

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 51390 – 2019

# 核电厂混凝土结构技术标准

Technical standard for concrete structures of  
nuclear power plants

2019 – 09 – 25 发布

2020 – 01 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部  
国家市场监督管理总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

# 核电厂混凝土结构技术标准

Technical standard for concrete structures of  
nuclear power plants

**GB/T 51390 - 2019**

主编部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 2 0 年 1 月 1 日

中国计划出版社

2019 北 京



# 中华人民共和国住房和城乡建设部公告

2019 年 第 262 号

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准 《核电厂混凝土结构技术标准》的公告

现批准《核电厂混凝土结构技术标准》为国家标准,编号为 GB/T 51390—2019,自 2020 年 1 月 1 日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站([www.mohurd.gov.cn](http://www.mohurd.gov.cn))公开,并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2019 年 9 月 25 日

# 前 言

本标准是根据住房和城乡建设部《关于印发〈2016 年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标函〔2015〕274 号)的要求,由中广核工程有限公司、中国核工业华兴建设有限公司会同有关单位共同编制完成的。

在编制过程中,编制组开展了大量的调查和专题研究,总结了我国核电厂混凝土结构研究、设计、施工、验收及检测工作中的经验,参考了有关国内和国际标准,并在全国范围内广泛征求有关科研、设计、施工等单位的意见,经反复讨论、修改、完善,最后经审查定稿。

本标准共分 13 章和 5 个附录,主要技术内容是:总则、术语和符号、基本设计规定、材料、荷载与荷载组合、结构分析、承载能力极限状态计算、正常使用极限状态验算、构造规定、结构构件的基本规定、预应力混凝土安全壳、施工和验收等。

本标准由住房和城乡建设部负责管理,由中广核工程有限公司负责具体技术内容的解释,为提高标准的质量,请各单位在执行本标准过程中,结合工程实践,认真总结经验,积累资料,并将意见和建议寄送至中广核工程有限公司国家标准《核电厂混凝土结构技术标准》管理组(地址:广东省深圳市龙岗区黄阁路天安数码城 5 号楼,邮编:518172),以便今后修订时参考。

本 标 准 主 编 单 位:中广核工程有限公司

中国核工业华兴建设有限公司

本 标 准 参 编 单 位:环境保护部核与辐射安全中心

深圳中广核工程设计有限公司

中国核电工程有限公司

上海核工程研究设计院有限公司  
中冶建筑研究总院有限公司  
中核能源科技有限公司  
大连理工大学  
清华大学  
中国核工业第二二建设有限公司  
中国核工业二四建设有限公司  
柳州欧维姆机械股份有限公司  
喜利得(中国)商贸有限公司  
国核工程有限公司

本标准主要起草人员:李忠诚 魏建国 潘 蓉 贡金鑫  
张卫国 储艳春 董占发 孙运轮  
张兴斌 郭俊营

王启宁(以下按姓氏笔画排列)

王 涛 王辉诚 白明鑫 吕光晔  
吕锦权 朱绍军 刘玉林 刘自妥  
庄 源 运广辉 李 军 李 亮  
李建波 李晓红 杨 浩 肖德宝  
张仕兵 张明皋 张磊磊 孟 剑  
赵 明 荣 华 袁 芳 徐征宇  
黄 涛 常会芳 樊 焯 樊建生  
黎鹏飞

本标准主要审查人员:林 皋 乔 治 李忠献 黄小坤  
潘 立 张超琦 陈李华 束伟农  
龚振斌 刘晶波 刘海卿 王德桂  
石云兴

# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 4 )
3	基本设计规定 .....	( 8 )
3.1	一般规定 .....	( 8 )
3.2	结构方案 .....	( 9 )
3.3	极限状态设计 .....	( 9 )
3.4	耐久性设计 .....	( 10 )
4	材 料 .....	( 13 )
4.1	混凝土 .....	( 13 )
4.2	钢筋 .....	( 13 )
5	荷载与荷载组合 .....	( 14 )
5.1	一般规定 .....	( 14 )
5.2	荷载 .....	( 14 )
5.3	承载能力极限状态的荷载组合 .....	( 17 )
5.4	正常使用极限状态的荷载组合 .....	( 21 )
5.5	结构整体稳定性验算的荷载组合 .....	( 21 )
6	结构分析 .....	( 23 )
6.1	基本原则 .....	( 23 )
6.2	分析模型 .....	( 24 )
6.3	弹性分析 .....	( 24 )
6.4	塑性内力重分布分析 .....	( 25 )
6.5	弹塑性分析 .....	( 25 )

7	承载力极限状态计算	( 27 )
7.1	一般规定	( 27 )
7.2	正截面承载力计算	( 27 )
7.3	平面内受剪	( 28 )
7.4	平面外受剪	( 29 )
7.5	剪摩擦验算	( 31 )
7.6	其他承载力计算	( 32 )
8	正常使用极限状态验算	( 33 )
8.1	裂缝控制验算	( 33 )
8.2	受弯构件挠度验算	( 33 )
9	构造规定	( 35 )
9.1	变形缝	( 35 )
9.2	混凝土保护层	( 35 )
9.3	钢筋锚固	( 35 )
9.4	钢筋连接	( 37 )
9.5	纵向受力钢筋的最小配筋率	( 38 )
10	结构构件的基本规定	( 39 )
10.1	基础	( 39 )
10.2	板	( 40 )
10.3	梁	( 40 )
10.4	柱及牛腿	( 42 )
10.5	墙	( 45 )
10.6	叠合受弯构件	( 46 )
10.7	预埋件与连接件	( 47 )
11	预应力混凝土安全壳	( 49 )
11.1	一般规定	( 49 )
11.2	承载力计算要求	( 49 )
11.3	正常使用应力要求	( 50 )
11.4	预应力系统材料	( 51 )

11.5	预应力系统设计 .....	( 52 )
12	施 工 .....	( 55 )
12.1	一般规定 .....	( 55 )
12.2	模板工程及支撑体系 .....	( 55 )
12.3	钢筋工程 .....	( 57 )
12.4	预应力工程 .....	( 61 )
12.5	混凝土工程 .....	( 64 )
13	验 收 .....	( 66 )
13.1	一般规定 .....	( 66 )
13.2	模板工程 .....	( 66 )
13.3	钢筋工程 .....	( 69 )
13.4	预应力工程 .....	( 71 )
13.5	混凝土工程 .....	( 77 )
附录 A	超设计基准范畴 .....	( 81 )
附录 B	安全壳结构完整性检测 .....	( 82 )
附录 C	抗大型商用飞机撞击结构设计 .....	( 86 )
附录 D	水池 .....	( 90 )
附录 E	混凝土后锚固 .....	( 91 )
	本标准用词说明 .....	( 95 )
	引用标准名录 .....	( 96 )
	附:条文说明 .....	( 99 )

# Contents

1	General provisions .....	( 1 )
2	Terms and symbols .....	( 2 )
2.1	Terms .....	( 2 )
2.2	Symbols .....	( 4 )
3	Basic requirements .....	( 8 )
3.1	General requirements .....	( 8 )
3.2	Structural scheme .....	( 9 )
3.3	Design of limit states .....	( 9 )
3.4	Durability design .....	( 10 )
4	Materials .....	( 13 )
4.1	Concrete .....	( 13 )
4.1	Steel reinforcement .....	( 13 )
5	Loads and combinations of loads .....	( 14 )
5.1	General requirements .....	( 14 )
5.2	Loads .....	( 14 )
5.3	Load combinations of ultimate limit states .....	( 17 )
5.4	Load combinations of serviceability limit states .....	( 21 )
5.5	Load combinations of global stability evaluation .....	( 21 )
6	Structural analysis .....	( 23 )
6.1	Basic principle .....	( 23 )
6.2	Analysis model .....	( 24 )
6.3	Elastic analysis .....	( 24 )
6.4	Analysis on plastic re-distribution of internal forces .....	( 25 )
6.5	Elastic-plastic analysis .....	( 25 )

7	Ultimate limit states calculation .....	( 27 )
7.1	General requirements .....	( 27 )
7.2	Calculation of flexural and axial capacity .....	( 27 )
7.3	In-plane shear resistance .....	( 28 )
7.4	Out-of-plane shear resistance .....	( 29 )
7.5	Checking of shear friction .....	( 31 )
7.6	Calculation of other capacity .....	( 32 )
8	Checking of serviceability limit states .....	( 33 )
8.1	Checking of cracks .....	( 33 )
8.2	Checking of deflection of flexural members .....	( 33 )
9	Detailing requirements .....	( 35 )
9.1	Movement joint .....	( 35 )
9.2	Concrete cover .....	( 35 )
9.3	Anchorage of steel reinforcement .....	( 35 )
9.4	Splices of reinforcement .....	( 37 )
9.5	Minimum ratio of longitudinal stressed reinforcements .....	( 38 )
10	Fundamental requirements for structural members .....	( 39 )
10.1	Foundations .....	( 39 )
10.2	Slabs .....	( 40 )
10.3	Beams .....	( 40 )
10.4	Columns and brackets .....	( 42 )
10.5	Shear walls .....	( 45 )
10.6	Composite bending members .....	( 46 )
10.7	Embedded parts and connecting pieces .....	( 47 )
11	Prestressed concrete containment .....	( 49 )
11.1	General requirements .....	( 49 )
11.2	Calculation requirements of bearing capacity .....	( 49 )
11.3	Requirements of stress and strain in normal service .....	( 50 )
11.4	Materials for prestressing system .....	( 51 )



11.5	Design of prestressing system .....	( 52 )
12	Construction .....	( 55 )
12.1	General requirements .....	( 55 )
12.2	Formwork and supports .....	( 55 )
12.3	Reinforcement engineering .....	( 57 )
12.4	Prestressed concrete engineering .....	( 61 )
12.5	Concrete engineering .....	( 64 )
13	Checking and acceptance .....	( 66 )
13.1	General requirements .....	( 66 )
13.2	Formwork engineering .....	( 66 )
13.3	Reinforcement engineering .....	( 69 )
13.4	Prestressed concrete engineering .....	( 71 )
13.5	Concrete engineering .....	( 77 )
Appendix A	Design extension domain .....	( 81 )
Appendix B	Structure integrity test of containments .....	( 82 )
Appendix C	Structural design against large commercial aircraft impact .....	( 86 )
Appendix D	Pool .....	( 90 )
Appendix E	Concrete post-anchorage .....	( 91 )
	Explanation of wording in this standard .....	( 95 )
	List of quoted standards .....	( 96 )
	Addition: Explanation of provisions .....	( 99 )

# 1 总 则

**1.0.1** 为在核电厂混凝土结构工程中贯彻执行国家的技术经济政策及核安全法规,做到安全第一、保证质量、经济合理,制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于核电厂核安全相关钢筋混凝土和预应力混凝土结构的设计、施工及验收。

**1.0.3** 本标准依据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的原则制定。

**1.0.4** 核电厂混凝土结构的设计、施工及验收除应符合本标准外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 设计基准事故 design basis accident

导致核电厂事故工况的假设事故,事故的放射性物质释放在可接受限值内,且核电厂是按确定的设计准则和采取了针对性措施来设计的事故。

#### 2.1.2 外部人为事件 external human event

发生在核电厂厂房外部并与人类活动直接相关的事件,如爆炸、飞机撞击等。

#### 2.1.3 外部自然事件 external natural event

发生在核电厂厂房外部并与自然活动直接相关的事件,如地震、龙卷风等。

#### 2.1.4 设计扩展工况 design extension conditions

不在设计基准事故范围的事故工况,在设计过程中按最佳估算方法考虑,并且该事故工况的放射性物质释放在可接受限值以内,设计扩展工况包括没有造成堆芯明显损伤的工况和堆芯熔化(严重事故)工况。

#### 2.1.5 设计基准范畴 design basis conditions / domain

为了满足核电厂的功能和性能要求而必须考虑的作为核电厂设计基准的事件、事故、条件等的总称,包括设计基准事故、外部自然事件、外部人为事件及其他设计条件(厂址及工艺条件)等。

#### 2.1.6 超设计基准范畴 conditions beyond design basis / design extension domain

超越设计基准范畴的工况,包括设计扩展工况和超设计基准外部事件。

**2.1.7 极限安全地震动** ultimate safety seismic ground motion

核电厂设计基准地震动的较高水准,是对应极限安全要求的地震动,通常为预估的核电厂所在地区可能遭遇的最大潜在地震动,对应的年超越概率为 $1 \times 10^{-4}$ 。

**2.1.8 运行安全地震动** operational safety seismic ground motion

核电厂设计基准地震动的较低水准,主要用于对核电厂运行安全的控制。

**2.1.9 预应力混凝土安全壳** prestressed concrete containment

简称“安全壳”,包括底板、圆形筒壁及穹顶,同时沿筒身及穹顶布置有预应力筋的混凝土壳体结构。

**2.1.10 核安全相关混凝土结构** nuclear safety related concrete structures

执行安全功能的混凝土结构,即在核设施设计、建造、运行和退役期间,能保护人员、社会和环境免受可能的放射性危害的结构,包括包容或支撑任何安全级系统、设备的结构,在事故或出现外部事件时,参与包容放射性产物的结构。

**2.1.11 安全壳结构完整性试验** structural integrity test of containment

简称“压力试验”,通过施加气压检验安全壳结构在设计基准事故工况压力作用下的结构性能的试验。

**2.1.12 预应力筋孔道摩擦试验** friction test between prestressing tendons and duct

简称“摩擦试验”,在安全壳预应力筋张拉施工前,选取不同类型的预应力筋在安全壳相应部位的典型预应力成孔管道内进行张拉,以验证预应力筋与孔道壁之间的实际摩擦系数与设计计算的假定摩擦系数的一致性,并为后续预应力筋张拉施工作业和张拉

值的确定提供依据的试验。

### 2.1.13 混凝土基准配合比      reference mixing ratio of concrete

以计算配合比为基础,经过试验室试配调整,并通过混凝土拌合物和硬化混凝土性能试验验证,试验结果满足设计和施工要求的配合比。

### 2.1.14 混凝土初步试验      concrete preliminary test

采用工程实际使用的原材料,在试验室经试配调整,得到混凝土拌合物和硬化混凝土性能满足设计要求的混凝土基准配合比的试验。

### 2.1.15 混凝土可行性试验      concrete availability test

验证采用基准配合比的混凝土在实际现场条件(主要是混凝土制备设备和输送装置)下制备、输送、浇筑时,混凝土拌合物是否满足施工要求以及硬化混凝土物理力学性能是否满足设计要求的试验。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 材料性能:

$c_c$  —— 施工缝处的粘结力;

$E_c$  —— 混凝土的弹性模量;

$E_s$  —— 钢筋的弹性模量;

$f_{ck}$ 、 $f_c$  —— 混凝土轴心抗压强度标准值、设计值;

$f_{ptk}$  —— 预应力筋极限强度标准值;

$f_{tk}$ 、 $f_t$  —— 混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值;

$f_{yk}$  —— 普通钢筋轴心抗拉强度标准值;

$f_y$ 、 $f'_y$  —— 普通钢筋抗拉、抗压强度设计值;

$f_{yv}$  —— 横向钢筋的抗拉强度设计值。

### 2.2.2 作用和作用效应:

$A_1$  —— 内部飞射物产生的撞击荷载;

- $A_2$ ——外部爆炸引起的冲击波荷载；
- $A_3$ ——外部飞射物引起的荷载；
- $C$ ——结构构件达到正常使用要求所规定的限值；
- $D$ ——不含预应力效应的永久荷载；
- $E_1$ ——运行安全地震动产生的地震作用；
- $E_2$ ——极限安全地震动产生的地震作用；
- $F$ ——由施加预应力产生的荷载；
- $G$ ——启动卸压阀或其他高能装置引起的荷载；
- $H_a$ ——内部水淹作用于安全壳的荷载；
- $L$ ——活荷载；
- $N$ ——轴向力设计值；
- $N_k$ ——垂直于施工缝面的永久净压力标准值；
- $N_x$ ——墙、板或壳体单位长度内的  $X$  向薄膜力设计值；
- $N_y$ ——墙、板或壳体单位长度内的  $Y$  向薄膜力设计值；
- $P_a$ ——设计基准事故引起的压力荷载；
- $P_t$ ——安全壳进行完整性检查时的压力荷载；
- $P_v$ ——安全壳内部或外部压力变化产生的压差荷载；
- $R(\cdot)$ ——结构构件的抗力函数；
- $R_a$ ——设计基准事故引起的管道和设备反力；
- $R_d$ ——结构构件的抗力设计值；
- $R_{d, stb}$ ——平衡作用效应的设计值；
- $R_o$ ——正常运行或停堆期间管道和设备的反力；
- $R_r$ ——设计基准事故引起的局部荷载；
- $S$ ——正常使用极限状态荷载组合的效应设计值；
- $S_0$ ——基本雪压；
- $S_d$ ——承载能力极限状态下作用组合的效应设计值；
- $S_{d, dst}$ ——不平衡作用效应的设计值；
- $S_{d, stb}$ ——平衡作用效应的设计值；
- $S_k$ ——雪荷载标准值；

$T$ ——扭矩设计值；  
 $T_a$ ——设计基准事故引起的温度作用；  
 $T_o$ ——正常运行或停堆期间的温度作用；  
 $T_t$ ——安全壳进行完整性检查期间的温度作用；  
 $V$ ——剪力设计值；  
 $V_w$ ——施工缝处的剪力设计值；  
 $W$ ——风荷载标准值；  
 $W_m$ ——龙卷风引起的飞射物荷载；  
 $W_0$ ——基本风压；  
 $W_p$ ——龙卷风的压差荷载；  
 $W_t$ ——设计基准龙卷风荷载；  
 $W_w$ ——龙卷风的风压荷载。

### 2.2.3 几何参数：

$\alpha$ ——钢筋与施工缝平面的夹角；  
 $\alpha_k$ ——几何参数的标准值；  
 $A$ ——构件截面面积；  
 $A_c$ ——混凝土施工缝处抗剪截面面积；  
 $A_s$ 、 $A'_s$ ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；  
 $A_p$ 、 $A'_p$ ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；  
 $A_{sx}$ ——墙、板或壳体单位长度内的  $X$  向钢筋截面面积；  
 $A_{sy}$ ——墙、板或壳体单位长度内的  $Y$  向钢筋截面面积；  
 $A_{sv}$ ——配置在同一截面内横向钢筋各肢的全部截面面积；  
 $A_{s,min}$ ——墙、板或壳体单位长度内的最小钢筋截面面积；  
 $b$ ——矩形截面的宽度， $T$  形、 $I$  形截面的腹板宽度；  
 $d$ ——钢筋的公称直径；  
 $h$ ——截面高度；  
 $h_0$ ——截面有效高度；  
 $s$ ——沿构件轴线方向上螺旋筋的间距、箍筋或拉筋的间距。

## 2.2.4 计算系数及其他：

$g$ ——重力加速度；

$k$ ——安全系数；

$V_0$ ——百年一遇的 3s 平均最大风速(距地面以上 10m 高度处阵风)；

$\beta_c$ ——混凝土强度影响系数；

$\beta_h$ ——截面高度影响系数；

$\beta_z$ ——高度  $z$  处的风振系数；

$\mu$ ——摩擦系数；

$\mu_s$ ——风荷载体型系数；

$\mu_z$ ——风压高度变化系数；

$\varphi$ ——钢筋混凝土构件的稳定系数。



## 3 基本设计规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 混凝土结构设计应满足安全性、适用性、耐久性及可建造性相关要求。

**3.1.2** 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,以可靠度指标度量结构构件的可靠度,采用分项系数的设计表达式进行设计。

**3.1.3** 在设计基准范畴下,混凝土结构应进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算。在超设计基准范畴下,可按附录 A 进行评估。

**3.1.4** 设计中应考虑厂址环境因素、厂区地基条件及附近区域边坡稳定性对核安全相关结构的影响。

**3.1.5** 混凝土结构应按现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB 50267 规定的抗震分类及其设计水准进行抗震设计。

**3.1.6** 混凝土温度不应超过下列数值:

1 在正常运行工况下或其他长期作用的温度限值为  $65^{\circ}\text{C}$ ,但局部范围,如高能管道穿管区域,其允许温度可适当提高,但不宜大于  $95^{\circ}\text{C}$ ;

2 在事故工况下或其他任何短期作用的温度限值为  $180^{\circ}\text{C}$ ,但对于管道破裂时喷射作用所影响的局部区域,其允许温度可提高到  $345^{\circ}\text{C}$ ;

3 混凝土温度超过上述限值时,若通过试验表明该较高温度作用下混凝土强度不低于设计值,则混凝土温度允许高于上述规定的限值。

**3.1.7** 混凝土结构的设计使用年限应满足核电厂设计寿期的要

求,且不应低于 50 年。

## 3.2 结构方案

3.2.1 混凝土结构方案设计应遵循下列主要原则:

- 1 结构的平、立面布置宜简单规则,刚度和质量分布宜均匀连续,刚度中心宜接近质量中心;
- 2 结构传力途径应简捷、明确,竖向承重构件宜上下对齐;
- 3 结构重心宜低;
- 4 重要构件应设置冗余约束;
- 5 对局部薄弱部位应采取加强措施;
- 6 应考虑非核安全相关结构对核安全相关混凝土结构的不利影响。

3.2.2 应根据结构体系的使用功能、厂房形状及受力特点等,结合伸缩变形、沉降变形、防震等功能要求,合理确定变形缝的设置和构造形式。

## 3.3 极限状态设计

3.3.1 混凝土结构构件按承载力极限状态设计时,应满足下列各式要求:

$$S_d \leq R_d \quad (3.3.1-1)$$

$$R_d = R(f_c, f_s, a_k, \dots) \quad (3.3.1-2)$$

式中:  $S_d$  ——承载力极限状态下作用组合的效应设计值;

$R_d$  ——结构构件的抗力设计值;

$R(\cdot)$  ——结构构件的抗力函数;

$f_c, f_s$  ——混凝土、钢筋的强度设计值;

$a_k$  ——几何参数的标准值。

3.3.2 整个结构或其一部分作为刚体失去平衡的承载力极限状态设计时,应满足下式要求:

$$S_{d, \text{stb}} / S_{d, \text{dst}} \geq k \quad (3.3.2)$$

式中:  $S_{d, stb}$  ——平衡作用效应的设计值;  
 $S_{d, dst}$  ——不平衡作用效应的设计值;  
 $k$  ——安全系数。

**3.3.3** 混凝土结构构件按正常使用极限状态设计时,应满足下式要求:

$$S \leq C \quad (3.3.3)$$

式中:  $S$  ——正常使用极限状态荷载组合的效应设计值;  
 $C$  ——结构构件达到正常使用要求所规定的限值。

### 3.4 耐久性设计

**3.4.1** 混凝土结构应通过合理选择材料、控制材料质量、采用有利于耐久性的结构形式和构造、控制施工质量、加强使用中的定期监测及维护等基本措施来保证耐久性。对处于恶劣环境的构件宜采用防腐蚀附加措施或多重防护策略。

**3.4.2** 按结构所处环境及其对钢筋、预应力筋和混凝土的影响可将环境分为4类,环境类别和环境作用等级应按表3.4.2的规定确定。

表 3.4.2 环境类别和环境作用等级

环境类别	作用等级	环境条件	结构或构件示例
一般环境	I-A	室内干燥环境	混凝土结构的室内构件
	I-B	非干湿交替的室内潮湿环境 非干湿交替的露天环境 长期湿润环境	中、高湿度环境中的室内构件;不接触或偶尔接触雨水的室外构件;长期与水或湿润土体接触的构件
	I-C	干湿交替环境	表面频繁淋雨或频繁与水接触的室外构件

续表 3.4.2

环境类别	作用等级	环境条件	结构或构件示例
冻融环境	II-D	微冻地区的有盐环境 混凝土高度饱水	泵房的水位变动区构件； 频繁受雨淋的构件水平表面 (悬挑构件上表面,如雨棚)
		严寒和寒冷地区的有盐环境 混凝土中度饱水	受雨淋的构件竖向表面 (厂房外墙)
	II-E	严寒和寒冷地区的有盐环境 混凝土高度饱水	泵房的水位变动区构件； 频繁受雨淋的构件水平表面 (如雨棚、挑檐等)
氯化物环境	III-C	水下区和土中区 周边永久浸没于海水或埋于土中	泵房外墙水下部分、厂房 外墙地下部分、厂房基础
	III-D	大气区(轻度盐雾) 距平均水位 15m 高度以上的海上大气区 涨潮岸线以外 100m ~ 300m 内的陆上室外环境	靠海的混凝土结构外墙及 室外构件
	III-E	距平均水位上方 15m 高度以内的海上大气区 离涨潮岸线 100m 以内、低于海平面上 15m 的陆上室外环境	泵房与海水不接触的外墙； 靠海的混凝土结构外墙及 室外构件
		潮汐区和浪溅区,非炎热地区	泵房与海水接触的部分
	III-F	潮汐区和浪溅区,炎热地区	泵房与海水接触的部分
化学腐蚀环境	V	按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定采用	

注:1 环境作用等级分为 A、B、C、D、E、F 共 6 级,其中 A 级为轻微、B 级为轻度、C 级为中度、D 级为严重、E 级为非常严重、F 级为极端严重;

2 环境条件指混凝土表面的局部环境;

3 干燥、低湿度环境指年平均湿度小于 60%,中、高湿度环境指年平均湿度大于 60%。

**3.4.3** 各类环境中普通钢筋的混凝土保护层厚度和混凝土强度等级、最大水胶比应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 中设计使用年限的规定。

**3.4.4** 耐久性设计除执行本节的规定外,还应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定。

## 4 材 料

### 4.1 混 凝 土

**4.1.1** 混凝土强度等级、设计取值应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定确定。

**4.1.2** 钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C30, 预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C40。

### 4.2 钢 筋

**4.2.1** 普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋, 也可采用 HPB300 钢筋。

**4.2.2** 普通钢筋宜选用满足下列抗震要求的钢筋:

1 钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25;

2 钢筋的屈服强度实测值与屈服强度标准值的比值不应大于 1.30;

3 钢筋最大拉力下的总伸长率实测值不应小于 9%。

**4.2.3** 普通钢筋的设计取值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

**4.2.4** 预应力筋宜采用钢绞线和预应力螺纹钢筋, 其性能指标应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

**4.2.5** 并筋和钢筋代换应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求。

**4.2.6** 当构件中采用预制的钢筋焊接网片, 应满足现行行业标准《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》JGJ 114 的要求。

## 5 荷载与荷载组合

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 混凝土结构设计考虑六类荷载:正常荷载、异常荷载、严重环境荷载、极端环境荷载、内部飞射物和外部人为事件引起的荷载。

1 正常荷载包括永久荷载、活荷载、雪荷载、正常运行或停堆期间的温度作用、正常运行或停堆期间管道和设备的反力、启动卸压阀或其他高能装置引起的荷载、安全壳内部或外部压力变化而引起的压力荷载、安全壳进行完整性检查时的压力荷载和温度作用等;

2 异常荷载包括由设计基准事故引起的压力荷载、温度作用、管道和设备反力、局部荷载,内部水淹作用于安全壳的荷载;

3 严重环境荷载包括风荷载、运行安全地震作用;

4 极端环境荷载包括龙卷风、极限安全地震作用;

5 内部飞射物引起的撞击荷载;

6 外部人为事件引起的荷载包括外部爆炸引起的冲击波荷载、外部飞射物引起的荷载等。

**5.1.2** 结构设计的荷载取值,应根据厂址条件、工艺要求或现行国家相关标准的规定确定。

**5.1.3** 结构设计应根据结构功能和性能要求,按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别定义荷载组合。

### 5.2 荷载

**5.2.1** 永久荷载  $D$  主要包括结构的自重、固定设备正常运行下的自重、正常运行下的液体自重及其静压力、土压力、地基沉降作

用、混凝土的收缩和徐变作用等。

### 5.2.2 活荷载 $L$ 应符合下列规定：

施工期间的活荷载(临时荷载、支撑荷载等)根据施工条件确定,且不宜小于  $4\text{kN/m}^2$ ;正常运行工况下的活荷载(可移动设备荷载、人员重量、吊车荷载等)根据土建接口条件确定;屋面活荷载取屋面最大积水荷载和屋面雪荷载两者中的较大值,且屋面均布活荷载不小于  $2\text{kN/m}^2$ 。

### 5.2.3 雪荷载应符合下列规定：

1 基本雪压  $S_0$  根据厂址条件按 100 年重现期确定；

2 雪荷载标准值  $S_k$  根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定确定；

3 雪荷载应考虑屋面积雪的不均匀性对结构内力的不利影响。

### 5.2.4 正常运行或停堆期间的温度作用 $T$ 应符合下列规定：

结构的温度作用应考虑建造温度和环境温度的影响。建造温度可根据厂址和施工条件确定,若无充分依据,可按  $20^\circ\text{C}$  考虑;室内温度可根据工艺资料确定;室外温度可根据厂址气象资料确定;地基温度可根据厂址条件确定,若无实测数据,可按  $10^\circ\text{C}$  考虑。

5.2.5 正常运行或停堆期间管道和设备的反力  $R$  仅指正常运行或停堆期间管道和设备的反力,不包括自重和地震产生的反力。

5.2.6 启动卸压阀或其他高能装置引起的荷载  $G$  应由工艺要求确定。

5.2.7 安全壳内部或外部压力变化而引起的压力荷载  $P_v$  及其对应的循环数量由工艺要求确定。

5.2.8 安全壳结构完整性试验时的压力荷载  $P_t$  宜取设计基准事故压力  $P_a$  的 1.10 倍~1.15 倍。

5.2.9 安全壳结构完整性试验时的温度作用  $T_t$  宜根据试验期间的环境温度确定。

5.2.10 设计基准事故引起的荷载和作用  $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$  应符合下



列规定：

1 压力荷载  $P_a$  的压力曲线及其引起的隔间压差根据工艺条件确定；

2 温度作用  $T_a$  应根据工艺条件确定；

3 管道和设备反力  $R_a$  为管道通过贯穿件及连接件作用在结构上的作用力或设备反力；

4 局部荷载  $R_l$  包括由高能管道破裂而产生的反力  $R_{rr}$ 、由高能管道破裂所产生的喷射冲击荷载  $R_{rj}$ 、由高能管道破裂所产生的撞击荷载  $R_{rm}$ 。

5.2.11 由地震动产生的地震作用包括下列内容：

1 运行安全地震动产生的地震作用  $E_1$ ，包括由运行安全地震动引起的结构、管道和设备的地震作用、土的地震作用、水池中水的地震作用等；

2 极限安全地震动产生的地震作用  $E_2$ ，包括由极限安全地震动引起的结构、管道和设备的地震作用、土的地震作用、水池中水的地震作用等。

5.2.12 风荷载应符合下列规定：

1 基本风压  $W_0$  应按下式计算：

$$W_0 = V_0^2 / 1600 \quad (5.2.12-1)$$

式中： $V_0$ ——百年一遇的 3s 平均最大风速（距地面以上 10m 高度处阵风）。

2 风荷载标准值  $W$  应按下式计算：

$$W = \mu_s \mu_z W_0 \beta_z \quad (5.2.12-2)$$

式中： $\mu_s$ ——风荷载体型系数；

$\mu_z$ ——风压高度变化系数；

$\beta_z$ ——高度  $z$  处的风振系数。

$\mu_s$ 、 $\mu_z$ 、 $\beta_z$  按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取值。

5.2.13 设计基准龙卷风荷载  $W_L$  应符合下列规定：

1 确定龙卷风参数时,龙卷风的分级遵循现行核安全导则的规定,设计基准龙卷风等级根据厂址条件确定;

2 龙卷风效应包括:风压荷载  $W_w$ 、压差荷载  $W_p$ 、龙卷风引起的飞射物荷载  $W_m$ ,龙卷风效应取值可按现行行业标准《核电厂安全相关土建结构抗龙卷风设计规定》NB/T 20360 确定。

**5.2.14** 内部飞射物产生的撞击荷载  $A_1$ 应符合下列规定:

暴露在飞射物范围内的厂房结构应考虑飞射物作用,内部飞射物产生的撞击荷载包括反应堆厂房中由控制棒或阀门部件等飞出引起的荷载、乏燃料罐坠落引起的荷载等。

**5.2.15** 外部爆炸引起的冲击波荷载  $A_2$ 应根据厂址调查确定,若无确切资料,可按现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105 确定。

**5.2.16** 外部飞射物引起的荷载  $A_3$ 应根据厂址调查确定,若无确切资料,可按现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105 确定。

**5.2.17** 内部水淹作用于安全壳的荷载  $H_a$ ,内部水淹范围和荷载应根据工艺要求确定。

**5.2.18** 由施加预应力产生的荷载  $F$ ,其值根据预应力筋的张拉控制应力及预应力损失计算确定。

### 5.3 承载能力极限状态的荷载组合

#### I 安全壳壳体承载能力极限状态的荷载组合

**5.3.1** 安全壳壳体按承载能力极限状态下的效应设计值  $S_d$  应根据下列荷载组合确定:

1 施加预应力前:

$$1.4D + 1.7L + 1.7W \quad (5.3.1-1)$$

2 正常运行加严重环境:

$$D + 1.3L + F + G + T_o + 1.5E_1 + R_o + P_v \quad (5.3.1-2)$$

$$D + 1.3L + F + G + T_o + 1.5W + R_o + P_v \quad (5.3.1-3)$$

3 正常运行加极端环境:

$$D+L+F+G+T_o+E_2+R_o+P_v \quad (5.3.1-4)$$

$$D+L+F+G+T_o+W_t+R_o+P_v \quad (5.3.1-5)$$

4 异常运行:

$$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a \quad (5.3.1-6)$$

$$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a \quad (5.3.1-7)$$

$$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a \quad (5.3.1-8)$$

5 异常运行加严重环境:

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25E_1+R_a \quad (5.3.1-9)$$

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a \quad (5.3.1-10)$$

$$D+L+F+G+T_o+E_1+H_a \quad (5.3.1-11)$$

$$D+L+F+G+T_o+W+H_a \quad (5.3.1-12)$$

6 异常运行加极端环境:

$$D+L+F+G+P_a+T_a+E_2+R_a+R_r \quad (5.3.1-13)$$

7 异常运行加内部飞射物:

$$D+L+F+G+P_a+T_a+R_a+A_1 \quad (5.3.1-14)$$

8 正常运行加外部飞射物:

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_2 \quad (5.3.1-15)$$

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_3 \quad (5.3.1-16)$$

注:当需要确定安全壳与其相邻或相接的管线和设备可能的相互影响时,应考虑安全壳的位移,安全壳壳体位移计算时,第 5.3.1 条及第 11.3.1 条所示的荷载效应组合中的所有荷载效应分项系数均取为 1.0。

**5.3.2** 本标准第 5.3.1 条所列各种荷载效应组合中的任何一种荷载足以减小其他荷载的效应时,若该荷载经常出现或与其他荷载同时发生,则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9,否则取 0。

**5.3.3** 本标准第 5.3.1 条组合中,除非经时程分析确认可取较低的值外, $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$ 应取最大效应值。

II 安全壳筏形基础承载能力极限状态的荷载组合

**5.3.4** 安全壳筏形基础按承载能力极限状态下的效应设计值  $S_d$  应根据下列荷载组合确定:

1 施加预应力前:

$$1.4D+1.7L+1.7W \quad (5.3.4-1)$$

2 正常运行:

$$1.4D+1.7L+1.4F+1.7(G+R_o+P_v) \quad (5.3.4-2)$$

$$1.05D+1.3L+1.05F+1.05T_o+1.3(G+R_o+P_v) \quad (5.3.4-3)$$

3 正常运行加严重环境:

$$D+1.3L+F+G+T_o+1.5E_1+R_o+P_v \quad (5.3.4-4)$$

$$D+1.3L+F+G+T_o+1.5W+R_o+P_v \quad (5.3.4-5)$$

4 正常运行加极端环境:

$$D+L+F+G+T_o+E_2+R_o+P_v \quad (5.3.4-6)$$

$$D+L+F+G+T_o+W_1+R_o+P_v \quad (5.3.4-7)$$

5 异常运行:

$$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a \quad (5.3.4-8)$$

$$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a \quad (5.3.4-9)$$

$$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a \quad (5.3.4-10)$$

6 异常运行加严重环境:

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25E_1+R_a \quad (5.3.4-11)$$

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a \quad (5.3.4-12)$$

$$D+L+F+G+T_o+E_1+H_a \quad (5.3.4-13)$$

$$D+L+F+G+T_o+W+H_a \quad (5.3.4-14)$$

7 异常运行加极端环境:

$$D+L+F+G+P_a+T_a+E_2+R_a \quad (5.3.4-15)$$

8 正常运行加外部飞射物:

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_2 \quad (5.3.4-16)$$

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_3 \quad (5.3.4-17)$$

5.3.5 本标准第 5.3.4 条所列各种荷载效应组合中的任何一种荷载足以减小其他荷载的效应时,若该荷载经常出现或与其他荷

载同时发生,则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9,否则取 0。

**5.3.6** 本标准第 5.3.4 条组合中,除非经时程分析确认可取较低的值外, $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$ 应取最大效应值。

Ⅲ 其他核安全相关混凝土结构承载能力极限状态的荷载组合

**5.3.7** 核安全相关混凝土结构按承载能力极限状态下的效应设计值  $S_d$  应根据下列荷载组合确定:

1 正常运行:

$$1.4D+1.7L+1.7R_o \quad (5.3.7-1)$$

$$1.05D+1.3L+1.05T_o+1.3R_o \quad (5.3.7-2)$$

2 正常运行加严重环境:

$$1.4D+1.7L+1.7E_1+1.7R_o \quad (5.3.7-3)$$

$$1.4D+1.7L+1.7W+1.7R_o \quad (5.3.7-4)$$

$$1.05D+1.3L+1.3E_1+1.05T_o+1.3R_o \quad (5.3.7-5)$$

$$1.05D+1.3L+1.3W+1.05T_o+1.3R_o \quad (5.3.7-6)$$

3 正常运行加极端环境:

$$D+L+T_o+R_o+E_2 \quad (5.3.7-7)$$

$$D+L+T_o+R_o+W_1 \quad (5.3.7-8)$$

4 异常运行:

$$D+L+T_a+R_a+1.25P_a \quad (5.3.7-9)$$

5 异常运行加严重环境:

$$D+L+T_a+R_a+1.15P_a+R_r+1.15E_1 \quad (5.3.7-10)$$

6 异常运行加极端环境:

$$D+L+T_a+R_a+P_a+R_r+E_2 \quad (5.3.7-11)$$

7 正常运行加内部飞射物:

$$D+L+T_o+R_o+A_1 \quad (5.3.7-12)$$

8 正常运行加外部人为事件:

$$D+L+T_o+R_o+A_2 \quad (5.3.7-13)$$

$$D+L+T_o+R_o+A_3 \quad (5.3.7-14)$$

注:若判断其他极端环境荷载(如极端洪水)对核安全相关混凝土结构有影响,则

应考虑附加的荷载效应组合,用该项极端环境荷载效应代替式(5.3.7-8)中的 $W_1$ 。

**5.3.8** 本标准第 5.3.7 条所列各种荷载效应组合中的任何一种荷载足以减小其他荷载的效应时,若该荷载经常出现或与其他荷载同时发生,则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9,否则取 0。

**5.3.9** 本标准第 5.3.7 条组合中,除非经时程分析确认可取较低的值外, $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$ 应取最大效应值。

## 5.4 正常使用极限状态的荷载组合

**5.4.1** 安全壳筏形基础正常使用极限状态的荷载组合,应根据正常使用极限状态的要求验算正常运行工况下的变形,按本标准第 5.3.4 条中各种荷载效应组合进行计算,此时荷载效应分项系数均取 1。

**5.4.2** 其他核安全相关混凝土结构正常使用极限状态的荷载组合,应根据正常使用极限状态的要求验算正常运行工况下的变形,按本标准第 5.3.7 条中各种荷载效应组合进行计算,此时荷载效应分项系数均取 1。

**5.4.3** 其他核安全相关混凝土结构正常使用极限状态的荷载组合,按正常使用极限状态的要求进行受力裂缝验算时的效应设计值  $S$ ,应根据下列荷载组合确定:

$$D+L+T_o+R_o \quad (5.4.3)$$

## 5.5 结构整体稳定性验算的荷载组合

**5.5.1** 混凝土结构应根据功能要求按式(3.3.2)进行抗滑、抗倾覆和抗浮整体稳定性验算。

**5.5.2** 抗滑和抗倾覆验算时, $S_{d,dst}$  为式(5.5.2-1)、式(5.5.2-2)荷载组合的效应设计值, $k$  采用 1.5; $S_{d,dst}$  为式(5.5.2-3)、式(5.5.2-4)荷载组合的效应设计值时, $k$  采用 1.1;抗浮验算时, $S_{d,dst}$  考虑浮力荷载标准值, $k$  采用 1.1。

$$D + L + W \qquad (5.5.2-1)$$

$$D + L + E_1 \qquad (5.5.2-2)$$

$$D + L + W_r \qquad (5.5.2-3)$$

$$D + L + E_2 \qquad (5.5.2-4)$$

## 6 结 构 分 析

### 6.1 基 本 原 则

**6.1.1** 结构应进行整体作用效应分析,同时应对整体模型难以准确分析的部位进行更详细的分析。

**6.1.2** 结构应根据不同阶段的各种受力状况分别进行结构分析,并确定最不利的作用组合。

**6.1.3** 结构分析所需的几何尺寸以及所采用的计算图形、边界条件、作用的取值与组合、材料性能的计算指标、初始应力和变形状况、构造措施等,应符合结构的实际工作状况。

结构分析中所采用的近似假定和简化,应有理论、试验依据或经工程实践验证,计算结果的精度应满足工程设计的要求。

**6.1.4** 结构分析应符合下列规定:

1 满足力学平衡条件;

2 在不同程度上符合变形协调条件,包括节点和边界的约束条件;

3 采用合理的材料本构关系或构件单元的受力-变形关系。

**6.1.5** 结构分析时,应根据结构类型、材料性能和受力特点等因素选择下列分析方法:

1 弹性分析方法;

2 塑性内力重分布分析方法;

3 弹塑性分析方法;

4 试验分析方法。

**6.1.6** 结构分析时应考虑活荷载不利布置的影响。

**6.1.7** 结构进行风荷载效应计算时,正反两个方向的风作用效应宜按构件受力组合不利的原则采用。体型复杂时,应考虑风向角



的不利影响。

## 6.2 分析模型

6.2.1 结构整体分析时,宜采用空间有限元模型,并考虑结构单元的弯曲、轴向、剪切、扭转等变形对结构组合内力的影响。

6.2.2 混凝土结构的计算简图宜按下列方法确定:

1 墙、板、基础、壳等二维构件的中轴面宜取截面中心线组成的平面或者曲面,梁、柱、杆等一维构件宜取截面几何中心的连线;

2 梁、柱等杆件的计算跨度或计算高度可按其两端支承长度的中心距或净距确定,并应根据支承点的连接刚度或支承点反力位置加以修正;

3 梁、柱等杆件间连接部分的刚度远大于杆件中间截面的刚度时,在计算模型中可作为刚域处理。

6.2.3 当地基条件对结构的内力和变形有显著影响时,结构分析中应考虑地基与结构相互作用效应。

## 6.3 弹性分析

6.3.1 结构的弹性分析方法可用于正常使用极限状态和承载力极限状态作用效应的分析。

6.3.2 结构构件的刚度可以按下列原则确定:

1 混凝土的弹性模量应按本标准第 4.1.1 条确定;

2 截面惯性矩可按匀质的混凝土全截面计算;

3 端部加腋的杆件应考虑其截面变化对刚度的影响;

4 对于构件的截面刚度,宜考虑混凝土开裂、徐变等因素的影响;

5 构件刚度假定应在单一工况的结构分析中保持一致。

6.3.3 结构分析时,二阶效应若显著增大作用效应时,应考虑该因素的不利影响。

混凝土结构在轴向荷载作用下的二阶效应可采用有限元分析

方法计算,并应考虑混凝土构件开裂对构件刚度的影响,也可采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中规定的简化方法计算。

## 6.4 塑性内力重分布分析

**6.4.1** 结构的塑性内力重分布分析方法可用于承载能力极限状态下连续梁和连续板的作用效应分析。

**6.4.2** 重力荷载作用下的钢筋混凝土梁以及双向板等,经弹性分析求得内力后,可对支座或节点弯矩进行适度调幅,并确定相应的跨中弯矩。

**6.4.3** 结构或构件用塑性内力重分布方法设计时,最大裂缝宽度与挠度须满足使用要求,配筋应满足本标准第 4.2.2 条规定的要求,并应采取有效的构造措施。

对于直接承受动力荷载的构件,处于冻融环境、氯化物环境和化学腐蚀环境中的结构,以及要求不出现裂缝的结构,不应采用考虑塑性内力重分布的分析方法。

**6.4.4** 钢筋混凝土梁、板支座或节点边缘截面可进行负弯矩调幅,调幅后的梁端截面相对受压区高度不应超过 0.35,且不宜小于 0.10。

应先对重力荷载作用下梁端弯矩进行调幅,再与水平荷载产生的梁端弯矩进行组合;梁截面设计时,跨中截面正弯矩设计值不应小于重力荷载作用下按简支梁计算跨中弯矩设计值的 50%。

## 6.5 弹塑性分析

**6.5.1** 结构的弹塑性分析方法可用于特殊部位的承载能力极限状态作用效应的分析,也可用于超设计基准范畴的分析评估中。

**6.5.2** 当采用弹塑性分析方法对结构整体或局部进行验算时,宜遵循下列原则:

- 1 预先设定结构的几何尺寸、边界条件、材料性能和配筋等;

2 材料的性能指标宜通过试验分析确定,并宜取平均值,也可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求确定;

3 考虑结构几何非线性的不利影响。

**6.5.3** 结构构件计算模型宜按下列原则确定:

1 梁、柱、杆等杆系构件可简化为一维单元;

2 墙、板、壳等构件可简化为二维单元;

3 结构节点或复杂受力部位需要做精细分析时,宜采用三维实体单元。

**6.5.4** 各种计算单元的受力-变形本构关系宜符合实际受力情况。

## 7 承载力极限状态计算

### 7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于钢筋混凝土构件的承载力极限状态计算。

7.1.2 深受弯构件的承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定,牛腿、叠合式构件的承载力计算应符合本标准第 10 章的有关规定。

7.1.3 对于二维或三维非杆系结构构件,若采用有限元法计算所得效应为应力时,可采用积分的方法将应力换算成相应内力。

### 7.2 正截面承载力计算

7.2.1 正截面受弯和受拉承载力计算,应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

7.2.2 轴心受压构件配置普通箍筋时,其正截面受压承载力应符合下列规定:

$$N \leqslant 0.8\varphi(f_c A + f'_y A'_s) \quad (7.2.2)$$

式中:  $N$  —— 轴向压力设计值;

$\varphi$  —— 钢筋混凝土构件的稳定系数,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定采用;

$f_c$  —— 混凝土轴心抗压强度设计值;

$A$  —— 构件截面面积;

$f'_y$  —— 普通钢筋抗压强度设计值;

$A'_s$  —— 全部纵向普通钢筋的截面面积。

当纵向普通钢筋的配筋率大于 3% 时,式(7.2.2)中的  $A$  应用  $(A - A'_s)$  代替。

7.2.3 轴心受压构件配置螺旋式或焊接环式间接钢筋时,其正截

面受压承载力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

**7.2.4** 偏心受压构件的承载力计算,可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

### 7.3 平面内受剪

**7.3.1** 墙、板和壳体平面内受剪的单位长度的混凝土名义剪应力应满足下式:

$$V/h \leqslant 0.25 f_c \quad (7.3.1)$$

式中:  $h$ ——墙、板或壳体的厚度。

**7.3.2** 受剪承载力可由双向正交钢筋网体系提供,混凝土只承受压力,不承受拉力。正交钢筋网体系的钢筋截面面积按下列公式计算(见图 7.3.2):

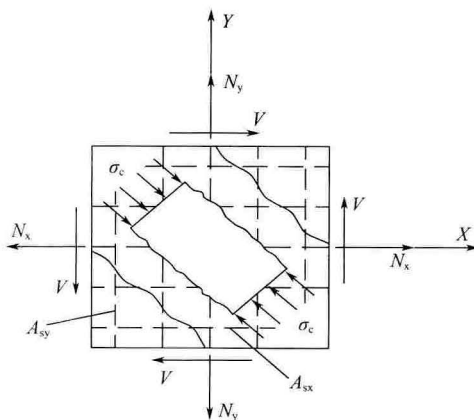


图 7.3.2 正交钢筋网体系的单元体

$\sigma_c$ —混凝土压应力

$$A_{sy} = \frac{N_y + V}{f_y} \quad (7.3.2-1)$$

$$A_{sx} = \frac{N_x + V}{f_y} \quad (7.3.2-2)$$

式中:  $A_{sy}$  ——墙、板或壳体单位长度内的  $Y$  向钢筋截面面积;

$N_y$  ——墙、板或壳体单位长度内的  $Y$  向薄膜力设计值, 拉力为正, 压力为负(如  $N_y$  在正截面承载力计算中已考虑, 则此处取 0);

$V$  ——墙、板或壳体单位长度平面内的剪力设计值;

$f_y$  ——普通钢筋抗拉强度设计值;

$A_{sx}$  ——墙、板或壳体单位长度内的  $X$  向钢筋截面面积;

$N_x$  ——墙、板或壳体单位长度内的  $X$  向薄膜力设计值, 拉力为正, 压力为负(如  $N_x$  在正截面承载力计算中已考虑, 则此处取 0)。

当按式(7.3.2-1)算得的钢筋面积  $A_{sy}$  小于最小配筋面积  $A_{s,min}$  时, 或  $A_{sy}$  为负值时, 则  $A_{sy}$  可按最小配筋面积  $A_{s,min}$  设置, 同时取:

$$A_{sx} = \frac{1}{f_y} \left( N_x + \frac{V^2}{A_{s,min} f_y - N_y} \right) \quad (7.3.2-3)$$

式中:  $A_{s,min}$  ——墙、板或壳体单位长度内的最小钢筋截面面积, 可取混凝土构件截面面积的 0.25%。

当按式(7.3.2-2)算得的钢筋面积  $A_{sx}$  小于最小配筋面积  $A_{s,min}$  时, 或  $A_{sx}$  为负值时, 则  $A_{sx}$  可按最小配筋面积  $A_{s,min}$  设置, 同时取:

$$A_{sy} = \frac{1}{f_y} \left( N_y + \frac{V^2}{A_{s,min} f_y - N_x} \right) \quad (7.3.2-4)$$

## 7.4 平面外受剪

7.4.1 对于墙、板、壳类构件, 受剪截面应符合下列条件:

$$V \leq 0.25 \beta_c f_c b h_0 \quad (7.4.1-1)$$

对于梁、柱构件, 受剪截面应符合下列条件:

$$V \leq 0.2 \beta_c f_c b h_0 \quad (7.4.1-2)$$

式中:  $V$  ——构件斜截面上的最大剪力设计值;

$\beta_c$  ——混凝土强度影响系数,当混凝土强度等级不超过 C50 时,  $\beta_c$  取 1.0;当混凝土强度等级为 C80 时,  $\beta_c$  取 0.8,其间按线性内插法确定;

$b$  ——矩形截面的宽度, T 形截面或 I 形截面的腹板宽度;

$h_0$  ——截面的有效高度。

**7.4.2** 不配置横向受力钢筋和弯起钢筋的一般板类受弯构件,其斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5\beta_h f_t b h_0 \quad (7.4.2-1)$$

$$\beta_h = \left( \frac{800}{h_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7.4.2-2)$$

式中:  $\beta_h$  ——截面高度影响系数,当  $h_0$  小于 800mm 时,  $h_0$  取 800mm;当  $h_0$  大于 2000mm 时,  $h_0$  取 2000mm;

$f_t$  ——混凝土轴心抗拉强度设计值。

**7.4.3** 矩形、T 形和 I 形截面受弯构件的斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5 f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (7.4.3)$$

式中:  $f_{yv}$  ——箍筋抗拉强度设计值;

$A_{sv}$  ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积,可取  $n \cdot A_{sv1}$ , 此处,  $n$  为在同一截面内箍筋的肢数,  $A_{sv1}$  为单肢箍筋的截面面积;

$s$  ——沿构件长度方向的箍筋间距。

**7.4.4** 矩形、T 形和 I 形截面的钢筋混凝土偏心受压构件,其斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5 f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.055 N \quad (7.4.4)$$

式中:  $N$  ——与剪力设计值  $V$  相应的轴向压力设计值,当  $N > 0.3 f_c A$  时,取  $N = 0.3 f_c A$ , 此处,  $A$  为构件的截面面积。

**7.4.5** 矩形、T 形和 I 形截面的钢筋混凝土偏心受拉构件,其斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leqslant 0.5f_t b h_0 + 0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 - 0.25N \quad (7.4.5)$$

式中:  $N$ ——与剪力设计值  $V$  相应的轴向拉力设计值, 当式 (7.4.5) 右边的计算值小于  $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$  时, 应取等于  $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ , 且  $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$  的值不应小于  $0.36f_t b h_0$ 。

## 7.5 剪摩擦验算

**7.5.1** 钢筋混凝土结构构件可根据设计需要进行施工缝处的剪摩擦验算。

**7.5.2** 施工缝处的受剪承载力应符合下式规定:

$$V_w \leqslant c_c A_c + 0.9N_k \mu + f_y A_s (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leqslant 0.25f_c A_c \quad (7.5.2-1)$$

当配置钢筋垂直于施工缝时, 可按下式规定:

$$V_w \leqslant c_c A_c + \mu (f_y A_s + 0.9N_k) \leqslant 0.25f_c A_c \quad (7.5.2-2)$$

式中:  $V_w$ ——施工缝处的剪力设计值(N);

$c_c$ ——施工缝处的粘结力(N/mm<sup>2</sup>), 当  $N_k$  为拉力时,  $c_c$  取 0;

$A_c$ ——混凝土施工缝处抗剪截面面积(mm<sup>2</sup>)。

$N_k$ ——垂直于施工缝面的永久净压力标准值(N),  $N_k \leqslant 0.6f_c A_c$ , 若  $N_k$  为拉力, 则取  $N_k = 0$ ;

$\mu$ ——施工缝处的摩擦系数, 按表 7.5.2 取值; 当  $N_k$  为拉力,  $\mu$  取为 0;

$A_s$ ——施工缝处受剪所需的附加钢筋面积, 不包含拉力及弯矩引起的受拉钢筋的面积(mm<sup>2</sup>);

$\alpha$ ——剪摩擦钢筋与施工缝平面的夹角;

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值(N/mm<sup>2</sup>), 施工缝两侧新旧混凝土的强度等级不同时,  $f_c$  按强度等级较低



的混凝土取值。

表 7.5.2 施工缝处摩擦系数  $\mu$  和粘结力  $c_c$  的取值

施工缝表面状况	$\mu$	$c_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
按施工缝要求处理,表面粗糙度不小于 6mm	0.85	0.45
按施工缝要求处理,表面粗糙度小于 6mm	0.6	0.3

## 7.6 其他承载力计算

**7.6.1** 结构构件扭曲截面承载力计算、局部受压承载力计算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

**7.6.2** 墙、板和壳体受冲切承载力计算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

**7.6.3** 受弯构件疲劳验算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行。

## 8 正常使用极限状态验算

### 8.1 裂缝控制验算

8.1.1 钢筋混凝土结构构件在不同环境作用等级下的最大裂缝宽度,不应超过表 8.1.1 中的限值。

表 8.1.1 钢筋混凝土构件最大裂缝宽度限值(mm)

环境作用等级	A	B	C、D	E、F
最大裂缝宽度	0.40	0.30	0.20	0.15

注:表中环境作用等级的划分见本标准第 3.4.2 条。

8.1.2 受力最大裂缝宽度按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算,非荷载裂缝宽度可基于变形协调计算。

### 8.2 受弯构件挠度验算

8.2.1 钢筋混凝土受弯构件宜满足表 8.2.1-1 和表 8.2.1-2 规定的最小截面高度要求。

表 8.2.1-1 梁或单向板的最小截面高度

构件类型	简支	一端连续	两端连续	悬臂
实心单向板	$l_0/12$	$l_0/15$	$l_0/19$	$l_0/5$
梁或带肋单向板	$l_0/10$	$l_0/13$	$l_0/16$	$l_0/4$

注:1  $l_0$ 为梁、板的计算跨度,对于悬臂构件取净挑出长度;

2 本表适用于  $f_{yk}$  为  $400\text{N/mm}^2$  的钢筋,对于  $f_{yk}$  不等于  $400\text{N/mm}^2$  的钢筋,本表所列数值应乘以  $(0.4 + 0.0015f_{yk})$ 。

表 8.2.1-2 双向板的最小厚度

支承条件	边缘连续性	最小厚度( $h$ )	
		长向与短向净跨比	
		$\beta=1.0$	$\beta=2.0$
$\alpha_m \geq 2.0$	$\beta_s = 0$	$l_n/22$	$l_n/25$
	$\beta_s = 1$	$l_n/25$	$l_n/30$
$\alpha_m \leq 1.0$	$\beta_s = 0$	$l_n/19$	$l_n/21$
	$\beta_s = 1$	$l_n/22$	$l_n/25$

注: 1  $\alpha_m$ 为在双向板的支承边上所有梁的 $\alpha$ 的平均值,其中 $\alpha$ 为梁截面的抗弯刚度与梁两侧相邻板格(如有时)中心线间板的横截面抗弯刚度之比,当双向板的支承边为墙时,可按 $\alpha_m \geq 2.0$ 考虑;

2  $\beta$ 为双向板长向与短向的净跨比;

3  $\beta_s$ 为一个板格的连续边的长度与总周长之比;

4  $l_n$ 为双向板长向净跨长;

5 对于 $\alpha_m$ 、 $\beta$ 及 $\beta_s$ 的其他值,最小厚度可按线性内插法确定;

6 本表适用于 $f_{yk}$ 为 $400\text{N/mm}^2$ 的钢筋,对于 $f_{yk}$ 不等于 $400\text{N/mm}^2$ 的钢筋,本表所列数值应乘以 $(8+0.0075f_{yk})/11$ 。

**8.2.2 受弯构件的挠度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行计算,其中考虑荷载长期作用影响的受弯构件截面刚度 $B$ 一般可取 $0.625B_s$ ( $B_s$ 为混凝土受弯构件的短期刚度),对于翼缘在受拉区的T形截面构件, $B$ 可取 $0.5B_s$ 。 $B_s$ 可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。**

挠度计算值不应超过表 8.2.2 规定的挠度限值。

表 8.2.2 受弯构件的挠度限值

类型	荷载效应组合 (荷载效应分项系数均取为 1.0)	梁	板
1	式(5.3.7-1)、式(5.3.7-3)、式(5.3.7-4)	$l_0/400$	$l_0/320$
2	式(5.3.7-7)、式(5.3.7-8)	$l_0/250$	$l_0/200$

注:对于双向板, $l_0$ 取短向净跨度。

## 9 构造规定

### 9.1 变形缝

**9.1.1** 伸缩缝设置应根据结构形式、材料、使用要求、环境条件、施工工艺等因素确定,也可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 执行。

**9.1.2** 当地基可能产生较大不均匀沉降时,混凝土结构宜设置沉降缝。沉降缝的宽度可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 执行。

**9.1.3** 防震缝的设置应符合现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB 50267 的规定。

**9.1.4** 伸缩缝和沉降缝的设计应满足防震缝的要求。

### 9.2 混凝土保护层

**9.2.1** 混凝土保护层厚度不得小于受力钢筋的公称直径,同时应满足现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的相关规定。

**9.2.2** 在确定保护层厚度时应考虑埋设件的要求。

**9.2.3** 当梁、柱、墙中纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度大于50mm时,宜对保护层采取有效的防裂构造措施。

### 9.3 钢筋锚固

**9.3.1** 受拉钢筋的抗震锚固长度应符合表 9.3.1 的规定。

表 9.3.1 受拉钢筋抗震锚固长度  $l_{aE}$ 

混凝土强度等级 钢筋牌号		C30	C35	C40	C45	C50	C55	$\geq C60$
HPB300		$35d$	$32d$	$29d$	$28d$	$26d$	$25d$	$24d$
HRB400 HRBF400	$d \leq 25$	$40d$	$37d$	$33d$	$32d$	$31d$	$30d$	$29d$
	$d > 25$	$45d$	$40d$	$37d$	$36d$	$35d$	$33d$	$32d$
HRB500 HRBF500	$d \leq 25$	$49d$	$45d$	$41d$	$39d$	$37d$	$36d$	$35d$
	$d > 25$	$54d$	$49d$	$46d$	$43d$	$40d$	$39d$	$38d$

注：1 表中  $d$  为钢筋的公称直径；

2 当为环氧树脂涂层带肋钢筋时，表中数据尚应乘以 1.25；

3 当纵向受拉钢筋在施工过程中易受扰动（如滑模施工）时，表中数据尚应乘以 1.10；

4 对于构件顶部（指水平钢筋锚固或搭接区域下部有大于 300mm 新浇混凝土的部位）钢筋，当带肋钢筋直径不小于 25mm，且纵向受力钢筋的保护层厚度大于  $d$  且不大于  $d+5\text{mm}$  时，表中数据尚应乘以 1.40；当保护层厚度大于  $d+5\text{mm}$  且不大于  $d+20\text{mm}$  时，表中数据尚应乘以 1.10；

5 对于非构件顶部钢筋，当带肋钢筋直径不小于 25mm，且纵向受力钢筋的保护层厚度大于  $d$  且不大于  $d+5\text{mm}$  时，表中数据尚应乘以 1.10；

6 若出现多项表中数据增大系数时，可按连乘计算。

**9.3.2** 纵向受拉普通钢筋末端可采用弯钩或机械锚固措施，当采用弯钩时，包含弯钩在内的平直段投影长度应满足本标准第 9.3.3 条第 3 款的要求，当采用部分锚固板和全锚固板对钢筋进行机械锚固时，可按国家现行相关标准的要求确定。

**9.3.3** 钢筋弯钩应满足下列要求：

1 钢筋弯折的弯弧内直径应符合表 9.3.3 的规定。

表 9.3.3 钢筋弯折的弯弧内直径

钢筋规格 $d$ (mm)	最小弯弧内直径
$d \leq 25$	$6d$
$25 < d \leq 40$	$8d$
$d > 40$	$10d$

注:当拉筋或箍筋直径不大于 16mm,且牌号为 HPB300、HRB400、HRBF400 时,最小弯弧内直径可取  $4d$ 。

2 钢筋  $90^\circ$ 弯钩的弯折后平直段长度不应小于  $12d$ ;  $99^\circ \sim 135^\circ$ 弯钩的弯折后平直段长度,对纵向受力钢筋不应小于  $5d$ ,对箍筋和拉筋不应小于  $10d$  及 75mm 中的较大值; $180^\circ$ 弯钩的弯折后平直段长度不应小于  $4d$  及 65mm 中的较大值。

3 纵向受拉钢筋采用弯折锚固时,弯折前的水平锚固长度应根据结构性质和部位确定,对中间层端节点不应小于  $0.4l_{aE}$ ,对其他情况不应小于  $0.6l_{aE}$ 。

4 当主受力钢筋直径大于 25mm 时,构件端部阳角部位宜设置护角钢筋,护角钢筋直径不宜大于 18mm。

## 9.4 钢筋连接

9.4.1 钢筋连接宜采用搭接、机械连接,也可采用焊接。机械连接接头及焊接接头的类型及质量应符合国家现行有关标准的规定。

9.4.2 钢筋的连接应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。纵向受拉钢筋的抗震搭接长度可按表 9.4.2 采用,当纵向受拉钢筋搭接接头面积百分率为表中的中间值时,抗震搭接长度可按内插取值。

表 9.4.2 纵向受拉钢筋的抗震搭接长度  $l_{aE}$

钢筋搭接接头面积百分率	$\leq 25$	50	100
抗震搭接长度	$1.2l_{aE}$	$1.4l_{aE}$	$1.6l_{aE}$

**9.4.3** 变截面梁、柱、墙、板的钢筋连接及构造应符合国家现行有关标准的规定。

**9.4.4** 抗大型商用飞机撞击设计的区域,钢筋连接的机械接头除应满足常规机械接头的技术指标以外,尚应进行瞬间加载冲击试验并满足相关指标要求。

## 9.5 纵向受力钢筋的最小配筋率

**9.5.1** 钢筋混凝土构件的纵向受力钢筋的最小配筋率应符合表 9.5.1 的规定。

表 9.5.1 纵向受力钢筋的最小配筋率(%)

构件分类		钢筋等级
		HRB400、HRB500
梁	支座	0.40 和 $80f_t/f_y$ 中的较大值
	跨中	0.30 和 $65f_t/f_y$ 中的较大值
柱	中柱、边柱	1.00
	角柱、框支柱	1.15
墙、板、次梁		0.20 和 $45f_t/f_y$ 中的较大值(受拉侧钢筋)
		0.20 (受压侧钢筋)

注:当混凝土强度等级为 C60 以上时,柱的最小配筋率应按表中数值增加 0.1 采用。

**9.5.2** 筏基底板单侧受力钢筋配筋率不应低于 0.2%。

## 10 结构构件的基本规定

### 10.1 基 础

**10.1.1** 基础形式应结合工程地质、上部结构体系、承载力要求、施工条件及技术经济指标等因素确定,并同时满足基础承载力、控制沉降变形、经济合理、易于施工的基本要求。

**10.1.2** 用于基础结构的混凝土和钢筋的强度等级应符合下列规定:

1 混凝土应满足本标准第 3.4 节、第 4.1 节的要求,垫层混凝土强度等级不应低于 C15,厚度不应小于 100mm,如基础采用掺矿物掺合料的混凝土时,可采用 60d 或 90d 龄期的强度指标作为混凝土设计强度;

2 地下室外墙、底板应采用防水混凝土,防水混凝土的抗渗等级应按现行国家标准《地下工程防水技术规范》GB 50108 选用,且不宜低于 P8;

3 钢筋应符合本标准第 4.2.1 条、第 4.2.2 条的规定。

**10.1.3** 筏基底板宜采用双层双向配筋。基础底板受力钢筋最小直径不宜低于 20mm,间距不宜大于 300mm,也不宜小于 150mm。

**10.1.4** 筏基底板的构造应满足下列要求:

1 筏基底板宜进行裂缝宽度验算,对于正常运行工况下的裂缝宽度可按本标准第 8 章的规定执行;

2 筏基底板挑出长度不宜大于 2m、1.5 倍板厚以及上部结构端开间墙(柱)距的 1/3 中的较大值,转角处板两向挑出时宜削去板角;

3 筏基底板厚度大于 2000mm 时,宜在板厚中间部位设置直径不小于 20mm 的双向钢筋网。



## 10.2 板

**10.2.1** 单向板与双向板的最小厚度应满足本标准第 8.2.1 条的要求,且不小于 150mm。

**10.2.2** 板宜采用双层双向配筋,板中纵向受力钢筋的间距不宜大于板厚的 1.5 倍,且不宜大于 300mm。

**10.2.3** 当板中设置抗剪拉筋时,拉筋间距不应小于 150mm。

**10.2.4** 简支板下部纵向受力钢筋伸入支座边的长度不应小于 150mm 且不小于  $5d$ ,且宜伸过支座中心线。当板内温度、收缩应力较大时,伸入支座的长度宜适当增加。

**10.2.5** 对板的无支承边的端部,宜设置 U 形构造钢筋并与板顶、板底的钢筋搭接,搭接长度不宜小于 U 形构造钢筋直径的 15 倍且不宜小于 200mm,也可采用板面、板底钢筋分别向下、上弯折搭接的形式。

**10.2.6** 混凝土板可采用配置拉筋和箍筋的方式来抗冲切,也可采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的弯起钢筋。

## 10.3 梁

**10.3.1** 梁的截面尺寸应符合下列规定:

- 1 截面宽度不宜小于 250mm;
- 2 截面高度与宽度的比值不宜大于 4;
- 3 净跨与截面高度的比值不宜小于 4。

**10.3.2** 梁的纵向受力钢筋应符合下列规定:

1 梁端纵向受拉钢筋配筋率不宜大于 2.5%,沿梁全长顶面和底面应至少各配置两根通长的纵向钢筋,钢筋直径不应小于 14mm;

2 梁上部纵向钢筋的净间距应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求;

3 梁最小配筋率满足本标准表 9.5.1 的要求。

**10.3.3** 梁简支端下部纵向受力钢筋从支座边算起的锚固应符合下列规定：

1 不小于  $12d$  ( $d$  为钢筋最大直径)；

2 如纵向受力钢筋伸入梁支座范围内的锚固长度不满足本条第 1 款的要求时，可采取弯钩或机械锚固措施，并应符合本标准第 9.3.2 条、第 9.3.3 条的规定。

**10.3.4** 梁支座负弯矩纵向受拉钢筋不应在受拉区截断。

**10.3.5** 在悬臂梁中，宜将上部纵向钢筋伸至悬臂梁外端，并向下弯折不小于  $12d$ 。

**10.3.6** 梁内受扭纵向钢筋的最小配筋率  $\rho_{tl,min}$  应按下列式计算：

$$\rho_{tl,min} = 0.72 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} \quad (10.3.6)$$

式中： $\rho_{tl,min}$ ——受扭纵向钢筋的最小配筋率，取  $A_{stl}/(bh)$ ，其中  $A_{stl}$  为沿截面周边布置的受扭纵向钢筋总截面面积；

$T$ ——扭矩设计值；

$b$ ——受剪的截面宽度，按本标准第 7.4.1 条的规定取用。

当  $T/(Vb) > 2.0$  时，取  $T/(Vb) = 2.0$ 。

**10.3.7** 抗扭所需的纵向钢筋及箍筋设置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

**10.3.8** 梁宜采用箍筋作为承受剪力的钢筋，最小配箍率  $\rho_{sv} = 0.3f_t/f_{yv}$ 。

**10.3.9** 梁中箍筋的配置应符合下列规定：

1 按承载力计算不需要箍筋的梁，应沿梁全长设置构造箍筋。

2 箍筋的最大间距应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定，且不应超过  $h_0/2$ 。

3 梁端箍筋加密区长度为 2 倍梁高,箍筋最大间距不大于  $6d$ 、梁高的  $1/4$  和  $100\text{mm}$  中的最小值,箍筋直径不应小于  $10\text{mm}$ ,非加密区的箍筋间距在满足计算要求的基础上不宜大于加密区箍筋间距的 2 倍。

4 当梁中配有按计算需要的纵向受压钢筋时,箍筋应符合下列规定:

1) 箍筋应做成封闭式;

2) 箍筋的间距不应大于  $15d$ ,同时不应大于  $400\text{mm}$ ,当一层内的纵向受压钢筋多于 5 根且直径大于  $18\text{mm}$  时,箍筋间距不应大于  $10d$ , $d$  为纵向受压钢筋的最小直径;

3) 当梁的宽度大于  $400\text{mm}$  且一层内的纵向受压钢筋多于 3 根时,或当梁的宽度不大于  $400\text{mm}$ ,但一层内的纵向受压钢筋多于 4 根时,应设置复合箍筋。

**10.3.10** 受扭所需的箍筋应做成封闭式,且应沿截面周边布置。当采用复合箍筋时,位于截面内部的箍筋不应计入受扭所需的箍筋面积。受扭所需箍筋的末端应做成  $135^\circ$  弯钩,弯钩端头平直段长度不应小于箍筋直径的 10 倍。受扭箍筋的间距不宜大于  $0.75b$  及  $300\text{mm}$ 。

**10.3.11** 局部配筋的设置应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求。

## 10.4 柱及牛腿

### I 柱

**10.4.1** 柱的截面形状宜规则,其截面尺寸宜满足下列各项要求:

1 最小截面尺寸不宜小于  $400\text{mm}$ ,圆柱的直径不宜小于  $450\text{mm}$ ;

2 剪跨比宜大于 2;

3 截面长边与短边的边长比不宜大于 3。

**10.4.2** 柱轴压比不宜超过 0.75。

**10.4.3** 柱中纵向钢筋的配置应符合下列规定：

1 柱纵向受力钢筋的总配筋率不应小于表 9.5.1 最小配筋率的要求，且不应大于 5%，剪跨比不大于 2 的柱，每侧纵向钢筋配筋率不宜大于 1.2%；

2 柱中纵向钢筋的净间距不应小于  $1.5d$  也不应小于 50mm，且不宜大于 300mm；

3 圆柱中纵向钢筋根数不宜少于 8 根，不应少于 6 根，且宜沿周边均匀布置。

**10.4.4** 柱中箍筋配置应符合下列规定：

1 当纵向钢筋直径不大于 32mm 时，箍筋直径不应小于 10mm，当纵向钢筋直径大于 32mm 时，箍筋直径不应小于 12mm；

2 柱箍筋应至少每隔一根纵向钢筋约束，箍筋肢距不宜大于 200mm；

3 柱的周边箍筋应做成封闭式，对圆柱中的箍筋，搭接长度不应小于本标准第 9.3.1 条规定的锚固长度，且末端应做成  $135^\circ$  弯钩，弯钩末端平直段长度不应小于 10 倍箍筋直径；

4 柱上下两端箍筋应加密，箍筋最大间距不应大于  $6d$  和 100mm 中的最小值，框支柱和剪跨比小于 2 的框架柱应在柱全高范围内加密箍筋，非加密区箍筋间距在满足计算要求上不应大于  $10d$ ；

5 柱的箍筋加密区长度应取柱截面长边尺寸（或圆形截面直径）、柱净高的  $1/6$  和 500mm 中的最大值，角柱应沿全高加密箍筋，底层柱根箍筋加密区长度不应小于柱净高的  $1/3$ ；

6 柱箍筋加密区箍筋的体积配筋率应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关公式计算，其中最小配箍特征值  $\lambda_v$  应按表 10.4.4 采用，且体积配筋率不应小于 0.8%，非加密区箍筋的体积配筋率不宜小于加密区配筋率的一半。

表 10.4.4 柱箍筋加密区的最小配箍特征值  $\lambda_v$

箍筋形式	轴 压 比					
	$\leq 0.3$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
复合箍	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20

#### 10.4.5 纵向钢筋的弯折应满足下列要求：

1 弯折钢筋的倾斜段对柱轴线的倾斜度不应超过 1 : 6, 倾斜段以上及以下钢筋应平行于柱轴线, 见图 10.4.5;

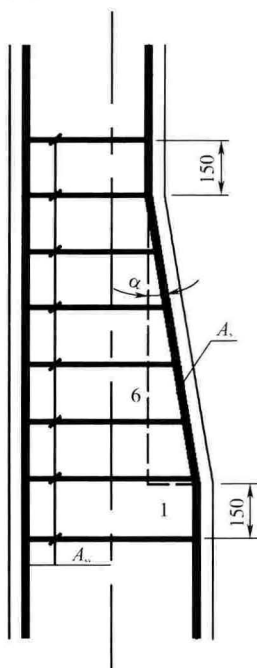


图 10.4.5 钢筋弯折示意图

2 在钢筋弯折段应由横向箍筋、螺旋箍筋或楼盖结构的某个部分提供水平支撑。所提供的水平支撑应能抵抗弯折钢筋倾斜段水平分量的 1.5 倍。如采用横向箍筋或螺旋箍筋, 应设置在距弯折点 150mm 以内, 所需箍筋面积  $A_{sv}$  为:

$$A_{sv} f_{yv} \geq 1.5 A_s f_y \sin \alpha \quad (10.4.5)$$

式中:  $f_{yv}$  ——箍筋强度设计值;

$A_s$  ——弯折钢筋的面积;

$f_y$  ——弯折钢筋的强度设计值。

**10.4.6** 梁柱节点构造措施可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中关于框架梁柱节点抗震等级为一级的构造要求的规定执行。

## II 牛 腿

**10.4.7** 牛腿可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定进行计算。

**10.4.8** 牛腿应设置水平封闭箍筋。平行于受拉主筋的封闭箍筋总面积不宜小于承受竖向力的受拉钢筋截面面积的  $1/2$ , 且应均匀布置在靠近受拉主筋  $2h_0/3$  的范围内。

**10.4.9** 当牛腿剪跨比不小于  $0.3$  时, 宜设置弯起钢筋, 弯起钢筋应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的构造要求。

**10.4.10** 纵向受力钢筋的配筋率不应小于  $0.2\%$  及  $0.45f_t/f_y$ , 也不宜大于  $0.6\%$ 。

**10.4.11** 牛腿顶受压面上, 按荷载效应标准组合计算的竖向力  $F_{vk}$  所引起的局部压应力不应超过  $0.75f_c$ 。牛腿的外边缘的截面高度不应小于  $0.5h_0$ 。

**10.4.12** 牛腿钢筋的锚固长度应满足本标准第 9 章的要求, 其他锚固构造宜按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关要求执行。

## 10.5 墙

**10.5.1** 竖向构件截面长边、短边(厚度)的比值大于  $4$  时, 宜按墙的要求进行设计。墙厚度不应小于  $200\text{mm}$  且不宜小于层高的  $1/20$ 。

**10.5.2** 应分别沿墙的两个侧面布置钢筋网, 且应采用拉筋连系,

拉筋直径不应小于 10mm,间距不宜大于 600mm。

**10.5.3** 墙水平和竖向钢筋直径不应小于 12mm,不宜大于墙厚的 1/10,间距不宜大于 300mm。水平和竖向钢筋的最小配筋率不应小于 0.25%,当  $h_w/l_w \leq 2.0$  时,竖向钢筋配筋率不宜小于水平钢筋配筋率。

**10.5.4** 墙中配筋构造应符合下列规定:

1 墙水平和竖向钢筋的搭接满足本标准第 9 章的要求;

2 墙中水平钢筋应伸至墙端,端部宜设置开口 U 形箍筋,该 U 形箍筋与水平钢筋完全搭接连接,U 形筋直径与水平钢筋相同或不大于 25mm,搭接范围内拉筋间距不大于 200mm;

3 端部有翼缘或转角的墙,内墙两侧和外墙内侧的水平钢筋应伸至翼墙或转角外边,并分别向两侧水平弯折  $15d$ ,且满足锚固长度要求,在转角墙处,外墙外侧的水平钢筋应在墙端外角处弯入翼墙,并与翼墙外侧的水平钢筋搭接;

4 带边框的墙,水平和竖向钢筋宜分别贯穿柱、梁或锚固在柱、梁内。

**10.5.5** 墙洞口周边的纵向钢筋除应满足受力要求外,尚应配置不少于 2 根直径不小于 16mm 的钢筋。对于计算分析中可忽略的洞口,洞边钢筋截面面积分别不宜小于洞口截断的水平分布钢筋总截面面积的一半。纵向钢筋自洞口边伸入墙内的长度不应小于受拉钢筋的锚固长度。

## 10.6 叠合受弯构件

**10.6.1** 二阶段成形的水平叠合受弯构件,当预制构件高度不足全截面高度的 40%时,施工阶段应有可靠的支撑。

施工阶段有可靠支撑的叠合受弯构件,可按整体受弯构件设计计算,但其斜截面受剪承载力和叠合面受剪承载力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关叠合受弯构件计算方法计算。

施工阶段无支撑的叠合受弯构件,应对底部预制构件及浇筑混凝土后的叠合构件按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关要求进行二阶段受力计算。

### 10.6.2 混凝土叠合式梁、板应符合下列规定:

1 叠合梁的叠合层混凝土的厚度不宜小于 150mm,预制梁的箍筋应全部伸入叠合层,且各肢伸入叠合层的直线段长度不宜小于  $10d$  ( $d$  为箍筋的直径),预制梁的顶面应做成凹凸差不小于 6mm 的粗糙面;

2 叠合板的叠合层混凝土厚度不宜小于 60mm,预制板表面应做成凹凸差不小于 4mm 的粗糙面,承受较大荷载的叠合板宜在预制底板上设置伸入叠合层的构造钢筋。

10.6.3 伸入叠合层内的抗剪钢筋应具有足够的锚固,其锚固应满足本标准第 9.3.3 条第 2 款的要求。伸入并锚固于叠合层的抗剪钢筋可作为水平抗剪钢筋。

## 10.7 预埋件与连接件

10.7.1 核电厂常用预埋件分为端锚型预埋件、锚筋型预埋件,如图 10.7.1 所示。各类型预埋件设计及构造按国家现行相关标准的规定执行。

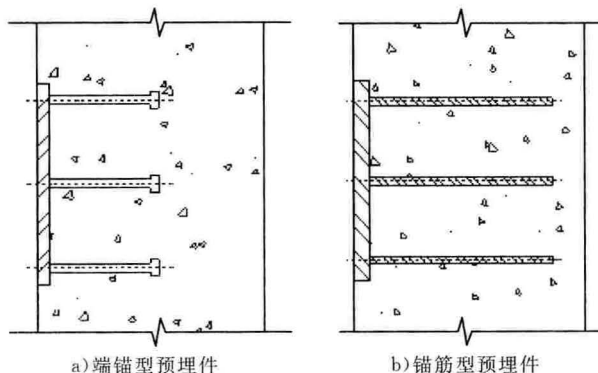


图 10.7.1 核电厂常用预埋件类型



**10.7.2** 受力预埋件的锚板宜采用 Q235、Q355 级钢, 不锈钢锚板宜选用 304 级、316 级或双相不锈钢等钢材。锚板厚度应根据受力情况计算确定, 且不应小于锚筋直径的 0.6 倍, 受拉和受弯预埋件的锚板厚度尚宜大于  $b/8$  ( $b$  为锚筋间距)。

受力预埋件的锚筋宜采用 HPB300 级、HRB400 级钢筋或更高强度等级的热轧钢筋, 不应采用冷加工钢筋。锚栓可由不低于 Q235 级的碳钢或合金钢制成。栓钉的选用应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 中规定的钢材材料及性能。

**10.7.3** 直锚筋与锚板应采用 T 形焊接。当锚筋直径不大于 20mm 时宜采用压力埋弧焊, 当锚筋直径大于 20mm 时宜采用穿孔塞焊。预埋件焊接应符合国家现行相关标准的规定。

**10.7.4** 预埋件锚筋中心至锚板边缘的距离不应小于  $2d$  ( $d$  为锚筋的直径) 和 20mm。预埋件的位置应使锚筋位于构件的外层主筋的内侧。

对受拉和受弯预埋件, 其锚筋的间距和锚筋至构件边缘的距离均不应小于  $3d$  和 45mm。

对受剪预埋件, 其锚筋的间距不应大于 300mm。预埋件平行剪力作用长度方向, 锚筋间距及锚筋至构件边缘的距离不应小于  $6d$  和 70mm; 预埋件垂直剪力作用长度方向, 锚筋间距及锚筋至构件边缘的距离不应小于  $3d$  和 45mm。

**10.7.5** 锚筋的锚固长度不应小于本标准第 9 章规定的受拉钢筋锚固长度。当无法满足锚固长度的要求时, 应采取其他有效的锚固措施。受剪和受压直锚筋的锚固长度不应小于  $15d$  ( $d$  为锚筋的直径)。

**10.7.6** 预制构件宜采用内埋式螺母、内埋式吊杆或预留吊装孔, 并采用配套的专用吊具实现吊装, 也可采用吊环吊装。吊装构件应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关要求。

## 11 预应力混凝土安全壳

### 11.1 一般规定

**11.1.1** 安全壳结构设计应按安全壳系统总体设计要求进行,并应确定下列内容:

- 1 各类工况下安全壳的压力和温度,包括峰值和时程曲线;
- 2 可能损害安全壳的冲击荷载和撞击荷载的来源及大小,包括各类工况下管道对于安全壳的作用力;
- 3 允许泄漏率;
- 4 放射性屏蔽要求。

**11.1.2** 安全壳结构设计应满足结构的完整性和密封性要求:

- 1 在设计基准范畴下满足结构的完整性要求;
- 2 在核电厂运行前进行规定压力下的结构完整性试验,及在所有贯穿件安装完成后和在核电厂运行寿期内进行规定压力下的泄漏率试验,验证安全壳的结构完整性及其密封性,安全壳结构完整性检测的要求见附录 B;

3 安全壳结构内放射性物质的外逸,在所有运行工况和试验状态下不得超过规定的限值,在事故工况下满足可接受的限制;

4 严重事故工况下保持安全壳结构的完整性,并应保证满足密封性要求。

**11.1.3** 严重事故工况下,安全壳结构应进行应力、应变评估。

**11.1.4** 安全壳结构分析时应满足混凝土、钢筋、钢内衬(若有)和预应力筋等结构材料间的变形协调要求。

### 11.2 承载力计算要求

**11.2.1** 安全壳壳体应采用整体结构模型有限元分析,对局部非

连续部位和贯穿件部位还应进行更详细的局部模型分析。

**11.2.2** 安全壳结构正截面受压、受拉和受弯承载力计算,可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

**11.2.3** 安全壳结构受剪承载力计算可按本标准第 7.3 节、第 7.4 节的有关规定执行。

**11.2.4** 安全壳壳体受压、受拉、受弯和受剪承载力也可通过目标性能化设计进行承载力计算。

**11.2.5** 预应力筋由于应变协调产生附加变形,承载力计算可考虑其额外效应,可通过预应力筋面积折算系数考虑。预应力筋最大应力不超过  $0.80f_{ptk}$  ( $f_{ptk}$  为预应力筋极限强度标准值)。

### 11.3 正常使用应力要求

**11.3.1** 安全壳壳体在正常使用下的效应设计值,可采取下列荷载组合:

1 施加预应力阶段:

$$D+L+F+W+T_o \quad (11.3.1-1)$$

2 结构完整性试验阶段:

$$D+L+F+P_t+T_t \quad (11.3.1-2)$$

3 正常运行或停堆阶段:

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v \quad (11.3.1-3)$$

**11.3.2** 安全壳壳体在正常使用下混凝土应力应符合下列规定:

- 1 截面边缘纤维压应力:  $\sigma_c \leq 0.7f_{ck}$ ;
- 2 截面边缘纤维拉应力:  $\sigma_t \leq 0.7f_{tk}$ ;
- 3 薄膜(平均)压应力:  $\sigma_{c,mean} \leq 0.4f_{ck}$ ;
- 4 薄膜(平均)拉应力:  $\sigma_{t,mean} \leq 0$ 。

式中:  $f_{tk}$ ——混凝土轴心抗拉强度标准值。

**11.3.3** 安全壳壳体在正常使用下钢筋应力应符合下列规定:

- 1 钢筋平均拉、压应力:  $\sigma_{s,mean} \leq 0.5f_{yk}$ ;
- 2 钢筋最大拉、压应力:  $\sigma_{s,max} \leq 0.8f_{yk}$ 。

式中： $f_{yk}$ ——普通钢筋屈服强度标准值。

## 11.4 预应力系统材料

**11.4.1** 安全壳预应力系统包括预应力筋、预应力筋用锚具、预应力成孔管道及孔道填充用材料等。

**11.4.2** 预应力筋应为高强度、低松弛率的钢绞线，其性能和质量应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的规定。

**11.4.3** 预应力筋用锚具性能和质量应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定。

**11.4.4** 预应力筋-锚具组装件静载试验应考虑工程实际工况，在试验台座一端放置混凝土承压构件，混凝土承压构件内埋设的锚垫板、预应力孔道应与实际工程使用一致。试验方法中其他要求按现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 中静载锚固性能试验方法的规定确定。

**11.4.5** 预应力成孔管道可为钢管或金属波纹管，应具有足够的强度和刚度，预应力成孔管道在混凝土中不应有漏浆现象。

**11.4.6** 预应力筋用钢管的性能和质量应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 的规定。

**11.4.7** 预应力筋用金属波纹管的性能和质量应符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225 的规定。

**11.4.8** 预应力成孔管道的性能要求应符合下列规定：

1 孔道内径的截面积不应小于 2 倍的钢绞线截面面积；

2 钢管壁厚不小于 2mm，内壁应光滑、无焊瘤，弯曲成形时不出现卷曲或压扁，金属波纹管宜采用镀锌钢带制作，壁厚不宜小于 0.6mm。

**11.4.9** 孔道填充用材料包括水泥浆和石蜡。水泥浆应为无收缩浆体，水泥浆的原材料及其他相关要求宜符合现行行业标准《压水堆核电厂安全壳预应力技术规程》NB/T 20325 的规定，石蜡的性

能和质量宜符合现行行业标准《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》JG/T 430 的规定。

## 11.5 预应力系统设计

11.5.1 在确定预应力效应设计值时,可采取下列荷载组合:

1 对于筒壁环向和穹顶的预应力筋:

$$D+1.2P_a+T_o \quad (11.5.1-1)$$

$$D+P_a+T_a \quad (11.5.1-2)$$

2 对于筒壁竖向预应力筋:

$$D+1.5P_a+T_o \quad (11.5.1-3)$$

$$D+1.25P_a+T_a \quad (11.5.1-4)$$

11.5.2 应根据壳体混凝土薄膜应力不出现拉应力的原则来选定有效预应力的尺寸。

11.5.3 预应力筋宜按下列原则布置:

1 预应力筋沿穹顶、筒体标准区域均匀布置;

2 沿筒体竖向设置张拉用扶壁柱,且和设备闸门、人员闸门等大洞口位置结合布置;

3 水平预应力筋在同一扶壁柱左右两侧锚固并进行张拉;

4 预应力成孔管道间净距不宜小于 1.5 倍孔道外径;

5 水平预应力成孔管道间竖向净距不应小于 1 倍孔道外径;

6 预应力筋最小弯转半径不应小于 8m;

7 预应力筋宜设监测钢束。

11.5.4 张拉和锚固时的预应力筋应力不宜超过下列数值:

1 张拉时,锚头处的拉应力:  $0.80f_{ptk}$ ;

2 紧接锚固后,锚头处的拉应力:  $0.75f_{ptk}$ ;

3 锚固后预应力筋全长的平均计算拉应力:  $0.65f_{ptk}$ 。

11.5.5 预应力计算中,应考虑下列因素引起的预应力损失:

1 张拉端锚具变形和预应力筋回缩;

2 预应力筋的摩擦;

- 3 预应力筋分批张拉时混凝土的弹性压缩的影响；
- 4 预应力筋的应力松弛；
- 5 混凝土的收缩和徐变。

**11.5.6** 锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值  $\sigma_{l1}$  可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的公式计算，如无确切数据，其内缩值可按 8mm 确定。

**11.5.7** 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值  $\sigma_{l2}$  可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的公式计算，当孔道成型方式满足本标准要求时，其摩擦系数可按表 11.5.7 确定，摩擦系数应通过预应力筋孔道摩擦试验核定。

**表 11.5.7 摩擦系数**

钢束类型	$k$	$\mu$
竖向钢束、r 形钢束	0.0008	0.16
水平钢束、倒 U 形钢束	0.0016	0.18
穹顶预应力钢束	0.0016	0.16

**11.5.8** 考虑后批张拉预应力筋所产生的混凝土弹性压缩对于先批张拉预应力筋的影响，所产生的预应力损失  $\sigma_{l3}$  可按式计算：

$$\sigma_{l3} = 0.5 E_s \Delta \sigma_c / E_c \quad (11.5.8)$$

式中： $E_s$ ——预应力筋的弹性模量；

$\Delta \sigma_c$ ——在初始时刻沿预应力方向混凝土的平均应力；

$E_c$ ——混凝土的弹性模量。

**11.5.9** 预应力筋由于应力松弛引起的预应力损失  $\sigma_{l4}$  可按式计算：

$$\sigma_{l4} = 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\eta} \left( \frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\eta)} \times 10^{-5} \sigma_{pi} \quad (11.5.9-1)$$

$$\eta = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}} \quad (11.5.9-2)$$

式中： $\rho_{1000}$ ——低松弛预应力筋在 20℃、0.7  $f_{ptk}$ 、张拉 1000h 后的

松弛损失(%),一般可取 2.5;

$\eta$ ——预应力筋初始预应力值与其极限强度标准值的比值;

$t$ ——张拉后的时间(h);

$\sigma_{pi}$ ——初始预应力值(MPa);

$f_{ptk}$ ——预应力筋极限强度标准值(MPa)。

若预应力筋温度高于 50℃,应对松弛损失进行检验。

**11.5.10** 预应力松弛损失与其他和时间变化有关的损失同时考虑时,应乘以 0.8 的折减系数。

**11.5.11** 混凝土的收缩和徐变损失  $\sigma_{ls}$  可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定,也可采用现场实际试验资料计算。

**11.5.12** 当锚垫板采用整体铸造时,应其局部受压区的设计应符合相关标准的规定。

**11.5.13** 当采用普通锚垫板时,应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求进行端部锚固区的局部受压承载力计算,并应配置间接钢筋,其体积配筋率不应小于 0.5%,垫板的刚性扩散角应取 45°。

**11.5.14** 安全壳筒壁和穹顶应设置径向拉筋。

**11.5.15** 当沿构件凹面布置曲线预应力筋时,应进行混凝土防崩裂设计。

**11.5.16** 安全壳筒壁和穹顶相接处,当设置环梁连接时,筒壁内侧钢筋宜弯转至穹顶,兼做穹顶底部径向钢筋,筒壁外侧钢筋宜和穹顶顶部径向钢筋可靠搭接。

## 12 施 工

### 12.1 一 般 规 定

12.1.1 施工前应对作业人员进行相关工作的培训。

12.1.2 应建立各项工序交底制度,对管理人员和施工操作人员进行施工安全、技术交底。

12.1.3 所有作业活动应有经批准的施工方案或其他相关文件。

12.1.4 构造复杂、施工难度大、质量要求高的混凝土结构施工前宜进行模拟试验,模拟试验前应制订试验方案。

12.1.5 筏形基础、安全壳、反应堆堆坑以及其他重要部位或结构复杂部位应在专项施工方案中明确施工逻辑关系。

12.1.6 各项施工活动除应符合本标准规定外,尚应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 和《大体积混凝土施工标准》GB 50496 的规定。

### 12.2 模板工程及支撑体系

#### I 基 本 要 求

12.2.1 模板和支撑的设计、制作、安装和拆除应符合本标准的要求外,尚应符合国家现行标准《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162 和《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 及其他相关标准的规定。

12.2.2 安全壳模板应选择安全、有效、可靠的模板体系。

#### II 模 板 及 支 撑 材 料

12.2.3 胶合板应符合国家现行标准《混凝土模板用胶合板》GB/T 17656 及《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162 的规定。胶合板宜选用 A 等品。



**12.2.4** 配制模板支撑及连接所用的配件均需有相应的合格证或试验检测证明。

**12.2.5** 脱模剂宜选择水性脱模剂,使用前应进行与混凝土的适应性试验,不应影响混凝土性能和外观质量造成影响。

### III 模板设计

**12.2.6** 模板分块宜按定型化、模数化和通用化设计。

**12.2.7** 安全壳及外墙模板应设置防风拉杆或其他防风装置。

**12.2.8** 模板施工方案设计除应符合现行行业标准《建筑工程大模板技术标准》JGJ/T 74、《钢框胶合板模板技术规程》JGJ 96、《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162 和《液压爬升模板工程技术标准》JGJ/T 195 等的规定外,还应符合下列规定:

1 模板施工设计方案考虑运输、堆放和装拆过程中对模板变形的影响;

2 对高架支模部分采取有效措施,以保证施工期间的安全;

3 上人通道设计需满足施工需求,具有足够的承载力;

4 人员作业高度超过 2m 时设置安全护栏、水平和垂直人行通道。

### IV 模板制作、安装

**12.2.9** 模板的加工、制作宜在加工车间或专用场地进行,并使用专用工装和平台。

**12.2.10** 洞口模板应根据洞口尺寸及混凝土性能设置混凝土振捣孔或排气孔。

**12.2.11** 模板接缝及与硬化混凝土交接处应有防止漏浆措施。

**12.2.12** 竖向构件模板及支架应采取抗侧移、抗浮和抗倾覆措施,水平构件模板及支架应采取保证稳定性的有效拉结措施。

### V 预埋件安装

**12.2.13** 预埋件在运输、堆放和吊装过程中造成的变形及涂层脱落等,应进行矫正和修补。

**12.2.14** 墙体预埋件安装前,应检查钢筋的垂直度,满足要求后

方可安装。

**12.2.15** 预埋件不应采用在结构钢筋上焊接的方式固定。

## VI 模板拆除与维护

**12.2.16** 混凝土底模及其支架拆除时的混凝土强度应符合设计规定,当设计无具体要求时,同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定。

**12.2.17** 大体积混凝土的拆模时间应满足本标准第 12.2.16 条对混凝土的强度要求,且混凝土浇筑体表面与大气温差不应大于 20℃。当模板作为养护保温措施的一部分时,其拆模时间应满足现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB 50496 的相关要求。

**12.2.18** 冬期施工模板拆除时混凝土表面与环境的温差宜小于 15℃,拆除模板后的混凝土应及时覆盖。

## 12.3 钢筋工程

### I 基本要求

**12.3.1** 寒冷地区宜设供暖的钢筋加工车间,车间大小以室内加工能力能够满足冬期施工需要为原则。

**12.3.2** 筏形基础及厚度不小于 800mm 楼板的钢筋支撑应经计算确定。

**12.3.3** 预埋件、钢筋及其他埋件密集处施工前应进行碰撞检查,并提出解决方案,钢筋或预埋件移位超过设计或标准允许偏差值,应经设计认可。

### II 原材料管理

**12.3.4** 钢筋的进场、储存和堆放应符合下列规定:

1 钢筋进场由采购单位组织相关单位进行验收,建设单位(或其授权代表)或监理单位见证;

2 钢筋储存场地坚实平整,不应因钢筋堆放而产生过大的变形,并避免场地内积水;

3 钢筋堆放时采用枕木或地垄墙架空,其间距布置以不使钢筋产生变形为宜;

4 钢筋堆放平面布置以“先进先出”为原则,钢筋进场后储存时间不宜超过 6 个月;

5 堆放储存区域不应存放各类油料、涂料等可能对钢筋造成污染的物料。

### III 翻样单编制

12.3.5 加工丝头的钢筋进行下料长度计算时需将二次切割的长度考虑在内。

12.3.6 钢筋下料长度除应满足图纸要求和施工便捷外,宜减少接头数量,同时控制断料长度与原材料定尺长度相匹配。

12.3.7 钢筋弯折的弯弧内直径应符合本标准第 9.3.3 条的规定。

### IV 钢筋制作

12.3.8 制作前检查应符合下列规定:

1 钢筋表面清洁、无损伤,油渍、漆污和灰浆在加工前清除干净;

2 带有颗粒状或片状老锈的钢筋严禁使用;

3 发现有裂纹、分层、凹坑、结疤、不圆等缺陷或硬度与钢种有较大出入时,重新检验该批钢筋符合要求后方可使用,经检验不符合要求的按报废处理,报废钢筋单独标识存放。

12.3.9 调直操作应符合下列规定:

1 盘圆钢筋宜采用无延伸功能的机械设备进行调直,不应采用冷拉法调直;

2 钢筋调直过程中不应损伤带肋钢筋的横肋,直条带肋钢筋弯折后严禁调直后再使用。

12.3.10 断料应符合下列规定:

对同类型数量大的钢筋,先检查单根断料长度无误后再批量切断,切断过程中检查断料长度和断口质量,每一班不少于 3 次、

每一次不少于 2 根。

### 12.3.11 弯曲、弯弧应符合下列规定：

1 钢筋弯曲严禁在环境温度低于 $-5^{\circ}\text{C}$ 时进行，弯曲过程中严禁加热钢筋；

2 圆弧钢筋、形状复杂的钢筋应在平整场地放样，比对加工成品弧度和形状的准确性；

3 钢筋弯弧宜采用弯弧机弯曲成型；

4 弯曲过程中如发现钢筋脆断或裂纹，应进行复检，满足要求后方可继续使用该批钢筋；

5 反应堆厂房内部结构及其他钢筋密集区的钢筋加工允许偏差应符合表 12.3.11 的规定，其他可按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定执行。

表 12.3.11 钢筋加工允许偏差 (mm)

项 目	允许偏差
钢筋顺长度方向的全长净尺寸	$\pm 5$
用于加工丝头钢筋的全长净尺寸	$\pm 3$
弯起钢筋的弯折位置	$\pm 10$
带有丝头的弯折钢筋外包尺寸	$\pm 5$
箍筋、拉筋内净尺寸	$\pm 3$

### V 加工成品的堆放与运输

12.3.12 加工成品应按单位工程或使用部位进行划分，分别堆放于各自固定的区域，应架空堆放。

12.3.13 加工成品装车运输前，应有专人清点确认钢筋数量、形状、规格及尺寸与申请单内容的一致性，钢筋调运至施工部位后应再次清点核对与该部位翻样单的一致性。

### VI 安 装 施 工

### 12.3.14 钢筋连接应符合下列规定：

1 钢筋连接方式和接头百分率符合设计要求和本标准第

9.4 节的规定；

2 钢筋焊接进行工艺评定，并符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定；

3 机械连接符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的规定，抗大型商用飞机撞击区域的钢筋连接应符合本标准附录 C 的规定。

### 12.3.15 安装工艺应符合下列规定：

#### 1 一般要求：

- 1) 未经设计许可严禁在现场弯曲预留钢筋，影响人员通行时应搭设翻越通道；
- 2) 意外弯曲的带肋钢筋严禁冷矫直，可采用加热矫直的方法；
- 3) 钢筋不宜点焊，现场其他工序焊接作业也应避免损伤钢筋；
- 4) 混凝土浇筑前，应清除钢筋表面影响钢筋与混凝土结合的剥离性锈蚀和其他污垢；
- 5) 钢筋绑扎应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定，绑扎丝应根据钢筋直径进行选择。

#### 2 钢筋保护层：

- 1) 钢筋保护层可采用砂浆垫块、混凝土垫块进行控制，垫块强度不应低于该部位的结构混凝土强度，严禁采用塑料垫块和金属垫块；
- 2) 用于支撑上层钢筋网片的支撑架为金属材质时，支撑架保护层应满足钢筋保护层最小厚度的要求。

#### 3 钢筋锚固：

- 1) 钢筋锚固长度应符合本标准第 9.3 节的规定；
- 2) 钢筋锚固板应符合现行行业标准《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256 的规定。

#### 4 筏形基础、楼板钢筋施工：

- 1) 上层钢筋网片的支撑架应采用永久性结构，严禁采用临

- 时支撑；
- 2) 支撑架不宜直接作用于垫层或模板上,可支撑加固在下层钢筋网片上；
  - 3) 筏形基础、楼板厚度不小于 2m 时,上层钢筋网临边应搭设围栏。
- 5 墙、柱钢筋施工：
- 1) 钢筋网片、骨架安装绑扎过程及完成后均应有可靠的防倾覆、防变形加固措施,模板支设需拆除加固设施时应确保钢筋网片或骨架不倾覆、不变形；
  - 2) 预制钢筋网片宜采用平衡梁吊装,单层网片吊点不宜少于 4 点；
  - 3) 预制钢筋网片、骨架的绑扎、吊运应有防变形措施,吊点处的纵、横钢筋的绑扎应加强。
- 6 安全壳钢筋施工：
- 1) 安全壳筒体钢筋连接方式宜采用机械连接,水平环形钢筋其中一个接头可采用搭接,但搭接接头位置不应设置在同一断面；
  - 2) 安全壳穹顶上、下层宜采用机械连接的纵、横向受力钢筋,且一次施工完成,纵、横向钢筋其中一个接头可采用搭接,但搭接接头位置不应设置在同一断面；
  - 3) 应严格控制径向拉筋的保护层厚度；
  - 4) 钢筋作业前应考虑与预应力孔道的交叉施工顺序,施工过程中应采取控制措施避免损伤预应力孔道；
  - 5) 钢筋设计位置与预应力孔道冲突时,在设计或规范允许范围内应优先避让预应力孔道,若超出允许值,应经设计确认。

## 12.4 预应力工程

### I 一般要求

#### 12.4.1 预应力工程作业人员应具备专项职业技能资格。

**12.4.2** 张拉施工前应进行预应力筋孔道摩擦试验。

**12.4.3** 孔道灌浆投入使用前,应进行浆体配合比验收试验。验收试验应以实验室确定的初步配合比为基准,在搅拌站进行相关试验,以确定正式灌浆时浆体的施工配合比和生产工艺。

**12.4.4** 在工程实体灌浆施工前,应采用与实际施工时相同的工艺、设备、材料,选取典型形状的孔道,进行全比例灌浆模拟试验。

**12.4.5** 正式张拉、灌浆前,预应力筋孔道摩擦试验、浆体配合比验收试验和全比例灌浆模拟试验的结论应满足设计要求,并通过设计单位认可。

## II 材料、贮存和装卸

**12.4.6** 预应力系统材料的性能应满足设计要求,设计无要求时应符合本标准第 11.4 节的规定。

**12.4.7** 钢绞线出厂时应采用水溶性油浸润保护,在运输过程及存放时应防止受到侵蚀或腐蚀。

**12.4.8** 运输和装卸时不应使预应力系统材料造成机械损伤或弯曲变形。

## III 排气孔

**12.4.9** 排气孔的设置应满足设计要求,设计无要求时应按下列原则设置:

1 水平孔道向下弯曲矢高超过 1.2m 时,在最低点设置一个排气孔;

2 水平孔道向上弯曲矢高超过 1.2m 时,在最高点两侧 3m~5m 范围内各设置一个排气孔;

3 穹顶孔道应在最高点两侧 4m~8m 范围内各设置一个排气孔,排气孔之间的距离根据孔道直径进行调整。

## IV 加工制作

**12.4.10** 钢管加工成型后应使直径较钢管规定直径小 5mm 的通球能自由通过该钢管。

**12.4.11** 钢管的连接应采用承插式连接。

**12.4.12** 波纹管卷制成品应能够使比设计内径小 0.5mm 的塞子自由通过该管的直线段,比设计要求直径大 5mm 的连接套筒能旋上该管,并满足现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225 的要求。

#### V 成孔管道安装

**12.4.13** 预应力孔道定位以钢内衬或安全壳内侧模板位置为基准。

**12.4.14** 孔道安装后敞口端应临时封闭保护。

**12.4.15** 混凝土浇筑前应检查孔道的完好性和畅通性,混凝土浇筑过程中、浇筑后均应检查孔道的畅通性。

#### VI 穿束张拉

**12.4.16** 穿束前应清除孔道内的积水和杂物。

**12.4.17** 预应力筋穿管前,应对钢绞线的表面状态再做一次外观检查,外观质量不符合要求的钢绞线不应使用。

**12.4.18** 穿束后应将预应力筋临时固定。

**12.4.19** 穿束后两端钢绞线应保留张拉需要的长度,应使用机械切割钢绞线,不得采用电弧、火焰等可能对钢绞线性能造成损害的切割方式。

**12.4.20** 同一孔道中的钢绞线应为同一批次。

**12.4.21** 宜采取措施使同一孔道中各根钢绞线的受力均匀。

**12.4.22** 张拉顺序应满足设计要求。

**12.4.23** 穿入孔道的钢绞线应在 30d 内完成张拉。

#### VII 灌 浆

**12.4.24** 灌浆前应对拟灌浆的孔道进行密封性检查。

**12.4.25** 灌浆时应监控灌浆压力、灌浆时间、水泥浆用量及钢内衬,当出现异常时,应停止灌浆,查明原因,采取措施并确认对灌浆质量及钢内衬无影响后方可继续灌浆。

**12.4.26** 灌浆的生产、储存的环境温度及灌浆孔道的温度宜在  $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  之间,超出此温度范围时应采取温度控制措施。



**12.4.27** 预应力筋张拉后应在 15d 内进行灌浆,采取保护措施后可延长至 30d。

## **12.5 混凝土工程**

### **I 配合比设计与试验**

**12.5.1** 配合比设计应满足混凝土配制强度及其他力学性能、长期性能和耐久性能的设计要求和施工对混凝土拌合物的性能要求。

**12.5.2** 设计配合比应经混凝土初步试验和可行性试验确定。

### **II 混凝土制备**

**12.5.3** 混凝土首次开盘前应进行开盘鉴定,开盘鉴定应包括下列内容:

- 1 混凝土的原材料与配合比设计所采用原材料的一致性;
- 2 出机混凝土工作性与配合比设计要求的一致性。

### **III 混凝土运输、浇筑和养护**

**12.5.4** 混凝土应采用搅拌运输车运输,运输车辆应符合国家现行有关标准的规定,运输过程中应保证混凝土拌合物的均匀性和工作性满足施工要求。

**12.5.5** 运输应满足现场施工连续供应的需要。

**12.5.6** 混凝土泵送前应确认发货单与设计要求相符。

**12.5.7** 混凝土拌合物浇筑倾落的自由高度应满足设计要求,当设计无要求时不宜超过 1.5m。

**12.5.8** 混凝土应分层浇筑,分层厚度不应大于 500mm。

**12.5.9** 对于钢筋、预埋件、预留洞口等密集部位或构件截面偏小部位,模板支设前应采取技术措施。

**12.5.10** 混凝土拌合物搅拌完成后应在 1.5h 内浇筑完成,当环境温度超过 30℃ 时,混凝土拌合物搅拌完成后应在 1h 内浇筑完成。

**12.5.11** 混凝土浇筑结束后,应清除附着在外露插筋上的浮浆。

**12.5.12** 混凝土入模温度不宜大于  $30^{\circ}\text{C}$  ,且不宜小于  $5^{\circ}\text{C}$  。

**12.5.13** 混凝土宜采用插入式振动棒振捣,振捣时间应经试验确定,在保证振捣密实的同时,应避免过振。采用其他振捣方式时,应经试验确认。

**12.5.14** 养护时间不应少于 7d,大体积混凝土养护时间应适当延长。当有试验数据表明,停止养护不影响混凝土后续强度增长和不引起其他混凝土质量问题时,养护时间可缩短。

**12.5.15** 冬期施工时,混凝土浇筑后 72h 内,混凝土温度应保持在  $10^{\circ}\text{C}$  以上,并应符合现行行业标准《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104 的规定。

**12.5.16** 安全壳混凝土浇筑时应采用全面分层法,并应控制浇筑速率。

## 13 验 收

### 13.1 一 般 规 定

**13.1.1** 核电厂各厂房的混凝土结构应作为一个混凝土结构子分部工程进行验收。混凝土结构工程的质量验收按照模板、钢筋、预应力、混凝土等分项工程开展,各分项工程可根据材料进场批次、工作班、楼层、变形缝或施工段分为若干检验批;分项工程的质量验收应在所含检验批验收合格的基础上,进行质量验收记录检查。

**13.1.2** 施工活动开始前,施工单位应制定质量跟踪文件,质量跟踪文件中应根据建设单位(或其授权代表)或监理单位的要求设置质量过程控制监督检查点,并经建设单位(或其授权代表)或监理单位审批通过。

**13.1.3** 工程质量的检查、验收需在施工单位自行检查、验收的基础上进行。施工单位质量检查人员验收合格后,应及时通知建设单位(或其授权代表)或监理单位验收,经检查验收合格通过后才能进行下道工序施工。

**13.1.4** 工程质量的检查、验收参与人员应具备规定的资格,承担见证取样检测及有关结构安全检测的单位应具有相应资质。

**13.1.5** 核电厂各厂房的混凝土结构子分部工程的质量验收除应符合本标准的规定外,尚应符合设计文件和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关规定。

### 13.2 模 板 工 程

#### I 原 材 料

**13.2.1** 模板及支架用材料的技术指标、外观质量和规格尺寸应满足设计文件要求或符合国家现行有关标准的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查质量证明文件,观察,尺量。

**13.2.2** 脱模剂的技术指标应符合现行行业标准《混凝土制品用脱模剂》JC/T 949 的规定,宜选用水性脱模剂,且使用前应进行与混凝土的适应性试验。脱模剂在使用前应提交材料审批单,并经建设单位(或其授权代表)或监理单位审查批准。

检查数量:按进场批次进行检查。

检验方法:检查质量证明文件、试验报告。

## II 模 板 安 装

**13.2.3** 模板的安装质量应符合下列规定:

- 1 模板的接缝严密;
- 2 模板内不应有杂物、积水或冰雪等;
- 3 模板与混凝土的接触面平整、清洁;
- 4 用作模板的地坪、胎膜等平整、清洁,不应有影响构件质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓;
- 5 对清水混凝土及装饰混凝土构件,使用能达到设计效果的模板。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.2.4** 现浇混凝土结构模板及支架的安装质量,应满足国家现行有关标准的规定和满足施工方案的要求。

检查数量:按国家现行相关标准的规定确定。

检验方法:按国家现行有关标准的规定执行。

**13.2.5** 现浇混凝土结构多层连续支模应符合施工方案的规定。上、下层模板支架的竖杆宜对准。竖杆下垫板的设置应满足施工方案的要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.2.6** 固定在模板上的预埋件和预留孔洞不得遗漏,且应安装

牢固,其位置应满足设计和施工方案的要求,当设计无具体要求时,应符合表 13.2.6 的规定。有抗渗要求的混凝土结构中的预埋件,应按设计及施工方案的要求采取防渗措施。

检查数量:每个检验批抽取总数的 10% 进行检查。

检验方法:观察、尺量。

**表 13.2.6 预埋件和预留孔洞的安装允许偏差(mm)**

项 目		允许偏差
预埋板中心线位置		7
预埋套管中心线位置		4
预埋螺栓	中心线位置	3
	外露长度	+10,0
预留洞	中心线位置	10
	尺寸	+10,0

注:检查中心线位置时,沿纵、横向两个方向量测,并取其中偏差的较大值。

**13.2.7** 现浇结构模板安装的偏差及检查数量、检验方法应满足设计要求,当设计无要求时,应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关规定。

### III 模 板 拆 除

**13.2.8** 混凝土底模及其支架拆除应符合本标准第 12.2.16 条的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度试验报告。

**13.2.9** 筏形基础大体积混凝土模板的拆模应符合本标准第 12.2.17 条的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.2.10** 模板拆除时,应考虑上一层结构强度、施工集中荷载及

设备基础等的要求,必要时需保留其支撑或设置临时支撑。模板拆除时不应対楼层形成冲击荷载,拆除后的材料宜分散堆放并及时清运。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

### 13.3 钢筋工程

#### I 原材料

**13.3.1** 钢筋及机械连接套筒在采购前应完成供应商的资格评审,并经建设单位(或其授权代表)或监理单位审查批准。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查资格评审文件。

**13.3.2** 钢筋进场时,每个品种每种直径的钢筋应按现行国家标准《钢筋混凝土用钢》GB/T 1499 的规定抽取试件做几何尺寸、屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能和重量偏差检验,结果应符合相关标准的规定。

检查数量:按进场批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.3.3** 钢筋机械连接套筒、钢筋锚固板的外观质量应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107、《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163 和《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256 的相关规定。

检查数量:按国家现行相关标准的规定确定。

检验方法:检查产品质量证明文件,观察,尺量。

**13.3.4** 对于防大型商用飞机撞击所要求的机械连接接头,其技术性能指标应符合设计文件的规定。

检查数量:按现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的规定确定。

检验方法:检查试验报告。

## II 钢筋加工制作

**13.3.5** 钢筋弯折的弯弧内直径应符合本标准第 9.3.3 条的规定。

检查数量:按每工作班同一类型钢筋、同一加工设备抽查不应少于 3 件。

检验方法:尺量。

**13.3.6** 加工成型和组装完成后的钢筋运至现场前必须挂有明显的标志牌,标明施工图中规定的构件编号及使用部位等信息。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查标志牌。

**13.3.7** 钢筋加工的形状、尺寸应满足设计要求,其偏差应符合本标准第 12.3.11 条的规定。

检查数量:按每工作班同一类型钢筋、同一加工设备抽查不应少于 3 件。

检验方法:尺量。

## III 钢筋连接

**13.3.8** 钢筋采用机械连接或焊接连接时,钢筋机械连接接头、焊接接头的力学性能、弯曲性能应分别符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定。除抗大型商用飞机撞击要求的接头试件外,接头试件应从工程实体中截取。

检查数量:按现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.3.9** 钢筋机械连接接头、焊接接头的外观质量应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定。

检查数量:按现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定确定。

检验方法:观察。

**13.3.10** 当纵向受力钢筋采用绑扎搭接接头、机械连接接头或焊接接头时,同一接头连接区段内纵向受力钢筋的接头面积百分率或绑扎搭接接头连接区段内接头的设置应满足设计要求,当设计无具体要求时,其接头面积百分率或接头的设置及检查数量、检验方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

#### IV 钢 筋 安 装

**13.3.11** 钢筋安装时,钢筋的牌号、规格、数量、连接形式应满足设计要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,尺量。

**13.3.12** 钢筋保护层应采用垫块进行控制,每平方米垫块数量不宜少于 2 个,垫块的强度不应低于该部位的结构混凝土强度,且不应采用塑料垫块和金属垫块。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,尺量及检查强度检验报告。

**13.3.13** 钢筋安装允许偏差应满足设计要求,当设计无具体要求时,钢筋安装允许偏差及检查数量、检验方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

### 13.4 预应力工程

#### I 原 材 料

**13.4.1** 所有预应力材料在采购前应完成供应商的资格评审,以及预应力筋-锚具组装件的静载锚固性能试验、疲劳荷载性能试验,并经建设单位(或其授权代表)或监理单位审查批准。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查资格评审文件。

**13.4.2** 预应力筋进场时,应按设计的规定抽取试件做抗拉强度、



伸长率和弹性模量检验,其检验结果应满足设计要求。

检查数量:按进场的批次和产品抽样检验方案确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.4.3** 预应力筋进场时,应进行外观检查,其外观质量应符合下列规定:

- 1 预应力筋表面应颜色均匀,允许有少许斑点和轻微浮锈;
- 2 无凹痕,允许有轻微刮痕;
- 3 无异物,允许少量氧化皮剥落;
- 4 露出金属光泽。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.4.4** 预应力筋用锚具应和锚垫板、局部加强钢筋配套使用,锚具进场时,应按现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的相关规定对其性能进行检验,检验结果应符合该标准的规定。

检查数量:按现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定确定。

检验方法:检查质量证明文件、锚固区传力性能试验报告和抽样检验报告。

**13.4.5** 预应力筋用锚具进场时,应进行外观检查,其表面应无污物、锈蚀、机械损伤和裂纹。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.4.6** 预应力成孔管道进场时,应进行孔道外观质量检查、径向刚度和抗渗漏性能检验,其检验结果应符合下列规定:

- 1 孔道外观清洁,内外表面无锈蚀、油污、附着物、孔洞;
- 2 波纹管不应有不规则褶皱,咬口应无开裂、脱扣,钢管焊缝连续;

3 径向刚度和抗渗漏性能符合现行行业标准《预应力混凝土

用金属波纹管》JG 225 的规定。

检查数量:外观应全数检查,径向刚度和抗渗漏性能的检查数量应按进场的批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法:观察,检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.4.7** 孔道灌浆用水泥应采用性能稳定、强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥。水泥、外加剂的质量应满足现行行业标准《压水堆核电厂安全壳预应力技术规程》NB/T 20325 的规定。

检查数量:按进场批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.4.8** 成品灌浆材料的性能指标和质量应满足设计要求,当设计无要求时,应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关规定。

检查数量:按进场批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.4.9** 预应力监测钢束使用的灌浆材料,其性能指标应符合设计文件规定。

检查数量:按进场批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.4.10** 预应力筋张拉机具及压力表应定期维护和标定,张拉设备和压力表应配套标定和使用,标定期限不应超过半年。

检查数量:全数检查。

检验方法:维护和标定记录。

## II 制作与安装

**13.4.11** 预应力筋安装时,其品种、规格、级别和数量应满足设计要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,尺量。

**13.4.12** 预应力筋或成孔管道的安装质量应符合下列规定:

1 成孔管道的连接应密封;

2 预应力筋或成孔管道平顺,并与定位支撑钢筋绑扎牢固;  
 3 成孔管道的端口做好临时密封保护措施;  
 4 锚垫板承压面与预应力筋或孔道曲线末端垂直,预应力筋或孔道曲线末端直线段长度满足设计要求,当设计无要求时,符合表 13.4.12 的规定;

5 曲线预应力孔道的线形和高差符合设计规定,当设计无要求时,波峰和波谷的高差大于 300mm;

6 成孔管道排气孔的设置符合本标准第 12.4.9 条的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,尺量。

表 13.4.12 预应力筋曲线起始点与张拉锚固点之间直线段最小长度

预应力筋张拉控制力 $N$ (kN)	$N \leq 1500$	$1500 < N \leq 6000$	$N > 6000$
直线段最小长度 (mm)	400	500	600

13.4.13 预应力混凝土安全壳的成孔管道安装偏差应满足设计要求,当设计无要求时应符合下列规定:

1 竖向孔道:

1) 定位孔道:径向和切向偏差均小于  $\pm 15\text{mm}$ ;

2) 其他孔道:径向偏差小于  $\pm 15\text{mm}$ ,与定位孔道之间的切向偏差小于  $\pm 50\text{mm}$ ,与相邻竖向孔道之间的偏差小于  $\pm 25\text{mm}$ 。

2 水平孔道:径向偏差小于  $\pm 15\text{mm}$ ,单根水平孔道与设计标高的偏差小于  $\pm 25\text{mm}$ 。

3 穹顶孔道:径向偏差小于  $\pm 15\text{mm}$ ,切向偏差小于  $\pm 25\text{mm}$ 。

检查数量:全数检查。

检验方法:尺量。

13.4.14 孔道安装时,孔道与孔道、孔道与模板之间的净距应满足设计要求,设计无具体要求时应符合表 13.4.14 的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法: 尺量。

表 13.4.14 孔道安装的最小净距(mm)

项 目	最小净距
模板与水平孔道	100
模板与竖向孔道	150
水平金属波纹管距下部施工缝	20
水平金属波纹管距上部施工缝	50
平行的金属波纹管之间	100
平行的金属波纹管和钢管	100
交叉的金属波纹管和钢管	50
平行的钢管	150
孔道与小贯穿件	孔道直径

### Ⅲ 张拉与放张

**13.4.15** 预应力筋张拉时间和张拉顺序应满足设计文件的要求,设计文件对张拉时间无要求时,穿入孔道的预应力筋应在 30d 内完成张拉。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,检查张拉记录。

**13.4.16** 预应力筋正式张拉前,宜采取措施使同一孔道中各根钢绞线的受力均匀。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查张拉记录。

**13.4.17** 预应力筋张拉前,混凝土的强度、弹性模量和龄期应满足设计要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查试验报告。

**13.4.18** 预应力筋张拉质量应符合下列规定:

1 采用应力控制方法张拉时,张拉力下预应力筋的实测伸长

值与计算伸长值的相对允许偏差为 $-5\% \sim 8\%$ ,锚固端预应力筋的实测拉力值与计算拉力值的相对允许偏差为 $-15\% \sim 20\%$ ;

**2** 最大张拉应力不应大于现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查张拉记录。

**13.4.19** 锚固阶段张拉端预应力筋的内缩量应满足设计要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:尺量。

**13.4.20** 预应力筋张拉过程中应避免钢绞线断裂或滑脱。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,检查张拉记录。

**13.4.21** 预应力筋张拉锚固后,如遇特殊情况需要卸锚时,其放张顺序和放张要求应满足设计要求及现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查放张记录。

#### IV 灌浆与封锚

**13.4.22** 预应力孔道的灌浆时间、灌浆顺序应满足设计文件的要求,设计文件对灌浆时间无要求时,预应力筋应在张拉完成后 15d 内完成灌浆。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查灌浆记录。

**13.4.23** 孔道灌浆应满足设计文件和施工方案的要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查灌浆记录。

**13.4.24** 预应力筋锚固后,锚具外预应力筋的外露长度不应小于其直径的 1.5 倍,且不应小于 30mm。

检查数量:在同一检验批内,抽查预应力筋总数的 3%,且不

应少于 5 束。

检验方法:观察,丈量。

#### **13.4.25 预应力筋和锚具应采用永久保护帽保护。**

检查数量:在同一检验批内,抽查预应力筋总数的 5%,且不应少于 5 处。

检验方法:观察,丈量。

### **13.5 混凝土工程**

#### **I 混凝土配合比设计**

**13.5.1 混凝土配合比设计应满足设计要求,包括混凝土性能指标、配合比设计方法、配合比生产评定方法等。**

检查数量:全数配合比。

检验方法:配合比试验报告。

**13.5.2 混凝土设计配合比应先经初步试验和可行性试验确认满足要求,然后报建设单位(或其授权代表)或监理单位审查批准。**

检查数量:全数设计配合比。

检验方法:检查设计配合比试验报告。

#### **II 原 材 料**

**13.5.3 所有混凝土原材料在采购前应完成供应商的资格评审,并经建设单位(或其授权代表)或监理单位审查批准。**

检查数量:每种混凝土原材料。

检验方法:检查资格评审文件。

**13.5.4 水泥进场时应按照设计要求的相关项目进行检验(至少应包括强度、安定性和凝结时间),检验结果应满足设计要求和符合国家现行标准的相关规定。**

检查数量:按同一厂家、同一品种、同一代号、同一强度等级、同一批号且连续进场的水泥,袋装不超过 200t 为一批,散装不超过 500t 为一批,每批抽样数量不应少于一次。

检验方法:检查抽样检验报告。

**13.5.5** 矿物掺合料进场时应按照设计要求进行检验,设计无具体要求时应按国家现行标准进行检验。检验结果应满足设计要求或符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 和《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 等的相关规定。

检查数量:按同一厂家、同一品种、同一批号且连续进场的矿物掺合料不超过 200t 为一批,每批抽样数量不应少于一次。

检验方法:检查抽样检验报告。

**13.5.6** 骨料进场时应按照设计要求进行检验,设计无具体要求时应按国家现行标准进行检验。检验结果应满足设计要求或现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684、《建设用卵石、碎石》GB/T 14685 的相关要求。

检查数量:同一厂家、同一规格的外购砂石料不超过 600t 为一批,每批抽样数量不应少于一次,自产砂石料每班不少于一次。

检验方法:检查抽样检验报告。

**13.5.7** 混凝土外加剂进场时应按照设计要求进行检验,设计无具体要求时应按国家现行标准进行检验。检验结果应满足设计要求或符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076、《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的规定。

检查数量:按同一厂家、同一品种、同一性能、同一批号且连续进场的混凝土外加剂,不超过 50t 为一批,每批抽样数量不应少于一次。

检验方法:检查质量证明文件和抽样检验报告。

**13.5.8** 混凝土拌合用水应按照设计要求进行检验,设计无具体要求时应按国家现行标准进行检验。检验结果应满足设计要求或现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的相关要求。

检查数量:不超过 6 个月一次。

检验方法:检查抽样检验报告。

### III 混凝土拌合物

**13.5.9** 混凝土生产应按照经建设单位(或其授权代表)或监理单

位批准的混凝土设计配合比进行生产。同一条混凝土生产线按设计配合比每日第一次生产混凝土时,建设单位(或其授权代表)或监理单位应进行该设计配合比的混凝土生产的开盘见证。

检查数量:同一混凝土生产线同一设计配合比的混凝土每个工作日检查不应少于一次。

检验方法:检查开盘鉴定资料和强度试验报告。

**13.5.10 混凝土生产时材料每盘计量允许偏差应符合表 13.5.10 的规定。**

检查数量:每盘混凝土。

检验方法:检查混凝土生产记录。

**表 13.5.10 混凝土材料每盘计量允许偏差**

原材料品种	水泥	骨料	水	外加剂	掺合料
每盘计量允许偏差(%)	±1	±2	±1	±1	±1

**13.5.11 混凝土生产取样应在浇筑地点随机抽取。当出机口离浇筑地点距离较近、运输时间较短,经试验证明出机口取样混凝土性能和浇筑地点取样混凝土性能差别较小时,可在搅拌站出机口进行混凝土试件取样。**

检查数量:全数检查。

检验方法:检查混凝土强度试验报告。

**13.5.12 混凝土试件应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 规定的频率进行混凝土取样。**

检查数量:全数检查。

检验方法:检查混凝土强度试验报告。

**13.5.13 混凝土试件的强度评定应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 的规定。**

检查数量:全数检查。

检验方法:检查混凝土强度评定报告。

#### IV 混凝土施工

**13.5.14 混凝土浇筑前应检查混凝土发货单。**



检查数量:全数检查。

检验方法:检查发货单。

**13.5.15** 施工缝的留设及处理方法应满足施工方案要求。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

**13.5.16** 混凝土的浇筑、振捣应符合本标准第 12 章和施工方案及现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164、《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定。

检查数量:每工作班检查一次。

检验方法:观察,检查施工方案和施工记录。

**13.5.17** 混凝土浇筑完毕后应及时进行养护,养护时间以及养护方法应符合本标准第 12 章和施工方案的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察,检查施工方案和施工记录。

**13.5.18** 现浇结构的位置、尺寸偏差及检查数量、检验方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

**13.5.19** 现浇设备基础的位置和尺寸应满足设计和设备安装的要求,其位置和尺寸偏差及检验方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

检查数量:全数检查。

## 附录 A 超设计基准范畴

**A.0.1** 超设计基准范畴分为设计扩展工况和超设计基准外部事件。

**A.0.2** 设计扩展工况荷载的取值可根据工艺条件确定；超设计基准地震的取值可根据地震裕量分析中审查水平地震的相关要求确定；大型商用飞机撞击荷载作用可按本标准附录 C 确定。

**A.0.3** 超设计基准范畴可采用下列三种估算方法进行评价：

- 1 考虑模型或材料非线性的数值分析法；
- 2 基于设计经验和规范折减系数的简化分析法；
- 3 高置信度低失效概率评估法。

**A.0.4** 超设计基准外部事件应根据结构构件的安全功能要求采用相应的评价准则。

## 附录 B 安全壳结构完整性检测

### B.1 一般规定

**B.1.1** 本附录适用于预应力混凝土安全壳结构。

**B.1.2** 通过检测安全壳结构在设计基准事故工况压力作用下的结构性能,来验证安全壳结构的完整性。

**B.1.3** 应按下列规定开展安全壳结构完整性试验及安全壳结构的检查工作:

1 在安全壳建造完成后、投入使用之前开展,检查安全壳结构的施工质量和设计符合性;

2 根据相关法规要求,进行在役期间的安全壳结构性能的检查工作;

3 试验按照一定的压力分级依次加载、卸载压力,且试验压力最高值符合本标准第 5.2.8 条的规定;

4 压力加减速率每小时不应大于最高试验压力的 20%,每级压力到达后,恒压时间不应小于 1h。

### B.2 安全壳结构检查项目

**B.2.1** 检查安全壳结构在试验压力作用下的整体变形,应测量基础底板变形、筒身变形和穹顶变形。

**B.2.2** 检查安全壳结构在试验压力作用下混凝土内部应变,应监测安全壳筒身、穹顶和基础底板的混凝土应变值。

**B.2.3** 压力试验过程中应测读灌蜡预应力监测钢束的预应力值。

**B.2.4** 试验过程中应监测安全壳混凝土内部的温度值。

**B.2.5** 在压力试验过程中,应对安全壳结构的截面不连续区域

和高应力集中区域进行外观检查。外观检查包括混凝土结构表面裂缝和缺陷、钢内衬锈蚀及变形、钢内衬涂层缺陷、钢内衬与混凝土间空鼓、预应力筋锚具外露部分和永久性保护部分缺陷(如灌浆帽、外露混凝土等)。

**B. 2. 6** 进行现场气象监测,监测压力试验过程中大气环境的温度、湿度、风向、风速和辐照数据。

### **B. 3 安全壳结构检查技术要求**

**B. 3. 1** 安全壳结构整体变形检查应符合下列规定:

1 应在安全壳结构基础底板边缘处设置沉降观测点,宜沿圆周方向均匀分布;

2 应沿安全壳筒身高度至少选择三个水平截面,在每个水平截面近似相等的 4 个方位测量筒身径向和切向变形;

3 宜在筒身顶部选择 4 个近似均匀分布测点,测量筒体相对于基础底板的竖向变形;

4 应在穹顶顶点和穹顶与起拱线之间的中点,至少在三个相等间隔的方位上测量穹顶的竖向变形;

5 整体变形测量系统的综合误差不应大于最大变形测点总变形值的 $\pm 5\%$ 或绝对误差不应大于 0.25mm,取其大者。

**B. 3. 2** 安全壳结构混凝土内部应变监测应符合下列规定:

1 应在混凝土下列部位的内、外排普通钢筋处,沿切向(纬向)和竖向(经向)设置应变测点,测点数量根据结构形式具体确定:

1)安全壳结构筒身与基础底板交接处;

2)安全壳结构筒身高度中间部位;

3)穹顶的顶点处。

2 宜在设备闸门孔附近部位沿切向和竖向设置应变测点,测点数量根据闸门形式具体确定。

3 在压力试验过程中,应在每一个压力平台上采集应变

数据。

4 应变测量误差不应大于最大应变测点应变值的 $\pm 5\%$ 或绝对误差不应大于 10 微应变,取其大者。

**B.3.3 安全壳结构预应力损失监测应遵循下列技术要求:**

1 应设置一定数量的灌蜡预应力监测钢束;

2 灌蜡预应力监测钢束宜采用穿心式测力传感器测量,测量误差不应大于被测张拉力值的 $\pm 1\%$ 。

**B.3.4 温度检查应遵循下列技术要求:**

1 应在应变传感器测点位置处布置能够实时反映测点温度的温度传感器;

2 宜在穹顶上表面、筒身上部外表面适当增设用于修正整体变形的温度测点。

**B.3.5 外观检查应遵循下列技术要求:**

1 压力试验开始前,应开展安全壳外观普查工作,根据普查结果确认试验过程中重点检查区域;

2 压力试验过程中重点检查安全壳结构外表面的危险区域,危险区域如本标准第 B.2.5 条所述;

3 压力试验卸压至零后,应重点检查安全壳裂缝观测区内是否有新的受力裂缝产生,并检查原有监测裂缝在试验过程中是否发生扩展;

4 压力试验开始前及卸压至零后应对安全壳钢内衬进行检测,重点关注空鼓等缺陷;

5 宜对所有预应力筋的外露锚具及锚具周围可见混凝土进行外观检查。

## **B.4 验收准则**

**B.4.1 最大试验压力作用下安全壳整体变形测量最大值不应超过理论计算值的 1.3 倍。**

**B.4.2 压力试验卸压结束或卸压 24h 后,安全壳结构整体变形**

最大残余量不应大于试验峰值压力作用下变形测量值的 20% 加 0.25mm 之和。

**B. 4. 3** 由裂缝状态、混凝土应变和整体变形数据分析确定非预应力筋不会出现屈服。

**B. 4. 4** 经检查,混凝土结构或钢内衬应无永久性损伤的可见痕迹。

## 附录 C 抗大型商用飞机撞击结构设计

### C.1 一般规定

**C.1.1** 本附录主要规定了核电厂抗大型商用飞机撞击防护原则和结构设计在材料、荷载、计算方法以及构造措施等方面的要求。军用飞机撞击可参考本附录执行。

**C.1.2** 结构抗飞机撞击防护设计应保证安全壳完整和乏燃料水池完整。

**C.1.3** 抗飞机撞击结构设计方案应符合下列规定：

1 核安全相关结构外部需设置抗飞机撞击结构时，核安全相关结构墙与抗飞机撞击结构墙之间的间距应大于飞机撞击下产生的最大结构位移；

2 混凝土构件可采取增大厚度或其他必要的措施防止背部剥落或穿透等局部破坏带来的不利影响；

3 应采取有效措施防止安全壳与燃料厂房内吊车跌落或保证吊车跌落不影响安全功能；

4 撞击面开设孔洞时应考虑飞射物穿透和火灾蔓延的风险。

**C.1.4** 抗飞机撞击结构分析应符合下列规定：

1 结构需进行整体动力计算、撞击部位的局部计算、冲击振动计算等。

2 结构构件可根据其功能要求进行变形的验算。

3 结构计算分析时的假定和要求：

1) 对于墙体结构，飞机和发动机是垂直地撞击结构；对于屋面结构，飞机和发动机按与水平面一定夹角撞击，荷载同时作用在撞击区域内；

2) 对于整体动力分析撞击位置的选取，应考虑飞机撞击的

最不利影响；

- 3) 对于振动冲击分析撞击位置的选取,应充分考虑撞击对所评估设备和系统的影响；
- 4) 分析时需合理地考虑水池中水的质量；
- 5) 在进行非线性有限元计算分析时,需考虑合适的非线性本构关系,并应根据失效类型确定合适的应变极限值。

## C.2 材料及荷载

### C.2.1 材料特性应符合下列规定：

- 1 混凝土强度可采用实测值,若无法取得实测值,也可采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的标准值；
- 2 钢材强度采用屈服强度标准值；
- 3 应考虑材料的应变率效应；
- 4 考虑飞机撞击的钢筋混凝土结构,混凝土强度等级不宜低于 C40。

### C.2.2 荷载应符合下列规定：

- 1 飞机撞击分析考虑整体荷载和局部荷载。
- 2 整体荷载可采用飞机的荷载时程曲线,该曲线根据飞机的压碎力分布、质量分布和撞击速度确定,并根据飞机的几何特征确定作用面积。当无可靠数据时,可采用图 C.2.2 所示的荷载时程

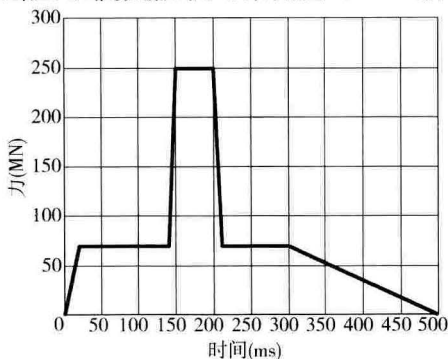


图 C.2.2 飞机撞击荷载时程曲线



曲线,飞机总的撞击面积为  $100\text{m}^2$ ,机身面积为  $50\text{m}^2$ ,机翼面积为  $50\text{m}^2$ 。

3 局部荷载应考虑飞机发动机(硬性飞射物)的撞击,撞击效应应根据发动机的等效直径、质量和撞击速度确定。

4 撞击速度应根据假定的撞击情况确定,当无可靠数据时,可取  $100\text{m/s}$ 。

### C.3 结构计算

C.3.1 整体动力计算应符合下列规定:

1 整体动力计算根据分析对象选择下列分析方法之一:

1)力时程分析方法;

2)飞射物-靶体相互作用分析方法。

2 钢筋混凝土模型宜采用分离式有限元模型,钢筋和混凝土之间的相互作用可采用共节点、耦合约束等方式进行处理。

3 整体动力分析的结果应满足下列要求:

1)结构的整体位移或变形不能影响系统或构件的安全功能;

2)钢筋的应变不超过极限应变。

C.3.2 局部效应计算时,可采用飞射物-靶体相互作用分析方法,也可根据试验确定或采用其他适用的经验公式。

### C.4 构造措施

C.4.1 钢筋连接应符合下列规定:

1 纵向受力钢筋应采用机械连接;

2 机械套筒接头的极限抗拉强度不应小于被连接钢筋的极限抗拉强度,同时需满足瞬间加载冲击试验要求;

3 相邻纵向受力钢筋的套筒接头宜错开不小于  $35d$  的距离( $d$ 为较小钢筋的直径),纵向受拉钢筋接头面积百分率不宜大于  $50\%$ 。

**C.4.2 抗剪钢筋应符合下列规定：**

**1** 抗剪钢筋的配置应根据计算确定。

**2** 抗剪钢筋的布置宜与结构构件的轴线垂直,其开口方向应朝向撞击面,如图 C.4.2 所示。

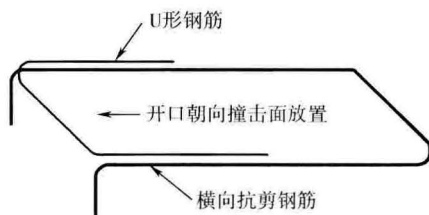


图 C.4.2 抗剪钢筋示意图

**3** 抗剪钢筋宜完全包裹住最外层纵向受力钢筋,并在端部提供有效的锚固。当抗剪钢筋无法完全包裹最外层纵向受力钢筋时,可在端部添加 U 形钢筋封口,直径不宜小于 10mm,间距可按抗剪钢筋间距大一倍取用。

## 附录 D 水池

### D.1 一般规定

**D.1.1** 混凝土水池结构在进行整体作用效应分析时,应计入液体因为外部荷载而产生的运动对水池结构的影响。

**D.1.2** 除了满足本标准第 9 章、第 10 章的相关构造要求外,混凝土水池结构尚宜满足下列要求:

- 1 混凝土水池采用较小的钢筋,钢筋间距不宜超过 300mm;
- 2 混凝土水池临水面设置钢内衬。

### D.2 分析方法

**D.2.1** 结构整体作用效应分析宜选用弹性分析方法,对于几何规则的水池可采用简化公式及附加质量方法,对于几何不规则的水池宜采用流固耦合数值分析方法。

**D.2.2** 水池构件设计时,可采用等效静力设计方法。当计入晃动模态部分对结构的影响时,所选取的楼面反应谱值可采用的阻尼值为 0.5%。

**D.2.3** 水池构件设计时,应考虑水平和竖直方向动水效应的影响。

**D.2.4** 水池构件设计时,应考虑混凝土内部的热梯度以及时变效应,可进行适当的线性简化。

**D.2.5** 当计算液体的晃动高度小于水池液面上方的净空时,可不必进行液体撞击水池顶盖的评估。

## 附录 E 混凝土后锚固

### E.1 一般规定

**E.1.1** 本附录适用于混凝土结构后锚固件的设计、施工及验收。

**E.1.2** 混凝土基材强度等级不应低于 C30,且不宜高于 C60。

**E.1.3** 后锚固件宜选用扩底型锚栓。

**E.1.4** 扩底型锚栓的材质可为碳素钢、不锈钢、合金钢或高抗腐不锈钢,且应为延性锚栓。锚固板的材质应与锚栓相匹配。在地震作用下锚固承载力降低系数应根据锚栓产品的认证报告确定,无认证报告时,混凝土结构中的锚栓性能应符合国家现行相关标准的规定。

### E.2 后锚固设计

**E.2.1** 锚栓内力宜按下列基本假定计算:

1 被连接件与基材结合面受力变形后仍保持为平面,锚板平面外刚度较大,其弯曲变形忽略不计;

2 锚栓本身不传递压力,锚固连接的压力通过被连接件的锚板直接传给混凝土基材;

3 群锚锚栓内力按弹性理论计算。

**E.2.2** 锚栓内力也可采用有限元分析方法计算获得。

**E.2.3** 后锚固锚栓设计时,不应由锚栓拔出破坏控制,应由钢材破坏控制。

**E.2.4** 后锚固连接设计应根据弹性分析得到的荷载效应进行设计。若考虑锚栓和混凝土之间的变形协调,当锚固破坏为锚栓钢材破坏,且为低强钢材时,可使用弹塑性分析得到的荷载效应进行设计。

**E. 2.5** 后锚固连接所选用的锚栓应有国家授权的检测机构出具的系统的锚栓承载力检测或认证报告,报告中应明确该锚栓是否适用于开裂混凝土或者抗震区,以及长期拉拔力作用下锚固力衰减(含基材裂缝影响)的性能指标,并提供在裂缝混凝土或抗震类区域的拔出破坏承载力。

**E. 2.6** 后锚固应按开裂混凝土考虑,确保所使用的机械锚栓能够在开裂混凝土中使用。

**E. 2.7** 后锚固连接可按现行行业标准《核电厂核安全相关混凝土结构后锚固技术规程》NB/T 20414 进行计算。

**E. 2.8** 后锚固连接应满足下列构造措施:

1 锚栓的有效埋置深度与混凝土基材厚度的关系根据锚栓产品的认证报告确定,当无认证报告时,锚栓的有效埋置深度不大于 0.5 倍的混凝土基材厚度,且混凝土基材厚度不小于 150mm;

2 群锚锚栓最小间距及最小边距根据锚栓产品的认证报告确定,当无认证报告时,最小间距和最小边距均为锚栓外径的 6 倍;

3 锚栓最小边距不应小于最大骨料粒径的 2 倍。

**E. 2.9** 后锚固连接设计所采用的设计使用年限不应小于整个被连接结构的设计使用年限。

### **E. 3 后锚固安装施工**

**E. 3.1** 后锚固施工钻孔前,首先清理基材表面,要求基材表面应坚实、平整,不应有蜂窝、麻面等局部缺陷,如有缺陷,应进行修整,再根据设计要求进行初步放样和画线定位,钻孔前应用钢筋探测器找出钻孔区域及深度范围内的单层钢筋位置。

**E. 3.2** 后锚固施工不应切断混凝土内部钢筋,如无法避开钢筋,切断钢筋前应取得设计方同意,并详实记录切断钢筋位置、直径等信息。

**E. 3.3** 锚栓安装前,应清理孔内粉尘。锚孔清孔完成后,若未立

即安装锚栓或植筋,应暂时封闭其孔口。临近锚固区的废弃锚孔应采用比原设计强度高一等级的高强度无收缩砂浆填充密实。

**E.3.4** 钻孔质量及直径允许偏差应符合国家现行相关标准的规定。

**E.3.5** 锚栓应有明显的安装就位标识,以保证正确安装。

**E.3.6** 锚栓的安装工艺及工具应满足产品使用说明书的要求,操作人员应经过专门的技能培训和安全技术交底。

**E.3.7** 锚板制作安装时,宜依据实际锚栓位置钻孔,且满足锚栓厂家或国家现行相关标准的要求。

**E.3.8** 锚栓使用扭矩扳手并按国家现行相关标准要求的扭紧力矩扭紧。

## **E.4 后锚固验收**

**E.4.1** 所有后锚固均应包含下列文件资料:

- 1 设计图纸及相关文件;
- 2 锚栓或钢筋的质量证明书、出厂合格证、产品说明书及检测报告或认证报告等;
- 3 后锚固施工记录以及相关检查结果文件;
- 4 进场复验报告等。

**E.4.2** 后锚固产品进场后,应按下列规定进行进场检验:

### **1 锚栓外观检查:**

从每批产品中抽取 5% 且不应少于 10 套样品,检查外形尺寸、表面裂纹、锈蚀或其他局部缺陷。外形尺寸符合产品质保书所示的尺寸范围,且表面不应有裂纹、锈蚀或其他局部缺陷。当有下列情况之一时,本批产品逐套检查,合格者方可进入后续检验:

- 1) 当有 1 件不符合要求时,另取双倍数量的样品重做检查,仍有 1 件不合格;
  - 2) 当有 1 件表面有裂纹、锈蚀或其他局部缺陷。
- 2 选用锚栓的实际各项承载力应根据现场同条件(含组合受

力工况)试验确定,试验方法须满足国家现行相关规范要求,试验结果须满足设计要求。

**E.4.3 施工验收应包括下列内容:**

**1** 后锚固产品应按设计或产品安装说明书的要求,检查其钻孔直径、钻孔深度、锚固深度、安装扭矩、位置等相关数值,允许偏差应满足设计要求;

**2** 自切底锚栓扩底时,应根据相关要求进行可视检查,确保扩底满足要求;

**3** 由有相关资质单位提供的选用锚栓的现场同条件承载力试验报告。

## 本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。



## 引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107
- 《地下工程防水技术规范》GB 50108
- 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119
- 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 《混凝土质量控制标准》GB 50164
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《核电厂抗震设计规范》GB 50267
- 《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476
- 《大体积混凝土施工标准》GB 50496
- 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
- 《钢筋混凝土用钢》GB/T 1499
- 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596
- 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224
- 《混凝土外加剂》GB 8076
- 《结构用无缝钢管》GB/T 8162
- 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 《建设用砂》GB/T 14684
- 《建设用卵石、碎石》GB/T 14685
- 《混凝土模板用胶合板》GB/T 17656
- 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046

《混凝土制品用脱模剂》JC/T 949  
《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163  
《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225  
《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》JG/T 430  
《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18  
《混凝土用水标准》JGJ 63  
《建筑工程大模板技术标准》JGJ/T 74  
《钢框胶合板模板技术规程》JGJ 96  
《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104  
《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107  
《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》JGJ 114  
《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162  
《液压爬升模板工程技术标准》JGJ/T 195  
《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256  
《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105  
《压水堆核电厂安全壳预应力技术规程》NB/T 20325  
《核电厂安全相关土建结构抗龙卷风设计规定》NB/T 20360  
《核电厂核安全相关混凝土结构后锚固技术规程》NB/T 20414

中华人民共和国国家标准

核电厂混凝土结构技术标准

**GB/T 51390 - 2019**

条 文 说 明

## 编 制 说 明

《核电厂混凝土结构技术标准》GB/T 51390—2019,经住房和城乡建设部 2019 年 9 月 25 日以第 262 号公告批准发布。

本标准编制过程中,编制组开展了大量调查和专题研究,总结我国核电厂混凝土结构研究、设计、施工、验收及检测工作中的经验,参考有关国内和国际标准,并在广泛征求意见的基础上,完成了本标准的制定。

为了便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,《核电厂混凝土结构技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

# 目 次

1	总 则 .....	(107)
2	术语和符号 .....	(108)
2.1	术语 .....	(108)
2.2	符号 .....	(108)
3	基本设计规定 .....	(109)
3.1	一般规定 .....	(109)
3.2	结构方案 .....	(111)
3.3	极限状态设计 .....	(111)
3.4	耐久性设计 .....	(111)
4	材 料 .....	(114)
4.1	混凝土 .....	(114)
4.2	钢筋 .....	(114)
5	荷载与荷载组合 .....	(116)
5.1	一般规定 .....	(116)
5.2	荷载 .....	(116)
5.3	承载能力极限状态的荷载组合 .....	(118)
5.4	正常使用极限状态的荷载组合 .....	(118)
5.5	结构整体稳定性验算的荷载组合 .....	(118)
6	结构分析 .....	(119)
6.1	基本原则 .....	(119)
6.2	分析模型 .....	(120)
6.3	弹性分析 .....	(120)
6.4	塑性内力重分布分析 .....	(120)
6.5	弹塑性分析 .....	(121)

7	承载力极限状态计算	(122)
7.1	一般规定	(122)
7.2	正截面承载力计算	(122)
7.3	平面内受剪	(122)
7.4	平面外受剪	(123)
7.5	剪摩擦验算	(123)
7.6	其他承载力计算	(124)
8	正常使用极限状态验算	(125)
8.1	裂缝控制验算	(125)
8.2	受弯构件挠度验算	(125)
9	构造规定	(127)
9.1	变形缝	(127)
9.2	混凝土保护层	(128)
9.3	钢筋锚固	(128)
9.4	钢筋连接	(130)
9.5	纵向受力钢筋的最小配筋率	(130)
10	结构构件的基本规定	(131)
10.1	基础	(131)
10.2	板	(131)
10.3	梁	(132)
10.4	柱及牛腿	(133)
10.5	墙	(134)
10.6	叠合受弯构件	(134)
10.7	预埋件与连接件	(134)
11	预应力混凝土安全壳	(135)
11.1	一般规定	(135)
11.2	承载力计算要求	(136)
11.3	正常使用应力要求	(141)
11.4	预应力系统材料	(141)

11.5	预应力系统设计 .....	(143)
12	施 工 .....	(145)
12.1	一般规定 .....	(145)
12.2	模板工程及支撑体系 .....	(145)
12.3	钢筋工程 .....	(146)
12.4	预应力工程 .....	(148)
12.5	混凝土工程 .....	(149)
13	验 收 .....	(150)
13.1	一般规定 .....	(150)
13.2	模板工程 .....	(150)
13.3	钢筋工程 .....	(152)
13.4	预应力工程 .....	(153)
13.5	混凝土工程 .....	(155)
附录 A	超设计基准范畴 .....	(158)
附录 B	安全壳结构完整性检测 .....	(159)
附录 C	抗大型商用飞机撞击结构设计 .....	(160)
附录 D	水池 .....	(166)
附录 E	混凝土后锚固 .....	(168)

# 1 总 则

**1.0.1** 在贯彻执行国家的技术、经济政策的同时,结合核电工程特点,明确核电厂混凝土结构工程必须遵守核安全法规的要求,在突出安全第一、保证质量的同时,提出经济合理的要求,贴合核电工程特点。

**1.0.2** 本条明确本标准的适用范围。预应力混凝土结构主要指带钢内衬的预应力混凝土安全壳。核电厂建筑工程中涉及的素混凝土结构、轻骨料混凝土结构、特种混凝土结构、钢板混凝土结构或非核安全相关混凝土结构等,不在本标准范围之内,可参照国家现行相关标准执行,如特种混凝土结构采用重晶石防辐射混凝土时,可参照现行国家标准《重晶石防辐射混凝土应用技术规范》GB/T 50557 的规定执行。

**1.0.3** 本条明确依据“现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的原则制定”;通过可靠度专题研究,对中国和美国核相关混凝土规范的设计方法,采用综合安全系数和可靠度方法对两国标准的安全度水平进行了对比分析,并提出了中国标准正常运行工况的目标可靠指标。

建议我国核安全相关混凝土结构正常运行工况下设计的目标可靠指标为 4.7。

**1.0.4** 本标准与相关的标准、规范进行了合理的分工和衔接,执行时尚应符合相关标准、规范的规定。



## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

本标准列出了核电厂结构工程特有的术语,现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑抗震设计规范》GB 50011 等标准中已明确的术语不再重复定义。

**2.1.10** 根据现行核安全法规《核动力厂设计安全规定》HAF 102 的要求及现行国家标准《压水堆核电厂物项分级》GB/T 17569 的规定,明确核安全相关混凝土结构的定义。

**2.1.11** 通过“压力试验”证明安全壳建造质量,检验安全壳的结构性能。

### 2.2 符 号

本标准列出了常用的符号,一些不常用的符号在条文相应处已有说明,在此不再列出。

## 3 基本设计规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 安全性是指结构能够承受各设计工况的最不利荷载组合作用的影响,满足设计规定的承载能力要求;适用性是指结构保持与不同的设计工况相适应的功能和性能要求;耐久性是指保证在正常维护条件下结构能够正常使用到规定设计年限的要求;可建造性是指针对核安全相关混凝土结构的构造特征,在设计阶段应考虑制造、建造、装配和安装等要求。

**3.1.2** 本标准依据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的原则制定,采用概率极限状态设计方法,以分项系数的形式表达,包括荷载分项系数、材料性能分项系数(通常以材料的强度设计值表达)等。

**3.1.3** 在设计基准范畴下,结构设计应确保整体结构的完整性与稳定性,以满足现行核安全法规《核动力厂设计安全规定》HAF 102 要求的基本安全功能,现行 HAF 102 明确要求,必须保证在核动力厂所有状况下实现下列基本安全功能:

- (1)控制反应性;
- (2)排出堆芯热量,导出乏燃料贮存设施所贮存燃料的热量;
- (3)包容放射性物质、屏蔽辐射、放射性的计划排放,以及限制事故的放射性释放。

根据现行 HAF 102 的要求,设计必须考虑超设计基准范畴,超设计基准范畴下应考虑提供适当的裕量,保护用于防止早期放射性释放或大量放射性释放所需的物项,提高核电厂应对设计扩展工况和超设计基准外部事件的能力,提高核电厂的安全性。

**3.1.4** 厂区地基条件包括水文、地质、地基稳定性、液化等。

**3.1.5** 核安全相关结构涉及抗震Ⅰ类建构筑物(或物项)和抗震Ⅱ类建构筑物(或物项),其中,抗震Ⅰ类建构筑物是指核电厂中与核安全有关的建构筑物,包括损坏后会直接或间接造成事故的构筑物,保证反应堆停堆并维持停堆状态及排出余热所需的构筑物,地震时和地震后为减轻核事故破坏后果所需的建构筑物以及损坏或丧失功能后会危及上述建构筑物的其他建构筑物;抗震Ⅱ类建构筑物是指核电厂中除抗震Ⅰ类建构筑物外与核安全有关的构筑物,以及损坏或丧失功能后会危及抗震Ⅰ类建构筑物的与核安全无关的构筑物。

抗震Ⅰ、Ⅱ类物项应基于设计基准地震动(核电厂抗震Ⅰ、Ⅱ类物项抗震设计中作为输入采用的地震动,包括极限安全地震动和运行安全地震动两个水准)进行抗震验算,并满足下列要求:

(1)抗震Ⅰ类物项应满足核电厂在极限安全地震动和运行安全地震动作用下的结构完整性和设计功能要求;

(2)抗震Ⅱ类物项应满足在极限安全地震动作用下的结构完整性,当运行安全地震动超过极限安全地震动的 $1/3$ 时,尚应满足运行安全地震动作用下的功能性要求。

**3.1.6** 本条是参考《美国核安全相关混凝土结构规范》ACI 349的要求制定,所规定的温度限值是指表面温度。本条第1款、第2款的规定较为保守,超过本条第1款、第2款规定的限值时,若通过试验等证明高温引起的混凝土强度降低在设计允许的范围内,则认为该温度可接受。

当超过本条第1款、第2款规定的限值且高温作用引起混凝土强度降低,混凝土强度可参考现行广东省标准《建筑混凝土结构耐久性设计技术规程》等标准取值。

**3.1.7** 在综合考虑各种堆型设计使用年限不同的现实情况下,强调设计使用年限的最低值。同时要考虑核电建造、使用及退役期的影响。

## 3.2 结构方案

**3.2.1** 本条明确刚度中心宜接近质量中心,以减小扭转效应;竖向承重构件宜上下对齐,避免局部突出或收进;考虑非核安全相关结构对核安全相关混凝土结构的不利影响,满足核安全法规要求。

**3.2.2** 变形缝可分为伸缩缝、沉降缝、防震缝三种。变形缝装置及构造应满足结构的使用要求,可参照现行行业标准《建筑变形缝装置》JG/T 372 及《变形缝建筑构造》14J936 执行。确定变形缝宽度时宜考虑两侧构件施工误差。

在满足核电工程厂房使用功能要求的前提下,根据实际情况,宜减少设缝或合并设缝,加强整体刚度,保证结构的整体性。结构变形缝的构造(间距与缝宽)应符合国家现行相关标准的规定。

## 3.3 极限状态设计

**3.3.1** 本标准在编制过程中,结合核电工程特殊性,以及国外相关核电标准和国内核电行业标准进行的设计实践,通过开展可靠度专题研究,提出了目标可靠指标。

**3.3.2** 考虑到结构整体稳定性或抗浮验算的需要,参考现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的规定,引入安全系数  $k$ 。

**3.3.3** “结构构件达到正常使用要求所规定的限值”主要指挠度和裂缝宽度等的限值,需做振动计算的结构构件在设计时,尚应符合专门标准的有关规定。

## 3.4 耐久性设计

**3.4.1** 混凝土结构的耐久性设计是一个系统工程,贯穿于材料、设计、施工、使用中的维护等各个环节和从建造到退役的整个过程。混凝土结构耐久性措施包括基本措施和附加措施。基本措施是对混凝土强度等级、最大水胶比、最小混凝土保护层厚度、混凝

土中最大氯离子含量、最大碱含量及矿物掺合料的使用等方面的要求,这些措施简单易行,成本低,效果可靠;附加措施是在采用基本措施仍不能满足混凝土结构耐久性要求或作为耐久性保障而另外采取的措施,如采用阴极保护、混凝土表面涂层、环氧树脂涂层钢筋、钢筋阻锈剂等,这些措施成本往往比较高,但有时是必要的,如处于海水浪溅区或水位变动区的混凝土结构。

**3.4.2 混凝土耐久性**是环境及环境中各种介质对混凝土的物理和化学作用,不同环境中混凝土耐久性劣化的机理是不同的,所以应根据结构所处环境及环境的作用等级对混凝土结构采用不同的耐久性措施。本标准参考了现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 中环境类别和作用等级的划分,但根据核安全相关混凝土结构所处环境的特点进行了修改,对有些类别进行了适当的归并:

(1)取消除冰盐等其他氯化物环境。

(2)考虑核电厂厂址盐渍土环境。盐渍土是易溶盐(氯盐、碳酸钠、碳酸氢钠、硫酸钠、硫酸镁等)含量大于或等于 0.3%,具有溶陷、盐胀或腐蚀等特性的土,广泛分布于我国青海、新疆、西藏等内陆地区,沿海各省也有滨海盐渍土,内地还有冲积平原盐渍土。现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》GB/T 50942 中盐渍土按含盐的化学成分分类,分为 5 类,详见表 1。

表 1 盐渍土按含盐的化学成分分类

盐渍土名称	$\frac{c(\text{Cl}^-)}{2c(\text{SO}_4^{2-})}$	$\frac{2c(\text{CO}_3^{2-}) + c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}$
氯盐渍土	$>2.0$	—
亚氯盐渍土	$>1.0, \leq 2.0$	—
亚硫酸盐渍土	$>0.3, \leq 1.0$	—
硫酸盐渍土	$\leq 0.3$	—
碱性盐渍土	—	$>0.3$

注:表中  $c(\text{Cl}^-)$  表示氯离子在 100g 土中所含毫摩尔数 (mmol/100g), 其他离子相同。

(3)将盐渍土环境中的氯盐渍土和亚氯盐渍土与海洋氯化物环境合并为氯化物环境。

(4)硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土可归为化学腐蚀环境中的硫酸盐环境。

(5)根据盐渍土氯盐和硫酸盐的含量,将其归类为氯化物环境和硫酸盐环境,并按两种环境采取相应的耐久性措施。氯盐和硫酸盐同时存在的盐渍土具有更强的危害性,可通过试验确定。需要说明的是,氯盐侵蚀和硫酸盐侵蚀都属于化学腐蚀,对于盐渍土,除具有这两种化学腐蚀外,还存在物理性的盐结晶破坏,耐久性设计时要充分考虑。

(6)碱性盐渍土中的钾、钠离子浓度应进行检测,防止因其向混凝土中渗透引起局部混凝土含碱量过高。

**3.4.3** 核安全相关混凝土结构除使用功能与普通混凝土结构不同外,材料、建造方法等与普通混凝土结构没有明显的不同,耐久性措施与普通混凝土结构基本是相同的。所以,核安全相关混凝土结构的耐久性措施采用了现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定,具体应用中按表 3.4.2 确定环境类别和环境作用等级,按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 中相同的环境类别和环境作用等级采取耐久性措施。

## 4 材 料

### 4.1 混 凝 土

**4.1.1** 设计取值包括混凝土轴心抗压强度、轴心抗拉强度的标准值和设计值,混凝土受压和受拉的弹性模量,混凝土的热工参数等。

**4.1.2** 本条结合国内外核电工程情况,给出了混凝土强度等级最低要求,使混凝土与钢筋的应用相匹配。

### 4.2 钢 筋

**4.2.1** 考虑到核电厂的特殊要求,对钢筋的延性、可焊性、机械连接性能及施工适应性要求较高,所以本标准推荐选用 HRB 钢筋;考虑到施工便利性,也可采用 HPB300 钢筋。

**4.2.2** 考虑到核电厂地震安全的特殊重要性,推荐使用牌号带有“E”的具有良好延性和变形能力的钢筋。

**4.2.3** 设计取值包括普通钢筋和预应力筋强度标准值、普通钢筋和预应力筋强度设计值、普通钢筋和预应力筋在最大力下的总伸长率限值、普通钢筋和预应力筋的弹性模量等。

**4.2.4** 安全壳推荐使用松弛率低且强度高的钢绞线,其余核安全相关结构需要通过施加预应力来局部加强的部位可采用预应力螺纹钢筋。

**4.2.5** 为解决粗钢筋及配筋密集引起的设计、施工困难,直径 28mm 及以下的钢筋并筋数量不应超过 3 根,直径 32mm 的钢筋并筋数量宜为 2 根,直径 36mm 及以上的钢筋不应采用并筋。

在钢筋混凝土设计、施工中,如果采用不同牌号、不同规格的

钢筋替代时,应使用等强代换的原则,同时注意由于钢筋强度和直径改变后会影晌正常使用阶段的挠度和裂缝开展宽度,因此还要满足最小配筋率和钢筋间距等的构造要求。



## 5 荷载与荷载组合

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 为了突出核安全相关混凝土结构荷载的特点,参考现行能标及 ACI 相关标准的荷载分类要求,将荷载分为正常荷载、异常荷载、严重环境荷载、极端环境荷载、内部飞射物和外部人为事件引起的荷载,并对每类包含的荷载予以明确。

**5.1.2** 与厂址条件和工艺要求无关的永久荷载及可变荷载一般按现行国家相关标准取标准值,其他荷载根据厂址条件、工艺要求或国家相关标准要求确定其荷载取值。

### 5.2 荷载

**5.2.1** 结构成型时混凝土收缩拉应力会对混凝土结构的开裂产生不利影响,混凝土最终收缩试验值可根据混凝土所用材料和设计配合比,通过混凝土试块试验确定,混凝土的徐变值应根据可靠试验值确定。当缺乏试验资料或无可靠试验资料时,可采用现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105 计算。

**5.2.2** 正常运行工况下楼面活荷载不宜小于  $5\text{kN/m}^2$ ,施工期间的活荷载最低限值为  $4\text{kN/m}^2$ ,不包含上层楼板重量。

**5.2.3** 根据现行国家标准《核电厂工程气象技术规范》GB/T 50674,明确雪压采用 100 年重现期。

参考现行美国标准《建筑和其他结构最小设计荷载》ASCE 7,提出考虑屋面积雪的不均匀性对结构设计的不利影响。屋面积雪的不均匀性可通过屋面积雪不均匀系数考虑,也可参考美国标准的相关规定。

**5.2.4** 对于室外温度,参考现行法国标准 RCC-CW,低温按连续

7d 的平均最低温度取值。核电厂室外温度通常根据厂址气象资料确定,对所述无充分依据时的结构建造温度作用取值,已考虑塑性折减。

**5.2.6** 该荷载属于局部效应,整体计算中可以不考虑。

**5.2.9** 试验时的温度作用除考虑试验期间的环境温度外,还需考虑低温时可能采用加热气体充气对壳体温度的影响。

**5.2.11** 设计基准地震作用按现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB 50267 取值, $E_2$ 通常为预估的核电厂所在地区可能遭遇的最大潜在地震动(对应的年超越概率为  $10^{-4}$ )产生的地震作用。设计基准地震作用包括地震动引起的结构、管道和设备的地震作用,土的地震作用,水池中水的地震作用等内容。

**5.2.12** 核电厂采用厂址条件风速,考虑到使用的方便及设计习惯,沿用了传统的基本风压计算公式。同时根据现行国家标准《核电厂工程气象技术规范》GB/T 50674,并参考现行美国标准《美国核安全相关混凝土结构规范》ACI 349,明确风压采用 100 年重现期。

参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009,考虑核电厂混凝土结构高度低、刚度大,且按阵风风速计算基本风压,风振系数一般可取 1;对于风压高度变化系数  $\mu_z$ ,由于核电厂采用厂址实测风速,已经反映了地面不规则障碍物的分布状况,所以可按地面粗糙度 B 类取值。

**5.2.13** 根据现行 HAD 101/10 的规定,龙卷风按照富士达 F 等级进行分类。龙卷风产生的风压效应与基本风荷载的作用模式类似,但不考虑风荷载随结构高度的变化,压差荷载是由龙卷风引起的旋转运动造成的大气压降在密闭的结构中产生的向外的压差荷载。

**5.2.16** 外部飞射物主要是指小型飞机、除龙卷风飞射物外的其他外部飞射物,如汽轮机部件等。超设计基准范畴下大飞机引起的飞射物荷载的计算评估见附录 C。

**5.2.18** 施加预应力产生的荷载包括建造和运行期间的预应力

作用。

### 5.3 承载能力极限状态的荷载组合

**5.3.7** 其他核安全相关结构是指不含安全壳的结构,该荷载组合不仅适用于核安全相关混凝土上部结构,还包括其筏形基础。

### 5.4 正常使用极限状态的荷载组合

**5.4.2** 本条针对正常使用极限状态验算的变形主要是指挠度。在结构变形计算时考虑不大于裂缝宽度限值的影响。

**5.4.3** 本条参考 ACI 349、ACI 359 的荷载组合编制而成,考虑了  $T_c$  的影响。混凝土在凝结硬化过程中的收缩作用可作为永久荷载效应考虑。

### 5.5 结构整体稳定性验算的荷载组合

**5.5.2** 本条参考了现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T 20012 中的相应要求,适用于包括安全壳在内的核安全相关混凝土结构的整体稳定性验算。对于式(5.5.2-1)、式(5.5.2-2)荷载组合的效应设计值,将原来的抗滑和抗倾覆系数 1.5 修改为安全系数  $k$  取 1.5;对于式(5.5.2-3)、式(5.5.2-4)荷载组合的效应设计值,将原来的抗滑和抗倾覆系数 1.1 修改为安全系数  $k$  取 1.1,其中  $D$  为起不利作用的永久荷载标准值的效应。抗浮验算时仅考虑浮力荷载标准值,将原来的抗浮安全系数 1.1 修改为安全系数  $k$  取 1.1。

## 6 结构分析

### 6.1 基本原则

**6.1.1** 在所有情况下,均需对结构进行整体分析。结构设计控制部位、基于整体模型难以准确分析部位主要指关键设备结构支撑部位、较大洞口周围、关键节点附近、安全壳扶壁柱等结构中特殊受力部位。

**6.1.2** 所有结构构件的内力往往不会在同一阶段、同一工况达到最不利结果,因此需要在结构分析时,对各阶段、各不利工况的组合内力计算结果取较大值,以确保结构各项承载力安全度满足最不利工况设计要求。

**6.1.3** 结构分析必须满足两个条件:计算假定和计算简图。整体结构分析中,宜以质量比、刚度比为控制条件划分主体与从属部件,以主体结构为分析对象,进行必要的简化是不可避免的。因此,计算的假定和简图应基于理论分析、试验测量或工程经验实践验证为依据,计算结果的精度应满足工程设计要求。计算假定和简图应有相应的构造措施作为保证,且应满足精度要求。

**6.1.4** 结构分析的基本条件为力的平衡、变形协调以及本构关系。力的平衡要完全满足,变形协调尽量满足,本构关系应根据结构的受力特点,同时兼顾计算精度及计算工具要求进行确定。

**6.1.5** 本条参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 编制。弹性分析方法是最基本和最成熟的结构分析方法,核安全相关混凝土结构的设计均基于此方法;对于其他特殊部位或构件、特殊工况,可按第 6.4 节、第 6.5 节的塑性内力重分布方法、弹塑性分析方法分析计算。

## 6.2 分析模型

**6.2.2** 本条明确了整体分析时模型计算简图要求和构件设计时计算长度的确定原则。

**6.2.3** 考虑地基与上部结构影响的具体要求详见现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB 50267。

## 6.3 弹性分析

**6.3.1** 本条明确了弹性分析的适用范围。

**6.3.2** 对于构件的截面刚度,在无可靠资料的情况下,对于受混凝土徐变影响较大的工况(如混凝土收缩、温度作用)下弹性模量折减系数可按 0.5~0.8 考虑,分别考虑长期效应和短期效应的影响,考虑长期效应时可以取较小值,考虑短期效应时取大值。

考虑混凝土开裂的影响,按线弹性方法计算的温度作用应力效应可适当折减,折减系数的大小与不同工况下混凝土开裂的程度相关。参考现行法国标准 ETC-C 对欧洲标准 EN 1992-1-1: 2004 5.4(1)~(3)补充规定,安全壳在设计基准事故范畴下折减系数取为 0.5;除安全壳外的 C35~C80 钢筋混凝土结构,在正常运行或停堆期间折减系数取为 0.6,在设计基准事故范畴下折减系数取为 0.35。

**6.3.3** 核安全相关混凝土结构墙体长度长、厚度大、平面外的刚度不能忽略、平面内刚度大,且按大震弹性设计,重力荷载在水平作用位移效应上引起的二阶效应(即  $P-\Delta$  效应)的影响相对较小,通常不用考虑,当二阶效应显著增大作用效应时,可按国家现行标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 的相关要求执行。

## 6.4 塑性内力重分布分析

**6.4.4** 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 一级抗震等级的框架梁梁端混凝土受压区高度要求,当核安全相关混

凝土结构采用所谓的“框架梁”时,梁端负弯矩调幅幅度不应大于 0.25。

## **6.5 弹塑性分析**

**6.5.3** 杆系一维单元可采用纤维束模型。墙、板、壳等构件宜采用分层的板单元或壳单元。

## 7 承载能力极限状态计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 本章主要针对钢筋混凝土结构承载能力极限状态做出规定,预应力安全壳承载能力极限状态的计算要求见第 11 章。目前核电厂核岛厂房结构设计中,除预应力混凝土安全壳外,尚未采用其他预应力混凝土结构构件,若采用预应力混凝土结构构件,其承载能力极限状态的计算可参考本章的规定。

### 7.2 正截面承载力计算

**7.2.2** 本标准的荷载及荷载效应组合与美国标准 ACI 349-06 附录 C 的规定相同,为保证本标准中承载能力极限状态设计的可靠度指标与现行美国标准 ACI 349 基本相当,则按本标准计算所得的抗力设计值也应与现行美国标准 ACI 349 匹配。对于配置普通箍筋的轴心受压构件抗力设计值,对比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 与现行美国标准 ACI 349,可知现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的抗力设计值较大,因此将现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的抗力折减系数 0.9 改为 0.8,折减抗力以提高其安全度。

### 7.3 平面内受剪

**7.3.2** 本条参考了现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T 20012 的规定,最初源于蔡绍怀先生根据 Gvozdev 极限平衡法和钢筋配筋量最小的原则推导出的板壳在中面力系作用下的极限设计公式。多年来,我国核安全相关混凝土墙、板、壳等构件设计中一直采用该方法,其公式简便适用,并

有足够的安全度。

## 7.4 平面外受剪

**7.4.1** 为防止构件发生斜压破坏,现行美国标准限制最大配箍量,而现行国标则限制剪压比。现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 对于矩形、T 形和 I 形截面的受弯构件剪压比限制如下:当  $h_w/b < 4$  时,  $V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0$ ; 当  $h_w/b \geq 6$  时,  $V \leq 0.2\beta_c f_c b h_0$ 。现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定中梁的剪压比限值较为严格,墙、板对于梁来说要“宽阔”许多,且墙、板构件通常按受力最大的单元进行设计,相对于梁、柱这种孤立的构件其安全度更高,因此,本标准墙、板类构件的剪压比取 0.25,比梁、柱的 0.2 要松。从现行美国标准最大配箍量推算得到的剪压比约为 0.22~0.23,因此本标准对于剪压比的限制要求具备足够的安全度。

**7.4.3** 本标准采用现行国标的材料强度指标及类似的计算表达式,通过合理的折减抗力得到的安全度与美国标准相当。

## 7.5 剪摩擦验算

**7.5.2** 本条所列剪摩擦验算公式,综合了现行国标、美国标准和欧标的相关计算方法,采用现行国标的材料强度指标及承载能力极限状态表达式制定而成。剪摩擦的抗力项考虑了施工缝界面的粘结力、剪摩擦配筋的抗剪作用以及施工缝界面上法向力的影响。

当施工缝界面上的法向力为拉力时,由于拉力所需配筋已计算并考虑,因此  $N_k$  取 0,由于法向拉力会大大削弱界面的粘结力,因此取  $c_c$  为 0。当施工缝界面上的法向力为压力时,法向压力可以与剪摩擦钢筋一同抵抗沿滑移面的剪力,参与抗剪作用的压力  $N_k$  定义为永久净压力标准值,限定其不超过  $0.6f_c A_c$ ,并对  $N_k$  乘以 0.9 的折减系数,以保证安全度。

剪摩擦配筋在施工缝两侧应满足受拉钢筋的锚固要求。



## 7.6 其他承载力计算

**7.6.1** 通过中美现行标准对比可知,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算得出的受扭构件抗力值约比现行美国标准 ACI 349 大 8.7%,两者相差不大,可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行扭曲截面承载力计算。

通过中美标准对比可知,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算得出的局部受压构件抗力值低于现行美国标准 ACI 349,因此可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行构件局部受压承载力计算。

**7.6.2** 通过中美现行标准的对比分析,现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中关于局部荷载或集中反力作用下不配箍筋或弯起钢筋的板受冲切承载力计算严于现行美国标准 ACI 349,而现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中配置箍筋或弯起钢筋时的受冲切承载力与现行美国标准 ACI 349 相当。因此,墙、板、壳受冲切承载力计算可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行。

**7.6.3** 目前核电厂中需进行疲劳验算的钢筋混凝土结构构件很少,也缺少相关的试验数据,因此沿用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的规定。

## 8 正常使用极限状态验算

### 8.1 裂缝控制验算

**8.1.1** 结构控制部位最大裂缝宽度验算宜考虑非荷载效应,其中非荷载效应包括收缩作用、温度作用等。应通过混凝土原材料的精心选择、合理的配合比设计、良好的施工养护和适当的构造措施等来控制非荷载因素引起的裂缝。

对要求设计成不透水的结构,需要采取特殊的保护措施,如采用不锈钢内衬等进行设计。

**8.1.2** 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行受力最大裂缝宽度计算时,计算采用的荷载组合按本标准第 5.4.3 条执行。

非荷载裂缝宽度的计算设计可参照 RCC-CW、EN 1992 等标准计算,基于变形协调原理,通过将温度等效为相应应变,作为荷载求出温度作用钢筋面积,并满足最小配筋率要求,或者通过温度作用下求出最大裂缝间距和钢筋与混凝土的应变差,计算出对应非重力荷载作用的裂缝宽度。

### 8.2 受弯构件挠度验算

**8.2.1** 受弯构件最小厚度要求采用现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T 20012 的相关规定。受弯构件的挠度与作用荷载及控制截面裂缝宽度有关,当作用荷载及控制截面裂缝宽度超过常用设计要求时,需对裂缝及挠度进行验算,必要时提高构件厚度;为确保非结构系统的功能,当受弯构件的挠度限值比本标准表 8.2.2 中的规定更严格时,本条规定的最小厚度将不适用,构件的设计应满足计算挠度在规定的范

围内。

**8.2.2** 受弯构件的挠度计算方法及挠度限值采用现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T 20012 的相关规定,即短期刚度  $B_s$ 。按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算,挠度限值参考美国标准 ACI 349 的相关规定,而一般构件长期刚度  $B$  的取值,对比了国内外现行相关标准,如现行行业标准《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362、美国标准 ACI 349 等,偏于保守取  $B = 0.625B_s$ ,对于翼缘在受拉区的 T 形截面构件,参考现行行业标准《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057,取  $B = 0.5B_s$ 。

## 9 构造规定

### 9.1 变形缝

**9.1.1** 建筑构件因温度和湿度等因素的变化会产生胀缩变形。为克服过大的温度差而设置的缝,基础可不断开,从基础顶面至屋顶沿结构断开。为此,通常在建筑物适当的部位设置垂直缝隙,自基础以上将房屋的墙体、楼板、屋面板等构件断开,将建筑物分离成几个独立的部分。

**9.1.2** 沉降缝指同一建筑物高低相差悬殊,上部荷载分布不均匀,或建在不同地基土壤上时,为避免不均匀沉降使墙体或其他结构部位开裂而设置的建筑构造缝,如结构建造在压缩性不同的地基上;结构的相邻部分高度相差两层以上或部分高度相差超过10m;结构相邻基础的结构体系、宽度和埋置深度相差悬殊;原有结构和新建结构紧相毗连。沉降缝把建筑物划分成几个独立单元,自成系统,从基础、墙体、楼板到房顶各不连接,将构筑物从基础至顶部完全分隔成段,以避免各段不均匀下沉而产生裂缝。通常设置在建筑高低、荷载或地基承载力差别很大的各部分之间,以及新旧建筑的连接处。缝内一般不填塞材料,当必须填塞时,应防止缝内两侧因房屋内倾而相互挤压影响沉降效果。

沉降缝与伸缩缝最大的区别在于沉降缝不但将墙、楼层及屋顶部分脱开,而且其基础部分亦必须分离。沉降缝构造与伸缩缝基本相同,但盖缝条及调节片构造必须注意能保证在水平方向和垂直方向自由变形。

**9.1.3** 防震缝是为使建筑物较规则,以期有利于结构抗震而设置的缝,基础可不断开,一般只考虑水平方向地震作用的影响,但与震动有关的建筑各相连部分的刚度差别很大时,也须将基础分开。防

震缝的设置目的是将大型建筑物分隔为较小的部分,形成相对独立的防震单元,避免因地震造成建筑物整体震动不协调产生破坏。

## 9.2 混凝土保护层

**9.2.1** 普通钢筋与预应力筋的保护层厚度(最外层钢筋外边缘至混凝土表面的距离)的规定是为了满足结构构件的耐久性要求和对受力钢筋有效锚固的要求。

**9.2.2** 核电厂埋设件众多,包括预埋件和用于连接附属结构的预埋金属部件。本条要求的目的是避免出现埋设钢板厚度超出保护层厚度而需截断主筋的情况。

**9.2.3** 在保护层内配置防裂、防剥落钢筋网片时,可参考国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》JGJ 114 的要求。

## 9.3 钢筋锚固

**9.3.1** 本条考虑到核电厂抗震设计的特殊重要性,借鉴了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中对抗震等级一级的相关构造要求。

对比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 与现行美国标准 ACI 349,一般情况下,对构件底部筋的情形,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的锚固长度要求仅为按美国标准 ACI 349 计算要求的 70% 左右,如为顶部筋的情形,则大致为 50% 左右(我国规范不计及顶部筋的不利影响)。因此在今后的核安全有关混凝土结构设计中,不宜直接采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 给出的锚固长度。本节的规定考虑了现行中国标准与美国标准锚固长度的差距,并考虑核安全相关混凝土结构中,构件的主筋直径一般大于 25mm,且一般采用三级及以上钢筋,因此当 HRB400 级及以上钢筋的直径大于 25mm 时,对按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010

计算出的锚固长度进行适当增大,乘以修正系数 1.1~1.4。

考虑核电厂设计的实际情况及选用的方便,在本标准中不建议再区分为基本抗震锚固长度和抗震锚固长度。现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中基本抗震锚固长度的定义为基本锚固长度乘以抗震修正系数,本标准中均按一级抗震等级考虑,抗震修正系数为 1.15。抗震锚固长度则考虑涂层、施工扰动、保护层等的修正。在不考虑涂层、施工等因素的情况下,基本抗震锚固长度和抗震锚固长度唯一的区别在于带肋钢筋直径大于 25mm 时有个 1.1 的修正系数,锚固长度差异  $3d \sim 4d$ ,在墙板的节点区,主筋弯折时,弯前平直段为 0.4 倍~0.6 倍的锚固长度,因此按基本抗震锚固长度与抗震锚固长度分别计算的弯前平直段仅差异  $1.2d \sim 2.4d$ ,对核安全相关混凝土结构的厚墙厚板而言,实际操作差异不大。因此考虑设计使用的方便并避免混淆,本标准统一按目前的抗震锚固长度考虑。

现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中,涂层、施工扰动等修正系数多于 1 项时,可连乘计算。表 9.3.1 注 4、注 5 是考虑现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 与现行美国标准 ACI 349 中锚固长度的差异而提出的修正系数,因此多于 1 项时也需要参与连乘计算。

**9.3.2** 核安全相关混凝土结构中纵向受拉普通钢筋较大且锚固长度较长,钢筋末端采用的锚固形式为弯钩和端锚固板的机械锚固。在构件节点区,受构件尺寸限制,平直段锚固长度无法满足要求,可按现行行业标准《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256 选用锚固板对钢筋进行机械锚固,以缩短平直段锚固长度,锚固板间距较小时应考虑群锚效应的不利影响。

**9.3.3** 钢筋弯折的最小弯弧内直径结合核电实际及依据现行 ACI 318 编制而成,同时符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 等的规定。

主受力钢筋标准弯钩弯前平直段投影长度可依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 及《混凝土结构施工图平面整体

表示方法制图规则和构造详图》16G101 图集按一级抗震等级确定。

## 9.4 钢筋连接

**9.4.3** 对变截面梁、柱、墙等纵筋在变截面处的构造,在《混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》16G101 图集中有较为全面的要求,核安全相关混凝土结构中变截面构件可参考 16G101 图集集中的梁变截面要求处理。

**9.4.4** 第三代核电厂在设计和建造过程中,均提出了抗大型商用飞机撞击的要求,以确保核安全相关混凝土结构的重要部位不受外部撞击事件的影响。抗大型商用飞机撞击区域钢筋用机械接头的生产厂家需要按照设计要求完成接头的瞬态冲击性能试验,并提供型式检验报告。

## 9.5 纵向受力钢筋的最小配筋率

**9.5.1** 本条中最小配筋率要求板、次梁按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 纵向钢筋的最小配筋率的要求执行,考虑到核电厂墙体按照整体计算配筋,因此其配筋也按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 纵向钢筋的最小配筋率的要求执行;梁、柱按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 抗震一级的要求确定,并参考现行美国标准 ACI 349 要求,适当提高中柱、边柱的最小配筋率。

柱包括中柱、边柱、角柱和框支柱,由于核安全相关混凝土结构中无采用严格意义的框架结构,因此这里所称的框支柱借用了民用建筑结构的名称,指形式上相仿的“框支柱”。

考虑到核电厂中作辐射防护等工艺需要的厚墙、厚板,其仅承受构件自重或所承受荷载较小,在板、墙的受拉面需要按计算配筋时,受拉面上的钢筋面积应满足表 9.5.1 的要求,当实际配筋面积超过计算配筋面积的 1.35 倍时,可参考现行美国标准 ACI 349 的要求,对上述最小配筋率适当调整。

## 10 结构构件的基本规定

### 10.1 基 础

**10.1.1** 本条明确基础设计选型目标。结合核电实际情况,通常选用筏形基础,特殊的地基条件或结构形式也可选用其他基础类型。

**10.1.2** 本条依据现行国家标准《粉煤灰混凝土应用技术规范》GB/T 50146、《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 的有关规定并结合 AP1000 核电堆型的实践制定。适当考虑掺矿物掺合料的混凝土的后期强度,有利于减小水泥用量和混凝土收缩影响等。

核电厂一般采用多道防水系统,如防水混凝土、卷材防水和外排水系统来预防外墙裂缝而形成的渗漏。考虑到核电的行业特点,较现行国家标准《地下工程防水技术规范》GB 50108 的混凝土的最小抗渗等级 P6,本标准对防水混凝土的最小抗渗等级予以提高至 P8。

**10.1.3、10.1.4** 这两条是参照现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关厂房地基基础设计规范》NB/T 20308 和《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 制定。

### 10.2 板

**10.2.1** 板的厚度要求须满足正常使用要求。

**10.2.2** 可根据实际情况适当放宽板中受力钢筋的间距要求,但最大不应超过板厚度的 3 倍,同时不应超过 450mm。

**10.2.3** 该条要求来源于美国标准 ACI 349-06 第 11.12.3 条。

**10.2.4** 该条要求同现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB



50010,同时参考美国标准 ACI 349-06 第 13.3.3 条的要求,增加锚固长度“不应小于 150mm”的要求。

**10.2.5** 该条要求同现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 中的第 9.1.10 条。

**10.2.6** 拉筋弯钩符合本标准第 9.3.3 条的要求。

## 10.3 梁

**10.3.1** 截面宽度参照了美国标准 ACI 349-06 中第 21.3.1.3 条的要求。

**10.3.3** 考虑到核安全相关混凝土结构梁中采用带肋钢筋作为受力筋,伸入支座锚固长度按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 采用  $12d$ 。

**10.3.4** 考虑到核安全相关混凝土结构特殊的重要性,采用比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 更为严格的要求。

**10.3.6** 通过对现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 与 ACI 349 关于梁内受扭纵向钢筋的最小配筋率的对比,现行美国标准的受扭纵筋最小配筋率约为国标的 1.2 倍。因此在现行国标公式的基础上,本标准将系数 0.6 修改为 0.72。

**10.3.8** 考虑到核电工程实际,推荐采用箍筋抗剪。

**10.3.9** 对于次梁,执行该条第 1 款、第 2 款、第 4 款,其中第 2 款箍筋最大间距同时参考了美国标准 ACI 349-06 第 11.5.5 条的要求,不超过  $h_0/2$ ,第 3 款箍筋要求参照现行国标要求,均比美国标准 ACI 349-06 严格。

**10.3.10** 本条参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的第 9.2.10 条编制,同时受扭箍筋的间距参考美国标准 ACI 349-06 的第 11.6.6 条第 1 款,增加“不宜大于 300mm”的要求。

## 10.4 柱及牛腿

### I 柱

**10.4.1** 核安全相关混凝土结构中柱子相对偏少,宜采用规则形状的柱子,避免出现异形柱。

**10.4.2** 考虑核安全相关混凝土结构多以厚墙、厚板结构为主,无严格意义上的框架结构或框架-剪力墙结构的柱子,结合核电设计实践,此处采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 抗震一级框架-剪力墙结构对轴压比限值的要求。

**10.4.3** 考虑到核安全相关混凝土结构特殊的重要性,配筋率采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 抗震一级框架柱的要求。柱中纵向钢筋的净间距同时参考美国标准 ACI 349-06 中净间距不小于  $1.5d$  和现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求编制而成。

**10.4.4** 考虑到核安全相关混凝土结构特殊的重要性,柱箍筋加密要求采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 抗震一级框架柱的要求。箍筋直径要求来源于美国标准 ACI 349-06 第 7.10.5 条第 1 款。第 5 款同时参考了美国标准 ACI 349-06 第 7.10.5 条第 3 款的要求。

**10.4.5** 本条参考美国标准 ACI 349-06 的第 7.8.1 条编制。

**10.4.6** 结合核电设计实践,核电无严格意义上的框架结构或框架-剪力墙结构等结构的梁柱节点,但参考国标对类似节点提出要求。

### II 牛腿

**10.4.7** 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 设计的牛腿安全度与按现行美国标准 ACI 349 按拉-压杆方法计算设计的牛腿安全度对比结果显示,两者安全度相当。

**10.4.11** 牛腿的外边缘的截面高度来源于美国标准 ACI 349-06 中第 11.9.2 条的要求。

## 10.5 墙

**10.5.1** 本节中墙体是特指核安全相关混凝土结构中的主要受力构件,主要具有下列特点:长度长、厚度大、平面外的刚度不能忽略、平面内剪切变形不容忽视、竖向和水平纵向钢筋需参与平面内抗剪。

**10.5.3** 该条主要参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 中第 11.7.14 条和第 11.7.15 条的要求,并参考了美国标准 ACI 349-06 中第 21.7.4 条第 3 款的要求编制。

**10.5.4** 该条要求针对一字墙和墙中洞口边。次要、薄墙可采用水平钢筋在墙端向内弯折  $10d$ 。

**10.5.5** 本条参考了美国标准 ACI 349-06 中第 14.3 节最小配筋并结合核电工程实际,提出了洞边最小构造钢筋要求。

## 10.6 叠合受弯构件

**10.6.2** 由于本标准预应力混凝土结构仅指预应力混凝土安全壳,所以取消现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中“以及预应力叠合板”内容,仅保留“承受较大荷载的叠合板”。

**10.6.3** 本条参考美国标准 ACI 349-06 第 17.4 节的要求编制。

## 10.7 预埋件与连接件

**10.7.1** 本条参考现行美国标准 ACI 349 并结合核电工程实际编制,端锚型预埋件的预埋板背面焊接的元件包括栓钉、锚栓或带钢板的钢筋等;锚筋型预埋件的预埋板背面焊接的钢筋包括直锚筋和带标准弯钩的钢筋。

**10.7.2** 由于核安全相关混凝土结构用预埋板一般较厚,且常采用有限元软件进行预埋件计算,因此当有可靠计算时,受拉和受弯预埋件的锚板厚度可不受锚筋间距的限制。

**10.7.5** 当受拉直锚筋无法满足锚固长度要求时,应采取其他有效的锚固措施,如改用端锚型预埋件等。

# 11 预应力混凝土安全壳

## 11.1 一般规定

**11.1.1** 安全壳结构设计时,通过承载力计算和满足正常使用应力要求保证结构的完整性,通过设置密封整体安全壳内壁的钢内衬,进行严格的无损检测等保证其密封性,通过役前期及运行期的压力试验、密封性试验分别检测其完整性及泄漏率。安全壳放射性屏蔽要求是根据辐射屏蔽设计要求,通过保证混凝土结构的最小厚度来实现的。

**11.1.2** 本条按照 HAF 102—2016 要求并参考现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 编制而成。按 IAEA 安全导则 NS-G-1.10 的要求,安全壳结构完整性和密封性的要求见表 2、表 3。第 11.3 节正常使用下荷载组合及应力限值要求满足结构完整性验收指标水准 1 的要求;第 11.2 节承载力计算的荷载组合及要求满足安全壳结构完整性验收指标水准 2 的要求。

通过安全壳结构完整性及应力、应变限值,保证安全壳结构对于钢内衬的支撑作用(若有),保障安全壳结构的密封性。同时通过密封试验等检验满足安全壳结构密封性验收指标水准 1 的要求。

表 2 安全壳结构完整性要求

安全壳结构 完整性验收指标	完整性要求
水准 1	结构整体处于弹性范围,无不可恢复的变形或破坏,结构完整性有较大裕量
水准 2	结构容许有小的永久变形,可能有局部永久变形,裕量可低于水准 1 的水平,应保证结构完整性

**表 3 安全壳结构密封性要求**

安全壳结构 密封性验收指标	密封性要求
水准 1	结构保证密封性,结构的密封性与内压相关,保证在设计限值以下

**11.1.3** 可参考现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 的相关要求进行评估。

**11.1.4** 安全壳结构分析时,截面应保证材料间变形协调的关系。当设有钢内衬时,在建造阶段、飞射物撞击作用等工况下,结构计算可计入钢内衬的结构强度,对于其他工况,可不计入钢内衬刚度的有利作用,但在确定最大应变时应考虑钢内衬与安全壳混凝土的相互作用。

## **11.2 承载力计算要求**

**11.2.1** 安全壳除进行整体有限元分析以外,对局部非连续部位和贯穿件部位还应进行较细网格的局部模型分析,根据整体分析给定局部分析的边界条件。只进行整体分析,对关键局部难以给出可靠的结果。安全壳计算模型、网格划分的可靠性宜根据标准解答进行检验,或进行收敛性分析,或进行灵敏度分析。当仅进行内压分析时,安全壳也可采用无弯矩薄膜理论进行简化分析。

**11.2.4** 安全壳壳体的承载力计算也可通过目标性能化设计进行承载力计算,即通过控制钢筋应力、混凝土应力限值保证安全壳的承载力要求。根据现行美国标准 ACI 359、法国标准 RCC-CW 的要求,安全壳壳体需要考虑一次应力以及二次应力效应(如温度应力、收缩徐变等),正常使用状态、承载力计算分别考虑薄膜力作用以及薄膜力加弯矩作用的不同应力限值,应力限值结合以上标准折算。荷载组合分组主要考虑不同组合下混凝土应力、钢筋应力的要求不同,现行法国标准 RCC-CW 对控制不同组合下钢筋应力

限值来满足控制裂缝的要求。控制裂缝的原则是在建造和正常使用时安全壳结构不出现裂缝,在 LOCA 事故工况下裂缝可控(如不出现贯穿裂缝)、钢内衬不撕裂等因素,同时考虑钢筋、预应力筋、钢内衬等的应变协调。现行法国标准 RCC-CW 关于承载力计算的性能要求是根据 IAEA 安全导则 NS-G-1.10 第 4.66 节和欧洲轻水反应堆统一技术要求(EUR)第 2.9.3 条关于安全壳结构完整性状态目标性能要求而来。本标准的目标性能化设计参考了 IAEA 第 4.66 节、EUR 的第 2.9.3 条和现行 RCC-CW 的相关规定。

安全壳壳体承载力计算的目标性能化设计的指标详见表 4,安全壳壳体荷载组合分组详见表 5,安全壳壳体承载力计算时,混凝土应力、应变限值详见表 6,安全壳壳体承载力计算时,钢筋应力、应变限值详见表 7。表 4 中,性能 1、性能 2 满足 IAEA 安全导则 NS-G-1.10、EUR 的第 2.9.3 条结构完整性 level I 的要求。性能 3 满足 IAEA 安全导则 NS-G-1.10、EUR 的第 2.9.3 条结构完整性 level II 的要求。

**表 4 安全壳壳体承载力计算的目标性能化设计的指标**

性能水平分类	性能要求	对应荷载组合分组
性能 1	结构整体处于弹性范围,无或有限的不可恢复的变形,防止出现裂缝或已有裂缝的继续开展	第一组(a)、 第一组(b)
性能 2	结构整体处于弹性范围,无或有限的不可恢复的变形,防止局部出现贯通裂缝	第二组
性能 3	容许局部有永久性变形,防止局部出现较大应变,保证结构的完整性,保持钢内衬的支撑功能、保障结构的气密性	第三组

表 5 安全壳体荷载组合分组

荷载组合分组		荷载组合类型	荷载组合	荷载组合编号
第一组	a	建造阶段施加预应力	$D+L+F+W+T_o$	(11.3.1-1)
		完整性试验	$D+L+F+P_t+T_t$	(11.3.1-2)
		正常运行	$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v$	(11.3.1-3)
	b	正常运行加严重环境	$D+1.3L+F+G+T_o+1.5W+R_o+P_v$	(5.3.1-3)
第二组		正常运行加严重环境	$D+1.3L+F+G+T_o+1.5E_1+R_o+P_v$	(5.3.1-2)
		正常运行加极端环境	$D+L+F+G+T_o+E_2+R_o+P_v$ $D+L+F+G+T_o+W_1+R_o+P_v$	(5.3.1-4) (5.3.1-5)
		异常运行	$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a$	(5.3.1-6)
			$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a$	(5.3.1-7)
			$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a$	(5.3.1-8)
		异常运行加严重环境	$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25E_1+R_a$	(5.3.1-9)
			$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a$	(5.3.1-10)
			$D+L+F+G+T_o+E_1+H_a$	(5.3.1-11)
			$D+L+F+G+T_o+W+H_a$	(5.3.1-12)
第三组		异常运行加极端环境	$D+L+F+G+P_a+T_a+E_2+R_a+R_t$	(5.3.1-13)
		异常运行加内部飞射物	$D+L+F+G+P_a+T_a+R_a+A_1$	(5.3.1-14)
		正常运行加外部飞射物	$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_2$ $D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_3$	(5.3.1-15) (5.3.1-16)

表 6 安全壳壳体承载力计算时,混凝土应力、应变限值和要求

安全壳壳体		安全壳壳体荷载组合分组			
		第一组(a)	第一组(b)	第二组	第三组
混凝土应力限值	$\sigma_{c, mean}$	$0.40 f_{ck}$	$0.55 f_{ck}$	$>0$	—
	$\sigma_{c, max}$	$0.70 f_{ck}$	$0.75 f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$
	$\sigma'_{c, max}$	$0.70 f_{ck}$	$0.75 f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$
	$\sigma_{t, max}$	—	—	—	—
混凝土应变限值	$\epsilon_{c, max}$	—	—	—	$0.3\%$

注:1  $\sigma_{c, mean}$ ——标准区域(指预应力筋布置均匀区域、安全壳截面无变化区域)薄膜力作用压应力;

2  $\sigma_{c, max}$ ——最大压应力;

3  $\sigma'_{c, max}$ ——最大压应力(抗剪计算);

4  $\sigma_{t, max}$ ——最大拉应力;

5  $\epsilon_{c, max}$ ——最大拉应变;

6  $f_{ck}$ ——混凝土轴心抗压强度标准值。

表 7 安全壳壳体承载力计算时,钢筋应力、应变限值和要求

安全壳壳体		安全壳壳体荷载组合分组		
		第一组	第二组	第三组
钢筋应力、应变限值	标准区域薄膜力作用应力	—	—	$\Delta\sigma_p, \sigma_{s, max} \leq f_{liner, k}$
	特殊区域薄膜力作用应力	$\sigma_{s, max} \leq 0.1 f_{ptk}$ ; $\Delta\sigma_p \leq 0.1 f_{ptk}$	$\sigma_{s, max} \leq 0.1 f_{ptk}$ ; $\Delta\sigma_p \leq 0.1 f_{ptk}$	$\Delta\sigma_p, \sigma_{s, max} \leq f_{liner, k}$
	标准区域薄膜力加弯曲作用应力		$0.8 f_{yk}$	$0.9 f_{yk}$
	特殊区域薄膜力加弯曲作用应力、应变(内侧钢筋)	$\sigma_{s, max} \leq \min[2/3 f_{yk}, \max(0.5 f_{yk}, 80 f_{ck}^{1/3})]$	$\sigma_{s, max} \leq \min[2/3 f_{yk}, \max(0.5 f_{yk}, 80 f_{ck}^{1/3})]$	$\epsilon_{s, max} = 1\%$



续表 7

安全壳体		安全壳体荷载组合分组		
		第一组	第二组	第三组
钢筋应力、应变限值	特殊区域薄膜力 加弯曲作用应力、 应变(外侧钢筋)	$\sigma_{s, \max} \leq \min[2/3 f_{yk},$ $\max(0.5 f_{yk},$ $80 f_{ck}^{1/3})]$	$0.8 f_{yk}$	$\epsilon_{s, \max} \leq 0.9 \epsilon_{uk}$
	抗剪作用应力		$0.8 f_{yk}$	$0.9 f_{yk}$

注:1  $f_{ptk}$ ——预应力筋极限强度标准值;

2  $f_{yk}$ ——普通钢筋屈服强度标准值;

3  $f_{liner, k}$ ——钢内衬屈服强度标准值;

4  $\sigma_{s, \max}$ ——普通钢筋最大应力;

5  $\Delta\sigma_p$ ——预应力筋考虑额外效应时的张拉应力增量;

6  $\epsilon_{s, \max}$ ——普通钢筋最大应变值;

7  $\epsilon_{uk}$ ——普通钢筋极限拉应力对应的应变值;

8 特殊区域指预应力筋布置较大变化区域(设备闸门周边等)、安全壳截面变化区域(扶壁柱、环梁、截锥体、洞口加厚区等)。

考虑预应力筋额外效应时,同时可执行本标准第 11.2.5 条的要求。

**11.2.5** 根据现行法国标准 RCC-CW,预应力筋的额外效应即初始张拉计入预应力筋的应力损失后已经远低于初始张拉应力值,在结构外力作用下(如 LOCA),由于应变协调产生附加变形,通过水泥灌浆后与截面其他材料一起协调工作,可以考虑承担部分拉力的贡献。预应力筋额外效应可折算为普通钢筋面积,按普通钢筋计算。计算时根据预应力筋与普通钢筋的粘结力的差异,预应力筋计算面积需乘以表 8 的折算系数(约为 0.4~1.0)。计算预应力筋额外效应时,还需考虑根据预应力筋的布置位置、偏转角度等因素。为防止预应力筋断裂等偶然因素,计算额外效应的预应力筋的总的最大应力不超过初始张拉应力  $0.80 f_{ptk}$ 。

表 8 预应力筋面积折算系数

	安全壳体荷载组合分组		
	第一组	第二组	第三组
预应力筋面积折算系数	$\sqrt{2}\xi_1$	$\sqrt{2}\xi_1$	1.0

注:1  $\xi_1 = \sqrt{\xi(\phi_s/\phi_p)}$ ;

2  $\phi_s$  ——最大的普通钢筋直径;

3  $\phi_p$  ——预应力筋等效直径,  $\phi_p = 1.6 \sqrt{A_p}$ ;

4  $\xi$  ——带肋钢筋粘结强度与预应力筋粘结强度的比值,详见表 9;

5 安全壳体荷载组合分组要求见表 5。

表 9 带肋钢筋粘结强度与预应力筋粘结强度的比值  $\xi$

后张预应力筋类型	$\xi$	
	$\leq C60$	$\geq C80$
钢绞线	0.50	0.30

### 11.3 正常使用应力要求

**11.3.1~11.3.3** 安全壳壳体的正常使用包括施加预应力、完整性试验、正常运行或停堆。正常使用下的荷载组合、混凝土应力限值和现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 的要求相同,钢筋应力限值要求与现行美国标准 ACI 359、法国标准 RCC-CW 相关要求规定的应力限值基本一致。

### 11.4 预应力系统材料

**11.4.1** 预应力筋用锚具包括锚垫板、锚板、夹片、灌浆帽等。

**11.4.4** 按图 1 装置进行预应力筋-锚具组装件静载试验。

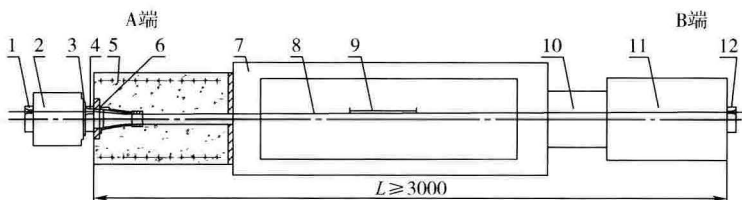


图1 预应力筋-锚具组装件静载锚固性能试验装置示意图

(图中尺寸单位:mm)

1—工具锚;2、11—加载用千斤顶;3—限位板;4、12—试验锚板、夹片;5—混凝土承压构件;6—锚垫板;7—试验台座;8—预应力筋;9—总伸长率测量装置;10—荷载传感器

混凝土承压构件的配筋及构造钢筋应按结构设计要求配置,并保证安全试验要求;试验采用锚具、锚垫板、限位板应使用锚具生产厂家的配套产品,锚具、千斤顶、荷载传感器、预应力筋应同轴对中,混凝土承压构件内孔道应顺直;加载应符合下列规定:

(1)在A端,用单根张拉千斤顶把各根钢绞线均匀预紧。均匀预紧后在外周取三根钢绞线如图1做好1米标距,在A端安装千斤顶与工具锚,安装完毕后,用A端千斤顶按 $0.2f_{ptk} \rightarrow 0.4f_{ptk} \rightarrow 0.6f_{ptk} \rightarrow 0.8f_{ptk}$ 分级缓慢加载,加载速度低于 $100\text{MPa}/\text{min}$ ;

(2)加载到 $0.8f_{ptk}$ 后进行放张锚固,放张后,在B端补加荷载到 $0.8f_{ptk}$ ,持荷1h;

(3)持荷1h后,在B端以低于 $100\text{MPa}/\text{min}$ 的加载速度缓慢加载直到破坏;

(4)对于非鉴定性试验,试验过程中,当测得的锚具效率系数 $\eta_a$ (%)、极限抗拉力 $F_{Tu}$ 时预应力筋受拉长度的总伸长率 $\epsilon_{Tu}$ (%)满足要求可终止试验。

**11.4.5** 预应力成孔管道应可靠连接,防止灌浆时产生漏浆,从而造成对周围混凝土的破坏。

**11.4.7** 采用金属波纹管是考虑到其在浇筑混凝土重力作用下能保持原有的形状。

**11.4.8** 核电厂安全壳目前有 19 根、37 根、54 根或 55 根直径 15.7mm 的预应力钢束用预应力成孔管道,综合其所用孔道内径与钢束的截面积的关系,一般在 2 倍~3 倍之间,本要求是核电工程经验总结。

## **11.5 预应力系统设计**

**11.5.3** 为避免分段张拉产生的不利影响,核电推荐水平钢束 360°整束张拉,而非分段张拉,即水平预应力筋在同一扶壁柱左右两侧锚固并进行张拉。

**11.5.5** 本条第 1 款、第 2 款、第 3 款属于瞬时损失,其数值在张拉完成后就已基本确定,本条第 4 款、第 5 款则为与时间相关的预应力损失。

“预应力筋分批张拉时混凝土的弹性压缩的影响”是参照欧洲标准 EN 1992-1-1 及现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 的相关要求编制而成,主要是安全壳预应力筋根数多,需考虑分阶段多批次张拉的影响。

**11.5.6** 安全壳预应力筋张拉时,采用限位板限制夹片的移动距离,一般限制的移动距离在 7mm 左右,偏于保守考虑,并结合设计经验,其内缩值规定为 8mm。

**11.5.7** 结合安全壳预应力筋用孔道水平向为金属波纹管、竖向及穹顶为钢管及设计经验,提出摩擦系数值。考虑核电厂结构特别是安全壳的重要性,摩擦系数应通过预应力筋孔道摩擦试验核定。

**11.5.8** 本条参照欧洲标准 EN 1992-1-1 及现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 的相关要求编制而成,主要是安全壳预应力筋根数多,需考虑分阶段多批次张拉的影响,同时考虑到安全壳对预应力筋张拉时的混凝土有明确要求,即混凝土必须达到 28d 设计强度后才可张拉,因此将参考公式中的  $E_c(t)$  直接取  $E_c$ 。

**11.5.9、11.5.10** 这两条根据现行欧洲标准 EN 1992-1-1 混凝土规范关于预应力松弛损失的规定编写。当环境温度较高,引起预应力筋温度高于 50℃时,需对松弛损失进行检验。

**11.5.12** 锚垫板采用整体铸造带有二次翼缘的垫板时,局部受压区的设计可参照欧洲标准 EN 1992-2 进行计算。锚垫板因其受力复杂,需通过专门的试验并结合计算分析确认其传力性能,故应选用按相关标准验证的产品,并配置要求的加强钢筋,同时满足锚具布置对间距和边距的要求。相关试验可按现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的相关规定执行。

**11.5.14** 通过设置径向拉筋防止混凝土被分层撕裂。

**11.5.15** 凹面布置主要是指闸门、洞口、加厚区域预应力筋有曲率变化的区域。可以通过配置构造 U 形插筋来防止预应力筋所在区域的混凝土崩裂,可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定。

**11.5.16** 结合核电设计实践,对带环梁的安全壳在环梁处的节点配筋提出要求。

## 12 施 工

### 12.1 一 般 规 定

**12.1.3** 核安全文化倡导凡事有章可循,为保证每一项作业活动都符合一定的要求和规范,使作业的结果可控,做此要求。考虑到厂房安全等级要求不同,施工方案或其他相关文件的批准单位不同,本标准对施工方案或其他相关文件的批准方不做明确。

**12.1.4** 混凝土结构实体施工质量的无损检测方法还不成熟,而对于构造复杂、施工难度大的混凝土结构(如预应力筋孔道摩擦试验、预应力筋孔道全比例模拟灌浆试验)施工质量控制难度更高,进行模拟试验可以验证所采用的施工工艺对控制施工质量是否有效。

**12.1.5** 核电厂筏形基础、安全壳、反应堆堆坑预埋构件多或结构复杂,各构件或各部位之间的施工就位顺序不合适时极易造成返工甚至质量问题,因此对这些部位或类似的部位各构件或部件之间的施工顺序及逻辑关系应提前进行准确的策划或安排。

### 12.2 模板工程及支撑体系

#### I 基 本 要 求

**12.2.2** 安全壳质量要求及施工安全风险较高,有整体密封性的要求,安全、有效、可靠的模板体系有利于保证施工质量及安全。

#### II 模板及支撑材料

**12.2.3** 核电站通用模板以胶合板为主,其他模板作为辅助模板。本标准仅对胶合板提出材料性能要求,其他模板如钢模板等由于各个项目使用要求不统一,可参见相关标准,本标准不做要求。

**12.2.5** 油性脱模剂对混凝土质量有一定影响,水性脱模剂也有与混凝土发生反应的可能性,故应进行与混凝土的适应性试验,避

免对混凝土质量造成影响。

### III 模板设计

**12.2.7** 核电厂位于沿海地区居多,厂址区一般风力较大,为防止大风导致安全事故,外墙模板应有可靠的防风装置。

### IV 模板制作、安装

**12.2.9** 模板加工、制作在固定场所,用工装和平台易保证加工质量,避免环境条件的影响造成质量问题。

**12.2.10** 核电厂结构墙体较厚,且有较多的预留洞口,洞口底部极易因振捣不到位而造成质量问题,因而洞口模板竖向必须设置一定数量的振捣孔或排气孔,孔的数量和间距应根据混凝土的流动性事先经试验确定。

### V 预埋件安装

**12.2.14** 本条根据核电施工经验编制,是为保证预埋件的安装质量,钢筋垂直度不满足要求的条件下安装预埋件,钢筋调正后将使预埋件位置产生偏差。

**12.2.15** 根据目前国内核电设计要求,不允许采用预埋件焊接在钢筋上固定的方式。

### VI 模板拆除与维护

**12.2.16** 现场条件与标准养护环境差异较大,导致混凝土实际强度与标准养护试件的强度也会有较大差异,所以拆模时应以同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度为准。

**12.2.17** 拆模时混凝土浇筑体表面与大气温差根据现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB 50496 的要求制订。

**12.2.18** 本条根据现行行业标准《核电工程混凝土冬期施工规程》NB/T 20387 的要求制订。

## 12.3 钢筋工程

### I 基本要求

**12.3.1** 寒冷地区冬季的室外,由于低温人员行动不便,各种操作

动作不易到位,不易保证钢筋的加工质量,为保证钢筋加工质量,推荐在供暖的室内进行钢筋加工。

## II 原材料管理

**12.3.4** 钢筋质量对于混凝土结构的最终质量有着至关重要的影响,因此应严格控制钢筋原材料的质量,管理措施应严密。

## III 翻样单编制

**12.3.7** 翻样单编制质量是钢筋加工制作质量控制的前提,翻样单质量不高,不仅会造成极大的浪费,也增加了造成钢筋施工质量问题的几率,因此钢筋下料的经验和相关规则对于提高翻样单的编制质量极为重要。

## IV 钢筋制作

**12.3.11** 核电厂内部结构钢筋配置密集,钢筋加工制作精度不高,不仅增加施工难度,降低施工效率,而且难以保证施工质量,而内部结构是核电厂的核心区域,施工质量至关重要,因此,对钢筋密集区的钢筋加工允许偏差应严格控制。

参考现行法国标准 RCC-CW 要求,对钢筋弯曲成型时的施工最低温度加以限制。

## VI 安装施工

**12.3.15** 核电厂外墙无抹灰及装修层,塑料垫块易形成渗水通道锈蚀钢筋,金属垫块也易锈蚀造成混凝土爆裂,本条根据核电工程实践并结合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 与现行法国标准 RCC-CW 的要求,对垫块强度提出明确要求,从严控制,规定严禁采用塑料垫块和金属垫块。

核电厂结构层高一般较高,按层高施工的钢筋网或骨架不采取加固措施时极易倾覆或变形,造成质量问题甚至安全事故,因此绑扎过程和成型后均应有可靠的防倾覆、防变形加固措施。

穹顶指带钢内衬的安全壳顶部结构,形状一般为半球形或半椭圆形。由于钢筋连续,安全壳钢筋又不宜留置搭接接头,穹顶钢筋一次施工完成可降低施工难度,保证施工质量,同时有利于上、



下层钢筋之间预应力成孔钢管的成品保护。

安全壳内外两层钢筋网之间的径向拉筋是安全壳结构平面外抗剪计算配筋,同时和内、外排钢筋网之间形成空间受力骨架,有效约束混凝土,对保证安全壳结构的受力有重要作用。如果拉筋长度过长,会导致拉筋失去拉结作用,通过控制拉筋的保护层厚度从而控制拉筋的长度,是为了方便控制。

施工顺序不恰当,导致施工难度增加,将增大对预应力孔道造成损伤的几率,而预应力孔道损伤未处理将会导致难以预料的后果,因此需避免损伤预应力孔道。

## 12.4 预应力工程

### I 一般要求

**12.4.4** 由于预应力工程对保证安全壳性能的重要性,核电厂需要通过全比例灌浆模拟试验检验水泥浆充满孔道的密实性,为后续预应力灌浆施工确定合理工艺参数。全比例灌浆模拟试验的验收要求可参考现行行业标准《压水堆核电厂安全壳预应力技术规程 第2部分:试验》NB/T 20325.2的相关规定执行。

### IV 加工制作

**12.4.10** 本条是对钢管加工成型后在车间采用通球的要求。钢管预埋在混凝土中后,孔道直径越大,弯管后变形越大,通球直径与实际管道直径、位置等有关,本标准不做统一要求,通球直径原则上应以保证预应力筋穿束施工为宜。

### V 成孔管道安装

**12.4.13** 由于安全壳直径较大,通常在30m~50m,壳体径向允许施工偏差为 $\pm 50\text{mm}$ ,考虑到施工的特点,设计通常要求预应力孔道定位以钢内衬或安全壳内侧模板位置为基准。

### VI 穿束张拉

**12.4.21** 为保证整体张拉时每束钢绞线受力均匀,通常在预应力筋正式张拉前采用同一台千斤顶及同一台油压表,预紧达到同样

的油压值,对单根钢绞线进行预紧,以保证正式张拉前各根钢绞线初应力一致。预紧张拉应力一般为5%~10%的张拉控制应力。

## VII 灌 浆

**12.4.24** 预应力孔道如果密封性不好,在灌浆时,浆体有可能通过混凝土内部的孔隙到达钢内衬一侧,由于灌浆压力较大会对钢内衬造成损伤,对预应力孔道进行密封性检查是为了确保预应力孔道在灌浆时的密封性。

**12.4.26** 本条参考现行行业标准《压水堆核电厂安全壳预应力技术规程 第2部分:试验》NB/T 20325.2对浆体温度提出要求。

## 12.5 混凝土工程

### I 配合比设计与试验

**12.5.2** 由于混凝土搅拌设备不同会导致混凝土拌合物性能可能产生较大差异,为了确保实际生产时的混凝土性能与试验时混凝土性能的一致性,在确定设计配合比前,需要进行混凝土可行性试验。

### II 混凝土制备

**12.5.3** 核电通过混凝土开盘制度进行混凝土生产过程控制。承包商严格按照批准的混凝土设计配合比进行生产,每工作日每个结构混凝土设计配合比生产前进行混凝土生产开盘见证。开盘见证时,混凝土生产前详细检查混凝土设计配合比种类、混凝土原材料、浇筑部位、生产参数设置等是否正确,生产中和生产后详细检查混凝土生产误差、混凝土和易性、混凝土取样等。与现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666要求开盘鉴定的频率和内容不同,核电厂混凝土的开盘鉴定如本条所述内容,其他如混凝土强度、凝结时间、耐久性等按照设计文件要求频率留样试验。

### III 混凝土运输、浇筑和养护

**12.5.14** 混凝土养护期间须维持连续保湿状态,严格避免忽干忽湿,以控制构件表层强度低于内部强度,减少构件早期表层裂损。

## 13 验 收

### 13.1 一 般 规 定

**13.1.1** 不同于普通建筑工程按照分部分项工程、主控和一般项目验收,核电工程质量验收重视过程控制,验收体系在满足现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的基础上,施工单位应根据质量监督的需要制订针对过程控制的质量跟踪文件记录,并通过设置质量过程控制监督检查点达到过程控制的要求。

**13.1.2** 核电工程质量验收重视过程控制,验收体系在满足现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的基础上,施工单位应根据质量监督的需要制定针对过程控制的质量跟踪文件记录,并通过设置质量过程控制监督检查点达到过程控制的要求。质量过程控制监督检查点的设置应考虑施工质量控制的重要性、施工单位的施工经验、操作工人的熟练程度等因素,一般包括见证点(W)、停工待检点(H)和报告点(R)。

### 13.2 模 板 工 程

#### I 原 材 料

**13.2.1** 支架及其配件的材质、规格、尺寸和力学性能等对模板体系的稳定性起到至关重要的作用,支架的设置不满足要求极易造成模板倾覆,带来安全、质量隐患。核电厂厂址选择一般位于沿海地区,厂区内风力较大,对于比较高或宽阔的结构,如安全壳、厂房外墙等,在模板施工过程中一般需在施工方案中考虑设置防风装置和加固措施。

模板材料、外观质量、规格尺寸相关的国家现行标准包括《普通胶合板》GB/T 9846、《混凝土模板用胶合板》GB/T 17656、《建

筑工程大模板技术标准》JGJ/T 74、《液压爬升模板工程技术标准》JGJ/T 195 等。

**13.2.2** 核电厂混凝土对耐久性和外观质量要求较高,模板在使用脱模剂时宜选用安全、环保的水性脱模剂,使用时不应污染钢筋、预应力筋、预埋件等。油性脱模剂对混凝土质量有一定影响,应该禁止使用。水性脱模剂也有与混凝土发生反应的可能性,为降低风险,故在使用前应进行与混凝土的适应性试验,避免对混凝土表面质量造成影响。

## II 模 板 安 装

**13.2.4** 现浇混凝土结构的模板及支架类型众多,验收检查的项目和重点也不相同,主要类型已有相应的国家或行业标准,故要求应按现行相关标准进行验收。国家现行相关标准通常给出的是对模板及支架安装的基本和通用要求,安装的详细要求往往由施工方案根据工程的具体情况规定,如支架杆件的间距,各种支撑的设置数量、位置等,故本条规定验收时除了应符合现行相关标准的规定以外,还应满足施工方案的要求。主要检验方法由有关标准规定。

**13.2.6** 核电厂中使用的预埋板主要用于安装管道或电缆桥架的支架,支架的尺寸一般比预埋板尺寸小很多,焊接区域比较小,所以预埋板的安装允许偏差可以在民用建筑预埋板安装允许偏差的基础上适当放宽。适当放宽浇筑前验收限值更符合实际,有利于现场施工。对于一些有特殊要求的预埋板,如用于安装精度要求较高的特殊物项时,设计单位会在设计文件或图纸中专门体现。预埋套管和预埋螺栓等存在类似的情况,按照相同的原则处理。

**13.2.7** 核电厂模板验收要求同现行国家标准的模板验收标准一致,施工不存在困难。

## III 模 板 拆 除

**13.2.8** 模板的拆除一般应按照先支的后拆、后支的先拆;先拆非承重结构、后拆承重结构;先拆上部结构、后拆下部结构的顺序进

行拆除。核电厂混凝土结构施工过程中,会出现因设备到货延误或施工顺序调整需要对结构混凝土做二次浇筑预留的情况,此时如果上部结构需要继续施工,下部结构模板的拆除时间和拆除范围需通过设计计算来确定。

**13.2.9** 大体积混凝土浇筑完毕后,早期因水泥水化热使混凝土内部温度很高,过早拆模时混凝土的表面温度较低,会形成很陡的温度梯度,产生很大的拉应力,极易形成裂缝。因此,有条件时应将模板作为养护保温措施的一部分,并适当延迟拆模时间。

### 13.3 钢筋工程

#### I 原材料

**13.3.1** 资格评审文件应包括下列内容:材料名称、规格型号、使用范围;材料质保等级及材料标准;材料生产单位资质、业绩;生产工艺流程;材料性能试验;产品质量统计资料(半年以上);试生产方案(如有);拟用产品检验结果等内容。对于首次供应产品的供应商(包括合格供应商供应的新产品)在供货前应经过源地评审。

#### III 钢筋连接

**13.3.8** 核电工程不允许使用焊接作为钢筋连接的通用方式,但是由于工程需要,某些特殊情况下必须进行焊接连接时,其要求应满足现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的规定。

为保证接头试件能够代表实际工程质量,机械连接或焊接连接的接头试件应从工程实体中截取,现场截取抽样试件后,原接头位置的钢筋可采用同等规格的钢筋进行绑扎搭接连接、焊接或机械连接方法补接。对于对钢筋连接方式有特殊要求的部位,如有抗大型商用飞机撞击要求的结构墙,钢筋连接方式一般要求必须要采用机械连接,接头试件不能从工程实体中截取。此时接头的力学性能、弯曲性能要求应根据设计规定的要求进行检验。

对某些不宜在工程中随机取样截取接头试件的情况,现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 中有明确规定。

**13.3.10** 同一绑扎搭接接头连接区段是指长度为 1.3 倍搭接长度的区段。搭接长度取相互连接两根钢筋中较小直径计算。该同一连接区段内纵向受力钢筋接头面积百分率为接头中点位于该连接区段长度内的纵向受力钢筋截面面积与全部纵向受力钢筋截面面积的比值。

同一机械连接接头或焊接接头连接区段是指长度为  $35d$  且不小于 500mm 的区段,  $d$  为相互连接两根钢筋的直径较小值。该同一连接区段内纵向受力钢筋接头面积百分率为接头中点位于该连接区段内的纵向受力钢筋截面面积与全部纵向受力钢筋截面面积的比值。

## 13.4 预应力工程

### I 原材料

**13.4.1** 本条根据核电工程实践并结合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定编制。

**13.4.2** 现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 仅要求做抗拉强度、伸长率检验,本条根据现行法国标准 RCC-CW 对进场验收需做拉伸试验内容的规定,提出了弹性模量检验的要求。

**13.4.3** 本条结合核电外观检查经验及 RCC-G 的相关要求编制。

**13.4.8** 核电厂采用水泥浆对预应力筋进行保护,与现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 要求的灌浆料要求一致。

### II 制作与安装

**13.4.13** 如果有钢内衬,水平孔道和竖向孔道的径向误差应改为相对于钢内衬实际位置的偏差小于  $\pm 15\text{mm}$ 。

### III 张拉与放张

**13.4.15** 在雨季或环境湿度较大的地区,预应力筋穿入孔道后极

易造成预应力筋的锈蚀,进而影响孔道摩擦系数,甚至影响预应力筋的力学性能。因此,实际工程中应尽量缩短预应力筋从穿束到张拉、张拉到灌浆之间的时间间隔。现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 规定,预应力筋穿入孔道后至孔道灌浆的时间间隔,当环境相对湿度大于 60%或处于近海环境时,不宜超过 14d;当环境相对湿度不大于 60%时,不宜超过 28d。无法满足要求时,应对预应力筋采取防锈措施。核电厂安全壳预应力筋每束由数十根钢绞线组成,沿壳体水平向成环形或竖向成倒伽马形及垂直线布置,线形布置复杂,预应力筋束数多,相对于民用建筑要复杂很多;预应力施工周期也比民用建筑施工周期长很多,并且与核电现场很多施工工序存在交叉施工。由于上述原因,导致核电现场的预应力施工很难按现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 规定的时间完成。因此,核电工程一般规定,预应力筋在供货前必须进行浸水溶性油保护,运至现场后也应根据现场实际情况定期进行喷油保护;穿入孔道的预应力筋应在 30d 内张拉,张拉后应在 15d 内进行灌浆,超出规定时间必须对预应力筋进行喷油保护。

**13.4.16** 核电工程每束预应力筋包含几十根钢绞线,预应力筋所在孔道复杂,尤其是水平预应力筋和伽马预应力筋在穿入孔道时预应力钢绞线极易交错缠绕在一起,有必要在正式张拉前采用同一台千斤顶及同一台油压表,且预紧时达到同样的油压值,对单根钢绞线进行预紧,以保证正式张拉前各根钢绞线初应力基本一致。

**13.4.18** 安全壳预应力筋的实测伸长值与计算伸长值的允许偏差、锚固端预应力筋的实测拉力值与计算拉力值的相对允许偏差是根据现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳建造规范》NB/T 20332 的规定以及核电厂预应力混凝土安全壳的设计、验收经验提出的双控要求。核电厂安全壳每束预应力筋由数十根预应力钢绞线组成,沿壳体水平向成环形或竖向成倒伽马形及垂直线布置,每束预应力筋的预应力钢绞线根数多、张拉力大,且和

预应力孔道接触不均匀,其在张拉下一般伸长值正偏差较大。目前核电厂安全壳预应力筋的允许偏差均是按 $-5\% \sim 8\%$ 控制验收。

**13.4.20** 参考现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定,结合核电实际情况,对预应力筋断丝及滑脱提出了要求。当发生预应力筋断裂或滑脱时,除非经计算复核确认,否则必须更换。

#### IV 灌浆与封锚

**13.4.24** 预应力筋外露长度的规定,主要是考虑到锚具的正常工作和预应力筋多余长度切割时可能的热影响。切割位置不宜距离锚具太近,同时不应影响构件的安装。

**13.4.25** 保护帽作为灌浆帽使用,并和孔道同时用灌浆材料灌注密实。保护帽可通过外部涂装防锈或封锚进行保护。

### 13.5 混凝土工程

#### I 混凝土配合比设计

**13.5.1** 混凝土配合比设计方法、性能试验方法和生产评定方法等大部分来自引进、消化、吸收国外的技术标准,这些标准与国标有一定差别,且各堆型之间也有较大差别。因此本条采用概述性描述方法进行描述,未列出具体性能指标。混凝土性能指标包括力学性能指标和耐久性能指标。

**13.5.2** 核电厂混凝土设计配合比一般经过初步试验和可行性试验后方可确定使用。初步试验主要是采用混凝土原材料在试验室内进行,得出的混凝土配合比各方面性能满足设计要求后形成混凝土基准配合比,主要验证混凝土配合比在室内的性能。可行性试验是采用基准配合比在搅拌站实际生产,并对混凝土各方面性能进行试验,主要验证混凝土配合比在实际生产条件下是否满足设计要求和施工要求。经过初步试验和可行性试验合格后,可确保混凝土设计配合比的可用性。



## II 原 材 料

**13.5.3** 资格评审文件应包括下列内容:材料名称、规格型号、使用范围;材料质保等级及材料标准;材料生产单位资质、业绩;生产工艺流程;材料性能试验;产品质量统计资料(半年以上);试生产方案(如有);拟用产品检验结果等内容。对于首次供应产品的供应商(包括合格供应商供应的新产品)在供货前应经过源地评审。

**13.5.6** 鉴于外购砂石料质量参差不齐,大部分核电项目都采用自产砂石。如采用自产砂石,要按照设计文件要求进行检验。一般检验频次和检验项目如下:每个工作日,颗粒级配、石粉含量、泥块含量;每七个工作日,针片状含量、空隙率;每月,有机物含量、轻物质含量、亚甲蓝 MB 值。

## III 混凝土拌合物

**13.5.9** 混凝土日常生产过程中,核电通过混凝土开盘制度进行混凝土生产过程控制。承包商严格按照经建设单位(或其授权代表)或监理单位批准的混凝土设计配合比进行生产。每工作日每个结构混凝土设计配合比生产前由承包商通知建设单位(或其授权代表)或监理单位进行混凝土生产开盘见证。开盘见证时,混凝土生产前建设单位(或其授权代表)或监理单位详细检查混凝土设计配合比种类、混凝土原材料、浇筑部位、生产参数设置等是否正确,生产中和生产后,详细检查混凝土生产误差、混凝土和易性、混凝土取样等。

**13.5.11** 为保证核电厂混凝土生产的及时性和质量,核电主体结构混凝土都采用现场混凝土搅拌站生产的方式。由于核电混凝土搅拌站出机口和现场浇筑地点距离较近、运输时间较短(一般运输时间 10min 以内),且搅拌站出机口取样比现场浇筑地点取样更能保证取样质量,因此当通过试验证明搅拌站出机口取样混凝土性能和浇筑地点取样混凝土性能差别较小时,可在搅拌站出机口进行取样。

**13.5.12、13.5.13** 目前国内各核电厂混凝土技术规格书中对于

主体结构混凝土的取样、强度评定原则都不一样,且与中国国家标准也不一致,各核电堆型的取样原则也不一致。考虑到国产化的需要,本标准规定混凝土试件取样要求与现行国家标准一致。

#### IV 混凝土施工

**13.5.14** 核电厂混凝土结构施工同时生产使用的混凝土设计配合比种类较多,为防止混凝土设计配合比种类错用,在混凝土浇筑前,现场应在每车混凝土浇筑前检查混凝土发货单,主要检查混凝土浇筑部位和混凝土设计配合比种类,确保混凝土浇筑正确。

**13.5.15** 核电厂混凝土结构施工中为了后续设备及临时施工通道需要,设置有二次浇筑区,其与民用的后浇带用途及设置有明显区别,该二次浇筑区留设产生的施工缝应满足本条要求。

## 附录 A 超设计基准范畴

**A.0.1** 为增强核电厂应对比设计基准事故更严重的或包含多重故障的事故的承受能力,避免不可接受的放射性后果,以进一步改善核电厂的安全性,《核动力厂设计安全规定》HAF 102 要求,设计阶段应考虑超设计基准范畴的工况,确保结构在超出设计基准事故范围的工况下能够保持其安全功能。其中,设计扩展工况包括没有造成堆芯明显损伤的工况和堆芯熔化(严重事故)工况,超设计基准外部事件包括超设计基准地震、大型商用飞机撞击等。

**A.0.3** 本条参考《Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA No. SSR-2/1 (Rev. 1)》及 RCC-CW 要求,从概率论、确定论安全分析和工程判断方面给出了对超设计基准范畴进行评价的三种估算方法。

**A.0.4** 结构构件的安全功能包括放射性物质包容、对安全相关物项起支撑作用、结构整体稳定、提供内部或外部灾害的防护等。通过这类分析,能够确定同一结构内的不同部位的性能。例如,在超设计基准地震作用下,直接支撑安全相关设备的墙体与只承担结构整体稳定的墙体,其允许位移量是不一样的。

## 附录 B 安全壳结构完整性检测

### B.1 一般规定

**B.1.2** 通过检测安全壳结构在基准事故工况荷载作用下的各项测试参数,判定安全壳结构的各项承载力安全度、刚度、局部应力与应变状态,最终给出结构完整性评估结论。

**B.1.3** 安全壳结构压力试验是从大气压开始,向安全壳内充入干净、干燥的空气来施加压力。

### B.3 安全壳结构检查技术要求

**B.3.1** 最大应变测点应变值是指试验中在峰值压力作用下发生最大应变变化测点的测量值,绝对误差不应大于 10 微应变参考了美国标准 ACI 359 中对应变测量误差的要求。

**B.3.5** 每个观测区内应将表面刷白,并分格画线。在压力试验前、试验中、试验后对混凝土外表面状态进行检查,绘出宽度超过 0.25mm 和长度超过 150mm 的裂缝。

### B.4 验收准则

**B.4.1** 本条技术要求参考了美国标准 ACI 359 的要求,也是核电实际检测经验的总结。最大试验压力是指压力试验中的压力峰值荷载。整体变形测量最大值是指试验峰值压力作用下所有底板、筒身和穹顶变形测点中变形测量的最大值。整体变形理论值是指安全壳结构在试验峰值压力作用下变形响应的计算值。

**B.4.2** 本条中 0.25mm 为本附录第 B.3.1 条中系统允许最大测量误差,同时现场加压试验宜在  $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  气温环境下进行,如试验期间温度波动明显,应在进行可靠的温度影响补偿、修正后再开展变形残余值分析评估工作。

## 附录 C 抗大型商用飞机撞击结构设计

### C.1 一般规定

**C.1.1** 抗大型商用飞机撞击是先进核电堆型的特征之一,核电厂设计时按超设计基准范畴考虑,需对撞击的后果进行评估。

除特别注明外,本附录所指的飞机均为大型商用飞机。

**C.1.2** 本条是规定抗飞机撞击结构应满足的安全要求,安全壳保持完整,即通过结构分析表明安全壳未被穿透,且在假设的堆芯损坏事件下,确保有效的缓解措施投运之前不会造成安全壳超压。乏燃料水池保持完整,即通过结构分析表明,大型商用飞机撞击乏燃料水池墙体及其支撑结构不会导致乏燃料水池安全运行最低水位线以下的位置发生泄漏。

**C.1.3** 在进行抗飞机撞击结构设计时应综合考虑飞机撞击产生的各种效应,在方案设计初期就采取合理可行的措施降低各种风险或减少分析的内容,本条结合工程实践给出了结构设计方案的一些原则要求。

**1** 基于简化分析的原则,考虑核安全相关结构(如安全壳)外设置抗飞机撞击结构来抵御飞机撞击,保证足够的距离使飞机撞击力不会作用到被防护结构上,不需要对被防护结构进行力学分析。

**2** 结构设计时需考虑硬性飞射物撞击产生的二次效应,根据试验研究表明,一定厚度的混凝土构件或背面设置钢内衬对预防撞击背面的混凝土剥落有较好的效果。通常防止背面剥落的临界厚度值更大。

**3** 在核电厂抗大型商用飞机撞击设计过程中不考虑飞机撞击时厂房内吊车正在运行的情况,安全壳和燃料厂房内均设置有

大型吊车,吊车不运行时应停放在指定区域,并采取有效措施防止在飞机撞击下产生跌落。

4 核电厂厂房外墙上由于工艺需要经常会有通风或其他功能需求的孔洞,对于处于防护范围内墙体的孔洞应设置专门的防护结构,防止飞射物穿透对内部的系统或设备产生影响,同时也可避免飞机撞击产生的火灾直接通过孔洞蔓延至厂房内。如未采取有效措施,则需要进行详细的分析,以评估核电厂的安全。

**C.1.4** 根据核电厂飞机撞击的防护要求,对抗飞机撞击结构应进行相应的计算分析,以确保厂房结构能抵御飞机的撞击,从而确保核电厂安全。

1 结合飞机撞击产生的效应,整体动力分析需考虑不同撞击位置的情况,确定飞机撞击对结构的最不利位置,需要进行多个撞击位置的考虑、分析和比较。局部计算分析主要考虑飞机部件(如发动机)作为硬性飞射物对结构的穿透、背面剥落等效应的计算。厂房结构的振动冲击效应分析主要是对影响安全的系统和设备进行评价。考虑动力稳定计算依据不足,本标准暂不做要求。

3 目前还没有出现大型商用飞机撞击核电厂的事件,同时在世界范围内大型商用飞机撞击的事件也很少,没有可以参照的依据,结构撞击分析影响因素很多,需要根据核电厂安全要求,采用一系列的保守假定。

1)核电厂目前主要考虑的飞机撞击事件是恶意撞击,属于超设计基准范畴,假定按照水平飞行考虑,对于墙体结构最不利撞击是垂直撞击,对于屋面结构,考虑到飞机操作的难度,结合 EPR 堆型设计时考虑飞机撞击角度,可取飞机轴线与水平面  $10^\circ$  夹角撞击;

2)通常情况下在结构构件的中间高度和中间跨度处为最不利位置,同时也应评估撞击其他位置导致更严重后果的可能性;

3)撞击位置的选取应有代表性,宜选在需评估楼层处,通常情况下,距离撞击位置或区域越近,产生的振动响应越大;

4)一般情况下不考虑流固耦合和水的阻尼效应,通常按质量

单元模拟考虑;

5)选用的本构模型宜经过验证,确保分析的准确性,在整体非线性动力分析中阻尼的影响不大,通常采用瑞利阻尼。

## C.2 材料及荷载

C.2.1 考虑到抗飞机撞击结构的特殊性,在计算与评价方面和静力计算不同,同时高速冲击下结构材料特性也有变化,将相关要求规定如下:

1 为了更为合理现实地分析飞机撞击的影响,混凝土强度宜采用现场实测值,测试的方法以及样本要求可参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010,也可参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 选取对应混凝土强度等级的标准值;

3 材料动力强度增大系数与材料的应变率相关,应变率越大,材料强度增大系数越高,没有可用数据时可采用表 10 的数据,该数据参见美国 NEI 07-13。

表 10 材料动力强度的动力增大系数表

材 料	动力增大系数 $DIF$
碳素钢板	1.29
不锈钢板	1.18
普通钢筋	1.10
预应力筋	1.00
混凝土抗压强度	1.25
混凝土抗剪强度	1.10

4 结合现有工程实践经验,通常强度等级较高的混凝土对抵抗撞击有好的效果。

C.2.2 结合飞机撞击产生的效应,通常需考虑飞机整体撞击产生的撞击力,主要是产生整体效应,如结构的变形、位移等影响。局部荷载主要指飞机的部件(如发动机)等硬性飞射物对结构的撞

击,主要产生穿透、背面剥落等局部效应。

2 整体荷载主要有两种考虑方式,一是力时程曲线,可由主管部门给定,也可根据飞机基本特征结合理论公式进行推导。图 C.2.2 给出的荷载时程曲线(其曲线列表见表 11)是基于国内外常规机型撞击曲线,同时参考了几类标准堆型的设计参数拟合而成,具有比较广泛的包络性,线型简单,方便使用。当无可靠数据时,可参考使用。二是建立飞机三维有限元模型作为荷载输入,需要详细的飞机几何模型和材料特性参数。

表 11 飞机撞击力时程曲线控制点坐标

序号	时间(ms)	力(MN)
1	0	0
2	20	70
3	140	70
4	150	250
5	200	250
6	210	70
7	300	70
8	500	0

3 通常飞机的发动机和起落装置比较坚硬,飞机在飞行过程中起落架是收起的,而发动机位于飞机机翼两侧,在撞击过程中易与飞机本体发生分离,形成独立的硬性飞射物,因此,在局部荷载效应中主要考虑发动机的撞击,影响发动机撞击局部效应的因素主要是根据撞击经验公式中的参数(等效直径、质量、速度)确定。

4 撞击速度应按实际撞击速度考虑,当没有明确的撞击速度时则按低空飞行速度或正常起飞和降落的速度考虑,考虑到大型商用飞机在低空飞行时的操控难度,以及核电厂目标相对较小,且通常位于山地之间,根据目前民航飞机的起飞降落时速度以及现有飞机坠毁的记录情况,一般为 100m/s。发动机与机身分离后作



为独立的飞射物,撞击速度也按 100m/s 考虑,此撞击速度 100m/s 仅适用于大型商用飞机,不适用于军用飞机。

### C.3 结构计算

**C.3.1** 整体动力计算时需要满足一定的要求,保证计算分析的合理性和可靠性。

1 具体计算方法目前主要有两种,也是目前工程中常用的方法,一是力时程曲线分析方法,该方法需要首先获取飞机撞击的力时程曲线以及飞机撞击作用面积,在分析过程中需假定飞机荷载均匀并同时作用在撞击区域,是一种相对保守的设计方法,但对于弧形面以及异形区域不能真实地反映飞机撞击情况;二是飞射物-靶体相互作用分析方法,该方法需要获取详细的飞机模型(包括几何信息和材料信息),但能准确地反映飞机撞击的真实情况,能模拟不同角度和各种撞击位置的真实情况。

3 本款结合实践工程案例给出了整体动力分析的判定准则。结构的整体位移和变形不宜过大,避免影响安全相关系统或设备,从而需要进一步论证安全系统的可用性,在撞击过程中,局部混凝土已发生破坏,通常计算时按照混凝土的应变考虑。撞击过程中产生的拉力主要由钢筋承担,钢筋模拟时通常采用理想弹塑性模型,失效准则也是以应变失效为判据,通常达到极限应变后认为失效,按照目前通行的取值,对于国标 HRB400 和 HRB500 钢筋的极限应变取值为 5%。

**C.3.2** 局部效应主要指硬性飞射物对结构的撞击,计算分析时通常采用经验公式法。

目前我国规范没有针对飞机硬性飞射物的穿透计算公式,具体计算时可参考美国标准 NEI 07-13 中给出的穿透计算公式,也可参考核电厂飞射物计算采用的其他穿透计算公式。

### C.4 构造措施

**C.4.1** 考虑到高速撞击下需保证钢筋性能的连续,要求纵向受

力钢筋必须采用机械连接,且采用的机械接头经过瞬间加载冲击试验验证。

本条主要是引用现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 中关于机械接头的规定。由于飞机撞击是瞬时高强度冲击荷载,因此需要开展瞬时加载冲击试验,试验控制的加载应变率为  $1.0\text{s}^{-1}$ ,此数据是第三代压水堆工程经验的反馈。

**C. 4. 2** 飞机撞击力相对于防护结构来说在局部产生较大的冲切力,需要配置一定数量的抗剪钢筋,抗剪钢筋的数量与冲切力及作用范围有关,可参考现行欧标冲切公式,按照飞机撞击力峰值乘以动力放大系数 1.6 后作为设计荷载的输入进行计算。

## 附录 D 水池

### D.1 一般规定

**D.1.1** 当液体自由液面到封闭容器顶的距离小于自由液面计算晃动高度的 50% 时,可不计入流体晃动效应,按一个整体来考虑。

**D.1.2** 核电厂混凝土水池一般在厂房内部,和结构整体同时布置,池壁外墙及底板兼做结构墙体及板,对防水要求较高,常采用不锈钢敷面作为内衬。本条参考《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》CECS 138 的要求及核电工程实践编制。

### D.2 分析方法

**D.2.1** 本条是针对混凝土结构的水池,一般情况下具有足够的刚度,可满足刚性池壁的假定。如果水池支承构件不满足刚性池壁假定的话,则不可忽略其影响。大部分情况下,水池系统可简化为水平向两种振动模态,一种是晃动模态,自由液面不受约束产生的晃动;另一种是冲动模态,底部的液体随支承结构共同作用。在竖向简化为一种振动模态,即液体随支承结构共同作用。简化的附加质量方法是评估出参与晃动的液体质量,在水平方向原水池结构上附加排除晃动质量后剩余的液体质量,在竖直方向保持所有的液体质量附加到原水池结构上。简化的公式计算方法适用于几何规则的水池,比如方形、圆柱形、圆环形、球形等,对于不规则或者规则但不连通的水池,建议直接采用线弹性数值分析方法评估出参与晃动的液体质量,再采用附加质量的方法。简化计算方法可参考美国核安全相关结构抗震规范 ASCE 4-98(2016 版)。

**D.2.2** 对于冲动模态部分则可选择支承构件的相同材料的阻尼值。

**D. 2. 3** 在考虑竖直方向的影响时,一般情况下可认为液体是不可压缩的,且允许只考虑一种振动模态,即采用集中质量的简化方式集中在水池的底部,但当液体较深时,应评估液体的压缩性带来的影响,必要时在竖直方向设置两种振动模式,而不能按第 D. 2. 1 条的条文说明中针对竖向只采用一种振动模式。在考虑水平方向的影响时,应考虑水池壁与支承基础之间的剪力传递,以及水池壁上的动压影响。

**D. 2. 4** 核电厂中,由于水池墙体较厚,在厚度方向的热梯度呈现非线性,可考虑用线性方式简化。

**D. 2. 5** 进行液体撞击水池顶盖评估时,撞击力大小可采用侧壁最大动水压力。评估方法可参考 *Seismic Design and Evaluation Guidelines for the Department of Energy High-Level Waste Storage Tanks and Appurtenances*(1995 版)。

## 附录 E 混凝土后锚固

### E.1 一般规定

**E.1.2** 目前锚栓抗震性能评估是基于混凝土强度等级 C25~C60 进行的,考虑到核安全相关混凝土结构对混凝土强度的要求,所以强度适当提高为 C30。

**E.1.3** 现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 中明确“承重结构用的锚栓,应采用有机械锁键效应的后扩底锚栓,也可采用适应开裂混凝土性能的定型化学锚栓”。参考现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145,同时考虑核电厂本身对化学锚栓的辐照影响,推荐采用扩底型锚栓。

**E.1.4** 混凝土结构中的锚栓性能应符合现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145 的相关规定。延性锚栓可参照 ACI 349 的要求确定,即指伸长率不小于 14%、面积收缩率不小于 30%的锚栓。

### E.2 后锚固设计

**E.2.3** 破坏控制的目的是为了实现延性破坏。

**E.2.4** 低强钢材是指强度等级不大于 5.8 级的后锚固螺栓。

**E.2.5** 核安全相关混凝土结构用锚栓由于与主体结构一样承受极限安全地震动产生的地震作用,且要求有较高的安全裕度。现有研究表明,长期拉拔力作用下,钢制扩底型锚栓的锚固力衰减程度随拉拔力增加、基材强度降低而增大,同时考虑使用年限的要求,编制本条内容。

**E.2.6** 一般而言,出于简化的目的,后锚固按开裂混凝土进行考虑,也可按第 E.2.3 条要求进行复核。

**E. 2. 7** 后锚固连接的具体计算可参考现行行业标准《核电厂核安全相关混凝土结构后锚固技术规程》NB/T 20414 进行设计。

**E. 2. 8** 锚栓的构造要求主要参考现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145 和美国标准 ACI 349 的要求,考虑到核电构件截面尺寸一般较大,从严给出本条规定的要求限值。其中后锚锚栓的钻孔能引起微裂缝,最小边缘距离为 2 倍最大骨料粒径的要求是为了尽可能减小微裂缝的影响。

S/N:155182 · 0468



统一书号: 155182 · 0468

---

定 价: 35.00元