

文章编号:1673-2049(2012)02-0111-07

波形钢腹板 H 型截面梁抗剪性能理论研究

屈讼昭,王志骞

(西安交通大学 土木工程系,陕西 西安 710049)

摘要:在前人研究波形钢腹板 H 型截面梁抗剪承载力成果的基础上,总结归纳了 2 种形式波形钢腹板在局部屈曲、整体屈曲和合成屈曲 3 种情况下的临界应力计算公式,通过对不同计算公式的比较提出了推荐公式。利用大量的数值计算分析,分别找出影响 2 种波形钢腹板 H 型截面梁极限抗剪承载力的因素,并得出 2 种不同波形钢腹板 H 型截面梁极限抗剪承载力计算的等效转换条件。结合前人的试验数据和本文的数值计算结果,提出了剪切稳定系数的实用计算公式。结果表明:波形钢腹板 H 型截面梁的波高、平子面板宽度、波幅、波长应合理设置,过大或过小都将削弱钢梁的极限承载力;提出的剪切稳定系数的实用计算公式与数值分析结果和试验数据拟合较好,并且计算简便,便于实际工程设计应用。

关键词:波形钢腹板 H 型截面梁;抗剪承载力;极限承载力;有限元分析;数值计算

中图分类号:TU391

文献标志码:A

Theoretical Research of Shear Performance of H-section Beams with Corrugated Steel Webs

QU Song-zhao, WANG Zhi-qian

(Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: The previous research on the shear capacity of two forms of corrugated steel webs was summarized, and the formulas for calculating the local, global and interactive buckling loads of two forms of corrugated steel webs were proposed respectively, and recommended formulas were proposed by comparing of different formulas for calculating buckling loads. Based on results from numerical calculation analysis, the factors of the ultimate shear capacities of two H-section beams with corrugated steel webs were identified respectively, and the transforming conditions of them were proposed. Based on previous experiment data and results from numerical calculation analysis, the practical formulas for calculating shear stability coefficients of two forms of corrugated steel webs were provided. The results show that the wave height, flat sub-panel width, amplitude, wave length of H-section beams with corrugated steel webs should be a reasonable set, if the set is too large or too small, it will weak the ultimate bearing capacity of steel beams; the calculation results of the formulas for predicting the shear stability coefficients of two forms of corrugated steel webs are better fitting with the numerical results and experiment data, and the calculation is simple, easy to practical engineering design.

Key words: corrugated steel web H-section beam; shearing capacity; ultimate bearing capacity; finite element analysis; numerical calculation

收稿日期:2011-12-09

作者简介:屈讼昭(1987-),男,河南襄城人,工学硕士研究生,E-mail:qusongzhao@126.com。

0 引言

波形钢腹板主要有 2 种形式,梯形和正弦波形。通过将腹板弯折成有周期性的正弦曲线形或梯形,大大提高了 H 型梁的平面外刚度,减少了梁的全部纵向加劲肋,并且腹板可以做的很薄,一般由 2~3 mm 厚的薄板通过冷轧而成。波形钢腹板 H 型梁由于焊缝数量少,与普通 H 型梁比较,其疲劳寿命有很大程度的提高^[1]。由于具有以上优点,波形钢腹板 H 型截面梁引起了各国学者的广泛关注,并对其进行了大量的理论分析和试验研究,为此类构件在工程实际中的应用奠定了理论基础。

相对于普通工字型钢,H 型钢的翼缘进行了加宽,且内、外表面一般是平行的,这样更方便其与高强螺栓及其他构件连接。H 型钢型号种类多,便于设计选用。波形钢腹板 H 型截面梁又较普通 H 型截面梁有较高的抗剪切屈曲能力,试验结果表明^[2-3],在同样的静载承载能力下,波形钢腹板 H 型截面梁比普通 H 型钢梁节约用钢量可达 30%;在相同条件下,波形钢腹板抗屈曲能力比平直腹板抗屈曲能力提高 1.5~2 倍。可见,波形钢腹板 H 型截面梁在经济方面是相当可观的。

本文中笔者在前人研究成果的基础上,对梯形波形和正弦波形 2 种截面 H 型钢梁的抗剪性能进行了研究,提出了波形钢腹板在整体屈曲、局部屈曲和合成屈曲 3 种屈曲形式下的抗剪弹性屈曲荷载计算公式。然后通过收集前人的试验数据,并结合本文的数值分析结果拟合得出正则化长细比-稳定系数($\lambda_s-\varphi_s$)关系曲线,用于指导波形钢腹板弹塑性屈曲荷载的计算。

1 梯形波形 H 型钢腹板抗剪弹性屈曲荷载计算公式的推导

波形钢腹板通常存在 3 种屈曲形式:整体屈曲、局部屈曲和合成屈曲。以下各种屈曲模式下的腹板抗剪弹性屈曲荷载的计算公式推导均基于小挠度理论得出的。图 1 为分别对梯形波形钢腹板和正弦波形钢腹板的几何参数说明,其中, t_w 为钢腹板厚度, λ_1 为正弦波半波长, h_1 为正弦波波幅, a, b, c 均为长度, h 为梯形高度, θ 为梯形腹板倾斜夹角。

1.1 局部屈曲

梯形波形钢腹板局部屈曲弹性抗剪承载力 $\tau_{cr,L}^e$ 计算公式,可以按照四边均匀受剪平板稳定理论进行推导^[4]

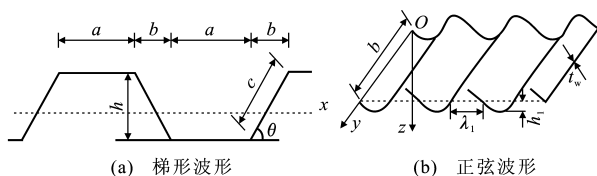


图 1 波形钢腹板几何参数

Fig. 1 Geometric Parameters of Corrugated Steel Webs

$$\tau_{cr,L}^e = k_L \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{\omega} \right)^2 \quad (1)$$

$$\omega = \max\{a, c\}$$

式中: k_L 为剪切屈曲系数; E 为材料弹性模量; μ 为泊松比。

对于两长边简支、两短边固定的受剪板

$$k_L = 5.34 + 2.31 \frac{\omega}{h_w} - 3.44 \left(\frac{\omega}{h_w} \right)^2 + 8.39 \left(\frac{\omega}{h_w} \right)^3 \quad (2)$$

对于四边简支的受剪板

$$k_L = 5.34 + 4 \left(\frac{\omega}{h_w} \right)^2 \quad (3)$$

对于四边固定的受剪板

$$k_L = 8.98 + 5.6 \left(\frac{\omega}{h_w} \right)^2 \quad (4)$$

式中: h_w 为腹板高度。

Moon 等^[5]建议,实际设计中取 $k_L = 5.34$,可以满足工程设计精度要求。

1.2 整体屈曲

Galambos 提出,整体屈曲的临界剪应力 $\tau_{cr,G}^e$ 为

$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{h_w^2 t_w} \quad (5)$$

式中: k_G 为整体剪切屈曲系数,当腹板与翼缘固接时, $k_G = 31.6$,当腹板与翼缘简支时, $k_G = 59.2$; D_x , D_y 分别为截面对 x, y 轴的抗弯刚度。

波纹钢腹板截面抗弯刚度计算公式为

$$D_x = \frac{q}{s} \frac{Et_w^3}{12} \quad (6)$$

$$D_y = \frac{EI_y}{q} \quad (7)$$

$$I_y = 2at_w(h/2)^2 + \frac{t_w h^3}{6\sin(\theta)} \quad (8)$$

$$q = 2(a+b) \quad (9)$$

$$s = 2(a+c) \quad (10)$$

式中: q 为一个周期腹板的等效净长; s 为一个周期腹板的周长。

基于式(5)~(10),Abbas 等^[6]在 2002 年提出了修正简化公式,即

$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{Et_w^{1/2} a^{3/2}}{12h_w^2} F(\theta, \beta) \quad (11)$$

$$F(\theta,\beta)=\sqrt{\frac{(1+\beta)\sin^3(\theta)}{\beta+\cos(\theta)}}[\frac{3\beta+1}{\beta^2(\beta+1)}]^{3/4}\tag{12}$$

式中: $F(\theta,\beta)$ 为量纲一的系数,用来描述波形腹板的几何形状; $\beta=a/c$,通常情况下, β 取为 $1\sim 2$, θ 取为 $30^\circ\sim 45^\circ$;当腹板与翼缘固接时, $k_G=31.6$,当腹板与翼缘简支时, $k_G=59.2$ 。

Moon 等提出

$$\tau_{cr,G}^e=36\beta\frac{D_y^{1/4}D_x^{3/4}}{t_w h_w^2}\tag{13}$$

$$D_x=\frac{Et_w^3[(b/t_w)^2+1]}{6\eta}\tag{14}$$

$$D_y=\frac{Et_w^3}{12(1-\mu^2)}\eta\tag{15}$$

式中: η 为量纲一的系数。

将式(14),(15)代入式(13)并且变形简化得

$$\tau_{cr,G}^e=k_G\frac{\pi^2E}{12(1-\mu^2)}(\frac{t_w}{h_w})^2\tag{16}$$

$$k_G=\frac{36\beta}{\pi^2\sqrt{\eta}}\{2[(\frac{h}{t_w})^2+1](1-\mu^2)\}^{3/4}\tag{17}$$

$$\eta=\frac{a+b}{a+c}=0.9\sim 1.0\tag{18}$$

式中: $\beta=1\sim 1.9$ 。

通常取 $\eta=1,\beta=1,\mu=0.3,\frac{h}{t_w}\geqslant 10$,则 k_G 可简化为

$$k_G=5.72(\frac{h}{t_w})^{1.5}\tag{19}$$

综合计算结果和复杂程度,将式(11)和式(16)进行比较,推荐采用实用计算公式(16)。

1.3 合成屈曲

表 1 为关于波形钢腹板合成屈曲剪切强度计算公式的一个总结。

Yi 等^[7]提出了合成屈曲只与波形钢腹板的几何参数有关,并且提出以下合成屈曲计算公式

$$\tau_{cr,l}^e=k_l\frac{\pi^2E}{12(1-\mu^2)}(\frac{t_w}{h_w})^2\tag{20}$$

$$k_l=\frac{k_Lk_G}{k_L+k_G(\omega/h_w)^2}\tag{21}$$

将 $k_L=5.34$ 和 $k_G=5.72(d/t_w)^{1.5}$ 代入式(21)进行化简,得

$$k_l=\frac{30.54}{5.34(d/t_w)^{-1.5}+5.72(\omega/h_w)^2}\tag{22}$$

瑞典规范中提出的计算公式为

$$\frac{1}{\tau_{cr,l}}=\frac{1}{\tau_{cr,L}^e}+\frac{1}{\tau_{cr,G}^e}\tag{23}$$

对于合成屈曲临界剪应力计算,本文中推荐采用计算公式(20)。

表 1 合成屈曲剪切强度计算公式	
Tab. 1 Calculation Formulas of Interactive Buckling Shear Strength	
公式来源	计算公式
文献[6]	$(\frac{1}{\tau_{cr,l}})^2=(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e})^2+(\frac{1}{\tau_{cr,G}^e})^2$
文献[8]	$\frac{1}{\tau_{cr,l}}=\frac{1}{\tau_{cr,L}^e}+\frac{1}{\tau_{cr,G}^e}$
文献[9]	$(\frac{1}{\tau_{cr,l}})^2=(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e})^2+(\frac{1}{\tau_{cr,G}^e})^2+(\frac{1}{\tau_y})^2$
文献[10]	$(\frac{1}{\tau_{cr,l}})^3=(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e})^3+(\frac{1}{\tau_{cr,G}^e})^3+(\frac{1}{\tau_y})^3$
文献[11]	$(\frac{1}{\tau_{cr,l}})^4=(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e})^4+(\frac{1}{\tau_{cr,G}^e})^4$
文献[12]	$(\frac{1}{\tau_{cr,l}})^n=(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e})^n+(\frac{1}{\tau_y})^n$, $n=4.0$ 为局部屈曲, $n=1.5$ 为整体屈曲

注: $\tau_{cr,l}$ 为合成屈曲剪切强度; τ_y 为材料抗剪屈服强度。

2 正弦波形 H 型钢腹板抗剪弹性屈曲荷载计算公式的推导

2.1 局部屈曲

郭彦林等^[13]提出,正弦波形钢腹板发生局部屈曲时,将各波形子面看作独立的四边简支板,抗剪弹性屈曲荷载计算公式为

$$\tau_{cr,L}^e=\frac{5.34\pi^2E}{12(1-\mu^2)(\omega/t_w)_0^2}\tag{24}$$

$$(\frac{\omega}{t_w})_0=\sqrt{80(\omega/t_w)_n}-22\tag{25}$$

$$(\frac{\omega}{t_w})_n=\frac{S}{t_w}\tag{26}$$

Pasternak^[14]建议局部屈曲弹性抗剪承载力计算公式为

$$\tau_{cr,L}^e=4.83E(\frac{t_w}{\lambda_1})^2\tag{27}$$

对于正弦波形钢腹板局部屈曲临界剪应力计算,推荐采用式(24)。当对于特殊角时,推荐采用式(44)~(46)。

2.2 整体屈曲

郭彦林等建议,正弦波形钢腹板发生整体屈曲时,宏观上看作正交各向异性板。

当构件足够长,并且 $\frac{D_y}{D_x}>50$ 时

$$\tau_{cr,G}^e=\frac{36D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{t_w h_w^2}\tag{28}$$

$$D_x=\frac{Et_w^3}{12(1-\mu^2)}\frac{\lambda_1}{S}\tag{29}$$

$D_y = EI_y$

式中： S 为波纹的半波弧长。

Pasternak 建议

$$\tau_{cr,G}^e = \frac{32.4 D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{t_w h_w^2} \tag{30}$$

$$D_x = \frac{Et_w^3 \lambda_1}{12 S} \tag{31}$$

$$D_y = \frac{EI_y}{\lambda_1} \tag{32}$$

$$I_y = \frac{1}{12} \lambda_1 t_w^3 + \frac{1}{2} \lambda_1 h_1^2 t_w \tag{33}$$

$$S = \int_0^{\lambda_1} \sqrt{1 + [A\omega' \cos(\omega' x)]^2} dx \tag{34}$$

式中： A 为波幅； ω' 为角频率。

由此可得，波纹的半波弧长 S 的近似简化计算公式为

$$S \approx \frac{1 + \pi^2 h_1^2}{4 \lambda_1} \tag{35}$$

对于正弦波形钢腹板整体屈曲临界剪应力计算，本文中推荐采用式(30)。

2.3 合成屈曲

计算方法同梯形波形钢腹板的合成屈曲强度计算方法，参照表 1。

3 弹塑性屈曲荷载计算

正弦波形钢腹板 H 型钢和梯形波形钢腹板 H 型钢对初始曲线的敏感程度为：

(1)正弦波形钢腹板 H 型截面梁的局部屈曲模态控制和整体屈曲模态控制下，承载力对 2 种初始缺陷均较敏感，前者表现更为突出。

(2)梯形波形钢腹板 H 型截面梁的局部屈曲模态控制和整体屈曲模态控制下，承载力对 2 种初始缺陷均不敏感^[15]。

本文中应用有限元分析软件 ANSYS 10.0 进行大量的数值分析，从而拟合出适合于 2 种波形钢腹板的剪切稳定系数计算公式，并与桥梁设计手册中提出的曲线和郭彦林等提出的曲线进行对比，证明本文中提出的曲线的合理性。

计算单元选用 Shell181， $E = 2.06 \times 10^5$ MPa， $G = 7.90 \times 10^4$ MPa。考虑到实际加工及运输情况并且结合 2 种波形钢腹板 H 型截面梁对初始缺陷的敏感程度，取初始几何缺陷为 1 阶模态的 $h_w/500$ 倍。图 2 为在 ANSYS 10.0 中建立 2 种不同波形钢腹板的有限元模型。

梯形波形钢腹板计算模型和正弦波形钢腹板计算模型之间的关系如图 3 所示，梯形波形钢腹板的

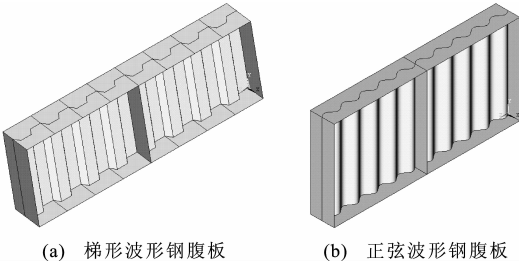


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite Element Models

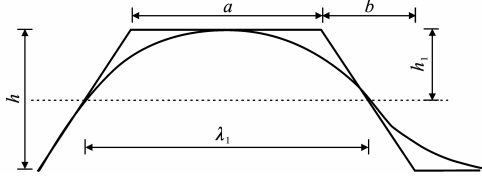


图 3 2 种波形钢腹板计算模型几何尺寸关系

Fig. 3 Relations of Geometric Dimensions of Calculation

Model for Two Forms of Corrugated Steel Webs

斜边与正弦波形钢腹板在 $y=0$ 和 $y=h_1$ 处均相切。

2 种模型几何参量之间的代换关系为

$$b = 2\lambda_1 / \pi \tag{36}$$

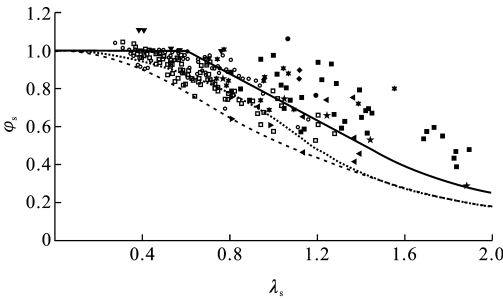
$$a = \lambda_1 - 2\lambda_1 / \pi \tag{37}$$

$$h = 2h_1 \tag{38}$$

本文中分别对 2 种波形钢腹板，按不同的腹板波长和波幅(波高)以及腹板的高度、腹板的厚度、H 型钢梁的长度等因素，共 260 组数据进行分析，并结合前人做过的 104 组试验数据^[16-25]，以正则化长细

比 λ_s ($\lambda_s = \sqrt{\frac{f_v}{\tau_{cr,G/L}^e}}$) 为横坐标，以稳定系数 φ_s ($\varphi_s =$

$\frac{\tau_{cr}}{f_v}$) 为纵坐标，绘制出散点图，如图 4 所示，并给出相应的剪切稳定系数计算公式。



- 设计手册曲线
- 文献[13]中的曲线
- - - 本文提出曲线
- 正弦波形数值分析结果
- 梯形波形数值分析结果
- 文献[16]中的试验数据
- ▲ 文献[17]中的试验数据
- 文献[19]中的试验数据
- △ 文献[6]中的试验数据
- ◇ 文献[5]中的试验数据
- × 文献[20]中的试验数据
- ☆ 文献[21]中的试验数据
- ▽ 文献[13]中的试验数据

图 4 $\lambda_s - \varphi_s$ 曲线

Fig. 4 $\lambda_s - \varphi_s$ Curves

桥梁设计手册中提出的剪切稳定系数 φ_s 计算公式为

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 & \lambda_s < 0.6 \\ 1 - 0.614(\lambda_s - 0.6) & 0.6 \leq \lambda_s < \sqrt{2} \\ 1/\lambda_s^2 & \lambda_s \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (39)$$

郭彦林等提出的剪切稳定系数计算公式为

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.35\lambda_s^2 & \lambda_s < 0.6 \\ -0.5\lambda_s^2 + 0.25\lambda_s + 0.895 & 0.6 \leq \lambda_s < 1.2 \\ 0.7/\lambda_s^2 & \lambda_s \geq 1.2 \end{cases} \quad (40)$$

本文中提出的剪切稳定系数计算公式为

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.6\lambda_s^2 & \lambda_s < 0.6 \\ 0.25\lambda_s^2 - 1.03\lambda_s + 1.31 & 0.6 \leq \lambda_s < \sqrt{2} \\ 0.7/\lambda_s^2 & \lambda_s \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (41)$$

通过图 4 得出,试验数据和有限元模拟结果都在所提出曲线的上方,因此应用式(41)计算 2 种波形钢腹板的抗剪承载力是合适的。

2 种波形钢腹板工字型截面梁的抗剪承载力均按下式计算

表 2 梯形波形钢腹板 H 型截面梁试验结果与有限元计算结果

Tab. 2 Experiment and Finite Element Calculation Results of H-section Beams with Trapezoidal Corrugated Steel Webs													
试件编号	a/mm	b/mm	h/mm	波纹倾角 $\theta/(\text{^\circ})$	梁长/ mm	t_w/mm	h_w/mm	t_f/mm	b_f/mm	加劲板厚度 t/mm	承载力试验 结果/ kN	承载力有限元 计算结果/ kN	相对误差/ $\%$
UFIX	38.1	25.4	25.4	45	635	0.75	305	13	102	13	65.59	67.23	2.5

注: t_f, b_f 分别为翼缘厚度和宽度。

表 3 正弦波形钢腹板 H 型截面梁试验结果与有限元计算结果

Tab. 3 Experiment and Finite Element Calculation Results of H-section Beams with Sinusoidal Corrugated Steel Webs								
试件编号	t_w/mm	h_w/mm	b_f/mm	t_f/mm	梁长/ mm	承载力试验结果/ kN	承载力有限元计算结果/ kN	相对误差/ $\%$
S-1	2.0	500	200	10	1 500	382.65	355.346	7.1
S-2	2.5	500	200	10	1 500	490.20	445.410	9.1
S-3	2.5	750	250	12	1 500	656.42	648.382	1.2
S-4	3.0	750	250	12	1 500	772.26	778.911	0.9
S-5	2.5	1 000	300	12	2 000	866.02	852.447	1.6
S-6	3.0	1 000	300	12	2 000	1 013.78	1 033.850	2.0

通过以上的分析可知,采用有限元建立的模型计算结果可靠。

5 参数分析结果

通过改变 2 种模型中的参数进行大量的参数分析,找出影响 2 种波形钢腹板 H 型截面梁的几何参数,对模型的设计起指导作用。表 4、5 为对 2 种波形钢腹板 H 型截面梁的有限元分析结果的汇总。

在此特别需要说明的是梯形的波纹波高和正弦曲线腹板的波纹波幅,如果初始值设置过小,构件的极限承载力会随着波高(波幅)的增大略有增加,但

$$V = \frac{\varphi_s f_y h_w t_w}{\gamma_R} \quad (42)$$

式中: V 为波形钢腹板工字型截面梁的抗剪承载力设计值; γ_R 为抗力分项系数, $\gamma_R = 1$ 。

4 有限元模型正确性验证

验算梯形波形钢腹板有限元模型的正确性,选取文献[19]中 4 根波形钢腹板 H 形截面梁试验中的任意 1 根梁作为有限元分析对象,在梁的跨中和两端支座处设有厚度为 13 mm 的横向加劲肋,试验采用在梁跨中单点加载方式加载,两端简支。构件材料为 Q235 钢。试验及有限元结果如表 2 所示。

为验算正弦曲线形波形钢腹板有限元模型的正确性,选取郭彦林等进行试验的 6 根正弦波形钢腹板 H 型截面梁作为有限元分析对象,在梁的跨中施加集中荷载,跨中和两端支座处均设置有横向加劲肋,试验采用的是两跨中单点加载方式,两端简支。材料屈服强度为 300 MPa,试验及有限元计算结果如表 3 所示。

表 4 梯形波形钢腹板 H 型截面梁的参数分析结果

Tab. 4 Parameter Analysis Results of H-section Beams with Trapezoidal Corrugated Steel Webs		
参数	弹性屈曲变形	极限承载力
波纹波高(增大)	增大	减小
腹板平面板宽度(增大)	增大	减小
腹板倾角(增大)	增大	增大
梁的腹板高度(增大)	减小	增大
梁的腹板厚度(增大)	减小	增大

是增加的幅度并不大。当增大到一定的值以后,构件的极限承载力就会随着波高(波幅)的增大略有降低,降低的幅度也有限。

表 5 正弦波形钢腹板 H 型截面梁的参数分析结果
Tab. 5 Parameter Analysis Results of H-section Beams with Sinusoidal Corrugated Steel Webs

参数	弹性屈曲变形	极限承载力
波纹波幅(增大)	增大	减小
波纹波长(增大)	增大	减小
梁的腹板高度(增大)	减小	增大
梁的腹板厚度(增大)	减小	增大

图 5 表明,按照图 3 中的 2 种有限元计算模型计算的极限承载力基本相等,但是梯形波形钢腹板 H 型截面梁的极限承载力略大于正弦波形钢腹板 H 型截面梁的极限承载力。通过式(36)~(38),2 种波形钢腹板 H 型截面梁的极限抗剪承载力的计算可等效转换。

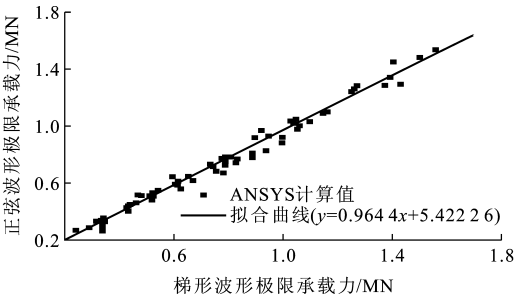


图 5 2 种形式计算模型极限承载力关系
Fig. 5 Relations of Ultimate Bearing Capacities of Two Forms of Calculation Models

当 $\theta=30^\circ$ 时

$$\tau_{cr,L}^e=5.34 \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t_w}{0.74\lambda_1}\right)^2 \tag{43}$$

当 $\theta=45^\circ$ 时

$$\tau_{cr,L}^e=5.34 \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t_w}{0.9\lambda_1}\right)^2 \tag{44}$$

当 $\theta=60^\circ$ 时

$$\tau_{cr,L}^e=5.34 \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t_w}{1.27\lambda_1}\right)^2 \tag{45}$$

6 结 语

- (1)通过总结归纳 2 种形式波形钢腹板在局部屈曲、整体屈曲和合成屈曲 3 种情况下的临界应力计算公式,并对不同计算公式进行比较,提出了推荐公式。
- (2)利用前人的试验数据和数值计算结果,提出了剪切稳定系数的实用计算公式,并与桥梁设计手册中提出的计算公式和郭彦林等提出的计算公式进行比较,证明本文中提出实用计算公式的合理性。
- (3)对 2 种模型进行大量的数值计算分析,讨论

了影响 2 种模型极限抗剪承载力的因素,并得出 2 种不同波形钢腹板 H 型截面梁抗剪极限承载力计算的等效转换条件,并提出了正弦波形钢腹板局部屈曲弹性抗剪承载力计算公式。

参考文献:
References:

[1] 王 宇,张权斌. 波纹腹板钢梁的受力性能[J]. 水利与建筑工程学报,2009,7(1):104-105,108.
WANG Yu,ZHANG Quan-bin. Behaviors of Corrugated Web Steel Beam Under Loading[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009,7(1):104-105,108.

[2] 常福清,李恒伟. 波纹腹板 H 型钢梁腹板的屈曲强度(Ⅱ)[J]. 东北重型机械学院学报,1996,20(2):150-153.
CHANG Fu-qing,LI Heng-wei. Buckling Strength of the Web of Whole Corrugated Web H-beam(Ⅱ)[J]. Journal of Northeast Heavy Machinery Institute, 1996,20(2):150-153.

[3] 常福清. 波纹腹板 H 型钢梁腹板的屈曲强度[J]. 机械强度,1997,19(1):42-44.
CHANG Fu-qing. Buckling Strength of the Web of Whole Corrugated Web H-beam[J]. Journal of Mechanical Strength,1997,19(1):42-44.

[4] 张 哲,李国强,孙飞飞. 波纹腹板 H 型钢研究综述[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(6):41-46.
ZHANG Zhe,LI Guo-qiang,SUN Fei-fei. State-of-the-art of Research on H-beam with Trapezoidally Corrugated Webs [J]. Progress in Steel Building Structures,2008,10(6):41-46.

[5] MOON J,YI J,CJOI B H,et al. Shear Strength and Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (5):1198-1205.

[6] ABBAS H H, SAUSE R. DRIVER R G. Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders [C]//SCHWING C. Proceedings of Structural Stability Research Council Annual Technical Session. Rolla:SSRC,2002:361-387.

[7] YI J,GIL H,YOUM K,et al. Interactive Shear Buckling of Trapezoidally Corrugated Webs[J]. Engineering Structures,2008,30(16):1659-1666.

[8] DRIVER R G,ABBAS H H,SAUSE R. Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girder[J]. Journal of Structural Engineering,2006,132(2):195-203.

[9] EL METWALLY A S. Prestressed Composite Girders with Corrugated Steel Webs[D]. Calgary:Univer-

- sity of Calgary, 1998.
- [10] SAYED-AHMED E Y. Behavior of Steel and (or) Composite Girders with Corrugated Steel Webs[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(4): 656-672.
- [11] HIROSHI S, HIROYUKI I, YOHIKI I, et al. Flexural and Shear Behavior of Composite Bridge Girder with Corrugated Steel Webs Around Middle Support [J]. Proceedings of JSCE, 2003(724): 49-67.
- [12] ELDIB M H. Buckling Analysis of Beams with Corrugated Webs[C]//ICAAE. Proceedings of 5th International Conference on Civil and Architecture Engineering. Cairo:ICAAE, 2004: 1-10.
- [13] 郭彦林, 张庆林, 王小安. 波浪腹板工形构件抗剪承载力设计理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 45-52.
- GUO Yan-lin, ZHANG Qing-lin, WANG Xiao-an. A Theoretical and Experimental Study of the Shear Strength of H-shaped Members with Sinusoidal Corrugated Webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 45-52.
- [14] PASTERNAK H. Expert Opinion on the Shear Bearing Capacity of Corrugated Web Beams[R]. Brunswick: HHP North/East Consulting Engineering Ltd, 1996.
- [15] 庞 礴, 聂建国, 董石麟. 波形腹板H型钢梁抗剪性能有限元分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 49-51, 36.
- PANG Bo, NIE Jian-guo, DONG Shi-lin. Finite Element Analysis on Shear Capacity of the Corrugated Web H-shaped Steel Beam[J]. Building Structure, 2011, 41(2): 49-51, 36.
- [16] HAMILTON R. Behavior of Welded Girders with Corrugated Webs[D]. Orono: University of Maine, 1993.
- [17] LINDNER J, ASCHINGER R. Boundary Shear Capacity of I-beams with Trapezoidal Shaped Bar Webs[J]. Steel Construction, 1998, 57(12): 377-380.
- [18] PEIL U. Static Test on Trapezoidal Bar Analysis of Cantilever Force Ability[R]. Brunswick: Institute of Steel Construction, 1998.
- [19] SMITH D. Behavior of Corrugated Plates Subjected to Shear[D]. Orono: University of Maine, 1992.
- [20] GIL H, LEE S, LEE J, et al. Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges [C]//TRB. Transportation Research Board Annual Meeting 2005. Washington DC: TRB, 2005: 473-480.
- [21] YAMAZAKI M. Buckling Strength of Corrugated Webs, Structural Engineering Research Paper [C]//JSCE. JSCE 47A. Tokyo: JSCE, 2001: 19-26.
- [22] 黄 琪. 波形钢腹板设计研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(3): 73-76.
- HUANG Qi. Design Study on the Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 73-76.
- [23] 狄 谨, 周绪红, 孔祥福, 等. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(5): 64-70.
- DI Jin, ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu, et al. Experimental Research on Pre-stressed Concrete Composite Box Girders with Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 64-70.
- [24] 聂建国, 李法雄. 考虑腹板剪切行为的波形钢腹板梁理论模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 40-48.
- NIE Jian-guo, LI Fa-xiong. Theory Model of Corrugated Steel Web Girder Considering Web Shear Behavior [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 40-48.
- [25] 邵旭东, 王皓磊, 昌 颖, 等. 多排预应力波形钢腹板组合挑梁试验及力学特性分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 67-73.
- SHAO Xu-dong, WANG Hao-lei, CHANG Ying, et al. Experiment and Mechanical Characteristic Analysis of Multi-cantilever Prestressed Composite Beams with Corrugated Steel Webs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 67-73.