



百校土木工程专业通用教材

# 混凝土结构设计原理

HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

同济大学出版社

主 编 赵顺波  
副主编 许成祥  
周新刚

# 混凝土结构设计原理

主 编 赵顺波

副主编 许成祥 周新刚



同济大学出版社

## 内 容 提 要

本书是按照高等学校土木工程专业指导委员会编制的《混凝土结构》课程教学大纲的要求组织编写的。全书共分十章,主要内容有:混凝土结构的材料,混凝土结构设计计算原则,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受压构件承载力计算,钢筋混凝土受拉构件承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算及预应力混凝土构件设计等。

本书可作为土木工程专业的课程教材,也可用于土建工程技术人员继续教育教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/赵顺波主编. —上海:同济大学出版社,2004.7

百校土木工程专业通用教材

ISBN 7-5608-2877-9

I. 混… II. 赵… 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(2004)第 051249 号

### 混凝土结构设计原理

主 编 赵顺波 副主编 许成祥、周新刚

责任编辑 司徒妙龄 责任校对 杨江淮 封面设计 李志云

---

出 版 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 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 21

字 数 420 000

印 数 1—4 100

版 次 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2877-9/TU·548

定 价 25.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

## “百校土木工程专业通用教材”编写委员会

**主任** 陈以一 (同济大学)

**委员** (排名不分主次)

刘春原 (河北工业大学)

许成祥 (长江大学)

赵顺波 (华北水利水电学院)

朱彦鹏 (兰州理工大学)

麻建锁 (河北建筑工程学院)

周新刚 (烟台大学)

覃 辉 (五邑大学)

许 强 (成都理工大学)

梁兴文 (西安建筑科技大学)

方 云 (中国地质大学·武汉)

陈忠汉 (苏州科技学院)

王全凤 (华侨大学)

李章政 (四川大学)

李传才 (武汉大学)

虞庐松 (兰州交通大学)

范 进 (南京理工大学)

郑荣跃 (宁波大学)

赵 林 (河南科技大学)

王广月 (山东大学)

杜守军 (河北农业大学)

白晓红 (太原理工大学)

肖 琦 (东北电力学院)

徐汉涛 (南通工学院)

严 兵 (江西科技师范学院)

高洪波 (信阳师范学院)

**策划** 周克荣 (同济大学)

## 前 言

本书是按照高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科培养目标和培养方案及课程教学大纲》(2002年11月出版)中的《混凝土结构》课程教学大纲的要求组织编写的,可作为土木工程专业的课程教材,也可用于土建工程技术人员继续教育教材。

全书共分十章,主要内容有:混凝土结构的材料,混凝土结构设计计算原则,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受压构件承载力计算,钢筋混凝土受拉构件承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算及预应力混凝土构件设计等。为了便于教学使用,本书各章后均列出了反映相应重点概念和计算方法的思考题和习题。

本书由同济大学出版社组织有多年丰富教学经验的教师编写,由赵顺波教授担任主编并统稿,许成祥教授、周新刚教授担任副主编。各章编写分工如下:1(赵顺波);2(周新刚、施养杭);3(许成祥,李凤兰);4(许成祥、许美姿、刘丰军);5(李凤兰、韩建平、孔伟);6(周新刚、颜少荣、林德忠);7(李大庆);8(许成祥、李碧雄、周明杰);9(赵顺波、邵永健、高洪波);10(赵顺波、杜喜凯、施养杭);各章思考题、习题及附表(李凤兰)。

由于各校在混凝土结构课程的学时安排上不尽相同,本书可与后继课程的教材——“百校土木工程专业通用教材”之《混凝土结构设计》配套使用,任课教师可根据课时情况对两本书的教学内容进行统筹安排。

本书编写过程中参考了国内同行的论文资料、著作和教材,在此谨致谢忱。由于编者水平有限,本教材中不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2004.3

# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| <b>1 绪论</b> .....          | (1)  |
| 1.1 混凝土结构的基本概念 .....       | (1)  |
| 1.2 混凝土结构的发展简况 .....       | (2)  |
| 1.2.1 材料与施工技术方面的发展 .....   | (2)  |
| 1.2.2 结构形式方面的发展 .....      | (4)  |
| 1.2.3 设计计算理论方面的发展 .....    | (6)  |
| 1.2.4 加固技术方面的发展 .....      | (6)  |
| 1.3 本课程的任务和特点 .....        | (6)  |
| 思考题与习题 .....               | (8)  |
| <b>2 混凝土结构的材料</b> .....    | (9)  |
| 2.1 钢筋 .....               | (9)  |
| 2.1.1 钢筋的品种 .....          | (9)  |
| 2.1.2 钢筋的力学性能 .....        | (10) |
| 2.1.3 钢筋的选用原则 .....        | (15) |
| 2.2 混凝土 .....              | (16) |
| 2.2.1 混凝土的强度 .....         | (16) |
| 2.2.2 混凝土的变形 .....         | (21) |
| 2.2.3 混凝土的选用原则 .....       | (28) |
| 2.3 钢筋的锚固与连接 .....         | (28) |
| 2.3.1 钢筋与混凝土之间的粘结机理 .....  | (28) |
| 2.3.2 钢筋的锚固 .....          | (32) |
| 2.3.3 钢筋的连接 .....          | (33) |
| 思考题与习题 .....               | (36) |
| <b>3 混凝土结构设计计算原则</b> ..... | (38) |
| 3.1 结构的功能要求和极限状态 .....     | (38) |
| 3.1.1 结构的功能要求 .....        | (38) |
| 3.1.2 结构的极限状态 .....        | (38) |
| 3.1.3 结构的设计状况 .....        | (39) |
| 3.1.4 结构的设计使用年限 .....      | (40) |

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| 3.1.5 结构上的作用、作用效应及结构抗力 .....     | (40)        |
| 3.2 概率极限状态设计方法 .....             | (41)        |
| 3.2.1 功能函数、极限状态方程 .....          | (41)        |
| 3.2.2 结构可靠度、失效概率及可靠指标 .....      | (42)        |
| 3.2.3 设计基准期 .....                | (44)        |
| 3.2.4 结构的安全等级 .....              | (44)        |
| 3.2.5 目标可靠指标 .....               | (44)        |
| 3.3 荷载的代表值 .....                 | (45)        |
| 3.3.1 荷载标准值 .....                | (45)        |
| 3.3.2 荷载准永久值 .....               | (45)        |
| 3.3.3 荷载组合值 .....                | (45)        |
| 3.4 材料强度的标准值和设计值 .....           | (46)        |
| 3.4.1 取值原则 .....                 | (46)        |
| 3.4.2 钢筋强度标准值和设计值 .....          | (46)        |
| 3.4.2 混凝土强度标准值和设计值 .....         | (46)        |
| 3.5 极限状态的实用设计表达式 .....           | (48)        |
| 3.5.1 承载能力极限状态设计表达式 .....        | (48)        |
| 3.5.2 正常使用极限状态设计表达式 .....        | (50)        |
| 3.6 混凝土结构的耐久性设计 .....            | (50)        |
| 3.6.1 混凝土结构耐久性概念 .....           | (50)        |
| 3.6.2 影响混凝土结构耐久性的因素 .....        | (51)        |
| 3.6.3 耐久性设计原则 .....              | (53)        |
| 3.6.4 提高耐久性的措施 .....             | (53)        |
| 思考题与习题 .....                     | (55)        |
| <b>4 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算 .....</b> | <b>(57)</b> |
| 4.1 受弯构件的基本构造要求 .....            | (57)        |
| 4.1.1 截面形状及尺寸 .....              | (57)        |
| 4.1.2 钢筋布置 .....                 | (58)        |
| 4.2 受弯构件正截面受力性能试验分析 .....        | (59)        |
| 4.2.1 正截面工作的三个阶段 .....           | (59)        |
| 4.2.2 正截面的破坏形式 .....             | (63)        |
| 4.3 正截面承载力计算原则 .....             | (64)        |
| 4.3.1 基本假定 .....                 | (64)        |
| 4.3.2 基本方程 .....                 | (65)        |
| 4.3.3 适筋和超筋破坏的界限条件 .....         | (67)        |

|                                 |             |
|---------------------------------|-------------|
| 4.3.4 适筋和少筋破坏的界限条件·····         | (68)        |
| 4.4 单筋矩形截面的承载力计算·····           | (69)        |
| 4.4.1 基本公式及适用条件·····            | (69)        |
| 4.4.2 计算方法·····                 | (69)        |
| 4.4.3 计算表格·····                 | (71)        |
| 4.5 双筋矩形截面的承载力计算·····           | (75)        |
| 4.5.1 基本公式及适用条件·····            | (75)        |
| 4.5.2 计算方法·····                 | (77)        |
| 4.6 T形截面的承载力计算·····             | (82)        |
| 4.6.1 T形截面计算的特点·····            | (82)        |
| 4.6.2 计算公式·····                 | (84)        |
| 4.6.3 计算方法·····                 | (87)        |
| 思考题与习题·····                     | (92)        |
| <b>5 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算·····</b> | <b>(96)</b> |
| 5.1 斜截面开裂前的受力分析·····            | (96)        |
| 5.2 无腹筋梁的斜截面受剪承载力·····          | (97)        |
| 5.2.1 斜截面受剪分析·····              | (97)        |
| 5.2.2 无腹筋梁的受剪破坏形态·····          | (99)        |
| 5.2.3 影响无腹筋梁斜截面受剪承载力的主要因素·····  | (100)       |
| 5.2.4 无腹筋梁斜截面受剪承载力计算·····       | (101)       |
| 5.3 有腹筋梁的斜截面受剪承载力·····          | (102)       |
| 5.3.1 腹筋的作用·····                | (102)       |
| 5.3.2 有腹筋梁的斜截面破坏形态·····         | (102)       |
| 5.3.3 有腹筋梁斜截面受剪承载力计算公式·····     | (103)       |
| 5.3.4 斜截面受剪承载力计算公式的适用条件·····    | (105)       |
| 5.3.5 斜截面受剪承载力计算步骤·····         | (107)       |
| 5.4 钢筋混凝土梁的斜截面受弯承载力·····        | (111)       |
| 5.4.1 抵抗弯矩图·····                | (112)       |
| 5.4.2 保证斜截面受弯承载力的措施·····        | (114)       |
| 5.4.3 钢筋混凝土伸臂梁的设计实例·····        | (117)       |
| 5.5 钢筋骨架的构造要求·····              | (123)       |
| 5.5.1 箍筋的构造要求·····              | (123)       |
| 5.5.2 纵向钢筋的构造要求·····            | (125)       |
| 5.5.3 弯起钢筋的构造要求·····            | (127)       |
| 思考题与习题·····                     | (128)       |



|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>6 钢筋混凝土受压构件承载力计算</b>         | (132) |
| 6.1 受压构件的基本构造要求                 | (132) |
| 6.1.1 受压构件的分类                   | (132) |
| 6.1.2 截面形式及尺寸                   | (133) |
| 6.1.3 材料强度等级                    | (134) |
| 6.1.4 纵向钢筋                      | (134) |
| 6.1.5 箍筋                        | (135) |
| 6.2 轴心受压构件的正截面承载力计算             | (135) |
| 6.2.1 普通箍筋轴心受压柱的受力性能与承载力计算      | (135) |
| 6.2.2 间接钢筋轴心受压柱的受力性能与承载力计算      | (142) |
| 6.3 偏心受压构件的正截面承载力分析             | (146) |
| 6.3.1 偏心受压构件的破坏形态及其特征           | (146) |
| 6.3.2 大、小偏心受压的分界                | (148) |
| 6.3.3 纵向弯曲对其承载力的影响              | (148) |
| 6.4 矩形截面偏心受压构件的正截面承载力计算         | (152) |
| 6.4.1 基本计算公式                    | (152) |
| 6.4.2 非对称配筋截面的承载力计算             | (154) |
| 6.4.3 对称配筋截面的承载力计算              | (165) |
| 6.5 工字形截面偏心受压构件的正截面承载力计算        | (169) |
| 6.5.1 基本计算公式                    | (169) |
| 6.5.2 对称配筋的计算                   | (171) |
| 6.6 偏心受压构件的正截面承载力 $N$ 和 $M$ 的关系 | (175) |
| 6.6.1 大偏心受压情况                   | (175) |
| 6.6.2 小偏心受压情况                   | (176) |
| 6.6.3 内力组合                      | (176) |
| 6.7 偏心受压构件的斜截面受剪承载力             | (177) |
| 6.7.1 轴向压力的作用                   | (178) |
| 6.7.2 计算公式                      | (178) |
| 思考题与习题                          | (180) |
| <b>7 钢筋混凝土受拉构件承载力计算</b>         | (186) |
| 7.1 受拉构件的分类                     | (186) |
| 7.2 轴心受拉构件的正截面承载力计算             | (186) |
| 7.3 偏心受拉构件的正截面承载力计算             | (187) |
| 7.3.1 偏心受拉构件的分类                 | (187) |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 7.3.2 小偏心受拉构件正截面承载力计算 .....      | (188)        |
| 7.3.3 大偏心受拉构件正截面承载力计算 .....      | (189)        |
| 7.4 偏心受拉构件的斜截面承载力计算 .....        | (192)        |
| 思考题与习题 .....                     | (193)        |
| <b>8 钢筋混凝土受扭构件承载力计算 .....</b>    | <b>(195)</b> |
| 8.1 受扭构件的分类 .....                | (195)        |
| 8.2 纯扭构件的承载力计算 .....             | (195)        |
| 8.2.1 矩形截面纯扭构件的破坏形态 .....        | (195)        |
| 8.2.2 矩形截面纯扭构件的开裂扭矩计算 .....      | (198)        |
| 8.2.3 矩形截面纯扭构件的承载力计算 .....       | (199)        |
| 8.2.4 带翼缘截面纯扭构件的承载力计算 .....      | (202)        |
| 8.2.5 箱形截面纯扭构件的承载力计算 .....       | (203)        |
| 8.2.6 构造要求 .....                 | (204)        |
| 8.3 剪扭共同作用下的构件承载力计算 .....        | (207)        |
| 8.3.1 剪扭相关性 .....                | (207)        |
| 8.3.2 简化计算方法 .....               | (208)        |
| 8.3.3 矩形截面剪扭构件的承载力计算 .....       | (209)        |
| 8.3.4 带翼缘截面剪扭构件的承载力计算 .....      | (209)        |
| 8.3.5 箱形截面剪扭构件的承载力计算 .....       | (210)        |
| 8.3.6 构造要求 .....                 | (210)        |
| 8.4 弯剪扭共同作用下的构件承载力计算 .....       | (215)        |
| 8.4.1 弯扭共同作用下的构件承载力计算 .....      | (216)        |
| 8.4.2 弯剪扭共同作用下的构件承载力计算 .....     | (216)        |
| 思考题与习题 .....                     | (221)        |
| <b>9 钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算 .....</b> | <b>(224)</b> |
| 9.1 抗裂验算 .....                   | (224)        |
| 9.1.1 一般要求 .....                 | (224)        |
| 9.1.2 轴心受拉构件的抗裂验算 .....          | (224)        |
| 9.1.3 受弯构件的抗裂验算 .....            | (225)        |
| 9.1.4 偏心受拉构件的抗裂验算 .....          | (227)        |
| 9.1.5 偏心受压构件的抗裂验算 .....          | (227)        |
| 9.2 裂缝宽度验算 .....                 | (229)        |
| 9.2.1 一般要求 .....                 | (229)        |
| 9.2.2 裂缝宽度的计算方法 .....            | (229)        |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 9.2.3 裂缝截面钢筋应力计算 .....        | (234)        |
| 9.3 变形验算 .....                | (237)        |
| 9.3.1 一般要求 .....              | (237)        |
| 9.3.2 钢筋混凝土受弯构件截面刚度 .....     | (237)        |
| 9.3.3 钢筋混凝土受弯构件挠度计算 .....     | (242)        |
| 思考题与习题 .....                  | (245)        |
| <b>10 预应力混凝土构件计算 .....</b>    | <b>(248)</b> |
| 10.1 预应力混凝土的基本理念 .....        | (248)        |
| 10.1.1 预应力混凝土的特点 .....        | (248)        |
| 10.1.2 预应力的施加方法 .....         | (249)        |
| 10.2 预应力锚具与孔道成型材料 .....       | (251)        |
| 10.2.1 锚具 .....               | (251)        |
| 10.2.2 孔道成型与灌浆材料 .....        | (254)        |
| 10.3 预应力钢筋的张拉控制应力及预应力损失 ..... | (254)        |
| 10.3.1 预应力钢筋的张拉控制应力 .....     | (254)        |
| 10.3.2 预应力损失 .....            | (255)        |
| 10.3.3 预应力损失值的组合 .....        | (261)        |
| 10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的设计 .....    | (262)        |
| 10.4.1 预应力张拉施工阶段应力分析 .....    | (262)        |
| 10.4.2 正常使用阶段应力分析 .....       | (266)        |
| 10.4.3 正常使用极限状态验算 .....       | (268)        |
| 10.4.4 正截面承载力计算 .....         | (270)        |
| 10.4.5 施工阶段局部承压验算 .....       | (270)        |
| 10.5 预应力混凝土受弯构件的设计 .....      | (278)        |
| 10.5.1 预应力张拉施工阶段应力分析 .....    | (278)        |
| 10.5.2 正常使用阶段应力分析 .....       | (281)        |
| 10.5.3 施工阶段混凝土应力控制验算 .....    | (282)        |
| 10.5.4 正常使用极限状态验算 .....       | (284)        |
| 10.5.5 正截面承载力计算 .....         | (288)        |
| 10.5.6 斜截面承载力计算 .....         | (289)        |
| 10.5.7 先张法预应力的传递长度 .....      | (291)        |
| 10.6 预应力混凝土构件的构造要求 .....      | (306)        |
| 10.6.1 截面形式和尺寸 .....          | (306)        |
| 10.6.2 纵向非预应力钢筋 .....         | (306)        |
| 10.6.3 先张法构件的要求 .....         | (307)        |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 10.6.4 后张法构件的要求                | (308) |
| 思考题与习题                         | (310) |
| <b>附表</b>                      | (314) |
| 附表 1 普通钢筋强度标准值                 | (314) |
| 附表 2 预应力钢筋强度标准值                | (314) |
| 附表 3 钢筋弹性模量                    | (315) |
| 附表 4 普通钢筋强度设计值                 | (315) |
| 附表 5 预应力钢筋强度设计值                | (315) |
| 附表 6 混凝土强度标准值                  | (316) |
| 附表 7 混凝土强度设计值                  | (316) |
| 附表 8 混凝土弹性模量                   | (316) |
| 附表 9 混凝土结构的环境类别                | (316) |
| 附表 10 纵向受力钢筋的混凝土保护层最小厚度        | (317) |
| 附表 11 截面抵抗矩塑性系数                | (317) |
| 附表 12 结构构件的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值     | (318) |
| 附表 13 受弯构件的允许挠度                | (318) |
| 附表 14 纵向受拉钢筋的最小配筋率             | (318) |
| 附表 15 钢筋混凝土矩形截面受弯构件正截面承载力计算系数表 | (319) |
| 附表 16 钢筋的计算截面面积及公称质量表          | (320) |
| 附表 17 各种钢筋间距时每米板宽中的钢筋截面面积      | (320) |
| 附表 18 钢丝的公称直径、截面面积及理论质量        | (321) |
| 附表 19 钢绞线的公称直径、截面面积及理论质量       | (321) |
| <b>参考文献</b>                    | (322) |

# 1 绪 论

## 1.1 混凝土结构的基本概念

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构;钢筋混凝土结构是指由配置受力钢筋的混凝土制成的结构;预应力混凝土结构是指由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土制成的结构。

众所周知,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,破坏时表现出良好的变形能力,但细长的钢筋受压时极易失稳,强度得不到充分发挥,仅能作为受拉构件,同时钢筋的防锈能力差,价格较高。混凝土的抗压强度高而抗拉强度很低,一般抗拉强度只有抗压强度的  $1/20 \sim 1/8$ ,受拉破坏时具有明显的脆性性质,破坏前无预兆,这就使得素混凝土结构仅能用于以受压为主的基础、柱墩和一些非承重结构,而很少用作主要受力构件。但如果将钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式有机地结合在一起共同工作,可以取长补短,使钢筋主要承受拉力、混凝土主要承受压力,充分发挥它们的材料特性,并使得结构具有良好的变形能力。因此,工程中应用最为广泛的是钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。

钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能很不相同,但能够共同工作,其主要原因是:

(1) 钢筋与混凝土之间存在有良好的粘结力,能牢固地形成整体,保证在荷载作用下钢筋和外围混凝土能够协调变形、共同受力。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。钢材为  $1.2 \times 10^{-5}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ,因此,当温度变化时,二者之间不会产生过大的相对变形而导致它们之间的粘结力破坏。

混凝土结构与其他结构相比,主要有如下优点:

(1) 合理用材。能充分合理的利用钢筋(高抗拉性能)和混凝土(高抗压性能)两种材料的受力性能,结构的承载力与其刚度比例合适,基本无局部稳定问题。对于一般工程结构,其经济指标优于钢结构。

(2) 耐久性好,维护费用低。在一般环境下,钢筋受到混凝土保护而不易发生锈蚀,而混凝土的强度随着时间的增长还有所提高,因而提高了结构的耐久性,不像钢结构那样需要经常的维修和保养。对处于侵蚀性气体或受海水浸泡的钢筋混凝土结构,经过合理的设计及采取特殊的防护措施,一般也可以满足工程需要。

(3) 耐火性好。混凝土是不良导热体,遭受火灾时,钢筋混凝土结构不会像木结构那样被燃烧,钢筋因有混凝土包裹而不致于很快升温到失去承载力的程度,这是钢、木结构所不能比拟的。

(4) 可模性好。混凝土可根据设计需要支模浇筑成各种形状和尺寸的结构,适用于建造形状复杂的结构及空间薄壁结构,这一特点是砌体、钢、木等结构所不具备的。

(5) 整体性好。现浇混凝土结构的整体性好,再通过合适的配筋,可获得较好的延性,有利于抗震、防爆。同时,其防辐射性能好,适用于防护结构;刚度大、阻尼大,有利于结构的变形控制。

(6) 易于就地取材。混凝土所用的大量砂、石,产地普遍,易于就地取材。另外,还可有效地利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

但是,混凝土结构也存在一些缺点,主要有:

(1) 自重。钢筋混凝土的重力密度约为  $25\text{kN/m}^3$ ,比砌体和木材的重度都大。尽管比钢材的重度小,但结构的截面尺寸较大,因而其自重远远超过相同宽度或高度的钢结构,这对于建造大跨度结构和高层建筑结构是不利的。因此,需要开发和研究轻质混凝土、高强混凝土和预应力混凝土。

(2) 抗裂性差。由于混凝土的抗拉强度较低,在正常使用时钢筋混凝土结构往往是带裂缝工作的,裂缝存在会降低抗渗和抗冻能力而影响使用性能。在工作条件较差的环境,如露天、沿海、化学侵蚀,会导致钢筋锈蚀而影响结构物的耐久性。采用预应力混凝土可较好地解决开裂问题,利用树脂涂层钢筋可防止因混凝土开裂而导致的钢筋锈蚀。

(3) 施工比较复杂,工序多。需要支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模,因此工期长,施工受季节、天气的影响较大。现浇钢筋混凝土使用模板多,模板材料耗费量大。

(4) 新老混凝土不易形成整体。混凝土结构一旦破坏,修补和加固比较困难。

## 1.2 混凝土结构的发展简况

混凝土结构从 19 世纪中叶开始采用以来,距今仅 150 多年。与砖石结构、木结构和钢结构相比,混凝土结构的历史并不长,但发展极为迅速,目前已成为世界各国现代土木工程建设中占主导地位的结构。为了克服混凝土结构的缺点,发挥其优势,以适应社会建设不断发展的需要,对混凝土结构的材料制造与施工技术、结构形式、结构设计计算理论等方面的研究也在不断地发展。

### 1.2.1 材料与施工技术方面的发展

#### (1) 混凝土材料

具有高强度、高工作性和高耐久性的高性能混凝土是混凝土的主要发展方向之

一。早期混凝土的强度都比较低,较高强度的混凝土又比较干硬而难以成型。目前,立方体抗压强度为  $50\sim 80\text{N/mm}^2$ 、坍落度为  $12\sim 16\text{cm}$  的高性能混凝土已在工程中广泛应用;立方体抗压强度为  $100\sim 200\text{N/mm}^2$  的超高强混凝土也得到了实际工程应用。采用活性细粉配制的混凝土立方体抗压强度可达  $200\sim 800\text{N/mm}^2$ ,抗拉强度可达  $25\sim 150\text{N/mm}^2$ 。大型结构的现浇混凝土施工,因采用工地现场拌和楼(站)集中搅拌混凝土和泵送技术,可将混凝土通过泵送管道输送至浇筑地点,给机械化现浇混凝土施工带来了很大的方便;商品混凝土的发展结束了在现场存放混凝土原材料、混凝土搅拌等工序,保证了混凝土质量,减少了环境污染,因此,在城市建筑中得到迅速的发展。

具有自身诊断、自身控制、自身修复等功能的机敏型高性能混凝土,得到越来越多的研究和重视。如自密实混凝土,可不需机械振捣,而是依靠自身的重量达到密实。混凝土具有高工作性,质量均匀、耐久,钢筋布置较密或构件体型复杂时也易于浇筑,施工速度快,使无噪声混凝土施工成为现实,从而实现了文明施工。再如内养护混凝土,采用部分吸水预湿轻骨料在混凝土内部形成蓄水器,保持混凝土得到持续的内部潮湿养护,与外部潮湿养护相结合,可使混凝土的自生收缩大为降低,减少了微细裂缝。

利用天然轻集料(如浮石、凝灰石等)、工业废料轻集料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石及其轻砂)、人造轻集料(如页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂)制成的轻集料混凝土,具有重度小(重度仅为  $14\sim 18\text{kN/m}^3$ ,自重减少  $20\%\sim 30\%$ )、相对强度高等特点,同时具有优良的保温和抗冻性能。天然轻集料及工业废料轻集料还具有节约能源、减少堆积废料占用土地、减少厂区或城市污染、保护环境等优点。承重的人造轻集料混凝土,由于弹性模量低于同等级的普通混凝土,吸收冲击能量快,能有效地减小地震作用,从而节约材料、降低造价。

再生骨料混凝土的研究和利用是解决城市改造与拆除重建建筑废料、减少环境建筑垃圾、变废为宝的途径之一。将拆除建筑物的废料如混凝土、砖块经破碎后得到的再生粗骨料,清洗以后可以代替全部或部分石子配制混凝土,其强度、变形性能视再生粗骨料代替石子的比率而有所不同。

用于大体积混凝土结构(如水工大坝、大型基础)、公路路面与厂房地面的碾压混凝土,其浇筑过程采用先进的机械化施工,浇筑工期可大为缩短,并能节约大量材料,从而获得较高的经济效益。

为了改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点,在混凝土中掺加纤维以改善混凝土性能的研究发展得相当迅速。目前,研究较多的有钢纤维、耐碱玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维混凝土等。在承重结构中,发展较快、应用较广的是钢纤维混凝土。钢纤维混凝土采用常规施工技术,其纤维掺量一般为混凝土体积的  $0.6\%\sim 2.0\%$ 。当纤维掺量在  $1.0\%\sim 2.0\%$  时,与基体混凝土相比,钢纤维混凝土的抗拉强度可提高  $40\%\sim 80\%$ ;抗弯拉强度可提高  $50\%\sim 120\%$ ;抗压强度提

高较小,在0%~25%;弹性阶段的变形与基体混凝土性能相比没有显著差别,但可大幅度提高衡量钢纤维混凝土塑性变形性能的韧性。为了提高纤维对混凝土的增强效果,先撒布钢纤维再渗浇砂浆或细石混凝土的技术已在公路钢纤维混凝土路面中得到应用。

其他各种特殊性能混凝土,如聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土、微膨胀混凝土和水下不分散混凝土等的应用,可提高混凝土的抗裂性、耐磨性、抗渗和抗冻能力等,对混凝土的耐久性十分有利。

另外,品种繁多的外加剂也在工程上得到应用,对改善混凝土的性能起着很大的作用。各种混凝土细掺料如硅粉、磨细矿渣、粉煤灰等的回收利用,不仅改善了混凝土的性能,而且减少了环境污染,具有很好的技术经济效益和社会效益。

### (2) 配筋材料

钢筋的发展方向是高强、防腐、较好的延性和良好的粘结锚固性能。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 $500\text{N/mm}^2$ ,预应力构件中已采用强度为 $1960\text{N/mm}^2$ 的钢绞线。为了提高钢筋的防腐性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋和钢绞线已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

采用纤维筋代替钢筋的研究也得到了较大的进展,常用的树脂粘结纤维筋有碳纤维筋、玻璃纤维筋和芳纶纤维筋。这几种纤维筋的突出优点是抗腐蚀、强度高,同时还具有良好的抗疲劳性能、大的弹性变形能力、高电阻及低磁导性,其缺点是断裂应变性能较差、较脆、徐变值和热膨胀系数较大,玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

在钢筋的连接成型方面,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。除了常用的绑扎搭接、焊接连接方式外,套筒连接方式得到了越来越多的推广应用。

### (3) 模板材料

模板材料除了目前使用的木模板、钢模板、竹模板、硬塑料模板外,今后将向多功能方向发展。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。

## 1.2.2 结构形式方面的发展

混凝土结构在土木工程各个领域得到了广泛的应用,目前,混凝土结构的跨度和高度都在不断地增大。在城市建筑中,上海市的金茂大厦是当今中国第一、世界第二的高楼,建筑总高度为420.5m,主楼地上88层、地下3层,为框筒结构体系,核心筒为现浇钢筋混凝土,外框为钢结构与混凝土结构复合成巨型框架,混凝土施工采用超高层泵送商品混凝土技术,C40级混凝土一次泵送高度为382.5m,C50级混凝土一次泵送高度为264.9m,C60级混凝土一次泵送高度为229.7m。在桥梁工程中,武汉长江二桥是一座主跨400m双塔双索面自锚式悬浮体系的预应力混凝土斜拉桥,



桥式组成以跨径  $50\text{m}+180\text{m}+400\text{m}+180\text{m}+50\text{m}$  双塔双索面的预应力混凝土斜拉桥为主桥,两侧布置跨径  $125\text{m}+130\text{m}+83\text{m}$  预应力混凝土连续刚构,在北岸边滩地布置跨径  $7\times 60\text{m}$  预应力混凝土连续箱梁,斜拉桥部分桥面宽  $29.4\text{m}$ ,其他部分为  $26.4\text{m}$ ,车行道宽均为  $23\text{m}$ (六车道),建筑规模与同类型斜拉桥相比,仅次于美国的达姆角桥,居世界第二;世界上跨度最大的混凝土拱桥——克罗地亚的克尔克 II 号桥,跨度达  $390\text{m}$ 。在水利工程中,世界上最高的钢筋混凝土拱坝——格鲁吉亚的英古力坝,高  $272\text{m}$ ;我国目前最高的混凝土拱坝——雅砻江二滩双曲拱坝,高  $240\text{m}$ 。在特种结构中,上海电视塔主体为混凝土结构,高  $415.2\text{m}$ ,是我国目前最高的电视塔。

近年来,钢板与混凝土或钢板与钢筋混凝土、型钢与混凝土组成的钢-混凝土组合结构得到了迅速的发展应用,如钢板混凝土用于地下结构和混凝土结构加固、压型钢板-混凝土板用于楼板、型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖和桥梁、外包钢筋混凝土柱用于电站主厂房等。以型钢或以型钢和钢筋焊成的骨架做筋材的钢骨混凝土结构,由于其筋材刚度大,施工时可用其来支撑模板和混凝土自重,可以简化支模工作。在房屋建筑工程中,世界上最高的混凝土高层建筑——马来西亚吉隆坡 City Center 的双塔大厦,为钢骨混凝土结构,高  $450\text{m}$ 。

在钢管内浇筑混凝土形成的钢管混凝土结构,由于管内混凝土在纵向压力作用下处于三向受压状态并起到抑制钢管的局部失稳,因而使构件的承载力和变形能力大大提高;由于钢管为混凝土的模板,施工速度较快,因此,在高层建筑结构的底层和拱桥等工程中得到了逐步推广应用。我国目前跨度最大的钢管拱桥——四川涪陵乌江桥,主跨达  $200\text{m}$ 。

这些高性能新型组合结构具有能充分利用材料强度、较好地适应变形能力(延性)、施工较简单等特点,从而大大拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围,使得大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊功能的钢筋混凝土结构的建造成为可能。

预应力混凝土结构由于抗裂性能好,可充分利用高强度材料,各种应用发展迅速。同时结合传统预应力工艺和实际结构特点,发展了以增强后张预应力孔道灌浆密实性为目的的真空辅助灌浆技术、以减小张拉力减轻张拉设备为目的的横张预应力技术、以实现筒形断面结构环向预应力为目的的环形后张预应力技术、以减小结构建筑高度为目的的预拉预压双预应力技术等。在高耸结构与特种结构中,世界上最高的预应力混凝土电视塔为加拿大多伦多电视塔,高达  $549\text{m}$ ;某些有特殊要求的结构,例如核电站安全壳和压力容器、海上采油平台、大型蓄水池、贮气罐及贮油罐等结构,抗裂及抗腐蚀能力要求较高,采用预应力混凝土结构有其独特的优越性,而非其他材料可比拟。

将预应力钢筋(索)布置在混凝土结构体外的预应力技术,因大幅度减小预应力损失,简化结构截面形状和减小截面尺寸,便于再次张拉、锚固、更换或增添新索,已在桥梁工程的修建、补强加固及其他建筑结构的补强加固中得到应用。