

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.024

引用格式: 杨磊. 栓钉焊接与 PBL 剪力键对比试验及力学性能研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 124-127+131.

Citation: YANG Lei. Study on mechanical properties of shear bond and comparative test between stud welding and PBL shear bond[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 124-127+131.

栓钉焊接与 PBL 剪力键对比试验及力学性能研究

杨磊

(广东省冶金建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510080)

摘要: 对于波形钢腹板-混凝土组合桥梁, 剪力连接件的力学性能是研究重点。文中分别设计栓钉连接剪力键和 PBL 剪力键两种试件, 对其进行单板插入试验, 从受力特性、破坏形态等方面比较两种剪力连接件的力学性能。结果表明, 栓钉剪力键的破坏形态为脆性破坏, PBL 剪力键的破坏形态为延性破坏; PBL 剪力键的承载力及延性等与栓钉剪力键相比均显著提升, 配置贯穿钢筋的 PBL 剪力键是一种更好的剪力连接形式。

关键词: 桥梁; 波形钢腹板; 栓钉剪力键; PBL 剪力键; 抗剪性能; 力学性能

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0124-04

波形钢腹板-混凝土组合桥梁是一种新型钢-混凝土组合形式, 具有自质量轻、跨越能力强等优点^[1-3], 近年来在桥梁建设中得到广泛应用^[4-5]。波形钢腹板组合桥梁的最大特点是利用较薄的波折形钢腹板代替混凝土腹板, 而钢腹板主要承受剪力而不承受轴力, 因此波形钢腹板的抗剪能力关系到整个结构的承载能力^[6-9]。

波形钢腹板-混凝土组合结构的剪力连接件的性能决定整个结构的抗剪能力, 近年来多位学者对其进行了研究。胡锋等设计一种适用于波形钢腹板组合箱梁斜拉桥的带栓钉埋入式抗剪连接件, 并对其室内试验和数值仿真。结果表明, 综合对比剪力连接件的抗剪承载力、极限位移和开裂荷载, 栓钉的最优焊接位置为钢板外侧; 相较于上折板及下折板, 直板为最优开孔位置^[10]。倪伟楠等对结合钢带板嵌入式连接件与结合钢筋嵌入式连接件的力学性能进行对比, 结果表明结合钢带板嵌入式连接件的抗剪承载力明显高于结合钢筋嵌入式连接件^[11]。胡旭辉等分析混凝土强度、波形钢板开孔直径和贯穿钢筋强度及直径等参数对波形钢腹板改进型埋入式剪力键抗剪承载力的影响, 结果表明波形钢板开孔直径和混凝土强度是影响埋入式剪力键极限承载力的主要因素, 贯穿钢筋直径和强度及波形钢板厚度对承载力的影响较小^[12]。石膏爽等对波形钢腹板 PBL (Perfobond Leiste) 剪力键进行静载推出试

验并分析其受力性能, 结果表明各试件有相似的滑移趋势并表现出一定延性, 随着腹板厚度和连接件孔径的增大, 极限承载能力增强^[13]。本文设计栓钉连接剪力键和 PBL 剪力键两种试件, 对其进行单板插入试验, 从受力特性、破坏形态等方面比较两种剪力键的受力性能。

1 试验准备

1.1 剪力键设计

综合考虑不同结构形式及钢-混截面是否存在黏结, 设计 4 种剪力键, 每种剪力键设置 2 个平行试件, 共 8 个试件, 试件参数见表 1。剪力键试件参数均按照实际工程中剪力键相关参数选取, 试件整体尺寸则综合考虑加载设备的最大加载力、加载空间等因素确定。表 1 中, SD-B 为栓钉剪力键试件, 对于该试件, 分别将 2 个栓钉焊接在钢板两侧的形心位置, 栓钉长度为 150 mm、直径为 22 mm; NJ-B 为纯黏结型试件, 用于研究钢板与混凝土的黏结性能;

表 1 剪力连接件的参数

试件 编号	试件说明	钢板厚/ mm	贯穿钢筋 直径/mm	孔径/ mm
SD-B	栓钉 $\phi 22 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$	25	—	—
NJ-B	纯黏结型	25	—	60
PB-UB	无黏标准 PBL	25	20	60
PB-B	黏结标准 PBL	25	20	60

PB-UB 为无黏结 PBL 剪力键试件,用于研究 PBL 剪力键在不考虑钢板与混凝土黏结情况下的抗剪性能,该剪力键由钢板和钢筋构成,在钢板形心处切出一个直径为 60 mm 的圆孔,向圆孔内插入一根直径为 20 mm 的钢筋,随后进行混凝土浇筑,为模拟无黏结情况,在混凝土浇筑前在钢板表面涂抹一层润

滑油;PB-B 为有黏结 PBL 剪力键试件,用于研究考虑钢板与混凝土黏结的 PBL 剪力键的抗剪性能,并与 PB-UB 试件进行对比。栓钉剪力键和 PBL 剪力键的构造尺寸分别见图 1、图 2,图中泡沫塑料垫块在试件浇筑和加工时使用,在试验加载前凿出,以消除加载时钢板底部混凝土的承压作用。

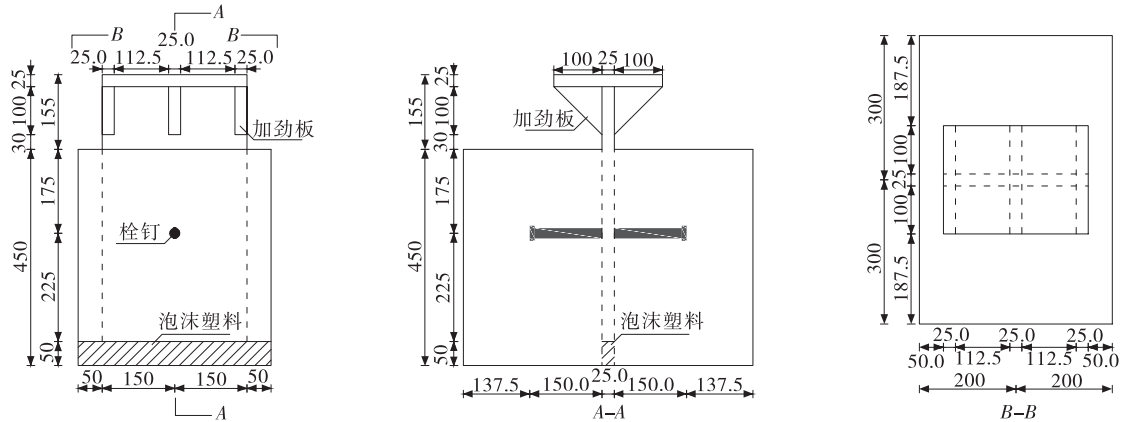


图 1 栓钉剪力键示意图(单位:mm)

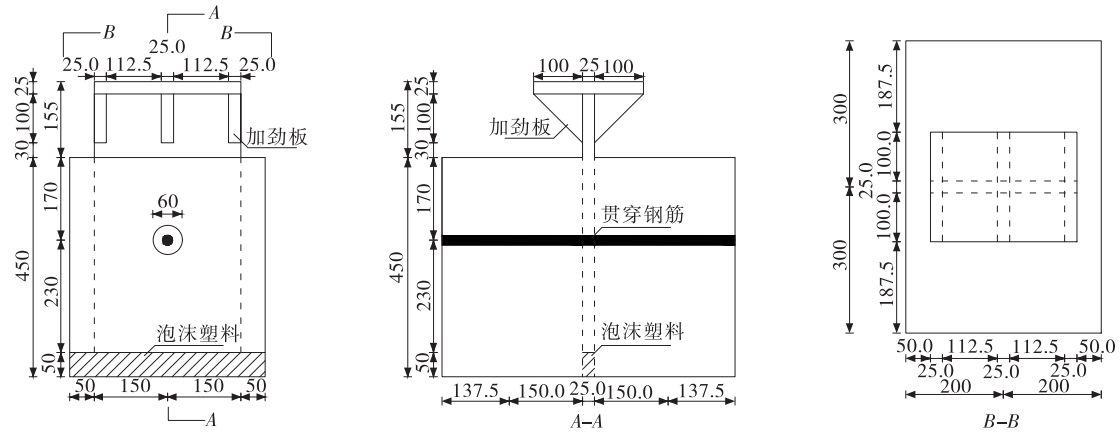


图 2 PBL 剪力键示意图(单位:mm)

1.2 加载流程

试验加载如图 3 所示。加载设备为一台液压试验机,其最大加载力 p 为 1 000 kN。加载时,将试件放在试验机的中心,以避免偏心受压,并在试件顶、底部设置细砂垫层,以保证试件顶板和底部均匀受力。在试件的顶部和侧面分别布置力传感器和 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)位移传感器,并使用 DH5937 型多通道数据采集仪以 10 Hz/s 的采样率采集荷载和位移数据。试验前对试件进行预加载,以检查各仪表的工作情况,并消除各种初始影响,预加载力为 100 kN。试验加载流程如下:在试件弹性阶段,采用荷载控制分级加载,每级荷载增量为 50 kN,加载速率为 2 kN/s,每级加载结

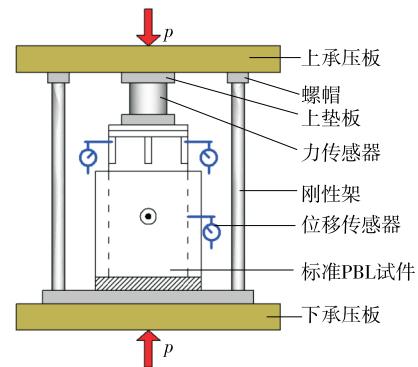


图 3 试件加载示意图

束后持荷 5 min,观察剪力键状态和试件裂缝分布;试件加载进入非线性阶段时,改为位移控制加载直到试件破坏,每级位移增量为 0.2 mm,加载速率为

0.2 mm/min, 同样每级加载结束后持荷 5 min。

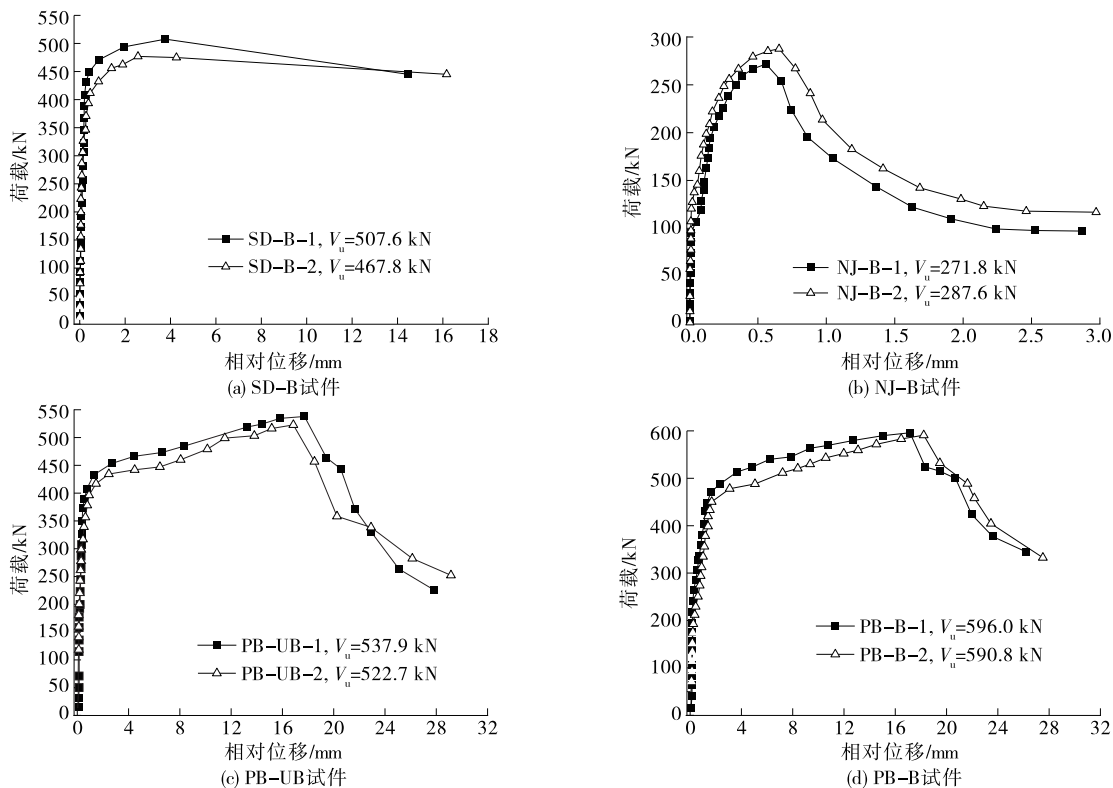
2 试验结果与分析

2.1 试验荷载-相对位移曲线

图 4 为各试验工况下试件的荷载-相对位移曲线, 各试件的抗剪刚度以其荷载-相对位移曲线的斜

率表示。

由图 4 可知: 总体而言, 各工况对应的 2 个平行试件的荷载-位移曲线趋势一致, 仅存在略微的数值差异, 表明试验结果可靠、可重复。在加载初期, 钢板与混凝土之间仅产生很小的相对位移, 在该阶段, 试件的剪力主要由钢-混界面的黏结和摩擦作用承



V_u 为极限抗剪承载力

图 4 各组试件加载全过程荷载-相对位移曲线

担。对于 NJ-B 试件, 荷载增大至 100 kN 时, 钢-混界面之间的相对位移明显增大, 在加载至 270 kN 左右时试件发生破坏, 其承载力迅速降低, 试件极限承载力对应的相对位移仅为 0.7 mm 左右。对于其他 3 组设置剪力键的试件, 在钢-混界面的黏结作用失效后, 相对位移的增长速度依旧十分缓慢, 随着荷载的继续增大, 3 组试件的荷载-位移曲线开始不同程度地产生非线性变化。对于 SD-B 试件, 加载至 400 kN 时曲线开始进入非线性阶段, 加载至 490 kN 左右时试件产生破坏。对于 PB-UB 和 PB-B 试件, 荷载-相对位移曲线在进入非线性阶段后又产生强化阶段, 表明在该阶段钢筋独自承受剪力并产生较明显的塑性变形。

2.2 静力特性分析

为更准确地分析各组试件的力学特性, 基于试

件的荷载-相对位移曲线分别计算各组试件的抗剪刚度 K_s 、弹性阶段最大剪力 V_e 、极限抗剪承载力 V_u 、极限抗剪承载力对应的最大相对位移 Δ_u 和延性系数 D_e , 计算结果见表 2。

由表 2 可知: 各工况对应的 2 个平行试件的各项力学参数都较接近。根据 K_s 和 V_e , 设置栓钉作为剪力键的 SD-B 试件在弹性阶段表现出更好的抗剪能力, 但其极限抗剪承载力、极限相对位移和延性系数明显小于设置贯穿钢筋作为剪力键的试件。此外, 由于 PB-B 试件考虑了钢板与混凝土的黏结, 其抗剪承载力比 PB-UB 试件提高 63.1 kN, 这部分提高可以认为是钢板与混凝土黏结作用的贡献, 约占 PB-B 试件总抗剪承载力的 11%。综上, 相较于使用焊接栓钉作为剪力键的方式, 使用贯穿钢筋作为剪力键能明显提高试件的抗剪能力和延性。

表 2 各组剪力连接件的主要静力学特性

试件编号	$K_s/(kN \cdot mm^{-1})$		V_e/kN		V_u/kN		Δ_u/mm		D_e
	计算值	均值	计算值	均值	计算值	均值	计算值	均值	
SD-B-1	1 873.9	1 778.8	374.8	355.8	507.6	491.2	3.8	4.0	20.1
SD-B-2	1 683.8		336.8		474.8		4.2		
PB-UB-1	1 360.1	1 354.8	272.0	271.0	537.9	530.3	17.7	17.2	86.2
PB-UB-2	1 349.6		269.9		522.7		16.8		
PB-B-1	1 209.3	1 136.2	241.8	227.2	596.0	593.4	17.1	17.6	88.3
PB-B-2	1 063.1		212.6		590.8		18.2		

2.3 破坏形态分析

加载完成后,使用冲击钻将各试件混凝土层凿开并观察钢板、栓钉和贯穿钢筋的破坏形态。栓钉试件的破坏形态见图 5,PBL 剪力键贯穿钢筋的破坏形态见图 6。

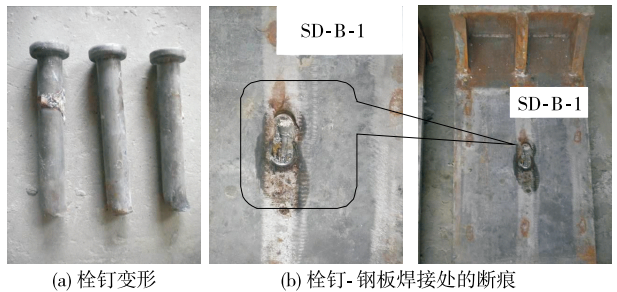


图 5 栓钉剪力键的破坏形态

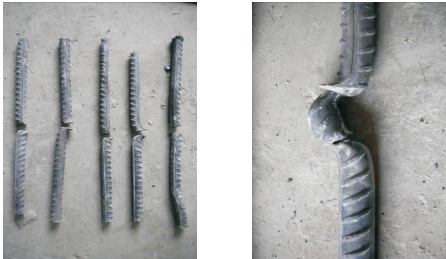


图 6 PBL 剪力键贯穿钢筋的破坏形态

由图 5 可知:在整个加载过程中,栓钉并没有产生明显变形,栓钉剪力键的破坏发生在栓钉和钢板焊接处。表明在整个加载过程中,栓钉的抗剪能力并没有完全发挥,试件的破坏形式为脆性破坏。

由图 6 可知:在 PBL 剪力键的钢筋与钢板交界处,钢筋产生明显塑性变形,且此处钢筋被剪坏。表明贯穿钢筋充分发挥了其抗剪能力,试件破坏形式为延性破坏。

3 结论

本文设计栓钉连接剪力键和 PBL 剪力键两种

试件,对其进行单板插入试验,从受力特性、破坏形态等方面比较两种剪力连接件的力学性能。主要结论如下:

(1) 在加载初期,各试件的剪力主要由钢-混界面的黏结和摩擦作用承担;随着荷载的提高,剪力键开始发挥抗剪作用。

(2) 相较于使用焊接栓钉作为剪力键的方式,使用贯穿钢筋作为剪力键能明显提高试件的抗剪能力和延性。这是由于栓钉剪力键破坏形式为焊接处脆性破坏,其抗剪能力没有得到充分发挥,而 PBL 剪力键充分发挥了其抗剪能力,表现出延性破坏。

(3) 相比 PB-UB 试件,PB-B 试件的抗剪承载力提高 63.1 kN,这部分提高可以认为是钢板与混凝土黏结作用的贡献,约占 PB-B 试件总抗剪承载力的 11%。

(4) 从受力行为、静力特性及破坏形态等方面综合比较,配置贯穿钢筋的 PBL 剪力键是一种更好的剪力连接形式。

参考文献:

[1] 许红胜,覃鑫林,颜东煌,等.波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺研究[J].公路与汽运,2023(4):111-114+124.
[2] 赵品,韩恒涛,荣学亮,等.变截面波形钢腹板连续梁的抗弯性能试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(3):425-433.
[3] 荣学亮,欧阳靖,赵品,等.波形钢腹板组合槽型梁动力特性研究及参数分析[J].桥梁建设,2022,52(6):95-101.
[4] 李华健,王旭东,覃鑫林,等.BIM 技术在波形钢腹板 PC 箱梁桥施工新工艺发展中的应用[J].公路与汽运,2023(6):118-122.
[5] 袁萌,刘峰.波形钢腹板 PC 组合结构在桥梁中的应用[J].四川建材,2022,48(1):145-146.

(下转第 131 页)

大,破坏形式以锥形破坏和扭曲变形为主,试样处于塑性状态,基本丧失抗压强度。说明含水率增加会改变黄土的骨架结构及力学性质,在单轴压缩作用下,其破坏模式由典型的劈裂破坏转变为塑性剪切和扭曲变形破坏。

3 结论

(1) 黄土遇水软化效应较明显,其抗压强度受水的作用劣化较严重。随着含水率的增加强度呈指数递减趋势,含水率增加到 16.18% 时其强度骤降至 59.5 kPa,相较于天然黄土,其强度丧失约 91.64%;随着含水率的继续增加,黄土的增湿强度基本保持不变。

(2) 含水率低于 16.18% 时,原状黄土试样以剪切破坏为主,出现明显剪切带,产生部分裂缝,裂缝沿纵向发展;加载过程中试样形状基本没有发生变化,保持较好的完整性。

(3) 含水率高于 16.18% 时,原状黄土试样沿剪切面发生错移,同时伴随扭曲变形,变形明显增大,破坏模式由典型的劈裂破坏转变为塑性剪切和扭曲变形破坏。

参考文献:

- [1] 来弘鹏,杨晓华.黄土地区隧道病害类型与机理探讨[J].公路交通科技,2006(3):12-14.

- [2] 廖自成.湿陷性黄土地区路基常见病害及处理措施分析[J].运输经理世界,2023(5):134-136.
- [3] 张宏杰.湿陷性黄土地区公路桥梁病害形式及机理分析[J].工程技术研究,2020,5(16):169-170.
- [4] 吕庆林,王淑华.黄土隧道的地表变形病害分析及治理[J].西部探矿工程,2006,18(11):133-135.
- [5] 张洁.黄土地区隧道病害类型与治理探讨[J].建材技术与应用,2018(5):44-45+48.
- [6] 杨凯,朱小明,雒成贤,等.甘肃公路隧道病害主要类型及养护对策研究[J].公路,2023,68(1):378-385.
- [7] 田森,韩智超,岳贤君.冀鲁地区黄土公路路基处理技术对比分析[J].公路与汽运,2019(1):69-71+142.
- [8] 李文秀.水泥石灰土处治湿陷性黄土路基研究[J].公路与汽运,2016(6):144-146+150.
- [9] 王燕,姚仰平,胡玉定,等.不同含水率原状黄土的强度与变形特性试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):325-330.
- [10] 段丹军,杨烜宇.降雨入渗对黄土拓宽路基变形影响的离心模型试验[J].交通科学与工程,2023,39(4):17-23+46.
- [11] 凌同华,袁三莲.超大断面黄土隧道基底加固技术及变形机理研究[J/OL].交通科学与工程,1-10[2024-11-26].<https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230412001>.

收稿日期:2023-09-06

(上接第 127 页)

- [6] 贺君,滕强,奉思东,等.可更换波形钢腹板连梁低周反复加载试验研究[J].交通科学与工程,2024,40(4):47-56.
- [7] 贾韶丽,高仕赵,王明斌,等.波形钢腹板 PC 组合箱梁中钢腹板的抗剪设计方法[J].公路工程,2015,40(5):96-100+123.
- [8] 陈立生,叶智勇,赵国强,等.单箱多室波形钢腹板组合箱梁斜拉桥抗剪特性研究[J].桥梁建设,2017,47(2):48-53.
- [9] 彭东林,杨建荣,郑晓龙.异步悬浇施工中波形钢腹板局部变形研究[J].交通科学与工程,2021,37(1):89-94.

- [10] 胡锋,刘晓东,袁阳光,等.波形钢腹板组合箱梁带栓钉埋入式抗剪连接件承载力推出试验及有限元模拟分析研究[J].工程力学,2021,38(11):43-56.
- [11] 倪伟楠,刘朵,张建东,等.波形钢腹板嵌入式连接件力学性能试验研究[J].世界桥梁,2014,42(2):70-75.
- [12] 胡旭辉,陈诗,唐朋胜,等.波形钢腹板改进型埋入式剪力键受力性能试验研究[J].桥梁建设,2018,48(4):45-50.
- [13] 石膏爽,王清远,欧阳雯欣,等.PBL 剪力连接件粘结滑移性能的静载推出试验研究[J].工程力学,2012,29(1):168-175.

收稿日期:2024-03-18