

钢筋与碱矿渣混凝土界面黏结性能有限元分析

袁晓辉, 陈格格*

(信阳师范大学 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 为能简单、准确、快捷、有效地模拟碱矿渣混凝土与钢筋的界面黏结性能,在碱矿渣混凝土钢筋拉拔试验结果基础上,借助Abaqus有限元数值分析软件,建立碱矿渣混凝土钢筋拉拔有限元数值分析模型。采用Spring2弹簧单元、轴向连接器单元和接触单元,分别模拟碱矿渣混凝土与钢筋的界面黏结行为,开展碱矿渣混凝土钢筋拉拔有限元分析。分析结果表明:弹簧单元法能够较为精确地模拟黏结滑移行为,且建模过程相对简单,计算易于收敛;连接器单元法通过自动化脚本匹配节点,提高了建模效率,但由于忽略了横向切向变形,可能导致模拟结果不易收敛;接触法通过直接定义接触属性来模拟黏结滑移,建模方法简单直接,但模拟结果依赖于接触对的定义和摩擦系数的设置,误差较大。综合考虑,弹簧单元法在准确性和效率上均表现较好,更适用于碱矿渣混凝土与钢筋界面黏结性能的模拟分析。

关键词: 碱矿渣混凝土;数值分析算法;弹簧单元;黏结滑移

中图分类号: TU375

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element analysis of interfacial bonding performance between steel bars and alkali activated slag concrete

YUAN Xiaohui, CHEN Gege*

(College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: To achieve a simple, accurate, efficient, and effective simulation of the interfacial bond behavior between alkali activated slag concrete (AASC) and reinforcing steel, finite element models of rebar pull out tests were developed based on experimental results using the Abaqus finite element software. The bond slip behavior at the AASC-steel interface was simulated using three approaches: the Spring2 spring element method, the axial connector element method, and the contact interaction method. Finite element analyses of rebar pull out behavior were conducted and systematically compared. The results showed that the spring element method was able to accurately capture the bond slip response while maintaining a relatively simple modeling procedure and good numerical convergence. The connector element method improved modeling efficiency through automated node matching via scripting; however, because transverse and tangential deformations were neglected, convergence difficulties were sometimes observed. The contact interaction method simulated bond slip behavior by directly defining contact properties and was straightforward to implement, but the results were highly dependent on the definition of contact pairs and the selection of friction coefficients, leading to larger uncertainties. Overall, the spring element method demonstrated superior performance in both accuracy and computational efficiency and was therefore more suitable for simulating the interfacial bond behavior between alkali activated slag concrete and reinforcing steel.

Key words: alkali activated slag concrete; numerical analysis algorithm; spring element; bond slip

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2024-11-28; *通信联系人, E-mail: XYNU-ChenGG@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(11702238); 河南省科技计划项目(252102230150); 河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(研究生工作站)(YJS2025GZZ31)

作者简介: 袁晓辉(1986—), 男, 河南灵宝人, 副教授, 博士, 主要从事钢管混凝土及混凝土新材料研究; 陈格格(2001—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事混凝土新材料及仿真研究。

引用格式: 袁晓辉, 陈格格. 钢筋与碱矿渣混凝土界面黏结性能有限元分析[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 129-138.
YUAN Xiaohui, CHEN Gege. Finite element analysis of interfacial bonding performance between steel bars and alkali activated slag concrete[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 129-138.

0 引言

碱矿渣混凝土作为一种具有显著快硬早强特性、卓越节能环保性能以及出色耐腐蚀能力的新型建筑材料,在当前推进生态优先与绿色发展的新型城镇化建设进程中展现出了广阔的应用前景^[1]。然而,为确保此类混凝土与钢筋之间的协同工作效能,深入探讨二者间的黏结性能显得尤为重要,这不仅是保障结构整体性能的关键,也是推动该材料进一步应用的基础^[2]。

在实验研究领域,中心拔出试验^[3]与梁式试验^[4]已成为评估钢筋与混凝土黏结强度的标准方法。而在数值模拟层面,针对钢筋混凝土的黏结滑移行为,目前主流的分析手段包括界面单元法与联结单元法。前者侧重于通过精细的接触分析来模拟钢筋与混凝土之间的实际接触状态,涉及复杂的表面接触对建立与切向摩擦系数的精确定义;后者则倾向于在钢筋与混凝土之间引入专门的黏结单元,更为直观地模拟二者间的界面行为^[5]。众多学者在此领域进行了深入研究,如赵卫平等^[6]利用三维接触对技术实现了对钢筋混凝土黏结滑移问题的高精度模拟;高向玲等^[7]则采用不连续介质力学的界面单元法,对钢筋拉拔过程进行了细致的数值模拟;张羽等^[8]的研究聚焦于FRP筋与混凝土间的黏结滑移关系,通过表面接触法揭示了其界面行为的特性;朱容畅等^[9]则创新性地运用非线性弹簧模型,深入探讨了混凝土强度与加载速率对黏结应力及滑移值的影响机制。

尽管上述研究在钢筋与普通混凝土的黏结滑移模拟方面取得了显著成果,但针对以碱激发技术为核心的碱矿渣混凝土的相关研究仍显不足。鉴于此,本研究将通过系统的碱矿渣混凝土-钢筋拉拔试验,精确获取二者间的黏结滑移曲线与力-位移关系。进而,借助Abaqus有限元分析软件,构建精确的数值模型,并将模拟结果与实验数据进行严格的对比分析,以验证所建模型的准确性与可靠性。本研究可为碱矿渣混凝土与钢筋间黏结滑移行为的有限元模拟提供一套科学、有效的建模计算方法。

1 拉拔试验

1.1 黏结滑移荷载位移曲线

黏结滑移试验曲线采用课题组前期试验成果,见文献[16],制作了3个拉拔试验试件,试件尺

寸为150 mm×150 mm×150 mm,混凝土强度等级为C40,拉拔钢筋采用HRB335直径为12 mm的光圆钢筋。试件1、2、3锚固深度分别为100 mm、120 mm和150 mm,开展碱矿渣混凝土与钢筋间的黏结性试验研究。为了降低贴片对黏结性能造成的干扰,本文采用将应变片贴置于钢筋内部的方法。如图1所示,钢筋内侧设计有4 mm×4 mm的凹槽,应变片间距为10 mm,应变片用细直径的多股导线从钢筋内部引出,导线末端设置编号,以便能准确识别各应变片的位置,试件钢筋应变测点布置如图2所示。采用荷载-自由端滑移关系来描述试件的黏结滑移特性,3个试件荷载-位移曲线如图3所示。

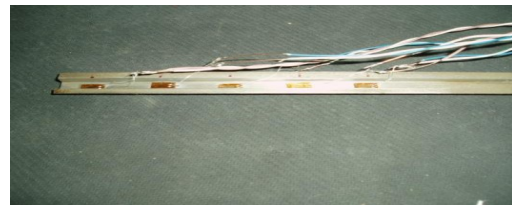


图1 钢筋中应变片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strain gauge in steel bar

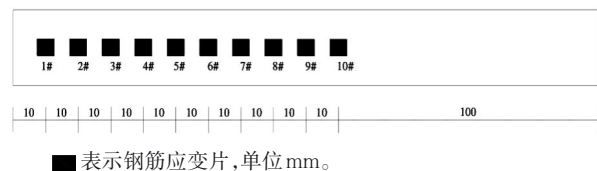


图2 钢筋应变测点布置示意图

Fig. 2 Steel bar strain measurement point layout diagram

图3显示,拉拔 P - S 曲线主要分为4个阶段。微滑移阶段:在加载初期,拉拔荷载保持在极限荷载的10%以下,滑移量极小,几乎可忽略,此时黏结力主要由胶结力构成, P - S 曲线呈线弹性状态。滑移发展阶段:随着荷载增大至接近破坏荷载的70%,自由端开始滑移,表明胶结力大部分失效,滑移量加速增长, P - S 曲线发生非线性变化,此时摩擦力和机械咬合力主导黏结力。下降阶段:当荷载达到峰值后,迅速下降,滑移量显著增加,反映出黏结界面的严重破坏。残余阶段:荷载保持在特定值,直至钢筋完全拔出。

1.2 黏结滑移受力机理分析

钢筋混凝土间的黏结应力由化学胶着力、摩擦阻力和机械咬合力共同作用产生。其中,化学胶着力通常较小且易失效,摩擦阻力受正压力和摩擦系数影响,而机械咬合力源于钢筋表面凹凸

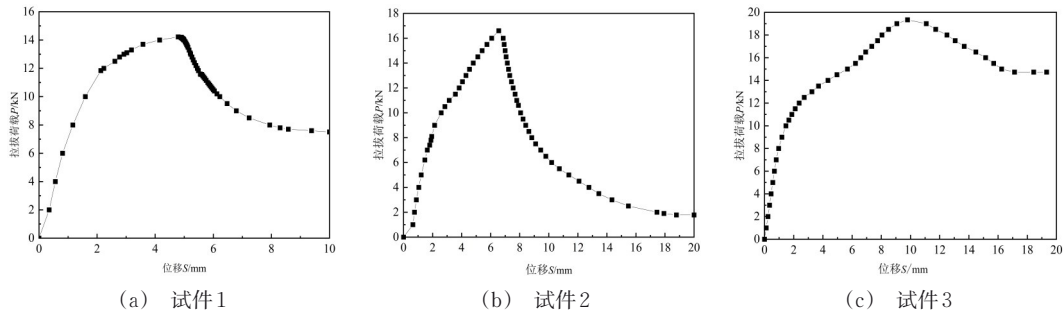


图3 光圆钢筋试件拉拔过程P-S曲线

Fig. 3 P-S curve during the drawing process of light round steel bar specimen

结构与混凝土的咬合作用^[10]。光圆钢筋的黏结应力主要依赖于化学胶着力和摩擦阻力,其机械咬合力较小,因此黏结强度较低。在加载初期,化学胶着力主导黏结力,界面无明显滑移。随着滑移的发生,摩擦力逐渐主导,黏结应力在达到峰值后逐步减小。当黏结力不足以抵抗外部拉力时,会发生黏结破坏,通常表现为剪切破坏。

2 黏结滑移本构关系理论

构建能够准确描述钢筋与混凝土间黏结滑移行为的本构模型,一直是国内外学者关注和研究的重点。该类模型不仅为结构设计提供了重要的理论基础,也推动了相关领域的科学进步。针对不同的钢筋与混凝土材料,学者们已经研究出多种黏结-滑移本构模型。目前,最为普遍采用的黏结-滑移关系表征方式是黏结滑移关系式,这是一种描述黏结应力与滑移量之间内在联系的本构方程。

NILSON^[12]通过在钢筋内部进行开槽,并采用预埋电阻应变片来测量钢筋锚固段的应变,同时在混凝土内部布置应变计来测量混凝土的应变,提出了早期的黏结滑移本构关系。

$$\tau = 3606 \times 10^3 S - 5356 \times 10^6 S^2 + 1086 \times 10^9 S^3, \quad (1)$$

式中: τ 为黏结应力, S 为滑移量。

宋玉普等^[13]对混凝土梁的纯弯段进行了试验研究,基于试验结果,提出了一种考虑混凝土弹性模量、保护层厚度、钢筋截面积、裂缝间距和离裂缝面的距离等因素的黏结滑移本构关系。

$$\tau = \frac{2\pi A_s E_c \sin \frac{2\pi x}{l_{cr}} \tau_1}{S l_{cr} \left(\frac{A_s}{2ab} + \frac{1}{\alpha_s} \right) \left(\frac{l_{cr}}{2} - x - \frac{l_{cr}}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{l_{cr}} \right)},$$

$$\tau_1 = 25.36 \times 10^{-1} S - 5.04 \times S^2 + 0.29 \times S^3, \quad (2)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量, x 为离裂缝面的距离, a 为钢筋重心到构件外表面的距离, b 为构件宽度, A_s 为钢筋的截面积, l_{cr} 为裂缝间距, α_s 为钢筋与混凝土弹性模量的比值。

ELIGEHAUSEN等^[14]通过大量的中心拉拔试验分析了不同加载方式、加载幅值、配筋率和侧面压力等对黏结滑移的影响,提出了四段式黏结滑移的本构模型。

$$\tau = \begin{cases} \tau_u (S/s_u), & 0 < S \leq s_1, \\ \tau_u, & s_1 < S \leq s_2, \\ \tau_u - (\tau_u - \tau_r) \frac{S - s_2}{s_3 - s_2}, & s_2 < S \leq s_3, \\ \tau_r, & s_3 < S, \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_u 为极限黏结强度;残余黏结强度取 $0.4\tau_u$; s_1 为 τ_u 对应的滑移量; s_3 为0.5倍的钢筋肋间距;针对拔出破坏 s_2 取2 mm,针对劈裂破坏 s_2 取 s_1 。

徐有邻^[15]通过一系列拉拔实验,研究了混凝土强度、配箍率以及保护层厚度等多个变量对黏结锚固性能的影响。结合临界受力状态及内裂缝情况,提出了五段式黏结滑移本构关系。

$$\tau = \begin{cases} \tau_s \sqrt[4]{\frac{S}{s_s}}, & 0 < S \leq s_s, \\ k_1 + k_2 \sqrt[4]{S}, & s_s < S \leq s_{cr}, \\ k_3 + k_4 \sqrt[4]{S}, & s_{cr} < S \leq s_u, \\ \tau_u - \frac{\tau_u - \tau_{cr}}{s_{cr} - s_u} (S - s_{cr}), & s_u < S \leq s_r, \\ \tau_r, & s_r < S, \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_s 为滑移黏结应力,对应的滑移量为 s_s ; τ_{cr} 为劈裂黏结应力,对应的滑移量为 s_{cr} ; τ_u 为极限黏结应力,对应的滑移量为 s_u ; τ_r 为残余黏结应力,对应

的滑移量为 s_f ; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 为系数值,

$$k_1 = \tau_{cr} - k_2 \sqrt[4]{s_{cr}}, k_2 = \frac{\tau_{cr} - \tau_s}{\sqrt[4]{s_{cr}} - \sqrt[4]{s_s}},$$

$$k_3 = \tau_u - k_4 s_u - k_5 s_u^2,$$

$$k_4 = \frac{2s_u(\tau_u - \tau_{cr})}{(s_u - s_{cr})^2}, k_5 = -\frac{\tau_u - \tau_{cr}}{(s_u - s_{cr})^2}.$$

总体而言,国内外对普通钢筋混凝土黏结应力-滑移本构关系的研究已经相对成熟,但仍存在一些不足。由于影响钢筋混凝土黏结滑移的因素复杂多变,相关学者在拟合黏结滑移曲线数据时,结果仍然存在较大的离散性,因此,需要根据考虑的具体因素情况进行单独研究。

目前,关于碱矿渣混凝土与钢筋间黏结特性的统一黏结滑移本构关系尚未确立。为简化计算,本文采用平均黏结应力-滑移本构关系来表征钢筋与混凝土之间的黏结行为。平均黏结应力的计算公式如下:

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi dl}, \quad (5)$$

式中: P 是施加的载荷, A 是混凝土和钢筋之间的总接触面积, d 是钢筋直径, l 是锚固深度。

平均黏结应力-滑移本构关系,使用简单的均值计算,简化了复杂的黏结滑移模型,该方法依赖于容易获得的参数,如拉拔荷载和钢筋面积,不需要复杂的实验数据或复杂的模型计算,易于实现。对于尚未有统一黏结滑移本构关系的碱矿渣混凝土,采用平均黏结应力-滑移本构关系能够提供一个合理的估算,尤其是数值分析计算。

3 有限元模拟

3.1 有限元模型

使用大型通用有限元软件 Abaqus 建立了钢筋混凝土分离模型,创建了混凝土部件和钢筋部件。锚固深度为 150 mm 的试件 3 钢筋埋置端存在类似螺纹钢筋的不规则凸起,导致拔出的过程中混凝土劈裂破坏,故只模拟锚固深度为 100 mm 与 120 mm 的试件 1 与试件 2。

有限元模型如图 4 所示,混凝土与钢筋单元采用 C3D8R 单元,混凝土试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,钢筋采用 HRB335 直径为 12 mm 的光圆钢筋,钢筋内侧凹槽尺寸为 4 mm × 4 mm。为了保证钢筋混凝土黏结部分节点重合,以及钢筋和混凝土之间相对滑移的准确性,钢筋部件和混凝土部件的网格尺寸均设为 10 mm。

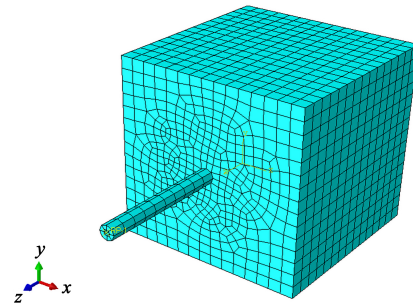


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model diagram

3.2 材料参数

由于试验中混凝土未出现劈裂破坏,为了更好地计算收敛性,有限元分析只考虑材料的弹性参数。其中,碱矿渣混凝土弹性模量通过试验应变片测得为 3.1746×10^4 N/mm²,泊松比为 0.251 2。钢筋的弹性模量为 2.1×10^5 N/mm²,泊松比为 0.3。

3.3 分析步及加载方式

在建立静力分析步骤时,采用几何非线性,将时间长度设为 1,最大增量步数设置为 1000。混凝土部件底部采用完全固定的连接方式。采用位移加载方式,在钢筋自由端表面施加 z 方向的竖向位移。模型的约束与加载方式如图 5 所示。

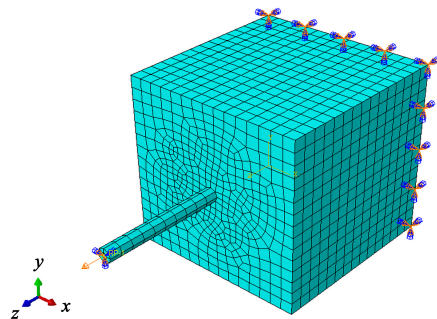


图 5 加载方式与边界条件

Fig. 5 Loading mode and boundary conditions

3.4 界面黏结性能模拟方法

3.4.1 弹簧单元法

弹簧单元是一种假想的力学模型,具有刚度,弹簧长度为零。在三维有限元分析中,可以通过法向、纵向切向和横向切向三个方向的弹簧单元模拟钢筋与混凝土之间的相互作用。如图 6 所示,图中节点 1 为钢筋单元节点,节点 2、3、4 为重合的相邻混凝土单元节点。 z 轴方向表示平行于钢筋轴向的纵向切向,弹簧刚度反映了钢筋与混凝土

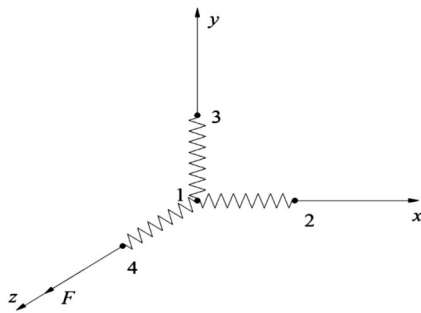


图6 非线性弹簧单元

Fig. 6 Nonlinear spring element

黏结滑移性能;而 x 轴和 y 轴方向分别表示垂直于钢筋轴长度方向的横向切向和法向方向,法向与横向切向弹簧刚度反映了钢筋对混凝土的销栓挤压作用。

在Abaqus中采用Spring2非线性弹簧单元来模拟黏结区域中钢筋与混凝土之间的相互作用,建立钢筋混凝土模型后,通过网格划分,使锚固区域内的钢筋与混凝土具备相同的节点,在重合节点的三个方向上分别建立弹簧接触对。由于法向和横向切向的变形相对纵向切向的变形要小得多,因此,可以将法向和横向切向的相互作用简化为刚度很大的弹簧。理论上弹簧刚度值越大越能模拟钢筋混凝土之间的变形,但过大的取值可能会导致计算不收敛,而过小的弹簧刚度值则会导致单元之间相互嵌入的问题,使模型与实际构件变形有一定的偏差。文献[17]建议将法向弹簧的刚度取为一个与混凝土弹性模量同数量级的大数,文中法向和横向切向弹簧刚度为 10^5 N/mm。

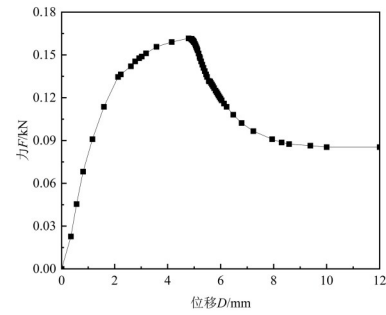
纵向方向 $F-D$ 曲线可以通过黏结滑移 $\tau-S$ 曲线根据以下公式确定。该弹簧单元的 $F-D$ 曲线如图7所示,其数学表达式为:

$$F = \tau \times A_1 = \tau \times \frac{\pi dl}{n}, \quad (6)$$

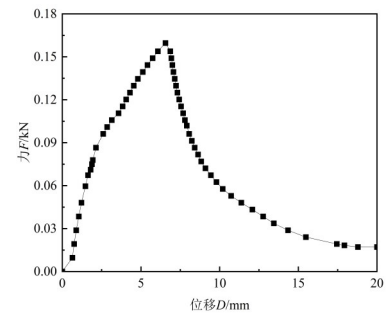
式中: F 为弹簧单元的力, τ 为弹簧单元所在节点的黏结应力, A_1 为联结单元周围的面积, n 为钢筋混凝土黏结界面的节点数。

3.4.2 连接器单元法

连接器单元可以模拟各种界面行为,将钢筋与混凝土之间的黏结滑移用三维两节点轴向连接器单元CONN3D2模拟,将钢筋与混凝土之间的相互作用简化为仅在一个方向产生运动的剪切滑移运动。轴向连接器单元示意图如图8所示,轴向连接器单元由 a 、 b 两个节点组成,轴向连接器单元中的 b 节点被限制为只能沿 a 节点的局部坐标系 x



(a) 试件1



(b) 试件2

图7 光圆钢筋试件拉拔过程 $F-D$ 曲线

Fig. 7 $F-D$ curve during the drawing process of smooth round bar specimen

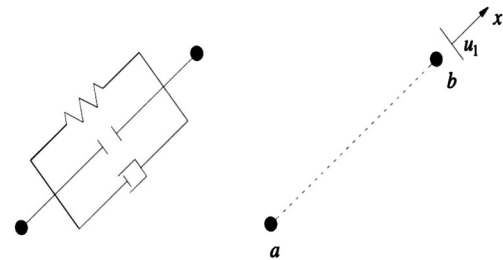


图8 轴向连接器单元示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the axial connector unit

轴方向发生位移。在模拟钢筋和混凝土之间的相互作用时,图中 a 表示混凝土节点, b 表示钢筋节点, u_1 表示钢筋和混凝土之间相对距离的改变。

在相互作用管理器中建立钢筋混凝土的表面接触对,接触表面法向方向采用“硬接触”,以限制计算过程中模型发生的穿透现象。由于接触面横向切向变形很小,所以可以忽略该方向的接触。纵向切向方向由于节点数量较多,使用自动化脚本来匹配钢筋与混凝土部件坐标相同的节点并建立节点集合,以便后续批量建立轴向连接器单元。在相互作用模块,连接截面选择弹性非线性,输入滑移方向的荷载位移关系,并指派给建立的轴向连接器单元。滑移方向的荷载-位移关系由 $F-D$ 曲线根据式(6)确定,纵向连接器单元所在节点上的

力为分配的黏结力,连接器的变形等于钢筋与混凝土间的相对滑移。

3.4.3 接触法

在接触分析中,钢筋与周围混凝土之间的相互作用通过设定接触面和相应的接触参数来模拟,采用了“面-面”接触方法。在定义“面-面”接触时,选择刚度较大的钢筋外表面作为主表面,刚度较小的混凝土内表面作为从表面。

接触参数选择摩擦系数,使用库伦摩擦模型描述钢筋与混凝土之间的切向力。如图 9 所示,图中实线描述了库伦摩擦模型的行为:当剪应力小于 μp 时,两者处于黏结状态,接触表面间不发生相对滑移。在模拟真实的摩擦行为时,钢筋与混凝土表面黏结时会发生小量级的相对滑动,如图 9 中虚线所示,滑动值的大小仅限于单元特征长度极小的那部分范围。当接触面上的剪应力大于表面之间的最大摩擦力时,切向滑动将会发生。

钢筋与混凝土在发生相对滑动之前,能够承受一定大小的切应力,达到临界应力值 τ_{crit} 时接触面之间开始产生滑动。临界应力值的计算公式如下:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p, \quad (7)$$

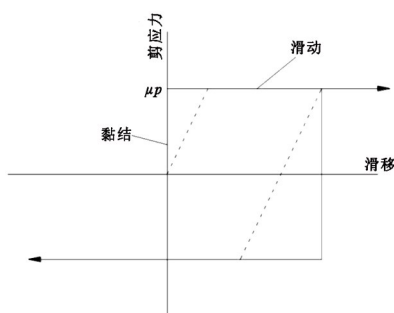


图 9 切线方向的摩擦行为

Fig. 9 Friction behavior in the tangential direction

式中: μ 称为摩擦系数,描述两个表面间的摩擦行为; p 为作用在摩擦面上的正压力。

文献[18]通过钢筋和混凝土黏结参数试验,测得钢筋与混凝土之间的摩擦系数取值范围为 0.2~0.6。本文试验使用表面光滑的光圆钢筋,在钢筋混凝土拉拔模型中将接触摩擦系数设置为 0.23。通过设定上述钢筋混凝土之间的相互作用关系,可以模拟钢筋与混凝土挤压面上传递的正向压力及切向摩擦力,进而实现对钢筋与混凝土间黏结滑移行为的准确模拟。

3.4.4 模拟方法对比分析

分析 3 种方法的建模过程可知,弹簧单元法建模的重点在于修改 inp 文件:一是修改弹簧单元所对应的钢筋和混凝土的节点编号,使钢筋混凝土共节点;二是根据计算出的力-位移数据修改弹簧单元的非线性参数。连接器单元法建模的重点在于使用自动化脚本快速匹配同一位置的钢筋和混凝土节点,在定义连接器属性时,修改笛卡尔坐标系方向,使所施加的力的方向与位移方向一致。接触法通过选择接触表面,定义接触对与接触属性来模拟钢筋混凝土黏结滑移,模拟结果主要取决于接触对的定义和摩擦系数的设置。

与前两种方法相比,接触法在黏结区直接定义接触属性而非材料属性来模拟计算,由于省略了黏结单元的定义,建模方法更加直接简单。

4 结果及分析

4.1 不同模拟方法的试验结果比较分析

表 1 为不同模拟方法下试件的极限荷载、位移计算值与试验值对比。3 种方法模拟的极限荷载值与试验值相符合,极限荷载的计算值与试验值相差较小,均不超过 1%;弹簧单元法与连接器单

表 1 极限荷载、位移计算值与实测值对比

Tab. 1 Comparison between the calculated value of ultimate load and the measured value

试件编号	项目	极限荷载/	模拟与试验	极限位移/	模拟与试验	极限平均黏结
		kN	误差/%	mm	误差/%	应力/MPa
1	试验值	14.22	—	4.79	—	3.78
	弹簧单元法	14.20	0.14	4.90	2.30	3.77
	连接器单元法	14.20	0.14	4.83	0.84	3.77
	接触法	14.35	0.91	1.10	77.04	4.04
2	试验值	16.60	—	6.56	—	3.67
	弹簧单元法	16.55	0.30	6.60	0.61	3.67
	连接器单元法	16.57	0.18	6.65	1.37	3.67
	接触法	16.73	0.78	1.20	81.70	3.97

元法模拟的极限位移计算值与试验值误差值较小,均不超过5%;接触法模拟的极限位移计算值与试验值误差值分别为77.04%和81.70%,误差值较大,这是由于接触法模型中极限黏结力与摩擦系数是线性关系,模拟结果快速达到最大静摩擦力后,力失效,钢筋开始滑动,使达到最大静摩擦力时极限位移小于试验值。滑动后,摩擦力从静摩擦力转变为动摩擦力,其值通常小于最大静摩擦力。

根据3种模拟方法,分别提取加载端钢筋的力

和位移,最终荷载-位移数值模拟曲线与试验曲线对比如图10所示。由图10可知,3种不同的模拟方法均可模拟出与试验结果相近的载荷-位移曲线。使用弹簧单元法和连接器单元法模拟的结果与试验结果吻合较好,试件1和2曲线上升阶段和下降阶段与用弹簧单元和连接器单元模拟得到的P-S曲线一致,且变化趋势相同;接触法的模拟曲线与试验曲线误差较大,曲线上升阶段斜率大于试验曲线斜率,当达到极限荷载后试验曲线开始大幅度下降,模拟曲线下降阶段则呈平缓趋势。

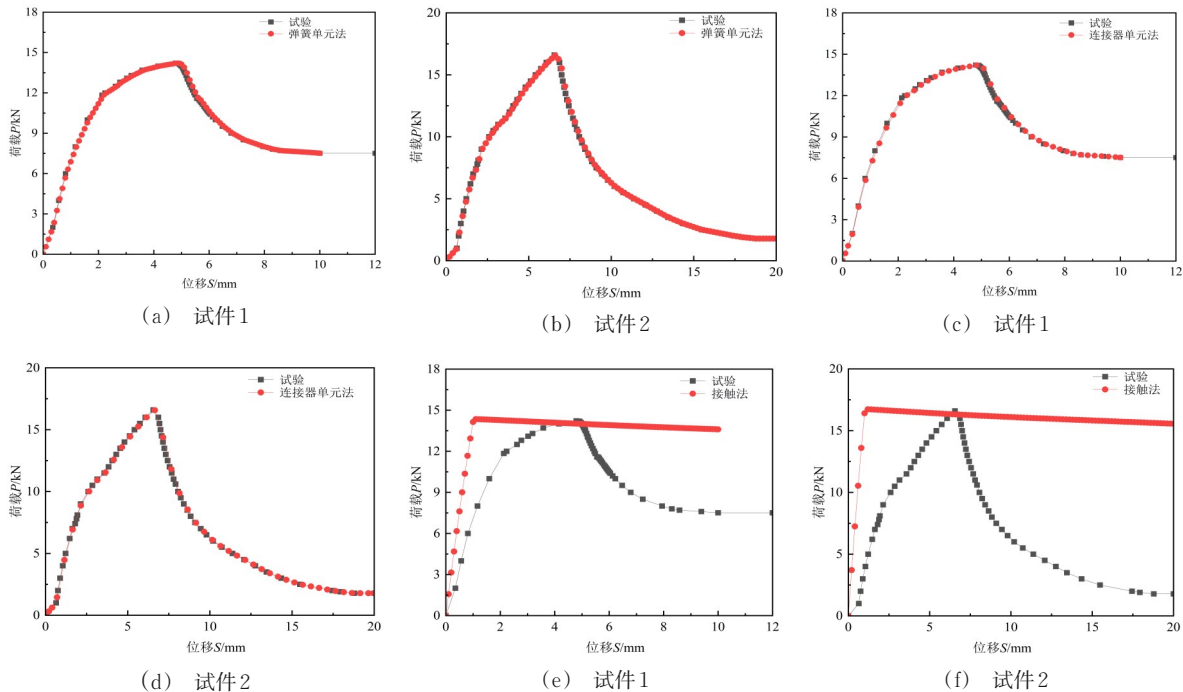


图10 有限元试验和计算荷载-位移曲线

Fig. 10 Finite element tests and calculation of load-displacement curves

使用接触法模拟所得到的结果与试验结果产生较大误差的原因如下:

一是在黏结区域中,钢筋与混凝土之间的接触界面仅产生滑动摩擦力,而在仍完好的区域中,界面黏结力是由3种界面力共同形成。只用摩擦接触模拟过于简单、粗糙,忽略了胶结力和机械咬合力的作用。

二是在真实的试验过程中,混凝土接触面上的水泥砂浆和碎屑的碾磨作用,使接触面的摩擦系数减小,导致黏结应力降低,但滑移量仍在增加。在模拟过程中,摩擦系数是一个固定的值,没有考虑钢筋和混凝土界面损伤后不断有混凝土粉末被刮出,导致界面接触压力降低的现象。

4.2 不同模拟方法优劣对比分析

图11为不同模拟方法下钢筋混凝土荷载-位移曲线数值计算结果与试验结果对比。由图11可见,使用弹簧单元法和连接器单元法模拟的结果与试验结果吻合较好,且整体趋势相同;与前两种模拟方法相比,接触法模型曲线存在一定差距,但总体变化趋势一致。

对比分析模型建立过程和试验结果吻合程度,连接器单元法忽略了横向切向方向的变形,导致模拟结果不易收敛。使用弹簧单元模拟时,弹簧刚度可根据实际试验加载情况、单元尺寸和荷载位移关系等由非线性弹性关系确定。同时,添加弹簧单元,避开了定义连接器属性的复杂性,建

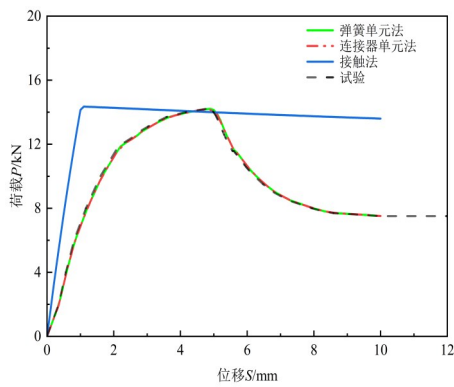


图 11 不同模拟方法下试件 1 的黏结滑移 $P-S$ 曲线
 Fig. 11 Bond slip $P-S$ curves of specimen 1 under different simulation methods

模过程较为简单且计算更易于收敛。综上,为更加真实有效地模拟钢筋与碱矿渣混凝土间的黏结滑移,结合钢筋混凝土拉拔试验的实际情况,采用弹簧单元法对试验进行数值模拟更为简单、精确和有效。

4.3 应力分布

表 2 为弹簧单元法模型模拟的极限荷载作用下,锚固长度为 100 mm、直径 12 mm 光圆钢筋各测点的钢筋应力试验值与计算值对比,图 12—15 分别是试件 1 与试件 2 弹簧单元法模型模拟的极限荷载下受拉方向钢筋与混凝土的应力云图。

表 2 极限荷载下试件 1 各测点钢筋应力值对比

Tab. 2 Comparison of steel bar stress value of each measuring point of specimen 1 under limit load

测点	应力值/MPa		误差/%
	试验值	计算值	
1#	28.6	30.1	5.2
2#	44.5	45.2	1.6
3#	60.0	60.3	0.5
4#	74.8	75.3	0.7
5#	94.0	90.4	3.8
6#	100.9	105.5	4.6
7#	116.0	120.5	3.9
8#	131.1	135.6	3.4
9#	152.6	150.6	1.3

由表 2 可知,将有限元计算值与试验结果进行比较,各测点应力值与试验值相接近,最大应力误差仅为 5.2%。

从图 12 和图 14 中可以看出,钢筋加载端的应力最大,从自由端到加载端,钢筋应力逐渐变大。

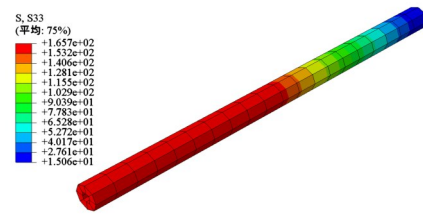


图 12 试件 1 极限荷载下钢筋 z 向应力云图
 Fig. 12 z -direction stress cloud diagram of steel bar under ultimate load of specimen 1

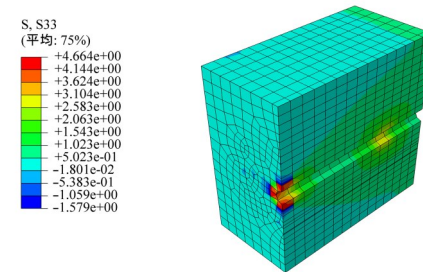


图 13 试件 1 极限荷载下混凝土 z 向应力云图
 Fig. 13 z -direction stress cloud diagram of concrete under ultimate load of specimen 1

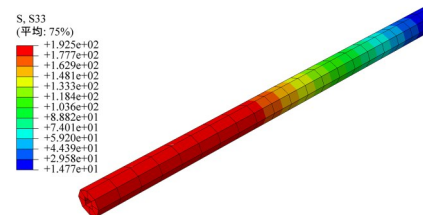


图 14 试件 2 极限荷载下钢筋 z 向应力云图
 Fig. 14 z -direction stress cloud diagram of rebar under ultimate load of specimen 2

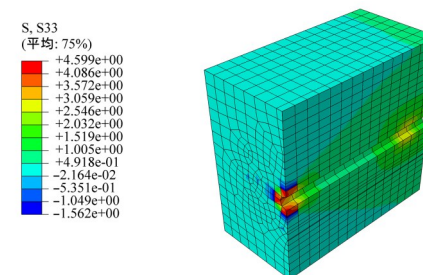


图 15 试件 2 极限荷载下混凝土 z 向应力云图
 Fig. 15 z -direction stress cloud diagram of concrete under ultimate load of specimen 2

从图 13 和图 15 中可以看出,在加载初期,混凝土应力主要分布在黏结区域钢筋与混凝土之间的接触面上,从黏结区域向混凝土四周扩展,但应力不

断减小。混凝土应力沿着锚固段发展,最终呈现为锚固段钢筋两端(即加载端和自由端)处混凝土应力大于锚固中间段。钢筋与混凝土的应力云图所表现出的规律与实际相符合。

4.4 网格疏密对结果的影响

模型弹簧单元设置在界面中每个网格的节点处,网格大小等于弹簧单元之间的距离,也决定了弹簧单元的数量。若网格尺寸较小,则弹簧距离将较小,弹簧元件的数量将较多,并且每个弹簧元件的力将较小。若网格尺寸较大,则弹簧距离将较大,弹簧元件的数量将较少,并且每个弹簧元件的力将较大。网格尺寸越大计算速度越快,但容易导致计算精度不足,而网格划分得过小则容易导致计算时间长,计算结果不易于收敛,因此,应根据具体问题确定网格大小和数量。

以锚固 120 mm 的试件 2 为例,进行参数分析。混凝土和钢筋纵向网格尺寸分别设定为 5、10、30 和 60 mm,如图 16 所示。

从图 16 中可以看出,网格尺寸、弹簧元件的距离和弹簧元件的数量对黏结行为的影响非常轻微,并且峰值荷载随着网格尺寸的增加而略微降低。当网格尺寸从 5 mm 增加到 10 mm 和 30 mm 时,极限荷载没有明显变化,当网格尺寸增加到 60 mm 时,极限荷载降低了 0.24%。有限元模型的网格划分直接影响计算精度、速度以及计算结果的收敛性。本文建立的弹簧单元法模型对网格尺寸敏感性较小,网格尺寸对结果影响不明显。

参考文献:

- [1] 袁晓辉,卢哲安,任志刚,等. 无机聚合物混凝土-钢筋拉拔有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 209-215.
YUAN Xiaohui, LU Zhean, REN Zhigang, et al. Finite element analysis of pullout tests on inorganic polymer concrete-steel bar[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 209-215.
- [2] 赵卫平,肖建庄. 带肋钢筋与混凝土间黏结滑移本构模型[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 164-171.
ZHAO Weiping, XIAO Jianzhuang. On bond-slip constitutive model between ribbed steel bars and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 164-171.
- [3] MA Yafei, GUO Zhongzhao, WANG Lei, et al. Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 240-249.
- [4] YU Xiaotong, ROBUSCHI S, FERNANDEZ I, et al. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112309.
- [5] 易伟建,罗光明. 变形钢筋与混凝土黏结性能数值模拟与计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(3): 1-12.
YI Weijian, LUO Xianming. Numerical simulation and calculation of bond performance between deformed bar and concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 1-12.
- [6] 赵卫平,范玉辉,李刚. 高强混凝土与钢筋黏结-滑移的数值模拟[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(6): 20-24.
ZHAO Weiping, FAN Yuhui, LI Gang. Numerical simulation of bond-slip between HSC and steel bar[J]. Journal of

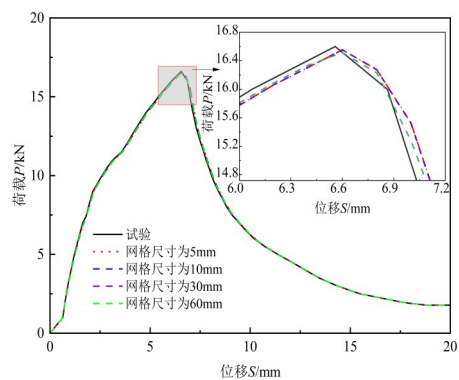


图 16 网格尺寸对荷载-位移的影响

Fig. 16 Influence of mesh size on load-displacement

5 结论

(1)创新性地引入了3种各具特色的黏结滑移接触单元,通过详尽的分析验证,这3类模拟方法都能较为准确地再现试验中的荷载-位移曲线。综合考量模型构建的复杂度及与试验结果的一致性,发现采用弹簧单元法的模型不仅构建流程更为简洁,计算结果也更趋稳定且易于收敛,且其数值模拟结果与实际拉拔试验的数据高度吻合。

(2)借助弹簧单元法成功地模拟出了钢筋与混凝土在 z 向的应力分布云图,模拟结果所展现的规律性与试验情况高度契合。此外,还深入探讨了网格疏密程度对模拟结果的可能影响,结果表明,弹簧单元法模型对网格尺寸的敏感度较低,网格尺寸的变化对结果的影响并不显著。

- Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(6): 20-24.
- [7] 高向玲, 李杰. 钢筋与混凝土黏结本构关系数值模拟[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 73-77.
GAO Xiangling, LI Jie. Numerical simulation of bond constitutive relation between reinforcement and concrete[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(1): 73-77.
- [8] 张羽, 傅丰, 郑吉丰, 等. 基于试验验证下的 FRP 筋与混凝土黏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.
ZHANG Yu, FU Feng, ZHENG Jifeng, et al. Establishment of finite element model of bond slip interface between FRP reinforcement and concrete based on experimental verification[J]. Building Structure, 2025, 55(12): 56-66.
- [9] 朱容畅. 加载速率对钢筋混凝土黏结滑移性能影响的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2024.
ZHU Rongchang. Study on the effect of loading rate on the bond slip performance of reinforced concrete[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2024.
- [10] 张众, 蔡斌. 钢筋与火山渣混凝土黏结滑移性能有限元分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(3): 25-30.
ZHANG Zhong, CAI Bin. Finite element analysis of bond slip behavior between reinforcement and light-weight aggregate concrete[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2022, 39(3): 25-30.
- [11] LIU Hongtao, CHEN Wenxiao, GUO Ruojiao, et al. Theoretical and numerical study on the bond behavior between reinforcing steel and concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109398.
- [12] NILSON A H. Internal measurement of bond slip[J]. ACI, 1972, 69(7): 439-441.
- [13] 宋玉普, 赵国藩. 钢筋与混凝土间的黏结滑移性能研究[J]. 大连工学院学报, 1987, 37(2): 93-100.
SONG Yupu, ZHAO Guofan. Study on bond slip behavior of steel bars and concrete[J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1987, 37(2): 93-100.
- [14] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations[C]//Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, 1982: 69-80.
- [15] 徐有邻. 钢筋与混凝土黏结锚固的分析研究[J]. 建筑科学, 1992(4): 18-24, 30.
XU Youlin. Analytical study on bond-anchorage between bar and concrete[J]. Building Science, 1992(4): 18-24, 30.
- [16] 袁晓辉, 卢哲安, 范小春, 等. 无机聚合物混凝土-钢筋拉拔试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(6): 117-122.
YUAN Xiaohui, LU Zhean, FAN Xiaochun, et al. Inorganic polymer concrete-steel bar pullout test study[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(6): 117-122.
- [17] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2版. 北京: 水利电力出版社, 1998.
ZHU Bofang. Principles and applications of finite element method[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1998.
- [18] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

责任编辑: 郭红建 张伟博