

HUNNINGTUJIEGOU

YINANSHIYIJI

JIETIZHIDAO

土 木 工 程 辅 导 丛 书

混凝土结构

疑难释义及解题指导

主编 朱玉华 赵 昕



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

土木工程辅导丛书

TU37

53

2006

混凝土结构

疑难释义及解题指导

主编 朱玉华 赵 昕



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为高等院校土木工程专业“混凝土结构”课程的教学参考书。

全书分为疑难释义、思考题、解题指导和习题四个部分。“疑难释义”部分结合规范,对混凝土结构中较深入的疑难问题,从基本理论和基本概念上进行释义。“解题指导”部分精选了各类有代表性的题目,通过指导解题思路及解题技巧进行解答。

本书可作为高等院校土建类专业师生的教学辅导教材,也可供从事土建工作的技术人员实施新规范时作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构疑难释义及解题指导/朱玉华,赵昕主编.

上海:同济大学出版社,2006.12

(土木工程辅导丛书)

ISBN 7-5608-3387-X

I. 混… II. ①朱…②赵… III. 混凝土结构—高等学校—教学参考资料 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 133293 号

土木工程辅导丛书

混凝土结构疑难释义及解题指导

朱玉华 赵 昕 主编

责任编辑 马继兰 责任校对 谢惠云 封面设计 陈益平

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 14.5

字 数 290 千

印 数 1—3100

版 次 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-3387-X/TU·694

定 价 25.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

本书是全面结合新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)编写的为了配合混凝土结构课堂教学,引导学生深入学习的参考书。全书分为疑难释义、思考题、解题指导和习题四个部分。“疑难释义”部分对混凝土结构中难点、重点进行了分析释义;“思考题”部分结合疑难问题进一步启发学生对有关问题进行深入思考;“解题指导”部分着重对混凝土结构中的典型题目的解题思路进行分析,并在解题过程中进一步深化对基本概念的理解和掌握;“习题”部分可以作为辅助课堂学习之用,习题附有答案,可供参考。

考虑到学生在学习混凝土课程时普遍感觉到“内容多、概念多、公式多、构造规定多”,复习时抓不住要领。在编写本书时,注重条理性的梳理和重点、难点的讲解,对一些教科书上很容易查到的概念、问题,尽量少费笔墨,而对于一些重要的难点、学生容易混淆、似是而非的问题,则尽可能讲深、讲透,力图使本书能起到指点迷津的作用。

本书同时编入了一些最新的实际应用类题目,如国家一级注册结构工程师考试的典型试题,实际工程中值得探讨、思考的问题等,使本书更具实用价值。

本书附有部分试题,选自同济大学建筑工程系历届学生模拟考卷及部分其他院校的模拟试题,可供学习时参考。

本书为高等院校土木工程专业“混凝土结构”课程的教学参考书,也可作为结构工程专业研究生入学考试前复习参考,同时可为国家一级注册结构工程师考试前复习提供参考。

本书结合新修订的规范,从基本理论和基本概念上进行释义,精选各类有代表性的题目,通过指导解题思路及解题技巧,进行解答,对从事混凝土结构教学和设计的人员实施新规范也可提供参考。

本书编者有教学第一线的教师,也有设计第一线的工程师,并均具有博士学位。朱玉华编写第1,2,3,5,9章及第13章,张盛东编写第4章,黄慎江编写第6章,朱杰江编写第7,8章,苏小卒编写第10章,李东编写第11,12章。赵昕编写了国家一级注册师部分试题的参考答案及实际工程中的一些问题,完成了附录1中的习题解答,并对全书内容进行了校核,岳昌智完成了附录2中同济大学及部分院校混凝土结构试题的收集与解答。全书由朱玉华、赵昕整理、统稿。

限于编者水平,书中不当乃至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2006年7月

目 次

前言

第 1 章	概述	(1)
1.1	疑难释义	(1)
第 2 章	钢筋和混凝土材料的力学性能	(5)
2.1	疑难释义	(5)
2.2	思考题	(22)
第 3 章	结构设计方法	(24)
3.1	疑难释义	(24)
3.2	思考题	(34)
3.3	解题指导	(35)
3.4	习题	(42)
第 4 章	钢筋混凝土受弯构件正截面承载力	(43)
4.1	疑难释义	(43)
4.2	思考题	(53)
4.3	解题指导	(54)
4.4	习题	(66)
第 5 章	钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力	(68)
5.1	疑难释义	(68)
5.2	思考题	(76)
5.3	解题指导	(76)
5.4	习题	(83)
第 6 章	钢筋混凝土受扭构件	(85)
6.1	疑难释义	(85)
6.2	思考题	(96)
6.3	解题指导	(97)
6.4	习题	(106)
第 7 章	钢筋混凝土受压构件	(108)
7.1	疑难释义	(108)
7.2	思考题	(118)

7.3	解题指导	(119)
7.4	习题	(129)
第 8 章	钢筋混凝土受拉构件	(132)
8.1	疑难释义	(132)
8.2	思考题	(134)
8.3	解题指导	(134)
8.4	习题	(137)
第 9 章	钢筋混凝土构件的裂缝和变形	(138)
9.1	疑难释义	(138)
9.2	思考题	(145)
9.3	解题指导	(145)
9.4	习题	(152)
第 10 章	预应力混凝土构件	(154)
10.1	疑难释义	(154)
10.2	思考题	(159)
10.3	解题指导	(159)
10.4	习题	(174)
第 11 章	钢筋混凝土梁板结构	(176)
11.1	疑难释义	(176)
11.2	思考题	(185)
11.3	解题指导	(186)
11.4	习题	(190)
第 12 章	钢筋混凝土单层厂房结构	(191)
12.1	疑难释义	(191)
12.2	思考题	(200)
第 13 章	钢筋混凝土框架结构	(201)
13.1	疑难释义	(201)
13.2	思考题	(206)
附录 1	习题参考答案	(208)
附录 2	同济大学及部分院校钢筋混凝土结构试题及解答	(211)
参考文献		(225)

第1章 概述

1.1 疑难释义

1.1.1 混凝土结构包含的结构形式及其特点?

我国国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构。混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和新性能的混凝土结构,如高性能混凝土结构、纤维增强混凝土结构和劲性混凝土结构。

(1) 素混凝土结构指只用混凝土一种材料制作而成的结构。这种结构承载力低,易开裂、破坏前无预兆,一般只用作基础的垫层或室内外地坪。

(2) 钢筋混凝土结构是指配置了钢筋但并未对其施加预应力的结构。在钢筋混凝土结构中,根据结构和构件的受力特点,在适当部位布置一定数量的钢筋,可大大提高构件的承载力,同时可改善素混凝土结构和构件破坏的脆性性能。

(3) 预应力混凝土结构是指在结构承受荷载之前预先施加了应力的结构。由于混凝土抗压强度高,抗拉强度低,抗压极限应变大,抗拉极限应变小,因此,钢筋混凝土结构在正常使用荷载下总是带裂缝工作的。如果在受力前预先施加压应力,抵消或减少外荷载产生的拉应力,使构件在正常使用荷载下不开裂,或者裂缝开展晚一些、裂缝开展的宽度小一些,可改善钢筋混凝土结构的使用性能。

(4) 高性能混凝土结构是具有高强度、高耐久性、高流动性、高抗震性能、抗渗、抗冲击等优点的混凝土结构。我国《高强混凝土结构设计施工指南》将混凝土等级 $\geq C50$ 的混凝土划定为高强混凝土。高强混凝土具有优良的物理力学性能和良好的耐久性,但受压时呈高度脆性,延性较差,需按有关设计标准正确采用高强混凝土。

(5) 纤维增强混凝土有钢纤维、碳纤维、玻璃纤维混凝土等。在普通混凝土结构中加入适当的纤维材料,可以提高混凝土结构的抗拉、抗剪、抗折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆等性能。钢纤维混凝土结构常用于预制桩的桩尖和桩顶、抗震框架节点、刚性防水屋面等。碳纤维混凝土结构目前广泛应用于结构的加固补强。

(6) 采用型钢或用钢板焊接成型钢形式作为混凝土结构的配筋,称为劲性钢筋混凝土。为了保证劲性钢筋与混凝土协同工作,充分发挥劲性钢筋的承载力,在劲性钢筋混凝土结构中,要设置适量的纵向受力钢筋和箍筋。

1.1.2 混凝土结构必须具备哪些抵御灾害的能力?

混凝土结构在使用过程中难免会遇到各种自然灾害(如地震作用、风灾、洪水等)

和人为灾害(如火灾、爆炸、冲撞)等。混凝土结构必须具备一定的抵御这些灾害的能力。

(1) 抵御自然灾害的能力

地震是一种自然现象,全球每年都要发生数十次破坏性地震。近几十年来,工程结构抗震研究已取得长足进步,分析模型和分析理论都日趋合理和成熟,抗震措施也已在实际地震中得到检验,这些成果已反映在现行的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中。因此,混凝土结构考虑地震作用时,需按《建筑抗震设计规范》进行设计。

建筑结构、特别是高层建筑、高耸建筑、大跨桥梁对风荷载的作用特别敏感,要求具有一定的抗风能力。风荷载是一种随机性的荷载,风振动理论研究非常复杂,需通过大量实测统计和风洞试验进行研究。目前国内在这方面已取得可喜进展。

(2) 抵御人为灾害的能力

钢筋混凝土结构具有较好的抗火性能,但遭受火灾后由于高温作用,会降低结构承载力,加大结构变形,使结构局部倒塌甚至失效。火灾对混凝土结构的粘结力的影响还有待进一步研究。车辆冲撞道路护栏,船只冲撞桥墩和岸堤,都可引起事故。因此,钢筋混凝土结构应有较好的抗冲撞能力。

1.1.3 混凝土结构课程有什么特点?

混凝土结构通常是由钢筋和混凝土两种材料组合而成的复合材料,而且,混凝土是非均匀、非连续、非弹性的材料。这与材料力学中单一、匀质、连续的弹性材料有很大不同。

(1) 钢筋混凝土结构需考虑两种材料在数量上和强度上的匹配问题。如果钢筋和混凝土在截面面积上的比例和材料强度上的匹配超过一定的界限,则会引起构件受力性能的改变。这是单一材料构件所没有的特点,而对于钢筋混凝土结构,则是一个既具有基本理论意义、又有工程实际意义的问题。

(2) 设计的综合性

本课程和力学课程不同,材料力学、结构力学侧重于构件的应力(或内力)和变形的计算,答案往往是唯一的。而混凝土结构要解决的不仅是强度和变形计算问题,更主要的是构件和结构的设计,包括材料选择、结构方案、构件类型和配筋构造等。结构设计是一个综合性问题。

(3) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)(以下简称《规范》)的学习和运用

为了贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量达到设计上必要的统一,国家颁布了《规范》。《规范》是国家制定的有关结构设计计算和构造要求的技术规定和标准,是具有约束性和立法性的文件,是设计、校核、审批结构工程设计的依据。但是,在学习规范有关条文时,要注重对基本概念和原理有正确理解,不能局限于规范的条文、表格等。

(4) 构造要求的重要性

混凝土结构设计需进行大量计算,但现行的实用计算方法一般只考虑了荷载效应。其他因素如混凝土收缩、温度影响以及地基不均匀沉降等,难于用公式表达。《规范》根据长期工程实践经验,总结出一些构造措施来考虑这些因素的影响。因此,学习本课程时,除了要了解掌握计算公式以外,对于各种构造措施,也必须给予足够重视。

1.1.4 我国混凝土结构的通用符号是根据什么标准确定的?

混凝土结构的符号体系是由主体符号或带上、下标的主体符号构成。主体符号一般代表物理量,上、下标则代表物理量以外的术语或说明语(说明材料种类、受力状态、部位、方向、原因、性质等),以进一步说明主体符号的含义。

主体符号应以一个字母表示,上、下标可采用字母、缩写词、数字或其他标记表示。上标一般只有一个,下标可采用一个或多个。当采用一个以上的下标时,可根据表示材料的种类、受力状态、部位、方向、原因、性质等的次序排列。

各符号的书写和印刷规则如下:

(1) 主体符号

主体符号采用下列三种字母,一律用斜体字母书写和印刷:

斜体大写拉丁字母:如 M, V, N ;

斜体小写拉丁字母:如 b, h, l ;

斜体小写希腊字母:如 ρ, ξ, σ 。

(2) 上、下标

上标采用标记或正体小写拉丁字母或小写希腊字母,下标采用正体小写拉丁字母、小写希腊字母、缩写词或正体数字,如

$$f'_y, f'_{cu,k}, \sigma_{p,min}^I, \alpha_1$$

1.1.5 组成混凝土结构的基本构件有哪些,按怎样的顺序学习?

(1) 以如图 1-1 所示的框架结构为例,它是由基本构件或部件组成:框架梁及楼盖中的板、次梁均为承受弯矩和剪力共同作用的受弯构件;柱是以承受压力为主,并同时受到弯矩及剪力作用的受压构件(屋架的上弦压杆及高层建筑中的剪力墙也属于受压构件,屋架的下弦拉杆为承受轴向拉力或同时受弯矩作用的受拉构件);框架边梁、挑檐梁为承受弯矩、剪力和扭矩共同作用的受扭构件。

(2) 为便于阐明基本概念,进行结构分析的顺序和设计时刚好相反,即先学习组成结构材料的力学性质(强度、变形的变化规律),图 1-4 为材料力学性能分析示意图;接着学习各种构件的受力性能、截面承载力和配筋计算及钢筋的布置图,图 1-3 为截面受力性能分析示意图;然后讨论混凝土结构(楼盖结构、单层厂房、框架结构)的设计,图 1-2 为构件受力特性。

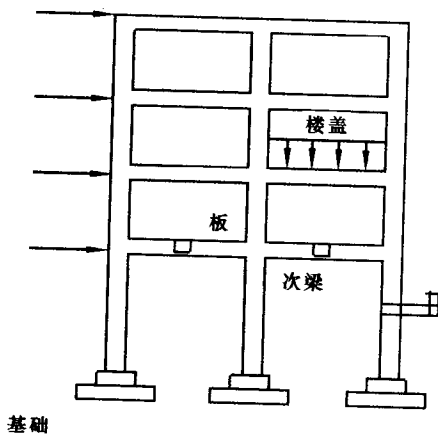


图 1-1 框架结构

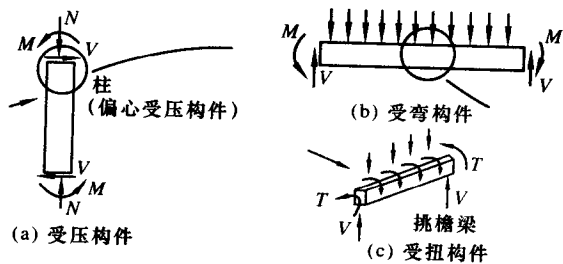


图 1-2 构件受力分析

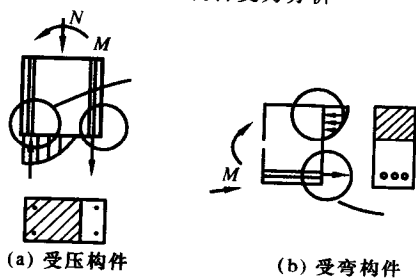


图 1-3 截面承载力分析

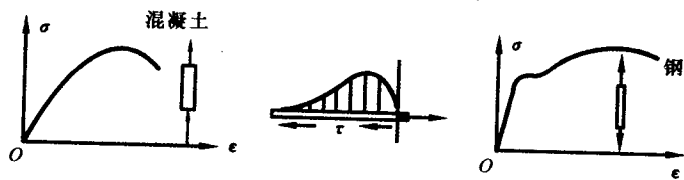


图 1-4 材料力学性能

第2章 钢筋和混凝土材料的力学性能

2.1 疑难释义

2.1.1 混凝土的强度等级是根据什么确定的？我国《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有哪些？

我国《混凝土结构设计规范》规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定,用符号 $f_{cu,k}$ 表示。即以边长为 150mm 的立方体为标准试件,在 $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度 90% 以上的潮湿空气中养护 28d,按照标准试验方法[试件表面不涂润滑剂,加载速度为 $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ ($< \text{C}30$) 或 $0.5 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ ($\geq \text{C}30$) 时]测得的具有 95% 保证率的立方体抗压强度作为混凝土的强度等级。《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有 C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60, C65, C70, C75, C80, 共 14 个等级。需要注意的是立方体试件的受力情况并不能代表混凝土在构件中的实际受力情况,它只是作为一种在给定的统一试验方法下衡量混凝土强度的指标,因为这种试件的制作和试验均较简便,且离散性较小。

2.1.2 影响混凝土强度的主要因素有哪些？

混凝土的强度是设计者和质量控制工程师认为最有价值的性质。混凝土的强度与原材料(水泥、砂、石、水等)的品质、配合比、搅拌、成型、养护及龄期等因素有关。这些因素中最重要的是水泥标号与水灰比。

(1) 原材料品质的影响

在配合比相同的条件下,水泥标号越高,颗粒越细,则生成水泥石的强度和粘结力越强,混凝土的强度也就越高。

骨料本身的强度与级配会直接影响混凝土的质量,骨料(特别是石子)的颗粒形状对混凝土强度也有显著影响,在水泥标号与水灰比相同的条件下,用具有棱角且表面粗糙的碎石拌制的混凝土的强度高于砾石混凝土。骨料的粒径对混凝土的强度也有影响。较大的骨料颗粒会增大混凝土内部组织的非匀质性和非连续性,可能使混凝土的强度降低。因此,骨料的粒径一般不宜大于 $25 \sim 40 \text{ mm}$,且不宜大于构件最小尺寸的 $1/4$,也不应大于钢筋的最小间隔。要配置高强混凝土,一般要采用较小粒径的骨料。

(2) 水灰比及水泥用量的影响

在水泥标号相同的情况下,在保证混凝土凝固所需化学结合水和混凝土拌和料

振捣密实所需塑性的前提下,水灰比越小,水泥石的强度越高,与骨料粘结力也越大,混凝土的强度就越高。

水泥用量对混凝土强度的影响,与水灰比及骨料的粒径、级配有关。一般地说,在一定限度内水泥用量愈多,混凝土的强度愈高。超过一定限度后,继续增加水泥用量,混凝土的强度不再提高。

应该注意,水灰比和水泥用量不但对混凝土的强度有重要影响,而且对混凝土的徐变、收缩等性能也有重要影响。在结构设计时,常常需对水灰比和水泥用量这两项指标提出专门要求。

(3) 龄期的影响

水泥石内部组织结构随时间的发展而变化,使混凝土的强度随龄期增长而提高,提高的速度与水泥品种、养护条件(温、湿度)等因素有关。在正常自然条件下,用普通硅酸盐水泥拌制的混凝土,早期强度提高较快,28d 龄期可完成最终强度的 80%。矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥混凝土的早期强度提高较慢,但在 28~90d 龄期之间的后期强度提高较快。

在实际工程中,常需根据设计的强度等级推算早期强度,或根据早期强度推算可能达到的强度等级。但在较多的情况下,是根据 7d 强度预测 28d 强度。我国常用的推算公式为

$$f_{\text{cu},28} = f_{\text{cu},7} + n\sqrt{f_{\text{cu},7}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

式中 $f_{\text{cu},28}$ ——28d 立方强度;

$f_{\text{cu},7}$ ——7d 立方强度;

n ——系数随水泥品种而定,普通硅酸盐水泥可取 2.5~3.5;早强硅酸盐水泥可取 1.6~2.5。

周围环境温度对水化作用进行的速度有显著影响,温度升高,水泥水化速度加快,因而混凝土强度的发展也加快;反之,温度降低,水泥水化速度降低,因而混凝土强度的发展也将相应迟缓。当温度降至冰点以下,由于水分大部分结冰,水泥颗粒不能和冰发生化学反应,混凝土强度停止发展,而且由于孔隙内水分结冰引起的膨胀作用,将使混凝土的内部结构遭受破坏,因此,冬季施工应采取措​​施以保证混凝土的质量。

周围环境湿度适当,水泥水化便能顺利进行,使混凝土强度得到充分发展。所以,为了使混凝土正常硬化,必须在成型后一定时间内维持周围环境有一定温度和湿度。

2.1.3 如何将非标准尺寸混凝土试块的抗压强度换算成标准尺寸试块的抗压强度?

混凝土的抗压强度与试块的尺寸和形状等因素有关。当试件在上、下表面不加润滑剂的情况下加压时,立方块的尺寸越小,试块与压力机加压板之间摩擦力作用的

影响就愈大,量测所得的极限强度值越高;反之则愈低。试件尺寸较小者实测强度偏高,尺寸较大者强度低这种现象称为“尺寸效应”。

中国、俄罗斯、德国和英国等国家一般以边长 150mm 的立方体作为测定混凝土抗压强度的标准试块。由于历史的原因,我国一些单位用于制作混凝土立方块的钢模边长不是标准尺寸 150mm,而是 200mm 或 100mm。当采用边长为 200mm 和 100mm 的立方块做试块时,应将立方体抗压强度的试验值分别乘以 1.053 与 0.947 的换算系数以后,才能将非标准尺寸混凝土试块的立方体抗压强度换算成标准尺寸混凝土试块的立方体抗压强度。

美国、日本、国际标准化组织(ISO)、欧洲混凝土委员会(CEB)和国际预应力学会(FIP)等国家和组织规定采用直径为 6in(约 152mm)、高 12in(约 305mm)的圆柱体作为测定混凝土抗压强度的标准试块;利用这种圆柱体试块测得的混凝土抗压强度,与边长 150mm 混凝土立方体试块抗压强度之间的比值约在 0.7~0.9 的范围内变化。欧洲混凝土委员会(CEB)建议取:

$$f'_{ck} = 0.8 f_{cu,k}$$

式中 f'_{ck} ——按圆柱体试块 6in×12in 测得的混凝土抗压强度标准值;

$f_{cu,k}$ ——按边长 150mm 立方体测得的混凝土抗压强度标准值。

2.1.4 混凝土抗拉强度是如何测定的?

混凝土的抗拉强度是混凝土的基本力学性能之一。混凝土的抗拉强度与混凝土构件的抗拉、抗剪、抗扭、抗裂等有关。抗拉强度试验方法比较复杂,有直接拉伸试验、劈裂拉伸试验和弯曲抗折试验,其中以劈裂拉伸试验为最常用。

轴心受拉试件通常采用 100mm×100mm×500mm 的柱体,两端设有埋长 150mm 的变形钢筋($d=16\text{mm}$),试验机夹紧两端伸出的钢筋,使试件受拉,破坏时在试件中部产生横向裂缝,其平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度。但是,由于轴心受拉试验对中比较困难,对中的偏差对强度的影响较大,故直接拉伸试验用得较少。

国内外多采用圆柱体或立方体的劈拉试验(图 2-1)来代替。因为试件与抗压强度试验的试件相同,不需要拉力试验机,所以应用较为普遍。劈拉试验是通过 5mm×5mm 的方钢条施加压力 F ,根据弹性理论,试件中间垂直截面上除加力点附近很小的范围以外,产生均匀的拉应力。劈拉强度可按下式计算:

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi dl}$$

式中 F ——破坏荷载;

d ——圆柱体直径或立方体边长;

l ——圆柱体长度或立方体边长。

试验表明劈裂拉伸强度略大于直接拉伸强度。试验还表明垫条的尺寸与材质对

劈拉强度有一定影响。

三点抗折试验采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 550\text{mm}$ 的混凝土梁, 抗折模量 $f_r = \frac{PL}{bd^2}$, 由抗折模量试验所得结果过高估计混凝土抗拉强度 $50\% \sim 100\%$, 主要是因为弯曲公式假定混凝土梁的整个横截面上呈线性应力应变关系, 与实际不符。此外, 在直接拉伸试验中, 试件整个体积在施加应力的作用下, 而弯曲试验仅一小部分接近横梁底部的混凝土受到高应力。抗折试验通常优先用于公路和机场跑道等混凝土的质量控制, 因为该处混凝土受弯曲荷载作用而不是受轴向拉伸作用。

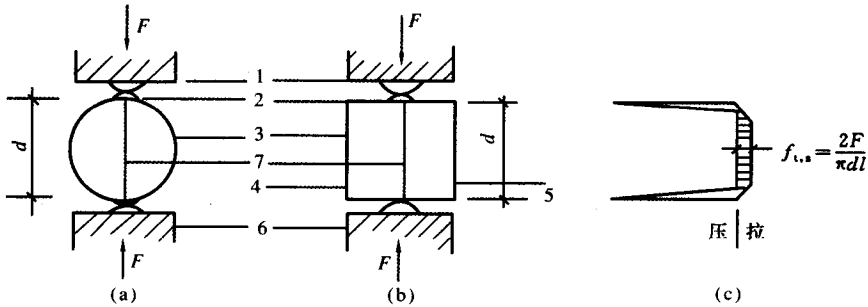


图 2-1 劈拉试验

2.1.5 混凝土材料在单调加载下的单轴受压应力-应变曲线是怎样的?

在普通压力试验机上获得具有下降段的应力-应变曲线是比较困难的。现在一般可采用具有伺服装置能控制下降段应变速度的电液伺服试验机, 也可以在试件旁附加各种弹性元件协同受压, 以吸收试验机内所积蓄的应变能, 防止试验机头回弹的冲击引起试件突然破坏(该方法已较少采用), 并以等应变加载, 就可以测量出具有真实下降段的应力-应变全曲线。混凝土达到极限强度后, 在应力下降幅度相同的情况下, 变形能力大的混凝土延性好。

我国采用棱柱体试件获得了一次短期加载下混凝土受压应力-应变全曲线。图 2-2 为实测的典型混凝土棱柱体受压应力-应变全曲线。可以看到, 这条曲线包括上升段和下降段两个部分。上升段(OC)又可分为三段, 从加载至应力约为 $(0.3 \sim 0.4)f_c$ 的 A 点为第 1 阶段, 由于这时应力较小, 混凝土的变形主要是骨料和水泥结晶体受力产生的弹性变形, 而水泥凝胶体的粘性流动以及初始微裂缝变化的影响一般很小, 所以应力-应变关系接近直线, 称 A 点为比例极限点。超过 A 点, 进入裂缝稳定扩展的第 2 阶段, 至临界点 B, 临界点的应力可以作为长期抗压强度的依据。此后, 试件中所积蓄的弹性应变能保持大于裂缝发展所需要的能量, 从而形成裂缝快速发展的不稳定状态直至峰点 C, 这一阶段为第 3 阶段, 这时的峰值应力 $\sigma_{\max}$ 通常作为混凝土棱柱体的抗压强度 f_c , 相应的应变称为峰值应变 ϵ_0 , 其值在 $0.0015 \sim 0.0025$ 之间波动, 通常取为 0.002 。

下降段 CE 是混凝土到达峰值应力后裂缝继续扩展、贯通,从而使应力-应变关系发生变化。在峰值应力以后,裂缝迅速发展,内部结构的整体受到愈来愈严重的破坏,赖以传递荷载的传力路线不断减少,试件的平均应力强度下降,所以,应力-应变曲线向下弯曲,直到凹向发生改变,曲线出现“拐点”,称为反弯点。超过反弯点后,曲线开始凸向应变轴,这时,只靠骨料间的咬合力与摩擦力以及残余承压面来承受荷载,随着变形的增加,应力-应变曲线逐渐凸向水平轴方向发展,此段曲线中曲率最大的一点 E 称为“收敛点”。从收敛点 E 开始以后的曲线称为收敛段,这时,贯通的主裂缝已很宽,内聚力几乎耗尽,对无侧向约束的混凝土,收敛段 EF 已失去结构意义。

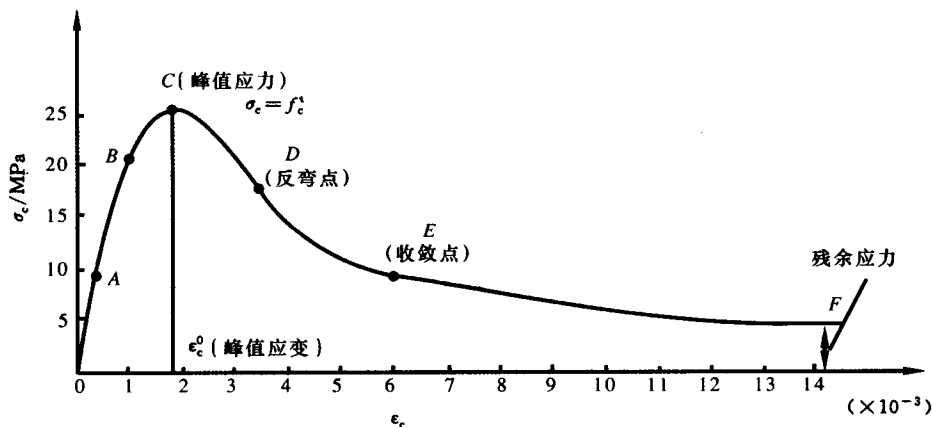


图 2-2 混凝土单轴受压应力-应变曲线

混凝土应力-应变曲线的形状和特征是混凝土内部结构发生变化的力学标志。需要指出的是应力-应变曲线受试验技术影响较大,尤其是下降段。

2.1.6 常见的混凝土单轴向受压应力-应变曲线的数学模型有哪些?

为了对混凝土结构进行定量分析,需要建立混凝土应力-应变关系的数学表达式,即混凝土材料的本构方程。由于混凝土材料的复杂性,尽管国内外有许多研究者做了大量的工作,提出了许多模型,但迄今为止还没有一个公认模型,实用上主要还是采用根据单轴试验曲线拟合得到的本构方程,如美国 Hognestad 建议的模型与德国 Rüschi 建议的模型等。常见的描述混凝土单轴向受压应力-应变曲线的数学模型有下面两种。

(1) 美国 Hognestad 建议的模型

如图 2-3 所示,模型的上升段为二次抛物线,下降段为斜直线。

$$\text{上升段: } \epsilon \leq \epsilon_0, \quad \sigma = f_c \left[2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$\text{下降段: } \epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u, \quad \sigma = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_u - \epsilon_0} \right]$$

式中 f_c ——峰值应力(棱柱体极限抗压强度);
 ϵ_0 ——峰值应力时的应变,取为 0.002;
 ϵ_u ——极限压应变,取为 0.0038。

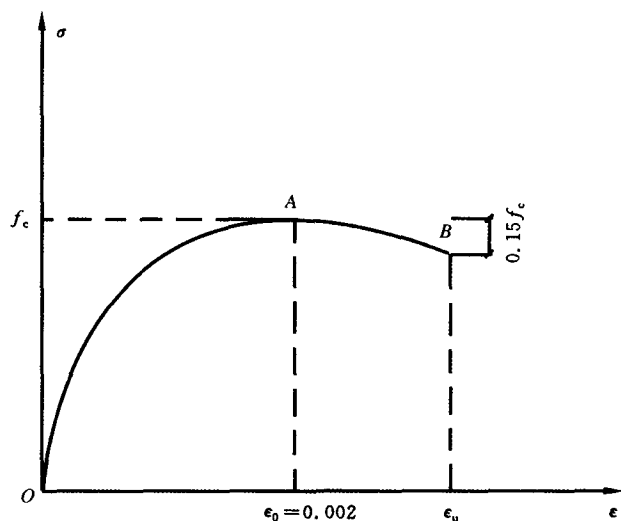


图 2-3 Hognestad 建议的应力-应变曲线

(2) 德国 Rüsç 建议的模型

如图 2-4 所示,该模型形式较简单,上升段也采用二次抛物线,下降段则采用水平直线。

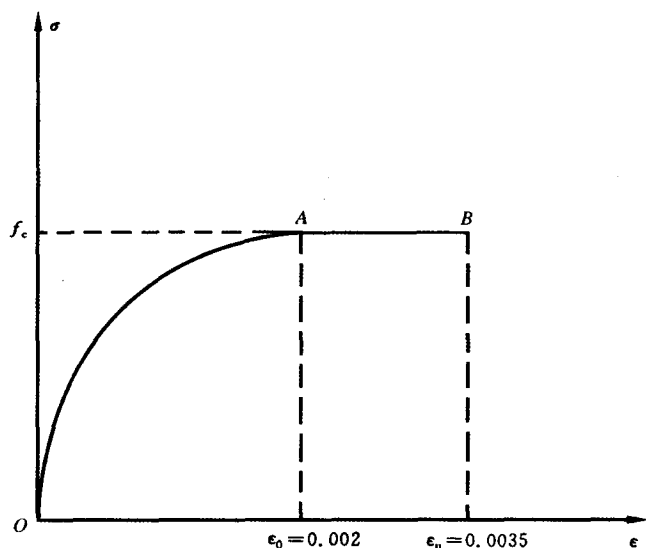


图 2-4 Rüsç 建议的应力-应变曲线

$$\text{当 } \epsilon \leq \epsilon_0 \text{ 时: } \sigma = f_c \left[2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$\text{当 } \epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u \text{ 时: } \sigma = f_c$$

式中取 $\epsilon_0 = 0.002$; $\epsilon_u = 0.0035$ 。

我国《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)关于混凝土材料的本构方程是采用 Rüsç 建议的模型,但混凝土的极限压应变值 ϵ_u 最大取为 0.0033。

2.1.7 什么是混凝土的弹性模量、割线模量和切线模量?

在拉伸或压缩下材料静弹性模量一般由单轴荷载下应力-应变曲线的斜率决定。因为混凝土的应力-应变曲线是非线性的,所以,混凝土的变形模量有如下三种表示方法(图 2-5)。

由混凝土的应力-应变曲线上原点所作切线,其斜率为初始切线模量,称作混凝土的弹性模量。

从混凝土的应力-应变原点起至曲线上任一点画连线,其斜率称为该点的割线模量或变形模量,有时也称为弹塑性模量,因为能较确切地反映混凝土的弹塑性变形性质。

由混凝土的应力-应变曲线上任一点所作切线的斜率称作该点混凝土的切线模量。

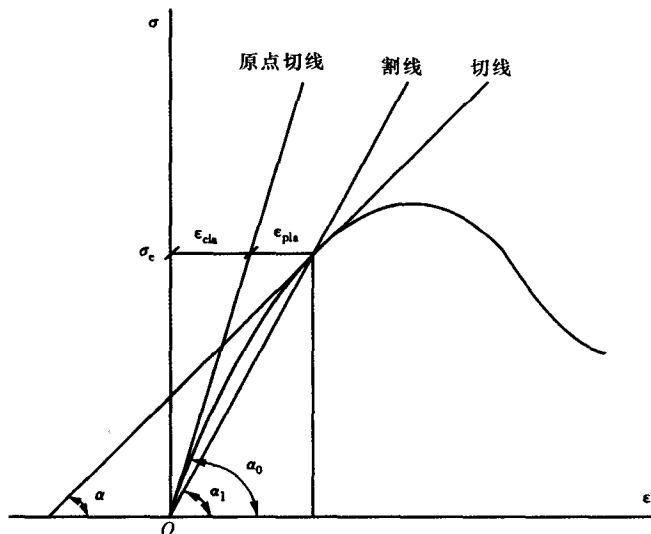


图 2-5 混凝土各种弹性模量的表示法

测定混凝土弹性模量的试验方法通常是:对标准尺寸 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体试件,先加载至 $\sigma = 0.5f_c$,然后卸载至零,再重复加载 5~10 次。由于混凝土