灌浆填芯加固空斗墙抗震性能试验研究

胡克旭　房　政　李宗沅*
（同济大学土木工程学院结构防灾减灾工程系，上海 200092）

摘　要　灌浆填芯加固法是一种将轻质、高流动性的灌浆材料灌注于空斗墙内部空腔以提高墙体受力性能的新型加固方式。本文通过对8片灌浆填芯加固空斗墙的拟静力试验，研究了不同高宽比、不同砌筑方式和不同灌浆材料种类对墙体抗剪承载力、破坏形态以及抗震性能的影响。试验结果表明：采用PE灌浆料加固的空斗墙体抗剪承载力最高、抗震性能最好，PP灌浆料加固空斗墙次之，P0灌浆料加固抗震效果相对较差；相同灌浆材料加固一顺二丁空斗墙的抗剪承载力优于一顺一丁；较小高宽比的灌浆填芯空斗墙加固效果高于大高宽比空斗墙。影响空斗墙加固效果的主要因素是灌浆料的抗拉、压性能。本文结合试验结果，参考钢筋混凝土面层加固砌体承载力计算方法，提出灌浆填芯加固空斗墙抗剪承载力计算公式，为这一新型加固技术的应用提供理论支持。

关键词　空斗墙，灌浆填芯加固，拟静力试验，抗震性能，抗剪承载力计算
中图分类号：TU362　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0014

Experimental Study on Seismic Performance of Grouting Core Reinforced Rowlock Wall

HU Kexu　FANG Zheng　LI Zongyuan*
（Department of Disaster Mitigation for Structures，College of Civil Engineering，Tongji University，Shanghai 200092，China）

Abstract　The grout injection and core-filling method introduces an innovative technique utilizing advanced lightweight，high-fluidity grout materials to fill internal voids in rowlock walls，thereby enhancing their load-bearing capacity. Quasi-static tests were conducted on eight rowlock wall specimens to investigate the effects of construction techniques and grout material types on failure modes，shear capacity，and seismic performance. This study examines how variations in aspect ratio，masonry bond pattern，and grout material type influence the shear capacity，damage morphology，and seismic behavior of grout-core-reinforced rowlock walls. Test results indicate that walls reinforced with PE grout cores exhibited the highest shear capacity and optimal seismic performance，followed by those with PP grout cores，while walls with P0 grout cores demonstrated the least favorable seismic response. For identical grout materials，walls constructed using the “one-stretcher-two-header” bond pattern outperformed those with out-and-in bond patterns in terms of shear resistance. Furthermore，the reinforcement efficacy was more pronounced in walls with smaller aspect ratios compared to those with larger ones. The compressive and tensile properties of the grout material were identified as the primary factors governing reinforcement effectiveness. By refining existing theoretical frameworks and fitting experimental data，this paper derives a calculation formula for the shear capacity of grout-reinforced rowlock walls under compressive-shear loading，offering theoretical support for practical application of this innovative

收稿日期：2024-12-30
作者简介：胡克旭，男，教授，主要从事工程结构抗火与工程结构检测鉴定和加固方法研究。E-mail：kexuhu@163.com
* **联系作者**：李宗沅，男，硕士研究生，主要从事建筑结构检测鉴定与加固方法研究。E-mail：lizongyuan1178@163.com

strengthening technique.

Keywords　rowlock wall, grouting core reinforcement, quasi-static tests, seismic performance, calculation of shear capacity

0　引　言

空斗墙是一种传统砌体形式，由于节省建筑材料，上世纪七、八十年代甚至九十年代的江南地区乃至长江流域的农村住宅几乎全部都是空斗墙房屋，目前仍是农村住宅房屋的主体。近些年，随着文化旅游事业蓬勃发展，在农村地区出现了大量由空斗墙住宅直接改造为经营性民宿的房屋。仅上海浦东新区的经营性民宿建筑目前就有1 000多幢，其中90%以上为空斗墙建筑。

空斗墙的抗剪承载力远低于同强度砌筑的实砌墙，由于斗砖稳定性较差，极易产生早于墙体本身剪切破坏的整体倒塌，地震作用下破坏十分严重[1]。民宿经营者为改善居住环境和品质，对原房屋结构的改造力度普遍较大，装修荷载明显增加，给房屋结构安全带来更大隐患。根据检测鉴定结果，绝大多数民宿空斗墙竖向承载力不足，由于拆除墙垛引起的墙体稳定性也多有不足，房屋结构普遍需要加固处理。

目前针对空斗墙常用的加固方法主要有高延性混凝土面层加固法、活性粉末混凝土（RPC）面层加固法、外加圈梁-构造柱加固法、外包钢加固法等。采用高延性混凝土面层加固后的空斗墙的变形能力和延性都会有所提高[2-3]；RPC面层加固技术能够提高墙体抗震承载力，减小刚度退化[4]；但上述方法在实施过程中均需铲除墙面粉刷层，对空斗墙而言这些操作易使砖块松动，严重影响结构安全。合理布置圈梁和构造柱能有效提高结构的整体性，但不能提高墙体本身的抗压和抗剪承载力[5]。外包钢加固法可以适当提高空斗墙的抗剪承载力[6]，但加固材料与原结构的共同工作性能较差且施工困难。

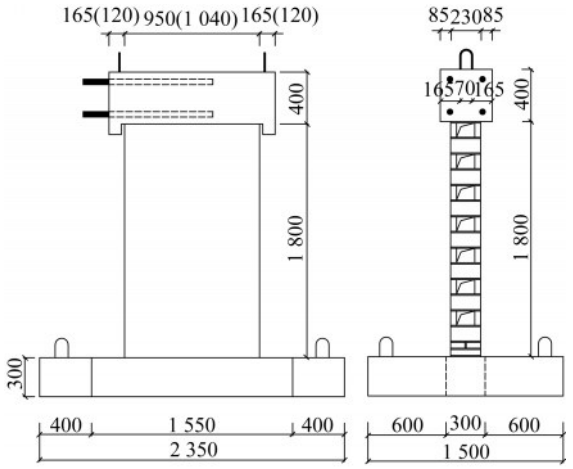
针对上述问题，本课题组提出了一种灌浆料加固空斗墙的方法，可以弥补以上缺陷。该方法是将灌浆料灌注于空斗墙空腔，与原砌体结构形成统一的受力体系，提升墙体的抗压和抗剪承载力，同时提高结构整体性和稳定性。考虑到空斗墙房屋层数不高且基础普遍较差，本课题组专门开发了一种用于空斗墙灌浆填芯加固的灌浆材料，这种灌浆料具有质轻（水化后重度小于16 kN/m^3）、延性好（内掺聚乙烯或聚丙烯纤维）、流动性高的特点，充盈性好，采用泵送压力灌注，施工速度快，对既有装修影响也小。

本文在课题组前期研究灌浆加固空斗墙受压性能基础上，进一步研究墙体的抗震性能。为此，本研究进行了8片灌浆加固的空斗墙拟静力试验，通过分析墙体的破坏形态和抗剪承载力、滞回曲线、骨架曲线、延性等抗震性能指标，研究砌筑方式（一顺一丁和一顺二丁无眠砖空斗墙）、不同灌浆料种类（不掺纤维、掺聚丙烯纤维和掺聚乙烯纤维）对加固空斗墙抗震性能的影响，以及不同高宽比的加固空斗墙的抗震性能；并在现有砌体结构面层加固法研究成果基础上，结合本文试验成果，提出灌浆填芯加固空斗墙抗剪承载力计算方法，为灌浆填芯加固空斗墙的抗震设计提供理论依据。

1　试验设计

1.1　试件设计

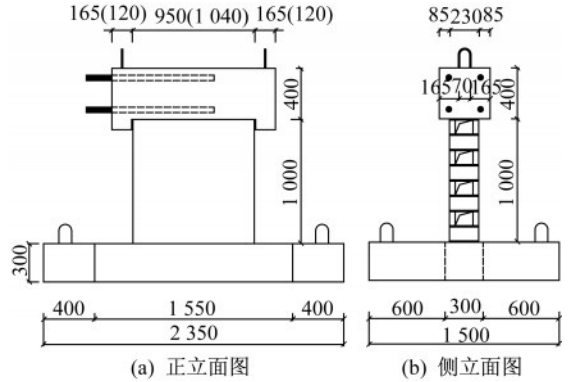
结合实际工程现状，试验试件采用两种砌筑方式（一顺一丁和一顺二丁无眠砖空斗墙）和两种高宽比（分别为1.8和1.0），设计并制作了8片灌浆填芯加固空斗墙，其中4片是第一批次，包括3片一顺一丁墙（高宽比为1.94），1片一顺二丁墙（高宽比为1.77），该组墙体设计尺寸参考了窗间墙的尺寸，试件立面图如图1所示。第二批次包括3片一顺一丁墙（高宽比为1.05）和1片一顺二丁墙（高宽比为0.96），该组墙体设计尺寸模拟了承重横墙的情况，试件立面图如图2所示，剖面图如图3所示。试件信息汇总见表1，其中试件编号中，W1为第一批次墙体，W2为第二批次墙体；灌浆料种类："P0"为不掺纤维的普通灌浆料，"PE"为掺聚乙烯纤维灌浆料，"PP"为掺聚丙烯纤维灌浆料，后缀1和2为砌筑方式。



(a) 正立面图 (b) 侧立面图

图1 第一批次试件尺寸图(单位:mm)

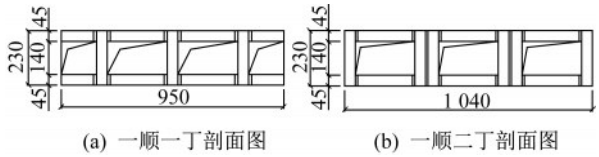
Fig.1 Dimensional drawings of the first batch of specimens (Unit: mm)



(a) 正立面图 (b) 侧立面图

图2 第二批次试件尺寸图(单位:mm)

Fig.2 Dimensional drawings of the second batch of specimens (Unit: mm)



(a) 一顺一丁剖面图 (b) 一顺二丁剖面图

图3 试件剖面图(单位:mm)

Fig.3 Sections of specimens (Unit: mm)

表1 试件数据汇总表

Table 1 Summary of specimen data

试验批次	试件编号	灌浆料种类	砌筑方式	墙宽/mm
第一批次	W1-P0-1	P0	一顺一丁	950
	W1-PE-1	PE	一顺一丁	950
	W1-PP-1	PP	一顺一丁	950
	W1-PP-2	PP	一顺二丁	1040
第二批次	W2-P0-1	P0	一顺一丁	950
	W2-PE-1	PE	一顺一丁	950
	W2-PP-1	PP	一顺一丁	950
	W2-PP-2	PP	一顺二丁	1040

1.2 试验材料

砌筑空斗墙使用的普通烧结黏土砖尺寸为230 mm×110 mm×45 mm,强度等级为MU10,实测强度为12.06 MPa。砌筑砂浆采用混合砂浆,强度等级为M2.5,28 d龄期的实测强度为2.43 MPa。试验所用灌浆材料共有3种:P0灌浆料、PP灌浆料、PE灌浆料,主要成分为:水泥30%~40%,活性粉料(粉煤灰、矿粉、硅粉)35%~45%,细骨料10%~20%,外加剂(含纤维)1%~3%。其中,P0灌浆料不掺纤维,PP灌浆料掺入适量聚丙烯纤维,PE纤维灌浆料掺入适量聚乙烯纤维。

试验测得灌浆料的力学性能指标如表2所示(试验龄期为58 d)。

表2 灌浆料力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of grout

灌浆料种类	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	狗骨试件抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
P0	14.84	14.07	1.00	4006
PP	12.90	12.13	1.50	3594
PE	14.65	14.30	2.21	3907

加固时采用机械搅拌泵送灌注,一次灌满,第二天补平顶部由于失水产生的凹陷,随后养护。

1.3 加载及测试

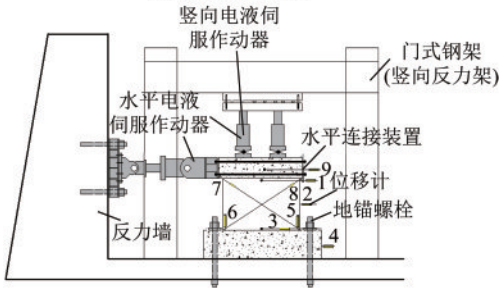
试验在同济大学四平路校区的结构试验中心进行,加载采用100 t电液伺服作动器,见图4。试件混凝土底座通过地锚螺栓固定于试验台,用两个油压千斤顶在混凝土加载梁上施加竖向荷载。高宽比1.94和1.77的空斗墙体顶部施加的竖向荷载分别为120.07 kN和131.45 kN,高宽比1.05和0.96的空斗墙体改变轴压比,竖向荷载分别为240.14 kN和262.90 kN。

水平作动器加载采用位移控制方式,每级输入周期为100s的正弦波,每级位移循环一次。在墙体开裂前按照每级1 mm加载,墙体开裂后按照每级2 mm进行加载。当正反向位移最大水平荷载均下降至峰值荷载的80%以下,或试件严重破坏无法继续加载时,终止试验。

试验过程中测试试件的水平位移和剪切变形。试件位移计测点布置见图5,在顶梁、墙体顶部、中部和底部各布置一水平位移计,测量墙体横向位移;沿墙体对角线布置两个斜向位移计,测量



(a) 试验装置实景

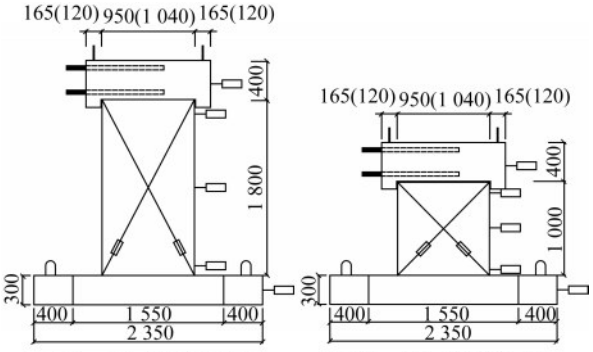


(b) 试验装置示意图

图4　试验加载设备

Fig.4　Loading equipment

墙体剪切变形。位移计与水平和作动器的加载(加位移)同步采集。



(a) 第一批次试件测点布置　(b) 第二批次试件测点布置

图5　试验测点布置

Fig.5　Layout of measurement points

2　试验结果及分析

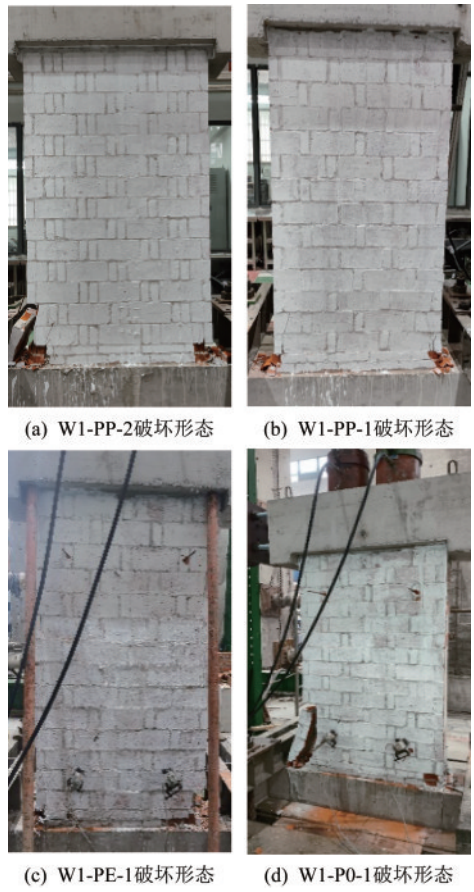
2.1　破坏形态

2.1.1　第一批试件破坏形态

4个试件的破坏过程基本一致,加载位移3~5 mm时墙体底边缘出现极细水平裂缝。随荷载增加裂缝加宽加长,加载位移达24~38 mm时,墙体角部砖块压碎,4个试件均呈压弯破坏形态,如图6所示。

2.1.2　第二批试件破坏形态

4个试件破坏过程和破坏形态基本相似,加



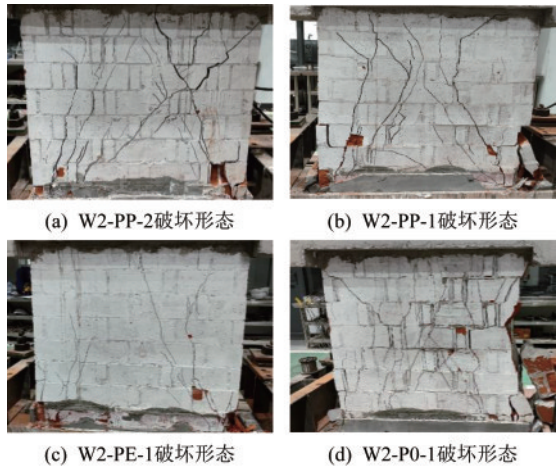
(a) W1-PP-2破坏形态　(b) W1-PP-1破坏形态

(c) W1-PE-1破坏形态　(d) W1-P0-1破坏形态

图6　第一批次试件破坏情况

Fig.6　Damage of the first batch specimens

载位移不大时(约4~5 mm),首先在试件底部出现水平裂缝;随荷载的增加,开始出现斜向裂缝,此时加载位移基本为11~18 mm;随荷载进一步增加,斜裂缝交叉形成“X”缝,此时加载位移为18~25 mm,随后荷载退化,停止试验,4个试件最终均呈现压剪破坏形态,如图7所示。



(a) W2-PP-2破坏形态　(b) W2-PP-1破坏形态

(c) W2-PE-1破坏形态　(d) W2-P0-1破坏形态

图7　第二批次试件破坏情况

Fig.7　Damage of the second batch specimens

2.2 特征荷载及对应位移

试验所得两批试件的开裂荷载和极限荷载及其对应的位移如表3所示。第一批次一顺一丁空斗墙试件中，PE灌浆料加固的空斗墙极限承载力高于P0和PP灌浆料加固的空斗墙，P0灌浆料加固的空斗墙承载力最小。PE和P0灌浆料加固的空斗墙峰值位移略大于PP灌浆料加固的空斗墙，相对而言PE峰值位移最大，变形能力最强。一顺二丁墙体的极限承载力和变形能力略高于一顺一丁墙体。

第二批次的一顺一丁空斗墙试件中，PE和PP灌浆料加固的空斗墙极限荷载均高于P0灌浆料加固的空斗墙；相对而言，PE灌浆料加固的墙体承载力更高。同时，PE和PP灌浆料加固空斗墙峰值位移均明显大于P0灌浆料加固空斗墙；相对而言，PE灌浆料加固墙体的变形能力最强。

表3 特征荷载与对应位移试验结果

Table 3 Characteristic load and corresponding displacement test results

试验批次	试件编号	开裂荷载/kN	开裂位移/mm	极限荷载/kN	峰值位移/mm
第一批次	W1-PP-2	62.97	6	123.36	34
	W1-PP-1	63.28	6	114.51	28
	W1-PE-1	49.56	3	125.80	32
	W1-P0-1	59.77	5	113.14	30
第二批次	W2-PP-2	121.98	5	271.72	12
	W2-PP-1	166.35	5	250.37	14
	W2-PE-1	151.72	5	272.63	16
	W2-P0-1	126.10	4	172.15	6

2.3 滞回曲线

两批试验所得滞回曲线分别如图8和图9所示。总体上滞回曲线的捏缩现象明显，说明灌浆填芯加固后的空斗墙的抗震性能仍然不佳。相对而言，高宽比1.8的试件的捏缩现象更为明显，地震作用下的耗能能力更差。高宽比1.8的试件的变形能力比高宽比1.0的试件大，但抗剪承载力低。

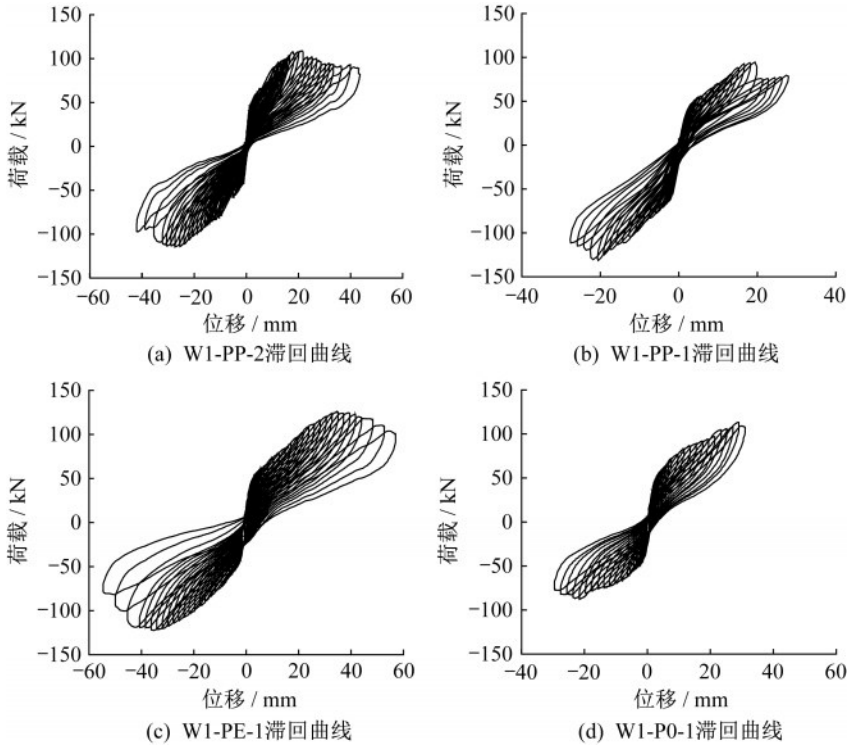


图8 第一批次试件滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of the first batch specimens

PP灌浆料和PE灌浆料加固的试件的承载力和变形能力明显高于P0灌浆料加固的试件，相对而言，PE灌浆料加固的试件具有更好的抗震承载力和变形能力。

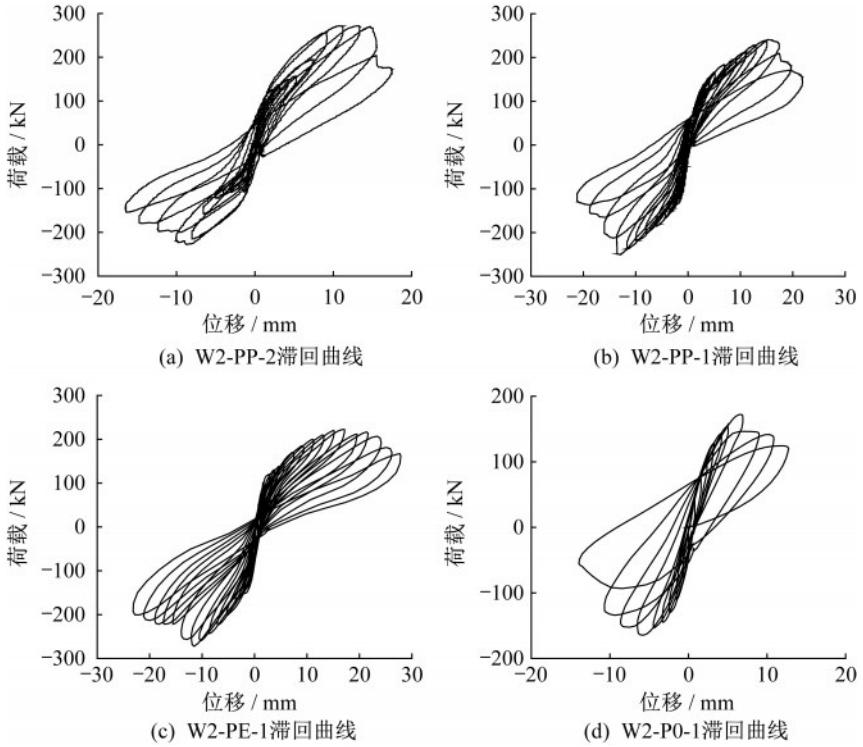


图 9　第二批次试件滞回曲线

Fig.9　Hysteresis curves of the second batch specimens

2.4　骨架曲线

根据滞回曲线所得的第一批次试件的骨架曲线如图 10 所示。各墙体的初始刚度无明显差别，墙体出现裂缝后，骨架曲线逐渐分离，PP 和 PE 灌浆料加固的墙体刚度明显高于 P0 灌浆料加固的墙体，且 PP 和 PE 灌浆料加固的墙体的极限承载力和变形能力也都明显高于 P0 灌浆料加固的墙体[图 10(a)所示]。对比不同砌筑方式的墙体[图 10(b)]，一顺二丁墙体的承载力和变形能力也均高于一顺一丁墙体。

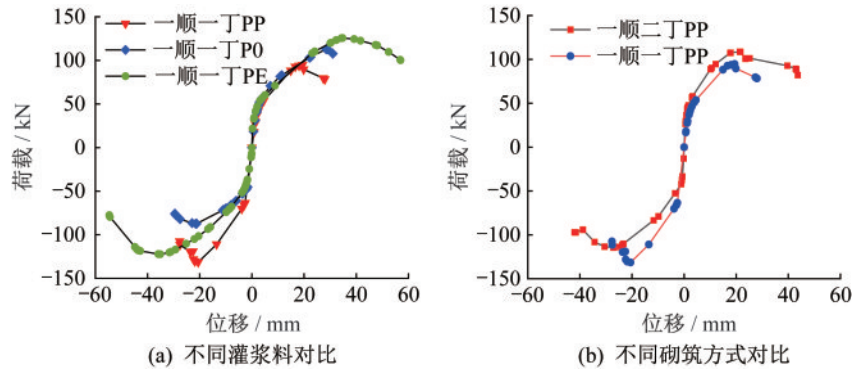


图 10　第一批次试验骨架曲线

Fig.10　Skeleton curves of the first batch tests

根据滞回曲线所得的第二批次试件的骨架曲线如图 11 所示。与第一批次试件相比，其承载能力明显提高，但变形能力降低。同样，PP 和 PE 灌浆料加固的墙体的承载力和变形能力也都明显高于 P0 灌浆料加固的墙体，相对而言 PE 灌浆料加固墙体的变形能力更大一些。对比不同的砌筑方式，一顺二丁墙体承载力略高于一顺一丁墙体，但变形能力略低于一顺一丁墙体。

2.5　刚度退化

图 12 和图 13 分别为第一批次试件和第二批次试件的刚度退化曲线。相同高宽比的 4 个试

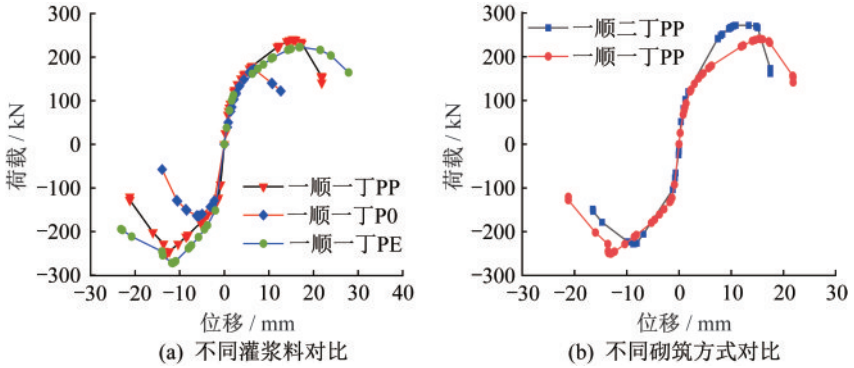


图 11 第二批次试验骨架曲线

Fig.11 Skeleton curves of the second batch tests

件，刚度退化规律基本一致，相对而言，P0灌浆料加固墙体刚度退化较PP和PE灌浆料加固墙体更快一些，一顺二丁墙体刚度退化比一顺一丁墙体略快一些。

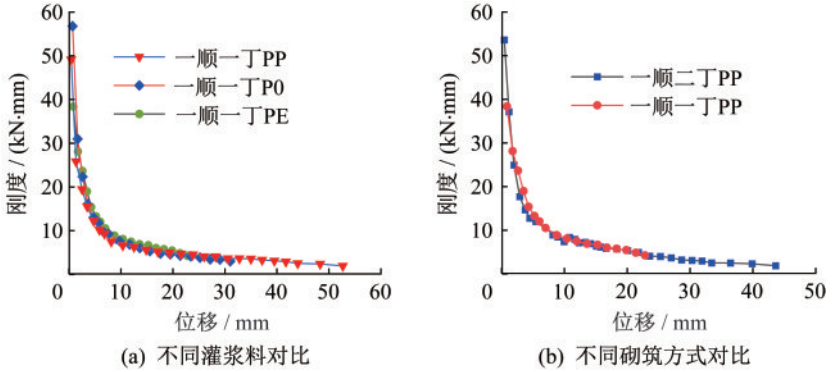


图 12 第一批次试验刚度退化曲线

Fig.12 Stiffness degradation curves of the first batch tests

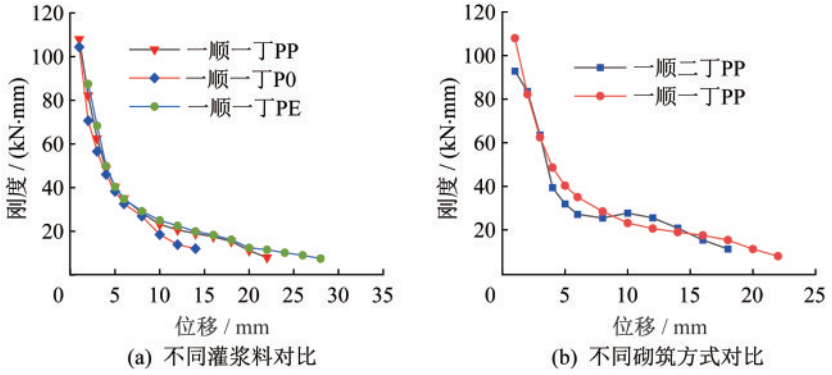


图 13 第二批次试验刚度退化曲线

Fig.13 Stiffness degradation curves of the second batch tests

2.6 耗能性能

图 14 是第一批试件的累积耗能曲线，4 片墙体的耗能变化规律基本相同。相对而言，PE灌浆料加固墙体累积耗能最高，一顺二丁墙体的耗能比一顺一丁墙体高。

图 15 是第二批试件的累积耗能曲线，开裂前，4 片墙体耗能能力差距较小，随着加载位移的增加，P0灌浆料加固墙体最先进入塑性变形阶段，累积耗能提速相对较快。但最终PP和PE灌浆料加固墙体的耗能能力明显高于P0加固墙体；相对而言，PE灌浆料加固墙体耗能能力更高。对比不同砌筑方式，一顺一丁墙体耗能能力略高于一顺二丁墙体。

对比图 14 和图 15 可知，高宽比较大的第一批次试件在加载前期累计耗能面积低于第二批次试件，但由于延性较强，较晚发生破坏，最终累计耗能面积明显高于第二批次试件。

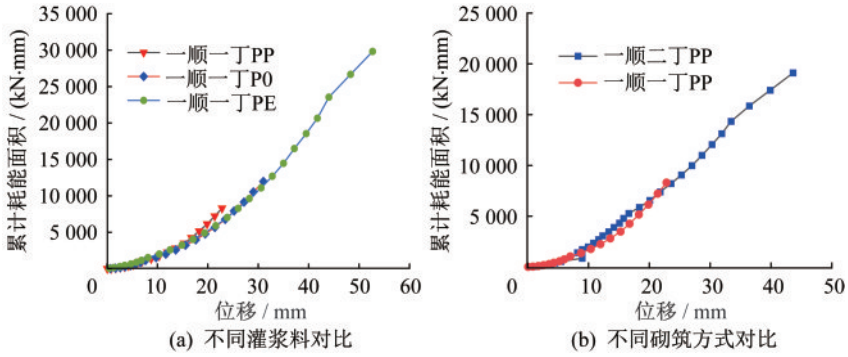


图 14　第一批次试验累计耗能曲线

Fig.14　Cumulative energy consumption curves of the first batch tests

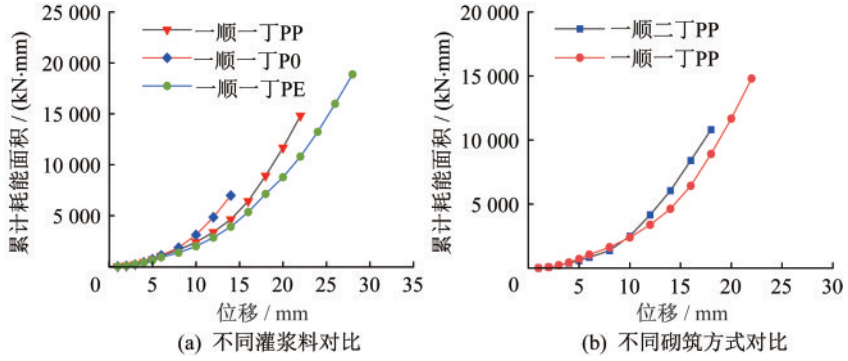


图 15　第二批次试验累计耗能曲线

Fig.15　Cumulative energy consumption curves of the second batch tests

3　抗剪承载力计算方法

3.1　抗剪承载力计算公式

灌浆填芯加固空斗墙的抗剪承载力 V 主要由灌浆料提供的抗剪承载力 V_{cs} 和空斗墙原有的抗剪承载力 V_m 组成，即

$$V = V_m + V_{cs} \tag{1}$$

其中，原墙体受剪承载力 V_m 按照《砌体结构设计规范》[7]中的计算方法，对于本文所用 MU10 烧结黏土砖，计算公式为：

$$V_m = (0.125\sqrt{f_2} + \alpha\mu\sigma_0)A_m \tag{2}$$

式中：f_2 为砂浆抗压强度平均值；A_m 为砌体所占面积；α 和 μ 为修正系数，对于 $\gamma_G = 1.2$ 的烧结黏土砖，α 取 0.60，$\mu = 0.26 - 0.082\dfrac{\sigma_0}{f}$；$\sigma_0$ 为永久荷载产生的水平截面平均压应力。

灌浆料提供的受剪承载力 V_{cs} 参考《砌体结构加固设计规范》[8]中对于钢筋混凝土面层加固受剪砌体承载力的计算：

$$V_{cs} = \alpha_g f_{tg} bh \tag{3}$$

式中：α_g 为灌浆料强度利用系数；f_{tg} 为灌浆料轴心抗拉强度；b 为灌浆部分厚度；h 为墙体水平方向长度。

由于高宽比 1.8 的墙体试件并未发生受剪破坏，无法拟合受剪承载力计算公式，因此本文主要利用高宽比 1.0 的试验结果进行拟合分析，灌浆填芯加固空斗墙的抗剪承载力计算公式如下：

$$V = V_m + \alpha_g f_{tg} bh \tag{4}$$

此公式建议适用范围为高宽比在 0.75~1.5 之间的灌浆填芯加固空斗墙，对于 P0、PP 和 PE 灌浆材料，式(4)中 α_g 分别取 1.05、1.09 和 0.82。

表 4 为根据式(4)所得采用三种灌浆材料加固空斗墙的抗剪承载力计算结果与试验结果的对比，公式拟合度较好，对工程实际具有指导意义。

表4 抗剪承载力计算值与试验值对比

Table 4 Comparison between calculated and experimental shear capacities

试件型号	墙宽/mm	灌浆料厚度/mm	抗剪承载力试验值/kN	抗剪承载力计算值/kN	相对误差/%
W2-P0-1	950	140	172.15	174.96	1.61
W2-PP-1	950	140	250.37	252.76	0.95
W2-PE-1	950	140	272.63	276.33	1.34

4 结 论

（1）灌浆填芯加固空斗墙的大高宽比试件（本文为1.8）的破坏形态为压弯破坏，小高宽比试件（本文为1.0）的破坏形态为压剪破坏。

（2）灌浆材料种类对加固空斗墙的抗震性能有明显影响，采用PP和PE灌浆料加固墙体的抗剪承载力和变形能力明显高于P0灌浆料加固的墙体；砌筑方式对加固墙体的抗震性能有一定影响，一顺二丁墙体抗剪承载力略高于一顺一丁墙体。

（3）PE灌浆料较PP和P0灌浆料有更好的抗拉强度和变形能力，用其加固的空斗墙的抗剪承载力和变形能力、刚度退化和耗能能力等抗震性能也相对最好。

（4）本文结合试验结果和既有理论，建立了灌浆填芯加固空斗墙抗剪承载力计算方法，可为实现工程应用提供指导。

（5）采用本研究开发的轻质、延性、高流动性灌浆材料灌浆填芯加固空斗墙，能有效提高其抗剪承载力。实际工程中再结合圈梁、构造柱等整体性加固措施，可方便实现空斗墙房屋的抗震加固。

参 考 文 献

[1] 李建根.空斗墙病害机理及加固试验研究[D].温州:温州大学,2021.
Li Jiangen. Experimental research on disease mechanism and reinforcement of empty bucket wall [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021. (in Chinese)

[2] 吴孝鑫,谢群,赵鹏,等.超高延性混凝土加固砌体墙抗震性能研究[J].防灾减灾工程学报,2024,44(4):859-869.
Wu Xiaoxin, Xie Qun, Zhao Peng, et al. Research on seismic performance of masonry walls reinforced with ultra-high ductility concrete [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(4): 859-869.(in Chinese)

[3] 周铁钢,王鑫,张再昱,等.高延性水泥基复合材料加固空斗墙抗震性能试验研究[J].工业建筑,2021,51(9):132-137.
Zhou Tiegang, Wang Xin, Zhang Zaiyu, et al. Experimental study on seismic performance of high ductility cementitious composites reinforced cavity bucket wall[J].Industrial Building, 2021, 51(9): 132-137.(in Chinese)

[4] 王勤,李桅,杨克家,等.RPC面层加固约束空斗墙参数分析和抗震承载力研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(2):204-215.
Wang Qin, Li Wei, Yang Kejia, et al. Parameter analysis and seismic bearing capacity study of RPC face reinforced restrained air bucket wall [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(2): 204-215.(in Chinese)

[5] 尹伟,郑伟,徐晓明,等.既有空斗墙砌体结构的整体加固与改造[J].建筑施工,2018,40(8):1331-1334.
Yin Wei, Zheng Wei, Xu Xiaoming, et al. Overall reinforcement and reconstruction of existing cavity wall masonry structure [J]. Building Construction, 2018, 40(8): 1331-1334.(in Chinese)

[6] 程浩然.钢板刚架加固负荷空斗墙受压性能研究[D].南京:东南大学,2023.
Cheng Haoran. Research on compressive performance of steel plate rigid frame reinforced loaded empty bucket wall[D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)

[7] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S].
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures[S].(in Chinese)

[8] GB 50702—2011 砌体结构加固设计规范[S].
GB 50702—2011 Code for design of strengthening masonry structures[S].(in Chinese)