

混凝土梁智能自修复试验与研究

匡亚川^{*1,2}, 欧进萍^{1,3}

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075;
3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 利用形状记忆合金的形状记忆效应和受限回复产生较大驱动力的特性以及胶粘剂对裂缝的填充、修复特性, 研究了一种智能自修复混凝土梁. 通过试验验证了智能混凝土梁的自修复能力, 并对智能混凝土梁的修复机理进行了分析. 试验结果表明: 裂缝产生后, 胶粘剂从修复纤维管中渗入裂缝; 通电加热改变形状记忆合金温度而使其对梁施加回复力, 裂缝闭合. 修复后的试样再次加载时, 其开裂荷载提高, 修复后的裂缝未再次开裂, 而在试件中出现了新的裂缝.

关键词: 智能混凝土梁; 自修复; 形状记忆合金; 修复纤维; 胶粘剂
中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A

0 引言

混凝土的发展已有 100 多年的历史, 因其具抗压强度高、耐久性好、成本低等特点已广泛应用于工程领域, 是目前用量最多的建筑材料^[1]. 从诞生到现在, 混凝土经历了普通混凝土、高强混凝土到高性能混凝土的发展过程^[2]. 如今, 随着地震、飓风等突发性自然灾害造成的灾难性事故和重大的生命财产损失, 以及工程结构长期服役后由环境侵蚀、材料老化和疲劳效应等导致的工程事故频发, 工程结构的安全性和防灾减灾能力愈发受到重视, 人们期望结构可以具有健康自诊断、自适应和损伤自修复的仿生化特征从而提高抵抗灾害的能力^[3]. 混凝土作为基础设施建设中应用最广泛的建筑材料, 成为实现人们对土木工程结构期望性能的载体. 本文将结合修复胶粘剂的填充、粘结功能和形状记忆合金的驱动特性, 研究一种混凝土智能自修复技术; 通过试验研究智能混凝土梁的自修复规律及其影响因素, 并对智能混凝土梁的自修复机理进行分析.

1 智能自修复混凝土

1.1 形状记忆合金的材料特性

形状记忆合金是一类应用前景广阔的智能材

料, 具有独特而优异的形状记忆效应和超弹性效应. 最近的研究结果表明: 利用形状记忆合金的形状记忆效应、超弹性效应和受限回复产生的驱动力, 能够显著增加混凝土结构的回复能力, 提高结构的抗震防灾性能^[4~8]. 本文中采用的形状记忆合金材料为西安赛特金属材料开发有限公司生产的 NiTi 形状记忆合金丝, 该合金丝为近似等原子比合金, 材料成分为 Ti-(50.8%)Ni. 采用示差扫描量热法测定合金丝的相变温度, 温度升高和降低的速度为 20 °C/min. 试验测得马氏体相变开始温度为 -4.3 °C, 马氏体相变结束温度为 -16.7 °C; 奥氏体相变开始温度为 39.6 °C, 奥氏体相变结束温度为 51.2 °C. 合金丝的极限强度为 920 MPa, 极限应变为 19%.

1.2 智能自修复混凝土

智能自修复混凝土, 是利用形状记忆合金的记忆效应, 在受限回复时产生较大的回复力, 结合修复胶粘剂对裂缝面的粘结功能, 实现混凝土损伤、裂缝及时的快速的自修复. 其基本原理是: 在混凝土的受拉或易产生裂缝的位置, 布置形状记忆合金丝和注有修复剂的纤维管; 在地震或台风作用下, 一旦混凝土结构构件中出现损伤或裂缝, 修复纤维管随之破裂, 其中的修复胶粘剂流出, 渗

入到混凝土裂缝中;同时,通电激励形状记忆合金丝,使之产生形状恢复效应,对裂缝施加压应力,迫使裂缝变小或合拢.形状记忆合金使裂缝面闭合,而修复剂将两裂缝面粘结在一起,从而实现混凝土损伤自修复.图1为智能自修复混凝土示意图.

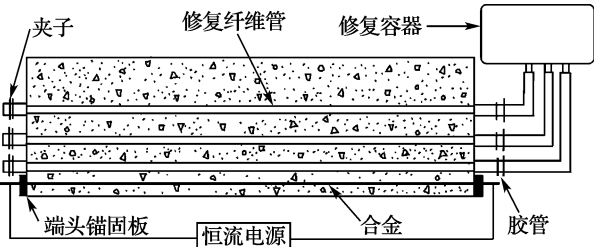


图1 智能自修复混凝土
Fig.1 Smart self-repairing concrete

2 试验设计及试验方法

以C40细石混凝土作为基体材料,石子的最大粒径为6 mm.混凝土基体梁的尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,形状记忆合金丝和修复纤维

维管在混凝土梁中的分布如图2所示.合金丝直径为2.0 mm,与混凝土之间无粘结,采用螺丝将合金丝固定在梁两端的钢板上使之与混凝土共同工作;合金丝的两端伸出钢板40 mm,用于连接通电导线.混凝土保护层为9 mm.两个T形热电偶温度传感器固定在合金的表面,用以测量合金的温度.为了验证智能混凝土梁的自修复能力,设计了4根混凝土梁:试件L1、L2、L3和L4;其中,在试件L1、L2的受拉区仅预埋了形状记忆合金丝,而试件L3和L4中预埋了形状记忆合金丝和含修复胶粘剂的修复纤维管,试件的基本特征如表1所示.修复纤维采用玻璃纤维,修复胶粘剂采用低粘度的环氧树脂胶粘剂.修复纤维管的外径为6 mm,壁厚为0.6 mm.

采用分层浇注的办法在模具中成型,拆模后在标准养护条件下养护至28 d龄期,在电子材料试验机上进行三点弯曲试验,加载速率为0.3 mm/min,由计算机自动控制,数字化结果由计算机自动采集.

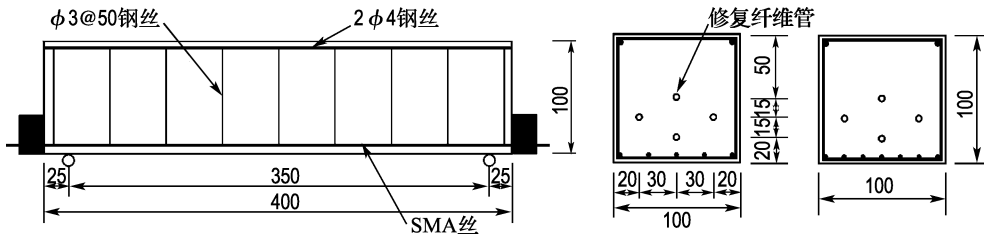


图2 形状记忆合金丝的配置及修复纤维管在混凝土梁中的分布图
Fig.2 Details of smart SMA wire and self-repairing fibre tubes in concrete beam

3 试验结果与分析

3.1 形状记忆合金驱动下梁的自修复规律

试验时在试件跨中施加集中荷载,图3和图4分别为试件L1和试件L2在试验过程中的荷载与跨中挠度曲线.混凝土开裂前,荷载大部分由混凝土承受;混凝土开裂以后,受拉区混凝土退出工作,荷

载直接由合金丝承受,应力促使合金产生马氏体相变.试件L2与试件L1中合金的根数和直径相同,但具有不同的预应变值.比较图5与图6可以发现:预应变值对混凝土梁驱动效应的影响较为明显,混凝土开裂以后,试件L2的曲线斜率比较陡峭,这表明随着变形的增大,合金承受的荷载不断增加.

表1 试件的基本特征
Tab.1 Basic characteristic of the specimens

试件	截面边长/ mm	长度/ mm	合金		合金的预 应变值	受压区钢筋		箍筋		修复纤 维根数
			直径/mm	数目		直径/mm	数目	直径/mm	间距/mm	
L1	100	400	2	5	—	4	2	3	50	—
L2	100	400	2	5	4%	4	2	3	50	—
L3	100	400	2	5	—	4	2	3	50	4
L4	100	400	2	5	4%	4	2	3	50	4

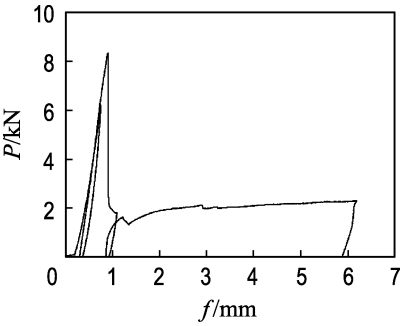


图 3 试件 L1 的荷载与跨中挠度曲线
Fig. 3 Load versus mid-span deflection in specimen L1

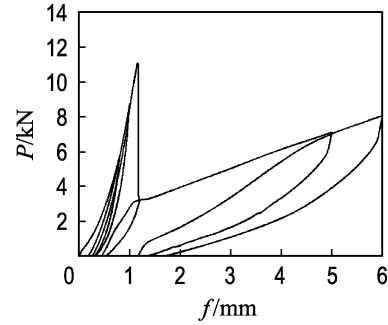


图 4 试件 L2 的荷载与跨中挠度曲线
Fig. 4 Load versus mid-span deflection in specimen L2

当梁的挠度达到一定值时,停止加载,此时合金中有一定的残余塑性应变.然后,采用通电的方式激励合金,电流由大功率的直流稳流电源提供,电流为 9 A.同时,通过热电偶温度传感器测定合金的温度,由自行研制的数据采集系统自动采集.图 5 和图 6 分别为试件 L1 和试件 L2 加热时的挠度回复曲线,从图中可见:初始阶段试件挠度随着温度的升高而缓慢地回复;当温度超过马氏体逆相变的终了温度(A_s)以后,试件挠度迅速减小;温度继续升高,合金从马氏体全部转化为奥氏

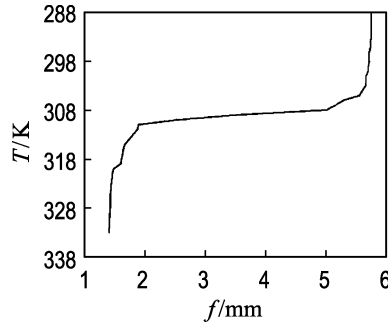


图 5 试件 L1 的温度与跨中挠度曲线
Fig. 5 Deflection reversion versus temperature in specimen L1

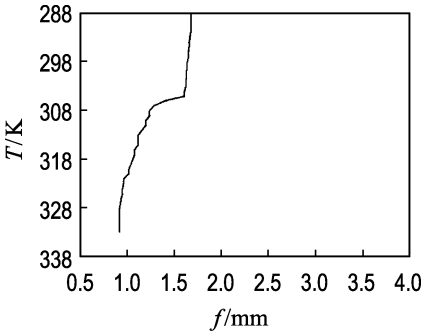


图 6 试件 L2 的温度与跨中挠度曲线
Fig. 6 Deflection reversion versus temperature in specimen L2

体,试件的挠度回复到最小值.试件 L2 由于合金的初始预应变值的存在,应力诱发的马氏体转化为奥氏体的量增大,通电激励合金使其回复时合金对梁的驱动力增大,所产生的反矩也增加,梁的挠度得到了更大的回复.

在加热过程中,合金的温度不断升高,图 7 为试件 L1 的加热时间与合金丝温度曲线.从图可见:在加热初始阶段,合金温度升高较快,曲线比较陡峭;温度较高时,合金温度升高较慢,曲线逐渐变得平缓.这是由于在加热过程中,合金不断向周围的混凝土传递热量,温度越高,合金与混凝土之间的温差越大,合金散发的热量越多,温度升高的速率越慢.

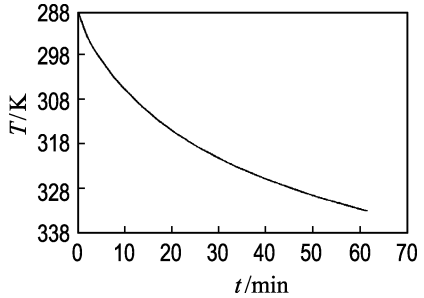
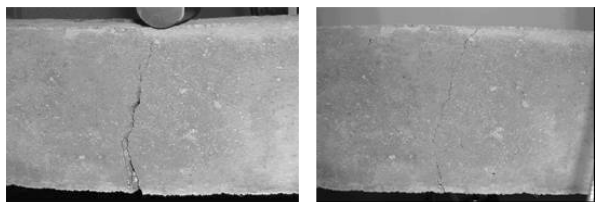


图 7 试件 L1 的升温曲线
Fig. 7 Heating time versus temperature in specimen L1

图 8 为试件 L1 的裂缝修复图案.在加载过程中,混凝土梁逐渐开裂;挠度达到一定值时,裂缝张开值也较大,如图 8(a)所示.卸载以后,通电激励合金回复,回复力促使梁的挠度逐渐减小,裂缝的张开值也随之减小,最后裂缝基本闭合,如图 8(b)所示.

将修复后的试件在试验机上进行第二次三点弯曲试件,图 9(a)和 9(b)分别为第二次试验时

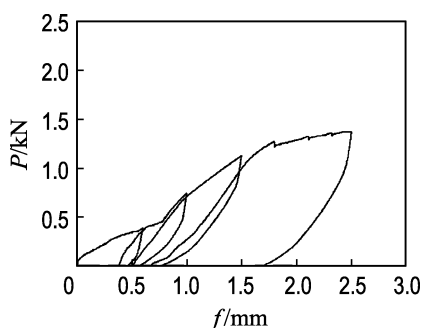


(a) SMA 修复前 (b) SMA 修复后

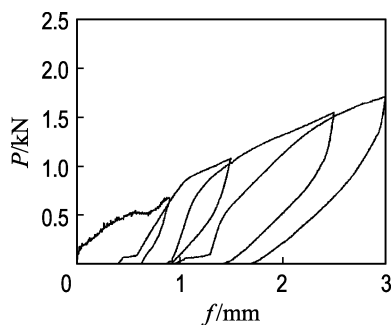
图8 试件 L1 的裂缝修复

Fig. 8 Crack behavior of self-repairing in specimen L1

试件 L1 和 L2 的荷载挠度曲线. 从图 9 中可以看出, 经形状记忆合金驱动修复后的试件再次受力时, 受拉区混凝土已经退出了工作, 荷载仅由合金承受, 原来闭合的裂缝也重新开展, 如图 10 所示.



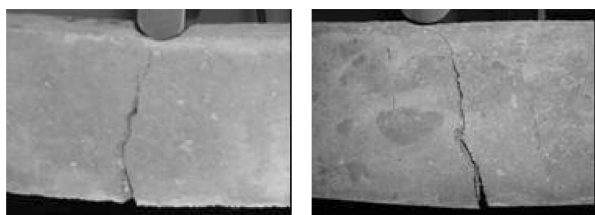
(a) 试件 L1



(b) 试件 L2

图9 第二次试验时的荷载与跨中挠度曲线

Fig. 9 Load versus mid-span deflection in the second testing



(a) 试件 L1 (b) 试件 L2

图10 再次试验时修复后的裂缝再次开展

Fig. 10 Cracks reopening in the second testing

由此可知, 激励合金使试件回复, 裂缝宽度变小、闭合, 构件的变形和挠度及时恢复, 但是开裂部分混凝土的强度及构件的刚度未得到修复.

3.2 自修复机理

形状记忆合金被激励起后, 梁在合金回复力作用下产生反向弯矩, 使其挠度不断减小. 梁两端的反弯矩 M_{SMA} 可用下列公式表示:

$$M_{SMA} = T_{SMA} h_s \quad (1)$$

式中: T_{SMA} 为合金所产生的回复力; h_s 为合金距梁中性轴的距离.

$$T_{SMA} = \sigma_r A_{SMA} \quad (2)$$

式中: σ_r 为合金的最大回复应力; A_{SMA} 为受拉区合金的总截面面积. σ_r 可用下列公式计算^[9]:

$$\sigma_r = \theta(T - T_0) + E_A \epsilon_{res} \quad (3)$$

式中: θ 为热弹性张量分量; T 为温度; T_0 为初始温度; E_A 为合金奥氏体弹性模量; ϵ_{res} 为加热前合金的残余应变.

由式(3)可以得到在合金的应变回复值范围内, 增大合金的预应变可以提高合金的回复应力, 从而提高形状记忆合金梁的恢复能力, 同时使裂缝闭合得更充分.

3.3 智能混凝土梁的自修复规律

试件 L3 和 L4 为预埋了形状记忆合金和内含修复胶粘剂的修复纤维管的智能混凝土梁试件, 加载至发现裂缝后, 继续加载, 当梁的挠度达到一定值时, 即刻停止. 然后, 启动电源开关, 通电激励合金回复, 并及时打开修复容器端头的夹子, 修复胶粘剂从修复容器经修复纤维管迅速渗入到裂缝, 填充、修复裂缝. 经一段时间后, 合金完全回复, 裂缝闭合, 停止通电. 10 d 后, 修复剂完全固化, 达到了其粘结强度, 试样再进行第二次三点弯曲试验.

图 11 和图 12 分别为修复前、后试件 L3 和 L4 的荷载与跨中挠度曲线. 分别将图 11(a)、12(a)和图 11(b)、12(b)比较可以发现: 试件 L3 和 L4 修复后的变形趋势与修复前基本一致, 修复后试件的开裂荷载有一定的提高; 其中试件 L3、L4 分别提高了 39.6%、45.2%. 这表明: 试件在第一次试验破坏后其性能得到了恢复; 开裂区混凝土强度得到了提高. 这是因为纤维管破裂、修复剂胶粘剂流入到裂缝中以后, 将裂缝面重新粘

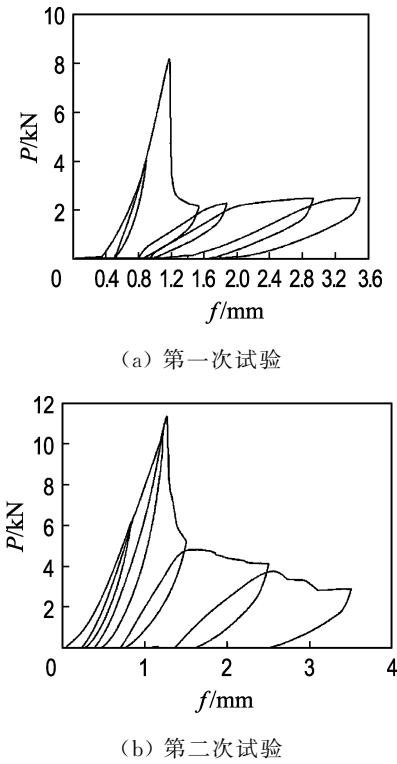


图 11 试件 L3 荷载与跨中挠度曲线
Fig. 11 Load versus mid-span deflection in specimen L3

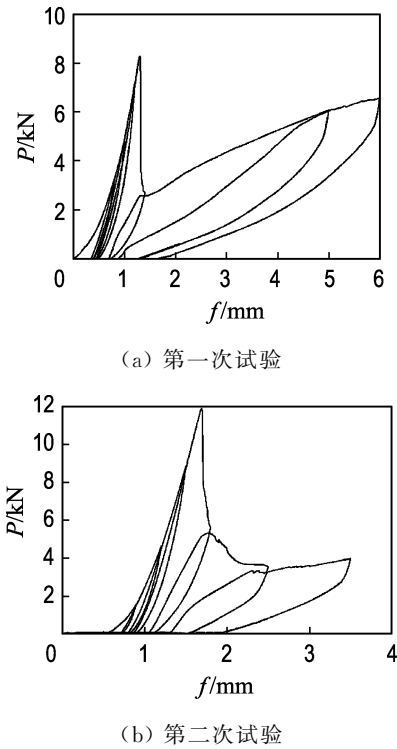


图 12 试件 L4 荷载与跨中挠度曲线
Fig. 12 Load versus mid-span deflection in specimen L4
结在一起,修补了裂缝,使混凝土性能得到了恢复;试件再次受力时,应力将重新分配到未开裂的

区域,因此其开裂荷载有所提高.试件 L4 的开裂强度提高得比试件 L3 多,这是由于合金的初始预应变值存在,合金回复后,对裂缝面产生一定的预压力,提高了修复胶粘剂的粘结强度.

图 13 为试验过程中试件 L3 裂缝的开展及修复图.试验加载使梁的挠度达到一定值时,混凝土开裂如图 13(a)所示;然后,通电激励合金回复,回复力促使梁的挠度逐渐减小,裂缝闭合,同时胶粘剂流出、修复裂缝,如图 13(b)和 13(c)所示;试件再次受力时,修复后的裂缝没有再次裂开,在试件中出现了新的裂缝,如图 13(d)所示.

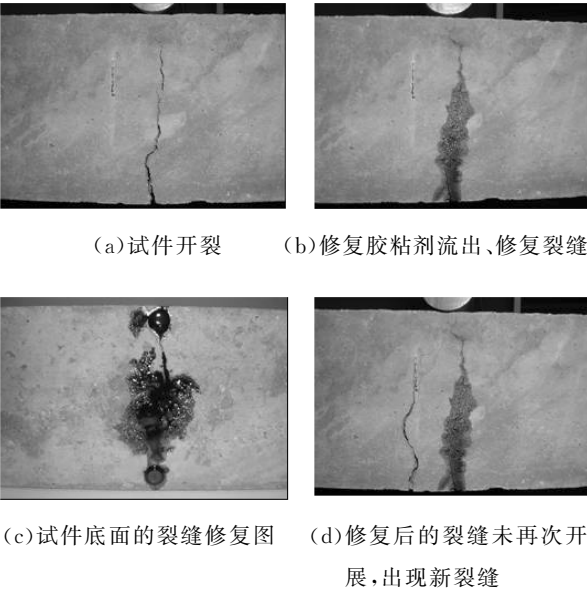


图 13 试件 L3 中裂缝开展及修复图
Fig. 13 Crack propagation and repairing in specimen L3

4 结 论

(1) 在形状记忆合金混凝土梁中裂缝出现后,通电加热改变形状记忆合金温度而使其对梁施加回复力,裂缝闭合梁的变形和挠度及时恢复.但是梁中开裂部分混凝土的强度及构件的刚度未得到修复,试件再次受力时原来闭合的裂缝也重新开展.

(2) 与形状记忆合金混凝土梁相比,智能混凝土具有更好的自修复性能.经形状记忆合金和修复胶粘剂修复后的试件梁,再次加载时,试件梁的开裂荷载提高了 39.6%~45.2%,修复后的裂缝未再次开裂,而在试件中出现了新的裂缝.

参考文献：

[1] 张 誉. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000

[2] 李 惠, 欧进萍. 智能混凝土与结构[J]. 工程力学, 2004, **24**(增刊): 45-61

[3] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全性评定[C] // 走向 21 世纪的中国力学 —— 中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179-189

[4] ARUP K M, IHOSVANY N. Smart prestressing with shape-memory alloy [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, **124**(10): 1121-1128

[5] WILDE K, GARDONI P, FUJINO Y. Base isolation system with shape memory alloy device for highway bridges [J]. **Engineering Structures**, 2000, **22**(1): 222-229

[6] YUJI S, YOSHIKAZU K, TOSSHIBUMI F, *et al.* Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire [C] // **Proceedings of SPIE**. Bellingham: SPIE, 2003: 178-186

[7] SUP C, JUNG J L. The shape control of a composite beam with embedded shape memory alloy wire actuators [J]. **Smart Materials and Structures**, 1998, **7**(5): 759-770

[8] LI H, LIU Z Q, OU J P. Study on damage emergency repair performance of a simple beam embedded with shape memory alloys [J]. **Advances in Structural Engineering**, 2004, **7**(6): 495-501

[9] 欧进萍. 结构振动控制 —— 主动、半主动和智能控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 411

Experimental study of self-repairing performance of smart concrete beams

KUANG Ya-chuan^{* 1,2}, OU Jin-ping^{1,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Smart concrete beam is developed by embedding martensite SMA (shape memory alloy) wires and fibers with adhesives into the tensile zone of concrete beams. The self-repairing performance of smart concrete beams is investigated experimentally and the repairing mechanism of beams is analyzed. Experimental results show that the deflections of beams are decreased and concrete cracks are closed by the SMA wires contracting using electrically heating. The adhesives flow out from the broken-open fibers into the concrete cracks. The strength of the cracked section is improved by the adhesives. The repaired cracks remains closed and new cracks form during reloading for the smart self-repairing concrete beams.

Key words: smart concrete beam; self-repairing; shape memory alloy; repairing fiber; adhesive