

RPC 钢筋网加固足尺 RC 柱偏压性能试验

卜良桃¹,朱天宇¹,贺洪霞²

(1. 湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘要 目的 研究使用活性粉末混凝土钢筋网薄层加固(RPCRM)的钢筋混凝土足尺偏压柱的受力性能。方法 对6根RPCRM柱进行二次受力偏压试验,分析加固层钢筋网配筋率及初始荷载水平对柱承载和变形能力的影响。结果 与未加固柱相比,RPCRM柱承载力和变形能力均有不同程度的提高,峰值荷载的最大提高幅度为233%,位移延性系数的最大提高幅度为155%,且提高幅度皆与钢筋网配筋率及初始荷载水平相关。基于试验结果和理论分析,建立了RPCRM柱承载力计算公式。结论 活性粉末混凝土钢筋网加固钢筋混凝土偏压柱的加固效果显著,加固后能有效提高柱的承载力、刚度和延性。RPCRM柱承载力公式的计算值与试验值吻合较好,可应用于实际工程。

关键词 活性粉末混凝土;钢筋网;二次受力加固;偏压柱;承载力计算;延性

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Experimental Study on Eccentric Compressive Behavior of Full-size RC Columns Strengthened by Thin Layer of RPC Reinforced Mesh

BU Liangtao¹, ZHU Tianyu¹, HE Hongxia²

(1. College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha, China, 410082; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureall, Tianjin, China, 300457)

Abstract: In order to study the mechanical performance of full-size RC eccentric compressive columns strengthened by reactive powder concrete reinforced mesh(RPCRM), 6 RPCRM columns under twice eccentric loading were tested. The eccentric pressure test analyzes the influence of the reinforcement ratio of reinforced mesh and the initial load on the load-bearing capacity and deformation capacity of columns. The results show that the load-bearing capacity and deformation capacity of the RPCRM columns have been improved to varying degrees compared with unreinforced columns. The peak load is increased by 233%. The displacement ductility coefficient is increased by 156%. The increases are related to the reinforcement ratio and the initial load. Based on the test results and theoretical analysis, a calculation formula for the bearing capacity of

收稿日期:2021-11-26

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。

the RPCRM column is established. The reinforcement effect of reinforced concrete eccentric column strengthened by reactive powder concrete reinforcement mesh is remarkable. The bearing capacity, stiffness and ductility of the column can be effectively improved after reinforcement. The calculation value of the RPCRM column bearing capacity formula is consistent with its experimental value. The bearing capacity formula of the RPCRM column can be applied to engineering practice.

Key words: reactive powder concrete (RPC); reinforced mesh; test for twice-loading strengthening; eccentrically compressed column; calculation of bearing capacity; ductility

我国建筑行业已进入新建与维修加固并重的重要时期,大量混凝土结构亟需加固。钢筋混凝土柱作为承受荷载的重要构件,众多学者都致力于通过加固方式以提高柱的承载能力和延性^[1-2]。近年来粘贴纤维复合材料加固法和钢筋网混凝土外包加固法发展迅速,且取得了一定的研究成果^[3-7]。但钢筋网混凝土外包加固法加固层较厚,加固后结构自重增加、净空减小;而粘贴纤维复合材料加固法有耐火性差,在不良环境中与混凝土粘结性能差、破坏突然等缺点。因此探寻新型加固方法以提高混凝土柱的性能具有重要意义。

活性粉末混凝土(RPC)作为一种水泥基复合材料,具有超高的强度、韧性和耐久性^[8-9]。RPC 钢筋网薄层加固法对结构自重和净空影响较小,能大幅度提高结构变形能力,并且适用于极端环境下的结构加固,在抗震设防和耐火性要求较高的结构加固方面效果优异。但目前大量的学者都致力于研究 RPC 结构的力学性能^[10-12],关于 RPC 在加固领域的研究较少。而且加固领域的试验研究中大多都采用缩尺构件^[13],忽略了尺寸效应的影响,一次受力下的加固也不符合实际工程中负载下加固的情况。基于此,笔者对二次受力下活性粉末混凝土薄层加固足尺混凝土(RC)柱的偏压性能进行试验研究,探究钢筋网配筋率和初始荷载水平对加固柱偏压性能的提高作用,并提出了活性粉末混凝土薄层加固(RPCRM)柱的二次受力正截面承载力的计算方法。

1 试验

1.1 试件设计

为研究不同钢筋网配筋率及初始荷载水平对 RPCRM 柱受力性能的影响,本次试验共设计 1 根未加固的对比柱和 6 根 RPCRM 柱,试验柱参数见表 1。

表 1 试验柱参数
Table 1 Test column parameters

试件编号	端部 加密	钢筋网间 距/mm	初始荷 载比例
Z1	是	—	—
Z-S50-P0	是	50	0
Z-S100-P0. 5-NSD	否	100	0. 5
Z-S100-P0. 5	是	100	0. 5
Z-S75-P0. 5	是	75	0. 5
Z-S50-P0. 5	是	50	0. 5
Z-S50-P0. 8	是	50	0. 8

注:试件编号中,Z 表示柱,S 表示钢筋网间距,P 表示初始荷载比例(柱一次受力荷载与计算承载力的比值),NSD 表示端部未加密。

为了更好地模拟工程实际中 RC 柱的性能,所有试件均设计成足尺柱,高度为 3 000 mm,偏心距为 120 mm,未加固柱中部截面长×宽为 350 mm×350 mm,端部设置牛腿,端部截面长×宽为 350 mm×550 mm,混凝土强度等级均为 C40。采用 HRB400 对称配筋,单侧配筋为 2 Φ 16,受拉钢筋弯入牛腿兼做斜筋,纵筋配筋率为 0. 7%,大于最小配筋率 0. 6%^[14]。箍筋配筋在柱中部为 Φ 6@200,为了防止柱端局部受压破坏(除 Z-S100-P0. 5-NSD 外),柱端部箍筋加密,配筋为 Φ 6@50,并在端部设置 3 排钢筋网,试验

柱配筋见图1。加固时需在柱侧四周绑扎钢筋网然后RPC进行包裹,强度等级为R100,加固层厚度为40 mm。在实验前根据文献[15-17]对制作的原材料力学性能进行测试确定。

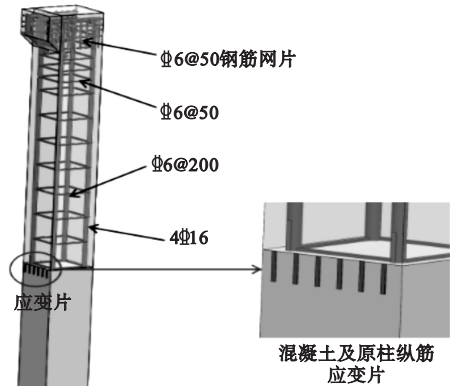


图1 试验柱Z1配筋图

Fig. 1 Test column reinforcement diagram

1.2 加载方案及量测内容

试验在10 000 kN压力试验机上进行,试件两端铰接,采用单刀铰支座进行偏心受压试验,加载装置示意图见图2。加载方案根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152—2012)^[15]执行,采用单调连续荷载控制分级加载法。

试验观测内容包括荷载、试件侧向挠度、应变、裂缝产生及发展情况四个方面。荷载由静载测试仪控制系统读取,侧向挠度由沿柱高均匀分布的5个百分表测得,上下端部

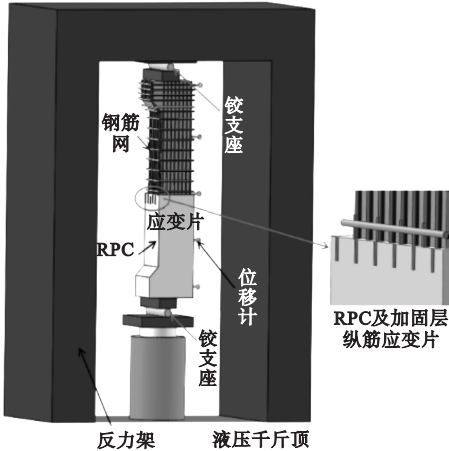


图2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

两个百分表距离柱端部100 mm,每个百分表之间距离700 mm,百分表布置见图2。在试件中部混凝土及RPC上沿截面高度方向布置5个应变片以测得中部混凝土及RPC应变,在原柱纵筋和加固层钢筋网纵筋布置应变片以测得钢筋应变。在试验过程中,由裂缝宽度仪测量裂缝宽度,观察并记录裂缝位置、发展情况及相对应的荷载。

2 试验结果与分析

2.1 试件现象及破坏形态

Z1为未加固的对比柱,表现为明显的大偏压破坏,柱身弯曲变形明显,受拉侧出现横向主裂缝,受压侧混凝土压碎剥落。整体来看,柱Z1延性较差,破坏征兆不明显,破坏形态如图3所示。

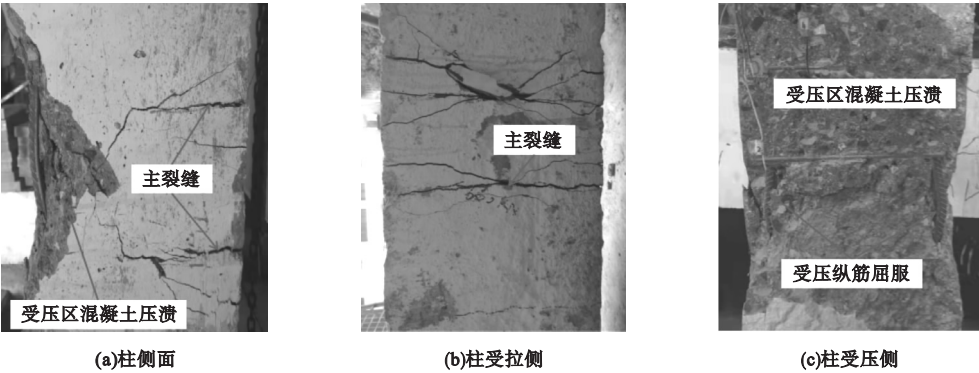


图3 Z1破坏形态与裂缝分布

Fig. 3 Z1 destruction form and crack distribution

对于 RPCRM 柱,各试件破坏过程基本相同(除 Z-S100-P0.5-NSD 外),笔者以试验柱 Z-S50-P0.5 为例进行说明。加载初期,柱身侧向变形不明显,当荷载达到 4 100 kN 时,柱端部加载点处出现竖向裂缝,随着荷载增加向受压侧延伸;进一步加载柱中部出现第一条横向裂缝,裂缝长度约 60 mm,并向侧面延伸;荷载继续增加时,试件持续出现细微的拉裂声,受拉侧横向裂缝不断增多,柱中偏上部的横向裂缝不断往受压侧延伸,有贯穿

柱横截面的趋势,侧向挠度也明显增加,柱身明显弯曲;达到极限荷载的 80% 时,出现密集的拉裂声,靠近受压侧出现斜向裂缝,RPC 呈剥落状;当荷载到达峰值荷载时,受拉侧出现一条主裂缝贯穿至受压侧,受拉侧纵向钢筋被拉断,受压侧 RPC 被压碎,荷载断崖式下落。RPCRM 柱试件最终破坏均表现为受拉侧钢筋屈服,受压侧 RPC 被压碎,破坏形态如图 4 所示。与对比柱 Z1 相比,RPCRM 柱裂缝发展更为充分,且裂缝宽度更大,延性较好。

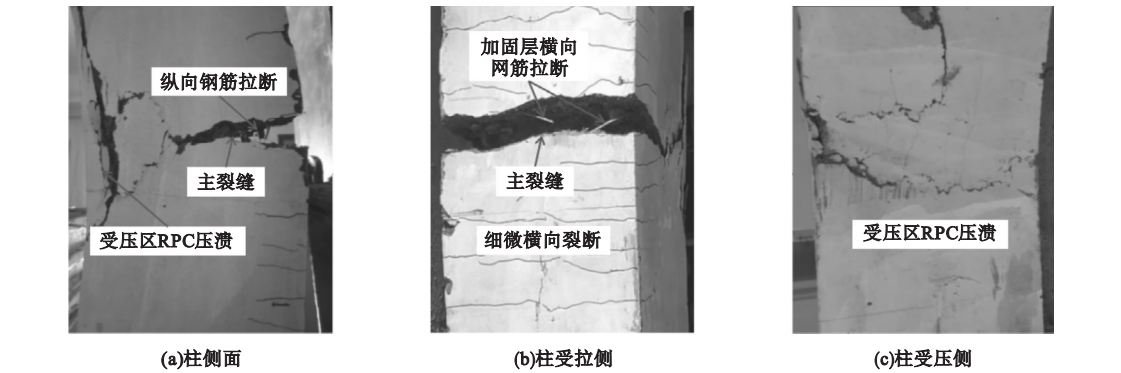


图 4 Z-S50-P0.5 破坏形态与裂缝分布

Fig. 4 Z-S50-P0.5 destruction form and crack distribution

2.2 结果分析

2.2.1 承载力分析

试验柱特征荷载结果见表 2。从表中可以看出,与对比柱相比,RPCRM 柱开裂荷载和峰值荷载均有不同程度的提高,且提高幅度随钢筋网配筋率的增大而增大,随初始荷载水平的增大而减小。

表 2 试件开裂及极限荷载

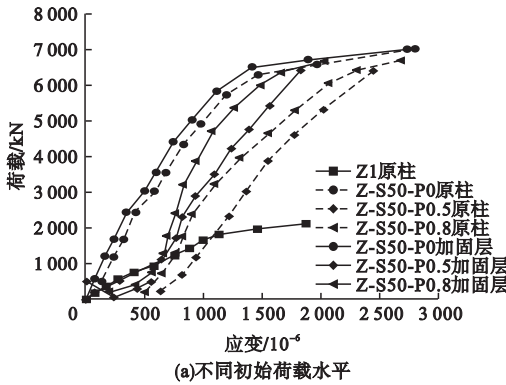
试件名称	$P_{cr}/$ kN	N_{cr}	$P_m/$ kN	N_m	$(P_{cr}/P_m)/\%$
Z1	840	1.00	2 109	1.00	39.83
Z-S50-P0	2 548	3.03	7 013	3.33	36.33
Z-S100-P0.5-NSD	2 250	2.67	3 450	1.63	65.21
Z-S100-P0.5	1 879	2.24	3 207	1.52	58.59
Z-S75-P0.5	2 639	3.14	4 419	2.10	59.72
Z-S50-P0.5	4 100	4.88	6 692	3.17	61.34
Z-S50-P0.8	2 983	3.55	6 431	3.05	46.38

注: P_{cr} 为试件开裂荷载; P_m 为峰值荷载; N_{cr} 为 RPCRM 柱与对比柱开裂荷载的比值; N_m 为 RPCRM 柱与对比柱峰值荷载的比值。

与试件 Z1 相比,试件 Z-S100-P0.5、Z-S75-P0.5、Z-S50-P0.5 开裂荷载分别提高了 124%、214%、388%,峰值荷载分别提高了 52%、110%、217%。通过文献[2]和文献[7]的试验研究可知,与高性能水泥复合砂浆钢筋网加固 RC 柱和树脂混凝土钢筋网加固 RC 柱相比,活性粉末混凝土钢筋网加固 RC 柱开裂荷载的提高幅度较大,这主要是因为 RPC 中加入了钢纤维,抗拉强度较高,能有效提高试件刚度,延缓试件开裂。

除加固层钢筋网配筋率外,加固柱的初始荷载水平也是影响 RPCRM 柱承载力的重要因素。与未加固柱 Z1 相比,试件 Z-S50-P0、Z-S50-P0.5、Z-S50-P0.8 开裂荷载分别提高了 203%、388%、255%,峰值荷载分别提高了 233%、217%、205%。可以看出,RPCRM 柱的承载力与初始荷载水平呈负相关且呈非线性下降的趋势,当初始荷载水平

越高时,加固柱承载力的下降幅度越大。另外,二次受力加固柱的开裂荷载比一次受力加固柱大,主要是因为二次受力加固柱的加固层受力小于一次受力加固柱。



2.2.2 荷载-应变分析

柱荷载-受拉侧纵向钢筋(原柱纵筋及加固层纵向网筋)应变如图5所示。

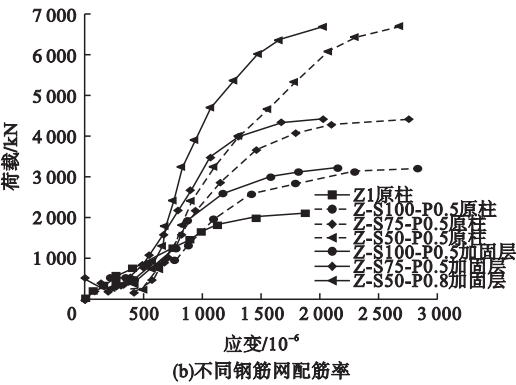


图5 荷载-受拉侧纵筋应变曲线

Fig.5 Load-strain curves of the longitudinal reinforcement on the tension side of the column

从图5(a)可以看出,二次受力加固柱受拉侧原柱纵筋和加固层纵向网筋之间存在应变滞后,随着初始荷载水平的增大,应变滞后的现象越明显。并且由于RPCRM柱为薄层加固,原柱纵筋和加固层纵向网筋距离较近,两者有着近乎相等的应变梯度,当初始荷载水平较大时,应变滞后现象很难消除。在达到峰值荷载时,试件Z-S50-P0.8受拉侧纵向网筋未达到屈服,试件Z-S50-P0.5受拉侧纵向网筋正好屈服,而试件Z-S50-P0受拉侧纵向网筋完全屈服。可见,初始荷载水平越小,加固层网筋强度越能得到充分利用。由图5

(b)可知,在初始荷载水平为 $0.5P_0$ 时,不同加固层配筋率的试件Z-S50-P0、Z-S50-P0.5、Z-S50-P0.8受拉侧,纵向钢筋应变增长梯度不同,随着加固层配筋率的增大,受拉侧纵向钢筋应变增长速度减小,屈服荷载增大。

柱荷载-(混凝土/RPC)受压侧应变如图6所示。从图6(a)可以看出,对比柱Z1受压侧混凝土的峰值应变为 1560×10^{-6} ,加固后混凝土应变显著提高,最高可达 2500×10^{-6} ,峰值应变提高了约60%。说明加固层的“套箍”约束作用能够较好地改善原柱核心混凝土的受力状态,使原柱的刚度、延性得

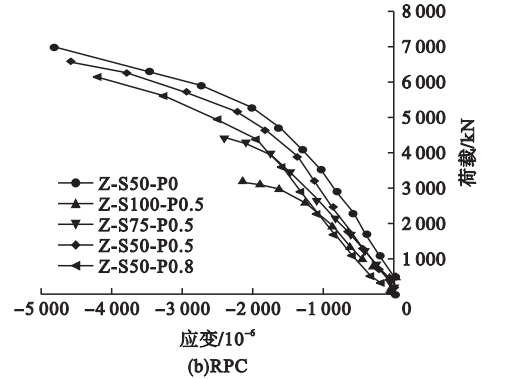
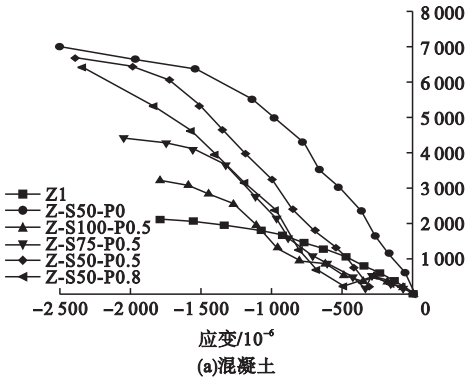


图6 荷载-受压侧混凝土/RPC应变曲线

Fig.6 Load-compression side concrete/RPC strain curves

到较大提高;且改善效果随钢筋网配筋率的提高而提高,随初始荷载水平的增大而降低。由图 6(b)可知,二次受力加固柱在纵筋屈服后,随着荷载增加,RPC 应变一直呈线性增

长,也能间接说明 RPC 约束作用的存在。

2.2.3 侧向位移分析

不同钢筋网配筋率及初始荷载水平下,各试件荷载-侧向位移曲线如图 7 所示。

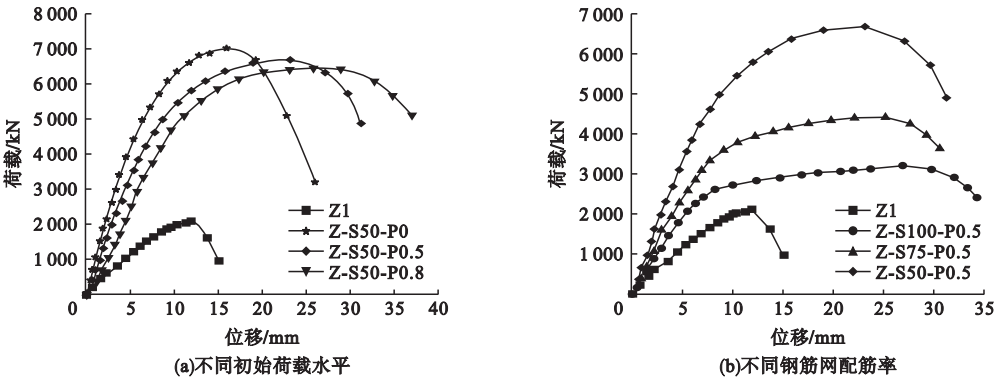


图 7 荷载-柱中侧向位移曲线

Fig. 7 Load-lateral displacement curves in the column

根据文献[18]确定试件的屈服位移 Δ_y ,取峰值荷载下降到 85% 时对应的位移作为试件的极限位移 Δ_u ,以 Δ_u 和 Δ_y 的比值定义位移延性系数 μ 。变形能 E_Δ 表示各试件因

变形消耗的能量,根据荷载-挠度曲线从开始加载到极限荷载时与 X 轴围成的面积计算^[19],各试件的位移延性系数见表 3。

表 3 各试件特征点位移及延性

试件编号	屈服点		峰值点		极限点		μ	$E_\Delta /$ (kN·mm)	γ
	Δ_y / mm	P_y / kN	Δ_p / mm	P_m / kN	Δ_u / mm	P_u / kN			
Z1	9.51	1 910	11.83	2 109	12.95	1 793	1.39	14 908	—
Z-S50-P0	9.25	6 125	15.89	7 013	20.81	5 961	2.26	101 074	1.63
Z-S100-P0.5	9.24	2 674	26.85	3 207	32.84	2 726	3.55	83 406	2.55
Z-S75-P0.5	10.14	3 738	25.13	4 419	30.08	3 756	2.96	102 872	2.13
Z-S50-P0.5	11.64	5 743	23.08	6 692	29.69	5 688	2.57	154 565	1.83
Z-S50-P0.8	13.34	5 603	28.91	6 431	35.59	5 466	2.66	174 793	1.91

注: Δ_y 、 Δ_p 、 Δ_u 分别为各试件的屈服位移、峰值位移、极限位移; P_y 、 P_m 、 P_u 分别为试件的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载; μ 和 E_Δ 分别为试件的位移延性系数和变形能; γ 为 RPCRM 柱与对比柱位移延性系数的比值。

从图 7 和表 3 可以看出,RPCRM 柱变形能力有明显的提高。与对比柱 Z1 相比,RPCRM 柱峰值位移 Δ_p 和极限位移 Δ_u 都有较大程度的提高,最大幅度可达 174%。这主要是因为 RPC 超高的力学性能,其极限抗拉强度远大于水泥砂浆,对核心混凝土的约束力大幅提高。位移延性系数 μ 的提高幅度

在 63% ~ 155%,且其提高幅度与钢筋网配筋率及初始荷载水平有关。

为进一步说明钢筋网配筋率及初始荷载水平对位移延性系数的影响,从表 3 可以看出,与对比柱相比,试件 Z-S100-P0.5 位移延性系数提高了 1.55 倍。但随钢筋网配筋率的提高,位移延性系数呈降低趋势,这主要是

Fig. 8 RPCRM column calculation model

RPCRM 柱的承载力计算公式为

$$N = \alpha_l f_{cc} b x + f_y A_s + \mu f_{zw}' A_{zw}' + k \mu [2 \alpha_l f_{mc} t_m x + f_{mc} (t_m b - A_{zw}')] - f_y A_s - \mu f_{zw} A_{zw} \quad (4)$$

$$M = Ne = \alpha_l f_{cc} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s' (h_0 - a_s) + \mu f_{zw}' A_{zw}' h_0 + k \mu \left[2 \alpha_l f_{mc} t_m x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{mc} (t_m b - A_{zw}') \left(h_0 - \frac{t_m}{2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: f_{cc} 为约束混凝土的峰值压应力,由 $f_{cc}=f_c+4\sigma_r+\sigma_j$ 确定,由基本假定(2)可知, σ_x 按式(2)取值,为简化计算, $\sigma_j=4k\frac{f_{mc}(20\cdot4b)}{A_c}$; k 为加固层抗压强度有效利用系数,两端箍筋加密时取0.3; μ 为加固层网筋强度利用系数,参照文献[20]规定; f_{zw}' 和 f_{zw} 为加固层纵向网筋的抗拉强度及抗压强度; A_{zw}' 、 A_{zw} 分别为受拉侧纵向网筋、受压侧纵向网筋总截面面积; f_{mc} 为RPC轴心抗压强度; t_m 为加固层厚度。

3.2.3 计算结果与试验结果对比

为了验证RPCRM柱的大偏压极限承载力计算公式的有效性,将本次试验的计算结果与试验结果进行比较,结果见表4。通过表4可知,计算结果和试验结果吻合较好,误差在15%以内,表明所推导的计算公式可应用在RPCRM柱的大偏压极限承载力计算中。

表4 试验承载力及计算承载力

Table 4 Test bearing capacities and calculated bearing capacities			
试件编号	P_{u1}/kN	P_{u2}/kN	$\frac{P_{u1}}{P_{u2}}$
Z-S50-P0	7 947	7 013	1.13
Z-S100-P0.5	2 855	3 207	0.89
Z-S75-P0.5	4 110	4 419	0.93
Z-S50-P0.5	7 647	6 692	1.14
Z-S50-P0.8	7 355	6 431	1.14

注: P_{u1} 为计算承载力, P_{u2} 为试验承载力。

4 结 论

(1)与未加固试件相比,采用RPC钢筋网薄层加固钢筋混凝土偏压柱,能有效提高柱的承载力和延性,两者最高提高幅度可达233%和155%。

(2)RPCRM柱的加固效果与加固层钢筋网配筋率显著相关,与试件Z-S100-P0.5相比,试件Z-S50-P0.5开裂荷载和极限荷载显著提高,位移延性系数则有一定降低。结果表明,随着加固层钢筋网配筋率的提高,可以延缓裂缝的出现,提高承载力,但可能对试件延性有一定的影响。

(3)当初始荷载水平小于 $0.8P_0$ 时,初始荷载水平对RPCRM柱的承载力及延性影响较小,表明RPC钢筋网薄层加固法适用于负载下的钢筋混凝土偏压柱的加固。

(4)基于试验结果和理论分析,给出了RPCRM柱的承载力计算公式,计算值与试验值误差符合工程精度要求,可为工程实际应用提供参考。

参考文献

[1] 蒋隆敏,李如博,何爱波,等. HPFL加固负载下有震损RC圆柱抗震性能的有限元分析[J]. 工程力学,2020,37(8):73-88.
(JIANG Longmin, LIU Rubo, HE Aibo. Finite element analysis of seismic behavior of preload damaged RC round columns strengthened with HPFL [J]. Engineering mechanics, 2020, 37 (8):73-88.)

[2] 蒋隆敏,尚守平,刘龙海. 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层二次受力加固RC偏压柱试验及承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(4):72-79.
(JIANG Longmin, SHANG Shouping, LIU Longhai. Experimental investigation and research on calculation method of load-carrying capacity for eccentrically compressed RC columns strengthened by high performance ferrocement laminates under twice loading [J]. Journal of building structures, 2011, 32 (4):72-79.)

[3] YANG J, WANG J, WANG Z. Rectangular high-strength concrete columns confined with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) under eccentric compression loading [J]. Construction and building materials, 2018, 193 (1):604-622.

[4] XIONG G J, WU X Y, LI F F, et al. Load

- carrying capacity and ductility of circular concrete columns confined by ferrocement including steel bars [J]. Construction and building materials, 2011, 25(5): 2263–2268.
- [5] LI X, XIE H, YAN M, et al. Eccentric compressive behavior of reinforced concrete columns strengthened using steel mesh reinforced resin concrete [J]. Applied sciences, 2018, 8(10): 18–27.
 - [6] 邓明科, 李彤, 范丽玮. 钢筋网高延性混凝土加固砖柱偏心受压性能试验及计算方法研究[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 61–71.
(DENG Mingke, LI Tong, FAN Liwei. Experiment and calculation method for eccentrically loaded masonry columns strengthened with bar mesh HDC [J]. Engineering mechanics, 2021, 38(5): 61–71.)
 - [7] 严猛. 超高高韧性树脂钢丝网混凝土及预应力筒支梁桥加固理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
(YAN Meng. High toughness resin concrete with steel wire mesh and the reinforcement theoretical research on prestressed concrete simply supported plate beam bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.)
 - [8] 邓明科, 马福栋, 张阳玺, 等. 活性粉末混凝土抗压强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2731–2736.
(DENG Mingke, MA Fudong, ZHANG Yangxi. Experimental study on the compressive strength of reactive powder concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(8): 2731–2736.)
 - [9] 卜良桃, 杨斯宇. 活性粉末混凝土型钢梁抗剪性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 787–795.
(BU Liangtao, YANG Siyu. Research on shear behavior of steel reinforced reactive powder concrete beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(5): 787–795.)
 - [10] FU Q, LV B F, CAO X, et al. Brief analysis on crack of unbonded partially prestressed RPC beam [J]. Applied mechanics & materials, 2012, 238: 181–184.
 - [11] JU Y Z, LI C Y, WANG D H. Influence of axial compression ratio on seismic behavior of reactive powder concrete (RPC) beam-column joints [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 597: 312–315.
 - [12] SHI C, LONG M, CAO C, et al. Mechanical property test and analytical method for reactive powder concrete columns under eccentric compression [J]. Ksce journal of civil engineering, 2016, 21(2): 1–12.
 - [13] AHMED A T, HADI M. Influence of steel fibres on the behaviour of RPC circular columns under different loading conditions [J]. Structures, 2018, 14: 111–123.
 - [14] LIU D J, HUANG H W, XUE Y D, et al. Behaviour of tunnel lining strengthened by textile-reinforced concrete [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(7): 91–90.
 - [15] 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 People's Republic of China. Standard for test methods of concrete structures GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
 - [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 活性粉末混凝土: GB/T31387—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Reactive powder concrete: GB/T31387—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
 - [17] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸实验: GB/T 228. 1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
(Standardization Administration. Metallic materials Tensile testing: GB/T 228. 1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)
 - [18] HO J, LAM J, KWAN A. Effectiveness of adding confinement for ductility improvement of high-strength concrete columns [J]. Engineering structures, 2010, 32(3): 714–725.
 - [19] 张勤, 李三亚, 赵永胜, 等. 纤维网增强混凝土复合材料约束混凝土应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 166–176.
(ZHANG Qin, LI Sanya, ZHAO Yongsheng. Study on stress-strain relationship of concrete confined with textile reinforced concrete composites [J]. Journal of building structures, 2021, 42(4): 166–176.)
 - [20] 蒋隆敏. 钢筋网高性能水泥复合砂浆加固 RC 柱在静载与低周反复荷载作用下的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
(JIANG Longmin. The research on the performance of RC columns strengthened with high performance composite cement mortar laminates reinforced by mesh reinforcements under monotonic loading and laterally cyclic loading [D]. Changsha: Hu'nan University, 2006.)
 - [21] 袁超. 聚乙烯醇纤维水泥砂浆钢筋网加固 RC 偏压柱试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
(YUAN Chao. The research on bearing capacity of PVA-ECC reinforced concrete square column subjected to eccentric load [D]. Changsha: Hu'nan University, 2013.)
 - [22] 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 People's Republic of China. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)