

RPC 钢筋网加固负载 RC 梁抗剪性能试验研究

卜良桃, 韩利磊, 杜国强

(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 目的 探究活性粉末混凝土(RPC)钢筋网对负载下钢筋混凝土(RC)梁抗剪性能的加固效果。方法 设计制作了5根RPC钢筋网四面加固梁和1根对比梁;通过抗剪试验,研究剪跨比和配箍率对加固梁抗剪性能的影响。结果 在不同参数下,各加固构件均发生剪压破坏,加固梁抗剪承载力最大可提高2.4倍,破坏过程表现出良好的延性。加固层和原始构件共同工作性能良好,未出现层间滑移现象。较大的剪跨比(2.0~3.0)和较小的配箍率(0.14%~0.28%)会降低加固梁的抗剪承载力。结论 RPC钢筋网加固方法能显著地提高钢筋混凝土梁的抗剪承载力和变形能力。基于试验结果,提出了负载下加固RC梁的抗剪承载力理论模型和计算公式,计算结果与试验值吻合较好,可为该加固技术在实际工程中应用提供参考。

关键词 负载;抗剪性能;活性粉末混凝土;钢筋网;加固

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Experimental Study on Shear Behavior of Loaded RC Beams Strengthened with RPC Steel Mesh

BU Liangtao, HAN Lilei, DU Guoqiang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082)

Abstract: In order to study the shear behavior of loaded concrete (RC) beams strengthened with reactive powder concrete (RPC) steel mesh. Six concrete beams were designed, five of which were strengthened with reactive powder concrete steel mesh, and one of which was not strengthened as a comparative test beam. Through the test, the effects of the shear span ratio and hoop ratio on the shear behavior of the Reinforced RC beams are analyzed. The results show that under different parameters, shear failure occurred in all beams. The shear capacity of the strengthened beam can be increased by 2.4 times, the failure process expressed good ductility. The reinforcement layer and the original component work well together, and there is no slippage between them. A larger shear span ratio (2.0 ~ 3.0) and a smaller hoop ratio (0.14% ~ 0.28%) reduced the shear capacity of the reinforced beam. The RPC steel mesh can significantly improve the shear capacity and deformation capacity of strengthened beams. Based on the test results, we proposing a theoretical

收稿日期:2022-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52078205)

作者简介:卜良桃(1963—),男,教授,博士,主要从事结构检测鉴定及加固方法等方面研究。

model and establish a formula for the shear capacity of loaded beams. The calculated results are in good agreement with the test values, which can provide a reference for the application of the reinforcement technology in practical engineering.

Key words: loaded beams; shear capacity; reactive powder concrete; steel mesh; strengthen

钢筋混凝土 (RC) 梁是混凝土结构中常用的水平受力构件,其主要破坏模式一般分为两种:弯曲破坏和剪切破坏。施工误差、外界环境和荷载变化可能会导致其在使用过程中不能满足要求,需要加固处理。

活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 具有超高的抗压强度、较高的抗拉强度、高耐腐蚀性和耐久性等特点^[1-3]。由于 RPC 与普通混凝土具有较好的相容性,同时钢纤维具有阻裂作用^[4-5],使得 RPC 在混凝土结构加固领域成为了一种热门的补强材料^[6-7]。邓宗才^[8]通过试验研究了不同纤维增强活性粉末混凝土加固普通 RC 梁抗弯性能,破坏过程中界面粘结良好。周乐^[9]研究了负载下外包钢筋混凝土加固轴心受压钢柱的力学性能,并提出了承载力计算公式。Mo Jinchuan^[10]研究了钢纤维、钢纤维氧化镁和钢纤维氧化镁聚丙烯纤维对 RPC 力学性能及 RPC 与旧混凝土劈裂抗拉强度的影响。H. M. Atheer^[11]通过试验研究了 RPC 对不同截面 RC 柱轴压性能的影响,结果发现圆形柱的加固效果更好。

对既有损伤结构进行加固是土木工程领域的主要研究内容之一。改造的目的是对构件进

行结构处理,使其恢复到原来的强度。目前国内外针对受损 RC 梁多采用三面 U 型加固,该方法对界面的要求较高^[12],实际工程中施工质量难以保证。为了模拟 RPC 钢筋网加固 RC 梁的实际工况,笔者考虑在负载下进行四面加固,在加固层中附加钢筋网,进而提高加固梁的整体性;通过研究剪跨比和钢筋网规格对加固梁抗剪性能的影响,给出抗剪承载力计算公式,为设计计算和工程应用提供参考。

1 试 验

1.1 试件设计

设计制作了 6 根 RC 梁,包括 1 根对比梁(编号 L1)和 5 根加固梁(编号 L2 ~ L6),长度均为 2 600 mm,净跨为 2 400 mm,保护层厚度为 20 mm。试件参数见表 1。原梁的箍筋间距为 150 mm,沿梁纵向均匀布置,梁底双排布置 4 根直径为 22 mm 的受拉钢筋,梁顶部设置两根直径为 18 mm 的架立筋。加固层厚度均为 25 mm,选取直径为 6 mm 的钢筋制作钢筋网,纵向钢筋间距为 60 mm,箍筋间距分别为 100 mm、150 mm 和 200 mm。加固试件构造和配筋如图 1 所示。

表 1 试验梁设计参数

Table 1 Design parameters of test beams

编号	梁长/mm	截面宽×高/mm	箍筋等级	纵筋等级	剪跨段 a/mm	加固方案	初始荷载
L1	2 600	150×300	Φ6@150	4 Ⅱ22	500	—	—
L2	2 600	200×350	Φ6@150	4 Ⅱ22	500	RPC+①号钢筋网	0.5P _u
L3	2 600	200×350	Φ6@150	4 Ⅱ22	500	RPC+②号钢筋网	0.5P _u
L4	2 600	200×350	Φ6@150	4 Ⅱ22	500	RPC+③号钢筋网	0.5P _u
L5	2 600	200×350	Φ6@150	4 Ⅱ22	625	RPC+③号钢筋网	0.5P _u
L6	2 600	200×350	Φ6@150	4 Ⅱ22	700	RPC+③号钢筋网	0.5P _u

注:①号钢筋网长×宽为 60 mm×100 mm;②号钢筋网长×宽为 60 mm×150 mm;③号钢筋网长×宽为 60 mm×200 mm;a 为加载点位置与左支座之间的水平距离;P_u 为对比梁 L1 的极限承载力。

1.2 试验材料

RC 梁混凝土设计强度等级为 C30,各组分的质量比为: m (水泥): m (砂子): m (碎石): m (水) = 1:2.07:3.38:0.60。加固层 RPC 采用湖南固力工程新材料有限责任公司生产的具有固定配合比的 RPC 干混料,强度等级为 R120。掺入钢纤维的体积分数为 2%、长径比为 100。混凝土和 RPC 的基本力学指标分别根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[13]和《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[14]测得,RPC 轴心抗拉强度由 $f_t = 2.14 \sqrt{f_c} - 12.8$ 计算,结果见表 2。根据《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1—2010)^[15],通过拉伸试验,测得试验所用钢筋力学性能指标见表 3。

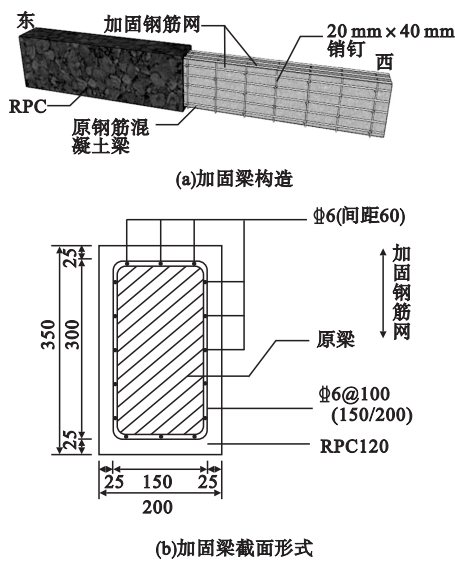


图 1 试件构造和配筋

Fig. 1 Specimen structure and reinforcements

表 2 混凝土基本力学性能指标

Table 2 Basic mechanical properties of concrete

材料种类	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
C30	37.5	20.1	2.1	300
RPC	130.1	105.2	9.15	431

表 3 钢筋基本力学性能指标

Table 3 Basic mechanical properties of steel bars

钢筋类型	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	屈服应变/ 10^{-6}
HPB235	6	355	485	210	1 690
HRB400	6	431	572	210	2 155
HRB400	18	475	612	210	2 140
HRB400	22	496	645	210	2 256

1.3 加固过程

- (1) 试件准备。对混凝土梁表面进行凿毛处理,凿毛深度为 2 mm,并将梁角打成半径为 20 mm 的圆弧。
- (2) 一次加载。对各加固试件按每级 10% 的极限荷载进行,达到抗剪承载力的 50% 时停止加载。在液压千斤顶两端用钢砖和钢片塞紧,将千斤顶的力等效转移到钢砖上。
- (3) 钢筋网布置。截取规定尺寸的加固上下纵筋,采用机械设备完成箍筋的弯折工作,在混凝土梁四周布置钢筋网,箍筋与纵筋

- 间采用绑扎连接的方式,并按一定的间距布置 20 mm × 40 mm 的销钉,固定钢筋网并做好清理,布置应变片。
- (4) 试件支模。按要求采用 30 mm 后的模板进行支模,并使用木方和铁箍对模板进行上下部的加固处理。为方便脱模,在浇筑前对模板刷油。
- (5) 支模浇筑。浇筑 RPC,搅拌前按 RPC 干混料质量的 6.8% 加入自来水,搅拌 10 min 后,加入体积分数为 2% 的钢纤维,继续搅拌 10 min 后出料。将拌合料浇进模板不断振捣

确保浇筑密实,同时预留同批次的 RPC 试块。

(6)拆模养护。浇筑完成后 48 h 拆模,为提高 RPC 的早期强度,前一周每隔 1 h 用热水进行养护,而后在标准条件下养护,共计 28 d。

1.4 加载方案及测点布置

试验在 600 kN 的反力架下进行,为防止

试验梁在集中荷载作用处发生局部破坏,加载点和支座处放置 30 mm 厚钢板,加载装置如图 2 所示。在支座和加载点处各放置 1 个位移计,测量实际荷载作用下梁的竖向位移。应变测点布置如图 3 所示。

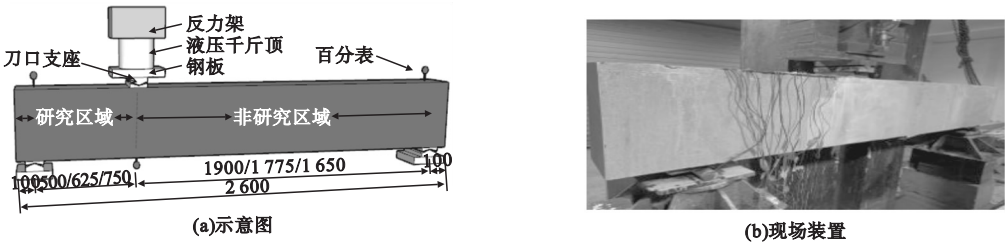


图 2 试验梁加载装置

Fig. 2 Loading device of test beam

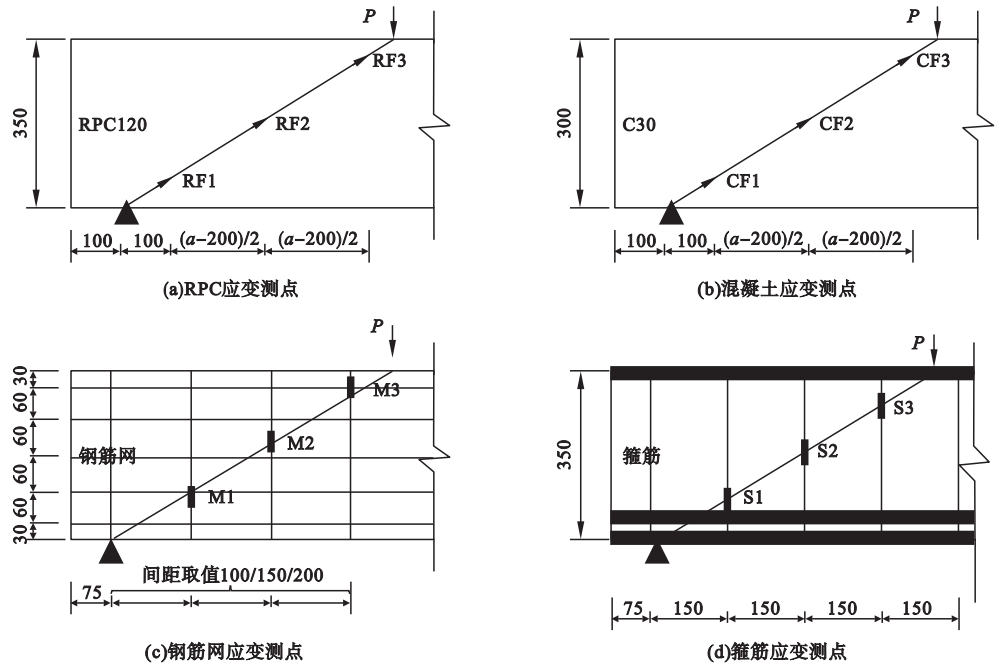


图 3 应变测点布置

Fig. 3 Strain measuring point layout

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[16],试验采用两阶段受力进行加载,为了确保仪器正常工作并消除初始误差,在每次加载前都要进行预加载。第一阶段:按照 1.3 小节中提到方法,完成负弯矩下混凝土梁的加固;第二阶段:首先按预计抗剪承载力的 10% 进行分级加载,达到极限荷载的 80% 后,每级加载按预计极限荷载的 5%

进行,每级荷载保持 15 min。当试件破坏后,停止加载,记录试验梁在每一级荷载下的裂缝宽度、挠度值和应变值。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

对比梁 L1 发生剪压破坏,当加载至 20 kN(极限荷载的 34%)时,在梁侧面形成

了第一条斜裂缝。当荷载增大到 48 kN(极限荷载的 80%)时出现临界斜裂缝,与之相交的箍筋尽数屈服,斜裂缝间混凝土保护层开始脱落。当荷载达到 60 kN(极限荷载)时,箍筋外露且部分被拉断,剪跨区的混凝土在临界斜裂缝处产生错动,主斜裂缝间的混凝土迅速剥落,剪压区混凝土被压溃。

与对比梁类似,加固梁同样发生剪压破坏,笔者主要研究二次受力阶段,以 L4 为例对破坏过程进行描述。在加载初始阶段,试件挠

度变化缓慢,当荷载为 70 kN(极限荷载的 40%)时,第一条细微斜裂缝在加载点的左侧稍靠下位置出现(小于 0.1 mm)。当加载至 130 kN(极限荷载的 75%)时,在近似平行于支座和加载点的连线方向产生多条新裂缝,并不断向加载点延伸,左侧支座处出现许多短斜裂缝,该过程伴随有钢纤维断裂的声音出现。当荷载达到 174 kN 时,试件宣告破坏。在此次试验过程中,所有加固构件的界面均没发生剥离破坏,破坏形态与裂缝分布如图 4 所示。

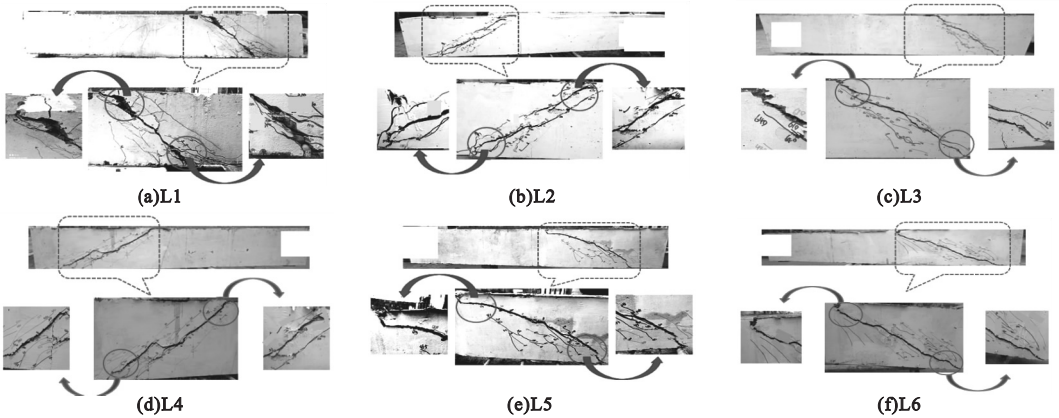


图 4 试件破坏形态与裂缝分布

Fig. 4 Specimen failure modes and crack distribution

2.2 试验结果

试验结果见表 4。对比试验数据可知,加固梁的抗剪性能得到了明显改善。加固梁的开裂荷载、极限荷载最大分别提高了 3.6 倍和 2.4 倍。当剪跨比一定时($\lambda=2$),加固层配箍率越小,加固梁抗剪承载力也越小,挠度相差不大。当加固层配箍率一定时,加固梁的抗剪承载力随剪跨比的增大而减小。由各加固梁的挠度大小可知,剪跨比对其影响较大。

2.3 荷载-挠度曲线

根据加载点位移计所测得的数据,按照设计参数将试验结果分成两组绘制,得到试验梁的荷载-挠度($P-f$)曲线如图 5 所示。二次受力阶段加固梁的荷载-挠度曲线大致分为 3 个阶段。①加固层开裂前阶段:试件的刚度较大,挠度增长缓慢,曲线保持线性增加。②弹塑性阶段:随着剪力的增大,RPC

开裂后,曲线出现了第一个拐点,此时挠度的增长加快。③破坏阶段:临近极限荷载时,相同的荷载增量下挠度急剧增大,出现了第二个较为明显的拐点,此阶段曲线并未呈现下降趋势。

表 4 试验结果

Table 4 Test results

编号	开裂荷载/ kN	极限荷载/ kN	挠度/ mm	宽度/ mm
L1	20	59	7.66	1.2
L2	93	200	12.43	0.3
L3	81	189	12.68	0.4
L4	70	174	12.73	0.5
L5	62	162	14.83	0.6
L6	56	146	16.02	0.8

加固层不同配箍率对加固梁抗剪承载力影响见图 5(a),可以看出,试件 L3 和 L4 弹性阶段缩短,这是因为尺寸较小的钢筋网与

RPC 共同作用可以更好地约束混凝土,从而延缓刚度的衰减。不同剪跨比对加固梁抗剪

承载力影响见图 5(b),可以看出,加固梁的挠度随剪跨比的增大而增大。

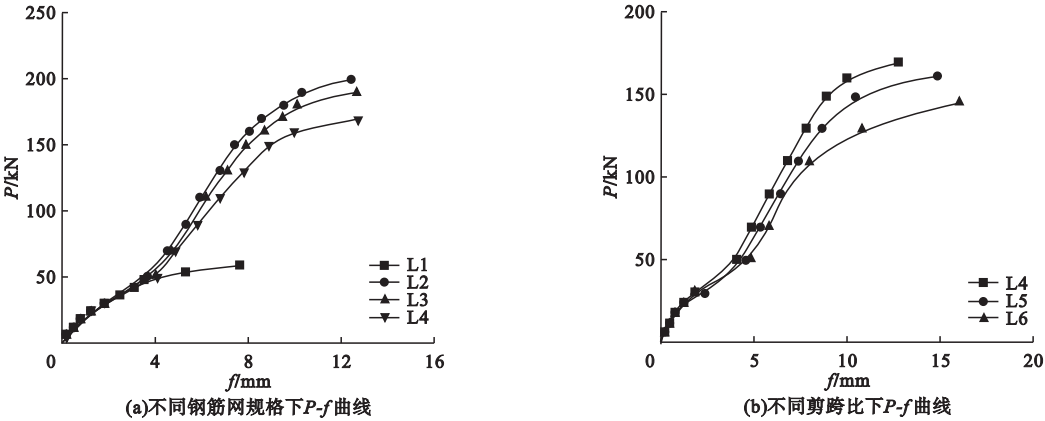


图 5 试验梁荷载 - 挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of test beams

2.4 荷载 - 应变曲线

根据 S2、M2 处所测应变数据,按照设计变量将试验结果分组绘制,得到负载情况下 RPC 钢筋网加固 RC 梁的荷载 - 应变 ($P - \varepsilon$) 曲线如图 6 所示。从图中可以看出,加固梁曲线斜率明显大于对比梁 L1,加载值达到加固梁极限荷载的 80% 以后,加固层作用减弱, $P - \varepsilon$ 曲线出现拐点。随着斜裂缝更加深入的发展,箍筋应变达到屈服,最终发生剪切

破坏。两组 $P - \varepsilon$ 曲线箍筋最小应变值为 2.638×10^{-3} ,钢筋网最小应变值为 2.876×10^{-3} ,都远大于各自的屈服应变。从图 6 可以看出,加固完成后,在受力初始阶段,箍筋与加固钢筋网之间存在应变差值,这是因为初始荷载的影响。加载后期,箍筋与加固钢筋网 $P - \varepsilon$ 曲线接近重合,应变差值得到消除,表明原梁和加固层协同工作性能良好。

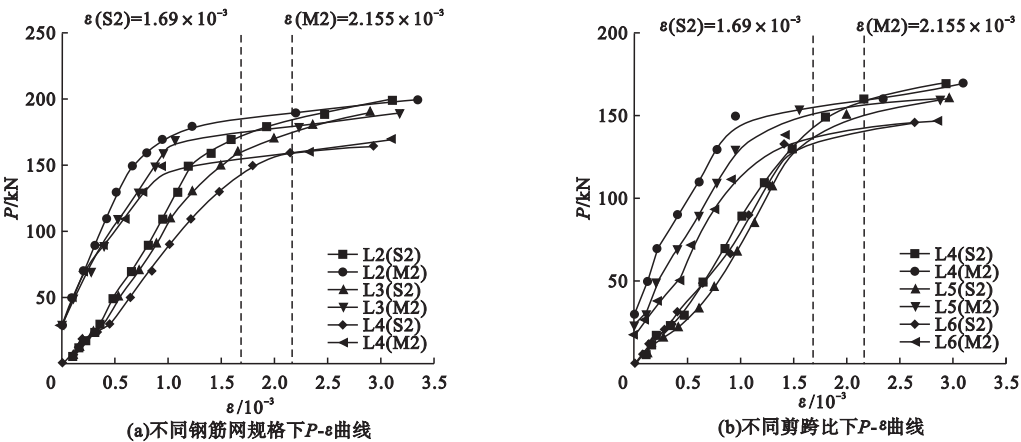


图 6 试验梁的荷载 - 箍筋应变曲线

Fig. 6 Load-stirrup strain curves of test beams

3 加固梁抗剪承载力计算

3.1 破坏模式

虽然国内外学者对加固梁的剪切破坏过

程提出了多种受剪传力机理,但抗剪计算公式比较复杂^[17-18]。借助我国现有混凝土规范来计算 RPC 钢筋网加固构件的抗剪承载力时,经常会忽略 RPC 中钢纤维的影响,计

算结果普遍偏小。笔者采用简单叠加法来计算 RPC 钢筋网加固梁的抗剪承载力,这种方法不仅计算简便,而且具有很高的可靠度^[19]。

3.2 基本假定

加固梁除满足最小截面要求外,尚应符合下列两个条件:

(1)加固层与原梁之间协同工作性能良好,没有出现相对滑移。

(2)加固构件的最终破坏形态为剪压破坏。

3.3 加固层承载力的计算

加固试件的抗剪承载力 N 包括三部分:一部分为原梁提供的抗剪承载力 N_1 ;另一部分为钢筋网提供的抗剪承载力 N_2 ;最后一部分为 RPC 提供的抗剪承载力 N_3 。

原梁的抗剪承载力 N_1 可由式(1)计算:

$$N_1 = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_y \frac{A_s}{s} h_0. \quad (1)$$

式中: $\lambda = x/h_0$ 为剪跨比,当 $\lambda < 1.5$ 时,取 $\lambda = 1.5$,当 $\lambda > 3$ 时,取 $\lambda = 3$; f_t 为原梁混凝土轴心的抗拉强度; b 为原梁的截面宽度; h_0 为原梁的截面有效高度; f_y 为原梁箍筋的抗拉强度设计值; A_s 为原梁箍筋的截面面积; s 为原梁箍筋的间距。

参考《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[20],加固层钢筋网的抗剪承载力计算公式:

$$N_2 = a_s f_{ySF} \frac{A_{SF}}{s_{SF}} h_{0j}. \quad (2)$$

式中: α_s 为钢筋网中竖向钢筋强度的材料利用系数,取 $\alpha_s = 0.9$; f_{ySF} 为钢筋网中竖向钢筋的抗拉强度设计值; A_{SF} 为同一截面内钢筋网中竖向钢筋的面积之和; s_{SF} 为钢筋网中竖向钢筋的间距; h_{0j} 为加固后截面的有效高度。

根据试验数据可知,当箍筋和 RPC 相继屈服时,剪压区混凝土并未出现压溃现象,导致加固层 RPC 抗压强度并未被充分利用,考虑初始荷载对钢筋强度和混凝土强度的影

响,采用类似的办法进行折减,为简化计算将剪跨段 RPC 视为单轴受压状态。笔者采用的混凝土和 RPC 的应力-应变模型^[21],见式(3)和式(4):

$$\frac{\sigma_c}{f_{m,c}} = \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{m,o}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{m,o}} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{m,o}. \quad (3)$$

式中: σ_c 为混凝土的压应力; ε_c 为混凝土的压应变; $\varepsilon_{m,o}$ 为极限压应变, $\varepsilon_{m,o} = 0.002$ 。

$$\frac{\sigma_{R,c}}{f_{R,c}} = 1.55 \left(\frac{\varepsilon_{R,c}}{\varepsilon_{R,o}} \right) - 1.20 \left(\frac{\varepsilon_{R,c}}{\varepsilon_{R,o}} \right)^4 + 0.65 \left(\frac{\varepsilon_{R,c}}{\varepsilon_{R,o}} \right), \quad 0 \leq \varepsilon_{R,c} \leq \varepsilon_{R,o}. \quad (4)$$

式中: $\sigma_{R,c}$ 为 RPC 的压应力; $\varepsilon_{R,c}$ 为 RPC 的压应变; $f_{R,c}$ 为极限压应力; $\varepsilon_{R,o}$ 为极限压应变,文中取 $\varepsilon_{R,o} = 0.00292$ 。加固层与混凝土协同变形,加固层的应力和应变分别设为 $\sigma_{R,i}$ 和 $\varepsilon_{R,i}$ 。考虑到 $0.5P_{max}$ 的预损伤,近似认为混凝土应力初始值为 $0.5\sigma_c$,带入式(3),近似求得此时混凝土已产生应变的大小为取 $\varepsilon_{c,o} = 0.30\varepsilon_{m,o}$,加固层 RPC 的应变为 $\varepsilon_{R,i} = 0.70\varepsilon_{m,o}$ 。定义 α_R 为因剪力滞后而引入的 RPC 的材料利用系数:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_{R,i}}{f_{R,c}}. \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),得到式(6):

$$\alpha_R = \frac{\sigma_{R,i}}{f_{R,c}} = 1.55 \left(\frac{\varepsilon_{R,i}}{\varepsilon_{R,o}} \right) - 1.20 \left(\frac{\varepsilon_{R,i}}{\varepsilon_{R,o}} \right)^4 + 0.65 \left(\frac{\varepsilon_{R,i}}{\varepsilon_{R,o}} \right)^5 = 0.70. \quad (6)$$

考虑到 RPC 加固层在加固梁抗剪过程中发挥的作用,为了计算方便,文献[22]提出了关于 RPC 加固层抗剪承载力计算方法:

$$N_3 = \alpha_R \frac{1.75}{\lambda + 1} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b_R h_{0j}. \quad (7)$$

式中:取 $\alpha_R = 0.70$; f_{t0} 为 RPC 的轴心抗拉强度设计值,取 $f_{t0} = 4.10$; $1 + \lambda_f \beta_v$ 为加固层钢纤维的贡献, $\beta_v = 0.7$; λ 为剪跨比,取值同式(1); λ_f 为钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = p_f l_f / d_f$,其中钢纤维体积参数 $p_f = 2\%$, l_f 为钢纤维的

等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径, 钢纤维的长径比 $l_f/d_f=100$; b_R 为加固层厚度。

3.4 计算值与试验值的比较

结合上述推导过程, 加固构件抗剪总承

载力计算式为

$$N=N_1+N_2+N_3.$$
(8)

将式(8)中所得计算结果与试验值 N_t 进行比较, 结果见表 5。

表 5 结果对比分析

Table 5 Comparative analysis of results

试件编号	N_1/kN	N_2/kN	N_3/kN	N/kN	N_t/kN	N/N_t
L1	42.35	—	—	42.35	46.54	0.910
L2	42.35	33.06	72.86	148.27	158.62	0.935
L3	42.35	22.04	72.86	137.25	149.82	0.916
L4	42.35	16.53	72.86	131.74	138.32	0.952
L5	37.88	16.53	62.45	116.86	128.63	0.908
L6	34.53	16.53	54.64	105.70	115.64	0.914

由表 5 可知, 各加固构件的计算值与试验结果对比误差均在 10% 内, 变异系数为 0.017, 远远小于 0.15 的限值, 说明该理论计算方法比较合理, 可以为 RPC 钢筋网加固负 载 RC 梁的抗剪设计应用和计算检验校准提供 参考。

4 结 论

(1) 加固层和原梁整体工作性良好, 加固界面间具有可靠的黏结强度。钢筋网和 RPC 弥补了原梁箍筋的抗剪不足问题, 与未加固的梁相比, 加固梁的开裂荷载和极限荷载均提高了两倍以上。

(2) 加固梁的抗剪性能与剪跨比呈负相关与配箍率呈正相关。当采用长 \times 宽为 60 mm \times 200 mm 的钢筋网进行加固时, 剪跨比增大 0.5, 加固梁的抗剪承载力降低约 13%。

(3) 给出了 RPC 钢筋网加固负 载 RC 梁抗剪承载力计算公式, 计算结果与试验结果吻合良好, 可为实际工程应用提供参考。

参考文献

[1] DENG H Z, JIANG Q, LI F, et al. Vortex-induced vibration tests of circular cylinders connected with typical joints in transmission towers [J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2011, 99 (10): 1069 – 1078.

[2] YOO D, YOON Y. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber reinforced concrete [J]. International journal of concrete structures and materials, 2016, 10(2) : 125 – 142.

[3] SADIP R, ABDUL R M R, ALSAADAYMEN J. Mechanical behavior of modified reactive powder concrete with waste materials powder replacement [J]. Periodica polytechnica-civil engineering, 2021, 65(2) : 649 – 655.

[4] 李旺旺, 季文玉, 安明喆. 活性粉末混凝土叠合梁的收缩性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3) : 399 – 405.

(LI Wangwang, JI Wenyu, AN Mingzhe. Shrinkage property of reactive powder concrete composite beams [J]. Journal of building materials, 2017, 20(3) : 399 – 405.)

[5] CHEN Baochun, ZHOU Jialiang, ZHANG Dong, et al. Experimental study on shear performances of ultra-high performance concrete deep beams [J]. Structures, 2022, 39: 310 – 322.

[6] 单波, 王志鸿, 肖岩, 等. RPC 管 – 海水海砂混凝土组合柱抗压性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9) : 104 – 112.

(SHAN Bo, WANG Zhihong, XIAO Yan, et al. Compression performance of seawater and sea sand concrete filled RPC tube composite columns under axial load [J]. Journal of Hu’nan university (natural sciences), 2020, 47(9) : 104 – 112.)

[7] WANG Xin, XIE Qun, WU Zhenli, et al. Experimental study on seismic performance of strengthening masonry wall using hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete [J]. Earthquake spectra, 2021, 37(3) : 1785 – 1805.

[8] 邓宗才, 张戊晨. 混杂纤维增强 RPC 加固混凝土梁抗弯性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(9) : 1199 – 1205.

(DENG Zongcai, ZHANG Wucen. Flexural performance of reinforced concrete beams reinforced with hybrid fiber reactive powder concrete [J]. Journal of Harbin engineering

- university, 2015, 36(9):1199-1205.)
- [9] 周乐,王晓初,白云皓,等. 负载下外包钢筋混凝土加固轴压钢柱承载力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(6): 990-997.
(ZHOU Le, WANG Xiaochu, BAI Yunhao, et al. A bearing capacity calculation method of axially loaded steel columns reinforced by outsourcing concrete under loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(6):990-997.)
- [10] MO Jinchuan, OU Zhongwen, WANG Yahui, et al. Influence of MgO and hybrid fiber on the bonding strength between reactive powder concrete and old concrete [J]. Advances in materials science and engineering, 2016:5283908.
- [11] ALGBURI A, SHEIKH M, HADI M. New technique for strengthening square-reinforced concrete columns by the circularisation with reactive powder concrete and wrapping with fibre-reinforced polymer [J]. Structure and infrastructure engineering, 2019, 15(10): 1392-1403.
- [12] ZBIGNIEW P, MARIUSZ C, STEFANIA G, et al. Experimental research on concrete beams reinforced with high ductility steel bars and strengthened with a reactive powder concrete layer in the compression zone [J]. Materials, 2020, 13(18):4173-4173.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for design of concrete structure: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
(Standardization Administration of the PRC. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.)
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T228. 1—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Standardization Administration of the PRC. Metallic materials-Tensile testing-part 1: Method of test at room temperature: GB/T228. 1—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [17] ACI Committee 318. 31802/318R02: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [M]. Farnington Hill: 38800 Country Club Drive, 2017.
- [18] 郑宇宙, 王文伟, 戴建国, 等. FRP-UHTCC 复合层抗剪增强钢筋混凝土梁受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8): 118-126.
(ZHENG Yuzhou, WANG Wenwei, DAI Jianguo, et al. Experimental study on mechanical performance of reinforced concrete beams shear-strengthened with FRP-UHTCC composite [J]. Journal of building structures, 2019, 40(8):118-126.)
- [19] 邓明科, 李琦琦, 马福栋, 等. 高延性混凝土加固 RC 梁抗剪性能试验研究 [J]. 工程力学, 2020, 37(5):55-63.
(DENG Mingke, LI Qiqi, MA Fudong, et al. Experimental study on the shear behavior of RC beams reinforced by high ductile concrete [J]. Engineering mechanics, 2020, 37(5):55-63.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [21] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):369-376.
(GUO Xiaoyu, KANG Jingfu, ZHU Jinsong. Constitutive relationship of ultrahigh performance concrete under uniaxial compression [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2017, 47(2):369-376.)
- [22] 湖南大学. 活性粉末混凝土结构技术规程: DBJ43/T325—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
(Hu'nan University. Technical specification for reactive powder concrete structure: DBJ43 / T325—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)