

DOI:10.11918/202406028

# 试验方法对锈蚀钢筋混凝土黏结性能影响的数值模拟研究

吴洁琼, 张子建, 金 浏, 杜修力

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

**摘要:** 为探究不同试验方法对锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的影响, 对拉拔试验和梁式试验开展数值模拟研究, 分别建立对应的拉拔模型和梁模型, 分析受拉钢筋非均匀锈蚀和约束条件(厚径比和箍筋约束情况)对黏结性能的影响。在数值模型中, 通过对受拉筋及其周围混凝土的精细化建模来模拟机械咬合力, 通过面面接触来反映摩擦力, 忽略化学胶结力, 考虑到受拉钢筋横截面的锈蚀非均质性, 采用两阶段数值分析方法, 即先通过施加强制位移模拟锈蚀对钢筋混凝土界面的影响, 然后再分析锈蚀试件的黏结性能。研究表明: 试验方法对锈蚀试件的破坏模式和黏结应力-滑移曲线有显著影响。梁模型和拉拔模型在发生黏结破坏时均会加深和加宽原有锈胀裂缝, 但梁模型还会产生贯穿黏结区的斜向裂缝; 拉拔模型的黏结强度和下降段斜率明显大于梁模型; 箍筋约束情况对梁模型和拉拔模型黏结强度的影响差别不大, 而厚径比由2.0增加到3.5, 3%锈蚀率时梁模型和拉拔模型黏结强度分别增加了16%和32%。通过与试验结果对比证明了上述数值模型的合理性, 并进一步建立了不同试验方式下黏结强度归一化模型。黏结强度归一化模型计算结果与数值模拟结果吻合较好, 验证了所提出归一化模型的可靠性。

**关键词:** 试验方式; 梁模型; 拉拔模型; 破坏模式; 黏结应力-滑移曲线; 数值模拟

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0070-14

## Numerical simulation study on the influence of experimental methods on the bond performance between corroded rebars and concrete

WU Jieqiong, ZHANG Zijian, JIN Liu, DU Xiuli

(Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education  
(Beijing University of Technology), Beijing 100124, China)

**Abstract:** To investigate the influence of different experimental methods on the bond performance between corroded rebars and concrete, numerical simulations were conducted on pull-out tests and beam tests. Corresponding pull-out and beam models were established, and the effects of non-uniform corrosion of tensile rebars and confinement conditions (thickness-diameter ratio and stirrup confinement) on bond performance were analyzed. In the numerical models, mechanical interlocking forces were simulated by fine modeling of the tensile rebar and the surrounding concrete, while frictional forces were reflected through face-to-face contact ignoring chemical bond forces. The corrosion heterogeneity within the cross-section of tensile rebar was also considered. A two-stage numerical analysis method was adopted, in which the influence of corrosion on the bond behavior between the rebars and the concrete interface was simulated by applying enforced displacements and then the bond performance of corroded specimens was analyzed. The results show that the experimental methods have a significant impact on the failure mode and bond stress-slip curve of the corroded specimens. The existing corrosion-induced cracks are deepened and widened in both the beam and pull-out models when the bond failure occurs, but the beam model also generates diagonally traversing cracks throughout the bond area. The bond strength and descending segment slope in the pull-out model are significantly greater than those in the beam model. Stirrups barely influence the bond strength. As the thickness-diameter ratio increases from 2.0 to 3.5, the bond strength in the beam model and pull-out model increases by 16% and 32% respectively at 3% corrosion rate. After demonstrating the validity of the aforementioned numerical model through comparing numerical results with experimental results, a normalized

收稿日期: 2024-06-13; 录用日期: 2024-08-16; 网络首发日期: 2025-06-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250605.1558.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52108106); 北京市杰出青年科学基金(JQ22025)

作者简介: 吴洁琼(1993—), 女, 校聘教授, 博士生导师; 金 浏(1985—), 男, 教授, 博士生导师; 杜修力(1962—), 男, 教授, 中国工程院院士

通信作者: 金 浏, jinliu@bjut.edu.cn

model was established for bond strength applicable to different test methods. Subsequently, comparison between the results calculated by this normalized bond strength model and those obtained from numerical simulations reveals good agreement, thereby confirming the reliability of the proposed normalized model.

**Keywords:** experimental method; beam model; pull-out model; failure mode; bond stress-slip curve; numerical simulation

钢筋与混凝土界面间良好的黏结作用是保证钢筋混凝土(简称“RC”)结构正常工作的前提,RC构件在各种荷载工况下的承载能力、刚度和变形能力都与界面黏结行为密切相关<sup>[1]</sup>。近几十年来,世界范围内大量钢筋混凝土结构受到腐蚀威胁,每年造成巨大的直接和间接损失<sup>[2-3]</sup>,钢筋锈蚀会影响钢筋与混凝土的接触面积以及接触面间的摩擦,导致黏结性能发生退化<sup>[1]</sup>,且大量试验或理论研究证实,黏结劣化是导致整体结构性能下降和使用寿命缩短的主要原因<sup>[4-8]</sup>。因此,对锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的研究具有重要的意义。

钢筋与混凝土间黏结性能研究的试验方法主要有拉拔试验、梁式试验和梁端式试验<sup>[9-10]</sup>。拉拔试验因其试件制作简单、加载方便等特性是应用最为广泛的试验方法,然而拉拔试验中钢筋受拉混凝土受压,这与大部分实际工程结构中的黏结应力状态不符,因此基于拉拔试验的黏结强度不适合直接应用于工程设计,仅适合黏结性能影响因素的定性研究<sup>[10]</sup>。梁式试验可以反应实际结构的黏结应力状态,是一种较为理想的黏结试验方法,可以很好地反映剪跨区剪力、弯矩对黏结性能的影响;与拉拔试件相比,梁式试件制作比较复杂,且需要配置大量箍筋以防止剪切破坏<sup>[10]</sup>。梁端式试验,又称半梁式试验,是梁式试验的另一种试验形式,适用于研究剪跨区钢筋的黏结锚固问题;与梁式试件相比,梁端式试件的制作得以简化<sup>[10]</sup>,但若梁端式试件的几何尺寸、竖向及水平约束位置、黏结长度等参数设计不当,会出现剪切破坏或不充分的黏结破坏等情况<sup>[9]</sup>;基于梁端式试件开展黏结试验的研究目前还较少<sup>[10]</sup>。国内外现行规范中,ACI 408R-03<sup>[11]</sup>、ACI 318-19<sup>[12]</sup>、Eurocode 2<sup>[13]</sup>和 Model Code 2010<sup>[14]</sup>关于钢筋与混凝土黏结性能的规定是基于梁式试验,而 GB50010-2010<sup>[15]</sup>则是基于拉拔试验。与此同时,现有关于钢筋与混凝土黏结性能的研究中,文献[6,16-21]采用拉拔试验来研究箍筋、厚径比和锈蚀等因素的影响,而文献[22-26]则采用梁式试验来分析上述因素的影响。可见,现行规范和现有研究中采用的钢筋与混凝土黏结性能试验方法并不统一,需探究不同试验方法对钢筋与混凝土黏结性能的影响。

文献[27]指出,影响锈蚀钢筋与混凝土黏结强度的主要因素有混凝土强度、钢筋锈蚀率、钢筋种类、箍筋、保护层厚度与钢筋直径的比值(即厚径比)等。一方面,文献[6,19-20]采用拉拔试验探究了厚径比和箍筋约束情况对锈蚀钢筋与混凝土黏结强度的影响。Wu等<sup>[20]</sup>通过对不同厚径比(1.00、1.25、1.56、2.08)和锈蚀水平的构件进行拉拔试验,发现厚径比较大的试件在出现裂缝前,其黏结强度随着锈蚀率增大而增大,而厚径比较小试件的黏结强度随着锈蚀率的增加而不断减小。Tian等<sup>[19]</sup>通过3种不同腐蚀速率、不同厚径比(1.75、2.25、2.75)以及不同箍筋间距(0、100、150 mm)下RC试件的拉拔试验,得到黏结强度的经验公式。Konstantinos等<sup>[6]</sup>的拉拔试验表明在锈蚀率为8.5%的条件下,箍筋间距为240 mm的构件黏结强度比未锈蚀时下降了60%,而箍筋间距为120 mm的构件黏结强度比未锈蚀时下降32%。另一方面,文献[22-24]则采用梁式试验探究了厚径比和箍筋约束情况对锈蚀钢筋与混凝土黏结强度的影响。Lin等<sup>[23]</sup>为研究箍筋和锈蚀对黏结强度的影响,对箍筋间距分别为150、100、70 mm的锈蚀梁试件进行了黏结试验,研究发现,箍筋对锈蚀开裂混凝土的约束起着重要作用,且有箍筋试件的黏结强度通常比无箍筋的大。卫军等<sup>[22]</sup>通过配有箍筋的梁式试件来研究锈蚀钢筋与混凝土黏结性能,研究发现箍筋对混凝土的横向约束作用对于改善黏结性能作用明显,黏结强度大幅增强。何化南等<sup>[24]</sup>对微锈蚀梁式试件进行黏结性能研究,试验得到了试件在不同厚径比(1.5、2.5)下的黏结强度,结果表明厚径比的增加加强了钢筋与混凝土之间的黏结性能。然而,已有研究大多只探究在某一试验方法下,厚径比、箍筋约束情况对锈蚀钢筋与混凝土间黏结强度的影响,尚需进一步探究在不同试验方法下,厚径比、箍筋约束情况对锈蚀钢筋与混凝土黏结强度影响的差异,以及在两种试验方法下黏结强度是否具有转化关系。

因此,本文通过对锈蚀钢筋与混凝土黏结性能研究的梁式试验和拉拔试验进行数值模拟研究,分析两种试验方法下破坏模式和黏结性能之间的区别,以及在两种试验方法下,厚径比、箍筋约束情况对锈蚀钢筋与混凝土黏结强度的影响,并建立相同

条件下,两种试验方法下试件的黏结强度转化公式。

### 1 模型建立及验证

#### 1.1 几何模型

为研究不同试验方法下锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的区别,对锈蚀钢筋与混凝土黏结性能研究的梁式试验和拉拔试验进行数值模拟研究,分别建立了三维有限元梁式试件模型(简称“梁模型”)和拉拔试件模型(简称“拉拔模型”)。一方面,基于本课题组前期研究<sup>[25]</sup>中开展的梁式试验,建立锈蚀钢筋与混凝土黏结性能研究的梁模型。试件尺寸和配筋见图 1。其中,混凝土由普通硅酸盐水泥制成,混

土立方体 28 d 抗压强度为 42 MPa,受拉钢筋为直径 20 mm 的变形钢筋,其屈服强度和极限强度分别为 450 和 653 MPa,箍筋采用 HPB300 的光圆钢筋,直径为 8 mm。钢筋与混凝土黏结长度为 150 mm,并在非黏结区的钢筋外套 PVC 管,使这部分钢筋与混凝土实现无黏结。另一方面,基于 Coccia 等<sup>[28]</sup>的拉拔试验,建立拉拔模型,试件尺寸和配筋见图 2。其中,混凝土由普通硅酸盐水泥制成,混凝土立方体 28 d 抗压强度为 29 MPa。受拉钢筋为直径 12 mm 的变形钢筋,其屈服强度和极限强度分别为 450 和 507 MPa。钢筋与混凝土黏结长度为 70 mm,并通过 PVC 套管在试件两端 40 mm 处设置非黏结区。

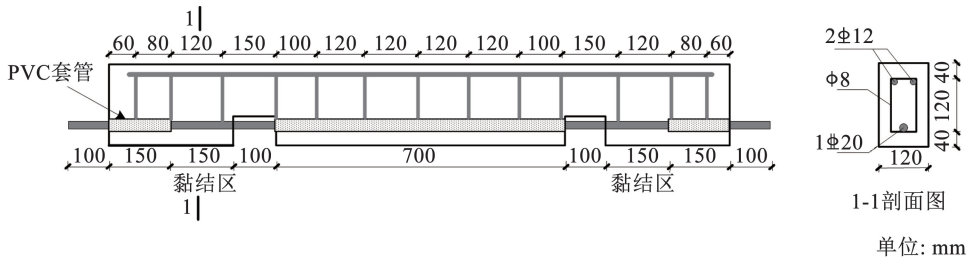


图 1 梁式试件尺寸

Fig. 1 Dimensions of beam specimens

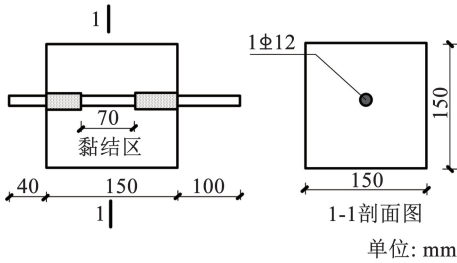
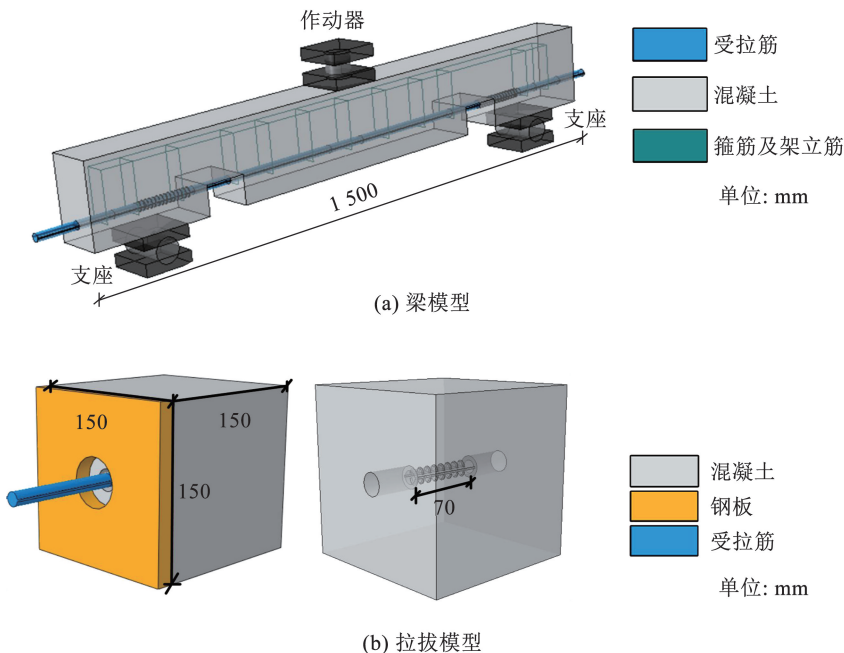


图 2 拉拔试件尺寸

Fig. 2 Dimensions of pull-out specimens

建立如图 3 所示的梁模型与拉拔模型。其中,混凝土部分采用宏观模型,线性四面体单元,为避免网格敏感性对数值模拟结果的影响,两种模型采用 3 种不同网格尺寸进行计算,分别为 4、6、8 mm。梁模型与拉拔模型均通过混凝土模型与带肋钢筋模型进行布尔运算,从而得到黏结区混凝土内部螺纹。



(b) 拉拔模型

图 3 3D 模型

Fig. 3 3D model

为更好反映混凝土与带肋钢筋界面间的黏结关系,对受拉钢筋进行分区域建模,具体为对黏结区钢筋进行精细化建模,即建立钢筋的横肋和纵肋,而非黏结区的钢筋则不对横肋建模,见图4。带肋钢筋采用线性四面体单元,同样采用3种不同网格尺寸,分别为4、6、8 mm。文献[25]和文献[28]的试件中受拉钢筋的直径分别为20和12 mm,参照国家标准GB 1499.2—2018<sup>[29]</sup>,横肋和纵肋的相关参数见表1。与此同时,文献[22]研究证实,钢筋混凝土梁中的受拉钢筋锈蚀具有不均匀性,即相较于距离混凝土保护层远侧的钢筋表面,距离保护层近侧的钢筋表面锈蚀更严重。参照文献[30]的研究,对不均匀锈蚀钢筋进行建模,见图5。将钢筋在横肋处分为混凝土保护层远侧钢筋(以下简称“F钢筋”)和混凝土保护层近侧钢筋(以下简称“N钢筋”),且在95%

置信区间内,F钢筋锈蚀率( $\eta_F$ )和N钢筋锈蚀率( $\eta_N$ )之比 $m$ 为<sup>[30]</sup>:

$$m = \frac{\eta_N}{\eta_F} = -0.014(\pm 0.004)\eta + 1.48(\pm 0.02) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\eta_F + \eta_N}{2} \quad (2)$$

结合式(2),可分别计算出文献[30]中N钢筋和F钢筋的锈蚀率。锈蚀后钢筋的半径及其肋的尺寸可根据以下公式计算<sup>[31]</sup>:

$$\delta = 1 - \sqrt{1 - \eta} \quad (3)$$

$$R_\eta = (1 - \delta)R_0 \quad (4)$$

$$L_{x_\eta} = (1 - \delta)L_{x_0} = L_{x_0}\sqrt{1 - \eta} \quad (5)$$

式中: $\delta$ 为尺寸减小率, $R_0$ 和 $R_\eta$ 为钢筋锈蚀前后的半径, $L_{x_0}$ 和 $L_{x_\eta}$ 为钢筋锈蚀前后肋的尺寸。

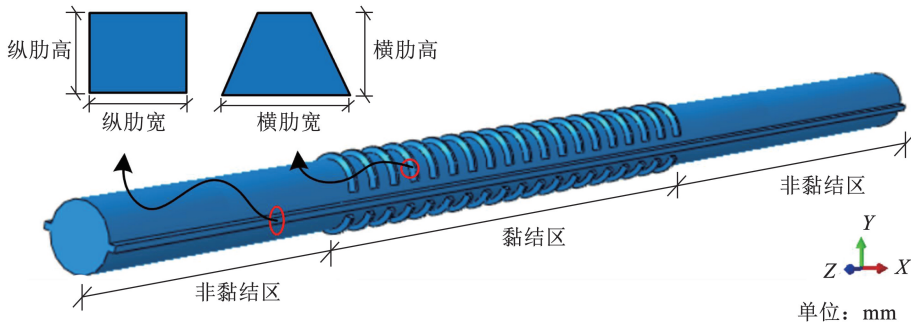


图4 带肋钢筋模型

Fig. 4 Ribbed rebar model

表1 钢筋肋的尺寸

Tab. 1 Size of rebar ribs

mm

参考文献	钢筋直径	横肋高	横肋宽	纵肋高	纵肋宽	肋间距
文献[25]	20.0	1.7	1.2	2.1	2.0	10.0
文献[28]	12.0	1.2	0.7	1.6	1.5	8.0

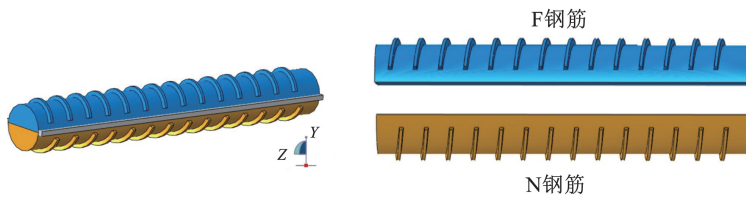


图5 黏结区中受拉钢筋

Fig. 5 Tensile rebar in the bond area

吴洁琼等<sup>[25]</sup>的研究中不均匀锈蚀钢筋的半径及其肋尺寸见表2。Coccia等<sup>[28]</sup>研究中受拉钢筋为均匀锈蚀,即 $\eta_N = \eta_F$ ,锈蚀钢筋半径及其肋尺寸如表3所示。

## 1.2 本构模型

混凝土材料采用塑性损伤本构(图6),即假定混凝土只发生拉伸和压缩破坏,拉伸和压缩引起的材料刚度退化可以通过损伤变量进行描述<sup>[31-32]</sup>。

表 2 锈蚀钢筋半径及其肋尺寸<sup>[25]</sup>

Tab. 2 The radius and rib size of corroded rebars<sup>[25]</sup>

H/%	$\eta_N$ 和 $\eta_F$ /%	$R_\eta$ /mm	横肋高/mm	横肋宽/mm	纵肋高/mm	纵肋宽/mm
2.6	2.0( $\eta_F$ )	19.80	1.68	1.19	2.08	1.98
	3.0( $\eta_N$ )	19.70	1.65	1.18	2.06	1.97
3.0	2.5( $\eta_F$ )	19.75	1.68	1.18	2.07	1.97
	3.5( $\eta_N$ )	19.65	1.67	1.18	2.06	1.96
5.3	4.4( $\eta_F$ )	19.56	1.66	1.17	2.05	1.96
	6.2( $\eta_N$ )	19.37	1.65	1.16	2.03	1.94
6.2	5.3( $\eta_F$ )	19.46	1.65	1.17	2.04	1.95
	7.1( $\eta_N$ )	19.28	1.64	1.16	2.02	1.93
10.3	8.8( $\eta_F$ )	19.10	1.62	1.15	2.00	1.91
	11.8( $\eta_N$ )	18.78	1.60	1.13	1.97	1.88
8.3	7.0( $\eta_F$ )	19.29	1.64	1.16	2.03	1.93
	9.6( $\eta_N$ )	19.02	1.62	1.14	2.00	1.90

表 3 锈蚀钢筋半径及其肋尺寸<sup>[28]</sup>

Tab. 3 The radius and rib size of corroded rebars<sup>[28]</sup>

H/%	$(\eta_N/\eta_F)$ /%	$R_\eta$ /mm	横肋高/mm	横肋宽/mm	纵肋高/mm	纵肋宽/mm
0.46	0.46	11.97	1.20	0.70	1.60	1.50
0.80	0.80	11.95	1.20	0.70	1.59	1.49
3.92	3.92	11.76	1.18	0.69	1.57	1.47
6.96	6.96	11.57	1.16	0.68	1.54	1.45

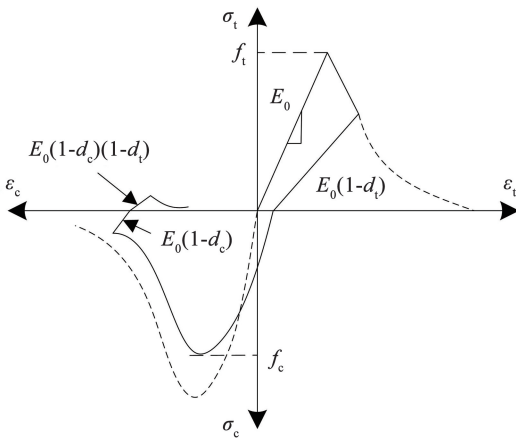


图 6 混凝土塑性损伤模型

Fig. 6 Concrete plastic damage model

材料在单轴拉伸和压缩作用下应力-应变关系为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (6)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (7)$$

式中： $\varepsilon_t$ 和 $\varepsilon_c$ 分别为单轴拉伸时应变和单轴压缩时应变， $\sigma_t$ 和 $\sigma_c$ 分别为单轴拉伸时应力和单轴压缩时应力， $d_t$ 和 $d_c$ 分别为拉伸损伤变量和压缩损伤变量，其变化范围为0~1， $E_0$ 为材料初始弹性模量， $\varepsilon_t^{pl}$ 和 $\varepsilon_c^{pl}$ 分别为单轴拉伸和压缩下的等效塑性应变。

钢筋本构采用图 7 所示的双折线模型<sup>[33-35]</sup>。

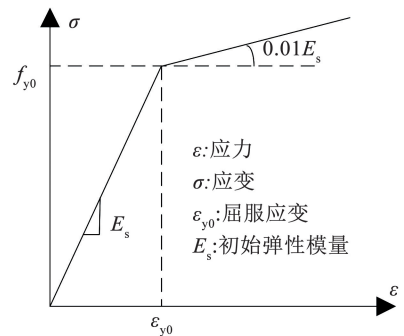


图 7 钢筋本构模型

Fig. 7 Rebar constitutive model

锈蚀会引起钢筋强度降低<sup>[36]</sup>，参考文献[37]中研究，锈蚀钢筋的强度折减为

$$f_{yc} = (1 - 1.074 7\eta) f_{y0} \quad (8)$$

式中 $f_{yc}$ 和 $f_{y0}$ 分别为锈蚀钢筋和未锈蚀钢筋的屈服强度。

### 1.3 接触设置

带肋钢筋与混凝土的黏结作用由 3 部分组成：机械咬合力、摩擦力以及化学胶结力<sup>[31]</sup>。试验表明，钢筋与混凝土之间的化学胶结力在 0.4~0.8 MPa，且一旦钢筋与混凝土发生相对滑移，化学胶结力就会失效<sup>[38]</sup>。因此，对于带肋钢筋与混凝土的黏结作

用,本文只考虑机械咬合力和摩擦力。将钢筋与混凝土的接触面设置为面面接触<sup>[38]</sup>。法向设置为硬接触,即钢筋横肋与肋间混凝土可以传递压力,但不会发生模型间的穿透行为,以实现横肋与肋间混凝土的机械咬合作用。切向设置罚摩擦,即钢筋混凝土接触表面的法向压力与摩擦系数 $\mu$ 的乘积为最大摩擦力。通过改变摩擦系数 $\mu$ ,可以改变钢筋与混凝土之间的切向摩擦力。钢筋锈蚀以后,锈蚀产物会充斥在钢筋与混凝土接触面之间,减小钢筋与混凝土间的摩擦,因此不同锈蚀率下的摩擦系数 $\mu$ 可以通过下式确定<sup>[39]</sup>:

$$\mu(x) = 0.37 - 0.26(x - x_{cr}) \quad (9)$$

式中: $x$ 为钢筋锈蚀深度( $x = \delta \cdot R_0$ ), $x_{cr}$ 为混凝土锈蚀胀开裂时钢筋的锈蚀深度,计算式为<sup>[38]</sup>

$$x_{cr} = 0.012c/d + 0.00084f_{cuk} + 0.018 \quad (10)$$

式中: $c$ 为保护层厚度, $d$ 为钢筋初始直径, $f_{cuk}$ 为混凝土强度标准值。

在非黏结区,PVC套管的存在限制了钢筋与混凝土之间的摩擦力和机械咬合作用。因此,在切向上将钢筋与混凝土之间的接触表面设定为无摩擦。与此同时,力仍然可以在法向上在钢筋和混凝土之间传递,因此根据Liu等<sup>[31]</sup>的研究,在钢筋与混凝土接触面的法向设定为硬接触。

#### 1.4 荷载及边界条件

本模型分为两阶段进行运算:1)钢筋锈蚀阶段;2)黏结性能测试阶段。

阶段1:通过对黏结区钢筋周围的混凝土表面施加强制位移,来模拟锈蚀产物对混凝土产生的锈胀作用。钢筋锈蚀时产生的锈蚀产物会导致钢筋与混凝土接触界面的位置发生变化,表现为钢筋截面面积改变以及混凝土产生径向位移,锈胀位移计算公式<sup>[38]</sup>为

$$u = \eta r(\rho - 1)/2 - \delta_0 \quad (11)$$

式中: $u$ 为混凝土径向位移, $r$ 为钢筋半径, $\rho$ 为钢筋锈蚀产物的膨胀率, $\rho = 3^{[40]}$ , $\delta_0$ 为钢筋与混凝土空隙过渡区(VTZ)的厚度,取 $\delta_0 = 12.5 \mu\text{m}^{[41]}$ 。将式(11)计算得到的锈胀位移强制添加到混凝土与钢筋接触的表面上来模拟锈胀的作用(图8)。

阶段2:对阶段1发生锈胀开裂的钢筋混凝土构件进行黏结性能测试。如图9(a)所示,拉拔模型中,将混凝土试块前面的垫板完全固定( $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向不能平移及转动),在钢筋加载端施加 $z$ 轴方向的位移荷载(静态加载)。在梁模型中(图9(b)),两

端边界条件为一端简支一端滑动,在梁跨中施加位移荷载(静态加载)。

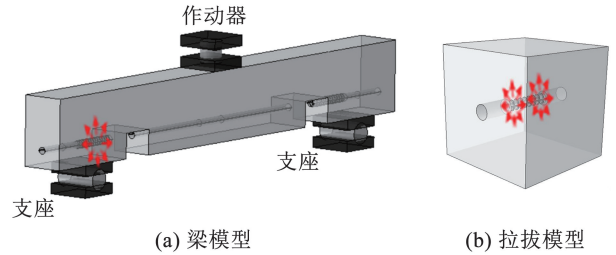


图8 锈胀膨胀作用示意

Fig. 8 Schematic diagram of corrosion expansion effect

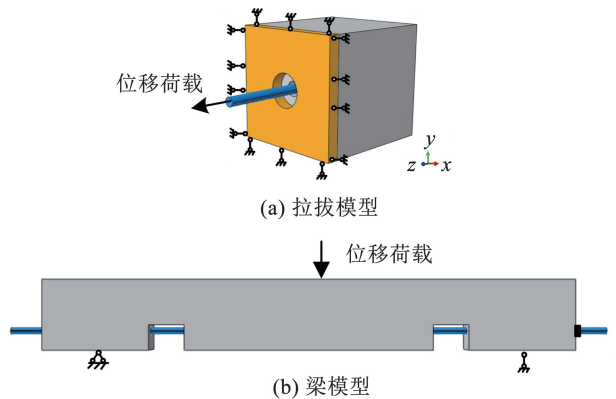


图9 黏结性能测试

Fig. 9 Bond performance test

#### 1.5 模型验证

在有限元软件中分析连续损伤问题,需要分析网格敏感性<sup>[31]</sup>。本文分析了4、6、8 mm的网格尺寸。图10分别给出了梁模型和拉拔模型在4、6、8 mm网格尺寸下的黏结应力-滑移曲线,可以看到网格尺寸对梁模型和拉拔模型的黏结应力-滑移曲线的上升段和黏结强度基本无影响。然而,不同的网格尺寸显著影响了黏结应力-滑移曲线的下降段,这与Grassl等<sup>[42]</sup>的研究结果一致。具体而言,4和6 mm的网格尺寸下,得到的下降段结果与试验结果(图10中的红线)差别不大,而8 mm的网格尺寸模拟得到的结果与试验结果差别较大。因此,考虑计算效率,在后续的数值计算中将网格尺寸设置为6 mm。

图11和图12分别给出了拉拔模型和梁模型的破坏模式和黏结应力-滑移曲线与Coccia等<sup>[28]</sup>和吴洁琼等<sup>[25]</sup>试验结果的对比,其中图11为与文献[28]进行验证的结果,图12为与文献[25]进行验证的结果。由图11和图12可知,模拟结果与试验结果吻合良好,验证了本文建模方法的可靠性。

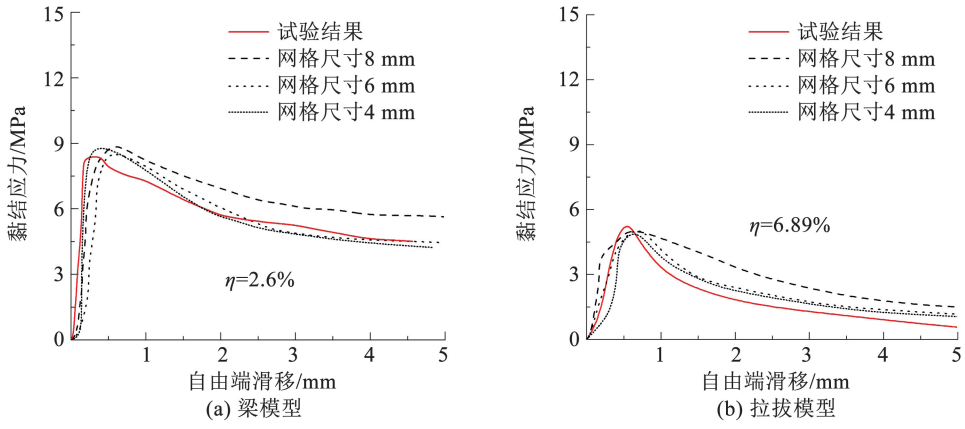


图 10 不同网格尺寸下的黏结应力-滑移曲线

Fig. 10 The bond stress-slip curve at different mesh sizes

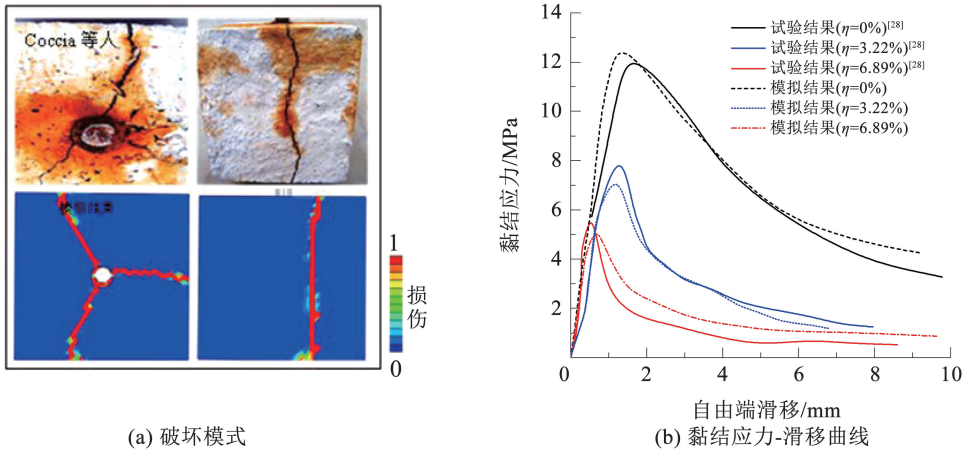
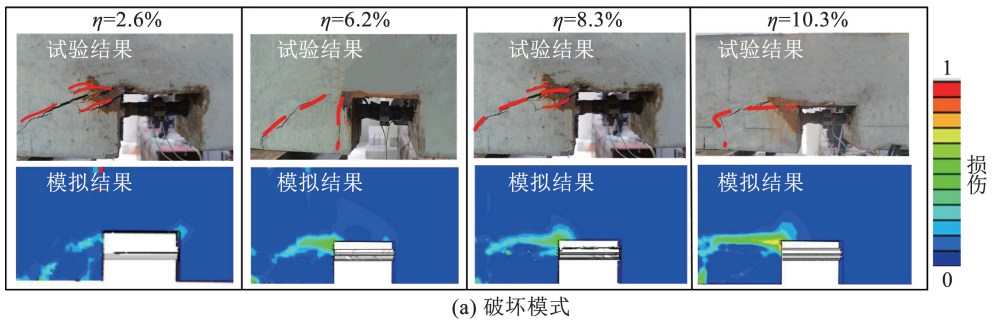
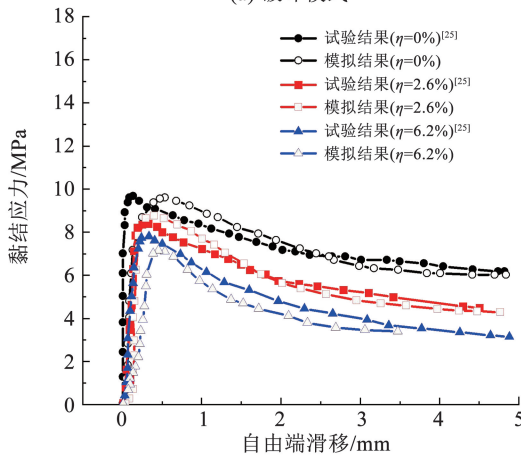


图 11 破坏模式及黏结-滑移曲线

Fig. 11 Failure mode and bond stress-slip curve



(a) 破坏模式



(b) 黏结应力-滑移曲线

图 12 破坏模式及黏结-滑移曲线

Fig. 12 Failure mode and bond stress-slip curve

## 2 参数分析

本文将采用 1.1 小节中的建模方法对锈蚀钢筋进行建模, 建立梁模型和拉拔模型, 分析厚径比、箍筋约束情况和纵筋锈蚀对其黏结性能的影响。其中, 箍筋约束情况通过箍筋约束指数  $\rho_{st}$  来表示<sup>[23]</sup>:

$$\rho_{st} = A_{st} / cS_{st} \quad (12)$$

式中:  $A_{st}$  为箍筋穿过开裂面的横截面积,  $S_{st}$  为箍筋间距。

图 13、图 14 分别为梁模型和拉拔模型尺寸图。表 4 给出了梁模型和拉拔模型各参数取值, 以及模型黏结区的横截面图。

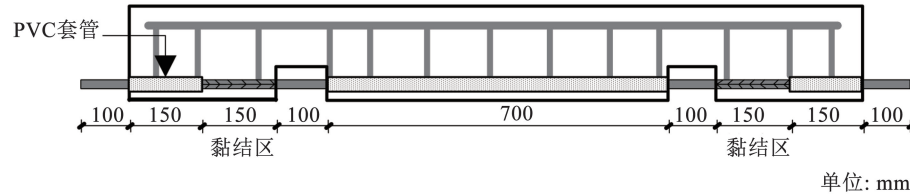


图 13 梁模型尺寸

Fig. 13 Dimension of beam model

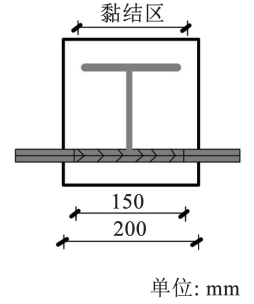


图 14 拉拔模型尺寸

Fig. 14 Dimension of pull-out model

表 4 A ~ F 组梁模型和拉拔模型参数取值

Tab. 4 Parameter values for A ~ F group beam model and pullout model

梁模型	拉拔模型	$\eta/\%$	梁模型	拉拔模型	$\eta/\%$	$c/d$	$\rho_{st}/\%$	横截面/mm
A <sub>11</sub>	A <sub>21</sub>	0	B <sub>13</sub>	B <sub>23</sub>	5	2.00	0	
B <sub>11</sub>	B <sub>21</sub>	1	B <sub>14</sub>	B <sub>24</sub>	7	—	—	—
B <sub>12</sub>	B <sub>22</sub>	3	B <sub>15</sub>	B <sub>25</sub>	10	—	—	—
C <sub>11</sub>	C <sub>21</sub>	0	D <sub>11</sub>	D <sub>21</sub>	3	2.25	0	
C <sub>12</sub>	C <sub>22</sub>	—	D <sub>12</sub>	D <sub>22</sub>	—	2.50	—	
C <sub>13</sub>	C <sub>23</sub>	—	D <sub>13</sub>	D <sub>23</sub>	—	2.75	—	
C <sub>14</sub>	C <sub>24</sub>	—	D <sub>14</sub>	D <sub>24</sub>	—	3.00	—	

表 4(续)

梁模型	拉拔模型	$\eta/\%$	梁模型	拉拔模型	$\eta/\%$	$c/d$	$\rho_{st}/\%$	横截面/mm
C <sub>15</sub>	C <sub>25</sub>	—	D <sub>15</sub>	D <sub>25</sub>	—	3.50	—	
E <sub>11</sub>	E <sub>21</sub>	0%	F <sub>11</sub>	F <sub>21</sub>	3%	2.00	0.47%	
E <sub>12</sub>	E <sub>22</sub>	—	F <sub>12</sub>	F <sub>22</sub>	—	—	0.84%	
E <sub>13</sub>	E <sub>23</sub>	—	F <sub>13</sub>	F <sub>23</sub>	—	—	1.68%	
E <sub>14</sub>	E <sub>24</sub>	—	F <sub>14</sub>	F <sub>24</sub>	—	—	2.51%	
E <sub>15</sub>	E <sub>25</sub>	—	F <sub>15</sub>	F <sub>25</sub>	—	—	3.35%	

2.1 破坏模式

为了便于比较梁模型与拉拔模型在黏结区混凝土侧表面的破坏模式,梁模型混凝土的破坏模式只截取图 15 所示部分。图 16 给出了 A 组中,梁模型 A<sub>11</sub>与拉拔模型 A<sub>21</sub>在黏结区的破坏模式,可见锈蚀率为 0% 时,梁模型与拉拔模型的破坏模式不同。在黏结区混凝土侧面,梁模型形成了贯穿黏结区混凝土的斜向的损伤,加载端损伤集中于受拉筋上侧的混凝土,之后损伤逐渐向混凝土下表面延伸。而拉拔模型损伤集中在钢筋周围并向混凝土表面扩展,且黏结区混凝土侧面没有斜向损伤。图 17 给出了锈蚀钢筋混凝土拉拔模型与梁模型的锈胀开裂模式以及黏结破坏模式,可见,锈蚀后的拉拔模型在发生黏结破坏时,裂缝是在锈胀开裂产生的裂缝基础上继续加深和延伸,这与陈留国等<sup>[43]</sup>的试验结果一致。而锈蚀后梁模型在发生黏结破坏时,不仅会加深原有的钢筋锈蚀膨胀产生的裂缝,还会产生与未

锈蚀时一样的贯穿混凝土黏结区的斜向裂缝。

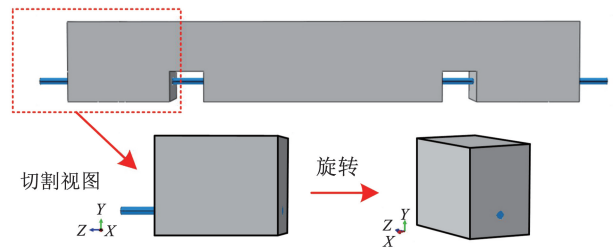


图 15 梁模型破坏模式截取区域

Fig. 15 Failure mode extraction area of the beam model

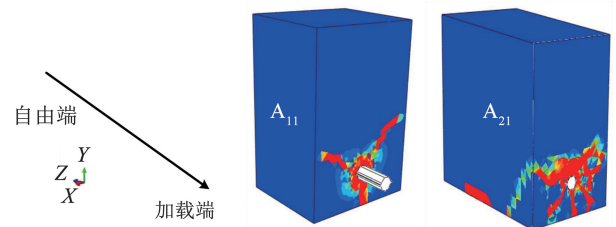


图 16 未锈蚀模型破坏模式

Fig. 16 Failure modes of un-corroded models

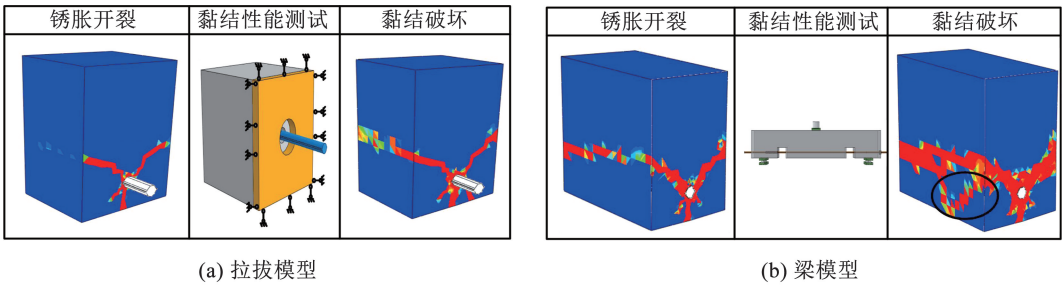


图 17 锈胀开裂及黏结破坏模式

Fig. 17 Cracking patterns in concrete induced by corrosion and bond failure modes

### 2.2 黏结应力-滑移曲线

图 18 分别给出了在不同箍筋约束指数、厚径比以及锈蚀率下,拉拔模型和梁模型的黏结应力-滑移曲线。首先,相同情况下拉拔模型与梁模型黏结应力-滑移曲线的上升段没有明显差别。其次,拉拔模型的黏结强度明显大于梁模型,这是由于在拉拔模型中混凝土处于受压的应力状态,导致混凝土孔隙被挤压,体积缩小,(抗压)强度增加<sup>[44]</sup>;在拉拔模型中,黏结强度取决于肋与肋间混凝土的相互挤压作用,因此混凝土抗压强度增加会导致钢筋与混

凝土的黏结强度增加。厚径比、箍筋约束指数和锈蚀率影响下的梁模型和拉拔模型黏结强度分析详见 2.3.1 小节。再次,拉拔模型下降段斜率明显大于梁模型。这是因为混凝土抗压强度增加的同时,徐变减小,弹性模量变大,脆性增加<sup>[45]</sup>,导致黏结应力-滑移曲线下降段斜率变大。最后,梁模型和拉拔模型的残余黏结强度随着滑移量的累积逐渐趋于相同水平,这是因为残余黏结强度是由钢筋与混凝土间摩擦系数决定的<sup>[38]</sup>,梁模型与拉拔模型材性相同,即钢筋与混凝土之间摩擦系数相同。

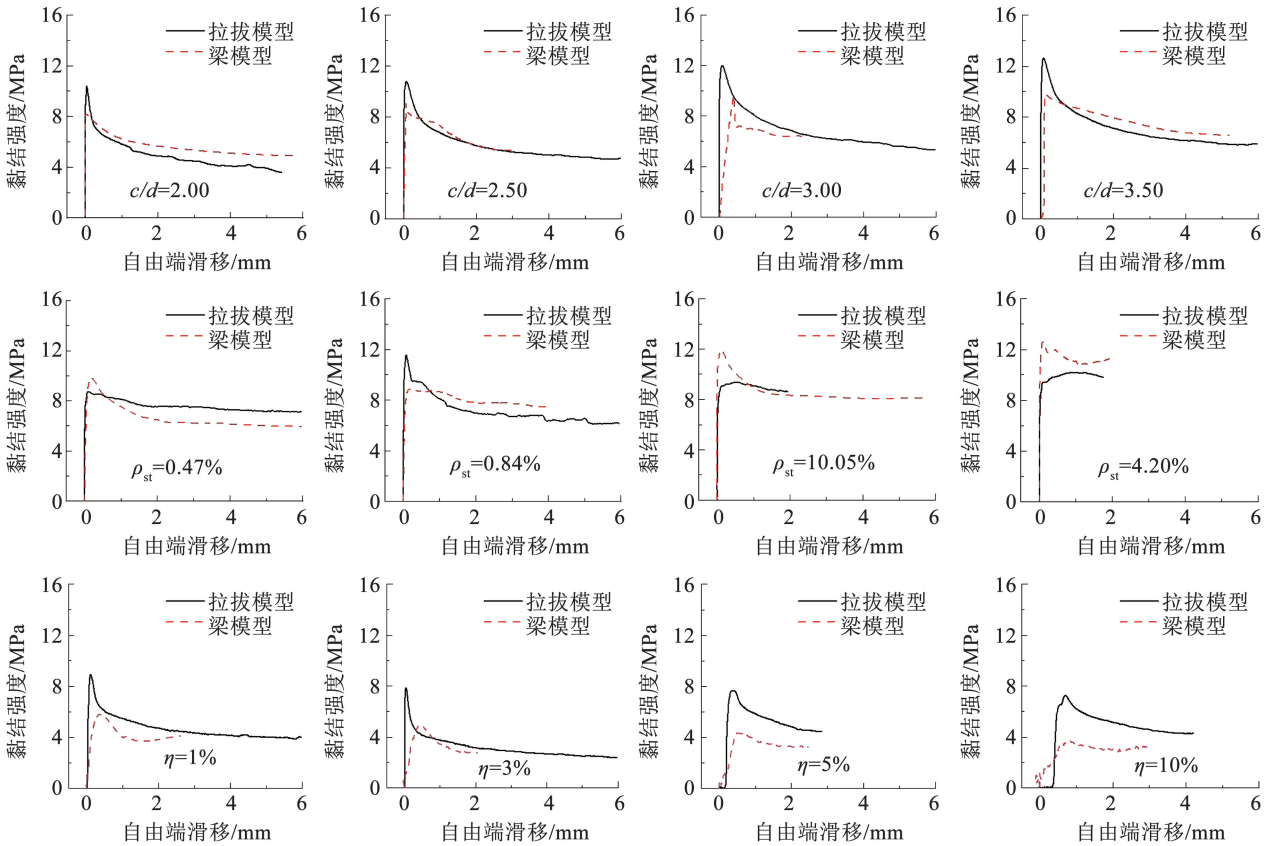


图 18 不同影响因素下拉拔模型与梁模型黏结应力-滑移曲线

Fig. 8 Bond-slip curves of pull-out model and beam model under different influencing factors

### 2.3 拉拔模型与梁模型黏结强度

#### 2.3.1 箍筋约束指数和厚径比的影响

图 19、图 20 给出了梁模型以及拉拔模型在锈

蚀率为 0% 和 3% 时,箍筋约束指数由 0.84% 增加到 3.35% 时和厚径比由 2.0 增加到 3.5 时黏结强度的变化,可以看到,箍筋约束指数对梁模型和拉拔

模型黏结强度的影响相似。当锈蚀率为 0% 时,箍筋约束指数由 0.84% 增加到 3.35%,梁模型黏结强度增加 13.6%,拉拔模型黏结强度增加 15.4%;锈蚀率为 3% 时,梁模型和拉拔模型黏结强度分别增加了 21.4% 和 21.6%。而厚径比对梁模型和拉拔模型黏结强度的影响有明显的区别。当锈蚀率为 0% 时,厚径比由 2.0 增加到 3.5,梁模型和拉拔模型黏结强度分别增加了 21% 和 34.8%;当锈蚀率为 3% 时,梁模型、拉拔模型黏结强度分别增加了 16.3%、32.2%。综上,无论钢筋是否锈蚀,箍筋约束指数由 0.84% 增加到 3.35%,梁模型和拉拔模型的黏结强度增幅相差在 5% 以内;但厚径比由 2.0 增加到 3.5,梁模型和拉拔模型黏结强度增幅相差 15% 左右。

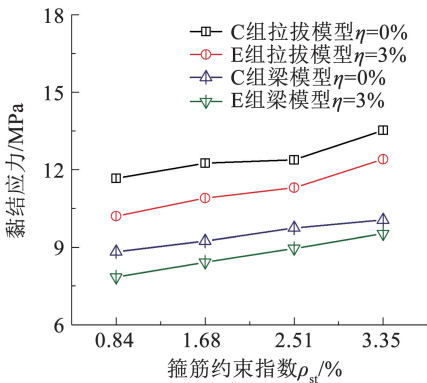


图 19 不同箍筋约束指数下锈蚀及未锈蚀模型黏结强度

Fig. 19 Bond strength of corroded and non-corroded models under different stirrup indices

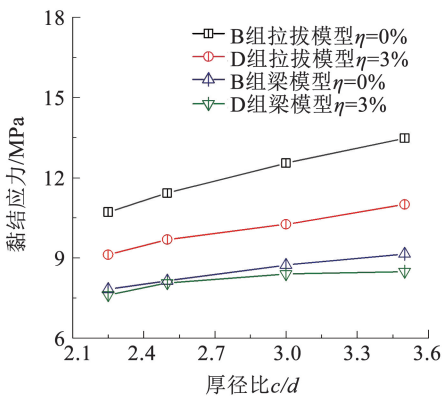


图 20 不同厚径比下锈蚀及未锈蚀模型黏结强度

Fig. 20 Bond strength of corroded and non-corroded models under different thickness-diameter ratios

2.3.2 不同试验方法下黏结强度归一化模型

如前文所述,由于两种试验方法适用的实际工况不同,不同工况应采用不同的试验方法。比如,为研究厚径比、箍筋约束情况以及纵筋锈蚀对钢筋与混凝土黏结性能的影响,考虑到试验成本和试验的

简便性,文献[6,9,21]采用拉拔试件,而为了可以反应实际结构的黏结应力状态,文献[22-24]采用梁式试件。然而对于高温、超低温等极端环境对钢筋与混凝土黏结性能的影响研究,限于试验条件,梁式试验难以开展,只能采用拉拔试件开展定性分析。因此有必要建立两种试验方法下黏结强度转化公式,将拉拔试验得到的黏结强度转化为相同条件下梁式试验的黏结强度。

定义与厚径比相关的梁模型与拉拔模型黏结强度之比的影响系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{\tau_{C_1} / \tau_{A_1}}{\tau_{C_2} / \tau_{A_2}} \quad (13)$$

式中: $\tau_{C_1}$ 和 $\tau_{C_2}$ 为C组中厚径比分别取2.25~3.50时梁模型和拉拔模型的黏结强度, $\tau_{A_1}$ 和 $\tau_{A_2}$ 分别为A组中梁模型和拉拔模型黏结强度, $\tau_{A_1}/\tau_{A_2} = 0.757$ 。厚径比对系数 $\alpha$ 的影响见图21,用A组和C组中梁模型和拉拔模型黏结强度数据得到的系数 $\alpha$ 与厚径比做拟合,当拟合优度 $R^2$ 为0.99时,考虑厚径比影响的系数 $\alpha$ 和厚径比 $c/d$ 之间的关系为

$$\alpha = -0.084c/d + 1.0 \quad (14)$$

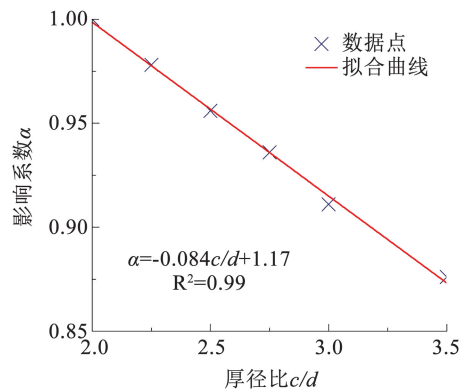


图 21  $\alpha$  与厚径比拟合关系

Fig. 21 Fitting relationship between  $\alpha$  and the thickness-diameter ratio

定义与箍筋约束指数相关的梁模型与拉拔模型黏结强度之比的影响系数  $\beta$  为

$$\beta = \frac{\tau_{E_1} / \tau_{A_1}}{\tau_{E_2} / \tau_{A_2}} \quad (15)$$

式中, $\tau_{E_1}$ 和 $\tau_{E_2}$ 分别为E组中箍筋约束指数分别取0.47%~3.35%时梁模型和拉拔模型的黏结强度。箍筋约束指数对系数 $\beta$ 的影响见图22,用A组和E组中梁模型和拉拔模型黏结强度数据得到的系数 $\beta$ 与箍筋约束指数做拟合,当拟合优度 $R^2$ 为0.96时,考虑箍筋约束指数影响的系数 $\beta$ 和箍筋约束指数 $\rho_{st}$ 之间的关系为

$$\beta = 0.02\rho_{st} + 1.0 \quad (16)$$

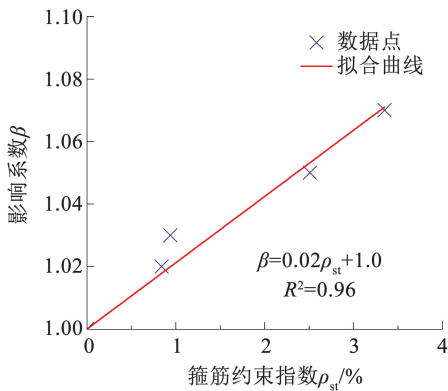


图 22  $\beta$  与箍筋约束指数拟合关系

Fig. 22 Fitting relationship between  $\beta$  and the stirrup index

定义与锈蚀率相关的梁模型与拉拔模型黏结强度之比的影响系数  $\varphi$  为

$$\varphi = \frac{\tau_{B_1} / \tau_{A_1}}{\tau_{B_2} / \tau_{A_2}} \quad (17)$$

式中,  $\tau_{B_1}$  和  $\tau_{B_2}$  分别为 B 组中锈蚀率分别取 3% ~ 10% 时梁模型和拉拔模型的黏结强度。锈蚀率对影响系数  $\varphi$  的影响见图 23, 用 A 组和 B 组中梁模型和拉拔模型黏结强度数据得到的  $\varphi$  与锈蚀率做拟合, 当拟合优度  $R^2$  为 0.86 时, 考虑锈蚀率影响的系数  $\varphi$  和锈蚀率  $\eta$  之间的关系为

$$\varphi = 0.03\eta + 1.0 \quad (18)$$

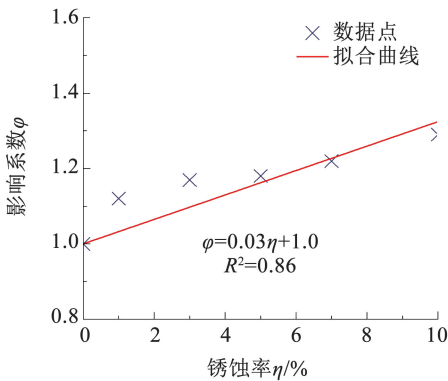


图 23  $\varphi$  与锈蚀率拟合关系

Fig. 23 Fitting relationship between  $\varphi$  and the mass loss rate

由式(13) ~ (18)可以得到考虑厚径比、箍筋约束情况和纵筋  $\eta$  锈蚀影响的两种试验方法下的黏结强度归一化模型,

$$\tau_1 = 0.757\tau_2\alpha\beta\varphi \quad (19)$$

式中,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为梁模型和拉拔模型的黏结强度。并通过 D 组和 F 组中梁模型和拉拔模型黏结强度对该归一化模型进行验证, 结果见图 24。

图 24 验证结果表明, 通过引入厚径比系数  $\alpha$ 、箍筋约束指数系数  $\beta$  和锈蚀率系数  $\varphi$  得到的不同试验方法下黏结强度归一化模型, 其预测值与实际值吻合较好, 验证了该模型的正确性。

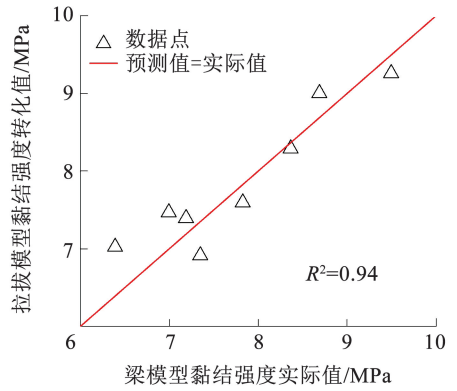


图 24 黏结强度归一化模型验证

Fig. 24 Bond strength normalized model validation

### 3 结 论

本文通过数值模拟方法, 对锈蚀/未锈蚀钢筋与混凝土在不同试验方法下的黏结性能进行研究, 同时考虑了厚径比(2.0 ~ 3.5)、箍筋约束指数(0% ~ 3.35%)和锈蚀率(0% ~ 10%)的影响, 得到以下结论。

1) 两种试验方法下破坏模式以及黏结应力-滑移曲线有区别。未锈蚀时, 在黏结区混凝土侧面, 梁模型形成了贯穿黏结区混凝土的斜向损伤, 而拉拔模型损伤集中在钢筋周围并向混凝土表面扩展。锈蚀后的梁模型和拉拔模型在发生黏结破坏时的裂缝是在原有锈胀裂缝基础上的加深和延伸, 锈蚀后梁模型还会产生与未锈蚀时一样的贯穿混凝土黏结区的斜向裂缝。锈蚀及未锈蚀拉拔模型的黏结强度和下降段斜率均明显大于梁模型。

2) 箍筋约束指数对梁模型和拉拔模型黏结强度影响程度相近, 而厚径比对梁模型和拉拔模型黏结强度的影响有明显区别。锈蚀率为 0% 和 3% 时, 箍筋约束指数由 0.84% 增加到 3.35%, 梁模型和拉拔模型的黏结强度增幅相差在 5% 以内; 但厚径比由 2.0 增加到 3.5, 梁模型和拉拔模型黏结强度增幅相差 15% 左右。

3) 通过引入与厚径比、箍筋约束指数以及锈蚀率相关的梁模型与拉拔模型黏结强度之比的影响系数, 得到了在两种试验方法下的黏结强度归一化模型, 并通过数值模拟结果验证了该归一化模型的有效性。

### 参考文献

[1] LIN Hongwei, ZHAO Yuxi, FENG Peng, et al. State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar[J]. Construction and Building Materials, 2019(213): 216. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.077  
 [2] OŽBOLT J, ORŠANIĆ F, BALABANIĆ G. Modeling pull-out

- resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three-dimensional finite element model [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014 (46): 41. DOI:10.1061/j. cemconcomp. 2013. 10.014
- [3] TAHERSHAMS M, FERNANDEZ I, LUNDGREN K, et al. Investigating correlations between crack width, corrosion level and anchorage capacity [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016(13): 1294. DOI:10.1080/15732479.2016.1263673
- [4] CHUNG L, NAJM H, BALAGURU P. Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008(30): 184. DOI:10.1016/j. cemconcomp.2007.08.005
- [5] DONG Wei, YE Jiabing, MURAKAMI Y, et al. Residual load capacity of corroded reinforced concrete beam undergoing bond failure [J]. *Engineering Structures*, 2016(127): 159. DOI:10.1016/j. engstruct. 2016.08.044
- [6] KOULOURIS K, APOSTOLOPOULOS C. An experimental study on effects of corrosion and stirrups spacing on bond behavior of reinforced concrete [J]. *Metals*, 2020(10): 1327. DOI:10.3390/met10101327
- [7] NEPAL J, CHEN Huapeng. Evaluation of residual strength of corrosion damaged reinforced concrete structures [M]. *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*, 2014: 443. DOI: 10.1201/617618-63
- [8] VAL D V, CHERNIN L. Serviceability reliability of reinforced concrete beams with corroded reinforcement [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009 (135): 896. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:8(896)
- [9] 林红威. 单调及重复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土黏结性能试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017  
LIN Hongwei. Experimental study on the bond performance of corroded reinforced concrete under monotonic and repeated loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [10] 林红威, 赵羽习. 变形钢筋与混凝土黏结性能研究综述 [J]. *建筑结构学报*, 2018(40): 11  
LIN Hongwei, ZHAO Yuxi. Summary of research on the bond performance between deformed steel bars and concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2018(40): 11. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2019.01.002
- [11] DARWIN David. Bond and development of straight reinforcing bars in tension; ACI 408R-03 [S]. USA: ACI, 2003
- [12] ANDERSEN Jack P. Building code requirements for structural concrete; ACI 318-19 [S]. USA: ACI, 2019
- [13] British Standard. Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings; EN 1992-1-1. Eurocode 2 [S]. UK: British Standard, 2004
- [14] Fib special activity group. Fib Model code for concrete structures; Model Code 2010 [S]. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2013
- [15] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 国家质检总局, 2010
- [16] Special activity group 5. Fib Model code construct; CEB-FIP Model code 2010 [S]. Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2012
- [17] FANG Chongqi, LUNDGREN K, PLOS M, et al. Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006 (36): 1931. DOI:10.1016/j. cemconres. 2006.05.008
- [18] HUANG Chung Ho. Effects of rust and scale of reinforcing bars on the bond performance of reinforcement concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014(26): 576. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000711
- [19] TIAN Yubin, LIU Junran, XIAO Hengheng, et al. Experimental study on bond performance and damage detection of corroded reinforced concrete specimens [J]. *Advances In Civil Engineering*, 2020, 7658623: 1. DOI:10.1155/2020/7658623
- [20] WU Yuanzhou, LV Henglin, ZHOU Shuchun, et al. Degradation model of bond performance between deteriorated concrete and corroded deformed steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016(119): 89. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2016.04.061
- [21] ZHENG Yue, ZHENG Shansuo, YANG Lu, et al. Experimental study and analytical model of the bond behavior of corroded reinforcing steel bars in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022(327): 126991. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2022.126991
- [22] 卫军, 张华, 徐港. 锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的试验研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(4): 28  
WEI Jun, ZHANG Hua, XU Gang. Experimental study on the bond performance between corroded steel bars and concrete [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(4): 28. DOI:10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2009.04.006
- [23] LIN Hongwei, ZHAO Yuxi. Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016 (118): 127. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2016.05.040
- [24] 何化南, 杨嫚嫚, 贡金鑫. 不同保护层厚度下微锈蚀钢筋混凝土黏结性能梁式试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(4): 25  
HE Huanan, YANG Manman, GONG Jinxin. A beam test study on the bond performance of slightly corroded reinforced concrete under different concrete cover thickness [J]. *Journal of Water Resources and Building Engineering*, 2016, 14(4): 25
- [25] 吴洁琼, 郭莉, 金浏, 等. 非均匀锈蚀钢筋-混凝土黏结性能试验 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(10): 109  
WU Jieqiong, GUO Li, JIN Liu, et al. Test on the bond performance of non-uniformly corroded steel bars and concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 109. DOI:10.11918/202111098
- [26] WU Jieqiong, GUO Li, JIN Liu, et al. Experimental investigation of the bond performance between nonuniformly corroded reinforcing bar and concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022(34): 04022346. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004515
- [27] LIN Hongwei, ZHAO Yuxi, FENG Peng. State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar [J]. *Construction and Building Materials*, 2019(213): 216. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2019.04.077
- [28] COCCIA S, IMPERATORE S, RINALDI Z. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete [J]. *Materials and structures*, 2016(49): 537. DOI:10.1617/s11527-014-0518-x
- [29] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 混凝土用钢 第二部分: 热轧带肋钢筋: GB/T 1499.2—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018

- [30] WU Jieqiong, ZHANG Xiaowang, JIN Liu, et al. Numerical study on the effects of non-uniform corrosion and confinement conditions on the bond performance of RC beams [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023 (19): e02328. DOI:10.106/j.cscm.2023.e02328
- [31] LIU Mengjia, JIN Liu, CHEN Fengjuan, et al. 3D meso-scale modelling of the bonding failure between corroded ribbed steel bar and concrete [J]. *Engineering Structures*, 2022 (256): 113939. DOI:10.1016/j.engstruct.2022.113939
- [32] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989(25): 299. DOI:10.1016/0020-7683(89)90050-4
- [33] BERRA M, CASTELLANI A, CORONELLI D, et al. Steel-concrete bond deterioration due to corrosion: Finite-element analysis for different confinement levels [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2003(55): 237. DOI:10.1680/mac.2003.55.3.237
- [34] BERTO L, SIMIONI P, SAETTA A. Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2008(30): 1375. DOI:10.1016/j.engstruct.2007.08.003
- [35] YANG Z J, CHEN J. Finite element modelling of multiple cohesive discrete crack propagation in reinforced concrete beams [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005 (72): 2280. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2005.02.004
- [36] SUN Xiaoyan, KONG Hangting, WANG Hailong, et al. Evaluation of corrosion characteristics and corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars based on three-dimensional scanning [J]. *Corrosion Science*, 2018 (142): 284. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.07.030
- [37] NIU Ditao, LU Mei, WANG Qinglin. Research on calculation method of the bending capacity of corrosive reinforced concrete beams [J]. *Building Structure*, 2002(10): 14
- [38] JIN Liu, LIU Mengjia, ZHANG Renbo, et al. 3D meso-scale modelling of the interface behavior between ribbed steel bar and concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020 (239): 107291. DOI:10.1016/j.engfracmech.2020.107291
- [39] WANG Xiaohui, LIU Xiali. Bond strength modeling for corroded reinforcements [J]. *Construction and Building Materials*, 2006 (20): 177. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.015
- [40] LU Chunhua, JIN Wweiliang, LIU Ronggui. Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures [J]. *Corrosion Science*, 2011 (53): 1337. DOI:10.1016/j.corsci.2010.12.026
- [41] LIU Youping. Modeling the time-to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures [D]. Virginia: Virginia Tech, 1996
- [42] GRASSL P, JIRÁSEK M. Meso-scale approach to modelling the fracture process zone of concrete subjected to uniaxial tension [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010 (47): 957. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2009.12.010
- [43] 陈留国, 方从启, 寇新建, 等. 受腐蚀钢筋混凝土的黏结性能 [J]. *工业建筑*, 2004(5): 15  
CHEN Liuguo, FANG Congqi, KOU Xinjian, et al. The bond performance of corroded reinforced concrete [J]. *Industrial Architecture*, 2004(5): 15
- [44] 贾金青, 胡玉龙, 王东来, 等. 混凝土抗压强度与孔隙率关系的研究 [J]. *混凝土*, 2015(10): 56  
JIA Jinqing, HU Yulong, WANG Donglai, et al. Research on the relationship between compressive strength and porosity of concrete [J]. *Concrete*, 2015(10): 56
- [45] 孙静, 姚谦峰. 普通强度高性能混凝土脆性损伤本构试验和理论研究 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(S2): 309  
SUN Jing, YAO Qianfeng. Experimental and theoretical study on brittle damage constitutive behavior of ordinary strength high performance concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(S2): 309. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2009.s2.054

(编辑 吕雪梅)

## 封面图片说明

封面图片来自本期论文“倾斜压力侧肩壁对涡轮凹槽叶顶气热性能影响”,通过模型简化、参数化、优化改型三个流程的描述,诠释了涡轮叶片流动传热机理分析和构型优化的关键途径。研究以数值仿真分析为主要手段,建立了涡轮级仿真模型,以涡轮动叶叶顶为研究对象,以实现较小几何改动的代价提升凹槽叶顶气热性能为目的,发展了基于非均匀偏置的压力侧肩壁倾斜造型方法,通过叶顶构型改进了流动组织与损失控制,结合可视化涡系结构分析揭示了性能提升机理,为涡轮转子叶片高效设计提供了新思路。

(图文提供:陶志,郭嘉杰,靳建祥,宋立明,李军。西安交通大学能源与动力工程学院)