

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.011

## 2400 型波形钢腹板抗剪性能分析

李淑琴, 侯彪, 宋京

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**随着波形钢腹板(corrugated steel webs, CSW)组合箱梁桥的发展,亟需针对适用于更大跨径的大尺寸 CSW 的力学性能进行研究。文章采用模型试验与有限元仿真相结合的方法,分析 2400 型大尺寸 CSW 的抗剪性能。首先通过一根 2400 型 CSW 工字钢梁的加载试验,掌握其基本受剪性能;然后通过 3 种加载方式下的有限元模型,对 2400 型 CSW 的屈曲稳定性和抗剪承载力进行分析;最后考虑腹板高度和厚度对 2400 型 CSW 弹性剪切屈曲性能的影响,并推导出弹性剪切屈曲强度优化公式。研究表明:2400 型 CSW 的剪应变随荷载的增大而增大,并沿高度方向均匀分布,而靠近加载点处截面,当荷载超过 400 kN 后,剪应变分布呈现非均匀性;2400 型 CSW 的屈曲荷载大于极限荷载,其抗剪承载力和屈曲稳定性均优于常规尺寸 CSW;2400 型 CSW 的高度和厚度都较小时易发生局部屈曲,高度和厚度都较大时易发生整体屈曲。该文提出的 2400 型 CSW 弹性剪切屈曲强度优化公式经验证具有较高的精度,可为工程设计提供一定的理论参考。

**关键词:**波形钢腹板(CSW);抗剪;模型试验;有限元;剪切屈曲;优化公式

**中图分类号:**U448.213; TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)11-1505-09

### Analysis on shear behavior of type 2400 corrugated steel webs

LI Shuqin, HOU Biao, SONG Jing

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** With the development of composite box girder bridge with corrugated steel webs(CSW), it is urgent to study the mechanical properties of large-size CSW for larger span. In this paper, the shear resistance of type 2400 large-size CSW is studied through the method of combining model test and finite element simulation. Firstly, its basic shear properties are obtained through the loading test of an I-beam with type 2400 CSW. Then, the buckling stability and shear capacity of type 2400 CSW are analyzed through the finite element simulation under three loading modes. Finally, the effects of webs height and thickness on the elastic shear buckling behavior of type 2400 CSW are considered. The results show that the shear strain of type 2400 CSW increases with the increase of load, and it is distributed evenly along the height direction. In the section near the loading point, when the load exceeds 400 kN, the shear strain distribution is non-uniform. The buckling load of type 2400 CSW is greater than the ultimate load. The shear capacity and buckling stability of type 2400 CSW are better than conventional-size CSW. Local buckling is easy to occur when the height and thickness of type 2400 CSW are smaller, and global buckling is easy to occur when the height and thickness are larger. The optimization formulas of elastic shear buckling strength of type 2400 CSW are verified to have high accuracy, and can provide theoretical reference for engineering design.

**Key words:** corrugated steel webs(CSW); shear resistance; model test; finite element; shear buckling; optimization formula

收稿日期:2022-03-29;修回日期:2022-05-26

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1608085QE103)

作者简介:李淑琴(1982—),女,安徽安庆人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师。

波形钢腹板 (corrugated steel webs, CSW) 组合箱梁桥具有受力合理、自重轻和方便施工等众多优点, 现已成为桥梁建设中被广泛采用的一种桥型。《波形钢腹板组合梁桥技术标准》(CJJ/T 272—2017) 规定的波形钢腹板型号有 1000 型、1200 型和 1600 型, 可满足常规跨径该类桥梁的建设需要, 并且众多学者对常规尺寸 CSW 的力学性能也已展开较为全面的研究。在该类桥梁中, 几乎所有的剪力都由波形钢腹板承担, 且剪应力沿高度方向均匀分布<sup>[1]</sup>, 而钢腹板在剪切荷载作用下又极易发生剪切屈曲问题, 这已成为设计该类桥梁的关键影响因素<sup>[2]</sup>。已有研究表明, CSW 的剪切屈曲性能受几何参数的影响较大<sup>[3-4]</sup>, 文献<sup>[2]</sup>对 CSW 工字钢梁进行剪切试验, 研究其剪切破坏机理, 并通过灵敏度分析得出直板段长度对 CSW 抗剪强度的影响最大, 弹性模量影响最小。

国外对于 CSW 的剪切屈曲性能研究较早。文献<sup>[5-6]</sup>通过剪切试验发现, CSW 具有局部屈曲、整体屈曲和组合屈曲 3 种屈曲模式; CSW 的弹性局部屈曲和整体屈曲强度公式已得到广泛认可<sup>[7-8]</sup>, 而对于组合屈曲强度公式却有不同争议, 文献<sup>[9-10]</sup>则通过有限元方法, 提出新的组合屈曲强度公式。国内研究中, 文献<sup>[11-13]</sup>通过有限元方法分析影响屈曲强度的关键因素, 提出屈曲强度的建议公式, 并开展多组 CSW 梁剪切屈曲试验, 推导出 CSW 屈曲强度简化公式及抗剪强度曲线; 文献<sup>[14]</sup>、文献<sup>[15]</sup>也分别推导出 CSW 剪切屈曲强度的计算公式; 文献<sup>[16]</sup>采用有限元方法, 验证内衬混凝土能够显著增强 CSW 的抗剪性能; 而文献<sup>[17]</sup>则通过试验验证竖向加劲肋同样可以增强 CSW 的抗剪性能, 且不影响其“手风琴效应”。这些研究都对增强 CSW 的抗剪性能起到积极作用。

CSW 组合箱梁桥逐步向更大跨径发展, 亟需大尺寸 CSW 来满足建设需要, 基于此, 有学者提出 2000 型和 2400 型 CSW, 文献<sup>[18]</sup>和文献<sup>[19]</sup>分别利用有限元方法研究几何参数对 2000 型和 2400 型 CSW 屈曲性能的影响, 最终拟合得到屈曲强度优化公式。现有的理论多针对于常规尺寸 CSW, 对于大尺寸 CSW 的力学性能需进行更加深入的研究。

本文采用模型试验与有限元仿真相结合的方法分析 2400 型大尺寸 CSW 的抗剪性能。首先通过一根 2400 型 CSW 工字钢梁的受压试验, 掌

握其基本受剪性能; 然后利用有限元仿真软件建立多组有限元仿真模型, 研究 2400 型 CSW 的剪切屈曲性能; 最后结合现有理论, 推导出合理的弹性剪切屈曲强度优化公式。

## 1 波形钢腹板剪切屈曲性能

CSW 通用断面如图 1 所示, 几何尺寸见表 1 所列。CSW 具有 3 种屈曲模式: 局部屈曲易发生在波纹较稀疏的腹板上, 且屈曲不跨越相邻折板, 仅表现在某一块折板上; 整体屈曲易发生在波纹较密集的腹板上, 屈曲常表现为贯穿多个折板乃至整块腹板; 组合屈曲是一种由局部屈曲和整体屈曲相互作用、相互影响, 并介于两者之间的屈曲模式。CSW 的 3 种屈曲模式如图 2 所示。

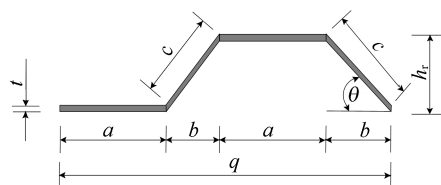
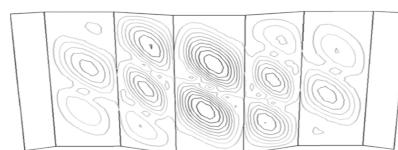


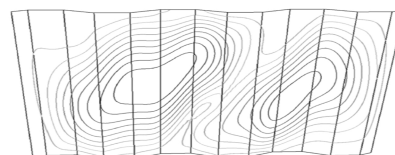
图 1 CSW 断面图

表 1 CSW 几何尺寸

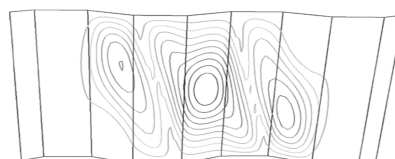
型号	波形尺寸				$t/\text{mm}$	$h_t/\text{mm}$
	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$c/\text{mm}$	$\theta/(\text{°})$		
1000 型	340	160	226	45.0	6~12	160
1200 型	330	270	336	37.0	8~16	200
1600 型	430	370	430	31.0	12~30	220
2000 型	530	470	527	27.0	14~34	240
2400 型	630	570	627	24.5	16~36	260



(a) 局部屈曲



(b) 整体屈曲



(c) 组合屈曲

图 2 屈曲模式示意图

《波形钢腹板组合梁桥技术标准》(CJJ/T 272—2017)中给出的屈曲强度公式为:

$$\tau_{cr,L}^e = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{\tau w}\right)^2 \quad (1)$$

$$k_L = 5.34 + 4.0 \left(\frac{\tau w}{h}\right)^2 \quad (2)$$

$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{(EI_y)^{0.25} (EI_x)^{0.75}}{h^2 t} \quad (3)$$

$$I_x = \frac{t^3 \left[ \left(\frac{h_r}{t}\right)^2 + 1 \right]}{6 \left(\frac{a+b}{a+c}\right)} \quad (4)$$

$$I_y = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

$$\tau_{cr,1}^e = \frac{1}{\left[ 1/(\tau_{cr,L}^e)^4 + 1/(\tau_{cr,G}^e)^4 \right]^{0.25}} \quad (6)$$

其中: $\tau_{cr,L}^e$ 为弹性局部屈曲强度; $\tau_{cr,G}^e$ 为弹性整体屈曲强度; $\tau_{cr,1}^e$ 为弹性组合屈曲强度; $k_L$ 为局部屈曲系数; $k_G$ 为整体屈曲系数,四边简支时, $k_G = 36$ ;  $E$ 为材料的弹性模量; $\nu$ 为材料的泊松比; $t$ 为腹板的厚度; $h$ 为腹板高度; $a$ 为平板宽; $b$ 为斜板宽的水平投影宽度; $c$ 为斜板宽; $\tau w$ 为平板宽或

斜板宽的最大宽度; $\theta$ 为斜板倾角; $h_r$ 为波高; $I_x$ 为单位长度腹板绕顺桥向形心轴的惯性矩; $I_y$ 为单位宽度波形钢腹板的抗弯惯性矩。

## 2 2400 型波形钢腹板工字梁试验

### 2.1 试验装置

制作 1 : 4 缩尺工字梁试件,选择 Q345D 型钢材,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。材性试验测得钢板屈服强度为 400 MPa,极限强度为 480 MPa。在试件的支座和跨中处分别设置竖向加劲肋。

腹板波形几何尺寸见表 2 所列,试件几何尺寸参数如图 3 所示。本试验测量 CSW 的剪应变、位移和承载力,其中应变花和位移计的布置见图 3。试件采取简支约束方式,在跨中施加竖向集中荷载。

表 2 腹板波形几何尺寸

型号	$q/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h_r/\text{mm}$	$\theta/(\text{°})$	$t/\text{mm}$
2400 型	600	158	142	65	24.5	6

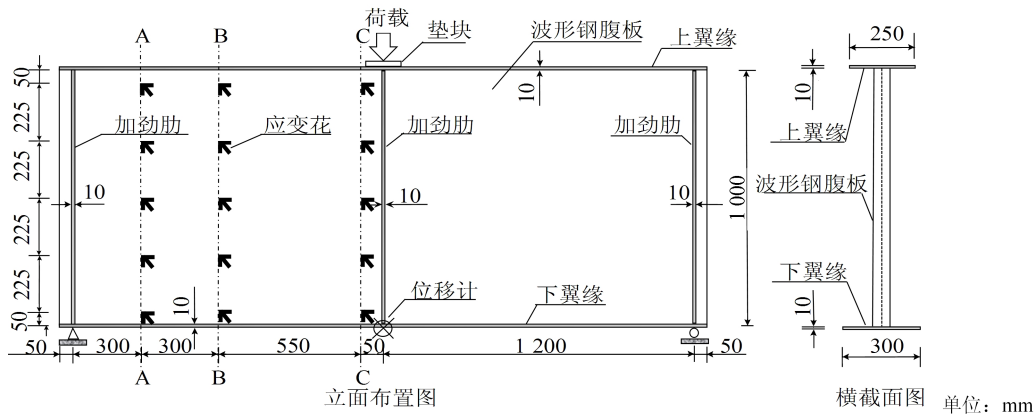


图 3 试件的几何参数

### 2.2 试验结果

试件的加载过程如图 4 所示,最终破坏结果如图 5 所示。



图 4 试件加载



图 5 试件破坏形态

试件中、上部发生局部破坏,当试件从弹性阶段转为塑性阶段时,达到极限荷载,随后继续加载,荷载开始变小,而试件的变形却继续加大。从

图 5 可以看出,上翼缘板中部出现凹陷,跨中加劲肋出现侧向弯曲,腹板发生小范围曲鼓,并向局部屈曲模态发展,而其余部位并未出现大范围破坏。

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 钢腹板剪应变

钢梁试件在不同位置下的剪应变分布情况如

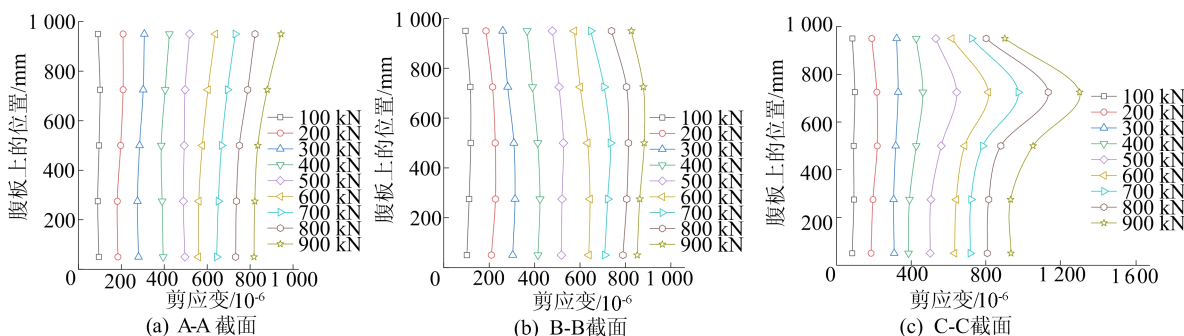


图 6 腹板剪应变分布

#### 2.3.2 荷载位移曲线

采用 Midas FEA 软件建立有限元模型对试验进行验证。模型采用六面体实体单元,单元尺寸具有足够精度,模型如图 7 所示。

基于范梅塞斯本构模型,考虑材料非线性,采用弧长法进行非线性静力分析,仿真结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,有限元仿真的破坏形态和试验结果基本一致。

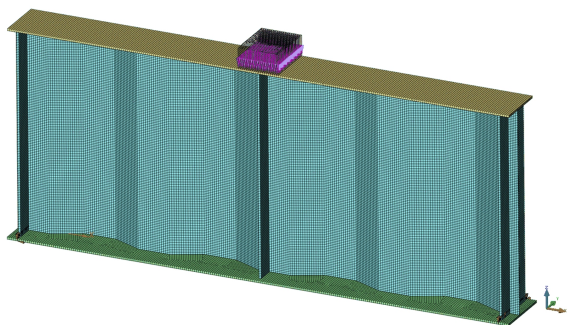


图 7 工字梁试件有限元仿真模型

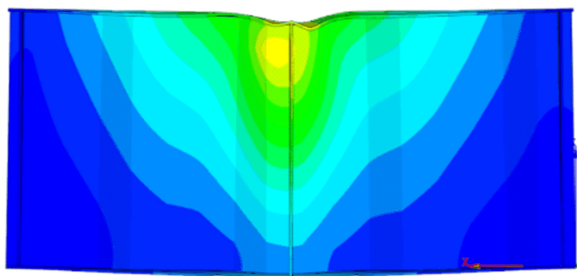


图 8 试件加载试验有限元仿真结果

试验与有限元仿真的底板跨中竖向位移随荷载变化的数据对比如图 9 所示。由图 9 可知:试

图 6 所示。

从图 6 可以看出:腹板的剪应变随荷载的增大而增大,在沿腹板的高度方向,剪应变呈现均匀分布;而 C-C 截面,当荷载超过 400 kN 后,集中力对钢腹板的剪应变产生较大影响,腹板曲鼓处,剪应变沿高度方向的分布呈现非均匀性。

验过程中,试件在弹性阶段的底板跨中竖向位移随荷载呈线性增长趋势,极限荷载为 1 980 kN,转入塑性阶段后,荷载出现下降,位移则继续增加,之后由于跨中加劲肋侧向弯曲较大,试验提前终止;有限元仿真过程中,极限荷载为 2 032 kN 后迅速转入塑性阶段,这一过程中位移随荷载变化的趋势与试验结果较为吻合。此外,由于有限元仿真继续测量,得到模型加载至最终破坏过程中的位移数据,也使试验得到相应的补充。有限元软件能够较好地模拟试验过程,获得较理想的模拟结果,验证了下文利用有限元软件 Midas FEA 分析大尺寸 CSW 抗剪性能的可行性。

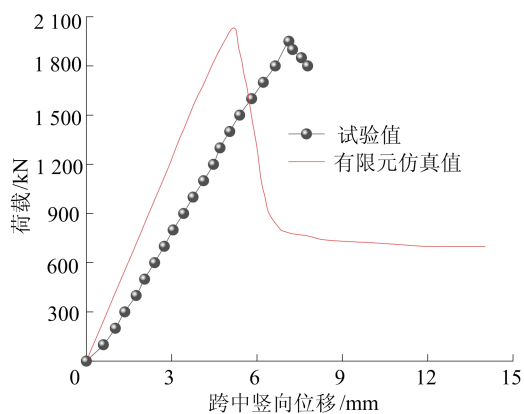


图 9 荷载-位移曲线

## 3 2400 型 CSW 抗剪性能分析

### 3.1 有限元模型

基于有限元软件 Midas FEA,建立 1000 型、

1200 型、1600 型、2400 型 CSW 梁有限元仿真模型共 20 组,各模型的跨径  $l$  均为 20 000 mm, $h$  均为 10 000 mm, $t$  分别为 18、22、26、30、34 mm。材料选用 Q345 钢,弹性模量  $E=2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu=0.3$ 。建立空间有限元模型,模型均采用六面体实体单元,单元尺寸具有足够精度。

加载方式分为 3 种,见表 3 所列,有限元仿真模型如图 10 所示。

表 3 加载方式

方式	边界条件	荷载类型	翼缘板
A	简支约束	跨中竖向集中荷载	上、下翼缘板长度为 20 000 mm,宽度为 600 mm,厚度为 50 mm
B	简支约束	竖向均布荷载	
C	单侧端部固定	自由端竖向均布荷载	

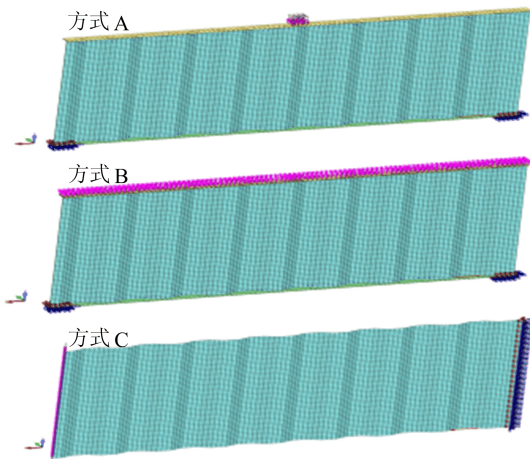


图 10 加载方式有限元仿真模型

进行非线性静力分析和线性屈曲分析来研究 CSW 的极限荷载和屈曲荷载,线性屈曲分析选取一阶屈曲模态。

### 3.2 结果分析

4 种型号 CSW 在 3 种加载方式下的极限荷载  $P_E$  和屈曲荷载  $P_B$  见表 4 所列。

表 4 中: $P_{E1}$ 、 $P_{E2}$ 、 $P_{E3}$  分别表示在方式 A、方式 B、方式 C 作用下的极限荷载; $P_{B1}$ 、 $P_{B2}$ 、 $P_{B3}$  分别表示在方式方式 A、方式 B、方式 C 作用下的屈曲荷载; $t$  为腹板的厚度。

由表 4 可知:在 3 种加载方式下,4 种型号 CSW 的  $P_E$  和  $P_B$  均随腹板厚度的增大而增大,且  $P_B$  均大于  $P_E$ ,腹板厚度是影响 CSW 抗剪性能的重要因素;相同腹板厚度下,CSW 的  $P_E$  和  $P_B$  均随 CSW 型号的增大而增大,2400 型 CSW 的  $P_E$  和  $P_B$  最大。

非线性静力分析结果显示,在模型加载过程中,4 种型号 CSW 的剪应变沿高度方向均呈现均匀分布,而仅在方式 A 中,当接近极限荷载时,靠近加载点处腹板的剪应变逐渐大于其余部位,这也与第 2 节的试验现象较为吻合。同时,线性屈曲分析结果显示,4 种型号 CSW 的的屈曲模态也较为相似。

以上有限元分析结果表明,2400 型 CSW 在剪力作用下,具有与 3 种常规尺寸 CSW 一样的抗剪规律,却具有更良好的抗剪承载力和屈曲稳定性。

表 4 3 种加载方式下腹板的极限荷载和屈曲荷载

型号	$t/mm$	方式 A			方式 B			方式 C		
		$P_{E1}/kN$	$P_{B1}/kN$	$P_{B1}/P_{E1}$	$P_{E2}/kN$	$P_{B2}/kN$	$P_{B2}/P_{E2}$	$P_{E3}/kN$	$P_{B3}/kN$	$P_{B3}/P_{E3}$
1000 型	18	23 798	76 868	3.23	42 095	69 128	1.64	19 772	56 462	2.86
	22	27 761	87 232	3.14	49 158	79 475	1.62	24 907	64 948	2.61
	26	30 417	102 817	3.38	56 943	85 376	1.50	29 343	85 075	2.90
	30	32 855	125 822	3.83	63 700	101 116	1.59	34 342	105 163	3.06
	34	40 187	134 958	3.36	71 484	112 336	1.57	37 724	117 737	3.12
1200 型	18	46 252	82 356	3.12	46 252	82 356	1.78	21 483	66 555	3.10
	22	51 249	99 865	3.35	51 249	99 865	1.95	26 806	76 052	2.84
	26	62 683	103 928	3.21	62 683	103 928	1.66	31 654	98 027	3.10
	30	68 181	117 875	3.27	68 181	117 875	1.73	36 261	109 464	3.02
	34	74 267	122 887	3.41	74 267	122 887	1.65	39 659	127 712	3.22
1600 型	18	27 933	90 564	3.24	49 708	87 572	1.76	22 881	68 571	3.00
	22	31 080	107 148	3.45	54 589	109 597	2.01	29 018	88 701	3.06
	26	36 348	119 688	3.29	66 686	111 188	1.67	33 628	104 021	3.09
	30	49 206	142 384	2.89	74 300	125 915	1.69	42 662	122 383	2.87
	34	55 678	157 049	2.82	80 147	146 302	1.83	47 706	147 569	3.09
2400 型	18	39 806	112 459	2.83	69 682	117 340	1.68	31 269	94 450	3.02
	22	48 150	126 121	2.62	78 756	137 965	1.75	37 692	127 877	3.39
	26	53 430	135 589	2.54	84 247	140 587	1.67	45 490	143 702	3.16
	30	60 722	168 970	2.78	89 494	170 011	1.90	51 279	164 523	3.21
	34	69 300	188 775	2.72	95 420	175 425	1.84	61 473	180 348	2.93

### 4 2400 型 CSW 弹性剪切屈曲性能

CSW 的几何参数对其力学性能会产生较大影响,本节通过有限元方法研究腹板的高度和厚度对 2400 型 CSW 剪切屈曲性能的影响。

#### 4.1 板高和板厚的影响

根据 2400 型 CSW 的适用高度和厚度,基于有限元软件 Midas FEA 建立 130 个模型,模型选择六面体实体单元,材料同第 3 节。各模型板长均为 9 600 mm,板高  $h$  为 1 000~10 000 mm,板厚  $t$  为 16~40 mm。2400 型 CSW 有限元仿真模型如图 11 所示。

各模型均采用四边简支约束方式,AB、BC 边和 CO 边约束 X、Y 2 个方向的平动自由度, AO 边则约束 X、Y 和 Z 3 个方向的平动自由度,在 BC 边施加竖向均布剪切荷载。通过线性屈曲分析,测得 2400 型 CSW 部分模型的屈

曲模态如图 12 所示。

依据有限元仿真得到各模型屈曲模态,采用式(1)和式(2)计算局部屈曲强度;采用式(3)~(5)计算整体屈曲强度;采用式(6)计算组合屈曲强度。屈曲强度的公式计算值  $\tau_{cr,F}$  和有限元仿真值  $\tau_{cr,FEA}$  如图 13 所示。各模型的屈曲模态及  $\tau_{cr,F}/\tau_{cr,FEA}$  值见表 5 所列。

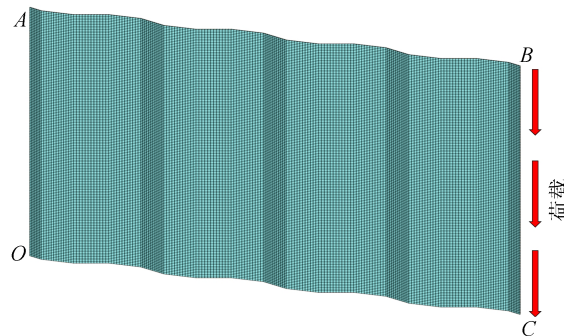


图 11 2400 型 CSW 有限元仿真模型

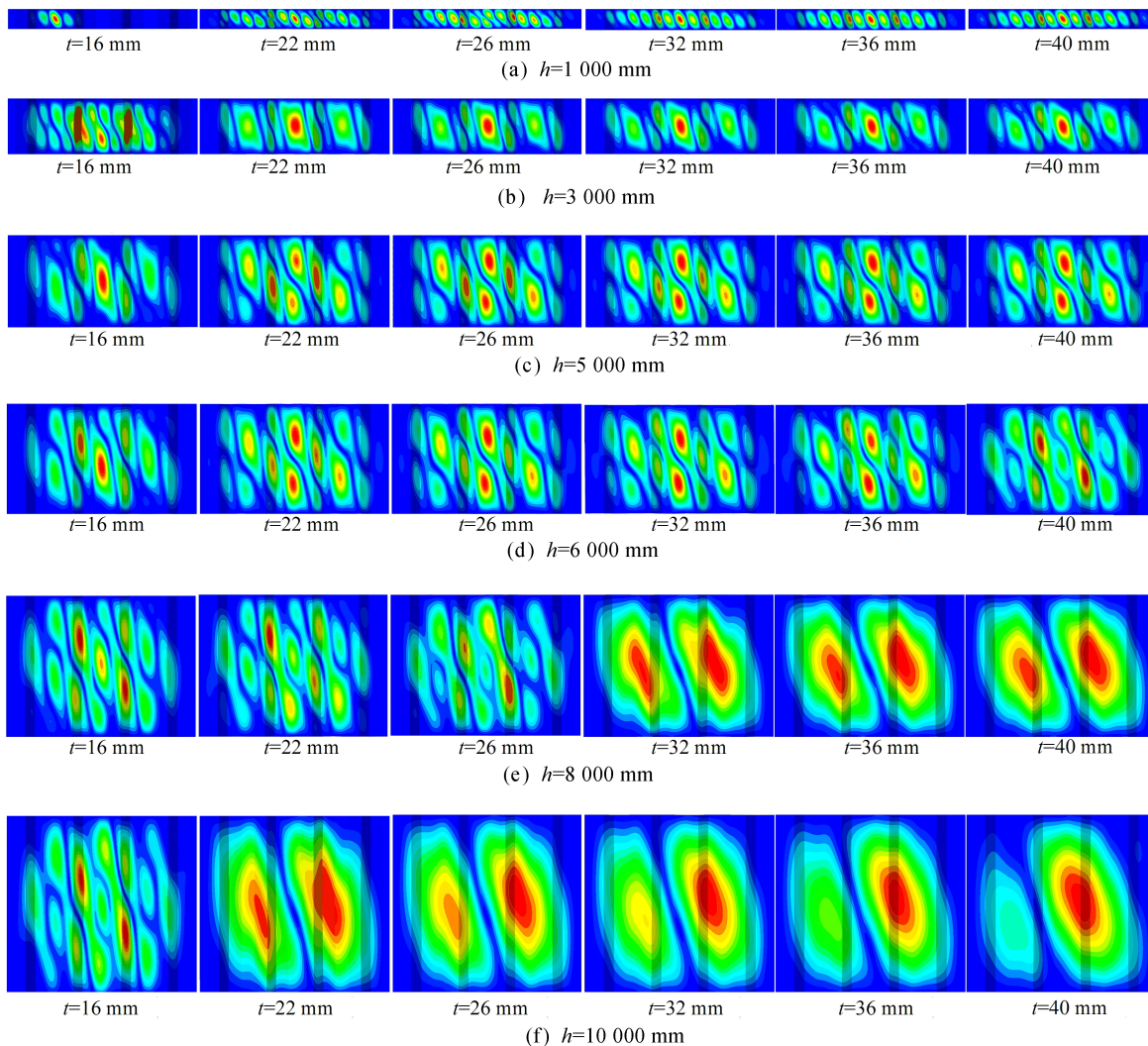


图 12 2400 型 CSW 部分模型屈曲模态图

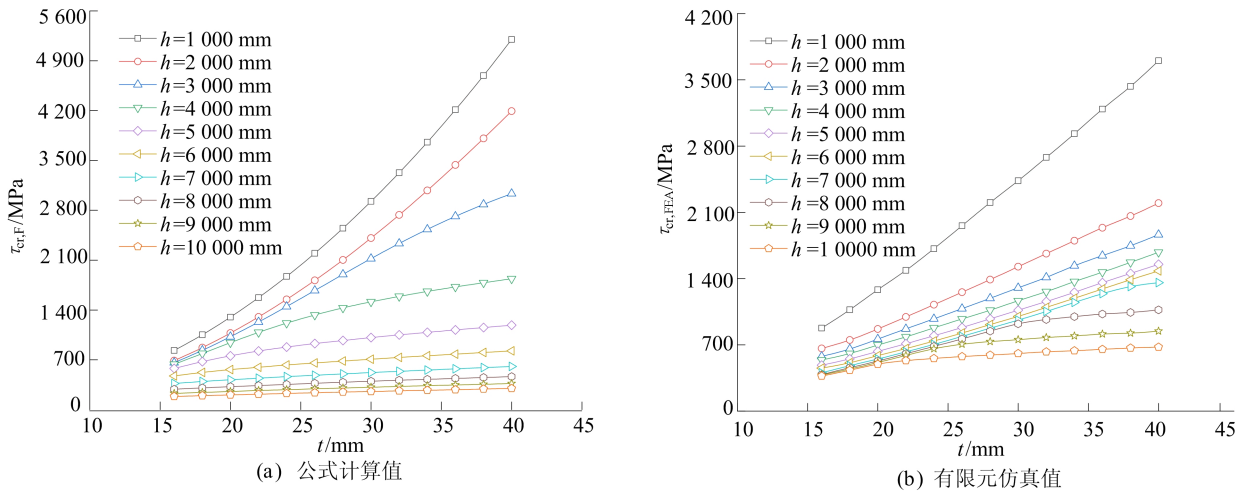


图 13 2400 型 CSW 腹板屈曲强度

从图 13 可以看出,2400 型 CSW 腹板的屈曲强度随腹板厚度的增大而增大,随腹板高度的增大而减小。

由图 12 和表 5 可知:在腹板高度和厚度均较小的情况下,易发生局部屈曲;在腹板高度较小、厚度较大的情况下,易发生组合屈曲;在腹板高度较大、厚度较小的情况下,易发生组合屈曲;在腹

板高度和厚度均较大的情况下,易发生整体屈曲。这些规律与常规尺寸 CSW 的屈曲规律较为一致。

此外,由表 5 还可知, $\tau_{cr,F}$  和  $\tau_{cr,FEA}$  存在较大差异,这表明现有屈曲强度公式不适用于计算 2400 型 CSW 的屈曲强度。因此,需对现有屈曲强度公式进行优化。

表 5 腹板屈曲模式和屈曲强度公式计算值与有限元仿真值的比值

t/mm	h/mm									
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000
16	L,0.95	L,1.04	I,1.14	I,1.18	I,1.19	I,1.04	I,0.91	I,0.75	I,0.60	I,0.50
18	L,0.98	L,1.16	I,1.27	I,1.30	I,1.22	I,1.02	I,0.82	I,0.67	I,0.54	I,0.45
20	L,1.01	L,1.24	I,1.35	I,1.35	I,1.20	I,0.96	I,0.76	I,0.61	I,0.50	I,0.42
22	L,1.06	L,1.31	I,1.42	I,1.38	I,1.16	I,0.90	I,0.71	I,0.56	I,0.46	G,0.41
24	L,1.09	I,1.38	I,1.49	I,1.38	I,1.10	I,0.85	I,0.66	I,0.52	I,0.43	G,0.41
26	L,1.12	I,1.44	I,1.55	I,1.37	I,1.05	I,0.80	I,0.61	I,0.49	G,0.42	G,0.41
28	L,1.16	I,1.51	I,1.59	I,1.34	I,1.00	I,0.75	I,0.57	I,0.46	G,0.41	G,0.42
30	L,1.20	I,1.58	I,1.63	I,1.30	I,0.95	I,0.71	I,0.54	I,0.43	G,0.42	G,0.42
32	L,1.24	I,1.64	I,1.65	I,1.26	I,0.91	I,0.67	I,0.51	G,0.43	G,0.42	G,0.42
34	L,1.28	I,1.71	I,1.65	I,1.21	I,0.87	I,0.64	I,0.48	G,0.43	G,0.42	G,0.43
36	L,1.32	I,1.77	I,1.65	I,1.17	I,0.83	I,0.60	I,0.46	G,0.43	G,0.43	G,0.43
38	L,1.37	I,1.85	I,1.65	I,1.13	I,0.79	I,0.58	I,0.45	G,0.43	G,0.43	G,0.43
40	L,1.40	I,1.91	I,1.63	I,1.10	I,0.77	I,0.56	G,0.45	G,0.43	G,0.43	G,0.44

注:单元格中字母表示屈曲模式(L、I、G 分别表示局部屈曲、组合屈曲、整体屈曲);数字表示采用公式计算的屈曲强度与有限元仿真的屈曲强度的比值。

#### 4.2 2400 型波形钢腹板屈曲强度公式优化

对于建立的 2400 型 CSW 模型,结合有限元仿真得到屈曲强度,对公式中的屈曲系数  $k$  进行拟合,得到的  $k-t$  关系曲线如图 14 所示, $k$  的拟合曲面如图 15 所示。

结合有限元仿真得到局部屈曲强度,对式(1)中的局部屈曲系数  $k_L$  进行拟合。从图 14a 可以看出, $k_L$  随腹板高度的增大而减小,随腹板厚度

的增大而减小。

选择适宜的函数模型对  $k_L$  进行拟合,拟合曲面如图 15a 所示,最终得到 2400 型 CSW 的  $k_L$  拟合公式为:

$$k_{L,2400} = 11 - \frac{11.4}{(1 + e^{2.23-1.76h/w})(1 + e^{-41t/w})} \quad (7)$$

结合有限元仿真得到整体屈曲强度,对式(3)

中的整体屈曲系数  $k_G$  进行拟合。从图 14b 可以看出,  $k_G$  因腹板高度而产生的变化不够显著, 随腹板厚度的增大而减小。

选择适宜的函数模型对  $k_G$  进行拟合, 拟合曲面如图 15b 所示, 最终得到 2400 型 CSW 的  $k_G$  拟合公式为:

$$k_{G,2400} = 10.2h/\omega + 253t/h_r - 0.28(h/\omega)^2 - 455(t/h_r)^2 - 15ht/(\omega h_r) \quad (8)$$

采用式(1)和式(7)计算出局部屈曲强度, 采用式(3)~(5)和式(8)计算出整体屈曲强度, 结合式(6)计算出新的组合屈曲强度, 将其与有限元仿真值对比, 仍存在较大差异。因此需要对式(6)

进行优化, 引入组合屈曲系数  $k_1$ , 提出的优化公式如下:

$$\tau_{cr,1}^e = k_1 \frac{1}{[1/(\tau_{cr,L}^e)^4 + 1/(\tau_{cr,G}^e)^4]^{0.25}} \quad (9)$$

结合有限元仿真得到组合屈曲强度, 对式(9)的组合屈曲系数  $k_1$  进行拟合。从图 14c 可以看出,  $k_1$  因腹板高度而产生的变化不够显著, 近似随腹板厚度的增大而增大。选择适宜的函数模型对  $k_1$  进行拟合, 拟合曲面如图 15c 所示, 最终得到 2400 型 CSW 的  $k_1$  拟合公式为:

$$k_{1,2400} = 1.58 - 0.11h/\omega - 9.5t/h_r + 5.8 \times 10^{-3}(h/\omega)^2 + 78(t/h_r)^2 \quad (10)$$

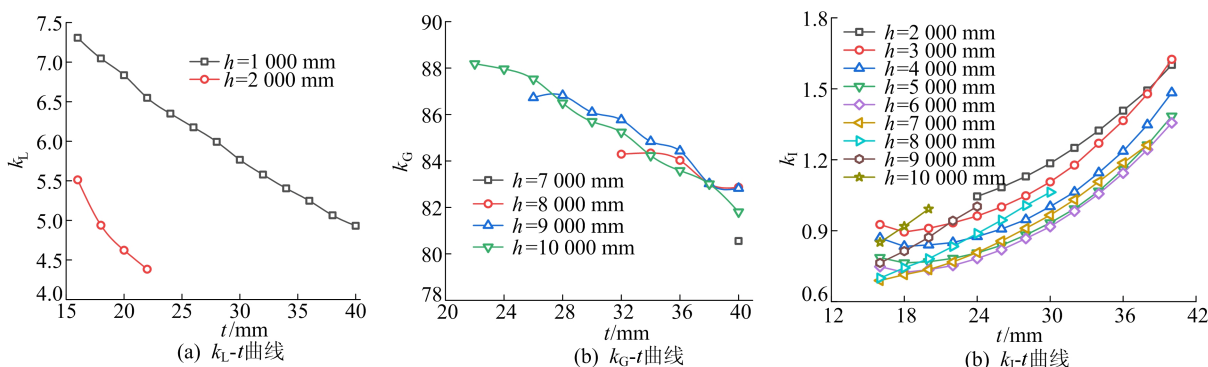


图 14  $k-t$  曲线

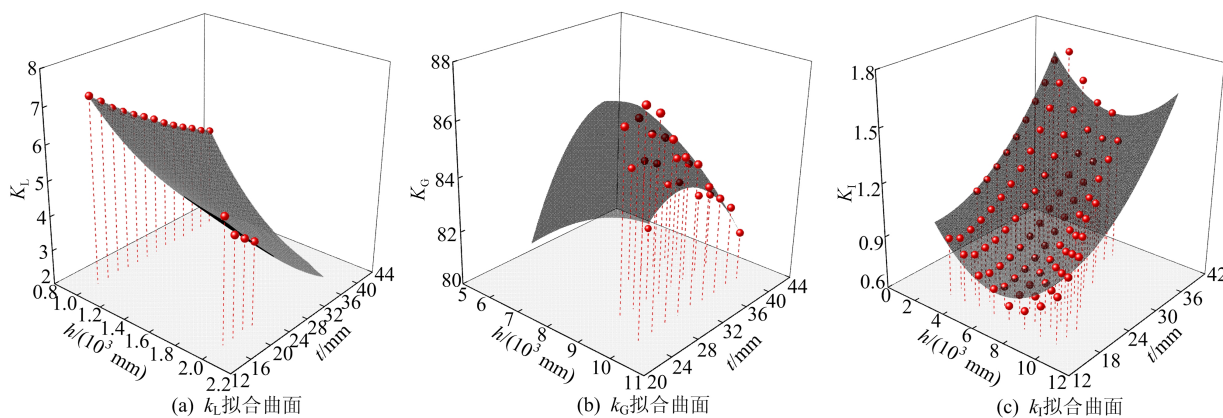


图 15  $k$  的拟合曲面

综上所述, 2400 型 CSW 的局部屈曲、整体屈曲和组合屈曲强度优化公式分别为:

$$\tau_{cr,L}^e = k_{L,2400} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{\omega}\right)^2 \quad (11)$$

$$\tau_{cr,G}^e = k_{G,2400} \frac{(EI_y)^{0.25} (EI_x)^{0.75}}{h^2 t} \quad (12)$$

$$\tau_{cr,1}^e = k_{1,2400} \frac{1}{[1/(\tau_{cr,L}^e)^4 + 1/(\tau_{cr,G}^e)^4]^{0.25}} \quad (13)$$

### 4.3 优化公式验算

因为 1000 型、1200 型、1600 型 CSW 已有明确的弹性屈曲强度公式, 本文弹性屈曲强度优化公式仅适用于 2400 型 CSW, 所以仅建立 9 个 2400 型 CSW 有限元模型来验证优化公式(7)、(8)和式(10)~(13), 结果见表 6 所列。

从表 6 可以看出, 优化公式计算值与有限元仿真值基本一致, 说明本文提出的优化公式具有较高的精度。

表 6 优化公式验证结果

$h/mm$	$t/mm$	屈曲 模态	屈曲强度/MPa		公式值/ 仿真值
			公式值	仿真值	
1 500	20	L	986.17	999.52	0.99
	28	L	1 492.33	1 622.25	0.92
	36	I	2 862.76	2 845.11	1.01
5 500	20	I	642.81	607.96	1.06
	28	I	1 022.66	937.71	1.09
	36	I	1 433.10	1 319.88	1.09
9 500	20	I	528.07	506.84	1.04
	28	G	665.91	658.08	1.01
	36	G	736.62	726.33	1.01

注:L、I、G 分别表示局部屈曲、组合屈曲、整体屈曲。

## 5 结 论

1) 2400 型 CSW 工字梁加载试验结果表明:腹板在受剪状态下,剪应变沿高度方向均匀分布,且随荷载的增大而增大,接近极限荷载后,腹板中上部受集中力影响,剪应变不再呈现均匀性;腹板弹塑性特征较为显著,达到极限荷载后,承载力迅速下降,而底板跨中竖向位移继续增加。

2) 4 种型号 CSW 的极限荷载和屈曲荷载均随腹板厚度的增大而增大,且屈曲荷载均大于极限荷载,剪应变沿腹板高度方向均呈均匀分布;2400 型 CSW 的极限荷载和屈曲荷载分别大于 3 种常规尺寸 CSW。这表明在剪力作用下,2400 型 CSW 具有与常规尺寸 CSW 相似的抗剪规律,而 2400 型 CSW 具有更良好的抗剪承载力和屈曲稳定性。

3) 2400 型 CSW 的几何参数对其剪切屈曲性能产生重要影响:当腹板的高度和厚度均较小时,易发生局部屈曲;当腹板高度较小、厚度较大时,易发生组合屈曲;当腹板高度较大、厚度较小时,易发生组合屈曲;当腹板高度和厚度都较大时,易发生整体屈曲。本文提出的 2400 型 CSW 屈曲强度优化公式经验证精度较高,可为工程设计提供一定的理论参考。

## [参 考 文 献]

[1] 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.

[2] LEBLOUBA M, BARAKAT S, AL-SAADON Z. Shear behavior of corrugated web panels and sensitivity analysis[J].

Journal of Constructional Steel Research, 2018, 151(12): 94-107.

[3] ELDIB M. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(12): 2129-2139.

[4] 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.

[5] LUO R, EDLUND B. Ultimate strength of girders with trapezoidally corrugated webs under patch loading[J]. Thin-Walled Structures, 1996, 24(2): 135-156.

[6] JOHNSON R P, CAFOLLA J. Corrugated webs in plate girders for bridges[J]. Structures & Buildings, 1997, 122(2): 157-164.

[7] YANG Y B, LIN C L, YAU J D, et al. Mechanism of resonance and cancellation for train-induced vibrations on bridges with elastic bearings[J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 269(12): 345-360.

[8] PAPANGELIS J, TRAHAIR N, HANCOCK G. Direct strength method for shear capacity of beams with corrugated webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137(10): 152-160.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 朱力, 蔡建军, 聂建国. 波形钢腹板的弹性剪切屈曲强度[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 40-46, 54.

[12] 聂建国, 唐亮. 基于弹性扭转约束边界的波形钢板整体剪切屈曲分析[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 1-7.

[13] 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.

[14] 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.

[15] JI W, LIU X C. Analysis of the shear buckling strength of variable-section corrugated steel webs[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(8): 2974-2990.

[16] 张峰, 李术才, 李宏江, 等. 波形钢腹板内衬混凝土部位抗剪性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 20-28.

[17] WANG S H, HE J, LIU Q Y. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web: part I: experimental study[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140(7): 248-262.

[18] 李月路. 大尺寸波形钢腹板梁力学性能理论及试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.

[19] 汪勇. 波形钢腹板梁抗剪性能分析与试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

(责任编辑 胡亚敏)