



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

高校土木工程学科  
专业指导委员会规划推荐教材

# 混凝土结构基本原理

同济大学混凝土结构研究室 集体编著

张誉 主编



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

TU37

15

面 向 21 世 纪 课 程 教 材

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

# 混凝土结构基本原理

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

同济大学混凝土结构教研室 集体编著

张 誉 主编

苏小卒 李 杰 龚绍熙 林宗凡 熊本松 编著  
赵 鸣 陆浩亮 郑步全 薛伟辰

中国建筑工程工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

混凝土结构基本原理/张誉主编. -北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 8

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-112-04294-1

I. 混… II. 张… III. 混凝土结构-结构设计-高等学校-教材  
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 28138 号

混凝土结构是土木工程中应用最广泛的一种结构形式。本书全面系统地介绍了普通钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构构件受力性能、承载能力、使用性能、耐久性能的基本原理。主要内容有: 材料基本力学性能; 粘结锚固性能; 轴心受力性能; 偏心受力性能; 受弯性能; 受剪性能; 受扭性能; 受冲切性能; 构件使用性能; 构件耐久性; 灾害作用下的结构性能等。

本书根据国家教育部大学本科新专业目录规定的土木工程专业培养要求编写, 可作为土木工程专业基础教材或参考书, 也可供从事土木工程钢筋混凝土结构设计与施工的工程技术人员参考。

**面向 21 世纪课程教材**

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

**混凝土结构基本原理**

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

同济大学混凝土结构教研室 集体编著

张 誉 主编

苏小卒 李 杰 龚绍熙 林宗凡 熊本松 编著  
赵 鸣 陆浩亮 郑步全 薛伟辰

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 23½ 字数: 598 千字

2000 年 8 月第一版 2000 年 8 月第一次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 32.00 元

ISBN 7-112-04294-1

TU·3716 (9749)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

我国高级工程专门人才培养模式正在面向专业宽口径方向转变,教育部新的本科专业目录,已将建筑工程、交通土建工程、矿井建设、城镇建设、涉外建筑工程、饭店工程等专业合并扩宽为一个土木工程专业。编写适用于宽口径专业的专业基础课——《混凝土结构基本原理》的教材是实施教学改革的一个必要条件。

土木工程专业涉及工程领域很广,混凝土结构的类型很多,但其基本受力构件的受力特点还是共性的。鉴于目前土木工程不同结构类别采用的设计规范尚不一致,本教材精选内容,突出受力性能分析,加强基础理论,而不拘泥于规范的具体规定。教材内容和体系注意到学生从数学、力学基础课过渡到学习专业课的认识规律,从材料性能、截面受力特征到构件抗力机理、承载力及变形的计算方法,形成完整体系,建立正确的基本概念和科学分析的逻辑思维。本教材为进一步学习混凝土结构设计专业课打下基础,为此,在计算方法中适当照顾到新修订的混凝土结构设计规范的规定和要求。每章都附有思考题和习题。为拓宽学生的知识面,在教材中对灾害下的混凝土结构的性能和混凝土结构的耐久性也作了适当介绍。

本教材在同济大学土木工程学院的组织下,由长期担任该课程教学的教师共同编写,委托我担任主编,参加编写的有张誉(第1章、第12章)、郑步全(第2章)、陆浩亮(第3章)、龚绍熙(第4章)、熊本松(第5章)、李杰(第6章、第13章)、苏小卒(第7章、第8章)、赵鸣(第9章)、薛伟辰(第10章)、林宗凡(第11章)。

清华大学江见鲸教授在百忙中为本教材审阅,并提出宝贵意见,在此表示诚挚谢意。

本教材作为土木工程专业基础课来编写是初次尝试,由于编者知识所限,书中可能会有诸多不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

张 誉

2000年3月15日

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第1章 绪 论                     | 1   |
| § 1.1 混凝土结构的特点及其应用概况        | 1   |
| § 1.2 混凝土结构的形式              | 4   |
| § 1.3 混凝土与钢筋共同工作的基础         | 5   |
| § 1.4 混凝土结构抗御灾害的能力          | 6   |
| § 1.5 混凝土结构的拓展及展望           | 7   |
| 第2章 混凝土与钢筋材料的基本力学性能         | 12  |
| § 2.1 混凝土的物理力学性能            | 12  |
| § 2.2 钢筋的物理力学性能             | 25  |
| 思考题                         | 33  |
| 第3章 轴心受力构件的受力性能             | 35  |
| § 3.1 轴心受拉构件的受力分析           | 35  |
| § 3.2 轴心受压短柱的破坏形态和承载力计算     | 41  |
| § 3.3 轴心受压长柱的破坏形态和承载力计算     | 50  |
| § 3.4 配有纵筋和螺旋筋的轴心受压柱的受力分析   | 52  |
| § 3.5 轴心受压钢管混凝土柱的受力分析       | 56  |
| 思考题                         | 60  |
| 习题                          | 60  |
| 第4章 受弯构件正截面受力性能             | 63  |
| § 4.1 概述                    | 63  |
| § 4.2 受弯构件的试验研究             | 65  |
| § 4.3 受弯构件正截面受力分析           | 71  |
| § 4.4 受弯构件正截面承载力的简化分析       | 79  |
| § 4.5 不同截面形式受弯构件的受力分析和承载力计算 | 85  |
| § 4.6 双向受弯构件的受力分析和承载力计算     | 98  |
| § 4.7 受弯构件的延性               | 101 |
| 思考题                         | 104 |
| 习题                          | 105 |
| 第5章 偏心受力构件正截面受力性能           | 107 |
| § 5.1 概述                    | 107 |
| § 5.2 偏心受压构件的试验研究           | 109 |
| § 5.3 偏心受压构件的受力分析           | 116 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| § 5.4 偏心受压构件承载力的计算 .....     | 130 |
| § 5.5 偏心受拉构件的受力分析 .....      | 153 |
| § 5.6 偏心受拉构件的承载力计算 .....     | 155 |
| 思考题 .....                    | 158 |
| 习题 .....                     | 158 |
| <b>第 6 章 构件受剪性能</b> .....    | 160 |
| § 6.1 构件弯剪斜裂缝的形成 .....       | 160 |
| § 6.2 构件受剪破坏形态及其影响因素 .....   | 165 |
| § 6.3 构件抗剪机理 .....           | 170 |
| § 6.4 有轴力作用构件的斜截面承载力计算 ..... | 177 |
| § 6.5 剪力墙的抗剪性能 .....         | 179 |
| § 6.6 保证构件受剪性能的构造措施 .....    | 184 |
| 思考题 .....                    | 191 |
| 习题 .....                     | 192 |
| <b>第 7 章 构件受扭性能</b> .....    | 194 |
| § 7.1 平衡扭转与协调扭转性能 .....      | 194 |
| § 7.2 混凝土结构构件受纯扭作用的性能 .....  | 194 |
| § 7.3 混凝土结构构件受弯剪扭作用的性能 ..... | 207 |
| § 7.4 混凝土结构构件受压扭作用的性能 .....  | 215 |
| § 7.5 例题和构造措施 .....          | 222 |
| 思考题 .....                    | 228 |
| 习题 .....                     | 229 |
| <b>第 8 章 构件受冲切性能</b> .....   | 231 |
| § 8.1 概述 .....               | 231 |
| § 8.2 混凝土板受冲切作用的性能和分析 .....  | 233 |
| § 8.3 混凝土基础受冲切作用的性能和分析 ..... | 239 |
| § 8.4 混凝土局部受压承载力的计算 .....    | 240 |
| § 8.5 例题 .....               | 244 |
| 思考题 .....                    | 248 |
| 习题 .....                     | 249 |
| <b>第 9 章 粘结与锚固</b> .....     | 250 |
| § 9.1 概述 .....               | 250 |
| § 9.2 粘结机理 .....             | 251 |
| § 9.3 粘结强度 .....             | 255 |
| § 9.4 粘结应力滑移本构关系 .....       | 260 |
| § 9.5 锚固长度、搭接长度及构造要求 .....   | 260 |
| 思考题 .....                    | 270 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 习题 .....                            | 270        |
| <b>第 10 章 预应力混凝土结构受力性能 .....</b>    | <b>272</b> |
| § 10.1 概述 .....                     | 272        |
| § 10.2 预应力混凝土的材料和锚具 .....           | 275        |
| § 10.3 预应力损失的计算 .....               | 279        |
| § 10.4 预应力混凝土构件的受力性能 .....          | 284        |
| § 10.5 超静定预应力混凝土结构的受力性能 .....       | 290        |
| 思考题 .....                           | 292        |
| 习题 .....                            | 292        |
| <b>第 11 章 混凝土构件的使用性能 .....</b>      | <b>294</b> |
| § 11.1 构件的裂缝控制 .....                | 294        |
| § 11.2 构件的变形控制 .....                | 311        |
| 思考题 .....                           | 324        |
| 习题 .....                            | 325        |
| <b>第 12 章 混凝土结构的耐久性 .....</b>       | <b>327</b> |
| § 12.1 概述 .....                     | 327        |
| § 12.2 材料的劣化 .....                  | 329        |
| § 12.3 混凝土结构耐久性设计 .....             | 342        |
| § 12.4 提高混凝土结构耐久性的技术措施 .....        | 344        |
| 思考题 .....                           | 346        |
| <b>第 13 章 灾害作用下的钢筋混凝土结构性能 .....</b> | <b>347</b> |
| § 13.1 概述 .....                     | 347        |
| § 13.2 抗震性能 .....                   | 348        |
| § 13.3 抗火性能 .....                   | 354        |
| 思考题 .....                           | 363        |
| <b>习题参考答案 .....</b>                 | <b>364</b> |
| <b>主要参考文献 .....</b>                 | <b>368</b> |

# 第 1 章 绪 论

## § 1.1 混凝土结构的特点及其应用概况

### 1.1.1 混凝土结构的特点

混凝土结构包括有素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。最常用的是由钢筋和混凝土两种材料组成的钢筋混凝土结构。我国每年混凝土用量 9 亿  $\text{m}^3$ ，钢筋用量 2000 万 t，我国每年用于混凝土结构的耗资达 2000 亿元以上。

钢筋混凝土结构是混凝土结构中最具代表性的一种结构。混凝土材料抗压强度较强，抗拉能力很低，而钢筋抗拉强度很高，将两者结合在一起协同工作，能充分发挥两种材料各自特长，而且可以克服钢材易锈、需要经常维护的麻烦，钢筋置于混凝土中不易受腐蚀，可提高其耐火性；混凝土材料本身脆性，有钢筋协同工作，可以增加其延性。钢筋混凝土结构已成为土木工程中应用最为广泛的一种结构形式，它具有很多优点：

(1) 可以根据需要，浇筑成各种形状和尺寸的结构，如曲线型的梁和拱、空间薄壳等形状复杂的结构；

(2) 强价比相对要大，用同样的费用做的木、砖、钢结构受力构件的承载力远比用钢筋混凝土制成的构件要小；

(3) 耐火性能比其他材料结构要好，遭火灾时与钢结构相比，钢筋有混凝土保护层包裹，不会因升温软化；

(4) 比其他结构的耐久性能要好，钢结构为防锈腐蚀需要经常维护，钢筋被混凝土包裹，不易生锈，钢筋混凝土结构使用寿命最长，混凝土结构还可以用于防辐射的工作环境，如用于建造原子反应堆安全壳等；

(5) 整体浇筑的钢筋混凝土结构整体性好，对抵抗地震、风载和爆炸冲击作用有良好性能；

(6) 混凝土中用量最多的砂、石等原料，可以就地取材。

事物总是一分为二，钢筋混凝土结构同样也存在一些弱点，如自重较大，不利于建造大跨结构；抗裂性差，过早开裂虽不影响承载力，但对要求防渗漏的结构，如容器、管道等，使用受到一定限制；现场浇筑施工工序多，需养护，工期长，并受施工环境和气候条件限制等等。

随着对钢筋混凝土结构的深入研究和工程实践经验的积累,混凝土结构的缺点在逐步克服,如采用预应力混凝土可以提高其抗裂性,并扩大其使用范围,可以用到大跨结构和防渗漏结构;采用高性能混凝土,可以改善防渗漏性能;采用轻质高强混凝土,可以减轻结构自重,并改善隔热隔声性能;采用预制装配式结构,可以减少现场操作工序,克服气候条件限制,加快施工进度等等。

### 1.1.2 混凝土结构的应用及其发展历史

钢筋混凝土结构与砖石结构、钢木结构相比,历史并不长,仅有150年左右,但因其可以就地取材,发展非常迅速。在20世纪初以前,所采用的钢筋和混凝土强度都非常低,仅限于建造一些小型梁、板、柱、基础等构件,钢筋混凝土本身计算理论尚未建立,设计沿用材料力学容许应力方法;1920年以后,预应力混凝土的发明和应用,混凝土和钢筋强度有所提高,试验研究的发展,计算理论已开始考虑材料的塑性性能,1938年左右已开始采用按破损阶段计算构件破坏承载力;进入1950年,随着高强混凝土、高强钢筋的出现,采用装配式钢筋混凝土结构、泵送商品混凝土工业化生产方式,许多大型结构,如超高层建筑、大跨桥梁、特长隧道的不断兴建,计算理论已过渡到按极限状态设计方法;近数十年来,国内外在钢筋混凝土学科领域进行了大量研究,使这门学科的计算理论日趋完善,引入数学统计理论,设计已过渡为以概率论为基础的可靠度设计方法;随着计算机的发展,钢筋混凝土结构分析中引入了数值方法,结构受力性能已发展采用非线性有限元分析;钢筋混凝土构件在复合受力和反复荷载作用下的计算理论正朝着从受力机理建立统一计算模式的方向发展,从而使钢筋混凝土结构计算理论和工程实践提高到一个新的水平。混凝土结构已成为土木工程中最重要的一种结构形式,广泛应用于土木工程各个领域,现摘要举例说明。

在房屋工程中,多层住宅、办公楼大多采用砌体结构作为竖向承重构件,然而楼板和屋面几乎全部采用预制钢筋混凝土板或现浇钢筋混凝土板;多层厂房和小高层房屋更多的是采用现浇的钢筋混凝土梁板柱框架结构;单层厂房也多是采用钢筋混凝土柱,钢筋混凝土屋架或薄腹梁、V形折板等;高层建筑采用钢筋混凝土结构体系更是获得很大发展,如澳洲最高建筑是澳大利亚墨尔本的里奥托中心,56层,高242m;欧洲最高建筑是莱茵河畔的密思埃姆大厦,63层,高257m;美国芝加哥的咨询大厦,64层,高298m;香港中环大厦,78层,高374m;马来西亚吉隆坡彼得罗纳斯双塔大厦,88层,高450m;广东中天大厦,80层,高322m;上海金茂大厦,88层,建筑高度421m,为正方形框筒结构,内筒墙厚850mm,混凝土强度C60,外围为钢骨混凝土柱和钢柱;上海正在建造的95层460m高的浦东环球金融中心大厦,内筒为钢筋混凝土结构,建成后将成为世界最高建筑物。有很多公共建筑采用钢筋混凝土结构建成很有特色的建筑,如1979年竣工的澳大利亚悉尼歌剧院,主体结构由三组巨大壳体组成,壳片曲率半径76m,整个结构建

在  $186\text{m} \times 97\text{m}$  的现浇钢筋混凝土基座上,建筑壳体涂成白色,在蓝色的海洋上宛如白色帆船,十分秀丽,成为悉尼的标志性建筑和世界著名风景点。

在桥梁工程中,中小跨桥梁绝大部分采用钢筋混凝土结构建造,如1976年建造的洛阳黄河桥共67孔,由跨度为50m的简支梁组成,1989年建成的厦门高集跨海大桥,主跨46m,桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。用钢筋混凝土拱建桥更具优势,我国江南水乡到处可见混凝土拱桥,目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥,为上承式空腹拱桥,跨度390m,拱券厚6.5m;我国1997年建成的四川万县长江大桥,为上承式拱桥,采用钢管混凝土和型钢骨架建成三室箱形截面,跨长420m,跃居为目前世界第一位拱桥。即使有些大跨桥梁,当跨度超过500m采用钢悬索或钢制斜拉索,但其桥墩、塔架和桥面结构都是采用钢筋混凝土结构,如1993年建成的上海杨浦斜拉桥,主跨602m;1997年建成的香港青马大桥跨度1377m,桥体为悬索结构,支承悬索的两端塔架,是高度203m的钢筋混凝土结构;1997年建成的江阴长江大桥为悬索桥,主跨1385m,已跃居世界第4位。

在隧道工程中,我国解放后修建了2500km长的铁道隧道,其中成昆铁路线中有隧道427座,总长341km,占全线路长31%;我国修建的公路隧道约400座,总长80km,公路隧道也向双向每洞双车道发展,仅上海就修建4条过江隧道,其中一条为人行道。地铁具有安全、运输量大、减小噪声污染等优点,已成为现代城市重要交通设施,我国除北京、上海、天津已有地铁外,广州、南京等城市也将建造地铁。与此同时,很多城市正在大力发展高架轻轨交通,北京、上海正在规划建造高速磁悬浮列车,其中架空轨道线路也是钢筋混凝土结构。

在水利工程中,水利枢纽中的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管也都是采用钢筋混凝土结构,世界上最高的重力坝为瑞士大狄克桑斯坝,高285m;我国黄河小浪底水利枢纽中小浪底大坝最大坝高154m,其主体工程混凝土和钢筋混凝土用量达269万 $\text{m}^3$ ;我国在建的三峡水利枢纽中的西陵峡水电站主坝也是重力坝,坝高190m,设计装机容量1820万kW,它将成为世界最大水电站。南水北调是一项跨世纪大型工程,沿线将建很多预应力混凝土渡槽。

除上述一些工程外,还有一些特种结构,如电线杆、烟囱、水塔、筒仓、储水池、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也多用钢筋混凝土结构建造,如我国宁波北仑火力发电厂有高度达270m的筒中筒烟囱;我国曾建造过倒锥形水塔,容量为1500 $\text{m}^3$ ;世界容量最大水塔是瑞典马尔默水塔,容量达10000 $\text{m}^3$ ;我国山西云岗建成两座预应力混凝土煤仓,容量6万t。随着滑模施工方法的发展,很多高耸建筑采用钢筋混凝土结构,世界最高的电视塔加拿大多伦多电视塔,塔高553.3m,就是用钢筋混凝土建造;其次是莫斯科奥斯坦电视塔,高537m;上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成独特造型,高456m,居世界第三位。

## § 1.2 混凝土结构的形式

### 1.2.1 混凝土结构的组成

钢筋混凝土结构由很多受力构件组合而成,主要受力构件有楼板、梁、柱、墙、基础等。

楼板:是将活荷载和恒载通过梁或直接传递到竖向支承结构(柱、墙)的主要水平构件,其形式可以是实心板、空心板、带肋板等。

梁:是将楼板上或屋面上的荷载传递到立柱上,前者为楼盖梁,后者为屋面梁,有时梁与板整浇在一起,中间的梁形成T形梁(图1-1),边梁构成L形梁。

柱:其作用是支承楼面体系,属于受压构件,荷载有偏心作用时,柱受压的同时还会受弯。

墙:与柱相似,是受压构件,承重的混凝土墙常用作基础墙、楼梯间墙,或在高层建筑中用于承受水平风载和地震作用的剪力墙,它受压的同时也会受弯。

基础:是将上部结构重量传递到地基(土层)的承重混凝土构件,其形式多样,有独立基础、桩基础、条形基础、平板式筏基础和箱形基础等。

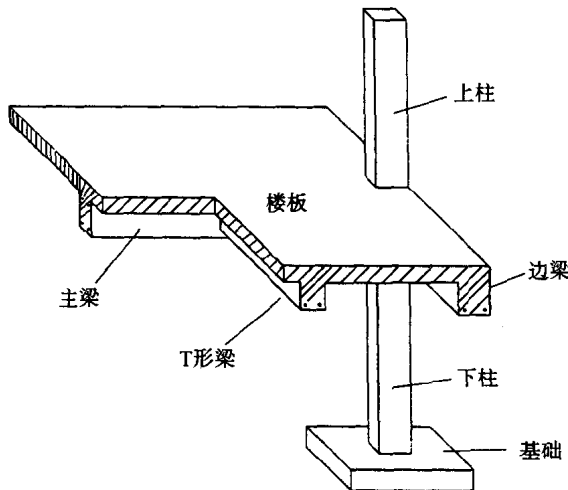


图 1-1 混凝土结构的组成

### 1.2.2 混凝土结构的基本构件

每一个承重结构都是由一些基本构件组成,按其形状和受力特点,可以汇总如下。

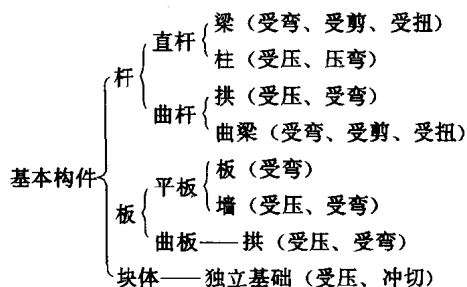


图 1-2 基本构件类型

### 1.2.3 混凝土结构的类型

混凝土结构按其构成的形式可分为实体结构和组合结构两大类。坝、桥墩、基础等通常为实体，称为实体结构；房屋、桥梁、码头、地下建筑等通常由若干基本构件连接组成，称为组合结构。连接组成的节点，如只能承受拉力、压力的称为铰接；如同时能承受弯矩等其他力作用时，称为刚接。前者有由压杆与拉杆铰接组成的桁架、梁与柱铰接的排架等；后者有压杆与拉杆刚接的空腹桁架、梁与柱刚接的框架等。

若组成的结构与其所受的外力在计算中视为皆在同一平面之内时，则称为平面结构，如平面排架、平面框架、平面拱等；若组成的结构可以承受不在同一平面内的外力，且计算时也按空间受力考虑时，则称该结构为空间结构，如壳体结构及考虑到双向地震作用时的框架，需作为空间结构计算。

以普通混凝土为主制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。素混凝土结构主要用于承受压力的结构，如基础、支墩、挡土墙、堤坝、地坪路面等；钢筋混凝土结构适用于各种受拉、受压和受弯的结构，如各种桁架、梁、板、柱、拱、壳等；预应力混凝土由于抗裂性好、刚度大和强度高，更适宜建造一些跨度大、荷载重及有抗裂抗渗要求的结构，如大跨屋架、桥梁、水池等。

## § 1.3 混凝土与钢筋共同工作的基础

### 1.3.1 粘 结 作 用

钢筋和混凝土两种材料组成为钢筋混凝土能有效地协同工作，有赖于混凝土硬化后钢筋与混凝土接触表面之间存在粘结作用，粘结作用来源于水泥浆胶体与钢筋接触面的化学粘着力、由于混凝土结硬的收缩将钢筋紧紧握裹而产生的摩擦力和钢筋表面凹凸不平而产生的机械咬合力。通过粘结应力可以传递两材料间的

应力,使钢筋和混凝土共同受力。

### 1.3.2 变形协调作用

钢筋和混凝土两种材料的温度膨胀系数很接近,钢筋为  $1.2 \times 10^{-5}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.4) \times 10^{-5}$ 。当温度变化时,不会因温度变化造成各自伸长(或缩短)而不协调,从而产生较大的相对变形,因此二者能共同工作。

### 1.3.3 良好的材料匹配

钢筋与混凝土两者粘结在一起能很好地共同工作,还需注意混凝土要有良好的配合比、浇捣工艺和养护。混凝土在空气中结硬体会收缩,在水中结硬体会膨胀,收缩比膨胀要大得多。仅混凝土一种材料时,其收缩自由不会产生裂缝;而与钢筋结合在一起,混凝土要收缩必然要带动钢筋,但钢筋在空气中不收缩,将阻止混凝土自由缩短。混凝土收缩会使钢筋受压,而钢筋使混凝土受拉,甚至开裂,混凝土退出工作,拉力会全部转移给钢筋承担,因此对混凝土必须减少水灰比、加强振捣和良好养护。

## § 1.4 混凝土结构抗御灾害的能力

在人们的日常生活中,难免遭受到各种自然灾害(如地震作用、风灾、洪水等)和人为的灾害(如火灾、爆炸、冲撞等)。混凝土结构必须具有一定抗御这些灾害的能力。

### 1.4.1 抗御自然灾害的能力

地震是一种自然现象,是由于地球表面板块构造运动引起,地壳内的地应力积累到一定程度就会产生岩石层的错动与断裂,能量的释放以波动形式向地表传播而引起地面强烈震动。全球每年要发生地震约 500 万次,其中 5 级以上强烈地震会对结构造成破坏,如 1960 年智利地震,1964 年美国阿拉斯加地震,1968 年日本十胜冲地震,1970 年秘鲁地震都引起大面积工程结构破坏;1976 年我国唐山地震造成极大损失。相对而言,钢筋混凝土结构有较好的抗震能力,但也不乏因处理不当而造成严重破坏的实例,比较典型的例子是 1972 年南美马那瓜地震,有二幢钢筋混凝土高层建筑隔河相望,一幢 15 层中央银行大厦地震时遭严重破坏,地震后拆除;另一幢 18 层的美洲银行大厦只受到轻微损坏,地震后稍加修理便恢复使用。近几十年来工程结构抗震研究有了长足发展,抗震理论经历了从静力到动力,从反应谱理论到时程反应分析,从线弹性理论计算到各种非线性理论计算,工程结构抗震从一般结构向复杂型、超大跨、超高层研究方向,抗震措施已发展有积极耗能、隔震减震和自动控制多种方法,且已取得明显效果。

建筑结构遭受风灾袭击时损失也是很严重的,有些高层建筑、高耸建筑、大跨桥梁对风的作用极为敏感,1940年美国刚建成数月的 Tocama 峡谷大桥在八级左右风力作用下,发生了强烈扭转颤振而振塌;1965年英国某电站三座 115m 高的钢筋混凝土双曲线冷却塔在飓风作用下顷刻间发生倒塌;1997年河南多座水库因强台风作用而坍塌,使数万人遇难。因风诱发的振动已成为设计时的首要控制因素。风荷载是一种随机性的瞬时动力荷载,风致振动理论非常复杂,包括颤振抖动、涡激振动、弛振等,是难度较大的一项研究工作,需通过大量实测统计和风洞试验来研究,目前国内外在这方面已取得可喜的成果。

洪水的灾害也是很严重的,1998年我国长江流域和松花江流域的严重水灾,使我国遭受巨大损失,江河堤埂在汛期中防洪作用十分艰巨,必须采取标本兼治,一方面加强上游的水土保持,另一方面要疏淤和加固并举。

#### 1.4.2 抗御人为灾害的能力

钢筋混凝土结构与钢、木结构相比,有较好抗火性能,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,使结构局部失效甚至倒塌。火灾是城市中一种多发性的灾害,应加强火灾后结构物的鉴定和加固修复的研究。火灾温度场及其升温曲线对混凝土不同燃烧层的强度和粘结力的影响,以及如何提高预应力混凝土结构构件耐久性能等问题,都还有待进一步研究。

爆炸是发生概率很低的灾害,但对受其作用的混凝土结构来说,破坏性极大,爆炸灾害有武器爆炸、燃料爆炸、化学药品爆炸等。家用燃气爆炸也是一种常见的人为灾害。它不同于化学爆炸和核爆炸,其压力过程是一个燃烧波随时间推进的过程,由于可燃预混气体燃烧热的释放,导致空间内压力不断上升,对结构造成破坏。混凝土结构抗御核武器和常规武器破坏,既要解决抗爆炸荷载的结构强度和抗力问题,解决打不垮的问题,同时要解决防护冲击震动(爆炸震动),解决震不死、震不坏问题。

对结构的冲撞引起的事故,如车辆冲撞道路护栏、船只冲撞桥墩和岸堤、工厂吊车吊物对结构的冲撞等。虽然都属于一次瞬时性作用,但其瞬时作用力会比静物重量大几倍到几十倍,而且会引起结构的振动。钢筋混凝土结构有较好的抗冲击性能。

### § 1.5 混凝土结构的拓展及展望

钢筋混凝土结构作为主要材料在 20 世纪获得很大发展,为进一步发挥其优越性,在所用的材料上和配筋方式上有了很多新进展,从而拓宽了钢筋混凝土结构使用范围,而且形成了一些新性能的钢筋混凝土结构形式,如高性能混凝土结构、纤维增强混凝土结构、钢骨混凝土结构、钢管混凝土结构、钢—钢筋混凝土组合

结构等等。

### 1.5.1 高性能混凝土结构

普通混凝土单位体积重量为  $2400\text{kg/m}^3$  左右, 远比钢、木等材料重, 其强度与单位重量比值远小于钢、木等结构材料, 因此用其制作相同承载力的构件和结构就比钢、木结构要重。结构自重大, 势必加大支承结构和基础的荷载, 增大结构构件截面, 减小有效空间, 上海有幢高层建筑底层柱截面甚至达到  $3\text{m} \times 3\text{m}$ ; 在软土地区, 结构重量增大还加剧了地基的沉降量; 在地震区, 结构重量增大, 还加大了惯性力和结构地震反应; 且其抗拉强度低容易开裂, 降低了结构使用性能, 由于这些缺点, 妨碍了它在工程中更广泛的应用。因此, 发展具有高强度、高耐久性、高流动性、提高其抗震、抗渗透、抗爆、抗冲击多方面优越性能的高性能混凝土是其发展的一个重要方面。

目前我国工程中普遍使用的混凝土强度等级为 C20~C40, 在高层建筑中, 也使用 C50~C60 级混凝土, 个别工程用到 C80, 国外有些重大工程甚至用到 C130。高强混凝土尚无明确的标准, 我国《高强混凝土结构设计施工指南》将混凝土等级  $\geq \text{C50}$  的混凝土划为高强混凝土范围。高强混凝土优点是强度高、变形小、耐久性好。其配合比的重要特点是低水灰比和多组掺合剂。降低水灰比可减少混凝土中孔隙, 提高密实性和强度, 并减少收缩徐变。外加高效减水剂、粉煤灰、沸石粉、硅粉等掺合剂可以改善拌料工作度, 降低泌水离析, 改善混凝土微观结构, 增加混凝土抗酸碱腐蚀和防止碱骨料反应的作用。材料强度的提高和性能的改善, 为钢筋混凝土结构进一步向大跨化、高耸化发展创造了条件, 桥梁的跨度本世纪末已突破 500m, 正逼近 2000m, 大跨度空间结构跨度也将突破 200m, 印度正在设计拟在孟买建造 560m 高的钢筋混凝土电视塔, 我国拟在雅砻江拐弯处建一座混凝土拱式电站大坝, 高 325m。

高强混凝土具有优良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, 为正确采用高强混凝土结构, 上海已颁布地方标准《高强混凝土结构设计规程》(DBJ 08—77—98), 中国工程建设标准化协会已出版《高强混凝土结构技术规程》(CECS104: 99)。

### 1.5.2 纤维增强混凝土结构

为了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, 在普通混凝土中掺入适当的各种纤维材料而形成的纤维混凝土结构, 现已得到很大发展和推广应用。

纤维材料有钢纤维、合成纤维(尼龙基纤维、聚丙烯纤维等)、玻璃纤维、碳纤维等, 其中钢纤维混凝土结构应用比较成熟, 美国混凝土学会 ACI544 委员会制定了钢纤维混凝土施工导引(3R—84); 日本土木学会于 1983 年制定了纤维混凝土

土设计施工建议；我国也于 1992 年出版了《钢纤维混凝土结构设计施工规程》(CECS38:92)。

钢纤维混凝土是将短的、不连续的钢纤维均匀乱向地掺入普通混凝土制成一种“特殊”混凝土，钢纤维混凝土结构有无筋钢纤维混凝土结构和钢筋钢纤维混凝土结构。可以采用浇筑振捣施工，有时也采用喷射方法施工。目前我国常用的钢纤维截面有圆形（圆直形）、月牙形（熔抽形）和矩形（剪切形），国外尚有波形纤维、变截面纤维、骨棒形纤维等。钢纤维长度从 20mm 到 50mm 分 7 级，钢纤维截面直径或等效直径在 0.3mm 到 0.8mm，长径比为 40~100。钢纤维的抗拉强度要求不低于  $380\text{N/mm}^2$ ，钢纤维掺量为混凝土体积的 0.5%~2%，钢纤维混凝土破坏时，钢纤维一般是从基体混凝土中拔出而不是拉断，因此钢纤维与基体混凝土的粘结强度是影响钢纤维增强和阻裂效果的重要因素。

钢纤维的工程应用很广，用于预制桩的桩尖和桩顶部分，可以取消桩顶防护钢板和铁制桩尖，并减少两端横向钢筋用量；用于抗震框架节点，可减少钢筋用量，并便于浇筑节点区混凝土；还可以用于刚性防水屋面、地下人防工程、地下泵房；在水工结构中，用于高速水流冲刷腐蚀部位、闸门的门槽、渡槽的受拉区，喷射钢纤维混凝土用于水电站中有压隧道衬砌工程、大坝防渗面板、隧洞及泄洪洞；在桥梁中用于混凝土拱桥受拉区段可提高抗拉强度，降低主拱高度，减轻拱圈自重。

合成纤维可以作为主要加筋材料，提高混凝土的抗拉、韧性等结构性能，用于各种水泥基板材；也可以作为一种次要加筋材料，主要用于提高水泥混凝土材料的抗裂性。用于混凝土材料的合成纤维，应具有较高的耐碱性及在水泥基体中的分散性与粘结性，目前应用较理想的有尼龙单丝纤维、纤化聚丙烯纤维、纤维长度一般为 20mm，一般掺量为  $600\sim 900\text{g/m}^3$ ，上海市建筑科学院研制的尼龙基合成纤维，已在上海东方明珠电视塔、地铁 1 号线和八万人体育场看台板面层使用，取得较好效果。

碳纤维具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳、施工便捷等优异性能，已广泛用于建筑、桥梁结构的加固补强。碳纤维长丝直径为  $5\sim 8\mu\text{m}$  之间，并合成含 3000~18000 根的长丝束，加固混凝土结构用的碳纤维有单向碳纤维布，双向碳纤维交织布，单向碳纤维层压板材，以及用于可施加预应力棒材，其拉伸模量均为  $230\text{GPa}$ ，拉伸强度为  $3200\sim 3500\text{GPa}$ 。1981 年瑞典最早采用碳纤维复合材料加固 Ebach 桥，此后十几年间此项技术在日美等国发展很快，日本至今已有 1000 多个工程加固项目采用这项技术，日本、美国、加拿大在 90 年代先后制定了加固设计规程。国内从 1997 年始也开始研究并在很多工程中应用，取得很好社会效益和经济效益，目前国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心正在主持编制我国《碳纤维布加固修复混凝土结构技术规程》。

### 1.5.3 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构有实腹式钢骨和空腹式钢骨两种形式,前者通常是采用由钢板焊接拼成,或用直接轧制而成的工字形、Ⅱ形、十字形截面,外包钢筋混凝土(图1-3);后者是用轻型型钢拼成构架埋入混凝土中(图1-4)。抗震结构多采用实腹式钢骨混凝土结构。

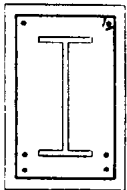


图 1-3 实腹式钢骨混凝土构件截面形式

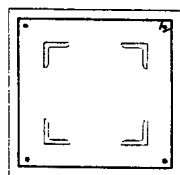
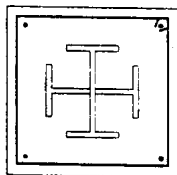
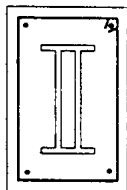


图 1-4 空腹式钢骨混凝土  
构件截面形式

钢骨混凝土的钢骨与外包钢筋混凝土共同承受荷载作用,且外包混凝土可以防止钢构件的局部屈曲,提高了构件的整体刚度,显著地改善钢构件的平面扭转屈曲性能,使钢材的强度可以得到充分发挥。此外,外包混凝土可增加结构的耐火性和耐久性,钢骨混凝土结构比钢结构节省钢材,增加刚度和阻尼,有利于控制结构的变形和振动;因此钢骨混凝土结构的承载力更大,且能提高延性和耗能能力,可显著地改善抗震性能。

钢骨混凝土结构中的钢材,根据构件的重要性及焊接要求,可以选用Q235B、C、D级的碳素结构钢或Q345B~E级低合金结构钢,混凝土强度等级不低于C25,有的高层建筑则用到C80。

各种结构体系,如框架、框架-剪力墙、剪力墙、框架-核心筒中的梁、柱、墙均可采用钢骨混凝土构件,在多数情况下,高层中仅有少数楼层或局部部位采用钢骨混凝土构件。钢骨混凝土构件也常常在混合结构中使用,如在不同的抗侧力单元中分别采用钢骨混凝土、钢或钢筋混凝土结构,也可能是在同一抗侧力结构中梁、柱或墙分别采用不同材料。

钢骨混凝土结构在美、英、俄、日等国早已开始应用,并分别编制有相应的结构设计规范。我国自改革开放以来,也广泛应用这种结构,已经建成的高层建筑也有30余幢,如26层的北京香格里拉饭店就是采用钢骨混凝土结构,88层的上海金茂大厦外围柱就是采用钢骨混凝土结构。正在建造的95层高的上海浦东世界环球金融中心大厦的外框筒柱是采用C80,内埋H型钢的钢骨混凝土柱。我国现已制定行业标准《钢骨混凝土结构设计规程》(YB 9082—97)。

展望21世纪,土木工程将是智能化建筑和高速交通时代,混凝土结构将起着愈来愈重要的作用。面对控制人口增长、节约能源、保护环境的可持续发展的战