

王科亮, 张娟, 郝骏, 等. 钢筋混凝土框架结构外设隔震支座加固前后抗震性能模拟分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 168–176. [WANG Keliang, ZHANG Juan, HAO Jun, et al. Simulation Analysis of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Structures Before and After Reinforcement with External Seismic Isolation Bearings[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 168–176]

钢筋混凝土框架结构外设隔震支座加固前后 抗震性能模拟分析

王科亮¹, 张娟¹, 郝骏¹, 童晔¹, 王帅²

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127; 2. 江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225001)

摘要: 采用隔震支座对钢筋混凝土框架结构进行加固处理, 并研究加固前后抗震性能变化情况, 旨在提高加固效果, 提高建筑物的抗震性能。通过在原始钢筋混凝土框架试件中安装间歇式 SMA 支座, 制作出加固试件, 并通过设计地震输入参数, 得到试件在不同地震波影响下的结构响应情况。并搭载加载装置, 针对两组试件同时进行拟静力模拟试验, 检测出钢筋的抗震强度。通过对比两组试件在不同地震波条件下层间位移角的变化情况, 证明钢筋混凝土框架结构的最大层间位移出现在结构底部。相较于原始试件, 隔震支座加固后的试件的结构响应性能分别提高了 38.47% 以及 40.14%。并调取两组试件的水平荷载—位移滞回曲线, 实验结果显示, 相对于加固前, 隔震支座可以提高 42.8% 的滞回环面积。隔震支座可以有效提高建筑框架结构的抗震性能, 相对于原始试件, 加固后的试件残余变形较低, 可以充分发挥结构的承载能力。

关键词: 钢筋混凝土; 隔震支座; 加固方法; 抗震性能;

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0168-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.19

Simulation Analysis of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Structures Before and After Reinforcement with External Seismic Isolation Bearings

WANG Keliang¹, ZHANG Juan¹, HAO Jun¹, TONG Ye¹, WANG Shuai²

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225001, China)

Abstract: This paper used seismic isolation bearings to reinforce reinforced concrete frame structures and studied the changes in seismic performance before and after reinforcement, so as to improve the reinforcement effect and enhance the seismic performance of buildings. By installing intermittent SMA bearings in the original reinforced concrete frame specimens, reinforced specimens were made, and the structural response of the specimens under different seismic wave effects was obtained by designing seismic input parameters. A loading device was equipped, and quasi-static simulation tests were conducted simultaneously on two sets of specimens, so as to detect the

收稿日期: 2024-03-07

作者简介: 王科亮(1980-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为建筑结构。

E-mail: g18410772@163.com

seismic strength of the steel bars. By comparing the changes in displacement angles between the lower layers of two sets of specimens under different seismic wave conditions, it is proven that the maximum inter-layer displacement of reinforced concrete frame structures occurs at the bottom of the structure. Compared with that of the original specimens, the structural response performance of the specimens reinforced with seismic isolation bearings increases by 38.47% and 40.14%, respectively. The horizontal load displacement-hysteresis curves of two sets of specimens are taken, and the experimental results show that after reinforcement, the seismic isolation bearings can increase the hysteresis loop area by 42.8%. Seismic isolation bearings can effectively improve the seismic performance of building frame structures. Compared with that of the original specimens, the residual deformation of the reinforced specimens is lower, which can fully utilize the load-bearing capacity of the structure.

Keywords: Reinforced concrete; Seismic isolation bearing; Reinforcement method; Seismic performance

0 引言

在地震作用下，建筑物的安全性和稳定性显得尤为重要。然而，由于各种原因，许多建筑物在设计和施工过程中可能存在不足，导致其抗震性能已经无法满足当前建筑物的承载力需求。钢筋混凝土框架结构作为一种当前主流的建筑结构存在形式，由于其具有较为理想的承载表现，因此被广泛应用在地质条件较为复杂的施工区域。然而，随着时间的推移，这些建筑可能会由于材料老化、损伤累积等原因而导致其抗震性能下降。因此，如何对钢筋混凝土框架结构进行有效的加固，以提高其抗震性能，是当前工程界关注的焦点之一。

隔震支座是一种有效的隔震措施，它可以通过在建筑物底部设置隔震支座来减少地震作用对建筑物的影响。在地震作用下，隔震支座可以有效地吸收和分散地震能量，从而减少建筑物受到的破坏。因此，对钢筋混凝土框架结构进行隔震加固具有重要的意义。在地震作用下，建筑物的破坏往往是由于地震能量得不到有效的吸收和分散而导致的。通过在建筑物底部设置隔震支座，可以有效地吸收和分散地震能量，从而减少建筑物受到的破坏。

近年来，国内外学者对钢筋混凝土框架结构的抗震性能进行了广泛的研究。一些学者通过数值模拟和实验研究的方法，分析了钢筋混凝土框架结构在地震作用下的结构响应变化情况。例如，文献[1]以自复位加固后的钢筋混凝土框架作为研究对象，通过模拟地震作用下的构件受力变化情况，从而实现混凝土框架抗震性能的有效分析。同时，还有一些学者研究了不同加固方法对钢筋混凝土框架结构承载力性能的影响情况。例如，

文献[2]以装配式混凝土框架作为研究对象，通过对其增设支撑体系，从而对比加固前后的抗震性能变化情况。

本文旨在分析钢筋混凝土框架结构在隔震加固前后的抗震性能变化情况。将综合考虑地震作用和结构自身特性的影响，分析不同地震烈度下结构的响应和破坏情况。

1 实验准备

1.1 实验材料与仪器

本次实验所选用的混凝土结构为多层框架结构，其中钢筋框架在水平方向以及垂直方向的跨度以及层高均有所不同^[3]。为了准确分析出混凝土框架在加固前后的抗震性能的改变，本文设置钢筋混凝土框架在水平方向X的跨度为5跨，每跨的单位长度为5 m；水平方向Y的跨度设置为8跨，每跨的单位长度为4.5 m；垂直方向Z的跨度为8跨，每跨的单位长度为3.5 m。具体混凝土框架结构如下图所示^[4-5]。

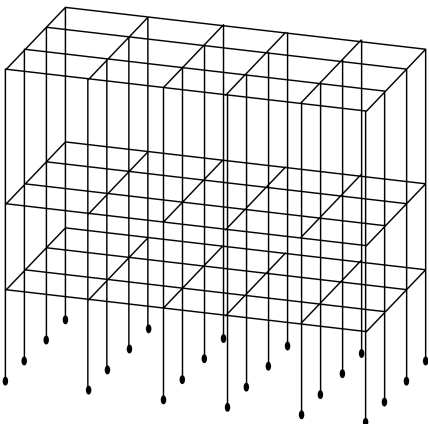


图1 钢筋混凝土框架结构
Fig.1 Reinforced concrete frame structure

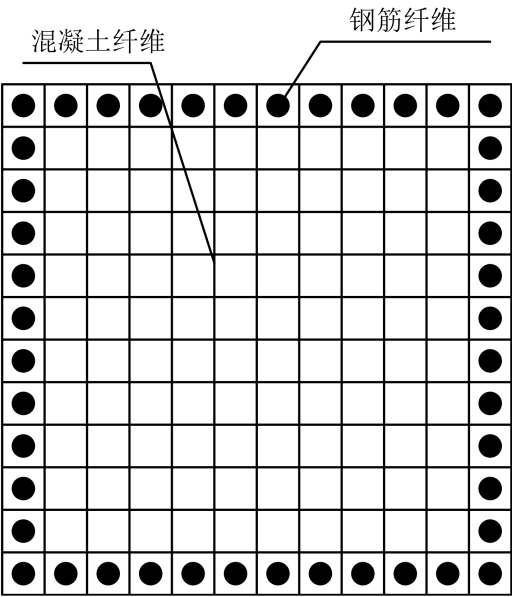


图2 混凝土框架截面
Fig.2 Section of the concrete frame

混凝土结构的材料设置如下表所示。

表1 混凝土结构材料设置		
Table 1 Material setting of concrete structure		
参数类型		具体配置
截面位置	主结构梁跨尺寸	770×330 mm
	次结构梁跨尺寸	600×330 mm
	垂直立柱尺寸	770×770 mm
荷载类型	恒载	3.5 kN/m ²
	活荷载	2.5 kN/m ²
	地震荷载	0.15 g

其中， g 代表重力加速度^[6]。本文所采用的水泥为42.5级水泥。

本次实验所用到的隔震支座为间歇式形状记忆合金（Shape Memory Alloy，SMA）支座，支座整体为橡胶材质，通过斜对角布置的方式对钢筋混凝土的上下连接处进行加固处理^[7]。具体隔震支座结构如下图所示。

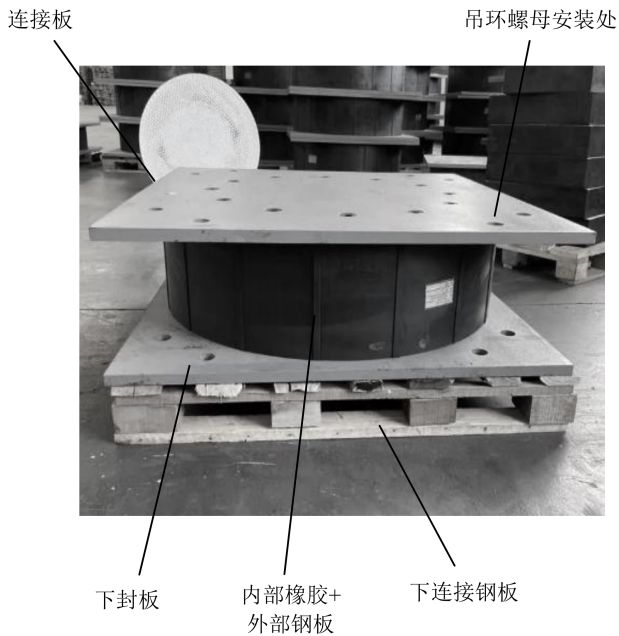


图3 SMA 支座结构
Fig.3 The SMA bearing structure

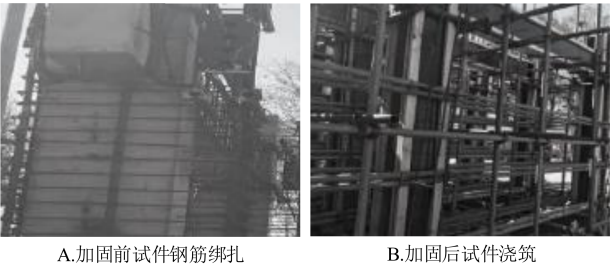
以上述支座作为主要加固手段，对混凝土框架结构进行加固处理，并针对上述混凝土框架结构以及具体材料设置，对地震情况进行仿真模拟，并对比外设隔震支座加固前后的抗震性能变化情况^[8-10]。

1.2 试件设计

为对比出隔震支座对于钢筋混凝土的加固性能，本文针对上述钢筋混凝土框架结构分别构建出原始试件以及加固后的试件，并检测出两组试件的抗压能力。首先，未加固试件根据原有建筑设计图进行同比缩小设计^[11-12]，具体试件参数如下表所示。

表 2 试件参数设计		
Table 2 Parameter design of specimen		
参数	配置	
截面尺寸	270 mm×270 mm	
梁截面	尺寸	150 mm×306 mm
	跨度	2 790 mm
地梁截面	尺寸	400 mm×700 mm
	跨度	45300 mm
柱纵筋	直径	18 mm
	强度	HRB400
柱箍筋	直径	6 mm
	强度	HPB300
	钢筋间距	60 mm
梁上部纵筋	直径	6 mm
	强度	HPB300
梁下部纵筋	直径	14 mm
	强度	HRB400
梁箍筋	直径	6 mm
	强度	HRB300
	加密间距	90 mm
	非加密	180 mm
混凝土等级	C20	
地梁灌浆料等级	C40	

采用隔震支座对原始试件进行加固，设置加固框架预制梁结构尺寸为 120 mm×450 mm，原始试件 内部预留四根绞线孔道，并将隔震支座固定在孔道上方实现加固处理^[13]。加固前后的试件制作过程如下图所示。



A.加固前试件钢筋绑扎 B.加固后试件浇筑

图 4 试件制作流程

Fig.4 Manufacturing process of specimen

对于两种试件的加载装置，本文采用多功能振动台对其进行静力加载测试。振动台主要包括压梁、反力墙、丝杆、门架以及水平作动器组成。通过采用竖向千斤顶向压梁施加压力，从而得到两组试件的张拉值^[14-15]。对此，本文在混凝土框架梁柱节点部位布设了 10 个检测点，每个检测点均采用拉线式位移计对位移情况进行检测。考虑到在进行实验的过程中任何微小的孔隙都可能导致位移计数据突然调动，因此本文在梁柱顶部布设了两个反向位移计，用于测量加载点处的反向位移，从而保证测量结果的可靠性。

2 实验过程

2.1 地震输入参数设计

自振周期是结构在自由振动时完成一个完整周期所需的时间，反映了结构的固有振动特性。本次实验通过有限元分析软件计算得到结构的自振周期。根据计算结果，该结构的自振周期约为 $T=0.5$ s。

为确保模拟的准确性和有效性，地震波的选取需紧密结合结构的自振周期。本次实验采用 SAP 软件，首先调用软件内置的 EL 波和 CPC 波作为自然波，这些波形基于实际地震记录和物理模型生成，能够较好地反映地震的真实情况。同时，根据反应谱特征周期合成波形作为人工波，进一步丰富了地震波形的选择范围。在选取地震波时，重点考虑了波形的频率特性和振幅。通过对比不同波形与结构自振周期的关系，选择那些能够引发结构明显响应的波形。此外，为确保模拟的多样性，设置了不同峰值加速度（0.2、0.4、0.6）的地震波，以模拟不同等级的地震震度。同时对地震波动的峰值速度进行持续监测，若峰值速度超过了设计标准，则通过手动输入地震波幅值的方式，对峰值速度进行调整，从而使实际模拟出的地震波形更接近设计标准。同时，本次实验测量了地震波形的时间历程、峰值加速度和峰值速度等关键参数，以便更好地理解地震波动的特性和对结构的影响。由此得到的三种地震波形如下图所示。

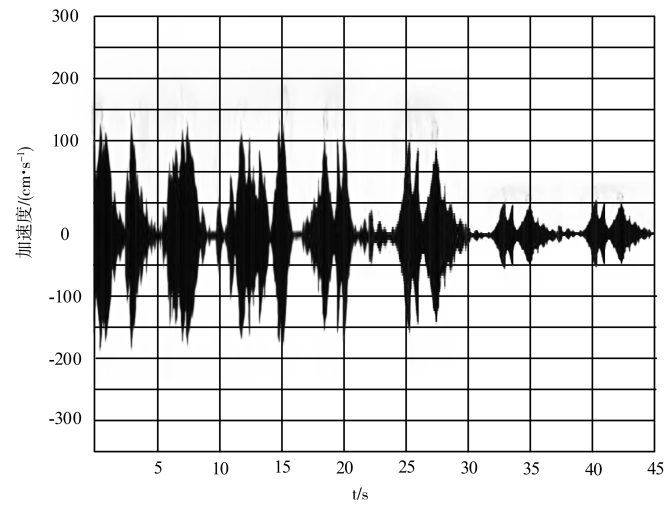


图5 EL地震波
Fig.5 EL seismic wave

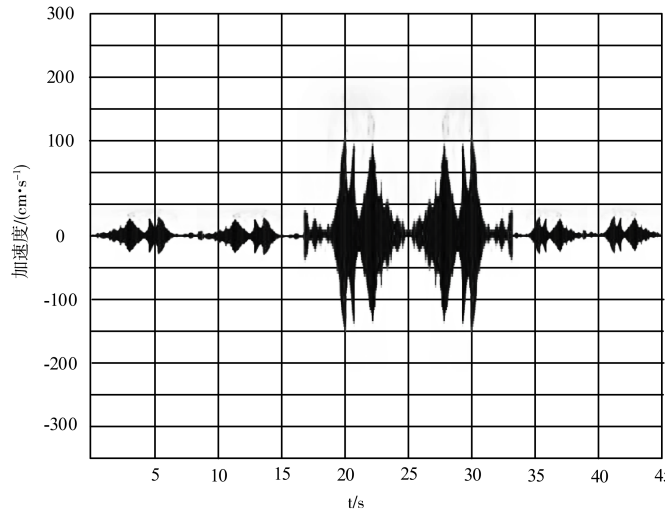


图6 CPC地震波
Fig.6 CPC seismic wave

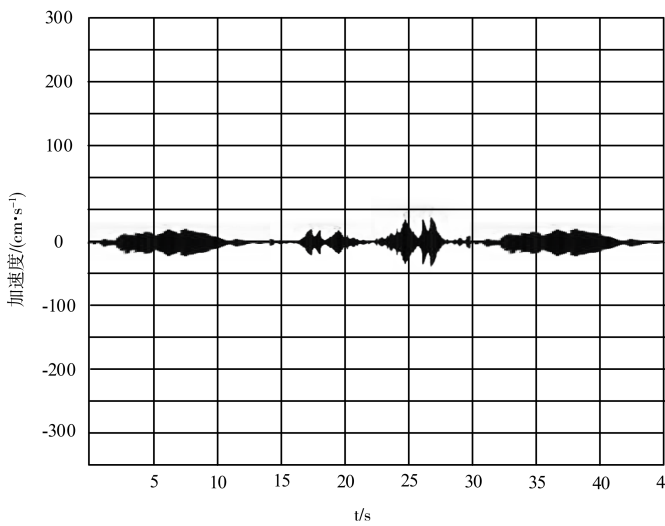


图7 人工地震波
Fig.7 Artificial seismic wave

分别将三种地震波形作为模拟施加压力的波形,将其输入到原始有限元模型中,进行地震模拟。有限元模型边界条件设置如下:在模型底部,所有节点的 X 、 Y 、 Z 方向的位移均被约束为0,即 $U_x=0$, $U_y=0$, $U_z=0$ 。在 Y 轴方向的侧面,约束 X 方向的位移 $U_x=0$,允许 Y 和 Z 方向的位移自由变化。模型的顶部不施加任何位移约束,允许其在地震作用下自由振动。本构关系设置如下:弹性阶段:在应力未达到屈服点之前,材料遵循胡克定律,即应力与应变成正比。弹性模量 $E=30\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.2$ 。塑性阶段:当应力超过屈服点后,材料进入塑性变形阶段。此时需要定义屈服准则和塑性流动法则。加载方式设置如下:将之前设

计好的EL波、CPC波和人工波作为地震荷载,分别施加到模型的底部节点上。对于EL波,在 X 方向施加水平地震作用,加速度峰值设为 0.2 g 、 0.4 g 和 0.6 g 进行多次模拟,按照地震波的时间历程进行加载,即在不同时间点施加不同的加速度值,以模拟地震的整个过程,从而得到多地震作用下钢筋混凝土框架结构的响应情况。

2.2 钢筋拟静力模拟实验

拟静力试验的框架加载装置如下图所示,通过采用三组不同的加载制度对原始试件以及加固后的试件模型进行张拉测试,从而得到预应力钢筋的初始张拉力。

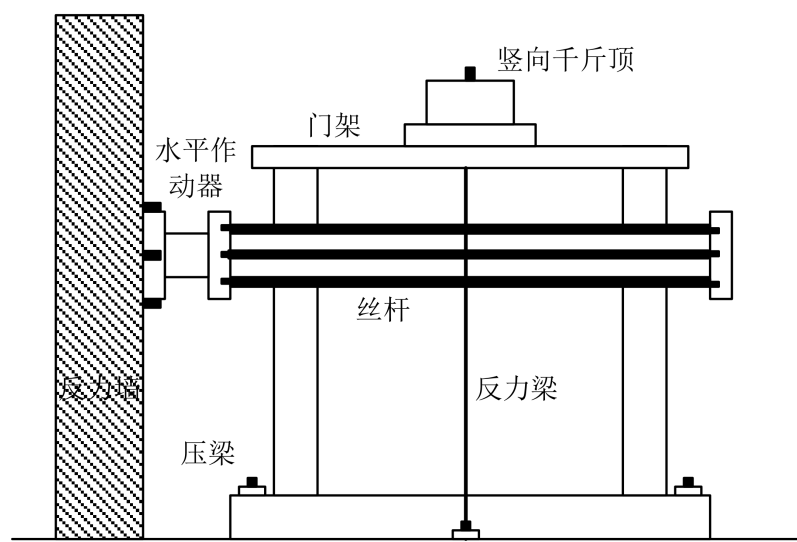


图8 加载装置模拟图
Fig.8 Simulation of loading device

采用液压伺服作动器,在横轴施加相同的拉力,并将其分为四个等级,每组等级荷载力分别循环一次,并以相同的压力施加到两组试件的相同位置。每次施力后,均记录下试件的损坏情况,从而比较两组试件的抗震性能。

3 实验结果

3.1 多遇地震作用下钢筋混凝土框架结构响应对比

图9为两组加固前后试件在模拟地震波条件下的结构层间位移角对比结果。

图9展示了EL地震波作用下加固前后试件的层间位移角对比结果。从图中可以观察到,加固

后的试件在各楼层的层间位移角均明显小于加固前的试件。特别是在结构底部,即低楼层位置,层间位移角的降低幅度尤为显著。这说明了在EL地震波的作用下,加固措施对减少结构底部的层间位移具有显著效果。图10展示了CPC地震波作用下的层间位移角对比结果。与EL地震波的情况类似,加固后的试件在CPC地震波作用下的层间位移角也明显小于加固前的试件。这一结果进一步证明了加固措施在不同类型的地震波作用下均能有效降低层间位移角。通过对比加固前后的层间位移角平均值可知,在EL地震波作用下,加固后的试件层间位移平均值从 $1/805$ 降低到了 $1/943$,下降了约19.9%;而在CPC地震波作用下,加固后的试件层间位移平均值从 $1/725$ 降低到了 $1/843$,下

降了约11.3%。由此可以证明外设隔震支座能够有效提高建筑结构的响应性能。此外，加固措施不仅降低了层间位移角的平均值，而且显著提高了结构的整体稳定性。原始试件相对于加固后的试

件，在EL地震波和CPC地震波作用下的结构响应性能分别下降了38.47%和40.14%。说明加固后的结构在地震作用下的变形和位移得到了有效控制，从而提高了结构的抗震性能。

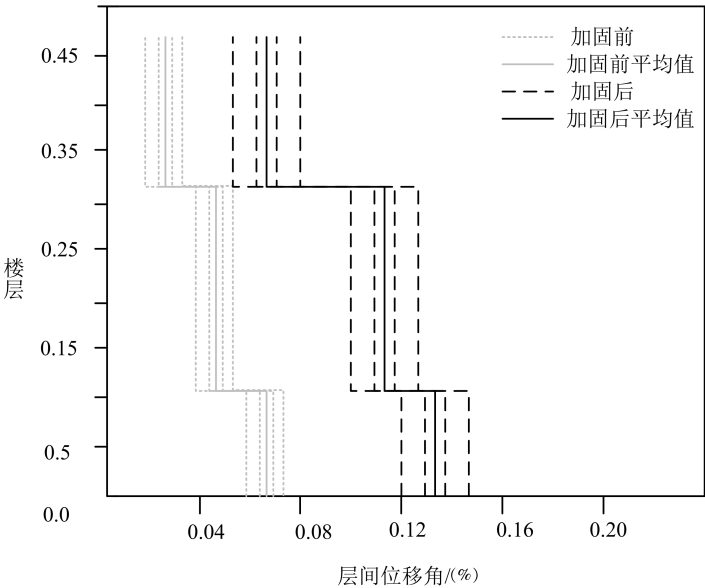


图9 EL地震波下层间位移角对比结果

Fig.9 Comparison of displacement angles between lower layers under EL seismic wave

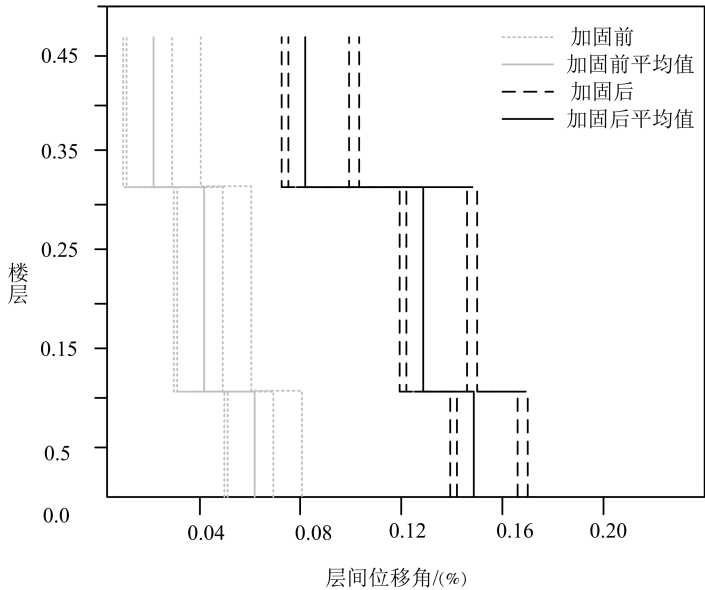


图10 CPC地震波下的层间位移角对比结果

Fig.10 Comparison of inter-layer displacement angles under CPC seismic wave

3.2 试件抗震强度检测对比结果

针对拟静力模拟实验，本文调取了两组试件的水平荷载—位移滞回曲线，该曲线可以用于衡量不

同时间的承载性能，滞回曲线耗能面积越大，代表试件的结构承载性能越高，具体实验结果如下图所示。

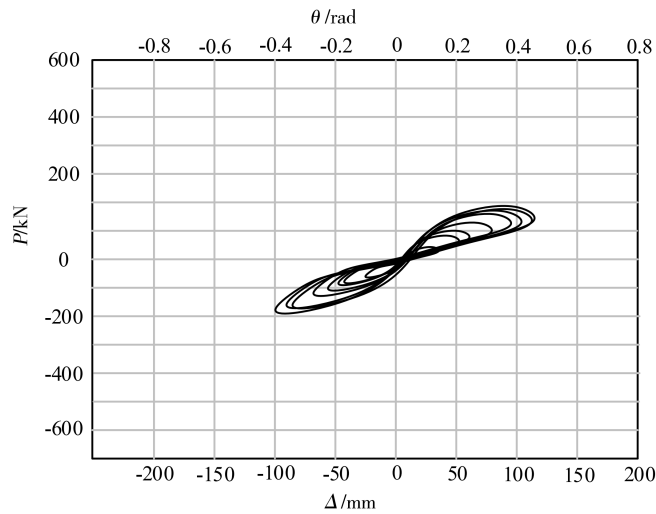


图 11 未加固试件的水平荷载—位移滞回曲线

Fig.11 Horizontal load-displacement hysteresis curve of unreinforced specimens

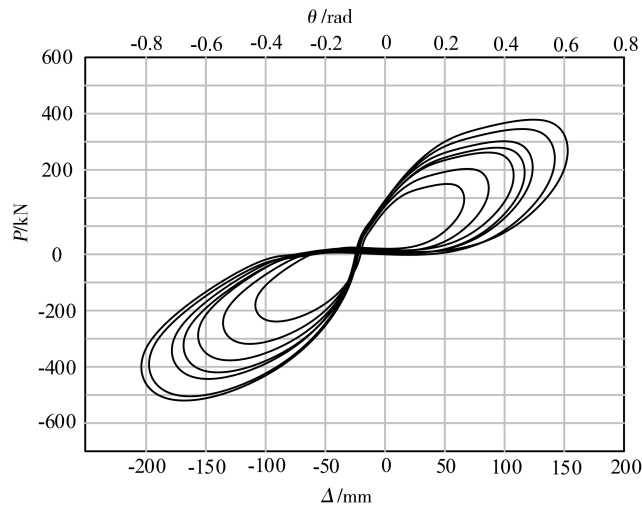


图 12 加固后试件的水平荷载—位移滞回曲线

Fig.12 Horizontal load-displacement hysteresis curve of reinforced specimen

通过对比图 11 和图 12 中的水平荷载—位移滞回曲线,可以明显看出加固与未加固试件在承受荷载时的结构承载性能差异。对于未加固试件,其滞回曲线展现出了较为显著的捏拢趋势,说明在加载和卸载的过程中,试件的形变能力较差,耗能面积相对较小。当试件的位移角达到 6/128 时,滞回曲线开始呈现出明显的缩小趋势,表明结构承载能力在此点后开始显著降低。这表明未加固试件在受到较大位移时,其结构性能会快速下降,不利于抵抗地震等外部荷载。而对于加固后试件,其滞回曲线形状更为饱满,耗能面积显著增大,说明加固后的试件在加载和卸载过程中具有更好的形变能力和耗能能力。当试件位移角达到 11/246 时,滞回曲线才开始展现出降低的趋势,这表明加固后试件的结构承载能力在更大的

位移范围内保持稳定。根据实验结果,隔震支座加固后的试件与未加固试件相比,滞回环面积提高了 42.8%。这一显著提升不仅证明了隔震支座加固措施的有效性,也显示了加固后试件在抵抗外部荷载时具有更高的结构承载性能和稳定性。

4 结语

在本研究中,通过对比隔震支座加固前后的混凝土框架结构的抗震性能表现,证明隔震支座能够有效提高混凝土结构的承载力。结果显示,加固后的结构在地震作用下的响应明显降低。隔震支座的有效设置使得地震能量得以分散,减少了结构内部的应力集中,从而提高了结构的整体稳定性。这为今后类似工程的抗震设计提供了新

的思路和方法。在未来的研究中,本文期望能够进一步拓展这一领域的应用范围,为建筑结构的抗震设计提供更为全面的理论支持。

参考文献

- [1] 刘航,范钰麟,韩明杰,等. 外设自复位构件加固钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(12): 22-31.
- [2] 张望喜,王冠杰,庞博,等. 基于多尺度模型的装配整体式混凝土框架结构抗震性能分析[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(10): 61-70.
- [3] 潘晓兰,刘笑强,郑志. 纤维布加固填充墙钢筋混凝土框架的抗震性能水准研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10459-10468.
- [4] 徐晓达,陈动,许庆,等. 玻璃纤维增强塑料筋混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(06): 703-710.
- [5] 余亚琳,孟二从,苏益声. 方钢管再生混凝土框架一再生空心砌块填充墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(03): 88-96.
- [6] 王秋丽,续强,黄晓丽. 基于损伤构件的型钢混凝土框架结构抗震性能评估[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2023, 39(04): 74-80.
- [7] 蔡越,范毅雄,皮文强,等. 现浇磷石膏填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能分析[J]. 特种结构, 2023, 40(03): 1-6.
- [8] 王珂. 装配式混凝土框架结构梁柱节点的抗震性能研究[J]. 混凝土世界, 2023(06): 81-84.
- [9] 张曙光,王孟鸿. 自复位预应力装配式混凝土框架节点抗震性能数值模拟分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2023, 24(02): 6-10.
- [10] 范钰麟,刘航,韩明杰,等. 钢筋混凝土框架外设自复位构件加固抗震性能研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(10): 1174-1177.
- [11] 范文杰. 带不同耗能构件的混凝土框架抗震性能研究进展[J]. 居业, 2023(05): 19-21.
- [12] 薛建阳,杨永,曹万林,等. 型钢再生混凝土框架一再生混凝土砌块填充墙结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(09): 102-107.
- [13] 何建鑫,韩启浩,朱南海,等. 带耗能部件的装配式混凝土框架结构抗震性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(04): 74-80.
- [14] 张石,张爱林,张艳霞,等. 碳纤维增强复合材料筋混凝土框架结构动力性能试验研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(02): 92-98+91.
- [15] 李东彬,向容,李伟龙,等. 装配整体式预应力混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(03): 1-7.