

村镇建筑基础隔震技术研究综述

李雅静¹, 王昊¹, 王振源¹, 罗超^{2,1} (1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

[摘要] 我国村镇民居抗震能力普遍低下, 具有极大的地震安全隐患。采用低成本简易隔震技术是提高村镇建筑抗震安全的一种有效途径。本文阐述了我国村镇民居建筑结构抗震能力现状, 总结了我国主要的几种村镇建筑结构类型, 分析了村镇建筑震害及其原因; 总结了村镇建筑现有隔震技术, 分析了每类隔震技术的优缺点; 对村镇隔震技术的应用提出了建议和展望。本文研究内容可为隔震技术在村镇建筑中的应用提供参考, 从而进一步推进隔震技术的应用与发展。

[关键词] 村镇建筑; 基础隔震; 基础滑移隔震系统; 橡胶垫层基础隔震系统; 复合基础隔震系统

[中图分类号] TU352.1

[文献标识码] A

A review of research on base isolation technology in rural buildings

Li Ya-jing¹, Wang Hao¹, Wang Zhen-yuan¹, Luo Chao^{2,1} (1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The seismic capacity of rural dwellings in our country is generally low, which has a great hidden danger of earthquake safety. Adopting low-cost and simple seismic isolation technology is an effective way to improve the seismic safety of rural buildings. In this paper, the present situation of the earthquake resistance capacity of residential buildings in our country's villages and towns is expounded, the main types of building structures are summarized, and the earthquake damage and its causes are analyzed. The existing seismic isolation technology of rural buildings is presented, and the advantages and disadvantages of each kind of seismic isolation technology are studied. The suggestions and prospects for the application of seismic isolation technology in villages and towns are put forward. The research content of this paper will provide references for the application of seismic isolation technology in rural buildings, so as to further promote the application and development of seismic isolation technology.

Keywords: rural building; base isolation; sliding based-isolation system; rubber bearings base-isolation system; composite base-isolation system

E-mail: lyj15081647306@163.com

我国地震活动频繁、强度大, 是一个震灾严重的国家。而历次地震表明, 农村建筑的倒塌破坏和人口伤亡程度比城市要严重的多, “小震致灾”的现象时有发生, 村镇民居抵御地震灾害的能力严重不足^[1-4]。历次地震造成的村镇建筑震害引起了我国学者的高度重视, 针对我国农村民居抗震能力差的

现状, 诸多学者展开了村镇建筑抗震减灾新技术的研究, 隔震减震技术也被引入到村镇建筑的抗震防灾领域。本文通过文献整理、分析, 总结国内村镇建筑隔震技术的研究现状、国外低成本的隔震技术研究现状, 从我国村镇建筑特点、村镇建筑结构震害等方面展开评述, 客观分析隔震技术在村镇建筑中应用的意义和价值, 探讨适用于村镇建筑的隔震技术的发展方向。

1 我国村镇建筑特点

1.1 我国村镇建筑类型

我国村镇建筑地域分布广泛, 通常是就地取材,

[收稿日期] 2020-03-24

[基金项目] 河北省自然科学基金青年基金 (E2019210245, E2019210350), 河北省引进留学人员资助项目 (C20190364, C20190363), 石家庄铁道大学大学生创新创业项目 (201910107085)

按照当地的传统习惯建造,因而建筑形式及结构类型丰富多样,具有鲜明的地域特点。王毅红、郑士举^[1,2,5]等通过在全国范围内开展随机抽样的散点调研,收集了既有村镇住宅建筑、结构、构造、施工等方面的资料,统计表明,我国既有村镇住宅建筑的结构类型可归为砌体结构、木结构、生土结构和石结构四大类,其中 60% 以上的农村房屋建筑属于砌体结构^[1,2,5]。姜旋^[6]等对我国村镇地区建筑结构类型进行了调研,调研结果表明砖木、砖混结构在村镇地区分布最为广泛,其中砖砌体结构占调研区域建筑的 93%。此外,王鲁华、李钢^[7,8]等在部分地区调研后发现农村房屋建筑以砌体结构形式居多,土木结构和木结构数量相对较少。综合国内文献可知,由于砌体结构造价低廉、施工技术简单,仍为村镇建筑主要的发展趋势,而村镇建筑隔震技术的发展也主要围绕砌体结构展开。依据我国村镇目前的施工水平 and 经济水平,砌体结构在未来很长时间内将继续被大量采用和发展,因此针对多层砌体结构的隔震设计研究具有重大的现实意义。

1.2 村镇建筑结构震害及分析

在汶川、芦山、玉树地震中,遭受破坏和倒塌的房屋除建成时间较久远、未经抗震加固或因施工质量存在重大问题的城市建筑外,基本上都是村镇建筑^[1,2,5,6,38]。其中,砌体结构的村镇建筑震害较为严重,造成人员伤亡的数量比重较大^[3,7]。历次震害资料表明,村镇建筑的震害主要表现为墙体开裂、楼屋盖破坏、墙角破坏、窗间墙破坏、楼梯间破坏、房屋倒塌等^[3,7]几种形式。造成以上震害的主要原因有以下两点^[3]:

(1) 结构整体性较差

农村建筑中各构件之间连接性能较差,如楼板与墙之间搁置长度不足,木梁与墙体之间缺少可靠锚固,纵横墙交接处缺乏必要的抗震构造措施等,从而导致结构整体性较差,在遭受地震时所引起的破坏加剧。

(2) 结构受力不均衡、整体刚度较差

建造村镇建筑的材料强度得不到保证,自拌混凝土强度没有技术标准、砂浆不饱满的现象较为常见。且农村建筑在设计时追求平面最大化、大窗和大悬挑,导致结构整体刚度下降。村镇建筑大部分是由村民自行设计,结构布置不合理导致结构受力不均衡,尤其是楼梯间因梯段侧向刚度较大且错层,

成为结构的薄弱点,在历次震害中造成严重破坏。

根据实地调研资料^[3,7]可知,造成农村民居震灾严重和小震致灾的根本原因是受经济水平的制约,农民群众在建房时基本不考虑抗震因素,为了追求房屋造价低廉导致房屋抗震能力低下。因此,除了加强政府部门对农村建房的监管外,还应有针对性的研发一些简易又成本低的高新技术来提高村镇建筑结构的抗震能力,为经济较不发达的村镇地区提供一种简便经济的抗震手段。这对维护广大农村地区社会稳定保障经济发展具有重要意义,更是建设社会主义新农村、构建和谐社区、实现全面建设小康社会奋斗目标的迫切需求。

2 村镇建筑现有隔震技术

我国是一个农业大国,农村人口占总人口数的 63.76%,所以村镇建筑结构的整体抗震性能的高低直接影响到我国抗震防灾的整体能力,因此,诸多学者将隔震减震技术引入到村镇建筑的抗震减灾中,展开了村镇建筑隔震技术的应用研究。国外学者针对低成本的隔震技术也做了一些研究,可较好地应用于村镇建筑。国内外众多学者针对村镇建筑的隔震形式通常为基础隔震,即在基础与主体之间设置一道隔震层,延长建筑物的基本周期,依靠隔震层的变形降低地震波传递给上部结构的能量。目前,村镇建筑的隔震技术研究可归纳为:基础滑移隔震系统、橡胶垫层基础隔震系统、复合基础隔震系统等几大类。

2.1 基础滑移隔震系统

基础滑移隔震系统采用摩擦滑移隔震元件,将原来由建筑结构构件塑性变形吸收地震能量,转变为由滑移隔震层隔绝和吸收地震能量。典型结构布置如图 1、图 2 所示。目前,国内外已有的基础滑移隔震技术采用的材料主要是石墨、不锈钢板、玻璃丝布、聚四氟乙烯板、土工布、钢球、砂、大理石等。

2005 年,我国窦远明^[9,10]等对砂垫层隔震进行了理论分析和试验研究,对砂垫层在不同工况下的减震效果进行了探讨,为砂垫层减震法在工程上的应用提供了理论依据。2006 年,Sassu^[11]提出了一种隔震构造方法,即在基础和上层结构之间插入 50mm 厚的低强度砂浆和 4mm 厚的隔震层,并通过布置垂直钢筋连接结构基础上来限制隔离层的位移,基础隔震层在小震或风荷载下不启动滑移,在中震或大震期间会引发低强度砂浆层启动摩擦和滑

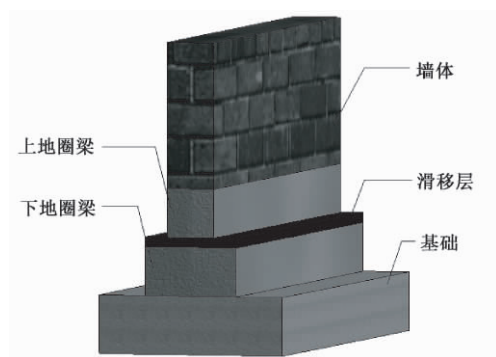


图1 基础滑移隔震系统三维示意图

Fig.1 Three dimensional schematic diagram of foundation slip-isolated systems

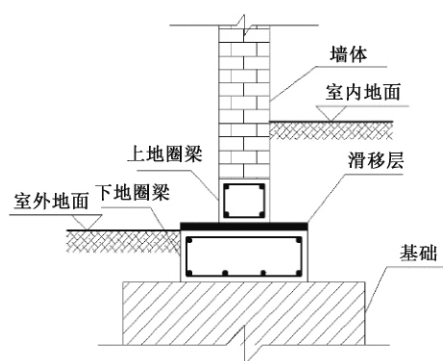


图2 基础滑移隔震系统结构示意图

Fig.2 Structural diagram of foundation slip-isolated systems

移。2010年,刘开康,李宏男^[12]等提出一种适用于村镇土坯结构的摩擦滑移隔震技术,并进行了部分理论和试验方面的研究,验证了砂层滑移隔震的对土坯结构的减震成果。2013年,王海刚,韩晓雷^[13]等结合一系列的试验研究及理论分析,明确了砂垫层摩擦滑移隔震性能,合理确定了村镇建筑物的垫层材料和厚度,为发展村镇建筑的砂垫层隔震技术提供了一定的理论基础。2014年,史庆轩^[14]等对砂垫层基础滑移隔震系统进行有限元分析,确定了多遇和罕遇地震作用下隔震层摩擦系数和滑移量建议界限,确定了满足不同摩擦力作用下地震抗剪承载力的最小砂浆标准。2015-2017年间,李英民^[3,15-19]团队提出了一种适用于村镇低层建筑的改性砂浆-橡胶束滑移隔震技术,在基础梁上铺设沥青-砂垫层并在基础上、下圈梁每隔一定距离设置橡胶束。通过对其进行试验及数值模拟研究证明沥青-砂垫层具有较好的隔震性能。此外,袁康、李英民^[4]等还提出一种适于高烈度寒区村镇建筑的砂

垫层-基础滑移复合隔震体系,以抵抗地基冻胀的影响。

2009年,Ahmad^[20]等通过单层1/4缩尺模型振动台试验,研究对比了固定基础且无任何隔震措施的普通砌体结构和摩擦滑移隔震砌体结构,又分别采用粗干砂和聚四氟乙烯板作为滑移隔震层材料,对这两种滑移隔震砌体结构的1/4缩尺模型进行了振动台对比试验,试验结果表明,后者比前者的隔震效果更好。2011年,赵桂峰,马玉宏^[21]等对村镇建筑带限位装置摩擦隔震体系的参数影响进行了研究,得出了摩擦系数、隔震层弹性刚度和屈服位移参数选取的合理取值范围。2011年,Nanda^[22]等研究了地震作用下土工布的隔震性能,采用土工布和大理石板材-土工织物作为隔震层材料,对其单层砖砌体结构的1/2缩尺模型进行了振动台试验。结果表明,土工布隔震层和带大理石板材-土工织物隔震层工作性能良好,能显著减轻上部结构的地震反应。2011年,Jayalekshmi^[23]等在土中植入纤维来提高土体的强度,然后在其上铺设一层光滑土工布进行隔震,研究表明该方法操作简易,具有良好的隔震效果。

另一类适用于村镇建筑的低成本隔震系统为滚动基础隔震系统。滚动基础隔震系统以悬吊、滚珠、滚轴、柔性柱、滚摆等为主的隔震元件,在基础与上部建筑之间铺设上述具有良好滑动性能的隔震元件,以在基础和建筑物之间引起相对滑动,并通过摩擦阻尼来消耗地震能。滚动摩擦力比滑移摩擦力小,允许很小的地震力向上部结构传播。目前的滚动隔震装置包括:带凹形复位板滚球、双向滚轴加复位消能装置、滚球加复位消能装置、碟形和圆锥形支座这几种形式。1999年,黄襄云^[24]团队讨论了刚度、自振频率、质量比等因素对隔震性能的影响,对滚动基础隔震结构进行了两质点模型和刚体模型的振动台试验,验证了理论的正确性。试验表明,球支撑滚动隔震体系具有显著的隔震效果。2005年,史红福^[25]团队介绍了滚球加弹簧复位装置及滚球带凹形复位板隔震装置这两种滚动基础隔震装置,通过设置弹簧限制底板的位移,研究了滚动基础隔震结构的数值分析方法与地震响应。通过比较分析可知,该种隔震系统具有良好的隔震效果,且震后能自动恢复到原来位置。尽管滚动隔震结构具有良好的隔震效果,但也具有一些缺陷:(1)由于基部和摩擦

表面之间的摩擦,其动力学特性是高度非线性的,国内外许多学者对此进行了理论和实验研究,但仍不成熟、不完善。(2) 以其整个使用寿命期间需要维护以保持良好的运行状态。但滚动隔震支座仍是目前隔震研究的新热点,对促进村镇结构领域的抗震研究具有积极意义。

综上所述,滑移隔震技术隔震效果较好,取材方便成本较低,耐久性较好。此外,当采用基础滑移隔震进行加固时,通常只建造建筑结构的基础部分,这不会影响上层建筑的功能和正常使用,是一种相对经济的抗震加固方法。但基础滑移隔震系统仍有许多不足:(1) 由于在水平方向上没有限位措施作为安全装置,因此在工程上和心理上都不易被接受;(2) 隔震层的滑动位移大且难以控制,如果通过调节摩擦系数来调节滑动位移量,则隔震效果会降低;(3) 地震波高频分量有一定程度的激发;(4) 在大震期间无法控制房屋的摆动,在极震期间无法控制房屋的脱离,对上层建筑是不利的^[26]。

2.2 橡胶垫层基础隔震系统

橡胶垫层基础隔震系统以橡胶支座作为主要的隔震元件,目前应用于村镇建筑中的主要有叠层橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座、纤维橡胶隔震支座等,典型结构布置如图 3、图 4 所示。

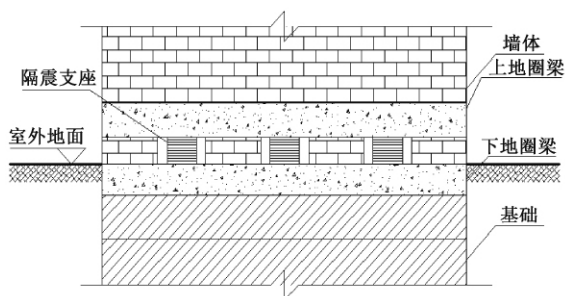


图 3 橡胶垫层基础隔震系统结构立面图

Fig. 3 Structural elevation of rubber bearings base-isolated systems

2008 年, Turer.A, Ozden.B, Tsang. H^[27, 28] 等研究了利用废旧轮胎作为基础隔震层,通过废轮胎隔震层的试验研究和模拟分析表明,废轮胎隔震层可以有效地降低上部结构的水平和竖向地震作用。2012 年,陈文,熊峰^[29] 等又在前人的基础上研究了废旧轮胎隔震技术,提出了废旧轮胎在隔震体系中的构造以及设计方法。

2014–2016 年间,王毅红^[30, 31] 等人提出了一种

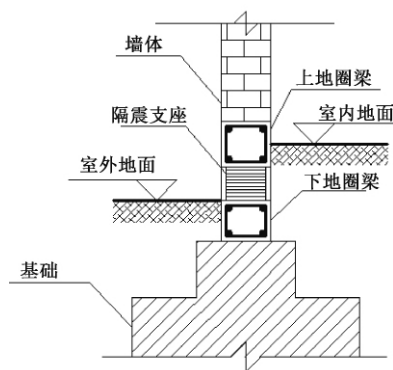


图 4 橡胶垫层基础隔震系统结构剖面图

Fig.4 Structural profile of rubber bearings base-isolated systems

适用于村镇低矮砌体结构房屋的叠层橡胶隔震技术,通过实验研究了不同参数隔震支座的抗震性能和受力破坏过程,验证了隔震方法及构造措施的有效性,为叠层橡胶支座在村镇建筑中的应用提供了理论和试验依据。

2016 年,郑瑶^[32] 等人将铅芯橡胶支座隔震技术应用于村镇砌体结构,提出了将隔震层设置于地坪以上的构造做法,进行了设置隔震层和无隔震层结构的振动台对比试验。采用反应谱法,研究了多种地震波输入工况下隔震结构和非隔震结构的地震反应规律。根据数值模拟分析结果,设计了结构振动台试验的传感器布置和加载方案,试验结果表明铅芯橡胶支座应用在村镇低矮砌体结构中具有良好的隔震效果。

1999 年,美国学者 J.M. Kelly^[33] 等提出了一种新型纤维橡胶支座,将传统叠层钢板橡胶隔震支座内部的叠层钢板采用碳纤维等材料代替,并取消橡胶支座的上、下联结钢板。通过试验研究和理论分析,验证了纤维支座的隔震性能。这种新型支座更适用于在村镇地区的 1–3 层砌体房屋,因为它减轻了隔震支座的重量,且降低了隔震支座的成本。2009 年,斯洛文尼亚的学者 Miha Tomaževic, Iztok Klemenc^[34] 等对纤维隔震支座的砌体结构进行了振动台试验,并与普通砌体结构进行了对比,结果表明纤维隔震支座隔震效果较好。2010–2011 年间,黄襄云,周福霖,曹京源^[35, 36] 等研究了一种适用于村镇砌体房屋的新型纤维橡胶隔震支座,代替了传统橡胶支座,并对其进行了理论分析和振动台试验,验证了该种支座良好的隔震效果。2016–2017 年间,

谭平^[37,38]等在传统橡胶隔震支座的基础上,提出用工程塑料板替代传统橡胶支座中的钢板,研发了一种适用于村镇建筑的简易隔震支座,并提出了相应的隔震连接构造与隔震层的施工方法。同时,对支座进行了有限元分析与力学性能测试,并在一个三层的砌体结构中应用这种隔震支座。

橡胶垫层基础隔震系统效果稳定,具有足够竖向刚度,兼具弹性变形与恢复及耗能等特点,它已广泛应用于城市的多层和高层建筑中,并成功地经受了地震的考验。将橡胶支座应用在村镇低矮砌体结构中具有良好的隔震效果,可以较好地减少向上传递的地震能量,并具有一定的限位功能^[32]。然而,橡胶支座在应用时需设置隔震沟、底层楼板等,导致造价较高,因而在应用于村镇建筑时需采用一定措施降低成本,如可设计小直径带铅芯的支座;简化施工程序,将隔震层置于室内地坪以上;在隔震层上设托梁支撑上部结构,不设底层地板和隔震沟等。此外,传统橡胶隔震支座中钢板材料造价较高,通过造价低廉的新型材料代替支座中的钢板将是今后一个重要的研究方向。其中,纤维橡胶隔震支座^[33-36]采用碳纤维材料代替钢板,隔震性能良好、工艺简单、造价低廉、重量轻运输安装不需大型器械,可人工搬运安装、便于施工。但纤维橡胶支座的纤维层平面中的刚度相对较小,并且难以抑制橡胶层的横向变形,所以支座的垂直刚度和承载能力远低于现有的夹层钢板橡胶支座。而且,纤维隔震支座水平极限变形能力和平面外的抗弯刚度均较小,在大震的作用下,很可能会发生翘曲和翻滚,从而导致失稳破坏。此外,纤维橡胶支座加劲层和橡胶层之间的粘结措施还有待展开进一步研究,有必要通过实验,进一步研究合适的纤维成分与适宜的粘结工艺,使纤维隔震支座刚度与承载力适当,粘结效果较好。

2.3 复合基础隔震系统

前述两类系统任意组合即串联或并联则构成复合基础隔震系统,或水平基础隔震方案与竖向减震技术混合应用形成混合隔震系统。典型结构布置如图5、图6所示。

2008年,许富华^[26]等人提出了水平地震作用的简化计算方法——“简化双质点模型模态分解反应谱法”,通过一系列研究方法与细致探讨研究了一种复合式基础隔震系统,将隔震减震、缓冲减震、耗能减震、自动复位、冗余隔震融功能为一体,较好

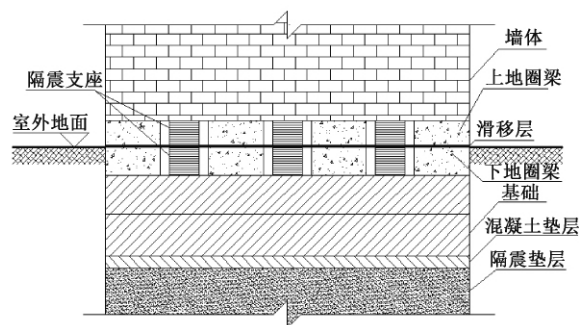


图5 复合基础隔震系统结构立面图

Fig.5 Structural elevation of composite base-isolation systems

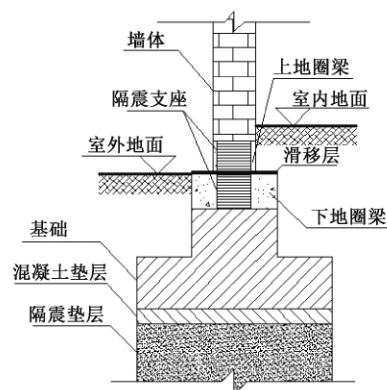


图6 复合基础隔震系统结构剖面图

Fig.6 Structural profile of composite base-isolation systems

地解决了隔震、承载与抗倾覆之间的矛盾。2015年,曹万林^[39,40]等研究了石墨玻璃丝布复合隔震层的隔震力学性能,试验表明,具有该隔震层的砌体结构在中震作用下可以进行滑移隔震,并能有效控制滑移量,隔震效果良好。2011年,尚守平^[41-43]等提出采用钢筋-沥青复合隔震技术和位于基础顶面放置新型的钢筋-沥青复合隔震墩技术,并在此基础上于2016年提出了一种以普通圆柱螺旋压缩弹簧为核心受力构件的三维防震支墩,并对其进行了拟静力试验和竖向振动台试验,测试出它在竖向及水平向的隔震效果良好。

复合隔震系统综合利用橡胶沥青等柔性垫层的优势,可以提供一定回复力,并具有滑移层滑动滞回耗能的特点,将基础滑移隔震和橡胶垫层隔震的优势在一定程度上展现出来,具有良好的隔震效果。然而,施工相对复杂,当不同材料组合使用时,难以控制隔震层的稳定工作性能。

3 村镇隔震技术应用的展望、建议

随着人们对隔震技术的逐渐认识、认同以及隔

震技术自身的不断完善,隔震技术在建筑结构抗震设计中将得到越来越多的应用。以上各项隔震技术均有各自的优势与不足,因此,针对村镇建筑隔震系统的研究还有待进一步展开。

(1) 基础滑移隔震系统

基础滑移隔震系统具有性能高、造价低、耐久性好、易施工等优点,但其震后复位的问题仍需展开进一步研究。而基础滑移隔震系统的限位装置不仅要考虑过大滑移限位,还要考虑对倾覆力矩及竖向地震的抵抗作用,并且要考虑减小滑移过程中的阻力,滑移隔震系统的限位措施仍是今后需要进一步研究的关键技术问题。

(2) 橡胶垫层基础隔震系统

橡胶支座已有 30 多年的发展,理论研究逐渐趋于成熟,其种类也有很多,但由于造价较高、施工相对复杂限制了其在村镇建筑中的应用。因此,还应进一步展开低成本橡胶隔震支座的研究,其中开发价格低廉的新型材料代替支座中的钢板是一种较有前景的研究思路。

(3) 复合基础隔震系统

复合基础隔震系统充分结合了前面两种隔震系统的优势,同时也改善了采用单一隔震技术的弊端,大大地提高了建筑结构的抗震能力。但如何有效利用不同材料的特性,控制隔震层的稳定性将是这类隔震系统的技术难点。

综上所述,不同类别的基础隔震技术均可有效提高村镇建筑的抗震能力,但针对其不足的方面还应展开进一步的研究。在实际工程中,结构的隔震设计因建筑物的情况不同而不同,可以参照上述内容在实际应用时进行有针对性的设计,从而提高村镇建筑结构的抗震性能,保证村镇建筑的抗震安全。

参考文献(References):

- [1] 郑士举,王卓琳,蒋利学,等. 既有村镇住宅结构现状调查分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(S1): 1229-1234
Zheng Shi-ju, Wang Zhuo-lin, Jiang Li-xue, et al. Status survey on the existing rural residential construction [J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 1229-1234(in Chinese)
- [2] 王毅红,卜永红,韩岗,等. 中国村镇民居的建造习惯与抗震性能评析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011,(03): 60-67
Wang Yi-hong, Bu Yong-hong, Han Gang, et al. Assessing on construction habituation and seismic behavior of village and town buildings in China [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011,(03): 60-67(in Chinese)
- [3] 卜长明. 村镇建筑简易消能减震技术抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012
Bu Chang-ming. Research on seismic behavior of simple energy dissipation technology for masonry structures in rural regions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012(in Chinese)
- [4] 袁康. 砂垫层—基础滑移复合隔震村镇建筑抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017
Yuan Kang. Research on seismic behavior of sand cushion-base sliding composite isolation rural buildings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese)
- [5] 王毅红,韩岗,卜永红,等. 村镇既有砌体结构民居建筑抗震性能现状分析[J]. 建筑结构, 2010,(12): 101-104
Wang Yi-hong, Han Gang, Bu Yong-hong, et al. Existing research on seismic behavior of masonry structure in village buildings [J]. Building Structure, 2010,(12): 101-104(in Chinese)
- [6] 姜旋. 既有村镇建筑的抗震加固对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2014
Jiang Xuan. Research on seismic behavior of sand cushion-base sliding composite isolation rural buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese)
- [7] 李钢,刘晓宇,李宏男. 汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(05): 724-730
Li Gang, Liu Xiao-yu, Li Hong-nan. Investigation and analysis of earthquake damage to buildings in towns and villages in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(05): 724-730(in Chinese)
- [8] 王鲁华. 村镇建筑抗震能力及实用抗震技术分析与研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017
Wang Lu-hua. Analysis of rural area housing seismic capacity and seismic techniques [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017(in Chinese)
- [9] 赵少伟,窦远明,郭蓉,等. 基础下砂垫层隔震性能振动台试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2005,(03): 92-97
Zhao Shao-wei, Dou Yuan-ming, Guo Rong, et al. An experimental study of isolating properties of sand cushion

- under the foundation by shaking table [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2005, (03): 92-97 (in Chinese)
- [10] 窦远明, 刘晓立, 赵少伟, 等. 砂垫层隔震性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005, (01): 125-128
Dou Yuan-ming, Liu Xiao-li, Zhao Shao-wei, et al. Experimental study on isolation performance of sand cushion [J]. Journal of Building Structures, 2005, (01): 125-128 (in Chinese)
- [11] M S. The reinforced cut wall (RCW): A low-cost base dissipator for masonry buildings [J]. Earthquake Spectra. 2006, 22(2): 533-554
- [12] 刘开康. 村镇土坯结构摩擦滑移隔震技术研究 [D]. 大连理工大学, 2010
Liu Kai-kang. Research on friction sliding isolation technology for adobe structure in rural regions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese)
- [13] 王海刚. 村镇建筑砂垫层摩擦滑移隔震性能试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
Wang Hai-gang. Experimental research on frictional sliding properties of rural isolated structure of sand cushion [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese)
- [14] 史庆轩, 戎羽中, 王秋维, 等. 村镇建筑砌体结构滑移隔震性能研究 [J]. 震灾防御技术, 2014, (04): 891-897
Shi Qing-xuan, Rong Yu-zhong, Wang Qiu-wei, et al. Study on sliding isolation performance of masonry structure of rural buildings [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, (04): 891-897 (in Chinese)
- [15] 李英民, 刘流. 村镇建筑简易滑移隔震技术抗震设防目标及采取措施 [J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 24-29
Li Ying-ming, Liu Liu. The seismic fortification criterion and technical measures of simple sliding seismic isolation technique for rural buildings [J]. Industrial Architecture, 2015, 45(11): 24-29 (in Chinese)
- [16] 郭军林, 袁康, 李英民. 改性砂浆-橡胶束滑移隔震墙试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, (S2): 230-236
Guo Jun-lin, Yuan Kang, Li Ying-ming. Experimental research on sliding isolation walls using modified mortar and rubber beam [J]. Journal of Building Structure, 2015, (S2): 230-236 (in Chinese)
- [17] 田弯. 高烈度寒冷地区村镇建筑简易复合隔震技术数值分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015
Tian Wan. Numerical analysis of simple composite isolation technology for rural masonry buildings in cold areas with high seismic intensity [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015
- [18] 姬淑艳, 王文东, 田弯, 等. 高烈度寒冷地区复合隔震村镇建筑地震反应特征分析 [J]. 工业建筑, 2015, (11): 35-39
Ji Shu-yan, Wang Wen-dong, Tian Wan, et al. Characteristic analysis for seismic response of rural buildings with composite isolated structure in cold areas with high seismic intensity [J]. Industrial Architecture, 2015, (11): 35-39 (in Chinese)
- [19] 王飞, 袁康, 郭军林, 等. 简易滑移隔震技术在村镇建筑中的应用 [J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 122-128
Wang Fei, Yuan Kang, Guo Jun-lin, et al. Application of simple sliding seismic isolation technology in rural buildings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 122-128 (in Chinese)
- [20] Ahmad S, Ghani F, Raghieb Adil M. Seismic friction base isolation performance using demolished waste in masonry housing [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 146-152
- [21] 赵桂峰, 马玉宏. 村镇建筑带限位装置摩擦隔震体系的参数影响研究 [J]. 振动与冲击, 2011, (11): 148-152
Zhao Gui-feng, Ma Yu-hong. Parameters study of rural buildings structures supported on slide-limited friction base isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, (11): 148-152 (in Chinese)
- [22] Nanda R P, Agarwal P, Shrikhande M. Base isolation by geosynthetic for brick masonry buildings [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 18(6): 903-910
- [23] Jayalekshmi B R S R V K. Shake table tests to investigate the efficiency of geomembranes for soil isolation in a space frame with isolated footing [J]. Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications, 2011, 2: 834-838
- [24] 黄襄云, 王清敏, 丰定国, 等. 球支撑滚动隔震体系试验研究 [J]. 华南建设学院西院学报, 1999, (03): 11-16
Huang Xiang-yun, Wang Qing-min, Feng Ding-guo, et al. Experimental study on ball supported rolling isolation system [J]. Journal of South China Construction University, 1999, (03): 11-16 (in Chinese)

- [25] 史红福. 滚动基础隔震结构的动力特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
Shi Hong-fu. Study on dynamic characteristics of rolling foundation isolation structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005 (in Chinese)
- [26] 许富华. 复合式基础隔震系统研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008
Xu Fu-hua. Research on composite base isolating earthquake system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008 (in Chinese)
- [27] Turer A, özden B. Seismic base isolation using low-cost Scrap Tire Pads (STP) [J]. Materials and Structures. 2008, 41(5): 891-908
- [28] Tsang H H. Seismic isolation by rubber - soil mixtures for developing countries [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(2): 283-303
- [29] 陈文, 熊峰. 利用废旧轮胎的农居砌体结构房屋隔震系统 [J]. 四川建筑, 2012, 32(1): 113-115
Chen Wen, Xiong Feng. Isolation system of building with building masonry structure using waste tires [J]. Sichuan Architecture, 2012, 32(1): 113-115 (in Chinese)
- [30] 王毅红, 张又超, 樊琨, 等. 村镇砌体结构叠层橡胶支座隔震试验研究 [J]. 工程抗震与加固改造. 2014, 36(2): 15-20
Wang Yi-hong, Zhang You-chao, Fan Kun, et al. Isolation performance test of laminated rubber isolator for rural masonry structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting. 2014, 36(2): 15-20 (in Chinese)
- [31] 靳娜. 低矮砌体结构橡胶隔震支座力学性能试验及构造研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016
Jin Na. Experimental research on mechanical properties of rubber isolation bearing and construction to rural low-rise masonry structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016 (in Chinese)
- [32] 郑瑶, 侍雪雷, 王毅红, 等. 村镇隔震砌体结构振动台试验方案设计研究 [J]. 震灾防御技术, 2016, 11(2): 297-305
Zheng Yao, Shi Xue-lei, Wang Yi-hong, et al. Design and research of vibration table test scheme for isolated masonry structure of villages and towns [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(2): 297-305
- [33] Kelly J M. Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators [J]. Journal Seismol Earthquake Engineering. 1999, 2(1): 19-34
- [34] Tomažević M, Klemenc I, Weiss P. Seismic upgrading of old masonry buildings by seismic isolation and CFRP laminates: a shaking-table study of reduced scale models [J]. Bulletin of Earthquake Engineering. 2009, 7(1): 293-321
- [35] 曹京源. 村镇房屋低造价隔震新技术的研究 [D]. 广州: 广州大学, 2011
Cao Jing-yuan. Analysis on the new low-cost isolation technical for rural housing [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011 (in Chinese)
- [36] 黄襄云, 周福霖, 曹京源, 等. 纤维橡胶隔震结构模拟地震振动台试验研究及仿真分析 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2010, 09(5): 21-26
Huang Xiang-yun, Zhou Fu-lin, Cao Jing-yuan, et al. Experimental research and simulation analysis of simulated seismic shaking table for fiber rubber isolated structures [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition). 2010, 09(5): 21-26 (in Chinese)
- [37] 谭平, 徐凯, 刘晗, 等. 村镇建筑新型简易隔震技术研究 [J]. 工程力学, 2017, 34(S1): 233-238
Tan Ping, Xu Kai, Liu Han, et al. Study of new seismic isolation technology for rural buildings [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S1): 233-238
- [38] 徐凯. 新型简易隔震技术理论与试验研究 [D]. 广州: 广州大学, 2017
Xu Kai. Theoretical and experimental study on new simple isolation technology [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017 (in Chinese)
- [39] 曹万林, 叶伟, 张玉山, 等. 玻璃珠-石墨基础滑移隔震砌体结构工作性能试验研究 [J]. 自然灾害学报, 2015, (05): 37-46
Cao Wan-lin, Ye Wei, Zhang Yu-shan, et al. Experimental study on working performance of the base sliding isolated masonry structure with glass beads - graphite layer [J]. Journal of Natural Disasters, 2015 (05): 37-46 (in Chinese)
- [40] 曹万林, 周中一, 王卿, 等. 农村房屋新型隔震与抗震砌体结构振动台试验研究 [J]. 振动与冲击, 2011 (11): 209-213
Cao Wan-lin, Zhu Zhong-yi, Wang Qing, et al. Experimental study on base vibration isolation and anti-seismic masonry structure in rural areas by shaking table

(下转第 136 页)

参考文献(References):

- [1] 王元清,王喆,石永久,袁英战. 门式刚架轻型房屋钢结构厂房的加固设计[J]. 工业建筑, 2001, (08): 60-62
Wang Yuan-qing, Wang Zhe, Shi Yong-jiu, Yuan Ying-zhan. Reinforcement design of steel structure workshop of portal-type rigid frame light house [J]. Industrial Construction, 2001, (08): 60-62(in Chinese)
- [2] 刘瑛,马乐为. 粘钢加固节点的足尺模型试验分析[J]. 工程抗震, 1999, (03): 26-29
Liu Ying, Ma Le-wei. Full-scale model test analysis of steel-reinforced joints [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999, (03): 26-29(in Chinese)
- [3] Teixeira de Freitas, S. Steel plate reinforcement of orthotropic bridge decks [D]. Delft: University of Technology, 2012
- [4] 赵士永,付素娟. 粘钢加固工字形钢梁抗剪承载力的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2012, (2): 40-42
Zhao Shi-yong, Fu Su-juan. Experimental study on shear capacity of I-shaped steel beams strengthened with sticky steel [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2012 (2): 40-42(in Chinese)
- [5] 赵士永,褚少辉,付素娟. 粘钢加固钢梁的有限元分析[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 15-20
Zhao Shi-yong, Chu Shao-hui, Fu Su-juan. Finite element analysis of steel beams strengthened with bonded steel [J]. North China Earthquake Sciences, 2017, 35 (2): 15-20(in Chinese)
- [6] GB 51022-2015, 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范[S]
GB 51022 - 2015, Technical specification for steel structure of portal rigid frame light house [S] (in Chinese)
- [7] JG/T 271-2010, 粘钢加固用建筑结构胶[S]
JG/T 271-2010, Building structural adhesive for steel reinforcement [S] (in Chinese)
- [8] 徐佳. 建筑钢结构粘结连接节点的试验研究与有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
Xu Jia. Experimental research and finite element analysis of bonded joints of building steel structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011(in Chinese)
- [作者简介] 赵更歧(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构加固技术研究
-
- (上接第 95 页)
- test [J]. Vibration and Impact, 2011, (11): 209-213 (in Chinese)
- [41] 尚守平, 郜志远, 徐梅芳. 新型隔震墩在农村民居中的应用[J]. 施工技术, 2011, (06): 58-61
Shang Shou-ping, Gao Zhi-yuan, Xu Mei-fang. Application of a new type of seismic isolation pier in rural residential buildings [J]. Construction Technology, 2011, (06): 58-61
- [42] 尚守平, 姚菲, 刘可. 一种新型隔震层的构造及其振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, (02): 36-41
Shang Shou-ping, Yao Fei, Liu Ke. Study of the structure of a new type of isolation layer and shaking table test [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, (02): 36-41
- [43] 崔向龙. 一种新型三维隔震墩的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016
Cui Xiang-long. Research on isolation performance of a new three-dimensional isolation pier [D]. Changsha: Hunan University, 2016

[作者简介] 李雅静(1999-), 女, 在读本科生