

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.019

BFRP布约束钢筋混凝土圆柱和方柱的抗震性能研究

黄镜淳¹, 高鹏², 胡凌志¹

(1. 合肥大学 城市建设与交通学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究玄武岩纤维增强聚合物(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)约束钢筋混凝土圆柱和方柱的抗震性能,文章分别对3根约束柱和对比柱开展低周反复侧向加载试验,研究轴压比、截面形状等参数对加固柱抗震性能的影响。结果表明:约束柱皆为弯曲破坏模式,其承载、延性和耗能能力均有上升;随着轴压比增大,加固柱承载力增大,延性和耗能性能降低;在相同截面面积和纵筋配筋率下,加固方柱的峰值荷载和弹性刚度比加固圆柱明显较大,但变形及耗能性能略小。最后分别计算 BFRP 布约束钢筋混凝土圆柱和方柱抗震承载力,所得结果的预测精度较高。

关键词:玄武岩纤维;约束圆柱;约束方柱;低周反复侧向加载;抗震性能

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1704-06

Research on seismic behavior of BFRP-confined reinforced concrete circular and square columns

HUANG Jingting¹, GAO Peng², HU Lingzhi¹

(1. School of Urban Construction and Transportation, Hefei University, Hefei 230601, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To investigate the seismic behavior of reinforced concrete (RC) circular and square columns confined with basalt fiber reinforced polymer (BFRP), three confined and control columns were tested under low cyclic lateral loading, respectively. The influence of parameters such as axial compression ratio and cross section shape on the seismic behavior was investigated. The results show that the columns present flexural failure mode after confinement. The load carrying capacity, ductility and energy dissipation capacity of columns are improved. With the increase of axial compression ratio, the load carrying capacity of confined columns rises and the ductility and energy dissipation capacity drop. With the same cross section area and longitudinal reinforcement ratio, the peak load and elastic stiffness of the confined square columns are larger than those of the confined circular columns, but the deformation and energy dissipation capacity of the former are slightly smaller than those of the latter. Finally, the seismic bearing capacities of BFRP-confined RC circular and square columns are calculated with relatively high accuracy, respectively.

Key words: basalt fiber; confined circular columns; confined square columns; low cyclic lateral loading; seismic behavior

纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)因力学性能优良、抗腐蚀性好且施工方便等

优点,已广泛应用于钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构加固领域。现有试验研究显示外

收稿日期:2024-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208158);安徽省高校重点自然科学基金资助项目(2022AH051805)和合肥大学人才科研基金资助项目(21-22RC38)

作者简介:黄镜淳(1988—),女,安徽合肥人,博士,合肥大学讲师,硕士生导师。

贴 FRP 布能够有效阻止纵筋屈曲,提高 RC 柱的承载力和变形性能^[1-3]。玄武岩纤维增强聚合物(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)是以天然玄武岩矿石为原料,将其破碎经高温熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板制成的丝状产品。相比于最常用的碳纤维增强聚合物, BFRP 节能环保、售价低廉,且其极限应变较高,特别适用于增强 RC 柱的抗震延性^[4]。

目前相比碳纤维增强聚合物,采用 BFRP 布进行 RC 柱抗震加固的研究较少。文献[5-8]的试验结果表明,对于设计轴压比范围为 0~0.45 的 RC 方柱, BFRP 布约束后其抗剪承载力、变形和耗能能力皆明显改善;文献[9-10]的研究得出 BFRP 布对设计轴压比为 0.34、0.35 的 RC 圆柱抗震性能加固效果良好的结论。

从上述文献研究可以看出,已有外包 BFRP 布的抗震加固试验多限于设计轴压比小于 0.5 且加固截面形状为方形的情况,因此本文采用外包 BFRP 布对不同轴压比的 RC 柱进行低周反复侧向加载试验,分析加固前后柱的滞回曲线、延性系数、能量耗散及刚度退化等指标的变化,且重点对比等截面面积和配筋率条件下加固方柱和圆柱抗震性能的差异,并对加固柱的抗震承载力进行验算。

1 试验概况

1.1 试验设计及材料特性

试验设计和制作了 4 个 RC 圆柱和 2 个 RC 方柱试件进行对比分析。

圆柱直径为 300 mm,方柱边长为 265 mm,倒角为 25 mm,柱高皆为 1 850 mm,底部基座高为 400 mm。圆柱和方柱的纵筋分别为 6 Φ 18、4 Φ 22 mm,纵筋配筋率均为 2.16%,箍筋为 ϕ 6@200 mm,混凝土保护层厚度为 25 mm。柱混凝土强度等级均为 C25,实测 28 d 混凝土立方体抗压强度平均值为 31.4 MPa。纵筋和箍筋分别采用 HRB400 和 HPB300 级钢筋,实测屈服强度分别为 477.3、393.3 MPa,抗拉强度分别为 626.5、519.6 MPa。实测 BFRP 布的单层为 0.107 mm,抗拉强度为 1 857.3 MPa,弹性模量为 79.4 GPa,延伸率为 2.4%。

所有加固方式为距柱底 600 mm 范围内全包 3 层 BFRP 布约束,且布环向搭接 150 mm,防止出现剥离破坏。

构件设计轴压比分别为 0.30、0.60,水平加

载点至柱底距离为 1 175 mm,试件参数设计见表 1 所列。表 1 中:U、C 分别代表未约束和 3 层 BFRP 布约束柱;C、S 分别代表圆形和方形截面柱;N3 和 N6 分别代表柱轴压比为 0.30、0.60。

表 1 试件参数设计

试件编号	加固方式	截面形状	轴压比
UC-N3		圆形	0.30
UC-N6		圆形	0.60
US-N3		方形	0.30
BC-N3	3 层 BFRP 布	圆形	0.30
BC-N6	3 层 BFRP 布	圆形	0.60
BS-N3	3 层 BFRP 布	方形	0.30

1.2 试验装置及加载制度

试验在合肥工业大学结构试验室进行,加载装置如图 1 所示。

采用自平衡装置对柱施加恒定竖向荷载,采用 MTS 液压伺服作动器对柱施加水平荷载且遵循全位移控制加载制度。

试件屈服前,按 0.25 倍屈服位移增加步长,每级循环 1 次;试件屈服后,按 1 倍屈服位移增加步长,每级循环 2 次。当荷载下降到峰值荷载的 85% 时,加载结束。

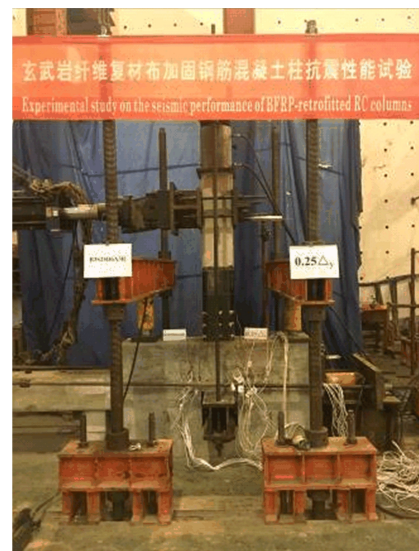


图 1 加载装置

2 试验结果和分析

2.1 试验现象

试件的破坏形态如图 2 所示。

从图 2a、图 2b 可以看出,未加固柱 UC-N3 和 UC-N6 呈现弯剪破坏形态,破坏时柱身均出现

较细的交叉主斜裂缝,两侧根部高为 200~300 mm 范围内混凝土碎裂脱落。

从图 2c 可以看出,未加固柱 US-N3 呈现剪切破坏形态,破坏时柱身出现 10~20 mm 宽的交叉主斜裂缝,混凝土沿斜裂缝发生错动且根部碎裂面积较大。

从图 2d、图 2e 可以看出,加固柱的破坏形式均为弯曲破坏,加固柱 BC-N3、BC-N6 破坏时,根

部有 100~150 mm 宽的 BFRP 布断裂,两侧混凝土压碎涌出。

从图 2f 可以看出,加固柱 BS-N3 仅柱根部东南侧拐角处有约 5 mm 宽 BFRP 布断裂,混凝土略微压碎。

对比图 2d、图 2e 可以看出,随着轴压比的增大,BFRP 布裂缝宽度也增大,混凝土压碎程度加重。

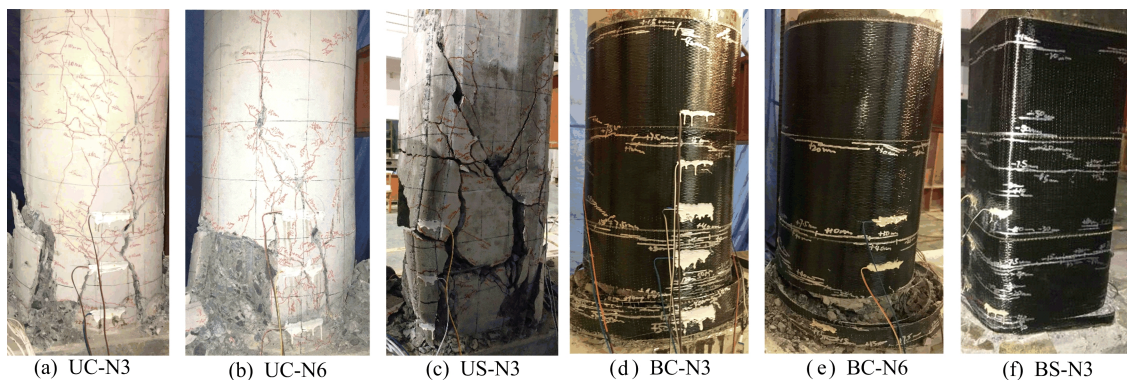


图 2 试件破坏形态

2.2 滞回曲线

各试件水平荷载-加载点水平位移($P-\Delta$)滞回曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出:未加固试件滞回曲线主要呈弓形且伴有明显的“捏缩”现象,极限位移和滞回环面积较小,显示出较差的变形和耗能能力;BFRP 布加固后,试件的滞回曲线转变成较饱满的梭形,柱的极限位移和滞回环面

积均明显提高,表明柱的延性和耗能能力增强。

对比图 3d、图 3e 可以发现,随着轴压比增大,加固柱 BC-N6 较柱 BC-N3 的水平承载力提高,但极限位移明显减小。

对比图 3d、图 3f 可以看出,等截面面积的加固圆柱 BC-N3 较加固方柱 BS-N3 极限位移略大,但承载力较低。

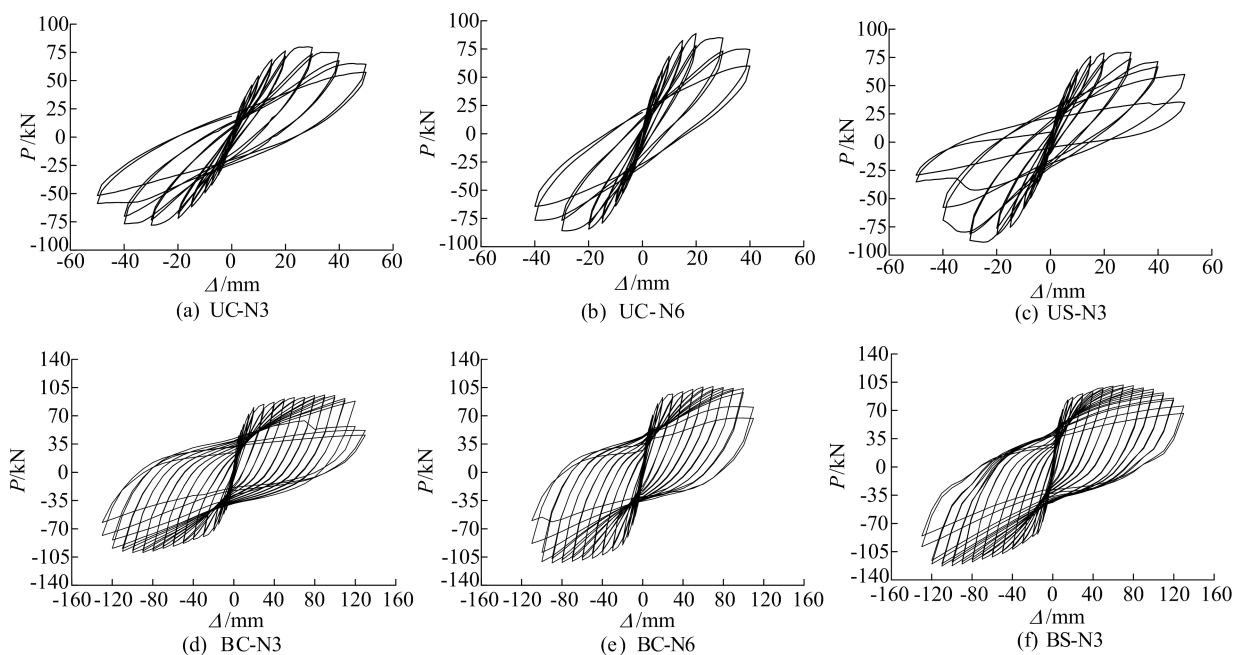


图 3 各试件滞回曲线

2.3 承载、变形和耗能能力

各试件 $P-\Delta$ 骨架曲线如图 4 所示,试验数据结果见表 2 所列。

表 2 中: $\Delta_y P_y$ 为屈服位移和屈服荷载,按几何作图法确定^[11]; Δ_u 、 P_u 为极限位移和极限荷载; Δ_m 为峰值位移; P_m 为峰值荷载;极限状态定义为水平荷载降至 85% P_m 时,位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$;等效黏滞阻尼系数 $\xi_e = S_D / (2\pi S_0)$, S_D 为滞回环面积, S_0 为推拉向滞回环峰值点与位移轴围成的三角形面积,取极限状态下的计算值^[12]。

随着轴压比由 0.30 增至 0.60,未约束柱的峰值荷载和等效阻尼黏滞系数增大,延性系数减小。约束后,柱 BC-N3 的峰值荷载、延性系数和等效阻尼黏滞系数较未加固前分别提高了

24.2%、118.0%、8.1%,而加固柱 BC-N6 的相同指标较未加固前分别提高了 25.4%、114.7%、5.6%。结果表明,对于较高轴压比的约束柱,其峰值荷载提高率较大,但延性系数和等效阻尼黏滞系数提高率较小。

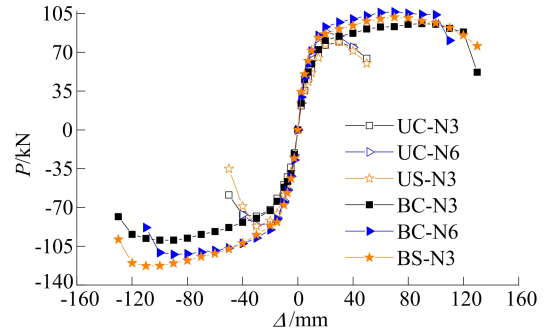


图 4 各试件骨架曲线

表 2 试验结果

试件编号	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_m /mm	P_m /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	μ	ξ_e
UC-N3	14.65	64.33	29.94	78.67	46.34	66.87	3.17	0.322
UC-N6	12.90	74.80	24.95	87.24	40.36	74.16	3.13	0.324
US-N3	12.53	69.56	29.95	83.18	40.26	70.70	3.28	0.316
BC-N3	18.15	73.68	89.92	97.71	123.92	83.06	6.91	0.348
BC-N6	15.92	84.42	79.91	109.39	106.14	92.98	6.72	0.340
BS-N3	16.17	81.60	89.95	112.23	122.74	95.40	7.59	0.346

等截面面积的未约束方柱较圆柱的峰值荷载和延性系数较大,等效阻尼黏滞系数较小。约束方柱则比圆柱的峰值荷载和延性系数增大了 14.9%、9.0%,等效阻尼黏滞系数略小了 0.6%,显示出较优的承载能力。由表 2 可知,约束方柱较圆柱的极限位移略小,但因其较大的弹性刚度出现了明显偏小的屈服位移,导致其延性系数反而高于圆柱。

2.4 刚度退化

各试件割线刚度-加载点水平位移 ($K-\Delta$) 曲线如图 5 所示。

第 i 次加载时割线刚度计算公式为:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

其中, $\pm F_i$ 、 $\pm X_i$ 分别为该加载时滞回曲线第 1 循环正反向峰值荷载和位移^[12]。

从图 5 可以看出:未约束和约束柱在加载前期刚度下降迅速,临近峰值荷载时开始趋于缓慢;在相同加载位移下,约束柱的刚度明显高于未约束柱,但加固柱破坏时的刚度均小于未加固柱;随着柱轴压比增大,约束柱的刚度有所增大且刚度

退化程度加剧;等截面面积下约束方柱的刚度略大于圆柱,但两者退化程度基本一致。

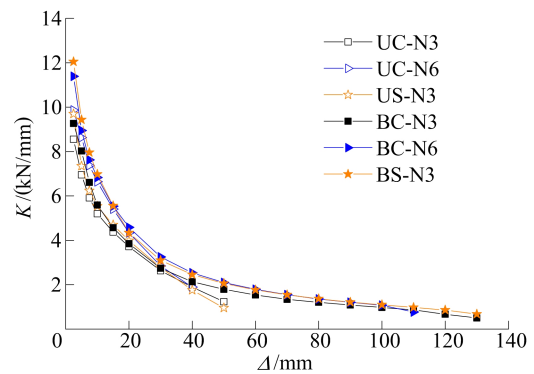


图 5 各试件刚度退化曲线

3 FRP 布约束 RC 圆方柱抗震承载力分析

3.1 约束作用

FRP 布约束圆柱时,其侧向约束应力沿圆形截面分布均匀,截面内均为有效约束区域。根据文献^[13]的研究,FRP 布约束圆柱有效约束应力计算公式为:

$$f_l = \frac{2E_f \epsilon_{f, \text{rup}} t_f}{D} \quad (2)$$

FRP 布约束方柱时,其侧向约束应力沿截面周边分布不均匀,截面内存在非有效约束区域。根据文献[14]的研究,考虑到有效约束区域面积的减小,定义 K_a 为截面形状系数,则 FRP 布约束方柱有效约束应力计算公式为:

$$f_l = K_a \frac{2E_f \epsilon_{f, \text{rup}} t_f}{B} \quad (3)$$

$$K_a = \frac{A_e}{A} = \frac{1 - \frac{2(B - 2r_c)^2}{3[B^2 - (4 - \pi)r_c^2]} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (4)$$

其中: E_f 为 FRP 布的弹性模量; $\epsilon_{f, \text{rup}}$ 为 FRP 布实际断裂应变,BFRP 布的 $\epsilon_{f, \text{rup}}$ 值可取约 0.55 倍的极限应变^[15]; t_f 为 FRP 布的总厚度; A 为柱截面面积; A_e 为柱有效约束面积; D 为约束圆柱的直径; B 为约束方柱的边长; r_c 为倒角半径; ρ_g 为扣除 r_c 后柱的纵筋配筋率。

3.2 抗震承载力计算

文献[16]提出地震作用下 CFRP 布加固 RC 方柱峰值荷载 $P_{m,c}$ 和圆柱的峰值荷载 $P_{m,s}$ 计算公式,即

$$P_{m,c} = \frac{f_c' A}{100(-0.15 + 0.22\lambda)} \times \left(0.70 + 2.62n + 4.75 \frac{f_y \rho_s}{100f_c} + 0.34 \frac{f_l}{f_c} \right) \quad (5)$$

$$P_{m,s} = \frac{f_c' A}{100(-0.17 + 0.55\lambda)} \times \left(2.3 + 8.5n + 17.5 \frac{f_y \rho_s}{100f_c} + 6.48 \frac{f_l}{f_c} \right) \quad (6)$$

其中: λ 为剪跨比; n 为轴压比; f_y 为纵筋屈服强度; ρ_s 为纵筋配筋率; f_c' 为加固柱未约束混凝土峰值应力。

依据已有抗震试验研究,对比等层数或等侧向刚度 CFRP、BFRP 布约束后,柱的峰值荷载基本相近^[5,8]。

因此,本文采用式(5)、式(6)计算 BFRP 布加固 RC 方柱和圆柱的抗震承载力,结果见表 3 所列。

表 3 中, $P_{m, \text{cal}}$ 、 $P_{m, \text{exp}}$ 分别为计算值、试验值。

表 3 BFRP 布加固圆柱抗震承载力计算值与试验值对比

试件编号	$P_{m, \text{cal}}/\text{kN}$	$P_{m, \text{exp}}/\text{kN}$	$P_{m, \text{cal}}/P_{m, \text{exp}}$
BC-N3	85.98	97.71	0.88
BC-N6	105.47	109.39	0.96
BS-N3	107.64	112.23	0.96

对承载力计算值与试验值的比值进行统计分析,得出承载力比值的平均值和标准差分别为 0.93 和 0.05,说明计算值较保守且稳定性良好。

4 结 论

通过 3 根 BFRP 布约束圆柱和 3 根对比方圆柱的低周反复荷载试验,得到如下结论。

1) 外包 BFRP 布约束 RC 柱塑性铰区后,柱均呈现弯曲破坏形态。较未约束前,柱的承载力、延性和耗能能力分别提升 24.2%~34.9%、114.7%~131.4%、5.0%~9.4%。

2) 随着轴压比的增大,BFRP 布加固柱峰值荷载增大,延性系数和等效黏滞阻尼系数减小,刚度退化程度有所加剧。且其峰值荷载承载力和延性性能的提高率随着轴压比的增大分别上升和下降,表明 BFRP 布对较高轴压比 RC 柱的承载力较延性的提升效果更好。

3) 对比 BFRP 布约束 RC 方柱和圆柱的抗震性能可知,在柱截面面积和纵筋配筋率相等的情况下,约束方柱的承载力和弹性刚度比约束圆柱有一定提高,但变形及耗能性能略有降低。本文建议采用的 BFRP 布约束 RC 圆柱和方柱抗震承载力公式计算结果与试验数据吻合良好。

[参 考 文 献]

- [1] 张振雷. 玄武岩纤维布聚氯乙炔管复合约束纤维再生混凝土短柱的轴压性能[J]. 复合材料科学与工程, 2023(11): 58-69.
- [2] 高鹏,袁大明,王田宇,等. 锚固的双向纤维布约束加固钢筋混凝土柱抗震性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5525-5536.
- [3] MEI S J, BAI Y L, DAI J G, et al. Seismic behaviour of shear critical square RC columns strengthened by large rupture strain FRP [J]. Engineering Structures, 2023, 280:115679.
- [4] 杜立兵,朱慧敏,邓志云,等. 玄武岩纤维增强复合材料现状及发展前景研究[J]. 混凝土, 2024(2):98-104.
- [5] 吴刚,魏洋,吴智深,等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 14-18, 69.
- [6] 黄加付,王文赞,戴良军,等. BFRP 加固钢筋混凝土方柱抗震性能试验研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2018, 26(6): 8-12.
- [7] DING B, OUYANG L J, LU Z D, et al. Seismic performance of RC short columns strengthened with BFRP[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351:1532-1536.

(下转第 1714 页)

劣之处。

4 结 论

本研究基于 20 层钢结构 Benchmark 模型展开,采用 5 种不同的振动控制策略,分析结构在 3 种地震波双向作用下的振动响应,结论如下。

1) 对于水平响应,除了在天津波下体系 a 和体系 b 指标 H_2 分别为 104.63% 和 107.68%,其他各体系的指标均不超过 100%,说明将 TMD 分散布置的控制效果与地震波种类有关;体系 b 指标 H_3 均不超过 20%,说明相对于单个阻尼器,分布式阻尼器对剪力控制有更好的效果;设有隔震的体系其指标 H_3 不超过 4.37%,其他指标均较小,说明隔震层对水平方向的各动力响应控制效果均较好,其中对剪力控制显著。

2) 对于竖向响应,体系 a 与体系 b 整体上控制效果接近,即仅将 TMD 分散布置对竖向动力响应的控制无明显效果;设有隔震层的体系指标 V_1 和 V_3 均较小,说明隔震层能有效减小地震作用下结构的竖向位移,且在双向地震作用下明显改变柱受力;体系 c 和体系 d 的指标 V_2 范围为 90.60%~137.63%,体系 e 的指标 V_2 不超过 86.89%,说明隔震层会放大竖向加速度,但若将 TMD 分散布置与隔震层混合使用,隔震层在竖向地震作用下放大动力响应的缺陷就会被克服,为结构减隔振提供一种新的思路。

[参 考 文 献]

- [1] 王海东,常广东,盛旺成. 近场水平、竖向地震共同作用下地基-基础-RC 框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(1):192-198.
- [2] 龚春玉. 竖向与水平地震作用下带 PSRC 空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [3] 尹攀,胡其高,李鹏. 近场地震水平及竖向反应谱及设计谱[J]. 工业建筑,2013,43(3):57-60,66.
- [4] 汪权,周超杰,孙旭,等. 多维地震作用下高层结构振动混合控制研究[J]. 应用力学学报,2022,39(4):742-747.
- [5] PELLIZZARI F, MARANO G C, PALMERI A, et al. Robust optimization of MTMD systems for the control of vibrations[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2022, 70: 1-18.
- [6] FRANS R, ARFIADI Y. Designing optimum locations and properties of MTMD systems[J]. Procedia Engineering, 2015, 125:892-898.
- [7] 汪权,袁加伟,王肖东,等. 地震作用下高层结构分布式多重调谐质量阻尼器振动控制研究[J]. 应用力学学报,2018,35(6):1214-1219,1415.
- [8] 袁胜利. 长周期地震动作用下高层隔震结构地震响应分析[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [9] ZHANG S R, HU Y C, LI S H, et al. Study on seismic response characteristics of the interlayer isolation structure[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(8):1765-1784.
- [10] 王肖东. 水平作用下建筑结构隔震与调谐质量阻尼器混合振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [11] 汤涛. 地震作用下附设 TMD 的混合层间隔震体系振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [12] 欧进萍. 结构振动控制:主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003:496-509.
- [13] 秦丽. 结构风振与地震响应的 TMD 控制[D]. 北京:北京工业大学,2008.
- [1] 王海东,常广东,盛旺成. 近场水平、竖向地震共同作用下地基-基础-RC 框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(1):192-198.
- [2] 滕锦光,陈建飞,SMITH S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4):237-245.
- [4] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures; ACI 440. 2R-17[S]. Farmington Hills; American Concrete Institute, 2017:1-65.
- [5] 王代玉. FRP 加固非延性钢筋混凝土框架结构抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1708 页)

- [8] OUYANG L J, GAO W Y, ZHEN B, et al. Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets; a comparative study[J]. Composite Structures, 2017, 162:294-307.
- [9] 李勇,解梦飞,张翰誉,等. 玄武岩纤维布约束典型钢筋混凝土桥墩抗震性能提升研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(6):74-81.
- [10] LI Y, XIE M F, LIU J B. Experimental study on the seismic behaviour of reinforced concrete bridge piers strengthened by BFRP sheets[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019:1-11.
- [11] 冯鹏,强翰霖,叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3):36-46.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015:

(责任编辑 张 镅)