

# 预应力钢带加固震后混凝土框架抗震性能试验研究

杨 勇, 王 婷, 陈 伟, 刘如月, 伊波松, 马晨光

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 提出采用预应力钢带加固技术对处于“可修”性能水准状态的钢筋混凝土框架进行快速抢救加固, 以有效提高历经大震的混凝土框架抵抗余震的能力, 并为震后全面加固提供条件. 首先对一榀三层单跨 1:2 比例的钢筋混凝土框架进行低周反复拟静力试验, 并加载至试件承载能力下降至极限荷载的 85% 时停止试验. 然后采用预应力钢带加固技术对该框架试件的柱端、梁端和节点核心区进行加固, 并重新进行低周反复拟静力, 以考察加固后框架试件的抗震性能. 通过详细对比加固前试件和加固后试件的承载能力、刚度、延性、层间位移角、耗能能力等性能指标, 发现采用预应力钢带加固的震后框架试件基本上能达到震前框架的抗震性能, 初步表明, 采用预应力钢带加固技术可以实现对震后混凝土框架的有效加固, 非常适用于对震后混凝土的快速抢救加固.

**关键词:** 钢筋混凝土框架; 预应力钢带; 震后加固方法; 抗震性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0029-07

## Experimental study on seismic performance of post-earthquake reinforced concrete frame structure retrofitted by prestressing steel strips

YANG Yong, WANG Ting, CHEN Wei, LIU Ruyue, YI Bosong, MA Chenguang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to improve the reinforced concrete frame's resistance ability of aftershocks and provide conditions for comprehensive post-earthquake strengthening, the strengthening technology with prestressing steel strips was adopted to retrofit reinforced concrete frame that remains stable and erect under strong earthquakes. In this paper, low-cyclic pseudo static test of the reinforced concrete frame with single span and three stories was conducted and was halted when the specimen's carrying capacity decreased to 85% of the ultimate load bearing capacity. Then, the prestressing steel strips retrofit technology was adopted to retrofit the beam end, the column end and the core area of frame joints. The low-cyclic pseudo static test was conducted again in order to study the seismic performance of the frame after it was retrofitted. A series of seismic performance indexes such as the bearing capacity, stiffness, ductility and energy dissipation capacity were contrasted in details between preshock and retrofitted specimen. It can be concluded that the seismic performance of post-earthquake reinforced concrete frame which was retrofitted by prestressing steel strips was almost similar to intact specimen's. The results showed that the post-earthquake structure retrofitted methods was suitable for strengthening post-earthquake reinforced concrete frame rapidly.

**Key words:** reinforced concrete frame; prestressing steel strips; post-earthquake structure retrofitted methods; seismic performance

钢筋混凝土框架结构是我国常用的建筑结构类型之一, 大量存在于我国地震区城镇. 历次震害表明, 大量多层钢筋混凝土框架结构在经历较大地震后, 会在其中一、两层形成薄弱层, 在这些薄弱楼层会出现较为严重的混凝土开裂和楼层变形, 楼层部分梁、柱构件钢筋屈服出现塑性铰, 甚至出现楼层承载能力下降到极限强度 85% 或者弹塑性层间侧移角超过 1/50 的情况, 但是由于该楼层具有较好延性仍不至发生倒塌, 处于接近于“不倒”的“可修”性能状态水准. 而其他非薄弱楼层则开裂和变形均不甚严重, 处于接近于“不坏”的“可修”性能水准. 这种震后钢筋混凝土框架结构, 由于各楼层性能水准差异较大, 从整体结构角度考虑, 处于

“可修”和“不倒”两种性能水准之间. 对于此类钢筋混凝土框架结构全部进行拆除固然是好, 但是由于此类建筑在地震中所占比例较大, 全部予以拆除会造成较多建筑垃圾, 且代价太大严重影响灾后重建恢复. 如能结合现有结构加固技术, 对此类建筑予以震后加固, 使其达到震前抗震性能或者达到现行抗震规范要求, 可以节约大量重建费用和时间, 具有重要社会意义.

目前, 国内外关于结构震后加固的研究<sup>[1-3]</sup>, 主要集中于震损较轻的结构, 对于此类个别楼层进入塑性阶段的结构的震后加固研究较少. 鉴于此, 项目组提出对此类钢筋混凝土框架结构进行震后加固, 使其达到或者接近震前抗震性能, 满足新建结

构抗震性能要求的思路,以充分利用震损结构,减小经济损失、建筑垃圾和资源消耗,加快震后恢复重建进程.针对该类型建筑结构特点,项目组提出“预应力钢带快速加固+防屈曲支撑整体加固”相结合的加固设计思路,具体加固办法为:在地震过后,利用预应力钢带加固技术的施工方便、快捷的突出优势,对受损框架结构首先采用预应力钢带技术<sup>[4-7]</sup>进行快速抢救加固,快速恢复震后结构的抗震性能,使其能有效抵抗后期余震;待地震结束后,再对结构进行全面评估分析,并采用防屈曲支撑等整体加固技术<sup>[8]</sup>对框架结构进行全面加固,全面提升震后结构的抗震性能,以达到抗震规范的要求.

基于此思路,本项目对一榀单跨三层 1:2 比例的钢筋混凝土框架分别进行了震前和震后加固的低周反复拟静力加载试验研究,对采用预应力钢带加固的介于“中震可修”和“大震不倒”之间性能

状态的钢筋混凝土框架抗震性能进行了全面分析研究.

1 试验方案

1.1 试件设计

本次试验设计制作一榀 1:2 的单跨三层钢筋混凝土框架.框架柱截面尺寸为 250 mm×250 mm,框架梁截面尺寸为 150 mm×300 mm,地梁截面尺寸为 450 mm×500 mm.每层层高均为 1.5 m,框架跨度为 3.6 m.框架梁、柱混凝土设计强度等级为 C30,钢筋、箍筋均采用 HRB400.试件尺寸及配筋详见图 1,其中 1-1 为地梁配筋图,2-2 为一、二、三层梁配筋图,3-3 为一层柱配筋图,4-4 为二、三层柱配筋图.试件中纵筋、箍筋、混凝土等材料性质实测结果详见表 1.

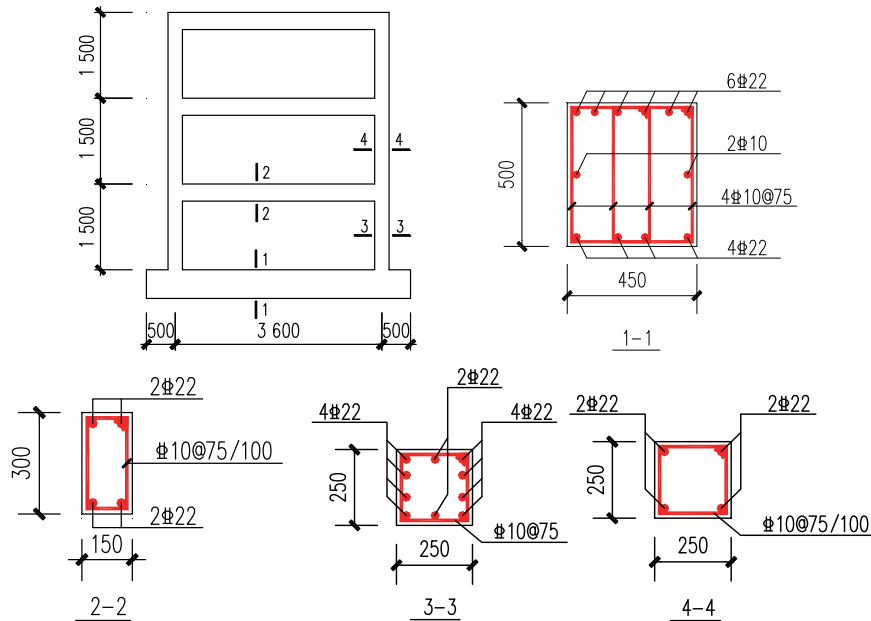


图 1 框架尺寸及配筋图  
Fig.1 Geometry dimension and reinforcement of specimen

1.2 加固设计

对于震后框架结构的快速抢救加固,本试验采用预应力钢带加固技术予以加固.针对钢筋混凝土框架在震后主要表现出的梁端、柱端和节点核心区混凝土开裂等破坏现象,均采用预应力钢带加固技术进行加固,具体加固思路为:在保持竖向荷载作用下,首先用高性能灌浆料对开裂破坏较严重处混凝土进行修补,然后采用预应力钢带加固技术对梁端、柱端和节点核心区安装预应力钢带.具体做法是:节点核心区安装两道三层钢带(钢带净距为 20mm),梁端、柱端均安装四道双层钢带(钢带净距

为 45 mm),梁端、柱端和节点核心区钢带安装后情况详见图 2,本次试验中加固所用钢带均为厚 0.9 mm,宽 32 mm 上海宝钢生产超高强钢带,钢带材料强度详见表 1.

表 1 材料实测强度  
Tab.1 The measured strength of materials

材料	屈服强度平均值 $f_y$ /MPa	抗拉强度平均值 $f_u$ /MPa	立方体抗压强度平均值 $f_{cu}$ /MPa
纵筋	415	575	—
箍筋	496	630	—
钢带	635	719	—
混凝土	—	—	19



图2 试件加固示意图

Fig.2 Schematic of retrofitted specimens

### 1.3 加载方案

试验在西安建筑科技大学结构实验室进行. 竖向荷载通过原型结构荷载进行折算后, 取为 400 kN. 采用压梁通过地梁将框架固定后, 在框架左右柱端采用稳压千斤顶各施加 400 kN 的竖向荷载, 然后在第三层顶端采用 MTS 电液伺服作动器施加水平反复荷载, 为防止框架试件发生平面外变形, 在框架的第二层两侧设置刚性横梁进行侧向支撑.

在本次框架拟静力试验中, 试验采用在顶点单点施加水平荷载的加载模式, 其目的是通过试验使三个楼层各层震损程度不同, 模拟实际震害中多层钢筋混凝土框架的薄弱层和非薄弱层共存情况. 试验加载装置和加载示意图分别见图 3a 和图 3b.

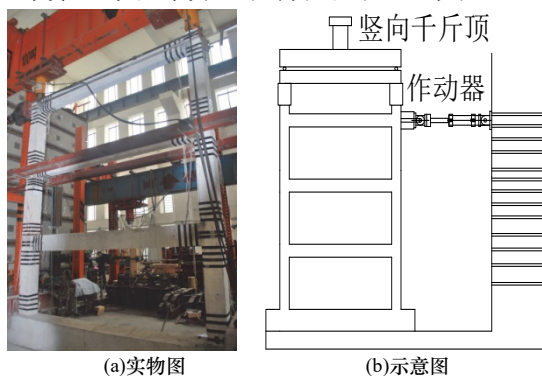


图3 试验加载装置

Fig.3 The loading setup

### 1.4 加载程序

本试验的加载采用《建筑抗震试验方法规程》<sup>[9]</sup>(JGJ101-1996)规定的荷载-变形混合控制加载制度. 首先采用力控制加载, 待加载至试件屈服后改用位移控制加载, 位移加载过程中位移增量均取为 5 mm, 即  $\Delta_{i+1} = \Delta_i + 5$ , 加载过程如图 4 所示.

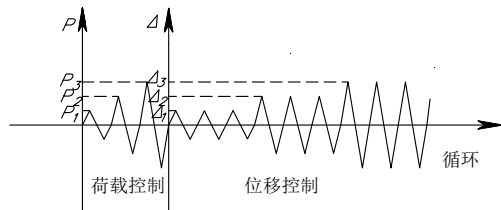


图4 加载制度

Fig.4 Loading schedule

### 1.5 测量内容及方法

本试验测量的内容主要包括应变、位移和力. 通过在梁端和柱端内的钢筋、箍筋上布置应变片以测量应变, 用于结构及构件内力分析. 在框架的每层梁端分别布置不同量程的位移计, 以量测框架各层的水平位移. 其中顶层位移和力由 MTS 电液伺服结构试验系统直接采集. 位移计、应变片的布置详见图 5. 对于加固框架, 除了上述内容, 还量测其梁柱端及核心区钢带的应变.

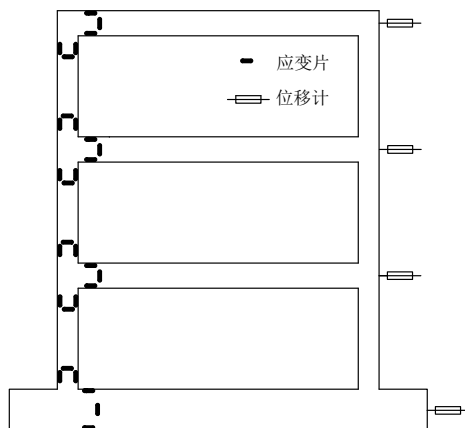


图5 位移计、应变片布置图

Fig.5 Layout of strain gauges and LVDTs

## 2 试验现象

### 2.1 原始框架

在加载初期, 原始框架无明显现象, 随着荷载的增加, 各层梁上开始出现裂缝. 在此, 定义水平千斤顶伸长(推力)为正向加载, 水平千斤顶缩短(拉力)为负向加载. 其中 MTS 电液伺服作动器位于框架西侧. 框架一层的裂缝较少: 当水平荷载为 -40 kN 时, 一层梁上开始出现裂缝, 当荷载增至 -70 kN, 细小裂缝增多, 之后并无新的裂缝出现. 框架二层的裂缝发展很明显: 当水平荷载为 -30 kN 时, 框架二层梁西侧上部开始出现竖向裂缝, 当荷载为 -50 kN 时, 开始增多并向跨中延展; 下部裂缝出现较晚, 当加载按位移控制为 35 mm 时才出现裂缝, 此时, 框架东侧二层梁柱节点处也出现裂缝. 当加载端位移为 30 mm 时, 框架东侧二层柱顶部出现竖向裂缝, 当位移为 -35 mm, -45 mm 时, 裂缝增多. 继续按位移加载, 裂缝变长且宽度增加. 框架三层裂缝发展趋势如下: 当水平荷载为 -30 kN, 梁东侧出现裂缝, 当按位移控制加载至 -35 mm, 梁西侧裂缝出现并迅速扩展. 同时三层柱端出现横向裂缝, 随后梁柱节点处也有裂缝出现. 当加载端位移为 70 mm 时, 可以听见轻微的混凝土开裂声, 位移增至 75 mm 时, 二层, 三层节点处均有混凝土剥落. 加载至荷载

下降为峰值荷载的 85%时停止加载. 试验过程中虽有混凝土脱落, 但仍未发生压溃现象. 图 6(a)为原始框架节点处的破坏形态.

2.2 加固框架

对试验加载完后框架进行局部修补, 采用预应力钢带加固技术对震后框架的梁端、柱端及梁柱节点进行加固. 再次模拟水平地震力对其加载. 当加载端荷载为 45 kN 时, 听见轻微的混凝土响动声, 当加载端按位移控制为 54 mm 时, 修补后的节点处混凝土响动较大, 当水平位移为 89 mm 时, 修补的混凝土外层脱落, 此时荷载达到峰值. 继续按位移加载, 由于钢带的作用, 荷载下降速度极其缓慢, 迟迟降不到峰值荷载的 85% ,最终当加载端位移为 139 mm 时终止试验, 此时层间位移角可达 1/23, 远大于规范规定的弹塑性层间位移角限值. 加固框架节点处破坏形态如图 6(b)所示.

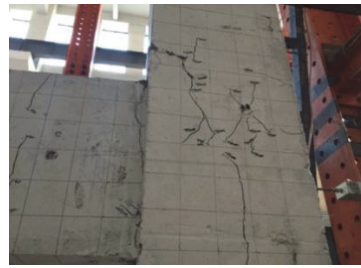
3 试验结果

3.1 滞回曲线

图 7 是原始框架和加固框架的水平荷载-顶点位移滞回曲线. 从图 7 可看出, 原始框架和加固框架滞回曲线均饱满, 屈服后曲线包围面积较屈服前大, 耗能能力很好. 原始框架的滞回曲线具有比较明显的捏缩现象, 而加固后框架捏缩现象反倒有所改善. 同时, 从图 7 还可看出, 加固框架具有较高的抗侧移刚度、承载能力和变形能力, 具有与原始框架相近的抗震性能.

根据滞回曲线, 分别得到原始框架和加固框架的骨架曲线(图 8)和各主要试验结果(表 2). 从图 8 和表 2 可看出, 加固框架的变形能力相对原始框架结构有显著提高, 加固框架顶点极限位移(拉压均值)从约 75.7 mm 增加到 135.0 mm, 提高近 80%. 原始框架的最大层间位移角为 1/41, 加固后框架的最大层间位移角为 1/23, 提高了 1.78 倍. 这些都说明在加载后期, 钢带很好地约束节点及梁柱端混凝土,

框架的变形能力得到有效提高.



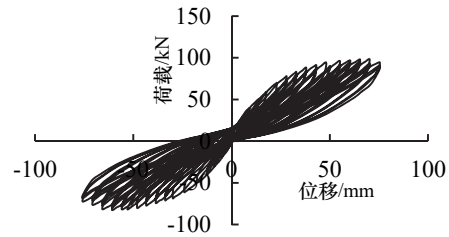
(a) 原始框架



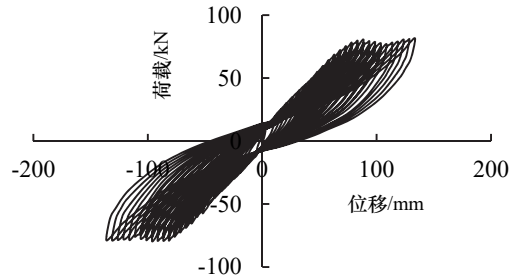
(b) 加固框架

图 6 试件破坏形态图

Fig.6 Failure pattern of specimens



(a) 原始框架



(b) 加固框架

图 7 试验滞回曲线

Fig.7 hysteretic curves of specimens

表 2 主要试验结果汇总表

Tab.2 Sum of experimental results

试件	加载方向	屈服		峰值		极限		延性系数	层间极限位移角
		$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$\Delta_m/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$		
未加固试件	正向	83.27	33.49	97.84	65.44	94.05	75.51	2.25	1/46
	负向	70.50	33.31	82.32	60.85	71.91	75.88	2.28	1/41
加固试件	正向	80.08	89.0	81.0	133.67	81.0	133.67	1.50	1/25
	负向	72.25	71.85	79.20	96.43	78.26	136.38	1.90	1/23

注: 本试验的屈服荷载按等能量法<sup>[10]</sup>确定.

3.2 承载能力

原始框架结构的最大承载力和加固框架结构

的最大承载力比较如表 2. 从表中可知, 加固框架水平承载力并无明显下降. 正向加载的极限承载力



为原始框架结构的 84%, 负向加载的极限承载力为原始框架结构的 98%。从图 8 的骨架曲线可知, 钢带加固后的框架达到峰值荷载后, 其承载力仍维持在较高水平, 并没有明显下降。这是因为钢带在加载后期, 框架节点处变形较大, 钢带充分发挥其作用, 约束混凝土的膨胀, 有效地提高了加载后期框架的承载性能。

### 3.3 延性系数

延性是指结构或构件从屈服开始到到达最大承载力或到达以后承载力没有明显下降期间的变形能力。它是反映结构、构件或材料非弹性变形能力的度量指标。本试验采用位移延性系数  $\mu$  ( $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ ) 来衡量试件的延性, 即以加载端极限位移  $\Delta_u$  与屈服位移  $\Delta_y$  的比值表示。

从表 2 的主要试验结果汇总表中可知, 采用钢带加固后, 框架的极限位移提高幅度很大, 变形能力很好。然而延性系数较之未加固框架反而有所下降, 主要有以下两个原因: 第一, 受损加固后框架的整体侧移刚度有所降低, 屈服位移相对原始框架有所增加, 致使按极限位移与屈服位移比值所计算所得位移延性系数较低。第二, 目前屈服位移计算方法, 主要是针对未历经损害的结构所提出的, 而本试验中加固框架是历经震损结构, 与此前所采用的屈服位移的概念和计算方法均应有所区别。同样的, 对于震后加固结构, 延性系数概念亦须进一步研究和定义。

### 3.4 耗能能力

耗能能力是结构抗震性能的一个重要指标。耗能能力通过滞回环的面积体现, 滞回环面积越大, 耗散的能力越多。

由图 7 的滞回曲线可知, 在同样大小位移下, 加固框架的耗能能力比原始框架的耗能能力稍低, 然而在加载后期, 由于构件变形大, 以致钢带作用越来越明显, 故随着位移的继续增大, 加固框架继续吸收、耗散地震能量。图 9 是框架累积耗能随顶层位移关系曲线。加固框架的总耗能 116.36 kN·m, 原始框架总耗能 47.39 kN·m, 可知钢带加固受损框架后, 其总耗能能力提高了 145.5%。

### 3.5 侧移刚度

刚度是结构受力时抵抗变形的能力, 在荷载保持不变的情况下, 会随着位移的增加而降低。试件刚度可用割线刚度来表示, 即将滞回曲线上每个滞回环的最大荷载点(正向加载)和最小荷载点(反向加载)分别与坐标原点的连线斜率作为正反向加载

时的结构刚度。  $K_i = P_i / \Delta_i$  式中,  $P_i$  为第  $i$  次峰点荷载值,  $\Delta_i$  为第  $i$  次峰点位移值。

图 10、图 11 分别是原始框架和加固框架各层刚度与层间位移的关系图。由图可知, 原始框架和加固框架的一层初始刚度较大, 二、三层刚度接近。图 12 是原始框架和加固框架二层的刚度随层间位移变化的对比图。由图 12 可知, 原始框架初始刚度大于加固框架初始刚度, 这是因为加固框架在采用钢带加固前, 内部已经有损伤。从图 12 也可看出, 加固框架的刚度退化比原始框架慢, 尤其在加载后期, 加固框架刚度退化极其缓慢。

### 3.6 强度退化

强度退化是指在循环往复荷载作用下, 当保持相同的位移幅值时, 承载力随循环次数的增加而下降的现象。试件的强度退化可用承载力降低系数  $\lambda$  来表示。

$$\lambda = \frac{P_i}{P_1} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  表示每一控制位移中第  $i$  次循环的峰值荷载;  $P_1$  表示每一控制位移中第 1 次循环的峰值荷载。

图 13 为原始框架和加固框架第三次循环时的承载力降低系数与位移的关系。从图中可知, 原始框架在加载后期承载力退化较快, 加固框架随着位移增大承载力系数降低直至趋于平缓, 说明加载后期钢带发挥作用较大, 使得承载力退化极其缓慢。

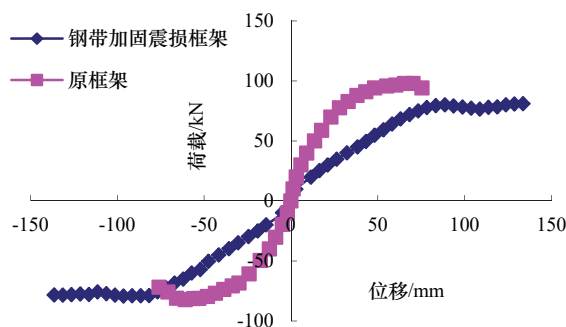


图 8 骨架曲线  
Fig.8 Skeleton curves of specimen

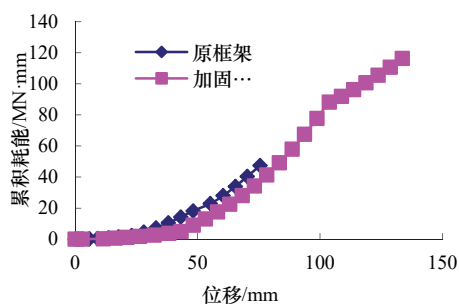


图 9 各阶段累计耗能曲线  
Fig.9 energy dissipation at different stages

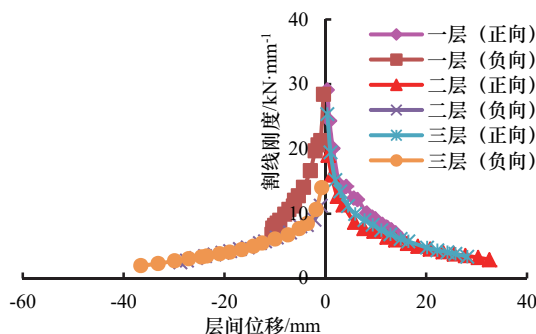


图10 原始框架各层刚度与层间位移的关系

Fig.10 Relation of uninjured specimen's stiffness and interstory drift

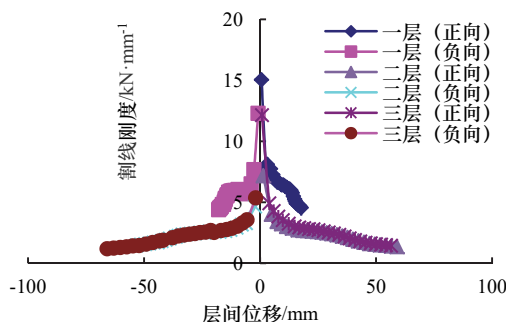


图11 加固框架各层刚度与层间位移的关系

Fig.11 Relation of strengthened specimen's stiffness and interstory drift

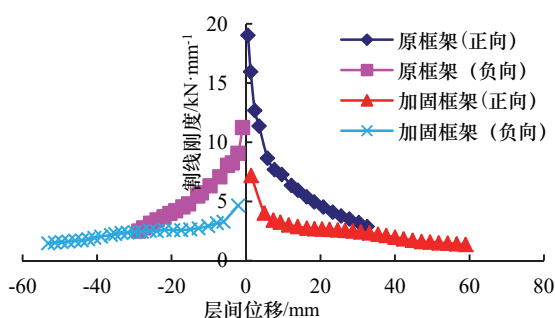


图12 原始框架与加固框架刚度对比图

Fig.12 Stiffness contrast figure between unstrengthened specimen and strengthened specimen

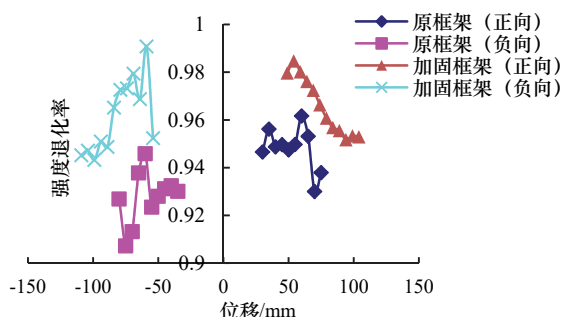


图13 承载力降低系数与位移的关系

Fig.13 Relation of strength degeneration and specimen's displacement

## 4 结语

本文通过未加固框架与震损后采用预应力钢

带加固的加固框架的低周反复拟静力试验,对钢带加固震损框架结构的抗震性能进行了研究.主要得出以下结论:

(1) 预应力钢带加固震后框架,具有与未经历地震的原始框架结构相近的承载能力,并具有更大的弹塑性极限变形能力.

(2) 预应力钢带加固震后的框架,与未经历地震原始的框架结构相比,强度退化和刚度退化更为缓慢.

(3) 受损虽然降低了同级位移下框架的耗能能力,然而加固框架的总耗能能力提高很大,抗震性能良好.

(4) 预应力钢带加固震后框架,与未经历地震的原始框架结构相比,抗侧移刚度降低较大.

总体而言,在预应力钢带加固基础上,若进一步结合防屈曲支撑予以整体加固,即采用本项目组提出的“预应力钢带局部加固+防屈曲支撑整体加固”技术,可以较好实现对震损结构的震后加固,并能使震损加固框架的抗震性能达到甚至优于震前抗震性能,实现震后加固的快速修复和重复利用,具有重要工程实践意义和社会意义.

## 参考文献 References

- [1] 熊宇. 低预应力钢带箍加固地震损伤钢筋混凝土柱抗震性能研究[D].长沙: 湖南大学, 2014.  
XIONG Yu. The seismic performance of the damaged RC column confined by low-prestressed steel belts[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [2] 于泽, 王泽云. 浅析震后房屋加固原则和技术[J].四川建材, 2010(1):75-77.  
YU Ze, WANG Zeyun. Analysis of the principle and technology of building retrofit after earthquake[J]. Sichuan Building Materials, 2010(1):75-77.
- [3] 余琼, 陆洲导. 受损对碳纤维加固框架节点的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(2):177-181.  
YU Qiong, LU Zhoudao. Comparison and analysis of injured frame's joint and uninjured frame's joint strengthened by carbon fiber reinforced plastics[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2004, 32(2): 177-181.
- [4] 杨勇, 薛建阳, 黄慧萍, 等. 建筑中构件节点加固方法: CN102051984A[P]. 2011-05-11.  
YANG Yong, XUE Jianyang, HUANG Huiping, et al. Retrofit method of structure joint: CN102051984A [P]. 2011-05-11.
- [5] 张波, 杨勇, 成浩. 预应力钢带加固技术在某办公楼改造工程中的应用[J]. 工业建筑, 2015 (3):35-39.  
ZHANG Bo, YANG Yong, CHENG Hao. Application of prestressed steel strips retrofitted method in reforming an office building[J]. Industrial Construction, 2015(3):35-39.
- [6] 赵飞. 预应力钢带加固高轴压比钢筋混凝土柱抗震性能研究[D].西安: 西安建筑科技大学, 2013.

- ZHAO Fei. Study on seismic performance of RC column with high compressive ratio retrofitted by prestressing steel strips[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & tech., 2013.
- [7] 周亮. 低预应力钢带箍横向约束加固 RC 柱抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- ZHOU Liang. The seismic performance of RC column confined by low-prestressed steel belts[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [8] 吴永河, 习会峰, 穆建春. 倒 V 形钢支撑加固 RC 框架的 PUSHOVER 分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(1): 5-9.
- WU Yonghe, XI Huifeng, MU Jianchun. Pushover analysis on inverted V-shape steel brace strengthening RC frame structure [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2013, 45(1): 5-9.
- [9] 建筑抗震试验方法规程: JGJ101-1996. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ1001-1996. [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996.
- [10] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- GUO Zhenhai. Principle of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

(编辑 沈波)

(上接第 28 页)

(4) 增加 PVC 管径壁厚, 内配 PVC 管约束高强混凝土短柱的初始刚度和峰值荷载变化不明显, 后期强度衰减减慢, 延性略有改善; 随着混凝土强度的提高, 内配 PVC 管约束高强混凝土短柱的初始刚度和峰值荷载提高显著, 但延性变差。

## 参考文献 References

- [1] 叶列平, 陆新征, 冯鹏, 等. 高强高性能工程结构材料与现代工程结构及其设计理论的发展[C]//第一届结构工程新进展国际论坛文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 208-250.
- YE Lieping, LU Xinzheng, FENG Peng, et al. High strength performance structural materials and the developments of modern engineering structures and the design theory [C]//Proc. 1<sup>st</sup> International Forum on Advances in Structural Engineering Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 208-250.
- [2] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1-9.
- SI Bingjun, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 1-9.
- [3] 史庆轩, 杨坤, 白力更, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (12): 9-17.
- SHI Qingxuan, YANG Kun, BAI Ligeng, et al. Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 9-17.
- [4] CARL E. Kurt, M. ASCE. Concrete filled structural plastic columns [J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(1): 55-63.
- [5] TOUTANJI H. Design equations for concrete columns confined with hybrid composite materials [J]. Advanced Composite Materials, 2001, 10(2): 127-138.
- [6] TOUTANJI H, SAAFI M. Stress-strain behavior of concrete columns confined with hybrid composite materials[J]. Materials and Structures, 2012, 35(6): 338-347.
- [7] 王俊颜, 杨全兵. 聚氯乙烯塑管混凝土力学性能的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 929-933.
- WANG Junyan, YANG Quanbing. Experimental research on mechanical properties of pvc-pipe concrete [J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2009, 37(7): 929-933.
- [8] 于峰, 牛荻涛. PVC-CFRP管钢筋混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 129-136.
- YU Feng, NIU Ditao. Experimental study on PVC-CFRP confined reinforced concrete short column under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 129-136.
- [9] 姜绍飞, 吴智林, 吴兆旗, 等. FRP-PVC管约束圆形截面钢筋混凝土组合柱滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 111-118.
- JIANG Shaofei, WU Zhilin, WU Zhaoqi, et al. Experimental study on reinforced concrete columns confined by FRP-PVC tubes under reversed loading [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 111-118.
- [10] 韩雯. 约束微膨胀混凝土承载力性能试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- HAN Wen. Experiment research on bearing capacity ability of expansive confined concrete [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [11] 陈波. 管材包裹预应力混凝土方形柱优化数值模拟[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 107-110.
- CHEN Bo. Numerical study on optimization design of square tubular column filled with pre-stressed concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 107-110.
- [12] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 等. 不同增强措施的高强混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(s1): 246-251.
- KE Xiaojun, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic performance of high-strength concrete short columns with different strengthening measures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(s1): 246-251.
- [13] SCOTT B D, Park R, and PRISETLEY M J N. Stress-Strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(2): 13-27.

(编辑 沈波)