

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701007



配箍率对不同剪跨比 RPC 梁 受剪性能的影响分析

金凌志, 周家亮, 蒋春松, 梅臣, 陈璇

(桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了探究不同剪跨比下配箍率对高强钢筋活性粉末混凝土(RPC)简支梁受剪性能的影响,对两组剪跨比(2.25,3.0)共 6 根不同配箍率的 HRB500 级钢筋 RPC 梁进行受剪性能试验,验证试验梁截面应变平截面假定,分析斜裂缝形态、开裂荷载与配箍率及剪跨比的关系,并提出基于修正压力场理论的 HRB500 级钢筋纤维 RPC 梁抗剪承载力的计算程序.研究表明:两组不同剪跨比下的试验梁在加载初始阶段均符合平截面假定,但达到 40.4%极限荷载后,这种假定将不再满足;高强钢筋 RPC 梁的斜裂缝形态主要以腹剪型斜裂缝为主,其产生与配箍率及剪跨比相关,配箍率和剪跨比越大越不易产生主斜裂缝,但剪跨比的影响明显大于配箍率;基于修正压力场理论的计算程序比较适用于钢纤维高强钢筋 RPC 梁抗剪承载力的计算,其计算值与试验值吻合良好.

关键词: 活性粉末混凝土;简支梁;剪跨比;配箍率;修正压力场理论

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)01-0038-07

Influence of Stirrup Ratio on Shear Behavior of RPC Beams Under Different Shear Span Ratio

JIN Lingzhi, ZHOU Jialiang, JIANG Chunsong,
MEI Chen, CHEN Xuan

(Key Laboratory of Guangxi Geotechnical and Geotechnics Engineering,
Guilin University of Science and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to discuss the influence of stirrup ratio on shear behavior of reactive powder concrete (RPC) simply supported beams with high-strength stirrups under different shear span ratio, six RPC beams with different stirrup ratio under two different shear span ratio (2.25 and 3.0) were experimented to verify the plane-section assumption of strain, to analyze the relationship among the shape of the inclined crack, the crack load, the shear span ratio and the stirrup ratio, then the calculation program of shear capacity of the steel fiber RPC beams with HRB500 stirrups were proposed based on the modified compression field theory (MCFT). It is showed that the two groups of test beams with different shear span ratio are in agreement with the plane-section assumption at the initial stage of loading, but this assumption is not valid when the load is over 40.4% of the ultimate value. The oblique cracks of RPC beams with high-strength stirrups are mainly the web-shear crack, which is related to the stirrup ratio and shear span ratio. As the shear span ratio and stirrup ratio increase, the main diagonal cracks occur seldom, the influence of shear span ratio is greater than stirrup ratio. This calculation program is suitable for the shear capacity of steel fiber reinforced high strength RPC beams

收稿日期: 2016-07-17

通信作者: 金凌志(1959-),女,教授,主要从事新型材料混凝土结构的研究. E-mail:jlz-5904@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368013);广西重点实验室科研基金资助项目(2015-A-02)

based on the modified compression field theory, the calculated values agree well with the test results.

Keywords: reactive powder concrete; simply supported beams; shear span ratio; stirrup ratio; modified compression field theory

自活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)问世以来,国内外学者始终在探究其材料乃至构件的力学性能. VOO 等^[1-2]通过 7 根预应力 RPC 无腹筋梁的受剪性能试验研究,认为预应力变化、钢纤维种类及掺量的变化对受剪承载力的影响显著;徐海斌等^[3]通过对超高性能混凝土梁抗剪承载力计算方法的对比分析,对修正压力场理论的相关方程进行了修正,从而得到了适合计算超高性能混凝土梁抗剪承载力的相关方程,但修正压力场理论的计算结果相对比较保守. 金凌志等^[4]对 4 根 HRB500 级钢筋 RPC 简支梁进行受剪性能试验,并基于试验数据建立了高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力计算公式. 但目前专门针对不同剪跨比条件下的高强钢筋 RPC 梁受剪性能的研究还比较少. 因此,本文选取两种剪跨比条件下,以配箍率为主要参数,进行 6 根高强钢筋 RPC 简支梁的受剪性能试验研究,并提出基于修正压力场理论的钢纤维高强钢筋 RPC 梁受剪承载力的计算方法.

1 试验概况

1.1 试验设计

共设计 6 根 2 组剪跨比 HRB400 级高强箍筋简支梁,一组剪跨比 $\lambda=2.25$,另一组 $\lambda=3.0$,主要研究对象为配箍率. 截面形状均为矩形, $b\times h=150\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,梁长为 2 200 mm,计算跨度为 1 800 mm. 为了保证剪跨区的剪切破坏先于跨中弯曲破坏,在梁底部配置了 5 根直径为 25 mm 的 HRB500 级纵筋. 试件配筋图,如图 1 所示,试件 L5 配筋与试件 L2 相同. 试件主要参数,如表 1 所示. 其中: λ 为剪跨比; h_0 为有效高度; ρ_f 为钢纤维体积掺量; ρ_{sv} 为配箍率; ρ_s 为纵筋率.

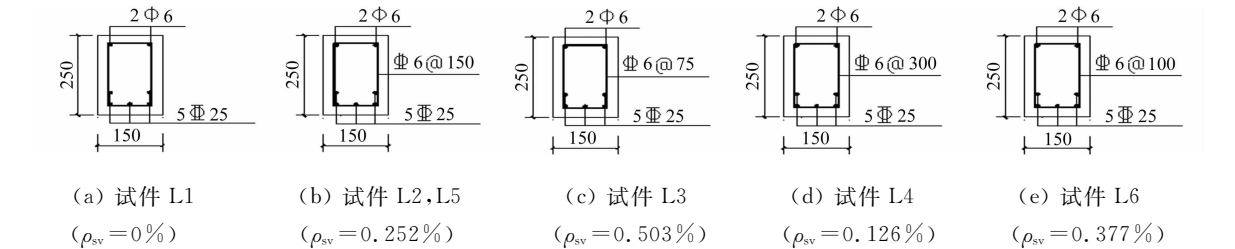


图 1 试件配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement detail of specimen (unit:mm)

表 1 试验梁主要参数

Tab. 1 Main parameters of test beams

试验分组	试件编号	h_0 /mm	λ	ρ_f /%	箍筋	ρ_{sv} /%	纵筋	ρ_s /%
第 1 组	L1	200	2.25	2	无腹筋	0	5Φ25	8.18
	L2	200	2.25	2	6@150	0.252	5Φ25	8.18
	L3	200	2.25	2	6@75	0.503	5Φ25	8.18
第 2 组	L4	200	3.00	2	6@300	0.126	5Φ25	8.18
	L5	200	3.00	2	6@150	0.252	5Φ25	8.18
	L6	200	3.00	2	6@100	0.377	5Φ25	8.18

1.2 试验材料

1.2.1 原材料 RPC 主要原材料:42.5 硅酸盐水泥;石英砂,粒径范围为 0.36~0.60 mm;石英粉,平均粒径为 40 μm ;微硅粉,比表面积为 $2.0\times 10^4\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$,平均粒径范围为 0.1~0.2 μm ;硅微粉,粒径在 2 μm 以下,平均粒径为 0.31 μm ;镀铜光面平直钢纤维,长径比为 64,抗拉强度大于 1.2 GPa;C900 聚羧酸高效减水剂,减水率为 25%.

1.2.2 试验配比 经筛选多组配比,选择的 RPC 配合比,如表 2 所示.表 2 中:钢纤维为体积分数,其他均为质量分数.

表 2 活性粉末混凝土配合比

Tab. 2 Mixture ratio of reactive powder concrete

%

材料	42.5 普通硅盐水泥	石英砂	微硅粉	石英粉	硅微粉	钢纤维	小组分	水
配合比	1.000	0.900	0.350	0.200	0.350	2.000	0.125	0.250

1.3 材料力学性能

1.3.1 混凝土力学性能 参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》，测得 RPC 试块的立方体(100 mm)和棱柱体(100 mm×100 mm×300 mm)的抗压强度 f_{cu} 和 f_c 分别为 150.8,144.5 MPa,弹性模量 E_c 为 4.55 MPa,棱柱体(100 mm×100 mm×400 mm)的劈裂强度 f_{cra} 为 7.96 MPa.

1.3.2 钢筋力学性能 参照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》进行测试,HRB500 级受力纵筋和 HRB400 级箍筋的力学性能,如表 3 所示.表 3 中: d 为直径; f_y , f_u 分别为屈服强度和极限强度; E_s 为弹性模量.

表 3 钢筋拉伸试验结果

Tab. 3 Tensile test results of steel bar

强度等级	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/TPa
HRB500	25	548	728	0.2
HRB400	6	472	663	0.2

1.4 测点布置

测点布置图,如图 2 所示.测点采用四分点单调静态加载,试验梁的加载在裂缝宽度小于 0.3 mm 前,按 10% 极限荷载分级加载;裂缝即将出现时,按 5% 加载;裂缝出现后,再按 10% 加载;裂缝宽度临近承载力极限状态下所允许的 1.5 mm 时,再按 5% 加载,直至破坏.每级荷载的加载间歇时间 15 min,使各仪表读数趋于稳定,以便读取记录数据.在箍筋、纵筋及 RPC 的剪跨段均粘贴电阻应变片,通过静态应变测试系统采集应变数据,支座及跨中均布置位移计测量试验梁的挠度.

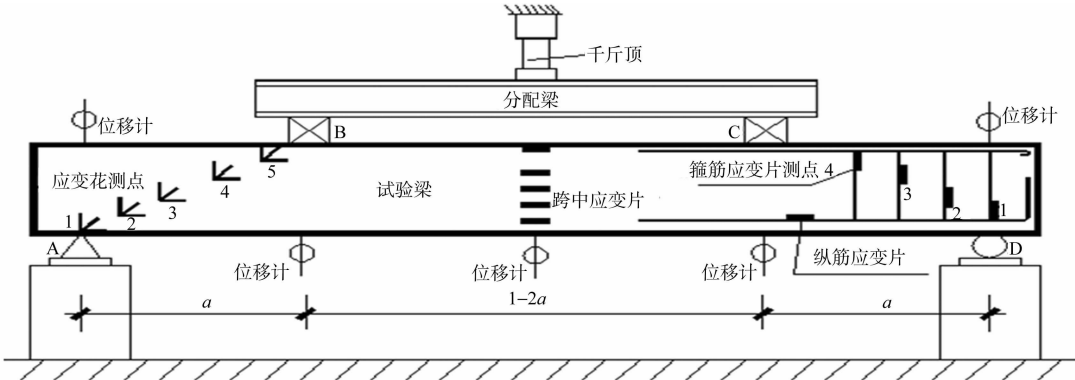


图 2 测点布置图

Fig. 2 Test point arrangement

2 试验结果及分析

2.1 平截面假定分析

部分试验梁的跨中正截面混凝土应变分布情况,如图 3 所示.图 3 中: h 为距梁底的距离; ϵ 为应变.

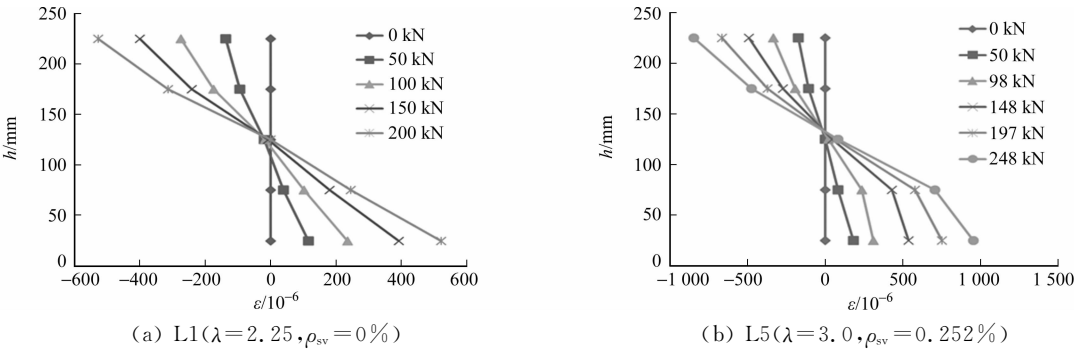


图 3 部分试验梁的跨中截面应变

Fig. 3 Mid-span section strain of some specimens

由图 3 可知:在加载初始阶段均符合平截面假定,但 RPC 开裂后,由于位于构件底端的应变迅速增大,应变很快超出量程而无法测得.普通钢筋混凝土梁没掺入钢纤维,开裂后混凝土裂缝处的应力为 0^[5],梁发生内力重分布,平截面假定失效^[6].RPC 试验梁达到一定荷载后产生弯剪裂缝,位于底端的混凝土首先开裂,开裂处钢纤维应力突增,钢纤维逐渐被拔出,微裂缝继续向上发展,钢纤维一旦屈服该处混凝土的应力也趋于 0,其平截面假定不再成立.但这种现象明显晚于普通钢筋混凝土梁.

由图 3 还可知:试块截面的混凝土上下应变相差不大,说明在荷载较小时,所有试验梁均基本符合平截面假定,但是加载到极限荷载的 20.5%~40.4%时,混凝土应变不再保持平面,平截面假定失效.由于试验构件数量有限,这种平截面假定失效的加载值有待进一步界定.

2.2 斜裂缝形成及发展

试验梁的破坏形态,如图 4 所示.由图 4 可知:所有试验梁均产生斜裂缝,其中,L1~L4 的主斜裂缝比较明显.试验梁之所以产生具有一定间距的斜裂缝,主要是由于梁中箍筋与纵筋的作用^[5].

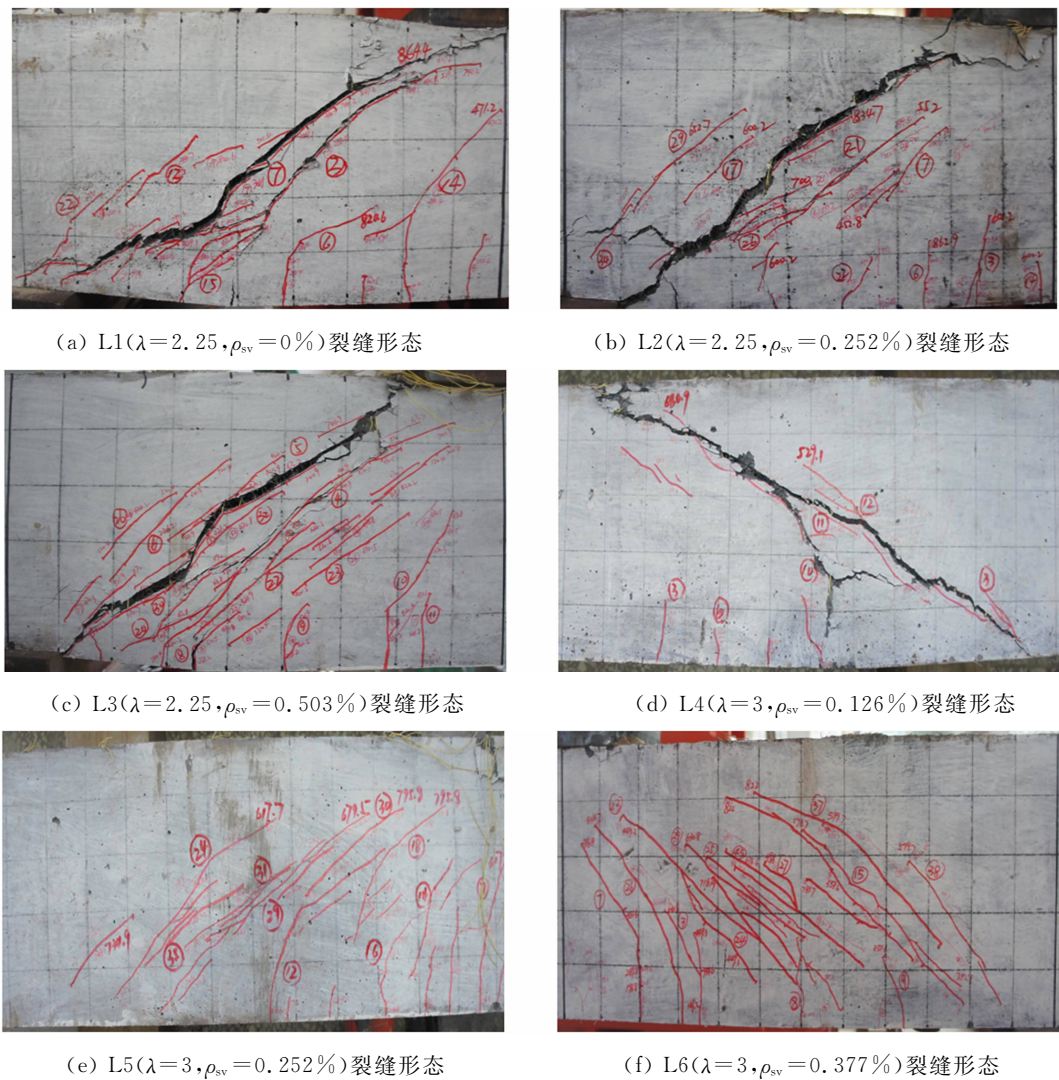


图 4 试验梁破坏形态

Fig. 4 Failure form of beams

钢筋混凝土受力单元体的受力分析,如图 5 所示.由图 5 可知:垂直于钢筋方向的混凝土受到正应力和剪应力,从而使单元体受力达到平衡,当混凝土应力超过其开裂荷载对应的开裂应力后即出现裂缝.斜向裂缝的发展具有一定的间距,可从钢筋纵、横方向应力角度分析,若试件只受纵向水平应力,则产生的平行箍筋分部竖向裂缝,若试件只受横向应力,则产生平行于纵筋的水平裂缝,两种钢筋应力及混凝土应力的叠加最后形成图 5 所示的斜裂缝.6 根试验梁受力后,均首先在剪跨区中部出现腹剪裂缝,而后裂缝向两端发展.

高强钢筋 RPC 梁的斜裂缝形态以腹剪型斜裂缝为主,主要是由于 RPC 具有较高的抗压强度,纵筋率较大,试验梁底部的纵筋产生了较强的销栓作用,明显增大了梁的底部刚度,故裂缝率先从刚度较为薄弱的梁腹部产生. 临界主斜裂缝的形成与剪跨比和配箍率均相关,剪跨比为 2.25 的 L1~L3,配箍率分别为 0%,0.252%,0.503%,均产生主斜裂缝. 剪跨比为 3.0 的试验梁,只有配箍率为 0.126%的 L4 产生主斜裂缝,而配箍率较高的 L5,L6(ρ_{sv} 为 0.252%,0.377%)并没有形成主斜裂缝. 上述两组试验梁表明,剪跨比和配箍率越大都越不容易产生主斜裂缝,但是相对配箍率而言,剪跨比的影响更大.

2.3 配箍率-开裂荷载曲线

剪跨比 λ 为 2.25 和 3.0 的配箍率(ρ_{sv})-开裂荷载(f_{cr})影响曲线,如图 6 所示. 由图 6 可知:剪跨比为 2.25 的试验梁,开裂荷载曲线近似为一条水平直线,变化幅度很小,而剪跨比为 3.0 的曲线变化幅度相对稍大,但二者的开裂荷载基本接近. 表明配箍率对两组剪跨比下,试验梁的开裂荷载影响甚微. 究其原因是斜裂缝出现前,拉应力主要由 RPC 承担,箍筋受力很小,甚至可以忽略;但裂缝发展到与箍筋相切的位置时,箍筋的应力突然增大,开始承担大部分拉应力,使得混凝土所受的应力大为减小,因而抑制了斜裂缝的发展.

3 受剪承载力计算

研究表明,将经典的修正压力场理论直接应用于 RPC 梁计算将导致受剪承载力的计算值与试验值相差较大^[7]. 这主要由于普通混凝土的本构模型并不适用于 RPC,普通混凝土强度相对较低,且未加入钢纤维,其本构关系过于保守,低估了 RPC 的抗拉和抗剪承载力. RPC 具有较高的强度,且掺入的钢纤维能有效提高梁的受剪承载力^[8],因此,需要将 RPC 主拉、主压应力-应变的本构关系进行修正.

主拉应力-应变的本构关系为

$$f_1 = \begin{cases} E_c \epsilon_1, & \epsilon_1 \leq \epsilon_{cr} \\ \frac{(f_{cr} + \varphi f_{tp})}{1 + \varphi} = \frac{(1 + k\varphi) f_{cr}}{1 + \varphi}, & \epsilon_1 > \epsilon_{cr} \end{cases} \tag{1}$$

主压应力-应变的本构关系为

$$f_2 = f_{2max} [2(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0}) - (\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0})^2]. \tag{2}$$

式(1),(2)中: f_1 为 RPC 主拉应力; E_c 为 RPC 弹性模量; f_{cr} 为 RPC 抗拉初裂强度; $\varphi = \sqrt{\frac{\epsilon_1 - \epsilon_{cr}}{0.005}}$, ϵ_{cr} 为 RPC 抗拉初裂应变, $\epsilon_{cr} = f_{cr}/E_c$,初裂强度取试验值 7.96 MPa; ϵ_1 为 RPC 主拉应变; f_{tp} 为 RPC 开裂后钢纤维的有效拉应力,为简化计算,设 $f_{tp} = k f_{cr}$,取 $k = 0.5$.

箍筋、纵筋的本构关系均采用弹性-全塑性曲线,如图 7 所示,其表达式为

$$\sigma_{sl} = \begin{cases} E_s \epsilon, & \epsilon < \epsilon_s \\ \sigma_s, & \epsilon \geq \epsilon_s \end{cases} \tag{3}$$

将式(1)~(3)代入编制的修正压力场理论计算程序,运行流程^[9]如下:

1) 读取试验梁各参数;

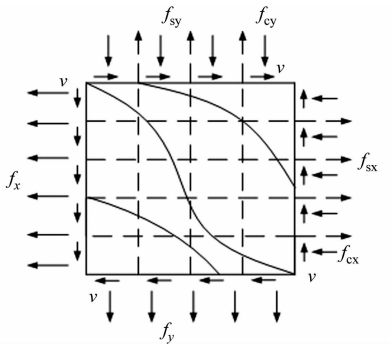


图 5 试验梁受力分析

Fig. 5 Force analysis of beams

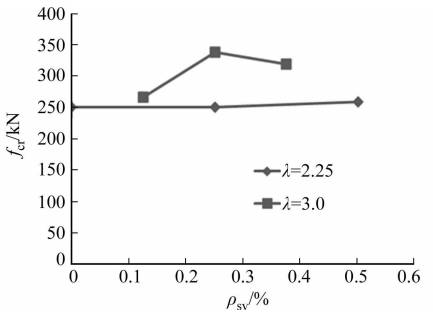


图 6 配箍率对斜截面开裂荷载的影响

Fig. 6 Influence of stirrup ratio on crack load in inclined section

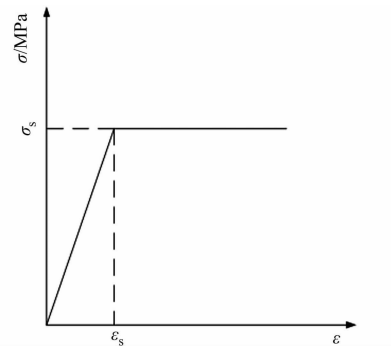


图 7 钢筋应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of steel bar

- 2) 选择初始主拉应变 ϵ_1 (一般取 0.001);
 - 3) 选择合适的斜裂缝倾角 θ 值;
 - 4) 由式 $s_{m,\theta} = \frac{1}{\sin \theta / s_{m,x} + \cos \theta / s_{m,y}}$ 和 $\omega = \epsilon_1 s_{m,\theta}$ 求得 ω ;
 - 5) 选择箍筋应力 f_v ;
 - 6) 当 $\epsilon < \epsilon_{cr}$ 时取 $f_1 < E_c \epsilon_1$, 当 $\epsilon_1 > \epsilon_{cr}$ 时取 $f_1 = \frac{(1+k\varphi)f_{cr}}{1+\varphi}$;
 - 7) 由 $v = \frac{A_v f_v}{s} (h_0 - a_s) \cot \theta + f_1 b_w (h_0 - a_s) \cot \theta$ 求出剪力 v ;
 - 8) 由 $\frac{f_{2,max}}{f_c} = \frac{1}{0.8+170\epsilon_1} \leq 1$ 求出 $f_{2,max}$;
 - 9) 判断是否满足 $f_2 \leq f_{2,max}$, 是则继续运算, 否则混凝土被压碎, 结束程序;
 - 10) 由 $\epsilon_2 = \epsilon_c [1 - \sqrt{1 - f_2 / f_{max}}]$ 求出 ϵ_2 ;
 - 11) 由 $\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 \tan^2 \theta + \epsilon_2}{1 + \tan^2 \theta}$ 和 $\epsilon_y = \frac{\epsilon_2 \tan^2 \theta + \epsilon_1}{1 + \tan^2 \theta}$ 求出 ϵ_x 和 ϵ_y ;
 - 12) 判断是否满足 $f_v = E_s \epsilon_y \leq f_{sy}$, 是则继续进行构件受弯阶段的计算, 否则返回步骤 5) 重取 f_v ;
 - 13) 计算 $M = V \times a$;
 - 14) 根据混凝土平截面假定选择合适的混凝土压应变 ϵ_t (从 0 开始叠代计算);
 - 15) 由 $\beta_1 = \frac{4 - \epsilon_t / \epsilon_c}{6 - 2\epsilon_t / \epsilon_c}$ 求得 β_1 , 由 $\alpha_1 \beta_1 = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_c} - \frac{1}{3} (\frac{\epsilon_t}{\epsilon_c})^2$ 求得 $\alpha_1 \beta_1$;
 - 16) 由 $x_c = h \epsilon_t / (2\epsilon_t + 2\epsilon_c)$ 求得 x_c ;
 - 17) 由 $M_1 = \alpha_1 \beta_1 f'_c x_c b_w (h_0 - \beta_1 x_c / 2) + E'_s A'_s (h_0 - a_s) (1 - a_s / x_c) \epsilon_t$ 求出弯矩;
 - 18) 判断外力产生的弯矩 M 是否等于 M_1 , 满足则继续运算, 不满足则返回步骤 14) 重新取 ϵ_t ;
 - 19) 验证轴力 $N = N_p - (V \cot \theta - f_1 b_w h_0)$ 是否满足 $N = 0$, 满足则结束程序, 不满足则返回步骤 3)
- 重新选定斜裂缝倾角 θ 值;
- 20) 输出承载力等各计算参数.

以上公式中, 无腹筋梁 L1 按有腹筋程序进行计算, 箍筋间距取剪跨长 450 mm; $s_{m,\theta}$ 为斜裂缝间长度; $s_{m,x}, s_{m,y}$ 分别代表水平、竖直方向的裂缝间长度; $s_{m,x}$ 取为箍筋间距; $s_{m,v}$ 取上部纵筋到分布钢筋间的距离; h_0 为截面有效高度, b_w 为试件宽度; ϵ_c 为 RPC 极限压应变, 取 0.003 18; ϵ_t 为假定的混凝土压应变; ϵ_x, ϵ_y 为试件水平、竖直方向的平均应变; f_{sy} 为箍筋屈服强度, 取实测值 472 MPa; x_c 为 RPC 截面受压区高度; M_1, M 分别为内、外力产生的力矩; N_p 为弯矩产生的轴力; 其他参数同上. 考虑到程序的收敛性, 在验证轴力 N 及内外弯矩 $M_1 - M$ 是否为 0 时, 取相对误差足够小即满足要求.

将试验梁数据及文献[10]数据代入编写的 Fortran 程序, 计算结果如表 4 所示. 表 4 中: MCFT 为按以上程序计算的修正压力场理论计算值; V_{cr}, V_{ex} 分别为开裂荷载、抗剪承载力的试验值.

表 4 修正压力场理论程序计算值与试验值对比一览

Tab. 4 Shear bearing capacity comparison between program calculation value of MCFT results and test results							
来源	试件编号	$b \times h / \text{mm} \times \text{mm}$	剪跨长/mm	V_{cr} / kN	MCFT/kN	V_{ex} / kN	V_{ex} / MCFT
文中	L1	150×250	450	125.20	377.2	450.50	1.194
	L2	150×250	450	125.40	417.5	502.50	1.204
	L3	150×250	450	129.85	465.8	529.20	1.136
	L4	150×250	600	133.45	371.7	354.65	0.954
	L5	150×250	600	169.20	437.2	418.30	0.957
	L6	150×250	600	159.95	429.8	421.70	0.981
文献[10]	JZL-1	150×250	450	—	379.4	356.25	0.939
	JZL-2	150×250	450	—	392.7	419.25	1.068
	JZL-3	150×250	450	—	412.7	430.85	1.044
	JZL-4	150×250	450	—	452.9	426.25	0.941

续表

Continue table

来源	试件编号	$b \times h / \text{mm} \times \text{mm}$	剪跨长/mm	$V_{\text{cr}} / \text{kN}$	MCFT/kN	$V_{\text{ex}} / \text{kN}$	$V_{\text{ex}} / \text{MCFT}$
	均值	—	—	—	—	—	1.042
	均方差	—	—	—	—	—	0.105
	变异系数	—	—	—	—	—	0.100

由表 4 可知:试验值与按照修正压力场理论程序计算的理论值对比均值为 1.042,均方差 0.105,变异系数 0.100,吻合良好.这说明基于修正压力场理论且考虑钢纤维作用的计算程序比较适用于高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力的计算,可为工程应用提供参考.

4 结 论

- 1) 剪跨比为 2.25 和 3.0 而配箍率不同的两组试验梁,在受荷初始阶段均符合平截面假定,但加载到极限荷载的 24.5%~40.4%时,这种假定将不再满足.
- 2) 两组不同剪跨比参数为配箍率的试验梁研究表明,高强钢筋 RPC 梁的斜裂缝形态主要以腹剪型斜裂缝为主,主斜裂缝的产生与配箍率和剪跨比有关,配箍率和剪跨比越大越不容易产生主斜裂缝,但剪跨比对主斜裂缝形成的影响程度明显大于配箍率.
- 3) 对于相同剪跨比的试验梁,配箍率对试验梁的剪切开裂荷载影响并不明显,开裂荷载的产生主要取决于 RPC 的抗拉强度,所以 RPC 的抗拉强度不容忽视.
- 4) 所编制的基于修正压力场理论且考虑钢纤维作用的计算程序可用于 HRB500 级 RPC 简支梁受剪承载力的计算,其理论值计算值与实际值吻合良好,对实际工程的应用有一定的借鉴作用.

参考文献:

[1] VOO Y L,FOSTER S J,GIBERT 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.

[2] VOO Y L,POON W K,FOSTER S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups[J]. Journal of Structural Engineering,2010,136(11):1393-1400.

[3] 徐海宾,邓宗才. 超高性能混凝土梁抗剪承载力计算方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(7):24-28,71.

[4] 金凌志,张猛,李丽. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪承载力公式浅析[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(5):92-95.

[5] 魏巍巍. 基于修正压力场理论的钢筋混凝土结构受剪承载力及变性研究[D]. 大连:大连理工大学,2011:139-159.

[6] 吕艳梅. 高强箍筋高强混凝土梁抗剪性能试验研究与理论分析[D]. 长沙:湖南大学,2007:81-82.

[7] 邓宗才,周冬至,程舒. 配筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(12):1512-1518.

[8] 邓宗才,王海忠,刘少新,等. 基于修正压力场理论的活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算[J]. 河北工业大学报,2014,43(6):22-25.

[9] 徐东坡. 基于修正压力场理论的混凝土梁抗剪研究[D]. 大连:大连理工大学,2006:30-34.

[10] 金凌志,梅臣. 配箍率对高强钢筋 RPC 梁抗剪性能影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(4):711-716.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)