

孔中钢筋位置对开孔板连接件受力性能的影响

苏庆田, 王 巍

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 孔中带贯穿钢筋的开孔板连接件的基本力学性能指标是基于钢筋位于孔中心这种状态得到的. 由于实际施工中钢筋位置会偏离孔中心, 所以以开孔板连接件孔中钢筋位置为变化参数进行了 9 组共 27 个试件的推出试验, 研究了孔中钢筋位置变化对开孔板连接件基本力学性能的影响. 试验结果表明, 孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的承载力有一定的影响, 但不显著; 对开孔板连接件的延性和刚度影响较大. 根据不同受力状态提出了开孔板连接件的抗剪刚度计算表达式.

关键词: 开孔板连接件; 孔中钢筋位置; 极限承载力; 抗剪刚度; 延性

中图分类号: TU 398.9

文献标识码: A

Influence of Transverse Bar Position in Hole on Mechanical Behavior of Perfobond Rib Connectors

SU Qingtian, WANG wei

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

Abstract: Basic mechanical behavior parameters of perfobond rib connector with transverse bar in the hole are obtained based on the state that transverse bar is located in the center of the hole. However, the position of transverse bar in the hole usually deviates from the hole center during actually construction. Nine groups, totally 27 specimens with perfobond rib connectors are designed and push-out tests are performed to investigate the influence of transverse bar position changes in the hole on mechanical behaviors of perfobond rib connectors. The test results show that transverse bar position changes have much more influence on ductility and stiffness of perfobond rib connectors rather than carrying capacity. Finally, the shear stiffness calculation expressions of perfobond rib connectors under different mechanical behavior

are proposed.

Key words: perfobond rib connector; transverse bar position; carrying capacity; shear rigid; ductility

随着我国桥梁建设的迅猛发展, 钢与混凝土组合结构桥梁由于其受力的合理性以及施工的便利性和经济性等越来越多地受到工程师们的青睐. 连接件是组合结构桥梁中保证钢与混凝土构件共同受力的关键构件. 开孔板连接件作为一种新型的连接件, 由于其施工方便、承载力高、抗疲劳性能好^[1]等优点最早应用于德国 Caroni 桥, 后来应用于日本和法国, 我国的南京三桥和上海长江大桥等也采用了这种连接件. 开孔板连接件是指在钢板上沿长度按适当间距开设圆孔, 孔内设置贯穿钢筋也可以不设, 并依靠圆孔中混凝土形成的销栓隼来承担钢与混凝土间作用力的新型连接件^[2]. 设置有贯穿钢筋的开孔板连接件较未设置贯穿钢筋者有更高的抗剪承载力和更好的延性^[3], 因而实际应用中的开孔板连接件多数都设置了孔内贯穿钢筋.

国内外学者对孔中带贯穿钢筋的开孔板连接件受力性能做了大量试验和理论研究^[4-9], 得出了影响开孔板连接件受力性能的主要参数, 如孔径、贯穿钢筋直径、混凝土强度、贯穿钢筋的强度等^[5-7]. 在以往的试验研究和数值分析中, 均以贯穿钢筋在开孔板孔洞中心这种状态进行研究的^[4-9], 但实际工程中由于开孔板加工制作的误差以及钢筋绑扎位置的偏差, 使得贯穿钢筋在孔洞中位置是随机变化的. 为此, 本文设计了 9 组共 27 个试件进行孔中钢筋位置变化对开孔板受力性能的影响分析, 得到的结论可供工程设计人员参考, 同时为我国规范编改积累基础数据.

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(50708075)

第一作者: 苏庆田(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢桥及组合桥梁. E-mail: sqt@tongji.edu.cn

通讯作者: 王 巍(1987—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为钢桥及组合桥梁. E-mail: weiwang314@163.com

1 开孔板连接件抗剪承载力试验

1.1 试件的制作

组合梁连接件承载力通常以推出试验的结果来确定. 本文设计了 9 组标准推出试验试件, 测试孔中不同钢筋位置下的开孔板连接件的抗剪承载能力. 其中每组有 3 个完全相同的试件, 试件构造如图 1 所示. 试件的两个开孔板上各开有一个直径 60 mm 的圆孔, 并在圆孔中贯穿直径为 22 mm 钢筋. 试件的制作模拟组合梁中混凝土桥面板的正立浇注状

态. 在钢翼缘与混凝土的接触面上涂抹润滑油以减小钢与混凝土的粘结力对试验的影响, 开孔板底部设置泡沫塑料垫块以排除板端混凝土端承作用的影响.

本文的 9 组试件中贯穿钢筋的中心位于开孔板孔洞中心的有 1 组, 贯穿钢筋位于开孔板孔洞最上、最下、最左、最右 4 个边缘位置的有 4 组, 贯穿钢筋的中心位于开孔板孔洞中心与最上、最下、最左、最右 4 个边缘位置各自中间的有 4 组. 试件结构左右对称, 本文以左侧开孔板为基本对象进行描述. 图 2 给出了开孔板孔中贯穿钢筋位置变化情况示意.

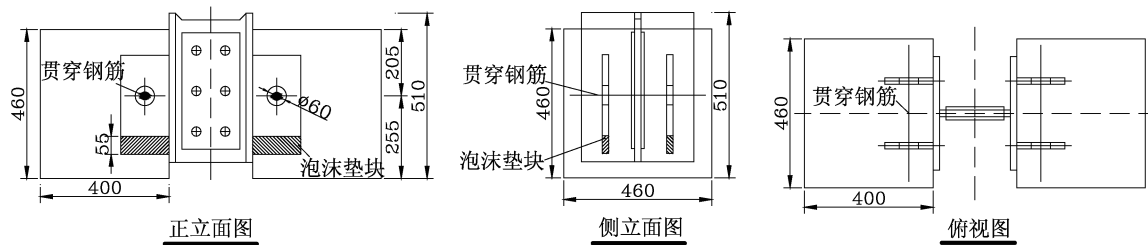


图 1 试件构造(单位:mm)

Fig.1 Specimen configuration (unit:mm)

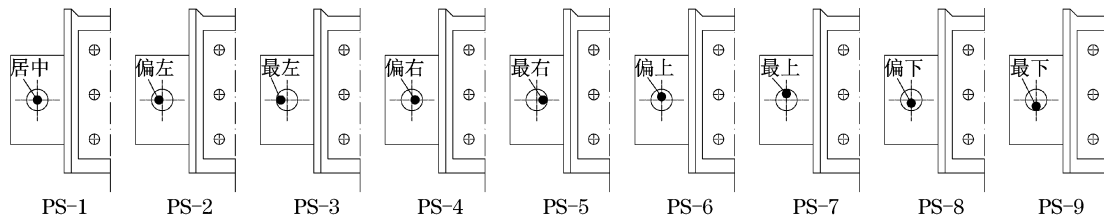


图 2 贯穿钢筋位置示意图

Fig.2 Sketch map for transverse bar position in the hole

1.2 试验方法

采用推出试验方法测试开孔板连接件的抗剪承载性能, 利用加载能力为 3 000 kN 的液压千斤顶对试件施加单向竖向荷载, 加载装置如图 3 所示. 本试验测试的主要内容是试件的荷载-位移曲线、极限承

载能力, 因此采用了 4 个千分表测试开孔板连接件位置处钢与混凝土间的相对滑移值. 为了尽量保证加载均匀, 在千斤顶和试件之间设置了钢垫块, 为了保证混凝土底部的接触面相对均匀受力, 在试件底部设置了细砂垫层.

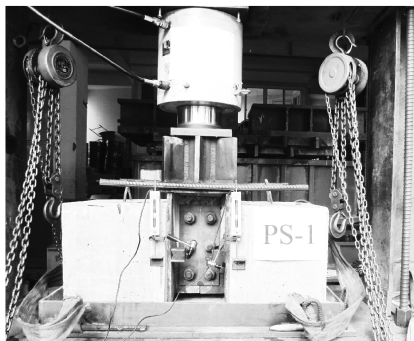


图 3 推出试验加载装置

Fig.3 Photograph for push-out test set-up

2 试验结果

2.1 基本材料特性

当混凝土龄期达到 28 d 时, 进行了边长为 150 mm 的混凝土立方体抗压强度测试, 其平均抗压强度为 55.5 MPa. 测试了贯穿开孔板孔洞钢筋的材料特性, 屈服强度为 339 MPa, 极限强度为 494 MPa.

2.2 荷载-滑移曲线

图 4 给出了各组试件的荷载-滑移曲线, 图中横

坐标为 4 个位移计测得钢与混凝土间相对滑移量的平均值,横坐标为单个孔洞承受的剪力。

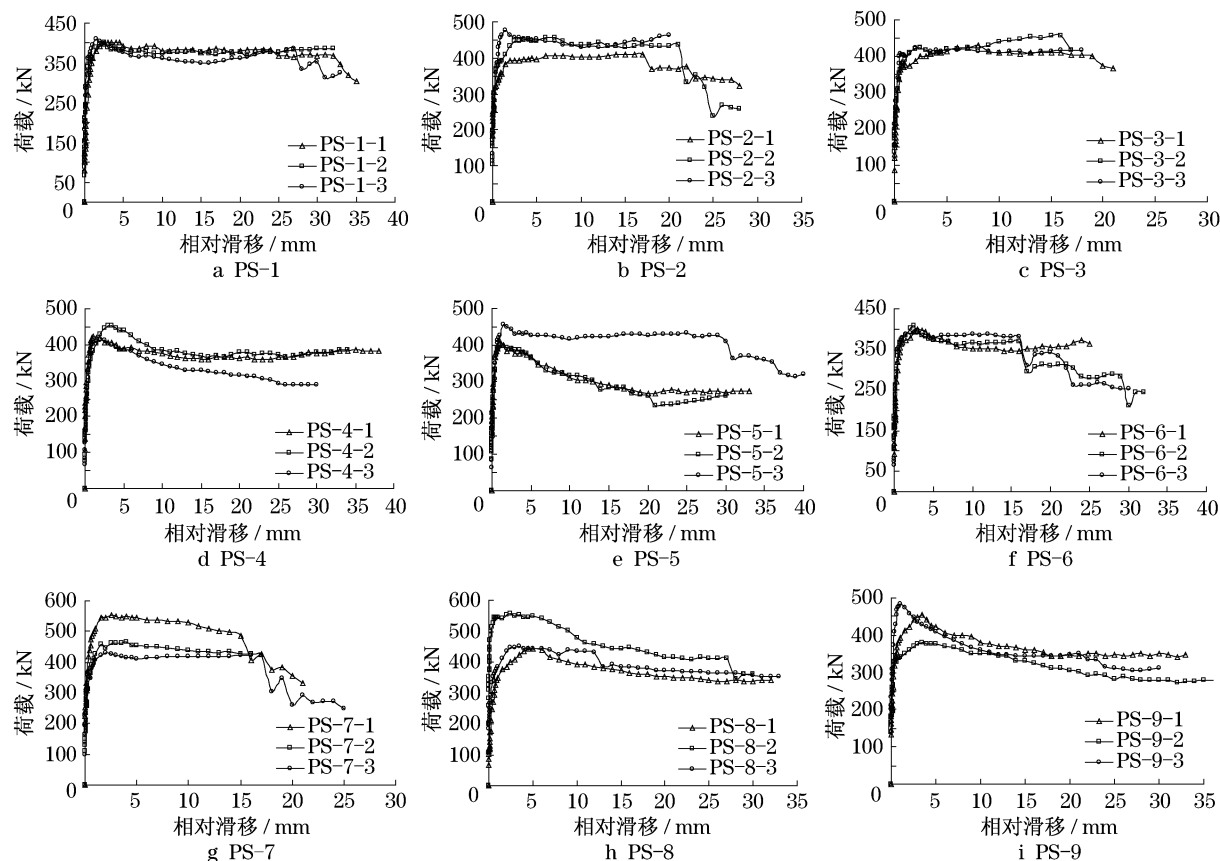


图 4 各组试件荷载-滑移曲线

Fig.4 Load-relative slip curve for push-out specimens

从图 4 中可以看出,每组试件的荷载-滑移曲线都经历以下几个阶段:阶段 1,随着荷载的增加,钢与混凝土间的相对滑移量增加较少,在该阶段主要是钢与混凝土间的粘结作用抵抗所施加的外荷载;阶段 2,随着荷载的增加,钢与混凝土间的相对滑移量有一定的增加,随着钢与混凝土粘结作用被克服,形成的混凝土销栓与孔中钢筋共同抵抗所施加的外荷载,在该阶段随着外荷载的增加先是开孔板孔洞附近的混凝土被剪断或压碎,然后是孔中钢筋由弹性状态转向屈服,在该阶段末试件基本达到了极限承载力状态;阶段 3,当试件达到极限承载力状态后,试件的承载能力降低,同时钢与混凝土间的相对滑移快速增加,贯穿钢筋的屈服范围增大甚至到达断裂状态。

由于 9 组试件中贯穿钢筋在孔中的位置不同,使得每组试件中以上 3 个阶段出现的时段也不相同,表 1 列出了各个试件的极限承载力及其对应的滑移量、最大滑移量及其对应的荷载。

从表 1 可以看出,每个试件的极限承载力各不相同,每一组完全相同的 3 个试件中也会出现承载力相差较大的情况,这种相同试件结果离散性较大的现象在国内外其他推出试验中也经常发生^[5,7],主要是因为开孔板孔洞中形成的混凝土质量随机性太大,孔洞中有无粗骨料对极限承载力都会有影响,其次是试验试件受力接触面的不平整也会对试验结果有较大的影响。因此从表 2 中难以判断贯穿钢筋在孔洞中的位置是否产生显著影响。

表 1 中每个试件的最大滑移量各不相同,但从每组最大滑移量的平均值可以看出,试件编号 PS-3 和 PS-7 两组最大滑移量的平均值分别为 19.13 mm 和 21.03 mm,明显小于其他几组的相应值。相对滑移曲线中出现荷载阶跃的部分对应试验加载过程中钢筋被剪断的情况,由图 4c,4f,4g 可以看出,钢筋分别位于孔中最左、偏上、最上边缘的 PS-3,PS-6 和 PS-7 组试件比其他组的试件更早出现断筋现象。在图 3 所示的推出试验中,工字钢受到竖向荷载作用

后有向下移动的趋势,当孔中钢筋位于最上边缘时该钢筋直接受到开孔板作用的力,此外,图 3 所示的推出试验中两边的混凝土块有向两边分离的趋势,当孔中钢筋位于最左边缘时该钢筋也会直接受到开孔板作用的力.钢筋受到开孔板直接作用力后其受力范围较其他试件中通过混凝土扩散后的受力范围更小,钢筋屈服范围短,容易较早断裂,因此贯穿钢筋位于孔中最上边缘和最左边缘的试件其最大滑移量均比其他试件小.由此可见孔中钢筋位置变化会对开孔板连接件的延性产生较大的影响.

表 1 试验结果
Tab.1 Results for push-out tests

试件编号	极限承载力 Q_u/kN	承载力均值 Q_{avg}/kN	Q_u 对应滑移/ mm	最大滑移 S_u/mm	平均最大滑移 $S_{\text{uavg}}/\text{mm}$	S_u 对应荷载 Q/kN	试件描述
PS-1	PS-1-1	402.92	3.10	35.29		302.34	居中
	PS-1-2	402.92	2.23	36.73	34.98	366.39	
	PS-1-3	411.43	1.69	32.91		324.86	
PS-2	PS-2-1	412.93	17.58	28.98		317.85	偏左
	PS-2-2	456.46	6.57	27.94	25.93	259.81	
	PS-2-3	480.48	1.59	20.87		447.96	
PS-3	PS-3-1	438.95	8.73	21.64		315.85	最左
	PS-3-2	427.44	2.18	17.80	19.13	417.93	
	PS-3-3	423.44	2.40	17.95		415.93	
PS-4	PS-4-1	424.94	1.27	41.44		359.89	偏右
	PS-4-2	457.46	3.32	36.89	38.74	399.92	
	PS-4-3	414.93	2.44	37.88		326.86	
PS-5	PS-5-1	416.43	1.15	43.06		328.86	最右
	PS-5-2	399.42	1.32	40.31	41.73	280.82	
	PS-5-3	461.97	1.67	41.82		293.83	
PS-6	PS-6-1	400.92	2.68	25.02		324.86	偏上
	PS-6-2	408.92	2.50	32.74	31.21	235.29	
	PS-6-3	391.41	3.05	35.87		255.80	
PS-7	PS-7-1	552.54	3.45	20.84		330.36	最上
	PS-7-2	465.47	3.42	16.66	21.03	424.44	
	PS-7-3	431.94	2.51	25.58		253.80	
PS-8	PS-8-1	448.96	4.97	34.12		349.38	偏下
	PS-8-2	556.04	2.85	37.96	34.65	401.92	
	PS-8-3	450.46	3.33	31.86		353.38	
PS-9	PS-9-1	454.96	3.52	43.13		384.91	最下
	PS-9-2	384.4	3.83	41.11	41.52	288.83	
	PS-9-3	482.98	1.01	40.32		359.89	

2.3 试件的破坏形式

试件在加载过程中首先是靠近开孔板附近的混凝土出现裂缝,随着荷载的增加,裂缝向斜下方向发展,直至达到极限承载力,混凝土在侧面有较大面积

的开裂甚至剥裂.开孔板中横向贯穿的钢筋在孔中有明显的弯曲,其中试件 PS-3,PS-6,PS-7 中有贯穿钢筋被剪断的情况,试件的破坏形式如图 5 所示.

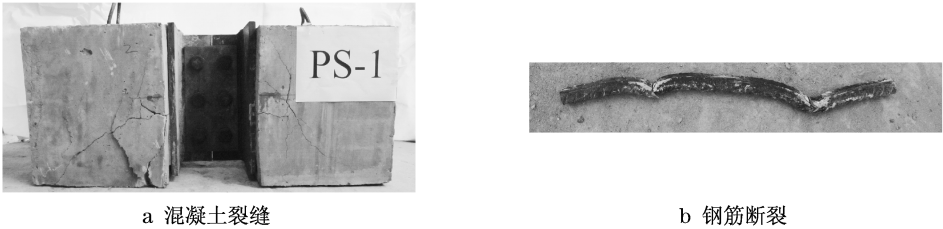


图 5 试件的破坏形态
Fig.5 Failure modes of specimen

3 孔中钢筋位置变化对开孔板连接件抗剪承载力的影响

由表 1 可知, 各组试件中开孔板连接件的抗剪承载力均值有较明显的差别, 且每组试件的 3 个试件间抗剪承载力的离散程度也较大, 不能由此判定孔中钢筋位置变化对开孔板连接件抗剪承载力是否有显著影响. 下面用数理统计的方法^[10]对此做假设检验.

由于试件的抗剪极限承载力受孔径、贯穿钢筋直径、混凝土强度、贯穿钢筋的强度、钢混交界面摩擦力等诸多因素共同影响, 各因素间的制作和试验误差可以认为是相互独立的, 故可假定各组试件抗剪极限承载力服从正态分布, 也即可以认为 9 组试件结果分别属于 9 个正态分布总体, 每组样本容量为 3. 由于本次试验的 9 组试件是在同一工厂内同一批加工、同一批加载, 故可认为各组样本的方差相同.

由表 1 可知, 各组试件抗剪承载力均值最小者为 PS-6 组, 其均值为 400.42 kN; 各组试件抗剪承载力均值最大者为 PS-8 组, 其均值为 485.15 kN. 现假设这两个总体的均值相同, 对其做显著性水平为 5% 的 t 检验.

设 X_1, X_2, X_3 是来自 PS-6 组正态总体 $N(\mu_1, \sigma^2)$ 的样本, Y_1, Y_2, Y_3 是来自 PS-8 组正态总体 $N(\mu_2, \sigma^2)$ 的样本, 且设两样本独立. 又分别记它们的样本均值为 \bar{X} 和 \bar{Y} , 记样本的方差为 S_1^2, S_2^2 . μ_1, μ_2, σ^2 均未知. 下面求检验问题.

原假设 $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$, 备样假设 $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$, 取显著性水平 $\alpha = 0.05$.

引入下述 t 统计量作为检验统计量^[8]:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{1}$$

$$S_w^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \tag{2}$$

式(1), (2) 中: n_1, n_2 为样本容量, 这里 $n_1 = n_2 =$

$3; \bar{X} = 400.42; \bar{Y} = 485.15; S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i -$

$\bar{X})^2; S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (Y_i - \bar{Y})^2$; 当 H_0 为真时, 有

$t \sim t(n_1 + n_2 - 2) \sim t(4)$, 其拒绝域为

$$|t| = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \geq t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2) \tag{3}$$

将以上数据代入式(1)~(3), 得表 2.

表 2 假设检验计算表(显著性水平 $\alpha = 0.05$)
Tab.2 Calculation results for hypothetical test($\alpha = 0.05$)

样本来源	总体样本	样本值	样本均值	样本方差	S_w	t 观测值	拒绝域 t 限值
PS-6	X_1	400.92	400.42	153.75	43.85	2.366 4	2.776 4
	X_2	408.92					
	X_3	391.41					
PS-8	Y_1	448.96	485.15	7 539.21			
	Y_2	556.04					
	Y_3	450.46					

由表 2 可知, 检验统计量的观测值为 $t = 2.366 4$, 拒绝域限值 $t_{0.025}(4) = 2.776 4$, $t < t_{0.025}(4)$ 故不能拒绝原假设 H_0 , 即认为 PS-6 组与 PS-8 组试件的开孔板连接件抗剪极限承载力均值无显著差别, 且判断错误的概率小于 5%. 由于其他各组试件开孔板抗剪承载力均值的观测值差异均小于 PS-6 组与 PS-8 组试件间的差异水平, 对其两两做以上假设检验可得相同的结果, 进而可以认为这 9 组试件的抗剪承载力均值在显著性水平为 5% 下相同, 得到孔中钢筋位置变化对开孔板连接件抗剪极限承载力没有显著影响.

4 孔中钢筋位置变化对开孔板连接件抗剪刚度的影响

随着计算机技术水平的提高, 对钢与混凝土组合结构进行仿真分析已成为可能^[8-9]. 在仿真分析中为了真实模拟连接件的作用, 必须准确知道连接件的抗剪刚度, 同样必须了解孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的抗剪刚度是否产生影响以及产生何种影响, 这样才能保证结构计算的准确性和安全性.

将每组试件在相同滑移量处的相对荷载取平均后,得到每组试件的荷载-滑移曲线.根据钢筋混凝土结构规范中在正常使用状态下混凝土最大裂缝宽度为 0.2 mm 的要求,同时考虑组合梁混凝土开裂后钢筋和连接件的耐久性,这里取钢与混凝土相对滑移量为 0.2 mm 对应的荷载为正常使用极限状态承载力 Q_s .由于不同组试件的 Q_s 不同,用 Q_s 除各组试件的荷载-滑移曲线中不同相对滑移量处对应的荷载值,得图 6a 所示的正常使用状态下各组试件的相对刚度曲线.由于表 1 中大多数试件的极限承载力对应的滑移量小于 5.0 mm,用各组试件承载力最大值 Q_u 除不同相对滑移量处对应的荷载值,得图 6b 所示的承载力极限状态相对刚度曲线.

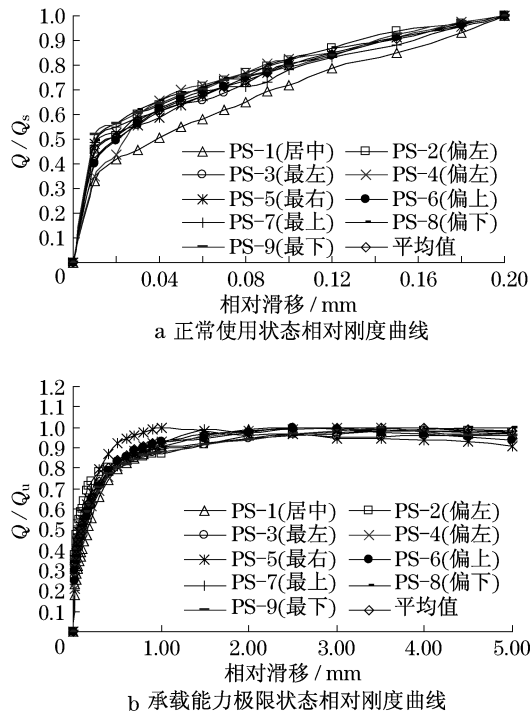


图 6 各组试件相对刚度曲线

Fig.6 Relative rigid curve for each group of specimens

由图 6a 可知,在正常使用状态下,各组开孔板连接件的相对刚度曲线只在相对滑移很小时(0.01 mm)有较好的线性关系,随后刚度明显减小;孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的正常使用状态的刚度影响较大,如相对滑移量为 0.02 mm 时的相对刚度相差最大达到 33.9%.

由图 6b 可知,在承载力极限状态下,各组试件的刚度变化有明显的规律性,极限承载力基本都在相对滑移为 2.50 mm 处达到,随后试件就进入了较为理想的塑性阶段;孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的承载力极限状态下的刚度有一定影响,

如相对滑移量为 1.00 mm 时的相对刚度相差最大达到 14.9%.

基于以上分析,用回归分析的方法可将开孔板连接件的刚度变化规律按正常使用状态和承载力极限状态分别提出以下相对刚度计算方法.

正常使用状态开孔板连接件相对刚度计算公式为

$$\frac{Q}{Q_s} = aS^b \quad 0 \leq S \leq 0.7 \quad (4)$$

承载力极限状态开孔板连接件相对刚度计算公式为

$$\frac{Q}{Q_u} = \begin{cases} cS^b & 0 \leq S \leq 0.7 \\ 0.7^b c + (S - 0.7)d & 0.7 \leq S \leq 2.5 \\ 1 & 2.5 \leq S \leq 5 \end{cases} \quad (5)$$

式(4), (5)中: Q_s 为 0.2 mm 相对滑移对应的荷载; Q_u 为开孔板接件的抗剪极限承载力; S 为相对滑移量; a, b, c, d 为参数,取值方法见表 3.

表 3 拟合公式参数取值

Tab.3 Values of parameters in fitted formulations

取值	a	b	c	d
拟合均值	1.515	0.276 1	1.000	0.050
拟合下限	1.695	0.366 8	0.958	0.089
拟合上限	1.415	0.231 1	1.040	0.022

图 7 给出了公式(4)和公式(5)对开孔板连接件

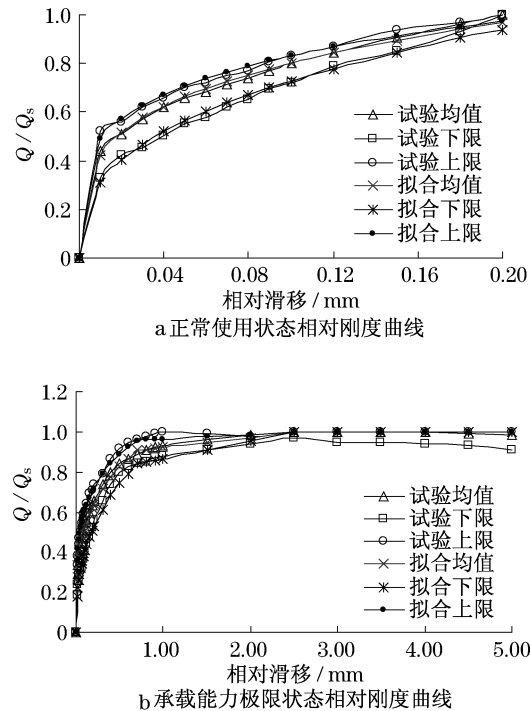


图 7 拟合相对刚度曲线

Fig.7 Fitted relative rigid curve

在正常使用状态下及承载能力极限状态下拟合相对刚度与试验平均值的比较. 由图 7 可以看出, 本文给出的公式与试验结果吻合较好.

5 结论

通过开孔板连接件推出试验及其结果分析, 得到以下结论:

(1) 孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的抗剪承载力有一定影响但不显著.

(2) 当孔中贯穿钢筋贴近开孔板主要抗剪方向一侧孔壁布置时, 开孔板连接件的延性会有明显下降, 较早出现钢筋被剪断的现象, 在布置钢筋时应避免靠近开孔板受力一侧.

(3) 孔中钢筋位置变化对开孔板连接件的刚度有一定影响, 本文给出的正常使用状态和承载能力极限状态的刚度计算式与试验结果吻合较好.

参考文献:

- [1] Leonhardt Fritz, Andrae Wolfhart, Andrae Hans-Peter, et al. New improved bonding means for composite load bearing structures with high fatigue strength [J]. Beton-und Stahlbetonbau, 1987, 82(12): 325.
- [2] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- LIU Yuqing. Steel-concrete hybrid bridge[M]. Beijing: China

- Communications Press, 2005.
- [3] 刘玉擎, 周伟翔. 开孔钢板连接件的受力性能及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(增刊): 381.
- LIU Yuqing, ZHOU Weixiang. Mechanical behavior and application of perfobond rib connector[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(Suppl.): 381.
- [4] Zellner W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors[C]// Composite Construction in Steel and Concrete: Proceedings of an Engineering Foundation Conference. New York: ASCE, 1988: 240 - 252.
- [5] Kim H Y, Jeong Y J. Experimental investigation on behaviour of steel-concrete composite bridge decks with perfobond ribs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 463.
- [6] 赵晨. 开孔板连接件抗剪性能试验及设计方法研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2009.
- ZHAO Chen. Design methods and experimental research on shear capacity of Perfobond rib connector[D]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2009.
- [7] Veldanda M R, Hosain M U. Behaviour of perfobond rib shear connectors: push-out tests[J]. Can J Civil Eng, 1992, 19: 1.
- [8] Oguejiofor E C, Hosain M U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors [J]. Computers & Structures, 1997, 62(4): 617.
- [9] Krans D, Wurzer O. Nonlinear finite-element analysis of concrete dowels [J]. Computers & Structures, 1997, 64 (5/6): 1271.
- [10] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Theory of possibility and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

• 下期文章摘要预报 •

渐进结构优化法在桥梁找型中的应用

陈艾荣, 常 成

介绍了结构拓扑优化方法的基本理论, 详细阐述了双向渐进结构优化法的原理和优化过程, 并根据双向渐进结构优化法编制了基于 ANSYS 平台的结构拓扑优化程序. 模拟现有桥梁结构和构件的边界条件, 应用该程序求解二维平面拓扑优化问题, 分别完成了不同矢跨比拱桥、悬索桥主缆以及斜拉桥桥塔的拓扑优化. 拓扑优化过程中结构可经历多种拓扑形态, 优化结果表明应力均匀、传力流畅, 从而验证了自编程序的有效性. 最后, 将该程序从二维平面拓展到三维空间, 实现一座峡谷桥梁的三维拓扑优化, 并基于优化结果的拓扑形式完成了其概念设计方案. 研究表明结构拓扑优化技术可以在桥梁概念设计阶段得出合理而富启发性的桥梁结构形式, 在桥梁找型方面具有良好的应用前景.