

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.005

新型减震填充墙(板)抗震性能、机理及应用研究进展*

周云¹, 陈章彦¹, 郭阳照², 张超¹

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610081)

摘要:为改善普通填充墙(板)结构的抗震性能,基于黏弹性阻尼器的原理和构造,提出一种构造简单、减震机理明确、具有自主知识产权的新型减震填充墙(板)。本文介绍减震填充墙(板)的构造及工作原理;给出适合构筑减震层的材料及其滞回性能;对减震填充墙(板)单元、带减震填充墙(板)平面框架进行性能试验,揭示减震填充墙(板)通过相邻砌体(墙板)单元间的相对运动迫使减震层发生剪切滞回变形、耗散地震输入能量的减震机理,建立减震填充墙(板)平面内“双斜撑”力学模型;通过带减震填充墙(板)三维框架的动力时程分析,验证地震下减震填充墙(板)可通过削减墙体自身对主体结构的刚度效应,显著降低对主体结构动力特性及抗震性能的影响,保护墙体不破坏的有效性;对减震填充墙(板)的平面外性能进行试验及分析,揭示减震填充墙(板)“拱承载机制”的平面外工作机理及“四铰拱”的破坏模式;介绍减震填充墙(板)在楼梯间、(震损)加固建筑等应用场景中的原理及构造;给出减震填充墙(板)今后研究的问题及方向。

关键词: 填充墙; 减震填充墙; 装配式减震墙板; 抗震性能; 震损加固; 楼梯间

中图分类号: TU375.4; TU352.1; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0753-15

Advances on the Seismic Performance, Mechanism and Application of Innovative Damped Infilled Wall/Wallboard

ZHOU Yun¹, CHEN Zhangyan¹, GUO Yangzhao², ZHANG Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of conventional infilled masonry wall, an innovative configuration named damped infilled wall/wallboard (DIW) was proposed by introducing the principle of viscoelastic damper. DIW has a simple construction, explicit working mechanism and independent intellectual property right. In this paper, the configuration and working mechanism of DIW was introduced. The material suitable for damping layer construction and its corresponding hysteretic performance were given. Seismic performance tests were carried out on DIW unit as well as plane frame structures with DIW. The in-plane working mechanism that the shear hysteretic deformation

* 收稿日期:2020-08-24;修回日期:2020-11-30

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0703600)、国家自然科学基金项目(51178128;51478133;51508117)、广东省自然科学基金(2016A030310259)资助

作者简介:周云(1965—),男,教授,博导,博士。主要从事结构减隔震方面的研究。E-mail:zhydxs@163.com

which is caused by relative movement between adjacent subpanel of DIW dissipates the input seismic energy was revealed. The double bracing macro-modelling method was proposed. The proposed model was used in the time-history analysis of a 3D frame structure with DIW. Results show that DIW is able to significantly reduce the influence on the dynamic characteristic and seismic performance of the main structures, and to protect the wall from suffering damages through decreasing the stiffness effect of wall/wallboard on structure. Out-of-plane performance of DIW was also studied by tests. The results reveal that the out-of-plane mechanism is the arching mechanism and the failure mode is four-hinge arching. The problems and directions that need to be further studied were given.

Keywords: infilled masonry wall; damped infilled wall; precast damping wallboard; seismic performance; reinforcement of damaged structure; staircase

引言

填充墙是一种常见的非结构构件,承担着空间分隔、隔音、隔热等重要的建筑功能。在框架设计中,框架-填充墙间的相互作用往往被忽略,未能准确评估填充墙的刚度效应与约束效应对框架主体结构及构件抗震性能的影响,致使主体结构或构件在地震中出现了震害,如“短柱破坏”“薄弱层破坏”等。由于地震中填充墙实际参与了主体结构的受力,墙体自身损坏严重,增加了震后修复成本^[1-4]。

针对框架填充墙的震害问题,国内外学者一方面从框架填充墙工作机理出发,研究填充墙对框架结构抗震性能的影响^[5-6],提出考虑填充墙影响的框架结构分析和设计方法^[7-8],并给出相应的规范条文^[9];另一方面,在厘清填充墙机理及其对框架结构影响的基础上,以削弱填充墙自身刚度效应、填充墙-框架间相互作用为落脚点,提出可提高框架填充墙结构抗震性能的新型填充墙构造^[10-19]。上述新型填充墙构造可有效提高框架填充墙结构的抗震性能,但仍然存在构造复杂、造价较高、平面外稳定性缺乏等问题。

周云等^[20-21]将耗能减震技术的原理移植于填充墙中,提出了一种具有自主知识产权的新型减震填充墙(板)。本文详细介绍新型减震填充墙(板)的构造与原理,从减震层、减震填充墙(板)单元、带减震填充墙(板)的平面框架以及带减震填充墙(板)的框架整体结构4个层面总结已有的研究成果,揭示其工作机理。同时介绍减震填充墙(板)的主要

应用场景、存在问题及下一步的研究方向。

1 减震填充墙(板)的构造与原理

减震填充墙的基本构造如图1所示,将填充墙(板)分割为若干水平分块(通常划分为3~4个分块),各分块称为砌体单元。在各砌体单元之间、砌体单元与梁之间设置减震层。砌体单元一侧与柱固结,另一侧与另一柱间预留缝隙。在地震作用下,相邻砌体单元之间产生相对位移,迫使减震层发生剪切滞回变形(图2),以达到通过削减墙体的刚度效应、耗散一定的地震能量,减小主体结构的地震反应,保护墙体不破坏的目的^[21-23]。

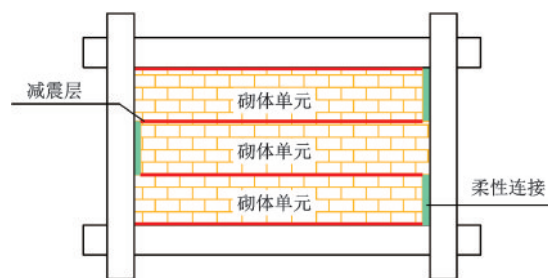


图1 减震填充墙基本构造

Fig.1 Configuration of damped infilled wall (wallboard)

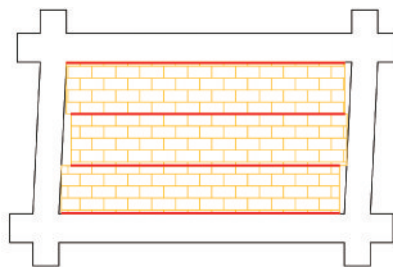


图2 减震填充墙变形模式

Fig.2 Deformation mode of damped infilled wall

针对预制装配式结构,提出装配式减震墙板^[24],如图3所示。装配式减震墙板的主要特点在于墙体先预制后拼装,可根据装配方式的不同,分为横条型和竖向型两种型式^[24],如图3(a)和(b)所示。图中,两种不同型式的装配式减震墙板均通过各预制墙板内置的钢筋之间、内置钢筋与框架柱预埋钢筋之间的焊接,来增强装配式减震墙板的整体性,提高装配式减震墙板-框架协同工作的性能。现场拼装装配式减震墙板时,遵循先下后上的拼装顺序,拼装完成后对预留缝隙进行填缝处理。

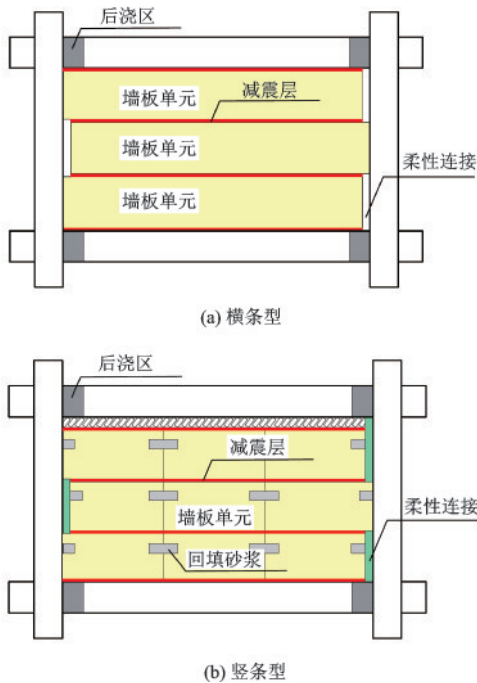


图3 装配式减震墙板构造

Fig.3 Configuration of precast damping wallboard

2 减震层的选材及性能

减震层是减震填充墙的核心部件。它一方面应具有一定的竖向刚度和竖向承载能力,以满足支撑上方墙体的承重要求;另一方面应具有一定的耗能能力以及较墙体剪切刚度小的特性,以实现水平荷载作用下砌体(墙板)单元相对错动、减震填充墙(板)的剪切位移集中于减震层,迫使减震层剪切滞回耗能工作,达到减轻墙体破坏的目标。在实现上述性能要求的同时,减震层的构造也应简便,方便施工。

橡胶类材料(高阻尼橡胶)是黏弹性阻尼器的构成材料。但该材料制作工艺较为繁杂、价格较

高,用于构筑减震层将提高减震填充墙(板)的成本,不利于工程推广。相比之下,板材或卷材类材料是常用的建筑材料,具有取材容易、价格便宜、方便裁剪等优点。

为优选板材或卷材类材料^[25],笔者对比研究了铁丝网-沥青油膏、橡塑板材、油毡、EVA板材以及SBS沥青卷材(图4)的剪切滞回性能以及竖向刚度。其中,SBS沥青卷材具有比另外4种材料更好的水平剪切变形能力、滞回性能(图5)以及竖向刚度,是较优的材料。进一步对卷材厚度、法向压应力、加载频率对SBS沥青卷材剪切刚度、耗能性能的影响进行试验研究^[26]。试验结果表明,SBS沥青卷材是一种具有速度相关性的材料,法向压应力、加载频率与剪切刚度、耗能量呈正相关关系;而卷材厚度则与剪切刚度、耗能量呈负相关关系;多次循环荷载作用下,SBS沥青卷材的刚度和强度下降不明显,耐疲劳性能良好,如图6所示。

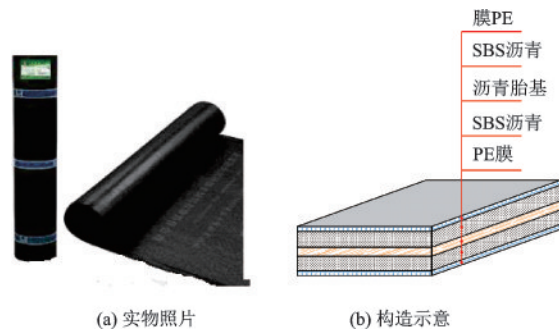


图4 SBS沥青卷材

Fig.4 SBS modified asphalt membrane

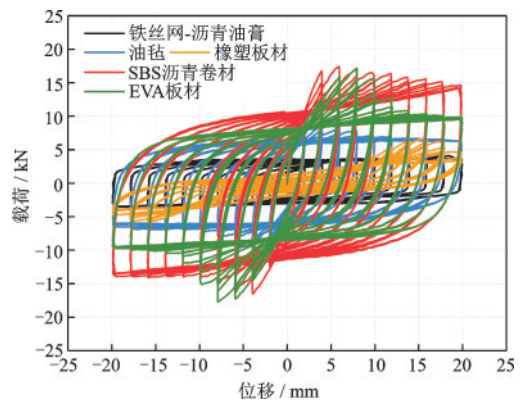


图5 不同板材、卷材剪切滞回曲线对比

Fig.5 Comparison of various membranes' shear hysteretic curves

与板材、卷材类减震层通过自身剪切滞回变形耗散能量不同,砂浆类材料构筑的减震层是通过其

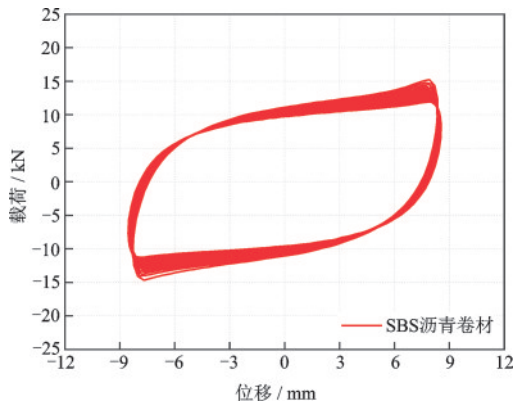


图6 SBS沥青卷材的疲劳性能

Fig.6 Fatigue performance of SBS modified asphalt membrane

内部形成滑移面后的摩擦行为耗散能量,降低墙体刚度的摩擦型减震层^[27]。针对该方案,研究普通低强度砂浆(简称LSM)、沥青砂浆(简称AM)、沥青橡胶粉砂浆(简称AWM)以及掺入聚合物纤维的苯丙聚丙烯砂浆(简称SPPM)、苯丙橡胶粉砂浆(简称ASRM)的剪切滞回性能(图7)。与低强度砂浆相比,掺入有机混合物的砂浆需拌合其他材料,会增加一定的施工难度,且这5种砂浆材料的滞回性能差别较小,可见低强度砂浆是构筑摩擦型减震层的较优材料。

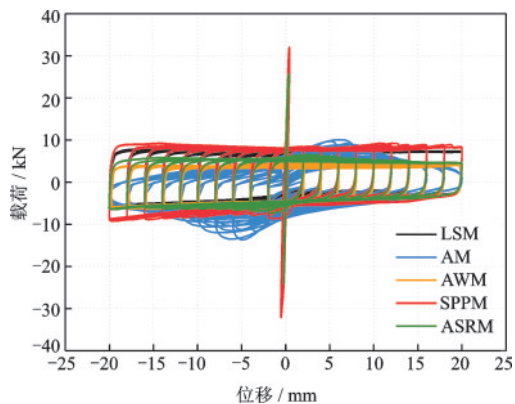


图7 不同砂浆类材料的滞回曲线对比

Fig.7 Comparison of various mortars' hysteretic curves

减震层与相邻砌体(墙板)单元的粘结是影响减震层工作机制的主要因素。对于使用砂浆类材料构筑减震层的减震填充墙(板),减震层的构筑方法与往常填充墙砂浆的砌筑方法一致,不需专门考虑粘结砂浆类减震层与砖块的粘结方案。但是,对于使用卷材类材料构筑的减震层,由于需要充分利用减震层的剪切变形,因此需考虑减震层-相邻砌体(墙板)单元之间的粘结。减震层与相邻砌体(墙

板)单元之间的粘结方案类型分别有:直接使用胶粘材料粘结卷材与相邻砌体(墙板)^[28](图8(a));或先将减震层与部分相邻砌体(墙板)单元预制,然后再与剩下的相邻砌体(墙板)单元通过砂浆粘结^[29](图8(b))。



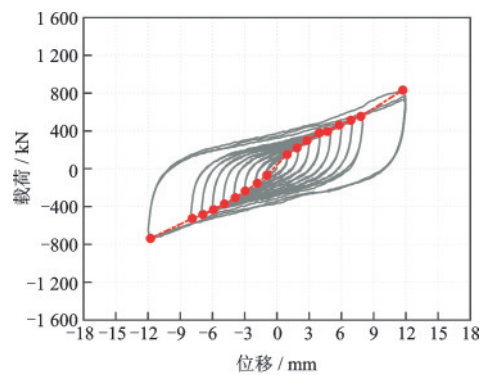
(a) 冷黏法直接粘贴

(b) 预制减震层

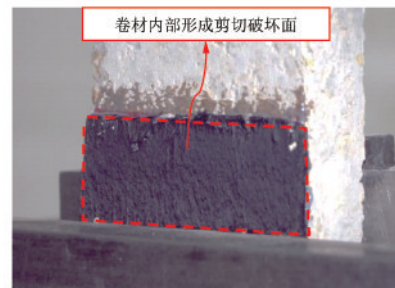
图8 减震层与相邻砌体(墙板)单元的粘结示意

Fig.8 Method to bond method between damping layer and the adjacent masonry or wallboard unit

早期研究中多使用万能胶(氯丁胶)作为胶粘材料^[28-29],但在正常工作中,万能胶(氯丁胶)不能避免减震层-相邻砌体(墙板)单元间粘结界面的提前失效的问题。为此提出使用自粘聚合物改性沥青卷材搭配复合材料加固中常用的环氧树脂胶的改进方案。该方案的减震层荷载在预期位移下荷载无退化,性能表现稳定(图9(a));在剪切位移70 mm时粘结界面不失效(图9(b))。



(a) 滞回曲线



(b) 破坏特征

图9 卷材-砖块粘结界面改进方案试验结果

Fig.9 Hysteretic curve of improvement material and glue for making damping layer

减震层材料的耐久性以及用于粘结减震层与墙(板)单元胶粘材料的耐久性是影响减震层剪切滞回性能的重要因素。具有良好耐久性的减震层是确保减震填充墙(板)在建筑生命周期内正常工作的关键。国内外对减震层材料以胶粘材料的耐久性进行了研究^[30-31],但大部分集中于材料基本力学性能,关于耐久性对减震层剪切滞回性能影响研究欠缺。另一方面,材料的产品型号众多,配方不尽相同,也给研究的全面性提出更高要求。为进一步完善材料耐久性问题,笔者课题组已着手准备关于减震层材料与胶粘材料的耐久性及其对减震层剪切滞回性能的影响研究。

3 减震填充墙单元性能试验研究

对减震填充墙单元(图10)共进行2个批次的低周往复试验。

第一批试验由1个普通填充墙单元(编号CIWU)、SBS沥青卷材为减震层的3个减震填充墙单元试件组成,各试件间的区别在于卷材的层数,层数依次为1层(编号DIWUM-L1)、2层(编号DIWUM-L2)以及4层(编号DIWUM-L4)^[32]。

第二批试验是以低强度砂浆为减震层的3个减震填充墙单元试件,各试件的区别在于使用的砖块类型不同,依次为小型实心混凝土砌块(试件编号DIWUF-SC)、灰砂砌块(试件编号DIWUF-LS)和加气混凝土轻质砌块(试件编号DIWUF-CL)^[33]。试验结果表明,采用SBS沥青卷材或低强度砂浆构筑减震层均可实现剪切位移集中减震层、砌体单元平移的预期机制(图11)。使用上述两种材料构筑减震层的减震填充墙单元滞回曲线均比普通填充墙单元滞回曲线饱满(图12~13)。使用SBS沥青卷材为减震层时,叠合2层SBS沥青卷材作为减震层的方案是较优方案。

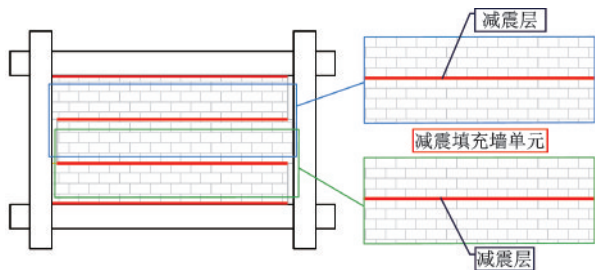


图10 减震填充墙单元示意

Fig.10 Schematic diagram of damped infilled wall unit



(a) 正向加载

(b) 负向加载

图11 低周往复荷载下减震填充墙砌体单元的相对运动

Fig.11 Relative movement of masonry unit in DIW under cyclic loading

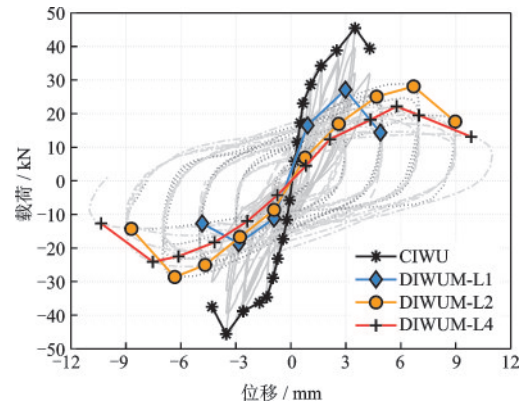


图12 SBS沥青卷材为减震层的减震填充墙单元的滞回曲线

Fig.12 Hysteretic curves of the damped infilled wall unit with damping layer made by SBS modified asphalt membrane

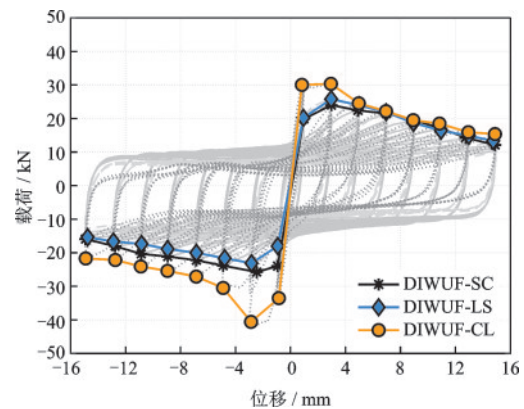


图13 低强度砂浆为减震层的减震填充墙单元的滞回曲线

Fig.13 Hysteretic curves of the damped infilled wall unit with damping layer made by low-strength mortar

4 减震填充墙(板)框架试验研究

4.1 减震填充墙(板)框架的抗震性能

为揭示减震填充墙(板)的工作机理和减震性能,先后对带减震填充墙的单层单跨混凝土平面框架、带横条型装配式减震墙板的单层单跨与双层双

跨混凝土平面框架、带竖条型装配式减震墙板的单层跨混凝土平面框架以及带装配式减震墙板单层跨平面钢框架进行系列的拟静力试验^[23,34-36]。

综合混凝土框架内设置减震填充墙以及装配式减震墙板的试验结果^[34-36],可得出以下结论:(1)使用SBS沥青卷材或低强度砂浆构筑减震层的减震填充墙或装配式减震墙板,均可实现相邻砌体(墙板)单元相对运动(图14),墙体剪切变形集中于减震层,减震层发生剪切滞回变形耗散能量;(2)由于预期工作机制的形成,减震填充墙(板)的刚度效应较普通填充墙大为削弱,剪切变形能力也更高(图15~16);(3)减震填充墙避免了普通填充墙(板)刚度效应对框架梁、柱的不利影响(如柱剪切破坏)(图17);(4)由于减震填充墙自身刚度降低,剪切变形能力增加,墙体自身的破坏程度较普通填充墙大为降低(图18)。

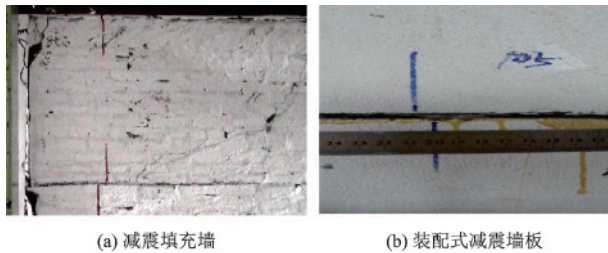


Fig.14 Relative movement of adjacent masonry units or wallboard

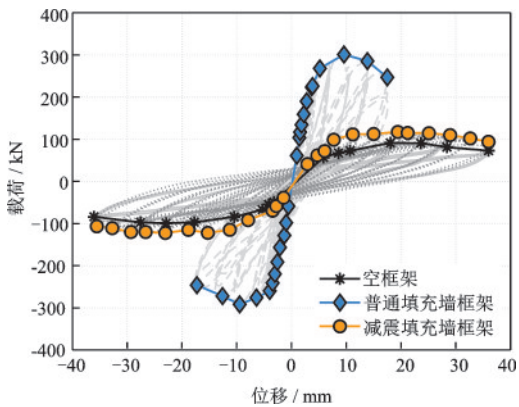


图15 减震填充墙与普通填充墙、空框架的滞回曲线对比
Fig.15 Comparison on the hysteretic curves of damped infilled masonry wall, infilled masonry wall and bare frame

通过钢框架内设置减震墙板的拟静力试验结果^[36](图19~20)可知,减震墙板实现了预期工作

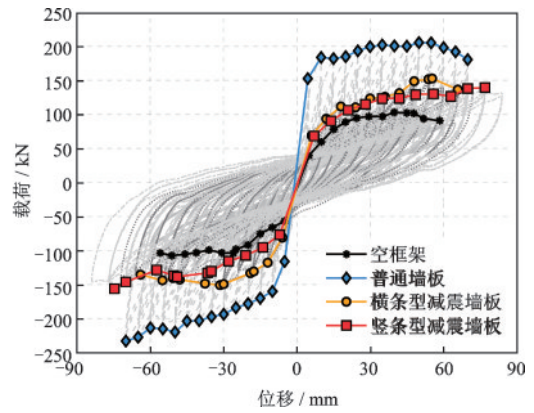


图16 装配式减震墙板框架与普通装配式墙板框架、装配式空框架的滞回曲线对比
Fig.16 Comparison on the hysteretic curves of precast damping wallboard frame, precast wallboard frame and precast bare frame

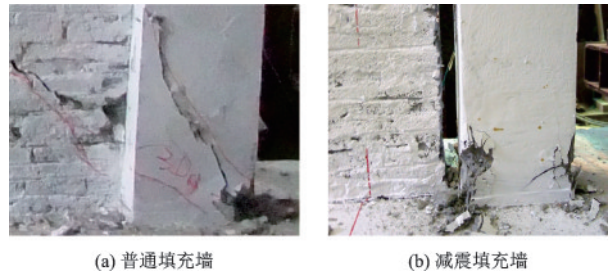


图17 减震填充墙对框架柱端部剪切裂缝的改善
Fig.17 Mitigation of shear damage at the end of column due to damped infill wall

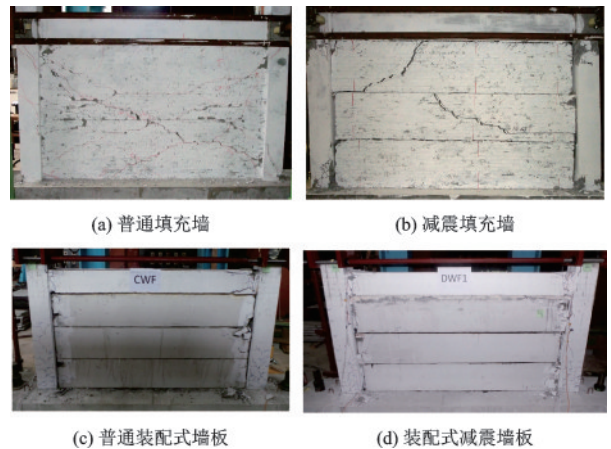


图18 混凝土框架减震填充墙(板)的破坏特征对比
Fig.18 Comparison of failure mode of damped infilled wall/wallboard surrounded by RC frame

机制,即通过相邻减震墙板单元的相对运动,使减震层产生摩擦滑移耗能,从而取得如下减震效果:(1)提高了预制墙板的变形能力,在适应钢结构较混凝土结构更大层间位移的同时确保墙板自身不



(a) 普通墙板钢框架 (b) 减震墙板钢框架

图 19 钢框架减震填充墙(板)的破坏特征对比

Fig.19 Comparison of failure mode of damped infilled wall/wallboard surrounded by steel frame

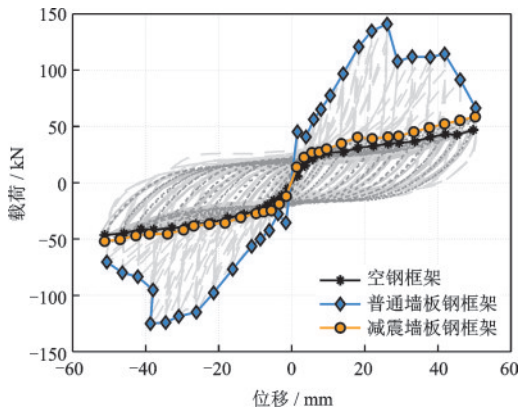


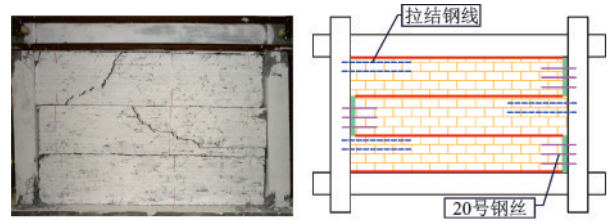
图 20 减震墙板钢框架、普通墙板钢框架以及钢框架的滞回曲线对比

Fig.20 Comparison of hysteretic curves between damping wall-fabricated steel frame, common wall-fabricated steel frame and bare fabricated steel frame

发生破坏;(2)有效降低了普通预制墙板对钢框架的附加刚度效应,达到不改变钢框架梁、柱构件延性工作机制,不影响钢框架结构抗震性能的目标;(3)减震层可耗散一定的输入能量,提高整体结构的耗能能力,改善钢框架结构的抗震性能。

4.2 减震填充墙(板)的改进措施

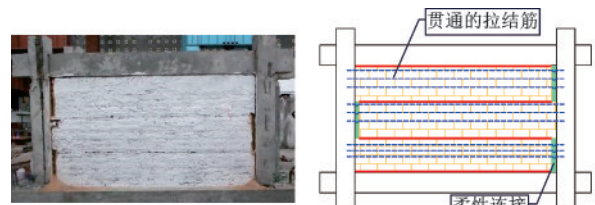
针对减震填充墙(板)在试验中出现的问题,提出了相应的改进措施。对于减震填充墙,砌体单元容易形成贯通裂缝(图 21(a)),这主要是由于原方案中砌体单元内拉结筋未贯通(图 21(b)),往复荷载下减震填充墙对砌体单元抗拉能力需求超过砌体单元自身抗拉强度所致。为改善该问题,文献[34]将原构造中深入墙体一定深度的拉结钢筋通长布置,增加砌体单元的整体性以及抗拉能力,有效解决了贯通裂缝的问题(图 22(a,b))。同时,将柔性连接端的拉结筋设置成弧形(图 22(c)),以避



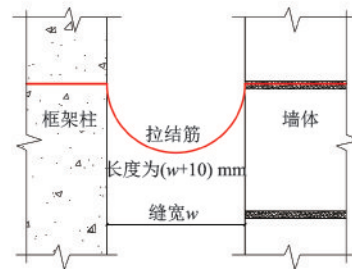
(a) 破坏模式 (b) 拉结筋未贯通的构造

图 21 减震填充墙改进前的构造与破坏模式

Fig.21 Configuration of damped infilled wall before improvement



(a) 破坏模式 (b) 拉结筋未贯通的构造



(c) 柔性连接处拉结筋弧状处理

图 22 减震填充墙的改进措施

Fig.22 Improved configuration of damped infilled wall after improvement

免减震填充墙在正常工作状态下,原外露于预留缝隙的直拉结筋与框架柱相互作用可能带来的负面影响。

各预制构件间的连接是装配式建筑重要问题。对于装配式减震墙板,合理、可靠的墙板-框架连接构造应具有保证装配式减震墙板平面外稳定的同时不妨碍其平面内工作机制的实现,且便于施工的特点。研究表明^[37-39],装配式减震墙板的墙-框连接构造可采用如图 23 所示的形式,使用固定于框架柱的双 L 形或 U 形卡件“夹”住墙板,用以保证墙板的平面外稳定性。减震墙板与混凝土框架之间采用柔性填缝材料,削减框架-减震墙板之间的相互作用,避免了墙板与框架的直接接触,进一步保护墙板。

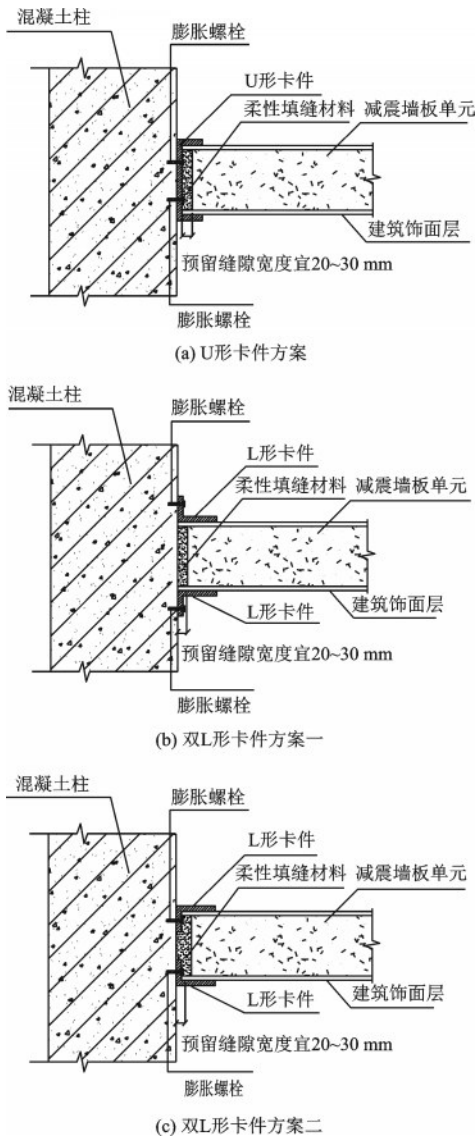


图 23 装配式减震墙板-框架连接构造
Fig.23 Configuration of connection between damped wall-board and frame

5 减震填充墙(板)框架整体结构分析

5.1 工作机理与力学模型

通过分析减震填充墙的墙-框相互作用、抗侧力与耗能机理、墙体对框架梁的作用、填缝措施的影响,可知:(1)砌体单元与框架柱的相互作用点在固定连接端的上下侧转移;(2)水平往复荷载下各砌体单元作近似刚体运动;(3)减震填充墙的耗能主要依靠中间两层减震层;(4)减震层较低的刚度可减小墙-梁之间的相互作用;(5)填缝构造措施宜采用刚度小的柔性材料或强度低的水泥砂浆。结合

有限元对减震填充墙应力分布的分析结果,提出双斜撑形式的简化力学模型^[40],如图 24 所示。该力学模型采用由弹簧元件和黏壶元件并联集成的 SDE 单元表征减震填充墙(板)对主体结构的刚度以及耗能贡献。SDE 单元通过弹性杆件与主体结构连接,连接处的力学行为使用铰接处理。

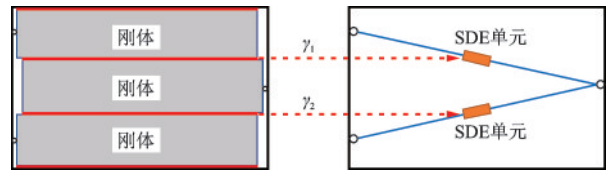


图 24 减震填充墙双斜撑力学模型
Fig.24 Double bracing model of damped infilled wall

5.2 减震填充墙(板)框架结构动力分析

基于该双斜撑模型,建立动力弹塑性模型,对空框架结构、带普通填充墙框架结构、带减震填充墙框架结构、带架空层的减震填充墙框架结构以及带架空层的普通填充墙框架结构进行对比分析^[41-42]。结果表明,由于减震填充墙对框架结构的刚度贡献明显小于普通填充墙,可使得:(1)减震填充墙框架结构的周期折减幅度小于普通填充墙框架结构;(2)减震填充墙在框架结构中竖向不连续布置引起的刚度突变不明显,可有效解决普通填充墙框架结构因架空层而发生的薄弱层破坏(图 25);(3)减震填充墙在平面布置不均匀时,因墙体的刚度效应对结构主轴方向动力特性影响大为降低(表 1);(4)可避免普通填充墙对框架结构梁、柱的不利影响(图 26)。可见,减震填充墙通过减震层的剪切变形耗散结构的部分能量,减小结构构件的非线性耗能,减轻结构构件在地震中的损伤。

6 减震填充墙(板)的平面外性能

地震中普通填充墙局部甚至整体的平面外倒塌具有突然性,墙体的塌落极易给建筑物内的人员生命及财产安全带来威胁(图 27(a))^[2-3,43]。填充墙平面外损伤甚至倒塌现象不仅是由墙体平面外方向的地震作用,也可能由墙体平面内、外双向地震作用引起^[3](图 27(b))。

在垂直于墙体表面的平面外荷载作用下,一般认为墙体四边与框架抵紧接触的传统填充墙,可形

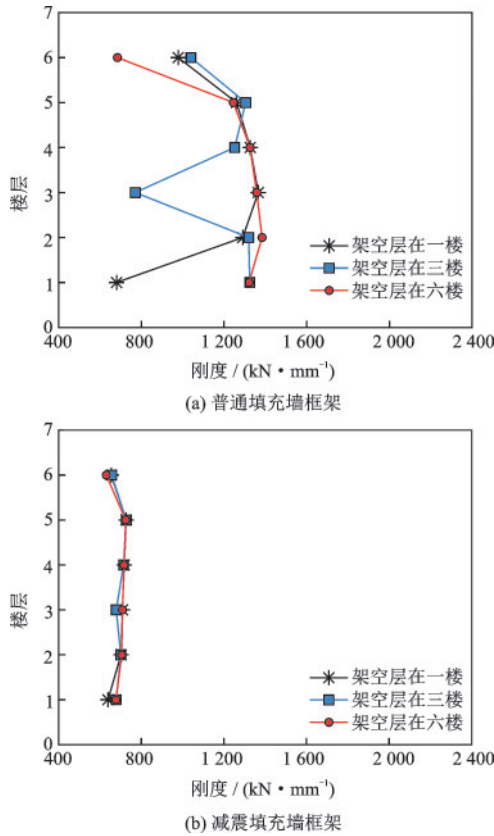


图25 减震填充墙对普通填充墙框架结构层刚度突变的改善
Fig.25 The improvement by using DIW in eliminating the story stiffness mutation of the frame structure with conventional infilled masonry wall (CIW)

表1 普通填充墙与减震填充墙对空框架前三阶振型与自振周期的影响

Table 1 Effect of CIW and DIW on the first three order of vibration mode and period of bare frame

	T_{BF}/s	T_{CIWF}/s	T_{DIWF}/s	Ψ_{CIWF}	Ψ_{DIWF}
T_1	0.895(X平动)	0.547(X平动)	0.871(X平动)	0.611	0.973
T_2	0.841(Y平动)	0.468(Y平动)	0.812(Y平动)	0.556	0.966
T_3	0.795(Z扭转)	0.409(Z扭转)	0.764(Z扭转)	0.514	0.961

注： T_{BF} 、 T_{CIWF} 、 T_{DIWF} 分别为空框架、传统填充墙框架减震填充墙框架的周期。 $\Psi_{CIWF} = T_{CIWF}/T_{BF}$ 、 $\Psi_{DIWF} = T_{DIWF}/T_{BF}$

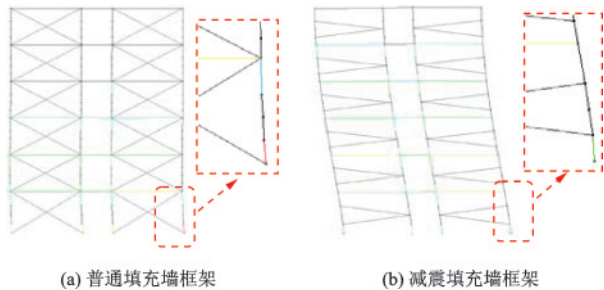


图26 普通填充墙框架与减震填充墙框架屈服机制对比
Fig.26 Comparison of the story yielding mechanism between frame with CIW and frame with DIW



(a) 平面外地震作用下外墙倒塌 (b) 平面内-外耦合地震作用的震害
图27 普通填充墙平面外震害

Fig.27 Out-of-plane damage of infilled masonry wall

成墙高、墙宽两个方向的拱承载机制以承受平面外荷载,其破坏模式为沿竖直方向可简化为“三铰拱”(图28(a))^[44]。对于减震填充墙,由有限元分析结果可知^[45-46],墙高方向形成拱承载机制承受平面外荷载(图28(b)),但破坏模式呈“四铰拱”的特征;墙宽方向拱承载机制的形成受墙体-框架间预留缝隙填充物的影响。总的来说,减震填充墙与框架梁、减震填充墙与框架柱之间的边界接触条件分别影响着减震填充墙(板)沿墙体高度、宽度方向拱承载机制的实现与否及机制实现的强弱程度,进而影响减震填充墙的平面外承载力。当边界条件一定时,平面外承载力受墙体高厚比、砌体抗压强度平均值的影响,而拉结筋仅影响墙体平面外荷载达到峰值后的下降幅度与速率^[47]。

为进一步探讨双向地震作用下减震填充墙的平面外性能,对经历平面内损伤的减震填充墙框架进行平面外加载试验^[48],结果表明减震填充墙通过拱承载机制抵抗平面外荷载,具备抵抗Ⅲ度罕遇地震的承载能力。从墙侧看,减震填充墙的平面外变形呈三折线的形态(图29),破坏特征为“四铰拱”。与使用低强度砂浆作为减震层相比,使用SBS沥青

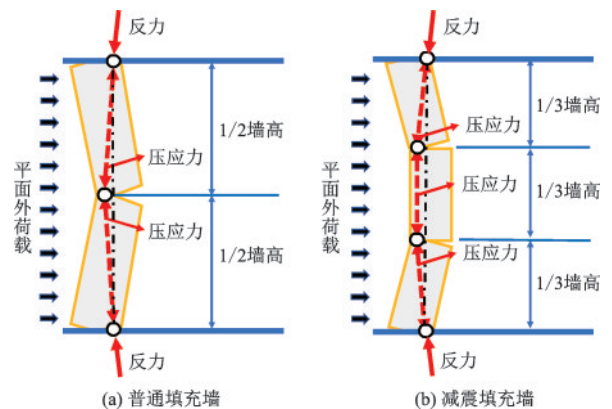


图28 平面外拱承载机制示意

Fig.28 Out-of-plane arching mechanism

卷材作为减震层的减震填充墙具有更高的初始刚度,可更好地控制墙体平面外变形。

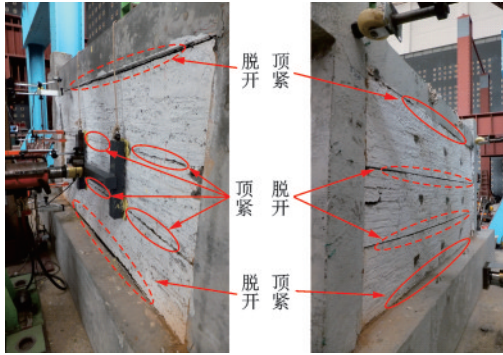


图 29 减震填充墙的平面外变形

Fig.29 Out-of-plane deformation of damped infilled wall

7 减震填充墙(板)的应用与拓展

7.1 消能楼梯间

消能楼梯间的构造如图 30 所示^[49-50],即使用减震填充墙(板)替换楼梯间普通填充墙,使用消能减震楼梯^[51]替换普通楼梯。

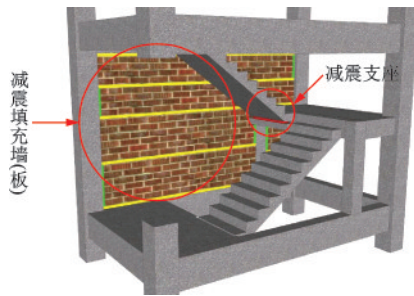
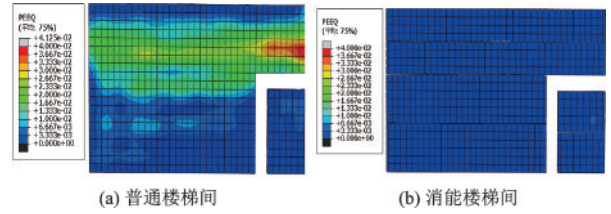


图 30 消能楼梯间构造示意

Fig.30 Configuration of damped staircase

与普通楼梯间相比,消能楼梯间具有如下优点:(1)改善传力机制,消除普通填充墙对楼梯间框架梁、柱的刚度效应,避免普通楼梯的支撑效应,使得消能楼梯间墙体、主要构件的受力降低,避免普通楼梯间填充墙、楼梯对楼梯间框架梁、柱的不利影响;(2)消能楼梯间内的填充墙以及楼梯的破坏程度大为下降(图 31),可保证逃生通道的安全,成为地震中的“安全岛”^[52]; (3)可大幅度减弱填充墙刚度效应以及楼梯支撑效应对框架结构抗侧刚度、动力特性的影响;(4)地震作用下消能楼梯间的减震填充墙(板)以及楼梯减震支座通过自身一定的耗能能力,改善了框架结构的抗震性能^[53]。实际应

用中,楼梯减震支座的布置位置对消能楼梯间的抗震性能影响可忽略^[54]。

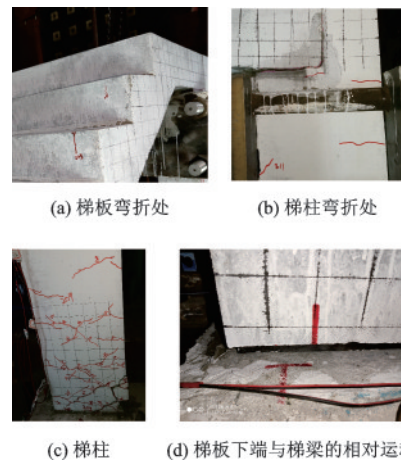


(a) 普通楼梯间 (b) 消能楼梯间

图 31 楼梯间内填充墙的塑性应变云图

Fig.31 Plastic strain contour of infilled masonry wall inside the staircase

消能楼梯间的概念可进一步推广到装配式建筑,形成装配式消能楼梯间^[55]。装配式楼梯间采用预制减震墙板,具有湿作业少、工厂预制程度高、施工速度快等优点。装配式建筑中的预制梯板与梯梁之间存在“天然”的缝隙,为减震楼梯中减震支座的安装提供了便利。从带有简易减震支座的装配式减震楼梯试验结果得知,预制梯板下部与梯梁的连接处设置高阻尼橡胶块作为简易楼梯减震支座,可使装配式楼梯的水平位移集中于减震支座,削弱梯板的支撑效应,减轻梯板及梯梁的破坏程度,提高楼梯间的抗震性能(图 32)。



(c) 梯柱 (d) 梯板下端与梯梁的相对运动

图 32 装配式减震楼梯破坏集中部位

Fig.32 Failure of precast damping staircase

7.2 减震填充墙(板)加固震损框架

针对二次地震时震损修复框架中填充墙仍然存在对框架刚度效应过高、自身破坏严重的问题,提出先采用常规方法加固震损框架,后使用减震填充墙(装配式减震墙板)的加固方法(图 33)^[35,56]。

该方法利用了减震填充墙(装配式减震墙板)

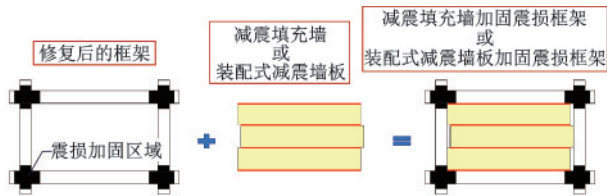


图 33 减震填充墙(装配式减震墙板)加固震损框架方法示意
Fig.33 The method of reinforcing damaged frame by damped infilled wall or precast damped wall

抗侧刚度较低及耗能能力较好的优点,提高震损加固框架结构抗震性能的同时避免墙体自身破坏,减小震后对震损框架结构中墙体的维修成本。拟静力试验结果表明,采用减震填充墙(装配式减震墙板)加固震损框架的方法与减震填充墙框架(装配式减震墙板框架)抗震性能基本一致,且抗震性能均好于震损修复空框架。减震填充墙(装配式减震墙板)加固震损框架具有良好的延性及变形能力,破坏时的层间位移角大于《建筑抗震设计规范》^[57]中混凝土框架结构罕遇地震下层间位移角 1/50 的限值(图 34~35)。

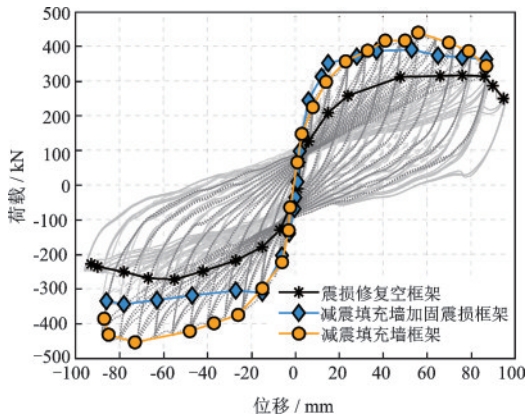


图 34 减震填充墙加固震损框架的滞回曲线
Fig.34 Hysteretic curve of damaged frame reinforced by damped infilled wall

7.3 既有墙体的减震改造

在某钢筋混凝土框架剪力墙结构加固工程中,对处于结构两端梯筒的剪力墙(图 36)作开缝处理,并在缝内填入黏弹性材料形成减震层;将新增楼层相应位置处的普通填充墙改造成减震填充墙(图 37)。该减震填充墙加固方法,解决了原结构平面扭转不规则、两个平面主轴方向动力特性差异大的问题(表 2);实现了通过减震层消耗输入结构的部分地震能量,减轻主体结构损伤、提高结构抗震性

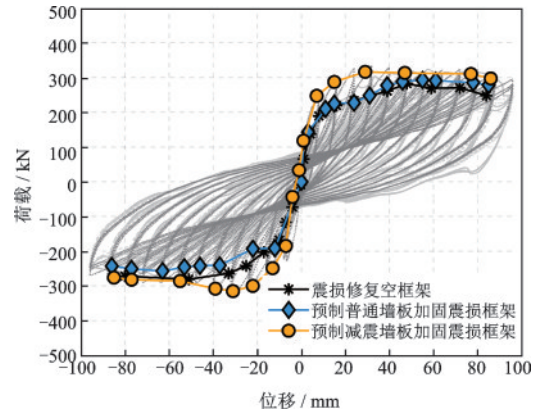


图 35 装配式减震墙板加固震损框架的滞回曲线
Fig.35 Hysteretic curve of damaged frame reinforced by precast damped wallboard

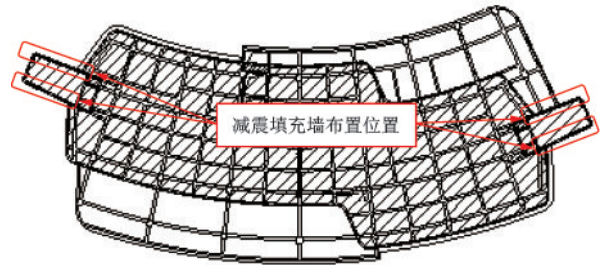


图 36 减震填充墙应用案例
Fig.36 Application case of damped infilled wall

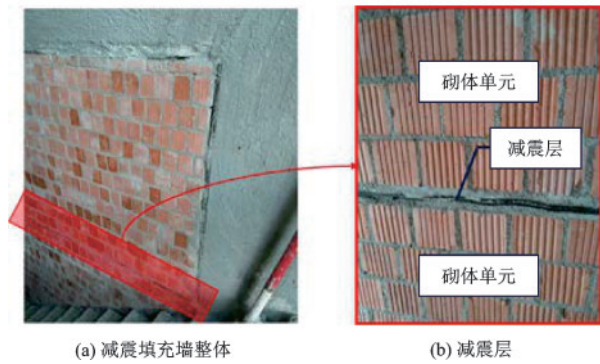


图 37 减震填充墙施工现场示意
Fig.37 In-situ configuration of damped infilled wall

能的目标;降低了梯筒结构的刚度,使梯筒与中间框架部分的地震响应趋于协调,各层连梁的变形减小。

8 结论与展望

减震填充墙(板)通过相邻砌体(墙板)单元在框架柱带动下往复剪切减震层,耗散一定的能量,降低墙体自身的刚度的工作机理,保护墙体自身基

表2 墙体改造前后结构周期、振型对比

Table 2 Comparison of period and vibration mode before and after reconstruction of wall

阶数	减震控制前		减震控制后	
	周期	振型	周期	振型
1	1.936	扭转	1.72	Y向平动
2	1.836	Y向平动	1.584	X向平动
3	1.52	X向平动	1.512	扭转
周期比	1.05>0.9		0.88<0.9	

注:周期比是指以扭转为主的第一自振周期 T_1 与以平动为主的第一自振周期 T_1 之比。该工程属于A级建筑高度,其周期比 T_1/T_1 限值应小于0.9

本不破坏的同时改善了传统框架填充墙结构的抗震性能,是一种构造简单、减震机理明确的新型墙体,为框架结构抗震性能的提升提供新的途径。

减震填充墙(板)应用前景广阔,在梯间内可将减震填充墙(板)与消能楼梯搭配使用形成消能楼梯间,有效避免普通现浇(预制)楼梯、楼梯间内填充墙(板)的破坏,让楼梯间成为地震中的“安全岛”。除新建建筑外,使用减震填充墙(板)改造(震损)加固建筑中的墙体可避免加固建筑中使用普通填充墙时仍然存在的墙体过大的刚度效应以及墙体破坏严重等抗震问题。

为推进减震填充墙(板)的工程实际应用,仍需进一步完善与深入研究以下问题:

(1)预制墙板是一种环保、节能的新型建筑材料,是墙体未来发展的方向。需进一步结合普通预制墙板的特点,对减震墙板构造、减震墙板-框架连接构造进行改进,给出施工更简便且不影响减震墙板预期工作机理的构造形式。

(2)推进减震填充墙(板)在实际工程应用中的“落地”,考虑实际工程应用中对墙体建筑功能的需求,给出减震填充墙(板)在门窗、构造柱、建筑饰面以及墙内预埋管线等情况下的构造,深化减震填充墙(板)在保温隔热、防火、隔声及防潮等建筑功能需求方面的构造。

(3)研究平面内-外耦合地震作用下减震填充墙(板)的工作机理、性能,以及耦合地震作用下可改进减震填充墙(板)抗震性能的构造措施,建立减震填充墙(板)平面外承载能力、稳定性分析及设计方法。

(4)制定减震填充墙(板)的标准、规范与图集,推动减震填充墙(板)的工程应用。

参考文献:

- [1] 冯远,刘宜丰,肖克艰,等.来自汶川大地震亲历者的第一手资料—结构工程师的视界与思考[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Feng Y, Liu Y F, Xiao K J, et al. First-hand material from wenchuan earthquake structural engineer vision and consideration[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese)
- [2] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008,29(4):10-19.
Li H N, Xiao Sh Y, Huo L Sh. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4):10-19 (in Chinese)
- [3] Braga F, Manfredi V, Masi A, et al. Performance of non-structural elements in RC buildings during the L' Aquila, 2009 Earthquake [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(1): 307-324.
- [4] Ricci P, De Luca F, Verderame G M. 6th April 2009 L' Aquila Earthquake, Italy: reinforced concrete building performance [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(1): 285-305.
- [5] Hashemi A, Mosalam K M. Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1827-1852.
- [6] Stavridis A, Koutromanos I, Shing P B. Shake-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(6): 1827-1852.
- [7] Asteris P G, Antoniou S T, Sophianopoulos D S, et al. Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12): 1508-1517.
- [8] Asteris P G, Cotsovos D M, Chrysostomou C Z, et al. Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1905-1921.
- [9] FEMA 356 Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, DC: ASCE, 2000.
- [10] Mohammadi M, Akrami V. An Engineered infilled frame: behavior and calibration [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(6): 842-849.
- [11] Aliaari M, Memari A M. Analysis of masonry infilled steel frames with seismic isolator subframes [J]. Engi-

- neering Structures, 2005, 27(4): 487-500.
- [12] Ahota M K, Riddington J R. Experimental investigation into using lead to reduce vertical load transfer in infilled frames[J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 94-101.
- [13] Gao X, Stavridis A, Bolis V, et al. Experimental study on the seismic performance of non-ductile RC frames infilled with sliding subpanels[C]//Proceedings of Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Los Angeles: Earthquake Engineering Research Institute, 2018:124-134.
- [14] Preti M, Migliorati L, Giuriani E. Experimental testing of engineered masonry infill walls for post-earthquake structural damage control [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(7): 2029-2049.
- [15] Preti M, Bettini N, Plizzari G. Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: large-scale experimental test[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(1): 125-141.
- [16] Bolis V, Paderno A, Preti M. Infill with sliding panels in presence of a full-height opening: experimental in-plane response[J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109368.
- [17] Tsantilis A V, Triantafillou T C. Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with the surrounding RC frames[J]. Engineering Structures, 2018, 155: 279-297.
- [18] Morandi P, Milanese R R, Magenes G. Innovative solution for seismic-resistant masonry infills with sliding joints: in-plane experimental performance[J]. Engineering Structures, 2018, 176: 719-733.
- [19] Mohammadi M, Akrami V, Mohammadi R. Methods to improve infilled frame ductility[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(6): 646-653.
- [20] 周云,郭阳照. 一种用于框架结构的阻尼抗震填充墙板:中国,ZL 201110156375.3 [P]. 2012-12-29.
Zhou Y, Guo Y Zh. Damping seismic filling wallboard of frame structures: China, CN102268900A [P]. 2012-12-29. (in Chinese)
- [21] 周云,彭水淋,郭阳照,等.提高框架填充墙结构抗震性能的新途径和新方法[J].防灾减灾工程学报, 2011, 31(5): 469-476.
Zhou Y, Peng Sh L, Guo Y Zh, et al. New ways and methods to improve the seismic performance of frame structures with infilled walls[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 469-476. (in Chinese)
- [22] 郭阳照,周云,甘英杰,等.新型框架阻尼填充墙性能分析[J].振动与冲击, 2013, 32(14): 127-133.
Guo Y Zh, Zhou Y, Gan Y J, et al. Performance analysis of a new-type damped infill wall[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(14): 127-133. (in Chinese)
- [23] 周云,郭阳照,杨冠男,等.阻尼砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2013, 34(7): 89-96.
Zhou Y, Guo Y Zh, Yang G N, et al. Experimental study on seismic behavior of frame structure with damped infill wall[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 89-96. (in Chinese)
- [24] 邓雪松,张超,曹均勇,等.装配式减震墙板RC框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2016, 37(5): 170-176.
Deng X S, Zhang Ch, Cao J Y, et al. Experimental study on seismic performance of precast damping wall-RC frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 170-176. (in Chinese)
- [25] 周云,郭阳照,廖奕发,等.阻尼填充墙简易减震层性能试验研究[J].地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 229-236.
Zhou Y, Guo Y Zh, Liao Y F, et al. Experimental performance study on simple damping layers of damping infill wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(3): 229-236. (in Chinese)
- [26] 周云,廖奕发,郭阳照,等.阻尼填充墙SBS层性能试验研究[J].地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 83-89.
Zhou Y, Liao Y F, Guo Y Zh, et al. Experimental performance study on SBS layer of damping infill wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(6): 83-89. (in Chinese)
- [27] 周云,廖奕发,郭阳照,等.摩擦阻尼填充墙简易摩擦层性能试验研究[J].工程抗震与加固改造, 2014, 36(5): 46-51, 45.
Zhou Y, Liao Y F, Guo Y Zh, et al. Performance experimental study on simple frictional damped layer for frictional damped infill wall [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(5): 46-51, 45. (in Chinese)
- [28] 廖奕发.新型框架阻尼填充墙简易减震层性能试验与参数分析研究[D].广州:广州大学, 2014.
Liao Y F. Performance experimental study on simple damped layer and parameters analysis of new damped infilled wall frame[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [29] 曹均勇.预制装配式混凝土框架减震墙板结构抗震性能试验研究[D].广州:广州大学, 2015.

- Cao J Y. Experimental studies on seismic behaviors of prefabricated damped partition board frame structure [D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2015. (in Chinese)
- [30] Li J, Xie J, Liu F, et al. A critical review and assessment for FRP-concrete bond systems with epoxy resin exposed to chloride environments[J]. Composite Structures, 2019, 229:111372.
- [31] 葛洋洋,王迎春,白树林,等.基于实际工程案例的SBS改性沥青卷材耐久性分析[J].新型建筑材料,2020,47(10):159-163.
Ge Y Y, Wang Y Ch, Bai Sh L, et al. Analysis of durability of SBS modified bituminous waterproof sheet based on actual engineering cases[J]. New Building Materials, 2020,47(10):159-163. (in Chinese)
- [32] 周云,郭阳照,廖奕发,等.阻尼填充墙单元性能试验研究[J].土木工程学报,2013,46(5):56-63.
Zhou Y, Guo Y Zh, Liao Y F, et al. Experimental study on the performances of damped infill wall unit[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 56-63. (in Chinese)
- [33] 周云,郭阳照,杨冠男,等.摩擦型阻尼填充墙单元的设计及性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):210-217.
Zhou Y, Guo Y Zh, Yang G N, et al. Design and performance experimental study of frictionally damped infill wall unit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 210-217. (in Chinese)
- [34] 周云,郭阳照,廖奕发,等.带SBS层阻尼砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014,47(9):21-28.
Zhou Y, Guo Y Zh, Liao Y F, et al. Experimental study on seismic behaviors of damped masonry in-filled reinforced concrete frame structures with SBS layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9): 21-28. (in Chinese)
- [35] 张超,邓雪松,龙佳栋,等.装配式拼装型减震墙板框架单元性能试验研究[J].土木工程学报,2019,52(1):53-59.
Zhang Ch, Deng X S, Long J D, et al. Experimental study on performance of precast assembled damping wall-frame unit [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 53-59. (in Chinese)
- [36] 高健洲.装配式钢框架减震墙板结构抗震性能研究[D].广州:广州大学,2020.
Gao J Zh. Study on seismic performance of damping wall-fabricated steel frame structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [37] 余坤.预制装配式混凝土框架减震墙板结构抗震性能研究[D].广州:广州大学,2018.
Yu K. Study on seismic behavior of prefabricated concrete frame with damped infill wall [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [38] 周云,童博,陈章彦,等.预制减震墙板加固震损框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(10):140-148.
Zhou Y, Tong B, Chen Zh Y, et al. Experimental study on seismic performance of damaged frame retrofitted by precast damping wall [J]. Journal of Building Structures, 2019,40(10):140-148. (in Chinese)
- [39] 林泽鑫.装配式减震墙板-混凝土框架结构连接构造研究[D].广州:广州大学,2019.
Lin Z X. Study on connection structure of precast damping wall-RC frame structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [40] 周云,郭阳照,廖奕发,等.阻尼填充墙简化力学模型研究[J].土木工程学报,2015,48(10):1-9.
Zhou Y, Guo Y Zh, Liao Y F, et al. Study on simplified mechanical model of infilled damping wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 1-9. (in Chinese)
- [41] 周云,郭阳照,杨冠男,等.框架阻尼填充墙减震效果分析[J].建筑结构,2015,45(10):74-80.
Zhou Y, Guo Y Zh, Yang G N, et al. Seismic reduction effect analysis on damped infill wall frame structures [J]. Building Structure, 2015, 45(10): 74-80. (in Chinese)
- [42] 郭阳照,杨冠男,周云,等.带架空层框架阻尼填充墙结构抗震性能研究[J].土木工程学报,2014,47(增2):1-7.
Guo Y Zh, Yang G N, Zhou Y, et al. Study on seismic behavior of damped infill wall-frame structure with stilt floors [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup 2): 1-7. (in Chinese)
- [43] 陈章彦,邓雪松,童博,等.填充墙平面外受力性能研究的回顾与展望[J].工程抗震与加固改造,2016,38(2):1-16.
Chen Zh Y, Deng X S, Tong B, et al. Retrospect and prospect in study of out-of-plane mechanical behavior of masonry wall [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 1-16. (in Chinese)
- [44] Abrams D P, Angel R, Uzarski J. Out-of-plane strength of unreinforced masonry infill panels[J]. Earthquake Spectra, 2012, 12(4):825-844. (in Chinese)
- [45] 陈章彦,邓雪松,周云,等.框架阻尼填充墙平面外受力性能分析研究[J].工业建筑,2018,48(8):80-85,72.

- Chen Zh Y, Deng X S, Zhou Y, et al. Out-of-plane mechanical properties analysis of damped infill wall frame [J]. Industrial Construction, 2018, 48(8): 80-85, 72. (in Chinese)
- [46] 陈章彦, 邓雪松, 周云, 等. 阻尼填充墙平面外工作机制与受力性能研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(增2): 76-84.
- Chen Zh Y, Deng X S, Zhou Y, et al. Study on out-of-plane mechanism and deformation of damped infill wall [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(Sup 2): 76-84. (in Chinese)
- [47] 陈章彦. 阻尼填充墙平面外受力性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
- Chen Zh Y. Study on out-of-plane mechanical performance of damped infilled wall [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017. (in Chinese)
- [48] 周云, 郭阳照, 杨冠男, 等. 经历平面内损伤的阻尼填充墙框架平面外受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 94-101.
- Zhou Y, Guo Y Zh, Yang G N, et al. Experimental study on out-of-plane mechanical performance of damped infill wall frame with in-plane damage[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 94-101. (in Chinese)
- [49] 罗德章, 周云, 童博, 等. 楼梯间抗震性能研究及提高其抗震性能的方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(6): 32-47, 54.
- Luo D Zh, Zhou Y, Tong B, et al. Studies concerning the seismic performance of staircases and methods to improve the seismic performance [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(6): 32-47, 54. (in Chinese)
- [50] 周云, 邓雪松, 罗德章. 一种用于框架结构的消能减震楼梯间构造: 中国, ZL201521013936.4[P]. 2016-5-4.
- Zhou Y, Deng X S, Luo D Zh. A configuration of damping staircase for frame structure: China, ZL201521013936.4[P]. 2016-5-4. (in Chinese)
- [51] 周云, 林松伟, 卢德辉, 等. 消能减震楼梯的减震原理与减震效果分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(3): 14-20.
- Zhou Y, Lin S W, Lu D H, et al. Analysis of the principle and effect of the energy dissipation buffering stair [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(3): 14-20. (in Chinese)
- [52] 邓雪松, 罗德章, 周云, 等. 消能减震楼梯间减震性能有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 55-63, 108.
- Deng X S, Luo D Zh, Zhou Y, et al. Finite element analysis of energy dissipating performance of Ddamped staircase[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(1): 55-63, 108. (in Chinese)
- [53] 罗德章, 邓雪松, 周云, 等. 带消能楼梯间框架结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(21): 80-85.
- Luo D Zh, Deng X S, Zhou Y, et al. Seismic performance analysis of frame structures with damped staircases[J]. Building Structure, 2019, 49(21): 80-85. (in Chinese)
- [54] 邓雪松, 罗德章, 周云, 等. 构造与设计参数对消能楼梯间减震性能的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(2): 1-9.
- Deng X S, Luo D Zh, Zhou Y, et al. Analysis of energy dissipating performance of damped staircase with different constructions and design parameters [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(2): 1-9. (in Chinese)
- [55] 王光宇. 装配式消能减震楼梯间楼梯单元抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- Wang G Y. Study on seismic performance of stair unit in assembled damping staircase [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [56] 周云, 童博, 陈章彦, 等. 阻尼填充墙加固震损框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 68-75.
- Zhou Y, Tong B, Chen Zh Y, et al. Experimental study on seismic performance of damaged frame reinforced by damped infill wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 68-75. (in Chinese)
- [57] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(本文责编: 池营营)