

基于开孔钢板连接的钢-混组合梁抗弯性能

胡晓暄¹, 贾艳敏^{1*}, 许峻铭¹, 王超凡¹, 韩旭华², 王鲁海³

(1. 东北林业大学土木与交通学院, 哈尔滨 150040; 2. 青岛市交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 青岛市即墨区交通运输局, 山东 青岛 266200)

摘要: 为研究开孔钢板连接 (perforated steel plate, PBL) 的钢-混组合梁 (Steel-concrete composite beams, PSCB) 抗弯性能。设计制作 PSCB 试件并开展抗弯加载试验, 对其破坏形态、挠度、应变以及承载力进行分析。基于简化塑性理论, 建立考虑 PBL 抗剪连接件影响的钢-混组合梁抗弯承载力计算公式。结果表明, PSCB 的破坏形态为弯曲破坏, 在 $0.79 P_u$ 前, 其沿梁高方向的应变规律基本符合平截面假定。通过简化塑性理论推导得到 PBL 连接的钢-混组合梁抗弯承载力计算公式, 公式计算值与试验值对比结果基本吻合。在计算 PSCB 的抗弯承载力时, 不可忽略 PBL 抗剪连接件中开孔钢板的作用。

关键词: PBL 抗剪连接件; 钢-混组合梁; 简化塑性理论; 抗弯试验; 承载力计算公式

中图分类号: U448.21

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.05.020

Study on Flexural Behavior of Connecting Steel-Concrete Composite Beams Based on PBL

HU Xiaoxuan¹, JIA Yanmin^{1*}, XU Junming¹, WANG Chaofan¹, Han Xuhua², WANG Luhai³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Qingdao Transportation Planning and Design Institute Co., Qingdao 266000, China; 3. Qingdao Jimo District Transportation Bureau, Qingdao 266200, China)

Abstract: In order to study the flexural behavior of steel-concrete composite beams (PSCB) connected by Perforated Steel Plate (PBL), in this paper, the PSCB was designed and the flexural loading test was carried out to analyze its failure mode, deflection, strain and bearing capacity. Based on the simplified plastic theory, a formula for calculating the flexural capacity of steel-concrete composite beams considering the influence of PBL connectors was established. The results showed that the failure mode of PSCB was bending damage, and its strain pattern along the beam height direction was basically consistent with the flat section assumption before $0.79 P_u$. The formula for calculating the flexural capacity of steel-concrete composite beams with PBL connection was derived by simplified plastic theory. The calculated values of the formula were basically consistent with the experimental values. When calculating the flexural capacity of PSCB, the role of perforated steel plates in PBL connectors cannot be ignored.

Keywords: PBL shear connector; steel-concrete composite beam; simplified plastic theory; flexural test; calculation formula for bearing capacity

0 引言

钢-混组合梁 (steel-concrete composite beams, PSCB) 是由钢梁与混凝土板组成, 二者的组合有助于发挥各自材料的性能优势^[1]。同时, 组合梁因其具有

自重小、结构轻和跨越能力大等优点在我国的桥梁工程中得到了广泛应用。

钢-混组合梁交界面的连接是保证结构整体性的关键, 一般通过抗剪连接件来保证钢梁和混凝土板间的有效传力^[2]。抗剪连接件的连接形式包括栓钉连

收稿日期: 2024-12-06

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (E2017003); 蓝谷至胶东国际机场快速通道工程科研项目 (HKF230500003)。

第一作者简介: 胡晓暄, 硕士研究生。研究方向为桥梁工程。E-mail: 1497957043@qq.com

***通信作者:** 贾艳敏, 博士, 教授。研究方向为道路桥梁。E-mail: yanminjia2008@126.com

引文格式: 胡晓暄, 贾艳敏, 许峻铭, 等. 基于开孔钢板连接的钢-混组合梁抗弯性能[J]. 森林工程, 2025, 41(5): 1073-1081.

HU X X, JIA Y M, XU J M, et al. Study on flexural behavior of connecting steel-concrete composite beams based on PBL[J]. Forest Engineering, 2025, 41(5): 1073-1081.

接、开孔钢板连接(perfobond leiste, PBL)和型钢连接等^[3]。其中,PBL连接件是由开孔钢板和贯穿钢筋组合而成,具有承载力强、刚度大的优性能,被广泛应用于钢-混组合结构中^[4-5]。

目前,国内外学者对钢-混组合结构中的PBL抗剪连接件的力学性能进行大量研究^[6-13]。其中,黄文峰等^[6]和武永丽等^[7]的研究结果表明,横向贯穿钢筋直径、开孔钢板厚度及开孔直径是影响PBL抗剪承载能力的重要因素,并提出PBL抗剪连接件的抗剪承载力计算公式。Wu等^[8]、Peng等^[9]和Shan等^[10]进行了多孔复合型PBL的推出试验,试验结果表明,不同板厚下的抗剪连接件均发生弯曲变形,孔数的增加可使多孔PBL的贯穿钢筋破坏形态由剪切破坏逐渐变为弯拉破坏。陈一馨等^[11]、张凡等^[12]和周凌宇等^[13]采用有限元软件对抗剪连接件推出试验全过程模拟,结果表明,PBL抗剪连接件主要通过开孔钢板传递剪力,开孔钢板高度和混凝土强度均是影响抗剪连接件极限承载力的关键因素。

综上所述,在PBL抗剪连接件的研究方面,大部分

学者多采用推出试验或者数值模拟的方法^[14-15],且对PBL自身的极限承载能力和抗剪性能的研究更为关注。关于PBL连接下的钢-混组合梁抗弯性能研究较少,其抗弯承载力计算公式还尚未进行系统性分析。通过试验,研究PBL连接下钢-混组合梁的抗弯性能;基于简化塑性理论,考虑PBL连接件中开孔钢板对组合梁抗弯性能的影响;最后,结合组合梁抗弯承载力计算成果,引入修正系数,推导PSCB的抗弯承载力计算公式。

1 试验概况

1.1 试验模型梁的设计与制作

模型梁总跨径为3.96 m,计算跨径为3.76 m,PBL抗剪连接件采用双排多孔式3 860 mm×10 mm×70 mm的布置形式。根据参考文献[16]计算得到PBL中开孔数量为22个。PBL详细布置如图1所示。

钢梁、开孔钢板、横隔板均采用Q355钢材。混凝土板内部布置上下两层纵筋,纵筋配筋率2.23%,横向配筋率0.41%。模型梁构造如图2所示。

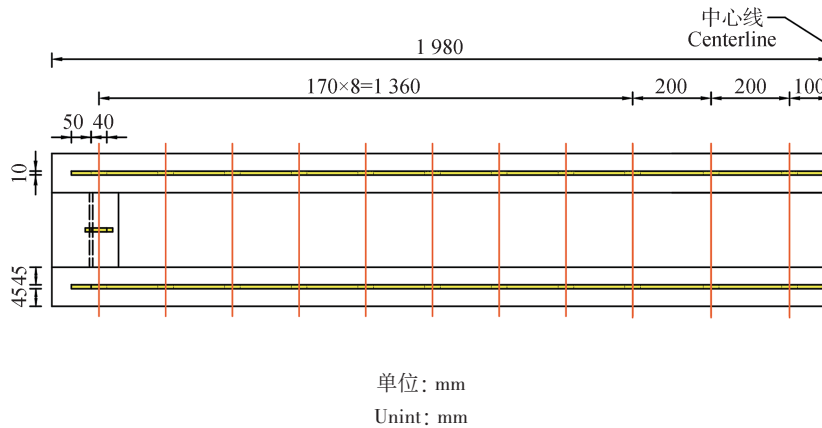


图1 PBL连接件
Fig. 1 PBL connector

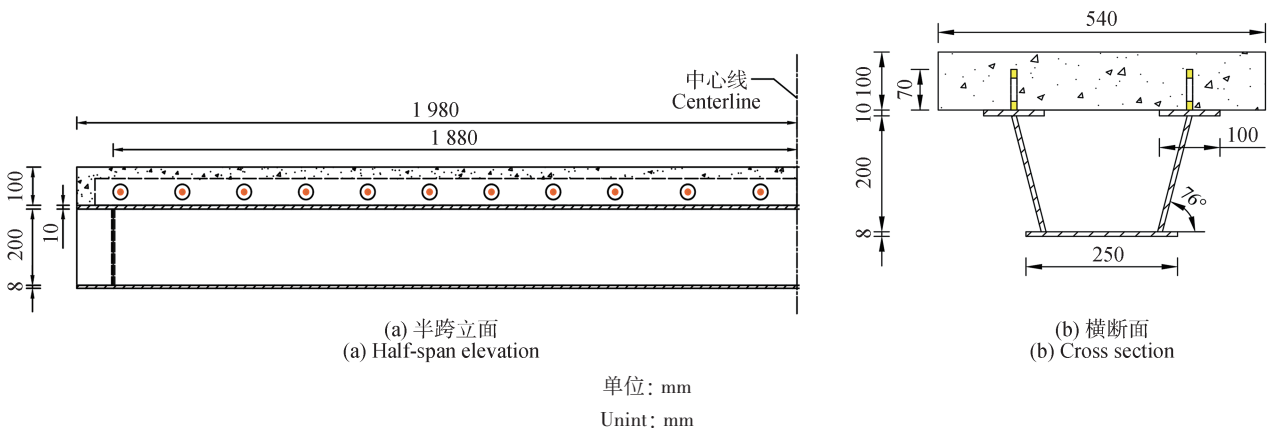


图2 试验模型梁构造
Fig. 2 Test model beam construction drawing

1.2 材料力学性能

PSCB 混凝土的轴心抗压强度实测值为 56.3 MPa,

弹性模量实测值为 3.33×10^4 MPa。钢材实测数据见表 1。

表 1 钢材的力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of steel

类别 Category	厚度(直径)/mm Thickness/Diameter	屈服强度/MPa Yield strength	抗拉强度/MPa Tensile strength	弹性模量/MPa Elastic modulus
Q355	8	440	555	2.06×10^5
Q355	10	442	558	2.06×10^5
HPB300	6	360	486	2.00×10^5
HRB400	12	449	615	2.10×10^5

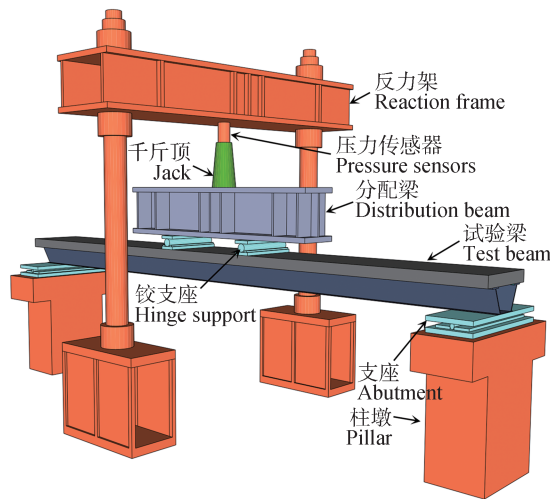
1.3 加载方案与测点布置

试验采用两点对称加载, 两加载点间距为 700 mm, 加载装置如图 3 所示。试验开始前, 先进行预加载至

25 kN。试验加载采用分级加载, 每一级 10 kN, 在每一级加载后持荷 3 min。



(a) 试验现场实际加载
(a) The actual loading diagram of the test site



(b) 试验加载装置
(b) Schematic diagram of test loading device

图 3 试验现场加载条件及加载装置

Fig. 3 Test site loading conditions and loading device

应变检测方法有应变电测法、光纤光栅测量、机械测试法等^[17-18],选用应变电测法来进行应变检测。分别在试验梁 1/4、跨中截面布置应变片测点,在支座、1/8、

1/4、3/8 和跨中截面布置开孔钢板和贯穿钢筋的应变片测点,在支座、1/4、跨中截面布置竖向位移传感器。试验梁的具体测点布置如图 4 所示。

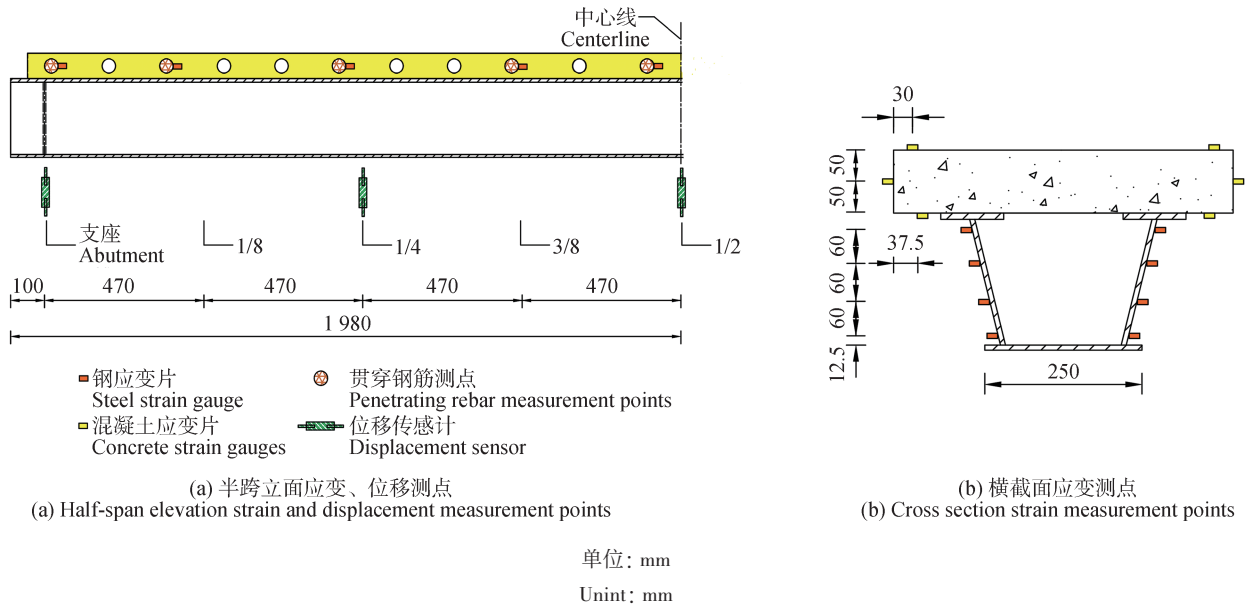


图 4 测点布置图
Fig. 4 Layout of measurement points

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏模式

在加载初期,钢梁和混凝土翼板呈现出良好的整体性。当荷载达到 508 kN 时,在加载点附近,PSCB 的混凝土板第一次出现横向细微裂纹,随着荷载持续增

大,混凝土翼板底部产生横向裂缝,如图 5(a)所示。当荷载达到 541.83 kN (P_u) 时,PSCB 达到极限抗弯承载力,此时,加载点附近横向主裂缝贯穿混凝土板,裂缝附近混凝土保护层剥落,如图 5(b)所示。弯剪段的混凝土板产生了纵桥向细微裂缝,如图 5(c)所示。



(a) 混凝土底板裂缝 (a) Cracks in concrete footings
(b) 混凝土顶板贯穿裂缝 (b) Concrete roof through cracks
(c) 混凝土弯剪段裂缝 (c) Cracks of concrete in bending shear section

图 5 裂缝分布情况
Fig. 5 Distribution of cracks

PSCB 的最终破坏表现为跨中加载点附近混凝土板上缘压碎。在加载结束时,PSCB 的破坏形态如图 6 所示。

2.2 荷载-挠度曲线

跨中荷载-挠度曲线如图 7 所示。由图 7 可知,PSCB 跨中荷载-挠度曲线可分为 3 个阶段。试验加载初期,PSCB 跨中荷载-挠度曲线基本呈线性关系,此

时 PSCB 处于线性阶段。在荷载超过 296.84 kN 后,该曲线斜率发生微小变化,但 PSCB 仍处于线性阶段。在荷载超过 $0.79 P_u$ 后,曲线倾角发生明显变化,此时 PSCB 进入非线性阶段。随着荷载的增大,挠度增长速率加快,此阶段荷载-挠度曲线逐渐呈非线性关系。当荷载达到 541.83 kN 时,PSCB 达到极限状态。



图 6 PSCB 受弯破坏形态

Fig. 6 Bending failure mode of PSCB

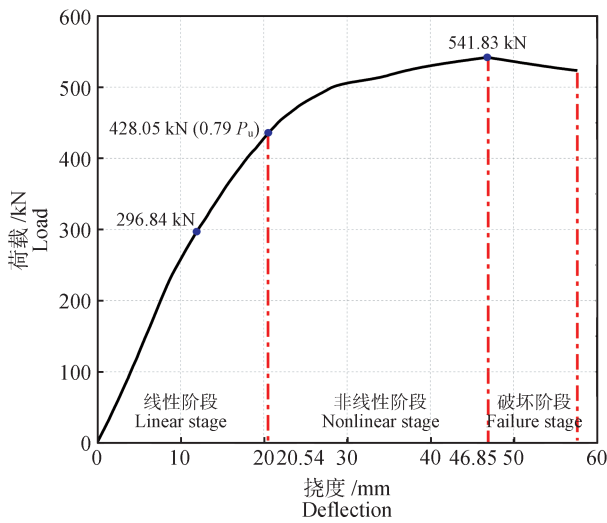


图 7 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 7 Mid-span load-deflection curve

2.3 应变分析

2.3.1 混凝土板与钢梁应变分析

对 PSCB 的跨中截面沿梁高方向的应变分布进行分析,如图 8 所示。由图 8 可知,在荷载达到 $0.79 P_u$ 前,混凝土板和钢梁上翼缘板处于受压状态。跨中截面钢梁和混凝土板沿梁高方向的应变基本呈线性变化,符合平截面假定。在荷载超过 $0.79 P_u$ 后,应变沿梁高逐渐呈非线性分布,混凝土板和钢梁的应变增大速率明显加快。当荷载达到 $0.94 P_u$ 时,跨中截面的中性轴上移,混凝土板底部和钢梁上翼缘处于受拉状态。在荷载超过 $0.94 P_u$ 后,跨中截面钢梁底缘的拉应变急剧增加,其拉应变超过其屈服应变 $2700 \mu\epsilon$ 。混凝土的压应变接近 $2500 \mu\epsilon$ 且超过混凝土峰值应变 $2000 \mu\epsilon$ ^[19],混凝土板发生开裂。

2.3.2 PBL 抗剪连接件应变分析

开孔钢板的应变沿纵桥向分布如图 9(a)所示,贯

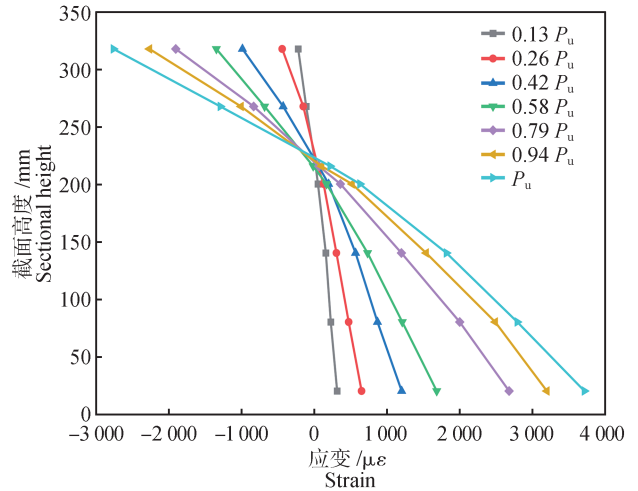


图 8 跨中沿梁高方向的应变分布

Fig. 8 Strain distribution along the beam height in mid-span

穿钢筋的横向应变沿纵桥向的分布如图 9(b)所示。由图 9 可知,在荷载加至 $0.26 P_u$ 前,开孔钢板和贯穿钢筋的应变很小且增长缓慢,PSCB 的结构抵抗力主要由开孔钢板两端的混凝土榫提供。在荷载超过 $0.26 P_u$ 后,随着荷载的持续增加,开孔钢板和贯穿钢筋应变逐渐变大,开孔钢板和贯穿钢筋逐步参与工作。

在不同荷载等级作用下,开孔钢板各个截面的应变值随着荷载的增大而增大,其整体曲线呈上升趋势。开孔钢板主要起到传递纵向剪力的作用。

在荷载超过 $0.26 P_u$ 后,贯穿钢筋应变增长速率明显加快,其中 $3/8$ 截面附近处的贯穿钢筋应变值最大。此阶段贯穿钢筋受力类似于支撑在两端混凝土块上并承受开孔钢板集中荷载的弹性地基梁^[20],实现抵抗部分弯曲变形的作用。在荷载超过 $0.94 P_u$ 后,靠近梁端的贯穿钢筋大部分应变超过其屈服应变 $1800 \mu\epsilon$,钢梁与混凝土板间 PBL 连接件的抗剪能力得到充分发挥。由于贯穿钢筋对开孔钢板孔内的混凝土具有约束作用,使得混凝土处于三向受压状态。这种约束作用在提高混凝土抗剪承载力的同时,使得混凝土破裂和恢复过程中所产生的应变多次调整,因此贯穿钢筋应变变化曲线形成了多段上升下降的形态^[21]。

3 抗弯承载力计算方法

3.1 组合箱梁的抗弯承载力计算方法

基于《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)中的简化塑性理论,参考文献[22]考虑 PBL 连接件中开孔孔径、开孔钢板厚度等因素,推导了 PSCB 的抗弯承载力计算方法。上述规范和参考文献均是工字形钢梁为研究对象所提出的抗弯承载力计算公式,

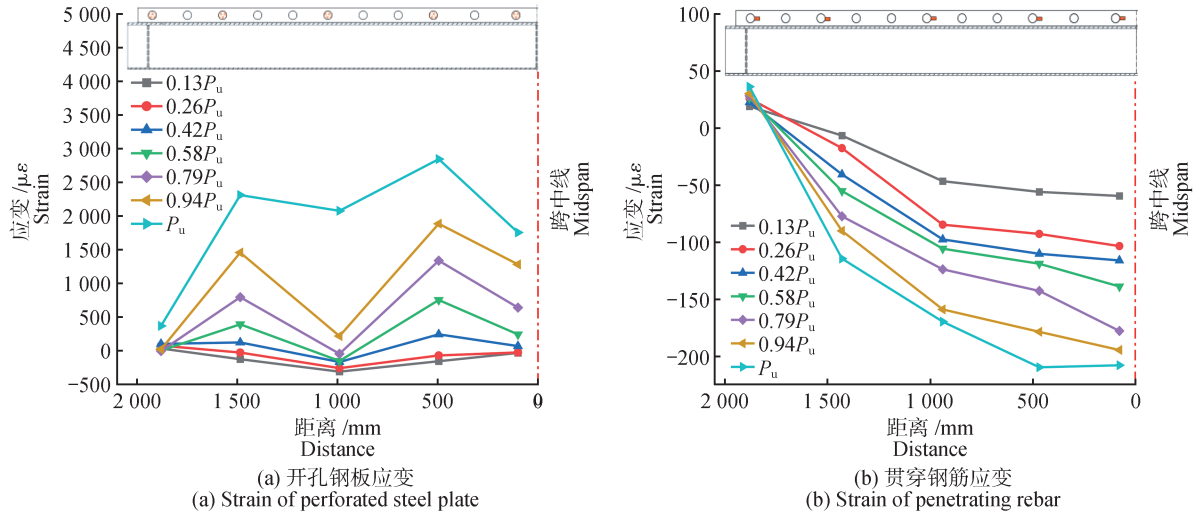


图9 纵桥向PBL的应变分布
Fig. 9 Strain distribution of PBL in longitudinal direction

而本研究对象PSCB为腹板带有倾角的钢-混组合箱梁,为能够精确计算钢梁腹板对PSCB抗弯承载力的贡

献,考虑PSCB腹板角度,由此引入修正系数 $\lambda = \csc\alpha$ 。组合梁塑性中性轴截面类型如图10所示。

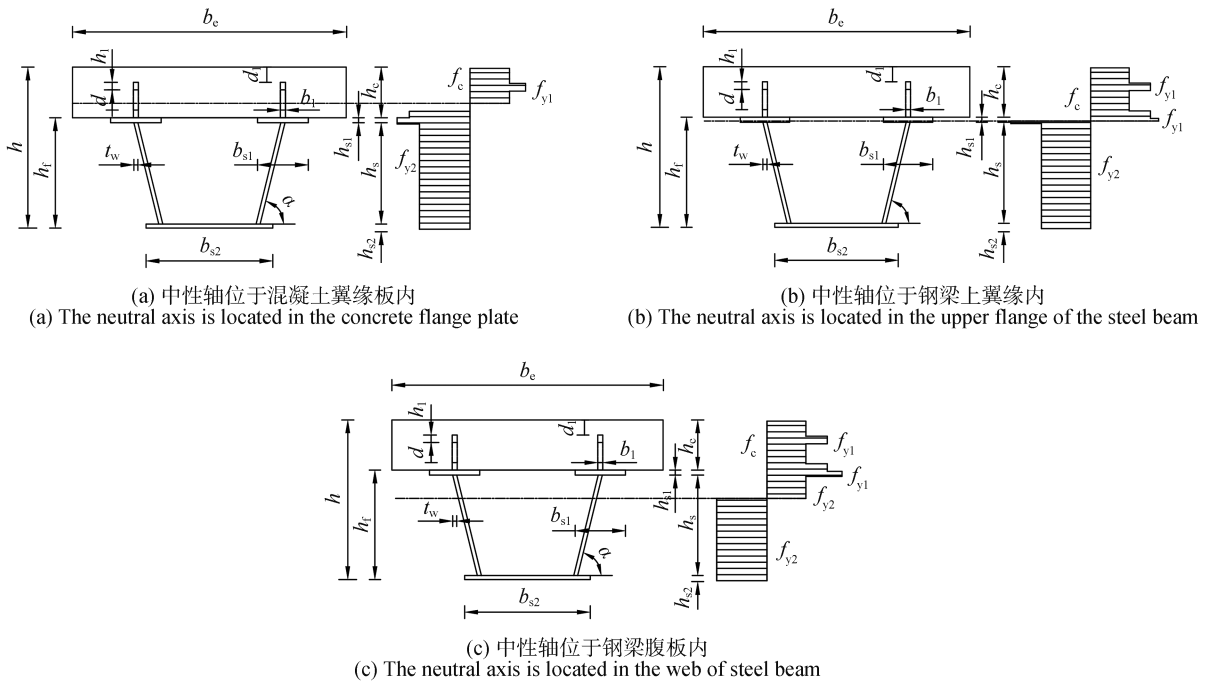


图10 箱型钢梁中性轴位置
Fig. 10 Position of neutral axis of box steel beam

考虑中性轴位置的不同,试件截面在受弯承载力极限状态下有以下几种情况。

1) 中性轴位于混凝土翼板内

中性轴位于混凝土翼板内时,即混凝土受压区高

$$M_u = f_c b_c \frac{x^2}{2} + f_{y1} b_1 2h_1 (x - d_1 - \frac{h_1}{2}) + f_{y1} b_1 2h_1 (h_c - x - \frac{h_1}{2}) + f_{y2} 2b_{s1} h_{s1} (h_c - x + \frac{h_{s1}}{2}) + \lambda f_{y2} h_s 2t_w (h - x - h_{s2} + \frac{h_s}{2}) + f_{y2} b_{s2} h_{s2} (h - x - \frac{h_{s2}}{2})$$

度 $h_c \leq x \leq 0$,根据力平衡方程 $\sum X=0$ 可得

$$f_c b_c x + f_{y1} b_1 2h_1 = f_{y1} b_1 2h_1 + f_{y2} b_{s1} 2h_{s1} + \lambda f_{y2} h_s 2t_w + f_{y2} b_{s2} h_{s2} \quad (1)$$

根据力矩平衡方程,可得试件承载力 M_u 为

$$(2)$$

2)中性轴位于钢梁上翼缘内

$$f_c b_e h_c + f_{y1} 2b_1 2h_1 + f_{y2} 2b_{s1} (x - h_c) =$$

中性轴位于钢梁上翼缘内时,即混凝土受压区高

$$f_{y2} 2b_{s1} (h_c + h_{s1} - x) + f_{y2} h_s 2\lambda t_w + f_{y2} b_{s2} h_{s2} \quad (3)$$

度 $h_c \leq x \leq h$,根据力平衡方程 $\sum X=0$ 可得

根据力矩平衡方程,可得试件承载力 M_u 为

$$M_u = f_c b_e h_c (x - \frac{h_c}{2}) + f_{y1} 2b_1 h_1 (x - d_1 - \frac{h_1}{2}) + f_{y1} 2b_1 h_1 (x - d_1 - h_1 - d - \frac{h_1}{2}) + f_{y2} b_{s1} \frac{(h_c + h_{s1} - x)^2}{2} + f_{y2} b_{s1} \frac{(x - h_c)^2}{2} + \lambda f_{y2} h_s 2t_w (h_c + h_{s1} - x + \frac{h_s}{2}) + f_{y2} b_{s2} h_{s2} (h - x - \frac{h_{s2}}{2}) \quad (4)$$

3)中性轴位于钢梁腹板内

$$f_c b_e h_c + f_{y1} 2b_1 2h_1 + f_{y2} b_{s1} 2h_{s1} + \lambda f_{y2} b_s t_w (x - h_c -$$

中性轴位于钢梁腹板内时,即混凝土受压区高度

$$h_{s1}) = \lambda f_{y2} t_w (h - x - h_{s2}) + f_{y2} b_s h_{s2} \quad (5)$$

$h_c \leq x \leq h$,根据力平衡方 $\sum X=0$ 可得

根据力矩平衡方程,可得试件承载力 M_u 为

$$M_u = f_c b_e h_c (x - \frac{h_c}{2}) + f_{y1} b_1 2h_1 (x - d_1 - \frac{h_1}{2}) + f_{y1} b_1 2h_1 (x - d_1 - d - h_1 - \frac{h_1}{2}) + f_{y2} 2b_{s1} h_{s1} (x - h_c - \frac{h_{s1}}{2}) + \lambda f_{y2} 2t_w \frac{(x - h_c - h_{s1})^2}{2} + \lambda f_{y2} 2t_w \frac{(h - x - h_{s2})^2}{2} + f_{y2} b_s h_{s2} (h - x - \frac{h_{s2}}{2}) \quad (6)$$

式中: f_c 为混凝土抗压强度设计值,MPa; f_{y1} 为开孔钢板的强度设计值,MPa; f_{y2} 为钢梁的强度设计值,MPa; b_e 为混凝土板宽度,m; b_1 为开孔钢板厚度,m; b_{s1} 为钢梁上翼缘宽度,m; b_{s2} 为钢梁下翼缘宽度,m; h 为组合梁总高度,m; h_c 为混凝土翼板高度,m; h_t 为钢梁的总高度,m; h_s 为钢梁腹板高度,m; h_1 为开孔孔径边缘到板边的距离,m; h_{s1} 为钢梁上翼缘厚度,m; h_{s2} 为钢梁下翼缘厚度,m; d 为开孔孔径,m; d_1 为开孔钢板上端到凝

土板距离,m; t_w 为钢梁腹板厚度,m; α 为钢梁腹板倾斜角度,(°); M_u 为开孔钢板对组合梁影响的弯矩设计值,kN/m。

3.2 抗弯承载力计算公式验证

极限弯矩反映结构在外力荷载作用下抵抗破坏的能力。为验证上述抗弯承载力计算公式的准确性,将本研究、文献[22]、文献[23]和文献[24]中试验梁参数代入上述公式后计算极限抗弯承载力。具体计算结果见表2。

表 2 极限承载力计算值与试验值的比较

Tab. 2 Comparison of calculated and experimental values of ultimate bearing capacity

试验来源 Test source	试件编号 Specimen number	$M_u/(kN \cdot m)$	$M'_u/(kN \cdot m)$	$M_u^T/(kN \cdot m)$	$\frac{M_u}{M_u^T}$	$E/\%$	$E'/\%$
本研究 This paper	PSCB	343.47	323.91	360.53	0.95	4.96	11.31
	试件 4	184.96	165.06	200.45	0.93	7.72	21.78
文献[22] Reference [22]	试件 5	184.96	165.06	194.56	0.95	4.93	17.23
	试件 7	184.96	165.06	185.80	0.99	1.45	12.05
文献[23] Reference [23]	T8-D150	146.51	140.01	165.60	0.89	10.52	17.85
	T8-D170	146.51	140.01	150.30	0.98	2.52	7.06
文献[24] Reference [24]	Y-TYPE-EXP	340.20	320.20	400.50	0.85	14.09	25.09
参数均值 Parameter mean value					0.94		

注: M_u 为考虑开孔钢板对组合梁影响的弯矩设计值; M'_u 为不考虑开孔钢板对组合梁影响的弯矩设计值; M_u^T 为组合梁试验极限弯矩值; E 为考虑开孔钢板作用下极限弯矩计算值与试验值的误差值; E' 为不考虑开孔钢板作用下极限弯矩计算值与试验值的误差值。

Note: M_u is the design value of the bending moment considering the influence of the perforated steel plate on the combined beam; M'_u is the design value of the bending moment without considering the influence of the perforated steel plate on the combined beam; M_u^T is the value of the ultimate bending moment of the combined beam in the test; E is the error value between the calculated value of the ultimate bending moment considering the effect of the perforated steel plate and the test value; E' is the error value between the calculated value of the ultimate bending moment without considering the effect of the perforated steel plate and the test value.

图11为是否考虑开孔钢板作用下的极限承载力公式计算值的误差对比。

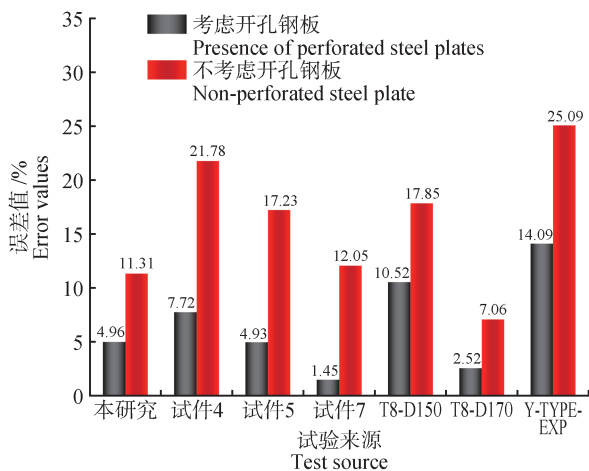


图11 是否考虑开孔钢板作用下的极限承载力公式计算值的误差对比

Fig. 11 Comparison of the error of the calculated values of the ultimate load capacity formula with or without considering the action of the perforated steel plate

由图11可知,在不考虑开孔钢板作用时,计算得到的抗弯承载力计算值与试验值的误差值明显大于考虑开孔钢板作用时的误差值,说明本研究推导的抗弯承载力公式计算结果更为准确。同时,在PBL连接的钢-混组合梁抗弯承载力计算中,不可忽视开孔钢板的作用。

4 结论

本研究通过对PSCB进行抗弯试验研究,研究了组合梁破坏形态、挠度以及应变,并推导了抗弯承载力计算公式,得出如下结论。

1)PSCB的破坏形态为弯曲破坏,破坏表现为跨中加载点附近混凝土板上缘压碎。PSCB跨中荷载-挠度曲线可分为3个阶段:线性阶段、非线性阶段和破坏阶段。在 $0.79 P_u$ 前,PSCB跨中荷载-应变曲线呈线性关系,沿梁高方向的应变规律基本符合平截面假定。

2)在PSCB承受荷载作用下,开孔钢板主要起传递纵向剪力的作用,贯穿钢筋主要起抵抗弯曲变形的作用。随着荷载的持续增大,开孔钢板应变值逐渐变大,贯穿钢筋应变值逐渐变大,PBL连接件的抗剪能力得到充分发挥。

3)本研究推导的PSCB抗弯承载力计算公式可以较好地预测该类型组合梁的极限抗弯承载力,在考虑开孔钢板作用时,PSCB的极限承载力计算值与试验值之比为0.94,抗弯承载能力公式计算值与试验值基本

吻合。推导的PSCB抗弯承载力计算公式可为该类型组合梁的实际工程设计提供一定参考。

参考文献

- [1] 韩强,倪玉龙,胡梦涵,等. 钢-混组合梁抗剪连接件构造型式及其力学性能研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(11): 1369-1385.
HAN Q, NI Y L, HU M H, et al. Review of configurations and behavior of shear connector for steel-concrete composite bridges[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(11): 1369-1385.
- [2] ZHAO X, SHAO X, CAO X, et al. Experimental and analytical investigations into flexural behavior of composite beams with UHPC T-section and HRS H-section[J]. Engineering Structures, 2024, 315: 118445.
- [3] CAO X, CHENG C, WANG M, et al. Experimental study on the flexural behavior of flat steel-concrete composite beam[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2021, 48(9): 1155-1168.
- [4] 肖林,廖轩,卫星,等. UHPC中PBL剪力键力学性能试验研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 157-164.
XIAO L, LIAO X, WEI X, et al. Experimental study on mechanical properties of PBL shear connectors in UHPC[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 157-164.
- [5] 武芳文,冯彦鹏,罗建飞,等. 钢-UHPC组合结构中PBL剪力键力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 147-160.
WU F W, FENG Y P, LUO J F, et al. Study on mechanical properties of PBL shear connectors in steel-UHPC composite structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 147-160.
- [6] 黄文峰,占玉林,李沿沿,等. PBL与T形PBL剪力键拉剪性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 1-13 [2025-01-22].
HANG W F, ZHAN Y L, LI Y Y, et al. Study on the tensile-shear performance of PBL and T-shaped PBL shear connectors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 1-13 [2025-01-22].
- [7] 武永丽,王秀丽,李芳军,等. 十字型开孔钢板剪力键抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(7): 124-129.
WU Y L, WANG X L, LI F J, et al. Experimental research on shear performances of cross-shaped perfo-bond strips[J]. Industrial Construction, 2023, 53(7): 124-129.
- [8] WU F, FAN Z, HE L, et al. Comparative study of the negative bending behaviour of corrugated web steel-concrete composite beams using NC, ECC and UHPC[J]. Engineering Structures, 2023, 283: 115925.

- [9] PENG K, LIU L J, WU F W, et al. Experimental and numerical evaluation on the performance of perfobond leiste shear connectors in steel - SFRCC composite beams [J]. *Materials*, 2022, 15(20): 7237.
- [10] SHAN Y, CHEN Y, ZONG Z, et al. Structural performance of orthotropic Steel-Concrete continuous composite decks with larger U-ribs and PBL shear connectors [J]. *Structures*, 2023, 51: 1030-1051.
- [11] 陈一馨, 贾晋三, 黄彦轲, 等. PBL剪力键破坏机理及极限承载力影响因素研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2024, 48(6): 1160-1167.
CHEN Y X, JIA J S, HUANG Y K, et al. Study on failure mechanism and influencing factors of ultimate bearing capacity of PBL shear connector [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2024, 48(6): 1160-1167.
- [12] 张凡, 陈炳聪, 刘爱荣, 等. 装配式钢-混凝土组合梁高强螺栓剪力连接件力学模型[J]. *工程力学*, 2022, 39(S1): 173-179.
ZHANG F, CHEN B C, LIU A R, et al. Mechanical model of high strength bolt shear connector of fabricated steel-concrete composite beam [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(S1): 173-179.
- [13] 周凌宇, 范进凯, 方蛟鹏, 等. 装配式槽钢组合梁中开孔钢板连接件力学性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(2): 58-67.
ZHOU L Y, FAN J K, FANG J P, et al. Mechanical properties of perforated steel plate connectors in prefabricated channel steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(2): 58-67.
- [14] 夏樟华, 暨邦冲, 杨阳, 等. 预应力RC-UHPC组合箱梁的受弯性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 1-9 [2024-12-05].
XIA Z H, JI B C, YANG Y, et al. Flexural performance of prestressed RC-UHPC composite box girder [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 1-9 [2024-12-05].
- [15] 朱经纬, 张宇航, 辛公锋, 等. 不同剪力连接程度钢箱组合梁抗弯性能试验研究[J]. *工程力学*, 1-13 [2024-12-05].
ZHU J W, ZHANG Y H, XIN G F, et al. Experimental study on flexural behavior of steel box composite girders with different degrees of shear connection [J]. *Engineering Mechanics*, 1-13 [2024-12-05].
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel and concrete composite bridges: GB 50917—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [17] SHI X, RATHOD V T, MUKHERJEE S, et al. Multi-modality strain estimation using a rapid near-field microwave imaging system for dielectric materials [J]. *Measurement*, 2020, 151: 107243.
- [18] MUKHERJEE S, SHI X, DENG Y, et al. A hybrid microwave NDE system for rapid inspection of GFRP composites [J]. *Materials Evaluation*, 2020, 78(8): 963-975.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [20] CHEN Y, NING J, REN C, et al. A strength degradation model of PBL shear connectors under fatigue load [J]. *Structures*, 2023, 48: 1684-1692.
- [21] DU H, YUAN S, YU T, et al. Experimental and analytical investigation on flexural behavior of high-strength steel-concrete composite beams [J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 902.
- [22] 陈思程, 黄海林, 邓轩, 等. 带T形肋剪力键的钢-混凝土组合梁受弯性能试验及理论分析[J]. *建筑结构*, 2023, 53(3): 72-79.
CHEN S C, HUANG H L, DENG X, et al. Experimental and theoretical analysis on flexural performance of steel concrete composite beams with T-section rib shear connector [J]. *Building Structure*, 2023, 53(3): 72-79.
- [23] 贺绍华, 杨刚, 房腾鹏, 等. 带开孔板连接件的HSS-UHPC组合梁抗弯性能[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(6): 143-157.
HE S H, YANG G, FANG T P, et al. Flexural performance of HSS-UHPC composite beams with perfobond strip connectors [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(6): 143-157.
- [24] KIM S H, CHOI J, PARK S J, et al. Behavior of composite girder with Y-type perfobond rib shear connectors [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 103: 275-289.