

文章编号:1673-2049(2007)03-0001-06

形状记忆合金增强弹性混凝土梁的变形特征

欧进萍^{1,2}, 匡亚川^{1,3}

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

摘要:利用形状记忆合金的超弹性和受限回复产生较大驱动力的特性,研制了一种智能混凝土梁。通过试验研究了形状记忆合金智能混凝土梁的变形规律及其影响因素,揭示了形状记忆合金超弹性梁的自修复机理。试验结果表明:形状记忆合金显著地提高了混凝土梁的变形能力;一旦外力消失,梁在形状记忆合金超弹性效应的驱动下,挠度迅速恢复,裂缝闭合;增加合金的总截面面积可提高合金对混凝土梁的驱动效果,但钢筋塑性变形的存在,则对形状记忆合金梁的变形回复起着阻碍作用。

关键词:智能混凝土;形状记忆合金;超弹性;变形特征;自修复

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Deformation Characteristic of Concrete Beams Embedded Superelastic Shape Memory Alloy

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

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

Abstract: Taking advantage of the superelasticity effect of shape memory alloy (SMA) and the characteristic of applying large forces on the resisting member in the transformation of SMA when restoring, smart concrete beam was developed by embedding superelastic SMA into the tensile zone of concrete beams during concrete casting. Deformation behavior and influence of factors on the deformation characteristic of SMA smart concrete beam were investigated experimentally. Self-restoring mechanism of SMA smart concrete beam embedded superelastic SMA was analyzed. Experimental results show that SMA significantly increases structural survivability and allows structure to recover from residual deformation by damaged earthquake and typhoon; the crack almost closes completely when unloading after generating a large deflection in the beams. Increasing the consumption of superelastic SMA can significantly improve the capacity of self-restoration of SMA concrete beams, but the steel main bars play a very negative role in reducing residual deformation.

Key words: smart concrete; shape memory alloy; superelasticity; deformation characteristic; self-restoring

收稿日期:2007-08-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50538020)

作者简介:欧进萍(1959-),男,湖南宁远人,教授,博士生导师,中国工程院院士,工学博士,E-mail:oujinping@hit.edu.cn。

0 引言

混凝土是当今世界土木工程领域应用最广、用量最大的结构材料,在可预见的将来,混凝土仍然是一种现代建设不可缺少的材料^[1-2]。随着现代材料科学的不断进步,混凝土已逐渐向高强、高性能、多功能和智能化方向发展,混凝土结构也趋于大型化和复杂化。混凝土是一种脆性材料,其抗压强度高,但其抗灾性能较差,由于过大的变形或钢筋屈服,结构将遭受永久破坏。因此,对已建成的大型混凝土结构和基础设施急需采用有效的手段确保其安全性,控制、修复其损伤^[3]。

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)是近几十年发展起来的一种新型的金属功能材料,具有独特的超弹性特性,使其可作为一种优越的驱动器而用于结构控制^[4-10]。本文将研究一种混凝土智能梁,利用形状记忆合金的超弹性效应和受限回复产生较大驱动力的特性,控制并恢复结构构件的变形和挠度,减轻台风、地震的冲击,提高结构的抗灾性能,确保其安全性;通过试验研究形状记忆合金混凝土梁的变形规律及其影响因素,分析形状记忆合金超弹性梁的自修复机理。

1 超弹性效应与智能混凝土

1.1 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。目前已发现的形状记忆合金有上百种,其中, NiTi 形状记忆合金因具有极好的机械性能和电阻特性及良好的抗腐蚀性能和抗疲劳效应等优点,而被广泛应用于电子仪器、汽车工业、医疗器械、空间技术和能源开发等领域。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 NiTi 形状记忆合金丝为近似等原子比合金,材料成分为 Ti-50.8(at)%Ni。采用示差扫描热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)测定合金丝的相变温度,试验在由美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Diamond DSC 示差扫描量热仪上进行,温度升高和降低的速度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。图 1 为试验测得的 DSC 曲线,用切线法可以确定马氏体相变开始温度为 $-56.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,马氏体相变结束温度为 $-84.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,奥氏体相变开始温度为 $-15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,奥氏体相变结束温度为 $12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,该 NiTi 形状记忆合金丝常温下处于奥氏体状态,其极限强度

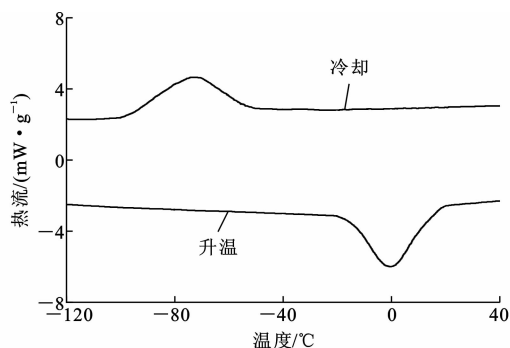


图 1 DSC 曲线

Fig. 1 DSC Curve

为 920 MPa,极限应变为 0.19。图 2 为超弹性形状记忆合金丝在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)拉伸及卸载过程中的应力-应变关系曲线,形状记忆合金丝的可回复应变约为 0.08。

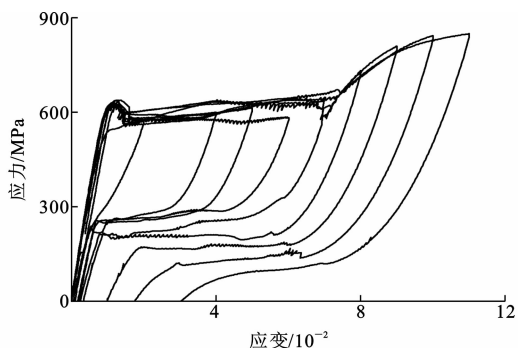


图 2 超弹性形状记忆合金丝的应力-应变关系

Fig. 2 Relation of Stress and Strain of Superelastic SMA Wire

1.2 形状记忆合金智能混凝土

形状记忆合金智能混凝土,是利用形状记忆合金的超弹性和在受限回复时能产生较大回复力的特性,控制并恢复结构构件的变形和挠度,实现混凝土裂缝的自修复。其基本原理是:在混凝土结构中易产生裂缝的部位或构件中,预埋形状记忆合金超弹性丝;混凝土及其构件在外力作用下产生变形,形状记忆合金丝将随之发生变形。在外力荷载,如地震和风荷载等作用下,混凝土开裂;一旦外力消失,形状记忆合金丝将产生弹性恢复效应,受限制的形状记忆合金丝将对裂缝施加压应力,抑制裂缝的开展,并且迫使其变小或闭合,从而实现裂缝的自修复。图 3 为形状记忆合金智能混凝土示意图。

1.2.1 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 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,形状记忆合金超弹性丝在混凝

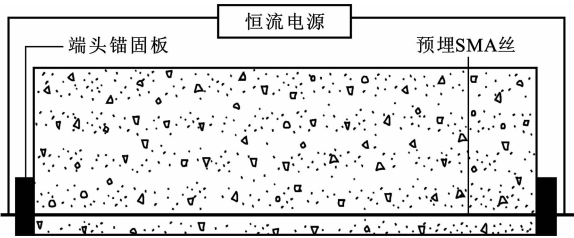


图 3 形状记忆合金智能混凝土

Fig. 3 Smart Concrete Embedded SMA

土梁中的分布如图 4 所示。合金丝直径为2.0 mm,采用螺栓将合金丝固定在梁两端的钢板上使之与混凝土共同工作,混凝土保护层为9 mm。为了研究形状记忆合金增强混凝土梁的变形能力及其影响因素,设计了 6 根混凝土试件梁:L1、L2、L3、L4、L5 和 L6,试件的基本特征如表 1 所示。

采用分层浇注法在模具中成型,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 3 点弯曲试验,加载速率 $0.3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,由计算机自动控制,数字化结果由计算机自动采集。在

表 1 试件的基本特征

Tab. 1 Basic Characteristic of Specimens

试件 编号	截面边长/mm	长度/mm	合金与混凝土 之间的黏结	合金		受压区钢筋		受拉区钢筋		箍筋	
				直径/mm	根数	直径/mm	根数	直径/mm	根数	直径/mm	间距/mm
L1	100	400	无	2	5	4	2			3	50
L2	100	400	有			4	2	4	2	3	50
L3	100	400	无	2	7	4	2			3	50
L4	100	400	无	3	5	4	2			3	50
L5	100	400	有	2	5	4	2			3	50
L6	100	400	无	2	5	4	2	4	2	3	50

其结果。

1.2.2 变形特征及自修复规律

试验时在试件跨中施加集中荷载,图 5 为试件 L1 在试验过程中的荷载-跨中挠度曲线。从图 5 可知:形状记忆合金混凝土试件梁具有显著的超弹性特征,在外力作用下混凝土梁产生变形,形状记忆合金丝随之发生变形;一旦外力消失,形状记忆合金迅速产生弹性恢复效应,梁在形状记忆合金回复力作用下产生反向弯矩,使其挠度不断减小、恢复;再次加载,混凝土梁及形状记忆合金重新产生变形。

图 6 为普通钢筋混凝土试件梁 L2 在试验过程中的荷载-跨中挠度曲线。从图 6 可知:在普通钢筋混凝土试件中,当试件挠度达到2 mm时,钢筋开始屈服;当试件挠度达到8 mm时,试件的承载能力开始降低;卸载以后,试件的挠度变化很小,几乎没有恢复。

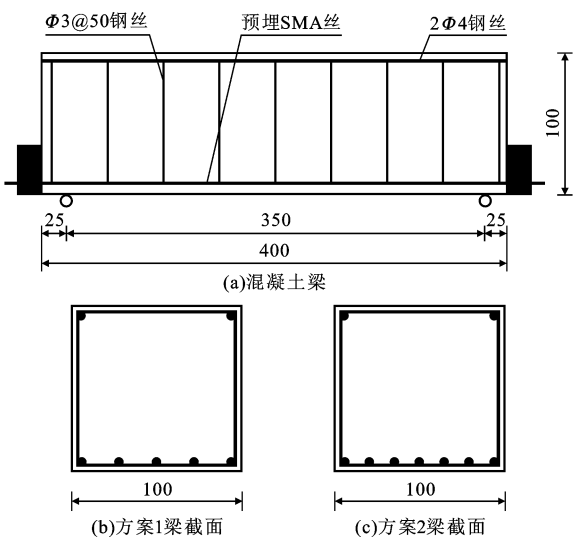


图 4 形状记忆合金的配置及修复纤维管的分布(单位:mm)

Fig. 4 Configure of SMA and Distribution of Restoring Fibre Tube(Unit:mm)

试验过程中,采用读数显微镜观测裂缝宽度,并记录

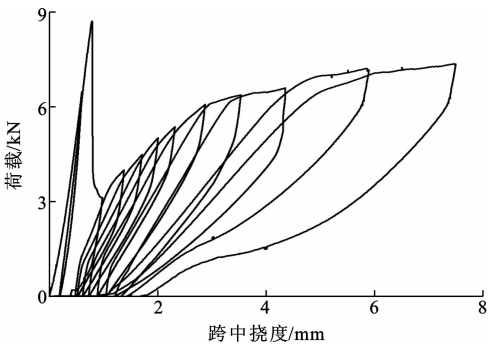


图 5 试件 L1 的荷载-跨中挠度关系

Fig. 5 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L1

梁在跨中竖向荷载作用下,裂缝宽度随着试件挠度的增加不断增加。图 7(a)、(b)分别为试件 L1 在最大挠度时和卸载以后的裂缝图。从图 7(b)中可以清楚地看到:卸载以后,裂缝基本上闭合。

图 8、9 分别为试件 L1 和试件 L2 在循环试验

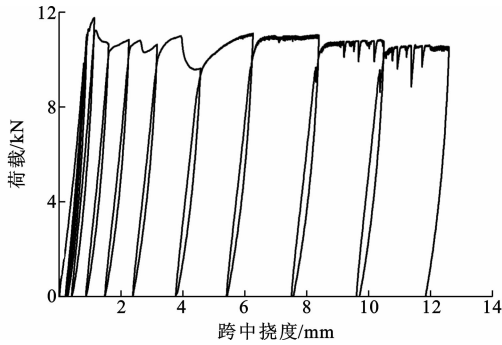
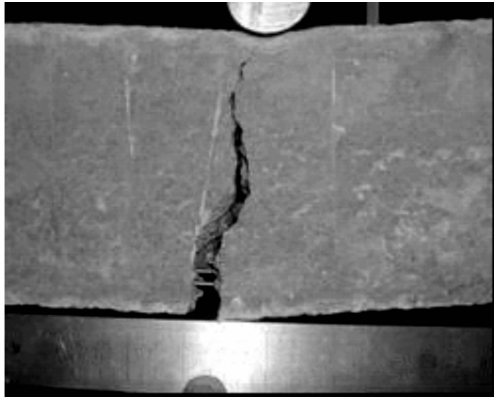


图 6 试件 L2 的荷载-跨中挠度关系

Fig. 6 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L2



(a)SMA修复前



(b)SMA修复后

图 7 试件 L1 的裂缝修复

Fig. 7 Crack Restoring of Specimen L1

过程中的裂缝宽度变化情况。在形状记忆合金混凝土试件梁 L1 中,卸载以后梁的挠度基本恢复;而在普通钢筋混凝土试件梁 L2 中,随着试件挠度的增加,裂缝宽度增加,卸载以后裂缝宽度变化较小。

2 影响形状记忆合金混凝土梁变形性能的主要因素

2.1 形状记忆合金的配置数量与直径

试件 L3 与试件 L1 的合金直径相同,但试件

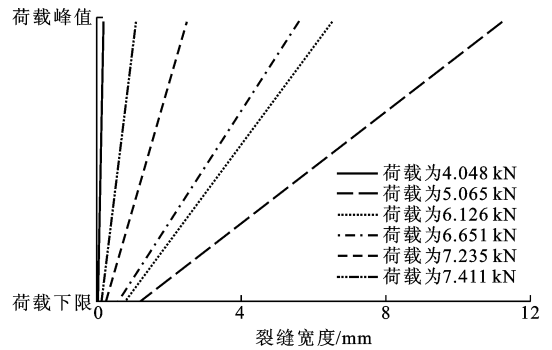


图 8 试件 L1 的裂缝宽度变化

Fig. 8 Variation of Crack Width of Specimen L1

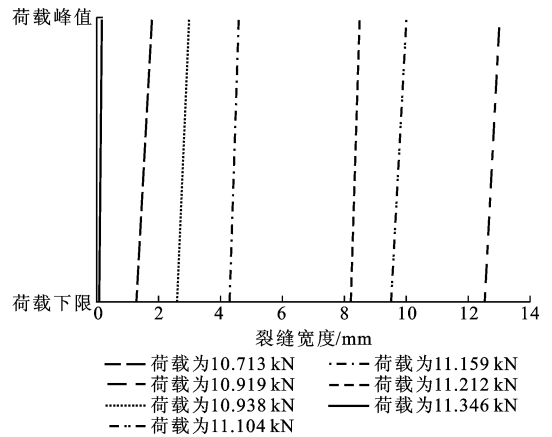


图 9 试件 L2 的裂缝宽度变化

Fig. 9 Variation of Crack Width of Specimen L2

L3 比 L1 多 2 根合金。试件 L4 与 L1 的合金根数相同,但合金的直径不同,L4 为 5 根直径 3 mm 的合金丝。图 10、11 分别为试件 L3 和 L4 在试验过程中的荷载-跨中挠度曲线。比较图 5、10、11 可见:3 根试件梁的变形趋势基本一致,都具有显著的弹性特性,卸载以后梁的挠度基本恢复。这表明形状记忆合金的数量和直径的大小对梁的变形及回复趋势影响较小,但当合金根数或者面积增加时,梁的抗弯刚度增加,梁能承受更多的荷载。跨中挠度为 7.5 mm 时,试件 L1 的荷载为 7.411 kN,试件 L3 的荷载为 9.283 kN;而试件 L4 在跨中挠度为 4 mm 时,荷载高达 10.806 kN。

2.2 形状记忆合金与混凝土之间的连接方式

试件 L5 与 L1 的合金直径及数量完全相同,但试件 L5 与 L1 的连接方式不同。在试件 L1 中,合金丝与混凝土之间没有黏结,合金通过螺栓锚固在梁端部的钢板上,与混凝土共同工作;而在试件 L5 中,合金丝与混凝土之间有黏结,合金通过黏结力与混凝土共同工作。试件 L5 的试验结果见图 12。从图 12 中可以看到:混凝土梁开裂以后,随着梁的挠

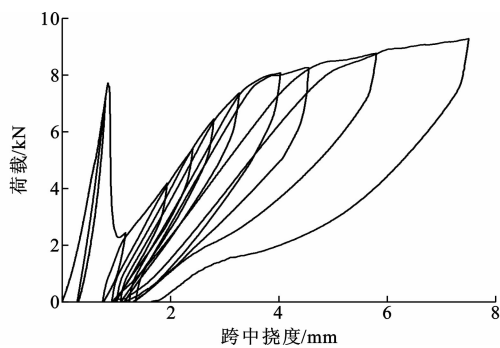


图 10 试件 L3 的荷载-跨中挠度关系
Fig. 10 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L3

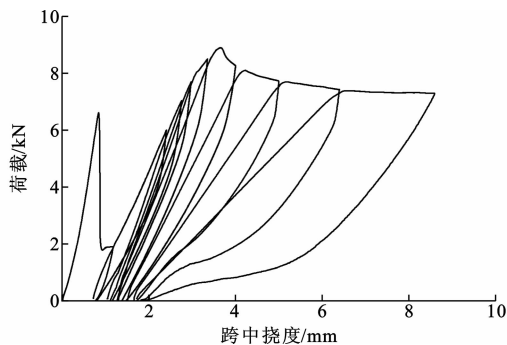


图 11 试件 L4 的荷载-跨中挠度关系
Fig. 11 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L4

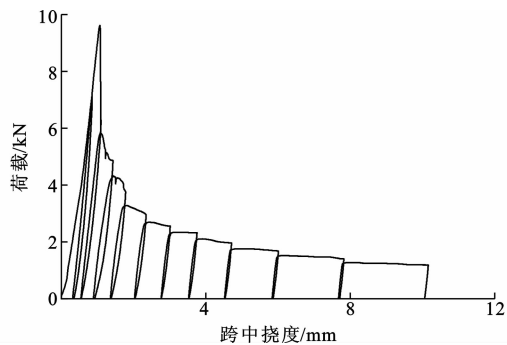


图 12 试件 L5 的荷载-跨中挠度关系
Fig. 12 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L5

度的增加,试件 L5 的承载能力迅速下降。这是由于形状记忆合金丝表面比较光滑,梁的挠度较大时,形状记忆合金与混凝土部分胶结产生滑移,界面黏结力下降,形状记忆合金施加给混凝土的压力减小的原因造成的,在试验过程中可以听到砰砰的清脆声音。卸载以后,试件挠度仅有小部分得到了回复。

2.3 受拉区钢筋的配置

试件 L6 与 L1 的合金根数及直径相同,但在试件 L6 的受拉区配置了 2 根直径为 4 mm 的钢筋,试

验结果如图 13 所示。由图 13 可见:在受拉区配置钢筋,大大地提高了试件的承载能力;卸载以后形状记忆合金的回复力促使梁的挠度回复,裂缝宽度减小,但回复的幅值较小。这是由于钢筋的塑性变形,阻碍了合金进一步回复,因此其修复效果较差。

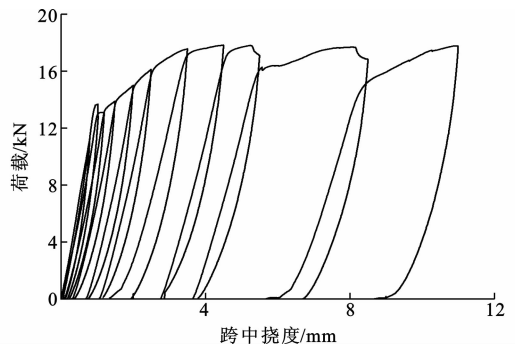


图 13 试件 L6 的荷载-跨中挠度关系
Fig. 13 Relation of Load and Mid-span Deflection in Specimen L6

3 结 语

(1)形状记忆合金大大地提高了梁的变形能力,在外力作用下混凝土梁产生变形,形状记忆合金将随之发生变形;一旦外力消失,形状记忆合金迅速产生弹性恢复效应,在梁中产生反向弯矩,使其挠度不断减小、恢复。

(2)在荷载作用下,梁的跨中附近出现裂缝,裂缝宽度随着荷载的增加不断增大;卸载后,裂缝基本上闭合。

(3)增加形状记忆合金的数量或增大合金丝的直径,对梁的变形及回复趋势影响较小,但当形状记忆合金的总截面面积增加时,混凝土的抗弯刚度增加,梁的承载能力提高。

(4)形状记忆合金丝表面比较光滑,与混凝土之间的黏结力较差,因此形状记忆合金与混凝土之间宜采用无黏结的形式。

(5)在混凝土梁中配置受拉钢筋,可以提高梁的承受荷载能力;但由于钢筋塑性变形的存在,阻碍了形状记忆合金进一步回复,因此,混凝土梁的修复效果较差。

参考文献:

References:

[1] 张 誉. 混凝土结构基本原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000:2-3.
ZHANG Yu. Basic Principle of Concrete Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,

- 2000;2-3.
- [2] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社,1999;1-2.
- GUO Zhen-hai. Reinforced Concrete Principle[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1999;1-2.
- [3] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全性评定[C]//杨卫,郑泉水,靳征谟. 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.
- OU Jin-ping. Cumulation Damage and Security Assess of Momentous Project Structure[C]//YANG Wei, ZHENG Quan-shui, JIN Zheng-mo. China Mechanics Towards 21 Century:Report Corpus of China Association for Science and Technology 9th Youth Scientist Forum. Beijing:Tsinghua University Press,1996;179-189.
- [4] YUJI S, YOSHIKAZU K, TOSSHIBUMI F, et al. Experimental Study on Enhancement of Self-restoration of Concrete Beams Using SMA Wire[C]//SPIE. Proceedings of SPIE. Bellingham; SPIE, 2003;178-186.
- [5] SUN Guo-jun, SUN Shuang-shuang, XU Xiao-dong, et al. A Study on the Thermomechanical Deformation of Elastic Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wires[J]. Materials and Design, 2000, 21(6): 525-528.
- [6] CHOI S, LEE J J. The Shape Control of a Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wire Actuators[J]. Smart Materials and Structures, 1998, 7(6):759-770.
- [7] ARUP K M, IHOSVANY N. Smart Prestressing with Shape-memory Alloy[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(10):1 121-1 128.
- [8] LI Hui, LIU Zhi-qiang, OU Jin-ping. Study on Damage Emergency Repair Performance of a Simple Beam Embedded with Shape Memory Alloys[J]. Advances in Structural Engineering, 2004, 7(6):495-502.
- [9] 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.
- [10] DESROCHES R, DELEMONT M. Seismic Retrofit of Simply Supported Bridges Using Shape Memory Alloys[J]. Engineering Structures, 2002, 24(5): 325-332.

《岩土工程学报》2008 年征订通知

《岩土工程学报》创办于 1979 年,是中国水利、土木、力学、建筑、水电、振动 6 个全国性学会联合主办的学术性科技期刊,由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行人。本刊主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表中国理论和实践水平的论文、报告、实录等;报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等;欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中排列首位;被收录为国家科技部中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),并被评为“百种中国杰出学术期刊”;被中国科技论文与引文数据库、中国期刊全文数据库和中文科技期刊数据库等多个国内重要的数据库收录,并可在中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网、万方网和重庆维普网全文检索;被美国《工程索引》Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊,大 16 开,双栏排版,160 页,每月中旬出版,每期定价 15.00 元,全年 180.00 元。

本刊国际标准连续出版物号为 ISSN 1000-4548,国内统一连续出版物号为 CN 32-1124/TU,国内邮发代号为 28-62,国外发行代号为 M520。

地 址:南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部

电 话:(025)85829534 85829553

邮 编:210024

E-mail:ge@nhri.cn