

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703009



间接加载高强钢筋 RPC 梁 受剪性能试验

曹霞^{1,2}, 陈逸聪^{1,2}, 宋亚运^{1,2}, 金奇志^{1,2}

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了研究间接加载对高强钢筋活性粉末混凝土(RPC)梁受剪性能的影响,进行一批不同加载位置 RPC 梁的试验,分析其对裂缝、挠度、抗剪承载力及破坏形态等方面的影响.结果表明:挑耳在上部和挑耳同梁等高的间接加载 RPC 梁的裂缝发展趋势相近,裂缝的增长速度比直接加载梁慢,而挑耳在下部的试验梁裂缝发展迅速,并在主梁上形成拱形裂缝;加载方式对 RPC 梁的刚度影响不大;挑耳在上部和挑耳同梁等高的间接加载 RPC 梁的极限承载力并不比直接加载 RPC 梁低;挑耳在下部的间接加载 RPC 梁发生了一定程度的拉脱破坏,从而导致其极限承载力比直接加载 RPC 梁降低 25%左右;间接加载梁的开裂荷载比直接加载梁都提高 25%左右;挑耳在梁上部及挑耳同梁等高的 RPC 主梁可不配置附加横向钢筋,挑耳在梁下部的主梁可以减少附加横向钢筋的配置量.

关键词: 高强钢筋; 活性粉末混凝土; 间接加载; 加载位置; 受剪性能

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)03-0330-06

Trial Research on Shear Capacity of RPC Beams Under Indirect Loading

CAO Xia^{1,2}, CHEN Yicong^{1,2}, SONG Yayun^{1,2}, JIN Qizhi^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the influence of indirect loading on shear capacity of reactive powder concrete (RPC) beams, a group of different loading positions of RPC beam was tested, and influences of different loading on cracking, mid span deflection, shear capacity, failure patterns were analyzed. The results show that the development trend of the cracks in the RPC beams with upper cross beam is similar to the trend with equal height cross beam, and the crack growth rate is slower than the rate of the direct loading beam. The crack of the main RPC beams with lower cross beams develops rapidly, and arch cracks form on the main beam. The loading pattern has little influence on the stiffness of the RPC beams. The ultimate bearing capacity of the RPC beams with upper or equal height cross beam under indirect loading isn't less than the capacity under direct loading. The tensile damage occurs in main RPC beams with the lower cross beams, which decreases the ultimate bearing capacity by about 25% in comparison with the capacity under direct loading. The cracking load of

收稿日期: 2016-09-26

通信作者: 曹霞(1965-),女,教授,主要从事新型混凝土结构、预应力技术和建筑物加固技术的研究. E-mail: 782343096@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368013); 广西岩土力学与工程重点实验室科研资助项目(2015-A-02); 广西研究生教育创新计划项目(YCSZ2015160)

three beams under indirect loading is approximately 25% greater than the ones under direct loading. The additional transverse rebar is unnecessary in RPC beams with upper or equal height cross beam, the additional transverse rebar with upper or equal height cross beam can be reduced.

Keywords: high strength steel; reactive powder concrete; indirect load; loading position; shear capacity

1993 年,法国 BOUYGUES 公司成功研制出一种具有超高强度、高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料——活性粉末混凝土(reactive powder concrete,RPC)^[1],并引起了国际工程界的重视.国内外已经开展了较多的 RPC 材料性能及构件的试验研究^[2-4],但对间接加载下 RPC 梁的试验研究较少.对于普通混凝土梁,Taylor^[5]试验得出,无腹筋间接加载梁的抗剪强度比直接加载梁降低 0%~70%;Zsutty^[6]指出,有关无腹筋直接加载细长梁抗剪强度的方程,同样适用于无腹筋间接加载梁.冒海智等^[7]运用有限元程序分析了直接加载和 3 种间接加载情况下梁内应力的分布,得出无吊筋间接加载简支深梁的承载力比直接加载时低,降低幅度最大可达 76%;邓海等^[8]对混凝土梁在间接荷载作用下的受力进行了分析,提出在确定附加横向钢筋的数量和位置时,应当考虑横梁与主梁的位置关系对主梁抗剪承载力的影响.我国现行混凝土设计规范^[9]提出对混凝土梁截面高度范围内的集中荷载处配置,宜采用箍筋的形式的附加横向钢筋.本文设计一批间接加载 RPC 试验梁,分析不同加载方式对 RPC 梁裂缝、挠度、抗剪承载力及破坏形态等方面的影响.

1 试验概况

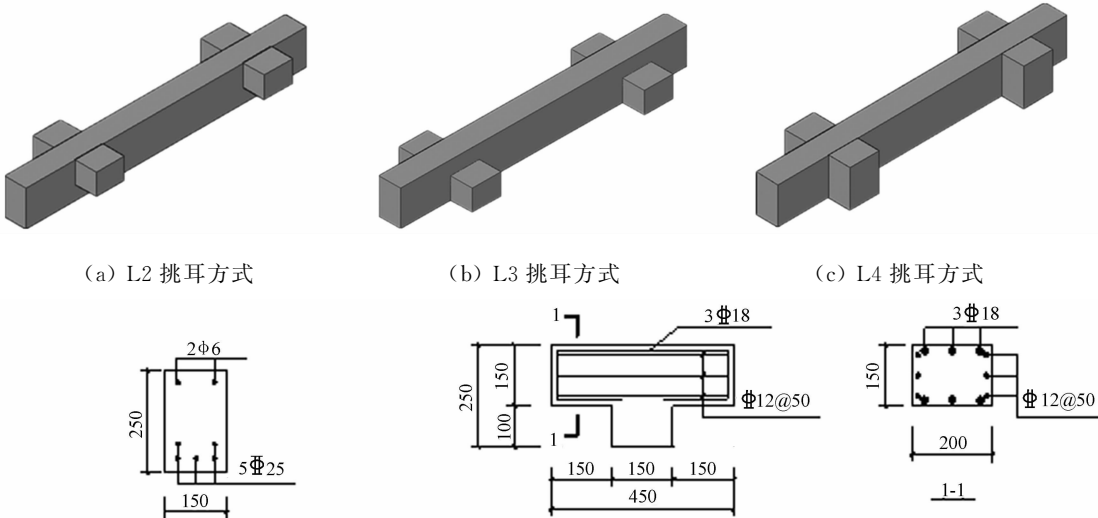
1.1 试件设计

在实际工程中,次梁交于主梁的位置可分为次梁交于主梁的上部、下部,次梁和主梁等高这 3 种梁的相交方式^[10].不同相交方式下,次梁对主梁的作用机理各不相同.

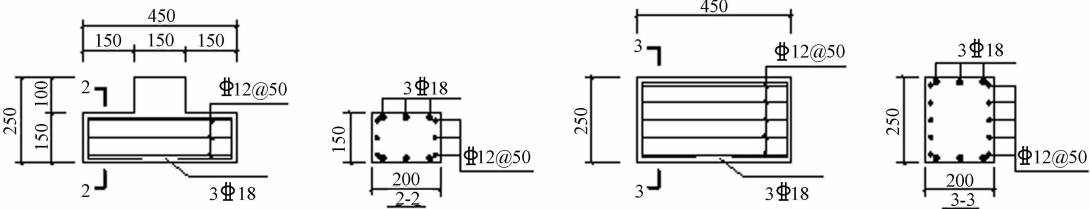
设计了 4 根高强钢筋 RPC 试验梁,采用 L2,L3,L4 等三种挑耳方式分别模拟不同的相交方式,挑耳位置及配筋示意图,如图 1 所示.图 1 中:L1 为直接加载无挑耳对比梁;L2 为挑耳分布于梁上部;L3 为挑耳分布于梁下部;L4 为挑耳分布于梁全截面;无挑耳梁和有挑耳梁的主梁配筋相同,各梁挑耳配筋均一致.

为了避免箍筋以附加横向钢筋的形式对主次梁交界处的混凝土产生套箍作用,准确反映主次梁交界处混凝土的受力状态,4 根试验梁均为无腹筋梁.试验参数(挑耳相对于梁顶的位置):梁跨长为 2 200 mm,截面尺寸为 150 mm×250 mm,剪跨比为 2.25,钢纤维量为 2%.

为了防止试验梁的弯曲破坏先于剪切破坏,配置了较多纵筋,由文献^[11]可知:RPC 适筋梁的最大配筋率可达 10%,故纵筋采用 5 根直径为 25 mm 的 HRB500 级钢,纵筋率为 8.18%.



(d) L1 无挑耳梁及间接加载梁主梁的配筋详图 (e) L2 挑耳配筋详图 (f) L2 挑耳 1-1 截面配筋图



(g) L3 挑耳配筋详图 (h) L3 挑耳 2-2 截面配筋图 (i) L4 挑耳配筋详图 (j) L4 挑耳 3-3 截面配筋图

图 1 挑耳位置及配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Position and reinforcement of cross beam (unit:mm)

1.2 测点布置及加载方案

试验梁采用两点对称集中加载,测点布置及加载装置,如图 2 所示。

1.3 材性试验

根据国家标准 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》规定,浇筑试验梁的同时,浇筑 6 个 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块,6 个 100 mm×100 mm×300 mm 和 3 个 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试块.与试验梁同条件下养护 28 d 后,测得立方体试块的力学性能,如表 1 所示.表 1 中: f_{cu} 为抗压强度; f_c 为轴心抗压强度; f_t 为劈裂抗拉强度; f_l 为抗折强度; E 为弹性模量; σ_y , σ_u 分别表示钢筋的屈服强度和极限强度。

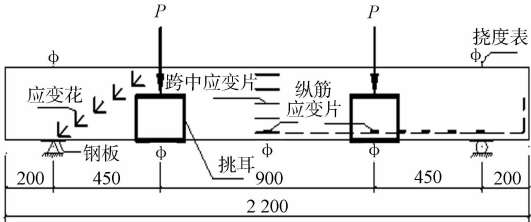


图 2 试件测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Measuring points of specimen (unit:mm)

表 1 材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of material

参数	PRC 立方体试块					钢筋	
	f_{cu}	f_c	f_t	f_l	E	σ_y	σ_u
数值	147.5	120.2	8.0	24.1	45.8×10^4	548	728

2 试验结果及分析

2.1 试验裂缝及破坏形态描述

4 根试验梁的试验结果,如表 2 所示.表 2 中: P_{cr} 为开裂荷载; P_{sls} 为裂缝宽度为 0.3 mm 时的荷载; P_u 为极限荷载; w_{max} 为最大裂缝宽度; θ_w 为最大裂缝倾角; γ_u 为破坏时挠度.试验梁的裂缝示意图,如图 3 所示.以 L3(挑耳分布于梁下部)为例,描述试验梁的裂缝发展情况和破坏形态。

表 2 梁加载试验结果

Tab. 2 Test results of beam

梁编号	P_{cr}/kN	P_{sls}/kN	P_u/kN	w_{max}/mm	$\theta_w/(\text{^\circ})$	γ_u/mm	破坏形式
L1	250.5	529.1	901.0	10.0	50	16.64	剪压破坏
L2	314.1	760.7	916.0	6.2	45	14.86	剪压破坏
L3	316.0	512.6	670.0	2.1	35	11.28	剪压破坏为主、兼有拉脱破坏
L4	310.2	729.6	914.0	18.0	45	17.42	剪压破坏

荷载施加到 93.2 kN 时,梁底部跨中区域出现首条竖向裂缝,宽 0.01 mm;加载到 316 kN 时,剪跨区出现斜裂缝,宽 0.02 mm;当荷载施加到 512.6 kN 时,能够听到钢纤维被拔出的吱吱声,其中最宽的裂缝宽度为 0.32 mm,达到了正常使用的极限值;荷载增加到 670.4 kN 的时候,伴随的“嘣”的一声巨响,试验梁破坏,最大主斜裂缝的宽度达到 2.06 mm,裂缝方向与水平方向大致呈 35° 的方向。

L3 的跨中上部出现了几乎水平的裂缝.这种裂缝从剪跨区开始出现,随着荷载的增加而发展,跨过挑耳,伸展到跨中段,不同于直接加载梁的裂缝止于加载点附近.根据裂缝形态,可以判断该裂缝是由于拉脱破坏所致,表明此处的混凝土受拉.从梁的整体破坏状态看,裂缝在梁上呈现出一个完整的拱形状,

试验梁发生剪压破坏,并兼有拉脱破坏(图 4(c)),与其他 3 根试验梁的破坏形态有明显区别。

仔细分析表 3 的试验结果及图 3 试验梁裂缝示意图,发现如下 3 点规律。

1) 从裂缝宽度看,L3 的最大裂缝宽度为 2.06 mm,远小于其他 3 根试验梁.这说明 L3 的裂缝还没有得到充分开展时,试验梁就已经发生了破坏,呈现一定脆性破坏的特征,其对应的极限荷载和最大挠度也比其他 3 根梁挠度小,此种挑耳设置方式不可取。

2) 从裂缝图走势看,L3 不同于其他 3 根梁的裂缝走势.首先,L3 的主斜裂缝倾角为 35°,比其余 3 根梁低 10°左右;其次,L3 的裂缝从支座处开始延伸,跨过挑耳后,上升趋势逐渐变缓,到达跨中后趋于水平状,裂缝不再向梁顶发展.此时,裂缝的最高处距离梁顶尚有 5 cm 左右,但是其余 3 根梁的裂缝从支座处开始一直向上发展,直到梁顶,其间并没有变缓的趋势,也未形成水平裂缝,裂缝最高处几乎达到梁顶.这说明 L3 顶部混凝土的抗剪承载力并没有完全发挥出来,形成了拱形裂缝,有效截面高度 h_0 降低,最终导致承载力降低,发生拉脱破坏。

3) 由图 3 可知,挑耳的位置虽然不同,但 L2,L4 和 L1 试验梁的主裂缝破坏形式类同,均为剪压破坏.L2,L4 在主斜裂缝宽度达到正常使用状态限值后,裂缝向加载点发展并延伸至挑耳上.破坏时,L1,L2 和 L4 的倾斜角相近,分别为 50°,45°和 45°。其中,L4 破坏端的最大裂缝宽度远远大于其余 3 根梁。

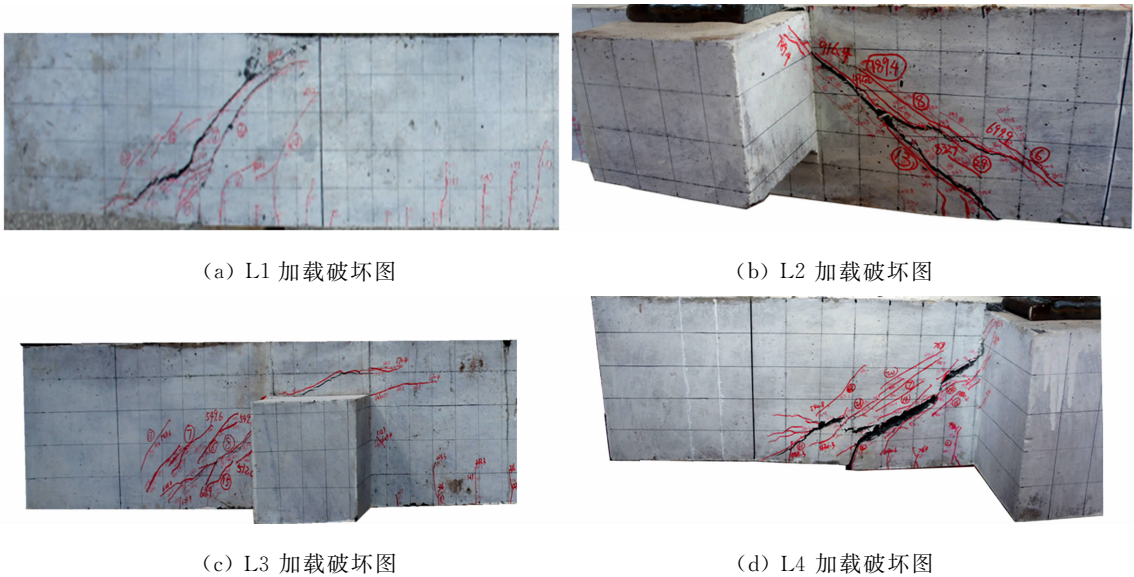


图 3 试验梁裂缝示意图
Fig. 3 Schematic diagram of cracks in beam

2.2 荷载-斜裂缝宽度分析

试验梁的荷载-斜裂缝宽度($P-w$)曲线,如图 4 所示.由图 4 可知:加载初期,混凝土处于弹性阶段,直接加载梁的斜裂缝细微,间接加载的试验梁并未出现斜裂缝;当荷载达到 400 kN 后,L1 和 L3 的斜裂缝宽度发展迅速;而加载到 500~600 kN 时,L1 进入正常使用阶段,裂缝开裂速度急剧增加;当荷载约为 750 kN 时,L3 已经破坏,L2 和 L4 达到正常使用阶段,裂缝宽度开展速度增加,与 L1 相近。

从曲线整体走向发现:挑耳在上和挑耳同梁等高的梁,其斜裂缝发展趋势相近,但增长速度比直接加载梁较慢.当裂缝宽度小于等于 0.6 mm 时,直接加载和挑耳在下部的试验梁的裂缝发展趋势相近,但由于 L3 所受的集中荷载位于梁底部的挑耳处,受到更大的拉力,其裂缝迅速发展,随后构件破坏。

2.3 荷载-挠度曲线分析

试验梁的荷载-挠度($P-\gamma$)曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:4 根试验梁在钢筋屈服前基本处于线弹性阶段,曲线的斜率变化不大,说明试验梁的刚度变化很小.这是因为 RPC 按照最大密实度理论进行配制,掺入活性材料硅灰,不含粗骨料,并进行高温高压养护,消除了砂浆与粗骨料之间的薄弱区域;钢纤维掺入 RPC 中更为匀质,起到更好的“桥架”作用^[12],更有效抑制裂缝的发展。

加载初期,挑耳位置对梁的挠度几乎没有影响,4 根试验梁的挠度发展趋势基本相同;随着荷载增加,挑耳位于梁下部的试验梁,最大挠度值明显小于其余 3 根梁,这是由于 L3 的极限承载力小于其他 3

根梁;当荷载达到最大值时,梁的挠度都有一个突然增大的过程,达到最大荷载后,梁突然被剪坏,曲线没有明显的下降段.这主要有两个原因,一方面,因为 4 根试验梁都属于无腹筋梁,抗剪承载力全部来自混凝土,梁整体呈脆性材料特征;另一方面,钢纤维对梁裂缝的阻碍作用有限,随着荷载的增加,钢纤维不断被拔出混凝土,当达到临界状态后,裂缝急剧发展,钢纤维的作用失效,试验梁随即破坏.4 根曲线的斜率相差很小,可见挑耳位置对梁的刚度影响较小.

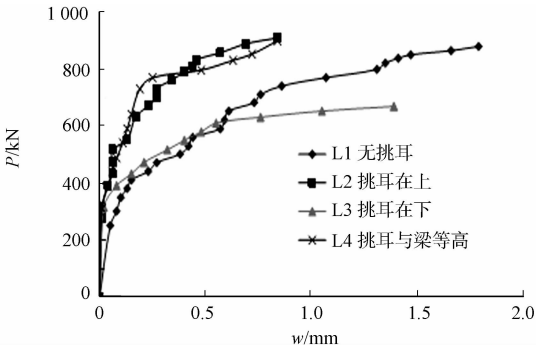


图 4 荷载-斜裂缝宽度曲线
Fig. 4 Load-inclined crack width curve

2.4 承载力分析

2.4.1 挑耳位置对承载力的影响分析 试验梁的斜截面受剪开裂荷载和极限荷载的变化,如图 6 所示.对比表 2 和图 6,可以得到以下 4 点结论.

1) 相对于直接加载梁,挑耳在下的 RPC 梁极限承载力降低了 25.6%,挑耳在上和挑耳同梁等高梁的极限承载力提高 1.7%和 1.4%.可见挑耳在上和挑耳同梁等高的加载方式对梁的极限承载力影响很小,挑耳在下的间接加载方式对梁的极限承载力影响最大,这种加载方式应尽量避免.

2) L3 的极限荷载要比其余 3 根梁降低 28%左右,表明间接荷载施加在主梁下部的情况对主梁承载力的降低作用比较显著.这是施加在挑耳上的荷载对主梁产生向下的拉力所致.

从破坏时的裂缝图可知:L3 挑耳附近产生了水平裂缝,拉脱破坏导致水平裂缝,使梁的承载力降低;而 L1,L2,L4 的荷载极限值相近,说明挑耳位于梁上部及挑耳同梁等高的情况对梁的承载力几乎没有影响,可忽略不计.

3) 间接加载梁 L2,L3,L4 的开裂荷载比较接近,且均比直接加载梁的开裂荷载还高 25%,说明间接加载使梁的开裂荷载提高.这是由于荷载传力路线没有那么直接,作用效应滞后于直接加载梁.

4) 当裂缝宽度为 0.3 mm 时(表 2),试验梁 L1 和 L3 的荷载值比较接近,L2 和 L4 比较接近,且 L2,L4 比 L1,L3 的荷载值高 38%左右,即挑耳在梁上部和挑耳同梁等高的情况能明显提高梁正常使用极限状态的荷载值,这也是间接加载导致荷载传力滞后的结果;而挑耳在梁下部时,由于梁下部拉力的影响,这种滞后效应减弱.

2.4.2 RPC 梁和普通混凝土梁在间接加载下的对比分析 RPC 梁与普通钢筋混凝土梁^[13]的间接加载下对比试验,如表 3 所示.表 3 中: r 为抗剪承载力降低率;两种混凝土梁均为无腹筋;负值代表荷载的提高;普通混凝土无腹筋梁挑耳在上部的情况,由于试验配置了吊筋,因此不具可比性.

由表 3 可知:间接加载对挑耳在上部和挑耳同梁等高 RPC 梁的承载力并没有降低,在挑耳处可不

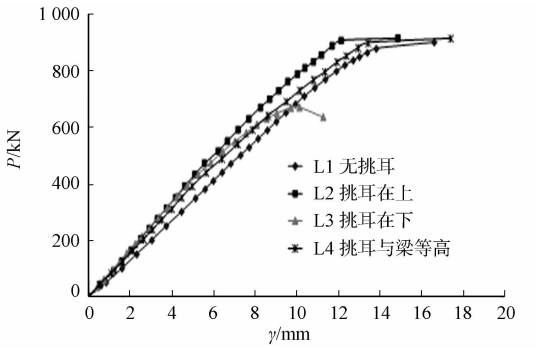


图 5 荷载-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves

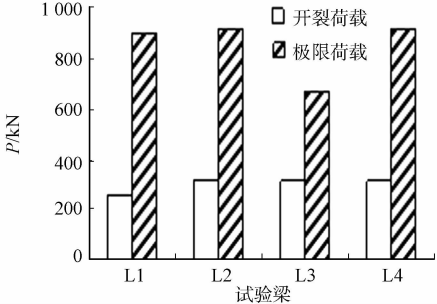


图 6 斜截面受剪开裂荷载和极限荷载的柱状图
Fig. 6 Histogram of inclined cracking load and ultimate load

表 3 混凝土梁间接加载承载力的比较
Tab. 3 Comparison of share capacity of concrete beams under indirect loading

梁种类	$r/\%$		
	挑耳在梁上部	挑耳在梁下部	挑耳同梁等高
RPC	-1.70	25.60	-1.40
普通混凝土	-	63.52	18.70

设置附加横向钢筋;挑耳在梁下部的RPC梁,间接加载对其承载力的降低远小于普通钢筋混凝土梁,挑耳处可减少附加横向钢筋的配置,这主要得益于RPC致密的内部结构和钢纤维的阻裂效果。

3 结论

1) 挑耳在上部的RPC间接加载梁的裂缝发展走势及速度与挑耳同梁等高的RPC梁相似;挑耳在下部的试验梁裂缝发展迅速,且倾角相比其他试验梁较小,间接加载对RPC梁的刚度影响不大,挑耳在下部的加载方式由于拉力作用,使RPC梁的最大挠度明显降低。

2) 4根试验梁的破坏形式均为剪压破坏,挑耳在梁下部的L3除发生剪压破坏还伴随一定程度的拉脱破坏,其极限承载力、最大挠度和最大裂缝宽度都比其他3根试验梁低,表明挑耳在梁下部的间接加载对梁受剪性能的影响最大。

3) 挑耳在下部的间接加载使RPC梁的极限抗剪承载力下降26%,挑耳在上部及挑耳同梁等高的间接加载对RPC梁的极限抗剪承载力影响很小,间接加载对RPC梁承载力的降低作用远小于普通钢筋混凝土梁。

4) 由于RPC梁优异的材料组成结构和钢纤维的阻裂作用,挑耳在梁上部及挑耳同梁等高的RPC梁在挑耳处可不配置附加横向钢筋,而挑耳在梁下部的RPC梁挑耳处可减少附加横向钢筋的配置量。

参考文献:

- [1] RICHARD P. Reactive powder concrete: A new ultra-high strength cementitious material[C]//The 4th International Symposium on Utilization of High Strength/Hugh Performance Concrete. Paris: Presses des Ponts et Chaussées, 1996: 1343-1349.
- [2] 郑文忠,吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 44-58.
- [3] 金凌志,周家亮,李月霞,等. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊2): 277-285.
- [4] VOO Y L, STEPHEN J, GILBERT R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 123-132.
- [5] TAYLOR R. Some aspects of the problem of shear in reinforced concrete beams without shear reinforcement[J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1960, 36(12): 145-154.
- [6] ZSUTTY T. Shear strength predication for separate categories of simple beam tests[J]. ACI Journal, 1971, 68(2): 138-143.
- [7] 冒海智,钱国梁,朱瞰. 钢筋混凝土深梁集中间接加载试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 1990, 23(4): 23-30.
- [8] 邓海,吕鹏,孙素景. 梁在间接加载情况下附加横向钢筋设计探讨[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2003, 16(3): 45-47.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 120-122.
- [10] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 289-290.
- [11] 郑文忠,李莉,卢珊珊. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 125-133.
- [12] 张宏战,黄承逵. 钢筋钢纤维高强混凝土箍筋梁剪切延性分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3): 422-426.
- [13] 王祖华. 间接加载钢筋混凝土梁的抗剪强度[J]. 土木建筑与环境工程, 1981(1): 57-81.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)