

螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪试验与分析

高立强¹, 袁焕鑫^{2*}, 王奥迪^{1,2}, 何昆松², 杜新喜²

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 武汉 430034; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要: 为研究螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的受剪力学性能, 设计并加工制作了6根螺栓连接梯形波纹腹板钢梁试件, 开展钢梁受剪试验, 试验结果表明所有试件的波纹腹板均发生了剪切屈曲破坏, 并得到了波纹腹板的剪切屈曲临界荷载以及钢梁的受剪承载力指标。在考虑材料非线性、几何非线性以及几何初始缺陷的基础上, 建立了螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的有限元模型, 并与钢梁受剪试验结果进行对比, 验证了所建立有限元模型的准确性。进一步开展有限元参数分析, 探究了波纹腹板高度和厚度、波纹宽度以及螺栓间距对钢梁受剪承载力的影响规律。根据试验数据、76个有限元算例的分析结果, 以及目前关于焊接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力的计算方法, 综合考虑T型钢翼缘的抗剪贡献, 提出了螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力计算公式。

关键词: 梯形波纹腹板钢梁; 受剪性能; 螺栓连接; 剪切屈曲; 试验研究; 有限元分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0054-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230907001

Shear Test and Analysis of Bolted Steel Girders with Trapezoidal Corrugated Webs

GAO Liqiang¹, YUAN Huanxin^{2*}, WANG Aodi^{1,2}, HE Kunsong², DU Xinxi²

(1. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

*Corresponding author: yuanhx@whu.edu.cn

Abstract: To study the shear mechanical properties of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs, a total of six bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs were designed and manufactured. The steel girder specimens were tested under shear loading. The test results show that all the girder specimens experienced shear buckling failure, and the critical shear buckling loads of the corrugated webs and the shear resistances of the tested girder specimens were obtained. Considering the material nonlinearity, geometric nonlinearity and geometric initial imperfections, the finite element model of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs was established, and compared with the shear test results of steel girders, verifying the accuracy of the established finite element model. Parametric studies were further conducted to evaluate the influences of the key factors including corrugated web height and thickness, corrugation width and bolt spacing on the shear capacity of steel girders. Based on the obtained test results, 76 generated numerical results and the existing calculation methods for predicting the shear capacity of welded steel girders with trapezoidal corrugated webs, the modified formulas accounting for the shear contributions from the T-section flange, were proposed for calculating the shear capacity of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs.

收稿日期: 2023-09-13

基金项目: 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室开放课题重点基金项目(BHKL19-03-KF)

作者简介:

高立强(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事桥梁与结构工程方面的研究。E-mail: gaoliqiang@126.com。

通信作者:

袁焕鑫(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高性能金属结构、钢结构腐蚀与防护等方面的研究。E-mail: yuanhx@whu.edu.cn。

Keywords: steel girder with trapezoidal corrugated webs; shear behavior; bolted connection; shear buckling; experimental study; finite element analysis

波纹钢板相比平钢板具有更高的受剪承载力及平面外刚度^[1],可以减轻结构自重、降低经济成本,因此近年来在桥梁、厂房等工程结构中得到了广泛应用。将波纹钢板作为腹板可以充分发挥波纹钢板的受剪力学性能,从而提高钢梁的受剪承载力^[2]。部分学者通过试验和有限元分析对波纹钢板和波纹腹板钢梁开展了受剪机理研究。窦超等^[3]利用有限元方法分析了波折钢板剪力墙体系中内嵌墙板的抗侧性能和承载机制,并提出了设计建议。罗洪光等^[4]运用ANSYS软件分析了梯形波纹腹板钢梁局部弹性剪切屈曲性能;杨洋洋^[5]采用ABAQUS软件建立了梯形波纹腹板H型钢梁的有限元数值模型并分析了其承载力计算方法的适用性;陈勇等^[6]根据能量原理分析了均布荷载作用下波纹腹板H型钢梁腹板的剪切屈曲强度;李国强等^[7]在对波纹腹板H型钢梁的受力分析中提出了波纹腹板局部屈曲和整体屈曲的抗剪承载力计算公式;ELGAALY等^[8]汇总了已有试验结果并开展了波纹腹板钢梁的数值模拟和承载力计算方法研究;LEBLOUBA等^[9-10]完成了12根波纹腹板钢梁的受剪试验,分析了钢梁的受剪性能。

目前波纹腹板钢梁的翼缘与腹板一般采用焊缝连接,焊缝形状取决于波纹腹板的形式,在腹板波折处的焊缝受力较为复杂且受到焊接残余应力的影响,往往会导致焊接波纹腹板钢梁在承受动荷载时存在明显的疲劳问题^[11-13]。因此,本文提出了一种螺栓连接波纹腹板钢梁^[14-15],将波纹腹板和翼缘之间的焊接连接替换为高强度螺栓连接,如图1所示。

课题组针对该类螺栓连接波纹腹板钢梁已经进行了高周疲劳试验研究,结果表明相比于焊接波纹腹板钢梁,其疲劳性能有了明显提升^[16]。同时,翼缘与波纹腹板采用螺栓连接与采用焊接相比,腹板的约束条件及钢梁的整体受力特性存在明显区别,需要开展针对性研究。

因此,设计并加工制作了6根螺栓连接波纹腹板钢梁试件,开展钢梁受剪试验研究,并建立有限元模型进一步分析螺栓连接波纹腹板钢梁的受剪性能及其关键影响

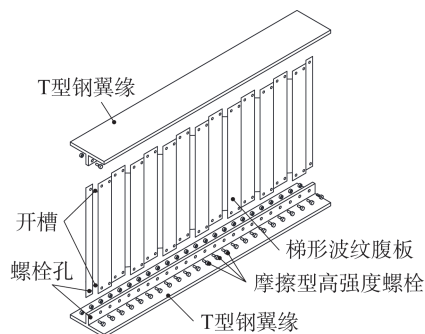


图1 螺栓连接梯形波纹腹板钢梁组成

Fig. 1 Composition of bolted steel girder with trapezoidal corrugated webs

因素;参考现有焊接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力计算方法,并考虑T型钢翼缘的抗剪贡献,提出了该梁的受剪承载力建议计算公式。

1 梯形波纹腹板钢梁受剪试验

1.1 钢梁试件设计

螺栓连接梯形波纹腹板钢梁试件的设计包括3个部分:螺栓连接构造、梯形波纹腹板尺寸和构件整体尺寸。首先为保证腹板全截面屈服时螺栓连接不发生破坏,针对2种不同波形的腹板分别确定螺栓规格和间距:较长波形VS1采用M20螺栓,间距85 mm沿梁长均匀布置;较短波形VS2采用M16螺栓,间距60 mm均匀布置。钢梁的上、下翼缘直接采用热轧T型钢,根据常规热轧T型钢的腹板厚度规格,并考虑腹板对波高的要求,将腹板波高取为20 mm,腹板厚度取为2 mm。在确定钢梁整体尺寸时,为确保试件发生受剪破坏,通过有限元试算确定了较大的腹板区格高宽比。本文共设计了6根钢梁试件,具体尺寸如表1所示,各符号含义如图2所示,包括2种波形和3种腹板高度,实测腹板厚度均为1.81 mm,翼缘厚度均为17.9 mm、宽度为199 mm。表1试件编号中的数值(500、600和700)表示钢梁试件的腹板高度。

表1 试件实测平均几何尺寸

Table 1 Measured average geometric dimensions of specimens

mm

试件编号	梯形波纹尺寸				h_T	h_w	H	$2a$	l_0	L
	b	d	q	s						
VS1-500						496.0	666.0	1 690.0	103.0	1 896.0
VS1-600	145.0	25.0	340.0	364.0	66.0	596.0	765.0	1 692.0	106.0	1 903.0
VS1-700						696.0	863.0	1 696.0	105.0	1 905.0
VS2-500						496.0	663.0	1 426.0	134.0	1 693.0
VS2-600	100.0	20.0	240.0	260.0	61.0	596.0	760.0	1 433.0	131.0	1 694.0
VS2-700						696.0	861.0	1 426.0	133.0	1 693.0

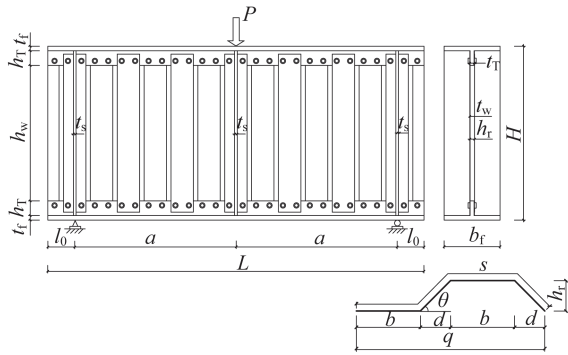


图2 钢梁试件几何形状

Fig. 2 Geometric shape of steel girder specimens

在进行螺栓连接波纹腹板钢梁的拼装之前,需在梯

形波纹腹板的上、下边加工螺栓孔,并在斜板段预先做开槽处理,拼装时将梯形波纹腹板的槽口对准T型钢竖腹板插入,随后安装翼缘和腹板之间的高强度螺栓,且按照《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82—2011)^[17]的要求施加扭矩,达到预定的预拉力值,从而完成钢梁试件的拼装。

根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]的要求,对应钢梁各个部位所用钢材,分别加工3个标准材性试样并完成单调拉伸试验,所得到的材料力学性能指标平均值汇总于表2,其中 E_0 为弹性模量, ν 为泊松比, A 为断后伸长率, σ_y 和 σ_u 分别为材料的屈服强度和抗拉强度, σ_y/σ_u 为屈强比, ϵ_{st} 为屈服平台末端应变。

表2 钢梁试件材料力学性能指标

Table 2 Material properties of steel girder specimens

钢梁部位	E_0/MPa	σ_y/MPa	ϵ_{st}	σ_u/MPa	σ_y/σ_u	ν	$A/\%$
T型钢翼缘	205 700	355.7	0.020 33	506.9	0.70	0.282	28.2
加劲肋	202 600	298.7	0.016 15	486.8	0.61	0.274	31.8
波形腹板	203 700	295.9	0.012 13	390.2	0.76	0.285	39.1

1.2 受剪试验过程

钢梁受剪试验采用三点弯曲加载装置,试验现场布置如图3所示,钢梁左右支座分别采用刀口铰支座和滚动铰支座,钢梁跨中采用2 000 kN电液伺服作动器施加竖向集中荷载,同时为防止钢梁发生面外失稳破坏,在钢梁支座和中部位置均设置面外侧向支撑。试验加载过程中,初始加载方式设置为荷载控制,加载速率为 $5 \text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$,当波纹腹板有明显剪切屈曲变形时,将加载方式调整为位移控制,加载速率为 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。当试件产生过大变形、局部严重破坏不适合继续承载或荷载下降至85%极限荷载时,终止受剪试验。

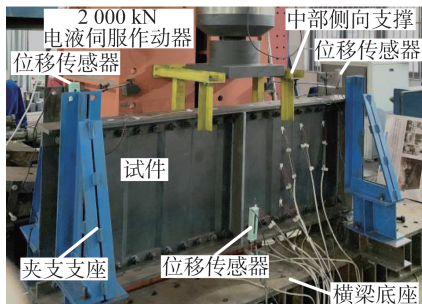


图3 试验装置

Fig. 3 Test setup

每根钢梁试件上共布置19个应变测点,包括12个应变花测点和7个单向应变片测点。试件的测点布置如图

4所示,其中,上翼缘布置4个单向应变片,下翼缘跨中布置1个单向应变片,且均沿梁纵向布置,用于监测翼缘的应变发展;梁端横向加劲肋上共布置2个单向应变片,用于监测横向加劲肋的应变发展;右侧腹板区格前、后对称布置12个应变花测点,用于监测腹板的受剪状态。在钢梁上翼缘两端支座处及下翼缘跨中位置安装3个位移传感器,用于测量钢梁的竖向变形。

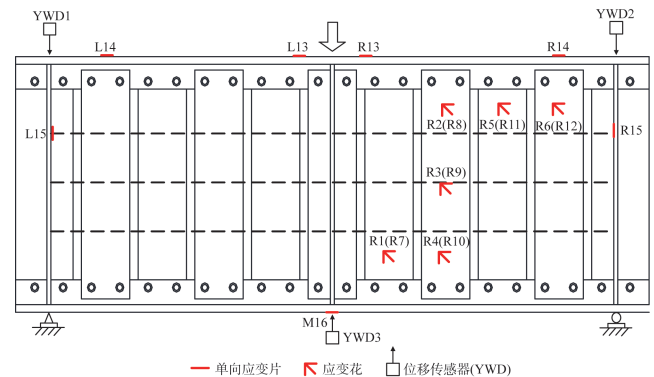


图4 试件测点布置

Fig. 4 Arrangement of measurement points of specimens

2 受剪试验结果分析

2.1 试验现象

试验结果表明6根螺栓连接梯形波纹腹板钢梁试件

的破坏模式均为腹板剪切屈曲破坏,钢梁试件的失效形态如图5所示。梯形波纹腹板在剪切受力作用下的变形主要分为5个过程:局部剪切屈曲、平板段鼓曲变形、斜板段鼓曲变形、平板段和斜板段剪切屈曲贯穿及整个腹板形成面外鼓曲变形。所有钢梁试件的螺栓连接处均未发生明显滑移,表明翼缘与腹板的螺栓连接对梯形波纹腹板构成了可靠约束。由于部分试件的梯形波纹腹板在开槽处进行了打磨以消除毛刺,试件在达到峰值荷载后腹板开槽切口处出现了轻微的局部撕裂,但撕裂口较小,也未导致钢梁的突然失效破坏。

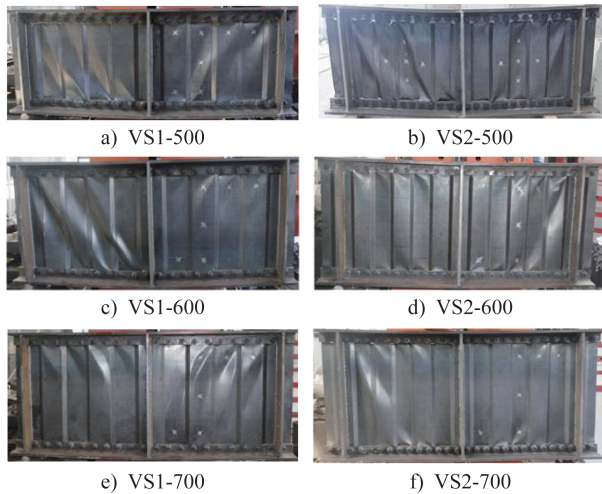


图5 试件失效形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

2.2 钢梁受剪承载力分析

由作动器的荷载 P 除以2得到钢梁截面的剪力 V ,绘制所有钢梁试件的剪力 V 与竖向变形 δ 的关系曲线如图6所示。将受剪试验得到的钢梁试件峰值荷载 $P_{u,T}$ 除以2得到受剪承载力 $V_{u,T}$ 。由试验曲线可知,试件极限受剪承载力随着波纹腹板高度的增加大致呈线性增长趋势。VS2组短波试件的受剪承载力高于VS1组长波试件的受剪承载力,这是由于长波组试件的斜向段子板带设置得更加稀疏,子板带宽度更大,斜向段子板带对水平段子板带的平面外约束能力弱于短波组试件的平面外约束能力。随着荷载变形的持续增加,斜向段子板带的变形也更加显著,更易趋于相互合并,最终形成贯穿整个截面的拉力带。

此外,采用《波纹腹板钢结构技术规程》(CECS 291:2011)^[19]中的公式计算钢梁试件的受剪承载力,翼缘和腹板的屈服强度分别取材性试验的实测值355.7 MPa和295.9 MPa,将受剪承载力计算值 $V_{u,c}$ 与试验结果 $V_{u,T}$ 进行比较,结果如表3所示。由表3结果可知,对于VS1组长波试件,规范公式计算得到的受剪承载力均低于试验结果,3根钢梁试件 $V_{u,c}/V_{u,T}$ 的平均值为0.76,表明规范计算公式可以保守地预测VS1组长波试件的受剪承载力;而对于VS2组短波试件,规范公式计算得到的受剪承

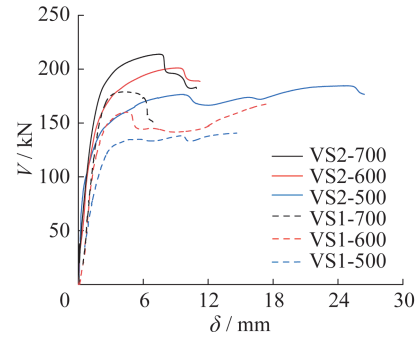


图6 钢梁试件剪力-竖向变形曲线

Fig. 6 Shear force-vertical deformation curves of steel girder specimens

载力普遍高于试验结果,3根钢梁试件 $V_{u,c}/V_{u,T}$ 的平均值为1.02,表明规范计算公式偏于不安全。

表3 钢梁试件受剪承载力的试验与计算结果

Table 3 Experimental and calculation results of shear capacity of steel girder specimens

试件编号	$V_{u,T}/$ kN	$V_{u,c}/$ kN	$V_{u,c}/$ $V_{u,T}$	$V_{cr,T}/$ kN	$\tau_{cr,T}/$ MPa	$\tau_{cr,c}/$ MPa	$\tau_{cr,c}/$ $\tau_{cr,T}$
VS1-500	135.7	101.42	0.75	65.2	72.8	72.7	1.00
VS1-600	160.8	121.11	0.75	96.4	89.3	88.9	1.00
VS1-700	179.7	139.81	0.78	140.4	112.1	109.8	0.98
VS2-500	176.6	170.17	0.96	80.6	89.9	89.8	1.00
VS2-600	201.2	203.06	1.01	98.2	91.7	91.3	1.00
VS2-700	213.9	235.51	1.10	116.3	93.0	91.9	0.99

经计算可以得到腹板两侧对称测点R1和R7的主拉应变和主压应变。图7为试件VS1-500的荷载-表面主应变曲线,梯形波纹腹板受剪屈曲时会发生侧向鼓曲变形,导致屈曲点凸面的主压应变 ϵ_p 达到最大值,随着荷载的增加, ϵ_p 逐渐减小,最终转变为拉应变。 ϵ_p 最大值对应的点被称为主压应变反转点,此时该点对应的荷载被定义为剪切屈曲荷载^[20]。

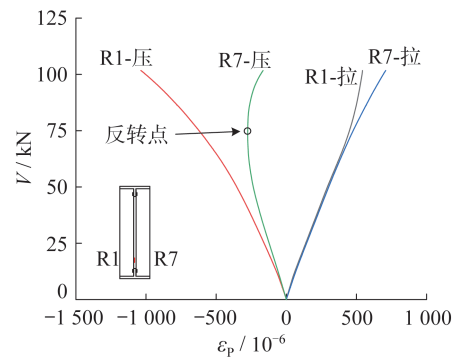


图7 试件VS1-500剪力-表面主应变曲线

Fig. 7 Shear force-principal strain curves of specimen VS1-500

由临界剪切屈曲荷载 $V_{cr,T}$ 计算得到临界剪切屈曲应力 $\tau_{cr,T}$, 计算公式如式(1)所示。采用聂建国等^[21]提出的计算公式也可得到临界剪切屈曲应力计算值 $\tau_{cr,c}$, 试验和计算结果汇总于表3。由表3可以看出, $\tau_{cr,c}/\tau_{cr,T}$ 的平均值为0.99, 均方差为0.01, 表明试验获得的临界剪切屈曲应力与现有公式计算值吻合良好。

$$\tau_{cr,T} = \frac{V_{cr,T}}{h_w t_w} \quad (1)$$

式中: h_w 和 t_w 分别为腹板高度和厚度。

3 钢梁受剪性能有限元分析

3.1 有限元模型建立及验证

采用ABAQUS软件建立螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的精细化有限元模型, 用于模拟该钢梁的剪切屈曲行为。模型的边界条件如图8a)所示, 支座两端简支, 在跨中施加竖向位移荷载, 约束支座及跨中的平面外自由度, 防止其发生平面外位移。单元类型及网格尺寸如下: 由于梯形波纹腹板、T型钢翼缘和加劲肋的厚度远小于板件宽度和长度方向的尺寸, 因此采用壳单元S4R模拟, 网格尺寸分别为7.5 mm、10 mm和15 mm。高强度螺栓参考文献[16]中的建模方法, 采用梁单元B31模拟, 每个螺栓网格均划分为9个单元。按照上述网格划分规则, 以试件VS1-500为例, 其单元总数为28 559个。考虑到螺栓连接可能存在的应力集中现象, 开展模型网格尺寸收敛性分析。将有限元模型原定网格尺寸减半, 并将网格细化处理后与处理前的模型计算结果进行对比, 发现二者最大误差在2.4%之内, 表明以上网格尺寸可以兼顾计算精度和效率。

将名义应力-应变曲线转换为真实应力-塑性应变曲线后, 利用拉伸试验得到的材料属性定义各部分的本构关系。所有螺栓无论是在终拧后还是在整个数值模拟过程中都处于弹性阶段, 在实际试验过程中未发生破坏。因此, 参照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[22], 将高强螺栓的应力-应变关系设定为双线性关系, 高强螺栓的屈服强度 σ_y 取900 MPa, 弹性模量 $E_0=206$ GPa, 泊松比 $\nu=0.3$ 。螺栓预拉力通过 Bolt Load 功能施加在梁单元中。有限元模型中的接触关系如图8b)所示, 与螺栓接触的区域均采用多点约束, 切向设置为抗滑移系数为0.3的库伦摩擦, 法向设置为硬接触; 梯形波纹腹板、T型钢翼缘和加劲肋之间的接触均采用绑定(Tie)约束。参考HASSANEIN等^[23]的方法考虑腹板几何初始缺陷的影响: 首先, 通过特征值屈曲分析获得1阶屈曲模态和特征值; 其次, 在第2个分析步将所得的1阶屈曲模态乘以 $h_w/200$ 作为初始缺陷引入模型。

将螺栓连接波纹腹板钢梁有限元模型的数值预测结果与试验结果进行对比。通过比较荷载-跨中竖向位移曲线来评估有限元模型的准确性。试件VS1-500和

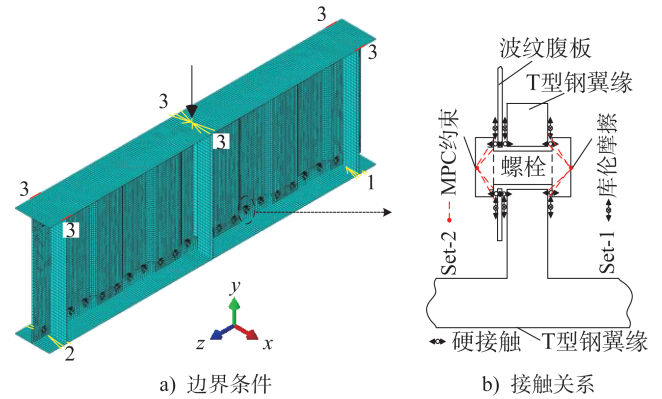


图8 有限元模型的边界条件和接触关系

Fig. 8 Boundary conditions and contact relationships of FEM

VS1-700的典型荷载-位移曲线如图9所示, 可以看出有限元模拟曲线与试验曲线吻合良好。

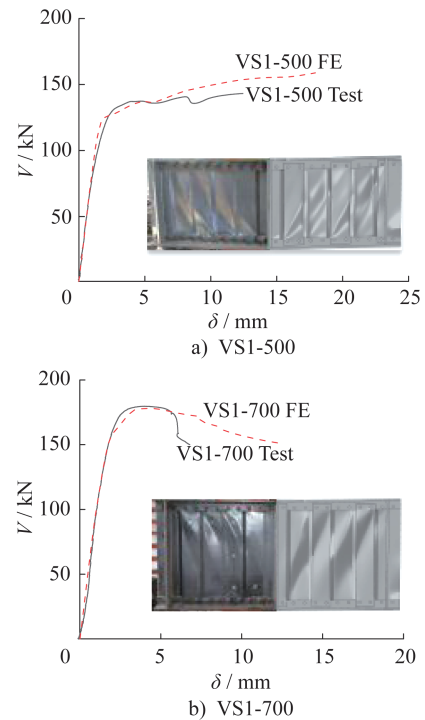


图9 试件剪力-竖向变形曲线与破坏形态的对比

Fig. 9 Comparison of shear force-vertical deformation curves and failure modes of specimens

表4给出了每个试件的受剪承载力 V_u 及相应位移 δ_u 的有限元模拟值与试验值的对比。由对比结果可知, 有限元计算得到的受剪承载力与试验结果比值的平均为1.01, 标准差为0.04; 相应位移之比平均值为0.67, 标准差为0.34。同时, 有限元模拟的钢梁的剪力-竖向变形曲线、破坏形态和受剪承载力与试验结果吻合良好, 表明所建立的数值模型能准确模拟螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的受剪性能。

表4 有限元模拟结果与受剪试验结果对比

Table 4 Comparison between FE simulation and shear test results

试件编号	试验结果		有限元结果		$\frac{V_{u,FE}}{V_{u,T}}$	$\frac{\delta_{u,FE}}{\delta_{u,T}}$
	$V_{u,T}/\text{kN}$	$\delta_{u,T}/\text{mm}$	$V_{u,FE}/\text{kN}$	$\delta_{u,FE}/\text{mm}$		
VS1-500	135.6	5.23	135.6	5.52	1.00	1.06
VS1-600	160.8	4.06	168.2	2.19	1.05	0.54
VS1-700	179.7	3.86	178.0	4.26	0.99	1.10
VS2-500	176.6	9.59	184.6	4.97	1.05	0.52
VS2-600	201.2	9.06	192.6	2.10	0.96	0.23
VS2-700	213.9	6.86	210.3	3.79	0.98	0.55

3.2 参数分析

利用验证准确的数值模型开展参数分析,所采用的标准模型为试件 VS1-500 的全模型,其参数为 $h_w=500\text{ mm}$ 、 $t_w=2.0\text{ mm}$ 、 $b=100\text{ mm}$ 、 $d=25\text{ mm}$ 、 $q=240\text{ mm}$ 、 $s=260\text{ mm}$ 、 $h_r=20\text{ mm}$ 。采用控制变量法探究腹板高度 h_w (500~1 200 mm)、腹板厚度 t_w (1.0~3.0 mm)、波纹宽度 b (92~132 mm) 及螺栓间距对波纹腹板钢梁受剪承载力的影响。

钢材本构模型选择屈服强度为 345 MPa、考虑弹塑性硬化的三折线本构模型 ($\sigma_1^T=345.6\text{ MPa}$ 、 $\epsilon_{p1}=0$; $\sigma_2^T=410.0\text{ MPa}$ 、 $\epsilon_{p2}=0.008\ 5$; $\sigma_3^T=537.0\text{ MPa}$ 、 $\epsilon_{p3}=0.142\ 7$)、 E_0 取 206 GPa,泊松比 ν 取 0.3。

首先选取 8 种不同的波纹腹板高度 h_w : 500 mm、600 mm、700 mm、800 mm、900 mm、1 000 mm、1 100 mm 和 1 200 mm,以研究腹板高度的影响。开展特征值屈曲分析可以得到相应的弹性剪切屈曲应力 τ_{el} 和剪切屈曲模态,结果表明所有钢梁模型的腹板均发生局部屈曲。通过 τ_{el} 可以准确判断梯形波纹腹板受剪稳定承载力的高低。有限元分析得到的 τ_{el} - h_w/t_w 曲线如图 10 所示,可以看出当腹板高厚比从 250 增加至 600 时,弹性剪切屈曲应力下降了 36%。

波纹腹板厚度分别设为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm 和 3.0 mm,建立钢梁有限元模型。进行特征值屈曲分析可得到不同的屈曲模态,如图 11 所示。可以看出当腹板厚度为 3.0 mm 时,与厚度为 1.5 mm 相比,腹板屈曲的范围明显增大,且屈曲模态从局部剪切屈曲转变为跨子板带剪切屈曲。图 12 给出了有限元分析得到的 V - δ 曲线,可以看出随着腹板厚度的增加,钢梁的受剪承载力和刚度显著增大。

为减小钢梁翼缘和腹板连接螺栓孔处的应力集中效应,螺栓一般采用等间距排布,而改变波纹宽度 b 会直接影响波形疏密程度,从而导致螺栓排列间距发生变化。在

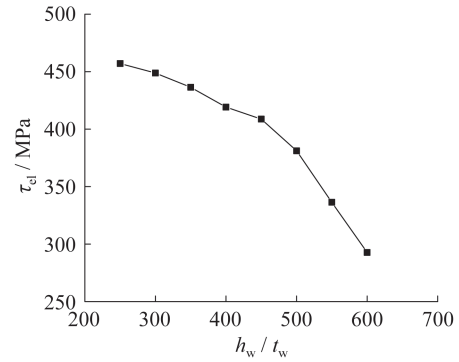


图 10 不同腹板高厚比钢梁的 τ_{el} 计算值 ($t_w=2.0\text{ mm}$)
Fig. 10 Calculated results of τ_{el} of steel girders with different web height to thickness ratios ($t_w=2.0\text{ mm}$)

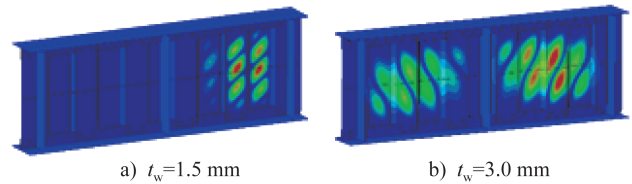


图 11 腹板厚度为 1.5 mm 和 3.0 mm 时钢梁屈曲模态对比

Fig. 11 Comparison of buckling modes of steel girders with web thicknesses of 1.5 mm and 3.0 mm

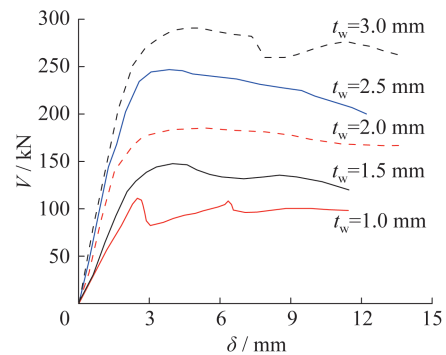


图 12 不同腹板厚度钢梁的剪力-竖向变形曲线
Fig. 12 Shear force-vertial deformation curves of steel girders with different web thicknesses

GB 50017—2017^[22] 允许的螺栓排列间距范围内取波纹宽度 b 为 92 mm、100 mm、110 mm、120 mm 和 132 mm,相应的螺栓排列间距为 56.0 mm、60.0 mm、64.6 mm、70.0 mm 和 76.4 mm。有限元分析得到的钢梁模型 V - δ 曲线如图 13 所示,可以看出随着波纹宽度的增加,钢梁的受剪承载力逐渐降低,刚度也略有下降,因此应通过合理设计来确定波纹宽度和螺栓排列间距。应保证在波纹腹板全截面屈服时螺栓连接不产生滑移,由此确定螺栓规格及排列间距,再基于单个平直板段内设置的螺栓数量 (1~2 个) 和 JGJ 82—2011^[17] 要求的螺栓排列间距确定尽可能小的波纹宽度 b ,以充分发挥波纹腹板的“褶皱”效应。

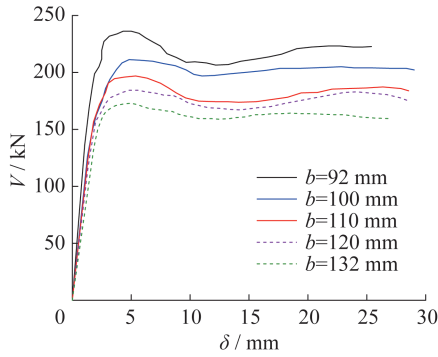


图13 不同波纹宽度及螺栓间距的钢梁
剪力-竖向变形曲线

Fig. 13 Shear force-vertical deformation curves of steel girders with different corrugation widths and bolt spacings

4 钢梁受剪承载力计算方法

基于本文试验和有限元分析结果,分别考虑了欧洲规范 EN 1993-1-5^[24]、中国规范《波纹腹板钢结构应用技术规程》(CECS 291:2011)^[19]及文献[21]中波纹腹板钢梁的受剪承载力计算方法,并在此基础上,提出了考虑T型钢翼缘抗剪贡献的螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力计算公式。

4.1 欧洲规范 EN 1993-1-5 公式

欧洲规范 EN 1993-1-5^[24]中规定的梯形波纹腹板钢梁的剪切强度计算公式为:

$$V_{Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} h_w t_w \quad (2)$$

式中: χ_c 为折减系数,取局部屈曲折减系数 $\chi_{c,1}$ 和整体屈曲折减系数 $\chi_{c,g}$ 中的较小值,即 $\chi_c = \min(\chi_{c,1}, \chi_{c,g})$; f_{yw} 为腹板的屈服强度; γ_{M1} 为分项系数。

局部屈曲折减系数 $\chi_{c,1}$ 的计算公式如式(3)所示。

$$\chi_{c,1} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{\lambda}_{c,1}} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{c,1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_{cr,1}}} \quad (4)$$

$$\tau_{cr,1} = 4.83 E_0 \left(t_w / a_{\max} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $a_{\max} = \max(b, d \sec \theta)$ 。

整体屈曲折减系数 $\chi_{c,g}$ 的计算公式如式(6)所示。

$$\chi_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (6)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_{cr,g}}} \quad (7)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt{D_x D_z^3} \quad (8)$$

$$D_x = \frac{E_0 t_w^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{l_b}{l_s} \quad (9)$$

$$D_z = \frac{E_0 I_z}{l_b} \quad (10)$$

式中: $l_b = b + d$,为半波的长度; l_s 为半波的展开长度; I_z 表示长度为 l_b 的波纹面积的二阶矩; E_0 为弹性模量; f_y 为钢材的屈服强度; ν 为弹性阶段泊松比。

4.2 中国规范 CECS 291:2011 公式

《波纹腹板钢结构应用技术规程》(CECS 291:2011)^[19]规定焊接梯形波纹腹板钢梁的受剪承载力全部由腹板承担,计算公式为:

$$V = \tau_{cr} h_w t_w \quad (11)$$

式中: τ_{cr} 为板件受剪强度,在腹板发生局部剪切屈曲和整体剪切屈曲两种情况下分别按式(12)和(13)计算。

$$\tau_{cr,L} = k_L \frac{\pi^2 E_0}{12(1-\nu^2) (\omega/t_w)} \quad (12)$$

$$\tau_{cr,G} = k_G \frac{D_x^{0.25} D_y^{0.75}}{t_w h_w^2} \quad (13)$$

$$D_x = q E_0 t_w^3 / (12s) \quad (14)$$

$$D_y = E_0 I_y / q \quad (15)$$

式中: $\tau_{cr,L}$ 和 $\tau_{cr,G}$ 分别为弹性局部剪切屈曲应力和弹性整体剪切屈曲应力, τ_{cr} 取二者中的较小值; q 为波长; s 为单波展开后长度; $\omega = \max(b, d \sec \theta)$,为水平段和斜向段较宽子板带的宽度; k_L 、 k_G 分别为腹板局部剪切屈曲和整体剪切屈曲所对应的剪切屈曲系数, k_L 取5.34, k_G 取31.6; I_y 为截面对 y 轴的惯性矩。

4.3 聂建国等^[21]计算公式

聂建国等^[21]认为波形钢腹板抗剪强度计算公式可以采用标准化抗剪强度 ρ 和剪切屈曲长细比 λ_s 的关系曲线形式表示。 ρ 和 λ_s 分别根据式(16)和(17)计算。

$$\rho = \tau_{cr} / \tau_y \quad (16)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\tau_y / \tau_{el}} \quad (17)$$

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} \quad (18)$$

式中: τ_y 为波纹钢腹板的剪切屈服强度; τ_{el} 为修正后的钢梁弹性剪切屈曲应力。

4.4 建议公式

汇总了6个试验和76个有限元算例的数据点,并将其与欧洲规范 EN 1993-1-5^[24]、CECS 291:2011^[19]及聂建国等^[21]给出的受剪承载力公式计算结果进行比较,如图14所示。可以看出:当 $\lambda_s < 0.6$ 时,试验和有限元数据点均高于各条曲线;当 $\lambda_s > 1.2$ 时,由于螺栓连接导致梯形波纹腹板的斜向段和T型钢翼缘的连接约束不足,受剪承载力有所降低,相关的数据点低于各条曲线,表明公式计算结果偏

于不安全。因此,在综合以上分析的基础上,提出螺栓连接梯形波纹腹板的剪切系数 ρ - λ_s 建议表达式:

$$\rho = \begin{cases} 1 & \lambda_s \leq 0.6 \\ 1.9 - 1.8\lambda_s + 0.5\lambda_s^2 & 0.6 < \lambda_s \leq \sqrt{2} \\ 0.71/\lambda_s^2 & \lambda_s > \sqrt{2} \end{cases} \quad (19)$$

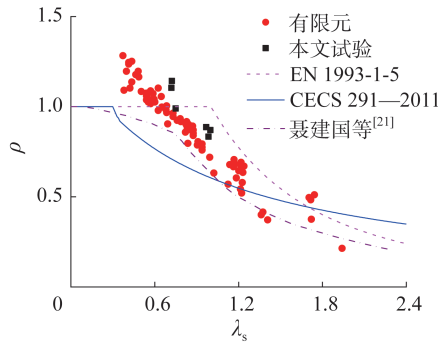


图14 螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力对比

Fig. 14 Comparison of shear capacity of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs

同时,螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的翼缘承担部分剪力,有限元分析表明T型钢竖腹板承担了15%的剪切承载力。因此需要考虑T型钢翼缘竖腹板的受剪贡献,相关建议计算公式如式(20)~(22)所示,其中将 $1.18V_{bw}$ 作为螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力的计算上限。

$$V_u = V_{bw} + V_{bf} \leq 1.18V_{bw} \quad (20)$$

$$V_{bw} = \tau_{cr} h_w t_w \quad (21)$$

$$V_{bf} = \tau_y h_f t_f \quad (22)$$

式中: V_u 为钢梁受剪承载力; V_{bw} 为腹板受剪承载力; V_{bf} 为T型钢翼缘受剪承载力; τ_y 为钢材抗剪强度; h_f 和 t_f 分别为T型钢竖腹板的高度和厚度。

以上建议公式计算结果与汇总的试验和有限元数据点的对比如图15所示,可以看出试验和有限元数据点均略高于建议公式曲线,表明建议公式可以较为准确地计算螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的受剪承载力。

5 结论

(1) 开展了6根螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的剪切屈曲试验,各试件均呈现出明显的剪切屈曲破坏特征,得到了钢梁的受剪承载力、腹板剪切屈曲应力及临界剪切屈曲荷载。

(2) 建立了螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的数值模型,模拟了钢梁受剪的全过程,并基于试验结果验证了该数值模型的准确性。

(3) 基于验证准确的有限元模型,对螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的受剪性能进行了参数分析,结果表明增大波纹腹板的高度和厚度可显著提高其受剪承载力,改变波纹宽度和螺栓排列间距对其受剪承载力也有一定

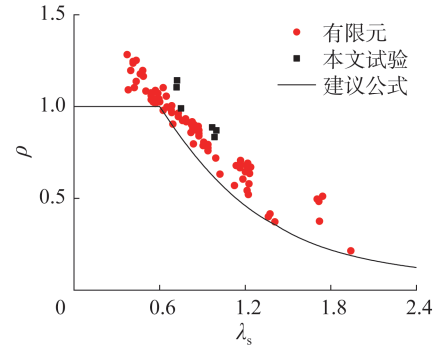


图15 受剪承载力的试验值、有限元值及建议公式计算值的对比

Fig. 15 Comparison of shear capacity between test, finite element analysis and recommended formula calculation results

影响。

(4) 基于受剪试验和有限元分析结果,对现有焊接形波纹腹板钢梁受剪承载力计算方法进行了分析,结合螺栓连接形式的特点以及T型钢翼缘的受剪贡献,提出了螺栓连接梯形波纹腹板钢梁的受剪承载力计算方法。

参考文献:

- [1] 徐强,万水.波形钢腹板PC组合箱梁桥设计与应用[M].北京:人民交通出版社,2009:1-5.
XU Qiang, WAN Shui. Design and application of PC composite box girder bridge with corrugated steel webs[M]. Beijing:China Communications Press,2009:1-5.(in Chinese)
- [2] 钟继卫,袁焕鑫,王奥迪,等.螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪承载力有限元分析[C]//第30届全国结构工程学术会议论文集(第三册).北京:《工程力学》杂志社,2021:149-156.
ZHONG Jiwei, YUAN Huanxin, WANG Aodi, et al. FE analysis on shear behavior of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs [C]//Proceedings of the 30th National Conference of Structural Engineering (No. III). Beijing:Engineering Mechanics Magazine, 2021:149-156. (in Chinese)
- [3] 窦超,朱仰泽,解程,等.梯形波折钢板剪力墙内嵌墙板抗侧性能研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(9):982-990.DOI:10.11784/tdxbz202005027.
DOU Chao, ZHU Yangze, XIE Cheng, et al. Lateral resistance behavior analysis of shear panels in trapezoidal corrugated steel shear walls[J].Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54 (9) : 982-990. DOI: 10.11784/tdxbz202005027.(in Chinese)
- [4] 罗洪光,蔡诚秀,张婵韬.梯形波纹腹板钢梁弹性局部剪切屈曲计算分析[J].建筑科学,2019,35(1):38-44.DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.01.007.
LUO Hongguang, CAI Chengxiu, ZHANG Chantao. Calculation analysis of local elastic shear buckling of steel

- girders with trapezoidal corrugated webs[J].Building Science, 2019, 35(1): 38-44. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.01.007.(in Chinese)
- [5] 杨洋洋. 梯形波纹腹板 H 型钢梁的力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
YANG Yangyang. Study on bearing capacity of the H-beams with corrugated webs [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 陈勇, 张春玉, 范伟. 波纹腹板 H 型钢梁的腹板受力分析[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(11): 43-44. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6864.2009.11.017.
CHEN Yong, ZHANG Chunyu, FAN Wei. Elastave bucking of whole-corrugate web H-beam [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 31(11): 43-44. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6864.2009.11.017. (in Chinese)
- [7] 李国强, 张哲, 孙飞飞. 波纹腹板 H 型钢梁抗剪承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 709-714.
LI Guoqiang, ZHANG Zhe, SUN Feifei. Shear strength of H-beam with corrugated webs [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(6): 709-714. (in Chinese)
- [8] ELGAALY M, HAMILTON R W, SESHADRI A. Shear strength of beams with corrugated webs[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 390-398. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(390).
- [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. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.002.
- [10] LEBLOUBA M, BARAKAT S, ALTOUBAT S, et al. Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 136: 75-90. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.05.007.
- [11] 李国强, 罗小丰, 孙飞飞, 等. 波纹腹板焊接 H 形钢疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 96-103. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.01.015.
LI Guoqiang, LUO Xiaofeng, SUN Feifei, et al. Experimental investigation on fatigue performance of welded H-beam with corrugated webs [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(1): 96-103. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.01.015. (in Chinese)
- [12] XU J, SUN H H, CAI S Y, et al. Fatigue testing and analysis of I-girders with trapezoidal corrugated webs[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109344.
- [13] 徐忠根, 郭轩, 邓长根. 波纹腹板 H 形钢吊车梁疲劳寿命有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(2): 88-94. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.02.010.
XU Zhonggen, GUO Xuan, DENG Changgen. Finite element analysis on fatigue life of a corrugated web H-shaped steel crane beam [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(2): 88-94. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.02.010. (in Chinese)
- [14] 高立强, 袁焕鑫, 王敏, 等. 一种开槽内嵌式波纹腹板钢梁及其系统: CN115262366A[P]. 2022-11-01.
GAO Liqiang, YUAN Huanxin, WANG Min, et al. A kind of slotted and embedded corrugated web steel beam and its system: CN115262366A[P]. 2022-11-01. (in Chinese)
- [15] 袁焕鑫, 杜新喜, 王奥迪, 等. 一种螺栓连接波纹腹板组合梁: CN112853924A[P]. 2021-05-28.
YUAN Huanxin, DU Xinxi, WANG Aodi, et al. A kind of steel beams with corrugated webs fabricated by bolted connections: CN112853924A[P]. 2021-05-28. (in Chinese)
- [16] 袁焕鑫, 李晗, 高立强, 等. 螺栓连接波纹腹板钢梁疲劳性能试验与分析[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(1): 86-93. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.01.009.
YUAN Huanxin, LI Han, GAO Liqiang, et al. Experimental and numerical analysis on the fatigue performance of bolted steel beams with corrugated webs [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(1): 86-93. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.01.009. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for High Strength Bolt Connections of Steel Structures: JGJ 82—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [19] 中国工程建设标准化协会. 波纹腹板钢结构技术规程: CECS 291:2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Steel Structures with Corrugated Webs: CECS 291:2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [20] VANN W P, SEHESTED J. Experimental techniques for plate buckling[C]//Proceedings of the 2nd Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Rolla: University of Missouri, 1973.
- [21] 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. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2013.06.005.
NIE Jianguo, ZHU Li, TANG Liang. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 97-109. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2013.06.005. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质

- 量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.(in Chinese)
- [23] HASSANEIN M F, KHAROUB O F. Shear buckling behavior of tapered bridge girders with steel corrugated webs [J]. Engineering Structures, 2014, 74: 157-169. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.021.
- [24] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1.5:Plated Structural Elements:EN 1993-1-5[S]. Brussels:European Committee for Standardization, 2006.

(上接第53页)

- [12] 周磊. 浅谈多功能模块化的电缆支架的研制和开发[J]. 中国设备工程, 2022(8): 98-99. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.08.060.
- ZHOU Lei. Research and development of multifunctional modular cable support[J]. China Plant Engineering, 2022(8): 98-99. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.08.060.(in Chinese)
- [13] 吴雪峰, 高川, 郑晓明. 老旧变电站电缆沟支架更换实施方案探讨[J]. 浙江电力, 2012, 31(6): 63-65. DOI: 10.19585/j.zjdl.2012.06.019.
- WU Xuefeng, GAO Chuan, ZHENG Xiaoming. Exploration on replacement schemes of cable trench supports in old substations[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(6): 63-65. DOI: 10.19585/j.zjdl.2012.06.019.(in Chinese)
- [14] 范龙. 基于 ANSYS 的复合材料电缆支架的仿真分析[J]. 河北电力技术, 2015, 34(1): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9898.2015.01.006.
- FAN Long. Simulated analysis of composite cable support based on ANSYS[J]. Hebei Electric Power, 2015, 34(1): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9898.2015.01.006.(in Chinese)
- [15] PAPANAGIOTIS J P, TRAHAI R N S. Flexural-torsional buckling tests on arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7): 1433-1443. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:7(1433).
- [16] EARLS C J. On single angle major axis flexure[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 51(2): 81-97. DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00023-1.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.(in Chinese)
- [18] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 6版. 北京:科学出版社, 2014:75-111.
- CHEN Ji. Stability of steel structures theory and design[M]. 6th ed. Beijing: Science Press, 2014:75-111.(in Chinese)
- [19] 吴勋. 电力隧道新型内支架力学分析及应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- WU Xun. Mechanical analysis and application of new type internal bracket in power tunnel[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.(in Chinese)
- [20] 盛桂琳, 胡鹏辉, 杜文凤, 等. 新型装配式管廊支架体系及受力性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 46-53, 7. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2023.03.007.
- SHENG Guilin, HU Penghui, DU Wenfeng, et al. Analysis of new type prefabricated pipe gallery support system and its mechanical performance [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 44(3): 46-53, 7. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2023.03.007.(in Chinese)
- [21] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 361-392.
- ZENG Pan. Finite element analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 361-392.(in Chinese)