

超大跨波形钢腹板箱梁弯扭耦合性能试验

张 皓¹, 陈宜言¹, 叶俊宇¹, 董桔灿², 赵 秋¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 云基智慧工程股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 本文设计并开展了 3 根超大跨波形钢腹板组合箱梁弯扭耦合试验, 得到了试验梁的破坏模式、扭矩-扭率曲线、弯矩-位移曲线以及应变分布规律等。然后, 基于已验证有限元法进行参数化分析, 根据超大跨波形钢腹板组合箱梁的破坏模式, 提出了弯扭耦合关系曲线以及简化承载力计算方法。结果表明: 在弯扭耦合作用下组合箱梁的破坏形式可分为弯型破坏和扭型破坏, 分别以混凝土顶板被压碎和混凝土底板剥落为标志; 弯型破坏时腹板的整体屈曲现象主要集中在弯剪扭段, 而扭转破坏时腹板的整体屈曲现象主要集中在弯扭段; 在一定范围内, 弯矩的存在使组合箱梁的抗扭强度得到加强; 建立的弯扭耦合关系曲线和简化承载力计算方法均具有较高精度, 最大误差不超过 6%。

关键词: 桥梁与隧道工程; 超大跨; 波形钢腹板; 破坏模式; 弯扭耦合关系曲线; 简化承载力计算方法

中图分类号: U488.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0209-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240607

Experiment on bending-torsional performance of super-span box girders with corrugated steel webs

ZHANG Hao¹, CHEN Yi-yan¹, YE Jun-yu¹, DONG Ju-can², ZHAO Qiu¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Yunji Intelligent Engineering Limited Company, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Three super-span composite box girders with corrugated steel webs (CSW) under combined bending and torsion were designed and experimentally investigated in this paper, and the failure modes, torque-twist curves, bending moment-displacement curves, and strain distribution laws were obtained. Based on the verified finite element analysis (FEA) method, a parametric analysis was carried out. The bending-torsional relationship curves and the simplified calculation method for capacity were proposed according to the failure modes. The results show that the failure modes of the composite box girders are the bending and torsional failure, with crushing of the concrete top slab and spalling of the concrete bottom slab, respectively. Global buckling of bending failure occurs in the bending-shear-torsional section, whereas that of torsional failure is concentrated in the bending-torsional section. The bending moment enhances the torsional strength of the composite box girders within a certain range. The proposed bending-torsional relationship curves and the simplified calculation method both provide high accuracy, with a

收稿日期: 2024-05-31.

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2019J01232).

作者简介: 张皓(1995-), 男, 博士研究生. 研究方向: 钢混组合结构. E-mail: 470268065@qq.com

通信作者: 赵秋(1976-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 钢混组合结构. E-mail: zhaoqiu@fzu.edu.cn

maximum error of less than 6%.

Key words: bridge and tunnel engineering; super-span; corrugated steel webs; failure modes; bending-torsional relationship curves; simplified load capacity calculation method

0 引言

波形钢腹板组合箱梁由于自重轻、施工简便、预应力效率高等优点被广泛应用于公路桥梁领域^[1]。近年来,国内外学者对其抗剪^[2]、抗弯^[3]和抗扭性能^[4]开展了大量的试验和理论研究,但是对其弯扭耦合性能方面的研究较少。实际上,当采用波形钢腹板代替传统混凝土腹板后,相较于传统混凝土箱梁,波形钢腹板组合箱梁的扭转刚度相对下降了60%~70%^[5],并且在偏心荷载作用下可能出现突然破坏,不利于结构的安全使用^[6]。此外,对于超大跨径梁桥^[7],高腹板效应使得组合箱梁承受的弯扭耦合作用更为突出。因此,有必要开展超大跨波形钢腹板组合箱梁在弯扭耦合作用下的受力机理研究,建立有效的弯扭耦合承载力计算模型。

针对波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合性能,学者们进行了一些理论和试验研究。李宏江等^[8]基于有限元法研究了波形钢腹板组合箱梁在偏载作用下的受力性能,并通过参数化分析确定了高跨比、宽跨比和板厚等几何参数对弯扭性能的影响;丁勇等^[9]采用偏心加载的方式对2根波形钢腹板组合箱梁进行了弯扭缩尺试验;黄洪猛^[10]采用试验和有限元结合的方法研究了波形钢腹板-钢管混凝土组合梁的弯扭耦合性能,并建立了弯扭相关方程。李运生等^[11]设计并完成了5根波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合试验,根据弯扭耦合破坏形式建立了极限弯扭关系方程。

综上所述,目前对波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合性能研究已取得一定成果,但是既有研究主要集中在中小跨径箱梁,对超大跨引起的高腹板效应对组合箱梁弯扭耦合行为影响的研究较为匮乏。针对该问题,本文设计并开展了3根超大跨波形钢腹板组合箱梁缩尺模型试验,结合有限元法研究了弯扭耦合作用下组合箱梁的受力响应、破坏模式以及极限承载力,并结合参数化分析补充了弯扭耦合关系曲线,提出了弯扭耦合承载力简化计算方法。

1 试验设计

1.1 试件尺寸

以东港特大桥为背景,设计了跨径布置为115 m+260 m+115 m的超大跨波形钢腹板组合箱梁箱梁桥,如图1所示。其主跨由两段87.5 m波形钢腹板组合箱梁和85 m的钢底板组合箱梁构成,边跨为115 m的波形钢腹板组合箱梁。为研究高腹板组合箱梁的弯扭耦合行为,基于刚度等效原则以1:10比例对腹板最大处即桥墩附近截面进行缩尺。由此得到的3根试验梁(对应编号S-1、S-2、S-3)尺寸相同,梁长和梁高分别为4 030 mm和1 300 mm,顶板长度和底板宽度分别为1 325 mm和650 mm,厚度均为80 mm,如图2所示。图2(c)展示了波形钢腹板的具体尺寸,腹板与混凝土板的连接方式是通过箍筋贯穿腹板顶、底板孔洞与混凝土板形成剪力件。混凝土顶、底板内分别布置直径为8 mm和12 mm、间距为80 mm的双层纵筋和箍筋。为有效传递扭矩,在构件两端分别布置长度为400 mm的混凝土实心段。

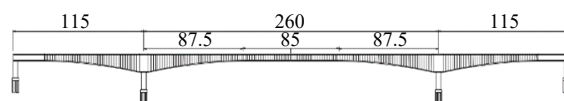


图1 试设计桥梁(单位:m)

Fig. 1 Design bridge(unit:m)

表1总结了试验梁的具体材料性能。混凝土立方体的实测平均抗压强度为50.9 MPa;波形钢腹板的屈服强度为260 MPa;钢筋的屈服强度为400 MPa;预应力筋采用单股 $\varnothing 15.2$ 低松弛钢绞线,顶板和底板分别布置4根和两根,标准强度为1 860 MPa。通过布置在预应力筋末端的压力传感器测量的有效预应力为100 kN。

1.2 加载方案及测点布置

采用福州大学的弯扭试验机进行加载,见图3。该装置通过对加载梁偏心加载来实现纯扭矩的施加,即利用钢梁固定构件一端,然后通过50 t千斤顶加载另一端上的钢梁(悬臂端长度1 500 mm)使构件能够绕着转动铰自由转动。采用三分点加载的方式来施加弯矩,即在跨中

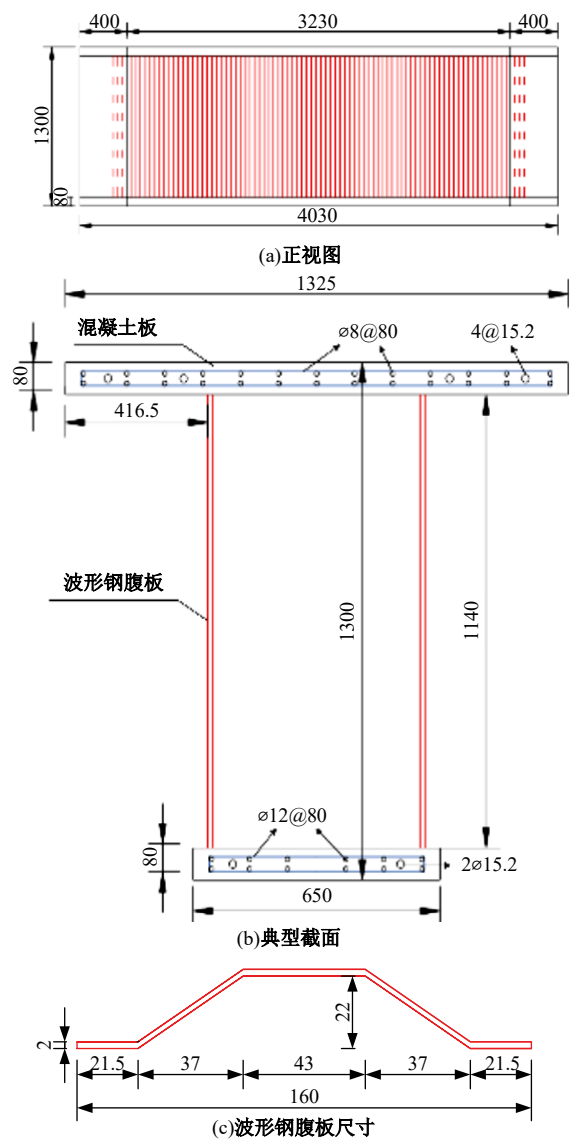


图 2 构件尺寸
Fig.2 Specimen dimension

表 1 试验梁材料属性

Table 1 Material property of specimens				
试验梁	混凝土抗压强度/ MPa	波形钢腹板屈服强度/ MPa	钢筋屈服强度/ 度/MPa	预应力筋拉伸强度/ MPa
S-1	51.2	260	410	
S-2	50.5	260	405	1 860
S-3	50.9	260	403	

1 300 mm 区域形成纯弯区,通过 200 t 千斤顶对分配梁施加集中荷载来实现弯矩加载。

3 根试验梁的加载方式略有不同。其中,S-1 采用先施加弯矩后扭矩的方式加载,而 S-2 和 S-3 采用先施加扭矩后弯矩的方式加载。选用分级加载制度,混凝土开裂前后扭矩每级加载 30 kN 和 20 kN,弯矩每级加载 40 kN 和 30 kN。

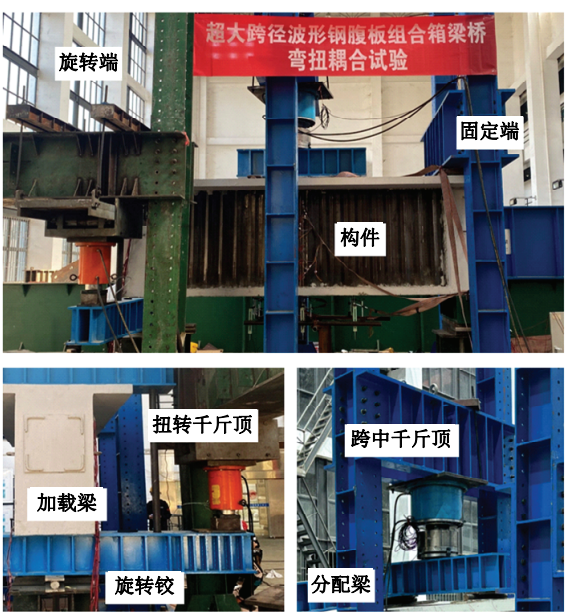


图 3 加载装置
Fig.3 Loading device

为监测试验梁的应变分布状况,在混凝土顶底板 A、B、C 截面和腹板 B 截面处分别布置应变花,如图 4 所示。其中,应变花编号为 XY 形式,X 以 T、B 和 S 表示,分别对应顶板、底板和腹板;Y 为应变花编号。在混凝土顶、底板 A 和 C 截面分别布置倾角仪和位移计来测量试验梁的扭转角和挠度。

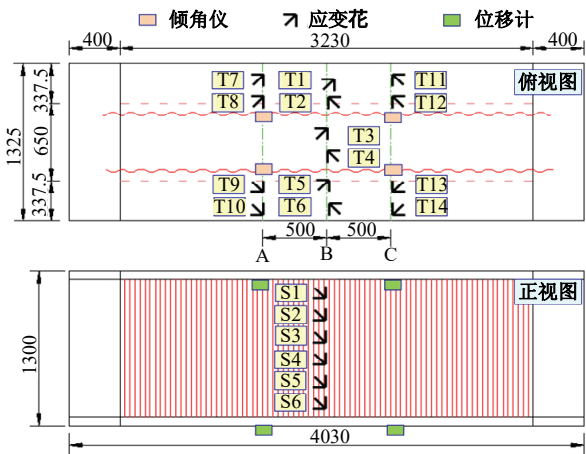


图 4 应变片布置
Fig.4 Arrangement of strain gage

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

图 5 和图 6 展示了 3 根试验梁的破坏模式和混凝土开裂模式。S-1 和 S-2 表现出典型的扭型破坏。S-1 在初始弯矩 134.35 kN·m 下始终处于弹性阶段。保持初始弯矩不变,当扭矩达到

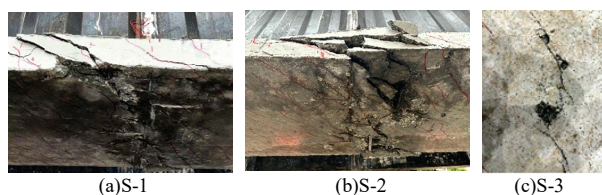


图5 破坏模式

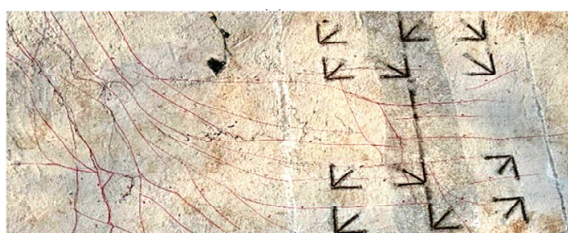
Fig. 5 Failure mode



(a)S-1



(b)S-2



(c)S-3

图6 混凝土开裂模式

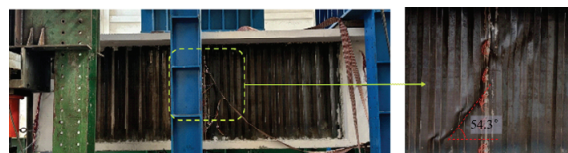
Fig. 6 Crack modes of concrete

164.81 kN·m时,混凝土底板最先出现斜向裂缝。随着扭矩的增大,裂缝不断扩展且增多。当扭矩增大至458.03 kN·m时,腹板达到屈服强度,此后裂缝数量不再增多,宽度逐渐增大。达到极限扭矩570.26 kN·m时,跨中弯扭段腹板出现明显的整体屈曲现象,钢筋屈服,混凝土底板发生剥落。S-2在初始扭矩为158.62 kN·m时,底板最先出现对角斜裂缝。随后扭矩增大至453.36 kN·m时,腹板屈服,螺旋型裂缝几乎布满构件表面。之后随着弯矩的施加和增大,试验梁的斜裂缝宽度和长度增长迅速。当弯矩达到910.23 kN·m时,腹板同样在跨中出现整体屈曲,混凝土底板剥落。

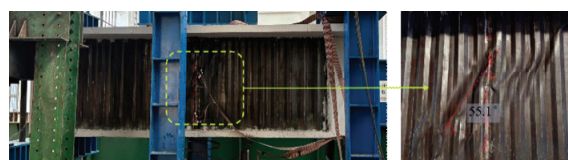
对于S-3,观察到弯型破坏。在初始扭矩145.07 kN·m下,构件表现出较好的整体性,混凝土板未出现开裂。保持初始扭矩不变,当弯矩加

至275.6 kN·m时,底板最先出现横向裂缝,并逐渐扩展至侧面。随后弯矩加至429.95 kN·m,顶板靠近固定端先出现横向裂缝,并逐渐由横向转为倾斜。当弯矩增大至769.9 kN·m时,腹板发生屈服,裂缝宽度不断增大。试验梁在达到弯矩1043.93 kN·m后加载端下侧腹板发生整体屈曲,桥面板靠近侧面边缘处被压溃。在整个加载过程中,3根试验梁的混凝土板与波形钢腹板交界处未观察到滑动和隆起现象。

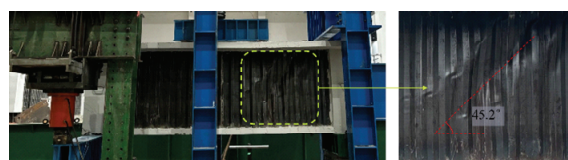
图7展示了试验梁的腹板屈曲模式。3根试验梁均为整体屈曲,且屈曲角度范围为 $45.2^{\circ} \sim 55.1^{\circ}$ 。S-1和S-2的腹板屈曲位置主要集中在跨中弯扭段,而S-3的腹板屈曲位置出现在靠近固定端加载处的弯剪扭段。造成该现象的主要原因可能是以扭矩主导的S-1和S-2腹板在跨中承受的剪力最大,而以弯矩主导的S-3腹板在靠近固定端加载处的剪力最大。



(a)S-1



(b)S-2



(c)S-3

图7 腹板屈曲模式

Fig. 7 Buckling mode

2.2 扭矩-扭率曲线

由于S-1扭矩施加前混凝土未开裂,而S-2和S-3为先扭后弯的加载方式,3根试验梁的扭矩-扭率曲线均可看作纯扭加载。由图8可知,S-1与S-2的扭矩-扭率曲线由以下3个阶段组成:①弹性阶段。扭矩与扭率呈线性增长关系,此时试验梁表现出较好的整体性;②弹塑性阶段。混凝土开裂后与钢筋充当桁架模型,与波形钢腹板共同承受外部扭矩。此时扭矩与扭率表现出非线性关系;③极限承载力阶段。裂缝宽度增大,腹板

与钢筋达到屈服强度,混凝土底板发生剥落。对于 S-3,由于施加的初始扭矩较小,该试验梁始终处于弹性阶段。

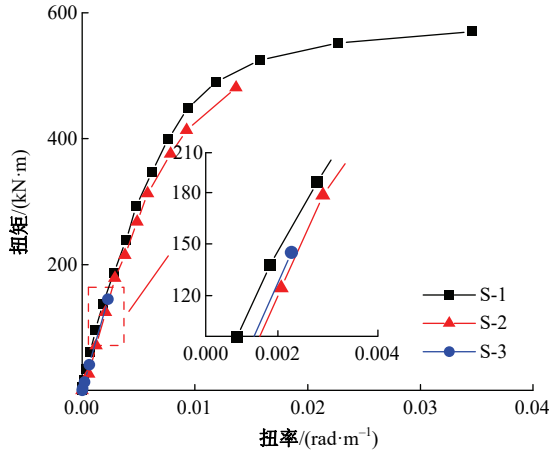


图 8 扭矩-扭率曲线

Fig. 8 Torque-twist curves

2.3 弯矩-位移曲线

对于弯型破坏的构件,当整体变形超过计算跨度的 1/50,即 64.6 mm 时,可认为超大跨波形钢腹板组合箱梁发生破坏^[3]。图 9 展示了试验梁

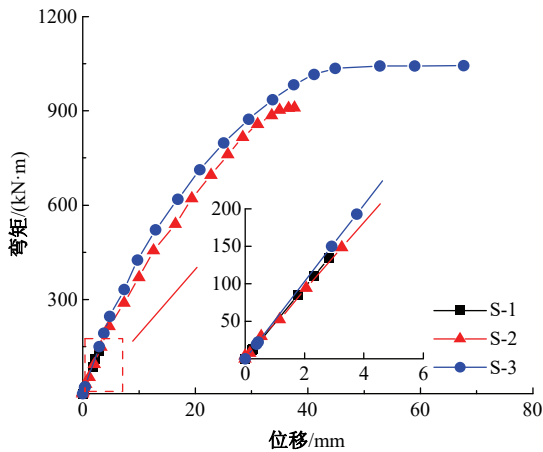


图 9 弯矩-位移曲线

Fig. 9 Bending moment-deflection curves

的弯矩-位移曲线。S-1 在弯矩加载过程中呈线性增长。S-2 和 S-3 在弯扭耦合作用下表现出较好的延性。由于 S-2 在弯矩施加前已发生开裂,其整体刚度相较于 S-3 有所下降。

2.4 混凝土板与波形钢腹板剪应变的关系

图 10 展示了试验梁的混凝土和波形钢腹板剪应变的关系曲线。在弹性阶段,混凝土与波形钢腹板剪应变均随扭矩呈线性增长。当混凝土开裂或腹板屈服时,两者的剪应变急剧增大。相较于混凝土,腹板剪应变增长速率更快。

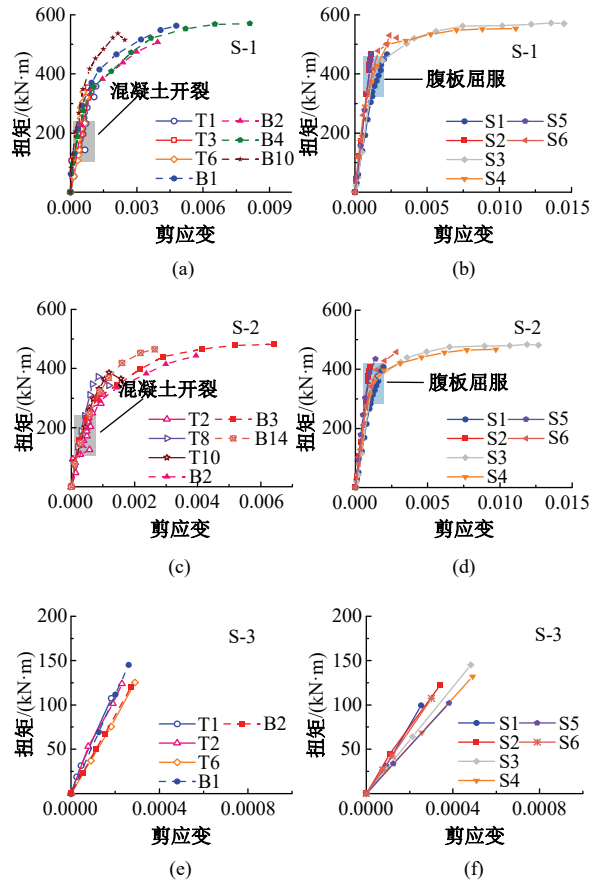


图 10 扭矩-剪应变曲线

Fig. 10 Torque-shear strain curves

3 有限元分析

3.1 模型建立

采用有限元软件 Abaqus 建立了试验梁的三维模型。混凝土顶、底板和实心段采用 C3D8R 实体单元,钢筋和预应力筋采用 T3D2 桁架单元,腹板采用 S4R 壳单元。混凝土与钢筋、波形钢腹板和预应力筋均采用嵌入式约束连接。由于试验梁一端固定,一端扭转,在旋转端设置参考点进行节点耦合,以实现扭矩加载。同样采用节点耦合的方式在三分点处对参考点施加集中力,以实现弯矩加载,见图 11。

3.2 有限元模型验证

图 12 给出了通过试验和有限元得到的超大跨波形钢腹板组合箱梁在弯扭耦合作用下的扭矩-扭率曲线、弯矩-位移曲线和扭矩-应变曲线。由图 12 可知,有限元预测曲线与试验曲线基本吻合。从表 2 和表 3 可看出,有限元模型很好地预测了试验梁在混凝土开裂、腹板屈服和极限承载力阶段的扭矩与弯矩值,表明了有限元模型的准确性。

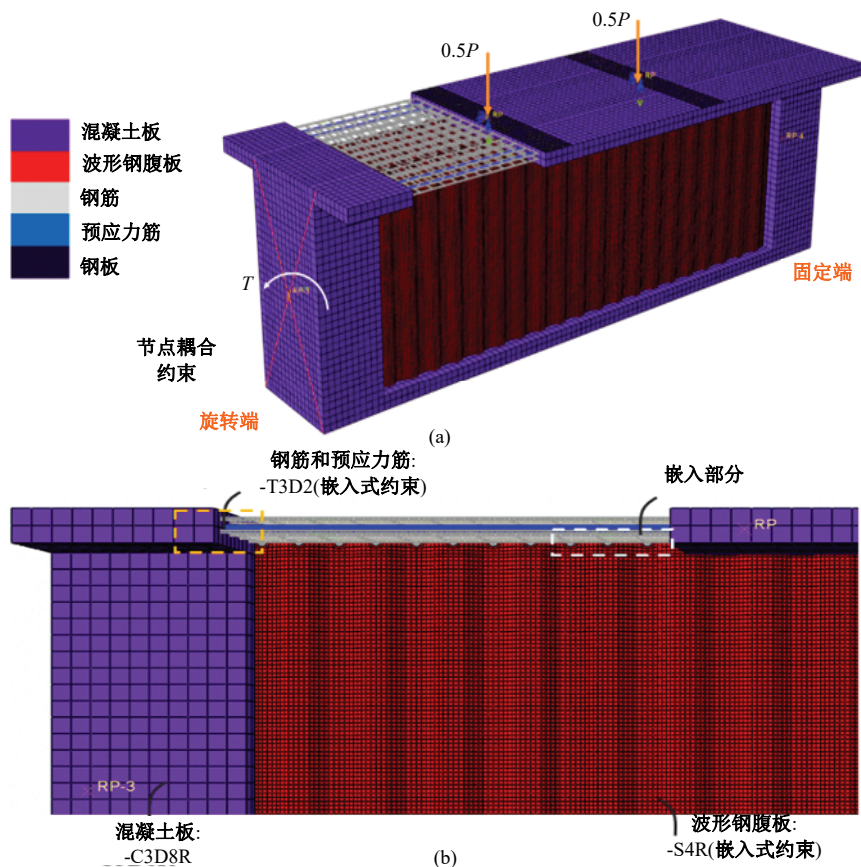
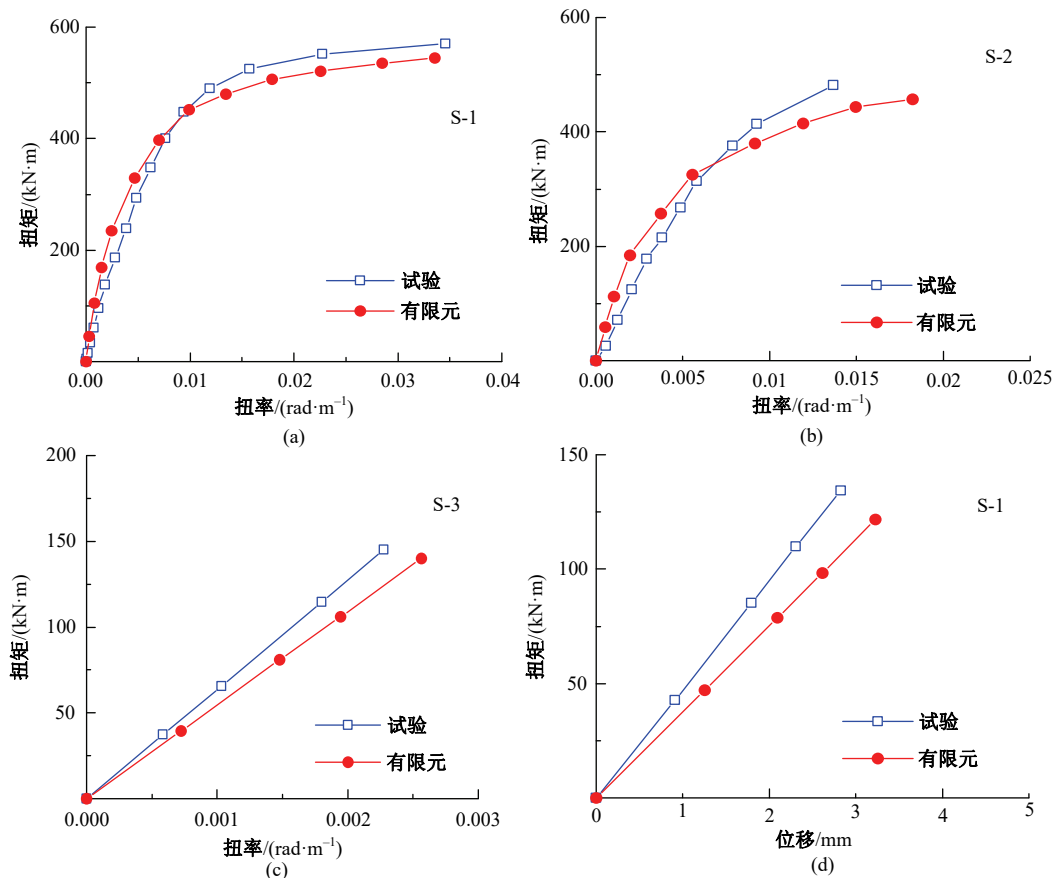


图 11 有限元模型

Fig.11 Finite element model



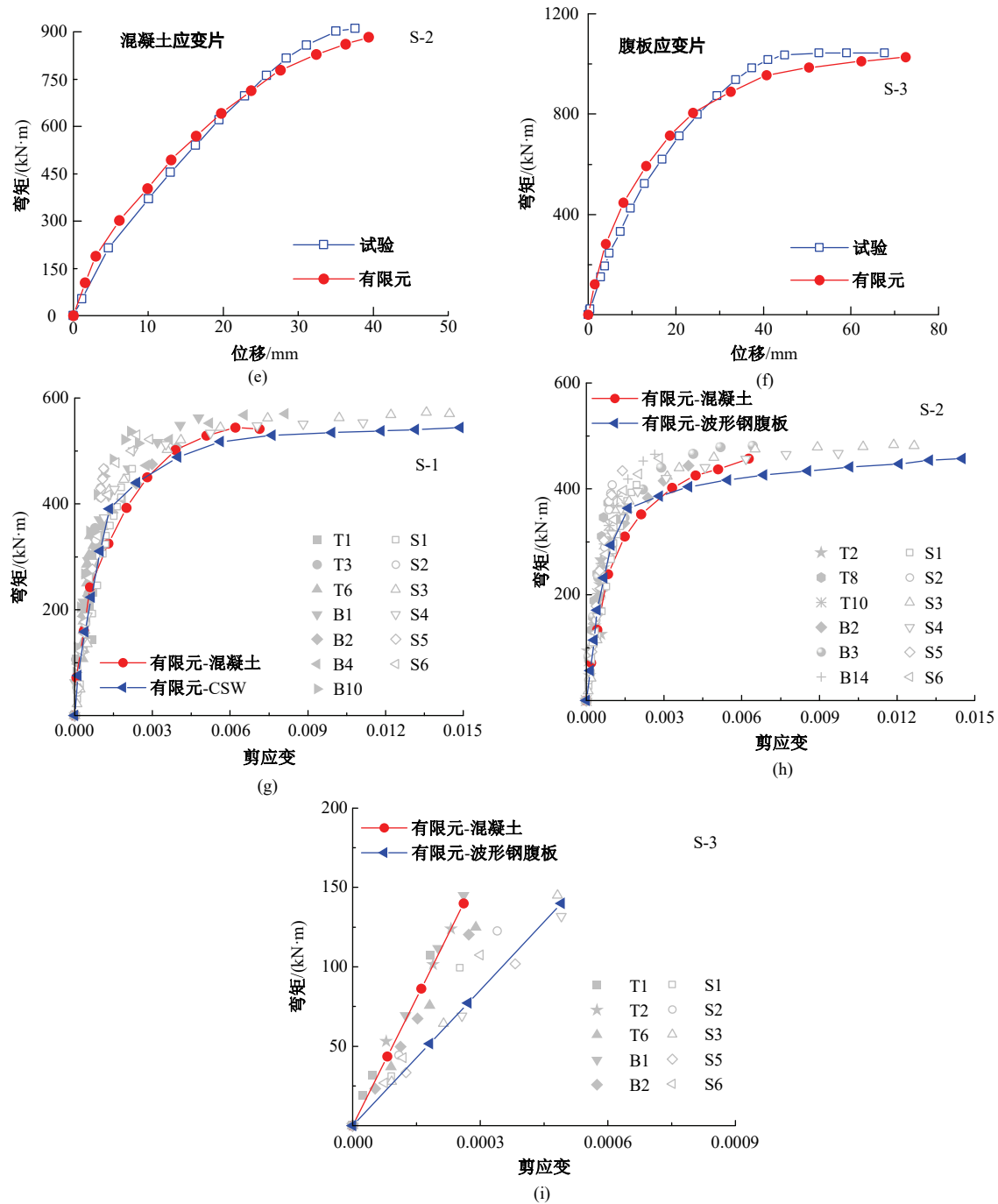


图 12 有限元模型验证

Fig. 12 Verification of finite element model

3.3 参数化分析

为进一步研究弯矩与扭矩之间的相互作用关系,基于已验证有限元模型开展了参数化分析,取初始弯矩为 0、405.41、709.46、810.82 kN·m 和初始扭矩为 0、305.96、422.01 kN·m,对应构件编号 S-4-S-10。其中, T 和 M 分别为组合箱梁在弯扭耦合作用下的抗扭强度和抗弯强度, T_u 和 M_u 分别为组合箱梁在纯扭作用下的抗扭承载力以及纯

弯作用下的抗弯承载力。

图 13 展示了通过参数化分析得到的弯扭相互作用曲线。由图 13 可知,当弯矩比 $M/M_u < 0.4$ 时,弯扭耦合关系曲线呈增长趋势,而弯矩比 $0.4 \leq M/M_u < 1.04$ 时,抗扭强度 T 随着弯矩比 M/M_u 的增大而减小。随后弯矩比 M/M_u 基本保持不变,抗扭强度 T 逐渐降低为 0。

表 2 有限元扭矩结果比较

Table 2 Comparison of torques with FEA results

试验梁	加载方式	弹性阶段			开裂阶段			腹板屈服阶段			极限承载力阶段			破坏模式
		$T_{e,Exp}/$ (kN·m)	$T_{e,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{T_{e,Exp}}{T_{e,FEA}}$	$T_{cr,Exp}/$ (kN·m)	$T_{cr,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{T_{cr,Exp}}{T_{cr,FEA}}$	$T_{wy,Exp}/$ (kN·m)	$T_{wy,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{T_{wy,Exp}}{T_{wy,FEA}}$	$T_{u,Exp}/$ (kN·m)	$T_{u,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{T_{u,Exp}}{T_{u,FEA}}$	
S-1	先弯后扭	—	—	—	164.81	169.10	0.975	458.03	461.72	0.992	570.26	543.98	1.048	扭型破坏
S-2	先扭后弯	—	—	—	158.62	161.37	0.983	453.36	451.39	1.004	481.23	457.37	1.052	扭型破坏
S-3	先扭后弯	145.07	139.94	1.037	—	—	—	—	—	—	—	—	—	弯型破坏

注:; T 表示扭矩;下角标 e 表示弹性阶段;cr 表示混凝土开裂状态;wy 表示腹板屈服状态;u 表示极限承载力状态;Exp 表示试验值。

表 3 有限元弯矩结果比较

Table 3 Comparison of bending moments with FEA results

试验梁	加载方式	弹性阶段			开裂阶段			腹板屈服阶段			极限承载力阶段			破坏模式
		$M_{e,Exp}/$ (kN·m)	$M_{e,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{M_{e,Exp}}{M_{e,FEA}}$	$M_{cr,Exp}/$ (kN·m)	$M_{cr,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{M_{cr,Exp}}{M_{cr,FEA}}$	$M_{wy,Exp}/$ (kN·m)	$M_{wy,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{M_{wy,Exp}}{M_{wy,FEA}}$	$M_{u,Exp}/$ (kN·m)	$M_{u,FEA}/$ (kN·m)	$\frac{M_{u,Exp}}{M_{u,FEA}}$	
S-1	先弯后扭	134.35	121.60	1.105	—	—	—	—	—	—	—	—	—	扭型破坏
S-2	先扭后弯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	910.23	882.95	1.031	扭型破坏
S-3	先扭后弯	—	—	—	275.60	281.89	0.978	769.90	782.35	0.984	1 043.93	1 027.85	1.016	弯型破坏

注: M 表示弯矩。

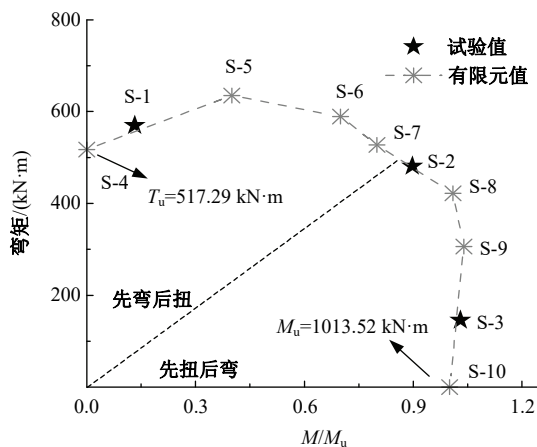


图 13 参数化分析

Fig. 13 Parametric analysis

4 弯扭相关性分析

4.1 已有弯扭耦合关系曲线

图 14 总结了现有钢-混凝土组合梁的弯扭耦合关系曲线(Tan 等^[12]、Nie 等^[13]、Colville^[14]、Nie 等^[15]、李运生等^[11]和 Huang 等^[16])。由图 14 可知, Colville^[14]和李运生等^[11]认为弯扭耦合作用下组合箱梁的承载力会相对减小。Nie 等^[13]和 Huang 等^[16]发现在一定范围内,弯矩和扭矩的存在分别提高了组合箱梁的抗扭强度 T 和抗弯强度 M 。Nie 等^[15]和 Tan 等^[12]得出了以下结论:在达到抗

弯承载力 M_u 前,抗扭强度 T 始终随着弯矩比 M/M_u 升高。然而,对于超大跨波形钢腹板组合箱梁,在弯扭耦合作用下其抗弯强度 M 未得到明显提升,而抗扭强度 T 得到提高。这可能是因为混凝土板内由弯矩产生的压应力抵消了由扭矩产生的斜拉应力,从而延缓了裂缝扩展,提高了组合箱梁的抗扭强度 T 。

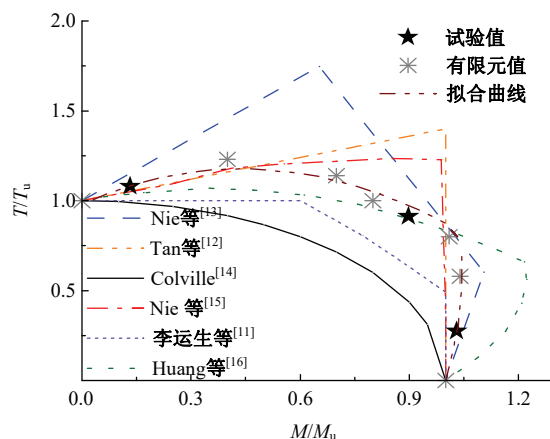


图 14 弯扭耦合关系曲线

Fig. 14 Bending-torsional relation curves

综上所述,现有弯扭耦合关系曲线并不适用于超大跨波形钢腹板组合箱梁。针对该问题,本文基于试验和参数化分析拟合得到了超大跨波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合关系公式,见式(1)。

参数化分析结果表明:在弯矩比 $0 < M/M_u < 0.852$ 时,弯矩的存在提高了组合箱梁的抗扭强度 T 。扭矩比 $T/T_u = 0.612$ 为组合箱梁弯型破坏和扭型破坏的界限。

$$\begin{cases} \frac{T}{T_u} + 0.996\left(\frac{M}{M_u}\right)^2 - 0.88\frac{M}{M_u} = 1, 0.612 < \frac{T}{T_u} < 1 \\ \frac{M}{M_u} + 0.122\left(\frac{T}{T_u}\right)^2 - 0.153\frac{T}{T_u} = 1, 0 \leq \frac{T}{T_u} \leq 0.612 \end{cases} \quad (1)$$

4.2 简化计算方法

为提高求解速率,对上述拟合公式进行简化,将两段抛物线方程转化为三折线模型,如图 15 所示。当 $0.89 < T/T_u < 1.2$ 时,抗扭强度 T 随着弯矩比 M/M_u 线性升高或降低。当 $M/M_u \geq 1$ 时,抗弯强度 M 按纯弯构件计算,见式(2):

$$\begin{cases} \frac{T}{T_u} = 0.415\frac{M}{M_u} + 1, \frac{M}{M_u} < 0.46 \\ \frac{T}{T_u} = 1.46 - 0.567\frac{M}{M_u}, 0.46 \leq \frac{M}{M_u} < 1 \\ \frac{M}{M_u} = 1, \frac{M}{M_u} \geq 1 \text{ 或 } 0 \leq \frac{T}{T_u} \leq 0.89 \end{cases} \quad (2)$$

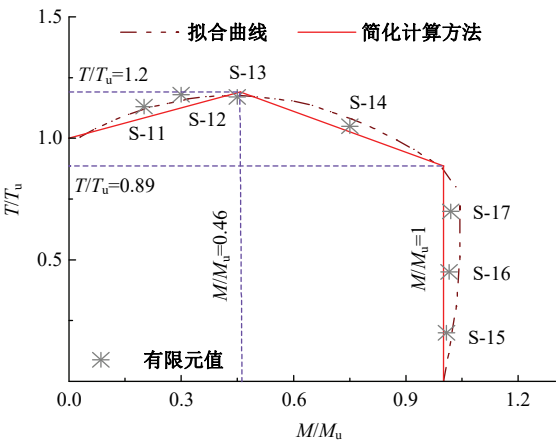


图 15 弯扭耦合简化曲线

Fig. 15 Simplified curve under combined bending and torsion

为验证拟合曲线和简化公式的适用性,通过有限元模型补充了初始弯矩为 202.7、304.06、456.08、760.14 kN·m 和初始扭矩为 103.46、232.78、362.1 kN·m 的情况,对应编号为 S-11-S-17。由图 15 和表 4 可知,本文提出的拟合曲线公式和简化计算方法与有限元分析结果最大误差不超过 6%,表明两者均可用于预测超大跨波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合行为。

表 4 参数化结果分析

Table 4 Parametric analysis results

有限元梁	加载方式	有限元		α_F	α_N	α_S	α_N/α_F	α_S/α_F	破坏模式
		$T/(kN\cdot m)$	$M/(kN\cdot m)$						
S-11	先弯后扭	584.54	202.70	0.177	0.179	0.185	1.011	1.045	扭型破坏
S-12	先弯后扭	610.40	304.06	0.254	0.255	0.267	1.004	1.051	扭型破坏
S-13	先弯后扭	605.23	456.08	0.385	0.383	0.379	0.995	0.984	扭型破坏
S-14	先弯后扭	543.15	760.14	0.714	0.706	0.725	0.989	1.015	扭型破坏
S-15	先扭后弯	103.46	1 021.63	5.040	5.060	5.000	1.004	0.992	弯型破坏
S-16	先扭后弯	232.78	1 028.72	2.256	2.169	2.222	0.961	0.985	弯型破坏
S-17	先扭后弯	362.10	1 033.79	1.457	1.442	1.429	0.990	0.981	扭型破坏
平均值		—	—	—	—	—	0.993	1.007	—
标准差		—	—	—	—	—	0.015	0.028	—

注: α_F 、 α_N 和 α_S 分别为通过有限元法、拟合曲线和简化计算方法得到的弯扭比 $(M/M_u)/(T/T_u)$ 。

5 结 论

(1)在弯扭耦合作用下,组合箱梁的破坏形式表现为弯型破坏和扭型破坏,分别以混凝土顶板被压碎和混凝土底板剥落为标志;两种破坏形式的界限为扭矩比 $T/T_u = 0.612$;弯型破坏时腹板整体屈曲现象集中在弯剪扭段,扭型破坏时腹板整体屈曲现象集中在弯扭段。

(2)建立的有限元模型能够准确预测超大跨径波形钢腹板组合箱梁在弯扭耦合作用下的全过程受力行为。

(3)当弯矩比 $0 < M/M_u < 0.852$ 时,组合箱梁的抗扭强度 T 得到提高。

(4)建立的弯扭耦合关系曲线和简化弯扭耦合承载力计算公式均具有较高的计算精度,最大误差不超过 6%,可用于预测超大跨波形钢腹板组合箱梁的弯扭耦合关系。

参考文献:

[1] 丁勇,江克斌,周寅智,等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭作用下抗扭承载力计算模型[J]. 计算力学学

- 报, 2013, 30(1): 137-142.
- Ding Yong, Jiang Ke-bin, Zhou Yin-zhi, et al. Analytical model for torsional strength of prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(1): 137-142.
- [2] 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.
- [3] 赵品, 荣学亮, 邵旭东, 等. 节段预制拼装波形钢腹板单箱双室箱梁抗弯性能试验研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 142-149.
- Zhao Pin, Rong Xue-liang, Shao Xu-dong, et al. Research on bending mechanism of precast segmental composite box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 142-149.
- [4] 黄汉辉, 陈康明, 吴庆雄, 等. 波形钢腹板-钢管混凝土桁式弦杆组合梁抗扭性能研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 93-104.
- Huang Han-hui, Chen Kang-ming, Wu Qing-xiong, et al. Research on torsional behavior of composite girders with CSW-CFST truss chords[J]. Journal of Civil Engineering, 2023, 56(1): 93-104.
- [5] Zhang H, Zhao Q, Xiao F, et al. Improved softened truss model for prestressed concrete composite box girders with corrugated steel webs under pure torsion[J]. Engineering Structures, 2024, 302: No. 117380.
- [6] Chen Y, Dong J, Tong Z, et al. Flexural behavior of composite box girders with corrugated steel webs and trusses[J]. Engineering Structures, 2020, 209: No. 110275.
- [7] 宋随弟, 陈克坚, 袁明. 波形钢腹板连续刚构桥极限跨度研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 72-77.
- Song Sui-di, Chen Ke-jian, Yuan Ming. Study of ultimate spans of continuous rigid-frame bridges with corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2017, 47(4): 72-77.
- [8] 李宏江, 万水, 钱培舒, 等. 波形钢腹板预应力混凝土箱梁的试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 34-39.
- Li Hong-jiang, Wan Shui, Qian Pei-shu, et al. Experimental study on prestressed concrete box girder with corrugated steel web[J]. China Highway Journal, 2004, 17(4): 34-39.
- [9] 丁勇, 江克斌, 林铸明, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁弯扭复合作用下抗扭强度试验研究[C]//第 23 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册), 兰州, 2014: 17-21.
- Ding Yong, Jiang Ke-bin, Lin Zhu-ming, et al. Experimental research on ultimate torsional strength of PC composite box girder with corrugated steel webs under torsion combined bending[C]//Proceedings of the 23rd National Structural Engineering Conference (Volume II), Lanzhou, China, 2014: 17-21.
- [10] 黄洪猛. 考虑剪切变形的波形钢腹板组合箱梁扭转和畸变理论及其应用[D]. 兰州: 兰州交通大学土木工程学院, 2023.
- Huang Hong-meng. Theory and application on torsion and distortion of composite box girders with corrugated steel webs considering shear deformation[D]. Lanzhou: School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [11] 李运生, 李孟彪, 王亚萍, 等. 钢-混凝土波形钢腹板组合梁弯扭性能研究[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43: 99-109.
- Li Yun-sheng, Li Meng-biao, Wang Ya-ping, et al. Study on the bending and torsion performance of steel-concrete corrugated steel web beams[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(1): 99-109.
- [12] Tan E L, Uy B. Experimental study on straight composite beams subjected to combined flexure and torsion[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2009, 65(8): 784-793.
- [13] Nie J, Luo L, Hu S. Experimental study on composite steel-concrete beams under combined bending and torsion[J]. Composite and Hybrid Structures, 2000, 2: 631-638.
- [14] Colville J. Tests of curved steel-concrete composite beams[J]. Journal of the Structural Division, 1973, 99(7): 1555-1570.
- [15] Nie J, Tang L, Cai C. Performance of steel-concrete composite beams under combined bending and torsion[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(9): 1048-1057.
- [16] Huang H, Chen K, Wu Q, et al. Experimental investigation on composite girders with CSW-CFST truss chords subjected to combined flexure and torsion[J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(8): 1468-1485.