第1章 绪 论

混凝土，一般是指由水泥掺入一定级配的石子和砂子加水拌和，经水泥水化结硬而成的具有所需形体、强度和耐久性的人造石材。其抗压强度较高而抗拉强度很低，力学性能与石材相似，也被形象地称为“砼”，意为人造石材。

我们的住房、工厂、商业大楼、大坝和输水设施、道路、桥梁、隧道以及其他基础设施的建造都离不开混凝土。混凝土已成为当今世界上应用最广泛的建筑材料，在日常生活中，几乎各方面都直接或间接地涉及到混凝土，按体积计算，混凝土是当今世界中数量最大的人造产品。

1.1 混凝土结构的一般概念及特点

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、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。素混凝土结构指不配置任何钢筋的混凝土结构，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）和一些非承重结构；钢筋混凝土结构是混凝土结构中最具代表性的一类结构，它是由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构，适用于各种受压和受弯构件，有时也用于受拉构件，如各种桁架、梁、板、柱、拱、壳等；预应力混凝土结构指结构构件制作时，在其受拉部位人为地预先施加压力的混凝土结构，由于抗裂性好、刚度大且强度高，较适宜建造跨度大、荷载重以及有抗裂抗渗要求的结构，如大跨屋架、桥梁、储水池、核电站反应堆安全壳等。混凝土材料抗压强度较高，而抗拉能力很低。钢筋的抗拉、抗压强度均很高，但细长的钢筋，受压易压屈，几乎不能形成实际的承重结构。在钢筋混凝土结构中，利用混凝土的抗压能力较强而钢筋的抗拉能力很强的特点，混凝土主要承受压应力，钢筋主要承受拉应力。另外，在混凝土结构中由于混凝土和箍筋的约束作用，在混凝土受压区钢筋也能发挥很好的作用。钢筋和混凝土组合共同工作，可以充分发挥两者的强度，满足工程结构的使用要求。

钢筋与混凝土结合形成一整体结构，能够很好地共同工作是基于混凝土硬化后与钢筋（尤其是带肋的钢筋）之间有良好的粘结力，在外荷载作用下，共同变形、共同受力。此外，钢筋的温度线膨胀系数为1.2×10^{-5}/℃，混凝土的温度线膨胀系数为（1.0×10^{-5}~1.5×10^{-5}) /℃，两者十分接近，当温度变化时，它们不会产生过大的相对变形而使其间的粘结发生破坏。

配有钢筋的混凝土构件因有钢筋协同工作，较素混凝土构件承载能力大为提高，而且破坏也不像素混凝土那样突然。钢筋混凝土结构，特别是现浇钢筋混凝土结构，整体性好，结构的各个部分是以一个力学上的整体状态结合在一起。通过合理配筋，可以获得较好的延性，对于结构抵抗地震作用或强烈爆炸时的冲击波作用具有较好的性能。

钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能，在某些情况下可以代替钢结构，从而节约钢材降低造价。近年来，利用工业废料制造人工骨料，或作为水泥的外加成分，以改善混凝土性能的研究和应用得到了大力发展。

钢筋混凝土工程在实际结构工程中得到广泛应用，是因为它有许多优点，主要包括：① 强（度）价（格）比高。在相同的建造费用条件下，砖、木、钢结构等受力构件的承载力远比钢筋混凝土制成的构件小。② 耐久性好。一般环境条件下，混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长，而钢筋受混凝土保护不易生锈，维修维护费用少。③ 耐火性好。混凝土是热的不良导体，遭火灾时，钢筋因有混凝土包裹，不致很快升温而达到失去承载力的程度，其耐火性比钢结构和木结构好。④ 可模性。混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构，适用于形状复杂的结构。⑤ 整体性好。整体浇筑的钢筋混凝土结构整体性好，对结构抗震、抗爆有利。⑥ 易于就地取材。混凝土原材料中占很大比例的是石子和砂子，产地广泛，便于就地取材。钢筋混凝土工程是人类迄今所发现的最具适应性、最大量采用和最完善的施工方法。另外，钢筋混凝土是由两种材料组合而成，它作为一种整体材料，又可以通过不同构造方式与其他结构材

料构成多种组合结构，如钢筋混凝土-型钢组合结构，钢筋混凝土-砖墙混合结构等，更扩大了它的适应性和应用范围，增加了结构方案的多样性。目前，钢筋混凝土结构已成为土木工程中最具代表性的结构形式，在国内外的工程建设中得到了广泛的应用。

钢筋混凝土结构也有许多缺点，不过在实际工程应用中，往往可以采取不同的技术和措施来减弱或消除这些缺点对结构的不利影响，混凝土结构的主要缺点及其减弱或消除对结构不利影响的技术和措施如下。

（1）自重大

在承受同样载荷的情况下，混凝土构件的自重往往比钢结构构件大很多，不适用于建造大跨度结构和高层建筑。混凝土结构的较大自重对结构的抗震也不利，也给运输和施工吊装带来困难。目前，在实际工程中，减轻混凝土结构的自重可以采取许多措施，例如：采用受力性能好且能减轻自重的构件型式，如空心板、槽形板、薄腹梁、空间薄壁结构等；采用轻质高强混凝土，缩小构件截面尺寸，可以减轻结构自重，并改善隔热隔声性能。

（2）抗裂性能差

由于混凝土抗拉强度低，普通钢筋混凝土结构在正常使用阶段往往带裂缝工作，在工作条件较差的环境下会影响结构的耐久性，对防渗、防漏要求较高的结构也不适用。同时，由于混凝土开裂，限制了其在大跨度结构中的应用，也限制了高强度钢筋在混凝土结构中的应用。采用预应力混凝土可以有效地提高混凝土构件的抗裂性，使得高强混凝土和高强钢筋在混凝土结构中得到广泛的应用，同时也大大扩展了混凝土结构的应用范围；利用树脂涂层钢筋可防止在恶劣工作环境下，因混凝土开裂而导致的钢筋锈蚀。

（3）施工的季节性

混凝土施工受到气候的限制。在严寒地区冬季施工，需要采取保温措施，可在混凝土中掺加化学拌和剂加速凝结、增加热量、防止冻结。在酷热地区夏季或雨季施工，需采用防护措施，控制水灰比，加强养护。

（4）施工复杂

现浇混凝土施工工序多、工期长，需大量模板和支撑，施工受季节、天气的影响较大。利用可重复使用的钢模板、滑模等先进施工技术，采用泵送混凝土、早强混凝土、商品混凝土、高性能混凝土、免振自密实混凝土等，可大大提高施工效率。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。

（5）混凝土修复和加固困难

混凝土结构一旦破坏，其修复、加固、补强都比较困难。但新型混凝土结构的加固技术不断得到发展，如最近研究开发的采用粘贴碳纤维布加固混凝土结构技术，不仅快速简便，而且几乎不增加原结构重量。

1.2 混凝土结构的形式

混凝土结构按其构成形式分为实体结构和组合结构两大类。大坝、桥墩、基础等通常为实体，结构中混凝土的体积很大，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合而成，称为组合结构。

一般的混凝土结构由许多构件组合而成，主要受力构件有楼板、梁、柱、墙、基础等基本构件。①楼板：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。②梁：将楼板上或屋面上的荷载传递到柱或承重墙上，前者为楼盖梁，后者为屋面梁，其截面形式多为矩形、花篮形、T形、倒L形等，如梁与板整体浇筑在一起，中间梁形成T形截面梁，边梁形成倒L形截面梁。③柱：其作用是支承楼（屋）面体系，属于受压构件，荷载偏心作用时，柱受压的同时还受弯，其截面形式有矩形、工字形等。④墙：与柱作用相似，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同时承受水平风载和地震作用的剪力墙，它受压的同时也受弯。⑤基础：将上部结构荷载传递到地基（土层）的混凝土承重构件，其形式多样，有独立基础、桩基础、条形基础、

平板式片筏基础和箱形基础等。有时，一个混凝土构件还会由受力不同的小构件组合而成，如屋架，就是由一系列受压和受拉的杆组成，进行受力分析时，这些受压和受拉的杆可简化成轴心受压和轴心受拉构件。

1.3 混凝土结构的发展及工程应用概况

最早在希腊和罗马是采用火山灰制造混凝土。现代意义的混凝土始于硅酸盐水泥发明以后（1824 年英国人阿斯普汀（Joseph Aspdin）取得硅酸盐水泥发明专利，而美国波特兰水泥则迟至1872年才由舍勒（David O. Saylor）制成，但价格低廉、用现代化方法生产的波特兰水泥更迟至1892年才出现）的约四分之一世纪，1848年法国人朗波特（J. L. Lambot）制造了第一只钢筋混凝土小船，1861年法国人莫尼埃（Joseph Monier）获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利，美国第一个钢筋混凝土工程是由沃德（W. E. Ward）于1875年在纽约建成的，其中墙、楼板（梁和屋面）用混凝土建造，并用金属加强。而后又建造了一些钢筋混凝土建筑，其中的加州科学院建筑（1888或1889年）很好地抗御了1906年地震。从实际意义的钢筋混凝土结构在土木工程中应用至今也仅仅130多年，与砖石砌体结构、钢结构和木结构相比，其发展历史并不长，但由于钢筋混凝土结构在物理力学性能及材料来源等方面的优点，发展非常迅速。目前，混凝土已成为土木工程结构中最主要的结构材料，而且高性能混凝土和新型混凝土结构形式还在不断发展。纵观历史，现代混凝土结构是随着水泥和钢铁工业的发展而发展起来的，其发展大体可分为三个历史阶段。

第一阶段：从混凝土发明至二十世纪初。硅酸盐水泥的发明和转炉炼钢的成功，为钢筋混凝土的广泛应用提供了充分而坚实的物质基础。欧美一些学者对钢筋混凝土构件进行了试验研究，发表了试验结果并提出了混凝土结构的计算理论和计算方法，初步奠定钢筋混凝土在建筑工程中应用的科学基础。这一阶段，所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低，主要用于建造中小型楼板、梁、柱、拱和基础等构件。计算理论套用弹性理论，设计则采用容许应力的方法。

第二阶段：从二十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，在计算理论上开始考虑材料的塑性，钢筋混凝土截面开始按破损阶段计算结构的破坏承载力。这一阶段的重要成就是预应力混凝土的发明和应用，混凝土被用来建造大跨度空间结构。

第三阶段：从第二次世界大战以后到现在。第二次世界大战后，由于钢材短缺，混凝土结构建筑得到大规模发展。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结构中。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，采用以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

从十九世纪中期到二十世纪初期的第一阶段，可以说是钢筋混凝土发展的初步阶段。从二十世纪30年代开始，在材料性能改善、结构形式多样化、施工方法革新、计算理论和设计方法完善等多方面开展了大量研究工作，工程应用十分普遍，使钢筋混凝土结构进入了现代化的阶段。现代混凝土结构的应用范围也在不断扩大，从工业与民用建筑、交通设施、水利水电建筑和基础工程扩大到了近海工程、海底建筑、地下建筑、核电站建设等领域，甚至已开始构思和实验用于月面建筑。随着轻质高强材料的使用，大跨度、高层建筑中的混凝土结构也越来越多。

在房屋建筑中，工厂、住宅、办公楼等单层、多层建筑广泛采用混凝土结构。自二十世纪50年代以来，钢筋混凝土在高层建筑中的应用有了迅猛发展。高强混凝土的发展，促进了混凝土在超高层建筑中的应用。著名的混凝土超高层建筑有：中国台北的金融大厦（101层，高508米）、美国芝加哥的西尔斯大厦（110层，高443米）、马来西亚吉隆坡的石油双塔大厦（95层，高390米，连同桅杆总高492米）、上海金茂大厦（88层，高420.5米）、广州中天广场的中信大厦（80层，高322.5米，连同桅杆总高382.5米）。2009年建成的迪拜塔为目前世界上最高的建筑，它采用高强混凝土结构，高度达到818米。此外，在大跨度的公共建筑和工业建筑中，钢筋混凝土桁架、门式刚架、拱、薄壳等结构形式也有广泛应用。法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅的钢筋混凝土薄壳结构，平面呈三角形，边长219米（此即跨度），壳顶离地面46米，是双层

波形拱壳，支承在3个角部墩座上，墩座与预应力拉杆相连。澳大利亚悉尼歌剧院，由3组、10对钢筋混凝土壳片组成，以环境优美和建筑造型独特闻名于世。

在桥梁建筑方面，钢筋混凝土桥梁随处可见，结构形式有梁、拱、桁架等。预应力简支梁桥已广为应用，1976年我国建成的洛阳黄河桥共67孔，由跨度为50米简支梁组成。1987年开工，1989年建成的厦门高集跨海大桥，跨过高崎－集美海峡，是我国第一座跨越海峡的公路大桥，大桥全长6695米，主桥长2070米，桥面宽23.5米，主跨46米，桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。钢筋混凝土刚架桥在铁路、公路中也广为应用。如广东洛溪跨越珠江的洛溪大桥，采用刚架结构，桥面与墩身整体刚接，主跨达180米。我国西南交通重要干线南昆铁路上，有许多桥梁采用混凝土结构。其中清水河大桥，主桥三跨为72米＋128米＋72米，为预应力连续刚架结构。由钢筋混凝土建造拱桥有较大优势，一些大跨度的桥梁也采用拱桥的结构形式用钢筋混凝土建造。1960年葡萄牙建成的波尔图拱桥，跨度达270米，拱顶厚3.0米，拱脚处厚4.0米。1965年建成的巴西和巴拉圭两国间通过巴拉那河的混凝土拱桥，跨度达290米，拱顶厚3.2米，拱脚处厚4.8米。1964年建成的格拉载斯威尔桥，拱跨达304.8米，拱顶厚4.28米，拱脚处厚7.0米。克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥，主跨390米。1989年我国建成的四川涪陵乌江拱桥，全长351.83米，主跨200米，矢跨比为1/4。1997年我国建成的箱形截面的万县长江拱桥，主跨420米，是当今世界最大跨度的钢筋混凝土拱桥。预应力混凝土箱形截面斜拉桥或钢与混凝土组合梁斜拉桥是当前大跨桥梁的主要结构形式之一，超过500米跨度的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥，目前也常与混凝土结构混合使用。如香港青马大桥，跨度1377米，桥体为悬索结构，其中支承悬索的两端立塔高203米，为混凝土结构。又如我国1993年10月建成通车的上海杨浦大桥，主跨602米，是钢与混凝土结合梁斜拉桥，桥全长1172米，“A”字型桥塔高220米，采用了256根斜拉索。1995年建成的重庆长江二桥，主跨444米，采用预应力混凝土梁斜拉桥。我国2008年建成通车的杭州湾跨海大桥全长36千米，大桥设南、北两个航道，其中北航道桥为主跨448米的钻石型双塔双索面钢箱梁斜拉桥，南航道桥为主跨318米的“A”字型单塔双索面钢箱梁斜拉桥，其余引桥采用跨度为30～80米不等的预应力混凝土连续箱梁结构，它是目前世界上最长的跨海大桥。

由于施工技术的发展，许多高耸建筑也采用混凝土结构。1967年建成的莫斯科奥斯坦金电视塔，高533.3米。1975年建成的加拿大多伦多电视塔，塔高553.3米，其截面主体中间为圆筒，塔楼以下为Y形肢翼相连的预应力钢筋混凝土结构。我国混凝土电视塔中，塔高超过400米的有，天津电视塔，高415.2米；北京中央电视塔，高405米；上海预应力钢筋混凝土电视塔（东方明珠），高达468米。

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，常用来修建大坝。如瑞士狄克桑斯坝为高285米，顶宽15米，底宽225米，长695米的混凝土重力坝。美国胡佛坝为1936年建成的混凝土重力坝，高221米，顶长379米，顶厚14米，底宽202米。巴西和巴拉圭共有的伊泰普水电站大坝为主坝高196米，长1060米的混凝土坝。我国1989年全部竣工的龙羊峡水电站，是青海省内黄河上游的第一座水电站，拦河大坝为混凝土重力坝，高178米，顶长393.34米，顶宽15米，底宽80米。我国长江三峡水利枢纽工程，是目前世界上最大的水利工程，其混凝土大坝高186米，坝顶总长3035米，坝体混凝土用量达2715万立方米。

以上仅列出主要土木工程中的一些常见项目，由于工程建设项目数量巨大，全部列出也是困难的，同时，由于编者水平所限，挂一漏万，未能全部列出。另外，混凝土结构在道路、港口工程以及其他特殊的结构中也有广泛应用。如高速公路、地下铁道工程、核发电站的安全壳、飞机场跑道、填海造地工程、海上采油平台等。在这些方面所取得的瞩目成就，在这里也没一一列举。

组成混凝土结构主体材料的混凝土，主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型。混凝土强度高可减少断面，减轻自重，提高空间利用率。目前，国内常用混凝土的强度等级为C20～C40，国外常用的强度等级在C60以上。在实验室内，我国已制成C100以上的混凝土，美国已制成C200混凝土。目前的高强混凝土的塑性不如普通强度混凝土，研制出塑性好的高强混凝土仍然是当今混凝土研究的主要课题。随着高强度钢筋、高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用，高性能混凝土的应用范围不断扩大，钢纤维混凝土和聚合物混

凝土的研究和应用有了很大发展。此外，轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”不但能改善混凝土的性能，而且对节能和保护环境具有重要意义。防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也在研究中。

总之，混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一，可以预见，在今后相当长时期内，混凝土仍将是一种重要的工程材料，并在材料、结构、施工技术和计算理论等各个方面得到进一步发展。

1.4 本课程的特点及学习方法

混凝土结构作为结构工程的一个学科分支，必然服从结构工程学科的一般规律：从工程实践中提出要求或问题，通过调查统计、试验研究、理论分析、计算对比等多种手段予以解决。总结其一般变化规律，揭示作用机理，建立物理模型和数学表达，确定计算方法和构造措施，再回到工程实践中进行验证，并加以改进和补充。一般需要经过实践－研究－实践的多次反复，渐臻完善，最终为工程服务。混凝土结构通常是由钢筋和混凝土结合而成的一种结构，而钢筋和混凝土又是力学性能完全不同的两种材料，其性能必然具有区别于单一材料结构（如钢结构、木结构等）的特殊性。所以，钢筋混凝土的性能不仅依赖于两种材料本身的性质，还在更大程度上取决于二者的相互关系和配合。

混凝土结构的基本理论相当于钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土材料力学。但众所周知，混凝土是非匀质、非线性的人工混合材料，力学性能复杂，且随时间而变化，性能指标的离散性大；钢筋和混凝土的配合又呈多样性，更使得钢筋混凝土的性能复杂多变。至今，还缺乏完善的、统一的理论方法，概括和解决普遍的工程问题。混凝土材料的力学性能以及钢筋混凝土构件的性能反应，一般只能在精确的实验中确定。根据一定数量的试验数据，研究其变化规律，并通过机理和统计分析，建立物理和数学模型加以描述，再用实验或工程实践加以验证，建立相应的计算方法和构造措施，以解决工程问题。钢筋混凝土结构理论是以实验为基础的，因此，除课堂学习外，还要加强实验的教学环节，以进一步理解学习内容和训练实验的基本技能。

为了指导混凝土结构的设计工作，各国都制定了专门的技术标准和设计规范，这些标准和规范都是各国在一定时期内理论研究成果和工程实践经验的总结，代表了该学科在一个时期的技术水平。由于科学技术水平的提高和生产实践经验不断积累，标准和规范必然需要不断修订和补充。混凝土结构是一门发展很快的学科，钢筋混凝土材料和结构不断发展，工程中会不断积累新的经验并提出新课题，相关的试验和理论研究也日新月异。因此，要用发展的观点看待设计规范，在学习和掌握钢筋混凝土结构理论和设计方法的同时，要多注意混凝土结构发展的新动向和新成果。

如前所述，钢筋混凝土材料的力学性能和构件的设计原则、计算方法和计算公式都是根据钢筋混凝土构件在不同受力状态和环境条件下性能的试验和理论研究成果建立的。然而，一些影响因素，如：混凝土的收缩、温度影响及地基不均匀沉降等，难以用具体的计算公式表达。往往根据长期的工程实践经验，总结出一些构造措施来考虑这些因素的影响。因此，在学习本课程时，除了要对各种计算公式了解和掌握外，对于构造措施也必须给予足够的重视。

本课程内容多、计算公式多、符号多、构造规定也多。学习本课程时应该注意各计算公式与力学公式的联系与区别，重视构件的试验研究，通过了解构件的受力性能，掌握受力分析所采用基本假设的试验依据。运用计算方法、计算公式时，要注意其适用范围和具体条件。在设计时，混凝土结构除了要满足各种计算要求外，还必须使各项构造措施得到满足。

结构设计是一个综合性的问题，所以在学习过程中，要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。在进行结构布置、处理构造问题时，不仅要考虑结构受力的合理性，还要考虑使用要求、材料、造价、施工、制造等方面的问题。既要做到安全、适用、耐久，又要做到技术先进、经济合理。设计过程中，同一问题往往有多种解决办法，答案也往往不是唯一的，应根据具体情况进行综合分析比较，确定最佳方案，以获得最佳的技术经济效果。

思 考 题

1.1 钢筋混凝土结构有哪些优点？在实际工程中，如何合理利用这些优点？

1.2 钢筋混凝土结构有哪些缺点？在实际工程中，如何克服这些缺点？

1.3 本课程有哪些主要的特点？学习本课程要注意哪些问题？