

## CxFe-SMA 筋与混凝土界面粘结性能有限元分析

史明方<sup>1</sup>, 程 鸿<sup>1</sup>, 赵继涛<sup>2</sup>, 王 宏<sup>1\*</sup>

1. 内蒙古科技大学, 土木工程学院, 内蒙古, 包头, 014010

2. 攀枝花学院, 土木与建筑工程学院, 四川, 攀枝花, 617000

**摘要:** 形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 在结构加固和自修复中具有显著优势, 铁基形状记忆合金 (Fe-SMA) 因低成本, 回复性能稳定以及力学性能优异等优势, 可将其加工为 Fe-SMA 筋广泛应用于建筑结构中。Fe-SMA 筋在混凝土中的粘结行为决定了 Fe-SMA 筋的加固、修复等功能, 因此本文建立 Fe-SMA 筋与混凝土界面三维细观有限元模型, 通过有限元模拟研究 Fe-SMA 筋粘结长度、直径、混凝土强度等级对界面粘结滑移性能的影响, 进一步揭示在拉拔过程中混凝土内部损伤演化机理以及 Fe-SMA 筋表面的应力分布。粘结-滑移曲线显示, 随着 Fe-SMA 筋粘结长度、直径减小以及混凝土强度等级的提升, 界面的粘结性能会得到提升; 有限元模型损伤云图显示, 当 Fe-SMA 筋直径以及混凝土强度等级较大时, 模型会发生劈裂破坏; 当粘结长度较大时, 加载端 Fe-SMA 筋在拔出过程中会被拉断; 混凝土的损伤从加载端开始, 随着 Fe-SMA 筋的滑移向自由端扩展, 最终会形成柱状损伤带或向混凝土表面扩展。

**关键词:** 铁基形状记忆合金; 有限元模拟; 粘结滑移性能; 损伤演化

## Finite Element Analysis of the Bond Performance at the Interface between Fe-SMA Bars and Concrete

Mingfang Shi<sup>1</sup>, Hong Cheng<sup>1</sup>, Jitao Zhao<sup>2</sup>, Hong Wang<sup>1,\*</sup>

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia, China, 014010

2. School of Civil and Architecture Engineering, Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan, China, 617000

**Abstract:** Shape memory alloys (SMAs) possess significant advantages in structural strengthening and self-repair applications. Iron-based shape memory alloys (Fe-SMAs), due to their low cost, stable recovery performance, and excellent mechanical properties, can be processed into Fe-SMA bars and widely utilized in building structures. The bonding behavior of Fe-SMA bars in concrete determines their effectiveness in reinforcement and repair functions. Consequently, this study establishes a three-dimensional mesoscale finite element model of the Fe-SMA bar-concrete interface. Through finite element simulation, the effects of bond length, bar diameter, and concrete strength grade on the interfacial bond-slip performance are investigated, further revealing the damage evolution mechanism inside concrete and the stress distribution on the Fe-SMA bar surface during the pull-out process. The bond-slip curves indicate that the interfacial bond performance improves with decreasing bond length and diameter of the Fe-SMA bar and with increasing concrete strength grade. The damage contours

from the finite element model demonstrate that when the Fe-SMA bar diameter and concrete strength grade are relatively large, the model undergoes splitting failure. When the bond length is substantial, the Fe-SMA bar at the loaded end tends to fracture during the pull-out process. Concrete damage initiates from the loaded end and propagates toward the free end with the slip of the Fe-SMA bar, ultimately forming a columnar damage zone or extending toward the concrete surface.

**Key words:** Iron-based shape memory alloys; Finite element simulation; Bond-slip performance; Damage evolution

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 是一种具有超弹性、高阻尼、耐疲劳等特性的新兴智能金属材料<sup>[1,2]</sup>, 可加工为 SMA 筋应用于土木工程领域。近年来, 铁基形状记忆合金 (Fe-SMA) 以成本低, 回复性能可预测性以及力学性能优异被广泛研究应用于建筑结构中, 学者们已对 Fe-SMA 筋在钢筋混凝土结构的加固和修复进行了研究<sup>[3-5]</sup>。基于 Fe-SMA 筋在建筑结构中的设计参数 (如锚固长度、混凝土强度等级及直径要求) 直接决定了其加固修复效果, 因此本文通过有限元模拟, 对 Fe-SMA 筋在混凝土中的粘结性能进行系统研究。

众多学者通过拉拔试验研究了 Fe-SMA 筋与混凝土界面之间的黏结滑移行为。但拉拔试验对 Fe-SMA 筋拔出过程中界面的失效机理和混凝土内部的损伤演化过程的揭示并不完全, 需要采用数值模拟方法对粘结滑移的内部损伤进行深入分析。目前, 针对钢筋-混凝土界面的数值模拟, 常采用内聚力单元模型<sup>[6]</sup>、非线性弹簧单元模型<sup>[7]</sup>以及四节点粘结单元模型<sup>[8,9]</sup>等来表征界面粘结滑移行为。Rezazadeh 等<sup>[6]</sup>根据试验得出的粘结-滑移曲线, 采用内聚力单元模型来模拟钢筋与混凝土界面的粘结行为, 并在有限元模型中实现了两种基于损伤的方法。结果表明: 粘结长度越长, 极限粘结应力越低, 但滑移量相应增大。Mao 等<sup>[7]</sup>通过试验和数值方法研究了钢筋的粘结行为, 采用非线性弹簧元件来模拟钢筋与混凝土界面的粘结性能, 通过试验结果证实所提出的有限元分析模型能够有效且准确地预测界面的粘结行为。Santos 等<sup>[8]</sup>在界面区域引入正交各向异性四节点平面应力粘结单元, 以表征界面粘结作用, 同时考虑钢筋应变的影响。该模型实现了对裂缝附近区域钢筋与混凝土粘结-滑移响应及钢筋应变的精确模拟。Murcia 等<sup>[9]</sup>采用四节点模型, 通过假设界面法向应力与粘结应力成正比来表示筋材肋的嵌入作用, 可以准确预测混凝土中的粘结-滑移行为, 并能模拟由混凝土劈裂引起的破坏模式。已有研究表明, 有限元模型可以表征出钢筋与混凝土界面之间的破坏过程, 但是目前针对于 Fe-SMA 筋与混凝土界面的混凝土损伤演化过程研究存在不足, 需要对这一问题展开针对性研究。

在此背景下, 本文建立 Fe-SMA 筋与界面的三维细观有限元模型, 以 Fe-SMA 筋粘结长度、直径以及混凝土强度等级为变量, 设计 10 组拉拔模型开展数值模拟计算, 来研究不同变量对界面粘结滑移性能的影响, 并揭示 Fe-SMA 筋拔出过程中表面应力分布以及混凝土内部的损伤演化过程。

## 1 参数设计

本文旨在研究 Fe-SMA 筋的锚固长度、直径以及混凝土强度等级对 Fe-SMA 筋和混凝土界面粘结性能的影响, 设计了 10 组不同参数的有限元模型, 各试件详细参数见表 1 所示。

表 1 有限元变量参数

Table 1 Finite element variable parameters

试件编号	Fe-SMA 筋锚固长度/ $l_a$	混凝土强度等级/ $c$	Fe-SMA 筋直径/ $d$
S-50-40-10	50mm	C40	10mm
S-70-40-10	70mm	C40	10mm
S-90-40-10	90mm	C40	10mm
S-120-40-10	120mm	C40	10mm
S-120-50-10	120mm	C50	10mm
S-120-60-10	120mm	C60	10mm
S-120-70-10	120mm	C70	10mm
S-120-40-12	120mm	C40	12mm
S-120-40-14	120mm	C40	14mm
S-120-40-16	120mm	C40	16mm

注：有限元模型编号为 S-SMA 筋锚固长度-混凝土强度等级-SMA 筋直径，例如，“S-50-40-10”表示 SMA 筋锚固长度为 50mm，混凝土强度等级为 C40，SMA 筋直径为 10mm 的拔出试件。

拉拔模型整体示意图如图 1 (a) 所示，混凝土为 150mm×150mm×150mm 的标准立方体，与混凝土直接接触的区段为粘结区，其余区段为非粘结区，拉拔模型尺寸示意图如图 1 (b) 所示。Fe-SMA 筋的长度为 400mm，其横肋及截面尺寸图如图 1 (c)、(d) 所示，几何参数见表 2。

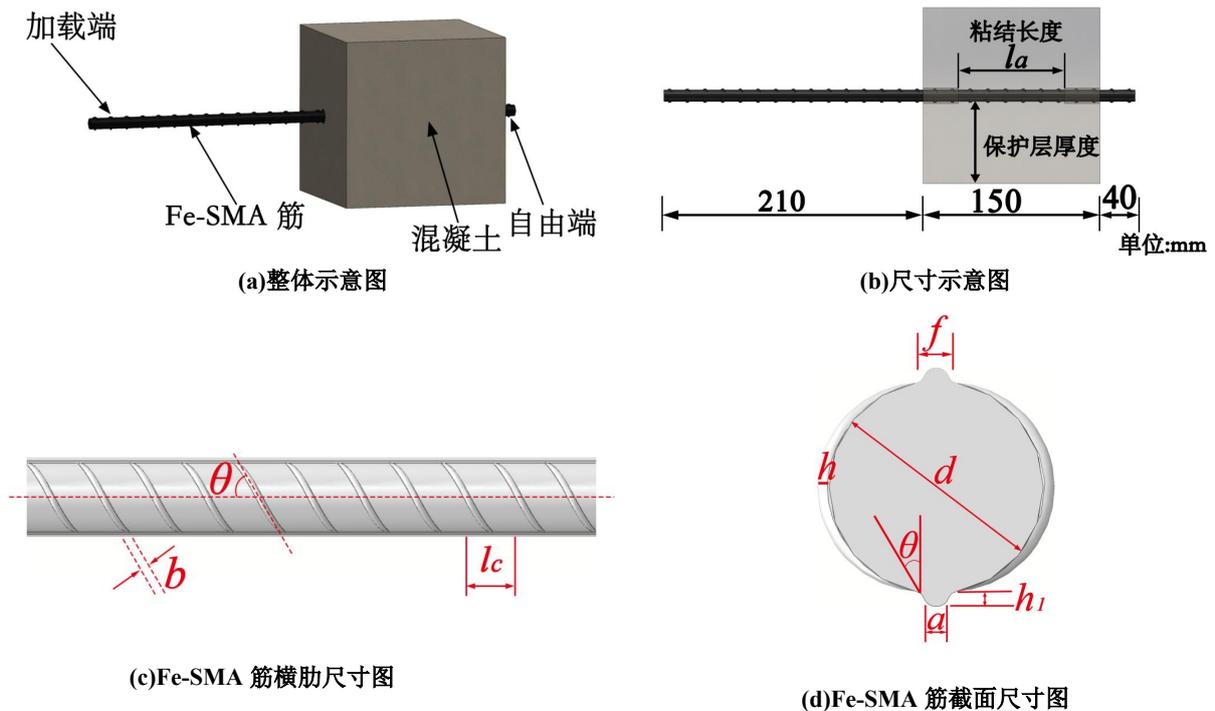


图 1 拉拔模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pull-out specimen

表2 Fe-SMA 筋几何参数  
Table 2 Geometric parameters of Fe-SMA bar

公称直径 $D$	$d$	$h$	$h_l$	$b$	$a$	$f$	$\theta$	$\beta$	$l_c$
10mm	9.6	1.1	1.3	0.6	1.5	3.0	60	60	7
12mm	11.5	1.2	1.6	0.7	1.5	3.5	60	60	8
14mm	13.4	1.4	1.8	0.8	1.8	4.0	60	60	9
16mm	15.4	1.5	1.9	0.9	1.8	4.5	60	60	10

## 2 有限元模拟

### 2.1 网格划分及模型装配

建立了尺寸为  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$  的立方体模型。如图2所示，混凝土模型采用四节点线性四面体单元(C3D4)，Fe-SMA 筋的网格类型采用四节点线性四面体单元(C3D4)，刚性墙选用四节点三维双线性刚性四边形(R3D4)的网格类型。粘结区进行网格局部加密，网格尺寸为1mm，其余装配部件网格尺寸为3mm。

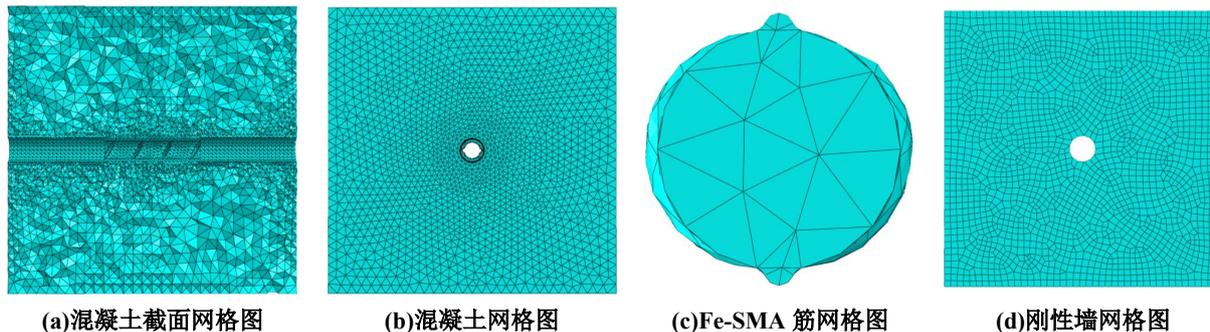


图2 网格示意图

Fig. 2 Mesh schematic

### 2.2 有限元模型参数

本文采用混凝土的塑性损伤模型<sup>[10,11]</sup>，认为试件在拉拔时的破坏机制为混凝土拉伸时的开裂和压缩时的挤压，如式(1)所示。

$$\sigma = (1 - D) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (1)$$

其中  $D$  代表各向同性损伤变量，其值介于0和1之间，其中“0”表示无损伤，“1”表示完全损伤。 $D_0^{el}$  表示无损伤各向同性线弹性刚度， $\varepsilon^{pl}$  表示塑性应变张量。

模型中其余力学参数均与试验测试值保持一致，详细参数见表3。

表3 Fe-SMA 筋和混凝土力学参数

Table 3 Mechanical properties of Fe-SMA bars and concrete

材料类别	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	杨氏模 ( $\text{GPa}$ )	泊松比	极限强度 ( $\text{MPa}$ )	膨胀角	偏心率	应力比
Fe-SMA 筋	2309	165	0.3	895	-	-	-
混凝土	2400	31	0.2	-	36	0.1	1.16

### 2.3 相互作用及边界条件

本模型对机械咬合力和摩擦力进行定义。横肋与混凝土的斜压作用设置为硬接触<sup>[12,13]</sup>，限制拉拔工作中横肋与混凝土的穿透和压应力的产生。界面切向的摩擦行为采用罚函数法

进行定义，摩擦系数设定为 0.3。在混凝土顶部设置刚性墙并施加固定约束，同时在 Fe-SMA 筋顶部选取一个参考点，于该点处施加沿 z 方向 20mm 的位移荷载，以模拟筋材向上拔出的过程。模拟的终止条件为 Fe-SMA 筋的滑移量达到 20mm 或混凝土发生劈裂破坏。

### 2.4 有限元模型结果分析

#### 2.4.1 网格验证及破坏模式对比

为了验证网格尺寸对数值模拟结果的影响，进行网格敏感性分析，以模型 S-50-40-10 为分析对象，采用 2mm、3mm 和 4mm 三种网格尺寸进行验证，图 3 (a) 对比分析了界面损伤云图，结果表明网格尺寸的改变对界面中混凝土的损伤范围影响较小。三种网格尺寸得出的粘结-滑移曲线均与试验曲线吻合良好 (图 3 (b))。三种网格尺寸对应的计算时间分别为 43h、12h 和 4h。综合考虑计算精度与效率，本文最终选取中间值网格尺寸 3mm 来进行数值模拟。

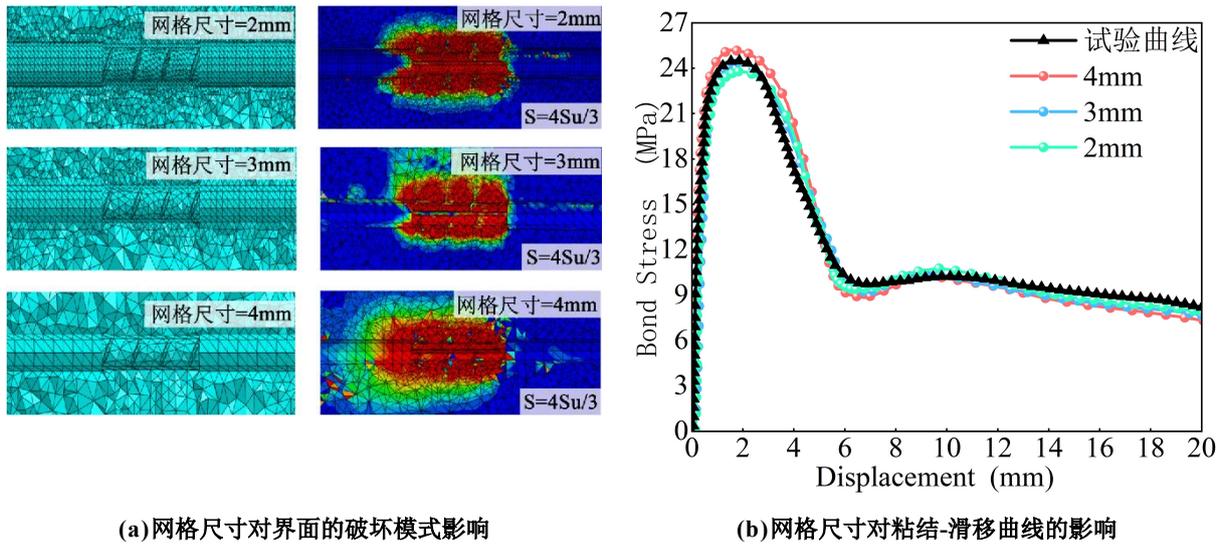


图 3 网格尺寸的敏感性分析验证

Fig. 3 Mesh sensitivity analysis and verification

混凝土表面破坏模式数值模拟与试验结果的对比见图 4。损伤云图显示，拔出破坏时表面混凝土在 Fe-SMA 筋周围仅发生轻微损伤，无明显裂缝，与试验中拔出破坏的表面现象一致。劈裂破坏时，混凝土损伤范围扩大，出现明显向外延伸的裂缝，裂缝方向与试验结果吻合较好。进一步验证该模型模拟拉拔试验中混凝土表面损伤模式的可靠性。

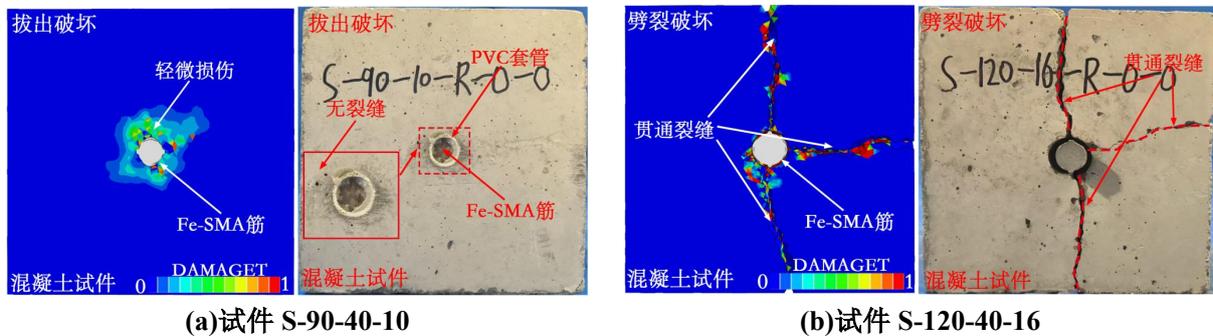


图 4 破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of failure modes

### 2.4.2 粘结-滑移曲线的分析

通过有限元模拟得出在不同因素影响下的粘结-滑移曲线如图5所示。试件的粘结应力与拉拔力的关系由下式给出：

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (2)$$

其中 $\tau$ 为界面的粘结应力, $F$ 为Fe-SMA筋所受的拉拔力, $d$ 为Fe-SMA筋的直径, $l_a$ 为Fe-SMA筋的粘结长度。

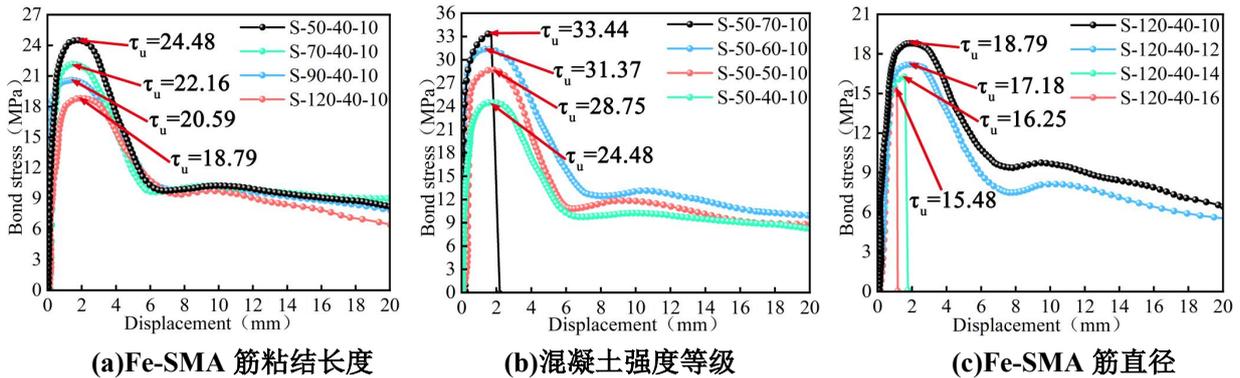


图5 不同影响因素下的粘结-滑移曲线

Fig. 5 Bond-slip curves under different influencing factors

图5(a)展示了在不同Fe-SMA筋粘结长度影响下的粘结-滑移曲线,当Fe-SMA筋的粘结长度由50mm增大至120mm,试件的极限粘结应力减小28%。这是由于粘结应力在Fe-SMA筋锚固段是由加载端向自由端传递,粘结应力主要集中在加载端附近,当增大Fe-SMA筋的锚固长度时,加载端应力集中现象更为显著,而传递至自由端的应力逐步减少,从而使得Fe-SMA筋粘结段表面应力分布更加不均匀<sup>[14]</sup>,因此极限粘结应力下降。

从图5(b)可以看出,当混凝土强度等级由C40增至C60,界面极限粘结应力提升28%,随着混凝土强度等级的提高,其抗压与抗剪强度相应增强,混凝土抑制微裂缝扩展的能力也得到提升,这使混凝土更能有效抵抗Fe-SMA筋横肋所产生的径向压应力<sup>[15]</sup>,混凝土更不容易横肋剪碎。在此条件下,横肋与混凝土之间的机械咬合作用得以充分发挥,界面的极限粘结应力得到显著提高。

Fe-SMA筋直对试件粘结性能的影响如图5(c)所示,当Fe-SMA筋直径由10mm增至12mm,界面极限粘结应力降低9%,因为当Fe-SMA筋直径增大时,其与混凝土的粘结面积变大,无法将粘结应力相对有效的传递到整个界面<sup>[16]</sup>,使得整个粘结面积无法被同时充分利用,从而导致极限粘结应力降低。当直径增大至14mm时,Fe-SMA筋所承受的荷载变大,其加载端横肋对混凝土产生的径向压力也随之增大,试件的破坏模式由拔出破坏转变为劈裂破坏。

### 2.4.3 Fe-SMA筋表面应力分布

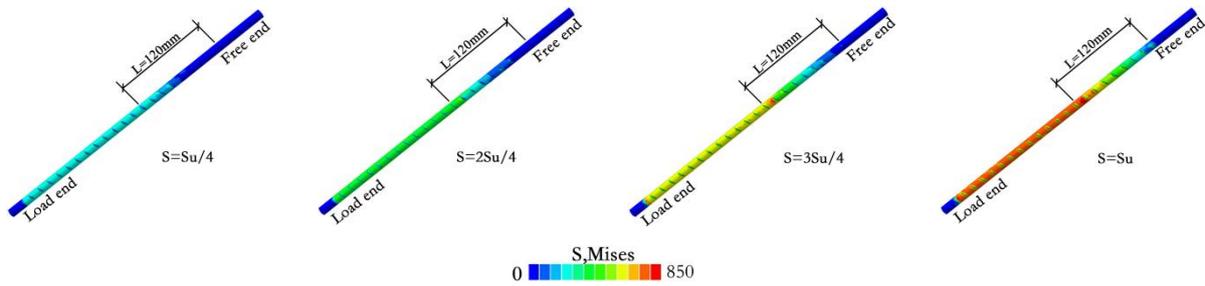


图 6 模型 S-120-40-10Fe-SMA 筋应力  
Fig. 6 Stress of Fe-SMA bar in model S-120-0-10

拉拔过程中 Fe-SMA 筋表面的应力示意图如图 6 所示，其中  $s$  为 Fe-SMA 筋的滑移距离， $S_u$  为模型到达极限粘结应力时 Fe-SMA 筋的滑移距离。当 Fe-SMA 筋发生滑移时，粘结应力首先在加载端产生，并随着滑移量的增大传递至自由端。当滑移量为  $S_u$  时，粘结应力沿粘结段全长分布，并从加载端向自由端逐渐减小。由于 Fe-SMA 横肋与混凝土出现脱粘，导致 Fe-SMA 表面横肋的应力小于其他部位的应力。在计算过程中，模型 S-120-40-10 的 Fe-SMA 筋非粘结段应力最大值达到 850MPa 左右，接近所测得 Fe-SMA 的极限应力，继续增大粘结长度可能导致加载端 Fe-SMA 筋提前达到极限应力，发生未拔出的 Fe-SMA 筋拉断破坏。

2.4.4 混凝土破坏模式

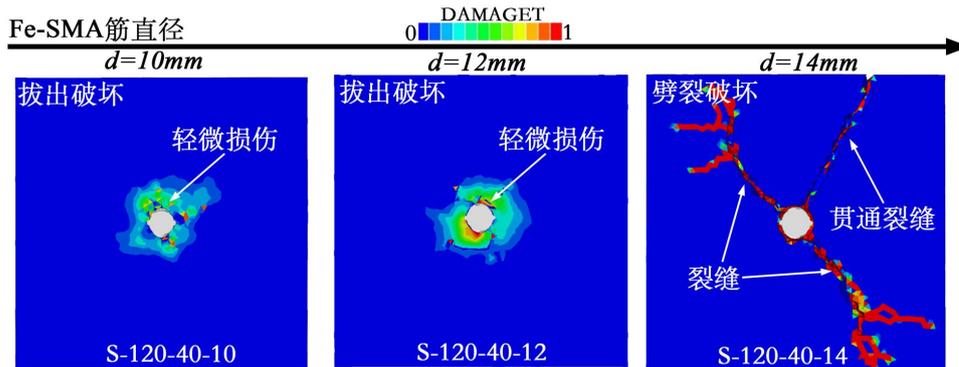


图 7 不同 Fe-SMA 直径的模型损伤云图  
Fig. 7 Damage contour plots of models with different Fe-SMA bar diameters

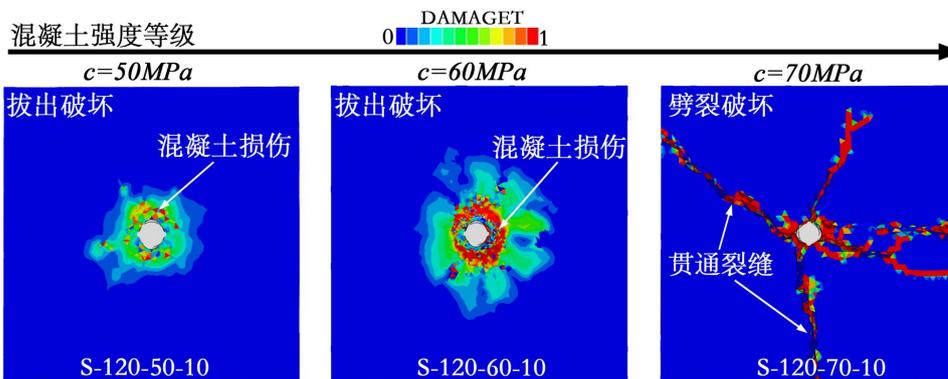


图 8 不同混凝土强度的模型损伤云图  
Fig. 8 Damage contour plots of models with different concrete strengths

不同变量参数对应的混凝土损伤云图如图 7、8 所示。结果表明，增大 Fe-SMA 筋直径或混凝土强度等级会导致加载端所受荷载变大，Fe-SMA 筋横肋对混凝土产生更大的径向压应力，当  $d=14\text{mm}$ 、 $c=70\text{MPa}$  时，压应力到达临界值，模型发生劈裂破坏。

### 2.4.5 混凝土损伤演化过程

通过有限元模拟获取了混凝土剖面的损伤演化过程如图 9 所示，混凝土的损伤最早出现在  $s=Su/3$  时，此时界面的化学胶着力消失，横肋开始挤压混凝土，混凝土受到损伤。

Fe-SMA 筋滑移距离增大到  $2Su/3$ ，Fe-SMA 筋横肋持续挤压与之接触的混凝土，横肋附近混凝土损伤变大。当到达极限荷载即 Fe-SMA 筋滑移距离为  $Su$  时，肋前混凝土被逐排压碎剪断。

当钢筋滑移距离增大到  $4Su/3$  时，粘结段所有与横肋接触的混凝土被完全压碎磨平，此时机械咬合力消失，Fe-SMA 筋周围的混凝土完全损伤，界面被完全破坏，此时的残余粘结应力由 Fe-SMA 筋与混凝土的摩擦力来承担，这与试验拔出破坏混凝土剖面图中界面的通道光滑且看不到横肋的痕迹有着较为吻合的对照，混凝土剖面损伤对比图如图 10 所示。

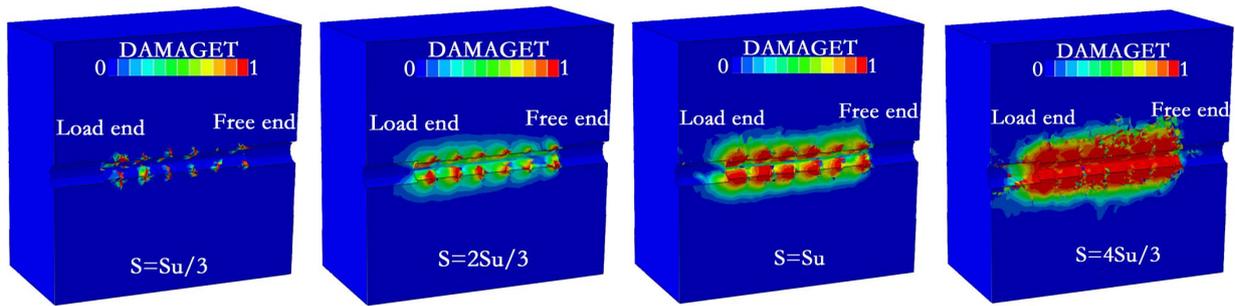


图 9 模型 S-90-40-10 混凝土剖面损伤  
Fig. 9 Concrete section damage of model S-50-0-10

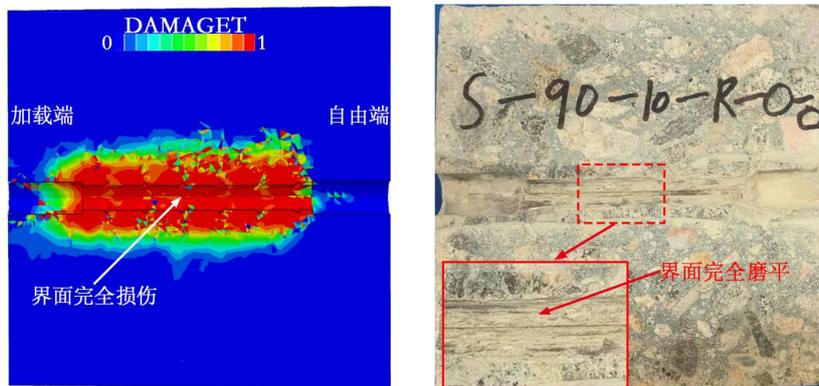
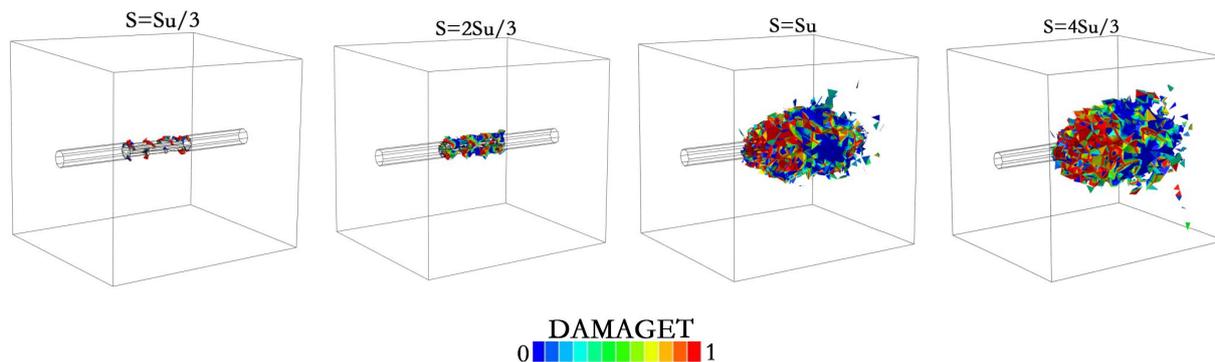


图 10 混凝土剖面图损伤对比  
Fig. 10 Comparison of damage in concrete section plots

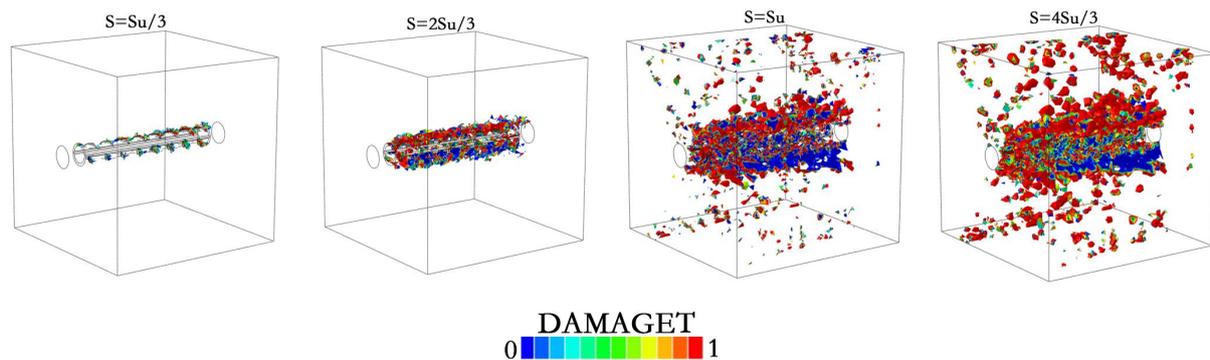
图 11 (a) 展示的是拔出过程中模型 S-50-40-10 (拔出破坏) 的混凝土内部损伤示意图，从图中可以看出，在 Fe-SMA 筋滑移量从  $Su/3$  增大到  $Su$  这一过程中，由于 Fe-SMA 筋横肋对混凝土的挤压作用，混凝土最先围绕着横肋开始发生损伤。随后损伤区域开始从横肋开始向四周扩散，横肋周围的混凝土被剪断，并且随着 Fe-SMA 筋的滑移而逐渐磨平。当滑

移量到达  $4S_u/3$  时, 沿着 Fe-SMA 筋纵轴线方向的损伤区域逐渐连接贯通, 形成一个柱状损伤带, 呈现出向混凝土表面扩散的趋势。

图 11 (b) 展示的是加载过程中 S-120-40-16 (劈裂破坏) 混凝土内部的损伤演化, 初始阶段混凝土的损伤发展模式与拔出破坏相似, 当到达劈裂荷载, 即 Fe-SMA 筋滑移量为  $S_u$  时, 混凝土失去对裂缝扩展的约束能力, 损伤迅速由横肋根部向外扩展, 内部微裂缝迅速贯通, 形成两个相交的损伤平面, 在试验劈裂破坏试件 S-120-0-16 的破坏现象中可体现为混凝土表面形成明显的纵向宏观裂缝。



(a) 模型 S-50-40-10 内部损伤示意图



(b) 模型 S-120-40-14 内部损伤示意图

图 11 不同破坏模式下混凝土内部损伤示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of internal concrete damage under different failure

### 3 讨论

筋材与混凝土界面有限元模拟是研究界面粘结性能、界面损伤演化规律以及结构抗震性能退化机理的重要手段。有限元模拟可系统研究不同筋材的粘结-滑移特性、耐久性退化规律, 为新材料的设计应用提供理论支撑。特别是对于筋材的脆性破坏模式、应力集中效应等特殊问题, 有限元模拟具有不可替代的优势。反复荷载作用下界面粘结退化、刚度退化是结构抗震性能劣化的关键因素, 通过建立考虑损伤累积、能量耗散的循环本构模型, 模拟低周疲劳作用下的拔出性能退化, 可为抗震设计提供更精确的滞回模型。

随着计算力学和材料本构理论的发展、界面模型的建立从简单光圆平面发展到复杂的三维精细化模型, 推动界面粘结性能有限元模拟研究从宏观力学响应预测逐步深入到界面微观损伤机理揭示。本文通过建立 Fe-SMA 筋与混凝土界面的三维细观有限元模型, 系统分析了在不同 Fe-SMA 筋粘结长度、直径以及混凝土强度等级下界面的粘结滑移性能, 在

此基础之上进一步揭示拔出过程中混凝土内部损伤演化规律, 研究表明通过减小 Fe-SMA 筋粘结长度、直径以及提高混凝土强度等级均可提升界面粘结性能, 拔出过程中, 混凝土的损伤从加载段开始产生, 并逐步向自由端扩散。然而, 界面粘结滑移有限元模拟仍存在诸多问题有待研究解决。

有限元模拟的计算结果会存在误差: 在拉拔的过程中, 界面的能量主要通过混凝土断裂、碎屑摩擦以及热能等方式耗散, 而数值模拟则是依赖混凝土损伤模型中定义的损伤因子和摩擦耗能, 两者难以完全等效。数值模拟中采用库仑摩擦定义界面行为, 无法实现 Fe-SMA 筋在滑移的过程中混凝土碎屑堆积在界面造成的摩擦系数动态变化。界面粘结-滑移模型是有限元模拟的核心, 但现有模型多采用经验公式(如 CEB-FIP 模型、BPE 模型)或简化弹簧单元, 将其简化为单一滑移关系, 而实际界面存在微裂缝扩展、骨料咬合、摩擦滑移等多重机制耦合, 因此数值模拟难以反映界面粗糙度、混凝土保护层厚度、约束效应等复杂因素的影响, 导致界面极限粘结应力以及筋材滑移量预测存在一定偏差。混凝土材料参数(弹性模量、抗拉强度、断裂能等)具有显著的离散性, 有限元模拟通常采用均值参数, 忽略了材料的离散对模拟结果的影响, 这进一步加剧了有限元模拟的精度不足。此外有限元模拟对于考虑预应变 Fe-SMA 筋在一定激励温度作用下的拔出过程较难实现, 仍存在着技术瓶颈。未来的研究需在材料本构模型、界面的粘结-滑移模型、材料的离散型等方面持续攻关, 推动技术的不断完善和成熟。

#### 4 结论

本文设计了 10 组不同参数的拉拔模型, 通过有限元模拟建立 Fe-SMA 筋与混凝土界面三维细观有限元模型, 得出不同 Fe-SMA 筋锚固长度、直径以及混凝土强度等级对界面粘结性能以及破坏模式的影响规律, 揭示拉拔过程中界面的失效机理和混凝土内部的损伤演化过程。得出以下结论:

(1) 在一定的参数范围内, 减小 Fe-SMA 筋直径、粘结长度会使粘结应力在界面的传递更加均匀。提高混凝土强度等级, 会增大其对 Fe-SMA 的约束力。均可提高界面粘结性能。当 Fe-SMA 筋直径增至 14mm、混凝土强度等级提升至 C70, Fe-SMA 筋横肋对混凝土的径向压应力到达临界值, 破坏模式转变为劈裂破坏。

(2) 当 Fe-SMA 筋粘结长度为 120mm 时, 在拔出过程中, Fe-SMA 筋表面应力云图显示筋材表面应力最大值可达到 850MPa, 接近其极限应力, 继续增大粘结长度会导致 Fe-SMA 筋提前达到极限抗拉强度, 出现加载端 Fe-SMA 筋拉断的失效模式。

(3) 数值模拟揭示了 Fe-SMA 筋与混凝土界面的粘结滑移行为, 得出了在不同破坏模式下混凝土内部损伤的演化过程, 来弥补试验的不足之处。拔出破坏和劈裂破坏的内部损伤演化初始阶段相同, 最先都发生在界面中与横肋接触的混凝土处, 从锚固段加载端向自由端扩展, 随着 Fe-SMA 筋滑移量的增大, 拔出破坏横肋周围的损伤区域开始连接贯通, 最终形成柱状损伤带, 而劈裂破坏的损伤开始向混凝土表面扩展, 最终形成两个向外延伸且相交的平面。

**参考文献:**

- [1] Alireza T, Mieczyslaw K, Zafiris T, et al. Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 467: 140309.
- [2] Tristan B, Hessam G. Effect of Embedded Shape Memory Alloy (SMA) on the Low-velocity Impact Behaviour of Stringer Stiffened Composite Plates[J]. *Applied Composite Materials*, 2025, 32(1): 21-44.
- [3] Daghash S, Ozbulut O. Bond-slip behavior of superelastic shape memory alloys for near-surface-mounted strengthening applications[J]. *Smart Materials and Structures*. 2017. 26(3): 20-26.
- [4] Michels J, Shahverd M, Czaderski C. Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shapememory alloy strips[J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(3): 876-891.
- [5] Rojoh H, El-Hacha R. Self-Prestressing Using Iron-Based Shape Memory Alloy for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams[J]. *Aci Structural Journal*, 2017, 114(2): 523-532.
- [6] Rezazadeh M, Carvelli V, Veljkovic A. Modelling bond of GFRP rebar and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 102-116.
- [7] Mao W H, Liu J P, Ding Y, et al. Bond-slip constitutive model and numerical analysis for rebar embedded in steel-polyethylene hybrid fiber-reinforced cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 308: 125092.
- [8] Santos J, Henriques A A. New finite element to model bond-slip with steel strain effect for the analysis of reinforced concrete structures[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 72-83.
- [9] Murcia-Delso J, Shing P B. Bond-Slip Model for Detailed Finite-Element Analysis of Reinforced Concrete Structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(4): 04014125.
- [10] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A Plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299-326.
- [11] Chi Y, Yu M, Huang L, et al. Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity [J]. *Engineering Structures*, 2017, 148: 23-35.
- [12] Liu J, Liu M J, Zhang R B, et al. 3D meso-scale modelling of the interface behavior between ribbed steel bar and concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 239: 107291.
- [13] 张羽, 傅丰, 郑吉丰, 等. 基于试验验证下的 FRP 筋与混凝土粘结滑移界面关系有限元模型的建立方法[J]. *建筑结构*, 2025, 55(12): 56-66.
- [14] Liu S, Zheng W Z, Tang W L, et al. Bond behaviour of ribbed steel bar and concrete at 24-h elevated temperatures: Experimental study and theoretical analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 447: 138116.
- [15] 张海霞, 何禄源. 基于 ABAQUS 的表面内嵌 CFRP 筋粘结滑移性能数值模拟分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(S1): 239-244.
- [16] Shi M F, Xu G P, Zhao J T, et al. The study on bond-slip constitutive model of shape memory alloy fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 418: 135395.

**基金项目:** 内蒙古自治区自然科学基金 (2024MS05066); 内蒙古自治区自然科学基金 (2025FX010); 2025 年内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室项目 (2025KYPT0113)。

<sup>1</sup> **第一作者简介:** 史明方(1991-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 形状记忆合金对混凝土结构的加固。 E-mail: shimingfang2019@imust.edu.cn

\* **通讯作者简介:** 王宏(1984-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 形状记忆合金复合材料。 E-mail: wanghong0998@163.com