

引用格式: Wang Zhaopeng, Du Shunyu, Yang Jingning. Numerical Analysis of Recovery Performance of Concrete Cracks by SMA[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(3): 111-116. [王兆芃, 杜顺禹, 杨静宁. SMA对混凝土裂纹修复性能的数值分析[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(3): 111-116.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2018.03.022.

SMA对混凝土裂纹修复性能的数值分析

王兆芃¹, 杜顺禹², 杨静宁¹

(1. 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 河北建研工程技术有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要 针对含有形状记忆合金(SMA)的混凝土试件进行了数值仿真分析。将 SMA 在温度变化下产生的驱动力转化来的预应力施加在 SMA 上, 并将 SMA 作为主筋埋入混凝土梁中, 通过调整混凝土型号、裂纹尺寸及位置、SMA 直径、温度等, 得出了不同因变量下 SMA 对混凝土裂纹修复性能较为全面的仿真结果。结果表明: SMA 对所有的参变量下的裂纹修复尺寸均呈现了一致的线性变化, 其中影响裂缝修复效果最强烈的是混凝土型号。影响最弱的是 SMA 自身直径。

关键词 形状记忆合金; 混凝土; 裂纹修复; 数值仿真分析

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2018)03-0111-06

形状记忆合金(SMA, shape memory alloy)是一种特殊的金属功能材料。SMA 具有形状记忆功能、超弹性和受限制恢复时产生的很大驱动力, 减小变形的特性。而且抗疲劳性能强, 易于同混凝土、钢等结构材料结合, 弹性模量会随温度的变化产生变化。基于此特点, SMA 对混凝土的修复能力研究这已逐渐成为当下的研究热点之一。

SMA 对混凝土的修复能力与多种因素有关。其中可控因素为 SMA 回复电流的强弱; 不可控因素为裂缝尺寸、裂缝位置、预应力大小、混凝土拉拔力大小、混凝土强度、钢筋直径等。对于 SMA 混凝土裂纹梁的研究主要体现在试验和数值仿真 2 个方面。李双蓓^[1-2]对带有裂纹的 SMA 混凝土梁进行了通电测试, 得出 SMA 材料性能随通电电流的变化规律, 探讨了 SMA 直径、根数等对混凝土梁裂纹的修复效果, 并将双样条 QR 法有效的应用于 SMA 混凝土梁的裂缝自修复分析; LANG C^[3]通过 Brinson 本构模型计算出 SMA 丝在不同温度下的受限应力, 反向推得对混凝土裂纹的作用力; 欧进萍等^[4]运用试验方法研究形状记忆合金智能混凝土梁的变形规律及其影响因素, 并分析形状记忆合金对梁的驱动机理; 狄生奎等^[5]实验研究了混凝土梁加载过

程中 SMA 丝电阻率与混凝土梁裂缝宽度的关系和 SMA 丝通电激励过程中混凝土梁裂缝恢复的变化规律; 邓宗才等^[6]分析了形状记忆合金预应变值、配置量及直径粗细、混凝土龄期、通电激励模式、试件养护方法及截面尺寸等因素对于梁变形性能(合金驱动效应)的影响; 洪雷等^[7]运用 ANSYS 对形状记忆合金的钢筋混凝土建模分析, 证明了利用 SMA 可以提高梁的强度和刚度, 达到变形主动控制的目的; 张学仁等^[8]提出了拟温度载荷法模拟 SMA 丝的恢复效应, 并通过有限元计算与实验结果对比证明了该方法是可行的; MaHZ^[9]将 SMA 作为一种针对裂纹的有效结构控制器做出了研究; 钟厉等^[10]实验表明 SMA 环向预应力混凝土柱与同等条件混凝土相比, 抗裂性能有较大提高。

研究采用数值仿真的手段, 分析了 SMA 对混凝土裂纹的修复性能。埋设 SMA 丝于混凝土长方体试件, 通过调整混凝土型号、裂纹尺寸及位置、SMA 直径、温度等不同参数, 确定了 SMA 修复混凝土裂纹的规律。

1 理论基础

在进行 SMA 对混凝土裂纹修复的实验仿真

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-03-14

作者简介: 王兆芃(1992-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为结构的非线性力分析。E-mail: www.6233579052qq.c@qq.com

前,首先要确保 SMA 不会在当前的实验仿真中受到超出 SMA 与混凝土连接的粘结力,避免粘结滑移的现象出现。

SMA 的抗拉拔力按照 SMA 丝与混凝土之间的平均粘结强度计算,当 SMA 受到的拉力大于抗拉力 F_{pull} 时,SMA 就会被拉拔力拉出,因此在仿真实验设计时,要保证 $F_{design} < F_{pull}$,可采用此种方法计算^[11]:

$$F_{pull} = \tau\pi LD, \quad (1)$$

其中: D 为 SMA 丝直径。

将 SMA 丝取一微元计算,SMA 微元横截面受到轴向拉力 N_x ;微元上下表面存在切应力 τ 。根据材料力学理论分别列出物理方程、静力平衡方程、变形协调方程

$$\left. \begin{aligned} dS_x &= \frac{N_x}{EA} dx, N_x = EA \frac{dS_x}{dx} \\ N_x &= F - K\pi D \int_x^L U_x dx \\ U_x &= U_g + S_x = U_g + \int_0^x \frac{N_x}{EA} dx \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

其中: E 为 SMA 弹性模量; A 为 SMA 丝截面面积; S_x 为微元截面处的拉伸变形量; F 有效拉力; U_x 为微元截面处 SMA 的总位移; U_g 为刚体位移。

对变形协调方程二次求导,并解出微分方程的通解,代入静力平衡方程,可以得到

$$N_x = F - K\pi D [C_1(e^{rx} - e^{-rx}) - C_2(e^{-rx} - e^{-rx})] + C_3, \quad (3)$$

其中: C_1 、 C_2 、 C_3 ,均为系数,可由边界条件求出,结合文献^[11]中计算方法,可以直接计算出粘结力系数为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta F_i}{\Delta U_i \pi LD}}{n-1}, \quad (4)$$

其中: n 为实验加载系数, ΔF_i 为相邻 2 次荷载增加量, ΔU_i 为 SMA 端头点的位移增加量。

对于下列仿真最不利变形计算出的单位长度粘结应力为 $K = 28.183 \text{ MPa}$,可以发现远小于 SMA 回复应力(600 MPa)。

在加载过程中,SMA 受到的最大拉应力

$$\sigma_{max} = \frac{M_y}{I_z} = \begin{cases} \frac{F'}{10\ 000} & (\text{SMA 在中心}), \\ \frac{3F'}{70\ 000} & (\text{SMA 在角部}), \end{cases} \quad (5)$$

计算得到 $\sigma_{max} = 1.8 \text{ MPa}$ 。从而保证了 SMA 在仿

真过程中的应力远低于 SMA 与混凝土结构失效的应力,确保了实验仿真的真实性。

2 有限元模型

忽略温度对 SMA 应变的影响,应用 ANSYS 的 APDL 功能对不同裂纹参数设置的混凝土进行大变形仿真分析,设定不同的驱动力数值来代表温度效应,如图 1 虚线框所示。

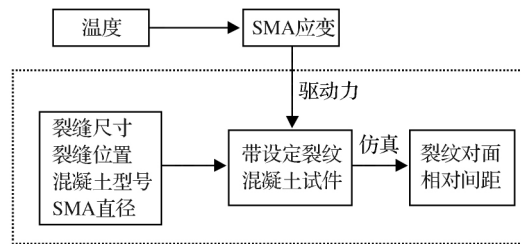


图 1 分析思路流程图

Fig.1 Flow chart of analysis method

2.1 材料属性及单元属性

SMA 线胀系数为 $1.2e-5 \text{ mm}/^\circ\text{C}$,弹性模量为 60 GPa。混凝土在设置为 Solid65 单元,多线性随动强化模型,混凝土型号 C25、C30、C35、C40 属性如图 2 所示。

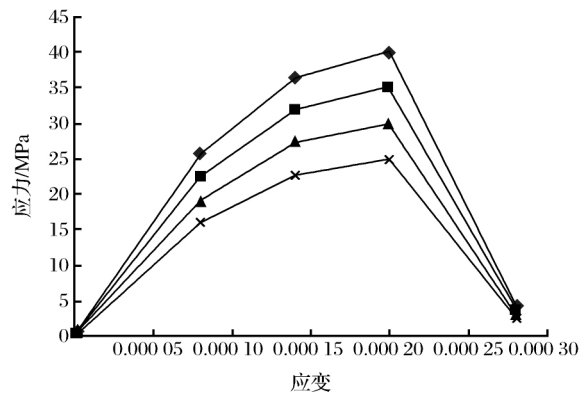


图 2 多线性随动强化模型应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of multi-linear kinematic hardening model

2.2 研究模型

针对单根 SMA 丝埋入带裂纹混凝土的试件,混凝土及裂纹设置如图 3~5 所示。长方形混凝土试件,尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,在试件长度方向、中心位置贯穿设置 SMA 丝,SMA 在混凝土试件两侧表面及内部与混凝土试件连接,如图 4 所示,此处用来模拟驱动力的作用位置。考虑到圣维南原理,裂纹仅设置在混凝土试件中间截面上,采用圆形裂纹,裂纹位置如图 4~7 中 A、B、C 3

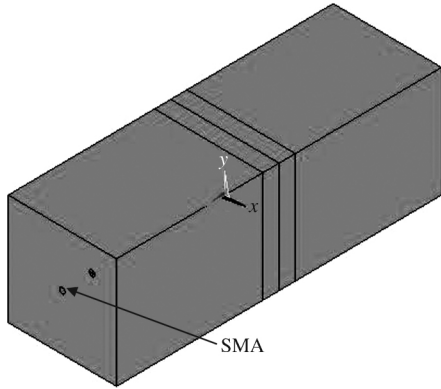


图 3 SMA 布置

Fig.3 SMA arrangement

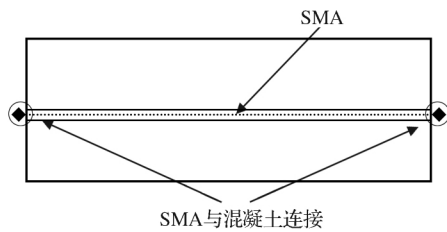


图 4 SMA 于混凝土的驱动力作用位置

Fig.4 Driving Force Position of SMA in Concrete

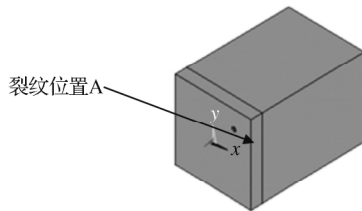


图 5 裂纹位置 A

Fig.5 Crack location A

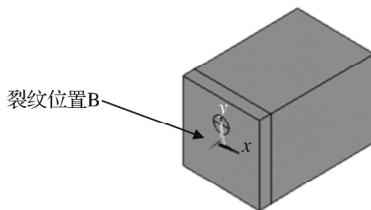


图 6 裂纹位置 B

Fig.6 Crack location B

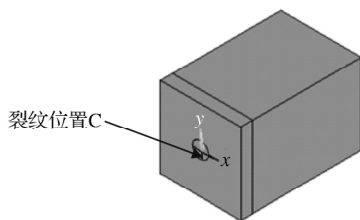


图 7 裂纹位置 C

Fig.7 Crack location C

种形式。混凝土内出现裂纹后,形成 2 个相对的裂纹面,设置此圆形裂纹区域面为标准接触。混凝土型号、裂纹尺寸及位置、SMA 直径、不同温度下的驱动力等变量,如表 1 所示。

表 1 数值仿真参数设置

Table 1 Setting of numerical simulation parameters

| 试件编号 | 裂纹直径 /mm | 裂纹位置 | 驱动力 /kN | 混凝土强度 | SMA 直径 /mm |
|------|----------|------|---------|-------|------------|
| S1 | 5 | B | 2.5 | C40 | 5 |
| S2 | 10 | B | 2.5 | C40 | 5 |
| S3 | 15 | B | 2.5 | C40 | 5 |
| S4 | 20 | B | 2.5 | C40 | 5 |
| S5 | 20 | A | 2.5 | C40 | 5 |
| S6 | 20 | C | 2.5 | C40 | 5 |
| S7 | 20 | B | 1.0 | C40 | 5 |
| S8 | 20 | B | 1.5 | C40 | 5 |
| S9 | 20 | B | 2.0 | C40 | 5 |
| S10 | 20 | B | 2.5 | C25 | 5 |
| S11 | 20 | B | 2.5 | C30 | 5 |
| S12 | 20 | B | 2.5 | C35 | 5 |
| S13 | 20 | B | 2.5 | C40 | 3.5 |
| S14 | 20 | B | 2.5 | C40 | 4 |
| S15 | 20 | B | 2.5 | C40 | 4.5 |

加载模型如图 8 所示。混凝土试件一端固定,另一端施加拉拔力;对 SMA 添加驱动力,统计裂纹面的相对距离。

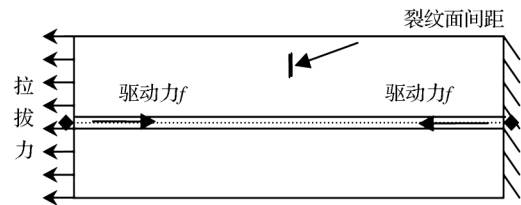


图 8 加载示意图

Fig.8 Schematic diagram of load

2.3 有限元模型验证

鉴于没有一致的试验研究及试验曲线来直接验证有限元模型的可靠性,现将 S4 试件有限元模型材料都统一成 C40 混凝土,并将所有节点合并,达到整模一体化效果,以此实现与文献[12]的统一,并进行单轴压缩试验仿真得到力-位移仿真数据曲线。将文献[12]中的试验数据转化成原始的力-位移曲线 L1,并与单轴压缩试验仿真得到曲线 L2 对比,如图 9 所示。由图可见,二者基本吻合,其中的误差主要是因为文献对应的试件混凝土强度为 43.534 MPa,

而研究设置 C40 的强度为 40MPa。

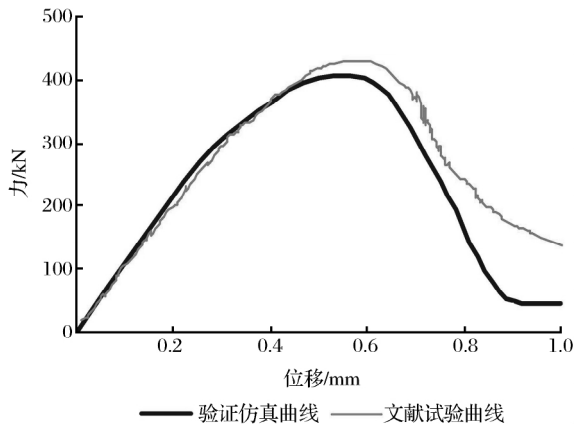


图 9 有限元模型验证对比曲线

Fig.9 Correlation curve of finite element model verification

3 有限元仿真结果

3.1 设立空白件对比验证

在进行 SMA 对混凝土裂纹修复性能的数值仿真分析前,先设立一个无 SMA 的混凝土试件,作为空白件,与有 SMA 的混凝土试件作为前提对照。同时通电升温,则无 SMA 的混凝土试件不会受到驱动力的作用,数值仿真的结果如图 10 所示。结果显示,在同样的拉拔力下,存在 SMA 的混凝土试件中裂纹面被拉开的间距明显小于无 SMA 的件;且随着拉拔力的递增,加入 SMA 的混凝土试件与未加入 SMA 的混凝土试件裂纹面宽度差值始终保持在 0.000 007 mm 左右。试验表明,通电状态下的 SMA 对混凝土裂纹存在修复性能。

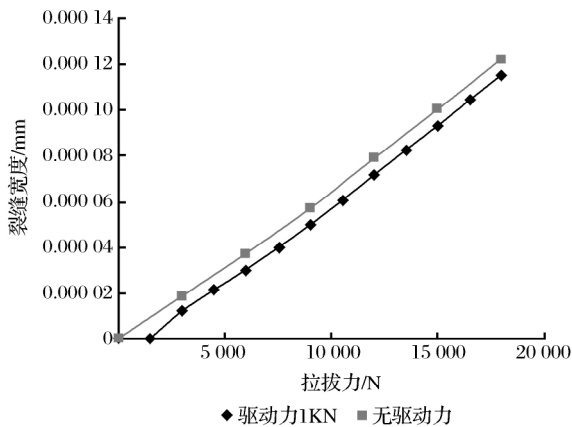


图 10 有无 SMA 效果验证

Fig.10 Conducting of sma effect verification

3.2 不同参变量下仿真结果

通过编写 APDL 程序,按照表 1 中不同参变量对混凝土试件进行设置,可以分别得到相应的混凝土试件裂纹宽度、以及随拉拔力增加而宽度扩大的

曲线变化规律。

(1)不同裂纹直径结果 表 1 中 S1、S2、S3、S4 表明圆形裂纹的直径由 5 mm 增大至 20 mm,对应图 11 中 S1、S2、S3、S4 曲线,可以看出,拉拔力在 3 000 N 以上,裂纹宽度随着拉拔力的增加而呈现近似线性的关系;且随着拉拔力的增大,不同直径下的裂纹宽度差值呈现出相同的扩大值,SMA 修复后的裂纹宽度与裂纹直径比值为一定值,表明 SMA 对单位面积的裂纹修复能力是固定的。

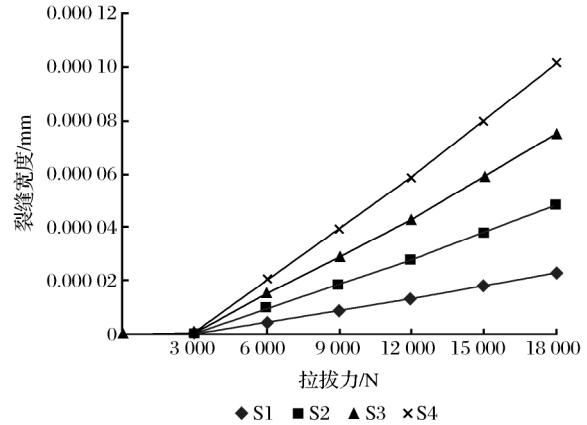


图 11 SMA 对不同直径裂纹的修复效果

Fig.11 Recovery effect of sma on different diameter cracks

(2)不同裂纹位置结果 表 1 中 S4、S5、S6 表明圆形裂纹的位置分别位于 A、B、C 处,对应图 12 中 S4、S5、S6 曲线,可以发现:B 位置与 A 位置的 SMA 对裂纹修复效果几乎一致;同时 C 处裂纹宽度要略小与 A、B 处,且此差距在随着拉拔力的增加在逐渐扩大,呈现发散趋势。

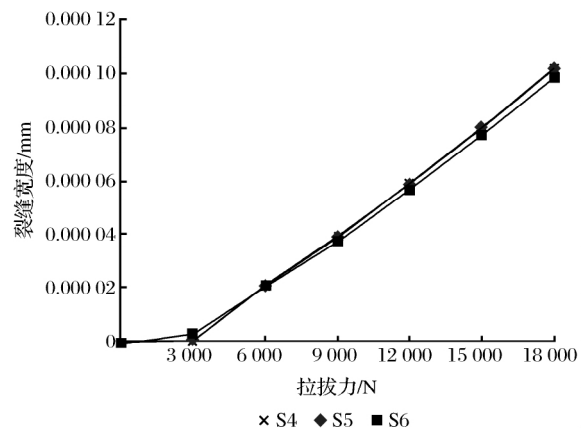


图 12 SMA 对不同裂纹位置的修复效果

Fig.12 Recovery effect of sma on different crack locations

SMA 设置在试件中心位置,与圆中心位置的裂缝处;而 A、B 2 处则近乎处于试件边界位置;从试件尺寸分析,同时可以发现,SMA 可以对距离 SMA 轴

线 5 倍的 SMA 直径范围内产生明显的修复作用,且 5 倍距离处修复效果仅比中心处弱化了 3.1% 左右。

但是在拉拔力 4 000~8 000 N 范围内,探测到仿真模型中的裂纹尺寸几乎一致。形成此种结果的原因很可能是较低的拉拔力下,未达到混凝土本身裂纹迅速扩展所需的能量;不同裂纹位置间存在的细小差别,在较大的拉拔力作用下才会被明显的放大,得到直观的数值差距。

(3) 不同驱动力结果 表 1 中 S4、S7、S8、S9 的圆形裂纹处在不同驱动力下,对应图 13 中 S4、S7、S8、S9 曲线,可以发现:驱动力越大,裂纹尺寸越小,裂纹修复效果越好;但是驱动力从 1 kN 增加到 2.5 kN,裂纹宽度差距几乎一致,表明驱动力和裂纹修复尺寸成正比例关系。同时也可以由图 13 预测,驱动力持续增大,裂纹修复效果增长幅度也会越来越弱,因此对于固定的裂纹形式,通电状态下的 SMA 仅会对混凝土裂纹形成一定程度的修复效果,并不会对裂纹一直进行修复。

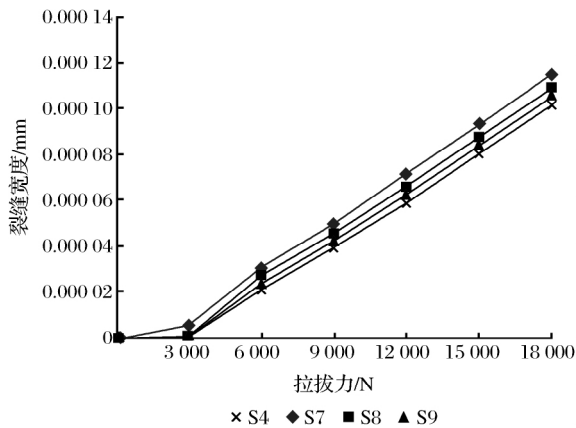


图 13 SMA 在不同驱动力下的修复效果

Fig.13 Recovery effect of sma on different driving forces

(4) 不同混凝土强度结果 表 1 中 S4、S10、S11、S12 的混凝土强度不同,对应图 14 中 S4、S10、S11、S12 曲线,可以发现:混凝土强度越大,对于 SMA 裂纹修复反应就越强烈,裂纹修复后的尺寸就越小;对于混凝土不同强度,裂纹修复效果同样与拉拔力呈现正比例的关系。

由此还可以发现与不同驱动力下相类似的表现:随着混凝土强度的增大,裂纹修复也不是无限制的增大下去,裂纹修复效果增长幅度也在逐渐减弱,因此,对于不同的混凝土强度类型,SMA 也只存在一定程度上的修复效果。

(5) 不同 SMA 直径结果 表 1 中 S4、S13、S14、S15 的 SMA 直径不同,对应图 15 中 S4、S13、S14、

S15 曲线,可以发现:4 条曲线几乎重合;在拉拔力持续增加 6 倍的情况下,细微的裂纹宽度差距都没有明显的被放大出来,可以断定 SMA 的直径存在关于裂纹修复的无关性。

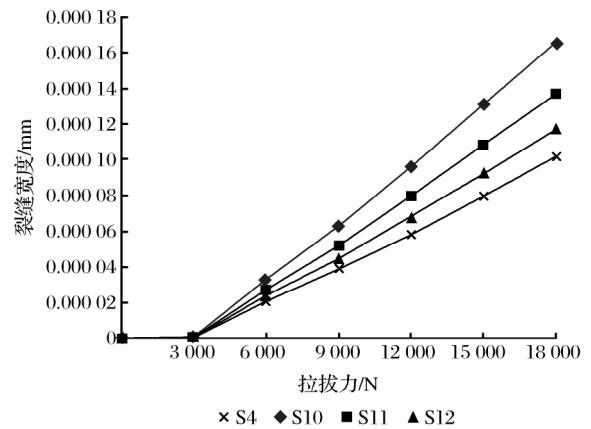


图 14 SMA 对不同混凝土强度的修复效果

Fig.14 Recovery effect of sma on different concrete strength

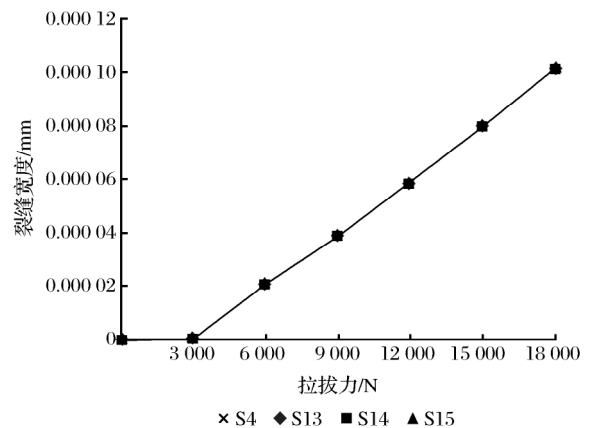


图 15 SMA 对不同 SMA 直径的修复效果

Fig.15 Recovery effect of sma on different sma diameter

(6) 不同参变量下仿真共同点 横向对比图 11~图 15,发现都在拉拔力 3 000 N 以下时,存在一个明显的近似平台区域,与拉拔力 3 000 N 以上的图线规律格格不入。这是因为对于所有的试件都施加了 SMA 在通电状态下,由温度变化而产生的驱动力,此时的驱动力被设定在 2 500 N;而当试件的裂纹进行扩展时,需要先克服 SMA 带来的驱动力,当拉拔力<2 500 N 时,不足以抵消 SMA 的驱动力,所以拉拔力的数值在 2 500 N 以下时,裂纹宽度近似为 0。

另外,混凝土裂纹对面参差不齐,当拉拔力和驱动力处在同一个量级时,裂纹左右 2 个对面相互干涉影响,这也是导致在拉拔力 3 000 N 以下,不同参量下计算得到的裂纹宽度并无明显规律可循。

在图 13 中明显可见,拉拔力 3 000 N 以下时,不同的驱动力对裂纹宽度的影响,当然不排除计算误差的因素和作图软件的图像效果差异。同样,图 10 中无驱动力的一条正比例直线和一条折线很好的印证了这种原因。

4 结语

研究综合考虑了众多因素,全面的确定了 SMA 修复混凝土裂纹的规律。不难发现其中影响裂纹修复效果最为强烈的是混凝土型号,此结果对特殊场合下的混凝土选用有一定的参考作用;最弱的是 SMA 本身直径,几乎不会造成裂纹修复效果的差异。同时,SMA 对所有的参变量下的裂纹修复尺寸均呈现了一致的线性变化。可以看出形状记忆合金(SMA)在一定程度上可以有效的对混凝土裂纹进行修复。

此外,将 SMA 与混凝土做成实验试件的尺寸,且仅单根 SMA,计算简洁、效果也更为明显,不失为一种快速有效定性分析的仿真手段。

参考文献:

[1] 李双蓓,莫春美,梁庆国.形状记忆合金回复性能研究及其在

混凝土梁裂缝修复中的应用[J].混凝土,2015,(4):68-73.

- [2] 李双蓓,梁庆国,蒋林洁,等.SMA 混凝土梁裂缝自修复性能分析的双样条 QR 法[J].广西大学学报:自然科学版,2014,39(1):180-186.
- [3] Lang C, Rogers C A. One-dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Material[J].Journal of Intelligent Material and Structure,1990,(1):201-234.
- [4] 匡亚川,欧进萍.形状记忆合金智能混凝土梁变形特性的研究[J].中国铁道科学,2008,(4):41-46.
- [5] 狄生奎,李慧,杜永峰,等.SMA 混凝土梁的裂缝监测及自修复[J].建筑材料学报,2009,(1):27-31.
- [6] 邓宗才,李庆斌.形状记忆合金对混凝土梁驱动效应分析[J].土木工程学报,2002,(2):41-47.
- [7] 洪雷,王林伟.形状记忆合金对混凝土梁驱动效应的有限元分析[J].山东建筑工程学报,2004,(3):31-33.
- [8] 张学仁,聂景旭,杜彦良.主动控制裂纹智能复合构件的有限元分析[J].复合材料学报,1999,16(2):147-151.
- [9] Ma H Z. Application of Shape Memory Alloy to the Structural Deformation and Control of the Crevice[J].Journal of Northwest Institute of Light Industry,1998,16(3):120-125.
- [10] 钟厉,邓兰兰,韩西,等.NiTi 形状记忆合金环向预应力混凝土结构强化现象的研究[J].混凝土,2008,(1):29-31.
- [11] 狄生奎,花尉攀,汲生伟,等.约束态 SMA 混凝土梁的裂缝监测及自修复[J].建筑材料学报,2010,(2):237-242.
- [12] 王梦梦.C40 早龄期混凝土力学性能试验研究[D].北京:北京交通大学,2014.

Numerical Analysis of Recovery Performance of Concrete Cracks by SMA

Wang Zhaopeng¹, Du Shunyu², Yang Jingning¹

(1. College of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Hebei Institute of Building Engineering and Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract The numerical simulation analysis was carried out for concrete samples containing SMA. The prestress transformed by the driving force of SMA under the temperature variation is applied to SMA, and SMA is embedded in the concrete beam as the main bar. By adjusting the concrete model, crack size and position, SMA diameter and temperature, etc., the more comprehensive simulation results of the recovery performance of the concrete cracks by SMA under different variables are obtained. The results show that: SMA shows a uniform linear change in the size of crack recovery under all parameters, and the strongest influence on the crack recovery effect is the concrete model. The weakest influence is SMA diameter.

Key words SMA; Concrete; Crack recovery; Numerical simulation analysis