

大跨径连续刚构钢混结合段剪力键力学性能研究

刘 通¹, 蒋 鑫², 刘 学³

(1. 广西高速公路投资有限公司高速公路总工程师办公室, 南宁 530000;
2. 广西桂浦高速公路投资有限公司, 南宁 530000; 3. 广西百宁高速公路投资有限公司, 南宁 530000)

摘 要: 为了研究大跨径连续刚构桥 PBL 剪力键的力学性能。通过开展静载试验, 研究了影响 PBL 剪力键承载能力的主要因素, 并结合有限元分析了 PBL 剪力键的传力机理。结果表明: PBL 剪力键的承载力随着混凝土强度的提升和贯通钢筋直径的增大而显著增强; 适当增大钢板孔径有助于改善剪力键的受力性能, 但当孔径达到一定阈值后, 其对承载能力的提升效果逐渐减弱, 继续增大孔径对整体结构的贡献趋于有限; PBL 剪力键的传力机制主要依赖贯通钢筋、混凝土及钢板的协同作用, 确保轴力和剪力的高效传递。此研究可为后续大跨径桥梁钢混结合段中 PBL 剪力键的应用提供了重要的理论依据和实践参考。

关键词: 连续刚构桥; PBL 剪力键; 有限元分析; 静载试验

中图分类号: U448.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0157-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.026

Study on the Mechanical Performance of Shear Keys in Steel-Concrete Composite Sections of Large-Span Continuous Rigid Frame Bridges

LIU Tong¹, JIANG Xin², LIU Xue³

(1. Highway Chief Engineer Office, Guangxi Highway Investment Co., Ltd., Nanning 530000, China;
2. Guangxi Guipu Highway Investment Co., Ltd., Nanning 530000, China;
3. Guangxi Baining Highway Investment Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: This study investigates the mechanical performance of PBL shear keys in large-span continuous rigid frame bridges. Through static load tests, the key factors affecting the load-bearing capacity of PBL shear keys are examined, and the force transfer mechanism of the shear keys is analyzed using finite element modeling. The experimental results indicate that the load-bearing capacity of PBL shear keys significantly increases with higher concrete strength and larger diameters of the through reinforcement. An appropriate increase in the steel plate hole diameter improves the shear key's performance. However, beyond a certain threshold, the effect of further enlarging the hole diameter on enhancing the load-bearing capacity gradually diminishes, and further increases in hole size offer limited benefits to the overall structural performance. The force transfer mechanism of the PBL shear key primarily relies on the synergistic interaction between the through reinforcement, concrete, and steel plate, ensuring efficient transmission of axial and shear forces. This research provides important theoretical foundations and practical insights for the application of PBL shear keys in steel-concrete composite sections of large-span bridges.

Key words: continuous rigid frame bridge; PBL shear key; finite element analysis; static load test

0 引言

钢-混凝土组合结构因其优异的承载性能与耐久性,在桥梁工程中得到了广泛应用。PBL 剪力键作为钢-混凝土组合结构的核心连接构件,在界面剪力传递中起关键作用^[1]。系统研究 PBL 剪力键的力学性能及其影响因素,对于优化结构设计、提升工程安全性及耐久性具有重要学术价值和工程意义。

大量学者通过试验研究了 PBL 剪力键的力学性能。龚超等^[2]对 PBL 钢筋连接接头开展拉伸性能试验,研究了接头试件的承载能力与破坏模式;肖林等^[3]通过对 PBL 剪力键开展推出试验,得出了影响 PBL 剪力键承载力的影响因素;武芳文等^[4]通过对钢-UHPC 组合结构进行推出试验,提出了 PBL 剪力键的极限承载力公式;马亚飞等^[5]提出了一种改进的承压组合剪力键,并研究了影响改进剪力键力学性能;周敏等^[6]对钢-UHPC 组合板加载,研究了高强度混凝土组合结构的破坏模式;陈思程等^[7]通过对钢-混组合梁结合段开展弯曲试验,研究了 PBL 剪力键的承载力以及破坏机理;秦华乾等^[8]提出了一种新型的剪力键形状,并通过试验验证了其优异的承载能力;宋瑞年等^[9]通过推出试验,研究了侧向压力对 PBL 剪力键的影响;熊炫伟等^[10]研究了 RPC 材料对 PBL 剪力键力学性能的影响。近年来,国内外的学者通过数值模拟分析了 PBL 剪力键力学性能;周勇超等^[11]通过 ABAQUS 建立 PBL 建立键的有限元模型,揭示了 PBL 剪力键的传力机理;王建萍等^[12]建立有限元模型,探究了附加装配式钢管 PBL 剪力键的抗剪性能;邵旭东等^[13]建立有限元模型,研究了不同强度的 UHPC 混凝土对 PBL 剪力键的承载力的影响;陈海等^[14]通过对新型组合剪力键建立有限元模型,分析了新型组合剪力键的受力机理;Karam 等^[15]建立了有限元模型,研究了钢筋位置与强度对 PBL 剪切键的破坏机理的影响;Li 等^[16]通过数值模拟,深入研究了含 PBL 剪切键的钢-UHPC 复合材料板的弯曲性能。

综上所述,现有研究围绕 PBL 剪力键的力学性能展开,重点关注不同受力工况、新型组合结构及材料特性,并取得了一定成果。然而,对于大跨径连续刚构钢混结构中 PBL 剪力键的受力性能,相关

研究仍较为有限。因此,通过开展静载试验,系统研究不同混凝土强度、钢筋直径及钢板孔径对 PBL 剪力键承载性能的影响。在此基础上,构建有限元模型,以探究大跨径连续刚构钢混结构中 PBL 剪力键的传力机理。

1 试验设计

试样混凝土选取 C30、C40、C50、C55。其中,采用 P. O 42.5 硅酸盐水泥,细砂为天然河砂,细度模数为 2.6,粗骨料采用粒径 $6\leq d\leq 10\text{ mm}$ 的碎石子。钢筋采用 HRB400,钢筋直径采用三种类型,分别为 20、25 以及 28 mm。钢板采用 Q345B 钢材,板厚 20 mm,板内开孔直径选取 3 种类型,分别是 40、50、70 mm 三种尺寸。模型试样结构如图 1 所示。试样的分组信息详见表 1。试验采用轴向受压加载方式,并采用力控制加载模式,以 6 kN/min 的加载速率持续施加荷载,直至试件达到极限承载力并发生破坏。

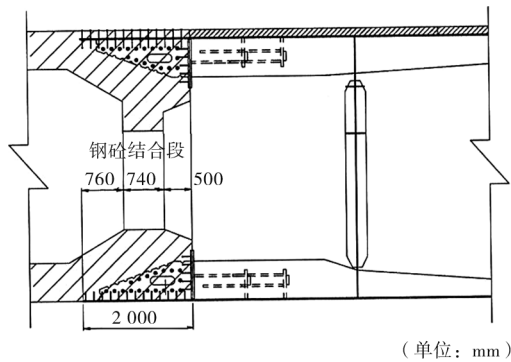


图 1 试样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the sample

表 1 试样分组 Table 1 Sample grouping			
试样编号	混凝土强度等级	钢筋直径 /mm	钢板开孔直径 /mm
A1	C30	20	40
A2	C40	20	40
A3	C50	20	40
A4	C55	20	40
A5	C30	25	40
A6	C30	28	40
A7	C30	20	50
A8	C30	20	70

2 试验结果分析

2.1 混凝土强度对 PBL 剪力键的影响

由图 2 可知,荷载随着位移的增加有着先增大后

减小的趋势,在位移为 30 mm 左右的位置荷载达到峰值。随着混凝土强度的增加,试件的荷载值也相应的同步升高,其中 C55 强度的混凝土的峰值荷载是 C30 混凝土峰值荷载的 1.9 倍。PBL 剪力键的承载力随混凝土强度提高而增加,主要原因在于高强度混凝土具备更强的抗剪、抗压能力,增强了剪力键的剪力传递和粘结-锚固性能。此外,高强度混凝土对孔洞周围区域的约束作用更强,减少局部压碎破坏,使剪力键更倾向于延性破坏,提高整体承载力和安全性。

PBL 剪力键的极限承载力经验公式如公式 1 所示:

$$P_u = k f_c^a A \quad (1)$$

式中: k 是经验系数; A 代表受力面积, m^2 ; f_c 为混凝土强度, MPa 。

由上式可知, PBL 剪力键的承载力与混凝土强度的大小存在正相关的关系,进一步验证了混凝土强度对剪力键受力机制的影响,即在更高强度的混凝土中,剪力键能够更有效地发挥承载作用,延缓局部破坏的发生,并优化结构的受力性能。

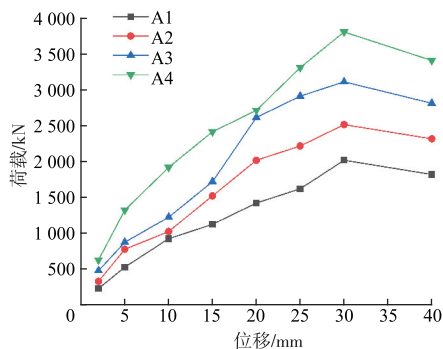


图 2 不同混凝土强度的 PBL 剪力键荷载-位移曲线
Fig. 2 Load-displacement curves of PBL shear keys with different concrete strengths

2.2 贯穿钢筋直径对 PBL 剪力键的影响

由图 3 可知,荷载随着位移的增加有着先增大后减小的趋势。随着贯穿钢筋直径的增加,试件的荷载值也相应的同步升高,其中直径 28 mm 钢筋的 PBL 剪力键的峰值荷载是直径 20 mm 钢筋峰值荷载的 1.3 倍。PBL 剪力键的承载力随钢筋直径的增加而提高,主要原因在于较大直径的钢筋具有更高的抗剪和抗拉拔能力,使剪力键能够承受更大的荷载传

递。此外,钢筋直径的增加会扩大其与混凝土的接触面积,增强黏结-锚固效应,提高剪力键的整体稳定性。同时,较大直径钢筋在孔洞周围形成更强的约束作用,减少局部混凝土压碎破坏的风险,使剪力键更加充分地发挥受力性能。因此,钢筋直径的增大不仅提升了 PBL 剪力键的极限承载能力,还优化了其受力机制,提高了结构的安全性和耐久性。

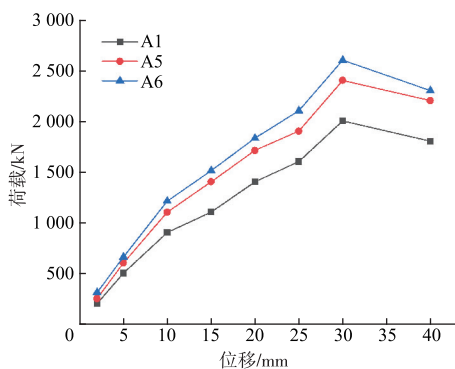


图 3 不同贯穿钢筋直径的 PBL 剪力键荷载-位移曲线
Fig. 3 Load-displacement curves of PBL shear keys with different through reinforcement diameters

2.3 钢板孔径对 PBL 剪力键的影响

从图 4 可知,随着钢板孔径的增加,试件的荷载值也相应的升高,其中 70 mm 的钢板孔径 PBL 剪力键的峰值荷载是钢板孔径为 40 mm 的 1.2 倍。钢板孔径从 40 mm 增加到 50 mm 时, PBL 剪力键承载力增幅较大。较大孔径使混凝土在孔洞区域的约束作用增强,减少局部应力集中现象,提高剪力键的整体承载能力。然而,当钢板孔径从 50 mm 增加到 70 mm 时,承载力提升有限。这种现象的原因可能是因为孔径的进一步扩大可能导致孔洞周围混凝土

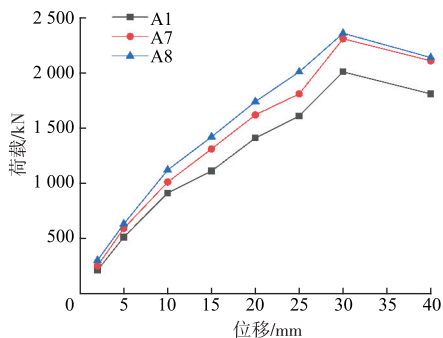


图 4 不同钢板孔径大小的 PBL 剪力键荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curves of PBL shear keys with different steel plate hole diameters

道桥技术

有效约束减弱,使局部破坏模式改变,进而影响承载力的提升。

3 PBL 剪力键结合段有限元模型

3.1 模型建立

3.1.1 单元选择类型及网格划分

采用 C3D8R 单元来模拟混凝土基体、开孔钢板及贯通钢筋,钢-混结合段有限元模型的钢梁部分采用四边形自由划分,钢梁顶板、底板和腹板沿纵桥向设置两种网格尺寸,结合段和靠近结合段的梁段网格尺寸为 80 mm,远离结合段的梁段网格尺寸为 120 mm,纵向加劲肋以及纵梁的网格尺寸为 50 mm,承压板和横隔板的网格尺寸分别为 150、200 mm,其余板件均为 100 mm;混凝土部分采用两种划分方式,混凝土桥面板和远离结合段的梁段采用六面体进行扫略划分,网格尺寸分别为 50、200 mm,结合段和靠近结合段的梁段采用四面体进行自由划分,网格尺寸分别为 80、100 mm;剪力钉和 PBL 钢筋沿轴向分为五段,预应力筋的网格尺寸为 100 mm。有限元模型如图 5 所示。



图 5 钢混结合段的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the steel-concrete composite section

3.1.2 边界条件及荷载情况

约束混凝土标准梁段端部所有节点三个方向的平动自由度,将混凝土梁端固定;在钢板处施加均布荷载。有限元模型的边界条件和加载示意图如图 6 所示。

3.2 PBL 剪力键传力机理分析

由图 7 可知,PBL 剪力键的传力机制主要依赖贯通钢筋、混凝土及钢板的协同作用,以实现剪力和轴力的有效传递。荷载传递过程中,贯通钢筋通过与混凝土的粘结锚固作用提供主要的剪力抵抗,混凝土在孔洞区域对钢筋形成约束,增强其抗剪承

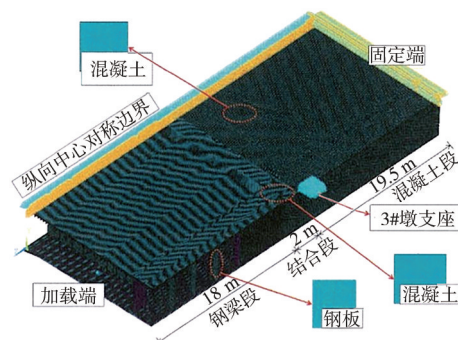
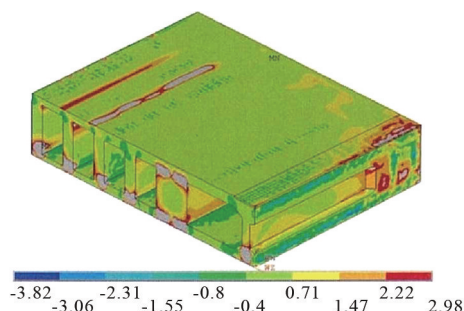
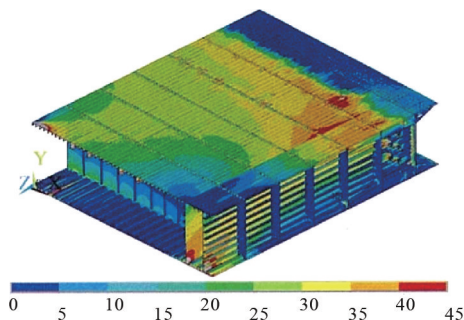


图 6 有限元模型边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of the finite element model



(a) 混凝土第一主应力/MPa



(b) 钢梁第一主应力/MPa

图 7 有限元仿真应力云图

Fig. 7 Finite element simulation stress contour plot

载力,而钢板则通过承压和限位作用,提高整体刚度并优化剪力分布。该传力机制确保了钢-混结合界面的稳定性,提升了结构的整体承载能力和抗滑移性能。优化孔洞布置、空洞间距、增强界面粘结力等措施可有效提升结合段的承载能力和长期服役性能。

4 结论

通过静载试验系统研究了不同混凝土强度、贯通钢筋直径及钢板孔径对 PBL 剪力键承载能力的影

响,并结合有限元分析深入探讨了 PBL 剪力键的传力机理,最终得出以下结论:

(1) PBL 剪力键的承载力随混凝土强度的提高和贯通钢筋直径的增大而显著提升。钢板孔径的增大在一定范围内有助于提高剪力键的承载能力,但当孔径增大至临界值后,其对承载力的提升作用趋于饱和,进一步增大孔径对剪力键的承载性能影响有限。

(2) PBL 剪力键的传力机制依赖于贯通钢筋、混凝土及钢板的协同作用,以确保轴力和剪力的高效传递。其中,贯通钢筋在荷载传递过程中通过与混凝土的粘结锚固提供主要的剪力抵抗。

(3) 通过优化钢板孔洞布置和增强界面粘结力,合理调整钢板孔径与孔洞间距,有助于优化剪力传递路径,减少局部应力集中,从而提高剪力传递效率。

参 考 文 献

- [1] LU W, LI D, HUANG Y W J. Study on Shear Resistance Property of a New PBL Connector with Steel-Rubber Tenon [J]. Materials, 2023, 16 (6): 2291-2291.
- [2] 龚超,梁梓豪,张素梅,等. PBL 抗剪传力钢筋连接接头受拉力学性能试验 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (7): 1391-1399.
- [3] 肖林,卫星,强士中. 两类 PBL 剪力键推出试验的对比研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (11): 70-80.
- [4] 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.
- [5] 马亚飞,周彪,王磊,等. 承压型组合剪力键剪切性能试验与承载力计算 [J]. 工程力学, 2023, 40 (11): 120-129.
- [6] 周敏,肖靖林,杨腾宇,等. 带开孔板剪力键的钢-UHPC 组合板受弯性能试验研究及数值模拟 [J]. 工程力学, 2022, 39 (7): 19-29.
- [7] 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.
- [8] 秦华乾,王振山,杨勇,等. 带翼缘双折型钢板剪力键粘结滑移及承载力计算研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (2): 212-224.
- [9] 宋瑞年,王潇碧,占玉林,等. 侧向压力作用下 PBL 剪力键的抗剪性能 [J]. 铁道建筑, 2019, 59 (12): 34-37.
- [10] 熊炫伟,经柏林,刘勇,等. 基于 RPC 材料的 PBL 剪力键力学性能试验研究 [J]. 公路工程, 2019, 44 (6): 240-245.
- [11] 周勇超,王丁丁. 基于有限元方法的 PBL 剪力键承载力分析 [J]. 公路, 2022, 67 (8): 109-113.
- [12] 王建萍,白志强,辛晓萱,等. 附加装配式钢管 PBL 剪力键抗剪承载力研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊 1): 1887-1892.
- [13] 邵旭东,陈玉宝,何广,等. 基于 PBL-栓钉组合剪力键的钢-UHPC 组合桁式拱桥节点拉拔性能研究 [J]. 桥梁建设, 2022, 52 (1): 33-40.
- [14] 陈海,郭子雄,刘阳,等. 新型组合剪力键抗剪机理及承载力计算方法研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (3): 159-168.
- [15] KARAM M S, NAKAMURA H, YAMAMOTO Y, et al. Numerical evaluation of the internal fracture mechanism of the single PBL shear connector considering the effects of position and strength of the transverse rebar [J]. Structural Concrete, 2024, 25 (4): 2759-2783.
- [16] LI C, SHI Y, XIAO H, et al. Experimental and numerical investigation on flexural behavior of steel-UHPC composite slabs with PBL shear connectors [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 95: 110109.