

建筑设计 — 建筑结构与抗震

一、理论基础与方法论

1.1 建筑结构体系概论

建筑结构是建筑的骨架，承担和传递各种荷载（重力、风、地震等）到基础。结构设计的核心目标是：在满足安全性、适用性和耐久性的前提下，实现经济合理的结构方案。

结构体系分类：

结构体系	适用高度(m)	适用层数	特点	造价 (元/m²)
砌体结构	≤21(6度)	≤7层	经济、施工简单	400-600
框架结构	≤50(6度)	≤15层	空间灵活	600-1000
剪力墙结构	≤150(7度)	≤50层	侧向刚度大	800-1200
框架-剪力墙	≤130(7度)	≤45层	兼具灵活与刚度	700-1100
筒体结构	≤300+	超高层	抗侧能力最强	1200-2000+
钢结构	不限	不限	大跨/高层/装配式	1000-1800
装配式结构	同现浇	同现浇	工厂预制+现场装配	增加200-500

1.2 结构力学基础

基本力学原理：

- 静力平衡**： $\sum F_x=0$, $\sum F_y=0$, $\sum M=0$
- 胡克定律**： $\sigma=E \cdot \epsilon$ （弹性阶段应力-应变关系）
- 弯矩-曲率关系**： $M=EI \cdot \kappa$ （梁的弯曲理论）
- 欧拉公式**： $P_{cr}=\pi^2EI/(KL)^2$ （压杆稳定临界力）

荷载分类与组合：

荷载类型	代表	分项系数	组合方式
永久荷载（恒载）	结构自重、覆土	1.2/1.35	基本组合
可变荷载（活载）	人群、家具、设备	1.4	基本组合
风荷载	风压	1.4/0.9	基本组合
地震作用	水平/竖向地震力	1.3	地震组合
雪荷载	积雪	1.4/0.7	基本组合

1.3 抗震设计理论

抗震设计理论经历了从静力法到性能化设计的演变：

阶段	理论	时期	核心思想
静力法	等效静力	1920s-	地震力=重量×地震系数
反应谱法	底部剪力法	1950s-	基于地震动反应谱
时程分析	动力时程	1970s-	直接数值积分
能力设计	延性设计	1980s-	强柱弱梁，塑性铰
性能化设计	多水准性能	2000s-	小震不坏/中震可修/大震不倒
基于位移	DBD	2010s-	以位移为设计目标

中国抗震设防三水准： - 第一水准（小震）：多遇地震，结构不损坏，正常使用 - 第二水准（中震）：设防地震，结构可修复，有限损坏 - 第三水准（大

震)：罕遇地震，结构不倒塌，保证生命安全

1.4 基础工程理论

基础类型选择：

基础类型	适用条件	承载力	造价
独立基础	地基好、柱荷载小	≤300kPa	低
条形基础	墙下/柱列	≤250kPa	较低
筏板基础	软弱地基、高层	200-400kPa	中
桩基础	软弱深层、高层	单桩1000-10000kN	较高
复合基础	复杂地质	按设计	高

二、核心知识点详解

2.1 框架结构设计

框架结构是最常见的建筑结构形式之一。

设计要点：1. 柱截面：底层柱截面通常为500×500至800×800mm 2. 梁截面：高度一般为跨度的1/10-1/12 3. 轴压比控制：一级抗震μN≤0.65，二级≤0.75，三级≤0.85 4. 强柱弱梁：节点处柱端抗弯能力之和>梁端抗弯能力之和×1.2 5. 延性要求：箍筋加密、纵筋配筋率控制

框架结构设计参数：

参数	6度区	7度区	8度区
最大适用高度(m)	60	55	45
抗震等级	三/四级	二/三级	一/二级
层间位移角限值	1/550	1/550	1/550
轴压比限值(一级)	0.75	0.65	0.65

2.2 剪力墙结构设计

剪力墙结构是高层住宅最常用的结构体系。

剪力墙类型：

类型	特点	延性	适用
整截面墙	无洞口或洞口很小	较差（脆性）	低层
整体小开口墙	洞口面积<15%	较好	多层
联肢剪力墙	连梁连接多肢	好	中高层
壁式框架	洞口大，接近框架	好	高层

剪力墙设计要点：1. 墙厚：底部加强区≥层高的1/16且≥200mm 2. 约束边缘构件：一二级抗震须设置约束边缘构件 3. 连梁设计：小震不坏、中震可屈服、大震耗能 4. 分布钢筋：最小配筋率0.25%

2.3 钢结构设计

钢结构在公共建筑和工业建筑中广泛应用。

钢材等级与性能：

钢材牌号	屈服强度MPa	抗拉强度MPa	延伸率%	适用
Q235B	235	375-500	≥26	一般结构
Q345B(Q355B)	355	470-630	≥22	主流结构钢
Q390B	390	490-650	≥20	重载结构

Q420B	420	520-680	≥19	大跨/高层
Q460C	460	550-720	≥17	超高层

钢结构连接方式：

连接方式	优点	缺点	适用
焊接	整体性好、省料	残余应力、检测难	工厂制作
高强螺栓	施工快、可拆	需制孔、节点大	现场安装
铆接	韧性好	费工费料	历史建筑修复

2.4 装配式结构设计

装配式结构是建筑业转型升级的主要方向。

装配式结构体系：

体系	预制率	装配率	增量成本	适用
预制剪力墙	50-70%	60-80%	200-500元/m²	住宅
预制框架	40-60%	50-70%	300-600元/m²	公建
模块化（MiC）	80-95%	90%+	500-1000元/m²	酒店/宿舍
装配式钢结构	—	70-90%	200-400元/m²	公建/住宅

预制构件连接技术：

连接方式	原理	适用范围	质量标准
套筒灌浆	钢筋插入套筒+灌浆料	竖向钢筋	JGJ 355
浆锚搭接	预留孔道+灌浆	竖向钢筋	设计要求
后浇带	预留后浇混凝土	水平连接	设计要求
螺栓连接	预埋螺栓+螺母	钢构件	GB 50205

2.5 抗震设计详解

抗震设计关键概念：

概念	含义	设计要求
设防烈度	50年内超越概率10%的地震	6-9度
设计基本地震加速度	对应的地面加速度	0.05g-0.40g
设计地震分组	反映震源距离影响	第一/二/三组
场地类别	土层剪切波速分类	I/II/III/IV类
抗震等级	结构抗震措施的等级	一/二/三/四级

各设防烈度对应参数：

设防烈度	地震加速度g	影响系数最大值	特征周期s
6度	0.05	0.04	按场地
7度	0.10(0.15)	0.08(0.12)	按场地
8度	0.20(0.30)	0.16(0.24)	按场地
9度	0.40	0.32	按场地

2.6 基础选型详解

桩基础设计要点：

桩型	直径/边长mm	单桩承载力kN	深度m	适用地质
预制管桩PHC	400-800	800-5000	15-50	软土/硬土层
钻孔灌注桩	600-2000	2000-20000	20-80	各种地质
旋挖灌注桩	600-1500	1500-15000	15-50	各种地质
人工挖孔桩	800-2500	3000-30000	10-30	硬土/岩层
CFG桩	400-600	200-800	5-25	软基处理

三、材质与工艺

3.1 混凝土材料

强度等级	抗压强度MPa	弹性模量GPa	适用	参考价格元/m³
C25	25	28	基础/垫层	350-420
C30	30	30	梁板柱	380-460
C35	35	31.5	高层梁板	420-500
C40	40	32.5	高层柱	460-550
C50	50	34.5	高层柱/转换	550-700
C60	60	36	超高层	700-900
C80	80	38	特殊结构	900-1200

3.2 钢筋材料

钢筋类型	牌号	屈服强度MPa	适用	参考价元/t
热轧带肋	HRB400	400	普通配筋	3800-4200
热轧带肋	HRB500	500	高强度配筋	4000-4500
细晶粒热轧	HRBF400	400	抗震	4000-4500
余热处理	RRB400	400	箍筋/构造	3600-4000

四、实践案例

案例1：上海中心大厦（框架-核心筒-外伸臂）

- 结构高度：632m
- 结构体系：钢混框架核心筒+外伸臂桁架+巨型柱
- 用钢量：约7万吨
- 亮点：120°螺旋外立面减少风荷载24%。采用9级抗震措施。

案例2：北京中国尊（巨型框架-核心筒）

- 结构高度：528m
- 结构体系：巨型钢框架+核心筒+外伸臂
- 抗震设防：8度（0.2g）
- 亮点：首座500m+抗震设防8度的超高层。

案例3：武汉绿地中心（框架-核心筒）

- 结构高度：475m
- 结构体系：钢混框架核心筒
- 风工程：风洞试验优化外形
- 亮点：三棱锥造型降低风荷载。

案例4：四川震后重建项目（减隔震技术应用）

- 采用隔震支座（铅芯橡胶隔震支座）
- 隔震后地震作用降低50-70%
- 结构构件截面减小，综合造价基本持平

案例5：深圳平安金融中心（巨型结构）

- 高度：599m
- 8根巨型钢柱+核心筒+外伸臂
- 钢板剪力墙代替混凝土剪力墙
- 亮点：钢板-混凝土组合剪力墙体系。

案例6：北京大兴国际机场（大跨度空间结构）

- 屋盖跨度：最大跨度约60m
- 结构形式：空间网架+自由曲面
- C型柱：12m悬挑+顶部直径18m
- 亮点：8000块不同形状的屋面玻璃。

案例7：港珠澳大桥（桥梁结构）

- 总长55km
- 沉管隧道6.7km
- 结构类型：斜拉桥+人工岛+海底隧道
- 亮点：120年设计使用年限，抗16级台风+8度地震。

案例8：国家体育场"鸟巢"（空间钢结构）

- 跨度：333m×296m
- 结构形式：编织式空间桁架
- 用钢量：4.2万吨
- 亮点：无规则编织结构，世界最大跨度钢结构。

五、施工/制作指导

5.1 结构设计流程

前期分析（1-2周）

- └─ 建筑方案理解
- └─ 地勘报告分析
- └─ 荷载计算
- └─ 结构选型

方案设计（2-4周）

- └─ 结构布置
- └─ 初步计算（PKPM/YJK/ETABS）
- └─ 结构超限分析（如有）
- └─ 方案比选

施工图设计（4-8周）

- └─ 结构计算书
- └─ 配筋设计
- └─ 基础设计
- └─ 节点设计
- └─ 图纸绘制

施工配合

- └─ 设计交底
- └─ 地基验槽

- 钢筋隐蔽验收
- 混凝土强度确认
- 结构验收

六、性能指标与评测

6.1 结构性能评价

指标	优秀	良好	一般	说明
含钢量	≤45kg/m²	45-60kg/m²	>60kg/m²	住宅
混凝土用量	≤0.35m³/m²	0.35-0.45	>0.45	住宅
层间位移角	<1/800	1/800-1/550	接近限值	框架
周期比	<0.85	0.85-0.9	>0.9	抗扭

七、适用场景与人群

结构体系	适用场景	经济跨度	典型造价
砌体结构	低层住宅/农村自建房	≤6m	400-600元/m²
框架结构	多层公建/商业	6-9m	600-1000元/m²
剪力墙结构	高层住宅	—	800-1200元/m²
钢结构	大跨/高层/工业	12-36m	1000-1800元/m²
装配式	标准化住宅/公建	同现浇	增加200-500元/m²

八、市场评价与行业动态

8.1 2024-2026年结构技术趋势

- 超高性能混凝土（UHPC）：抗压强度120-200MPa，用于桥梁/特殊结构
- 高强钢结构：Q460/Q690在超高层中应用增加
- 3D打印建筑：大型3D打印混凝土结构已进入实用阶段
- 智能结构：内置传感器的自监测结构
- 减隔震技术：从特殊建筑走向常规应用

九、内容指导文件

9.1 核心规范清单

规范编号	名称
GB 50009	建筑结构荷载规范
GB 50010	混凝土结构设计规范
GB 50011	建筑抗震设计规范
GB 50017	钢结构设计标准
GB 50007	建筑地基基础设计规范
JGJ 3	高层建筑混凝土结构技术规程

十、购买决策问答

Q1: 高层住宅应选择什么结构体系？

A: 推荐： 1. 剪力墙结构：≤150m高层住宅首选，侧向刚度大 2. 框架-剪力墙：需要大空间底部商业时用 3. 装配式剪力墙：政策推广方向，增量成本200-500

元/m²

Q2: 大跨度公共建筑选择什么结构形式？

A: 推荐： 1. **钢结构桁架**：跨度30-60m，造价适中 2. **空间网架/网壳**：跨度30-100m，造型丰富 3. **索膜结构**：跨度100m+，适合体育场 4. **预应力混凝土**：跨度15-30m，经济性好

Q3: 装配式结构值不值得采用？

A: 分析： 1. **政策支持**：多城市强制装配率≥30% 2. **质量优势**：工厂预制精度高 3. **工期优势**：缩短30-50% 4. **成本**：增量200-500元/m²，规模化后可降低

Q4: 抗震设防如何确定？

A: 确定方法： 1. 查阅GB 18306确定当地设防烈度 2. 6度区大部分采用标准抗震措施 3. 7-8度区需重点设计，抗震等级提高 4. 9度区需专门论证

Q5: 基础选型如何决策？

A: 决策因素： 1. **地质条件**：软土→桩基，硬土→浅基础 2. **建筑荷载**：高层→桩基+筏板 3. **地下水位**：高水位需抗浮设计 4. **经济性**：在满足安全前提下的经济选择

十一、热点与趋势

11.1 减隔震技术普及

2025年新版《建筑抗震设计规范》将隔震设计列为优先推荐方案。铅芯橡胶隔震支座+阻尼器组合体系可降低地震作用50-70%。

11.2 高性能材料

UHPC（超高性能混凝土）强度达200MPa+，用于桥梁/幕墙/特殊结构。碳纤维增强复合材料（CFRP）在加固领域广泛应用。

11.3 数字化结构设计

BIM+参数化+AI优化结构设计。自动配筋、自动出图技术逐步成熟。

附录

核心标准

编号	名称
GB 50009	建筑结构荷载规范
GB 50010	混凝土结构设计规范
GB 50011	建筑抗震设计规范
GB 50017	钢结构设计标准
GB 50007	建筑地基基础设计规范
GB 50205	钢结构工程施工质量验收标准