

NiTiNb-SMA 丝主动加固 RC 圆柱抗震性能试验

潘盛山[†], 乐锐, 惠华星, 朱禹熹

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为研究国产镍钛铌形状记忆合金(NiTiNb-SMA)丝主动约束加固钢筋混凝土墩柱的抗震性能,完成了3个墩柱试件的拟静力试验。基于试验现象和水平力-位移曲线,对比分析了各试件的骨架曲线、承载力和延性、强度退化、累计耗能、残余位移等性能指标。结果表明:热激励 NiTiNb-SMA 丝能有效地为墩柱提供主动约束应力,减轻墩柱的损伤,并提高墩柱的延性和耗能能力,对比原试件, NiTiNb-SMA 丝对试件主动加固后的位移延性系数和累计耗能分别提高了 27.8% 和 10.4%;有效减缓了墩柱的强度衰减,减小了墩柱的残余位移。

关键词:桥墩抗震; NiTiNb-SMA 加固; 主动约束; 被动约束; 拟静力试验

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

Experimental Study on Seismic Performance of Active Confined RC Piers with NiTiNb-SMA Wires

PAN Shengshan[†], YUE Rui, HUI Huaxing, ZHU Yuxi

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the seismic performance of reinforced concrete (RC) piers retrofitted by active confinement of domestic NiTiNb-SMA wires, a pseudo-static test of three column specimens was carried out. Based on the experimental phenomena and lateral force-displacement curves, the skeleton curves, bearing capacity and ductility, strength degradation, cumulative energy dissipation and residual displacement of the specimens were analyzed. The results show that thermal excited NiTiNb-SMA wires can effectively provide active confinement stress for the pier, which reduced the damage and improved the ductility and energy dissipation capacity of piers. Compared with the control specimens, thermal excited SMA wires increased the displacement ductility coefficient and cumulative energy dissipation of the specimen by 27.8% and 10.4%, respectively. What's more, it effectively reduced the strength degradation and improved the ability of restoring the residual displacement of piers.

Key words: seismic pier; NiTiNb-SMA retrofitting; active confinement; passive confinement; pseudo-static experiment

* 收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678110), National Natural Science Foundation of China(51678110)

作者简介: 潘盛山(1976—), 男, 广西南宁人, 大连理工大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: pssbu@dlut.edu.cn

桥墩作为桥梁结构中的重要承重结构,地震作用下发生的破坏会对人类生命和财产造成严重损害.旧桥墩柱普遍存在抗剪承载力偏低的问题,如何对其进行抗震加固是近年关注的主要课题.研究表明^[1],主动约束法对钢筋混凝土(RC)桥墩性能的提升明显优于被动约束方法,这是因为预应力的主动约束作用使混凝土处于三向受压状态,提高了墩柱的抗震承载能力.目前的主动约束加固技术,其预应力施加均需要机械张拉(采用千斤顶等)来实现,存在操作复杂、施工困难、人力需求较大、锚具庞大外露、成品保护困难及美观性较差等问题.然而,采用形状记忆合金(Shape memory alloy,简称SMA)对混凝土墩柱进行主动加固,可以利用其热力学特性完成对墩柱预应力的施加,避免传统张拉机具的使用,操作更为简便,是一种新颖的主动加固方法.另外,SMA丝可提供较稳定预应力,并通过多个体型较小U型箍连接锚固,锚固可靠,几乎不影响加固墩柱外形.

SMA具有高阻尼、超弹性和形状记忆效应^[2-3],并具有良好耐腐蚀性,近几年已成为墩柱抗震加固研究的热点材料.国内外一些研究人员将NiTi-SMA应用于混凝土柱,取得一些研究成果:崔迪等^[4]将SMA作为墩柱的纵向主筋,研究SMA不同预应变对混凝土柱阻尼比和频率的影响;Muntasir Billah等^[5]将SMA作为墩柱塑性铰处搭接纵筋,研究SMA对墩柱延性及震后残余位移的影响;余志刚等^[6-7]将SMA作为螺旋箍筋对墩柱进行轴压试验,研究是否热激励驱动及不同预应变的SMA对墩柱的抗裂性能及变形能力的影响,此外还研究了SMA丝和混凝土在不同粘结条件下对柱抗裂性能的影响;洪陈凯^[8]采用SMA丝外缠加固墩柱,研究超弹性形状记忆合金增强混凝土柱的轴压性能;Tran等^[9]通过轴压试验对比了主、被动SMA丝外缠加固墩柱的效果.然而,由于NiTi-SMA相变温度滞后区间小^[10-11],恢复到室温后提供的永久回复应力有限,主动约束作用并不突出.因此,Andrewes^[12-14]和Choi^[15-16]等采用具有更大相变温度滞后区间的NiTiNb-SMA丝来主动约束墩柱:将低温下预应变为6%的NiTiNb-SMA丝外缠圆墩柱,并设置NiTi-SMA、FRP、钢套箍等加固对比柱,通过轴压试验和拟静力试验来研究加固柱的性能,结果表明NiTiNb-SMA提供的永久回复力较大,围压值更高,加固效果最好.

由于NiTiNb-SMA的热力学性能与材料原子比、生产工艺、热处理制度等影响因素密切相关^[7],与国外生产的NiTiNb-SMA的研究结果不同,国内的研究^[18]表明国产NiTiNb-SMA却在高于马氏体相变开始温度30℃环境下采用16%的预应变,其回复应力较高.因此,国产NiTiNb-SMA加固混凝土墩柱的效果如何,需通过试验来进行验证和探讨.本文采用国产NiTiNb-SMA,在常温下进行预张拉后对混凝土圆柱进行加固,通过拟静力试验研究国产NiTiNb-SMA丝主动和被动加固混凝土墩柱对抗震性能的影响.

1 NiTiNb-SMA的主动加固原理

NiTiNb-SMA在典型温度范围内通常含有两种晶体组成相,即低温状态下的马氏体相和高温状态下的奥氏体相,这两种晶体相受温度和应力影响可以相互转变,相变的过程是SMA具备形状记忆效应和超弹性的原因.如图1所示,国产NiTiNb-SMA在常温下为奥氏体状态(起始A点),通过机械张拉至一定程度促使应力诱发奥氏体状态相变为马氏体状态(图1中路径A→B→C→D,其中BC段为相变发生段),由于应力诱发后SMA相变温度提升,马氏体仍可在常温下维持;马氏体相的SMA在完全卸载后经历弹性回复回到E点(路径D→E),AE段为残余变形;与工程所用的合金钢不同,通过热激励诱发SMA从马氏体相向奥氏体相转变后,残余变形还能有一定程度的回复(图1中的EF段).如果在热激励恢复形变的过程中SMA受到约束,则会产生回复力;回复力施加到结构上,即可实现对结构的主动加固.

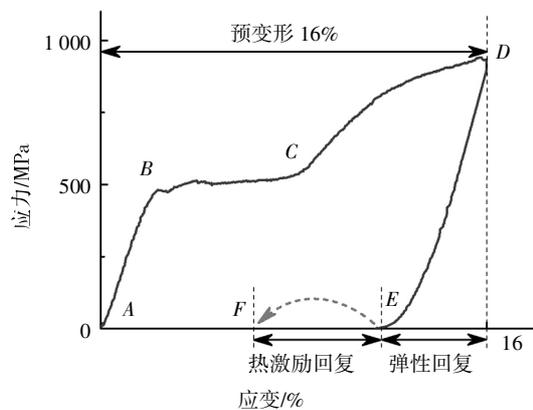


图1 NiTiNb-SMA热力学行为

Fig.1 Thermomechanical behavior of NiTiNb-SMA

2 试验设计

2.1 NiTiNb-SMA 丝材料参数

本文试验采用北京有研医疗器械有限公司(北京有色金属研究院)生产的 Ni44Ti47Nb9-SMA 丝,材料参数见表 1。室温下, SMA 丝处于奥氏体状态,使用前将其在常温下张拉,预张拉控制应变为 16%,卸载后残余变形量约为 11%。

表 1 NiTiNb-SMA 丝材质参数

Tab.1 Material parameters of NiTiNb-SMA wires

参数	对应范围量
直径	2.0 ± 0.01 mm
ω	Ni: 47.5%~49.5%; Nb: 13.5%~15.5%; Ti: 余量
相变温度	A_s : 90 °C; A_f : 100 °C; M_s : -30 °C; M_f : -40 °C
力学性能	极限抗拉强度 ≥ 700 MPa
收缩率	≥ 6%

注: ω 为各元素质量占比; A_s 和 A_f 分别为奥氏体相变开始温度和结束温度; M_s 和 M_f 分别为马氏体相变开始温度和结束温度。

2.2 试件尺寸及参数设计

根据 SMA 加固墩柱的类似研究^[9,13,19-20],已有试验中对每种研究变量均设置一个试件作为研究对象。为了研究国产 NiTiNb-SMA 的主动约束效果,与合金丝被动约束影响区分开,本试验设置了原试件和无预应力的被动加固试件作为对比,共制作了 3 个钢筋混凝土墩柱试件,尺寸构造及配筋如图 2 所示。试件采用 C40 混凝土,其实测均值为 39.3 MPa。钢筋强度通过 MTS 试验机测得,直径为 12 mm 和 14 mm 的 HRB400 钢筋的屈服强度分别为 423 MPa 和 445 MPa,极限强度分别为 620 MPa 和 607 MPa;直径为 8 mm 的 HRB300 钢筋屈服强度和极限强度分别为 345 MPa 和 440 MPa。柱身配箍率为 0.76%;纵筋配筋率为 1.28%。纵筋保护层厚度为 20 mm。

试件的编号为 BP-1、BP-2 和 BP-3。BP-1 为未加固的对比试件, BP-2 和 BP-3 均在墩身底部缠绕 SMA 丝,缠绕高度为 300 mm,间距为 20 mm,其中 BP-2 未进行热激励,为被动加固试件; BP-3 采用热激励,为主动加固试件。

由于预变形张拉装置的行程限制(单根 SMA 丝长度不超过 1.5 m), NiTiNb-SMA 丝分成多段预张拉后再通过 U 型箍连接到一起,按设计间距在墩柱的

塑性铰区缠绕好,其上下端亦通过 U 型箍进行自锁固定,如图 3 所示。

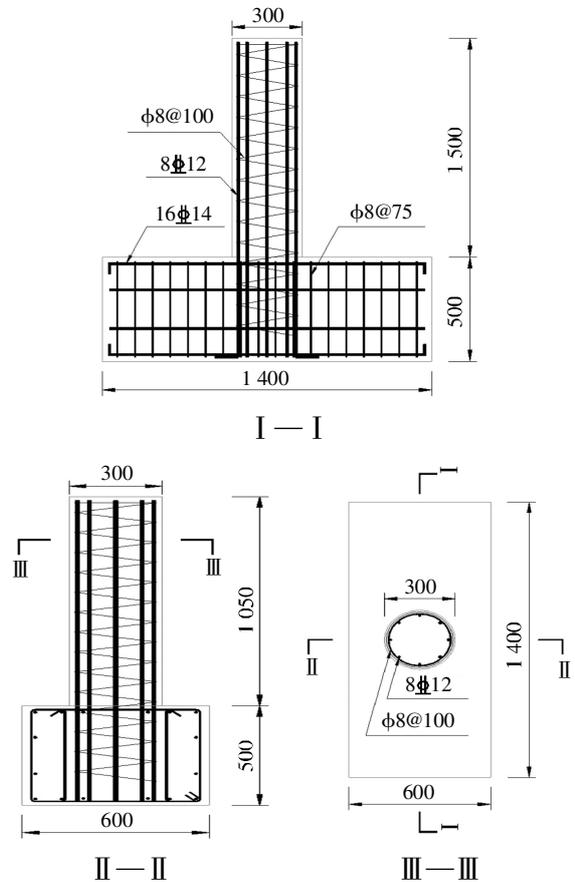


图 2 试件的尺寸和配筋(单位:mm)

Fig.2 Dimension and reinforcement layout of specimens (unit:mm)

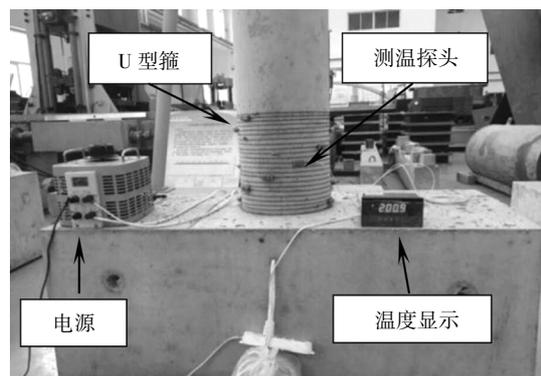


图 3 SMA 丝加固墩柱热激励控制

Fig.3 Thermal excitation control of column retrofitted with SMA wires

2.3 SMA 热激励控制

缠绕在墩柱上的 SMA 丝经历热激励的高幅度升、降温过程,由于很难直接测试其回复应力,因此

先对单根直线 SMA 丝的激励电流强度、激励温度及恢复应力进行试验研究(试验装置如图 4 所示),试验结果可作为缠绕在墩桩上的 SMA 恢复应力的控制依据。

经过多次试验验证,结果表明热激励温度为 200 ℃时,恢复室温后的永久性恢复应力为 400 MPa。因此,在墩桩上热激励 SMA 丝时,通过控制电流强度和测试 SMA 丝表面温度(达到 200 ℃)作为恢复应力的控制参数,实际加热控制如图 3 所示。

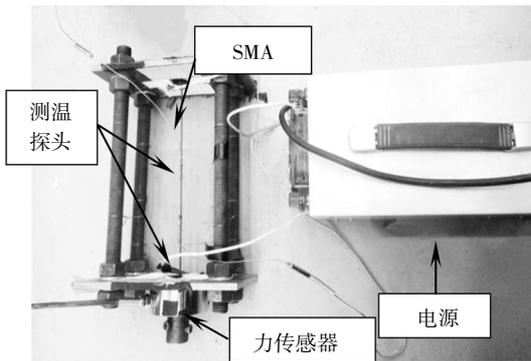
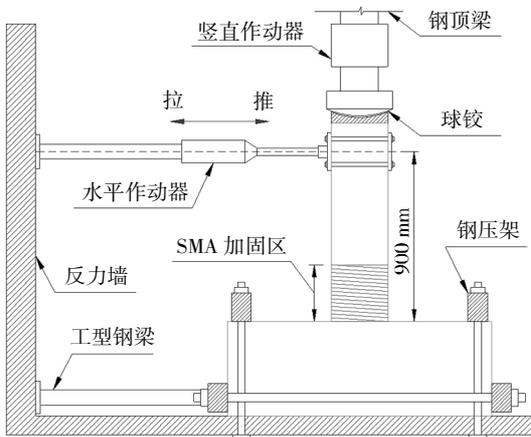


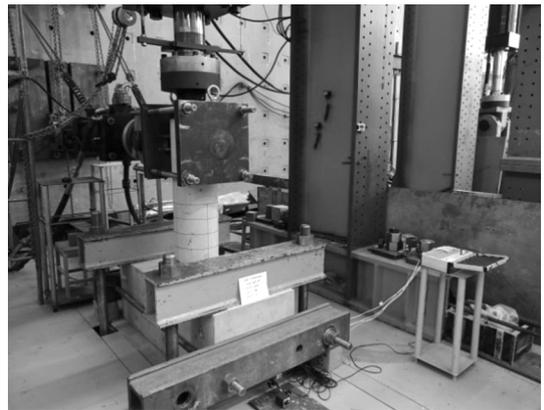
图 4 单根 SMA 丝热激励试验装置
Fig.4 Single SMA wire thermal excitation test device

2.4 拟静力试验装置与加载方案

拟静力试验装置如图 5 所示,采用悬臂式加载。竖向力由固定在框架横梁上的千斤顶施加。试件顶部设有圆弧形接触面,能够使试件顶部处于均匀受压状态。水平加载装置为固定在反力墙上的电液伺服水平作动器,加载能力为 1 000 kN,位移行程为± 300 mm。为防止在水平力作用下试件整体发生滑移,本实验在竖直方向和水平方向均使用钢梁和高强螺栓将底座加以固定,再用钢梁将底座与反力墙连在一起。



(a)示意图



(b)实拍图

图 5 拟静力试验装置
Fig.5 Quasi-static test equipment

根据参考文献[21]对国内旧桥桥墩的参数统计得知,桥墩的轴压比范围为 0.06 ~ 0.15,考虑到实验室的加载设备条件,本文 3 个试件采用相同的轴压比 0.15,即试件轴向力为 284 kN,循环加载前由机器控制一次性加载到试件上,试验过程中保持恒定。试件水平力加载轴线高度为 900 mm,加载方案如图 6 所示。

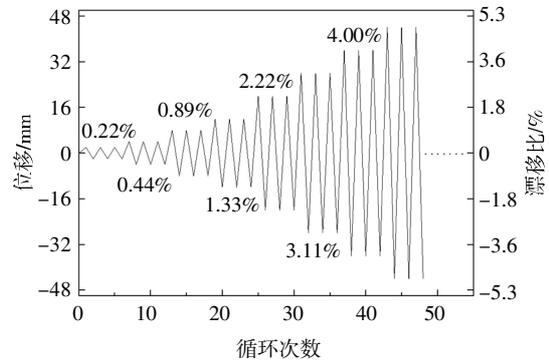


图 6 加载方案

Fig.6 Loading scheme

3 试验现象

3 个试件在试验过程中的破坏现象如表 2 所示。从表中看到,位移幅值达到 12 mm 以前,各试件损伤轻微,试验现象类似;但 12 mm 以后,在出现同样的典型损伤现象情况下,主动约束试件 BP-3 迟于被动约束试件 BP-2,再明显迟于原试件 BP-1,表明 SMA 丝增加了试件的延性,并且主动加固的试件增加效果更为明显。

3 个试件的最终破坏状态如图 7 所示,试件上规则环线是参考高度线,间距为 10 cm;不规则并带数

表 2 各试件试验过程破坏现象汇总表
Tab.2 Record of failure phenomenon of each specimen

加载位 移幅值	BP-1	BP-2	BP-3
4 mm	柱底 0 ~ 300 mm 范围内出现水平裂缝	柱底 0 ~ 400 mm 范围内出现水平裂缝	柱底 0 ~ 450 mm 范围内出现水平裂缝
12 mm	加载面水平裂缝横向贯通、加宽, 延伸至侧面后斜向发展	裂缝斜向发展, 加固区以上新增水平裂缝, 柱底与基座间新增水平裂缝	裂缝斜向发展, 加固区以上新增水平裂缝, 柱底与基座间新增水平裂缝
20 mm	柱底出现受压竖向裂缝, 试件承载力达到峰值	承载力达峰值, 柱底出现受压竖向裂缝	承载力达峰值
28 mm	保护层混凝土脱落, 承载力逐渐减小	裂缝加宽, SMA 约束间隙内混凝土脱落	柱底出现受压竖向裂缝
44 mm	保护层混凝土完全脱落, 核心混凝土压碎, 纵筋屈曲	柱底保护层混凝土轻微鼓起	裂缝加宽, SMA 约束间隙内混凝土脱落
52 mm	受拉纵筋断裂, 试件承载力急剧下降, 试件破坏	柱底 100mm 范围内出现竖向严重鼓起, 混凝土严重脱落	柱底混凝土鼓起, 沿裂缝处混凝土严重脱落
60 mm	—	受拉纵筋断裂, 试件承载力急剧下降, 试件破坏	柱底 200mm 高度附近出现竖向严重鼓起
76 mm	—	—	受拉纵筋断裂, 试件承载力急剧下降, 试件破坏

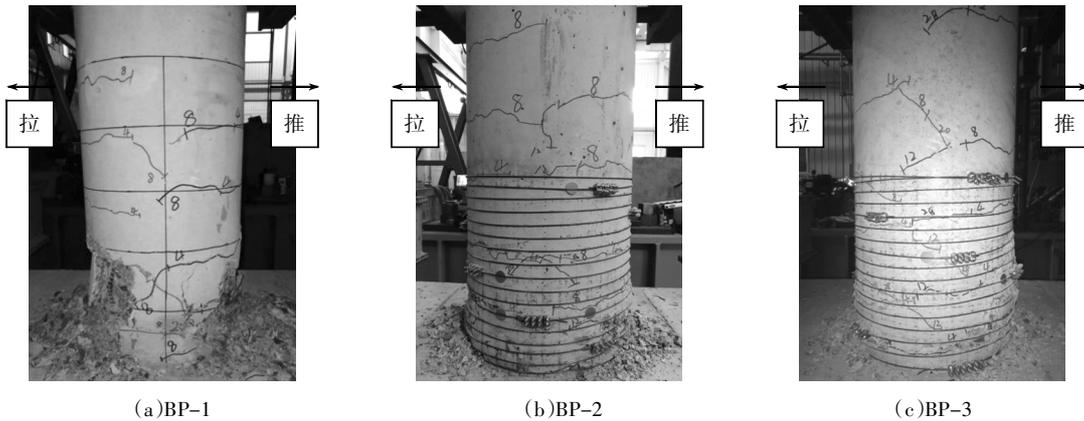


图 7 各试件最终破坏模式

Fig.7 Final failure modes of specimens

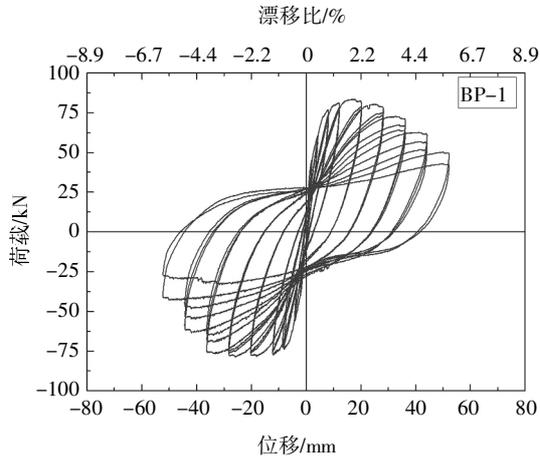
字的线为在该数字对应加载位移下主要裂缝发展的走势线. 图 7(a)所示原试件在柱底加载面两侧 200 mm 范围内存在较大的混凝土脱落区, 出现露筋, 两侧裂缝范围平均达到 400 mm. 图 7(b)和(c)所示的加固柱的最终损伤模式明显轻于原试件, 但是整体裂缝范围几乎是原试件的 1.5 倍, 达到约 600 mm 的平均高度, 且增加范围内的裂纹宽度非常小. 这是由于 SMA 丝的环箍作用, 一方面使压碎的混凝土仍然能够在束缚的作用下承担部分压力, 从而延缓了墩柱的破坏发展; 另一方面使塑性铰区混凝土三向受压, 增加了加固区柱身的刚度, 导致损伤向加固区两端发展, 同时也降低了局部损伤程度.

4 结果分析

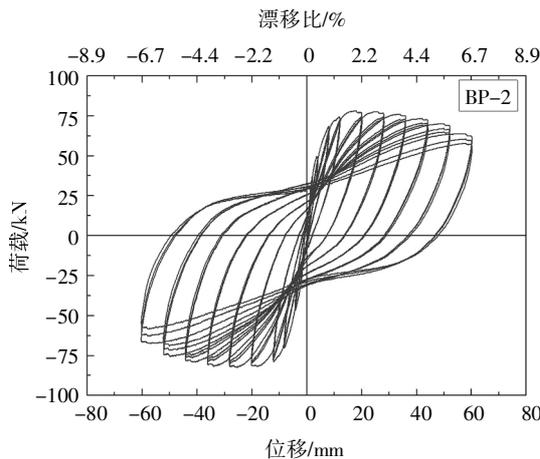
4.1 滞回曲线和骨架曲线

3 个试件的滞回曲线如图 8(a)~(c)所示. 对比原试件 BP-1, 两个加固件的滞回曲线更为饱满, 表明加固件的耗能能力较强. 图 9 为各试件的骨架曲线, 3 个试件在初始加载阶段曲线几乎重合, 表明 SMA 丝并没有明显改变墩柱的初始刚度, 因此不会改变结构固有频率, 不能改变结构在地震作用下的受力情况; 水平力达到最大值前, 各试件在不同位移

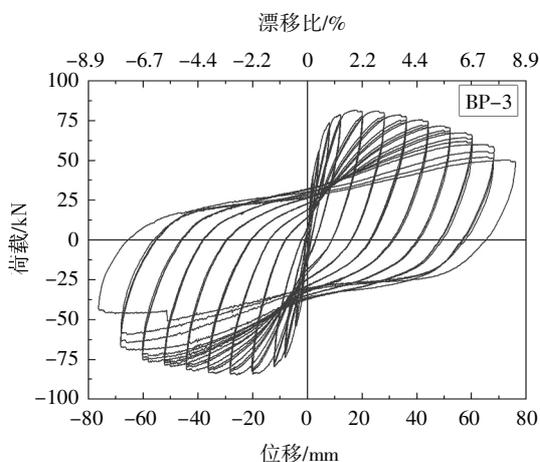
下的峰值荷载相差很小,但试件承载力达到峰值后,加固试件的强度衰减速度明显较慢于原试件,表现出较好的变形能力;对比试件 BP-2 和 BP-3,两者骨架曲线很接近,但 BP-2 在 60 mm 位移循环下破坏,而 BP-3 在 76 mm 位移循环下破坏,主动约束作用主要体现在更大的破坏位移。



(a)BP-1 滞回曲线



(b)BP-2 滞回曲线



(c)BP-3 滞回曲线

图 8 水平荷载-位移滞回曲线

Fig.8 Lateral load-displacement hysteresis curves

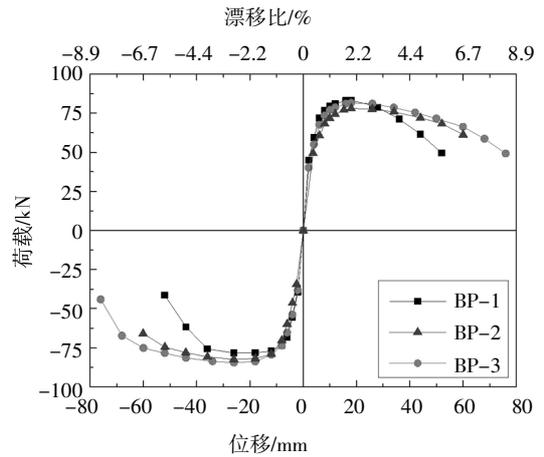


图 9 试件骨架曲线

Fig.9 Skeleton curves of specimens

4.2 承载力和延性分析

各试件的承载力和延性分析结果汇总见表 3,其中数据为正、反向加载的平均值, K 为初始刚度, Δ_y 为名义屈服位移, P_y 为名义屈服荷载, Δ_u 为极限位移(取水平荷载下降至峰值荷载的 85%时对应的位移), P_u 为峰值荷载, $\mu\Delta$ 为位移延性系数, θ_u 为极限位移角, L 为墩柱有效高度.与原试件 BP-1 相比,被动约束试件 BP-2 的位移延性系数和极限位移角分别提高了 1.2%和 34.9%,主动约束的试件 BP-3 的位移延性系数和极限位移角分别提高了 27.8%和 51.2%.这表明 SMA 丝的约束作用大幅度提高了桥墩柱的变形能力,其中主动约束作用的增幅更明显.对比各试件的承载力,相比于 BP-1,试件 BP-2 的峰值荷载和屈服荷载分别减小了 0.7%和 5.7%;试件 BP-3 的峰值荷载提高了 2.4%,而屈服荷载却减小了 3.4%,这表明试验中所采用的围压水平对试件的承载力提升并不明显.另外,出现 BP-1 峰值荷载略高于 BP-2,应属于试验结果的离散误差范围.因此,SMA 丝被动和主动加固主要能提高圆柱的延性,但对承载力提高的作用不大.

表 3 试验结果汇总

Tab.3 Summary of test results

试件 编号	$K/(kN \cdot mm^{-1})$	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	$\mu\Delta = \Delta_u/\Delta_y$	$\theta_u = \Delta_u/L$
BP-1	18.10	6.03	73.05	38.87	80.75	6.45	0.043
BP-2	18.68	8.03	68.91	52.30	80.19	6.53	0.058
BP-3	18.83	7.11	70.60	58.56	82.70	8.24	0.065

4.3 强度衰减

各试件在不同位移下的强度衰减如图 10 所示. 图中 κ 轴表示各位移幅第 3 次循环下试件水平力强度的衰减系数, 其中各值为正负两个方向衰减系数的均值. 当水平位移达到 28 mm 时, BP-1 开始出现明显的强度衰减, 最后强度衰减达 20% 以上, 而此阶段 BP-2 和 BP-3 的强度均在 95% 以上, 表明 SMA 丝的约束作用有效减缓并控制了试件的强度衰减. BP-2 和 BP-3 的强度出现明显衰减分别是在水平位移达 36 mm 和 52 mm 后, 表明 SMA 丝主动加固对墩柱在循环荷载作用下强度衰减的控制更为显著.

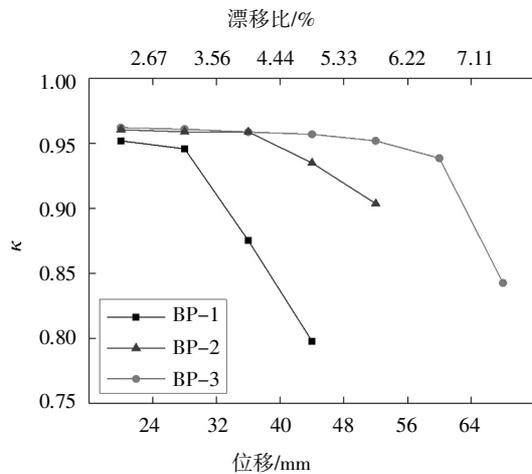


图 10 试件强度衰减曲线图

Fig.10 Curves of strength degradation of specimens

4.4 耗能特性

耗能特性可由滞回环包围面积体现. 图 11 为 3 个试件累积能耗 (E_{hyst}) 随加载位移的变化条形图.

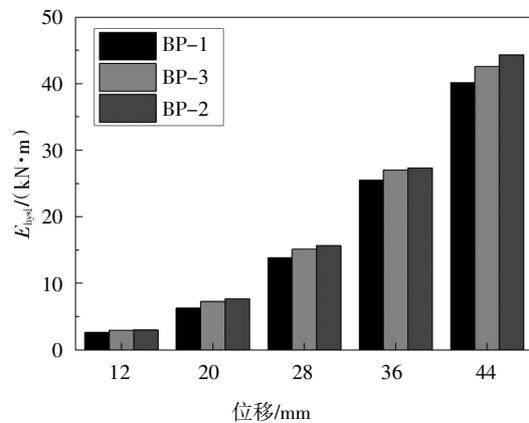


图 11 试件累计耗能

Fig.11 Curves of cumulative energy dissipation of specimens

从图中看到, 在水平位移达到 12 mm 时, 3 个试

件的累计耗能几乎相同, 表明试件在产生主要斜裂缝前各试件的耗能基本相同; 12 mm 以后, 加固件均比原试件的累计耗能高, 并且在水平位移为 44 mm 时, 加固试件 BP-2 和 BP-3 的累计耗能分别为 42.6 kN·m 和 44.4 kN·m, 相较于原试件 BP-1 (40.1 kN·m), 分别提升了 6.2% 和 10.7%. 可以发现同一位移幅值下, SMA 丝对墩柱的耗能有一定的提升, 并且呈现出主动加固试件耗能能力优于被动加固试件, 但提升程度有限, 这是由于目前的 SMA 丝缠绕间距相对较大, 导致给墩柱混凝土提供的围压较小, 因此在后续研究中可考虑不同 SMA 丝间距的影响.

4.5 残余位移

残余位移反应试件的自复位能力, 其大小为荷载-位移滞回曲线卸载段与水平坐标轴交点的横坐标值. 取每一位移幅值 3 次循环后的平均值作为该位移幅值下的残余位移, 如图 12 所示.

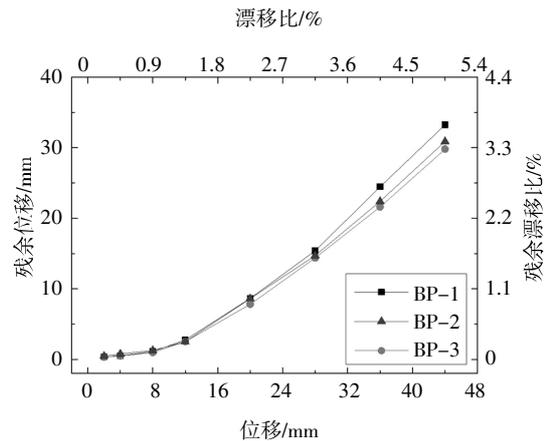


图 12 试件残余位移曲线

Fig.12 Curves of residual displacement of specimens

当水平位移达到 8 mm 之前, 试件处于弹性阶段, 复位能力强, 各试件的残余位移漂移比 0.1% 以下, 可以忽略不计. 当位移达到 12 mm 后, 试件残余位移增速变大, 3 条曲线走势出现差异: 相同位移幅值下, 残余位移最小为 BP-3, 其次为 BP-2, 最大为 BP-1. 其中, 44 mm 位移下, 相较于 BP-1, BP-2 的残余位移减小了 7.1%, BP-3 的残余位移减小了 10.4%. 这表明在 SMA 丝的约束作用下, 试件的残余变形得到了一定的控制, 且主动约束作用下的残余位移更小. 在此, 同样可以发现主动加固试件和被动加固试件的残余位移减小程度仍然是有限的, 说明 SMA 丝的加固体积率仍需要提高.

4.6 与既有试验对比

将类似研究的试验结果与本试验结果进行对比,如表4所示.从表中对比结果可知,SMA提供的主动围压越大,试件的整体性能提升越好.这是由于SMA约束墩柱,使混凝土处于三向受压,提高了混凝土抗压性能,理论上在一定范围内,约束围压越大,混凝土性能提高得越好.而SMA主动约束墩柱,使混凝土初始受一定的三向压力,后续由于混凝土的膨胀导致SMA产生被动约束力,围压进一步增加,因此,约束混凝土在某一膨胀应变下,SMA主动约束试件的围压高于被动约束试件的围压,最后导致主动加固试件的抗震性能更好.

表4 试验结果对比

Tab.4 Comparison of test results

试验	Shin 试验 ^[12]	Choi 试验 ^[20]	本文试验	
	主动加固	主动加固	主动加固	被动加固
损伤	明显改善	明显改善	明显改善	明显改善
承载力	6.0%	16.7%	2.4%	-0.7%
初始刚度	—	28.6%	4.0%	3.2%
位移延性	185.7%	114.1%	27.8%	1.2%
累计耗能	271.0%	—	184%	50.0%

注:表中3组试验试件尺寸及SMA性能各不相同,根据换算SMA提供的主动围压依次分别为1.09 MPa、0.67 MPa和0.42 MPa.每组试验数据为主动加固试件与对应原试件对比提升的百分数或程度.特别地,根据参考试验的结果,表中累计耗能为最终累计耗能提升百分比.

另外,主动围压的大小并不与试件承载力和初始刚度等性能正相关,这可能是SMA丝的性能和尺寸以及墩柱尺寸和参数的不同导致的.

5 结论

本文采用国产NiTiNb-SMA丝加固钢筋混凝土圆柱,通过拟静力试验,研究了SMA丝被动加固和主动加固钢筋混凝土圆柱的加固效果,主要得到以下结论:

1)国产NiTiNb-SMA丝在常温下施加预应变后应用于钢筋混凝土圆柱的加固中,能提供较大的主动约束力,避免机械张拉,是一种有效的主动约束加

固方法.

2)SMA丝主动约束作用能有效抑制竖向裂缝的开展,相比被动加固试件损伤程度要轻,而在各变形下未加固试件的损伤程度均比加固试件严重.

3)SMA丝无论被动加固或主动加固混凝土圆柱,均能提高圆柱的延性和耗能能力,但主动加固提高的幅度更大,说明国产NiTiNb-SMA丝提供的预应力更能有效提高圆柱的延性和耗能能力.对比原试件,主动约束试件的位移延性提高了27.8%,累计耗能提高了10.4%,提升效果较明显.

4)SMA丝加固圆柱可有效延缓圆柱的强度衰减,减小墩柱震后残余位移.并且主动加固对强度衰减的控制更好,残余位移也更小.

参考文献

- [1] GHADAMI J, NEMATZADEH M. Effect of bond shear stress on compressive behaviour of steel tube-confined concrete with active and passive confinement [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, 22: 783—810.
- [2] 贺志荣,周超,刘琳,等.形状记忆合金及其应用研究进展[J]. *铸造技术*, 2017, 38(2): 257—261.
HE Z R, ZHOU C, LIU L, *et al.* Research progress of shape memory alloys and their applications [J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(2): 257—261. (In Chinese)
- [3] 陈云,吕西林,蒋欢军.新型耗能增强型形状记忆合金阻尼器减震性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(2): 31—38.
CHEN Y, LÜ X L, JIANG H J. Seismic performance study on new enhanced energy dissipation SMA damper [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(2): 31—38. (In Chinese)
- [4] 崔迪,李宏男,宋钢兵.形状记忆合金混凝土柱动力特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 150—154.
CUI D, LI H N, SONG G B. Experimental study on dynamic properties of SMA reinforced concrete columns [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 150—154. (In Chinese)
- [5] MUNTASIR BILLAH A H M, SHAHRIA ALAM M. Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 730—742.
- [6] 余志刚,韩西,钟厉,等.预应变影响下形状记忆合金约束混凝土圆柱体轴压试验[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(3): 124—129.
YU Z G, HAN X, ZHONG L, *et al.* Axial compression experiment on concrete circular columns confined with shape memory alloy under influence of pre-strain condition [J]. *China Journal of Highway and*

- Transport, 2013, 26 (3): 124—129. (In Chinese)
- [7] 余志刚, 韩西, 钟厉, 等. 不同黏结条件下 SMA 驱动混凝土柱轴压试验研究[J]. 建筑材料导报, 2013, 16(4): 711—715.
- YU Z G, HAN X, ZHONG L, *et al.* Axial compression experimental study of shape memory alloy (SMA) actuating concrete column at different bond conditions [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16 (4): 711—715. (In Chinese)
- [8] 洪陈凯. 超弹性形状记忆合金增强混凝土柱轴压性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2015: 29—56.
- HONG C K. Experimental investigation of concrete columns reinforced with superelastic shape memory alloys [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2015: 29—56. (In Chinese)
- [9] TRAN H, BALANDRAUD X, DESTREBECQ J F. Improvement of the mechanical performances of concrete cylinders confined actively or passively by means of SMA wires [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(1): 292—299
- [10] CHOI E, NAM T, YOON S, *et al.* Confining jackets for concrete cylinders using NiTiNb and NiTi shape memory alloy wires[C]//3rd International Symposium on Functional Materials/Advances in Functional Materials Conference, Jinju City, South Korea: 2010, DOI: 10.1088/0031-8949/2010/T139/014058.
- [11] VOKOUN D, KAFKA V, HU C T. Recovery stresses generated by NiTi shape memory wires under different constraint conditions [J]. Smart Materials and Structures 2003, 12: 680—685.
- [12] ANDRAWES B, SHIN M. Seismic retrofitting of bridge columns using shape memory alloys [C]// Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). San Diego, CA: Ahmadian M, 2008: K9281—K9281.
- [13] SHIN M, ANDRAWES B. Lateral cyclic behavior of reinforced concrete columns retrofitted with shape memory spirals and FRP wraps [J]. Journal of Structural Engineering - ASCE, 2011, 137: 1282—1290.
- [14] CHEN Q, ANDRAWES B. Cyclic stress-strain behavior of concrete confined with NiTiNb-shape memory alloy spirals [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(5): 1—13.
- [15] CHOI E, PARK S, CHO B, *et al.* Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 5771: S756—S759.
- [16] Choi E, Kim D J, Youn H. Stiffness and confinement ratios of SMA wire jackets for confining concrete [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23: 2727—2731.
- [17] 冯昭伟, 王江波, 米绪军, 等. 退火温度对 Ni47Ti44Nb9 冷拉丝及热拉应力学性能和记忆性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2174—2178.
- FENG Z W, WANG J B, MI X J, *et al.* Effect of annealing temperature on mechanical properties and memory properties of Ni47Ti44Nb9 cold drawn and hot drawn wires [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (10): 2174—2178. (In Chinese)
- [18] 赵连城, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 99—102.
- ZHAO L C, CAI W, ZHENG Y F. Shape memory effect and superelasticity in alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 99—102. (In Chinese)
- [19] SHIN M, ANDRAWES B. Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys [J]. Engineering Structures, 2010, 32(3): 656—664.
- [20] CHOI E, CHUNG Y S, CHOI D H, *et al.* Seismic protection of lap-spliced RC columns using SMA wire jackets [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(3): 239—252.
- [21] 卓卫东, 林荃冰, 刘丽玲, 等. 基于模型试验的 RC 墩柱抗震加固方法比较[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 109—115.
- ZHUO W D, LIN Q B, LIU L L, *et al.* Comparison of seismic retrofit measures for rc bridge columns based on model test [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37 (4): 109—115. (In Chinese)