

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.041



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



胶接缝桥面板全装配组合梁正弯矩区 力学性能试验研究

石国操^{1a}, 范亮^{1a,1b}, 刘伟², 文强^{1a}

(1. 重庆交通大学 a. 土木工程学院; b. 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074;
2. 中国建筑第八工程局有限公司西南分公司, 成都 610041)

摘要:提出一种可更换桥面板全装配钢-混组合梁,其桥面板采用胶接缝连接并配置可拆卸高强螺栓剪力键。为剖析不同接缝形式对全装配组合梁正弯矩区力学性能的影响机制,设计制备4片不同桥面板接缝形式的组合梁试件并完成静力加载试验,分析了各试件的破坏形式、承载力、延性、抗弯刚度、界面滑移等力学特征。结果表明:与现浇梁的弯曲破坏相比,全装配组合梁为弯剪破坏,且主裂缝位置出现在胶接缝附近,为混凝土的内聚破坏;直线形、阶梯形、企口形接缝梁的抗弯承载力较现浇梁分别降低了4.78%、2.07%、2.04%,桥面板以受压为主,使得接缝形式对接缝梁承载力的影响较小;有无接缝对组合梁整体延性影响较大,现浇梁延性系数较直线形、阶梯形、企口形接缝分别高出14.39%、34.87%、7.75%;接缝形式对组合梁整体弹性刚度影响不显著,接缝梁弹性刚度较现浇梁分别降低了0.55%、5.43%、2.06%;现浇梁的梁端部滑移量最大,全装配组合梁的最大滑移则出现在接缝附近;在不同接缝形式中,企口形接缝的强度和刚度表现最优。基于塑性理论提出了考虑高强螺栓连接件和胶接缝桥面板影响的全装配组合梁抗弯承载力计算式。

关键词:全装配钢混组合梁;胶接缝;桥面板;高强螺栓;试验研究

中图分类号:U443.31 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2026)02-0190-09

Experimental study on mechanical properties of fully assembled composite beams with adhesive bonded bridge deck panels in positive moment region

SHI Guocao^{1a}, FAN Liang^{1a,1b}, LIU Wei², WEN Qiang^{1a}

(1a. College of Civil Engineering; 1b. State Key Laboratory of Bridge and Tunnel Engineering in Mountainous Area, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Southwest Branch of China State Construction Eighth Engineering Bureau Co., LTD., Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: The proposal entails the utilisation of a replaceable steel-hybrid composite beam, accompanied by an

收稿日期:2024-01-18

基金项目:国家自然科学基金(U20A20312);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0103)

作者简介:石国操(1999-),男,主要从事钢-混组合梁研究,E-mail:209699738@qq.com。

范亮(通信作者),女,博士生导师,教授,E-mail:fanliang@cqjtu.edu.cn。

Received: 2024-01-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. U20A20312); Special Key Project of Chongqing Technology Innovation and Application Development (No. CSTB2022TIAD-KPX0103)

Author brief: SHI Guocao (1999-), main research interest: steel-concrete composite beam, E-mail: 209699738@qq.com.

FAN Liang (corresponding author), doctoral advisor, professor, E-mail: fanliang@cqjtu.edu.cn.

adhesive joint bridge panel and a removable high-strength bolt-shear bond. In order to analyze the influence mechanism of different joint forms on the mechanical properties of the fully assembled composite beam in the positive moment zone, four composite beams with different bridge panel joint forms were designed and prepared, and a static loading test was completed. The mechanical characteristics of each specimen, including failure mode, bearing capacity, ductility, flexural stiffness and interface slip, were analyzed. The findings indicate that, in comparison to cast-in-place beams, which demonstrate failure in bending, fully assembled composite beams manifest bending-shear failure, with the main crack occurring near the adhesive joint, indicating concrete cohesion failure. Linear, stepped and dovetail joint beams showed a reduction in flexural capacity of 4.78%, 2.07% and 2.04% respectively compared to cast-in-place beams. The bridge deck dominated by compression has a relatively minor impact on the bearing capacity of the jointed beam. The presence or absence of joints exerts a significant influence on the overall ductility of the composite beam. The ductility coefficient of the cast-in-place beam is 14.39%, 34.87% and 7.75% higher than that of the straight joint, stepped joint and tongue-and-groove joint, respectively. The overall elastic stiffness of composite beams is not significantly affected. The elastic stiffness of the lap joint beams are reduced by 0.55%, 5.43% and 2.06% respectively. The slip at the end of the cast-in-place beams is the largest, while the maximum slip of fully assembled composite beams occurs near the joints. Among different joint forms, the tongue and groove joint exhibits the best performance in terms of strength and stiffness. Finally, based on plastic theory, the calculation formula for the flexural capacity of fully assembled composite beams considering the influence of high-strength bolted joints and adhesive joint bridge panels is proposed.

Keywords: fully assembled steel-concrete composite beam; adhesive joint; bridge deck; high-strength bolts; experimental study

钢-混组合梁桥是由钢梁和混凝土板通过抗剪连接件连接、共同受力的结构形式^[1-2]。该桥型通过利用预制桥梁构件,有效减少了施工工作量,加快了施工进度,因此深受工程师的青睐^[3]。组合梁中桥面板接缝作为桥梁受力的薄弱部位^[4-5],对结构工作性能有着重要影响。

桥面板接缝常用处理方法有直接湿接缝、凿毛湿接缝、干接缝和环氧胶接缝等^[6]。目前,学者们针对湿接缝桥面板已开展大量研究,但对于预制桥面板干接缝和胶接缝的接缝材料、接缝形式、有无预应力作用等方面的研究较少^[7]。苟文忠等^[8]研究了不同接缝形式对节段预制胶接缝力学性能的影响发现,双键齿胶接缝比单键齿胶接缝的承载力高。潘仁胜等^[9]通过不同键齿数胶接缝试件的直剪试验发现,接缝抗剪承载力随键齿数量的增加而增大;单键齿与多键齿接缝均存在抗剪折减效应,并提出了折减效应的理论计算方法。Jiang等^[10]研究了体外预应力组合梁整体式、干接缝式和环氧树脂胶接缝式3种接缝形式,并改变接缝数量等因素,发现干接缝的剪切行为与环氧树脂胶接缝相比没有明显差异,接缝形式对接缝梁的失效模式影响较小。Ahmed等^[11]通过研究平滑的、有网格的、干燥式、环氧树脂胶接缝式4种接缝形式,并改变接缝的键齿

数量发现,环氧树脂减少了接缝处的损伤,键齿数量的增加提高了节段梁的延性。

常规装配式钢-混组合梁采用预制混凝土桥面板与钢梁通过湿接缝进行装配组合,具有良好的装配施工特点,但预制桥面板中的湿接缝仍然需要一定的模板和现浇施工,这会显著降低桥梁的施工效率,还会影响施工质量。以胶接缝代替传统湿接缝,可以避免现浇施工;同时,采用可拆卸高强螺栓抗剪连接件代替传统栓钉抗剪连接件不仅可实现施工全装配化,还可更换失效的桥面板和抗剪连接件。

组合梁桥面板接缝的力学行为与前述基于混凝土主梁的接缝有显著不同。目前,对于全装配组合梁桥胶接缝桥面板,考虑不同接缝形式对组合梁正弯矩影响的研究较少。笔者通过对不同胶接缝形式组合梁的力学试验研究,揭示胶接缝对全装配钢-混组合梁力学性能的影响规律,并在此基础上提出了胶接缝桥面板全装配组合梁承载力的计算方法。

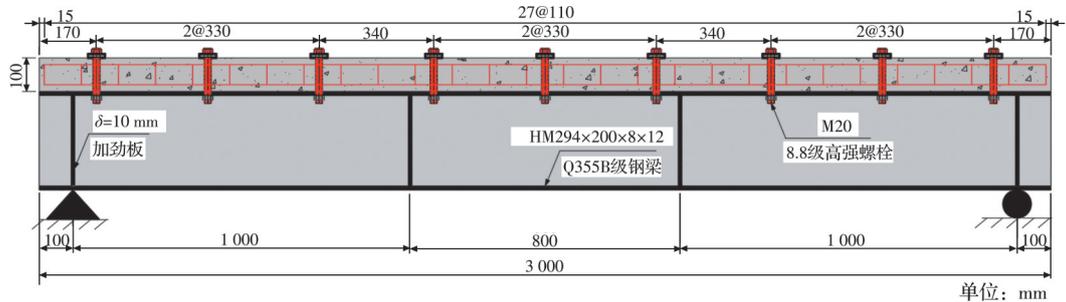
1 试验方案

1.1 试验设计

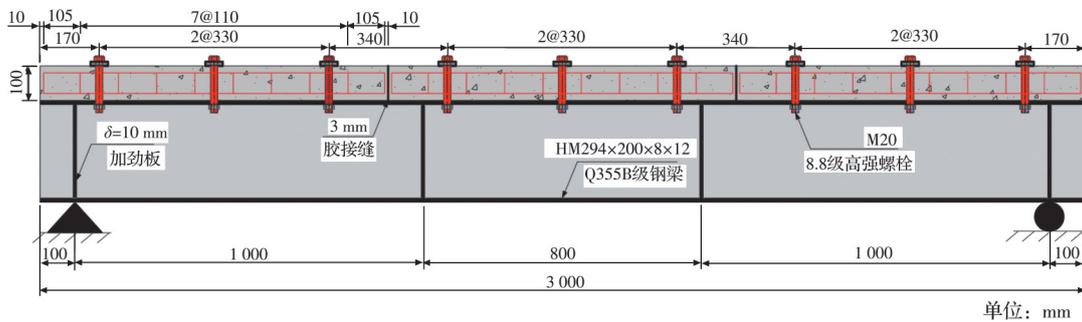
为对比现浇式组合梁与全装配式组合梁的受

力差异,设计并制作如图 1 所示的组合梁试件,包括 1 片整体浇筑板试件和 3 片接缝拼接板试件,试件编号分别为 N1、N2、N3、N4。试件总长为 3 000 mm (净跨 2 800 mm);桥面板采用 C50 混凝土,混凝土

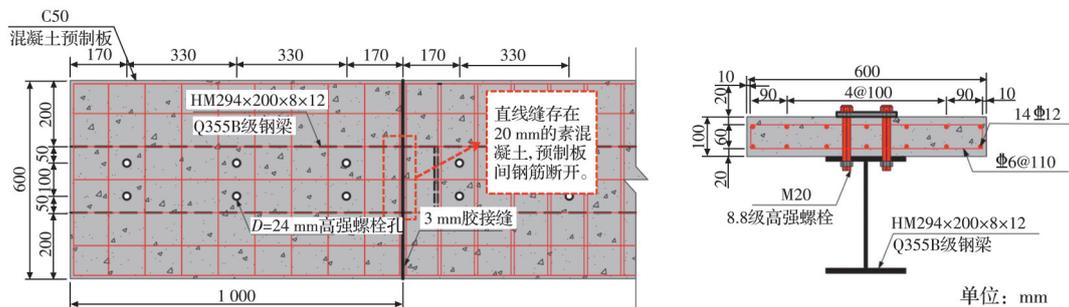
板宽 600 mm、厚 100 mm;钢梁采用 Q355B 级 HM294×200 热轧 H 型钢;抗剪连接件采用 8.8 级 M20 高强螺栓。



(a) N1 试件立面图



(b) N2 试件立面图



(c) N2 试件俯视图和断面图

图 1 试件截面尺寸图

Fig. 1 Sectional dimensions of the specimens

N1 为对照组,其混凝土桥面板通过钢筋笼固定于模板内整体浇筑成型;待桥面板达到设计强度后与钢梁完成预拼装,再施加螺栓预紧力。N2 的混凝土桥面板由 3 块等尺寸预制板通过环氧树脂胶黏形成整体,接缝形式为直线形;N3、N4 除接缝形式不同外,其余构造均与 N2 一致(见表 1)。

1.2 试件材料参数

试验梁接缝黏结胶采用环氧树脂;按照规范^[12-13]制作并养护混凝土立方体抗压强度试件(150 mm×150 mm×150 mm)、轴心抗压强度试件(100 mm×100 mm×300 mm)和弹性模量试件(100 mm×100 mm×300 mm);同时对各类钢材进行相应的材料性能试验。各材料的力学性能参数

分别见表 2~表 4。

1.3 加载方案

试验采用双点加载,试件长 3 m,计算跨径 2.8 m。试验梁按三点加载方案设计,为避开胶接缝位置,在距离支座 1 m 处布置加载点,两个加载点间距 0.8 m,加载装置见图 2。为深入研究试件的弹性恢复力、塑性变形和刚度变化规律,采用如图 3 所示的三级加载制度,依次进行 3 次弹性加载、2 次弹塑性加载和 1 次破坏加载(P_u 为破坏荷载)。为防止弹性加载中混凝土开裂,3 次弹性加载荷载均控制在 $0.4P_u$ 左右,2 次弹塑性加载荷载控制在 $0.6P_u \sim 0.8P_u$ 之间, P_u 的理论值为 983.2 kN。在混凝土开裂前($0.6P_u$ 左右),按 5 kN/级逐级加载;混

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of the specimens

名称	接缝形式	试件编号	预制板数量	图例
现浇梁 (XJL)	无接缝	N1	1	
直线形接缝梁 (ZJF)	直线形接缝	N2	3	
阶梯形接缝梁 (JTF)	阶梯形接缝	N3	3	
企口形接缝梁 (QKF)	企口形接缝	N4	3	

表 2 环氧树脂力学性能

Table 2 Mechanical properties of epoxy resin

抗拉强度/ MPa	受拉弹性模 量/MPa	抗弯强度/ MPa	抗压强度/ MPa	抗压弹性模 量/MPa
≥40	≥4 000	≥50	≥80	≥8 000

表 3 混凝土力学性能

Table 3 Mechanical properties of concrete

立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
52.3	40.2	37 400

混凝土开裂后,按 20 kN/级加载;当加载至 $0.8P_u$ 左右时,切换为 1 mm/min 的位移控制加载,直至试件梁破坏。

1.4 测点布置

试验测点布置主要包括位移测点和滑移测点,4 片组合梁的测点布置情况基本一致,现以 N2 为例

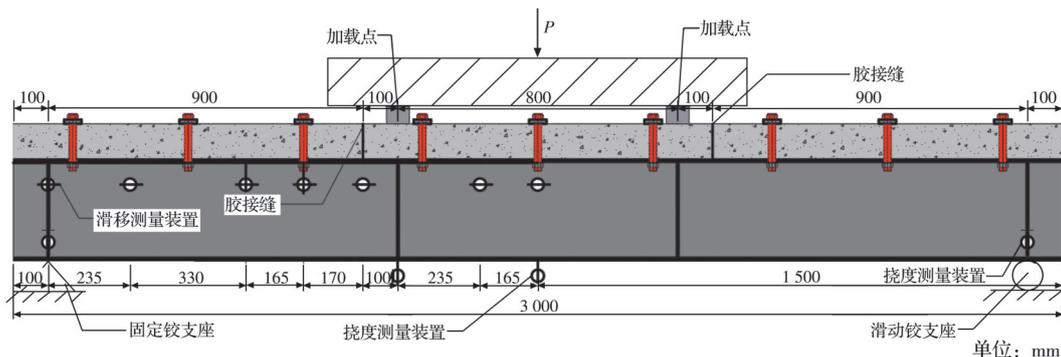


图 4 加载组合梁测点布置

Fig. 4 Arrangement of measuring points for loaded composite beams

表 4 钢材材料性能

Table 4 Material properties of steel

试样	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
Q355 钢材	2.1×10^5	362	561
8.8 级 M20 螺栓	2.06×10^5	640	830
HRB400 纵筋	2.04×10^5	403	564
HRB400 箍筋	2.1×10^5	474.9	612

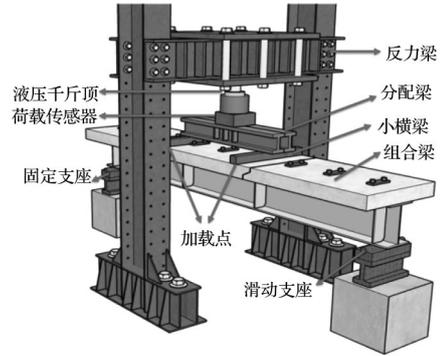


图 2 组合梁加载装置

Fig. 2 Composite beam loading device

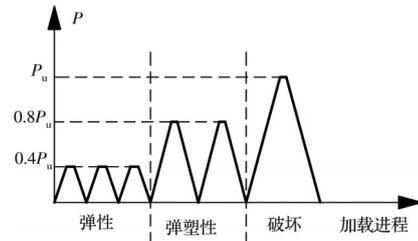


图 3 组合梁加载制度

Fig. 3 Loading protocol of composite beam

(如图 4)进行说明。在组合梁支座处各布置一个位移计;在跨中和加载处钢梁下翼缘各布置一个位移计,以获取组合梁的荷载-挠度曲线;为准确测得试验梁界面的相对滑移,在梁支点、梁跨 1/4 处、梁跨 1/2 处、第 3 颗螺栓处、第 1 与第 2 颗螺栓中点处、第 3 与第 4 颗螺栓中点处及第 4 与第 5 颗螺栓中点处共布置 7 个百分表。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

2.1.1 破坏形态

4 片试验梁均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段 3 个阶段。

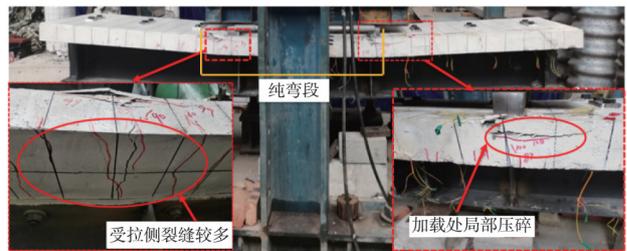
弹性阶段:加载初期,4 片试验梁的试验现象基本相似,当荷载加至 $0.6P_0$ 左右时,试件纯弯段和加载点附近混凝土受拉侧均出现细小裂纹,此时裂缝产生。

弹塑性阶段:随着荷载从 $0.6P_0$ 增加至 $0.8P_0$, 钢梁挠度变大,弯剪段和纯弯段的混凝土受拉侧裂缝数量增加,已存在的裂缝宽度逐渐扩展。

破坏阶段:随着荷载从 $0.8P_0$ 增至 $1.0P_0$,4 片试验梁跨中钢梁挠度持续增大,钢梁底板首先达到屈服;混凝土开裂,裂缝沿高度向上扩展,组合梁中性轴上移,钢梁屈服面积增大。试件 N1~N4 加载处附近均出现混凝土局部压碎,压碎区有开裂分层现象,越靠近混凝土板顶压碎越严重。该局部破坏产生的原因是:弯曲产生的水平向受压正应力与竖向受压正应力共同作用于加载处,导致加载点处混凝土受压应力超限,发生压碎破坏。试件 N1 加载处混凝土受拉侧出现大量横向裂缝,但裂缝向上扩展的高度较小,如图 5(a) 所示。3 片接缝梁的加载处出现局部压碎,且胶接缝处的素混凝土受拉侧形成横向贯通裂缝,裂缝向上扩展的高度较大。4 片试件梁破坏形态均表现为:混凝土板下翼缘受拉裂缝向上延伸并扩展至混凝土压碎区,压碎区水平裂缝数量不断增加;当二者近乎接触、荷载无法增加时,压碎区混凝土损伤持续发展,最终试件破坏(图 5)。

2.1.2 裂缝形态

现浇梁与全装配梁的混凝土裂缝如图 5 所示。对比发现,在加载初期混凝土板呈受压状态;随着荷载的增加,4 片试验梁滑移增加,中性轴上移,混凝土板下缘出现拉应力并转入受拉状态,各试件混凝土受拉侧均产生较多裂缝。不同之处在于:N1 构造均匀,裂缝分布相对均匀,主裂缝出现较晚,且相较于接缝梁,其裂缝宽度较小,主裂缝位于加载处下方。N2、N3、N4 接缝部分的构造强度相对预制板更弱,混凝土板受拉后,首条裂缝均出现在接缝处,位于胶与素混凝土之间;因该处无钢筋贯通,荷载作用下裂缝的宽度和高度发展较快,导致受压区混凝土面积减小,裂缝上方混凝土被压碎;接缝处混凝土主裂缝横向贯通并向上扩展,最终受压区混凝土发生压碎破坏。



(a) N1



(b) N2



(c) N3



(d) N4

图 5 各试验梁破坏形式图

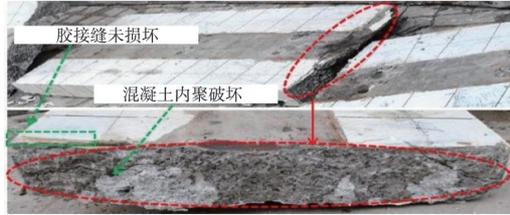
Fig. 5 Failure form diagram of each test beam

2.1.3 试件内部破坏模式分析

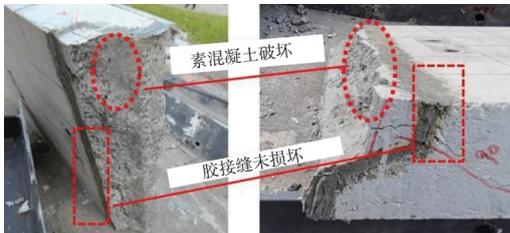
试验结束后,对 4 片试验梁的钢梁与混凝土桥面板进行拆分,发现各构件均有不同程度的损伤(如图 6 所示)。由于没有接缝,N1 混凝土板受力更均匀,最不利受力位置在加载点下方,开裂后裂缝扩展、板内钢筋受拉产生明显弯曲变形;有接缝的 N2、N3、N4 混凝土板下缘主裂缝均出现在接缝附近,但未与接缝重合,裂缝竖直向上发展并切割阶梯缝和企口缝的突出构造。现浇梁和全装配组合梁的破坏模式不一致:现浇梁表现为弯曲破坏,接缝板则为弯剪破坏;由于胶的抗拉强度高于混凝土,胶接缝保持完整,未发生破坏,仅部分缝端混凝土发生内聚破坏;钢梁均表现为上、下缘受拉局部屈曲破坏,呈明显弯曲状态,材料进入塑形阶段,钢梁变形无法恢复。



(a) N1



(b) N2



(c) N3



(d) N4



(e) 钢梁拆解图

图 6 各试件拆解图

Fig. 6 Disassembly diagram of each specimen

2.2 试验结果分析

2.2.1 荷载-位移曲线

根据测得的试验数据,绘制了4片试件跨中位移随总荷载变化的荷载-位移图(图7)。4片试验梁的荷载-位移曲线变化趋势相似,其屈服荷载、极限荷载及对应跨中竖向位移,以及经计算求得的延性系数如表5所示。其中,屈服荷载根据屈服点最远点法由实测值确定,试验梁的延性系数以式(1)计算。4片试验梁中,N1延性最好,其延性系数较N2、N3、N4分别提高了14.39%、34.87%、7.75%。综上可知,现浇梁和企口形接缝梁表现出良好的延

性,裂缝发展较为均匀;而采用直线形接缝和阶梯形接缝的混凝土板延性较差,接缝处开裂严重,开裂后混凝土板难以有效传递拉应力。

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中: μ 为延性系数; Δ_u 为破坏荷载下的挠度; Δ_y 为屈服荷载下的挠度。

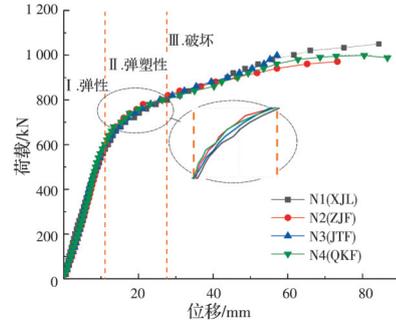


图 7 各试件荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of specimens

表 5 各试件力学性能指标

Table 5 Mechanical property indices of each specimen

试件编号	f_y /kN	Δ_y /mm	f_u /kN	Δ_u /mm	μ	K /(kN/mm)	开裂荷载/kN
N1	707.6	15.7	1019.7	85.1	5.42	45.07	617
N2	708.2	15.8	971.0	73.3	4.64	44.82	578
N3	707.6	16.6	998.6	58.6	3.53	42.62	594
N4	706.3	16.0	998.9	80.5	5.03	44.14	597

注: f_y 为屈服荷载; f_u 为极限荷载实测值; Δ_y 、 Δ_u 分别为 f_y 、 f_u 对应的跨中竖向位移; μ 为延性系数; K 为抗弯刚度。

试验中抗弯刚度定义为荷载-位移曲线弹性阶段的斜率,计算公式如式(2)所示。由表5可知,N1的抗弯刚度和抗弯承载力均最大,N2、N3、N4的抗弯刚度相较于N1分别降低了0.55%、5.434%、2.06%;直线形、阶梯形和企口形接缝梁的抗弯承载力分别降低了4.78%、2.07%、2.04%。其原因是现浇梁的钢筋混凝土板为整体构造,板内钢筋未断开;而接缝梁由3块预制板拼接而成,板间钢筋相互断开。

$$K = f_y / \Delta_y \quad (2)$$

式中: K 为抗弯刚度; f_y 为屈服荷载。

2.2.2 抗开裂性能

在弹塑性阶段加载过程中,混凝土桥面板开始出现裂缝,将此时的荷载定义为开裂荷载。4片梁的开裂荷载如表5所示,其中N1的开裂荷载最高,分别较N2、N3、N4高出6.3%、3.72%、3.24%。3片接缝梁中,N4的主裂缝在裂缝扩展中穿过企口缝突出构造,切割混凝土和内部钢筋,由此使得N4的裂缝宽度小于N2、N3,表明企口缝可有效阻止裂缝发展。综上,企口形胶接缝试件梁的抗开裂性能更好。

2.2.3 滑移的分布与对比分析

试件梁采用对称加载方式,依据 4 片试验梁的实测数据绘制各试件沿梁长方向的滑移分布图(取对称的一半),如图 8 所示。在荷载达到 $0.6P_u$ 前,4 片试验梁的滑移增量均较小;当荷载超过 $0.6P_u$ 后,滑移增量明显加快。接缝梁胶接处附近的滑移现

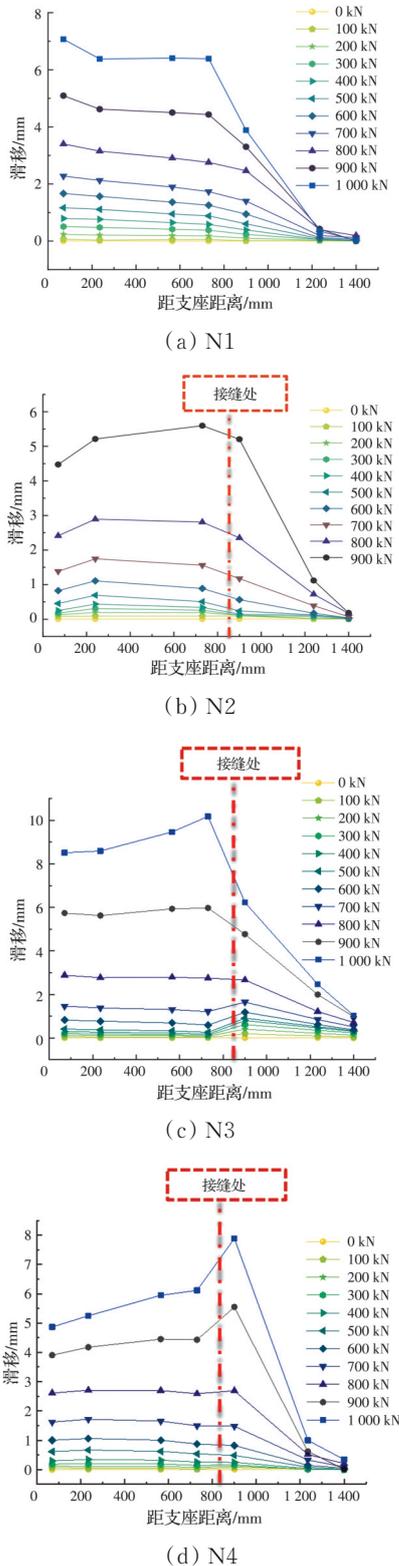


图 8 各试件滑移分布

Fig. 8 Slip distribution of each specimen

象最为显著,究其原因,胶接缝处裂缝的扩展导致钢梁与混凝土变形不协调,二者的变形差异随之增大。滑移发展过程明显分为两个阶段: $0.6P_u$ 之前滑移量较小, $0.6P_u$ 之后滑移增长加快,且 N1 与 N2、N3、N4 的滑移分布规律存在显著差异。其中 N1 的最大滑移出现在梁端,N2、N3、N4 的最大滑移位于接缝附近。在相同荷载下,N2、N3 的滑移量均小于 N1,这是由于接缝梁存在胶接缝,胶的弹性模量较小、质地柔软,其压缩变形缓解了组合梁中钢梁与混凝土的受力不均匀问题,改善了二者的变形协调,从而减小了纵向滑移量;而 N4 因企口键齿被剪断,导致其滑移量增大。

分析可知,现浇梁和全装配组合梁的破坏模式存在差异:现浇板表现为弯曲破坏,接缝板为弯剪破坏,胶接缝处的破坏则表现为接缝附近混凝土的内聚破坏。桥面板是否设置接缝,对组合梁发生破坏时的延性有较大影响;对组合梁在弹性阶段的整体刚度有一定影响,但差异不显著,接缝梁的刚度相较于现浇梁降低 5% 左右;对组合梁的抗弯承载力影响较小。通过对 3 种胶接缝形式的对比分析可知,接缝对结构整体性能的影响与现浇整体式相近,相对而言,企口形接缝的强度、刚度和抗开裂表现最优。采用胶接缝替代传统湿接缝,对结构纵向正弯矩性能影响较小;在满足性能要求的前提下,可实现全装配式施工替代现浇施工的方案,极大地提高了装配性。

3 胶接缝桥面板全装配组合梁承载力分析

3.1 高强螺栓剪力键抗剪承载力表达式

试验所用胶接缝桥面板全装配组合梁的抗剪连接件采用摩擦型高强螺栓连接件,螺栓受力阶段可分为如图 9 所示的 3 个阶段:摩擦阶段、滑移阶段和承压阶段。其中滑移阶段受力较小,可忽略不计,实际受力状态可划分成高强螺栓摩擦力以及高强螺栓孔壁与螺杆承压抗剪力两种形式。单个高强螺栓连接件的抗剪强度依据《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.1—2010)、《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规范^[14-15]进行计算。

摩擦阶段抗剪承载力计算式为

$$N_{v1}^b = 0.9k_n \mu P \tag{3}$$

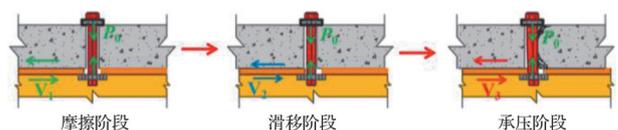


图 9 摩擦型高强螺栓的受力过程

Fig. 9 Stress process of friction-type high-strength bolt

承压阶段抗剪承载力计算式为

$$N_{v2}^b = \min \left\{ d_e t f_c^b, n_t \frac{\pi d_e^2}{4} f_v^b \right\} \quad (4)$$

高强螺栓剪力键抗剪承载力为

$$N_v^b = N_{v1}^b + N_{v2}^b \quad (5)$$

式中: k 为孔型系数; n_t 为传力摩擦面数目; μ 为摩擦面抗滑系数; P 为单个高强螺栓预拉力设计值; d_e 为高强螺栓杆的有效直径; t 为钢梁翼缘板厚度; f_c^s 为钢梁的抗压强度; f_c^b 为高强螺栓抗压强度设计值; f_v^b 为高强螺栓抗剪强度设计值。

3.2 胶接缝组合梁抗弯承载力表达式

现行规范中没有涉及胶接缝组合梁的承载力计算方法,依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[15]给出无接缝组合梁塑性抗弯承载力的计算方法。

1)完全抗剪连接件组合梁

①当中和轴位于混凝土板内(即 $A_s f \leq b h f_c$)时

$$M \leq b x f_c y \quad (6)$$

式中: b 为混凝土板有效宽度; x 为混凝土板受压区高度; f_c 为混凝土抗压强度设计值; y 为截面受压区合力至受拉区合力的距离。

②当中和轴位于钢梁内(即 $A_s f > b h f_c$)时

$$M \leq b h_c f_c y_1 + A_{sc} f y_2 \quad (7)$$

式中: A_{sc} 为中和轴上方的钢梁截面面积; h_c 为混凝土板高度; f 为钢梁抗拉、抗压强度设计值; y_1 为钢梁受拉区截面形心到混凝土翼板形心的距离; y_2 为钢梁受拉区截面形心至钢梁受压区截面形心的距离。

2)部分抗剪连接件组合梁

$$M = n_r N_v^b y_1 + 0.5(A f - n_r N_v^b) y_2 \quad (8)$$

式中: n_r 为部分抗剪连接时最大正弯矩验算截面至最近零弯矩点的抗剪连接件数量; A 为钢梁横截面积。

①依据文献[16]可得组合梁抗剪连接度 η

$$\eta = \frac{n}{\left[\frac{\min \{ f_d A_s, f_{cd} A_c \}}{N_v^c} \right]} \quad (9)$$

式中: A_s 、 A_c 分别为钢梁和混凝土板的横截面积; f_d 、 f_{cd} 分别为钢梁和混凝土板的设计强度; N_v^c 为单个连接件的抗剪承载力。

根据试验梁构造,其抗剪连接度为0.78,故该组合梁为部分抗剪连接组合梁。

②参考 Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings^[17]中提出的部分抗剪连接组合梁计算式形式,见式(10),结合有无接缝及不同

接缝类型对抗弯承载力的影响,提出胶接缝桥面板全装配组合梁正弯矩计算公式,见式(11)。

$$M_{Rd} = M_g + \eta(M_{pl,Rd} - M_g) \quad (10)$$

$$M_f = M_g + \omega(M - M_g) \quad (11)$$

式中: $M_{pl,Rd}$ 为完全抗剪连接组合梁承受的弯矩; M_g 为装配桥面板未连接前纯钢梁能承受的弯矩; M 为整体现浇组合梁所能承受的弯矩; ω 为胶接缝强度折减系数。

3.3 折减系数

胶接缝强度折减系数 ω 参考 AASHTO 规范^[18]中不同类型接缝的抗弯强度折减系数建议值,如表6所示。试验梁的接缝是不存在预应力筋的A类接缝,其抗弯折减系数取0.9。

表6 节段预制拼装梁抗弯强度折减系数

Table 6 Bending strength reduction coefficient of segmental prefabricated beams

桥面板材料	是否存在预应力筋	接缝类型	抗弯折减系数
普通混凝土	存在预应力筋	A类接缝	0.95
	不存在预应力筋	B类接缝	0.85
		A类接缝	0.90

3.4 试验值与理论值对比

表7为4片试验梁极限抗弯承载力的试验值与理论计算值对比结果。数据分析表明,各试验梁极限抗弯承载力理论计算值与试验值的误差均不超过5%。

表7 弯矩承载力计算结果对比

Table 7 Comparison of calculation results of bending moment bearing capacity

试件编号	抗弯承载力/(kN·m)		误差/%
	实验值	理论值	
N1	509.85	491.60	3.53
N2	485.50	479.98	1.15
N3	499.30	479.98	4.03
N4	499.45	479.98	4.06

4 结论

对1片现浇式组合梁和3片全装配组合梁进行试验,分析了不同形式胶接缝对全装配组合梁力学性能的影响,得到主要结论如下:

1)现浇梁和全装配组合梁的破坏模式存在差异:现浇板呈弯曲破坏特征,接缝板为弯剪破坏,胶接缝处的破坏形式表现为胶接缝附近混凝土的内聚破坏。

2)桥面板有无接缝对组合梁整体结构性能影响并不显著。相对而言,3种胶接缝中企口形接缝的强度、刚度和抗开裂表现最优。采用胶接缝替代

传统湿接缝可实现全装配式施工,以替代现浇施工,提高结构的装配性,在装配式工程应用中具有施工优势。

3)桥面板有无接缝对组合梁整体延性有较大影响。现浇梁延性最大,其延性系数较直线形、阶梯形和企口形接缝分别高出14.39%、34.87%、7.75%。

4)基于现有规范公式,提出了考虑高强螺栓抗剪连接件和胶接缝桥面板的全装配组合梁承载力计算方法,计算误差均小于5%。

参考文献

- [1] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2017.
HUANG Q. Design principle of bridge steel-concrete composite structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
NIE J G. Steel-concrete composite bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [3] DENG S W, SHAO X D, YAN B F, et al. On flexural performance of girder-to-girder wet joint for lightweight steel-UHPC composite bridge [J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1335.
- [4] CULMO M. Connection details for prefabricated bridge elements and systems [R]. United States Federal Highway Administration Office of Bridge Technology, 2009
- [5] 彭华春, 张康康, 时松, 等. 节段预制拼装桥梁研究综述[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 75-83.
PENG H C, ZHANG K K, SHI S, et al. Summary of research on segmental precast assembled bridge [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 75-83. (in Chinese)
- [6] 李国平, 胡皓, 任才, 等. 桥梁混凝土结构接缝的耐久性能[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 98-103.
LI G P, HU H, REN C, et al. Study on durability of joints in concrete bridge structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 98-103. (in Chinese)
- [7] 何伟, 时松, 王博, 等. 胶接缝节段预制拼装桥梁理论研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10369-10378.
HE W, SHI S, WANG B, et al. Summary of precast segmental assembling bridges with epoxy resin joints [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10369-10378. (in Chinese)
- [8] 苟文忠, 陈浩, 程高, 等. 节段预制拼装胶接缝抗剪性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 77-85.
GOU W Z, CHEN H, CHENG G, et al. Test on shear performance of segmental precast epoxied joint [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 77-85. (in Chinese)
- [9] 潘仁胜, 程凌霄, 何伟伟, 等. UHPC键齿胶接缝直剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 38-49.
PAN R S, CHENG L X, HE W W, et al. Experimental research on direct shear performance of UHPC keyed epoxy joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(11): 38-49. (in Chinese)
- [10] JIANG H B, LI Y H, LIU A R, et al. Shear behavior of precast concrete segmental beams with external tendons [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8): 04018049.
- [11] AHMED G H, AZIZ O Q. Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading [J]. Engineering Structures, 2019, 182: 89-100.
- [12] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [14] 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱: GB/T 3098.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 45-46.
Mechanical properties of fasteners—Bolts, screws and studs: GB/T 3098.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 45-46. (in Chinese)
- [15] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 黄侨, 郑兴, 李文贤. 抗剪连接程度对组合梁受力性能影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 1070-1078.
HUANG Q, ZHENG X, LI W X. Effect of shear connection degree on mechanical behavior of composite beams [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(8): 1070-1078. (in Chinese)
- [17] JOHNSON R P, ANDERSON D. Designers' Guide to EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings [M]. London: Thomas Telford, 2004.
- [18] 谢红兵. 节段式混凝土桥梁设计和施工指导性规范(一) [J]. 国外桥梁, 1993(4): 297-315.
XIE H B. Guiding code for design and construction of segmented concrete bridges (I) [J]. World Bridges, 1993 (4): 297-315. (in Chinese)