

混凝土

结构规范

工程建设标准规范分类汇编

2000 年版

GONGCHENG
JIANSHE
BIAOZHONGUIFAN
FENLEIHUIBIAN

● 中国建筑工业出版社

工程建设标准规范分类汇编

混凝土结构规范

(2000 年版)

本社编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构规范:2000年版/中国建筑工业出版社编. —北京:
中国建筑工业出版社,2000
ISBN 7-112-04105-8

I. 混… II. 中… III. 混凝土结构-标准-汇编 IV. TU37-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 57847 号

工程建设标准规范分类汇编

混凝土结构规范

(2000 年版)

本社编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 58¼ 插页: 4 字数: 1296 千字

2000 年 10 月第一版 2000 年 10 月第一次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 110.00 元

ISBN 7-112-04105-8

TU · 3221 (9555)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

中华人民共和国行业标准

钢筋混凝土薄壳结构设计规程

Specification for Design of Reinforced Concrete Shell Structures

JGJ/T 22—98

主编单位：中国建筑科学研究院
批准单位：中华人民共和国建设部
施行日期：1998年12月1日

关于发布行业标准《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》的通知

建标[1998]126号

根据建设部《关于印发一九九二年工程建设行业标准制订、修订项目计划(建设部分第一批)的通知》(建标[1992]227号)要求,由中国建筑科学研究院主编的《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》经审查,批准为推荐性行业标准,编号 JGJ/T22—98,自1998年12月1日起施行。原部标准《钢筋混凝土薄壳顶盖及楼盖结构设计计算规程》BTG16—65同时废止。

本标准由建设部建筑工程技术标准归口单位中国建筑科学研究院负责管理,由中国建筑科学研究院负责具体解释工作。

本标准由建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版。

中华人民共和国建设部

1998年6月9日

前 言

1 总 则

本规程系根据建设部建标[1992]227号文的要求,由中国建筑科学研究院会同有关科研、设计单位和高等院校对原《钢筋混凝土薄壳顶盖及楼盖结构设计计算规程》BJG16—65进行修订而成。在修订过程中,修订组汇总了国内外有关薄壳结构的主要科研、设计资料,调查总结了近年来国内的科研成果和工程实践经验,提出修订稿,并以多种方式广泛征求了全国有关单位的意见,经反复修改,最后由有关主管部门组织审查定稿。

本规程共分8章和5个附录,对原规程作了较大的补充和修改,对原规程条文作了全面的整理。主要内容是:

1. 根据国家标准《建筑结构设计统一标准》GBJ 68—84的要求,规定了设计原则和计算方法。

按照国家标准《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T 50083—97的规定,修改了符号、计量单位和基本术语。

2. 以概率极限状态设计法代替原规程采用的容许应力设计法。

3. 增加了扁壳的控制偏微分方程的表达式、薄壳结构地震作用的验算、壳板厚度取值和配筋构造建议;补充了多种集中荷载作用下圆形底旋转薄壳的内力和位移计算及相应的图表、连续扭壳的设计、膜型扁壳的设计、任意边界形状和条件下双曲扁壳控制方程的求解;介绍了各种半解析方法和数值方法;此外,对带肋壳的控制方程求解作了详细说明。

本规程必须与国家标准《建筑结构设计统一标准》GBJ68、《建筑结构荷载规范》GBJ9、《混凝土结构设计规范》GBJ10等配套使用。

1.0.1 为了在钢筋混凝土薄壳结构设计中贯彻执行国家的技术经济政策,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于整体式或装配式钢筋混凝土及预应力混凝土薄壳结构的设计。

1.0.3 本规程是根据国家标准《建筑结构设计统一标准》GBJ 68—84规定的原则制定的。符号、计量单位和基本术语按照国家标准《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T50083—97的规定采用。

1.0.4 本规程是根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GBJ 9、《混凝土结构设计规范》GBJ 10、《建筑抗震设计规范》GBJ 11、《混凝土结构工程施工及验收规范》GB 50204和其他有关规范,并结合钢筋混凝土薄壳结构的设计特点、实践经验和科研成果而编制的。

1.0.5 钢筋混凝土薄壳结构的设计除执行本规程外,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 壳板 shell plate
由两个曲面所限定,且此两曲面之间的距离远比曲面尺寸为小的物体。
- 2.1.2 壳体 shell structure
由壳板(有时壳板上有加劲肋)与其边界上的边缘构件组成的具有一定承载能力的物体。
- 2.1.3 壳面 shell surface
壳板的表面。
- 2.1.4 壳板厚度 shell thickness
两壳板间垂直于中曲面的距离称为壳板厚度。
- 2.1.5 壳板中曲面 middle surface of shell
在理论分析时能定义壳板抽象形体的曲面,常为平分壳板厚度的曲面。
- 2.1.6 壳板主曲率 principal curvature of shell
壳板中曲面上某点处的最大和最小法曲率。
- 2.1.7 薄壳 thin shell
壳板厚度与其中曲面最小曲率半径之比不大于 $1/20$ 的壳体。
- 2.1.8 壳体矢高 rise of shell structure
壳板中曲面最高水平处到壳体底平面的最大竖直距离。
- 2.1.9 壳板矢高 rise of shell
壳板中曲面最高水平处到壳板底平面的最大竖直距离。
- 2.1.10 壳体边长 side length of shell
壳板中曲面与边缘构件中心面相交的曲线在底平面上的投影

长度。

- 2.1.11 单侧平面曲线 plane curve line without counterflexure
曲率半径中心在曲线同一侧的光滑的平面曲线。
- 2.1.12 壳板高斯曲率 Gauss curvature of shell
壳板两个主曲率的乘积。
- 2.1.13 正高斯曲率 positive Gauss curvature
两个主曲率对应的曲率半径中心在曲面同一侧时的高斯曲率。
- 2.1.14 负高斯曲率 negative Gauss curvature
两个主曲率对应的曲率半径中心在曲面异侧时的高斯曲率。
- 2.1.15 零高斯曲率 zero Gauss curvature
两个主曲率中有一个为零的高斯曲率。
- 2.1.16 正高斯曲率壳体 shell with positive Gauss curvature
具有正高斯曲率的壳体。
- 2.1.17 负高斯曲率壳体 shell with negative Gauss curvature
具有负高斯曲率的壳体。
- 2.1.18 零高斯曲率壳体 shell with zero Gauss curvature
具有零高斯曲率的壳体。
- 2.1.19 旋转壳 shell of revolution
由母线(直线或单侧平面曲线)在空间绕一轴线旋转而形成的壳体。底面一般为圆形,又称为圆形底旋转壳。
- 2.1.20 扁壳 shallow shell
壳板矢高与壳体最短边长之比不大于 $1/5$ 的薄壳。
- 2.1.21 球面壳 spherical shell
母线为圆弧线的旋转壳,其各点主曲率的倒数等于球面半径。
- 壳板矢高与壳底面直径之比不大于 $1/5$ 的球面壳称为扁球壳。
- 2.1.22 椭圆面壳 rotational elliptical shell
母线为椭圆线的旋转壳。
- 2.1.23 旋转抛物面壳 rotational parabolical shell
母线为抛物线的旋转壳。

2.1.24 移动面壳体 translational shell

由母线（直线或单侧平面曲线）在空间沿两条准线（直线或单侧平面曲线）移动而形成的壳体。

2.1.25 双曲扁壳 double curvature shallow shell

母线及准线均为单侧平面曲线（一般为抛物线或圆弧线），具有正高斯曲率的移动面扁壳。

2.1.26 圆柱面壳 cylindrical shell

母线为直线，准线为单侧平面曲线的移动面壳体。

2.1.27 双曲抛物面壳 hyperbolic paraboloidal shell

母线为抛物线，准线为单侧平面曲线，具有负高斯曲率的移动面壳体。

2.1.28 膜型扁壳 membrane shell

两个主压应力方向上的截面内力彼此相等的扁壳。

2.1.29 封闭壳 shell without opening

壳面不敞口的壳体。

2.1.30 非封闭壳 shell with opening

壳面敞口的壳体。

2.1.31 壳体薄膜内力 membrane forces of shell

在各种作用下，忽略壳体截面上的弯矩、扭矩和垂直于壳面的剪力而求得的壳体截面上的内力。

2.1.32 边缘抗力 edge effect

在壳体与边缘构件连接处，由于位移协调而产生的应力或内力。

2.1.33 切向 tangential direction

壳体中曲面切平面内沿坐标轴的方向。

2.1.34 法向 normal direction

壳体中曲面的法线方向。

2.2 符 号

2.2.1 作用

F_z ——竖向集中荷载；

F_a ——法向集中荷载；

F_x —— x 轴方向集中荷载；

F_y —— y 轴方向集中荷载；

q_z ——均布线荷载；

q_{z0} ——旋转壳内环竖向均布线荷载；

q_n ——壳板上曲面上的法向均布荷载；

q_s ——壳板上曲面上的竖向均布荷载；

s ——壳板上曲面水平投影面上的分布雪荷载；

q_x ——壳板上曲面上 x 轴方向的均布荷载分量；

q_y ——壳板上曲面上 y 轴方向的均布荷载分量；

q_z ——壳板上曲面上 z 轴方向的均布荷载分量；

q_φ ——旋转壳壳板上曲面上经向的均布荷载分量；

q_m ——壳板上曲面上法向的均布荷载分量；

q_p ——膜型扁壳截面上给定的均布线压力；

Q ——膜型扁壳总荷载；

r_n ——膜型扁壳壳体周边垂直于底平面的分布线反力；

s_n ——圆柱面壳壳板上曲面水平投影面上的分布雪荷载；

载；

B_z ——圆柱面壳壳板上曲面上实际的均布恒荷载；

q_{bn} ——圆柱面壳壳板上曲面上的竖向分布线荷载，包括边缘自重；

重；

P_z ——作用在圆柱面壳壳板上梁截面上有效的预应力合力；

q_{zb} ——圆柱面壳壳壳板上水平的分布边缘抗力；

q_{z0} ——圆柱面壳壳壳板上竖向的分布边缘抗力；

q_{z1} ——圆柱面壳壳壳板上切向的分布边缘抗力；

m_{z1} ——圆柱面壳壳壳壳板上切向的分布边缘力矩；

q_{sz} ——圆柱面壳壳壳壳壳板上切向的分布边缘抗力；

q_{sn} ——圆柱面壳壳壳壳壳壳壳板上法向的分布边缘抗力；

q_{se} ——圆柱面短壳板边缘上环向的分布边缘扰力;
 m_s ——圆柱面短壳板边缘上的分布边缘力矩;
 q_{Lbh} ——圆柱面长壳边缘上水平的分布边缘扰力;
 q_{Lbv} ——圆柱面长壳边缘上竖向的分布边缘扰力;
 q_{Lbt} ——圆柱面长壳边缘上切向的分布边缘扰力;
 m_{Lb} ——圆柱面长壳边缘上的分布边缘力矩;
 q_{bh} ——圆柱面短壳边缘上水平的分布边缘扰力;
 q_{bv} ——圆柱面短壳边缘上竖向的分布边缘扰力;
 q_{bt} ——圆柱面短壳边缘上沿切向的分布边缘扰力;
 m_b ——圆柱面短壳边缘上的分布边缘力矩。

2.2.2 作用效应

n_q ——旋转壳壳板截面上经向的分布轴向力;或圆柱面

壳壳板截面上环向的分布轴向力;

n_θ ——旋转壳壳板截面上环向的分布轴向力;

n_x, n_y ——壳板截面上 x, y 轴方向的分布轴向力;

n_1, n_2 ——壳板截面上顺 x, y 轴中曲面切线方向的分布轴向力;

n_1^m, n_2^m, n_3^m —— x, y, z 坐标系中壳板截面上相应的分布薄膜内力;

n_θ^m, n_φ^m —— θ, φ 坐标系壳板截面上相应的分布薄膜内力;

n_h ——旋转壳壳板边缘上水平的分布内推力;

n_{ho}^m ——旋转壳外环边缘上水平的分布薄膜内推力;

n_{ho}^m ——旋转壳内环边缘上水平的分布薄膜内推力;

γ ——壳板截面上的分布剪力;

ν_θ ——壳板截面上法向的分布剪力;

ν_t ——壳板截面上切向的分布剪力;

ν_n ——壳板截面上竖向的分布剪力;

ν_h ——壳板截面上水平的分布剪力;

ν_c ——扁壳壳板点截面上的分布剪力;

ν_v, ν_w ——壳板平行于 y, x 轴截面上竖向的分布剪力;
 ν_θ ——旋转壳壳板垂直于经向的截面上法向的分布剪力;

t ——壳板截面上的分布扭矩;

t_c ——扁壳角点截面上的分布扭矩;

m_1, m_2 ——壳板平行于 y, x 轴截面上的分布弯矩;

m_φ ——旋转壳壳板截面上经向的分布弯矩;或圆柱面壳板截面上环向的分布弯矩;

m_θ ——旋转壳壳板截面上环向的分布弯矩;

N_{ba}, N_{bo} ——旋转壳外、内环截面上的轴向力;

u, v, w ——壳体 x, y, z 轴方向的位移;

u_θ ——壳体 θ 轴方向的位移;

ν_φ ——壳体 φ 轴方向的位移;

w_θ ——壳体法向的位移;

u_θ^m ——旋转壳壳体按薄膜理论计算的水平位移;

ψ ——壳体的转角;

ψ_φ^m ——旋转壳壳体按薄膜理论计算的经向转角;

u_{sh} ——旋转壳壳板外环边缘处的水平位移;

u_{sh} ——旋转壳外环梁与壳板相接处的水平位移;

u_{sh} ——旋转壳壳板内环边缘处的水平位移;

u_{sh} ——旋转壳内环梁与壳板相接处的水平位移;

ψ_φ ——旋转壳壳板外环边缘处的经向转角;

ψ_θ ——旋转壳壳板内环边缘处的经向转角;

$\psi_{\theta\varphi}$ ——旋转壳外环梁与壳板相接处的经向转角;

ψ_θ ——旋转壳内环梁与壳板相接处的经向转角;

ν_θ ——圆柱面壳板边缘的水平位移;

ν_h ——圆柱面壳边缘与壳板连接处的水平位移;

w_θ ——圆柱面壳板边缘的竖向位移;

$w_{\theta h}$ ——圆柱面壳边缘与壳板连接处的竖向位移;

$\psi_{\theta\theta}$ ——圆柱面壳板边缘的环向转角；

$\psi_{\theta\phi}$ ——圆柱面壳边缘与壳板连接处的环向转角；

$\sigma_{\theta\theta}$ ——圆柱面壳边缘截面上边缘中点的正应力；

$\sigma_{\theta\theta}$ ——圆柱面壳边缘截面下边缘中点的正应力。

2.2.3 几何特征

θ, φ, z ——旋转壳的坐标系；

x, φ, z ——圆柱面壳的坐标系；

r, θ, z ——扁球壳的坐标系；

x, y, z ——壳的直角坐标系；

t ——壳板厚度；

f ——壳板的矢高；

f_{tot} ——壳体的矢高；

f_a, f_b ——双曲扁壳 a 边、 b 边上的矢高；

t_{11}, t_{21} ——带肋壳在 x, y 轴方向按截面惯性矩折算的厚度；

t_{1a}, t_{2a} ——带肋壳在 x, y 轴方向按截面面积折算的厚度；

t_{e1} ——带肋旋转壳在经向按截面惯性矩折算的厚度；

t_{e0} ——带肋旋转壳在环向按截面惯性矩折算的厚度；

t_{e0a} ——带肋旋转壳在经向按截面面积折算的厚度；或带肋圆柱面壳在环向按截面面积折算的厚度；

t_{0a} ——带肋旋转壳在环向按截面面积折算的厚度；

t_{a0} ——带肋圆柱面壳在环向按截面刚度折算的厚度；

t_{x0} ——带肋圆柱面壳在 x 轴方向按截面刚度折算的厚度；

度；

t_{x0} ——带肋圆柱面壳在环向按截面刚度折算的厚度；

t_{xa} ——带肋圆柱面壳在 x 轴方向按截面面积折算的厚度；

度；

κ ——等曲率壳的曲率；

κ_1, κ_2 ——壳体中曲面的主曲率；

κ_1 ——壳体中曲面的扭曲率；

r_a ——球面壳的半径；或等曲率壳的曲率半径；

r_1 ——旋转壳中曲面任意点经向的曲率半径；

r_2 ——旋转壳中曲面任意点纬向的曲率半径；

r_{2a} ——旋转壳中曲面外环边缘处纬向的曲率半径；

r_{20} ——旋转壳中曲面内环边缘处纬向的曲率半径；

D ——壳板截面单位长度的刚度；

s_1 ——旋转壳壳体沿经线方向由旋转轴至外环边缘的弧长；

s_2 ——旋转壳壳体沿经线方向由内环边缘至外环边缘的弧长；

s_3 ——旋转壳由壳体外环边缘量起的经向弧长；

s_0 ——旋转壳由壳体内环边缘量起的经向弧长；

α ——膜型扁壳周边上的倾斜度；

φ ——圆柱面壳体右边梁与壳板连接处至壳面上某点的圆弧所对应的圆心角；

φ ——圆柱面壳体横截面成对称线到壳板边缘的圆弧所对应的圆心角；

q ——圆柱面壳体横截面成对称线到壳板边缘的圆弧所对应的圆心角；

A_1 ——圆形底膜型扁壳边缘构件的钢筋截面面积；

A_{as}, A_{ab} ——矩形底膜型扁壳 a 边、 b 边边缘构件的钢筋截面面积。

C ——壳体的特征长度参数；

C_a, C_o ——旋转壳外环、内环边缘处的特征长度参数；

C_1, C_2 ——双曲扁壳 x, y 轴方向的特征长度参数。

2.2.4 其他

3 基本规定

3.1 结构选型

- 3.1.1 薄壳结构的型式应根据建筑设计要求、施工条件和经济合理性确定。
- 3.1.2 底面为圆形的壳体型式可采用球面壳、椭球面壳、旋转抛物面壳和膜型扁壳。
- 3.1.3 底面为矩形的壳体型式可采用双曲扁壳、圆柱面壳、双曲抛物面扭壳和膜型扁壳。
- 3.1.4 周边支承的矩形底面双曲扁壳、双曲抛物面扭壳和膜型扁壳,其底面长度与宽度的比值宜小于2。
- 3.1.5 当荷载分布变化较大或圆形底面直径大于8m、矩形底较大边长度大于6m时,不宜采用膜型扁壳。

3.2 计算原则

- 3.2.1 壳体的计算曲率应采用中曲面的曲率。
- 3.2.2 壳板及其边缘构件可按弹性理论分析其内力与位移。当壳体的矢高与较小边长之比不大于1/5时,可采用扁壳理论进行计算。
- 除本规程有专门规定外,壳体的截面设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》的规定。混凝土的泊松比可忽略不计。
- 3.2.3 壳体截面应进行承载力验算。壳板最大主拉应力不应大于4倍混凝土抗拉强度设计值。圆柱面壳边梁底的最大拉应力不应大于8倍混凝土抗拉强度设计值。
- 3.2.4 壳体边缘构件应验算在正常使用极限状态下的变形。除有特殊要求者,对荷载短期效应组合下的挠度值,在跨度大于7m时

不应大于跨度的1/1000,在跨度不大于7m时不应大于跨度的1/500;荷载长期效应组合下的挠度值,在跨度大于7m时不应大于跨度的1/500,在跨度不大于7m时不应大于跨度的1/250。

3.2.5 对于在正常使用极限状态下不宜出现裂缝的壳体,按荷载标准值并考虑弯矩影响所得最大主拉应力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》的规定。

3.2.6 壳板的自重可按壳板的实际总重量折算成平均厚度重量进行计算。

3.2.7 使用阶段薄壳结构的设计应符合下列规定:

3.2.7.1 非抗震设计时,结构构件荷载效应组合的设计值应按下列公式计算:

$$S = \gamma_G C_G G_k + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k} + \psi_w \gamma_w C_w w_k \quad (3.2.7-1)$$

式中 S ——结构构件荷载效应组合的设计值;

γ_G 、 γ_{Q1} 、 γ_w ——恒荷载、活荷载和风荷载的分项系数;

G_k 、 Q_{1k} 、 w_k ——恒荷载、活荷载和风荷载的标准值;

C_G 、 C_{Q1} 、 C_w ——恒荷载、活荷载和风荷载的荷载效应系数;

ψ_w ——风荷载的组合值系数。

3.2.7.2 非抗震设计时,荷载分项系数应按下列规定采用:

(1) 承载力计算时:

恒荷载分项系数 (γ_G):

当恒荷载效应对结构不利时,分为两种情况:当壳板折算厚度不大于50mm时取1.25;当壳板折算厚度大于50mm时取1.20。

当恒荷载效应对结构有利时,取1.0。

活荷载分项系数 (γ_{Q1}):当活荷载标准值不小于4kN/m²时取1.3;其他情况取1.4。

风荷载分项系数 (γ_w) 取1.4。

(2) 变形计算时,各分项系数均取1.0。

3.2.7.3 抗震设计时,应考虑荷载效应与地震作用效应的基本组合。结构构件作用效应组合的设计值应按下列公式计算:

$$S = \gamma_G C_G G_E + \gamma_{EN} F_{EN} + \gamma_{EK} C_{EK} F_{EK} + \psi_w \gamma_w C_{wE} w_k \quad (3.2.7-2)$$

式中 G_E 、 F_{EN} 、 F_{EK} 、 w_k ——重力代表值、水平地震作用标准值、竖向地震作用标准值、风荷载标准值；

C_G 、 C_{EN} 、 C_{EK} ——重力、水平地震作用、竖向地震作用及风荷载的作用效应系数；

γ_G 、 γ_{EN} 、 γ_{EK} 、 γ_w ——相应的作用分项系数；

ψ_w ——风荷载组合值系数。

3.2.7.4 抗震设计时，对承载力计算荷载与地震作用分项系数应按下列规定采用：

(1) 恒荷载分项系数 (γ_G)：

当恒荷载效应对结构不利时，分为两种情况：当壳体折算厚度不大于 50mm 时取 1.25；当壳体折算厚度大于 50mm 时取 1.20。

当恒荷载效应对结构有利时，取 1.0。

(2) 水平地震作用分项系数 (γ_{EN})：

当水平地震作用效应对结构不利时取 1.3。

(3) 竖向地震作用分项系数 (γ_{EK})：

当竖向地震作用效应对结构不利、且跨度大于 24m 时，取 0.5。

3.2.8 对于扁球壳、双曲扁壳、圆柱面壳（壳面倾角大于 0° 的锯齿形圆柱面壳除外）、双曲抛物面扭壳和膜型扁壳，可不考虑风荷载对壳体板的影响，但必须考虑风荷载对边缘构件的影响。对于旋转壳及壳面倾角大于 0° 的锯齿形圆柱面壳，必须考虑风荷载对壳体板的影响。

3.2.9 垂直于壳体表面上的风荷载标准值应按下列公式计算：

$$w_k = \beta_z \mu_z \mu_{s0} w_0 \quad (3.2.9)$$

式中 w_k ——风荷载标准值，kN/m²；

β_z ——z 高度处的风振系数；

μ_s ——风荷载体型系数；

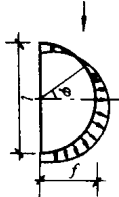
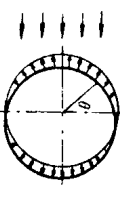
μ_z ——风压高度变化系数；

w_0 ——基本风压，kN/m²。

对于基本风压、风压高度变化系数、风振系数，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GBJ9—87 的规定采用。

与壳体形式有关的风荷载体型系数可按表 3.2.9 采用。

旋转壳和锯齿形圆柱面壳的风荷载体型系数 μ_s ，表 3.2.9

壳体类型	顶盖图形	体型系数 μ_s 值
球面壳		$\frac{f}{r} > \frac{1}{4} \text{ 时, } \mu_s = 0.5 \sin^2 \theta \sin \theta - \cos^2 \theta$ $\frac{f}{r} \leq \frac{1}{4} \text{ 时, } \mu_s = -\cos^2 \theta$ θ——壳面法线与旋转轴间的夹角； θ——壳面法线在水平面上的投影与水平轴间的夹角
椭圆面壳及旋转抛物面壳		$\mu_s \text{ 应由试验确定, 无试验数据时, 可近似地按球面壳采用}$
锯齿形圆柱面壳		当 $0 \leq \alpha \leq 15^\circ$ 时, $\mu_s = -0.8$ 当 $\alpha = 30^\circ$ 时, $\mu_s = 0$ 当 $\alpha \geq 60^\circ$ 时, $\mu_s = 0.8$ 当 α 介于上列数值之间时, μ_s 可采用插入法确定

3.2.10 壳体水平投影面上的雪荷载标准值应按下列公式计算：

$$s_k = \mu_{s0} s_0 \quad (3.2.10)$$

式中 s_k ——雪荷载标准值，kN/m²；

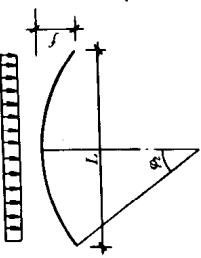
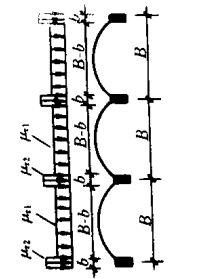
μ_{s0} ——壳面积雪分布系数；

s_0 ——基本雪压，kN/m²，根据不同地区按现行国家标准

《建筑结构荷载规范》GBJ 9—87 采用。

壳面积雪分布系数的取值与壳面形式有关。对旋转壳（包括扁球壳）及圆柱面壳，其值应按表 3.2.10 采用；对双曲扁壳、双曲抛物面扭壳及膜型扁壳，其值应取 1.0。

旋转壳及圆柱面旋转壳的积雪分布系数 μ 表 3.2.10

旋转壳 (包括扁球壳)	圆柱面壳
	
$\mu_r = \frac{L}{8}$ 但不得大于 1 和小于 0.4. 当 φ 大于 30° 时, 应按第 4.3.1 条计算	$\mu_{r1} = 1$ $\mu_{r2} = 2$ b ——边梁宽度 B ——壳跨度

3.2.11 薄壳结构的抗震验算应符合下列规定:

3.2.11.1 抗震设防烈度为 7 度的地区, 对于周边支承、跨度不大于 24m 的薄壳结构可不进行水平抗震验算, 对于跨度大于 24m 的薄壳结构宜进行水平抗震验算; 抗震设防烈度为 8 度或 9 度的薄壳结构宜进行水平抗震验算; 抗震设防烈度为 8 度或 9 度的薄壳结构, 对于各种类型的薄壳结构均应进行水平抗震验算。

3.2.11.2 抗震设防烈度为 7 度的地区, 薄壳结构可不进行竖向抗震验算; 抗震设防烈度为 8 度或 9 度的地区, 薄壳结构均应进行竖向抗震验算。

3.2.11.3 对于悬挑长度较大的薄壳结构和跨度大于 24m 的薄壳结构, 当设防烈度为 8 度或 9 度时, 其竖向地震作用值可分别取该结构自重的 10% 或 20% 进行简化计算。

3.2.11.4 对于体型复杂的薄壳结构和跨度大于 24m 的薄壳结构, 可采用振型分解反应谱法或时程分析法进行专门的竖向抗震分析和验算。

3.2.12 薄壳结构设计时应按下列主要部分进行全面验算: 壳板、边缘构件和装配整体式薄壳结构的连接。

3.2.13 边缘构件在其本身平面内应具有足够的刚度。当边缘构件为钢筋混凝土桁架时, 可按荷载集中在上弦杆节点作内力分析,

但对上弦杆尚应考虑节点间荷载与剪力的偏心作用所引起的力矩。
3.2.14 装配整体式薄壳结构的预制构件, 必须进行装配过程中的内力和抗裂度的验算。验算荷载包括自重、施工荷载和起吊荷载等。

对于曲板构件宜按微弯板进行计算。

3.3 薄壳结构的内力和变形分析

3.3.1 薄壳结构的内力与变形分析可采用下列方法: 直接求解偏微分方程组法、半解析法和数值法。

3.3.2 当薄壳结构的底面投影比较规则且受均布荷载或规则分布荷载作用时, 其内力与位移的计算、构造措施和边缘构件的设计应符合本规程第 4、5、6、7 和 8 章的规定。

3.3.3 当薄壳结构的底面投影不规则, 或底面投影虽较规则, 但本规程第 4~8 章未涉及时, 其内力与位移宜采用半解析法或数值法求解, 且其计算和构造措施应符合本规程相关章节的规定。

3.3.4 当薄壳结构体型复杂时, 宜采用有限单元法进行整体分析。

3.4 壳体的构造和配筋

3.4.1 壳板的厚度不仅应符合强度要求, 还应根据壳板的性能、施工要求等因素决定。其中包括壳板的钢筋布置、保护层厚度、施工质量保证、结构稳定性以及壳板和辅助构件的变形控制等, 同时应考虑结构的防火要求。

3.4.2 壳板的厚度可在 50mm 和 80mm 之间选择。在壳板接近边缘和支承构件的部位, 宜增厚至中部厚度的 2~3 倍并增加抗弯钢筋的数量。

壳板应逐渐增厚, 保证光滑性。增厚的范围至少应为增厚厚度的 5~10 倍。

3.4.3 壳体混凝土保护层应符合下列规定:

3.4.3.1 壳板加劲肋的混凝土保护层厚度可与壳板相同。

3.4.3.2 边缘构件和支承构件的混凝土最小保护层厚度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》的有关规定。壳板钢筋伸入边缘构件的部位,其保护层厚度可维持壳板内的厚度。

3.4.3.3 当壳板表面完全暴露在大气中时,应适当增加壳板的保护层厚度,并按照暴露的程度和内外表面所处的条件来确定保护层厚度。

3.4.3.4 对壳板表面较陡、需用双面模板施工的区域,应增加保护层的厚度。

3.4.3.5 最小保护层厚度不应小于混凝土骨料最大颗粒的直径,也不宜小于钢筋的直径。当最小保护层厚度不能满足防火要求时,应在主应力配筋及受弯配筋处增加保护层厚度。

3.4.4 壳板的配筋应符合下列规定:

3.4.4.1 在薄壳结构中,应设置薄膜内力配筋、弯矩配筋及壳体边缘处和孔洞附近的特殊配筋。薄膜内力配筋可设置在壳体中面,由单层相互正交钢筋组成,而弯矩配筋宜设置于靠近壳板表面处。

3.4.4.2 配筋宜采用较小直径的钢筋。除焊接钢筋网外,应全部采用变形钢筋并合理确定钢筋间距。

3.4.4.3 不宜采用抗拉强度标准值大于 340N/mm^2 的钢筋,否则应限制该类钢筋的设计值。

3.4.4.4 薄膜内力配筋可以不按主应力方向设置,当主拉应力较大时,可在该区主拉应力方向上增添一层薄膜内力配筋。

3.4.4.5 薄膜内力配筋最小应为单层相互正交钢筋。其最小直径,若采用变形钢筋应取 6mm ;若采用焊接钢筋网,现浇混凝土情况应采用 5mm ,预制情况可采用 4mm 。薄膜内力配筋,在一个方向上的最小配筋率应为 0.2% ,在两个方向上的总和应不小于 0.6% 。

3.4.4.6 薄膜内力的最大配筋率可按下列公式计算:

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = 0.6 \frac{f_{ts}}{f_y} \quad f_{ts} < 28\text{N/mm}^2 \quad (3.4.4-1)$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{16.8}{f_y} \quad f_{ts} \geq 28\text{N/mm}^2 \quad (3.4.4-2)$$

式中 A_s ——壳板钢筋截面面积;

A_c ——壳板给定的横截面面积;

f_{ts} ——混凝土轴心抗压强度标准值, N/mm^2 ;

f_y ——钢筋的抗拉强度标准值, N/mm^2 。

上述公式适用于钢筋的布置与壳体的主应力线相一致的情况。如果钢筋布置的方向与主应力线之间的夹角大于 10° ,最大配筋率应按与 3.4.4.7 款相同的折减系数 γ_1 折减。

3.4.4.7 薄膜内力配筋与主应力线的偏斜角 φ 不宜大于 10° 。如果偏斜角大于 10° ,应降低钢筋强度设计值,折减系数 γ_1 可根据偏斜角度和两主应力之比 α 来确定。两主应力之比中,主应力绝对值较大的为分母。

实际工程中较重要的情况为 $\alpha = -1$,此时折减系数 γ_1 应按下列公式采用:

$$\gamma_1 = 1.0, \varphi \leq 10^\circ \quad (3.4.4-3)$$

$$\gamma_1 = 1.3 - 0.03\varphi, 10^\circ < \varphi < 30^\circ \quad (3.4.4-4)$$

$$\gamma_1 = 0.4, \varphi \geq 30^\circ \quad (3.4.4-5)$$

当 $\alpha \neq -1$ 时,折减系数 γ_1 应在 $0.4 \sim 1.0$ 的范围内酌情取值。

3.4.4.8 采用变形钢筋时,钢筋的间距不宜大于 5 倍壳板厚度,也不宜大于 300mm ;采用焊接钢筋网片时,钢筋间距不宜大于 4 倍壳板厚度,也不宜大于 200mm 。

3.4.4.9 钢筋的最小搭接长度与钢筋受力类型、接头类型密切相关,应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GBJ 10—89 的规定。

受拉钢筋直径大于 22mm 时不应采用搭接,而应采用焊接。

3.4.5 除膜型壳外,在整体式壳体的壳板和边缘构件的连接处,应满足下列构造要求:

3.4.5.1 靠近边缘构件的壳板应根据该区域的内力大小逐渐增厚,增厚范围不应小于壳体直径或壳板短边边长的 $1/12$,增加的

厚度不小于壳体中间部分的厚度。四块组合型双曲抛物面扭壳的加厚,应符合本规程第 7.4.2 条的规定。

3.4.5.2 在壳板增厚区域内必须至少配置直径为 $4 \sim 10\text{mm}$ 、间距不大于 200mm 的双层钢筋,且上下二层钢筋均必须锚入边缘构件内。其中上层钢筋的锚固长度不得小于 30 倍钢筋直径,下层钢筋的锚固长度不得小于 15 倍钢筋直径。此外,锚固长度还应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GBJ 10—89 的规定。

3.4.6 装配整体式壳体在壳板和边缘构件连接处应符合下列构造要求:

3.4.6.1 当壳板上具有与边缘构件正交的加劲肋时,除计算要求加厚者外,壳板可不加厚。如无加劲肋,则仍应按整体式壳体的规定加厚。

3.4.6.2 在预制构件的连接边可设置齿形槽口,槽口的长度不得大于 1.2m (图 3.4.6)。

3.4.6.3 当壳板上具有与边缘构件正交且间距不大于 3m 的加劲肋时,壳体构造应符合下列规定:

(1) 壳板中可配置直径不小于 6mm 的单层钢筋;在肋的上部与下部应配置直径不小于 10mm 的钢筋。同时应将肋的上层钢筋及壳板钢筋伸出,并与边缘构件中伸出的钢筋焊牢。焊接长度在单面焊时不应小于 10 倍钢筋直径,在双面焊时不应小于 5 倍钢筋直径。在拼缝中应浇筑细石混凝土。

(2) 除采用壳板、肋和边缘构件的钢筋相互伸出并焊接连接外,也可采用预埋件连接。可将肋中钢筋焊接在肋的预埋件上,再用钢板将其与边缘构件的预埋件焊牢。焊接接头强度不得小于肋中钢筋的强度。此时,预制板的加劲肋及预埋件的间距均不应大于 1.5m 。

(3) 当壳体跨度不小于 24m 时,肋的预埋件必须设置在上表面 (图 3.4.6a, 截面 I—I); 当壳体跨度小于 24m 时,也可将肋的预埋件设置在下表面 (图 3.4.6b, 截面 I—I)。

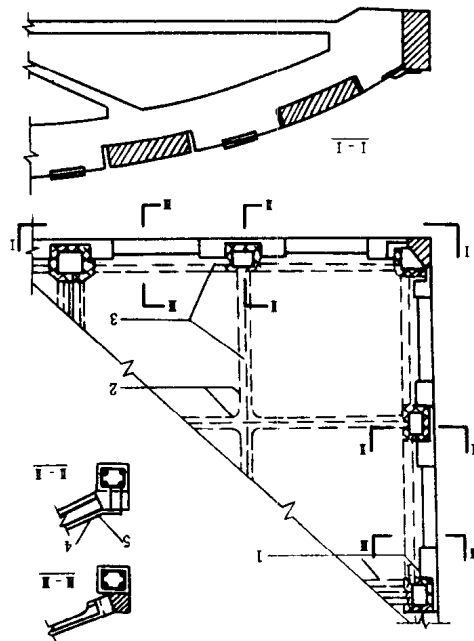
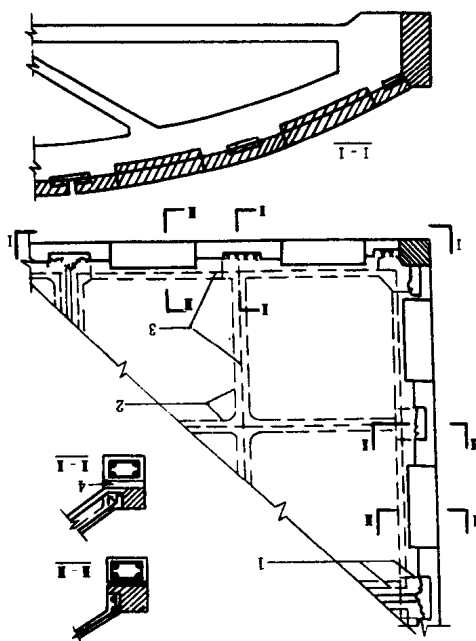


图 3.4.6 装配整体式壳体在壳板和边缘构件连接处应符合下列构造要求: 1—钢筋; 2—边缘构件; 3—壳体; 4—钢筋; 5—壳体

3.5 装配式壳体

- 3.5.1 装配整体式壳体可全部采用预制构件,也可部分预制、部分现浇。
- 3.5.2 装配整体式壳体的壳体预制构件划分,应符合下列规定:
- 3.5.2.1 应减少拼缝与构件类型。
- 3.5.2.2 应便于预制板的施工、堆放、运输及安装。
- 3.5.2.3 应减少模板和支撑,节约钢材与木材。
- 3.5.2.4 应使拼缝处于受压区或剪力与拉力较小的区域。
- 3.5.3 预制壳体宜采用曲板。对圆柱面壳及曲率不大的扁壳,也可采用平板,此时板沿曲线边的边长不得大于3m。
- 3.5.4 壳体分块数目应符合下列规定:
- 3.5.4.1 扁球壳沿环向分块不应少于8块、沿经向不应少于4块。
- 3.5.4.2 双曲扁壳及双曲抛物面扭壳每边分块均不应少于9块。
- 3.5.4.3 圆柱面壳沿环向不应少于7块、沿纵向可不受限制。
- 3.5.5 预制板的周边应设置加劲肋,肋高应由壳体稳定及预制构件在运输、安装过程中的刚度要求确定,宜为块体边长的 $1/20 \sim 1/15$ 。对于大型构件,在运输和安装时应设置临时支撑。
- 3.5.6 预制壳板的接缝,可根据接缝处的受力情况采用混凝土接缝、钢筋混凝土接缝和预应力混凝土接缝。
- 3.5.7 混凝土接缝应符合下列规定:
- 3.5.7.1 在接缝中应浇筑细石混凝土,混凝土的强度等级不得低于预制构件的混凝土强度等级。
- 3.5.7.2 当预制壳板加劲肋的高度不大于100mm时,接缝上口宽度不应小于30mm;当肋高大于100mm时,上口宽度不应小于50mm。
- 3.5.7.3 当剪应力值大于 $1/4$ 混凝土抗拉强度设计值,且超过压应力的 $1/3$ 时,预制构件的侧边加劲肋必须做槽形齿口。预制构件的板内钢筋应伸出一部分,并和相邻板的伸出钢筋相连接,其

绑扎长度为 $20 \sim 30$ 倍钢筋直径,且在伸出钢筋的垂直方向另加二根分布钢筋(图3.5.7)。

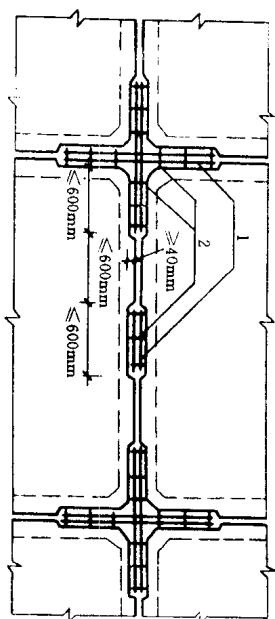


图 3.5.7 有槽口的混凝土接缝
1—附加钢筋; 2—板内伸出钢筋

- 3.5.8 钢筋混凝土接缝应符合下列规定:
- 3.5.8.1 应将预制构件的板内钢筋伸出,并在接缝中绑扎或焊接。绑扎长度为 30 倍钢筋直径,焊接长度当采用单面焊时为 10 倍钢筋直径,采用双面焊时为 5 倍钢筋直径。
- 3.5.8.2 肋内钢筋可不伸出,但必须另外放置一个双层的十字形骨架,骨架的钢筋直径应与预制构件肋内钢筋的直径相同,其长度应符合图3.5.8的规定。
- 3.5.8.3 十字形骨架应与预制构件的板内伸出钢筋绑扎在一起,然后用细石混凝土填充,其强度等级不得低于预制构件的混凝土强度等级。
- 3.5.8.4 当剪应力与拉应力的矢量和大于混凝土抗拉强度

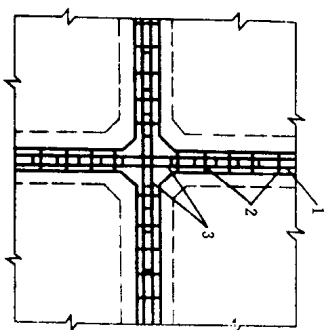


图 3.5.8-1 无槽口的钢筋
混凝土接缝
1—附加钢筋; 2—板内伸出钢筋;
3—双层十字形骨架

土的方法。

3.6 预应力薄壳结构

- 3.6.1 在边拱拉杆、横隔、旋转壳的支座环、圆柱面壳的边梁以及壳板的受拉区域和剪力较大区域均可采用预应力配筋（图 3.6.1）；在受压区域也可采用预应力配筋来连接预制构件。
- 当边缘构件支承点间的距离不大于 24m 时，宜采用预应力配筋。

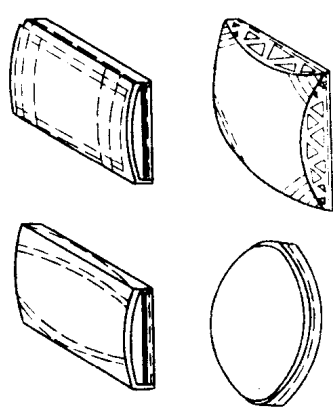


图 3.6.1 壳体预加应力

- 3.6.2 装配整体式薄壳结构的预制构件包括边缘构件、壳板等的预加应力值，应根据装配整体后结构的工作情况及安装应力确定。预应力预制构件均必须验算安装前由于施加预应力产生的影响。
- 3.6.3 装配整体式薄壳结构的块体划分要便于安置预应力筋及灌浆。
- 3.6.4 薄壳结构可根据结构的装配方案采用先张法或后张法。在施加预应力的端部区域，构件的尺寸和构造应根据对预应力构件的设计规定确定。
- 3.6.5 薄壳结构的预应力筋应采用直线型或曲率不大的曲线型钢筋。在未经特殊处理时，应避免把预应力钢筋或钢丝束布置在

度设计值时，侧边加肋上必须做槽形齿口（图 3.5.8-2）。

3.5.8.5 如不采用钢筋绑扎或焊接连接，则可在预制构件的壳板上埋入间距不大于 1.5m 的铁件，其内表面应与加肋筋中的主钢筋焊接。在各预制构件就位后，应系用连接板将其焊牢，焊缝强度及铁件强度均不应小于切断钢筋的强度。

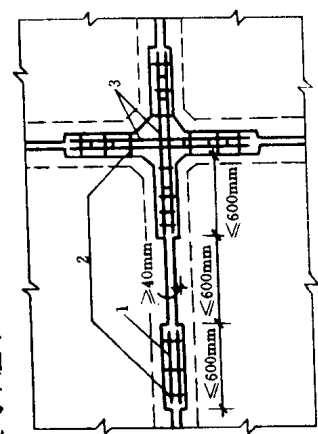


图 3.5.8-2 有槽口的钢筋
混凝土接缝
1—附加钢筋；2—板内伸出钢筋；
3—双层十字形骨架

- 3.5.9 预应力混凝土接缝应符合下列规定：
- 3.5.9.1 预应力筋可穿入间距不大于 1.5m 的预留孔或槽内。
- 3.5.9.2 填缝细石混凝土的强度等级不应低于预制构件的强度等级；填充预应力孔道的水泥砂浆强度等级不应低于 M20。
- 3.5.9.3 预制壳板与预制边缘构件的连接可按本规程第 3.4.6 条的规定采用。
- 3.5.10 各接缝的适用范围应符合下列规定：
- 3.5.10.1 混凝土接缝适用于受压或受压又受剪的接缝。
- 3.5.10.2 钢筋混凝土接缝适用于受拉或受剪又受拉的接缝。
- 3.5.10.3 预应力混凝土接缝适用于在正常使用情况下不宜出现裂缝的壳体，或接缝中主拉应力大于混凝土抗拉强度设计值时。
- 3.5.11 预制构件与现浇部分的连接，可采用从预制构件内伸出必要数量的钢筋，与现浇部分的钢筋绑扎或焊接，然后浇筑混凝土。

壳体结构的弯折处。

3.6.6 预加力可作为外荷载,其分项系数应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》的有关规定采用。

对于直线配筋,可将其作为作用在锚固处的外力。对于曲线配筋,除将其作为作用在锚固处的外力外,还应考虑预应力钢筋的拉力对壳体产生的等效荷载。

3.6.7 设计和计算预应力薄壳结构时,应作下列验算:

1. 预加应力过程中结构的强度;
2. 荷载标准值作用下结构的抗裂度;
3. 荷载设计值作用下结构的强度。

3.6.8 预应力薄壳结构的基本构造应符合下列规定:

3.6.8.1 当受拉区部分钢筋施加预应力已能使构件符合抗裂度或裂缝宽度要求时,承载力计算所需的其余抗拉钢筋可采用非预应力钢筋。当如非预应力钢筋采用与预应力钢筋同级的冷拉Ⅰ级或冷拉Ⅱ级钢筋时,其截面面积不宜大于受拉钢筋总截面面积的20%;当非预应力钢筋采用Ⅱ级及Ⅲ级以下的热轧钢筋时,其截面面积可不受限制。

3.6.8.2 对后张预应力混凝土薄壳结构的端部锚固区,应进行局部受压承载力计算,并配置间接钢筋,且其体积配筋率不应小于0.5%。

3.6.8.3 在靠近支座区段宜将一部分预应力钢筋弯起,并尽可能沿构件端部均匀布置。如预应力钢筋在构件端部不能均匀布置,而需集中在端部截面的下部,或上部和下部时,应在构件端部截面高度的0.2倍范围内设置竖向的附加焊接钢筋网、封闭式箍筋或其它形式的构造钢筋。其中,竖向附加钢筋的截面面积宜由下列公式计算:

$$A_{sv} \geq 0.2 \frac{N_p}{f_{yv}} \quad (3.6.8)$$

式中 N_p ——作用在构件端部截面重心上部或下部预应力钢筋的合力,计算时宜考虑混凝土预压前的预应力损

失值:

f_{yv} ——竖向附加钢筋的抗拉强度设计值,当 f_{yv} 大于 210N/mm^2 时,取 f_{yv} 为 210N/mm^2 。

3.6.8.4 当构件端部有局部凹进时,应增设折线构造钢筋。

3.6.8.5 当构件端部与下部支承结构焊接时,在构件端部可能产生裂缝的部位应设置足够的非预应力纵向构造钢筋。

3.6.8.6 孔道灌浆应密实,水泥浆强度等级不应低于 M20,其水灰比宜为 0.40~0.45,并宜掺入 0.01% 水泥用量的铝粉。

3.6.8.7 对于无粘结预应力混凝土构件,应采用现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ/T 92 的规定。

3.7 孔 洞

3.7.1 当孔洞直径或矩形孔的长边不大于壳体短边的 1/5,且符合下列规定时,可不考虑开口影响,但必须在孔洞附近采取适当的构造措施。

3.7.1.1 当孔洞位于受压区、直径或边长不大于 2m 时,必须在孔洞周边设置加劲肋,且在任意法向剖面上其混凝土与钢筋的截面面积均不得少于被割去壳体混凝土与钢筋的截面面积。同时,孔洞附近的壳体必须设置双层钢筋网,上层钢筋网的钢筋直径不小于 $\phi 6$ 、间距不大于 150mm (图 3.7.1)。

3.7.1.2 当孔洞位于受压区、孔洞直径或边长为 2~3m 时,除在孔洞周边设置加劲肋外,尚应在孔洞中加十字形梁。在任意法向剖面上加劲肋和十字形或井字形梁混凝土与钢筋的截面面积不得少于被割去壳体混凝土与钢筋的截面面积。孔洞附近的壳体必须配置与 3.7.1.1 款同样要求的双层钢筋网。

3.7.1.3 当孔洞位于受拉区、直径或边长不大于 1m 时,仍可按 3.7.1.2 款规定的构造要求采用。

3.7.1.4 当壳面设置较多孔洞时,孔洞的分布应匀称,且宜采用圆孔。当必需采用矩形孔时,其长边与短边之比不宜超过 2。相邻孔洞之间的净距不应少于较大孔洞直径或矩形长边的 3 倍。