

节段拼装变截面波形钢腹板连续组合箱梁的剪切性能 试验研究

赵品^{1,2,3}, 邵旭东^{3†}, 荣学亮^{1,2}, 刘鑫⁴

[1. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

4. 河北自贸区汉曹铁路有限公司, 河北 唐山 063200]

摘要:为了研究节段预制拼装波形钢腹板连续组合箱梁的抗剪性能,制作两片缩尺试验梁,包括节段拼装变截面波形钢腹板连续箱梁和相同尺寸的整体浇筑变截面波形钢腹板连续箱梁.通过静力试验和数值分析,得到了节段拼装梁的剪应力分布规律、波形钢腹板承剪比例等.结果表明:在中跨对称加载作用下,中跨 1/4 位置处节段拼装梁与整体梁波形钢腹板的剪应力沿梁高方向均匀分布,节段拼装梁的剪应力值要大于整体梁的相应值.推导出节段拼装变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力计算公式,并考虑施工工艺对剪应力的影响,通过与实测值对比验证公式的准确性.两片试验梁的波形钢腹板的承剪比受荷载影响较小,保持一个恒定的比例;两片试验梁在中支座位置处的钢腹板承剪比均为 50%,并沿着试验梁纵向方向向两侧不断增大;在中跨 1/4 位置,节段拼装梁钢腹板的承剪比达到 85% 以上,整体梁的钢腹板在该位置的承剪比在 75% 左右,两片试验梁在边跨相应位置承剪比相差不大.将适用于节段拼装混凝土箱梁的 AASHTO 接缝抗剪强度计算公式乘 0.9 可用于接缝截面抗剪承载力计算;上述公式值与试验值、有限元结果的误差在 5% 左右,可以较好地预测钢混组合结构胶接缝的抗剪强度.

关键词:桥梁工程;节段拼装;剪切性能;室内试验;变截面;波形钢腹板;抗剪承载力

中图分类号:U442

文献标志码:A

Experimental Study on Shear Performance of Segmental Assembly Continuous Composite Box Girder with Variable Cross-section Corrugated Steel Webs

ZHAO Pin^{1,2,3}, SHAO Xudong^{3†}, RONG Xueliang^{1,2}, LIU Xin⁴

[1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

4. Hebei Free Trade Zone Hanco Railway Co., Ltd, Tangshan 063200, China]

* 收稿日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578229), National Natural Science Foundation of China (51578229);京津冀协同创新共同体建设专项(20547601D), Beijing-Tianjin-Hebei Cooperative Innovation Community Construction Project (20547601D)

作者简介:赵品(1982—),女,河北石家庄人,石家庄铁道大学讲师,湖南大学博士后

† 通信联系人, E-mail: shaofd@hnu.edu.cn

Abstract: To study the shear performance of segmental prefabricated continuous composite box girder with corrugated steel webs, two scaled test beams were made, including segmental continuous box girder with variable section corrugated steel webs and monolithic continuous box girder with variable section corrugated steel webs in the same size. Through static tests and numerical analyses, the distribution of shear stress and shear ratio of corrugated steel webs are obtained. The results show that the shear stress of the corrugated steel webs of the segmental and monolithic beams at 1/4 of the mid-span is evenly distributed along the beam height, and the shear stress value of the segmental beams is greater than that of the monolithic beams. The calculation formula of shear stress of segmental assembly box girder with variable section corrugated steel webs is derived, and the effect of construction technology on shear stress is considered. The shear ratio of corrugated steel webs of two test beams is less affected by the load and maintains a constant ratio. The shear ratio of the steel web of the two test beams at the position of the middle support is about 50%, and increases along the longitudinal direction of the test beam to both sides. At the position of 1/4 of the middle span, the shear ratio of the steel web of the segment-assembled beam reaches more than 85%, and the shear ratio of the steel web of the whole beam is about 75%. The shear ratio of the two testing beams at the corresponding position of the side span is not much different. The shear strength calculation formula of the AASHTO joint applicable to segmental concrete box girder multiplied by 0.9 can be applied to the calculation of the shear bearing capacity of the joint section. The error between the above formula value and the experimental value as well as with the finite element result is about 5%. It can better predict the shear strength of steel-concrete composite structure adhesive joints.

Key words: bridge engineering; segmental assembly; shear performance; laboratory test; variable cross-section; corrugated steel webs; shear resistance

波形钢腹板组合桥梁以其自重轻、预应力效果好、抗震性能好、节约材料、造型美观等优点在国内被广泛应用^[1-3]。该桥型采用波形钢腹板代替混凝土腹板,有效地解决了腹板开裂问题,且波形钢腹板适合工厂批量制造,更适合节段预制拼装的施工工艺。节段预制波形钢腹板组合桥梁与传统桥梁相比,明显提升施工速度,减少模板用量、降低造价,可见节段预制波形钢腹板桥梁在未来桥梁建设中具有广阔的前景。

国外关于波形钢腹板的力学性能研究较早,但主要对波形钢腹板的剪切性能和屈曲模式进行分析^[4-5]。Moon等^[6]通过试验与有限元模型确定屈曲参数的取值,并提出了波形钢腹板抗剪强度计算公式。国内学者对于节段拼装梁进行了大量的研究,较为全面地掌握了节段拼装梁的力学特性。刘钊等^[7]对一片48 m的节段预制拼装箱梁的足尺试验梁进行静力试验,结果表明节段拼装梁的整体性较好,基本符合平截面假定。袁爱民等^[8-9]制作了三片节段拼装试验箱梁,考虑体内外预应力混合配束,对裂缝开

展、破坏形态进行分析,并发现梁体变形主要存在接缝位置。石雪飞^[10]等制作了节段拼装连续梁的足尺模型,并对整个施工过程进行测试,对梁体变形、裂缝发展、预应力增加进行研究,结果表明该类型的承载能力破坏是一个缓慢的过程,安全性较高。张鸿等^[11-12]对两片足尺模型节段试验梁,对波形钢腹板箱梁的横向内力进行研究,并论证了采用节段拼装工艺对波形钢腹板组合箱梁施工的可行性,研究表明波形钢腹板采用高强螺栓具有较强的调整误差的能力。代岳龙等^[13]对4个模型试件进行了试验,研究了节段拼装梁在偏载下的力学特性,提出了考虑接缝影响时抗扭刚度的计算公式。邓文琴等^[14]制作三根缩尺试验梁并进行静力试验,对比分析了节段拼装波形钢腹板箱梁与整体波形钢腹板箱梁力学特性,提出了节段拼装梁的抗弯承载力计算公式。周绪红等^[15]通过进行缩尺试验研究了波形钢腹板组合箱梁的剪切性能,并得出剪切屈曲强度的半经验半理论的设计公式。李立峰等^[16]对波形钢腹板的弹性屈曲强度进行分析,推导出弹性屈曲强度的计算公式

并给出适用范围.

以上针对混凝土节段拼装梁桥,关于剪切性能研究也大多为直剪试验^[15-21],对于节段拼装变截面波形钢腹板连续梁的弯剪研究还较少,也未提出针对节段拼装的连续梁的剪应力计算公式.鉴于此,本文对节段拼装变截面波形钢腹板组合连续梁与相同尺寸的整体浇筑变截面波形钢腹板组合连续梁进行静力试验,对节段拼装变截面波形钢腹板组合连续梁的弯剪性能进行研究,为后续节段预制波形钢腹板组合箱梁的抗剪设计提供参考.

1 模型试验

1.1 梁体构造

以某实桥为原型,按照一定比例设计并制作了两片试验梁:整体式变截面波形钢腹板连续箱梁和节段预制变截面波形钢腹板连续箱梁.两片梁的构造尺寸一致,为三跨连续梁,跨径布置为(250+500+250) cm,试验梁顶板宽 150 cm,底板宽 108 cm.中支座梁高 710 mm,波形钢腹板高 500 mm;边支座梁高 510 mm,波形钢腹板高 300 mm;中跨跨中梁高 510 mm,波形钢腹板高 300 mm;梁底线形形似二次抛物线,具体尺寸如图 1 所示.

直接浇筑整体梁,首先制作并组装好试验梁顶底板的混凝土模板,对波形钢腹板进行固定,随后进行顶底板混凝土浇筑,完成试验梁的制作(见图 2).节段拼装梁需考虑拼装工艺,制作 13 块节段并进行拼装,其中波形钢腹板的连接采用焊接的方式,混凝土顶底板采用节段预制拼接胶 CMRB-A/B 进行胶结. CMRB-A/B 胶的抗压强度为 80 MPa,弹性模量为 2 400 MPa,黏结强度为 2.5 MPa.由于本试验梁截面为变截面,在拼接过程中在梁底垫木块来维持梁底线形,先对接缝位置的混凝土顶底板均匀涂抹 3 mm 厚 CMRB-A/B 胶,用木块控制变截面底板的整体线形,再利用叉车将每一块节段梁块按照整体梁的形状放置到摆放好的木头上,随后进行预应力张拉将接缝处的 CMRB-A/B 胶挤压出来,使 CMRB-A/B 胶与混凝土梁体充分贴合,再对接缝位置的波形钢腹板进行焊接,完成节段梁拼装.图 3 为试验梁构造图,图 4 为节段拼装梁的接缝实图.

两片试验梁均采用 C40 混凝土,在试验梁浇筑

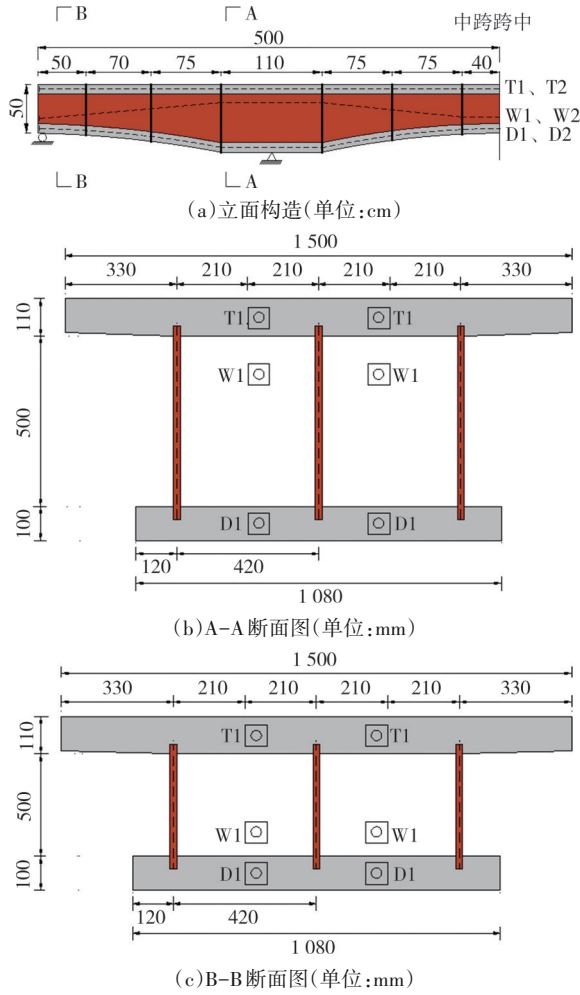


图 1 试验梁模型构造图

Fig.1 General structure of experimental beam model

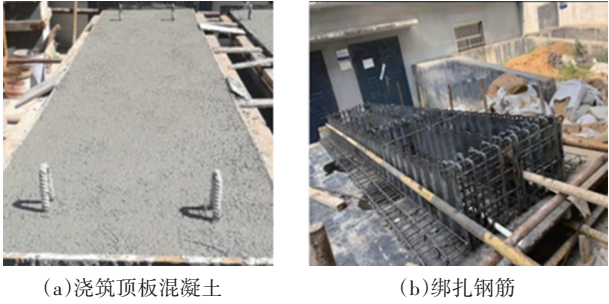


图 2 试验梁制作过程

Fig.2 Fabrication process of test beam

的同时制作混凝土立方体试块,通过抗压实验,得到平均抗压强度 44.7 MPa.波形钢腹板采用 Q235 型钢,厚度为 4 mm,具体尺寸如图 5 所示.体外预应力钢束经转向块沿折线布置,如图 1 所示,其中 T1、T2 为顶板体内预应力钢束,D1、D2 为底板体内预应力钢束,W1、W2 为体外预应力钢束.预应力钢束单根直径为 15.2 mm,抗拉强度为 1 860 MPa,初始张拉力为 100 kN.



图 3 试验梁构造图

Fig.3 Test beam structure diagram



图 4 节段拼装接缝实图

Fig.4 Actual diagram of segmenting assembly joint

1.2 加载方案与测点布置

通过 1 000 kN 的液压加载头与反力架对两片试

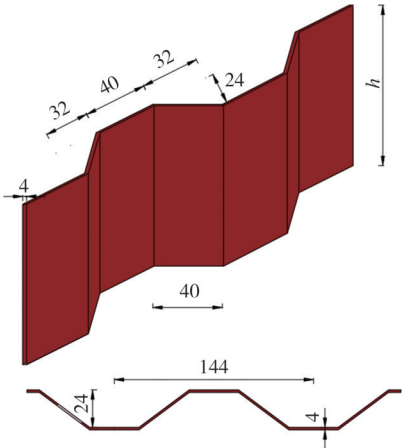


图 5 波形钢腹板构造(单位:mm)

Fig.5 Structure of corrugated steel web (unit: mm)

验梁进行加载,分为中跨跨中对称加载和中跨三分点偏载,加载间距为 220 cm,采用分配梁调整间距,如图 6 所示.

因为两片试验梁为三跨连续梁,为了防止边跨在加载过程中向上位移,使用分配梁与钢绞线对边跨竖向位移进行约束,将分配梁横向放置在边支座位置上,分配梁两端穿入钢绞线并进行锚固,钢绞线的另一端锚固在地板上,最后使用油压千斤顶对钢绞线进行张拉.

两片梁分别在九个波形钢腹板断面上布置应变测点,通过电阻式应变片测得钢腹板应变.在梁底布置位移计,测量不同荷载等级下试验梁的挠度变化.具体布置如图 6、图 7 所示.图 8 为加载实图,图 9 为加载示意图.

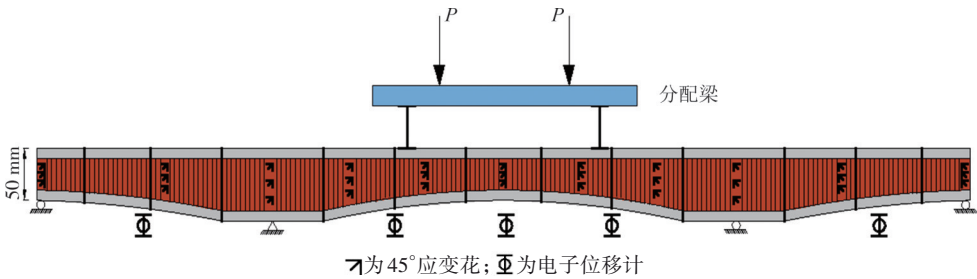


图 6 纵向测点布置图

Fig.6 Layout of longitudinal measuring points

2 试验结果分析

2.1 位移结果分析

通过荷载-位移曲线可以有效地了解试验梁破坏的过程,分别对两片试验梁中跨跨中截面与边跨

跨中截面的位移进行测量,如图 10 所示.

由图 10 可知,整体梁与节段梁中跨承受对称荷载时,边跨位移向上,中跨跨中截面位移的绝对值大于边跨跨中截面位移的绝对值,这也符合连续梁桥受力特点.

当两片试验梁处于弹性阶段时,节段梁中跨跨

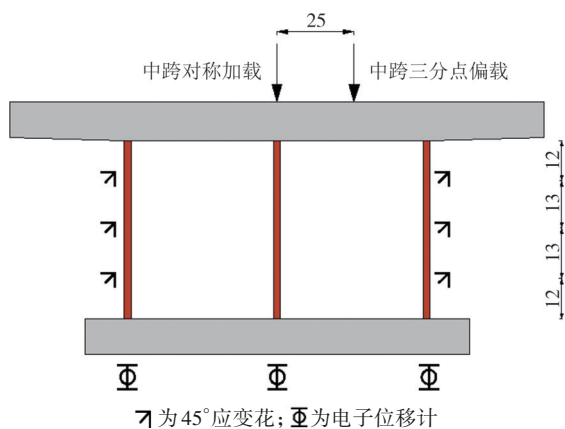


图7 横截面测点布置图(单位:mm)

Fig.7 Layout of cross section measuring points (unit: mm)



图8 试验梁中跨对称三分点加载试验

Fig.8 Cross-symmetric two-point loading experiment in the test beam

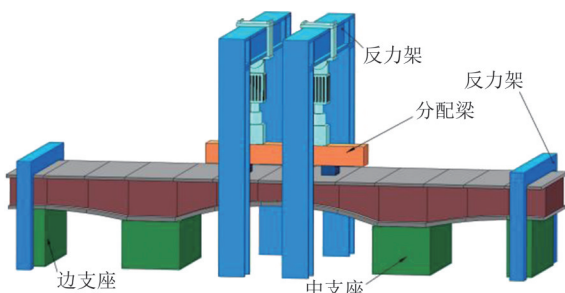


图9 试验梁加载示意图

Fig.9 Test beam loading diagram

中的挠度比整体梁在该位置的挠度略大,节段梁的刚度略大于整体梁的刚度.进入塑性阶段后,节段梁中跨跨中位移的增长速度远远大于整体梁,这说明节段梁的刚度要小于整体梁的刚度.这是由于节段梁混凝土顶底板采用胶接缝,且胶接缝中没有普通钢筋,进入开裂阶段后,节段梁的胶接缝开裂导致其刚度大幅降低.

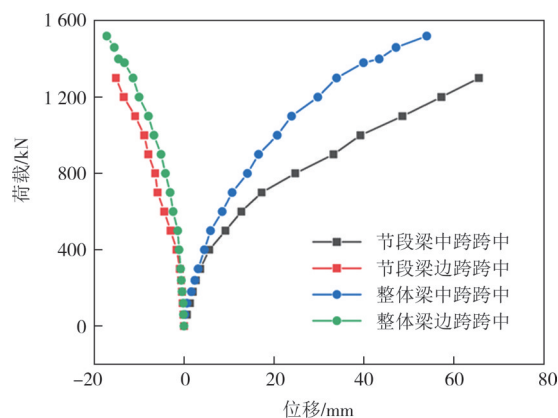


图10 试验梁荷载-位移曲线

Fig.10 Test beam load-displacement curve

2.2 剪应力结果分析

试验测得波形钢腹板三向应变,按照式(1)可以计算波形钢腹板的剪应力值.

$$\tau = -G[2\varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ})] \quad (1)$$

式中: ε_{0° 为腹板纵向的应变值; ε_{45° 为与腹板纵向夹角 45° 应变值; ε_{90° 为腹板沿高度方向的应变值.

当试验梁中跨承受对称荷载时,按照式(1)得到节段拼装梁与整体梁中跨1/4位置的剪应力沿梁高分布图,由于篇幅限制只展示60 kN、180 kN、300 kN三个荷载等级下的剪应力沿梁高分布图,如图11所示.

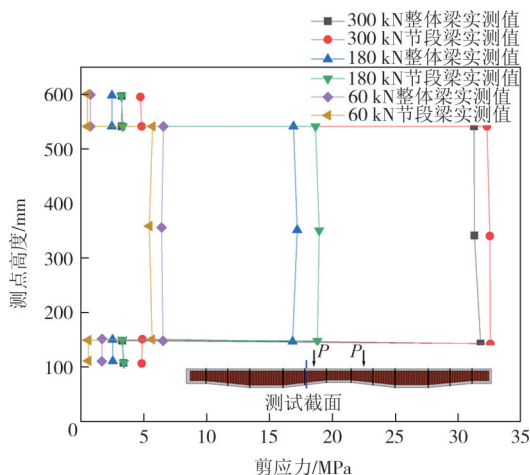


图11 中跨1/4位置剪应力沿梁高分布图

Fig.11 Shear stress distribution along beam height at 1/4 position of mid-span

由图11可知,节段拼装梁与整体梁在中跨1/4位置波形钢腹板的剪应力值随着荷载的增大而增大,但沿着梁高的方向并无明显变化,在整个波形钢腹板断面上呈现均匀分布;顶底板的剪应力值远小于波形钢腹板的剪应力值;在承受相同荷载时,节段

拼装梁中跨 1/4 位置的波形钢腹板上的剪应力值,要略大于整体梁同一位置处的剪应力值.这是由于节段拼装梁的混凝土顶底板的接缝是采用胶接缝,且接缝位置没有布置普通钢筋,胶接缝对截面抗剪的作用贡献很小,仅起到密封作用,而整体梁顶底板没有接缝,钢筋-混凝土顶底板的抗剪能力大于节段梁,波形钢腹板的抗剪贡献要小于节段拼装梁.

为了解节段预制拼装波形钢腹板箱梁与整体式波形钢腹板箱梁在整个加载过程中的腹板的受力情况,绘制节段梁与整体梁在破坏阶段的荷载-剪应力曲线,如图 12 所示.

由图 12 可知,节段梁与整体梁波形钢腹板的剪应力随着荷载的增大而增大,基本呈现线性分布,荷载-剪应力曲线未发生明显突变,说明试验梁底板裂缝的出现对波形钢腹板箱梁的抗剪作用影响较小.

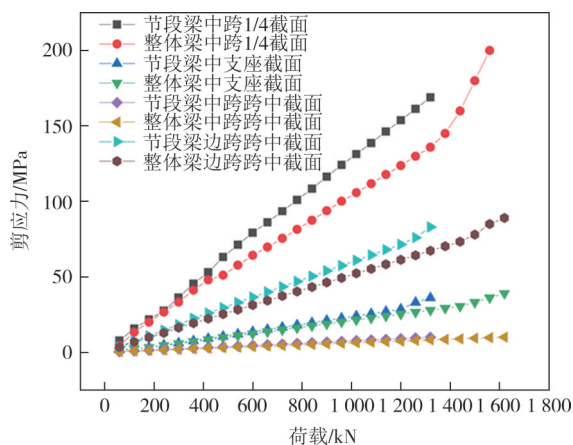


图 12 波形钢腹板荷载-剪应力曲线

Fig.12 Corrugated steel web load-shear stress curve

当节段梁处于弹性阶段时,中跨 1/4 截面上波形钢腹板剪应力略大于整体梁在同一位置的剪应力.进入塑性阶段后,节段梁在该位置的波形钢腹板剪应力的增长速度明显大于整体梁.当荷载值为 1 100 kN 时,节段梁的剪应力相对于整体梁增加了 24%.这是由于节段梁在底板胶接缝位置没有普通钢筋,在底板开裂后,原本由倾斜底板所承受的剪力全部转移到波形钢腹板.当荷载超过 1 400 kN 后,整体梁中跨截面 IV 的波形钢腹板剪应力增长速度迅速增大,并在 1 600 kN 时发生剪切屈曲破坏.

3 节段拼装变截面波形钢腹板连续箱梁剪应力计算方法

根据变截面波形钢腹板组合箱梁的受力特点,

当荷载作用时,混凝土顶底板的抗剪贡献不可忽略,除截面剪力之外,截面弯矩和截面轴力以及预应力也会对剪应力产生影响,但在弹性范围内,预应力的增量很小,故忽略这部分对剪应力的影响,即

$$\tau = \tau_Q + \tau_M + \tau_N \quad (2)$$

式中: τ 为截面的剪应力; τ_Q 为截面剪力作用产生的剪应力; τ_M 为截面弯矩作用产生的剪应力; τ_N 为截面轴力作用产生的剪应力.

τ_Q 通常采用经典的剪应力计算公式:

$$\tau_Q = \frac{QS}{nb} \quad (3)$$

式中: Q 为截面剪力; S 为截面的面积矩; I 为忽略波形钢腹板的截面惯性矩; b 为波形钢腹板的厚度; n 为截面上波形钢腹板的数量.

为了得到在截面弯矩和截面轴力作用下的剪应力,选取变截面上的一块微元体进行分析,如图 13 所示,微元体的长度为 dx ,水平倾角为 α ,左侧受到的轴力为 N ,弯矩为 M ,剪力为 Q ,右侧受到的轴力为 $N+dN$,弯矩为 $M+dM$,剪力为 $Q+dQ$,对 O 点取矩,得到:

$$Q + N \tan \alpha = \frac{dM}{dx} \quad (4)$$

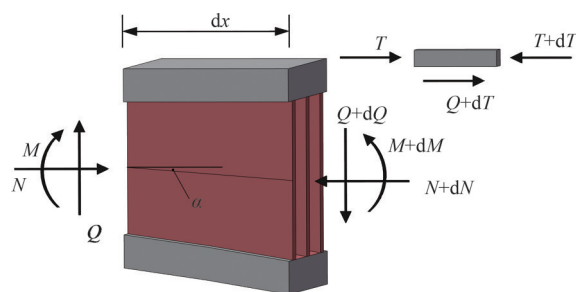


图 13 微元体受力图

Fig.13 Force diagram of microunit

图 14 为波形钢腹板组合箱梁的截面图,坐标轴取顶板宽度为 b_1 ,厚度为 t_1 ,顶板面积为 A_1 ,底板宽度为 b_2 ,厚度为 t_2 ,底板的面积为 A_2 ,截面高度为 h ,计算点距离顶板上缘的距离为 y_0 ,形心轴距离顶板上缘的距离为 y_c , T 为计算点以上区域的水平力的合力.

由材料力学公式可知,由轴力在截面上产生正应力为:

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A}$$

由弯矩在截面上产生正应力为:

$$\sigma_M = \frac{M(y_c - y_0)}{I}$$

由此可以得到截面的轴向力 T_N 和由弯矩产生的

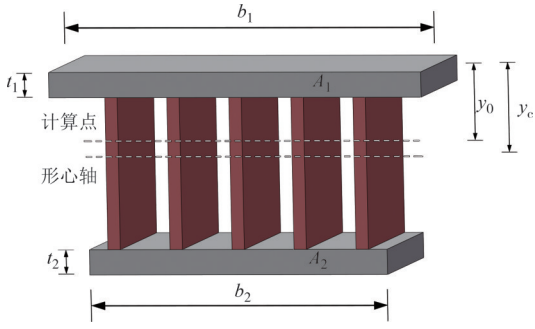


图 14 波形钢腹板组合箱梁截面

Fig.14 Section of composition box girder with corrugated steel webs

弯矩轴向力 T_M :

$$T_N = \int_0^{y_0} \sigma_N n b d y = \frac{N}{A} A_0$$

$$T_M = \int_0^{y_0} \sigma_M n b d y = \frac{M}{I} S_0$$

计算点以上区域的水平力的合力为:

$$T = T_N + T_M = \frac{N}{A} A_0 + \frac{M}{I} S_0 \quad (5)$$

式中: A_0 为计算点到顶板上缘的面积; S_0 为计算点到顶板上缘的静矩.

由材料力学公式可知,微元体的截面剪应力为:

$$\tau = \frac{dT}{n b dx} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)中,再根据式(4)的力矩平衡条件得到:

$$\tau_N = \frac{N}{n b} \left(\frac{dA_0}{A dx} - \frac{A_0 dA}{A^2 dx} + \frac{S_0}{I} \tan \alpha \right) \quad (7)$$

$$\tau_M = \frac{M}{n I b} \left(\frac{dS_0}{dx} - \frac{S_0 dI}{I dx} \right) \quad (8)$$

为了求解波形钢腹板上剪应力的的大小,在计算全截面特性时考虑波形钢腹板面积的影响,截面总面积 A 沿 x 方向的变化率为:

$$\frac{dA}{dx} = n b \frac{dH}{dx} + (b_2 - n b) \frac{dt}{dx} \quad (9)$$

截面的惯性矩 I 沿着 x 方向变化率为:

$$\frac{dI}{dx} = 2 \left(S_1 \frac{dt}{dx} + S_2 \frac{dH}{dx} \right) \quad (10)$$

截面的形心距 y_c 沿着 x 方向变化率为:

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{A_1 dt}{A} + \frac{A_2 dH}{A} = \tan \alpha \quad (11)$$

计算点距离箱梁顶部的面积 A_0 沿着 x 方向变化率为:

$$\frac{dA_0}{dx} = (y - t_1) \frac{db}{dx} = 0 \quad (12)$$

计算点距离箱梁顶部的面积矩 S_0 沿着 x 方向变化率为:

$$\frac{dS_0}{dx} = \frac{A_0 A_1}{A} \frac{dt}{dx} + \frac{A_0 A_2}{A} \frac{dH}{dx} \quad (13)$$

将式(7)~式(13)代入式(7)、式(8)可得到截面轴力作用下的剪应力 τ_N 和截面弯矩作用下的剪应力 τ_M :

$$\tau_N = \frac{N}{n b} \left[\left(\frac{S_0 A_2}{A I} - \frac{n b A_0}{A^2} \right) \tan \alpha + \left(\frac{S_0 A_1}{A I} - \frac{A_0 (b_2 - b)}{A^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (14)$$

$$\tau_M = \frac{M}{n I b} \left[\left(\frac{A_0 A_2}{A I} - \frac{2 S_0 S_2}{I^2} \right) \tan \alpha + \left(\frac{A_0 A_1}{A I} - \frac{2 S_0 S_1}{I^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (15)$$

将式(14)、式(15)代入式(2),得到变截面波形钢腹板箱梁的剪应力计算公式,即

$$\tau = \frac{QS}{n I b} + \tau_M + \tau_N \quad (16)$$

根据公式(16)计算得到节段梁在荷载作用下,剪力作用产生的剪应力 τ_Q 、弯矩作用产生的剪应力 τ_M 、轴力作用产生的剪应力 τ_N 、阶段施工挠度导致剪应力变化各项在总剪应力 τ 所占的比重,如表 1 所示.

表 1 剪力分布情况表

Tab.1 Shear division table

荷载/ kN	τ_Q /MPa	τ_Q 占 比/%	τ_M /MPa	τ_M 占 比/%	τ_N /MPa	τ_N 占 比/%
60	5.02	74	0.75	11	1.02	15
120	10.39	75	1.25	9	2.22	16
180	14.56	74	1.97	10	3.15	16
240	19.54	74	2.91	11	3.96	15
300	25.56	77	2.99	9	4.65	14

在拼装过程中,节段梁在匹配位置时,会因自重发生变形,如图 15 所示.

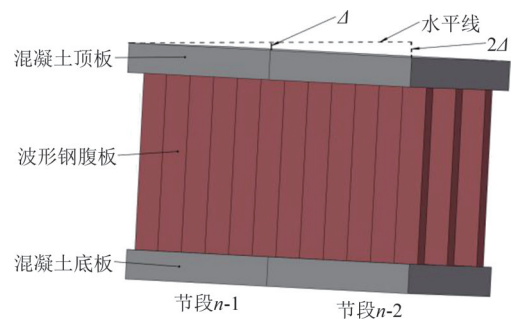


图 15 波形钢腹板组合梁拼接时的挠度

Fig.15 Deflection of composite beams with corrugated steel webs when splicing

在拼装 n 号块时,由于 n 号块自身自重作用,导致已拼接梁块 $n-1$ 块的梁面线发生变化,产生向下的挠度.该部分挠度会影响钢腹板的剪切变形,从而导致波形钢腹板的剪应力发生变化,因此在推导变截面节段预制波形钢腹板箱梁的剪应力计算公式时,需要对该部分进行考虑.

根据结构能量原理,外力功等于梁的弯曲应变能与剪切应变能之和.考察挠度对波形钢腹板组合箱梁剪切变形的影响,首先确定波形钢腹板组合箱梁在拼接过程中的挠度 2Δ ,由此确定组合梁的剪切应变能.波形钢腹板内的剪切应变能密度为:

$$u = \frac{\tau^2}{2G_s} \quad (17)$$

式中: G_s 为波形钢腹板的剪切模量,其计算公式如下:

$$G_s = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (18)$$

式中: G_s 为钢材的剪切模量; μ 为钢材的泊松比; E 为钢材弹性模量.

如图16所示,斜板段对竖向挠度的贡献与直板段有所不同.首先将斜板段修正为等效厚度为 $t_w' = t_w / \cos\theta$ 的直板段, θ 为波折角,则它的计算剪应力减少到 $\tau \cos\theta$.为了与等效前斜板段的能量密度相同,波形钢腹板内的剪切应变能密度为:

$$u' = u = \tau^2 / (2G_s) \quad (19)$$

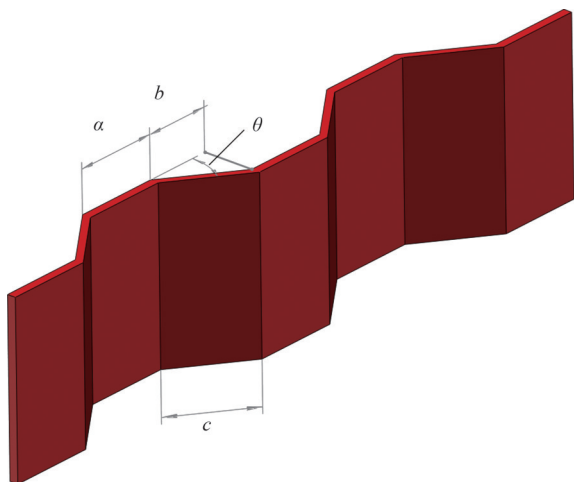


图16 波形钢腹板示意图

Fig16 Schematic diagram of corrugated steel web

对斜板段的剪切模量进行修正,

$$G'_s = G_s \cos^2\theta \quad (20)$$

则斜板段微元体内的剪切应变能为:

$$U_{Qex} = \frac{t_w}{2} \frac{\tau^2}{G_s \cos^3\theta} dydz =$$

$$\frac{t_w}{2\cos\theta} \frac{\tau^2}{G_s} dydz =$$

$$\frac{t_w}{2\cos\theta} \frac{\tau^2}{G_s} dydz = \frac{Et_w}{\cos\theta} \frac{\tau^2}{1+\mu} dydz \quad (21)$$

由于节段梁在匹配位置因自身重力所发生的变形,在确定波形钢腹板组合箱剪切应变能的基础上,运用能量法得到

$$\int_0^l \frac{q_x}{2} \Delta dx = U_Q \quad (22)$$

选取满足边界条件的形函数

$$y = a_1 x(l-x) \quad (23)$$

将形函数代入积分方程求出待定常数1,即可得到所需位移:

$$\Delta = \frac{\tau(1+\mu)}{2EG(1+\cos\theta)} \quad (24)$$

节段梁在匹配位置因自重所发生的变形,将导致待浇梁段梁面变成不规则斜面.后续节段前端中央处梁高将比理论梁高缩小 2Δ ,得到节段箱梁剪应力在自重作用下与挠度的关系

$$\tau = \frac{\Delta EG(1+\cos\theta)}{1+\mu} \quad (25)$$

将式(25)代入式(14),得到变截面节段拼装波形钢腹板箱梁的剪应力计算公式,即:

$$\tau = \frac{QS}{nIb} + \tau_M + \tau_N + \frac{\Delta EG \cos\theta}{1+\mu} \quad (26)$$

将式(26)计算得出的节段梁剪应力公式值与实测值进行对比,如图17所示,剪应力公式值与剪应力实测值吻合较好,公式值略大于剪应力实测值,误差在5%以内,说明此公式具有一定精度.

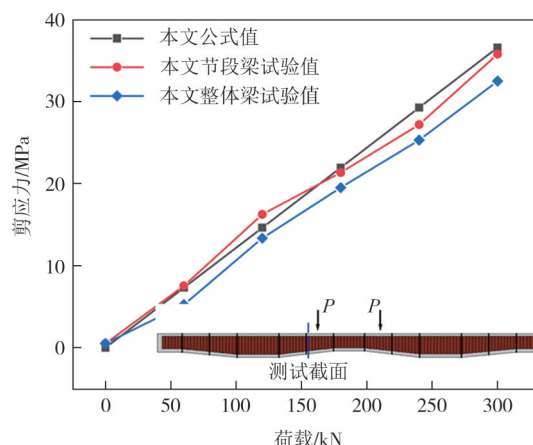


图17 整体梁中跨1/4截面剪应力对比

Fig.17 Comparison of shear stress in 1/4 section of middle span of integral beam

4 承剪比分析

目前,国内大部分波形钢腹板组合箱梁在设计时不考虑混凝土顶底板抗剪作用,认为所有的剪力都由钢腹板承担,这样的设计对于钢腹板来说偏于保守.为了探究节段拼装变截面波形钢腹板组合连续梁中钢腹板的抗剪贡献,对节段拼装梁与整体梁中跨 1/4 位置在不同荷载等级下的承剪比进行对比,并且通过有限元模型结果进行验证.

承剪比 ρ 为腹板剪力值与截面总剪力的比值,即 $\rho=Q_w/Q$, Q 为截面总剪力,腹板剪力 $Q_w=\tau A_n$, τ 为波形钢腹板的剪应力值,由上文可知,波形钢腹板的剪应力沿梁高方向接近均匀分布,所以 τ 的实测值取同一截面 6 个测点的剪应力的平均值, τ 的有限元值为板内表面与外表面的平均值, A 为波形钢腹板的横截面积; $n=3$ 为单箱双室组合梁的波形钢腹板的数量.利用上式计算得到了在不同荷载作用下,两片试验梁的腹板剪力的实测值与有限元值、承剪比的实测值与有限元值如表 2 所示,图 18 给出腹板剪力随荷载变化曲线.由式(8)计算得到截面剪应力,进而计算出承剪比例的理论值,得到承剪比随荷载变化的曲线,见图 19.

根据表 2 和图 18,在两点对称荷载作用下,节段梁与整体梁中跨 V-V 截面波形钢腹板剪力随着荷载的增大而增大,且呈线性分布.在相同荷载下,节段梁的腹板剪力要大于整体梁的腹板剪力,随着荷载值的增大,两片梁腹板承受剪力的差值也增大,两片试验梁的腹板承剪比均未随着荷载等级的增加发生明显的变化.当对称荷载为 300 kN 时,节段梁的腹板剪力与整体梁的腹板剪力相差 10% 左右,在节段梁设计时,应该考虑一定的折减.

为探究变截面波形钢腹板对节段拼装试验梁的

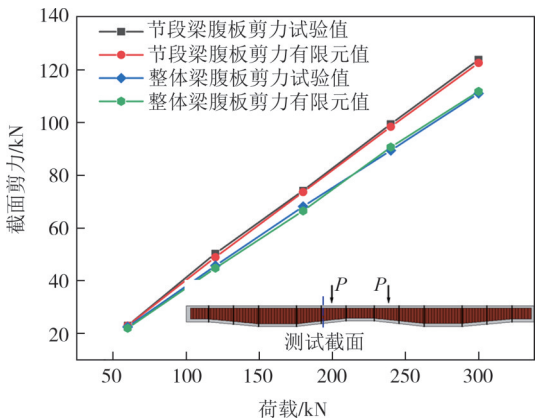


图 18 腹板剪力对比

Fig.18 Comparison of web shear forces

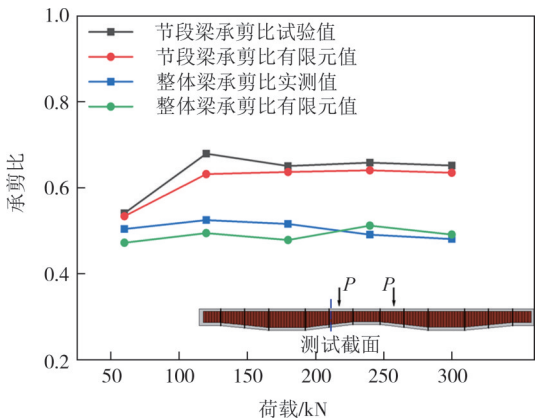


图 19 承剪比对比

Fig.19 Comparison of bearing shear ratio

抗剪作用,将两片试验梁划分为 9 个控制截面,按照上文的计算方法得到当对称荷载为 300 kN 时,两片试验梁不同截面的腹板剪力的实测值与有限元值、承剪比的实测值与有限元值.得到结果如表 3 所示,其中边跨截面 1、2、9、10 截面总剪力为 37.5 kN,中跨截面 4、5、6、7 截面总剪力为 150 kN.支点截面 3、8 截面总剪力为 187.5 kN.由式(8)计算得到截面剪应力,进而计算出承剪比例的理论值,得到两片试验梁不同截面钢腹板的承剪比,见图 20.

表 2 荷载作用下中跨 1/4 断面下钢腹板的承剪比

Tab.2 Shear ratio of 1/4 section of middle span under different load grades

荷载/kN	节段拼装梁				整体梁			
	实测值		有限元值		实测值		有限元值	
	腹板剪力/kN	承剪比 ρ /%	腹板剪力/kN	承剪比 ρ /%	腹板剪力/kN	承剪比 ρ /%	腹板剪力/kN	承剪比 ρ /%
60	23.65	79.05	23.01	76.70	22.56	75.20	22.08	73.60
120	50.38	83.97	48.96	81.60	45.74	76.24	44.83	74.72
180	74.28	82.53	73.66	81.84	68.21	75.79	66.53	73.92
240	99.51	82.93	98.45	82.04	89.46	74.55	90.72	75.60
300	123.88	82.59	122.64	81.76	111.05	74.03	111.84	74.56

表3 不同截面的腹板剪力与承剪比

Tab.3 Ratio of web shear force to shear force under different sections

截面	节段拼装梁				整体梁			
	实测值		有限元值		实测值		有限元值	
	腹板剪力/kN	承剪比/%	腹板剪力/kN	承剪比/%	腹板剪力/kN	承剪比/%	腹板剪力/kN	承剪比/%
I	30.21	80.56	29.46	78.56	28.63	76.36	29.74	75.26
II	26.04	69.46	25.31	67.50	24.84	66.25	24.46	65.24
III	99.11	52.86	95.41	50.89	94.42	50.36	92.12	49.13
IV	123.88	82.59	122.64	81.76	111.05	74.03	111.84	74.56
V	128.50	85.67	125.48	83.32	117.26	78.32	116.32	77.54

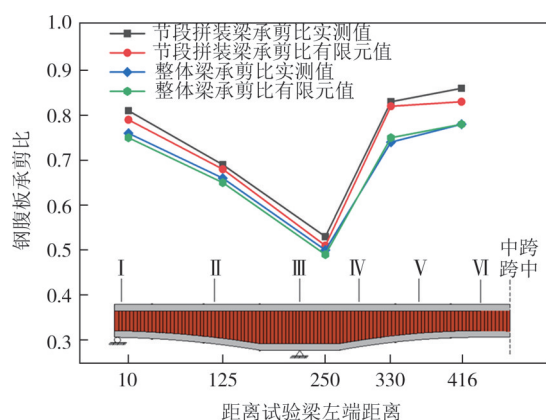


图20 不同截面钢腹板的承剪比

Fig.20 Proportion of shear force borne by steel webs of different sections

由表3和图20可知,当对两片试验梁施加300 kN的对称荷载时候,节段拼装梁在中跨IV、V截面的承剪比达到了85%以上,整体梁在该位置的承剪比在75%左右,这说明了在该位置上,两片梁的波形钢腹板承担了大部分的剪力.在中支点位置到中跨跨中位置,两片试验梁的波形钢板钢腹板所承受的剪力比例是不断增大的,这说明越靠近中跨跨中,两片试验梁波形钢腹板的抗剪作用越大,混凝土顶底板的抗剪作用越小.

对于中支点位置的Ⅲ截面,两片试验梁波形钢腹板的承剪比在50%左右,混凝土顶底板承受近一半的剪力.这是由于越靠近中支点位置,变截面效应越明显,两片波形钢腹板组合箱梁皆施加了大量的体内、体外预应力,预应力筋的竖向分量会减小钢腹板承受的剪力,从而增加了该位置处混凝土顶底板承受的剪力.并且在梁高变化比较明显的区域,变截面中的腹板剪应力还受弯矩作用产生的附加剪应力的影响,从而减小该位置的钢腹板所承受的剪力.节段梁与整体梁的波形钢腹板承受剪力的比例相差不大,这是因为节段拼装梁的中支点0号块的截面是不变的,且此位置没有焊接缝与胶接缝,节段拼装梁

与整体梁的构造差异较小,因此节段拼装梁与整体梁的波形钢腹板的承剪比相差不大.

由中支点截面Ⅲ到边跨截面Ⅱ、Ⅰ,两片试验梁的波形钢腹板的承剪比不断增大,混凝土顶底板的抗剪作用不断减小,到边支座位置,混凝土顶底板的抗剪作用仅为20%~30%,体现了波形钢腹板连续梁的承剪特点.

在中跨截面IV、V位置处,节段拼装梁的波形钢腹板承剪比要大于整体梁的承剪比,差值在10%左右,这是由于在该位置处整体梁的混凝土顶底板的整体性更好,所能承受的剪力要更大一些,而节段拼装梁的混凝土顶底板的连接方式为胶接缝,且没有普通钢筋的作用,因此混凝土承受的剪力要小一些,钢腹板的承剪比要大于整体梁在该位置的承剪比.在中支点截面Ⅲ处,两片梁波形钢腹板的承剪比的有限元值,略小于实测值,误差范围在5%以内,这验证了有限元模型的准确性,较为清晰地体现两片试验梁的力学性能.通过式(8)计算得到的承剪比,与实测值基本吻合,验证了公式的准确性.

5 抗剪承载力计算公式的修正

文献[3]中提到依据美国AASHTO规范,接缝面的抗剪承载力包括混凝土剪力键和混凝土摩擦提供的抗剪贡献两部分.本接缝除上述两种剪力外仍要考虑胶层黏结提供的摩擦贡献和钢腹板的抗剪贡献,同时要考虑变截面对断面抗剪承载力的影响.考虑上述五部分的抗剪贡献,节段拼装组合箱梁的抗剪承载力计算式可修正如下:

$$V_u = 0.9 \left[A_k \sqrt{f_{ck}} (0.204 8 \sigma_n + 0.996 1) + 0.6 A_{sm} \sigma_n \right] \quad (27)$$

式中: A_k 为剪力键根部面积; A_{sm} 为接触部分的混凝土面积; f_{ck} 为混凝土标准抗压强度; σ_n 为接缝面平均压

应力水平。

图 21 为采用公式(27)(该公式能够反映混凝土剪力键的胶层黏结对抗剪承载力的影响)得到的计算值与实测值、有限元结果比较,可以看出前者与后两者误差在 5% 左右。可知式(27)可以较好地预测剪力键胶接缝的抗剪强度。

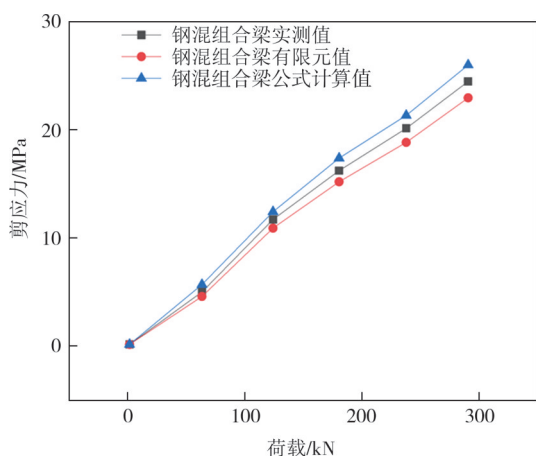


图 21 钢混组合结构结果对比图

Fig.21 Comparison diagram of the results of the steel-concrete composite structure

6 结论

1)在对称加载作用下,在中跨 1/4 位置处节段拼装梁与整体梁波形钢腹板的剪应力沿梁高方向均匀分布,节段拼装梁的剪应力值要略大于整体梁在相同位置的剪应力值。

2)推导了节段拼装变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力计算公式,并考虑施工工艺对剪应力的影响,与节段拼装梁剪应力的实测值进行对比,误差在 5% 以内,验证了该公式具有一定的精度。

3)在对称加载工况下,节段拼装梁与整体梁的承剪比在弹性范围内受荷载影响较小,保持一个恒定的比例。中支座位置处的波形钢腹板承剪比在 50% 左右,波形钢腹板的承剪比沿着试验梁纵向方向由中支座向两侧不断增大,在中跨 1/4 位置,节段梁钢腹板的承剪比达到了 85% 以上,整体梁的钢腹板在该位置的承剪比在 75% 左右,节段梁波形钢腹板承剪比略大于整体梁。

4)文中提出的接缝截面抗剪承载力计算公式值与实测值、有限元结果的误差在 5% 左右,可以较好地预测钢混组合结构胶接缝的抗剪强度。

参考文献

- [1] 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 J G, LI F X. Theory model of corrugated steel web girder considering web shear behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 40-48. (in Chinese)
- [2] 李杰,武海鹏,陈淮.波形钢腹板变截面连续体系梁桥钢腹板承剪分析[J].桥梁建设,2015,45(1):79-84.
LI J, WU H P, CHEN H. Analysis of steel web shear capacity of variable section continuous system composite box beam bridge with corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 79-84. (in Chinese)
- [3] 沈殷,蔡鹏,陈立生,等.节段预制拼装混凝土桥梁剪力键接缝的抗剪强度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(10):1414-1420.
SHEN Y, CAI P, CHEN L S, et al. Shear strength of keyed joints in segmental precast concrete bridges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(10): 1414-1420. (in Chinese)
- [4] SAYED-AHMED E Y. Behaviour of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(4): 656-672.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘钊,武焕陵,种艾秀,等.南京长江第四大桥节段预制拼装箱梁足尺模型试验[J].桥梁建设,2011,41(3):9-12.
LIU Z, WU H L, CHONG A X, et al. Full-scale model test for precast and assembled segmental box girder of the fourth Nanjing Changjiang River bridge[J]. Bridge Construction, 2011, 41(3): 9-12. (in Chinese)
- [8] 袁爱民,何雨,戴航,等.不同加载方式及配束比下节段预制箱梁受力性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):58-68.
YUAN A M, HE Y, DAI H, et al. Force bearing performance test of precast segmental bridge beams with different tendon ratios under different loads[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(1): 58-68. (in Chinese)
- [9] 袁爱民,吴闻秀,孙大松,等.体内体外混合配束节段预制箱梁受弯性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(5):73-81.
YUAN A M, WU W X, SUN D S, et al. Experimental on flexural behavior of segmental precast concrete beam with internal tendons and external tendons[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(5): 73-81. (in Chinese)
- [10] 石雪飞,刘志权,胡可,等.全体外预应力节段预制拼装连续梁桥承载能力足尺模型试验[J].中国公路学报,2018,

- 31(12): 163-173.
- SHI X F, LIU Z Q, HU K, et al. Full-scale test of bearing capacity of a complete external prestressed segmental precast continuous girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 163-173. (in Chinese)
- [11] 张鸿, 郑和晖, 王敏. 节段预制拼装波形钢腹板组合箱梁桥横向受力性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1070-1075.
- ZHANG H, ZHENG H H, WANG M. Experimental study on transverse mechanical behavior of precast segmental composite box girder bridge with corrugated steel webs [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1070-1075. (in Chinese)
- [12] 张鸿, 郑和晖, 陈鸣. 波形钢腹板组合箱梁桥节段预制拼装工艺试验[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 82-87.
- ZHANG H, ZHENG H H, CHEN M. Tests of segmental precasting and assembling technology for composite box girder bridge with corrugated steel webs [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 82-87. (in Chinese)
- [13] 代岳龙, 杜松, 郑和晖, 等. 节段预制拼装波形钢腹板箱梁桥偏载作用下扭转性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(4): 670-675.
- DAI Y L, DU S, ZHENG H H, et al. Experimental study on torsional behavior of precast segmental box girders bridge with corrugated steel webs under eccentric loading [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2016, 40(4): 670-675. (in Chinese)
- [14] 邓文琴, 张建东, 张鸿, 等. 节段预制波形钢腹板PC组合箱梁的受力性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 128-136.
- DENG W Q, ZHANG J D, ZHANG H, et al. Mechanical behavior of segmental precast prestressed composite box girder with corrugated steel webs [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(7): 128-136. (in Chinese)
- [15] 周绪红, 孔祥福, 侯健, 等. 波纹钢腹板组合箱梁的抗剪受力性能[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 77-82.
- ZHOU X H, KONG X F, HOU J, et al. Shear mechanical property of composite box girder with corrugated steel webs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 77-82. (in Chinese)
- [16] 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 L F, HOU L C, SUN J C. Research on shear mechanical property of corrugated steel webs [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(11): 56-63. (in Chinese)
- [17] 杨俊, 周建庭, 张中亚, 等. UHPC-NC键槽界面抗剪性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 132-144.
- YANG J, ZHOU J T, ZHANG Z Y, et al. Shear performance of keyway interface between UHPC and normal concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 132-144. (in Chinese)
- [18] 李萌, 邵旭东, 曹君辉, 等. UHPC中短栓钉抗剪性能试验及理论分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 191-204.
- LI M, SHAO X D, CAO J H, et al. Performance of experimental and theoretical analysis on shear short headed studs embedded in UHPC [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 191-204. (in Chinese)
- [19] 朱劲松, 王永光, 郭晓宇, 等. 钢-UHPC华夫板组合梁抗剪性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 169-181.
- ZHU J S, WANG Y G, GUO X Y, et al. Experimental study on shear behaviors of steel-UHPC composite beams with waffle slab [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 169-181. (in Chinese)
- [20] 邵旭东, 方恒, 李文光. 钢-超薄UHPC组合桥面板界面抗剪性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 44-51.
- SHAO X D, FANG H, LI W G. Research on the interfacial shear resistant performance of the composite deck system composed of orthotropic deck and ultra-thin UHPC layer [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5): 44-51. (in Chinese)
- [21] 姜海波, 董孝童, 邵腾飞, 等. 预制UHPC组合梁槽口式连接界面抗剪性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 276-288.
- JIANG H B, DONG X T, SHAO T F, et al. Study on the interface shear behavior of precast UHPC composite beam with shear pocket [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 276-288. (in Chinese)