

T/CECS xxx-2021

中国工程建设标准化协会标准

波浪腹板钢结构应用技术规程

Technical Specification for Application of Sinusoidal Web Structures

(征求意见稿)

中国建筑工业出版社

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2019 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字[2019]22 号)的要求,规程编制组经广泛调查研究,深入分析和试验,认真总结实践经验,参考国内外相关技术标准,并在广泛征求意见的基础上,修订本规程。

本规程共分 13 章,主要技术内容包括:总则,术语和符号,材料,基本规定,结构体系和结构分析,波形腹板工形截面构件和节点设计,波形腹板钢拱设计,波形腹板组合构件设计,波形钢板管涵设计,制作与安装,防腐与涂装及验收。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理,由清华大学土木系负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送清华大学土木系(地址:北京市海淀区清华大学何善衡楼;邮政编码:100084)

本 规 程 主 编 单 位 : 清华大学

中建路桥集团有限公司

本 规 程 参 编 单 位 :

本规程主要起草人员:

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	2
3	材 料	6
	3.1 钢材	6
	3.2 连接材料	6
	3.3 混凝土	6
4	基本规定	8
	4.1 波形钢板结构选型.....	8
	4.2 结构承载能力和正常使用极限状态设计.....	15
5	结构分析	17
	5.1 作用及作用效应计算.....	17
	5.2 弹性分析	22
	5.3 弹塑性分析	31
6	波形腹板钢构件设计	34
	6.1 一般规定	34
	6.2 受弯构件设计	35
	6.3 轴心受力构件设计.....	52
	6.4 拉弯、压弯构件设计.....	55
	6.5 局部承压设计	61

6.6	吊车梁疲劳计算.....	64
6.7	支撑系统设计	67
6.8	檩条与墙梁设计.....	71
6.9	构件构造	74
6.10	节点构造	83
6.11	节点设计	92
7	波形腹板钢拱设计	97
7.1	一般规定	97
7.2	截面强度与板件稳定.....	99
7.3	平面内整体稳定.....	102
7.4	节点设计与构造.....	105
8	波形腹板组合构件设计.....	107
8.1	一般规定	107
8.2	波形腹板组合梁设计.....	107
8.3	波形腹板组合柱设计.....	118
8.4	节点设计与构造.....	123
9	波形钢板剪力墙设计	125
9.1	一般规定	125
9.2	单层波形钢板墙设计.....	125
9.3	双层波形钢板墙设计.....	126
9.4	波形钢板阻尼墙设计.....	131
9.5	节点设计与构造.....	133
10	波形钢板管涵设计	135

10.1	一般规定	135
10.2	单层波形钢板管涵设计.....	136
10.3	双层波形钢板组合管涵设计.....	147
10.4	波形钢板渗水井设计.....	147
10.5	连接设计与构造.....	147
11	制作与安装	156
11.1	一般规定	156
11.2	波形腹板门式刚架.....	156
11.3	波形腹板吊车梁.....	162
11.4	波形腹板钢拱	164
11.5	波形腹板组合构件.....	169
11.6	波形钢板墙	169
12	防腐与涂装	172
12.1	一般规定	172
12.2	防腐涂料涂装	173
12.3	连接部位涂装	174
12.4	波形钢板管涵	174
13	验收	178
13.1	一般规定	178
13.2	波形钢板结构验收.....	178
13.3	分项工程质量验收.....	180
	本规程用词说明	182
	引用标准名录	183

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	2
3	Material.....	6
3.1	Steel	6
3.2	Connecting material	6
3.3	Concrete.....	6
4	Basic requirements.....	8
4.1	Selection principles of steel corrugated-plate structures.....	8
4.2	Limit state design of load-carrying capacity and servicablity	15
5	Structural analysis.....	17
5.1	Load effect and analysis.....	17
5.2	Elastic analysis.....	22
5.3	Elastoplastic analysis	31
6	Design of steel members with corrugated web	34
6.1	General requirements	34
6.2	Design of flexural members	35
6.3	Design of axially loaded members.....	52
6.4	Design of members under combined axial force and bending	55

6.5	Design of local pressure.....	61
6.6	Fatigue design of crane beams.....	64
6.7	Design of bracing systems.....	67
6.8	Design of purlins and wall beams.....	71
6.9	Detailings of members.....	74
6.10	Detailings of connections.....	83
6.11	Design of connections.....	92
7	Design of steel arches with corrugated web.....	97
7.1	General requirements.....	97
7.2	Cross-sectional capacity and plate stability.....	99
7.3	In-plane global stability.....	102
7.4	Design and detailings of connections.....	105
8	Design of steel–concrete composite members with steel corrugated web.....	107
8.1	General requirements.....	107
8.2	Design of steel–concrete composite beams with steel corrugated web.....	107
8.2	Design of steel–concrete composite columns with steel corrugated web.....	118
8.4	Design and detailings of connections.....	123
9	Design of steel corrugated-plate shear walls.....	125
9.1	General requirements.....	125
9.2	Design of single steel corrugated-plate shear walls.....	125

9.3	Design of double steel corrugated-plate shear walls.....	126
9.4	Design of steel corrugated-plate damping walls.....	131
9.5	Design and detailings of connections.....	133
10	Design of steel corrugated-plate pipe culverts.....	135
10.1	General requirements.....	135
10.2	Design of single steel corrugated-plate pipe culverts.....	136
10.3	Design of double steel corrugated-plate composite pipe culverts.....	147
10.4	Design of steel corrugated-plate filter well.....	147
10.5	Design and detailings of connections.....	147
11	Fabrication and erection.....	156
11.1	General requirements.....	156
11.2	Portal frames of H-shaped sectional members with steel corrugated web.....	156
11.3	Crane beams with steel corrugated web.....	162
11.4	Steel Arches with steel corrugated web.....	164
11.5	Concrete and steel-corrugated-web composite members	169
11.6	Steel corrugated-plate walls.....	169
12	Corrosion prevention and coating.....	172
12.1	General requirements.....	172
12.2	Coating of anticorrosive paint.....	173
12.3	Coating at connecting parts.....	174
12.4	Steel corrugated-plate pipe culverts.....	174

13	Acceptance.....	178
13.1	General requirements	178
13.2	Acceptance of steel corrugated-plate structures.....	178
13.3	Acceptance of branch engineering quality.....	180
	Explanation of wording in this specification	182
	List of quoted standards.....	183

1 总 则

1.0.1 为规范波形钢板结构在工程建设中的应用,做到安全适用、技术先进、经济合理、施工方便和确保工程质量,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于由波形钢板组成的结构形式(包括波形腹板钢构件、波形腹板钢拱、波形腹板组合构件、波形钢板剪力墙、波形钢板管涵和波形钢板深渗水井等)的设计、制作、安装和验收。

1.0.3 波形钢板结构的设计、制作、安装和验收,除应符合本规程外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】由波形钢板组成的结构和结构构件多种多样。

目前在工程建设中,波形腹板工形截面构件应用在门式刚架轻型房屋钢结构及吊车梁中。除此以外,在房屋建筑中也开始应用波形腹板钢拱及波形腹板组合柱,在民用高层建筑结构中采用波形钢板剪力墙,在市政和交通工程中应用波形腹板组合梁、波形钢板桥涵、管涵和管廊以及波形钢板渗水井等。在使用本规程进行结构设计时,要注意建筑、公路、交通和市政工程中结构可靠度以及荷载作用计算和取值之间的差异,按国家现行有关标准执行。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 波形钢板 steel corrugated-plate

由平钢板冷弯形成的钢板,包括波浪形和波折形截面的钢板。

2.1.2 波形钢板结构 steel corrugated-plate structures

由波形钢板作为组成部分的结构,包括波形腹板钢构件、波形腹板钢拱、波形腹板组合构件、波形钢板剪力墙、波形钢板管涵和波形钢板渗水井等结构。

2.1.3 波形腹板门式刚架 portal frame of steel members with corrugated web

采用波形腹板钢构件的门式刚架。

2.1.4 波形腹板吊车梁 crane beam with steel corrugated web

采用波形腹板的吊车梁。

2.1.5 波形腹板钢拱 steel arches with corrugated web

采用波形腹板的钢拱。

2.1.6 波形腹板组合梁和组合柱 steel-concrete composite beam and column with steel corrugated web

采用波形腹板和混凝土翼板的组合梁和组合柱。

2.1.7 波形钢板管涵 steel corrugated-plate pipe culvert

采用波形钢板的管涵,包括采用波形钢板的桥涵和管廊等结构。

2.1.8 波形钢板渗水井 steel corrugated-plate filter well

由波形钢板组成的渗水井。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应设计值

M —— 弯矩;

N —— 轴力；
 P —— 集中荷载；
 p —— 土压力；
 V —— 剪力；

2.2.2 计算指标

E —— 钢材的弹性模量；
 E_c —— 混凝土的弹性模量；
 f —— 钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
 f_c —— 混凝土的抗压强度设计值；
 f_{st} —— 钢筋的抗拉强度设计值；
 f_u —— 钢材的抗拉强度最小值；
 f_v —— 钢材的抗剪强度设计值；
 f_v^b —— 螺栓的抗剪强度设计值；
 f_y —— 钢材的屈服强度；
 G —— 钢材的剪切模量；
 N_t^b —— 螺栓的受拉承载力设计值；
 N_v^b —— 螺栓的受剪承载力设计值；
 N_c^b —— 螺栓的承压承载力设计值；
 γ —— 土的容重；变截面构件的楔率；
 ν —— 钢材的泊松比；
 σ —— 正压力；
 τ —— 剪压力；
 $\Delta\sigma$ —— 正应力幅；
 $\Delta\tau$ —— 剪应力幅；
[$\Delta\sigma$] —— 正应力的容许应力幅；
[$\Delta\tau$] —— 剪应力的容许应力幅；

2.2.3 几何参数

- A —— 截面积；
- a —— 波形腹板的波幅；剪跨段的长度；
- b 、 h —— 截面的宽度和高度；
- D_h 、 D_v —— 管涵结构的跨度和计算矢高的两倍；
- D_x 、 D_y —— 波形钢板对强轴和弱轴的弯曲刚度常数；
- H —— 管涵顶部以上的覆土总厚度；
- H_s —— 波形钢板的扭转刚度常数；
- I_t —— 截面的扭转惯性矩；
- I_x 、 I_y —— 截面对 x 轴和 y 轴的惯性矩；
- I_{z1} —— 单位长度波形板对中性轴的面外惯性矩；
- I_ω —— 截面的翘曲惯性矩；
- i_x 、 i_y —— 构件截面对 x 轴和 y 轴的回转半径；
- K —— 约束刚度；
- K_v —— 截面剪切刚度；
- l —— 构件的跨度；
- l_{0x} 、 l_{0y} —— 构件对 x 轴和 y 轴的计算长度；
- q —— 波形腹板单个重复波的波长；
- q_0 —— 波形钢板过渡段的宽度；
- q_1 —— 波形钢板波峰段的宽度；
- q_2 —— 波形钢板过渡段的投影宽度；
- q_3 —— 波形钢板波谷段的宽度；
- s —— 波形腹板单个重复波展开后的长度；
- t —— 板件厚度；
- W_x 、 W_y —— 对 x 轴和 y 轴的截面模量；
- γ_c —— 波形钢板过渡段的倾角；

θ —— 夹角；套箍指标；刚度常数比；

2.2.4 计算参数及其他

k_b —— 受剪弹性屈曲系数；

α_E —— 钢与混凝土弹性模量的比值；

β —— 非均匀波形影响系数；等效宽高比；

β_b —— 等效临界弯矩系数；

β_m 、 β_t —— 等效弯矩系数；

γ_0 —— 结构重要性系数；

γ_{RE} —— 构件承载力抗震调整系数；

γ_x 、 γ_y —— 对 x 轴和 y 轴的截面塑性发展系数；

λ —— 长细比；

φ —— 稳定系数。

ω —— 螺栓分布折减系数。

3 材 料

3.1 钢材

3.1.1 波形钢板结构的钢材选用应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定，且质量等级不应低于 B 级。

3.1.2 处于外露环境，且对耐腐蚀有特殊要求或处于侵蚀性介质环境中的波形钢板结构，可采用 Q235NH 和 Q345NH 牌号的耐候结构钢，其质量应符合现行国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171 和《焊接结构用耐候钢》GB/T 4172 的规定。

3.1.3 抗震结构钢材的力学性能指标应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

3.1.4 冷弯型材的力学性能指标应符合现行国家标准《冷弯型钢结构技术规范》GB 50018 的规定。

3.2 连接材料

3.2.1 波形钢板结构中连接用螺栓的选用应符合下列要求：

- 1 波形钢板结构螺栓选用应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定；
- 2 波形钢板结构中对拉螺栓宜采用高强度材料制作的螺栓；
- 3 承受反复荷载作用的波形钢板结构的对拉螺栓不应采用膨胀自锁连接形式。

3.2.2 焊接材料的选用应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《钢结构焊接规范》GB 50661 的规定。

3.3 混凝土

3.3.1 波形钢板结构的混凝土选用应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

3.3.2 波形钢板结构中混凝土的选用应符合下列规定：

1 波形钢板-混凝土组合构件的混凝土强度等级不宜低于 C40，且不应低于 C30；

2 内填混凝土可采用普通混凝土或自密实混凝土。普通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《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定。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/T 283 的规定。

4 基本规定

4.1 波形钢板结构选型

4.1.1 波形钢板结构在充分考虑其应用范围、工程类型以及荷载作用情况等条件下，可采用下列结构形式或构件形式：

- 1 波形腹板钢构件；
- 2 波形腹板钢拱；
- 3 波形腹板组合构件；
- 4 波形钢板剪力墙；
- 5 波形钢板桥涵、管涵和管廊等；
- 6 波形钢板渗水井。

【条文说明】 本规程将由波形钢板组成的结构形式或构件形式统称为波形钢板结构，包含波形腹板钢梁(包含吊车梁)和钢柱、波形腹板组合梁和组合柱、波形腹板钢拱、波形钢板剪力墙、波形钢板桥涵、管涵和管廊及波形钢板渗水井等多种形式。

4.1.2 波形腹板门式刚架可采用波形腹板钢梁和钢柱。当吊车额定起重量较大时，可采用波形腹板组合柱或格构柱，宜采用波形腹板吊车梁。波形腹板可采用波浪腹板或波折梯形腹板。

【条文说明】 由于波形腹板工形截面梁柱构件具有较高的承载力效率，在工程设计中被广泛应用。门式刚架轻型房屋是设置起重量不超过 20t 的轻中级工作制桥式吊车或悬挂式吊车的钢结构单层房屋。可采用波形腹板工形截面梁柱构件代替门式刚架轻型房屋钢结构中的平腹板工形截面梁柱构件。在重型工业厂房中，当吊车额定起重量较大时，可采用波形腹板组合柱或格构柱以及波形腹板吊车梁。

4.1.3 波形腹板吊车梁可采用单波形腹板工形截面或双波形腹板箱形截面（图 4.1.3），其设计应符合下列规定：

1 采用单波形腹板的吊车梁，其腹板厚度不应小于 2mm，腹板与翼缘应采用双面焊缝连接。

2 采用双波形腹板的吊车梁，单个腹板厚度不宜小于 2mm；当单个腹板厚度不大于 6mm 时，腹板与翼缘可采用单面焊缝连接；当单个腹板厚度大于 6mm 时，可采用两个单波形腹板工形截面并行对焊所形成的箱形截面，两个单波形腹板工形截面应采用双面焊缝连接。

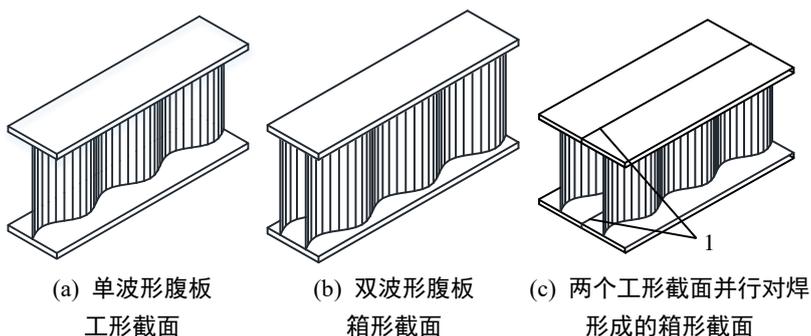


图 4.1.3 波形腹板吊车梁的截面形式

1-焊缝

【条文说明】实践证明，双面焊缝的疲劳性能优于单面焊缝的疲劳性能，波浪腹板的疲劳性能优于波折腹板的疲劳性能。考虑到单波形腹板易于实现双面焊缝连接，应采用双面焊缝连接。当腹板承受较大的剪力时，可采用双波形腹板箱形截面梁。建议通过两个单波形腹板工形截面梁侧向并行对焊组成箱形截面，便于实现波形腹板的双面焊缝连接。

4.1.4 波形腹板组合构件可用于框架结构、框架-剪力墙结构、框架-核心筒结构、框架-支撑结构。波形腹板组合梁可采用单波形腹板工形截面钢梁或双波形腹板箱形截面钢梁（图 4.1.4）。

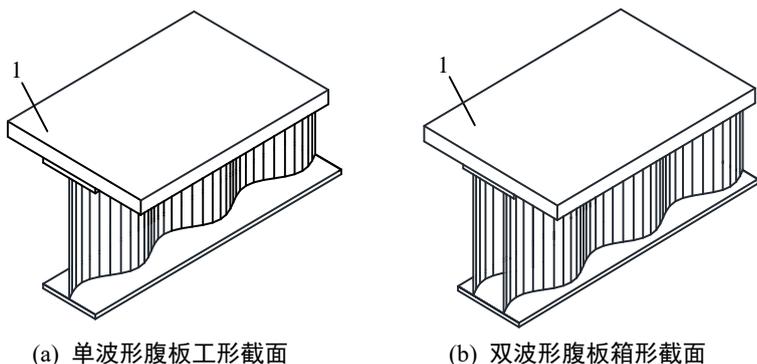


图 4.1.4 波形钢板组合梁的截面形式

1-混凝土

【条文说明】 波形腹板组合梁由波形腹板梁钢梁和混凝土板组成。

4.1.5 波形腹板组合柱可采用单波形腹板截面或双波形腹板截面（图 4.1.5）。

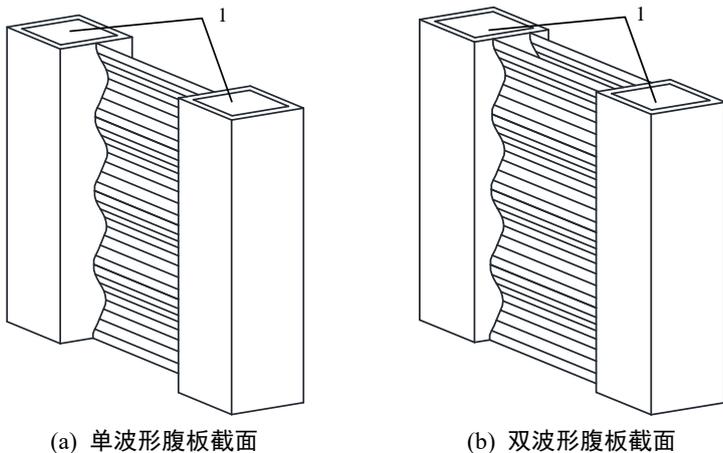


图 4.1.5 波形钢板组合柱的截面形式

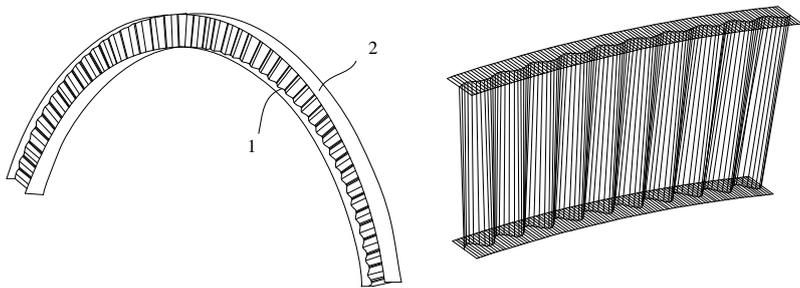
1-钢管混凝土

【条文说明】 波形腹板组合柱由两个矩形钢管混凝土柱和波

形腹板组成。波形腹板组合梁和组合柱可用于建筑工程、市政工程和公路工程等。单波形腹板工形截面的组合梁常用于楼面梁和中小跨度桥梁工程，双波形腹板箱形截面的组合梁常用于大跨度结构。波形钢板组合柱常用于重型工业厂房或者多层多跨工业和公共建筑。

波形钢板组合梁和组合柱的抗剪性能优越，压弯承载力高，整体稳定承载力高，整体经济效益显著。这是因为波形钢板的受剪屈曲荷载高，并且几乎不承担轴向荷载，所以抗剪性能优越。因为面外刚度大，波形腹板可以做得宽（高）而薄，使得梁柱截面更加展开，整个截面的抗弯刚度大，所以构件承载力设计一般由截面强度控制。

4.1.6 波形腹板钢拱可采用弧形翼缘与弧形单波形腹板的工形截面、弧形翼缘与弧形双波形腹板的箱形截面或内嵌混凝土的箱形组合截面（图 4.1.6），翼缘可采用翼缘板或方钢管。



(a) 单波形腹板钢拱

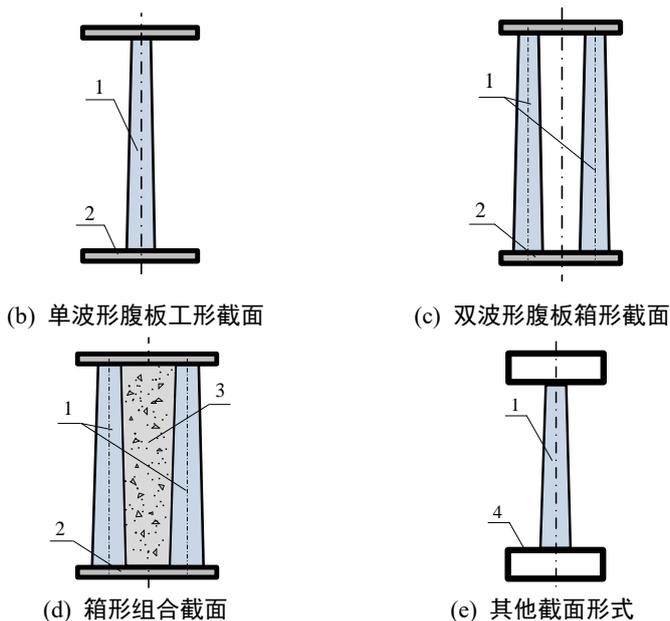


图 4.1.6 波形腹板钢拱的截面形式

1-波形腹板；2-翼缘板；3-混凝土；4-方钢管翼缘

【条文说明】波形腹板钢拱由弧形翼缘（面外）和弧形波形腹板（面内）焊接组成，可用于建筑工程的屋盖结构以及市政和公路桥梁等工程。波形腹板钢拱具有平面内承载力高及设计经济等特点，主要用于建筑屋盖结构。双波形腹板箱形截面组合拱承载效率高，尤其适用于大跨度的公路桥梁工程。

因为在钢拱加工制作过程中，在拱轴线以上波形腹板被拉伸，在拱轴线以下波形腹板被缩短，所以波形腹板的上部波幅小于下部波幅。

4.1.7 波形钢板剪力墙适用于框架-剪力墙结构，可采用单层波形钢板墙和双层波形钢板墙（图 4.1.7）。波形钢板墙的波形型式可采用波浪波形和梯形波折波形。单层波形钢板墙可设置加劲肋，

加劲肋可在两面布置或单面布置，且宜与波形钢板棱线垂直。双层波形钢板墙可采用平行对扣（图 4.1.7b 和 c）或正交对扣（图 4.1.7d）的连接形式。单层波形钢板墙宜采用波峰和波谷宽度一致的波折梯形钢板，双层波形钢板墙宜采用波峰宽于波谷的波折梯形钢板。波形钢板与边缘框架构件可直接焊接，或通过鱼尾板焊接连接，或通过鱼尾板螺栓连接。

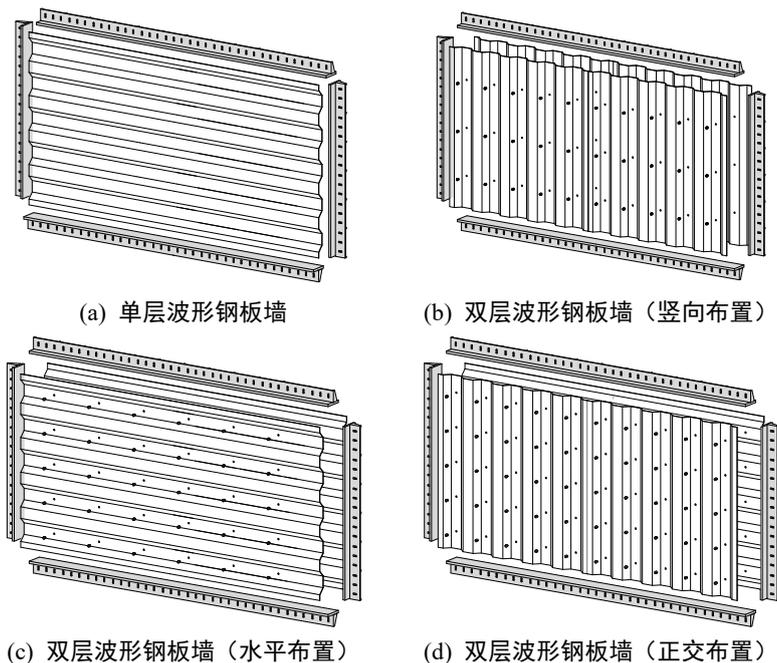
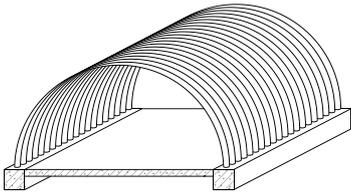


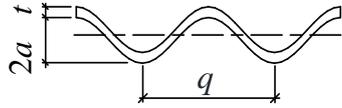
图 4.1.7 波形钢板墙的形式

【条文说明】波形钢板墙多用于多高层建筑工程的抗侧力结构或构件。波形钢板墙内嵌于框架结构，并与框架梁柱构件连接或通过鱼尾板与框架梁柱构件连接。

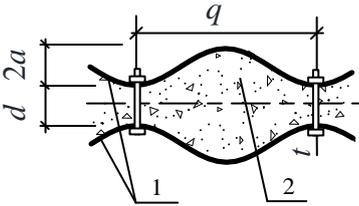
4.1.8 波形钢板桥涵、管涵和管廊可采用单层波形钢板截面、对称双层波形钢板组合截面或非对称双层波形钢板组合截面（图 4.1.8）。



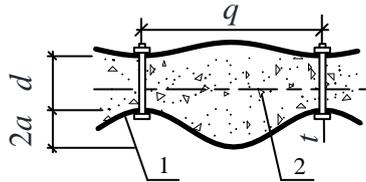
(a) 单层波形钢板桥涵、管涵和管廊



(b) 单波形钢板截面



(c) 对称双层波形钢板组合截面



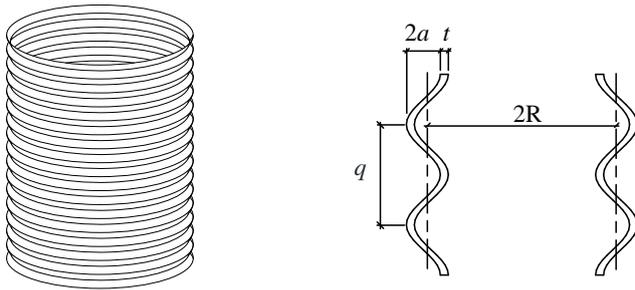
(d) 非对称双层波形钢板组合截面

图 4.1.8 波形钢板桥涵、管涵和管廊的截面形式

1-波形腹板；2-混凝土

【条文说明】波形钢板桥涵、管涵和管廊的主要承力方向为沿跨度方向（横向）。近年来，波形钢板桥涵、管涵和管廊的工程应用逐渐增多。本规程推荐了三种波形钢板桥涵、管涵和管廊的形式，即单波形钢板截面、对称双层波形钢板内嵌混凝土组合截面以及非对称双层波形钢板内嵌混凝土组合截面。

4.1.9 波形钢板柱面壳可用于渗水井和水管（图 4.1.9）。



(a) 波形钢板渗水井和水管

(b) 纵向剖面

图 4.1.9 波形钢板渗水井和水管的形式

【条文说明】 波形钢板柱面壳是由多块弧形波形钢板连接形成的结构。近年来,公路工程中的渗水井多采用波形钢板渗水井,由冷弯形成的弧形波形钢板拼接组成。

4.2 结构承载能力和正常使用极限状态设计

4.2.1 在持久设计状况、短暂设计状况下,波形钢板结构或构件的承载力应符合下式规定:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (4.2.1)$$

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小于 1.1,对安全等级为二级的结构构件不小于 1.0;

S_d —— 作用组合的效应设计值;

R_d —— 构件承载力设计值。

4.2.2 在地震设计状况下,波形钢板结构或构件的承载力应符合下式规定:

$$S_d \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (4.2.2)$$

式中: 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 4.2.2-1 和表 4.4.2-2 确定;当仅计算竖

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采用 1.0。

表 4.2.2-1 组合构件承载力抗震调整系数

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-混凝土组合构件	
0.80	0.85	0.85

表 4.2.2-2 钢构件承载力抗震调整系数

强度验算（波形钢板、梁、柱、节点板件、螺栓、焊缝）	稳定验算
0.75	0.80

4.2.3 结构正常使用极限状态验算应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定。

5 结构分析

5.1 作用及作用效应计算

5.1.1 波形钢板结构的荷载及荷载效应计算应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《钢结构设计标准》GB 50017 的规定执行，波形钢板管涵的荷载及荷载效应计算尚应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

5.1.2 对于波形腹板钢拱，应考虑风荷载、雪荷载等可变荷载在拱轴线平面内的最不利分布作用，且应考虑其可能在拱平面外产生的不利作用。

【条文说明】近年来对钢结构事故调查表明，钢结构由风荷载、雪荷载等可变荷载引发的工程事故增多，故本条提醒工程设计人员要重视荷载的最不利分布形式，特别是局部雪荷载的堆积作用。

5.1.3 波形钢板管涵结构应考虑土压力和可变荷载的作用。

【条文说明】除了土压力作用外，波形钢板管涵结构的作用计算还涉及到土传递车辆等可变荷载的复杂过程。

5.1.4 土压力在波形管涵结构上产生的作用（图 5.1.4）应按下列公式计算：

$$p_{ts} = A_f p_s \quad (5.1.4-1)$$

$$p_s = \gamma D_h (H + 0.11D_v) \quad (5.1.4-2)$$

式中： p_{ts} —— 纵向单位长度内上部土体的总压力（N/mm）；

p_s —— 纵向单位长度内上部填土自重产生的压力（N/mm）；

γ —— 土的容重，地下水位以下应采用有效容重加上水的密度，分层叠加 (N/mm^3);

D_h —— 管涵结构的跨度 (mm);

H —— 管涵顶部以上的覆土总厚度 (mm);

D_v —— 管涵计算矢高的两倍 (mm);

A_T —— 考虑两侧土体压力传递后的土压力放大系数，应按表 5.1.4 采用。

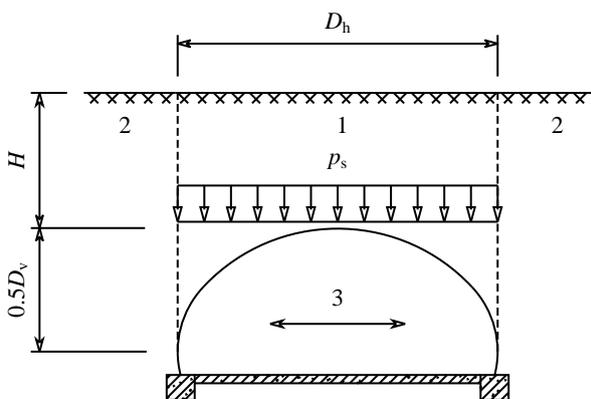


图 5.1.4 管涵上部土体自重产生的压力

1-上部填土；2-侧填土；3-管廊横向

表 5.1.4 土压力放大系数

H/D_h	D_h/D_v					
	≤ 0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	≥ 1.6
> 3.0	1.62	1.40	1.20	1.10	1.05	1.02
3.0	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
2.0	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
1.8	1.61	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
1.6	1.60	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
1.4	1.59	1.38	1.22	1.15	1.08	1.02
1.2	1.55	1.34	1.20	1.12	1.07	1.02

1.0	1.53	1.30	1.19	1.10	1.05	1.02
0.8	1.55	1.31	1.19	1.11	1.06	1.03
0.6	1.65	1.34	1.20	1.12	1.07	1.04
0.4	1.82	1.40	1.23	1.15	1.10	1.05
≤0.2	2.28	1.60	1.28	1.20	1.15	1.10

5.1.5 车辆可变荷载在波形钢板管涵结构上产生的作用应符合下列规定：

- 1 车道均布可变荷载应按土体自重传递到拱顶的压力计算；
- 2 车辆荷载扩散到拱顶的压力（图 5.1.5）应按下列公式计算：

$$\sigma_t = \frac{G_{td}}{w_t l_t} m_f (1 + A_m) \quad (5.1.5-1)$$

$$w_t = b_t + 1.2H \quad (5.1.5-2)$$

$$l_t = a_t + H \quad (5.1.5-3)$$

$$A_m = 0.4(1 - 0.0005H) \geq 0.1 \quad (5.1.5-4)$$

式中： σ_t —— 车辆荷载扩散到拱顶的压力（N/mm²）；

G_{td} —— 设计车辆荷载的后轴轴重（N）；

w_t —— 轮压荷载沿管涵横向扩散后的尺寸（mm）；

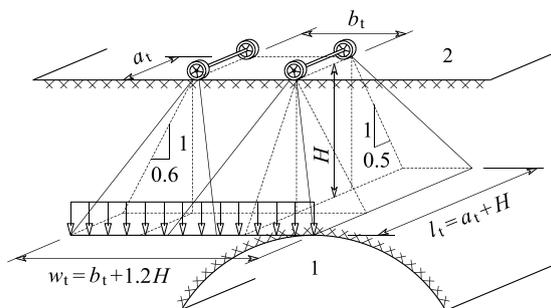
l_t —— 轮压荷载沿管涵纵向扩散后的尺寸（mm）；

m_f —— 多车道折减系数，应按表 5.1.5 采用；

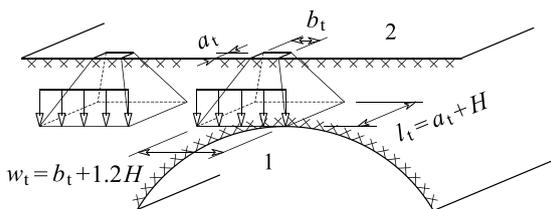
A_m —— 车辆荷载动力系数；

b_t —— 当前后相邻轮压扩散后重叠时，取沿管涵跨度方向车辆承重轮之间的距离，包括车轮着地长度；当前后相邻轮压扩散后不重叠时，取车轮着地长度；车轮着地宽度可取 200mm，车轮着地长度可取 600mm（mm）；

a_t —— 当左右相邻轮压扩散后重叠时，取沿管涵纵向车辆承重轮之间的距离，包括车轮着地宽度；当左右相邻轮压扩散后不重叠时，取车轮着地长度（mm）。



(a) 前后相邻轮压扩散后重叠



(b) 前后相邻轮压扩散后不重叠

图 5.1.5 车辆荷载扩散图

1-管廊；2-路面

表 5.1.5 多车道折减系数

车道数	1	2	3	4	5	6	7	8
m_f	1.20	1.00	0.78	0.67	0.60	0.55	0.52	0.50

5.1.6 当波形钢板管涵结构上部作用有其他类别的集中荷载时，应按式(5.1.5-1)计算其扩散到管涵上的分布压力，取 $m_f = 1$ ， $A_m =$

0。

5.1.7 当波形钢板管涵结构的抗震设防烈度大于或等于 7 度时，应考虑竖向地震作用。沿管涵纵向单位长度内的竖向地震作用标准值应按下式计算：

$$p_{Ev} = 0.65\alpha_{max} p_{eq} \quad (5.1.7)$$

式中： p_{Ev} —— 纵向单位长度内竖向地震作用标准值（N/mm）；
 α_{max} —— 水平地震影响系数最大值，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 采用；
 p_{eq} —— 纵向单位长度内等效重力荷载代表值，土和结构的自重取标准值，可变荷载取标准值的 50%（N/mm）。

5.1.8 波形钢板管涵结构的荷载组合应考虑车辆荷载可能的不利位置，荷载分项系数应按表 5.1.8 采用。

表 5.1.8 管涵的荷载及其分项系数

荷载分类	荷载名称	荷载分项系数	
		不利时	有利时
永久荷载	结构自重，回填土（含结构功能回填土）竖向压力，结构上部和影响范围内的设施及建筑物压力	1.3	0.9
	水压力及浮力	1.1	0
可变荷载	地面车辆荷载及动力作用，人群荷载，绿化植物重量，施工荷载，含分层回填土侧压力，施工机具荷载，设备运输及吊装荷载，地面堆载，注浆引起的附加荷载	1.5	0
偶然荷载	地震作用	1.3	0
	人防荷载	1.5	0

注：地震作用组合计算时，永久荷载分项系数取 1.2；施工阶段的承载力验算时，分项系数乘以 0.9。

5.2 弹性分析

5.2.1 波形钢板结构的内力与变形分析可采用一阶弹性分析。在构件细长或结构刚度较小的情况下，宜采用二阶弹性分析。

5.2.2 波形腹板构件在轴力、弯矩与剪力作用时，翼缘仅承担轴力与弯矩产生的截面法向应力，腹板仅承担截面剪力。

【条文说明】 清华大学的研究成果表明，腹板波形的存在极大地降低了腹板沿构件轴向的刚度，使得波形腹板构件在轴力与弯矩作用下，上下翼缘承担了几乎全部轴向力，只有靠近翼缘的小部分腹板上存在正应力。可以认为，在轴力与弯矩作用下，仅翼缘有效，腹板不承受任何轴向作用力，但截面剪力全部由波形腹板承担，且剪应力沿腹板高度均匀分布。见《波折腹板工形构件截面承载力设计方法》，收录于《建筑科学与工程学报》，2006年第23卷第4期。

5.2.3 波形钢板结构的内力和变形分析时，其结构分析有限元模型应符合下列要求：

1 结构分析有限元模型应能准确反映结构的受力性能、截面组成、材料特性、边界条件及荷载作用等；

2 依据结构或构件的截面组成，结构分析有限元模型中的单元类型可采用平面应力或平面应变单元、梁单元、壳单元和实体单元；

3 对于波形腹板组合构件，应准确处理波形钢板与钢管混凝土构件或者混凝土梁之间的内力与变形协调。

5.2.4 波形腹板工形截面构件的等效刚度应符合下列规定：

1 波形腹板工形截面构件可采用等效梁单元，其等效截面刚度应按下列公式计算：

1) 截面弯曲刚度：

$$EI_x = \frac{Eb_f t_f h_w^2}{2} \quad (5.2.4-1)$$

$$EI_y = \frac{Eb_f^3 t_f}{6} \quad (5.2.4-2)$$

2) 截面剪切刚度:

$$K_v = \frac{qGh_w t_w}{s} \quad (5.2.4-3)$$

3) 截面扭转刚度:

$$GI_t = \frac{G(h_w t_w^3 + 2b_f t_f^3)}{3} \quad (5.2.4-4)$$

4) 截面翘曲刚度:

$$EI_\omega = \frac{E(h_w + t_f)^2 b_f^3 t_f}{24} \quad (5.2.4-5)$$

2 波形腹板钢拱可采用等效梁单元, 其等效截面剪切刚度 K_v 应按下列公式计算:

$$K_v = \beta G A_w \frac{q_0}{s_0} \quad (5.2.4-6)$$

$$\beta = 1 - 630 \left(\frac{\Delta a}{h_w} \right)^2 \geq 0.9 \quad (5.2.4-7)$$

3 当波形腹板采用波浪腹板且波形为正弦式时, 其截面参数可按下列公式计算:

$$s = q \left[2.94 \left(\frac{a}{q} \right)^2 + 1.27 \frac{a}{q} + 0.94 \right] \quad (5.2.4-8)$$

$$I_{z1} = a^2 t_w \sqrt{\frac{0.250 + 2.35 a^2 / q^2}{1 + 0.342 a^2 / q^2}} \quad (5.2.4-9)$$

4 变截面构件的等效刚度应取单元两节点对应截面刚度的平均值。

式中： E —— 钢材的弹性模量 (N/mm^2)；
 G —— 钢材的剪切模量 (N/mm^2)；
 I_x 、 I_y —— 截面对 x 轴和 y 轴的惯性矩 (mm^4)；
 I_t —— 截面的扭转惯性矩 (mm^4)；
 I_w —— 截面的翘曲惯性矩 (mm^6)；
 I_{z1} —— 单位长度波形板对中性轴的面外惯性矩 (mm^3)；
 A_w —— 腹板的毛截面积 (mm^2)；
 b_f 、 t_f —— 翼缘的宽度和厚度 (mm)；
 h_w 、 t_w —— 腹板的高度和厚度 (mm)；
 q —— 波形腹板单个重复波的波长 (mm)；
 s —— 波形腹板单个重复波展开后的长度 (mm)；
 a —— 波形腹板的波幅 (mm)；
 q_0 —— 拱截面波形腹板纵向中线处的单个重复波形的波长 (mm)；
 s_0 —— 拱截面波形腹板纵向中线处的单个重复波形展开后的长度 (mm)；
 β —— 非均匀波形影响系数；
 Δa —— 腹板上下两端的波幅差 (mm)。

【条文说明】 在波形腹板工形截面承受压弯荷载时，因为波形特征，腹板几乎不能承受正应力，所以弯曲刚度计算忽略腹板贡献。在波浪腹板工形截面承受剪力时，剪力几乎全部由腹板承担，且近似均匀分布，所以剪切刚度计算仅考虑腹板贡献，并将腹板刚度乘以 q/s 的折减系数。波浪腹板工形截面扭转刚度的计算直接沿用平腹板工形截面的计算方法。在波浪腹板工形截面翘曲刚度的推导过程中，假定腹板不产生翘曲正应力，因此得到的翘曲惯性矩沿构件轴线不变。

波形腹板工形截面的扭转惯性矩计算公式与平腹板工形截面相同，均按式(1)计算：

$$I_t = (h_w t_w^3 + 2b_f t_f^3) / 3 \quad (1)$$

波形腹板和平腹板工形截面的翘曲惯性矩计算存在一些差异。从翘曲惯性矩的定义出发，对波形腹板梁的翘曲惯性矩进行了推导，结果如下：

对于图 1 所示的任一腹板偏心的工形截面，其翘曲惯性矩按式(2)计算：

$$I_\omega^* = \frac{h_w^2}{4} \left[\frac{b_f^3}{6} t_f + 2(1-\eta)^2 a_x^2 b_f t_f \right] \quad (2)$$

其中：

$$\eta = \frac{2b_f t_w + h_w t_w}{2b_f t_f + h_w t_w}$$

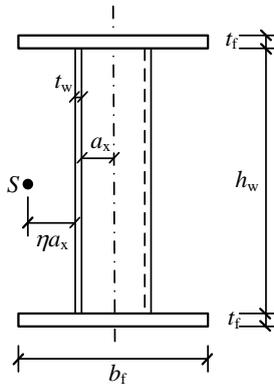


图 1 波形腹板构件任一截面的尺寸

假设腹板波形不会导致腹板截面厚度的变化，那么对于波形腹板的任意一小段截面，腹板偏离中心的距离为 a_x ，均可由式(3)计算出其翘曲惯性矩。对于整个波形腹板构件，可以根据每一小

段截面的翘曲扭矩与转角之间的关系通过积分求解出整体构件的翘曲扭矩与转角之间的关系,并由此得到构件的平均翘曲惯性矩。但由于积分过程十分复杂,这里近似地用各微段翘曲惯性矩的平均值代替:

$$I_{\omega} = \frac{1}{q} \int_0^q I_{\omega}^* dx = \frac{h_w^2}{4} \left[\frac{b_f^3}{6} t_f + (1-\eta)^2 a^2 b_f t_f \right] \quad (3)$$

将式(3)的翘曲惯性矩代入到屈曲方程中,计算得到的屈曲荷载与有限元结果十分接近,可用于精确计算波形腹板工形截面构件的弯扭屈曲荷载。

若直接假定腹板不产生翘曲正应力,则推导所得的翘曲惯性矩为:

$$I_{\omega} = \frac{(h_w + t_f)^2 b_f^3 t_f}{24} \quad (4)$$

对于常用构件,发现式(3)中的后一项对计算结果影响很小,可以忽略,式(4)和式(3)所得的计算结果误差很小,因此采用式(4)进行简化计算。

波形腹板钢拱制作时,由于腹板在冷弯成弧形的过程中,其中线以上的波折被拉伸(波长变大波幅变小),而中线以下的波折被压缩(波长变小波幅变大),因此沿截面高度方向的波折不再是均匀的。研究表明,非均匀波形将降低截面的抗剪刚度,本条文即考虑此因素对波形腹板钢拱截面剪切刚度的影响。

5.2.5 波形腹板钢拱的结构分析有限元模型应符合下列规定:

1 波形腹板工形截面构件简化分析时,可采用平腹板工形截面的梁单元,按折减腹板弹性模量或折减腹板厚度的方法来处理:

- 1) 采用折减腹板弹性模量的方法时,对其弹性模量乘以

1×10^{-4} 或更小的折减系数；

- 2) 采用折减腹板厚度的方法时，对其腹板厚度乘以 1×10^{-4} 或更小的折减系数；
 - 3) 应修正截面剪切刚度，使其等于波浪腹板工形截面的剪切刚度，截面的其他刚度常数可对等效截面直接积分计算；
- 2 波形腹板钢拱简化分析时，相邻梁单元夹角不宜超过 3° 。

【条文说明】 由于腹板波折和曲线拱轴的特点，波形腹板钢拱的壳单元模型建立和分析计算复杂耗时。当只用于弹性内力和变形计算时，可采用简化的梁单元模型，使用平腹板工形截面代替波形腹板工形截面。梁单元简化模型可采用多段直线，通过以直代曲的方法逼近拱轴线，因此需要足够的单元数目。分析表明，当相邻梁单元的夹角不超过 3° 时，采用直梁单元模拟曲线钢拱一般能够满足计算精度的要求。

通过折减平腹板的弹性模量或厚度，来模拟波形腹板不承受轴向力的特点。同时，平腹板梁单元的截面剪切刚度应修正为波形腹板工形截面的剪切刚度。

5.2.6 波形钢板墙简化分析时，可等效为正交异性平钢板墙，其等效刚度常数应按下列公式计算：

1 当采用单层波形钢板时：

$$D_x = \frac{Et_w a^2}{2b_0} \left(q_1 + \frac{q_2}{3 \cos \gamma_c} \right) \quad (5.2.6-1)$$

$$D_y = \frac{q}{s} \cdot \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5.2.6-2)$$

$$H_s = \frac{s}{q} \cdot \frac{Et_w^3}{12(1+\nu)} \quad (5.2.6-3)$$

2 当采用平行对扣的双层波形钢板墙时：

$$D_x = \frac{E}{6q} \cdot [(q_1 + q_3)t_w^3 + 4(2q_0 + 3q_1)t_w a^2] \quad (5.2.6-4)$$

$$D_y = \frac{q}{q_3 + \frac{q_0^2 + 2q_0q_1}{2q_0 + 3q_1}} \cdot \frac{Et_w^3}{6(1-\nu^2)} \quad (5.2.6-5)$$

$$H_s = \frac{2Et_w}{qs(1+\nu)} \cdot a^2 (q_1 + q_2)^2 \quad (5.2.6-6)$$

3 当采用正交对扣的双层波形钢板墙时:

$$D_x = D_{x1} + \frac{Et_w^3 b_0}{12(1-\nu^2)} \frac{\left(\frac{2}{3}q_0 + q_1\right)s + 3(q_0 + q_1)^2}{\left(\frac{2}{3}q_0 + q_1\right)s^2 - (q_0 + q_1)^2 s} \quad (5.2.6-7)$$

$$H_s = 1.82 \sqrt{\frac{t_w}{a}} \cdot \frac{Et_w a^2}{1+\nu} \cdot \frac{(q_1 + q_2)^2}{q(s + b_0)} \quad (5.2.6-8)$$

4 单块波形钢板的刚度常数:

$$D_{x1} = \frac{E}{q} \cdot \left\{ \frac{(q_1 + q_3)t_w^3}{12} + \left[\frac{2}{3}q_0 + q_1 - \frac{(q_0 + q_1)^2}{s} \right] a^2 t_w \right\} \quad (5.2.6-9)$$

$$D_{y1} = \frac{q}{s} \cdot \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5.2.6-10)$$

$$H_{s1} = \frac{s}{q} \cdot \frac{Et_w^3}{12(1+\nu)} \quad (5.2.6-11)$$

式中: D_x 、 D_y —— 波形钢板墙对强轴和弱轴的弯曲刚度常数

($\text{N}\cdot\text{mm}$);

H_s —— 波形钢板墙的扭转刚度常数 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

D_{x1} 、 D_{y1} —— 单块波形钢板对强轴和弱轴的弯曲刚度常数 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

H_{s1} —— 单块波形钢板的扭转刚度常数 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

ν —— 钢材的泊松比，可取 0.3；

q_0 —— 波形钢板过渡段的宽度（mm）；

q_1 —— 波形钢板波峰段的宽度（mm）；

q_2 —— 波形钢板过渡段的投影宽度（mm）；

q_3 —— 波形钢板波谷段的宽度（mm）；

γ_c —— 波形钢板过渡段的倾角。

【条文说明】原则上，应采用壳单元精确分析波形钢板墙，但其计算比较复杂，计算成本高，不适合工程设计。因此，波形钢板墙可近似简化成正交异形板。其中，假定双层波形钢板墙的两块波形钢板为一个整体，忽略了螺栓间距的影响。

5.2.7 当波形钢板管涵结构采用明挖回填土施工方式时，波形钢板管涵结构分析应采用二维或三维有限元模型（图 5.2.7），且应符合下列规定：

1 沿管涵纵向，模型尺寸不应小于管涵结构跨度的 50%，当管涵内部有集中荷载时，模型尺寸应取为集中荷载作用点间距，且集中荷载作用点位于模型中部；沿管涵横向，管涵两侧填土应取 1.5 倍的管涵结构跨度、计算矢高两倍与管顶上部的覆土总厚度之和的 1.5 倍两者中的较大值，且不应小于 2500mm；管涵基础回填材料的高度不应小于 1000mm，管涵顶部填土高度应按实际情况取值；

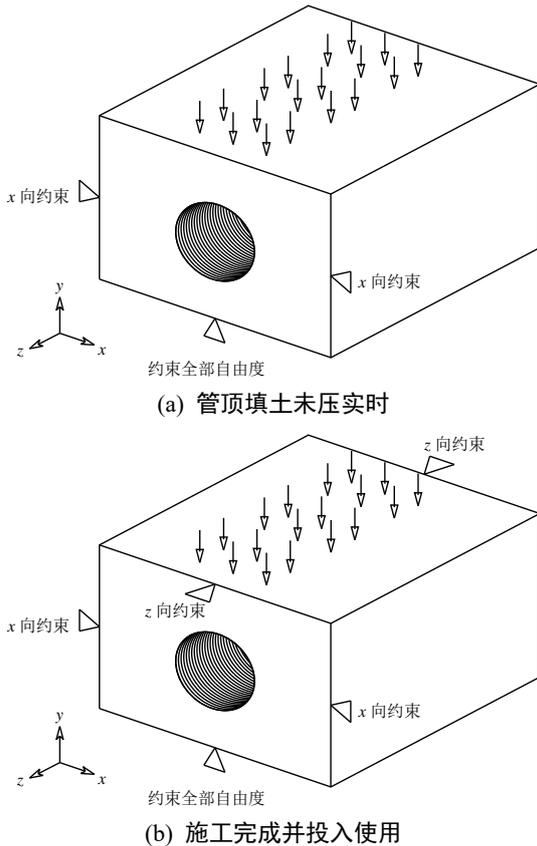


图 5.2.7 波形钢板管涵结构有限元模型

2 应准确模拟原状土和各层填土的几何尺寸和物理性质，各参数的取值应具有 90%的保证率，泊松比应取平均值 3；

3 应准确模拟回填过程，对管涵进行分步加载，每步加载应模拟前一步压实后回填土的土工性质。加载步数不应少于 3 步，第 1 步为回填土从基坑底到起拱线，第 2 步为回填土到管顶，第 3 步为回填土到地面；

4 当计算永久荷载作用下的内力和变形时，应考虑徐变的影响并折减土体的变形模量；

5 网格尺寸应按波形钢板管涵、管涵附近土体及远离管涵土体的顺序从小到大划分；

6 边界条件应根据不同施工进度确定。对应于管涵顶填土未压实的情况，有限元模型底面约束所有位移和转角自由度，两侧立面施加 x 向约束，其余面自由，顶面施加荷载；对应于施工完成并投入使用后的情况，有限元模型底面约束所有位移和转角自由度，两侧立面施加 x 向约束，前后立面施加 z 向约束，顶面施加荷载。

【条文说明】 模拟回填过程应考虑加载过程中的不利情况，包括回填土从基坑底到起拱线时的两侧挤压上拱的情况，回填土到管顶附近时的结构受力最不利位置，以及回填土到地面的情况。

有限元网格划分应满足精度要求，所以波形钢板管涵的网格划分相比土体更为密集。

5.2.8 当波形钢板管涵结构用于既有工程的加固或涵洞，采用暗挖的施工方式时，结构分析有限元模型应与实际结构尺寸、边界条件、材料特性和场地条件等相符。

【条文说明】 桥涵和管涵结构可采用明挖土方和暗挖土方的施工。明挖土方的施工要考虑结构回填土施工过程对结构成型内力和变形的影响，所以要进行结构设计与施工过程一体化分析。暗挖土方的施工过程很少涉及回填土施工对结构成型内力的影响，往往在暗挖结构成型后安装波形钢板桥涵和管涵，暗挖土方的施工更多用于既有管涵的加固工程中。在加固工程中，结构自重更多应由既有结构承担，而后续作用的可变荷载由既有结构和新增管涵结构两者共同承担。

5.3 弹塑性分析

5.3.1 依据结构设计要求，波形钢板结构的弹塑性分析可采用静

力弹塑性分析法或弹塑性时程分析法。

5.3.2 波形钢板结构弹塑性分析应符合下列要求：

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 材料性能参数宜通过试验分析并取平均值确定，也可按相关标准的规定确定；

3 宜采用空间结构计算模型，宜计入结构或构件二阶效应；

4 明挖施工的波形钢板管涵结构，应进行施工过程的填埋土模拟分析，并以施工过程完成后的状态作为弹塑性分析的初始状态。

5.3.3 弹塑性分析时，波形钢板结构或构件的有限单元类型和材料本构模型应符合下列规定：

1 波形腹板工形截面构件可采用梁单元，波形腹板部分可采用等效薄膜单元代替；

2 波形钢板组合构件宜采用等效截面的分层纤维模型；

3 当进行稳定承载力分析时，波形腹板钢拱宜采用壳单元，并考虑拱的整体初始几何缺陷和翼缘及腹板的板件初始几何缺陷；可采用平面内最低阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷的分布形式，缺陷幅值可按拱跨度的 $1/n$ 取值，按《钢结构设计标准》GB 50017 中 a、b、c、d 类截面分别取 $n = 600, 500, 400, 300$ ；当能够保证板件局部屈曲不先于钢拱的整体失稳破坏而发生时，可采用梁单元模型进行计算；

4 波形钢板墙可采用剪切膜单元；

5 波形钢板管涵应采用三维模型计算，波形钢板管涵宜采用壳单元或梁单元，土体结构宜采用实体单元；

6 钢材和混凝土的本构模型可按现行团体标准《波形钢板组合结构技术规程》T/CECS 624 确定。

【条文说明】 根据波形钢板结构的受力特性采用不同的单元

类型。采用壳单元对波形腹板钢拱进行精细化建模和分析并充分考虑初始几何缺陷和材料弹塑性，能够较为准确地反映其变形和应力发展过程，获得极限承载力和破坏模式。由于钢拱平面内稳定承载力对整体反对称初始缺陷较为敏感，可采用平面内最低阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷的分布形式。

5.3.4 罕遇地震作用下进行结构弹塑性计算时，波形钢板结构的阻尼比应取 0.05。

【条文说明】 本条参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011。

6 波形腹板钢构件设计

6.1 一般规定

6.1.1 波形腹板构件用于门式刚架轻型房屋钢结构梁柱时，其焊接与螺栓连接应符合现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 的规定。

6.1.2 波形腹板构件用作门式刚架轻型房屋钢结构厂房吊车梁时，应符合《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 中关于吊车额定起重量的要求。依据《钢结构设计标准》GB 50017 设计的大型厂房，其波形腹板吊车梁的额定起重量不宜超过 50t。

【条文说明】在门式刚架轻型房屋钢结构设计中，吊车梁常采用平腹板工形截面和波形腹板工形截面。研究表明，当吊车梁采用波形腹板工形截面时，不仅不需要设置加劲肋，而且抗疲劳性能相比平腹板工形截面有较大提升。《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB51022 中关于最大吊车吨位的规定，主要是从刚架的整体刚度考虑，确保结构在使用过程中不会由于吊车刹车力而导致刚架侧移过大。这一条仍然适应采用波形腹板制作的门式刚架结构的吊车梁。

在一些刚度较大且依据《钢结构设计标准》GB 50017 设计的大型厂房中，当采用波形腹板吊车梁时，可以不受上述限制，但考虑到目前的工程应用经验及波形腹板轧制能力，吊车额定起重量不宜大于 50t。

6.1.3 波形腹板构件用于框架结构主梁时，应在主梁端部一定范围内采用平腹板过渡区段，其平腹板过渡区段长度不宜小于 1.5 倍的腹板高度。波形腹板构件用于框架结构次梁且次梁与主梁铰接时，次梁在其端部也应采用平腹板过渡。

【条文说明】 波形腹板构件除应用于门式刚架轻型房屋结构外，也可用于框架结构中的主梁和次梁。考虑到主梁节点承担较大弯矩且具有一定的耗能要求，故在端部区段一定范围内进行加强，以实现结构设计功能要求。

6.1.4 波形腹板构件特别适用于以受弯为主的大跨度梁系结构，包括建筑结构的屋面梁、公路和市政工程中的桥梁、工业厂房中桥式吊车的主（箱）梁等。

【条文说明】 波形腹板构件应用范围广泛，特别应用在以受弯为主的梁系结构中，会产生较好的经济效益，因为采用高而薄的腹板，使其腹板用钢量降低。结构梁跨度越大，其设计经济性越好。

6.2 受弯构件设计

6.2.1 在主平面内受弯的波形腹板构件，其受弯强度应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (6.2.1-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx} / \gamma_{RE}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny} / \gamma_{RE}} \leq f \quad (6.2.1-2)$$

式中： M_x 、 M_y —— 同一截面处对 x 轴和 y 轴的弯矩设计值
($\text{N}\cdot\text{mm}$)；

W_{nx} 、 W_{ny} —— 对 x 轴和 y 轴的净截面模量，忽略腹板的贡献 (mm^3)；

γ_x 、 γ_y —— 对 x 轴和 y 轴的截面塑性发展系数，取
 $\gamma_x = 1.0$ ， $\gamma_y = 1.2$ ；对于需要计算疲劳的
 波形腹板构件梁，宜取 $\gamma_y = 1.0$ ；

f —— 钢材的抗弯强度设计值 (N/mm^2)。

【条文说明】 绕强轴 (x 轴) 弯曲时，由于腹板不参与抗弯
 受力，构件并不具有塑性发展空间，所以在计算截面模量时，不
 考虑腹板部分的贡献，取 $\gamma_x = 1.0$ ；而绕弱轴 (y 轴) 弯曲时，参
 照《钢结构设计标准》GB 50017 的相关规定取值，取 $\gamma_y = 1.2$ 。

6.2.2 在主平面内受弯的波形腹板构件，其受剪强度应按下列公
 式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{V}{A_{\text{wn}}} \leq f_v \quad (6.2.2-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{V}{A_{\text{wn}}/\gamma_{\text{RE}}} \leq f_v \quad (6.2.2-2)$$

式中： V —— 计算截面处沿腹板平面作用的剪力设计值 (N)；

A_{wn} —— 腹板的净截面面积 (mm^2)；

f_v —— 钢材的抗剪强度设计值 (N/mm^2)。

【条文说明】 研究表明，波形腹板工形构件在受剪时腹板承
 受 99% 以上的剪力，剪应力沿腹板高度方向分布均匀。

6.2.3 在主平面内的波形腹板构件，其受弯挠曲值应按下式计算：

$$\Delta = \left(1 + k_q \frac{b_f t_f h_w}{t_w l^2} \right) \Delta_M \quad (6.2.3)$$

式中： k_q —— 剪切变形影响系数，应按表 6.2.3 取值；

b_f 、 t_f —— 翼缘的宽度和厚度 (mm)；

h_w 、 t_w —— 腹板的高度和厚度 (mm);

l —— 波形腹板构件的跨度 (mm);

Δ_M —— 按线弹性理论计算得到的波形腹板构件跨中挠度, 忽略腹板对截面抗弯刚度的贡献 (mm)。

表 6.2.3 不同工况下的剪切变形影响系数

工况	均布荷载作用的简支梁	跨中集中荷载作用的简支梁	均布荷载作用的悬臂梁	边缘集中荷载作用的悬臂梁
k_q	15.0	18.8	6.26	4.69

【条文说明】 波形腹板工形构件的受弯挠度计算须考虑腹板剪切变形的影响。

6.2.4 当铺板密铺在梁的受压翼缘上并与其牢固相连, 能阻止梁受压翼缘的侧向位移时, 可不计算波形腹板梁的整体稳定性。

【条文说明】 本条主要参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 执行。

6.2.5 除本规程第 6.2.4 条所规定情况外, 在最大刚度主平面内受弯的波形腹板梁, 其整体稳定性应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f \quad (6.2.5-1)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x / \gamma_{RE}} \leq f \quad (6.2.5-2)$$

式中: M_x —— 绕强轴作用的最大弯矩设计值 (N·mm);

W_x —— 按受压最大纤维确定的毛截面模量 (mm³), 忽略腹板的贡献;

φ_b —— 波形腹板梁的整体稳定系数, 应按本规程第 6.2.6 条确定。

6.2.6 波形腹板梁的整体稳定系数应按下列公式计算：

$$\varphi_b = \frac{1}{(1 - \lambda_{b0}^{2n} + \lambda_b^{2n})^{1/n}} \leq 1.0 \quad (6.2.6-1)$$

$$n = 2\sqrt[3]{\frac{b}{h}} \quad (6.2.6-2)$$

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{W_x f_y}{M_{cr}}} \quad (6.2.6-3)$$

$$M_{cr} = \beta_b \frac{\pi^2 E I_y}{l^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{l^2 G I_t}{\pi^2 E I_\omega} \right)} \quad (6.2.6-4)$$

式中： M_{cr} ——波形腹板梁的弹性屈曲临界弯矩（N·mm）；

b 、 h ——受压翼缘宽度和上、下翼缘中面之间的距离（mm）；

λ_{b0} ——起始正则化长细比，取 0.3；

λ_b ——波形腹板梁的通用长细比；

n ——结构类型影响系数；

β_b ——等效临界弯矩系数，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定取值。

【条文说明】波形腹板梁发生弯扭失稳，其屈曲荷载与构件的扭转刚度与翘曲刚度有关。本条参考现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022，其中梁的起始正则化长细比 λ_{b0} 和结构类型影响系数 n 的取值参考陈绍蕃、顾强主编的《钢结构》上册（第三版）。

6.2.7 波形腹板的受剪稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{V}{\eta\varphi_s A_w} \leq f_v \quad (6.2.7-1)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{V}{\eta\varphi_s A_w / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (6.2.7-2)$$

式中: V —— 计算截面沿腹板平面作用的剪力设计值 (N);

A_w —— 腹板的毛截面面积 (mm^2);

d —— 腹板开孔的孔洞直径 (mm);

η —— 考虑开孔的腹板受剪稳定承载力折减系数; 当腹板未开孔时, 取 $\eta = 1.0$; 当孔洞直径在 $1/6 h_w \sim 2/3 h_w$ 范围内时, 按式(6.2.8-17)计算;

φ_s —— 腹板的受剪稳定系数。

6.2.8 当波形腹板采用波浪腹板且波形为正弦式时, 波形腹板的受剪稳定系数按下列公式计算:

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.04\lambda_s & \lambda_s < 0.5 \\ -\lambda_s^2 + \lambda_s + 0.73 & 0.5 \leq \lambda_s < 1.0 \\ 0.73 / \lambda_s^{1.4} & \lambda_s \geq 1.0 \end{cases} \quad (6.2.8-1)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{f_{vy}}{\tau_{cr,I}}} \quad (6.2.8-2)$$

$$\tau_{cr,I} = \frac{\tau_{cr,G} \cdot \tau_{cr,L}}{\sqrt{\tau_{cr,G}^2 + \tau_{cr,L}^2}} \quad (6.2.8-3)$$

$$\tau_{cr,L} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s/2} \right)^2 \quad (6.2.8-4)$$

$$k_L = \alpha + \beta(a/q) \quad (6.2.8-5)$$

$$\alpha = \left[\begin{array}{l} 5.16 + 0.539 \frac{a}{t_w} - 0.00614 \left(\frac{a}{t_w} \right)^2 - 11.2 / \left(\frac{h_w}{q} \right) \\ + 32.6 / \left(\frac{h_w}{q} \right)^2 + 0.762 \left(\frac{a}{t_w} \right) / \left(\frac{h_w}{q} \right) \end{array} \right] \quad (6.2.8-6)$$

$$\beta = 0.816 - 5.27 \left(\frac{a}{t_w} \right)^{0.5} \quad (6.2.8-7)$$

$$\tau_{cr,G} = k_G \frac{D_y^{1/4} D_z^{3/4}}{L^2 t_w} \quad (6.2.8-8)$$

$$D_z = EI_{z1} \quad (6.2.8-9)$$

$$k_G = \kappa + \omega(h_w / l) - \kappa(h_w / l)^{0.5} \quad (6.2.8-10)$$

$$\kappa = \kappa_1 + \kappa_2 \frac{q}{l} \quad (6.2.8-11)$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \frac{q}{l} \quad (6.2.8-12)$$

$$\kappa_1 = \left[\begin{array}{l} 68.1 + 5.87(a/t_w) - 0.655(a/t_w)^2 \\ + 0.0159(a/t_w)^3 + 87.0(a/q) \end{array} \right] \quad (6.2.8-13)$$

$$\kappa_2 = \left[\begin{array}{l} 184 + 287(a/t_w) - 4.35(a/t_w)^2 + 541(a/q) \\ + 693(a/q)^2 + 89.9(a/q)(a/t_w) \end{array} \right] \quad (6.2.8-14)$$

$$\omega_1 = \left[\begin{array}{l} 60.7 - 2.27(a/t_w) + 0.0433(a/t_w)^2 - 2.84(a/q) \\ + 4.97(a/q)^2 + 1.45(a/q)(a/t_w) \end{array} \right] \quad (6.2.8-15)$$

$$\omega_2 = \left[\begin{array}{l} 65.5 + 75.7(a/t_w) - 1.11(a/t_w)^2 + 345(a/q) \\ + 362(a/q)^2 + 6.24(a/q)(a/t_w) \end{array} \right] \quad (6.2.8-16)$$

$$\eta = 0.55(d/h_w)^2 - 1.55d/h_w + 1 \quad (6.2.8-17)$$

式中： λ_s —— 波形腹板的通用高厚比；

f_{vy} —— 钢材的抗剪屈服强度，取 $f_y / \sqrt{3}$ (N/mm²)；

$\tau_{cr,I}$ —— 波形腹板相关屈曲应力 (N/mm²)；

$\tau_{cr,L}$ —— 波形腹板局部屈曲应力 (N/mm²)；

$\tau_{cr,G}$ —— 波形腹板整体屈曲应力 (N/mm²);

D_y —— 波形腹板对弱轴的弯曲刚度常数, 按式(5.2.6-2)计算 (N·mm);

D_z —— 波形腹板对强轴的弯曲刚度常数 (N·mm);

I_{z1} —— 单位长度波形板对中性轴的面外惯性矩, 按式(5.2.4-9)计算 (mm³);

α 、 β —— 局部屈曲应力计算参数;

κ 、 ω —— 整体屈曲应力计算参数;

κ_1 、 κ_2 —— κ 的计算参数;

ω_1 、 ω_2 —— ω 的计算参数。

【条文说明】 波形板可以看成正交异性板, 两个方向的柱面刚度相差较大。定义 D_y 为波形板绕较弱方向的柱面刚度, 可按式(5)计算。该表达式是通过折减平钢板的柱面刚度得到, 考虑了板件沿波形方向表观长度与展开长度的一致。

$$D_y = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{q}{s} \quad (5)$$

定义 D_z 为波形板绕较强方向的柱面刚度, 可根据式(6)计算。 I_{z1} 为该方向单位长度波形板绕中性轴的面外惯性矩。

$$D_z = EI_{z1} \quad (6)$$

对于常用波形腹板的应用范围, 一般有 $D_z/D_y > 50$ 。这种性能使得波形腹板的剪切屈曲荷载与平腹板相比大大提高。

波形腹板一般会发生两种形式的剪切屈曲模态, 即整体屈曲与局部屈曲。根据相关研究成果 (详见《Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall》, 收录于 Engineering Structures, 2016年8月刊, 136-146页), 波形板的尺寸在常用工

程范围内时，受剪局部屈曲应力可按式(6.2.8-4)-(6.2.8-7)计算，受剪整体屈曲应力可按式(6.2.8-8)-(6.2.8-15)计算。

波形腹板屈曲后承载力迅速下降，其屈曲后行为对初始几何缺陷较为敏感。考虑到由于整体屈曲与局部屈曲相互影响对稳定承载力产生的不利影响，计算波形腹板抗剪极限承载力引入相关屈曲应力，相关屈曲应力按照式(7)计算。

$$\left(\frac{1}{\tau_{cr,I}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\tau_{cr,G}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau_{cr,L}}\right)^2 \quad (7)$$

取波形腹板一阶屈曲模态作为初始缺陷形式，考虑其对腹板受剪承载力的影响。根据对波形腹板出厂尺寸误差的控制，当一阶屈曲模态表现为局部屈曲模态时，设计可忽略几何初始缺陷的影响，当一阶屈曲模态表现为整体屈曲模态时，计算时取初始缺陷幅值为 $h_w / 750$ 。

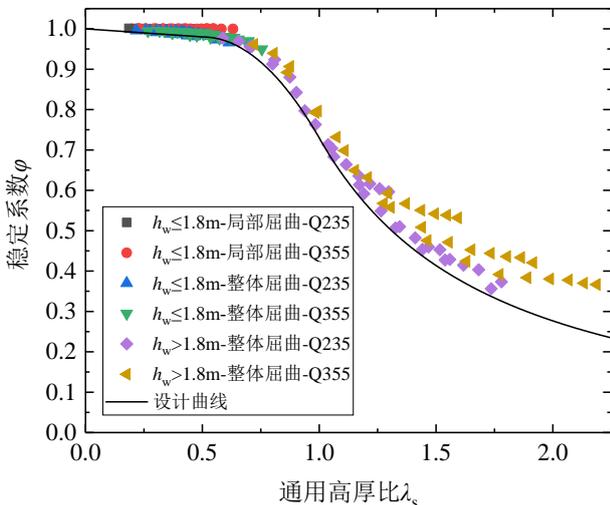


图2 $\varphi_s - \lambda_s$ 曲线

清华大学的研究成果表明，在工程常用的波形腹板的波形尺寸范围（即 $q=150\text{mm}$ ， $a=22.5\text{mm}$ ， $t=2\sim 6\text{mm}$ ），通过大量精细化有限元数值分析拟合得到 $\varphi_s - \lambda_s$ 曲线（即公式(6.2.8-1)，分为三段，见图2）：当 λ_s 较小时，极限剪应力接近受剪屈服强度，随着 λ_s 的增加稳定系数缓慢减小；当 λ_s 适中时，随着 λ_s 的增加稳定系数迅速减小；当 λ_s 较大时，稳定系数与 λ_s^2 成反比减小，极限承载力并不等于弹性屈服荷载。

对于腹板开孔的波形腹板构件，研究表明，腹板截面上的剪应力不再均匀分布，且腹板中有正应力存在，受力状态复杂。腹板开孔构件的受剪稳定承载力可通过折减腹板未开孔构件的受剪稳定承载力确定，折减系数 η 的公式 6.2.7-16 是在大量数值分析基础之上获得的。这部分研究内容见《腹板开有圆孔的波形腹板工形构件抗剪承载力设计方法研究》，收录于《工业建筑》，2012年第42卷第7期。

6.2.9 隅撑支撑波形腹板梁和隅撑的设计应符合下列规定：

1 实腹式刚架斜梁在平面内可按受弯构件计算强度，在平面外应按受弯构件计算稳定；

2 实腹式刚架斜梁的平面外计算长度，应取侧向支承点间的距离，当存在系杆时可取系杆间距；当斜梁两翼缘侧向支承点间的距离不等时，应取最大受压翼缘侧向支承点间的距离；

3 当实腹式刚架斜梁的下翼缘受压时，支承在屋面斜梁上翼缘的檩条，不能单独作为屋面斜梁的侧向支承；

4 当屋面斜梁和檩条之间设置的隅撑满足下列条件时，下翼缘受压的屋面斜梁的平面外计算长度可考虑隅撑的作用：

- 1) 在屋面斜梁的两侧均设置隅撑；
- 2) 隅撑的上支承点的位置不低于檩条形心线；

3) 符合对隅撑的设计要求；

5 隅撑单面布置时，应考虑隅撑作为檩条的实际支座承受的压力对屋面斜梁下翼缘的水平作用；屋面斜梁的强度和稳定性计算宜考虑其影响。

6 隅撑支撑梁的弹性屈曲临界弯矩应按下列公式计算；

1) 当计算长度范围内布置有多道隅撑时：

$$M_{cr} = \begin{cases} C_A \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t L^2}{\pi^2 EI_\omega}\right) + \frac{K_Z L^4}{\pi^4 EI_y l_s}} & K_Z \leq K_{ZA} \\ M_{crA} + (M_{crB} - M_{crA}) \frac{K_Z - K_{ZA}}{K_{ZB} - K_{ZA}} & K_{ZA} < K_Z < K_{ZB} \\ M_{crB} & K_Z \geq K_{ZB} \end{cases} \quad (6.2.9-1)$$

$$M_{crA} = C_A \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t L^2}{\pi^2 EI_\omega}\right) + \frac{K_{ZA} L^4}{\pi^4 EI_y l_s}} \quad (6.2.9-2)$$

$$M_{crB} = C_B \frac{\pi^2 EI_y}{l_s^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t l_s^2}{\pi^2 EI_\omega}\right)} \quad (6.2.9-3)$$

$$K_{ZA} = \frac{\pi^2 GI_t}{L} (n_k - 1) [1 + (n_k^2 + 1) \frac{\pi^2 EI_\omega}{GI_t L^2}] \quad (6.2.9-4)$$

$$K_{ZB} = \frac{\pi^4 EI_\omega}{l_s^3} \left(1 + \frac{GI_t l_s^2}{\pi^2 EI_\omega}\right) A_n \quad (6.2.9-5)$$

$$C_A = 2.88 - 1.87k - 0.01k^2 + (k - 1)\xi^{0.043} \quad (6.2.9-6)$$

$$\xi = \frac{K_Z L^4}{EI_\omega l_s} \geq 1000 \quad (6.2.9-7)$$

$$C_B = 1.75 - 1.05k_s + 0.30k_s \leq 2.30 \quad (6.2.9-8)$$

$$k_s = 1 - \frac{1 - k}{n_k + 1} \quad (6.2.9-9)$$

2) 当计算长度范围内仅布置有一道隅撑时：

$$M_{\text{cr}} = \begin{cases} M_{\text{crO}} + (M_{\text{crD}} - M_{\text{crO}}) \frac{K_Z}{K_{\text{ZD}}} & K_Z < K_{\text{ZD}} \\ M_{\text{crD}} & K_Z \geq K_{\text{ZD}} \end{cases} \quad (6.2.9-8)$$

$$M_{\text{crO}} = C_O \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t L^2}{\pi^2 EI_\omega}\right)} \quad (6.2.9-9)$$

$$M_{\text{crD}} = C_D \frac{\pi^2 EI_y}{l_s^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t l_s^2}{\pi^2 EI_\omega}\right)} \quad (6.2.9-10)$$

$$K_{\text{ZD}} = \frac{GI_t}{L} \left(30 + 100 \frac{\pi^2 EI_\omega}{GI_t L^2}\right) \quad (6.2.9-11)$$

$$C_O = 1.75 - 1.05k + 0.30k \leq 2.30 \quad (6.2.9-12)$$

$$C_D = 1.75 - 1.05k_s + 0.30k_s \leq 2.30 \quad (6.2.9-13)$$

$$k_s = \frac{1+k}{2} \quad (6.2.9-14)$$

3) 隅撑对梁的等效约束刚度应按下式计算:

$$K_Z = \frac{EI_p}{0.175(1-\gamma)^2 l_p} \quad (6.2.9-15)$$

4) 梁计算长度梁段的弯矩比应按下式计算:

$$k = \frac{M_2}{M_1} \quad (6.2.9-16)$$

式中: M_{crO} —— 无隅撑简支梁的弹性屈曲荷载 (N·mm);
 M_{crA} 、 M_{crB} —— 多隅撑支撑梁的单波屈曲弹性屈曲荷载临界值和达到完全约束刚度时的弹性屈曲荷载 (N·mm);
 M_{crD} —— 单隅撑支撑梁达到完全约束刚度时的弹性屈曲荷载 (N·mm);

- K_Z —— 隅撑檩条支撑体系的等效约束刚度 (N·mm);
 K_{ZA} 、 K_{ZB} —— 多隅撑支撑梁的单波屈曲临界约束刚度和完全约束刚度 (N·mm);
 K_{ZD} —— 单隅撑梁的完全约束刚度 (N·mm);
 L —— 梁的计算长度 (mm);
 l_s —— 相邻隅撑的间距 (mm);
 l_p —— 檩条的跨度 (mm);
 I_p —— 檩条截面对强轴的惯性矩 (mm⁴);
 C_O —— 无隅撑简支梁的等效弯矩系数;
 C_A 、 C_B —— 多隅撑支撑梁的单波屈曲等效弯矩系数和达到完全约束刚度时的等效弯矩系数;
 C_D —— 单隅撑支撑梁达到完全约束刚度时的等效弯矩系数;
 ξ —— 隅撑对梁的相对约束刚度;
 k_s —— 隅撑间距梁段的弯矩比;
 k —— 梁计算长度梁段的弯矩比, 使构件段产生同向曲率时取同号, 使构件段产生反向曲率时取异号, $|M_1| \geq |M_2|$;
 n_k —— 计算长度范围内隅撑的数目;
 γ —— 隅撑与檩条的连接点离开主梁距离与檩条跨度的比值;
 A_n —— 多隅撑支撑梁的完全约束刚度计算系数, 应按表 6.2.8 取值。

表 6.2.8 多隅撑支撑梁的完全约束刚度计算系数

n_k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

0	—	—	1.46	1.61	1.72	1.80	1.86	1.91	1.95	1.98
10	2.01	2.04	2.06	2.07	2.09	2.10	2.12	2.13	2.14	2.15
20	2.15	2.16	2.17	2.18	2.18	2.19	2.19	2.20	2.20	2.21
30	2.21	2.21	2.22	2.22	2.22	2.23	2.23	2.23	2.23	2.24
40	2.24	2.24	2.24	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.26

【条文说明】 本条结合有限元模型，对现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 中弹性屈曲临界弯矩进行了修正计算。

现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 将隅撑简化为侧向支撑并连续化处理，弹性屈曲弯矩按照最小值计算，所得结果不能覆盖所有隅撑布置情况。在隅撑间隔布置的情况下连续化处理可能不成立。而隅撑刚度较弱时有可能小于无隅撑简支梁的弹性屈曲临界弯矩，计算结果不合理。

本条将隅撑简化为扭转弹簧，檩条远端保守简化为铰接，隅撑给斜梁提供一个转动约束刚度。按照实际情况，仍然将隅撑做离散化处理，弹性屈曲临界弯矩和约束刚度、斜梁刚度、隅撑间距有关。

隅撑提供的约束刚度按照图 3 简化模型进行推导。

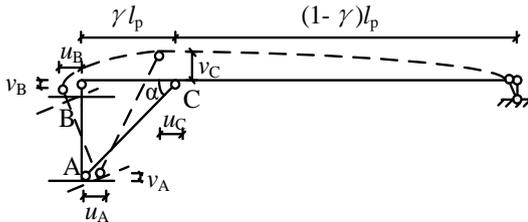


图 3 檩条隅撑简化模型

得到约束刚度为：

$$K_{Z1} = \left[\frac{1}{(e_1 + e_2)EA_k \cos^2 \alpha \sin \alpha} + \frac{1}{(e_1 + e_2)EA_p \tan \alpha} + \frac{(1-\gamma)^2 l_p}{3EI_p} \right]^{-1} \quad (8)$$

式中, e_1 为斜梁剪心至檩条形心线的距离, e_2 为隅撑在斜梁上的支撑点至剪心的垂直距离, A_k 为隅撑的横截面积, A_p 为檩条的横截面积, I_p 为檩条截面惯性矩, l_p 为檩条跨度, γl_p 隅撑与檩条的连接点离开主梁的距离, α 为隅撑和檩条的夹角。

上式三项分别为隅撑轴向变形为约束刚度提供的贡献, 檩条轴向变形的贡献和檩条弯曲的贡献。其中, 檩条的弯曲是约束刚度的主要影响因素, 对约束刚度影响最大。

上式可以简化得到:

$$K_{Z1} = \frac{EI_p}{0.35(1-\gamma)^2 l_p} \quad (9)$$

当隅撑为两侧布置时, 则为:

$$K_Z = \frac{2EI_p}{0.35(1-\gamma)^2 l_p} \quad (10)$$

工程中一般均两侧布置隅撑, 单侧布置时需要单独计算其稳定性, 因此本条按照该式子简化计算。

将隅撑简化为约束弹簧之后, 对于不同的约束刚度可以得到弹性屈曲临界弯矩的近似解。多个隅撑时情况如图 4:

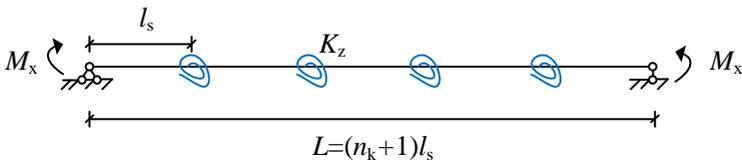


图 4 多道隅撑简化模型

当约束刚度较小, 满足 $K_Z \leq K_{ZA}$ 时, 即图 5 中的 OA 曲线段, 梁发生单波屈曲变形, 基本上接近于正弦波, 此时可以得到较为

简洁的弹性屈曲荷载计算公式。通过有限元验证，对于常用的隔撑刚度和梁高算例，大部分算例变形都属于这种情况。

当约束刚度达到完全支撑刚度，满足 $K_Z \geq K_{ZB}$ 时，屈曲波长等于扭转支撑间距，梁在两个支撑之间发生屈曲。这种情况对于截面较高的梁比较少见，但截面较小时可能会出现这种情况，因此也应该加以考虑，此时弹性屈曲荷载可以直接取两个支撑间距的梁段来计算弹性屈曲荷载。

当约束刚度不是特别大，满足 $K_{ZA} < K_Z < K_{ZB}$ 时，梁屈曲为多个复杂屈曲模态的组合，还未完全支撑刚度。此时弹性屈曲荷载表达式过于复杂，与扭转支撑的个数有较大关系。该屈曲模态同样比较少见，可以通过 K_{ZA} 和 K_{ZB} 线性插值确定。弹性屈曲荷载相对于支撑刚度是上凸的函数，线性插值处理为保守计算方式。

多道隔撑支撑梁的完全支撑刚度计算系数与隔撑数目 n_k 有关，按下式计算：

$$A_n = \frac{\begin{bmatrix} 28(n_k + 1)^6 - 48(n_k + 1)^5 + 70(n_k + 1)^4 \\ -56(n_k + 1)^3 + 16(n_k + 1)^2 - 8(n_k + 1) - 1 \end{bmatrix}}{2(n_k + 1)^4 [6(n_k + 1)^2 + 1]} \quad (11)$$

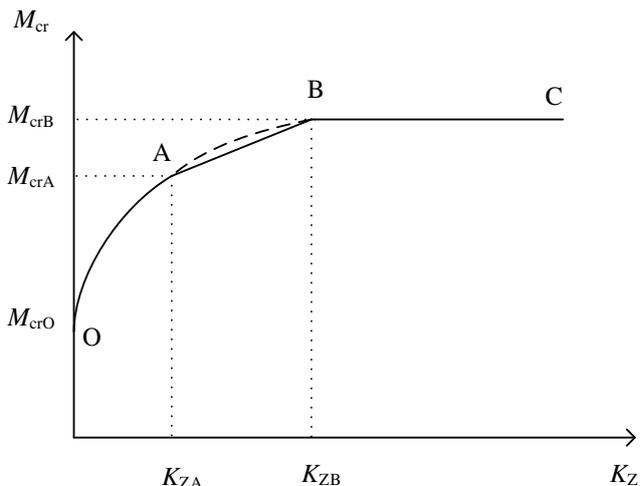


图 5 离散弹簧支撑下弹性屈曲荷载

在不等弯矩作用下，引入了等效弯矩系数，采用有限元计算结果对等效弯矩系数进行拟合得到。

如图 6 所示，在以系杆间距作为计算长度时，梁段内有可能出现只有单个隅撑的情况。此时计算与多个隅撑时类似。

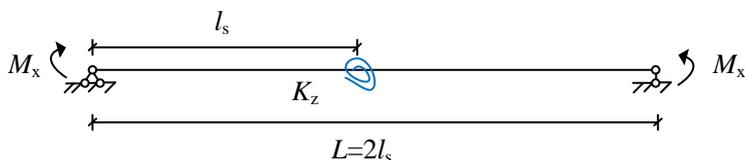


图 6 单个隅撑简化模型

当约束刚度较小，满足 $K_z \leq K_{zD}$ 时，即图 7 中的 OD 曲线段，梁发生单波屈曲变形，基本上接近于正弦波，此时可以得到较为简洁的弹性屈曲荷载计算公式；当约束刚度继续提高，达到约束刚度 K_{zD} 之后，继续提高约束刚度，弹性屈曲荷载变化不大，即图 7 中的 DE 直线段。

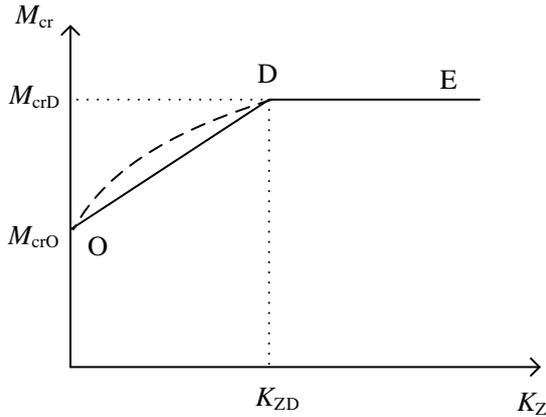


图 7 跨中单个弹簧支撑弹性屈曲荷载简化

单个隅撑情况较为少见，采用 O 点和 D 点线性插值确定中间的弹性屈曲荷载值，由于弹性屈曲荷载和约束刚度关系是上凸函数，因此采用线性插值简化方式偏于保守的。

隅撑可以减小梁的计算长度。当隅撑-檩条支撑体系的刚度较大，达到完全支撑刚度时，梁的计算长度减小到了隅撑的长度。对于大多数的情况隅撑-檩条支撑体系一般没法达到如此大的支撑刚度，但一般可以将隅撑支撑梁的计算长度减小到约 2 倍的隅撑间距长度，甚至更短。而现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 所采用的弹性屈曲荷载方式与计算长度无关，实则是一种过于保守的简化方式，经济性略差。

计算式通过有限元验证，对于平腹板梁和波形腹板梁都同样适用，但是计算波形腹板梁的弹性屈曲荷载时需要按照波形腹板梁的截面特性进行计算。对于非线性弯矩作用下，近似采用最小弯矩和最大弯矩的比值简化为线性弯矩计算等效弯矩系数。

6.3 轴心受力构件设计

6.3.1 轴心受压和受拉波形腹板构件，其截面强度应按下列公式计算：

1 除高强度螺栓摩擦型连接处外：

1) 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{A_m} \leq f \quad (6.3.1-1)$$

2) 地震设计状况：

$$\frac{N}{A_m/\gamma_{RE}} \leq f \quad (6.3.1-2)$$

2 高强度螺栓摩擦型连接处：

1) 持久、短暂设计状况：

$$\left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_m} \leq f \quad (6.3.1-3)$$

$$\frac{N}{A_f} \leq f \quad (6.3.1-4)$$

2) 地震设计状况：

$$\left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_m/\gamma_{RE}} \leq f \quad (6.3.1-5)$$

$$\frac{N}{A_f/\gamma_{RE}} \leq f \quad (6.3.1-6)$$

式中： N —— 计算截面处的轴力设计值 (N)；

A_m —— 翼缘的净截面面积 (mm²)；

A_f —— 翼缘的毛截面面积 (mm²)；

n —— 在节点或拼接处，构件一端连接的高强度螺栓数目；

n_1 —— 所计算截面（最外列螺栓处）上高强度螺栓的数目。

【条文说明】 与受弯时类似，波形腹板工形构件在轴力作用下，可以认为仅翼缘有效，腹板不承受任何轴向作用力。所以在计算轴心受压构件强度时，不考虑腹板部分的贡献。

6.3.2 轴心受压波形腹板构件，其稳定性应按下列公式计算：

1) 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\varphi A_f} \leq f \quad (6.3.2-1)$$

2) 地震设计状况：

$$\frac{N}{\varphi A_f / \gamma_{RE}} \leq f \quad (6.3.2-2)$$

式中： φ —— 轴心受压波形腹板构件的稳定系数（取截面两主轴稳定系数中的较小者），根据构件的长细比（或换算长细比）、钢材屈服强度，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 附录 D 采用，对强轴 x 轴按 **b** 类截面采用，对弱轴 y 轴按 **c** 类截面采用。

6.3.3 波形腹板构件，其长细比和换算长细比应按下列公式计算：

1 对 x 轴应取换算长细比：

$$\lambda_{0x} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{\pi^2 EA_f s}{GA_w q}} \quad (6.3.3-1)$$

$$\lambda_x = l_{0x} / i_x \quad (6.3.3-2)$$

2 对 y 轴应取长细比：

$$\lambda_y = l_{0y} / i_y \quad (6.3.3-3)$$

式中： λ_x 、 λ_y —— 构件对 x 轴和 y 轴的长细比；

λ_{0x} —— 构件对 x 轴的换算长细比；

l_{0x} 、 l_{0y} —— 构件对 x 轴和 y 轴的计算长度（mm）；

i_x 、 i_y —— 构件截面对 x 轴和 y 轴的回转半径，忽略腹板的贡献 (mm)。

【条文说明】 轴心受压波形腹板工形构件的稳定性计算的关键在于稳定系数的确定。

由于波形腹板很薄，剪切刚度远小于普通工字钢的腹板，剪切变形常常是不可忽略的。故绕强轴的稳定性计算须考虑剪切变形的影响。

波形腹板工形构件绕强轴的稳定性验算类似于格构柱的稳定性验算：上下翼缘板相当于格构柱的两肢；而腹板只起到连接作用，不承受轴力。参考格构柱的弹性屈曲荷载推导过程，推导出波形腹板工形构件绕强轴的弹性屈曲应力为：

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_x^2 + \pi^2 EA_f s / (GA_f q)} \quad (12)$$

即可定义换算长细比，采用与普通工字钢受压柱相同的稳定性计算公式计算波形腹板工形构件绕强轴的稳定性。

考虑初始缺陷及残余应力，进行了大量有限元分析，并进行两根足尺寸构件的试验。研究表明，采用换算长细比控制，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中 b 类柱子曲线（附表 D.0.2）可偏于保守地获得波形腹板工形构件绕强轴的弹塑性极限承载力。

波形腹板工形构件绕弱轴的稳定性计算与普通工字钢基本无异。考虑初始缺陷及残余应力，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中 c 类柱子曲线（附表 D.0.3）可偏于保守地获得波形腹板工形构件绕弱轴的弹塑性极限承载力。

6.4 拉弯、压弯构件设计

6.4.1 弯矩作用在两个主平面内的波形腹板拉弯构件和压弯构件，其截面强度应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{A_{fn}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (6.4.1-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{A_{fn}/\gamma_{RE}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}/\gamma_{RE}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}/\gamma_{RE}} \leq f \quad (6.4.1-2)$$

式中： N —— 同一截面处轴力设计值 ($N \cdot mm$)；

M_x 、 M_y —— 同一截面处对 x 轴和 y 轴的弯矩设计值 ($N \cdot mm$)；

γ_x 、 γ_y —— 对 x 轴和 y 轴的截面塑性发展系数，按本规程第 6.2.1 条确定。

6.4.2 弯矩作用在对称平面内的波形腹板构件，其弯矩作用平面内稳定性应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\varphi_x A_f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\left(1 - \frac{0.8N}{N'_{Ex}}\right) W_{1x}} \leq f \quad (6.4.2-1)$$

$$N'_{Ex} = \pi^2 EA_f / \left(1.1 \lambda_{0x}^2\right) \quad (6.4.2-2)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{\varphi_x A_f / \gamma_{RE}} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\left(1 - \frac{0.8N}{N'_{Ex}}\right) W_{1x} / \gamma_{RE}} \leq f \quad (6.4.2-3)$$

式中： N —— 所计算构件段范围内轴心压力设计值 (N)；

M_x —— 所计算构件段范围内的最大弯矩设计值 ($N \cdot mm$)；

N'_{Ex} —— 参数 (N);

W_{1x} —— 在弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量 (mm^3), 忽略腹板贡献;

φ_x —— 弯矩作用平面内的轴心受压波形腹板构件稳定系数;

等效弯矩系数 β_{mx} 应按下列规定采用:

3 无侧移框架柱和两端支承的构件:

1) 无横向荷载作用时, β_{mx} 应按下列式计算:

$$\beta_{mx} = 0.6 + 0.4M_2/M_1 \quad (6.4.2-4)$$

式中: M_1 、 M_2 —— 端弯矩, 构件无反弯点时取同号, 构件有反弯点时取异号, $|M_1| \geq |M_2|$ (N·mm)。

2) 无端弯矩但有横向荷载作用时, β_{mx} 应按下列公式计算: 跨中单个集中荷载:

$$\beta_{mx} = 1 - 0.36N/N_{cr} \quad (6.4.2-5)$$

全跨均布荷载:

$$\beta_{mx} = 1 - 0.18N/N_{cr} \quad (6.4.2-6)$$

$$N_{cr} = \pi^2 EA_T / \lambda_{0x}^2 \quad (6.4.2-7)$$

式中: N_{cr} —— 弹性临界力 (N)。

3) 端弯矩和横向荷载同时作用时, $\beta_{mx}M_x$ 应按下列式计算:

$$\beta_{mx}M_x = \beta_{mqx}M_{qx} + \beta_{m1x}M_1 \quad (6.4.2-8)$$

式中: M_{qx} —— 横向均布荷载产生的弯矩最大值 (N·mm);

M_1 —— 跨中单个横向集中荷载产生的弯矩 (N·mm);

β_{m1x} —— 取按本条第 1 款第 1 项计算的等效弯矩系数;

β_{mqx} —— 取按本条第 1 款第 2 项计算的等效弯矩系数;

4 有侧移框架柱和悬臂构件:

1) 除本款第 2 项规定之外的框架柱, β_{mx} 应按下列式计算:

$$\beta_{\text{mx}} = 1 - 0.36N/N_{\text{cr}} \quad (6.4.2-9)$$

- 2) 有横向荷载的柱脚铰接的单层框架柱和多层框架柱的底层柱, $\beta_{\text{mx}} = 1.0$ 。
- 3) 自由端作用有弯矩的悬臂柱, β_{mx} 应按下列公式计算:

$$\beta_{\text{mx}} = 1 - 0.36N(1-m)/N_{\text{cr}} \quad (6.4.2-10)$$

式中: m —— 自由端弯矩与固定端弯矩之比, 当弯矩图无反弯点时取正号, 有反弯点时取负号。

【条文说明】 本条主要参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 执行, 其中计算长细比、截面模量时须考虑波形腹板构件的受力特点, 忽略腹板贡献。

6.4.3 弯矩作用在对称平面内的波形腹板构件, 其弯矩作用平面外稳定性应按下列公式计算:

- 1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{N}{\varphi_y A_f} + \frac{\beta_{\text{lx}} M_x}{\varphi_b W_{\text{lx}}} \leq f \quad (6.4.3-1)$$

- 2 地震设计状况:

$$\frac{N}{\varphi_y A_f / \gamma_{\text{RE}}} + \frac{\beta_{\text{lx}} M_x}{\varphi_b W_{\text{lx}} / \gamma_{\text{RE}}} \leq f \quad (6.4.3-2)$$

式中: φ_y —— 弯矩作用平面外的轴心受压波形腹板构件稳定系数;

φ_b —— 均匀弯曲的受弯构件整体稳定系数。

等效弯矩系数 β_{lx} 应按下列规定采用:

3 在弯矩作用平面外有支承的构件, 应根据两相邻支承点间构件段内荷载和内力情况确定:

- 1) 无横向荷载作用时, β_{lx} 应按下列公式计算:

$$\beta_{\text{lx}} = 0.65 + 0.35 M_2 / M_1 \quad (6.4.3-3)$$

- 2) 端弯矩和横向荷载同时作用时, β_{lx} 应按下列规定取值:

使构件段产生同向曲率时, $\beta_{\text{ix}} = 1.0$; 使构件段产生反向曲率时, $\beta_{\text{ix}} = 0.85$;

3) 无端弯矩有横向荷载作用时, $\beta_{\text{ix}} = 1.0$;

4 弯矩作用平面外为悬臂的构件, $\beta_{\text{ix}} = 1.0$ 。

【条文说明】本条主要参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 执行, 其中计算长细比、截面模量时须考虑波形腹板构件的受力特点, 忽略腹板贡献。

6.4.4 波形腹板变截面构件, 其弯矩作用平面内的稳定性应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{N_0}{\varphi_x A_{f0}} + \frac{\beta_m M_1}{\left(1 - \frac{N_0}{N'_{\text{Ex0}}} \varphi_x\right) W_{\text{el}}} \leq f \quad (6.4.4-1)$$

$$N'_{\text{Ex0}} = \pi^2 EA_{f0} / (1.1 \lambda_{0x}^2) \quad (6.4.4-2)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{N_0}{\varphi_x A_{f0} / \gamma_{\text{RE}}} + \frac{\beta_m M_1}{\left(1 - \frac{N_0}{N'_{\text{Ex0}}} \varphi_x\right) W_{\text{el}} / \gamma_{\text{RE}}} \leq f \quad (6.4.4-3)$$

式中: N_0 —— 小头的轴心压力设计值 (N);

M_1 —— 大头的弯矩设计值 (N·mm);

N'_{Ex0} —— 参数 (N);

A_{f0} —— 小头的翼缘截面面积 (mm²);

W_{el} —— 大头有效截面最大受压纤维的截面模量, 忽略腹板贡献 (mm³);

φ_x —— 轴心受压杆件稳定系数，楔形柱计算长度系数按现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 附录 A 确定；

λ_{ox} —— 构件的换算长细比，按小头截面确定；

β_m —— 等效弯矩系数，有侧移刚架柱的等效弯矩系数取 1.0。

【条文说明】 计算长细比、截面模量时须忽略腹板贡献。数值计算结果及两根足尺寸构件的试验结果表明，公式可偏于安全的计算构件的极限承载力。这部分研究内容具体见《波形腹板变截面压弯构件稳定承载力设计方法和试验研究》，收录于《工程力学》，2010 年第 27 卷第 9 期。

6.4.5 波形腹板变截面构件，其弯矩作用平面外稳定性应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N_0}{\varphi_y A_{t0}} + \frac{\beta_t M_1}{\varphi_{br} W_{el}} \leq f \quad (6.4.5-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N_0}{\varphi_y A_{t0} / \gamma_{RE}} + \frac{\beta_t M_1}{\varphi_{br} W_{el} / \gamma_{RE}} \leq f \quad (6.4.5-2)$$

式中： φ_y —— 弯矩作用平面外的轴心受压波形腹板构件稳定系数，按小头截面确定；

φ_{br} —— 均匀弯曲的变截面受弯构件整体稳定系数；

β_t —— 等效弯矩系数，对一端弯矩为零的区段，按式 (6.4.6-1) 计算；对两端弯曲应力基本相等的区段，取 $\beta_t = 1.0$ 。

6.4.6 波形腹板变截面构件的平面外稳定系数和等效弯矩系数应按下列公式计算：

$$\beta_t = 1 - N_0 / N'_{\text{Ex}0} + 0.75 (N_0 / N'_{\text{Ex}0})^2 \quad (6.4.6-1)$$

$$\varphi_{\text{br}} = \frac{1}{(1 - \lambda_{\text{b}0}^{2n} + \lambda_{\text{b}0}^{2n})^{1/n}} \leq 1.0 \quad (6.4.6-2)$$

$$n = 2.3 \sqrt{\frac{b_0}{h_0}} \quad (6.4.6-3)$$

$$\lambda_{\text{b}} = \sqrt{\frac{W_{\text{x}0} f_y}{M_{\text{cr}}}} \quad (6.4.6-4)$$

$$M_{\text{cr}} = \beta_{\text{b}} \frac{\pi^2 EI_y}{\mu_s^2 l^2} \sqrt{\frac{I_{\omega}}{I_y} \left(\frac{\mu_s^4}{\mu_w^4} + \frac{\mu_s^2 l^2 GI_t}{\pi^2 EI_{\omega}} \right)} \quad (6.4.6-5)$$

$$\mu_s = 1 + 0.023 \gamma \sqrt{l_1 h_0 / A_{\text{cf}}} \quad (6.4.6-6)$$

$$\mu_w = 1 + 0.00385 \gamma \sqrt{l_1 / i_{y0}} \quad (6.4.6-7)$$

$$\gamma = h_1 / h_0 - 1 \quad (6.4.6-8)$$

式中： $\lambda_{\text{b}0}$ —— 起始正则化长细比，取 0.3；

i_{y0} —— 小头截面受压翼缘对 y 轴的回转半径（mm）；

A_{cf} —— 受压翼缘的截面面积（mm²）；

b_0 —— 小头截面的宽度（mm）；

t_0 —— 受压翼缘的厚度（mm）；

$W_{\text{x}0}$ —— 小头截面的毛截面模量（mm³）；

l_1 —— 变截面构件计算区段的平面外计算长度，取支撑点之间的距离（mm）；

γ —— 变截面构件的楔率；

h_0 、 h_1 —— 小头、大头截面的高度（mm）。

【条文说明】 本条主要参照清华大学的研究成果（见《波形腹板变截面压弯构件稳定承载力设计方法和试验研究》，收录于《工程力学》，2010年第27卷第9期）和现行国家标准《门式刚

架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022，但计算公式中的截面受压刚度和截面模量截面特性计算不考虑波形腹板的贡献。

6.4.6 波形腹板单阶柱可分为上下段分别计算，上下段计算长度系数 μ_1 、 μ_2 应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 确定，在计算柱线刚度比值时，柱截面的抗弯刚度计算不考虑腹板的贡献。

【条文说明】 研究表明，在工程常用的构件尺寸范围内，剪切变形对阶形柱计算长度系数的影响很小，因此波形腹板阶形柱可采用和平腹板阶形柱相同的计算长度系数计算公式，仅需注意在计算柱子线刚度比值时，柱截面的抗弯刚度按照不考虑腹板的贡献计算。这部分研究内容具体见《偏心受压波形腹板阶形柱稳定性与变形计算》，收录于《工业建筑》，2012 年第 42 卷第 7 期。

6.5 局部承压设计

6.5.1 当波形腹板梁上翼缘作用有集中荷载时，腹板的局部承压承载力应按下式计算：

$$\sigma_c = \frac{P}{16at_w \left(1 + \frac{a_1}{0.17}\right) \left(\frac{W_{ef}}{qI_{z1}/t_w}\right)^{0.4}} \leq f \quad (6.5.1)$$

式中： P —— 集中荷载设计值，动力荷载应考虑动力系数(N)；
 a_1 —— 集中荷载沿跨度方向的支承长度，轨道上的轮压可取 50mm (mm)；
 W_{ef} —— 集中荷载作用的翼缘对自身弱轴方向的有效截面模量 (mm³)。

【条文说明】 波形腹板梁翼缘在局部集中荷载作用下形成塑性铰破坏机制，腹板较厚时发生屈服破坏，较薄时发生局部屈

曲破坏。由于其破坏机理复杂，在大量有限元算例的基础上总结出波形腹板梁的局部承压极限承载力的简化计算公式。

6.5.2 当波形腹板梁受弯矩和上翼缘处集中荷载的共同作用时，腹板的局部承压承载力应符合下列规定：

- 1 当 $\frac{M}{b_f t_f h_w f} \leq 0.5$ 时，应按本标准式(6.5.1)计算。
- 2 当 $\frac{M}{b_f t_f h_w f} > 0.5$ 时，应按下式计算：

$$\sigma_{cM} = \sigma_c + \frac{M}{b_f t_f h_w} \leq 1.5f \quad (6.5.2)$$

式中： M —— 集中荷载作用截面的弯矩设计值 (N·mm)；

σ_c —— 按本规程式(6.5.1)计算的局部承压应力 (N/mm²)。

【条文说明】参考欧洲规范 Eurocode 3: EN1993-1-5 中 7.2 条公式的形式，经有限元计算（图 8）总结出波形腹板梁在集中荷载 P 和弯矩 M 共同作用下的承载力相关公式为：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{P}{P_u} \leq 1 & \frac{M}{M_u} \leq 0.5 \\ \frac{P}{P_u} + \frac{M}{M_u} \leq 1.5 & \frac{M}{M_u} > 0.5 \end{array} \right. \quad (13)$$

式中， $M_u = b_f t_f h_w f$ ，表示波形腹板梁的塑性极限弯矩。

该相关公式表明，当截面的弯矩 M 大于梁的塑性极限弯矩 M_u 的 50% 时，集中荷载才会对局部承压承载力产生不利影响。

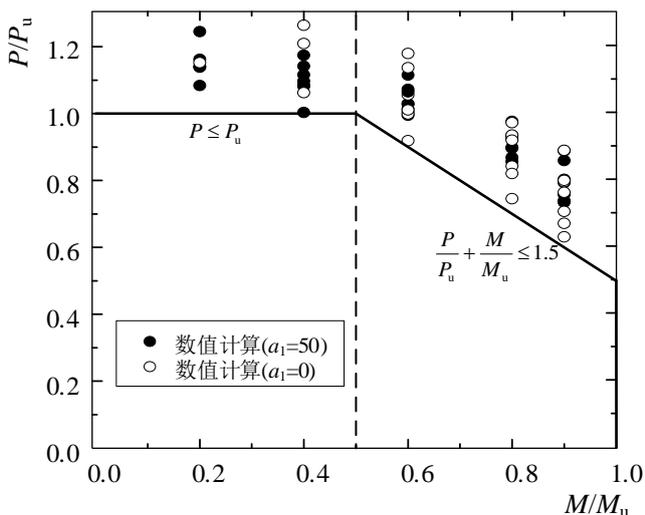


图 8 弯矩作用与局部承压承载力相关曲线

这部分的研究内容具体可参见《波形腹板工形梁局部承压承载力设计方法研究》，收录于《工业建筑》，2012 年第 42 卷第 7 期。

6.5.3 梁的支承加劲肋，应按承受梁支座反力或固定集中荷载的轴心受压构件计算其在腹板平面外的稳定性。此受压构件的截面应包括加劲肋和加劲肋两侧 $15t_w\sqrt{235/f_y}$ 范围内的腹板，腹板可按照平腹板考虑，计算长度取腹板高度。当梁支承加劲肋的端部为刨平顶紧时，应按其所承受的支座反力或固定集中荷载计算其端面承压应力；当端部为焊接时，应按传力情况计算其焊缝应力。支承加劲肋与腹板的连接焊缝，应按传力需要进行计算。

【条文说明】本条主要参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 执行，受压构件截面的取法可忽略腹板波形的有利影响，直接按照平腹板计算（图 9），这样的计算结果偏于安全。

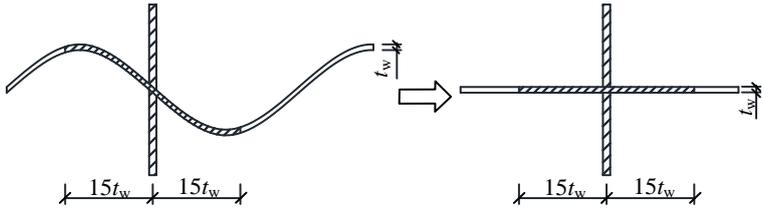


图9 梁支承加劲肋的计算模型

6.6 吊车梁疲劳计算

6.6.1 波形腹板钢结构的疲劳计算应符合下列要求：

1 对于直接承受动力荷载重复作用的波形腹板钢结构构件及其连接，当应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 时，应进行疲劳计算；

2 疲劳计算应采用基于名义应力的容许应力幅法，名义应力应按弹性状态计算，容许应力幅应按构件和连接类别、应力循环次数以及计算部位的板件厚度确定，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定采用；

3 疲劳计算主要针对应力循环中出现拉应力的部位以及波形腹板与翼缘的连接焊缝，特别是受孔洞、切割、焊接等影响部分的主体金属以及连接。对于在应力循环中不出现拉应力的部位，可不进行疲劳计算；

4 对重级、中级工作制的波形腹板吊车梁，应进行疲劳计算；对轻级工作制的波形腹板吊车梁，可不进行疲劳计算。

6.6.2 重级、中级工作制的波形腹板吊车梁的疲劳可作为常幅疲劳，按下列公式计算：

1 正应力幅疲劳计算应按下列公式计算：

$$\alpha_f \Delta \sigma \leq \gamma_t [\Delta \sigma]_{2 \times 10^6} \quad (6.6.2-1)$$

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (6.6.2-2)$$

2 剪应力幅疲劳计算应按下列公式计算：

$$\alpha_f \Delta \tau \leq [\Delta \tau]_{2 \times 10^6} \quad (6.6.2-3)$$

$$\Delta \tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \quad (6.6.2-4)$$

3 板厚或直径修正系数 γ_t 应按下列规定采用:

- 1) 对于横向角焊缝连接和对接焊缝连接, 当连接板厚大于 25mm 时, 应按下式计算:

$$\gamma_t = \left(\frac{25}{t} \right)^{0.25} \quad (6.6.2-5)$$

- 2) 对于螺栓轴向受拉连接, 当螺栓的公称直径大于 30mm 时, 应按下式计算:

$$\gamma_t = \left(\frac{30}{d} \right)^{0.25} \quad (6.6.2-6)$$

- 3) 其余情况取 $\gamma_t = 1.0$ 。

式中: $\Delta \sigma$ —— 构件或连接计算部位的正应力幅 (N/mm^2);

σ_{\max} —— 计算部位应力循环中的最大拉应力, 取正值 (N/mm^2);

σ_{\min} —— 计算部位应力循环中的最小拉应力或压应力, 拉应力取正值, 压应力取负值 (N/mm^2);

$\Delta \tau$ —— 构件或连接计算部位的剪应力幅 (N/mm^2);

τ_{\max} —— 计算部位应力循环中的最大剪应力 (N/mm^2);

τ_{\min} —— 计算部位应力循环中的最小剪应力 (N/mm^2);

α_f —— 欠载效应的等效系数, 按表 6.6.2-1 采用;

$[\Delta \sigma]_{2 \times 10^6}$ —— 正应力的容许应力幅, 应按表 6.6.2-2 采用, 构件与连接类别按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 采用 (N/mm^2);

$[\Delta\tau]_{2\times 10^6}$ —— 剪应力的容许应力幅，应按 6.6.2-3 采用，构件与连接类别按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 采用 (N/mm^2)。

表 6.6.2-1 吊车梁欠载效应的等效系数

吊车类别	α_f
重级工作制硬钩吊车（如均热炉车间夹钳吊车）	1.0
重级工作制软钩吊车	0.8
中级工作制吊车	0.5

表 6.6.2-2 循环次数 n 为 2×10^6 次的正应力容许应力幅 (N/mm^2)

构件和连接类别	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
$[\Delta\sigma]_{2\times 10^6}$	176	144	125	112	100	90	80	71	63	56	50	45	40	36

表 6.6.2-3 循环次数 n 为 2×10^6 次的剪应力容许应力幅 (N/mm^2)

构件与连接类别	J1	J2	J3
$[\Delta\tau]_{2\times 10^6}$	59	100	90

【条文说明】 波形腹板构件能规避传统平腹板工形构件因腹板较薄而需要设置大量横向加劲肋的问题，因而可以代替平腹板吊车梁在工业建筑中应用。相关试验研究证明，波折腹板工形截面吊车梁的抗疲劳性能优于传统的吊车梁，从波形或波折腹板梁的受力机理分析也能证明这一点。梁的疲劳破坏源于受拉应力幅的循环作用。波形或波折腹板梁由于腹板冷轧成波形后轴向刚度几乎变成零，不再承受法向拉应力作用。波形腹板与翼缘板之间的焊接区域或者主体金属主要承受剪切应力，而剪应力区域的疲劳性能一般要优于拉应力区域的疲劳性能。另外，波形腹板受剪屈曲荷载远远大于同厚度的平腹板受剪屈曲荷载，因而在波形腹板与翼缘连接区域很难产生疲劳破坏。因此，波形腹板吊车梁的疲劳性能验算可偏于安全地按照现行国家标准《钢结构设计标准》

GB 50017 进行。

6.7 支撑系统设计

6.7.1 支撑系统的设计应符合下列要求：

1 以波形腹板工形截面构件作为刚架梁柱构件时，应根据工程需要设置支撑系统。支撑系统设置设计应符合现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 的规定；

2 每个温度区段、结构单元或分期建设的区段、结构单元应设置独立的支撑系统，与刚架结构一同构成独立的空间稳定体系。柱间支撑与屋盖横向支撑宜设置在同一开间；

3 支撑系统设计应考虑支撑系统对主体波形腹板工形截面构件的影响。施工安装阶段，结构临时支撑的设置尚应符合本规范对施工的相关规定。

【条文说明】波形腹板刚架与门式刚架所用的支撑系统所一致，支撑系统设计可按现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 要求进行。

6.7.2 柱间支撑系统的布置应符合下列规定：

1 当有吊车时，每个吊车跨两侧柱列均应设置柱间支撑。吊车牛腿下部支撑宜设置在温度区段中部，当温度区段较长时，宜设置在三分点内，且支撑间距不应大于 50m。牛腿上部支撑设置原则与无吊车时的柱间支撑设置相同。

2 当无吊车时，柱间支撑间距宜取 30m~45m，端部柱间支撑宜设置在房屋端部第一或第二开间。

【条文说明】屋面支撑与柱间支撑应布置在同一开间，以组成完整的空间稳定体系。如支撑布置在同一开间有困难时，应布置在相邻开间内，且应设置可靠的传力构件。

下部支撑布置间距过长时，会约束吊车梁因温度变化所产生的伸缩变形，从而在支撑内产生温度附加内力。

6.7.3 柱间支撑可采用柔性支撑或刚性支撑。柔性支撑可选用圆钢或钢索。刚性支撑可选用热轧型钢、冷弯方矩管或圆管截面。当有吊车时，吊车牛腿以下交叉支撑应选用刚性交叉支撑。交叉节点可选用固定连接节点（图 6.7.3），角度自适应的支撑连接件应只焊接一对连接板，另一对连接板不应焊接。

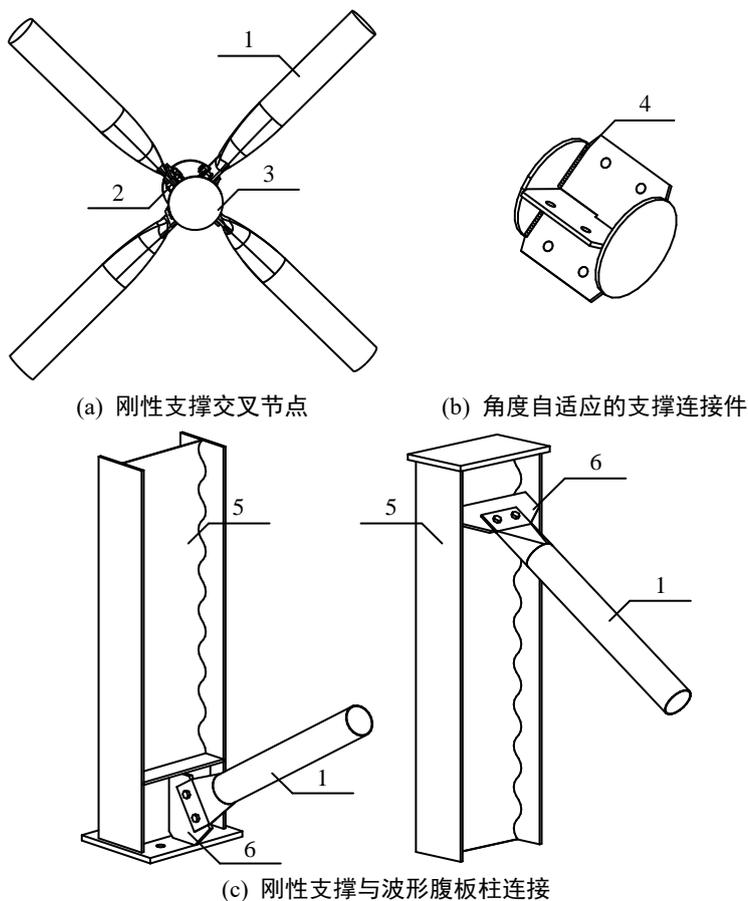


图 6.7.3 刚性支撑连接

1-圆管支撑；2-高强螺栓；3-连接件；4-焊缝；5-波形腹板构件；6-连接板

【条文说明】交叉支撑一般选用张紧的圆钢或钢索，当支撑承受吊车等动力荷载时，应选用刚性交叉支撑。

6.7.4 同一柱列不宜混用刚度差异大的支撑形式，其共同承担柱列纵向水平荷载，设计时水平荷载应按各支撑刚度分配。

6.7.5 柱间支撑的设计，应按支承于柱脚基础上的竖向悬臂桁架计算；对于圆钢或钢索交叉支撑应按拉杆设计，型钢可按拉杆设计，支撑中的刚性系杆应按压杆设计。

6.7.6 屋面端部横向支撑应布置在房屋端部和温度区段第一或第二开间，当布置在第二开间时应在房屋端部第一开间抗风柱顶部对应位置应布置刚性系杆。支撑系统中的刚性系杆应按刚性支撑设计，可选用型钢或压扁头的钢管构件（图 6.7.6）。

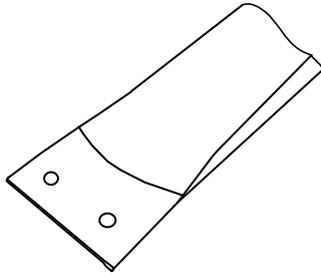


图 6.7.6 压扁头圆管刚性支撑

【条文说明】刚性系杆承受抗风柱顶传递来的风荷载，按压杆设计。也可用抗风柱顶临近的两根檩条兼做，按压弯杆件设计。刚性系杆可以用临近节点的两根檩条兼做，按压弯杆件设计。

6.7.7 屋面支撑形式可选用圆钢或钢索交叉支撑；当屋面斜梁承受悬挂吊车荷载时，屋面横向支撑应选用型钢交叉支撑。屋面横向交叉支撑节点布置应与抗风柱相对应，并应在屋面梁转折处布置节点。

6.7.8 屋面横向支撑应按支承于柱间支撑柱顶水平桁架设计；圆钢或钢索应按拉杆设计，型钢可按拉杆设计，刚性系杆应按压杆设计。钢索强度按照下列公式计算：

$$\frac{N_{k \max}}{A} \leq \frac{f_k}{K} \quad (6.7.10)$$

式中： $N_{k \max}$ —— 钢索最大拉力的标准值 (N)；
 A —— 拉索截面面积 (mm^2)；
 f_k —— 钢索材料强度的标准值 (N/mm^2)；
 K —— 安全系数，取值 2.0~2.5。

6.7.9 当设有带驾驶室且起重量大于 15t 桥式吊车的跨间，应在屋盖边缘设置纵向支撑；在有抽柱的柱列，应沿托架长度设置纵向支撑。

【条文说明】 纵向支撑可设置在吊车跨间单侧边缘；当提供刚架平面内侧向刚度的柱抽柱时，刚架平面内侧向刚度削弱，在托架处应设置纵向支撑。纵向支撑形式一般宜选用圆钢或钢索交叉支撑，檩条可兼作撑杆用。

6.7.10 隅撑的设计应符合下列规定：

1 当实腹式门式刚架的梁、柱翼缘受压时，应在受压翼缘侧布置隅撑与檩条或墙梁相连接；

2 隅撑宜连接在内翼缘，也可连接在内翼缘附近的腹板或连接板上，距内翼缘的距离不应大于 100mm；

3 隅撑应按轴心受压构件设计；轴力设计值 N 可按下式计算，当隅撑成对布置时，每根隅撑的计算轴力可取计算值的 1/2：

$$N = Af / (60 \cos \theta) \quad (6.7.10)$$

式中： A —— 被支撑翼缘的截面面积 (mm^2)；
 f —— 被支撑翼缘钢材的抗压强度设计值 (N/mm^2)；
 θ —— 隅撑与檩条轴线的夹角。

【条文说明】 隅撑配合檩条和墙梁使用可以对刚架构件提供有效支撑，减小钢架构件平面外计算长度。

6.8 檩条与墙梁设计

6.8.1 檩条和墙梁的设计应符合现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 的规定。檩条宜采用实腹式构件，也可采用桁架式构件；跨度大于 9m 的简支檩条宜采用桁架式构件。

【条文说明】 波形腹板刚架与门式刚架所用的檩条和墙梁体系一致，因此墙梁与檩条的设计可按现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 要求进行。

6.8.2 实腹式檩条宜采用直卷边槽形和斜卷边 Z 形冷弯薄壁型钢，斜卷边角度宜为 60° ，也可采用直卷边 Z 形冷弯薄壁型钢或高频焊接 H 型钢。檩条卷边的宽厚比不宜大于 13，卷边宽度与翼缘宽度之比不宜小于 0.25，不宜大于 0.326。桁架式檩条可采用平面桁架式，平面桁架式檩条应设置拉条体系。

【条文说明】 设计卷边的宽度与翼缘宽度及板件宽厚比密切相关，卷边宽度与翼缘宽度之比不宜小于 0.25，是为了保证卷边对翼缘有较充分的约束，使翼缘屈曲系数不小于 3.0，此根据 AISI 设计指南卷边充分加劲条件下的翼缘屈曲系数；卷边宽度与翼缘宽度之比不宜大于 0.326，是为了保证任何情况下卷边不先于翼缘局部屈曲。

6.8.3 檩条兼做屋面横向水平支撑压杆和纵向系杆时，檩条长细比不应大于 200，应按压弯构件计算，其压杆稳定系数应按构件平面外方向计算，计算长度应取拉条或撑杆的间距。

6.8.4 檩条与刚架斜梁宜采用普通螺栓连接，檩条每端应设两个螺栓。檩条连接宜采用檩托板，檩条高度较大时，檩托板处宜设加劲板。嵌套搭接方式的 Z 形连续檩条，当有可靠依据时，可不设檩托，由 Z 形檩条翼缘用螺栓连于刚架上（图 6.8.4a）。连续檩条的搭接长度 $2a$ 不宜小于 10% 的檩条跨度（图 6.8.4b），嵌套搭

接部分的檩条应采用螺栓连接，按连续檩条支座处弯矩验算螺栓连接强度。檩托板设计也可采用 U 型和 W 型檩托(图 6.8.4c, d)。

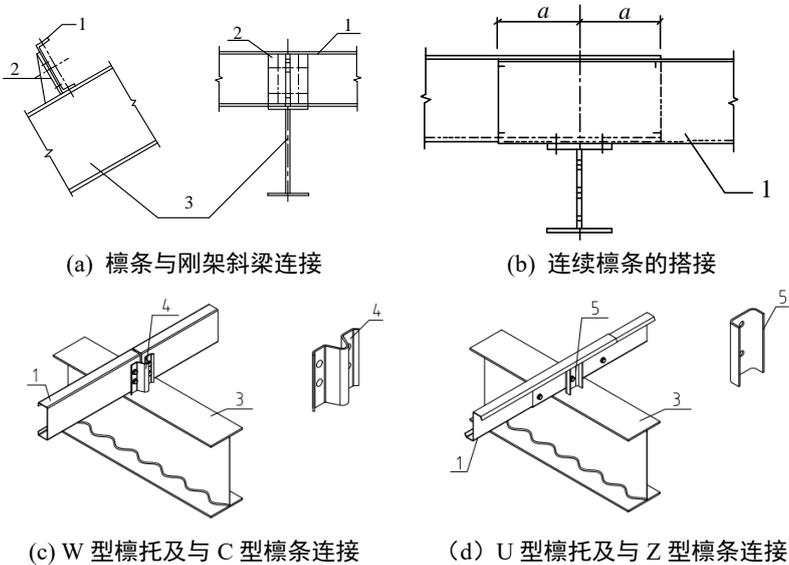


图 6.8.4 檩条与刚架梁的连接

1-檩条；2-檩托；3-屋面斜梁；4-W 型檩托；5-U 型檩托

6.8.5 桁架式檩条设计时所有节点均应按铰接进行计算，应对上、下弦杆轴内力进行验算，设计时可考虑重力作用下屋面板对檩条的影响，当屋面板不能阻止上弦杆面外位移时应验算其平面外稳定性。风吸力作用下应验算下弦杆的平面外稳定性。

6.8.6 门式刚架宜在合适位置布置拉条，拉条宜采用圆钢或薄壁 C 型钢。实腹式檩条跨度不宜大于 12m，当檩条跨度大于 4m 时，宜在檩条间跨中位置设置拉条或撑杆；当檩条跨度大于 6m 时，宜在檩条跨度三分点处各设一道拉条或撑杆；当檩条跨度大于 9m 时，宜在檩条跨度四分点处各设一道拉条或撑杆。斜拉条和刚性撑杆组成的桁架结构体系应分别设在檐口和屋脊处(图 6.8.6)，当构造能保证屋脊处拉条互相拉结平衡，在屋脊处可不设斜拉条和刚性撑杆。

当单坡长度大于 50m，宜在中间增加一道双向斜拉条和刚性撑杆组成的桁架结构体系（图 6.8.6）。

拉条或薄壁 C 型钢用于拉条时，其强度计算应满足檩条沿屋面坡度向下挠曲的刚度控制要求。薄壁 C 型钢用于撑杆时，其整体稳定按轴心受压构件计算，轴压力取（Z 型）檩条自重沿屋面屋脊方向的分力。

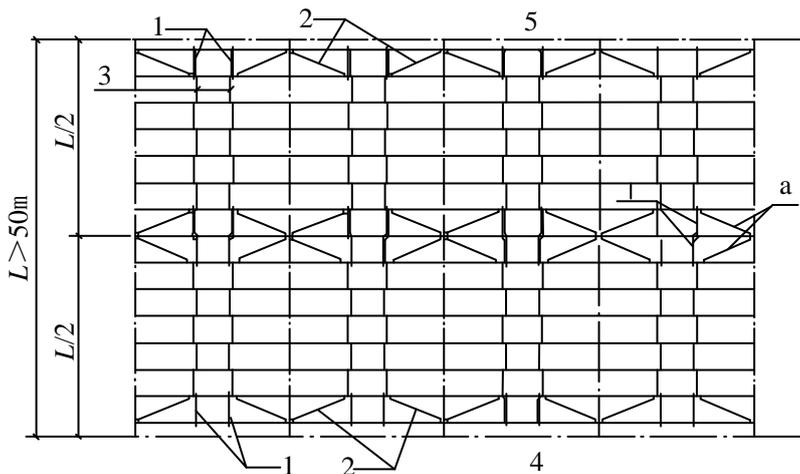


图 6.8.6 双向斜拉条和撑杆体系

（本图与《门规》相同，没有按照元宏建议更改）

- 1-刚性撑杆；2-斜拉条；3-拉条；4-檐口位置；5-屋脊位置；
L-单坡长度；a-斜拉条与刚性撑杆组成双向斜拉条和刚性撑杆体系

【条文说明】 一般情况下，多道拉条宜均匀间隔布置，如考虑弯矩图按不均匀间隔布置拉条对檩条稳定更为有利，也可按非均匀布置。

6.8.7 应根据檩条的整体稳定性设置一层檩间支撑或上、下二层檩间支撑。檩间支撑的形式可采用刚性支撑系统或柔性支撑系统。

【条文说明】 檩间支撑可以对檩条提供侧向支撑以提高其稳定承载能力，同时可以将屋面荷载对檩条产生的倾覆力传递到屋

面梁。

6.8.8 墙梁的布置应符合下列要求：

1 轻型墙体结构的墙梁宜采用卷边槽形或卷边 Z 形的冷弯薄壁型钢或高频焊接 H 型钢，兼做窗框的墙梁和门框等构件宜采用卷边槽形冷弯薄壁型钢或组合矩形截面构件。

2 墙梁可设计成简支或连续构件，两端支承在刚架柱上，墙梁主要承受水平风荷载，宜将腹板置于水平面。当墙板底部端头自承重且墙梁与墙板间有可靠连接时，可不考虑墙面自重引起的弯矩和剪力。当墙梁需承受墙板重量时，应考虑双向弯曲。

3 当墙梁跨度为 4m~6m 时，宜在跨中设一道拉条；当墙梁跨度大于 6m 时，宜在跨间三分点处各设一道拉条。在最上层墙梁处宜设斜拉条将拉力传至承重柱或墙架柱；当墙板的竖向荷载有可靠途径直接传至地面或托梁时，可不设传递竖向荷载的拉条。

【条文说明】当墙梁兼做窗框和门框时应采用卷边槽形冷弯薄壁型钢或组合矩形截面构件以使窗、门框洞形成平台面。

当墙板的竖向荷载有可靠途径直接传至地面或托梁时，可不设传递竖向荷载的拉条。

6.8.9 外挂墙板的墙梁应计算其强度和稳定。仅外侧设有压型钢板的墙梁在风吸力作用下的稳定性，可按现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 的规定计算。

6.9 构件构造要求

6.9.1 波形腹板工形构件的长细比不应大于表 6.9.1 规定的限值。

表 6.9.1 波形腹板工形截面构件的长细比限值

构件受力情况	构件类别	长细比限值
受压构件	轻型钢结构用作柱及吊车梁以下支撑时	180
	轻型钢结构用作其它支撑时	220
受拉构件	直接承受动力荷载时	250

	用作其它构件时	350
--	---------	-----

- 注： 1 轻型钢结构的定义应符合现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 的规定；
 2 有抗震设防要求的结构，除轻型钢结构外，尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

6.9.2 波形腹板工形构件的翼缘板宽度不宜小于 150mm。受压翼缘板的自由外伸宽度与其厚度之比，不应大于 $15\nu\sqrt{235/f_y}$ 。受压翼缘板宽厚比计算系数 ν 应按表 6.9.2 取值。

表 6.9.2 受压翼缘板宽厚比计算系数

$\alpha_1 \backslash \beta_1$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.5	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
0.02	1.15	1.09	1.05	1.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.06	1.27	1.22	1.17	1.14	1.11	1.09	1.07	1.06	—	—	—	—	—	—
0.10	1.28	1.28	1.23	1.19	1.16	1.13	1.12	1.10	1.08	—	—	—	—	—
0.18	1.28	1.28	1.28	1.28	1.24	1.20	1.17	1.15	1.12	1.10	1.08	1.07	1.06	1.05
0.22	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.24	1.21	1.17	1.15	1.13	1.11	1.08	1.06	1.05
0.26	—	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.24	1.21	1.18	1.15	1.13	1.11	1.09	1.07
0.30	—	—	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.25	1.21	1.18	1.15	1.13	1.11	1.09
0.35	—	—	—	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.22	1.19	1.16	1.13	1.11
0.40	—	—	—	—	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.23	1.20	1.17	1.14

- 注： 1 α_1 为腹板波幅系数， $\alpha_1 = a/b_1$ ， b_1 为受压翼缘宽度的一半；
 2 β_1 为腹板波长系数， $\beta_1 = q/b_1$ 。

【条文说明】 受压翼缘板的自由外伸宽度指波浪腹板中心线到翼缘板边缘的距离。研究表明，波浪腹板工形构件受压翼缘板的弹性屈曲荷载不仅与翼缘板的名义宽厚比 b_1/t_f 有关，而且与腹板波幅系数 α_1 、腹板波长系数 β_1 亦有关。翼缘板在受压时可能发生两种形式的屈曲模态，分别为屈曲模态 I 与屈曲模态 II，如

图 10 所示。

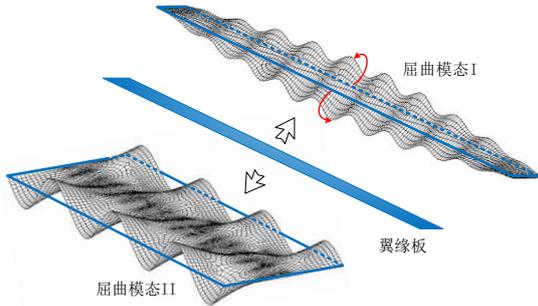


图 10 受压翼缘板的屈曲模态

屈曲模态 I 的特征是：腹板两侧的翼缘板分别向相反方向发生整体的单波状变形，在此基础上叠加了多个余弦波变形，余弦波的分布与腹板波浪相对应；由于单个波长范围内翼缘外伸长度不一样，单波波峰处翼缘外伸长度较长，导致单波长内除波谷处的其他点腹板约束均大幅度减弱。可采用欧拉板柱模型描述翼缘的屈曲行为，得到屈曲模态 I 的屈曲应力为：

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_f}{(0.5q)^2 A_f} = \frac{\pi^2 E}{3\beta_1^2} (t_f/b_1)^2 \quad (14)$$

式中， EI_f 为翼缘绕厚度方向的弯曲刚度， A_f 为翼缘面积。

屈曲模态 II 的特征是：翼缘边缘以初始位置为基准，叠加多个正弦波状变形。此时翼缘板可视为加载边简支，非加载边一边自由，一边约束的板件，通过拟合公式可计算屈曲模态 II 的屈曲应力为：

$$\sigma_{cr} = \left[\sigma_1 + \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{1 + c(\beta_1/\alpha_1)^2} \right] / (1 + \alpha_1)^3 \quad (15)$$

式中， $\sigma_1 = 0.425 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_1/t_f)^2}$ ，为三边简支板的屈曲荷

载； $\sigma_2 = 1.28 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_1/t_f)^2}$ ，为一边夹支、另一边自由的板件的

的屈曲荷载； c 为拟合系数，建议取0.0035。

但在应用公式(15)时，还需注意一个事实，即式(15)中翼缘的计算宽度为翼缘的最大外伸宽度，该假设过于保守地考虑了腹板波浪区域内翼缘板的作用；腹板波浪区域内的翼缘板并不一定会使翼缘的计算宽度增加，也可能会由于腹板的约束而基本不发生变形，从而减小翼缘的计算宽度。这主要取决于波长与波幅的比值 q/a 。引入计算宽度修正系数 μ 对式(15)进行修正，该变量的物理意义为腹板波浪区域内的翼缘中，参与翼缘整体屈曲变形的部分所占的比例，其取值见表2。

表2 计算宽度增大系数

q/a	5	6	7	8	9	10	11	12	≥ 13
μ	0	0.17	0.33	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00

由于屈曲模态 I 对初始缺陷较为敏感，一般控制腹板波浪尺寸以避免发生，可通过验算式(16)以实现这一目的；计算结果表明，除极少数构件外，常用构件腹板波形尺寸均能满足式(16)。

$$8.56/\beta^2 > \left[1 + \frac{2.012}{1 + c(\beta_1/\alpha_1)^2} \right] / (1 + \mu\alpha_1)^3 \quad (16)$$

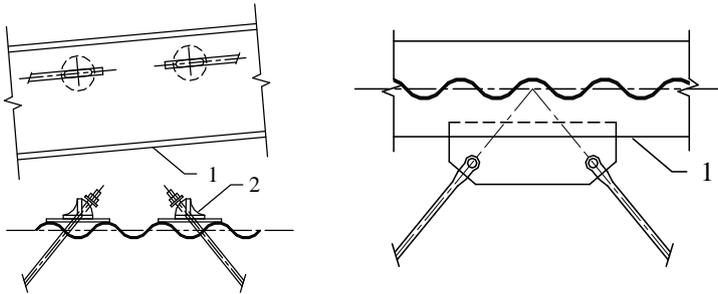
以翼缘在屈服前不发生局部屈曲为原则，本条按照屈曲模态 II 的计算公式给出了翼缘宽厚比的限值。即受压翼缘板的自由外伸宽度与其厚度之比不应大于 $15\nu\sqrt{235/f_y}$ ，其中 ν 按照式(17)计算。常用构件的 ν 值可通过查表 6.9.2 获得，表中的数值按照公式(17)计算，但对于大于 1.28 的 ν 值仍按照 1.28 取值。

$$v = \left[1 + \frac{2.012}{1 + 0.0035(\beta_1 / \alpha_1)^2} \right]^{1/4} / (1 + \mu\alpha_1)^{3/4} \quad (17)$$

该部分研究成果具体可见《波折腹板工形构件翼缘稳定性能研究》，收录于《建筑科学与工程学报》，2007年第24卷第4期。

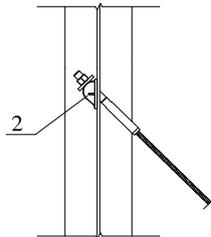
6.9.3 圆钢支撑的直径不宜小于 16mm，圆钢与波形腹板构件的夹角应在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内，宜接近 45° 。在屋面的屋脊以及边跨处，支撑系杆不宜由檩条兼做。在其它部位的支撑系杆采用檩条兼做时，应在钢梁两侧设置隅撑并可靠连接，且应按压弯构件计算其整体稳定性。

圆钢支撑与构件连接节点可用连接板连接，钢索支撑与构件连接节点应设置垫块或垫板（图 6.9.3）。



(a) 柔性支撑与波形腹板连接

(b) 柔性支撑与翼缘连接



(c) 柔性支撑与平腹板连接

图 6.9.3 柔性支撑连接形式

1-波形腹板构件；2-弧形垫块

【条文说明】对无吊车的门式刚架建筑，当宽度不大于 60m 时，不要求沿每个纵向柱列均设置柱间支撑，但设计屋盖水平支撑时，应考虑这一因素的影响。

本条规定支撑系杆不宜由檩条兼做是基于近年来雪灾事故的调查。调查发现，被大雪压垮的轻型门式刚架结构中，有相当一部分是由于在边跨或者屋脊檩条失稳后刚架没有足够的侧向支撑而发生坍塌，因而在设计时，在这些关键部位不宜用檩条兼做支撑系杆。

6.9.4 檩条与波形腹板工形梁的连接方式应符合下列规定：

1 檩条与波形腹板刚架梁上翼缘可采用檩托板连接或螺栓连接等方式；

2 檩条在与波形腹板刚架梁的翼缘连接时，可采用檩条筒支或连续搭接的连接方式；采用连续搭接的连接方式时，其最小总搭接长度，对 Z 型檩条不得小于 3 倍檩条高度，对 C 型檩条不得小于 6 倍檩条高度。

【条文说明】当刚架梁翼缘与檩条的连接采用连续搭接的方式时，连接节点的构造方式及搭接长度应由试验确定。参照 AISI 的规定，最小总搭接长度，对 Z 型檩条不得小于 3 倍檩条高度，对 C 型檩条不得小于 6 倍檩条高度。相关试验表明，檩条的有效搭接长度与檩条的跨度无关，但加强搭接长度可能会改善受力性能。

6.9.5 对波形腹板工形截面构件设置隅撑时，隅撑可采用双侧隅撑（图 6.9.5a）或单侧隅撑（图 6.9.5b）。隅撑宜连接在梁、柱构件的下（内）翼缘上，隅撑与梁、柱、檩条或墙梁应采用螺栓连接，隅撑与梁、柱构件腹板的夹角不宜小于 45° ，其连接节点构造见图 6.9.5c。

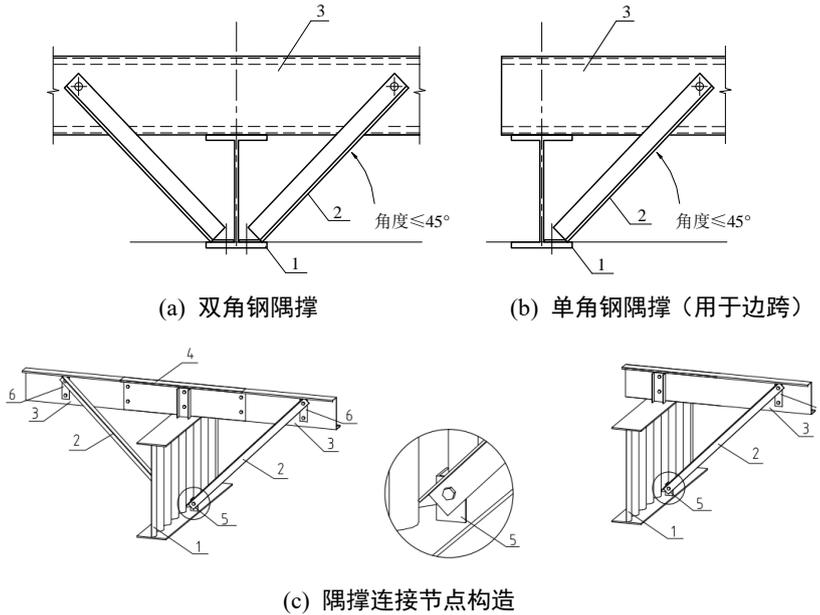


图 6.9.5 隔撑形式及连接节点

1-波形腹板构件；2-隔撑；3-檩条或墙梁；4-屋面檩条搭接连接；5-隔撑座；
6-厚 2mm 镀锌板补强垫

6.9.6 波形腹板工形构件板件拼接应符合下列规定：

1 不同厚度或宽度的翼缘板拼接时，在一侧相差 4mm 以上时，应分别在宽度方向或厚度方向从一侧或两侧做成坡度不大于 1:2.5 的斜角。直接承受动力荷载且需要进行疲劳验算的构件，其斜角坡度不应大于 1:4。

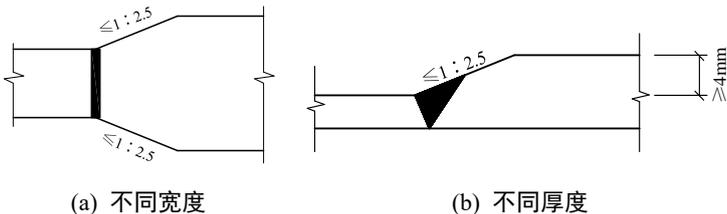


图 6.9.6 不同宽度或厚度钢板的拼接

2 除寒冷地区需要进行疲劳验算的构件外,当符合以下情况时,板与板对接焊接可不放坡:

- 1) 板与板一侧的厚度差小于 4mm 时,板与板对接焊接时可不放坡;
- 2) 梁柱连接节点处,节点板与梁翼缘的连接采用全熔透对接焊缝时,在节点板宽度和厚度方向可不放坡。

3 拼接位置及尺寸应符合下列规定:

- 1) 沿腹板高度的拼接位置宜在整个构件的中心线上;
- 2) 腹板拼接宽度应大于 300mm,长度应大于 600mm;
- 3) 翼缘拼接长度不应小于两倍板宽,且应大于 600mm;
- 4) 上下翼缘板和腹板的拼接焊缝应错开 200mm 以上;
- 5) 端板不允许拼接。

6.9.7 波形腹板结构的变形应符合下列规定:

1 波形腹板结构屋面坡度不宜小于 5%;采用 360° 直立缝卷边屋面板时,屋面坡度不宜小于 2%;

2 波形腹板门式刚架结构的柱顶侧移限值,不应大于表 6.9.7-1 规定的限值;其它结构的柱顶侧移限值,应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

3 波形腹板受弯构件的挠度与其跨度的比值,不应大于表 6.9.7-2 规定的限值。

表 6.9.7-1 波形腹板结构刚架柱顶位移计算值的限值

吊车情况	其它情况	柱顶位移限值
无吊车	当采用轻型金属墙板时	$H/60$
	当采用外挂预制轻质墙板时	$H/120$
有吊车	当吊车有驾驶室时	$H/400$
	当吊车由地面操作时	$H/180$

注: H 为刚架柱高度。

表 6.9.7-2 波形腹板受弯构件的挠度与跨度比限值

波形腹板刚架斜梁	斜梁挠度限值
仅支承压型钢板屋面和冷弯型钢檩条	$l/180$
有吊顶	$l/240$
有悬挂起重机	$l/400$ 且单台起重机荷载作用下 $l/500$
支承混凝土楼（屋）面	
主梁	$l/400$
次梁	$l/250$

注： 1 l 为斜梁跨度；

2 对悬臂梁，按 2 倍悬伸长度计算受弯构件的跨度；

3 当屋面坡度较小时，对压型钢板和冷弯型钢檩条屋面尚应符合以下条件：

- 1) 屋面坡度不大于 2.00%时，屋面梁的挠度不应大于 $l/300$ ；
- 2) 屋面坡度大于 2.00%且不大于 2.40%时，屋面梁的挠度不应大于 $l/250$ ；
- 3) 屋面坡度大于 2.40%且不大于 3.00%时，屋面梁的挠度不应大于 $l/200$ ；
- 4) 屋面坡度大于 3.00%且不大于 3.33%时，屋面梁的挠度不应大于 $l/180$ 。

【条文说明】波浪腹板屋面坡度值应根据屋面板板型、排水坡长、雨水量等因素确定。360°直立缝卷边屋面板是指用卷边机将已涂有密封胶的屋面板之间以360°双锁定直立缝方式连接而成的屋面板，其屋面板与檩条间通过嵌入板缝的连接片连接，相互之间可进行滑动，具有较高的防水性能和释放温度变形的能力，因而可采用较小的屋面坡度。

考虑屋面坡度的改变会影响屋面雨水的排泄，因此对小坡度屋面提高了屋面梁的挠度限值。

6.9.8 高强度螺栓连接的连接面处理应符合下列要求：

1 当高强度螺栓的连接采用承压型螺栓连接设计时，连接件之间的接触面应清除油污及浮锈。

2 当高强度螺栓的连接采用摩擦型设计时，接触面抗滑移系数应符合设计文件的要求。

3 当设计未对摩擦面抗滑移系数提出要求时，连接接触面可不作专门处理，也可不做摩擦面抗滑移试验。

6.9.9 波形腹板开孔高度不宜大于腹板高度的 $2/3$ ，且应符合受剪强度与受剪稳定承载力要求。

6.9.10 波形腹板与翼缘板焊接时，当腹板厚度不大于 4.0mm 时可采用单面焊缝，当腹板厚度大于 4.0mm 时应采用双面焊缝。对于波形腹板吊车梁构件及牛腿，腹板与翼缘连接应采用双面焊缝。

【条文说明】 波浪腹板构件的常用腹板厚度在 $2.0\text{mm} \sim 6.0\text{mm}$ 之间，门式刚架轻型房屋钢结构常用的波浪腹板厚度一般不大于 4.0mm ，这时腹板与翼缘采用单面焊缝实际上能够达到全熔透焊的效果。对于波浪腹板厚度大于 4.0mm 的情况，腹板与翼缘焊接应采用双面焊缝。由于吊车梁直接承受动力荷载，单面焊缝可能会产生应力集中，所以腹板与翼缘焊接应采用双面焊缝。

6.9.11 柱与底板的连接、柱与牛腿的连接、梁端板的连接、支承局部悬挂荷载的吊架及直接承受动力荷载的结构件等，除非设计专门规定，不得采用单面角焊缝。

【条文说明】 本条参照现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》GB 51022。该规定同样适用于波浪腹板构件。

6.10 节点构造

6.10.1 波形腹板构件采用端板连接节点时，螺栓布置及端板厚度应符合下列要求：

1 端板连接节点应采用高强度螺栓，不得采用普通螺栓；

2 螺栓应在波形腹板两侧成对布置，螺栓中心至波形腹板构件翼缘表面的距离，应符合拧紧螺栓时的施工要求；螺栓中心至波形腹板中心距离尚应考虑波形腹板的腹板变幅对螺栓安装的影响，且不宜小于 $(35+a)$ mm；高强度螺栓的中心距不应大于 400mm，当端板上下两对螺栓间的最大距离大于 400mm 时，应在端板的中部增设一对螺栓；

3 端板节点的端板厚度宜大于理论计算所得的连接螺栓直径且不应小于 16mm。端板厚度的设计按本规程第 6.11.2 条进行。

【条文说明】 对非端板式连接节点，螺栓的布置间距应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的相关规定。端板式连接节点中，因端板厚度的理论计算值是根据端板受荷后形成屈服铰线确定的，只有按本规程施加预拉力的高强度螺栓才会出现上述屈服线，所以此类连接节点应采用高强度螺栓，不得采用普通螺栓。

6.10.2 节点加劲肋的设置应符合下列要求：

1 在梁与中柱连接处、较大集中荷载作用处和翼缘转折处，应在腹板对应位置设置横向加劲肋；

2 加劲肋外伸部分截面宽厚比 b_s/t_s 不应大于 15。

【条文说明】 刚性节点域主要承受剪力，其平板的抗剪屈曲荷载较低，可采取设置加劲肋的方式进行加强。

6.10.3 边柱与梁应采用刚性连接，可采用端板平放、端板竖放或端板斜放的连接形式（图 6.10.3）。

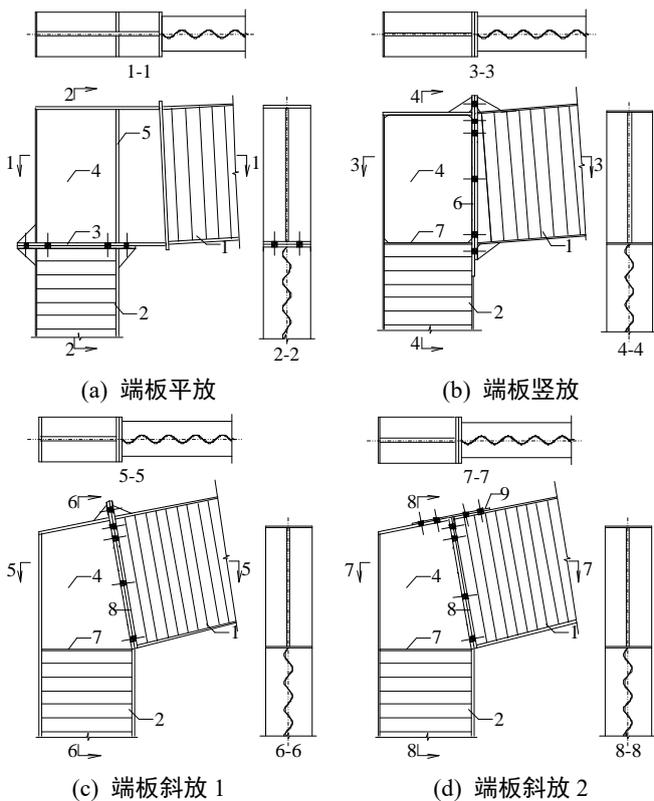


图 6.10.3 边柱与梁的连接节点

1-波形腹板梁；2-波形腹板柱；3-水平端板；4-平腹板；
 5-竖向加劲肋；6-竖向端板；7-水平加劲肋；8-斜向端板；9-盖板
6.10.4 中柱与梁的连接节点可采用刚接或铰接的连接形式（图 6.10.4）。

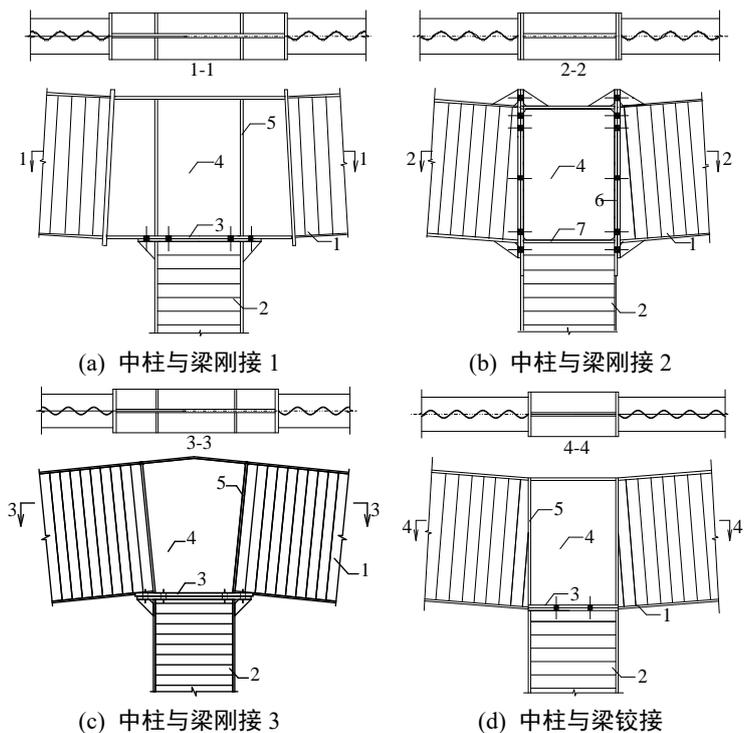
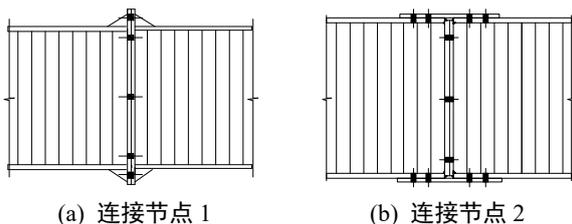


图 6.10.4 中柱与梁的连接节点

1-波形腹板梁；2-波形腹板柱；3-水平端板；4-平腹板；
5-竖向加劲肋；6-竖向端板；7-水平加劲肋；8-斜向端板

6.10.5 梁与梁的拼连接接节点可采用端板连接或焊接连接形式（图 6.10.5）。



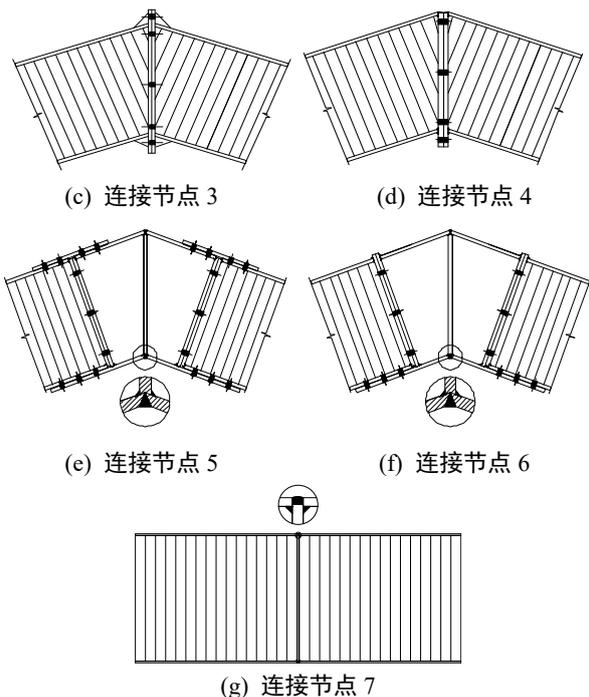


图 6.10.5 梁与梁的拼接连接节点

6.10.6 波浪腹板次梁与平腹板主梁连接节点,可采用主梁肋板外探式或次梁肋板外探式(图 6.10.6)。竖向肋板应与次梁下翼缘等宽,与腹板等高。

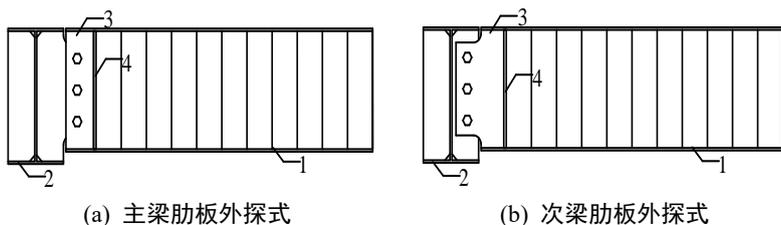


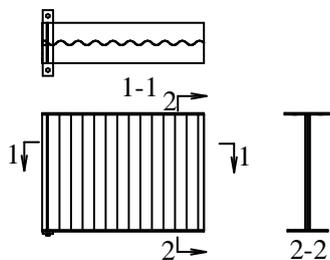
图 6.10.6 波浪腹板 H 型钢次梁与平腹板 H 型钢主梁连接节点

1-波浪腹板次梁; 2-平腹板主梁; 3-节点连接板; 4-竖向肋板

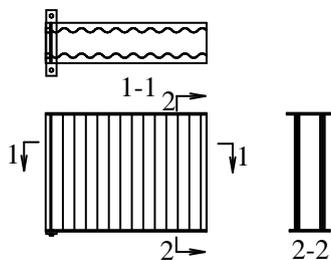
【条文说明】根据河北元宏世纪轻钢建筑有限责任公司提供的实际工程中应用情况新加入波形腹板 H 型钢次梁和平腹板 H

型钢主梁连接节点。

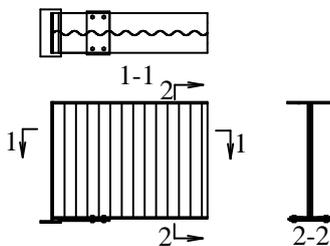
6.10.7 波形腹板吊车梁可采用等截面吊车梁,亦可采用鱼腹式波浪单腹板吊车梁或鱼腹式波浪双腹板(图 6.10.7a~f)。吊车梁端板处宜采用方钢管加强(图 6.10.7g)。



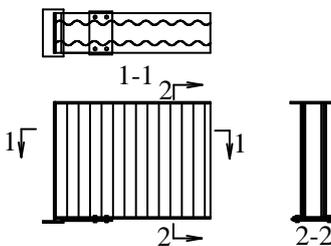
(a) 平板式波浪单腹板吊车梁



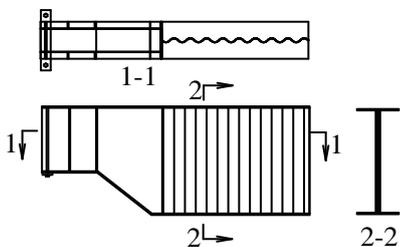
(b) 平板式波浪双腹板吊车梁



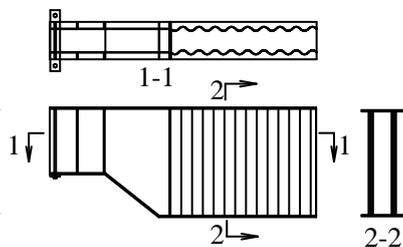
(c) 突缘式波浪单腹板吊车梁



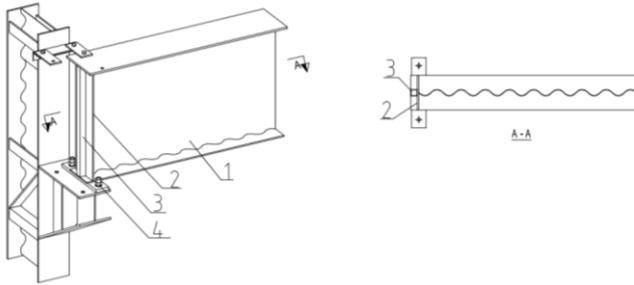
(d) 突缘式波浪双腹板吊车梁



(e) 鱼腹式波浪单腹板吊车梁



(f) 鱼腹式波浪双腹板吊车梁



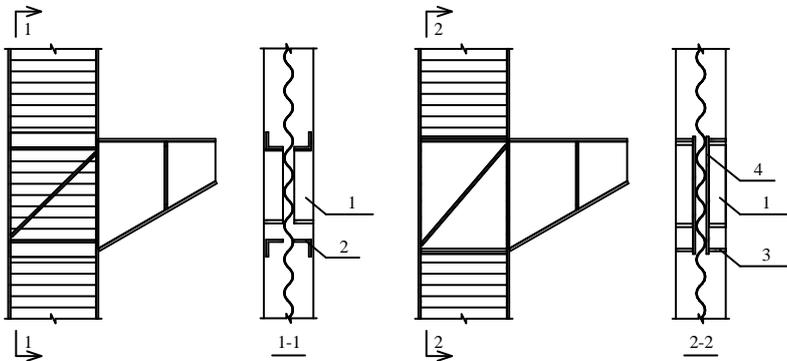
(g) 波浪腹板吊车梁端板加强方案

图 6.10.7 波形腹板吊车梁、端部加强方案以及与牛腿连接

1-波浪腹板吊车梁；2-吊车梁端板，其与下翼缘板等宽、与腹板等高；3-方管加强方案，与端板焊接，中间跨时方管取 40x40x2.5mm，端跨时方管取 100x50x2.5mm；4-此处必须用双螺母连接

【条文说明】 根据河北元宏世纪轻钢建筑有限责任公司提供的实际工程中应用情况新加入吊车梁形式。

6.10.8 吊车牛腿连接可采用角钢筋板式或平板外贴式的连接形式（图 6.10.8）。



(a) 角钢筋板式

(b) 平板外贴式

图 6.10.8 吊车牛腿的连接形式

1-斜筋板；2-角钢；3-平筋板；4-贴板

6.10.9 当翼缘板的厚度不大于 12mm 时，翼缘板与端板间宜采用等强角焊缝；当翼缘板的厚度大于 12mm 时，翼缘板与端板间宜采用等强组合角焊缝或熔透焊缝；腹板与端板间的焊缝可采用角焊缝或熔透焊缝。当采用熔透焊缝时，焊缝质量等级应达到二级要求，其它焊缝质量等级应达到三级要求。

6.10.10 波形腹板工形截面柱的柱脚可采用铰接柱脚（图 6.10.10-1）、刚接柱脚（图 6.10.10-2）或埋入式柱脚（图 6.10.10-3）。铰接柱脚宜采用 2 个或 4 个锚栓，同时柱底板下宜放置调平螺母，并宜采用双螺母，采用单螺母时应采取预防螺母松动的措施。

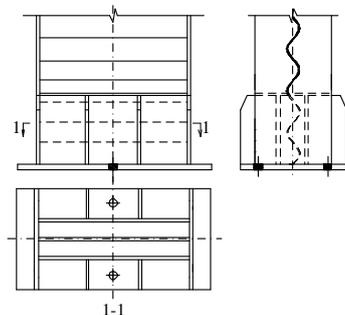
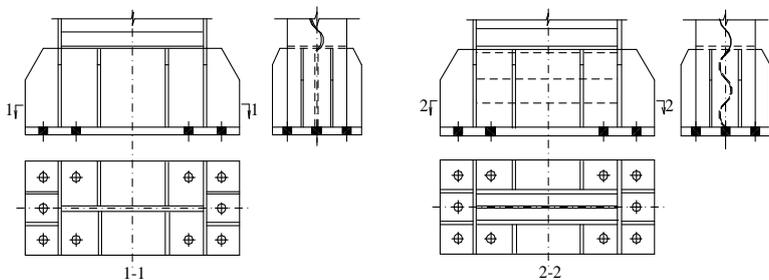


图 6.10.10-1 铰接柱脚



(a) 平板式刚接柱脚 1

(b) 平板式刚接柱脚 2

图 6.10.10-2 平板式刚接柱脚

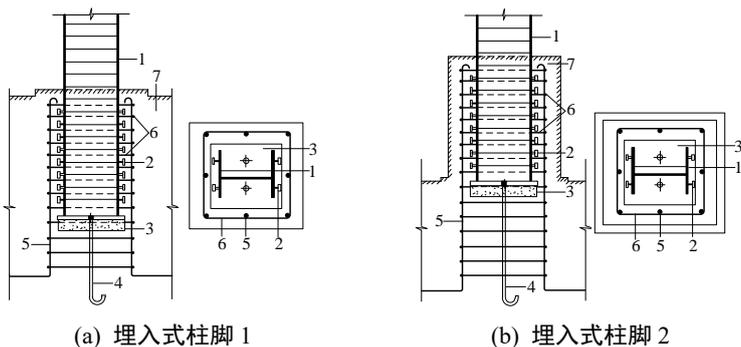


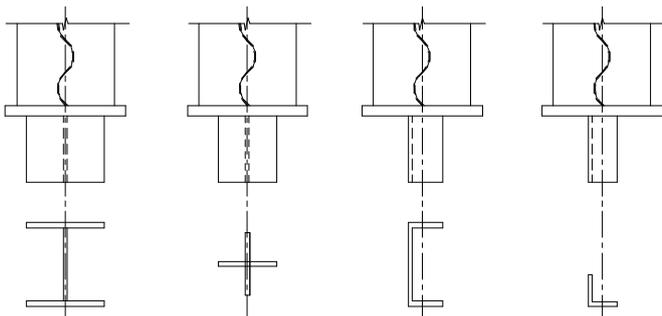
图 6.10.10-3 埋入式柱脚

1-波形腹板柱；2-栓钉；3-底板；4-锚栓；
5-纵向钢筋；6-箍筋；7-混凝土

【条文说明】 铰接柱脚宜采用 2 个或 4 个锚栓，其中 4 个锚栓的柱脚连接在安装时更易保证柱子的稳定性，同时柱底板下宜放置调平螺母，方便调整柱子标高及水平度；并宜采用双螺母，采用单螺母时应采取预防螺母松动的措施。

6.10.11 柱脚底板的厚度应根据计算确定，且不应小于 16mm。

6.10.12 柱脚锚栓不宜用于承受柱脚底部的水平剪力。水平剪力可由底板与混凝土基础件的摩擦力承受，摩擦系数可取 0.4。当柱底最大水平剪力设计值不小于 0.4 倍的最大剪力设计值对应的组合中的柱底轴力设计值时应设置抗剪键（图 6.10.13），同时基础应预留抗剪键所对应的槽口。



(a) 工字抗剪键 (b) 十字抗剪键 (c) 槽形抗剪键 (d) 角钢抗剪键

图 6.10.13 抗剪键的形式

6.10.13 柱脚在地面以下的部分宜采用强度等级较低的混凝土包裹,且包裹的混凝土高出地面的距离不应小于 150mm。当柱脚底面在地面以上时,柱脚底面高出地面的距离不应小于 100mm。

6.11 节点设计

6.11.1 端板节点螺栓群连接计算可按下列规定进行:

1 当节点承受弯矩 M 和轴力 N 共同作用(图 6.11.1),且 $M/h_w + N/2 > 0$ 时,可将 M 与 N 转化为上翼缘的拉力,拉力由翼缘两侧的螺栓承受,每个螺栓承受的轴心拉力 N_t 应按下式计算:

$$N_t = \frac{M/h_w + N/2}{n_f} \quad (6.11.1-1)$$

式中: M —— 端板处的弯矩设计值 (N·mm);

N —— 端板处的轴心拉力设计值 (N);

n_f —— 受拉翼缘两侧螺栓的数目。

2 当节点承受剪力 V 作用时,每个螺栓承受的剪力 N_v 应按下列下式计算:

$$N_v = \frac{V}{n} \quad (6.11.1-2)$$

式中: V —— 端板处的剪力设计值 (N);

n —— 端板上螺栓的数目。

3 摩擦型高强度螺栓应按下列下式计算:

1) 持久、短暂设计状况:

$$\frac{N_v}{N_v^b} + \frac{N_t}{N_t^b} \leq 1 \quad (6.11.1-3)$$

2) 地震设计状况:

$$\frac{N_v}{N_v^b/\gamma_{RE}} + \frac{N_t}{N_t^b/\gamma_{RE}} \leq 1 \quad (6.11.1-4)$$

式中： N_t^b —— 一个高强度螺栓的受拉承载力设计值，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 取值(N)；

N_v^b —— 一个高强度螺栓的受剪承载力设计值，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 取值(N)。

4 承压型高强度螺栓应按下列公式计算：

1) 持久、短暂设计状况：

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (6.11.1-5)$$

$$N_v \leq N_c^b/1.2 \quad (6.11.1-6)$$

2) 地震设计状况：

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b/\gamma_{RE}}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b/\gamma_{RE}}\right)^2} \leq 1 \quad (6.11.1-7)$$

$$N_v \leq N_c^b/1.2\gamma_{RE} \quad (6.11.1-8)$$

式中： N_c^b —— 一个高强度螺栓的承压承载力设计值，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 取值(N)。

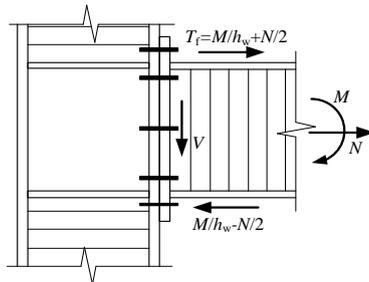


图 6.11.1 波形腹板构件端板连接螺栓受力简图

【条文说明】 波形腹板构件端板节点螺栓群连接计算的特点

在于，波形腹板不能有效传递轴向力，所以翼缘附近的螺栓连接显得比较重要。将弯矩、轴力等作用力等效成上下翼缘承受的轴力，并将该轴力传递给翼缘附近的螺栓承受，是计算螺栓受力的一种简单而且可靠的计算方法。

6.11.2 端板连接节点的端板厚度 t_p (图 6.11.2)应符合下列规定：

1 伸臂类端板：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6N_t e_f}{b_p f}} \quad (6.11.2-1)$$

2 两邻边支承类端板：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6N_t e_f e_w}{[b_p e_w + 2(e_f + e_w) e_f] f}} \quad (6.11.2-2)$$

3 两对边支承类端板（端板外伸式），可按上下翼缘间的两对边固支板进行计算；在轴力和弯矩作用下，仅有一个翼缘内侧的一对螺栓受拉时，端板厚度可按式(6.11.2-3)计算；若上、下翼缘内侧的一对螺栓（共两对）均受拉时，端板厚度可按(6.11.2-4)计算：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_t e_f (h_w - e_f)^2}{h_w^2 b_p f}} \quad (6.11.2-3)$$

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_t e_f (h_w - e_f)}{h_w b_p f}} \quad (6.11.2-4)$$

4 两对边支承类端板（端板平齐式），可按上下翼缘间的两对边简支板进行计算；在轴力和弯矩作用下，仅有一个翼缘内侧的一对螺栓受拉时，端板厚度可按式(6.11.2-5)计算；若上、下翼缘内侧的一对螺栓（共两对）均受拉时，端板厚度可按(6.11.2-6)计算：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_t e_f (h_w - e_f)}{h_w b_p f}} \quad (6.11.2-5)$$

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_t e_f}{b_p f}} \quad (6.11.2-6)$$

式中： b_p —— 端板的宽度（mm）；

e_f 、 e_w —— 螺栓中心至翼缘和腹板边缘的距离（mm）；

d —— 螺栓对之间的距离（mm）；

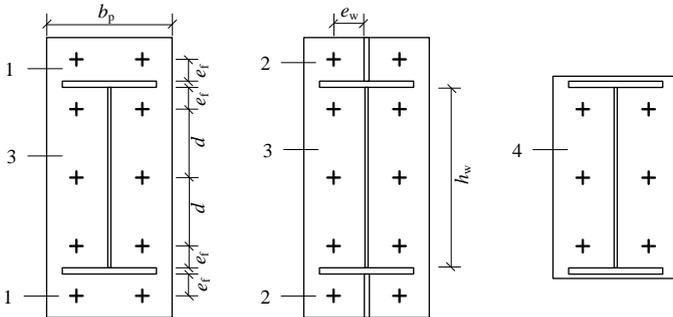


图 6.11.2 端板支承条件

1-伸臂类端板；2-两邻边支承类端板；

3-两对边支承类端板（端板外伸式）；4-两对边支承类端板（端板平齐式）；

【条文说明】 波形腹板沿纵向抗压刚度几乎为零，因而腹板不能对端板提供有效的支承作用，所以上下翼缘之间腹板区域端板厚度的计算与一般门式刚架端板计算（见现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》GB 51022）有所不同。两翼缘间的端板按外伸式、平齐式分别可看作两对边固定、两对边简支的板件进行验算，其作用力可分别按照在轴力与弯矩共同作用下仅有翼缘内侧一对螺栓受拉的情况与上、下翼缘内侧两对螺栓均受拉的情况，按照端板在螺栓位置处形成塑性铰线的原则计算端板厚度。

7 波形腹板钢拱设计

7.1 一般规定

7.1.1 波形腹板钢拱的轴线形状与拱脚构造，应根据建筑物的功能要求、荷载条件、跨度大小、施工方法及基础条件综合确定。

7.1.2 波形腹板钢拱的下部支承结构或基础应具有足够的刚度和强度以抵抗拱脚推力。当拱脚沉降或侧移较大时，应考虑其对固支拱或两铰拱受力性能的影响。

【条文说明】 拱脚推力是拱形结构的重要受力特征之一，拱脚位移对固支拱或两铰拱的受力性能影响显著。设计和施工中应采取有效措施抵抗拱脚推力、减小拱脚位移。

7.1.3 当进行波形腹板钢拱整体稳定性计算时，应采用一阶弹性分析确定内力。对跨度不小于 60m 的波形腹板钢拱，宜采用二阶弹性分析进行强度与变形计算。

【条文说明】 波形腹板钢拱可简化为曲线构件进行内力和变形计算，其弧长、跨度和矢高按拱轴线尺寸确定，并采用实际截面轴向刚度、抗弯刚度和剪切刚度。此外分析表明，考虑几何非线性与否对拱脚反力的计算结果影响较小，故拱脚反力计算可采用线性分析方法；但在计算波形腹板钢拱的弯矩与变形时，特别对大、中跨度拱（跨度不小于 60 米），宜采用考虑几何非线性的弹性分析方法。进行波形腹板钢拱整体稳定性验算时，根据本规程 7.3 节的规定，内力通过一阶线弹性计算确定。

7.1.4 本章规定适用于等截面波形腹板圆弧拱、抛物线拱。对于变截面或轴线形状复杂的波形腹板钢拱，宜采用有限元法进行内力和变形计算，并采用弹塑性全过程分析确定其稳定承载力。

【条文说明】 对于等截面工形截面波形腹板圆弧拱、抛物线

拱的平面内稳定承载力，本规程已给出相应的计算公式。对于截面与轴线变化复杂的波形腹板，尚无可供设计使用的简化设计方法，故推荐按照有限元分析方法进行计算。

7.1.5 波形腹板钢拱结构的选型应考虑面外支撑的设置要求。面外支撑可采用钢桁架、钢梁、檩条或屋面板体系等。

【条文说明】 单独钢拱的平面外稳定性要低于平面内，因此钢拱选型设计时宜通过设置面外约束构件保证其平面外不发生失稳，从而充分发挥其平面内承载能力。

7.1.6 波形腹板钢拱在平面外宜设置足够铺板或支撑阻止拱的平面外位移，此时可不计算平面外整体稳定性。

【条文说明】 面外支撑设计和布置可参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中钢梁的相关规定进行。

7.1.7 波形腹板钢拱的最大竖向位移不应大于其跨度的 $1/400$ ，平面内拱顶最大水平侧移不应大于其跨度的 $1/200$ 。荷载取值与组合系数应符合国家现行标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定。

【条文说明】 此值是综合近年来国内外的设计与使用经验而确定的。

7.1.8 对于中小跨度波形腹板钢拱可采用平均风荷载乘风振系数的方法考虑结构的风动力效应，风振系数取值宜在 $1.2\sim 1.8$ 之间。当跨度大于 120m ，或结构基本自振周期大于 1.0s 时，风动力效应宜通过风振响应分析或风洞试验确定。

【条文说明】 以风振系数表达的结构等效静风荷载主要适用于以基阶振动为主的高耸型结构，波形腹板钢拱的振动中往往存在多阶振型的贡献，因此采用风振系数考虑波形腹板钢拱的风致动力效应只是一种近似方法。本条给出的风振系数是参考取值。实际设计时，结构跨度较大且自振频率较低者取较大值。根据工

程经验,当结构跨度大于 120m 时可视为大型拱结构;根据美国、澳大利亚等国家的规范,当结构自振周期大于 1.0s 时,其风动力效应较为明显。

7.1.9 在抗震设防烈度为 6 度的地区,波形腹板钢拱可不进行抗震验算。在抗震设防烈度为 7 度的地区,当波形腹板钢拱的矢跨比大于或等于 1/5 时,应对波形腹板钢拱进行水平抗震验算,当矢跨比小于 1/5 时,应进行竖向和水平抗震验算;在抗震设防烈度为 8 度或 9 度的地区,应对波形腹板钢拱进行水平和竖向抗震验算。当拱跨度大于 120m 时,应进行罕遇地震分析。

【条文说明】波形腹板钢拱的水平振动与竖向振动属同一数量级,但矢跨比较大的拱形钢结构,将以水平振动为主。在设防烈度为 7 度的地震区,当波形腹板钢拱的矢跨比大于等于 1/5 时,竖向地震作用对拱的影响不大,因此本条规定在设防烈度为 7 度的地震区、矢跨比大于等于 1/5 的波形腹板钢拱可不进行竖向抗震验算,但必须进行水平抗震验算。

7.1.10 地震作用分析时,应考虑支承体系对波形腹板钢拱受力的影响,宜按整体分析模型对波形腹板钢拱与支承体系进行计算,也可按弹性支承模型将支承体系简化为波形腹板钢拱的弹性支座进行计算。

7.2 截面强度与板件稳定

7.2.1 弯矩作用在两个主平面内的波形腹板钢拱,其截面强度应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (7.2.1-1)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{N}{A_{\text{In}}/\gamma_{\text{RE}}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{\text{nx}}/\gamma_{\text{RE}}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{\text{ny}}/\gamma_{\text{RE}}} \leq f \quad (7.2.1-2)$$

式中： N —— 同一截面处的轴力设计值 ($\text{N}\cdot\text{mm}$)；

M_x 、 M_y —— 同一截面处对 x 轴和 y 轴的弯矩设计值 ($\text{N}\cdot\text{mm}$)；

W_{nx} 、 W_{ny} —— 对 x 轴和 y 轴的净截面模量，忽略腹板的贡献 (mm^3)；

γ_x 、 γ_y —— 对 x 轴和 y 轴的截面塑性发展系数，取 $\gamma_x = 1.0$ ， $\gamma_y = 1.2$ ；

f —— 钢材的抗弯强度设计值 (N/mm^2)。

7.2.2 在主平面内受弯的波形腹板钢拱，其受剪强度应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{1.1V}{A_{\text{wn}}} \leq f_v \quad (7.2.2-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{1.1V}{A_{\text{wn}}/\gamma_{\text{RE}}} \leq f_v \quad (7.2.2-2)$$

式中： V —— 计算截面处沿腹板平面作用的剪力设计值 (N)；

A_{wn} —— 腹板的净截面面积 (mm^2)；

f_v —— 钢材的抗剪强度设计值 (N/mm^2)。

【条文说明】 研究表明，波形腹板钢拱的腹板波形不是沿截面高度均匀分布，截面中线以上波长大波幅小，而中线以下波长小波幅大，因此剪应力在腹板截面上将不再均匀分布，这点与直的波形腹板梁有所不同。由于不均匀波形的影响，波形腹板钢拱的截面剪切刚度降低、剪切变形增大 (0~10%，随着波形不均匀程度而不同)，考虑此不利影响偏于安全地引入 1.1 的剪应力增大

系数。

7.2.3 波形腹板钢拱的腹板高厚比不应大于 $600\sqrt{235/f_y}$ ，腹板厚度不宜小于 2mm。

7.2.4 波形腹板工形截面钢拱的翼缘宽度不宜小于 150mm。受压翼缘板的自由外伸宽度与其厚度之比不应大于 $13v\sqrt{235/f_y}$ 。受压翼缘板宽厚比计算系数 v 应按表 6.9.2 取值，其中 α_1 和 β_1 按照波形腹板上部与翼缘连接处的波长 q_1 和波高 a_1 进行计算。

【条文说明】 波形腹板钢拱以受压或压弯受力为主，翼缘承受轴力和弯矩，如果发生板件局部失稳，将会大大降低波折腹板拱的极限承载力。波形腹板钢拱的翼缘宽厚比限值可参照直波形腹板构件取值。考虑到波形腹板钢拱在加工制作过程中腹板上部波形被拉伸而波幅减小，导致腹板上部波形边界对翼缘稳定的有利作用小于比腹板下部，因此偏于保守地取腹板上部与翼缘连接处的波长 q_1 和波高 a_1 进行计算。同时，由于钢拱多作为主要承重构件，其翼缘宽厚比限值偏于安全地由 $15v\sqrt{235/f_y}$ 减小为 $13v\sqrt{235/f_y}$ 。

7.2.5 波形腹板钢拱的腹板受剪稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{V}{\varphi_{sa} A_w} \leq f_v \quad (7.2.6-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{V}{\varphi_{sa} A_w / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (7.2.6-2)$$

式中： V —— 按一阶线弹性分析方法确定的拱内最大剪力设计值 (N)；

φ_{sa} —— 波形腹板钢拱的腹板受剪稳定系数。

7.2.6 波形腹板钢拱的腹板受剪稳定系数应按下式计算：

$$\varphi_{sa} = \begin{cases} 1 - 0.35\lambda_s^2 & \lambda_s < 0.6 \\ \left(149\frac{\Delta a}{h_w} - 0.5\right)\lambda_s^2 + \left(0.25 - 268\frac{\Delta a}{h_w}\right)\lambda_s & 0.6 \leq \lambda_s < 1.2 \\ +0.895 + 98.4\frac{\Delta a}{h_w} & \\ (0.7 - 16.5\Delta a/h_w)/\lambda_s^2 & \lambda_s \leq 1.2 \end{cases} \quad (7.2.6)$$

式中： λ_s —— 波形腹板的通用高厚比，应按本规程第 6.2.7 条确定；

Δa —— 腹板上下两端的波幅差（mm）；

h_w —— 波形腹板的高度（mm）。

【条文说明】 在保证翼缘不发生失稳破坏的前提下，除截面强度破坏外，波形腹板钢拱存在平面内整体失稳和腹板剪切失稳的两种破坏模式，最终失效模式由两者的承载力较小值决定。本条规定了腹板剪切失稳的承载力验算。稳定系数 φ_{sa} 考虑了波形腹板钢拱中波形沿腹板高度方向不均匀分布的不利影响，是对均匀波形腹板的抗剪承载力稳定系数 φ_s 的修正。

7.3 平面内整体稳定

7.3.1 轴心受压波形腹板工形截面钢拱的平面内整体稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\varphi_a A_f} \leq f \quad (7.3.1-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{\varphi_a A_f / \gamma_{RE}} \leq f \quad (7.3.1-2)$$

式中： N —— 按一阶线弹性分析方法确定的拱脚轴力设计值 (N)；

φ_a —— 波形腹板钢拱的平面内整体稳定系数，应根据拱的平面内换算长细比、钢材的屈服强度，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 附录 D 中的 c 类截面确定；

A_f —— 翼缘的毛截面面积 (mm²)。

【条文说明】 均布径向荷载作用下的圆弧拱以及全跨水平均布竖向荷载作用下的抛物线拱，属于轴心受压拱。研究表明，对于轴心受压钢拱，抛物线拱的平面内整体稳定承载力略高于圆弧拱，因此可偏于保守地选取圆弧拱的稳定系数曲线。此外，波形腹板钢拱的平面内稳定系数 φ_a 可偏于安全地采用现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中的 c 类柱子曲线，并考虑矢跨比、剪切变形的影响而根据平面内换算长细比 λ_e 查现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中的附表 D.0.3 确定取值。

7.3.2 轴心受压的波形腹板工形截面钢拱的平面内换算长细比 λ_e 应按下列公式计算：

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{\lambda_x^2}{K_a} + \frac{\pi^2 EA_f}{K_v}} \quad (7.3.2-1)$$

$$\lambda_x = \frac{S}{2i_x} \quad (7.3.2-2)$$

式中： λ_x —— 波形腹板钢拱平面内几何长细比；

K_v —— 波形腹板钢拱的截面剪切刚度 (N)；

S —— 波形腹板钢拱的拱轴线长度 (mm)；

i_x —— 拱平面内的截面回转半径 (mm), 忽略腹板贡献。
 平面内屈曲系数 K_a 应按下列规定采用:

1 两端铰支拱:

$$K_a = 1 - 0.736 \left(\frac{H}{L} \right)^{1.5} \quad (7.3.2-3)$$

2 两端固支拱:

$$K_a = 2.06 - 0.177 \left(\frac{H}{L} \right)^{1.5} \quad (7.3.2-4)$$

式中: H —— 按拱轴线计算的拱的矢高 (mm);

L —— 按拱轴线计算的拱的跨度 (mm)。

【条文说明】 类似于格构柱, 波形腹板钢拱的平面内换算长细比 λ_e 考虑了截面剪切变形对平面内稳定性的降低作用。同时, 屈曲系数 K_a 反映了矢跨比和拱脚约束条件的影响, 其依据弹性屈曲分析结果拟合得到。

7.3.3 弯矩作用在对称平面内的波形腹板工形截面钢拱, 其弯矩作用平面内稳定性应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{N}{\varphi_a A_f} + \frac{M}{W_x} \leq f \quad (7.3.3-1)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{N}{\varphi_a A_f / \gamma_{RE}} + \frac{M}{W_x / \gamma_{RE}} \leq f \quad (7.3.3-2)$$

式中: N —— 按一阶线弹性分析方法确定的拱脚轴力设计值 (N);

M —— 按一阶线弹性分析方法确定的拱内最大弯矩设计值 (N·mm);

W_x —— 按受压最大纤维确定的毛截面模量，忽略腹板的贡献（ mm^3 ）；

φ_a —— 波形腹板钢拱的平面内稳定系数，按本规程第 7.3.1 条确定；当钢拱整体受拉力作用时，取 $\varphi_a = 1.0$ 。

【条文说明】 抗剪极限承载力低于整体破坏极限承载力时，波形腹板钢拱发生腹板局部剪切破坏，这说明波形腹板钢拱的破坏模式由两者的较小值决定。根据波形腹板工形截面的受力特点，轴力和弯矩完全由上下翼缘承担，腹板只承担剪力。因此在其他参数一定的条件下，整体破坏极限承载力只与翼缘的尺寸有关，与腹板尺寸无关；腹板局部剪切破坏极限承载力只与腹板的尺寸有关，与翼缘的尺寸无关。

7.4 节点设计与构造

7.4.1 波形腹板钢拱结构节点选型与设计应遵循构造简单、整体刚度好、传力明确、安全可靠、节约材料和施工方便等原则。节点构造与计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

7.4.2 波形腹板钢拱的拼接节点可采用对接焊缝连接或端板连接。拼接位置应位于弯矩较小的截面。螺栓布置、端板厚度、加劲肋及焊缝等应符合本规程第 6.9 节的规定。

7.4.3 波形腹板钢拱的设计应考虑拱脚推力对基础或位于支承结构上的下部结构的影响。当拱脚推力较大且条件允许时，宜设置连接拱脚的钢绞线或型钢拉杆或采用索拱结构。

【条文说明】 钢拱的拱脚水平推力对于下部结构或基础的影响不可忽略。必要和条件允许（主要考虑净空要求）时，采用拉杆拱形成自平衡体系降低或消除拱脚推力的影响。此外，采用索

拱结构，依靠拉索的牵拉约束作用在显著提高钢拱平面内稳定承载力同时，也可以调整拱脚推力的大小。

7.4.4 波形腹板钢拱的拱脚底板的厚度应根据计算确定，且不应小于 16mm。

7.4.5 当采用铰接拱脚时，可在拱脚位置设置支座肋板并采用销轴连接；当采用刚接拱脚时，拱脚部位的截面高度宜适当扩大，或采取设置加劲肋或填充混凝土等加强措施。

【条文说明】 刚接拱脚处一般弯矩较大，可采取构造措施如填充加劲板或填充混凝土加强，以防止拱脚处板件应力过大而引起局部屈曲或强度破坏。波形腹板钢拱采用刚接拱脚时，可参照本规程第 6.9 节中的柱脚形式。

7.4.6 波形腹板钢拱中需要加劲的拱段宜采用为平腹板拱段，并在平腹板拱段内设置加劲肋。平腹板拱段与波形腹板拱段可通过端板采用焊接或高强螺栓进行连接。

【条文说明】 从构造的角度看，给波形腹板配置加劲肋是比较困难的，因此需要设置加劲肋的节点区域宜替换为平腹板，具体构造可参考本规程第 6.9 节的相关规定。

8 波形腹板组合构件设计

8.1 一般规定

8.1.1 混凝土硬结前的材料重量和施工荷载应由钢结构承担。

8.1.2 组合构件施工时，应根据实际情况按规定验算其强度、稳定性和变形。

8.2 波形腹板组合梁设计

8.2.1 组合梁截面承载能力计算时，跨中及中间支座处混凝土翼板的有效宽度 b_e （图 8.2.1）应按下列公式计算：

$$b_e = b_0 + b_1 + b_2 \quad (8.2.1-1)$$

$$b_1 = \min \left\{ \frac{l_e}{6}, 6h_{c1} \right\} \leq S_1 \quad (8.2.1-2)$$

$$b_2 = \min \left\{ \frac{l_e}{6}, 6h_{c1} \right\} \leq \frac{S_0}{2} \quad (8.2.1-3)$$

式中 b_0 —— 板托顶部的宽度；当板托倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时，应按 $\alpha = 45^\circ$ 计算；当无板托时，取波形腹板钢梁上翼缘的宽度；当混凝土板和波形腹板钢梁不直接接触（如之间有压型钢板分隔）时，取栓钉的横向间距，当仅有一列栓钉时取 0（mm）；

b_1 、 b_2 —— 梁外侧和内侧的翼板计算宽度（mm）；

h_{c1} —— 混凝土翼板的厚度（mm）；

l_e —— 等效跨径；对于简支组合梁，取为简支组合梁的跨度；对于连续组合梁，中间跨正弯矩区取为 0.6 倍的组合梁跨度，边跨正弯矩区取为 0.8 倍的组

合梁跨度，支座负弯矩区取为相邻两跨跨度之和的 0.2 倍 (mm)；

S_1 —— 翼板的实际外伸宽度 (mm)；

S_0 —— 相邻钢梁上翼缘或板托间净距 (mm)。

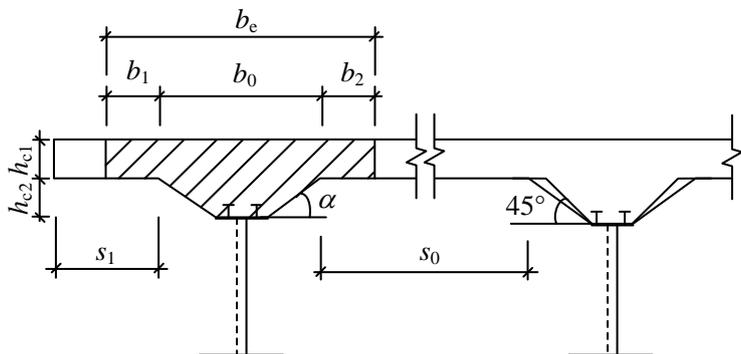


图 8.2.1 翼板有效宽度计算

【条文说明】 波形腹板组合梁的混凝土翼缘板既可带板托，也可不带板托。由于板托构造复杂，施工不便，在没有必要采用板托的前提下优先采用不带板托的组合梁。

与混凝土结构类似，组合梁混凝土板同样存在剪力滞后效应。目前各国规范均采用有效宽度的方法考虑混凝土板剪力滞后效应的影响，但有效宽度计算方法不尽相同，本规范采用现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中有效宽度的计算方法。

8.2.2 完全抗剪连接组合梁正弯矩作用区段，其受弯承载力应按下列规定计算：

1 塑性中和轴在混凝土翼板内 (图 8.2.2a)，即 $A_f f \leq b_e h_{c1} f_c$ 时：

1) 持久、短暂设计状况：

$$M \leq b_e x_f \xi_c y \quad (8.2.2-1)$$

$$x = \frac{A_f f}{b_e f_c} \quad (8.2.2-2)$$

2) 地震设计状况:

$$M \leq b_e x f_c y / \gamma_{RE} \quad (8.2.2-3)$$

2 塑性中和轴在钢梁上翼缘内 (图 8.2.2b), 即 $A_f f > b_e h_{c1} f_c$ 时:

1) 持久、短暂设计状况:

$$M \leq A_{bf} f h_s + b_e f_c h_{c1} \left(\frac{h_{c1}}{2} + h_{c2} \right) \quad (8.2.2-4)$$

2) 地震设计状况:

$$M \leq \left[A_{bf} f h_s + b_e f_c h_{c1} \left(\frac{h_{c1}}{2} + h_{c2} \right) \right] / \gamma_{RE} \quad (8.2.2-5)$$

式中: M —— 正弯矩设计值 (N·mm);

A_f —— 波形腹板钢梁上下翼缘的截面面积之和 (mm²);

A_{bf} —— 波形腹板钢梁下翼缘的截面面积 (mm²);

h_s —— 波形腹板钢梁的截面高度 (mm);

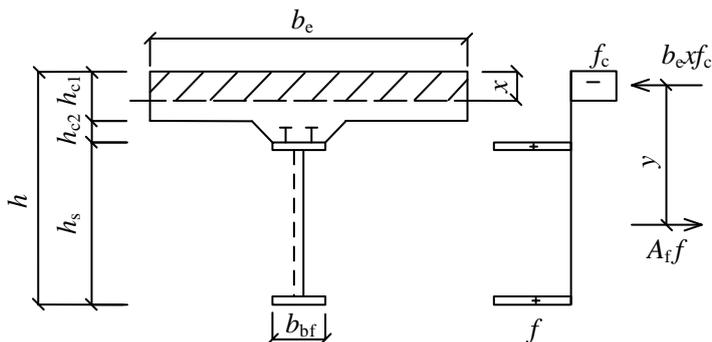
h_{c2} —— 板托的高度, 未设板托时取 0 (mm);

x —— 混凝土翼板的受压区高度 (mm);

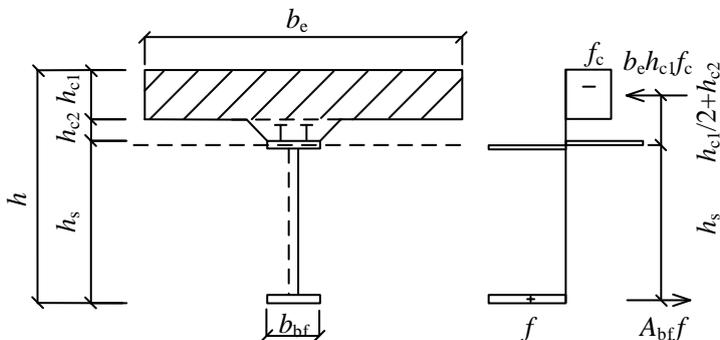
y —— 波形腹板钢梁截面形心 (不考虑腹板) 至混凝土受压应力形心的距离 (mm);

f_c —— 混凝土的抗压强度设计值 (N/mm²);

f —— 钢材的抗拉、抗压强度设计值 (N/mm²);



(a) 塑性中和轴位于混凝土翼板内时组合梁截面及应力图形



(b) 塑性中和轴位于钢梁上翼缘内时组合梁截面及应力图形

图 8.2.2 正弯矩作用区段抗弯承载力计算

【条文说明】 当塑性中和轴位于混凝土翼板内时，位于塑性中和轴一侧的受拉混凝土因为开裂而不参加工作，假定混凝土受压区均匀受压且达到抗压强度设计值，钢梁截面全部受拉但不考虑腹板贡献。当塑性中和轴位于钢梁上翼缘内时，钢梁上翼缘存在受拉区和受压区，由于翼缘厚度相对较小且拉应力和压应力合力与塑性中和轴的距离非常小，故上翼缘的拉压正应力对截面弯矩的贡献可以忽略，仅考虑下翼缘和混凝土翼板所形成的抵抗弯矩。

8.2.3 完全抗剪连接组合梁的负弯矩作用区段，其受弯承载力应

按下列规定计算：

1 塑性中和轴在钢梁下翼缘内（图 8.2.3a）时：

1) 持久、短暂设计状况：

$$M' \leq A_{st} f_{st} (y' + h_s) + A_{tf} f h_s \quad (8.2.3-1)$$

2) 地震设计状况：

$$M' \leq [A_{st} f_{st} (y' + h_s) + A_{tf} f h_s] / \gamma_{RE} \quad (8.2.3-2)$$

2 塑性中和轴在钢梁上翼缘内（图 8.2.3b）时：

1) 持久、短暂设计状况：

$$M' \leq A_{bf} f h_s + A_{st} f_{st} y' \quad (8.2.3-3)$$

2) 地震设计状况：

$$M' \leq (A_{bf} f h_s + A_{st} f_{st} y') / \gamma_{RE} \quad (8.2.3-4)$$

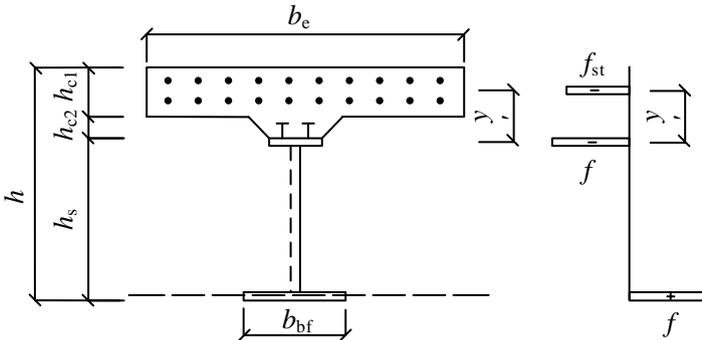
式中： M' —— 负弯矩设计值（N·mm）；

A_{st} —— 混凝土翼板有效宽度范围内的纵向钢筋截面面积（ mm^2 ）；

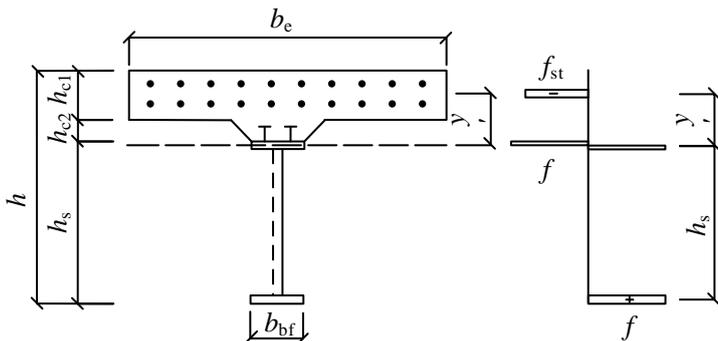
A_{tf} —— 波形腹板钢梁上翼缘的截面面积（ mm^2 ）；

y' —— 纵向钢筋截面形心至波形腹板钢梁上翼缘形心的距离（mm）；

f_{st} —— 钢筋的抗拉强度设计值（N/mm²）。



(a) 塑性中和轴在钢梁腹板内时组合梁截面及应力图形



(b) 塑性中和轴在钢梁上翼缘内时组合梁截面及应力图形

图 8.2.2-2 负弯矩作用区段抗弯承载力计算

【条文说明】连续组合梁在支座位置及临近区域产生负弯矩，梁截面混凝土上翼板受拉而钢梁下翼板受压。在组合梁负弯矩作用区段内，由于混凝土翼板受拉开裂对拉应力不产生贡献，故仅考虑钢筋的受拉作用。当塑性中和轴位于钢梁下翼缘内时，考虑受拉钢筋和钢梁受拉上翼缘对下翼缘形成的抵抗弯矩，一般出现在钢梁下翼缘加强的情况下。当塑性中和轴位于钢梁上翼缘内时，与正弯矩作用区段的情况相类似，同样可以忽略上翼缘内应力对截面抵抗弯矩的贡献，仅考虑受拉钢筋和钢梁下翼缘形成的抵抗弯矩。

8.2.4 在主平面内受弯的波形腹板组合梁，其受剪强度应按下列公式计算：

1 当剪跨比 $\lambda_b = a/h_{c1} > 8$ 时：

1) 持久、短暂设计状况：

$$V \leq A_{wn} f_v \quad (8.2.4-1)$$

2) 地震设计状况：

$$V \leq (A_{wn} f_v) / \gamma_{RE} \quad (8.2.4-2)$$

2 当剪跨比 $\lambda_b = a/h_{c1} \leq 8$ 时：

1) 持久、短暂设计状况:

$$V \leq \left[0.046 + 0.168 \exp\left(-\frac{\lambda_b^{1.51}}{9.67}\right) \right] f_c b_e h_{c1} + A_{wn} f_v \quad (8.2.4-3)$$

2) 地震设计状况:

$$V \leq \left\{ \left[0.046 + 0.168 \exp\left(-\frac{\lambda_b^{1.51}}{9.67}\right) \right] f_c b_e h_{c1} + A_{wn} f_v \right\} / \gamma_{RE} \quad (8.2.4-4)$$

式中: V —— 计算截面沿腹板平面作用的剪力设计值 (N);

A_{wn} —— 腹板的净截面面积 (mm^2);

a —— 组合梁剪跨段的长度 (mm)。

【条文说明】 当剪跨比 $\lambda_b = a/h_{c1} > 8$ 时, 仅考虑波形腹板组合梁腹板对抗剪承载力的贡献, 并考虑波形腹板内剪应力沿着高度均匀分布; 当 $\lambda_b = a/h_{c1} \leq 8$ 时, 还需考虑混凝土翼板对构件截面抗剪承载力的贡献。

8.2.5 波形腹板的受剪稳定承载力应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$V_1 \leq \varphi_s A_w f_v \quad (8.2.5-1)$$

2 地震设计状况:

$$V_1 \leq (\varphi_s A_w f_v) / \gamma_{RE} \quad (8.2.5-2)$$

式中: V_1 —— 波形腹板的剪力设计值 (N);

A_w —— 腹板的毛截面面积 (mm^2);

φ_s —— 波形腹板的受剪稳定系数, 应按本规程第 6.2.7 条确定。

8.2.6 波形腹板组合梁的抗剪连接件应符合下列规定:

1 组合梁的抗剪连接件宜采用圆柱头焊钉, 也可采用槽钢或有可靠依据的其他类型连接件 (图 8.2.6-1)。单个抗剪连接件的受剪承载力应按下列公式确定:

1) 圆柱头焊钉连接件:

$$N_v^c = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (8.2.6-1)$$

式中: E_c —— 混凝土的弹性模量 (N/mm^2);

A_s —— 圆柱头焊钉钉杆的截面面积 (mm^2);

f_u —— 圆柱头焊钉钢材的抗拉强度最小值, 应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定 (N/mm^2)。

2) 槽钢连接件:

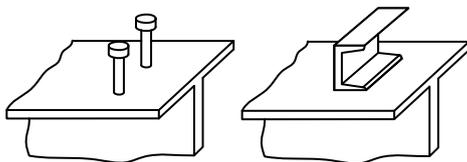
$$N_v^c = 0.26(t + 0.5t_w)l_c \sqrt{E_c f_c} \quad (8.2.6-2)$$

式中: t —— 槽钢翼缘的平均厚度 (mm);

t_w —— 槽钢腹板的厚度 (mm);

l_c —— 槽钢的长度 (mm)。

槽钢连接件通过肢尖肢背两条通长角焊缝与钢梁连接, 角焊缝按承受该连接件的受剪承载力设计值 N_v^c 进行计算。



(a) 圆柱头焊钉连接件

(b) 槽钢连接件

图 8.2.6-1 连接件的外形

2 位于负弯矩区段的抗剪连接件, 其受剪承载力设计值 N_v^c 应乘以折减系数 0.9。

3 当采用柔性抗剪连接件时, 抗剪连接件的计算应以支座点、零弯矩点和弯矩绝对值最大点为界限, 划分为若干个剪跨段 (图 8.2.6-2), 逐段进行布置。每个剪跨区内钢梁与混凝土翼板交界面的纵向剪力 V_s 应按下列公式确定:

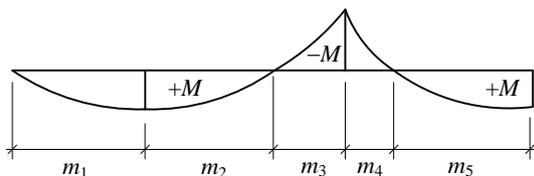


图 8.2.6-2 连续梁剪跨区划分图

1) 对位于正弯矩区的剪跨区段, 即 m_1 和 m_2 区段, 当中和轴在混凝土翼板内时取 $V_s = A_t f$, 当中和轴在钢梁内时取 $V_s = f_c b_e h_{c1}$ 。

2) 对位于负弯矩区的剪跨区段, 即 m_3 区段, 取 $V_s = A_{st} f_{st}$ 。
各剪跨区内所需连接件数目 n , 应按下式确定:

$$n = \frac{V_s}{N_v^c} \quad (8.2.6-3)$$

按式(8.2.6-3)算得的连接件数目, 可在对应的剪跨区段内均匀布置。当在此剪跨区段内有较大集中荷载作用时, 应将连接件数目 n 按剪力图面积比例分配后再各自均匀布置。

【条文说明】 由于组合梁承载力按照塑性进行设计, 故可认为在各剪跨区内由于塑性内力重分布, 各连接件受力接近相等, 连接件可均匀布置。

8.2.7 波形腹板组合梁的挠度计算应符合下列规定:

1 组合梁的挠度应分别按荷载的标准组合和准永久组合进行计算, 以其中的较大值作为依据。挠度可按结构力学方法进行计算, 仅受正弯矩作用的组合梁, 其弯曲刚度应取考虑滑移效应和波形腹板剪切变形影响的折减刚度, 连续组合梁宜按变截面刚度梁进行计算。按荷载的标准组合和准永久组合进行计算时, 组合梁应各取其相应的折减刚度。

2 组合梁考虑滑移效应和波形腹板剪切变形影响的折减刚度 B 可按下式确定:

$$B = C_1 C_2 E I_{\text{eq}} \quad (8.2.7-1)$$

式中： I_{eq} —— 组合梁的换算截面惯性矩；对荷载的标准组合，可将截面中的混凝土翼板有效宽度除以钢与混凝土弹性模量的比值 α_E 换算为钢截面宽度后，计算整个截面的惯性矩；对荷载的准永久组合，则除以 $2\alpha_E$ 进行换算（ mm^4 ）；

C_1 —— 考虑组合梁叠合界面滑移的刚度折减系数；

C_2 —— 考虑波形腹板剪切变形的刚度折减系数。

3 组合梁的换算截面惯性矩应分别根据荷载的标准组合和准永久，按下列公式计算：

1) 对荷载的标准组合：

$$I_{\text{eq}} = I_s + \frac{I_c}{\alpha_E} + A_0 d^2 \quad (8.2.7-2)$$

$$A_0 = \frac{A_f A_c}{\alpha_E A_f + A_c} \quad (8.2.7-3)$$

2) 对荷载的准永久组合：

$$I_{\text{eq}} = I_s + \frac{I_c}{2\alpha_E} + A_0 d^2 \quad (8.2.7-4)$$

$$A_0 = \frac{A_f A_c}{2\alpha_E A_f + A_c} \quad (8.2.7-5)$$

$$d = \frac{A_{\text{tf}}(h_{c1} + h_{c2}) + A_{\text{bf}} h}{A_f} - \frac{h_{c1}}{2} \quad (8.2.7-6)$$

式中： I_s —— 波形腹板钢梁对自身形心轴的惯性矩，忽略腹板的贡献（ mm^4 ）；

I_c —— 混凝土翼板在有效宽度范围内对自身形心轴的惯性矩，考虑受拉混凝土的贡献（ mm^4 ）；

A_c —— 混凝土翼板在有效宽度范围内的截面面积 (mm^2);

d —— 波形腹板钢梁截面形心到混凝土翼板截面形心的距离, 忽略波形腹板的贡献 (mm);

h —— 组合梁截面的总高度 (mm);

α_E —— 组合梁中钢与混凝土弹性模量的比值。

4 考虑组合梁叠合界面滑移的刚度折减系数 C_1 宜按下列公式计算:

$$C_1 = \frac{1}{1 + \zeta} \quad (8.2.7-7)$$

$$\zeta = \eta \left[0.4 - \frac{3}{(jl)^2} \right] \quad (8.2.7-8)$$

$$\eta = \frac{36E_s dp A_0}{n_s k h l^2} \quad (8.2.7-9)$$

$$j = 0.81 \sqrt{\frac{n_s k A_1}{E I_{eq} p}} \quad (8.2.7-10)$$

$$A_1 = \frac{I_0 + A_0 d^2}{A_0} \quad (8.2.7-11)$$

$$I_0 = I_s + \frac{I_c}{\alpha_E} \quad (8.2.7-12)$$

式中: A_0 —— 参数, 按荷载标准组合下公式计算, 按本标准式 (8.2.7-3) 确定 (mm^2);

l —— 组合梁的跨度 (mm);

k —— 抗剪连接件刚度系数, 取 $k = N_v^c$ (N/mm);

p —— 抗剪连接件的纵向平均距离 (mm);

n_s —— 抗剪连接件在一根梁上的列数。

5 考虑波形腹板剪切变形的刚度折减系数 C_2 宜按下列公式

计算:

$$C_2 = \frac{t_w l^2}{t_w l^2 + k_q b_f t_f h_w} \quad (8.2.7-13)$$

式中: k_q —— 剪切变形影响系数, 应按表 6.2.3 取值;

b_f 、 t_f —— 翼缘的宽度和厚度 (mm);

h_w 、 t_w —— 腹板的高度和厚度 (mm)。

【条文说明】 在实际的组合梁截面中, 由于剪力连接件刚度有限, 并不可能存在理想的完全抗剪连接组合梁。试验结果表明, 相比于按照换算截面方法计算的挠度, 叠合界面的滑移效应将产生 20%~30% 的附加挠度。同时, 由于波形腹板构件的抗剪刚度较小, 在计算组合梁挠度时也应计入腹板剪切变形产生的影响。

8.3 波形腹板组合柱设计

8.3.1 波形腹板组合柱的单肢承载力计算, 应根据组合柱截面的轴力和弯矩确定其单肢的轴力, 按压肢和拉肢分别进行。在确定其单肢轴力时, 不考虑波形腹板的贡献, 截面的轴力和弯矩由两个分肢截面承担 (图 8.3.1)。波形腹板组合柱的单肢承载力应按下列公式计算:

1 轴心受压的波形腹板组合柱单肢柱, 其截面强度应按下列公式计算:

1) 持久、短暂设计状况:

$$N_1 \leq \varphi_1 N_0 \quad (8.3.1-1)$$

$$N_0 = (1 + \sqrt{\theta} + \theta) A_{c1} f_c \quad (8.3.1-2)$$

$$\theta = \frac{A_{a1} f}{A_{c1} f_c} \quad (8.3.1-3)$$

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1 & l/d \leq 4 \\ 1 - 0.115\sqrt{l/d - 4} & l/d > 4 \end{cases} \quad (8.3.1-4)$$

2) 地震设计状况:

$$N_1 \leq (\varphi_1 N_0) / \gamma_{RE} \quad (8.3.1-5)$$

2 轴心受拉的波形腹板组合柱单肢柱, 其截面强度应按下式计算:

1) 持久、短暂设计状况:

$$N_2 \leq f_a A_{a1} \quad (8.3.1-6)$$

2) 地震设计状况:

$$N_2 \leq (f_a A_{a1}) / \gamma_{RE} \quad (8.3.1-7)$$

式中: N_0 —— 轴心受压钢管混凝土短柱的承载力设计值 (N);

φ_1 —— 轴心受压钢管混凝土柱的稳定系数;

f —— 钢管的抗拉、抗压强度设计值 (N/mm²);

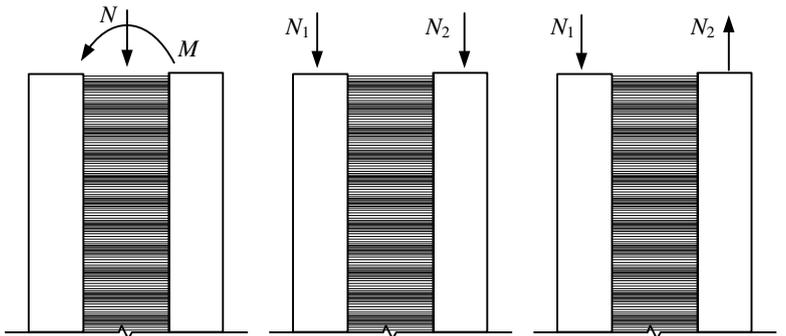
A_{a1} —— 单肢钢管的截面面积 (mm²);

A_{c1} —— 单肢钢管内混凝土的截面面积 (mm²);

θ —— 单肢钢管混凝土的套箍指标;

l —— 波形腹板组合柱的高度 (mm);

d —— 钢管的外直径 (mm)。



(a) 构件截面内力

(b) 小偏压下的分肢内力

(c) 大偏压下的分肢内力

图 8.3.1 波形腹板组合柱内力

【条文说明】 由于波形腹板面外波折的存在，可将腹板做得高而薄，进而最大程度地拉开两个钢管混凝土分肢间的距离，增加波形腹板组合柱截面绕强轴的惯性矩，提升构件材料的使用效率。另一方面，由于波形腹板在其轴向的压缩刚度为零，对钢管混凝土分肢的轴向变形不产生约束，而是保证两个分肢间侧向与纵向变形的协调。因此，波形腹板组合柱中起连接作用的腹板相当于格构柱中的缀板，则波形腹板组合柱的设计方法则类似于钢管混凝土格构柱的设计方法。

由于波形腹板不承受轴压和弯矩产生的轴向应力，故构件截面的轴压力和弯矩均由两个分肢截面承担。考虑到波形腹板组合柱左右分肢间距较大，并且与柱整体宽度相比分肢断面宽度较小，可以近似认为两个分肢断面均为轴心受力杆件，即轴向应力在某一分肢断面上均匀分布。

8.3.2 轴心受压的波形腹板组合柱，其稳定性应按下列公式计算：

1) 持久、短暂设计状况：

$$N \leq \varphi_1^* \varphi_2^* N_0^* \quad (8.3.2-1)$$

$$N_0^* = \sum_1^i N_{0i} \quad (8.3.2-2)$$

2) 地震设计状况：

$$N \leq (\varphi_1^* \varphi_2^* N_0^*) / \gamma_{RE} \quad (8.3.2-1)$$

式中： N —— 波形腹板组合柱的轴心压力设计值 (N)；

N_0^* —— 各钢管混凝土分肢轴心受压短柱的承载力设计值之和 (N)；

N_{0i} —— 各钢管混凝土单肢柱的轴心受压短柱承载力设计值 (N)，应按本标准第 8.3.2 条确定；

φ_1^* —— 考虑组合柱构件长细比影响的承载力折减系数;

φ_2^* —— 考虑组合柱构件偏心率影响的承载力折减系数。

8.3.3 轴心受压的波形腹板组合柱的承载力折减系数应按下列公式计算:

$$\varphi_1^* = \begin{cases} 1 & \lambda_x^* \leq 16 \\ 1 - 0.0575\sqrt{\lambda_x^* - 16} & \lambda_x^* > 16 \end{cases} \quad (8.3.3-1)$$

$$\varphi_2^* = \begin{cases} \frac{1}{1 + 2e_0^*/h} & e_0^*/h \leq \varepsilon_b \\ \frac{\theta^*}{(1 + \sqrt{\theta^* + \theta^*})(2e_0^*/h - 1)} & e_0^*/h > \varepsilon_b \end{cases} \quad (8.3.3-2)$$

$$\lambda_x^* = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{\pi^2 EA}{GA_w} \cdot \frac{s}{q}} \quad (8.3.3-3)$$

$$\lambda_x = \frac{l}{\sqrt{I_x/A}} \quad (8.3.3-4)$$

$$A = A_a + \frac{E_c A_c}{E} \quad (8.3.3-5)$$

$$\theta^* = \frac{A_a f_a}{A_c f_c} \quad (8.3.3-6)$$

$$\varepsilon_b = 0.5 + \frac{\theta^*}{1 + \theta^*} \quad (8.3.3-7)$$

式中: λ_x^* —— 波形腹板组合柱的等效长细比;

λ_x —— 波形腹板组合柱的几何长细比;

A —— 组合柱截面的折算面积, 忽略腹板的贡献(mm^2);

I_x —— 组合柱截面对虚轴的惯性矩, 忽略腹板的贡献(mm^4);

l —— 波形腹板组合柱的高度 (mm);

- A_a —— 组合柱各分肢钢管截面面积之和 (mm^2);
- A_c —— 组合柱各分肢钢管内混凝土的截面面积之和 (mm^2);
- A_w —— 波形腹板的毛截面面积 (mm^2);
- θ^* —— 组合柱截面的套箍指标;
- h —— 两个钢管混凝土分肢中心间距 (mm);
- e_0^* —— 组合柱整体偏心距, 取为弯矩设计值 M 与轴心压力设计值 N 的比值 (mm);
- ε_b —— 组合柱的界限偏心率。

【条文说明】 波形腹板组合柱与格构柱相似, 在计算其绕虚轴的稳定承载力时, 必须考虑剪切变形的影响, 原因是波形腹板平面内的抗剪刚度较小, 剪切变形不可忽略。通过对波形腹板组合柱绕虚轴的等效长细比的推导, 即可将组合柱构件绕虚轴的整体稳定承载力计算等效为实腹式构件的承载力计算。

8.3.4 波形腹板的受剪承载力应按下列规定计算:

1 波形腹板的剪力设计值 V 可认为沿组合柱高度方向不变, 应按下式计算:

$$V = \frac{N_0^*}{85} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (8.3.4-1)$$

2 波形腹板的受剪强度应按下列规定计算:

1) 持久、短暂设计状况:

$$\frac{V}{A_w} \leq f_v \quad (8.3.4-2)$$

2) 地震设计状况:

$$\frac{V}{A_w / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (8.3.4-3)$$

3 波形腹板的受剪稳定承载力应按下列规定计算:

1) 持久、短暂设计状况:

$$\frac{V}{\varphi_s A_w} \leq f_v \quad (8.3.4-4)$$

2) 地震设计状况:

$$\frac{V}{\varphi_s A_w / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (8.3.4-5)$$

式中: φ_s —— 波形腹板的受剪稳定系数, 应按本规程第 6.2.7 条确定。

【条文说明】 波形腹板起到了连接两个钢管混凝土分肢且承受截面剪力的作用, 通过其自身的剪切变形, 一方面使两个分肢的侧向变形相同, 另一方面保证两个分肢截面的纵向变形协调(类似平截面假定), 因而波形腹板将承受一定的剪切应力。波形腹板所受剪力参照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中的规定。

8.4 节点设计与构造

8.4.1 波形腹板组合梁的混凝土翼板与波形腹板钢梁上翼缘之间应采用栓钉连接。栓钉的设计和构造要求应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

8.4.2 波形腹板组合柱的柱脚可采用独立基础(图 8.4.2-1)或分离式基础(图 8.4.2-2), 分离式基础可按轴心受力设计。

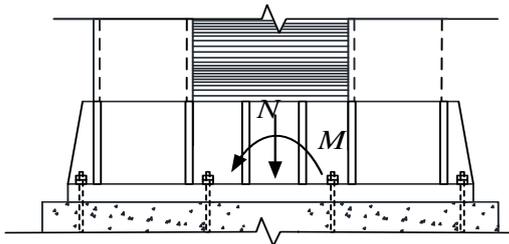


图 8.4.2-1 独立基础

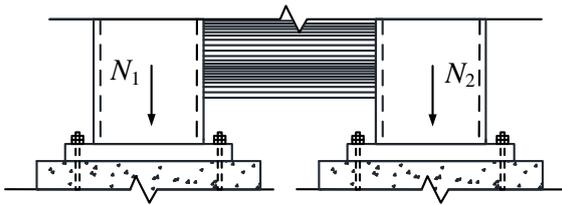


图 8.4.2-2 分离式基础

9 波形钢板剪力墙设计

9.1 一般规定

9.1.1 波形钢板剪力墙竖向放置时，设计时应考虑钢板墙与框架同步安装时在墙板中产生的初始压应力的不利影响。

9.1.2 波形钢板剪力墙与框架边缘构件应可靠连接。当采用焊接或螺栓连接时，应采用鱼尾板的连接方式。

9.1.3 波形钢板剪力墙开洞时，其洞口边缘构件刚度应能保证波形钢板剪力墙的受剪承载力不会降低。

9.2 单层波形钢板墙设计

9.2.1 单层波形钢板墙的受剪稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{V}{\varphi_s t_w b_s} \leq f_v \quad (9.2.1-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{V}{\varphi_s t_w b_s / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (9.2.1-2)$$

式中： V —— 剪力设计值 (N)；

t_w —— 波形钢板的厚度 (mm)；

b_s —— 波形钢板墙的宽度 (mm)；

f_v —— 钢材的抗剪强度设计值 (N/mm²)。

9.2.2 单层波形钢板墙的受剪稳定系数应按下列公式计算：

1 单层波形钢板墙的受剪稳定系数 φ_s 应按下列公式计算：

1) 非加劲单层加劲波形钢板墙：

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.148\lambda_{ns}^2 & \lambda_{ns} \leq 0.8 \\ \left(\Phi_m - \sqrt{\Phi_m^2 - 4\lambda_{ns}^2} \right) / (2\lambda_{ns}^2) & 0.8 < \lambda_{ns} \leq 1.05 \\ 0.637/\lambda_{ns} & \lambda_{ns} > 1.05 \end{cases} \quad (9.2.2-1)$$

$$\Phi_m = 0.5 + 0.68\lambda_{ns} + \lambda_{ns}^2 \quad (9.2.2-2)$$

2) 竖向加劲单层加劲波形钢板墙:

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.137\lambda_{ns}^2 & \lambda_{ns} \leq 0.8 \\ 0.73/\lambda_{ns} & \lambda_{ns} > 0.8 \end{cases} \quad (9.2.2-3)$$

2 单层波形钢板墙的正则化宽高比 λ_{ns} 应按下列公式计算:

$$\lambda_{ns} = \sqrt{\frac{0.58t_w b_s f_y}{V_{cr}}} \quad (9.2.2-4)$$

$$V_{cr} = k_b \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{b_s} \quad (9.2.2-5)$$

$$\theta = \frac{H_s}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (9.2.2-6)$$

$$\beta = \frac{b_s}{H} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}} \quad (9.2.2-7)$$

3 受剪弹性屈曲系数 k_b 应按下列公式计算:

1) 非加劲单层加劲波形钢板墙:

$$k_b = (7 + 20\theta)\beta^2 + 8\beta + 61.2 + 29.5\theta \quad (9.2.2-8)$$

2) 竖向加劲单层加劲波形钢板墙:

$$k_b = (7 + 20\theta)\beta^2 + 16\beta + 180 + 100\theta \quad (9.2.2-9)$$

式中: V_{cr} —— 波形钢板墙的受剪弹性屈曲荷载 (N);

D_x 、 D_y —— 波形钢板墙对强轴和弱轴的弯曲刚度常数 (N·mm);

H_s —— 波形钢板墙的扭转刚度常数 (N·mm);

H —— 波形钢板墙的高度 (mm);

f_y —— 钢材的屈服强度 (N/mm²);

θ —— 波形钢板墙的刚度常数比;

β —— 波形钢板墙的等效宽高比。

9.2.3 竖向加劲单层波形钢板墙的加劲肋刚度应符合下式规定:

$$EI_a + EA_a \left(\frac{a}{2} + b_{st} \right)^2 \geq 25D_y b_s \quad (9.2.3)$$

式中: I_a —— 单个加劲肋的截面惯性矩 (mm⁴);

A_a —— 单个加劲肋的截面面积 (mm²);

a —— 波形腹板的波幅 (mm);

b_{st} —— 加劲肋中性轴到波形钢板板面的距离 (mm)。

9.3 双层波形钢板墙设计

9.3.1 双层波形钢板墙的的受剪稳定承载力应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\frac{V}{2\varphi_s t_w b_s} \leq f_v \quad (9.3.1-1)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{V}{2\varphi_s t_w b_s / \gamma_{RE}} \leq f_v \quad (9.3.1-2)$$

式中: V —— 剪力设计值 (N);

t_w —— 单块波形钢板的厚度 (mm)。

9.3.2 双层波形钢板墙的受剪稳定系数应按下列公式计算:

1 双层波形钢板墙的受剪稳定系数 φ_s 应按下列公式计算:

1) 平行对扣:

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.233\lambda_{ns}^2 & \lambda_{ns} \leq 0.67 \\ 0.6/\lambda_{ns} & \lambda_{ns} > 0.67 \end{cases} \quad (9.3.2-1)$$

2) 正交对扣:

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 & \lambda_{ns} \leq 0.3 \\ -0.0588\lambda_{ns} + 1.018 & 0.3 < \lambda_{ns} < 2.0 \\ 0.9 & \lambda_{ns} \geq 2.0 \end{cases} \quad (9.3.2-2)$$

2 双层波形钢板墙的正则化宽高比 λ_{ns} 应按下列公式计算:

$$\lambda_{ns} = \sqrt{\frac{1.16t_w b_s f_y}{V_{cr}}} \quad (9.3.2-3)$$

$$k_b = \omega k_{b,0} \quad (9.3.2-4)$$

$$\theta_1 = \frac{H_{s1}}{\sqrt{D_{x1} D_{y1}}} \quad (9.3.2-5)$$

$$\beta_1 = \frac{b_s}{H} \sqrt[4]{\frac{D_{y1}}{D_{x1}}} \quad (9.3.2-6)$$

式中: D_{x1} 、 D_{y1} —— 单块波形钢板对强轴和弱轴的弯曲刚度常数 (N·mm);

H_{s1} —— 单块波形钢板的扭转刚度常数 (N·mm);

k_b —— 双层波形钢板墙的受剪弹性屈曲系数;

$k_{b,0}$ —— 双层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;

θ_1 —— 单块波形钢板的刚度常数比;

β_1 —— 单块波形钢板的等效宽高比。

3 双层波形钢板墙的受剪弹性屈曲荷载 V_{cr} 应按下列公式计算:

1) 平行对扣:

$$V_{cr} = k_b \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{b_s} \quad (9.3.2-7)$$

$$\omega = 1 - \frac{\eta^{1.1}(1 - \omega_1)}{\eta^{1.1} + 0.08(1 - \eta)^{1.1}} \quad (9.3.2-8)$$

$$\eta = \frac{d_s}{b_s} \quad (9.3.2-9)$$

$$\omega_1 = \frac{2k_{b,1}}{k_{b,0}} \sqrt[4]{\frac{D_{x1}^3 D_{y1}}{D_x^3 D_y}} \quad (9.3.2-10)$$

$$k_{b,1} = 121 - 38.4\theta_1 + 345\theta_1^2 - 162\beta_1 + 168\beta_1^2 - 19.0\beta_1^3 \quad (9.3.2-11)$$

$$k_{b,0} = 96.5 + 6.36\theta - 0.444\theta^2 - 110\beta + 115\beta^2 + 40.5\theta\beta \quad (9.3.2-12)$$

2) 正交对扣:

$$V_{cr} = k_b \frac{D_x}{b_s} \quad (9.3.2-13)$$

$$\omega = C_0 + C_1 \frac{H}{b_s} + C_2 \frac{t_w}{a} + C_3 \left(\frac{H}{b_s}\right)^2 + C_4 \left(\frac{t_w}{a}\right)^2 + C_5 \frac{Ht_w}{ab_s} \quad (9.3.2-14)$$

$$k_{b,0} = (11.6\beta^2 + 8.2\beta)(-28.6\theta^2 + 28.4\theta + 0.7) \quad (9.3.2-15)$$

式中: d_s —— 对拉螺栓沿棱线方向的间距 (mm);

$k_{b,1}$ —— 非对称单波形钢板墙的受剪弹性屈曲系数;

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;

θ —— 双层波形钢板墙的刚度常数比, 应按本规程式 (9.2.2-3) 确定;

β —— 双层波形钢板墙的等效宽高比, 应按本规程式 (9.2.2-4) 确定;

C_{0-5} —— 螺栓分布折减系数的拟合系数, 应按表 9.3.2 取值。

表 9.3.2 螺栓分布折减系数的拟合系数

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。

9.3.3 双层波形钢板墙的对拉螺栓剪力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{b_0 d_s A_0 \sqrt{(K_1 + K_2)^2 + (L_1 + L_2)^2}}{2(1 - V_u / V_{cr}) A_b} < f_v^b \quad (9.3.3-1)$$

$$K_1 = \frac{\pi^3}{ab_s^3 s_1^2} \left[C_1 D_x (4s_1^2 + 3\alpha_1^2 b_s^2) + C_2 H_s b_s^2 \right] \quad (9.3.3-2)$$

$$K_2 = \frac{\pi^3}{2ab_s^2 s_1^3} \cdot \left[C_1 D_x \cdot (12s_1^2 + \alpha_1^2 b_s^2) + C_2 H_s \cdot b_s^2 \right] \quad (9.3.3-3)$$

$$L_1 = \frac{2\pi^3 \alpha_1}{ab_s s_1^2} \cdot C_2 H_s \quad (9.3.3-4)$$

$$L_2 = \frac{\pi^3}{2ab_s^2 s_1^3} \cdot \left[C_1 D_y b_s^2 + C_2 H_s (4s_1^2 + \alpha_1^2 b_s^2) \right] \quad (9.3.3-5)$$

$$\alpha_1 = (0.117\theta + 0.646) \cdot 4 \sqrt{\frac{D_y}{D_x}} \quad (9.3.3-6)$$

$$s_1 = (0.139\theta + 0.688) b_s \cdot 4 \sqrt{\frac{D_y}{D_x}} \quad (9.3.3-7)$$

$$C_1 = \frac{3(q_0 + q_1)}{2(2q_0 + 3q_1)} \quad (9.3.3-8)$$

$$C_2 = \frac{q_1 + 2q_2 + q_3}{4(q_1 + q_2)} \quad (9.3.3-9)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{b_0 d_s A_0 \sqrt{(K_1 + K_2)^2 + (L_1 + L_2)^2}}{2(1 - V_u / V_{cr}) A_b / \gamma_{RE}} < f_v^b \quad (9.3.3-10)$$

式中： V_u —— 双层波形钢板墙的受剪稳定承载力，应按本规程第 9.3.1 条确定 (N)；

b_0 —— 对拉螺栓垂直棱线方向的间距 (mm)；

A_0 —— 面外几何初始缺陷幅值，可取为波形钢板墙高度的 1/500 (mm)；

A_b —— 对拉螺栓截面积 (mm^2)；

f_v^b —— 对拉螺栓钢材的抗剪强度设计值 (N/mm^2)；

K_1 、 K_2 —— 对拉螺栓剪力计算参数 (N/mm^3)；

L_1 、 L_2 —— 对拉螺栓剪力计算参数 (N/mm^3)；

α_1 、 s_1 —— 双层波形钢板墙的受剪屈曲变形参数；

C_1 、 C_2 —— 波形钢板尺寸参数；

q_0 —— 波形钢板过渡段的宽度 (mm)；

q_1 —— 波形钢板波峰段的宽度 (mm)；

q_2 —— 波形钢板过渡段的投影宽度 (mm)；

q_3 —— 波形钢板波谷段的宽度 (mm)。

【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。

9.4 波形钢板阻尼墙设计

9.4.1 波形钢板阻尼墙应提供足够的抗侧刚度和耗能能力，并满足波形钢板屈曲不先于屈服的要求。

【条文说明】 类似于 BRB 受力机理，波形钢板阻尼墙既能提

供足够的抗侧刚度，也能达到消能减震的作用。波形钢板阻尼墙的耗能性能和设计指标，应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对耗能构件的规定。

9.4.2 波形钢板阻尼墙中，内嵌钢板与上下框架可采用螺栓连接，所需连接件数目 n ，应按下式计算：

$$n = \frac{V_{u1}}{N_v^b} \quad (9.4.2-1)$$

$$V_{u1} = 1.23V_u \quad (9.4.2-2)$$

式中： V_{u1} —— 内嵌钢板的受剪屈服强度（N）；

N_v^b —— 一个螺栓的受剪承载力设计值，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 取值（N）。

【条文说明】 波形钢板阻尼墙作为耗能构件，在水平地震作用下塑性充分发展，进入屈服强化阶段，故对其受剪屈服强度乘以 1.23 的放大系数。

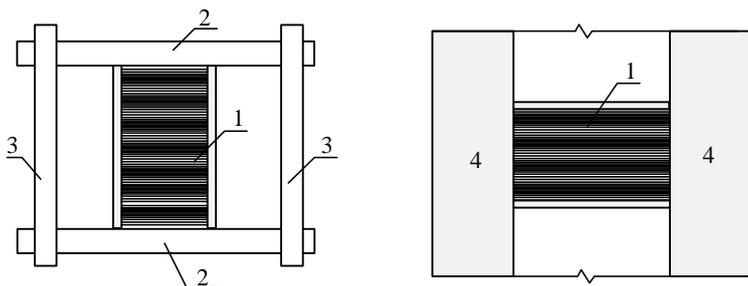
9.4.3 波形钢板阻尼墙中，边缘构件对垂直钢板平面的截面惯性矩 I_b 应符合下列规定：

1 当波形钢板棱线与剪力方向平行时（图 9.4.3a）：

$$I_b \geq 2a(qt_w)^{3/2} \quad (9.4.3-1)$$

2 当波形钢板棱线与剪力方向垂直时（图 9.4.3b）：

$$I_b \geq \frac{0.00015aqt_w b_s^2}{H} \quad (9.4.3-2)$$



(a) 框架梁中的阻尼墙

(b) 剪力墙中的阻尼墙

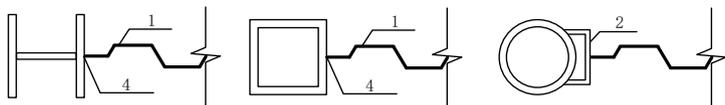
图 9.4.3 波形钢板阻尼墙

1-波形钢板阻尼墙；2-框架梁；3-框架柱；4-混凝土剪力墙

【条文说明】波形钢板阻尼墙的边缘约束构件的刚度应使整个钢板在剪力作用下的稳定承载力充分发挥。在边缘约束构件刚度达到一定阈值前，波形钢板阻尼墙的受剪稳承载力随边缘约束构件刚度的增大而增大；当边缘约束构件刚度达到一定阈值后，波形钢板阻尼墙的受剪稳承载力不再有显著提高。边缘构件的设计应满足 GB50017 中第一类截面对板件宽厚比的要求，以获得足够的塑性变形能力。大量有限元分析表明，波形钢板棱线与剪力方向平行或垂直时需要的边缘约束刚度不同。当边缘约束构件满足本规程 9.4.3 条规定时，波形钢板阻尼墙的受剪稳定承载力能达到极限值的 95%。

9.5 节点设计与构造

9.5.1 钢框架-单波形钢板墙结构和钢框架-竖向加劲单波形钢板墙结构中，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（图 9.5.1）。



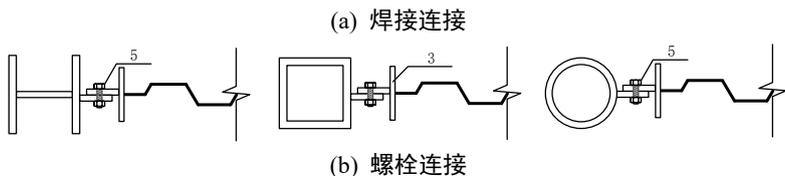


图 9.5.1 钢框架-单波形钢板墙结构连接节点示意

1-波形钢板; 2-槽钢; 3-连接件; 4-焊接点; 5-高强度螺栓

9.5.2 钢框架-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 (图 9.5.2)。

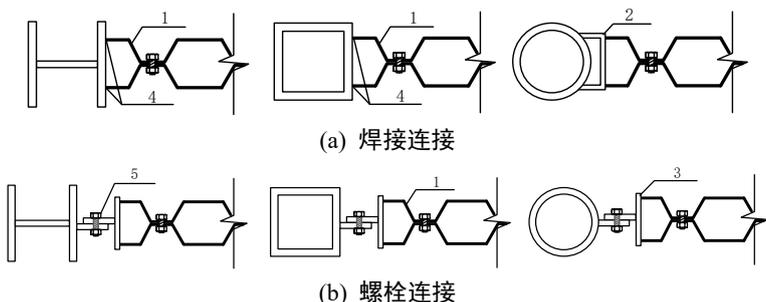


图 9.5.2 钢框架-平行对扣双波形钢板墙结构连接节点示意

1-波形钢板; 2-槽钢; 3-连接件; 4-焊接点; 5-高强度螺栓

9.5.3 钢框架-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 (图 9.5.3)。

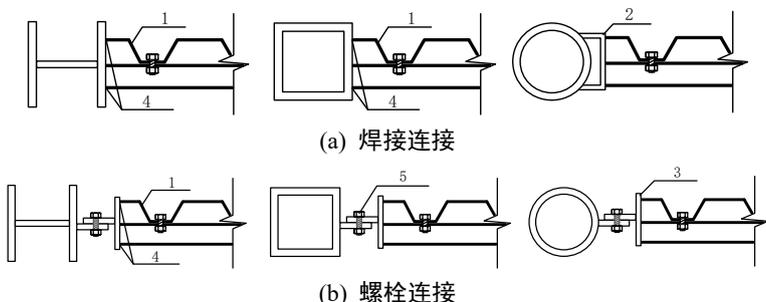


图 9.5.3 钢框架-正交对扣双波形钢板墙结构连接节点示意

1-波形钢板; 2-槽钢; 3-连接件; 4-焊接点; 5-高强度螺栓

10 波形钢板管涵设计

10.1 一般规定

10.1.1 本章中单层波形钢板管涵结构的规定适用于明挖施工的设计计算。

10.1.2 波形钢板管涵结构的横断面形式应依据管涵类型、应用范围和场地条件综合考虑确定，宜选用圆形、簸箕形等或拱形（包括半圆拱形、高圆拱形和三圆拱形等）（图 10.1.2）。

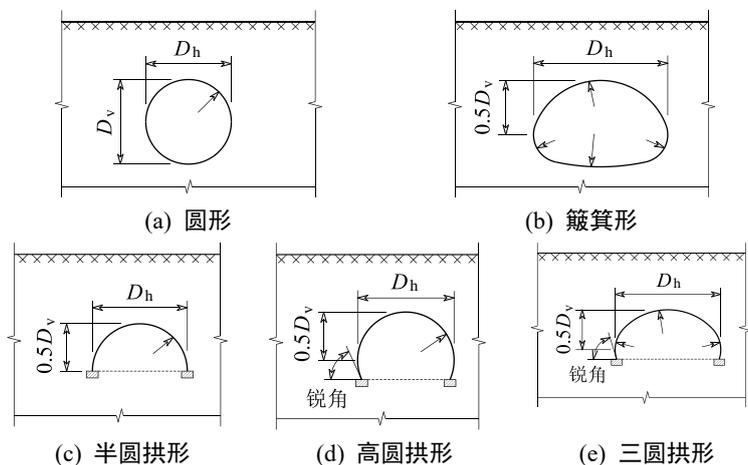


图 10.1.2 波形钢板管涵的横截面形状

10.1.3 波形钢板管涵纵断面呈波浪形，其波高应依据管涵跨径及荷载大小确定，可采用浅波（波高不小于 1mm 且小于 50mm）、中波（波高不小于 50mm 且小于 100mm）、深波（波高不小于 100mm 且小于 150mm）和大波（波高不小于 150mm）四种形式。

【条文说明】波形钢板管涵的波形尺寸必须满足两个条件，其一是便于波形钢板的冷弯制作成型，其二，波形钢板不应在截面屈服前发生局部屈曲。

10.1.4 管廊上部结构功能回填土厚度不应小于 600mm、式(10.1.4-1)和式(10.1.4-2)三者的最大值。

$$d_1 = \frac{D_h}{6} \sqrt{\frac{D_h}{D_v}} \quad (10.1.4-1)$$

$$d_2 = 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \quad (10.1.4-2)$$

10.1.5 波形钢板管涵顶部以上填土施工完成后,波形钢板管涵的竖向挠度不应大于表 10.1.5 的规定,管涵一侧起拱线处的水平膨胀位移不应大于管涵跨度的 0.5%。

表 10.1.5 波形钢板管涵竖向挠度限值

波形钢板管涵的波形	浅波	中波	深波	大波
管涵拱顶上拱(下挠)量/ D_v	4%	3%	2%	1.5%

10.1.6 波形钢板管涵拱矢跨比宜控制在 0.3~0.9 之间,管涵直径宜控制在 1m~20m 之间。波形钢板渗水井直径宜控制 3m~20m 之间。波形钢板管涵拱和波形钢板渗水井的波形选择应符合现行国家标准《冷弯波纹钢管》GB/T 34567 的规定。

10.2 单层波形钢板管涵设计

10.2.1 波形钢板管涵拱的内力宜采用有限元结构分析确定,其强度计算应按下列公式计算:

1 持久、短暂设计状况:

$$\left(\frac{N}{N_{pf}} \right)^{5/3} + \frac{M}{M_{pf}} \leq 1.0 \quad (10.2.1-1)$$

$$N_{pf} = A_n f \quad (10.2.1-2)$$

$$M_{pf} = 1.1W_n f \quad (10.2.1-3)$$

2 地震设计状况:

$$\left(\frac{N}{N_{\text{pf}}/\gamma_{\text{RE}}} \right)^{5/3} + \frac{M}{M_{\text{pf}}/\gamma_{\text{RE}}} \leq 1.0 \quad (10.2.1-4)$$

式中： N —— 纵向单位长度内截面的轴压力设计值 (N/mm)；
 N_{pf} —— 纵向单位长度内截面的受压承载力设计值 (N/mm)；
 M —— 纵向单位长度内截面的弯矩设计值 (N·mm/mm)；
 M_{pf} —— 纵向单位长度内截面的受弯承载力设计值 (N·mm/mm)；
 A_n —— 纵向单位长度内的净截面面积 (mm²/mm)；
 W_n —— 纵向单位长度内截面对自身中性轴的净截面模量 (mm³/mm)；
 f —— 钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)。

10.2.2 在环向均匀轴压力作用下，圆弧形波形钢板管涵拱的稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\rho_m \varphi A f} \leq 1.0 \quad (10.2.2-1)$$

$$\varphi = \frac{1}{(1 + \lambda_n^m)^k} \quad (10.2.2-2)$$

$$m = 0.8n + 0.75 \quad (10.2.2-3)$$

$$k = -1.7n + 3.0 \quad (10.2.2-4)$$

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{q_y}{q_{\text{cr}}}} \quad (10.2.2-5)$$

$$q_y = \frac{A f_y}{R} \quad (10.2.2-6)$$

$$q_{\text{cr}} = \frac{EI}{R^3} \left(\frac{\pi^2}{\alpha^2} - 1 \right) \quad (10.2.2-7)$$

2 地震设计状况:

$$\frac{N}{\rho_m \varphi A f / \gamma_{RE}} \leq 1.0 \quad (10.2.2-2)$$

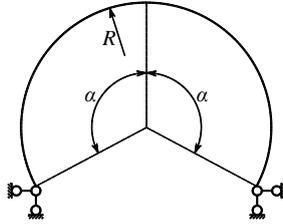


图 10.2.2 拱结构计算参数示意图

式中: ρ_m —— 波形钢板管涵拱的屈曲应力折减系数, 应按现行团体标准《综合管廊波纹钢结构技术规程》(T/CECS 883-2021) 规定计算;

φ —— 波形钢板管涵拱受压屈曲的稳定系数;

m —— 指数, 按本标准式(10.2.2-3)计算;

k —— 指数, 按本标准式(10.2.2-4)计算;

A —— 纵向单位长度内的毛截面面积 (mm^2/mm);

R —— 计算部分圆弧拱半径;

λ_n —— 波形钢板管涵拱的正规化长细比;

n —— 矢跨比;

I —— 纵向单位长度内绕长度方向轴的截面惯性矩 (mm^4/mm), 波形为正弦式时按照式(5.2.3-7)计算;

α —— 从拱顶向一侧算起的角度 (rad)。

【条文说明】清华大学的研究成果表明, 管涵拱的稳定承载力

随拱矢跨比减小而显著降低。当初始缺陷幅值取为2%拱直径时，稳定系数随矢跨比的有限元计算结果见图11。

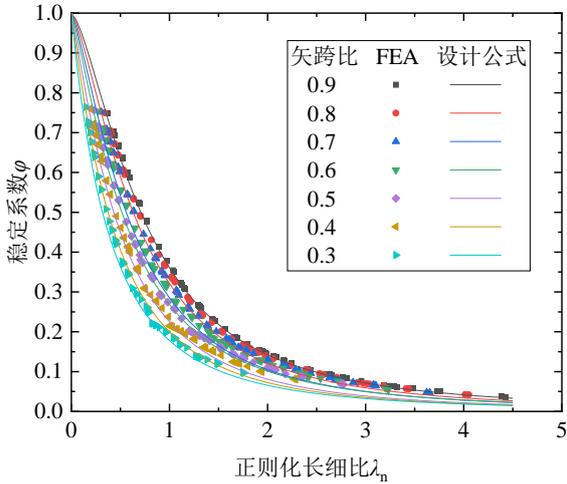


图11 管涵拱稳定系数

稳定系数可近似按下式计算：

$$\varphi = \frac{1}{(1 + \lambda_n^m)^k} \quad (18)$$

$$m = 0.8n + 0.75 \quad (19)$$

$$k = -1.7n + 3.0 \quad (20)$$

10.2.3 在环向轴压力和弯矩共同作用下，波形钢板管涵拱的稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\rho_m \varphi A f} + 0.55 \frac{M}{W f} \leq 1.0 \quad (10.2.3-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{\rho_m \varphi A f / \gamma_{RE}} + 0.55 \frac{M}{W f / \gamma_{RE}} \leq 1.0 \quad (10.2.3-2)$$

式中： W —— 纵向单位长度内截面对自身中性轴的毛截面模量
(mm^3/mm)。

10.2.4 对波形钢板管涵拱，其板件波形宽厚比应满足下列公式：

$$\frac{s}{2t} \leq 70.8 \quad (10.2.4-1)$$

式中， s —— 波形腹板单个重复波展开后的长度(mm)；
 t —— 波形钢板厚度(mm)；
 q —— 单个重复波的波长(mm)；
 a —— 波形的波幅 (mm)。

【条文说明】 清华大学的研究成果表明，通过限制波形钢板波长与板厚的比值可以实现“屈服而不局部屈曲”的设计理念。

采用约束波形钢板波峰和波谷处外面位移的计算模型，可以获得波形钢板在均布压力下的局部屈曲模态和屈曲荷载。

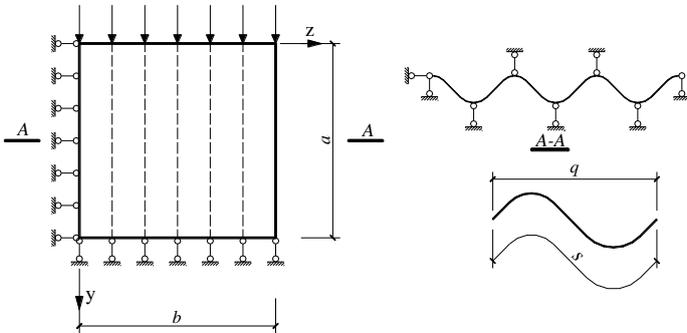


图 12 波形钢板局部屈曲模型图

波形钢板在均匀分布的压力荷载下，其板件弹性局部屈曲荷载可按下式计算：

$$\sigma_{cr} = \frac{\kappa\pi^2 E}{12(1-\nu^2)\left(\frac{s}{2t}\right)^2} \quad (21)$$

$$\kappa = \begin{cases} \frac{0.22s}{2t} + 2 & \frac{s}{2t} < 100 \\ \frac{0.1s}{2t} + 14 & \frac{s}{2t} \geq 100 \end{cases} \quad (22)$$

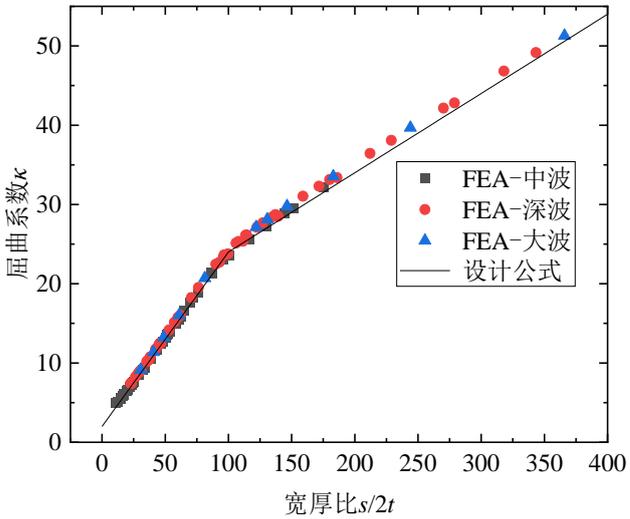


图13 波形钢板屈曲系数与宽厚比的关系

正则化宽厚比定义为：

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (23)$$

算例分析中，初始缺陷幅值如下：

$$\delta_0 = \begin{cases} \frac{3}{2000} s & t \leq 6\text{mm} \\ \frac{1.5}{2000} s & 6\text{mm} < t \leq 14\text{mm} \\ \frac{1}{2000} s & t > 14\text{mm} \end{cases} \quad (24)$$

稳定系数的有限元计算结果如下图：

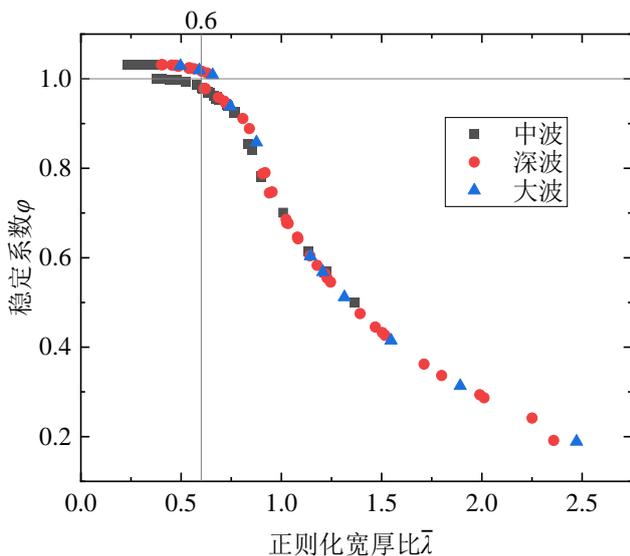


图14 波形钢板局部屈曲稳定系数

以“局部屈曲不先于屈服”的设计准则，可得到正则化宽厚比限值为0.6，以此可获得波形钢板宽厚比的限制要求。

10.2.5 波形钢板管涵施工过程中，内力宜根据有限元分析确定，截面强度应按下式计算：

$$\frac{N_c}{N_{pf}} + \frac{M_c}{M_{pf}} \leq 1.0 \quad (10.2.5)$$

式中： N_C —— 施工过程中纵向单位长度内的轴压力设计值
(N/mm)；

M_C —— 施工过程中纵向单位长度内的弯矩设计值
(N·mm/mm)。

10.3 双层波形钢板组合管涵设计

10.3.1 双层波形钢板组合管涵的设计，波形钢板间的净距不宜小于 80mm。

【条文说明】 本条文规定是为了避免两侧波形钢板波谷之间的距离过小而对混凝土浇筑的密实性产生影响。

10.3.2 双层波形钢板组合管涵的截面强度应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M - M_u}{\eta M_{\max} - M_u} + \left(\frac{N - \eta N_M / 2}{\eta N_M / 2} \right)^2 \leq 1 \quad 0 \leq N \leq \eta N_M \\ \frac{N_u - \eta N_M}{N_u} \cdot \frac{M}{M_u} + \frac{N}{N_u} \leq 1 \quad \eta N_M < N \leq N_u \end{array} \right. \quad (10.3.2-1)$$

$$N_u = 2n\beta_s f t s + n\beta_c f_{cu} q(d+a) \quad (10.3.2-2)$$

$$M_u = M_{us} + M_{uc} \quad (10.3.2-3)$$

$$M_{us} = nt\beta_s f \left[s(d+2a-h_c) + a_s(h_c-h_s) \right] + (s-a_s)(a/2-h_c+h_s) \quad (10.3.2-4)$$

$$M_{uc} = n\beta_c f_{cu} \frac{h_c^2 q(d+a)}{2(d+2a)} \quad (10.3.2-5)$$

$$h_c = \frac{2t\beta_s f (s-a_s)(d+2a)}{q\beta_c f_{cu} (d+a)} \quad (10.3.2-6)$$

$$N_M = nq\beta_c f_{cu} (d+a) \quad (10.3.2-7)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{8} n \beta_c f_{cu} q (d + 2a)(d + a) + nt \beta_s f_s (d + a) \quad (10.3.2-8)$$

2 地震设计状况:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M - M_u / \gamma_{RE}}{\eta M_{\max} / \gamma_{RE} - M_u / \gamma_{RE}} + \left(\frac{N - \eta N_M / 2 \gamma_{RE}}{\eta N_M / 2 \gamma_{RE}} \right)^2 \leq 1 \quad 0 \leq N \leq \eta N_M / \gamma_{RE} \\ \frac{N_u - \eta N_M}{N_u} \cdot \frac{M}{M_u / \gamma_{RE}} + \frac{N}{N_u / \gamma_{RE}} \leq 1 \quad \eta N_M / \gamma_{RE} < N \leq N_u / \gamma_{RE} \end{array} \right. \quad (10.3.2-9)$$

式中: M —— 截面弯矩设计值 (N·mm);

N —— 截面轴压设计值 (N);

M_u —— 纯弯作用下截面受弯承载力设计值 (N·mm);

N_u —— 截面受压承载力设计值 (N);

M_{\max} —— 压弯作用下截面承受的最大弯矩设计值 (N·mm);

$M_{u,s}$ —— 钢材承担的弯矩 (N·mm);

$M_{u,c}$ —— 混凝土承担的弯矩 (N·mm);

N_M —— 压弯作用下, 截面弯矩设计值为 M_u 时对应的最大轴压力 (N);

η —— 考虑混凝土不均匀受压的折减系数, 取 0.9;

f_{cu} —— 混凝土立方体抗压强度设计值 (N/mm²);

t —— 波形钢板的厚度 (mm);

s —— 波形钢板单个重复波展开后的长度 (mm);

q —— 波形钢板单个重复波的波长 (mm);

d —— 波形钢板组合拱的最小截面厚度 (mm);

a —— 波形钢板的波幅 (mm);

a_s —— 在单个重复波内, 波形钢板的受压长度 (mm);

h_c —— 混凝土等效受压区高度 (mm);

β_s —— 波形钢板塑性强化系数，取为钢材抗拉强度和屈服强度的比值；

β_c —— 混凝土应力不均匀系数，取 0.75；

n —— 波形钢板组合拱的重复波形数。

【条文说明】 与双层波纹钢板组合剪力墙受面外压弯作用类似，可将双层波纹钢板组合管涵看作压弯作用下的双层波纹钢板组合剪力墙。

如图 15 所示，通过理论分析可以得到，压弯作用下弯矩和轴力的相互作用曲线可以用一条直线和一条抛物线表示。考虑到实际受力时混凝土不均匀受力，在试验和大量有限元的基础上，对理论结果进行调整，得到压弯作用下的 $N-M$ 相关曲线。

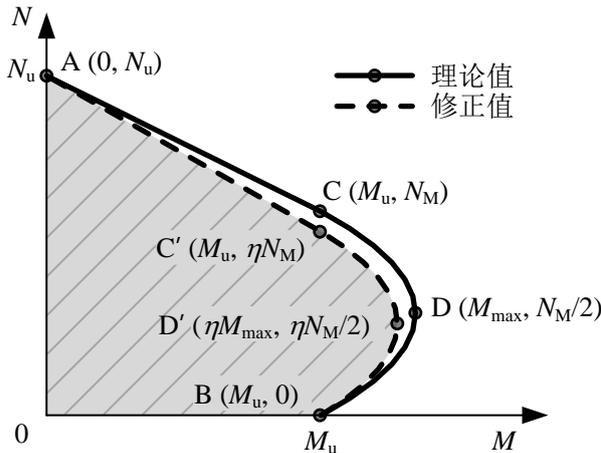


图 15 $N-M$ 相关曲线

如图 16(a)所示，该状态对应双层波纹钢板组合管涵在轴压下的受力情况。将混凝土按面积相等原则等效为矩形截面，等效截面的宽度为 $d + 4a$ ，长度为 $b_{c,eff} = nq(d + 2a)/(d + 4a)$ 。由于钢板为曲面，不考虑钢板的局部屈曲，同时忽略受拉区混凝土的贡献。

有限元分析表明,轴压下钢材可达到极限强度,故波形钢板的塑性强化系数取为钢材抗拉强度和屈服强度的比值;由于混凝土受力不均匀,故混凝土的承载力应乘以不均匀系数0.75。

如图16(b)所示,该状态对应双层波形钢板组合管涵在纯弯下的受力情况。同样将混凝土等效为矩形截面,由受力平衡可得混凝土等效受压区高度 h_c 。弯矩由混凝土和波形钢板共同承担,对塑性中和轴取矩,即可得到纯弯下双层波形钢板组合管涵的承载力。

如图16(c)所示,该状态对应双层波形钢板组合管涵在压弯作用下截面弯矩为 M_0 时的受力情况。理论分析可得,此时混凝土(等效为矩形截面)的等效受压区高度为 $d+2a-h_c$,结合图16(b),容易得到此时的轴力大小。

图16(d)所示,该状态对应双层波形钢板组合管涵所受弯矩最大时的受力情况。理论分析可得,此时截面中性轴与中心线重合,轴向荷载恰好为图16(c)对应状态的轴力的翼板,即 $N_M/2$ 。

相关研究内容参见《Sectional strength and design of double-skin composite walls with re-entrant profiled faceplates》,收录于《Thin-Walled Structures》,2021年第125卷。

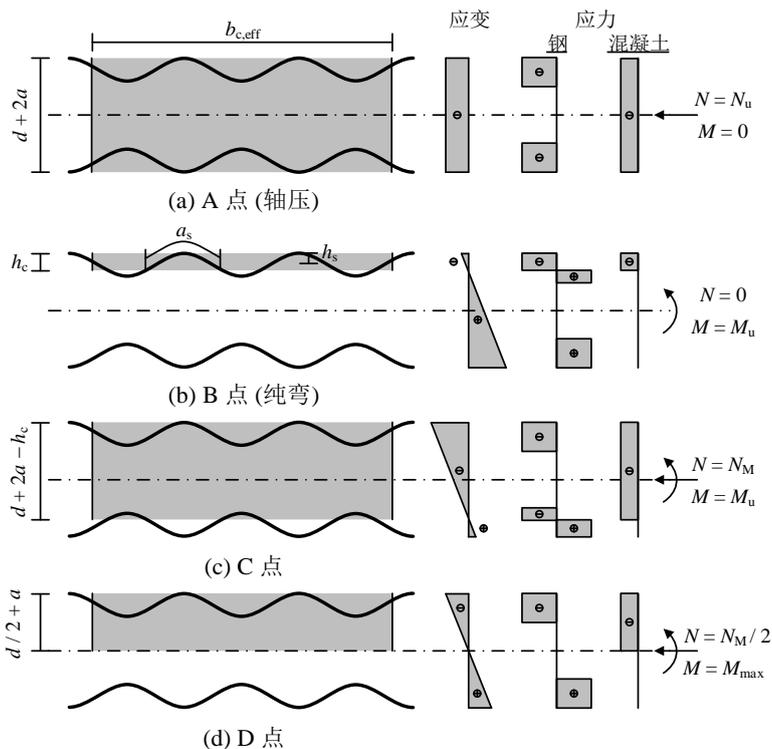


图 16 特征点受力状态

10.4 波形钢板渗水井设计

10.4.1 波形钢板渗水井的截面强度应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{A_n} + \frac{M}{W_n} \leq f \quad (10.4.1-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{A_n/\gamma_{RE}} + \frac{M}{W_n/\gamma_{RE}} \leq f \quad (10.4.1-2)$$

式中： N —— 纵向单位长度内渗水井的环向轴压力设计值
(N/mm)；

M —— 纵向单位长度内渗水井的环向弯矩设计值
(N·mm/mm)；

A_n —— 纵向单位长度内的净截面面积 (mm²/mm)；

W_n —— 纵向单位长度内截面对自身中性轴的净截面模量
(mm³/mm)。

10.4.2 圆弧形波形钢板渗水井，在环向均匀轴压力作用下的稳定承载力应按下列公式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (10.4.2-1)$$

$$\varphi = \frac{1}{[1 + (K_s \lambda_n)^{1.78}]^{1.65}} \quad (10.4.2-2)$$

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (10.4.2-3)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(1.8R)^2} \quad (10.4.2-4)$$

$$K_s = \frac{0.37 \xi_s^{0.23} + \xi_s^{0.95}}{0.36 + \xi_s^{0.95}} \quad (10.4.2-5)$$

$$\xi_s = \frac{EI}{E_s R^3} \quad (10.4.2-6)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{\varphi A / \gamma_{RE}} \leq f \quad (10.4.2-7)$$

式中： φ —— 圆弧形波形钢板渗水井的稳定系数；

A —— 纵向单位长度内的毛截面面积 (mm²/mm)；

- λ_n —— 圆弧形波形钢板渗水井的正则化长细比；
- N_{cr} —— 纵向单位长度内截面的弹性屈曲荷载 (N/mm)；
- R —— 圆弧形波形钢板渗水井的半径 (mm)；
- K_s —— 圆弧波形钢板渗水井的屈曲系数；
- ξ_s —— 圆弧波形钢板渗水井与周围土体的相对刚度；
- I —— 纵向单位长度内绕长度方向轴的截面惯性矩 (mm⁴/mm)，波形为正弦式时按照式(5.2.3-7)计算。
- E_s —— 圆弧波形钢板渗水井周围土体的变形模量 (N/mm²)。

【条文说明】清华大学的研究成果表明，把周围土体简化成弹簧作用，可以提高圆弧形波形钢板渗水井的稳定承载力。

参考现行团体标准《综合管廊波纹钢结构技术规程》(T/CECS 883-2021)和加拿大CAN/CSA规范Winkler地基的模型，波形钢板渗水井的临界荷载为：

$$N_{cr1} = \frac{(n^2 - 1)EI}{R^2} + \frac{k_w R^2}{n^2 - 1} \quad (25)$$

对于不同的等效弹簧刚度值，屈曲模态会发生变化，其弹性屈曲荷载可以近似表达为：

$$N_{cr1} = \begin{cases} \frac{3EI}{R^2} + \frac{k_w R^2}{3} & (\xi_s \geq \frac{1}{24}) \\ 2\sqrt{k_w EI} & (\xi_s < \frac{1}{24}) \end{cases} \quad (26)$$

其中，等效弹性常数可以取 $k_w = E_s / R$ 。

不考虑土体弹簧作用的弹性屈曲荷载为：

$$N_{cr0} = \frac{3EI}{R^2} \quad (27)$$

引入屈曲系数

$$K_s = \sqrt{\frac{N_{cr0}}{N_{cr1}}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{9\xi_s}{1+9\xi_s}} & (\xi_s \geq \frac{1}{24}) \\ \sqrt{\frac{3}{2}\xi_s^{0.25}} & (\xi_s < \frac{1}{24}) \end{cases} \quad (28)$$

拟合得到

$$K_s = \frac{0.37\xi^{0.23} + \xi^{0.95}}{0.36 + \xi^{0.95}} \quad (29)$$

在环向轴压工况下，稳定系数的有限元计算结果如下：

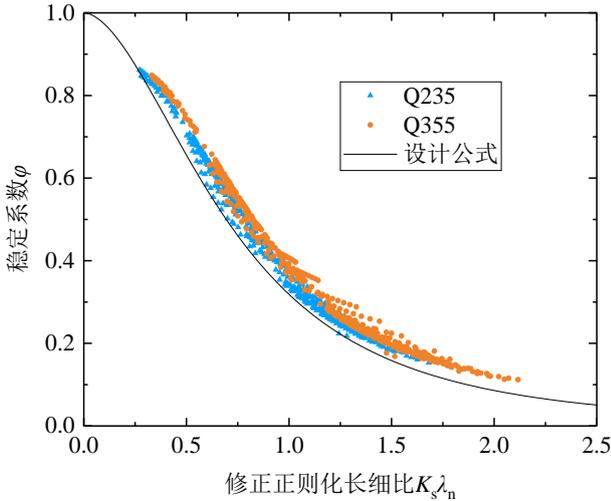


图 17 环向均匀受压稳定系数曲线

于是，稳定系数采用下列公式计算：

$$\varphi = \frac{1}{[1 + (K_s \lambda_n)^{1.78}]^{1.65}} \quad (30)$$

10.4.3 圆弧形波形钢板渗水井在环向轴压力和弯矩共同作用下，其稳定承载力按下式计算：

1 持久、短暂设计状况：

$$\frac{N}{\varphi Af} + 0.75 \frac{M}{Wf} \leq 1.0 \quad (10.4.3-1)$$

2 地震设计状况：

$$\frac{N}{\varphi Af / \gamma_{RE}} + 0.75 \frac{M}{Wf / \gamma_{RE}} \leq 1.0 \quad (10.4.3-2)$$

式中： W —— 纵向单位长度内截面对自身中性轴的毛截面模量 (mm^3/mm)。

【条文说明】 清华大学的研究成果表明，圆弧形波形钢板渗水井在环向轴压力和弯矩共同作用时，可借助M-N相关承载力曲线进行整体稳定承载力设计。考虑多种不同荷载组合作用，获得不同荷载工况下的极限承载力，于是得到压弯稳定承载力相关曲线如下图所示。

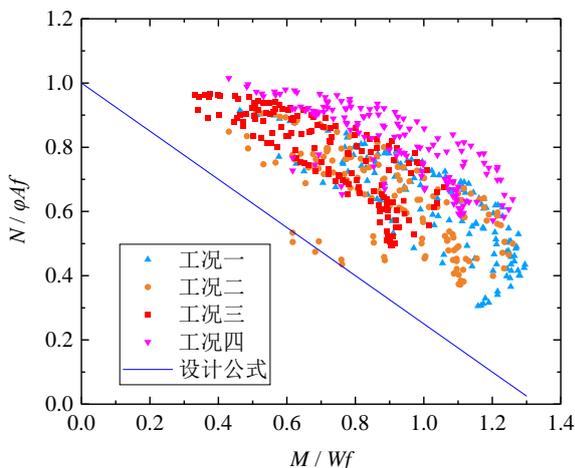


图 18 压弯稳定承载力相关曲线

可以采用下式计算压弯稳定承载力：

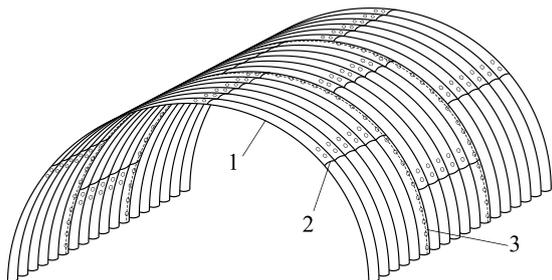
$$\frac{N}{\varphi A f} + 0.75 \frac{M}{W f} \leq 1.0 \quad (31)$$

10.4.4 圆弧波形钢板渗水井与周围土体的相对刚度 ξ_s 不应小于 0.0033。

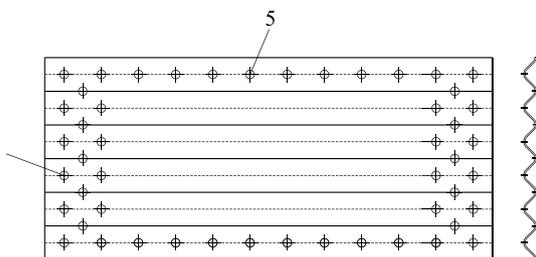
【条文说明】 本条是为了防止出现过大的浅拱效应。

10.5 连接设计与构造

10.5.1 单层波形钢板的拼装，应采用高强度螺栓搭接连接（图 10.5.1），不应采用焊接连接。螺栓的排列和间距应符合下列规定：



(a) 波形钢板拱的拼接位置



(b) 波形钢板螺栓孔位置

图 10.5.1 波形钢板拱的拼接

1—波纹钢板；2—板端拼接（纵缝）；3—板侧拼接（环缝）；4—板端孔；
5—板侧孔

1 板端螺栓应设置在波峰和波谷处，螺栓沿管涵跨度方向（传力方向）的间距应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定，端距不应小于 2.5 倍的螺栓孔径，波峰或波谷的螺栓总数目不应少于 2 个，单个波谷或波峰的螺栓数目可为 1 个，搭接长度不应小于 2 倍的波高；螺栓沿管涵纵向（垂直于传力方向）的最大间距应取为现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 规定值的 1.25 倍；当波长大于 60 倍的板厚时，在进行净截面强度计算时，应取 30 倍的板厚为有效宽度，且扣除螺栓孔面积；

2 板侧螺栓沿管涵环向（跨度方向）的间距不应大于 50 倍的板厚；在管涵的转折部位以及可能产生沉降差的部位，应适当减小最大间距或增加搭接长度；

3 板件拼接纵缝和环向缝连接应设置高强度螺栓挤压密封条防水，螺栓间距尚应满足防水密封的要求。

10.5.2 单层波形钢板之间的连接应符合下列规定：

1 波形钢板搭接连接时，搭接部分边缘至最外侧螺栓孔的距离应符合现行国家标准《冷弯波纹钢管》GB/T 34567 的规定；

2 搭接接头的受弯承载力不应小于波形钢板受弯承载力的 75%，受压承载力不应小于波形钢板受压承载力的 1.3 倍；

3 波形钢板搭接时，应错缝拼装，不得有四层钢板叠合的情况；

4 螺栓孔位置应避开最大应力集中处；

5 波形钢板拼接所采用的高强度螺栓规格应与波形钢板尺寸匹配；

6 波形钢板拼接处应考虑水流的自然方向；拼装处应采取密封措施，密封材料应具有弹性和不透水性，并应填塞紧密。

10.5.3 单层波形钢板拼接用高强度螺栓应符合下列规定：

1 高强度螺栓的形式应符合现行国家标准《冷弯波纹钢管》GB/T 34567 的规定；

2 当采用 8.8 级黑皮高强度螺栓时，施工扭矩应达到 $0.03d^3$ ， d 为螺栓的公称直径；当采用 10.9 级黑皮高强度螺栓时，施工扭矩应达到 $0.042d^3$ ；当采用成品镀锌高强度螺栓时，施工扭矩应增加 35%；

3 纵缝和环缝所用高强度螺栓应按承压型连接计算承载力，承载力计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

10.5.4 开口单层波形钢板管涵拱的拱脚应沿管涵纵向通长布置，拱脚与基础的连接宜按铰接设计（图 10.3.4）。当采用灌浆处理时，拱脚埋深不应小于 200mm，灌浆厚度不应小于 100mm。

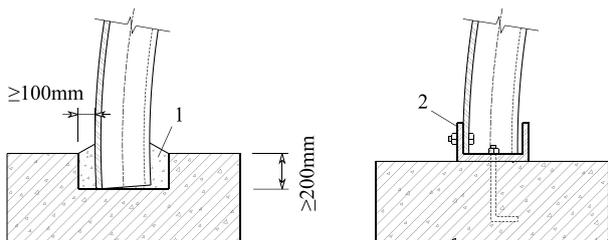


图 10.5.4 开口波形钢板管涵拱的拱脚铰接构造

1—灌浆；2—连接件

10.5.5 双层波形钢板组合拱的拼接，应采用高强度螺栓连接。横向拼接宜采用法兰连接节点，纵向拼接连接宜采用板件搭接连接节点。

10.5.6 波形钢板渗水井的横纵向连接，应采用高强度螺栓连接，宜采用法兰连接节点（图 10.3.6-1 和图 10.3.6-2）。

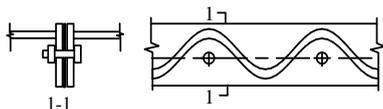


图 10.5.6-1 波形钢板组合拱横向法兰连接

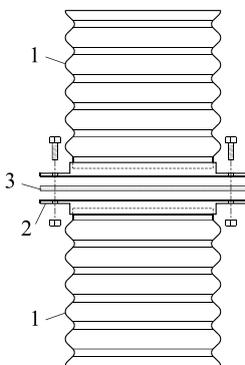


图 10.5.6-2 波形钢板渗水井横向法兰连接

1—管节；2—法兰；3—密封圈

11 制作与安装

11.1 一般规定

11.1.1 波形钢板结构的制作与安装，应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 和《钢结构工程施工规范》GB 50755 的规定。

11.1.2 波形钢板结构所采用的板材、辅材、连接和涂装材料应符合国家现行有关标准和设计文件的规定。

11.1.3 波形钢板结构在制作前，应根据设计文件、施工详图的要求和制作单位的技术条件编制加工工艺文件，制定合理的工艺流程并建立质量保证体系。

11.1.4 波形钢板结构在运输与安装过程，应按施工组织设计进行，保证结构的稳定性和避免永久性变形。

11.1.5 波形钢板结构在施工前，应做好技术准备工作，编制施工组织设计、施工方案及专项施工方案。

11.1.6 对于复杂的波形钢板结构的制作和安装，宜进行工艺性试验和模拟预拼装。

11.2 波形腹板门式刚架

11.2.1 波形钢板的轧制应符合下列规定：

1 波形钢板轧制所用的钢板应符合现行国家标准《冷轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 708 的规定；

2 波形钢板的波幅的允许偏差（ Δ_1 、 Δ_2 ）应为 $\pm 2\text{mm}$ ，且波峰偏差绝对值不应大于波幅的 1/10，波长的允许偏差（ Δ_3 ）应为 $\pm 2\text{mm}$ 。波幅偏差和波长偏差应按下列公式计算：

$$\Delta_1 = a_1 - a_2 \quad (11.2.1-1)$$

$$\Delta_2 = a_1 - a_3 \quad (11.2.1-2)$$

$$\Delta_3 = q_1 - q_2 \quad (11.2.1-3)$$

式中： a_1 、 a_2 、 a_3 ——波浪形板的波幅（mm）；

q_1 、 q_2 ——波浪形板的波长（mm）。

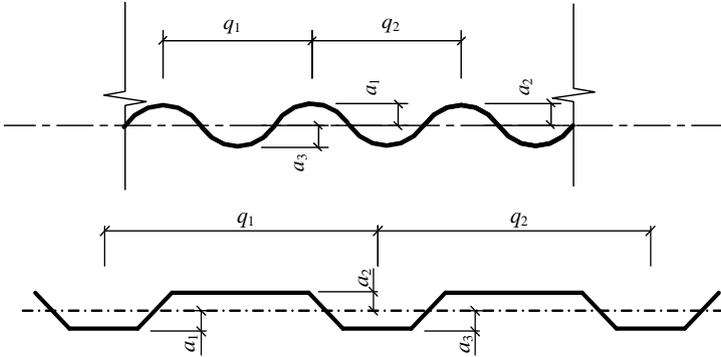


图 11.2.1 波形钢板轧制偏差

11.2.2 波形腹板构件的焊接应符合下列要求：

1 手工焊接用的焊条应符合现行国家标准《碳钢焊条》GB/T 5117 或《低合金钢焊条》GB/T 5118 的规定，埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂应符合现行国家标准《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》GB/T 5293 规定，二氧化碳气体保护焊用的焊丝应符合现行国家标准《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110 的规定；

2 当波形腹板与端板、翼缘板连接采用对接焊缝和角焊缝时应符合下列规定：

- 1) 波形腹板与翼缘板的焊接宜采用自动连续焊接；
- 2) 波形腹板的梁柱翼缘板和腹板与端板的连接焊缝，应根据施工图要求的焊缝质量等级选择相应的焊接工艺进行施焊；当施工图没有标明对接焊缝质量等级要求时，与端板连接的焊缝和板的拼接焊缝可按二级熔透焊缝施焊。

11.2.3 组装构件允许偏差应按表11.2.3-1和表11.2.3-2确定。

表 11.2.3-1 钢柱外形尺寸允许偏差（mm）

项目		允许偏差	图示
柱底面到柱端与斜梁连接的最上一个安装孔的距离 (H_2)		$\pm H_2/1500$ ± 5.0	<p>The diagram shows a vertical column section with a corrugated web. Dimension H is the total height, H_1 is the height to the first hole, and H_2 is the height to the top hole. Dimension a is the distance from the top hole to the top edge. Dimension Δ is the camber of the flange.</p>
柱底面到牛腿支承面距离 (H_1)		$\pm H_1/2000$ ± 5.0	
受力托板表面到第一个安装孔的距离 (a)		± 1.0	
牛腿面的翘曲 (Δ)		± 2.0	
柱身扭转	牛腿处	3.0	
	其他处	6.0	
柱截面的宽度和高度		+3.0	
		-2.0	
翼缘板对腹板的垂直度	连接处	± 1.5	<p>The diagram shows two views of a T-joint. The left view shows the connection with dimensions b (flange width), h (web height), and Δ (perpendicularity deviation). The right view shows the flange elsewhere with the same dimensions.</p>
	其他处	$\pm b/100,$ ± 5.0	
柱脚底板平面度		3.0	
柱脚螺栓孔中心对柱轴线的距离		± 3.0	<p>The diagram shows a top view of a column base plate with four bolt holes. Dimension a is the distance from the central axis to the center of a bolt hole.</p>

表 11.2.3-2 波形腹板梁允许偏差 (mm)

项目		允许偏差	图示
端板倾斜度 (α)		$h_e/300$	
端板上靠近梁中心线第一个螺栓孔距离 (a)		± 1.0	
梁上翼缘中点偏离梁中心线 (a_1)		± 3.0	
梁下翼缘中点到封板边孔距离 (a_2)		± 3.0	
端板外角孔中心到梁中心距离 (a_3, a_4)		± 1.5	
端板弯曲度 (c)		$h_e/300$	
翼缘板倾斜度 (Δ)		连接处: ± 2.0 其他处: ± 5.0	
梁截面的宽度和高度		+3.0 -2.0	
腹板中心线偏离翼缘中心线 (e)		2.0	
侧弯 矢高	$L \leq 9m$	6.0	
	$L > 9m$	9.0	
梁长度 (L)		$\pm L/2000$	

	±10.0	
扭曲	$h/250$; 10.0	

注： h_e 为端板高度；

h 为梁高。

11.2.4 本节未规定的构件制作偏差应符合现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022的规定。

11.2.5 构件安装误差控制应符合下列规定：

1 建筑物的定位轴线、基础轴线和标高、地脚螺栓的规格及紧固应符合设计要求；

2 支承面、地脚螺栓（锚栓）的允许偏差应符合表 11.2.5-1 的规定；

表 11.2.5-1 支承面、地脚螺栓（锚栓）的允许偏差（mm）

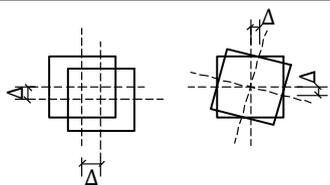
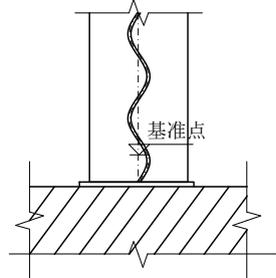
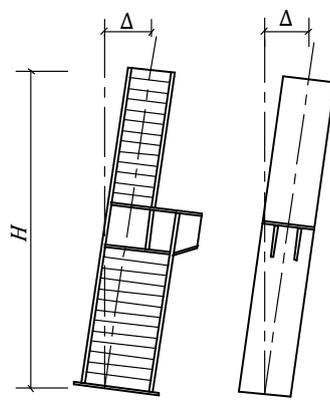
项目		允许偏差
支承面	标高	±3.0
	水平度	$l_a/1000$
地脚螺栓（锚栓）	螺栓中心偏移	5.0
	螺栓露出长度	+20.0
		0
螺栓长度	+20.0	
	0	
预留孔中心偏移		10.0

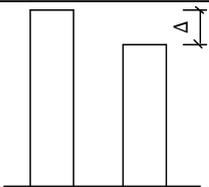
注： l_a 为锚栓总长度。

3 刚架柱安装的允许偏差应符合表 11.2.5-2 的规定；

表 11.2.5-2 刚架柱安装的允许偏差（mm）

项目	允许偏差	图示
----	------	----

柱脚底座中心线对定位轴线的偏移 (Δ)		± 5.0		
柱基准点标高	有吊车梁的柱	+3.0 -5.0		
	无吊车梁的柱	+5.0 -8.0		
挠曲矢高		$H/1000$		
		10.0		
柱轴线垂直度 Δ	单阶柱	$H \leq 12m$	10.0	
		$H > 12m$	$H/1000$ 20.0	

	多阶柱	底层柱	± 10.0	
		柱全高	± 25.0	
柱顶标高 Δ			± 10.0	

4 刚架斜梁安装的允许偏差应符合表 11.2.5-3 的规定；

表 11.2.5-3 刚架斜梁安装的允许偏差 (mm)

项目		允许偏差
梁跨中垂直度		$H/500$
梁挠曲	侧向	$L/1000$
	垂直方向	+10.0, -5.0
相邻梁接头部位	中心错位	3.0
	顶面高差	2.0
相邻梁顶面高差	支承处	1.0
	其它处	$L/500$

5 本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。

11.3 波形腹板吊车梁

11.3.1 波形腹板吊车梁的制作与安装，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的规定。

11.3.2 吊车梁的翼缘焊接拼接应采用加引弧板和引出板的焊透对接焊缝，引弧板和引出板割去处应予打磨平整。焊接吊车梁的工地整段拼接应采用焊接或高强度螺栓的摩擦型连接。

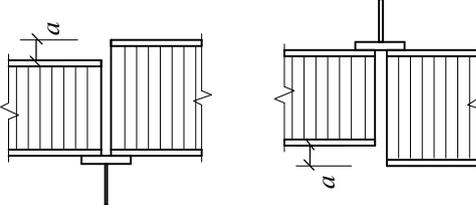
11.3.3 吊车梁的波形腹板不宜直接对接焊接拼接。

11.3.4 吊车梁的翼缘与波形腹板之间的焊接应采用双面焊接连接。

11.3.5 吊车梁安装允许偏差应符合表11.3.5的规定。

表 11.3.5 吊车梁安装的允许偏差 (mm)

项目	允许偏差 a		图示
轨距	10		
直线度	3		
竖向偏差	10	梁跨的 1/1500	
上承时梁顶高差	支座处 ± 10 其它处 ± 15		

下挂时梁底高差	± 10	
相邻梁高差	± 1.0	

11.4 波形腹板钢拱

11.4.1 波形腹板钢拱制作时，宜先加工得到直线翼缘板和直线均匀波形腹板，然后将其分别加工成设计曲率的弧形翼缘和波形腹板，再将翼缘和腹板焊接形成钢拱。

【条文说明】波形腹板钢拱由于波形腹板不承担轴向力，其沿波折方向的压缩刚度几乎为零，因此在面内进行冷弯成型非常容易，之后直接与上下翼缘焊接，方便经济，避免了平腹板钢拱中平腹板冷弯成型时受弯屈曲或褶皱，或煨弯成型时残余应力过大和材性损伤等问题。同时，翼缘的塑性变形与残余应力均小，并且成型对焊缝变形没有要求。

11.4.2 波形腹板钢拱制作时，可先加工制作直线波形腹板梁，然后将其冷弯或煨弯成设计曲率的波形腹板钢拱。

【条文说明】此制作成型方法的优点在于，现有波形腹板梁的制作工艺及设备已相当成熟，可实现自动化生产。但由于起拱之前

翼缘已与波形腹板焊接,因此弯曲成型时会导致焊缝变形和受力较为不利。

11.4.3 波形腹板钢拱制作时,翼缘和波形腹板的焊接宜采用计算机控制的自动化焊接工艺。

11.4.4 采用本规程第 11.4.1 条的方法制作正弦波形腹板圆弧钢拱时,直线均匀波形腹板的波幅和波长应符合下式规定:

$$3.88 \frac{a_0^2}{q_0^2} + 1.07 \frac{a_0}{q_0} + 0.95 > 1 + \frac{4Hh_w}{L^2 + 4H^2} \quad (11.4.5)$$

式中: a_0 —— 直线均匀波形腹板的波幅 (mm);

q_0 —— 直线均匀波形腹板的单个重复波形的波长 (mm);

L —— 按拱轴线计算的拱的跨度 (mm);

H —— 拱的矢高 (mm);

h_w —— 波形腹板的高度 (mm)。

【条文说明】当采用冷弯直线波形腹板、再与翼缘焊接的制作方法时,控制腹板纵向中线处正弦形波折的波长和波幅保持不变,则在冷弯成圆弧形的过程中,中线以上的波折被拉伸,波长变大而波幅变小;中线以下的波折被压缩,波长变小而波幅变大。沿截面高度方向,波形腹板的波折不再是均匀的。当腹板高度较高、曲率较大,波幅较小时,冷弯加工过程中与上翼缘相连处的波折可能会被拉平。满足本条文的条件时,可避免这种情况的发生。

11.4.5 波形腹板钢拱的弯曲成型加工应符合下列规定:

1 碳素结构钢在环境温度低于 -16°C 、低合金高强度结构钢在环境温度低于 -12°C 时,不应进行冷弯曲加工;

2 采用热弯曲加工成型时,加热温度宜控制在 $900^{\circ}\text{C} \sim$

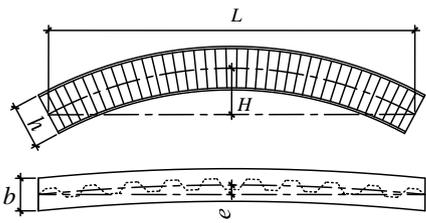
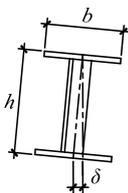
1000°C；碳素结构钢的温度下降到 700°C之前，低合金结构钢的温度下降到 800°C之前，应结束加工；低合金结构钢应自然冷却，且不得在兰脆温度区段进行弯曲加工；

3 弯曲部位的螺栓孔宜在弯曲加工后再开孔；

4 弯曲成型后的曲线应光滑，构件表面不应有明显褶皱，且局部凹凸度不应大于 1mm。弯曲部位不应存在裂纹、过烧、分层等缺陷。

11.4.6 波形腹板钢拱的制作允许偏差应符合表 11.4.6 的规定。

表 11.4.6 波形腹板钢拱的制作允许偏差 (mm)

项目		允许偏差	检验方法	图示
拱段长度		± 3.0	用钢尺检查	
矢高 (H)		$L/2500$ 8.0	用拉线和钢尺检查	
侧弯 (e)		$L/3000$ 6.0		
截面尺寸	端部	± 3.0	用钢尺检查	
	其他处	± 5.0		
扭曲 (δ)		$h/250$ 5.0	用吊线和钢尺检查	

端部垂 直度 (Δ)	$h/500$ 3.0	用直角尺 和钢尺检 查	
---------------------------	--------------------	-------------------	--

11.4.7 波形腹板钢拱安装前，应对基础及预埋件进行验收。

11.4.8 波形腹板钢拱的安装顺序宜从拱脚至拱顶方向两侧对称安装。在安装过程中应及时连接侧向稳定构件，或采用缆风绳等临时施工措施，以确保结构的稳定性。

11.4.9 波形腹板钢拱临时支撑卸载时，宜遵循从拱脚至拱顶对称拆撑的顺序。拆撑方法应保证结构受力体系的合理转化。

11.4.10 波形腹板钢拱可采用分段吊装高空组对法、旋转起扳法、整体提升法、分段累积提升法、旋转起扳提升法或推移法等方法安装。

11.4.11 波形腹板钢拱的安装允许偏差应符合表 11.4.11 的规定。

表 11.4.11 波形腹板钢拱的安装允许偏差 (mm)

项 目	允许偏 差	检查 方法	图 示
拱脚底座中 心对定位轴 线的偏移 (Δ)	5.0	用吊 线和 钢尺 检查	
跨度 (L)	$\pm L/2000$ ± 30.0	用经 纬仪	

			和光电测距仪测量	
	跨中垂直度 (Δ)	$L/1500$ 25.0	用吊线和钢尺检查	
侧向弯曲矢高 e	$L \leq 60\text{m}$	$L/1000$ 10.0	用拉线、吊线和钢尺检查	
	$60\text{m} < L \leq 120\text{m}$	$L/2500$ 20.0		
	$L > 120\text{m}$	$L/2500$ 40.0		
相邻钢拱顶面高差	支座处	10.0	用水准仪和钢尺检查	
	其他处	15.0		

11.5 波形腹板组合构件

11.5.1 波形腹板组合梁的制作与安装应符合下列规定：

1 波形腹板组合梁中，波形腹板工形梁的制作与安装应按本规程第 11.2 节执行；

2 波形腹板组合梁中，波形腹板工形梁之上的混凝土浇筑、钢筋和栓钉施工要求应符合《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

11.5.2 波形腹板组合柱的制作与安装应符合下列规定：

1 波形腹板组合柱中，波形腹板的制作与安装应按本规程 11.2 节执行；

2 波形腹板组合柱中，钢管混凝土柱的制作和安装应符合《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 的规定。

11.6 波形钢板墙

11.6.1 波形钢板墙的工厂与工地焊接，宜采用焊接变形和收缩量小且焊接残余应力低的焊接工艺。

11.6.2 波形钢板墙运输过程中，宜采用专用胎架。

11.6.3 波形钢板墙装卸车及吊装时，应采用牢固的绑扎方式，吊点设置宜选择保证波形钢板墙变形最小的位置。

11.6.4 波形钢板墙角部位宜切割成圆角或倒角形式，圆切角半径或直角切角边长不应小于 35mm 和墙板厚度的较大值。当鱼尾板与波形钢板墙采用夹板连接时，连接夹板的拼接点应远离角部。

11.6.5 当波形钢板墙的棱线竖向布置且设计主要用于承受水平剪力、不承担竖向压力时，宜采用后固定法施工；当波形钢板墙设计既承受水平剪力，又承担竖向压力时，可与结构框架同步施工。

11.6.6 当波形钢板墙的棱线水平布置，可与结构框架同步施工。

11.6.7 当同层内波形钢板墙同时采用高强度螺栓和焊接连接时，应先进行高强度螺栓施工，再进行焊接施工。

11.7 波形钢板管涵

11.7.1 波形钢板管涵在制作和安装过程中，其环向轴线和波形局部尺寸偏差应满足下列要求：

1 波形管涵的环向轴线尺寸偏差不应大于 $\pm 2\% D$ ，其中 D 为管涵的直径。

2 波形管涵的局部波形尺寸偏差不应大于下式计算结果：

$$\delta_0 = \begin{cases} \frac{3s}{2000} & t \leq 6 \\ \frac{1.5s}{2000} & 6 < t \leq 14 \\ \frac{s}{2000} & t > 14 \end{cases} \quad (11.7.1)$$

式中： s —— 波形腹板单个重复波展开后的长度（mm）；

t —— 板件厚度（mm）。

11.7.2 波形钢板管涵运输和安装过程应符合下列要求：

1 波形管涵成品件在运输、吊装过程中应编制成品保护方案，防止变形及镀锌层破损；弧形波形板的现场存放应提前规划好位置，放置应确保成品不变形，做好涂层防护措施；

2 波形钢板管涵在安装前，应检查波形板、高强螺栓等的出厂检验报告、产品质量合格证书和复检报告，并依据国家相关技术标准 and 设计要求对产品的外观质量、几何尺寸、防腐涂层等进行进场质量抽检；

3 波形钢板管涵安装前，应对基底（或基础）设计标高、管涵定位线等进行复测；

4 波形钢板管涵组装用高强螺栓的强度等级不应低于 8.8 级；

5 波形钢板管涵安装前应进行施工技术交底，安装过程应依据设计图纸及施工方案（含拼装顺序，螺栓群紧固作业顺序等）进行，严禁强行穿孔或超拧、漏拧；

6 波形钢板管涵安装时，应根据安装板片标记编号进行定位

安装，且应符合设计要求。波形钢板安装严禁采用焊接，不得强行别撬或用硬物敲打，以免损坏防腐涂层。如有损坏必须进行防腐修复处理。

11.7.3 波形钢板管涵的地基处理，应符合下列规定：

1 地基及地基处理质量应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 和《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202 的规定；

2 基坑回填应在波形钢板管涵结构及防水工程验收合格后进行；结构功能回填土范围内布料时，运料机械应平行于结构纵向行驶，严禁用铲车垂直于波形钢板管身铲运，或运料车垂直于波波形钢板管身直接倾倒；

3 在回填过程中，波形钢板管涵外边缘向外 2m 范围内及从波形钢板管涵顶到最小覆土厚度范围内，除夯实机械以外，严禁重型机械驶入；

4 波形钢板管涵顶部及周围 20m 范围内不允许强夯。

12 防腐与涂装

12.1 一般规定

12.1.1 波形钢板构件的防腐与涂装，应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755和《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205的规定。

12.1.2 应用在工业建筑中的波形钢板构件，其防腐蚀设计应符合现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046。除有可靠的涂装预防措施的情况外，在强腐蚀介质环境下不宜使用波形钢板构件。

12.1.3 波形钢板结构应采取有效的防腐蚀构造措施，便于检查、清刷、油漆及避免积水，闭口截面构件沿全长和端部应焊接封闭。对长期有高温、高湿作用的局部环境，应采取隔护、通风、排湿等措施。

12.1.4 波形钢板构件应按设计要求进行表面处理，除锈方法和除锈等级应符合现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB 8923的规定。

12.1.5 波形钢板结构所采用的标准连接件（高强螺栓、螺母、垫圈）及配件（管箍、法兰盘等），出厂前应进行热镀锌防腐处理。当采用热浸镀铝、静电喷涂等其他方式代替镀锌时，应有试验验证资料，确保其防腐性能不低于规范所规定的热浸镀锌方法的相应要求。

12.1.6 波形钢板构件普通防腐涂料涂装工程应在钢结构构件组装、预拼装或钢结构安装工程检验批的施工质量验收合格后进行。

12.1.7 波形钢板结构和构件在使用期间应定期进行检查与维护。

维修及重新涂装的质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205的规定。

12.1.8 波形钢板结构的防火设计应符合下列规定：

1 应根据防火设计要求采用喷涂防火或外包覆防火，其耐火等级及耐火极限应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016的规定；

2 防火涂装和防火板材应符合国家现行有关标准和设计要求的規定；

3 当同时使用防腐涂料和防火涂料时，其相容性应符合相关技术要求。

12.2 防腐涂料涂装

12.2.1 涂装前，波形钢板构件表面除锈等级应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205的规定和设计要求。

12.2.2 波形钢板结构应采用成熟的涂料和涂装工艺。当设计要求或施工单位首次采用某涂料和涂装工艺时，应按国家现行有关标准的规定进行涂装工艺评定。

12.2.3 采用连续热镀锌钢板及钢带加工的波形钢板构件，其有效镀锌层厚度和质量不应低于表12.2.3规定的要求。

表 12.2.3 热浸镀锌质量要求

项目	要求
单面附着量 (g/m ²)	强腐蚀性环境：波形钢板、波形钢板件和管箍 ≥ 600， 螺栓、螺母 ≥ 350； 中等腐蚀性和弱腐蚀性环境：波形钢板、波形钢板件和 管箍 ≥ 300，螺栓、螺母 ≥ 175

镀锌层附着性	镀锌层应与金属结合牢固，经锤击实验不剥离、不凸起
外观质量	镀锌层应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面光滑，不允许有流挂滴瘤或结块
镀锌层均匀性	镀锌层应均匀，无金属铜的红色沉淀物
镀锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象

注：强腐蚀性指金属表面均匀腐蚀大于0.5mm/年；中等腐蚀指金属表面均匀腐蚀0.1~0.5mm/年；弱腐蚀性指金属表面均匀腐蚀小于0.1mm/年

12.3 连接部位涂装

12.3.1 波形钢板构件工地焊接部位的焊缝两侧宜留出暂不涂装区，宽度可为焊缝两侧各100mm。焊缝两侧也可涂刷不影响焊接性能的车间底漆。焊接完毕后，对焊缝热影响区应按原涂装要求重新进行表面清理和涂装。

12.3.2 波形钢板结构工程连接焊缝或临时焊缝、补焊部位，涂装前应清理焊渣、焊疤等污垢，钢材表面处理应符合设计要求。当设计无要求时，宜采用人工打磨处理，除锈等级不低于St3。

12.3.3 高强度螺栓连接部位，涂装前应按设计要求除锈、清理，当设计无要求时，宜采用人工除锈、清理，除锈等级不低于St3。

12.4 波形钢板管涵

12.4.1 波形钢板管涵应根据其使用条件和所处环境，包括水文地质状况、盐度、pH值、气候条件、结构特点、施工方法和使用条件等因素综合进行防腐、防水和防火设计。

12.4.2 波形钢板管涵的内、外表面和连接件均应进行热镀锌防腐处理，接缝应进行密封防水和防腐处理。

12.4.3 经五年现场试验证明符合防腐蚀、防水和防火要求的新工艺、新材料、新结构、新技术，或在已建类似波形钢板管涵工程中成功的腐蚀控制措施，经论证确认后，可在相应条件下推广应用。

12.4.4 波形钢板管涵的防腐设计可采用多种材料和涂层组合方案，防腐方案可按表12.4.4确定。

表 12.4.4 波形钢板管涵防腐方案

方案	适用场合	内壁防腐蚀方案	外壁防腐蚀方案
方案一	干旱~半干旱、弱腐蚀地区	镀锌层厚 86 μ m+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μ m+热涂沥青层
方案二	弱腐蚀	镀锌层 86 μ m+（聚合物）水泥砂浆*+热涂沥青层	镀锌层 86 μ m+（聚合物）水泥砂浆*+热涂沥青层
方案三	中等腐蚀	镀锌层 86 μ m +涂层系统 1+热涂沥青层	镀锌层 86 μ m+热涂沥青层
方案四	强腐蚀	镀锌层 86 μ m +涂层系统 2+热涂沥青层	镀锌层 86 μ m+涂层系统 1+热涂沥青层
方案五	强腐蚀性海港地区	镀锌层 86 μ m +涂层系统 2+聚合物水泥砂浆	镀锌层 86 μ m+涂层系统 2+热涂沥青层
方案六	山区冲刷严重地区	镀锌层 86 μ m +（聚合物）水泥砂浆*	镀锌层 86 μ m+热涂沥青层

方案七	波形钢板管涵腐蚀层的更新或维护	(1) 涂层系统: 底层: 富锌漆(无机或有机)厚75 μm ; 面层: 氧化橡胶漆、聚氨酯漆、丙烯酸树脂漆、乙烯树脂漆厚250 μm ; (2) 喷涂锌厚250 μm	——
-----	-----------------	--	----

注: *可采用水泥砂浆或聚合物水泥砂浆, 根据需要设置。

12.4.5 波形钢板管涵外壁的防腐层应根据土壤腐蚀性等级进行设计, 可按表12.4.5确定。

表 12.4.5 波形钢板管涵的外壁防腐层

防腐层	底涂层			面涂层		
	漆基类型	涂装道数	单面镀锌量或漆膜厚度	漆基类型	涂装道数	漆膜厚度(μm)
镀锌	热浸锌	1	600g/m ²	—	—	—
复合涂层	热浸锌	1	600g/m ²	环氧	≥ 3	150
重防腐涂层	环氧	2	100 μm	环氧	≥ 3	150
重防腐涂层	环氧	2	100 μm	环氧	≥ 3	350
涂层+阴极保护	环氧	2	100 μm	环氧	≥ 3	350

12.4.6 波形钢板管涵内壁的防腐层可结合大气中的腐蚀性介质、大气湿度、温差、管廊内湿度和结露情况等因素进行设计, 可按表12.4.6确定。

表 12.4.6 波形钢板管涵内壁防腐层

防腐层体系	底涂层			面涂层		
	漆基类型	涂装道数	单面镀锌量或漆膜厚度	漆基类型	涂装道数	漆膜厚度(μm)
镀锌	热浸锌	1	600g/m ²	—	—	—

复合涂层	热浸锌	1	600g/m ²	环氧	≥ 3	250
重防腐涂层	环氧	2	100μm	环氧	≥ 3	250

12.4.7 高强度螺栓连接处应进行绝缘处理，并采取其他必要的防腐措施。

12.4.8 波形钢板管涵的防腐工程施工，应符合下列要求：

1 当防腐涂装采用热沥青、乳化沥青或其他环氧涂层等进行二次涂装时，应在涂抹均匀，不得漏涂，可采用喷涂、刷涂；

2 施工过程中，严禁用坚硬、尖锐的物体敲打、冲击管廊结构，以防破坏防腐层；如发现波形钢板构件出现锌层破损等情况，应由专业人员及时进行修补，修补涂层应与原材料匹配。

13 验 收

13.1 一般规定

13.1.1 波形钢板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,进行各分项工程验收。

13.1.2 波形钢板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。

13.1.3 波形钢板结构分项工程可包含若干个检验批,其中波形腹板及波形钢板应专门作为一个检验批,并应执行本规程的检验规定和填写验收记录。

13.2 波形钢板结构验收

13.2.1 波形钢板的高度、宽度、波幅、夹角、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。

13.2.2 波形钢板成型后板面应波形顺滑,不应有皱褶或裂纹。

检查数量:每批同类构件抽查5%,且不少于10件。

检验方法:观察检查和用10倍放大镜检查。

13.2.3 波形钢板在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。

13.2.4 波形钢板结构制作和安装的允许误差应符合本规程第11章的规定。

检查数量：每批同类构件抽查5%，且不少于10件。

检验方法：用尺检查。

13.2.5 波形钢板结构的螺栓、焊缝连接应符合设计要求，检查数量和检验方法应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205和《钢结构焊接规范》GB 50661的规定。

13.2.6 波形腹板组合构件的验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628的规定。

13.2.7 波形钢板表面防腐涂层厚度应符合设计要求，检查数量和检验方法应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205和《建筑钢结构防火规范》GB 51249的规定

13.2.8 波形钢板管涵所采用的原材料，其品种、规格、性能等应符合国家现行有关标准和设计要求，在波形钢板管涵进场时，应检查质量证明文件。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查质量合格证明文件、检验报告及质量验收记录。

13.2.9 必要时，应对波形钢板的钢材化学成分及力学性能进行抽样复验，其复验结果应符合国家现行有关标准和设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查复验报告。

13.2.10 波形钢板管涵结构工程的验收应符合下列规定：

1 波形钢板管涵结构搭接处防水密封材料应平整顺直，不得有变形和损坏，无缺失；密封宽度允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ ；

检查数量：每20m检测水平垂直尺寸一次，量测值与设计值差值除设计值为偏差，最少不得少于10组；

检验方法：尺量检查；

2 管涵结构防腐涂装厚度要求及其检验方法应符合表13.2.10的规定；

表 13.2.10 防腐涂装厚度要求及检验方法

序号	检查项目	厚度要求	检验方法与频次
1	喷涂厚度	$\geq 0.1\text{mm}$	仪器测量检查，每 20m 检测一次，最少 3 点
2	刷涂厚度	$\geq 0.2\text{mm}$	仪器测量检查，每 20m 检测一次，最少 3 点

3 安装外观质量应符合下列规定：

- 1) 管涵整体顺直、无弯曲；
- 2) 管涵壁不得有裂纹、凹陷、鼓包、划痕、焊疤、电弧擦伤等缺陷；
- 4) 法兰板连接严密、平整；
- 5) 防腐涂装应无漏涂，且表面光滑、连续、均匀，无肉眼可见的孔隙、裂缝、脱皮、破损及其他缺陷；
- 6) 管内壁无污染；

4 螺栓丝扣外露应为2扣~3扣，其中允许有10%的螺栓丝扣外露1扣或4扣；

检查数量：全数检查；

检验方法：观察检查；

5 在回填施工中应及时监测管体变形量，管涵结构主体椭圆度允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

13.3 分项工程质量验收

13.3.1 波形钢板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。各项检查均应资料完整、质量合格。

13.3.2 波形钢板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。

13.3.3 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》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 验收项目应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。

13.3.4 波形钢板管涵工程宜划分为地基与基础工程、管涵结构工程等分部工程进行验收。

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 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 2 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 3 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 4 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 5 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 6 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 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 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》 GB 50202
- 10 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 11 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 12 《钢管混凝土工程施工质量验收规范》 GB 50628
- 13 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 14 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 15 《钢结构工程施工规范》 GB 50755
- 16 《钢管混凝土结构技术规范》 GB 50936
- 17 《建筑钢结构防火技术规范》 GB 51249
- 18 《碳素结构钢》 GB/T 700
- 19 《冷轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》 GB/T 708
- 20 《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》 GB/T 709
- 21 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 22 《耐候结构钢》 GB/T 4171
- 23 《焊接结构用耐候钢》 GB/T 4172
- 24 《碳钢焊条》 GB/T 5117
- 25 《低合金钢焊条》 GB/T 5118

- 26 《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》 GB/T 5293
- 27 《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》 GB/T 8110
- 28 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》 GB 8923
- 29 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》 GB/T 8923.1
- 30 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》 GB/T 10433
- 31 《钢结构防火涂料》 GB 14907
- 32 《建筑结构用钢板》 GB/T 19879
- 33 《冷弯波纹管》 GB/T 34567
- 34 《富锌底漆》 HG/T 3668
- 35 《高层建筑混凝土结构技术规程》 JGJ 3
- 36 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55
- 37 《钢结构高强度螺栓连接技术规程》 JGJ 82
- 38 《高层民用建筑钢结构技术规程》 JGJ 99
- 39 《组合结构设计规范》 JGJ 138
- 40 《建筑钢结构防腐技术规程》 JGJ/T 251
- 41 《自密实混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
- 42 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60