

DOI:10.11918/202312025

# 形状记忆合金嵌入式加固钢筋混凝土柱 抗震性能试验

邢国华, 赵嘉华, 常召群, 王浩楠, 陆勇健

(长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)

**摘要:** 为研究形状记忆合金(SMA)嵌入式加固法对钢筋混凝土柱抗震性能的影响,设计制作6根SMA嵌入式加固钢筋混凝土柱试件,通过低周往复荷载试验研究SMA筋加固混凝土柱的破坏过程及破坏模式,分析SMA加固量、轴压比和环包CFRP布对加固柱滞回性能、位移延性、刚度退化和耗能等抗震性能的影响,基于数字图像相关法分析SMA筋嵌入式加固柱的曲率分布。结果表明:SMA筋嵌入式加固钢筋混凝土柱因柱脚处纵向受拉钢筋屈服和混凝土压溃形成塑性铰而破坏,主要表现为延性破坏模式;相同轴压比下,加固柱试件较普通混凝土柱承载力提高了51.2%~70.2%,位移延性和累计耗能也得到提升,抗震性能显著改善;随加固量增加,SMA筋嵌入式加固柱的耗能、塑性铰长度和极限位移显著提高;在层间位移角达到1/50之前,承载力没有明显下降;轴压比增大至0.4时,加固柱的峰值荷载和耗能能力增大,延性显著降低,环包CFRP布后加固柱的变形和耗能明显改善。基于平截面假定,提出SMA筋嵌入式加固钢筋混凝土柱受弯承载力计算模型,计算结果与试验结果吻合良好。

**关键词:** 钢筋混凝土柱;形状记忆合金;抗震性能;嵌入式加固;承载力;数字图像相关法

中图分类号: TU375.3 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)02-0078-12

## Seismic behavior of RC columns strengthened with near-surface mounted shape memory alloy bars

XING Guohua, ZHAO Jiahua, CHANG Zhaoqun, WANG Haonan, LU Yongjian

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To investigate the effect of the near-surface mounted (NSM) technique using shape memory alloy (SMA) bars on the seismic performance of reinforced concrete columns, six reinforced concrete (RC) columns strengthened with near-surface mounted (NSM) shape memory alloy (SMA) bars were designed and fabricated to investigate the failure process and failure modes of SMA-reinforced concrete columns through low-cyclic reversed loading tests. The effect of SMA reinforcement ratios, axial compression ratio and CFRP wraps on the seismic performance of the columns, including hysteresis performance, displacement ductility, stiffness degradation, and energy dissipation capacity of those columns, were analyzed. Additionally, the curvature distribution of reinforced concrete columns strengthened with near-surface mounted SMA bars was analyzed based on the displacement field provided by the digital image correlation (DIC) method. Results indicated that the failure of concrete columns reinforced with SMA bars results from the yield of longitudinal tension reinforcement and concrete crushing at the column base, forming plastic hinges. This primarily exhibits a ductile failure mode. Under the same axial compression ratio, the load bearing capacity of the strengthened columns increased by 51.2% to 70.2% compared to ordinary RC column. Displacement ductility and the cumulative energy dissipation of the columns were also increased, significantly enhancing the seismic performance. As the amount of SMA reinforcement increased, the energy dissipation capacity, the length of the plastic hinges and the ultimate displacement of the strengthened columns greatly improved. The bearing capacity of the strengthened columns did not show a significant decrease before the drift ratio reached 1/50. As the axial compression ratio increased to 0.4, the peak load and energy dissipation capacity increased, while the ductility decreased significantly. The deformation performance and energy dissipation capacity of the columns wrapped with CFRP improved obviously. Additionally, based on the plane sections assumption, a theoretical calculation model that predicts the flexural bearing capacity of the SMA bar

收稿日期: 2023-12-11; 录用日期: 2024-02-01; 网络首发日期: 2024-03-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240319.0856.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52178106, 52308137); 陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0617); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102281303)

作者简介: 邢国华(1983—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 常召群, czq199212@163.com

strengthened columns was established. The calculated results were in good agreement with the test results.

**Keywords:** reinforced concrete column; shape memory alloys; seismic behavior; near-surface mounted; bearing capacity; digital image correlation method

钢筋混凝土(RC)柱是框架结构中的主要抗侧力构件,其抗震性能关系到地震灾害中建筑物的安危<sup>[1]</sup>。随着新抗规实施、结构使用功能改变及恶劣环境侵蚀作用等因素<sup>[2-3]</sup>,中国许多老旧混凝土建筑的抗震性能不满足现行规范的相关要求,故对框架结构的重要抗侧力构件 RC 柱进行加固补强以保障结构抗震安全至关重要。

嵌入式加固(near surface mounted, NSM)技术是在混凝土构件表面开槽并利用填充材料将加固材料黏结到加固槽中的加固方法<sup>[4]</sup>,与传统加固方式相比,嵌入式加固技术具有加固系统黏结性能好、不改变构件截面尺寸、施工工期短等优点<sup>[5]</sup>。纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)因具有轻质高强、耐久性好等优点被用于嵌入式加固柱中<sup>[6]</sup>,然而由于 FRP 材料的线弹性材料性能,FRP 嵌入式加固混凝土柱易发生脆性破坏,材料强度利用率低<sup>[7-9]</sup>。为了克服 FRP 嵌入式加固技术的劣势,需要采用延性良好的材料替换 FRP 加固材料。

近年来,形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)由于其形状记忆效应、超弹性、高阻尼、耐腐蚀和耐疲劳等优点<sup>[10]</sup>,在结构变形控制、耗能减震等方面取得了很大进展,已成为工程加固领域的研究热点。相关学者采用 SMA 丝或条带对混凝土构件进行加固<sup>[11-17]</sup>,开展了相关的试验研究和理论分析。El-Hacha 等<sup>[15]</sup>对预应力 SMA 嵌入式加固混凝土梁的力学性能进行了研究,结果表明,加固梁的受弯承载力和延性有所提高,但是所采用的铁基 SMA 表面光滑未做处理,加载过程中与填充材料出现脱粘现象,严重影响加固效果。Sinha 等<sup>[16]</sup>研究了预应力 Ni-Ti SMA 丝嵌入式补强 RC 损伤梁的力学性能,对加固后的预损梁中 SMA 丝进行热激励后,梁体裂缝宽度减小,跨中挠度有所恢复,降低了构件损伤。潘盛山等<sup>[17]</sup>开展了 Ni-Ti SMA 丝主动约束加固钢筋混凝土墩柱的抗震性能试验研究,结果表明,热激励 SMA 丝显著提高了 RC 柱耗能能力和延性,减小了 RC 柱的残余位移。

现有关于 SMA 加固钢筋混凝土柱的研究主要集中在两个方面:一是利用 SMA 丝对混凝土柱进行环向约束;二是将 SMA 筋作为纵向受力筋替代传统钢筋。然而,不同的加固方式会导致加固效果产生显著差异,采用 SMA 筋加固构件可较大幅度提高构件承载力,影响加固材料与混凝土之间的黏结强度,

改变加固试件的破坏模式。对于 SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱的抗震性能,目前仍缺乏系统的试验研究。前期 SMA 筋加固混凝土柱抗震性能试验预研发现<sup>[18]</sup>,所采用的 SMA 筋表面光滑且未做端部处理,加载过程中 SMA 筋被拔出,承载能力提高幅度较低。

为深入研究 SMA 嵌入式加固对钢筋混凝土柱抗震性能的影响,设计了一种经过端部增大和表面粗糙处理的 SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱,以轴压比、SMA 加固筋配筋率和是否环包 CFRP 为变量开展低周往复荷载试验,分析试件的破坏过程及破坏模式,从滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能特性和曲率分布等方面研究了加固柱的抗震性能,并提出了 SMA 嵌入式加固 RC 柱的受弯承载力计算方法。

## 1 试验

### 1.1 试件设计及制作

以轴压比、SMA 加固筋配筋率和是否环包 CFRP 为变量,设计并制作了 5 个 SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱和 1 个普通钢筋混凝土柱,具体的设计参数见表 1。试件的几何尺寸和配筋如图 1 所示,柱截面尺寸为 250 mm × 250 mm,柱高为 1 700 mm,加载点至柱底的距离为 1 600 mm,保护层厚度为 30 mm。配置纵筋为 4 $\Phi$ 14 (HRB400 级钢筋),箍筋为  $\Phi$ 6@80 (HRB400 级钢筋),为防止局部压溃,柱端箍筋加密为  $\Phi$ 6@40,加密长度为 300 mm。加固筋采用直径为 12 mm 的 55.9% Ni-44.1% Ti (质量分数) SMA 筋,对棒材表面进行双旋向车削螺纹处理,螺距为 3.3 mm,牙深为 0.45 mm。其中,SMA 筋端部 15 mm 范围内套丝,螺距为 1.5 mm,并且安装 10.9 级 M12 螺母,增强 SMA 筋在底梁中的锚固效果(见图 1)。

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main design parameters of specimens

试件编号	$n$	$\rho_{\text{SMA}}/\%$	$n_t$
CC			0.1
SMA-1-W	1	0.38	0.1
SMA-2-W	2	0.76	0.1
SMA-2	2	0.76	0.1
SMA-2-0.4	2	0.76	0.4
SMA-2-W-0.4	2	0.76	0.4

注: $n$ 为单侧 SMA 筋个数; $\rho_{\text{SMA}}$ 为 SMA 加固筋配筋率; $n_t$ 为试验轴压比。试件编号中,“CC”表示未加固的钢筋混凝土柱,“SMA”表示采用形状记忆合金进行嵌入式加固,数字“1”和“2”分别表示试件单侧嵌入 SMA 筋数量,“W”表示环绕式 CFRP 包裹,“0.4”表示高轴压比试件,其试验轴压比为 0.4。

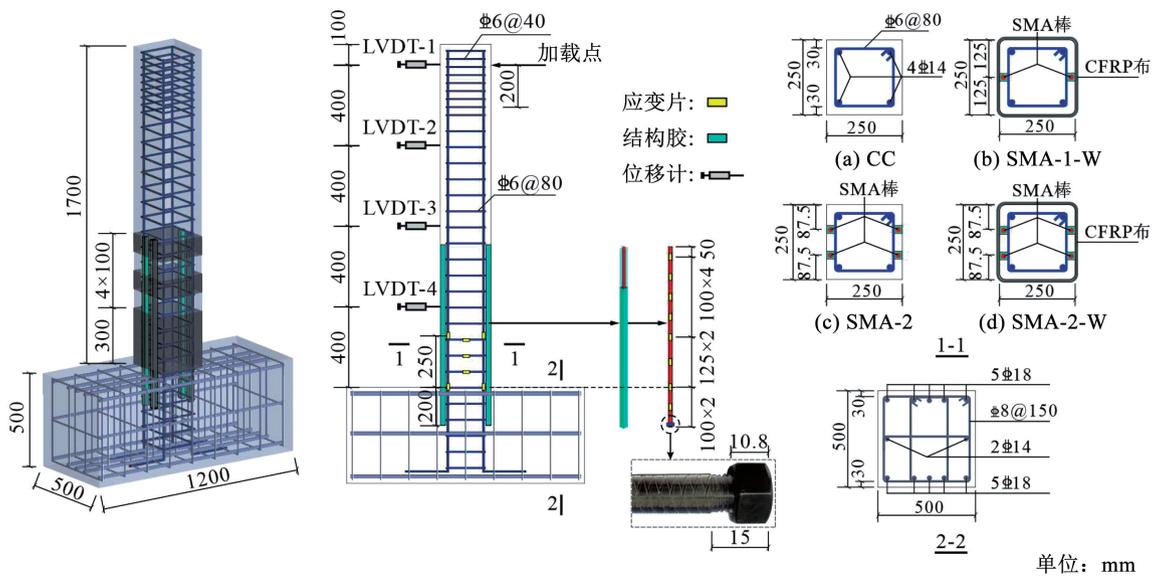


图 1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Geometry size and reinforcing bars of specimens

SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱的加固系统主要由 SMA 筋、结构胶和 CFRP 布构成。其中, SMA 筋不仅能作为纵向受力筋提高混凝土柱的承载能力,同时可在卸载阶段为构件提供恢复力,使其具备自复位功能;结构胶为 SMA 筋与混凝土之间提供黏结力;CFRP 布通过提供环向约束,间接提升混凝土的力学性能,防止 SMA 筋屈曲,避免加固系统过早发生剥离破坏<sup>[19]</sup>,提高材料利用率。

SMA 嵌入式加固柱设计应满足以下构造要求: SMA 筋的直径应小于混凝土保护层厚度,为增强 SMA 筋与混凝土的黏结性能,还应对 SMA 筋表面进行压痕、车削螺纹等粗糙处理,以及对其端部进行增大处理;对于混凝土保护层有严重缺陷或混凝土强度偏低的构件或结构,应对其先进行修复和补强;加固槽间距  $l$  需满足  $l \geq 2D_a$ ,  $D_a$  为 SMA 筋直径,加固槽至梁边缘距离  $x$  需满足  $x \geq 4D_a$ ;加固槽的最大尺寸不得超过保护层厚度,且应大于  $1.5D_a$ <sup>[20]</sup>。

SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱试件的加固施工工艺为:首先,根据设计加固筋位置,在基础内打孔,并在混凝土柱保护层内切割加固槽,孔洞和加固槽的截面尺寸为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ,对粘贴 CFRP 布的柱角部进行半径为  $15 \text{ mm}$  的倒角处理,并用高压气枪清理柱体表面、加固槽和基础孔洞。其次,用结构胶 Sikadur 30CN 填满孔洞和加固槽的一半,将 SMA 筋压入结构胶内,然后用结构胶填满加固槽,压实结构胶并抹平表面。最后,对粘贴 CFRP 布的部位涂刷 Sikadur 330CN 结构胶作底胶,在柱身环绕粘贴 3 层 CFRP 布,边贴边对 CFRP 布外表面涂刷 Sikadur 330CN 结构胶,用滚筒沿着纤维方向滚动以

挤出气泡;最后一层 CFRP 布粘贴完毕后在其表面涂抹一层结构胶。

## 1.2 试验材性

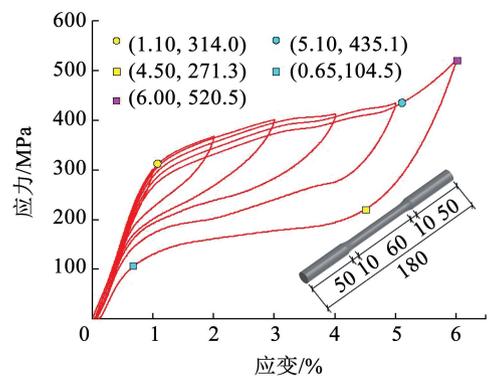
柱试件选用的混凝土强度等级为 C30,实测立方体抗压强度为  $44.3 \text{ MPa}$ 。纵筋和箍筋均采用 HRB400 级钢筋,其力学性能参数见表 2。

表 2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of materials

材料类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
钢筋 $\phi 6$	434.6	605.2	202
钢筋 $\phi 14$	442.3	616.5	203

SMA 筋的马氏体相变结束和开始温度分别为  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,奥氏体相变开始和结束温度分别为  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,常温下 SMA 筋具备超弹性。将 SMA 筋制成狗骨状试件,经  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  保持  $30 \text{ min}$  的热处理后进行变幅循环拉伸试验,结果<sup>[21]</sup>如图 2 所示。

图 2 SMA 筋应力-应变曲线<sup>[21]</sup>Fig. 2 Stress-strain relationship of SMA bars<sup>[21]</sup>

采用 Sikadur 30CN 和 Sikadur 330CN 双组份环氧树脂型结构胶 (epoxy resin adhesive) 作为 SMA 筋和 CFRP 布的黏结材料, 其力学性能见表 3。单层 CFRP 布厚度为 0.167 mm, 弹性模量为 237 GPa, 极限强度为 3 434 MPa。

表 3 结构胶力学性能

Tab. 3 Mechanical parameters of epoxy adhesive

材料类型	抗拉强度/ MPa	受拉弹性模量/ GPa	抗弯强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	伸长 率/%
Sikadur 330CN	49.7	2.55	79.5	17.1	1.84
Sikadur 30CN	40.0	3.2	50.0	20.0	

注: 空白表示未测量。

### 1.3 加载装置及加载制度

采用悬臂梁式加载方式, 试验装置如图 3 所示。采用 5 000 kN 液压千斤顶施加竖向荷载, 千斤顶与反力梁之间布设有可水平移动的滑板, 千斤顶下端设置万向铰, 保证轴压力始终保持竖直。本次实验采用位移加载控制方式<sup>[18,22]</sup>, 加载制度如图 4 所示, 以 4 mm 位移增量逐级加载, 每级位移幅值循环 3 次。当试件水平荷载降低至峰值荷载 80% 以下时, 试验终止。

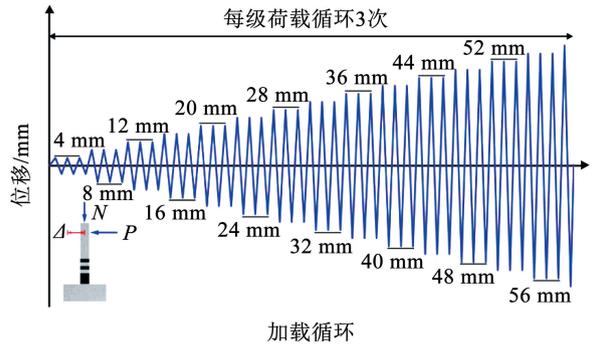


图 4 加载制度

Fig. 4 Loading system

### 1.4 测点布置及量测

通过 MTS 作动器记录试件的荷载-位移曲线。分别在底梁高 250 mm, 柱高 400、800、1 200 mm 处布设位移计, 位移计和应变片布设情况如图 1 所示。使用裂缝观测仪测量裂缝宽度, 记录裂缝分布情况。

采用基于数字图像相关技术 (digital image correlation method, DIC) 的非接触式三维动态全场应变测量系统对试件表面位移场进行采集。现场试验前, 在试件待测表面布置人工散斑 (图 3 (b)) 作为数据测点, 架设 3D 数字照相机和 DIC 数据采集仪, 记录各加载位移下试件的数字图像。

## 2 试验结果及分析

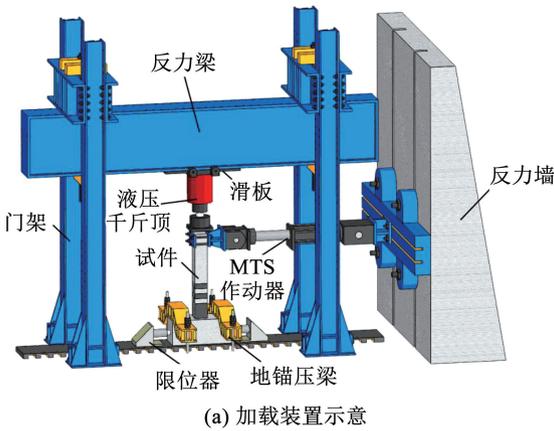
### 2.1 试验现象及破坏形态

试件在水平低周往复荷载作用下主要发生偏心受压破坏 (弯曲型破坏), 最终破坏形态如图 5 所示。

1) 对比试件。加载初期, 试件距基础约 75 mm 高度处出现第一条弯曲裂缝。随后, 分别在柱底, 柱高 150、250、320 mm 处陆续出现水平裂缝。加载至 16 mm 时, 纵筋屈服, 屈服荷载为 39.8 kN; 加载至 20 mm 时, 荷载达到正向峰值 41.53 kN。此后, 原有裂缝逐渐加宽并沿水平方向不断延伸。加载至 48 mm 的过程中, 柱底出现数条纵向黏结裂缝; 加载至 56 mm 时, 试件承载力降至峰值荷载的 80% 以下, 极限荷载为 31.79 kN。此时柱塑性铰区混凝土被压碎剥落, 纵向钢筋明显屈曲, 试验终止, 发生大偏心受压破坏 (弯曲破坏)。

2) SMA 加固试件。SMA 加固试件破坏形态基本一致, 箍筋均未屈服。现以 SMA-2-W 为例, 阐述试件破坏过程。

加载初期, 柱高约 350 mm 位置出现弯曲裂缝; 随着荷载的增加, 裂缝数量不断增多且大部分分布在未包裹 CFRP 布的区域。加载至 15 mm 时, 纵筋屈服, 屈服荷载为 64.2 kN。加载至 28 mm 时, 正负向裂缝相交, 形成交叉斜裂缝, 此时裂缝基本发育完全。



(a) 加载装置示意



(b) 加载现场

图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

加载至 29 mm 时, SMA 筋的拉应变为  $11.046 \times 10^{-3}$ , 超过马氏体相变起始应变  $11 \times 10^{-3}$ , 此时荷载为 71.88 kN, 此后, SMA 筋进入应力诱发马氏体相变阶段。在层间位移角小于  $1/50$  时<sup>[23]</sup>, 试件表面混凝土未脱落, SMA 与混凝土之间未出现脱粘现象, 柱体破坏程度较小, 抗震性能良好。加载至 52 mm 时, 荷载达到正向峰值 74.55 kN。加载至 72 mm 和 88 mm 的过程中, 分别听到“砰”的两声, 柱底位置的 SMA 筋局部脱粘, 水平承载力骤降。加载至 92 mm 时, 水平荷载降至峰值荷载的 80% 以下, 极限荷载为 59.61 kN, 试验终止, 发生伴随 SMA 筋局部

脱粘的弯曲塑性铰破坏(弯曲破坏)。

对于环包 CFRP 布的试件 SMA-1-W、SMA-2-W、SMA-2-W-0.4, 由于 CFRP 布对混凝土的约束作用, 裂缝集中在 300 mm 宽 CFRP 布中部以及未包裹 CFRP 布的柱段, 裂缝开展数量较少, 试验结束后试件外形基本保持完整。

未环包 CFRP 布的试件 SMA-2 和 SMA-2-0.4 塑性铰区裂缝数量较多且分布均匀。柱底出现竖向裂缝, 混凝土被压溃且混凝土块存在不同程度的剥落。在高轴压力下, 试件 SMA-2-0.4 加固筋屈曲, 混凝土保护层剥离, 试件极限位移较小, 延性较差。

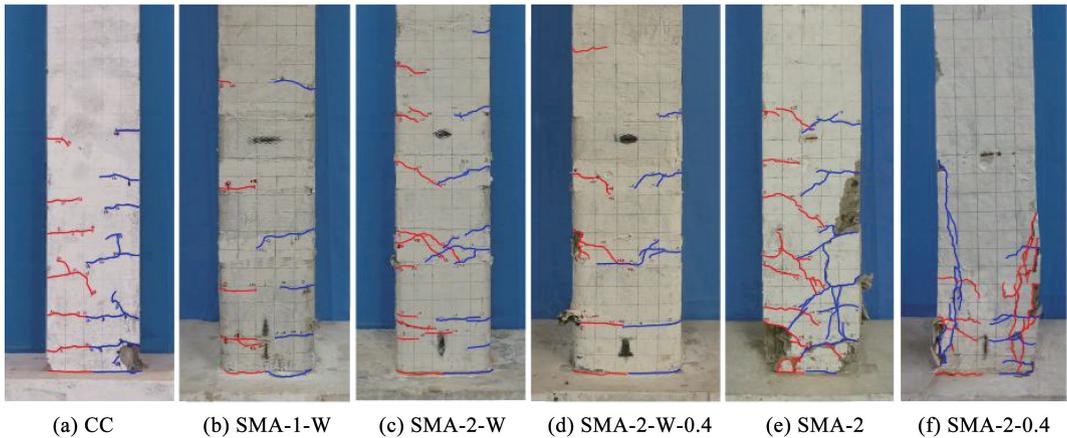


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

## 2.2 滞回特性

各试件的滞回曲线如图 6 所示, 可以看出, 由于黏结滑移的影响, 各滞回曲线均出现明显的“捏缩”效应。试件 CC 的水平荷载达到峰值后下降速度较快, 滞回环所围面积较小, 耗能能力和延性均较差; SMA 加固后, 试件滞回环饱满, 荷载、延性和耗能能力明显提高, 峰值荷载后的荷载降低速度和刚度退化减缓, 极限位移也有所提高。

相比对比柱, 低轴压比试件( $n_t = 0.1$ )的循环次数大幅增加, 曲线饱满, 表明嵌入 SMA 筋能明显提升混凝土柱的极限位移和耗能能力。加载后期, 试件滞回曲线均出现不同程度的骤降, 这是因为 SMA 筋与混凝土之间的黏结应力随加载位移增加不断变大, 最终 SMA 筋局部脱粘, 引起荷载骤降。

与未环包 CFRP 布的试件相比, 试件 SMA-1-W 和 SMA-2-W 脱粘时的位移较大, 承载能力和耗能能力明显提高。这是因为 CFRP 布能限制 SMA 筋屈曲和混凝土横向变形, 二者协同变形能力有所提升, 提高了 SMA 筋的材料强度利用率。

随着轴压比从 0.1 增加到 0.4, 试件承载力大幅提高, 滞回环愈发饱满, 耗能能力明显提升。这是

因为对于高轴压比试件, 箍筋和 CFRP 布对核心混凝土和 SMA 筋的约束作用更明显。而试件 SMA-2-0.4 的极限位移较小, 原因是大轴压力作用下试件的  $P-\Delta$  效应比较明显, 混凝土横向变形较大, 而且由于缺少横向约束, 加固筋屈曲, 混凝土保护层剥离。因此, 在大轴压力作用下, 使用 CFRP 布约束 SMA 筋, 能明显提升 SMA 加固柱的抗震性能。

## 2.3 骨架曲线与延性

试件骨架曲线如图 7 所示。由于 SMA 材料存在应力诱发马氏体相变阶段(应力平台段), 试件的骨架曲线在峰值荷载后的荷载下降很小。与试件 CC 相比, SMA 加固柱承载力提高了 51.20% ~ 236.60%。试件 SMA-2-W 的屈服荷载和峰值荷载分别比试件 SMA-1-W 高 10.17% 和 12.56%, 峰值荷载对应的位移提升了 185.66%, 平均极限位移增加了 9.42 mm。表明 SMA 配筋率增大后, 构件承载能力、抗弯刚度和变形能力随之增大, 由于 SMA 的屈服应力即马氏体相变起始应力较低, 承载力提高幅度有限, 但可以保证结构在层间位移角小于  $1/50$  时<sup>[23]</sup> 仍能保持较高的承载能力。

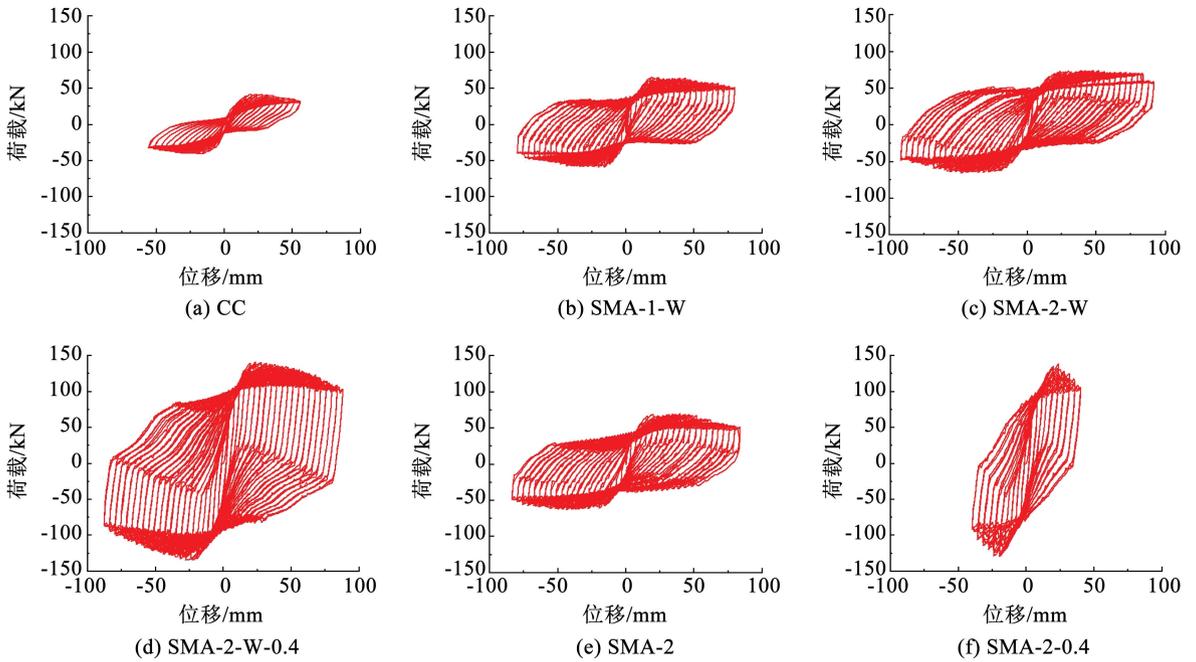


图 6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves of specimen

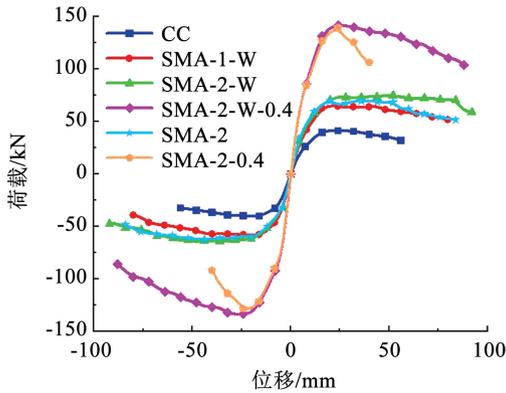


图 7 试件骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of skeleton curves of specimens

对比轴压比不同的 SMA 加固柱骨架曲线可知, 增大轴压比可以明显提高试件的承载力、刚度和屈服位移, 但极限位移显著减小, 骨架曲线没有出现平缓段, 下降段斜率增大, 刚度衰减加快。其中, 相比试件 SMA-2-W-0.4, 未环包 CFRP 布试件 SMA-2-0.4 的极限位移减小幅度超过 50%, 这是因为高轴压力作用下, 柱底混凝土发生研磨破坏, 进而导致 SMA 棒缺乏横向约束而发生屈曲, 加固柱承载力骤降。表明使用 SMA 筋嵌入式加固高轴压比框架柱时, 可采用横向约束以提高加固结构的变形能力。

骨架曲线特征点试验结果见表 4。其中, 将纵向钢筋达到屈服应变时的荷载取为屈服荷载; 将荷

载降至 80% 峰值荷载时的位移取为极限位移<sup>[24]</sup>。

由表 4 可知, 与试件 CC 相比, 相同轴压比下 SMA 加固柱位移延性系数提高了 50.02% ~ 70.18%, 0.1 轴压比下试件的位移延性系数均大于 5, 表明 SMA 嵌入式加固技术能明显改善结构的变形能力。试件 SMA-2-W、SMA-2-W-0.4 的位移延性系数分别比试件 SMA-2、SMA-2-0.4 提升了 8.4% 和 89.1%, 表明环包 CFRP 布可以提高加固试件的延性和变形能力。

SMA 加固柱的极限层间位移角在 1/44 ~ 1/22, 除试件 SMA-2-0.4 外, SMA 加固柱的极限层间位移角较试件 CC 提高了 33.32% ~ 53.64%, 说明 SMA 嵌入式钢筋混凝土柱具有优异的变形能力和较强的抗侧移能力。

### 2.4 刚度退化

通过计算试件的割线刚度  $K_i$  和相对刚度  $K_i/K_1$ , 分析 SMA 加固钢筋混凝土柱的刚度退化规律。其中,  $K_1$  为第一级加载时试件的割线刚度。试件的刚度退化曲线和相对刚度退化曲线如图 8 所示。

由图 8(a) 可知, SMA 加固试件的刚度退化规律与对比试件基本一致。试件屈服前, 随加载位移增大, 试件刚度迅速减小, 这是因为加载初期裂缝持续开展, 数量和宽度逐渐增加。侧向位移大于 48 mm 后 (层间位移角为 3%), 裂缝基本发育完全, 试件刚度退化趋于平缓。

表 4 骨架曲线特征点试验结果

Tab. 4 Experimental results of skeleton curve feature points

试件编号	方向	$P_{sy}/kN$	$\Delta_{sy}/mm$	$P_{SMAy}/kN$	$\Delta_{SMAy}/mm$	$P_m/kN$	$\Delta_m/mm$	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$	$\mu$	$E_{sum}/(kN \cdot m)$
CC	正向(推)	39.80	16.00			41.53	20.04	31.79	53.95	3.37	46.73
	负向(拉)	40.38	15.98			40.49	19.96	32.55	55.54	3.48	
	平均	40.09	15.99			41.01	20.00	32.17	54.75	3.42	
SMA-1-W	正向(推)	59.55	15.00	62.72	30.02	65.08	18.99	52.01	79.98	5.33	268.39
	负向(拉)	50.75	13.01	57.48	31.05	58.93	16.00	47.10	70.42	5.49	
	平均	55.15	14.01	60.10	30.51	62.01	17.50	49.55	75.20	5.41	
SMA-2-W	正向(推)	64.20	14.99	71.88	29.00	74.55	51.98	59.61	89.94	6.00	382.11
	负向(拉)	57.32	13.86	59.83	24.00	65.04	47.99	52.00	78.30	5.65	
	平均	60.76	14.43	65.86	26.50	69.80	49.99	55.80	84.12	5.82	
SMA-2-W-0.4	正向(推)	135.00	20.96	135.80	34.98	141.63	24.01	113.26	77.20	3.68	658.05
	负向(拉)	128.90	19.02	125.00	34.96	134.46	23.02	107.46	68.78	3.62	
	平均	131.95	19.99	130.40	34.97	138.04	23.51	110.36	72.99	3.65	
SMA-2	正向(推)	61.85	12.99	66.99	27.98	69.94	40.00	55.91	70.05	5.39	315.81
	负向(拉)	56.28	15.01	60.39	32.01	62.79	43.00	50.18	80.15	5.34	
	平均	59.06	14.00	63.69	29.99	66.36	41.50	53.04	75.10	5.37	
SMA-2-0.4	正向(推)	131.10	20.03	最大应变为		139.26	23.00	111.37	36.57	1.83	131.43
	负向(拉)	120.98	18.00	$7.389 \times 10^{-3}$ , 未进入		129.25	19.99	103.26	36.75	2.04	
	平均	126.04	19.01	应力诱发马氏体相变		134.25	21.50	107.32	36.66	1.93	

注:  $P_{sy}$  为纵筋屈服时的荷载,  $\Delta_{sy}$  为纵筋屈服时的位移,  $P_{SMAy}$  为 SMA 筋进入应力诱发马氏体相变时的荷载,  $\Delta_{SMAy}$  为 SMA 筋进入应力诱发马氏体相变时的位移,  $P_m$  为峰值荷载,  $\Delta_m$  为峰值荷载对应的位移,  $P_u$  为极限荷载,  $\Delta_u$  为极限荷载对应的位移,  $\mu$  为位移延性系数,  $E_{sum}$  为累积耗能。

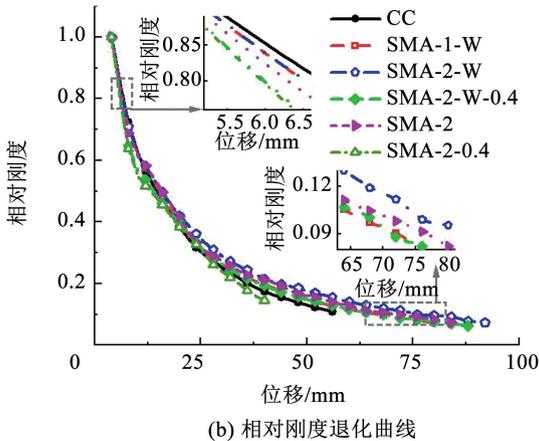
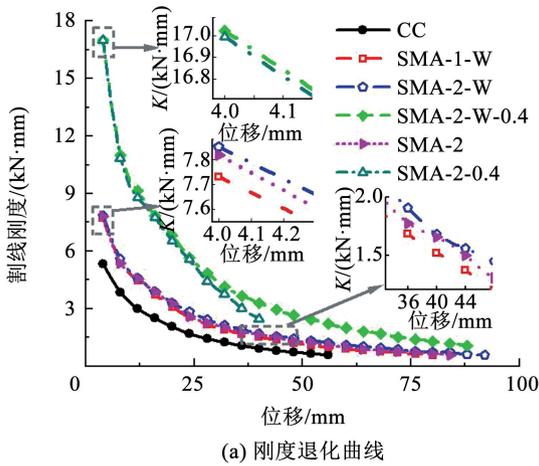


图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curves

SMA 加固试件初始刚度明显大于对比试件,表明在混凝土保护层中嵌入 SMA 筋能大幅提高钢筋混凝土柱的抗侧向刚度。试件 SMA-2-W 的初始刚度大于试件 SMA-1-W,表明 SMA 加固筋配筋量越多,抗侧向刚度提高幅度越大。同一加载位移下,高轴压比试件刚度最大,表明提高轴压比可以提升 SMA 加固柱的抗侧向刚度。原因可能是大轴压力作用下,混凝土骨料间的摩擦力和黏结性能提升,材料性能得到充分发挥。试件 SMA-2-W、SMA-2-W-0.4 的刚度始终大于试件 SMA-2、SMA-2-0.4,表明环包 CFRP 布能提高 SMA 加固试件的抗侧移刚度。

由图 8(b)可知,试件屈服后,对比试件的相对刚度低于 SMA 加固试件,原因是 SMA 筋进入应力诱发马氏体相变阶段后,其应力较弹性阶段有所提升,材料超弹性发挥作用,塑性损伤减小,从而减缓了试件的相对刚度退化速度。

### 2.5 耗能能力

采用累积耗能和等效黏滞阻尼系数评价试件的耗能能力。

#### 2.5.1 累积耗能

试件的累积耗能通过滞回环所围面积之和计算。图 9 给出试件的耗能曲线,总耗能量见表 4。

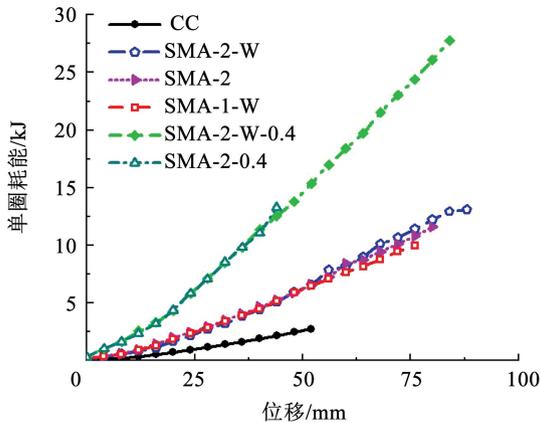
SMA 加固柱单圈耗能和累积耗能随着加载位移增加而不断增大。弹性阶段,加固柱的耗能能力

略大于对比柱, 累积耗能增长速度较慢; 弹性阶段, 累积耗能增长迅速; 相同轴压比下 SMA 加固试件的耗能曲线基本重合, 而不同轴压比试件的耗能能力有明显差别。

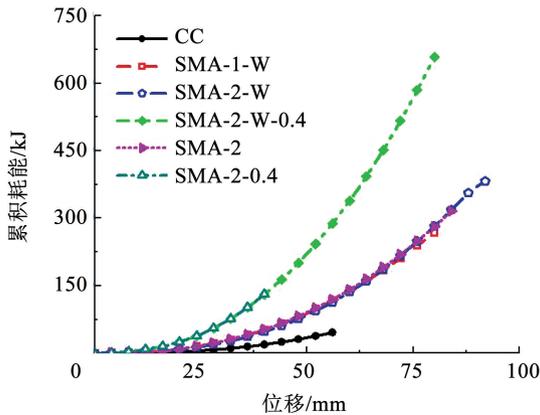
与试件 CC 相比, 试件 SMA-1-W、SMA-2、SMA-2-W 的总耗能量增加了 474.32% ~ 717.68%, 同一位移下, SMA 加固柱的耗能能力也明显优于对比柱, 表明 SMA 筋嵌入式加固钢筋混凝土柱可以提升试件的耗能能力。这得益于 SMA 筋具有良好的变形能力, 嵌入后试件的承载力和极限变形得到提升。

试件 SMA-2-W、SMA-2-W-0.4 的累积耗能分别比试件 SMA-2、SMA-2-0.4 提升了 30.38% 和 394.39%, 这是因为 CFRP 布的约束作用改善了混凝土的力学性能和 SMA 筋的受力状态, 从而提升试件的耗能能力。

试件 SMA-2-W-0.4 的总耗能为试件 SMA-2-W 的 2.14 倍, 而 SMA-2-0.4 的总耗能为试件 SMA-2 的 0.56 倍, 表明轴压比的提高对 SMA 加固柱的耗能能力具有增强作用, 但轴压比较大时, 应为试件提供必要的横向约束。



(a) 单圈循环耗能曲线



(b) 累积耗能曲线

图 9 耗能曲线

Fig. 9 Energy dissipation

### 2.5.2 等效黏滞阻尼系数

图 10 给出试件等效黏滞阻尼系数与水平位移的关系。可以看出, 加载初期 ( $\Delta \leq 16$  mm), 各试件均处于弹性阶段, 等效黏滞阻尼系数存在小幅波动; 进入弹塑性阶段后, 试件的等效黏滞阻尼系数随加载位移增加逐渐增大, 破坏前达到最大值, 表明 SMA 加固柱的耗能能力随塑性变形的增加而不断增大。破坏时 SMA 加固柱的等效黏滞阻尼系数均大于 0.4, 远高于普通钢筋混凝土柱的 0.24, 表明采用 SMA 筋嵌入式加固法能明显改善钢筋混凝土柱的阻尼性能。

试件 SMA-2、SMA-1-W 的等效黏滞阻尼系数均大于试件 SMA-2-W, 表明增加 SMA 加固量或环包 CFRP 布会降低 SMA 加固柱的耗能能力。原因在于 SMA 加固量增加后, 回复力提升, 塑性损伤降低, 残余变形减小, 而且 SMA 材料为旗帜型本构, 可以通过超弹性耗散输入结构的能量。其他条件相同时, 等效黏滞阻尼系数随轴压比增加而增大, 这是因为在大轴压力作用下, 混凝土骨料间的摩擦和黏结性能增强的同时,  $P-\Delta$  效应明显, 加快了试件塑性损伤的累积速度。

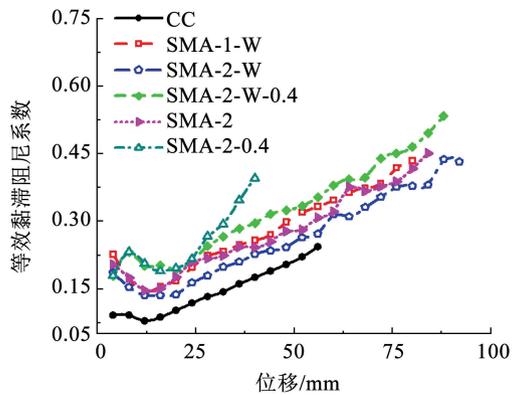


图 10 等效黏滞阻尼系数

Fig. 10 Equivalent viscous damping coefficients

### 2.6 曲率分析

为进一步分析 SMA 嵌入式加固法对钢筋混凝土柱变形性能的影响, 基于 DIC 技术获得的试件表面应变场数据, 分别对试件曲率及其分布规律进行了计算和分析。

试件 SMA-2-W 在极限状态下的裂缝分布图和应变云图如图 11(a) 所示。对比可知, 试件表面应变分布能直观地呈现出裂缝形态及分布情况, 表明 DIC 技术用于混凝土结构能够准确获取结构表面应变分布情况。在试件表面共选取  $26 \times 12$  个曲率计算基点, 如图 11(b) 所示。基于 DIC 设备记录的各基点处变形, 可以解得沿试件高度相邻测点间的平

均曲率,进而得到试件的曲率分布图。平均曲率  $\varphi_a$  由下式计算

$$\varphi_a = \frac{\Delta_t - \Delta_c}{HL_g} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{L_g} \quad (1)$$

式中: $\Delta_t$ 和 $\Delta_c$ 分别为拉压侧相邻基点间的竖向变形, $\varepsilon_t$ 和 $\varepsilon_c$ 分别为其对应的轴向应变, $H$ 和 $L_g$ 分别为垂直和水平方向相邻基点间的距离。

由于局部开裂和混凝土材料的不均匀性,同一截面不同高度处的混凝土轴向应变存在较大波动,如图 11(c)所示。因此,计算基点的选取对平均曲率  $\varphi_a$  的计算结果有很大影响,但是同一高度不同位置处的轴向应变近似呈线性分布。基于上述分析,通过线性拟合得到截面轴向应变的线性拟合曲线,其斜率即为截面曲率。

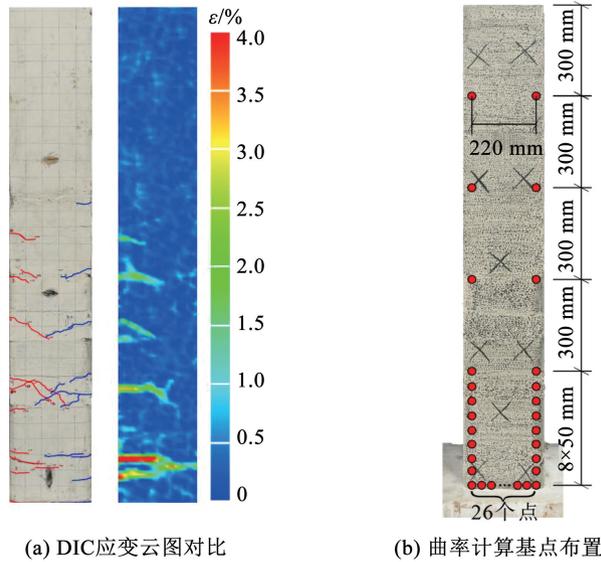


图 11 曲率计算基点布置及应变分布

Fig. 11 Layout of curvature calculation points and strain distribution

计算得到的试件曲率分布如图 12 所示。总体而言,试件曲率分布基本对称。屈服后,曲率增加较快。其中,曲率变化较大的部位集中在柱高 150 mm 和 300 ~ 400 mm,原因是该位置混凝土开裂,导致

式(1)中( $\Delta_t - \Delta_c$ )项增大。由于计算中不包含柱脚处钢筋滑移引起的转动变形,试件根部曲率较小。

对比图 12(a)和 12(b)可知,SMA 加固量增加后,试件屈服后的曲率大幅增加。其中,试件中部(柱高 500 ~ 900 mm)曲率明显增大,表明 SMA 加固量提高后,试件塑性较长度变大,参与耗能的区域增多,试件变形能力更强。

相比试件 SMA-2-W,试件 SMA-2-W-0.4 曲率较大的位置下移,表明 SMA 加固柱的塑性较长度随轴压比增大而减小,塑性损伤比较集中,构件延性有所降低。未环包 CFRP 布试件的曲率分布不具备对称性,这是由塑性铰区无横向约束、试件两侧裂缝开展较多且分布不对称导致的。

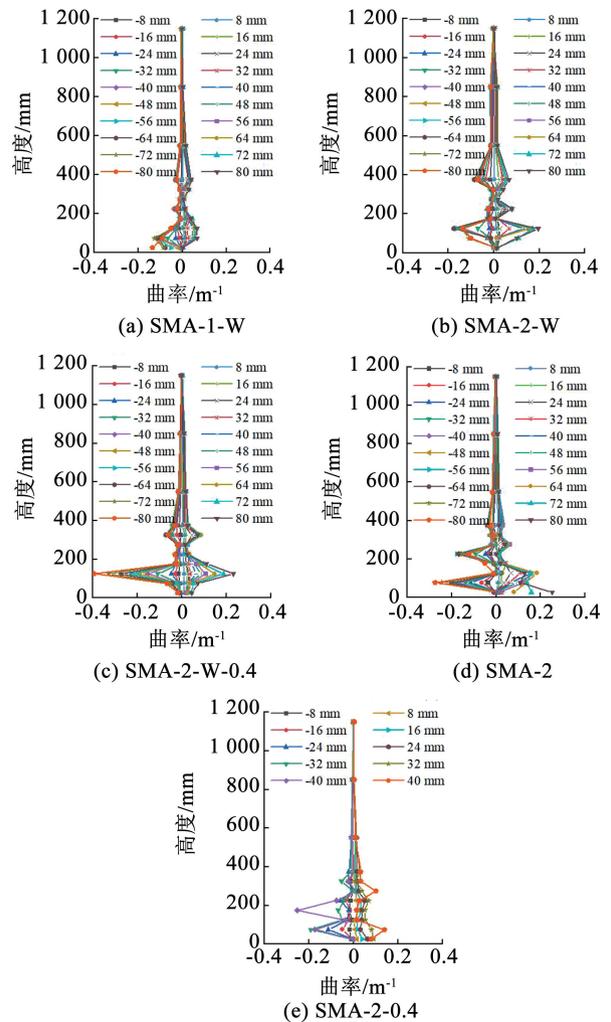


图 12 曲率分布

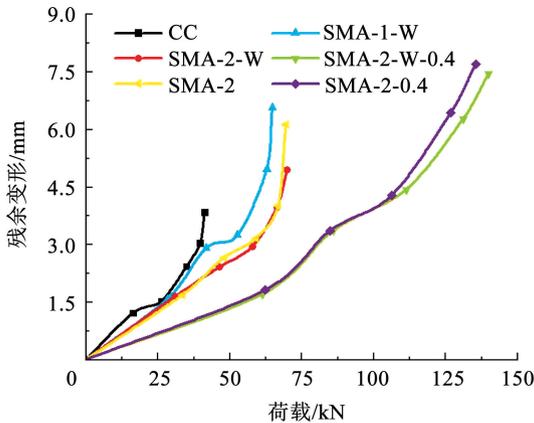
Fig. 12 Curvature distributions

### 2.7 残余变形

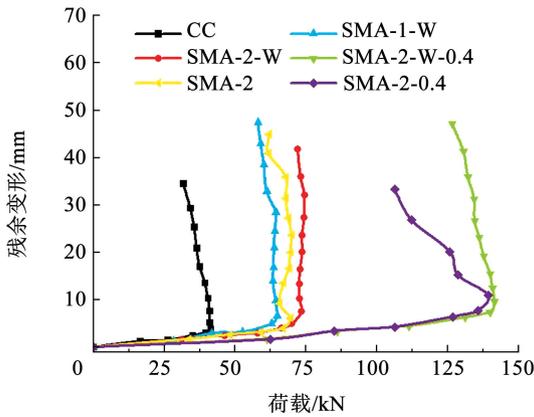
图 13 为各试件在不同荷载下的残余变形。可以看出,峰值荷载前(图 13(a)),同一荷载下 SMA 加固柱的残余位移均小于对比试件 CC,表明同一荷载水平下嵌入 SMA 筋可以降低钢筋混凝土柱的残

余位移。轴压比相同时,同一荷载下 SMA 加固柱的残余位移大小与 SMA 加固量呈负相关,增加 SMA 加固量可以减少加固柱的残余位移,这是因为 SMA 加固量增加后提高了加固柱的加卸载刚度,从而提升了加固柱的自复位能力;同一荷载水平下,高轴压比试件的残余位移均小于低轴压比试件,主要是由于提高柱的轴压比能够提升试件的抗侧移刚度。

如图 13(b) 所示,峰值荷载后,试件的残余位移快速增长。因为试件进入弹塑性阶段后,钢筋和混凝土的塑性变形发展速度较快,材料损伤不断累积,而 SMA 筋的恢复力相对较低。试件 SMA-2-W、SMA-2-W-0.4 的残余变形发展趋势比试件 SMA-2、SMA-2-0.4 更平稳,表明环包 CFRP 布的试件抗震性能比较稳定。这是因为 CFRP 布能够缓解混凝土裂缝的发展,减少混凝土裂缝的数量,能够延缓 SMA 筋与混凝土之间的黏结性能退化,使得构件塑性铰区材料性能稳定发挥。



(a) 峰值荷载前



(b) 加载至柱端位移为 60 mm 时

图 13 残余变形

Fig. 13 Residual displacement

为方便比较,图 13(b) 中除试件 CC 和 SMA-2-0.4 外(极限位移均小于 60 mm),其余试件的残余变形最大值均为加载位移等于 60 mm 时的柱端残余位

移。可以看出:相同加载位移下,试件 SMA-1-W、SMA-2-W、SMA-2 的残余变形依次减小,这是因为增加 SMA 配筋率能提高加固柱的恢复力,从而提升加固柱的自复位能力;而且环包 CFRP 布能减小相同加载位移下 SMA 加固柱的残余位移。究其原因,CFRP 布能防止 SMA 筋在加载过程中发生屈曲,抑制混凝土裂缝的开展,使混凝土处于三向受压状态,增强混凝土的力学性能,从而减小了加固柱的损伤。

### 3 SMA 加固柱承载力计算

SMA 加固柱在低周反复荷载作用下均发生了弯曲破坏,基于偏压构件的正截面计算理论提出了 SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱受弯承载力计算模型,结合试验结果对计算模型进行了验证。

#### 3.1 基本假定

- 1) 混凝土柱破坏截面满足平截面假定,截面拉力由受拉钢筋、受拉 SMA 筋承担,忽略混凝土抗拉作用。
- 2) 不考虑钢筋、SMA 筋与混凝土间的黏结滑移。
- 3) 无约束混凝土和钢筋的本构关系按 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[25]</sup> 的建议取用。
- 4) 采用 Mander 等<sup>[26]</sup> 提出的约束混凝土本构关系,约束混凝土抗压强度计算公式如下:

$$f'_{cc} = f'_{co} K \quad (2)$$

$$K = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_{el}}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_{el}}{f'_{co}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中: $f'_{cc}$  为约束混凝土抗压强度, $f'_{co}$  为无约束混凝土抗压强度, $K$  为侧向约束系数, $f'_{el}$  为侧向约束应力, $\varepsilon_{cc}$  为约束混凝土峰值应变, $\varepsilon_{co}$  为无约束混凝土峰值应变。

- 5) 基于文献[10]提出的 SMA 改进超弹性本构模型,采用简化后的 SMA 筋本构关系

$$\sigma_{SMA} = \begin{cases} E_A \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{Ms} \\ \sigma_{Ms} + K_1 (\varepsilon - \varepsilon_{Ms}), & \varepsilon_{Ms} \leq \varepsilon < \varepsilon_{Mf} \\ \sigma_{Mf} + E_M (\varepsilon - \varepsilon_{Mf}), & \varepsilon_{Mf} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_A$  为 SMA 奥氏体相弹性模量, $\sigma_{Ms}$  和  $\sigma_{Mf}$  分别为马氏体相变开始和结束应力, $\varepsilon_{Ms}$  和  $\varepsilon_{Mf}$  分别为其对应的应变, $K_1$  为应力诱发马氏体相变阶段 SMA 筋的弹性模量, $E_M$  为马氏体相 SMA 筋的弹性模量。

#### 3.2 承载力计算

SMA 加固混凝土柱截面应变、应力分布如图 14 所示。基于 3.1 节的基本假定,根据受力平衡可得

$$N + \sigma_s A_s + \sigma_{SMA} A_{SMA} = \alpha_1 f_c b x + \sigma'_s A'_s + \sigma'_{SMA} A'_{SMA} \quad (6)$$

式中： $N$  为轴力， $\sigma_s$  和  $\sigma_{SMA}$  分别为受拉钢筋和受拉 SMA 筋的应力， $A_s$  和  $A_{SMA}$  分别为其对应的截面面积之和， $\sigma'_s$  和  $\sigma'_{SMA}$  分别为受压钢筋和受压 SMA 筋的应力， $A'_s$  和  $A'_{SMA}$  分别为其对应的截面面积之和。

根据上式求出 SMA 加固柱受压区高度  $x$  后，对受拉侧 SMA 筋合力点取矩，可以得到 SMA 加固柱

的正截面抗弯承载力计算式：

$$M_u = PH = \alpha_1 f_c b x \left( h_1 - \frac{x}{2} \right) + \sigma'_{SMA} A'_{SMA} (h_1 - a'_{SMA}) + \sigma'_s A'_s (h_1 - a'_s) - \sigma_s A_s (a_s - a_{SMA}) \quad (7)$$

式中： $H$  为计算柱高， $a'_{SMA}$ 、 $a'_s$  分别为受压 SMA 筋、受压钢筋合力点至柱截面边缘的距离， $a_{SMA}$ 、 $a_s$  分别为受拉 SMA 筋、受拉钢筋合力点至柱截面边缘的距离， $h_1$  为受拉 SMA 筋合力点至截面受压区边缘的距离。

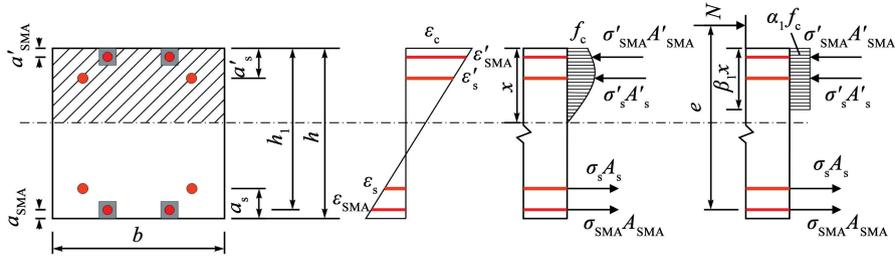


图 14 截面应变、应力分布

Fig. 14 Distribution of sectional strain and stress

### 3.3 计算结果与试验结果对比

由式(7)得到的试件承载力计算值与试验值的结果如表 5 所示。SMA 加固柱 3 个阶段的承载力试验值与计算值的最大偏差分别为 13.3%、9.1% 和 6%，试验值与计算值之比的平均值分别为

1.081、1.051 和 1.021，标准差分别为 0.038、0.062 和 0.024。总体上计算值与试验值吻合较好，表明建立的承载力计算公式精度较好，可用于 SMA 嵌入式加固混凝土柱的受力分析。

表 5 SMA 加固柱承载力计算值与试验值比较

Tab. 5 Comparison between calculated and experimental value of bearing capacity of columns strengthened by SMA bars

试件编号	$P_{sy,t}/\text{kN}$	$P_{sy,c}/\text{kN}$	$P_{sy,t}/P_{sy,c}$	$P_{SMAy,t}/\text{kN}$	$P_{SMAy,c}/\text{kN}$	$P_{SMAy,t}/P_{SMAy,c}$	$P_{m,t}/\text{kN}$	$P_{m,c}/\text{kN}$	$P_{m,t}/P_{m,c}$
CC	40.1	38.9	1.030	—	—	—	41.0	42.1	0.987
SMA-1-W	55.2	50.9	1.083	60.1	55.3	1.088	62.0	60.1	1.033
SMA-2-W	60.8	53.6	1.133	65.9	60.4	1.091	69.8	65.8	1.060
SMA-2-W-0.4	132.0	123.3	1.071	125.0	130.4	0.959	138.0	135.8	1.016
SMA-2	59.1	52.9	1.117	63.7	59.7	1.067	66.4	65.4	1.015
SMA-2-0.4	126.0	119.6	1.054	—	—	—	134.3	132.4	1.014
平均值	—	—	1.081	—	—	1.051	—	—	1.021
标准差	—	—	0.038	—	—	0.062	—	—	0.024

注： $P_{sy}$  为屈服荷载， $P_{SMAy}$  为 SMA 筋进入应力诱发马氏体相变时的荷载， $P_m$  为峰值荷载，t 和 c 分别表示试验值与计算值。

## 4 结 论

1) 5 根 SMA 嵌入式加固混凝土柱均发生了弯曲破坏，其中，环包 CFRP 的混凝土加固柱由于约束作用在破坏阶段未出现混凝土保护层剥离现象。加固柱较普通混凝土柱承载力提高了 51.2% ~ 70.2%，延性增大 56.9% ~ 70.2%，累积耗能提高 474.3% ~ 717.7%，加固效果良好。

2) 随着 SMA 加固量的增加，加固柱的承载能力得到提高，但 SMA 的屈服应力即马氏体相变起始应力较低使其承载力提高幅度有限；加固柱塑性较长度和极限位移有所提升，变形能力增强，试件 SMA-2-W

相对试件 SMA-1-W 平均极限位移增加了 9.42 mm。

3) 随着轴压比的增加，加固柱的承载力得到了提升，但延性大幅降低。采用环包 CFRP 布约束后，高轴压比加固柱 SMA-2-W-0.4 呈现出良好的变形能力和耗能能力，相比试件 SMA-2-0.4 位移延性提升了 89.1%。

4) 增加 SMA 加固量、环包 CFRP 布均能提升 SMA 加固柱的自复位能力，环包 CFRP 布的 SMA 加固柱抗震性能更加稳定。

5) 建立了 SMA 嵌入式加固钢筋混凝土柱承载力计算模型，加固柱的峰值荷载试验值与理论计算值之比的平均值为 1.021，标准差为 0.024，吻合较好。

## 参考文献

- [1]董立国,郑山锁,左河山,等.基于集中塑性铰模型的弯曲破坏锈蚀RC框架柱数值模拟方法[J].建筑结构学报,2020,41(4):141  
DONG Ligu, ZHENG Shansuo, ZUO Heshan, et al. Numerical simulation method for corroded RC frame columns of flexural failure based on lumped plastic hinge model [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 141. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0188
- [2]李宏男,张宇,李钢.考虑氯离子腐蚀作用的近海桥梁结构地震反应分析[J].土木工程学报,2015,48(7):112  
LI Hongnan, ZHANG Yu, LI Gang. Nonlinear seismic analysis of offshore bridges considering chloride ions corrosion effect [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(7): 112. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2015.07.012
- [3]DUPRAT F, VU N T, SELLIER A. Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66(17): 597. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.103
- [4]DE LORENZIS L, TENG Jinguang. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 119. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.08.003
- [5]WANG Haonan, XING Guohua, ZHAO Jiahua, et al. Seismic behavior of RC columns strengthened with near-surface-mounted aluminum alloy bars and CFRP wraps [J]. Engineering Structures, 2022, 268(19): 114742. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114742
- [6]BARROS J A O, VARMA R K, SENA-CRUZ J M, et al. Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: experimental and numerical research [J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3412. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.05.019
- [7]PARRETTI R, NANNI A. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: design overview [J]. Advances in Structural Engineering, 2004, 7(6): 471. DOI: 10.1260/1369433042863198
- [8]SHIN J, JEON J S, WRIGHT T R. Seismic mobile shaker testing of full-scale RC building frames with high-strength NSM-FRP hybrid retrofit system [J]. Composite Structures, 2019, 226(20): 111207. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111207
- [9]AL-ABDWAIS A H, AL-MAHAIDI R S. Experimental and finite element analysis of flexural performance of RC beams retrofitted using near-surface mounted with CFRP composites and cement adhesive [J]. Engineering Structures, 2021, 241(16): 112429. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112429
- [10]常召群. SMA 自复位摩擦阻尼器的研发设计及功能可恢复防震结构体系研究[D].西安:长安大学,2021  
CHANG Zhaoqun. Research on design of SMA self-centering friction damper and earthquake resilient structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021
- [11]QIAN Hui, ZHANG Qingyuan, ZHANG Xun, et al. Experimental investigation on bending behavior of existing RC beam retrofitted with SMA-ECC composites materials [J]. Materials, 2021, 15(1): 1. DOI: 10.3390/ma15010012
- [12]ROJOB H, EL-HACHA R. Self-prestressing using iron-based shape memory alloy for flexural strengthening of reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(2): 523. DOI: 10.14359/51689455
- [13]SHAHVERDI M, CZADERSKI C, MOTAVALLI M. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112(11): 28. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.174
- [14]SHAHVERDI M, CZADERSKI C, ANNEN P, et al. Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer [J]. Engineering Structures, 2016, 117(12): 263. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.023
- [15]EL-HACHA R, ROJOB H. Flexural strengthening of large-scale reinforced concrete beams using near-surface-mounted self-prestressed iron-based shape-memory alloy strips [J]. PCI Journal, 2018, 63(6): 61. DOI: 10.15554/pci63.6-03
- [16]SINHA A, TATAR N, TATAR J. Rapid heat-activated post-tensioning of damaged reinforced concrete girders with unbonded near-surface mounted (NSM) NiTiNb shape-memory alloy wires [J]. Materials and Structures, 2020, 53(4): 14. DOI: 10.1617/s11527-020-01522-8
- [17]潘盛山,乐锐,惠华星,等. NiTiNb-SMA 丝主动加固 RC 圆柱抗震性能试验 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(7): 93  
PAN Shengshan, YUE Rui, HUI Huaxing, et al. Experimental study on seismic performance of active confined RC piers with NiTiNb-SMA wires [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(7): 93. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2020.07.011
- [18]XING Guohua, OZBULUT O E, AL-DHABYANI M A, et al. Enhancing flexural capacity of RC columns through near surface mounted SMA and CFRP bars [J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(29): 4666. DOI: 10.1109/CSSR.2010.5773725
- [19]YU Xiaoguang, XING Guohua, CHANG Zhaoqun. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted 7075 aluminum alloy bars [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31(5): 101393. DOI: 10.1016/j.job.2020.101393
- [20]ACI 440 Committee. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI-440.2R[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008
- [21]CHANG Zhaoqun, XING Guohua, HAN Meng, et al. Multiparameter optimization design of self-centering friction damper using shape memory alloy bars [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(4): 835. DOI: 10.1080/13632469.2022.2033354
- [22]Federal Emergency Management Agency. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and non-structural components: FEMA 461[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2007
- [23]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016
- [24]SU Junsheng, WANG Junjie, LI Zhongxian, et al. Effect of reinforcement grade and concrete strength on seismic performance of reinforced concrete bridge piers [J]. Engineering Structures, 2019, 198(21): 109512. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109512
- [25]中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [26]MANDER J B, PRIESTLEY M J, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1812. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)