

第一篇

结构设计通论

.....



第1章

概论

1.1 建筑结构的特点、类型和发展趋势

本书的适用对象主要是土木工程(civil engineering)专业的本科生。土木工程专业可分为建筑工程和岩土工程方向。在设计单位,建筑工程方向主要适合从事结构设计,岩土工程方向主要适合从事岩土工程勘察和岩土工程设计。

土木工程的含义非常广泛,它不但指建造各类工程设施所应用的材料、设备和所进行的规划、勘察、设计、施工、运维、消纳等技术活动,而且指建筑物、桥梁、道路、隧道、岩土工程、地下工程、铁路工程、矿山设施、港口工程等各种工程设施。在各种工程设施中,建筑结构最为常见,是人类生活、生产必不可少的。

1.1.1 建筑结构的特点

建筑物的设计原则是“适用、经济、绿色、美观”。建筑结构(building structure)是建筑物中能承受、传递各种水平和竖向作用的骨架,需满足安全性、适用性、耐久性和绿色的要求。

1. 安全性(safe ability)

安全是建筑结构永恒的主题。建筑结构必须要能够抵御地震、风、重力等自然作用和预估的振动、爆炸等人为作用。建筑物在承受预定的各种作用时,应具有足够的承载力,不产生过大的变形和开裂,不出现过大的地基变形,即使在面对偶然事件时,也应保持整体坚固性,不发生连续倒塌。

2. 适用性(serviceability)

建筑物可分为民用建筑和工业建筑,不同建筑类型有不同的功能要求和美观要求。建筑结构首先应提供适合各种功能要求的空间。对于民用建筑,量大面广的住宅、旅馆、宿舍等居住建筑一般需要小空间,而影剧院、体育场馆、展览馆等公共建筑则往往需要人流密集的高大空间;对于工业建筑,建筑结构必须要满足生产工艺要求,往往需要高大空间,并且大多要考虑吊车安装、运行的要求。其次,建筑结构中,构件的布置不能影响使用功能和人流疏散的要求,一般不宜在某一房间的中部布置墙、柱,不应在疏散通道上布置凸出墙外的柱、墙等结构构件。最后,建筑结构还要满足美观要求,要与建筑艺术融为一体。

3. 耐久性(durability)

耐久性是指结构在确定的环境作用和维修、使用条件下,结构构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。如果耐久性不足,不仅会增加使用过程中的维修费用,影响建筑物的正常使用,而且会缩短使用年限,严重浪费资源。合理的耐久性设计,可以在造价不明显增加的前提下,大幅提高建筑物的使用年限,使建筑物具有全寿命周期的经济性。

4. 绿色(green)

绿色建筑指在全寿命周期内,节约资源、保护环境、减少污染,为人们提供健康、适用、高效的使用空

间,最大限度地实现人与自然和谐共生的高质量建筑。为实现绿色建筑结构,首先,应在综合考虑经济、供应、施工便利、结构性能等因素的基础上,尽可能选择资源节约型、环境友好型的建筑材料;其次,要选择合理的结构体系,充分发挥所采用材料的性能,有效地利用材料,尽可能地节约材料。

1.1.2 建筑结构的分类

1. 按材料分类

按照所用材料,建筑结构主要分为混凝土结构(concrete structure)、钢结构(steel structure)、砌体结构(masonry structure)和木结构(wood structure)。依性能从优到劣按 A、B、C、D 排列,这 4 种结构类型的对比如表 1-1 所示。

表 1-1 不同结构类型的对比

| 结构类型 | 强度 | 自重 | 工艺性 | 耐久性 | 经济性 | 整体性 | 防火性 | 可塑性 |
|-----------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 混凝土结构(现浇) | B | C | C | A | B | A | B | A |
| 钢结构 | A | B | B | C | C | B | C | C |
| 砌体结构 | D | D | D | B | A | D | A | D |
| 木结构 | C | A | A | C | D | C | D | B |

注:① 本表引自易伟建编著《混凝土结构试验与理论研究》,科学出版社,2012年;

② 关于耐久性的评价有一些争议,结构耐久性主要取决于材料,混凝土结构中,钢筋的腐蚀对耐久性影响较大,而钢结构采用耐候钢时,结构的耐久性较好。

从表 1-1 可以看出,混凝土结构的综合优势明显,这就是目前混凝土结构使用最为普遍的原因。

按制作和施工方式,混凝土结构可分为现浇混凝土结构(cast-in-situ concrete structure)和装配式混凝土结构(precast concrete structure)。现浇混凝土结构指在施工现场原位支模并整体浇筑而成的混凝土结构,整体性好,目前使用最为普遍,本书第四篇介绍的多层及高层建筑结构主要指现浇混凝土结构。但现浇混凝土结构存在耗费模板和脚手架、施工现场用工量大、劳动生产率低、污染环境、质量不稳定等问题。装配式混凝土结构简称为装配式结构,是先在工厂或施工现场预先制作混凝土构件,即预制混凝土构件,然后在施工现场将预制混凝土构件通过可靠的连接方式装配而成。装配式混凝土结构具有节省模板和脚手架、现场用工量少、劳动生产率高、保护环境、质量稳定等优点。因此,装配式结构代表了混凝土结构的发展趋势。第三篇介绍的单层工业厂房结构设计,就是曾经广为使用的、极为典型的装配式结构。

装配式结构可分为装配整体式混凝土结构和全装配混凝土结构。装配整体式混凝土结构简称装配整体式结构,指由预制混凝土构件通过可靠的连接方式进行连接并与现场后浇混凝土、水泥基灌浆料形成整体的装配式混凝土结构。全装配混凝土结构指现场不需要后浇混凝土、水泥基灌浆料,由预制混凝土构件直接通过可靠的连接方式进行连接而形成整体的装配式混凝土结构。这两种结构类型均有较好的发展前景。

实际工程中,钢-混凝土混合结构(steel-concrete hybrid structure)也较为常见。影剧院、体育场馆和展览馆等建筑的屋盖大多采用网架、网壳等钢结构,其他部分大多采用混凝土结构,从而形成了下部为钢筋混凝土结构,上部为钢结构的空问结构(space structure)。一些超高层建筑,周边采用钢梁、钢柱等钢结构,中间部位大多采用钢筋混凝土筒体,形成了钢-混凝土混合结构。

2. 按部位分类

建筑结构按室内地面±0.000 分界,以上部分为地上结构,以下为地下结构。

地上结构由水平结构体系和竖向结构体系组成。水平结构体系主要是楼盖结构,在本书第二篇将重点介绍楼盖结构。

竖向结构体系包括①单层工业厂房主要采用的排架结构(bent-frame),将在第 10 章介绍;②多高层

建筑主要采用的框架结构(frame structure)、剪力墙结构(shear wall structure)和由二者混合组成的框架-剪力墙结构(本书以下简称为框剪结构)(frame-shear wall structure),即通常所说的三大结构体系,将在本书第四篇介绍。框架结构的竖向承重构件一般为一维的柱,剪力墙结构一般为二维平面的墙,框剪结构则既有柱,也有墙。墙在平面内的刚度比柱大得多,因此,剪力墙结构的侧向刚度比框架结构大,在水平地震和风荷载作用下的侧移较小。但墙在平面外刚度较小,如将墙在结构平面内连续、封闭布置,即形成了筒体。有了筒体,就组成了侧向刚度更大的筒体结构(tube structure)。

地下结构和地上结构并没有本质区别,但地下结构具有以下特点:

(1) 地下结构的外围要考虑防水要求,一般采用混凝土结构。地下结构外围应根据地表水、地下水、毛细管水等的作用,以及由于人为因素引起的附近水文地质改变的影响,依据《建筑与市政工程防水通用规范》(GB 55030—2022)进行防水设计。因此,地下结构一般采用混凝土结构,迎水面采用结构厚度不小于250mm的自防水混凝土。

(2) 地下结构外围的耐久性问题更加突出。地下结构的外围与土、水直接接触,如果土、水对混凝土或钢筋具有腐蚀性,则应采取防腐蚀措施。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,2015年版,以下简称《混凝土规范》),地上结构的环境类别多为一类一室内干燥环境,但地下外围混凝土结构的环境类别分别为二a类(非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境)、二b类(严寒和寒冷地区冰冻线以上与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境)、三a类(严寒和寒冷地区冬季水位冰动区环境)、三b类(盐渍土环境)和五类(受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境)。地下外围的钢筋混凝土结构应按照《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)和《工业建筑防腐蚀设计标准》(GB/T 50046—2018)等要求进行防护设计。

(3) 地下结构应和地基基础统一进行设计。如果地下结构的安全性出现问题,不仅地下结构自身受到影响,地上结构也难以幸免。由于地下结构的周边是土体,平时室内人员也较少,裂缝不易被发现。地下结构的检测鉴定、维修加固也比地上结构困难。因此,地下结构的安全性需要更加重视。

(4) 地下空间往往用作设备用房、车库、防空地下室(civil air defence basement)等特殊房间,一般地下室设计比地上结构复杂。防空地下室指具有预定战时防空功能的地下室,应根据《人民防空地下室设计规范》(GB 50038—2005)设计。除临空墙、防护门的门框墙等特殊构件需要根据抗力级别承受不同的爆炸动荷载作用外,其内外墙、顶板、底板也承受了较大的荷载。此外,防空地下室对建筑、采暖通风、给水排水、电气、通信等专业的要求较多、较高,需要在梁、墙、板上设置预埋件、预埋管线、预留洞口,其设计比其他地下室的设计更为复杂。

(5) 部分荷载和地上结构不同。主要区别是:地下结构外墙、底板要承受土压力、水压力;地下结构一般不承受风荷载;地下结构的地震作用和温度作用一般比地上结构小。

3. 按使用功能分类

如按使用功能分类,建筑结构可分为工业建筑结构和民用建筑结构。工业建筑结构为工业生产服务,主要包括单层、多层工业厂房结构和仓储设施;民用建筑结构为人民生活、社会活动等服务,包括公共建筑结构和居住建筑结构。但从本质上来说,工业建筑结构和民用建筑结构并没有根本的区别。

单层工业建筑结构主要是排架和刚架结构,两者之间的区别在于排架的梁、屋架与柱为铰接,而刚架的梁与柱为刚接。排架主要采用装配式钢筋混凝土结构,刚架包括钢筋混凝土结构门式刚架和钢结构门式刚架,目前主要采用钢结构门式刚架。多层工业建筑结构主要采用框架结构。民用建筑结构以框架结构、剪力墙结构和框剪结构为主,其中框架结构主要用于多层建筑,剪力墙结构和框剪结构主要用于高层建筑。

4. 按高度分类

依据《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019),建筑可按地上建筑高度或层数进行分类,相应结构也可随之进行分类:

(1) 低层或多层建筑结构,指建筑高度不大于 27.0m 的住宅建筑、不大于 24.0m 的公共建筑及大于 24.0m 的单层公共建筑的结构;

(2) 高层建筑结构,指建筑高度大于 27.0m 的住宅建筑和大于 24.0m 的非单层公共建筑,且高度不大于 100.0m 的建筑结构;

(3) 超高层建筑结构,指建筑高度大于 100.0m 的建筑结构。

需要注意的是,依据最新发布的《住宅项目规范》(征求意见稿),住宅建筑按层数如下分类:1~3 层为低层住宅,4~6 层为多层 I 类住宅,7~9 层为多层 II 类住宅,10~18 层为高层 I 类住宅,19~26 层为高层 II 类住宅。同时,住宅的层高不应低于 3.00m。

1.1.3 建筑结构的的发展趋势

1. 建筑结构材料的发展趋势

100 多年来,混凝土和钢筋、钢材奠定了现代建筑结构的基石,迄今仍居于绝对主导地位。但建筑结构材料也在不断朝着更轻、更强、更耐久、更可持续的方向发展。

1) 高性能混凝土

20 世纪 70 年代以来,众多建成的混凝土基础设施出现了过早劣化,由此带来了建筑物寿命缩短、维修费用高昂的问题。为增强混凝土的耐久性,可采用高性能混凝土(high performance concrete, HPC)。根据《高性能混凝土评价标准》(JGJ/T 385—2015),高性能混凝土指“以建设工程设计、施工和使用对混凝土性能特定要求为总体目标,选用优质常规原材料,合理掺加外加剂和矿物掺合料,采用较低水胶比并优化配合比,通过预拌和绿色生产方式以及严格的施工措施,制成具有优异的拌合物性能、力学性能、耐久性能和长期性能的混凝土”。高性能混凝土包括超高性能混凝土、自密实混凝土、再生混凝土、海水海砂混凝土等类型,具有良好的发展前景。

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)按照最大堆积密度原理配制,各组分间相互填充,水胶比一般为 0.16~0.2,显著地降低了孔隙尺寸和孔隙率,掺入的硅灰等矿物掺合料可与水泥的水化产物氢氧化钙进行火山灰反应,形成水化硅酸钙,使得水泥基体与骨料间的界面过渡区如同水泥基体一样致密。此外,通过添加短而细的钢纤维,改善了材料的强度与变形性能。因此,超高性能混凝土具有超高的力学性能和超高的耐久性能。目前已发展出高耐磨 UHPC、真空振动挤压成形 UHPC、低收缩自密实性 UHPC、轻型组合桥面专用 UHPC 等多种类型,是近 30 年研究、应用、创新、发展最具活力的水泥基复合材料之一。普通混凝土、高性能混凝土、超高性能混凝土的性能指标比较如表 1-2 所示。

表 1-2 普通混凝土、高性能混凝土、超高性能混凝土的性能指标

| 性能指标 | 普通混凝土 (NC) | 高性能混凝土 (HPC) | 超高性能混凝土 (UHPC) |
|---|---------------|-----------------|-------------------|
| 抗压强度/MPa | 20~50 | 60~100 | 120~250 |
| 抗折强度/MPa | 2~5 | 6~10 | 30~60 |
| 弹性模量/GPa | 30~40 | 30~40 | 40~60 |
| 断裂能/(kJ/m ²) | 0.12 | 0.14 | 20~40 |
| 氯离子扩散系数/(10 ⁻¹² m ² /s) | 1.1 | 0.6 | 0.02 |
| 冻融剥落/(g/cm ²) | >1000 | 900 | 7 |
| 吸水特性/(kg/m ³) | 2.7 | 0.4 | 0.2 |
| 磨耗系数 | 4.0 | 2.8 | 1.3 |

注:本表引自邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13。

自密实混凝土(self-compacting concrete, SCC)也是一种高性能混凝土,具有高流动性、均匀性和稳定性,浇筑时无需外力振捣,可避免人工振捣的工序,能够在自重作用下流动并充满模板空间,进而提高生产效率。其配合比的特征是不大于 0.45 的低水胶比、400~550kg/m³ 的高胶凝材料用量和 50%左右的高

砂率。目前,我国已颁布《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012),自密实混凝土已在工程中使用。

再生混凝土(recycled aggregate concrete,RAC)同样也是一种高性能混凝土。再生混凝土利用了旧的基础设施和建筑拆除后产生的混凝土等建筑废弃物,部分或全部代替砂石等天然骨料制作混凝土,有利于节材、节能、节地和保护环境。目前,我国已颁布《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)、《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)及《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011),再生混凝土已在土木工程中应用。

海水海砂混凝土(seawater sea-sand concrete,SSC)是利用海水和海砂或珊瑚礁石配制的混凝土。海水海砂混凝土不但可以缓解河砂资源日益匮乏和供不应求的困难,而且在远海岛礁建设中具有重要地位。目前海水海砂混凝土应用现状和发展方向主要分为以下四类:①钢筋+海砂混凝土,采用海水淡化技术/阻锈技术;②FRP筋材+海水海砂混凝土;③FRP筋材+(活性粉末材料+海水海砂)混凝土;④FRP筋材+(再生骨料+海水海砂)混凝土。《海砂混凝土应用技术规范》(JGJ 206—2010)已颁布,海水海砂混凝土也已在岛礁建设中得到应用。

高性能混凝土的推广应用,对提高工程质量、降低工程全寿命周期的综合成本、发展循环经济、促进技术进步、推进混凝土行业结构调整具有重大意义。

2) 高性能结构钢材

钢结构与混凝土结构相比,钢材可以循环再使用,其生产及施工过程中的总能耗较混凝土材料更低,是符合绿色发展趋势的一种建筑结构形式。钢结构还具有抗震性能优异、施工效率高、后期改造方便等优势。建筑钢结构的标准体系也较为完善,产品质量可控。但钢结构在隔音、防火、防腐方面劣于混凝土结构,钢结构本身与屋面板、楼板和墙板之间的协调性也存在一定问题。在造价方面,若只考虑建造环节前期投入,现阶段钢结构建筑的成本高于混凝土建筑。

采用高性能结构钢材,可以减少用钢量,从而降低成本。高性能结构钢材包括:①高强钢,屈服强度达到或超过460MPa,最高可达到1000MPa;②耐候钢,其耐腐蚀性指数不小于6.0,抗大气腐蚀能力比普通钢材高2~8倍;③耐火钢,在钢材受600℃高温作用时,剩余屈服强度不低于常温屈服强度的2/3,且钢材可以承受更高温作用;④抗震耐蚀耐火钢,其常温屈服强度不低于460MPa,600℃高温屈服强度不低于常温屈服强度的2/3,耐腐蚀性指数不小于6.0,钢材屈强比不大于0.85,断后伸长率不低于18%。采用高性能结构钢材,可以充分发挥结构钢材自身的高强、抗灾、环保等优势,进一步提升钢结构体系的耐久性、耐高温和抗火能力。

3) 纤维复合材料

纤维复合材料(fiber reinforced polymer,FRP)简称复合材料或复材,是由纤维增强体与树脂基体复合而成的材料。纤维增强体包括玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维以及玄武岩纤维,各类纤维性能价格比较如表1-3所示。

表 1-3 各类纤维性能与价格对比

| 纤维种类 | 纤维产品 | 拉伸强度/MPa | 拉伸模量/GPa | 断裂伸长率/% | 价格/(元/kg) |
|-------|--------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 玻璃纤维 | E 玻璃纤维 | 3100~3800 | 93~120 | ≤2.0 | 5~15 |
| | S 玻璃纤维 | 3600~4600 | 70~90 | ≤2.0 | 5~20 |
| 碳纤维 | 日本东丽 T300(标准弹性模量) | >2500 | 200~280 | 1.50~2.00 | 200 |
| | 日本东丽 T800HB(中等弹性模量) | >4500 | 280~350 | 1.73~1.81 | 3500~4000 |
| | 日本东丽 M40JB(高弹性模量) | >4500 | 350~600 | 0.50~1.30 | 3200 |
| | 日本东邦 UM63(超高弹性模量) | >4500 | >600 | 0.50~0.60 | 3800 |
| 芳纶纤维 | 美国杜邦 Kevlar 纤维(Kelvar49) | 2900~3400 | 70~140 | 2.8~4.4 | 300~400 |
| | 荷兰 Twaron(Kelvar149) | 2800~3100 | 65~120 | 2.0~3.4 | 200~350 |
| | 俄罗斯 CBM、APMOC(HM-50) | 4000~5000 | 130~145 | 3.5~4.0 | 150~280 |
| 玄武岩纤维 | — | 3000~4500 | 79~93 | 1.5~3.2 | 30~40 |

注:① 本表引自刘伟庆,方海,方园.纤维增强复合材料及其结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(4):1-16;

② 表中价格为2018年市场调研结果。

根据纤维增强体的不同,常见的复材分为玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)以及芳纶纤维增强复合材料(AFRP 材)。主要产品包括复材筋、复材管及复材型材等。复材筋可代替钢筋,用于耐腐蚀、无磁等特殊要求的混凝土结构中。复材管可与混凝土组合,形成复材管约束混凝土柱、桩,复材管约束海水海砂混凝土尤其适合于岛礁工程建设。复材型材具有工业化程度高、质量稳定等优点,已用于桥面板、房屋结构、钻井平台以及护栏系统等。

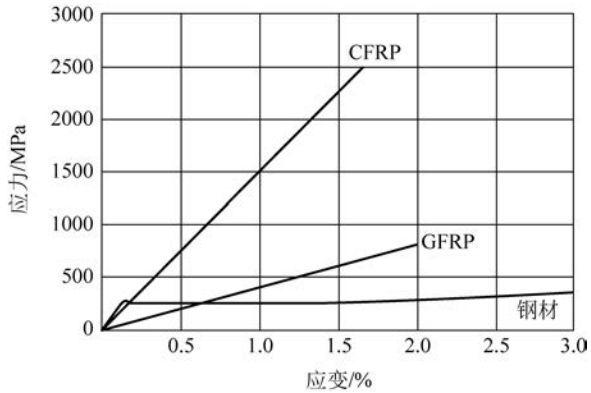


图 1-1 复材和钢材的典型应力-应变曲线

与传统结构材料相比,复材具有轻质高强(密度约为钢材的 1/4,而强度可达普通碳素结构钢的 10 倍以上,见图 1-1)、良好的抗腐蚀性能、可设计性强等优点,是目前唯一被认为能够解决基础设施腐蚀问题及实现长寿命和高性能的结构材料。因此复合材料结构在面广量大的土木、交通、船舶、海洋等工程领域拥有广阔的应用前景,我国已颁布《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020),复合材料结构呈现出良好的发展态势。

4) 智能混凝土

智能混凝土(intelligent concrete)是在混凝土原有的组分基础上复合智能型组分,使混凝土材料具有自诊断、自调节、自修复等特性,包括自诊断混凝土、自调节混凝土、自修复混凝土和高阻尼混凝土等。自诊断混凝土又称自感应混凝土,主要有碳纤维混凝土和光纤维混凝土,具有压敏性、温敏性、磁敏性等自感应特性。自调节混凝土包括形状记忆合金混凝土和添加沸石粉的混凝土。在混凝土中埋入形状记忆合金后,在受到异常荷载干扰时,可通过合金形状的变化,使混凝土内部应力重分布并产生一定的预应力,从而提高混凝土结构的承载能力。在混凝土中添加沸石粉后,由于沸石中的硅酸钙含有大量的孔隙,这些孔隙可以对水分进行有选择性的吸附,从而制备符合实际需要的自动调节环境湿度的混凝土。自修复混凝土包括自愈混凝土和复合无机渗透结晶材料的混凝土,自愈混凝土复合某种特殊组分(如含有修补剂的液芯纤维或胶囊),在混凝土内部形成智能型仿生自愈合神经系统,材料损伤破坏后,能够对受伤部位自动分泌修补剂,从而恢复甚至提高材料性能;复合无机渗透结晶材料的自修复混凝土通过其含有的特殊活性组分在混凝土内部渗透和反应,生成一种不溶于水的硅酸盐晶体填充、修复裂缝,从而提高了混凝土的强度和抗渗性能。高阻尼混凝土在聚合物混凝土的基础上,添加乳胶微料、硅粉、甲基纤维素等材料,增加混凝土的阻尼比,以增加结构的耗能,提高结构的抗震性能。尽管智能混凝土在投入实际工程之前,还存在很多问题,但包括智能混凝土在内的智能材料的研究与应用,肯定是混凝土结构重要发展方向之一。

2. 高性能结构构件的发展与应用

高性能结构构件主要包括钢-混凝土组合构件和复材-混凝土组合构件。钢-混凝土组合构件主要包括型钢混凝土和钢管混凝土构件。型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)如图 1-2 所示,也称为劲性混凝土,是以型钢为骨架并在型钢周围配置钢筋和浇筑混凝土的钢-混凝土组合构件。与钢筋混凝土构件相比,型钢混凝土构件的承载力大,刚度大,抗震性能好;与钢结构相比,型钢混凝土构件的防火性能好,结构局部和整体稳定性好,节省钢材。

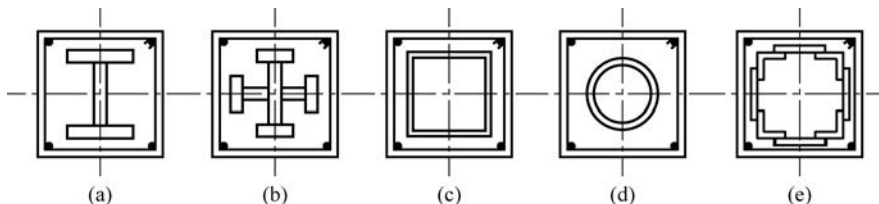


图 1-2 型钢混凝土的典型截面

钢管混凝土(concrete filled steel tube, CFST)如图 1-3 所示,是在钢管中填充混凝土而形成的钢-混凝土组合构件。钢管混凝土中的钢管可以为混凝土提供侧向约束力从而提高其承载力,中间的混凝土可以避免钢管过早屈曲,并可以防止钢管内壁的腐蚀,增加钢管的耐火极限。因此,钢管混凝土具有承载力高、耐久性好、抗震性能优良等优点。按截面形式不同,可分为圆形、方形、矩形和多边形等形状的钢管混凝土。

型钢混凝土和钢管混凝土应遵照《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)进行设计。

复合材料(简称复材)-混凝土组合构件主要为复合材料管混凝土组合柱,如图 1-4 所示。复合材料管(简称复材管)混凝土组合柱中,复材管的纤维缠绕方向接近环向,为内部混凝土提供环向约束。由于复材管的约束作用,混凝土强度及极限应变相对于素混凝土有大幅提高,从而提高了承载力及延性。

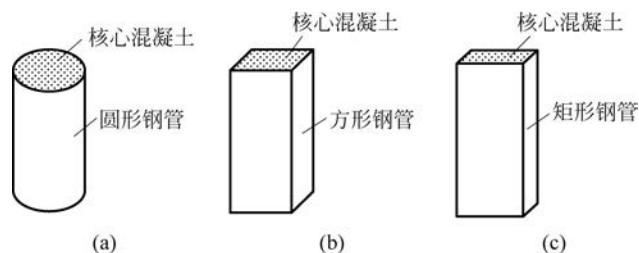


图 1-3 钢管混凝土

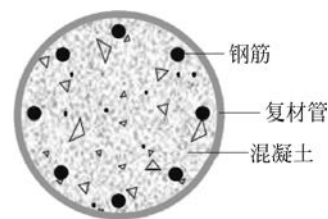


图 1-4 复材管混凝土组合柱

复材管混凝土柱中,也可在混凝土中配置型钢、钢管,从而形成了承载力高、抗震性能好、耐久性好的复材管-钢-混凝土组合柱,如图 1-5 所示。

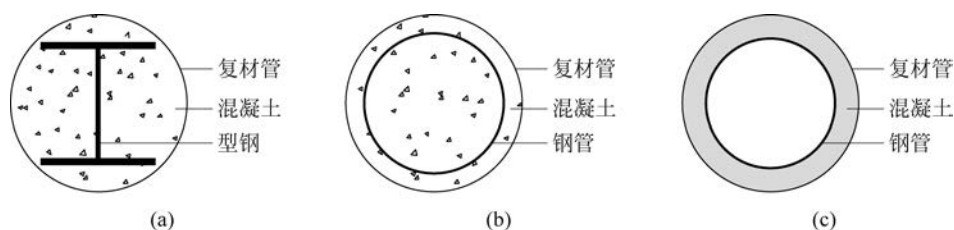


图 1-5 复材管-钢-混凝土组合柱

复材管-钢-混凝土组合柱也可做成空心的,如图 1-6 所示。

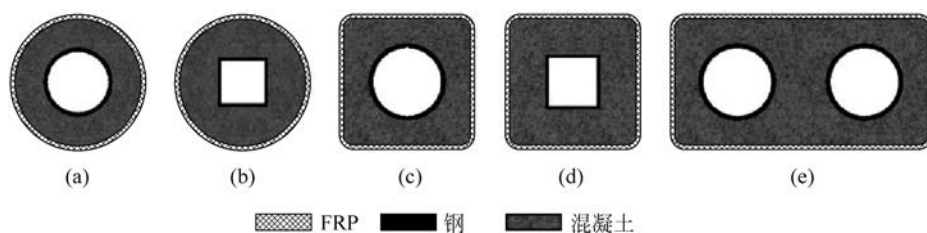


图 1-6 复材管-钢-混凝土空心组合柱

综上所述,混凝土和钢材是应用最普遍的两种结构材料,复材是正在兴起的新型结构材料。混凝土具有抗压强度高、耐久性好、经济等突出优点,但抗拉强度低、施工不便且要耗费模板;钢筋和钢材的抗拉强度高、施工方便、可循环使用,但耐火极限低、存在腐蚀问题和受压时的稳定性问题,材料成本也较高;复材耐腐蚀性能优异、抗拉强度高,但抗压强度很小。因此,结构构件的发展趋势就是充分发挥混凝土、钢材、复材的优势,最大限度地趋利避害,从而研发出承载力更高、耐久性能更佳、抗震性能更好、施工更为便利、造价更为经济、自重更轻、绿色的组合构件。

3. 结构体系的发展

结构体系的主要进展是钢-混凝土混合结构的应用。钢-混凝土混合结构主要指由钢框架或型钢混凝土、钢管混凝土框架与钢筋混凝土核心筒组成的框架-筒体结构,以及由钢或型钢混凝土、钢管混凝土

外筒与钢筋混凝土核心筒组成的筒中筒结构。与混凝土结构相比,钢-混凝土混合结构在降低结构自重、减少结构断面尺寸、改善结构受力性能、加快施工进度等方面具有明显的优势;与纯钢结构相比,又具有防火性能好、综合用钢量小、风荷载作用下舒适度好的特点。因此,钢-混凝土混合结构兼有钢结构和混凝土结构的优点,在我国高层及超高层建筑中得到了广泛的应用。据不完全统计,截至2019年年底,全国已完成主体结构封顶最高的100幢建筑中,混合结构、组合构件约占82%。

除常用的型钢混凝土和钢管混凝土外,一些新型的组合结构构件也在工程中得到了应用,如钢管混凝土叠合柱、约束钢管混凝土柱、钢板剪力墙、暗埋型钢剪力墙、暗埋桁架式剪力墙、异形钢管混凝土柱、巨型组合柱、钢-混凝土组合梁等。这些新型组合构件解决了混合结构设计中的某些难题,更加适应超高、超复杂的高层建筑。

4. 抗震设计方法和理论

目前的钢筋混凝土抗震结构一般采用延性设计方法。虽然通过延性设计能够实现三水准基本设防目标,可以避免结构在强震下发生倒塌,但是延性设计是以结构主要受力构件发生塑性变形为代价,存在大震后损伤严重、难以修复的问题。近年的震害表明,地震中建筑倒塌和人员伤亡的数量已经得到了有效控制,但地震所造成的经济损失和社会影响仍然十分巨大,主要原因是地震时建筑受损严重,震后难以修复,或者由于修复时间过长,建筑功能中断,影响正常生产和生活。因此,消能减震及隔震技术得到了推广应用,建筑抗震韧性理论和方法也应运而生。

1) 消能减震及隔震技术

消能减震结构利用结构抗震控制思想,把支撑、剪力墙等设计成消能构件,或在结构节点、顶层等部位安装消能元件以增加结构阻尼,从而减少结构在风和地震作用下的响应。常用的消能元件有金属阻尼器和黏滞阻尼器。金属阻尼器属于位移相关型阻尼器,包括软钢阻尼器和屈曲约束支撑等,在地震往复作用下通过金属屈服时产生的滞回变形耗散地震能量;黏滞阻尼器属于速度相关型阻尼器,包括杆式黏滞阻尼器和黏滞阻尼墙等,在地震往复作用下利用其黏滞材料的阻尼特性来耗散地震能量。隔震技术则通过在建筑物底部和基础间或楼层间设置隔震层,在隔震层设置叠层橡胶支座和滑动支座等具有很小的水平刚度的隔震装置,减少输入上部结构的地震能量,从而减轻结构的地震响应和破坏。

消能减震和隔震技术已列入《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010,2016年版,以下简称《抗震规范》),并颁发了《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)和《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408—2021)等相关技术标准。理论研究和震后调查表明,消能减震及隔震技术可有效降低地震作用,便于震后建筑使用功能的快速恢复,减小震后修复的工作量和难度,大幅度改善结构的抗震性能。

2021年9月1日起施行的《建设工程抗震管理条例》规定:“位于高烈度设防地区、地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、养老机构、儿童福利机构、应急指挥中心、应急避难场所、广播电视等建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术,保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求”,并鼓励在其他建设工程中采用隔震减震等技术,提高抗震性能。

2) 建筑抗震韧性理论和方法

20世纪90年代后,为了减轻地震的经济损失,基于性能的抗震设计得到了广泛的重视和发展。进入21世纪,特别是在2011年日本“3·11”大地震和新西兰克赖斯特彻奇(Christchurch,又称基督城)地震后,城市中建筑和公共设施大多中断服务,且多数房屋由于损坏严重,修复代价极大而只能将其拆除重建,造成了极大的经济损失。有鉴于此,提出了建筑抗震韧性(seismic resilience of building)的理论,建筑抗震韧性指“建筑在设定水准地震作用后,维持与恢复原有建筑功能的能力”。通过建筑抗震韧性的实施,实现在遭遇中小地震时城市的基本功能不丧失,可以快速恢复;在遭遇严重地震灾害时,城市应急功能不中断,不造成大规模的人员伤亡,所有人员均能及时完成避难,城市能够在几个月内基本恢复正常运行。

随着我国社会、经济的不断发展,人们对于建筑物抵御地震灾害的期望已由抗震安全性向抗震韧性转变,要求安全和功能双保护。我国现行抗震设计规范中关于性能化设计的规定均集中于保障建筑物结构部分的抗震安全性能,对建筑功能的震后可恢复性关注不足,建筑抗震韧性有望解决该问题。目前,我