

宋丹,李林.震后混凝土缺陷加固修复构件性能实验分析[J].地震工程学报,2019,41(6):1671-1678.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1671

SONG Dan, LI Lin. Experimental Analysis of the Performance of Reinforcement and Repair Members on Concrete Defects after Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1671-1678. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1671

震后混凝土缺陷加固修复构件性能实验分析

宋丹¹, 李林²

(1. 广安职业技术学院, 四川 广安 638000; 2. 四川农业大学, 四川 都江堰 611800)

摘要: 为避免震后建筑工程加固不合理导致再次受损,并为加固修复工程提供合理化建议,促进震后救灾工作顺利开展,提出震后建筑工程混凝土缺陷加固修复方法的研究。首先,对混凝土梁试件和混凝土柱试件进行设置,研究基于碳纤维布或外包钢套加固方法对混凝土梁和混凝土柱试件展开循环荷载试验;其次,通过混凝土梁试件滞回曲线、骨架曲线、延性及耗能情况,分析不同加固修复方法的混凝土梁试件抗震性能;最后,通过混凝土柱试件延性及耗能、刚度退化和承载力退化情况,分析采用不同加固方法修复的混凝土柱试件抗震性能。试验结果显示:高配筋率可提升混凝土梁试件滞回特性,外包钢套加固混凝土梁试件滞回饱满程度较高、耗能较少,碳纤维布加固梁试件可将加载位移由10 mm延缓至30 mm,提升延性;碳纤维布加固可提升混凝土柱延性,外包钢套加固重度缺陷混凝土柱可以良好抑制其刚度和承载力退化。试验结果验证了碳纤维加固可提升震后建筑工程混凝土结构延性,外包钢套加固可抑制混凝土结构刚度、承载力退化。

关键词: 地震; 建筑; 混凝土; 缺陷; 加固; 修复

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1671-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1671

Experimental Analysis of the Performance of Reinforcement and Repair Members on Concrete Defects after Earthquake

SONG Dan¹, LI Lin²

(1. Guang'an Vocational and Technical College, Guang'an 638000, Sichuan, China;

2. Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611800, Sichuan, China)

Abstract: To prevent re-damage caused by the inadequate reinforcement of post-earthquake construction projects, provide reasonable suggestions for reinforcement and repair projects, and promote the smooth performance of post-earthquake disaster relief work, in this paper, we present our research on the reinforcement and repair methods used to address concrete defects in post-earthquake construction projects. First, we arranged concrete beam and concrete column specimens for testing and conducted cyclic load tests of these specimens using two types of reinforcement methods: carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) and enveloped steel. Then, based on the

收稿日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708373)

第一作者简介: 宋丹(1984-),女,四川雅安人,硕士,讲师,研究方向: 建筑工程项目管理。E-mail: sd24876362@163.com。

通信作者: 李林(1982-),男,四川南充人,博士,讲师,研究方向: 隧道及地下工程。

hysteretic curves, skeleton curves, ductility, and energy dissipation of the concrete beam specimens, we analyzed their seismic performances after they had undergone different reinforcement and repair methods. Lastly, based on the ductility, energy dissipation, stiffness degradation, and load-bearing degradation of the concrete column specimens, we analyzed their seismic performances after they had undergone different repair and reinforcement methods. The test results show that a high reinforcement ratio can improve the hysteretic characteristics of concrete beams, concrete beams strengthened with enveloped steel exhibit high hysteretic saturation and little energy consumption, and beams strengthened with CFRP can restrict loading displacement from 10 mm to 30 mm. Strengthening the CFRP can improve the ductility of concrete columns, and strengthening enveloped steel can restrain the degradation of stiffness and bearing capacity of these columns. The test results verify that CFRP reinforcement can improve the ductility of concrete structures in post-earthquake construction projects, and enveloped steel reinforcement can restrain the degradation of stiffness and bearing capacity of concrete structures.

Keywords: earthquake; building; concrete; defect; reinforcement; repair

0 引言

随着地震灾害日渐频繁发生,地震带来的人员伤亡及财产损失不可估量^[1]。秉承小震不坏、中震可修、大震不倒理念,受地震损害的建筑通常采用一些加固方法对其进行修复处理。不合理的加固方式很容易使建筑工程再次遭受到地震的破坏,加重经济损失^[2]。因此如何采取合理、有效的震后建筑工程混凝土缺陷加固修复方法是震后救灾工作的重点及难点。

当前使用较多的建筑工程混凝土缺陷加固修复方法包括外包钢套、碳纤维布、增大截面等^[3-5]。对震后建筑工程混凝土结构加固修复的研究有很多。文献^[6]提出采用碳纤维布和外包钢套组合方法加固震后损伤混凝土框架,通过实验研究指出加固后的混凝土结构承载力、延性能等指标均有一定程度提升;文献^[7]采用制作5个外包钢套结合碳纤维布加固混凝土柱修复方法,展开抗剪试验,得出抗剪计算公式;文献^[8]研究不同震后损伤情况下采用不同加固方法修复混凝土梁的抗震情况,通过试验得出外包钢套加固方法抗震效果较好。

本文通过采用外包钢套、碳纤维布加固方法修复震后建筑工程混凝土缺陷试件,并进行模拟静力试验,为实际震后加固修复工程提供相关参考借鉴。

1 试件设计与试验方法

1.1 混凝土试件

1.1.1 混凝土梁试件的构建

混凝土梁是一种梁端受制约的受力构件,遭受

外部荷载时,跨中或者梁端会产生开裂现象,严重时会受到损坏^[9-10]。为研究不同配筋率及采用不同加固技术修复的混凝土梁震后受力性能及抗震效果,制作了10个混凝土梁试件,其中有6个为未加固混凝土梁试件,编号分别为T1、T2、T3、T4、T5、T6;4个为有缺陷加固混凝土梁试件,编号分别为JT1、JT2、JT3、JT4。这样设置主要是为了研究地震后建筑工程混凝土中梁在配筋率相同的情形和不同情形下,采用相同和不相同技术进行加固后的受力性能和加固后的效果。

混凝土梁试件尺寸和配筋信息如表1和图1所示。

表1 混凝土梁试件配筋率及加固方式

Table 1 Reinforcement ratio and strengthening method of concrete beam specimens

编号	纵筋	加固方式
T1	4×14	否
T2	4×14	否
T3	4×14	否
T4	4×18	否
T5	4×18	否
T6	4×18	否
JT1	4×14	外包钢套
JT2	4×14	碳纤维布
JT3	4×18	外包钢套
JT4	4×18	碳纤维布

1.1.2 混凝土柱试件的构建

地震作用下混凝土柱是一种具备一定轴压比、柱两端受制约的水平受力构件,遭受外力荷载时,通常在混凝土柱顶端产生开裂现象,严重时会造成损伤^[11-12]。采用相同方法制作7根混凝土柱试件,柱

截面为 180 mm×260 mm,柱端和地梁相连。采用 1/100、1/50 位移角模拟震中混凝土柱中度缺陷和重度缺陷。混凝土柱试件各项参数如表 2 所列。

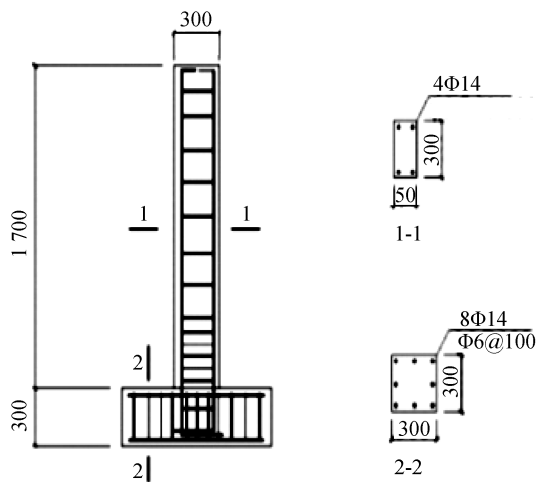


图 1 梁构建配筋尺寸图(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement dimension diagram of concrete beam

1.2 试验装置及加载制度

选取 C 大学工程实验中心作为试验点。以人工控制方式进行加载,便于观察试验过程中试件的受力特点和损坏状态^[13-14],根据每个设计轴压比的具体数值进行竖向力计算,将计算结果施加在杠杆稳压千斤顶的试件柱顶上,一直保持竖向荷载数值不变,然后应用 MTS 电液伺服水平作动器系统反复施加水平方向上的荷载数值^[15]。按照我国的《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)的相关规定进行试验,试件屈服前按荷载控制以及分数级完成加载步骤,以 10 kN 为初始级差并重复加载,观察试件的承压情况,判定试件的最大荷载负荷;当出现开裂情况后,二次级差设为 20 kN,进行反复加载 1 次,调整为位移控制加载,保证每次增加的位移是屈服位移的倍数,循环反复 3 次,并判断荷载是否下降到最大承载力的 85%,直至试件不能承担预定竖向轴压力时试验终止。加载制度如图 2 所示。

表 2 混凝土柱试件各项参数及加固方式

试件编号	纵筋	轴压比	剪跨比	轴压力	缺陷情况	加固方式
P0	8×14	0.3	3.32	550	无缺陷	无
P1	8×14	0.3	3.32	550	无缺陷	碳纤维布
P2	8×14	0.3	3.32	550	中度缺陷	碳纤维布
P3	8×14	0.3	3.32	550	重度缺陷	碳纤维布
WP1	8×14	0.3	3.32	550	无缺陷	外包钢套
WP2	8×14	0.3	3.32	550	中度缺陷	外包钢套
WP3	8×14	0.3	3.32	550	重度缺陷	外包钢套

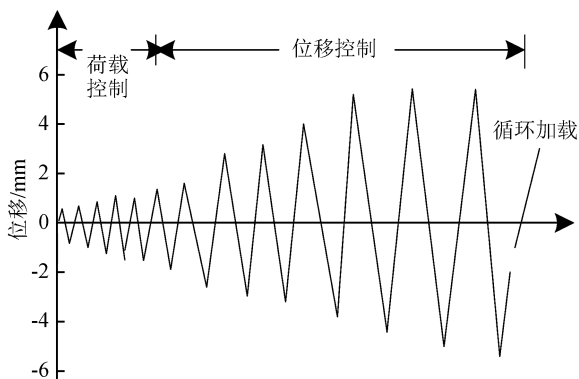


图 2 加载制度示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading system

2 试验结果及分析

2.1 混凝土梁加固修复抗震性能试验

2.1.1 混凝土梁试件滞回曲线分析

滞回曲线是作为混凝土结构抗震弹塑性分析的标准之一,它可以通过混凝土结构作用力和位移之

间关系展现混凝土结构整体抗震性能。图 3 为试件 T1、T6 的负载-位移滞回曲线。

分析图 3 中不同配筋率试件的荷载-位移滞回曲线可知,在其他参数相同的情况下,配筋率高的试件梁实验得到的滞回曲线所包围的面积更大,刚度得到了增强,可促进混凝土梁试件滞回特性提升,提高抗震效果。

图 4 为采用外包钢套加固方法修复的 JT1 试件和采用碳纤维布加固方法修复的 JT2 试件的负载-位移滞回曲线。

分析图 4 可知,通过比较相同配筋率采用不同加固方法的混凝土梁试件荷载-位移滞回曲线可知,采用外包钢套方法加固混凝土梁试件在荷载较小时显现出捏拢效应,滞回曲线所包围的面积相对比较小,试件滞回饱满程度也远不如采用碳纤维布加固的试件。

2.1.2 混凝土梁试件骨架曲线分析

骨架曲线能够体现出混凝土梁的强度、变形等

特点,它是评价抗震性能的重要指标之一。实验对混凝土梁试件 T1 和采用碳纤维加固方法修复的混

凝土梁试件 LT2 的骨架曲线对比,对比结果如图 5 所示。

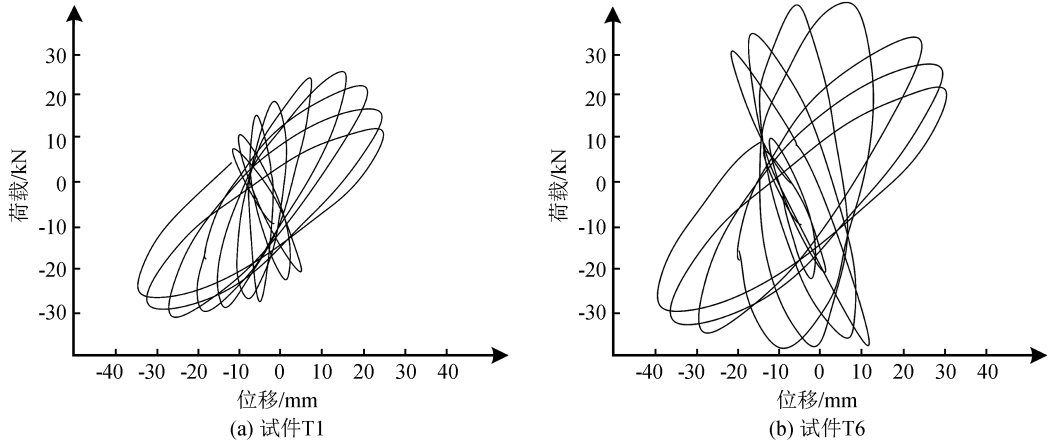


图 3 不同配筋率试件荷载-位移滞回曲线

Fig.3 Load-displacement hysteretic curves of specimens with different reinforcement ratios

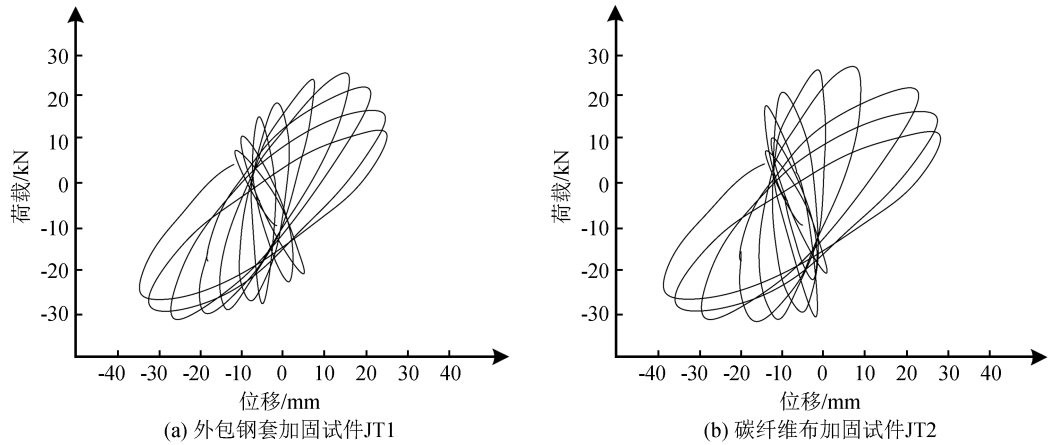


图 4 不同加固方法混凝土梁的荷载-位移滞回曲线

Fig.4 Load-displacement hysteretic curves of concrete beams strengthened by different methods

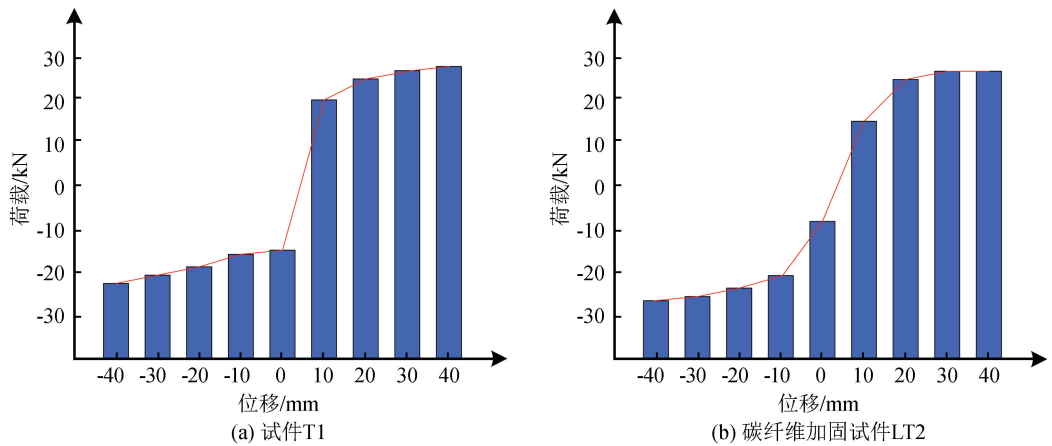


图 5 梁试件和碳纤维加固梁试件的骨架曲线对比

Fig.5 Comparison of skeleton curves of beam specimens and CFRP-strengthened beam specimens

分析图 5 可知,碳纤维加固混凝土梁试件历经弹性、屈服以及极限三个阶段,当位移加载处于正负

10 mm 之间时骨架曲线呈现线性上升,伴随位移加载逐渐增大,荷载增加减缓,位移加载至 30 mm 时

荷载停止增加,总体显现出良好的延性。而试件 T1 的骨架曲线位移加载处于正负 10 mm 之间时,波动较大,不如碳纤维加固混凝土梁试件稳定。故可以看出采用碳纤维加固方法修复的混凝土梁试件性能较好。

2.1.3 混凝土梁延性及耗能分析

混凝土梁试件延性为试件极限变形值与初始屈服变形值的比值,加固后混凝土梁试件延性结果如表 3 所列。

表 3 加固后混凝土梁试件延性比较

Table 3 Ductility comparison of reinforced concrete beams

试件编号	JT1	JT2	JT3	JT4
配筋	4×14	4×14	4×18	4×18
加固方法	外包钢套	碳纤维布	外包钢套	碳纤维布
屈服值	26	26	26	26
极限值	46	51	51	51
破坏值	56	61	61	66
延性	2.15	2.35	2.35	2.54

分析表 3 可知,当混凝土试件修复方法均为外包钢套时,其试件的配筋率不相同,其中 4×14 的配筋率下极限值为 46,破坏值为 56,延性为 2.15;而 4×18 的配筋率下极限值为 51,破坏值为 61,延性为 2.35。证明了混凝土梁试件配筋率越高,混凝土梁试件延性越好;当选用修复的方法不同时,但配筋率相同时碳纤维布的修复方法优于外包钢套修复方法。

缺陷混凝土梁试件加固修复后在循环荷载作用

下产生的加载曲线、卸载曲线与位移轴形成的面积分别用来描述试件吸收、释放能量大小,反复一周形成的滞回环面积为试件耗能值。混凝土梁试件耗能性能比较结果如表 4 所列。

表 4 混凝土梁试件耗能值

Table 4 Energy consumption of concrete beam specimens

试件编号	JT1	JT2	JT3	JT4
配筋	4×14	4×14	4×18	4×18
加固方法	外包钢套	碳纤维布	外包钢套	碳纤维布
耗能值/kJ	1280	1541	1302	1595

对比表 4 中 JT1、JT3 两个试件以及 JT2、JT4 两个试件可知,当加固方式均为外包钢套或碳纤维布方法时,同种加固方法修复情况下,混凝土梁试件配筋率越低,试件耗能值越小;对比 JT1、JT2 两个试件以及 JT3、JT4 两个试件可知,当配筋率同为 4×14 和 4×18 时,碳纤维布加固方法修复的混凝土梁试件能耗高,采用外包钢套加固方式修复混凝土梁试件耗能较少。

2.2 混凝土柱加固修复抗震性能试验

2.2.1 混凝土柱延性及耗能分析

为研究加固后混凝土柱试件抗震性能,对各混凝土柱试件延性及耗能情况进行了详细的分析。

通过混凝土柱试件骨架特征点分析混凝土柱试件延性系数和极限承载力,获取外包钢套和碳纤维布两种加固方法的抗震性能。混凝土柱试件的骨架曲线特征点如表 5 所列。

表 5 混凝土柱各试件骨架曲线特征点

Table 5 Feature points of skeleton curves of concrete column specimens

试件编号	加载方向	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	最大荷载 /kN	最大位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	延性系数
P0	正	73.78	16.21	128.39	25.69	108.99	46.56	2.87
	负	93.44	16.17	123.53	24.82	142.68	48.07	2.97
WP1	正	139.08	16.25	136.89	40.11	160.03	57.88	3.56
	负	140.77	16.30	137.37	41.07	161.81	58.06	3.56
WP2	正	85.24	18.87	149.11	43.30	159.11	61.25	3.25
	负	96.27	18.85	151.43	46.14	147.83	61.76	3.28
WP3	正	85.01	19.50	139.14	44.01	154.10	61.55	3.16
	负	80.95	19.68	136.31	43.72	149.33	61.87	3.14
P1	正	74.52	16.08	161.05	35.41	141.33	57.24	3.56
	负	94.13	17.10	147.25	34.33	133.51	60.01	3.51
P2	正	75.24	16.22	131.55	43.30	132.81	56.25	3.47
	负	97.27	17.21	146.44	46.14	141.83	57.76	3.36
P3	正	85.01	15.67	143.99	34.01	134.12	53.18	3.39
	负	80.95	16.21	142.68	33.72	130.33	51.37	3.17

通过表 5 可以看出,试件 WP1、试件 P1 的平均延性系数相较于试件 P0 分别提升了 21.92%、21.06%,试件 WP1、试件 P1 的平均极限承载力相

比于试件 P0 分别增加了 27.89%、9.21%;试件 WP2、试件 P2 相比于试件 P0 平均延性系数分别增加 11.82%、16.95%,试件 WP2、试件 P2 相比于试

件 P0 平均极限承载力分别增加 21.96%、9.13%；试件 WP3、试件 P3 相比于试件 P0 平均延性系数分别增加 7.88%、12.33%，试件 WP3、试件 P3 相比于试件 P0 平均极限承载力分别增加 20.57%、5.08%。结果表明；采用外包钢套加固方法修复混凝土柱试件增加了试件的极限承载力，采用碳纤维布加固方法修复混凝土柱试件增加试件延性。

实验还通过等效阻尼比指标分析混凝土柱试件耗能情况，不同情况下各混凝土柱试件等效阻尼比如图 6 所示。

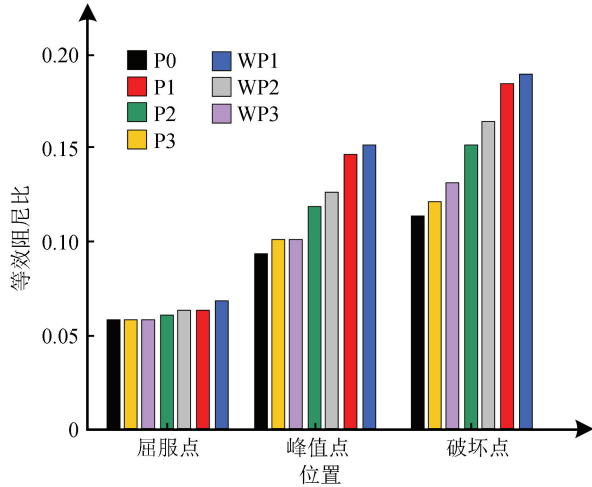


图 6 各试件等效阻尼比情况

Fig.6 Feature points of skeleton curves of concrete column specimens

从图 6 可以看出，震后缺陷混凝土柱试件采用外包钢套或者碳纤维布加固修复后，试件等效阻尼比增加，其中以采用外包钢套加固试件效果最为显著。屈服过程中，两种加固方法效果差别不明显；处于峰值点位置时，采用碳纤维布加固方法的试件等效阻尼比上升较快，增强效果较明显；处于破坏点时，采用外包钢套加固方法的试件等效阻尼比较大，能耗低。

2.2.2 刚度退化和承载力退化分析

震后混凝土柱试件会表现出刚度退化及承载力退化等性能改变。通过不同加载位移下试件滞回曲线的割线刚度表示刚度退化，采用处于同级加载下的最大荷载计算割线刚度实验，混凝土柱各试件刚度退化情况如图 7 所示。

从图 7 可以看出，伴随加载位移不断增大，试件刚度随之不断减小，相较于未采取加固措施的试件 P0，采取加固措施的 6 个试件刚度退化持续时间均有所增加，结果表明采取加固措施可以提升试件刚

度退化能力。未采用加固措施的试件 P0、采用碳纤维布加固的重度缺陷试件 P3 以及采用外包钢套加固的重度缺陷试件 WP3 的刚度退化终止加载位移分别处于 50 mm、60 mm 以及 70 mm 处，结果表明采用外包钢套加固修复的混凝土柱试件在遭受重度地震时可以更好抑制混凝土柱刚度退化。

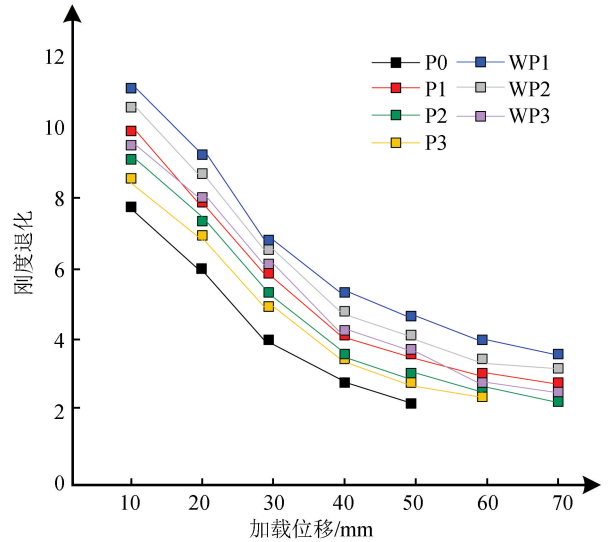


图 7 各试件刚度退化曲线

Fig.7 Stiffness degradation curve of each specimen

不同加载位移下第 3 次和第 1 次往复的峰值荷载比值为承载力退化系数，用来判定各试件承载力退化情况。混凝土柱各试件承载力退化情况如图 8 所示。

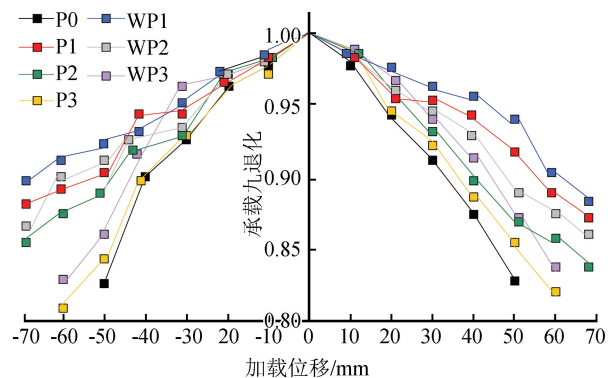


图 8 各试件承载力退化曲线

Fig.8 Degradation curves of bearing capacity of specimens

分析图 8 可知，伴随加载位移的增大，混凝土柱试件承载力均呈现退化趋势，表明加载位移的增大导致混凝土柱试件柱脚铰发展以及缺陷不断堆积，促进承载力退化，未采取加固措施混凝土柱试件 P0 承载力退化速率最快。承载力退化时，采取碳纤维布方法加固的试件产生波动现象，采用外包钢套方

法加固试件未产生波动现象且刚度退化较为平稳,表明碳纤维布加固方法是随着承载位移增加逐步产生作用;震后采用外包钢套加固方法修复重度缺陷试件的承载力退化曲线比采用碳纤维布方法加固重度缺陷混凝土柱试件可以更好地抑制混凝土柱承载力退化。

3 结论

震后建筑工程的有效快速加固可以最大限度的减少震后损失,本文主要研究碳纤维布及外包钢套两种混凝土梁、柱加固方法。为了研究地震后建筑工程混凝土中梁在配筋率相同的情形和不同情形下,制作了 10 个混凝土梁试件,其中有 6 个为未加固混凝土梁试件,分析不同加固修复方法的混凝土梁试件抗震性能。试验发现,建筑工程遭遇地震灾害后,采用碳纤维布或外包钢套两种加固方法修复建筑梁以及柱结构均能取得良好抗震效果,被加固震损试件具备良好二次抗震能力,表明采用碳纤维布或外包钢套加固方法可以更好地抑制混凝土柱承载力退化,为建筑工程的加固设计提供参与借鉴。

参考文献(References)

- [1] 崔春义,孟坤,孔艳,等.新型装配式方钢管混凝土柱-钢梁节点力学性能数值分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(1):131-138.
CUI Chunyi, MENG Kun, KONG Yan, et al. Numerical Parametric Analyses on Mechanical Performance of a New Fabricated Joint Including Square Concrete-filled Steel Tubular Column and Steel Beam[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2018, 37(1): 131-138.
- [2] 赵博,高原,梁建宏,等.应用地震干涉法定位四川九寨沟 7.0 级地震震源位置[J].地球物理学报,2018,61(6):2292-2300.
ZHAO Bo, GAO Yuan, LIANG Jianhong, et al. Interferometric Source Estimation of Sichuan Jiuzhaigou M7.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2292-2300.
- [3] 彭胜,许成祥,万冲,等.型钢混凝土柱震后加固方法对比试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(30):206-211.
PENG Sheng, XU Chengxiang, WAN Chong, et al. Comparative Experimental Investigation on Strengthening Approach of Seismic-damaged Steel Reinforced Concrete Frame Columns [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 206-211.
- [4] 杨勇,李辉,陈伟,等.预应力钢带加固钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(10):53-60.
YANG Yong, LI Hui, CHEN Wei, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame Structure Retrofitted by Pre-stressed Steel Strips[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 53-60.
- [5] 张亮泉,付皓然,毛晨曦,等.钢筋混凝土框架结构震后加固方案优选[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):97-107.
ZHANG Liangquan, FU Haoran, MAO Chenxi, et al. The Optimal Method for Scheme Selection of Reinforcement of Reinforced Concrete Frame Structures Damaged by Earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 97-107.
- [6] 肖良丽,蒋思杰,李瑶,等.高强钢筋自密实混凝土短肢剪力墙地震损伤模型研究[J].工程抗震与加固改造,2018,40(4):21-26.
XIAO Liangli, JIANG Sijie, LI Yao, et al. Study on Seismic Damage Model for High Strength Reinforced Self-compacting Concrete Short-leg Shear Walls[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(4): 21-26.
- [7] 李炳奇,李泽阳,张宇弛,等.聚脲基涂层对碳纤维布加固混凝土力学性能影响的研究[J].水利水电技术,2017,48(7):144-150.
LI Bingqi, LI Zeyang, ZHANG Yuchi, et al. Study on Effect of Polyurea-coat on Mechanical Property of Carbon Fiber Cloth Reinforced Concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(7): 144-150.
- [8] 张景奎,崔德密.冲击回波法检测混凝土结构厚度与缺陷的试验研究[J].长江科学院院报,2018,35(2):125-128,134.
ZHANG Jingkui, CUI Demi. Experimental Study on Detecting Thickness and Defects of Concrete Structure by Impact-Echo Method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 125-128, 134.
- [9] 卢亦焱,易斯,李杉,等.圆钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(10):65-74.
LU Yiyi, YI Si, LI Shan, et al. Experimental Research on Seismic Performance of Circular RC Column Strengthened with Self-compacting Concrete Filled Circular Steel Tube [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 65-74.
- [10] 孙传智,乔燕,王振波,等.HDPF加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(3):83-91.
SUN Chuazhi, QIAO Yan, WANG Zhenbo, et al. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Column Strengthened with HDPF [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 83-91.
- [11] 邓明科,张阳玺,胡红波.高延性混凝土加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(6):86-94.
DENG Mingke, ZHANG Yangxi, HU Hongbo. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Column Strengthened with High Ductile Concrete [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 86-94.

- [12] 崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 连续屈服节理模型对剪切地震波传播的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1203-1210, 1218.
CUI Zhen, SHENG Qian, LENG Xianlun, et al. Transmission of S-wave across one Joint Using the Continuously Yielding Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1203-1210, 1218.
- [13] 周彬, 任晓崧, 王显妤. 采用后加混凝土构件加固的某既有砌体结构的抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 128-134.
ZHOU Bin, REN Xiaosong, WANG Xianyu. Analysis on the Seismic Performance of the Existing Masonry Structure Reinforced by Post-Installed Concrete Element[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(1): 128-134.
- [14] 卢春玲, 刘传超, 吴有胜, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土圆柱预应力损失试验研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 41-48, 70.
LU Chunling, LIU Chuanchao, WU Yousheng, et al. Experimental Study on Prestress Loss of Concrete Circular Columns Strengthened with Prestress CFRP Sheets[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 41-48, 70.
- [15] 仇泽, 李伟平, 王激扬, 等. 碳纤维布加固混凝土梁的极限承载力试验研究[J]. 混凝土, 2018(2): 26-28.
QIU Ze, LI Weiping, WANG Jiyang, et al. Experimental Study on the Ultimate Bearing Capacity of Concrete Beams Strengthened by Carbon Fiber Sheet[J]. Concrete, 2018(2): 26-28.

(上接第 1636 页)

- [22] CHEN C H, TENG T L, GUNG Y C. Ten-Second Love-Wave Propagation and Strong Ground Motions in Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B9): 21253-21273.
- [23] BAKER J W. Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [24] BENIOFF H. Mechanism and Strain Characteristics of the White Wolf Fault as Indicated by the Aftershock Sequence, Earthquakes in Kern County, California during 1955[J]. California Division of Mines Bulletin, 1955, 171: 199-202.
- [25] HIRASAWA T, STAUDER W. On the Seismic Body Waves from a Finite Moving Source[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1965, 55: 237-262.
- [26] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10.
LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, et al. Basic Characteristics of Near-Fault Ground Motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10.
- [27] 姜慧, 黄剑涛, 俞言祥, 等. 地表破裂断层近场速度大脉冲研究[J]. 华南地震, 2009, 29(2): 1-9.
JIANG Hui, HUANG Jiantao, YU Yanxiang, et al. Study on Large Velocity Pulses near Surface Rupture Faults[J]. South China Journal of Seismology, 2009, 29(2): 1-9.