

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.04.012

钢-混凝土组合结构多排PBH剪力键力学行为试验研究

范亮¹, 罗开勇¹, 何骏²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 为了模拟结构中的真实受力方式, 在PBH剪力键(Perfobond Hoop)单排受力研究的基础上, 开展了以排数和排间间距为主要参数的多排PBH力学行为静载推出试验研究。多排PBH剪力键试验的试件排数分别为1~5排, 排间间距为75~300 mm, 共8个试件; 试验得到多排PBH剪力键的典型荷载-滑移全过程曲线、承载力、破坏形态及滑移分布规律。多排PBH剪力键试验表明, 其破坏形态为混凝土劈裂破坏, 穿孔钢筋受弯屈服; 沿高度方向的界面滑移呈现“两端大中间小”的分布规律; 在排数5排以内时, 多排PBH抗剪极限承载力与剪力键排数呈近似正相关, 与排间间距无明显关系。依据影响因素和分析结果, 提出了相应极限承载力计算公式, 与试验结果吻合较好。

关键词: 桥梁工程; 组合结构; 试验研究; 承载力; 剪力键; 多排

中图分类号: TU398.9; TU317.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)04-0080-07

Experimental Study on Mechanical Behaviors of Multiple-row PBH Shear Connectors in Steel-concrete Composite Structure

FAN Liang¹, LUO Kai-yong¹, HE Jun²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Zhejiang Provincial Communications Planning, Design & Research Institute, Hangzhou Zhejiang 310006, China)

Abstract: In order to simulate the real loading mode of the structure, the static push-out test on the mechanical behaviors of multiple-row Perfobond Hoop (PBH) shear connectors including 8 specimens is performed considering the row number (i. e., 1-5 rows) and the row spacing (i. e., 75-300 mm), based on single-row bearing research of PBH shear connectors. Then, the typical load-slip whole process curve, the bearing capacity, the failure pattern and the slip distribution of multiple-row PBH shear connectors are obtained. The experimental result of multiple-row PBH shear connectors indicates that (1) the failure exhibits the splitting of concrete and bending of the perforated rebars; (2) the interface slip along the height direction is big on both ends but small in the middle; (3) the ultimate shear capacity of multiple-row PBH shear connectors within 5 rows is mainly positive correlated with the row number of shear connectors, while it is not obvious related with the row spacing. Finally, based on the influencing factors and the analysis result, the corresponding bearing capacity calculation formula is proposed, which agrees well with the experimental result

Key words: bridge engineering; composite structure; experimental research; bearing capacity; shear connector; multiple-row

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308571)

作者简介: 范亮(1979-), 女, 安徽芜湖人, 副教授. (fanliangcq@qq.com)

0 引言

随着我国桥梁事业的发展,钢-混凝土组合结构桥梁得到了飞速发展^[1-2]。钢箱-混凝土组合结构^[3]是近年发展出来的一种新型钢-组合结构形式,已被应用于多座桥梁结构中^[4-5]。组合结构中剪力键是保证结构中钢箱与混凝土共同工作的关键受力构件,现最为常用的剪力键形式有栓钉、PBL等。针对钢箱-混凝土组合结构(图1),有研究在PBL(开孔钢板连接件)的基础上进行针对性的改造后,提出PBH剪力键^[8-9](Perfobond Hoop,以下简称PBH)。PBH剪力键的结构为一种带孔加劲肋套箍剪力键,见图2,位于钢箱顶板,将钢箱顶板上加劲肋板按照一定间距开孔,而后将箍筋穿过加劲肋的圆孔。与PBL相比,PBH将穿入钢筋与钢筋骨架中的箍筋合二为一,简化了构造及施工,特别适用于类似钢箱-混凝土组合结构中。已有PBH与PBL比较试验研究成果表明^[9],PBH剪力键的抗剪刚度和抗剪承载力较PBL剪力键有较好表现,由图3可见,在约0~40% P_u 区间,两者曲线基本吻合,之后,二者差异逐渐增大,在相同荷载下,PBL的变形增加速度明显大于PBH。以滑移量1mm为例,PBH的荷载为PBL的1.252倍。PBH是钢箱-混凝土组合压弯结构中适宜的剪力联结构造形式。

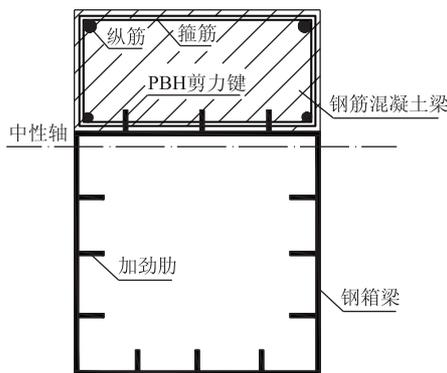


图1 钢箱-混凝土组合结构

Fig. 1 Steel box-concrete composite structure

在实际工程中,剪力键的传力形式均以多排的传力形式出现,而常规试验一般只研究单个剪力键的受力情况,对多排剪力键传力的研究较少。已有研究表明^[10]多排剪力连接件的荷载传递过程十分复杂,其力学特性和单排剪力连接件存在较大差异,各排剪力连接件间的荷载分配可能存在较大差异。多排剪力连接件中各排剪力连接件间荷载分配的不均匀程度由剪力连接件类型、钢构件及混凝土构件

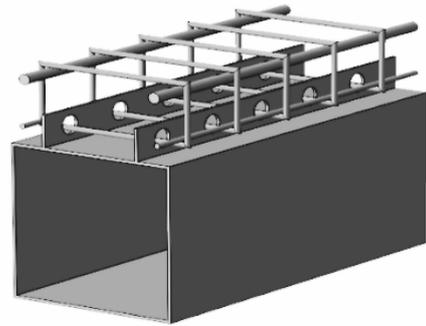


图2 PBH剪力键构造图

Fig. 2 Structure of PBH Shear connectors

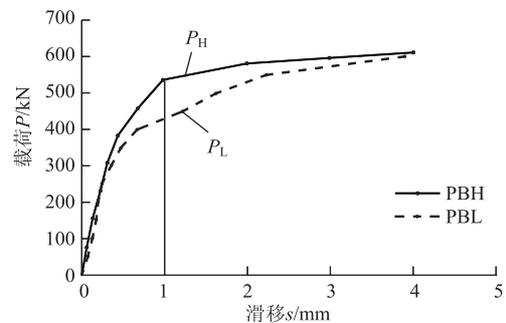


图3 PBH和PBL实测荷载-滑移曲线比较

Fig. 3 Comparisons of measured load-slippage curves between PBH and PBL

的刚度、钢-混凝土结合段的长度、各排剪力连接件的数目、外荷载大小等多种因素所决定^[11]。

PBH剪力键作为一种新型剪力键,其剪力键群的研究尚待开展。由于多排(此处的“排”特指垂直于加载方向上的数目,下同)PBH剪力键的传力机制较复杂,为了研究多排PBH剪力键的力学性能,本文开展了2组8个PBH试件的推出试验,研究1~5排情况下PBH的剪力排间效应。

1 试验方案设计

1.1 试件设计

试件设计借鉴欧洲结构协会 ECSS 推荐的剪力键推出试验的建议尺寸及配筋要求,并充分考虑了目前对PBH键工作性能的研究成果。试件由外包混凝土块、贯穿箍筋、钢箱及肋板、纵向钢筋4部分构成。为了避免试件钢箱受压屈曲破坏,试件钢箱顶、底板均设置加劲肋。

本文试验在分析多排PBH的排间效应影响时,考虑的参数为剪力键排数和排间间距。排数参数设置为1,2,3,4,5排,排间间距设置为75,100,150,300mm。

试件详细参数见表1。典型试件构造图见图4,其余试件构造类似。其中开孔孔径为30 mm,穿入钢筋直径及纵筋直径均为8 mm,钢箱钢板及肋板厚均为8 mm。根据材料试验实测,其中钢板为Q235钢材,屈服强度为242 MPa,极限强度为368.5 MPa,弹性模量为 1.67×10^5 MPa;穿孔钢筋为HRB335,屈服强度为359.6 MPa,极限强度为519.9 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa。28 d 混凝土立方体抗压强度为29.6 MPa,弹性模量为 3.35×10^4 MPa。

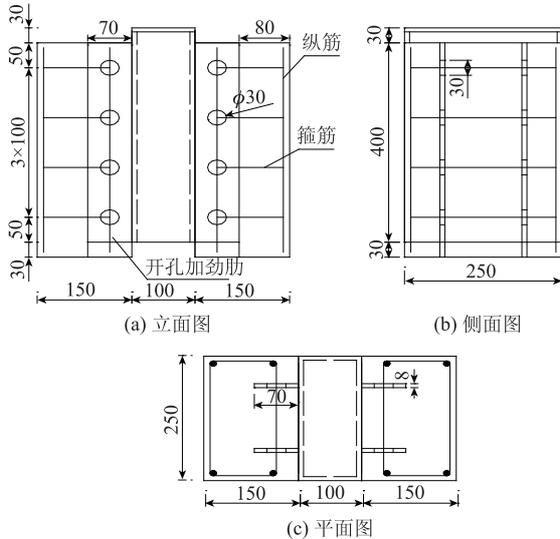


图4 典型试件构造图(SB4/SC4)(单位:mm)

Fig. 4 Structure of typical specimen of SB4/SC4 (unit: mm)

表1 试件分类情况表

Tab. 1 Specimen classification table

剪力连接件分组	试件编号	剪力键 排数/排	排间间距/ mm	试件高度/ mm
A (变化剪力键排数)	SB1	1	无	160
	SB2	2	100	260
	SB3	3	100	360
	SB4	4	100	460
	SB5	5	100	560
B (变化排间间距)	SC2	2	300	460
	SC3	3	150	460
	SC4	4	100	460
	SC5	5	75	460

注: SB4 和 SC4 为同一试件。

1.2 试验加载方案

以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》^[12]的PBL单孔抗剪承载力设计荷载计算值作为加载参考值。计算见式(1):

$$N_v^c = 2\alpha \left(\frac{\pi}{4} d_1^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 \right) f_{td} + 2 \frac{\pi}{4} d_2^2 \cdot f_{vd}, \quad (1)$$

式中, N_v^c 为开孔板连接件的单孔承载力设计值; d_1 为开孔直径; d_2 为横向贯通钢筋直径; f_{td} 为混凝土轴心抗拉强度设计值; $f_{vd} = 0.577f_{sd}$, f_{sd} 为钢筋抗拉强度设计值; α 为提高系数, 取6.1。

PBH 剪力键单排承载力参考计算值为102.5 kN, 假定不考虑剪力键中各排的不均匀性, 各个试件的承载力按照单排承载力乘以排数确定。加载试验在重庆交通大学结构重点实验室10 000 kN压力试验机上进行。试件加载系统示意图和加载现场如图5、图6所示。

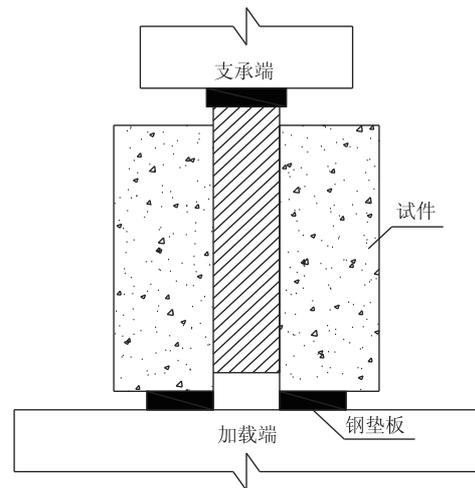


图5 试验加载立面示意图

Fig. 5 Elevation of test loading



图6 试验加载现场

Fig. 6 Test loading site

加载方案^[14]如下, 其中 F 为承载力计算参考值:

① 加载顺序依次为: $0F \rightarrow 0.04F \rightarrow 0.1F \rightarrow 0.14F \rightarrow 0.2F$ 加、卸载3次;

② $0F \rightarrow 0.04F \rightarrow 0.1F \rightarrow 0.14F \rightarrow 0.2F \rightarrow 0.26F \rightarrow 0.32F \rightarrow 0.38F \rightarrow 0.44F \rightarrow 0.5F$ 加、卸载3次;

③ 最后以0.1F为步长加载至试件破坏。

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

多排PBH剪力键在加载过程中,出现了以下几种情况破坏形态:

(1) 钢箱与混凝土的界面开裂

钢箱与混凝土这两种材料在加载过程中逐渐变形不协调,二者界面产生可见缝隙,见图7(a),一般在加载初期出现,此后由界面两端向中间延伸,直到贯通。

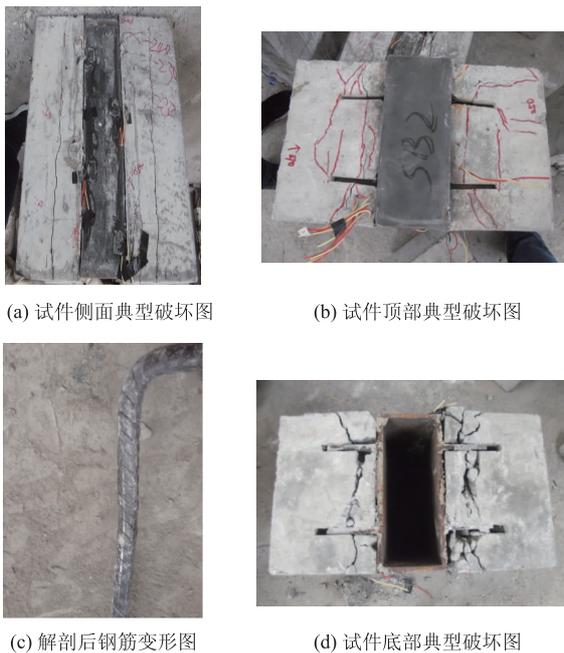
(2) 局部混凝土劈裂

试件的最终破坏表现为混凝土劈裂破坏。加载中,箍筋上方混凝土受到来自箍筋和榫孔内混凝土的挤压,沿肋边缘薄弱处向试件外缘产生劈裂裂缝,随后裂缝由内向外发展,最终形成贯通裂缝,见图7(b)。

(3) 穿孔钢筋的局部变形

在极限荷载阶段,变形增加明显加快。剖开试件发现,肋板处穿孔钢筋出现局部弯曲变形,见图7(c)。

除此以外,图7(d)所示的试件表面外包混凝土底部压溃和图7(b)所示的试件顶部角隅碎裂,亦为典型的表观试验现象。本次试验中均为混凝土先于钢结构失效。



(a) 试件侧面典型破坏图 (b) 试件顶部典型破坏图
(c) 解剖后钢筋变形图 (d) 试件底部典型破坏图

图7 试件的破坏形态

Fig. 7 Destruction form of specimens

2.2 典型荷载-滑移全过程曲线

各试件的荷载-滑移实测曲线如图8所示,其中滑移为各测点数据采取平均值方法得到的平均荷载滑移。

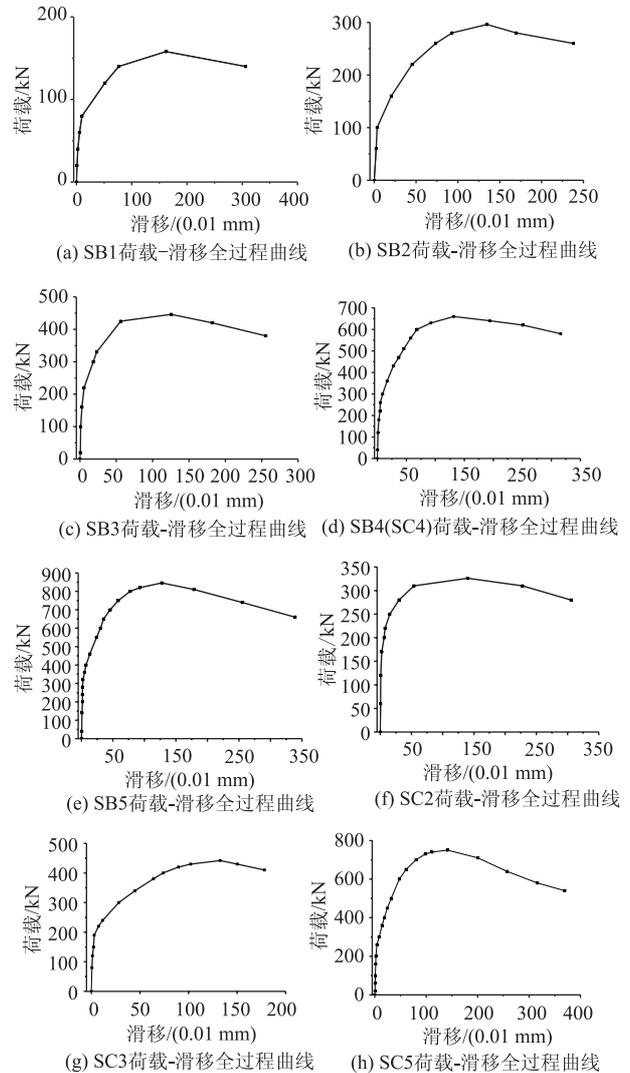


图8 各试件荷载-滑移全过程曲线

Fig. 8 Load-slip whole process curve of each specimen

基于各试件的荷载-滑移曲线特点分析,归纳典型多排PBH剪力键典型荷载-滑移曲线见图9。多排PBH剪力键典型荷载-滑移曲线可分为3个阶段:弹性阶段(OA段)、弹塑性阶段(AB段)、破坏阶段(BC段)。对应荷载-滑移典型曲线与试验过程中的试验现象,可以发现:试件由弹性阶段过渡到弹塑性阶段时(A点),钢箱与混凝土界面发生明显的相对滑移,且随着试件塑性的增大,滑移增大明显加快;待试件发展到极限承载力时(B点),局部混凝土出现劈裂;之后,继续增加荷载,穿孔钢筋产生局部变形,滑移持续发展,直至无法承载(C点)。

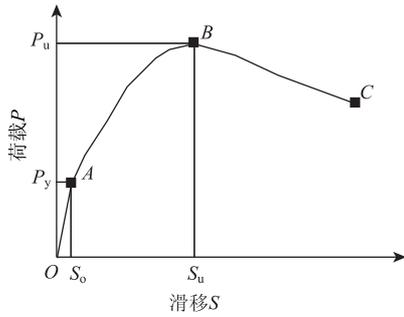


图9 多排PBH剪力键典型荷载-滑移全曲线

Fig. 9 Typical load-slip whole process curve of multiple-row PBH shear connectors

2.3 实测承载力

分别定义：弹性承载力 P_y 为荷载-滑移曲线开始显著倾斜时所对应的荷载值，即试件开始产生塑性滑移时所对应的荷载值；极限承载力 P_u 为加载过程中荷载峰值； S_o 和 S_u 分别为荷载到达 P_y 和 P_u 所对应的滑移值；弹性刚度 K_v 为试件弹性承载力与其对应荷载滑移量的比值， $K_v = P_y / S_o$ 。

各组试件的试验实测数据见表2。

表2 试件各工作阶段极限状态代表值

Tab. 2 Limit state typical values of specimens in each working stage

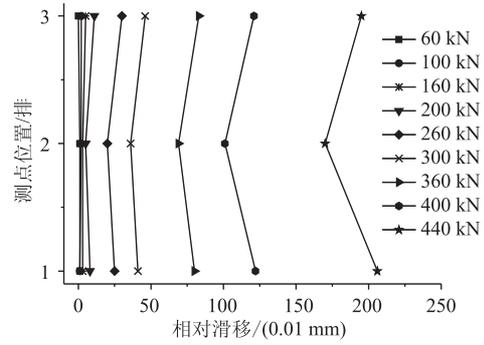
试件编号	界面抗剪面积 A/mm^2	S_o/mm	P_y/kN	$K_v/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	S_u/mm	P_u/kN	$\frac{P_y}{P_u} \times 100\%$
SB1	106 000	0.10	80	800	3.24	158	50.6
SB2	212 000	0.04	100	2 500	2.96	296	33.8
SB3	318 000	0.03	160	5 333	2.51	446	35.9
SB4 (SC4)	424 000	0.04	260	6 500	2.64	668	38.9
SB5	530 000	0.05	360	7 200	2.55	846	42.6
SC2	424 000	0.03	170	5 667	2.80	326	52.1
SC3	424 000	0.03	190	6 333	2.65	444	42.8
SC5	424 000	0.04	270	6 750	2.82	750	34.7

注：表中符号意义与图9对应。

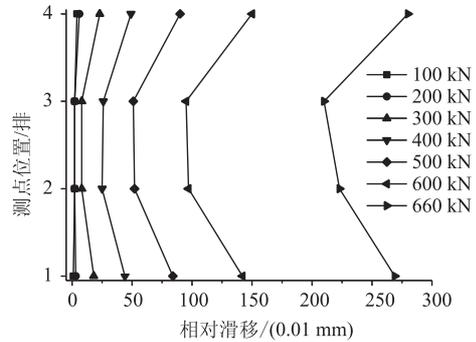
2.4 沿剪力方向界面滑移分布

为了研究多排PBH剪力键沿剪力方向的滑移分布，沿试件高度分别设置多个滑移测点，测点位于各试件开孔处对应界面位置，如试件SB5取1, 2, 3, 4, 5排开孔处界面的滑移。分别绘制不同荷载等级下各试件界面相对滑移分布，如图10所示，图中测点位置（排）由试件上部向下部排列。

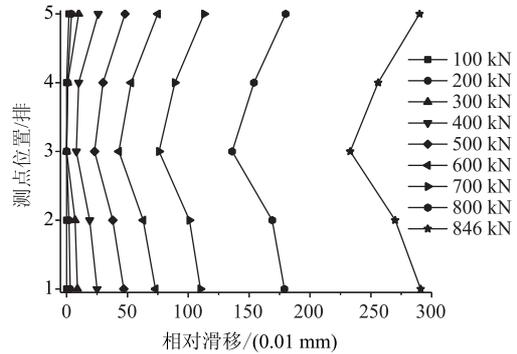
可以看出，剪力键在3~5排的范围，随着荷载的增大各排滑移值的分布呈现明显的不均，试件



(a) SB3试件沿剪力方向的滑移分布



(b) SB4试件沿剪力方向的滑移分布



(c) SB5试件沿剪力方向的滑移分布

图10 试件SB3-SB5不同荷载等级下界面相对滑移分布

Fig. 10 Interface relative slip distributions of SB3-SB5 specimens under different load levels

两端剪力键的相对滑移明显大于内部剪力键，沿高度方向的滑移呈现“两端大中间小”的分布规律。沿界面滑移的不均匀反映出界面剪应力的不均匀，排间不均匀抗剪将造成承载力排间折减效应。但由于PBH的较强延性，排数较少时，界面剪应力不均匀程度较弱，表现为该不均匀性产生的实测承载力折减效应不显著。但考虑到排数增多时，滑移两头大中间小的现象将愈加明显，其折减效应将愈加显著。

3 多排PBH剪力键力学行为分析

3.1 多排PBH抗剪承载力影响分析

当排数超过1排时，剪力键的排数和排间间距

将对剪力键的各项力学行为产生影响, 本文称之为排间效应。为分析排间效应, 分别考察剪力键排数和排间间距对多排 PBH 抗剪承载力的影响。其中试件 SB1 - SB5 考察剪力键排数影响, 通过比较试件 SB2 - SB5 与 SC2 - SC5 考察排间间距的影响。

图 11 为剪力键排数与极限承载力的关系。可以看出, 随着剪力键排数的增加, 其极限承载力近似线性增大 (图 11 中虚线为线性拟合线), 即 PBH 剪力键的排数与其极限承载力近似呈正比。各个试件的单排平均极限承载力为 148 ~ 167 kN, 图 11 可见各排剪力键的纵向折减不明显。

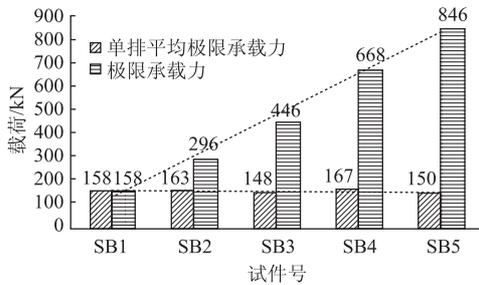


图 11 剪力键排数变化影响

Fig. 11 Influence of number of shear connector rows

表 3 反映的是排间间距对极限承载力的影响。可知, 随着排间间距的增大, 界面抗剪面积随之增大, 极限承载力相应提高。但排间间距与极限承载力不成线性关系, 相较于排数影响, 排间间距影响较小。

表 3 排间间距变化影响

Tab. 3 Influence of row spacing

试件组	排间间距 比值	极限承载力 差值/ kN	极限承载力变化 百分比/%
SB2、SC2	3	30	9.2
SB3、SC3	1.5	-2	-0.005
SB5、SC5	0.75	-96	-11.3

注: 排间间距比值由后者比前者得到, 极限承载力差值由后者减前者得到, 极限承载力变化百分比由差值比上两者中最大的极限承载力得到。

以上分析表明: 多排 PBH 剪力键的极限承载力主要与剪力键的排数有关, 与排间间距相关较小。

3.2 多排 PBH 极限承载力计算方法

根据已有研究^[14]表明, 单排 PBH 剪力键承载力主要由外包混凝土抗剪作用、混凝土榫抗剪和贯穿钢筋的抗剪作用提供, 即由加劲肋加强的混凝土部分 + 孔内混凝土部分 + 贯穿钢筋部分 = 剪力键承载力。其受力机理和破坏形式与 PBL 有一定相似性,

参考 PBL^[15]可以得到单排 PBH 承载力的公式^[8]:

$$Q_u = b_v f_c^2 \sqrt{A_c} + b_2 d^2 f_c^2 + b_3 A_{tr} f_s \quad (2)$$

在本文 2.4 节分析基础上, 假定 P_u 和排数成正比, 与排间间距无关。将 8 个试件的剪力键排数与极限承载力的关系绘制成曲线, 见图 12, 可以看出, 该假定在 $n \leq 5$ 时, 基本合理。5 排以内多排 PBH 剪力键的极限承载力可近似表达为: $Q_u = n \cdot Q$, 式中 Q_u 为多排 PBH 剪力键极限承载力; n 为剪力键排数; Q 为单排 PBH 剪力键极限承载力。

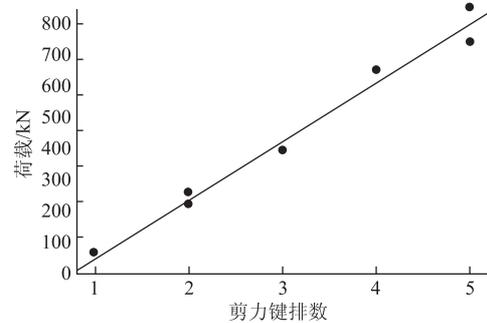


图 12 剪力键排数与极限承载力关系

Fig. 12 Relationship between row number of shear connectors and ultimate bearing capacity

在本试验和文献 [14] 的试验数据基础上, 采用多元回归分析方法^[13], 得到多排 PBH 极限承载力的计算公式:

$$Q_u = n(1.373 2f_c^2 \sqrt{A_c} + 0.036 8d^2 f_c^2 + 2.133 6A_{tr} f_s) \quad (3)$$

式中, Q_u 为多排 PBH 剪力键极限承载力; n 为剪力键排数, 本文 $n \leq 5$; A_c 为混凝土抗剪面积; A_{tr} 为贯穿箍筋截面积; f_s 为贯穿箍筋的屈服强度; d 为开孔直径, 表征钢筋混凝土榫面积; f_c 为立方体混凝土抗压强度。

将实测数据与计算数据对比, 见图 13。

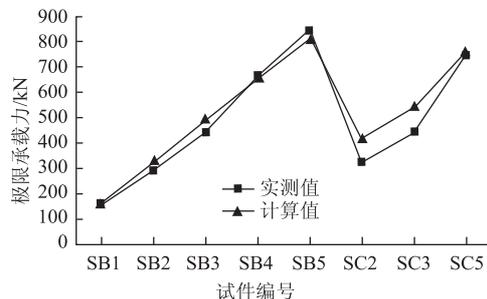


图 13 极限承载力实测值与计算值比较

Fig. 13 Comparison of ultimate bearing capacity between measured values and calculated values

由图13可知,各组试件的计算值与实测值吻合良好。

4 结论

本文通过对PBH剪力键试件进行以排数和排间间距为研究参数的静载推出试验,得到以下结论:

(1) 多排PBH剪力键弹性阶段到弹塑性阶段的试验现象为钢箱与混凝土界面发生明显的相对滑移;弹塑性阶段到破坏阶段的破坏形态为混凝土劈裂破坏,穿孔钢筋受弯屈服。

(2) 当排数不多于5排时,多排PBH剪力键的极限承载力与剪力键的排数近似线性相关,排间间距变化对其影响相对较小。

(3) 多排PBH剪力键沿高度方向的界面滑移呈现“两端大中间小”的分布规律。

(4) 当排数不多于5排时,利用理论分析及经验回归相结合的方式,得到多排PBH剪力键极限承载力半理论半经验计算公式,其计算值与实测值吻合良好。

参考文献:

References:

- [1] 聂建国,陶慕轩,黄远,等. 钢-混凝土组合结构体系研究新进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 71-80.
NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan, HUANG Yuan, et al. Research Advances of Steel-concrete Composite Structural Systems [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 71-80.
- [2] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012(6): 110-122.
NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan, WU Li-li, et al. Advances of Research on Steel-concrete Composite Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012(6): 110-122.
- [3] 范亮,周志祥. 拱桥钢箱-混凝土组合受弯构件试验研究[J], 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 15-21.
FAN Liang, ZHOU Zhi-xiang. Experimental Analysis for Steel Box-concrete Composite Beam of Arch Bridge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(6): 15-21.
- [4] 周志祥,范亮. 钢箱-混凝土组合拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 134-140.
ZHOU Zhi-xiang, FAN Liang. Steel Box-concrete Composite Arch Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2015: 134-140.
- [5] ZHOU Z, FAN L, WANG S. Chongqing Wanshen Zaodu Bridge-Steel Box-Concrete Composite Arch Bridge [J]. Structural Engineering International, 2013(1): 71-74.
- [6] 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.
XIAO Lin, WEI Xing, QIANG Shi-zhong. Comparative Study on Two Kinds of Push-out Tests of PBL Shear Connectors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 70-80.
- [7] 肖林,李小珍,卫星. PBL剪力键静载力学性能推出试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 14-20.
XIAO Lin, LI Xiao-zhen, WEI Xing. Research on the Static Load Mechanical Properties of PBL Shear Connectors' Push-out Test [J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 14-20.
- [8] FAN Liang, ZHOU Zhi-xiang. Study on the Shear Capacity of PBH Shear Connector Basing on PBL Shear Connector [J]. Computer Modelling and New Technologies, 2014, 18(12): 174-180.
- [9] FAN Liang, ZHOU Zhi-xiang. New Shear Connectors Basing on PBL Shear Connector [J]. Structural Engineering International, 2014, 24(2): 281-284.
- [10] 汪维安,李乔,赵灿晖,等. 混合结构PBL剪力键群承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2014(6): 109-117.
WANG Wei-an, LI Qiao, ZHAO Can-hui, et al. Experimental Study on Bearing Capacity of PBL Shear Connector Group in Hybrid Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 109-117.
- [11] 卫星,肖国亮. 基于BP神经网络的钢-混组合结构PBL剪力键承载力[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10): 60-64.
WEI Xing, XIAO Guo-liang. Shear Resistance of Perfobond Shear Connectors in Steel-concrete Composite Structure Based on BP Neural Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(10): 60-64.
- [12] GB50917—2013, 钢-混凝土组合桥梁设计规范[S]. GB50917—2013, Code for Design of Steel and Concrete Composite Bridges [S].
- [13] ROTTER J M. Rapid Exact Inelastic Biaxial Bending Analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1981, 111(12): 2659-2674.
- [14] 范亮. 钢箱-混凝土组合拱截面受力行为与设计原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
FAN Liang. Study on Mechanical Behaviors and Design Principles of Steel Box-concrete Composite Arch Sections [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [15] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. Behavior of Perfobond Rib Shear Connectors in Composite Beams; Full Size Test [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(2): 224-235.