【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

二次受力下外包 RPC 加固钢柱偏压性能分析

卜良桃, 肖礼瀚

湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082

摘要: 为研究超高性能混凝土对钢柱的加固效果, 采用活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, RPC) 对初始荷载作用下的 6 根足尺偏压钢柱进行外包加固, 考虑初始荷载、偏心距和 RPC 强度对偏压钢柱受力性能的影响, 进行二次受力偏压试验。试验结果表明: 二次受力下采用 RPC 加固偏压钢柱能显著提高钢柱的极限承载力、稳定性和刚度。RPC 与型钢能够良好地协同工作, 加固构件截面基本符合平截面假定。试件的极限承载力随着 RPC 强度增大而增大, 随着初始荷载和偏心距增大而减小。当型钢初始荷载与极限荷载比值为 0.7 时, 原构件承载力提升 5 倍左右。基于破坏机理, 给出了考虑 RPC 强度折减的极限承载力计算公式, 可供实际加固工程参考。

关键词: 结构工程; 二次受力; 活性粉末混凝土; 偏压钢柱; 加固; 承载力

中图分类号: TU398.9; TU323.1

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.04400

Analysis of performance of eccentrically compressed steel columns reinforced by outsourcing RPC under secondary loading

BU Liangtao and XIAO Lihan

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, P. R. China

Abstract: In order to study the effect of ultra-high performance concrete on steel columns, we propose to use reactive powder concrete (RPC) to outsource and reinforce 6 full-scale eccentric steel columns under initial load. Considering the influence of initial load, eccentricity, and RPC strength on the mechanical performance of eccentrically loaded steel columns, we carry out the secondary eccentrically loaded test. The test results show that the use of RPC to reinforce the eccentrically compressed steel column under secondary loading can significantly improve the ultimate bearing capacity, stability and stiffness. RPC and section steel work well together, and the section of the reinforced members basically conforms to the assumption of a flat section. The ultimate bearing capacity of the specimen increases with the increase of RPC strength and decreases with the increase of initial load and eccentricity. When the ratio of the initial load to the ultimate load reaches 70%, the load capacity of the original member can still increase by about 5 times. Based on the failure mechanism and considering the RPC strength reduction, we derive the ultimate bearing capacity calculation formula, which can be used as a reference for practical reinforcement projects.

Key words: structural engineering; secondary load; reactive powder concrete; eccentrically compressed steel column; reinforcement; bearing capacity

Received: 2020-11-24; **Accepted:** 2021-03-23; **Online (CNKI):** 2021-06-11

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51678231)

Corresponding author: Professor BU Liangtao. E-mail: plt63@126.com

Citation: BU Liangtao, XIAO Lihan. Analysis of performance of eccentrically compressed steel columns reinforced by outsourcing RPC under secondary loading [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(4): 400-407. (in Chinese)

型钢自重轻、强度高、韧性强, 被广泛用在建筑行业中, 但需要及时对在役钢结构进行加固与修复^[1]. 实际工程中对钢结构的加固主要是在负载下进行, 负载加固技术^[2]主要分为增大截面加固、焊接加固和黏贴加固等, 但都无法有效解决钢结构防火耐腐蚀性差等问题. 为了解决上述不足, 周乐等^[3-4]在负载作用下外包钢筋混凝土加固轴压钢柱, 研究初始荷载对破坏形态和承载力大小的影响; 王元清等^[5]对不同初始负载下外包混凝土加固轴压柱进行有限元分析发现, 初始应力对加固效果影响较大, 当初应力系数大于 20% 时, 要考虑对加固材料进行强度折减; 杨文强等^[6]将此方法运用在实际框架结构柱加固工程中, 结构现已投入正常使用且无异常. 以上方法受到了型钢初始荷载的制约, 受粗骨料的影响, 在实际加固过程中还难以进行振捣. 本研究提出使用活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, RPC) 对负载下的偏压钢柱进行外包加固. RPC 是用水泥、硅灰、细石英砂、高效减水剂和钢纤维等制成的一种高强度、高韧性、耐久性以及耐火性极强的新型水泥基复合材料^[7], 各项指标都优于普通混凝土, 并且能够和型钢良好协同工作^[8], 已逐渐成为国内外加固材料领域的研究热点. 众多学者对 RPC 加固柱的轴压和偏压性能进行了理论研究^[9-11]. 使用 RPC 作为加固材料, 不仅使原构件承载力提升数倍, 还能有效解决防火防腐等问题, 由于没有粗骨料的存在, 能更好地运用在桥梁、建筑等^[12-13]实际加固工程中. 但目前研究鲜有涉及 RPC 对型钢柱的加固, 尤其在二次受力方面, 无法有效预估加固后构件的承载力. 此外, 大部分研究所用的构件为缩尺构件, 难以准确反映实际构件受力情况. 本研究采用足尺构件, 在负载作用下外包 RPC 加固偏压钢柱, 考虑初始荷载、偏心距和 RPC 强度对偏压钢柱受力性能的影响, 分析构件受力特征与破坏过程, 并得到承载力计算公式.

1 试验概况

1.1 构件设计与材料力学性能

试验设计了 6 根外包 RPC 加固柱和 1 根型钢对比柱, 试验参数包括初始荷载、RPC 强度和偏心距 (e). 钢柱均采用 Q235B 型的热轧中翼缘 H 型钢, 长度为 2 400 mm. 考虑箍筋在受力中的贡献^[14], 在加固柱中沿高度设置直径为 8 mm 的 HRB335 级箍筋, 构件两端 600 mm 内为加密区, 箍筋间距为

100 mm, 中部非加密区箍筋间距为 200 mm. 加固柱截面尺寸为 250 mm × 350 mm, 截面如图 1. Z0 为纯型钢对比柱, 用于对比分析负载下外包 RPC 加固方法的优势. 试件 Z1 ~ Z3 用于对比分析不同初始荷载对加固柱极限承载力的影响, 试件 Z2、Z5 和 Z6 对比分析 RPC 强度对加固效果的影响, Z1 与 Z4 柱对比分析不同偏心距对加固效果的影响, 各试件参数见表 1.

图 1 加固柱截面图 (单位: mm)
Fig. 1 Sectional view of reinforced column (unit: mm)

表 1 试件主要设计参数					
Table 1 Main design parameters of specimens					
试件	柱高/ mm	截面尺寸/ (mm × mm)	RPC 强 度等级	偏心距/ mm	初始荷载/ 极限荷载
Z0	2 400	—	—	90	—
Z1	2 400	250 × 350	R120	90	0.5
Z2	2 400	250 × 350	R120	90	0.6
Z3	2 400	250 × 350	R120	90	0.7
Z4	2 400	250 × 350	R120	120	0.5
Z5	2 400	250 × 350	R100	90	0.6
Z6	2 400	250 × 350	R140	90	0.6

为保证构件的偏心受力, 在型钢两端居中焊接 40 mm 厚的端板, 根据规范^[15-16]对预留的钢材和 RPC 试块进行力学性能测试, 力学性能参数见表 2 和表 3. RPC 的峰值压应变和极限压应变可根据文献^[17]计算得出.

表 2 RPC 力学性能参数				
Table 2 Mechanical parameters of RPC				
RPC 等级	立方体抗压 强度/MPa	轴心抗压 强度/MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	弹性模量/ GPa
R100	108.4	98.2	8.6	39.8
R120	131.7	121.3	10.9	42.5
R140	147.3	136.5	12.8	44.9

表 3 钢材力学性能参数
Table 3 Mechanical parameters of steels

钢材 类型	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
热轧型钢	273.5	381.6	210	0.25
B8 箍筋	372.3	502.3	200	0.30

1.2 加载方案与测点布置

加载设备由 6 500 kN 液压千斤顶、静载测试仪及反力架组成, 根据规范^[18]的要求, 所有构件进行预加载后再正式加载. 具体加载方式为: 对 Z0 构件稳定的分级施加荷载, 接近极限荷载时采用位移加载, 直到其屈服破坏. 由于 Z1 ~ Z6 涉及到二次受力的问题, 因此实行两阶段加载: 第 1 阶段为初始荷载的施加, 通过液压千斤顶和静载测试仪系统分级加载至预定荷载; 第 2 阶段在维持初始荷载不变的情况下继续加载, 在裂缝出现以前每级荷载为预估极限荷载的 10%, 持荷 5 min, 待稳定后再测量数据以及施加下一级荷载. 当荷载达到预估荷载的 80% 以后, 每级荷载增量为预计极限荷载的 5%, 在接近极限荷载时采用位移加载, 当力传感器显示的荷载降低幅度很快或者构件破坏形态很明显时停止加载, 每一级荷载同步记录对应的侧向位移大小以及测点应变. 试验加载装置如图 2.

图 2 加载装置图

Fig. 2 Loading device diagram

试验过程中, 沿柱高均匀布置 5 个百分表, 用于测量受力过程中的侧向位移, 位置如图 2. 型钢在柱高中部的腹板上等距布置 5 个应变片, 受压与受拉翼缘外侧各等距布置 3 个应变片, RPC 在柱高中部拉压区各等距布置 3 个应变片, 两侧面各等距

布置 5 个应变片, 应变片布置见图 3. 所有应变片数值由 DH3816N 静态应变测试系统自动采集, 通过静载测试仪控制系统直接读取试验过程中试验柱所承受的荷载.

图 3 应变片布置图

Fig. 3 Strain gauges layout drawing

2 试验结果分析

2.1 破坏现象

Z0 柱为未加固型钢的对比柱, 前期随着荷载的增加, 面内弯曲逐渐增大, 侧向位移保持线性增长, 并且由于几何缺陷的存在, 构件沿着几何缺陷的方向发生轻微移动. 当荷载接近峰值荷载, 荷载基本维持不变, 最后构件由于变形太大而不能继续承受荷载, 整个构件呈现弯扭破坏形态. Z1 至 Z6 为加固柱, 破坏过程基本类似, 在二次受力阶段大体经历了弹性阶段、裂缝发展阶段及破坏阶段^[19]. 以加固柱 Z3 为例, 在加载初期, 侧向位移线性增长, 由于钢纤维的存在, 荷载达到峰值的 51% (2 248 kN) 时, 构件受拉区中部才出现首条水平裂缝, 长度为 85 mm. 随着荷载的增加, 构件弯曲程度越来越大, 并不断传来钢纤维被拉断的“滋滋”声. 水平裂缝数量不断增多, 长度和宽度持续增大, 荷载达到 3 000 kN 时, 上端部支座处出现纵向裂缝, 并逐渐向受压区延伸, 上端部受压区 RPC 不断掉落碎屑. 到峰值荷载的 80% 时, 能看到柱子明显弯曲, 柱中侧向位移达到 22.4 mm, 中部受压区 RPC 明显起鼓. 达到峰值荷载 4 480 kN 时, 柱子受压区 RPC 压碎, 受拉区 RPC 裂开, 柱子呈现小偏心受压特征; 主裂缝贯穿折断截面, 主裂缝最大宽度为 12.8 mm, 构件破坏图如图 4.

图4 Z3 试件破坏图

Fig. 4 Specimen destruction diagram of Z3

2.2 破坏机理

二次受力构件不等同于一次受力构件, 它的破坏机理在于初始荷载造成外包材料应变滞后, 使得原结构和外包加固材料应力应变无法同步, 二者先后产生破坏. 在二次受力的过程中, 型钢承担着初始应力, 若不考虑截面的应力重分布, 随着二次受力荷载的增加, 外包 RPC 才逐渐开始受力, 型钢除了承担原荷载以外, 还将和外包 RPC 一起承担新增的荷载, 因此 RPC 应力始终滞后于型钢应力, 随后某一刻型钢会先进入屈服阶段, 应力不变, 应变增加, 增加的荷载全部由外包 RPC 承担, 导致 RPC 的应变速率增大, 最后发生破坏, 构件失效. 从试验破坏现象来看, 破坏时受压区 RPC 压碎, 内部型钢没有出现局部屈曲或者整体失稳, 说明两种材料相互约束, 型钢屈服后荷载由 RPC 承担, RPC 破坏后构件失效; 从试验中测出的数据来分析, Z1 柱和 Z3 柱的受拉受压翼缘应变曲线如图 5. 其中, Z1 柱和 Z3 柱的初始荷载百分比分别为 50% 和 70%. 由图 5 可见, 在有初始荷载时, 外包 RPC 应变滞后于型钢, 初始荷载越大, 应变滞后现象越明显, Z1 和 Z3 柱的应变约为 0.401×10^{-3} 和 0.523×10^{-3} . 在荷载为 3 000 kN 时, Z1 柱型钢进入塑性阶段, 此时应变为 1.400×10^{-3} 左右, 而 RPC 应变为 0.982×10^{-3} . 当荷载达到 4 000 kN 时, 型钢应变为 1.984×10^{-3} , 达到屈服. 最后构件破坏时, 外包 RPC 测得受压区应变为 2.869×10^{-3} , 未达到

极限屈服应变, 而此时型钢受拉应变为 1.102×10^{-3} , 受压应变为 2.816×10^{-3} , 已经屈服. Z3 构件破坏时 RPC 受压应变约为 2.476×10^{-3} , 未达到极限屈服水平, 而型钢受压应变为 2.964×10^{-3} , 已经进入极限屈服阶段. 这说明构件破坏时, 由于应变滞后的影响, 型钢会先达到屈服, 然后由外包 RPC 继续承受增加荷载, 应力应变也急剧增加, 最后发生破坏. 对比 Z1 和 Z3, 当应变滞后越大, 二次受力中型钢屈服越早, 外包 RPC 抗压强度利用率越低, 也会更早发生破坏, 极限承载力随之降低.

2.3 影响因素

2.3.1 初始荷载

不同初始荷载下得到的柱高中部荷载-侧向位移曲线如图 6 (a). A、B、C 3 点分别代表加固前后的分界点. 试件 Z1、Z2 和 Z3 的初始荷载百分比分别为 50%、60% 和 70%, 所对应的极限承载力分别为 5 500、5 176 和 4 480 kN. 可以看出, 加固柱的极限承载力随初始荷载的增大而减小. 3 根加固构件相对于纯型钢 Z0 来说, 极限承载力分别提高了 524%、487% 和 408%, 加固效果显著. Z2 构件极限承载力比 Z1 构件降低了 5.9%, Z3 构件极限承载力比 Z2 构件极限承载力降低了 13.4%. 由此可见, 极限承载力下降的速率大于初始荷载递增的速率. 从斜率上看, 加固后曲线的斜率明显大于加固前, 说明外包 RPC 极大的提升了构件的刚度, 3 根构件在加固后起始阶段的斜率相差不大, 说明 RPC 在初期提供的加固效果基本一致. 但是 3 根构件处于弹性阶段的时间却不一样, 初始荷载越大,

(a) Z1柱受拉受压边缘荷载-应变曲线

(b) Z3柱受拉受压边缘荷载-应变曲线

图 5 典型试件受拉受压区荷载-应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves of typical specimens in tension and compression zones

加固构件处于弹性阶段时间越短, 会更快进入塑性阶段, 然后屈服, 曲线的斜率开始变小, 加固构件刚度退化也会更快. 这是因为型钢承受初始荷载越大, 在二次受力过程中型钢不能与 RPC 承受较大变形, 将更快地从弹性进入塑性阶段, 然后增加的荷载全部由外包 RPC 承担, 导致外包 RPC 在较短的时间进入塑性阶段, 整体刚度也因此变小. 但是由于 RPC 的力学性能优于普通混凝土, 所以不会发生很明显的脆性破坏, 曲线很平缓的从弹性过渡到屈服阶段.

2.3.2 RPC 强度

不同 RPC 强度下的荷载-侧向位移曲线如图 6 (b), A 点为加固前后的分界点. Z5、Z2 和 Z6 构件所使用的 RPC 强度分别为 100、120 和 140 MPa, 所对应的极限承载力分别为 4 828、5 176 和 5 371 kN, 可以看出, 极限承载力随着 RPC 强度等级的增大而增大. 与 Z5 相比, Z2 和 Z6 的承载力分别提升了 7.2% 和 11.2%, Z6 比 Z2 承载力提高了

(a) 不同初始荷载下的荷载-位移曲线

(b) 不同RPC强度下的荷载-位移曲线

(c) 不同偏心距下的荷载-位移曲线

图 6 荷载-侧向位移曲线

Fig. 6 Load-lateral displacement curves

3.8%, 说明 RPC 强度对加固效果有影响, 但随着 RPC 强度的增加, 加固效果逐渐降低. 比较 3 根曲线斜率, 发现加固前的曲线基本重合, 加固柱 RPC 等级越强, 曲线斜率越大, 刚度越大, 相同荷载下的侧向位移更小. 这是因为在其他条件相同情况下, 加固构件受力主要由外包 RPC 提供, RPC 等

级越高, 构件刚度也会相对更高。

2.3.3 偏心距

不同偏心距下的荷载-侧向位移曲线如图 6 (c)。Z1 和 Z4 构件的 RPC 强度均为 120 MPa, 初始荷载均为 50%, 偏心距分别为 90 mm 和 120 mm, A 和 B 两点为加固前后受力分界点。可以看出, 偏心距对加固承载力的影响较大, 偏心距为 90 mm 时, 构件承载力为 5 500 kN, 而偏心距为 120 mm 时, 极限承载力为 4 616 kN, 下降了 16.1%。因此随着偏心距增大, 加固构件极限承载力降低。在加固点以后, 偏心距越大, 曲线斜率越小, 表示构件刚度越小, 并且越早进入了屈服平台。因为型钢加载到相同初始荷载再进行加固, 偏心距越大的型钢承受弯矩也越大, 弹性储备剩余空间越小, 在加固后会更早进入塑性阶段, 加固构件会更早破坏。

3 计算公式

3.1 折减系数

综上所述得出, 在整个二次受力过程中由于应变滞后或应力超前, 型钢和 RPC 无法同时到达材料强度的极限峰值, 因此极限荷载要比一次受力情况下更低。一般认为, 当型钢达到屈服时构件就已经失效, 而此时 RPC 的强度还未达到峰值, 因此它的强度未被完全利用, 需要对外包 RPC 的强度进行折减。由于小偏压构件最后的破坏状态的一般是受压区 RPC 被压碎, 而此时截面的应力应变状态比较复杂, 因此作出如下假设: ① 加固柱在受力过程中横截面符合平截面假定; ② 外包 RPC 和型钢之间的无黏结滑移, 两者之间能良好的协同工作; ③ 只研究 RPC 受压强度的利用率, 忽略弯曲变形带来的影响, 把构件近似视为轴心受压构件; ④ 型钢本构模型采用理想的二折线简化模型; ⑤ RPC 本构模型采用文献[20]提供的应力-应变关系式。由此可推出 RPC 强度折减系数 φ_c 为

$$\varphi_c = \frac{\sigma_c}{f_c} = 2.45 \frac{f_{ss}}{E_{ss}\varepsilon_{c0}}(1-\beta) - 1.34 \times \left[\frac{f_{ss}}{E_{ss}\varepsilon_{c0}}(1-\beta) \right]^4 + 0.65 \left[\frac{f_{ss}}{E_{ss}\varepsilon_{c0}}(1-\beta) \right]^5 \quad (1)$$

其中, σ_c 为 RPC 压应力; f_c 为 RPC 轴心抗压强度; f_{ss} 为型钢极限抗压强度; E_{ss} 为型钢弹性模量; ε_{c0} 为 RPC 峰值压应变; β 为型钢初始荷载比。

3.2 承载力计算公式

Z1 柱中部沿截面高度的应变如图 7。由图 7 可

知, Z1 构件的受压区 RPC 应变随截面高度近似呈线性变化, 基本符合平截面假定, 其余构件截面应变规律类似。可知在二次受力作用下, 外包 RPC 加固型钢构件依旧能够满足平截面假定。本研究参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[21], 对型钢混凝土偏压柱受力计算公式进行修正, 截面应力状态与受力图如图 8。根据力平衡条件, 引进抗拉强度系数 $k = 0.25$ ^[22], 并考虑受压 RPC 强度折减系数, 可得式(2)和式(3):

图 7 Z1 柱中部沿截面高度的应变

Fig. 7 Strain along the section height in the middle of the column Z1

图 8 截面受力图

Fig. 8 Sectional force diagram

$$F_u = \varphi_c \alpha f_c b x + f'_y A'_s + f'_a A'_{af} - \sigma_y A_s - \sigma_a A_{af} - k f_t b \left(h - \frac{x}{\beta} \right) + N_{aw} \quad (2)$$

$$F_u e = \varphi_c \alpha f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s \left(h_0 - a'_s \right) + f'_a A'_{af} \left(h_0 - a'_s \right) - k f_t b \left(h - \frac{x}{\beta} \right) \left[\frac{1}{2} \left(h - \frac{x}{\beta} \right) - a \right] + M_{aw} \quad (3)$$

其中, F_u 为外包 RPC 加固偏压柱的极限承载力; 其余参数意义参见规范^[21] (可扫描文末右下角二维码). 通过改进后的公式重新对试验构件进行承载力计算, 结合有限元模拟值和试验值, 对比如表 4. 其中, F_s 为试验值; F_m 为有限元模拟值. 由表 4 可见, 计算结果接近且低于试验值, 误差均值为 5%, 偏于安全, 且有限元模拟值与计算值较接近, 计算公式较规范合理.

表 4 计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results

试件	折减系数	F_s/kN	F_m/kN	F_u/kN	F_s/F_u
Z0	—	882	856.7	845	1.04
Z1	0.65	5 500	5 462.5	5 374	1.02
Z2	0.55	5 176	4 737.1	4 825	1.07
Z3	0.41	4 480	4 056.7	4 047	1.09
Z4	0.65	4 616	4 448.3	4 567	1.01
Z5	0.62	4 828	4 718.5	4 604	1.05
Z6	0.51	5 371	5 118.3	5 026	1.07

4 结 论

1) 在 50% ~ 70% 初始荷载下, 采用 RPC 外包加固偏心受压钢柱具有良好的加固效果, RPC 和型钢能够协调工作, 加固后构件的刚度有明显增加, 在初始荷载水平指标达到 70% 的情况下仍能将原构件承载力提升 5 倍.

2) RPC 加固偏压钢柱的加固效果与偏心距、初始荷载和 RPC 强度有关, 承载力随偏心距和初始荷载的增大而降低, 随 RPC 强度的增大而增加. 同时, 初始荷载对加固构件极限承载力影响较大, 60% 初始荷载的构件比 50% 初始荷载的构件极限承载力平均降低 5.9%; 70% 初始荷载的构件比 60% 初始荷载的构件极限承载力平均降低 13.4%, 比 50% 初始荷载比例的构件极限承载力平均降低 18.5%.

3) 参考现有规范, 给出了二次受力下外包 RPC 加固偏心受压钢柱的承载力计算公式, 计算值和试验值平均误差为 5%, 可供实际工程参考.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51678231)

作者简介: 卜良桃 (1963—), 湖南大学教授. 研究方向: 工程结构可靠性鉴定与加固技术. E-mail: plt63@126.com

引 文: 卜良桃, 肖礼瀚. 二次受力下外包 RPC 加固钢柱偏压性能分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(4): 400-407.

参考文献 / References:

- [1] 杨旭, 罗永峰, 刘俊, 等. 既有网格结构损伤检测与模拟方法研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(2): 1-13, 21.
YANG Xu, LUO Yongfeng, LIU Jun, et al. Research progress on damage detection and simulation methods for existing grid structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(2): 1-13, 21. (in Chinese)
- [2] 王元清, 宗亮, 施刚, 等. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(2): 1-6, 22.
WANG Yuanqing, ZONG Liang, SHI Gang, et al. Application research on new strengthening technologies for steel structures [J]. Industrial Building, 2017, 47(2): 1-6, 22. (in Chinese)
- [3] 周乐, 聂晓梅, 王元清, 等. 负载下外包钢筋混凝土加固钢柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 275-284.
ZHOU Le, NIE Xiaomei, WANG Yuanqing, et al. Experimental study of axial compression behavior on steel columns strengthened by enclosed reinforced concrete under load [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Suppl. 1): 275-284. (in Chinese)
- [4] 周乐, 王晓初, 白云皓, 等. 负载下外包钢筋混凝土加固轴心受压钢柱受力性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 192-203.
ZHOU Le, WANG Xiaochu, BAI Yunhao, et al. Research on mechanical properties of axially loaded steel columns reinforced by outsourcing reinforced concrete while under load [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 192-203. (in Chinese)
- [5] 王元清, 唐伟明, 贾连光, 等. 负载下外包钢筋混凝土加固轴压钢柱的承载性能有限元分析[J]. 钢结构, 2017, 32(1): 83-86, 96.
WANG Yuanqing, TANG Weiming, JIA Lianguang, et al. Finite element analysis of bearing capability of precompressed steel reinforced concrete columns under loads [J]. Steel Construction, 2017, 32(1): 83-86, 96. (in Chinese)
- [6] 杨文强, 刘巍, 黄正明. 钢柱外包混凝土加固在钢框架加固中的应用[J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 735-740.
YANG Wenqiang, LIU Wei, HUANG Zhengming. Application of steel column wrapped concrete reinforcement in steel frame reinforcement [J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 735-740. (in Chinese)
- [7] 王秋维, 史庆轩, 陶毅, 等. 活性粉末混凝土抗压力学性能及指标取值[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1381-1389.
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. Compressive mechanical properties and indexes of reactive

- powder concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 178-182. (in Chinese)
- [8] 卜良桃, 罗恺彦. 型钢外包活性粉末混凝土 (RPC) 的界面黏结性能[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 307-312.
- BU Liangtao, LUO Kaiyan. Interfacial bonding properties of steel-clad reactive powder concrete (RPC) [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 307-312. (in Chinese)
- [9] ALGBURI A, SHEIKH M, HADI M. Analytical investigation on the behavior of circular and square RC columns strengthened with RPC and wrapped with FRP under uniaxial compression [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 25: 100833.
- [10] 邓明科, 李睿喆, 张阳玺. HDC 与 RPC 加固 RC 柱轴心受压性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(9): 74-83.
- DENG Mingke, LI Ruizhe, ZHANG Yangxi. Experimental investigation on axial compression behavior of RC columns strengthened with HDC and RPC jackets [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(9): 74-83. (in Chinese)
- [11] 王欣, 周扬帆, 王旗, 等. MRPC 加固震损异形柱节点抗震性能研究[J]. 山东建筑大学学报, 2021, 36(1): 23-31.
- WANG Xin, ZHOU Yangfan, WANG Qi, et al. Study on the seismic behavior of the frame joints of seismic damaged special-shaped columns reinforced by MRPC [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2021, 36(1): 23-31. (in Chinese)
- [12] 位三栋, 马跃强, 彭斌, 等. 超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 284-289.
- WEI Sandong, MA Yueqiang, PENG Bin, et al. Experimental study on performance of UHPC-strengthened historical protected brick masonry load-bearing walls [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 284-289. (in Chinese)
- [13] WANG Shilei, KE Zaitian, GAO Yan, et al. Long-term in situ performance investigation of orthotropic steel bridge deck strengthened by SPS and RPC solutions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(6): 04019054.
- [14] 金浏, 李平, 杜修力. 考虑尺寸影响的箍筋约束混凝土轴压本构模型[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(1): 81-89.
- JIN Liu, LI Ping, DU Xiuli. Compressive stress-strain model for stirrup-confined concrete columns considering the effect of structural size [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 81-89. (in Chinese)
- [15] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S].
- GB/T 31387—2015 Reactive powder concrete [S]. (in Chinese)
- [16] GB/T 228. 1-2010 金属材料拉伸实验[S].
- GB/T 228. 1-2010 Metallic materials tensile testing [S]. (in Chinese)
- [17] 吕雪源, 王英, 符程俊, 等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(10): 1-9.
- LÜ Xueyuan, WANG Ying, FU Chengjun, et al. Basic mechanical property indexes of reactive powder concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(10): 1-9. (in Chinese)
- [18] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].
- GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures [S]. (in Chinese)
- [19] 卜良桃, 秦川. 型钢活性粉末混凝土柱大偏压性能分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(6): 606-613.
- BU Liangtao, QIN Chuan. Analysis of mechanical performance of steel reinforced reactive powder concrete columns under large eccentric loading [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(6): 606-613. (in Chinese)
- [20] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 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): 125-134.
- ZHENG Wenzhong, LI Li, LU Shanshan. Experimental research on mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 125-134. (in Chinese)
- [21] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S].
- JGJ 138—2016 Code for design of composite structures [S]. (in Chinese)
- [22] DBJ 43/T 325—2017 活性粉末混凝土结构技术规程[S].
- DBJ 43/T 325—2017 Technical specification for reactive powder concrete structures [S]. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】

补充材料

<http://journal.szu.edu.cn>