

文章编号:1671-1637(2026)05-0154-12

波形钢腹板组合箱梁桥抗剪承载力计算方法

赵秋^{*1}, 李天宇^{1,2}, 陈宜言¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建福州 350108; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要:为建立适用于桥梁用波形钢腹板的抗剪承载力计算方法, 分别对3块初始几何缺陷试件和9块纵向残余应力试件进行了试验测量, 得到波形钢腹板实际初始几何缺陷和纵向残余应力分布规律; 在此基础上, 建立了考虑实际初始缺陷分布的有限元模型, 并验证了模型合理性; 基于有限元模型, 进行了大量数值计算和参数分析, 提出了桥梁用波形钢腹板弹性屈曲系数合理取值; 基于非线性有限元参数分析结果, 提出了适用于桥梁用波形钢腹板的抗剪稳定承载力计算公式。分析结果表明: 波形钢腹板纵向残余应力在一个波长内均呈对称分布, 在弯角段、斜板段和直板段中点处取得最大值, 约为钢材屈服强度的24.3%~43.4%; 波形钢腹板初始几何缺陷沿板高方向呈半波正弦分布, 且初始几何缺陷幅值均小于规范规定的腹板高度1/750的验收要求; 桥梁用波形钢腹板在计算其弹性剪切屈曲强度时, 整体屈曲系数应取40, 合成屈曲系数应取2; 与过往研究所提公式相比, 采用所得公式可以更精确地计算局部屈曲和合成屈曲控制下波形钢腹板抗剪承载力, 对于整体屈曲控制下的波形钢腹板采用所得公式进行计算则更加安全。

关键词:桥梁工程; 初始缺陷; 试验研究; 波形钢腹板; 抗剪承载力; 数值模拟

中图分类号: U448.21 文献标志码: A DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.044

Calculation method for shear capacity of corrugated steel web composite box girder bridges

ZHAO Qiu^{*1}, LI Tian-yu^{1,2}, CHEN Yi-yan¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: To develop a method for calculating the shear capacity of corrugated steel webs in bridges, experiments were conducted on three specimens with initial geometric imperfections and nine specimens with longitudinal residual stresses. The actual initial geometric imperfections and the distribution patterns of longitudinal residual stresses of corrugated steel webs were obtained. Based on these results, a finite element model incorporating the actual distribution of initial imperfections was developed and validated. Using the finite element model, extensive numerical calculations and parametric analyses were carried out, and reasonable values for the elastic buckling coefficient of corrugated steel webs in bridges were proposed. Based on the results of nonlinear finite element parametric analysis, a calculation formula for the shear stability capacity of corrugated steel webs for

出版历程: 2025-03-11 收稿, 2025-08-29 修回, 2025-09-26 录用

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2019J01232)

*作者简介: 赵秋(1976-), 男, 吉林通榆人, 教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: zhaqiu@fzu.edu.cn.

引用格式: 赵秋, 李天宇, 陈宜言. 波形钢腹板组合箱梁桥抗剪承载力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(5): 154-165.

Citation: ZHAO Qiu, LI Tian-yu, CHEN Yi-yan. Calculation method for shear capacity of corrugated steel web composite box girder bridges [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 154-165.

bridges was proposed. The analysis results indicate that the longitudinal residual stresses of corrugated steel webs are symmetrically distributed within one wavelength, with maximum values occurring at the midpoints of the bend segments, inclined plate segments, and flat plate segments, reaching approximately 24.3%-43.4% of the steel yield strength. The initial geometric imperfections of corrugated steel webs exhibit a half-wave sinusoidal distribution along the web height direction, and the amplitudes of the initial geometric imperfections are all less than the acceptance requirement of 1/750 of the web height specified in the code. When calculating the elastic shear buckling strength of corrugated steel webs for bridges, the global buckling coefficient should be taken as 40, and the combined buckling coefficient should be taken as 2. Compared with existing formulas, the proposed formula more accurately calculates the shear capacity of corrugated steel webs under local buckling and combined buckling control, while it is more conservative when applied to corrugated steel webs governed by global buckling.

Keywords: bridge engineering; initial imperfection; experimental study; corrugated steel web; shear capacity; numerical simulation

Publication history: Received 2025-03-11; Received in revised form 2025-08-29; Accepted 2025-09-26

Funding: Natural Science Foundation of Fujian Province (2019J01232)

* **Corresponding author:** ZHAO Qiu, professor, PhD, E-mail: zhaoqiu@fzu.edu.cn.

0 引言

波形钢腹板组合箱梁桥用波形钢腹板代替传统混凝土腹板,能充分发挥钢材和混凝土材料的优势,避免腹板开裂,近年来在桥梁工程领域被广泛应用^[1-3]。波形钢腹板作为一种冷弯薄壁结构,在实桥中主要承担剪力,但随着桥梁跨径不断增大,其根部梁的高度也会随之增大,这使得波形钢腹板的屈曲稳定问题变得愈发明显,抗剪承载力成为控制波形钢腹板组合梁桥承载能力的关键因素^[4]。而波形钢腹板在生产、加工的过程中受到冲压、弯折等外部因素的影响,不可避免的会产生初始缺陷,这种初始缺陷包括初始几何缺陷和残余应力^[5]。当波形钢腹板受力变形时,初始缺陷会导致结构过早发生屈曲破坏,从而降低桥梁整体的承载能力。

针对波形钢腹板初始缺陷分布规律,国内外学者进行了相关研究。闫林君等^[6]通过数值模拟与试验,验证了焊接时温度场与残余应力分布的模拟方法可靠性。冀伟等^[7]通过有限元法研究了焊接残余应力的分布特征,认为焊接残余应力以纵向残余拉应力为主,横向残余应力相对较小,拉压应力共存。郑尚敏等^[8]通过试验和有限元相结合的方法,分析了残余应力对波形钢腹板极限屈曲荷载的影响,认为残余应力降低了波形钢腹板的极限屈曲荷载,并会加快其在屈曲后的破坏速度。Moon等^[9-10]通过试验测量了波形钢腹板的初始几何缺陷分布,研究

发现初始几何缺陷在腹板高度方向上主要呈正弦半波分布,且实桥钢腹板的初始缺陷幅值通常小于试验模型试件。李立峰等^[11]测量了4片波形钢腹板H型钢梁抗剪模型试件的初始几何缺陷,其中发生局部屈曲的试件最大几何缺陷值为1.86 mm,整体屈曲的试件最大几何缺陷值为2.36 mm。过往学者研究表明初始缺陷对波形钢腹板抗剪承载力影响很大,但目前相关试验研究较少,波形钢腹板初始缺陷实际分布规律尚不明确,因此对波形钢腹板的初始缺陷开展试验测量具有重要意义。

关于波形钢腹板的抗剪承载力,不少国内外学者进行了相关研究。Elgaaly等^[12]最早通过非线性有限元模拟研究了其剪切屈曲性能,并指出初始缺陷是导致有限元计算结果与实测抗剪承载力差异的主要原因。此后,Luo等^[13-15]相继开展了相关研究,提出了多种屈曲控制下的波形钢腹板弹性剪切屈曲强度及抗剪承载力计算公式。聂建国等^[16]通过试验与有限元分析,提出了弹性剪切屈曲强度的简化计算公式和抗剪强度计算曲线。Wang等^[17]修正了波形钢腹板在不同板宽情况下的弹性局部屈曲临界应力计算公式,并通过参数分析拟合得到了抗剪稳定系数曲线。Deng等^[18]通过试验与模拟,提出增加板厚是提高抗剪稳定承载力的有效方式。刘勇等^[19]采用数值模拟方法发现焊接残余应力对波形钢腹板抗剪强度的影响较为有限,而初始几何缺陷则对其产生了更为显著的影响。王晓明等^[20]通过非线性有限

元分析发现,设置新型内衬后波形钢腹板的极限承载能力提高约23%。但过往研究中波形钢腹板非线性抗剪承载力计算公式多是以小尺寸波形钢腹板抗剪试验结果与数值模拟为基础拟合得到,其在桥梁常用波形钢腹板尺寸范围的适用性还有待验证。同时由于初始缺陷试验数据较少,有限元模拟时计入的初始几何缺陷多凭经验取值且未考虑残余应力的影响,有限元模拟结果与实际不符,导致现有公式中未能合理考虑实际初始缺陷的影响,因此,仍需进一步完善波形钢腹板抗剪稳定承载力计算方法。

针对上述问题,本文通过试验测量得到波形钢腹板初始缺陷分布规律,并建立考虑实测初始缺陷的数值分析模型,结合有限元模型在桥梁常用尺寸范围内进行参数分析,进一步完善波形钢腹板组合箱梁桥抗剪承载力设计计算方法,为波形钢腹板组合箱梁桥腹板设计提供理论支撑。

1 初始缺陷测量试验方案

1.1 冷弯残余应力

为研究波形钢腹板冷弯残余应力分布规律,设计了9块试验板件,采用切条法^[21]测量试件的残余应力。试验试件采用了波形钢腹常用的Q355钢材,以《组合结构桥梁用波形钢腹板》(JT/T 784—2022)规定标准波长尺寸为基础进行1:2.5缩尺,试件尺寸及尺寸参数如图1和表1所示。图1中: a_w 为平板段长度; b_w 为斜板段投影长度; t_w 为腹板厚度; d_w 为波折高度; r 为弯折半径; L_w 为波折长度。

本试验采用线切割的方法对波形钢腹板试件进

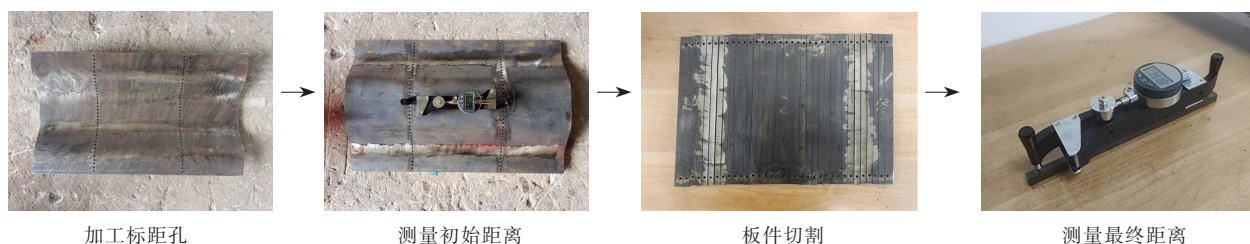


图2 波形钢腹板试件实际测量过程

Fig. 2 Actual measurement process of corrugated steel web specimens

当波形钢腹板试件被切割成单元条后,残余应力释放,钢板会产生伸缩变形,试验测量单元条最终距离与初始距离差值即为该单元条处残余应变 ϵ 。将 ϵ 代入式(1)计算得到该单元条处冷弯残余应力 σ

$$\sigma = -E\epsilon \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量。

通过理论计算得到的各试件纵向残余应力 σ_0 分

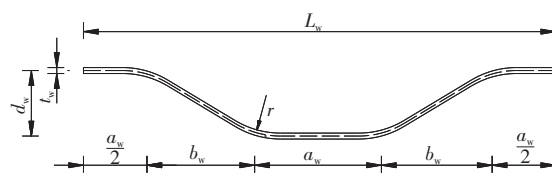


图1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen dimensions

表1 试件分组及尺寸参数

Table 1 Specimen grouping and dimensional parameters

序号	试件编号	波板型号	t_w /mm
1	S1200-8	1200型	8
2	S1600-4	1600型	4
3	S1600-6	1600型	6
4	S1600-8	1600型	8
5	S1600-10	1600型	10
6	S1600-12	1600型	12
7	S1800-8	1800型	8
8	S2000-8	2000型	8
9	S2400-8	2400型	8

行切割,该方法将试件浸在线切割机器的工作液中,通过两电极之间的脉冲电蚀作用进行高精度切割,切割时热量输入极小,以保证切割过程中尽可能少的残余应力输入而影响试验结果。

具体步骤如下:在残余应力试件测试前,对试件进行除锈处理,尽可能排除锈渣对测量精度的影响;在试件上预设长度为280 mm、宽度为10 mm的标准条带,每个条带两端设置;采用YB-25手持式应变仪对各个单元条两端标距孔的初始距离进行测量;采用线切割机对试件进行切割;将板件完全切割成独立的条带后,测量单元条最终距离,测量具体过程如图2所示。

布如图3(a)~(i)所示。可以看出,各个试件的残余应力分布模式基本相同,均呈波浪形分布,在弯角中心、斜板和平板中心处达到最大值,其中在转角中心处为最大压应力,压应力最大值在90~151 MPa之间,在斜板和平板中心处为最大拉应力,最大拉应力在-161~-95 MPa之间,为钢材屈服强度的24.3%~43.4%。

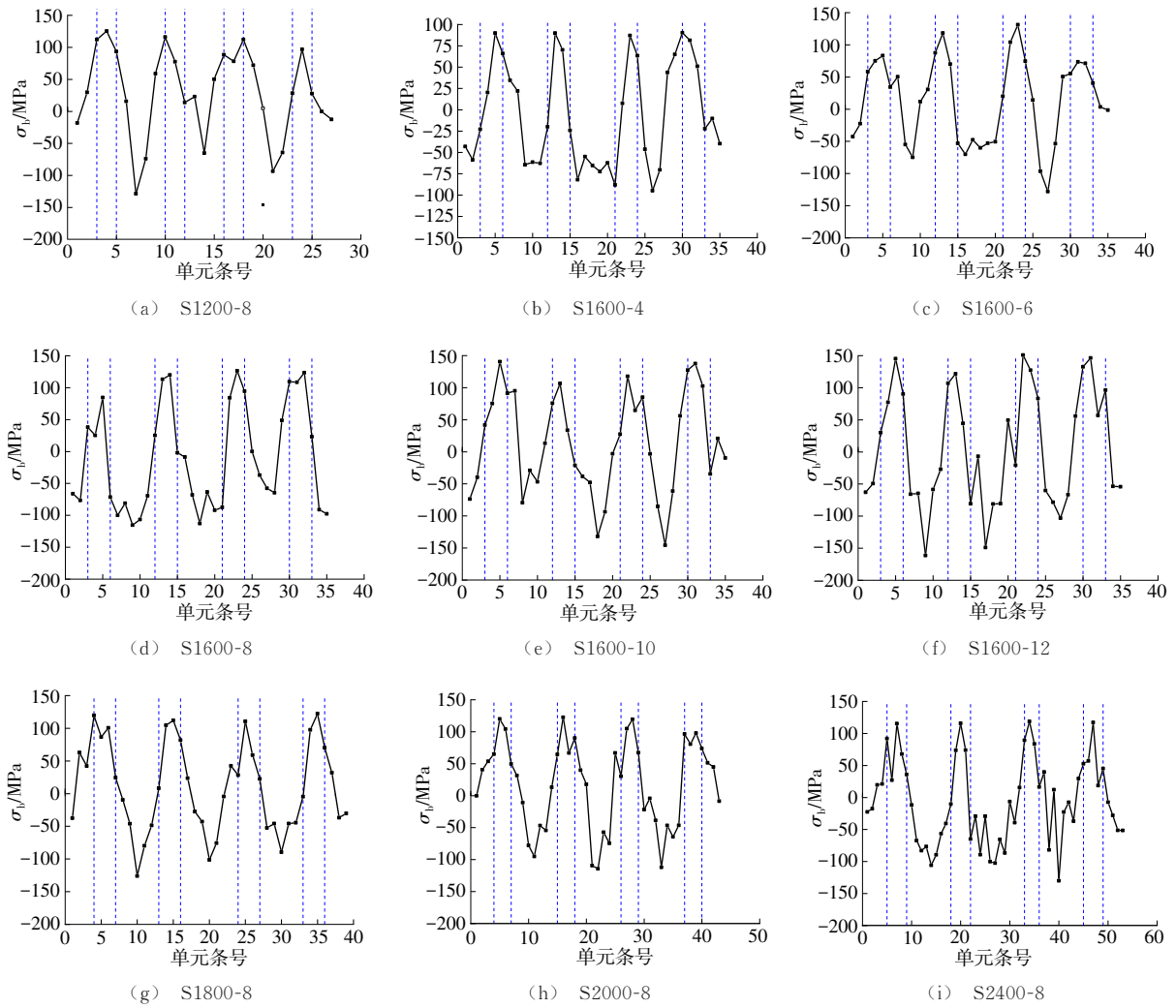


图 3 残余应力试验测量结果

Fig. 3 Measurement results of residual stress tests

根据试验结果和残余应力自平衡的特点,可由弯角中点处残余应力 σ_{ma} 、平板中点处残余应力 σ_{me} 确定残余应力的分布模型,本文提出的纵向残余应力简化分布模型如图 4 所示。

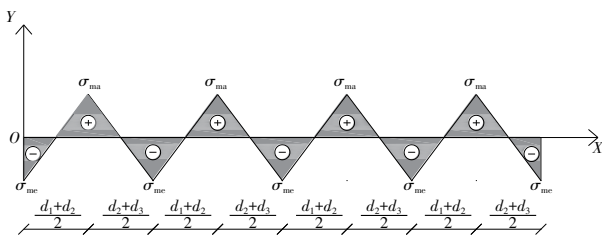


图 4 残余应力简化分布模型

Fig. 4 Simplified distribution model of residual stresses

图 4 中 $d_1 \sim d_3$ 分别为波形钢腹板平板段、弯角段、斜板段长度,可按式(2)~(4)计算

$$d_1 = a_w - 2r \tan(2\theta_w) \quad (2)$$

$$d_2 = \frac{\theta_w \pi r}{180} \quad (3)$$

$$d_3 = c_w - 2r \tan(2\theta_w) \quad (4)$$

通过线性回归方法得到的 δ_{ma} 和 δ_{me} 计算公式为

$$\sigma_{mi} = \delta_{mi} f_y \quad (5)$$

$$\delta_{ma} = 0.31 + 0.011t_w - \frac{0.181d_w}{b_w} \quad (6)$$

$$\delta_{me} = -0.204 - 0.012t_w + \frac{0.058d_w}{b_w} \quad (7)$$

式中: σ_{mi} 为波形钢腹板残余应力,其中 i 取 a、e; f_y 为波形钢腹板屈服强度; δ_{ma} 为弯角中点处残余压应力系数; δ_{me} 为平板和斜板中点处残余拉应力系数; c_w 为斜板长度; θ_w 为斜板倾角。

1.2 初始几何缺陷

试验共测量 3 块不同腹板高度和腹板厚度的波形钢腹板,用于测量的实桥波形钢腹板试件具体尺寸参数如表 2 所示。

对于 3 块实桥波形钢腹板构件,其初始缺陷测量采用激光水平仪打出一道水平激光构造出理想水

表 2 试件尺寸参数

Table 2 Specimen dimensional parameters

试件编号	板长 L/m	h_w/m	t_w/mm	波板型号
S1	3.6	3.2	14	1800 型
S2	3.6	3.6	18	1800 型
S3	3.6	3.2	18	1800 型

平面,理想水平面和实际板平面之间的距离通过位移计测量,位移计的读数即为该测点间隙值,测量3次取所测数据均值作为测量结果并记录,由此得到的初始几何缺陷数据是沿着构件长度方向的初始几何缺陷的大小,测量原理如图5所示。

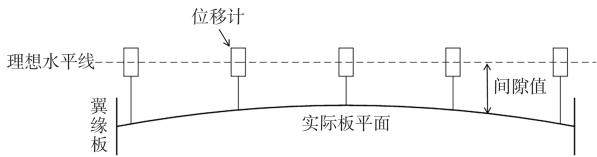


图 5 几何缺陷测量

Fig. 5 Measurement of geometric imperfections

腹板初始几何缺陷测量采用激光水平仪构造理想水平面,采用位移计测量腹板与理想水平面垂直距离,以得到腹板几何缺陷形状,图6给出了腹板几何缺陷的实际测量过程。具体测量步骤如下:

- (1)将试件以上下翼缘板侧表面为底,平放在水平地面上;
- (2)利用精度较高的激光水准仪打出水平激光构造理想水平面;

- (3)架设位移计,调零读数一次;
- (4)使位移计上水平标记点与激光水准仪打出的水平激光对齐,读数一次;
- (5)记录位移计读数转至下一测点;
- (6)重复上述步骤。



图 6 初始几何缺陷测量

Fig. 6 Measurement of initial geometric imperfections

波形钢腹板几何缺陷分布如图7所示,可以看出,波形钢腹板每块子板范围内拥有相同的初始变形方向,沿长度方向,相邻的子板变形方向相反,且平子板变形与斜子板相比有着更大的变形量。沿腹板高度方向,几何缺陷沿腹板高度方向呈半波正弦分布,几何缺陷测量值在腹板中部达到最大值并向两侧逐渐减小。试件S1、S2、S3初始几何缺陷幅值分别为4.13、4.39、3.87 mm,将初始缺陷幅值用板高比值的表示形式,得到3个试件的初始几何缺陷幅值分别为 $h_w/774$ 、 $h_w/820$ 、 $h_w/826$,均小于中国《组合结构桥梁用波形钢腹板》(JT/T 784—2022)所规定的 $h_w/750$ 。

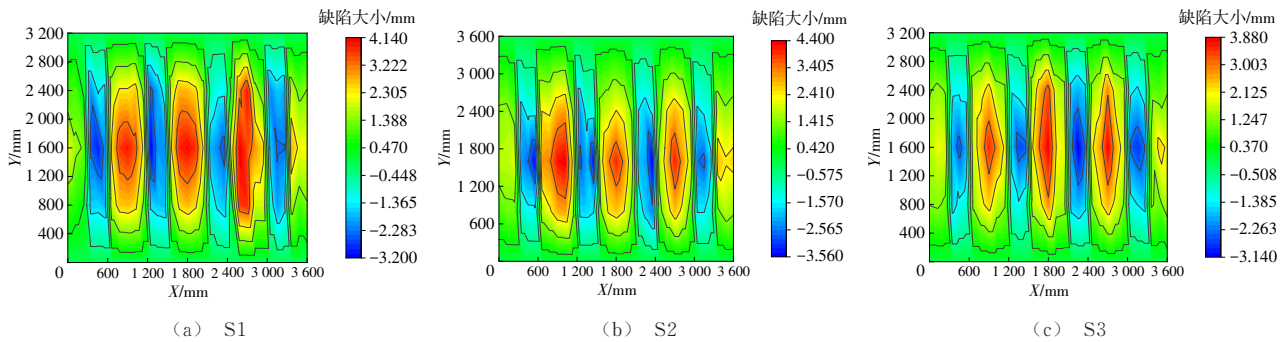


图 7 初始几何缺陷测量结果

Fig. 7 Measurement results of initial geometric imperfections

2 数值模拟方法验证

如图8所示,从较保守的工程设计角度出发,仅建立单块波形钢腹板有限元模型,以消除上、下翼缘板对波形钢腹板屈曲性能的影响。钢板采用Shell181单元,同时为了模拟波形钢腹板的纯剪受力状态,沿BC边施加竖向均布剪力。波形钢板弹性模量取为206 GPa,钢板泊松比取为0.3。

如表3所示,模型边界条件考虑四边简支,约束

AD边三向自由度,同时约束AB、BC和CD边的X和Y向自由度,释放所有边转动自由度。

在进行非线性分析时,考虑材料非线性、几何非线性,钢材应力应变曲线采用经典的三折线模型如图9所示,屈服平台长度取为10倍的屈服应变,强化段弹性模量取为初始弹性模量的1%。

同时,基于试验结果在模型中对初始缺陷(残余应力和初始几何缺陷)进行了合理的简化和假设。对于残余应力,根据本文所提出的波形钢腹板

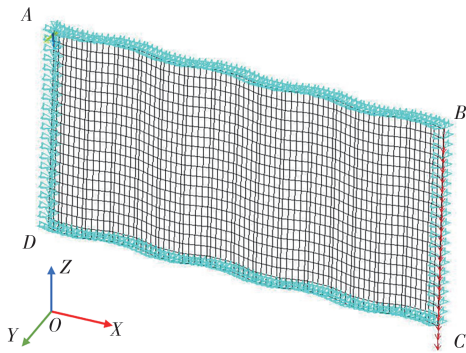


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

表 3 边界条件设置

Table 3 Boundary condition settings

约束类型	平动自由度			转动自由度		
	X	Y	Z	X	Y	Z
AB	✓	✓	×	×	×	×
BC	✓	✓	×	×	×	×
CD	✓	✓	×	×	×	×
AD	✓	✓	✓	×	×	×

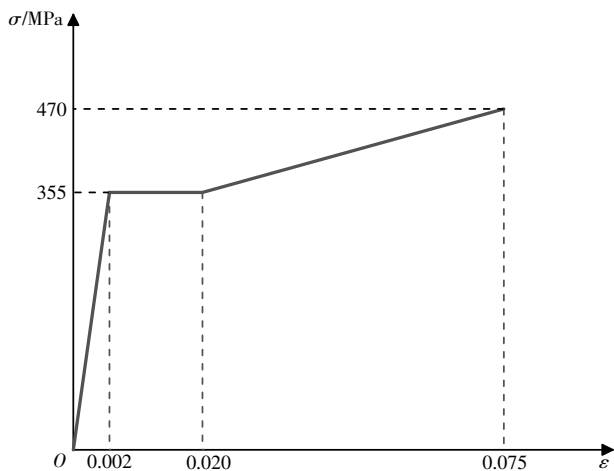
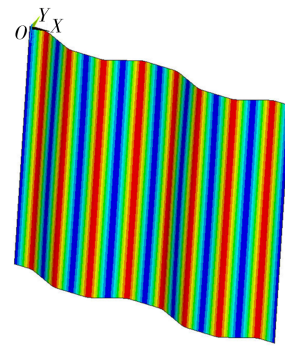


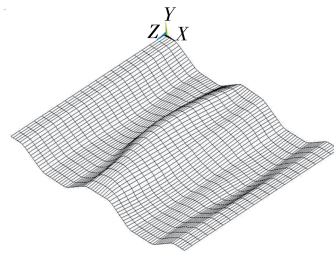
图 9 三折线本构模型

Fig. 9 Trilinear constitutive model

残余应力简化分布模型基础上计算得到关键节点残余应力值,再利用线性插值方法得到模型其他位置的残余应力值,最后在 ANSYS 的 /SOLU 处理器中通过 *INISTATE 命令将残余应力引入到有限元模型中。对于几何缺陷,采用特征值分析中的第一阶屈曲模态来模拟结构中初始几何缺陷的形态。同时,局部屈曲控制的波形钢腹板,参考欧洲规范 EN 1993-1-5 取值方法,几何缺陷幅值取发生局部屈曲板件短边长度的 1/200,即 $a_w/200$ 。合成和整体屈曲控制的波形钢腹板,参考中国《组合结构桥梁用波形腹板》(JT/T 784—2022)对于腹板高度方向平整度的规定,几何缺陷幅值偏保守的取 $h_w/750$ 。图 10 为引入初始缺陷的有限元模型。



(a) 引入残余应力



(b) 引入初始几何缺陷

图 10 引入初始缺陷的有限元模型

Fig. 10 Finite element model with initial imperfections

为验证上述建模方法的正确性,基于 Driver 等^[10-11]开展的局部屈曲控制的波形钢腹板抗剪屈曲试验试件 L1、L2、G7A、G8A 以及 Koichi 等^[22]开展合成屈曲和整体屈曲控制的波形钢腹板抗剪缩尺模型试验试件 CG240-2、CG240-6 进行有限元和模拟。

如表 4 和图 11 所示,对于发生局部、合成和整体破坏的波形钢腹板,有限元模型均可以准确模拟波形钢腹板极限承载力和破坏模式,有限元计算值与试验实测值的差别均在 5% 以内。因此,本文所建立的波形钢腹板有限元计算模型较为准确,可用于波形钢腹板的参数分析。表 4 中, $V_{u,1}$ 和 $V_{u,2}$ 分别为有限元计算的极限承载力和试验得到的极限承载力。

表 4 试验与有限元极限承载力对比

Table 4 Comparison of ultimate load-carrying capacities between test and finite element analysis

试件编号	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{u,2}/\text{kN}$	$V_{u,1}/V_{u,2}$
L1 ^[11]	52.07	52.34	0.995
L2 ^[11]	101.50	102.90	0.986
G7A ^[10]	2 143.10	2 190.20	0.978
G8A ^[10]	2 027.60	2 062.30	0.983
CG240-6 ^[22]	437.24	446.02	0.980
CG240-2 ^[22]	378.41	392.10	0.965

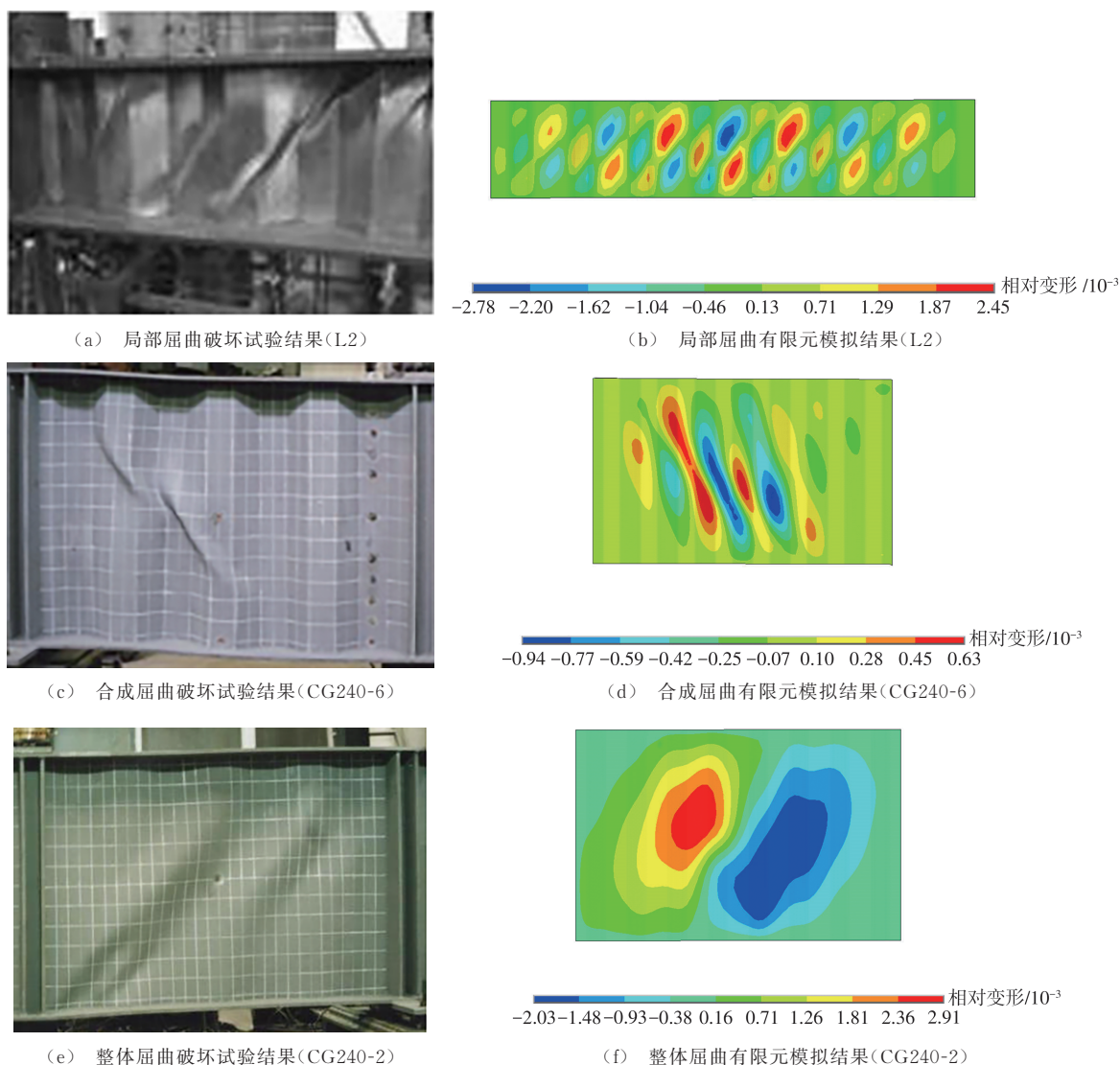


图 11 试验与有限元破坏模式对比

Fig. 11 Comparison of failure modes between test and finite element analysis

3 计算方法

3.1 弹性剪切屈曲强度

根据文献[14]、[23]和[24]的研究,对于波形钢腹板的弹性局部剪切屈曲强度 $\tau_{cr,L}^e$ 、弹性合成剪切屈曲强度 $\tau_{cr,I}^e$ 、弹性整体剪切屈曲强度 $\tau_{cr,G}^e$ 已有明确的计算公式如下

$$\tau_{cr,L}^e = \frac{K_L \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{a}\right)^2 \quad (8)$$

$$\tau_{cr,G}^e = \frac{K_G D_x^{3/4} D_y^{1/4}}{h_w^2 t_w} \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{\tau_{cr,I}^e}\right)^n = \left(\frac{1}{\tau_{cr,L}^e}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_{cr,G}^e}\right)^n \quad (10)$$

式中: K_L 、 K_G 、 n 分别为局部、整体和合成剪切屈曲系

数; a 为 a_w 与 c_w 中的较大值; D_x 、 D_y 分别为波形钢腹板长度方向和高度方向单位长度的等效抗弯刚度; ν 为泊松比。

但对于局部、整体和合成剪切屈曲系数的取值不同的学者给出的建议取值差异较大,因此,本文对国内外一些已建波形钢腹板组合实桥的波形尺寸参数进行整理归纳,同时从研究角度出发拓宽参数研究范围如表5所示。

表 5 腹板几何参数变化范围

Table 5 Range of variation of web geometric parameters			
波板型号	t_w /mm	h_w /m	L /m
1000型	8~16	1~15	10~25
1200型	8~22		
1600型	8~38		
1800型	8~38		

根据中国广西壮族自治区交通运输行业指南《公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥设计指南》(DBJT45/T 051—2023)^[25],可按式(11)、(12)计算波形钢腹板局部屈曲和合成屈曲 $h_{w,LI}$ 、合成屈曲和整体屈曲之间的转换的临界高度 $h_{w,IG}$,进而判断波形钢腹板将会发生的屈曲破坏模式。基于此,将波形钢腹板在表 5 参数范围内划分成局部、整体和合成破坏 3 类进行参数分析

$$h_{w,LI} = C_1 t_w^{p_1} \quad (11)$$

$$h_{w,IG} = C_2 t_w^{p_2} \quad (12)$$

式中: C_1 、 C_2 、 p_1 、 p_2 为屈曲模态转换系数,具体取值如表 6 所示。

表 6 屈曲模态转换系数

Table 6 Buckling mode conversion coefficients

系数	C_1	p_1	C_2	p_2
1000型	7 955	-0.673	15 620	-0.534
1200型	11 485	-0.726	20 189	-0.543
1600型	21 832	-0.839	29 923	-0.546
1800型	23 315	-0.796	34 857	-0.540

根据有限元参数分析结果,本文拟合得到适用于桥梁常用波形钢腹板的弹性局部屈曲系数如下

$$K_L = -84.7 + 0.0017\beta^{14.9} + 5.87 \left(\frac{a_w}{h_w} \right)^{1.44} + 81.54\eta^{-0.0287} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{a_w}{c_w}$$

$$\eta = \frac{t_w}{a_w \sin(\theta_w)}$$

式中: β 为平板段长度与斜板段长度的比值。

如图 12 所示,本文所提出拟合公式结果 $K_{L,cal}$ 与有限元计算结果 $K_{L,FEM}$ 比值误差均小于 5%,因此,本文提出的弹性局部屈曲系数计算式可用于桥梁常用波形钢腹板弹性局部屈曲强度计算。

图 13 为 4 种型号波形钢腹板在桥梁常用尺寸范围内所有发生整体屈曲有限元整体剪切屈曲系数 K_G 计算结果的分布散点图。可以看出整体屈曲系数 K_G 在桥梁常用尺寸范围内分布在 40~74 之间,Elgaaly 等^[12,23,26]在四边简支边界下给出的整体剪切屈曲系数均小于 40,过于保守。因此,基于有限元分析结果,本文建议对于桥梁常用波形钢腹板在计算其整体剪切屈曲强度时,整体剪切屈曲系数 K_G 可偏安全地取 40 用于设计计算。

图 14 为在 n 分别取 1、2、3、4 时式(10)计算的合成剪切屈曲强度与有限元计算结果对比。当 $n=1$

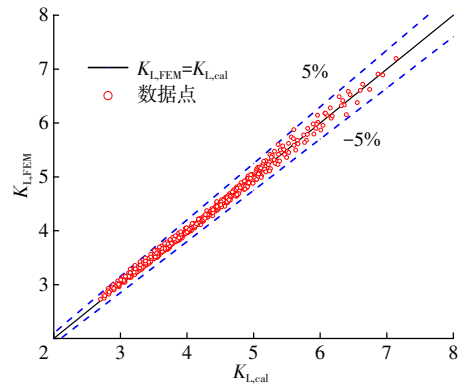


图 12 本文提出计算公式与有限元计算结果对比

Fig. 12 Comparison between proposed formula and finite element calculation results

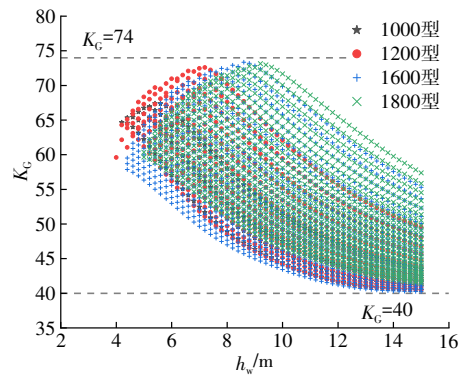


图 13 K_G 散点分布

Fig. 13 Scatter distribution of K_G

时,四边型号波形钢腹板合成剪切屈曲强度理论值 $\tau_{cr,1}^e$ 与有限元计算结果 $\tau_{cr,FEA}^e$ 比值分布在 0.28~0.84 内,式(10)计算结果过于保守。当 $n=3$ 和 4 时, $\tau_{cr,1}^e$ 与 $\tau_{cr,FEA}^e$ 的比值分别分布在 0.44~1.06 和 0.46~1.11 内,特别是在中小跨径腹板高度常用的 2~6 m 时,式(10)计算结果均大于有限元计算结果,计算结果偏于不安全。当 $n=2$ 时, $\tau_{cr,1}^e$ 与 $\tau_{cr,FEA}^e$ 的比值分布在 0.40~1.01 内,相比于 $n=1,3,4$ 能在保守的基础上较为精确地计算波形钢腹板的合成剪切屈曲强度。因此,本文建议在弹性合成剪切屈曲强度计算时 n 取 2,在较保守的基础上尽量保证计算的精确性。

值得注意的是,目前针对波形钢腹板合成剪切屈曲的计算公式(10)是基于有限元分析和试验研究结果得到的经验公式,反映的是 $\tau_{cr,1}^e$ 、 $\tau_{cr,L}^e$ 和 $\tau_{cr,G}^e$ 之间的关系,其数学形式决定了其计算结果必然会在较大误差。对于更为准确的弹性合成剪切屈曲强度计算公式仍需进一步研究。

3.2 抗剪承载力

建筑中冷弯薄壁型钢结构稳定承载力的计算方法主要包括有效宽度法和直接强度法^[27-28]。由于直

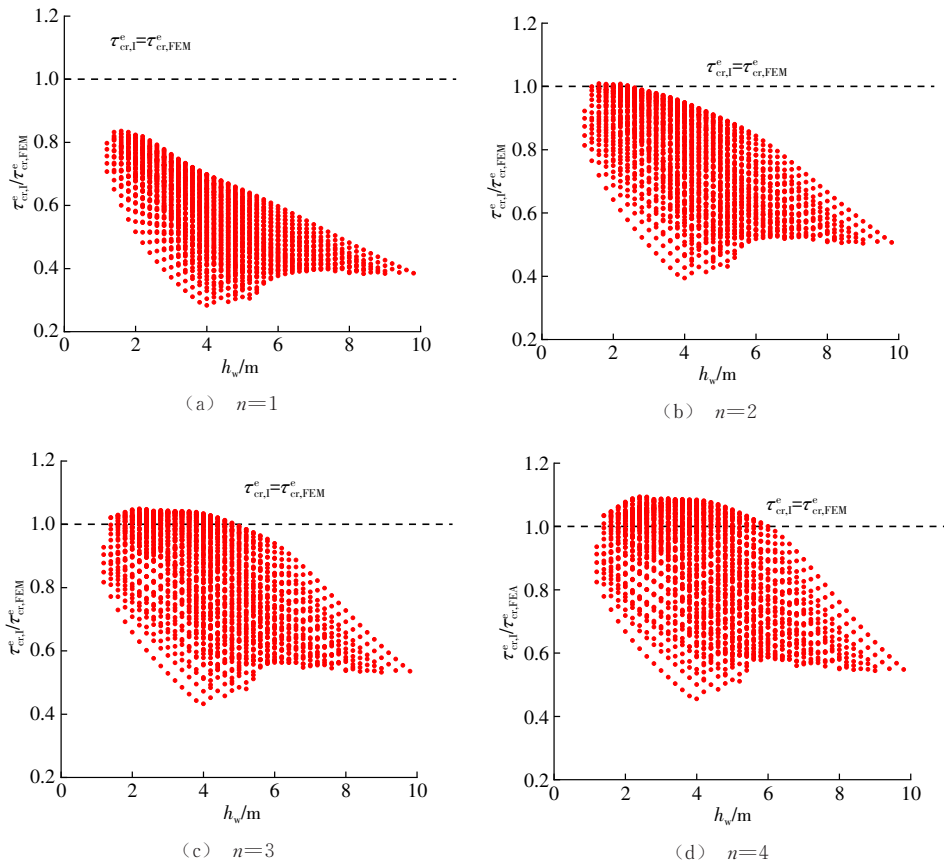


图 14 有限元与式(10)计算结果比较

Fig. 14 Comparison between finite element results and Eq. (10)

接强度法是基于整个截面进行计算分析,所需要的弹性剪切屈曲强度为整个构件的屈曲强度值,而非其中的单个板件,因此,直接强度法能够适用于计算截面形式复杂的钢结构稳定承载力,还可以解决有效宽度法难以计算的合成屈曲承载力问题。因此,直接强度法波形钢腹板抗剪稳定承载力计算的优选方法。过往波形钢腹板抗剪承载力计算公式多基于直接强度法以 λ - ρ 关系曲线形式给出,其计算公式如下

$$\rho = \frac{V_u}{V_y} \tag{14}$$

$$\lambda = \sqrt{\tau_y / \tau_{cr}} \tag{15}$$

$$\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = \frac{V_y}{A} \tag{16}$$

式中: ρ 为标准化抗剪强度; λ 为剪切屈曲长细比; V_u 为波形钢腹板极限承载力; τ_{cr} 为波形钢腹板弹性剪切屈曲强度; V_y 为波形钢腹板剪切屈服剪力; τ_y 为波形钢腹板剪切屈服应力; f_y 为钢材的屈服强度; A 为腹板横截面面积。

根据本文所提出的弹性剪切屈曲强度计算方法,对3种屈曲控制的波形钢腹板计算其对应的弹

性剪切屈曲强度,并将计算结果代入式(15)中得到剪切屈曲长细比 λ 。同时,将非线性有限元模型计算得到的抗剪承载力 τ_u 代入式(14)中得到标准化抗剪强度 ρ ,绘制3种屈曲控制下波形钢腹板的 λ - ρ 散点图如图15所示。

El-Metwally^[29]的研究中提出了波形钢腹板抗剪承载力计算公式的标准形式如下

$$\rho = [1 / (\lambda^{2n} + 1)]^{1/n} \tag{17}$$

因此本文在式(17)基础上进行诸多尝试,拟合得到在3种屈曲控制下波形钢腹板 λ - ρ 曲线下限计算公式如式(18)~(20)所示。

对于局部屈曲控制的波形钢腹板,拟合得到其 λ - ρ 曲线,即

$$\rho = \begin{cases} 1 & \lambda_L < 0.23 \\ 1.05 - 0.2\lambda_L - 0.08\lambda_L^2 & \lambda_L \geq 0.23 \end{cases} \tag{18}$$

对于合成屈曲控制的波形钢腹板,拟合得到其 λ - ρ 曲线,即

$$\rho = \begin{cases} 1 & \lambda_1 < 0.30 \\ 1 - 15\lambda_1^6 & 0.30 \leq \lambda_1 \leq 0.45 \\ (-3 + 4.27\lambda_1^{0.04})^{-1} & 0.45 < \lambda_1 \end{cases} \tag{19}$$

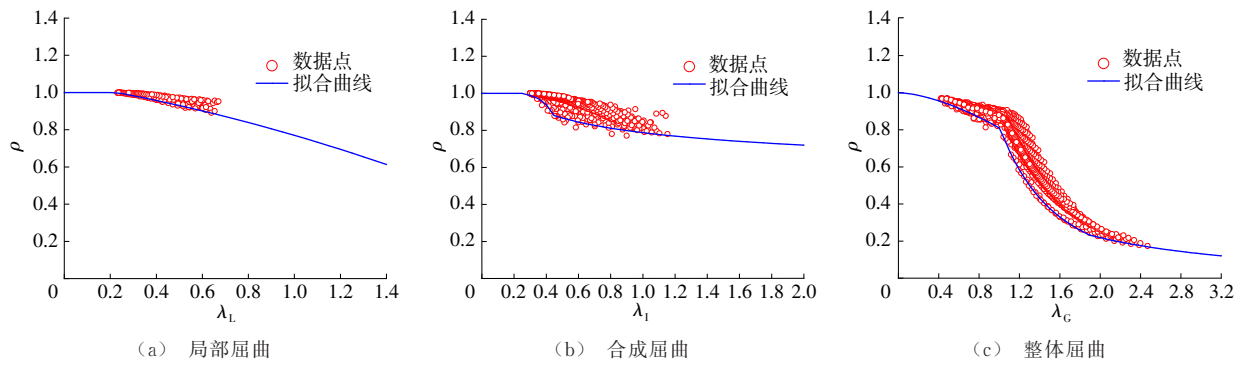


图 15 拟合公式与有限元计算结果对比

Fig. 15 Comparison between fitted formula and finite element calculation results

对于整体屈曲控制的波形钢腹板,拟合得到其 λ - ρ 曲线,即

$$\rho = \begin{cases} 1 - 0.19\lambda_G^{1.6} & \lambda_G \leq 1.0 \\ (\lambda_G^2 + 0.22)^{-1} & 1.0 < \lambda_G < 1.95 \\ (\lambda_G^{1.66} + 1.42)^{-1} & 1.95 \leq \lambda_G \end{cases} \quad (20)$$

3.3 对比分析与计算流程

波形钢腹板抗剪强度的计算公式已有相关研究,将本文提出公式与过往计算公式进行对比如图 16 所示。从图 16 中可以看出,在桥梁常用尺寸范围内,对于局部屈曲 ($\lambda_L < 0.67$) 和合成屈曲 ($\lambda_1 < 1.15$) 控制下的波形钢腹板,欧洲规范、日本规范以及 Moon 等^[9,16,29-30] 提出的抗剪承载力计算曲线大部

分位于本文拟合曲线上方,计算结果偏于不安全。Wang 等^[17,31] 提出的计算曲线均位于本文拟合曲线下方,表明采用这些曲线可以偏安全的计算波形钢腹板的抗剪承载力,但有着较大的安全冗余。对于整体屈曲 ($\lambda_G < 2.45$) 控制下的波形钢腹板,欧洲规范提出的计算曲线整体位于本文曲线上方, Moon 等^[9,16-17,29-30] 提出的计算曲线与本文曲线较为接近,但在多数区间内仍过高地估计了波形钢腹板的抗剪承载力。总的来说,对于局部屈曲和合成屈曲控制下的波形钢腹板,采用本文提出的计算公式可以更精确地计算其抗剪承载力,对于整体屈曲控制下的波形钢腹板采用本文公式进行计算则更加安全。

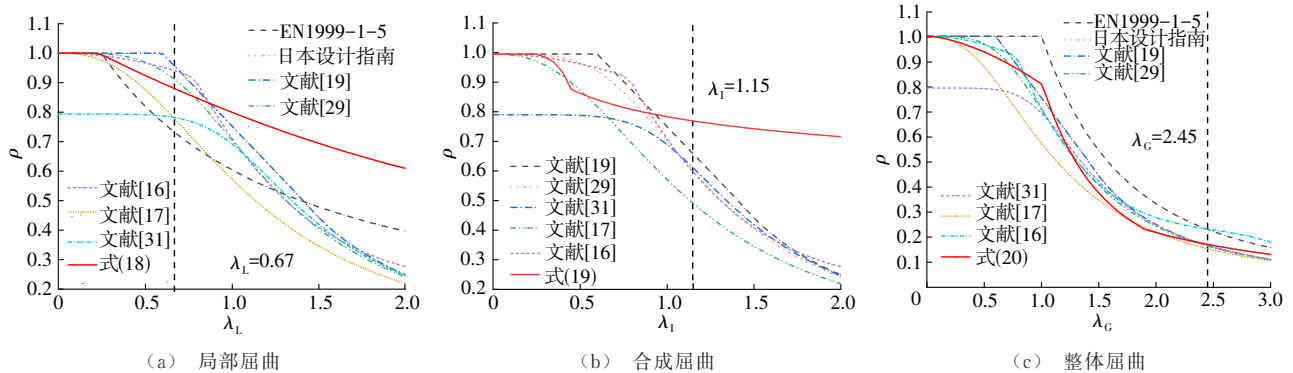


图 16 拟合公式与过往计算公式对比

Fig. 16 Comparison between fitted formulas and existing formulas

结合上述研究,提出适用于桥梁常用波形钢腹板^[32]的抗剪承载力计算方法,计算流程如下:

- (1) 在桥梁常用波形钢腹板尺寸范围内给定波形钢腹板型号、腹板高度 h_w 、腹板厚度 t_w ;
- (2) 根据广西壮族自治区交通运输行业指南《公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥设计指南》(DBJ45/T 051—2023)判断波形钢腹板的控制剪切屈曲模式;
- (3) 根据波形钢腹板的剪切屈曲模式从式(8)~

- (10) 中选择相对应的公式计算弹性剪切屈曲强度 τ_{cr} ;
- (4) 将得到的弹性剪切屈曲强度 τ_{cr} 代入式(15)中得到相应的剪切屈曲长细比 λ ;
- (5) 将得到的剪切屈曲长细比 λ 代入相对应的式(18)~(20)中计算得到标准化抗剪强度 ρ ;
- (6) 将标准化抗剪强度 ρ 代入式(16)中计算得到波形钢腹板的抗剪承载力。

4 结 语

(1) 试验测量了3块用于实际桥梁工程中的波形钢腹板初始几何缺陷,3块波形钢腹板初始几何缺陷最大值均小于行业规范JT/T 784—2022所规定的波形钢腹板验收时所允许的初始面外变形量的 $h_w/750$ 。结合本文试验结果和相关规范,提出了波形钢腹板数值分析模型中初始几何缺陷的合理取值方法:局部屈曲控制的波形钢腹板初始几何缺陷取 $a_w/200$,合成和整体屈曲控制的波形钢腹板初始几何缺陷取 $h_w/750$ 。

(2) 采用切条法对波形钢腹板纵向残余应力进行了试验测量,发现9个波形钢腹板试件残余应力在一个波长内均呈对称分布,在弯角段、斜板段和直板段中点处取得最大值,最大值残余拉应力和残余压应力分别在 $-161\sim-95$ MPa和 $90\sim151$ MPa之间。根据试验结果提出了波形钢腹板纵向残余应力简化模型。

(3) 在桥梁常用尺寸范围内,基于弹性有限元模型参数分析结果拟合得到了局部剪切屈曲系数 K_L 简化计算公式,同时给出了整体屈曲系数 K_G 和合成屈曲系数 n 的合理取值,在边界条件为四边简支时整体屈曲系数 K_G 应取40,合成屈曲系数 n 应取2。

(4) 拟合得到了适用于桥梁用波形钢腹板的抗剪承载力计算公式。将本文公式与过往研究所提出的计算公式对比发现,在桥梁常用尺寸范围内,采用本文公式可以更精确地计算局部屈曲和合成屈曲控制下波形钢腹板抗剪承载力,而对于整体屈曲控制下的波形钢腹板采用本文公式进行计算则更加安全。给出了波形腹板抗剪承载力设计计算流程。

(5) 本文主要研究了桥梁用波形钢腹板的抗剪承载力计算方法,但残余应力试验采用缩尺模型,后续可对足尺模型开展相关研究。同时本文提出的计算方法主要基于四边简支边界有限元模型参数分析得到,而实际边界并非理想简支,仍需考虑实际边界条件对该稳定计算方法做进一步的分析与修正,以完善波形钢腹板的抗剪承载力计算理论,为波形钢腹板组合箱梁桥设计提供参考。

参考文献:

Reference:

[1] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
CHEN Yi-yan. Design and construction of prestressed

concrete bridges with corrugated steel webs [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

- [2] 刘玉擎, 陈艾荣. 组合折腹桥梁设计模式指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
LIU Yu-qing, CHEN Ai-rong. Model guideline of design for composite bridges with corrugated steel webs [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [3] 张 皓, 陈宜言, 叶俊宇, 等. 超大跨波形钢腹板箱梁弯扭耦合性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2026, 56(1): 209-218.
ZHANG Hao, CHEN Yi-yan, YE Jun-yu, et al. Experiment on bending-torsional performance of super-span box girders with corrugated steel webs [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2026, 56(1): 209-218.
- [4] 冀 伟, 马建红. 变截面波形钢腹板弹性整体屈曲计算及几何参数分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 132-141.
JI Wei, MA Jian-hong. Elastic global buckling calculation and geometric parameter analysis of corrugated steel webs with variable section [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11): 132-141.
- [5] 刘 勇. 考虑初始几何缺陷及残余应力影响的波形钢腹板结构屈曲性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
LIU Yong. Study on buckling behavior of corrugated steel webs considering the initial geometric imperfections and residual stresses [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [6] 闫林君, 关义朋, 罗 奎, 等. 波形钢腹板工字形梁焊接残余应力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 143-151.
YAN Lin-jun, GUAN Yi-peng, LUO Kui, et al. Study on welding residual stresses of the i-girder with corrugated steel web [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(3): 143-151.
- [7] 冀 伟, 张 鹏. 波形钢腹板梁T形接头焊接仿真分析与试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 691-698.
JI Wei, ZHANG Peng. Simulation analysis and experimental research on T-joint welding of corrugated steel web girders [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 691-698.
- [8] 郑尚敏, 吴志强. 残余应力对桥梁波形钢腹板屈曲性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(11): 37-42, 51.
ZHENG Shang-min, WU Zhi-qiang. Influence of residual stress on buckling performance of bridge corrugated steel webs [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2024, 43(11): 37-42, 51.
- [9] MOON J, YI J, CHOI B H, et al. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5): 1198-1205.
- [10] DRIVER R G, ABBAS H H, SAUSE R. Shear behavior of

- corrugated web bridge girders [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(2): 195-203.
- [11] 李立峰,侯立超,孙君翠. 波形钢腹板抗剪性能的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(11): 56-63.
LI Li-feng, HOU Li-chao, SUN Jun-cui. Research on shear mechanical property of corrugated steel webs [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(11): 56-63.
- [12] ELGAALY M, HAMILTON R W, SESHADRI A. Shear strength of beams with corrugated webs [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(4): 390-398.
- [13] LUO R, EDLUND B. Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs [J]. *Thin-walled Structures*, 1996, 26(1): 19-44.
- [14] YI J, GIL H, YOUM K, et al. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(6): 1659-1666.
- [15] HASSANEIN M F, KHAROOB O F. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design [J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 544-553.
- [16] 聂建国,朱力,唐亮. 波形钢腹板的抗剪强度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 97-109.
NIE Jian-guo, ZHU Li, TANG Liang. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(6): 97-109.
- [17] WANG T, MA J X, WANG Y H. Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel web dominated by local buckling [J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 111909.
- [18] DENG H, SHAO Y B, HASSANEIN M F. Experimental shear testing of small-scale corrugated web girders used in conventional buildings [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 189: 107086.
- [19] 刘勇,冀伟,赵彦华,等. Q460高强钢焊接波形钢腹板梁的剪切性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(2): 234-242.
LIU Yong, JI Wei, ZHAO Yan-hua, et al. Shear performance of welded corrugated steel web girder using Q460 high-strength steel [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2025, 46(2): 234-242.
- [20] 王晓明,张嘉鼎,赵建领,等. 新型内衬组合波形钢腹板的剪切行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9): 46-55.
WANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ding, ZHAO Jian-ling, et al. Shear behavior of corrugated steel webs with new encasement [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(9): 46-55.
- [21] TEBEDGE N, ALPSTEN G, TALL L. Residual-stress measurement by the sectioning method [J]. *Experimental Mechanics*, 1973, 13(2): 88-96.
- [22] KOICHI W, SHOSEI U, HIROSHI K. Shear buckling performance of corrugated steel web girders [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 53A: 13-24.
- [23] 李夏元,万水,付理想,等. 一种考虑波形钢腹板等效剪切变形自由度的新型箱梁单元[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 385-398.
LI Xia-yuan, WAN Shui, FU Li-xiang, et al. A novel box girder beam element considering equivalent shear deformation freedom of corrugated steel webs [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(5): 385-398.
- [24] GALAMBOS T V. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [25] DBJT45/T 051—2023, 公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥设计指南[S].
DBJT45/T 051—2023, Design guideline of prestressed concrete beam bridges with corrugated steel web [S].
- [26] JOHNSON R P, CAFOLLA J, BERNARD C. Corrugated webs in plate girders for bridges [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 1997, 122(2): 157-164.
- [27] 陈骥. 冷弯薄壁型钢构件的直接强度设计法[J]. 建筑钢结构进展, 2003, 5(4): 5-13.
CHEN Ji. Direct strength method for the design of cold-formed lipped channel members [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2003, 5(4): 5-13.
- [28] 何保康,蒋路. 冷弯薄壁型钢构件的直接强度法[J]. 建筑结构, 2007, 37(1): 20-23.
HE Bao-kang, JIANG Lu. Direct strength method of cold-formed thin wall steel members [J]. *Building Structure*, 2007, 37(1): 20-23.
- [29] EL-METWALLY A S. Prestressed composite girders with corrugated steel webs [D]. Calgary: University of Calgary, 1988.
- [30] Prestressed Concrete Technology Association (Japan). Design and construction guidelines for composite bridges [M]. Tokyo: Gihodo Shuppan Co., Ltd., 2005.
- [31] SAUSE R, BRAXTAN T N. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(2): 223-236.
- [32] 陈康明,黄汉辉,吴庆雄,等. 波形钢腹板-钢管混凝土桁式弦杆组合梁桥疲劳性能[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5): 200-216.
CHEN Kang-ming, HUANG Han-hui, WU Qing-xiong, et al. Fatigue performance of composite girder bridge with corrugated steel webs-concrete filled steel tubular truss chords [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(5): 200-216.