

文章编号:1673-2049(2013)02-0104-05

光面钢筋拉拔试验细观数值模拟研究

赵琳^{1,2}, 李建波^{1,2}, 付兵²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:从钢筋-混凝土界面的细观粘结机理出发,把化学胶结力、机械咬合力的弱化过程看成损伤过程,对其进行了库仑摩擦模拟;考虑混凝土的非均质特性,并假定其界面细观单元力学特性服从Weibull分布,对光面钢筋的拉拔试验进行了数值模拟,并对随机生成的100组试件的细观数值模拟结果进行了统计分析。结果表明:计算结果与试验结果吻合良好,拉拔强度呈正态分布,拉拔强度的均值接近于规范建议值,验证了模型的合理性。

关键词:钢筋混凝土结构;光面钢筋;拉拔试验;细观数值模拟;粘结机理

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Research on Mesoscale Numerical Simulation of Smooth Rebar Pullout Test

ZHAO Lin^{1,2}, LI Jian-bo^{1,2}, FU Bing²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of

Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: On the basis of the interface bonding mechanism between rebar and concrete, the weaken process of the chemical adhesive force and the machinery bite force was taken as a damage process. After that, the friction force would become the main force between rebar and concrete, which would be simulated by Coulomb friction model. Furthermore, Weibull distributed parameters were also used in the analysis to describe the inhomogeneity of the interface. Finally, based on statistical analysis on the mesoscale numerical simulations of 100 sets of random test specimens, the smooth rebar debonding procedure in the pullout test was numerically simulated. The results show that the calculation results coincide well with the test results, the tensile strength shows normal distribution and its mean value meets well with the advice value in specification, which can validate the rationality of the model.

Key words: reinforced concrete structure; smooth rebar; pullout test; mesoscale numerical simulation; bonding mechanism

0 引言

钢筋混凝土结构由于具有承载能力强、延性好

等良好的工程和力学性能,已被广泛地应用于高坝、核电站、桥梁、海洋平台、隧道等大型工程结构。钢筋与混凝土之间因具有足够的粘结强度,使得应力

收稿日期:2013-03-07

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(200801411099);水沙科学国家重点实验室开放基金项目(Shlhse-2010-C-03)

作者简介:赵琳(1977-),男,辽宁开原人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:jianboli@dlut.edu.cn。

可以在二者之间传递,钢筋和混凝土能够共同工作。在工程应用以及试验中,钢筋和混凝土的粘结经常发生破坏,致使结构丧失全部或部分功能,从某种意义上讲,钢筋-混凝土界面是钢筋混凝土结构中的薄弱环节,其粘结强度及本构关系对钢筋混凝土结构的工作性能具有非常重要的影响。因此,钢筋-混凝土界面力学性能的研究是钢筋混凝土结构设计和安全性评价的基础性工作之一^[1-2]。

拉拔试验是研究钢筋-混凝土界面力学性能的有效手段^[3-4],是对计算模型的重要检验,为界面力学参数选取提供了重要依据。Nilson 在试验的基础上,给出了粘结-滑移经验曲线,为结构设计、计算模型的参数选择提供了较好的参考。另外,极端环境作用下的拉拔试验也是研究热点,如锈蚀钢筋-混凝土界面的静动力学性能就受到了广泛的关注^[5-6]。这些试验成果加深了人们对钢筋-混凝土界面粘结机理的认识,为结构设计及安全性评价提供了第一手资料。然而,试验研究成果受试验条件的影响较大,得出的结果离散性较大。

作为试验的补充,拉拔试验的数值模拟能够避开试验机特性对试验结果的影响,弥补试验研究成果的不足^[7-8]。在拉拔试验数值模拟中,界面的本构关系对界面剪应力的分布有重要的影响。对于界面的力学性能的模拟,大多数学者采用基于强度理论的方法或断裂力学方法。强度理论模型认为^[9-12],一旦界面的剪应力达到阈值,界面便发生脱离。Marshall 等认为,脱离的界面由于咬合作用和摩擦作用,界面仍能承受常剪应力作用。Hutchinson 等及 Dollar 等发展了强度理论模型,认为脱离界面承受的剪应力不是常量,而是符合库仑摩擦定律的,该模型能够考虑到砂浆收缩及热应力对脱离界面残余摩擦力的影响。Gao 等^[13]及 Stang 等^[14]将断裂力学理论应用于钢筋拉拔试验的数值模拟中,认为当能量释放率达到界面断裂抵抗能时界面发生脱离。此外,高向玲等^[15]基于界面元方法对钢筋拉拔试验进行了数值模拟;刘佩玺等^[16]利用非线性弹簧来模拟复杂的界面粘结力。

从细观粘结机理分析来看,一般可以认为钢筋与混凝土之间的粘结力主要由化学胶结力、摩擦力及机械咬合力组成。对于光面钢筋而言,其粘结强度在滑移前主要取决于化学胶结力,发生滑移后则主要由摩擦力构成。钢筋-混凝土界面脱离的过程可以看成是化学胶结力弱化损伤的过程,同时考虑到混凝土力学性质的细观非均质特性,提出了一种损伤-库仑摩擦界面本构关系模型假定界面细观单

元力学特性服从 Weibull 分布,将其应用于拉拔试验数值模拟。

1 损伤-库仑摩擦界面本构关系

如前所述,钢筋-混凝土界面的脱离过程可以看成化学胶结力弱化损伤过程和滑移摩擦过程。对于这 2 个阶段,应用不同的界面本构进行描述。

1.1 胶结力弱化损伤过程

为简化起见,对于界面化学胶结力弱化损伤过程,采用非耦合的双线性损伤模型。切向剪应力-切向相对位移关系如图 1 所示,其中, τ 为剪应力, u 为切向相对位移, u_t^0 为钢筋-混凝土界面处于化学胶结力粘着状态的最大抗剪切变形能力, u_t^m 为经过 u_t^0 的下降段的直线延伸点,此时剪切向胶结力为 0, u_t^c 为钢筋-混凝土界面在化学胶结力失效后,所能承担的最大残余抗剪切变形能力。

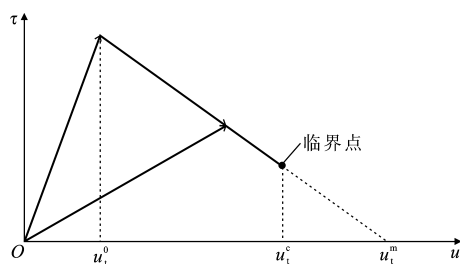


图 1 切向剪应力-切向相对位移关系

Fig. 1 Relation of Shear Stress-shear Relative Displacement

各个方向的应力解析表达式为

$$\left. \begin{aligned} P_n &= K_n u_n (1 - d_t) \\ T_y &= K_t u_y (1 - d_t) \\ T_z &= K_t u_z (1 - d_t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: d_t 为界面损伤变量; K_n, K_t 分别为钢筋-混凝土界面的切向刚度和法向刚度; P_n 为接触面法向粘结力; y, z 为接触面的 2 个切向方向; T_y, T_z 分别为接触面内沿 y 轴和 z 轴的切向粘结力; u_n 为接触面两侧法向相对位移; u_y, u_z 分别为接触面内沿 y 轴和 z 轴的切向位移。

考虑到钢筋-混凝土界面破坏主要以剪切破坏为主且其损伤过程是一个不可逆的过程,定义界面损伤变量 d_t 为

$$d_t = \frac{s(u_t) - u_t^0}{s(u_t) - u_t^m} \frac{u_t^m}{u_t^0} \quad (2)$$

$$s(u_t) = \max_{0 \leq \tau \leq \tau} \{u_t(\tau)\} \quad (3)$$

式中: $s(u_t)$ 为历史最大切向相对位移; τ 为任意时刻界面上的剪应力。

同时,认为当界面化学胶结力损伤达到一定损

伤阈值 d_t^* 以后,界面进入库仑摩擦状态,即 d_t 满足 $0 \leq d_t \leq d_t^*$ 。钢筋-混凝土界面发生破坏时,经历了胶结力弱化损伤过程和滑移摩擦过程,这 2 个阶段分别用双线性损伤和库仑摩擦进行模拟,并利用相对剪切位移进行状态判断。当胶结力损伤达到一定程度时,界面进入滑移摩擦过程。

1.2 滑移摩擦过程

当界面损伤达到一定程度时,界面相互作用主要靠钢筋与混凝土之间的摩擦来维持,其力学行为服从库仑摩擦定律,即当界面切向剪应力大于临界值时,钢筋和混凝土相对滑动,否则保持粘着状态。临界剪应力-法向应力 ($\tau_c-\sigma_n$) 关系如图 2 所示,其中, μ 为摩擦因数。

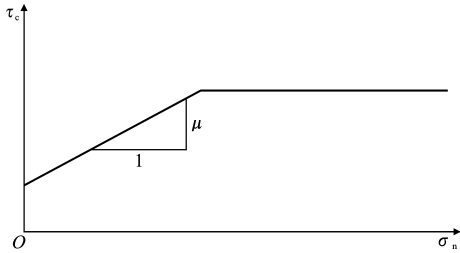


图 2 界面的库仑摩擦模型

Fig. 2 Coulomb Friction Model of Interface

临界剪应力和法向应力关系满足下式

$$\tau_c = \tau_0 + \mu \sigma_n \tag{4}$$

式中: τ_0 为界面上初始剪应力。

在计算过程中,界面状态判断非常关键,在接触分析过程中,应保证接触面满足归一化接触条件。

2 界面力学特性参数的选取

钢筋-混凝土界面力学性质具有较为明显的非均质特性,为描述这种非均质特性,假定组成钢筋-混凝土界面的细观接触单元的力学特性满足 Weibull 分布,该分布的密度函数 $f(u)$ 定义为

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left(- \frac{u}{u_0} \right)^m \tag{5}$$

式中: u_0 为与单元材料属性期望值相关的参数; m 为均值度,反映单元材料属性的离散程度, m 越大,单元材料属性越趋于平均值。

3 光面钢筋拉拔试验数值模拟

考虑到试件横截面形状对计算结果影响不大,用二维轴对称有限元模型模拟单一钢筋从混凝土试件中拉拔试验。从试验观测来看,钢筋-混凝土界面是钢筋混凝土结构中的薄弱环节,是导致拉拔试验反应呈现非线性的主要原因,需要着重分析。从界

面粘结机理出发,利用无厚度的摩擦单元对界面进行模拟,认为界面单元在拉拔过程中经历了弹性变形、损伤弱化、滑移摩擦 3 个阶段,其本构关系如前所述。另一方面,在拉拔试验中,混凝土也有破坏的现象发生,然而这种情况大多数是集中在变形钢筋的拉拔试验中,光面钢筋很少发生混凝土破坏的现象。因此,对光面钢筋及混凝土采用线弹性轴对称单元进行模拟。试件剖分示意如图 3 所示,其中右上部局部椭圆区域的界面剖分放大示意如图 4 所示,其中, P 为钢筋承受的拔出力, P_N 为该钢筋混凝土局部区域所承受的围压。

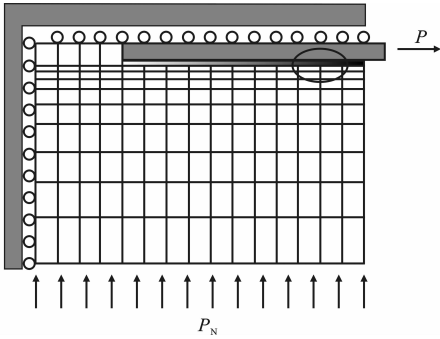


图 3 试件剖分示意

Fig. 3 Schematic of Specimen Mesh

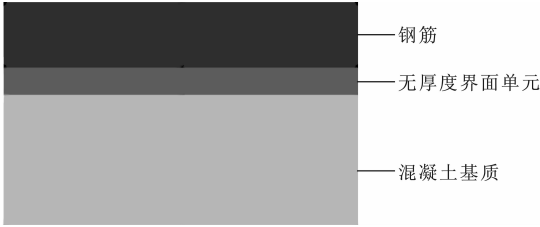


图 4 界面剖分局部放大

Fig. 4 Local Enlargement of Interface Mesh

因混凝土收缩而产生的残余应力是界面粘结强度及拉拔反应的主要因素,在数值模拟中可用适当的围压进行模拟。

钢筋-混凝土界面的传力机理复杂,试验所得的曲线离散性较大,典型的拔出力-端部位移曲线形状如图 5 所示^[17]。图 5 中, Δ 为端部位移, P_{max} 为最大拔出力, Δ_{max} 为最大拔出力所对应的端部位移, Δ_0 为完全脱离点所对应的端部位移。

在拉拔过程中,钢筋经历了线弹性变形、局部脱离、完全脱离 3 个阶段。

4 算例分析

钢筋混凝土试件的锚固长度可按相应规范进行取值,特殊情况需要通过单端拉拔试验进行验证。单端拉拔试件的尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,

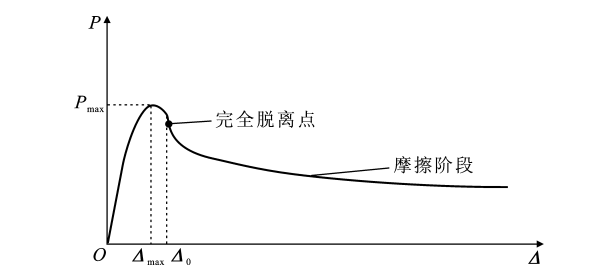


图 5 典型拔出力-端部位移曲线

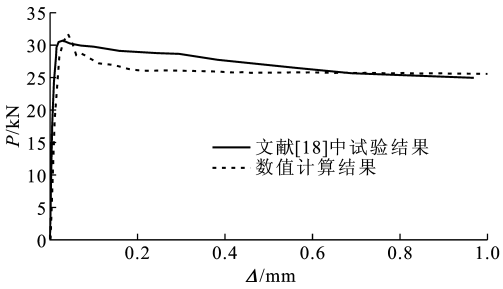


图 6 单端拉拔试件 $P-\Delta$ 曲线数值结果与试验结果比较

Fig. 5 Typical Pulling Force-end Displacement Curve

钢筋直径为 20 mm,其界面局部区域见图 4。钢筋的弹性模量 E_s 为 210 GPa,泊松比 μ_s 为 0.3;混凝土的弹性模量 E_c 为 34 GPa,泊松比 μ_c 为 0.2;光面钢筋的界面模型描述涉及 2 个较为重要的参数,即界面最大剪应力 τ_{\max} 和界面残余剪应力 τ_{coh} , τ_{coh} 代表化学胶结力失效后,钢筋与混凝土摩擦所能承担的残余剪应力。将 τ_{\max} , τ_{coh} 设为随机变量,假定满足 Weibull 分布。由于化学胶结力受诸多因素影响,不均匀特性更强,相比之下,界面残余剪应力的不均匀特性要弱一些,因此,在没有相关试验支持的情况下,以与试验结果吻合的峰值强度和破坏段曲线为依据,通过试算,给出了如表 1 所示的 2 组界面力学性能参数值。

表 1 界面力学性能参数

化学胶结状态		化学胶结力失效后	
τ_{\max} 均值/MPa	m	τ_{coh} 均值/MPa	m
15.00	2.5	5.35	8.0

Tab. 1 Mechanical Performance Parameters of Interface

通过对比分析可知,基于 Monte Carlo 方法生成 100 组随机样本空间,可达到统计收敛。在此基础上,通过概率统计分析,可获得不同保证率下的计算结果,以供工程设计使用。

单端拉拔典型试件在各级荷载作用下的钢筋自由端的滑移如图 6 所示。图 6 中的数值计算结果与文献[18]中的试验结果吻合较好,峰值拔出力相差 3.2%。随着钢筋自由端位移的增加,拔出力迅速线性增长至峰值拔出力的 60%左右,此后,由于脱离区域的增加,拔出力增长趋势呈非线性。当 62%左右的界面发生局部脱离时,拔出力达到峰值,此后脱离区域进一步快速地扩展,使拔出力快速降低,同时由于库仑摩擦的作用,拔出力最终稳定在 25 kN 左右。

在钢筋拉拔过程中,大部分界面单元也经历了弹性变形、损伤弱化、滑移摩擦 3 个阶段。如图 7 所示,首先界面在钢筋的加载端达到应力的最大值并开始脱离,此后,随着荷载的逐级增加,脱离区域逐渐向钢筋的另一端发展,由于界面具有不均质性的

Fig. 6 Comparisons of Single-ended Pullout Specimen $P-\Delta$ Curves Between Numerical Results and Experiment Results

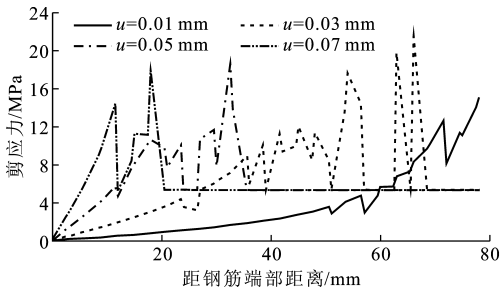


图 7 接触面切向剪应力分布

Fig. 7 Distributions of Interface Shear Stress

特点,部分区域在加载前就存在微裂纹等导致的界面力学性能弱化的初始缺陷,使部分单元在主要脱离区域到达之前就已经发生脱离,最终试件的粘结力分布呈现锯齿状,这一点在文献[1]中实测的混凝土应变结果可得到验证。相应的钢筋拔出力的分布密度曲线如图 8 所示。

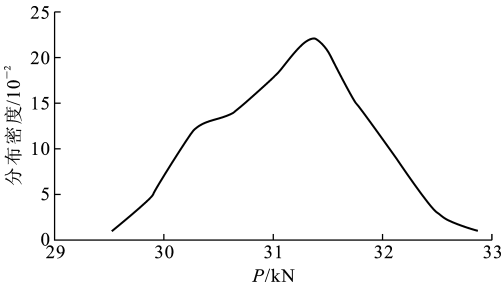


图 8 钢筋拔出力的分布密度曲线

Fig. 8 Distribution Density Curve of Pulling Force of Rebar

从图 8 可以看出,拔出力呈现正态分布的趋势,其均值 31.17 kN 与规范中的建议值基本吻合。据此,进一步开展概率统计分析,可获得不同保证率条件下的钢筋拔出力,使不确定性的影响分析定量化。当然,若还要考虑其他参数不确定性的影响,随机样本空间中的样本组数需要进一步增加。

5 结 语

笔者从界面的细观粘结机理出发,认为钢筋-混

凝土之间的粘结力主要由化学胶结力、机械咬合力和摩擦力组成,将化学胶结力及机械咬合力的弱化过程看成损伤过程。当这二者完全破坏时,摩擦力作为钢筋-混凝土之间的主要相互作用力,用库仑摩擦进行模拟。考虑到混凝土的非均质特性,假定界面细观单元的力学特性服从 Weibull 分布,并进行数值模拟。数值计算结果和试验结果吻合良好,说明了此方法的科学性和合理性。进一步,通过概率统计分析,可获得不同保证率条件下的试件强度。本文中提出的方法对钢筋-混凝土界面粘结本构研究具有一定的理论价值,同时也可作为工程设计的依据。

参考文献:

References:

- [1] 宋玉普,赵国藩. 钢筋与混凝土间的粘结滑移性能研究[J]. 大连工学院学报,1987,26(2):93-100.
SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Study of Bond-slip Property Between Steel Bars and the Concrete[J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1987, 26(2):93-100.
- [2] NILSON A H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method[J]. ACI Journal, 1968,65(9):757-766.
- [3] 金伟良,赵羽习. 随不同位置变化的钢筋与混凝土的粘结本构关系[J]. 浙江大学学报:工学版,2002,36(1):1-6.
JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Study on the Bond Stress-slip Relationship Variation with the Position [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(1):1-6.
- [4] NAAMAN A E, SHAH S P. Pull-out Mechanism in Steel Fiber-reinforced Concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(8):1537-1548.
- [5] 郑晓燕,吴胜兴. 锈蚀钢筋与混凝土动态粘结性能的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(2):71-75.
ZHENG Xiao-yan, WU Sheng-xing. Research on Bond Behavior of Corroded Steel Bar and Concrete Under Dynamic Loads[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(2):71-75.
- [6] 徐育才. 钢筋锈蚀拉拔试验及其粘结性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
XU Yu-cai. Research on Bond Performance Between the Rusted Bar and Concrete by Pullout Tests [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [7] MOBASHER B, LI C Y. Modeling of Stiffness Degradation of the Interfacial Zone During Fiber Debonding [J]. Composites Engineering, 1995, 5(10/11):1349-1365.
- [8] LI C Y, MOBASHER B. Finite Element Simulations of Fiber Pullout Toughening in Fiber Reinforced Cement Based Composites[J]. Advanced Cement Based Materials, 1998, 7(13):123-132.
- [9] MARSHALL D B, OLIVER W C. Measurement of Interfacial Mechanical Properties in Fiber-reinforced Ceramic Composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1987, 70(8):542-548.
- [10] HUTCHINSON J W, JENSEN H M. Models of Fiber Debonding and Pullout in Brittle Composites with Friction[J]. Mechanics of Materials, 1990, 9(2):139-163.
- [11] HSUEH H. Interfacial Debonding and Fiber Pullout Stresses of Fiber Reinforced Composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 1990, 123(1):1-11.
- [12] DOLLAR A, STEIF P S, WANG Y C, et al. Analyses of the Fiber Push-out Test[J]. International Journal of Solids and Structures, 1993, 30(10):1313-1329.
- [13] GAO Y C, MAI Y W, COTTERELL B. Fracture of Fiber-reinforced Materials [J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1988, 39(4):550-572.
- [14] STANG H, SHAH S P. Failure of Fibre-reinforced Composites by Pull-out Fracture[J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(3):953-957.
- [15] 高向玲,李杰. 钢筋与混凝土粘结本构关系的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1):73-77.
GAO Xiang-ling, LI Jie. Numerical Simulation of Bond Constitutive Relation Between Reinforcement and Concrete[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(1):73-77.
- [16] 刘佩玺,徐永清,刘福胜. 钢筋混凝土结构粘结滑移分析在 ANSYS 中的实现[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2007, 38(1):125-130.
LIU Pei-xi, XU Yong-qing, LIU Fu-sheng. Realization of RC Structure Bond-slip Analysis with ANSYS[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2007, 38(1):125-130.
- [17] NAAMAN A E, NAMUR G G, ALWAN J M, et al. Fiber Pullout and Bond Slip. II: Experimental Validation[J]. Journal of Structure Engineering, 1991, 117(9):2791-2800.
- [18] FANG C Q, LUNDGREN K, CHEN L G, et al. Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11):2159-2167.