

引文格式:余 洁,陈星宇,王宇航,等. 嵌入式 SMA-CFRP 复合板材加固 RC 梁有限元模拟及理论分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(3): 92-102.

YU Jie, CHEN Xingyu, WANG Yuhang, et al. Finite element simulation and theoretical analysis of embedded SMA-CFRP composite sheet reinforced RC beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 92-102.

DOI:10.19815/j.jace.2023.09084

# 嵌入式 SMA-CFRP 复合板材加固 RC 梁有限元模拟及理论分析

余 洁<sup>1,2,3</sup>, 陈星宇<sup>1</sup>, 王宇航<sup>2</sup>, 余 周<sup>3</sup>, 沈琪雯<sup>3</sup>, 薛尚铃<sup>3</sup>

(1. 重庆科技大学 土木与水利工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 中冶赛迪集团有限公司, 重庆 400013)

**摘要:**为研究碳纤维复合材料(CFRP)与形状记忆合金(SMA)采用内嵌(NSM)和外贴(EB)等不同加固方式组合加固钢筋混凝土(RC)梁后的抗弯性能,通过有限元软件 ABAQUS 创建有效的 SMA 以及 CFRP 加固 RC 梁模型,对其加固性能进行分析,研究了不同 SMA 直径与数量对钢筋混凝土梁加固效果的响应;建立了嵌入式 SMA 加固 RC 梁的有限元模型,并基于有限元模拟结果推导加固梁的抗弯承载力计算公式。结果表明:提升 SMA 直径对试验梁加固效果有积极影响,加固梁开裂荷载提升了 33%~133%,极限承载力提升了 8%~31%;嵌入式 SMA-CFRP 复合板材加固梁能很大程度提升加固效果,极限承载力提升了 92.7%,开裂荷载增长 31.9%,屈服荷载增长 33.3%;与外贴加固相比,嵌入式复合板材可以有效延缓端部剥离破坏,使加固材料充分发挥强度;提出的组合加固梁抗弯承载力计算公式的理论计算结果与有限元模型结果吻合良好,可为后续相关研究提供参考。

**关键词:**结构加固;形状记忆合金;有限元分析;碳纤维板材;抗弯性能;钢筋混凝土梁

中图分类号:TU318

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)03-0092-11

## Finite element simulation and theoretical analysis of embedded SMA-CFRP composite sheet reinforced RC beams

YU Jie<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xingyu<sup>1</sup>, WANG Yuhang<sup>2</sup>, YU Zhou<sup>3</sup>, SHEN Qiwen<sup>3</sup>, XUE Shangling<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology,

Chongqing 401331, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 3. CISDI Group Co., Ltd., Chongqing 400013, China)

**Abstract:** In order to investigate the flexural performance of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) and shape memory alloy (SMA) using different strengthening methods, including near-surface mounted (NSM) and externally bonded (EB) techniques, finite element models of SMA- and CFRP-strengthened RC beams were established using ABAQUS software to analyze their strengthening performance. The effects of

收稿日期:2023-09-05

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52108117);重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1242);

重庆市博士后研究项目特别资助项目(2021XM3045);重庆高新区科技创新局揭榜挂帅项目(2022)

作者简介:余 洁(1993-),女,工学博士,副教授,E-mail:cquyuji@sina.com.

SMA diameter and quantity on the strengthening effectiveness of RC beams were systematically studied. A finite element model for RC beams strengthened with embedded SMA was developed, and a formula for calculating the flexural bearing capacity of strengthened beams was derived based on simulation results. The results show that increasing the SMA diameter positively influences the strengthening effect. The cracking load of strengthened beams are increased by 33%-133%, and the ultimate bearing capacity are improved by 8%-31%. The combined use of embedded SMA-CFRP composite plates significantly enhance the strengthening performance, achieving a 92.7% increase in ultimate bearing capacity, a 31.9% growth in cracking load, and a 33.3% improvement in yield load. Compared to externally bonded reinforcement, embedded composite plates effectively delay end debonding failure, allowing full utilization of the material strength. The theoretical calculation results of the proposed flexural bearing capacity calculation formula of composite strengthened beams are in good agreement with finite element simulation results, which can provide reference for subsequent related research.

**Key words:** structural reinforcement; shape memory alloy; finite element analysis; carbon fiber sheet; flexural performance; reinforced concrete beam

**Author resume:** YU Jie(1993-), female, PhD, associate professor, E-mail: cqyujie@sina.com.

## 0 引言

形状记忆合金(SMA)是一种能记忆不同形状的金属,目前主要应用于航天、人工智能、医疗等领域。近年来,SMA以超弹性、滞回能量耗散、抗疲劳性以及耐腐蚀性等特点被用于土木工程中的传感、能量耗散、驱动、监测、振动控制、自适应和修复<sup>[1]</sup>。目前形状记忆合金使用较多的两类为镍钛形状记忆合金(NiTi-SMA)和铁基形状记忆合金(Fe-SMA),其中NiTi-SMA通常被制作成丝材,而Fe-SMA多以板材的形状出现<sup>[2]</sup>。近些年来,镍钛铌形状记忆合金(NiTiNb-SMA)逐渐被研究人员重视并应用于结构加固中<sup>[3-5]</sup>。NiTiNb-SMA是在NiTi-SMA的基础上加入了铌元素,与常见的镍钛形状记忆合金相比,镍钛铌形状记忆合金具有更高的强度、硬度<sup>[6]</sup>。相较于铁基形状记忆合金,NiTiNb-SMA具有更高的延展性以及较宽的温度滞回特性<sup>[7]</sup>,在对形状记忆合金升温激活后,合金丝会产生回复力,待其降至室温后,回复力几乎没有折损,稳定性良好,在结构加固中有着良好的应用前景。

通过预拉伸与升温操作,可使SMA材料从拉伸状态收缩恢复到最初状态,这种属性被称为形状记忆功能。El-tahan等<sup>[8-9]</sup>对带有裂缝的钢构件使用SMA与碳纤维复合(CFRP)片材结合加固,结果表明此方法能有效闭合裂缝,增加钢构件抗疲劳性能。部分学者将NiTi-SMA合金丝嵌入梁体,发现合金丝能对混凝土梁进行有效驱动<sup>[10-13]</sup>,但只限于

0.8~2 mm小直径NiTi-SMA的应用研究,且加固梁尺寸偏小,对较大尺寸试验梁的加固效果也未做探究。王文炜等<sup>[14]</sup>使用SMA与CFRP片材组合加固钢筋混凝土(RC)梁,研究其抗弯性能,结果表明加固梁刚度以及开裂、极限、屈服荷载均有提升,但加固梁破坏形式为端部剥离破坏,这严重影响了SMA与CFRP的加固效率,让原本造价成本较高的SMA在实际运用推广中受到阻碍。

在上述研究的基础上,提出嵌入式SMA-CFRP复合板材加固RC梁,与其他常见的加固方式相比,使用CFRP与SMA丝复合加固方式的CFRP材质更轻,对于加固结构的二次受力影响较小、耐腐蚀能力强、施工便捷,且SMA能给CFRP提供更加快速有效的预应力施加方式,相较于传统张拉方式具有快捷、准确、前期工序简单等优点。

通过有限元软件ABAQUS创建可靠的SMA与CFRP有限元模型,建立SMA-CFRP复合板材加固RC梁模型,并对以下三个方面进行研究:①探究不同数量与直径的SMA对RC梁的加固效果;②研究预应力SMA-CFRP复合板材对RC梁的加固性能及破坏模式;③建立预应力SMA-CFRP复合板材加固RC梁抗弯承载力公式。

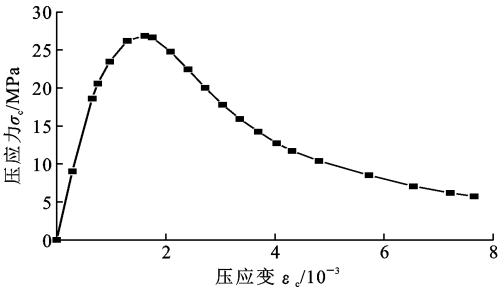
## 1 有限元模型参数设置

### 1.1 本构模型及材料参数

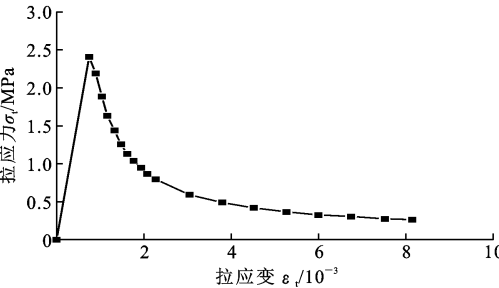
#### 1.1.1 混凝土本构

ABAQUS中采用混凝土损伤塑性模型,可以

较准确地模拟混凝土的实际受力<sup>[15]</sup>。根据《混凝土结构设计规范》(GB 5001—2010)计算其本构关系曲线,结果如图 1 所示。



(a) 压应力-压应变关系曲线



(b) 拉应力-拉应变关系曲线

图 1 混凝土塑性损伤本构关系曲线  
Fig. 1 Plastic damage constitutive relationship curves of concrete

1.1.2 钢筋本构与碳纤维本构

在静力学模拟过程中,钢筋与碳纤维的本构模型通常选择理想弹塑性模型与线弹性本构模型<sup>[16]</sup>,如图 2、3 所示。

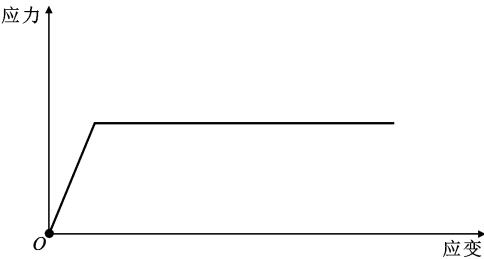


图 2 钢材本构关系曲线  
Fig. 2 Constitutive relationship curve of steel

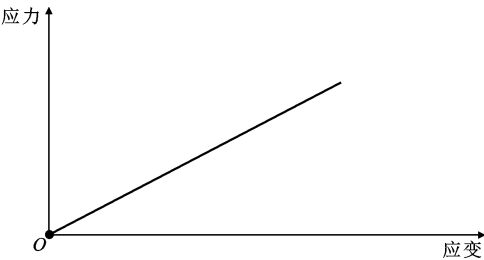


图 3 碳纤维板条本构关系曲线  
Fig. 3 Constitutive relationship curve of CFRP slat

1.1.3 NiTiNb-SMA 本构

NiTiNb-SMA 的形状记忆效应(图 4)是引入预应力的关键,对 NiTiNb-SMA 合金丝初始拉伸后,通过升温使其产生回复力<sup>[12-13]</sup>。

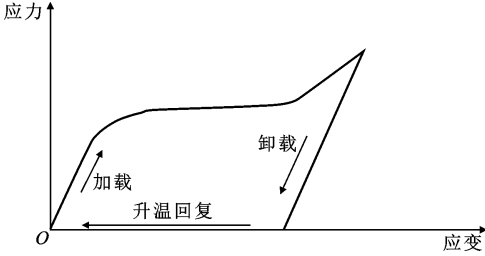


图 4 SMA 的形状记忆效应<sup>[12]</sup>  
Fig. 4 Shape memory effect of SMA<sup>[12]</sup>

由于制作厂家不同,SMA 的材料属性也会有一定差别,本文将文献[13]中 NiTiNb-SMA 合金在常温下的拉伸试验以及在不同初始拉伸后的升温回复力试验数据作为有限元中 SMA 材料属性,文献[13]中 SMA 的应力-应变关系以及温度回复力曲线如图 5、6 所示。

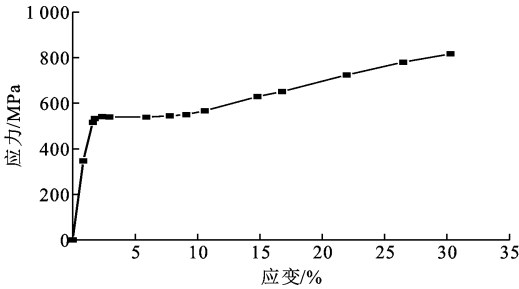


图 5 NiTiNb-SMA 的单轴拉伸应力-应变曲线<sup>[13]</sup>  
Fig. 5 Uniaxial tensile stress-strain curve of NiTiNb-SMA<sup>[13]</sup>

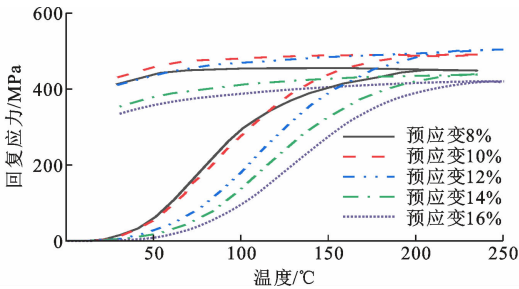


图 6 不同预应变下的回复力-温度曲线<sup>[13]</sup>  
Fig. 6 Recovery stress-temperature curves under different prestrains<sup>[13]</sup>

在实际使用时,会抽取同一批用于加固的 SMA 进行回复力测试,并记录下产生最大回复力时的温度以及电流大小。在后续加固过程中,只需将电流设置到记录的最佳电流值即可。

从图 5 可以看出,当应力接近 510 MPa 时, SMA 进入屈服阶段,其应变可达到 10% 左右,此时不适用于继续承受荷载,故将其本构简化成理想弹塑性模型,其屈服强度为 510 MPa,使用 ABAQUS 中的桁架单元模拟 SMA。为贴合升温激励这一操作过程,可采用“温度控制法”对 SMA 施加回复力。SMA 降到室温后,预应力会有部分损失,所以取 10% 预应变后的 SMA 丝残余回复应力的最大值作为 SMA 最大回复应力, SMA 最大回复力设置为 427 MPa。

### 1.2 单元类型及网格划分

混凝土结构的网格尺寸通常为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ <sup>[17]</sup>,如图 7(a)所示,单元类型为 C3D8R;钢筋选取桁架单元,单元类型为 T3D2,钢筋单元长度为 120 mm;钢垫块单元类型为 C3D8R,单元长度为 50 mm,钢垫块采用与钢筋相同的泊松比 0.3,为了避免软件计算时在钢垫块处的混凝土应力集中导致其畸变,将钢垫块弹性模量设置偏大,本文钢垫块弹性模量设置为 500 GPa;CFRP 板材沿纤维受拉方向尺寸远大于截面尺寸,所以选用壳单元 S4R 进行模拟,为方便在后续研究中嵌入 SMA,此处壳体属性设置为连续壳,将 CFRP 单元长度设置为 4 mm;结构胶、CFRP 板条和混凝土的相互作用比较复杂,目前的研究大多数忽略了结构胶<sup>[18]</sup>,故本文也暂不考虑。

### 1.3 边界条件及加载方式

为模拟简支梁受力特点,将左侧支座垫块的中心线与中心线中点 50 mm 处参考点耦合,约束 3 个方向上的位移自由度( $U_1=U_2=U_3=0$ )和 2 个转角自由度( $U_{R1}=U_{R2}=0$ ),采用相同的方式在右支座处约束位移自由度( $U_2=U_3=0$ )和转角自由度( $U_{R1}=U_{R2}=0$ )。在加载垫块中心线处按照支座耦合方法进行相同处理,在耦合点处采用位移加载。边界条件及加载方式如图 7(b)所示。

### 1.4 接触关系

模型的接触关系主要有钢筋与混凝土的接触和碳纤维板条与混凝土的接触。用嵌入能很好地模拟钢筋与混凝土之间的作用关系。碳纤维板采用嵌入方式与混凝土连接,加载垫块和支座垫块与混凝土梁之间采用 Tie 方式连接,如图 7(c)所示。

## 2 有限元模型验证与建立

### 2.1 SMA 与 CFRP 模型的验证

由于 SMA 与 CFRP 组合嵌入式加固 RC 梁可

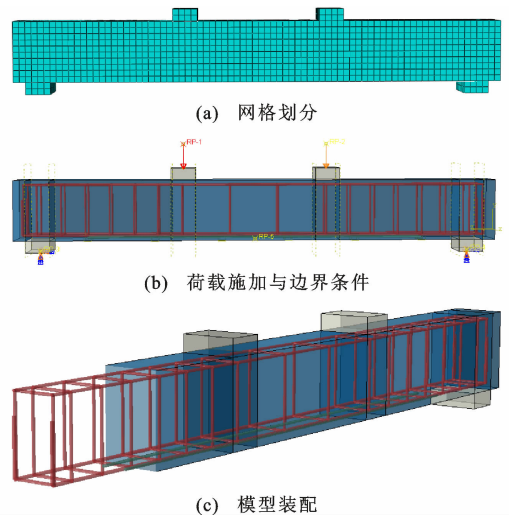


图 7 ABAQUS 模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ABAQUS model

追溯文献非常少,相关 SMA 模型也较少,为准确模拟加固梁,参考文献[13]、[14]引入近表安装(NSM)技术,使用 NSM-SMA 与 NSM-CFRP 两种加固方式加固 RC 梁。通过 ABAQUS 对上述两种加固方式进行模拟并验证,结果如图 8 所示。可以看出,各位移-荷载曲线以及加固梁相应的损伤状态与本文试验结果均高度吻合,相对误差控制在 10% 之内,产生误差的主要原因有:①有限元模拟中未考虑钢筋与混凝土之间的滑移;②忽略了 CFRP 板条与结构胶之间的黏结影响;③有限元中边界条件设置为理想简支梁状态,在实际工况中难以实现;④未考虑 SMA 与 CFRP 之间的滑移。需要注意的是,图 8(f)中曲线第一个拐点处对应的试验现象为 CFRP 中部已经与梁体脱落,后续加载过程中主要利用两端锚固进行兜贴,所以可以将第一个拐点视为加固失效。图 8(e)、(f)中模拟值相较于试验值在加固梁屈服前的刚度偏大,这是由于试验中加固试件的尺寸偏小,受到尺寸效应以及钢筋与 SMA 合金丝在混凝土中滑移的影响。上述结果证明 ABAQUS 可准确模拟 SMA 与 CFRP 嵌入式加固梁,可以将建立的有限元模型用于后续研究。

### 2.2 有限元模型建立

本次有限元分析中的 RC 梁模型共 7 组,试验梁尺寸与配筋如图 9 所示,试件基本尺寸为宽度  $b=150\text{ mm}$ ,高度  $h=250\text{ mm}$ ,梁长  $l=2\,000\text{ mm}$ ,底部支座至梁端距离为 100 mm。为充分体现 SMA 与 SMA-CFRP 复合板材对梁的加固性能的影响,梁底纵筋与上部构造筋分别采用直径 10 mm 与 8 mm 的 HRB400 钢筋。混凝土保护层厚度为 20 mm,

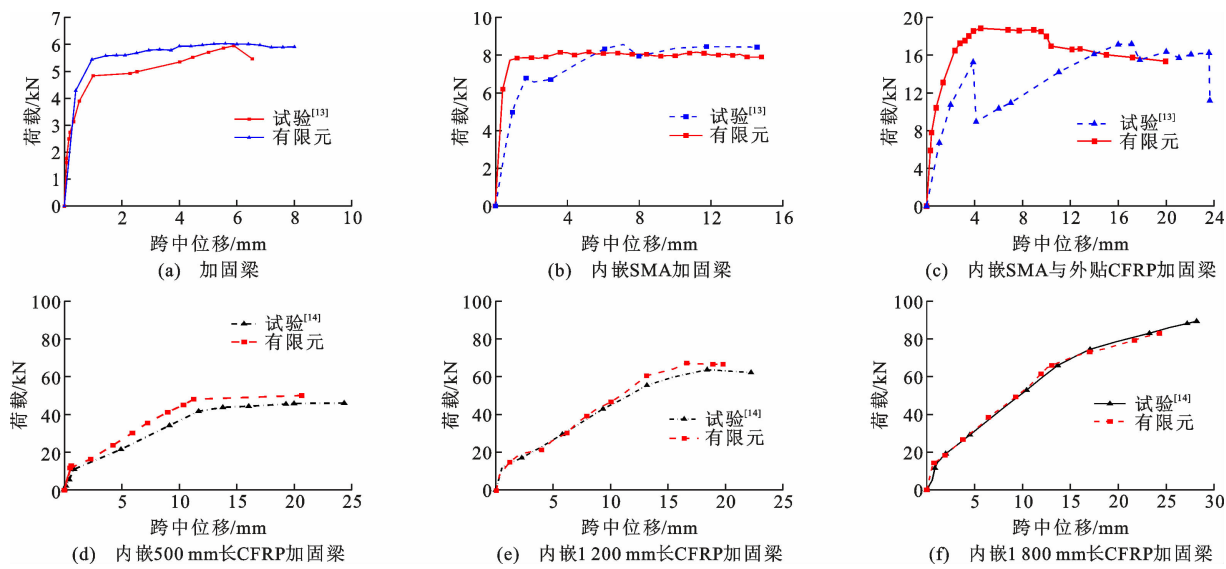


图 8 NSM-SMA 与 NSM-CFRP 加固 RC 梁有限元模型验证

Fig. 8 Finite element model validation of NSM-SMA and NSM-CFRP reinforced RC beams

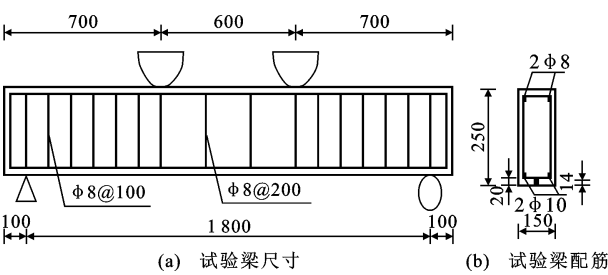


图 9 试验梁尺寸与配筋示意图(单位:mm)

Fig. 9 Schematic diagram of test beam size and reinforcement (unit: mm)

CFRP 板材截面尺寸为  $2\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ , 长度为  $1\,400\text{ mm}$ 。SMA-CFRP 复合板材中的 SMA 合金丝采用直径  $2\text{ mm}$  的 NiTiNb-SMA, 复合板材加固 RC 梁有限元模型如图 10 所示, 试验主要参数见表 1。

3 SMA 直径、数量对加固性能的影响

为探究使用小直径 SMA 加固较大尺寸梁的加固效果, 将  $2\text{ mm}$  直径 SMA 并排 3 根布置于未加固梁底, 其荷载-位移曲线如图 11(a) 所示。可以看出,  $2\text{ mm}$  直径 SMA 无法满足对较大尺寸梁的加固, 加固梁荷载-位移曲线与未加固梁几乎一致, 因考虑到 SMA 两端需设置锚具, 不宜嵌入数量过多的 SMA。选用较大尺寸的 SMA 进行加固, 嵌入不同数量  $6\text{ mm}$  直径 SMA 加固梁的荷载-位移曲线如图 11(b) 所示。可以看出: 加固效果有明显的提高, 在混凝土开裂前, 曲线呈明显的线性关系; 当受拉区混凝土部分开裂后, 梁体刚度有所下降, 此时受拉钢筋与 SMA 共同受力, 但 SMA 弹性模量较低, 承载主要

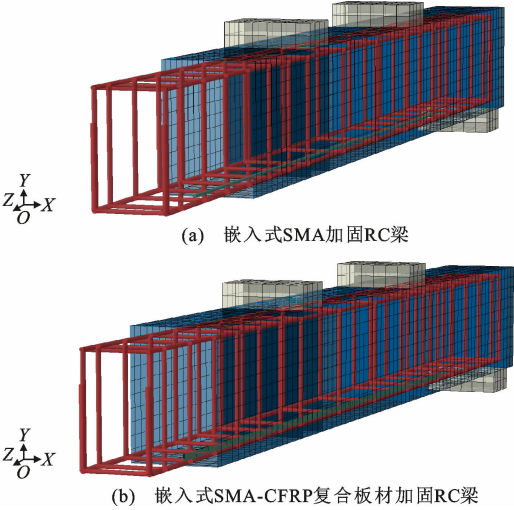


图 10 NSM-SMA 加固 RC 梁与 NSM-SMA-CFRP 加固 RC 梁有限元模型

Fig. 10 Finite element model of NSM-SMA reinforced RC beam and NSM-SMA-CFRP reinforced RC beam

依靠于受拉钢筋; 钢筋屈服后, 加固梁受压区混凝土达到极限压应力, 加固梁破坏。不同嵌入数量的 SMA 加固梁的开裂荷载与极限承载力分别得到不同程度的提升, 内嵌 1~3 根  $6\text{ mm}$  直径 SMA 时, 加固梁开裂荷载提升了  $33\%\sim 133\%$ , 极限承载力提升了  $8\%\sim 31\%$ 。与极限承载力相比, 开裂荷载的提升效果更加明显。但是目前直径大于  $2\text{ mm}$  的 NiTi-SMA 还未实现大规模、批量化生产, 而且成本昂贵, 尚处于研究阶段。

4 SMA-CFRP 加固 RC 梁性能

将 SMA 的回复力引入相关加固材料中进行组



表 1 试件主要参数  
Table 1 Main parameters of specimen

试件编号	加固方式	SMA 数量	SMA 直径/mm	有无复合板材
B0	未加固			无
B1-S3D2	SMA 加固	3	2	无
B1-S1D6	SMA 加固	1	6	无
B1-S2D6	SMA 加固	2	6	无
B1-S3D6	SMA 加固	3	6	无
B0-SC	复合板材			有
B1-SC	复合板材			有

注: B1-S3D6 中 S 表示形状记忆合金, S 后面数字表示加固材料的数量, D 表示 SMA 直径, D 后面数字表示直径大小; SC 表示 SMA 与 CFRP 复合板材; B 表示试验梁, B1 为预应力加固试验梁, B0 为未加固控制梁, 没有预应力影响。

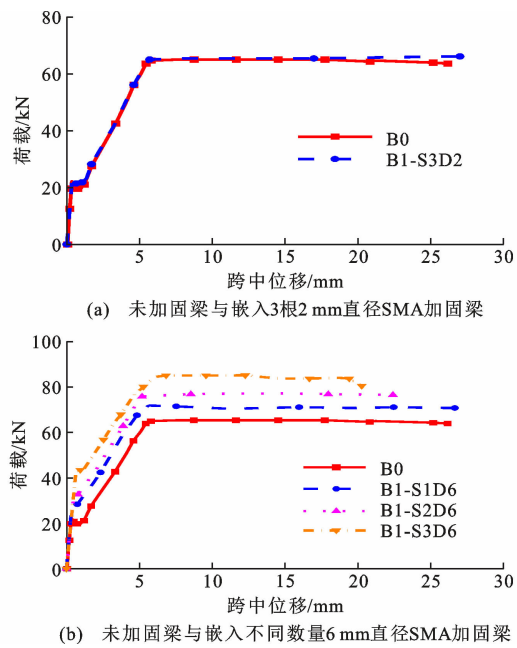


图 11 试件荷载-跨中位移曲线

Fig. 11 Load-mid-span displacement curves of specimens

合加固是更加经济实用的方法<sup>[6,9,15]</sup>。本次研究将合金丝嵌入使用连续壳单元建模的 CFRP 板材中, 并用上述温度控制法施加回复力, 拟在 CFRP 板材中引入 420 MPa 预应力, 通过  $F=\sigma A$  ( $F$  为回复力,  $\sigma$  为 SMA 截面应力,  $A$  为 SMA 截面面积) 大致推算出所需要的 2 mm 直径 SMA 的数量为 9 根, SMA-CFRP 加固装配如图 12(a) 所示。将相关数量的 SMA 嵌入 CFRP 板材中, 再将整体复合板材嵌入梁底预先开的槽内。需要注意的是, SMA 是通过升温回复得到回复应力的, 需要对两端进行约束, SMA 边界条件设置如图 12(b) 所示, 有限元模拟中对 SMA 两端限制所有方向的位移。预应力复合板材与预应力 RC 梁示意图如图 13 所示。观察引入

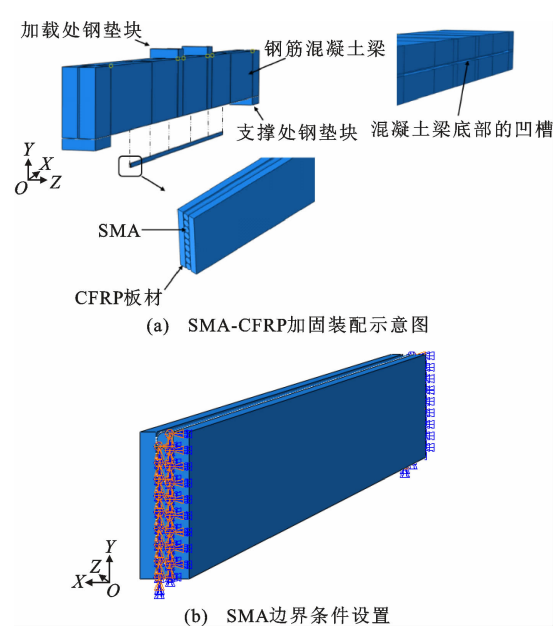


图 12 SMA-CFRP 板材加固 RC 梁示意图

Fig. 12 Schematic diagram of SMA-CFRP sheet reinforced RC beams

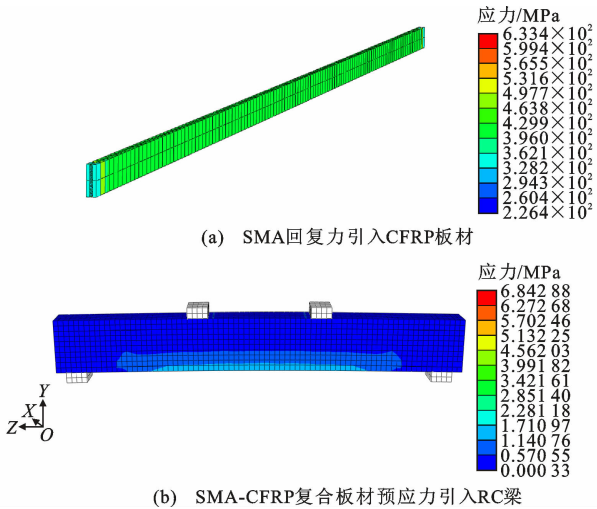


图 13 预应力复合板材与预应力 RC 梁示意图

Fig. 13 Schematic diagram of prestressed composite sheet and prestressed RC beam

CFRP 板材后的预应力大小以及加固梁预应力施加情况可以看出, CFRP 板材中预应力分布均匀, 预应力大小符合预期, 复合板材预应力能有效传递至加固梁, 梁体受拉区出现局部预压力, 并使梁体发生轻微上拱。

4.1 加固梁位移-荷载曲线分析

为探究嵌入式 SMA-CFRP 复合板材预应力混凝土梁的加固效果, 以预应力 SMA-CFRP 组合加固梁为研究对象, 分析该加固方式是否能提升承载力, 提高开裂荷载和延缓端部剥离破坏。

预应力加固梁(B1-SC)破坏过程如图 14 所示。从图 14(a)可以看出,梁底跨中受拉区范围发生塑性变形,并出现塑性应变,加固梁发生开裂,此时截面刚度最大,在此之前加固梁截面处于弹性阶段,加固梁整体位移较小。从图 14(b)、(c)可以看出,加固梁裂缝逐渐由跨中向支座端延伸,梁底受拉区混凝土退出工作,此现象与未加固适筋梁类似,但由于复合板材与受拉钢筋共同作用,破坏延伸速度较慢。从图 14(c)、(d)可以看出,伴随着受拉钢筋屈服,加固梁开裂较大,支座处逐渐形成一条贯穿的斜裂缝,随着受压区混凝土达到应力峰值,加固梁受压破坏,此时最大塑性应变分布于加固梁跨中位置。

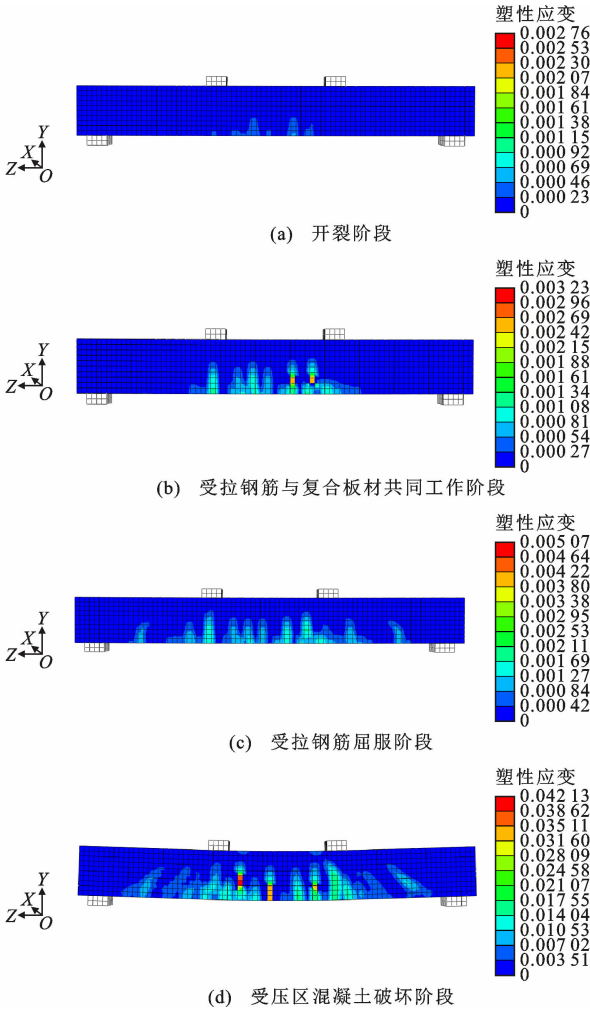


图 14 预应力加固梁(B1-SC)破坏过程

Fig. 14 Damage process of prestressed reinforced beam (B1-SC)

预应力 SMA-CFRP 复合板材加固梁荷载-位移曲线如图 15 中的 B1-SC 构件所示,整个过程分为 4 个阶段:①开始加载前,由于预应力作用,加固梁会产生与加载方向相反的位移,此时梁底产生预压力;②预压力产生的负弯矩逐渐被荷载施加的力矩抵

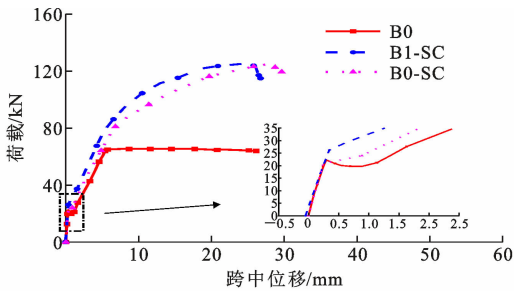


图 15 Load-displacement curves of prestressed reinforced beam, non-prestressed reinforced beam and unreinforced beam

消,一直到加固梁达到开裂荷载前,加固梁荷载-位移曲线呈高度线性关系;③加固梁达到开裂荷载后,刚度有所减小,此时荷载由复合板材与钢筋共同受力,曲线斜率出现下降;④当受拉钢筋屈服后,曲线有明显的屈服段,因为此时钢筋退出工作进入塑性阶段,荷载由复合板材承受,直至混凝土梁受压区压溃,加载结束。与未加固梁的荷载-位移曲线相比,预应力复合板材加固梁极限承载力提升显著,提高了约 92.7%。开裂荷载与屈服荷载较未加固梁与非预应力复合板材加固梁增长 31.9%,这是由于预应力会使混凝土梁受拉区产生压应力,抵消部分荷载效应,从而提升了混凝土开裂与钢筋屈服时所需的荷载。但相较于非预应力 SMA-CFRP 复合板材加固梁,极限荷载的涨幅不明显,有学者针对此问题给出相应解释<sup>[19-20]</sup>,本文不再赘述。

#### 4.2 破坏模式分析

为体现嵌入式复合板材较外贴式复合片材加固梁在破坏特点上的优势,对 B1-SC 试验梁的破坏模式进行分析定义。NSM 加固 RC 梁的破坏特征主要有 3 类:①复合板材达到抗拉强度发生脆性断裂;②加固梁受压区混凝土达到应力峰值压溃;③复合板材发生端部剥离破坏。除第②类破坏模式外,其余破坏模式均属于脆性破坏,在加固施工中应避免。在 NSM 加固 RC 梁有限元分析中,3 种破坏模式分别可通过观察复合板材应力分布、加固梁受压区应力分布、复合板材端部混凝土塑性变形达到特定值时的先后顺序来确定<sup>[21]</sup>。选取构件 B1-SC 在加载过程中加固梁受压区达到应力峰值时的应力云图,以及此时对应的复合板材应力云图与加固梁塑性应变云图进行对比分析,如图 16 所示。从图 16(a)可以看出,加载点支座处有局部集中应力产生,这是由

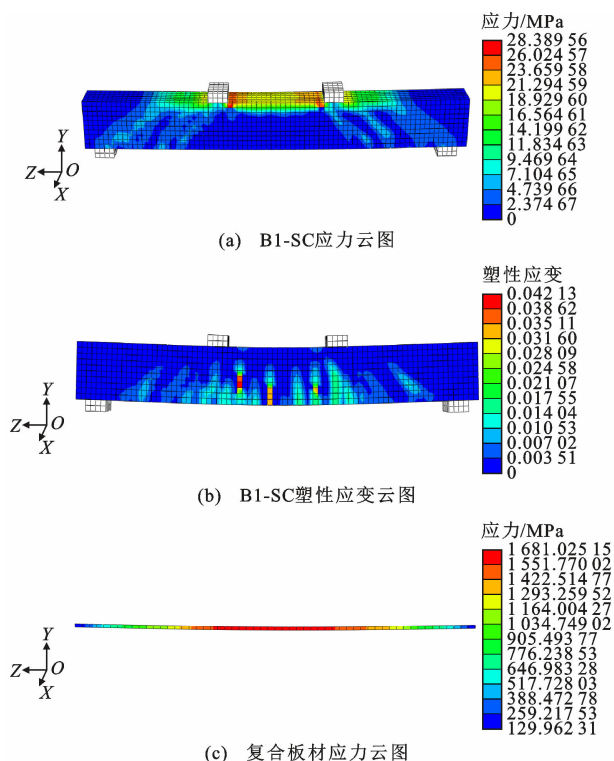
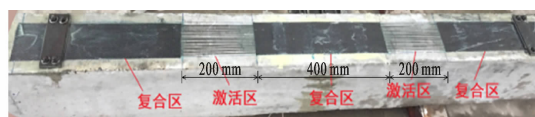


图 16 加固梁 B1-SC 的应力、应变云图以及复合板材应力云图

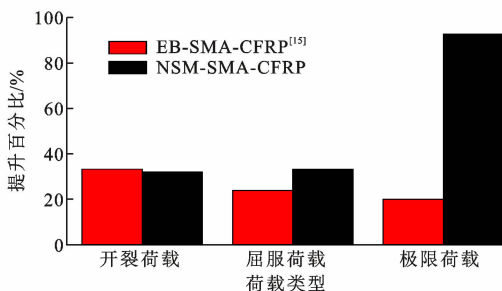
Fig. 16 Stress and strain clouds of reinforced beam B1-SC and stress cloud of composite sheet

于垫块刚度与混凝土相差较大所致,可忽略此处应力突变值,对于靠近跨中部位应力,当应力达到峰值应力 20.1 MPa 时,可认为试验梁 B1-SC 发生受压破坏。与此同时,复合板材跨中处最大应力为 1 681 MPa,远未达到断裂的极限应力。结合之前学者的相关研究内容<sup>[21]</sup>,对于内嵌板材加固 RC 梁,当板材端部处混凝土塑性应变达到 0.02 时,则视为发生端部剥离破坏。从图 16(b)可以看出,加固梁压区混凝土破坏时,复合板材端部混凝土塑性变形未达到 0.02。综合上述分析可知,B1-SC 构件破坏模式为受压区混凝土压坏。

外贴与嵌入 SMA-CFRP 复合板材开裂荷载、屈服荷载、极限荷载提升程度对比如图 17 所示,与外贴(EB)技术的 EB-SMA-CFRP 复合片材加固 RC 梁相比,NSM-SMA-CFRP 复合板材具有更好的加固能力,开裂荷载的提升较 EB 加固梁略小,可能是由于采用 EB 方式加固 RC 梁时,复合片材贴于梁外表面,在荷载开始施加时复合片材能先于混凝土梁承受部分荷载。采用嵌入式技术加固 RC 梁的屈服荷载与极限荷载都提升明显,尤其是极限荷载提升了 92.7%,这是由于嵌入式加固较外贴加固



(a) EB-CFRP-SMA 复合片材加固 RC 梁<sup>[14]</sup>



(b) 加固梁荷载提升百分比对比

图 17 外贴与嵌入 SMA-CFRP 复合板材加固效果对比

Fig. 17 Comparison of reinforcement effect between external and embedded SMA-CFRP composite sheets

很大程度上延缓了加固材料端部的剥离破坏,使加固材料的强度尽可能发挥至理想的水平。

## 5 SMA-CFRP 梁抗弯承载力计算验证

### 5.1 开裂弯矩计算

以现有的嵌入式 CFRP 加固 RC 梁计算模型为基础<sup>[21]</sup>,结合 SMA-CFRP 复合材料加固 RC 梁破坏模式,引入 SMA 提供的回复力,对嵌入式 SMA-CFRP 加固 RC 梁的抗弯承载力进行理论分析。

预应力 CFRP 加固受弯构件的开裂荷载由消压荷载与非预应力受弯构件的开裂荷载组成。受弯构件受预应力的作用,构件下部出现压应力,外荷载作用的弯矩与预压力产生的弯矩(消压弯矩)相同时,截面受拉区边缘所受合力为 0,全截面处于受压状态。全截面所受压力和  $F_c$  计算公式如式(1)所示。

$$F_c = F_{\text{cfrp}} + F_{\text{sma}} \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{cfrp}}$  为 CFRP 的预拉力;  $F_{\text{sma}}$  为 SMA 产生的回复力。

在受弯构件还未达到开裂荷载前,截面的压应力分布近似为三角形,作用点在截面受压区边缘的  $h/3$  ( $h$  为梁截面高度)处,则消压弯矩  $M_k$  为

$$M_k = (F_{\text{cfrp}} + F_{\text{sma}}) \frac{2h}{3} \quad (2)$$

通过换算截面面积,确定截面开裂荷载前受压区高度。假设钢筋与复合板材在混凝土中黏结可靠,通过各材料应变协调计算截面变形,将 SMA、CFRP、钢筋、混凝土换算成相同计算截面。截面开裂至钢筋屈服过程中,受拉区混凝土(受拉钢筋水平位置)应变与应力近似成正比,图 18 为组合截面受



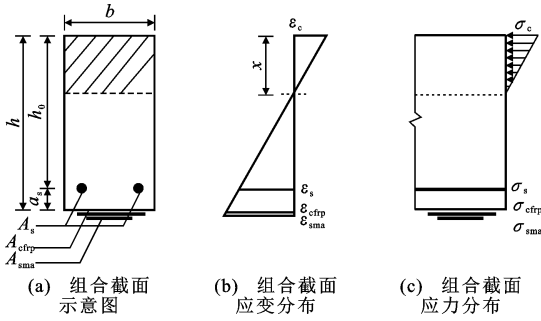


图 18 组合截面受力分析

Fig 18 Combined section force analysis

力分析图。

根据应变协调,可得

$$\epsilon_c = \epsilon_s \quad (3)$$

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_c$  为混凝土受压区应变;  $\epsilon_s$  为受拉钢筋应变;  $\sigma_c$  为混凝土受压区应力;  $E_c$  为混凝土弹性模量。

假设钢筋与 SMA 在屈服前为线弹性材料,则可得

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (5)$$

$$\sigma_{sma} = E_{sma} \epsilon_{sma} \quad (6)$$

式中:  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $E_{sma}$  为形状记忆合金弹性模量;  $\epsilon_{sma}$  为 SMA 丝应变。

将式(2)和式(4)代入式(3)可得

$$\sigma_c = E_c \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_s}{\alpha_{sc}} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_{sc}$  为组合截面中钢筋对混凝土的换算系数,  $\alpha_{sc} = E_s / E_c$ 。

混凝土中 CFRP、SMA 换算系数分别为  $\alpha_{cfrp}$  ( $\alpha_{cfrp} = E_{cfrp} / E_c$ )、 $\alpha_{sma}$  ( $\alpha_{sma} = E_{sma} / E_c$ ), 为方便计算, 将钢筋面积、CFRP 面积、SMA 面积等效成相应等效截面面积  $A_{sc}$ 、 $A_{cfrp}$ 、 $A_{sma}$ , 如式(8)~(10)所示。换算后的等效截面如图 19 所示。

$$A_{sc} = \frac{F_s}{\sigma_c} = \frac{\sigma_s A_s}{\sigma_c} = \alpha_{sc} A_s \quad (8)$$

$$A_{cfrp} = \frac{F_{cfrp}}{\sigma_c} = \frac{\sigma_{cfrp} A_{cfrp}}{\sigma_c} = \alpha_{cfrp} A_{cfrp} \quad (9)$$

$$A_{sma} = \frac{F_{sma}}{\sigma_c} = \frac{\sigma_{sma} A_{sma}}{\sigma_c} = \alpha_{sma} A_{sma} \quad (10)$$

组合截面面积  $A_0$  为

$$A_0 = bh + (\alpha_{sc} - 1)A_s + (\alpha_{cfrp} - 1)A_{cfrp} + (\alpha_{sma} - 1)A_{sma} \quad (11)$$

式中:  $b$  为梁截面宽度。

考虑受压区钢筋影响[式(12)], 结合拉区与压区对中和轴面积矩相同, 可求出中和轴位置, 并确定受压区高度。

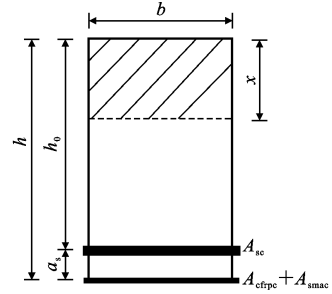


图 19 换算后的等效截面

Fig. 19 Equivalent cross section after conversion

$$\frac{1}{2}bx^2 + (\alpha_{sc} - 1)A'_s(x - c') = \frac{1}{2}b(h - x)^2 +$$

$$(\alpha_{sc} - 1)A_s(h_0 - x) + (\alpha_{cfrp} - 1)A_{cfrp}(h - x) + (\alpha_{sma} - 1)A_{sma}(h - x) \quad (12)$$

受压区高度  $x$  为

$$x = \left[ \frac{1}{2}bh^2 + (\alpha_{sc} - 1)A_s h_0 + (\alpha_{cfrp} - 1)A_{cfrp} h + (\alpha_{sc} - 1)A'_s c' + (\alpha_{sma} - 1)A_{sma} h \right] / [bh + (\alpha_{sc} - 1)(A_s + A'_s) + (\alpha_{cfrp} - 1)A_{cfrp} + (\alpha_{sma} - 1)A_{sma}] \quad (13)$$

式中:  $c'$  为受压区混凝土保护层厚度;  $h_0$  为有效高度。

组合截面的惯性矩  $I_0$  为

$$I_0 = \frac{b}{3}[x^3 + (h + x)^3] + (\alpha_{sc} - 1)A'_s(x - c')^2 + (\alpha_{sc} - 1)A_s(h_0 - x)^2 + (\alpha_{cfrp} - 1)A_{cfrp}(h - x)^2 + (\alpha_{sma} - 1)A_{sma}(h - x)^2 \quad (14)$$

受拉区边缘抵抗矩  $W_0$  为

$$W_0 = \frac{I_0}{h - x} \quad (15)$$

组合截面开裂弯矩  $M'_{cr}$  为

$$M'_{cr} = \gamma_m W_0 f_t \quad (16)$$

式中:  $\gamma_m$  为截面抵抗矩塑性系数;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度。

预应力 CFRP-SMA 组合加固受弯构件的开裂弯矩  $M_{cr}$  为

$$M_{cr} = M_k + M'_{cr} \quad (17)$$

## 5.2 极限弯矩计算

根据模拟结果, SMA-CFRP 复合板材加固梁的破坏模式属于第 4.2 节中第②类, 即受压区混凝土压碎时, 受拉钢筋屈服, 复合板材未被拉断, 且未发生端部剥离破坏, 此时  $\epsilon_{cf} < \epsilon_{cfu}$ ,  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ , 截面应力-应变分布如图 20 所示。

由图 20 可得

$$\frac{x_c}{h_{cf}} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{cf}} \quad (18)$$

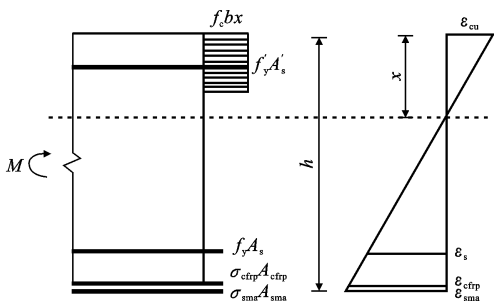


图 20 截面应力-应变分布

Fig. 20 Cross-section stress-strain distribution

$$\frac{x_c}{h_{sma}} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sma} - \epsilon_{sma0}} \quad (19)$$

式中: $\epsilon_{sma0}$  为 SMA 丝的预应变; $h_{sma}$  为 SMA 丝的有效高度; $x_c$  为组合梁截面受压计算高度。

由于混凝土等级不超过 C50,故  $\alpha = 1.0, \beta = 0.8$ ,建立力的平衡方程,即

$$\alpha f_c b \beta x_c + f'_y A'_s = f_y A_s + \sigma_{\delta} A_{\delta} + \sigma_{sma} A_{sma} \quad (20)$$

式中: $\sigma_{sma}$  为 SMA 丝的应力; $A_{sma}$  为 SMA 丝的截面面积; $f_y$  为钢筋抗拉强度; $f'_y$  为钢筋抗压强度; $A_s$ 、 $A'_s$  分别为受压、受拉钢筋的截面面积。

由式(19)、(20)可得  $x_c$ 、 $\sigma_{cf}$ 、 $\sigma_{sma}$ 。然后对受拉钢筋的作用点取距为 0,可得 SMA-CFRP 复合加固梁破坏时的极限弯矩  $M_u$  为

$$M_u = f_c b x_c \left( h_0 - \frac{x_c}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a') + \sigma_{cf} A_{cf} (h_t - h_0) + \sigma_{sma} A_{sma} (h_{sma} - h_0) \quad (21)$$

式中: $\sigma_{cf}$  为 CFRP 布的极限应力; $a'$  为受压区保护层厚度。

当  $x_c > x_{cf}$  ( $x_{cf}$  为 CFRP 在组合截面中的计算高度),即  $\xi > \xi_{cf}$  ( $\xi$  为截面相对受压区高度, $\xi_{cf}$  为 CFRP 所在截面相对受压区高度),破坏模式为第①类的受压区混凝土压碎;当  $x_c < x_{cf}$  即  $\xi < \xi_{cf}$ ,破坏模式为第②类的 CFRP 布拉断。为防止超筋破坏,还需要满足  $x_c \leq \xi_b h_0$ 。加固梁承载力的计算值与模拟值对比如表 2 所示。通过 SMA-CFRP 组合加固 RC 梁的公式对本文相关模拟值进行比对验证,发现理论计算值与模拟值吻合较好,有限元模拟结果误差在可控范围内,验证了此加固模型的准确性。

## 6 结 语

(1)利用 ABAQUS 有限元软件可以很好地模拟 SMA 回复力在混凝土梁中的作用效果,用温度控制法能精准模拟出 SMA 升温激励这一过程。建立的有限元模型能有效预测 SMA 在混凝土结构中的形状记忆效应。

表 2 承载力计算值与模拟值对比

Table 2 Comparison of calculated and simulated values of bearing capacity

试件编号	开裂荷载			极限荷载		
	模拟值/ kN	计算值/ kN	相对误差/ %	模拟值/ kN	计算值/ kN	相对误差/ %
B0	19.7	20.1	2.0	65.2	60.0	8.6
B0-SC	20.5	22.3	5.2	119.6	126.4	5.6
B1-SC	26.8	27.5	2.6	121.7	129.3	6.2

(2)在工程中采用造价相对经济的直径 2 mm 的 NiTi-SMA 合金丝对混凝土构件进行加固时,建议将其与纤维复合材料或其他材料结合使用,提升加固效果的同时可降低整体成本。

(3)对比 NSM-SMA-CFRP 加固 RC 梁与 EB-SMA-CFRP 加固 RC 梁的加固效果发现,二者加固梁开裂荷载与屈服荷载差距不明显,但 NSM 方法可以使加固梁极限荷载提升 92.7%。

(4)基于嵌入式 SMA-CFRP 复合板材加固 RC 梁破坏模式,在原有预应力碳板加固梁的公式基础上进行改进,引入 SMA 回复力,提出嵌入式复合板材加固梁的承载力计算方法,理论计算结果与有限元模拟结果吻合良好,可为后续相关研究提供参考。

## 参考文献:

### References:

[1] MORAES Y J O, RODRIGUES M C, SILVA A A, et al. Vibration control systems in a building prototype: application of SMA coil springs in diagonal bracing and TMD[J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115319.

[2] CLADERA A, OLLER E, RIBAS C. Pilot experiences in the application of shape memory alloys in structural concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(11): 04014084.

[3] LEE K J, LEE J H, JUNG C Y, et al. Crack-closing performance of NiTi and NiTiNb fibers in cement mortar beams using shape memory effects[J]. Composite Structures, 2018, 202: 710-718.

[4] 王 帅. 镍钛铌形状记忆合金的回复应力试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

WANG Shuai. Experimental study on recovery stress of Ni-Ti-Nb shape memory alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[5] 惠华星. 镍钛铌合金记忆性能与力学性能的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.

HUI Huaxing. Experimental study on memory properties and mechanical properties of NiTiNb alloy[D].

- Dalian; Dalian University of Technology, 2020.
- [6] CHOI E, NAM T H, CHUNG Y S, et al. Behavior of NiTiNb SMA wires under recovery stress or pre-stressing [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7(1): 66.
- [7] 陈翔, 陈伟, 赵洋, 等. 考虑塑性变形和相变耦合效应的 NiTiNb 记忆合金管接头装配性能模拟[J]. *金属学报*, 2020, 56(3): 361-373.
- CHEN Xiang, CHEN Wei, ZHAO Yang, et al. Assembly performance simulation of NiTiNb shape memory alloy pipe joint considering coupling effect of phase transformation and plastic deformation[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(3): 361-373.
- [8] EL-TAHAN M, DAWOOD M. Fatigue behavior of a thermally-activated NiTiNb SMA-FRP patch [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(1): 015030.
- [9] ZHENG B, DAWOOD M. Fatigue strengthening of metallic structures with a thermally activated shape memory alloy fiber-reinforced polymer patch [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(4): 04016113.
- [10] 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, 35(2): 41-47.
- DENG Zongcai, LI Qingbin. Actuating effects of embedded shape memory alloy on concrete beam [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(2): 41-47.
- [11] 薛伟辰, 刘振勇, 李杰, 等. 基于 SMA 的智能预应力梁主动控制试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 22-27.
- XUE Weichen, LIU Zhenyong, LI Jie, et al. Experimental study on active control of intelligent prestressed beams with SMA [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 22-27.
- [12] 胡美玲. 表面内嵌 SMA 丝加固混凝土梁抗弯试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- HU Meiling. Experimental study on bending resistance of concrete beams strengthened with SMA wires embedded in the surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [13] 蒋杰良. 嵌入式 SMA 与 CFRP 复合加固 RC 梁抗弯性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- JIANG Jieliang. Study on flexural behavior of RC beams strengthened with embedded SMA and CFRP [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [14] 王文伟, 周畅, 张亚飞, 等. CFRP/SMA 复合材料片材增强钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 282-295.
- WANG Wenwei, ZHOU Chang, ZHANG Yafei, et al. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP/SMA composite sheets [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 282-295.
- [15] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67, 82.
- NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59-67, 82.
- [16] 何国浩. 侧贴碳纤维加固钢筋混凝土梁有限元分析[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- HE Guohao. Finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened with side bonded carbon fiber [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [17] CHEN G M, TENG J G, CHEN J F. Finite-element modeling of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(3): 339-353.
- [18] 王姝燊. B-FRCM 加固钢筋混凝土梁抗弯性能有限元分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
- WANG Shuyu. Finite element analysis of flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with B-FRCM [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2019.
- [19] NORDIN H, TALJSTEN B. Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(1): 60-68.
- [20] AL RJOUB Y S, ASHTEYAT A M, OBAIDAT Y T, et al. Shear strengthening of RC beams using near-surface mounted carbon fibre-reinforced polymers [J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2019, 20(1): 54-62.
- [21] 李刚. 混凝土梁表层嵌贴 CFRP 抗弯加固试验研究及有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- LI Gang. Experimental study and finite element analysis of flexural strengthening of concrete beams with CFRP embedded in the surface [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.