

# 大直径混凝土榫 PBL 连接件力学性能试验

韩 兴<sup>1</sup>,王学伟<sup>1</sup>,祝 兵<sup>1</sup>,谢明志<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031; 2. 西南交通大学峨眉校区 土木工程系,四川 峨眉山 614202)

**摘 要:**PBL 连接件作为主要的传力构件被广泛应用于钢-混组合桥梁结构中,为研究基于大直径混凝土榫的 PBL 连接件力学性能,设计了 8 组共 24 个试件,对其进行推出试验研究。根据推出试件的内部破坏状态分析了大直径混凝土榫 PBL 连接件的破坏形态及破坏机理;探讨了大直径混凝土榫 PBL 连接件抗滑移性能及承载能力的影响因素;从荷载-滑移曲线特征、抗剪刚度及延性性能三方面对比分析了不同直径混凝土榫 PBL 连接件的力学性能。研究表明:大直径混凝土榫 PBL 连接件的主要破坏形式有横向贯穿钢筋的剪断破坏、孔内混凝土的压碎破坏及开孔剪切钢板的受剪破坏 3 种;横向贯穿钢筋直径、开孔剪切钢板厚度及其破坏形态均为影响 PBL 连接件抗滑移性能的重要因素,剪切钢板的开孔直径对 PBL 连接件抗滑移性能的影响较小;横向贯穿钢筋直径、开孔剪切钢板厚度及其开孔直径是影响 PBL 连接件承载能力的重要因素;在大直径混凝土榫 PBL 连接件中,钢板开孔直径为 75 mm 的 PBL 连接件的力学性能优于钢板开孔直径为 60 mm 的,而钢板开孔直径为 90 mm 的 PBL 连接件的力学性能优于钢板开孔直径为 75 mm 的。研究结果为大直径混凝土榫 PBL 连接件的工程应用奠定了理论依据。

**关键词:**桥梁工程;力学性能;推出试验;PBL 连接件;大直径混凝土榫;破坏形态;破坏机理;影响因素  
**中图分类号:**U448.38 **文献标志码:**A

## Experiment on mechanical property of PBL connector for large diameter concrete dowel

HAN Xing<sup>1</sup>, WANG Xue-wei<sup>1</sup>, ZHU Bing<sup>1</sup>, XIE Ming-zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University-Emei Campus,  
Emeishan 614202, Sichuan, China)

**Abstract:** PBL connectors are widely used in steel-concrete composite bridges as a kind of main load-transferring component. In order to reveal the mechanical properties of PBL connectors for large diameter concrete dowel, push-out tests with 24 specimens in 8 groups were carried out. Failure modes and failure mechanisms of PBL connectors were analyzed according to the interior failure modes of these specimens, influence factors of bearing capacity and anti-slip property of PBL connectors were investigated, and mechanical properties of PBL connectors for different diameter concrete dowels were analyzed from three aspects of load-slip curve feature, shear

收稿日期:2016-09-02

基金项目:教育部“春晖计划”项目(Z2014034)

作者简介:韩 兴(1985-),男,安徽合肥人,工学博士研究生,E-mail:hanxing1122@163.com。

通讯作者:祝 兵(1965-),男,江苏无锡人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhubing126@.com。

stiffness, and ductility performance, respectively. The results show that there are three main failure modes of PBL connectors of large diameter concrete dowel, shear failure of transverse reinforcement, compression failure of concrete in the hole, and shear failure of perforated rib. Diameter of transverse reinforcement, thickness and failure mode of perforated rib are the important influence factors of anti-slip property of PBL connectors while perforated rib diameter has insignificant influence on anti-slip performance of PBL connectors. Diameter of transverse reinforcement, thickness and diameter of perforated rib are the important influence factors of ultimate bearing capacity of PBL connectors. Among the PBL connectors for large diameter concrete dowel, the mechanical properties of PBL connectors with perforated rib diameter of 75 mm are superior to those of 60 mm, and the mechanical properties of PBL connectors with perforated rib diameter of 90 mm are superior to those of 75 mm. The results provide theoretical basis for engineering application of large diameter concrete dowel PBL connectors. 4 tabs, 5 figs, 25 refs.

**Key words:** bridge engineering; mechanical property; push-out test; PBL connector; large diameter concrete dowel; failure mode; failure mechanism; influence factor

## 0 引言

PBL 连接件最早设计并应用于钢-混凝土组合梁中,用于解决钢腹板与混凝土顶、底板的连接问题,是一类新型的抗剪连接件,由德国 Leonhardt and Parterners 公司所开发,20 世纪 90 年代初,首次在委内瑞拉的 Third Caroni 河桥上得到应用<sup>[1-3]</sup>。随着钢-混凝土组合箱梁桥的兴起,PBL 连接件的试验研究也得到了国内外学者的广泛关注,采用的主要分析方法为:推出试验<sup>[4-6]</sup>、模型试验<sup>[7-8]</sup>及数值分析<sup>[9-10]</sup>,其中推出试验因制作简单、受力明确,成为研究剪力连接件的主要方法。

国内外针对 PBL 连接件的实体推出试验较多,研究内容主要集中在承载能力影响因素及计算方法上。张清华等采用理论分析模型的方法对 PBL 连接件群的承载力进行了分析<sup>[11-12]</sup>;聂建国等最早利用推出试验的方法回归分析得到了估算剪力键抗剪承载能力的计算公式,考虑了钢板的开孔数量和间距、横向贯穿钢筋、分布钢筋、横向钢筋位置以及混凝土强度等影响因素<sup>[13-14]</sup>;胡建华等利用推出试件完成了极限承载力试验,研究分析了各种因素(包括混凝土强度、钢板孔洞和贯通钢筋大小、箍筋配筋率、贯通钢筋的摆放位置、钢板开坡口与否及钢板孔洞个数和贯通钢筋排列形式)对 PBL 键极限承载力的影响,并将试验结果与栓钉极限承载力作了比较,也与各国专家提出的 PBL 键承载力计算公式所得结果作了比较<sup>[15-16]</sup>;Ahn 等利用推出试验对 PBL 剪力键在静载和动态荷载作用下的力学行为进行研究,对比分析了混凝土樁、横向钢筋以及循环荷载作用对剪力键力学

性能的影响<sup>[17]</sup>;黄翔等针对桥塔钢-混凝土结合段的新型剪力键采用新型试验方法进行了破坏试验,对剪力键的承载能力和破坏机理进行了分析,并建立了剪力键承载力的统一计算公式<sup>[18]</sup>;夏嵩等针对 PBL 剪力键在拉-剪组合环境下的力学性能,利用推出试验对其承载能力和滑移量进行研究,考虑了钢筋与混凝土强度、钢板开孔直径、钢筋直径及环境应力等因素的影响<sup>[19-21]</sup>;陈建兵等利用推出试验研究了波形钢腹板剪力键的力学性能,分析了波形钢腹板和直钢腹板、有无混凝土樁、波形钢腹板高度、倾斜角度及钢板开孔直径对剪力键承载能力的影响<sup>[22-23]</sup>;肖林等通过推出试验对比分析了 2 种不同类型剪力键的力学性能,在考虑众多影响因素的基础上同时考虑了钢板厚度对承载能力的影响<sup>[24-25]</sup>。

通过对已有推出试验所考虑的影响因素进行分析可以发现,开孔钢板的直径均在 60 mm 以下,未发现超过 60 mm 开孔直径的 PBL 连接件的推出试验研究。鉴于此,本文针对开孔直径在 60 mm 及以上的大直径混凝土樁 PBL 连接件进行试验研究,共设计 8 组 24 个试件进行推出试验,分别考虑开孔直径为 60、75、90 mm。通过试验研究,得到大直径混凝土樁的力学性能和破坏机理,为大直径混凝土樁圆形开孔剪力键在工程中的推广应用提供依据。

## 1 试验概况

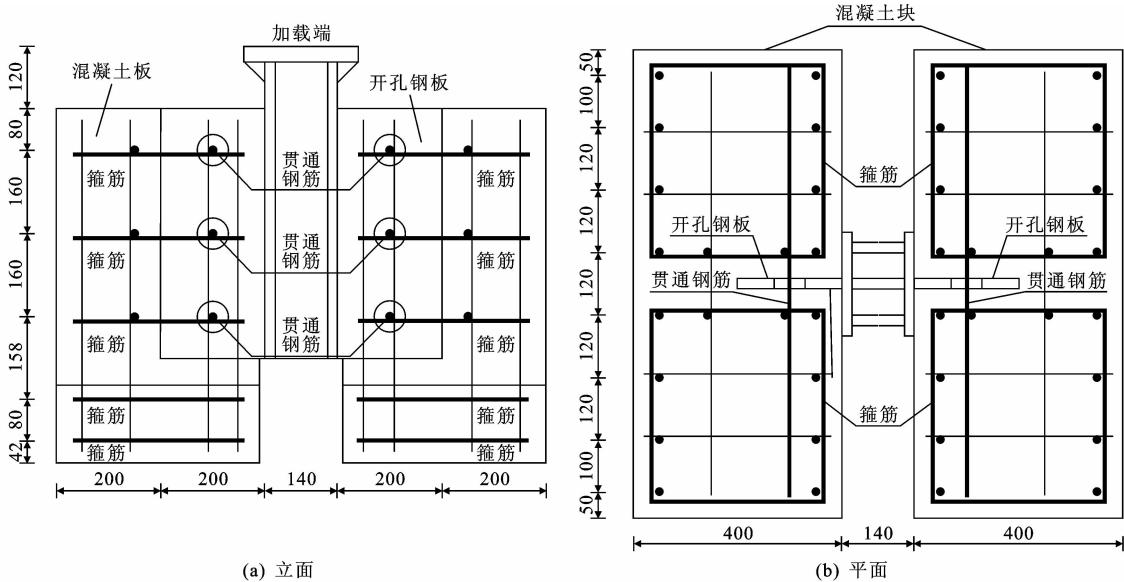
### 1.1 试验设计

本文共设计 8 组 24 个试件进行推出试验,其构造参数见下页表 1。每个试件设置 6 个 PBL 连接件,钢板圆孔直径分为 3 种,分别为 60、75、90 mm,

钢筋直径分为 4 个等级,分别为 16、20、25、28 mm,构造形式。混凝土等级采用 C55,钢筋均采用  
钢板厚度分为 2 类,分别为 20、24 mm,图 1 为试件 HRB400 级,剪切钢板及加劲板采用 Q345qE。

表 1 各组试件构造参数  
Tab. 1 Structure parameters of specimens

试验组 编号	孔径/mm	贯通钢筋 直径/mm	钢板厚 度/mm	连接件数	试件数	试验组 编号	孔径/mm	贯通钢筋 直径/mm	钢板厚 度/mm	连接件数	试件数
BH1	60	16	20	6	3	BH5	75	25	20	6	3
BH2	60	20	20	6	3	BH6	75	25	24	6	3
BH3	75	16	20	6	3	BH7	90	25	20	6	3
BH4	75	20	20	6	3	BH8	90	28	20	6	3



单位: mm

图 1 PBL 连接件的试件构造形式  
Fig. 1 Specimens structure form of PBL connector

1.2 试验方法

首次加载测试前每组试件均按 0.5 倍弹性极限荷载  $F$  完成 2 次预加载(预加载时间持续约 5 min),以达到消除残余粘结力的目的。每组试件(共有 3 个试件)通过第 1 个试件的加载来确定弹性承载力,另外 2 个试件在第 1 次加载的基础上调整加载步骤来确定极限承载力。加载设备采用 1 000 t 微机控制电液伺服压剪试验机,如图 2 所示。

1.3 材料特性

为得到试验所用混凝土的材料特性,对试验用混凝土材料进行了立方体抗压强度试验,制作了 3 个混凝土立方体试块,编号分别为 M1、M2、M3,试验结果如下页表 2 所示。开孔钢板的屈服强度和极限强度分别为 345、490 MPa,横向贯穿钢筋的屈服强度和极限强度分别为 400、540 MPa。

2 试验结果分析

下页表 3 给出了各组试件的承载能力试验结



图 2 加载设备  
Fig. 2 Loading equipment

果。关于弹性承载能力的取值,有学者以 0.2 mm 滑移量作为弹性承载能力,有的以荷载-滑移曲线弹性阶段的线性拟合程度来确定,本文通过拟合荷载-滑移曲线的方法来确定 PBL 连接件的弹性承载能力,取线性拟合相关系数 $R^2=0.95$ ,典型的荷载-滑

表 2 混凝土材料特性

Tab. 2 Material properties of concrete

试件编号	极限荷载/kN	立方体抗压强度/MPa	平均值/MPa	弹性模量/MPa
M1	1 485.1	56.00	56.00	36 100
M2	1 483.0	55.91		
M3	1 487.3	56.10		

表 3 试验结果

Tab. 3 Experimental results

试验组号	单孔弹性承载力/kN			平均单孔弹性承载力/kN	平均弹性滑移量/mm	单孔极限承载力/kN			平均单孔极限承载力/kN	极限平均弹性滑移量/mm
	试件 1	试件 2	试件 3			试件 1	试件 2	试件 3		
BH1	160.0	112.4	233.3	168.6	0.225	323.3	291.7	325.0	313.3	11.9
BH2	181.3	166.7	172.3	173.4	0.188	383.3	347.1	433.3	386.1	13.6
BH3	154.7	129.2	182.7	155.5	0.157	383.3	373.3	375.0	377.2	10.4
BH4	155.4	154.8	163.5	157.9	0.156	400.0	400.0	500.0	433.3	15.7
BH5	166.3	172.3	206.8	181.8	0.254	575.0	580.0	533.3	562.8	20.7
BH6	184.4	263.3	271.8	239.8	0.255	700.0	683.3	683.3	688.9	29.6
BH7	177.1	231.5	226.5	211.7	0.257	641.7	616.7	616.7	625.0	32.0
BH8	231.1	186.4	200.0	205.8	0.174	675.0	700.0	633.3	669.4	33.1

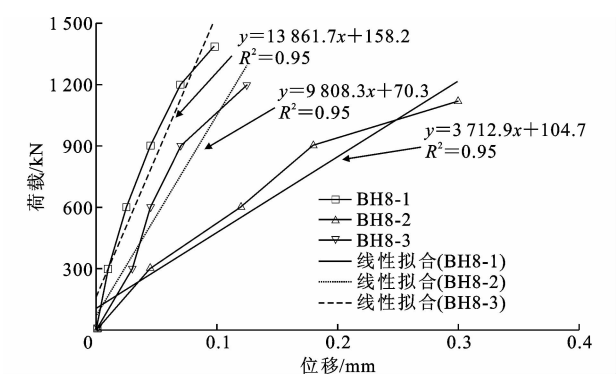


图 3 弹性阶段荷载-滑移曲线及线性拟合

Fig. 3 Load-slip curves in elastic stage and linear fitting

相对较弱的一方决定了剪力键的最终极限承载能力,也就出现了剪切钢板和混凝土樁无屈服破坏,而横向贯穿钢筋发生屈服的情况,由此表明钢板及混凝土的强度和刚度大于贯穿钢筋,从而使得贯穿钢筋先于钢板及孔内混凝土而发生破坏,失去承载能力。第 2 种情况如图 4(d)、(e)、(f)所示,属于孔内混凝土压碎破坏,钢板及贯穿钢筋基本保持完好状态,未发生明显破坏,这种情况下,钢板及贯穿钢筋的强度和刚度大于孔内混凝土,因此,孔内混凝土先于钢板及贯穿钢筋而发生破坏,从而失去承载能力。第 3 种情况如图 4(g)、(h)、(i)所示,为剪切钢板的屈服破坏,横向贯穿钢筋也发生了明显的屈服变形,而剪切钢板两侧混凝土未出现明显破坏,可以看出此时混凝土樁的整体强度和刚度优于剪切钢板,从而使得开孔钢板屈服破坏,横向贯穿钢筋也出现明

显的变形,导致承载能力丧失。

2.1 大直径混凝土樁 PBL 连接件破坏形态分析

PBL 连接件的破坏形态大致分为 3 种情况,如图 4 所示。第 1 种情况如图 4(a)、(b)、(c)所示,为横向贯穿钢筋的屈服破坏,剪切钢板与混凝土樁无明显屈服现象。其剪切承载力主要由剪切钢板、混凝土樁和横向贯穿钢筋 3 个部分组成,刚度和强度

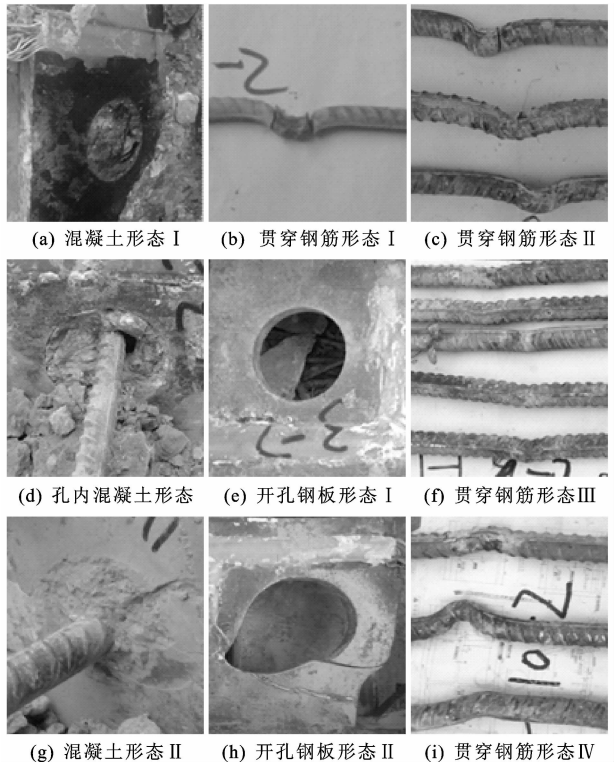


图 4 试件内部破坏形态

Fig. 4 Interior failure modes of specimens

显的变形,导致承载能力丧失。

综上所述,PBL 连接件的主要破坏形式有:贯穿钢筋剪断破坏、孔内混凝土压碎破坏及钢板剪切破坏 3 种。PBL 连接件的承载力由钢板、贯穿钢筋及混凝土三者共同提供,且当其中任一方面的强度

和刚度较弱时,PBL 连接件的承载能力由该部分来决定,只有当钢板、贯穿钢筋及混凝土的强度和刚度相当时才能充分发挥 PBL 连接件的极限承载能力,因此应进行深入分析,通过更多试验来确定三者的最佳组合方式。

## 2.2 大直径混凝土樁 PBL 连接件抗滑移性能及影响因素

### 2.2.1 钢筋直径

BH3、BH4、BH5 试件钢筋直径分别为 16、20、25 mm,其余参数均相同,对应的极限平均滑移量分别为 10.4、15.7、20.7 mm,随着钢筋直径的增加,PBL 连接件的滑移量也增大,说明钢筋直径是影响 PBL 连接件滑移性能的重要因素。究其原因:在极限承载能力阶段,贯穿钢筋作为主要受力因素,当混凝土樁被剪断后,混凝土樁及贯穿钢筋共同承担的荷载将全部由贯穿钢筋承担,如果钢筋直径过小,则其很快将屈服而失去承载能力,相应的滑移量也较小;如果钢筋直径较大,则贯穿钢筋将继续承担荷载,由于钢筋具有较好的延性而产生较大的滑移量。

### 2.2.2 钢板厚度

BH5、BH6 试件除钢板厚度分别为 20、24 mm 外,其余参数均相同,其极限平均滑移量分别为 20.7、29.6 mm,表明随着钢板厚度的增加,其滑移量增大,说明钢板厚度对 PBL 连接件的抗滑移性能有较大影响。究其原因:当混凝土樁被剪断后,贯穿钢筋作为主要受力构件承担荷载作用,但开孔钢板及孔内混凝土仍起到传递荷载的作用,钢板厚度越大,由钢板及孔内混凝土传递给贯穿钢筋的分布荷载的宽度也越大,从而降低了贯穿钢筋的剪切应力,使得贯穿钢筋在发生剪切破坏前能充分发挥其延性性能,增大滑移量。

### 2.2.3 混凝土樁直径

BH1、BH3 试件钢板开孔直径分别为 60、75 mm,钢筋直径为 16 mm,BH2、BH4 试件钢板开孔直径分别为 60、75 mm,钢筋直径为 20 mm,其余参数均相同。BH1、BH3 试件的滑移量分别为 11.9、10.4 mm,BH2、BH4 试件的滑移量分别为 13.6、15.7 mm。通过对比 2 组数据可以看出,当钢板开孔直径不同时,PBL 连接件的滑移量相差不大,说明钢板开孔直径对 PBL 连接件的抗滑移性能影响不大。究其原因:在极限承载能力阶段,混凝土樁已被剪断,只起到传递荷载的作用,钢筋直径和钢板厚度是决定 PBL 连接件抗滑移性能的主要

因素。

### 2.2.4 钢板破坏形态

BH7、BH8 试件的钢筋直径分别为 25、28 mm,其余参数均相同,其单孔极限平均滑移量分别为 32.0、33.1 mm,虽然钢筋直径不同,但滑移量基本相近,这与之前的分析相矛盾,其主要原因是 BH7、BH8 试件的破坏形态属于钢板被剪断而发生破坏,其滑移量最终由钢板特性来决定,而两者的钢板厚度相同,因此其滑移量基本相同。同时可以得出,在其他构件未屈服的情况下,钢板破坏程度越大,其滑移量越大,这一点由 BH5 和 BH7 试件可以印证,两者除开孔直径不同外,其余参数均相同,但后者滑移量要大于前者,主要原因为后者钢板出现屈服破坏,而前者钢板较为完好。

## 2.3 大直径混凝土樁 PBL 连接件承载能力及影响因素

### 2.3.1 钢筋直径

BH4、BH5 试件的钢筋截面积分别较 BH3 试件大 56.3%、144.1%,弹性承载能力分别增加了 1.5%、16.9%,极限承载能力分别增加了 14.9%、49.2%,说明贯通钢筋对弹性承载能力的影响较小,而对极限承载能力的影响较大。在弹性承载能力阶段,混凝土樁 PBL 连接件的相对滑移较小,整体性较好,是主要受力构件,因此其弹性阶段的承载能力主要受混凝土樁直径的影响,而与贯穿钢筋直径无关;在极限承载能力阶段,混凝土樁被剪断,由贯穿钢筋承受全部的剪切荷载,贯穿钢筋直径越大,其抗剪强度越高,因此钢筋直径是影响 PBL 连接件极限承载能力的重要因素。

### 2.3.2 钢板开孔直径

BH7 试件的钢板开孔面积较 BH5 试件大 44%,而弹性承载能力增加了 16.4%,极限承载能力增加了 11.1%,说明钢板开孔面积对弹性承载能力和极限承载力的影响较大。当钢板厚度和贯穿钢筋直径相同时,钢板开孔直径越大,贯穿钢筋与钢板孔洞间的间隙越大,混凝土樁的面积越大,混凝土的抗剪强度也越高,有利于提高 PBL 连接件的弹性承载能力和极限承载能力。同时在极限承载能力阶段,当混凝土樁被剪断后,混凝土樁起到传递剪切荷载的作用,贯穿钢筋与钢板开孔间的距离越大,传递到钢筋上的分布荷载的宽度也就越大,从而降低了贯穿钢筋的剪切应力,继而提高了 PBL 连接件的极限承载能力。

2.3.3 钢板厚度

BH6 试件的钢板厚度较 BH5 试件增大 20%，弹性承载能力增加了 32%，极限承载能力增加了 22.4%，说明钢板厚度对弹性承载能力和极限承载能力的影响较大。在弹性承载能力阶段，钢板厚度越大，混凝土樁受到剪切的宽度也越大，因此弹性承载能力相应增加；在极限承载能力阶段，当混凝土樁被剪断后，贯穿钢筋作为主要受力构件承担荷载作用，但开孔钢板和孔内混凝土仍起到传递荷载的作用，钢板厚度越大，由钢板和孔内混凝土传递给贯穿钢筋的荷载的分布宽度越大，降低了贯穿钢筋的剪切应力，从而提高了 PBL 连接件的极限承载能力。

综上所述，当 PBL 连接件钢板开孔直径为 60 mm 时，贯穿钢筋直径宜取 20 mm，钢板厚度不宜小于 20 mm；当开孔直径为 75 mm 时，贯穿钢筋直径宜取 25 mm，钢板厚度不宜小于 24 mm；当钢板开孔直径达到 90 mm 时，其破坏模式为钢板的剪切破坏，贯穿钢筋未屈服，因此需要进行更多的试验来确定合理的贯穿钢筋直径和钢板厚度。

3 大直径混凝土樁 PBL 连接件力学性能对比分析

3.1 荷载-滑移曲线对比分析

3 种不同钢板开孔直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线对比如图 5 所示，其中图 5(a)为 60、75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线对比，图 5(b)为 75、90 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线对比。 $P$  为加载端所承受的荷载值， $S$  为钢板相对于混凝土的相对滑移量，BH $X$ - $X$ - $\Phi 75$  中 BH $X$ - $X$  表示模型试件的编号， $\Phi 75$  表示剪切钢板的开孔直径(mm)。

通过对比分析不同直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线，可以得到如下结论。

(1)3 种不同钢板开孔直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线所表现的力学特性相似，可划分为 3 个阶段：弹性段、弹塑性段及屈服段，均产生了较大的滑移变形，塑性变形明显，展现出良好的延性性能。

(2)由图 5(a)可知，60 mm 开孔直径的试件所得到的单孔平均极限承载能力与其相应的平均滑移量分别为 386.1 kN 和 13.6 mm；75 mm 开孔直径的试件所得到的单孔平均极限承载能力与其相应的平均滑移量分别为 554.4 kN 和 17.7 mm；后者的单孔平均极限承载能力与平均滑移量较前者分别提高 43.6%和 30.1%，因此 75 mm 直径 PBL 连接件

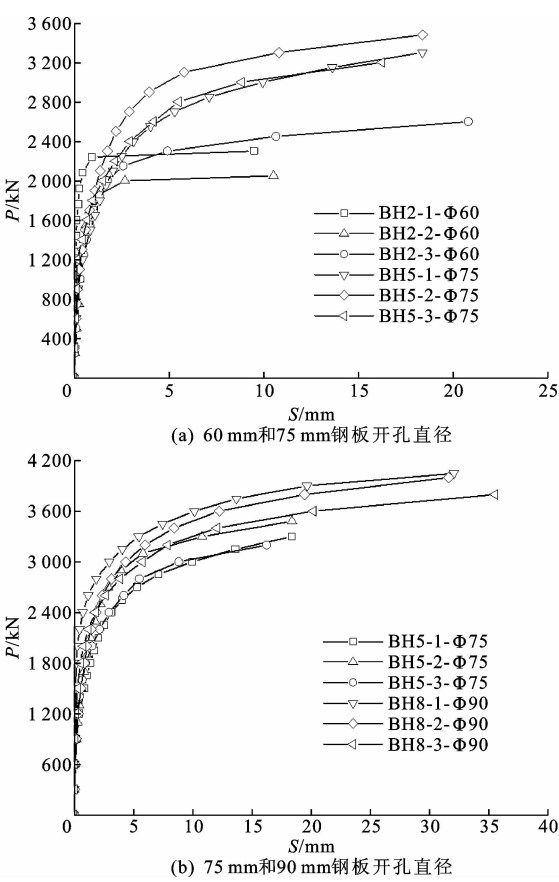


图 5 不同钢板开孔直径 PBL 连接件的荷载-滑移曲线对比  
Fig. 5 Contrast on load-slip curves of PBL connector with different diameters

的承载能力和滑移量均优于 60 mm。

(3)由图 5(b)可知，90 mm 开孔直径的试件所得的单孔平均极限承载能力与其相应的平均滑移量分别为 669.4 kN 和 33.1 mm，较 75 mm 开孔直径试件分别提高了 20.7%和 87.0%，因此前者的极限承载能力和滑移量均大于后者。同时可以看出，承载能力增加的幅度较低，而滑移量的增幅明显提高，分析其原因为过大的钢板开孔直径使得剪切钢板的面积大大减小，从而使得钢板首先发生屈服破坏；而横向贯穿钢筋并没有完全发挥其承载能力，使得 PBL 键的承载能力降低，然后由于钢板的屈服破坏而产生了较大的塑性变形，从而使得 PBL 键的延性性能增加。

3.2 抗剪刚度及延性性能的对比分析

为更好地了解大直径混凝土樁 PBL 连接件的力学特性，对不同直径混凝土樁 PBL 连接件的抗剪刚度及延性性能进行对比分析。抗剪刚度  $K$  为弹性承载能力与弹性滑移量的比值(其物理意义为：PBL 连接件在使用阶段中其单位滑移量所能承受的荷载值)；延性指标  $D_1$  为极限承载能力与弹性承

载能力的比值,可以作为 PBL 连接件延性性能的指标之一,也可以表征 PBL 连接件承载能力的安全储备;延性指标  $D_{\parallel}$  为极限滑移量与弹性滑移量的比

值,表征 PBL 键的延性性能,为 PBL 连接件延性性能的另一重要指标。抗剪刚度及延性指标的试验结果见表 4。

表 4 抗剪刚度及延性指标的试验结果

Tab. 4 Experimental results of shear stiffness and ductility indexes

混凝土樁直径/mm	试验组编号	弹性承载力 $P_e/\text{kN}$	弹性滑移量 $\delta_e/\text{mm}$	极限承载力 $P_u/\text{kN}$	极限滑移量 $\delta_u/\text{mm}$	抗剪刚度 $K(P_e/\delta_e)/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	延性指标 $D_I(P_u/P_e)$	延性指标 $D_{\parallel}(\delta_u/\delta_e)$
60	BH1	168.6	0.225	313.3	11.9	749.3	1.9	52.9
	BH2	173.4	0.188	386.1	13.6	922.3	2.2	72.3
75	BH3	155.5	0.157	377.2	10.4	990.4	2.4	66.2
	BH4	157.9	0.156	433.3	15.7	1 012.2	2.7	100.6
	BH5	181.8	0.254	562.8	20.7	715.7	3.1	81.5
	BH6	239.8	0.255	688.9	29.6	940.4	2.9	116.1
90	BH7	211.7	0.257	625.0	32.0	823.7	3.0	124.5
	BH8	205.8	0.174	669.4	33.1	1 182.8	3.3	190.2

由表 4 可知,60 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的平均抗剪刚度为 835.8 kN/mm,平均延性指标  $D_I$ 、 $D_{\parallel}$  分别为 2.1、62.6;75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的平均抗剪刚度为 914.7 kN/mm,平均延性指标  $D_I$ 、 $D_{\parallel}$  分别为 2.8、91.1;90 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的平均抗剪刚度为 1 003.3 kN/mm,平均延性指标  $D_I$ 、 $D_{\parallel}$  分别为 3.2、157.4。通过分析可以发现,75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的平均抗剪刚度及平均延性指标  $D_I$ 、 $D_{\parallel}$  较 60 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件分别提高了 9.4%、33.3%、45.5%;90 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的平均抗剪刚度及平均延性指标  $D_I$ 、 $D_{\parallel}$  较 75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件分别提高 9.7%、14.3%、72.3%;说明 75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的抗剪刚度和延性性能优于 60 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件;90 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的抗剪刚度和延性性能优于 75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件。

综上,在大直径混凝土樁 PBL 连接件中,75 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的力学性能优于 60 mm;而 90 mm 钢板开孔直径 PBL 连接件的力学性能优于 75 mm。

4 结 语

(1)PBL 连接件的主要破坏形式有:贯穿钢筋屈服破坏、孔内混凝土的压碎破坏及钢板剪切破坏 3 种。钢板、贯穿钢筋及孔内混凝土是 PBL 连接件承载能力的主要组成部分,且当其中任一部分的强度和刚度较弱时,PBL 连接件的承载能力由该部分来决定,只有当钢板、贯穿钢筋及混凝土的强度和刚

度相当时才能充分发挥 PBL 连接件的极限承载能力,因此应作更多试验进行深入分析,以确定三者的最佳组合方式。

(2)通过对大直径混凝土樁 PBL 连接件抗滑移性能及承载能力影响因素的分析,贯穿钢筋直径、钢板厚度及破坏形态是影响大直径混凝土樁 PBL 连接件抗滑移性能的重要因素,钢板开孔直径对其影响较小;贯穿钢筋直径、钢板厚度及钢板开孔直径是影响 PBL 连接件承载能力的重要因素。

(3)钢板开孔直径范围宜为 60~90 mm,开孔直径为 60 mm 时,贯穿钢筋直径宜取 20 mm,钢板厚度不宜小于 20 mm;开孔直径为 75 mm 时,贯穿钢筋直径宜取 25 mm,钢板厚度不宜小于 24 mm;当钢板开孔直径达到 90 mm 时,其破坏形态为钢板的剪切破坏,需要进行更多试验来确定合理的贯穿钢筋直径和钢板厚度。

(4)对钢板开孔直径分别为 60、75、90 mm 的 PBL 连接件来说,钢板开孔直径为 75 mm 的 PBL 连接件的力学性能较钢板开孔直径 60 mm 的更好,而钢板开孔直径 90 mm 的 PBL 连接件的力学性能较钢板开孔直径 75 mm 的好,此研究结果为大直径混凝土樁 PBL 连接件的工程应用奠定了一定的理论依据。

(5)随着 PBL 连接件的广泛应用和发展,虽然已经进行了较多试验和数值分析研究,但在理论分析方面的研究较为缺乏。因此,下一步应针对组合结构的力学特性,从理论分析层面进行深入研究,以确保试验所得 PBL 连接件承载能力和抗滑移性能的可靠性。

## 参考文献:

## References:

- [1] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. A parametric study of perfobond rib shear connectors[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(4): 614-625.
- [2] AHN J H, KIM S H, JEONG Y J. Shear behaviour of perfobond rib shear connector under static and cyclic loadings[J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(5): 347-357.
- [3] SU Q T, WANG W, LUAN H W, et al. Experimental research on bearing mechanism of perfobond rib shear connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95(3): 22-31.
- [4] 张清华, 李 乔, 唐 亮. 桥塔钢-混凝土结合段剪力键破坏机理及极限承载力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 85-90.  
ZHANG Qing-hua, LI Qiao, TANG Liang. Fracture mechanism and ultimate carrying capacity of shear connectors applied for steel concrete joint segment of bridge pylon [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 85-90.
- [5] COST-NEVES L F, FIGUEIREDO J P, DA S VELLASCO P C G, et al. Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: an experimental approach[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 721-737.
- [6] VALENTE I B, CRUZ P J S. Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 65(10/11): 465-479.
- [7] DA S VELLASCO P C G, DE ADRADE S A L, FERREIRA L T S, et al. Semi-rigid composite frames with perfobond and T-rib connectors part 1: full scale tests[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 263-279.
- [8] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. Tests of full-size composite beams with perfobond rib connectors[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(1): 80-92.
- [9] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors[J]. Computer & Structures, 1997, 62(4): 617-624.
- [10] 张清华, 李 乔, 唐 亮. 剪力连接件的三维非线性仿真分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 595-599.  
ZHANG Qing-hua, LI Qiao, TANG Liang. Research on 3D FEM nonlinear simulation method for shear connectors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 595-599.
- [11] 张清华, 李 乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究(I): 理论模型[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 71-77.  
ZHANG Qing-hua, LI Qiao, BU Yi-zhi. Load transmission mechanism of PBL shear connector group (I): theoretical model[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 71-77.
- [12] 张清华, 李 乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究(II): 极限承载力[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 101-108.  
ZHANG Qing-hua, LI Qiao, BU Yi-zhi. Load transmission mechanism of PBL shear connector group (II): load capacity[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 101-108.
- [13] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声, 等. 钢-混凝土组合梁中剪力连接件实际承载力的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 21-28.  
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min, YUAN Yan-sheng, et al. Research on actual capacity of shear connectors in steel-concrete composite beams [J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2): 21-28.
- [14] 宗周红, 车惠民. 剪力连接件静载和疲劳试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 1999, 27(6): 61-66.  
ZONG Zhou-hong, CHE Hui-min. Experimental study of shear connector under static and fatigue loading[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 1999, 27(6): 61-66.
- [15] 胡建华, 侯文崎, 叶梅新. PBL 剪力键承载力影响因素和计算公式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(6): 12-18.  
HU Jian-hua, HOU Wen-qi, YE Mei-xin. Study of influence factors and formula for the bearing capacity of PBL shear connectors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(6): 12-18.
- [16] 胡建华, 叶梅新, 黄 琼. PBL 剪力键承载力试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 65-72.  
HU Jian-hua, YE Mei-xin, HUANG Qiong. Experiment on bearing capacity of PBL shear connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 65-72.
- [17] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1295-1307.

- [18] 黄 翔,李 力,岳 磊.某大跨径斜拉桥钢-混结合段 PBL 剪力键承载力研究[J]. 桥梁建设,2010(3):19-23.  
HUANG Xiang, LI Li, YUE Lei. Study of bearing capacity of PBL shear connectors for steel-concrete joint section of a long span cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2010(3):19-23.
- [19] 夏 嵩,赵灿晖,张育智,等. PBL 传剪器极限承载力的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2):166-170.  
XIA Song, ZHAO Can-hui, ZHANG Yu-zhi, et al. Experimental investigation on ultimate load-bearing capacity of PBL shear connectors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2):166-170.
- [20] 赵灿晖,夏 嵩,李 乔. PBL 剪力连接器的承载机理与屈服荷载[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4):605-611.  
ZHAO Can-hui, XIA Song, LI Qiao. Load-bearing mechanism and yield load of PBL shear connectors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4):605-611.
- [21] 王振海,李 乔,赵灿晖. PBL 剪力键破坏形态及极限承载力试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(5):517-522.  
WANG Zhen-hai, LI Qiao, ZHAO Can-hui. Experimental investigation on ultimate bearing capacity of perfobond rib shear connectors and their failure modes[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5):517-522.
- [22] 陈建兵,万 水,尤元宝. 开孔波折板连接件破坏机理及承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(12):74-80.  
CHEN Jian-bing, WAN Shui, YOU Yuan-bao. Experimental study on failure modes and bearing capacity of perforated corrugated plate connectors [J]. Building Structure, 2013, 43(12):74-80.
- [23] KIM S H, AHN J H, CHOI K T, et al. Experimental evaluation of the shear resistance of corrugated perfobond rib shear connections[J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(2):249-264.
- [24] 肖 林,强士中,李小珍,等. 考虑开孔钢板厚度的 PBL 剪力键力学性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(8):282-288, 296.  
XIAO Lin, QIANG Shi-zhong, LI Xiao-zhen, et al. Research on mechanical performance of PBL shear connectors considering the perforated plate's thickness[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8):282-288, 296.
- [25] 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.
- (上接第 49 页)
- [18] 李朋飞,袁 堃,牛富俊,等. 多冻土地区块石气冷拓宽路基差异融沉处治效果分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(7):47-54.  
LI Peng-fei, YUAN Kun, NIU Fu-jun, et al. Analysis of differential thaw settlement treatment effect of widened crashed rock embankment in permafrost regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(7):47-54.
- [19] 徐连军. 青藏铁路多年冻土区碎石护坡与片石护道路基地温特性分析[D]. 成都:西南交通大学, 2006.  
XU Lian-jun. Ground temperature characteristic analysis on rubble slope embankment and gravel pavement embankment of Qinghai-Tibet Railway permafrost region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [20] 宋景振,王连俊,沈宇鹏. 青藏铁路多年冻土区路堤阴阳坡差异分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2):6-10.  
SONG Jing-zhen, WANG Lian-jun, SHEN Yu-peng. Study on the difference between the southern and northern slopes of the embankment in permafrost region on Qinghai-Tibet Plateau[J]. China Railway Science, 2006, 27(2):6-10.
- [21] 任国忠. 青藏高原公路沿线环境保护与公路地质灾害[J]. 青海交通科技, 2009(4):3-4.  
REN Guo-zhong. Environmental protection and geological disaster along the highway in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Qinghai Science and Technology of Transportation, 2009(4):3-4.
- [22] 马 辉,刘建坤,张 弥,等. 青藏铁路建设中的冻土工程问题及其应对措施[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2):85-92, 106.  
MA Hui, LIU Jian-kun, ZHANG Mi, et al. Frozen soil problems in Qinghai-Tibet Railway construction and engineering measures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2):85-92, 106.