

文章编号:1005-0523(2025)06-0074-08



变厚度波形钢腹板剪切屈曲性能的数值模拟研究

郑尚敏^{1,2}, 刘翠琛²

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室,江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:为探究变厚度波形钢腹板的弹性剪切屈曲性能,以1000型变厚度波形钢腹板为主要研究对象,采用ANSYS有限元软件建立了纯剪切受力状态下的数值分析模型进行剪切屈曲分析,并研究了高厚比、长厚比、波折角及型号对其弹性剪切屈曲性能的影响。结果表明:腹板高度和长度相同时,变厚度波形钢腹板相较于等厚度波形钢腹板,剪切屈曲荷载增大约4%;变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载随高厚比、长厚比的增大而减小,当高厚比大于263或长厚比大于636时,其剪切屈曲荷载的降幅加大;变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载随波折角的增大而增大;不同型号的变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板相比,剪切屈曲荷载均有提高,其中1000型变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的增幅最大。当腹板的高厚比设计值小于263或长厚比设计值小于636时,变厚度波形钢腹板在弹性剪切屈曲性能方面优于等厚度波形钢腹板。

关键词:桥梁工程;变厚度波形钢腹板;有限元分析;弹性剪切屈曲性能;屈曲稳定

中图分类号:U441

文献标志码:A

本文引用格式:郑尚敏,刘翠琛.变厚度波形钢腹板剪切屈曲性能的数值模拟研究[J].华东交通大学学报,2025,42(6):74-81.

Numerical Simulation of Shear Buckling Behavior of Corrugated Steel Webs with Variable Thickness

Zheng Shangmin^{1,2}, Liu Cuichen²

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The study investigates the elastic shear buckling performance of corrugated steel webs with variable thickness, taking the 1000-type variable thickness corrugated steel webs as the main research object. A numerical analysis model under pure shear stress state is established using ANSYS finite element software for shear buckling analysis, and the influence of height-to-thickness ratio, length-to-thickness ratio, corrugation angle, and type on its elastic shear buckling performance is investigated. The results indicate that when the height and length of the web are fixed, the shear buckling load of the variable thickness corrugated steel webs increases by nearly 4% compared to the equal thickness corrugated steel webs; the shear buckling load of the variable thickness corrugated steel webs decreases with the increase of height-to-thickness ratio and length-to-thickness ratio, and the decreased amplitude of the shear buckling load increases when the height-to-thickness ratio is greater than 263 or

收稿日期:2024-09-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52068025);江西省自然科学基金项目(20242BAB25309);江西省交通运输厅项目(2024YB021)

the length-to-thickness ratio is greater than 636; the shear buckling load of the variable thickness corrugated steel webs increases with the increase of the fold angle; compared with equal thickness corrugated steel webs, different types of variable thickness corrugated steel webs all have improved shear buckling loads, among which the 1000 type variable thickness corrugated steel webs has the largest increase in shear buckling load. When the design value of the height-to-thickness ratio of the webs is less than 263, or the design value of the length-to-thickness ratio is less than 636, the elastic shear buckling performance of the variable thickness corrugated steel webs is better than that of the constant thickness corrugated steel webs.

Key words: bridge engineering; variable thickness corrugated steel webs; finite element analysis; elastic shear buckling behavior; buckling stability

Citation format: ZHENG S M, LIU C S. Numerical simulation of shear buckling behavior of corrugated steel webs with variable thickness[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 74-81.

波形钢腹板是一种轻质高强、经济效益良好的桥梁结构材料。实际工程中,波形钢腹板预应力混凝土(prestressed concrete, PC)组合箱梁桥利用波形钢腹板取代了常规的混凝土腹板,显著降低了桥梁的结构重量,并有效解决了混凝土梁桥腹板易开裂的难题^[1-2]。受“手风琴效应”影响,波形钢腹板几乎不承受弯矩而主要承受剪力,且剪应力沿腹板高度近似均匀分布^[3],故波形钢腹板的剪切屈曲强度关系到整个结构的承载能力。

在波形钢腹板的剪切屈曲研究领域, Easley 等^[4]率先对波形钢腹板的弹性屈曲特性进行了深入分析,构建了相应整体屈曲理论体系。Yi 等^[5]探讨了波形钢腹板的合成屈曲特性,得出不考虑材料非线性的合成屈曲计算方程。Moon 等^[6]基于试验研究结果,推导出了波形钢腹板剪切屈曲强度的计算公式。冀伟等^[7]采用伽辽金法,对波形钢腹板的整体屈曲强度的计算公式进行了理论推导。

波形钢腹板的结构参数对其剪切屈曲性能起决定性作用。近年来,国内外学者深入研究了波形钢腹板的几何参数对其剪切屈曲行为的影响。Lee 等^[8]认为水平板的长度直接影响局部剪切屈曲。Leblouba 等^[9]认为腹板的长细比能显著影响抗剪强度。Padmanaban 等^[10]发现对于带切口的波形钢腹板梁,增加梁的高度,其抗剪屈曲强度可提高约 25%。Zevallos 等^[11]认为腹板较厚的梁具有较高的屈曲荷载。Hassanein 等^[12]认为增大腹板厚度,梁所承受的极限剪切荷载和腹板所承受的极限剪应力

均增大。吕梁等^[13]认为增大腹板厚度能够有效增强结构的抗屈曲能力。查上等^[14]建立了波形钢腹板工字钢-混凝土结合板梁有限元模型进行参数敏感性分析,对波形钢腹板高厚比、钢梁高跨比等设计参数的合理取值作出了建议。

综上所述,波形钢腹板厚度是影响结构的剪切屈曲性能的重要因素。目前关于波形钢腹板的厚度对其屈曲强度影响的研究,通常是将整块腹板增厚至不同厚度后对比屈曲强度。然而,整体增厚腹板会增加钢材用量、增大结构自重,且往往造成材料浪费。本文提出变厚度波形钢腹板(腹板厚度沿波长方向呈规律性变化),相较于等厚度波形钢腹板,可在不增加钢材用量的情况下具备更优异的弹性剪切屈曲性能。采用 ANSYS 软件建立了变厚度波形钢腹板的有限元模型,分别探究了变厚度波形钢腹板随着高厚比、长厚比、波折角和型号的变化对其剪切屈曲荷载的影响规律。

1 变厚度波形钢腹板构造

波形钢腹板构造示意图如图 1 所示。 q 为波

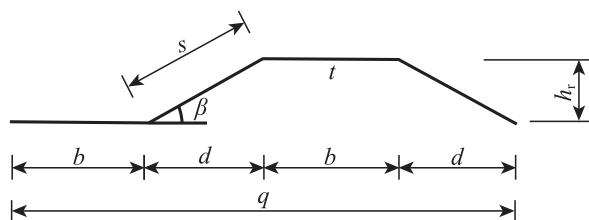


图 1 波形钢腹板构造示意图

Fig. 1 Construction diagram of corrugated steel webs

长; h_r 为波高; b, s 分别为直板段与斜板段的长度; d 为斜板段在桥梁纵向的长度; t 为腹板厚度; β 为波折角。

变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板相比, 构造的区别之处仅在于变厚度波形钢腹板每个波长的厚度按变厚度方式发生变化。

1) 对于由 n 个波 ($n \geq 3$) 组成的波形钢腹板节段中, 以左端为计数起点, 沿腹板的长度方向对每个波长以 $1 \sim n$ 依次计数。

2) 若 $n \geq 3$ 且 n 为奇数, 则设定位于两端的波

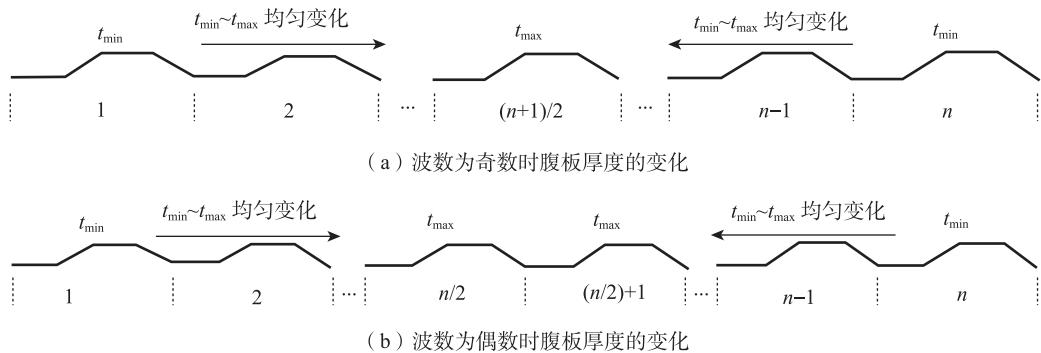


图2 变厚度波形钢腹板示意图

Fig. 2 Diagram of variable thickness corrugated steel webs

2 有限元模型

2.1 单元类型和边界条件

采取较为保守的工程设计原则, 即不考虑翼缘和加劲肋对波形钢腹板的约束作用, 采用四边简支的边界条件代替^[15]。通过ANSYS有限元软件建立等厚度波形钢腹板模型, 使用SHELL181单元模拟波形钢腹板, 钢腹板弹性模量 $E=206$ GPa, 泊松比 $\nu=0.3$ 。 F 为约束自由度; R 为释放自由度; 模型的约束条件见表1, 其中 OA 、 AB 、 BC 、 CO 为4条支撑边; U_x 、 U_y 、 U_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的平动自由度; R_x 、 R_y 、 R_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的转动自由度。沿 BC 边施加竖向荷

表1 波形钢腹板四边简支约束条件

Tab.1 The constraints of simple support on four sides of corrugated steel webs

支撑边	平动自由度			转动自由度		
	U_x	U_y	U_z	R_x	R_y	R_z
OA	F	F	F	R	R	R
AB	F	R	F	R	R	R
BC	F	R	F	R	R	R
CO	F	R	F	R	R	R

(第1个和第 n 个)的厚度为 t_{\min} (腹板最小厚度), 位于中间的波(第 $(n+1)/2$ 个)的厚度为 t_{\max} (腹板最大厚度), 其余波长(从两端向中间)的厚度分别沿腹板长度方向朝位于中间的波长线性递增, 如图2(a)所示。

3) 若 $n \geq 3$ 且 n 为偶数, 则设定位于两端的波长(第1个和第 n 个)的厚度为 t_{\min} , 位于中间的2个波长(第 $n/2$ 个和第 $(n/2)+1$ 个)的厚度为 t_{\max} , 其余波(从两端向中间)的厚度分别沿腹板长度方向朝位于中间的2个波长线性递增, 如图2(b)所示。

载, 使腹板处于纯剪切的受力状态^[16-17]并进行屈曲分析, 有限元模型如图3所示。

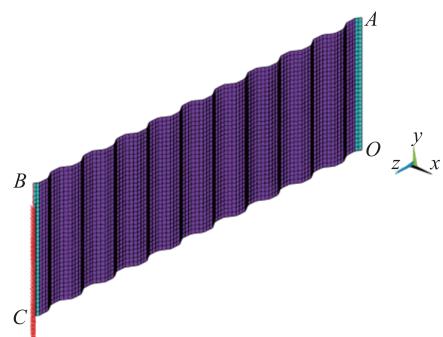


图3 等厚度波形钢腹板有限元模型

Fig. 3 Finite element model of corrugated steel webs with equal thickness

2.2 模型验证

ANSYS 特征值屈曲分析得出的特征值为结构荷载屈曲系数, 相应的屈曲强度 τ 计算式^[18]为

$$\tau = k \frac{P}{h_w t} \quad (1)$$

式中: k 为一阶屈曲系数; P 为施加的荷载; h_w 为腹板高度(加载边的边长)。

为验证本文建模方法的准确性,依据文献[19]中提到的波形钢腹板的型号、尺寸,采用四边简支的边界条件,建立有限元模型并将弹性屈曲分析结果 τ_{FE} 与文献[19]中有限元值 $\tau_{FE,H}$ 进行对比,结果如表2所示。相对误差 δ 按 $|\frac{(\tau_{FE} - \tau_{FE,H})}{\tau_{FE,H}}|$ 计算。由表2可知,本文建立的有限元模型

分析结果 τ_{FE} 与参考文献[19]中的有限元结果 $\tau_{FE,H}$ 基本吻合,故本文建模方法的准确性得以验证。此方法能较好地模拟不同规格的等厚度波形钢腹板在剪切荷载作用下的响应效果,并将其用于变厚度波形钢腹板的弹性剪切屈曲性能有限元分析。

表2 有限元模型分析结果
Tab.2 Finite element model analysis results

序号	h_w/mm	t/mm	$\tau_{FE,H}/MPa$	τ_{FE}/MPa	$\delta/%$
1	1 600.0	16.0	1 548	1 559	0.71
2	1 600.0	18.0	1 809	1 818	0.50
3	2 000.0	16.0	1 469	1 474	0.34
4	2 000.0	18.0	1 705	1 710	0.29
5	2 400.0	16.0	1 385	1 388	0.22
6	2 400.0	18.0	1 610	1 610	0

3 变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载

波数为奇数时的变厚度波形钢腹板以高为4.8 m,平均厚度为18.0 mm,分别以7,9,11个波长组成的1000型变厚度波形钢腹板为例;波数为偶数时的变厚度波形钢腹板以高为4.8 m,平均厚度为18.0 mm,分别以8,10,12个波组成的1000型变厚度波形钢腹板为例。对这些示例分别建立有限元数值分析模型,通过实常数控制模型中各个波间钢板的厚度变化,并将其与相同条件下厚度为18.0 mm的等厚度波形钢腹板进行特征值屈曲对比分析。波数为9和10的变厚度波形钢腹板厚度分布如图4所示(其余波数的厚度分布规律以此类推),其中 \bar{t} 为平均厚度。变厚度波形钢腹板有限元模型如图5所示。

目前尚无关于变厚度波形钢腹板的屈曲强度计算公式,故本文对变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载进行对比分析,结果如

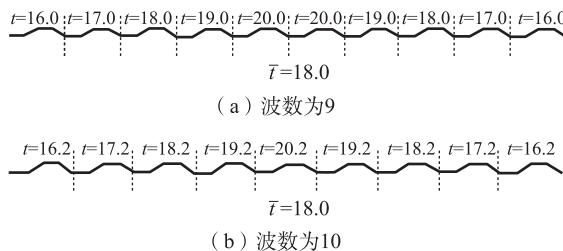


图4 变厚度波形钢腹板厚度布置(单位:mm)

Fig. 4 Variable thickness corrugated steel webs thickness layout (Unit: mm)

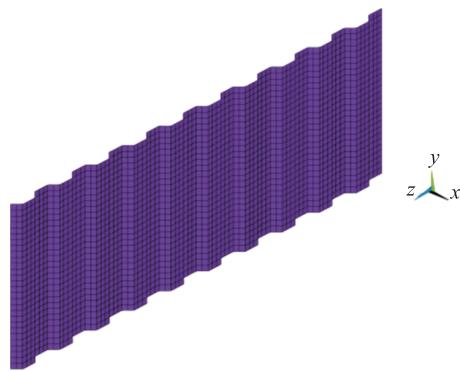


图5 变厚度波形钢腹板有限元模型
Fig. 5 Finite element model of corrugated steel webs with variable thickness

表3所示。

由表3可知,波数为奇数和波数为偶数的变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板相比,均能实现钢材用量相同的情况下,剪切屈曲荷载提升近4%,同时,两者间较等厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的提升幅值非常接近。

4 波形钢腹板剪切屈曲敏感性分析

4.1 高厚比

为对比分析不同高度下1000型的变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板的抗屈曲能力,建立腹板长度为10.0 m,高分别为4.2,4.5,4.8 m。具有不同平均厚度的变厚度波形钢腹板及等厚度波形钢腹板有限元模型,分析得到各模型的剪切屈曲荷载。图6展示了各波形钢腹板的剪切屈曲荷载与不同高厚比之

表3 波形钢腹板的有限元剪切屈曲荷载结果

Tab.3 Finite element shear buckling load results of corrugated steel webs

钢腹板类型	波数为奇数				波数为偶数			
	波数	\bar{t}/mm	剪切屈曲荷载/ kN	剪切屈曲荷载 增长率/%	波数	\bar{t}/mm	剪切屈曲荷载/ kN	剪切屈曲荷载 增长率/%
等厚度	7	18.0	68 587	3.5	8	18.0	67 732	3.7
变厚度			70 977				70 245	
等厚度	9	18.0	66 893	3.7	10	18.0	66 400	3.9
变厚度			69 371				69 009	
等厚度	11	18.0	65 917	3.7	12	18.0	65 645	3.6
变厚度			68 370				67 983	

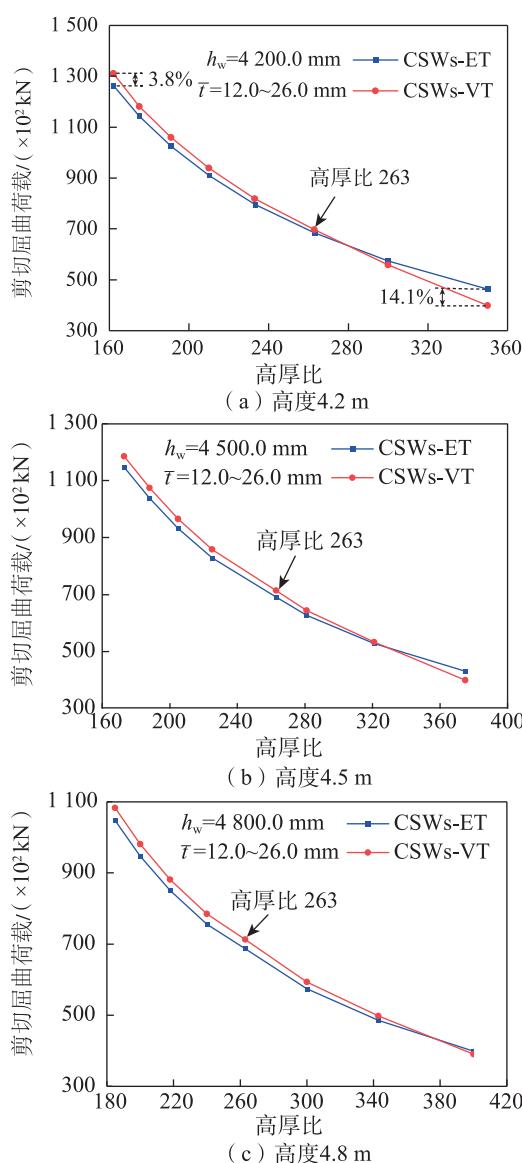


图6 波形钢腹板屈曲荷载与高厚比的关系曲线

Fig. 6 Correlation between the buckling load and the height-to-thickness ratio for corrugated steel webs

间的关系,用CSWs-ET指代等厚度波形钢腹板(corrugated steel webs of equal thickness),CSWs-VT指代变厚度波形钢腹板(corrugated steel webs of variable thickness)。

由图6可知,1000型变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载均随着高厚比的增大而减小。同一高度下,相较于等厚度波形钢腹板,整体上呈现为变厚度波形钢腹板有效增大其剪切屈曲荷载,其中最大增幅为3.8%。当高厚比小于263时,变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载较等厚度波形钢腹板均有所提升,此时两者的剪切屈曲荷载随高厚比增大而减小的幅度基本一致,屈曲模式均为整体屈曲;当高厚比大于263时,变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的减小幅度逐渐递增,与此同时,其对于等厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的增幅逐渐缩小;高厚比继续增大,变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载较等厚度波形钢腹板有所降低,最大降幅为14.1%,其屈曲模式转变为局部屈曲,而等厚度波形钢腹板的屈曲模式仍为整体屈曲,且剪切屈曲荷载变化幅度基本维持不变,此时两种波形钢腹板的屈曲模态如图7所示。

4.2 长厚比

对3种不同腹板长度($l=6.0, 10.0, 14.0 \text{ m}$)的不同平均厚度的1000型变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板进行有限元分析,其剪切屈曲荷载与长厚比之间的关系曲线如图8所示。

由图8可知,1000型变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载均随着长厚比的增大而减小。相同长度下,对比等厚度波形钢腹板,整体上呈现为变厚度波形钢腹板有效增大其剪切屈曲荷载,最大增幅为3.6%。当长厚比小于636

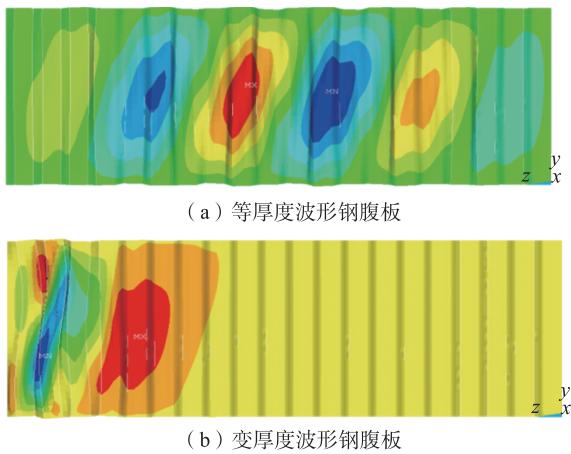


图7 两种波形钢腹板屈曲模态示意图

Fig. 7 Diagram of buckling modes of two corrugated steel webs

时,变厚度波形钢腹板的较等厚度波形钢腹板均有所提升,此时两种波形钢腹板的屈曲模式均为整体屈曲;当长厚比大于636时,变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的减小幅度迅速增大,较等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载增幅开始缩小;长厚比继续增大,变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载较等厚度波形钢腹板有所降低,最大降幅为23.4%,屈曲模式转变为局部屈曲,而等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载减小幅度基本维持不变,屈曲模式仍为整体屈曲。

4.3 波折角

选取3种高度下均由6个波长组成的变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板为分析对象,两种腹板的直板段长度为340.0 mm,斜板段长度为160.0 mm,平均厚度为20.0 mm。波折角分别取为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ 。由于波折角的改变,钢腹板的波高和斜板段水平长度随之改变,而保持钢腹板其余尺寸参数不变。

不同波折角对于各波形钢腹板的剪切屈曲荷载的影响关系如图9所示,随着波折角度的增加,不同高度的波形钢腹板的剪切屈曲荷载均有所增加。同时,变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载相较于等厚度波形钢腹板有所提升,最大提升幅值为3.6%。

4.4 波形钢腹板型号

取腹板平均厚度为20.0 mm,高度为4.2 m,长为9.6 m,对常用的1000型、1200型、1600型,以及文献[20]提出并已应用于实际工程中的1800型的

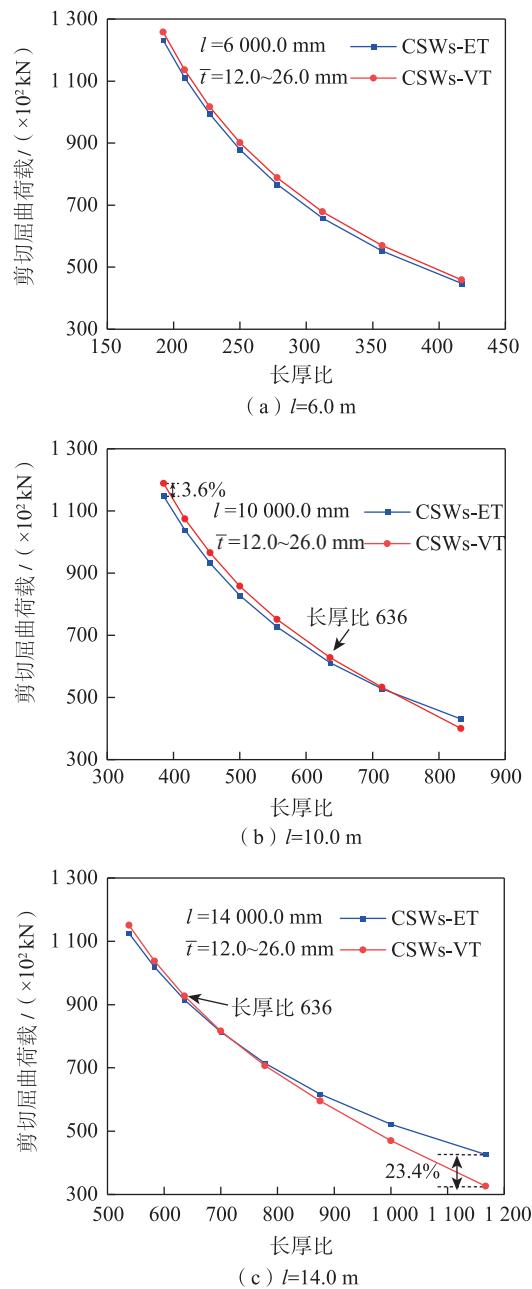


图8 波形钢腹板屈曲荷载与长厚比的关系曲线

Fig. 8 Curve of buckling load and length-thickness ratio of corrugated steel webs

变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板,建立有限元模型进行特征值屈曲分析,所得结果如表4所示。

由表4可知,由于1600型和1800型的波纹比其他两种型号(1000型、1200型)更为稀疏,因此更容易发生合成屈曲,而1000型和1200型则均为整体屈曲。对比各型号的变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载可得:1000型,1200型,1600型,1800型的变厚度波形钢腹板较等厚度波形

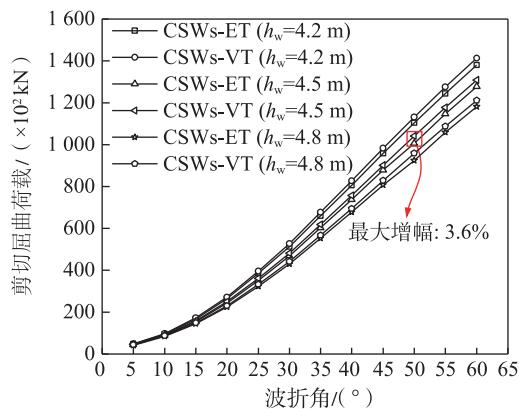


图9 波折角对波形钢腹板屈曲荷载的影响关系

Fig. 9 Influence of wave angle on buckling load of corrugated steel webs

表4 不同型号的波形钢腹板的剪切屈曲荷载

Tab.4 Shear buckling loads of different types of corrugated steel webs

波形钢腹板型号	腹板类型	屈曲模式	剪切屈曲荷载/kN
1000型	等厚度	整体屈曲	91 307
	变厚度	整体屈曲	94 457
1200型	等厚度	整体屈曲	131 558
	变厚度	整体屈曲	132 830
1600型	等厚度	合成屈曲	95 737
	变厚度	合成屈曲	95 891
1800型	等厚度	合成屈曲	80 328
	变厚度	合成屈曲	81 683

钢腹板,剪切屈曲荷载分别增大了3.5%,1.0%,0.2%,1.7%;1000型变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载增幅最大。变厚度波形钢腹板较适用于波纹较密的型号。

5 结论

1) 变厚度波形钢腹板相较于等厚度波形钢腹板,可在不增加钢材用量的情况下增大剪切屈曲荷载,提升弹性剪切屈曲强度。

2) 不同腹板高度下,1000型变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板相比,整体上呈现为变厚度波形钢腹板有效增大剪切屈曲荷载;变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载随高厚比的增大而减小,高厚比大于263时,其剪切屈曲荷载的减小幅度递增。

3) 不同腹板长度下,1000型变厚度波形钢腹板与等厚度波形钢腹板相比,整体上呈现为变厚度

波形钢腹板有效增大剪切屈曲荷载;变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载随长厚比的增大而减小,长厚比大于636时,变厚度波形钢腹板剪切屈曲荷载的减小幅度迅速增大。

4) 变厚度波形钢腹板和等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载均随着波折角的增大而增大;且在不同腹板高度下,任意波折角的变厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载均大于相应等厚度波形钢腹板的剪切屈曲荷载。

5) 不同型号的变厚度波形钢腹板较等厚度波形钢腹板,剪切屈曲荷载均有提高,其中1000型的增幅最大;变厚度波形钢腹板较适用于波纹较密的型号。

参考文献:

- 李斐然,袁波.装配式波形钢腹板梁桥设计研究及应用[J].桥梁建设,2022,52(2): 119-125.
LI F R, YUAN B. Design research and application of precast segmental girder bridge with corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 119-125.
- 王力,刘世忠,虞庐松,等.新型波形钢腹板组合箱梁等效阻尼比计算方法[J].桥梁建设,2021,51(2): 34-39.
WANG L, LIU S Z, YU L S, et al. Calculation of equivalent damping ratio of new-type composite box girder with corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2021, 51 (2): 34-39.
- ELGAALY M, SESHADRI A, HAMILTON R W. Bending strength of steel beams with corrugated webs[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 772-782.
- EASLEY J T, MCFARLAND D E. Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(7): 1497-1516.
- 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.
- 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.
- 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 W, MA J H. 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.
- [8] LEE S H, PARK G W, YOO J H. Analytical study of shear buckling behavior of trapezoidal and sinusoidal corrugated web girders[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(2): 525-537.
- [9] LEBLOUBA M, JUNAID M T, BARAKAT S, et al. Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 113: 13-26.
- [10] PADMANABAN P, HENDERSON J H. Experimental and numerical studies on shear buckling behavior of corrugated web steel girders with cutouts[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(5): 4321-4331.
- [11] ZEVALLOS E, HASSANEIN M F, REAL E, et al. Shear evaluation of tapered bridge girder panels with steel corrugated webs near the supports of continuous bridges[J]. Engineering Structures, 2016, 113: 149-159.
- [12] HASSANEIN M F, ELKAWAS A A, EL HADIDY A M, et al. Shear analysis and design of high-strength steel corrugated web girders for bridge design[J]. Engineering Structures, 2017, 146: 18-33.
- [13] 吕梁, 梁斌, 徐红玉, 等. 波形钢腹板箱梁剪切屈曲特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 70-75.
- LYU L, LIANG B, XU H Y, et al. Shear buckling property of box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36(3): 70-75.
- [14] 查上, 邓文琴, 刘朵, 等. 波形钢腹板工字钢-混凝土结合板梁桥设计参数分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(1): 87-93.
- ZHA S, DENG W Q, LIU D, et al. Analysis of design parameters of composite girder bridge with I steel girders, concrete slabs and corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2023, 53(1): 87-93.
- [15] 郑尚敏, 沈强, 程海根, 等. 新型组合波形钢腹板的弹性剪切屈曲强度[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 92-97.
- ZHENG S M, SHEN Q, CHENG H G, et al. Elastic shear buckling strength of new composite corrugated steel webs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(1): 92-97.
- [16] ELDIB M E A H. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(12): 2129-2139.
- [17] NIE J G, ZHU L, TAO M X, et al. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 105-115.
- [18] 王银辉, 郑亮, 管炎增, 等. 波形钢腹板的弹性局部剪切屈曲强度[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(12): 51-56.
- WANG Y H, ZHENG L, GUAN Y Z, et al. Elastic local shear buckling strength of trapezoidal corrugated steel webs[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(12): 51-56.
- [19] HASSANEIN M F, KHAROOB O F. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (I) Real boundary condition at the juncture of the web and flanges[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 554-564.
- [20] 唐亚森, 罗婷倚, 张云, 等. 横州飞龙大桥主桥设计[J]. 世界桥梁, 2024, 52(3): 17-22.
- TANG Y S, LUO T Y, ZHANG Y, et al. Design of main bridge of feilong bridge in Hengzhou[J]. World Bridges, 2024, 52(3): 17-22.



第一作者: 郑尚敏(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为组合结构桥梁力学性能。E-mail: lanxiaowenlin@126.com。



通信作者: 刘翠琛(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为组合结构桥梁力学性能。E-mail: lccyuanyuan99@163.com。

(责任编辑: 姜红贵)