	(432)
参考文献	(441)

1 钢筋混凝土材料的物理和力学性能

1.1 混凝土

1.1.1 混凝土的强度

在设计和施工中常用的混凝土强度可分为立方体强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度等。现分别叙述如下。

1) 混凝土立方体强度

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主要指标。混凝土立方体强度不仅与养护时的温度、湿度和龄期等因素有关,而且与试件的尺寸和试验方法也有密切关系。在一般情况下,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,它将像两道套箍一样将试件套住,延缓了裂缝的发展,从而提高了试件的抗压强度。破坏时,试件中部剥落,其破坏形状如图 1-1a 所示。如果在试件的上下表面涂上润滑剂,试验时摩阻力就大大减小,所测得的抗压强度较低,其破坏形状如图 1-1b 所示。工程中实际采用的是不加润滑剂的试验方法。试验还表明,立方体的尺寸不同,试验时测得的强度也不同,立方体尺寸愈小,摩阻力的影响愈大,测得的强度也愈高。新《规范》* 规定,混凝土立方体强度,系指按标准方法制作、养护的边长为 150 mm 的立方体试件,在 28 d(天)龄期,用标准试验方法测得的抗压强度。

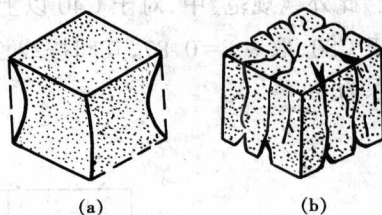


图 1-1 混凝土立方体受压破坏特征

在生产实际中,有时也采用边长为 100 mm 或 200 mm 的立方体试件,则所测得的立方体强度应分别乘以换算系数 0.95 或 1.05。

《规范》所规定的混凝土强度等级用符号 C 表示,系按立方体抗压强度标准值确定,亦即按上述方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度(详见第二章 2.6.2 节)。

《规范》规定的混凝土强度等级有 14 级,为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80。在钢筋混凝土结构中,混凝土强度等级不应低于 C15;当采用 HRB335 级钢筋时,混凝土强度等级不应低于 C20;当采用 HRB400 和 RRB400 级钢筋以及对承受重复荷载的构件,混凝土强度等级不得低于 C20。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C30;当采用预应力钢丝、钢绞线、热处理钢筋作预应力钢筋时,混凝土强度等级不宜低于 C40。当采用山砂混凝土及高炉矿渣混凝土时,尚应符合专门规程的规定。

2) 混凝土轴心抗压强度(棱柱体强度)

如前所述,混凝土的抗压强度与试件尺寸和形状有关。在实际工程中,一般的受压构件

* 对《混凝土结构设计规范》GB 50010-2002,在本书中简称为《规范》。

不是立方体而是棱柱体,即构件的高度要比截面的宽度或长度大。因此,有必要测定棱柱体的抗压强度,以更好地反映构件的实际受力情况。试验表明,棱柱体试件的抗压强度较立方体试件的抗压强度低。棱柱体试件高度 l_0 与截面的边长 b 之比愈大,则强度愈低。当高宽比由 1 增至 2 时,混凝土强度降低很快。但是当高宽比由 2 再增大到 4 时,其抗压强度变化不大。这是因为在此范围内,既可消除垫板与试件接触之间摩阻力对抗压强度的影响,又可避免试件因纵向弯曲而产生的附加偏心距对抗压强度的影响,测得的棱柱体抗压强度较稳定。因此,国家标准《普通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 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的试件为标准试件。

棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之间的关系很复杂,与很多因素有关。例如试件大小、混凝土组成材料的性质、试验方法等等。对于普通混凝土(C50 及以下),根据国内 349 组棱柱体($l_0/b = 3 \sim 4$)的强度试验结果,在立方体($200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$)强度 $f_{cu(200)}^\circ$ (上标 \circ 表示实测值,下同)为 $16 \sim 50\text{ N/mm}^2$ 的范围内,轴心抗压强度与立方体($200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$)强度之比平均为 0.80。图 1-2 示出 122 组截面为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的棱柱体抗压强度的试验结果。按《规范》,采用 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体强度 f_{cu}° 时,则轴心抗压强度与立方体强度的比值 α_{c1} 平均值为 0.76。近年来,对于高强混凝土的试验结果表明,轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值 α_{c1} 大于 0.76。因此,在《规范》中,对 C50 及以下取 $\alpha_{c1} = 0.76$,对 C80 取 $\alpha_{c1} = 0.82$,其间按线性插入。考虑到试件尺寸不统一,试件与实际结构受力情况有差异,以及多年来的工程实践经验,将 α_{c1} 乘以系数 0.88 予以修正。此外,《规范》中,对于 C40 以上混凝土考虑了脆性折减系数 α_{c2} ,对于 C40,取 $\alpha_{c2} = 1.0$,对于 C80,取 $\alpha_{c2} = 0.87$,其间按线性插入。于是可得轴心抗压强度 f_c° 与立方体强度 f_{cu}° 的关系为

$$f_c^\circ = 0.88 \alpha_{c1} \alpha_{c2} f_{cu}^\circ \quad (1-1)$$

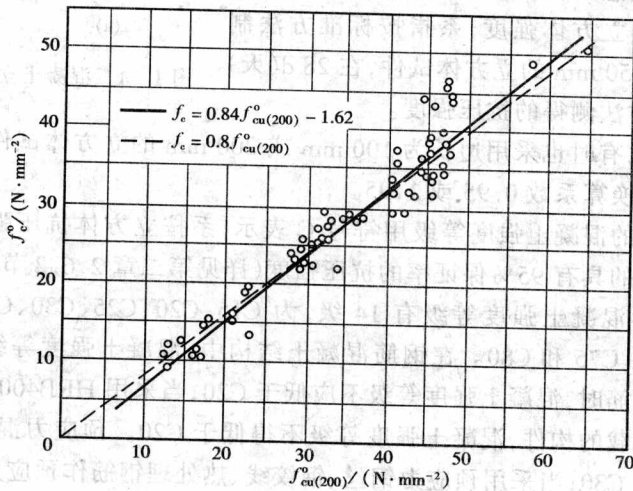


图 1-2 混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

3) 混凝土轴心抗拉强度

混凝土轴心抗拉强度和轴心抗压强度一样,都是混凝土的重要基本力学指标。但是,混

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 $\frac{1}{18} \sim \frac{1}{8}$ ，其比值随着混凝土强度的增大而减小。在实际工程中，为了防止和减少混凝土的裂缝，提高混凝土的抗裂性能，希望尽可能提高它的抗拉强度。

大量试验表明，即使是抗压强度基本相同的混凝土，不同的研究者所测得的抗拉强度也不相同，甚至差别很大。其原因除了试件大小、形状及养护条件不同外，试验方法不同也是一个重要因素。

混凝土抗拉强度的试验方法主要有三种：直接轴向拉伸试验、弯折试验和劈裂试验。

采用直接轴向拉伸试验时，由于安装试件时很难避免较小的歪斜和偏心，或者由于混凝土的不均匀性，其几何中心往往与物理中心不重合，所有这些因素都会对实测的混凝土轴心抗拉强度有较大的影响，试验结果的离散程度是较大的。采用弯折试验时，由于混凝土的塑性性能，不能测得混凝土的真实抗拉强度。因此，目前国内外常采用立方体或圆柱体的劈裂试验来测定混凝土轴心抗拉强度。

如图 1-3 所示，在卧置的立方体(或圆柱体)与加载板之间放置一压条，使上下形成对应条形加载。这样，在竖直面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(如图 1-3b 所示)，从而形成劈裂破坏。对于立方体和圆柱体，其抗拉强度可采用下列公式计算：

$$f_t^o = \frac{2N}{\pi dl} = 0.637 \frac{N}{dl} \quad (1-2)$$

式中 f_t^o ——混凝土轴心抗拉强度(实测值)；
 N ——劈裂荷载；
 d ——立方体边长或圆柱体直径；
 l ——立方体边长或圆柱体长度。

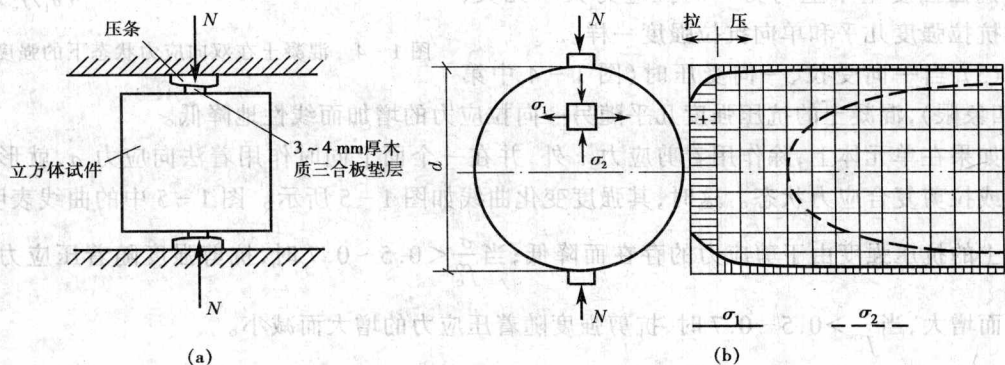


图 1-3 混凝土的劈裂试验

必须指出，加载压条、垫层和试件尺寸对劈裂试验的结果都有一定影响，垫层尺寸愈大，抗拉强度试验值愈大。由于混凝土是非匀质脆性材料，随着受拉断面尺寸的增大，内部薄弱环节增多，抗拉强度相应降低。

对于混凝土抗拉强度与抗压强度的关系，国内外进行了大量的试验研究，由于试验方法、原材料性质和试件尺寸等具体条件不同，试验结果尚不很一致。根据国家建设委员会建筑科学研究院等单位的试验结果，混凝土的轴心抗拉强度 f_t^o 与立方体强度 f_{cu}^o 的关系如下：

$$f_t^o = 0.26(f_{cu}^o)^{2/3} \quad (1-3)$$

与轴心抗压强度相类似,取修正系数 0.88,则混凝土轴心抗拉强度为

$$f_t^o = 0.88 \times 0.26(f_{cu}^o)^{2/3} = 0.23(f_{cu}^o)^{2/3} \quad (1-4)$$

近年来,我国对高强混凝土进行了不少研究。在对高强混凝土的试验数据和原有的试验数据进行综合分析后,对于混凝土轴心抗拉强度 f_t^o 与立方体抗压强度 f_{cu}^o 的关系,《规范》采用了下列公式:

$$f_t^o = 0.88 \times 0.395(f_{cu}^o)^{0.55} \alpha_{c2}$$

$$f_t^o = 0.348(f_{cu}^o)^{0.55} \alpha_{c2} \quad (1-5)$$

则

4) 复合应力状态下的混凝土强度

在钢筋混凝土结构中,混凝土一般都处于复合应力状态。例如,钢筋混凝土梁剪弯段的剪压区,框架中梁与柱的节点区,后张法预应力钢筋混凝土锚固区等等。在复合应力状态下,混凝土的强度和变形性能有明显的变化。

双向应力状态,亦即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 1-4 所示,其强度变化规律的特点如下:

(1) 当双向受压时(图 1-4 中第三象限),一向的强度随另一向压应力的增加而增加,当横向应力与轴向应力之比为 0.5 时,其强度比单向抗压强度增加 25% 左右。而在两向压应力相等的情况下,其强度仅增加 16% 左右。

(2) 当双向受拉时(图 1-4 中第一象限),一向的抗拉强度基本上与另一向拉应力大小无关,即其抗拉强度几乎和单向抗拉强度一样。

(3) 当一向受拉、一向受压时(图 1-4 中第二、四象限),混凝土的抗压强度几乎随另一向拉应力的增加而线性地降低。

如果在单元体上,除作用着剪应力 τ 外,并在一个面上同时作用着法向应力 σ ,就形成压剪或拉剪复合应力状态。这时,其强度变化曲线如图 1-5 所示。图 1-5 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 $\frac{\sigma}{f_c^o} < 0.5 \sim 0.7$ 时,抗剪强度随着压应力的增大而增大,当 $\frac{\sigma}{f_c^o} > 0.5 \sim 0.7$ 时,抗剪强度随着压应力的增大而减小。

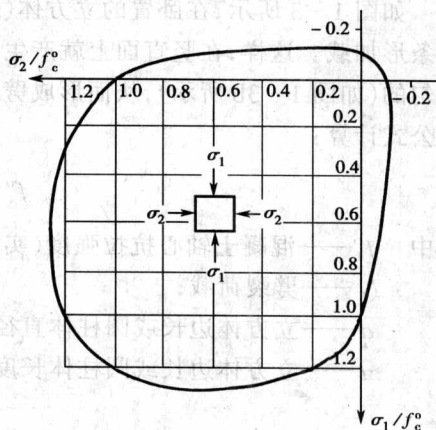


图 1-4 混凝土在双向应力状态下的强度

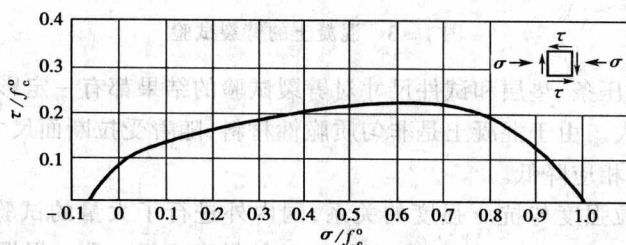


图 1-5 混凝土在法向应力和剪应力组合下的强度

混凝土三向受压时,混凝土一向抗压强度随另二向压应力的增加而增加,并且混凝土的极限应变也大大增加。

混凝土圆柱体三向受压的轴向抗压强度 f_{cc}° 与侧压力 σ_r 之间的关系可用下列经验公式表示:

$$f_{cc}^{\circ} = f_c^{\circ} + k\sigma_r \quad (1-6)$$

式中 k 为侧压效应系数,侧向压力较低时,其值较大。为简化起见,可取为常数。较早的试验资料给出 $k=4.1$,后来的试验资料给出 $k=4.5\sim 7.0$ 。

根据近来的大量试验资料,尤其是在高侧压力下的试验资料,我国学者蔡绍怀建议采用下列公式:

$$f_{cc}^{\circ} = f_c^{\circ} \left(1 + 1.5 \sqrt{\frac{\sigma_r}{f_c^{\circ}}} + 2 \frac{\sigma_r}{f_c^{\circ}} \right) \quad (1-7)$$

在工程实践中,为了进一步提高混凝土的抗压强度,常常用横向钢筋来约束混凝土。例如,螺旋箍筋柱、钢筋混凝土铰和装配式柱的接头等等,它们都是用密排螺旋钢筋或矩形箍筋来约束混凝土以限制其横向变形,使混凝土处于三向受压的应力状态,从而大大提高混凝土的抗压强度和延性。

1.1.2 混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类。一类是由于受力而产生的变形;另一类是由收缩和温湿度变化而产生的变形。

1) 混凝土在一次短期加荷时的变形性能

(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特性的一个重要方面,在钢筋混凝土结构承载力计算、变形验算、超静定结构内力重分布分析以及结构延性计算等方面,它都是理论分析的基本依据。特别是近代在采用电子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必不可少的依据。

典型的混凝土应力-应变曲线包括上升段和下降段两部分(图 1-6)。在上升段,当应力较小时,一般在 $(0.3\sim 0.4)f_c^{\circ}$ 以下时,混凝土可视为线弹性体,超过 $(0.3\sim 0.4)f_c^{\circ}$ 时,应力-应变曲线逐渐弯曲(在图 1-6 中, ϵ_{ce} 为弹性应变, ϵ_{cp} 为塑性应变)。当应力达到峰值点 C 后,曲线开始下降。在下降段,曲线渐趋平缓,并有一个反弯点 (D 点)。

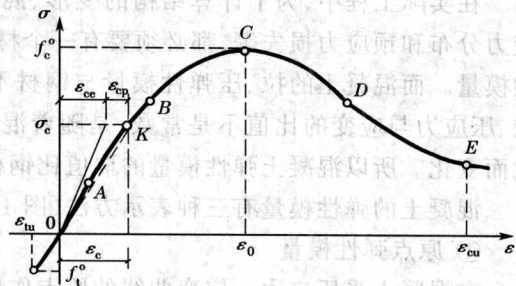


图 1-6 混凝土应力-应变曲线

影响混凝土应力-应变曲线的因素很多,诸如混凝土的强度、组成材料的性质、配合比、龄期、试验方法以及箍筋约束等。试验表明,混凝土强度对其应力-应变曲线有一定的影响。如图 1-7 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,则应力峰值点处的应变也稍大些。对于下降段,混凝土强度有较大的影响,混凝土强度愈高,应力下降愈剧烈,延性也就愈差。加荷速度也影响着混凝土应力-应变曲线的形状。图 1-8 所示为相同强度的混凝土在不同应变速度下的应力-应

变曲线。由图中可见,应变速度愈大,下降段愈陡,反之,下降段要平缓些。

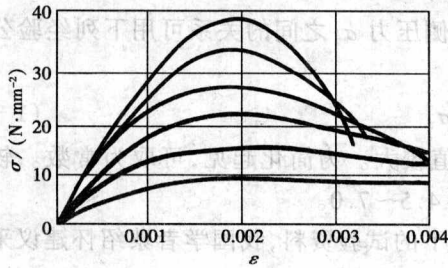


图 1-7 不同强度混凝土的受压应力-应变曲线

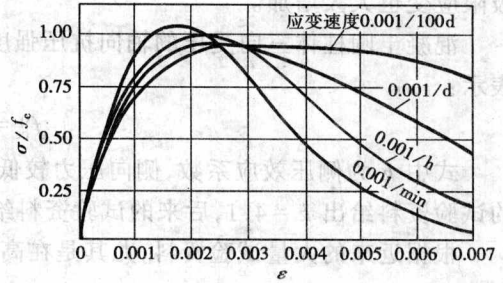


图 1-8 不同应变速度下的混凝土应力-应变曲线

(2) 混凝土受压时纵向应变与横向应变的关系

在一次短期加压时,混凝土除了在纵向产生压缩应变外,还将在横向产生膨胀应变,横向应变与纵向应变的比值,称为横向变形系数,又称为泊松比 ν_c 。

试验表明,在不同应力下,横向变形系数的变化如图 1-9 所示。当混凝土应力小于 $0.5f_c$ 时,横向变形系数基本上保持为常数(《规范》中取 $\nu_c = 0.2$)。当混凝土压应力超过 $0.5f_c$ 时,横向变形系数逐渐增大,应力愈高,增大的速度愈快。

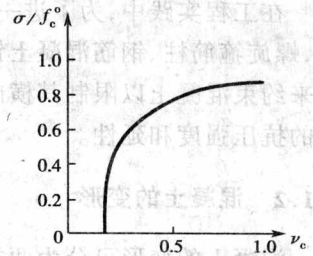


图 1-9 混凝土横向变形系数与应力的关系

试验还表明,混凝土体积应变 ϵ_v 与应力的关系如图 1-10 所示。当混凝土压应力较小时,体积随压应力增大而减小。然后,随压应力增大,体积又重新增大,最后,竟超过了原来的体积。

(3) 混凝土的弹性模量、变形模量和剪变模量

在实际工程中,为了计算结构的变形、混凝土及钢筋的应力分布和预应力损失等,都必须要有个材料常数——弹性模量。而混凝土的拉、压弹性模量与钢材不同,混凝土的拉、压应力与应变的比值不是常数,是随着混凝土的应力变化而变化。所以混凝土弹性模量的取值比钢材复杂得多。

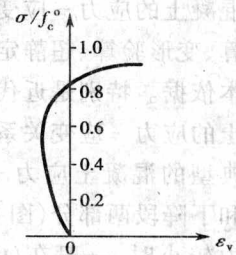


图 1-10 混凝土体积应变与应力的关系

混凝土的弹性模量有三种表示方法(图 1-11):

① 原点弹性模量

在混凝土受压应力-应变曲线的原点作切线,该切线的斜率即为原点弹性模量(简称弹性模量),即

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ce}} = \tan \alpha_0 \quad (1-8)$$

② 变形模量

连接混凝土应力-应变曲线的原点 O 及曲线上某一点 K 作一割线, K 点混凝土应力为 σ_c ,则该割线(OK)的斜率即为变形模量,也称为割线模量或弹塑性模量,即

$$E'_c = \tan \alpha_1 = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \quad (1-9)$$

③ 切线模量

在混凝土应力-应变曲线上某一应力 σ_c 处作一切线,该切线的斜率即为相应于应力 σ_c 时的切线模量,即

$$E'_c = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (1-10)$$

在某一应力 σ_c 下,混凝土应变 ϵ_c 可认为是由弹性应变 ϵ_{ce} 和塑性应变 ϵ_{cp} 两部分组成。于是混凝土的变形模量与弹性模量的关系为

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_c} \cdot \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ce}} = \nu E_c \quad (1-11)$$

式中 ν ——弹性特征系数,即 $\nu = \epsilon_{ce}/\epsilon_c$ 。

弹性特征系数 ν 与应力值有关,当 $\sigma_0 = 0.5f_c^0$ 时, $\nu = 0.8 \sim 0.9$, 当 $\sigma_c = 0.9f_c^0$ 时, $\nu = 0.4 \sim 0.8$ 。一般情况下,混凝土强度愈高, ν 值愈大。

对于混凝土弹性模量 E_c , 目前各国还没有统一的试验方法。显然,在混凝土一次加荷的应力-应变曲线上作原点的切线,以求得 α_0 的准确值是不容易的(由于试验结果很不稳定)。我国《规范》规定的弹性模量是按下述方法确定的:在试验的棱柱体上先加荷至 $0.5f_c^0$, 然后卸荷至零,再重复加荷、卸荷 5 次,并按应力为 $0.5f_c^0$ 时的变形值计算其弹性模量。《普通混凝土力学性能试验方法》对上述试验方法略作修改,将加荷的应力改为 $0.4f_c^0$, 加荷、卸荷重复次数改为 3 次。由于混凝土不是弹性材料,每次卸荷至应力为零时,变形不能全部恢复,即存在残余变形。随着加荷、卸荷次数的增加,应力-应变曲线渐趋于稳定,并基本上接近直线。该直线的斜率即为混凝土的弹性模量。试验结果表明,按上述方法测得的弹性模量比按应力-应变曲线原点切线斜率确定的弹性模量要略低一些。

根据中国建筑科学研究院对 387 个试件的实测结果,混凝土的受压弹性模量与边长为 200 mm 的立方体强度 $f_{cu(200)}$ 关系(图 1-12)为

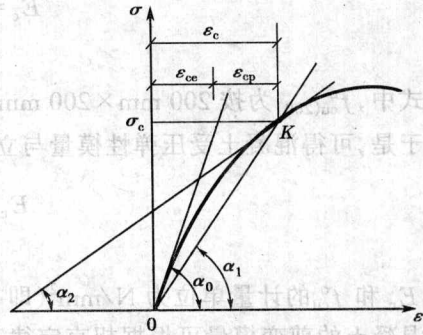


图 1-11 混凝土的弹性模量、变形模量和切线模量

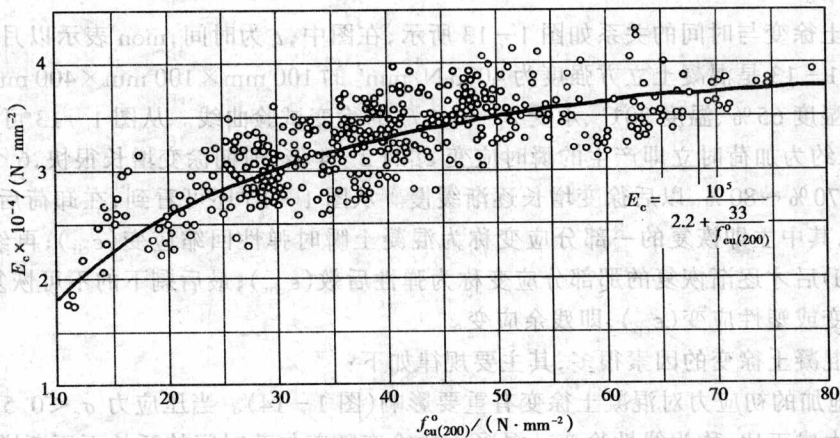


图 1-12 混凝土弹性模量与混凝土强度的关系

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{33}{f_{cu}^{\circ}(200)}} \quad (1-12)$$

式中, $f_{cu}^{\circ}(200)$ 为按 200 mm × 200 mm × 200 mm 立方体试件测得的立方体抗压强度。

于是, 可得混凝土受压弹性模量与立方体强度 f_{cu}° 的关系为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}^{\circ}}} \quad (1-13)$$

式中 E_c 和 f_{cu}° 的计量单位为 N/mm^2 (即 $N \cdot mm^{-2}$)。

混凝土的剪变模量可根据胡克定律, 按下式确定:

$$G_c = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1-14)$$

式中 τ ——剪应力;

γ ——剪应变。

由于目前还没有适当的抗剪试验方法, 要通过试验求得混凝土的剪变模量是困难的, 所以混凝土的剪变模量 G_c 一般可根据抗压试验测得的弹性模量 E_c 和泊松比按下式确定:

$$G_c = \frac{E_c}{2(\nu_c + 1)} \quad (1-15)$$

在《规范》中取 $\nu_c = 0.2$, $G_c = 0.43E_c$, 故近似取 $G_c = 0.4E_c$ 。

2) 混凝土在长期荷载作用下的变形性能

在荷载的长期作用下, 混凝土的变形将随时间而增加, 亦即在应力不变的情况下, 混凝土的应变随时间继续增长, 这种现象称为混凝土的徐变。徐变对钢筋混凝土和预应力混凝土结构有着有利和不利两方面的影响。在某些情况下, 徐变有利于防止结构物的裂缝形成, 同时还有利于结构或构件内力重分布。但在预应力混凝土结构中, 徐变则引起预应力损失。徐变变形还可能超过弹性变形, 甚至达到弹性变形的 2~4 倍, 因而能够改变超静定结构的应力状态, 所以对混凝土徐变的试验研究已为大家所重视。

混凝土徐变的主要原因是由于在荷载长期作用下, 混凝土凝胶体中的水分逐渐析出, 水泥石逐渐粘性流动, 微细空隙逐渐闭合, 结晶内部逐渐滑动, 微细裂缝逐渐发生等各种因素的综合结果。

混凝土徐变与时间的关系如图 1-13 所示, 在图中, t 为时间, mon 表示以月 (month) 为单位。图 1-13 是混凝土立方强度为 $40.3 N/mm^2$ 的 $100 mm \times 100 mm \times 400 mm$ 棱柱体试件在相对湿度 65%、温度 $20^\circ C$ 、承受 $\sigma_c = 0.5f_c^{\circ}$ 的徐变试验曲线。从图 1-13 可见, 24 个月的徐变 ϵ_{cc} 约为加荷时立即产生的瞬时应变 ϵ_{ci} 的 2~4 倍, 前期徐变增长很快, 6 个月可达最终徐变的 70%~80%, 以后徐变增长逐渐缓慢。从图 1-13 还可看到, 在卸荷后, 应变会恢复一部分, 其中立即恢复的一部分应变称为混凝土瞬时弹性回缩应变 (ϵ_{cir}); 再经过一段时间 (约 20 d) 后才逐渐恢复的那部分应变称为弹性后效 (ϵ_{chr}); 最后剩下的不可恢复的应变称为永久应变或塑性应变 (ϵ_{cp}), 即残余应变。

影响混凝土徐变的因素很多, 其主要规律如下:

(1) 施加的初应力对混凝土徐变有重要影响 (图 1-14)。当压应力 $\sigma_c < 0.5f_c^{\circ}$ 时, 徐变大致与应力成正比, 称为线性徐变。混凝土的徐变随着加荷时间的延长而逐渐增加, 在加荷初期增加很快, 以后逐渐减缓以致停止; 当压应力 $\sigma_c > 0.5f_c^{\circ}$ 时, 徐变的生长较应力的增大