

DOI: 10.11779/CJGE202012011

CFRP 加固地铁车站结构中柱地震损伤评价研究

马 超¹, 王作虎¹, 路德春^{*2}, 杜修力²

(1. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 102616; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: FRP(纤维增强复合材料)能够在不显著改变钢筋混凝土柱侧向刚度的情况下, 改善柱子的侧向变形能力, 而地铁车站结构地震反应的强烈程度取决于土-结构相对刚度比, 因此采用FRP加固地铁车站结构中柱, 能够在不影响车站结构整体地震反应的情况下, 减小地震引起的中柱损伤。开展了CFRP(碳纤维增强复合材料)加固混凝土柱的抗震性能试验, 分析了CFRP对钢筋混凝土柱侧向刚度和变形能力的影响规律。采用试验结果验证了数值模型的合理性, 并研究了不同轴压下CFRP加固柱的侧向变形能力。采用三维非线性时域显式整体分析方法, 模拟获得了CFRP加固地铁车站结构的地震反应, 分析了地震作用过程中结构中柱的变形行为。基于改进的Park-Ang模型, 评价了加固柱与非加固柱的地震损伤程度。研究结果表明, 在地震PGA介于0.3g~0.4g时, 地铁车站结构下层加固柱在震后处于易修复或可修复状态, 而非加固柱处于难修复或不可修复状态。

关键词: 地铁车站; CFRP 加固; 地震反应; 抗震试验; 损伤评价

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2249-08

作者简介: 马 超(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土力学与城市地下结构防灾减灾等方面的教学与科研工作。
E-mail: machao@bucea.edu.cn。

Seismic damage evaluation of CFRP-strengthened columns in subway stations

MA Chao¹, WANG Zuo-hu¹, LU De-chun², DU Xiu-li²

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: FRP, fiber reinforced plastics, can be used to improve the lateral deformation capacity of reinforced concrete columns without remarkably changing their lateral stiffness. The intensity of seismic response of subway stations depends on the relative stiffness between surrounding soils and structures. Therefore, when using the FRP-strengthened columns of subway stations, the damage of columns can be decreased, but the seismic response of overall structures will not be influenced. The experimental analysis is conducted to study the lateral stiffness and deformation capacity of reinforced concrete columns strengthened by CFRP, i.e., carbon fiber-reinforced plastics. The test results are used to verify the reasonability of numerical models, then the deformation properties of CFRP-strengthened columns under different axial forces are discussed using the verified models. The 3D nonlinear time-domain explicit integration algorithm is employed to simulate the seismic response of subway stations strengthened by CFRP, and the deformation behaviours of columns during earthquakes are analyzed. The earthquake-induced damages of non-strengthened and CFRP-strengthened columns are evaluated by the improved Park-Ang model. It is found that under the earthquakes with PGA of 0.3g~0.4g, the CFRP-strengthened columns in bottom storey are in the easily repairable or repairable states, but the non-strengthened columns are in the difficultly repairable or irreparable states.

Key words: subway station; CFRP strengthening; seismic performance; seismic test; damage evaluation

0 引言

地铁车站结构地震破坏机理表明, 车站结构的塌毁破坏, 是由于地震作用下结构中柱与侧墙的侧向变形能力不协调导致的^[1-5], 其根本原因在于中柱的侧向变形能力不足。地铁车站结构发生塌毁破坏后, 其修复与重建需要大量的时间与经济成本, 因此, 研究提

升地铁车站结构中柱侧向变形能力的技术, 改善地铁

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208294, 51778026); 北京市属高校活动经费项目(X18147); 北京建筑大学金字塔人才培养工程(JDYC20200311)

收稿日期: 2020-05-15

*通信作者(E-mail: dechun@bjut.edu.cn)

车站结构整体抗震韧，可以避免地铁车站结构在地震中发生不可修复的损伤破坏。

《地下结构抗震设计标准》^[6]指出，地下结构抗震设计可以采用减隔震技术措施，以提高结构适应侧向变形的能力。目前关于改善地铁车站结构中柱抗震性能的主要技术措施，是在结构中柱顶、底端施加减隔震支座^[7-11]，以减小传递至结构中柱的地震作用，进而减小中柱的地震反应。Mikami 等^[7]将柔性橡胶支座设置于地铁车站结构中柱与顶梁之间，结果显示，施加支座后中柱在地震中的剪力与弯矩显著减小。还毅等^[8]将碟形弹簧和铅芯橡胶隔震支座应用于大开车站结构，研究结果表明，采用支座后结构在阪神地震作用时不会发生塌毁破坏。Chen 等^[9]在结构中柱底部施加自复位耗能装置，来改善地铁车站结构的抗震性能。Ma 等^[10]将滚动摩擦支座设置于大开车站中柱顶梁与中柱之间，避免了车站结构在地震中发生塌毁破坏，同时探讨了摩擦系数对结构地震反应的影响规律。Xu 等^[11]对比分析了隔震支座应用于地铁车站结构底部与结构中柱顶端时，结构整体反应的差异，研究结果表明，将隔震支座设置在中柱顶端能够更好地改善结构的整体抗震性能。此外，路德春等^[12-13]研发了叠层夹芯柱，与普通混凝土柱相比，该柱的侧向变形能力极强，且竖向承载能力没有被明显削弱。采用叠层夹芯柱的地铁车站结构，在地震作用时，不会因中柱与侧墙变形能力不协调而发生损伤破坏。《地下结构抗震设计标准》^[6]建议在强震区采用钢管混凝土柱，这种类型的柱子同样具有较强的侧向变形能力。目前鲜有关于既有地铁车站结构抗震加固的研究，且现有研究仅采用中柱的漂移比、剪力与弯矩，作为判断中柱地震反应的指标，未能对中柱在地震中的损伤程度及可修复能力进行评价。

FRP 具有增加混凝土延性的优势，因而在混凝土结构抗震加固领域广泛^[14]。地铁车站结构的地震反应受围岩土体的约束，结构在地震作用中的侧变形主要取决于围岩土体的相对刚度比^[15-16]。采用 FRP 加固钢筋混凝土柱时，柱子侧向刚度改变不大^[17]，即当采用 FRP 加固地下结构中柱时，不会导致结构整体地震反应的增强，但中柱延性的增加，可以提高中柱及结构适应水平变形的能力。因此，本文基于地铁车站结构中柱与侧墙变形能力不协调导致结构发生地震损伤破坏的认识，研究 CFRP 加固地铁车站的地震反应规律。首先采用试验结果验证了数值模型的合理性，继而采用三维非线性时域显式整体分析方法，研究了 CFRP 对改善地铁车站结构地震损伤破坏的有效性，同时对结构的损伤程度与可修复性进行了评价。

1 CFRP 加固柱试验研究

为研究 CFRP 对钢筋混凝土柱变形能力的改善效果，本文设计了一组截面边长 450 mm 的钢筋混凝土方柱（1 个非加固柱、3 个加固柱），开展柱子低周反复加载试验，试验所用构件的详细尺寸与配筋形式如图 1 所示，采用 3 层 CFRP 布对加固柱进行全包裹的加固形式，CFRP 纤维方向平行于柱子断面。其中，采用 C40 混凝土浇筑混凝土，纵筋配筋率均为 1.0%，配箍率均为 0.5%，纵筋采用 HRB400 级钢筋，箍筋采用 HPB300 级钢筋。材性试验获得的各材料参数分别为：混凝土实测单轴抗压强度为 51.65 MPa，HRB400 钢筋屈服强度与极限强度分别为 453，609 MPa，HRB300 钢筋屈服强度与极限强度分别为 386，452 MPa，单层 CFRP 布厚度为 0.167 mm、抗拉强度为 3461 MPa、延伸率为 1.60%。

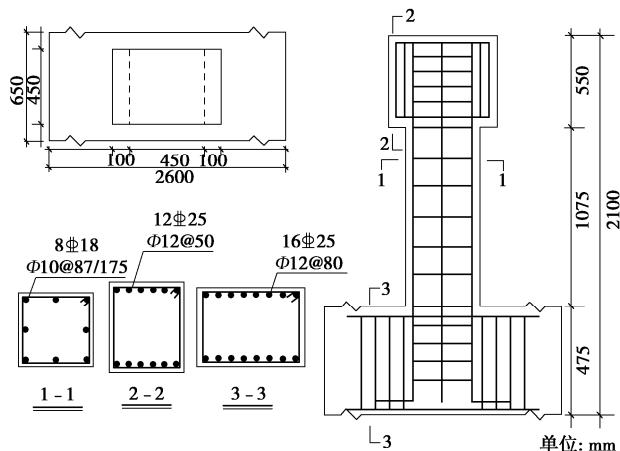


图 1 混凝土柱尺寸与配筋

Fig. 1 Sketch of columns and rebars

模型试验的加载装置及加载机制如图 2 所示，试验加载中边界条件的设置：柱墩底部完全固定，先在顶部施加一定的轴向荷载 N ，保持竖向荷载不变、限制柱顶旋转，在水平方向施加位移荷载 Δ 。试验采用逐级加载的加载模式。试验前，先根据混凝土和钢筋的屈服强度与 CFRP 的抗拉强度，计算出柱的屈服位移 δ_y ，试验中，按每级增加 $\delta_y/2$ ，每级循环 3 次，当监测到的水平荷载减小至峰值荷载的 80% 时，判定柱子失去承载力，停止加载并结束试验。试验中，非加固柱的轴压比为 0.15，CFRP 加固柱的轴压比分别为 0.15，0.30 和 0.45，获得的柱子在轴压比为 0.15 时的荷载 - 位移曲线如图 3 所示。

由图可知，随着位移加载量的增加，两柱的刚度逐渐退化，峰值荷载后，两柱的强度也逐步退化直至失去承载能力。两柱的初始刚度相当，非加固柱刚度和变形能力退化更为明显。CFRP 加固柱的侧向变形

能力及延性系数提高分别提高 31%、20%。试验表明, CFRP 能够在保证钢筋混凝土柱侧向刚度不变的情况下, 显著提高柱子的侧向变形能力。

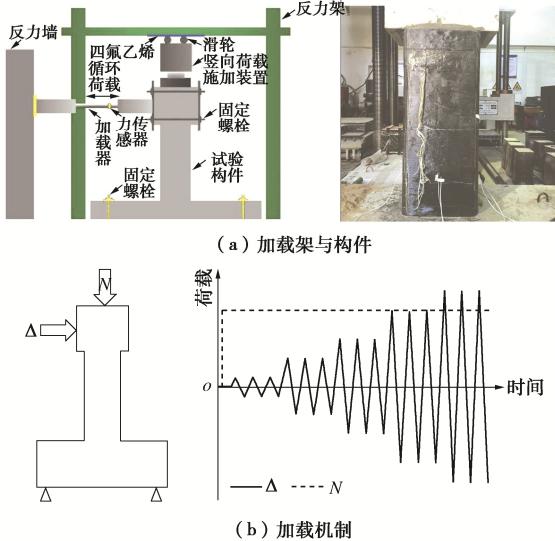


图 2 荷载条件及加载机制

Fig. 2 Boundary and loading conditions

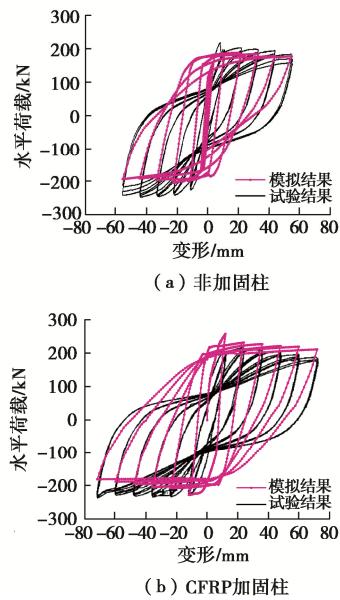


图 3 试验与模拟获得的荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Comparison of load-deformation curves obtained from tests and simulations

建立如图 4 所示的钢筋混凝土柱有限元模型, 模拟 CFRP 加固柱与非加固柱在试验荷载条件下的受力与变形行为。混凝土采用塑性损伤模型, 钢筋采用《混凝土结构设计规范》^[18]规定的反复加载应力 - 应变关系, 如图 5 所示。图中, ε_a 为再加载路径起点对应的应变, σ_a , ε_b 分别为再加载路径起点对应的应力和应变, E_s 为钢筋的弹性模量, k 为钢筋硬化段斜率。CFRP 采用纤维增强复合材料模型, 混凝土与 CFRP 之间采

用绑定接触, 不考虑两者之间的脱粘; 模拟过程中, 未考虑钢筋与混凝土之间的滑移。模拟中采用实测的各材料参数。

模拟结果如图 3 所示, 对比模拟结果与试验结果可知, 有限元模型能够用于模拟 CFRP 加固柱与非加固柱在加载过程中的变形行为, 尤其是柱子刚度与强度的退化行为。由于模拟中未考虑钢筋与混凝土之间的滑移, 模拟获得的荷载 - 位移曲线的捏拢效应并不明显。但准确地预测了混凝土柱受荷后的承载力和变形能力, 验证了有限元模拟的合理性, 可以用于模拟 CFRP 加固地铁车站结构的地震反应。

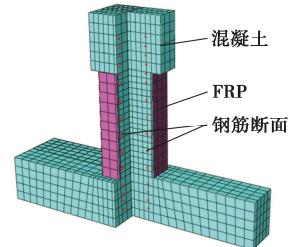


图 4 混凝土柱有限元模型

Fig. 4 FEM model for concrete columns

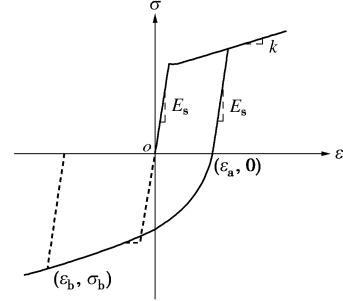


图 5 钢筋反复加载应力 - 应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of steel under cyclic loading

2 CFRP 加固地下结构地震反应模拟

以某地铁车站为例, 开展 CFRP 加固车站中柱改善结构抗震性能的研究。该车站埋深 4.10 m, 车站宽 22.70 m, 高 13.90 m, 侧墙厚度为 0.70 m, 顶、中、底板厚度分别为 0.70, 0.40, 0.90 m, 结构中柱断面尺寸为 0.70 m × 1.10 m, 中柱在垂直于断面的方向净距为 8.00 m, 断面尺寸与配筋详见图 6。围岩土层信息如表 1 所示, 埋深 50 m 以下土层剪切波速大于 500 m/s, 可作为地震输入基岩面^[6]。

由于该车站结构在横断面内为对称结构, 为了对比分析 CFRP 加固柱与非加固柱地震反应的差异, 仅对右排柱进行了加固, CFRP 的加固层数为 3 层。沿结构纵向选取三跨, 建立如图 7 所示的三维有限元模型, 考虑边界效应及场地条件, 确定的模型尺寸为 160

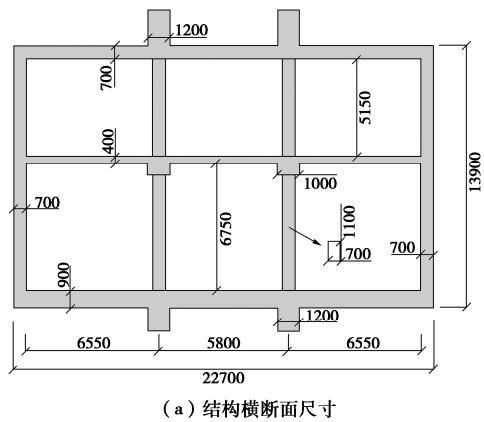
表 1 地层信息及相关参数

Table 1 Description of strata and corresponding material parameters

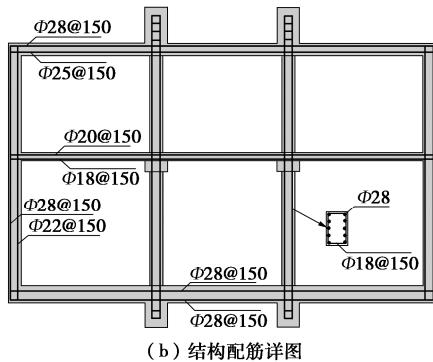
土层剖面	岩土类别	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	φ /($^{\circ}$)	杨氏模量 /MPa	泊松比 ν	黏聚力 /kPa
①填土	①填土	1	17.0	25	216	0.35	20
②粉质黏土 1	②粉质黏土 1	10	18.3	30	199	0.28	20
③粉质黏土 2	③粉质黏土 2	14	17.4	25	276	0.30	19
④粉质黏土 3	④粉质黏土 3	3	18.8	32	366	0.25	20
⑤细砂	⑤细砂	6	19.0	25	385	0.30	19
⑥碎石	⑥碎石	16	21.0	30	673	0.30	20

$m \times 50 m \times 19 m$, 采用实体单元离散围岩土体及混凝土。采用桁架单元离散钢筋, 采用膜单元离散 CFRP。

由于现场勘查和室内试验仅提供了如表 1 所示的土层参数, 因而选用 Mohr-Coulomb 模型模拟围岩土体, 采用塑性损伤本构模型模拟混凝土, 采用纤维增强复合材料模型模拟 CFRP 布的行为。采用如图 5 所示的本构模型模拟钢筋行为, 其中结构设计时中柱选用 C50 混凝土, 其他部位选用 C30 混凝土, 实际模拟过程中采用规范^[18]规定的材料参数, CFRP 的材料参数为试验获得的实际值。



(a) 结构横断面尺寸



(b) 结构配筋详图

图 6 车站结构详细尺寸与配筋

Fig. 6 Sketch of subway station and rebars

2.1 中柱变形能力分析

首先, 分析 CFRP 加固对车站结构中柱变形能力的影响。采用与第 1 节相同的边界条件, 加载制度为单调加载, 即在设定的轴压下推覆钢筋混凝土柱, 直至柱子发生破坏。各柱的尺寸、材料参数、网格划分与图 7 所示的有限元模型一致。地震作用前, 上层柱和下层柱的轴压分别为 7.6, 8.9 MPa, 因此, 图 8 给出了 CFRP 加固柱与非加固柱在相应轴压下的荷载-位移曲线, 由图可知, CFRP 几乎不影响柱子的初始侧向刚度。相对而言, CFRP 明显改变了两柱在峰值荷载后的变形行为, 当设定峰值荷载下降至 85% 对应的变形, 为柱子的侧向极限变形能力时, CFRP 显著提高了柱子的水平向变形能力。

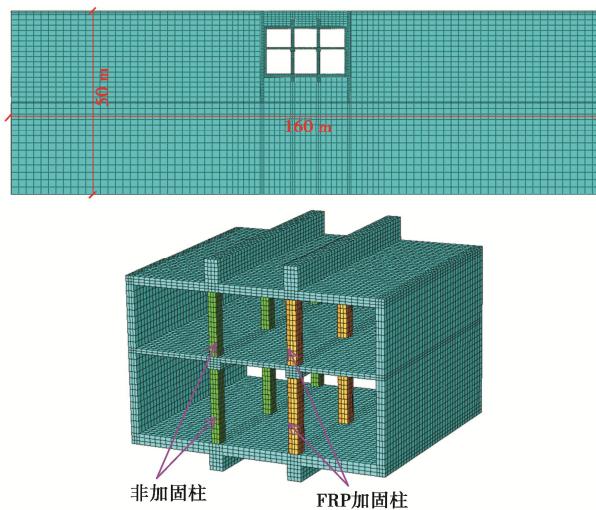


图 7 车站与土体有限元模型

Fig. 7 FEM model for subway station and surrounding soils

图 9 给出了不同轴压下 CFRP 加固对上、下层柱侧向变形能力的提高程度, 由图可知, 随着轴压的增加, CFRP 对柱子侧向变形能力的提高程度呈减小的

趋势。当上层柱和下层柱的轴压分别为 7.6, 8.9 MPa 时, 侧向变形能力的提高程度不低于 20% 和 10%。

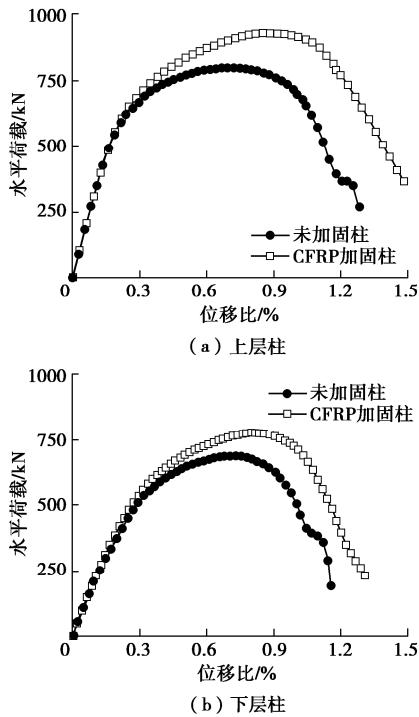


图 8 车站中柱荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load-deformation curves of columns

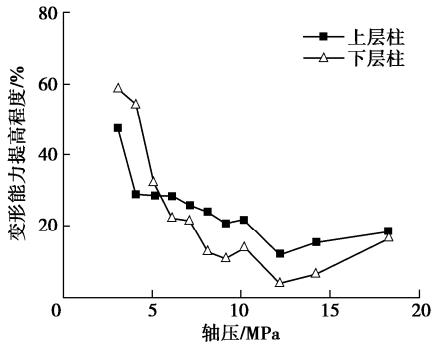


图 9 不同轴压下 CFRP 对柱变形能力的提高程度

Fig. 9 Increase ratio of deformation property of columns under different axial stresses

2.2 车站结构中柱地震反应

采用如图 10 所示的造成地下结构发生严重破坏的阪神、集集、汶川、熊本地震记录和一条人工地震记录, 模拟地铁车站结构的地震反应。采用黏弹性人工边界条件模拟无限域对计算区域的影响, 土与结构之间接触行为采用动力相互作用, 即法向采用硬接触, 单元之间相互不侵入; 切向采用摩擦接触, 摩擦系数为 0.4^[1-2]。计算过程中, 不考虑钢筋与混凝土之间的相对滑移。模拟过程中, 各组地震记录 PGA 分别调整为 0.2g, 0.3g 和 0.4g, 探讨车站结构地震反应随地震动强度的变化规律。

图 11 给出了阪神地震记录 (0.3g) 作用下结构中柱的变形时程曲线, 由图可知, 结构下层柱的地震反应明显高于上层柱的地震反应; 同一层 CFRP 加固柱与非加固柱的变形反应相同, 峰值变形和残余变形仅有微小差异。表 2 列出了所有工况下车站中柱的最大变形 δ_m , 可知, 在地震动相同时, 同一层车站中柱的最大变形量几乎相等。这主要是由于 CFRP 加固前后, 中柱的侧向刚度未发现变化, 即结构整体侧向刚度不变, 土与结构的相对刚度比也不发生变化, 因此, 地震引起的车站结构变形不会显著改变, 继而 CFRP 加固柱与非加固柱的变形反应没有明显差异。

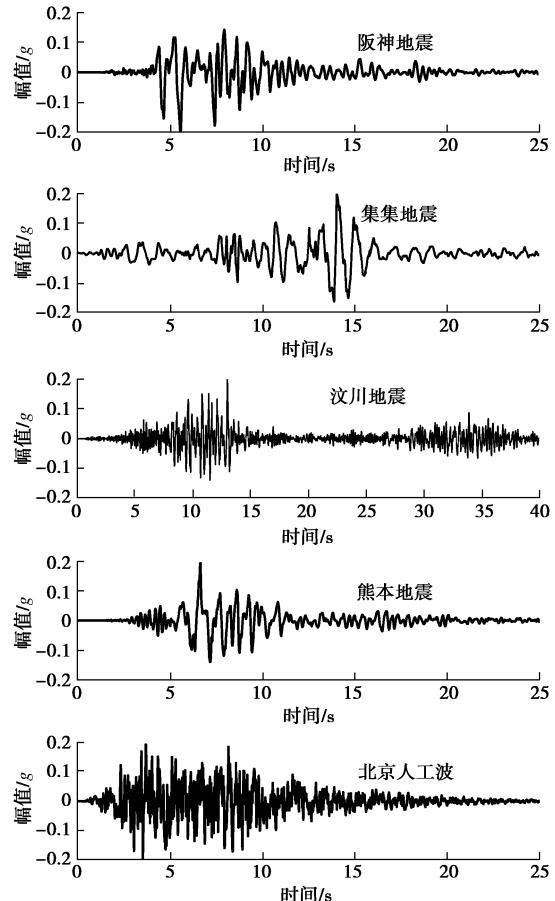


图 10 地震动加速度时程

Fig. 10 Accelerations of applied ground motions

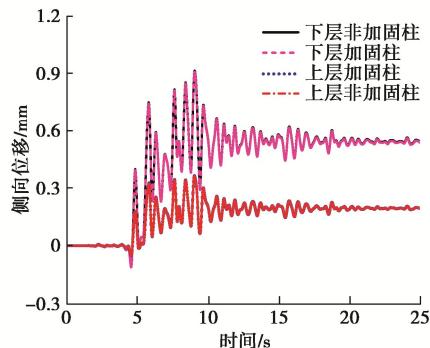


图 11 中柱变形时程曲线 (PGA=0.3g)

Fig. 11 Time histories of deformation of columns (PGA=0.3g)

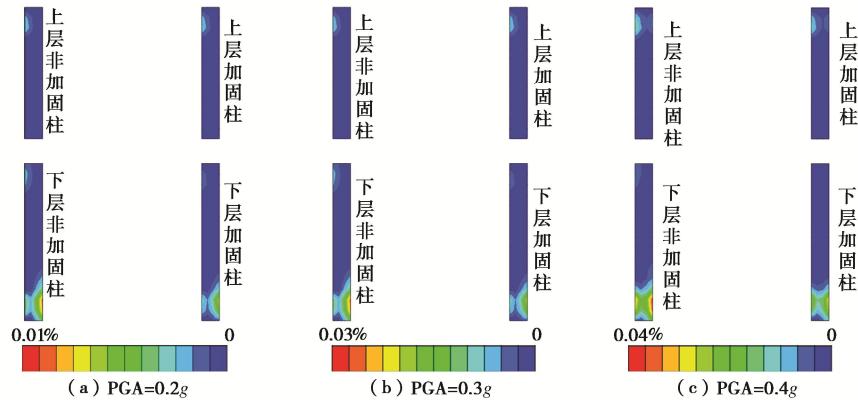


图 12 结构中柱等效塑性应变云图

Fig. 12 Nephograms of equivalent plastic strain in columns

表 2 中柱在地震作用时的变形

Table 2 Deformations of columns during earthquakes

地震动	幅值	非加固				CFRP 加固			
		上层柱		下层柱		上层柱		下层柱	
		δ_m/mm	E/kJ	δ_m/mm	E/kJ	δ_m/mm	E/kJ	δ_m/mm	E/kJ
阪神	0.2g	6.40	0.70	11.90	0.80	6.40	0.90	11.90	0.70
	0.3g	13.57	2.78	25.60	5.03	13.54	3.21	25.30	6.26
	0.4g	22.50	7.40	47.30	16.30	22.60	7.70	46.90	17.50
集集	0.2g	8.60	1.24	15.51	1.58	8.58	1.07	15.58	1.33
	0.3g	15.16	3.79	27.31	7.18	14.91	4.06	27.48	6.30
	0.4g	19.58	8.26	35.16	12.72	19.18	8.48	35.28	11.96
熊本	0.2g	5.07	0.40	9.46	0.35	5.10	0.33	9.49	0.20
	0.3g	8.63	1.08	15.94	1.34	8.63	0.92	16.04	1.34
	0.4g	11.96	2.98	22.41	6.16	11.82	2.83	22.58	6.15
人工波	0.2g	5.09	0.28	8.96	0.26	5.03	0.34	8.90	0.35
	0.3g	7.84	0.81	14.07	1.17	7.81	0.94	13.96	1.46
	0.4g	10.16	1.82	18.22	3.27	10.12	1.88	18.10	3.57
汶川	0.2g	3.63	0.22	6.01	0.16	3.65	0.21	6.01	0.28
	0.3g	6.29	0.63	10.52	0.73	6.34	0.52	10.18	0.66
	0.4g	9.33	1.35	14.63	1.82	9.37	1.07	14.74	1.62

虽然地震作用下，地铁车站结构 CFRP 加固柱与非加固柱的侧向变形差异不大，但由于两类柱侧向变形能力不同，因而其损伤破坏程度也存在差异。塑形变形能够表征柱子的损伤破坏程度，图 12 给出的不同地震强度下，中柱的等效塑性应变云图，可知，相同地震强度下，上层柱的损伤程度远小于下层柱的损伤程度，CFRP 加固柱的损伤程度小于非加固柱的损伤程度。

3 结构中柱损伤评价

目前，多采用层间位移角的 1/550 和 1/250，作为地下结构在常遇和罕遇地震下的抗震限值^[6]，但该限值无法评价结构在地震中的损伤程度。本文借鉴地上结构钢筋混凝土柱的损伤评估方法，即采用改进的 Park-Ang 模型^[19]，评价 CFRP 加固柱与非加固柱在地震中的损伤程度。损伤因子 D 的表达式为

$$D = (1 - \beta) \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} + \beta \frac{E}{Q_y(\delta_u - \delta_y)} , \quad (1)$$

式中， δ_m 为地震作用下中柱的最大变形， δ_y 、 δ_u 为单

调荷载作用下中柱的屈服变形与极限变形， Q_y 为单调荷载作用下中柱的屈服荷载， $E = \int d\varepsilon$ 为中柱塑性积累耗能， β 为组合参数，均值为 0.10~0.15^[19]，本文选取 $\beta=0.15$ 根据 Hindi 等损伤等级划分标准^[20]：① $D < 0.1$ ，无损伤；② $0.1 \leq D < 0.2$ ，微损伤，微小裂缝出现，易修复；③ $0.2 \leq D < 0.4$ ，中等程度损伤，裂缝开展，保护层混凝土剥落，可修复；④ $0.4 \leq D < 0.6$ ，严重损伤，裂缝加宽，钢筋外露；修复困难；⑤ $0.6 \leq D < 1$ ，严重损伤，混凝土压碎，钢筋弯曲，不可修复；⑥ $D \geq 1$ ，倒塌。

表 2 给出了车站结构各柱在地震中的最大变形与塑性积累耗能。将计算获得的各柱的损伤因子绘制于图 13 中，图 13 为四分位图，图中的实点为计算获得的平均值，由图可知，各柱的损伤程度随着地震动强度的增强而增大。

相同地震强度下，结构上层柱的损伤程度明显低于下层柱。对于上层柱，在地震动强度介于 0.2g~0.4g 时，上层柱的损伤程度基本小于 0.4，根据损伤因子平均值判定，震后混凝土柱处于易修复状态。相比较而

言, 下层柱的损伤程度更大, 在 PGA 为 $0.4g$ 时, 个别工况出现了柱子 $D>0.6$ 的情况, 即柱子严重损伤, 震后不可修复。

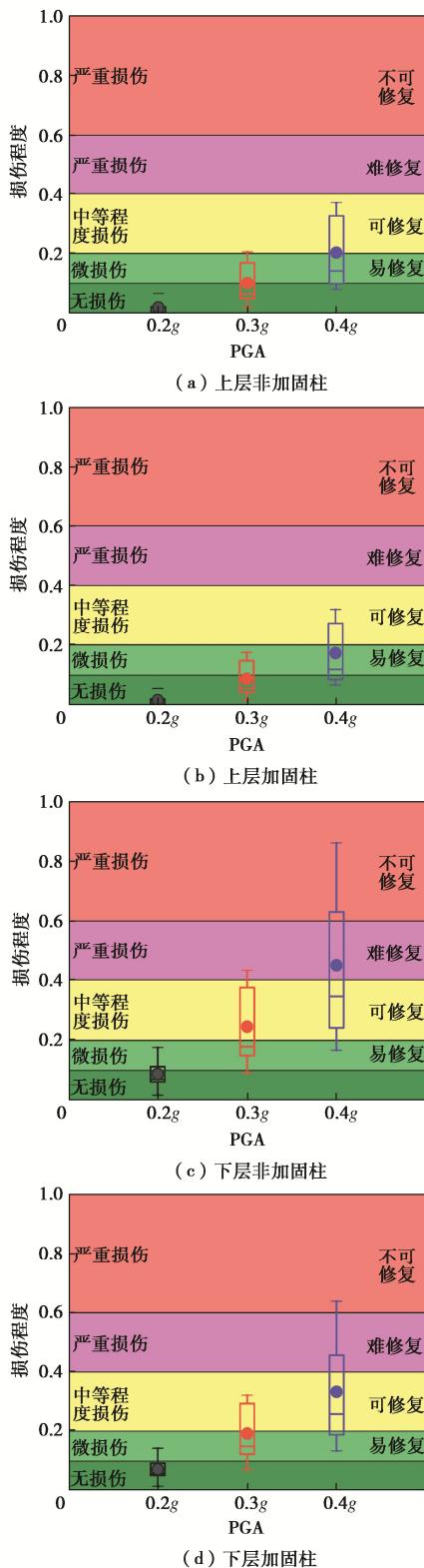


图 13 结构中柱损伤因子

Fig. 13 Damage factors of columns

在本文研究的地震强度下, CFRP 加固柱的损伤程度小于非加固柱的损伤程度, 以损伤因子的平均值作为判定依据, 当 PGA 为 $0.3g\sim0.4g$ 时, CFRP 加固

柱的损伤等级低于非加固柱的损伤等级, 这是由于 CFRP 加固柱的变形能力得到提高的缘故。尤其需要指出的是, 即使 PGA=0.4g 时, 下层 CFRP 加固柱震后也基本处于可修复状态, 几乎不出现不可修复的状况; 而下层非加固柱震后的损伤等级处于难修复甚至不可修复的状态。

4 结语

本文开展的钢筋混凝土柱抗震试验显示, CFRP 加固能够在几乎不改变柱子侧向刚度的情况下, 改善柱子的侧向变形能力。而地铁车站结构的地震破坏机理表明, 结构塌毁破坏的根本原因在于中柱侧向变形能力不足。因此, 可采用 CFRP 加固地铁车站结构中柱, 改善中柱的侧向能力, 能够减小中柱在地震中的损伤破坏程度, 继而提升结构的整体抗震韧性。采用数值模拟的研究手段, 探讨了轴压对 CFRP 加固混凝土柱侧向变形能力的影响, 结果表明, 采用三层 CFRP 加固本文研究的车站结构中柱时, 上下层中柱的侧向变形能力分别提高 20% 和 10%。

采用 5 条地震动模拟了地铁车站结构的地震反应, 结果表明车站结构下层的地震反应更为剧烈。由于 CFRP 加固车站中柱, 不影响结构的整体刚度, 因此, 地震作用过程中, CFRP 加固柱与非加固的变形反应没有明显差异, 表现为加固中柱的峰值变形和残余变形几乎等于非加固柱的变形, 但非加固柱的损伤破坏更严重。采用改进的 Park-Ang 模型评价 CFRP 加固柱与非加固柱的损伤破坏程度。CFRP 加固柱的损伤等级低于非加固柱的损伤等级。PGA 为 $0.2 g\sim0.4g$ 的地震动作用后, 上层加固柱与非加固柱均处于易修护或可修护状态; 下层 CFRP 加固柱震后基本处于可修复状态, 而下层非加固柱在强震作用后, 处于难修复甚至不可修复的状态。研究结果表明, 采用 CFRP 加固地铁车站结构中柱, 能够较好地提升结构的抗震韧性。

参考文献:

- [1] MA C, LU D C, DU X L, et al. Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 265–280.
- [2] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53–62. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai station under seismic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53–62. (in Chinese))

- [3] AN X H, SHAWKY A A, MAEKAWA K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin Earthquake[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, **19**: 241 - 257.
- [4] 庄海洋, 程绍革, 陈国兴. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析 [J]. *岩土力学*, 2008, **29**(1): 245 - 250. (ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, CHEN Guo-xing. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Daikai metro station caused by Kobe earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(1): 245 - 250. (in Chinese))
- [5] 杜修力, 李 洋, 许成顺, 等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展 [J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(2): 223 - 236. (DU Xiu-li, LI Yang, XU Cheng-shun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(2): 223 - 236. (in Chinese))
- [6] 地下结构抗震设计标准: GB/T 51336—2018[S]. 2019. (Standard for Seismic Design of Underground Structures: GB/T 51336—2018[S]. 2019. (in Chinese))
- [7] MIKAMI A, KONAGAI K, SAWADA T. Stiffness design of isolation rubber for center columns of tunnel[J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2001, **682**: 415 - 420. (in Japanese)
- [8] 还 豪, 方 秦, 陈 力, 等. 强震作用下地铁车站结构损伤破坏的三维非线性动力分析[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(6): 852 - 862. (HUAN Yi, FANG Qin, CHEN Li, et al. 3D Nonlinear damage analysis of metro-station structures under strong seismic loading[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, **37**(6): 852 - 862. (in Chinese))
- [9] CHEN Zhi-yi, ZHOU Yu. Seismic performance of framed underground structures with self-centering energy-dissipation column base[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, **22**(13): 2809 - 2822.
- [10] MA Chao, LU De-chun, DU Xiu-li. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **74**: 1 - 9.
- [11] XU Zi-gang, DU Xiu-li, XU Cheng-shun, et al. Numerical analyses of seismic performance of underground and aboveground structures with friction pendulum bearings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, **130**: 105967.
- [12] LU De-chun, WU Chun-yu, MA Chao, et al. A novel segmental cored column for upgrading the seismic performance of underground frame structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, **131**: 106011.
- [13] 路德春, 李 强, 杜修力, 等. 基于失效模式控制的地铁车站结构抗震性能研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **38**(8): 1400 - 1407. (LU De-chun, LI Qiang, DU Xiu-li, et al. Seismic performance of subway station based on failure model control[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **38**(8): 1400 - 1407. (in Chinese))
- [14] HOLLOWAY L C, TENG J G. Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites[M]. UK: Woodhead Publishing Ltd, 2008.
- [15] 禹海涛, 张正伟. 地下结构抗震设计和分析的反应剪力法 [J]. *结构工程师*, 2018, **34**(2): 134 - 144. (YU Hai-tao, ZHANG Zheng-wei. Response shear stress method for seismic design and analysis of underground structures[J]. *Structural Engineers*, 2018, **34**(2): 134 - 144. (in Chinese))
- [16] 庄海洋, 任佳伟, 王 瑞, 等. 两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(1): 131 - 138. (ZHUANG Hai-yang, REN Jia-wei, WANG Rui, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station with two layers and three spans[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(1): 131 - 138. (in Chinese))
- [17] 董振华, 杜修力, 韩 强. FRP 加固钢筋混凝土墩柱抗震性能研究综述 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2013, **30**(2): 55 - 64. (DONG Zhen-hua, DU Xiu-li, HAN Qiang. Review of research on seismic performance of RC columns strengthened with FRP[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2013, **30**(2): 55 - 64. (in Chinese))
- [18] 混凝土结构设计规范: GB—50010 2010[S]. 2010. (Code for Design of Concrete Structures: GB—50010 2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [19] WILLIAMS M S, SEXSMITH R G. Seismic damage indices for concrete structures: a state-of-art review[J]. *Earthquake Spectra*, 1995, **11**(3): 320 - 349.
- [20] HINDI R A, SEXSMITH R G. Inelastic damage analysis of reinforced concrete bridge columns based on degraded monotonic energy[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, **9**(4): 326 - 332.