

AUDC



# 中华人民共和国国家标准

P GB

---

## 核电厂混凝土结构技术标准

Technical specification for concrete structures of nuclear power plants

### 征求意见稿

XXXX-XX-XX 发布 XXXX-XX-XX 实施

---

中华人民共和国住房和城乡建设部  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

## 前 言

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 号文件）的要求，本标准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。

在编制过程中，编制组开展了专题研究和调查研究，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，参考有关国际标准和国外先进标准，并在全国范围内广泛征求有关设计、科研、施工等单位的意见，经反复讨论、修改、充实，最后经审查定稿。

本标准的主要内容包括：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、验收以及相关的附录。

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，E-mail: guojunying@cgnpc.com.cn），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

中国核电工程有限公司

上海核工程设计研究院

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

中核工业第二二建设有限公司

中核工业第二四建设有限公司

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：

本标准主要审查人员：

## 目 次

1	总则	1
2	术语和符号	1
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本设计规定	7
3.1	一般规定	8
3.2	结构方案	9
3.3	承载能力极限状态计算	10
3.4	正常使用极限状态验算	11
3.5	耐久性设计	11
4	材料	14
4.1	混凝土	15
4.2	钢筋	15
5	荷载与荷载组合	16
5.1	一般规定	17
5.2	荷载	17
5.3	核安全相关混凝土结构承载能力极限状态的荷载组合	22
5.4	安全壳壳体承载能力极限状态的荷载组合	23
5.5	安全壳筏形基础承载力计算的荷载组合	24
5.6	核安全相关混凝土结构正常使用极限状态的荷载组合	25
5.7	安全壳壳体正常使用极限状态的荷载组合	26
5.8	安全壳筏形基础正常使用极限状态的荷载组合	26
5.9	结构整体稳定性验算	26
6	结构分析	27
6.1	基本原则	28
6.2	分析模型	29

6.3	弹性分析.....	29
6.4	塑性内力重分布分析.....	30
6.5	弹塑性分析.....	31
7	承载力极限状态计算.....	31
7.1	一般规定.....	32
7.2	正截面承载力计算.....	32
7.3	平面内受剪.....	33
7.4	平面外受剪.....	35
7.5	受冲切承载力计算.....	36
7.6	扭曲截面承载力计算.....	37
7.7	局部受压承载力计算.....	37
7.8	疲劳验算.....	37
7.9	剪摩擦验算.....	37
8	正常使用极限状态验算.....	38
8.1	裂缝控制验算.....	39
8.2	受弯构件挠度验算.....	40
9	构造规定 .....	42
9.1	变形缝.....	43
9.2	混凝土保护层.....	44
9.3	钢筋锚固.....	44
9.4	钢筋连接.....	46
9.5	最小配筋的要求.....	47
10	结构构件的基本规定.....	48
10.1	基础.....	49
10.2	板.....	49
10.3	梁.....	50
10.4	柱.....	53

10.5	剪力墙.....	55
10.6	叠合受弯构件.....	56
10.7	预埋件与连接件.....	57
11	预应力混凝土安全壳.....	58
11.1	一般规定.....	59
11.2	承载力计算要求.....	59
11.3	应力、应变要求.....	62
11.4	预应力系统.....	63
11.5	预应力系统设计.....	65
12	施工 .....	68
12.1	一般规定.....	69
12.2	模板工程及支撑体系.....	69
12.3	钢筋工程.....	71
12.4	预应力工程.....	76
12.5	混凝土工程.....	78
13	验收 .....	79
13.1	一般规定.....	80
13.2	模板工程.....	80
13.3	钢筋工程.....	84
13.4	预应力工程.....	88
13.5	混凝土工程.....	94
附录 A	安全壳结构整体性检测.....	99
附录 B	抗大型商用飞机撞击结构设计.....	103
附录 C	水池.....	112
附录 D	混凝土后锚固.....	114
附录 E	超设计基准工况.....	128

本标准用词说明.....	130
引用标准名录.....	131

## Contents

1	General Provisions.....	1
2	Terms and Symbols .....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	4
3	General Requirements.....	8
3.1	General.....	8
3.2	Structural Scheme .....	9
3.3	Ultimate Limit States .....	10
3.4	Serviceability Limit States.....	11
3.5	Durability Requirements.....	11
4	Materials .....	15
4.1	Concrete .....	15
4.2	Steel Reinforcement.....	15
5	Load and Load Combination .....	17
5.1	General.....	17
5.2	Load .....	17
5.3	Load Combinations of Ultimate Limit States for Nuclear Safety Related Concrete Structures.....	22
5.4	Load Combinations of Ultimate Limit States for Containment.....	23
5.5	Load Combinations of Ultimate Limit States for Raft Foundation of Containment.....	24
5.6	Load Combinations of Serviceability Limit States for Nuclear Safety Related Concrete Structures.....	25
5.7	Load Combinations of Serviceability Limit States for Containment.....	26
5.8	Load Combinations of Serviceability Limit States for Raft Foundation of Containment.....	26



5.9	Checking of Global Stability.....	26
6	Structural Analysis.....	28
6.1	General.....	28
6.2	Analysis Model.....	29
6.3	Elastic Analysis.....	30
6.4	Analysis on Plastic Re-distribution of Internal Forces.....	30
6.5	Elastic-Plastic Analysis.....	31
7	Ultimate Limit States Design.....	32
7.1	General.....	32
7.2	Calculation of Flexural and Axial Capacity.....	32
7.3	In-Plane Shear Resistance.....	33
7.4	Out-of-Plane Shear Resistance.....	35
7.5	Calculation of Punching Shear Capacity.....	36
7.6	Calculation of Torsional Capacity.....	37
7.7	Calculation of Local Compression Capacity.....	37
7.8	Checking of Fatigue.....	37
7.9	Checking of Shear Friction.....	37
8	Checking of Serviceability Limit States.....	39
8.1	Checking of Cracks.....	39
8.2	Checking of Deflection of Flexural Members.....	40
9	Detailing Requirements.....	43
9.1	Movement Joint.....	43
9.2	Concrete Cover.....	44
9.3	Anchorage of Steel Reinforcement.....	44
9.4	Splices of Reinforcement.....	46
9.5	Requirements of Minimum Ratio of Reinforcement.....	47
10	Fundamental Requirements for Structural Members.....	49

10.1	Foundations .....	49
10.2	Slabs.....	49
10.3	Beams.....	50
10.4	Columns .....	53
10.5	Shear Walls.....	55
10.6	Composite Bending Members.....	56
10.7	Embedded Parts and Connecting Pieces.....	57
11	Prestressing Concrete Containment .....	59
11.1	General .....	59
11.2	Calculation Requirements of Bearing Capacity .....	59
11.3	Requirements of Stress and Strain.....	62
11.4	Prestressing System .....	63
11.5	Design of Prestressing System .....	65
12	Construction.....	69
12.1	General.....	69
12.2	Formwork Engineering .....	69
12.3	Reinforcement Engineering .....	71
12.4	Prestressing Engineering.....	76
12.5	Concrete Engineering .....	78
13	Checking and Acceptance .....	80
13.1	General.....	80
13.2	Formwork Engineering .....	80
13.3	Reinforcement Engineering .....	85
13.4	Prestressed Engineering.....	88
13.5	Concrete Engineering .....	94
Appendix A	Integrity Test of Containment .....	100
Appendix B	Structural Design against Large Commercial Aircraft	

Impact.....	104
Appendix C Pool.....	113
Appendix D Concrete Post-Anchorage.....	125
Appendix E Design Extension Domain.....	129
Explanation of Wording in This Specification.....	130
List of Quoted Standards.....	131

# 1 总 则

**1.0.1** 为在核电厂建筑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。

**【条文说明】**：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，明确核电厂建筑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。非核安全相关混凝土结构和特种混凝土结构应符合现行国家标准的相关规定。

**【条文说明】**：明确本标准适用的范围。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 50557 的规定执行。

**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》GB50153 的原则制定。

**【条文说明】**：明确依据“现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 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中国和美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** 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 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人为事件，如爆炸、大型商用飞机撞击等。

#### 2.1.2 物项 structure, system and component, SSC

核电厂结构、系统、部件的通称。

【条文说明】：本条参照《核电厂质量保证大纲的制定》(HAD003/01)制定。

#### 2.1.3 设计基准工况 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（地震等）、外部人为事件（大型商用飞机撞击等）及其它工艺条件等。

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

导致核动力厂事故工况的假设事故，这些事故的放射性物质释放在可接受限值以内，该核动力厂是按确定的设计准则和保守的方法来设计的。

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

不在设计基准事故工况考虑范围的事故工况，在设计过程中应该按最佳估算方法加以考虑，并且该事故工况的放射性物质释放在可接受限制以内。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。

#### 2.1.6 超设计基准工况 conditions beyond design basis / design extension domain

超越设计基准之外的工况，包括设计扩展工况和超设计基准外部事件(如地震、大型商用飞机撞击等)。

#### 2.1.7 极限安全地震动 ultimate safety 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 $10^{-4}$ 。

#### 2.1.8 运行安全地震动 operational safety 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控制、设计中的荷载组合与应力分析等，该地震动具有与极限安全地震动不同的用途。

### 2.1.9 安全壳 containment vessel

包括底板、圆形筒壁及穹顶，且混凝土内表面带有钢内衬，同时沿筒身及穹顶布置有预应力筋的混凝土壳体结构。

【条文说明】：钢内衬主要用于实现安全壳的密封功能，除在建造阶段、飞射物撞击作用等特殊工况外，钢内衬不考虑其结构强度，但在确定最大应变时应考虑钢内衬与安全壳混凝土的共同作用。钢内衬的具体设计可按国家现行相关标准的规定执行。

### 2.1.10 核安全相关 nuclear safety related

按照核安全法规、导则要求对核电厂混凝土构筑物进行安全分级，符合安全级及非安全级（有特殊要求的）要求。

### 2.1.11 墙 wall

核电厂混凝土结构中的主要抗侧力构件。主要具有下列特点：长度长、厚度大、平面外的刚度不能忽略、墙体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。

### 2.1.12 安全壳压力试验 pressure 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。

【条文说明】：通过压力试验检验安全壳的结构性能，进而保证安全壳的结构整体性和密封性。

### 2.1.13 预应力筋摩擦试验 friction test for prestressing tendons

简称“摩擦试验”，在安全壳预应力筋张拉施工前，选取不同类型的典型预应力筋在安全壳相应部位进行张拉，以验证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。

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

以计算配合比为基础，在试验室试配调整，并进行混凝土拌合物和硬化混凝土性能试验，试验结果满足设计和施工要求的配合比。

### 2.1.15 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。

### 2.1.16 混凝土可用性试验 test of concrete availability

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。

【条文说明】:本节中只列出常用的、重要的、核电厂特有的术语;现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010中已定义的不再重复定义。

## 2.2 符号

### 2.2.1 材料性能

$E$ ——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;

$f_{ss}$ ——纵向受拉普通钢筋的实际应力;

$f_{tk}$ 、 $f_t$ ——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;

$c$ ——施工缝处的粘结力;

$C$ ——结构构件达到正常使用要求所规定的限值;

$D$ ——不包括施加预应力产生的永久荷载;

$E_0$ ——运行安全地震作用;

$E_s$ ——极限安全地震作用;

$F$ ——由施加预应力产生的永久荷载;

$F_e$ ——飞机等效静力荷载。

$G$ ——启动卸压阀或其它高能装置引起的荷载；

$G_e$ ——结构的等效重力荷载；

$H_a$ ——内部水淹作用于安全壳的荷载。

$L$ ——活荷载；

$N$ ——轴向力设计值；

$N_x$ ——墙、板或壳体单位长度内的水平向薄膜力设计值，拉力为正，压力为负；

$N_y$ ——墙、板或壳体单位长度内的竖向薄膜力设计值，拉力为正，压力为负；

$P_a$ ——压力荷载；

$P_r$ ——安全壳进行整体性检查时的压力荷载；

$P_v$ ——安全壳内部或外部压力变化而引起的压力荷载；

$R$ ——结构构件的抗力设计值；

$R(\cdot)$ ——结构构件的抗力函数；

$R_a$ ——管道和设备反力；

$R_o$ ——正常运行或停堆期间管道和设备的反力；

$R_r$ ——局部荷载；

$S$ ——承载能力极限状态下作用组合的效应设计值；

$S_k$ ——雪荷载；

$T_a$ ——温度变化作用；

$T_o$ ——正常运行或停堆期间的温度变化作用；

$T_r$ ——安全壳进行整体性检查期间的温度变化作用；

$V$ ——剪力设计值；

$V_w$ ——施工缝处的剪力设计值；

$W$ ——风荷载标准值；

$W_m$ ——龙卷风的飞射物荷载；



$W_o$ ——基本风压;

$W_p$ ——龙卷风的差压荷载;

$W_r$ ——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

$a_k$ ——几何参数的标准值;

$A$ ——构件截面面积;

$A_c$ ——施工缝处为抵抗剪力传递的混凝土截面面积;

$A_e$ ——结构中单根钢筋外周握裹混凝土的有效截面面积;

$A_s$ ——受拉区纵向普通钢筋的截面面积;

$A'_s$ ——受压区纵向普通钢筋的截面面积;

$A_{sx}$ ——墙、板或壳体单位长度内的水平向钢筋截面面积;

$A_{sy}$ ——墙、板或壳体单位长度内的竖向钢筋截面面积;

$A_{sv}$ ——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形截面或I形截面的腹板宽度;

$b_e$ ——结构等效重心到倾覆点之间的水平距离;

$d_c$ ——从边缘受拉纤维到相邻钢筋形心的距离;

$h$ ——墙、板或壳体的厚度;

$h_0$ ——截面的有效高度;

$h_1$ ——从受拉钢筋形心到中和轴的距离;

$h_2$ ——从边缘受拉纤维到中和轴的距离;

$h_e$ ——飞机荷载作用点到倾覆点之间的垂直距离;

$s$ ——沿构件长度方向的箍筋间距;

$W_{\max}$ ——最大裂缝宽度)；

$\alpha$ ——斜向钢筋与施工缝平面的夹角。

#### 2.2.4 计算系数及其它

$g$ ——重力加速度；

$V_0$ ——百年一遇的 3 秒平均最大风速（距地面以上 10m 高处阵风）。

$\beta_c$ ——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** 混凝土结构设计应符合安全性、适用性、耐久性及其可建造性相关要求。

【条文说明】：安全性是指结构能够承受各种作用的影响，满足设计规定的承载能力要求；适用性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混凝土结构的厚墙、厚板、转换多、配筋量多、跨度大及双向预应力筋等结构特点，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。

【条文说明】：本标准依据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 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。对难于量化的间接作用和耐久性等，仍采用基于经验的定性方法进行设计。

**3.1.3** 设计中应考虑厂址环境因素对核安全相关结构的影响，主要包括：

- 1 厂址地基条件及附近区域边坡的稳定性；
- 2 洪水、暴雨、海啸或湖涌、台风、龙卷风、地震等自然灾害的影响；
- 3 极端环境温度；
- 4 自然环境对结构材料的影响；
- 5 飞机坠毁、爆炸等外部人为事件。

【条文说明】：厂址地基条件包括水文、地质、地基稳定性、液化等；自然环境对结构材料的影响，是指诸如空气中的含氟物和其它有害物质、侵蚀性地下水的腐蚀；外部人为事件是指发生在核电厂厂房外部并与人类活动直接相关的人为事件，如爆炸、大型商用飞机撞击等。

**3.1.4** 在设计基准工况下，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。在超设计基准工况下，可按附录 E 进行评估。

【条文说明】：在设计基准工况下，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》HAF102 要求的基本安全功能，HAF102 4.1.1 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 HAF102 5.1.9 的要求，设计必须考虑超设计基准工况，超设计基准工况下除应考虑上述基本安全功能外，还必须提供适当的裕量，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。

**3.1.5** 对于承载力和密封性有特殊要求的结构，必要时应通过规定压力下的压力试验验证其结构完整性。安全壳压力试验的要求见附录 A。

**【条文说明】**：本条主要针对安全壳。安全壳在核电厂建造完成后，投入运行之前需进行首次压力试验，以检测其结构的完整性和密封性功能，在役期间还需进行定期压力试验以检测结构的承载力和密封性功能。

**3.1.6** 混凝土结构应按现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB50267 规定的抗震分类及其设计水准进行抗震设计。

**【条文说明】**：混凝土结构的抗震设计符合现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB50267 规定的抗震分类及其设计水准：核安全相关结构属于抗震 I、II 类物项，应基于设计基准地震动进行抗震验算，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。

混凝土结构的抗震验算按本标准相关要求进行。

**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。

**【条文说明】**：在综合考虑各种堆型设计使用年限不同的现实情况，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** 混凝土结构方案设计遵循下列主要原则：

- 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 重要构件应考虑设置冗余约束；
- 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。

【条文说明】：1、明确刚度中心宜接近质量中心，以减小扭转效应。2、竖向承重构件宜上下对齐，避免局部突出或收进；3、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** 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、沉降、防震等功能要求，合理确定变形缝的设置和构造形式。

【条文说明】：在满足核电工程厂房使用功能要求前提下，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 承载能力极限状态计算

**3.3.1** 在设计基准工况下，混凝土结构构件应根据承载能力极限状态进行验算，结构构件的承载力应符合下式要求：

$$S_d \leq \frac{1}{\gamma_R} R_d \quad (3.3.1-1)$$

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

式中： $S_d$ ——承载能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；

$\gamma_R$  ——结构构件抗力调整系数：除特别注明外， $\gamma_R$  均取 1。

$R(\cdot)$  ——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。

【条文说明】：由于核电工程特殊性，国外相关核电标准及按国内核电行业标准进行的设计实践中，均未涉及结构重要性系数 $\gamma_0$ 、结构构件抗力模型不定性系数 $\gamma_{Rd}$ 或承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE}$ ，本标准在编制过程中，通过开展可靠度专题研究，提出了目标可靠指标。

同时，考虑到结构整体稳定性验算中调整安全系数的需要，以及后锚固设计中锚固承载

力设计值调整的需要，引入结构构件抗力调整系数  $\gamma_R$ 。

### 3.4 正常使用极限状态验算

**3.4.1** 在设计基准工况下，混凝土结构构件应进行正常使用极限状态验算，结构构件应符合下式要求：

$$S \leq C \quad (3.4.1)$$

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。

【条文说明】：“结构构件达到正常使用要求的规定限值”主要指挠度和裂缝宽度等的限值。正常使用极限状态的荷载组合指正常运行工况、正常运行加严重环境、正常运行加极端环境。

### 3.5 耐久性设计

**3.5.1** 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、严格控制施工质量、加强使用中的定期监测及维护等基本措施来保证耐久性。对处于严重腐蚀环境的构件可采用防腐附加措施。

【条文说明】：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。

**3.5.2** 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 3.5.2-1 的规定确定。盐渍土环境可根据土中不同离子的含量按表 3.5.2-3 分为 5 类，氯盐渍土和亚氯盐渍土可归为氯化物环境，硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土可归为硫酸盐环境。

表 3.5.2-1 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-B	室内环境	混凝土结构的室内构件
冻融环境	II-D	微冻地区的有盐环境	泵房的水位变动区构件

		混凝土高度饱水	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 100~300m 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、低于海平面以上 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	按表 3.5.2-2 采用	

表 3.5.2-2 水、土中硫酸盐和酸类物质环境作用等级

环境 作用等级	作用因素 水中硫酸根离子 浓度 $\text{SO}_2^{-4}$ (mg/L)	土中硫酸根离子 浓度(水溶值) $\text{SO}_2^{-4}$ (mg/kg)	水中镁离子 浓度 (mg/L)	水中酸 碱度(pH 值)	水中侵蚀性 二氧化碳 浓度(mg/L)
V-C	200~1000	300~1500	300~1000	6.5~5.5	15~30
V-D	1000~4000	1500~6000	1000~3000	5.5~4.5	30~60
V-E	4000~10000	6000~15000	$\geq 3000$	<4.5	60~100

表 3.5.2-3 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	2.0~1.0	—
亚硫酸盐渍土	1.0~0.3	—
硫酸盐渍土	<0.3	—
碱性盐渍土	—	>0.3

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

【条文说明】：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 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。

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。本标准引用了现行国家标准 GB/T 50942-2014《盐渍土地区建筑技术规范》中盐渍土按含盐的化学成份分类方法，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。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。

**3.5.3 一般环境、冻融环境、氯化物环境、化学腐蚀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》GB50476 中设计使用年限 100 年的规定。**

【条文说明】：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 50476) 的规定，具体应用中按表 3.5.2-1 和表 3.5.2-2 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 50476）中相同的环境类别和环境作用等级采取耐久性措施。在综合考虑各种堆型设计使用年限不同的现实情况，强调设计使用年限的最低值。耐久性规定的设计使用年限应充分考虑核电建造、使用及退役期，特别是结构退役后仍需具有避免放射性物质泄漏的功能，所以核安全相关混凝土结构的耐久性措施按 100 年考虑。

**3.5.4 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》 GB50476 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。

【条文说明】：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** 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。对于受混凝土徐变影响较大的工况，应对弹性模量进行适当折减。

【条文说明】：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。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，在事故工况下，安全壳结构弹性模量可根据法国标准 ETC-C 进行折减。

**4.1.3** 混凝土温度不得超过下列数值：

1 在正常运行工况下或其它长期作用的温度限值为 65℃，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℃；

2 在事故工况下或其它任何短期作用的温度限值为 180℃，但由于管道破裂时的喷射作用所影响的局部区域，其允许温度可提高到 345℃。

【条文说明】：本条是参考美国标准 ACI349 /NB20303 的要求制定。

**4.1.4** 混凝土温度超过本标准 4.1.3 条温度限值时，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本标准 4.1.3 条规定的限值。若超过本标准 4.1.3 条温度限值且高温作用引起混凝土强度退化，混凝土强度可按国家现行相关标准取值。

【条文说明】：一般温度情况下，结构设计时采用混凝土强度设计值；在超高温或者长期高温作用下，混凝土强度会退化，在此情况下，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》取值。

### 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。

【条文说明】：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用性要求较高，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。

#### 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%。

【条文说明】：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 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》GB50010 的规定。

【条文说明】：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 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》GB50010 的规定。

【条文说明】：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 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》GB50010 的要求。

【条文说明】：为解决粗钢筋及配筋密集引起的设计、施工困难，直径 28mm 及下列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，并筋应按单根等效直径进行计算，等效钢筋的等效直径应按截面面积相等的原则换算确定。

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构造要求。

#### 4.2.6 当构件中采用预制的钢筋焊接网片或钢筋骨架配筋时，应满足国家现行相关标准的要求。

【条文说明】：考虑到模块化建设的需要，钢筋的专业化加工配送有利于节省材料、方便施工、提高工程质量。

## 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的荷载分为三类：永久荷载、可变荷载、偶然荷载。

【条文说明】：永久荷载是指在结构使用期间，其值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计的荷载（如核电厂物项的自重、液体静压力、预应力等）；可变荷载是指在结构使用期间，其值随时间变化，且其变化与平均值相比不可以忽略不计的荷载（包括使用期间的活荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载、温度作用等）；偶然荷载是指在结构使用期间，不一定出现，而一旦出现其量值很大且持续时间很短的荷载（如地震、外部爆炸等）。

**5.1.2** 结构设计时，荷载取值应根据厂址条件、工艺要求或国家相关标准的规定确定。

【条文说明】：与厂址条件和工艺条件无关的永久荷载及可变荷载，一般按现行国家标准取值；其它荷载根据厂址条件、工艺要求或国家相关标准要求确定其荷载取值。

**5.1.3** 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。

**5.1.4** 考虑混凝土开裂的影响，采用线弹性方法计算的温度应力可适当折减，折减系数为：

- 1 安全壳在设计基准事故工况下取 0.5；
- 2 除安全壳外的钢筋混凝土结构：
  - 1) 正常运行或停堆期间，取 0.6；
  - 2) 设计基准事故工况，取 0.35；

【条文说明】：关于温度作用效应的折减，主要参考法国标准 ETC-C 对欧洲标准 EN 1992-1-1 5.4 (1) ~ (3) 补充规定，同时结合设计实践，对于混凝土强度等级为 C35~C80 的混凝土结构给出折减系数，折减系数的大小与不同工况下混凝土开裂的程度相关。

**5.1.5** 结构分析时应考虑活荷载不利布置引起的结构内力增大。

### 5.2 荷载

#### 5.2.1 永久荷载 ( $D$ 或 $F$ )

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；地基沉降作用；混凝土的收缩和徐变作用。

【条文说明】：抗裂设计不应忽略结构成型时混凝土收缩拉应力不利影响。混凝土最终收缩试验值可根据混凝土所用材料 and 设计配合比，通过混凝土试块试验确定；当缺乏试验资料时，混凝土的收缩可采用现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB 20105 计算（该公式和欧洲标准 EN1992-2 一致）；也可近似采用  $2.50 \times 10^{-4}$  作为混凝土的最终收缩值，其中一半的收缩效应在建造阶段已经发生，计算时可考虑  $1.25 \times 10^{-4}$  收缩值。

混凝土的徐变值应根据可靠试验值确定，当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 20105 计算。

永久荷载 ( $F$ )：指施加预应力产生的荷载。

【条文说明】：包括建造和运行期间的预应力作用。

### 5.2.2 活荷载 ( $L$ )

活荷载主要包括：施工期间的活荷载（搬运荷载、支撑荷载等），根据施工条件确定，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、土和土中水压力等），根据土建接口条件和厂址条件确定。屋面活荷载取屋面最大积水荷载或屋面雪荷载（按百年一遇取值）两者中较大值，且屋面均布活荷载不小于  $2 \text{ kN/m}^2$ 。

【条文说明】：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  $4 \text{ kN/m}^2$ ，不包含上层楼板重量；土压力根据现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T20012/《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303（源自美国标准），为活荷载。

### 5.2.3 雪荷载 ( $S_k$ )

基本雪压应根据厂址条件按百年重现期确定；无可用资料时，也可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定取值。雪荷载应考虑屋面积雪的不均匀性对结构设计的不利影响。

【条文说明】：考虑到核电建造、使用及退役期较长，采用偏严的基本雪压值。屋面积雪的不均匀性通过屋面积雪不均匀系数考虑。

### 5.2.4 正常运行或停堆期间的温度作用 ( $T_0$ )

结构的温度作用应考虑建造温度和环境温度的影响。其中，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℃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℃考虑。

【条文说明】：此处的“温度作用”实际上应为“温度变化作用”，考虑到是核电习惯用语，此处不作修改。对于室外温度，参考法国标准 RCC-CW，低温按连续七 d 的平均最低温度的取值。

### 5.2.5 正常运行或停堆期间管道和设备的反力 ( $R_o$ )

正常运行或停堆期间，由于温度效应等引起的管道和设备作用力，不包括自重和地震产生的反力。

### 5.2.6 启动卸压阀或其它高能装置引起的荷载 ( $G$ )

【条文说明】：该荷载属于局部效应，整体计算中可以不考虑。

### 5.2.7 安全壳内部或外部压力变化而引起的压力荷载 ( $P_v$ )

该压力及其对应的循环数由工艺要求确定。

### 5.2.8 安全壳进行整体性检查时的压力荷载 ( $P_t$ )

对于首次整体性检查，压力  $P_t$  宜取设计基准事故压力  $P_a$  的 1.10~1.15 倍；对于服役期间的定期检查，压力  $P_t$  宜取设计基准事故压力  $P_a$  的 1.0 倍；安全壳结构整体性检查详见附录 A。

### 5.2.9 安全壳进行整体性检查期间的温度作用 ( $T_t$ )

试验期间的环境温度可根据实际情况确定；若无确切数据，可按 5℃~40℃考虑。

【条文说明】：此处的“温度作用”实际上应为“温度变化作用”，考虑到是核电习惯用语，此处不作修改。试验期间的环境温度应在 5℃以上。

### 5.2.10 设计基准事故引起的荷载和作用 ( $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$ )

#### 1 压力荷载( $P_a$ )

设计基准事故引起的压力曲线及隔间压差根据工艺资料确定。

#### 2 温度作用( $T_a$ )

设计基准事故引起的温度应根据工艺资料确定。

### 3 管道和设备反力 ( $R_a$ )

- 1) 管道通过贯穿件及连接件作用在结构上的作用力;
- 2) 设备反力。

### 4 局部荷载 ( $R_r$ )

- 1) 由高能管道破裂而产生的反力  $R_{rr}$ ;
- 2) 由高能管道破裂所产生的喷射冲击荷载  $R_{rj}$ ;
- 3) 由高能管道破裂所产生的撞击荷载  $R_{rm}$ 。

【条文说明】：此处的“温度作用”实际上应为“温度变化作用”，考虑到是核电习惯用语，此处不作修改。

## 5.2.11 设计基准地震作用 ( $E_s$ 、 $E_o$ )

- 1 极限安全地震作用 ( $E_s$ ) ;
- 2 运行安全地震作用 ( $E_o$ ) 。

【条文说明】：设计基准地震作用按现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB50476 定义及取值， $E_s$  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  $10^{-4}$ 。

## 5.2.12 风荷载 ( $W_o$ 、 $W$ )

### 1 基本风压 ( $W_o$ )

基本风压应按下列式计算：

$$W_o = V_o^2 / 1600 \quad (5.2.12-1)$$

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

【条文说明】：由于核电厂采用厂址实测风速，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。

### 2 风荷载标准值 ( $W$ )

风荷载标准值应按下列式计算：

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

式中： $\beta_z$ ——高度  $z$  处的风振系数；

$\mu_s$ ——风荷载体型系数；

$\mu_z$ ——风压高度变化系数；

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

【条文说明】：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 设计基准龙卷风荷载 ( $W_t$ )

#### 1 龙卷风参数

1) 龙卷风的分级遵循现行核安全法规 HAD 101/10 的规定，按照富士达 F 等级进行分类。

2) 设计基准龙卷风等级按照厂址条件确定。

#### 2 龙卷风效应

龙卷风效应包括：风压荷载  $W_w$ 、差压荷载  $W_p$ 、龙卷风的飞射物荷载  $W_m$ ；龙卷风效应取值可按国家现行标准确定。

【条文说明】：根据 HAD101/10 规定，龙卷风按照富士达分级方法进行分级；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；差压荷载是由龙卷风引起的旋转运动造成的大气压降，从而在密闭的结构中产生的向外的差压荷载。龙卷风效应取值按现行行业标准《核电厂安全相关土建结构抗龙卷风设计规定》NB20360 确定。

### 5.2.14 内部飞射物产生的撞击荷载 ( $A_1$ )

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。

### 5.2.15 外部爆炸引起的冲击波荷载 ( $A_2$ )

根据厂址调查确定，若无确切资料时，可按国家现行相关标准确定。



【条文说明】：若无确切资料时，可按现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB20105 确定。

### 5.2.16 外部飞射物引起的荷载 ( $A_3$ )

根据厂址调查确定，若无确切资料时，可按国家现行相关标准确定。

【条文说明】：外部飞射物主要是指小型飞机、汽轮机部件等。对于外部飞射物引起的荷载，如小型飞机坠毁、汽轮机部件飞出引起的荷载，若无确切资料时，可按现行行业标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB20105 确定。超设计基准工况下大飞机引起的飞射物荷载的计算评估参见附录 B。

### 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。

## 5.3 核安全相关混凝土结构承载能力极限状态的荷载组合

5.3.1 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

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

$$1.05D+1.3L+1.05T_o+1.3R_o \quad (5.3.1-2)$$

#### 2 正常运行加严重环境

$$1.4D+1.7L+1.7W+1.7R_o \quad (5.3.1-3)$$

$$1.05D+1.3L+1.3W+1.05T_o+1.3R_o \quad (5.3.1-4)$$

#### 3 正常运行加极端环境

$$D+L+T_o+R_o+E_s \quad (5.3.1-5)$$

$$D+L+T_o+R_o+W_t \quad (5.3.1-6)$$

#### 4 异常运行

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

#### 5 异常运行加严重环境

$$D+L+T_a+R_a+1.15P_a+R_r+1.15E_o \quad (5.3.1-8)$$

#### 6 异常运行加极端环境

$$D+L+T_a+R_a+P_a+R_r+E_s \quad (5.3.1-9)$$

7 正常运行加内部飞射物或外部人为事件

$$D+L+T_o+R_o+A_1 \quad (5.3.1-10)$$

$$D+L+T_o+R_o+A_2 \quad (5.3.1-11)$$

$$D+L+T_o+R_o+A_3 \quad (5.3.1-12)$$

注：1 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它荷载的效应，若该荷载经常出现或与其它荷载同时发生，则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9，否则取 0；

2 本标准第 5.3.1 条组合时  $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$  应取最大效应值，除非经时程分析认可可取较低的值；

3 若判断其它极端环境荷载（如极端洪水）对核安全相关结构有影响，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（5.3.1-6）中的  $W_t$ 。

【条文说明】：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 安全壳壳体承载能力极限状态的荷载组合

5.4.1 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

$$1.4D+1.7L+1.7W \quad (5.4.1-1)$$

2 正常运行加严重环境

$$D+1.3L+F+G+T_o+1.5E_o+R_o+P_v \quad (5.4.1-2)$$

$$D+1.3L+F+G+T_o+1.5W+R_o+P_v \quad (5.4.1-3)$$

3 正常运行加极端环境

$$D+L+F+G+T_o+E_s+R_o+P_v \quad (5.4.1-4)$$

$$D+L+F+G+T_o+W_t+R_o+P_v \quad (5.4.1-5)$$

4 异常运行

$$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a \quad (5.4.1-6)$$

$$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a \quad (5.4.1-7)$$

$$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a \quad (5.4.1-8)$$

5 异常运行加严重环境

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25E_o+R_a \quad (5.4.1-9)$$

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a \quad (5.4.1-10)$$

$$D+L+F+G+T_o+E_o+H_a \quad (5.4.1-11)$$

$$D+L+F+G+T_o+W+H_a \quad (5.4.1-12)$$

6 异常运行加极端环境

$$D+L+F+G+P_a+T_a+E_s+R_a+R_r \quad (5.4.1-13)$$

7 异常运行加内部飞射物

$$D+L+F+G+P_a+T_a+R_a+A_1 \quad (5.4.1-14)$$

8 正常运行加外部飞射物

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_2 \quad (5.4.1-15)$$

$$D+L+F+G+T_o+R_o+P_v+A_3 \quad (5.4.1-16)$$

注：1 本标准第 5.4.1 条所列各种荷载效应组合中的任何一种荷载足以减小其它荷载的效应，若该荷载经常出现或与其它荷载同时发生，则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9，否则取 0；

2 本标准第 5.4.1 条组合时  $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$  应取最大效应值，除非经时程分析确认可取较低的值；

3 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，安全壳的位移应按本标准第 5.6.1 条的要求考虑。对于(5.4.1-15)、(5.4.1-16)组合可按本标准第 11.3.3 条的要求进行设计。

### 5.5 安全壳筏形基础承载力计算的荷载组合

5.5.1 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

$$1.4D+1.7L+1.7W \quad (5.5.1-1)$$

2 正常运行

$$1.4D+1.7L+1.4F+1.7(G+R_o+P_v) \quad (5.5.1-2)$$

$$1.05D+1.3L+1.05F+1.05T_o+1.3(G+R_o+P_v) \quad (5.5.1-3)$$

3 正常运行加严重环境

$$D+1.3L+F+G+T_0+1.5W+R_0+P_v \quad (5.5.1-4)$$

4 正常运行加极端环境

$$D+L+F+G+T_0+E_s+R_0+P_v \quad (5.5.1-5)$$

$$D+L+F+G+T_0+W_t+R_0+P_v \quad (5.5.1-6)$$

5 异常运行

$$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a \quad (5.5.1-7)$$

$$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a \quad (5.5.1-8)$$

$$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a \quad (5.5.1-9)$$

6 异常运行加严重环境

$$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a \quad (5.5.1-10)$$

$$D+L+F+G+T_0+W+H_a \quad (5.5.1-11)$$

7 异常运行加极端环境

$$D+L+F+G+P_a+T_a+E_s+R_a \quad (5.5.1-12)$$

8 正常运行加外部飞射物

$$D+L+F+G+T_0+R_0+P_v+A_2 \quad (5.5.1-13)$$

$$D+L+F+G+T_0+R_0+P_v+A_3 \quad (5.5.1-14)$$

注：1 本标准第 5.5.1 条所列各种荷载效应组合中的任何一种荷载足以减小其它荷载的效应，若该荷载经常出现或与其它荷载同时发生，则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9，否则取 0；

2 本标准第 5.5.1 条组合时  $P_a$ 、 $T_a$ 、 $R_a$ 、 $R_r$  应取最大效应值，除非经时程分析确认可取较低的值。

### 5.6 核安全相关混凝土结构正常使用极限状态的荷载组合

5.6.1 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 5.3.1 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。

【条文说明】：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宽度裂缝限值的影响。本条中需要进行变形验算的“正常运行工况”是指式

5.3.1-1~5.3.1-6 的工况。

**5.6.2** 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：

$$D+L+R_0 \quad (5.6.2-1)$$

### 5.7 安全壳壳体正常使用极限状态的荷载组合

**5.7.1** 安全壳壳体应按下列荷载的荷载效应组合验算混凝土正常使用极限状态的容许应力：

1 施加预应力阶段

$$D+L+F+W+T_0 \quad (5.7.1-1)$$

2 结构整体性试验阶段

$$D+L+F+P_t+T_t \quad (5.7.1-2)$$

3 正常运行或停堆

$$D+L+F+G+T_0+R_0+P_v \quad (5.7.1-3)$$

### 5.8 安全壳筏形基础正常使用极限状态的荷载组合

**5.8.1** 宜根据正常使用极限状态的要求进行最大裂缝宽度验算，按本标准 5.5.1 条中式 5.5.1-1~6 荷载效应组合进行计算，荷载效应组合中的系数均取为 1。

### 5.9 结构整体稳定性验算

**5.9.1** 混凝土结构应根据功能要求，按 3.3.1 式进行稳定性验算；对于  $S_d$  为 (5.9.1-1)、(5.9.1-2) 荷载效应组合， $\gamma_R$  采用 1.5；对于  $S_d$  为 (5.9.1-3)、(5.9.1-4) 荷载效应组合， $\gamma_R$  采用 1.1；抗浮验算时仅考虑永久荷载， $\gamma_R$  采用 1.1。

$$D+L+W \quad (5.9.1-1)$$

$$D+L+E_0 \quad (5.9.1-2)$$

$$D+L+W_t \quad (5.9.1-3)$$

$$D+L+E_s \quad (5.9.1-4)$$

**【条文说明】** 本条参考现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T20012 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 (5.9.1-1)、(5.9.1-2) 荷载效应组合，将原来的抗滑和抗倾覆系数 1.5 修改为  $\gamma_R$  取

1.5; 对于(5.9.1-3)、(5.9.1-4)荷载效应组合, 将原来的抗滑和抗倾覆系数 1.1 修改为  $\gamma_R$  取 1.1; 抗浮验算时仅考虑永久荷载标准值, 将原来的抗浮安全系数 1.1 修改为  $\gamma_R$  取 1.1。

## 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,同时应对结构中重要部位或受力复杂的部位进行更详细的分析。

【条文说明】: 在所有情况下,均需对结构进行整体分析,对于重要部位或受力复杂部位应进行详细分析。重要部位或受力复杂部位主要指关键设备结构支撑部位,及结构重要的转换层部位等。

**6.1.2** 结构应根据不同阶段的多种受力状况分别进行结构分析,并确定其最不利的作用效应组合。

【条文说明】: 结构在不同的工作阶段,例如结构施工期、检修期和使用期,预制构件的制作、运输和安装阶段等,应确定其可能的不利作用效应组合。

**6.1.3** 结构分析所需的各种几何尺寸,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态。

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

【条文说明】: 结构分析必须满足的两个条件: 计算假定和计算简图。假定和简图本身就意味着必要的简化是不可避免的。简化的原则是: 尽可能真实模拟实际结构的受力状态和效应分布,同时还必须能够进行简化计算。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,计算结果的精度应符合工程设计要求。计算假定和简图应有相应的构造措施作为保证,且应满足足够的精度要求。

**6.1.4** 结构分析应符合下列要求:

- 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。

【条文说明】: 结构分析的基本条件: 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** 结构分析时,应根据结构类型、材料性能和受力特点等选择下列分析方法:

- 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。

【条文说明】：本条参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 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；对于重要结构如安全壳采用弹性分析方法计算结构内力，通过正常使用状态及承载力计算保证结构功能的实现，具体见第 11 章；对于其他特殊部位或构件、特殊工况，可按第 6.4、6.5 节的弹塑性分析方法、塑性内力重分布方法分析计算。

**6.1.6** 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两个方向计算的较大值采用；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。当轴向、剪切或扭转变形对结构内力的影响不大时，可采用简化模型。

【条文说明】模拟原则：明确提出了采用空间有限元进行结构整体分析，壳元计入横向剪切变形的影响。对于扭转变形的考虑，当采用简化模型时应考虑附加偏心距或采用内力增大系数的方法计入结构扭转产生的影响。

**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。

【条文说明】：计算简图的简化要求；本条第 1 款是整体分析模型计算简图要求，本条第 2 款是构件设计时计算长度的确定原则。

**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在设计基准工况下的正常使用极限状态和承载能力极限状态作用效应的分析。

【条文说明】：明确了弹性分析的适用范围。

**6.3.2** 结构构件的刚度可以按下列原则确定：

- 1 混凝土的弹性模量可按本标准第 4.1.1 条确定；
- 2 截面惯性矩可按均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。

【条文说明】：在构件正常使用极限状态验算计算截面刚度时，应考虑开裂、徐变等因素对刚度折减的影响。

**6.3.3** 当结构的二阶效应可能使作用效应显著增大时，在结构分析中应考虑二阶效应的不利影响。

混凝土结构在竖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》GB50010 中规定的简化方法计算。

**6.3.4** 当边界支承位移对双向板的内力及变形有较大影响时，在板的分析中应考虑边界支承竖向变形及扭转等的影响。

## 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在设计基准工况下部分构件的承载能力极限状态作用效应的分析。

【条文说明】：部分构件指连续梁和连续板等。

**6.4.2** 重力荷载作用下的钢筋混凝土框架梁以及双向板等，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。

混凝土连续梁和连续单向板，可采用塑性内力重分布的方法进行分析。

**6.4.3** 按考虑塑性内力重分布分析方法设计的结构和构件，钢筋应满足本标准第 4.2.2 条规定的要求，并应满足正常使用极限状态要求且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；框架梁截面设计时，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%。

**【条文说明】**：较现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010，连续梁调幅幅度变小与框架梁一致。且规定了跨中弯矩最小设计值。

## 6.5 弹塑性分析

**6.5.1** 结构的弹塑性分析方法可用于设计基准工况下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工况的分析评估中。

**6.5.2** 对于超设计基准工况，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 材料的性能指标宜取平均值，并宜通过试验分析确定，也可采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中提供的材料平均强度、本构模型或多轴强度模型；

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。

**【条文说明】**：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。

**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。钢筋、混凝土材料的本构关系可通过试验分析确定，也可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中规定采用。

## 7 承载能力极限状态计算

### 7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于钢筋混凝土构件的承载能力极限状态计算。

【条文说明】：本章主要针对钢筋混凝土结构承载能力极限状态给出规定，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，尚未采用其它普通预应力混凝土结构构件，若今后采用到普通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。

7.1.2 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》GB50010 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，可采用区域积分的方法将应力等代为内力。

### 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》GB50010 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：

$$N \leq 0.8\varphi(\alpha_1 f_c A + f_y' A_s') \quad (7.2.2)$$

式中： $N$ ——轴向压力设计值；

$\varphi$ ——钢筋混凝土构件的稳定系数，按 GB50010 表 6.2.15 采用；

$\alpha_1$ ——系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时， $\alpha_1$  取为 1.0，当混凝土强

度等级为 C80 时， $\alpha_1$  取为 0.94，其间接线性内插法确定；

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值；

$A$ ——构件截面面积；

$A_s'$ ——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，公式 7.2.2 中的  $A$  应改用  $(A - A_s')$  代替。

【条文说明】：本标准的荷载及荷载效应组合与美国标准 ACI349 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美国标准 ACI349 基本相当，则按本标

准计算所得的抗力设计值也应与美国标准 ACI349 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》GB50010 与美国标准 ACI349，可知国标 GB50010 的抗力设计值较大，因此本标准给出了配置普通箍筋的轴心受压构件正截面受压承载力计算公式，引入了高强混凝土的影响系数  $\alpha_1$ ，并将国标 GB50010 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。

**7.2.3 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》GB50010 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》GB50010 的有关规定进行，当判别为小偏心受压时，其抗力项应乘以 0.9 的折减系数。**

**【条文说明】：**美国标准采用强度折减系数对抗力设计值总体进行折减，对于混凝土受压控制、偏于脆性破坏的受力状态，美国标准采取更低的强度折减系数。因此，本标准按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 计算所得的小偏心构件的抗力设计值，乘以 0.9 的折减系数。

### 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：**

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

式中： $h$ ——墙、板或壳体的厚度；

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值；

**7.3.2 受剪承载力可由竖向和水平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）：**

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

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

式中： $N_y$ ——墙、板或壳体单位长度内的竖向薄膜力设计值，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）；

$N_x$ ——墙、板或壳体单位长度内的水平向薄膜力设计值，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）；

$V$ ——墙、板或壳体单位长度平面内的剪力设计值；

$A_{sy}$ ——墙、板或壳体单位长度内的竖向钢筋截面面积；

$A_{sx}$ ——墙、板或壳体单位长度内的水平向钢筋截面面积；

$A_{s,min}$ ——墙、板或壳体单位长度内的最小钢筋截面面积，可取混凝土毛面积的 0.25%；

$f_y$ ——普通钢筋抗拉强度设计值。

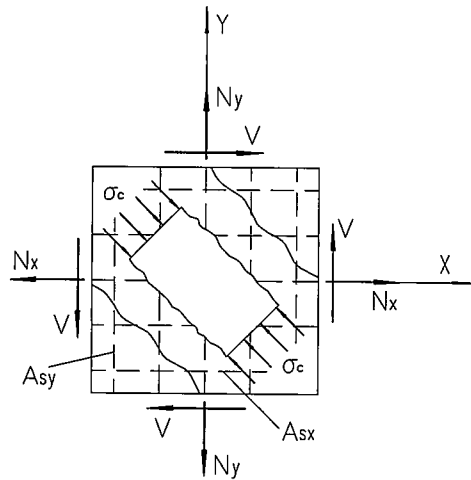


图 7.3.2 正交钢筋网体系的单元体

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：

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

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

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

当按式 (7.3.2-1) 和 (7.3.2-2) 算得的钢筋面积均小于  $A_{s,min}$ ，甚至为负值时，

则两个方向的钢筋均可按  $A_{s,\min}$  设置。

【条文说明】：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/T20012 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。二十多年来，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 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；

$h_w$ ——截面的腹板高度：矩形截面，取有效高度；T 形截面，取有效高度减去翼缘高度；I 形截面，取腹板净高。

【条文说明】：为防止构件发生斜压破坏，美国标准限制最大配箍量，而国标则限制剪压比。GB50010 对于矩形、T 形和 I 形截面的受弯构件剪压比限制如下：当  $h_w/b \leq 4$  时，

$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0$ ；当  $h_w/b \geq 6$  时， $V \leq 0.2\beta_c f_c b h_0$ 。由美国标准最大配箍量推演得到的剪压比约为 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。

7.4.2 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，取 800mm；当  $h_0$  大于 2000mm 时，取 2000mm；

$f_t$ ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

$b$ ——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。

**7.4.3** 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：

$$V \leq 0.5\beta_h f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (7.4.3-1)$$

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。

【条文说明】：本标准采用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。

**7.4.4** 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：

$$V \leq 0.5\beta_h f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.05N \quad (7.4.4-1)$$

式中： $N$ ——与剪力设计值  $V$  相应的轴向压力设计值。当  $N > 0.3f_c A$  时，取

$N = 0.3f_c A$ ，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：

$$V \leq 0.5\beta_h f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 - 0.25N \quad (7.4.5-1)$$

## 7.5 受冲切承载力计算

**7.5.1** 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》GB50010 的有关规定进行。

【条文说明】：通过中美标准对比分析，现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 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

于美国标准 ACI349；而国标 GB50010 中配置箍筋或弯起钢筋时的受冲切承载力与美国标准 ACI349 相当。因此，墙、板、壳受冲切承载力计算可按国标 GB50010 进行。

## 7.6 扭曲截面承载力计算

7.6.1 结构构件扭曲截面承载力计算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定进行。

【条文说明】：通过中美国标准对比可知，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 计算得出的受扭构件抗力值约比美国标准 ACI349 大 8.7%，两者相差不大，可按国标 GB50010 进行扭曲截面承载力计算。

## 7.7 局部受压承载力计算

7.7.1 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》GB50010 的有关规定进行。

【条文说明】：通过中美国标准对比可知，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 计算得出的局部受压构件抗力值低于美国标准 ACI349，因此可按国标 GB50010 进行构件局部受压承载力计算。

## 7.8 疲劳验算

7.8.1 疲劳验算应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定进行。

【条文说明】：目前核电厂中需进行疲劳计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》GB50010 中的规定。

## 7.9 剪摩擦验算

7.9.1 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，其施工缝处的受剪承载力应符合下列规定：

$$V_w \leq cA_c + \mu(f_y A_s + 0.9N) \leq 0.25f_c A_c \quad (7.9.1)$$

式中： $V_w$ ——施工缝处的剪力设计值 (N)；

$A_s$ ——施工缝处受剪所需的、垂直于施工缝的附加钢筋面积，不包含拉力及弯矩引起的受拉钢筋的面积 ( $\text{mm}^2$ )；

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



$\mu$ ——施工缝处的摩擦系数，可按表 7.9.1 取值；

$c$ ——施工缝处的粘结力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )，当  $N$  为拉力时， $c$  取 0；

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )，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；

$A_c$ ——施工缝处为抵抗剪力传递的混凝土截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

表 7.9.1 施工缝处摩擦系数  $\mu$  和粘结力  $c$  的取值

施工缝表面状况	$c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$\mu$
按施工缝要求处理，且表面粗糙度不小于 6mm	1.0	0.85
按施工缝要求处理	0.4	0.6

【条文说明】：本条所列剪摩擦验算公式 7.9.1，综合了国标、美国标准和欧标的相关计算方法，采用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的。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，因此式 7.9.1 中  $N$  取 0，由于法向拉力会大大削弱界面的粘结力，因此取  $c$  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  $N$  定义为永久净压力标准值，限定其不超过  $0.6f_cA_c$ ，并对  $N$  值乘以 0.9 的折减系数，以保证安全度。

公式 7.9.1 中剪摩擦配筋均为垂直于施工缝的钢筋，若需配置斜向钢筋，则式 7.9.1 可改为：

$$V_w \leq cA_c + 0.9N\mu + f_yA_s(\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.25f_cA_c \quad (1)$$

式中： $\alpha$ ——斜向钢筋与施工缝平面的夹角。

剪摩擦配筋在施工缝两侧应满足受拉钢筋的锚固要求。

## 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的限值 (mm)

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

注：1 表中环境作用等级的划分见本标准3.5.2条；

2 对于钢筋混凝土挡水结构，其表面裂缝计算宽度限值为 0.10mm。

【条文说明】：结构控制部位最大裂缝宽度验算应组合非荷载效应，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。

8.1.2 对暴露在严重腐蚀性环境中经受腐蚀的结构或要求设计成不透水的结构，需要采取特殊的保护措施。

8.1.3 受力最大裂缝宽度按本标准第 5.6.2 条进行荷载效应组合，可按下式计算：

$$W_{max} = 0.011 \times 10^{-3} \times f_{ss} \frac{h_2}{h_1} \sqrt[3]{d_c A_c} \quad (8.1.3)$$

式中： $W_{max}$ ——最大裂缝宽度 (mm)；

$h_1$ ——从受拉钢筋形心到中和轴的距离 (mm)；

$h_2$ ——从边缘受拉纤维到中和轴的距离 (mm)；

$d_c$ ——从边缘受拉纤维到相邻钢筋形心的距离 (mm)；

$f_{ss}$ ——纵向受拉普通钢筋的实际应力 (N/mm<sup>2</sup>)；

$A_c$ ——结构中单根钢筋外周握裹混凝土的有效截面面积 (mm<sup>2</sup>)，等于单位长度或宽度上，包围钢筋且与这些钢筋具有相同形心的混凝土有效受拉总面积除以所含钢筋的根数。当钢筋直径不同时，由钢筋总面积除以最大直径的钢筋面积作为钢筋根数。

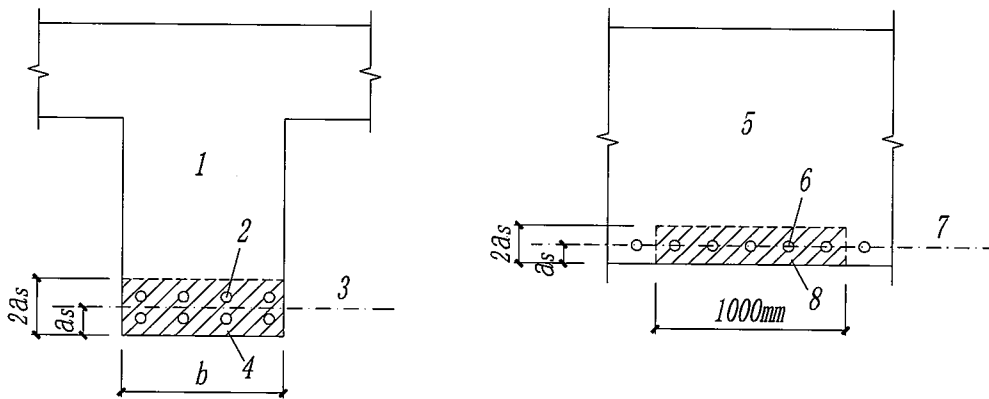


图 8.1.3 混凝土有效受拉面积

1—梁；2—钢筋，共  $n$  根；3—钢筋形心；4—阴影部分为全部钢筋外周握裹混凝土的有效截面面积  $nA_e$ ；  
5—板；6—钢筋，每延米  $n$  根；7—钢筋形心；8—阴影部分为单位长度上全部钢筋外周握裹混凝土的有效截面面积  $nA_e$ 。

对于一般受弯构件，可取  $h_2/h_1=1.2$ 。

【条文说明】：最大裂缝宽度的计算公式参考现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T20012。基于变形协调原理，在计算确定  $f_{ss}$  时组合非荷载产生的相应增量。

8.1.4 非荷载裂缝宽度的计算可按相关标准的规定执行。

【条文说明】：非荷载裂缝宽度的计算设计可参照欧洲标准 EN 1992 等标准计算。

## 8.2 受弯构件挠度验算

8.2.1 钢筋混凝土受弯构件应具有足够的刚度，以限制对结构及与之相连的非结构构件的承载力或使用性能有不利影响的挠度或任何其它变形。

8.2.2 对于一般钢筋混凝土受弯构件应满足表 8.2.2-1 和表 8.2.2-2 规定的最小厚度要求。不满足最小厚度要求的钢筋混凝土构件应按 8.2.3 的要求进行挠度计算，并应满足表 8.2.3 规定的挠度限值。

表 8.2.2-1 可不进行挠度计算的非预应力梁或单向板的最小厚度

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  $f_{yk}$  小于  $400\text{N/mm}^2$  的钢筋，本表所列数值应乘以  $(0.4+0.0015f_{yk})$ 。

表 8.2.2-2 可不进行挠度计算的非预应力双向板的最小厚度

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 $\beta_s$ 的其它值，最小厚度可线性插入；

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

**【条文说明】**：受弯构件不需进行挠度计算的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，即参考美国标准 ACI349 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，应提高最小厚度，并对裂缝及挠度进行验算。

**8.2.3** 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  $0.625B_s$ ，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。

所求得挠度计算值不应超过表 8.2.3 规定的挠度限值。

表 8.2.3 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	正常运行加严重环境	$l_0/400$	$l_0/320$
2	正常运行加极端环境	$l_0/250$	$l_0/200$

注：对于双向板， $l_0$ 取短向净跨度。

【条文说明】：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/T20012 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 规定计算，挠度限值参考美国标准 ACI349 的相关规定，而一般构件长期刚度  $B$  的取值，对比了国内外相关标准，如行标 DL/T 5057、JTG D62、美国标准 ACI349 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 DL/T 5057，取  $B=0.5B_S$ 。

## 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。

**【条文说明】：**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 JG/T 372《建筑变形缝装置》及 14J936《变形缝建筑构造》执行。确定变形缝宽度时宜考虑两侧构件施工误差。

建筑构件因温度和湿度等因素的变化会产生胀缩变形。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、楼层、屋顶等构件断开，将建筑物分离成几个独立的部分。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。

**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。

**【条文说明】：**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它结构部位开裂而设置的建筑构造缝，如 a) 结构建造在压缩性不同的地基上；b) 结构的相邻部分高度相差两层以上或部分高度相差超过 10 米；c) 结构相邻基础的结构体系、宽度和埋置深度相差悬殊；d) 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段落，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的竖直缝。借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，以及在新旧建筑的联接处。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** 防震缝的设置应符合现行国家标准《核电厂抗震规范》GB50267 的要求；

**【条文说明】：**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波的影响，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，而产生破坏。在核电厂中，防震缝的设置宽度应能避免由于相邻结构的震动引起执行安全功能的抗震 I 类结构的整体性和功能性。

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》GB50476 的相关规定。

【条文说明】：普通钢筋与预应力筋的保护层厚度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 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。

【条文说明】：在保护层内配置防裂、防剥落钢筋网片时，可参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 和现行行业标准《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》JGJ114 要求。

9.2.3 在确定保护层厚度时应考虑埋设件的要求。

【条文说明】：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。该项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。

## 9.3 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
HRB400 HRBF400 RRB400	$d \leq 25$	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为  $d-d+5\text{mm}$  范围时,表中锚固长度修正系数应取 1.10;
- 5 对于构件顶部钢筋,当带肋钢筋直径不小于 25mm,且纵向受力钢筋的保护层厚度为  $d-d+5\text{mm}$  范围时,表中锚固长度修正系数应取 1.40;当保护层厚度为  $d+5\text{mm}\sim d+20\text{mm}$  范围时,表中锚固长度修正系数应取 1.10。

**【条文说明】:** 考虑到核电厂抗震设计的特殊重要性,借鉴现行国家标准《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 GB 50010-2010 与美国标准 ACI349,一般情况下,对构件底部筋的情形,按我国混凝土结构规范 GB 50010 计算的锚固长度要求仅为按美国标准 ACI349 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,不宜直接采用我国混凝土结构规范 GB50010 给出的锚固长度。本节的规定考虑了中国规范锚固长度与美国标准的差距,并考虑核安全相关构筑物中,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,对接 GB 50010 计算出的锚固长度乘以修正系数 1.10 进行适当增大。

**9.3.2** 当纵向受拉普通钢筋末端采用弯钩或机械锚固措施时,包含弯钩或机械锚固块在内的平直段投影长度应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 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。

**【条文说明】:** 核电厂中主受力钢筋较大且锚固长度较长。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** 钢筋弯钩应满足下列要求:

- 1 钢筋弯折的弯弧内直径应符合下表规定:



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
$d \leq 16$	6d (4d, 用做拉筋或箍筋)
$16 < d \leq 25$	6d (5d, 用做拉筋或箍筋)
$25 < d \leq 40$	8d
$d > 40$	10d

2 钢筋 90° 弯钩弯后平直段长度不应小于 12d; 99° ~135° 弯钩弯后平直段长度不应小于 10d 及 75mm 中较大值; 180° 弯钩弯后平直段长度不应小于 4d 及 65mm 中较大值;

3 主受力钢筋标准弯钩弯前平直段投影长度不宜小于 0.35~0.55 倍抗震锚固长度  $l_{aE}$ , 弯后平直段长度不应小于 12d;

【条文说明】: 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。

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下表 9.4.2 采用。

表 9.4.2 纵向受拉钢筋的抗震搭接长度  $L_{lE}$

钢筋搭接头面积百分率	$\leq 25$	50	100
搭接长度	$1.2 L_{lE}$	$1.4 L_{lE}$	$1.6 L_{lE}$

9.4.3 钢筋直径不小于 20mm 时, 连接接头宜采用机械连接接头。

【条文说明】：鉴于近年来钢筋强度提高，且机械连接产品及技术已经非常成熟，施工方便，质量能够保证，并考虑核电厂中钢筋通常较为密集，本标准推荐钢筋直径大于等于 20mm 时采用机械连接接头。

#### 9.4.4 变截面梁、柱、墙、板的钢筋连接及构造应满足国家现行有关标准的规定。

【条文说明】：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 中有较为全面的要求，核电厂中变截面构件可参考 16G101 中的梁变截面要求处理。

#### 9.4.5 抗大型商用飞机撞击设计的区域，钢筋连接宜采用抗大型商用飞机撞击用机械接头。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，详见附录 B。

【条文说明】：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，以确保核电厂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专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 最小配筋的要求

#### 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下表规定：

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	0.95
	角柱、框支柱	1.15
板、次梁受拉侧钢筋		0.25
墙单侧钢筋		0.25

注：柱（中柱、边柱、角柱）指核电厂结构中主要的承力柱，由于核安全相关结构中不会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”。

【条文说明】：最小配筋率是对所有外露混凝土表面而言的，是为了控制混凝土开裂和拉结结构保持完整性的构造钢筋。纵向受力钢筋的最小配筋率主要考虑承载力要求及限裂要求。

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；当实际配筋大于计算配筋超过 1/3 时可不考虑上述最小配筋率。结构板、墙或壳的所有其它外露表面的配筋应符合本标准第 9.5.2~9.5.4 的要求。

**9.5.2 所有外露的混凝土表面应在两个正交方向上配置构造钢筋。**

【条文说明】：不是在原有混凝土或岩石上浇注的混凝土，应认为其表面是外露的。

**9.5.3 截面厚度不大于 1200mm 的构件，单侧单方向的钢筋最小配筋率不应小于 0.12%。**

**9.5.4 截面厚度大于 1200mm 且不大于 1800mm 的构件，单侧单方向的钢筋最小配筋截面面积  $A_{s,min}$  按下式确定，但不得超过  $A_c/100$ 。**

$$A_{s,min} = A_c \times \frac{f_{tk}}{0.6f_{yk}} \quad (9.5.4)$$

式中： $f_{tk}$ ——混凝土轴心抗拉强度标准值；

$f_{yk}$ ——普通钢筋轴心抗拉强度标准值。

## 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，并满足厂房的变形要求。

【条文说明】：宜选用筏形基础，特殊的地基条件也可选用其它基础类型。

**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要求：

1 混凝土应符合本标准第 3.5 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。如基础混凝土内掺入一定数量的矿物掺合料，可适当考虑混凝土后期强度；

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》GB50108 选用，且不宜低于 P8；

3 钢筋应符合本标准第 4.2.1、4.2.2 条的要求。

【条文说明】：第 10.1.2 条第 1 款补充加矿物掺和料后，考虑后期强度的增强，后期强度的龄期可为 90d。

**10.1.3** 筏基底板宜采用双层双向配筋。单侧受力钢筋配筋率不应低于 0.2%。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。

【条文说明】：本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/T20308 和《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3 制定。

**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少于 20mm 的双向钢筋网。

【条文说明】：本条是参照现行行业标准《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T20308 制定。

### 10.2 板

**10.2.1** 单向板、双向板厚度可按本标准第 8.2.2 条最小厚度确定，且厚度不应小于 150mm。不满足最小厚度要求时应按本标准第 8.2.3 条的要求进行挠度计算，并应满足本标准表 8.2.3 规定的挠度限值。

【条文说明】：板的厚度要求须满足正常使用要求。

**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。

【条文说明】：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** 当板中设置抗剪钢筋时，抗剪钢筋间距应不小于 150mm。

【条文说明】：该条要求来源于美国标准 ACI349-06 第 11.12.3 条。

**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。

【条文说明】：该条要求同 GB50010，同时参考美国标准 ACI349-06 第 13.3.3 条要求，增加锚固长度“不小于 150mm”的要求。

**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。

【条文说明】：该条要求同 GB50010 9.1.10。

**10.2.6** 混凝土板可采用配置横向钢筋的方式来抗冲切，也可采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的弯起钢筋。

【条文说明】：横向钢筋包括拉筋和箍筋，拉筋弯钩符合 9.3.3 条的要求。

## 10.3 梁

**10.3.1** 梁的截面尺寸应符合下列要求：

- 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。

【条文说明】：截面宽度参照美国标准 ACI349-06 第 21.3.1.3 条要求。

**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至少应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满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 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符合本条第 1 款的要求时，可采取弯钩或机械锚固措施。

【条文说明】：考虑到核电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》GB50010 采用 12d。

**10.3.4** 梁支座负弯矩纵向受拉钢筋不应在受拉区截断。

【条文说明】：考虑到核电厂特殊重要性，采用比现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 更为严格的要求。

**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  $\rho_{tl,min}$  按式 (10.3.5) 计算：

$$\rho_{tl,min} = 0.72 \sqrt{\frac{T}{Vb}} \frac{f_t}{f_y} \quad (10.3.5)$$

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

式中： $\rho_{tl,min}$ ——受扭纵向钢筋的最小配筋率，取  $A_{stl}/(bh)$ ；

$b$ ——受剪的截面宽度，按本规范第 6.4.1 条的规定取用，对箱形截面构件， $b$  应以  $b_h$  代替；

$A_{stl}$ ——沿截面周边布置的受扭纵向钢筋总截面面积。

【条文说明】：通过对中国规范 GB50010-2010 与美国标准 ACI349-06 关于梁内受扭纵向钢筋的最小配筋率的对比，按美国标准的受扭纵筋最小配筋率约为国标的 1.2 倍。

**10.3.7** 抗扭所需的纵向钢筋及箍筋设置应按现行国家标准《混凝土结构设计规

范》GB50010 确定。

### 10.3.8 梁宜采用箍筋作为承受剪力的钢筋。

【条文说明】：考虑到核电工程实际，不用弯起钢筋，推荐采用箍筋抗剪。

### 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》GB50010 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 100mm 中的最小值，箍筋直径应不小于 10mm；非加密区的箍筋间距在满足计算要求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 400mm。当一层内的纵向受压钢筋多于 5 根且直径大于 18mm 时，箍筋间距不应大于 10 d，d 为纵向受压钢筋的最小直径；
  - 3) 当梁的宽度大于 400mm 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 400mm 但一层内的纵向受压钢筋多于 4 根时，应设置复合箍筋。

【条文说明】：对于次梁，执行该条第 1，2，4 款。其中第 2 条箍筋最大间距同时参考了美国标准 ACI349-06 第 11.5.5 条要求，不超过  $h_0/2$ ；第 3 条箍筋要求参照现行国标要求，均比美国标准 ACI349-06 严格。

10.3.10 在弯剪扭构件中，箍筋的配筋率不应小于  $0.28f_t/f_{yv}$ 。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° 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 300mm。

【条文说明】：本条参考国标 GB50010 中第 9.2.10 编制，同时受扭箍筋的间距参考美国标准 ACI349-06 第 11.6.6.1 条，增加“不大于 300mm”。

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》GB50010

的要求。

## 10.4 柱

### (I) 基本规定

**10.4.1** 柱的截面形状宜规则，其截面尺寸宜符合下列各项要求：

- 1 最小截面尺寸不宜小于 400mm；圆柱的直径不宜小于 450mm；
- 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。

【条文说明】：核电厂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** 柱轴压比不宜超过 0.75。

【条文说明】：考虑到核电厂结构的特点，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，此处偏于安全的采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 抗震一级框架-剪力墙的要求。

**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%；

【条文说明】：考虑到核电厂特殊重要性，配筋率采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 抗震一级框架柱的要求。

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

【条文说明】：本条规定同时参考美国标准 ACI349 第 7.6.3 条（净间距不少于  $1.5d$ ）和 GB50010 第 9.3.2 条要求。

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 柱上下两端箍筋应加密，加密区箍筋最大间距不超过 100mm。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  $10d$ ；

2 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



度应不小于柱净高的 1/3；

3 柱箍筋加密区箍筋的体积配筋率按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关公式计算，其中最小配箍特征值  $\lambda_v$  按表 10.4.4 采用；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	0.9
复合箍	0.1	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.23

4 当纵向钢筋直径不大于 32mm 时，箍筋直径应不小于 10mm，当纵向钢筋直径大于 32mm 时，箍筋直径不小于 12mm；

5 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。当纵向钢筋沿圆周布置时，可使用完整的圆形箍筋。

【条文说明】：考虑到核电厂特殊重要性，柱箍筋加密要求采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 抗震一级框架柱的要求。箍筋直径要求来源于美国标准 ACI349-06 第 7.10.5.1 条。第 5 条同时参考了美国标准 ACI349 第 7.10.5.3 条要求。

#### 10.4.5 纵向钢筋的弯折应满足下列要求：

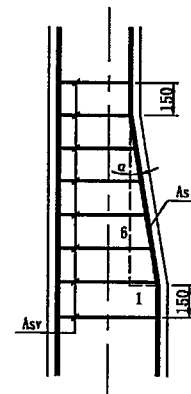
1 弯折钢筋的倾斜段对柱轴线的倾斜度不应超过 1:6，倾斜段以上及以下钢筋应平行于柱轴线，见图 10.4.5；

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：

$$A_{sv} f_{yv} \geq 1.5 A_s f_y \sin \alpha \quad (10.4.5-1)$$

式中：  $f_{yv}$  ——箍筋强度设计值；

$A_s$  ——弯折钢筋的面积；



10.4.5 钢筋弯折示意图

$f_y$ ——弯折钢筋的强度设计值。

【条文说明】：本条参考美国标准 ACI349-06 第 7.8.1 条编制。

## (II) 梁柱节点

**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》GB50010 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。

## (III) 牛腿

**10.4.7** 牛腿可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定进行计算。

【条文说明】：按中国标准 GB50010-2010 设计的牛腿安全度与按美国标准 ACI349-06 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。

**10.4.8** 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，弯起钢筋应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 第 9.3.13 条的构造要求。

**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，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  $0.5h_0$ 。

【条文说明】：牛腿的外边缘的截面高度来源于美国标准 ACI349-06 第 11.9.2 条要求。

**10.4.12** 牛腿钢筋的锚固长度满足本标准第 9 章要求，其它锚固构造按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关要求执行。

## 10.5 剪力墙

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

**10.5.2** 剪力墙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** 剪力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。

【条文说明】：该条主要参照 GB50010 第 11.7.14 和 11.7.15 条要求、并参考了美国标准 ACI349-06 第 21.7.4.3 条要求编制。

#### 10.5.4 剪力墙中配筋构造应符合下列要求：

1 剪力墙水平和竖向钢筋的搭接满足本标准第 9 章要求；

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；

【条文说明】：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。

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 墙洞口上、下两边的水平钢筋除应满足受力要求外，洞口尚不应少于 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按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 有关叠合受弯构件计算。

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》GB50010 的相关要求进行两阶段受力计算。

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。

【条文说明】：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 GB50010 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 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 9.3.3.2 条的要求。伸入并锚固于叠合层的抗剪钢筋可作为水平抗剪钢筋。

【条文说明】：本条参考美国标准 ACI349-06 第 17.4 章要求编制。

## 10.7 预埋件与连接件

10.7.1 根据锚固件的不同，核电厂常用预埋件分为端锚型预埋件、直锚筋型预埋件，示意图见图 10.7.1 所示。各类型的预埋件设计及构造按国家现行相关标准的规定执行。

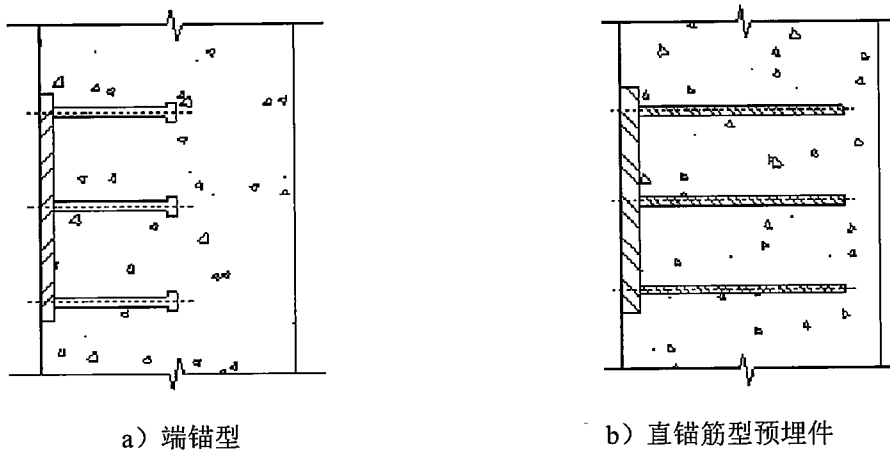


图 10.7.1 核电厂常用预埋件类型

10.7.2 受力预埋件的锚板宜采用 Q235、Q345 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 HRB400 级、HPB300 级钢筋或更高强度等级的热轧钢筋，严禁采用冷加工钢筋。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 GB/T 10433 中规定的钢材材料及性能等级。

【条文说明】：由于核电厂用混凝土预埋板一般较厚，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。

**10.7.3** 直锚筋与锚板应采用 T 型焊接。当钢筋直径不大于 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。预埋件焊接应符合相关规范的要求。

**10.7.4** 预埋件锚筋中心至锚板边缘的距离不应小于  $2d$  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；预埋件宽度方向，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** 受拉直锚筋和弯折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，应采取其它有效的锚固措施。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。

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》GB50010 的相关要求。

**【条文说明】**：当受拉直锚筋和弯折锚筋无法满足锚固长度要求时，应采取其它有效的锚固措施，如改用端锚型预埋板等。

## 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 安全壳的允许泄漏率;
- 4 放射性屏蔽要求。

【条文说明】:安全壳结构设计时,通过承载力计算和正常使用状态验算保证结构的整体性,通过设置密封安全壳内壁的钢内衬、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检测其泄漏率;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 安全壳结构的设计必须满足结构的完整性和密封性的要求:

- 1 安全壳结构的设计应满足在核电厂运行前进行规定压力下结构的完整性的要求,见附录 A;安全壳结构的强度应根据设计基准工况效应进行计算;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,在设计基准事故工况下不得超过安全壳的允许泄漏率;
- 2 严重事故工况下应保证安全壳结构的完整性,并充分地考虑其密封性;
- 3 安全壳结构的设计应满足在全部贯穿件安装完毕后能进行设计压力下的贯穿件密封性试验的要求。

11.1.3 安全壳结构应进行严重事故状态下的应力、应变验算。

### 11.2 承载力计算要求

11.2.1 安全壳壳体宜采用整体结构模型有限元分析,也可采用无弯矩薄膜理论。

【条文说明】:安全壳详细计算宜采用整体结构模型,可采用无弯矩薄膜理论进行简化分析。

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》GB50010的规定执行。

11.2.3 安全壳壳体受剪承载力计算可按本标准第 7.3、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按目标性能化设计计算。

【条文说明】:安全壳壳体的承载力计算也可通过目标性能化设计进行计算,即通过控制钢

筋应力、混凝土应力限值，保证安全壳的气密性功能及承载力要求。根据美国标准 ACI359、法国标准 RCC-CW 要求，安全壳壳体需要考虑主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、承载力状态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，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壳体不出现裂缝，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。

安全壳按目标性能化设计进行结构承载力计算时采用的荷载组合分组应按表 1 的规定；对应混凝土的应力、应变限值按表 2 的规定；对应普通钢筋、预应力筋的应力、应变限值按表 3 的规定，考虑预应力筋额外效应时，同时可按本标准 11.2.5 条要求。

表 1 安全壳壳体荷载组合分组

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	施加预应力前	$1.4D+1.7L+1.7W$	(5.4.1-1)
	正常运行加严重环境	$D+1.3L+F+G+T_0+1.5E_0+R_0+P_v$	(5.4.1-2)
		$D+1.3L+F+G+T_0+1.5W+R_0+P_v$	(5.4.1-3)
第二组	正常运行加极端环境	$D+L+F+G+T_0+E_s+R_0+P_v$	(5.4.1-4)
		$D+L+F+G+T_0+W_1+R_0+P_v$	(5.4.1-5)
	异常运行	$D+L+F+G+1.5P_a+T_a+R_a$	(5.4.1-6)
		$D+L+F+G+P_a+T_a+1.25R_a$	(5.4.1-7)
		$D+L+F+1.25G+1.25P_a+T_a+R_a$	(5.4.1-8)
	异常运行加严重环境	$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25E_0+R_a$	(5.4.1-9)
		$D+L+F+G+1.25P_a+T_a+1.25W+R_a$	(5.4.1-10)
		$D+L+F+G+T_0+E_0+H_a$	(5.4.1-11)
		$D+L+F+G+T_0+W+H_a$	(5.4.1-12)
第三组	异常运行加极端环境	$D+L+F+G+P_a+T_a+E_s+R_a+R_t$	(5.4.1-13)
	异常运行加内部飞射物	$D+L+F+G+P_a+T_a+R_a+A_1$	(5.4.1-14)
	正常运行加外部飞射物	$D+L+F+G+T_0+R_0+P_v+A_2$	(5.4.1-15)
$D+L+F+G+T_0+R_0+P_v+A_3$		(5.4.1-16)	

表 2 安全壳壳体承载力计算时，混凝土容许应力、应变限值

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
混凝土应力限值	标准区域薄膜力作用压应力	$0.55f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$
	最大压应力	$0.75f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$
	最大压应力（抗剪计算）	$0.75f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$
	最大拉应力	/	/	/
混凝土应变限值		/	/	0.3%

注：1 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。

2 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）。

表 3 安全壳壳体承载力计算时，钢筋应力、应变限值

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	/（不验算）	/（不验算）	$\Delta\sigma_p, \sigma_{s,max} \leq f_{liner,k}$
	特殊区域薄膜力作用应力	$\sigma_{s,max} \leq 0.1f_{ptk}$ ; $\Delta\sigma_p \leq 0.1f_{ptk}$	$\sigma_{s,max} \leq 0.1f_{ptk}$ ; $\Delta\sigma_p \leq 0.1f_{ptk}$	$\Delta\sigma_p, \sigma_{s,max} \leq f_{liner,k}$
	标准区域薄膜力加弯曲作用应力		$0.8f_{yk}$	$0.9f_{yk}$
	特殊区域薄膜力加弯曲作用应力、应变（内侧钢筋）	$\sigma_{s,max} \leq \min\{2/3f_{ys}, \max(0.5f_{ys}, 80f_{ck}^{1/3})\}; f_{ys} = \min(f_{yk}, 500)$	$\sigma_{s,max} \leq \min\{2/3f_{ys}, \max(0.5f_{ys}, 80f_{ck}^{1/3})\}; f_{ys} = \min(f_{yk}, 500)$	$\epsilon_{s,max} = 1\%$
	特殊区域薄膜力加弯曲作用应力、应变（外侧钢筋）		$0.8f_{yk}$	$\epsilon_{s,max} \leq 0.9\epsilon_{uk}$
	抗剪作用应力		$0.8f_{yk}$	$0.9f_{yk}$

注：1  $f_{liner,k}$ ——钢内衬屈服强度标准值；



- 2  $\sigma_{s,max}$ ——普通钢筋最大应力;
- 3  $\Delta\sigma_p$ ——预应力筋考虑额外效应时的张拉应力增量。

**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来考虑。预应力筋最大应力不超过  $0.80f_{ptk}$ 。

【条文说明】:根据法国标准 ETC-C、RCC-CW,预应力筋的额外效应,即初始张拉后计入损失后预应力筋的应力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它材料一起协调工作,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下列表折算系数(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  $0.80f_{ptk}$ 。

表 4 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。
- 5 安全壳体荷载组合分组要求见表 1。

表 5 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	0.5	0.30

### 11.3 应力、应变要求

**11.3.1** 正常使用极限状态下安全壳壳体在施加预应力、整体性试验和正常运行三种工况下的混凝土应力应符合下列容许值：

- 1 截面边缘纤维压应力： $\sigma_c \leq 0.70f_{ck}$ ；
- 2 截面边缘纤维拉应力： $\sigma_t \leq 0.70f_{tk}$ ；
- 3 薄膜（平均）压应力： $\sigma_c \leq 0.4f_{ck}$ ；
- 4 薄膜（平均）拉应力： $\sigma_t \leq 0$ 。

【条文说明】：11.3.1~11.3.2 正常使用极限状态下的混凝土应力限值要和现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 要求相同，比较美国标准 ACI359、法国标准 RCC-CW 其应力限值要求的水平接近一致。

**11.3.2** 正常使用极限状态下安全壳壳体钢筋应力应符合下列容许值：

- 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  $\sigma_{s,max} \leq 0.83f_{yk}$ 。

【条文说明】：11.3.1~11.3.2 正常使用极限状态下的荷载组合见 5.7.1 条，钢筋应力限值要求结合现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303、美国标准 ACI359、法国标准 RCC-CW 相关要求，规定的应力限值接近一致。钢筋平均拉、压应力限值指考虑施加预应力单独作用下的普通钢筋应力限值，钢筋最大拉、压应力限值为考虑指施加预应力与其它荷载组合下的的普通钢筋应力限值。

**11.3.3** 严重事故工况计算时，容许应力、应变应满足下列要求：

- 1 对于组合工况（5.4.1-15）、（5.4.1-16）允许考虑钢内衬的结构强度。混凝土、钢筋以及钢内衬可以进入塑性状态；
- 2 混凝土最大极限压应变  $\varepsilon_{cu}$  按 0.3%，钢筋拉应变  $\varepsilon_s$  按 1%考虑。

【条文说明】：此条参照现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303 的要求制定。

## 11.4 预应力系统

**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水泥浆。

【条文说明】：预应力筋用锚具包括锚垫板、锚板、夹片、灌浆帽等。

**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。试验方法中其它要求按现行国家标准《预应力用锚具、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。

【条文说明】:按图1装置进行预应力筋-锚具组装件静载试验;

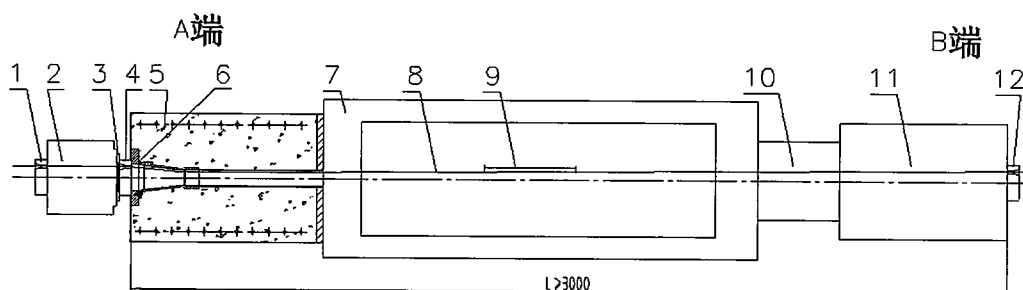


图1 预应力筋-锚具组装件静载锚固性能试验装置示意图(mm)

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。

- 1 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;
- 2 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;

3 加载应符合下列规定:

a) 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 $0.2f_{ptk} \rightarrow 0.4f_{ptk} \rightarrow 0.6f_{ptk} \rightarrow 0.8f_{ptk}$ 分级缓慢加载,加载速度低于 $100\text{MPa}/\text{min}$ ;

b) 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;

c) 持荷1h后,在B端以低于 $100\text{MPa}/\text{min}$ 加载速度,缓慢加载直到破坏;

d) 对于非鉴定性试验,试验过程中,当测得的 $\eta_a$ 、 $\varepsilon_{Tu}$ 满足要求可终止试验。

**11.4.5** 预应力成孔管道为刚性或半刚性管,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** 预应力筋用刚性管的性能和质量应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB 8162的规定。

**11.4.7** 预应力筋用半刚性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。。

【条文说明】：半刚性管采用金属波纹管，是考虑到其在浇筑混凝土重力作用下能够保持原有的形状。

**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 倍钢绞线截面面积；
- 2 刚性孔道应采用壁厚不小于 2mm 的钢管，且应具有光滑的内壁并可被弯曲成适当的形状而不出现卷曲或被压扁；半刚性孔道应是波纹状的金属管，金属波纹管宜采用镀锌钢带制作，壁厚不宜小于 0.6mm。

【条文说明】：核电安全壳有 19 束、37 束和 54 束直径 15.7mm 的预应力筋用预应力成孔管道，综合其所用孔道内径与钢绞线的截面积的关系，一般在 2~3 倍之间，本要求是核电工程经验总结。

**11.4.9** 孔道填充用水泥浆应为无收缩浆体。

【条文说明】：孔道填充用水泥浆的原材料及水泥浆相关要求可按现行行业标准《压水堆核电站安全壳预应力技术规程》NB/T20325 的相关规定执行。

## 11.5 预应力系统设计

**11.5.1** 在确定预应力效应时，可采取下列荷载效应组合。

- 1 对于筒壁环向和穹顶的预应力筋

$$D+1.2P_a+T_0 \quad (11.5.1-1)$$

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

- 2 对于筒壁竖向预应力筋

$$D+1.5P_a+T_0 \quad (11.5.1-3)$$

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

**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的大小。

**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小于 8m；
- 7 预应力筋宜设监测钢筋。

**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，锚头处的拉应力为： $0.75f_{ptk}$ ；
- 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 预应力筋与孔道壁的摩擦损失；
- 2 预应力筋锚具的变形，钢筋回缩和接缝压缩的损失；
- 3 混凝土的弹性压缩损失；
- 4 预应力钢绞线的应力松弛损失；
- 5 混凝土的收缩和徐变损失。

**【条文说明】**：本条第 1、2、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、5 款则为与时间相关的预应力损失。

“混凝土的弹性压缩损失”及第 11.5.8 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》NB20303 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** 锚具变形和钢筋内缩  $\sigma_{l1}$  可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 确定。

**11.5.7** 摩擦损失  $\sigma_{l2}$  可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 确定，摩擦系数应通过预应力筋摩擦试验核定。

**11.5.8** 由于混凝土在预应力张拉过程中的弹性压缩，导致预应力损失  $\sigma_{l3}$ ，可按下式计算：

$$\sigma_{l3} = 0.5E_p\Delta\sigma_c / E_c(t) \quad (11.5.10-1)$$

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

$E_p$ ——预应力筋的弹性模量；

$E_c(t)$ —— $t$  时刻混凝土的弹性模量。

**11.5.9** 预应力钢绞线由于应力松弛引起的预应力损失 $\sigma_{l4}$ ，可按下列公式计算：

$$\sigma_{l4} = 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \times 10^{-5} \sigma_{pi} \quad (11.5.8-1)$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}} \quad (11.5.8-2)$$

式中： $\sigma_{pi}$ ——初始预应力绝对值（MPa）；

$t$ ——张拉后的时间（h），最终松弛损失可按 500，000h 估计；

$f_{ptk}$ ——预应力筋极限强度标准值（MPa）；

$\rho_{1000}$ ——低松弛钢绞线在平均温度为 20℃ 的条件下张拉 1000h 后的松弛损失（%），一般可取 2.5。

【条文说明】：本条根据欧洲标准 EN1992 1-1 混凝土规范关于预应力松弛损失的规定，具体见第 3.3.2、5.10.6 条。当同其它时效应变相加时，应力松弛损失可以考虑乘以 0.8 的系数。

**11.5.10** 混凝土的收缩和徐变损失 $\sigma_{l5}$ 可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 确定，也可采用现场具体试验资料计算。

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

【条文说明】：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，故应选用经按有关规范标准验证的产品，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《预应力用锚具、夹具和连接器》14370 的相关规定执行。

**11.5.12** 当采用普通锚垫板时，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的要求进行端部锚固区的局部受压承载力计算，并配置间接钢筋，其体积配筋率不应小于 0.5%，垫板的刚性扩散角应取 45°。

**11.5.13** 对于安全壳筒壁和穹顶的曲线形预应力筋，应设置径向拉筋，径向拉筋应包绕最内层预应力筋和最外层的钢筋。

**11.5.14** 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。

【条文说明】：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区域。可以通

过配置构造 U 型插筋来防止预应力筋所在区域混凝土崩裂。可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 确定。

## 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作业指导书。

【条文说明】：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，故作此要求。

**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，模拟试验前应制定试验方案。

【条文说明】：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。混凝土表面缺陷的处理可按《混凝土结构工程施工规范》GB50666的相关规定执行。

**12.1.5** 筏形基础、安全壳、反应堆堆坑以及其它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。

【条文说明】：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。

**12.1.5** 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》GB50666和《大体积混凝土施工规范》GB50496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》JGJ162和《混凝土结构工程施工规范》GB50666及其它相关标准的规定。

**12.2.2** 安全壳模板应选择安全、有效、可靠的模板体系。

【条文说明】：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** 胶合板应符合国家现行标准《混凝土模板用胶合板》GB/T17656及《建筑施工模板安全技术规范》JGJ162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  
对混凝土性能和外观质量造成影响。

【条文说明】：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

**12.2.6** 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它防风装置。

【条文说明】：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。

**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规程》JGJ74、《钢框胶合板模板技术规程》JGJ96、《建筑施工模板安全技术规范》JGJ162和《液压爬升模板工程技术规程》JGJ195等的规定外，还应符合下列要求：

- 1 模板施工设计方案应考虑运输、堆放和装拆过程中对模板变形的影响；
- 2 对高架支模部分应采取有效措施，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时应设计安全护栏、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。

【条文说明】：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的质量问题。

**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。

【条文说明】：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。

**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。

**【条文说明】：**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** 除非有试验证明焊接不会对结构钢筋或预埋件锚固筋造成损伤可焊接固定外，预埋件固定不应采用在结构钢筋上焊接的方式。

#### (VI) 模板拆除与维护

**12.2.16** 拆模时混凝土需达到的强度应以同条件养护试件确定。

**【条文说明】：**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试件的强度为准。

**12.2.17** 大体积混凝土的拆模，应满足现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB50666 对混凝土的强度要求，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《大体积混凝土施工规范》GB50496 相关要求。

**12.2.18** 模板拆除时混凝土表面温度与外界温度相差不宜大于 20℃，冬期施工模板拆除时混凝土表面温度不应低于 5℃，拆除模板后的混凝土应及时覆盖，使其缓慢冷却。

### 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。

**【条文说明】：**寒冷地区冬季在室外，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。

**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、钢筋及其它埋设件密集处施工前应进行碰撞检查，提出解决方案，涉及钢筋或预埋件移位时应经设计认可。

## ( 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 钢筋进场应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 钢筋储存场地应坚实平整，不应因钢筋堆放而产生过大的变形，并避免场地内积水。

3 钢筋堆放时应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。

【条文说明】：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

**12.3.5** 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。

【条文说明】：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

**12.3.8** 制作前检查应符合下列要求：

1 钢筋表面应清洁、无损伤，油渍、漆污和灰浆应在加工前清除干净；

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，应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应按报废处理，报废钢筋应单独标识存放。

12.3.9 调直操作应符合下列要求：

- 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 断料应符合下列要求：

对同类型数量大的钢筋，应先检查单根断料长度无误后再批量切断；切断过程中应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、弯弧应符合下列要求：

- 1 钢筋弯曲严禁在环境温度低于-5℃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，符合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它钢筋密集区的钢筋加工允许偏差应符合表 12.3.11 的要求。其它可按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 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	±5
用于加工丝头钢筋的全长净尺寸	±3
弯起钢筋的弯折位置	±10
带有丝头的弯折钢筋外包尺寸	±5
箍筋、拉筋内净尺寸	±3

【条文说明】：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误差应严格控制。

参考法国标准ETC-C和RCC-CW要求，对钢筋弯曲成型时的施工最低温度加以限制。

### (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要求：

- 1 钢筋连接方式和接头百分率应符合设计要求和本标准第9.4节的规定。
- 2 钢筋焊接应进行工艺评定，并符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18的规定。
- 3 机械连接应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ107的规定。

**12.3.15** 安装工艺应符合下列要求：

#### 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，现场其它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它污垢。
- 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》GB50666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。

**【条文说明】：**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，为从严控制，规定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 节要求。
- 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 2.0m 时，上层钢筋网片应搭设围栏。

### 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。

**【条文说明】：**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。

- 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；抗大型商用飞机撞击区域的钢筋连接应符合本标准附录 B 的规定。
- 2) 安全壳穹顶钢筋宜一次施工完成，不宜分段绑扎。

**【条文说明】：**此处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。

3) 应严格控制径向拉筋的保护层厚度。

【条文说明】：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。

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。

【条文说明】：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。

5) 钢筋设计位置与预应力孔道冲突时，应优先避让预应力孔道。

## 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。验收试验应以试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，按 1:1 的比例进行全比例模拟试验。

【条文说明】：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。

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

### (II) 材料验收、贮存和装卸

12.4.6 预应力系统材料应按设计要求验收，设计无要求时按本标准第 11.4 节验收。

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 运输和装卸时不应对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 3~5m 范围内各设置一个排气孔；

3 穹顶孔道应在最高点两侧 4~8m 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 的塞子能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，并符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG225 的要求。

### (Ⅴ) 成孔孔道安装

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。

【条文说明】：由于安全壳直径较大，通常在 30~50m，壳体径向允许施工偏差为±50mm，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。

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作一次外观检查，外观质量不符合要求的钢绞线严禁使用。

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** 张拉顺序应符合设计要求。

**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。

【条文说明】：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，由于灌浆压力较大可能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。

**12.4.25** 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** 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它力学性能、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混凝土可用性试验确定。

【条文说明】：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，需要进行混凝土可用性试验。

### ( 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 混凝土的原材料与设计配合比所用原材料的一致性；
- 2 出机混凝土和易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。

**12.5.5** 运输应满足现场施工连续供应的需要。

**12.5.6** 混凝土泵送前应检查发货单与设计要求的符合性。

**12.5.7** 混凝土拌合物浇筑倾落的自由高度应符合设计要求，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** 对由于钢筋、预埋件、预留洞口等密集或由于构件截面尺寸小而导致混凝土浇筑困难的部位，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℃，且不宜小于 5℃。

**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，应避免离析。采用其它振捣方式时，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它混凝土质量问题时，养护时间可缩短。

**【条文说明】**：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。

**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℃ 以上，并应符合现行行业标准《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T104 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** 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。

【条文说明】：不同于国标按照分部分项工程、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。

**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。

【条文说明】：核电工程质量验收重视过程控制，验收体系在满足国家标准《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）。

**13.1.3** 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** 混凝土结构工程的质量验收除应满足本标准的规定外，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符合设计文件要求或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，丈量。

**【条文说明】：**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，支架的设置不符合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规程》JGJ 74、《液压爬升模板工程技术规程》JGJ 195 等。

**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。

**【条文说明】：**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

**13.2.3** 模板的安装质量应符合下列要求：

- 1 模板的接缝应严密；
- 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应平整、清洁；
- 4 用作模板的地坪、胎膜等应平整、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，应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，应符合国家现行有关标准的规

定和施工方案的要求。

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。

【条文说明】：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，故要求应按有关标准进行验收。国家有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有关标准的规定以外，还应符合施工方案的要求。主要检验方法由有关标准规定。

**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符合施工方案的要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

**13.2.6** 后浇带模板的支设应按施工技术方案执行。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

【条文说明】：后浇带模板及支架在施工过程中留置时间较长，一般考虑独立设置，有利于其它区域模板及支架的及时拆除，加快模板及支架的周转使用。

**13.2.7** 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 13.2.7 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 13.2.7 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		10
预埋套管中心线位置		5
预埋螺栓	中心线位置	5
	外露长度	+10, 0

	垂直度	1%l
预留洞	中心线位置	10
	尺寸	+10, 0

注：l为预埋螺栓长度。

【条文说明】：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。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。预埋套管和预留孔洞等存在类似的情况，按照相同的原则处理。

**13.2.8** 现浇结构模板安装的尺寸偏差及检验方法应符合设计要求，当设计无要求时应符合表 13.2.8 的规定。

检查数量：在同一检验批内，对梁、柱和独立基础，应抽查构件数量的10%，且不应少于3件；对墙和板，应按有代表性的自然间抽查10%，且不应少于3间；对大空间结构，墙可按相邻轴线间高度5m左右划分检查面，板可按纵、横轴线划分检查面，抽查10%，且均不应少于3面。

检验方法：尺量。

表 13.2.8 现浇结构模板安装的允许偏差及检验方法(mm)

项目		允许偏差	检验方法
轴线位置		8	尺量检查
底模上表面标高		5	水准仪或拉线、尺量
模板内部尺寸	基础	+15, -10	尺量
	柱、墙、梁	+10, -5	尺量
	楼梯相邻踏步高差	6	尺量
垂直度	柱、墙层高≤6m	10	经纬仪或吊线、尺量
	柱、墙层高>6m	12	经纬仪或吊线、尺量
相邻两块模板表面错边		2	尺量
表面平整度		8	2m靠尺和塞尺量测

【条文说明】：核电厂模板一般采用定型大模板体系，模板安装过程中一般通过测量放线控制模板下口偏差、垂直度、上口平直度和截面尺寸，达到控制模板安装尺寸偏差的目的。

### (III) 模板拆除

**13.2.9** 混凝土底模及其支架拆除时的混凝土强度应符合设计要求；当设计无具体要求时，混凝土强度应符合表 13.2.9 的相关规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查同条件养护试件强度试验报告。

表 13.2.9 底模拆除时的混凝土强度要求

构件类型	构件跨度(m)	达到设计的混凝土立方体抗压强度 标准值的百分率(%)
板	$\leq 2$	$\geq 50$
	$>2, \leq 8$	$\geq 75$
	$> 8$	$\geq 100$
梁、拱、壳	$\leq 8$	$\geq 75$
	$> 8$	$\geq 100$
悬臂构件		$\geq 100$

【条文说明】：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。

**13.2.10** 筏形基础大体积混凝土模板的拆模，应满足设计文件和施工方案的规定。当模板作为养护保温措施的一部分时，其拆模时间应符合现行国家标准《大体积混凝土施工规范》GB50496 对温控要求的相关规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

【条文说明】：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。

**13.2.11** 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。模板拆除时不应对楼层形成冲击荷载，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。

**【条文说明】**：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。

**13.3.2** 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 的规定抽取试件作几何尺寸、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。

检验数量：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》JGJ107、《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163、《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》JGJ107 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 节的规定。

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：丈量。

**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、尺寸应符合设计要求，其偏差应符合本标准第 12.3.11 节的规定。

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：丈量。

### (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》JGJ107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 的规定。除抗大型商用飞机撞击要求的接头试件外，接头试件宜从工程实体中截取。

检查数量：按现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 的规定确定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

**【条文说明】**：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《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 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，试件截取后相应位置应按照钢筋绑扎搭接的要求进行恢复。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安全壳外壳墙体，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。

**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》JGJ107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 的规定。

检查数量：按现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ107 和《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 的规定确定。

检验方法：观察。

**13.3.10** 当纵向受力钢筋采用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应符合设计要求；当设计无具体要求时，应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB50666 的规定。

检查数量：在同一检验批内，对梁、柱和独立基础，应抽查构件数量的10%，且不应少于3件；对墙和板，应按有代表性的自然间抽查10%，且不应少于3件；对大空间结构，墙可按相邻轴线间高度5m左右划分检查面，板可按纵横轴线划分检查面，抽查10%，且均不应少于3面。

检验方法：观察，尺量。

【条文说明】：同一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。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。

**13.3.11** 当纵向受力钢筋采用绑扎搭接接头时，同一接头连接区段内接头的设置和接头搭接面积百分率应符合设计要求；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规范》GB 50666 的规定。

检查数量：在同一检验批内，对梁、柱和独立基础，应抽查构件数量的10%，且不应少于3件；对墙和板，应按有代表性的自然间抽查10%，且不应少于3间；对大空间结构，墙可按相邻轴线间高度5m左右划分检查面，板可按纵横轴线划分检查面，抽查10%，且均不应少于3面。

检验方法：观察，尺量。

【条文说明】：同一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。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。

#### (IV) 钢筋安装

**13.3.12** 钢筋安装时，钢筋的牌号、规格、数量、连接形式必须符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量。

**13.3.13** 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，且严禁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，尺量及强度检验报告。

**13.3.14** 钢筋安装允许偏差应符合设计要求，当设计无具体要求时应符合下列规定：

1 钢筋到结构表面距离的最大偏差为：所需最小保护层的  $1/10$ （只能向内）；

2 钢筋在除保护层厚度控制方向外的其它方向的最大偏差为  $1d$ ，当遇到障碍物时，钢筋的位置偏离偏差在结构平面内可增大到  $\pm 5d$ ，受最小保护层控制的方向除外，但钢筋间距的增加不得超过 50%。

检查数量：在同一检验批内，对梁、柱和独立基础，应抽查构件数量的 10%，且不少于 3 件；对墙和板，应按有代表性的自然间抽查 10%，且不少于 3 间；对大空间结构，墙可按相邻轴线间高度 5m 左右划分检查面，板可按纵横轴线划分检查面，抽查 10%，且均不少于 3 面。

检查方法：尺量。

## 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，并经建设单位（或其授权代表）或监理单位审查批准。当预应力锚具和预应力筋为不同厂家供货时，在使用前应进行匹配性试验。

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作抗拉强度、伸长率检验，其检验结果应符合设计要求。

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 不得有杂质，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，应按国家现行标准《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。

检查方法：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 金属孔道外观应清洁，内外表面应无锈蚀、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；钢管焊缝应连续；
- 3 径向刚度和抗渗漏性能应符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG225 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、外加剂的质量应符合本标准第 3.5 节的规定。

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符合设计要求，当设计无要求时，应

符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB 50448、《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** 预应力监测筋使用的灌浆材料，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、级别和数量必须符合设计要求。

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应平顺，并应与定位支撑钢筋绑扎牢固；
- 3 成孔管道的端口应做好临时密封保护措施；
- 4 锚垫板承压面应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应符合设计要求，当设计无要求时，应符合表 13.4.12 的规定；
- 5 曲线预应力孔道的线形和高差应符合设计规定，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应符合本标准第 12.4.9 条的规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量检查。

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符合设计要求，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±1.5cm。

2) 其它孔道：径向偏差小于±1.5cm，与定位管之间的切向偏差小于±5cm，与相邻竖向孔道之间的偏差小于±2.5cm。

**2 水平孔道：**径向偏差小于±1.5cm，单根水平孔道与理论高差的偏差小于±2.5cm。

**3 穹顶孔道：**径向偏差小于±1.5cm，切向偏差小于±2.5cm。

检查数量：全数检查。

检验方法：尺量。

【条文说明】：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±1.5cm。

**13.4.14** 孔道安装时，孔道与孔道、孔道与模板之间的净距应符合设计要求，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(cm)

项目	最小净距
模板与水平孔道	10
模板与竖向孔道	15
水平半刚性管道距下部施工缝	2
水平半刚性管道距上部施工缝	5
平行的波纹管之间	10
平行的波纹管和刚性管	10
交叉的波纹管和刚性管	5
平行的刚性管	15
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符合设计文件的要求，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。

【条文说明】：在雨季或环境湿度较大地区，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由数十束钢绞线组成，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，预应力筋根数多，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《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** 预应力筋正式张拉前宜先进行等应力张拉。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查等应力张拉记录。

【条文说明】：等应力张拉的目的是为了克服预应力筋初始松弛，使钢绞线在正式张拉前受力均匀，处于相同的预张拉状态。核电工程单根预应力筋的钢绞线束数多，预应力线型复杂，尤其是水平预应力筋和伽马预应力筋，钢绞线在穿入孔道时已经交错在一起，有必要在正式张拉前进行等应力张拉操作，竖向预应力筋可根据实际情况确定。

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

检查数量：全数检查。

检验方法：检查试验报告。

**13.4.18** 对后张法预应力结构构件，每根预应力筋的钢绞线出现断裂或滑脱的束数严禁超过同一截面钢绞线总束数的 3%，且每束断裂的钢绞线断丝不得超过

1 丝。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，检查张拉记录。

**13.4.19** 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%~8%。

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》

GB50666 的规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查张拉记录。

**【条文说明】**：安全壳预应力筋的实测伸长值与计算伸长值的允许偏差是根据现行行业标准《压水堆核电站预应力混凝土安全壳建造规范》NB/T 20332 的规定以及核电站预应力混凝土安全壳的实际提出的要求。核电站安全壳预应力筋由数十束钢绞线组成，沿壳体水平向成环形或竖向成倒伽马形及垂直线布置，预应力筋的钢绞线束数多、张拉力大、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；目前核电站安全壳预应力筋的允许偏差均是按-5%~8%控制验收。

**13.4.20** 锚固阶段张拉端预应力筋的内缩量应符合设计文件和要求，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》GB50204 的相关规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：丈量。

**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符合设计要求及现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB50666 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** 预应力孔道灌浆时间、灌浆顺序应符合设计文件的要求；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。

【条文说明】：见第 13.4.15 条条文说明。

#### 13.4.23 孔道灌浆应符合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 预应力筋锚固后的锚具外露长度不应小于预应力筋直径的 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 根。

检验方法：观察，尺量。

【条文说明】：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 预应力筋的封锚保护措施应符合下列要求：

1 当外露预应力筋和锚具采用混凝土保护时，保护层厚度不应小于：I 类环境时 20mm，II 类环境时 50mm，III 类环境时 80mm；

2 当外露预应力筋和锚具采用永久保护帽保护时，永久保护帽应进行防锈处理。

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，尺量。

【条文说明】：预应力灌浆后的封锚主要是为了保证锚具和外露预应力筋的正常工作，防止锚具和外露预应力筋锈蚀。封锚保护措施一般有两种：采用混凝土保护或采用永久密封的保护帽保护。采用混凝土保护时，孔道灌浆前需安装临时的灌浆帽，灌浆完成浆体达到强度要求后再拆除灌浆帽；采用永久保护帽保护时，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。

## 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。**

**【条文说明】：**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于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 混凝土设计配合比应经初步试验和可用性试验后确定，混凝土设计配合比经确定后应报建设单位（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：设计配合比试验报告。**

**【条文说明】：**核电厂混凝土设计配合比一般经过初步试验和可用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。可用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。经过初步试验和可用性试验合格后，可确保混凝土设计配合比的可用性。

## (II) 原 材 料

**13.5.3 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。**

**【条文说明】：**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。

**13.5.4 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），检验结果应符合设计要求和国家现行标准的相关规定。**

**检验数量：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：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。检验结果应符合设计要求和现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T1596、《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T18046 的相关规定。

检验数量：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：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。检验结果应符合设计要求和现行国家标准《建设用砂》GB/T14684、《建设用卵石、碎石》GB/T14685 的相关要求。

检验数量：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：抽样检验报告。

【条文说明】：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，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。

**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。检验结果应符合设计要求和现行国家标准《混凝土外加剂》GB8076、《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119 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** 混凝土拌合用水应符合设计要求和现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ63 的相关要求。

检查数量：不超过 6 个月一次。

检验方法：抽样检验报告。

### (III) 混凝土拌合物

**13.5.9** 混凝土生产应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。同一条混凝土生产线每日第一次生产某设计配合比混凝土时由建设单位（或其授权代表）或监理单位进行设计混凝土生产开盘见证。

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。

【条文说明】：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。

**13.5.10** 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：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时，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：混凝土强度试验报告。

【条文说明】：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 10 分钟以内），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** 混凝土试件的取样应符合设计要求。当设计无要求时，应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 频率进行混凝土取样。

检查数量：全数检查。

检验方法：混凝土强度试验报告。

【条文说明】：考虑到各核电混凝土技术规格书中对于主体结构混凝土的取样都不一样，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。本条混凝土试件取样要求是在考虑核电现状的基础上制定的。

**13.5.13** 混凝土试件的强度评定应符合设计要求。当设计无要求时，应按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107 进行混凝土强度检验评定。

检查数量：全数检查。

检验方法：混凝土强度评定报告。

【条文说明】：各核电混凝土技术规格书中对于主体结构混凝土的强度评定原则都不一样，且与中国国家标准也不一致。各核电堆型的混凝土强度评定原则也不一致。本条混凝土试件强度评定要求是在考虑核电现状的基础上制定的。

#### (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。

【条文说明】：核电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，因此在混凝土浇筑前，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** 后浇带的留设位置应符合设计要求，后浇带和施工缝的留设及处理方法应符合施工方案要求。

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：按楼层、结构缝或施工段划分检验批。在同一检验批内,对梁、柱和独立基础，应抽查构件数量的 10%,且不应少于 3 件；对墙和板,应按有代表性的自然间抽查 10%,且不应少于 3 间；对大空间结构,墙可按相邻轴线间高度 5m 左右划分检查面,板可按纵、横轴线划分检查面,抽查 10%,且均不应少于 3 面；对电梯井，应全数检查。

**13.5.19** 现浇设备基础的位置和尺寸应符合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。

检验方法：观察，检查施工方案和施工记录。

## 附录 A 安全壳结构整体性检测

### A.1 一般规定

**A.1.1** 本附录检查内容适用于预应力混凝土安全壳结构。

**A.1.2** 通过检查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强度和可靠性。

**A.1.3** 应按下列规定定期开展压力试验及安全壳结构的检查工作：

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

2 核电厂投产后的第一次停堆换料时，开展第二次压力试验，检查安全壳结构性能的变化情况；

3 此后每隔 10 年开展一次压力试验，检查安全壳结构性能的持续符合性；

【条文说明】：安全壳混凝土结构压力试验的施压方式是从大气压开始，向安全壳内充入干净、干燥的空气来施加压力。

当核电厂停堆换料时间进度安排不能保证恰在间隔 10 年时间节点处，则应将压力试验安排在距离 10 年间隔最近的一次停堆换料期间。

4 若在核电厂运行过程中发生对安全壳结构有损伤的偶然事故，应对结构损伤进行评估修复后随即开展安全壳结构压力试验，安全壳结构可靠性通过检查验证后方可继续使用；

5 安全壳结构在核电厂投产前的首次强度试验及投产后的定期强度试验应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 条要求；

6 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，恒压时间应不小于 1h。

### A.2 安全壳结构检查项目

**A.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。

**A.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。

**A.2.3** 强度试验过程中应测读灌油（蜡）监测预应力筋的预应力值。

**A.2.4** 试验过程中应监测安全壳混凝土内部的温度值。

**A.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）。

**A.2.6** 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。

### **A.3 安全壳结构检查技术要求**

**A.3.1** 安全壳结构整体变形检查符合下列要求：

- 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0.25mm。

**A.3.2** 安全壳结构混凝土内部应变监测应符合下列要求：

- 1 应在混凝土下列部位的内、外排普通钢筋处，沿切向（经向）和竖向（纬向）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 综合误差不应大于  $10\mu\epsilon$ ;

**A.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油(蜡)预应力监测筋;
- 2 灌油(蜡)预应力监测筋宜采用穿心式测力传感器测量,其误差不应大于被测张拉值的 $\pm$ 错误!未找到引用源。1%。

**A.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代表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。

**A.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 A.2.5 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;

【条文说明】: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。

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。

#### **A.4 验收准则**

**A.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 130%。

【条文说明】:本条技术要求参考了美国标准 ACI359 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峰值压力荷载。整体变形测量最大值是指峰值试验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峰值试验峰值压力荷载作用下变形响应的计算值。

**A.4.2** 压力试验卸压至零后 24h,安全壳结构整体变形最大残余量不应大于峰值

试验压力作用下变形测量值的 20%加 0.25mm 之和。

**【条文说明】** 本条中 0.25mm 为本附录 A.3.1 条中系统允许最大测量误差。同时现场加压试验宜在  $200^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$  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。

**A.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。

**A.4.4** 经检查，混凝土结构和钢内衬应无永久性损伤的可见痕迹。

## 附录 B 抗大型商用飞机撞击结构设计

### B.1 一般规定

**B.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。

【条文说明】：本条给出了附录的适用范围和主要内容。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事件考虑，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。

**B.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。

【条文说明】：本条是规定抗飞机撞击结构应满足的安全要求，安全壳保持完整性，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。乏燃料池保持完整性，即通过结构分析表明，大型商用飞机撞击乏燃料池墙体及其支撑结构不会导致乏燃料池安全运行最低水位线以下的位置发生泄漏。

**B.1.3** 抗飞机撞击结构设计应符合下列要求：

【条文说明】：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的一些原则要求。

**1** 设置双层安全壳或双层墙时，双层安全壳或双层墙之间的间距应大于飞机撞击下产生的最大结构位移。

【条文说明】：本条是基于简化分析的原则设置，考虑通过双层壳或墙结构的外层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内层结构上，不需要对内层结构进行力学分析。

**2** 混凝土构件应采取增大厚度或其它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。

【条文说明】：本条主要是防止硬性飞射物撞击产生的二次效应，根据试验研究证明，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 应采取有效措施防止安全壳与乏燃料厂房内吊车跌落或保证吊车跌落不影响安全功能。**

**【条文说明】：**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 撞击面开设孔洞时应考虑飞射物穿透和火灾蔓延的风险。**

**【条文说明】：**核电厂厂房外墙上由于工艺需要经常会有通风或其它功能需求的孔洞，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，则需要进行分析，以评估核电厂的安全。

**B.1.4 抗飞机撞击结构分析应满足下列要求：**

**【条文说明】：**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，确保核电厂安全。

**1 应进行结构整体稳定性计算、整体动力计算、撞击部位的局部计算，同时还应考虑振动冲击的影响。**

**【条文说明】：**结合飞机撞击产生的效应，需要针对具体结构进行整体稳定性计算，主要是指飞机撞击厂房结构顶部时情况。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。

厂房结构应进行振动冲击效应分析，以提供相应的楼层加速度反应谱或时程曲线。根据飞机撞击评估的要求，对于影响安全系统和设备的楼层需要进行楼层反应谱计算分析，特别是对于主控室所在楼层，由于涉及较多控制系统和敏感仪器。通常振动效应计算分析后，提供楼层的反应谱曲线或时程曲线。

用于生成楼层加速度反应谱或结构响应时程曲线的有限元节点应结合所需评估物项所在位置确定。由于飞机撞击振动产生的响应与评估位置有关，离撞击位置越远的区域产生的振动加速度越小，离撞击位置越近的区域产生的振动加速度越大，因此，在选取反应谱曲线

生产曲线的位置点应与实际评价的物项所在位置尽量保持一致。

楼层反应谱分析可采用完全瞬态分析方法，可按弹性计算。按照目前工程实践经验，飞机撞击振动楼层反应谱的计算主要按弹性计算，如有必要，也可采用非线性的方法进行计算分析。完全瞬态动力分析方法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应，功能较强，可包括各类非线性特性（如塑性、大变形、大应变等）。其特点是：容易使用，不必关心选择主自由度或振型；可考虑各种类型的非线性特性；采用完整的系统矩阵，无质量矩阵近似；一次分析就能得到所有的位移和应力；可施加所有类型的荷载，缺点是比其它方法占用资源多。

## 2 结构构件应根据其功能要求进行变形的验算。

**【条文说明】**：对于有变形要求的构件应进行相应的计算分析，如乏燃料水池搁架等。

## 3 结构计算分析时应符合下列假定和要求：

**【条文说明】**：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) 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 10 度夹角撞击。荷载同时作用在撞击区域内；

**【条文说明】**：核电厂目前主要考虑的飞机撞击事件是恶意撞击，属于超设计基准事件，假定按照水平飞机考虑，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，取飞机轴线与水平面 10 度夹角撞击。

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；

**【条文说明】**：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它位置导致更严重后果的可能性。

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；

**【条文说明】**：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) 分析时需合理地考虑水池中水的质量；

【条文说明】：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) 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，并根据失效类型确定合适的应变极限值。

【条文说明】：裂缝对混凝土性能有较大影响时，应选取能模拟混凝土开裂的材料模型。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。

## B.2 材料

### B.2.1 材料特性应符合下列要求：

【条文说明】：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 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》GB50010 规定的标准值；

【条文说明】：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《混凝土结构设计规范》GB50010，也可参照《混凝土结构设计规范》GB50010 选取对应混凝土强度等级的标准值。

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；

【条文说明】：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 1 的数据，该数据参见美国 NEI07-13。

表 1 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 考虑飞机撞击的钢筋混凝土结构，混凝土强度等级不应低于 C40。

【条文说明】：结合现有工程实践经验，通常高强度混凝土对抵抗撞击有好的效果。

## B.3 荷载

### B.3.1 荷载应符合下列要求：

#### 1 飞机撞击分析应考虑整体荷载和局部荷载。

【条文说明】：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，如结构的稳定、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 整体荷载宜采用飞机荷载曲线，该曲线根据飞机的压碎力分布、质量分布和撞击速度来确定，并根据飞机的几何特征确定作用面积。

【条文说明】：整体荷载主要有两种考虑方式，一是力时程曲线，根据法规标准给出的飞机荷载曲线，如法规标准没有相应机型的荷载曲线时，可根据飞机基本特征结合理论公式进行推导。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。

#### 3 飞机荷载曲线应满足主管部门的要求。

4 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。

【条文说明】：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。

5 撞击速度应根据假定的撞击情况确定，当无可靠数据时，可按 100m/s 考虑。

【条文说明】：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来考虑，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。

6 结构整体稳定性计算可采用等效静力法，动力系数可取 1.6。

【条文说明】：采用等效静力法计算时，将飞机荷载曲线峰值乘以动力系数后，按静力计算，参考 EPR 设计的情况，动力系数取 1.6。

## B.4 结构计算

B.4.1 整体稳定验算可采用有限元方法，也可采用下列公式进行计算：

1 结构抗滑移稳定性验算：

$$\frac{G_e \mu}{F_c} \geq 1.1 \quad (\text{B.4.1-1})$$

式中： $G_e$ ——结构的等效重力荷载；

$\mu$ ——基础底部与地基之间的摩擦系数，由试验确定，无试验数据时可依据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 确定；

$F_c$ ——飞机等效静力荷载。

【条文说明】：如采用有限元的方法可直接在软件中模拟飞机撞击的场景，评价结构是否倒塌。经验公式主要是参考《建筑地基基础设计规范》GB 50007。飞机等效静力荷载可由飞机撞击荷载峰值乘以动力系数，动力系数参考 EPR 设计的情况，取为 1.6。

2 结构抗倾覆稳定性验算：

$$\frac{G_e b_e}{F_c h_e} \geq 1.1 \quad (\text{B.4.1-2})$$

式中： $b_e$ ——结构等效重心到倾覆点之间的水平距离；

$h_e$ ——飞机荷载作用点到倾覆点之间的垂直距离。

【条文说明】：如采用有限元的方法可直接在软件中模拟飞机撞击的场景，评价结构是否倒塌。经验公式主要是参考《建筑地基基础设计规范》GB 50007。

B.4.2 整体动力计算应满足下列要求：

1 整体动力计算根据分析对象选择下列分析方法：



### 1) 力时程分析方法;

### 2) 飞射物-靶体相互作用分析方法。

【条文说明】: 美国 NEI 07-13 中推荐的方法, 也是目前工程实践中常用的方法, 包括美国 AP1000 和法国 EPR 堆型设计均采用本条文中的方法。

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地作用在撞击区域, 占用计算资源较少, 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应飞机撞击情况。

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, 模型单元尺寸比较小, 占用计算资源较大, 但能准确地反应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。

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。

【条文说明】: 本条给出了在进行有限元计算分析时, 钢筋混凝土的建模方式。

### 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安全功能;

#### 2) 钢筋的应变不超过极限应变。

【条文说明】: 本条结合实践工程案例给出了整体动力分析的判定准则, a) 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%。

### B.4.3 局部计算应符合下列要求:

1 局部效应计算可采用飞射物-靶体相互作用分析方法, 也可根据试验确定或采用其它适用的经验公式。

【条文说明】: 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,

也可建立硬性飞射物三维有限元模型进行碰撞分析。

目前我国规范上没有针对飞机硬性飞射物的穿透计算公式,美国 NEI 07-13 中给出了英制单位的穿透计算公式,考虑到本标准的适用性,参考选取了目前核电厂龙卷风引起飞射物的穿透公式来参考设计。

在硬性飞射物冲击作用下钢筋混凝土结构的局部穿透计算可按下式计算:

$$\frac{\rho V^2}{1.2 f_{ck}} = 1.89 \left( \frac{\rho H^2 D}{M} \right)^{4/3} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  ——混凝土的密度,通常取  $2500 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ;

$f_{ck}$  ——混凝土轴心抗压强度标准值 ( $\text{MPa}$ );

$M$  ——飞射物的质量 ( $\text{Kg}$ );

$D$  ——飞射物的(等效)直径 ( $\text{m}$ );

$V$  ——飞射物的速度 ( $\text{m/s}$ );

$H$  ——结构构件穿透的临界厚度 ( $\text{m}$ )。

公式适用范围:  $0.5 < \frac{D}{H} < 1.5$ ;

$$0.5 < \frac{M}{\rho H^3} < 5.0;$$

$$30\text{MPa} < f_{ck} < 45\text{MPa};$$

$$100\text{Kg/m}^3 < \text{对称钢筋} < 250\text{Kg/m}^3。$$

## B.5 构造措施

**B.5.1** 钢筋连接应符合下列要求:

1 纵向受力钢筋应采用机械连接。

【条文说明】:考虑到高速撞击下需保证钢筋性能连续,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冲击验证。

2 机械套筒接头的极限抗拉强度应不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。

【条文说明】:本条主要是引用《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107-2016 中关于机械接头

的规定和要求。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  $1.0s^{-1}$ ，此数据是第三代压水堆工程经验的反馈。

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%。

【条文说明】：本条主要是引用《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107-2016 中关于机械接头的规定和要求。

### B.5.2 横向抗剪钢筋应符合下列要求：

1 横向抗剪钢筋的配置应根据计算确定。

【条文说明】：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，横向抗剪钢筋的数量与冲切力及作用范围有关，通常情况下冲切力按照飞机撞击产生力峰值乘以动力放大系数 1.6 后作为设计荷载的输入，目前按欧标的冲切公式计算，考虑混凝土和钢筋的抗冲切作用。

2 横向抗剪钢筋的布置应与结构构件的轴线垂直，其开口方向应朝向撞击面，如图 1 所示。

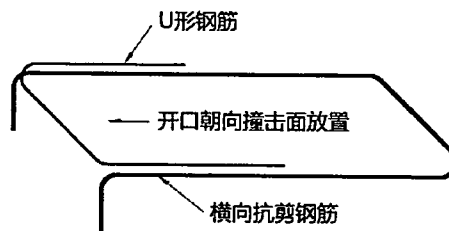


图 1 横向抗剪钢筋示意图

【条文说明】：本条主要是根据现有工程实践案例确定。

3 横向抗剪钢筋应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。当横向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，间距可按横向抗剪钢筋间距大一倍取用

## 附录 C 水池

### C.1 一般规定

**C.1.1** 结构在进行整体作用效应分析时，应计入液体因为外部激励产生的运动对结构的影响。

【条文说明】：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。

### C.2 分析方法

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

【条文说明】本标准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；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，比如方型、圆柱型、圆环型、球型等，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“Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary” ASCE4（2017 版）。

**C.2.2** 水池构件设计时，可采用等效静力设计的方法，计入晃动模态部分的影响所选取的楼面反应谱值可采用的阻尼值为 0.5%。

【条文说明】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。

**C.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。

【条文说明】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，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，必要时在垂直方向设置 2 种振动模式，而不能按 C.2.1 的条文说明中针对竖向只采用一种振动模式。

**C.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，且应允许进行适当的线性简化。

【条文说明】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。

**C.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。

【条文说明】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。评估方法可参考美国手册"Seismic Design and Evaluation Guidelines For The Department of Energy High-Level Waste Storage Tanks and Appurtenances"（1995 版）。

## 附录D 混凝土后锚固

### D.1 一般规定

**D.1.1** 本附录适用于混凝土结构上后锚固件的设计、施工及验收。

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

【条文说明】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的要求，所以强度适当提高为 C30。

**D.1.3** 后锚固件宜选用扩底型锚栓。

【条文说明】目前《混凝土结构加固设计规范》GB50367-2006 13.1 章节中明确“承重结构用的锚栓，应采用有机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《JGJ 145-2013 混凝土结构后锚固技术规程》，按核电厂抗震要求的有扩底型及特殊倒锥形化学锚栓，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。

**D.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。

【条文说明】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 ACI349 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。

### D.2 后锚固设计

**D.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，锚固连接的压力应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。

**D.2.2** 锚栓内力也可采用有限元分析方法计算获得。

**D.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。

【条文说明】破坏控制的目的是为了实现在延性破坏。

**D.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。

【条文说明】低强钢材是指强度等级不大于 5.8 级的后锚固螺栓。

**D.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，并提供在裂缝混凝土或抗震类区域的拔出破坏承载力。

【条文说明】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等作用效应，且要求有较高的安全裕度，参考美国标准 ACI349 及结合国内三代工程实践，提出了本条要求。

**D.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。

【条文说明】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 D2.3 条要求进行复核。

**D.2.7** 后锚固连接应按本标准 3.3.1 条进行承载能力极限状态验算。

【条文说明】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 20414 进行设计。

**D.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应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应不大于 0.5 倍混凝土基材厚度，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应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。

【条文说明】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 ACI349 的要求，考虑到核电构件一般较厚大，从严要求给出本条规定；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。

**D.2.9** 后锚固连接设计所采用的设计使用年限应不小于整个被连接结构的设计使用年限。

### **D.3 后锚固安装施工**

**D.3.1** 后锚固施工钻孔前，首先对基材表面清理，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。

**D.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同意，并详实记录切断钢筋位置、直径等信息。

**D.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。

**D.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。

**D.3.5** 锚栓应有明显的安装就位标识，以保证正确安装。

**D.3.6** 锚栓的安装工艺及工具应符合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。

**D.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。

**D.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。

### **D.4 后锚固验收**

**D.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。

**D.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：

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

- 1) 当有 1 件不符合要求时，应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、锈蚀或其它局部缺陷。
- 2** 承载力性能试验检查应满足设计要求或国家现行相关标准的要求。

**D.4.3** 施工验收包括下列内容：

- 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检查，确保扩底满足要求。

## 附录E 超设计基准工况

**E.1.1** 超设计基准工况分为设计扩展工况和超设计基准外部事件。

【条文说明】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》HAF102-2016要求，设计阶段应考虑超设计基准工况，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。

**E.1.2** 对设计扩展工况荷载的取值，可根据工艺条件确定；对超设计基准地震，可根据地震裕量分析的相关要求确定；对大型商业飞机撞击荷载作用的取值，按本标准附录B确定。

【条文说明】设计扩展工况荷载当设计无具体要求时，可参照现行行业标准《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB20303执行。

**E.1.3** 超设计基准外部事件，采用下列三种最佳估值法进行评价：

- 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 地震裕量分析法；

【条文说明】：用地震裕量分析法来评估结构裕量水平时，采用高置信度低概率失效（HCLPF）值确定。

**E.1.4** 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。

【条文说明】：结构构件的安全功能包括应有放射性物质包容、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局部水平。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。

## 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，在条件允许时首先这样做的：

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 条文中指定应按其它有关标准、规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 1 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 2 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 3 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 4 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 5 《核电厂抗震设计规范》 GB 50267
- 6 《混凝土结构耐久性设计规范》 GB 50476
- 7 《钢筋混凝土用钢》 GB 1499
- 8 《预应力混凝土用钢丝》 GB/T 5223
- 9 《预应力混凝土用钢绞线》 GB/T 5224
- 10 《混凝土强度检验评定标准》 GB/T 50107
- 11 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 12 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 13 《盐渍土地区建筑技术规范》 GB/T 50942