

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.085



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 形状记忆合金丝加固古塔墙体抗震性能试验研究

谢启芳<sup>1</sup>, 浩文明<sup>1</sup>, 徐敦峰<sup>1</sup>, 王越众<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院; 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055;

2. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 郑州 450000)

**摘要:**针对砖石古塔墙体抗震性能差的问题,提出采用形状记忆合金丝(SMA丝)对古塔墙体进行抗震加固的新技术。为研究其加固效果,对SMA丝进行了力学性能测试,分析应变幅值对其耗能的影响,并通过SMA丝加卸载训练使其保持稳定的完全超弹性状态;通过2片SMA丝加固古塔墙体模型(1片完好墙体和1片损伤墙体)和1片未加固古塔墙体模型的拟静力试验,研究SMA丝加固对古塔墙体破坏形态、滞回性能、承载力、变形能力、刚度退化规律、延性及耗能能力等抗震性能的影响。试验结果表明:采用SMA丝加固古塔墙体虽未改变墙体的破坏模式,但在一定程度上可改善其脆性破坏,显著提高墙体的承载力和耗能能力,有效限制墙体的剪切变形,延缓墙体的开裂和刚度退化;与未加固墙体相比,SMA丝加固墙体的承载力和极限位移分别提高了16.91%和22.65%,SMA丝加固损伤墙体的承载力和变形能力甚至超过了完好墙体,但其弹性段和开裂段刚度和承载力明显低于完好墙体。

**关键词:**古塔墙体;形状记忆合金丝;超弹性;抗震加固;抗震性能

**中图分类号:**TU362 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0038-10

## Experimental studies on seismic performance of ancient pagoda wall strengthened with shape memory alloy wire

XIE Qifang<sup>1</sup>, HAO Wenming<sup>1</sup>, XU Dunfeng<sup>1</sup>, WANG Yuezhong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering; Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. Zhengzhou University Comprehensive Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, P. R. China)

**Abstract:** In view of the poor seismic performance of the ancient pagoda wall, a new seismic strengthening technology, strengthening the ancient pagoda wall with shape memory alloy wire (SMA wire), was proposed. In order to study the reinforcement effect, the mechanical properties of SMA wire were tested, and the influence of strain amplitude on its energy consumption was analyzed. The SMA wires were trained by loading and unloading to maintain a stable fully superelastic state. Then, the pseudo-static tests of two

**收稿日期:**2021-01-05

**基金项目:**国家自然科学基金(51878550);陕西省杰出青年科学基金(2021JC-44)

**作者简介:**谢启芳(1978-),男,博士,教授,主要从事古建筑结构、组合结构及其抗震性能研究, E-mail: nacy.xie@163.com。

**Received:**2021-01-05

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878550); Science Fund for Distinguished Young Scholars of Shaanxi Province (No. 2021JC-44)

**Author brief:** XIE Qifang (1978-), PhD, professor, main research interests: ancient building structure, composite structure and its seismic performance, E-mail: nacy.xie@163.com.

ancient pagoda wall models (one intact wall and one damaged wall) strengthened with SMA wire and one unreinforced model were carried out. The effects of SMA wire reinforcement on the seismic performance such as failure mode, hysteretic performance, bearing capacity, deformability, stiffness degradation law, ductility and energy dissipation capacity of historical masonry tower wall were studied. Test results show that SMA wire reinforcement does not change the failure mode of the wall, but can improve the brittle failure to a certain extent, can significantly improve the bearing capacity and energy consumption capacity of the wall, effectively limit the shear deformation of the wall and delay the wall cracking and stiffness degradation. Compared with the unreinforced wall, the bearing capacity and ultimate displacement of the wall strengthened with SMA wire increase by 16.91% and 22.65%, respectively. The bearing capacity and deformation capacity of the damaged wall strengthened with SMA wire are even greater than that of the intact wall. However, the stiffness and bearing capacity of elastic section and cracked section are obviously lower than that of intact wall.

**Keywords:** ancient pagoda wall; shape memory alloy wire; superelasticity; seismic strengthening; seismic performance

砖石古塔作为中国古建筑的杰出代表,是历史发展中宝贵的文化遗产,代表着中国历史、宗教、艺术等方面的发展,同时也具有极高的科研价值<sup>[1-3]</sup>。然而,由于古代建筑技术与材料的限制和长年累月的风雨洗礼及地震破坏,砖石古塔伤痕累累,甚至已濒临倒塌<sup>[4-5]</sup>,古塔结构的保护已成为亟待研究的课题。随着经济的不断发展,古建筑的保护与传统文化的弘扬已深入人心,砖石古塔的保护也得到了重视和更多的投入。

砖石古塔破坏形式主要为墙体开裂,裂缝的存在严重影响了古塔的整体性,对此,工程上主要采用灌浆、勾缝和植筋的加固方式<sup>[6-8]</sup>。灌浆加固可填充古塔内部的裂缝,从而提高古塔的密实性和整体性,但由于灌浆料与原材料不同,易产生应力集中现象。植筋加固能有效提高墙体的抗剪承载力、延性和耗能能力,但因其在墙体开槽植筋,造成了墙体的破坏。现有的加固方法仅针对存在裂缝的部位进行加固,并不能限制墙体裂缝的进一步发展,且很难满足古塔“最小干预”的保护原则。形状记忆合金(Shape Memory Alloy,简称 SMA)由于具有独特的形状记忆效应、超弹性和高阻尼等良好的物理力学性能<sup>[9-10]</sup>,已应用于结构抗震加固研究中,包括砖石古塔结构。王风华等<sup>[11]</sup>针对古塔设计了一种新型 SMA 阻尼器,该阻尼器能有效降低古塔结构在地震作用下的响应。赵祥等<sup>[12]</sup>根据不同数量、长度的 SMA 丝设计了 3 种 SMA 阻尼器,通过古塔模型的振动台试验,表明 SMA 阻尼器能吸收部分地震能量,并能有效防止塔体的变形和开裂,但该阻尼器安装于塔体的外部,通过沿塔身竖向的钢索与阻尼器

相连,严重影响了古塔的外观。王社良等<sup>[13]</sup>利用 SMA 的超弹性,设计了一种形状记忆合金复合悬挂减震系统,并通过小雁塔模型振动台试验验证了该减震系统优越的减震性能,该方法将阻尼器安装于古塔内部,避免了对古塔外观的影响。SMA 阻尼器可利用 SMA 的超弹性吸收和耗散能量,进而降低古塔的地震响应,但其存在造价贵与影响古塔外观等问题。

笔者所在课题组前期开展了不同大小洞口古塔墙体模型的拟静力试验<sup>[14]</sup>,墙体模型均发生剪切型破坏,沿斜向产生“X”型裂缝。针对砖石古塔墙体的破坏特征,提出采用 SMA 丝对古塔墙体进行抗震加固的新技术,通过 SMA 丝消耗原本由古塔墙体损伤所消耗的能量来达到降低墙体损伤的目的,并通过沿对角线布置的 SMA 丝来约束墙体变形,从而提高墙体的整体性,通过将 SMA 丝设置于古塔墙体内侧来避免对古塔外观的影响,并结合灌浆、勾缝等方法加固塔体外部角区,且 SMA 丝外接的加固件和锚固件便于拆卸,也可作为古塔的临时性加固方法。通过 2 个加固古塔砖墙试件及其对比试件的低周反复加载试验,对比分析其破坏形态、滞回性能、承载力、变形能力、刚度退化规律、延性及耗能能力等抗震性能,为古塔墙体抗震加固提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验包含 3 片古塔墙体模型,古塔墙体模型是以西安小雁塔第 7 层为原型,按 1:2 的比例制作的缩尺模型。试件具体尺寸如图 1 所示,墙体模型的

厚度为 370 mm。

试件 W-1 为未加固对比试件,考虑到市面上常见的 SMA 元件包括 SMA 丝和 SMA 棒, SMA 丝较 SMA 棒具有更稳定的滞回性能和良好的耗能能力,因此,选用 6 根直径为 2 mm 的 SMA 丝制成丝束作为加固元件,试件 W-2 和 W-3 为 SMA 丝加固试件,其中,试件 W-2 的原试件与试件 W-1 相同,试件 W-3 的原试件为试件 W-1 加载后的试件。考虑到墙体的破坏形态、SMA 丝耗能等因素, SMA 丝加固采用沿墙体对角线布置长度为 14 mm 的合金丝束,合金丝束通过合金丝夹具固定, SMA 丝夹具由课题组自行设计,固定 6 根直径为 2 mm SMA 丝的夹具在测试过程中未出现 SMA 丝滑移现象,可靠度较高。合金丝夹具与固定于墙体的直径 16 mm 高强螺杆连接,高强螺杆的刚度远大于 SMA 丝,在加载过程中,高强螺杆产生微小的变形,较 SMA 丝的变形可忽略不计,因此,组合杆件中的 SMA 丝依然具备超弹性特性。SMA 丝加固古塔墙体、SMA 丝和夹具连接细部构造和螺杆固定构造分别如图 2、图 3 和图 4 所示。由于 SMA 丝的超弹性特性,当墙体加载时,受拉伸的 SMA 丝应变逐渐增大,在应变增大的过程中消耗能量,进而减小原本由墙体损伤所消耗的能量,由于经过加卸载训练的 SMA 丝几乎不存在残余变形,受压缩的 SMA 丝应变逐渐恢复。

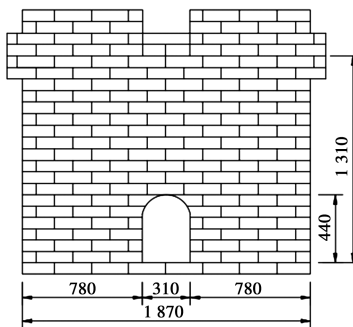


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen size(unit: mm)

## 1.2 材料力学性能

古塔墙体试件通过糯米灰浆和青砖砌筑而成,灰缝厚度为 10 mm。青砖的抗压强度根据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)<sup>[15]</sup>测得,其平均值为 7.04 MPa。糯米灰浆的抗压强度根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)<sup>[16]</sup>测得,其平均值为 1.07 MPa。

采用的直径 2 mm SMA 丝的相变温度  $A_f < 0$ ,即在常温下就拥有超弹性,主要成分见表 1。为了

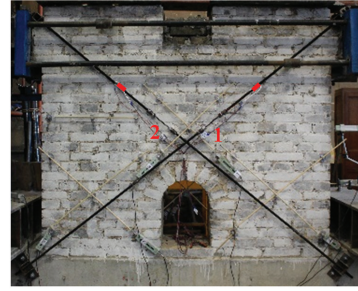


图 2 SMA 丝加固试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SMA wire reinforced specimen

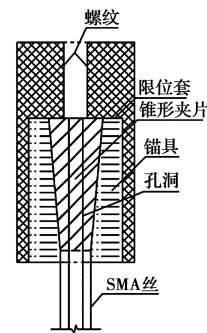


图 3 SMA 丝和夹具连接细部构造

Fig. 3 Detailed structural drawing of SMA wire and fixture connection

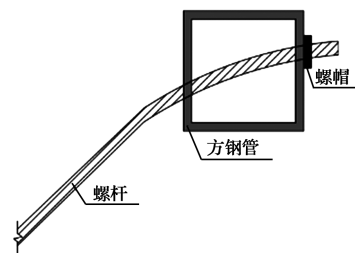


图 4 螺杆固定构造图

Fig. 4 Screw fixing structure drawing

保证 SMA 丝在超弹性工作范围内消耗能量,通过 5 根 SMA 丝循环加载试验得到不同的增量应变幅值来确定 SMA 丝的超弹性极限应变。循环加载试验每级应变增量为 4%,循环 3 次,加载速率为 0.3 mm/s,其中一根 SMA 丝的试验结果如图 5 所示,其中,黑色线条表示不同增量应变幅值 SMA 丝的应力-应变关系,红色线条表示 SMA 丝在超弹性范围的包络线, SMA 丝的超弹性极限应变约为 0.12,说明在此范围内,载荷不会导致 SMA 丝产生较大的不可恢复变形。图 6 显示了 SMA 丝在不同应变幅值下的能量耗散, SMA 丝的耗能随着应变幅值的增加近似线性增加,这一规律与文献[17]得到的结论一致,应变幅值每增加 1%, SMA 丝的耗能约增加 2.2 MJ/m<sup>3</sup>。说明 SMA 丝可通过吸收原本由古

塔墙体损伤所消耗的能量来达到提高其抗震性能的目的。与普通钢筋仅进入弹塑性阶段之后才开始耗能不同,SMA 丝能在超弹性阶段耗散大量的能量,且普通钢筋耗能后产生较大残余变形,而 SMA 丝可通过反复加卸载训练保持稳定的超弹性状态。为了提高古塔墙体的耗能,在加载前对 SMA 丝进行 6%的预拉伸。

表 1 SMA 丝主要成分及含量

Table 1 Main composition and content of SMA wire

成分	含量/%
Ni	55.86
Ti	44.05
C 及其他	0.09

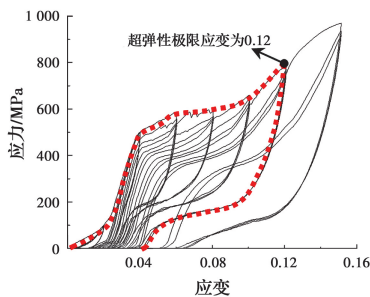


图 5 SMA 丝循环加载结果

Fig. 5 Cyclic loading results of SMA wire

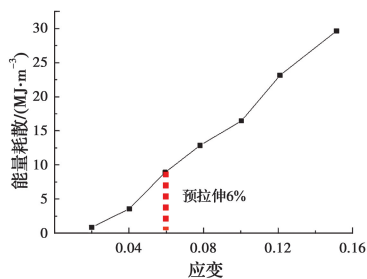


图 6 SMA 丝能量耗散

Fig. 6 Energy dissipation of SMA wire

为了使 SMA 丝保持稳定的完全超弹性状态(消除残余变形)并进一步研究其力学性能,对 6 根形状记忆合金丝在关键应变幅值 0.12 下进行了加卸载训练(循环加载试验)。根据图 7 所示的方法计算 SMA 丝的力学性能,具体数值见表 2。

表 2 SMA 丝力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of SMA wire

材料	奥氏体弹性模量/GPa	相变模量/GPa	正相变开始应力/MPa	抗拉强度/MPa
SMA 丝	28	5	300	989

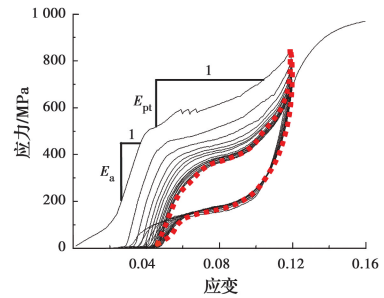
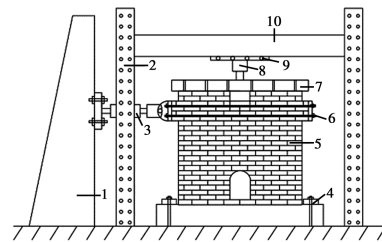


图 7 SMA 丝力学性能测试

Fig. 7 Mechanical properties test of SMA wire

### 1.3 试件加载与量测方案

试验前先进行预加载以检查仪器,预加载值为开裂荷载的 20%。试件加载装置如图 8 所示。试验采用低周反复加载,竖向施加 0.24 MPa 的均布荷载,依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[18]</sup>,水平方向采用位移控制方式加载。按 0.5 mm 的级差增加位移,每级循环 3 次,当墙体承载力下降 15% 以上时,认为试件破坏。



注: 1.反力墙; 2.反力框架; 3.电液压伺服作动器; 4.压梁; 5.墙体试件; 6.水平连接装置; 7.刚性垫梁; 8.液压千斤顶; 9.滑动支座; 10.反力梁

图 8 试验加载装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of test loading device

位移传感器的布置如图 9 所示。所有位移传感器均设置在前后两侧,以消除弯曲的影响。传感器 S1 测量墙体底部的滑动,传感器 S2~S4 测量墙体的面内横向变形,传感器 S5~S10 检测墙体的对角裂纹,传感器 S11 测量横向裂纹长度,并仔细记录裂纹的开展路径。

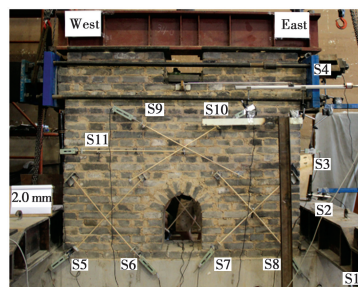


图 9 传感器布置图

Fig. 9 Sensor layout drawing

## 2 试验现象

### 2.1 W-1 试件

位移为 0.6 mm 时,砖拱中部出现竖向细裂缝,这是由于砖拱部位青砖特殊的排列方式与洞口的存在导致截面的削弱引起的。随着位移的增加,裂缝向上沿灰缝延伸 3 匹砖。位移为 1.5 mm 时,砖拱顶部半圆范围内,出现较多细裂缝。位移增加到 3.5 mm 时,墙体中部细裂缝向上延伸了 7 匹砖,距顶部仅剩 4 匹砖,同时,墙体左下角和右下角最外层砖出现了竖向灰缝破坏,墙体内部个别砖块被压坏。位移达到 5.0 mm 时,砖拱部位灰浆掉落严重,砖块位置错动不大,其他部位没有明显的破坏。位移继续增加,墙体高度 1/3 附近(约为洞口顶部高度)洞口两侧墙体出现了大量竖向裂缝和 45°斜向裂缝,且发展很快。位移达到 8.0 mm 时,裂缝发展到墙体底部,宽度增加至 3 mm,并向上延伸到墙体高度的 2/3,数量和宽度均小于下部,墙体上部裂缝宽度约为 2 mm。位移达到 9.0 mm 时,左右均形成高瘦的“X”型主裂缝,墙体承载力开始快速下降,位移达到 11.5 mm 时,试件破坏,加载结束。

### 2.2 W-2 试件

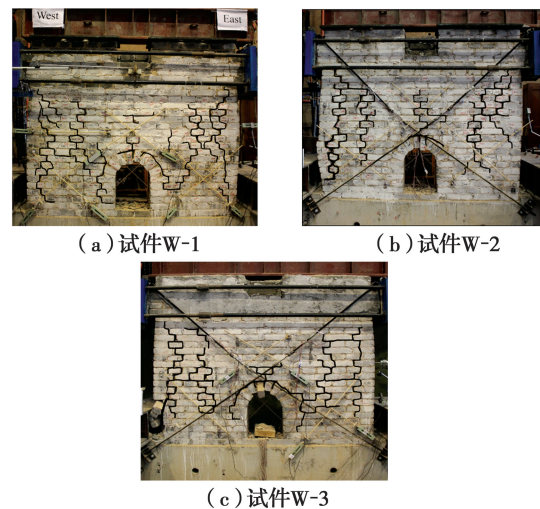
位移为 0.6 mm 时,拱顶出现剪切裂缝,这与未加固墙体现象类似。位移为 1.5 mm 时,拱顶裂缝向上延伸 2 匹砖,墙体 1/2 高度靠近两边的范围内竖向灰缝出现裂缝。位移为 4.0 mm 时,两边的竖向裂缝继续增多,墙体上部中间也出现裂缝,对角线附近一定范围内没有出现裂缝。位移为 6.0 mm 时,墙体右边出现斜向贯穿裂缝,加固范围内仍没有裂缝,这说明了 SMA 丝加固能够限制裂缝的产生与发展。位移为 8.0 mm 时,右边裂缝发展到底部,此时,中部裂缝宽度约为 2 mm,明显小于未加固墙体的裂缝,且裂缝并未出现明显向上延伸的趋势;左边也出现类似裂缝,个别小裂缝跨过对角线加固部位。位移为 10.0 mm 后,裂缝不断延伸并迅速加宽,两条主裂缝错动有限。位移为 14.5 mm 时,因试件破坏严重,试验结束。

### 2.3 W-3 试件

试件 W-3 自身已经带有裂缝,无法观察裂缝的开展情况,仅观察其变形情况。随着加载进行,闭合的裂缝再次张开。位移为 4.0 mm 时,两边的“X”型裂缝再次形成,被裂缝分割成的小块都绕“X”型裂缝交点转动,位移越大,转动效果越明显,裂缝

的宽度也越大;位移为 6.0 mm 时,洞顶的砖在往复荷载中逐渐下落;位移为 8.0 mm 时,裂缝不断加宽,中部裂缝宽度超过 3 mm;位移为 11.5 mm 时,洞口上部砖块有掉落危险,为保护洞口中的导线,垫入木块;最终,位移为 14.5 mm 时,墙体左下角破坏,试验结束,整个过程中灰缝有严重的压碎、掉落现象。

3 片墙体达到破坏状态的裂缝分布如图 10 所示。3 片墙体均发生剪切型破坏,说明 SMA 丝加固并未改变古塔墙体的破坏模式,这与注浆加固古塔墙体得到的结论一致<sup>[6]</sup>。



(a) 试件W-1 (b) 试件W-2



(c) 试件W-3

图 10 试件破坏形态

Fig. 10 Failure modes of specimens

## 3 试验结果及分析

### 3.1 滞回曲线

3 组试件的滞回曲线如图 11 所示。

试件开裂前,荷载-位移曲线基本呈线性,随着位移的增加,试件的损伤逐渐累积,滞回环的面积逐渐增大,试件耗能不断增大。与试件 W-1 相比,试件 W-2 的滞回环更加饱满,表明 SMA 丝加固能够有效提高墙体的耗能能力。

由于墙体相对地面滑移和墙体开裂的影响,各试件均出现了明显的捏拢现象,滞回环呈反“S”型,当试件达到峰值荷载时,滞回曲线的捏拢效应更加明显,卸载时曲线出现了明显的刚度退化现象。

试件 W-3 损伤严重,灰缝压碎掉落,导致捏拢点更低,捏拢现象更严重。相比于完好试件,滞回环的面积大大降低,说明大量灰缝经反复荷载作用,已经被压碎和掉落,致使摩擦系数降低,位移小于 10 mm 时的加载刚度很小。

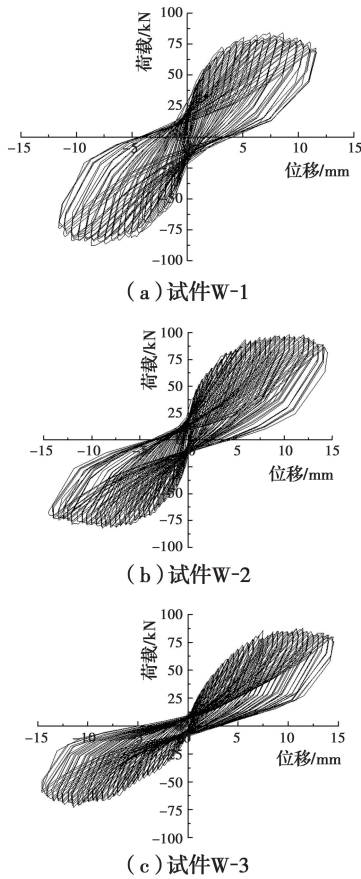


图 11 荷载-位移曲线  
Fig. 11 Load-displacement curves

### 3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 12 所示,骨架曲线特征点见表 3。各特征点按照文献[19]的方法确定,其中,屈服点按照能量等值法计算,极限点取峰值荷载

85%时对应的点。位移延性系数  $\mu$  取极限位移与屈服位移的比值。

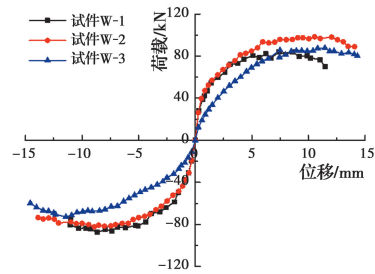


图 12 骨架曲线  
Fig. 12 Skeleton curves

由图 12 和表 3 可知:

1)采用 SMA 丝加固墙体的骨架曲线在形式上与未加固墙体的相同,均可分为弹性段、开裂段和滑移段。

2)正向加载时,试件 W-2 的峰值荷载较试件 W-1 提高了 16.92%,正、负向加载极限位移分别增加了 22.66%和 24.43%,表明 SMA 丝加固能够有效提高古塔墙体的承载力和变形能力。

3)试件 W-3 与 W-1 相比,由于试件 W-3 为损伤试件,墙体的初始损伤降低了墙体的整体性和整体刚度,前期承载力和刚度低于试件 W-1,但试件 W-3 的极限位移在正、负向加载过程中均高于试件 W-1,试件 W-3 的承载能力接近甚至超过了完好墙体,正向加载时,试件 W-3 的极限承载力明显高于试件 W-1,表明 SMA 丝加固损伤墙体能够显著提高其延性,且后期承载力甚至超过了完好墙体。

4)正、负加载过程中,试件 W-2 和 W-3 的极限

表 3 各试件骨架曲线特征点

Fig. 3 Characteristic points of skeleton curve of specimens

试件编号	加载方向	屈服点		峰值荷载点		极限点		$\mu$
		$P_y/kN$	$\Delta_y/mm$	$P_{max}/kN$	$\Delta_{max}/mm$	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$	
W-1	正	72.40	3.10	84.13	7.39	70.00	11.48	3.67
	负	69.46	3.78	87.61	8.65	72.77	11.15	2.94
W-2	正	81.34	4.03	98.36	10.55	89.02	14.08	3.50
	负	68.04	3.70	82.31	8.92	73.52	13.87	3.75
W-3	正	75.58	5.98	87.75	10.82	80.23	14.33	2.40
	负	62.63	6.98	72.92	11.42	59.72	14.56	2.04

位移较试件 W-1 均有一定提高,试件 W-3 的初始损伤主要为洞口两侧的高瘦“X”型主裂缝,加载过程中,裂缝张开并不断加宽、延伸,依然保持“X”型裂缝,因此,刚度和承载力低于完好墙体,随着荷载的增加,SMA 丝的约束作用逐渐增强,因此,后期承载

力接近甚至超过完好墙体,试件 W-2 的承载力仅在正向加载过程中提升明显,说明负向加载所对应的 SMA 丝还有待进一步设计。

### 3.3 剪切变形分析

加固前后古塔墙体均发生剪切型破坏,剪切变

形在墙体整体变形中占比较大,因此,有必要对墙体试件的剪切变形进行分析。测量剪切变形的位移传感器布置如图 9 所示。采用式(1)计算各墙体试件的剪切变形<sup>[20]</sup>。

$$\gamma = \frac{\sqrt{L^2 + h^2}}{2Lh} (a_1 + a_2 + b_1 + b_2) \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为墙体试件的剪切角,rad; $L$ 和 $h$ 分别为测量区域的边长,mm; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 和 $b_2$ 为墙体两对角线的伸长量,mm。剪切变形计算示意如图 13 所示。

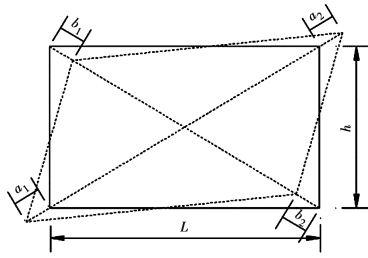


图 13 剪切变形计算简图

Fig. 13 Calculation diagram of shear deformation

图 14 显示了 3 片墙体试件在其屈服点和峰值点洞口左侧的剪切角(由于各剪切变形规律相同,仅给出洞口左侧剪切变形的结果)。极限点的数据由于墙体裂缝过大导致失真,因此未列出。试件 W-2 的剪切角从加载初期就均小于试件 W-1,表明 SMA 丝在加载初期已经发挥作用,这是由于在加载前对 SMA 丝进行了 6% 的预拉伸。随着位移的增加,试件 W-2 的剪切角较试件 W-1 减小的幅度更大,这说明 SMA 丝加固能够有效限制墙体的剪切变形,且随着位移的增加,SMA 丝展现出更强的限制墙体剪切变形的能力。当位移较小时,试件 W-3 的剪切角略大于试件 W-1,随着位移的增大,试件 W-3 的剪切角渐渐接近甚至小于试件 W-1,这说明 SMA 丝在剪切变形的限制上发挥了明显的作用。

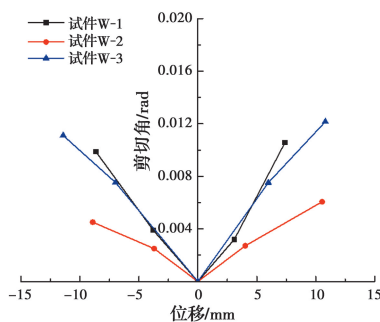


图 14 墙体试件剪切变形

Fig. 14 Shear deformation of wall specimens

### 3.4 耗能能力

采用等效粘滞阻尼系数来评估古塔墙体的耗能

能力<sup>[21]</sup>。

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_h}{E_s} \quad (2)$$

式中: $E_h$ 为古塔墙体所耗散的能量; $E_s$ 为每次荷载作用下的应变能。

图 15 显示了 3 片墙体试件的等效粘滞阻尼系数。由图可知,试件 W-1 的初始等效粘滞阻尼系数最大,随着位移的不断增大,等效粘滞阻尼系数呈下降趋势,这是由于墙体砖块未经机械压缩或烘烤、墙体的初始残余变形较大,也说明随着位移的增大,墙体的耗能逐渐降低。

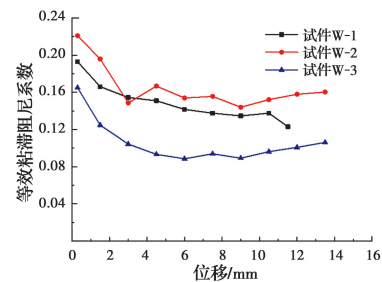


图 15 等效粘滞阻尼系数

Fig. 15 Equivalent viscosity damping ratios

试件 W-2 的阻尼系数均超过试件 W-1 (3 mm 处除外),这说明试件 W-2 的耗能能力明显高于试件 W-1,同时也说明 SMA 丝从试件加载初期便开始参与耗能,这是由于 SMA 丝进行了 6% 的预拉伸,在加载初期便具备较强的耗能能力。且在加载中后期,整体曲线保持平稳并呈现缓慢上升趋势,试件 W-2 的耗能可分为墙体耗能和 SMA 丝耗能,这说明随着位移的增加,SMA 丝耗能不断提高。

对比试件 W-3 和 W-1,发现试件 W-3 初期的等效阻尼系数高于试件 W-1 末期,随后快速下降并稳定在 0.1 附近,在后期缓慢上升,接近试件 W-1 末期的水平。等效阻尼系数前期较高,可能是由于试件经过整理,裂缝闭合,摩擦接触面大,待裂缝再次张开后,便快速下降。由于灰缝破坏程度更加严重,耗能能力较低,加载中后期,试件 W-3 的整体曲线保持平稳并缓慢上升,与试件 W-2 的变化趋势相同,说明 SMA 丝耗能不断提高,试件 W-3 的耗能明显提升。

### 3.5 刚度退化

不同顶点位移下的侧向刚度通过该点的割线刚度来表征。第  $i$  级割线刚度  $K_i$  按式(3)计算。

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中:  $+F_i$ 、 $-F_i$  分别为正、负向峰值荷载;  $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$  分别为正、负向峰值荷载所对应的位移。所有试件在不同侧移角下的侧向刚度见表 4, 侧向刚度  $K$  退化曲线如图 16 所示。

表 4 各试件的侧向刚度

Fig. 4 Lateral stiffness of specimens

试件 编号	$K_i/(kN \cdot mm^{-1})$		
	$\theta=1/1\ 000$	$\theta=1/500$	$\theta=1/250$
W-1	36.77	22.43	13.95
W-2	30.78	20.33	12.63
W-3	22.48	16.44	13.05

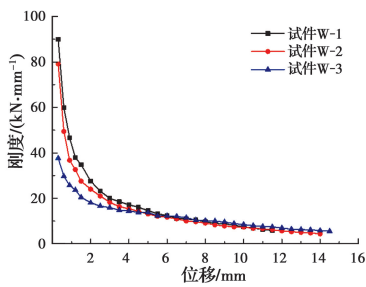


图 16 刚度退化

Fig. 16 Stiffness degradation

由表 4 和图 16 可知:

1) 随着位移的增加, 墙体的刚度不断减小, 这是由于墙体在加载过程中产生了累积损伤; 墙体开裂段刚度迅速退化, 退化速率不断降低; 到达滑移段后, 试件刚度逐渐趋于稳定, 刚度退化速率逐渐减小, 趋近于 0。

2) 试件 W-2 的初始刚度低于试件 W-1, 主要是由于砌体的离散性较大, 试件间存在差异。试件 W-2 的后期刚度超过了试件 W-1。试件 W-2 的刚度退化曲线较试件 W-1 更为平缓, 这是由于 SMA 丝良好的拉伸性能, 说明 SMA 丝加固能在一定程度上改善墙体的脆性破坏, 提高墙体的变形能力。

3) 试件 W-3 的初始刚度 (37.66 kN/mm) 明显低于试件 W-1 (89.98 kN/mm), 高于试件 W-1 的末期刚度 (5.86 kN/mm), 这是因为试件 W-3 是由损伤试件经过整理、裂缝闭合形成的。试件 W-3 的刚度退化曲线更为平缓, 这说明 SMA 丝能有效限制墙体裂缝的发展, 减缓墙体的损伤发展。

### 3.6 SMA 丝应变

为了分析 SMA 丝在墙体加载过程中发挥的作用, 对试件 W-2 和 W-3 中 SMA 丝的应变进行了分析。应变片布置于螺杆上 (图 2), 螺杆主要起到传

力的作用, SMA 丝和螺杆受到的力是相等的, 试验中通过测得螺杆的应变, 并通过受力大小相等原理以及螺杆和 SMA 丝的应力-应变关系可得到 SMA 丝的应变, 螺杆起到固定 SMA 丝的作用, SMA 丝起到对墙体变形约束的作用, 其中, 螺杆的应力-应变关系见式 (4)。SMA 丝应变变化如图 17 所示, 其中, SMA 丝 1 的应变位于正向加载位移处, SMA 丝 2 的应变位于负向加载位移处。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & (\epsilon \leq \epsilon_{sy}) \\ f_y + 0.01 E_s (\epsilon - \epsilon_{sy}) & (\epsilon_{sy} < \epsilon \leq \epsilon_{su}) \\ 0 & (\epsilon > \epsilon_{su}) \end{cases} \quad (4)$$

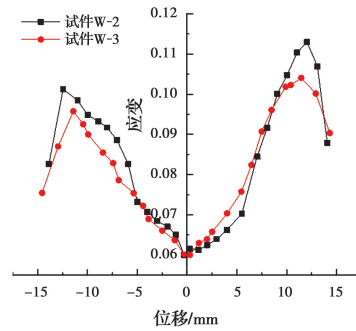


图 17 试件 W-2 和 W-3 的 SMA 丝应变发展

Fig. 17 SMA wire strain development of specimens

W-2 and W-3

由图 17 可知:

1) SMA 丝应变随着加载位移的增大而增大, 在 6 mm 之前, 曲线出现了较为明显的拐点, 这是由于墙体的开裂引起 SMA 丝应变快速增大, 这也解释了 SMA 丝的耗能和限制墙体剪切变形的能力随位移的增大不断增强。

2) SMA 丝 1 的正、负峰值应变分别为 0.113 和 0.104, 而 SMA 丝 2 的正、负峰值应变分别为 0.101 和 0.096, SMA 丝 1 的应变明显超过 SMA 丝 2, 这是由于 SMA 丝在张拉过程中存在误差而导致初始状态有所不同, 且在试件推拉过程中, SMA 丝交替发挥作用 (SMA 丝 1 先于 SMA 丝 2) 引起墙体两侧损伤不同, 这也说明在正向加载过程中 SMA 丝发挥的作用更加明显, 也解释了在正向加载过程中 SMA 丝加固更能有效提高墙体的承载力。

3) 当加载位移超过峰值位移后, SMA 丝的应变才达到峰值, 说明 SMA 丝的耗能能力在加载过程中发挥得较为充分, SMA 丝应变达到峰值后快速下降, 这是由于墙体破坏严重导致 SMA 丝逐渐松弛, 这同时也说明了 SMA 丝在墙体加载过程中发挥了较大作用, 可作为古塔墙体的有效保护措施。



4)在加载初始阶段,试件 W-3 中 SMA 丝受到的拉力与试件 W-2 基本相当,甚至超过试件 W-2,但由于试件 W-3 带有严重的初始损伤,试件 W-3 的初始刚度低于试件 W-1,随着位移的增加,试件 W-2 中 SMA 丝发挥的作用较试件 W-3 更为明显。

## 4 结论

1)针对古塔墙体的破坏特征,提出 SMA 丝抗震加固古塔墙体的新技术。SMA 丝的耗能随着应变幅值的增加近似线性增加,应变幅值每增加 1%,SMA 丝的耗能约增加 2.2 MJ/m<sup>3</sup>,SMA 丝能吸收原本由墙体损伤所消耗的能量,起到保护古塔墙体的作用。

2)古塔墙体的拟静力试验研究表明,由于 SMA 丝良好的拉伸性能,SMA 丝加固虽未改变墙体的破坏形态,但在一定程度上可改善墙体的脆性破坏,限制裂缝的产生与发展。

3)由于 SMA 丝极强的耗能能力,能有效分担古塔墙体的损伤耗能,提升墙体的延性和耗能能力,SMA 丝的耗能随着位移的增加不断增大。

4)SMA 丝加固能有效提高古塔墙体的承载力和变形能力,墙体的承载力和极限位移分别从加固前的 84.13 kN 和 11.48 mm 提高到 98.36 kN 和 14.08 mm,提高幅度分别为 16.91%和 22.65%。SMA 丝加固损伤墙体的后期承载力和变形能力甚至超过了完好墙体,但其弹性段和开裂段刚度和承载力明显低于完好墙体,可考虑采用 SMA 丝和灌浆或勾缝等结合的复合加固方法提高墙体的刚度和承载力。

5)由于 SMA 丝进行了 6%的预拉伸,在加载初期就能有效限制墙体的剪切变形,且 SMA 丝限制墙体剪切变形的能力随位移的增加而不断增强。

6)由于试件数量有限,尚需进一步研究 SMA 丝长度、直径等对墙体加固效果的影响,以便得到最优的加固设计参数并提出相应的设计公式。

### 参考文献:

[1] 俞茂宏. 古建筑结构研究的历史性、艺术性和科学性[J]. 工程力学, 2004, 21(Sup1): 190-213.  
YU M H. Studies on the historical, art and scientific characteristic of ancient structures [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(Sup1): 190-213. (in Chinese)

[2] 卢俊龙, 李晓蕾. 内填黏土实心结构砖塔振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 154-162.

LU J L, LI X L. Shaking table test on brick masonry pagoda with solid structure in-filled by clay [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 154-162. (in Chinese)

[3] 卢俊龙, 李传立, 韩鑫, 等. 竖向荷载下砖石古塔的损伤性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 164-175.  
LU J L, LI C L, HAN X, et al. Damage performance of ancient masonry pagodas under the vertical load [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 164-175. (in Chinese)

[4] 卢俊龙, 李凯, 李嘉怿. 某宋代砖塔结构整体损伤识别分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 61-66.  
LU J L, LI K, LI J Y. Analysis of integrated damage for a masonry pagoda built in song dynasty [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 61-66. (in Chinese)

[5] SOTI R, ABDULRAHMAN L, BARBOSA A R, et al. Case study: Post-earthquake model updating of a heritage pagoda masonry temple using AEM and FEM [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 109950.

[6] 王善伟, 王社良, 杨涛, 等. 古砖墙注浆加固性能试验及滞回模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9): 1295-1302.  
WANG S W, WANG S L, YANG T, et al. Performance tests and hysteretic model research on ancient brick walls reinforced by grouting [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(9): 1295-1302. (in Chinese)

[7] 魏智辉, 潘毅, 邱洪兴, 等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 184-188.  
WEI Z H, PAN Y, QIU H X, et al. Experimental study on compressive behavior of masonry walls strengthened with pointing mortar [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 184-188. (in Chinese)

[8] 呼梦洁, 张苏俊, 李胜才, 等. 砖石古塔灌浆与围箍加固的抗震性能研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(11): 1196-1199.  
HU M J, ZHANG S J, LI S C, et al. Research on seismic behavior of masonry pagoda strengthened by grouting and surrounding-hoop [J]. Architecture Technology, 2017, 48(11): 1196-1199. (in Chinese)

[9] XIE Q F, ZHANG L P, ZHOU W J, et al. Cyclical behavior of timber mortise-tenon joints strengthened with shape memory alloy: Experiments and moment-

- rotation model [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2019, 13(8): 1209-1222.
- [10] 董金芝, 李向民, 张富文, 等. 基于 SMA 装置的框架-受控摇摆墙结构抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(4): 41-51.  
DONG J Z, LI X M, ZHANG F W, et al. Experimental study on seismic performance of frame-controlled rocking wall structures using SMA devices [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(4): 41-51. (in Chinese)
- [11] 王凤华, 周福霖, 黄襄云, 等. 新型形状记忆合金阻尼器在古塔抗震加固中的应用与优化分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2011, 33(2): 43-49.  
WANG F H, ZHOU F L, HUANG X Y, et al. Application and optimization analysis of new type shape memory alloy damper in seismic strengthening of ancient tower [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2011, 33(2): 43-49. (in Chinese)
- [12] 赵祥, 王社良, 周福霖, 等. 基于 SMA 阻尼器的古塔模型结构振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 219-223.  
ZHAO X, WANG S L, ZHOU F L, et al. Shaking table tests for ancient pagoda model structure based on shape memory alloy actuating devices [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 219-223. (in Chinese)
- [13] 王社良, 刘伟, 杨涛. 西安小雁塔结构振动控制试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(16): 113-121.  
WANG S L, LIU W, YANG T. Experimental study on vibration control of Xiaoyan pagoda in Xi'an [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(16): 113-121. (in Chinese)
- [14] XIE Q F, XU D F, WANG Y Z, et al. Seismic behavior of brick masonry walls representative of ancient Chinese pagoda walls subjected to in-plane cyclic loading [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2019, 180: 1-13.
- [15] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
Test methods for wall bricks; GB/T 2542-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [16] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Standard for test method of basic properties of construction mortar; JGJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 刘博, 王社良, 李彬彬, 等. 一种考虑应变幅值和应变速率影响的超弹性 SMA 宏观唯象本构模型[J]. *材料导报*, 2020, 34(14): 14161-14167.  
LIU B, WANG S L, LI B B, et al. A superelastic SMA macroscopic phenomenological model considering the influence of strain amplitude and strain rate [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(14): 14161-14167. (in Chinese)
- [18] 建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Specification for seismic test of building; JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [19] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.  
TANG J R. Seismic resistance of reinforced concrete frame joints [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989. (in Chinese)
- [20] 冯榆晟, 伍云天, 胡逸轩, 等. 钢板混凝土联肢剪力墙子结构抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(Sup1): 18-30.  
FENG Y S, WU Y T, HU Y X, et al. Experimental study on seismic performance of coupled steel plate and concrete composite walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Sup1): 18-30. (in Chinese)
- [21] XUE J Y, WU C W, ZHANG X C, et al. Effect of pre-tension in superelastic shape memory alloy on cyclic behavior of reinforced mortise-tenon joints [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 118136.

(编辑 王秀玲)