

文章编号:1673-2049(2013)04-0014-08

预制板上粘贴钢板条桁架对砌体教学楼 抗震性能的影响

屈文俊, 郭朋, 崔巍

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立了典型砌体结构教学楼(预制多孔板装配式楼盖)的数值模型。利用有限元时程分析方法,分析房屋在汶川地震波作用下的地震响应,验证了预制多孔板楼盖水平刚度不足是砌体结构教学楼倒塌的主要原因。在此基础上,提出了一种新式加固方法——板底粘贴桁架型钢板条来增强楼盖的水平刚度。采用时程分析方法,对未加固模型与加固后模型的地震响应进行了对比。结果表明:板底粘贴桁架型钢板条法对提高房屋结构抗震防倒塌能力是行之有效的。

关键词:砌体结构;预制多孔板楼盖;教学楼;有限元法;时程分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Influences of Sticking Steel Strips Under Precast RC Slabs on Seismic Performance of Masonry Teaching Building

QU Wen-jun, GUO Peng, CUI Wei

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Authors used general finite element analysis software ANSYS to build a numerical model of typical masonry teaching building with precast reinforced concrete (RC) slabs. The finite element time history analysis method was used to get this model's seismic response under Wenchuan seismic wave, proving that inadequate floor's in-plane stiffness was the key defect causing collapse of masonry teaching building. Based on this analysis, authors proposed a new strengthening method of sticking steel strips under slabs to enhance the floor's in-plane stiffness. The time history analysis method was used to make comparisons between the seismic responses of unstrengthened and strengthened models. The results show that the strengthening method of sticking steel strips under slabs is effective for anti-seismic collapse of building structures.

Key words: masonry structure; floor system of precast holy slab; teaching building; finite element method; time history analysis

0 引言

在中国 20 世纪八九十年代,由于技术和经济条件的限制,大量中小学教学楼的楼盖采用预制钢筋

混凝土板,并且为了使教学楼建筑满足采光要求而在纵墙将窗口开设的较大,窗间墙较窄。

在“5·12”汶川地震中大量砌体结构教学楼的垮塌主要源于纵向窗间墙的失效^[1-3]。窗间墙作为

收稿日期:2013-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50178050);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A07-04)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

主要的竖向受力构件,承受绝大部分楼盖荷载。地震时,由于预制钢筋混凝土板的水平刚度不足,楼层受到的地震力不能按照抗震墙的刚度进行分配,致使纵向窗间墙在承受竖向荷载的同时还需要承受较大的水平地震作用。纵向窗间墙在较大的水平地震作用下,竖向荷载产生较大偏心,然后由于强度不足和延性不够发生破坏甚至倒塌,使上部大梁失去有效支撑,导致房屋损坏甚至整体倒塌。

本文中笔者建议采用板底粘贴桁架型钢板条的方法加固预制装配式楼板的水平刚度,并对该方法进行理论上的验证。

1 砌体预制楼板教学楼抗震性能

1.1 既有砌体结构教学楼抗震性能缺陷

通过对上海地区中小学教学楼的抗震安全调查与鉴定分析结果,得到砌体结构教学楼抗震性能的薄弱环节主要体现在以下 6 个方面:

(1)整体性连接构造上:外墙四角、大房间内外墙交接处缺少构造柱及贯通的圈梁,楼盖木屋架与墙体缺少可靠连接。

(2)大部分楼面为预制楼板,达不到刚性楼面的要求。

(3)抗震构造中,大部分建筑的圈梁构造柱不符合规范要求,房屋的整体性、抗震性能较差。承重结构的连接构造无法保证结构安全。

(4)砌筑砂浆、砌体材料强度偏低,达不到《建筑鉴定抗震标准》(GB 50023—2009)^[4]中的规定。

(5)部分砌体结构墙体的抗震承载力、抗压承载力不足。

(6)房屋存在易引起局部倒塌的构件及其连接,如出入口或通道处的女儿墙、出屋面小烟囱以及钢筋混凝土挑檐、雨罩。

1.2 震害分析

由于装配式空心预制板楼盖的平面内刚度很小,不能满足结构设计中的平面内刚度无穷大假定。在地震作用下,结构纵墙的位移地震响应比横墙大,并且由于预制板楼盖平面内的刚度不足,纵墙变形与横墙变形并不一致。上述原因将会导致纵墙的倒塌,使其上部大梁失去支撑,从而导致整个房屋的倒塌,如图 1 所示。

2 预制板上粘贴钢板桁架砌体教学楼的抗震性能

本文中依照上海市多项中小学教学楼抗震鉴定



(a) 预制板倒塌



(b) 窗间墙倒塌

图 1 教学楼倒塌震害记录

Fig. 1 Earthquake Records of Teaching Building Collapse
加固修复项目经验,利用大型通用有限元分析软件 ANSYS 13.0^[5],建立一典型砌体结构教学楼在加固前后的有限元模型,采用时程分析方法得到其地震响应和破坏模式。

2.1 工程概况

以上海市中小学教学楼抗震鉴定加固项目为依托,建立一典型砌体结构教学楼模型,教学楼结构平面和立面见图 2。

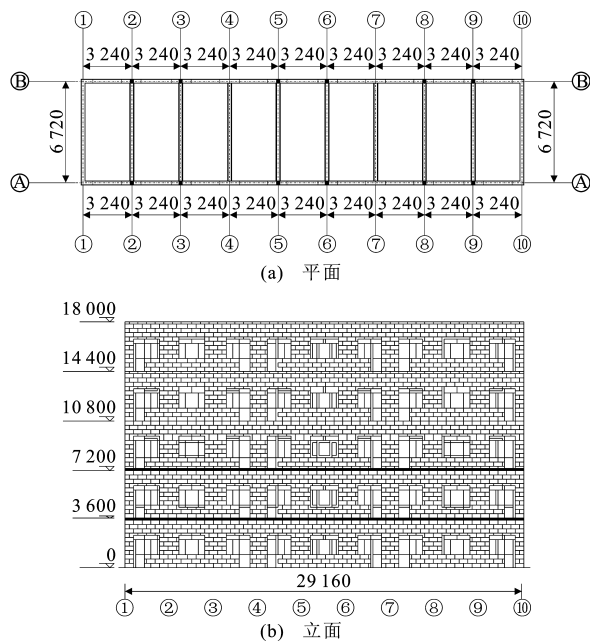


图 2 教学楼结构平面和立面(单位:mm)

Fig. 2 Structural Plane and Elevation of Teaching Building (Unit:mm)

2.2 计算参数的选取

上海市中小学教学楼大部分建造于 20 世纪七八十年代,混凝土强度等级为 C20,砂浆的强度等级为 M2.0,烧结粘土砖的强度等级为 MU10。建筑砌体墙厚度为 240 mm,承重大梁尺寸为 240 mm×400 mm,大梁下承重柱尺寸为 240 mm×240 mm。空心预制板尺寸为 240 mm×3 000 mm,板间距为 80 mm。空心预制板厚度为 120 mm,折算成实心预制板,厚度为 114 mm(弯曲模量一致)。

为了尽量模拟出真实结构的抗震性能,同时尽量加快收敛速度,本文中混凝土的阻尼比取为 0.10,砌体材料的阻尼比取为 0.07^[6]。

楼面恒载、活载:根据实际楼板厚度、构造做法及《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[7]中的规定确定。鉴于楼板和楼盖的总荷载相差较小,在模型中将其统一取为 3.8 kPa。

本文中分析所采用的地震波由中国国家强震动台网中心提供,为四川省什邡市八角镇地震观测台未经校正的数据,共持时 225 s,步长 0.005 s,共 45 000 个点。如此长的地震动记录对结构模型的非线性时程响应分析是不适合的,需要耗费大量计算机存储空间和运行时间。因此,在不影响加速度波形的前提下,本文中取什邡八角波第 30~60 s 的波进行计算,步长取为 0.02 s,总共 1 500 个计算点。根据 Wilson^[8]推荐的加速度校正方法,对第 30~60 s 的加速度波进行校正。

2.3 加固前的结构有限元分析

为了建立一个实用并且准确的模型,本文中对多种尺寸的有限元模型进行了尝试,最终建立的结构有限元模型如图 3 所示。

2.3.1 动力模态

本文中把房屋结构的长轴方向(纵墙方向)作为 x 方向,把短轴方向(横墙方向)作为 y 方向,表 1 为加固前砌体结构教学楼的前 6 阶模态。由表 1 可以看出,结构第 1 振型表现为 x 方向的一阶平动,说明 x 方向抗侧刚度小于 y 方向抗侧刚度,这是由于 y 方向的横墙较大,而 x 方向纵墙由于受门窗洞口的影响,刚度较小。

2.3.2 地震作用下的分析结果

加固前的分析结果见图 4~11。图 4 为加固前房屋顶点位移-基底剪力关系曲线。由图 4 可以看出,顶点位移-基底剪力关系曲线的形状不规整也不饱满,这表明结构的抗震性能较弱。图 5 为加固前 y 方向纵墙与横墙顶点加速度对比,图 6 为加固前

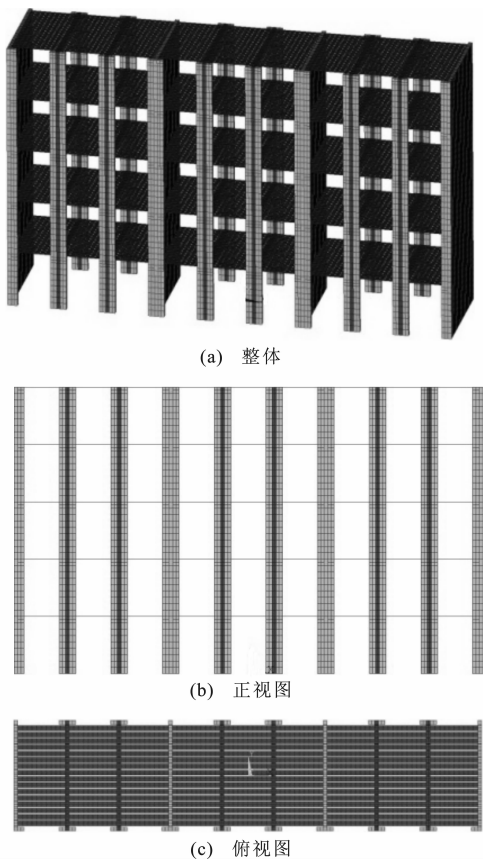


图 3 结构有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Structure

表 1 加固前砌体结构教学楼的前 6 阶模态

Tab. 1 The First Six Order Modes of Masonry Structural Teaching Building Before Strengthening

阶次	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	0.195 1	5.125 6	x 方向一阶平动
2	1.188 2	0.841 6	x 方向二阶平动
3	1.544 0	0.647 7	y 方向一阶平动
4	1.722 9	0.580 4	一阶扭转
5	2.321 7	0.430 7	y 方向二阶平动
6	2.902 4	0.344 5	二阶扭转

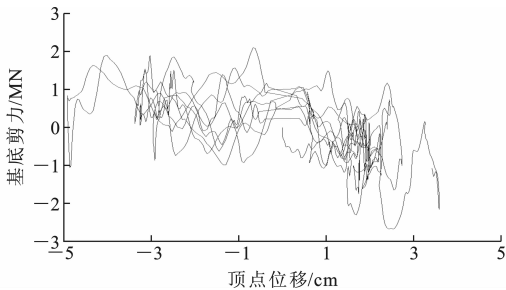


图 4 加固前顶点位移-基底剪力关系曲线

Fig. 4 Relation of Top Story Displacement and Base Shear Before Strengthening

y 方向层间位移角峰值沿高度的变化,图 7 为加固

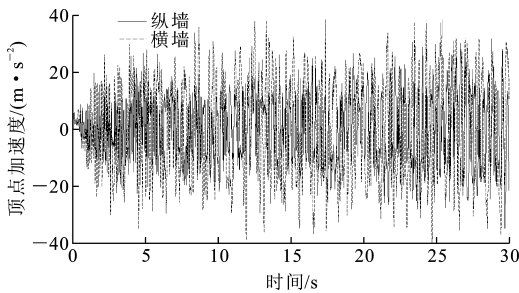


图 5 加固前 y 方向纵墙与横墙顶点加速度对比

Fig. 5 Comparisons of Top y-direction Accelerations of Longitudinal and Cross Walls Before Strengthening

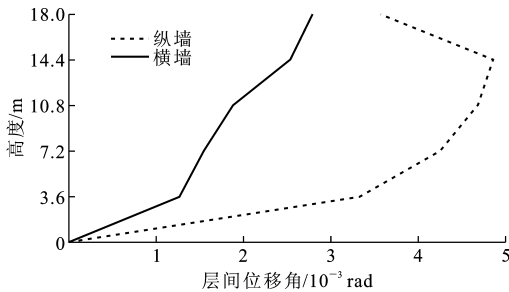


图 6 加固前 y 方向层间位移角峰值沿高度的变化

Fig. 6 Variations of y-direction Peak Values of Story Drift Ratios Along Height Before Strengthening

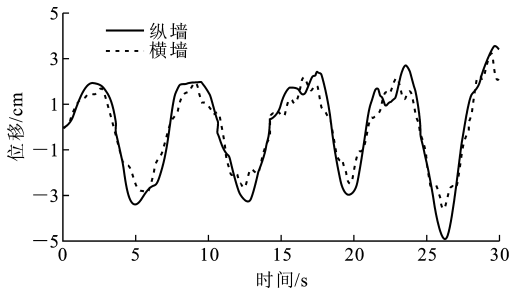


图 7 加固前 y 方向顶层横墙与纵墙位移对比

Fig. 7 Comparisons of y-direction Displacements of Cross and Longitudinal Walls of Top Story Before Strengthening

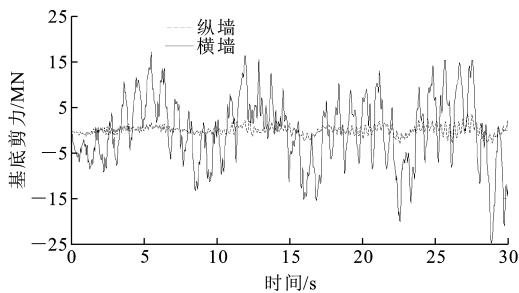


图 8 加固前 y 方向基底剪力时程曲线对比

Fig. 8 Comparisons of Time History Curves of y-direction Base Shear Before Strengthening

前 y 方向顶层纵墙与横墙位移对比,图 8 为加固前 y 方向基底剪力时程曲线对比。由图 6 可以看出,

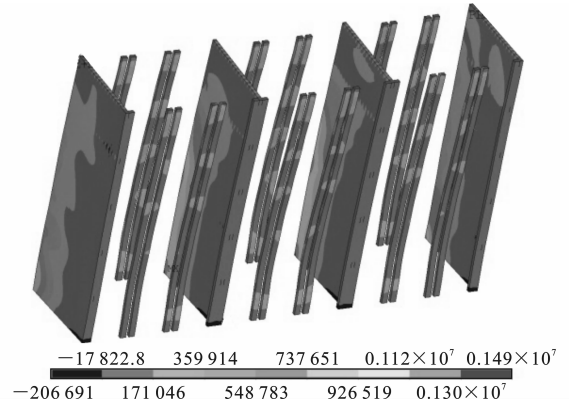


图 9 加固前第 26.34 s 时墙体第一主应力云图 (单位:Pa)

Fig. 9 The First Principal Stress Nephogram of Wall at 26.34 s Before Strengthening (Unit:Pa)

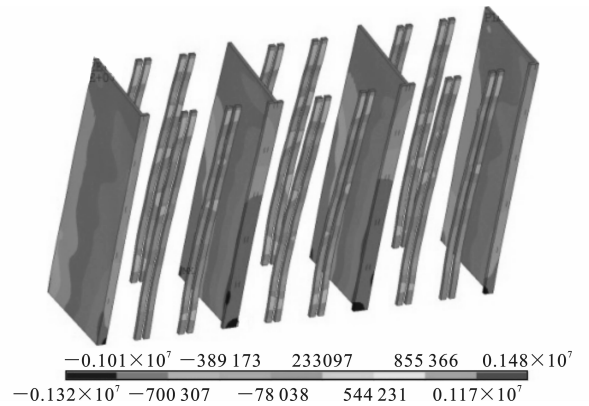


图 10 加固前第 26.34 s 时墙体 z 方向应力云图 (单位:Pa)

Fig. 10 z-direction Stress Nephogram of Wall at 26.34 s Before Strengthening (Unit:Pa)

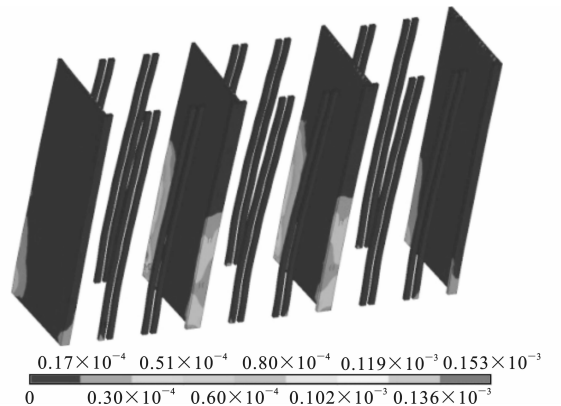


图 11 加固前第 26.34 s 时墙体塑性应变云图

Fig. 11 Plastic Stress Nephogram of Wall at 26.34 s Before Strengthening

底层 y 方向层间位移角最大,第 4 层的层间位移角次之。

图 9 为加固前墙体(砌体)的第一主应力云图,图 10 为加固前墙体 z 方向应力云图,图 11 为加固前墙体塑性应变云图。从图 9~11 可以看出,结构

应力主要集中在底层横墙两端,并且底层横墙两端材料均进入塑性阶段。

砌体教学楼的纵墙与横墙在汶川地震波作用下的不同响应分析如下:

(1)图 5 的结果表明,纵墙的加速度总小于横墙,由于楼盖平面内的刚度不足,两者的加速度在地震初期之后并不同步。

(2)由图 6 的层间位移角峰值对比可以看出,每层纵墙的层间位移角峰值均比横墙大 2~3 倍。图 7 说明在汶川地震波作用下砌体教学楼纵墙的 y 方向变形始终大于横墙的 y 方向变形,峰值时纵墙变形为横墙变形的 137.5%。

(3)图 8 中的纵墙剪力很小,剪力最大值为 377.3 kN,横墙仍然承担了绝大部分基底剪力,剪力最大值为 2 482.3 kN。与横墙相比,纵墙承担的剪力可以忽略不计。

2.4 加固后的结构抗震分析

20 世纪七八十年代建造的砌体房屋大多采用预制多孔板作为楼盖结构,其不满足现行《建筑抗震鉴定标准》关于结构整体性的要求。本文中在对装配式楼盖砌体结构的有限元地震分析基础上,提出了一种新式加固方法——板底粘贴桁架型钢板条,并验证其加固效果。通过这种桁架,原本由纵墙承担的水平地震力将传递至横墙,同时桁架也将约束纵墙的变形。粘贴钢板条加固方法示意图 12。

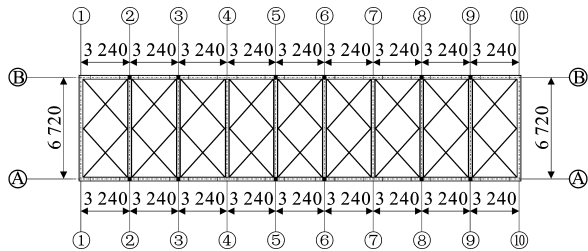


图 12 粘贴钢板条加固方法示意(单位:mm)
Fig. 12 Diagram of Method of Sticking Steel Strips Under Slabs (Unit:mm)

粘贴钢板条后的结构有限元模型如图 13 所示。在数值模型中,利用 Link8 单元模拟钢板条桁架,钢板条横截面面积为 0.003 m²。与上述分析相同,采用汶川波分析其加固后的地震响应。表 2 为加固后砌体结构教学楼的前 6 阶模态。

2.4.1 动力模态分析

由表 2 可以看出,板底粘贴钢板条加固砌体房屋后,因为结构形式及结构的主要抗侧力构件——横向及纵向砌体墙并未改变,因此其动力特性与加固前保持一致,其前 6 阶模态的模态频率与加固前

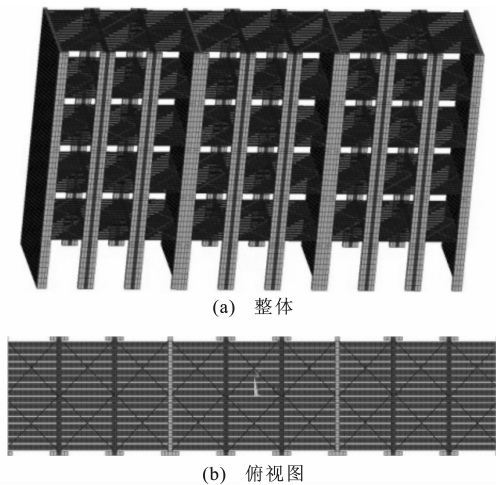


图 13 粘贴钢板条后的结构有限元模型
Fig. 13 Finite Element Models of Structure After Sticking Steel Strips Under Slabs

表 2 加固后砌体结构教学楼的前 6 阶模态
Tab. 2 The First Six Order Modes of Masonry Structural Teaching Building After Strengthening

阶次	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	0.195 2	5.122 9	x 方向一阶平动
2	1.207 5	0.828 1	x 方向二阶平动
3	1.698 1	0.588 9	y 方向一阶平动
4	1.898 7	0.526 7	一阶扭转
5	3.273 4	0.305 5	y 方向二阶平动
6	3.677 8	0.271 9	二阶扭转

基本相同。
2.4.2 地震作用下的分析结果
板底粘贴钢板条加固后的砌体结构教学楼在地震作用下的分析结果见图 14~21。

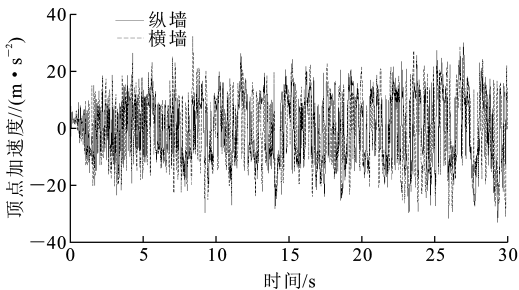


图 14 加固后 y 方向纵墙与横墙顶点加速度对比
Fig. 14 Comparisons of Top y -direction Accelerations of Longitudinal and Cross Walls After Strengthening

图 15,16 非常明显地体现了钢板条桁架加固对纵墙和横墙变形的约束作用,纵墙可以和横墙同步变形。在图 15 中,纵墙与横墙的变形时程几乎完全重合,说明加固效果十分明显。

图 19~21 均可以说明楼盖经粘贴钢板条桁架

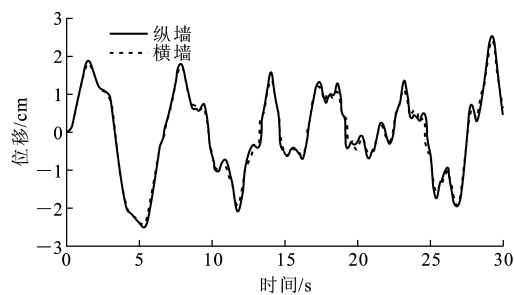


图 15 加固后 y 方向顶层纵墙与横墙位移对比
Fig. 15 Comparisons of y-direction Displacement of Longitudinal and Cross Walls of Top Story After Strengthening

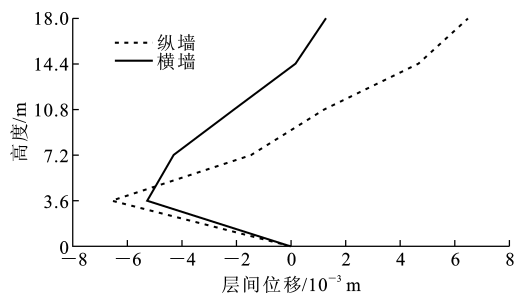


图 16 加固后 y 方向层间位移峰值沿高度的变化
Fig. 16 Variations of y-direction Peak Values of Story Drift Along Height After Strengthening

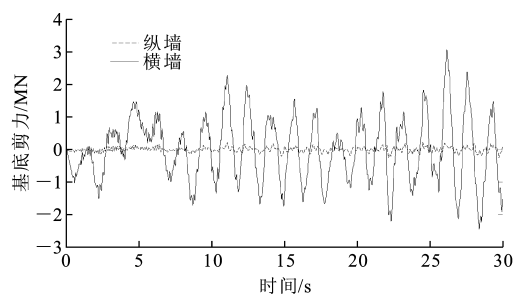


图 17 加固后 y 方向基底剪力时程曲线对比
Fig. 17 Comparisons of Time History Curves of y-direction Base Shear After Strengthening

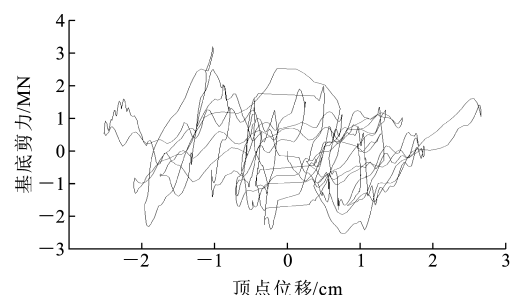


图 18 加固后顶点位移-基底剪力关系曲线
Fig. 18 Relation of Top Story Displacement and Base Shear After Strengthening

加固后,横墙墙体应力增大,塑性变形区域增大,塑性应变也随之增大;纵墙的应力大幅减小。汶川地

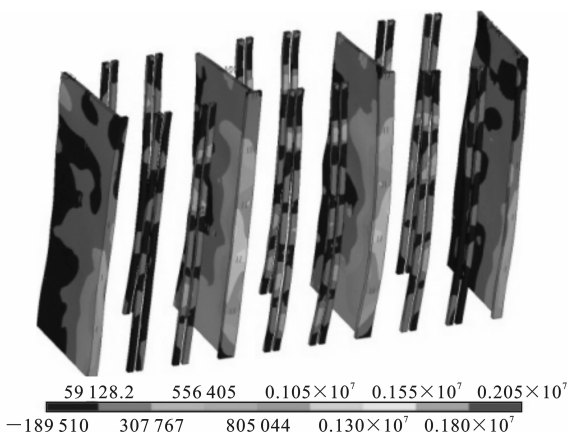


图 19 加固后第 29.24 s 时墙体第一主应力云图(单位:Pa)
Fig. 19 The First Principal Stress Nephogram of Wall at 29.24 s After Strengthening (Unit:Pa)

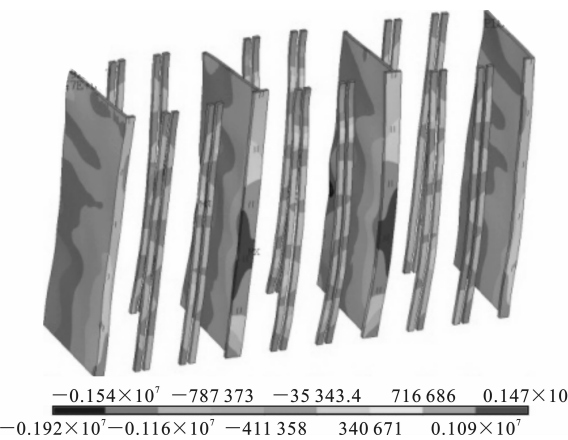


图 20 加固后第 29.24 s 时墙体 z 方向应力云图(单位:Pa)
Fig. 20 z-direction Stress Nephogram of Wall at 29.24 s After Strengthening (Unit:Pa)

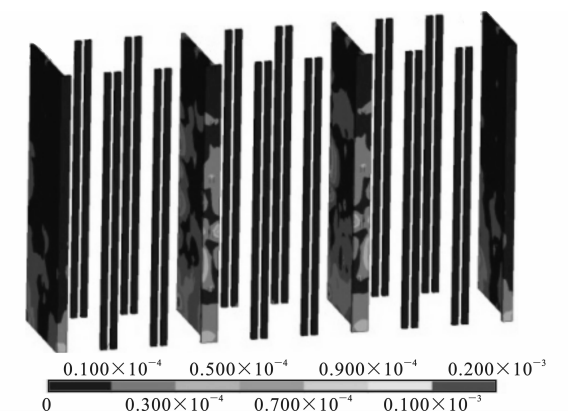


图 21 加固后第 29.24 s 时墙体塑性应变云图
Fig. 21 Plastic Stress Nephogram of Wall at 29.24 s After Strengthening

震波作用下砌体结构教学楼加固前后的地震响应对比见表 3。

2.5 存在的问题和改进措施

本文中提出的新式加固方法——板底粘贴桁架

表 3 砌体结构教学楼的加固前后对比

Tab.3 Comparisons of Masonry Structural Teaching Building Before and After Strengthening

抗震性能参数	加固前	加固后(粘贴钢板条)
最大位移/mm	49.1	26.6
最大速度/(m·s ⁻¹)	0.634 3	0.527 3
最大加速度/(m·s ⁻²)	39.86	37.06
最大层间位移角/rad	0.004 0	0.001 8
最大基底剪力/kN	2 557.2	3 207.9
最大位移时纵墙应力最大值/MPa	0.68	0.31

型钢板条,可以约束纵墙的侧向变形。但是在实际工程中,此加固方法依旧存在以下 2 个问题:

(1)在水平力作用下部分钢条处于受压状态,因此,如何确保足够的连接措施以保证其在受压时的稳定是非常重要的。

(2)墙体在地震中会受到较大的集中力作用,使桁架型钢板条与墙壁连接处墙体有较大屈服和破坏(图 22)。

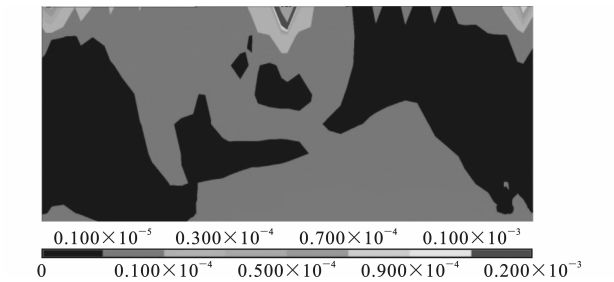


图 22 第 29.98 s 时轴线⑤,⑥纵墙应力云图(单位:Pa)

Fig. 22 Longitudinal Wall Stress Nephogram from Axial ⑤, ⑥ at 29.98 s (Unit:Pa)

因此,钢板条与墙体的连接需要设置特殊的锚固措施,较为易行且合理的方法是设置锚固件,加大在连接部位处墙体和钢板条的接触面积,从而减小集中应力。本文中推荐的板底粘贴钢板条连接方法如图 23 所示,但其连接可靠性还需要进一步的试验验证。

3 结 语

(1)总结了在汶川地震中砌体结构教学楼的震害特征,并指出装配式预制多孔板楼盖是砌体房屋的致命缺陷。由于装配式预制板平面内的刚度不足,在地震中纵墙预制板水平刚度弱,纵墙的侧向变形无法被约束,因此大量砌体教学楼的纵墙在重力和侧向变形的双重作用下先垮塌,进而引起整个房屋的倒塌。

(2)利用有限元时程分析方法分析了装配式预

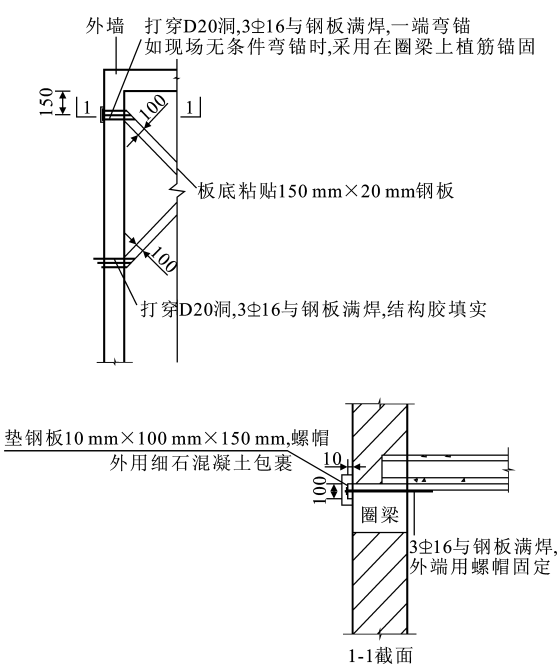


图 23 板底粘贴钢板条连接方法(单位:mm)

Fig. 23 Connecting Details of Sticking Steel Strips Under Slabs (Unit:mm)

制多孔板砌体教学楼在汶川地震波作用下的地震响应,验证了装配式预制多孔板楼盖水平刚度不足是教学楼倒塌的主要原因,纵墙的位移和加速度均大于横墙。

(3)提出了一种新式加固方法——板底粘贴桁架式钢板条。经板底粘贴桁架型钢板条加固后,纵墙与横墙的加速度在汶川地震波作用下可以基本保持一致,并且纵墙与横墙的加速度基本上同时达到各个峰值;经板底粘贴桁架型钢板条加固后,汶川地震波作用下纵墙的变形由 49.1 mm 减小至 26.6 mm。以纵墙的侧向变形为标准,板底粘贴桁架型钢板条具有很好的加固作用;经板底粘贴桁架型钢板条加固后,纵墙的主拉应力最大值在汶川地震波作用下为 0.56 MPa,横墙的主拉应力最大值为 2.0 MPa。说明水平地震力大部分传至横墙,横墙起到了很好的抗震作用。

(4)钢板条可以连接纵墙与横墙,并约束纵墙在地震中的侧向变形。通过对砌体教学楼在汶川地震波作用下的地震时程分析,得到此种加固方法可以达到一定的加固效果,提高楼盖的水平刚度,约束纵墙的侧向变形,使砌体教学楼抗震性能大大提高。

参考文献:

References:

[1] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构

- 专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
- Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [2] 屈文俊, 马瑞嘉, 崔巍. 预制板现浇混凝土叠合层加固砌体教学楼的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 7-13.
- QU Wen-jun, MA Rui-jia, CUI Wei. Analysis of Seismic Behavior of Masonry Teaching Buildings Strengthened by Cast-in-place RC Layer on Precast RC Slabs[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 7-13.
- [3] 周果行. “5·12”汶川地震震区建筑受损的内在原因分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 109-115.
- ZHOU Guo-xing. Analysis of Internal Factors of Damaged Buildings in “5·12” Wenchuan Earthquake Zone[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 109-115.
- [4] GB 50023—2009, 建筑抗震鉴定标准[S].
- GB 50023—2009, Standard for Seismic Appraisal of Buildings[S].
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xin-min. Numerical Analysis of Engineering Structure with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [6] 黄冲. 汶川地震后砌体结构震害调查与震害分析[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- HUANG Chong. Site Investigation and Seismic Analysis of Masonry Structures About the Wenchuan Earthquake[D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [7] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [8] WILSON E L. 结构静力与动力分析——强调地震工程的物理方法[M]. 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- WILSON E L. Static & Dynamic Analysis of Structures: Emphasis on Physical Methods of Earthquake Engineering[M]. Translated by Civil King Software Technology Co., Ltd, China Institute of Building Standard Design & Research. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.

《建筑科学》2014 年征订通知

《建筑科学》创刊于 1985 年,是由中华人民共和国住房和城乡建设部主管,中国建筑科学研究院主办的建筑科学类综合性科技期刊。《建筑科学》是原建设部优秀科技期刊,被《中文核心期刊要目总览》2004 年版收录,是中国科技核心期刊、《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范建筑核心类期刊》,同时也是国际 CODEN 中心收录期刊、国际连续出版物数据系统收录期刊、ICONDA 国际建筑文献数据库收录期刊。为适应当前建筑科学发展的需要,《建筑科学》于 2006 年 6 月起由双月刊改为月刊,并新增“可持续建筑”版面。

《建筑科学》在内容上注重工程的实用性和可借鉴性,主要为读者提供地基基础、建筑结构、建筑防灾、暖通空调、建筑材料、建筑物理等专业领域的研究成果和新技术工程、大型工程、重点工程的设计实例以及标准规范编修背景及动态、国外建筑工程先进经验等。

《建筑科学》“可持续建筑”版面内容则着重介绍建筑新能源、新技术、新设备、新材料、新产品的开发和推广以及在节能和可持续建筑中的规模化应用,涉及建筑设计、暖通空调、建筑物理、水资源利用、环保建材为主的各相关专业。

《建筑科学》为月刊,大 16 开本,112 页,每月 20 日出版,每期定价 12 元,全年共 144 元;国内邮发代号:2-381;也可直接到本刊发行部购买,邮费为书刊定价的 20%。

地 址:北京市北三环东路 30 号《建筑科学》编辑部 邮 编:100013

电 话:(010)64517786 64517427 E-mail:busc@263.net;bjb365@126.com

