

文章编号:1671-8879(2009)03-0073-04

# 波形钢腹板的设计方法

黄 琪<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 河南省交通基本建设质量检测监督站,河南 郑州 450006)

**摘 要:**针对大跨径波形钢腹板 PC 组合箱梁结构中的波形钢腹板的失稳破坏形式,分别对波形钢腹板的剪应力、局部屈曲强度、整体屈曲强度以及合成屈曲强度进行了计算,绘制出了波形钢腹板局部剪切屈曲界限图和整体剪切屈曲界限图,给出了波形钢腹板的一般设计方法和步骤,并将世界上已建的部分波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的波形钢板的设计资料进行了归纳整理。验证结果表明,剪切屈曲界限图可用于波形钢腹板的参数设计,山东鄄城黄河大桥控制参数均位于适用范围内,为波形钢腹板的设计提供了依据。

**关键词:**桥梁工程;波形钢腹板;屈曲;设计

**中图分类号:**U443.3 **文献标志码:**A

## Design study on the corrugated steel webs

HUANG Qi<sup>1,2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Provincial Communications Quality Control Institute, Zhengzhou 450006, Henan, China)

**Abstract:** Aimed at design of corrugated steel webs in structure of long-span PC composite box-girder with corrugated steel webs, shearing strength, local buckling strength and composite buckling strength were calculated. The graph about the local shear buckling limit boundary and the total shear buckling limit boundary are drawn based on the calculated results for the design of large span box-girder bridges with corrugated steel webs. Design materials of some box-girder bridges with the corrugated steel webs built in the world are summarized. The results indicate that geometrical parameters about corrugated steel webs can be designed with shear buckling limit boundary graphs. General design method and process which can provide reference for design of corrugated steel web summarized for the corrugated steel web. 1 tab, 3 figs, 10 refs.

**Key words:** bridge engineering; corrugated steel web; buckling; design

## 0 引 言

波形钢板是波形钢腹板 PC 组合箱梁结构中最具特点的构件。随着桥梁跨径的增大,腹板的高度

也相应增高。作为箱梁腹板的波形钢板,其截面厚度一般为 10~20 mm,仅为普通混凝土腹板厚度(300~800 mm)的几十分之一,因此其破坏形式也由混凝土腹板的强度破坏转变为波形腹板的失稳破

收稿日期:2008-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50078014)

作者简介:黄 琪(1970-),女,河南信阳人,河南省交通基本建设质量检测监督站高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:hq66138@sina.com.cn。

坏<sup>[1-5]</sup>。美国 Drexel 大学的 Elgaaly 和 Hamilton 等学者和其他研究者认为,波形钢腹板梁的剪力完全由腹板承担,而且钢腹板的破坏是由于屈曲造成的,当波纹较密时,由整体屈曲强度控制;当波纹较疏时,由局部屈曲控制;而在屈曲过程中,又有可能伴随着合成屈曲<sup>[6-10]</sup>。为此,本文研究了波形钢腹板的剪应力、局部屈曲强度、整体屈曲强度以及合成屈曲强度,分析波形钢腹板局部剪切屈曲界限和整体剪切屈曲界限,并研究了该界限的适用性。

## 1 波形钢腹板的构造形式与设计

波形钢腹板一般由卷材或板材弯折而成,如图 1 所示。波形钢腹板的几何控制参数主要有:波形钢腹板高度  $h$ ,波形钢腹板波高  $d$ ,钢腹板厚度  $t$ ,直板段宽度  $a_1$ ,斜板段投影宽度  $a_2$ ,斜板段宽度  $a_3$ 。

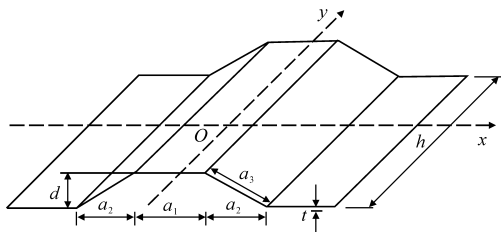


图 1 波形钢腹板构造

### 1.1 波形钢腹板剪应力计算

相关研究证明,波形钢板的剪应力沿高度方向均匀分布。因此,实用设计时波形钢腹板的平均剪应力  $\tau_{ws}$  计算式为

$$\tau_{ws} = \frac{S_w}{A_w} = \frac{S - S_p}{A_w} \quad (1)$$

式中: $S_w$  为钢腹板竖向剪力; $A_w$  为钢腹板毛截面积( $A_w = th$ ,  $h$  取顶底板间钢腹板净高); $S$  为总剪力; $S_p$  为预应力竖向分力。

### 1.2 波形钢腹板局部屈曲计算

波形钢腹板的局部屈曲表现为钢板条的屈曲。钢板条的几何控制参数是  $h$ 、波形钢板波折段最大长度  $a$  ( $a = \max(a_1, a_3)$ ) 和  $t$ 。 $h$  确定以后,调整  $a$  和  $t$ ,即可改变波形钢腹板的局部屈曲强度。两弯折边间的波形钢腹板条的局部临界屈曲强度  $\tau_{cr,l}$  的计算式为

$$\tau_{cr,l} = \frac{x_1 E \pi^2}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{h} \right)^2 K \quad (2)$$

式中: $x_1$  为钢板条的嵌固系数(4 边简支时为 1.0,弹性支承时为 1.24;4 边固结时为 1.9,一般可偏于安全考虑,按 4 边简支取为 1.0); $E$  为钢材的弹性模量; $\nu$  为钢材的泊松比; $K$  为屈曲系数, $K =$

$$\begin{cases} 5.34 + 4.00(h/a)^2 & a/h \geq 1 \\ 4.00 + 5.34(h/a)^2 & a/h < 1 \end{cases}$$

根据《钢结构设计规范》,有

$$\text{当 } \lambda_s \leq 0.8 \text{ 时, } \tau_{cr} = f_v;$$

$$\text{当 } 0.8 < \lambda_s \leq 1.2 \text{ 时, } \tau_{cr} = [1 - 0.59(\lambda_s - 0.8)] f_v;$$

$$\text{当 } \lambda_s > 1.2 \text{ 时, } \tau_{cr} = 1.1 f_v / \lambda_s^2。$$

式中: $\lambda_s$  为用于腹板受剪计算时的通用高厚比,  $\lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,l}}$ ;  $\tau_{cr}$  为屈曲强度; $f_v$  为钢材抗剪强度的设计值。

为充分利用钢材强度,设计上一般要求理论局部剪切屈曲强度应不大于钢材抗剪屈服强度,即  $\lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,l}} \leq 0.8$ ,将式(2)代入,可得

$$a \leq \begin{cases} h & \gamma \geq \frac{1}{k} \\ \frac{1}{0.865 \sqrt{1/k^2 - \gamma^2}} & \gamma < \frac{1}{k} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为波形钢腹板的板厚与腹板高度的比值( $\gamma = t/h$ ); $k$  为与局部屈曲有关的系数,  $k = 48.92 \sqrt{\frac{345}{\sigma_y}}$ ,  $\sigma_y$  为流动极限。

中国桥梁钢结构中通常使用的钢材种类主要有:Q235q、Q345q、Q370q、Q420q 等。根据钢材屈服强度不同,以  $\gamma$  为横坐标,折板段宽高比  $\alpha = a/h$  为纵坐标,可以得到波形钢腹板局部剪切屈曲界限,如图 2 所示。

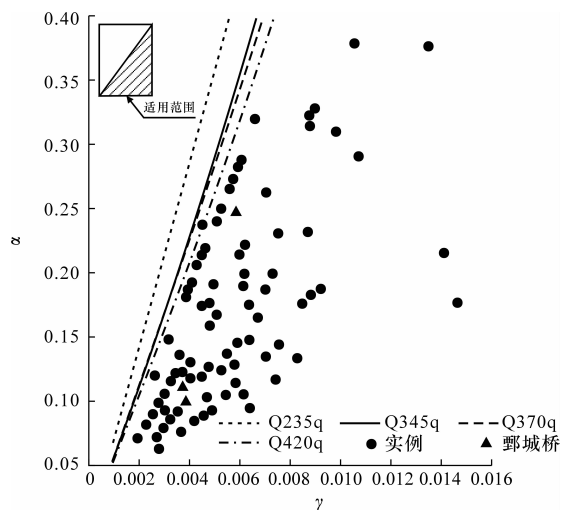


图 2 波形钢腹板几何参数的分布(局部屈曲)

### 1.3 波形钢腹板整体屈曲计算

波形钢腹板的整体屈曲表现为各向异性板的整体发生屈曲。波形钢腹板整体的几何控制参数为  $h$  和  $d$ 。当  $h$  确定后,可通过改变  $d$  来改变波形钢腹板

整体屈曲界限强度。波形钢腹板整体屈曲强度  $\tau_{cr,G}$  计算式为

$$\tau_{cr,G} = 36\beta \frac{(EI_y)^{1/4} (EI_x)^{3/4}}{h^2 t} \tag{4}$$

式中: $\beta$ 为波形钢腹板整体嵌固系数(可偏于安全考虑,按简支取为 1.0); $I_x$ 为波形钢腹板桥轴向中性轴单位长度上的惯性矩, $I_x = t^3(\delta^2 + 1)/(6\eta)$ ;  $\delta$ 为波形钢腹板波高板厚比, $\delta = d/t$ ;  $\eta$ 为长度减少率(波形钢腹板沿桥轴向长与波形钢腹板展开长度的比值);  $I_y$ 为波形钢腹板高度方向中性轴单位长度上的惯性矩, $I_y = t^3/[12(1 - v^2)]$ 。

这里与局部屈曲的式(2)一样,整体屈曲在剪切应力下不发生的条件为  $\lambda_s = \sqrt{f_v/\tau_{cr,G}} \leq 0.8$ ,将式(4)代入,并偏于安全考虑,取  $\eta = 1.0$ ,可得

$$d \geq t \sqrt{\frac{1}{3 \sqrt{(k\gamma)^8}} - 1} \tag{5}$$

采用与局部屈曲计算相同方法,根据钢材屈服强度不同,以  $\gamma$  为横坐标,  $\delta$  为纵坐标,可得到波形钢腹板整体剪切屈曲界限,如图 3 所示。

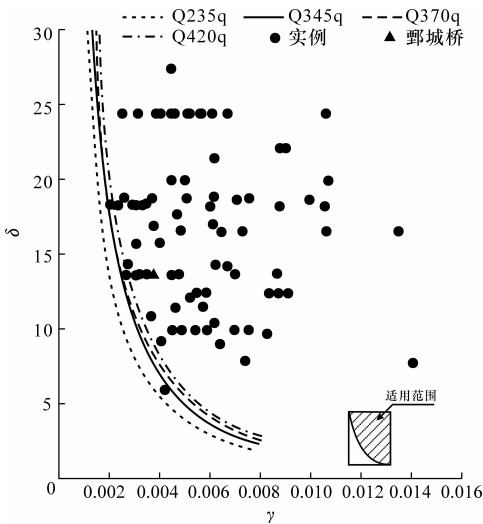


图 3 波形钢腹板几何参数的分布(整体屈曲)

1.4 波形钢腹板合成屈曲计算

波形钢腹板的合成屈曲是同时出现局部屈曲破坏和整体屈曲破坏的现象,是处于局部屈曲和整体屈曲中间的屈曲模式。波形钢腹板的合成屈曲临界剪应力(屈曲强度)经验计算公式为

$$\left(\frac{1}{\tau_{cr,l}}\right)^4 + \left(\frac{1}{\tau_{cr,G}}\right)^4 = \left(\frac{1}{\tau_{cr}}\right)^4 \tag{6}$$

2 实 例

2.1 波形钢腹板的设计资料

为了方便波形钢腹板的设计,将世界上已建的

部分波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的波形钢腹板的设计资料归纳,将数据标于图 2 和图 3。

从图 2、图 3 可以看出,实例数据绝大部分包含在适用范围内,个别数据处于适用范围之外,是因为腹板高度已达到 4~5 m,但在板内浇注了混凝土内衬,形成组合腹板,以提高整体失稳性能。

2.2 郾城黄河大桥波形钢腹板参数设计

山东郾城黄河大桥主桥(70 m+11×120 m+70 m)是在建的中国第一座采用悬臂施工方法施工的波形钢腹板 PC 组合多跨连续箱梁桥。在初步设计中,郾城黄河大桥主桥波形钢腹板 PC 组合箱梁的波形钢腹板采用 Q345q 钢材,几何控制参数如表 1 所示。

表 1 郾城黄河大桥主桥波形钢腹板控制参数

箱梁节段	钢腹板最大高度/mm	钢腹板厚度 t/mm	a <sub>1</sub> /mm	a <sub>2</sub> /mm	a <sub>3</sub> /mm	d/mm
0	混凝土腹板					
1	混凝土与波形钢板组合腹板					
2	4 253	16	430	370	430	220
3~8	3 787	14	430	370	430	220
9~11	1 729	10	430	370	430	220

根据表 1 参数,将式(3)、式(4)计算的结果标于图 2、图 3 中。由图 2、图 3 可以看出,郾城桥参数均位于适用范围内,表明波形钢腹板控制参数选择满足要求。

3 结 语

(1)建立了波形钢腹板局部剪切屈曲界限图和整体剪切屈曲界限图;对中国第一座采用悬臂施工方法建设的波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥——郾城黄河大桥的钢腹板进行了参数设计。

(2)剪切屈曲界限图可用于波形钢腹板的参数设计;一般设计方法为,根据箱梁整体布置确定钢腹板高度,然后按抗剪强度计算选定钢腹板厚度,查局部屈曲强度界限图,确定最大波折段长度,查整体屈曲强度界限图,确定最小波高;根据以上确定的几何参数,计算合成屈曲强度并预留一定的安全度,以确保其值大于钢腹板剪切屈服强度。

参考文献:

References:

[1] 李宏江,万 水,叶见曙. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的结构特点[J]. 公路交通科技,2002,19(3):53-57.  
LI Hong-jiang, WAN Shui, YE Jian-shu. Structural features of prestressed concrete box-girder with cor-

[9] 孔祥福. 波纹钢腹板预应力混凝土箱梁设计理论研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.