



CECS 290 : 2011

中国工程建设协会标准

波浪腹板钢结构应用 技术规程

Technical specification for application of
sinusoidal web steel structures

中国计划出版社

中国工程建设协会标准

波浪腹板钢结构应用
技术规程

Technical specification for application of
sinusoidal web steel structures

CECS 290 : 2011

主编单位:清 华 大 学
巴特勒(上海)有限公司
批准单位:中国工程建设标准化协会
施行日期:2 0 1 1 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 82 号

关于发布《波浪腹板钢结构应用技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会建标协字〔2008〕52 号文《关于印发〈2008 年工程建设标准协会标准制订、修订计划(第一批)〉的通知》的要求,由清华大学和巴特勒(上海)有限公司等单位编制的《波浪腹板钢结构应用技术规程》,经本协会建筑与市政工程产品应用分会(筹)组织审查,现批准发布,编号为 CECS 290 : 2011,自 2011 年 9 月 1 日起施行。

中国工程建设标准化协会
二〇一一年五月三十一日

前 言

根据中国工程建设标准化协会建标协字〔2008〕52号文《关于印发〈2008年工程建设协会标准制订、修订计划(第一批)〉的通知》的要求,制定本规程。

为统一波浪腹板钢结构在设计、制作、安装及验收等方面的应用技术要求,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量,保证波浪腹板钢结构的应用效果,特制定本规程。

本规程共7章和1个附录,主要内容包括:总则、术语和符号、材料与构件、构造、设计、施工、验收等。

根据原国家计委计标〔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。

本规程的某些内容涉及专利,涉及发明专利(或实用新型专利)的具体技术问题,使用者可直接与本规程主编单位协商处理,本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑与市政工程产品应用分会(筹)归口管理并负责解释(地址:北京市海淀区首体南路9号主语国际2号楼,邮政编码:100048)。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:清华大学

巴特勒(上海)有限公司

参编单位:山东华兴钢构有限公司

美联钢结构建筑系统(上海)有限公司

烟台新科钢结构有限公司

深圳市金鑫钢结构建筑安装工程有限公司
中国建筑科学研究院
湖南大学

河北金环钢结构工程有限公司
之江钢铁(上海)有限公司
北京德力钢结构技术开发有限公司

主要起草人：郭彦林 王赛宁 (以下按姓名字母顺序排列)

陈 明 甘秀明 韩小红 姜子钦 刘澍滋
李祝元 舒兴平 孙成疆 唐 潮 王桂亮
王明贵 王小安 辛克贵 张 枫 张军强
张 强

主要审查人：顾 强 曹平周 贺贤娟 童根树 路克宽
丁 阳 肖 瑾 杨强跃 朱 丹

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(2)
3	材料与构件	(6)
3.1	材料	(6)
3.2	构件	(7)
3.3	波浪腹板的尺寸范围	(8)
4	构 造	(10)
4.1	一般构造	(10)
4.2	节点构造	(15)
4.3	柱脚构造	(19)
5	设 计	(22)
5.1	一般规定	(22)
5.2	受弯构件计算	(22)
5.3	轴心受力构件计算	(25)
5.4	压弯构件计算	(27)
5.5	局部承压计算	(31)
5.6	节点计算	(32)
5.7	疲劳计算	(35)
6	施 工	(37)
6.1	波浪腹板的轧制要求	(37)
6.2	波浪腹板构件的焊接要求	(37)
6.3	构件制作误差控制	(38)

6.4	构件安装误差控制	(43)
6.5	钢构件除锈与涂装防腐	(46)
7	验收	(48)
7.1	一般规定	(48)
7.2	波浪腹板验收	(48)
7.3	工程质量验收	(49)
附录 A	波浪腹板钢结构验收记录表	(51)
	本规程用词说明	(52)
	引用标准名录	(53)
附:	条文说明	(55)

1 总 则

1.0.1 为使波浪腹板钢结构的设计、施工及验收做到技术先进、安全适用、经济合理、施工方便和确保质量的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于使用波浪板作为构件腹板的门式刚架轻型房屋钢结构以及梁系构件的设计、施工及验收。

1.0.3 波浪腹板钢结构的设计、施工及验收除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 波浪腹板 sinusoidal web

平钢板通过辊轧形成的表面起伏,波折曲线为正弦曲线的用作构件腹板的板件。

2.1.2 波浪腹板构件 sinusoidal web members

上、下翼缘构件与波浪腹板焊接形成的构件。

2.1.3 波浪腹板工形构件 I-shaped members with sinusoidal webs

截面形状为工字形的波浪腹板构件。

2.1.4 波浪腹板门式刚架 portal frames with sinusoidal web members

波浪腹板构件组成的门式刚架结构。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应设计值

V ——剪力设计值;

M ——弯矩设计值;

M_1 ——所计算构件段大头截面的弯矩设计值;

N ——轴心拉力或轴心压力的设计值;

N_0 ——所计算构件段小头截面的轴心压力设计值;

N_1 ——单个高强度螺栓受拉承载力设计值;

P ——集中荷载设计值;

σ_c ——局部压应力;

$\Delta\sigma$ ——疲劳计算的应力幅；

τ ——剪应力。

2.2.2 计算指标

E ——钢材的弹性模量；

G ——钢材的剪切模量；

f_y ——钢材的屈服强度；

f ——钢材的抗弯、抗拉、抗压强度设计值；

f_v ——钢材的抗剪强度设计值；

f_{ce} ——钢材的端面承压强度设计值；

α ——钢材的线膨胀系数；

ρ ——钢材的质量密度。

2.2.3 几何参数

A_f ——翼缘的毛截面面积；

A_{fn} ——翼缘的净截面面积；

A_{f0} ——变截面构件小头的翼缘截面面积；

A_{cf} ——受压翼缘的截面面积；

A_w ——腹板截面面积；

A_{wn} ——波浪腹板的净截面面积；

H ——柱的高度；

L ——刚架的跨度；

W ——按受压翼缘确定的截面模量，忽略腹板的贡献；

W_{ef} ——集中荷载作用翼缘绕自身弱轴方向的净截面模量；

W_{e1} ——变截面构件大头截面最大受压纤维的截面模量，忽略腹板的贡献；

W_n ——忽略腹板贡献的净截面模量；

a ——波浪腹板波折曲线的幅值；

a_1 ——集中荷载沿构件跨度方向的支承长度；

b_v ——端板宽度；

b_f ——翼缘宽度；

- b_s ——加劲肋的外伸宽度；
 e_f ——螺栓中心至翼缘边缘的距离；
 e_s ——螺栓中心至加劲板边缘的距离；
 h ——截面高度；
 h_w ——腹板高度；
 h_0 ——小头截面高度；
 h_1 ——大头截面高度；
 l ——构件的长度或跨度；
 l_0 ——受弯屈曲的计算长度；
 l_1 ——梁受压翼缘侧向支撑点间的距离或变截面构件计算区段的平面外计算长度；
 l_a ——锚栓总长度；
 q ——波浪腹板单个重复波浪的波长；
 s ——波浪腹板单个重复波浪展开后的长度；
 t_f ——翼缘厚度；
 t_w ——腹板厚度；
 t_s ——加劲肋的厚度；
 t_p ——端板的厚度；
 t_0 ——受压翼缘的厚度；
 α_f ——疲劳计算的欠载效应等效系数；
 α_1 ——腹板波幅系数；
 β_1 ——腹板波长系数；
 γ ——变截面构件的楔率。

2.2.4 计算系数及其他

- n ——螺栓或连接件的数目；
 n_1 ——所计算截面最外列螺栓处上高强度螺栓的数目；
 k_q ——剪切变形影响系数；
 β_b ——波浪腹板梁整体稳定的等效临界弯矩系数；
 β_{max}, β_{min} ——压弯构件稳定的等效弯矩系数；

β_m, β_t ——变截面压弯构件稳定的等效弯矩系数；

γ_x, γ_y ——截面绕强轴、弱轴的塑性发展系数；

η ——考虑开孔的腹板抗剪稳定承载力折减系数；

λ ——长细比；

λ_{0x} ——构件绕主轴的等效长细比；

μ_1, μ_2 ——阶形柱上段、下段的计算长度系数；

φ ——波浪腹板构件的轴心受压稳定系数；

φ_b ——均匀受弯波浪腹板梁的整体稳定系数；

φ_{br} ——均匀受弯波浪腹板变截面构件的整体稳定系数；

Δ_M ——按线弹性理论计算得到的梁跨中挠度，计算构件截面抗弯刚度时忽略腹板贡献的惯性矩。

3 材料与构件

3.1 材 料

3.1.1 波浪腹板钢结构钢材的选用应符合下列规定:

1 用于承重的波浪腹板钢结构,应采用现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 规定的不低于 Q235 级的钢材、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 规定的 Q345、Q390、Q420、Q460 钢材。当采用其他牌号的钢材时,尚应符合相应有关标准的规定和要求。

2 对钢材的综合性能要求较高时,波浪腹板钢结构可采用符合现行国家标准《建筑结构用钢板》GB/T 19879 中的 Q235GJ、Q345GJ、Q390GJ 和 Q420GJ 的钢材。

3 波浪腹板钢结构处于外露环境时,可采用符合现行国家标准《焊接结构用耐候钢》GB/T 4172 的 Q235NH 和 Q345NH 钢。

4 用于承重结构的钢材应具有抗拉强度、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碳当量的合格保证;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;抗震结构钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不应大于 0.85,应有明显的屈服台阶,且伸长率应大于 20%;钢材应有良好的可焊性和合格的冲击韧性。

3.1.2 钢材的强度设计值应按表 3.1.2 采用。

表 3.1.2 钢材的强度设计值(N/mm²)

钢材 牌号	钢材厚度 或直径(mm)	屈服强度 f_y	强度设计值		
			抗拉、抗压 和抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压 (刨平顶紧) f_{ec}
Q235	≤ 16	235	215	125	320
	$> 16 \sim 40$	225	205	120	320

续表 3.1.2

钢材牌号	钢材厚度或直径(mm)	屈服强度 f_y	强度设计值		
			抗拉、抗压和抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
Q345	≤ 16	345	310	180	400
	$> 16 \sim 35$	325	295	170	400
Q390	≤ 16	390	350	205	415
	$> 16 \sim 35$	370	335	190	415
Q420	≤ 16	420	380	220	440
	$> 16 \sim 35$	400	360	210	440

3.1.3 钢材的物理性能指标应按表 3.1.3 采用。在波浪腹板钢结构的设计和钢材订货文件中,应注明所采用的钢材的牌号、等级和相关的物理力学性能和化学成分的保证,以及结构所需要的附加性能的保证。

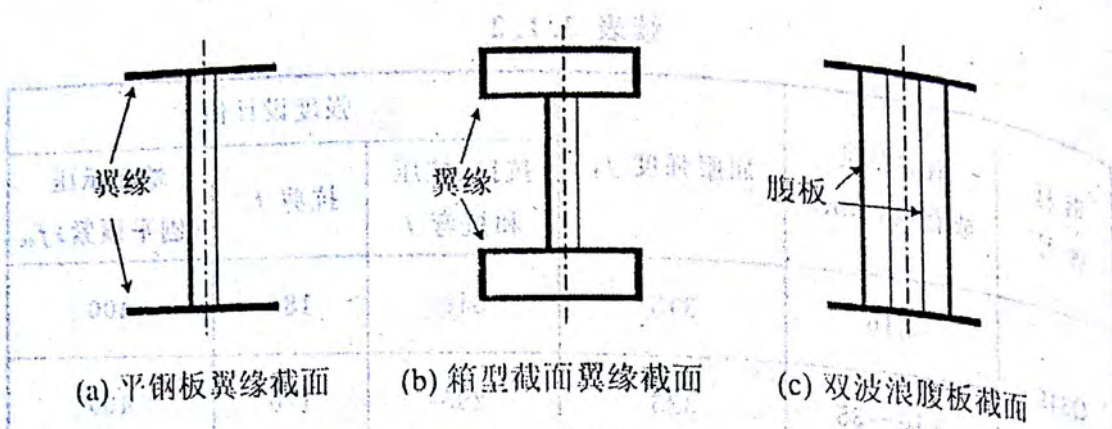
表 3.1.3 钢材的物理性能指标

弹性模量 E (N/mm ²)	剪切模量 G (N/mm ²)	线膨胀系数 α (以每℃计)	质量密度 ρ (kg/m ³)
206×10^3	79×10^3	12×10^{-6}	7850

3.2 构 件

3.2.1 波浪腹板构件由波浪腹板与翼缘构件焊接构成。

3.2.2 波浪腹板构件的翼缘可采用平钢板[图 3.2.2(a)]、箱型截面型材[图 3.2.2(b)]等形式,腹板可采用单腹板[图 3.2.2(a)]、图[3.2.2(b)]以及双腹板[图 3.2.2(c)]等形式。



(a) 平钢板翼缘截面 (b) 箱型截面翼缘截面 (c) 双波浪腹板截面

图 3.2.2 波浪腹板构件截面的形式

3.2.3 由波浪腹板构件组成的门式刚架结构,在构件转折、牛腿以及梁柱连接等节点域位置,构件的腹板宜按照平腹板(图3.2.3)设计,必要时在节点域可设置加劲肋。

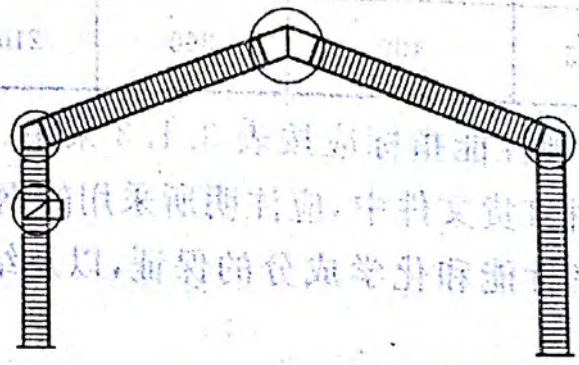


图 3.2.3 构件节点处的腹板设计

3.3 波浪腹板的尺寸范围

3.3.1 波浪腹板工形构件的腹板高厚比不应大于 $600\sqrt{235/f_y}$, 腹板厚度不宜小于 2.0mm, 其波浪腹板尺寸宜按照表 3.3.1 中的分组取值。表 3.3.1 中的参数示意图 3.3.1。

表 3.3.1 波浪腹板工形截面波浪腹板尺寸分组取值

分组	波浪腹板尺寸			
	腹板厚度 t_w (mm)	腹板高度最大值 h_w (mm)	腹板波幅 a (mm)	单波长度 q (mm)
第一组	2.0	1200	20	150

续表 3.3.1

分组	波浪腹板尺寸			
	腹板厚度 t_w (mm)	腹板高度最大值 h_w (mm)	腹板波幅 a (mm)	单波长度 q (mm)
第二组	2.5	1500	20	150
第三组	3.0	1800	30	200
第四组	3.5	2100	30	200
第五组	4.0	2400	30	200
第六组	5.0	3000	40	300
第七组	6.0	3600	40	300

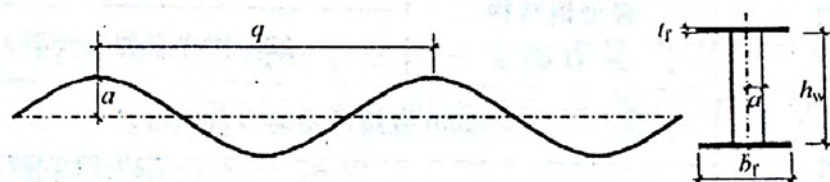


图 3.3.1 波浪腹板尺寸参数示意

4 构 造

4.1 一般构造

4.1.1 波浪腹板工形构件的长细比应符合表 4.1.1 规定的限值。

表 4.1.1 波浪腹板工形截面构件的长细比限值

构件受力情况		长细比限值	
		受压构件	轻型钢结构
250(直接承受动力荷载时)			
受拉构件	250(直接承受动力荷载时)		350(用作其他构件时)

注: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。

4.1.2 波浪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 $15\upsilon \sqrt{235/f_y}$, υ 可按 α_1 与 β_1 查表 4.1.2 取值。

表 4.1.2 受压翼缘板宽厚比计算系数 υ

α_1	β_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

续表 4.1.2

α_1	β_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
0.26	—	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： α_1 ——腹板波幅系数， $\alpha_1 = a/b_1$ ， b_1 为翼缘的半宽， $b_1 = b_f/2$ ； β_1 ——腹板波长系数， $\beta_1 = q/b_1$ 。

4.1.3 波浪腹板门式刚架结构的支撑设置应符合下列要求：

1 在每个温度区段或分期建设的区段中，应分别设置能独立构成空间稳定结构的支撑体系。

2 在设置柱间支撑的开间，宜同时设置屋盖横向支撑，以组成几何不变体系。

3 支撑的间距应符合下列要求：

1) 当无吊车时，采用圆钢交叉支撑宜取 30m~45m，采用型钢支撑时，不宜大于 60m；

2) 当房屋高度较大时，柱间支撑应分层设置；

3) 当房屋内有吊车梁时，柱间支撑应分层设置，且宜设在温度区段中部，或当温度区段较长时宜设在三分点处，支撑间距不宜大于 60m；

4) 当建筑物宽度大于 60m 时，在内柱列宜适当设置柱间支撑。

4 支撑形式可采用带张紧装置的十字交叉圆钢支撑。圆钢支撑可以用于屋面支撑及柱间支撑。当房屋中有起重重量大于 5t 的桥式吊车时，吊车梁以下柱间支撑宜采用型钢支撑。

圆钢支撑与构件连接，可采用图 4.1.3 的形式。

圆钢支撑直径不宜小于 16mm, 圆钢与波浪腹板构件的夹角应在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内, 宜接近 45° 。

5 在屋面的屋脊以及边跨处, 支撑系杆不宜由檩条兼做。在其他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, 且应按照压弯构件验算其整体稳定性。

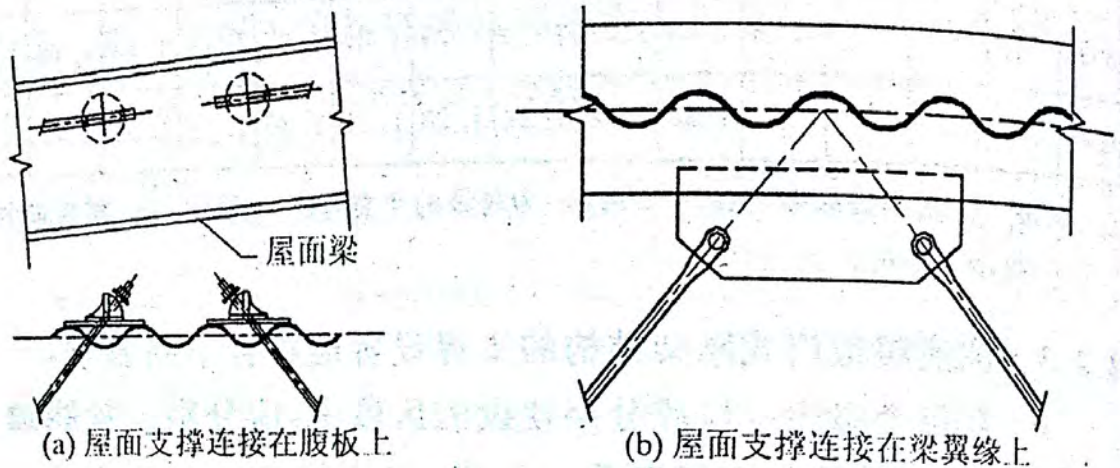


图 4.1.3 屋面支撑连接形式

4.1.4 檩条与波浪腹板工形梁的连接方式应符合下列要求:

1 檩条与波浪腹板刚架梁上翼缘可采用檩托板连接或螺栓连接。

2 檩条在与波浪腹板刚架梁的翼缘连接时, 可采用檩条简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。

4.1.5 波浪腹板工形构件需要设置隅撑时, 应符合下列要求:

隅撑可采用双侧隅撑[图 4.1.5(a)]、单侧隅撑[图 4.1.5(b)]或其他形式。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° 。

4.1.6 波浪腹板工形构件板件拼接应符合下列要求:

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计算的构件,斜角坡度不应大于 1:4(图 4.1.6)。

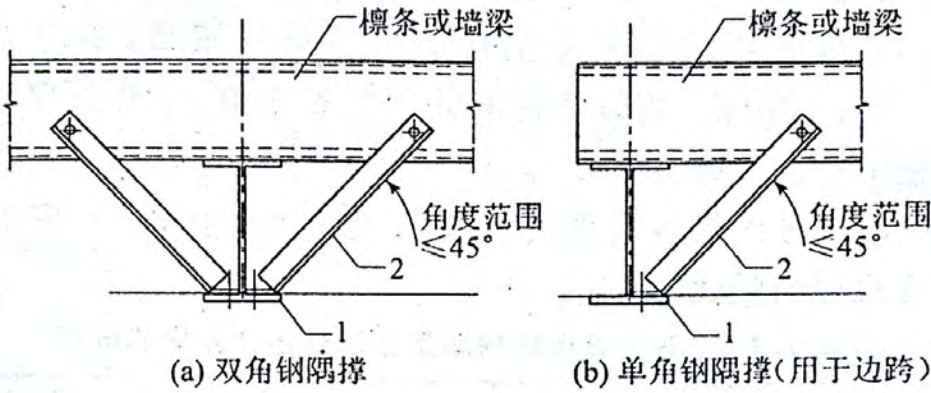


图 4.1.5 隅撑形式

1—波浪腹板梁或柱; 2—刚性压杆

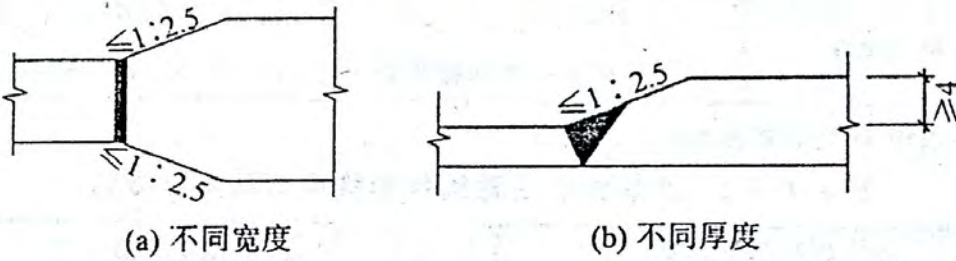


图 4.1.6 不同宽度或厚度钢板的拼接

2 除寒冷地区需要验算疲劳的构件外,当符合以下情况时,板对接焊接时可不放坡:

- 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要求:

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

4.1.7 波浪腹板结构的变形应符合下列规定:

1 波浪腹板屋面坡度不宜小于 5%;采用 360°直立缝卷边屋面板时,屋面坡度不宜小于 2%。

2 波浪腹板门式刚架结构的柱顶侧移限值,不应大于表 4.1.7-1 规定的限值;其他结构的柱顶侧移限值,应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的相关规定。

3 波浪腹板受弯构件的挠度与其跨度的比值,不应大于表 4.1.7-2 规定的限值。

表 4.1.7-1 波浪腹板结构刚架柱顶位移计算值的限值

吊车情况	其他情况	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	$H/120$
有桥式吊车	当吊车有驾驶室时	$H/400$
	当吊车由地面操作时	$H/180$

注:表中 H 为刚架柱高度。

表 4.1.7-2 波浪腹板受弯构件的挠度与跨度比限值

波浪腹板刚架斜梁	斜梁挠度限值
仅支撑压型钢板屋面和冷弯型钢檩条	$l/180$
尚有吊顶	$l/240$
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,按悬伸长度的 2 倍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满足以下条件:

1) 屋面坡度为 2% 时,屋面梁的挠度不大于 $l/300$;

2) 屋面坡度为 2.4% 时,屋面梁的挠度不大于 $l/250$;

3) 屋面坡度为 3% 时,屋面梁的挠度不大于 $l/200$;

4) 屋面坡度为 3.33% 时,屋面梁的挠度不大于 $l/180$ 。

4.1.8 高强度螺栓连接的处理应符合下列规定:

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满足设计文件规定的要求。

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

4.1.9 波浪腹板开孔高度不宜大于腹板高度的 $2/3$,且应满足抗剪强度与抗剪稳定承载力要求。

4.1.10 波浪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。对于波浪腹板吊车梁构件及牛腿,腹板与翼缘连接应采用双面焊缝。

4.1.11 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。

4.2 节点构造

4.2.1 波浪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。

2 端板连接时螺栓应在波浪腹板两侧成对布置,螺栓中心至波浪腹板构件翼缘表面的距离,应满足拧紧螺栓时的施工要求。螺栓中心至波浪腹板中心距离尚应考虑波浪腹板的腹板变幅对螺栓安装的影响,且不宜小于 $(35+a)\text{mm}$, a 为波浪腹板的波幅。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 。端板厚度的设计应按本规程第 5.6.2 条执行。

4.2.2 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应符合 $b_s/t_s \leq 15$ 的要求。

4.2.3 边柱与梁应采用刚性连接,可采用端板平放[图 4.2.3 (a)]、端板竖放[图 4.2.3 (b)]、端板斜放[图 4.2.3 (c)]与[图 4.2.3 (d)]等连接形式。

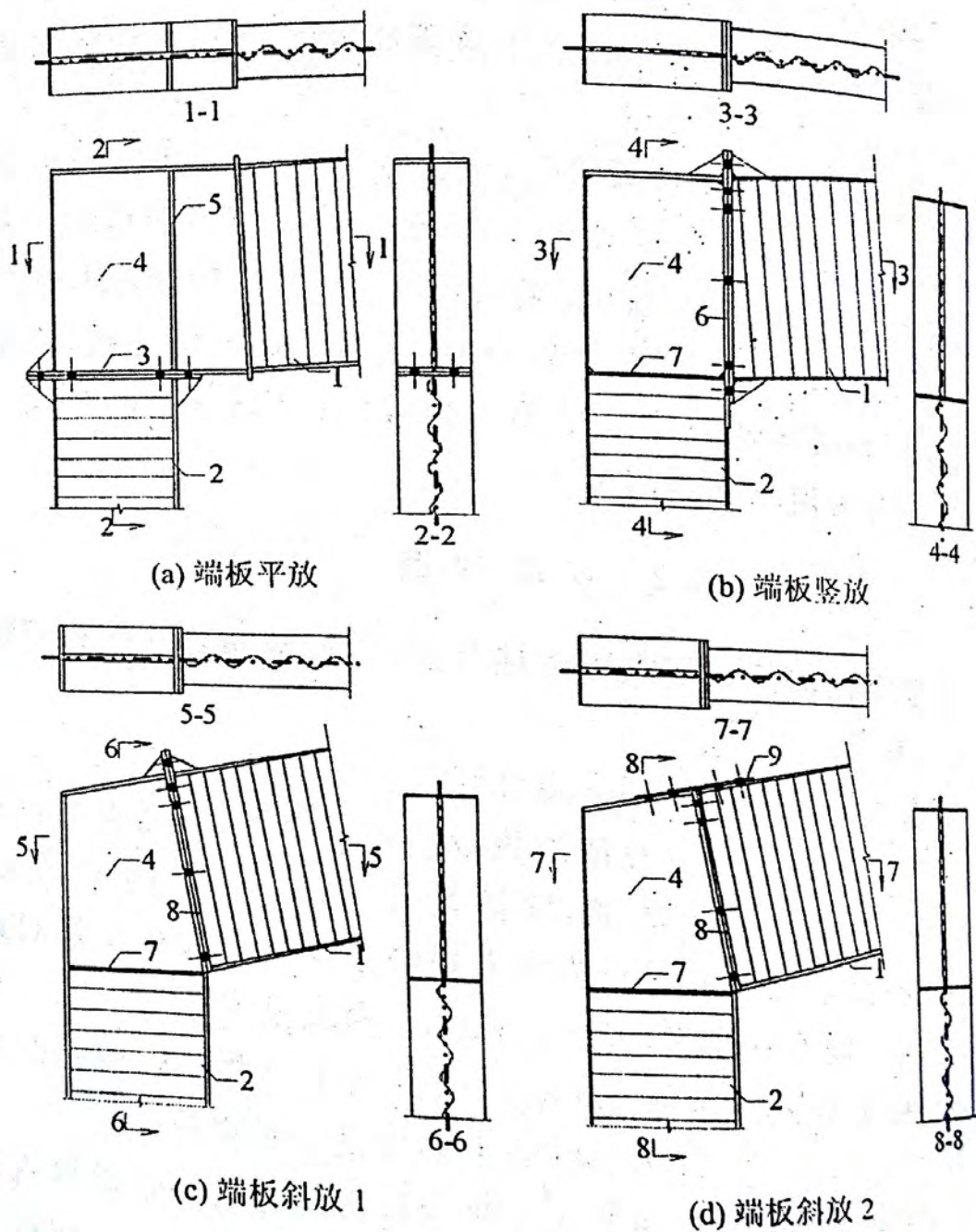


图 4.2.3 边柱与梁的连接

1—波浪腹板梁, 2—波浪腹板柱, 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

4.2.4 中柱与梁的连接节点可采用刚接[图 4.2.4(a)]、[图 4.2.4(b)]与[图 4.2.4(c)]或铰接[图 4.2.4(d)]的连接形式。

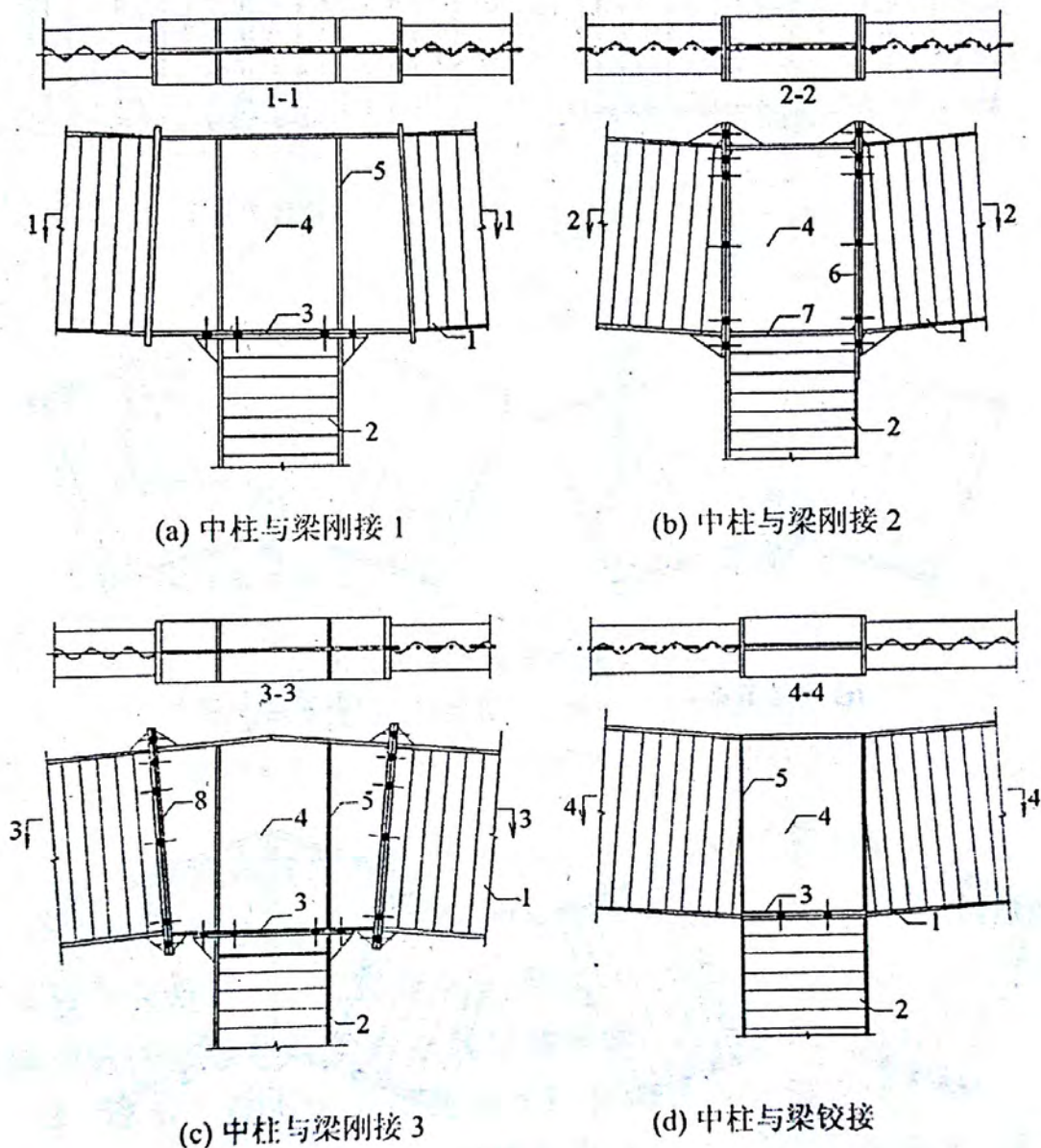
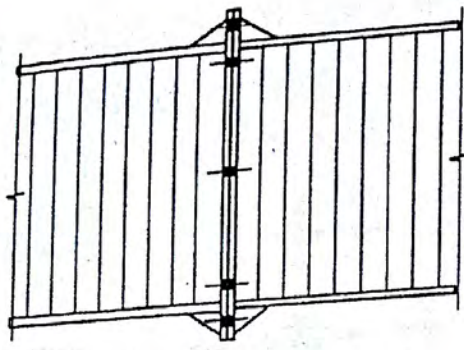


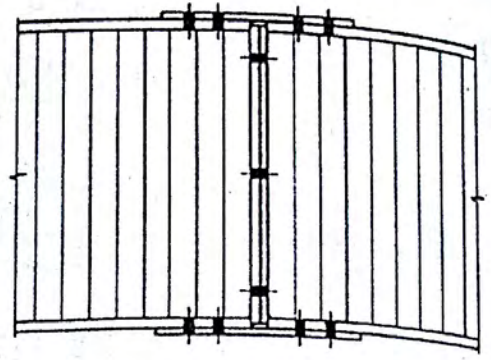
图 4.2.4 中柱与梁的连接

- 1—波浪腹板梁；2—波浪腹板柱；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

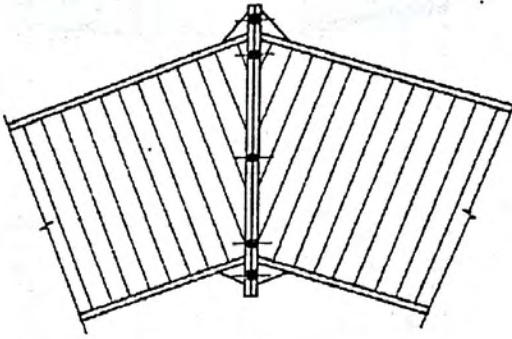
4.2.5 梁与梁的拼接连接节点可采用图 4.2.5 的形式。



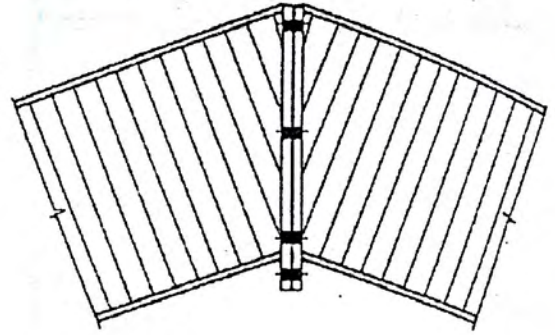
(a) 连接节点 1



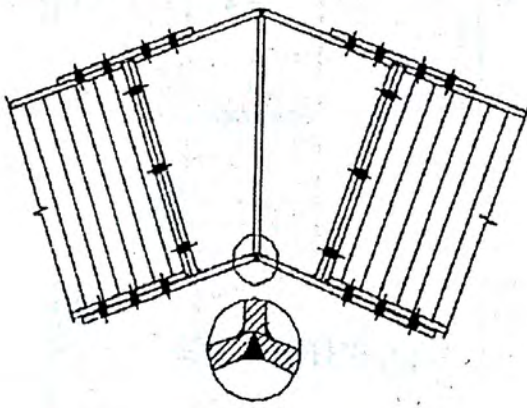
(b) 连接节点 2



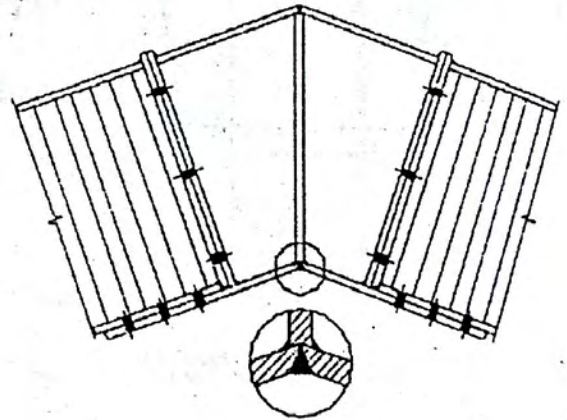
(c) 连接节点 3



(d) 连接节点 4



(e) 连接节点 5



(f) 连接节点 6

图 4.2.5 梁与梁的拼接连接节点

4.2.6 吊车牛腿连接可采用图 4.2.6 的形式。

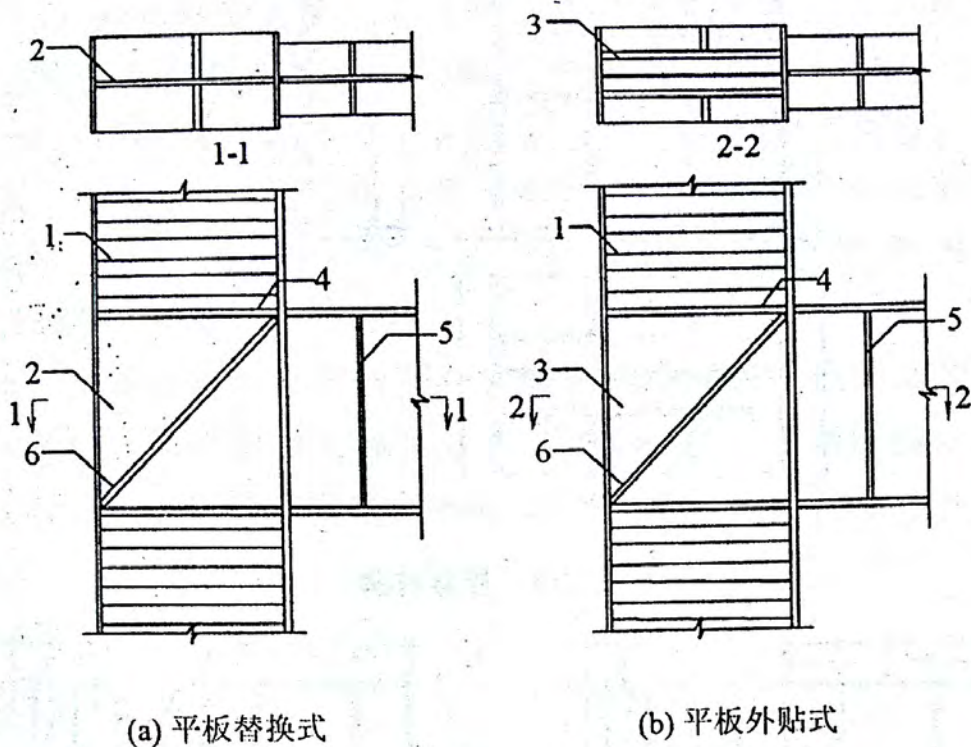


图 4.2.6 吊车牛腿的连接

1—波浪腹板柱；2—平腹板；3—波浪腹板双侧外贴平板；
4—水平加劲肋；5—腹板两侧竖向加劲肋；6—斜向加劲肋

4.2.7 节点处焊缝应符合下列要求：

1 当翼缘板的厚度小于或等于 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。

2 腹板与端板间的焊缝可采用角焊缝或熔透焊缝。

3 当采用熔透焊缝时，焊缝质量等级应达到二级要求，其他焊缝质量等级应达到三级要求。

4.3 柱脚构造

4.3.1 波浪腹板工形截面柱的柱脚可采用铰接柱脚(图 4.3.1-1)、平板式刚接柱脚(图 4.3.1-2)或埋入式柱脚(图 4.3.1-3)。

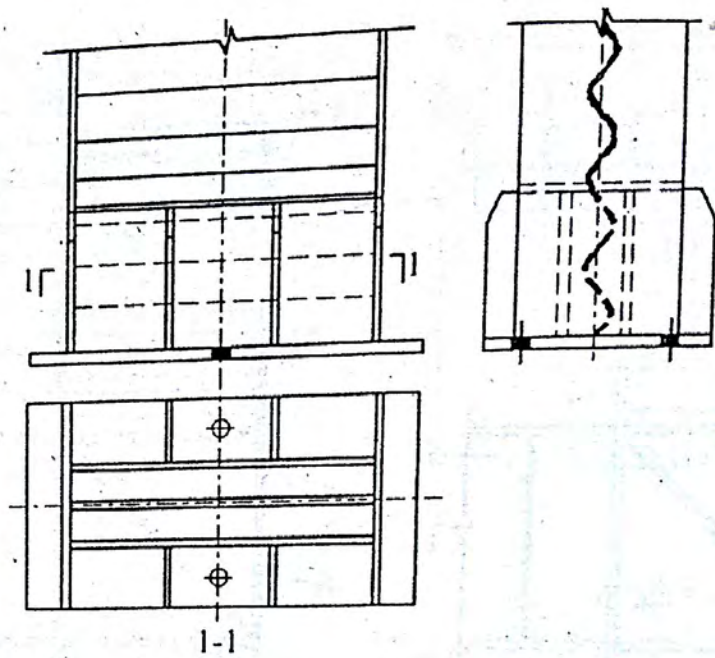
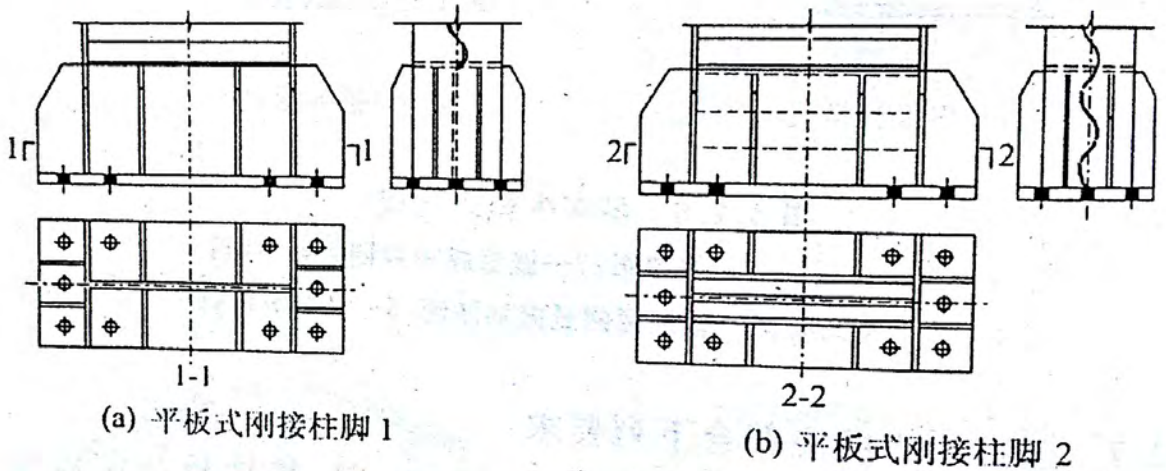


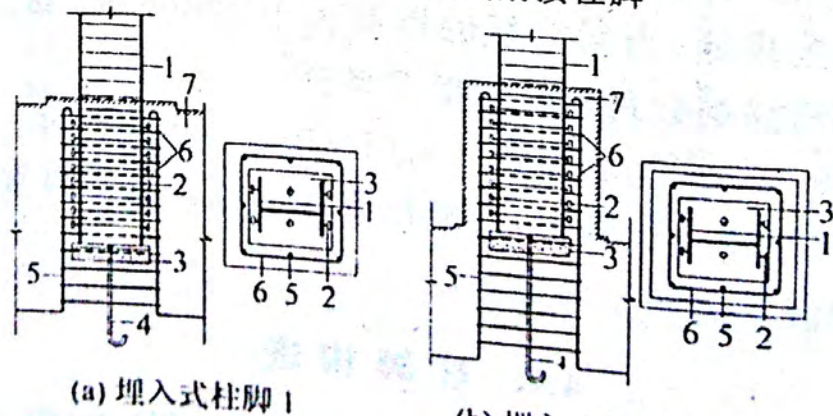
图 4.3.1-1 铰接柱脚



(a) 平板式刚接柱脚 1

(b) 平板式刚接柱脚 2

图 4.3.1-2 平板式刚接柱脚



(a) 埋入式柱脚 1

(b) 埋入式柱脚 2

图 4.3.1-3 埋入式柱脚

1—波浪腹板柱; 2—栓钉; 3—底板; 4—锚栓; 5—纵向钢筋(示意);
6—箍筋(示意); 7—混凝土

4.3.2 柱脚底板的厚度应根据计算确定,但不应小于 16mm。

4.3.3 柱脚锚栓不宜用于承受柱脚底部的水平剪力。此水平剪力可由底板与混凝土基础件的摩擦力(摩擦系数可取 0.4)承受。当 $V \geq 0.4N$ 时应设置抗剪键承受,同时基础应预留抗剪键所对应的槽口。其中, V 是柱底最大水平剪力设计值; N 是最大剪力设计值对应的组合中的柱底轴力设计值,以压力为正,当 N 为负值时取其值为 0。

4.3.4 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,并使包裹的混凝土高出地面 150mm 以上。当柱脚底面在地面以上时,柱脚底面应高出地面 100mm 以上。

表 4.3.2 柱脚底板的厚度

注:1. 当柱脚底板的厚度 $t < 16\text{mm}$ 时,应按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行配筋。
2. 当柱脚底板的厚度 $t \geq 16\text{mm}$ 时,可不配筋。

$$(4.3.3) \quad V > \frac{M}{W_x} + \frac{M}{W_y}$$

式中: V ——柱底最大水平剪力设计值;
 M ——柱底最大弯矩设计值;
 W_x 、 W_y ——柱底截面抵抗矩,按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。

注:1. 当柱脚底板的厚度 $t < 16\text{mm}$ 时,应按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行配筋。
2. 当柱脚底板的厚度 $t \geq 16\text{mm}$ 时,可不配筋。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 本章规定了波浪腹板构件的设计方法,包括截面强度计算模型以及构件强度、刚度与稳定计算公式。

5.1.2 波浪腹板构件在轴力、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。

5.1.3 波浪腹板构件的焊接与螺栓连接应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 及现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 的相关规定。

5.1.4 波浪腹板构件用作门式刚架轻型房屋钢结构厂房吊车梁时,应满足现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 中关于吊车吨位的要求。依据现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 设计的重型厂房,其波浪腹板吊车梁的最大吨位不宜超过 50t。

5.2 受弯构件计算

5.2.1 在主平面内受弯的波浪腹板构件,其抗弯强度应按下式计算:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (5.2.1)$$

式中: M_x 、 M_y ——同一截面处绕强轴(x轴)和弱轴(y轴)的弯矩设计值;

W_{nx} 、 W_{ny} ——对 x 轴和 y 轴忽略腹板贡献的净截面模量;

γ_x 、 γ_y ——截面绕强轴和弱轴的塑性发展系数,取 $\gamma_x = 1.0$, $\gamma_y = 1.2$;

f ——钢材的抗弯强度设计值。

对于需要计算疲劳的梁,宜取 $\gamma_y = 1.0$ 。

5.2.2 在主平面内受弯的波浪腹板构件,其抗剪强度应按下式计算:

$$\tau = \frac{V}{A_{wn}} \leq f_v \quad (5.2.2)$$

式中: V ——计算截面处沿腹板平面作用的剪力设计值;

A_{wn} ——扣除开孔后波浪腹板的净截面面积;

f_v ——腹板钢材的抗剪强度设计值。

5.2.3 波浪腹板构件在主平面内的受弯挠曲值应按下式计算:

$$\Delta = \left(1 + k_q \frac{b_f t_f h_w}{t_w l^2} \right) \Delta_M \quad (5.2.3)$$

式中: k_q ——剪切变形影响系数,按表 5.2.3 取值;

b_f ——翼缘宽度;

t_f ——翼缘厚度;

h_w ——波浪腹板高度;

t_w ——波浪腹板厚度;

l ——波浪腹板构件的跨度;

Δ_M ——按线弹性理论计算得到的梁跨中挠度,计算构件截面抗弯刚度时忽略腹板贡献。

表 5.2.3 不同工况下的剪切变形影响系数 k_q

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

5.2.4 满足下列条件之一时,可不进行波浪腹板梁的整体稳定性计算:

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

2 等截面简支梁受压翼缘的自由长度 l_1 与其宽度 b_1 之比不

超过现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017—2003 表 4.2.1 所规定的数值时。

5.2.5 当不满足本规程第 5.2.4 条时,在最大刚度主平面内受弯的波浪腹板梁,其整体稳定性应按下列式计算:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f \quad (5.2.5)$$

式中: M_x ——绕强轴的最大弯矩的设计值;

W_x ——按受压纤维确定的波浪腹板梁的毛截面模量,忽略腹板的贡献;

φ_b ——波浪腹板梁的整体稳定系数,按本规程第 5.2.6 条确定。

5.2.6 波浪腹板梁的整体稳定系数应按下列公式计算:

$$\varphi_b = \begin{cases} \varphi_{b0} & \varphi_{b0} \leq 0.36 \\ \left(\frac{1}{1 + 0.24/\varphi_{b0}} \right)^2 & \varphi_{b0} > 0.36 \end{cases} \quad (5.2.6-1)$$

$$\varphi_{b0} = \frac{8640}{\beta_b \lambda_y^2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y t_0}{4.4 h_w} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{235}{f_y} \quad (5.2.6-2)$$

式中: β_b ——波浪腹板梁整体稳定的等效临界弯矩系数,应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017—2003 附录 B 的规定执行;

λ_y ——波浪腹板梁在侧向支承点间对截面弱轴 y 的长细比, $\lambda_y = l_1 / i_y$, l_1 见本规程第 5.2.4 条, i_y 为梁毛截面对 y 轴的截面回转半径,忽略腹板的贡献;

η_b ——截面不对称影响系数:对双轴对称截面: $\eta_b = 0$;对单轴对称工字形截面:加强受压翼缘, $\eta_b = 0.8(2\alpha_b - 1)$;加强受拉翼缘, $\eta_b = 2\alpha_b - 1$; $\alpha_b = I_1 / (I_1 + I_2)$ 式中 I_1 、 I_2 分别为受拉翼缘与受压翼缘绕 y 轴的惯性矩;

t_0 ——受压翼缘的厚度。

5.2.7 波浪腹板梁屈曲后的受剪稳定承载力应按下列式计算:

$$\tau = \frac{V}{t_w h_w} \leq \eta \varphi_s f_v \quad (5.2.7-1)$$

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.35\lambda_s^2 & \lambda_s < 0.6 \\ -0.5\lambda_s^2 + 0.25\lambda_s + 0.895 & 0.6 \leq \lambda_s < 1.2 \\ 0.7/\lambda_s^2 & \lambda_s \geq 1.2 \end{cases} \quad (5.2.7-2)$$

$$\lambda_s = \max \left(\frac{t_w^{1/8} h_w}{173.4 (q/s)^{1/8} I_{z1}^{3/8}} \sqrt{\frac{f_y}{235}}, \frac{\sqrt{40s/t_w} - 22}{85.6} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \right) \quad (5.2.7-3)$$

$$s = q \left(3.88 \frac{a^2}{q^2} + 1.07 \frac{a}{q} + 0.95 \right) \quad (5.2.7-4)$$

$$I_{z1} = \frac{a^2 t_w}{2} \left(1.054 - 0.945 \frac{a}{q} - 0.277 \frac{a^2}{q^2} \right) \quad (5.2.7-5)$$

$$\eta = 0.55(d/h_w)^2 - 1.55d/h_w + 1 \quad (5.2.7-6)$$

式中: V ——计算截面处沿腹板平面作用的剪力设计值;

t_w ——波浪腹板厚度;

h_w ——波浪腹板高度;

φ_s ——腹板的抗剪承载力稳定系数;

λ_s ——用于波浪腹板受剪计算时的通用高厚比;

q ——波浪腹板单个重复波浪的波长;

s ——波浪腹板单个重复波浪展开后的长度;

I_{z1} ——单位长度波浪板绕中性轴的面外惯性矩;

η ——考虑开孔的腹板抗剪稳定承载力折减系数,当未开孔时,取 1.0;当孔洞直径 d 在 $1/6h_w \sim 2/3h_w$ 范围内时,按公式(5.2.7-6)计算。

5.3 轴心受力构件计算

5.3.1 轴心受压构件和受拉构件,除高强度螺栓摩擦型连接处外,其强度应按下式计算:

$$\sigma = \frac{N}{A_{fn}} \leq f$$

(5.3.1-1)

式中: N ——轴心拉力或轴心压力的设计值;

A_{fn} ——翼缘的净截面面积。

高强度螺栓摩擦型连接处的强度应按下列公式计算:

$$\sigma = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_{fn}} \leq f$$

(5.3.1-2)

$$\sigma = \frac{N}{A_f} \leq f$$

(5.3.1-3)

式中: 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;

A_f ——翼缘的毛截面面积。

5.3.2 轴心受压波浪腹板构件的稳定性按下式计算:

$$\frac{N}{\varphi A_f} \leq f$$

(5.3.2-1)

式中: φ ——波浪腹板构件的轴心受压稳定系数, 取截面两主轴稳定系数 φ_x 、 φ_y 中的较小者。

波浪腹板构件绕强轴的轴心受压稳定系数 φ_x , 应根据构件绕强轴的等效长细比 λ_{0x} 、钢材的屈服强度, 按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017—2003 中附表 C-2 采用。

构件绕强轴的等效长细比 λ_{0x} 应按下列公式计算:

$$\lambda_{0x} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{\pi^2 EA_f s}{qGA_w}}$$

(5.3.2-2)

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x}$$

(5.3.2-3)

式中: l_{0x} ——构件绕主轴 x 的计算长度;

i_x ——构件截面对主轴 x 的回转半径, 忽略腹板贡献;

A_w ——腹板截面面积。

波浪腹板构件绕弱轴的轴心受压稳定系数 φ_y , 应根据构件绕弱轴的长细比 λ_y 、钢材的屈服强度, 按现行国家标准《钢结构设计

规范》GB 50017—2003 中表 C-3 采用。

构件绕弱轴的长细比按下式计算：

$$\lambda_y = \frac{l_{0y}}{i_y} \quad (5.3.2-4)$$

式中： l_{0y} ——构件绕主轴 y 的计算长度；

i_y ——构件截面对主轴 y 的回转半径，忽略腹板贡献。

5.4 压弯构件计算

5.4.1 弯矩作用在主平面内的波浪腹板拉弯构件、压弯构件，其强度应按下式计算：

$$\frac{N}{A_{fn}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (5.4.1)$$

式中： γ_x 、 γ_y ——与截面模量相应的塑性发展系数，按本规程第 5.2.1 条确定。

5.4.2 弯矩作用在对称平面内的波浪腹板构件，其弯矩作用平面内稳定性应按下式计算：

$$\frac{N}{\varphi_x A_f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\left(1 - \frac{N}{N'_{Ex}} \varphi_x\right) W_{1x}} \leq f \quad (5.4.2)$$

式中： N ——所计算构件段范围内的轴压力；

N'_{Ex} ——参数， $N'_{Ex} = \frac{\pi^2 EA_f}{1.1\lambda_{0x}^2}$ ；

φ_x ——弯矩作用平面内的轴心受压波浪腹板构件的稳定系数；

M_x ——所计算构件段范围内的最大弯矩设计值；

W_{1x} ——在弯矩作用平面内对较大受压纤维的毛截面模量，忽略腹板的贡献；

β_{mx} ——等效弯矩系数。

等效弯矩系数 β_{mx} 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: $\beta_{mx} = 0.65 + 0.35 \frac{M_2}{M_1}$, 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, $\beta_{mx} = 1.0$ 。

5.4.3 弯矩作用在对称平面内的波浪腹板构件, 其弯矩作用平面外稳定性应按下式计算:

$$\frac{N}{\varphi_y A_f} + \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_b W_{1x}} \leq f \quad (5.4.3)$$

式中: φ_y ——弯矩作用平面外的轴心受压构件稳定系数, 按第 5.3.2 条确定;

φ_b ——波浪腹板梁的整体稳定系数, 按本规程第 5.2.6 条确定;

M_x ——所计算构件段范围内的最大弯矩设计值;

β_{tx} ——等效弯矩系数。

等效弯矩系数 β_{tx} 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荷载和内力情况确定:

1) 所考虑构件段无横向荷载作用时: $\beta_{tx} = 0.65 + 0.35 \frac{M_2}{M_1}$, M_1 和 M_2 是弯矩作用平面内的端弯矩, 使构件段产生同向曲率时取同号; 产生反向曲率时取异号, $|M_1| \geq |M_2|$;

2) 所考虑构件段内有端弯矩和横向荷载作用时: 使构件段产生同向曲率时, $\beta_{tx} = 1.0$; 使构件段产生反向曲率时, $\beta_{tx} = 0.85$;

3) 所考虑的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, $\beta_{ix} = 1.0$ 。

5.4.4 波浪腹板变截面构件弯矩作用平面内的稳定性应按下列公式计算:

$$\frac{N_0}{\varphi_{xy} A_{f0}} + \frac{\beta_m M_1}{\left(1 - \frac{N_0}{N'_{E0}} \varphi_{xy}\right) W_{el}} \leq f \quad (5.4.4-1)$$

$$N'_{E0} = \frac{\pi^2 EA_{f0}}{1.1\lambda_{0x}^2} \quad (5.4.4-2)$$

式中: N_0 ——所计算构件段小头截面的轴心压力设计值;

M_1 ——所计算构件段大头截面的弯矩设计值;

A_{f0} ——变截面构件小头的翼缘截面面积;

W_{el} ——变截面构件大头截面最大受压纤维的截面模量, 忽略腹板的贡献;

φ_{xy} ——轴心受压稳定系数, 其中计算长度系数应按现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》CECS 102: 2002 中第 6.1.3 条第 2 款的规定确定, 长细比 λ_{0x} 按小头截面回转半径, 依据本规程第 5.3.2 条计算;

β_m ——等效弯矩系数, 有侧移刚架柱的等效弯矩系数取 1.0;

N'_{E0} ——参数, $N'_{E0} = \pi^2 EA_{f0} / (1.1\lambda_{0x}^2)$, 其中 λ_{0x} 以小头截面为准, 按本规程第 5.3.2 条计算, 计算长度系数应按现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》CECS 102: 2002 中第 6.1.3 条第 2 款的规定确定。

5.4.5 波浪腹板变截面构件弯矩作用平面外稳定性应按下述公式计算:

1 弯矩作用平面外稳定性:

$$\frac{N_0}{\varphi_y A_{f0}} + \frac{\beta_i M_1}{\varphi_{br} W_{el}} \leq f \quad (5.4.5-1)$$

$$\beta_i = 1 - N_0 / N'_{Ex0} + 0.75 (N_0 / N'_{Ex0})^2 \quad (5.4.5-2)$$

式中： φ_y ——波浪腹板轴心受压构件弯矩作用平面外的稳定系数，以小头截面为准，按本规程第 5.3.2 条确定，计算长度取纵向支撑点间的距离；

φ_{br} ——均匀受弯波浪腹板变截面构件的整体稳定系数，按照本条第 2 款确定；

N_0 ——所计算构件段小头截面的轴心压力设计值；

M_1 ——所计算构件段大头截面的弯矩设计值；

β_1 ——等效弯矩系数，对一端弯矩为零的区段，按公式(5.4.5-2)计算；对两端弯曲应力基本相等的区段， $\beta_1=1.0$ 。

2 均匀受弯波浪腹板变截面构件的整体稳定系数 φ_{br} ，按下列公式计算：

$$\varphi_{br} = \begin{cases} \varphi_{b1} & \varphi_{b1} \leq 0.36 \\ \left(\frac{1}{1+0.24/\varphi_{b1}} \right)^2 & \varphi_{b1} > 0.36 \end{cases} \quad (5.4.5-3)$$

$$\varphi_{b1} = \beta_b \frac{8640}{\lambda_{y0}^2} \sqrt{\left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^4 + \left(\frac{\lambda_{y0} t_0}{4.4 h_0} \right)^2} \frac{235}{f_y} \quad (5.4.5-4)$$

$$\lambda_{y0} = \mu_s l_1 / i_{y0} \quad (5.4.5-5)$$

$$\mu_s = 1 + 0.023 \gamma \sqrt{l_1 h_0 / A_{cf}} \quad (5.4.5-6)$$

$$\mu_w = 1 + 0.00385 \gamma \sqrt{l_1 / i_{y0}} \quad (5.4.5-7)$$

$$\gamma = h_1 / h_0 - 1 \quad (5.4.5-8)$$

式中： φ_{b1} ——均匀受弯波浪腹板变截面构件的弹性整体稳定系数；

i_{y0} ——小头截面受压翼缘绕 y 轴的回转半径；

A_{cf} ——受压翼缘的截面面积；

t_0 ——小头截面受压翼缘的厚度；

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；

γ ——变截面构件的楔率；

h_0, h_1 ——分别为小头、大头截面的高度。

5.4.6 波浪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 可按照现行国家标准《钢结构设计规范》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。

5.5 局部承压计算

5.5.1 当波浪腹板梁上翼缘作用有集中荷载时,腹板的局部承压承载力可按下式计算:

$$\sigma_c = \frac{P}{8.0 \left(1 + \frac{a_1 + 2h_R}{0.17}\right) \left(\frac{W_{ef}}{qI_{z1}/t_w}\right)^{0.4} \cdot 2at_w} \leq f \quad (5.5.1)$$

式中: P ——集中荷载设计值,对动力荷载应考虑动力系数;

a_1 ——集中荷载沿跨度方向的支承长度(以 m 为单位),对轨道上的轮压,可取 0.05m;

h_R ——轨道的高度(以 m 为单位),对梁顶无轨道的梁 $h_R = 0$;

W_{ef} ——集中荷载作用翼缘绕自身弱轴方向的净截面模量。

5.5.2 当波浪腹板梁受弯矩和上翼缘处集中荷载的共同作用时,局部承压承载力可按照下列规定计算:

当 $\frac{M}{b_f t_f h_w f} \leq 0.5$ 时,按照公式(5.5.1)计算;

当 $\frac{M}{b_f t_f h_w f} > 0.5$ 时,按下式计算:

$$\sigma_{c,M} = \sigma_c + \frac{M}{b_f t_f h_w} \leq 1.5f \quad (5.5.2)$$

式中: σ_c ——按照公式(5.5.1)计算;

M ——集中荷载作用截面的弯矩设计值。

5.5.3 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 $15t_w \sqrt{235/f}$ 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。

5.6 节点计算

5.6.1 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 和轴心力 N 共同作用时(图 5.6.1), 可将 M 与 N 转化为上翼缘的拉力 $T_1 = M/h_w + N/2$; 拉力 T_1 由翼缘两侧的螺栓承受, 每个螺栓承受的拉力 N_t 按下列公式计算:

当 $M/h_w + N/2 > 0$ 时,

$$N_t = \frac{M/h_w + N/2}{n_t} \quad (5.6.1-1)$$

式中: M ——端板处承受的弯矩设计值;

N ——端板处承受的轴心力设计值, 拉力为正值;

n_t ——受拉翼缘两侧螺栓的个数。

2 当受剪力 V 作用时, 每个螺栓受承的剪力 N_v 按下式计算:

$$N_v = \frac{V}{n} \quad (5.6.1-2)$$

式中: V ——端板处承受的剪力设计值;

n ——端板上螺栓的个数。

3 摩擦型高强度螺栓按下式计算:

$$\frac{N_v}{N_v^b} + \frac{N_t}{N_t^b} \leq 1 \quad (5.6.1-3)$$

式中: N_t^b ——一个高强度螺栓的抗拉承载力设计值;

N_v^b ——一个高强度螺栓的抗剪承载力设计值。

N_t^b 与 N_v^b 按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 取值。

4 承压型高强度螺栓按下列公式计算：

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (5.6.1-4)$$

$$N_v \leq N_c^b / 1.2 \quad (5.6.1-5)$$

式中： N_c^b ——一个高强度螺栓的承压承载力设计值；

N_v^b ——一个高强度螺栓的抗剪承载力设计值。

N_c^b 与 N_v^b 按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 取值。

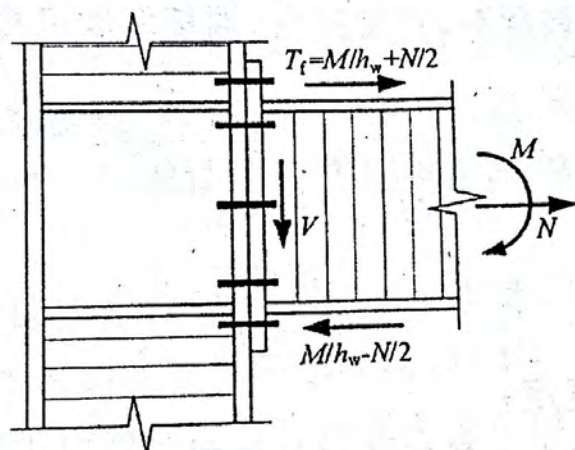


图 5.6.1 波浪腹板构件端板连接螺栓受力简图

5.6.2 端板连接节点的端板厚度 t_p 可按下列分类并计算：

I 伸臂类端板：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6N_t e_t}{b_p f}} \quad (5.6.2-1)$$

II 两邻边支承类端板：

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6N_t e_t e_w}{[b_p e_w + 2(e_t + e_w)e_t] f}} \quad (5.6.2-2)$$

III 两对边支承类端板(端板外伸式)，可按照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，端板厚度可按公式(5.6.2-3)计算；若上、下翼缘内侧的一对螺栓(共两对)均受拉时，端板厚度可按公式(5.6.2-4)计算；

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_1 e_f (h_w - e_f)^2}{h_w^2 b_p f}} \quad (5.6.2-3)$$

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_1 e_f (h_w - e_f)}{h_w b_p f}} \quad (5.6.2-4)$$

IV 两对边支承类端板(端板平齐式),可按照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,端板厚度可按公式(5.6.2-5)计算;若上、下翼缘内侧的一对螺栓(共两对)均受拉时,端板厚度可按公式(5.6.2-6)计算;

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_1 e_f (h_w - e_f)}{h_w b_p f}} \quad (5.6.2-5)$$

$$t_p \geq \sqrt{\frac{8N_1 e_f}{b_p f}} \quad (5.6.2-6)$$

式中: b_p ——端板宽度;

e_f ——螺栓中心至翼缘边缘的距离;

d ——螺栓对之间的距离;

N_1 ——单个高强度螺栓受拉承载力设计值;

f ——端板钢材的受弯强度设计值。

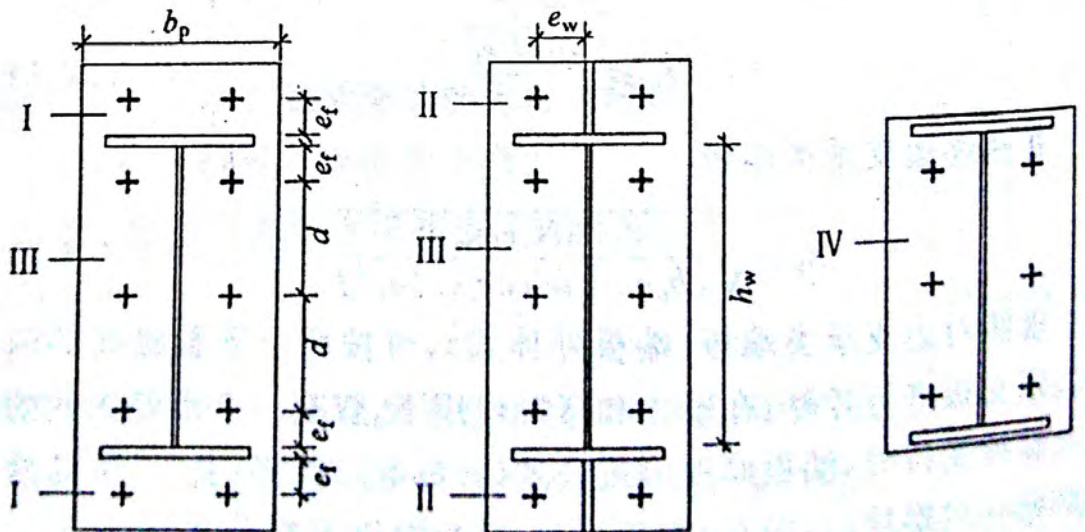


图 5.6.2 端板支承条件

5.7 疲劳计算

5.7.1 波浪腹板钢结构的疲劳计算应满足以下规定：

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

2 疲劳计算采用容许应力幅法，应力按弹性状态计算，容许应力幅按构件和连接类别以及应力循环次数确定，依照现行国家标准《钢结构设计规范》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浪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，可不计算疲劳；

4 对重级、中级工作制的波浪腹板吊车梁，应进行疲劳强度计算；对于轻级工作制的波浪腹板吊车梁，可不计算其疲劳。

5.7.2 重级、中级工作制的波浪腹板吊车梁的疲劳可作为常幅疲劳，按下式计算：

$$\alpha_1 \Delta\sigma \leq [\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} \quad (5.7.2)$$

式中： $\Delta\sigma$ ——按一台吊车标准值算出的计算应力幅， $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ；

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或压应力（拉应力取正值，压应力取负值）；

α_1 ——欠载效应的等效系数，按表 5.7.2-1 采用；

$[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ ——循环次数 n 为 2×10^6 次的容许应力幅，按表 5.7.2-2 采用。

表 5.7.2-1 吊车梁欠载效应的等效系数 α_f

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 5.7.2-2 循环次数 n 为 2×10^6 次的容许应力幅(N/mm²)

构件和连接类别	1	2	3	4	5	6	7	8
$[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$	176	144	118	103	90	78	69	59

6 施 工

6.1 波浪腹板的轧制要求

6.1.1 波浪腹板轧制所用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 的有关规定。

6.1.2 波浪腹板波幅偏差的最大值 $\Delta_1 = |a_1 - a_2|$ 与 $\Delta_2 = |a_1 - a_3|$ 不应超过 2mm, $\Delta_2 = a_1 - a_3$ 不应超过 2mm, 且不应超过波幅的 1/10, 波长偏差最大值 $\Delta_3 = |q_1 - q_2|$ 不应超过 4mm(图 6.1.2)。

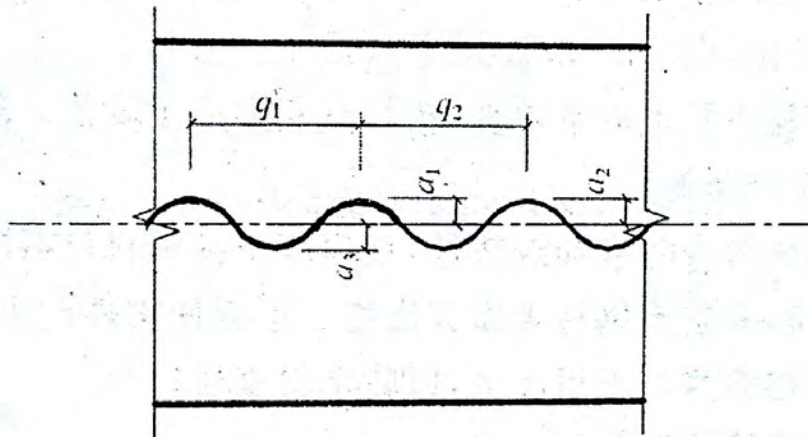


图 6.1.2 波浪腹板轧制偏差示意

6.2 波浪腹板构件的焊接要求

6.2.1 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。

6.2.2 焊接材料应与母材强度相匹配。当两种不同强度钢材相

连接时,应采用与低强度钢材相匹配的焊接材料。

6.2.3 焊接前应根据结构特点和焊接工艺规定的焊接顺序、方法和措施,确定具体的焊接参数,保证焊接质量。

6.2.4 当波浪腹板与端板、翼缘板连接采用对接焊缝和角焊缝时应符合下列规定:

1 波浪腹板与翼缘板的焊接宜采用自动连续焊接。

2 波浪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。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。

3 焊缝质量等级的要求应按现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的规定执行。

6.2.5 钢材不平直应予矫直,构件有变形应予矫正。矫直或矫正时应采取下列措施:

1 顶床矫直时应加放垫模,垫模应垫在钢材(构件)受力性能较好的部位,并空出钢材表面突出物。不得使构件产生永久变形;

2 火焰烘烤时不得浇水,以防钢材变质;

3 锤击矫正时应加锤垫。

6.3 构件制作误差控制

6.3.1 C级螺栓孔径的允许偏差应符合表 6.3.1 的规定,螺栓孔孔壁表面粗糙度 R_a 不应大于 $25\mu\text{m}$ 。

表 6.3.1 C级螺栓孔径的允许偏差(mm)

项目	允许偏差
直径	+1.0
	0.0
圆度	2.0
垂直度	$0.03t$,且不应大于 2.0

6.3.2 螺栓孔孔距的允许偏差应符合表 6.3.2 的规定。

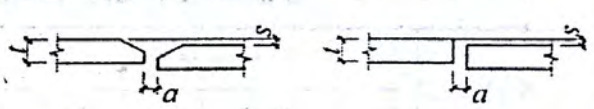
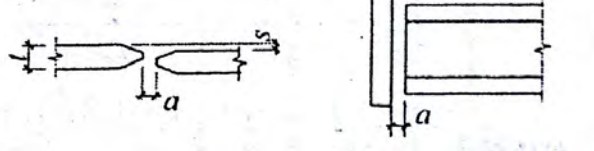
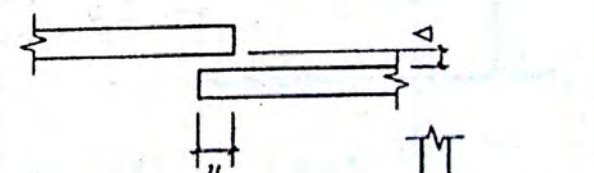
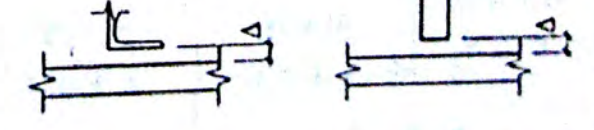
表 6.3.2 螺栓孔孔距允许偏差(mm)

螺栓孔孔距范围	≤500	501~1200	1201~3000	>3000
同一组内任意两孔间距离	±1.0	±1.5	—	—
相邻两组的端孔间距离	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0

- 注:1 在节点中连接板与一根杆件相连的所有螺栓孔为一组;
 2 对接接头在拼接板一侧的螺栓孔为一组;
 3 在两相邻节点或接头间的螺栓孔为一组,但不包括上述两款所规定的螺栓孔;
 4 受弯构件翼缘上的连接螺栓孔,每米长度范围内的螺栓孔为一组。

6.3.3 钢构件焊接应按现行行业标准《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81 的规定执行,焊接加工件及焊缝允许偏差应符合表 6.3.3-1~表 6.3.3-3 的规定。

表 6.3.3-1 焊接连接拼装的允许偏差(mm)

项目		允许偏差	图例
边缘高差 s		$t/10$ 且不大于 3.0	
对接 间隙 a	手工焊、气体保护焊	±1.0	
	埋弧焊	1.0	
搭接长度 u		5.0	
顶接缝隙 Δ		1.5	

续表 6.3.3-1

项目	允许偏差	图例
端接头错位或短缺 c	2.0	

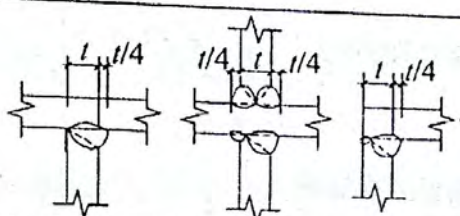
表 6.3.3-2 非熔透组合焊缝和角焊缝外形尺寸的允许偏差(mm)

项目	示意图	允许偏差	
		$K \leq 6$	$K > 6$
焊脚尺寸 K		+1.5 0	+3.0 0
角焊缝余高 C		+1.5 0	+3.0 0

表 6.3.3-3 对接焊缝和组合焊缝的外形尺寸的允许偏差(mm)

项目	质量标准		示意图
	一、二级	三级	
对接焊缝余高 C	$b < 20$ $C = 1.5 \pm 1.0$	$b < 20$ $C = 1.5 \pm 1.5$	
	$b \geq 20$ $C = 2.0 \begin{matrix} +1.0 \\ -1.5 \end{matrix}$	$b \geq 20$ $C = 2.0 \begin{matrix} +1.5 \\ -2.0 \end{matrix}$	
对接焊缝错边 S	$S < 0.1t$ 但不得大于 2.0	$S < 0.15t$ 但不得大于 3.0	

续表 6.3.3-3

项目	质量标准		示意图
	一、二级	三级	
熔透的组合 焊缝焊脚 尺寸 K	$K \geq t/4$	+4 0	

6.3.4 组装构件允许偏差应符合表 6.3.4-1、表 6.3.4-2 的规定。

表 6.3.4-1 钢柱外形尺寸允许偏差(mm)

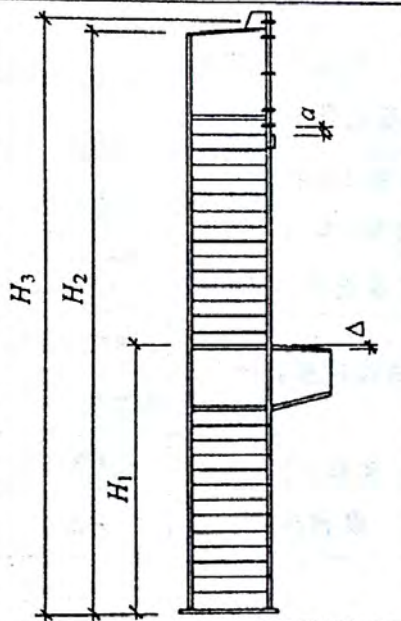
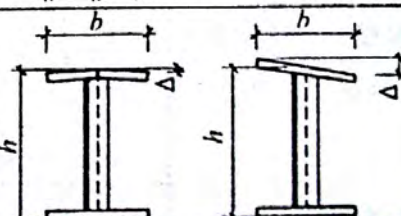
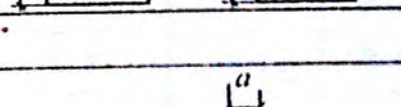
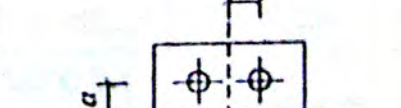
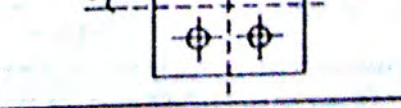

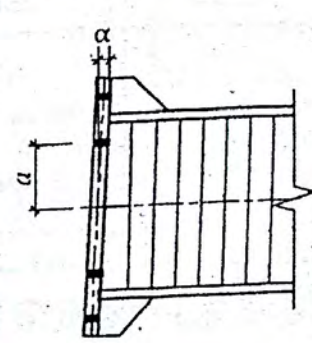
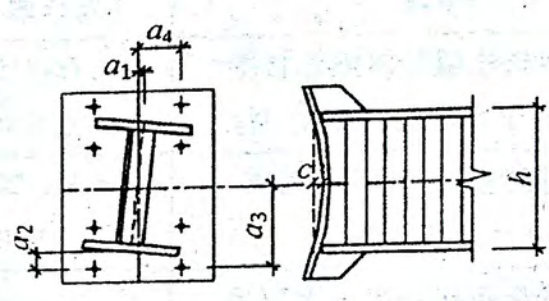
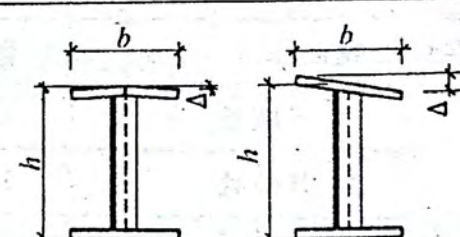

项目		允许偏差	图例
柱底面到柱端与斜梁连接的最上一个安装孔的距离 H_2		$\pm H_2/1500$ ± 5.0	
柱底面到牛腿支承面距离 H_1		$\pm H_1/2000$ ± 5.0	
受力托板表面到第一个安装孔的距离 a		± 1.0	
牛腿面的翘曲 Δ		2.0	
柱身扭转	牛腿处	3.0	
	其他处	6.0	
柱截面的宽度和高度		+3.0	
		-2.0	
翼缘板对腹板的垂直度	连接处	± 1.5	
	其他处	$\pm b/100, \pm 5.0$	
柱脚底板平面度		3.0	
柱脚螺栓孔中心对柱轴线的距离		± 3.0	

表 6.3.4-2 波浪腹板梁允许偏差 (mm)

项目		允许偏差	图例
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	
扭曲		$h/250, 10.0$	
梁长度 L		$\pm L/2000$	
		± 10.0	

注: h_e 为端板高度, h 为梁高.

6.3.5 本章节未规定的构件制作偏差应符合现行行业标准《门式刚架轻型房屋钢构件》JG 144 的有关规定。

6.4 构件安装误差控制

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

6.4.2 支承面、地脚螺栓(锚栓)的允许偏差应符合表 6.4.2 的规定。

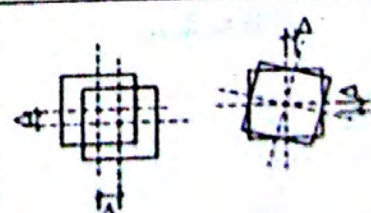
表 6.4.2 支承面、地脚螺栓(锚栓)的允许偏差(mm)

项目		允许偏差
支承面	标高	±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	+10.0 0
	螺栓长度	+20.0 0
预留孔中心偏移		10.0

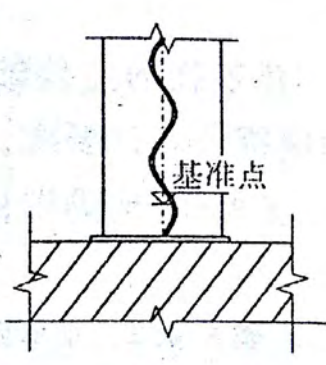
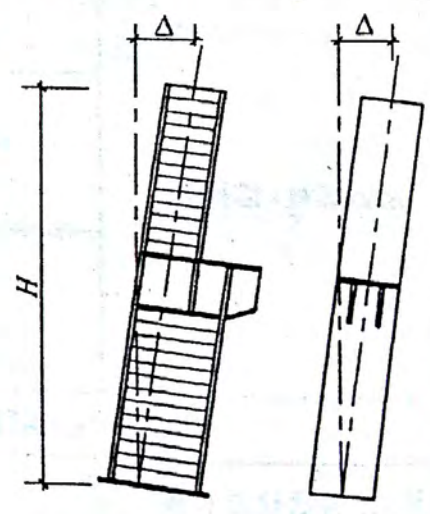
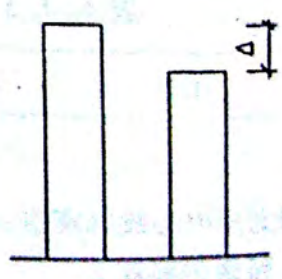
注： l_a 为锚栓总长度

6.4.3 刚架柱安装的允许偏差应符合表 6.4.3 的规定。

表 6.4.3 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	±3.0	

续表 6.4.3

项目		允许偏差	图示	
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	$H \leq 10m$	± 10.0	
		$H > 10m$	± 20.0	
	多阶柱	底层柱	± 10.0	
		柱全高	± 25.0	
柱顶标高 Δ		± 10.0		

6.4.4 刚架斜梁安装的允许偏差应符合表 6.4.4 的规定。

表 6.4.4 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	10.0
	其他处	$L/500$

6.4.5 吊车梁安装的允许偏差应符合表 6.4.5 的规定。

表 6.4.5 吊车梁安装的允许偏差(mm)

项目	允许偏差 a		图例
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	
	其他处	±15	

续表 6.4.5

项目	允许偏差 a	图例
下挂时梁底高差	± 10	
相邻梁高差	± 1.0	

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

6.5 钢构件除锈与涂装防腐

6.5.1 应用在工业建筑中的波浪腹板构件,其防腐蚀设计应按照现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 的规定执行。在强腐蚀介质环境下不得使用波浪腹板构件,否则应有可靠的涂装预防措施。

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

6.5.3 无论是采用手工除锈还是喷射或抛射除锈,钢构件表面的除锈等级不应低于现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923 中除锈等级的最低要求,且不应低于表 6.5.3 规定的各种底漆或防腐漆要求的最低除锈等级要求。

表 6.5.3 各种底漆或防腐漆要求的最低除锈等级

涂料品种	除锈等级
醇酸等底漆或防腐漆	St2

续表 6.5.3

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

6.5.4 钢结构涂装工程应在构件制作质量经检验符合标准后进行。

6.5.5 表面处理后到涂底漆的时间间隔不应超过 6h,在此期间表面应保持洁净,严禁沾水和油污等。

6.5.6 涂装应在适宜的温度、湿度和清洁环境中进行,并应符合下列规定:

1 涂装固化应符合涂料产品说明书的要求,当产品说明书无要求时,涂装固化温度以 $5^{\circ}\text{C} \sim 38^{\circ}\text{C}$ 为宜;

2 施工环境相对湿度不应大于 85%,构件表面有结露时不得涂装;

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

6.5.7 构件涂底漆后,应在明显位置标注构件代号。

6.5.8 施工图中应注明暂时不涂底漆的部位不得涂漆,待安装完毕后补涂。

6.5.9 应在图纸中注明对涂层进行定期的检查和维护,以保证构件的耐久性。

6.5.10 除锈和涂装工程验收应包括在中间检查和竣工验收中。

7 验 收

7.1 一般规定

7.1.1 波浪腹板钢结构工程验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的规定。

7.1.2 波浪腹板钢结构工程施工质量的验收应在施工单位自检合格的基础上,按照检验批的划分,进行波浪腹板钢结构分项工程验收。

7.1.3 波浪腹板钢结构分项工程可包含若干个检验批,其中,波浪腹板及其构件应专门作为一个检验批,并应执行本规程附录 A 的检验规定和填写验收记录。

7.2 波浪腹板验收

I 主控项目

7.2.1 波浪腹板高度、腹板宽度、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。

7.2.2 波浪腹板成型后板面不应有裂纹。

检查数量:每批同类构件抽查 5%,且不少于 10 件。

检查方法:观察检查和用 10 倍放大镜检查。

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

检查数量:全数检查。

检验方法:检查焊接工艺评定报告和焊接方案。

II 一般项目

7.2.4 波浪腹板的允许误差应符合表 7.2.4 的规定。

检查数量:每批同类构件抽查 5%,且不少于 10 件。

检查方法:用尺检查。

表 7.2.4 波浪腹板的尺寸允许误差(mm)

项 目	允许误差
波幅 a	± 2
波长 q	± 4
腹板高度 h_w	± 4

7.2.5 波浪腹板成型后不应有凹凸和皱褶。

检查数量:每批同类构件检查 5%。

检查方法:观察检查。

7.3 工程质量验收

7.3.1 波浪腹板钢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。

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

7.3.3 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 和本规程的相关规定,并达到下列要求:

1 主控项目必须符合合格质量标准的要求。

2 一般项目其检验结果应有 80% 及以上的检验点符合合格质量标准的要求,且最大值不应超过其允许值的 1.2 倍。

3 质量检查记录、质量证明文件等资料应完整。

7.3.4 波浪腹板钢结构分项工程施工质量控制资料应包括材料和证明文件、材料实验报告、焊缝质量检测报告、各检验批记录等,并应符合设计文件的要求。

7.3.5 波浪腹板钢结构分项工程施工材料复验资料应包括涉及结构安全性能的原材料及成品的见证取样复验报告,承担见证取样检测及有关结构安全检测的单位应具有相应资质。

7.3.6 波浪腹板钢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。

7.3.7 波浪腹板钢结构分项工程竣工验收时应提交下列文件和记录:

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

附录 A 波浪腹板钢结构验收记录表

工程名称			检验批部位		
施工单位			项目经理		
监理单位			总监理工程师		
施工依据标准			施工单位负责人		
主控项目		合格质量标准 (按本规程)	施工单位检验评 定记录或结果	监理(建设)单位 验收记录或结果	备注
1	波浪板规格	第 7.2.1 条			
2	波浪腹板 表面质量	第 7.2.2 条			
3	波浪板焊接	第 7.2.3 条			
一般项目					
1	波浪腹板尺寸 允许偏差	第 7.2.4 条			
2	波浪腹板成型 后表面质量	第 7.2.5 条			
施工单位 检验评定结果		班组长： 或专业工长： 年 月 日			质检员： 或项目技术负责人： 年 月 日
监理(建设)单位 验收结论		监理工程师： 或建造单位技术负责人：			年 月 日

本规程用词说明

1 为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:

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,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《钢结构设计规范》GB 50017
- 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018
- 《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046
- 《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《冷轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 708
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《焊接结构用耐候钢》GB/T 4172
- 《碳钢焊条》GB/T 5117
- 《低合金钢焊条》GB/T 5118
- 《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》GB/T 5293
- 《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110
- 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923
- 《建筑结构用钢板》GB/T 19879
- 《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81
- 《门式刚架轻型房屋钢构件》JG 144
- 《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102

中国工程建设协会标准

波浪腹板钢结构应用
技术规程

CECS 290 : 2011

条文说明

目 次

1	总 则	(59)
3	材料与构件	(62)
3.1	材料	(62)
3.2	构件	(62)
3.3	波浪腹板的尺寸范围	(62)
4	构 造	(64)
4.1	一般构造	(64)
4.2	节点构造	(67)
4.3	柱脚构造	(68)
5	设 计	(69)
5.1	一般规定	(69)
5.2	受弯构件计算	(69)
5.3	轴心受力构件计算	(75)
5.4	压弯构件计算	(76)
5.5	局部承压计算	(77)
5.6	节点计算	(78)
5.7	疲劳计算	(79)
6	施 工	(80)
6.2	波浪腹板构件的焊接要求	(80)
6.3	构件制作误差控制	(81)
6.4	构件安装误差控制	(81)
6.5	钢构件除锈与涂装防腐	(82)
7	验 收	(82)

7.1	一般规定	.....	(82)
7.2	波浪腹板验收	.....	(82)
7.3	工程质量验收	.....	(82)

7.4	.....	.....	.....
7.5	.....	.....	.....
7.6	.....	.....	.....
7.7	.....	.....	.....
7.8	.....	.....	.....
7.9	.....	.....	.....
7.10	.....	.....	.....
7.11	.....	.....	.....
7.12	.....	.....	.....
7.13	.....	.....	.....
7.14	.....	.....	.....
7.15	.....	.....	.....
7.16	.....	.....	.....
7.17	.....	.....	.....
7.18	.....	.....	.....
7.19	.....	.....	.....
7.20	.....	.....	.....
7.21	.....	.....	.....
7.22	.....	.....	.....
7.23	.....	.....	.....
7.24	.....	.....	.....
7.25	.....	.....	.....
7.26	.....	.....	.....
7.27	.....	.....	.....
7.28	.....	.....	.....
7.29	.....	.....	.....
7.30	.....	.....	.....
7.31	.....	.....	.....
7.32	.....	.....	.....
7.33	.....	.....	.....
7.34	.....	.....	.....
7.35	.....	.....	.....
7.36	.....	.....	.....
7.37	.....	.....	.....
7.38	.....	.....	.....
7.39	.....	.....	.....
7.40	.....	.....	.....
7.41	.....	.....	.....
7.42	.....	.....	.....
7.43	.....	.....	.....
7.44	.....	.....	.....
7.45	.....	.....	.....
7.46	.....	.....	.....
7.47	.....	.....	.....
7.48	.....	.....	.....
7.49	.....	.....	.....
7.50	.....	.....	.....
7.51	.....	.....	.....
7.52	.....	.....	.....
7.53	.....	.....	.....
7.54	.....	.....	.....
7.55	.....	.....	.....
7.56	.....	.....	.....
7.57	.....	.....	.....
7.58	.....	.....	.....
7.59	.....	.....	.....
7.60	.....	.....	.....
7.61	.....	.....	.....
7.62	.....	.....	.....
7.63	.....	.....	.....
7.64	.....	.....	.....
7.65	.....	.....	.....
7.66	.....	.....	.....
7.67	.....	.....	.....
7.68	.....	.....	.....
7.69	.....	.....	.....
7.70	.....	.....	.....
7.71	.....	.....	.....
7.72	.....	.....	.....
7.73	.....	.....	.....
7.74	.....	.....	.....
7.75	.....	.....	.....
7.76	.....	.....	.....
7.77	.....	.....	.....
7.78	.....	.....	.....
7.79	.....	.....	.....
7.80	.....	.....	.....
7.81	.....	.....	.....
7.82	.....	.....	.....
7.83	.....	.....	.....
7.84	.....	.....	.....
7.85	.....	.....	.....
7.86	.....	.....	.....
7.87	.....	.....	.....
7.88	.....	.....	.....
7.89	.....	.....	.....
7.90	.....	.....	.....
7.91	.....	.....	.....
7.92	.....	.....	.....
7.93	.....	.....	.....
7.94	.....	.....	.....
7.95	.....	.....	.....
7.96	.....	.....	.....
7.97	.....	.....	.....
7.98	.....	.....	.....
7.99	.....	.....	.....
7.100	.....	.....	.....

1 总 则

1.0.1、1.0.2 波浪腹板构件具有承载效率高,经济性好等优点,是一种高效型材,主要应用在轻型钢结构门式刚架结构中。由于波浪腹板具有较大的面外刚度与较高的抗剪屈曲荷载,在轻型钢结构中推荐使用波浪腹板工形截面构件主要基于下列考虑:①一般平腹板工形截面构件,当板件高厚比较大时,腹板比较薄,其腹板的面外刚度变得非常弱,故构件在制作与运输过程中易于产生较大的扭转等变形,甚至产生不可恢复的变形,给构件的运输、吊装以及就位产生较大的影响。尽管从承载效率考虑,采用较大的高厚比可以产生较大的经济效益,但在现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 中仍然规定腹板的高厚比不宜超过 $250 \sqrt{235/f_y}$,这正是基于运输与安装时的刚度考虑。②在门式刚架轻型房屋钢结构工程中,采用波浪腹板代替平腹板制作的工形截面构件,较薄的波浪腹板可以大大提高构件的截面高度。依据工程经验以及试验结果,采用 2.5mm 厚的波浪腹板,其工形构件的腹板高度取到 1500mm~2000mm 时其构件仍具有足够强的运输与吊装刚度。但对于一般的平腹板工形截面构件,已经远远不能满足对构件运输与吊装刚度的要求。③从波浪腹板工形截面构件的受力性能分析,清华大学的研究表明:波浪腹板抗剪屈曲荷载与同厚度的平腹板构件相比可以超出几倍到几十倍,但在截面法向应力作用下会退出工作。作为梁构件,由于采用较薄的波浪腹板可以大大提高腹板的高度,其本身抗剪屈曲荷载也大大提高,尽管采用波浪腹板牺牲了其本身承受弯矩的能力,但薄而高的腹板大大提高了构件的整体抗弯刚度,其整体经济效益还是非常高的。作为压弯构件,由于波浪腹板也承受剪应力,其受力

机理与梁是类似的。对于轴心受压构件，波浪腹板失去了承担轴向应力的能力，但采用薄而高的波浪腹，不仅节约了腹板用材，而且大大提高了截面的抗弯刚度，进而提高了构件的整体稳定承载力。另外，过薄的平腹板的轴压局部屈曲荷载较低，其本身分担的轴向压力很低。综上所述，对于轴向受压的波浪腹板工形截面构件，合理的设计也会取得较好的经济效益。

下面给出一个算例，用以对比波浪钢板与平钢板弹性剪切屈曲荷载的大小。

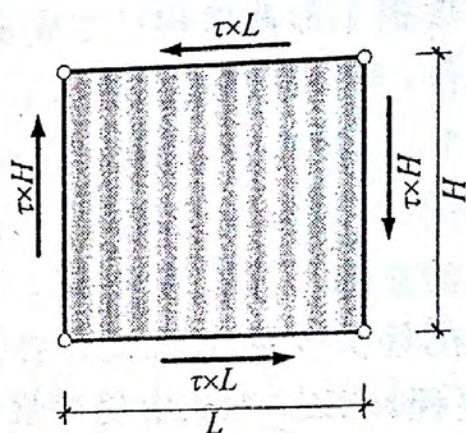


图1 算例模型示意

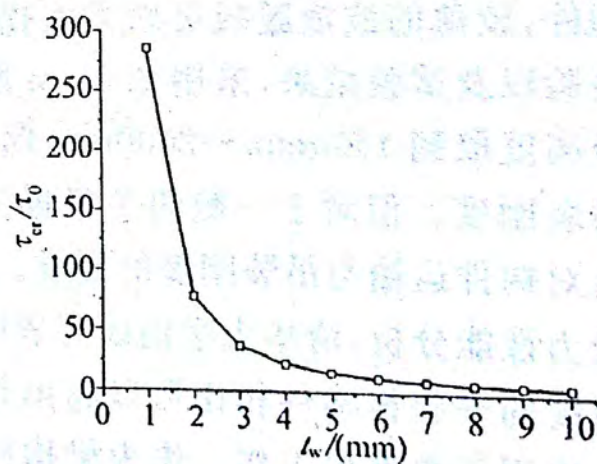


图2 剪切屈曲应力对比

如图1所示，分别将一块波浪钢板与一块平钢板置于一个四周无限刚的框架内。框架的外围尺寸为 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，且构件铰接。

波浪钢板的波形尺寸参数设置为：波幅 $a = 20\text{mm}$ ，波长 $q = 200\text{mm}$ 。

变化板件的厚度 t_w 为 $1\text{mm} \sim 10\text{mm}$ ，比较波浪钢板与平钢板的弹性剪切屈曲荷载，如图 2 所示，其中 τ_{cr}/τ_0 为波浪钢板的弹性剪切屈曲应力与平钢板的弹性剪切屈曲应力的比值。当板厚为 4mm (对应的板件高厚比为 500) 时，波浪钢板的弹性剪切屈曲应力达到平钢板的弹性剪切屈曲应力的 23 倍多；当板厚为 8mm (对应的板件高厚比为 250) 时，波浪钢板的弹性剪力屈曲应力是平钢板的弹性剪切屈曲应力的 7 倍多。

3 材料与构件

3.1 材 料

3.1.3 本条给出钢材的物理性能指标,并提出在波浪腹板结构设计和材料订货中应考虑的一些注意事项。

3.2 构 件

3.2.2 本条给出波浪腹板构件截面的几种形式。

3.2.3 考虑到节点域处的连接与构造方便,一般用平板代替波浪板。

3.3 波浪腹板的尺寸范围

3.3.1 本条给出波浪腹板工形构件中波浪腹板尺寸的取值范围。在门式刚架结构中,国外波浪腹板的设计厚度大都控制在 3.5mm 以内,目前辊压设备也仅能制作 6mm 以内的腹板。最近国内有关企业也已经进口了这种设备,考虑到超出 6mm 厚度范围的腹板还应用不多,故将其厚度控制在 6mm 以内。另外控制腹板厚度不小于 2mm,旨在与现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 协调。

在现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 中,将平腹板构件的腹板高厚比的限值取为 $250 \sqrt{235/f_y}$ 。由于梁腹板设计理论允许板件发生局部屈曲,故对其腹板高厚比进行限制主要是考虑构件在制作、运输与吊装过程中要有足够的刚度,确保上述作业不影响工程安装质量。很显然,与平腹板比较,波浪腹板具有较大的面外弯曲刚度。依据奥地利 Zeman 公司的制作与安装经验,波浪腹板工形构件的腹板高厚比不超过 600

$\sqrt{235/f_y}$ 时,其在运输与吊装过程中仍保持足够的刚度;依据国内工程项目的建造经验,波浪腹板高厚比按照 $600\sqrt{235/f_y}$ 设计,其运输与吊装刚度远能满足上述作业要求。因而,本条取 $600\sqrt{235/f_y}$ 作为波浪腹板高厚比的限值要求。

下面对表 3.3.1 所给出的七组波浪腹板构件,分别与相应厚度的平腹板构件进行比较,考察其二者之间腹板的弯曲刚度及均匀受压屈曲荷载比值的大小。假设这二者承受作用于腹板顶部的、集度相同的均匀竖向荷载,可分别简化成两根受压的短柱计算其弹性屈曲荷载。波浪腹板单位长度面外惯性矩可按照公式 (5.2.7-5) 计算,其中波浪腹板的高度取为 $600t_w$,平腹板的高度取为 $250t_w$,二者均由高厚比限值控制。

表 1 给出了波浪腹板与平腹板单位长度面外惯性矩的比值以及受压屈曲荷载的比值。从中可以看出,波浪腹板采用 $600\sqrt{235/f_y}$ 作为其高厚比限值时,其面外弯曲刚度及受压屈曲应力仍然能够比同样受限值控制的平腹板高出数倍,且远远大于二者高厚比限值之比 2.4(等于 $600/250$)。

表 1 波浪腹板与平腹板单位长度面外惯性矩及受压屈曲应力的比值

分组	一	二	三	四	五	六	七
比值							
面外惯性矩	46.2	29.5	45.3	33.3	25.5	29.5	20.5
屈曲荷载	8.0	5.1	7.9	5.8	4.4	5.1	3.6

4 构 造

4.1 一般构造

4.1.1 表 4.1.1 中轻型钢结构的定义应符合现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 的规定;有抗震设防要求的要求的结构,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。

4.1.2 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 3 所示。

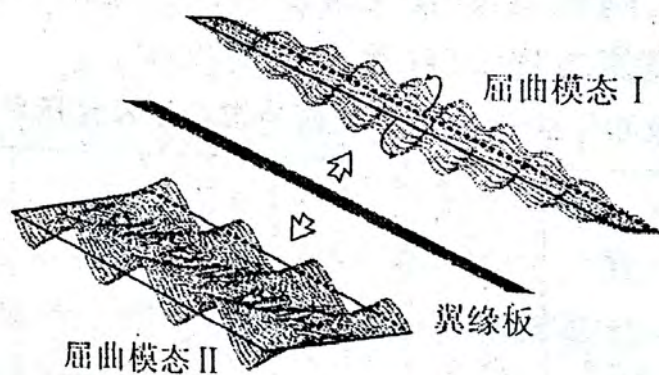


图 3 受压翼缘板的屈曲模态

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:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_f}{(0.5q)^2 A_f} = \frac{\pi^2 E}{3\beta_1^2} \left(\frac{t_f}{b_1} \right)^2 \quad (1)$$

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:

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

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

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

荷载; c 为拟合系数,建议取 0.0035。

但在应用公式(2)时,还需注意一个事实,即公式(2)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 对公式(2)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,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,可通过验算公式(3)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公式(3)的要求。

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

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 按照公式(4)计算。常用构件的 ν 值可通过查表 4.1.2 获得,表中的数值按照公式(4)计算,但对于大于 1.28 的 ν 值仍按照 1.28 取值。

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

该部分研究成果具体参见《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)。

4.1.3 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。

4.1.4 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。

4.1.7 波浪腹板屋面坡度值应根据屋面板板型、排水坡长、雨量等因素确定。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。

当围护墙体采用现场砌筑(或浇筑)的材料时，柱顶位移尚不得大于 $H/240$ 。

4.1.10 波浪腹板构件的常用腹板厚度约在2.0mm~6.0mm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，故建议腹板与翼缘焊接应采用双面焊缝。

4.1.11 本条源于现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102。该规定仍然适用于波浪腹板构件。

4.2 节点构造

4.2.1 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《钢结构设计规范》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。

4.2.2 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。

4.3 柱脚构造

4.3.1 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。

4.3.3 常用的抗剪键形式如图4。

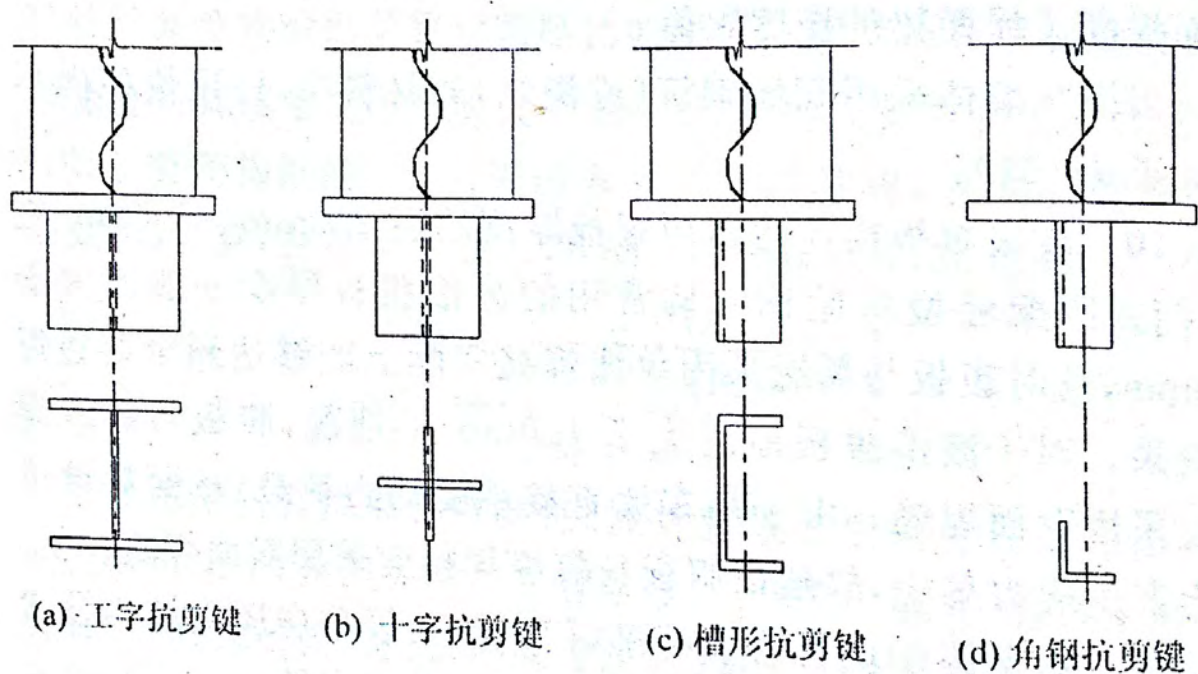


图4 抗剪键的形式

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 本章给出了波浪腹板构件强度、刚度及稳定性计算公式。这些计算公式基于清华大学完成的 18 个构件的试验结果与理论研究成果,以及国外的试验与理论研究成果,还参考了奥地利 Zeman 公司提供的应用在欧洲工程项目中的设计与施工经验。

5.1.2 清华大学的研究成果表明,腹板波浪的存在极大的降低了腹板沿构件轴向的压缩刚度,使得波浪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,腹板上只有靠近翼缘的小部分存在正应力。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。但截面剪力几乎全部由波浪腹板承担,且剪应力沿腹板高度均匀分布。(参见《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)。

5.1.4 现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》CECS 102 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。在这一条仍然适应采用波浪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现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 设计的一些重型厂房,当采用波浪腹板吊车梁时,可以不受上述限制,但考虑到的波浪腹板构件在我国应用时间不长,仍规定其吊车吨位不宜超过 50t。

5.2 受弯构件计算

5.2.1 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,按照现行国家标准《钢

结构设计规范》GB 50017 的相关规定取值,取 $\gamma_y = 1.2$ 。

5.2.2 研究表明,波浪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。

5.2.3 波浪腹板工形构件的受弯挠度计算应考虑腹板剪切变形的影响。

5.2.4 本条主要按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定执行。

5.2.6 波浪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。波浪腹板梁的扭转惯性矩计算公式与普通工形梁相同,均按公式(5)计算:

$$I_t = \frac{h_w t_w^3 + 2b_f t_f^3}{3} \quad (5)$$

二者翘曲惯性矩的计算有一些差异。从翘曲惯性矩的定义出发,对波浪腹板梁的翘曲惯性矩进行了推导,结果如下:

对于图 5 所示的任一腹板偏心的工形截面,其翘曲惯性矩按公式(6)计算:

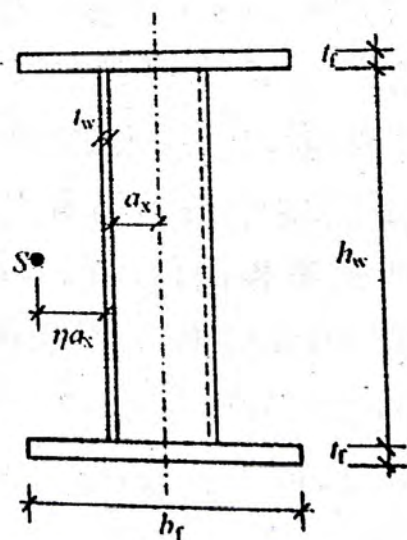


图 5 波浪腹板构件任一截面的尺寸

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

其中:

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

假设腹板波浪不会导致腹板截面厚度的变化,那么对于波浪腹板的任意一小段截面,腹板偏离中心的距离为 a_x ,均可由公式(6)计算出其翘曲惯性矩。对于整个波浪腹板构件,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:

$$I_w = \frac{1}{q} \int_0^q I_w^* dx = \frac{h_w^2}{4} \left[\frac{b_f^3}{6} t_f + (1-\eta)^2 a^2 b_f t_f \right] \quad (7)$$

将公式(7)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,可用于精确计算波浪腹板工形构件的弯扭屈曲荷载。对于常用构件,发现公式(7)中的后一项对计算结果影响很小,可以忽略。

参考现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017,定义等端弯矩作用下波浪腹板工形构件的弹性稳定系数定义为:

$$\varphi_{b0} = \frac{M_{cr}}{W_x f_y} = \beta_b \frac{\pi^2 E I_y}{W_x f_y l^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_y} \left(1 + \frac{l^2 G I_t}{\pi^2 E I_w} \right)} \quad (8)$$

考虑波浪腹板工形构件的截面特性:

$$\begin{aligned} W_x &= b_f t_f h_w \\ I_w &= \frac{I_y h_w^2}{4} = \frac{b_f^3 h_w^2 t_f}{24} \\ I_t &= \sum A_i t_i^2 / 3 \approx A_f t_f^2 / 3 \end{aligned}$$

公式(8)可简化为:

$$\varphi_{b0} = \beta_b \frac{8640}{\lambda_y^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y t_0}{4.4 h_w} \right)^2} \frac{235}{f_y} \quad (9)$$

通过有限元数值分析建立波浪腹板梁稳定系数的计算公式,其中初始几何缺陷幅值取 $l/1000$,残余应力的分布及幅值取值见图6。大量数值分析结果表明,几何初始缺陷和残余应力均会使构件的平面外稳定承载力降低。按数值计算结果进行拟合,得到的公式(10)

能较好地反映上述缺陷幅值的影响(见图7)。此外,拟合公式与三根足尺寸构件的试验结果吻合较好,验证了该公式的适用性。

$$\varphi_b = \begin{cases} \varphi_{b0} & \varphi_{b0} \leq 0.36 \\ \left(\frac{1}{1+0.24/\varphi_{b0}} \right)^2 & \varphi_{b0} > 0.36 \end{cases} \quad (10)$$

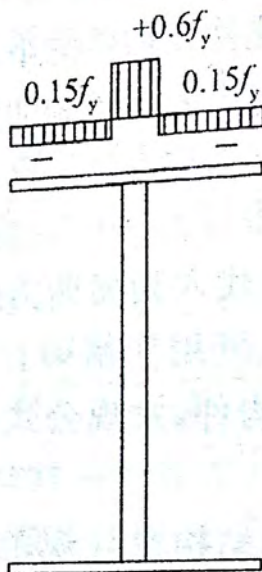


图6 翼缘残余应力分布

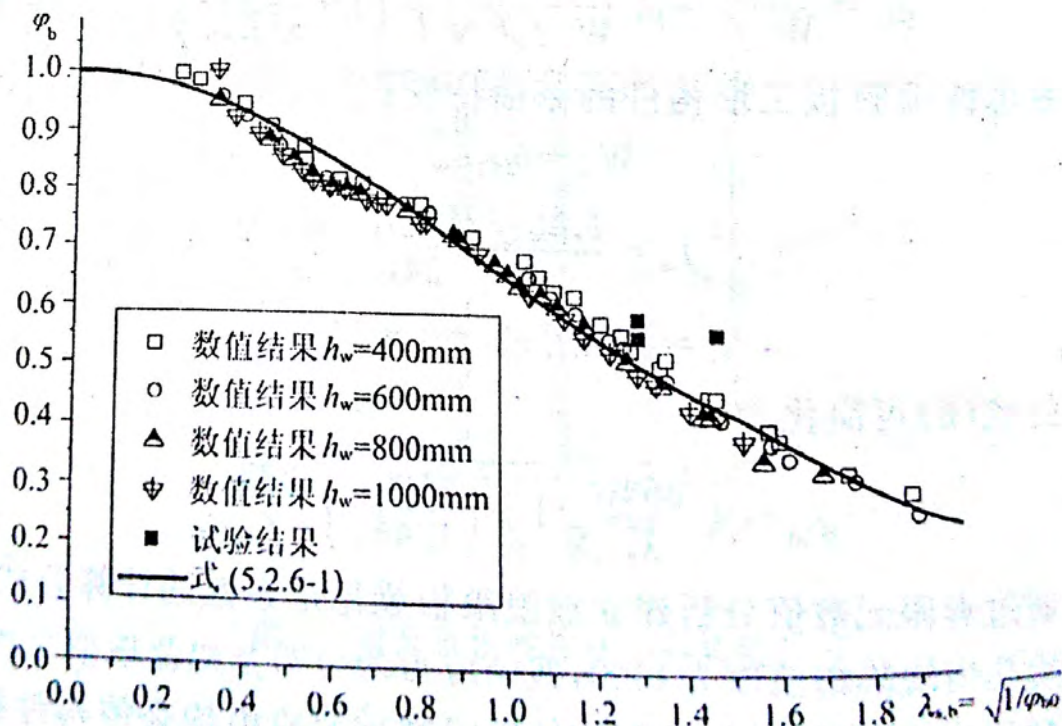


图7 波浪腹板梁整体稳定系数

上述研究内容具体可参见《波浪腹板梁平面外稳定承载力理论和试验研究》(收录于《土木工程学报》,2010年第43卷第11期)以及《波浪腹板钢结构设计理论最新研究进展与应用》(收录于《工业建筑》,2012年第42卷第7期)。

5.2.7 波浪板可以看成正交异性板,两个方向的柱面刚度相差较大。

D_y 为波浪板绕较弱方向的柱面刚度,其可按公式(11)计算,该表达式形式与平钢板相同,但由于板件沿波浪方向表观长度与展开长度的不一致,需进行折减。 s 为波浪腹板单个重复波浪展开后的长度,按本规程拟合公式(5.2.7-4)计算。

$$D_y = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{q}{s} \quad (11)$$

D_z 为波浪板绕较强方向的柱面刚度,根据公式(12)计算。 I_{z1} 为该方向单位长度波浪板绕中性轴的面外惯性矩,可按照本规程拟合公式(5.2.7-5)计算。

$$D_z = EI_{z1} \quad (12)$$

常用波浪腹板一般有 $D_z/D_y > 50$ 。这种性能使得波浪腹板的剪切屈曲荷载与平腹板相比大大提高。

波浪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 Easley 的研究成果(详见《Buckling of light gauge corrugated metal shear diaphragms》,收录于 Journal of the Structural Division, ASCE, 1969 年第 7 期),波浪(波折)板的整体屈曲应力可按公式(13)计算。

$$\tau_{cr,G} = \frac{36D_y^{1/4} D_z^{3/4}}{t_w h_w^2} \quad (13)$$

波浪板的局部屈曲与波浪子面的宽厚比有关。其名义宽厚比为 $(W/t_w)_n = s/2t_w$ 。但由于波浪子面为曲面,所以需对名义宽厚比 $(W/t_w)_n$ 进行修正,按照式(14)转换成等效宽厚比 $(W/t_w)_e$ 后,

可建立起波浪板的局部屈曲应力与波浪子面的宽厚比之间的关系式,见公式(15)。其中 k_s 为屈曲系数,可取 5.34。

$$\left(\frac{W}{t_w}\right)_0 = \sqrt{80\left(\frac{w}{t_w}\right)_n - 22} \quad (14)$$

$$\tau_{cr,L} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)\left(\frac{w}{t_w}\right)_0^2} \quad (15)$$

波浪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。考虑残余应力、初始缺陷等因素的影响,波浪腹板抗剪极限承载力的稳定系数 $\varphi_s = \tau_{cr}/f_v$ 可用通用高厚比 $\lambda_s = \sqrt{f_{vy}/\tau_{cr}}$ 表示。由于有两种屈曲模态,所以 λ_s 可取整体屈曲和局部屈曲分别对应的通用高厚比中的较大者,即本规程公式(5.2.7-3)。

通过大量数值分析拟合得到的 $\lambda_s - \varphi_s$ 曲线[(即本规程公式(5.2.7-2),见图8)],分为三段: λ_s 较小时,极限剪应力接近屈服剪应力,随着 λ_s 的增加稳定系数缓慢减小; λ_s 适中时,腹板发生弹塑性屈曲,随着 λ_s 的增加稳定系数迅速减小;在 λ_s 较大时,稳定系数与 λ_s^2 成反比减小,但极限承载力并不等于弹性屈曲荷载,约偏低 30%。该公式经过在清华大学进行的 6 根短梁试验结果的验证,也与国外进行的试验结果进行了比较,确定可偏于安全的计算

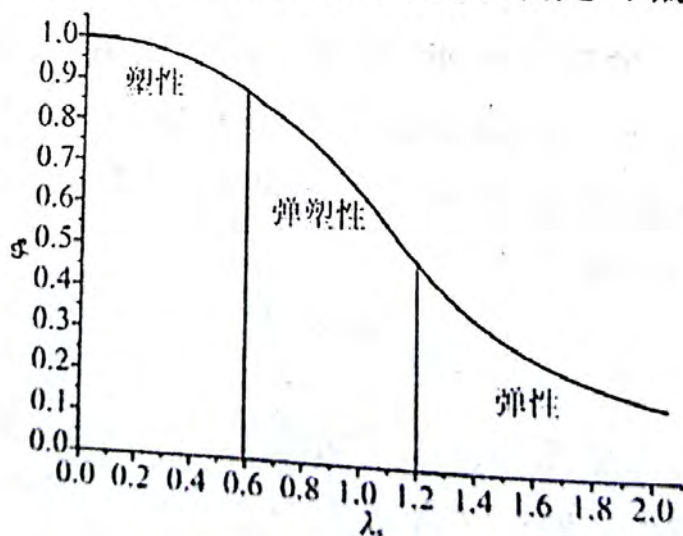


图8 $\lambda_s - \varphi_s$ 曲线

波浪(波折)钢板的抗剪稳定承载力。

这部分研究成果详见《波浪腹板工形构件抗剪承载力设计理论及试验研究》，收录于《土木工程学报》，2010年第43卷第10期。

对腹板开孔的波浪腹板构件而言，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。腹板开孔构件的抗剪稳定极限承载力计算，可在腹板未开孔构件抗剪极限承载力计算公式的基础上考虑折减系数 η 进行。此系数的计算公式[即本规程公式(5.2.7-6)]是在大量数值分析基础之上获得的。(这部分研究内容见《腹板开有圆孔的波浪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)。

5.3 轴心受力构件计算

5.3.1 与受弯时类似，波浪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。

5.3.2 轴心受压波浪腹板工形构件的稳定性计算的关键在于稳定系数的确定。

1 绕强轴稳定系数的确定

由于波浪腹板很薄，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需考虑剪切变形的影响。

波浪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，推导得到波浪腹板工形构件绕强轴的弹性屈曲应力为：

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_x^2 + \pi^2 EA_1 s / (qGA_w)} \quad (16)$$

定义换算长细比：

$$\lambda_{0x} = \sqrt{\lambda_x^2 + \pi^2 EA_1 s / (qGA_w)} \quad (17)$$

即可采用与普通工字钢受压柱相同的稳定计算公式计算波浪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,并进行了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《钢结构设计规范》GB 50017—2003(附表 C-2)中 b 类柱子曲线可偏于保守地获得弹塑性极限承载力。

2 绕弱轴稳定系数的确定

波浪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《钢结构设计规范》GB 50017—2003 中 c 类柱子曲线(附表 C-3)可偏于保守地获得弹塑性极限承载力。

5.4 压弯构件计算

5.4.2 本条主要按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 执行,其中计算长细比、截面模量时需考虑波浪腹板构件的受力特点,忽略腹板的贡献。

5.4.3 本条主要按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 执行,其中计算长细比、截面模量时须考虑波浪腹板构件的受力特点,忽略腹板的贡献。

5.4.4 本条主要按照现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 执行,其中计算长细比、截面模量时需忽略腹板的贡献。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可参见《波浪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)。

5.4.5 本条主要按照现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 执行,其中波浪腹板变截面构件弹塑性稳定系数与弹性稳定系数之间的关系应按本规程公式(5.2.6-1)建立。数值计算结果表明,公式可偏于安全的计算构件的极限承载力(这

部分研究内容具体可参见《波浪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）。

5.4.6 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，因此波浪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可参见《偏心受压波浪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）。

5.5 局部承压计算

5.5.1 波浪腹板梁翼缘在局部集中荷载作用下形成塑性铰线破坏机制，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浪腹板梁的局部承压极限承载力的简化计算公式：

$$P_u = 8.0 \left(1 + \frac{a_1 + 2h_R}{0.17} \right) \left(\frac{W_{ef}}{qI_{x1}/t_w} \right)^{0.4} \cdot 2at_w f \quad (18)$$

公式(18)适用于上述两种腹板的破坏模式。

5.5.2 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（见图 9）总结出波浪腹板梁在集中荷载 P 和弯矩 M 共同作用下的承载力相关公式为：

$$\begin{cases} \frac{P}{P_u} \leq 1 & \frac{M}{M_u} \leq 0.5 \\ \frac{P}{P_u} + \frac{M}{M_u} \leq 1.5 & \frac{M}{M_u} > 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

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

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

（本规程第 5.5.1 条与第 5.5.2 条的研究内容具体可参见《波浪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)。

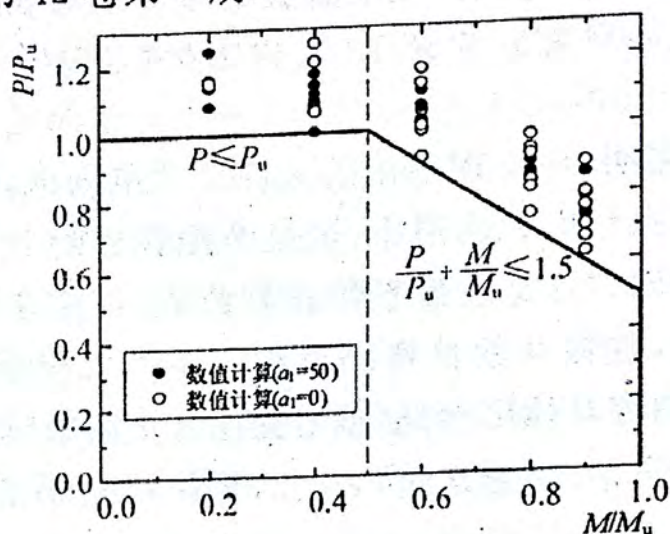


图9 弯矩作用与局部承压承载力相关曲线

5.5.3 本条主要参考现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017的规定,受压构件截面的取法可忽略腹板波浪的有利影响,直接按照平腹板计算(见图10),这样的计算结果偏于安全。

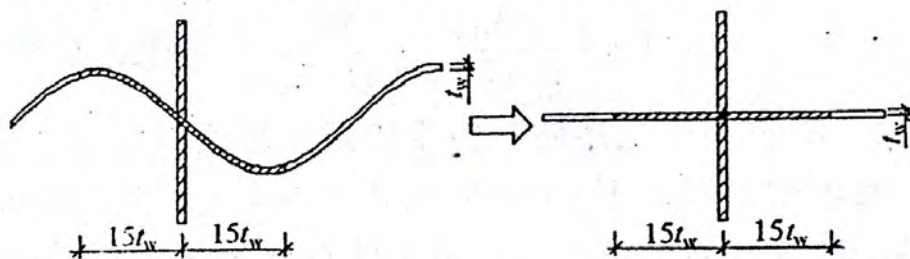


图10 梁支承加劲肋的计算模型

5.6 节点计算

5.6.1 波浪腹板构件端板节点螺栓群连接计算的特点在于,波浪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。

5.6.2 波浪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(见现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102:2002 中第 7.2 节)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。

5.7 疲劳计算

波浪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,从波浪或波折腹板梁的受力机理分析也能证明这一点。众所周知,梁的疲劳破坏源于受拉应力幅的循环作用。波浪或波折腹板梁由于腹板冷轧成波浪后轴向刚度几乎变成零,不再承受法向拉应力作用。波浪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,波浪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,因而在波浪腹板与翼缘连接区域很难产生疲劳破坏。因此,波浪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《钢结构设计规范》GB 50017 进行。

6 施 工

6.2 波浪腹板构件的焊接要求

6.2.1 本条主要参考现行行业标准《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81—2002 中第 3.0.5、3.0.6 与 3.0.7 条的规定。埋弧焊时应按现行国家标准并根据钢材的强度级别、质量等级和牌号适当选择焊剂,同时尽可能有良好的脱渣性等焊接工艺性能。

6.2.2 本条主要参考现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017—2003 中第 8.2.1 条的规定。根据试验,Q235 钢与 Q345 钢材焊接时,若用 E50XX 型焊条,焊缝强度比用 E43XX 型焊条时提高不多,设计时只能取用 E43XX 型焊条的焊缝强度设计值。从连接的韧性和经济方面考虑,规定宜采用与低强度钢材相适应的焊接材料。

6.3 构件制作误差控制

6.3.1 本条主要参考现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205—2001 中第 7.6.1 条的规定。条文中螺栓孔孔壁表面粗糙度(R_a)是根据现行国家标准《产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》GB/T 1031 确定的。

现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 规定摩擦型高强度螺栓孔径比杆径大 1.5mm~2.0mm,承压型高强度螺栓孔径比杆径大 1.0mm~1.5mm。

6.3.2 本条主要参考现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205—2001 中第 7.6.2 条的规定。

6.3.3 本条主要参考现行行业标准《门式刚架轻型房屋钢构件》

JG 144—2003 中第 4.4 节的规定。

6.3.4 本条主要参考现行行业标准《门式刚架轻型房屋钢构件》JG 144—2002 中第 4.4 节的规定。

6.4 构件安装误差控制

6.4.2 本条主要参考现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102：2002 中第 8.2.7 条的规定。

6.4.3 本条主要参考现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102：2002 中第 8.2.8 条的规定。

6.4.4 本条主要参考现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102：2002 中第 8.2.9 条的规定。

6.4.5 本条主要参考现行协会标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102：2002 中第 8.2.10 条的规定。

6.5 钢构件除锈与涂装防腐

6.5.3 适当的基材除锈质量及涂层品种和厚度才能保证构件的预期耐久性。以上国家标准和涂料的最低除锈等级要求仅是最低限值,设计人应作出除锈要求和涂层品种厚度的最佳要求。过低的除锈要求会使漆膜过早脱落;过薄的漆膜厚度会影响结构的使用寿命。对壁厚很薄的波浪腹板,应引起足够的重视。

6.5.5 表面处理后到涂底漆的时间间隔过长,会在构件表面产生浮锈,影响漆膜与基层的粘结和成型。

6.5.6 涂装时的温度、湿度和环境状况会影响漆膜在成型时的质量,进而影响涂层的耐久性。

7 验 收

7.1 一般规定

7.1.1 为加强建筑工程质量管理,统一波浪腹板钢结构工程施工质量的验收标准,特制订本条。

7.1.2 根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300的规定,钢结构工程施工质量的验收,是在施工单位自检合格的基础上,按照检验批的划分,进行波浪腹板钢结构分项工程验收。

7.1.3 检验批的划分可根据钢结构分部工程中,便于管理和质量控制的实际需要来划分。此条把波浪腹板及其构件作为一个检验批,目的是确保这种新型构件的加工质量。

7.2 波浪腹板验收

7.2.1 波浪腹板的波形以及尺寸对腹板工作的稳定性很重要,列为主控检查项目进行检查,确保工程安全。

7.2.2 冷加工钢材容易出现裂纹,列为主控检查项目进行检查,确保成型后的钢材质量。

7.3 工程质量验收

7.3.1 本条规定了工程验收的组织程序,这是验收工作的组织保证。

7.3.2 本条规定了波浪腹板钢结构分项工程施工质量合格的基本要求。

7.3.3 检验批的验收是最小验收单元,也是最重要和最基本的验收工作内容,分项工程的验收是建立在检验批验收合格基础之

上的。

7.3.4 本条规定了波浪腹板钢结构分项工程施工质量控制资料应包含的内容和合格的基本要求。

7.3.5 本条规定了施工材料复验资料的内容和要求。

7.3.6 本条规定了施工现场检查的内容和要求。