

新型组合结构桥梁——
波形钢腹板PC组合桥梁系列

波形钢腹板 设计与制造

李淑琴 万 水 张长青 编著



人民交通出版社

China Communications Press

新型组合结构桥梁——波形钢腹板 PC 组合桥梁系列

Boxing Gangfuban Sheji yu Zhizao

波形钢腹板设计与制造

李淑琴 万 水 张长青 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书总结了波形钢腹板设计与加工中的一些研究成果与经验,内容包括:波形钢腹板的力学特性和设计、加工、连接和抗剪连接的构造、防腐蚀涂装体系、防腐蚀涂装工艺、质量检验及其应用实例。

本书旨在为我国的波形钢腹板 PC 组合梁桥的建造与发展提供技术参考,可供桥梁工程设计、施工人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

波形钢腹板设计与制造 / 李淑琴等编著.

—北京:人民交通出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-114-09219-0

I. ①波… II. ①李… III. ①钢板:腹板—设计
②钢板:腹板—制造 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 119226 号

新型组合结构桥梁——波形钢腹板 PC 组合桥梁系列

书 名: 波形钢腹板设计与制造

著 作 者: 李淑琴 万 水 张长青

责任编辑: 丁润铎

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12.25

字 数: 290 千

版 次: 2011 年 7 月 第 1 版

印 次: 2011 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09219-0

定 价: 35.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

波形钢腹板 PC 组合箱梁桥是用波折形薄钢腹板代替箱梁混凝土腹板形成的一种钢混组合桥梁结构,它可以大幅度减轻箱梁的自重,减少下部结构的工程量,从而降低造价,实现桥梁的轻型化,有效地解决预应力混凝土箱梁腹板的开裂问题。波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的一个重要特点在于它采用了波形钢腹板,它的设计和加工直接关系到桥梁的质量、承载能力和耐久性。本书总结了波形钢腹板设计与加工中的一些研究成果与经验,其目的是为我国的波形钢腹板 PC 组合梁桥的建造与发展提供一定的技术参考。

本书共分 7 章。第 1 章介绍了波形钢腹板的力学特性和设计,第 2 章介绍了波形钢腹板的加工,第 3 章介绍了波形钢腹板的连接和抗剪连接件的构造,第 4 章介绍了波形钢腹板的防腐涂装体系,第 5 章简述了波形钢腹板的防腐涂装工艺,第 6 章介绍了波形钢腹板的质量检验,第 7 章给出了一些波形钢腹板的应用实例。

本书第 1 章由万水、乐斐、蒋正国、李淑琴、张长青编写,第 2 章由万水、吴晓霞、马骅、孙天明、霍玉娴、郑会玺、郭彦群编写,第 3 章由万水、郑连群、靳九贵、汪之明、张新领、李淑琴、马磊编写,第 4 章由万水、常兴文、汤意编写,第 5 章由万水、武世英、刘培贤、肖亚伟、卫亚洲编写,第 6 章由李淑琴、万水、张长青、张国清、郭红军、陈建兵编写,第 7 章由李淑琴、万水、张长青编写。

感谢东南大学波形钢腹板 PC 组合箱梁桥结构研究团队的大力支持,感谢博士研究生朱坤宁、马磊、杨丙文、任大龙、钟志鹏、郑尚敏以及硕士研究生黄浩、黎雅乐、周林云、向苇康、唐明敏、张宏杰的协助。王用中先生为本书的编写给予了许多帮助,在此表示感谢。在本书的编写过程中,作者参考了现有桥梁与钢结构的设计规范和相关标准,引用了许多国内外关于波形钢腹板设计、加工与应用的研究成果和实例资料,在此对书中引用资料的作者们和单位表示诚挚的谢意。

感谢河北省邢台路桥总公司、河南省交通规划勘察设计院有限责任公司、濮阳豫龙高速公路有限责任公司、中铁三局集团第二工程有限公司、河南省公路工程监理咨询有限公司、邢台路桥交通设施厂等单位所给予作者的大力支持。衷心感谢所有在本书写作中给予过大力支持的专家和朋友们。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年 3 月

目 录

第 1 章 波形钢腹板概述与设计	1
1.1 波形钢腹板 PC 组合箱梁的特点	1
1.2 波形钢腹板的分类与几何尺寸	1
1.3 波形钢腹板的力学特性	2
1.4 波形钢腹板的设计.....	11
第 2 章 波形钢腹板的制造	14
2.1 钢材的选用及要求.....	14
2.2 钢板的切割.....	17
2.3 波形钢腹板的弯曲成型.....	20
2.4 制孔与边缘加工.....	23
2.5 波形钢腹板的焊接.....	25
2.6 波形钢腹板的组拼与整形.....	32
2.7 波形钢腹板上检查孔的加工.....	35
第 3 章 波形钢腹板的连接	36
3.1 波形钢腹板的高强螺栓连接.....	36
3.2 波形钢腹板与混凝土的连接.....	41
3.3 抗剪连接件的一些改进方案.....	48
3.4 波形钢腹板与混凝土横隔梁的连接.....	57
第 4 章 波形钢腹板的防腐蚀涂装	60
4.1 大气腐蚀与防腐涂装标准.....	60
4.2 桥梁钢结构重防腐涂装体系.....	71
4.3 波形钢腹板防腐蚀涂装体系.....	78
第 5 章 波形钢腹板的涂装工艺	98
5.1 波形钢腹板的表面处理标准.....	98
5.2 锈蚀等级与除锈质量等级	100
5.3 除锈工艺	101
5.4 表面防锈	106
5.5 防腐涂料的涂装工艺	107
5.6 热浸镀锌工艺	115
5.7 电泳涂装	118
5.8 富锌底漆的涂装施工	122
5.9 波形钢腹板的现场涂装施工	123

第 6 章 波形钢腹板的质量检验..... 125

6.1 波形钢腹板的外观质量检验 125

6.2 钢材与连接件的质量检验 127

6.3 波形钢腹板的焊接质量检验 134

6.4 波形钢腹板涂装质量的检验 140

第 7 章 波形钢腹板的加工与应用实例..... 160

7.1 长征桥波形钢腹板的设计与加工 162

7.2 东营银座桥波形钢腹板的设计与加工 165

7.3 邢台郭守敬桥波形钢腹板的加工 167

7.4 邢台钢铁路桥波形钢腹板的加工 170

7.5 鄞城黄河大桥波形钢腹板的加工 173

7.6 卫河桥波形钢腹板的设计与加工 178

7.7 大广高速衡大段 6 号跨线桥波形钢腹板的加工 185

参考文献..... 188

第1章 波形钢腹板概述与设计

1.1 波形钢腹板 PC 组合箱梁的特点

波形钢腹板预应力混凝土(PC)组合箱梁最显著的特点是用波折形钢腹板取代了混凝土腹板,使箱梁成为由钢筋混凝土和波形钢腹板组成的组合结构。由于用波形钢腹板代替了混凝土腹板,减轻了 PC 箱梁的自重,进而减少了下部结构的工程量,降低了造价。有关资料表明,与同跨度的预应力混凝土桥相比,波形钢腹板 PC 组合箱梁桥可节约成本约 10%。由于波形钢腹板 PC 组合箱梁相对较轻,采用节段悬臂浇注施工方法时可以增加每个施工节段的长度,从而缩短工期。从结构上看,波形钢腹板 PC 组合箱梁受力明确,在轴向力和弯矩作用下,腹板上的轴向应力基本为零,轴向力基本上由混凝土顶、底板承担;在剪力作用时,87%左右的剪力由波形钢腹板承受;扭矩作用时,75%左右的扭矩由波形钢腹板承受。波形钢腹板对轴向力无抵抗作用,避免了由于腹板的约束作用所造成的预应力效率的降低,能更有效地对混凝土顶、底板施加预应力。由于波形钢腹板不约束箱梁顶、底板混凝土由于收缩徐变产生的变形,可以避免箱梁截面的预应力向钢腹板转移。用钢板作为腹板,避免了传统混凝土腹板的斜向开裂问题,提高了耐久性。相对于预应力混凝土箱梁来说,波形钢腹板 PC 组合箱梁截面的抗扭转刚度下降了约 60%。

1.2 波形钢腹板的分类与几何尺寸

波形钢腹板一般由卷材或板材弯折而成。通常桥梁中所用的波形钢腹板是等波长的。波形钢腹板的几何控制参数主要有:波形钢腹板高度 h 、波形钢板波高 d 、钢板厚度 t 、直板段宽度 a_1 、斜板段投影宽度 a_2 等。波形钢腹板通用断面如图 1-1 所示。

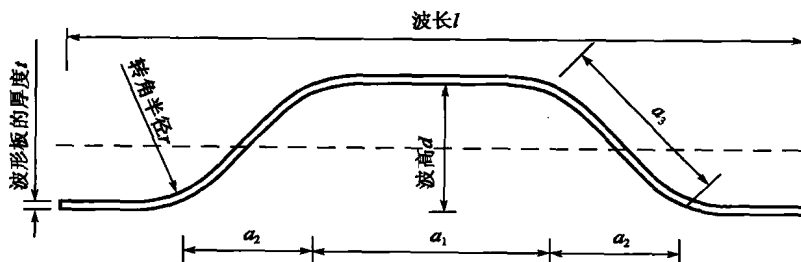
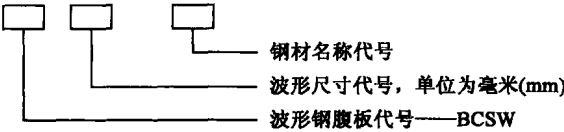


图 1-1 波形钢腹板通用断面图

波形钢腹板的波形形状,应根据施工可行性、经济性、景观性等各方面统筹考虑来选择。在实际应用中,考虑到加工时模具制造等因素,往往给出几种比较常用的波形钢腹板型号,以

利于加工制作。波形钢腹板分类代号为 BCSW。波形钢腹板型号表示如图 1-2 所示。



示例: 材质为Q345c的1000型波形钢腹板型号表示为BCSW1000/Q345c

图 1-2 波形钢腹板分类代号

由上述表示方法,按波形钢腹板波长的大小,将波形钢腹板分为 1000 型波形钢腹板 (BCSW1000)、1200 型波形钢腹板 (BCSW1200) 和 1600 型波形钢腹板 (BCSW1600),其尺寸规格见表 1-1。其中,1600 型多用于大跨径桥梁,1200 型与 1000 型多用于中、小跨径桥梁。

常用波形钢腹板的几何尺寸(mm) 表 1-1

类 型	波长 l	建议适用厚度 t	常用波形钢腹板的几何尺寸				转角半径 r
			a_1	a_2	a_3	d	
1000 型	1000	8~12	340	160	226	160	$15t$
1200 型	1200	8~20	330	270	332	200	$15t$
1600 型	1600	10~30	430	370	430	220	$15t$

1.3 波形钢腹板的力学特性

1.3.1 波形钢腹板抗剪性能

波形钢腹板 PC 组合箱梁桥结构的一个重要特点在于它采用了波形钢腹板。在设计荷载作用下,波形钢腹板的弯曲剪应力 τ_{ws} 计算公式为:

$$\tau_{ws} = \frac{S - S_p}{A_w} \tag{1-1}$$

- 式中: S ——设计荷载作用时的剪力;
 S_p ——计算断面预应力的竖向分力;
 A_w ——腹板截面积, $A_w = \sum t_i \cdot h$;
 t_i ——第 i 块波形钢腹板的厚度;
 h ——腹板高度,取顶底板间钢腹板净高。

在设计荷载作用下,由自由扭转引起的剪应力 τ_{ts} 的计算公式:

$$\tau_{ts} = \frac{M_t}{2A_m t (1 + \alpha)} \tag{1-2}$$

式中: M_t ——设计荷载作用时的计算扭矩;

A_m ——箱形截面中心线围成的面积；

t ——波形钢腹板板厚；

α ——修正系数， $\alpha = 0.4h/b - 0.6$ ，当 $h/b \leq 0.2$ 时， $\alpha = 0$ 。其中 h 为混凝土顶底板中心间距； b 为波形钢腹板中心线间距。

1.3.2 波形钢腹板等效为正交异性平板

当波形钢腹板端部各波均与支撑结构采用连接件相连时，在剪力作用下其截面形状几乎不发生畸变或畸变很小，此时可将波形钢腹板等效为正交异性平板进行数值研究。由图 1-3 得出波形钢腹板的等效弹性常数^[1]：

$$E_y = \frac{a_1 + a_3}{a_1 + a_2} E_0 \quad (1-3)$$

$$E_x = \xi \frac{I_0}{I_x} E_0 = \xi \frac{a_1 + a_2}{3a_1 + a_3} \left(\frac{t}{d} \right)^2 E_0 \quad (1-4)$$

$$\mu_{yx} = \mu_0 \quad (1-5)$$

$$\mu_{xy} = \frac{E_x}{E_y} \mu_{yx} \quad (1-6)$$

$$G_e = \frac{a_1 + a_2}{a_1 + a_3} G_0 \quad (1-7)$$

式中： E_y 、 E_x ——分别为等效正交异性平板在 y 轴和 x 轴方向上的等效弹性模量；

μ_{yx} 、 μ_{xy} ——分别为等效正交异性平板在 y 轴和 x 轴方向上的等效泊松比；

G_e ——等效正交异性平板的等效剪切模量；

E_0 、 μ_0 、 G_0 ——钢材的弹性常数；

I_0 、 I_x ——分别为等效正交异性平板和波形钢腹板关于 x 轴的惯性矩；

ξ ——修正系数，一般取 2~2.5。

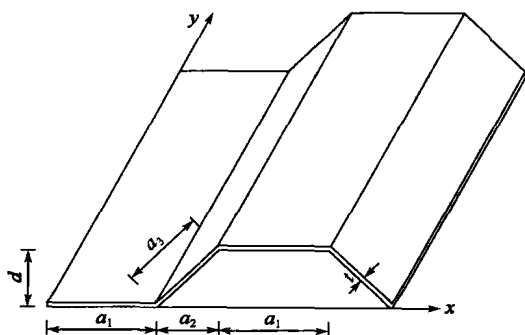


图 1-3 波形钢腹板

1997 年英国 Warwick 大学的 Johnson 教授建立了与式(1-7)一致的波形钢腹板有效剪切模量的公式^[2]。参考文献[3]认为波形钢板在纵向的表现弹性模量 E_x 与波高 d 、板厚 t 以及波纹形状系数 ζ 有关，对于图 1-3 所示波形钢板， E_x 表达式为：

$$E_x = \zeta \left(\frac{t}{d} \right)^2 E_0 = \frac{a_1 + a_2}{4a_1} \left(\frac{t}{d} \right)^2 E_0 \quad (1-8)$$

其中 $\zeta = (a_1 + a_2)/(4a_1)$

通常波形钢腹板中平折板宽度 a_1 与斜折板宽度 a_3 是相等的。这时，对比式(1-8)和式(1-4)可见，前者比后者少了一个修正系数 ξ ，其余部分基本相同。Atrek 和 Nilson 指出，只有在波纹端部连接不够，不能维持波纹的形状时才需考虑修正系数。

1.3.3 波形钢腹板的弹性屈曲特性

波形钢腹板的设计中,剪切屈曲分析是一项重要的内容。在板壳稳定性问题中,有两种基本屈曲形态:分支点屈曲与极值点屈曲。分支点屈曲的临界荷载定义为使结构保持稳定平衡状态的极限荷载。当荷载达到临界荷载时,在任何微小的扰动下,构件都将发生显著的屈曲变形,导致结构的崩塌。在这类屈曲过程中,结构的应力状态由屈曲前的薄膜应力状态变成显著的弯曲应力状态。波形钢腹板的屈曲过程则是典型的结构分支点屈曲。

分析波形钢腹板在剪切荷载作用下的屈曲模式和屈曲荷载,一般可分为两个方面进行。一种是将波形钢腹板视为一系列折叠的平板,这些板条彼此互相支撑,端部支撑在翼缘上,然后就其中的一个单独的板条进行研究。在分析这种屈曲模式时,假定屈曲只在某一单个的平板发生,这种屈曲模式称之为局部屈曲。另一种屈曲模式则是波形钢腹板的整体屈曲,这种屈曲模式并不是只发生在一块板件上,而是屈曲贯穿了几个板条或分布在波形钢腹板的全部范围之内,分析整体屈曲模式时可将波形钢腹板等效成正交各向异性板。

1.3.3.1 波形钢腹板的局部弹性屈曲

波形钢腹板的局部屈曲受力见图 1-4,图中的几何参数是:波形钢腹板的高度 h 、波形钢腹板波折段最大宽度 a [$a = \max(a_1, a_3)$] 和钢腹板厚度 t 。波形钢腹板的高度 h 确定以后,调整波形钢腹板波折段长度 a 和钢腹板厚度 t ,即可改变波形钢腹板的局部屈曲强度。

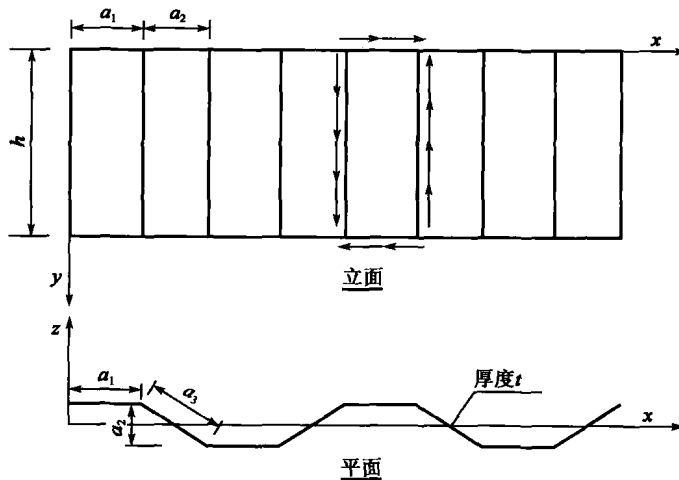


图 1-4 波形钢腹板局部屈曲受力

现有的国内外波形钢腹板 PC 组合箱梁桥,其波形钢腹板的高度 h 均大于波折板的宽度 a ,且一般波折板的宽高比 $\alpha = a/h < 1/5$,波形钢板的临界屈曲剪应力为:

$$\tau_{cr,l} = \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 k_\tau \quad (1-9)$$

其中,当钢条的约束边界按四边简支考虑时:

$$k_{\tau 1} = 5.34 + 4.0 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \quad (1-10)$$

当钢条边界约束按固定端考虑时:

$$k_{\tau 2} = 8.98 + 5.6 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \quad (1-11)$$

当平钢板边界约束按高度方向简支,而与顶底板连接处固定考虑时:

$$k_{\tau 3} = 5.34 + 2.34 \cdot \frac{a}{h} - 3.44 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 8.39 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \quad (1-12)$$

一般在工程中偏于安全地将钢条的约束边界按四边简支考虑。于是波形钢腹板的局部弹性临界翘曲剪应力可按式计算:

$$\tau_{\text{cr},l} = \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)} \gamma^2 k \quad (1-13)$$

$$k = 5.34 + 4.0 \left(\frac{a}{h} \right)^2$$

式中: γ ——波形钢腹板的厚高比, $\gamma = t/h$ 。

1.3.3.2 波形钢腹板的整体弹性屈曲

如果波形尺寸比较稠密,波折板尺寸和整个腹板的外形尺寸相比比较小,则波形钢腹板可能发生贯穿多个波长甚至全部板件的整体屈曲(图 1-5)。

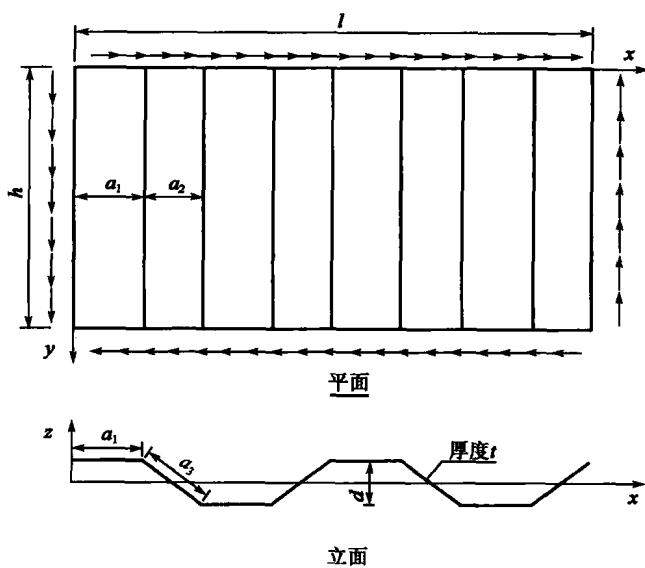


图 1-5 波形钢腹板整体屈曲受力

波形钢腹板的分析精度,在很大程度上取决于截面特性的计算方法。目前常用的波形钢腹板整体剪切屈曲临界剪应力 $\tau_{\text{cr},G}$ 的计算公式为:

$$\tau_{\text{cr},G} = 36\chi_G \frac{(EI_y)^{1/4} (EI_x)^{3/4}}{h^2 t} \quad (1-14)$$

式中: χ_G ——波形钢腹板整体嵌固系数(简支边界条件取 $\chi_G = 1.0$, 固结时 $\chi_G = 1.9$);

E ——钢的弹性模量;

I_y ——对波形钢腹板高度方向中性轴单位长度上的惯性矩, $I_y = t^3/[12(1-\mu^2)]$;

I_x ——对波形钢腹板桥轴向中性轴单位长度上的惯性矩, $I_x = t^3 \cdot (\delta^2 + 1)/6\eta$;

t ——钢板的厚度;

δ ——波高板厚比, $\delta = d/t$;

η ——波形板沿桥轴向长与波形板展开长度的比值, $\eta = \frac{a_1 + a_2}{a_1 + a_3}$;

h ——波形钢腹板的高度。

1.3.3.3 波形钢腹板的合成弹性屈曲

波形钢腹板的合成弹性剪切屈曲强度 $\tau_{cr,I}$ 的经验公式为:

$$\frac{1}{(\tau_{cr,I})^n} = \frac{1}{(\tau_{cr,L})^n} + \frac{1}{(\tau_{cr,G})^n} \quad (1-15)$$

在日本设计指南中推荐 $n=4$, 即采用下面的公式计算:

$$\frac{1}{\tau_{cr,I}^4} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4} \quad (1-16)$$

或

$$\tau_{cr,I} = \tau_{cr,L} \{1/[1 + (\tau_{cr,L}/\tau_{cr,G})^4]\}^{1/4} \quad (1-17)$$

式中: $\tau_{cr,I}$ ——合成屈曲强度;

$\tau_{cr,L}$ ——局部屈曲强度;

$\tau_{cr,G}$ ——整体屈曲强度。

1.3.4 波形钢腹板的非弹性屈曲特性

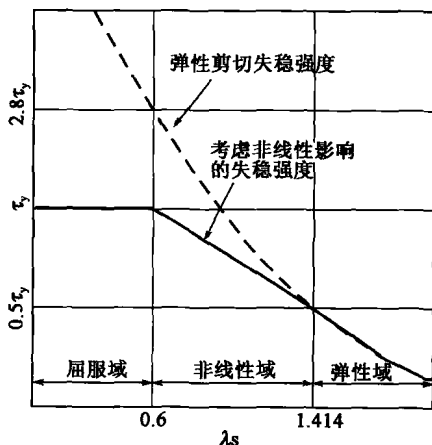


图 1-6 考虑非弹性的剪切屈曲强度

为达到经济合理性,设计以控制屈曲发生在屈服域、非弹性域为原则。屈曲应力处于非弹性区域,即 $\lambda_s \leq \sqrt{2}$ (λ_s 是剪切屈曲系数, $\lambda_s = \sqrt{\tau_y/\tau_{cr,I}^e}$ 是容许的,但更希望的是 $\lambda_s \leq 0.6$, 以便使材料能得到充分利用,见图 1-6。

在日本的设计指南中,以剪切屈曲系数 $\lambda_s = \sqrt{\tau_y/\tau_{cr,I}}$ 作参数,给出了波形钢腹板屈曲应力的验算公式,即:

$$\begin{cases} \tau_{cr} = \tau_y & \lambda_s \leq 0.6 \\ \tau_{cr} = \tau_y [1 - 0.614(\lambda_s - 0.6)] & 0.6 \leq \lambda_s \leq \sqrt{2} \\ \tau_{cr} = \tau_y / \lambda_s^2 & \lambda_s \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (1-18)$$

式中: τ_y ——材料的剪切流动极限。

1.3.4.1 波形钢腹板的局部屈曲剪应力验算条件

为充分利用钢材强度,设计上要求满足波形钢腹板的局部剪切应力验算条件,即:

$$\lambda_s = \sqrt{\tau_y/\tau_{cr,L}} \leq 0.6 \quad (1-19)$$

为得到局部屈曲界限图将式(1-13)代入式(1-18)得:

$$k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \gamma^2 \geq \frac{\tau_y}{0.36} \tag{1-20}$$

即

$$k \geq \frac{12(1-\mu^2)\tau_y}{0.36E\pi^2\gamma^2} \tag{1-21}$$

当 $\alpha = \frac{a}{h} < 1$,且板的约束条件按四边简支考虑时取:

$$k = 4.0 + \frac{5.34}{\alpha^2} \tag{1-22}$$

将式(1-22)代入式(1-21),得:

$$\left(\frac{a}{h}\right)^2 \leq \frac{5.34}{\frac{12(1-\mu^2)\tau_y}{0.36E\pi^2\gamma^2} - 4.0} \tag{1-23}$$

$$\frac{a}{h} \leq \frac{1}{0.865\sqrt{\frac{1}{\Psi_1\gamma^2} - 1.0}} \tag{1-24}$$

- 式中: a ——折板的最大长度,mm;
 γ ——波形钢腹板的板厚与腹板高度的比值, $\gamma=t/h$;
 t ——钢板的厚度,mm;
 h ——波形钢腹板的高度,mm;

Ψ_1 ——材料特性有关的系数, $\Psi_1=1.141\sqrt{\frac{E}{\tau_y}}$ 。

根据日本桥梁中的钢材性能,取 $E=2.0\times10^5\text{MPa}$,可得到日本规范中给出的 Ψ_1 的数据,如表 1-2 所示。我国桥梁用钢材的 Ψ_1 见表 1-3。

日本 钢 材 的 Ψ_1 表 1-2

钢材名称 系数	SS400、SM400、 SMA400W	SM490	SM490Y、SM520、 SMA490W	SM570、 SMA570W
$\tau_y(\text{MPa})$	135	180	205	260
Ψ_1	43.9	38.0	35.6	31.6

我国 钢 材 的 Ψ_1 表 1-3

钢材名称 系数	Q235	Q345	Q375	Q420q
$\tau_y(\text{MPa})$	135.7	199.2	216.5	242.5
Ψ_1	43.8	36.2	34.7	32.8

以波形钢腹板厚高比 $\gamma=t/h$ 为横坐标,折板段宽高比 $\alpha=a/h$ 为纵坐标,由式(1-24)可得到波形钢腹板的局部剪切屈曲界限图(图 1-7)。

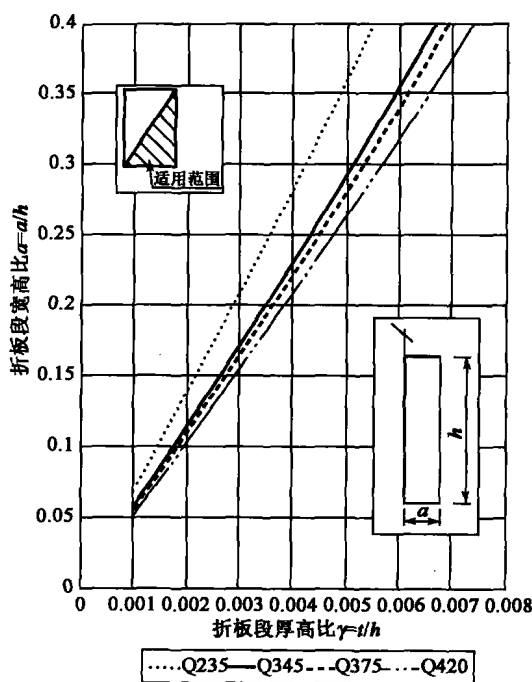


图 1-7 局部剪切屈曲界限图

1.3.4.2 波形钢腹板的整体屈曲剪应力验算条件

与局部屈曲一样,波形钢腹板的整体屈曲应力验算条件为:

$$\lambda_s = \sqrt{\tau_y / \tau_{cr,G}} \leq 0.6 \quad (1-25)$$

$$36\chi_G \cdot \frac{(EI_y)^{1/4} (EI_x)^{3/4}}{h^2 t} \geq \tau_y / 0.36 \quad (1-26)$$

取

$$I_x = \frac{t^3 (\delta^2 + 1)}{6\eta}, I_y = \frac{t^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (1-27)$$

将式(1-27)代入式(1-26),得:

$$\left[\frac{t^3 (\delta^2 + 1)}{6\eta} \right]^{3/4} \geq \frac{\tau_y h^2 t}{0.36 \times 36\chi_G E \left[\frac{t^3}{12(1 - \mu^2)} \right]^{1/4}} \quad (1-28)$$

令

$$\Psi_G = 1.364 \sqrt{\frac{\chi_G E}{\tau_y}} \quad (1-29)$$

由 $\delta = d/t$, 并取 $\eta = 1.0$ 可得:

$$\delta^2 \geq \left(\frac{1}{\Psi_G^2 \gamma^2} \right)^{4/3} - 1.0 = \frac{1}{(\Psi_G \gamma)^{8/3}} - 1.0 \quad (1-30)$$

$$d/t \geq \sqrt{\frac{1}{(\Psi_G \gamma)^{8/3}} - 1.0} \quad (1-31)$$

式中: d ——波形钢腹板的波高, mm;
 t ——波形钢腹板的板厚, mm;
 γ ——波形钢腹板厚高比, $\gamma = t/h$;
 h ——波形钢腹板的高度, mm;

Ψ_G ——与波形钢腹板材料特性和约束有关的系数, $\Psi_G = 1.364 \sqrt{\frac{\chi_G E}{\tau_y}}$ 。

根据日本桥梁中的钢材性能,取 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\chi_G = 1.9$ 得到的 Ψ_G 见表 1-4。

日本钢材的 Ψ_G 表 1-4

钢材名称 系数	SS400、SM400、 SMA400W	SM490	SM490Y、SM520、 SMA490W	SM570、 SMA570W
$\tau_y \text{ (MPa)}$	135	180	205	260
Ψ_G	72.3	62.6	58.7	52.2

我国桥梁钢结构中常用的钢材种类主要有：Q235、Q345、Q370 和 Q420 等。取 $E=2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ， $\chi_G = 1.9$ 即可得到我国钢材的 Ψ_G ，见表 1-5。与表 1-4 中日本桥梁用钢材的特性比较可以看到，它们的剪切流限分别与 SS400、SM400、SMA400W，SM490，SM490Y，SM520，SMA490W 和 SM570，SMA570W 钢材接近，略低于日本钢材。

以波形钢腹板厚高比 $\gamma=t/h$ 为横坐标，波高与板厚的比 $\delta=d/t$ 为纵坐标，可以由式 (1-31) 得到波形钢腹板的整体剪切屈曲界限图(图 1-8)。

我国钢材的 Ψ_G 表 1-5

钢材名称 系数	$\tau_y(\text{MPa})$	Ψ_G
Q235q	135.7	72.2
Q345q	199.2	59.5
Q375q	216.5	57.2
Q420q	242.5	54.0

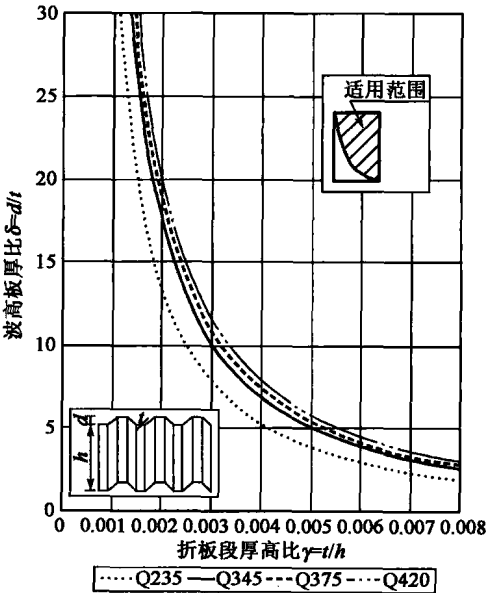


图 1-8 整体剪切屈曲界限图

1.3.4.3 波形钢腹板的合成屈曲剪应力验算

由式(1-16)，并考虑到式(1-19)和式(1-25)有：

$$\frac{1}{\tau_{cr,I}^4} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4} \leq \frac{2 \times 0.36^4}{\tau_y^4} \tag{1-32}$$

得合成屈曲剪应力验算条件：

$$\tau_{cr,I} \geq \frac{\tau_y}{0.43} \tag{1-33}$$

1.3.5 带有翼缘板的波形钢腹板梁的疲劳性能^[4]

Sherif A. Ibrahim 等对波形钢腹板梁进行疲劳试验研究后指出：波形腹板板梁的疲劳寿命比普通加劲板梁高 49%~78%。从疲劳试验得到波形钢腹板梁破坏形态与 Elgaaly 的波形钢腹板梁在静载下发生的破坏形态完全不同。破坏裂缝都发生在受拉翼缘板处。裂缝开始于腹板与翼板的焊脚处，从折线弧段端靠近斜板段的焊接处开始，疲劳裂缝沿垂直于受拉翼板中纵向应力的方向展开。有时候，裂缝能延伸到整个翼板宽。受拉翼板的纵向应力在圆弧段和斜板段衔接处达到最大值，它是使受拉翼板在这个区域发生破坏的主要因素。

为讨论方便，作一个圆，使波形钢腹板的直板段和斜板段的中点都切于这个圆的圆周上

(图 1-9), 这个圆弧段的半径称为 R_{circular} 。Ibrahim 的试验表明, 增加折线的曲率半径, 能显著地降低波形钢腹板和翼缘板的应力集中因子, 而几乎不影响其极限承载能力。如折线圆弧段曲率半径增加到 1/4 相应的 R_{circular} (R/R_{circular} 从 0.0 增到 0.23), 极限承载力仅下降 1%, 然而波形钢腹板上垂直方向上(图 1-10)的应力 (S_{22}) 集中因子从 4.95 降低到 3.05, SCF 值减少 62.5%。同时, 受拉翼板的纵向应力 (S_{11}) 集中因子从 1.17 减小到 1.02(图 1-11)。这意味着可以通过增加折线的曲率半径提高波形钢腹板板梁的疲劳寿命, 同时又不显著降低静载承载力。

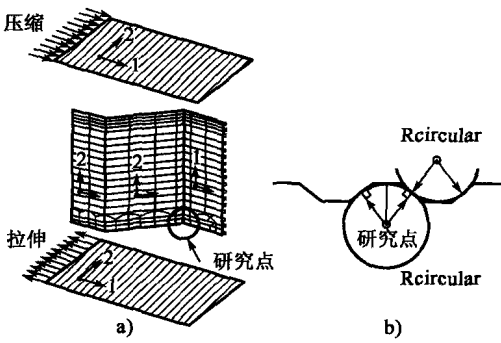


图 1-9 有限元模型及圆弧段示意图

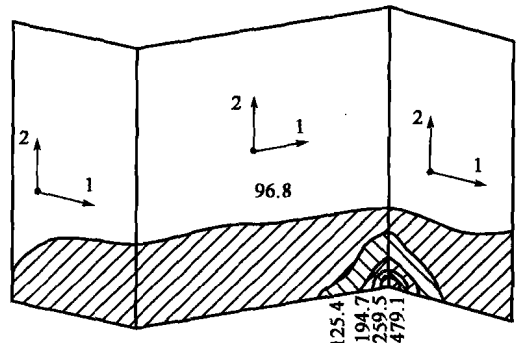


图 1-10 波形钢腹板上的应力示意图 (MPa)

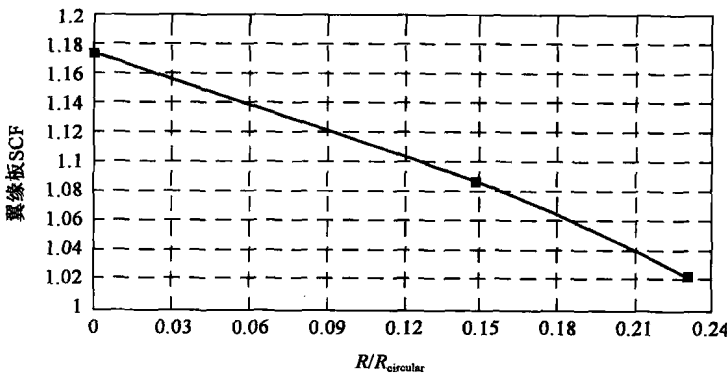


图 1-11 翼缘板 SCF 与 R/R_{circular} 的关系^[28]

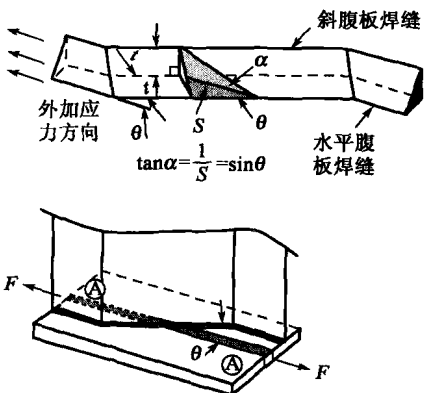


图 1-12 焊角有效坡度倾角 α 与斜折板倾角 θ 的示意图^[28]

翼板—腹板焊接以及加劲肋—腹板焊接一般是 45° 的贴脚焊, 因此, 焊接点与作用的应力方向有个 1:1 的坡度。对于斜板段, 焊接表面在作用的应力方向上的有效坡度比 1:1 小。焊脚有效坡度的倾角 α 是斜板段倾角 θ 的函数, 如图 1-12 所示, 即:

$$\tan \alpha = \sin \theta \quad (1-34)$$

Sherif A. Ibrahim 等指出, 翼板—腹板焊脚的应力集中因子 (SCF) 的值与焊脚有效坡度倾角 α 间的关系为:

$$\text{SCF} = 0.8279\alpha^{0.236} \quad (1-35)$$

一般来说,波形钢腹板的斜板段倾角 θ 是已知的,利用式(1-34)和式(1-35),就可确定翼板—腹板焊脚的 SCF 值。Sherif A. Ibrahim 等利用线弹性断裂力学分析方法对试验结果进行分析,得到的疲劳寿命 N 与作用应力范围之间的关系为:

$$\lg N = 8.544 - 3.0 \lg SCF - 3.0 \lg F_r \quad (1-36)$$

式中: F_r ——应力范围, $F_r = F_{r \max} - F_{r \min}$, $F_{r \max}$ 和 $F_{r \min}$ 分别为波形钢腹板的最大和最小应力, MPa;

N ——应力循环次数。

由式(1-36)可知,疲劳寿命 N 是关于应力 F_r 和应力集中因子 SCF 的函数。采用有限元法对波形腹板板梁进行分析,可得到应力范围 F_r 。应力集中因子 SCF 的值,可通过式(1-34)和式(1-35)得到。这样,就可通过式(1-37)直接估计出波形钢腹板梁的疲劳寿命。

例如:波形腹板梁的直板段宽 117mm,斜板段宽 125mm。斜板段倾角 θ 为 37° ,折线圆角半径为 $R=27\text{mm}$, $R_{\text{circular}}=182\text{mm}$, $R/R_{\text{circular}}=0.148$,由图 1-11 得受拉翼缘板的 SCF 值是 1.09。由式(1-34)得 $\alpha=31.04^\circ$,再由式(1-35)得翼板—腹板焊脚的 SCF 值为 1.86。这两个系数的结合得到 $SCF=1.86 \times 1.09=2.02$ 。把它代入式(1-36),得波形钢腹板梁的疲劳寿命:

$$\lg N = 7.63 - 3.0 \lg F_r \quad (1-37)$$

在日本设计指南中,要求斜折板与直板的折线圆弧段曲率半径为板厚的 15 倍以上,当达不到这个要求时,要求确保钢材应有的冲击功,并且控制氮元素的含量。

1.4 波形钢腹板的设计

波形钢腹板的设计流程见图 1-13。

波形钢腹板的设计步骤如下:

(1)根据箱梁整体布置确定腹板高度 h ,按抗剪强度即式(1-1)选定钢板厚度 t 。

(2)由局部剪切屈曲界限图 1-7 确定最大波折段长度 a 。

(3)由整体剪切屈曲界限图 1-8 确定波高 d 。

(4)根据以上确定的几何参数,结合式(1-33)来验算合成屈曲剪应力,并预留一定的安全度。

(5)利用式(1-37)估算具有翼缘型抗剪连接件的波形钢腹板的疲劳寿命。

根据国外部分已建成的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的波形钢板的几何参数绘制出的局部剪切屈曲界限和整体剪切屈曲界限见图 1-14 和图 1-15。从图中可以看出,绝大部分已建的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的波形钢腹板,都处于剪切屈曲界限图的安全区内。个别数据处于稍过界限,因为腹板高度已达到 4~5m,这时已在波

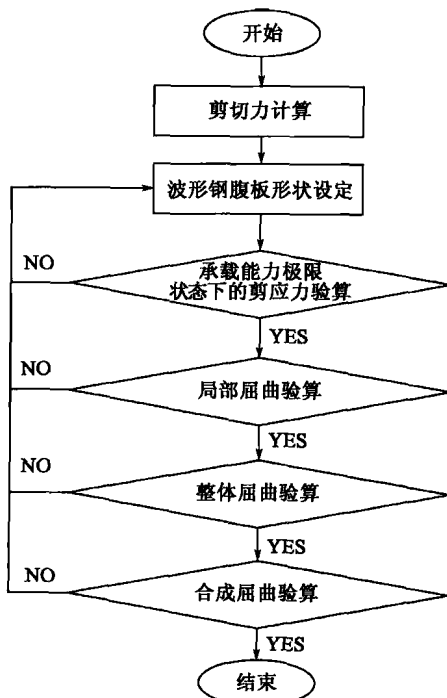


图 1-13 波形钢腹板的设计流程