

文章编号: 1000-4750(2016)09-0179-07

肋板间距对开孔板连接件抗剪刚度影响分析

柳扬清, 刘玉擎, 郑双杰

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要: 为探讨开孔板连接件肋板间距合理的布置方法, 通过模型试件抗剪推出试验和弹性地基梁理论, 分析了肋板间距对开孔板连接件抗剪刚度的影响机理, 提出了考虑肋板间距影响的开孔板连接件抗剪刚度计算公式。研究表明: 肋板间距对开孔板连接件抗剪承载力及峰值滑移量影响较小, 对开孔板连接件抗剪刚度影响较大; 抗剪刚度随着肋板间距增加近似线性增大, 逐渐趋近于单块开孔板连接件受力的抗剪刚度; 肋板间距与开孔板孔径的比值为开孔板连接件抗剪刚度的主要影响因素, 建议并列焊接多个开孔板连接件时距径比不宜小于 3.3。

关键词: 组合结构桥梁; 开孔板连接件; 模型试验; 抗剪刚度; 肋板间距

中图分类号: U448.38 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.02.0122

ANALYSIS ON EFFECT OF PLATE SPACING ON SHEAR STIFFNESS OF PERFOBOND CONNECTORS

LIU Yang-qing, LIU Yu-qing, ZHENG Shuang-jie

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to discuss the reasonable plate spacing of perfibond connector, the influence of plate spacing on the shear stiffness of perfibond connector is analyzed through the push-out model test and based on the theory of elastic foundation beam. The calculation formula for perfibond shear stiffness is proposed, which accounts for the influence of plate spacing. Research results indicate that the plate spacing has little effect on shear capacity and peak slip of perfibond connector but changes the shear stiffness. Shear stiffness approximately linearly increases as the plate spacing increases, gradually approaching the single plate shear stiffness. The main influence factor for the shear stiffness of perfibond connector is the spacing-diameter ratio, which is suggested to be no less than 3.3 when multi perfibonds are arranged in parallel.

Key words: composite bridge; perfibond connector; model test; shear stiffness; plate spacing

近年来, 组合结构桥梁钢与混凝土的结合, 逐渐开始采用开孔板连接件。开孔板连接件构造简单、抗剪性能好, 成为钢与混凝土结合面的一种重要连接方式。在混合梁、混合塔、混合拱肋等的结合段设计中, 通常在结合段中设置格室, 并在其顶、底板及侧板上焊接开孔肋板作为连接件^[1-2]。一般要求结合部能够传递很大的作用力, 但格室空间尺寸较小, 必须设置过多的开孔肋板用于钢与混凝土的结合。因此, 开孔肋板间距对开孔板连接件抗剪性能的影响成为关键技术问题之一。

各国学者通过模型试验, 研究了影响开孔板连接件抗剪性能的主要因素, 包括孔数量、孔间距、孔径、孔中钢筋直径、钢板厚度、混凝土的厚度、强度和骨料性质等^[3-6]。最近几年, 石膏爽等^[7]研究孔径对开孔板连接件破坏机理的影响, 肖林等^[8]通过 24 个模型试件探讨开孔板厚度对承载性能的影响, 汪维安等^[9]通过模型试验分析了荷载-滑移变形曲线, 郑双杰等^[10]研究用于有限元计算的开孔板连接件初期抗剪刚度等。目前开孔板连接件的试验研究、理论分析和数值计算大多针对单个开孔板连接

收稿日期: 2015-02-07; 修改日期: 2015-06-01

通讯作者: 刘玉擎(1962—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 主要从事组合结构桥梁研究(E-mail: yql@tongji.edu.cn).

作者简介: 柳扬清(1991—), 男, 吉林人, 硕士生, 主要从事组合结构桥梁研究(E-mail: lyq_solar@163.com);

郑双杰(1985—), 男, 福建人, 博士生, 主要从事组合结构桥梁研究(E-mail: sjzhengcn@163.com).

件，其成果还没有形成设计标准。但实际应用中一般并列焊接多个开孔板连接件，开孔板的肋板间距可能会影响连接件的抗剪性能。

为此，本文以开孔肋板间距为变化参数，进行了3组共9个开孔板连接件抗剪性能推出试验，分析了肋板间距对抗剪性能的影响；基于弹性地基梁理论分析了两块开孔板并列布置的受力机理，提出了考虑肋板间距影响的抗剪刚度计算公式；分析肋板间距对开孔板连接件抗剪性能的影响系数，给出了开孔板连接件肋板间距与孔径的比不宜小于3.3的建议。

1 连接件推出试验方案

1.1 模型试验分组

表1为开孔板连接件抗剪性能推出试验分组，分为3组共9个试件，每组第三个试件进行重复加载。除了开孔板的肋板间距 e 不同，各个开孔板连接件模型试件的构造尺寸、试验方法、材料性能以及混凝土浇筑方式均相同。孔中钢筋屈服强度 $f_y=374$ MPa，混凝土棱柱体抗压强度 $f_c=34.64$ MPa。

表1 模型试验分组

Table 1 Model test grouping

试件分组	试件个数	孔径 d/mm	板厚 t/mm	钢筋直径 d_s/mm	板间距 e/mm
PBC-75	3	60	20	20	75
PBC-150	3	60	20	20	150
PBC-200	3	60	20	20	200

1.2 模型试件构造

图1为开孔板连接件抗剪性能推出试验试件构造图。两块T形钢拼接连接成工形钢，在两侧翼缘上浇筑混凝土。翼缘与混凝土通过开孔板连接件连接，进行推出式加载。试件的制作模拟组合梁中的正立浇筑状态，在钢板与混凝土的接触面上涂抹润滑油，减少钢与混凝土之间摩擦力和粘结力对试验的影响。在滑移方向前端设置泡沫塑料垫块，排除混凝土端部承压作用的影响。

目前开孔板连接件的试验研究，主要通过改变孔径、板高、板厚、钢筋直径、混凝土强度等参数来研究抗剪性能。本试验保持其他参数不变，仅改变开孔板间距 e 来研究肋板间距对开孔板连接件抗剪性能的影响。图2为开孔板间距变化示意图，孔径 $d=60$ mm，板高 $h=150$ mm，板厚 $t=20$ mm，钢

筋直径 $d_s=20$ mm。

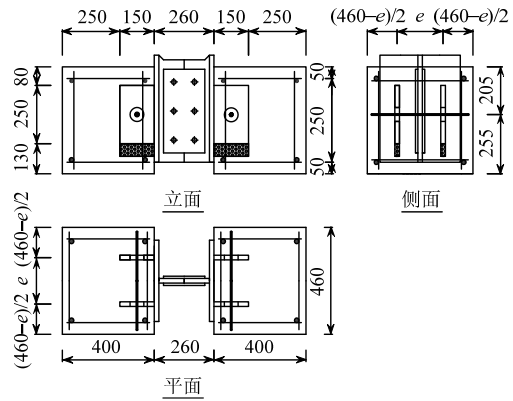


图1 模型试件构造 /mm

Fig.1 Configuration of model test specimens

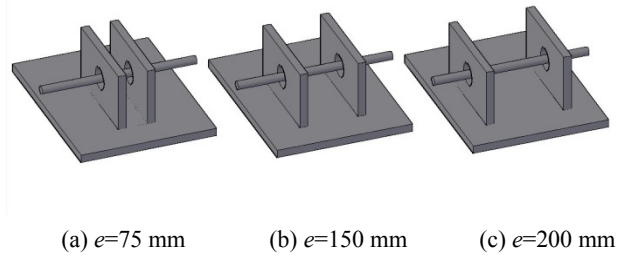


图2 肋板间距变化示意

Fig.2 Variation of plate spacing of perfobond connector

1.3 加载及测试方法

图3为开孔板连接件抗剪性能推出试验的加载测试方法。通过分配梁将千斤顶施加的推力均匀作用到工形钢翼缘，使开孔板连接件承受剪力荷载。为了使试件边缘均匀受力，在混凝土块的底部铺设细沙垫层。在开孔板孔洞高度位置，混凝土块的两侧对称布置位移计，用来测试连接件在加载时的相对滑移。

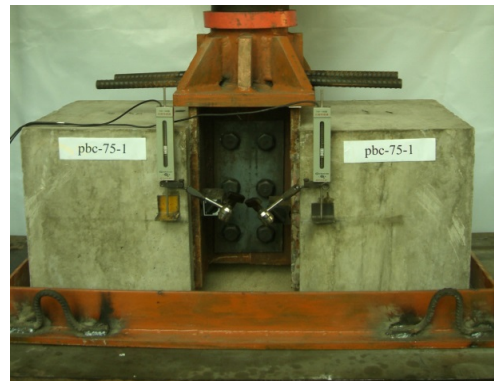


图3 推出试验加载及测试

Fig.3 Push-out test setup and instrumentation

2 连接件模型试验结果及分析

2.1 试验结果及分析

推出试验结果如表 2 所示, 其中 V_u 为每个开孔板连接件的平均抗剪承载力, sp 为达到抗剪承载力时所对应的峰值滑移量, k_s 为开孔板连接件的抗剪刚度。抗剪刚度取剪力-相对滑移曲线中, 切线与割线斜率比值为 0.5 的点所对应割线斜率^[10]。

表 2 抗剪性能试验结果
Table 2 Test results of shear behavior

试件 分组	板间距 e/mm	V_u/kN		sp/mm		$k_s/(kN/mm)$	
		单孔	平均	单孔	平均	单孔	平均
PBC-75-1	—	335.3		3.61		573	
PBC-75-2	75	333.8	338.9	2.53	3.39	587	542
PBC-75-3	—	347.5		4.03		465	
PBC-150-1	—	347.0		3.44		693	
PBC-150-2	150	352.3	342.7	3.71	3.46	678	657
PBC-150-3	—	328.7		3.22		599	
PBC-200-1	—	362.7		3.67		716	
PBC-200-2	200	369.1	354.6	3.68	3.45	658	672
PBC-200-3	—	332.0		2.99		642	

由表 2 可知, 板间距对峰值滑移量几乎没有影响。随着板间距的增加, 开孔板连接件的抗剪承载力和抗剪刚度增大。板间距 75 mm 和 150 mm 的试件, 抗剪承载力分别为板间距 200 mm 试件的 95.6% 和 96.6%、抗剪刚度分别为 80.7% 和 97.8%。

图 4 为模型试件加载破坏后孔中钢筋的变形形状。在两块开孔板处受到集中剪力作用, 钢筋明显弯折。可认为从钢筋表面到开孔板孔洞边缘, 沿着钢筋纵向通长的孔中混凝土, 变形与孔中钢筋基本一致, 与作用两个集中力受到周围均匀地基介质支撑的地基梁的变形形状相似。

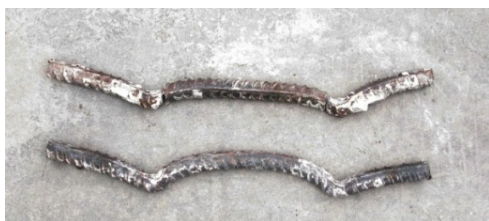


图 4 孔中钢筋弯折变形

Fig.4 Bending deformation of hole reinforcement

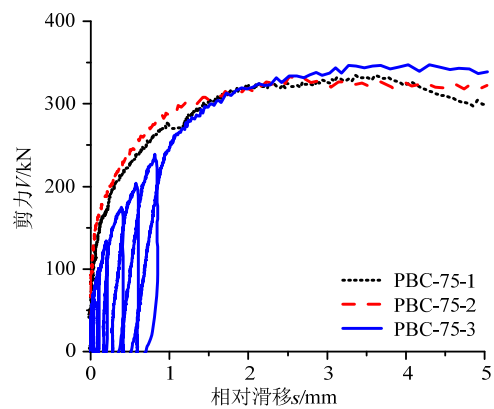
试验结果表明, 板间距不同的开孔板连接件峰值滑移量相近, 抗剪承载力和抗剪刚度随着板间距的增加而增大, 板间距对承载力影响较小, 对刚度影响较大。基于失效破坏机理可知, 主要原因是加载初期试件处于弹性阶段, 当板间距较小时孔洞可能处于另一个孔洞的变形影响区域, 导致孔洞处的

变形量增大, 影响了加载初期试件的抗剪刚度。当开孔板连接件接近破坏时已经进入塑性阶段, 发生混凝土剪切破坏, 两个孔洞相互影响较小。影响承载力和峰值滑移量的主要因素为孔径、钢筋直径、混凝土强度等孔洞自身属性。

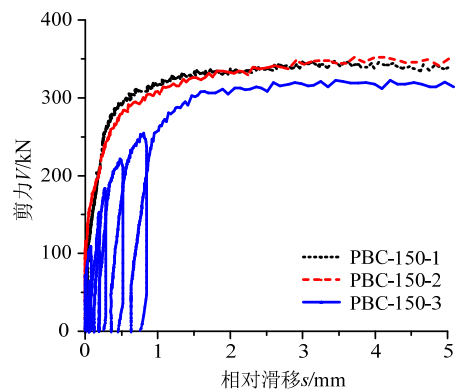
2.2 剪力-相对滑移曲线

图 5 为推出试验试件的剪力-相对滑移曲线。重复加载试件的剪力-相对滑移曲线规律与单调加载试件相近。重复加载试件的抗剪刚度小于单调加载试件, 分别为后者的 80.2%、87.4% 和 93.4%。板间距越小, 重复加载对试件抗剪刚度的影响越大。当剪力达到峰值后, 曲线在较大的位移范围内缓慢下降, 开孔板连接件的变形性能较好。

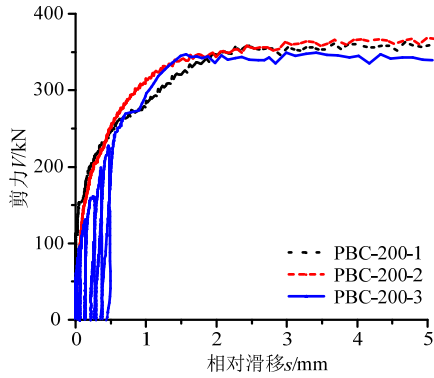
开孔板连接件主要通过孔中混凝土与钢筋组成的销栓抵抗剪力。试件在加载初期处于弹性阶段, 相对滑移量随着剪力的增加近似线性增加; 随着剪力继续增加, 试件进入塑性阶段, 刚度逐渐减小。此时开孔板孔洞附近的混凝土开始发生剪切破坏, 孔中钢筋部分区域达到屈服; 达到极限承载力状态后, 钢与混凝土间的相对滑移快速增加, 试件破坏。



(a) PBC-75



(b) PBC-150



(c) PBC-200

图 5 剪力-相对滑移曲线

Fig.5 Shear force-slip curves

2.3 残余滑移量

考察 3 组试件中进行重复荷载加载的试件，图 6 为 3 个试件的残余滑移量与相对剪力关系曲线。开孔肋板间距越小，重复加载每次产生的残余滑移量越大，抗剪刚度越小。板间距 150 mm 与 200 mm 的试件残余滑移量接近，当剪力为极限承载力的 0.5 倍时，残余滑移量小于 0.2 mm。

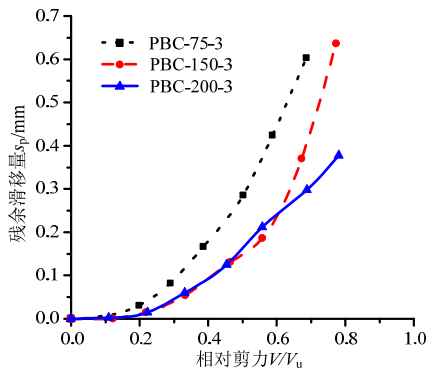


图 6 残余滑移量-相对剪力曲线

Fig.6 Residual slip-relative shear curves

3 肋板间距对抗剪刚度影响理论分析

图 7 为设置两块开孔板连接件抗剪受力模型。取开孔板中贯穿的孔中钢筋和混凝土为受力隔离体，承受由孔洞处传递来的集中剪力。相对滑移小于 0.2 mm 时试件处于弹性阶段，假定隔离体周围的混凝土对隔离体的变形起弹性支承作用，开孔板连接件的受力模型可以比拟为弹性地基梁，其中梁体截面是由孔中钢筋和孔中混凝土组成的组合截面。图中直角坐标系的 x 轴沿隔离体纵向，原点设为两开孔板之间的中点， y 轴正方向为加载方向。

基于弹性地基梁的基本理论，假定模型符合线弹性条件，孔中混凝土和孔中钢筋满足平截面假

定；周围混凝土的支承作用与隔离体的变形成正比；忽略开孔板连接件与混凝土的粘结摩擦作用。

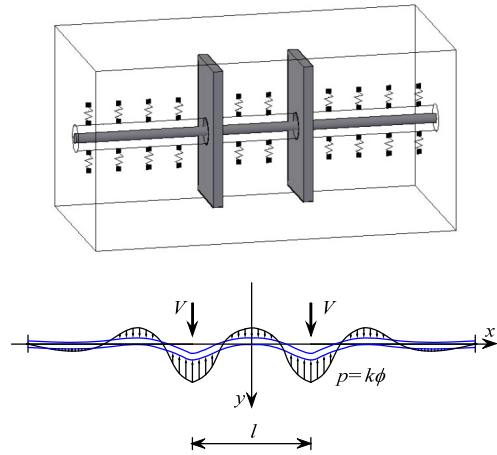


图 7 开孔板连接件受力模型

Fig.7 Mechanism model of perfbond connectors

对于单孔开孔板连接件的受力，参考 Winkler 地基梁的解析法，比拟的弹性地基梁竖向挠曲线的表达式为：

$$\phi = \frac{V\beta}{2kb} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (1)$$

其中： V 为作用剪力； b 为弹性地基梁的宽度，取开孔板孔径 d ； β/mm^{-1} 为基础梁的柔度指标。 β 可表示为：

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI}} \quad (2)$$

式中：

$$EI = \frac{\pi}{64} E_c d^4 [1 + (n_E - 1)n_d^4] \quad (3)$$

式中： EI 为钢筋与混凝土组合截面隔离体的抗弯刚度； E_c 为混凝土弹性模量； d 为开孔板圆孔直径； n_E 为钢筋与混凝土的弹性模量比； n_d 为钢筋直径 d_s 与开孔板孔径 d 的比值； k 为地基梁周围介质的弹性支撑刚度。 k 可表示为：

$$k = \frac{C}{b} E_c \quad (4)$$

其中， C 为无量纲参数，表示混凝土支承刚度修正系数。

将式(3)、式(4)代入式(2)中化简得到：

$$\beta = 2\sqrt[4]{\frac{C}{\pi d^4 [1 + (n_E - 1)n_d^4]}} \quad (5)$$

当两块间距为 l 的开孔板同时受力时会相互影响，根据线弹性的假设采用叠加法，设两块开孔板之间的中点为原点，则比拟弹性地基梁的竖向挠曲

线表达式为($x \geq l/2$):

$$\phi = \frac{V\beta}{2kb} e^{-\beta(x+\frac{l}{2})} \left[\cos \beta \left(x + \frac{l}{2} \right) + \sin \beta \left(x + \frac{l}{2} \right) \right] + \frac{V\beta}{2kb} e^{-\beta(x-\frac{l}{2})} \left[\cos \beta \left(x - \frac{l}{2} \right) + \sin \beta \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \quad (6)$$

当 $x=l/2$ 时, 可以得到开孔板处的竖向位移为:

$$s = \frac{\beta}{2kb} [1 + e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l)] V \quad (7)$$

为此, 开孔板连接件抗剪刚度 k_s 可以表示为:

$$k_s = \frac{2kb}{\beta [1 + e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l)]} \quad (8)$$

将 β 代入抗剪刚度 k_s 的表达式, 引入参数:

$$C_1 = \sqrt[4]{\pi(1 + (n_E - 1)n_d^4)} \quad (9)$$

得到单块开孔板连接件的抗剪刚度计算式:

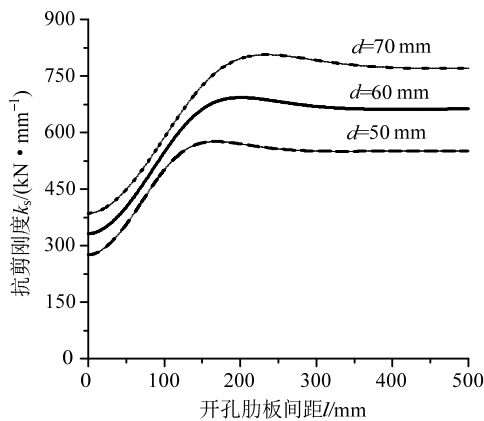
$$k_s = \frac{\sqrt[4]{C^3} C_1 E_c d}{1 + \sqrt{2} e^{-\frac{2\sqrt[4]{C} l}{C_1 d}} \sin \left(\frac{2\sqrt[4]{C} l}{C_1 d} + \frac{\pi}{4} \right)} \quad (10)$$

式中只有 C 为未知量, 参考国内外 125 个推出试验数据^[10-16], 利用最小二乘法进行参数拟合得到:

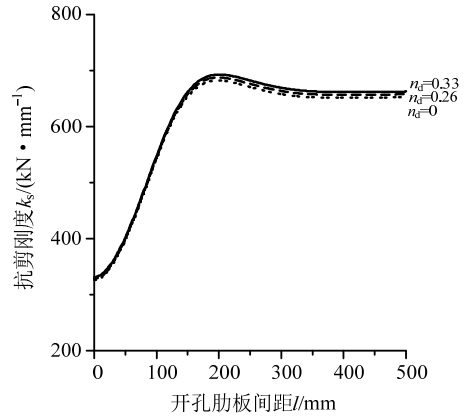
$$C = 0.16 \quad (11)$$

至此得到了考虑开孔肋板间距 l 影响的抗剪刚度 k_s 计算式, 即式(10)。推导过程中将孔洞处的变形线性叠加, 是建立在孔洞处孔中混凝土和钢筋处于弹性阶段的基础上。因此式(10)适用于计算开孔肋板连接件处于弹性阶段的初期抗剪刚度。

图 8 为由式(10)计算得到的开孔板连接件抗剪刚度与开孔肋板间距关系曲线, 分别在 $n_d=0.33$ 时变化 d , 和 $d=60$ mm 时变化 n_d 的计算曲线。由此得出开孔板连接件抗剪刚度随肋板间距不同的设计曲线。



(a) $n_d=0.33$



(b) $d=60$ mm

图8 肋板间距对抗剪刚度的影响

Fig.8 Effect of plate spacing on shear stiffness

从抗剪刚度-肋板间距变化曲线分析, 当两块肋板趋于重合为一块肋板时, 每块开孔肋板连接件各承担一半的剪力, 其抗剪刚度为单独设置一块开孔肋板连接件的 1/2; 随着肋板间距逐渐增加, 抗剪刚度逐渐增大。当开孔板处作用集中剪力时, 比拟弹性地基梁的部分区域有向上弯曲的变形趋势, 如果另一个开孔板位于此区域时, 变形量会减小, 抗剪刚度会稍微增大到超过单块开孔肋板受力时的抗剪刚度, 产生峰值; 当肋板间距进一步增大, 两板之间相互影响越来越小, 抗剪刚度趋近于单块开孔肋板受力时的抗剪刚度。

另一方面, 保持钢筋直径与开孔板孔径的比值一定, 增加孔径时抗剪刚度明显增大, 并且抗剪刚度峰值对应的板间距随着孔径的增加而增大; 保持孔径一定, 改变钢筋直径与孔径的比值对抗剪刚度影响较小, 抗剪刚度峰值对应的肋板间距几乎不变。

4 考虑肋板间距的抗剪刚度计算式

式(10)的分子为单板开孔板连接件受剪力作用时的抗剪刚度表达式 k_s' ^[10], 分母的倒数反映板间距为 l 对抗剪刚度的影响, 设其影响系数 $\alpha_l(x_l)$ 为:

$$\alpha_l(x_l) = \frac{1}{1 + \sqrt{2} e^{-\frac{2\sqrt[4]{C} x_l}{C_1 d}} \sin \left(\frac{2\sqrt[4]{C} x_l}{C_1 d} + \frac{\pi}{4} \right)} \quad (12)$$

考察 $\alpha_l(x_l)$ 的极值点, 令式(12)关于自变量 x_l 的导数为 0, 解得前两个极值点为:

$$x_{l1} = 0, \quad \alpha_{l\min} = 0.5 \quad (13)$$

$$x_{l2} = \frac{\pi d C_1}{2\sqrt[4]{C}}, \quad \alpha_{l\max} = 1.045 \quad (14)$$

当自变量 x_l 趋近于无穷大时 $\alpha_l(x_l)=1.0$ 。为此, 如图 9 所示, 将 $k_s/k'_s-l/d$ 用二折线表示, 因为 $\alpha_{l\max}$ 接近于 1.0, 可设 $x_l \geq \frac{\pi d C_1}{2\sqrt{C}}$ 时 $k_s/k'_s-l/d$ 为水平线。

在常用开孔板连接件的材料和几何参数下, n_E 介于 5~7、 n_d 介于 0~0.4, C_1 可以近似为:

$$C_1 = \sqrt[4]{\pi \left(1 + \frac{n_E n_d^2}{40} \right)} \quad (15)$$

为此, 二折线交点处的肋板间距 e 与孔径 d 的比为:

$$e/d = 3.3 + 0.08 n_E n_d^2 \quad (16)$$

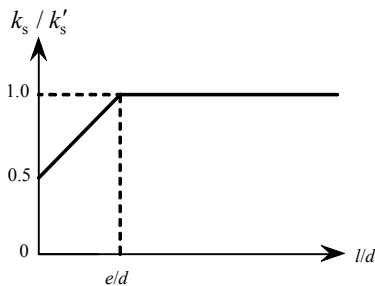


图9 $k_s/k'_s-l/d$ 变化关系

Fig.9 The relationship between k_s/k'_s and l/d

参照单独设置一块开孔板连接件的抗剪刚度计算公式^[10], 开孔板连接件多排布置, 考虑肋板间距的影响, 每个单孔连接件的抗剪刚度简化计算公式为:

$$k_s = \alpha_e (0.27 + 0.14 n_E n_d^2) E_c d \quad (17)$$

考虑 n_d 较小, 式中肋板间距影响系数 α_e 为:

$$\alpha_e = \begin{cases} 0.5 + 0.15 \frac{e}{d}, & e/d < 3.3 \\ 1.0, & e/d \geq 3.3 \end{cases} \quad (18)$$

表 3 为式(17)的计算结果与试验结果对比, 肋板间距较小时抗剪刚度计算值偏小, 误差在 10%左右, 其主要原因为间距为简化公式在上升段用直线代替曲线。

表 3 计算与试验结果比较

Table 3 Comparison between calculation and test results

试件 分组	板间距 e/mm	试验值 $k_s/(\text{kN}/\text{mm})$	计算值 $k_s/(\text{kN}/\text{mm})$	计算值与 试验值的比
PBC-75	75	542	472.9	0.87
PBC-150	150	657	601.8	0.92
PBC-200	200	672	687.8	1.02

基于试验和理论研究可知, 抗剪刚度受到开孔板间距 e 与开孔孔径 d 的比值即距径比的影响。为此, 建议并列焊接多个开孔板连接件时, 距径比不宜小于 3.3; 当距径比不满足要求时, 计算中应考

虑肋板间距对开孔板连接件抗剪性能的影响。

5 结论

(1) 开展了以肋板间距为变化参数的 9 个开孔板连接件抗剪性能推出试验, 结果表明肋板间距不同的开孔板连接件峰值滑移量相近, 抗剪承载力和抗剪刚度随着板间距的增加而增大, 板间距对承载力影响较小, 对抗剪刚度影响较大。

(2) 基于弹性地基梁理论, 揭示了肋板间距对开孔板连接件抗剪刚度的影响机理。当两块肋板趋于重合为一块肋板时, 每块开孔肋板连接件各承担一半的剪力, 其抗剪刚度为单独设置一块开孔肋板连接件的 1/2; 抗剪刚度随着肋板间距的增加近似线性增大, 肋板间距进一步增大, 趋近于单块开孔板连接件抗剪刚度。

(3) 进一步分析开孔板连接件肋板间距影响因子, 钢筋直径与开孔板孔径的比值保持不变, 孔径增加时抗剪刚度明显增大, 抗剪刚度峰值对应的肋板间距增加; 孔径保持不变, 钢筋直径与孔径的比值增加对抗剪刚度影响较小, 抗剪刚度峰值对应的板间距几乎不变。

(4) 提出考虑肋板间距影响的抗剪刚度计算公式, 并建议并列焊接多个开孔板连接件时肋板间距与孔径的比不宜小于 3.3, 否则应考虑肋板间距对开孔板连接件抗剪性能的影响。

参考文献:

- [1] 刘玉擎, 裴炳志, 赵晨. 开孔板连接件在桥梁结构中的应用与发展[J]. 中外公路, 2009, 29(5): 112—116.
Liu Yuqing, Pei Bingzhi, Zhao Chen. Application and development of perfobond connector in bridge structures [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(5): 112—116. (in Chinese)
- [2] He Jun, Liu Yuqing, Pei Bingzhi. Experimental study of the steel-concrete connection in hybrid cable-stayed bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(3): 559—570.
- [3] Ahn Jinhee, Lee Changoo, Won Jeonghun, Kim Sanghyo. 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.
- [4] Kim Sanghyo, Choi Jaegu, Park Sejun, Ahn Jinhee, Jung Chiyoung. Behavior of composite girder with Y-type perfobond rib shear connectors [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103(12): 275—289.
- [5] Vianna J da C, Andrade S A L de, Vellasco P C G da S,

- et al. Experimental study of Perfobond shear connectors in composite construction [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 81(2): 62–75.
- [6] Cândido-Martins J P S, Costa-Neves L F, S Velasco P C G da. Experimental evaluation of the structural response of perfobond shear connectors [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(8): 1976–1985.
- [7] 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.
- Shi Xiaoshuang, Wang Qingyuan, Ouyang Wenxin, et al. Push-out experimental study on bond-slip behaviors of PBL shear connector under static loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(1): 168–175. (in Chinese)
- [8] 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 Shizhong, Li Xiaozhen, 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. (in Chinese)
- [9] 汪维安, 李乔, 赵灿晖, 等. 混合结构 PBL 剪力键的荷载-滑移特征曲线研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 57–65, 81.
- Wang Weian, Li Qiao, Zhao Canhui, et al. Study on load-slip characteristic curve of perfobond shear connectors in hybrid structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 57–65, 81. (in Chinese)
- [10] 郑双杰, 刘玉擎. 开孔板连接件初期抗剪刚度试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(11): 69–75.
- Zheng Shuangjie, Liu Yuqing. Experiment of initial shear stiffness of perfobond connector [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(11): 69–75. (in Chinese)
- [11] 平陽兵, 古市耕輔, 山村正人, et al. 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究[J]. *コンクリート工学年次論文報告集*, 1998, 20(3): 859–864.
- Taira Y, Furuichi K, Yamamura M, et al. Experimental research on fundamental characteristics of perfobond connectors [J]. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 1998, 20(3): 859–864. (in Japanese)
- [12] 古市耕輔, 平陽兵, 山村正人. 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に関する実験的研究[J]. *鹿島技術研究所年報*, 1998, 46(9): 87–90.
- Furuichi K, Taira Y, Yamamura M. Experimental study on shear strength of shear connectors using perforated plate [J]. *Annual Report of Kajima Technical Research Institute*, 1998, 46(9): 87–90. (in Japanese)
- [13] 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, et al. 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究[J]. *構造工学論文集*, 2000, 46A(3): 1593–1604.
- Hosaka T, Mitsuki K, Hiragi H, et al. An Experimental study on shear characteristics of perfobond strip and its rational strength equations [J]. *Proceedings of Structural Engineering*, 2000, 46A(3): 1593–1604. (in Japanese)
- [14] 西海健二, 富永知徳, 室井進次, et al. 拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する研究[J]. *コンクリート工学年次論文報告集*, 1998, 20(3): 865–870.
- Nishiumi K, Tominaga T, Muroi S, et al. Research on slip behavior of perfobond connectors under confinement [J]. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 1998, 20(3): 865–870. (in Japanese)
- [15] 堀元彦, 眞嶋隆行. 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力および基本特性確認試験[J]. *日本橋梁技報*, 2015(18): 8–15.
- Hori M, Majima T. Experimental study on shear capacity and fundamental characteristics of perfobond connector [J]. *Journal of Japanese Bridge Technology*, 2015(18): 8–15. (in Japanese)
- [16] 日向優裕, 藤井堅, 深田和宏, et al. 並列配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動[J]. *構造工学論文集*, 2007, 53A(3): 1089–1098.
- Himukai M, Fujii K, Fukada K, et al. Ultimate slip behavior of double-lined perfobond rib connector [J]. *Proceedings of Structural Engineering*, 2007, 53A(3): 1089–1098. (in Japanese)