

CECS xxx : 201x

中国工程建设标准化协会标准

波形钢板组合结构技术规程

Technical Specification for Structures with Corrugated Steel Plate
Components

(征求意见稿)

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2017 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划》的要求，制定本规程。

本规程的主要内容包括：总则，术语和符号，基本规定，材料，结构分析，构件设计，连接与节点设计，防火设计，制作与安装，验收。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由清华大学土木工程系（北京海淀区清华大学土木工程系，邮编 100084）负责解释。在使用中如发现需要修改和补充之处，请将意见和资料径寄解释单位。

本 规 程 主 编 单 位：清华大学

浙江中南建设集团钢结构有限公司

本 规 程 参 编 单 位：北京清华同衡规划设计研究院有限公司

中国建筑设计院有限公司

浙江省建筑设计研究院

中南建筑设计院股份有限公司

北京市建筑设计研究院有限公司

华诚博远工程技术集团有限公司

悉地国际建筑设计顾问有限公司

中国中元国际工程有限公司

深圳市建筑设计研究总院有限公司

上海中巍结构设计事务所有限公司

浙江大学建筑设计研究院有限公司
清华大学建筑设计研究院
北京城建集团有限责任公司
浙江大学
北京智慧建科科技有限公司
青岛理工大学
北京汇筑建筑科技有限公司
华电重工股份有限公司
邯郸市建筑设计研究院
河北住建绿色建筑科技有限公司

本规程主要起草人员：郭彦林 王宇伟

（以下按英文字母顺序排名）

蔡文章	崔清树	范 重	费建伟
高博青	郭满良	郭宇飞	侯建群
李 霆	李志安	刘 涛	刘学武
罗尧治	孙晓彦	童精中	王昌兴
王国辉	王海山	王俊杰	王立军
王梦争	王再胜	夏伟平	肖志斌
杨 啸	杨蔚彪	杨晓明	杨学林
张 可	张晋勋	张同亿	张跃峰
张震中	朱博莉	朱靖申	朱勇军

本规程主要审查人员：

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	13
3.1	一般规定	13
3.2	结构体系和选型要求.....	13
3.3	建筑形体及布置规则性要求.....	15
3.4	抗震设计、水平位移和舒适度要求.....	16
3.5	构件承载力设计.....	19
3.6	波形钢板混凝土组合墙.....	20
3.7	波形钢板墙	27
4	材 料	32
4.1	一般规定	32
4.2	钢材	32
4.3	连接材料	33
4.4	混凝土	33
5	结构分析	34
5.1	一般规定	34
5.2	弹性分析	36
5.3	弹塑性分析	42

6	构件设计	44
6.1	一般规定	44
6.2	波形钢板混凝土组合墙设计.....	44
6.3	波形钢板墙设计.....	75
6.4	框架梁与柱设计.....	88
6.5	楼盖设计	89
7	连接与节点设计	90
7.1	一般规定	90
7.2	波形钢板混凝土组合墙连接节点设计.....	90
7.3	波形钢板墙连接节点设计.....	101
7.4	其他连接节点	103
8	防火设计	104
8.1	一般规定	104
8.2	波形钢板组合结构防火设计.....	104
9	制作与安装	108
9.1	一般规定	108
9.2	构件制作误差控制.....	108
9.3	构件安装误差控制.....	110
9.4	构件安装稳定性控制.....	111
9.5	结构除锈与防腐涂装.....	111
10	验收	115
10.1	一般规定	115
10.2	波形钢板验收	115

10.3	波形钢板混凝土组合墙验收.....	116
10.4	波形钢板墙验收.....	116
10.5	工程质量验收	117
附录 A	波形钢板混凝土组合墙弹塑性分析模型.....	119
A.1	钢材本构模型.....	119
A.2	混凝土本构模型.....	120
附录 B	波形钢板墙弹塑性分析模型.....	129
	本规程用词说明	131
	引用标准名录	132

《波形钢板组合结构技术规程》
(征求意见稿)

Contents

1	General principles	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Fundamental provisions	13
3.1	General provisions	13
3.2	Structural systems and selection principles	13
3.3	Building shapes and layout principles	15
3.4	Seismic and comfort design provisions	16
3.5	Strength design of structural members	19
3.6	Fundamental provisions for CPCCWs	20
3.7	Fundamental provisions for SCPWs	27
4	Materials	32
4.1	General provisions	32
4.2	Steel	32
4.3	Connecting material	33
4.4	Concrete	33
5	Structure analysis	34
5.1	General provisions	34
5.2	Elastic analysis	36
5.3	Elastoplastic analysis	42
6	Design of components	44

6.1	General provisions	44
6.2	Design of CPCCWs	44
6.3	Design of SCPWs	75
6.4	Design of frame beams and cloumns	88
6.5	Design of floor systems	89
7	Design of connections and joints	90
7.1	General provisions	90
7.2	Connections and joints of CPCCWs	90
7.3	Connections and joints of SCPWs	101
7.4	Other connections and joints	103
8	Fire resistive design	104
8.1	General provisions	104
8.2	Fire resistive design of shear wall structures with CPCCWs	104
9	Fabrication and erection	108
9.1	General provisions	108
9.2	Error control of component fabrication	108
9.3	Erroe control of component erection	110
9.4	Check of temporary stability for erection	111
9.5	Rust removal, coating and corrosion proof	111
10	Acceptance	115
10.1	General provisions	115
10.2	Acceptance of SCPs	115

10.3	Acceptance of CPCCWs	116
10.4	Acceptance of SCPWs	116
10.5	Acceptance of construction quality	117
Appendix A	CPCCW models for elastoplastic analysis.....	119
A.1	Constitutive model of steel.....	119
A.2	Constitutive model of concrete	120
Appendix B	SCPW models for elastoplastic analysis.....	129
	Word description for the specification	131
	List of quoted standards	132

1 总 则

1.0.1 为使波形钢板组合结构在多、高层民用建筑工程中的应用做到技术先进、安全适用、经济合理、施工方便和确保质量的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于波形钢板组合结构的设计、制作、安装及验收。

1.0.3 波形钢板组合结构的设计、制作、安装及验收，除应符合本规程外，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 波形钢板混凝土组合墙 Corrugated plate-concrete composite wall (CPCCW)

由波形钢板、内填混凝土、对拉螺栓和边缘构件组成的承力构件，可承受竖向和水平荷载作用；包括正交螺栓布置和错列螺栓布置两种形式。

2.1.2 波形钢板墙 Steel corrugated plate wall (SCPW)

由波形钢板为主要部件形成的承力构件，主要承受水平荷载作用，也可包含型钢加劲肋和对拉螺栓作为其组成部件；包括单波形钢板、带竖向加劲的单波形钢板、平行对扣双波形钢板和正交对扣双波形钢板四种形式。

2.1.3 波形钢板组合结构 Structure with corrugated steel plate components

以包含波形钢板的结构构件（包括波形钢板混凝土组合墙和波形钢板墙）作为承力构件所形成的结构体系。

2.1.4 波形钢板混凝土组合墙结构 Shear wall structure with CPCCWs

由波形钢板混凝土组合墙、连梁及楼盖组成的结构，属于波形钢板组合结构中的一类结构体系。

2.1.5 框架-波形钢板混凝土组合墙结构 Frame-CPCCW structure

由框架与波形钢板混凝土组合墙并行组成的结构，属于波形钢板组合结构中的一类结构体系。

2.1.6 框架-波形钢板混凝土组合核心筒结构 Frame-CPCCW core wall structure

由外围框架与波形钢板混凝土组合墙围成的核心筒组成的框架-核心筒结构，属于波形钢板组合结构中的一类结构体系。

2.1.7 框架-波形钢板墙结构 Frame-SCPW structure

由框架及内嵌于框架内的波形钢板墙并行组成的结构，属于波形钢板组合结构中的一类结构体系。

2.1.8 波形钢板 Steel corrugated plate (SCP)

平钢板通过辊轧形成的表面起伏波形曲线的板件。

2.1.9 对拉螺栓 Connecting bolt

用于连结两块波形钢板的螺栓。

2.1.10 正交螺栓布置的波形钢板混凝土组合墙 Standard-bolted CPCCW

采用正交螺栓布置形式的波形钢板混凝土组合墙。

2.1.11 错列螺栓布置的波形钢板混凝土组合墙 Diamond-bolted CPCCW

采用错列螺栓布置形式的波形钢板混凝土组合墙。

2.1.12 单波形钢板墙 Single SCPW

由单一梯形波折的钢板组成的波形钢板墙。

2.1.13 竖向加劲波形钢板墙 Vertical-stiffened SCPW

单波形钢板墙的波形棱线水平放置且设置竖向加劲肋并用螺栓连接形成的波形钢板墙。

2.1.14 平行对扣双波形钢板墙 Parallel-installed double SCPW

由两块波形钢板平行对扣并用对拉螺栓连接形成的波形钢板墙。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应设计值

V ——剪力

M ——弯矩

N ——轴力

2.2.2 几何参数

I_{sw} ——波形部分的钢板的截面惯性矩

I_{si} ——波形部分单片钢板的截面惯性矩

I_{cw} ——波形部分混凝土的截面惯性矩

I_{cc} ——单根边缘构件的混凝土的截面惯性矩

I_{sc} ——单根边缘构件的钢板的截面惯性矩

I_{bc} ——组合墙简支边单块侧板对面内的截面惯性矩

I_a ——单个加劲肋的截面惯性矩

h ——组合墙高度

h_b ——钢梁高度

h_e ——角焊缝计算厚度

h_{e1} ——贴板之间对接焊缝的计算厚度

h_{e2} ——贴板与边缘构件钢管之间角焊缝的计算厚度

h_s ——外环板伸出宽度

ρ ——一字形组合墙截面含钢率

A_c ——两根边缘构件中混凝土和波形部分混凝土总面积

A_s ——两根边缘构件中钢材和波形部分钢材总面积

A_{cw}	——波形部分混凝土面积；腹板墙肢部分混凝土面积
A_{tc}	——单侧边缘构件混凝土面积
A_{tf}	——翼缘墙肢部分混凝土面积
A_{sw}	——波形部分钢材毛截面面积；腹板墙肢部分钢材面积
A_{sf}	——翼缘墙肢部分钢材面积
A_{sc}	——单侧边缘构件钢材毛截面面积
$A_{sw,n}$	——波形部分钢材净截面面积
$A_{sc,n}$	——单侧边缘构件钢材净截面面积
$A_{sc,w}$	——单根边缘构件柱平行于墙受力平面的边缘构件中钢板面积
$A_{cw,c}$	——波形部分受压区混凝土面积
A_{dc}	——单块侧板钢材面积
A_l	——平均每个对拉螺栓所约束波形钢板面积
A_b	——对拉螺栓截面积
A_{a1}	——边缘构件型钢锚件截面面积
A_{a2}	——波形组合墙板锚件或锚栓截面面积
A_a	——单个加劲肋的截面面积
a	——波形钢板的波幅
b	——波形钢板墙的宽度
b_w	——组合墙波形部分宽度
b_c	——单根边缘构件宽度
b_0	——波形钢板重复波形的波长

b_s	——加劲肋中性轴到波形钢板板面的距离
$D_{a,x}$	——组合墙上表面面外（绕弱轴 x 轴）抗弯刚度
$D_{a,z}$	——组合墙侧面面外（沿高度方向绕 z 轴）抗弯刚度
D_x, D_y	——波形钢板在强轴和弱轴方向上的弯曲刚度常数
D_{x1}, D_{y1}	——单块非对称波形钢板在强轴和弱轴方向上的弯曲刚度常数
H	——波形钢板的扭转刚度常数
H_1	——单块非对称波形钢板的扭转刚度常数
t_c	——边缘构件钢板厚度
t_{we}	——等效钢板厚度
t_w	——单片波形钢板厚度
t_h	——横隔板的厚度
t_{bf}	——钢梁翼缘厚度
t_d	——隔板厚度
t_p	——贴板厚度
t_s	——外环板厚度
l_1, l_2	——隔板上气孔到边缘的距离
l_{w1}	——贴板之间对接焊缝的长度
$\sum l_{w2}$	——贴板与边缘构件钢管之间角焊缝的总长度
l_p	——贴板高度
s	——单个波展开后长度
s_d	——上下节组合墙波形钢板边距
q_1	——波形钢板波峰长度

- q_2 ——波形钢板倾斜段的水平宽度
 q_3 ——波形钢板波谷段宽度
 q_0 ——波形钢板倾斜段的宽度
 γ ——波形钢板倾斜段的倾角
 d_1 ——竖向螺栓间距
 d_2 ——横向螺栓间距
 d_f ——翼缘墙肢部分厚度
 d_{we} ——等效混凝土厚度
 d_w ——腹板墙肢部分厚度
 d_c ——单根边缘构件厚度
 $d_{cw,c}$ ——波形部分受压区混凝土形心到组合墙形心距离
 $W_{sw,p}$ ——波形钢板塑形截面抵抗矩
 l_w ——钢管混凝土柱腹板贴板角焊缝计算长度
 n ——相邻两列螺栓之间的波形钢板的波数

2.2.3 设计计算参数

- γ_0 ——结构重要性系数
 S_d ——作用组合的效应设计值
 R_d ——构件承载力设计值
 γ_{RE} ——构件承载力抗震调整系数
 α ——波形钢板混凝土组合墙中混凝土的工作承担系数
 G_i ——第 i 楼层重力荷载设计值
 EJ_d ——结构一个主轴方向的弹性等效侧向刚度

V_0	——对应于地震作用标准值的结构底层总剪力
V_f	——对应于地震作用标准值且未经调整的各层（或某一段内各层）框架承担的地震总剪力
$V_{f,\max}$	——对应于地震作用标准值且未经调整的各层框架承担的地震总剪力中的最大值；
V_w	——底部加强部位剪力墙截面考虑地震作用组合的剪力计算值
M_{wua}	——剪力墙抗震受弯承载力
M_w	——底部加强部位剪力墙底截面弯矩的组合计算值
$N_{cr,l}$	——一字形组合墙受压整体弹性屈曲荷载
$N_{cr,ps}$	——四边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲荷载
$N_{cr,pf}$	——三边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲荷载
$N_{sw,cr}$	——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲荷载
$N_{T,cr}$	——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙绕非对称轴弯曲屈曲受压弹性屈曲荷载
N_w	——组合墙波形部分轴力
N_c	——组合墙边缘构件轴力
M_w	——组合墙波形部分弯矩
M_c	——边缘构件弯矩
M_p	——单位宽度边缘构件钢板的塑性弯矩
M_b	——节点梁端正弯矩
V_u	——组合墙受剪承载力

V_{cr}	——波形钢板墙受剪弹性屈曲荷载
V_b	——对拉螺栓截面剪力
E_{sw}	——波形部分钢材的弹性模量；
E_{cw}	——波形部分混凝土的弹性模量；
E_{sc}	——边缘构件钢材的弹性模量；
E_{cc}	——边缘构件混凝土的弹性模量；
E_b	——对拉螺栓弹性模量
f	——钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值
f_{sw}	——波形部分钢材抗拉抗压和抗弯强度设计值
f_{sc}	——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值
f_{yw}	——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值
f_{yc}	——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值
f_{vy}	——钢材的受剪屈服强度
f_{cw}	——波形部分混凝土抗压强度设计值
f_{cc}	——边缘构件混凝土抗压强度设计值
f_{ckw}	——波形部分混凝土抗压强度标准值
f_{ckc}	——边缘构件混凝土抗压强度标准值
f_{a1}	——边缘构件型钢锚件抗拉强度设计值
f_{a2}	——波形组合墙板锚件或锚栓抗拉强度设计值
f_{au1}	——边缘构件型钢锚件极限抗拉强度最小值
f_{au2}	——波形组合墙板锚件或锚栓极限抗拉强度最小值
f_d	——隔板抗拉强度设计值
f_t^w	——角焊缝抗拉、抗压和抗剪强度设计值

- f_t^w ——对接焊缝抗拉强度设计值
 f_{sp} ——贴板抗拉强度设计值
 f_s ——外环板抗拉强度设计值
 f_y ——钢材屈服强度
 ν_s ——钢材泊松比
 μ_c ——混凝土泊松比
 σ_s ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性
 屈曲应力
 τ_y ——钢材屈服剪应力
 φ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压稳定
 系数
 ϕ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压稳定
 系数计算参数
 φ_1 ——一字形组合墙受压整体稳定系数
 ϕ_1 ——一字形组合墙受压整体稳定系数计算参数
 φ_{ps} ——四边简支组合墙受压整体稳定系数
 ϕ_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢稳定系数计算参数
 φ_{pf} ——三边简支组合墙受压整体稳定系数
 ϕ_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢稳定系数计算参数
 φ_T ——T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压整体稳
 定系数
 ϕ_T ——T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压墙肢稳
 定系数计算参数
 φ_s ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板受压部分的稳

定系数；波形钢板墙的受剪稳定系数

- Φ_m ——受剪稳定系数中间变量
- Φ_s ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压稳定系数计算参数
- λ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲长细比
- λ_1 ——一字形组合墙受压整体长细比
- λ_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢长细比
- λ_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢长细比
- λ_T ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压墙肢长细比
- $\lambda_{n,s}$ ——波形钢板墙的正则化宽高比
- κ_s ——波形钢板展开系数
- k_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲系数
- k_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲系数
- k_b ——波形钢板墙受剪弹性屈曲系数
- $k_{b,0}$ ——双波形钢板墙在螺栓密布情况下的受剪弹性屈曲系数
- $k_{b,1}$ ——非对称单波形钢板墙的受剪弹性屈曲系数
- k_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲系数
- ρ_{sw} ——剪力对波形钢板轴向力的削弱系数
- ρ_{sc} ——剪力对边缘构件中平行于组合墙受力平面的钢板的削弱系数

- η_{vw} ——剪力增大系数
 η_b ——波形钢板混凝土组合墙对拉螺栓的截面拉应力局部屈曲发展系数
 η ——螺栓间距系数；边缘构件承载力放大系数
 χ ——中和轴相对位置
 ε_c ——波形钢板发生局部屈曲的临界混凝土压应变
 α_c ——波形部分混凝土受压区等效矩形应力折减计算系数
 α_p ——波形部分钢材塑性过渡区折减计算系数
 θ ——波形钢板墙的刚度常数比
 β ——波形钢板墙的等效宽高比
 θ_1 ——非对称单波形钢板墙的刚度常数比
 β_1 ——竖向螺栓间距相对值；非对称单波形钢板墙的等效宽高比
 β_2 ——单片波形钢板厚度相对值
 β_c ——波形部分混凝土受压区等效矩形应力折减系数
 ω ——双波形钢板墙螺栓分布折减系数
 ω_1 ——双波形钢板墙在没有螺栓情况下的螺栓分布折减系数

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 本章适用于波形钢板组合结构的部件构造、结构体系选型和抗震设计等。

3.1.2 波形钢板组合结构的选型应与实际建筑功能相匹配。

3.1.3 波形钢板组合结构的结构形体和结构布置，地基、基础和地下室设计，荷载、作用及其效应的计算分析和组合，舒适度核算，非结构构件及其连接设计，抗震性能化设计，抗连续倒塌设计，耐久性及施工要求，除应符合本标准的要求外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3.2 结构体系和选型要求

3.2.1 波形钢板组合结构可采用下列结构体系：

- 1 波形钢板混凝土组合墙结构；
- 2 框架－波形钢板混凝土组合墙结构；
- 3 框架－波形钢板混凝土组合核心筒结构；
- 4 框架－波形钢板墙结构。

【条文说明】波形钢板组合结构指的是以包含波形钢板的结构构件（包括波形钢板混凝土组合墙和波形钢板墙）作为承力构件所形成的结构体系，总共包含四种类型：（1）波形钢板混凝土组合墙结构是由波形钢板混凝土组合墙、连梁及楼盖组成的结构体系，主要由波形钢板混凝土组合墙承受水平和竖向荷载作用，可类比传统的剪力墙结构；（2）框架－波形钢板混凝土组合墙结构是由框架与波形钢板混凝土组合墙并行组成的结构体系，可类

比传统的框架-剪力墙结构；(3) 框架-波形钢板混凝土组合核心筒结构是由外围框架与波形钢板混凝土组合墙围成的核心筒组成的框架-核心筒结构体系，可类比于传统的框架-核心筒结构；

(4) 框架-波形钢板墙结构是由框架及内嵌于框架内的波形钢板墙组成的结构，其中波形钢板墙可将波形棱线水平放置或者采用滞后安装的方式有效释放其竖向预压力，进而波形钢板墙主要承受水平向荷载作用，可类比于传统的框架-钢板剪力墙结构。

3.2.2 波形钢板混凝土组合墙结构中的连梁可采用热轧 H 型钢和焊接 H 形钢构件等，必要时可采用消能构件；波形钢板组合结构中的框架部分，其梁可采用热轧 H 型钢、焊接 H 形钢或其他截面的钢构件，其柱可采用钢柱、钢管混凝土柱等，也可采用异形截面混凝土组合柱（图 3.2.2）。

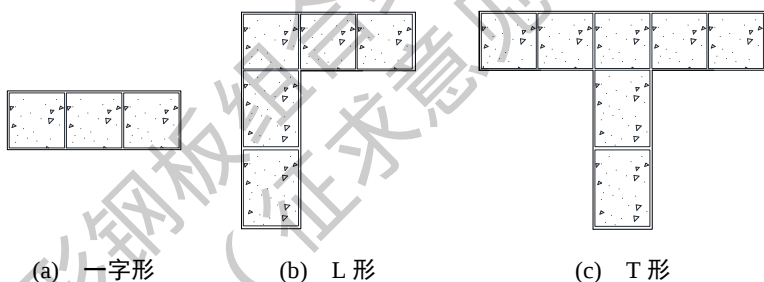


图 3.2.2 异形柱组合截面形式

【条文说明】 框架柱采用异形截面形式，主要考虑在住宅建筑设计中，异形柱的截面厚度宜与墙体厚度基本一致，避免在室内出现凸梁凸柱现象。用于非住宅建筑的结构构件除外。

3.2.3 抗震设防烈度为 6 度至 9 度的乙类和丙类高层民用建筑的适用的最大高度应符合表 3.2.3 的规定。平面和竖向均不规则的波形钢板组合结构的最大适用高度宜适当降低。

表 3.2.3 波形钢板组合结构的最大适用高度（m）

结构体系	6 度， 7 度 (0.10g)	7 度 (0.15g)	8 度		9 度 (0.40g)
			(0.20g)	(0.30g)	
波形钢板混凝土组合 墙结构 框架 - 波形钢板混凝土组合墙结构 框架 - 波形钢板墙结构	160	150	130	110	80
框架 - 波形钢板混凝土组合核心筒结构	220	200	160	140	100

注：1、房屋高度指室外地面到主要屋面板顶的高度（不包括局部突出屋顶部分）；
2、超过表内高度的房屋，应进行专门研究和论证，采取有效的加强措施；
3、6 度区、7 度区、8 度区的甲类建筑的适用高度，宜提高 1 度后查表，9 度区的甲类建筑的适用高度，应专门研究。

【条文说明】最大适用高度参考《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99)、《组合结构设计规范》(JGJ138)、《钢管混凝土结构设计规范》GB50936 等的规定。

3.2.4 高层民用建筑波形钢板组合结构的高宽比不宜大于表 3.2.4 的规定。

表 3.2.4 高层民用建筑波形钢板组合结构适用的最大高宽比

烈度	6 度，7 度	8 度	9 度
最大高宽比	6.5	6.0	5.5

注：计算高宽比的高度一般从室外地面算起，当塔形建筑底部有大底盘时，从大底盘顶部算起。

【条文说明】参考《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99)

中关于高层民用建筑钢结构的相关规定。

3.3 建筑形体及布置规则性要求

3.3.1 波形钢板组合结构的平面布置宜规则、对称，并应具有良好的整体性。在满足建筑使用功能要求的条件下，避免平面短方向布置剧烈凸出或缩进所产生的传力中断现象。

3.3.2 波形钢板组合结构的立面和竖向剖面宜规则，结构的侧向刚度沿高度宜均匀变化，竖向抗侧力构件的截面尺寸和材料强度宜自下而上逐渐减小，避免抗侧力结构的侧向刚度和承载力突变。

3.3.3 波形钢板组合结构的建筑设计应根据抗震概念设计的要求，明确建筑形体的规则性，不规则的建筑方案应按规定采取加强措施；特别不规则的建筑方案，应进行专门研究和论证，采用特别的加强措施；严重不规则的方案不应采用。

3.4 抗震设计、水平位移和舒适度要求

3.4.1 波形钢板组合结构应根据设防分类、烈度和房屋高度采用不同的抗震等级，并应符合相应的计算和构造措施要求。丙类建筑的抗震等级应按表 3.4.1 确定。

表 3.4.1 波形钢板组合结构的抗震等级

结构 体系		6 度		7 度			8 度			9 度	
结构 类型	高度 (m)	≤ 80	> 80	≤ 24	25~ 80	> 80	≤ 24	25~ 80	> 80	≤ 24	> 24
波形钢板混 凝土组合墙 结构	波形钢板混 凝土组合墙	四		四	三		三	二		二	一

框架-波形 钢板混凝土 组合墙结构	框架	四	三	四	三	二	三	二	一	二	一
	波形钢板混 凝土组合墙	四		四	三		三	二		二	一
框架-波形 钢板墙结构	框架	四	三	四	三	二	三	二	一	二	一
	波形钢板墙	四		四	三		三	二		二	一
框架 - 波形 钢板混凝土 组合核心筒 结构	高度 (m)	≤ 160	> 160	≤ 140	> 140	≤ 110	> 110	≤ 100			
	框架	三	二	二	一	一	一	一			
	波形钢板混 凝土组合核 心筒	三		三	二	二	一	一			

注：1、连梁抗震等级同波形钢板组合墙；

2、钢结构构件抗震等级，大于 50m 抗震设防烈度为 6、7、8、9 时应分别取四、三、二、一；≤50m 抗震设防烈度为 6、7、8、9 时应分别取四、四、三、二。

【条文说明】参考《建筑抗震设计规范》GB50011、《组合结构设计规范》JGJ138、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3 等的规定。

3.4.2 抗震设计的波形钢板组合结构，当地下室顶层作为上部结构的嵌固端时，地下一层相关范围的抗震等级应按上部结构采用，地下一层以下抗震构造措施的抗震等级可逐层降低一级，但不应低于四级；地下室中超出上部主楼相关范围且无上部结构的部分，其抗震等级可根据具体情况采用三级或四级。

3.4.3 抗震设计时，与主楼连为整体的裙房的抗震等级，除应按裙房本身确定外，相关范围不应低于主楼的抗震等级；主楼结构在裙房顶板上、下各一层应适当加强抗震构造措施。裙房与主楼分离时，应按裙房本身确定抗震等级。

3.4.4 在风荷载或多遇地震标准值作用下，波形钢板组合结构的弹性水平位移限值应满足下列要求：

1 在风荷载标准值作用下，按弹性方法计算的波形钢板混凝土组合墙结构、框架－波形钢板混凝土组合墙结构和框架－波形钢板混凝土组合核心筒结构楼层层间最大水平位移与层高之比不宜大于 $1/350$ ；

2 在多遇地震标准值作用下，按弹性方法计算的波形钢板混凝土组合墙结构、框架－波形钢板混凝土组合墙结构和框架－波形钢板混凝土组合核心筒结构楼层层间最大水平位移与层高之比不宜大于 $1/300$ ；

3 在风荷载或多遇地震标准值作用下，按弹性方法计算的框架－波形钢板墙结构楼层层间最大水平位移与层高之比不宜大于 $1/250$ 。

【条文说明】 当用于住宅建筑时，考虑到使用功能的复杂性以及避免围护结构开裂，层间位移角限值可适当偏严；当用于其他建筑时，依据其使用功能和围护材料使用情况，可适当放宽。

3.4.5 在罕遇地震标准值作用下，波形钢板混凝土组合墙结构、框架－波形钢板混凝土组合墙结构和框架－波形钢板混凝土组合核心筒结构的薄弱层或薄弱部位的弹塑性层间位移不应大于层高的 $1/80$ ，框架－波形钢板墙结构的薄弱层或薄弱部位的弹塑性层间位移不应大于层高的 $1/50$ 。

【条文说明】 参考《钢板剪力墙技术规程》JGJ/T380 及《建筑抗震设计规范》GB50011 中关于多高层钢结构弹塑性层间位移角限值的规定。

3.4.6 波形钢板组合结构应用于不小于 120m 的高层民用建筑结

构时，应满足风振舒适度要求。在现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的 10 年一遇的风荷载标准值作用下，结构顶点的顺风向和横风向振动最大加速度计算值不应大于表 3.4.6 的限值。结构顶点的顺风向和横风向振动最大加速度，可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的有关规定计算，也可通过风洞试验结果判断确定。

表 3.4.6 结构顶点的顺风向和横风向风振加速度限值

使用功能	风振加速度限值 (m/s ²)
住宅、公寓	0.20
办公、旅馆	0.28

3.4.7 波形钢板组合结构中楼盖应具有适宜的舒适度。楼盖结构的竖向振动频率不宜小于 3Hz，竖向振动加速度峰值不应大于表 3.4.7 的限值。楼盖结构竖向振动加速度可按现行行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3 的有关规定计算。

表 3.4.7 竖向振动加速度限值

人员活动环境	峰值加速度限值 (m/s ²)	
	竖向自振频率 不大于 2Hz	竖向自振频率 不小于 4Hz
住宅、办公	0.07	0.05
商场及室内连廊	0.22	0.15

3.5 构件承载力设计

3.5.1 波形钢板组合结构的构件承载力应按下列公式验算：

$$\text{持久设计状况、短暂设计状况} \quad \gamma_0 S_d \leq R_d \quad (3.5.1-1)$$

$$\text{地震设计状况} \quad S_d \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.5.1-2)$$

式中, γ_0 ——结构重要性系数, 对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1, 对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0;

S_d ——作用组合的效应设计值;

R_d ——构件承载力设计值;

γ_{RE} ——构件承载力抗震调整系数, 组合构件和钢构件应分别按表 3.5.1-1 和表 3.5.1-2 确定; 当仅考虑竖向地震作用组合时, 各类结构构件的承载力抗震调整系数均应取为 1.0。

表 3.5.1-1 组合构件承载力抗震调整系数 γ_{RE}

压、弯承载力计算		受剪承载力、 节点计算
钢管混凝土柱	波形钢板混凝土组合墙	
0.80	0.85	0.85

表 3.5.1-2 钢构件承载力抗震调整系数 γ_{RE}

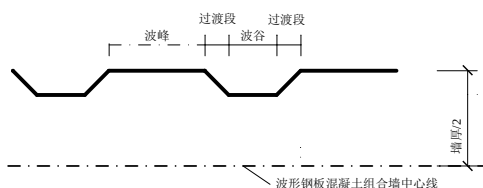
强度验算 (梁、柱、节点板件、螺栓、焊缝)	稳定验算
0.75	0.80

3.6 波形钢板混凝土组合墙

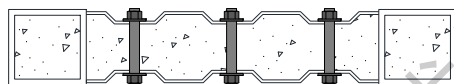
3.6.1 波形钢板混凝土组合墙的厚度不宜小于 150mm, 两块波形钢板波谷之间的净距离不应小于 70mm。

【条文说明】 波形钢板混凝土组合墙是由波形钢板、内填混凝土、对拉螺栓和边缘构件组成的承力构件, 可承受竖向和水平荷载作用。本条文是为了避免两侧波形钢板波谷之间的距离过小。

3.6.2 波形钢板宜采用非对称梯形波折形式 (图 3.6.2), 波形钢板厚度不宜小于 4mm。



(a) 波形钢板的波形示意图



(b) 墙肢示意图

图 3.6.2 梯形波形钢板的波形和墙肢示意图

【条文说明】 本条文主要考虑波形钢板的防腐需要、设备成型能力、辊轧成型的弯角大小以及混凝土浇灌压力等因素确定。本规程中的波形钢板均采用梯形波折形式，这是综合优化获得的结果。参考波形具体参数见下图：

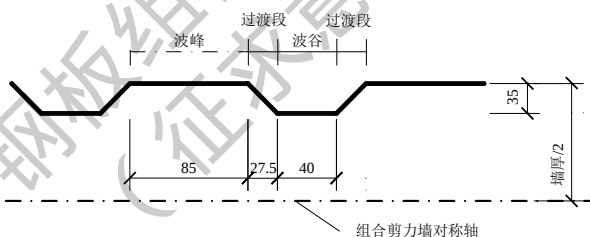


图 3.6.2-1 参考波形参数

3.6.3 波形钢板混凝土组合墙对拉螺栓立面布置可采用正交布置（图 3.6.3a）或错列布置（图 3.6.3b）。当螺栓竖向间距间距和钢板厚度的比值满足式(3.6.3)的规定时，承载力计算时可不考虑波形钢板局部屈曲的影响。

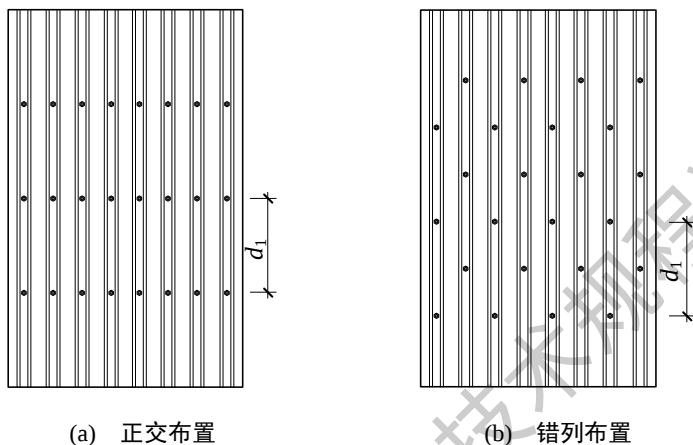


图 3.6.3 对拉螺栓立面布置形式

正交布置：

$$\frac{d_1}{t_w} \leq 130 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.6.3)$$

错列布置：

$$\frac{d_1}{t_w} \leq 180 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

式中， d_1 ——螺栓竖向间距；
 t_w ——波形钢板厚度；
 f_y ——钢板屈服强度。

【条文说明】当波形钢板混凝土组合墙受到水平剪力作用时，波形钢板易于发生斜向贯穿的屈曲波形，此时正交布置的对拉螺栓可有效抑制斜向屈曲波形的发生；另一方面，当波形钢板混凝土组合墙受到竖向压力作用时，波形钢板易于发生水平方向的屈曲波形，此时错列布置的对拉螺栓可有效抑制水平屈曲波形的发生。因此，对拉螺栓采用正交布置形式适用于波形钢板混凝土

土组合墙受到水平剪力控制的情况，而对拉螺栓采用错列布置形式适用于波形钢板混凝土组合墙受到竖向压力或弯矩控制的情况。因此，对拉螺栓采用正交布置形式适用于波形钢板混凝土组合墙受到水平剪力控制的情况，而对拉螺栓采用错列布置形式适用于波形钢板混凝土组合墙受到竖向压力或弯矩控制的情况。

本条文给出的螺栓间距与钢板厚度限值，在第 3.6.2 条建议波形参数条件下给出，对于其他波形参数应具体分析确定。

3.6.4 波形钢板混凝土组合墙的对拉螺栓直径不应小于 6mm，也不应大于波形钢板波谷宽度的 1/2。

【条文说明】 结合螺栓的实际供货和受力要求确定。

3.6.5 波形钢板混凝土组合墙的对拉螺栓连接形式应按照图 3.6.5 进行，由螺杆、螺母和限位螺母组成。

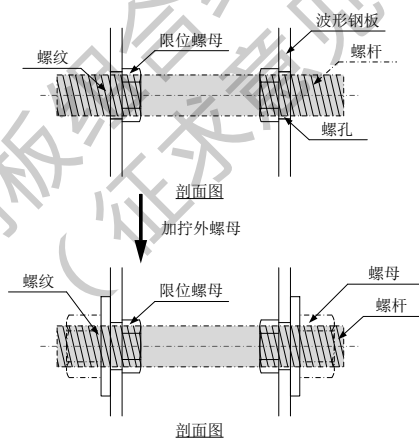


图 3.6.5 对拉螺栓连接形式

3.6.6 波形钢板混凝土组合墙底部加强部位，应符合下列规定：

- 1 底部加强部位的高度，应从地下室顶板算起；
- 2 房屋高度大于 24m 时，底部加强部位的高度可取底部两

层和墙体总高度的 1/10 二者的较大值；房屋高度不大于 24m 时，底部加强部位可取底部一层。

3 当结构计算嵌固端位于地下一层的底板或以下时，底部加强部位尚宜向下延伸到计算嵌固端。

4 底部加强部位应保证组合墙不局部屈曲。

【条文说明】 在地震作用下，波形钢板混凝土组合墙底部会受到更大的外荷载作用，因此需要通过加密螺栓、增加波形钢板厚度、增加墙厚、加强边缘构件等措施 或多种措施的组合来达到更好的受力和耗能性能（目的是不发生局部屈曲）。底部加强部位的规定参考《建筑抗震设计规范》GB50011 关于钢筋混凝土抗震墙底部加强部位的规定。

3.6.7 重力荷载代表值作用下，一、二、三、四级波形钢板混凝土组合墙墙肢的轴压比不宜超过表 3.6.7 的限值。

表 3.6.7 波形钢板混凝土组合墙墙肢轴压比限值

抗震等级	一级（9 度）	一级（7、8 度）	二级	三、四级
轴压比限值	0.4	0.5	0.55	0.6

注：重力荷载代表值作用下，墙肢轴压比=墙肢承受的轴压力设计值/（墙肢钢材的截面面积×屈服强度设计值+墙肢混凝土的截面面积×轴心抗压强度设计值）。

【条文说明】 波形钢板混凝土组合墙墙肢轴压比限值参考《建筑抗震设计规范》GB50011 中关于钢筋混凝土抗震墙墙肢轴压比限值的规定。在《建筑抗震设计规范》GB50011 中计算轴压比时只考虑墙的全截面面积和混凝土轴心抗压强度设计值乘积，由于波形钢板混凝土组合墙含钢率高，波形钢板具有很好的承载性能，因此本条文在计算轴压比时考虑了波形钢板的贡献，即墙肢轴压比是指重力荷载代表值作用下墙肢承受的轴压力设计值与

墙肢的钢材的截面面积和屈服强度设计值乘积以及混凝土的截面面积和轴心抗压强度设计值乘积之和的比值。

3.6.8 波形钢板混凝土组合墙受压构件中混凝土的工作承担系数应按下列公式计算，并应控制在 0.1~0.7 之间。

$$\alpha = \frac{f_c A_c}{f_c A_c + f A_s} \quad (3.6.8)$$

式中， α ——波形钢板混凝土组合墙中混凝土的工作承担系数；

f_c ——组合墙中混凝土抗压强度设计值；

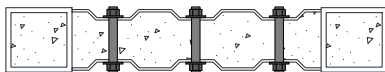
f ——组合墙中钢材的强度设计值；

A_c ——组合墙中混凝土截面面积；

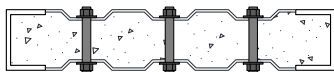
A_s ——组合墙中钢材截面面积。

【条文说明】当波形钢板混凝土组合墙用于多、高层建筑结构体系，并且承受地震荷载作用时，需要保证其具有一定的抗震性能，因此波形钢板混凝土组合墙必须有较好的延性。本条文参考《矩形钢管混凝土结构技术规程》CECS159 的相关规定。

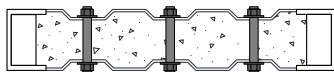
3.6.9 波形钢板混凝土组合墙截面的侧边以及多个墙肢截面交界处应设置边缘构件。波形钢板混凝土组合墙中的边缘构件可采用矩形钢管形式（图 3.6.9a）和槽形钢形式（图 3.6.9b 和图 3.6.9c）。边缘构件的板件壁厚不应小于 6mm，且至少比波形钢板厚度大 2mm。



(a) 边缘构件为矩形钢管形式



(b) 边缘构件为槽形钢形式



(c) 边缘构件为槽形钢且在与连梁翼缘连接的高度内设水平加劲板

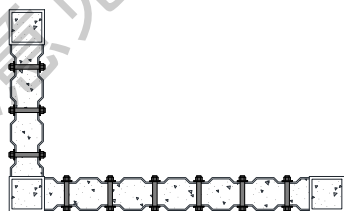
图 3.6.9 边缘构件形式

【条文说明】 本条文的目的是为确保边缘构件钢管不先于波形钢板发生局部屈曲，以获得更好的受力性能。边缘构件为槽形截面时，为了确保连梁翼缘的轴向力向边缘构件的有效传递而不导致边缘构件先于连梁破坏，可在边缘构件内且与连梁翼缘连接的高度位置设置横向加劲板。

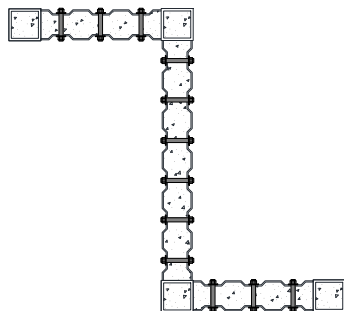
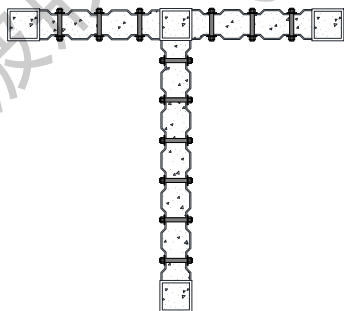
3.6.10 波形钢板混凝土组合墙的平面布置可采用一字形（图 3.6.10a）、L 形（图 3.6.10b）、T 形（图 3.6.10c）、Z 形（图 3.6.10d）、十字形（图 3.6.10e）。



(a) 一字形

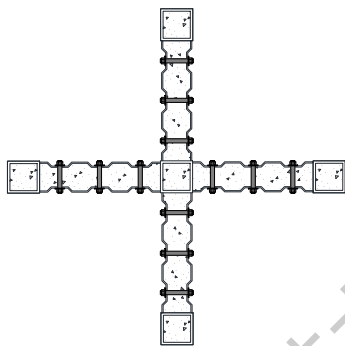


(b) L 形



(c) T 形

(d) Z 形

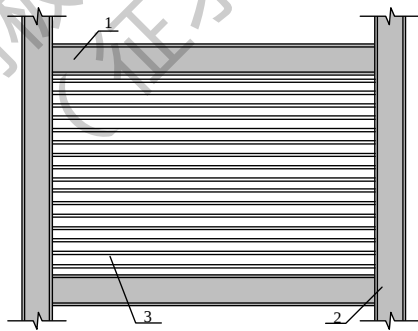


(e) 十字形

图 3.6.10 波形钢板混凝土组合墙平面布置形式

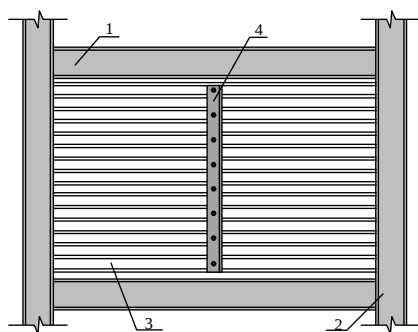
3.7 波形钢板墙

3.7.1 波形钢板墙可采用单波形钢板墙（图 3.7.1a）、竖向加劲单波形钢板墙（图 3.7.1b）、平行对扣双波形钢板墙（图 3.7.1c）、正交对扣双波形钢板墙（图 3.7.1d）等形式。



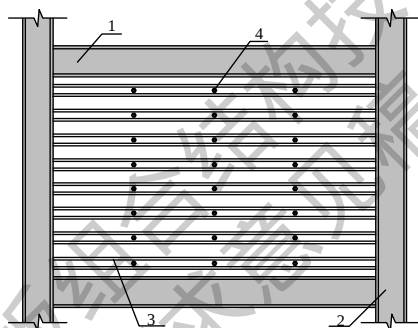
1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板

(a) 单波形钢板墙



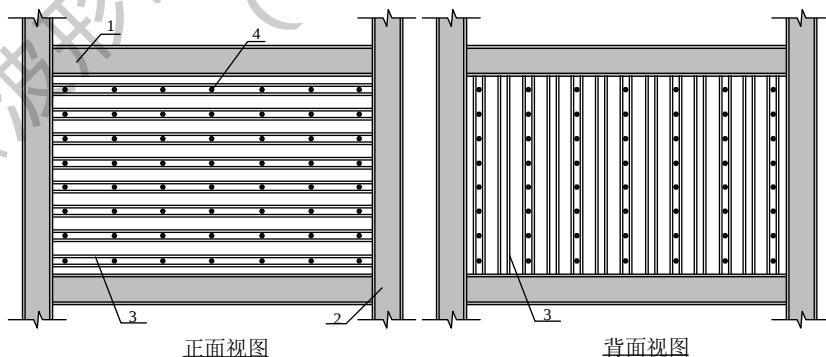
1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板 4—加劲肋

(b) 竖向加劲单波形钢板墙



1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板 4—高强度螺栓

(c) 平行对扣双波形钢板墙



正面视图

背面视图

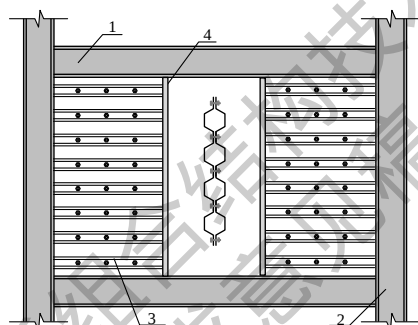
1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板 4—高强度螺栓

(d) 正交对扣双波形钢板墙

图 3.7.1 波形钢板墙的形式

【条文说明】波形钢板墙是由波形钢板为主要部件形成的承力构件，主要承受水平荷载作用，也可包含型钢加劲肋和对拉螺栓作为其组成部件。波形钢板墙的剖面图可参考 7.3 节的节点图。

3.7.2 波形钢板墙可满布于框架内（图 3.7.1），也可布置于框架内一侧、两侧、中间位置等（图 3.7.2）。



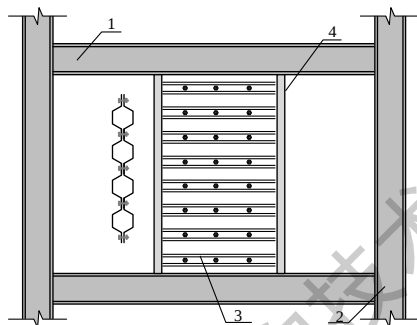
1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板 4—竖向边缘构件

图 3.7.2 波形钢板墙在框架内非满布型式

【条文说明】波形钢板墙通常满布于框架内，且在同一柱间通高布置。在住宅建筑中，由于开设门窗洞的功能需求，要求布置波形钢板墙时在框架内留出洞口，此时波形钢板墙可布置在框架内一侧、两侧或中间位置等。用于波形钢板墙的竖向边缘构件（非框架柱）需要具有足够的刚度与强度，保证其波形钢板墙体破坏不先于边缘构件破坏。竖向边缘构件可采用一字形钢板、工形截面、钢管截面等构件。

3.7.3 波形钢板墙可用作阻尼墙（图 3.7.3），宜布置在偏离框架

柱一定距离的位置。阻尼墙设计要满足结构整体或结构局部对其耗能性能的要求，满足竖向边缘构件的刚度要求，其弹塑性计算模型见附录 B。



1—框架梁 2—框架柱 3—波形钢板阻尼墙 4—竖向边缘构件

图 3.7.3 波形钢板墙阻尼墙

【条文说明】清华大学的理论和试验研究表明，波形钢板墙能用于阻尼墙（阻尼器）使用，既可给框架结构提供抗侧刚度，也可当做阻尼器应用以消能减震，此时阻尼墙的作用类似于防屈曲支撑（BRB）。阻尼墙的设计要满足结构相关耗能指标要求，其设计要考虑：（1）竖向边缘构件需要足够的刚度和承载力；（2）用作阻尼墙的波形钢板，无论采用单波形钢板、带竖向加劲肋的波形钢板、平行对扣的双波形钢板和正交对扣的双波形钢板，均要满足局部屈曲不先于屈服的设计原则，或满足耗能性能指标所对应的阻尼墙正则化高厚比限值要求；（3）对扣双波形钢板阻尼墙，其连接螺栓强度设计要能保证双钢板协同工作。

3.7.4 波形钢板墙中波形钢板的厚度不应小于 2mm。

【条文说明】本条文主要考虑波形钢板的防腐需要、设备成型能力以及辊轧成型的弯角大小等因素确定。如工程设计中使用

较薄的波形钢板，应采取措施提高波形钢板的防腐等级，并满足结构耐久性要求。

3.7.5 单波形钢板墙和竖向加劲单波形钢板墙应采用梯形波折的波形钢板，并应采用波峰与波谷宽度相等的对称波形。

3.7.6 平行对扣和正交对扣双波形钢板墙应采用梯形波折的波形钢板，并宜采用波峰宽度大于波谷的非对称波形形式。

3.7.7 平行对扣和正交对扣双波形钢板墙对拉螺栓立面布置采用正交布置，正交对扣双波形钢板墙的螺栓间距是所在方向上波形钢板波长的整数倍。

3.7.8 竖向加劲单波形钢板墙中，加劲肋宜双侧布置。当有可靠计算或试验依据时可单侧设置。加劲肋可采用热轧型钢（角钢和槽钢等）和冷弯型钢（帽形截面、Z 形和 C 形截面或闭口截面等）。依据加劲肋的截面形式和螺栓连接情况，设计时可考虑加劲肋弯曲和扭转刚度的贡献或仅考虑加劲肋弯曲刚度对波形钢板的加劲作用。

3.7.9 波形钢板墙中的对拉螺栓的直径不应小于 12mm。对于平行对扣和正交对扣的双波形钢板剪力墙，螺栓直径不应大于波形钢板波谷宽度的 1/2。

4 材 料

4.1 一般规定

4.1.1 本章适用于波形钢板组合结构中钢材、连接材料和混凝土材料的选用和设计。

4.1.2 波形钢板组合结构中的材料，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。设计文件中应完整地注明对材料的技术要求。

4.2 钢材

4.2.1 波形钢板组合结构钢材的选用应符合下列规定：

1 波形钢板组合结构钢材选用应符合《钢结构设计标准》GB50017、《建筑抗震设计规范》GB50011、《冷弯型钢结构技术规范》GB50018、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 等标准的规定，且质量等级不应低于 B 级。其中波形钢板用钢材，不宜采用 Q390 以上的高强度钢；

2 波形钢板组合结构重要承重构件所用较厚的钢板宜采用综合性能要求较高 Q235GJ、Q345GJ、Q390GJ 和 Q420GJ 的钢材，其材质和材料性能应符合现行国家标准《建筑结构用钢板》GB/T 19879 的规定；

3 冷弯型材，其力学性能指标应按现行国家标准《冷弯型钢结构技术规范》GB50018 的规定采用；

4 抗震结构钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不应大于 0.85，应有明显的屈服台阶，且伸长率应大于 20%；钢材应有良好的可焊性和合格的冲击韧性。

【条文说明】 由于波形钢板采用冷加工成型工艺，对板材的延性要求较高。

4.3 连接材料

4.3.1 波形钢板组合结构中连接用螺栓的选用应符合下列规定：

- 1 波形钢板组合结构中对拉螺栓宜采用高强材料的螺栓；
- 2 波形钢板组合结构螺栓选用符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017 的规定；

3 对于直接承受动力荷载和承受反复荷载作用的波形钢板组合结构，其对拉螺栓不应采用膨胀自锁连接形式。

4.3.2 焊接材料的选用应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017、《钢结构焊接规范》GB50661 的规定。

4.4 混凝土

4.4.1 波形钢板组合结构中混凝土的材料性能应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 执行；当采用 C80 以上高强混凝土时，应有可靠的依据。自密实混凝土的配合比设计、施工、质量检验和验收应符合现行行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T283 的规定。

4.4.2 波形钢板组合结构中混凝土的选用应符合下列规定：

1 波形钢板混凝土组合墙及其钢管混凝土柱内的混凝土强度等级不宜低于 C40，不应低于 C30。

2 波形钢板混凝土组合墙内填混凝土可采用自密实混凝土，也可采用普通混凝土，当采用普通混凝土时应采用合适的配合比、坍落度，并采取合理的施工措施保证密实性和施工质量。

5 结构分析

5.1 一般规定

5.1.1 波形钢板组合结构的荷载及荷载组合应符合国家现行标准《建筑结构荷载规范》GB50009、《建筑抗震设计规范》GB50011的有关规定。

5.1.2 波形钢板组合结构应根据施工和使用的实际情况进行各受力状况下的结构分析。对地震设计状况，应进行多遇地震作用下的内力和变形分析；不规则且具有明显薄弱部位可能导致重大地震破坏的结构，尚应进行罕遇地震作用下的变形分析。

5.1.3 结构分析时，应根据结构类型、材料性能和受力特点等采用弹性或弹塑性分析方法。多遇地震作用下的内力和变形分析，可采用线弹性静力方法或线弹性动力方法；罕遇地震作用下的变形分析，应根据结构的特点，采用静力弹塑性方法或弹塑性时程分析方法。

5.1.4 结构分析中，应符合下列要求：

- 1 满足力学平衡条件；
- 2 符合变形协调条件；
- 3 采用合理的材料本构关系；
- 4 合理考虑施工安装方案的影响。

5.1.5 结构分析所采用的计算软件应经过考核和验证，其技术条件应符合本规程和国家现行有关标准的要求。

5.1.6 波形钢板组合结构弹性计算时，钢筋混凝土楼板与钢梁间应有可靠连接，可计入钢筋混凝土楼板对钢梁刚度的增大作用，两侧有楼板的钢梁其惯性矩可取为 $1.5I_b$ ，仅一侧有楼板的钢梁其

惯性矩可取为 $1.2I_b$ ， I_b 为钢梁截面惯性矩。弹塑性计算时，不应考虑楼板对钢梁惯性矩的增大作用。

5.1.7 计算各振型地震影响系数所采用的结构自振周期，应考虑非承重填充墙体的刚度影响予以折减。当非承重墙体为填充轻质砌块、填充轻质墙板或外挂墙板时，自振周期折减系数可取 0.9~1.0。结构计算中不应计入非结构构件对结构承载力和刚度的有利作用。

5.1.8 采用振型分解反应谱法时，振型数不应小于 15，多塔结构的振型数不应小于塔楼数的 9 倍，且计算振型数应使各振型参与质量之和不小于总质量的 90%。

5.1.9 波形钢板组合结构的整体稳定性应满足下式要求：

$$EJ_d \geq 1.0H^2 \sum_{i=1}^n G_i \quad (5.1.9)$$

式中， G_i ——分别为第 i 楼层重力荷载设计值（kN），取 1.2 倍的永久荷载标准值与 1.4 倍的楼面可变荷载标准值的组合值；

H ——房屋高度（mm）；

EJ_d ——结构一个主轴方向的弹性等效侧向刚度（kN·mm²），可按倒三角形分布的侧向荷载作用下结构顶点位移相等的原则，将结构的侧向刚度折算为竖向悬臂受弯构件的等效侧向刚度。

【条文说明】本条参考《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 中的规定，用于控制重力 $P-\Delta$ 效应不超过 20%，使结构的稳定具有适宜的安全储备。在水平力作用下，波形钢板组合结构的稳定应满足本条的规定，不应放松要求。如不满足本条的规定，应

调整并增大结构的侧向刚度。

5.1.10 高层波形钢板组合结构整体计算中,当地下室顶板作为上部结构嵌固部位时,地下一层与首层侧向刚度比不宜小于 2。

5.2 弹性分析

5.2.1 结构体系的弹性分析方法可用于承载能力极限状态和正常使用极限状态作用效应的分析。

5.2.2 结构弹性分析模型应根据实际情况确定,应能准确反映结构的刚度和质量分布以及各构件的受力状况,并应符合下列规定:

1 波形钢板混凝土组合墙中,边缘柱可采用等效梁单元,波形钢板混凝土组合墙板可采用刚度等效的膜单元;

2 波形钢板墙可采用等效的剪切膜单元。

5.2.3 波形钢板混凝土组合墙的弹性分析,等效截面参数可按式(5.2.3-1)和式(5.2.3-2)计算。

$$d_{we} = \frac{A_{c,0}}{b_0} \quad (5.2.3-1)$$

$$t_{we} = \frac{s}{b_0} t_w \quad (5.2.3-2)$$

式中, d_{we} ——等效混凝土厚度;

t_{we} ——等效钢板厚度;

$A_{c,0}$ ——单个波形中混凝土总面积(图 5.2.3a);

b_0 ——波形钢板波长;

s ——波形钢板单个波展开后长度。

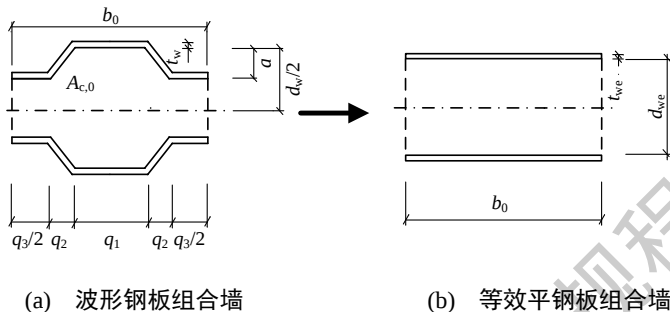


图 5.2.3 波形钢板混凝土组合墙的刚度等效

【条文说明】当采用本条文公式将波形钢板组合墙按面积等效为双平钢板组合墙后，二者的受压刚度和抗弯刚度相等，抗剪刚度稍有增加，经过有限元分析得知，等效截面总抗侧刚度（抗弯刚度+抗剪刚度）比原截面总刚度提高在 1.5% 以内。

软件条件允许情况下，可增加考虑双平钢板组合墙的剪切刚度等效。双平钢板混凝土组合截面参数可按式(5.2.3-3)~式(5.2.3-5)计算。

$$d_{we} = \frac{A_{t1} + A_{t2} / k}{b_0} \quad (5.2.3-3)$$

$$t_{we} = t_w \quad (5.2.3-4)$$

$$k = 1.033 - 0.0985 \left(\frac{2q_2}{q_1 + 2q_2} \right) + 0.750 \left(\frac{2q_2}{q_1 + 2q_2} \right)^2 - 0.485 \left(\frac{2q_2}{q_1 + 2q_2} \right)^3 \quad (5.2.3-5)$$

式中， A_{t1} ——单个波形中波形钢板波谷高度范围内的混凝土总面积（图 5.2.3-1a）；

A_{t2} ——单个波形中波形钢板波谷高度范围外梯形混凝土的总面积（图 5.2.3-1a）；

k ——截面形状参数；

q_1 ——波形钢板波峰长度；
 q_2 ——波形钢板倾斜段的水平宽度。

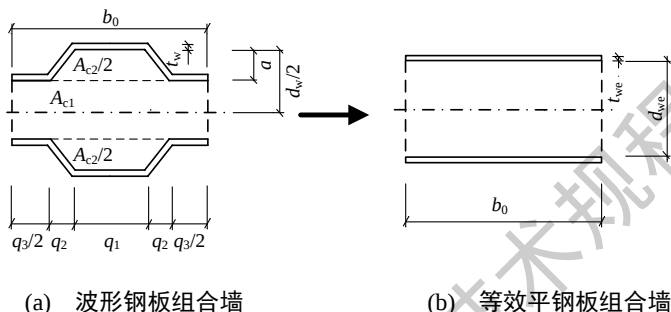


图 5.2.3-1 波形钢板混凝土组合墙的刚度等效

5.2.4 波形钢板墙的弹性分析中，等效剪切刚度可按照下列公式计算：

- 1 单波形钢板墙截面的剪切刚度可取为 $G_s b t_w \cdot b_0 / s$ ；
- 2 双波形钢板墙（包括平行和正交布置形式）截面的剪切刚度可取为 $2 G_s b t_w \cdot b_0 / s$ 。

5.2.5 体型复杂、结构布置复杂以及特别不规则的波浪钢板组合结构，应采用至少两个不同力学模型的结构分析软件进行整体计算。

5.2.6 多遇地震和风荷载作用下进行结构弹性计算时，结构阻尼比的取值应符合下列规定：

- 1 波形钢板墙钢框架结构多遇地震下，房屋高度不大于 50m 时可取 0.04；房屋高度大于 50m 且小于 200m 时可取 0.03；房屋高度不小于 200m 时宜取 0.02；

- 2 除第 1 项以外的波形钢板组合结构多遇地震下，房屋高度不大于 50m 时可取 0.04；房屋高度大于 50m 且小于 200m 时

可取 0.035；房屋高度不小于 200m 时宜取 0.03；

3 风荷载作用下楼层位移验算和构件设计时，阻尼比取 0.02~0.03；

4 风振舒适度验算时，阻尼比可取 0.01~0.02。

【条文说明】条文参考《建筑抗震设计规范》GB50011、《组合结构设计规范》JGJ138、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 确定。

5.2.7 框架－波形钢板墙结构、框架－波形钢板混凝土组合墙结构，对应于地震作用标准值的各层框架总剪力应符合下列规定：

1 满足式(5.2.7)要求的楼层，其框架总剪力不必调整；不满足式(5.2.7)要求的楼层，其框架总剪力应按 $0.25V_0$ 和 $1.8V_{f,\max}$ 二者的较小值采用；

$$V_f \geq 0.25V_0 \quad (5.2.7)$$

式中， V_0 ——对框架柱数量从下至上基本不变的结构，应取对应于地震作用标准值的结构底层总剪力；对框架柱数量从下至上分段有规律变化的结构，应取每段底层结构对应于地震作用标准值的总剪力；

V_f ——对应于地震作用标准值且未经调整的各层（或某一段内各层）框架承担的地震总剪力；

$V_{f,\max}$ ——对框架柱数量从下至上基本不变的结构，应取对应于地震作用标准值且未经调整的各层框架承担的地震总剪力中的最大值；对框架柱数量从下至上分段有规律变化的结构，应取每段中对应于地震作用标准值且未经调整的各层框架承担的地震总剪力中的最大值。

2 各层框架所承担的地震总剪力按本条第 1 款调整后,应按调整前、后总剪力的比值调整每根框架柱和与之相连框架梁的剪力及端部弯矩标准值,框架柱的轴力标准值可不予调整;

3 按振型分解反应谱法计算地震作用时,本条第 1 款所规定的调整可在振型组合之后、并满足《建筑抗震设计规范》GB50011 关于楼层最小地震剪力系数的前提下进行。

【条文说明】条文参考《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 确定。

5.2.8 抗震设计时,框架-波形钢板混凝土组合核心筒结构的框架部分按侧向刚度分配的楼层地震剪力标准值应符合下列规定:

1 框架部分分配的楼层地震剪力标准值的最大值不宜小于结构底部总地震剪力标准值的 10%;

2 当框架部分分配的地震剪力标准值的最大值小于结构底部总地震剪力标准值的 10%时,各层框架部分承担的地震剪力标准值应增大到结构底部总地震剪力标准值的 15%;此时,各层核心筒墙体的地震剪力标准值宜乘以增大系数 1.1,但可不大于结构底部总地震剪力标准值,墙体的抗震构造措施应按抗震等级提高一级后采用,已为一级时需要采取比一级更有效的抗震构造措施;

3 当框架部分分配的地震剪力标准值小于结构底部总地震剪力标准值的 25%,但其最大值不小于结构底部总地震剪力标准值的 10%时,应按结构底部总地震剪力标准值的 25%和框架部分楼层地震剪力标准值中最大值的 1.8 倍二者的较小值进行调整;

4 按本条第 2 款或第 3 款调整框架柱的地震剪力后,框架柱端弯矩及与之相连的框架梁端弯矩、剪力应进行相应调整;

5 有加强层时,本条框架部分分配的楼层地震剪力标准值

的最大值不应包括加强层及其上、下层的框架剪力。

【条文说明】条文参考《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 确定。

5.2.9 抗震设计的框架-波形钢板混凝土组合墙结构,应根据在规定的水平力作用下结构底层框架部分承受的地震倾覆力矩与结构总地震倾覆力矩的比值,确定相应的设计方法,并应符合下列规定:

1 框架部分承受的地震倾覆力矩不大于结构总地震倾覆力矩的 10%时,按波形钢板混凝土组合墙进行设计,其中框架部分应按框架-波形钢板混凝土组合墙结构的框架进行设计;

2 当框架部分承受的地震倾覆力矩大于结构总地震倾覆力矩的 10%但不大于 50%时,按框架-波形钢板混凝土组合墙结构进行设计;

3 当框架部分承受的地震倾覆力矩大于结构总地震倾覆力矩的 50%但不大于 80%时,按框架-波形钢板混凝土组合墙结构进行设计,其最大适用高度可比《组合结构设计规范》JGJ138 的框架结构适当增加,框架部分的抗震等级和轴压比限值宜按组合结构设计规范》JGJ138 的框架结构的规定采用;

4 当框架部分承受的地震倾覆力矩大于结构总地震倾覆力矩的 80%时,按框架-波形钢板混凝土组合墙结构进行设计,但其最大适用高度宜按《组合结构设计规范》JGJ138 的框架结构采用,框架部分的抗震等级和轴压比限值应按《组合结构设计规范》JGJ138 的框架结构规定采用。

【条文说明】条文参考《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3、《组合结构设计规范》JGJ138。

5.2.10 一级波形钢板混凝土组合墙的底部加强部位以上部位,墙肢的组合弯矩设计值和组合剪力设计值应乘以增大系数,弯矩增大系数可取为 1.2,剪力增大系数可取为 1.3。

5.2.11 底部加强部位波形钢板混凝土组合墙截面的剪力设计值,一、二、三级时应按式(5.2.11-1)调整,9 度一级剪力墙应按式(5.2.11-2)调整;二、三级的其它部位及四级时可不调整。

$$V = \eta_{vw} V_w \quad (5.2.11-1)$$

$$V = 1.1 \frac{M_{wua}}{M_w} V_w \quad (5.2.11-2)$$

式中, V ——底部加强部位剪力墙截面剪力设计值;

V_w ——底部加强部位剪力墙截面考虑地震作用组合的剪力计算值;

M_{wua} ——剪力墙抗震受弯承载力,应考虑承载力抗震调整系数 γ_{RE} 、采用材料强度标准值和组合的轴力设计值;

M_w ——底部加强部位剪力墙底截面弯矩的组合计算值;

η_{vw} ——剪力增大系数,一级取 1.6,二级取 1.4,三级取 1.2。

【条文说明】条文参考《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3。

5.3 弹塑性分析

5.3.1 波形钢板组合结构的弹塑性分析,当房屋高度不超过 100m 时,可采用静力弹塑性分析法;高度超过 150m 时,应采用弹塑性时程分析法;高度为 100m~150m 时,可视结构不规则程度选择静力弹塑性分析法或弹塑性时程分析法。

【条文说明】 参考《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 中的相关规定。

5.3.2 结构的弹塑性分析宜遵循下列原则:

1 应预先设定结构、构件的形状、尺寸、边界条件和材料性能等;

2 材料的性能参数宜取平均值,并宜通过试验分析确定,也可按相关标准的规定确定;

3 宜采用空间计算模型;

4 宜考虑结构二阶效应的不利影响;

5 复杂结构应首先进行施工模拟分析,以施工全过程完成后的状态作为弹塑性分析的初始状态;

6 结构构件上应作用重力荷载代表值,其效应应与地震作用效应组合,分项系数可取 1.0;

7 分析结果用于承载力复核时,宜考虑抗力模型不定性系数对结构的抗力进行适当调整。

5.3.3 罕遇地震作用下进行结构弹塑性计算时,波形钢板组合结构的阻尼比可取 0.05。

5.3.4 弹塑性分析时,波形钢板混凝土组合墙可采用等效截面的纤维模型或分层壳模型,其中钢材和混凝土材料的本构模型可分别按本规程附录 A.1 和 A.2 的规定采用。

5.3.5 弹塑性分析时,波形钢板墙可采用剪切膜单元,其分析模型可按本规程附录 B 的规定采用。

6 构件设计

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于波形钢板组合结构中构件的强度和稳定性设计。特别给出了波形钢板混凝土组合墙的强度、整体稳定和墙肢稳定计算设计公式，以及波形钢板墙抗剪承载力计算设计公式。

6.1.2 波形钢板组合结构中梁、柱、楼盖等构件的设计，除符合本规程外，尚应符合国家现行相关标准的规定。

6.2 波形钢板混凝土组合墙设计

6.2.1 考虑地震作用的波形钢板混凝土组合墙，其轴力、弯矩、剪力设计值除符合本规程规定外，尚应符合现行国家标准的有关规定。

6.2.2 波形钢板混凝土组合墙受压强度承载力按照下列公式计算：

$$N \leq N_u \quad (6.2.2-1)$$

$$N_u = \varphi_c f_{sw} A_{sw} + f_{cw} A_{cw} + 2(f_{sc} A_{sc} + f_{cc} A_{cc}) \quad (6.2.2-2)$$

式中， N ——轴力设计值；

N_u ——波形钢板混凝土组合墙受压强度承载力；

φ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压稳定系数，按式(6.2.2-3)计算；当波形钢板的螺栓间距和板厚满足式(3.6.3)时，取 1.0；

f_{cw} ——波形部分混凝土抗压强度设计值；

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

f_{cc} ——钢管混凝土中混凝土抗压强度设计值；

f_{sc} ——钢管混凝土中钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

A_{cw} ——波形部分混凝土面积；

A_{sw} ——波形部分钢板面积；当波形钢板的螺栓间距和板厚满足式(3.6.3)时，取净截面面积 $A_{sw,n}$ ；

A_{cc} ——单根钢管混凝土柱混凝土面积；

A_{sc} ——单根钢管混凝土柱钢管面积。

$$\varphi_c = \frac{1}{\phi_c + \sqrt{\phi_c^2 - \lambda_c^2 / 4}} \quad (6.2.2-3)$$

式中， ϕ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压稳定系数计算参数，按式(6.2.2-4)计算。

$$\phi_c = 0.5(1 + 0.09\lambda_c + 0.25\lambda_c^2) \quad (6.2.2-4)$$

式中， λ_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲长细比，按式(6.2.2-5)计算。

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_{yw} A_{sw}}{N_{sw,cr}}} \quad (6.2.2-5)$$

式中， $N_{sw,cr}$ ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲荷载，按式(6.2.2-6)计算；

f_{yw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值。

$$N_{sw,cr} = k_c \frac{\pi^2 E_{sw} I_{si}}{d_1^2} \quad (6.2.2-6)$$

式中， k_c ——波形钢板混凝土组合墙波形钢板部分受压弹性屈曲荷载系数，螺栓正交布置时按式(6.2.2-7a)计算，螺栓错列布置时按式(6.2.2-7b)计算；

E_{sw} ——波形部分钢材弹性模量；

I_{si} ——波形部分单片钢板的截面惯性矩；

d_1 ——竖向螺栓间距。

$$k_c = 1.40 - 0.87 / \sqrt{\beta_1} + 1.37\beta_2 \quad (6.2.2-7a)$$

$$k_c = \left(-0.15 + 1.75 / \sqrt{\beta_1} - 6.30\beta_2 \right)^{-1} \quad (6.2.2-7b)$$

式中， β_1 ——竖向螺栓间距相对值， $\beta_1 = d_1 / d_2$ ；

β_2 ——单片波形钢板厚度相对值， $\beta_2 = t_w / d_2$ ；

d_2 ——横向螺栓间距；

t_w ——单片波形钢板厚度。

【条文说明】针对波形钢板混凝土组合墙中波形钢板部分受压稳定系数的有限元分析中考虑了对拉螺栓和混凝土对波形钢板的侧向约束作用。

6.2.3 受压弯剪联合作用下的波形钢板混凝土组合墙，其受弯承载力计算可采用考虑波形钢板局部屈曲的全截面塑性设计方法，且应考虑剪力对波形钢板轴向强度的降低作用，其承载力按下列规定计算：

1 如图 6.2.3 所示，塑性中和轴相对位置 χ 按下列规定计算：

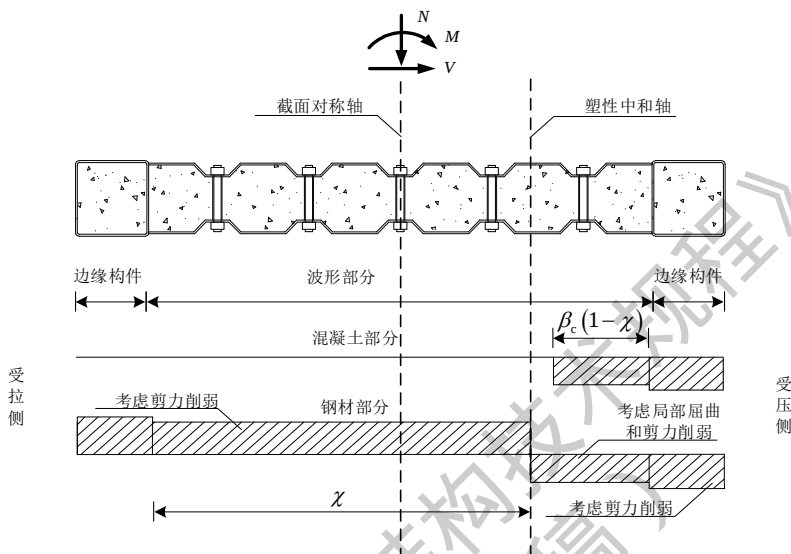


图 6.2.3 压-弯荷载作用下的截面应力分布

波形钢板混凝土组合墙的临界轴压力按下列规定计算：

$$N_1 = -\frac{1}{2}(1-\varphi_p)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \frac{1}{2}\beta_c f_{cw}A_{cw} + f_{cc}A_{cc} \quad (6.2.3-1a)$$

$$N_2 = \varphi_c \rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \beta_c f_{cw}A_{cw} + f_{cc}A_{cc} \quad (6.2.3-1b)$$

当 $N \leq N_1$ 时：

$$\chi = \frac{\varphi_p \rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \beta_c f_{cw}A_{cw} + f_{cc}A_{cc} - N}{(1+\varphi_p)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \beta_c f_{cw}A_{cw}} \quad (6.2.3-2)$$

当 $N_1 < N \leq N_2$ 时：

$$\chi = \frac{1}{2} - \frac{(1+\varphi_c)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \beta_c f_{cw}A_{cw}}{4(\varphi_c - \varphi_p)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw}} \left(\sqrt{1 + \frac{8(\varphi_c - \varphi_p)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw}(N - N_1)}{[(1+\varphi_c)\rho_{sw}f_{sw}A_{sw} + \beta_c f_{cw}A_{cw}]^2}} - 1 \right) \quad (6.2.3-3)$$

当 $N_2 < N < N_u$ 时:

$$\chi = \frac{b_c (\varphi_c \rho_{sw} f_{sw} A_{sw} + \beta_c f_{cw} A_{cw} + f_{cc} A_{cc} - N)}{b_w [(1 - \beta_c) f_{cw} A_{cw} + 2(\rho_{sc} b_c + d_c) / (b_c + d_c) f_{sc} A_{sc} + f_{cc} A_{cc}]} \quad (6.2.3-4)$$

式中, N ——轴力设计值;

N_u ——波形钢板混凝土组合墙受压强度承载力;

f_{cw} ——波形部分混凝土抗压强度设计值;

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

f_{cc} ——钢管混凝土中混凝土抗压强度设计值;

f_{sc} ——钢管混凝土中钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

A_{cw} ——波形部分混凝土面积;

A_{sw} ——波形部分钢板面积; 当波形钢板的螺栓间距和板厚满足式(3.6.3)时, 取净截面面积 $A_{sw,n}$;

A_{cc} ——单根钢管混凝土柱混凝土面积;

A_{sc} ——单根钢管混凝土柱钢管面积;

b_w ——波形部分宽度;

b_c ——单根钢管混凝土柱宽度;

φ_c ——波形钢板部分受压稳定系数, 按式(6.2.2-2)计算;

φ_p ——波形部分钢材塑性过渡区折减系数, 按式(6.2.3-5)计算;

β_c ——波形部分混凝土受压区等效矩形应力折减系数, 按式(6.2.3-6)计算;

ρ_{sw} ——剪力对波形钢板轴向力的削弱系数, 按式(6.2.3-7)计算;

ρ_{sc} ——剪力对钢管混凝土柱中平行于组合墙受力平面钢

板的削弱系数，按式(6.2.3-8)计算。

$$\varphi_p = \alpha_p (\beta_1 / \beta_2^2)^{-0.1} \quad (6.2.3-5)$$

式中， α_p ——波形部分钢材塑性过渡区折减计算系数，螺栓正交布置时取 1.45，螺栓错列布置时取 1.50；

β_1 ——竖向螺栓间距相对值， $\beta_1 = d_1 / d_2$ ；

β_2 ——单片波形钢板厚度相对值， $\beta_2 = t_w / d_2$ 。

$$\beta_c = \alpha_c (\beta_1 / \beta_2)^{-0.43} \quad (6.2.3-6)$$

式中， α_c ——波形部分混凝土受压区等效矩形应力折减计算系数，螺栓正交布置时取 4.2，螺栓错列布置时取 4.6；

β_1 ——竖向螺栓间距相对值， $\beta_1 = d_1 / d_2$ ；

β_2 ——单片波形钢板厚度相对值， $\beta_2 = t_w / d_2$ 。

$$\rho_{sw} = \left[1 - (V / V_u)^2 \right]^2 \quad (6.2.3-7)$$

$$\rho_{sc} = \begin{cases} 1 & V / V_u \leq 0.5 \\ 1 - (2V / V_u - 1)^2 & V / V_u > 0.5 \end{cases} \quad (6.2.3-8)$$

式中， V ——剪力设计值；

V_u ——波形钢板混凝土组合墙受剪承载力。

2 受弯承载力按下列规定计算：

$$M \leq M_u \quad (6.2.3-9)$$

式中， M ——弯矩设计值；

M_u ——波形钢板混凝土组合墙受弯承载力。

当 $N \leq N_1$ 时：

$$M_u = \frac{1}{2} \chi (1 - \chi) (1 + \varphi_p) \rho_{sw} f_{sw} A_{sw} b_w \\ + \frac{1}{2} \beta_c (1 - \chi) (1 - \beta_c + \beta_c \chi) f_{cw} A_{cw} b_w + \frac{1}{2} f_{cc} A_{cc} (b_w + b_c) \quad (6.2.3-10)$$

当 $N_1 < N \leq N_2$ 时:

$$M_u = \frac{1}{2} \chi (1 - \chi) [1 + \varphi_c - 2(\varphi_c - \varphi_p) \chi] \rho_{sw} f_{sw} A_{sw} b_w \\ + \frac{1}{2} \beta_c (1 - \chi) (1 - \beta_c + \beta_c \chi) f_{cw} A_{cw} b_w + \frac{1}{2} f_{cc} A_{cc} (b_w + b_c) \quad (6.2.3-11)$$

当 $N_2 < N < N_u$ 时:

$$M_u = \frac{1}{2} \left(\frac{b_w \chi}{b_c} + 1 \right) [\beta_c (1 - \beta_c) f_{cw} A_{cw} b_w + f_{cc} A_{cc} (b_w + b_c)] \quad (6.2.3-12)$$

3 受剪承载力按下列规定计算:

$$V \leq V_u \quad (6.2.3-13)$$

$$V_u = 0.577 (f_{sw} A_{sw,n} / \lambda_s + 4 f_{sc} b_c t_c) \quad (6.2.3-14)$$

式中, V ——剪力设计值;

V_u ——波形钢板混凝土组合墙受剪强度承载力;

λ_s ——波形钢板展开系数, $\lambda_s = s / b_0$;

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

f_{sc} ——钢管混凝土中钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

$A_{sw,n}$ ——波形部分钢材净截面面积;

b_c ——单根钢管混凝土柱宽度;

t_c ——钢管混凝土柱钢管壁厚。

【条文说明】 波形钢板组合结构截面强度承载力的设计理论将基于全截面塑性方法, 同时分别考虑允许波形钢板局部屈曲和不允许波形钢板局部屈曲两种情况。从定性角度分析, 当对拉螺栓间距较大、波形钢板厚度较小时, 波形钢板的局部屈曲将先于全截面屈服发生。针对波形钢板组合结构截面强度设计的整体思路为波形钢板组合结构的剪力完全由波形钢板和平行于剪力墙平面的钢管混凝土壁板承担, 轴力和弯矩由钢板和混凝土共同承担, 且不考虑受拉区混凝土的作用。因此采用考虑剪力对波形钢板竖向强度削弱作用的全截面塑性设计方法, 其中允许波形钢板局部屈曲的设计方法还需要考虑波形钢板局部屈曲对竖向强度的削弱作用。由于钢管混凝土侧柱通过限制钢管壁板宽厚比的构造措施避免钢管壁板的局部屈曲, 且已在平钢板组合墙中有过深入研究, 其设计直接参考《钢板剪力墙技术规程》(JGJ/T 380-2015)。因此, 研究中针对墙肢部分截面强度承载力的计算理论进行了重点研究。

6.2.4 波形钢板混凝土组合墙中对拉螺栓的截面拉力应采用下列公式计算:

$$N_b \leq f_t^b \cdot A_b \quad (6.2.4-1)$$

$$N_b = \frac{A_b (\eta_b E_b A \varepsilon_c)}{\alpha_b A_b + \beta_b A} \quad (6.2.4-2)$$

式中, N_b ——对拉螺栓截面拉力;

A_b ——对拉螺栓截面积;

η_b ——波形钢板混凝土组合墙对拉螺栓的截面拉应力局部屈曲发展系数, 取 2.0;

E_b ——对拉螺栓弹性模量；

A_1 ——平均每个对拉螺栓所约束波形钢板面积，按式(6.2.4-2)计算；

A_b ——对拉螺栓截面积；

ε_c ——波形钢板发生局部屈曲的临界混凝土压应变，取0.002；

α_b, β_b ——波形钢板混凝土组合墙对拉螺栓的截面拉应力计算系数，螺栓正交布置时按式(6.2.4-3)计算，螺栓错列布置时按式(6.2.4-4)计算。

$$A_1 = d_1 d_2 \quad (6.2.4-2)$$

式中， d_1 ——竖向螺栓间距；

d_2 ——横向螺栓间距；

$$\alpha_b = \left(0.122 + \frac{0.265 d_1}{10^3 t_w} \ln \frac{d_1}{t_w} \right)^2 \quad (6.2.4-3)$$

$$\beta_b = 0.619 - \frac{2.77 d_1}{10^3 t_w}$$

$$\alpha_b = 0.0179 + \frac{0.0583 d_1^{1.5}}{10^3 t_w} \quad (6.2.4-4)$$

$$\beta_b = 0.632 - \frac{0.832 d_1}{10^3 t_w} \ln \left(\frac{d_1}{t_w} \right)$$

式中， d_1 ——竖向螺栓间距；

t_w ——单片波形钢板厚度。

【条文说明】 研究中针对对拉螺栓设计采用了在对拉螺栓和波形钢板连接部位更为精细的有限元模型，同时该模型得到了试

验的验证。分析结果反映，对拉螺栓拉应力在波形钢板组合结构加载全过程中都在增长，但只有在波形钢板还未发生局部屈曲的情况下能够得到较为精确的对拉螺栓拉应力公式解。因此结合试验和有限元分析结果，对拉螺栓拉应力计算公式中引入了局部屈曲发展系数。

6.2.5 一字形波形钢板混凝土组合墙在轴向压力和弯矩作用下的整体稳定性应按照下列规定计算：

1 受轴向压力作用，其整体受压稳定性按下列规定计算：

$$N \leq N_{u,I} \quad (6.2.5-1)$$

$$N_{u,I} = \varphi_I (A_{cw} f_{cw} + 2A_{cc} f_{cc} + A_{sw} f_{sw} + 2A_{sc} f_{sc}) \quad (6.2.5-2)$$

式中， φ_I ——一字形组合墙受压整体稳定系数，按式(6.2.5-3)计算；

A_{cw} ——波形部分混凝土面积；

A_{cc} ——单侧边缘构件混凝土面积；

A_{sw} ——波形部分钢材毛截面面积；

A_{sc} ——单侧边缘构件钢材毛截面面积；

f_{cw} ——波形部分混凝土抗压强度设计值；

f_{cc} ——边缘构件混凝土抗压强度设计值；

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

f_{sc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

受轴向压力作用的一字形波形钢板混凝土组合墙，其整体稳定系数按下列规定计算：

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1 - 0.835\lambda_1^2 + 0.370\lambda_1^3 & 0 \leq \lambda_1 < 0.8 \\ \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \lambda_1^2}} & \lambda_1 \geq 0.8 \end{cases} \quad (6.2.5-3)$$

式中, ϕ_1 ——一字形组合墙受压整体稳定系数计算参数, 按式(6.2.5-4)计算;

λ_1 ——一字形组合墙受压整体长细比, 按式(6.2.5-5)计算。

$$\phi_1 = 0.50[1 + 0.90(\lambda_1 - 0.46) + \lambda_1^2] \quad (6.2.5-4)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{N_{yk,I}}{N_{cr,I}}} \quad (6.2.5-5)$$

式中, $N_{yk,I}$ ——一字形组合墙全截面塑性承载力标准值, 按式(6.2.5-6)计算;

$N_{cr,I}$ ——一字形组合墙受压整体弹性屈曲荷载, 按式(6.2.5-7)计算。

$$N_{yk,I} = A_{cw} f_{ckw} + 2A_{cc} f_{ckc} + A_{sw} f_{yw} + 2A_{sc} f_{yc} \quad (6.2.5-6)$$

式中, f_{ekw} ——波形部分混凝土抗压强度标准值;

f_{ckc} ——边缘构件混凝土抗压强度标准值;

f_{yw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值;

f_{yc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值;

$$N_{cr,I} = \frac{\pi^2(E_{sw}I_{sw} + E_{cw}I_{cw})}{h^2} + \frac{\pi^2(2E_{sc}I_{sc} + 2E_{cc}I_{cc})}{h^2} \quad (6.2.5-7)$$

式中, E_{sw} ——波形部分钢材的弹性模量;

E_{cw} ——波形部分混凝土的弹性模量;

E_{sc} ——边缘构件钢材的弹性模量；

E_{cc} ——边缘构件混凝土的弹性模量；

I_{sw} ——波形部分的钢板的截面惯性矩；

I_{cw} ——波形部分的混凝土的截面惯性矩；

I_{cc} ——单根钢管混凝土柱的混凝土的截面惯性矩；

I_{sc} ——单根钢管混凝土柱的钢板的截面惯性矩；

h ——组合墙高度。

2 受轴压力和面内弯矩共同作用，其整体压弯稳定性按下列规定计算：

$$\left(\frac{N}{N_{u,l}} \right)^2 + \frac{M}{M_{u,l}} \leq 1 \quad (6.2.5-8)$$

式中， $M_{u,l}$ ——一字形组合墙整体受弯稳定承载力，按式(6.2.5-9)计算；

$$M_{u,l} = (1 - \chi)(N_{c,c} + N_{w,c})b_w + \chi(N_{w,t} + N_{c,t})b_w \quad (6.2.5-9)$$

式中， $N_{c,c}$ ——一字形组合墙边缘构件承受的压力，按式(6.2.5-10)计算；

$N_{w,c}$ ——一字形组合墙波形部分的钢板和混凝土共同承受的压力，按式(6.2.5-11)计算；

$N_{w,t}$ ——一字形组合墙波形部分的钢板承受的拉力，按式(6.2.5-12)计算；

$N_{c,t}$ ——一字形组合墙边缘构件承受的拉力，按式(6.2.5-13)计算；

χ ——中和轴相对位置，按式(6.2.5-14)计算；

$$N_{c,c} = A_{sc,n} f_{sc} + A_{tc} f_{cc} \quad (6.2.5-10)$$

$$N_{w,c} = (1-\chi)(f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}) \quad (6.2.5-11)$$

$$N_{w,t} = \chi f_{sw} A_{sw,n} \quad (6.2.5-12)$$

$$N_{c,t} = A_{sc,n} f_{sc} \quad (6.2.5-13)$$

$$\chi = \frac{f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}}{2 f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}} \quad (6.2.5-14)$$

式中, $A_{sw,n}$ ——波形部分钢材净截面面积;

$A_{sc,n}$ ——单侧边缘构件钢材净截面面积;

【条文说明】一字形波形钢板混凝土组合墙整体稳定性计算模型包括两片波形钢板, 波形钢板中间的混凝土以及两侧边缘构件, 边缘构件一般采用矩形钢管混凝土柱。

弹性屈曲荷载公式考虑两种材料组成的复合截面, 将中间波形部分和两侧边缘构件计算的弹性屈曲荷载进行简单叠加。

对于宽度小于 4m, 厚度不小于 150mm 的一字形组合墙, 在受弯工况下不存在稳定问题, 受弯稳定承载力可按照强度公式进行计算。对于宽度更大或者厚度较小的墙需要单独进行设计。

为简便组合墙受弯承载力计算, 把组合墙波形部分根据面积等效为平钢板组合剪力墙, 等效后保持总面积和宽度不变, 改变钢板和混凝土的厚度。

6.2.6 对于除一字型之外的其他平面布置的波形钢板混凝土组合墙, 包括 T 型、L 型、Z 型、十字型, 除了对其整体稳定进行计算外, 还应考虑其墙肢稳定承载性能。根据各墙肢板件所处位置

和受其他板件的约束情况，墙肢板件的边界条件可视为四边简支或三边简支一边自由，边界条件的确定可按照图 6.2.6 采用。



图 6.2.6 墙肢板件边界条件

【条文说明】 本条文针对一字形以外其他形式布置的组合墙，当组合墙某一墙肢较长或者厚度较小时，组合墙的某一墙肢可能绕与多个墙肢相连的矩形钢管混凝土柱发生面外失稳，面外失稳可能先于整体失稳的发生，需要对组合墙墙肢单独进行验算。

6.2.7 四边简支波形钢板混凝土组合墙在轴向压力和弯矩作用下的整体稳定性应按照下列规定计算：

1 受轴向压力作用，其墙肢受压稳定性按下列规定计算：

$$N \leq N_{u,ps} \quad (6.2.7-1)$$

$$N_{u,ps} = \varphi_{ps} (A_{cw} f_{cw} + A_{sw} f_{sw} + 2A_{bc} f_{sc}) \quad (6.2.7-2)$$

式中， φ_{ps} ——四边简支组合墙受压整体稳定系数，按式(6.2.7-3)

计算；

A_{cw} ——波形部分混凝土面积；

A_{sw} ——波形部分钢材毛截面面积；

A_{bc} ——单块侧板钢材面积，侧板为一块矩形钢板，厚度

与边缘构件钢板厚度相同,长度与组合墙厚度相同;

f_{cw} ——波形部分混凝土抗压强度设计值;

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

f_{sc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

受轴向压力作用的四边简支波形钢板混凝土组合墙,其墙肢稳定系数按下列规定计算:

$$\varphi_{\text{ps}} = \begin{cases} 1 & \lambda_{\text{ps}} \leq 0.35 \\ \frac{1}{\phi_{\text{ps}} + \sqrt{\phi_{\text{ps}}^2 - \lambda_{\text{ps}}^2}} & \lambda_{\text{ps}} > 0.35 \end{cases} \quad (6.2.7-3)$$

式中, ϕ_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢稳定系数计算参数,按式(6.2.7-4)计算;

λ_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢长细比,按式(6.2.7-5)计算。

$$\phi_{\text{ps}} = 0.5 \left[1 + 2(\lambda_{\text{ps}} - 0.35) + \lambda_{\text{ps}}^2 \right] \quad (6.2.7-4)$$

$$\lambda_{\text{ps}} = \sqrt{\frac{N_{\text{yk,ps}}}{N_{\text{cr,ps}}}} \quad (6.2.7-5)$$

式中, $N_{\text{yk,ps}}$ ——四边简支组合墙全截面塑性承载力标准值,按式(6.2.7-6)计算;

$N_{\text{cr,ps}}$ ——四边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲荷载,按式(6.2.7-7)计算。

$$N_{\text{yk,ps}} = A_{\text{cw}} f_{\text{ckw}} + A_{\text{sw}} f_{\text{yw}} + 2A_{\text{bc}} f_{\text{yc}} \quad (6.2.7-6)$$

式中, f_{ckw} ——波形部分混凝土抗压强度标准值;

f_{yw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值;

f_{yc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值；

$$N_{cr,ps} = k_{ps} N_{cr,ps0} \quad (6.2.7-7)$$

$$k_{ps} = \exp \left[\left(0.11 + \frac{0.60}{h/b_w} \right)^{-1} \right] \quad (6.2.7-8)$$

式中， k_{ps} ——四边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲系数；

$N_{cr,ps0}$ ——根据欧拉荷载的形式计算四边简支组合墙屈曲荷载，按式(6.2.7-9)计算；

b_w ——组合墙波形部分宽度；

h ——组合墙高度；

$$N_{cr,ps0} = \frac{\pi^2 (E_{sw} I_{sw} + E_{cw} I_{cw})}{h^2} + \frac{2\pi^2 E_{sc} I_{bc}}{h^2} \quad (6.2.7-9)$$

式中， E_{sw} ——波形部分钢材的弹性模量；

E_{cw} ——波形部分混凝土的弹性模量；

E_{sc} ——边缘构件钢材的弹性模量；

I_{sw} ——波形部分的钢板面内的截面惯性矩；

I_{bc} ——组合墙简支边单块侧板对面内的截面惯性矩；

I_{cw} ——波形部分的混凝土面内的截面惯性矩。

2 受轴压力和面内弯矩共同作用，其墙肢压弯稳定性按下列规定计算：

$$1.7 \left(\frac{N}{N_{u,ps}} \right)^2 - 0.7 \frac{N}{N_{u,ps}} + \frac{M}{M_{u,ps}} \leq 1 \quad (6.2.7-10)$$

式中， $M_{u,ps}$ ——四边简支组合墙墙肢受弯稳定承载力，按式(6.2.7-11)计算；

$$M_{u,s} = (1 - \chi)(N_{c,c} + N_{w,c})b_w + \chi(N_{w,t} + N_{c,t})b_w \quad (6.2.7-11)$$

式中, $N_{c,c}$ ——四边简支组合墙受压侧板承受的压力, 按式

(6.2.7-12)计算;

$N_{w,c}$ ——四边简支组合墙波形部分的钢板和混凝土共同承受的压力, 按式(6.2.7-13)计算;

$N_{w,t}$ ——四边简支组合墙波形部分的钢板承受的拉力, 按式(6.2.7-14)计算;

$N_{c,t}$ ——四边简支组合墙受拉侧板承受的拉力, 按式(6.2.7-15)计算;

χ ——四边简支组合墙受拉区比例系数, 按式(6.2.7-16)计算;

$$N_{c,c} = A_{dc} f_{sc} \quad (6.2.7-12)$$

$$N_{w,c} = (1 - \chi)(f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}) \quad (6.2.7-13)$$

$$N_{w,t} = \chi f_{sw} A_{sw,n} \quad (6.2.7-14)$$

$$N_{c,t} = A_{dc} f_{sc} \quad (6.2.7-15)$$

$$\chi = \frac{f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}}{2f_{sw} A_{sw,n} + f_{cw} A_{cw}} \quad (6.2.7-16)$$

式中, $A_{sw,n}$ ——波形部分钢材净截面面积;

$A_{sc,n}$ ——单侧边缘构件钢材净截面面积;

【条文说明】 四边简支波形钢板混凝土组合墙墙肢稳定计算模型包括两片波形钢板, 波形钢板中间的混凝土以及两侧的侧板,

侧板为一块矩形钢板，厚度与边缘构件采用的钢板厚度相同，长度与组合墙厚度相同。

四边简支组合墙在受弯工况下不存在失稳问题，可以根据强度设计来进行受弯稳定承载力的计算。

对于四边简支的组合墙，当组合墙厚度越大时，轴压稳定性能越好，在压弯工况下也越难失稳，压弯曲线向外凸越明显。

6.2.8 三边简支一边自由波形钢板混凝土组合墙在轴向压力和弯矩作用下的整体稳定性应按照下列规定计算：

1 受轴向压力作用，其墙肢受压稳定性按下列规定计算：

$$N \leq N_{u, pf} \quad (6.2.8-1)$$

$$N_{u, pf} = \varphi_{pf} (A_{cw} f_{cw} + A_{cc} f_{cc} + A_{sw} f_{sw} + A_{sc} f_{sc} + A_{bc} f_{sc}) \quad (6.2.8-2)$$

式中， φ_{pf} ——三边简支组合墙受压整体稳定系数，按式(6.2.8-3)计算；

A_{cw} ——波形部分混凝土面积；

A_{cc} ——单侧边缘构件混凝土面积；

A_{sw} ——波形部分钢材毛截面面积；

A_{sc} ——单侧边缘构件钢材毛截面面积；

A_{bc} ——单块侧板钢材面积，侧板为一块矩形钢板，厚度与边缘构件钢板厚度相同，长度与组合墙厚度相同；

f_{cw} ——波形部分混凝土抗压强度设计值；

f_{cc} ——边缘构件混凝土抗压强度设计值；

f_{sw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

f_{sc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

受轴向压力作用的三边简支一边自由波形钢板混凝土组合墙，其墙

肢稳定系数按下列规定计算：

$$\varphi_{pf} = \begin{cases} 1 & \lambda_{pf} \leq 0.5 \\ \frac{1}{\phi_{pf} + \sqrt{\phi_{pf}^2 - \lambda_{pf}^2}} & \lambda_{pf} > 0.5 \end{cases} \quad (6.2.8-3)$$

式中， ϕ_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢稳定系数计算参数，按式

(6.2.8-4)计算；

λ_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢长细比，按式(6.2.8-5)计算。

$$\phi_{pf} = 0.5 \left[1 + 1.7 (\lambda_{pf} - 0.46) + \lambda_{pf}^2 \right] \quad (6.2.8-4)$$

$$\lambda_{pf} = \sqrt{\frac{N_{yk,pf}}{N_{cr,pf}}} \quad (6.2.8-5)$$

式中， $N_{yk,pf}$ ——三边简支组合墙全截面塑性承载力标准值，按式

(6.2.8-6)计算；

$N_{cr,pf}$ ——三边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲荷载，按式

(6.2.8-7)计算。

$$N_{yk,pf} = A_{cw} f_{ckw} + A_{cc} f_{ckc} + A_{sw} f_{yw} + A_{sc} f_{yc} + A_{bc} f_{yc} \quad (6.2.8-6)$$

式中， f_{ckw} ——波形部分混凝土抗压强度标准值；

f_{ckc} ——边缘构件混凝土抗压强度标准值；

f_{yw} ——波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值；

f_{yc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值；

$$N_{cr,pf} = k_{pf} N_{cr,pf0} \quad (6.2.8-7)$$

$$k_{\text{pf}} = \exp \left[-0.41 + 1.16 \cdot \sqrt{h / (b_w + b_c)} \right] \quad (6.2.8-8)$$

式中, k_{pf} ——三边简支组合墙受压墙肢弹性屈曲系数;

b_w ——组合墙波形部分宽度;

b_c ——单根矩形钢管混凝土柱宽度;

$N_{\text{cr,pf0}}$ ——根据欧拉荷载的形式计算三边简支组合墙屈曲

荷载, 按式(6.2.8-9)计算。

$$N_{\text{cr,pf0}} = \frac{\pi^2 (E_{\text{sw}} I_{\text{sw}} + E_{\text{cw}} I_{\text{cw}})}{h^2} + \frac{\pi^2 (E_{\text{sc}} I_{\text{bc}} + E_{\text{sc}} I_{\text{sc}} + E_{\text{cc}} I_{\text{cc}})}{h^2} \quad (6.2.8-9)$$

式中, E_{sw} ——波形部分钢材的弹性模量;

E_{cw} ——波形部分混凝土的弹性模量;

E_{sc} ——边缘构件钢材的弹性模量;

E_{cc} ——边缘构件混凝土的弹性模量;

I_{sw} ——波形部分的钢板面内的截面惯性矩;

I_{bc} ——组合墙简支边单块侧板对面内的截面惯性矩;

I_{cw} ——波形部分的混凝土的截面惯性矩;

I_{cc} ——单根钢管混凝土柱的混凝土的截面惯性矩;

I_{sc} ——单根钢管混凝土柱的钢板的截面惯性矩。

2 受轴压力和面内弯矩共同作用, 其墙肢压弯稳定性按下列规定计算:

考虑自由侧受压简支侧受压拉:

$$1.3 \left(\frac{N}{N_{\text{u,pf}}} \right)^2 - 0.3 \frac{N}{N_{\text{u,pf}}} + \frac{M}{M_{\text{u,pf}}} \leq 1 \quad (6.2.8-10)$$

考虑自由侧受拉简支侧受压:

$$\frac{N}{N_{u,pf}} + \frac{M}{M_{u,pf}} \leq 1 \quad (6.2.8-11)$$

式中， $M_{u,pf}$ ——三边简支组合墙整体受弯稳定承载力；

考虑自由侧受压简支侧受拉工况，其受弯稳定承载力按式(6.2.8-12)计算：

$$M_{u,pf} = 0.9(1-\chi)(N_{c,c} + N_{w,c})b_w + \chi(N_{w,t} + N_{c,t})b_w \quad (6.2.8-12)$$

式中， $N_{c,c}$ ——三边简支组合墙受压边缘构件承受的压力，按式(6.2.8-13)计算；

$N_{w,c}$ ——三边简支组合墙波形部分的钢板和混凝土共同承受的压力，按式(6.2.8-14)计算；

$N_{w,t}$ ——三边简支组合墙波形部分的钢板承受的拉力，按式(6.2.8-15)计算；

$N_{c,t}$ ——三边简支组合墙受拉侧板承受的拉力，按式(6.2.8-16)计算；

χ ——三边简支组合墙受拉区比例系数，按式(6.2.8-17)计算；

$$N_{c,c} = A_{sc} f_{sc} + A_{cc} f_{cc} \quad (6.2.8-13)$$

$$N_{w,c} = (1-\chi)(f_{sw} A_{sw} + f_{cw} A_{cw}) \quad (6.2.8-14)$$

$$N_{w,t} = \chi f_{sw} A_{sw} \quad (6.2.8-15)$$

$$N_{c,t} = A_{bc} f_{sc} \quad (6.2.8-16)$$

$$\chi = \frac{(3A_{dc} - 4A_{sc})f_{sw} + 3(f_{sw}A_{sw} + f_{cw}A_{cw})}{7f_{sw}A_{sw} + 3f_{cw}A_{cw}} \quad (6.2.8-17)$$

考虑自由侧受拉简支侧受压工况，其稳定承载力按式(6.2.8-18)计算：

$$M_{u,pf} = 0.75(1-\chi)(N_{c,c} + N_{w,c})b_w + \chi(N_{w,t} + N_{c,t})b_w \quad (6.2.8-18)$$

式中， $N_{c,c}$ ——三边简支组合墙受压侧板承受的压力，按式(6.2.8-19)计算；

$N_{w,c}$ ——三边简支组合墙波形部分的钢板和混凝土共同承受的压力，按式(6.2.8-20)计算；

$N_{w,t}$ ——三边简支组合墙波形部分的钢板承受的拉力，按式(6.2.8-21)计算；

$N_{c,t}$ ——三边简支组合墙受拉边缘构件钢板承受的拉力，按式(6.2.8-22)计算；

χ ——三边简支组合墙受拉区比例系数，按式(6.2.8-23)计算：

$$N_{c,c} = A_{dc} f_{sc} \quad (6.2.8-19)$$

$$N_{w,c} = (1-\chi)(f_{sw}A_{sw} + f_{cw}A_{cw}) \quad (6.2.8-20)$$

$$N_{w,t} = \chi f_{sw} A_{sw} \quad (6.2.8-21)$$

$$N_{c,t} = A_{sc} f_{sc} \quad (6.2.8-22)$$

$$\chi = \frac{(9A_{dc} - 10A_{sc})f_{sw} + 9(f_{sw}A_{sw} + f_{cw}A_{cw})}{19f_{sw}A_{sw} + 9f_{cw}A_{cw}} \quad (6.2.8-23)$$

【条文说明】三边简支一边自由波形钢板混凝土组合墙墙肢稳定计算模型包括两片波形钢板，波形钢板中间的混凝土以及自由侧的边缘构件和简支边的侧板，边缘构件一般为矩形钢管混凝土柱，侧板为一块矩形钢板，厚度与边缘构件采用的钢板厚度相同，长度与组合墙厚度相同。

三边简支一边自由组合墙有两种受弯工况，分别是组合墙自由侧受压和自由侧受拉。在两种工况下对于高度较大和厚度较小的组合墙都有可能发生稳定性破坏，在对参数范围内的组合墙进行受弯承载力计算后，采用下包络的方式设计受弯承载力，简化计算的同时偏于安全。

6.2.9 T形平面布置波形钢板混凝土组合墙在轴向压力和弯矩作用下的整体稳定性应按下列规定计算：

1 受轴向压力作用时，T形平面布置波形钢板混凝土组合墙发生绕非对称轴弯曲屈曲的稳定承载力按下列规定计算：

$$N \leq N_{u,T} \quad (6.2.9-1)$$

$$N_{u,T} = \varphi_T (A_{cf} f_{cf} + A_{cw} f_{cw} + 4A_{cc} f_{cc} + A_{sf} f_{sf} + A_{sw} f_{sw} + 4A_{sc} f_{sc}) \quad (6.2.9-2)$$

式中， φ_T ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压整体稳定系数，按式(6.2.9-3)计算：

A_{cf} ——翼缘墙肢波形部分混凝土面积；

A_{cw} ——腹板墙肢波形部分混凝土面积；

A_{cc} ——边缘构件混凝土面积；

A_{sf} ——翼缘墙肢波形部分钢材毛截面面积；

A_{sw} ——腹板墙肢波形部分钢材毛截面面积；

A_{sc} ——边缘构件钢材毛截面面积；

f_{cf} ——翼缘墙肢波形部分混凝土的轴心抗压强度设计值；

f_{cw} ——腹板墙肢波形部分混凝土的轴心抗压强度设计值；

f_{cc} ——边缘构件混凝土的轴心抗压强度设计值；

f_{sf} ——翼缘墙肢波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

f_{sw} ——腹板墙肢波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值；

f_{sc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值。

T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压整体稳定系数按下列规定计算：

$$\varphi_T = \begin{cases} 1 - 0.972\lambda_T^2 + 0.310\lambda_T^3 & \lambda_T \leq 0.7 \\ \frac{1}{\phi_T + \sqrt{\phi_T^2 - \lambda_T^2}} & \lambda_T > 0.7 \end{cases} \quad (6.2.9-3)$$

式中， ϕ_T ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受压墙肢稳定系数计算参数，按式(6.2.9-4)计算；

λ_T ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙长细比，按式(6.2.9-5)计算。

$$\phi_T = 0.5 \left[1 + 0.922(\lambda_T - 0.260) + \lambda_T^2 \right] \quad (6.2.9-4)$$

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{N_{yk,T}}{N_{cr,T}}} \quad (6.2.9-5)$$

式中， $N_{yk,T}$ ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙全截面塑性承载力标准值，按式(6.2.9-6)计算；

$N_{cr,T}$ ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙绕非对称轴

弯曲屈曲受压弹性屈曲荷载，按式(6.2.9-7)。

$$N_{yk,T} = A_{sf} f_{yf} + A_{sw} f_{yw} + 4A_{sc} f_{yc} + A_{cf} f_{ckf} + A_{cw} f_{ckw} + 4A_{cc} f_{ckc} \quad (6.2.9-6)$$

式中， f_{ckf} ——翼缘墙肢波形部分混凝土的轴心抗压强度标准值；

f_{ckw} ——腹板墙肢波形部分混凝土的轴心抗压强度标准值；

f_{ckc} ——边缘构件混凝土的轴心抗压强度标准值；

f_{yf} ——翼缘墙肢波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值；

f_{yw} ——腹板墙肢波形部分钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值；

f_{yc} ——边缘构件钢材的抗拉抗压和抗弯强度标准值。

$$N_{cr,T} = \frac{\pi^2 (E_{cf} I_{cf} + E_{cw} I_{cw} + E_{cc} \sum I_{cc} + E_{sf} I_{sf} + E_{sw} I_{sw} + E_{sc} \sum I_{sc})}{h^2} \quad (6.2.9-7)$$

式中， E_{cf} ——翼缘墙肢波形部分混凝土的弹性模量；

E_{cw} ——腹板墙肢波形部分混凝土的弹性模量；

E_{cc} ——边缘构件混凝土的弹性模量；

E_{sf} ——翼缘墙肢波形部分钢材的弹性模量；

E_{sw} ——腹板墙肢波形部分钢材的弹性模量；

E_{sc} ——边缘构件钢材的弹性模量；

I_{cf} ——翼缘墙肢波形部分的混凝土绕组合墙形心轴的截面惯性矩；

I_{cw} ——腹板墙肢波形部分的混凝土绕组合墙形心轴的截面惯性矩；

$\sum I_{cc}$ ——全部边缘构件混凝土绕组合墙形心轴的截面惯

性矩；

I_{sf} ——翼缘墙肢波形部分的钢板绕组合墙形心轴的截面惯性矩；

I_{sw} ——腹板墙肢波形部分的钢板绕组合墙形心轴的截面惯性矩；

$\sum I_{sc}$ ——全部边缘构件钢材绕组合墙形心轴的截面惯性矩；

h ——组合墙高度。

2 受轴向压力和腹板墙肢面内弯矩共同作用，T形平面布置波形钢板混凝土组合墙的压弯稳定性按下列规定计算：

$$\frac{N}{N_{u,T}} + \frac{M}{(1 - 0.8N / N'_{cr,T}) M_{u,T}} \leq 1 \quad (6.2.9-8)$$

$$N'_{cr,T} = N_{cr,T} / 1.1 \quad (6.2.9-9)$$

式中， $M_{u,T}$ ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受弯承载力，按式(6.2.9-10)计算。

3 受腹板墙肢面内弯矩作用，T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受弯承载力按下列规定计算：

$$M_{u,T} = \eta_T M_{u,Ts} + M_{u,Tc} \quad (6.2.9-10)$$

式中， η_T ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材受弯承载力调整系数；

$M_{u,Ts}$ ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材受弯承载力；

$M_{u,Tc}$ ——T形平面布置波形钢板混凝土组合墙混凝土受弯承载力。

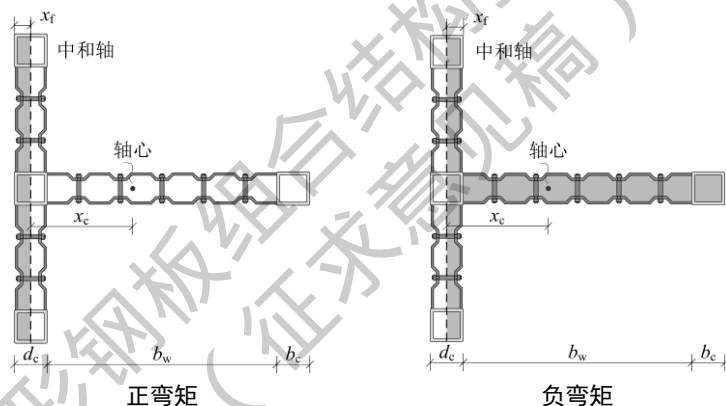
如图 6.2.9 所示, 当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内正弯矩作用时, η_T 取为 1; 当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内负弯矩作用时, η_T 按式(6.2.9-11)计算

$$\eta_T = 1 - \frac{1 - 1 / (1.14 + 1.54n)}{1.18 + 0.803b_w / b_f} \quad (6.2.9-11)$$

式中, n —— T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙轴压比设计值;

b_w —— 腹板墙肢波形部分宽度;

b_f —— 翼缘墙肢波形部分宽度。



(a) 中和轴位于翼缘墙肢混凝土部分

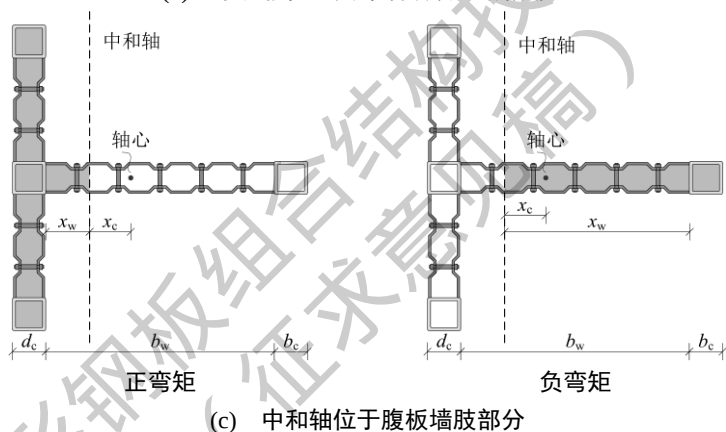
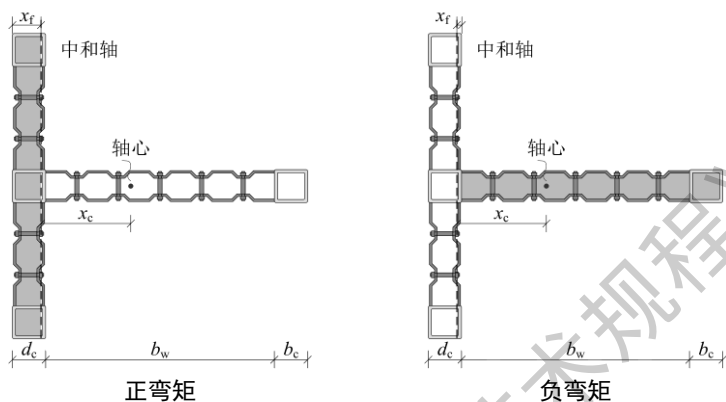


图 6.2.9 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙中和轴位置

如图 6.2.9(a)所示,当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内正弯矩作用且中和轴位于翼缘墙肢混凝土部分时, T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材和混凝土的受弯承载力按式(6.2.9-12)和式(6.2.9-13)计算:

$$\begin{aligned}
M_{u,Ts} = & (A_{sf} f_{sf} + 6b_c t_c f_{sc}) \frac{d_f}{2} \\
& + A_{sw} f_{sw} \left(d_f + \frac{b_w}{2} - x_f - x_c \right) \\
& + A_{sc} f_{sc} \left(d_f + b_w + \frac{b_c}{2} - x_f - x_c \right) \\
& + 6d_c t_c f_{sc} \left[\frac{x_0^2 + (d_f - x_0)^2}{2d_f} + \left(\frac{2x_f}{d_f} - 1 \right) x_c \right]
\end{aligned} \tag{6.2.9-12}$$

$$M_{u,Tc} = A_{cf} f_{cf} \frac{x_f}{d_f} \left(\frac{x_f}{2} + x_c \right) + 3A_{cc} f_{cc} \frac{x_f}{d_f} \left(\frac{x_f}{2} + x_c \right) \tag{6.2.9-13}$$

$$x_f = d_f \frac{A_{sw} f_{sw} + A_{sc} f_{sc} + 6d_c t_c f_{sc}}{12d_c t_c f_{cc} + A_{cf} f_{cf} + 3A_{cc} f_{cc}} \tag{6.2.9-14}$$

式中, d_f ——翼缘墙肢波形部分厚度;

d_w ——腹板墙肢波形部分厚度;

b_w ——腹板墙肢波形部分宽度;

d_c ——边缘构件厚度;

b_c ——边缘构件宽度;

t_c ——边缘构件钢板厚度;

x_f ——翼缘墙肢部分的受压区高度;

x_c ——中和轴和形心之间的距离。

如图 6.2.9(c)所示,当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内正弯矩作用且中和轴位于腹板墙肢部分时, T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材和混凝土的受弯承载力按式(6.2.9-15)和式(6.2.9-16)计算:

$$\begin{aligned}
 M_{u,Ts} = & A_{sf} f_{sf} \left(\frac{d_f}{2} + x_0 + x_c \right) \\
 & + A_{sw} f_{sw} \left[\frac{x_w^2 + (b_w - x_w)^2}{2b_w} + \left(\frac{2x_w}{b_w} - 1 \right) x_c \right] \\
 & + A_{sc} f_{sc} \left(\frac{3d_f}{2} + b_w + \frac{b_c}{2} + 2x_w + 2x_c \right)
 \end{aligned} \quad (6.2.9-15)$$

$$\begin{aligned}
 M_{u,Tc} = & (A_{cf} f_{cf} + 3A_{cc} f_{cc}) \left(\frac{d_f}{2} + x_w + x_c \right) \\
 & + A_{cw} f_{cw} \frac{x_w}{b_w} \left(\frac{x_w}{2} + x_c \right)
 \end{aligned} \quad (6.2.9-16)$$

$$x_w = b_w \frac{A_{sw} f_{sw} - A_{sf} f_{sf} - 2A_{sc} f_{sc} - A_{cf} f_{cf} - 3A_{cc} f_{cc}}{2A_{sw} f_{sw} + A_{cw} f_{cw}} \quad (6.2.9-17)$$

式中， x_w ——腹板墙肢部分的受压区高度。

如图 6.2.9(a)所示，当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内负弯矩作用且中和轴位于翼缘墙肢混凝土部分时，T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材和混凝土的受弯承载力按式 (6.2.9-18) 和式 (6.2.9-19) 计算：

$$\begin{aligned}
 M_{u,Ts} = & (A_{sf} f_{sf} + 6b_c t_c f_{sc}) \frac{d_f}{2} + A_{sw} f_{sw} \left(\frac{b_w}{2} + x_f - x_c \right) \\
 & + A_{sc} f_{sc} \left(b_w + \frac{b_c}{2} + x_f - x_c \right) \\
 & + 6d_c t_c f_{cc} \left[\frac{x_f^2 + (d_f - x_f)^2}{2d_f} - \left(\frac{2x_f}{d_f} - 1 \right) x_c \right]
 \end{aligned} \quad (6.2.9-18)$$

$$M_{u,Tc} = A_{cf} f_{cf} \frac{x_f}{d_f} \left(\frac{x_f}{2} - x_c \right) + A_{cw} f_{cw} \left(\frac{b_w}{2} + x_f - x_c \right) + A_{cc} f_{cc} \left[\frac{3x_f}{d_f} \left(\frac{x_f}{2} - x_c \right) + \left(b_w + \frac{b_c}{2} + x_f - x_c \right) \right] \quad (6.2.9-19)$$

$$x_f = d_f \frac{6d_{cf} f_{sc} - A_{sw} f_{sw} - A_{sc} f_{sc} - A_{cw} f_{cw} - A_{cc} f_{cc}}{12d_{cf} f_{sc} + A_{cf} f_{cf} + 3A_{cc} f_{cc}} \quad (6.2.9-20)$$

如图 6.2.9(c)所示, 当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内负弯矩作用且中和轴位于腹板墙肢部分时, T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙钢材和混凝土的受弯承载力按式(6.2.9-21)和式(6.2.9-22)计算:

$$M_{u,Ts} = A_{sf} f_{sf} \left(\frac{d_f}{2} + b_w - x_w + x_c \right) + A_{sw} f_{sw} \left[\frac{x_w^2 + (b_w - x_w)^2}{2b_w} - \left(\frac{2x_w}{b_w} - 1 \right) x_c \right] + A_{sc} f_{sc} \left(\frac{3d_f}{2} + 3b_w + \frac{b_c}{2} - 2x_w + 2x_c \right) \quad (6.2.9-21)$$

$$M_{u,Tc} = A_{cw} f_{cw} \frac{x_w}{b_w} \left(\frac{x_w}{2} - x_c \right) + A_{cc} f_{cc} \left(\frac{b_c}{2} + x_w - x_c \right) \quad (6.2.9-22)$$

$$x_w = b_w \frac{A_{sf} f_{sf} + A_{sw} f_{sw} + 2A_{sc} f_{sc} - A_{cc} f_{cc}}{2A_{sw} f_{sw} + A_{cw} f_{cw}} \quad (6.2.9-23)$$

如图 6.2.9(b)所示, 当 T 形平面布置波形钢板混凝土组合墙受面内弯矩作用且中和轴位于翼缘墙肢波形钢板部分时, 可按上述规定先计算出中和轴位于翼缘墙肢部分波形钢板波谷和波峰时

对应的轴力和弯矩承载力，然后通过轴力的线性插值得到受弯承载力

【条文说明】T形平面布置波形钢板混凝土组合墙墙肢稳定计算模型包括翼缘墙肢部分、腹板墙肢部分和墙肢部分端部的边缘构件，边缘构件一般为矩形边缘构件。T形平面布置波形钢板混凝土组合墙有两种受弯工况，分别是翼缘墙肢部分受较大压力的正弯矩和腹板墙肢部分受较大压力的负弯矩。当T形平面布置波形钢板混凝土组合墙受负弯矩作用时，钢材部分的受弯承载力没有达到全截面塑性受弯承载力，因此引入钢材受弯承载力调整系数加以修正。在两种工况下对于高度较大和厚度较小的组合墙都有可能发生稳定性破坏，在对参数范围内的组合墙进行压弯承载力计算后，采用下包络的方式设计压弯承载力，简化计算的同时偏于安全。

6.3 波形钢板墙设计

6.3.1 单波形钢板墙的受剪稳定承载力应按下列规定计算：

1 单波形钢板墙的受剪稳定承载力应按式(6.3.1-1)计算。

$$V \leq V_u \quad (6.3.1-1)$$
$$V_u = \varphi_s \cdot t_w b f_{vy}$$

式中， V_u ——单波形钢板墙的受剪稳定承载力；

φ_s ——单波形钢板墙的受剪稳定系数；

t_w ——单片波形钢板厚度；

b ——单波形钢板墙的宽度；

f_{vy} ——钢材的受剪屈服强度。

2 单波形钢板墙的刚度常数应按式(6.3.1-2)计算。

$$D_x = \frac{E_s t_w a^2}{2b_0} \left(q_1 + \frac{q_2}{3\cos\gamma} \right)$$

$$D_y = \frac{b_0}{s} \cdot \frac{E_s t_w^3}{12(1-\mu_s^2)} \quad (6.3.1-2)$$

$$H = \frac{s}{b_0} \cdot \frac{E_s t_w^3}{12(1+\mu_s)}$$

式中, D_x, D_y ——波形钢板在强轴和弱轴方向上的弯曲刚度常数;

H ——波形钢板的扭转刚度常数;

E_s ——钢材的杨氏模量;

μ_s ——钢材的泊松比;

a ——波形钢板的波幅;

q_1 ——波形钢板波峰段(或波谷段)宽度;

q_2 ——波形钢板倾斜段的水平宽度;

γ ——波形钢板倾斜段的倾角;

b_0 ——波形钢板重复波形的波长, 按式(6.3.1-3)计算;

s ——波形钢板重复波形的展开长度, 按式(6.3.1-3)计算;

$$b_0 = 2q_1 + 2q_2 \quad (6.3.1-3)$$

$$s = 2q_1 + \frac{2q_2}{\cos\gamma}$$

3 单波形钢板墙的受剪稳定系数应按式(6.3.1-4)计算。

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.148\lambda_{n,s}^2 & \lambda_{n,s} \leq 0.8 \\ \left[\Phi_m - \sqrt{\Phi_m^2 - 4\lambda_{n,s}^2} \right] / 2\lambda_{n,s}^2 & 0.8 < \lambda_{n,s} \leq 1.05 \\ 0.637 / \lambda_{n,s} & \lambda_{n,s} > 1.05 \end{cases} \quad (6.3.1-4)$$

$$\Phi_m = 0.5 + 0.68\lambda_{n,s} + \lambda_{n,s}^2$$

式中, $\lambda_{n,s}$ ——单波形钢板墙的正则化宽高比, 按式(6.3.1-5)计算;

Φ_m ——受剪稳定系数中间变量。

$$\lambda_{n,s} = \sqrt{\frac{t_w b f_{vy}}{V_{cr}}} \quad (6.3.1-5)$$

式中, V_{cr} ——单波形钢板墙受剪弹性屈曲荷载, 按式(6.3.1-6)计算。

$$V_{cr} = k_b \cdot \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{b} \quad (6.3.1-6)$$

式中, k_b ——单波形钢板墙受剪弹性屈曲系数, 按式(6.3.1-7)计算。

$$k_b = (7 + 20\theta)\beta^2 + 8\beta + 61.2 + 29.5\theta$$

$$\theta = \frac{H}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (6.3.1-7)$$

$$\beta = \frac{b}{h} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}}$$

式中, θ ——单波形钢板墙的刚度常数比;

β ——单波形钢板墙的等效宽高比;

h ——单波形钢板墙的高度。

6.3.2 竖向加劲波形钢板墙的受剪稳定承载力应按下列规定计算:

1 竖向加劲波形钢板墙的受剪稳定承载力应按式(6.3.2-1)

计算。

$$V \leq V_u \quad (6.3.2-1)$$

$$V_u = \varphi_s \cdot t_w b f_{vy}$$

式中, V_u ——竖向加劲波形钢板墙的极限受剪承载力;

φ_s ——竖向加劲波形钢板墙的受剪稳定系数;

b ——竖向加劲波形钢板墙的宽度;

f_{vy} ——钢材的受剪屈服强度。

2 竖向加劲波形钢板墙的刚度常数与单波形钢板墙的刚度常数相同, 按 6.3.1 节计算。

3 竖向加劲波形钢板墙的受剪稳定系数应按式(6.3.2-2)计算。

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.137 \lambda_{n,s}^2 & \lambda_{n,s} \leq 0.8 \\ 0.73 / \lambda_{n,s} & \lambda_{n,s} > 0.8 \end{cases} \quad (6.3.2-2)$$

式中, $\lambda_{n,s}$ ——竖向加劲波形钢板墙的正则化宽高比, 按式(6.3.2-3)计算。

$$\lambda_{n,s} = \sqrt{\frac{t_w b f_{vy}}{V_{cr}}} \quad (6.3.2-3)$$

式中, V_{cr} ——竖向加劲波形钢板墙受剪弹性屈曲荷载, 按式(6.3.2-4)计算。

$$V_{cr} = k_b \cdot \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{b} \quad (6.3.2-4)$$

式中, k_b ——竖向加劲波形钢板墙受剪弹性屈曲系数, 按式

(6.3.2-5)计算。

$$k_b = (7 + 20\theta)\beta^2 + 16\beta + 180 + 100\theta$$

$$\theta = \frac{H}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (6.3.2-5)$$

$$\beta = \frac{b}{h} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}}$$

式中, θ ——竖向加劲波形钢板墙的刚度常数比;

β ——竖向加劲波形钢板墙的等效宽高比;

h ——竖向加劲波形钢板墙的高度。

4 竖向加劲波形钢板墙的加劲肋的截面应满足式(6.3.2-6)。

$$E_s I_a + E_s A_a \cdot \left(\frac{a}{2} + b_s \right)^2 > 25 D_y b \quad (6.3.2-6)$$

式中, I_a ——单个加劲肋的截面惯性矩

A_a ——单个加劲肋的截面面积;

b_s ——加劲肋中性轴到波形钢板板面的距离。

6.3.3 平行对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力应按下列规定计算:

1 平行对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力应按式(6.3.3-1)计算。

$$V \leq V_u \quad (6.3.3-1)$$

$$V_u = \varphi_s \cdot 2t_w b f_{vy}$$

式中, V_u ——平行对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力;

φ_s ——平行对扣双波形钢板墙的受剪稳定系数；

b ——平行对扣双波形钢板墙的宽度；

f_{vy} ——钢材的受剪屈服强度。

2 平行对扣双波形钢板墙的刚度常数，单块非对称波形钢板刚度常数应按式(6.3.3-2)计算。

$$\begin{aligned}
 D_x &= \frac{E_s}{6b_0} \cdot [(q_1 + q_3)t_w^3 + 4(2q_0 + 3q_1)t_w a^2] \\
 D_y &= \frac{b_0}{q_3 + \frac{q_0^2 + 2q_0 q_1}{2q_0 + 3q_1}} \cdot \frac{E_s t_w^3}{6(1 - \mu_s^2)} \\
 H &= \frac{2E_s t_w}{b_0 s(1 + \mu_s)} \cdot a^2 (q_1 + q_2)^2 \\
 D_{x1} &= \frac{E_s}{b_0} \cdot \left[\frac{(q_1 + q_3)t_w^3}{12} + \left(\frac{2}{3}q_0 + q_1 - \frac{(q_0 + q_1)^2}{s} \right) a^2 t_w \right] \\
 D_{y1} &= \frac{b_0}{s} \cdot \frac{E_s t_w^3}{12(1 - \mu_s^2)} \\
 H_1 &= \frac{s}{b_0} \cdot \frac{E_s t_w^3}{12(1 + \mu_s)}
 \end{aligned} \tag{6.3.3-2}$$

式中， D_x, D_y ——平行对扣双波形钢板在强轴和弱轴方向上的弯曲刚度常数；

H ——平行对扣双波形钢板的扭转刚度常数；

D_{x1}, D_{y1} ——单块非对称波形钢板在强轴和弱轴方向上的弯曲刚度常数；

H_1 ——单块非对称波形钢板的扭转刚度常数；

E_s ——钢材的杨氏模量；

μ_s ——钢材的泊松比；

t_w ——单片波形钢板厚度；

a ——波形钢板的波幅；

q_1 ——波形钢板波峰段宽度；

q_2 ——波形钢板倾斜段的水平宽度；

q_3 ——波形钢板波谷段宽度；

q_0 ——波形钢板倾斜段的宽度；

γ ——波形钢板倾斜段的倾角；

b_0 ——波形钢板重复波形的波长，按式(6.3.3-3)计算；

s ——波形钢板重复波形的展开长度，按式(6.3.3-3)计算；

$$b_0 = q_1 + 2q_2 + q_3 \quad (6.3.3-3)$$

$$s = q_1 + 2q_0 + q_3$$

2 平行对扣双波形钢板墙的受剪稳定系数应按式(6.3.3-4)计算。

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.170\lambda_{n,s}^2 & \lambda_{n,s} \leq 0.64 \\ 0.595/\lambda_{n,s} & \lambda_{n,s} > 0.64 \end{cases} \quad (6.3.3-4)$$

式中， $\lambda_{n,s}$ ——平行对扣双波形钢板墙的正则化宽高比，按式(6.3.3-5)计算；

$$\lambda_{n,s} = \sqrt{\frac{2t_w b f_{vy}}{V_{cr}}} \quad (6.3.3-5)$$

式中， V_{cr} ——平行对扣双波形钢板墙受剪弹性屈曲荷载，按式(6.3.3-6)计算。

$$V_{cr} = k_b \cdot \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{b} \quad (6.3.3-6)$$

式中， k_b ——平行对扣双波形钢板墙受剪弹性屈曲系数，按式(6.3.3-7)计算。

$$k_b = \omega k_{b,0}$$

$$\omega = 1 - \frac{\eta^{1.1} \cdot (1 - \omega_1)}{\eta^{1.1} + 0.08 \cdot (1 - \eta)^{1.1}}$$

$$\eta = \frac{d_2}{b}$$

$$\omega_1 = \frac{k_{b,1}}{k_{b,0}} \cdot 2 \sqrt[4]{\frac{D_{x1}^3 D_{y1}}{D_x^3 D_y}}$$

$$k_{b,1} = 121 - 38.4\theta_1 + 345\theta_1^2 - 162\beta_1 + 168\beta_1^2 - 19.0\beta_1^3 \quad (6.3.3-7)$$

$$k_{b,0} = 96.5 + 6.36\theta - 0.444\theta^2 - 110\beta + 115\beta^2 + 40.5\theta\beta$$

$$\theta = \frac{H}{\sqrt{D_x D_y}}$$

$$\beta = \frac{b}{h} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}}$$

$$\theta_1 = \frac{H_1}{\sqrt{D_{x1} D_{y1}}}$$

$$\beta_1 = \frac{b}{h} \sqrt[4]{\frac{D_{y1}}{D_{x1}}}$$

式中, $k_{b,0}$ ——平行对扣双波形钢板墙在螺栓密布情况下的受剪弹性屈曲系数;

$k_{b,1}$ ——非对称单波形钢板墙的受剪弹性屈曲系数;

ω ——螺栓分布折减系数;

ω_1 ——没有螺栓情况下的螺栓分布折减系数;

η ——螺栓间距系数;

d_2 ——两排螺栓之间的间距;

θ ——平行对扣双波形钢板墙的刚度常数比;

β ——平行对扣双波形钢板墙的等效宽高比;

θ_1 ——非对称单波形钢板墙的刚度常数比;

β_1 ——非对称单波形钢板墙的等效宽高比;

h ——平行对扣双波形钢板墙的高度。

6.3.4 正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力应按下列规定计算:

1 正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力应按式(6.3.4-1)计算。

$$V \leq V_u \quad (6.3.4-1)$$

$$V_u = \varphi_s \cdot 2t_w b f_{vy}$$

式中, V_u ——正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力;

φ_s ——正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定系数;

b ——正交对扣双波形钢板墙的宽度;

f_{vy} ——钢材的受剪屈服强度。

2 正交对扣双波形钢板墙的刚度常数, 单块非对称波形钢板刚度常数应按式(6.3.4-2)计算。

$$D_{x1} = \frac{E_s}{b_0} \cdot \left[\frac{(q_1 + q_3)t_w^3}{12} + \left(\frac{2}{3}q_0 + q_1 - \frac{(q_0 + q_1)^2}{s} \right) a^2 t_w \right]$$

$$D_x = D_{x1} + \frac{E_s t_w^3 b_0}{12(1 - \mu_s^2)} \frac{\left(\frac{2}{3}q_0 + q_1 \right) s + 3(q_0 + q_1)^2}{\left(\frac{2}{3}q_0 + q_1 \right) s^2 - (q_0 + q_1)^2 s} \quad (6.3.4-2)$$

$$H = 1.82 \sqrt{\frac{t_w}{a}} \cdot \frac{E_s t_w a^2}{1 + \mu_s} \cdot \frac{(q_1 + q_2)^2}{b_0(s + b_0)}$$

式中, D_x ——正交对扣双波形钢板在强轴方向上的弯曲刚度常数

H ——正交对扣双波形钢板的扭转刚度常数;

D_{x1} ——单块非对称波形钢板在强轴方向上的弯曲刚度常数;

E_s ——钢材的杨氏模量;

μ_s ——钢材的泊松比;

t_w ——单片波形钢板厚度;

a ——波形钢板的波幅;

q_1 ——波形钢板波峰段宽度;

q_2 ——波形钢板倾斜段的水平宽度;

q_3 ——波形钢板波谷段宽度;

q_0 ——波形钢板倾斜段的宽度;

γ ——波形钢板倾斜段的倾角;

b_0 ——波形钢板重复波形的波长, 按式(6.3.4-3)计算;

s ——波形钢板重复波形的展开长度, 按式(6.3.4-3)计算;

$$b_0 = q_1 + 2q_2 + q_3 \quad (6.3.4-3)$$

$$s = q_1 + 2q_0 + q_3$$

3 正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定系数应按式(6.3.4-4)计算。

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 & \lambda_{n,s} \leq 0.3 \\ -0.0588\lambda_{n,s} + 1.018 & 0.3 < \lambda_{n,s} < 2.0 \\ 0.9 & \lambda_{n,s} \geq 2.0 \end{cases} \quad (6.3.4-4)$$

式中, $\lambda_{n,s}$ ——正交对扣双波形钢板墙的正则化宽高比, 按式(6.3.4-5)计算;

$$\lambda_{n,s} = \sqrt{\frac{2t_w b f_{vy}}{V_{cr}}} \quad (6.3.4-5)$$

式中, V_{cr} ——正交对扣双波形钢板墙受剪弹性屈曲荷载, 按式(6.3.4-6)计算。

$$V_{cr} = k_b \cdot \frac{D_x}{b} \quad (6.3.4-6)$$

式中, k_b ——正交对扣双波形钢板墙受剪弹性屈曲系数, 按式(6.3.4-7)计算。

$$k_b = \omega k_{b,0}$$

$$\omega = C_0 + C_1 \cdot \frac{h}{b} + C_2 \cdot \frac{t_w}{a} + C_3 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 + C_4 \cdot \left(\frac{t_w}{a}\right)^2 + C_5 \cdot \frac{h}{b} \cdot \frac{t_w}{a} \quad (6.3.4-7)$$

$$k_{b,0} = (11.6\beta^2 + 8.2\beta)(-28.6\theta^2 + 28.4\theta + 0.7)$$

$$\theta = \frac{H}{\sqrt{D_x D_y}}$$

$$\beta = \frac{b}{h} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}}$$

式中, $k_{b,0}$ ——正交对扣双波形钢板墙在螺栓密布情况下的受剪弹性屈曲系数;

ω ——螺栓分布折减系数;

$C_0 \sim C_5$ ——拟合系数, 按表 6.3.4 取值;

θ ——正交对扣双波形钢板墙的刚度常数比;

β ——正交对扣双波形钢板墙的等效宽高比;

h ——正交对扣双波形钢板墙的高度。

表 6.3.4 折减系数的拟合参数

n	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
2	0.876	-0.419	-0.0334	0.214	-0.613	0.854
3	0.528	-0.405	2.46	0.117	-6.28	0.806
4	0.407	-0.232	1.57	0.109	-0.766	-0.472
5	0.416	-0.177	0.390	0.0770	2.14	-0.365

注: n 为相邻两列螺栓之间的波形钢板的波数。

6.3.5 平行或正交对扣双波形钢板墙的对拉螺栓承载力应按式 (6.3.5-1) 计算。

$$V_b = \frac{b_0 d_2 \cdot A_b \sqrt{(K_1 + K_2)^2 + (L_1 + L_2)^2}}{2(1 - V_u/V_{cr})} < f_v^b \cdot A_b \quad (6.3.5-1)$$

式中, V_b ——对拉螺栓截面剪力;

A_b ——对拉螺栓截面积;

b_0, d_2 ——对拉螺栓的竖向和水平向间距;

A_0 ——面外几何初始缺陷幅值, 可按照墙板高度的 1/500 取值;

V_u ——平行或正交对扣双波形钢板墙的受剪稳定承载力, 依据双波形钢板为平行或正交放置, 分别按式 (6.3.3-1)或式(6.3.4-1)计算;

V_{cr} ——平行或正交对扣双波形钢板墙的受剪弹性屈曲荷载, 依据双波形钢板为平行或正交放置, 分别按式 (6.3.3-6)或式(6.3.4-6)计算;

K_1, K_2, L_1, L_2 ——对拉螺栓剪力计算参数, 按式(6.3.5-2)计算。

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\pi^3}{ab^3s^2} \cdot [C_1D_x \cdot (4s^2 + 3\alpha^2b^2) + C_2H \cdot b^2] \\ K_2 &= \frac{\pi^3}{2ab^2s^3} \cdot [C_1D_x \cdot (12s^2 + \alpha^2b^2) + C_2H \cdot b^2] \\ L_1 &= \frac{2\pi^3\alpha}{abs^2} \cdot C_2H \end{aligned} \quad (6.3.5-2)$$

$$L_2 = \frac{\pi^3}{2ab^2s^3} \cdot [C_1D_y \cdot b^2 + C_2H \cdot (4s^2 + \alpha^2b^2)]$$

式中, b ——平行或正交对扣双波形钢板墙的宽度;

a ——波形钢板的波幅;

D_x, D_y, H ——平行或正交对扣双波形钢板墙的刚度常数,

依据双波形钢板为平行或正交放置, 分别按式 (6.3.3-2)或式(6.3.4-2)计算;

α, s_1 ——平行或正交对扣双波形钢板墙的受剪屈曲变形参数, 按式(6.3.5-3)计算;

C_1, C_2 ——波形钢板尺寸参数, 按式(6.3.5-4)计算。

$$\alpha = (0.117\theta + 0.646) \cdot \sqrt[4]{D_y/D_x} \quad (6.3.5-3)$$

$$s_1 = (0.139\theta + 0.688)b \cdot \sqrt[4]{D_y/D_x}$$

$$C_1 = \frac{3(q_0 + q_1)}{2(2q_0 + 3q_1)}, \quad C_2 = \frac{q_1 + 2q_2 + q_3}{4(q_1 + q_2)} \quad (6.3.5-4)$$

式中, θ ——平行或正交对扣双波形钢板墙的刚度常数比, 依据双波形钢板为平行或正交放置, 分别按式(6.3.3-7)或式(6.3.4-7)计算;

q_1, q_2, q_3, q_0 ——波形钢板的几何参数。

【条文说明】 试验和有限元分析均表明, 承受剪力作用的平行或正交对扣双波形钢板墙的对拉螺栓内力以剪力为主, 因此, 相关设计条文主要关注对拉螺栓的受剪承载力设计。通过对对拉螺栓及双波形钢板单位微元体的应力分析, 获得对拉螺栓剪切内力的理论解, 并通过有限元分析和试验对理论结果进行了比较验证。

6.4 框架梁与柱设计

6.4.1 框架梁和钢框架柱按现行《钢结构设计标准》GB50017、《建筑抗震设计规范》GB50011、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 等现行标准设计。

6.4.2 钢管混凝土柱应按《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3、《钢管混凝土结构技术规范》GB50936、《组合结构设计规范》JGJ380 等现行标准设计。

6.5 楼盖设计

6.5.1 楼盖体系应具有良好的整体性和水平刚度。楼盖结构选型应符合下列规定：

1 宜采用压型钢板现浇钢筋混凝土组合楼板、钢筋桁架现浇钢筋混凝土组合楼板或现浇钢筋混凝土楼板等现浇混凝土楼盖体系。

2 6、7度且房屋高度不超过 50m 时，也可采用装配整体式钢筋混凝土楼板，或装配式楼板及其它轻型楼盖。

3 8、9度时或结构高度超过 50m 时，宜采用现浇混凝土楼盖体系。

4 房屋顶层、结构转换层和加强层、大底盘多塔结构的裙房顶层以及地下室顶板，应采用现浇混凝土楼盖体系。

6.5.2 楼盖与钢梁、波形钢板混凝土组合墙之间应可靠连接；当采用装配式楼板或其它轻型楼盖时，应将楼板预埋件与钢梁上翼缘、波形钢板混凝土组合墙搁置板进行焊接，或采取其它保证楼盖整体性的措施。

6.5.3 楼板设计除满足本节要求外，应按《混凝土结构设计规范》GB50010、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3、《组合结构设计规范》JGJ380 等现行标准设计。

7 连接与节点设计

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于波形钢板组合结构连接节点的构造和设计。

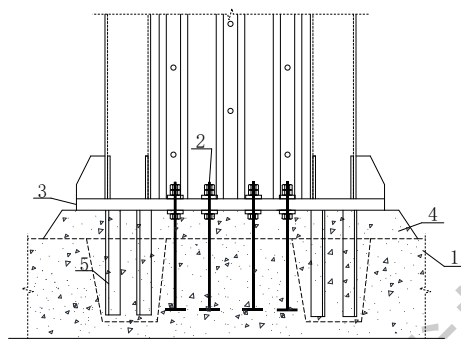
7.1.2 波形钢板组合结构的连接节点构造应保证内力的有效传递，应保证节点域具有足够的刚度。

7.1.3 波形钢板混凝土组合墙，其侧边缘构件应具有足够的刚度和强度，以保证墙体能够充分发挥其承载性能；特别是波形钢板混凝土组合墙的侧边缘构件与连梁的连接节点应保证构造合理，传力顺畅，安全可靠。

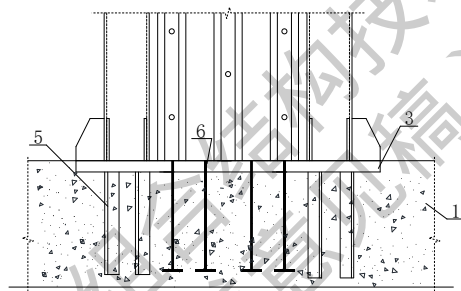
7.2 波形钢板混凝土组合墙连接节点设计

7.2.1 波形钢板混凝土组合墙与基础连接宜采用外露式，并应保证连接承载力不低于波形钢板混凝土组合墙的承载力设计值；抗震设计时连接的极限承载力应大于波形钢板混凝土组合墙的塑性承载力。

1 波形钢板混凝土组合墙与基础连接可按照图 7.2.1-1 进行设计，可采用锚栓式节点、预埋式节点。



(a) 锚栓式节点



(b) 预埋式节点

1—基础底板 2—锚栓 3—底板 4—二次浇筑混凝土 5—边缘构件型钢
锚件 6—波形组合墙板锚件

图 7.2.1-1 墙肢与基础外露式连接节点

2 波形钢板组合墙与基础外露式连接节点的承载力设计值验算满足式(7.2.1-1)、(7.2.1-2)要求；抗震设计时且应满足式(7.2.1-3)塑性承载力要求。

$$f_{a1} A_{a1} \geq \eta f A_{sc} \quad (7.2.1-1)$$

$$f_{a2} A_{a2} \geq f A_{sw} \quad (7.2.1-2)$$

$$f_{au1}A_{a1} + f_{au2}A_{a2} \geq 1.2 f_y A_s \quad (7.2.1-3)$$

式中, A_s ——边缘构件钢材和波形部分钢材总面积;

A_{sw} ——波形部分钢材面积;

A_{sc} ——边缘构件钢材面积;

A_{a1} ——边缘构件型钢锚件截面面积;

A_{a2} ——波形组合墙板锚件或锚栓截面面积;

f ——钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值;

f_{a1} ——边缘构件型钢锚件抗拉强度设计值;

f_{a2} ——波形组合墙板锚件或锚栓抗拉强度设计值;

f_y ——钢材的屈服强度设计值;

f_{au1} ——边缘构件型钢锚件极限抗拉强度最小值;

f_{au2} ——波形组合墙板锚件或锚栓极限抗拉强度最小值;

η ——边缘构件承载力放大系数, 抗震等级一级、二级、三级, 分别取 1.3、1.2、1.1, 抗震等级四级与非抗震时, 取 1.0。

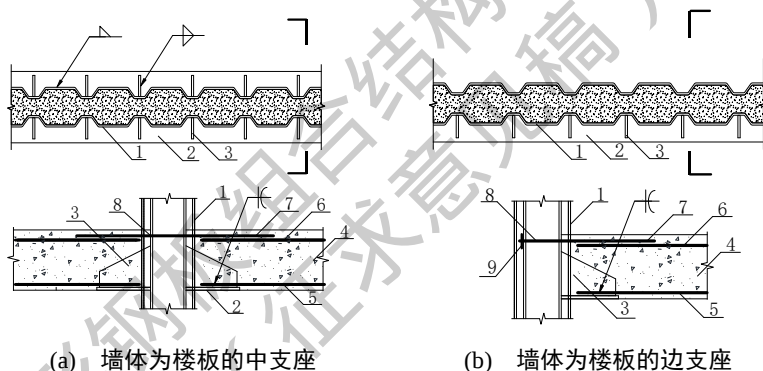
3 波形钢板混凝土组合墙底部的剪力可由底板与混凝土之间的摩擦力传递, 摩擦系数取 0.4; 当剪力大于底板下的摩擦力时, 应设置抗剪键, 由抗剪键承受全部剪力。

4 波形钢板混凝土组合墙与基础连接节点应符合下列构造要求:

- 1) 边缘构件型钢锚件可采用角钢、槽钢或钢管, 当采用钢管时, 截面宽度和高度宜与边缘构件相同, 底板上需预留浇筑孔, 埋入深度不小于边缘构件长边尺寸的 2.5 倍;

- 2) 波形组合墙板锚件可采用锚筋、钢板、角钢、槽钢、钢板或其他型钢；当采用锚筋时，材质不宜低于HRB400，并应满足混凝土规范埋件章节的相关规定；
- 3) 底板材质不宜低于波形钢板组合墙钢构件材质；当采用锚筋或锚栓时，底板厚度不宜小于锚栓或锚筋直径的0.8倍；
- 4) 采用锚栓式节点时，边缘构件型钢锚件位置需预留槽，预留槽内和后浇层混凝土宜采用微膨胀自密实混凝土，强度等级宜较基础混凝土提高一级。

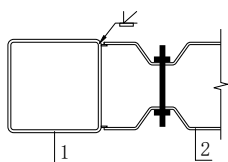
7.2.2 波形钢板混凝土组合墙与楼板连接可按照图 7.2.2 进行。



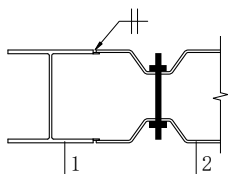
1—墙板 2—搁置板 3—加劲肋 4—楼板 5—楼板下层钢筋 6—楼板上层钢筋 7—支座钢筋 8—组合墙预留孔 9—钢筋固定措施

图 7.2.2 墙肢与楼板连接节点

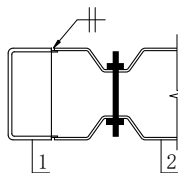
7.2.3 波形钢板混凝土组合墙的波形钢板与边柱连接应根据边柱形式采用不同的节点形式，可按照图 7.2.3 进行。



(a) 矩形钢管边柱



(b) H 型钢边柱

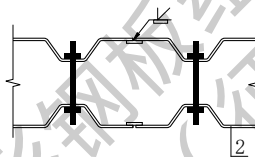


(c) 槽钢边柱

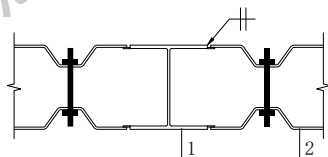
1—边柱 2—波形钢板

图 7.2.3 波形钢板与边柱连接节点

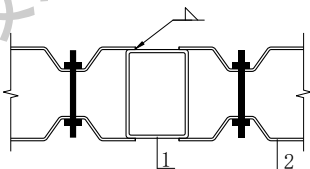
7.2.4 波形钢板混凝土组合墙中波形钢板的水平拼接可按照图 7.2.4 进行。



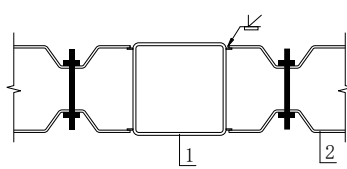
(a) 焊接拼接节点



(b) H 型钢拼接节点



(c) 矩形钢管拼接节点 1



(d) 矩形钢管拼接节点 2

1—拼接件 2—波形钢板

图 7.2.4 波形钢板水平拼接节点

7.2.5 波形钢板混凝土组合墙的竖向拼接可按照图 7.2.5 进行, 并应满足下列要求:

- 1 施工现场完成的拼接位置宜取在楼面以上 1.3 米处;
- 2 横隔板的厚度不宜小于上下墙波形钢板厚度的较大值加 2mm, 且不宜小于 16mm;
- 3 当上节墙体厚度小于下节墙体厚度, 且上下节组合墙波形钢板边距 $s_d \leq 25\text{mm}$ 时, 横隔板的厚度 t_h 应满足式(7.2.5)的要求。

$$t_h \geq s_d - t_1 + t_2 \quad (7.2.5)$$

式中: t_h ——横隔板的厚度;

s_d ——上下节组合墙波形钢板边距;

t_1 ——上下节组合墙边缘构件钢板厚度的较大值;

t_2 ——上下节组合墙边缘构件钢板厚度的较小值。

- 3 当上节墙体厚度小于下节墙体厚度, 且上下节组合墙波形钢板边距 $s_d > 25\text{mm}$ 时, 需设置加劲肋, 横隔板厚度同第 2 款要求。

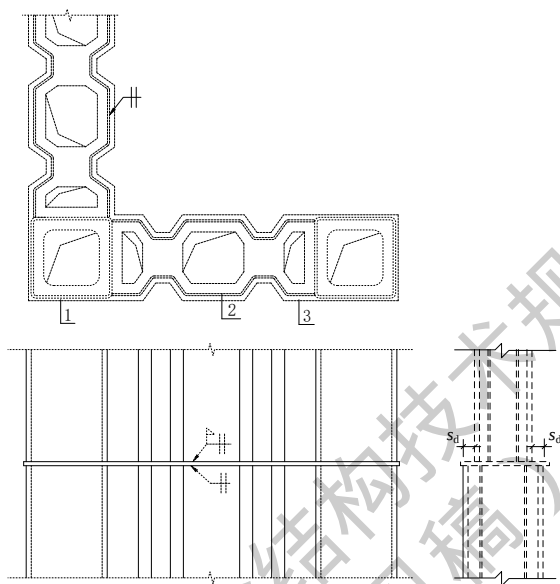
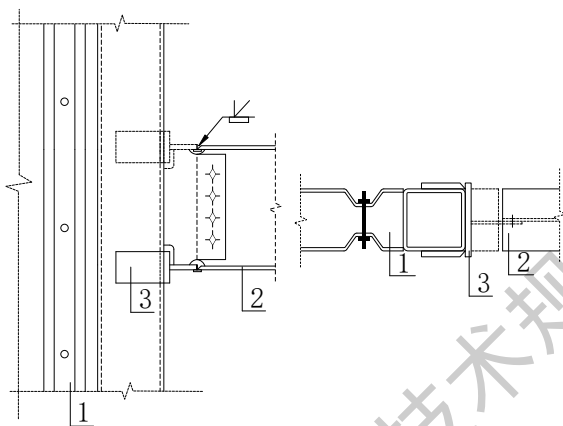


图 7.2.5 波形钢板竖向拼接节点

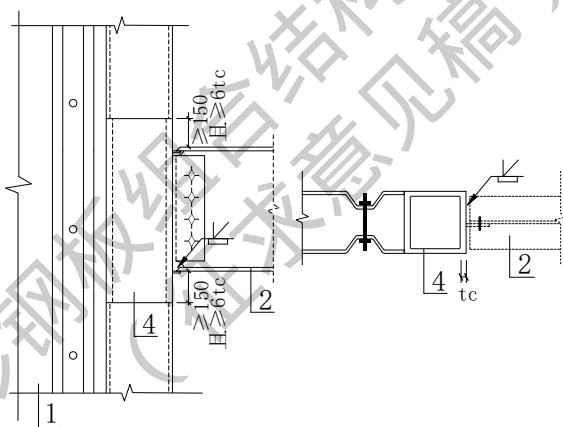
1—边柱 2—波形钢板 3—横隔板

7.2.6 波形钢板组合结构中墙体与连梁连接可采用刚性连接节点或铰接连接节点形式。

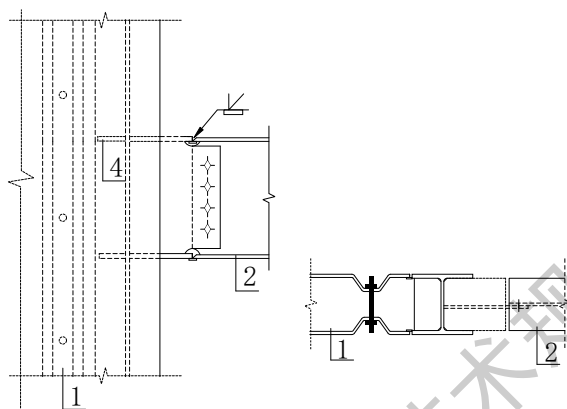
1 采用刚性连接节点时，按照图 7.2.6-1 中的节点形式设计。



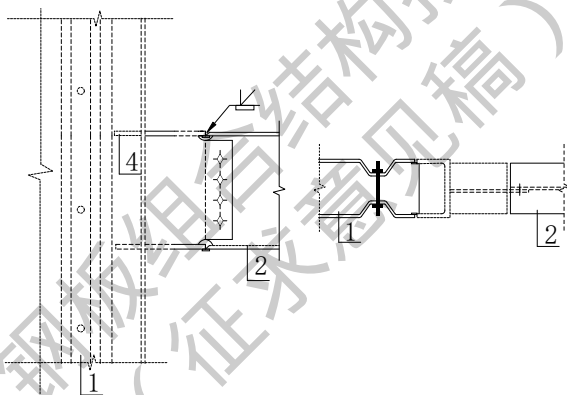
(a) 矩形钢管边缘构件贴板式刚性连接节点



(b) 矩形钢管边缘构件局部加厚刚性连接节点



(c) H 型钢边缘构件刚性连接节点

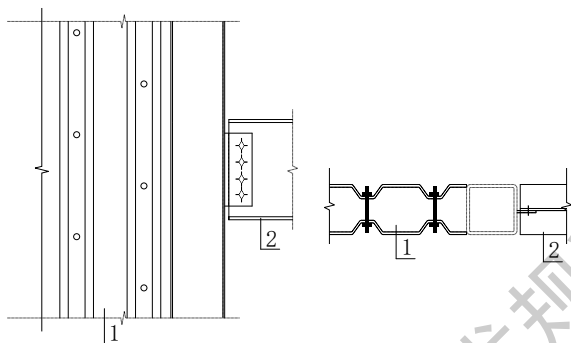


(d) 槽型钢边缘构件刚性连接节点

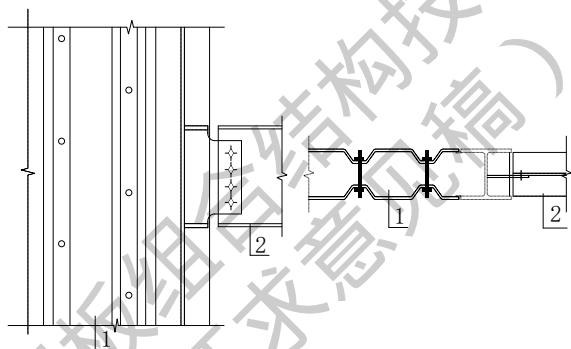
1—墙板 2—钢连梁 3—贴板 4—节点加厚区 5—隔板

图 7.2.6-1 墙肢与连梁刚性连接节点

2 采用铰接连接节点时,按照图 7.2.6-2 中的节点形式设计。



(a) 铰接连接节点 1



(b) 铰接连接节点 2

1—墙肢 2—钢连梁

图 7.2.6-2 墙肢与连梁铰接连接节点

3 贴板式节点的侧板截面应满足承载力要求，节点受弯承载力按照式(7.2.6-1)计算。

$$\alpha M_p \leq M_{uj} = \left(\frac{4}{\sqrt{3}} f_{sc} t_c \sqrt{d_c t_c} + 2 f_{sp} l_p t_p \right) (h_b - t_{bf}) \quad (7.2.6-1)$$

式中， α ——钢构件连接的连接系数，按《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99 的有关规定计算；

M_p ——梁的全塑性受弯承载力；

$M_{u,j}$ ——节点受弯承载力；

f_{sc} ——边缘构件钢材抗拉抗压和抗弯强度设计值；

t_c ——边缘构件钢板厚度；

d_c ——单根边缘构件厚度；

f_{sp} ——贴板抗拉抗压和抗弯强度设计值；

l_p ——贴板高度；

t_p ——贴板厚度；

h_b ——钢梁高度；

t_{bf} ——钢梁翼缘厚度。

【条文说明】贴板式节点正弯矩承载力分别考虑了钢管混凝土柱翼缘和柱腹板贴板的抗弯作用，根据屈服线机制推导。

4 贴板和边缘构件之间的角焊缝应符合式(7.2.6-2)的要求。

$$\frac{\alpha M_p}{(h_b - t_{bf}) h_e \sum l_w} \leq f_t^w \quad (7.2.6-2)$$

式中， h_e ——贴板与边缘构件钢管之间角焊缝的计算厚度；

$\sum l_w$ ——贴板与边缘构件钢管之间角焊缝的总长度；

f_t^w ——角焊缝强度设计值。

5 贴板式节点的贴板高度不宜小于 $12t_c$ ，且贴板厚度应符合式(7.2.6-3)的要求。

$$t_p \geq \max \left\{ \sqrt{\frac{6\beta M_b}{f_{sp}(h_b - t_{bf})}}, \sqrt{\frac{4\alpha\beta M_p}{f_{sp}(h_b - t_{bf})}} \right\} \quad (7.2.6-3)$$

式中， M_b ——节点梁端弯矩；

β ——弯矩调整系数，根据表 7.2.6 取值。

表 7.2.6 贴板节点弯矩调整系数

d_c/l_p	β	d_c/l_p	β
0	0.0484	1.0	0.0505
0.5	0.0504	1.2	0.0420
0.6	0.0524	1.4	0.0319
0.7	0.0540	1.6	0.0227
0.8	0.0544	1.8	0.0155
0.9	0.0532	2.0	0.0101

【条文说明】在翼缘拉力的作用下，贴板厚度应保证贴板满足承载力要求。

6 边缘构件局部加厚的刚性连接节点，加厚区域范围伸出梁上下翼缘外应不小于 150mm 且不小于 $6t_c$ ，连接计算按现行《钢结构设计标准》GB50017 进行设计，且对母材和焊缝均应根据有效宽度进行强度计算。

7.3 波形钢板墙连接节点设计

7.3.1 框架-单波形钢板墙结构和框架竖向加劲波形钢板墙结构中，内嵌波形钢板与边缘梁柱构件可采用焊接连接或螺栓连接形式。

1 对于采用焊接连接形式的节点，可按照图 7.3.1-1 进行。

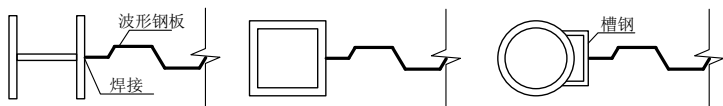


图 7.3.1-1 框架-单波形钢板墙结构连接节点（焊接连接形式）

2 对于采用螺栓连接形式的节点,可按照图 7.3.1-2 进行。

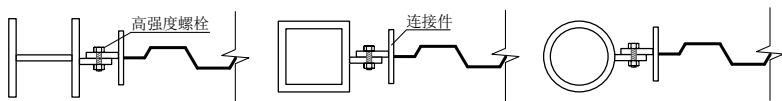


图 7.3.1-2 框架-单波形钢板墙结构连接节点 (螺栓连接形式)

7.3.2 框架-平行对扣双波形钢板墙结构中,内嵌波形钢板与边缘梁柱构件可采用焊接连接或螺栓连接形式。

1 对于采用焊接连接形式的节点,可按照图 7.3.2-1 进行。

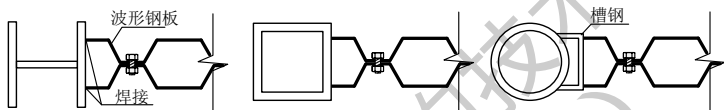


图 7.3.2-1 框架-平行对扣双波形钢板墙结构连接节点

(焊接连接形式)

2 对于采用螺栓连接形式的节点,可按照图 7.3.2-2 进行。

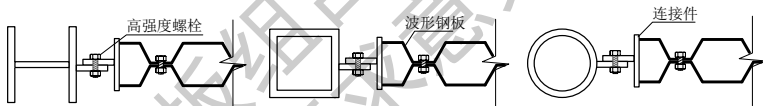


图 7.3.2-2 框架-平行对扣双波形钢板墙结构连接节点

(螺栓连接形式)

7.3.3 框架-正交对扣双波形钢板墙结构中,内嵌波形钢板与边缘梁柱构件可采用焊接连接或螺栓连接形式。

1 对于采用焊接连接形式的节点,可按照图 7.3.3-1 进行。

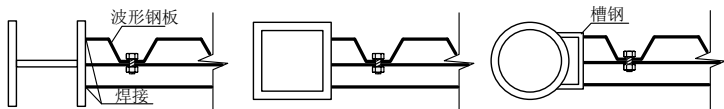


图 7.3.3-1 框架-正交对扣双波形钢板墙结构连接节点

(焊接连接形式)

2 对于采用螺栓连接形式的节点，可按照图 7.3.3-2 进行。

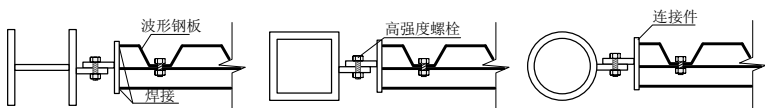


图 7.3.3-2 框架-正交对扣双波形钢板墙结构连接节点
(螺栓连接形式)

7.4 其他连接节点

7.4.1 梁柱连接节点应按《钢结构设计标准》GB50017、《建筑抗震设计规范》GB50011、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99、《组合结构设计规范》JGJ380 等现行标准设计。

8 防火设计

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于波形钢板组合结构的防火设计。

8.1.2 应用在波形钢板组合结构中的构件,除本规范有关规定外,尚应符合现行国家与行业标准《建筑设计防火规范》GB50016、《建筑钢结构防火技术规范》GB51249、《钢结构防火涂料应用技术规范》CECS24、《钢结构防火涂料》GB14907 的规定。

8.2 波形钢板组合结构防火设计

8.2.1 波形钢板组合结构的防火设计可选用防火涂料或防火板材,相应构件的耐火极限应符合下列规定:

1 波形钢板组合结构的耐火等级应按《建筑设计防火规范》GB50016 确定;

2 波形钢板组合结构中构件的耐火极限不应低于表 8.2.1 的规定。

表 8.2.1 波形钢板组合结构构件的耐火极限 (h)

构件名称	耐火等级	
	一级	二级
波形钢板墙、波形钢板混凝土组合墙	3.0	2.5
柱	3.0	2.5
梁	2.0	1.5
楼盖	1.5	1.0
屋顶承重构件	1.5	1.0

楼梯	1.5	1.0
----	-----	-----

注：建筑物中的楼梯间和电梯井的墙、防火墙、住宅分户墙、疏散走道两侧的隔墙、非承重外墙、房间隔墙、吊顶等按现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016 的要求执行。

8.2.2 当采用防火涂料时，可选用膨胀型防火涂料和非膨胀型防火涂料两类，选用产品均应通过国家检测机构检测合格。

8.2.3 膨胀型防火涂料和非膨胀型防火涂料的主要技术性能和技术指标应符合《钢结构防火涂料》GB14907 的要求。

8.2.4 采用钢结构防火涂料时，应符合下列规定：

- 1 室内隐蔽构件，宜选用非膨胀型防火涂料；
- 2 设计耐火极限大于 1.5h 的构件，不宜选用膨胀型防火涂料；
- 3 室外、半室外钢结构采用膨胀型防火涂料时，应选用符合环境对其性能要求的产品；
- 4 非膨胀型防火涂料涂层的厚度不应小于 10mm；
- 5 防火涂料与防腐涂料应相容、匹配。

【条文说明】 参考《建筑钢结构防火技术规范》GB51249 中钢结构防火涂料的相关规定。

8.2.5 用于保护波形钢板组合结构的防火涂料应不含石棉，不用苯类溶剂，在施工干燥后应没有刺激性气味；不腐蚀钢材，在预定的使用期内须保持其性能。

8.2.6 防火涂料的涂层厚度，应按《建筑设计防火规范》GB50016、《建筑钢结构防火技术规范》GB51249 等现行国家规范进行设计。

8.2.7 施加给波形钢板组合结构的涂层质量，应计算在结构荷载

内，不得超过允许范围。

8.2.8 波形钢板混凝土组合墙的防火保护层构造措施应满足《建筑钢结构防火技术规范》GB51249 以及下列要求的规定：

1 当使用非膨胀型防火涂料且保护层最薄处厚度大于25mm时,可设置与墙体可靠连接的钢丝网或其他有效措施防止保护层脱落。

2 当防火保护层采用水泥砂浆或其他混合砂浆时，应设置需与墙体可靠连接的钢丝网或其他更加有效的措施防止保护层脱落。

3 当防火保护层采用蒸压加气混凝土防火板时，防火板底面、防火板之间应采用防火材料填缝，并由射钉或自钻孔螺钉固定。

8.2.9 保护裸露波形钢板组合结构以及露天波形钢板组合结构的防火涂层，应规定出外观平整度和颜色装饰要求。

8.2.10 选用防火板材时，应符合下列要求：

1 按耐火极限和保护层厚度要求，可分别选用防火薄板或防火厚板，其分类可按照表 8.2.10-1 确定：

表 8.2.10-1 防火板的分类及性能特点

性能特点 分 类		密度 (kg/m³)	厚度 (mm)	抗折强度 (MPa)	导热系数 [W/(m.K)]
厚度	防火薄板	400~1800	5~20	—	0.16~0.35
	防火厚板	300~500	20~50	—	0.05~0.23
密度	低密度板	<450	20~50	0.8~2.0	—
	中密度板	450~800	20~30	1.5~10	—
	高密度板	>800	9~20	>10	—

2 防火板材应为不燃性（A 级）材料，并应具有产品鉴定证书，以及国家指定的防火材料检测机构提供的产品耐火性能检测报告，产品厂家应有消防监督部门核发的生产许可证。

3 采用防火板对波形钢板组合结构进行防火保护时，生产厂家需提供产品的导热系数、密度和比热等技术参数。常用防火板主要技术性能参数可按照表 8.2.10-2 选用。

表 8.2.10-2 常用防火板主要技术性能参数

防火板类型	外形尺寸 (mm)	密度 (kg/m ³)	最高使用 温度 (°C)	导热系数 [W/(m.K)]	执行标准
纸面石膏板	3600×1200 ×(9~18)	800	600	0.19 左右	GB/T 9775
纤维增强 水泥板	2800×1200 ×(4~8)	1700	600	0.35 左右	JC 412
纤维增强 硅酸钙板	3000×1200 ×(5~20)	1000	600	0.28	JC/T 564
蛭石防火板	1000×610 ×(20~65)	430	1000	0.11 左右	—
硅酸钙防火板	2440×1220 ×(12~50)	400	1100	≤0.08	—
玻镁平板	2500×1250 ×(10~15)	1200 ~1500	600	≤0.29	JC 688

4 防火板的接缝构造（单层板或多层板）和接缝材料均应具有不低于防火板的防火性能。

【条文说明】 参考《钢结构住宅设计规范》CECS261 中的相关规定。

9 制作与安装

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于波形钢板组合结构制作与安装过程中的设计。

9.2 构件制作误差控制

9.2.1 波形钢板轧制所用的钢板应满足《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 709 的相关规定。

9.2.2 波形钢板的波幅偏差的最大值 $\Delta_1 = |a_1 - a_2|$ 与 $\Delta_2 = |a_1 - a_3|$ ，不应超过 1mm，且不应超过波幅的 1/10，波长偏差最大值 $\Delta_3 = |q_1 - q_2|$ 不应超过 2mm。

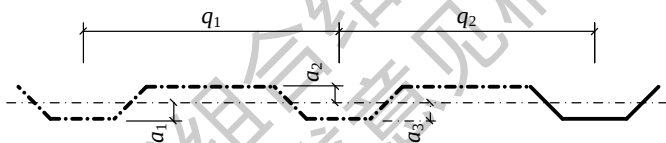


图 9.2.2 波形钢板轧制偏差示意

9.2.3 螺栓连接构件的栓孔孔径应符合设计要求，高强度螺栓连接构件制孔允许偏差应符合《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82 的规定；普通螺栓连接构件制孔允许偏差应符合《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定，螺栓孔孔壁表面粗糙度 Ra 不应大于 25 μ m。

9.2.4 螺栓孔竖向、水平向孔距的允许偏差应符合表 9.2.4 的规定。

表 9.2.4 螺栓孔竖向、水平向孔距允许偏差 (mm)

螺栓孔竖向孔距范围	250~500	500~1200
-----------	---------	----------

螺栓孔竖向孔距允许偏差	±1.0	±1.5
螺栓孔水平向孔距允许偏差	±0.5	

9.2.5 钢构件焊接应按《钢结构焊接规范》GB 50661 的规定执行，焊接加工件及焊缝允许偏差，见表 9.2.5-1，9.2.5-2，9.2.5-3。

表 9.2.5-1 焊接连接拼装的允许偏差（mm）

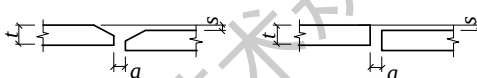
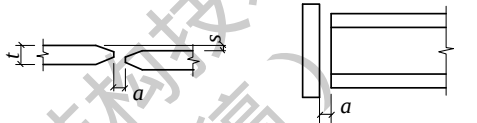
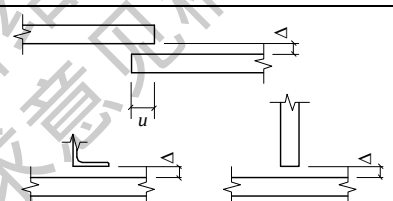
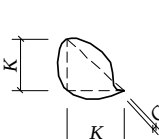
项目		允许偏差	图例
边缘高差（s）		$t/10$ 且不大于 2.0	
对接 间隙 （a）	手工焊、气 体保护焊	±1.0	
	埋弧焊	1.0	
搭接长度（u）		5.0	
顶接缝隙（Δ）		1.5	

表 9.2.5-2 非熔透组合焊缝和角焊缝外形尺寸的允许偏差（mm）

项目	示意图	允许偏差	
		$K \leq 6$	$K > 6$
焊脚尺寸(K)		+1.5 0	+3.0 0

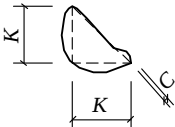
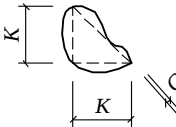
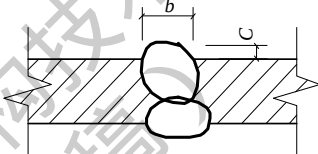
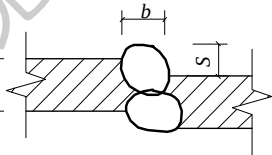
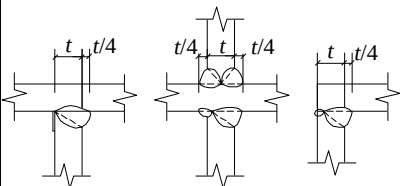
角焊缝余高(C)	 	+1.5 0	+3.0 0
----------	---	-----------	-----------

表 9.2.5-3 对接焊缝和组合焊缝的外形尺寸的允许偏差 (mm)

项目	质量标准		示意图
	一、二级	三级	
对接焊缝余高 (C)	$b < 20$ $C = 1.5 \pm 1.0$	$b < 20$ $C = 1.5 \pm 1.5$	
	$b \geq 20$ $C = 2.0$ $+1.0$ -1.5	$b \geq 20$ $C = 2.0$ $+1.5$ -2.0	
对接焊缝错边 (S)	$S < 0.1t$ 但不得大于 2.0	$S < 0.15t$ 但不得大于 3.0	
熔透的组合焊缝焊脚尺寸 (K)	$K \geq t/4$	$+4$ 0	

9.3 构件安装误差控制

9.3.1 建筑物的定位轴线、基础轴线和标高、地脚螺栓的规格及其紧固应符合设计要求。

9.3.2 支承面、地脚螺栓（锚栓）的允许偏差应符合表 9.3.2 的规

定。

表 9.3.2 支承面、地脚螺栓（锚栓）的允许偏差（mm）

项目		允许偏差
支承面	标高	± 2.0
地脚螺栓（锚栓）	螺栓中心偏移	2.0
	螺栓露出长度	$+10.0$ 0
	螺栓长度	$+20.0$ 0

【条文说明】参考《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的相关规定。

9.3.3 本章节未规定的构件安装偏差，应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

9.4 构件安装稳定性控制

9.4.1 一字形的波形钢板混凝土组合墙，在其底部连接刚度较弱或墙高度较大时，安装时应该设置临时侧向支撑或缆风绳等防倾覆措施。必要时，进行波形钢板混凝土组合墙及临时支撑的稳定计算。

9.4.2 波形钢板混凝土组合墙的混凝土浇筑应在结构安装完成、检测合格后进行。

9.5 结构除锈与防腐涂装

9.5.1 应用在建筑结构中的波形钢板组合构件，其防腐蚀设计应按照《工业建筑防腐蚀设计规范》GB50046 及《建筑钢结构防腐

技术规程》JGT-T 251 的规定执行。在强腐蚀介质环境下不得使用波形腹板构件，否则应有可靠的涂装预防措施。

9.5.2 钢构件的除锈方法、除锈等级和涂层的种类、厚度、涂装方法，应考虑构件的基材种类、钢材表面原始状态、构件所处的环境、涂层的预期耐蚀寿命和工程造价等因素综合确定。

9.5.3 无论是采用手工除锈还是喷射或抛射除锈，钢构件表面的除锈等级首先不应低于现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定》GB/T8923.1 中除锈等级的最低要求，其次还不应低于各种底漆或防腐漆要求的最低除锈等级要求，见表 9.5.3。

表 9.5.3 各种底漆或防腐漆要求的最低除锈等级

涂料品种	除锈等级
醇酸等底漆或防腐漆	St2
高氯化聚乙烯、氯化橡胶、氯磺化聚乙烯、环氧树脂、聚氨酯等底漆或者防锈漆	Sa2
无机富锌漆、有机硅、过氯乙烯等底漆	Sa2.5

9.5.4 钢结构涂装工程应在构件制作质量经检验符合标准后进行。

9.5.5 清理后的钢结构表面应及时涂刷底漆，表面处理与涂装之间的间隔时间不宜超过 4h，车间作业或相对湿度较低的晴天不应超过 12h。否则，应对经预处理的有效表面采用干净牛皮纸、塑料膜等进行保护。涂装前如发现表面被污染或返锈，应重新清理至原要求的表面清洁度等级。

9.5.6 涂装应在适宜的温度、湿度和清洁环境中进行，并应符合下列规定：

- 1 施工环境温度宜为 $5^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不宜大于 85%；
- 2 钢材表面温度应高于露点 3°C 以上；
- 3 在大风、雨、雾、雪天、有较大灰尘及强烈阳光照射下，不宜进行室外施工；

- 4 当施工环境通风较差时，应采取强制通风。

- 5 涂膜固化时间与环境温度、相对湿度和涂装品种有关，每道涂层涂装后，表面至少在 4 小时内不得被雨淋和沾污。

9.5.7 构件涂底漆后，应在明显位置标注构件代号。

9.5.8 需在工地拼装焊接的钢结构，其焊缝两侧应先涂刷不影响焊接性能的车间底漆或暂时不涂底漆，焊接完毕后应对焊缝热影响区进行二次表面清理，并应按设计要求进行重新涂装。

9.5.9 应在图纸中注明对涂层进行定期的检查和维护，以保证构件的耐久性。

9.5.10 除锈和涂装工程验收应包括在中间检查和竣工验收中。

9.6 混凝土浇筑

9.6.1 波形钢板组合结构混凝土的浇筑，应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB50666、《钢管混凝土结构技术规范》50936 的有关规定。

9.6.2 波形钢板组合墙内混凝土宜采用从顶部向下浇筑，不可采用泵送顶升浇筑法。

9.6.3 波形钢板组合墙内混凝土浇筑应符合下列规定：

- 1 粗骨料粒径不应大于 20mm；
- 2 混凝土应采取减少收缩的技术措施；
- 3 混凝土最大倾落高度不宜大于 9m；当倾落高度大于 9m 时，宜采用串筒、溜槽或溜管等辅助装置进行浇筑；

4 一次浇筑高度不宜大于 12m;

5 混凝土从波形钢板组合墙顶向下浇筑时应符合下列要求:

- 1) 浇筑应有足够的下料空间, 并使混凝土充满整个波形钢板组合墙;
- 2) 每段波形钢板组合墙内混凝土应连续浇筑, 且应控制浇筑速度和单次下料量, 浇筑面至波形钢板组合墙顶面的距离不宜大于对拉螺栓的竖向间距;
- 3) 混凝土浇筑完毕后应对组合墙顶部进行临时封闭。

6 当混凝土浇筑到波形钢板组合墙顶端时, 可按下列方法选择其中一种进行施工:

- 1) 使混凝土稍微溢出后, 再将封顶板紧压到波形钢板组合墙顶端, 随即进行点焊; 待混凝土达到设计强度的 50%后, 再将封顶板按设计要求补焊完成;
- 2) 将混凝土浇筑到稍低于波形钢板组合墙顶端, 待混凝土达到设计强度的 50%后, 再用相同等级的水泥砂浆补填至管口, 并按上述方法将封顶板一次封焊到位。

10 验 收

10.1 一般规定

10.1.1 波形钢板组合结构工程验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204的规定。

10.1.2 波形钢板组合结构工程施工质量的验收应在施工单位自检合格的基础上,按照检验批的划分,进行波形钢板组合结构分项工程验收。

10.1.3 波形钢板组合结构分项工程可包含若干个检验批,其中波形钢板应专门作为一个检验批。

10.2 波形钢板验收

10.2.1 波形钢板高度、宽度、波幅、夹角、各段波长、总波长均应符合设计及相关标准的规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察检查和尺量。

10.2.2 波形钢板成型后板面不应有裂纹。

检查数量:每批同类构件抽查5%,且不少于10件。

检查方法:观察检查和用10倍放大镜检查。

10.2.3 波形钢板焊接前应进行焊接工艺评定,并应根据评定结果制定焊接工艺参数、焊接顺序、方法、措施等施工方案,确保焊接质量。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查焊接工艺评定报告和焊接方案。

10.3 波形钢板混凝土组合墙验收

10.3.1 波形钢板混凝土组合墙的内填混凝土的强度等级应符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查试件强度试验报告。

10.3.2 波形钢板混凝土组合墙的内填混凝土应满足浇筑密实度的要求。

检查数量：全数检查；按照施工段内钢板墙构件数量抽查20%，不少于3处，每处不应少于3个点。

检验方法：0.5磅小锤敲击检查。

10.3.3 波形钢板混凝土组合墙的螺栓、焊缝连接应满足设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察检查/焊脚量规/超声波探伤仪/磁粉探伤仪/扭矩扳手检验。

10.3.4 波形钢板混凝土组合墙表面防火及防腐涂层厚度应符合设计要求。

检验数量：抽检。

检验方法：测厚仪。

10.3.5 波形钢板混凝土组合墙不应有吊装、堆放、运输等造成的油漆损伤和变形。

查数量：按照批次抽查20%，并不少于3件。

检验方法：目测检查。

10.4 波形钢板墙验收

10.4.1 波形钢板墙的螺栓、焊缝连接应满足设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察检查/焊脚量规/超声波探伤仪/磁粉探伤仪/扭矩扳手检验。

10.4.2 波形钢板墙表面防火及防腐涂层厚度应符合设计要求。

检验数量：抽检。

检验方法：测厚仪。

10.4.3 波形钢板墙不应有吊装、堆放、运输等造成的油漆损伤和变形。

查数量：按照批次抽查20%，并不少于3件。

检验方法：目测检查。

10.5 工程质量验收

10.5.1 波形钢板组合结构分项工程竣工验收应由建设单位组织实施，勘察单位、设计单位、监理单位、施工单位应共同参与。参加验收的各方人员应具备规定的资格。

10.5.2 波形钢板组合结构分项工程施工质量的合格应在各检验批均合格的基础上，进行质量控制资料检查、材料性能复验资料检查、观感质量现场检查。各项检查均应要求资料完整、质量合格。

10.5.3 检验批合格质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 及本规程的相关规定，并达到下列要求：

- 1 验收项目必须符合合格质量标准的要求。
- 2 质量检查记录、质量证明文件等资料应完整。

10.5.4 波形钢板组合结构分项工程施工质量控制资料应包括材

料和证明文件、材料实验报告、焊缝质量检测报告、各检验批记录等，并应符合设计文件的要求。

10.5.5 波形钢板组合结构分项工程施工材料复验资料应包括涉及结构安全性能的原材料及成品的见证取样复验报告，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。

10.5.6 波形钢板组合结构分项工程施工质量现场检查应包括涂层防护外观质量检查、外形观感检验。

10.5.7 波形钢板组合结构分项工程竣工验收时应提交下列文件和记录：

- 1 设计图纸和相关设计文件；
- 2 施工现场管理记录；
- 3 有关安全及功能的检验和见证检测记录；
- 4 各检验批检验记录；
- 5 原材料成品质量合格证明文件，中文标志性检验报告；
- 6 不合格检验批的处理报告；
- 7 其他有关文件和记录。

附录 A 波形钢板混凝土组合墙弹塑性分析模型

A.1 钢材本构模型

A.1.1 波形钢板混凝土组合墙中钢材的恢复力模型可采用非线性混合强化模型，其中包含了等向强化和随动强化的部分，由图A.1.1给出，并满足下列规定：

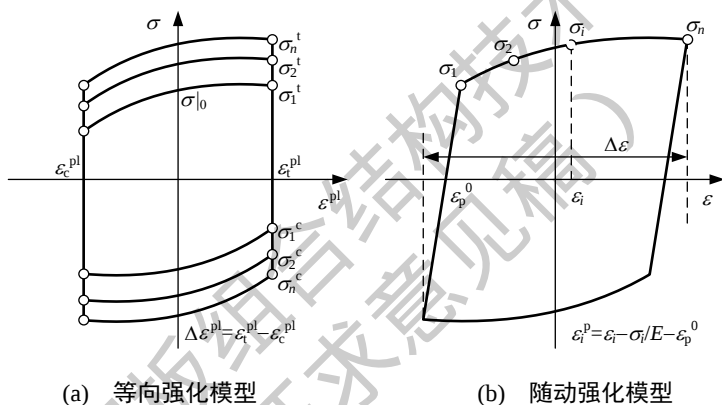


图 A.1.1 钢材的非线性混合强化模型

1 等向强化模型（图A.1.1a）定义了屈服面的大小 σ^0 ，是等效塑性应变 ε_p 的函数，由式(A.1.1-1)给出。

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_\infty \left(1 - e^{-b_{iso} \varepsilon_p}\right) \quad (A.1.1-1)$$

式中， σ_0 ——等效塑性应变为零时的应力，可取钢材的屈服应力；

Q_∞ ——屈服面最大变化值；

b_{iso} ——屈服面随着塑性应变的增加而变化的比率。

第*i*圈的屈服面大小 σ_i^0 由式(A.1.1-2)给出。

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2} \quad (\text{A.1.1-2})$$

式中, σ_i^t ——第*i*圈的最大拉应力;

σ_i^c ——第*i*圈的最大压应力。

2 随动强化模型(图A.1.1b)定义了背应力 α , 由式(A.1.1-3)和式(A.1.1-4)给出。

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (\text{A.1.1-3})$$

$$\alpha_k = \frac{C_k}{\gamma_k} \left(1 - e^{-\gamma_k \epsilon_p} \right) \quad (\text{A.1.1-4})$$

式中, N ——背应力演化模型的项数, 一般可取 $N=3$ 或 4 ;

C_k ——背应力变化常数;

γ_k ——随着塑性应变的增加而变化的背应力的变化率。

【条文说明】参考 Chaboche 等提出的非线性混合强化模型, 在进行钢材模拟时, 可采用通用有限元软件中 Chaboche 强化模型的模块, 根据材性试验得到的 $\sigma|_0$ 、 Q_∞ 、 b_{iso} 、 C_k 、 γ_k 等参数对钢材进行模拟。

A.2 混凝土本构模型

A.2.1 混凝土的抗压强度及抗拉强度的平均值 f_{cm} 、 f_{tm} 可按下列公式计算:

$$f_{cm} = f_{ck} / (1 - 1.645\delta_c) \quad (\text{A.2.1-1})$$

$$f_{\text{tm}} = f_{\text{tk}} / (1 - 1.645\delta_c) \quad (\text{A.2.1-2})$$

式中, $f_{\text{cm}}, f_{\text{ck}}$ ——混凝土抗压强度的平均值、标准值;

$f_{\text{tm}}, f_{\text{tk}}$ ——混凝土抗拉强度的平均值、标准值;

δ_c ——混凝土强度变异系数, 宜根据试验统计确定。

A.2.2 本节规定的混凝土本构模型应适用于下列条件:

- 1 混凝土强度等级 C20~C80;
- 2 混凝土质量密度 $2200\text{kg/m}^3 \sim 2400\text{kg/m}^3$;
- 3 正常温度、湿度环境;
- 4 正常加载速度。

A.2.3 混凝土单轴受拉的应力-应变曲线(图 A.2.3)可按下列公式确定:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (\text{A.2.3-1})$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (\text{A.2.3-2})$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{tr}}} \quad (\text{A.2.3-3})$$

$$\rho_t = \frac{f_{\text{tr}}}{E_c \varepsilon_{\text{tr}}} \quad (\text{A.2.3-4})$$

式中, α_t ——混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值, 按表 A.2.3 取用;

f_{tr} ——混凝土的单轴抗拉强度代表值, 其值可根据实际结构分析需要分别取 f_t 、 f_{tk} 或 f_{tm} ;

$\varepsilon_{t,r}$ ——与单轴抗拉强度代表值 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变，按表 A.2.3 取用；

d_t ——混凝土单轴受拉损伤演化参数。

表 A.2.3 混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数取值

$f_{t,r}$ (N/mm ²)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{t,r}$ (10 ⁻⁶)	65	81	95	107	118	128	137
α_t	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

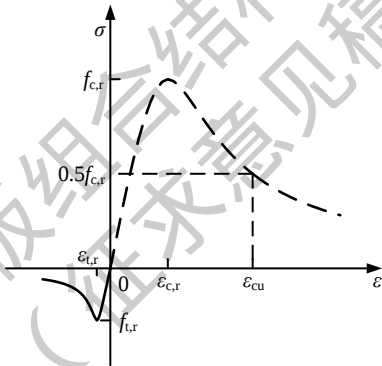


图 A.2.3 混凝土单轴应力-应变曲线

注：混凝土受拉、受压的应力应变曲线示意图绘于同一坐标系中，但取不同的比例，符号取“受拉为负，受压为正”。

A.2.4 混凝土单轴受压的应力-应变曲线（图 A.2.3）可按下列公式确定：

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \tag{A.2.4-1}$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (\text{A.2.4-2})$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (\text{A.2.4-3})$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (\text{A.2.4-4})$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (\text{A.2.5-4})$$

式中， α_c ——混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段的参数值，按表 A.2.4 取用；

$f_{c,r}$ ——混凝土的单轴抗压强度代表值，其值可根据实际结构分析需要分别取 f_c 、 f_{ck} 或 f_{cm} ；

$\varepsilon_{c,r}$ ——与单轴抗压强度代表值 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变，按表 A.2.4 取用；

d_t ——混凝土单轴受压损伤演化参数。

表 A.2.4 混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数取值

$f_{c,r}$ (N/mm ²)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$\varepsilon_{c,r}$ (10 ⁻⁶)	1470	1560	1640	1720	1790	1850	1920	1980	2030	2080	2130	2190	2240
α_c	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00	3.25	3.50	3.75	3.99
$\varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c,r}$	3.0	2.6	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.6

注： ε_{cu} 为应力应变曲线下降段应力等于 $0.5f_{c,r}$ 时的混凝土压应变。

A.2.5 在重复荷载作用下，受压混凝土卸载及再加载应力路径（图 A.2.5）可按下列公式确定：

$$\sigma = E_r (\varepsilon - \varepsilon_z) \quad (A.2.5-1)$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_z} \quad (A.2.5-2)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{un} - \frac{(\varepsilon_{un} + \varepsilon_{ca})\sigma_{un}}{\sigma_{un} + E_c \varepsilon_{ca}} \quad (A.2.5-3)$$

$$\varepsilon_{ca} = \max \left\{ \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{un}}, \frac{0.09\varepsilon_{un}}{\varepsilon_c} \right\} \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_{un}} \quad (A.2.5-4)$$

式中， σ ——受压混凝土的压应力；

ε ——受压混凝土的压应变；

ε_z ——受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变；

E_r ——受压混凝土卸载/再加载的变形模量；

$\sigma_{un}, \varepsilon_{un}$ ——分别为受压混凝土从骨架线开始卸载时的应力和应变；

ε_{ca} ——附加应变；

ε_c ——混凝土受压峰值应力对应的应变。

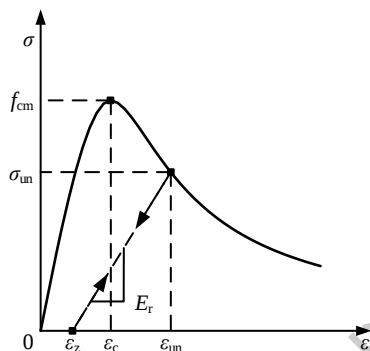


图 A.2.5 重复荷载作用下混凝土应力-应变曲线

A.2.6 混凝土在双轴加载、卸载条件下的本构关系可采用损伤模型或弹塑性模型。弹塑性本构关系可采用弹塑性增量本构理论，损伤本构关系按下列公式确定：

1 双轴受拉区 ($\sigma'_1 < 0, \sigma'_2 < 0$)

1) 加载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{Bmatrix} = (1 - d_t) \begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2.6-1})$$

$$\varepsilon_{t,e} = -\sqrt{\frac{1}{1-\nu^2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 2\nu\varepsilon_1\varepsilon_2)} \quad (\text{A.2.6-2})$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{Bmatrix} = \frac{E_c}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2.6-3})$$

式中， d_t ——受拉损伤演化参数，可由式(A.2.3-2)计算，其中

$$x = \varepsilon_{t,e} / \varepsilon_t ;$$

$\varepsilon_{t,e}$ ——受拉能量等效应变；

σ'_1, σ'_2 ——有效应力；

ν ——混凝土泊松比，可取 0.18~0.22。

2) 卸载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 - \sigma_{un,1} \\ \sigma_2 - \sigma_{un,2} \end{Bmatrix} = (1 - d_t) \frac{E_c}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \varepsilon_{un,1} \\ \varepsilon_2 - \varepsilon_{un,2} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2.6-4})$$

式中， $\sigma_{un,1}, \sigma_{un,2}, \varepsilon_{un,1}, \varepsilon_{un,2}$ ——二维卸载点处的应力、应变。

在加载方程中，损伤演化参数应采用即时应变换算得到的能量等效应变计算；卸载方程中的损伤演化参数应采用卸载点处的应变换算的能量等效应变计算，并且在整个卸载和再加载过程中保持不变。

2 双轴受压区 ($\sigma'_1 \geq 0, \sigma'_2 \geq 0$)

1) 加载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{Bmatrix} = (1 - d_c) \begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2.6-5})$$

$$\varepsilon_{c,e} = \frac{1}{(1 - \nu^2)(1 - \alpha_s)} \left[\alpha_s (1 + \nu) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \sqrt{(\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1)^2 - (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1)} \right] \quad (\text{A.2.6-6})$$

$$\alpha_s = \frac{r - 1}{2r - 1} \quad (\text{A.2.6-7})$$

式中， d_c ——受压损伤演化参数，可由式(A.2.4-2)计算，其中

$$x = \varepsilon_{c,e} / \varepsilon_c ;$$

$\varepsilon_{c,e}$ ——受压能量等效应变；

α_s ——受剪屈服参数；

r ——双轴受压强度提高系数，取值范围 1.15~1.30，可取

实验数据确定，在缺乏实验数据时可取 1.2。

2) 卸载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 - \sigma_{un,1} \\ \sigma_2 - \sigma_{un,2} \end{Bmatrix} = (1 - \eta_d d_c) \frac{E_c}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \varepsilon_{un,1} \\ \varepsilon_2 - \varepsilon_{un,2} \end{Bmatrix} \quad (A.2.6-8)$$

$$\eta_d = \frac{\varepsilon_{c,e}}{\varepsilon_{c,e} + \varepsilon_{ca}} \quad (A.2.6-9)$$

式中， η_d ——塑性因子；

ε_{ca} ——附加应变，按式(A.2.5-4)计算。

3 双轴拉压区（ $\sigma'_1 < 0$ ， $\sigma'_2 \geq 0$ ）或（ $\sigma'_1 \geq 0$ ， $\sigma'_2 < 0$ ）

1) 加载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - d_t & 0 \\ 0 & 1 - d_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{Bmatrix} \quad (A.2.6-10)$$

$$\varepsilon_{t,e} = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu^2}} \varepsilon_1 (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2) \quad (A.2.6-11)$$

式中， d_t ——受拉损伤演化参数，可由式(A.2.3-2)计算，其中

$$x = \varepsilon_{t,e} / \varepsilon_t ;$$

d_c ——受压损伤演化参数，可由式(A.2.4-2)计算，其中

$$x = \varepsilon_{c,e} / \varepsilon_c ;$$

$\varepsilon_{t,e}$ ， $\varepsilon_{c,e}$ ——能量等效应变，其中 $\varepsilon_{c,e}$ 按式(A.2.6-6)计算， $\varepsilon_{t,e}$

按式(A.2.6-11)计算。

2) 卸载方程

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 - \sigma_{un,1} \\ \sigma_2 - \sigma_{un,2} \end{Bmatrix} = \frac{E_c}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 - d_t & (1 - d_t)\nu \\ (1 - \eta_d d_c)\nu & 1 - \eta_d d_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \varepsilon_{un,1} \\ \varepsilon_2 - \varepsilon_{un,2} \end{Bmatrix} \quad (A.2.6-12)$$

式中， η_d ——塑性因子。

【条文说明】参考《混凝土结构设计规范》GB50010 中对于混凝土材料本构关系的相关规定。

《波形钢板组合结构技术规程》
(征求意见稿)

附录 B 波形钢板墙弹塑性分析模型

B.0.1 进行静力弹塑性分析时，当波形钢板墙的正则化宽高比 $\lambda_{n,s} \leq 0.5$ 时，其层间位移角 δ 与平均剪应力 τ 的相关关系可依据图 B.0.1a 给出的形式；当波形钢板的正则化宽高比 $\lambda_{n,s} > 0.5$ 时，其层间位移角 δ 与平均剪应力 τ 的相关关系可依据图 B.0.1b 给出的形式，其中波形钢板墙的受剪稳定系数 φ_s 应根据第 6.3 节的规定进行计算，层间位移角为 1.0% 的残余剪应力系数 $\varphi_{r,1}$ 和层间位移角为 2.0% 的残余剪应力系数 $\varphi_{r,2}$ 可根据式(B.0.1)进行计算。

$$\varphi_{r,1} = 0.6/\lambda_{n,s}, \quad \varphi_{r,2} = 0.45/\lambda_{n,s} \quad (\text{B.0.1})$$

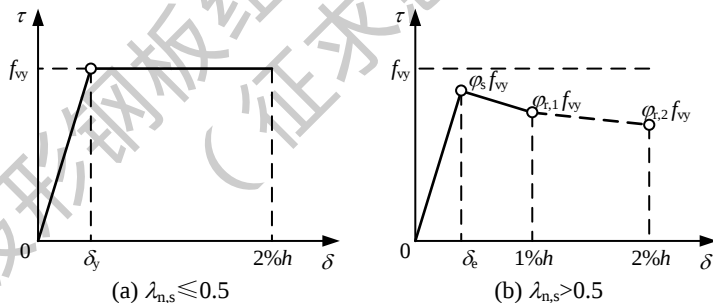


图 B.0.1 波形钢板墙的静力弹塑性分析模型

B.0.2 进行动力弹塑性分析时，对于正则化宽高比 $\lambda_{n,s} \leq 0.5$ 的波形钢板墙，其在水平剪力作用下的恢复力模型可采用双线性随动强化模型，由图 B.0.2 给出。其中材料屈服后的切线模量可取为初始弹

性模量的 2%。

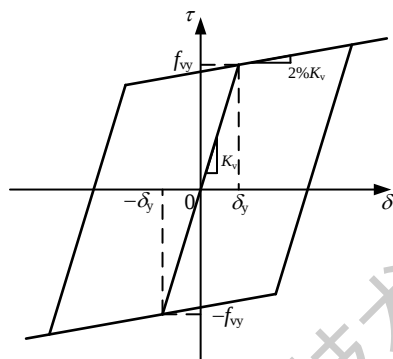


图 B.0.2 波形钢板墙的动力弹塑性分析模型

【条文说明】当波形钢板墙用作多、高层建筑结构的阻尼器时，一般要求其具有较为饱满的滞回曲线，从而产生较为优越的消能减震性能。因此，本规程仅给出了能够满足建筑结构阻尼器相关性能要求的参数范围内的恢复力模型，对于其他参数范围内的钢板剪力墙，本规程建议利用试验或纤维单位的有限元分析结果作为设计的参考。

本规程用词说明

1 为便于执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的：

正面词采用“可”；

反面词采用“不可”。

2 条文中指定应按其他有关标准执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。非必须按所指定的标准执行时，写法为“可参照……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 3 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 4 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 5 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 6 《高层民用建筑钢结构技术规程》 JGJ 99
- 7 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》 GB 50018
- 8 《工业建筑防腐蚀设计规范》 GB 50046
- 9 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 10 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 11 《建筑钢结构防火技术规范》 GB 51249
- 12 《碳素结构钢》 GB/T 700
- 13 《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》 GB/T 709
- 14 《产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》 GB/T 1031
- 15 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 16 《耐候结构钢》 GB/T 4171
- 17 《非合金钢及细晶粒钢焊条》 GB/T 5117
- 18 《热强钢焊条》 GB/T 5118
- 19 《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》 GB/T 5293
- 20 《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》 GB/T 8110
- 21 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定》

GB/T8923.1

- 22 《建筑结构用钢板》 GB/T 19879
- 23 《钢结构防火涂料应用技术规范》 CECS 24
- 24 《钢结构住宅设计规范》 CECS 261
- 25 《钢结构防火涂料》 GB14907
- 26 《建筑钢结构防腐技术规程》 JGJ/T 251
- 27 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 28 《钢管混凝土结构技术规范》 GB 50936

《波形钢板组合结构技术规范》
(征求意见稿)