



某砌体-钢加层房屋整体抗震性能与加固措施研究

期刊：	工业建筑
稿件ID：	IC-2023-0005
稿件栏目：	论文
作者提交日期：	2023-11-17
参与作者列表：	author 1
关键词：	砌体结构, 增层改造, 弹塑性时程分析, 性态水准, 加固措施
英文关键词：	
学科领域：	土木工程学

某砌体-钢加层房屋整体抗震性能与加固措施研究

田志鹏¹, 段隆焰², 唐唯峰¹, 龚波¹

(1. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610081;

2. 成都空港城市发展集团有限公司, 四川 成都 610200)

摘要: 针对目前日益增多的既有建筑加层改造项目, 结合某一典型的砌体结构上加钢结构层建筑, 采用杨卫忠砌体受压本构模型和适当的砌体受拉、受剪本构模型, 利用 SAP2000 建立改造前和改造后的有限元模型, 通过模态分析结果表明, 该模型与通过大量实测数据得到的砌体结构基本周期公式所得结果非常接近。对有限元模型进行地震弹塑性时程分析, 该建筑在增层改造后, 层间位移角较原结构增大, 特别是原结构局部凸出部分, 增层后为砌体-钢框架混合结构, 砌体部分将承担大部分 X 方向的楼层剪力。由于上部钢加层结构存在很强的鞭梢效应, 新加层钢结构与原结构的连接尤为重要。对于砌体结构钢加层改造, 本文提出采用钢筋混凝土板墙及钢筋网水泥砂浆面层进行墙体承载力加固, 同时采用外包混凝土式钢柱脚刚接加固, 本文提出的内框-钢结构加层建筑加固方案及重要加固节点措施可有效保证加层后结构整体的安全性和抗震性能, 同时施工可操作性强, 经济性较高。

关键词: 砌体结构; 增层改造; 弹塑性时程分析; 性能水准; 加固措施

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号:

Research on the Overall Seismic Performance and Reinforcement Measures of Masonry - steel Storey Building

TIAN ZhiPeng¹, DUAN LongYan², TANG WeiFeng¹, GONG Bo¹

(1. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, China;

2. Aerotropolis City Development Group of Shuang Liu, Chengdu 610200, China)

Abstract: Aiming at the current increasing number of existing building addition and renovation projects, a typical inner frame masonry structure with an added steel structure building has been analyzed. Finite element modeling of original structure and renovation structure has been established using SAP2000, in which Yang Weizhong masonry compression constitutive model and appropriate masonry tension and shear constitutive models has been adopted. The results of modal analysis show that the basic period of established model is very close to the results obtained from the basic period formula of masonry structures, which is verified by a large number of measured data. The seismic elastoplastic time history analysis of the finite element model shows that the story drift of structure with added steel structure is larger than that of the original structure. Regarding the local protruding structure of the original structure, the floor is the layer is a masonry-steel frame hybrid structure after retrofitting, the masonry part will bear most of the story shear in the X direction. Due to the strong whip effect of the upper steel layer structure, the connection between the new layer steel structure and the original structure is particularly important. For the steel storey adding reconstruction of Masonry, this paper proposes to use reinforced concrete slab wall and ferrocement mortar surface layer to strengthen the wall bearing capacity, and at the same time, use the steel column foot rigid connection reinforcement of the encased concrete. The reinforcement scheme of the inner frame steel structure storey adding building and important reinforcement node measures proposed in this paper can effectively ensure the overall safety and seismic performance of the structure after storey adding. At the same time, the construction is highly operable and economical.

Key word: masonry structure; adding story; seismic elastoplastic time history analysis; performance level; reinforcement measures

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 四川省建筑科学研究院科技基金项目 (ZF-79)

第一作者: 田志鹏 (1985—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市安全、工程抗震及加固改造。

E-mail: zhipeng0523@qq.com

0 引言

目前全国现存大量的砌体结构房屋。随着经济快速发展,部分地区用地日益紧张,而砌体结构因其自身抗震性能限制,层数一般不多,土地利用率较低。对于性能尚可的砌体结构建筑,拆除重建缺乏经济型,或因其他条件限制,原建筑不能拆除。对此类建筑,采用钢结构进行增层改造成为业主提高建筑使用功能的选择之一,部分建筑已经进行了改造加层的工程实践。谢新[1]结合某多层砖混结构加层的设计改造项目,提出了一种实用的抗震分析方法,并且提出了砌体与新增加层结构连接处理方法。闫旭朝[2]对某砖混结构进行了加固改造和加层分析,介绍了该既有建筑加层的结构形式、相关设计与施工的技术问题。

对于砌体结构上新加钢结构建筑,加层后结构整体的动力特性和原结构有较大变化,底部砌体结构刚度、质量较大,上部钢结构加层刚度、质量较小,在地震作用下容易出现明显的“鞭梢效应”,且上部加层将对下部结构带来额外的水平地震作用。所以,此类房屋的抗震性能值得引起注意。

对于砖混结构与钢结构加层的混合结构房屋,目前规范尚无明确的设计方法,国内常用的大型综合结构设计软件也难以满足针对此类问题的较为简便的整体式建模分析需求。本文针对此类问题,结合某一内框砌体结构与钢结构加层的混合结构,对内框-钢结构加层建筑整体抗震性能进行分析,根据分析结果,提出了内框-钢结构加层建筑加固方案及重要加固节点措施,从而很好的解决了“鞭梢效应”为结构带来的不利影响。

1 工程概况

1.1 原有建筑概况

该建筑原功能作为疗养院,修建于1995年,为一地上2层,局部三层的内框结构,楼盖、屋盖采用预应力空心板,横墙承重,墙体厚度为240mm。房屋主要开间为3.9m,主要进深为7.8m。一层层高4.2m,二、三层层高3.3m。混凝土构件设计强度为C20,

砖设计强度等级为MU10,砂浆设计强度为M5。该建筑每层设置有圈梁,房屋四角设置有构造柱。该建筑的房屋结构布置三维示意图如图1所示。经现场对该建筑原结构构件进行检测,该房屋结构布置、构件尺寸符合设计要求,原结构混凝土构件材料强度满足原设计要求,烧结砖实测强度均不低于MU20,砂浆实测典型强度为M3.0。

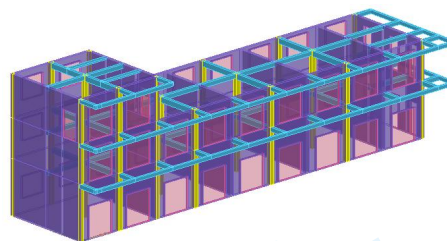


图1 原结构布置示意图

Fig. 1 schematic diagram of original structure

1.2 加层结构概况

在原结构基础上,原二层部分加建至三层,原局部三层区域加建至四层,加建部分采用单跨钢框架结构,主要钢柱截面为H350×250×10×16,钢框架梁主要截面为500×200×10×14,钢材牌号为Q355B,屋面采用压型钢板组合楼板,钢梁与钢柱刚接,次梁与主梁铰接,原结构与新增钢梁铰接,柱脚采用刚接。加层后结构整体模型示意图如图2所示。

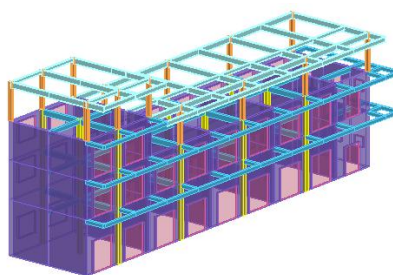


图2 加层结构布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of retrofitting Structure

2 模型建立

2.1 砌体材料本构关系

对于砌体结构弹塑性有限元分析,其本构关系对结果至关重要。砌体结构表现出明

显的各向异性特点,对于砌体受压本构模型,郑妮娜^[3]对比具有代表性的本构关系后发现,各种模型在上升段时的数据基本一致,当模型到达下降段,特别是 $\varepsilon/\varepsilon_m > 2.5$ 以后,杨卫忠模型^[4]更符合实际,且该模型具有形式简单、通用性好、含参数少且易于标定等优点,对于砌体受拉本构模型,其采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)中的混凝土受拉应力-应变曲线,并适当修正。经过试验和模拟计算对比,该砌体结构本构模型数值分析和试验结果吻合良好,故本文采用该参考文献砌体结构受压、受拉本构模型。对于砌体受剪本构关系,本文采用 J. Aleman^[5]在 SAP2000 中利用非线性分层壳建立砌体模型所采用的本构关系。

2.2 材料强度及基本力学参数

经过现场实测,该结构钢构件、混凝土构件材料强度均不低于设计强度,有限元模型钢构件取设计强度 Q355B,混凝土构件取设计强度 C20。砌体结构材料强度依照实测值,并参照文献^[6]计算各本构关系中的基本力学参数,砌体泊松比取 0.15。

2.3 有限元模型建立

采用 SAP2000 有限元软件,建立原结构有限元模型和加层后结构有限元模型,其中,砌体承重墙采用 2 层的非线性分层壳模拟,分别模拟砌体结构受压、受拉力学行为和受剪力学行为,钢筋混凝土梁、柱和钢结构梁、柱采用框架单元模拟,并在端部设置塑性铰考虑材料的非线性行为。

结构恒载按照建筑实际使用情况取值,活载按照改造时期《建筑结构荷载规范》的有效版本取值。建筑场地类别为 II 类,设计地震分组为第三组,抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.10g,建筑抗震设防类别为丙类。

原结构有限元模型和加层后结构有限元模型如图 5、图 6 所示。

2.4 模态分析

模态分析可以用来了解结构的固有动力特性,计算出的振型和周期可以为后续的动力时程分析提供必要的基础^[7],并且可以通过模态分析结果一定程度检验计算模型正确性。

采用特征向量法,利用 SAP2000 对原结构和加层结构进行模态分析,分析结果见表 4。从结果可以看出,加建钢结构层后,结构周期增大,结构变柔,低阶振型主要为上部钢结构振动,质量参与系数较原结构偏低,在地震作用下,高阶振型对地震响应贡献增大。

周洋^[8]基于大量实测数据,提出了大开间砌体结构有圈梁构造柱结构房屋基本周期与高宽比的关系:

$$T_1 = 0.19486 + 0.00175H^2/\sqrt{B}$$

当仅计算底部两层,依据此公式计算的结构基本周期为 0.235s,相应的仅建立底部 2 层砌体结构有限元模型的第一阶周期为 0.248s,二者非常接近,因此该有限元建模方法可以较为真实地反应结构力学特性。

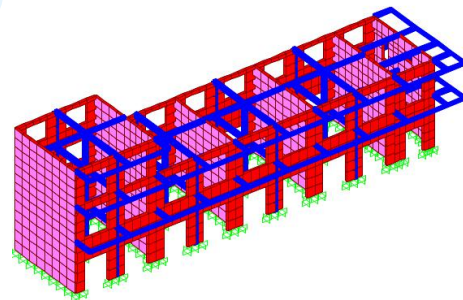


图 5 原结构有限元模型

Fig. 5 finite element model of Original structure

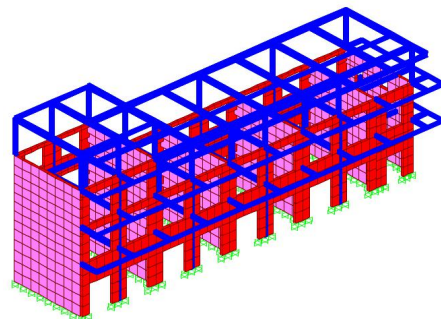


图 6 加层结构有限元模型

Fig. 6 finite element model of retrofitting structure

表 1 结构前三阶模态分析

Table 1 The first three modal analysis of the structure

振型	原结构			加层结构		
	周期/s	振型描述	质量参与系数	周期/s	振型描述	质量参与系数
1	0.305	X 向平动	0.706	0.526	X 向平动	0.32
2	0.254	Y 向平动	0.544	0.373	Y 向平动	0.37
3	0.198	扭转	0.553	0.351	扭转	0.24

3 地震波选取

依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016 年版),该建筑场地特征周期为 0.45s,本文选取 2 组天然波、1 组人工波,采用双向输入,主方向与次方向加速度峰值比例为 1: 0.85,地震时程加速度最大值多遇地震为 35cm/s²,罕遇地震为 220cm/s²。

经验算,所选地震波地震影响系数曲线与振型分解反应谱法采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符,且每条时程曲线计算出的基地剪力、平均基地剪力与反应谱法计算结果的比值均满足规范要求。所选地震波名称(括号内为后文简称)及反应谱信息如图 7 所示。

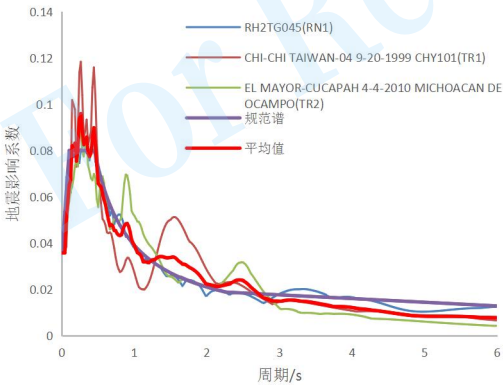


图 7 地震波名称及反应谱

Fig. 7 Response Spectrum of Seismic Wave

4 结构地震响应

1) 砌体、钢结构混合层楼层剪力

该建筑原结构为局部 3 层砌体,加层改造时,在原结构 2 层屋面区域加建钢结构,改造后 3 层为砌体结构与钢框架结构的混合结构。该层在地震作用下,原结构部分与加建结构部分层间剪力结果如表 3 所示。

由表格结果可知,由于砌体结构刚度较大,而钢结构部分刚度较小,且该方向为钢柱弱轴,在地震作用下,X 向层间剪力主要由砌体结构承担。在 Y 方向,由于没有砌体结构侧向支撑,新增钢结构该方向层间剪力较 X 方向更大。

表 3 混合层各部分楼层剪力

Table 3 shear force of each part of the mixed layer

质量/t	砌体结构剪力 /KN		新加钢结构剪力 /KN	
	156.34		217.34	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向
RN1 小震	128	22	11	63
RN1 大震	855	58	92	457
TR1 小震	139	22	12	65
TR1 大震	918	60	94	465
TR2 小震	145	23	14	59
TR2 大震	958	61	111	432

2) 层间位移角

层间位移角是衡量结构地震响应的重要指标,目前规范尚无砌体结构在地震作用下层间位移角限值的具体规定。许多学者对砌体结构层间位移角和相应的结构性能水准评判标准做了很多研究,但评价标准尚未达成共识,本文选择李佳^[9]对墙体破坏等级的划分水准,划分标准如表 4 所示。原结构和加层结果在多遇地震和罕遇地震作用下,砌体结构各楼层层间位移角结果如图 8、图 9 所示。

由结果可知,原结构在多遇地震作用下,三条波 X 向最大层间位移角平均值为 1/1475,略超过轻微破坏限值,Y 向最大层间位移角平均值为 1/3564,处于完好状态。在罕遇地震作用下,X 向最大层间位移角平均值为 1/301,Y 向最大层间位移角平均值

为 1/489，两个方向均超过中等破坏限值，尚未达到严重破坏限值。

对于加层结构砌体部分，在多遇地震作用下，三条波 X 向最大层间位移角平均值为 1/1247，超过轻微破坏限值，Y 向最大层间位移角平均值为 1/1690，接近轻微破坏状态。在罕遇地震作用下，X 向最大层间位移角平均值为 1/189，在 TR2 地震动作用下 Y 向层间位移角为 1/176，最大层间位移角已接近严重破坏限值。Y 向最大层间位移角平均值为 1/473，超过中等破坏限值，尚未达到严重破坏限值。对于刚结构部分，在多遇地震和罕遇地震作用下最大层间位移角分别为 1/388 和 1/116，满足规范限值要求。

相较于原结构，由于新加钢结构层的影响，加层结构多遇地震作用下 X 向最大层间

位移角平均值增大 18.2%，罕遇地震作用下增大 59.3%，多遇地震作用下 Y 向最大层间位移角平均值增大 110.9%，位于 3 层，罕遇地震作用下增大 3.4%，位于 1 层。

3) 钢结构加层对原结构影响

通过剪力、层间位移角的对比可知，对于砌体结构局部 3 层部分，由于其侧边新增的钢框架结构较柔，该层 X 向地震作用主要由原砌体结构承担，3 层新增部分重力荷载代表值为原 3 层砌体部分的 1.39 倍，因此，3 层砌体部分 X 向最大层间位移角增大，在罕遇地震作用下增大约 59.3%，接近严重破坏限值。在 Y 向，该部分砌体由于上部增加钢结构层，引起结构动力特性变化，罕遇地震作用下 3 层砌体部分 Y 向层间位移角较原结构增加约 116%，平均值达到 1/479。

表 4 砌体结构形态水准与结构破坏

Table4 Performance level and structure failure of masonry structure

性能水准	充分运行 (完好)	运行 (轻微破坏)	基本运行 (中等破坏)	生命安全 (严重破坏)	接近倒塌
层间位移角限值	1/2000	1/1600	1/700	1/150	—

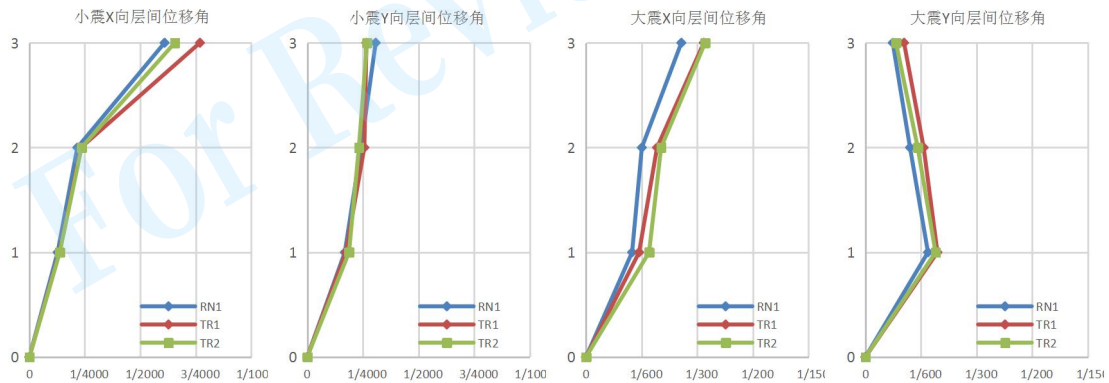


图 8 原结构层间位移角

Fig. 8 The story-drift of original structure

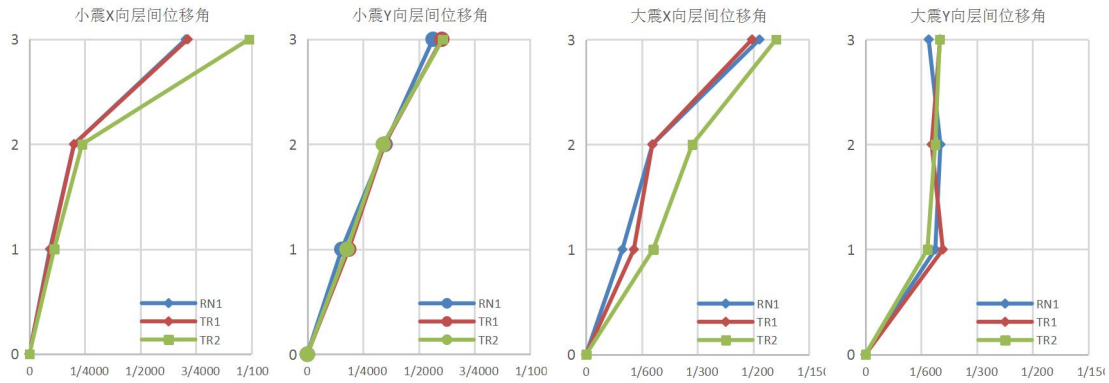


图 9 加层结构层间位移角

Fig. 9 The story-drift of retrofitting structure

5 结构加固措施

采用 PKPM 软件对原砌体结构建立计算分析模型, 并将 SAP2000 所计算新加钢结构对原结构的作用施加到分析模型中, 对砌体结构部分进行抗压、抗震承载力计算。依据计算结果, 该建筑加层改造后, 原砌体结构部分墙体抗压承载能力与荷载效应之比小于 1.0, 部分墙体抗震承载力不足。

对抗压、抗震承载力不足的墙体, 综合结构体系和墙体承载力情况, 采用单面钢筋混凝土板墙和双面钢筋网水泥砂浆面层进行加固, 加固做法见图 10 和图 11。

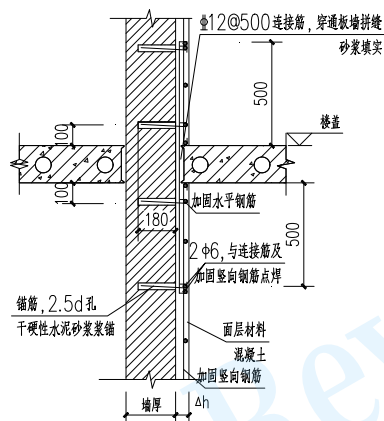


图 10 单面钢筋混凝土板墙做法

Fig. 10 Strengthened by External Reinforced Concrete Layer on one side

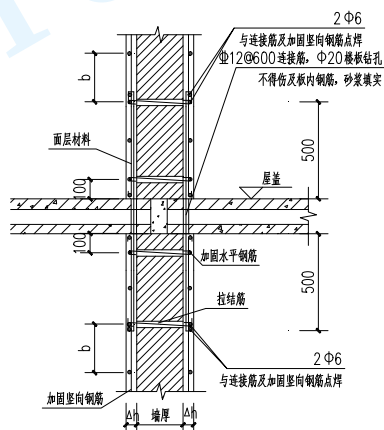


图 11 双面钢筋网水泥砂浆面层做法

Fig. 11 Strengthened by External Steel-meshed Mortar Layer on both side

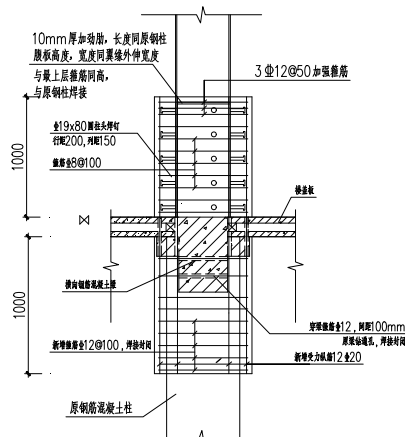


图 12 钢柱脚做法

Fig. 12 Steel Column Base

由于上部钢结构存在很强的鞭梢效应, 新加钢结构与原结构的连接尤为重要, 连接部位的做法宜采取更高的安全度。依据设计和计算, 新增钢结构钢柱脚为刚接, 采用外包钢筋混凝土形式, 钢柱脚刚接做法见图 12 所示。

经验算, 加固后该结构在持久设计状况和地震设计状况下, 构件承载能力和结构位移均能满足现行国家相关规范要求。该加固方法可有效保证加层后结构整体的安全性和抗震性能。上述方法施工可操作性强, 该工程加固处理后, 经验收, 工程质量完全满足设计要求, 加固效果显著, 同时经济性较高, 值得同类工程参考。

6 结论

本文针对目前存在的部分砌体结构上加钢结构加层建筑, 对砌体-钢结构加层混合结构房屋和原砌体结构房屋的抗震性能对比分析, 研究了该类结构改造加固的方法措施, 得到以下结论:

1) 选取杨卫忠砌体受压本构关系和适当的砌体受拉、受剪本构关系, 通过 SAP2000 非线性分层壳单元模拟砌体墙建立有限元模型, 其模态分析结果显示结构基本周期与文献 7 提出的公式非常接近, 此建模方法可以较为真实地反映结构力学特性;

2) 对于砌体与钢框架结构混合的楼层, 在砌体支撑钢框架方向, 砌体将承担大部分地震剪力, 因此该方向砌体结构层间位移角增大, 不利于抗震;

3) 砌体上加钢结构层, 将影响结构整体力学特性, 影响结构抗震验算, 目前国内常用的结构设计分析软件还不能较为方便地解决此类问题。本文通过建立能反映结构整体特性的有限元模型, 计算得到地震作用下上部加层对下部结构的影响, 将该部分作用添加到常用的结构设计软件中进行计算, 得到较为准确的下部砌体结构分析计算结果。

4) 砌体结构加层改造时, 采用钢筋混凝土板墙及钢筋网水泥砂浆面层进行墙体承载力加固, 同时采用外包混凝土式钢柱脚刚接加固处理, 加固后结构承载能力均能满足现行国家相关规范要求。该加固方法可有效保证结构整体的安全性和抗震性能, 同时施工可操作性强, 经济性较高, 可为后续类似工程加固改造提供一定借鉴意义。

参 考 文 献:

[1] 谢新, 张建林, 郭永涛等. 某多层砖砌体结构轻钢加层改造设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(03): 107-110.

[2] 闫旭朝, 陈俊. 某砖混结构加固改造与加层分析[J]. 浙江建筑, 2009, 26(06): 28-30. DOI: 10.15874/j.cnki.cn33-1102/tu.2009.06.008.

[3] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究[D]. 重庆大学, 2010.

[4] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, No.298(10): 80-82. DOI: 10.19701/j.jzjg.2008.10.027.

[5] Aleman J, Mozaffarian H. Reliability of Simplified Modeling Strategies for In-Plane Walls in URM Buildings using ASCE 41-13 Procedures[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. 2017.

[6] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[7] 黄有露, 蒋欢军. 老旧砌体房屋改造底部加层方法研究[J]. 中国科技论文, 2021, 16(06): 628-635.

[8] 周洋, 施卫星, 韩瑞龙. 多层大开间砌体结构的基本周期实测与分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 197-204.

[9] 李佳. 基于数值模拟的砌体结构倒塌影响因素分析及倒塌措施初探[D]. 重庆大学, 2013.

[10] 张涛. 既有建筑顶部钢结构加层的结构设计与抗震性能分析[D]. 清华大学, 2005.

附: 信息统计表

姓名	田志鹏	性别	男	出生年月	1985. 5
籍贯	甘肃张掖	职称	高级工程师	研究方向	城市安全与工程抗震
邮寄地址	成都市金牛区一环路北三段 55 号	联系电话	13982218316	E-mail	zhipeng0523@qq. com
参考文献数量		10	引用本刊文章的数量		
已发表的相关文章					