

# 钢-混凝土组合结构中 SMA 连接件抗剪试验

孙 丽<sup>1</sup>, 崔朦朦<sup>1</sup>, 崔 迪<sup>2</sup>, 甘 博<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连大学土木技术与研究开发中心, 辽宁 大连 116622)

**摘 要** 目的 将形状记忆合金(SMA)制成螺栓型连接件,应用于钢-混凝土组合结构中,研究不同因素对 SMA 连接件承载能力的影响. 方法 采用改进的推出试验方法,从水平力、混凝土强度、SMA 连接件的直径、配筋情况 4 个方面来研究 SMA 作为连接件的抗剪性能. 结果 在相同的相对滑移下,SP-2 比 SP-1 的荷载极限值约降低了 20%;SMA 连接件的直径由 6 mm 增大为 8 mm 时,其极限荷载增加了 90%,屈服荷载增加了 110%;SMA 连接件的屈服荷载约为极限荷载的 60%,屈服滑移为极限滑移的 34%. 结论 水平力的存在会降低 SMA 连接件的承载能力;SMA 连接件直径对其承载能力的影响极为显著;混凝土强度对 SMA 连接件承载能力的影响较小;混凝土中是否配筋对 SMA 连接件的承载能力的影响不明显. 同时,应用 SMA 连接件的试件延性较好,可以应用到实际工程中.

**关键词** SMA 连接件;推出试验;极限荷载;屈服荷载;延性

中图分类号 TU375.4 文献标志码 A

## Research on Shear Resistance Test of SMA Connectors in Steel-concrete Composite Structure

SUN Li<sup>1</sup>, CUI Mengmeng<sup>1</sup>, CUI Di<sup>2</sup>, GAN Bo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Civil Technology and Research and Development Center, Dalian University, Dalian, China, 116622)

**Abstract:** To study the mechanical properties of SMA (Shape Memory Alloy) connectors, the SMA was made into bolt-type connectors and used in the steel-concrete composite structure. The influence of 4 factors on the bearing capacity of SMA connectors, including horizontal force, strength of the concrete, the diameter of SMA connectors and whether the concrete was reinforced were studied by applying an improved method of the push-out test. The result showed that compared with SP-1, the limit load of SP-2 was reduced by about 20% under the same relative slip, and when the diameter of the SMA connector was increased from 6 mm to 8 mm, the limit load was increased by 90% and the yield load was increased by up to 110%, moreover, the yield load of SMA connector was about 60% of the limit load and the yield slip was 34% of the limit slip. The conclusion was as follows: firstly, the existence of horizontal force would reduce the bearing capacity of SMA con-

收稿日期:2016-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51378085, 51578347);辽宁省教育厅科研项目(L2013465, LT2015023);辽宁省百千万人才工程资助项目(2014921045)

作者简介:孙丽(1974—),女,教授,博士,主要从事结构试验方法、结构健康监测及其损伤控制的研究.

nectors, then, the influence of the diameter of SMA connectors on bearing capacity was quite significant, however, the influence of the strength of concrete was subtle, furthermore, the effect of whether the concrete was reinforced on bearing capacity of SMA connectors was not obvious. At the same time, the SMA connectors had good ductility and could be applied to the practical engineering.

**Key words:** SMA connectors; push-out test; limit load; yield load; ductility

随着国内外建筑结构的发展, 钢-混凝土组合结构已得到了普遍的应用. 在钢-混凝土组合结构中, 连接件能够有效承担型钢与混凝土交界面上的纵向剪力, 且能抵抗二者间的相对滑移, 使得型钢和混凝土更好地形成整体, 从而共同发挥作用. 由此可见, 连接件起着至关重要的作用. 孙国华等<sup>[1-4]</sup>将栓钉作为抗剪连接件应用在钢框架混凝土剪力墙结构中, 研究发现, 栓钉作为抗剪连接件的受力极其复杂, 通常处于拉剪耦合的受力状态, 在轴向拉力的作用下抗剪性能有所降低. 此外, 动荷载的作用也极易使栓钉抗剪连接件发生低周疲劳破坏. 在钢-混凝土组合结构中, 连接件一旦发生疲劳破坏, 将不再传递荷载, 结构所承受的荷载瞬间转移给钢框架, 导致结构的整体承载能力急剧下降, 最终结构呈脆性破坏<sup>[5]</sup>. 因此, 对钢-混凝土组合结构中连接件的抗剪性能的研究具有重要意义.

智能材料是一种新型功能材料, 它能感知外部刺激及时作出判断并处理信息. 按其功能特点可分为两大类<sup>[6]</sup>: 一类是感知材料, 即能够感知来自外部刺激作用的材料. 这类材料主要有电感材料、光纤、压电材料、形状记忆材料、热敏材料等. 另一类是驱动材料, 即对外界环境条件的影响或者内部状态的变化做出反应或驱动的材料. 这类材料主要有电流变体、形状记忆材料、磁流变体、磁致伸缩材料、电致伸缩材料、压电材料、液晶材料等. 目前智能材料的应用逐渐从航空航天、军事等领域发展到了土木工程领域, 将智

能材料引入到建筑结构中使结构具有仿生体的自感知、自修复、自适应能力是当前研究的一个热点<sup>[7]</sup>.

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 作为智能材料之一, 是一类具有独特“形状记忆”功能的合金材料. 早年间被广泛用于军事、医疗等精密领域. 近年来, SMA 在土木工程领域也得到了广泛的应用. 因自身具有的形状记忆效应和可恢复变形大、电阻对应变敏感、良好的抗疲劳性能等优点得到了国内外众多学者的青睐. 笔者用形状记忆合金材料制成抗剪连接件, 并将其应用于钢混组合结构中, 采用改进的推出试验方法开展了试验研究, 结果表明, 与应用普通栓钉连接件的试件相比, 应用 SMA 连接件的试件延性更好.

## 1 形状记忆合金特性

### 1.1 形状记忆效应

形状记忆效应 (Shape Memory Effect, SME) 是指在低温状态下, 对处于马氏体相的材料施加外力使其变形, 然后加热或者通电后, 该材料仍能恢复到原始形状.

### 1.2 超弹性

超弹性 (Super-elasticity Effect, SE) 指对处于奥氏体状态的 SMA 施加外力使之产生弹性变形, 卸载后即便不加热 SMA 也能发生马氏体逆相变并且恢复成原始形状的现象. 超弹性示意图见图 1. 处于奥氏体状态的 SMA 材料, 随着应力的增加, 应变也随之增加直至产生非弹性应变. 继续加载, SMA 材料将发生马氏体相变, 这种马氏体相变是由

应力诱发导致的,最后 SMA 材料完全变成马氏体相.但是这种马氏体为热弹性马氏体,处于完全不稳定状态,卸载后,SMA 材料随即发生马氏体逆相变或奥氏体相变.这个过程的发生不受温度的控制,即温度不增加,此过程也会发生,最后 SMA 材料将恢复到原来的奥氏体相.

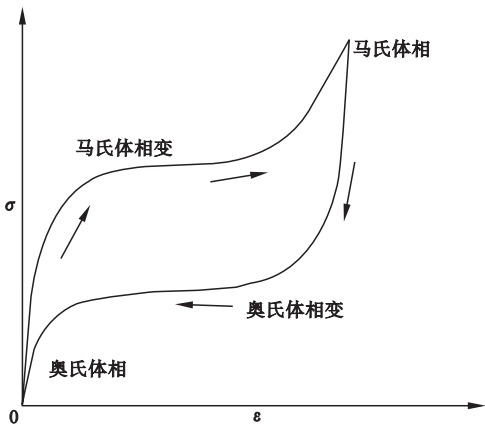


图1 超弹性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the super elasticity

SMA 能承受较大的变形,且有很少的残余应变,使结构具有自动恢复的能力<sup>[8]</sup>.一般只要不超过 8%~10% 的变形量,均可恢复原有形状.除此之外,SMA 超弹性的存在使得 SMA 具有良好的抗疲劳性能.近年来,一些学者鉴于形状记忆合金的超弹性<sup>[9-12]</sup>,设计开发了 SMA 阻尼器,并将其应用到结构中进行抗震研究,结果发现,SMA 阻尼器有良好的减震控制效果.还有一些学者利用形状记忆合金材料代替普通钢筋应用于混凝土结构中<sup>[13-17]</sup>,研究发现,形状记忆合金不仅能很好地提高混凝土结构的自修复能力,而且还能对结构的振动起到控制作用.但将形状记忆合金作为连接件应用到钢-混凝土组合结构中的研究还很少.

2 试验概况

笔者用形状记忆合金制成螺栓型,取代栓钉抗剪连接件,并将其应用于钢混组合结构中,从水平力、混凝土强度、SMA 连接件的

直径、配筋情况 4 个方面来研究 SMA 作为连接件的抗剪性能.

确定连接件的抗剪性能的试验方法有 3 种:拔出试验、梁式试验、推出试验<sup>[14]</sup>.其中,推出试验是研究抗剪连接件承载能力最常用的试验方法.推出试验相比其他两种试验方法,操作简单,安全可靠.为了方便施加水平荷载,本试验采用了两侧型钢,中间混凝土块的试件形式对传统的推出试验的试件形式进行了改进.并根据文献[18-19]提到的方法,确定了各试件的屈服承载力.

2.1 试件设计

试验共设计了 6 个试件,编号为 SP1~SP6,具体参数见表 1.为了能够施加水平向荷载,本试验对传统推出试验的试件形式进行了改进,即试件两侧为型钢,中间为混凝土块(见图 2).试件中的连接件均为形状记忆合金材料,螺栓型 SMA 连接件的长度为 70 mm,螺距为 1 mm.6 个试件中的型钢均采用 Q235B 的 H 型钢,其型号为 H200 mm×200 mm×8 mm×12 mm,高度均为 500 mm.混凝土块的尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,保护层厚度为 10 mm.试件 SP-4 的混凝土强度等级为 C20,试件 SP-5 的混凝土强度等级为 C40,其他试件的混凝土强度等级均为 C30.混凝土块内配置了强度等级为 HPB300、直径为 6 mm 的光面钢筋(见图 3).

表1 试件主要参数

Table 1 Parameters of specimens

试件 编号	混凝土 等级	抗剪连接件 直径/mm	配筋 设置	水平拉 力/kN
SP-1	C30	8	配筋	0
SP-2	C30	8	配筋	3
SP-3	C30	6	配筋	0
SP-4	C20	6	配筋	0
SP-5	C40	6	配筋	0
SP-6	C30	6	未配筋	0

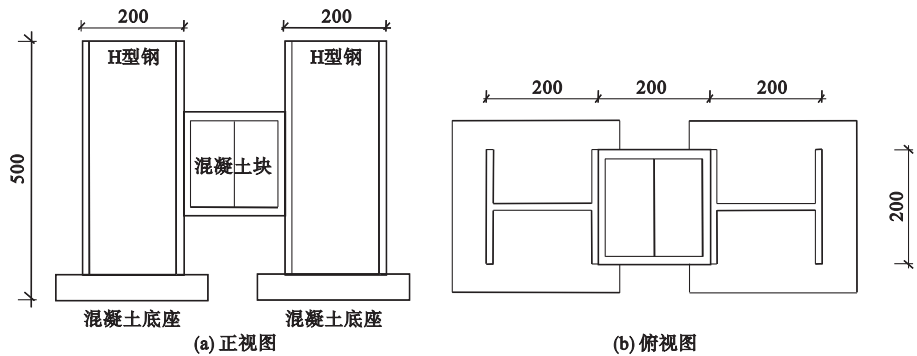


图 2 试件示意图

Fig. 2 Sketch of specimen

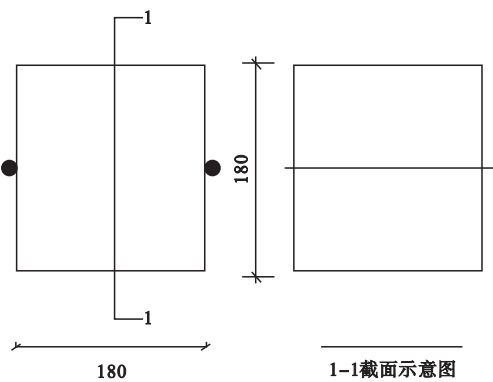


图 3 钢筋笼尺寸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel bar cage

2.2 试验装置与加载方案

试验装置如图 4 所示. 试件的一侧 H 型钢通过法兰盘与千斤顶相连, 沿 SMA 螺栓连接件轴线方向施加水平拉力; 另一侧 H 型钢通过轴向螺栓杆固定于反力墙. 竖向荷载施加于混凝土块上表面中心处.

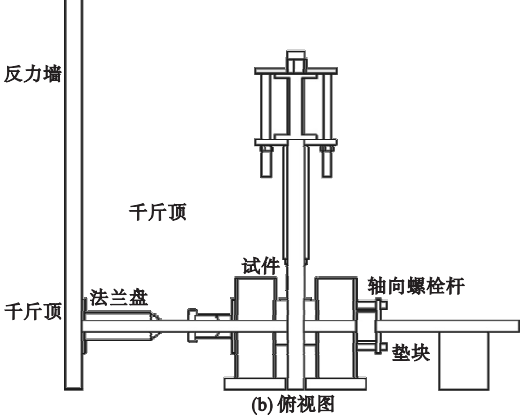


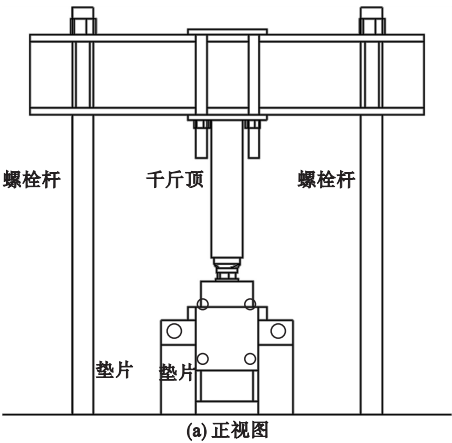
图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

试验前, 在混凝土上表面铺垫细沙和铁板, 便于混凝土块均匀承受竖向荷载. 试验采用力控制加载的方法. 轴向荷载和竖向荷载均用液压千斤顶施加. 在加载过程中, 首先施加一定幅值的轴向拉力, 并固定该荷载, 然后再施加竖向荷载.

2.3 量测方案

试验主要量测的内容有: ①在混凝土块的铁板上架设位移计以获得混凝土块的绝对位移; ②分别在混凝土块的前后两侧架设位移计以获得型钢与混凝土块之间的水平滑移量; ③分别于左右两侧底座上架设位移计以获得底座的绝对位移; ④分别在混凝土块上方架设位移计以监测左右型钢与混凝土之间的竖向滑移; ⑤在混凝土块的左侧、中部、右侧 3 个截面处粘贴应变片以监测混凝土块的应变值. 试验的测点布置如图 5 所示.



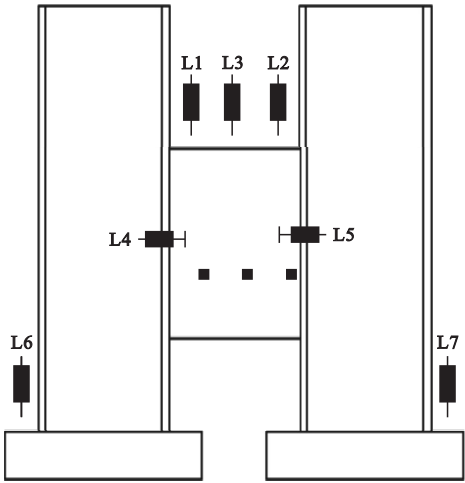


图 5 测点布置

Fig. 5 Instrumentation arrangement

3 试验现象与结果分析

3.1 试验现象

6 个试件的破坏过程大体相同,最终破坏均为试件同侧的两个连接件被剪断(见图 6). 加载初期,混凝土块没有裂缝产生;随着荷载的增加,混凝土块与 H 型钢的交界面角部轻微开裂;荷载继续增加,裂缝宽度加大;加载后期,能够听到混凝土块和 H 型钢相互摩擦产生的“吱吱”声. 随着荷载进一步增加,声音越来越大,最后达到极限承载力,连接件被剪坏,H 型钢与混凝土块分离. 试验中未出现混凝土起皮脱落,同时也未出现试件两侧的两个 SMA 连接件同时剪断破坏.



(a) 混凝土侧破坏面



(b) 型钢侧破坏面



(c) 试件整体破坏

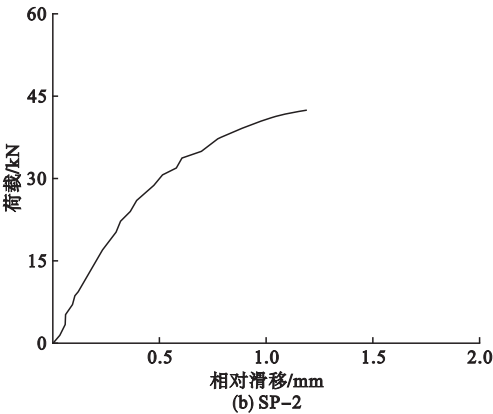
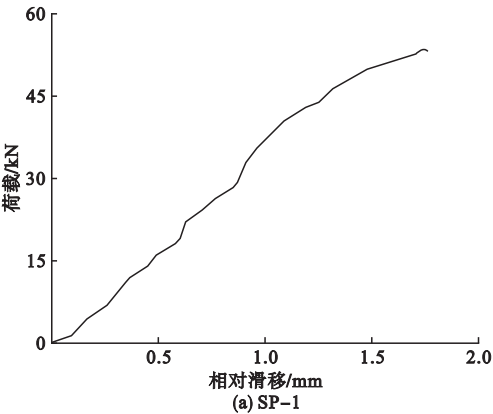
图 6 试件破坏现象

Fig. 6 Damage phenomenon of specimens

3.2 结果分析

根据各个试件的试验数据绘制出 SMA

连接件的荷载 - 滑移曲线(见图 7).



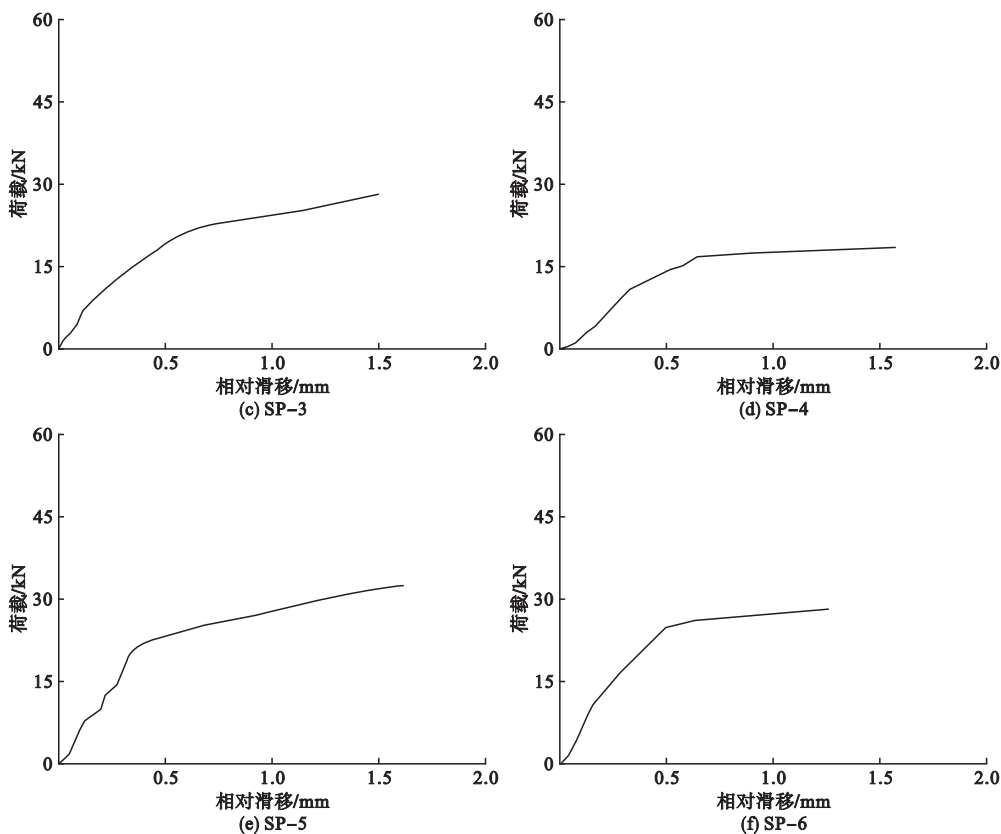


图 7 试件荷载 - 滑移曲线

Fig. 7 Load vs. slip curves of specimens

试验中不考虑 H 型钢的变形值, 设定试件水平方向的相对滑移量就是 SMA 连接件的位移量. 分析图 7 中各个试件的荷载 - 滑移曲线, 从试验加载到试件破坏的整个试验过程中, 试件的受力大致可分: 线弹性阶段 - SMA 连接件部分屈服阶段 - 破坏 (剪断) 3 个阶段.

(1) 加载初期, 试件的受力基本处于弹性阶段, 其荷载 - 相对滑移曲线呈线性关系.

(2) 随着荷载的增加, 型钢与混凝土块连接处 SMA 连接件的应力增加较快, 并出现了局部的屈服, 试件进入屈服阶段. 但此时并不影响 SMA 连接件的受力, 试件仍能继续承受荷载.

(3) 荷载持续增加, SMA 连接件的有效抗剪面积不断减小, H 型钢与混凝土块之间的相对滑移迅速加大. 最后, 连接件的屈服面扩展到整个截面, SMA 连接件被剪断, 型钢与混凝土块分离, 试件破坏.

4 SMA 连接件的性能分析

根据文献[18 - 19], 绘制出 SMA 连接件弹性阶段的切线后将该切线偏移连接件直径的 5%, 得到其平行线, 将该平行线与荷载 - 滑移曲线的交点视为屈服点 (见图 8). 由图 8 可知 SMA 连接件的极限荷载, 但屈服荷载未能直接获得.

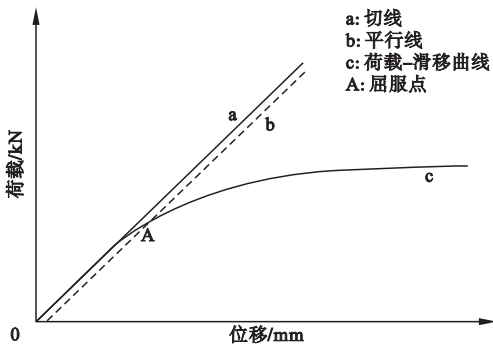


图 8 屈服荷载取值示意图

Fig. 8 Schematic diagram of yield load

据上述计算方法,表2给出了不同因素影响下,SMA连接件的荷载与位移值.其中 $F_u$ 为SMA连接件的极限荷载, $S_u$ 为SMA连接件的极限位移, $F_y$ 为SMA连接件的屈服荷载, $S_y$ 为SMA连接件的屈服位移.经计算可得: $F_y/F_u$ 平均值为0.64,标准差为0.081. $S_y/S_u$ 平均值为0.34.标准差为0.05.

表2 SMA连接件的荷载及位移

Table 2 Load and displacement of SMA connectors

试件	$F_u/\text{kN}$	$S_u/\text{mm}$	$F_y/\text{kN}$	$S_y/\text{mm}$	$F_y/F_u$	$S_y/S_u$
SP-1	53.60	1.750	28.38	0.872	0.53	0.50
SP-2	42.50	1.196	25.26	0.392	0.59	0.33
SP-3	28.20	1.506	15.48	0.368	0.55	0.24
SP-4	18.50	1.578	13.34	0.436	0.72	0.28
SP-5	32.20	1.400	22.52	0.434	0.70	0.31
SP-6	27.90	1.260	20.72	0.448	0.72	0.356

由表2分析可得:

(1)由试件SP-1、SP-2的荷载-相对滑移曲线可知,在相同的相对滑移下SP-2比SP-1的荷载极限值约降低了20%,即水平力的存在降低了SMA连接件的极限荷载.

(2)从试件SP-1与SP-3的试验结果可知,SMA连接件的直径由6 mm增大为8 mm时,其极限荷载增加了90%,屈服荷载增加了110%.该结果表明,增大连接件的直径对于提高其抗剪承载能力效果显著.

(3)从试件SP-3、SP-4、SP-5的试验结果可知,试件的混凝土等级由C20增加到C30时,连接件的极限荷载提高了约50%,而试件的混凝土等级由C30增加到C40时,连接件的极限荷载仅提高了14%.结果表明,提高试件混凝土强度可以增加SMA连接件的抗剪承载能力.

(4)从试件SP-3与SP-6的试验结果可知,在相同的相对滑移下,SP-3比SP-6的极限荷载仅增加了1%,主要是由于混凝土的强度相比于SMA连接件的强度大很多,试验过程中没有出现混凝土劈裂现象,故

混凝土块内是否配置钢筋对SMA连接件抗剪承载能力的影响不明显.

(5)SMA连接件的屈服荷载约为极限荷载的60%,屈服滑移为极限滑移的34%,说明SMA连接件的后续变形能力较强,即SMA连接件具有良好的延性.

5 结 论

(1)从加载到破坏的整个试验过程中,SMA连接件的受力大致可分:线弹性阶段-SMA局部屈服阶段-破坏(剪断)3个阶段.

(2)水平力的存在会降低SMA连接件的承载力,SMA连接件直径对其抗剪承载能力的影响最为显著.混凝土强度的增加可以提高SMA连接件抗剪承载能力,混凝土中是否配筋对SMA连接件的抗剪承载能力的影响不明显.

(3)SMA连接件的屈服荷载约为极限荷载的60%,屈服滑移为极限滑移的34%,说明SMA连接件具有较好的延性.

参考文献

[1] 孙国华,顾强,何若全,等.半刚接钢框架内填暗竖缝钢筋混凝土剪力墙结构滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(9):16-26.  
(SUN Guohua, GU Qiang, HE Ruquan, et al. Experimental investigation of partially-restrained steel frame with concealed vertical slits RC infill walls[J]. Journal of building structures, 2010, 31(9): 16-26.)  
[2] 彭晓彤,顾强,林晨,等.半刚性节点钢框架内填钢筋混凝土剪力墙结构试验研究[J].土木工程学报,2008,41(1):64-69.  
(PENG Xiaotong, GU Qiang, LIN Chen, et al. Experimental study on steel frame-reinforced concrete infill wall structures with semi-rigid joints[J]. China civil engineering journal, 2008, 41(1): 64-69.)  
[3] 方有珍,顾强,申林.半刚接钢框架(柱弱轴)-内填剪力墙结构滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(2):51-62.  
(FANG Youzhen, GU Qiang, SHEN Lin. Hysteretic behavior of semi-rigid composite steel frame with reinforced concrete infill wall in

- column weak axis [J]. Journal of building structures, 2008, 29(2): 51 - 62. )
- [4] 颜鹏, 方有珍. 刚性连接钢框架-内填剪力墙结构滞回性能试验研究[J]. 建筑技术开发, 2012(3): 8 - 14.  
(YAN Peng, FANG Youzhen. Experimental study on hysteretic behavior of rigid composite steel frame with reinforced concrete infill wall [J]. Building technology development, 2012 (3): 8 - 14. )
- [5] 孙国华, 何若全, 郁银泉, 等. 半刚接钢框架内填 RC 墙结构滞回性能试验-局部性能分析[J]. 土木工程学报, 2010(1): 47 - 55.  
(SUN Guohua, HE Ruoquan, YU Yinquan, et al. Experimental study of partially-restrained steel frame with RC infill walls; local performance analysis [J]. China civil engineering journal, 2010(1): 47 - 55. )
- [6] 张新民. 智能材料研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013, 2: 57 - 63.  
(ZHANG Xinmin. Research progress of smart materials [J]. FRP / Composites, 2013, 2: 57 - 63. )
- [7] 杜善义, 冷劲松, 王殿富. 智能材料系统和结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
(DU Shanyi, LENG Jinsong, WANG Dianfu. Smart material systems and structures [M]. Beijing: Science press, 2001. )
- [8] CHOI E, CHO S C, HU J W, et al. Recovery and residual stress of SMA wires and applications for concrete structures [J]. Smart materials and structures, 2010, 19(9): 94 - 104.
- [9] 王社良, 陈先河, 樊禹江, 等. SMA 新型阻尼器在 RAC 框架上的减震性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(2): 169 - 172.  
(WANG Sheliang, CHEN Xianhe, FAN Yujia, et al. Analysis of noise reduction performance of a new shape memory alloy damper attached to recycled concrete frame [J]. Noise and vibration control, 2014, 34 (2): 169 - 172. )
- [10] PARULEKAR Y M, REDDY G R, VAZE K K, et al. Seismic response attenuation of structures using shape memory alloy dampers [J]. Structural control and health monitoring, 2012, 19(1): 102 - 119.
- [11] ASGARIAN B, MORADI S. Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(1): 65 - 74.
- [12] LI H, MAO C X, OU J P. Experimental and theoretical study on two types of shape memory alloy devices [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2008, 37(3): 407 - 426.
- [13] 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 Di, LI Hongnan, SONG Gangbing. Experimental study on dynamic properties of SMA reinforced concrete columns [J]. Journal of vibration and shock, 2010, 29 (4): 150 - 154. )
- [14] 崔迪, 李宏男, 宋钢兵. 形状记忆合金混凝土梁力学性能试验研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(2): 117 - 123.  
(CUI Di, LI Hongnan, SONG Gangbing. Behavior of SMA reinforced concrete beam [J]. engineering mechanics, 2010, 27 (2): 117 - 123. )
- [15] 孙丽, 陈晓丹, 高倩倩. 配置预应力形状记忆合金丝的混凝土梁修复性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊 2): 265 - 269.  
(SUN Li, CHEN Xiaodan, GAO Qianqian. Experimental study on self-repair capability of concrete beam reinforced with prestressed shape memory alloy wires [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S2): 265 - 269. )
- [16] CHOI E, CHUNG Y S, CHO B S, et al. Confining concrete cylinders using shape memory alloy wires [J]. European physical journal special topics, 2008, 158(1): 255 - 259.
- [17] WILKINSON T. Dowel bearing strength usda forest service research paper FPL-RP-505 [R]. Madison WI: Forest Products Laboratory, 1991.
- [18] MOHAMMAD M, QUENNEVILLE J H P. Influence of cyclic loads on strength and stiffness of bolted timber connections [J]. Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, 1998, 57(3): 375 - 382.
- [19] 俞宏, 吴文清, 张立志, 等. 竹-混凝土组合结构螺钉剪力连接件推出试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2015, 39(1): 65 - 69.  
(YU Hong, WU Wenqing, ZHANG Lizhi, et al. Experimental study on screw shear connectors of bamboo concrete composite structure [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2015, 39(1): 65 - 69. )