

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202501009



# NC-UHPC 界面抗剪性能试验及 基于内聚力模型的仿真分析

黄维<sup>1,2</sup>, 王婷<sup>1,2</sup>, 张雨婷<sup>1,2</sup>, 斯比努尔·下木希奴<sup>1,2</sup>, 周知<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 力学与工程科学系, 湖北 武汉 430070;

3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为探究超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土(NC)界面抗剪机理,通过 9 组 NC-UHPC 试件双面剪切试验,研究钢纤维掺量、混凝土龄期及边界约束条件对界面力学性能的影响规律。结合 ABAQUS 软件建立含界面粘结-滑移特性的精细化有限元模型,并通过理论推导构建界面粘结应力分布模型。结果表明:在无约束工况下,低钢纤维掺量(体积分数为 0%~1%)试件呈现单面破坏特征,而固定 NC 试块下端可有效激发双剪破坏模式;UHPC 钢纤维掺量与界面抗剪强度呈正相关,而界面刚度受钢纤维掺量影响较小;UHPC 龄期增长可提升界面刚度,而 NC 龄期增加则产生抑制作用;建立的有限元模型能有效表征界面损伤演化过程,但对双剪试件非对称应变场的模拟存在局限性;基于能量守恒原理建立界面荷载-位移两参数模型,其预测结果与试验数据具有良好一致性。

**关键词:** NC-UHPC 界面; 单推试验; 数字图像相关; 有限元; 内聚力模型

**中图分类号:** U 454

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0400-10

## NC-UHPC Interface Shear Performance Test and Simulation Based on Cohesive Zone Model

HUANG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuting<sup>1,2</sup>,  
SIBINUER · Xiamuxinu<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhi<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Mechanics and Engineering Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To investigate the shear mechanism at the interface between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC), nine groups of double-sided shear tests were conducted on NC-UHPC specimens, the effects of steel fiber content, concrete age, and boundary constraint conditions on interfacial mechanical properties were studied. Combining with ABAQUS software, a refined finite element model considering interfacial bond-slip characteristics was established, and an interfacial bond stress distribution model was constructed through theoretical derivation. The results show that under unrestrained conditions, specimens with low steel fiber content (0%-1% volume fraction) exhibit single-surface failure characteristics, while

**收稿日期:** 2025-01-09

**通信作者:** 黄维(1986—),男,副教授,博士,主要从事工程材料力学性能的研究。E-mail:whuang@whut.edu.cn。

**基金项目:** 湖北省青年科技人才联合项目(2023DJC001);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202310497204)

fixing the bottom of the NC blocks effectively activates a dual-surface failure mode. The steel fiber content in UHPC positively correlates with the interfacial shear strength, while the interfacial stiffness is less affected by the steel fiber content. The increase of UHPC age enhances interfacial stiffness, while higher NC age has the inhibitory effect. The proposed finite element model effectively simulates the damage evolution at the interface, but simulates the asymmetric strain field in double-shear specimens with limitations. Based on the principle of energy conservation, the two-parameter model of interfacial load-displacement is established, and its prediction results conforms well with the test data.

**Keywords:** NC-UHPC interface; pushout test; digital image correlation; finite element; cohesive zone model

由于普通混凝土(NC)与超高性能混凝土(UHPC)界面强度的影响因素众多且复杂,从上个世纪至今,国内外众多学者进行了大量的研究,但至今仍存在可进一步深究的部分,如界面处理方式、界面粘结方式的参数影响规律、界面粘结机理等方面。

国内外学者通过大量实验研究新、旧混凝土界面的粘结性能。郭进军<sup>[1]</sup>采用 Z 字形粘结抗剪试验,建立抗剪强度与界面粗糙度及混凝土强度的关系式。叶果<sup>[2]</sup>研究抗剪性能与界面粗糙度及钢筋摩擦力的关系。张雷顺等<sup>[3]</sup>通过界面抗剪试验,得出植筋率、混凝土抗压强度与粘结强度的关系式。刑强<sup>[4]</sup>发现界面强度与混凝土强度等级、连接界面面积和钢筋面积密切相关,并提出抗剪强度公式。Tayeh 等<sup>[5]</sup>通过劈裂和斜剪试验,揭示 NC-UHPC 界面粘结的不同破坏阶段。Semendary 等<sup>[6]</sup>则通过斜剪、直接拉伸和剪切试验,探讨混凝土强度、表面粗糙度等因素对粘结性能的影响。Al-Madani 等<sup>[7]</sup>研究基体处理方式和养护条件对界面粘结的具体影响。Bastien-Masse 等<sup>[8]</sup>研究纤维分布对界面性能的影响,而 Hussein 等<sup>[9]</sup>发现钢纤维掺量对粘结劈拉强度影响不大。

同时,有限元软件在提升新、旧混凝土界面上也起到了重要作用。党祺<sup>[10]</sup>使用非线性有限元软件 Marc 模拟了 UHPC 层与 NC 层的混合结构,通过 Links-Insert、Contact、Touching 等功能增强了两层结构的连接和钢筋结合,提高了整体强度和稳定性。王兴旺<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 研究切槽、凿毛、植筋等技术对混凝土抗剪性能的影响,发现钢筋的应用比其他方法更能有效提升承载力。田稳苓等<sup>[12]</sup>通过剪切实验和数值模型分析新、旧混凝土的抗拉强度,结果显示植筋率的增加和三角形排列能提高粘结力和抗剪强度。Harris 等<sup>[13]</sup>通过劈拉、斜剪和拉拔试验分析混凝土界面粗糙度对粘结性能的影响,并开发了有限元模型评估 UHPC 的应力分布。Dias-da-Costa 等<sup>[14]</sup>利用 DIANA 软件研究混凝土界面的纵向抗剪强度,通过 A 型直剪试件和平面应力双线性有限元模拟,结合 Mohr-Coulomb 摩擦定律,深入分析各参数对抗剪性能的影响。Farzad 等<sup>[15]</sup>开发了一种高效的数值模拟方法,预测不同混凝土层间的抗剪强度,并通过调整参数来提升粘结性能。

虽然国内外学者对 NC-UHPC 界面粘结性能的影响因素与机理开展了大量探索,但仍存在以下关键问题亟待解决:界面抗剪强度对钢纤维掺量与混凝土养护龄期的耦合响应规律尚未量化,现有数值模型因忽略界面粗糙度随机性而难以精确模拟粘结-滑移过程,且缺乏对界面荷载传递动态演化机制的理论解析。针对上述问题,本文通过多变量控制试验量化了钢纤维掺量(体积分数  $\varphi$  为 0%~2%)与混凝土养护龄期(7~28 d)对抗剪强度的协同效应;基于内聚力模型(CZM)构建考虑界面形貌随机特征的精细化有限元模型,模拟了界面损伤萌生、扩展至失效的全过程;最后,结合试验与模拟结果,提出了界面荷载传递的三阶段发展理论,揭示了界面应力重分布与能量耗散的动态规律。

1 试验方案

1.1 试验材料及配合比

C40 混凝土和超高性能混凝土每立方米材料配合比,分别如表 1、2 所示。表 1、2 中: $m$  为质量。

表 1 C40 混凝土每立方米材料配合比 (单位:kg)  
Tab. 1 Material mix proportion per cubic meter of C40 concrete (unit:kg)

$m$ (水)	$m$ (水泥)	$m$ (细骨料)	$m$ (粗骨料)	$m$ (减水剂)
166.71	340.20	793.00	1 101.00	4.76

表 2 超高性能混凝土每立方米材料配合比 (单位:kg)

Tab. 2 Material mix proportion per cubic meter of UHPC (unit:kg)

试件编号	$m(\text{水泥})$	$m(\text{粉煤灰})$	$m(\text{硅灰})$	$m(\text{细砂})$	$m(\text{中砂})$	$m(\text{粗砂})$	$m(\text{水})$	$m(\text{减水剂})$	$m(\text{钢纤维})$
1	754	201	160	469	368	279	200	30	0
2	754	201	160	469	368	279	200	30	78.5
3	754	201	160	469	368	279	200	30	157.0

1.2 试件设计

考虑到 NC 与 UHPC 的粘结长度、UHPC 的钢纤维掺量(体积分数)、NC 与 UHPC 的龄期及混凝土强度等级对界面粘结强度的影响,设计并制作了 9 组 NC-UHPC 试件,其中,NC-UHPC 试件由 2 个 150 mm×150 mm×50 mm 的 NC 试件和 1 个 150 mm×150 mm×50 mm 的 UHPC 试件组成,试件尺寸,如图 1 所示。

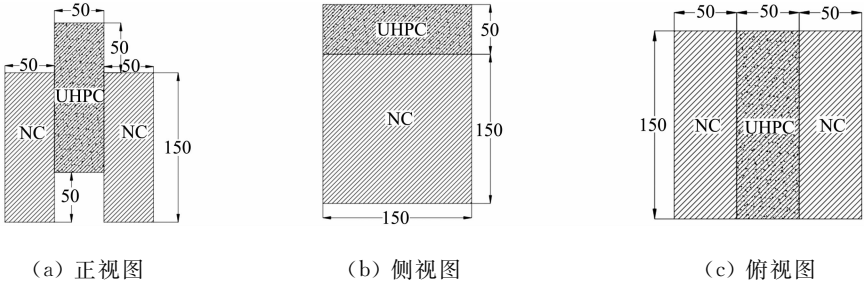


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen dimensions (unit: mm)

9 组试件对应的工况,如表 3 所示。表 3 中: $t_n$  为 NC 龄期; $t_u$  为 UHPC 龄期。试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在上、下端分别粘结了钢板固定,其加载方式与其他试件有所不同。

表 3 9 组试件对应的工况

Tab. 3 Working conditions corresponding to 9 groups of specimens

试件编号	$\varphi/\%$	$t_n/d$	$t_u/d$	试件编号	$\varphi/\%$	$t_n/d$	$t_u/d$	试件编号	$\varphi/\%$	$t_n/d$	$t_u/d$
U7-N14-0	0	14	7	U7-N28-0	0	28	7	U10-N17-0	0	17	10
U7-N14-1	1	14	7	U14-N28-0	0	28	14	U10-N17-1	1	17	10
U7-N14-2	2	14	7	U28-N28-0	0	28	28	U10-N17-2	2	17	10

1.3 测量方案

采取双面直剪试验测定试件的粘结强度。为了准确得到 NC-UHPC 界面的滑移情况,在界面附近的 NC 上端粘结钢片,布置位移计,获得 NC 滑移情况。在界面 UHPC 侧粘结应变片,以测量界面应变情况,加载装置采用电子万能试验机。采用数字图像相关(DIC)技术设备对试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 的界面受力过程进行全程测量。

1.4 试验现象

由于各试件破坏过程相似,以试件 U10-N17-0 为例,对加载破坏过程进行说明,其荷载( $F$ )-位移( $\Delta$ )曲线,如图 2 所示。试件破坏现象,如图 3 所示。

由图 2、3 可知:试验加载初期(点 A),NC-UHPC 界面无明显裂纹,表明此时 NC-UHPC 构件界面还未出现滑移或滑移量很小,其界面应变最大值出现在 NC-UHPC 左侧界面的下侧(图 3(a));随着荷载增加至点 B,NC-UHPC 界面仍然无明显裂纹,应变在 NC-UHPC 两侧界面下侧均达到较大值(图 3(b));随着荷载的进一步加大,在左侧出现微裂缝并迅速增大,但荷载达到峰值点 C 时,右侧界面也出现微小裂缝(图 3(c));随着左侧界面开裂,右侧界面也迅速开裂,最后达到点 D(图 3(d))。

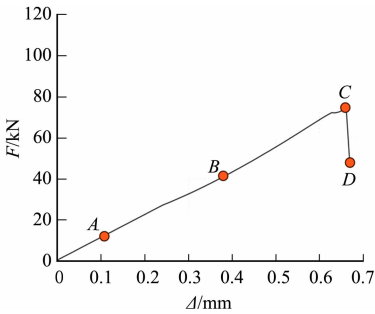
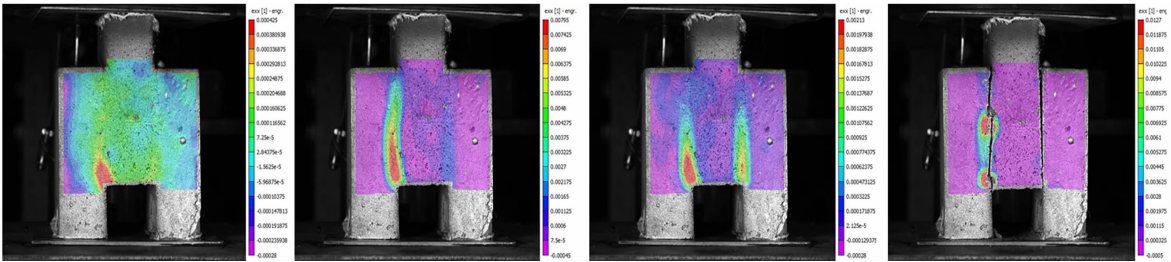


图 2 试件 U10-N17-0 的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of specimen U10-N17-0



(a) 点 A (b) 点 B (c) 点 C (d) 点 D

图 3 试件的破坏现象

Fig. 3 Phenomenon of specimen failure

1.5 荷载-位移曲线

9 组试件的荷载-位移曲线,如图 4 所示。各试件的特征参数,如表 4 所示。表 4 中: $K_G$  为抗剪刚度; $F_n$  为峰值荷载; $\tau_p$  为抗剪强度; $S_n$  为峰值荷载对应的滑移量。

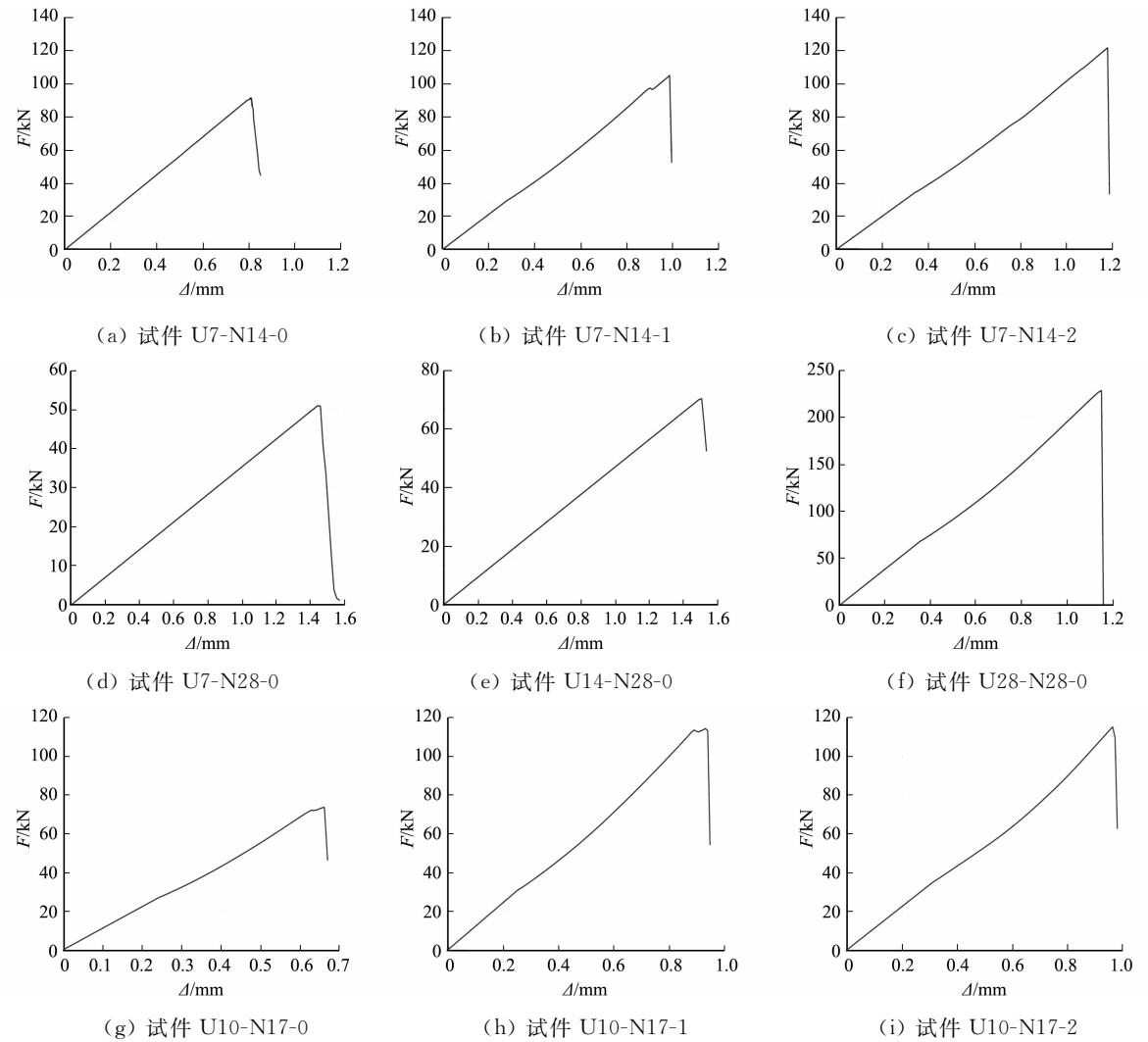


图 4 不同试件的各工况荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of different specimens under various working conditions

由图 4 和表 4 可知:当钢纤维掺量从 0% 增至 2% (试件 U7-N14-0、U7-N14-1 和 U7-N14-2) 时,界面峰值荷载与抗剪强度分别提升 32.9% 和 33.3%,峰值滑移量增加 0.37 mm,但界面刚度下降约 9.6%,表明钢纤维的增韧效应在提升界面承载能力的同时会削弱其刚性;在 NC 龄期均为 28 d 条件下,UHPC 龄期由 7 d 延长至 28 d (试件 U7-N28-0、U14-N28-0 和 U28-N28-0),可使界面刚度提升 61.6%,峰值荷载与抗剪强度分别增大 364.2% 和 363.4%,且峰值滑移量增加 1.26 mm (试件 U28-

N28-0 较试件 U7-N28-0),表明 UHPC 水化进程对界面力学性能具有主导作用;双侧约束试件 U10-N17-0 因钢板限制侧向位移,其峰值荷载较无约束试件 U7-N14-0 提高了 6.2%,但钢纤维掺量为 1%的试件 U10-N17-1 出现刚度与抗剪强度异常,刚度较同组试件 U10-N17-0、U10-N17-2 分别提高了 8.8%和 8.6%,抗剪强度分别提高了 37.0%和 6.1%,推测与约束条件下纤维分布均匀性改善有关。

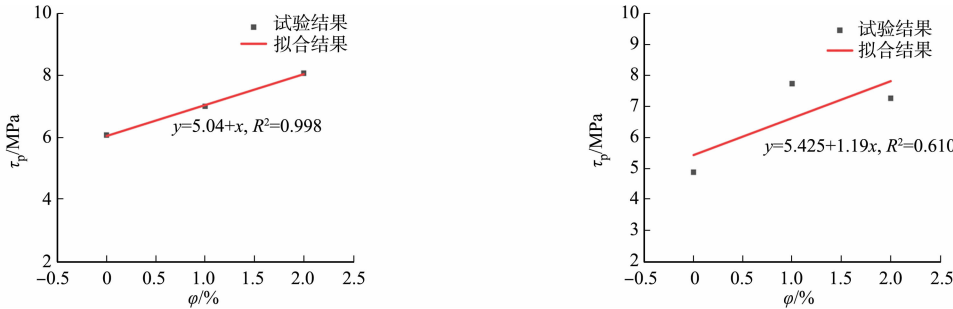
表 4 各试件的特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of each specimen

试件编号	$K_G/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$F_n/\text{kN}$	$\tau_p/\text{MPa}$	$S_n/\text{mm}$	试件编号	$K_G/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$F_n/\text{kN}$	$\tau_p/\text{MPa}$	$S_n/\text{mm}$
U7-N14-0	112.7	91.0	6.07	0.81	U28-N28-0	124.1	235.8	15.71	1.90
U7-N14-1	106.3	105.0	7.00	0.98	U10-N17-0	110.8	73.1	4.87	0.68
U7-N14-2	101.9	121.0	8.07	1.18	U10-N17-1	121.5	111.6	7.73	0.99
U7-N28-0	76.8	50.8	3.39	0.64	U10-N17-2	111.8	114.1	7.26	1.16
U14-N28-0	96.1	68.3	4.55	0.67					

1.6 UHPC-NC 界面抗剪承载力影响因素分析

1.6.1 钢纤维掺量 不同约束条件下的抗剪强度-钢纤维掺量曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:无约束条件下,抗剪强度随着钢纤维掺量增加呈线性增长趋势(图 5(a), $R^2=0.998$ );而双侧约束试件中,钢纤维掺量为 1%试件的抗剪强度异常高于钢纤维掺量为 2%的试件(图 5(b))。这一现象与试件浇筑工艺密切相关,采用先浇筑 NC 基体、后浇筑 UHPC 的分层施工方法,可能导致钢纤维在界面区域的分布受限(尤其高钢纤维掺量时纤维易在 NC 表面堆积),致使纤维桥联效应未能充分发挥,从而削弱了界面抗剪强度的提升效率。

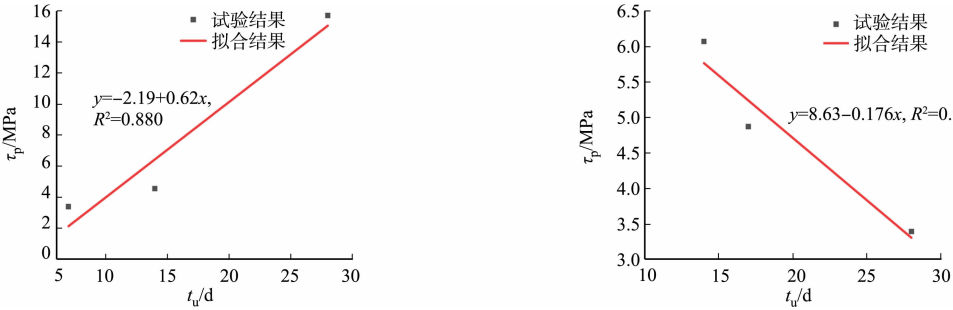


(a) 试件 U7-N14-0、U7-N14-1、U7-N14-2 (b) 试件 U10-N17-0、U10-N17-1、U10-N17-2

图 5 不同约束条件下的试件抗剪强度-钢纤维掺量曲线

Fig. 5 Shear strength-steel fiber content curve of specimens under different constraint conditions

1.6.2 混凝土龄期 进一步分析 UHPC 与 NC 龄期对抗剪强度的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知:UHPC 龄期从 7 d 增至 28 d 时,抗剪强度增长呈现显著线性特征;尽管线性拟合相关系数较低( $R^2=0.880$ ),但龄期 14~28 d 的抗剪强度增幅达 11.16 MPa,是 7~14 d 增幅(1.16 MPa)的 9.62 倍,表明 UHPC 后期水化反应加速了界面过渡区(ITZ)的密实化进程,进而强化了界面力学性能。相比之下,NC 龄期固定为 28 d 时,其抗剪强度发展对界面抗剪性能的贡献趋于稳定。



(a) 试件 U7-N28-0、U14-N28-0、U28-N28-0 (b) 试件 U7-N14-0、U7-N28-0、U10-N17-0

图 6 不同试件的抗剪强度-混凝土龄期曲线

Fig. 6 Shear strength-concrete age curve of different specimens



## 2 NC-UHPC 界面抗剪性能有限元分析

### 2.1 材料及界面本构关系

UHPC 和 NC 采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性 (CDP) 模型, 其压缩拉伸特性采用国家规范 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中提出的单轴受拉和单轴受压本构, 混凝土本构模型应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )曲线, 如图 7 所示。图 7 中:  $f_{c,r}$  为抗压强度;  $\epsilon_{c,r}$  为与峰值压应力相对应的应变;  $\epsilon_{t,r}$  为与峰值拉应力相对应的应变;  $f_{t,r}$  为抗拉强度。

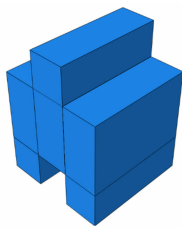
### 2.2 单元选取

NC-UHPC 构件主体部分为 NC 和 UHPC 试块, 因此, 在建模时所选择的单元类型将直接影响计算的准确性和速度, NC 和 UHPC 单元均选用 8 节点 6 面体线性缩减积分单元 (C3D8R) 进行计算。

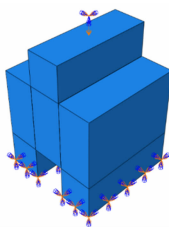
NC-UHPC 界面粘结强度在实际工程中起重要作用。为准确模拟单推荷载下 NC 与 UHPC 界面的粘结-滑移特性, 需要在 NC 与 UHPC 之间建立相应的特殊连接单元来实现粘结-滑移效果。选择 Cohesive 单元进行分析, 本构模型为双线性模型, 为剪切牵引力与裂纹滑动位移的关系, 如图 8 所示。图 8 中:  $\tau$  为剪切牵引力;  $\delta$  为裂纹滑动位移;  $\tau_n$ 、 $\delta_n$  分别为峰值切应力及其对应的滑动位移。

### 2.3 模型建立与网格划分

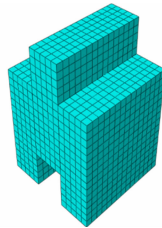
建立几何模型(图 9(a)), 并在试块底部施加固定约束, 在顶部施加位移载荷(图 9(b))。采取结构化网格划分, 为了方便计算, 网格不宜太密, 综合多次试验结果, 网格尺寸选择 10 mm(图 9(c))。试验采用内聚力接触的方法定义接触。定义内聚力接触需要的主要参数包括材料刚度( $K$ )和损伤变量, 均可通过试验数据计算获得。



(a) 几何模型



(b) 边界条件



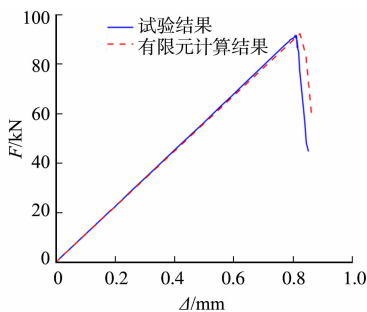
(c) 网格划分

图 9 有限元模型

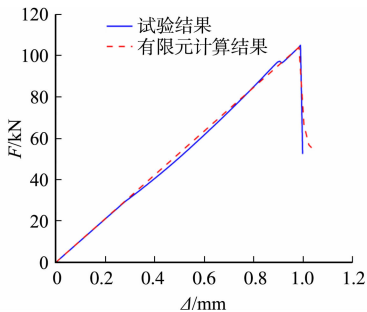
Fig. 9 Finite element model

### 2.4 有限元计算结果与试验结果的对比分析

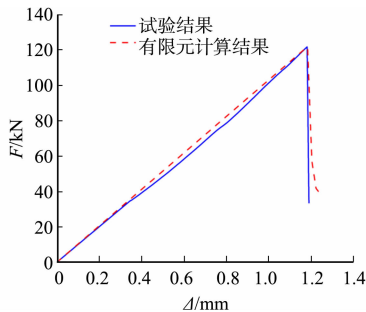
从有限元计算结果中提取荷载-位移曲线, 与试件 U7-N14-0、U7-N14-1、U7-N14-2 和试件 U10-N17-0、U10-N17-1、U10-N17-2 的试验结果进行对比, 如图 10 所示。由图 10 可知: 采用内聚力模型建立的 NC-UHPC 粘结界面有限元模型能较好地模拟其界面的受力发展过程, 其计算得到的承载力误差



(a) 试件 U7-N14-0



(b) 试件 U7-N14-1



(c) 试件 U7-N14-2

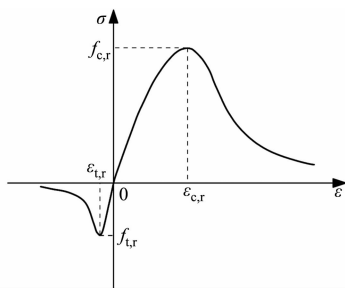


图 7 不同试件的混凝土的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of concrete with different specimens

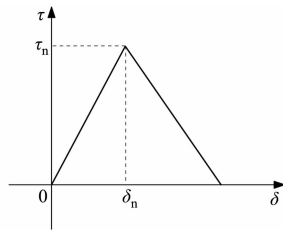


图 8 双线性本构模型

Fig. 8 Bilinear constitutive model

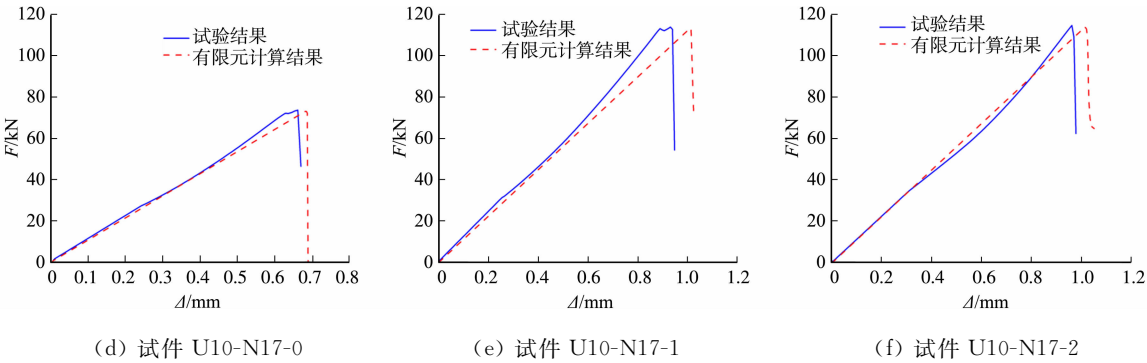
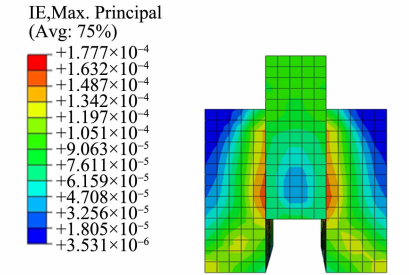


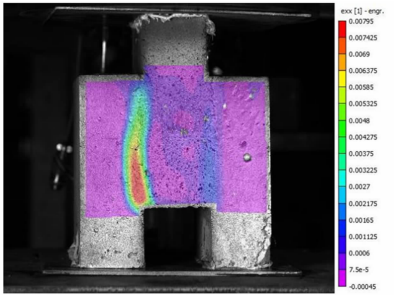
图 10 不同试件的有限元计算结果与试验结果的对比

Fig. 10 Comparison between finite element calculation results and test results of different specimens in 5%以内.

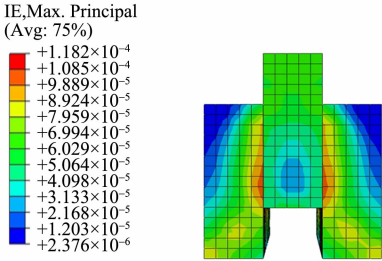
试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 峰值荷载对应应变分布的有限元计算结果与试验结果的对比,如图 11 所示。



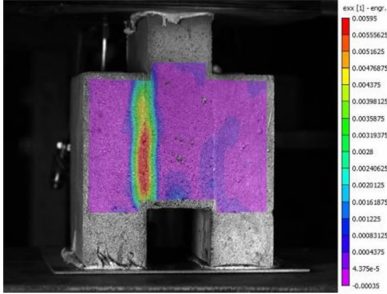
(a) 试件 U10-N17-0 的有限元计算结果



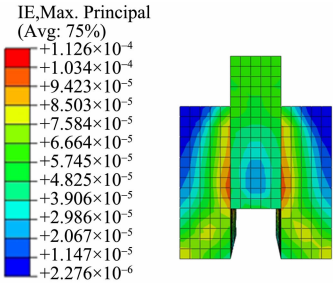
(b) 试件 U10-N17-0 的试验结果



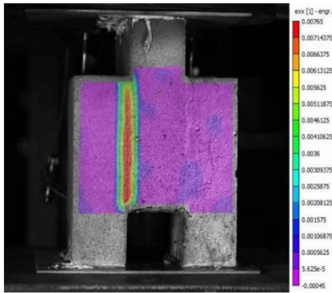
(c) 试件 U10-N17-1 的有限元计算结果



(d) 试件 U10-N17-1 的试验结果



(e) 试件 U10-N17-2 的有限元计算结果



(f) 试件 U10-N17-2 的试验结果

图 11 不同试件的峰值荷载对应应变分布的有限元计算结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison between finite element calculation results and test results of strain distribution under peak load of different specimens

由图 11 可知:采用文中方法得到的峰值荷载有限元计算结果比试验结果小;有限元计算结果应变分布对称,而试验结果应变偏向一侧。产生这种现象的原因是建立的有限元模型为对称模型,而试验因为界面存在初始差异,造成界面一侧达到最大,而另一侧处于相对较小的应变状态。这也说明采用内聚

力模型建立的有限元模型能较好地反映界面整体的受力过程,但无法精确考虑因实际缺陷产生的偏差。

### 3 NC-UHPC 界面抗剪受力分析

#### 3.1 NC-UHPC 界面抗剪粘结应力分布

为了分析普通混凝土与超高性能混凝土之间的相对滑移,参考殷小澍<sup>[16]</sup>的理论分析结果,对新、旧混凝土界面粘结应力进行推导。根据文献[17]研究表明,UHPC-NC 界面粘结应力  $\tau$  在试验荷载上升阶段沿截面位置  $d$  呈现负指数分布,其表达式为

$$\tau(d)=Ae^{-Bd}。 \tag{1}$$

粘结界面任意截面位置  $d$  处的相对滑移  $S(d)$  的计算式为

$$S(d)=S(0)+(k_c-k_s)\frac{1}{B^2}+\left[\frac{1}{B^2L}(k_c-k_s)\times (BLE^{-BL}+2e^{-BL}-2)-\frac{P}{E_cA_c}\right]d-(k_c-k_s)\frac{1}{B^2}e^{-Bd}。 \tag{2}$$

由最小势能原理和平衡方程可以得

$$S(L)=S(0)-\frac{PL}{E_cA_c}+\frac{1}{B^2}(k_c-k_s)\cdot (BLE^{-BL}+e^{-BL}-1), \tag{3}$$

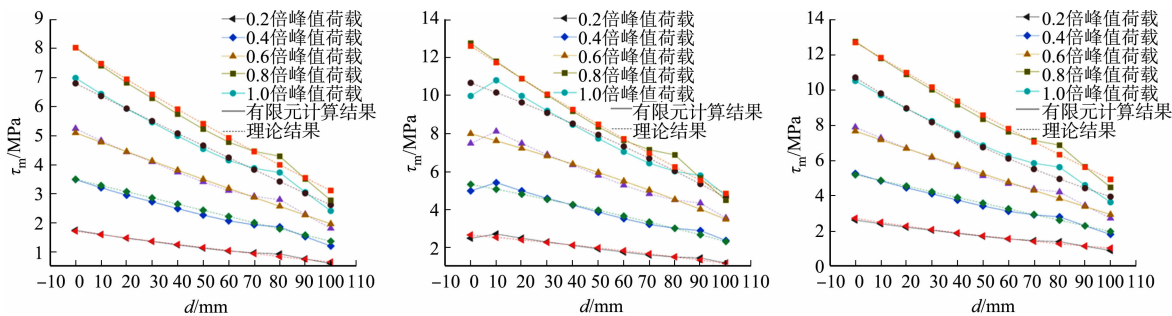
$$P=\frac{C_sA}{B}(1-e^{-BL})。 \tag{4}$$

式(1)~(4)中: $A$ 、 $B$  为待定系数; $P$  为外力荷载; $L$  为粘结长度; $E_c$  为 NC 的弹性模量; $A_c$  为 NC 的横截面积; $C_s$  为粘结面宽度的 2 倍;系数  $k_s=\frac{AC_s}{E_sA_s}$ ,  $k_c=-\frac{AC_s}{E_cA_c}$ , 其中,  $E_s$  为 UHPC 的弹性模量,  $A_s$  为 UHPC 的横截面积。

$S(L)$ 、 $S(0)$  可通过加载端位移计测得,外力荷载  $P$  可通过试验测得,则通过式(3)、(4)可计算得  $A$  和  $B$ ,代入式(1)可得粘结应力分布曲线。

#### 3.2 NC-UHPC 界面粘结应力计算结果与试验结果对比

计算得到试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 倍峰值荷载时的界面粘结应力分布,如图 12 所示。图 12 中: $\tau_m$  为界面粘结应力。由图 12 可知:理论结果与有限元计算结果基本吻合,界面粘结应力沿粘结长度呈现负指数分布;随着外荷载的增大,加载端部的应力增加幅值明显。



(a) 试件 U10-N17-0

(b) 试件 U10-N17-1

(c) 试件 U10-N17-2

图 12 试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在不同峰值荷载时的界面粘结应力分布

Fig. 12 Interface bonding stress distribution of specimens U10-N17-0, U10-N17-1 and U10-N17-2 under different peak loads

将不同试件 DIC 测量得到的 0.6 倍、0.8 倍和 1.0 倍峰值荷载时对应的界面粘结应力分布试验结果与理论结果、有限元计算结果进行对比,如图 13 所示。

由图 13 可知: DIC 测量得到的界面粘结应力分布试验结果与理论结果、有限元计算结果变化趋势相同,但在数值上存在一些差异。产生这种现象的原因主要是试件界面不均匀,试件界面粗糙及微裂缝发展使 DIC 测量存在一定的误差。



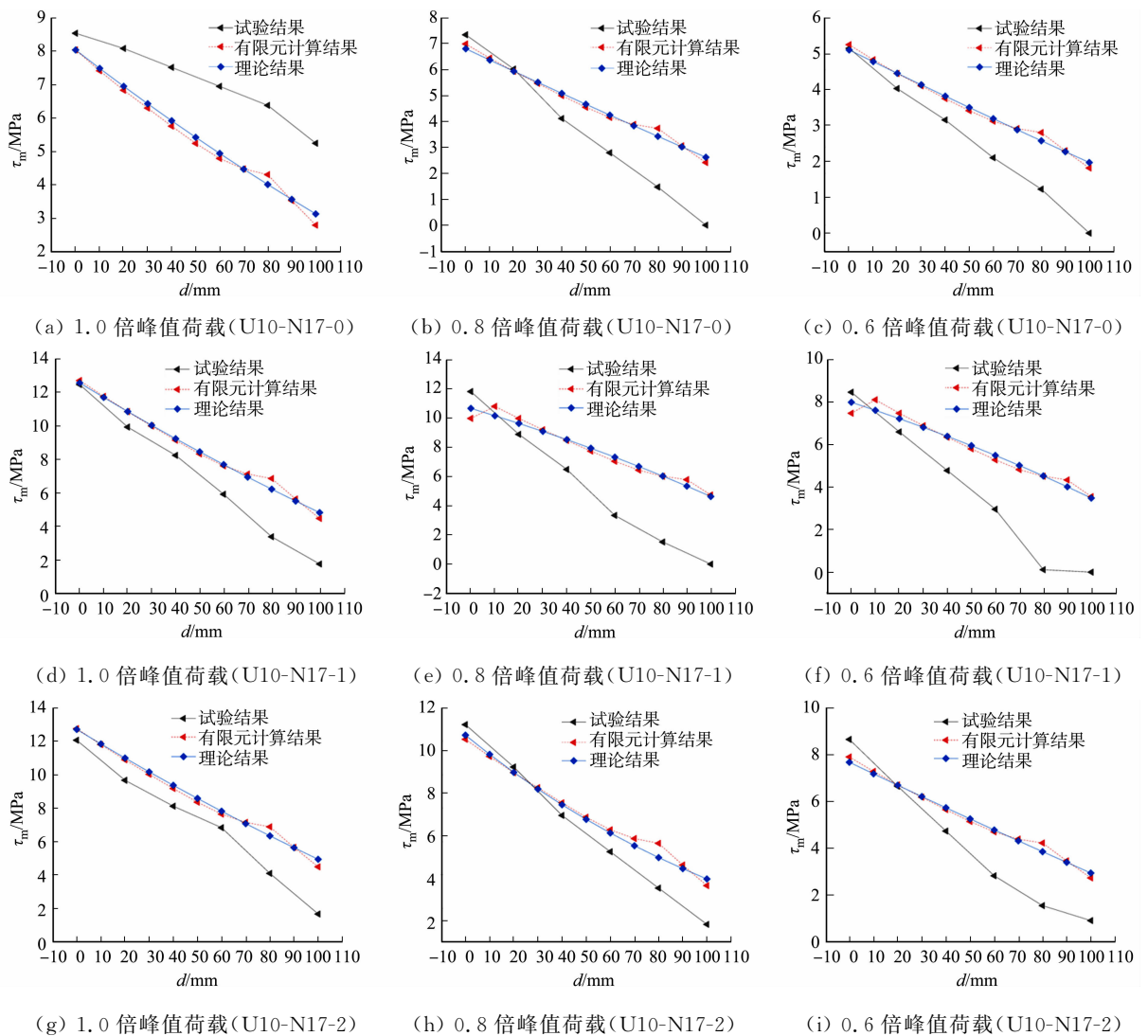


图 13 界面粘结应力分布的试验结果、理论结果和有限元计算结果的对比  
Fig. 13 Comparison of test results, theoretical results and finite element calculation results for interface bonding stress distribution

4 结论

针对新、旧混凝土的抗剪性能进行试验和有限元数值模拟,设计 9 组超高性能混凝土和普通混凝土组合构件的界面剪切试验,分析 UHPC 中钢纤维掺量和混凝土养护龄期对界面抗剪强度的影响。

1) 通过 9 组 NC-UHPC 试件界面剪切试验,研究了超高性能混凝土的钢纤维掺量、混凝土龄期及边界约束条件对界面抗剪性能的影响。结果表明:在无边界约束工况下,当 UHPC 钢纤维掺量为 0%~1%时,试件易发生单面破坏;当 NC 试块下端固定时,试件更易出现双剪破坏;UHPC 钢纤维掺量与界面抗剪强度呈正相关,而界面刚度受钢纤维掺量影响较小;界面刚度随着 UHPC 龄期的增加而增加,但随着 NC 龄期的增加而减小。

2) 在 ABAQUS 有限元软件中采用内聚力模型,建立基于界面性能的 NC-UHPC 试块精细有限元模型,将有限元计算模型和试验得到的荷载-位移曲线进行对比,结果表明,试验结果与有限元计算结果相似,峰值荷载相近,误差较小。将峰值荷载对应的应变云图与 DIC 测量得到的试验结果进行对比发现,因双剪试验两界面存在一定差异,其应变发展并不对称。采用内聚力模型计算得到的界面荷载-位移曲线从宏观上反映了界面的发展,但是无法精确模拟界面因构造差异产生的受力不均匀现象。

3) 以 NC-UHPC 试件的单压试验为基础,基于能量分析的方法,运用 ABAQUS 有限元软件中的

内聚力模型的计算方法,得到弹性范围适用的 NC-UHPC 界面荷载-位移曲线沿粘结界面竖向长度的分布及函数表达式。与内聚力模型计算结果和试验结果进行对比,证明了理论公式的适用性。

## 参考文献:

- [1] 郭进军. 高温后新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
- [2] 叶果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [3] 张雷顺,王二花,闫国新. 植筋法新老混凝土粘结面剪切性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2006,27(3):34-37. DOI:10.3969/j.issn.1671-6833.2006.03.008.
- [4] 邢强. 新旧混凝土界面的连接方法及受力性能研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
- [5] TAYEH B A,BAKAR B H A,JOHARI M A M,*et al.* Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay[J]. Construction and Building Materials,2012,36(6):538-548. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013.
- [6] SEMENDARY A A,HAMID W,KHOURY I,*et al.* Experimental investigation of direct tension bond performance of high-strength concrete and ultrahigh-performance concrete connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019,31(9):04019171. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002800.
- [7] AL-MADANI M K,AL-OSTA M A,AHMAD S,*et al.* Interfacial bond behavior between ultra high performance concrete and normal concrete substrates[J]. Construction and Building Materials,2022,320(7):126229. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.126229.
- [8] BASTIEN-MASSE M,DENARIÉE,BRÜHWILER E. Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers[J]. Cement and Concrete Composites,2016,67(2):111-125. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.01.001.
- [9] HUSSEIN L,AMLEH L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members[J]. Construction and Building Materials,2015,93(3):1105-1116. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.030.
- [10] 党祺. UHPC 加固损伤板受弯性能的研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [11] 王兴旺. UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [12] 田稳苓,宋昭,肖成志,等. 带植筋新老混凝土粘结面剪切试验及有限元模拟分析[J]. 建筑结构,2019,49(23):127-133. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.23.024.
- [13] HARRIS D K,CARBONELL MUÑOZ M A,GHEITASI A,*et al.* The challenges related to interface bond characterization of ultra-high-performance concrete with implications for bridge rehabilitation practices[J]. Advances in Civil Engineering Materials,2015,4(2):75-101. DOI:10.1520/ACEM20140034.
- [14] DIAS-DA-COSTA D,ALFAIATE J,JULIO E. FE modeling of the interfacial behaviour of composite concrete members[J]. Construction and Building Materials,2012,26(1):233-243. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.015.
- [15] FARZAD M,SHAFIEIFAR M,AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and ultra high-performance concrete (UHPC)[J]. Engineering Structures,2019,186:297-305. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.02.030.
- [16] 殷小微. 型钢混凝土粘结-滑移推出试验的理论分析[J]. 结构工程师,2010,26(3):48-53. DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2010.03.008.
- [17] 胡海昌. 弹性力学的变分原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,1981.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)