

贯穿钢筋在波形 PBL 连接件中的影响研究

赵洪智,李 明*,朱旭东

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:为了研究贯穿钢筋直径对波形 PBL 连接件极限抗剪承载力的影响,设计了贯穿钢筋直径分别为 16 mm、20 mm 和 25 mm 三组 PBL 连接件推出试验试件,通过使用 5 000 kN 的加载试验机对试件进行加载试验,测量出试件中工字钢与混凝土板之间的相对位移,并绘制出试件的荷载位移曲线.试验结果表明,当贯穿钢筋直径从 16 mm 增加到 20 mm 时,波形 PBL 连接件的抗剪承载力随着贯穿钢筋直径的增加而提高,当贯穿钢筋直径从 20 mm 变到 25 mm 时,波形 PBL 连接件的抗剪承载力虽在增加但增幅明显下降.

关键词:贯穿钢筋;波形 PBL 连接件;推出试验;极限抗剪承载力

中图分类号:TU375 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2018)06-0022-06

Research on Influence of Through Rebar to Corrugated PBL Connector

ZHAO Hongzhi, LI Ming*, ZHU Xudong

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the influence of diameter of through rebar on the ultimate shear capacity of corrugated PBL shear connector, a test specimen is designed for the three groups of PBL connectors, which are 16 mm, 20 mm and 25 mm of diameter of through rebar, meanwhile, vertical load to test specimens is applied through 5 000 kN-loading test machine, relative displacement of I-beam and concrete plates is measured, and the load-displacement curve is plotted. The test results shows that, the ultimate shear capacity of corrugated PBL connector increases with the increase of the diameter of rebar. But when the diameter of the rebar increases from 20 mm to 25 mm, the increasing rate of the ultimate shear capacity of corrugated PBL connector is obviously reduced.

key words: through rebar; corrugated PBL connector; push-out test; ultimate shear capacity

收稿日期:2018-07-06

作者简介:赵洪智(1984-),男,硕士研究生,主要从事桥梁工程方面的研究.E-mail:595451071@qq.com.* 通信作者:

李 明(1971-),男,副教授,主要从事道路桥梁及隧道方面的研究.E-mail:1121446131@qq.com

0 引言

钢-混凝土组合结构桥梁是指钢腹板或钢桁架组成的钢梁与混凝土面板通过抗剪连接件连接在一起的桥梁结构形式,这种结构可以让钢材和混凝土共同承受主梁的荷载。

钢材和混凝土是建造桥梁的主要结构材料,这两种材料在物理和力学性能上都具有各自的优缺点,如果采用其中一种材料建造桥梁,结构将受到材料性能的制约。对于普通混凝土梁特别是大跨度预应力混凝土桥梁,由于混凝土材料具有较高的刚度和抗压强度,但存在抗拉强度低的缺点,导致梁在正常使用状态下,混凝土受拉区容易发生开裂,此时受拉区混凝土将不能抵挡外力作用,在这种情况下,混凝土不但不能对结构受力起到承载作用,反而会由于自重成为结构的负担。对于

钢梁,由于钢材的强度高、韧性好,但钢梁经常设计成薄壁构件,此时该结构的稳定性较差,经常会发生失稳破坏而非强度破坏^[1]。因此,组合结构桥梁则是将混凝土和钢材通过连接件组合在一起,保留受压区的混凝土板,而受拉区换成钢梁,在这种结构中,混凝土将不产生受拉开裂的问题,钢梁也不会因为侧向无约束而发生失稳情况。因此能否保证混凝土与钢梁有效连接在一起,连接件成为了至关重要的构件。连接件在结构中起到的作用主要有两点:1)能够传递混凝土板与钢梁间的剪力;2)能够提供一定的抗拔力,防止混凝土板与钢梁间的竖向分离^[1]。常见的连接件有栓钉连接件(如图 1(a))、型钢连接件(如图 1(b))、弯筋连接件(如图 1(c))、高强螺栓连接件(如图 1(d))和开孔钢板连接件(如图 1(e))。

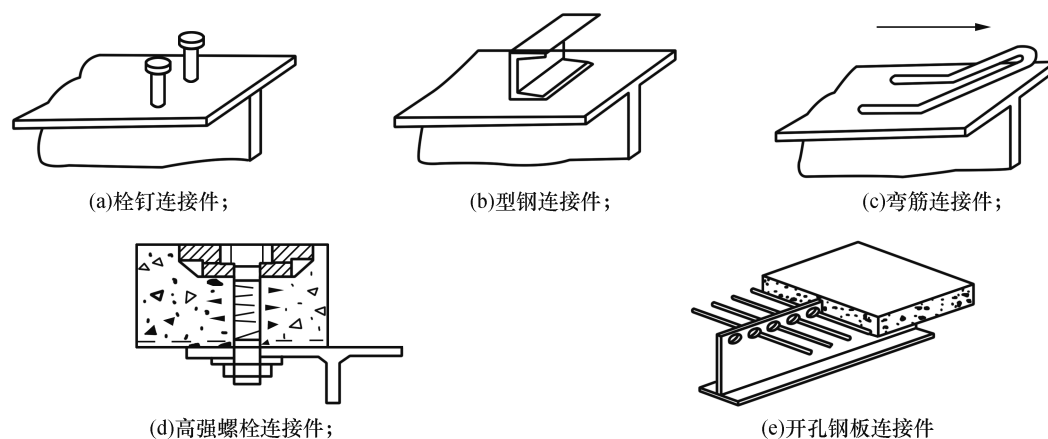


图 1 连接件类型

Fig.1 Types of connector

开孔钢板连接件(perfobond strip connector, 也称为 PBL 连接件)是 1987 年,德国学者 Leonhardt 在解决委内瑞拉的卡罗尼第三大桥组合结构剪力连接件的疲劳问题时提出的一种新型剪力连接件^[2]。PBL 连接件是通过开孔钢板在混凝土板中形成的一系列混凝土榫、开孔钢板和贯穿钢筋共同承担剪力。

国外从 1992 年的 M. R. Veldanda 和 M. U. Hosain 等人通过对 PBL 连接件进行推出试验研究了贯穿钢筋对 PBL 连接件承载力的影响^[3]到 2012 年, J. da. C. Vianna 等人通过推出试验对 PBL 连接件的各个方面的性能(包括 PBL 连接件的承载力、抗滑移性能和破坏形态)^[4]均做了研究。

而国内,则是从 1999 年的福州大学的宗周红^[5]等人通过推出试验研究栓钉连接件和开孔钢板连接件两种类型的连接件的承载力开始对 PBL 连接件的承载力进行研究,并提出了 PBL 连接件的极限抗剪承载力公式。2006 年,刘玉擎等人^[6]通过推出试验研究了贯穿钢筋直径对 PBL 连接件承载能力的影响,表明增大贯穿钢筋直径可以明显提高 PBL 连接件的抗剪能力。同年,湖南大学的胡建华^[7]等人通过推出试验表明贯穿钢筋的直径应该与开孔孔径相协调,否则不但不能提高连接件承载力反而可能使得连接件的承载力变小。2008 年,西南交通大学的李小珍^[8-9]等人通过有限元模拟软件对 PBL 连接件进行了数值模拟和加载试验并分析了 PBL 连接件的传力机理。

以及开孔孔径、混凝土强度、贯穿钢筋直径及开孔数量等对连接件承载力的影响。2010 年,华中科技大学的黄翔、李力^[10]等人通过试验和有限元模拟对开孔钢板的不同尺寸对 PBL 连接件承载力的影响,并首次提出了 PBL 连接件的抗剪刚度计算公式。2011 年,西南交通大学的张清华^[11-12]等人首次通过建立理论模型研究了 PBL 连接件群的承载过程与机理,并通过将建立的模型与试验以及三维仿真模拟结果进行对比,验证了所提出的理论模型的正确性。直到 2012 年长安大学的张智晖^[13]等人通过静力破坏试验对 Twin-PBL 连接件进行了研究。

因此本人通过对传统直板 PBL 连接件进行结构改进,提出了一种新型 PBL 连接件——波形 PBL 连接件,如图 2 所示。同时本文仅对贯穿钢筋在波形 PBL 连接件中的影响进行研究。

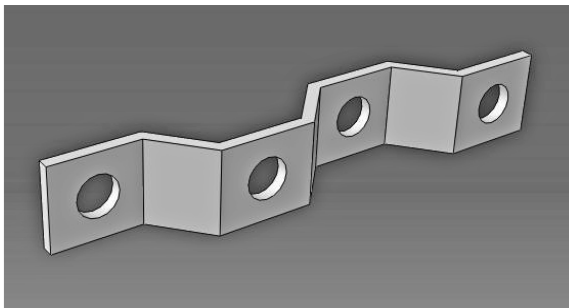


图 2 波形 PBL 连接件

Fig.2 Corrugated PBL connector

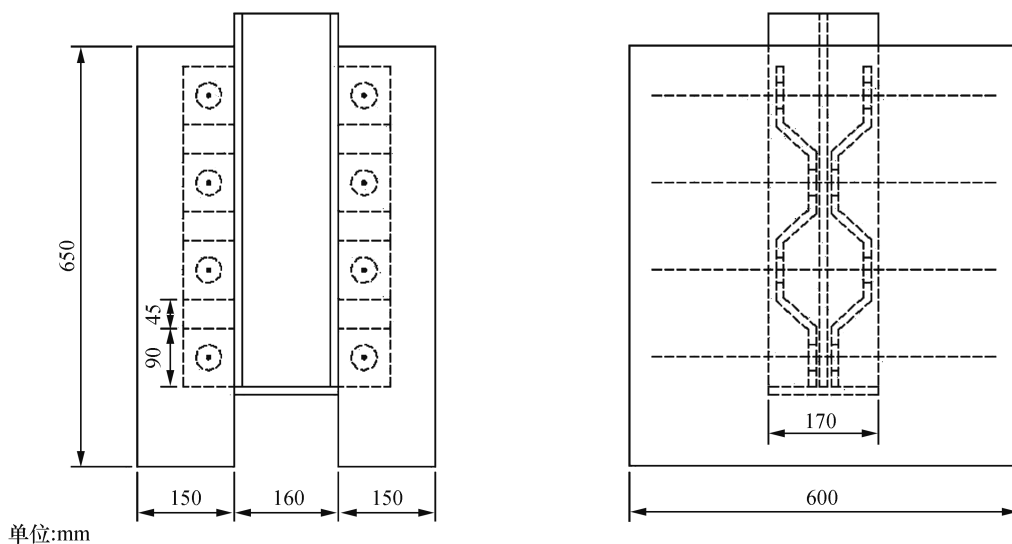


图 3 波形 PBL 连接件试件尺寸

Fig.3 Specimen size of corrugated PBL connector

1 推出试验

本论文试件参照欧洲规范 4^[14],因试验条件限制,对标准试验方法进行简化,将结构中的构造钢筋进行删除。本文只考虑贯穿钢筋对波形 PBL 连接件承载能力的影响,因此共设计 3 组试验,每组 3 个试件。PBL 连接件试件尺寸见图 3。

试件由一块工字钢和两侧的混凝土组成,波形 PBL 连接件焊接在工字钢两侧,每侧两块波形 PBL 连接件,连接件对称布置,可形成对称受力。工字钢腹板较薄,容易发生屈曲变形,而影响力的传递,因此腹板部分进行了加强,本试验通过采用双工钢代替工字钢,同时对腹板焊接钢板加厚腹板厚度,以提高工字钢的刚度。双工钢与混凝土接触面涂抹润滑剂,减小混凝土与钢材直接的粘结力。

试件中的混凝土板采用 C50 混凝土。工字钢和 PBL 连接件均采用 Q345 钢,钢材厚度均为 12 mm,其中 PBL 连接件分为两类,一类为直板 PBL 连接件,开孔直径为 40 mm,一类为波形 PBL 连接件,波高为 50 mm,开孔直径为 40 mm。钢筋采用 HRB335 钢筋,钢筋直径分别为 16 mm、20 mm 和 25 mm。试件编号及分组见表 1。

表 1 试件编号

Table 1 Specimen number

编号	混凝土 强度等级	PBL 连接件 孔径 d/mm	贯穿钢筋直径 ϕ/mm	波高 h $/\text{mm}$
B1	C50	40	16	501
B2	C50	40	20	50
B3	C50	40	25	50

本试验中采用的加载设备为 YAW-J5000F 型微机控制电液伺服压剪试验机,通过试验机对试件进行单调静力加载如图 4 所示;试件的位移则通过微位移传感器和 YE2538A 程控静态应变仪进行测量,微位移传感器与静态应变仪的连接采用半桥连接。

试件的加载方式按以下要求进行加载:

1) 首先加载至预计破坏荷载的 40%,然后在 5%~40%预期极限荷载范围内反复加载、卸载 5 次,每个加载循环时间不能少于 5 min;

2) 预加载结束后开始正式加载至试件破坏,加载过程时间不少于 15 min,因此加载速度定在 80 kN/min;

3) 测量混凝土与钢材的相对位移。

后期对试验结果进行分析需要绘制荷载-位移曲线。荷载可以通过加载试验机进行数据读取,因此在正式加载过程中需要进行分级加载,步长为 200 kN;位移则是指混凝土与钢材之间的相对位移,通过位移计进行测量,每读取一个荷载值对应读取位移值。

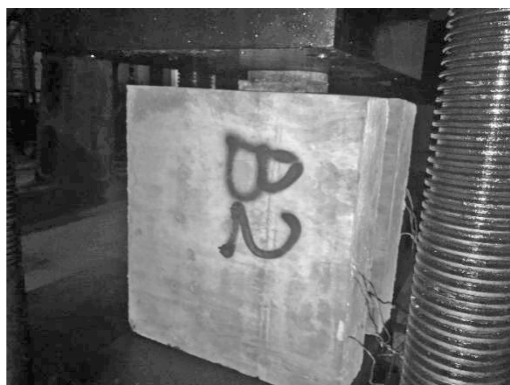


图 4 试件加载

Fig.4 Specimen loading

2 试验分析

2.1 荷载位移曲线

取每个试件中通过位移传感器测量的工字钢

竖向相对位移的平均值为横坐标,取加载试验机的荷载值为纵坐标。试验以单调静力加载方式对试件进行加载,以 200 kN 为单位进行测量读数,读取试件的竖向位移,最后得到试件的荷载位移曲线。

根据加载试验绘出的荷载位移曲线,如图 5 所示。

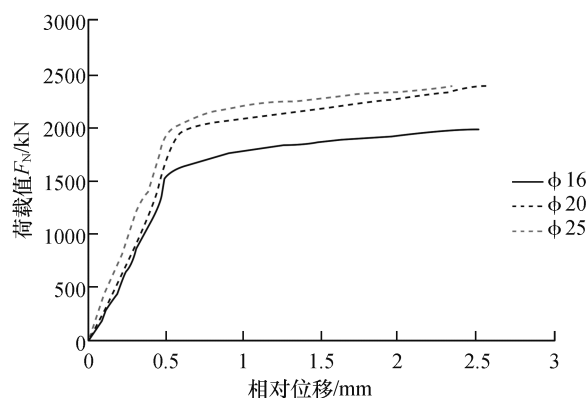


图 5 试件荷载位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve

从图 5 中的三条荷载位移曲线可以看出,试件在竖向加载的过程中一开始处于线性阶段,当相对位移大致在 0.5~0.7 mm 时,试件开始进入非线性阶段,竖向相对位移增加迅速,但对应的荷载增加缓慢。由于试件的钢材部分已经发生了屈曲变形,之后的竖向受力对力的传递至 PBL 连接件的影响很大,认为之后的荷载没有利用价值,因此停止加载,取停止加载时的荷载值为试件的极限承载力。

荷载位移曲线中可以看出虽然贯穿钢筋直径不一样,但这三组试件的线性阶段基本一致。当荷载增加,试件进入非线性阶段后,三组试件的荷载位移曲线出现差异。而且根据荷载位移曲线发现,贯穿钢筋直径对试件的承载力有明显的影响,表现为当贯穿钢筋直径从 16 mm~20 mm 时,波形 PBL 连接件的承载力在增加,当贯穿钢筋直径从 20 mm 增加到 25 mm 的时候,发现波形 PBL 连接件的承载力虽在增加但增加的幅度很小。可能的原因是因为由于孔径直径固定不变的情况下,贯穿钢筋直径过大导致混凝土中的粗骨料不能进入开孔中,导致混凝土樁的承载力减小,而影响了波形 PBL 连接件的承载力。

2.2 极限抗剪承载力

E.C.Oguejiofor 和 M.U.Hosain 通过推出试验,

得到了混凝土板纵向劈裂的开孔钢板连接件破坏形式, 据此提出的纵向抗剪承载力计算公式为^[15]:

$$V_{up} = 4.5htf'_c + 3.31nd^2 \sqrt{f'_c} + 0.91A_{tr}f_y \quad (1)$$

式中: h ——钢板连接件的高度;

t ——钢板连接件的厚度;

n ——连接件圆孔的数量;

d ——连接件圆孔的直径;

A_{tr} ——穿过圆孔的全部横向钢筋的截面积;

f_y ——钢筋的屈服强度;

f'_c ——混凝土的圆柱体抗压强度.

式中第一项反映了混凝土的抗劈裂承载力, 第二项反映了混凝土樁的抗剪承载力, 第三项则反映了贯穿钢筋对混凝土的约束作用. 对试验数据和公式结果进行对比, 结果见表 2.

表 2 波形 PBL 连接件极限抗剪承载力

Table 2 Ultimate shear capacity of corrugated PBL connector

编号	孔径 d /mm	贯穿钢筋直径 ϕ /mm	开孔个数	试件极限承载力 F_N /kN			按 Oguejiofor 公式的抗剪承载力 F_N'/kN
				试件 1	试件 2	试件 3	
B1	40	16	16	2 102	2 152	2 187	2 786.28
B2	40	20	16	2 506	2 428	2 352	3 062.108
B3	40	25	16	2 624	2 576	2 692	3 493.044

从表 2 中的公式所得纵向抗剪承载力可以看出, 波形 PBL 连接件的抗剪承载力随着贯穿钢筋直径的增加而提高. 但根据试验结果来看, 波形 PBL 连接件的抗剪承载力虽在提高但之后的贯穿钢筋直径的变化却对承载力提高的不大. 分析原因可能是公式中并未考虑到开孔中粗骨料的情况, 当开孔孔径较小, 而贯穿钢筋直径较大时, 粒径较大的粗骨料不能进入孔径中, 这种情况大大降低了混凝土樁的承载能力. 因此在采用公式(1)计算 PBL 连接件抗剪承载力应该先考虑贯穿钢筋截面面积在开孔面积的占比再考虑 PBL 连接件抗剪承载力的计算公式.

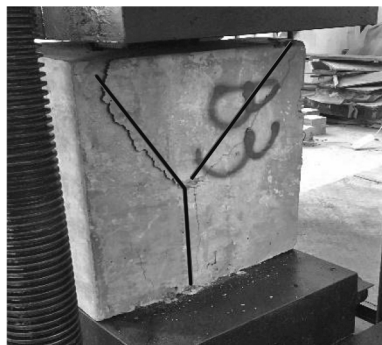
2.3 破坏形态

在波形 PBL 连接件的加载过程中首先在混

凝土侧板出现竖向裂缝, 随着荷载的增加, 裂缝斜向上延伸直到裂缝贯通, 如图 6(a) 所示, 裂缝到了顶部后又向布置有开孔连接件的位置延伸. 当荷载加载至极限抗剪承载力时, 混凝土底部出现混凝土压碎的现象, 如图 6(b) 所示.

敲碎混凝土后发现贯穿钢筋和波形 PBL 连接件均有部分发生变形, 如图 7 所示.

分析原因可能是因为 PBL 连接件对混凝土的劈裂效果, 使得混凝土发生开裂现象, 又由于波形 PBL 连接件的布置形式为上侧打开下侧靠近的形式, 如图 3 所示, 使得混凝土的开裂形式为正漏斗形式; 由于斜板的存在, 使得混凝土开裂的裂缝上侧宽, 下侧窄, 如图 6(a) 所示.



(a) 波形 PBL 连接件混凝土开裂



(b) 波形 PBL 连接件混凝土压碎

图 6 波形 PBL 连接件混凝土破坏形态

Fig.6 Concrete failure form of corrugated PBL connector



图 7 贯穿钢筋和波形 PBL 连接件变形情况

Fig.7 Deformation condition of through rebar and corrugated PBL connector

3 结 论

根据试验结果发现贯穿钢筋的直径对波形 PBL 连接件的极限抗剪承载力表现为随着贯穿钢筋直径的增加,波形 PBL 连接件的极限抗剪承载力也在增加,但是当贯穿钢筋从 20 mm 增加到 25 mm 时,波形 PBL 连接件的抗剪承载力虽然也有提高,但是明显提高的幅度很小,可能的原因是由于贯穿钢筋截面积占开孔面积较大,使得混凝土中大部分粗骨料不能进入开孔中而影响到波形 PBL 连接件的抗剪承载力。

波形 PBL 连接件试件的破坏形态表现为混凝土侧板首先出现裂缝,然后随着荷载的增加,裂缝开始至下向斜上方开展直至裂缝贯通,当裂缝到达顶部的时候又开始向连接件布置的位置延伸,当接近到极限荷载时,试件底部也开始出现混凝土压碎的现象。

参考文献:

- [1] 聂建国.钢-混凝土组合结构桥梁[M].2 版.北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 邹韵,黄侨,汪炳.PBL 连接件静力和疲劳性能研究综述[J].中外公路,2016,36(4):133-139.
- [3] VELDANDA M R,HOSAIN M U.Behavior of perfobond rib shear connectors in composite beams;Push-out tests [J]. Canadian journal of civil engineering, 1992, 19 (2):1-10
- [4] VIANNA J DA. C,DE ANDRADE S A L,DA S. VEL-LASCO P C G, et al.Experimental study of perfobond shear connectors in composite construction[J].Journal of constructional steel research,2013,81:62-75.
- [5] 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.
- [6] 刘玉擎,周伟翔,蒋劲松.开孔板连接件抗剪性能试验研究[J].桥梁建设,2006(6):1-5.
- [7] 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.
- [8] 李小珍,肖林,张迅,等.斜拉桥钢-混凝土结合段 PBL 剪力键承载力试验研究[J].钢结构,2009,24(9):22-27.
- [9] 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):15-20.
- [10] 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.
- [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.
- [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.
- [13] 张智晖,贺拴海.Twin-PBL 剪力键承载力影响因素及破坏形态[J].武汉理工大学学报,2013,35(8):98-102.
- [14] European committee for standardization.Eurocode 4;design of composite steel and concrete structures.part1.1. EN 1994-H; 2004 [S]. Brussels, Belgium; European committee for standardization,2004.
- [15] OGUEJIOFOR E C,HOSAIN M U.Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rid connectors [J].Computer and structure,1996,62(4):617-624.

(责任编辑:周泉)