

文章编号:1001-4888(2017)06-0871-09

RPC-NC 组合梁弯曲承载力的影响因素^{*}

鞠彦忠, 孙启健, 王德弘, 白俊峰

(东北电力大学 建筑工程学院, 吉林吉林 132012)

摘要: 活性粉末混凝土(RPC)因其高强度、高韧性、高耐久性得到广泛应用。但预制 RPC 构件整体性、抗震性差;全截面采用 RPC 会造成材料浪费、增加工程成本。RPC-NC 叠合构件的使用可避免上述问题。为研究 RPC 水胶比、界面粗糙度及 RPC 厚度对 RPC-NC 叠合构件承载力的影响,根据正交试验设计了 9 组 27 个 RPC-NC 叠合梁试件,进行四点弯曲试验,并进行极差分析研究各因素对承载力的影响,基于本构关系推导叠合试件开裂弯矩计算公式。试验结果表明:RPC-NC 叠合试件承载力明显高于 C30 混凝土弯曲试件,承载力提高了 74.33%~157.76%,且 RPC 表现出良好的控裂能力;界面粗糙度对承载力影响最大,RPC 厚度次之,RPC 水胶比影响最小;试验得到最优配合为界面切槽处理、RPC 厚度为 0.5 倍梁高、RPC 水胶比为 0.22。开裂弯矩公式计算所得弯矩值与试验值吻合较好,可作为叠合构件开裂弯矩计算公式。

关键词: RPC-NC 叠合试件;界面粗糙度;承载力;极差分析

中图分类号: TU528.57

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-193

0 引言

RPC(Reactive Power Concrete, 简称 RPC)是 20 世纪 90 年代由法国 Bouygues 公司研发的一种具有高强度、高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料——活性粉末混凝土^[1]。RPC 优良的力学性能及耐久性更加适应现代工程向大跨、高耸、重载及承受恶劣使用环境的要求,备受工程界关注。但 RPC 生产成本较高、制作工艺复杂、施工工艺要求较高,实际工程应用多为预制 RPC 构件,虽然在一定程度上保证了施工质量、缩短了施工周期,但预制装配构件整体性能差,不能满足现代建筑结构对抗震性能的要求^[2]。如果梁式构件全截面采用 RPC,那么在构件受弯破坏阶段受压区 RPC 并未充分发挥其抗压强度,会出现材料利用率低等问题。这些都阻碍了 RPC 构件在实际工程中的应用。另一方面,随着 RPC 研究逐渐成熟,RPC 也逐渐应用到实际工程中,如加拿大魁北克省的 RPC 桁架桥、法国 RPC 放射性冷却塔等^[3]。RPC 工程结构在使用过程中,会受到自然环境及人为因素的破坏,使结构受到一定损伤,但由于其使用及功能的特殊要求不能重新替换,需要对损伤处进行修补加固以达到正常使用要求,修补加固过程中便会涉及到叠合结构。基于以上现状,RPC-普通混凝土叠合构件(简称 RPC-NC 叠合试件)的使用,能充分利用两种材料的各自特性,提高材料利用率,降低工程造价。结合预制与现浇工艺,保证施工质量的同时也更加符合结构整体性能的设计要求。另外关于 RPC-NC 叠合构件性能及机理的研究,会推动现有 RPC 结构的修补加固技术的发展,具有重要的理论意义和实用价值。

本文提出的 RPC-NC 叠合构件属于梯度混凝土范畴。目前有关纤维梯度混凝土的研究主要集中在混凝土中纤维的梯度分布,以研究纤维梯度分布对混凝土结构性能的影响方面。如:赵军等通过有限

^{*} 收稿日期:2016-09-28;修回日期:2017-04-25

基金项目:国家自然科学基金(51378040)资助

通讯作者:王德弘(1985—),讲师,博士研究生。主要从事高性能混凝土材料与结构方面研究。Email: hitwdh@126.com

元模拟分析了钢纤维梯度分布对钢纤维混凝土力学性能的影响^[4];海然等以玻璃纤维呈梯度分布探索了梯度结构对水泥基材料力学性能的影响^[5]。本文的 RPC-NC 叠合构件属两种强度梯度混凝土结构,根据正交设计试验,以 RPC 水胶比、界面粗糙度及 RPC 厚度为因素,研究上述因素水平对 RPC-NC 叠合试件弯曲承载力的影响。

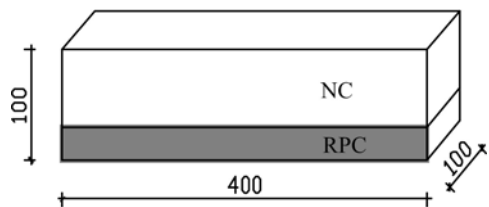


图 1 弯曲试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bending specimen

1 试验概况

1.1 试验设计

RPC-NC 弯曲试验采用的棱柱体试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$, 具体形式如图 1 所示。根据 RPC 配制技术、RPC 性能研究及新老混凝土界面性能影响因素的研究成果^[6], 选取本次试验研究因素分别为: RPC 水胶比、RPC 厚度及界面粗糙度。RPC 水胶比分别为 0.2、0.22、0.24; RPC 厚度分别为 30mm、50mm。RPC 钢纤维体积掺量为 1.5%^[7]。考虑到经济适用及简单易行, 本次试验界面粗糙度通过对普通混凝土界面处理实现, 并用灌砂法测得的平均灌砂深度作为界面粗糙度^[8]: (1) 对普通混凝土自然浇筑面用钢丝刷刷毛, 清除表面浮浆及细小颗粒, 平均灌砂深度 $\Delta h = 2.2 \sim 2.4\text{mm}$; (2) 对普通混凝土自然浇筑面人工凿毛, 凿去表面浮浆及水泥石, 露出粗骨料使表面呈现凹凸不平状, 平均灌砂深度 $\Delta h = 3.5 \sim 3.6\text{mm}$; (3) 对普通混凝土界面沿长边每 50mm 进行切槽处理, 平均槽深 15~20mm, 并保持切槽后的原始状态, 平均灌砂深度 $\Delta h = 5.1 \sim 5.4\text{mm}$ 。界面处理效果如图 2 所示。选取以上因素及水平进行正交试验设计^[9], 试验方案如表 1 所示。试验组共 9 组, 每组 3 个共浇筑 27 个叠合试件。

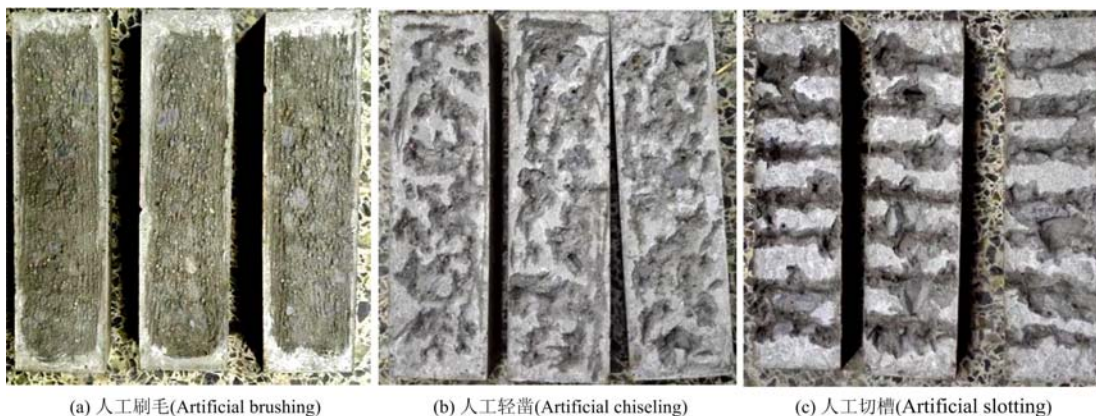


图 2 界面处理效果图

Fig. 2 Interface treatment renderings

1.2 试件制作及试验加载

试验所用普通混凝土设计强度等级为 C30, 采用 32.5 普通硅酸盐水泥配置, 配合比如表 2 所示。RPC 采用 42.5 普通硅酸盐水泥配置, 配合比如表 3 所示^[10]。C30 普通混凝土及 RPC 均为标准养护^[11]。具体浇筑如下:

(1) 首先浇筑 C30 普通混凝土, 充分振捣后, 两小时内对混凝土表面进行切槽处理, 其他试件静置 24 小时后进行刷毛和轻凿处理, 并拆模养护至 28 天龄期。

(2) 对达到龄期的普通混凝土采用灌砂法测其粗糙度, 再次装模后对界面进行浸湿处理但不能使界面存留水分^[12], 然后浇筑剩余 RPC 部分, 充分振捣后静置 24 小时拆模标准养护至 28 天龄期。

试件制作时浇筑 3 个 C30 棱柱体对照组试件, 并浇筑 3 个 C30 普通混凝土 100mm 立方体伴随试件及 3 组 9 个 RPC100mm 立方体伴随试件以测其抗压强度。对照组及伴随试件均置于与试验组相同的养护条件养护至 28 天龄期。

表 1 RPC-NC 正交试验设计方案
Tab.1 RPC-NC orthogonal experimental design

组别	RPC 水胶比	界面处理方式	RPC 厚度(mm)	试件编号
1	0.2	人工刷毛	30	WA1-30
2	0.2	人工轻凿	50	WA2-50
3	0.2	人工切槽	30	WA3-30
4	0.22	人工切槽	30	WB3-30
5	0.22	人工轻凿	30	WB2-30
6	0.22	人工刷毛	50	WB1-50
7	0.24	人工刷毛	30	WC1-30
8	0.24	人工轻凿	30	WC2-30
9	0.24	人工切槽	50	WC3-50

注：试件编号中 W 表示弯曲；A、B、C 分别代表水胶比为 0.2、0.22、0.24；1、2、3 分别代表界面处理方式为人工刷毛、人工轻凿、人工切槽；30、50 分别表示 RPC 的厚度。

表 2 C30 混凝土配合比
Tab.2 Mixture ratio of C30 concrete

水泥(kg·m ⁻³)	水(kg·m ⁻³)	石子(kg·m ⁻³)	砂(kg·m ⁻³)	抗压强度(MPa)
407	175	1164	645	45.26

表 3 RPC 配合比
Tab.3 Mixture ratio of RPC

水胶比	水泥(kg/m ³)	硅灰(kg/m ³)	粗砂(kg/m ³)	中砂(kg/m ³)	细砂(kg/m ³)	减水剂(kg/m ³)	水(kg/m ³)	钢纤维(kg/m ³)	抗压强度(MPa)
0.2	757.9	227.4	738.9	371.4	169.9	68	149.5	117.3	94.11
0.22	751.9	225.6	733.1	368.5	168.6	67.5	167.9	117.3	97.91
0.24	746.1	223.8	727.4	365.6	167.2	66.9	185.9	117.3	93.67

试件养护至龄期后,用 100 吨材料微机控制电液伺服万能试验机进行四点弯曲试验。试件加载时首先按照等速率负荷控制加载,加载速率为 0.05kN/s,当荷载达到 20kN 时转为等速率位移控制加载,加载速度为 0.2mm/min,直至试件最终破坏^[13]。试验时在试件跨中位置设置位移计,测量试件挠度。试验加载图如图 3 所示。

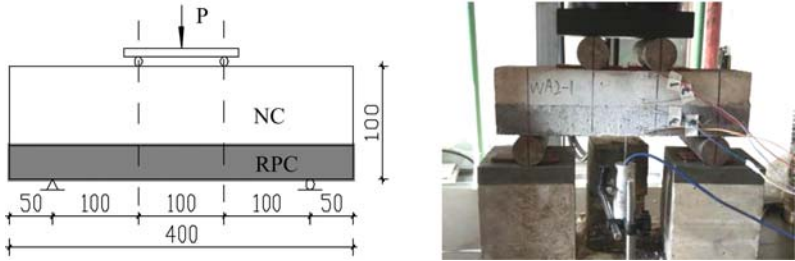


图 3 试件加载图
Fig.3 Specimen loading

2 试验现象及结果分析

2.1 试验现象

对照组试验时,试件开裂即破坏,为典型的脆性破坏。开裂时跨中挠度几乎没有变化,约为

0.1mm。裂缝首先出现在试件底部,并迅速向上扩展,短时间内贯穿整个截面。破坏时仅纯弯区一条裂缝贯穿试件截面,无其他裂缝分支。

试验组 RPC-NC 叠合试件相比于对照组试件,其承载力和韧性明显提升,呈现出延性破坏特征。试件有较长的裂缝扩展及挠度增长时间。试件开裂时挠度同样为 0.1mm 左右,至试件破坏挠度缓慢增长到 6~9mm。叠合试件的开裂位置主要有三个区段:纯弯区、试件三分点处及试件剪切区。

(1) 试件纯弯区开裂,如图 4(a)所示。此时叠合试件破坏形式与对照组试件相同,即纯弯区一条主裂缝贯穿整个试件。但在试件开裂后,裂缝基本沿竖向传播且裂缝扩展传播速度极大降低,挠度逐渐增大。试件破坏时界面未开裂,RPC 与普通混凝土仍粘结成一个整体。

(2) 试件三分点开裂,如图 4(b)所示。此时裂缝在 RPC 中基本沿三分线竖向传播,发展到界面时界面未开裂,裂缝继续沿三分线在普通混凝土中扩展。随着试验进行,普通混凝土中裂缝产生朝向试件中线方向的分支,试件破坏时主裂缝贯穿试件。

(3) 试件剪切区开裂,如图 4(c)所示。剪切区开裂位置均位于距三分点 3cm 以内位置。与纯弯区及三分点处开裂时裂缝沿竖向发展不同的是,剪切区开裂时,RPC 中裂缝向纯弯区斜向发展,会出现两种情况:①RPC 中裂缝斜向传播至界面时,裂缝已经扩展到纯弯区则界面不开裂,裂缝直接进入普通混凝土中传播,扩展过程中产生 1~2 条斜裂缝分支,主裂缝贯穿试件而破坏。②RPC 中裂缝传播至界面时裂缝未扩展到纯弯区,此时界面开裂,裂缝沿界面横向发展至纯弯区段后,纯弯区普通混凝土开裂,随着加载的继续,普通混凝土中裂缝产生斜裂缝分支,至主裂缝贯穿试件而破坏。

RPC 开裂后,随着加载的进行,裂缝宽度逐渐增大,会听到钢纤维与水泥石剥离的声音。RPC 中裂缝扩展速度比对照组明显降低,普通混凝土中裂缝的发展又比 RPC 中裂缝发展缓慢。至试件破坏,所有纯弯区开裂和三分点开裂试件及大部分剪切区开裂试件界面未开裂,两种材料仍粘结为一个整体。

基于以上现象,所有试件只存在少数界面小面积开裂,普通混凝土中裂缝与 RPC 中裂缝连贯性较好,这说明 RPC 与 NC 两种材料的粘结力大于 C30 混凝土的开裂荷载,否则界面在 C30 混凝土开裂前出现大面积的剥离开裂。此外,对加载完成试件凿开观察发现,开裂区钢纤维分布较未开裂区稀疏,初步认为 RPC 中钢纤维的分布情况决定了试件的开裂位置。RPC 开裂后钢纤维与骨料的咬合作用提高了叠合试件的延展性,使构件开裂后有较大的挠度增长及较长时间的裂缝发展时间,表现出延性破坏特征而非对照组脆性破坏。叠合试件上部普通混凝土开裂后,钢纤维与骨料的咬合作用又起到耗能作用,抑制裂缝的迅速发展并产生细小裂缝分支,表现出良好的控裂能力。

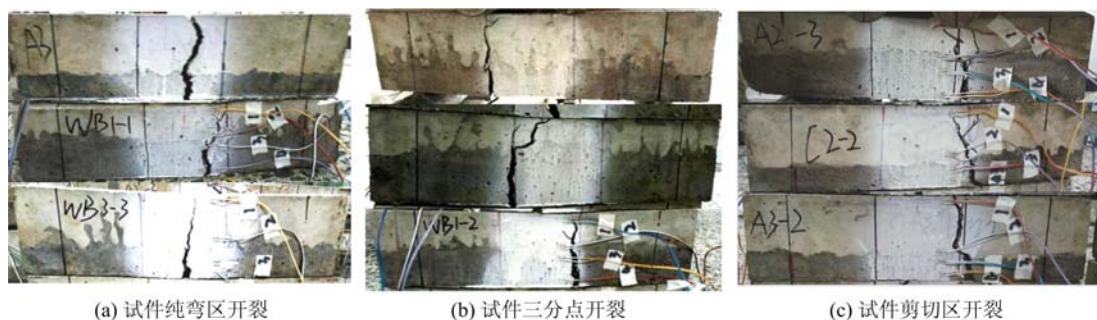


图 4 试件开裂及破坏模式

Fig. 4 Specimen cracking and failure mode

2.2 试验结果

试验组与对照组承载力结果如表 4 所示。表中结果表明 RPC-NC 叠合试件承载力明显高于对照组试件, RPC-NC 承载力最小试件 WB3-30 比对照组承载力提高了 74.33%, 承载力最大的 WC2-30 提高了 157.76%。对比 RPC 与 NC 两种材料性能可知, 承载力的提高是 RPC 具有较高抗拉强度的体现。RPC-NC 叠合试件的应用达到了利用两种材料特性、提高材料利用率的目的。

2.3 试验结果极差分析

以表 1 所确定的正交设计试验方案为基础对试验结果进行极差分析^[14], 结果如表 5 所示。

表 4 弯曲试验承载力结果
Tab. 4 Bearing capacity results of bending test

试件编号	弯曲承载力 (kN)	试件编号	弯曲承载力 (kN)	试件编号	弯曲承载力 (kN)
WA1-30	22.163	WB1-50	28.195	WC1-30	21.926
WA2-50	23.048	WB2-30	23.99	WC2-30	31.061
WA3-30	26.526	WB3-30	21.007	WC3-50	27.931
NC 弯曲试件	12.05				

表 5 弯曲承载力试验结果极差分析
Tab. 5 Gradation analysis of bending capacity test results

试验号	水胶比(A)	界面粗糙度(B)	RPC 厚度(C)	弯曲承载力(kN)
1	0.2(A ₁)	人工刷毛(B ₁)	30mm(C ₁)	22.163
2	0.2(A ₁)	人工轻凿(B ₂)	50mm(C ₃)	23.048
3	0.2(A ₁)	人工切槽(B ₃)	30mm(C ₂)	26.526
4	0.22(A ₂)	人工切槽(B ₃)	30mm(C ₁)	21.007
5	0.22(A ₂)	人工轻凿(B ₂)	30mm(C ₂)	23.99
6	0.22(A ₂)	人工刷毛(B ₁)	50mm(C ₃)	28.195
7	0.24(A ₃)	人工刷毛(B ₁)	30mm(C ₂)	21.926
8	0.24(A ₃)	人工轻凿(B ₂)	30mm(C ₁)	31.061
9	0.24(A ₃)	人工切槽(B ₃)	50mm(C ₃)	27.931
K ₁	72.284	71.737	74.231	
K ₂	78.099	73.192	72.442	
K ₃	75.095	80.918	79.174	
k ₁	24.095	23.912	24.744	
k ₂	26.033	24.397	24.147	
k ₃	25.155	26.973	26.391	
R	1.938	3.061	2.244	

注：表中 RPC 厚度为 30mm 时根据正交表区分为 C1、C2 两个水平以研究 30mm 厚度时的差异影响；K_i(第 j 列)=第 j 列中数字 i 对应的指标总和；k_i(第 j 列)=K_i(第 j 列)/3；R(第 j 列)=第 j 列的 k₁、k₂、k₃…中的最大值减最小值的差。

极差 R 值越大说明该因素对试验结果的影响越大。从表 5 可知,对于 RPC-NC 叠合试件弯曲承载力各因素的影响顺序为:B>C>A,即界面粗糙度对承载力的影响最明显,其次为 RPC 厚度,最小为 RPC 水胶比。为进一步分析各因素水平对承载力的影响,以各因素水平为横坐标,以各因素水平相应的承载力值(k_i)为纵坐标绘制因素与指标关系图,如图 5 所示。从图 5 可知:水胶比为 0.22 时试件承载力最大,这与表 3 中水胶比为 0.22 时 RPC 抗压强度最高相对应;承载力随着粗糙度的增大而增大,切槽处理时承载力最大;对于 RPC 厚度,两组 30mm 厚度 RPC 承载力相差不大,可近似认为相等;50mm 厚承载力最大,这也与预期结果相符合。

综上所述,增大界面粗糙度、增大 RPC 厚度及适当增大 RPC 水胶比均可增大 RPC-NC 叠合试件承载力,但是不能片面过度强调某一因素的作用,如本试验中 RPC 水胶比从 0.22 增加到 0.24 时承载力反而降低。也有研究^[15]表明,界面粗糙度过大反而会降低叠合试件的粘结性能。本试验得到的最优配

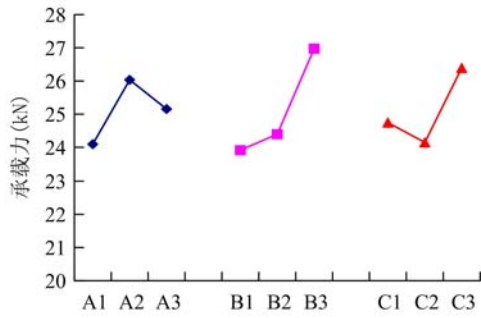


图 5 弯曲承载力与因素水平关系图

Fig. 5 Relationship between curved bearing capacity and factor levels

y 为试件截面中性轴距, h 为试件截面高度, h_1 为试件 C30 高度, h_2 为试件 RPC 高度, E_1 为 C30 混凝土弹性模量, E_2 为 RPC 弹性模量, $n = E_1 / E_2$ 。

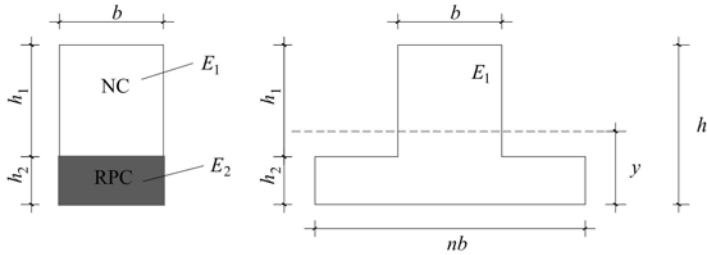


图 6 叠合试件换算截面

Fig. 6 Transformed cross section of composite specimens

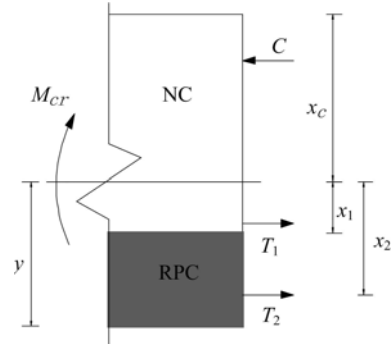


图 7 开裂荷载下截面受力状态

Fig. 7 Section stress state at crack moment

叠合试件即将开裂时, RPC-NC 叠合梁正截面受力状态如图 7 所示, 受压区应力近似为三角形分布, 受拉区应力分布为曲线, 为方便计算近似为三角形分布和梯形分布。开裂荷载可以视为有 RPC 承担, 即

$$M_{cr} = f_t W_s \quad (1)$$

若采用截面抵抗矩塑性影响系数 γ_m 反映叠合梁受拉区弹塑性发展状态, 用材料力学原理建立抗裂公式, 则 M_{cr} 的计算公式为

$$M_{cr} = \gamma_m f_t W_0 \quad (2)$$

式中, f_t 为 RPC 的峰值拉应力; W_s 为考虑受拉区塑性变形影响的叠合梁截面弹塑性抵抗矩; γ_m 为截面抵抗矩塑性影响系数; W_0 为叠合梁换算截面对受拉边缘的弹性抵抗矩。

令式(1)和式(2)相等, 得到

$$\gamma_m = W_s / W_0 \quad (3)$$

根据图 7 得, 受压区 C30 混凝土合力计算公式为

$$C = \frac{1}{2} b x_c E_c \epsilon_c \quad (4)$$

受拉区 C30 混凝土合力计算公式为

$$T_1 = \frac{1}{2} b x_t E_c \epsilon_t \quad (5)$$

受拉区 RPC 合力计算公式为

$$T_2 = \frac{1}{2} b (h - x_c - x_t) (f_t + 0.1 f_t) \quad (6)$$

合为 A2B3C3, 即水胶比为 0.22、界面为切槽处理、RPC 厚度为 0.5 倍梁高。该配合下 RPC-NC 叠合试件承载力最大。

2.4 RPC-NC 叠合试件开裂弯矩

本试验在 RPC-NC 叠合试件纯弯区段沿截面不同高度粘贴应变片, 测量叠合试件加载过程中截面应变沿截面高度的变化规律, 应变片分布如图 3 所示。试验结果表明: 截面应变沿截面高度呈线性变化, 叠合试件在受力过程中符合平截面假定。

根据材料力学将双材料截面经等效变换为均质材料换算截面如图 6 所示^[16]。图中: b 为试件截面宽度,

根据截面力矩平衡条件得到

$$M_{cr} = C \cdot \frac{2}{3} x_c + T_1 \cdot \frac{2}{3} x_t + T_2 \cdot x_2 \tag{7}$$

$$W_s = \left[C \cdot \frac{2}{3} x_c + T_1 \cdot \frac{2}{3} x_t + T_2 \cdot x_2 \right] / f_t \tag{8}$$

根据图 6 计算等效单材料截面中性轴距离为

$$y = \frac{n \times b \times h_2 \times \frac{1}{2} \times h_2 + h_1 \times b \times \left[\frac{1}{2} \times h_1 + h_2 \right]}{b \times h_1 + n \times b \times h_2} \tag{9}$$

等效截面对形心轴的惯性矩为

$$I = \frac{1}{12} n b h_2^3 + n b h_2 \left[y - \frac{1}{2} h_2 \right]^2 + \frac{1}{12} b h_1^3 + b h_1 \left[\frac{1}{2} h_1 + h_2 - y \right]^2 \tag{10}$$

$$W_0 = \frac{\left[n b h_2^3 + 12 n b h_2 \left[y - \frac{1}{2} h_2 \right]^2 + b h_1^3 + 12 b h_1 \left[\frac{1}{2} h_1 + h_2 - y \right]^2 \right] \times (b \times h_1 + n \times b \times h_2)}{6 n b h_2^2 + 12 h_1 b \left[\frac{1}{2} h_1 + h_2 \right]} \tag{11}$$

将式(8)及式(11)代入式(3),得到叠合梁的截面抵抗矩塑性影响系数 γ_m ,结果如表 6 所示。从表中可以发现,随着粗糙度的增大, γ_m 随之增大,验证了界面粗糙度的增大可以提高界面粘结强度。将表 6 中的 γ_m 和界面粗糙度关系点列于图 8,考虑粘结及界面粗糙的约束作用拟合得到叠合梁 γ_m 的计算公式为

$$\gamma_m = 0.8408 + 0.0914 h \tag{12}$$

表 6 叠合梁 γ_m 计算值

Tab. 6 Calculation γ_m of composite beams		
试件编号	平均灌砂深度 $h(\text{mm})$	γ_m
WA1-30	2.3	1.04
WA2-50	3.62	1.18
WA3-30	5.1	1.38
WB1-50	2.22	1.02
WB2-30	3.54	1.17
WB3-30	5.5	1.25
WC1-30	2.41	1.01
WC2-30	3.54	1.14
WC3-50	5.43	1.31

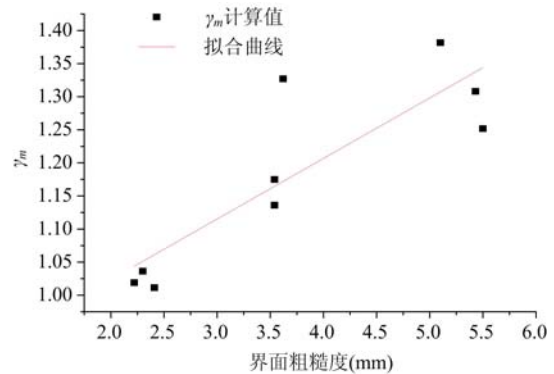


图 8 叠合梁 γ_m 推导值与拟合值

Fig. 8 Derived value and fitted value of γ_m

表 7 开裂弯矩计算值与实测值比较

Tab. 7 Comparison of calculated value and test value of crack moment

试件编号	开裂荷载 (kN)	$M_{cr}^c (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{cr}^t (\text{kN} \cdot \text{m})$	M_{cr}^t / M_{cr}^c
WA1-30	22.163	1.13	1.11	1.02
WA2-50	23.048	1.12	1.15	0.97
WA3-30	26.526	1.32	1.33	0.99
WB1-50	28.195	1.29	1.41	0.92
WB2-30	23.99	1.22	1.2	1.02
WB3-30	21.007	1.04	1.05	0.99
WC1-30	21.926	1.17	1.1	1.06
WC2-30	31.061	1.55	1.55	1
WC3-50	27.931	1.38	1.4	0.98

使用式(2)及式(11)得到的计算开裂弯矩值 M_{cr}^c 和实测开裂弯矩值 M_{cr}^t 比较如表 7 所示。表中各试

件开裂弯矩计算值和实测值比值数字特征为:平均值 $\bar{x}=0.994$, 标准差 $\sigma_x=0.038$, 变异系数 $\delta_x=0.038$ 。因此,用式(2)、(11)及(12)计算得到的叠合梁开裂弯矩是可用的。

3 结 论

(1) RPC-NC 叠合试件中钢纤维能有效提高试件的延性,避免叠合试件的脆性破坏。钢纤维表现出良好的耗能作用,有较好的控裂能力。RPC 与 NC 两种材料有较好的粘结强度保证 RPC-NC 叠合试件的整体性。

(2) RPC-NC 叠合试件承载力相比于 C30 普通混凝土有大幅度提高,叠合试件的应用达到了提高构件承载力充分利用材料各自特性的目的,提高了材料利用率。

(3) RPC 水胶比、界面粗糙度及 RPC 厚度对 RPC-NC 叠合试件承载力均有显著影响,影响顺序为:界面粗糙度>RPC 厚度>RPC 水胶比。本次试验得到最优配合为界面处理为切槽处理(平均灌砂深度 $\Delta h=5.1\sim 5.4\text{mm}$)、RPC 厚度为 0.5 倍梁高、RPC 水胶比为 0.22。

(4) 对于各影响因素,不能片面过度强调某一因素的作用,而应在优化的原则下确定最优组合。过度增大 RPC 水胶比及界面粗糙度反而会降低 RPC-NC 叠合试件粘结性能。

(5) 本文推导的叠合试件开裂弯矩计算公式所得的弯矩值能与试验开裂弯矩值较好吻合,推导的开裂弯矩计算公式可作为叠合试件开裂弯矩计算依据。

参考文献:

- [1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [2] 赵顺波, 张新中. 混凝土叠合结构设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001 (ZHAO Shunbo, ZHANG Xinzong. Concrete composite structure design principles and applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001 (in Chinese))
- [3] 柯开展, 蔡文尧. 活性粉末混凝土(RPC)在工程结构中的应用与前景[J]. 福建建材, 2006(2):17-19 (KE Kaizhan, CAI Wenyao. Application and prospect of reactive powder concrete (RPC) on the engineering's structures[J]. Fujian Building Materials, 2006(2):17-19 (in Chinese))
- [4] 赵军, 李晓龙, 杨久俊. 纤维梯度分布混凝土的抗弯性能[J]. 河南科学, 2006(1):100-103 (ZHAO Jun, LI Xiaolong, YANG Jiujun. The flexural performance of steel fiber gradient distribution reinforced concrete[J]. Henan Science, 2006(1):100-103 (in Chinese))
- [5] 海然, 杨久俊, 吴科如. 玻璃纤维梯度分布对水泥基材料力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2005(6):12-14 (HAI Ran, YANG Jiujun, WU Keru. Effect of the glass fiber gradient distributions on the mechanical property of cement-based composite materials[J]. New Building Materials, 2005(6):12-14 (in Chinese))
- [6] 韩菊红, 毕苏萍, 张启明, 等. 粗糙度对新老混凝土粘结性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2001, 22(3):22-24 (HAN Juhong, BI Suping, ZHANG Qiming, et al. Influence of the roughness on the bonding properties of new and old concrete[J]. Journal of Zhengzhou University(Eng. Sci.), 2001, 3:22-24 (in Chinese))
- [7] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨, 等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 实验力学, 2011, 26(3):254-260 (JU Yanzhong, WANG Dehong, LI Qiuchen, et al. On the influence of steel fiber volume fraction on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3):254-260 (in Chinese))
- [8] 韩菊红, 袁群, 张雷顺. 新老混凝土粘结面粗糙度处理实用方法探讨[J]. 工业建筑, 2001, 31(2):1-3 (HAN Juhong, YUAN Qun, ZHANG Leishun. Research on practical treating method for the interfacial roughness of new to old concrete[J]. Industrial Construction, 2001, 31(2):1-3 (in Chinese))
- [9] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55 (LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52-55 (in Chinese))
- [10] 鞠彦忠, 周冠男, 郑维权. 200MPa 级活性粉末混凝土(RPC200)的配制与试验研究[J]. 东北电力学院学报,

- 2007, 27(2):18—21 (JU Yanzhong, ZHOU Guannan, ZHENG Weiquan. The compounding and test study of 200MPa reactive power concrete[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2007, 27(2):18—21 (in Chinese))
- [11] 张胜, 周锡玲, 谢友均, 等. 养护制度对活性粉末混凝土强度及微观结构影响的研究[J]. 混凝土, 2007, 6:16—18 (ZHANG Sheng, ZHOU Xiling, XIE Youjun, et al. Study on the effect of curing system on the strength and microstructure of reactive powder concrete[J]. Concrete, 2007, 6:16—18 (in Chinese))
- [12] Bouksani O, Kharchi F, Benhadji M, et al. Influence of the roughness and moisture of the substrate surface on the bond between old and new concrete[J]. Contemporary Engineering Sciences, 2010, 3:139—147.
- [13] GB/T50081—2002. 普通混凝土力学性能试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015 (GB/T50081—2002. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese))
- [14] 白富志, 张贵恩. 概率论与数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001 (BAI Fuzhi, ZHANG Guen. Probability and statistics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001 (in Chinese))
- [15] 管大庆, 陈章洪, 石毓珠. 界面处理对新老混凝土粘结性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 1994(3):23—24 (GUAN Daqing, CHEN Zhanghong, SHI Wenzhu. The impact of dealing with interface to new and old concrete bonding properties[J]. China Concrete and Cement Products, 1994(3):23—24 (in Chinese))
- [16] 鞠彦忠. 材料力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014 (JU Yanzhong. Mechanics of materials[M]. Wuhan: Huozhong University of Science & Technology Press, 2014 (in Chinese))

Factors Influencing Bearing Capacity of RPC-NC Composite Beam

JU Yan-zhong, SUN Qi-jian, WANG De-hong, BAI Jun-feng

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: Reactive Powder Concrete is widely used for its high strength, toughness and durability. But the prefabricated RPC components are poor in integrity and seismic performance; full-scale use of RPC will cause material waste and increase the cost of the project. The use of RPC-NC stacking components can avoid these problems. In order to study the factors influencing the bearing capacity of RPC-NC composite specimens, selected RPC water-binder ratio, interfacial roughness and thickness of the RPC as the research factors. According to the orthogonal experiment designed nine groups of 27 RPC-NC composite beam specimens, four-point bending test was conducted and studied the effect of various factors on the adhesive power by gradation analysis. Based on constitutive relation deduced the calculation formula of cracking moment of composite specimen. The results showed that the RPC-NC bearing capacity of composite specimens were significantly higher than C30 concrete bending specimen, the bearing capacity improved 74.33% to 157.76%, and RPC showed good ability to control crack. The interface roughness was the biggest factor influencing the bearing capacity, RPC thickness followed, RPC water-binder ratio was the minimum. The interface with slotting treatment, RPC thickness of 0.5 times of the beam height and RPC water-binder ratio of 0.22 was the optimal combination. The bending moment calculated from the formula was in good agreement with the experimental value and could be used as the formula for calculating the cracking moment of the composite specimen.

Keywords: RPC-NC composite specimen; interface roughness; bearing capacity; gradation analysis