

文章编号: 1000-5013(2011)06-0684-05

采用剪力墙体外加固的中小学校舍 框架结构抗震性能分析

王伟¹, 郭子雄¹, 林树枝², 方东振¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 厦门市建设与管理局, 福建 厦门 361003)

摘要: 采用外加剪力墙的体外加固方法, 对一个不满足抗震要求的4层中小学框架结构校舍进行加固. 通过对不同加固方案的加固结构进行弹性和弹塑性地震反应分析, 研究地震作用下不同加固方案对结构的抗震性能影响. 数值分析结果表明: 外加剪力墙可使原结构各榀框架所受的地震剪力有较大幅度的降低, 剪力墙越宽, 降幅越大; 可使各楼层层间位移角趋于均匀, 有效控制结构层间变形的集中, 防止结构层屈服机制的出现; 框架结构梁柱构件的塑性变形明显推迟, 结构塑性铰发展减缓.

关键词: 中小学校舍; 框架结构; 体外加固; 剪力墙; 抗震性能; 推覆分析

中图分类号: TU 244; TU 352.102

文献标志码: A

体外加固方法是一种结构体系的加固方法, 它利用整体子结构与原有结构的协同工作, 增强原结构的整体抗震能力或改变原结构的结构体系, 进而改善原结构的受力状态和变形模式. 体外加固的加固施工主要在结构外部完成, 可最大限度地减小对建筑正常使用的干扰^[1]. 我国规范采用柱端弯矩增大措施也只能适度推迟柱端塑性铰的出现, 不能避免出现柱端塑性铰, 加上楼板对结构整体的影响, 结构的破坏并不是呈现规范所要求的“强柱弱梁”的形式^[2-3]. 层屈服机制是对结构不利的一种屈服机制, 很多框架是呈现层屈服机制的破坏模式. 在原结构的基础上附加子结构的加固方法, 不但能够有效地提高结构的整体刚度和抗震能力^[4], 而且能够最大限度地减少加固施工对建筑物内部正常使用的影响. 外加剪力墙对结构进行加固, 改变结构体系, 使结构成具有多重抗侧力抗震体系, 提高原有结构抗震能力^[5]. 体外加固具有布置灵活方便、使用功能不中断和整体性容易保证等优点, 是中小学框架结构教学楼理想的加固方式. Kaltakci 等^[6]针对土耳其其中小学框架结构校舍的结构特点, 采用外加剪力墙对单榀两层两跨框架进行加固试验研究. 本文主要探讨采用外加剪力墙方法对不满足抗震要求的4层中小学框架结构进行抗震加固的可行性, 并研究加固后结构的抗震性能.

1 原模型加固方案的设计

1.1 原模型的参数设置

原模型结构平面图, 如图1所示. 原框架模型总长为44.0 m, 总高度为14.5 m, 底层层高为4.0 m, 2~4层层高均为3.5 m. 混凝土强度等级采用C20. 构件截面尺寸: 框架柱为400 mm×400 mm, 框架梁为250 mm×600 mm, 楼板为80 mm. 为了构造不满足要求的框架结构, 原结构按照抗震设防烈度为7度, 场地类别为Ⅱ类, 设计地震分组为第1组, 设防类别为乙类, 场地特征周期为0.35 s.

1.2 加固模型及主要参数

原结构的纵、横两个方向均采用外加剪力墙的加固方式, 外加剪力墙部分混凝土强度等级为C30,

收稿日期: 2011-04-26

通信作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震防灾的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2010J01298); 福建省厦门市建设科技计划项目(3502Z20093029)

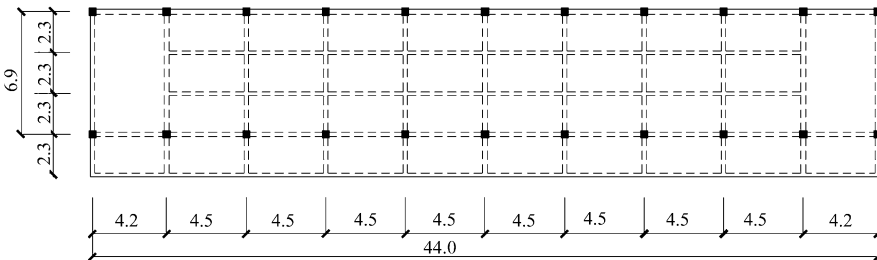


图 1 原结构平面图(单位:m)

Fig. 1 Plan of the original frame (unit: m)

剪力墙厚 150 mm. 根据剪力墙纵、横向布置宽度的不同,设有 KJ-A,KJ-B,KJ-C 等 3 种加固模型,如图 2 所示. 图 2 中:加固模型 KJ-A,KJ-B,KJ-C 的纵向长度(l_x)分别为 0.8,0.8,1.2 m,而其横向长度(l_y)分别为 0.8,1.2,0.8 m.

加固后,抗震设防烈度为 7.5 度. 实际中,剪力墙和框架柱通过连梁来连接,结构配筋采用 PKPM 进行设计,利用通用有限元程序 SAP 2000 建立结构模型,采用两端铰接的刚性杆连接单元来模拟剪力墙与框架间的连梁. 梁和柱采用空间杆单元,楼板采用膜单元,剪力墙采用梁单元模拟,并在底部固结.

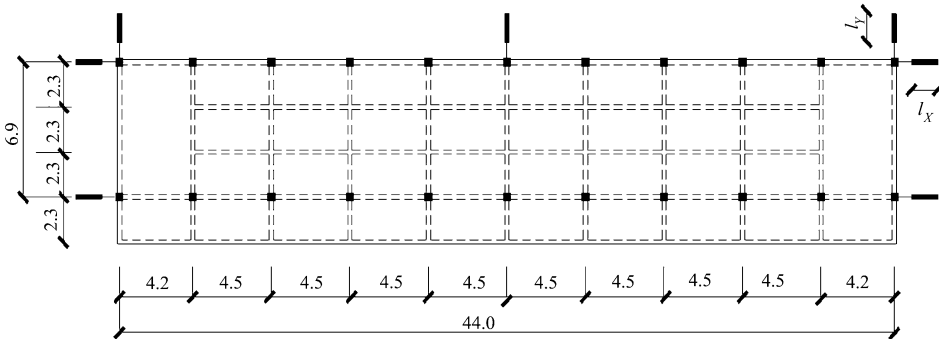


图 2 加固模型图(单位:m)

Fig. 2 Plan of retrofitted model (unit: m)

2 小震作用下结构整体性能分析

采用反应谱分析方法,计算结构加固前后在 7.5 度烈度地震力作用下,其受地震力情况和各榀框架分配地震力情况,以及结构楼层位移角变化情况. 7.5 度水平地震影响系数最大值为 0.12,振型组合方式按照规范推荐采用完全二次项组合(complete quadratic combination,CQC)法.

2.1 地震作用力的对比

各个模型的纵、横向地震作用剪力的对比结果,如表 1 所示. 表 1 中: F_x 和 F_y 表示纵、横方向所受的地震作用剪力; F_{KJ} 为原框架地震作用剪力. 从表 1 可知:增设剪力墙后,3 个加固模型的前 3 阶的周期均有减小;各加固模型纵向地震力增加 11%~15%,横向地震力增加 13%~18%;模型 KJ-B 相对于模型 KJ-A 横向地震剪力增幅较大,纵向地震力增幅也最大.

剪力墙部分纵、横向分配的地震剪力和弯矩,如表 2 所示. 表 2 中: F_x, M_x, F_y 和 M_y 分别为在 X, Y 向地震作用下沿纵向布置的 4 片剪力墙分配的地震剪力和弯矩总和. 从表 2 可知:对于剪力墙-框架结

表 1 模型地震作用剪力对比

模型	F_x/kN	F_x/F_{KJ}	F_y/kN	F_y/F_{KJ}
KJ	1 082	—	1 125	—
KJ-A	1 204	1.11	1 269	1.13
KJ-B	1 239	1.15	1 323	1.18
KJ-C	1 203	1.11	1 284	1.14

表 2 剪力墙部分分配地震作用力

模型	F_x/kN	$M_x/\text{kN} \cdot \text{m}$	F_y/kN	$M_y/\text{kN} \cdot \text{m}$
KJ-A	444	1 296	397	1 108
KJ-B	456	1 326	673	2 378
KJ-C	693	2 600	398	1 108

构,剪力墙拥有较大刚度的抗侧力构件,吸收原有框架部分地震力,在地震作用力下分配较大的地震剪力和弯矩.

在 Y 向地震作用下,不同模型的各榀框架底部剪力分布图,如图 3 所示. 图 3 中: N 为轴线号. 从图 3 可知:原始框架结构各榀框架分配地震力为 100 kN 左右;模型 KJ-A 沿原框架横向增设 3 片宽 0.8 m 的剪力墙后,原始结构各榀框架分配的 Y 向地震剪力均有所减小,其中与剪力墙相连的框架地震幅度降幅较大,尤其结构两端框架;模型 KJ-B 增设宽度为 1.2 m 的剪力墙后规律更加明显.

综述,增设剪力墙后,结构周期降低,地震力增加,地震剪力按照刚度来分配,剪力墙拥有较大的抗侧刚度,而增加的地震剪力均被剪力墙部分吸收,原始各榀框架所受地震剪力也下降. 剪力墙作为拥有较大的抗侧刚度的整体型关键构件,可分配较大的地震力,使结构原有的各榀框架分配的地震剪力有较大幅度的降低,可以达到加固的效果.

2.2 位移角的对比分析

图 4 为结构层间位移角的对比结果. 图 4 中: φ_x, φ_y 分别为纵向和横向的层间位移角; n 为楼层数. 由图 4 可看出:在未加设剪力墙之前,结构最大位移角在第 2 层,其横纵向层间位移角达到 1/400 rad,约为结构顶层层间位移角的 2 倍.

在增设剪力墙之后,结构底部的两层层间位移角减小幅度较大,特别是结构底层层间位移角降幅最大,而顶层层间位移角有增大,结构各层的变形趋于均匀化,各层楼层位移呈现均匀化趋势. 这归结于剪力墙作为一个拥有较大抗侧刚度的整体关键型构件的特点.

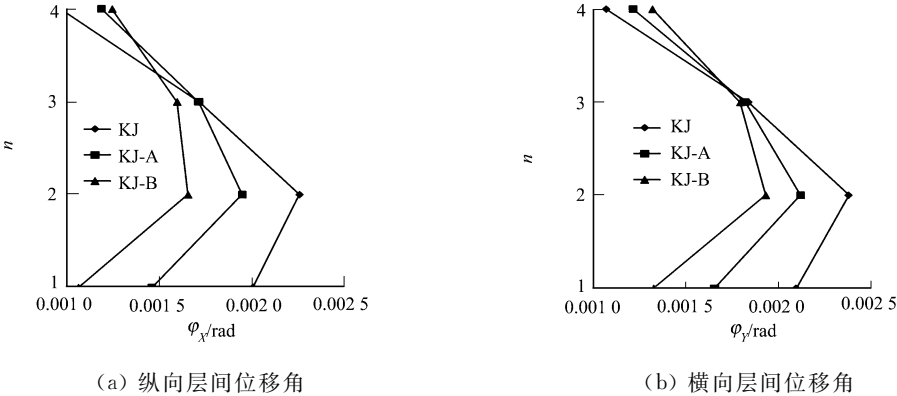


图 4 楼层层间位移角对比
Fig. 4 Comparison of inter-story drift ratio

3 静力弹塑性分析

推覆(pushover)分析是近年来用于结构抗震性能评估的比较通用的方法^[7]. 为考察增设剪力墙对结构弹塑性地震反映的影响,采用 SAP 2000 分析结构加固前后在 7.5 度罕遇地震作用下的塑性铰发展情况. 对原始模型(KJ)和加固模型(KJ-A, KJ-B, KJ-C)进行推覆(pushover)分析. 第 1 次推覆分析采用能力谱法确定结构在预估地震下的性能点(目标位移点),第 2 次推覆分析是基于第 1 次的目标位移点的推覆,确定结构在预估地震作用下的性能情况.

按照我国的抗震规范对于地震影响系数的规定与美国抗震规范 ATC-40 中的系数关系,可以确定 7.5 度罕遇地震下系数 $C_A=0.288, C_V=0.252$. 采用能力谱法可以确定各模型的结构性能点位移,原始模型结构的纵向和横向位移分别为 42.0, 47.3 mm;模型 KJ-A 的结构性能点纵向和横向位移分别为 41.0, 47.7 mm;模型 KJ-B 的结构性能点纵向和横向位移分别为 44.0, 45.0 mm;模型 KJ-C 的结构性能点纵向和横向位移分别为 26.0, 37.0 mm.

SAP 2000 程序提供了自定义分布, 均匀加速度分布和振型荷载分布等 3 种加载方式. 振型荷载分布的侧向力是给定的振型和该振型下的圆频率的平方及相应的质量乘积获得的, 通常取第 1 振型, 相当于倒三角分布; 均匀加速度分布的侧向力是由均一的加速度和相应质量分布的乘积得到的, 相当于均布分布. 文中采用 SAP 2000 程序中提供的塑性铰本构模型, 其纵横方向均采用振型加载方式.

建模时, 梁端指定弯曲(M3)铰, 柱端指定 P-M2-M3 铰, 剪力墙采用梁单元来模拟, 并在底部固结, 各层和剪力墙之间采用两端铰接的刚性杆连接. 实际工程中, 剪力墙和框架之间是通过连梁连接的, 文中采用两端铰接的刚性杆来模拟连梁的作用. 建模过程中的楼板 4 个角点采用 Diagram 约束, 模拟楼面平面内刚度无穷大. 混凝土泊松比 0.2, 考虑箍筋对混凝土的约束作用, 采用 Takeda 滞回模型, 而钢筋滞回模型采用 Kinematic 滞回模型.

美国抗震规范 ATC-40 将建筑物遭受地震后可维持的功能定义为 4 种不同的性能等级, 即正常使用(operational)、可立即使用(immediate occupancy, IO)、生命安全(life safty, LS)和避免倒塌(collapse prevention, CP)^[8]. 不同性能极限状态相应性能状态点, 如图 5 所示. 图 5 中: R 为转角, M 为弯矩. 从图 5 可知: 正常使用相当于小震弹性承载力计算阶段; 基本运行也就是目前工程界较为常用的“中震不屈服阶段^[9]”; 生命安全及接近倒塌阶段, 表明结构已明显进入弹塑性阶段.

在罕遇地震作用下, 原结构和增设剪力墙结构的塑性铰发展情况, 如图 6 所示. 从图 6(a)可以看出: 原结构模型(KJ)的纵向塑性铰发展比较严重, 柱端大量出现塑性铰. 第 1 层部分梁塑性铰已达到 CP-C 阶段, 第 2 层梁端塑性铰大多处在生命安全阶段, 且第 2 层和第 3 层柱上端塑性铰均处于 B-IO 正常使用阶段; 横向塑性铰集中在底下 3 层, 底层柱端塑性铰处于可立即使用. 从图 6(b)可以看出: 在增设剪力墙之后, 纵向底层柱端大为减少, 梁端塑性铰发展情况相对于原结构减缓, 横向柱没有出现塑性铰, 结构的 4 层梁端均出现塑性铰.

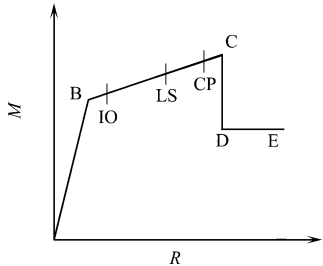


图 5 塑性铰状态示意图
Fig. 5 Distribution of plastic hinge

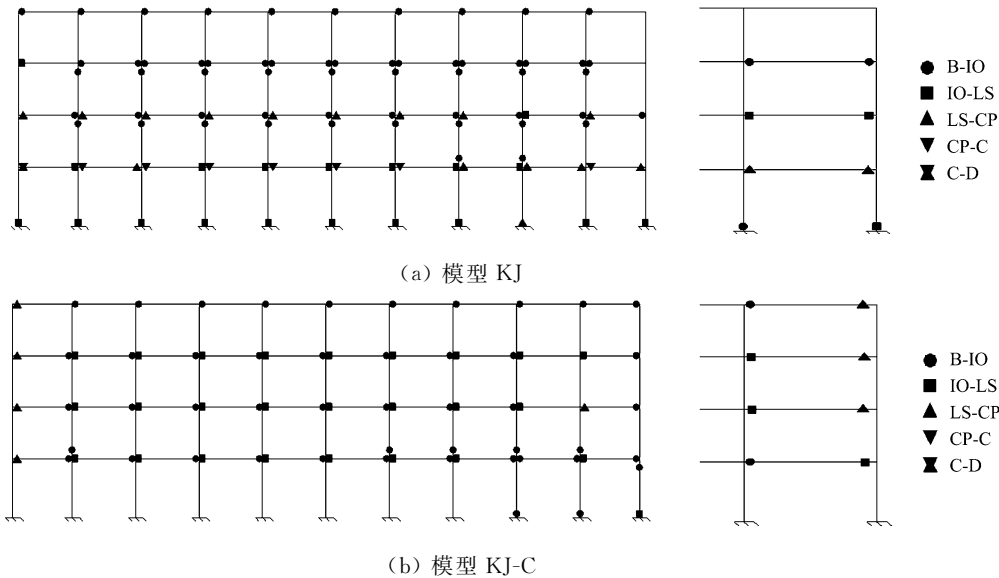


图 6 罕遇地震下的框架模型塑性铰发展状况

Fig. 6 State of plastic hinges under 7.5 degree rare earthquake

从以上分析可以看出, 外加剪力墙对于减缓柱端塑性铰的出现有良好的效果, 原始结构柱端出现了大量的塑性铰, 在加设剪力墙之后, 柱端塑性铰大为减少. 分析表明在体外增设剪力墙之后, 纵向底层柱端塑性铰在同地震作用下, 由于剪力墙作为拥有较大刚度整体关键型构件, 能够协调各层的变形, 减小原结构变形较大的楼层变形的楼层变形, 增大原结构变形较小的楼层变形.

从中小学框架结构加固前后在 7.5 度罕遇地震作用下塑性铰发展状态来看, 原始结构第 1 层梁已经处于倒塌阶段了, 框架柱处于中震不屈服阶段, 而增设剪力墙后, 框架梁柱大部分均处于中震不屈服阶段, 框架两端梁进入了弹塑性发展阶段. 从静力弹塑性分析结果来看, 采用外加剪力墙加固中小学框

架结构效果良好,达到加固的目的.

4 结 论

(1) 在原结构外侧增设剪力墙加固后,地震作用下剪力墙分配较多的地震剪力,原框架结构分配的地震剪力有较大幅度下降,降幅和增设剪力墙的总刚度有关.

(2) 与原框架结构相比,外加剪力墙后使各层层间位移角趋于均匀,有效控制结构层间变形的集中,可以防止结构层屈服机制的出现,充分发挥结构整体抗震及耗能能力.

(3) 增设剪力墙之后,框架结构梁柱构件的塑性变形明显推迟,多数构件的塑性铰状态仍处于可经济修复范围.

参考文献:

[1] 曲折,叶列平.附加子结构抗震加固方法及其在日本的应用[J]. 建筑结构,2010,40(5):55-58.
[2] 冯远,吴小兵,李从春,等.现浇楼梯对框架结构的抗震影响分析与建议[J]. 土木工程学报,2010,43(10):54-62.
[3] 叶列平,曲哲,马千里,等.从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J]. 建筑结构,2008,38(11):52-67.
[4] CABINET OFFICE. The building standard law of Japan[S]. Tokyo:The Building Center of Japan,2004.
[5] 叶列平.体系能力设计法与基于性能/位移抗震设计[J]. 建筑结构,2004,34(6):10-14.
[6] KALTAKICI M Y,ARSLAN M H,YILMAZ U S,et al. A new approach on the strengthening of primary school buildings in Turkey: An application of external shear wall[J]. Building and Environment,2008,43(6):983-990.
[7] 潘毅,杨成,赵世春,等.基于 Pushover 方法的既有建筑结构安全性鉴定[J]. 西南交通大学学报,2010,45(2):174-178.
[8] Applied Technology Council. Sesimic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40[R]. Redwood City:Applied Technology Council,1996.
[9] 张胜,甘明,纪青,等.基于结构位移性能的合肥游泳馆抗震设计[J]. 建筑结构,2006,36(6):48-51.

Study on Seismic Behavior of Middle and
Primary School Frame Structures
Retrofitted with External Shear Wall

WANG Wei¹, GUO Zi-xiong¹,
LIN Shu-zhi², FANG Dong-zhen¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. Xiamen Construction and Administration Bureau, Xiamen 361003, China)

Abstract: An external retrofitting shear wall is adopted to strengthen the middle and primary school 4-storey frame structure which don't meet the seismic requirement. According to elastic and elasto-plastic seismic response analysis, the seismic behavior of retrofitted frame using various strengthening plan was investigated. The analytical results show that the external retrofitting shear wall reduces obviously the seismic force of retrofitted frame, the width of shear wall is positive correlative to the reduction of seismic force, and the shear wall narrows the difference of drift ratio of each storey. Comparing with the original frame, The development of plastic hinge of retrofitted frame is postponed.

Keywords: school building; frame structure; external retrofitting; shear wall; seismic performance; pushover analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)