

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审定

混凝土结构

(上册)

主 编 吴培明
副主编 刘立新



A0952353

武汉工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构(上册)/吴培明主编. —武汉:武汉工业大学出版社,2001.8
ISBN 7-5629-1737-X

I. 混…

II. 吴

III. 混凝土-结构-高等学校-教材

IV. TU37

出版者:武汉工业大学出版社(武汉市:武昌珞狮路122号 邮编:430070)

印刷者:武汉工业大学出版社印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:13.5

字 数:450千字

版 次:2001年8月第1版 2001年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-5629-1737-X/TU·137

印 数:1~5000册

定 价:21.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

前 言

为适应我国高等学校本科土木工程专业教育的发展和变化,根据全国普通高校土木工程专业教学指导委员会制定的大纲,编写了《混凝土结构》(上册)教材。书中与规范有关的内容参照了即将颁布的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010)。

本教材的内容共分为10章,主要内容包括钢筋混凝土材料的力学性能,基于概率理论的极限状态设计原理,普通钢筋混凝土受弯、受扭、受压、受拉构件的正截面、斜截面承载力计算,受拉、受弯构件的裂缝宽度计算,受弯构件的刚度、变形计算;以及预应力混凝土构件的基本概念、计算原理和预应力混凝土轴心受拉、受弯构件的承载力计算和裂缝计算等。章节中包括了典型的例题,而且各章均有提要、小结、思考题和习题,以便于作为教材使用。

尽管本书是作为高等学校土木工程专业的教科书编写的,但也完全可供土木行业中的工程技术人员参考使用。

本书由吴培明教授任主编,刘立新教授任副主编。书中的第1、5、8章由刘立新编写,第2、7、10章由吴培明编写,第3、4、9章由徐茂波编写,第6章由何培玲编写。

由于编者水平有限,且由于接触新规范时间较短,在对规范的深入理解和使用经验等方面多有欠缺,书中不免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2001.8

1 绪 论

本章提要

本章叙述了混凝土结构的一般概念,钢筋和混凝土这两种性质不同的材料能够组合在一起共同工作的条件,以及混凝土结构的优缺点。介绍了混凝土结构在房屋建筑工程、交通土建工程、水利工程及其他工程中的应用;介绍了混凝土结构的发展前景,包括在材料、结构、施工技术、计算理论等方面的发展。本章还介绍了混凝土结构课程的特点和学习方法,以及指导工程设计的混凝土结构设计规范的概况。

1.1 混凝土结构的一般概念

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各种其他形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构常用于路面和一些非承重结构,预应力混凝土结构是在结构或构件中配置了预应力钢筋并施加预应力的结构;在多数情况下,混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。

钢筋和混凝土都是土木工程中重要的建筑材料,钢筋的抗拉和抗压强度都很高,但价格也相对较高;混凝土的抗压强度较高而抗拉强度却很弱。为了充分发挥材料的性能,把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,就组成了钢筋混凝土。

图 1.1a 为一用素混凝土制成的简支梁,由试验可知,由于混凝土抗拉强度很低,在不大的荷载作用下,梁下部受拉区边缘的混凝土即出现裂缝,而受拉区混凝土一旦开裂,裂缝迅速发展,梁瞬时断裂而破坏。此时受压区混凝土的抗压强度还远远没有充分利用,梁的承载力很低。如果在梁的底部受拉区配置抗拉强度较高的钢筋(图 1.1b),形成钢筋混凝土梁,当荷载增加到一定值时,梁的受拉区仍会开裂,但钢筋可以代替混凝土承受拉力,裂缝不会迅速发展,梁的承载能力还会继续提高。如果配筋适当,梁可以在较大的荷载作用下才被破坏,破坏时钢筋的应力可以达到屈服强度,受压区混凝土的抗压强度也能得到充分利用。而且在破坏前,裂缝充分发展,梁的变形迅速增大,有明显的破坏预兆。因此,在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后,可以使构件的承载力得到很大提高,构件的受力性能也得到显著改善。

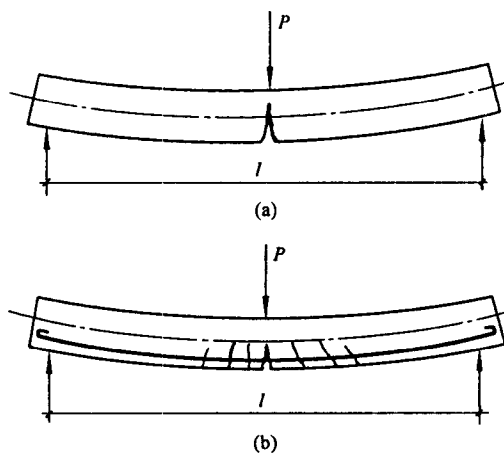


图 1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的破坏情况
(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种物理力学性能很不相同的材料,它们能够有效地结合在一起共同工作的主要原因是:

(1) 混凝土硬化后,钢筋和混凝土之间存在粘结力,使两者之间能传递力和变形。粘结力是使这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数接近,钢筋为 $1.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$,所以当温度变化时,钢筋和混凝土的粘结力不会因两者之间过大的相对变形而破坏。

以钢筋混凝土为主要承重骨架的土木工程构筑物,就称为钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构是由一系列

受力类型不同的构件所组成,这些构件称为基本构件。钢筋混凝土基本构件按其主要受力特点的不同可以分为:

- (1) 受弯构件,如各种单独的梁、板以及由梁组成整体的楼盖、屋盖等。
- (2) 受压构件,如柱、剪力墙和屋架的压杆等。
- (3) 受拉构件,如屋架的拉杆、水池的池壁等。
- (4) 受扭构件,如带有悬挑雨篷的过梁、框架的边梁等。

也有不少构件受力情况较复杂,如压弯构件、拉弯构件、弯扭构件、拉弯扭构件等。

钢筋混凝土结构在土木工程结构中有广泛的应用,这是因为它有很多优点,其主要优点有:

(1) 强度高。和砌体、木结构相比,其强度高。在一定条件下可以用来代替钢结构,达到节约钢材、降低造价的目的。

(2) 耐久性好。在一般环境条件下,钢筋可以受到混凝土的保护不易生锈,而且混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长;能减少维护费用。

(3) 耐火性好。当发生火灾时,由于有混凝土作为保护层,混凝土内的钢筋不会像钢结构那样很快达到软化温度而破坏。

(4) 可模性好。可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构。

(5) 整体性好。现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好,对抗震、抗爆有利。

(6) 易于就地取材。在混凝土结构中,钢筋和水泥这两种工业产品所占的比例较小,砂、石等材料所占比例虽然较大,但属于地方材料,可就地供应。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要是结构自重大、抗裂性较差、一旦损坏修复比较困难、施工受季节环境影响较大等,这也使钢筋混凝土结构的应用范围受到某些限制。随着科学技术的发展,上述缺点已在一定程度上得到了克服和改善。如采用轻质混凝土可以减轻结构自重,采用预应力混凝土可以提高结构或构件的抗裂性能,采用植筋或粘钢等技术可以较好地对发生局部损坏的混凝土结构或构件进行修复等。

1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用

混凝土结构是在19世纪中期开始得到应用的,与砌体结构、木结构、钢结构相比,是一种出现较晚的结构形式。但是由于混凝土结构具有很多明显的优点,使其在各方面的应用发展很快,现已成为世界各国占主导地位的结构。

1.2.1 混凝土结构发展的几个阶段

混凝土结构的发展,大体上可分为三个阶段。

第一阶段是从钢筋混凝土发明至20世纪初。这一阶段,所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低,主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。计算理论套用弹性理论,设计方法采用容许应力法。

第二阶段是从20世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段混凝土和钢筋的强度有所提高,预应力混凝土结构的发明和应用,使钢筋混凝土被用来建造大跨的空间结构。混凝土结构的试验研究开始进行,在计算理论上已开始考虑材料的塑性,已开始按破损阶段计算结构的破坏承载力。

第三阶段是从第二次世界大战以后到现在。这一阶段的特点是随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、泵送商品混凝土以及各种新的施工技术等广泛地应用于各类土木工程,如超高层建筑、大跨度桥梁、跨海隧道、高耸结构等。在计算理论上已过渡到充分考虑混凝土和钢筋塑性的极限状态设计理论,在设计方法上已过渡到以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

1.2.2 混凝土结构的工程应用

(1) 房屋建筑工程

在房屋建筑工程中,厂房、住宅、办公楼等多高层建筑广泛采用混凝土结构。在7层以下的多层房屋中虽然墙体大多采用砌体结构,但其楼板几乎全部采用预制混凝土楼板或现浇混凝土楼盖。采用混凝土结构的高

层和超高层建筑已十分普遍,我国 20 世纪 90 年代建成的广州国际大厦(高 200m,地上 63 层,地下 2 层)、1990 年建成于美国芝加哥的威克·德赖夫大楼(高 296m,65 层)、德国的密思埃姆大厦(高 256m,70 层)、香港中心大厦(高 374m,78 层)等都采用了混凝土结构。

在大跨度建筑方面,预应力混凝土屋架、薄腹梁、V 形折板、SP 板,钢筋混凝土拱、薄壳等已得到广泛应用。法国巴黎国家工业与发展技术展览中心大厅,平面为三角形,屋盖结构采用拱身为钢筋混凝土装配整体式薄壁结构的落地拱,跨度为 206m。美国旧金山地下展厅,采用钢筋混凝土拱 16 片,跨度为 83.8m。澳大利亚悉尼歌剧院的主体结构由三组巨大的壳片组成,壳片曲率半径为 76m,建筑涂白色,状如帆船,已成为世界著名的风光建筑。

(2) 桥梁工程

在桥梁建设方面,中小跨度桥梁中很大一部分采用钢筋混凝土建造,结构形式有梁、拱、桁架等。一些大跨度桥虽已采用钢悬索或钢斜拉索,但其桥面结构也有用混凝土结构的。洛阳黄河大桥,共 67 孔,由跨度为 50m 的预应力混凝土简支梁组成。厦门高崎-集美跨海大桥,主跨 46m,桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。用钢筋混凝土建造拱桥有较大优势,目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克 1 号桥,形式为敞肩拱桥,跨度达 390m。公路拱桥在我国应用很广,1989 年建成的涪陵乌江桥,全长 351.8m,主跨 200m,为拱结构,矢跨比为 1/4,是我国目前跨度最大的拱桥。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上的永定河 7 号桥,跨度达 150m。在我国西南交通干线上,有许多桥梁采用钢筋混凝土结构,其中清水河大桥,主跨为 72m+128m+72m,为预应力连续刚架结构,其 4 号桥墩高 100m,是世界上最高的铁路桥墩。跨度超过 500m 的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥,但目前也常与混凝土结构混合使用。如香港的青马大桥,跨度 1377m,桥体为悬索结构,其中支撑悬索的两端立塔高 202m,是混凝土结构。又如上海杨浦大桥,主跨 602m,为斜拉桥,其桥塔和桥面均为混凝土结构。

(3) 特种结构与高耸结构

混凝土结构在道路、港口工程中也有大量应用,许多贮水池、贮仓构筑物、电线杆、上下水管道等均可见到混凝土结构的应用。由于滑模施工技术的发展,许多高耸建筑可以采用混凝土结构。加拿大多伦多电视塔,高 549m,是目前世界上最高的混凝土结构建筑物。混凝土结构高耸建筑物还有莫斯科奥斯坦金电视塔(高 533.3m)、天津电视塔(高 415.2m)、北京中央电视塔(高 405m)等。

(4) 水利及其他工程

在水利工程中,因混凝土自重大,其中砂石比例大、易于就地取材,故常用来修建大坝。瑞士狄克桑斯坝,坝高 285m,坝顶宽 15m,坝底宽 225m,坝长 695m,库容量 4 亿 m^3 ,是目前世界上最高的混凝土重力坝。我国龙羊峡水电站拦河大坝为混凝土重力坝,坝高 178m,坝顶宽 15m,坝底宽 80m,坝长 393.34m,是我国目前已建坝中最高的。长江葛洲坝水利枢纽工程,发电能力 271.5 万 kW,库容量 15.8 亿 m^3 ,整个工程混凝土用量达 983 万 m^3 。

混凝土结构在其他特殊的结构中也有广泛的应用,如地下铁道的支护和站台工程,核电站的安全壳,机场的跑道,海上采油平台,填海造地工程等。

1.2.3 混凝土结构发展概况

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一,中国更是广泛应用这一材料的国家。目前,我国水泥年产量已超过 4 亿 t,年混凝土用量约为 5 亿 m^3 ,年钢筋用量接近 2000 万 t,混凝土结构在各类工程结构中占有主导地位。可以预见,今后混凝土仍将是一种重要的工程材料,并将在材料、结构、施工技术和计算理论等方面得到进一步发展。

(1) 材料方面

混凝土材料主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型,钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能。

目前国内常用的混凝土强度等级为 20~40 N/mm^2 ,国外常用的强度等级为 60 N/mm^2 。在实验室内,我国已制成 100 N/mm^2 以上的混凝土,在工程应用中将达到 80 N/mm^2 ,美国已制成 200 N/mm^2 的混凝土。今后常用的混凝土强度可达 100 N/mm^2 ,在特殊结构(如高耸、大跨、薄壁空间结构等)的应用中,可配制出

400N/mm² 的混凝土。

为了减轻混凝土结构的自重,国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料。轻质骨料主要有天然轻集料(浮石、凝灰岩等)、人造轻集料(页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等)和工业废料(炉渣、矿渣粉煤灰陶粒等)。轻质混凝土的体积密度一般为 14~18kN/m³,可在预制或现浇混凝土结构中使用。目前国外轻质混凝土的强度为 30~60N/mm²,国内轻质混凝土的强度为 20~40N/mm²。由轻质混凝土制成的结构自重可比普通混凝土减少 20%~30%,在地震区采用轻质混凝土结构可有效地减小地震作用,节约材料降低造价。

为了提高混凝土的抗裂性和耐久性,掺入高分子化合物的混凝土,如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等将会得到发展和应用。实验室研究显示,这类混凝土不仅抗压强度高,抗拉性能也很好,而且耐磨、抗渗、抗冲击、耐冻等性质大大优于普通混凝土。纤维混凝土因改善了混凝土的抗裂性、耐磨性及延性,在一些有特殊要求的工程中已开始应用。

外加剂的发明与应用对改善混凝土的性能起到了很大作用。目前的外加剂主要有四类:① 改善混凝土拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂、增塑剂等;② 调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;③ 改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂、阻锈剂等;④ 改善混凝土其他性能的外加剂,如加气剂、防冻剂、膨胀剂、着色剂等。今后一段时间内各种高性能的外加剂还会不断地研制出来。

对于钢筋,主要是向高强并有较好延性、防腐、高粘结锚固性等方向发展。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 435N/mm²,在中等跨度的预应力构件中将采用强度为 800~1370N/mm² 的中强螺旋肋钢丝,在大跨度的预应力构件中将采用强度为 1570~1860N/mm² 的高强钢丝和钢绞线。试验结果显示,中强和高强螺旋肋钢丝不仅强度高、延性好,而且与混凝土的粘结锚固性能也优于其他钢筋。为了提高钢筋的防腐性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋已经开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

(2) 结构方面

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一,现在已有先张法、后张法、无粘结预应力和体外张拉等技术,预应力技术将来还会有重大发展。在锚具方面将发展高效而耐久的锚夹具,在施加预应力方面也有新的技术出现,近期在国内外已研究将预应力用于组合结构。又如体外张拉预应力筋的技术,初期只是用于结构的加固补强,因体外张拉预应力筋可以避免制孔、穿筋、灌浆等工序,并且发现问题时易于更换预应力筋,目前已开始用于新建结构。在预制构件方面正在发展采用高强钢丝、钢绞线和高强度混凝土的大跨度高效预应力楼板,以适应大开间住宅的需要。

钢和混凝土组合结构近年来应用范围逐渐扩大。在约束混凝土概念的指导下,钢管混凝土柱、外包钢混凝土柱已在高层建筑、地下铁道、桥梁、火电厂厂房以及石油化工企业构筑物中应用。钢-混凝土组合梁、钢骨混凝土(劲性钢筋混凝土)构件,由于其具有强度高、截面小、延性好以及简化施工等优点,今后也将得到更加广泛的应用。

在工程结构实践的基础上,将会有更多的大型、巨型工程采用混凝土结构。

(3) 施工技术

在混凝土结构施工过程中,施工技术的改进起了很大作用。预应力技术的发明使混凝土结构的跨度大大增加,滑模施工法的发明使高耸结构和贮仓、水池等特种结构的施工进度大大加快。泵送混凝土技术的出现使高层建筑、大跨桥梁可以方便地整体浇注。蒸汽养护法使预制构件成品出厂时间大为缩短。喷射混凝土、碾压混凝土等施工技术也日益广泛地应用于公路、水利工程中。

在模板方面,除了目前使用的木模板、钢模板、竹模板、硬塑料模板外,今后将向多功能发展。发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的永久性模板,将使模板可以作为结构的一部分参与受力,还可省去装修工序。透水模板的使用,可以滤去混凝土中多余的水分,大大提高混凝土的密实性和耐久性。

在钢筋的绑扎成型方面,正在大力发展各种钢筋成型机械及绑扎机具,以减少大量的手工操作。钢筋的连接方面,除了现有的绑扎搭接、焊接、螺栓及挤压连接方式外,随着化工胶结材料的发展,将来胶接方式也会有较大发展。

可以预见,今后混凝土结构的施工技术还将有很大发展。

1.2.4 混凝土结构计算理论的发展概况

(1) 混凝土结构计算理论发展概况

混凝土结构基本理论和设计方法也在不断发展中。早期由于混凝土结构材料的性能及其内在规律尚未被人们认识,多数国家采用以弹性理论为基础的容许应力设计方法。实践证明,这种设计方法和结构的实际情况有很大出入,不能正确揭示混凝土结构或构件受力性能的内在规律,现在绝大多数国家已不采用。

由于对钢筋混凝土构件极限强度试验的进展,20世纪40年代出现了按破损阶段的设计方法。这种方法考虑了混凝土和钢筋的塑性,更接近于钢筋混凝土的实际情况,比容许应力法前进了一步,但在总安全系数的规定方面带有很大的经验性。

随着对荷载和材料变异性的研究,认识到各种荷载对结构产生的效应以及结构的抗力均非定值,在20世纪50年代提出了按极限状态的设计方法:指出结构的极限状态是一种特定状态,当达到此状态时,结构或构件即丧失承载力或不能正常使用。而计算系数则是根据荷载及材料强度的变异性由统计规律分项确定,并考虑了影响结构构件承载力的非统计因素,这种设计方法又称为半经验、半概率极限状态设计方法。由于这种方法概念较明确,比按破损阶段的设计方法合理,到了20世纪70年代已为多数国家所接受。

随着结构设计理论的进一步发展,为了合理规定结构及其构件的安全系数或分项系数,结构可靠度理论也得到发展,提出了以失效概率来度量结构安全性的以概率理论为基础的极限状态设计方法。由于这种方法对各种荷载、材料强度的变异规律进行了大量的调查、统计、分析,各分项系数的确定比较合理,而且用失效概率和可靠度指标能够比较明确地说明结构“可靠”或“不可靠”的概念,目前已有许多国家采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法。

(2) 我国混凝土结构设计规范发展概况

作为反映我国混凝土结构学科水平的混凝土结构设计规范,也随着我国工程建设经验的积累、科研成果以及世界范围内技术的进步而不断改进。解放初期东北地区首先颁布了《建筑物结构设计暂行标准》,1955年又制定了《钢筋混凝土结构设计暂行规范》(结规6—55),采用了当时前苏联规范中的按破损阶段设计方法。1966年颁布了第一本《钢筋混凝土结构设计规范》(GBJ21—66),采用了当时较为进步的以多系数表达的极限状态设计方法。在总结工程经验和科学研究成果的基础上,1974年编制了《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74),采用了多系数分析、单一系数表达的极限状态设计方法。

20世纪70年代,为了解决各类材料的建筑结构可靠度的合理和统一问题,组织了有关高校、科研、设计单位对荷载、材料性能及构件几何尺寸等设计基本变量进行了大量实测统计,并认真借鉴了国外的先进经验,于1984年颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84),规定了我国各种建筑结构设计规范均统一采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,从而把我国结构可靠度设计方法提高到当前的国际水平。在此基础上对《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74)进行了全面系统的修订,于1990年颁布了《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)。

近十年来,随着我国经济建设的加快,混凝土结构学科科研的新进展,在工程建设领域出现了许多新技术和新材料,而且随着人民生活水平的提高,对房屋建筑结构可靠性、耐久性的要求也进一步提高,原有的《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)已显得不能适应工程建设的需要。因此,从1997年开始又组织了有关高校、科研、设计单位对GBJ10—89规范进行了修订,并规定了新的《混凝土结构设计规范》(GB50010—××)。新《规范》反映了近十年来在工程建设中的新经验和混凝土结构学科新的科研成果,标志着我国混凝土结构的计算理论和设计水平又有了新的提高。

和GBJ10—89《规范》相比,新的GB50010—××《规范》将混凝土强度等级提高为C15~C80,混凝土结构中的非预应力钢筋以HRB400级(原Ⅲ级)作为主导钢筋,预应力钢筋以钢绞线和高强钢丝作为主导钢筋,并适当调整了材料设计强度的取值以提高结构的安全度。新《规范》增加了耐久性设计的有关内容,主要包括环境分级、对混凝土和钢筋材料性能的要求、设计工作寿命等。还增加了混凝土结构内力及应力分析的基本方法。为适应复杂结构分析的需要,增加了混凝土及钢筋本构关系及破坏准则的有关内容。新《规范》还对结构构件承载力计算方法、各类构件的构造措施等进行修订、补充和完善。此外,新《规范》还明确了工程设计人员必须遵守的强制性条文。新《规范》的颁布实施必将促进我国混凝土结构设计水平进一步提高。本教

材除了介绍混凝土结构设计的基本原理外,在设计方法上将主要讲述新的《混凝土结构设计规范》(GB50010—××)的内容。

1.3 本课程的特点与学习方法

本课程从学习钢筋混凝土材料的力学性能和以概率理论为基础的极限状态设计方法开始,然后对各种钢筋混凝土构件的受力性能、设计计算方法及配筋构造进行讨论,如受弯构件正截面和斜截面承载力计算,受扭构件承载力计算,受压和受拉构件承载力计算,受弯构件变形和裂缝宽度验算以及预应力混凝土构件的计算等。然后学习钢筋混凝土楼盖设计方法和单层工业厂房、多层及高层建筑混凝土结构的设计方法。

学习本课程时应注意以下特点:

(1) 钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成的复合材料,它与以往学过的材料力学中单一理想的弹性材料不同,所以材料力学公式可以直接应用的不多。为了对钢筋混凝土的受力性能和破坏特性有较好的了解,首先要掌握好钢筋和混凝土材料的力学性能。

(2) 钢筋混凝土既然是一种复合材料,就存在着两种材料的数量比例和强度搭配问题,超过一定范围,构件的受力性能就会改变,不能正常使用。以钢筋混凝土简支梁为例,随着受拉区配置的纵向受拉钢筋的增加,梁的破坏形态可能由受拉钢筋先屈服而变为受压区混凝土先压碎。

(3) 钢筋混凝土材料的力学性能和构件的计算方法都是建立在试验研究基础上的,许多计算公式都是在大量试验资料的基础上用统计分析方法得出的半理论半经验公式。这些公式的推导并不像数学或力学公式那样严谨,但却能较好地反映钢筋混凝土的真实受力情况。

(4) 学习本课程是为了在工程建设中进行混凝土结构的设计,它包括方案、材料选择、截面形式、配筋、构造措施等。结构设计是一个综合问题,要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。同一构件在相同的荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸、配筋方法及配筋数量。设计时需要进行综合分析,结合具体情况确定最佳方案,以获得良好的技术经济效果。所以在学习过程中,要学会对多种因素进行综合分析的设计方法。

(5) 学习本课程时,要学会运用现行的《混凝土结构设计规范》(GB50010—××)。设计规范是国家颁布的有关计算和构造要求的技术规定和标准,规范条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带法律性的技术文件。这将使设计方法达到统一化和标准化,从而有效地贯彻国家的技术经济政策,保证工程质量。《规范》是总结了近年来全国高校和设计、科研单位的科研成果和工程实践经验,学习借鉴了国外先进规范和经验,并广泛征求国内有关单位意见,经过反复修改而制订的,它代表了该学科在一个时期的技术水平。

由于科学技术水平和生产实践经验是不断发展的,所以设计规范也必然需要不断修订和补充。因此,要用发展的观点来看待设计规范,在学习和掌握钢筋混凝土结构理论和设计方法的同时,要善于观察和分析,不断地进行探索和创新。

混凝土结构是我国工程建设中应用最广泛的一种结构,在现代化建设事业中起着重要作用。随着改革开放的不断深入,中国的建筑业必将走向世界,所以应该大力开展混凝土结构的科学研究,努力提高生产技术水平,采用先进的设计理论,推广新材料、新工艺,使我国的混凝土结构理论和设计水平尽快达到国际先进水平。

本章小结

(1) 钢筋混凝土是把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作,充分发挥两种材料各自优点的一种复合材料。在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后,可以使构件的承载力得到很大提高,构件的受力性能也得到显著改善。

(2) 钢筋和混凝土能够有效地结合在一起共同工作的主要原因是钢筋和混凝土之间存在粘结力,使两者之间能传递力和变形;钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。

(3) 钢筋混凝土结构的主要优点是强度高、耐久性好、耐火性好、可模性好、整体性好、易于就地取材等。主要缺点是结构自重大、抗裂性较差、一旦损坏修复比较困难、施工受季节环境影响较大等。

(4) 混凝土材料主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型等。钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能等。

(5) 《规范》条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带法律性的技术文件,遵守《规范》是为了使设计方法达到统一化和标准化,从而有效地贯彻国家的技术经济政策,保证工程质量。

思考题与习题

- 1.1 在混凝土构件中配置一定形式和数量的钢筋有哪些作用?
- 1.2 钢筋和混凝土这两种不同材料能够有效地结合在一起共同工作的主要原因是什么?
- 1.3 钢筋混凝土结构有哪些优点? 有哪些缺点? 如何克服这些缺点?
- 1.4 简述混凝土结构计算理论的发展过程。
- 1.5 学习混凝土结构课程时应注意哪些问题?

2 钢筋混凝土材料的力学性能

本章提要

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种材料共同工作而形成的,而钢筋和混凝土的力学性能又与力学中所学的理想弹性材料不完全相同,因而钢筋混凝土结构构件的受力性能与由单一弹性材料做成的结构有很大差异。本章主要讨论钢筋和混凝土在不同受力条件下强度和变形的变化规律,以及这两种材料的共同工作的性能,它将为建立有关计算理论并进行钢筋混凝土构件的设计提供重要的依据。

2.1 钢筋的形式和品种

钢筋的力学性能主要取决于它的化学成分。其主要成分是铁元素,此外还含有少量的碳、锰、硅、硫等元素。增加含碳量可提高钢材的强度,但塑性和可焊性降低。根据钢材中含碳量的多少,通常可分为低碳钢(含碳量少于0.25%)和高碳钢(含碳量在0.6%~1.4%范围内)。锰、硅元素可提高钢材强度,并保持一定塑性;磷、硫是有害元素,其含量超过一定限度时,钢材塑性明显降低,磷使钢材冷脆,硫使钢材热脆,且焊接质量也不易保证。

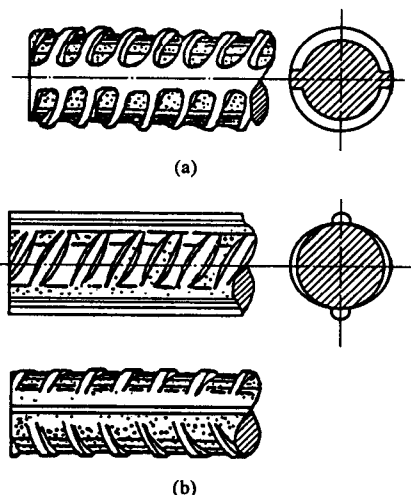


图 2.1 变形钢筋的外形
(a) 螺纹钢筋; (b) 月牙纹钢筋

除上述元素外,再加入少量合金元素,如锰、硅、钒、钛等即制成低合金钢。低合金钢能显著改善钢筋的综合性能,根据其所加元素的不同,可分为锰系、硅钒系等多种。

目前我国钢筋混凝土及预应力混凝土结构中采用的钢筋和钢丝有热轧钢筋、冷拉钢筋、钢丝和热处理钢筋等种类,其中应用量最大的是热轧钢筋。

热轧钢筋按其强度由低到高分为 HPB235、HRB335、HRB400 和 RRB400 四级,其中 HPB235 钢筋为低碳钢,其余各级钢筋均为低合金钢。HPB235 钢筋的外形为光面圆钢筋,称为光圆钢筋;其余 3 级均在表面上轧有肋纹,称为变形钢筋(图 2.1)。过去通用的肋纹有螺纹和人字纹,近年来为了改进生产工艺并改善使用性能,变形钢筋的螺纹形式已逐步被月牙纹取代。

冷拉钢筋和冷拔钢筋是通过某些等级的热轧钢筋进行冷加工而成,热处理钢筋是对某些特定钢号的热轧钢筋进行热处理得到的(图 2.2)。

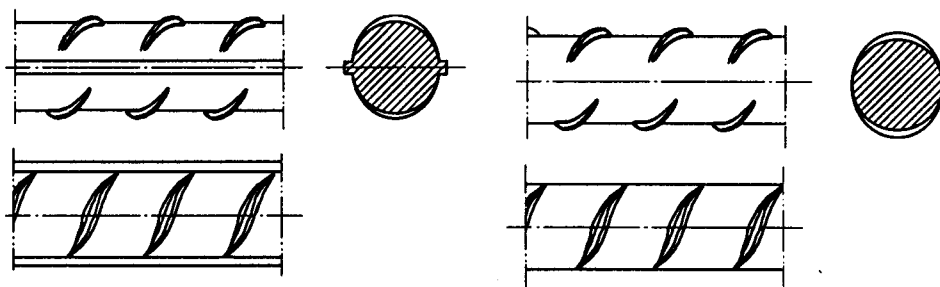


图 2.2 热处理钢筋的外形

钢丝分碳素钢丝、消除应力钢丝和刻痕钢丝三种。刻痕钢丝是用高碳钢光圆盘条钢筋经冷拔和矫直回火。再将表面经过机械刻痕制成(图2.3)。钢绞线则是由几根高强钢丝用绞盘绞成一股而成。

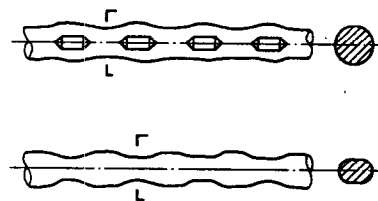


图 2.3 刻痕钢丝

2.2 钢筋的力学性能

根据钢筋在单调受拉时所反应的应力-应变性质的不同,我们可以把钢筋分为有明显屈服点的和没有明显屈服点的两大类,有时也分别称为有明显物理流限和无明显物理流限的钢筋。

热轧钢筋和冷拉钢筋属于有明显屈服点的钢筋;钢丝和热处理钢筋属于无明显屈服点的钢筋。

图2.4表示有明显屈服点的钢筋试件在试验机上进行拉伸试验得出的典型应力-应变曲线。从图中可以看出,当应力达到 a' 点之前,应力和应变成比例,此时钢筋具有理想的弹性性质,若此时卸去荷载,则应变恢复为零,故 a' 点称为比例极限。

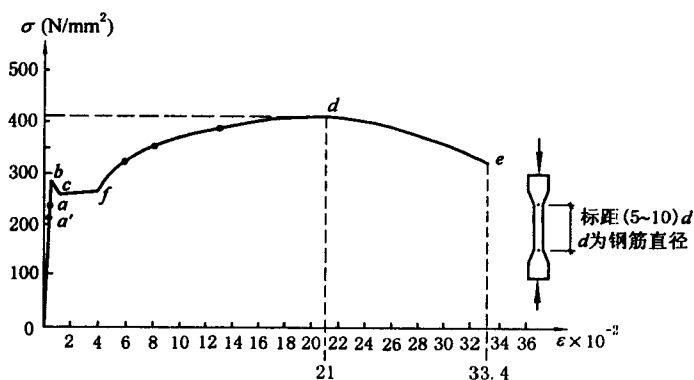


图 2.4 有明显物理流限钢筋的应力-应变曲线

应力超过比例极限后,应变的增长速度将逐渐变得比应力增长速度略快。但若在应力达到 a 点的“弹性极限”之前卸荷,应变基本上仍能完全恢复。

在应力达到 b 点后,钢筋的应力-应变性质将发生明显变化。超过 b 点后,钢筋应力将下降到 c 点,然后应变将在应力不增长或略有波动的情况下不断增大,从而产生相当大的纯塑性变形。这种现象被称为“屈服”或“流动”, b 、 c 两点被称作上、下屈服点,而与下屈服点对应的应力则称为“屈服强度”或“流限”。这种塑性应变一直延续到 f 点, c 、 f 两点之间的应变则称为钢筋的“流幅”。

超过 f 点后,钢筋的应力重新开始增长,但这时曲线的斜率变得远比弹性阶段小,而且随着应力的增长越来越小,直到 d 点处钢筋达到了它的极限抗拉强度。曲线的 fd 段通常称为“强化段”。

当钢筋应力达到极限抗拉强度(d 点)后,在试件内的某个较为薄弱的部位应变急剧增长,试件直径迅速变细,最后试件在这种“颈缩”部位被拉断。产生颈缩现象后,试件在该处的截面面积缩小,因此材料所受的实际应力仍在不断增长。但若按初始截面计算,则应力是在不断降低的,从而出现了应力-应变曲线上的下降段 de 。

钢筋的受压性能通常是用短粗钢筋试件在试验机上测定的。测得的应力-应变曲线表明,在达到屈服强度之前,受压钢筋也具有理想的弹性性质,而且屈服强度与受拉时基本相同。在达到屈服强度后,受压钢筋也将在压应力不增长的情况下产生明显的塑性压缩,然后进入强化段。

从拉伸试验中测得的没有明显屈服点的钢筋的典型应力-应变曲线如图2.5所示。从图中可以看出,当应力未超过对应于图中 a 点的比例极限(大约相当于极限抗拉强度的0.65倍)时,钢筋具有理想弹性性质;应力超过比例极限之后,钢筋将表现出越来越明显的塑性性质,但应力、应变都是持续增长的,而且在曲线上找不到一个明显的屈服点。在达到极限抗拉强度后,同样由于颈缩现象而使曲线具有一个下降段。

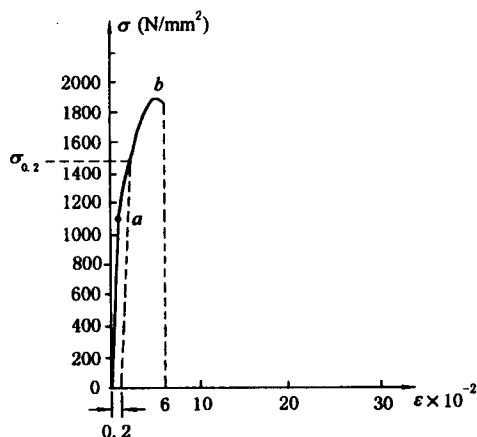


图 2.5 无明显物理流限钢筋的应力-应变曲线

这类钢筋虽然没有明显的屈服点,但可以参照有明显屈服点钢筋的思路,为它在塑性变形开始明显增长处找到一个相当的假想屈服点,以便在设计中把它作为这类钢筋可以利用的应力的上限,一般取残余应变为 0.2% 的应力 $\sigma_{0.2}$ (即如图 2.5 所示,加荷到这个应力后再卸去荷载,这时残存的塑性应变为 0.2%) 作为这个应力的上限,并称之为“条件屈服强度”。对于高强钢丝, $\sigma_{0.2}$ 大致相当于极限抗拉强度的 0.86 倍;对于热处理钢筋, $\sigma_{0.2}$ 大致相当于极限抗拉强度的 0.9 倍。为了统一起见,在规范中规定取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为极限抗拉强度 σ_b 的 0.8 倍,即

$$\sigma_{0.2} = 0.8 \sigma_b \quad (2.1)$$

2.3 钢筋的冷加工和热处理

所谓冷拉是指把有明显屈服点的钢筋用卷扬机或其他拉伸装置逐根拉至其应力超过原有的屈服强度,使之进入应力-应变曲线的强化段,然后卸掉全部拉力,使钢筋应力重新恢复到零。在这个第一次加荷的过程中,从钢筋应力超过弹性极限开始,随着塑性变形的增大,其内部晶格产生滑移和错位。由于错位的堆集,使得钢筋对塑性变形的阻力增大,从而在第二次受拉时能够获得比原来更高的屈服强度。这种现象称为钢筋的“冷拉强化”(图 2.6)。冷拉只能提高钢筋的抗拉强度。

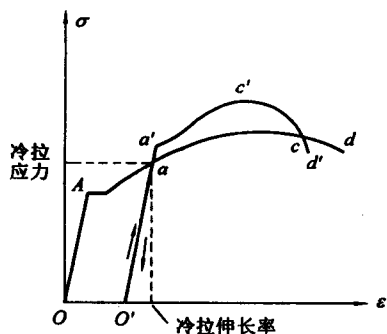


图 2.6 钢筋冷拉前后的应力-应变曲线

冷拔加工是用强力把光圆钢筋通过比其本身直径稍小的、硬质合金模上的锥形拔丝孔,使钢筋产生塑性变形,横截面减小,长度增大。钢筋经过多次冷拔,钢筋延伸率不断减小,塑性明显降低,而且经冷拔后的钢丝没有明显的屈服点和流幅,对冷拔后的碳素钢丝如进行低温回火处理,则可改善其塑性性能。冷拔可同时提高钢筋的抗拉压屈服强度。

冷拉和冷拔固然可以提高钢筋的强度,但同时也会使钢筋的脆性增加,使钢筋受力后容易发生突然断裂,因此不宜推广使用。

热处理是对某些特定钢号的热轧钢筋进行淬火和回火处理。钢筋经淬火后,硬度大幅度提高,但塑性和韧性降低,通过回火又可以在不降低强度的前提下,消除由淬火产生的内应力,改善塑性和韧性,使这些钢筋成为较理想的预应力钢筋。

2.4 对钢筋质量的要求

强度是钢筋质量的重要指标。对于有明显屈服点的钢筋,由于受拉或受压而达到屈服强度后,它将在荷载基本不增长的情况下产生持续的塑性变形。而各类结构构件的试验结果表明,绝大多数结构构件的钢筋尚未进入强化阶段之前或最多进入强化段后不久就将产生最终破坏。对于无明显屈服点的钢筋,在受力达到条件屈服点后也将产生较大的塑性变形,且距离最终破坏相差不远。因此,在一般结构的设计中统一规定不考虑钢筋在强化阶段(或达到条件屈服强度以后)的能力,而取屈服强度(或条件屈服强度)作为可以利用的应力上限,也就是钢筋的强度。因此,屈服强度就成为钢筋最关键的质量指标。

为了保证钢筋能满足所规定的综合强度性能,在检验钢筋的质量时还要保证它的极限抗拉强度满足检验标准的要求。在抗震结构中,考虑到钢筋可能受拉进入强化段,因此还要保证极限抗拉强度与屈服强度的比值不低于 1.25。

检验钢筋质量的另一个指标是反映钢筋受拉时塑性性质的“伸长率” δ 。如果在试件受力之前把钢筋试件

上量测伸长值的基本标距取为 l_1 , 而试件拉断并重新合拢后量测的延长了之后的这个标距为 l_1' , 则伸长率即为

$$\delta = \frac{l_1' - l_1}{l_1} \quad (2.2)$$

此外, 根据质量检验标准, 钢筋还应满足冷弯要求。这是指把钢筋围绕某个具有规定直径 D 的辊轴(弯心)进行弯转(图 2.7), 要求在达到规定的冷弯角度 α 时, 钢筋不发生裂纹、起层或者断裂。冷弯试验是检验钢筋韧性和内部匀质性的有效方法。钢筋内部组织的不均匀性, 内应力以及夹杂物等的不良影响在冷弯试验中比在均匀受力的拉伸试验中更容易表现出来。

概括起来, 在对有明显屈服点的钢筋进行质量检验时, 主要应测定屈服强度、极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能这四项指标。必要时, 还须补充进行抗冲击韧性和反弯性能等项检验。

由于没有明显屈服点的钢筋的条件屈服强度不容易测定, 因此在这类钢筋的质量检验中就以极限抗拉强度作为检测的主要强度指标, 然后再通过公式(2.1)求出其条件屈服强度。于是, 在这类钢筋的质量检验中需要测定的指标一般只有三项: 极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能。

钢筋在使用中常需要相互连接。如采用焊接接头, 就必须满足图 2.8 的要求, 才能保证强度不会因接头而降低。

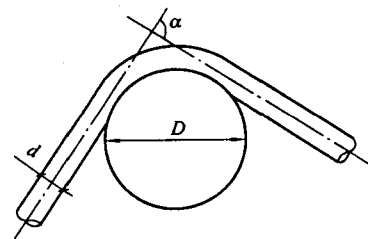


图 2.7 钢筋的弯转

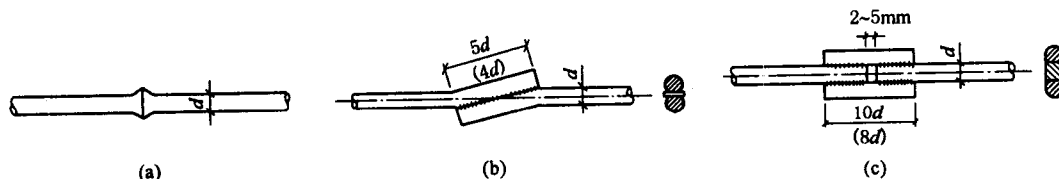


图 2.8 钢筋的焊接接头

(a) 对头接触电焊(闪光对焊); (b) 两条焊缝的搭接电弧焊; (c) 四条焊缝的帮条电弧焊

2.5 钢筋的蠕变、松弛和疲劳

钢筋在高应力作用下, 随时间增长其应变继续增加的现象为蠕变。钢筋受力后, 若保持长度不变, 则其应变随时间增长而降低的现象称为松弛。

蠕变和松弛随时间的增长而增大, 它们与钢筋初始应力的大小、钢材品种和温度等因素有关, 通常初始应力大时蠕变和松弛也大。温度增加时蠕变和松弛则增大。

钢筋的疲劳破坏是指钢筋在承受重复、周期动荷载作用下, 经过一定次数后, 从塑性破坏的性质转变成脆性突然断裂的现象。钢筋在疲劳破坏时的强度低于钢筋在静荷载下的极限强度。疲劳强度是指在某一规定应力幅度内, 经受某一规定次数循环加载后, 才发生疲劳破坏的最大应力值。通常认为, 在外力作用下, 钢筋产生疲劳断裂是由于钢筋内部或外表的缺陷引起了应力集中, 钢筋中超负载的弱晶粒发生滑移, 产生疲劳裂纹, 最后断裂。

影响钢筋疲劳强度的因素很多, 如应力的幅度、最大应力值的大小、钢筋外表面的几何形状、钢筋直径、钢筋等级和试验方法等。

对于承受重复荷载的钢筋混凝土构件, 如吊车梁、桥梁面板等, 如何确保其在正常使用期间不发生疲劳破坏, 这就需要在设计时考虑钢筋的疲劳强度。

2.6 混凝土的强度等级

混凝土是由水泥、沙子、石子和水拌合而成, 浇筑后逐渐硬化成具有很高强度的密实块体。混凝土的力学性能和组成它的各种材料都不相同, 这可以由图 2.9 中的应力-应变曲线看出。

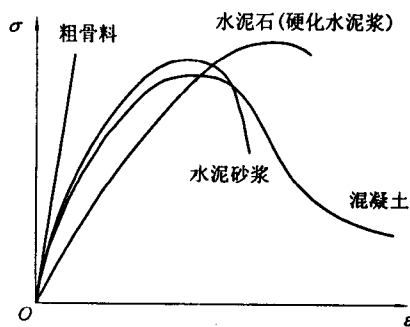


图 2.9 混凝土的复合材料性质

我国规范规定的混凝土强度等级,是按立方体强度标准值(即有 95% 超值保证率,详见第三章)确定的,用符号 C 表示,规范中列出的有 14 个等级,即: C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。字母 C 后面的数字表示以 N/mm^2 为单位的立方体抗压强度标准值。

混凝土的立方体强度,是衡量混凝土强度大小的基本指标,也是评价混凝土等级的标准。规范规定,用边长为 150mm 的标准立方体试件,在标准养护条件下(温度 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, 相对湿度不小于 90%) 养护 28d 后在试验机上试压。试验时,试块表面不涂润滑剂,全截面受力,加荷速度约为 $0.15 \sim 0.25 \text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 。试块加压至破坏时,所测得的极限平均压应力,作为混凝土的立方体抗压强度,用符号 f_{cu} 表示,单位为 N/mm^2 。

2.7 混凝土的强度

2.7.1 立方体抗压强度

混凝土立方体抗压强度是在一定的试验条件下得出的。试件在试验机上受压时,纵向缩短,横向就要扩张。在一般情况下,试件的上下表面和试验机垫板之间有摩擦力,这是由试件横向扩张产生的。摩擦力就如同在试件上下端各加了一个套箍,它阻碍了试件的横向变形,这样就延缓了裂缝的开展,从而提高了试件的抗压极限强度。在试验过程中也可以看到,试件破坏时,首先是试块中部外围混凝土发生剥落。这也说明,试块和试验机垫板之间的摩擦对试块有“套箍”作用,且这种“套箍”作用,越靠近试块中部则越小。

如果在试件的上下表面加润滑剂后再做试验,由于在受压时没有“套箍”作用的影响,横向变形几乎不受约束。试验表明,这样的试件不仅测得的混凝土抗压强度低,而且试件破坏情况与前述试件也不相同。

试验还表明,混凝土的立方体抗压强度还与试块的尺寸有关,立方体尺寸越小,测得混凝土抗压强度越高,这也可以从上述试块和试验机垫板之间的摩擦力对试块的影响得到解释。

在实际工程中,混凝土构件的形状、尺寸都与立方体试件大不相同。受压构件的高度通常要比构件截面的边长大许多倍,受力时也不存在前述“套箍”作用。这样,实际工程中混凝土的工作条件与前述立方体试块试验时的工作条件不相同,因而两者表现出的强度也不相同。因此,立方体抗压强度不能直接用于结构设计。

立方体抗压强度试验所需设备和试验方法都比较简单,试验结果的离散性也相对较小,尤其适合于在施工过程中检验和控制混凝土的强度。因此,立方体抗压强度是混凝土的基本强度指标。混凝土结构设计中使用的混凝土其他强度值,都可以根据立方体强度值换算得出。

2.7.2 混凝土的轴心抗压强度(棱柱体强度)

用标准棱柱体试件测定的混凝土抗压强度,称为混凝土的轴心抗压强度或棱柱体强度,用符号 f_c 表示。

为了用于对实际工程中受压构件的设计和计算,就必须测定混凝土在实际受压构件中的强度。为此,也必须确定和实际受压构件工作条件相同或接近的试件,用以测定混凝土在实际轴心受压构件中的强度。试验表明,棱柱体试件当其高度 h 与截面边长 b 的比值太小时,由于前述“套箍”作用的影响而使测出的强度值随 h 与 b 的比值减少而增大;当 h 与 b 的比值太大时,又由于难以避免的附加偏心距的影响,使混凝土的强度随 h 与 b 的比值的增大而减少。而当试件的 h 与 b 之比值在 2~4 之间时,测出的混凝土的抗压强度值比较稳定。这是因为在此范围内既可大部分消除垫板与试件之间摩擦力对抗压强度的影响,又可大部分消除可能的附加偏心距对试件强度的影响。因此,国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(CBJ81—85) 规定以 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的试件作为试验混凝土轴心抗压强度的标准试件。

混凝土的立方体抗压强度与轴心抗压强度之间关系复杂,与很多因素有关,但也有一定规律。根据试验分析(图 2.10),混凝土棱柱体抗压强度平均值,与边长为 150mm 立方体抗压强度平均值的关系为

$$f_c^0 = 0.76 f_{cu}^0 \quad (2.3)$$

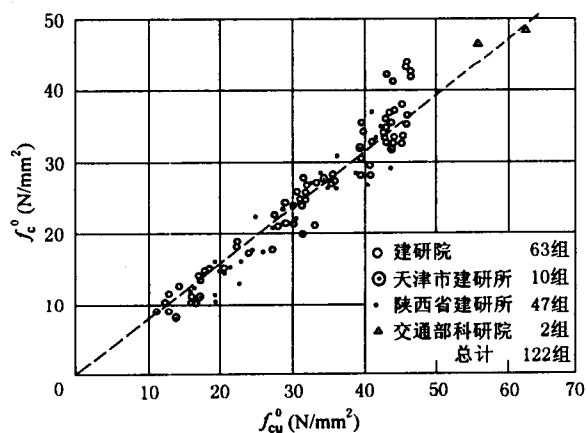


图 2.10 混凝土轴心抗压强度与立方体强度的关系

考虑到结构中混凝土的工作条件与试件的工作条件之间仍有一定差异,根据以往的经验,并结合试验数据分析,以及参考其他国家的有关规定,对试件强度取修正系数 0.88,则结构中混凝土轴心抗压强度平均值 f_c^0 为

$$f_c^0 = 0.88 \times 0.76 f_{cu}^0 = 0.67 f_{cu}^0 \quad (2.4)$$

在钢筋混凝土结构中,计算轴心受压构件(例如轴心受压柱、桁架受压腹杆等)时,要采用混凝土的轴心抗压强度。

2.7.3 混凝土的轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度远小于其抗压强度,一般只有抗压强度的 $1/18 \sim 1/9$ 。因此,在钢筋混凝土结构中,一般不采用混凝土承受拉力。但是,在钢筋混凝土结构构件中,处于受拉状态下的混凝土,在未开裂之前,确实承受了一部分拉力。如果计算混凝土构件在混凝土开裂之前的承载力,或者控制混凝土构件的开裂,都必须知道混凝土的抗拉强度。混凝土的轴心抗拉强度用 f_t 表示。

混凝土抗拉强度的测定方法分为两类:一类为直接测试法,即对棱柱体试件两端预埋钢筋,且使钢筋位于试件的轴线上,然后施加拉力,试件破坏时截面的平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度。这种试验对试件的制作及试验要求较严格。另一类为间接测试方法,如弯折试验、劈裂试验等;这些试验一般又需要较高的试验技术及条件。

结构中混凝土的轴心抗拉强度平均值,与边长 150mm 的立方体抗压强度平均值的关系,由试验结果得出为

$$f_t^0 = 0.23 f_{cu}^{0.2/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2.5)$$

各个强度等级混凝土的轴心抗压、轴心抗拉强度,我国规范已经给出具体的数值(见附表 1、附表 2);进行结构计算时,可以直接查用,而不必再根据它们与立方体强度的关系进行换算。

2.7.4 复杂受力状态下混凝土的强度

严格地说,结构构件中的混凝土理想单轴压力作用的情况是很少的,多数则处在多轴正应力、甚至多轴正应力剪应力的复合作用之下。到目前为止,对复合受力情况下的混凝土强度问题已做了不少试验和理论分析工作。但由于问题的难度较大,至今尚不能给出能同时圆满解释各种现象的强度理论。因此更多的是采用由试验结果总结出来的一些经验性规律。

试验表明,混凝土两向受压时,两个方向的抗压强度都有所提高,最大可以达到单向受压时的 1.2 倍左右。混凝土三向受压时,各个方向上的抗压强度都有很大的提高(图 2.11)。这类情况下混凝土强度提高的原因通常用“侧向约束”的概念来说明。侧向约束限制了混凝土受压后的横向变形,包括限制了混凝土内部裂缝的产生和发展,从而提高了混凝土在受压方向上的抗压强度。用侧向约束的概念来研究、分析混凝土的多向应力状态,可以避开直接应用多向应力分析时在概念上和分析方法上的复杂性。

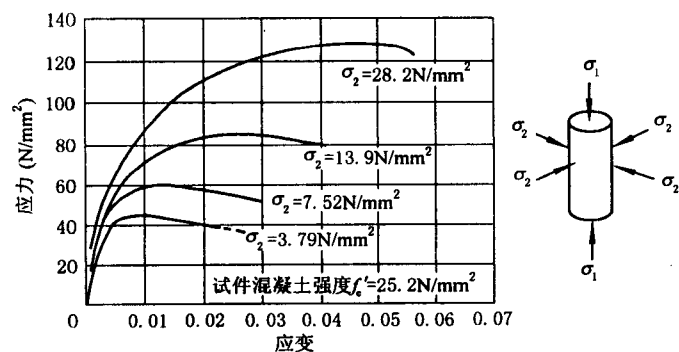


图 2.11 侧向压力对混凝土强度的影响

在实际工程中,常常采用横向钢筋约束混凝土的办法提高混凝土的抗压强度,例如在柱中采用密排螺旋钢筋。由于这种钢筋有效地约束了混凝土的横向变形,所以使混凝土的强度和延性都有较大的提高。

当混凝土内部沿某一剪切面受剪时,垂直于剪切面的正应力对混凝土的抗剪能力有所影响。垂直于剪切面的压应力能提高混凝土的抗剪能力,但压应力过大时又将削弱混凝土的抗剪能力。垂直于剪切面的拉应力总会削弱混凝土的抗剪能力。在计算混凝土构件抗剪能力时要考虑上述这种影响。

2.8 荷载作用下混凝土的变形性能

2.8.1 混凝土的应力-应变关系

混凝土在单轴短期单调加载过程中的应力-应变关系(σ - ϵ 曲线)是混凝土最基本的力学性能之一,它是研究钢筋混凝土构件强度、裂缝、变形、延性所必需的依据。

混凝土的应力-应变曲线通常用棱柱体试件进行测定,在试件的四个侧面安装应变仪测读纵向压应变的变化,图 2.12 所示为轴心受压混凝土典型的应力-应变曲线,图中几个特征阶段如下:

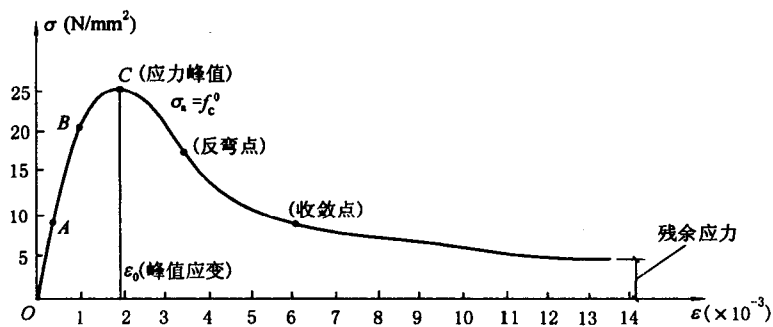


图 2.12 混凝土的应力-应变曲线

OA 段:应力较小, $\sigma \leq 0.3f_c'$, 混凝土表现出理想的弹性性质,应力-应变关系呈直线变化,混凝土内部的初始微裂缝没有发展。

AB 段: $\sigma = (0.3 \sim 0.8)f_c'$, 混凝土开始表现出越来越明显的非弹性性质,应力-应变关系偏离直线,应变增长速度比应力增长速度快。在此阶段,混凝土内部微裂缝已有所发展,但处于稳定状态。

BC 段: $\sigma = (0.8 \sim 1.0)f_c'$, 应变增长速度进一步加快,应力-应变曲线的斜率急剧减小,混凝土内部微裂缝进入非稳定发展阶段。

C 点:当应力到达 C 点即应力峰值 σ_c 时,混凝土发挥出它受压时的最大承载能力,即轴心抗压强度 f_c' 。此时,内部微裂缝已延伸扩展成若干通缝。相应于最大应力的应变值 ϵ_0 称为峰值应变,随混凝土强度等级的不同在 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}$ 之间变动。实用中对轴心受压通常取 $\epsilon_0 = 2 \times 10^{-3}$; 曲线的 OC 段一般称为应