

中国工程建设标准化协会

波纹腹板钢结构技术规程

Technical specification for
steel structures with corrugated webs

CECS 291 : 2011

主编单位： 同济大学
主要参编单位： 上海欧本钢结构有限公司
批准单位： 中国工程建设标准化协会
施行日期： 2011 年 9 月 1 日

中国计划出版社

2011 北京

中国工程建设标准化协会 公告

第 83 号

关于发布《波纹腹板钢结构技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会建标协字[2007] 81 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 2007 年第二批标准制、修订项目计划的通知》的要求，由同济大学等单位编制的《波纹腹板钢结构技术规程》，经本协会轻型钢结构专业委员会组织审查，现批准发布，编号为 CECS 291: 2011，自 2011 年 9 月 1 日起施行。



前言

根据（2007）建标协字第 81 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 2007 第二批标准制、修订项目计划的通知》的要求，规程编制组经过广泛调查研究，采用了国内外近期的研究成果，参考了国内外有关工程设计经验，并在广泛征求意见的基础上制定了本规程。

本规程共 8 章和 3 个附录，主要内容是：总则，术语和符号，材料，基本设计规定，波纹腹板钢构件，波纹腹板 H 型钢组合梁，连接节点，制作，安装和防腐等内容。

根据国家计委计标[1986]1649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求，推荐给工程建设、设计、施工等使用单位及工程技术人员采用。

本规程由中国建设标准化协会轻钢结构专业委员会（TC28）归口管理并负责解释（地址：湖北省武汉市武昌中南二路 10 号），邮政编码：430071），在使用中如发现需要修改和补充之处，请将意见和资料径寄解释单位。

主编单位：同济大学

参编单位：郑州大学

上海大学

上海欧本钢结构有限公司

巴特勒（上海）有限公司

美联钢结构建筑系统（上海）有限公司

之江钢铁（上海）有限公司

上海同钢建筑科技有限公司

烟台新科钢结构有限公司

浙江精功科技股份有限公司

主要起草人：李国强 孙飞飞 张 哲 陈 明 王赛宁

孙成疆 石文龙 刘玉姝 范 昕 罗小丰

唐 鹏 韩小红 张军强 唐 潮 张 浩

张晓进 俞焕庆

主要审查人：马克俭 顾 强 童根树 徐厚军 唐 扬

杨强跃 倪志刚 贺贤娟 刘承宗

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.....	5
4 基本设计规定.....	6
4.1 设计原则.....	6
4.2 设计强度.....	6
5 波纹腹板钢构件.....	7
5.1 轴心受拉、受压构件.....	7
5.2 受弯构件.....	8
5.4 拉弯和压弯构件.....	13
5.5 受压翼缘的局部稳定.....	16
5.6 构件的变形计算.....	16
5.7 疲劳计算.....	17
5.8 抗震设计.....	18
6 波纹腹板 H 型钢组合梁.....	19
6.1 一般规定.....	19
6.2 组合梁设计.....	19
6.3 挠度计算.....	22
7 连接节点.....	23
7.1 设计原则.....	23
7.2 梁-梁连接.....	23
7.3 梁-柱连接.....	24
7.4 吊车梁支座.....	30
8 制作和防腐蚀.....	32
8.1 波纹腹板钢构件的制造.....	32
8.2 波纹腹板钢构件的防腐处理.....	32
8.3 波纹腹板钢构件的制造容许误差.....	33
附录 A 推荐波纹腹板波形.....	34
附录 B 波纹腹板 H 型钢单元刚度矩阵.....	35
附录 C 波纹腹板 H 型钢参数.....	36
本规程用词说明.....	40
本规程引用标准名录.....	41

条文说明.....42

Contents

1 General Provisions	1
2 Terms and Symbols	2
2.1 Terms.....	2
2.2 Symbols	2
3 Materials.....	5
4 Basic Requirements for Structural Designs	6
4.1 Design Principles	6
4.2 Design Strength.....	6
5 Steel Members with Corrugated Webs	7
5.1 Axially tensioned Members	7
5.2 Axially Compressed Members	错误! 未定义书签。
5.3 Bending Members.....	8
5.4 Tension-bending and Compression-bending Members.....	13
5.5 Local Stability of Compressed Flange	16
5.6 Deformation Computing of Members.....	16
5.7 Fatigue design.....	19
6 Composite Beams with Corrugated Steel Webs.....	19
6.1 General Provison.....	19
6.2 Design of Composite Beams.....	19
6.3 Deformation Computing	22
7 Connection Joints	23
7.1 Design Principles	23
7.2 Beam-Beam Connections.....	23
7.3 Beam-Column Connections	24
7.4 Crane beam support.....	32
8 Manufacture, Installation and Anticorrosion.....	32
8.1 Manufacture of Steel Members with Corrugated Webs	32
8.2 Corrosion Protection of Steel Members with Corrugated Webs	32
8.3 Tolerances of Steel Members with Corrugated Webs	33
Appendix A Recommended wave shape for corrugated web.....	34
Appendix B Stifeness matrix for I-section with corrugated webs.....	37
Appendix C Section steel tables.....	36
Explanation of wording in this specification	40
List of quoted standards	41
Explanation of standard.....	42

1 总 则

- 1.0.1** 为使波纹腹板钢结构的设计和施工做到技术先进、经济合理、安全适用，制订本规程。
- 1.0.2** 波纹腹板钢构件适用于一般工业与民用建筑所采用的钢构件及其所构成的结构。
- 1.0.3** 本规程是根据国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定的原则制订的。
- 1.0.4** 对有防火和防腐蚀要求的结构，应按有关的专门规定，作防火和防腐蚀处理。在强腐蚀作用环境条件下不宜采用波纹腹板钢构件。
- 1.0.5** 波纹腹板钢结构设计时，除应符合本规程的规定外，尚应满足国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 波纹腹板钢构件 steel members with corrugated webs

由波纹腹板和平板翼缘构成的 H 型构件。

2.1.2 波纹腹板钢结构 structures using steel members with corrugated webs

由波纹腹板钢构件组成的钢结构

2.1.3 波纹腹板 H 型钢组合梁 composite beams with corrugated steel webs

由混凝土翼板及波纹腹板 H 型钢组成的组合梁

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应设计值

N	——	轴心力
M_x	——	绕强轴作用的最大弯矩
P	——	波纹腹板钢上翼缘作用的集中荷载

2.2.2 计算指标

E	——	钢材的弹性模量
G	——	钢材的剪切模量
σ	——	正应力
f	——	材料的抗拉、抗压和抗弯强度设计值
f_v	——	腹板钢材的抗剪承载力设计值
$\tau_{cr,l}$	——	波纹腹板局部屈曲的弹性极限承载力
$\tau_{cr,g}$	——	波纹腹板整体屈曲的弹性极限承载力
f_f	——	翼缘材料的屈服强度设计值
f_w	——	腹板材料的屈服强度设计值
P_w	——	腹板承载力设计值
P_f	——	翼缘承载力设计值
M_{pf}	——	翼缘的塑性抗弯承载力设计值

2.2.3 几何参数

A	——	构件毛截面面积
A_n	——	构件的净截面面积
A_f	——	翼缘的毛截面面积
A_{nf}	——	翼缘的净截面面积
A_q	——	构件腹板的有效受剪面积
A_w	——	腹板截面积
B	——	翼缘的自由外伸宽度
B_{cb}	——	组合梁考虑滑移效应的折减刚度
b	——	波纹中水平板带的宽度
d	——	波纹中倾斜板带的水平投影宽度
θ	——	波纹中倾斜板带倾角
h_r	——	波纹高度
λ	——	腹板波纹的波长
s	——	波长的展开长度
W_{nx}	——	净截面抵抗矩
W_x	——	梁截面模量
h	——	梁截面高度
I_y	——	截面对 y 轴的惯性矩
I_t	——	截面的抗扭惯性矩
I_w	——	截面翘曲常数
W_{1x}	——	在弯矩作用平面内对受压纤维的毛截面模量
l_1	——	受压翼缘的自由长度
h_w	——	腹板高度
t_w	——	腹板厚度
b_f	——	翼缘宽度
t_f	——	翼缘厚度
h_R	——	轨道高度
c	——	荷载分布宽度
c_0	——	集中荷载在腹板计算高度边缘的假定分布长度

2.2.4 计算系数及其他

φ	——	柱子的整体稳定系数
λ_x	——	整个构件对 x 轴的长细比；
λ_{ox}	——	换算长细比
χ_c	——	考虑屈曲的承载力折减系数
γ_x	——	截面塑性发展系数
φ_b	——	梁的整体稳定系数
β_b	——	梁整体稳定的等效临界弯矩系数
α_E	——	钢材的弹性模量与混凝土弹性模量的比值

3 材 料

3.0.1 用于承重结构的波纹腹板钢构件的带钢或钢板，宜采用现行国家标准《普通碳素结构钢》GB/T 700 规定的 Q235 钢和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 规定的 Q345 钢。当有可靠依据时，可采用其他钢号的钢材。

3.0.2 用于承重结构的波纹腹板钢构件的带钢或钢板应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保证，对焊接结构尚应具有含碳量的合格保证。焊接承重结构以及重要的非焊接承重结构采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证。

3.0.3 用于地震区的波纹腹板钢构件若承受地震作用，则构件的材料应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的要求。

3.0.4 波纹腹板钢构件的连接材料应符合下列要求：

1 手工焊接采用的焊条，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。选择的焊条型号应与主体金属力学性能相适应。对直接承受动力荷载或振动荷载且需要进行疲劳验算的波纹腹板钢构件，宜采用低氢型焊条。

2 自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和相应的焊剂应与主体金属力学性能相适应，并应符合现行国家标准的规定。

3 普通螺栓应符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 和《六角头螺栓》GB/T 5782 的规定。

4 高强度螺栓应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 或《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632，《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副技术条件》GB/T 3633 的规定。

5 圆柱头焊钉(栓钉)连接件的材料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。

4 基本设计规定

4.1 设计原则

4.1.1 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，以分项系数设计表达式进行计算。

4.1.2 波纹腹板钢结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

4.1.3 设计波纹腹板钢结构时的重要性系数 γ_0 应根据结构的安全等级或结构的设计使用年限确定。

一般工业与民用建筑波纹腹板钢结构的安全等级取为二级，设计使用年限为 50 年时，其重要性系数不应小于 1.0；设计使用年限为 25 年时，其重要性系数不应小于 0.95。特殊建筑波纹腹板钢结构安全等级、设计使用年限另行确定。

4.1.4 按承载能力极限状态设计波纹腹板钢结构，应考虑荷载效应的基本组合，地震区还应考虑含地震作用的荷载效应组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合，采用荷载设计值和强度设计值进行结构承载力验算。荷载设计值等于荷载标准值乘以荷载分项系数；强度设计值等于材料强度标准值除以抗力分项系数。

4.1.5 按正常使用极限状态设计波纹腹板钢结构，应考虑荷载效应的标准组合，采用荷载标准值和变形限值进行结构变形验算。

4.1.6 计算结构构件和连接时，荷载标准值、荷载分项系数、荷载效应组合和荷载组合值系数应分别按结构承载力极限状态和正常使用极限状态设计要求，根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定取值。

4.2 设计强度

4.2.1 钢材的强度设计值应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 相关规定采用。

4.2.2 焊缝的强度设计值应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 相关规定采用。

4.2.3 钢材和钢铸件的物理性能指标应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 相关规定采用。

5 波纹腹板钢构件

5.1 轴心受拉、受压构件

5.1.1 波纹腹板构件的轴向抗拉强度应按照下式验算：

$$\sigma = \frac{N}{A_{nf}} \leq f \quad (5.1.1)$$

式中 σ ——截面正应力；

N ——轴心拉力设计值；

A_{nf} ——翼缘的净截面面积；

f ——材料的抗拉、抗压和抗弯强度设计值。

5.1.2 波纹腹板轴心受压构件除了应按照式(5.1.1)计算强度之外，还应按照下式计算其整体稳定性：

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A_f} \leq f \quad (5.1.2-1)$$

式中 A_f ——构件的翼缘截面面积；

φ ——柱子的整体稳定系数，取截面两主轴稳定系数 φ_x 、 φ_y 的较小值。当计算构件绕强轴

方向的整体稳定系数 φ_x 时，应采用如下换算长细比：

$$\lambda_{ox} = \sqrt{\lambda_x^2 + 25.7 \frac{A_f}{A_q}} \quad (5.1.2-2)$$

$$A_q = h_w t_w \frac{\lambda}{s} \quad (5.1.2-3)$$

式中 λ_{ox} ——换算长细比；

λ_x ——整个构件对 x 轴的长细比，忽略腹板面积；

A_q ——构件腹板的有效受剪面积；

λ ——腹板波纹的波长(图 5.1.2-1)；

s ——腹板波纹波长的展开长度(图 5.1.2-2)。

在计算截面绕两个主轴方向的回转半径时，均忽略腹板部分的贡献。

5.1.3 波纹腹板轴心受压构件的整体稳定系数，应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 附录 C 确定。当计算绕强轴方向的整体稳定时，可以按照 b 类截面计算其稳定系数。当计算绕弱轴方向的整体稳定时，可按照 c 类截面计算其稳定系数。

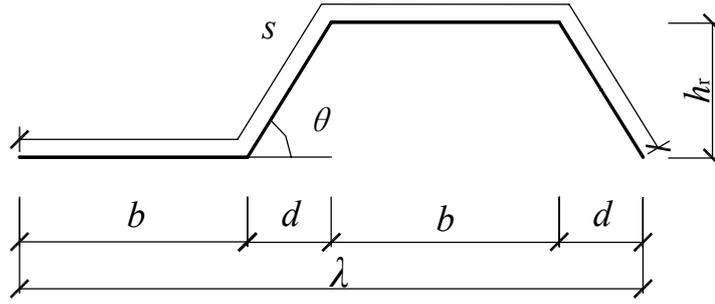


图 5.1.2-1 波纹腹板几何参数示意图

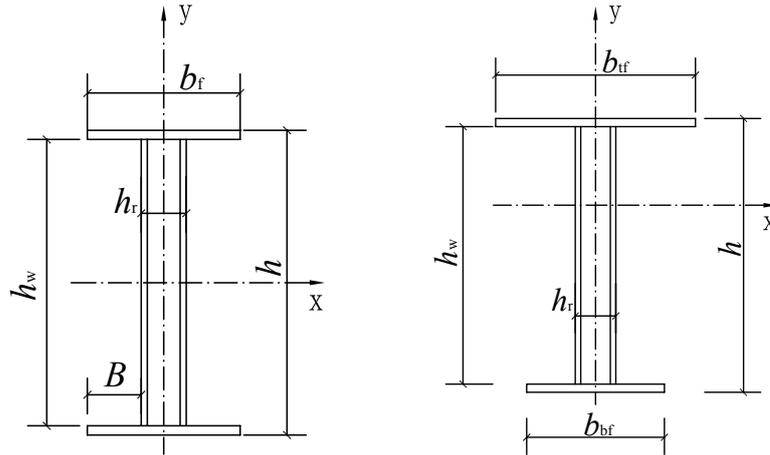


图 5.1.2-2 构件截面尺寸示意图

5.2 受弯构件

5.2.1 波纹腹受弯构件的抗剪承载力应满足下列要求：

1 当有充分试验证明波纹腹板屈服前不发生屈曲，腹板的抗剪承载力应按下列公式验算：

$$V \leq f_v h_w t_w \quad (5.2.1-1)$$

式中： f_v 为腹板钢材的抗剪承载力设计值。

2 如没有充分试验证明波纹腹板屈服前不发生屈曲，梯形波纹腹板 H 型钢抗剪承载力应按下式验算：

$$V \leq \chi_c f_v h_w t_w \quad (5.2.1-2)$$

$$\chi_{c,l} = 1.15 / (0.9 + \bar{\lambda}_{c,l}) \leq 1.0 \quad (5.2.1-3)$$

$$\chi_{c,g} = 0.68 / \bar{\lambda}_{c,g}^{0.65} \leq 1.0 \quad (5.2.1-4)$$

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{(f_y / \sqrt{3}) / \tau_{cr,l}} \quad (5.2.1-5)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{(f_y / \sqrt{3}) / \tau_{cr,g}} \quad (5.2.1-6)$$

$$\tau_{cr,l} = k_s \pi^2 E / [12(1 - \mu^2)(w/t_w)^2] \quad (5.2.1-7)$$

$$\tau_{cr,g} = k_s D_x^{0.25} D_y^{0.75} / (t_w h_w^2) \quad (5.2.1-8)$$

$$w = \max \{b, d/\cos \theta\}, D_x = qEt_w^3/12s, D_y = EI_{wy}/q$$

$$I_{wy} = 2bt_w (h_r/2)^2 + t_w h_r^3 / (6 \sin \theta) \quad (5.2.1-9)$$

式中, χ_c -----为考虑屈曲的承载力折减系数, 取 $\chi_{c,l}$ 、 $\chi_{c,g}$ 的较小值:

k_s -----为屈曲系数, 局部屈曲可取为 5.34, 整体屈曲可取为 31.6,

$\tau_{cr,l}$ 和 $\tau_{cr,g}$ -----分别为波纹腹板局部屈曲和整体屈曲的弹性极限承载力。

5.2.2 波纹腹板钢的弯曲承载力应满足下列要求:

1 在绕强轴的弯矩作用下, 构件截面强度按下列规定计算:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \leq f \quad (5.2.2-1)$$

对于双向受弯构件, 其强度计算公式为:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (5.2.2-2)$$

式中 M_x 、 M_y ——同一截面绕 x 轴和 y 轴的弯矩;

γ_x 、 γ_y ——截面绕强轴和弱轴的塑性发展系数, 对 H 型截面分别取为 1.0、1.2, 对箱形截面,

分别取 1.0, 对需要计算疲劳的梁, γ_y 宜取 1.0;

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

f ——钢材抗弯强度设计值。

2 在最大刚度主平面内受弯的构件, 其整体稳定性应按下列式计算:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f \quad (5.2.2-3)$$

当截面上下翼缘不对称时, 整体稳定系数可按下列式计算:

$$\varphi_b = \frac{4320 A_f h \beta_b}{\lambda_y^2 W_x} \left[\eta_b + \sqrt{\eta_b^2 + \frac{4 I_w}{h^2 I_y} \left(1 + \frac{l_1^2 I_t}{25.7 I_w} \right)} \right] \frac{235}{f_y} \quad (5.2.2-4)$$

当截面上下翼缘对称时, 可以按照下面的简化公式计算:

$$\varphi_b = \frac{2752.5 \beta_b}{h l_1} \sqrt{0.064 \frac{b_f}{t_f} I_t + 1.64 \frac{b_f}{t_f} \frac{I_w}{l_1^2}} \cdot \frac{235}{f_y} \quad (5.2.2-5)$$

式中 M_x ——绕强轴作用的最大弯矩;

W_x ——按受压纤维确定的梁毛截面模量, 忽略腹板贡献;

φ_b ——梁的整体稳定系数;

β_b ——梁整体稳定的等效临界弯矩系数, 按表 5.2.2 采用;

λ_y ——构件绕弱轴的长细比； $\lambda_y = l_1/i_y$

i_y ——截面绕弱轴的回转半径；

I_y ——截面对 y 轴的惯性矩，忽略腹板贡献；

h ——梁截面高度；

I_t ——截面的抗扭惯性矩， $I_t = \frac{b_1 t_1^3 + b_2 t_2^3 + h_w t_w^3}{3}$ ； b_1, t_1, b_2, t_2 分别为上下翼缘的宽度和厚度；

I_w ——截面的翘曲常数，当上下翼缘不对称时， $I_w = \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} h^2 + \frac{t_w h^3 h_r^2}{12} (3\alpha_b^2 - 3\alpha_b + 1)$ ； 当

上下翼缘对称时， $I_w = \frac{h^2 t_f b_f^3}{24} + \frac{t_w h^3 h_r^2}{48}$ ；

η_b ——截面不对称影响系数；对上下翼缘相同的截面， $\eta_b = 0$ ；对加强受压翼缘的截面：

$\eta_b = 0.8(2\alpha_b - 1)$ ；加强受拉翼缘： $\eta_b = 2\alpha_b - 1$ ， $\alpha_b = I_1/(I_1 + I_2)$ ， I_1 和 I_2 分别是受压翼缘和受拉翼缘对 y 轴的惯性矩；

l_1 ——受压翼缘的自由长度。

当按上式计算得到的 ϕ_b 大于 0.45 时，应用下式计算的 ϕ_b' 代替 ϕ_b 值：

$$\phi_b' = 1.05 - \frac{0.29}{\phi_b} \leq 1.0 \quad (5.2.2-6)$$

表 5.2.2 等效临界弯矩系数 β_b

项次	侧向支承	荷载		$\xi = \frac{l_1 t_1}{b_1 h}$	
				$\xi \leq 2.0$	$\xi > 2.0$
1	跨中无侧向支承	均布荷载作用在	上翼缘	0.69+0.13ξ	0.95
2			下翼缘	1.73-0.20ξ	1.33
3		集中荷载作用在	上翼缘	0.73+0.18ξ	1.09
4			下翼缘	2.23-0.28ξ	1.67
5	跨度中点有一个侧向支承点	均布荷载作用在	上翼缘	1.15	
6			下翼缘	1.40	
7		集中荷载作用在截面高度上任何位置	1.75		
8	跨中有不少于两个等距离侧	任意荷载作用在	上翼缘	1.2	
9			下翼缘	1.4	

	向支承点		
10	梁端有弯矩，但跨中无荷载作用		$1.75-1.05 \frac{M_2}{M_1} + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3$

注：1 表中， $\xi = l_1 t_1 / b_1 h$ ， b_1 为受压翼缘的宽度， l_1 为受压翼缘的自由长度。

2 M_1 和 M_2 为梁的端弯矩，使梁产生同向曲率时， M_1 和 M_2 取同号，产生反向曲率时，取异号， $|M_1| \geq |M_2|$ 。

3 表中项次3、4和7的集中荷载是指一个或少数几个集中荷载位于跨中附件的情况，对于其他情况的集中荷载，应按表中项次1、2、5、6内的数值采用。

4 表中项次8、9的 β_b ，当集中荷载作用在侧向支承点处时，取 $\beta_b = 1.20$ 。

5 荷载作用在上翼缘系指荷载作用点在翼缘表面，方向指向截面形心；荷载作用在下翼缘，系指荷载作用点在翼缘表面，方向背向截面形心。

5.2.3 当满足下列条件之一时可以不计算梁的整体稳定：

1 有铺板(各种钢筋混凝土板和钢板)密铺在梁的受压翼缘并与其牢固相连、能阻止梁受压翼缘的侧向位移时。

2 波纹腹板钢筒支梁受压翼缘的自由长度 l_1 与其宽度 b_1 之比不超过表5.3.3所规定的数值时。

表 5.3.3 波纹腹板钢筒支梁不需计算整体稳定性的最大 l_1/b_1 值

钢号	跨中无侧向支承点的梁		跨中有侧向支撑点的梁，不论荷载作用在何处
	荷载作用在上翼缘	荷载作用在下翼缘	
Q235	13.0	20.0	16.0
Q345	10.5	16.5	13.0
Q390	10.0	15.5	12.5
Q420	9.5	15.0	12.0

5.2.4 当波纹腹板钢上翼缘受有沿腹板平面作用的集中荷载（图5.3.4），且该荷载处又未设置加劲肋时，腹板计算高度上边缘的局部承压强度应按式验算：

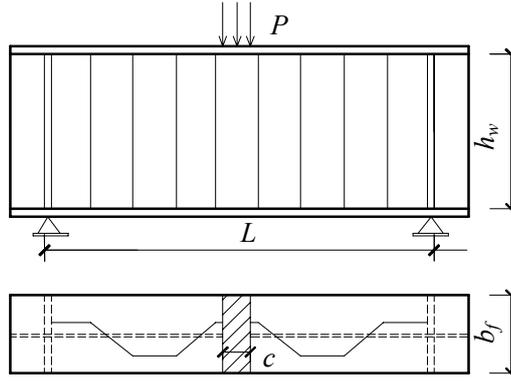


图 5.3.4 局部承压试验简图

1 当荷载有效分布宽度 c_0 小于腹板波纹的波长 λ 时:

$$P_u = P_f + P_w \quad (5.2.4-1)$$

$$c_0 = c + 5h_y + 2h_R \quad (5.2.4-2)$$

$$P_w = (E f_w)^{0.5} t_w^2 \quad (5.2.4-3)$$

$$P_f = 4M_{pf} / [a - (c/4)] \quad (5.2.4-4)$$

$$M_{pf} = b_f f_f t_f^2 / 4 \quad (5.2.4-5)$$

$$a = \left[(f_f b_f t_f^2) / (2 f_w t_w) \right]^{0.5} + c/4 \geq c/2 \quad (5.2.4-6)$$

式中, P_u ——波纹腹板钢局部承压极限承载力;

c_0 ——集中荷载在腹板计算高度边缘的假定分布长度;

P_w ——腹板承载力;

P_f ——翼缘承载力;

M_{pf} ——翼缘的塑性抗弯承载力;

b_f ——翼缘宽度;

f_f ——翼缘材料的设计强度值;

f_w ——腹板材料的设计强度值;

t_f ——翼缘厚度;

c ——集中荷载沿梁跨度方向的支承长度;

h_y ——自梁顶置腹板计算高度上边缘的距离;

h_R ——轨道的高度;

a ——为负弯矩塑性铰间距.

2 当荷载假定分布宽度 c_0 大于腹板波纹的波长 λ 时:

$$P_u = \gamma t_f t_w f_w \quad (5.2.4-7)$$

式中, $\gamma = 15.6\gamma_a\gamma_c$, γ_a 和 γ_c 按下式取值:

$$\gamma_a = \begin{cases} (1+\cos\theta)/(2\cos\theta) & t_f/t_w \geq 3.82 \\ 1 & t_f/t_w < 3.82 \end{cases} \quad (5.2.4-8)$$

$$\gamma_c = (1+c/240) \quad (5.2.4-9)$$

5.2.5 波纹腹板受弯构件腹板的波形应满足下列构造要求:

$$h_r=30\sim 100\text{mm}, b \cdot \cos\theta/d=1\sim 1.5, \theta=45\sim 60^\circ, s/\lambda=1.15\sim 1.4, h_w/t_w \leq 600.$$

常见波纹腹板波形见本规程附录 A。

5.3 拉弯和压弯构件

5.3.1 波纹腹板拉弯和压弯构件的强度应按下列公式验算:

$$\frac{N}{A_{nf}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (5.3.1)$$

式中, γ_x 、 γ_y ——截面绕强轴和弱轴的塑性发展系数, 可以分别取为 1.0 和 1.2;

W_{nx} 、 W_{ny} ——对 x 轴和 y 轴的净截面抵抗矩。

5.3.2 等截面波纹腹板压弯构件, 弯矩作用平面内的整体稳定性应按下列公式验算:

$$\frac{N}{\varphi_x A_f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N'_{Ex}} \right)} \leq f \quad (5.3.2)$$

式中 N ——所计算杆件段内的轴线压力;

N'_{Ex} ——参数, $N'_{Ex} = \pi^2 EA_f / (1.1\lambda_{ox}^2)$;

φ_x ——弯矩作用平面内轴线受压构件的整体稳定系数, 应按照换算长细比确定;

W_{1x} ——在弯矩作用平面内对受压纤维的毛截面模量, 忽略腹板贡献;

β_{mx} ——弯矩等效系数, 应按下列规定采用:

1 框架柱和两端支承的构件:

- 1) 无横向荷载作用时: $\beta_{mx} = 0.65 + 0.35 M_2 / M_1$, M_1 和 M_2 为端弯矩, 使构件产生同向曲率(无反弯点)时取同号; 使构件产生反向曲率(有反弯点)时取异号, $|M_1| \geq |M_2|$;
- 2) 有端弯矩和横向荷载同时作用时, 使构件产生同向曲率时, $\beta_{mx} = 1.0$; 使构件产生反向曲率时, $\beta_{mx} = 0.85$;
- 3) 无端弯矩但有横向荷载作用时, $\beta_{mx} = 1.0$ 。

2 悬臂构件和分析内力未考虑二阶效应的无支撑纯框架和弱支撑框架柱, $\beta_{mx}=1.0$ 。

5.3.3 等截面波纹腹板压弯构件弯矩作用平面外的整体稳定应按下列公式验算:

$$\frac{N}{\varphi_y A_f} + \eta \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_b W_{1x}} \leq f \quad (5.3.3)$$

式中, φ_y ——弯矩作用平面外的轴心受压构件稳定系数, 按照 5.2.2 条确定;

φ_b ——均匀弯曲的受弯构件整体稳定系数, 按照 5.3.2 条确定;

M_x ——所计算杆件段范围内最大弯矩;

η ——截面影响系数, 闭口截面 $\eta=0.7$, 其他截面 $\eta=1.0$;

β_{tx} ——等效弯矩系数, 应按下列规定采用:

1 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的荷载和内力情况确定:

- 1) 所考虑构件段内无横向荷载作用时: $\beta_{tx} = 0.65 + 0.35 M_2 / M_1$, M_1 和 M_2 为弯矩作用平面内端弯矩, 使构件产生同向曲率(无反弯点)时取同号; 使构件产生反向曲率(有反弯点)时取异号, $|M_1| \geq |M_2|$;
- 2) 所考虑构件段内有端弯矩和横向荷载同时作用时: 使构件产生同向曲率时, $\beta_{tx}=1.0$; 使构件产生反向曲率时, $\beta_{tx}=0.85$;
- 3) 所考虑构件段内无端弯矩但有横向荷载作用时, $\beta_{tx}=1.0$ 。

2 弯矩作用平面外为悬臂的构件, $\beta_{tx}=1.0$ 。

5.3.4 弯矩作用在两个主平面内的等截面波纹腹板压弯构件, 其稳定性应按下列公式验算:

$$\frac{N}{\varphi_x A_f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N'_{Ex}} \right)} + \eta \frac{\beta_{ty} M_y}{\varphi_{by} W_y} \leq f \quad (5.3.4-1)$$

$$\frac{N}{\varphi_y A_f} + \eta \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_{bx} W_x} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_y \left(1 - \varphi_y \frac{N}{N'_{Ey}} \right)} \leq f \quad (5.3.4-2)$$

式中 φ_x 、 φ_y ——对强轴 (x-x) 和弱轴 (y-y) 的轴心受压构件整体稳定系数, 按 5.2.1 条确定;

φ_{bx} 、 φ_{by} ——均匀弯曲的受弯构件整体稳定性系数, 按 5.3.2 条计算, 其中对于 H 型截面, φ_{by}

取 1.0; 对闭口截面 $\varphi_{bx} = \varphi_{by}=1.0$;

M_x 、 M_y ——所计算构件段范围内对强轴和弱轴的最大弯矩;

N'_{Ex} 、 N'_{Ey} ——参数, $N'_{Ex} = \pi^2 EA_f / (1.1\lambda_{ox}^2)$, $N'_{Ey} = \pi^2 EA_f / (1.1\lambda_y^2)$;

W_x 、 W_y ——对强轴和弱轴的毛截面模量, 忽略腹板部分;

β_{mx} 、 β_{my} ——等效弯矩系数，应按 5.4.2 条确定；

β_{lx} 、 β_{ly} ——等效弯矩系数，应按 5.4.3 条确定。

5.3.5 波纹腹板楔形压弯构件弯矩作用平面内的整体稳定性应按下式验算：

$$\frac{N_0}{\varphi_{xy}A_{f0}} + \frac{\beta_{mx}M_1}{\left[1 - \frac{N_0}{N'_{Ex0}}\varphi_{xy}\right]W_1} \leq f \quad (5.3.5-1)$$

$$N'_{Ex0} = \pi^2 EA_{f0} / 1.1\lambda_{ox}^2 \quad (5.3.5-2)$$

式中， N_0 ——小头的轴向压力设计值；

M_1 ——大头的弯矩设计值；

A_{f0} ——小头的翼缘截面面积；

W_1 ——大头截面最大受压纤维的截面模量，忽略腹板贡献；

φ_{xy} ——杆件轴心受压稳定系数，计算长细比时取小头的回转半径，并忽略腹板的贡献；

β_{mx} ——等效弯矩系数，有侧移构件的等效弯矩系数取 1.0；

N'_{Ex0} ——参数，计算 λ_{ox} 时以小头为准，且忽略腹板贡献；计算长度按照《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS102 中的 6.1.3 条第 2 款确定。

5.3.6 波纹腹板楔形构件压弯弯矩作用平面外的整体稳定性应按下式验算：

$$\frac{N_0}{\varphi_y A_{f0}} + \frac{\beta_t M_1}{\varphi_{by} W_1} \leq f \quad (5.3.6-1)$$

式中， φ_y ——波纹腹板轴心受压构件弯矩作用平面外稳定系数，以小头截面为准，按本规程第 5.2.2 条确定；

φ_{by} ——均匀受弯波纹腹板楔形构件的整体稳定系数；

N_0 ——所计算构件段内小头截面的轴向压力设计值；

M_1 ——所计算构件段内大头截面的弯矩设计值；

β_t ——等效弯矩系数，对两端弯曲应力基本相等的区段， $\beta_t=1.0$ ，对一端弯矩为零的区段：

$$\beta_t = 1 - N/N'_{Ex0} + 0.75(N/N'_{Ex0})^2 \quad (5.3.6-2)$$

均匀受弯上下翼缘对称的波纹腹板楔形构件的整体稳定系数 φ_{by} ，可按下列式计算：

$$\varphi_{by} = \frac{4320 A_{f0} h_0}{\lambda_y^2 W_{x0}} \left[\sqrt{\left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)^4 + \left(\frac{\lambda_{y0} t_0}{4.4 h_0}\right)^2} \right] \frac{235}{f_y} \quad (5.3.6-3)$$

$$\lambda_{y0} = \mu_s l / i_{y0} \quad (5.3.6-4)$$

$$\mu_s = 1 + 0.023 \gamma \sqrt{l h_0 / A_{cf}} \quad (5.3.6-5)$$

$$\mu_w = 1 + 0.00385\gamma\sqrt{l/i_{y0}} \quad (5.3.6-6)$$

$$\gamma = d_1/d_0 - 1 \quad (5.3.6-7)$$

式中, A_{t0} 、 h_0 、 W_{x0} 、 t_0 ——分别为构件小头的翼缘截面面积、截面高度、截面模量、受压翼缘截面厚度;

A_{cf} ——受压翼缘截面面积;

i_{y0} ——小头截面受压翼缘绕 y 轴的回转半径;

l ——楔形构件计算区段内的平面外计算长度, 去支撑点之间的距离;

γ ——楔形构件的楔率;

h_0 、 h_1 ——分别为小头、大头截面高度。

当按上式得到的 ϕ_{by} 大于 0.45 时, 应用下式计算的 ϕ'_{by} 代替 ϕ_{by} 值:

$$\phi'_{by} = 1.05 - \frac{0.29}{\phi_{by}} \leq 1.0 \quad (5.3.6-8)$$

5.4 受压翼缘的局部稳定

5.4.1 波纹腹板钢梁轴压、受弯和压弯构件中受压翼缘的局部稳定, 应通过板件的宽厚比进行控制。

受压翼缘自由外伸宽度 B 与厚度 t 的比值应满足下列要求:

$$\frac{B}{t} \leq r_f \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.4.1-1)$$

$$B = \frac{b_f - h_t/2}{2} \quad (5.4.1-2)$$

式中, r_f -----对于 8 度和 9 度地震设防地区, 分别取 12 和 11; 对于其他情况, 取 15。

5.5 构件的变形计算

5.5.1 波纹腹板简支梁挠度可按下列公式计算:

1 跨中受集中荷载作用时

$$\Delta = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4G'A_w} \quad (5.5.1-1)$$

$$G' = G \cdot \lambda/s \quad (5.5.1-2)$$

2 受均布荷载作用时

$$\Delta = \frac{5ql^4}{384EI} + \frac{ql^2}{8G'A_w} \quad (5.5.1-3)$$

式中 P ——波纹腹板钢上翼缘作用的集中荷载;

q ——横向均布荷载；

l ——梁的跨度。

5.5.2 两端固支的梁、连续梁及框架梁的挠度可按下列公式计算：

1 跨中受集中荷载作用时：

$$\Delta = \frac{Pl^3}{192EI} + \frac{Pl}{4G'A_w} \quad (5.5.2-1)$$

2 均布荷载作用时：

$$\Delta = \frac{ql^4}{384EI} + \frac{ql^2}{8G'A_w} \quad (5.5.2-2)$$

5.5.3 采用有限元方法计算波纹腹板钢结构的变形时，波纹腹板构件的单元刚度矩阵需要考虑构件剪切变形的影响，其单元刚度矩阵形式见附录 B。

5.5.4 波纹腹板钢结构的变形应符合《钢结构设计规范》GB 50017 中附录 A 的规定。

5.5.5 波纹腹板受压构件的容许长细比不宜超过表 5.6.5 的容许值：

表 5.6.5 波纹腹板受压构件容许长细比

构件类型	长细比限值
主要构件	180
其他构件、支撑	220

5.5.6 波纹腹板受拉构件的容许长细比不宜超过表 5.5.6 的容许值：

表 5.6.6 波纹腹板受拉构件容许长细比

构件类型	长细比限值
直接承受动力荷载的结构	250
间接承受动力荷载的结构 或承受静力荷载的结构	350

5.6 疲劳计算

5.6.1 直接承受动力荷载重复作用的波纹腹板钢构件其翼缘与腹板焊缝处，应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 次时，应进行疲劳计算。

5.6.2 波纹腹板钢构件疲劳计算宜采用容许应力幅法，应力变化按弹性状态计算，容许应力幅按构件类别及应力循环次数确定。在应力循环中不出现拉应力的部位可不计算疲劳。

5.6.3 对受常幅应力变化的波纹腹板钢构件，应按下列式进行疲劳验算：

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (5.6.3-1)$$

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{C}{n}\right)^{1/\beta} \quad (5.7.3-2)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——构件翼缘与腹板焊接部位应力幅，取为 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ；

σ_{\max} ——计算部位每次应力循环中的最大拉应力（取正值）；

σ_{\min} ——计算部位每次应力循环中的最小拉应力（取正值）或压应力（取负值）；

$[\Delta\sigma]$ ——常幅疲劳的容许应力幅（N/mm²），应按下式计算：

n ——应力循环次数；

C 、 β ——参数，根据现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 中表 6.2.1 采用，构件类别宜选为 3 类。

5.6.4 重级工作制波纹腹板 H 型钢吊车梁的疲劳可作为常幅疲劳，按下式计算：

$$\alpha_f \cdot \Delta\sigma \leq [\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} \quad (5.6.4)$$

式中 α_f ——欠载效应的等效系数，对重级工作制硬钩吊车取为 1.0，对重级工作制软钩吊车取为 0.8；

$[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ ——循环次数 n 为 2×10^6 次的容许应力幅，按《钢结构设计规范》GB50017 中表 6.2.3-2 采用，构件类别宜选为 3 类。

5.7 抗震设计

5.7.1 波纹腹板钢结构可用于非地震区以及设防烈度为 6 度的地震区。

5.7.2 对于设防烈度为 7 度及以上的地震区，如结构中的构件满足下列条件，则该构件可采用波纹腹板钢构件：

1 构件含地震作用的轴向力设计值与构件全截面面积和钢材抗拉强度设计值乘积的比值不超过 0.4；

2 构件在重力荷载代表值和中震作用标准值的组合效应下，构件截面不屈服，且构件的承载力满足设计要求；

3 结构的安全等级为二级或三级。

6 波纹腹板 H 型钢组合梁

6.1 一般规定

6.1.1 本章规定适用于不直接承受动力荷载由混凝土翼板与波纹腹板 H 型钢梁通过抗剪连接件组成的组合梁。

6.1.2 波纹腹板 H 型钢组合梁混凝土翼板有效宽度 b_e 可按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中的计算方法确定。

6.1.3 组合梁的挠度应按弹性方法进行计算，并按现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 中的规定考虑混凝土翼板和钢梁之间的滑移效应对组合梁刚度的影响。

6.1.4 组合梁施工时，若钢梁下无临时支承，则混凝土硬结前的材料重量和施工荷载应由波纹腹板钢梁承受。此时钢梁应按本规程第 5 章的规定进行施工阶段的强度、稳定和变形验算。

6.2 组合梁设计

6.2.1 完全抗剪连接组合梁正弯矩作用区段的抗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 6.2.1-1），即 $A_f f \leq b_e h_c f_c$ 时：

$$M \leq b_e x f_c y \quad (6.2.1-1)$$

$$x = A_f f / b_e f_c \quad (6.2.1-2)$$

式中 M ——正弯矩设计值；

A_f ——钢梁翼缘毛截面面积。

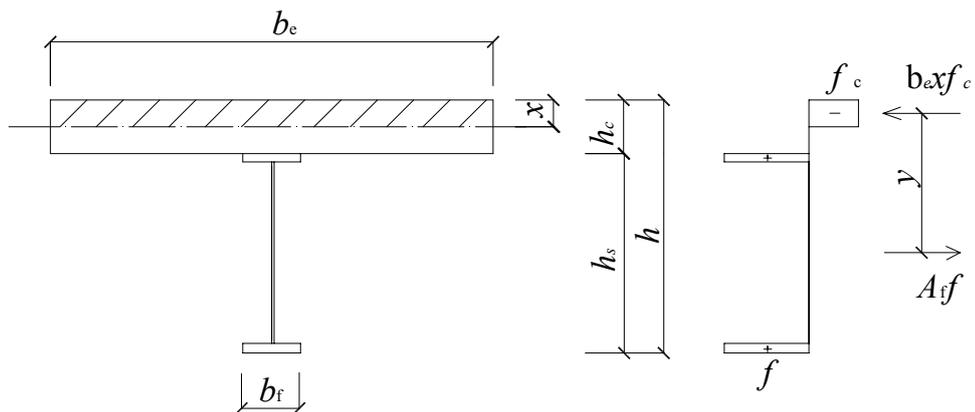


图 6.2.1-1 塑性中和轴位于混凝土翼板内时组合梁截面及应力图形

2 当塑性中和轴位于钢梁上翼缘内（图 6.2.1-2），即 $A_f f > b_e h_c f_c$ 时，

$$M \leq A_{bf} f h_s + b_e f_c \frac{h_c^2}{2} \quad (6.2.1-3)$$

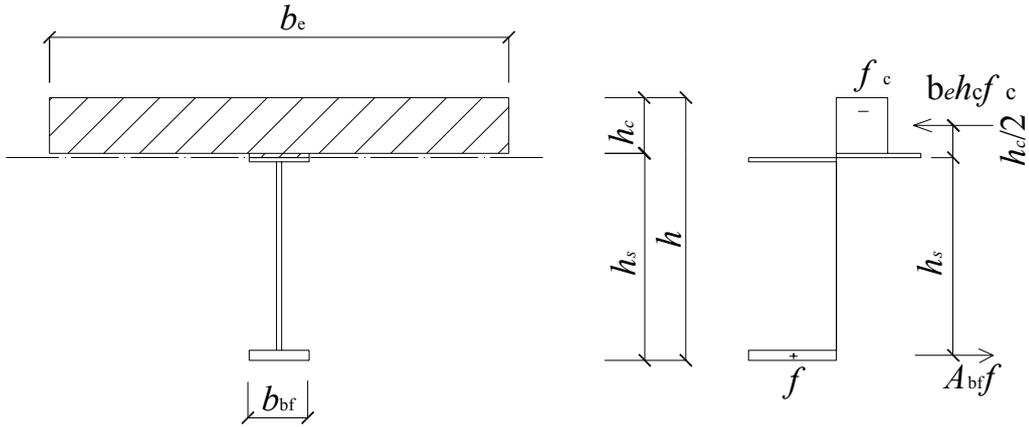


图 6.2.1-2 塑性中和轴位于钢梁上翼缘内时组合梁截面及应力图形

3 塑性中和轴位于钢梁腹板内 (图 6.2.1-3)

$$M \leq A_{tf} f h_s + b_e h_c f_c \left(\frac{h_c}{2} + h_s \right) \quad (6.2.1-4)$$

式中 A_{tf} ——钢梁上翼缘面积

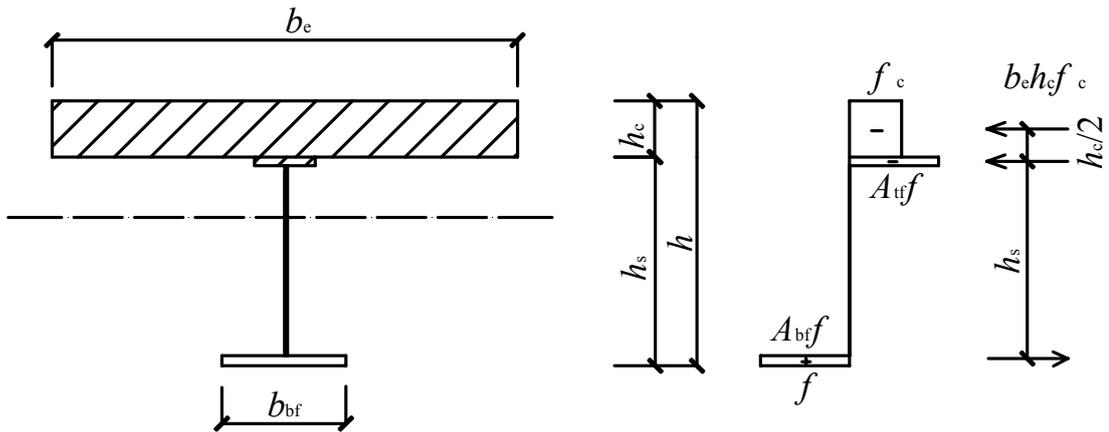


图 6.2.1-3 塑性中和轴位于钢梁腹板内时组合梁截面及应力图形

6.2.2 完全抗剪连接波纹腹板 H 型钢组合梁的负弯矩作用区段，抗弯承载力应按下列规定计算：

1 当塑性中和轴在钢梁腹板内 (图 6.2.2-1)：

$$M' \leq A_{st} f_{st} (y_3 + h_s) + A_{tf} f h_s \quad (6.2.2-1)$$

式中， A_{st} ——负弯矩区混凝土翼板有效宽度范围内的纵向钢筋截面面积；

A_{tf} ——钢梁上翼缘的面积；

f_{st} ——钢筋抗拉强度设计值；

y_3 ——纵向钢筋截面形心至钢梁上翼缘形心的距离。

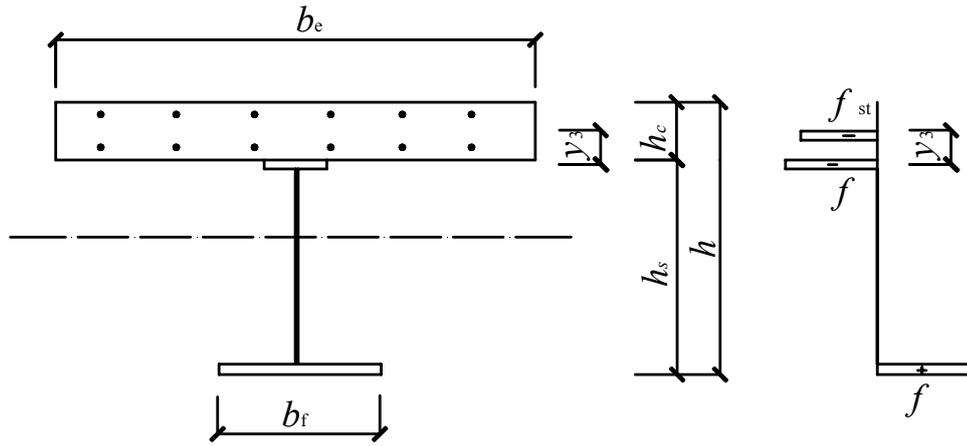


图 6.2.2-1 负弯矩作用时组合梁截面及应力图形（中和轴位于钢梁腹板）

2 塑性中和轴位于钢梁上翼缘内（图 6.2.2-2）

$$M' \leq A_{bf} f h_s + A_{st} f_{st} y_3 \quad (6.2.2-2)$$

式中， A_{bf} 为钢梁下翼缘的面积。

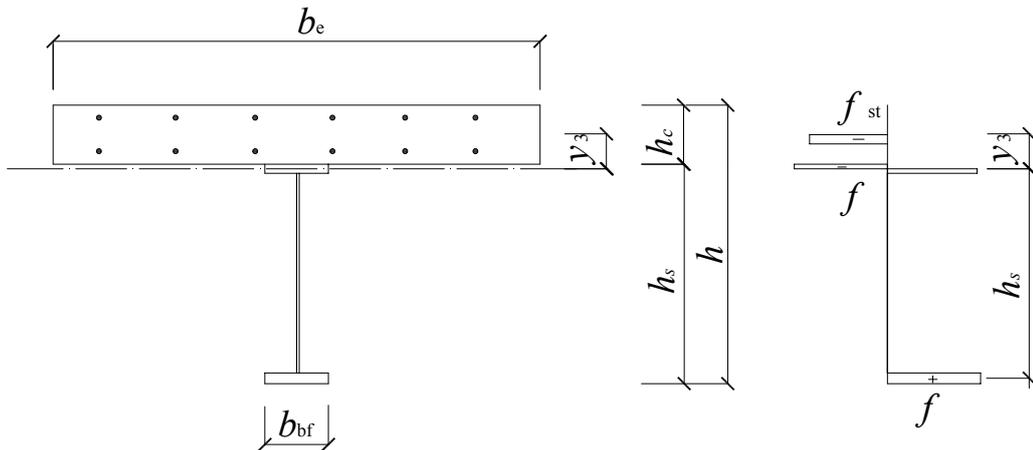


图 6.2.2-2 负弯矩作用时组合梁截面及应力图形（中和轴位于钢梁上翼缘）

6.2.3 组合梁的抗剪承载力应根据混凝土翼板的剪跨比采用下列公式计算：

1 当剪跨比 $\lambda_b = a/h_c > 8$ 时

$$V = h_w t_w f_w / \sqrt{3} \quad (6.2.4-1)$$

式中， h_w ——腹板高度；

t_w ——腹板厚度；

f_w ——腹板材料的屈服强度设计值；

a ——组合梁剪跨段长度；

h_c ——混凝土翼板的厚度。

2 当剪跨比 $\lambda_b \leq 8$ 时

$$V_u = \left[0.04646 + 0.16757 \exp\left(-\frac{\lambda_b^{1.514}}{9.66508}\right) \right] f_c b_e h_0 + h_w t_w f_w / \sqrt{3} \quad (6.2.4-2)$$

6.2.4 抗剪连接件的计算可以按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定进行。

6.3 挠度计算

6.3.1 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，取其中较大值作为设计依据。

6.3.2 计算波纹腹板 H 型钢组合梁的挠度时应考虑波纹腹板钢梁剪切变形的影响，即

$$\delta = \delta_b + \delta_s \quad (6.3.4)$$

式中 δ ——组合梁总挠度；

δ_b ——组合梁弯曲变形产生的挠度，由组合梁抗弯刚度计算；

δ_s ——组合梁剪切变形产生的挠度，由波纹腹板抗剪刚度计算。

6.3.3 波纹腹板 H 型钢组合梁的挠度限值可按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中附录 A 的相关规定确定。

7 连接节点

7.1 设计原则

7.1.1 波纹腹板钢结构的节点连接，可采用焊接、高强度螺栓连接和栓焊混合连接。

7.1.2 波纹腹板钢结构构件之间节点的连接可采用端板的连接方法，其中翼缘和端板之间采用等强的连接方法，腹板和端板之间应采用角对接组合焊缝或与腹板等强的角焊缝，端板之间采用高强螺栓连接。

7.1.3 焊缝的坡口形式和尺寸，应按现行国家标准《手工电弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》GB985和《埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》GB986的规定采用，或选用其他适用的规定。

7.1.4 焊缝熔敷金属应与母材强度相匹配。不同强度的钢材焊接时，焊接材料的强度应按强度较低的钢材采用。

7.1.5 节点连接强度应根据其所受的轴力、弯矩和剪力分别验算强度。

7.2 梁-梁连接

7.2.1 次梁-主梁节点宜采用简支连接（图 7.2.1），必要时也可采用刚接连接。

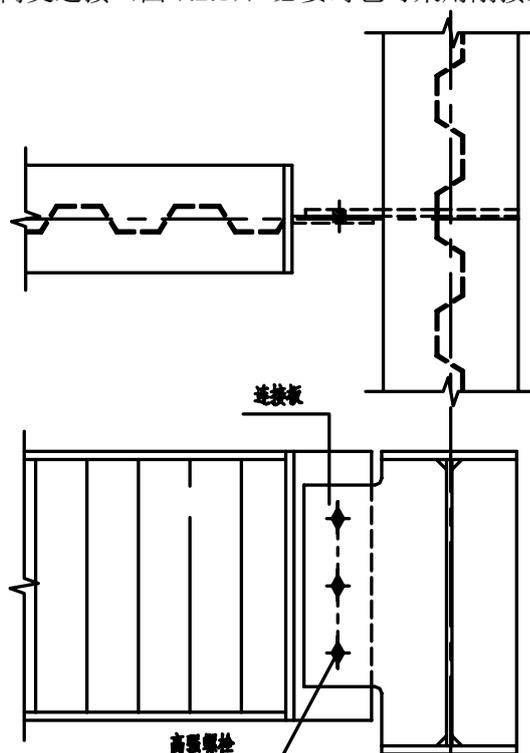


图 7.2.1 次梁-主梁节点

7.2.2 梁的拼接可采用如图 7.2.2-1 所示的端板连接的形式，翼缘和端板之间采用全熔透的对接焊缝，腹板和端板之间应采用角对接组合焊缝或与腹板等强的角焊缝，端板之间采用高强螺栓连接。

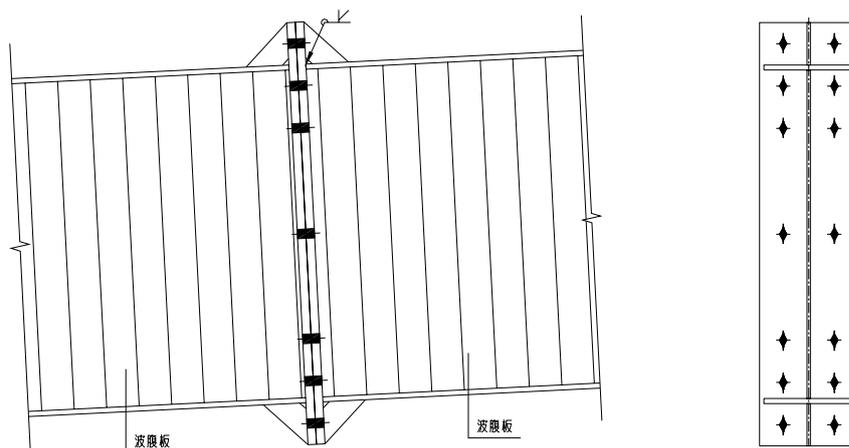


图 7.2.2-1 梁-梁拼接

屋脊节点梁的拼接宜采用图 7.2.2-2 的方式连接：

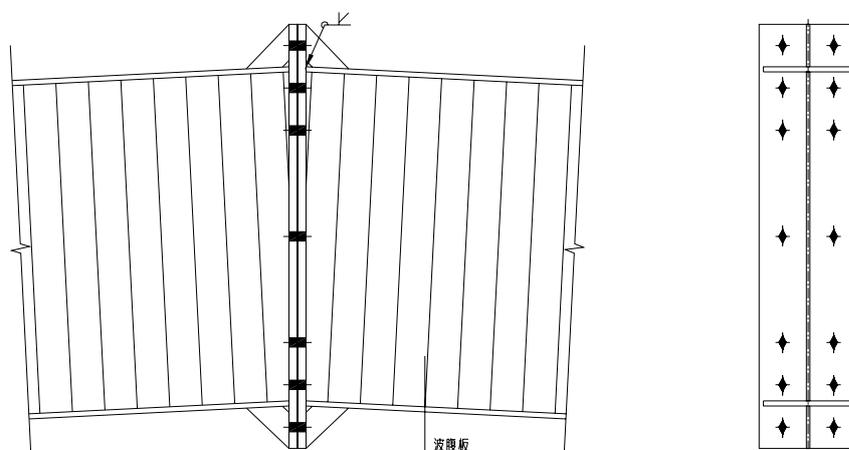


图 7.2.2-2 屋脊梁-梁拼接节点

7.3 梁-柱连接

7.3.1 框架梁与柱的连接宜采用柱贯通型。

7.3.2 梁-柱主轴之间的铰接可以在梁高度范围内设置梁、柱的竖向连接板，然后通过高强度螺栓连接（图 7.3.2）。

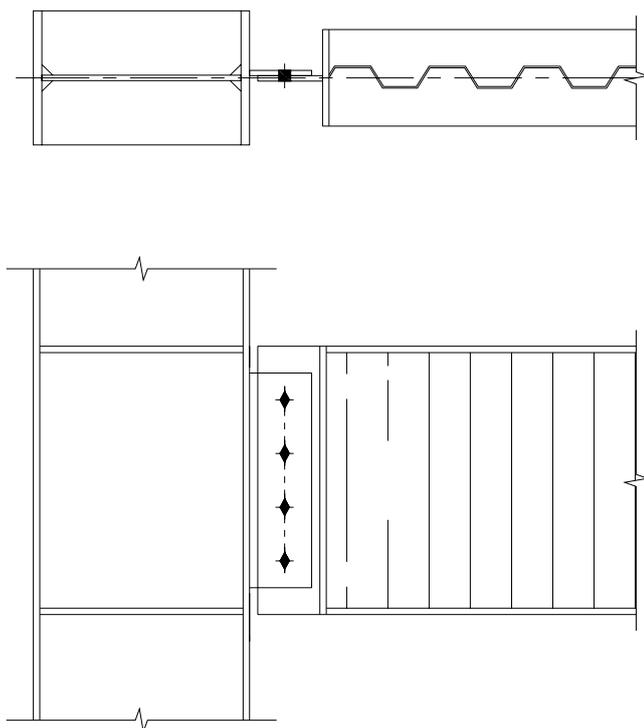


图 7.3.2 梁-柱铰接（强轴方向）

7.3.3 当梁端垂直于工字型柱腹板与柱铰接时，应在梁高度范围内设置柱的竖向连接板，梁连接板与柱连接板用高强度螺栓连接（图 7.3.3）。

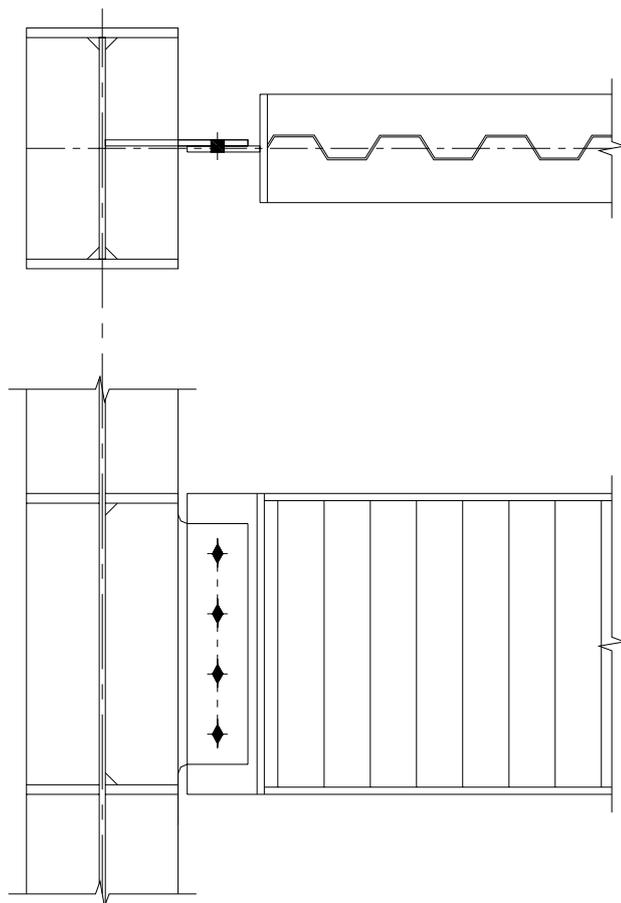


图 7.3.3 梁-柱铰接（弱轴方向）

7.3.4 在互相垂直的两个方向都与柱铰接连接的箱型截面柱（图 7.3.4）。

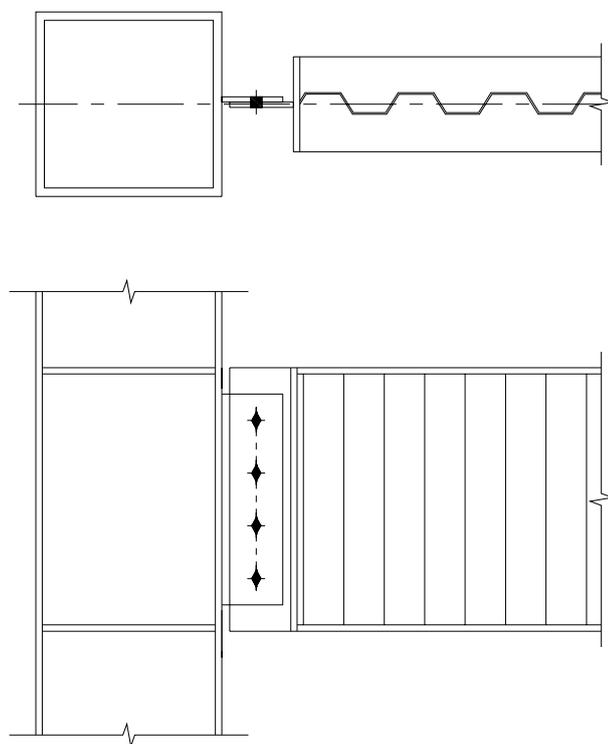


图 7.3.4 梁-箱型柱铰接连接

7.3.5 梁-柱刚性连接时，应按下列各项进行验算：

- 1) 梁与柱的连接在弯矩和剪力下的承载力；
- 2) 在梁上下翼缘标高处设置的柱水平加劲肋或隔板的厚度；
- 3) 节点域的抗剪强度。

7.3.6 当梁与柱翼缘刚性连接时，梁翼缘与柱采用全熔透的焊缝连接，梁腹板与柱宜采用摩擦型高强度螺栓连接（图 7.3.6）。

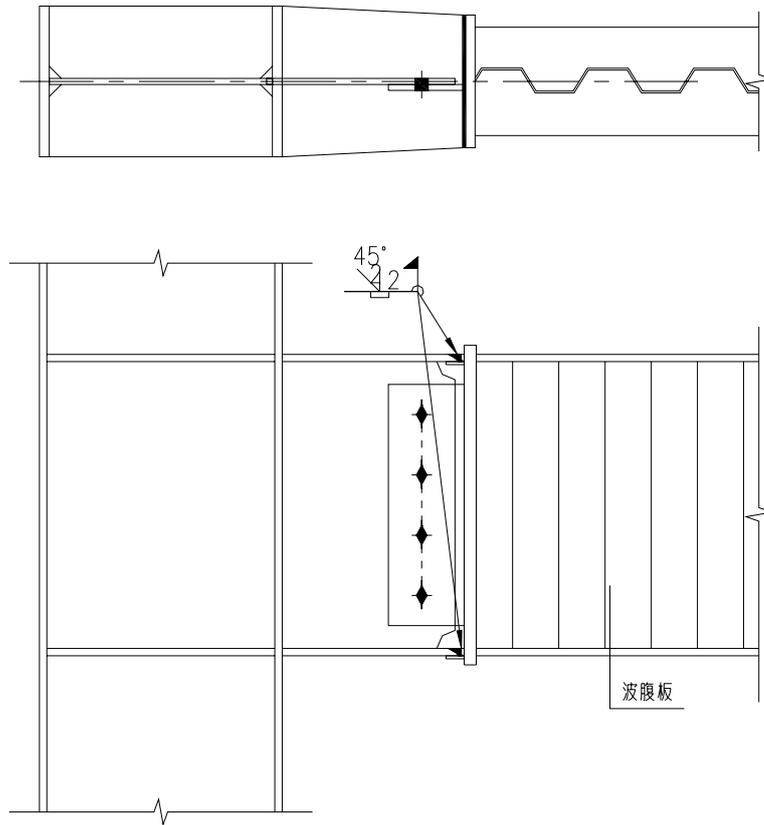


图 7.3.6 梁-柱刚接（强轴方向）

7.3.7 当梁端垂直于工字型柱腹板与柱刚接时，应在梁翼缘对应位置设置柱的横向加劲肋，在梁高度范围内设置柱的竖向连接板。梁柱的现场连接中，梁翼缘与柱横向加劲肋用全熔透的焊缝连接，应避免连接板件宽度的突变，腹板与柱连接板用摩擦型高强度螺栓连接（图 7.3.7）。

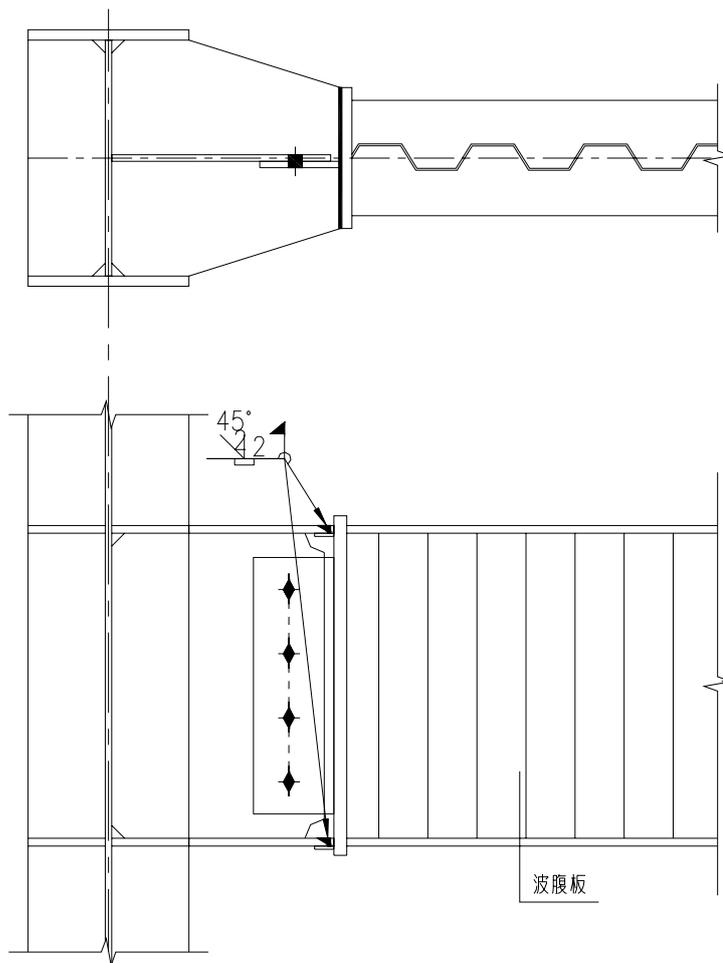


图 7.3.7 梁-柱刚接（弱轴方向）

7.3.8 在互相垂直的两个方向都与柱刚性连接的柱，宜采用箱型截面（图 7.3.8）。

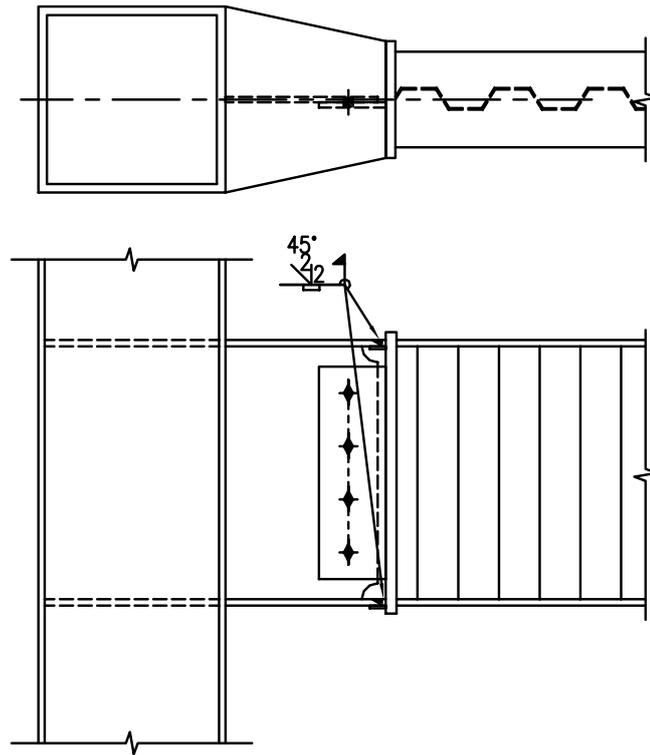


图 7.3.8 梁-箱型柱刚接连接

7.3.9 梁翼缘与柱焊接时，应全部采用全熔透坡口焊缝，并按规定设置衬板，翼缘坡口两侧设置引弧板。在梁腹板上下端应做扇形切角，半径宜取 35mm，扇形切角端部与梁翼缘连接处，应以半径=10mm 的圆弧过渡，衬板反面与柱翼缘相接处宜适当焊接（图 7.3.9）。

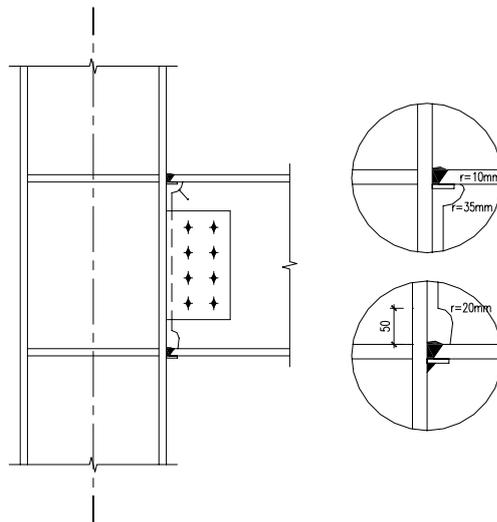


图 7.3.9 梁-柱刚接细部

7.3.10 梁与柱刚性连接时，应在梁翼缘的对应位置设置柱的水平加劲肋（或隔板）。对于抗震设防的结构，水平加劲肋应与梁翼缘等厚。对非抗震设防的结构，水平加劲肋应能传递梁翼缘的集中力，其厚度不得小于梁翼缘厚度的 1/2，并应符合板件宽厚比限值。水平加劲肋的中心线应与梁翼缘的中心线对准。

7.3.11 门式刚架中梁-柱节点连接宜采用图 7.3.11-1 或图 7.3.11-2 的形式：

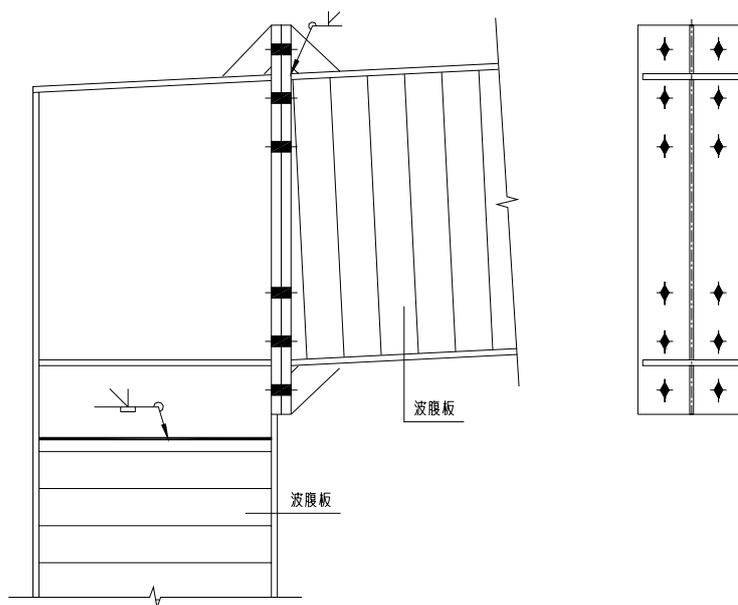


图 7.3.11-1 门式刚架梁-柱节点 1

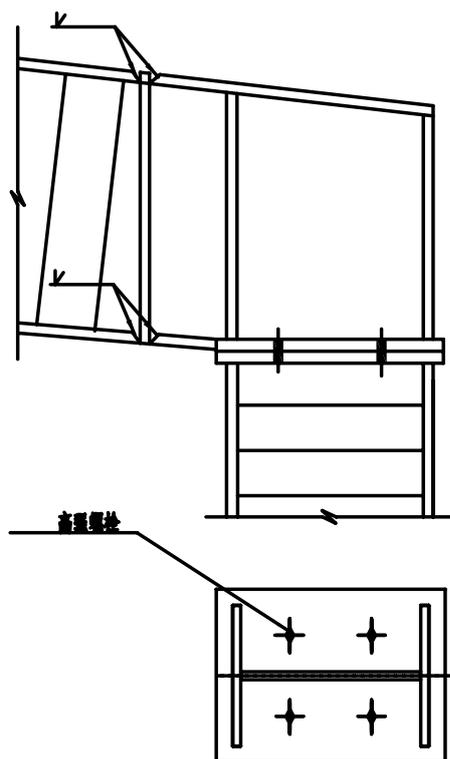


图 7.3.11-2 门式刚架梁-柱节点 2

7.4 吊车梁支座

7.4.1 波纹腹板吊车梁宜采用平板式支座和突缘式支座（图 7.4.1-1 和图 7.4.1-2）两种形式。

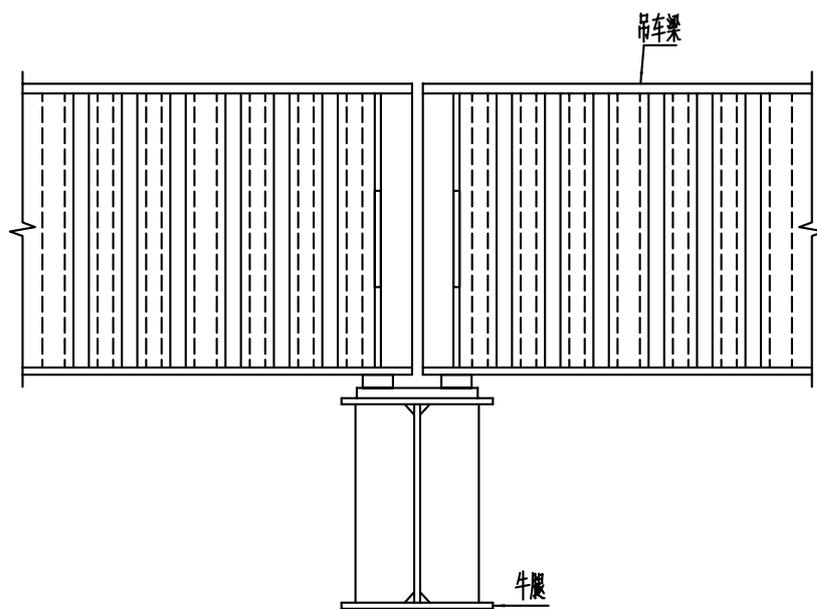


图 7.4.1-1 平板式支座

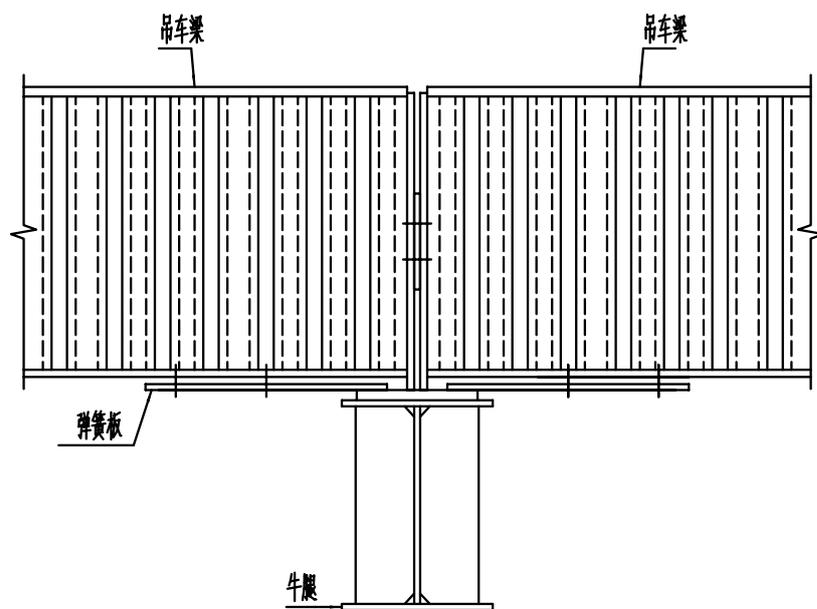


图 7.4.1-2 突缘式支座

8 制造、安装和防腐蚀

8.1 波纹腹板钢构件的制造

8.1.1 波纹腹板钢构件可由波折钢板构成的腹板及平钢板构成的翼缘焊接而成。截面高度不宜小于400mm，且不宜大于3000mm。其构造形式及截面尺寸见图8.1.1。

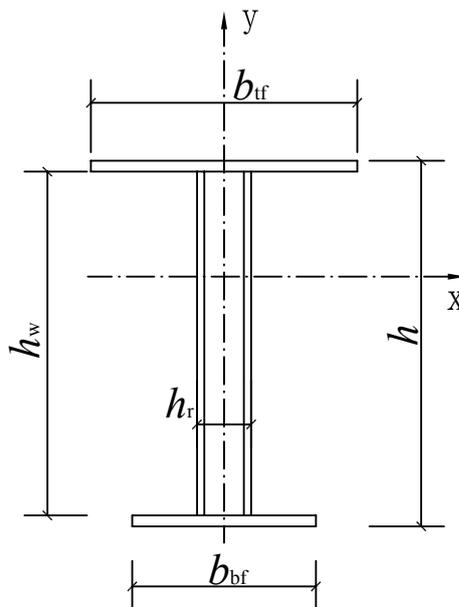


图 8.1.1 波纹腹板钢截面尺寸示意图

8.1.2 构件尺寸

构件应服从一定的建筑尺寸模数，且构件的主要部位的尺寸在下列范围：

1 腹板尺寸

高度：400~3000mm

厚度：2~6mm

2 翼缘尺寸

宽度：150~500 mm

厚度：5~40 mm

8.2 波纹腹板钢构件的防腐处理

8.2.1 波纹腹板钢构件必须采取有效的防腐蚀措施，构造上应考虑便于检查、清刷、油漆及避免积水，闭口截面构件沿全长和端部均应焊接封闭。

8.2.2 波纹腹板钢结构应根据其使用条件和所处环境，选择相应的表面处理方法和防腐措施。环境腐蚀性等级、防腐蚀涂层配套及维护年限按现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB50046 执行。

8.2.3 波纹腹板钢结构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》GB8923 的规定。

8.2.4 波纹腹板钢结构在使用期间应定期进行检查与维护。

8.2.5 波纹腹板钢结构重新涂装的质量应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB5020 的规定。

8.2.6 波纹腹板 H 型钢的腹板和翼缘通过角焊缝连接，在腹板未焊接的一侧，焊缝的焊喉部位需要增加一道防锈底漆。

8.3 波纹腹板钢构件的制造容许误差

8.3.1 制作波纹腹板钢构件的翼缘和腹板所采用钢板和钢带的厚度、宽度和长度的允许偏差及外观等均应符合国家标准《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 709 的相关规定。

8.3.2 波纹腹板钢构件中腹板波形尺寸的制造误差不能超过以下容许值：

波纹水平板带宽度	±2mm
波纹倾斜板带投影宽度	±2mm
波纹高度	±2mm
截面高度	+5mm
翼缘的平行	0.5%翼缘宽度
纵向误差	0mm; +5mm
腹板初始弯曲或凹陷	1%腹板高度

附录 A 推荐波纹腹板波形

下列波纹腹板波形经充分试验和理论分析，证明用于波纹腹板受弯构件，能保证腹板剪切屈曲不先于剪切屈服发生，具有较好的剪切屈服延性。

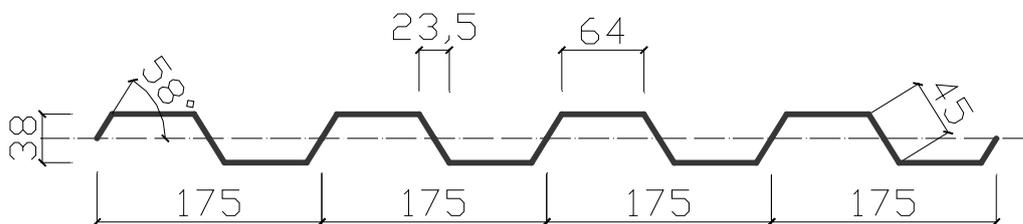


图 A-1 推荐波形 1 $s/\lambda=1.25$

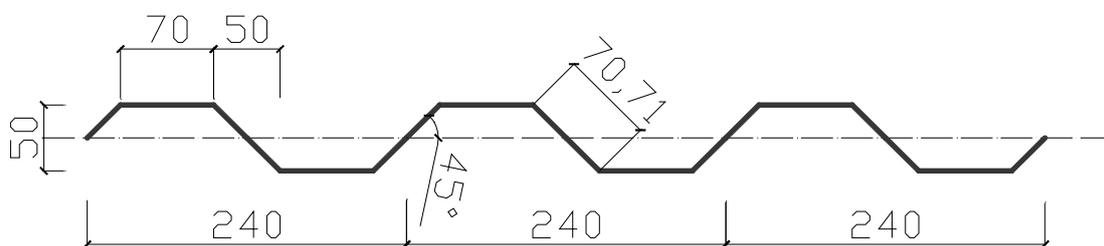
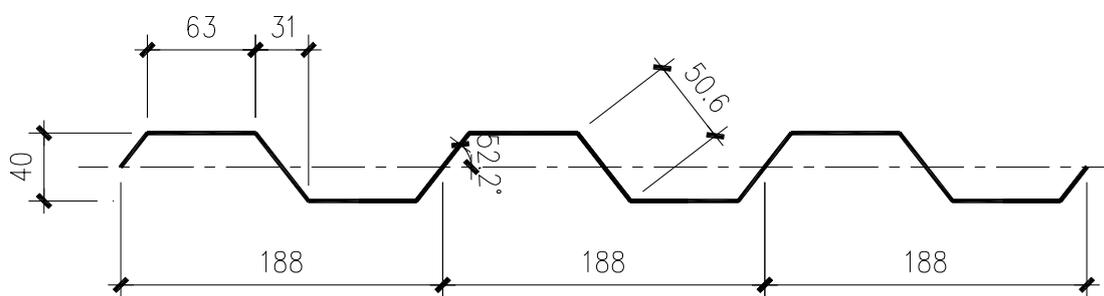


图 A-2 推荐波形 2 $s/\lambda=1.17$



欧本钢构推荐波形 $s/\lambda=1.21$

附录 B 波纹腹板 H 型钢单元刚度矩阵

$$\begin{bmatrix}
 \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI}{(1+\phi)l^3} & \frac{-6EI}{(1+\phi)l^2} & 0 & \frac{-12EI}{(1+\phi)l^3} & \frac{-6EI}{(1+\phi)l^2} \\
 0 & \frac{-6EI}{(1+\phi)l^2} & \frac{(4+\phi)EI}{(1+\phi)l} & 0 & \frac{6EI}{(1+\phi)l^2} & \frac{(2-\phi)EI}{(1+\phi)l} \\
 -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{-12EI}{(1+\phi)l^3} & \frac{6EI}{(1+\phi)l^2} & 0 & \frac{12EI}{(1+\phi)l^3} & \frac{6EI}{(1+\phi)l^2} \\
 0 & \frac{-6EI}{(1+\phi)l^2} & \frac{(2-\phi)EI}{(1+\phi)l} & 0 & \frac{6EI}{(1+\phi)l^2} & \frac{(4+\phi)EI}{(1+\phi)l}
 \end{bmatrix}$$

式中 A ——截面面积，取 $A=2A_f$ ，只考虑翼缘部分面积；

I ——截面对强轴的惯性矩，忽略腹板部分的贡献；

l ——构件长度；

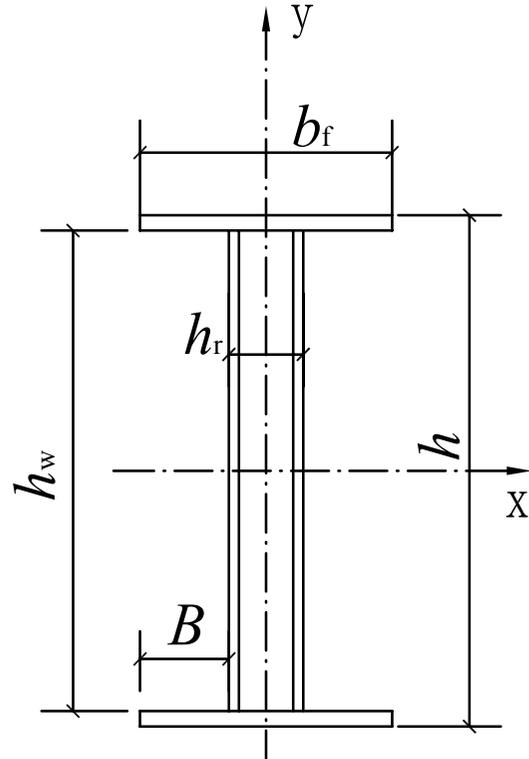
E ——材料的弹性模量；

ϕ ——参数，取 $\phi = 12EI / (G' A_w l^2)$ ， $G' = G \cdot \lambda / s$ ；

A_w ——腹板截面面积。

附录 C 波纹腹板 H 型钢表

波纹腹板 H 型钢参数见表 C 和图 C。



附表 C 波纹腹板 H 型钢表

CW-500			CWA	$t_w=$	2.0	mm	$A_q=$	8.0	cm^2			
			CWB	$t_w=$	3.0	mm	$A_q=$	12.0	cm^2			
			CWC	$t_w=$	4.0	mm	$A_q=$	16.0	cm^2			
几何尺寸			质量			几何参数						
b_f	t_f	h	CWA	CWB	CWC	A_f	I_x	i_x	I_y	i_y	I_t	I_w
mm	mm	mm	kg/m	kg/m	kg/m	cm^2	cm^4	cm	cm^4	cm	cm^4	cm^6
200	10	520	41.2	46.1	51.0	40	26010	25.50	1333	5.77	13.3	867000
220	10	520	42.4	46.3	54.2	44	28611	25.50	1775	6.35	14.7	1153977
250	10	520	47.1	51.0	58.9	50	32513	25.50	2604	7.22	16.7	1693359
200	12	524	45.5	49.5	57.3	48	31457	25.60	1600	5.77	23.0	1048576
220	12	524	49.3	53.2	61.1	53	34603	25.60	2130	6.35	25.3	1395655
250	12	524	55.0	58.9	66.7	60	39322	25.60	3125	7.22	28.8	2048000
300	12	524	64.4	68.3	76.1	72	47186	25.60	5400	8.66	34.6	3538944
220	15	530	59.7	63.6	71.4	66	43762	25.75	2662	6.35	49.5	1765072
250	15	530	66.7	70.7	78.5	75	49730	25.75	3906	7.22	56.3	2590088
300	15	530	78.5	82.4	90.3	90	59676	25.75	6750	8.66	67.5	4475672
350	15	530	90.3	94.2	102.1	105	69622	25.75	10719	10.10	78.8	7107201
250	20	540	86.4	90.3	98.1	100	67600	26.00	5208	7.22	133.3	3520833
300	20	540	102.1	106.0	113.8	120	81120	26.00	9000	8.66	160.0	6084000
350	20	540	117.8	121.7	129.5	140	94640	26.00	14292	10.10	186.7	9661167
400	20	540	133.5	137.4	145.2	160	108160	26.00	21333	11.55	213.3	14421333
300	25	550	125.6	129.5	137.4	150	103359	26.25	11250	8.66	312.5	7751953
350	25	550	145.2	149.2	157.0	175	120586	26.25	17865	10.10	364.6	12309814
400	25	550	164.9	168.8	176.6	200	137813	26.25	26667	11.55	416.7	18375000
450	25	550	184.5	188.4	196.3	225	155039	26.25	37969	12.99	468.8	26162842
350	30	560	172.7	176.6	184.5	210	147473	26.50	21438	10.10	630.0	15054484
400	30	560	196.3	200.2	208.0	240	168540	26.50	32000	11.55	720.0	22472000
450	30	560	219.8	223.7	231.6	270	189608	26.50	45563	12.99	810.0	31996266

CW-1000			CWA			$t_w=$	2.0	mm	$A_q=$	16.0	cm^2	
			CWB			$t_w=$	3.0	mm	$A_q=$	24.0	cm^2	
			CWC			$t_w=$	4.0	mm	$A_q=$	32.0	cm^2	
几何尺寸			质量			几何参数						
b_f	t_f	h	CWA	CWB	CWC	A_f	I_x	i_x	I_y	i_y	I_t	I_w
mm	mm	mm	kg/m	kg/m	kg/m	cm^2	cm^4	cm	cm^4	cm	cm^4	cm^6
200	10	1020	51.0	60.8	70.7	40	102010	50.50	1333	5.77	13.3	3400333
220	10	1020	54.2	64.0	73.8	44	112211	50.50	1775	6.35	14.7	4525844
250	10	1020	58.9	68.7	78.5	50	127513	50.50	2604	7.22	16.7	6641276
200	12	1024	57.3	67.1	76.9	48	122897	50.60	1600	5.77	23.0	4096576
220	12	1024	61.1	70.9	80.7	53	135187	50.60	2130	6.35	25.3	5452543
250	12	1024	66.7	76.5	86.4	60	153622	50.60	3125	7.22	28.8	8001125
300	12	1024	76.1	86.0	95.8	72	184346	50.60	5400	8.66	34.6	13825944
220	15	1030	71.4	81.2	91.1	66	169987	50.75	2662	6.35	49.5	6856147
250	15	1030	78.5	88.3	98.1	75	193167	50.75	3906	7.22	56.3	10060791
300	15	1030	90.3	100.1	109.9	90	231801	50.75	6750	8.66	67.5	17385047
350	15	1030	102.1	111.9	121.7	105	270434	50.75	10719	10.10	78.8	27606811
250	20	1040	98.1	107.9	117.8	100	260100	51.00	5208	7.22	133.3	13546875
300	20	1040	113.8	123.6	133.5	120	312120	51.00	9000	8.66	160.0	23409000
350	20	1040	129.5	139.3	149.2	140	364140	51.00	14292	10.10	186.7	37172625
400	20	1040	145.2	155.0	164.9	160	416160	51.00	21333	11.55	213.3	55488000
300	25	1050	137.4	147.2	157.0	150	393984	51.25	11250	8.66	312.5	29548828
350	25	1050	157.0	166.8	176.6	175	459648	51.25	17865	10.10	364.6	46922445
400	25	1050	176.6	186.4	196.3	200	525313	51.25	26667	11.55	416.7	70041667
450	25	1050	196.3	206.1	215.9	225	590977	51.25	37969	12.99	468.8	99727295
350	30	1060	184.5	194.3	204.1	210	556973	51.50	21438	10.10	630.0	56857609
400	30	1060	208.0	217.8	227.7	240	636540	51.50	32000	11.55	720.0	84872000
450	30	1060	231.6	241.4	251.2	270	716108	51.50	45563	12.99	810.0	120843141

CW-1500			CWA			$t_w=$	2.0	mm	$A_q=$	24.0	cm^2	
			CWB			$t_w=$	3.0	mm	$A_q=$	36.0	cm^2	
			CWC			$t_w=$	4.0	mm	$A_q=$	48.0	cm^2	
几何尺寸			质量			几何参数						
b_f	t_f	h	CWA	CWB	CWC	A_f	I_x	i_x	I_y	i_y	I_t	I_w
mm	mm	mm	kg/m	kg/m	kg/m	cm^2	cm^4	cm	cm^4	cm	cm^4	cm^6
200	10	1520	60.8	75.6	90.3	40	228010	75.50	1333	5.77	13.3	7600333
220	10	1520	64.0	78.7	93.4	44	250811	75.50	1775	6.35	14.7	10116044
250	10	1520	68.7	83.4	98.1	50	285013	75.50	2604	7.22	16.7	14844401
200	12	1524	67.1	81.8	96.6	48	274337	75.60	1600	5.77	23.0	9144576
220	12	1524	70.9	85.6	100.3	53	301771	75.60	2130	6.35	25.3	12171431
250	12	1524	76.5	91.3	106.0	60	342922	75.60	3125	7.22	28.8	17860500
300	12	1524	86.0	100.7	115.4	72	411506	75.60	5400	8.66	34.6	30862944
220	15	1530	81.2	96.0	110.7	66	378712	75.75	2662	6.35	49.5	15274722
250	15	1530	88.3	103.0	117.8	75	430355	75.75	3906	7.22	56.3	22414307
300	15	1530	100.1	114.8	129.5	90	516426	75.75	6750	8.66	67.5	38731922
350	15	1530	111.9	126.6	141.3	105	602497	75.75	10719	10.10	78.8	61504857
250	20	1540	107.9	122.7	137.4	100	577600	76.00	5208	7.22	133.3	30083333
300	20	1540	123.6	138.4	153.1	120	693120	76.00	9000	8.66	160.0	51984000
350	20	1540	139.3	154.1	168.8	140	808640	76.00	14292	10.10	186.7	82548667
400	20	1540	155.0	169.8	184.5	160	924160	76.00	21333	11.55	213.3	123221333
300	25	1550	147.2	161.9	176.6	150	872109	76.25	11250	8.66	312.5	65408203
350	25	1550	166.8	181.5	196.3	175	1017461	76.25	17865	10.10	364.6	103865804
400	25	1550	186.4	201.2	215.9	200	1162813	76.25	26667	11.55	416.7	155041667
450	25	1550	206.1	220.8	235.5	225	1308164	76.25	37969	12.99	468.8	220752686
350	30	1560	194.3	209.0	223.7	210	1228973	76.50	21438	10.10	630.0	125457609
400	30	1560	217.8	232.6	247.3	240	1404540	76.50	32000	11.55	720.0	187272000
450	30	1560	241.4	256.1	270.8	270	1580108	76.50	45563	12.99	810.0	266643141

本规程用词说明

1 为了便于在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，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

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用词：

正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”。

2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应按……执行”或“应符合……要求（或规定）”。

本规程引用标准名录

- 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068
- 《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》GB 50083
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《钢结构设计规范》GB 50017
- 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《工业建筑防腐蚀设计规范》GB50046
- 《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
- 《普通碳素结构钢》GB/T 700
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《碳钢焊条》GB/T 5117
- 《低合金钢焊条》GB/T 5118
- 《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780
- 《六角头螺栓》GB/T 5782
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228
- 《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229
- 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231
- 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副 技术条件》GB/T 3633
- 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》GB 985.1
- 《埋弧焊的推荐坡口》GB 985.2
- 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB8923
- 《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 709
- 《气体保电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110
- 《低合金钢药芯焊丝》GB/T 10045
- 《焊接用二氧化碳》HG/T 2537
- 《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 : 2002

波纹腹板钢结构技术规程

条文说明

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.....	5
4 基本设计规定.....	6
4.1 设计原则.....	6
4.2 设计强度.....	6
5 波纹腹板钢构件.....	7
5.1 轴心受拉、受压构件.....	7
5.2 受弯构件.....	8
5.4 拉弯和压弯构件.....	13
5.5 受压翼缘的局部稳定.....	16
5.6 构件的变形计算.....	16
5.7 疲劳计算.....	17
5.8 抗震设计.....	18
6 波纹腹板 H 型钢组合梁.....	19
6.1 一般规定.....	19
6.2 组合梁设计.....	19
6.3 挠度计算.....	22
7 连接节点.....	23
7.1 设计原则.....	23
7.2 梁-梁连接.....	23
7.3 梁-柱连接.....	24
7.4 吊车梁支座.....	30
8 制作和防腐蚀.....	32
8.1 波纹腹板钢构件的制造.....	32
8.2 波纹腹板钢构件的防腐处理.....	32
8.3 波纹腹板钢构件的制造容许误差.....	33
附录 A 推荐波纹腹板波形.....	34

1 总 则

1.0.2 本规程以梯形波纹为主要内容。并指出本规程适用于一般工业与民用建筑所采用的波纹腹板钢构件及其所构成的结构。

1.0.3 本条强调本规程是根据国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定的原则制订的。

1.0.4 对有特殊设计要求（如防火和防腐蚀要求等），尚应符合国家现行有关规范的规定，如《建筑设计防火规范》GB 50016、《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046。根据《钢结构的腐蚀防护标准环境》ISO 12944 将大气对钢材的腐蚀等级分 C1~C5 五个等级，其中在 C4、C5 等级的腐蚀环境下不适宜采用波纹腹板 H 型钢结构。或者按照《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 的相关规定，环境中介质对钢结构长期作用下的腐蚀性等级分为强腐蚀、中等腐蚀、弱腐蚀、无腐蚀四个等级，其中强腐蚀环境下，不宜采用波纹腹板 H 型钢结构。

1.0.5 波纹腹板钢结构设计时，除应符合本规程的规定外，尚应满足其他有关标准的设计要求。例如，取用的荷载及其组合值应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009。符号、计量单位和基本术语按照国家标准《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》GB 50083 的规定采用。设计也应符合国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的相关规定。材料和施工质量尚应符合国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 及国家相关的其他规定。

2 术语和符号

本章所用的术语和符号是参考我国现行国家标准《工程结构设计基本术语和通用符号》GBJ 132和《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T 50083 规定编写的，并根据需要增加了一些内容。

2.1 术语

本规程主要给出了波纹腹板钢结构设计方面的专业术语，并从钢结构设计角度赋予其特定的涵义，给出了的英文译名是参考国外某些资料拟定的，不一定是国际上标准术语。

2.2 符号

本规程给出的常用符号并分别做出了定义，这些符号都是本规程各章节中所引用的。

3 材料

3.0.1 本条明确了适用于承重结构的波纹腹板钢构件的钢材型号包括：普通碳素结构钢中的 Q235，低合金结构钢中的 Q345、Q390 和 Q420 钢。

3.0.2 本条规定了承重结构的钢材应具有力学性能和化学成分等合格项目的要求。

3.0.3 为了防止结构发生脆性破坏，本条提出用于地震区的波纹腹板钢构件钢材应符合抗震设计规范的要求。

3.0.4 本条对波纹腹板钢构件的连接材料进行了相应的规定。由于腹板厚度较薄，翼缘和腹板的连接焊缝及在工地焊接过程中与腹板的连接焊缝，应严格执行国家标准《碳钢焊条》GB/T 5117 和《低合金钢焊条》GB/T 5118 的规定。若采用螺栓连接，应符合普通螺栓、高强度螺栓等相应国家标准，若用于多高层组合结构，所采用圆柱头焊钉(栓钉)，与型钢的连接也应符合相应的现行国家标准。

4 基本设计规定

4.1 设计原则

4.1.1 本条明确本规程以概率理论为基础的极限状态设计方法，以分项系数设计表达式进行设计验算。

4.1.2 对构件和结构的设计和计算包括承载能力极限状态和正常使用极限状态进行，而且波纹腹板钢结构腹板剪切变形所占比重较大，对正常使用极限状态尤其要注意验算。

4.1.3 波纹腹板钢结构的重要性系数 γ_0 与钢结构设计规范中相关规定取值相同。

4.1.4 进行波纹腹板钢结构承载力极限状态验算时，根据《建筑结构荷载规范》GB50009的要求，应考虑荷载效应的基本组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合，采用荷载设计值和强度设计值进行结构承载力验算。

4.1.5 进行波纹腹板钢结构正常使用极限状态验算时，采用荷载效应的标准组合，对其变形限值，本规程也做了专门规定。

4.1.6 在对波纹腹板钢结构的验算过程中，荷载、荷载分项系数、荷载效应组合和荷载组合值系数的取值，应按照两种极限状态按照《建筑结构荷载规范》GB 50009取值，如考虑抗震尚应符合《建筑抗震设计规范》GB50011的规定。

4.2 强度设计值

4.2.1~4.2.3 钢材的强度设计值、焊缝的强度设计值、螺栓连接的强度设计值及钢材和钢铸件的物理性能指标，均可以按照《钢结构设计规范》GB50017的相关规定取值。

5 波纹腹板钢构件

5.1 轴心受拉、受压构件

5.1.1 波纹腹板构件在轴向受拉的状态下，由于腹板不承受正应力作用，所以其轴向承载力仅考虑翼缘的作用，验算过程中受荷面积取为翼缘的净截面积。

5.1.2 波纹腹板钢构件在轴心受压状态下，除了要验算构件的强度之外还需要验算其稳定性。由于波纹腹板轴压构件受力、变形特点与桁架较为类似，腹板剪切变形较大，所以需要考虑腹板的剪切变形对构件整体稳定的影响。因此，在计算构件绕强轴的整体稳定性系数时，应用格构式轴压构件中换算长细比的概念：

$$\lambda_{ox} = \lambda_x \sqrt{(1 + N_E \cdot \gamma)} \quad (1)$$

式中， N_E 为杆件的欧拉临界力：

$$N_E = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_x^2} \quad (2)$$

式中， A 应只考虑构件翼缘的面积，故 $A=A_f$ 。 γ 为单位剪力作用下的轴线转角，可以按照下式计算：

$$\gamma = \frac{1}{Gh_w t_w \frac{\lambda}{s}} \quad (3)$$

将上述两式代入(1)可得：

$$\lambda_{ox} = \sqrt{\lambda_x^2 + \pi^2 \frac{EA_f}{GA_q}} \approx \sqrt{\lambda_x^2 + 25.7 \frac{A_f}{A_q}} \quad (4)$$

$$A_q = h_w t_w \frac{\lambda}{s} \quad (5)$$

A_q 为构件的有效受剪面积，其原理在 5.6.1 条文说明中有详细阐述。

5.1.3 在确定波纹腹板轴心受压构件的整体稳定系数时，可以按照《钢结构设计规范》GB50017 附录 C 取值。按照《钢结构设计规范》GB50017 的分类，当计算波纹绕强轴方向的整体稳定时，可以按照 b 类截面计算其稳定系数。当计算绕弱轴方向的整体稳定时，可按照 c 类截面计算其稳定系数。需要注意的是，在计算构件绕两个主轴方向的长细比时，腹板部分面积均不考虑在内。

5.2 受弯构件

5.2.1 波纹腹板 H 型钢最主要的技术特点就是普通 H 型钢的平腹板改为波纹的形式（包括梯形、正弦曲线和三角形波形），由于波纹钢板具有较高的平面外刚度和剪切屈曲强度，所以在腹板高厚比

较高的情况下，能够具有较大的承载力，故经济效益非常明显。同时，这一优势在运输、吊装过程中也能够充分体现。

现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS102-2002 中规定腹板高厚比不宜超过 $250\sqrt{235/f_y}$ ，而根据同济大学的大量试验及理论分析，结合国内外研究成果，证明若波纹腹板的波形设计合理，波纹腹板 H 型钢的腹板高厚比在远超这一限值的情况下依然能够满足“腹板屈服前不发生屈曲”这一原则。反之，若腹板波形设计不合理，则腹板有可能发生弹性剪切屈曲，且其强度远低于剪切屈服强度的情况。

目前，国外资料中关于波纹腹板的剪切强度有若干设计公式，都采用的是强度折减系数法。这些方法对于某些能够满足“屈服前不屈曲”原则的腹板波形会低估其承载力，所以本规程提出如有充分试验证明波纹腹板屈服前不发生屈曲，腹板的抗剪承载力可以按照剪切屈服强度与腹板面积的乘积作为抗剪承载力。此处，所谓“充分试验”指的是在国家认可的试验室进行超过 3 个及以上的足尺试件试验。

另一方面，如没有充分试验证明波纹腹板屈服前不发生屈曲，抗剪承载力可以按照式(5.2.1-2)的折减系数的方法计算：

$$V \leq \chi_c f_v h_w t_w \quad 5.2.1-2$$

式中， χ_c 为考虑屈曲的承载力折减系数。由于波纹腹板的剪切屈曲分为整体屈曲和局部屈曲，其中局部屈曲的弹性极限承载力是按照板的强度理论推导出来的，而整体屈曲在按照各项异性板的理论推导而来。本规程中采用的折减系数计算方法，参考了 Eurocode 3¹ 的相关条文。根据同济大学所进行试验，并结合国外大量的试验数据，本规程认为 Eurocode3 关于局部屈曲的设计公式具有足够的安全性和准确性，但是对于整体屈曲，计算效果较差，所以基于同济大学的研究成果²，本规程提出了新的设计公式，该公式结合 5.3.5 条提出的波纹腹板的构造要求，能够对波纹腹板的整体屈曲承载力提供一个合理、准确的估值。

5.2.2 本条分别从波纹腹板钢构件的截面强度和整体稳定规定了构件抗弯承载力的计算方法。首先，波纹腹板钢构件在受弯时，若为强度控制，考虑到截面最外边缘纤维屈服到翼缘的完全屈服过程较短，因此建议绕强轴塑性发展系数取为 1.0。由于腹板的“折叠”效应，腹板不承受任何正应力，所以在计算截面模量时，只考虑翼缘部分的面积。

在波纹腹板弯曲状态下的整体稳定方面，设计公式可延用《钢结构设计规范》GB50017 中的表达形式：

$$\frac{M_x}{\phi_b W_x} \leq f \quad (6)$$

根据经典的梁弹性稳定理论，其弹性屈曲极限可表示为：

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y \left(GI_t + EI_w \frac{\pi^2}{l^2} \right)} \quad (7)$$

波纹腹板梁与平腹板梁不同的是，截面翘曲常数 I_w 的取值。经过大量有限元分析，并与国外研究者提出的计算方法进行对比后，采用下式计算波纹腹板梁的截面翘曲常数：

$$I_w = \frac{t_f h^2 b_f^3}{24} + \frac{t_w h^3 h_r^2}{48} \quad (8)$$

由于波纹腹板梁截面模量 W_x 和对弱轴惯性矩 I_y 均忽略腹板的贡献， $W_x \approx b_f t_f h$ ， $I_y = t_f b_f^3 / 6$ ，所以整体稳定系数可以用下式计算：

$$\varphi_b = \frac{M_{cr}}{W_x f_y} = \frac{2752.5 \beta_b}{h l_1} \sqrt{0.064 \frac{b_f}{t_f} I_t + 1.64 \frac{b_f}{t_f} \frac{I_w}{l_1^2}} \cdot \frac{235}{f_y} \quad (9)$$

梁整体稳定的等效临界弯矩系数 β_b 仍按照钢结构设计规范中对于平腹板梁的规定进行取值。

若为加强受压或受拉翼缘的截面形式，则整体稳定系数可以用下式计算：

$$\varphi_b = \frac{4320 A_f h \beta_b}{\lambda_y^2 W_x} \left[\eta_b + \sqrt{\eta_b^2 + \frac{4 I_w}{h^2 I_y} \left(1 + \frac{l_1^2 I_t}{25.7 I_w} \right)} \right] \frac{235}{f_y} \quad (10)$$

为验证上述计算方法，同济大学进行了大量的分析，图 1 给出了有限元的计算结果与现有设计公式的对比情况。

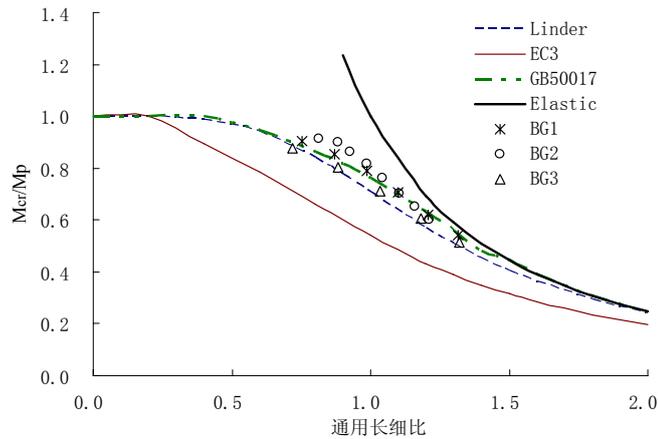


图 1 实际受弯构件与设计公式梁整体稳定系数对比图

图 1 中，BG1、BG2、BG3 为实际波纹腹板钢梁整体稳定系数结果，曲线“Linder”为文献[3]提出设计公式、“EC3”为 Eurocode 3 的设计公式，“GB50017”为按照本规程提出的 φ_b 计算方法，当 $\varphi_b > 0.6$ 时，按《钢结构设计规范》GB50017 方法进行修正，“Elastic”为材料为完全弹性时的整体稳定曲线。从图中可以看到，Linder 提出设计公式较为合理，但计算过程复杂；EC3 设计公式过于保守；如果按照我国《钢结构设计规范》GB50017 弹塑性整体稳定的设计方法，结果略不安全，所以需要进行修正，为此，当 φ_b 大于 0.45 时，采用下式计算的 φ_b' 代替 φ_b 值：

$$\varphi_b' = 1.05 - \frac{0.29}{\varphi_b} \leq 1.0 \quad (11)$$

修正后的结果见图 2。

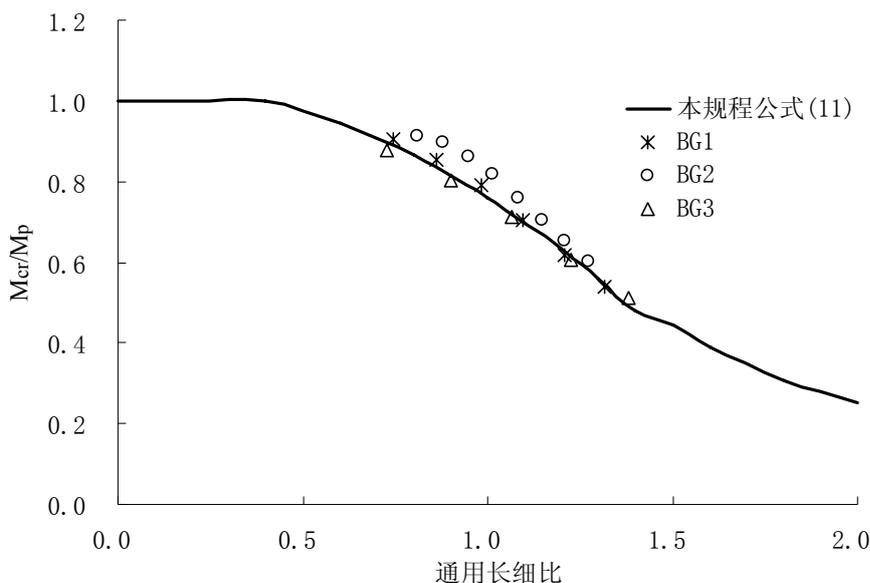


图 2 实际受弯构件与本规程公式整体稳定系数结果对比图

对于截面上下翼缘不对称的波纹腹板受弯构件，其整体稳定系数仍可以参考《钢结构设计规范》GB50017 关于截面不对称平腹板受弯构件整体稳定系数的计算方法，结合波纹腹板构件的受力特性来确定。

5.2.3 对不需要计算整体稳定的梁，其设计要求可与平腹板梁相同。

5.2.4 波纹腹板钢梁的局部承压承载力较平腹板梁有明显的提高，尤其是荷载分布宽度较小的情况下，这种趋势更加明显。根据同济大学试验研究成果，现有波纹腹板钢梁局压承载力计算公式适用范围都有一定局限性，某些资料沿用《钢结构设计规范》GB50017 中平腹板梁局压强度计算方法，得出的结果与试验差别较大。因此，本条提出，按照荷载分布宽度是否达到腹板波纹的波长，采用不同的计算公式：

1 当荷载有效分布宽度 c_0 小于腹板波纹的波长 λ 时，根据同济大学试验研究并结合国外试验数据，发现下式可以为大多数试验结果提供一个理想估值：

$$P_u = P_f + P_w \quad (12)$$

2 当荷载假定分布宽度 c_0 大于腹板波纹的波长 λ 时，下面的经验公式计算结果与试验值很接近：

$$P_u = \gamma t_f t_w f_w \quad (13)$$

上述两式经过试验和有限元验证，具有足够的安全储备。

5.2.5 本条给出了波纹腹板的若干构造要求，所提出的要求是基于同济大学所进行相关研究，并考虑了我国现有的加工水平和钢铁产品规格。在本条给定的范围内，波纹腹板 H 型钢的抗剪承载力能够达到较高的水平，而且可以控制腹板的褶皱率不至于过高，这样可以节约钢材。本构造要求结合附录 A 可以为生产企业提供一定的技术参考。

5.3 拉弯和压弯构件

5.3.1 由于波纹腹板 H 型钢梁的受力性能与格构式构件较为接近，波纹腹板钢构件在拉弯和压弯受力状态下，强度计算方法与格构式构件较为类似。

5.3.2 等截面波纹腹板压弯构件弯矩作用平面内的整体稳定性计算与格构式构件相同，均采用最大边缘纤维屈服准则，因此计算公式与《钢结构设计规范》GB50017 的公式（5.2.3）相同。需要注意的是，在计算截面面积、和欧拉临界荷载时，均不考虑腹板的贡献；计算轴压杆稳定系数时，按换算长细比取值。

5.3.3 某些文献将等截面波纹腹板压弯构件弯矩作用平面外整体稳定，视为受压翼缘的稳定问题，这将严重低估波纹腹板构件的承载力。本规程根据研究结果，认为可以参照《钢结构设计规范》GB 50017 中相关规定执行，其中计算长度长细比、截面模量时均忽略腹板部分的贡献。

5.3.4 本条主要参照现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 的规定确定。

5.3.5 本条主要参照现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS102: 2002 执行，在计算长细比、截面面积、截面模量时忽略腹板部分。

5.3.6 本条主要参照《门式刚架轻钢房屋钢结构技术规程》CECS102: 2002 执行，在计算长细比、截面面积、截面模量时忽略腹板部分。

5.4 受压翼缘的局部稳定

5.4.1 由于腹板的波纹形状能够为翼缘提供 stronger 的支撑作用，波纹腹板钢构件受压翼缘的局部稳定性能优于平腹板 H 型钢。同时，为了设计方便，参照国外相关资料，波纹腹板钢构件的局部稳定不再按照不同的受力状态进行区分，统一按照下式控制翼缘的宽厚比：

$$\frac{B}{t} \leq r_f \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (14)$$

$$B = \frac{b_f - h_r/2}{2} \quad (15)$$

在计算受压翼缘的自由外伸宽度时，需要考虑腹板波形的有利影响，近似采用受压翼缘宽度的一半减去波高的一半。

5.5 构件的变形计算

5.5.1 由于波纹腹板的厚度一般较薄（2~4mm），所以构件的剪切变形较大，在计算构件变形时，应考虑剪切变形的影响，即：

$$\Delta = \sum \int \frac{k \overline{Q} \overline{Q}_p}{GA} ds + \sum \int \frac{\overline{M} \overline{M}_p}{EI} ds \quad (16)$$

需要注意的是，在计算剪切变形时需沿腹板的波形进行积分运算，其变形为沿波长积分的 λ/q 倍，为方便计算，这里对钢材的剪切模量进行折减，即：

$$G' = G \frac{\lambda}{s} \quad (17)$$

某些情况下为方便计算（如 5.2.1 条），也可采用折减腹板面积的做法：

$$A_q = h_w t_w \frac{\lambda}{s} = A_w \frac{\lambda}{s} \quad (18)$$

这里将 A_q 定义为腹板的有效受剪面积。对于 H 型截面，剪应力不均匀分布系数约等于截面全面积与腹板面积的比值。

根据以上特性，本条分别给出简支梁在跨中集中荷载和均布荷载作用下挠度的计算公式。

5.5.2 本条给出了两端固支、连续梁和框架梁在均布荷载和跨中集中荷载作用下挠度的计算公式。

5.5.3 本条明确了采用有限元方法计算波纹腹板钢结构或构件变形时，应采用的单元刚度矩阵形式，及需要注意的事项，重点在于考虑腹板剪切变形的影响。

5.5.4 为了不影响结构或构件的正常使用和观感，设计时应应对结构或构件的变形（挠度和侧移）规定相应的限值。本条明确了波纹腹板钢结构或构件的变形限值，主要依据《钢结构设计规范》GB 50017 中附录 A 相关规定。计算变形时，可不考虑螺栓引起的截面削弱。为改善外观和使用条件，可将横向受力构件预先起拱，起拱大小应视实际情况而定，一般为恒荷载标准值加 1/2 活荷载标准值所产生的挠度值。

5.5.5 本条给出了受压构件容许长细比的限值，主要参考协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102: 2002 的相关规定。

5.5.6 本条给出了受拉构件容许长细比的限值，主要参考《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102: 2002 的相关规定。

5.6 疲劳计算

5.6.1 本条主要参照《钢结构设计规范》GB50017 的规定，要求对直接承受动力荷载重复作用的波纹腹板钢构件翼缘与腹板焊缝处，当应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 次时，应进行疲劳计算。

5.6.2 本条建议波纹腹板钢构件的疲劳计算采用容许应力方法。

5.6.3 对于波纹腹板钢构件常幅应力疲劳计算，仍然采用《钢结构设计规范》GB50017 的方法，构件和连接类别建议选为 3 类。

5.6.4 根据国内外研究资料，证明波纹腹板 H 型钢吊车梁的疲劳性能优于平腹板钢梁，主要原因在于波纹腹板的采用，可以避免吊车梁中过多采用腹板加劲肋，且可减小由于梁上荷载偏离腹板在梁翼缘与腹板焊缝处产生的扭矩应力，这样就提高了波纹腹板 H 型钢吊车梁的疲劳强度，这一结论也经过同济大学 4 个足尺波纹腹板钢梁疲劳试验的验证。

5.7 抗震设计

5.7.2 波纹腹板型钢压弯构件进入塑性以后，如果轴压力较大，在地震反复作用下塑性区容易发生轴向屈曲，故本条对允许在地震区采用的波纹腹板钢构件的轴压比给予一定限制。

当构件在重力荷载代表值和中震作用标准值的组合效应下，构件截面仍不屈服，且构件满足承载力设计要求时，说明地震对该构件的影响很小。

6 波纹腹板 H 型钢组合梁

6.1 一般规定

6.1.1 本条指出波纹腹板 H 型钢组合梁由混凝土翼板与波纹腹板钢梁通过抗剪连接件组成,适用于不直接承受动力荷载的情况。目前钢-混凝土组合梁常用的翼板形式包括:现浇混凝土板,混凝土叠合板和压型钢板混凝土组合板,这些翼板形式在波纹腹板 H 型钢组合梁中都可以采用。

6.1.2 根据理论分析,现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 关于常规钢-混凝土组合梁中混凝土翼板有效宽度 b_e 的计算规定,仍可在本规程中使用。

6.1.3 本条明确了波纹腹板 H 型钢组合梁的挠度应按弹性方法进行计算,并考虑混凝土翼板和钢梁之间的滑移效应对组合梁刚度的影响。

6.1.4 本条规定在施工工况下,波纹腹板 H 型钢组合梁强度、稳定性和变形的计算要求。

6.2 组合梁设计

6.2.1 波纹腹板 H 型钢组合梁可以采用塑性理论假定来计算组合梁的抗弯承载力。根据抗剪连接件的不同设计,组合梁可以分为完全抗剪连接组合梁和部分抗剪连接组合梁。组合梁在正弯矩作用区段抗弯塑性极限状态有下列几种情况:1)塑性中和轴位于混凝土翼板内;2)塑性中和轴位于钢梁上翼缘内;3)塑性中和轴位于钢梁腹板范围内。

1) 塑性中和轴在混凝土翼板内,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,混凝土受压区假定均匀受压,且达到轴心抗压强度设计值。钢梁全部受拉,但不考虑腹板的面积。

2) 塑性中和轴有可能位于钢梁上翼缘内,腹板不承受弯曲正应力。此时,钢梁上翼缘存在受拉区和受压区,由于翼缘厚度相对较小,而且拉应力和压应力合力距离塑性中和轴非常接近,所以上翼缘对截面弯矩的影响可以忽略,仅考虑下翼缘和混凝土翼板所形成的抵抗弯矩。

3) 当采用加强受拉翼缘的形式时,塑性中和轴有可能位于钢梁腹板内。

6.2.2 组合梁负弯矩作用区段内,仅考虑钢筋的受拉作用,组合梁塑性中和轴有可能在钢梁腹板内,此时考虑受拉钢筋和钢梁上翼缘对下翼缘形成的抵抗弯矩。

当钢梁上下翼缘面积相同,则塑性中和轴可能位于钢梁上翼缘内,计算时,可以忽略上翼缘内应力的影响,仅考虑受拉钢筋和钢梁下翼缘形成的抵抗弯矩。

6.2.3 计算钢-混凝土组合梁抗剪承载力时,一般偏于安全不考虑混凝土翼板的抗剪作用。而根据大量组合梁抗剪试验的研究成果,对于腹板较为薄弱的组合梁,混凝土翼板的抗剪能力可以到达整个组合梁的 50%。由于波纹腹板钢梁腹板的厚度较薄,抗剪能力较低,可以考虑利用混凝土翼板对波纹腹板 H 型钢组合梁抗剪承载力的贡献。但是根据大量的研究结果,组合梁的剪跨比较大时,如果考虑混凝土翼板的抗剪作用会过高估计组合梁的抗剪承载力。所以本条提出,当剪跨比 $\lambda_b > 8$,仅计入

钢梁腹板的抗剪承载力；当剪跨比 $\lambda_b \leq 8$ 时，可以考虑混凝土翼板抗剪能力的贡献。

6.2.4 由于波纹腹板钢组合梁所采用基本原理与平腹板组合梁基本类似，抗剪连接件的作用和设置也基本相同，所以抗剪连接件的计算可以按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB20017 的有关规定进行。

6.3 挠度计算

6.3.1 本条提出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，取其中较大值作为设计依据。挠度计算可按结构力学公式进行，同时，需要考虑滑移引起的刚度折减。仅受正弯矩作用的组合梁，其抗弯刚度应取考虑滑移效应的折减刚度，连续组合梁应按变截面刚度梁进行计算。在上述两种荷载组合中，组合梁应各取其相应的折减刚度。

6.3.2 本条规定了波纹腹板 H 型钢组合梁的挠度计算方法，需要注意的是，由于钢梁腹板较薄，所以需要考虑钢梁剪切变形对组合梁挠度的影响。

6.3.3 本条规定了波纹腹板 H 型钢组合梁的挠度限值，主要参考了现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 的相关要求。

7 连接节点

7.1 设计原则

7.1.1 波纹腹板钢结构的节点连接方法与普通钢结构基本相同，同样可采用焊接、高强度螺栓连接和栓焊混合连接。

7.1.2 由于波纹腹板钢构件的特殊腹板形式，所以建议在节点处采用端板的连接方式。

7.1.3 波纹腹板钢结构在坡口焊过程中，焊缝的坡口形式和尺寸，应遵守现行国家标准。

7.1.4 本条规定了熔敷材料强度与母材强度的匹配关系。

7.1.5 本条规定了节点连接需要进行计算的内容。

7.2 梁-梁连接

7.2.1 次梁-主梁节点宜采用简支连接及刚接连接，连接方法与普通钢结构结构连接方式基本相同。但由于波纹腹板厚度较薄，而且呈波纹形状，加工不便。所以在次梁的梁端通过焊接封头盖板，并在盖板上焊接一块平腹板，通过这块平板和主梁加劲肋进行连接。

7.2.2 梁的拼接可采用通过两块端板连接，翼缘和端板之间采用全熔透的对接焊缝，腹板和端板之间应采用角对接组合焊缝或与腹板等强的角焊缝，端板之间采用高强螺栓连接。这种连接方法也可用到屋脊节点中。

7.3 梁-柱连接

7.3.1 本条规定框架梁与柱的连接宜采用柱贯通型。

7.3.2 本条规定了梁-柱之间的铰接处理方法，可以在梁端焊接端板和一段平板，然后与柱的拼接板进行连接。

7.3.3 本条规定了当梁端垂直于工字型柱腹板，并柱铰接时所适宜采用的连接方法。

7.3.4 本条规定了箱形柱与波纹腹板钢梁铰接连接方法。

7.3.5 本条明确了波纹腹板钢梁-柱刚性连接时，所要进行的验算项目与普通钢结构连接验算相同。

7.3.6 本条明确了当梁与柱翼缘刚性连接时，宜采用的连接手段。

7.3.7 本条明确了当梁端垂直于工字型柱腹板与柱刚接时，宜采用的连接手段。

7.3.8 本条建议在互相垂直的两个方向都与柱刚性连接的柱，宜采用箱型截面。

7.3.9 本条明确了波纹腹板钢梁翼缘与柱焊接时，采用全熔透坡口焊缝时的一些注意事项。

7.3.10 本条规定了梁与柱刚性连接时，应在梁翼缘的对应位置设置柱的水平加劲肋（或隔板）及一些构造要求。

7.3.11 本条规定了门式刚架中梁-柱节点宜采用的连接形式。

8 制造、安装和防腐蚀

8.1 波纹腹板钢构件的制造

8.1.1 本条提出了波纹腹板 H 型钢截面高度的适宜范围为 400~3000mm，而且梁高也应符合一定的模数。截面高度较小时，波纹腹板的优势无法充分体现；而高度过大生产加工存在一定困难，而且应用范围也受到限制。并给出了截面构造示意图。

8.1.2 本条在波纹腹板 H 型钢性能研究的基础上，并参考我国现有热轧 H 型钢的规格尺寸，提出波纹腹板钢构件主要的一些尺寸。这些尺寸应服从一定的建筑尺寸模数以便于生产。

根据研究，目前波纹腹板钢构件腹板的高厚比一般都会控制在 600 以内。如果腹板厚度过薄，存在易引起焊接缺陷等不利影响，而且钢板一旦发生锈蚀，会对整个构件造成显著的不利影响，所以厚度限定在 2.0~6.0mm 的范围内。

由于截面正应力主要由翼缘承担，剪力由腹板承担，所以在设计工程中，可以根据弯矩和轴力大小灵活选用截面高度和翼缘的尺寸，并根据剪力大小选择腹板厚度等参数。

8.2 波纹腹板钢构件的防腐处理

8.2.1 本条规定波纹腹板钢构件必须采取有效的防腐蚀措施，在构造上还要考虑便于处理和检查。

8.2.2 本条提出波纹腹板钢结构应根据其使用条件和所处环境，选择相应的表面处理方法和防腐措施。所采用的环境腐蚀性评级、防腐蚀涂层配套措施及维护年限应按照《工业建筑防腐蚀设计规范》GB50046 的相关规定执行。

8.2.3 本条提出波纹腹板钢结构进行表面处理时应按照《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB8923 的规定。

8.2.4 本条规定波纹腹板钢结构在使用期间应定期进行检查与维护。

8.2.5 本条规定了波纹腹板钢结构重新涂装的质量要求应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB5020 的要求。

8.2.6 本条对波纹腹板 H 型钢腹板和翼缘角焊缝位置提出了专门的防腐要求。

8.3 波纹腹板钢构件的制造容许误差

8.3.1 本条提出：制作波纹腹板钢构件所采用钢板和钢带的厚度、宽度和长度的允许偏差及外观等均应符合国家标准《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 709 的相关规定。

8.3.2 由于波纹腹板 H 型钢最主要的技术革新就是将平腹板改为波纹腹板，所以本条对腹板波形尺寸的制造误差提出了一些具体要求。

附录 A 推荐波纹腹板波形

本规程所推荐波形为某些企业，经同济大学试验室试验论证的有效波形，其是否申请专利保护，请采用单位自行了解。

参考文献

-
- 1 European Committee for Standardisation. prEN 1993-1-5. EUROCODE 3: Design of steel structures[S]; Part 1.5 : Plated structural elements.
 - 2 李国强, 张哲, 孙飞飞. 波纹腹板 H 型钢梁抗剪承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6).
 - 3 Lindner J. Lateral torsional buckling of beams with trapezoidally corrugated webs[R]. Proc., Int. Colloquium of Stability of Steel Structures, Budapest, Hungary, 1990: 79–86.