

文章编号:1673-2049(2011)02-0044-08

基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟

赵卫平

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:采用通用有限元程序 ANSYS 10.0 对拔出试件进行了接触分析,对数值模拟中的材料模型定义、有限元模型的建立、接触单元生成及后处理等关键技术进行了系统的研究;重点介绍了使用 Target170 和 Contal74 单元建立三维接触对的实用方法,建议了库仑摩擦模型中摩擦因数和胶着强度的取值,最终实现了基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟。结果表明:该方法可对钢筋拔出过程中的接触摩擦力、接触压力及接触状态等问题进行研究,弥补了宏观试验的不足,模拟拔出试验中的粘结-滑移关系具有一定的可行性。

关键词:高强混凝土;细晶粒钢筋;粘结-滑移;数值模拟;ANSYS;高温

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Bond-slip Numerical Simulation Based on ANSYS Contact Analysis

ZHAO Wei-ping

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Contact analysis of pull-out specimen was carried out by using finite element program ANSYS 10.0. A series of numerical simulation techniques, such as defining material model, establishing finite element model (FEM), generating contact element and post-processing were studied. The practical method of setting up 3-D contact pair with element Target170 and Contal74 was emphatically introduced. Both friction coefficients of Coulomb friction model and adhesion strength were recommended. Finally, bond-slip numerical simulation was achieved based on ANSYS contact analysis. Results show that contact friction, contact pressure and contact state in the process of steel bar pull-out can be studied by this method, which makes up the deficiency of macro test. This method is feasible to simulate bond-slip relationship during pull-out test.

Key words: high strength concrete; fine-grained steel bar; bond-slip; numerical simulation; ANSYS; elevated temperature

0 引言

1967 年 Ngo 等^[1]建立了第 1 个关于钢筋与混凝土粘结问题的有限元模型。1968 年 Bresler 等^[2]和 Nilson^[3]提出用线性和非线性弹簧模拟钢筋与混凝土的粘结行为,这种“界面层”模型得到了广泛的认可,到现在仍然被广泛地应用。1984 年 Rein-

hardt 等^[4]用改进的“界面层”模型模拟了粘结问题,界面层划分成隆起的单元,其外形与钢筋肋形状相符,钢筋和混凝土视为线弹性材料,隆起单元采用弹塑性的受压本构模型模拟非线性行为,采用拉应力截断的 Mohr-Coulomb 准则破坏面描述多轴应力下的破坏情况。1992 年 Cox 等^[5]基于对拔出试验数据的分析提出了 2-D 塑性粘结模型,在钢筋周围有

收稿日期:2011-04-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2007AA03Z550)

作者简介:赵卫平(1981-),男,河北石家庄人,工学博士研究生,E-mail:weipingzhao163@163.com。

限厚度的区域内,建立了局部滑移模与粘结应力之间的关系。1995 年 Van Mier 等^[6]提出一种非常特别的有限元模型,模型中采用了 20 世纪 90 年代兴起的格构模型,混凝土被规则或随机生成的格构形式“微梁”代替,模型充分考虑了材料的不均匀性。“微梁”的拉、压、弯都采用简单的线弹性本构模型,通过在各荷载步中移除超过容许应力的“微梁”模拟混凝土和界面的开裂。由于格构是一种基于微观力学性能的模型,而文中参数却是宏观的,因此如何确定“微梁”的几何参数和力学指标十分困难;此模型自身的简洁性使其具有很好的应用前景,但是微观格构能在多大程度上描述宏观混凝土或砂浆仍存在争议。2003 年高向玲等^[7]采用不连续介质力学的界面单元法对粘结性能进行了细观力学分析,模型假定块体元的变形累积与界面,成功地描述了接触面上的错位、滑移、张开度,计算结果与试验结果吻合良好。

近年来,商业有限元软件日臻完善,在前处理、运算功能和后处理方面均表现出较强功能。ANSYS 中内含的多种单元类型和材料本构模型为混凝土结构仿真提供了理论平台,正逐渐成为结构理论研究和工程应用的常用工具^[8-9]。1991 年 Hammaty 等^[10]首次用 ANSYS 中的非线性弹簧单元(Combin39)对钢筋与混凝土粘结-滑移问题进行数值模拟。王依群等^[11]和刘佩玺等^[12]分别在 2006 年和 2007 年也用同样的单元(Combin39)对此问题进行了数值模拟,这种模拟技术通过在分离式模型中插入非线性弹簧,利用弹簧的力-伸长关系实现对粘结-滑移问题的模拟。弹簧的力-伸长关系须依据粘结试验标定,然后作为单元实常数输入。本文中笔者基于 ANSYS 10.0 的接触分析功能,实现了粘结-滑移问题的数值模拟,不仅可以对试验结果进行补充,而且有助于对粘结机制有更清楚的认识和理解。

1 拔出试验试件参数

为研究不同温度经历的高强混凝土与细晶粒钢筋间的粘结-滑移性能,文献[13]中分别针对 20 ℃、200 ℃、400 ℃、600 ℃、800 ℃等温度经历的混凝土拔出试件进行了试验研究。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)规定的方法检验和评定了高强混凝土(C80)与细晶粒钢筋(500 MPa)之间的粘结性能,粘结长度为 3 倍钢筋直径,试件边长为 10 倍钢筋直径。试件几何尺寸如图 1 所示,C80 混凝土配合比见表 1。

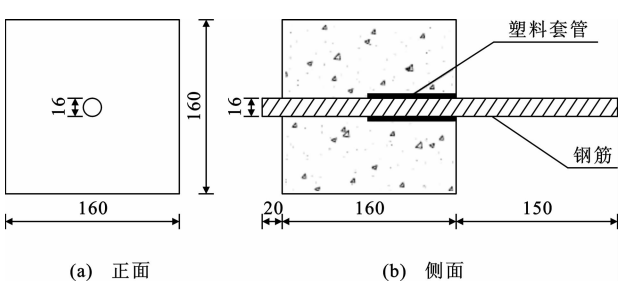


图 1 试件几何尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Geometric Dimensions of Specimens (Unit:mm)

表 1 C80 混凝土配合比
Tab. 1 Mix Proportions of C80 Concrete

| 各种材料用量/(kg·m ⁻³) | | | | | | | 坍落度/mm |
|------------------------------|-----|----|-----|-----|-------|-------|--------|
| 水泥 | 矿渣 | 硅粉 | 水 | 砂 | 碎石 | 减水剂 | |
| 420 | 120 | 60 | 162 | 615 | 1 140 | 9.526 | 200 |

注:碎石直径为 5~20 mm。

试验中采用的是 500 MPa 细晶粒钢筋,钢筋的力学性能见表 2。

表 2 500 MPa 细晶粒钢筋力学性能
Tab. 2 Mechanical Properties of 500 MPa Fine-grained Steel Bar

| 直径/ mm | 屈服强 度/MPa | 屈服应 变/10 ⁻² | 极限强 度/MPa | 极限应 变/10 ⁻² | 弹性模 量/GPa |
|-----------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| 16 | 500 | 0.27 | 666 | 12.15 | 206 |

2 ANSYS 接触分析模型

2.1 材料模型定义

2.1.1 钢筋材料模型

在 ANSYS 程序分析中,钢筋材料采用双线性等向强化模型(MISO)模拟。弹性模量、屈服强度和极限强度按表 2 选取,泊松比取 0.3,忽略温度经历对钢材性能的影响。

2.1.2 混凝土材料模型

混凝土材料的定义包括混凝土在单轴受压下的应力-应变曲线和混凝土的破坏准则 2 个部分。高温后混凝土单轴受压应力-应变关系可采用文献[14]中所提出的模型,将应力-应变曲线简化为多段折线,按照多线性等向强化模型模拟输入。该模型的表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{ax - x^2}{1 + (a-2)x} & x \leq 1 \\ \frac{x}{b(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_0$, ε 为应变, ε_0 为峰值应变,取 $\varepsilon_0 = 0.0033$; $y = \sigma/\sigma_0$, σ 为应力, σ_0 为峰值应力,取 $\sigma_0 = 80 \text{ MPa}$; a, b 为参数,取值见表 3。

表 3 参数 a 与 b 的取值
Tab. 3 Values of Parameters a and b

| 温度/℃ | 20 | 200 | 400 | 500 | 600 | 800 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| a | 1.398 | 1.507 | 1.007 | 1.132 | 1.000 | 1.002 |
| b | 0.717 | 0.414 | 3.303 | 3.306 | 1.597 | 14.189 |

混凝土峰值应变随温度经历的变化采用文献 [15] 中提出的经验公式计算

$$\frac{\epsilon_0^T}{\epsilon_0} = 1 + 0.002T \tag{2}$$

式中： T 为温度。

2.2 单元类型选择

钢筋采用 Solid45 单元模拟。虽然 ANSYS 10.0 专门提供了面向混凝土、岩石材料的 Solid65 单元,但是为确保计算收敛常关闭压碎开关,此时相当于采用了“拉力截断”的 Von Mises 模型,只有当围压很小的情况下才能取得良好的计算结果。然而,拔出过程中带肋钢筋的锥楔作用导致钢筋和混凝土界面存在很大的被动压力,采用此单元势必影响计算的准确性^[16]。本文中采用 Solid185 单元模拟混凝土,Solid185 单元是一种采用力与位移混合形状函数的线形六面体单元,单元技术包括 \bar{B} 方法(选择缩减积分法)、一致缩减积分法和增强应变方法,其中 \bar{B} 方法可有效防止“剪切闭锁”,选用此单元可促进计算收敛,保证计算效率。在钢筋和混凝土的界面上插入界面单元,采用面-面接触单元,较刚的钢筋表面被当作目标面,采用 Target170 单元模拟三维的目标面,较柔的混凝土表面被当作接触面,采用 Conta174 单元模拟,目标单元和接触单元必须设置相同的实常数号。

2.3 接触单元实常数和关键选项设置

2.3.1 实常数

ANSYS 10.0 使用 20 个实常数控制面-面接触单元的接触,忽略控制热接触模拟的实常数,本文中针对几个主要实常数做如下 4 点说明:

(1) F_{TOLN} 为拉格朗日算法指定容许的最大穿透。正值表示下伏单元厚度的比例因子,负值表示绝对值,如果程序发现穿透大于此值时,即使不平衡力和位移增量已经满足了收敛准则,总的求解仍被当作不收敛处理。此值太小可能会造成太多的迭代次数或不收敛,太大会影响计算精度,本文中设置最大穿透 $F_{TOLN} = -0.02$ 。

(2) F_{KN} 为接触刚度指定一个比例因子或指定一个绝对值。比例因子一般在 0.01~10 之间,对于弯曲为主的问题,通常为 0.01~0.1;对于本文中的

大变形问题,设置 $F_{KN} = 1$ 既可以避免过多的迭代次数,又能使穿透到达极小值。

(3) I_{CONT} 用来指定一个初始接触环,初始接触环是指沿着目标面的“调整环”的深度。 I_{CONT} 正值表示相对于下伏单元厚度的比例因子,负值表示接触环的绝对值。任何落在“调整环”域内的接触检查点将被自动移到目标面上,如图 2 所示。建议使用一个较小的 I_{CONT} 值[图 2(a)],否则可能会发生严重的不连续[图 2(b)]。

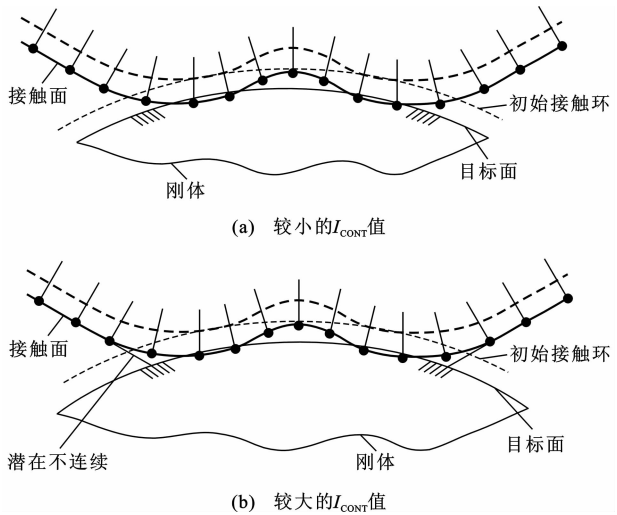


图 2 I_{CONT} 对接触面的调整
Fig. 2 Adjustment of Contact Surface by I_{CONT}

2.3.2 关键选项

面-面接触单元包括数个关键选项。对大多数接触问题,默认的关键选项是合适的。对于带肋钢筋与混凝土粘结-滑移问题的模拟,需要改变几个默认值才能得到较理想的结果:

(1)设置 KEYOPT(5)=3: 闭合间隙或减少初始穿透。

(2)设置 KEYOPT(7)=1: 如果一次迭代期间产生太大的穿透,或接触状态急剧变化,则进行时间步长二分。

(3)设置 KEYOPT(10)=1: 允许已处于“闭合”状态的单元接触刚度在荷载步之间改变。对于从“张开”到“闭合”状态的单元,将在每一个子步上修正接触刚度。

2.4 库仑摩擦模型

界面接触单元支持库仑摩擦模型,在基本的库仑摩擦模型中,2 个接触面在开始相互滑动之前,在它们的界面上会有达到某一大小的剪应力产生,这种状态被称作粘合状态。库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力 τ ,在某一法向压应力 p 作用下剪应力

达到此值时表面开始滑动

$$\tau = \mu p + C_{\text{OHE}} \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦因数; C_{OHE} 为粘聚力。

本文中忽略温度经历对摩擦因数的影响, 取 $\mu = 0.45$, 并且忽略摩擦生热造成的内能损失。不同温度经历混凝土和钢筋的粘聚力服从如下关系

$$C_{\text{OHE}} = \begin{cases} 1.92 + 2.895 \times \frac{T}{1000} & T \leq 400 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0 & T > 400 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

一旦剪应力超过 τ 后, 2 个表面之间将开始相互滑动, 这种状态称为滑动状态。ANSYS 10.0 程序提供了一个指定最大等效剪应力的选项, 不管接触压力值的大小, 若等效剪应力 τ 达到此值时, 即发生滑动, 如图 3 所示, 其中, P 为接触面上的压力, T_{AUMAX} 为接触界面上的最大容许剪应力。

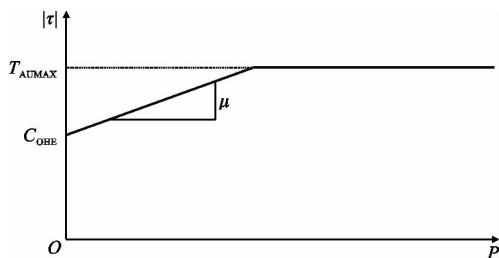


图 3 库伦摩擦模型

Fig. 3 Coulomb Friction Model

钢筋拔出时, 钢筋肋与肋前混凝土间存在非常大的接触压力, 以至于用库伦摩擦模型计算出的界面剪应力可能超过混凝土材料的极限抗压强度, 须设置实常数 T_{AUMAX} 指定接触界面上的最大容许剪应力。拔出破坏以肋间混凝土被剪断为主要的破坏形式, 根据能量强度理论得

$$\sigma_{zs} = \sqrt{3\tau^2} = \sqrt{3}\tau \leq f_y \quad (5)$$

$$\tau \leq \frac{1}{\sqrt{3}} f_y \approx 0.58 f_y \quad (6)$$

式中: σ_{zs} 为 Von Mises 屈服应力 (折算应力); f_y 为材料的屈服强度。

混凝土作为准脆性材料并没有明显的屈服平台, 建议采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 中的混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 代替 f_y , 因此, T_{AUMAX} 的一个合理上限估值可取 $0.58 f_c$ (本文中的 $f_c = 35.9 \text{ MPa}$)。

2.5 几何模型简化

钢筋和混凝土之间的粘结力主要由 3 个部分组成: 化学胶着力、摩擦力和钢筋肋与混凝土之间的机械咬合力。化学胶着力和摩擦力在库伦摩擦模型中

有充分的考虑, 机械咬合力主要通过建模时生成的隆起单元提供。月牙肋钢筋外形如图 4 所示^[17], 其中, a' 为纵肋顶宽, b' 为横肋宽, h 为纵肋高, h_1 为横肋高, l 为相邻肋间距, d_1 为钢筋公称直径, α_1 为钢筋横肋与钢筋纵向夹角, θ_1 为纵肋倾角, β' 为横肋与钢筋纵向夹角。理论分析模型和有限元模型一般将钢筋横截面简化为轴对称图形。

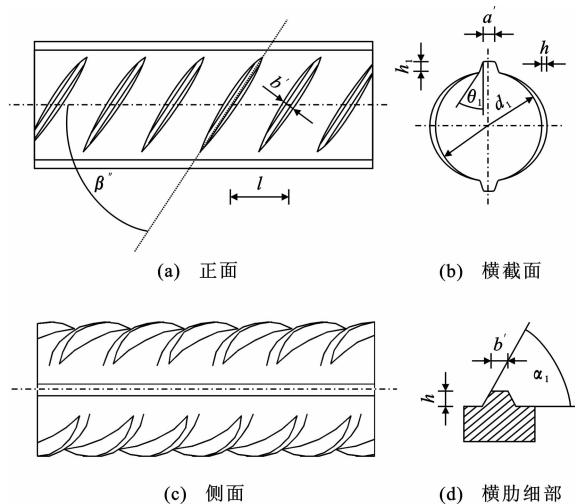


图 4 月牙肋钢筋外形

Fig. 4 Shapes of Ribbed Steel Bar

钢筋拔出过程中, 随荷载增大, 混凝土逐渐被挤压成粉末, 密实地嵌固在肋的根部。荷载继续增大, 贯通形成锥状脱离体^[18], 脱离体表面形成新的滑移面, Gambarova 等^[19]的研究表明, 此阶段破碎滑移面是曲面形式, 如图 5 所示, 其中, P' 为肋前破碎混凝土与钢筋肋之间的压力, P'' 为肋前破碎混凝土与外围混凝土之间的压力, β' 为混凝土裂缝与钢筋纵向夹角, θ 为钢筋横肋与钢筋纵向夹角, $\theta > \beta'$, ΔS 为滑移量增量, N 为拔出力, ΔN 为拔出力增量。

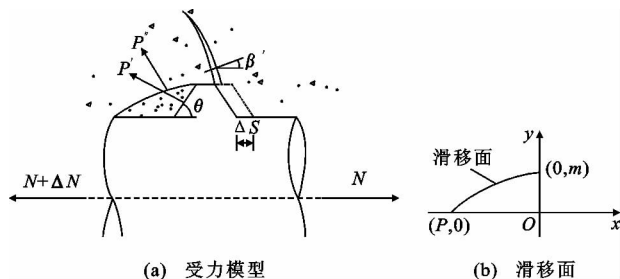


图 5 混凝土开裂后的受力模型和滑移面

Fig. 5 Force Model and Slip Surface After Concrete Cracking

基于以上分析, 钢筋与混凝土的滑移面应包括锥状脱离体的上表面, 用二次函数对新的滑移面进行拟合

$$y = nx^2 + m \quad (7)$$

式中: n 为二次项系数; m 为等效肋高。

根据文献[11]中 $\Phi 16$ 钢筋的外形特点, n 、 m 分别取 -0.5 mm^{-2} 和 2 mm , 相邻肋间距为 10 mm 。

2.6 有限元模型的建立

有限元分析的最终目的是要再现实际工程系统的数学行为特征, 分析必须是物理原型准确的数学模型。结合图 5 中对称简化后的几何模型, 以相邻 2 个钢筋肋间的混凝土为研究对象, 采用自下而上(依次生成点、线、面、体)的顺序建立几何模型, 然后再对实体模型进行网格划分, 得到有限元模型。具体建模步骤如下:

步骤 1: 选择所需要的各种单元类型, 并设置各单元的关键选项等参数。

步骤 2: 分别输入混凝土和钢筋所需要的材料模型, 定义混凝土的材料模型时输入摩擦因数 $\mu = 0.45$ 。

步骤 3: 自下而上生成实体, 即先定义关键点, 然后再生成线、面和体(母线绕中心线旋转生成体)。

步骤 4: 分别选择与混凝土和钢筋实体对应的单元类型和材料属性对实体进行网格划分, 六面体的 Solid 单元一般比四面体的单元计算要稳定且收敛性好, 尽量使用六面体单元。

步骤 5: 指定目标面和接触面, 生成接触单元(一个接触对中的目标面和接触面必须有相同的实常数号)。

步骤 6: 检查接触单元外法向, 确保接触面的外法向指向目标面, 否则, 程序认为存在过度的穿透, 而很难找到初始解。

步骤 7: 施加必须的边界条件并定义求解选项和荷载步。

为节约机时, 根据对称性取 $1/4$ 结构, 在对称面施加对称约束。单元的划分不宜过密, 同时也要兼顾有足够的单元对钢筋肋的外形进行离散, 如图 6 所示。图 7、8 分别为敷在钢筋表面的 Targe170 单元和敷在混凝土表面的 Conta174 单元。

3 有限元分析结果

3.1 粘结-滑移本构关系

图 9 为 ANSYS 10.0 计算值与文献[13]中试验值的对比, 图 9 中滑移量 S 为自由端滑移。由于 20°C 拔出过程中钢筋被拉断, 本文中仅对 400°C 、 600°C 、 800°C 温度经历的拔出试件进行模拟。有限元模拟结果表明, 随经历温度的升高, 钢筋与混凝土

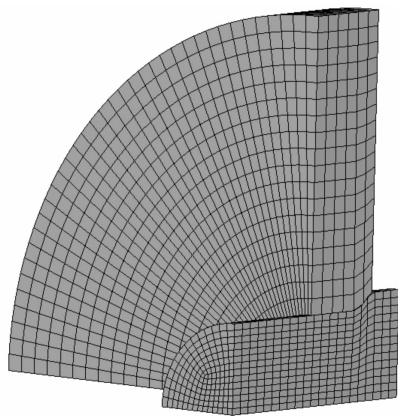


图 6 有限元计算模型

Fig. 6 Finite Element Calculation Model

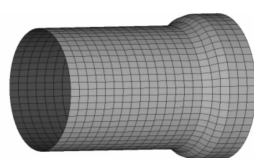


图 7 Targe170 单元

Fig. 7 Element Targe170



图 8 Conta174 单元

Fig. 8 Element Conta174

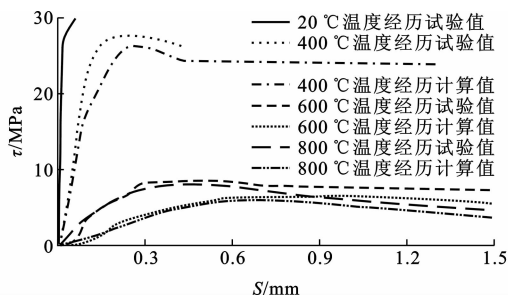


图 9 粘结-滑移关系曲线 FEM 计算值和试验值比较

Fig. 9 Comparisons of FEM Calculation Results and Test Results of Bond-slip Curves

土的粘结性能迅速退化, 与试验结果一致。

试验过程中, 400°C 温度经历的试件发生了劈裂破坏, 没有完整的下降段。将 ANSYS 10.0 模拟结果与 600°C 、 800°C 温度经历试块对比发现, 在粘结-滑移关系曲线的下降段, 数值模拟结果明显高于试验结果, 导致此差异的主要因素可能包括:

(1) 不同温度经历试件在拔出过程中可能会形成不同滑移面, 建模时未加区分, 并且忽略了温度对摩擦因数的影响。

(2) 取相邻钢筋肋间混凝土为研究对象, 粘结长度仅为 10 mm , 与试验中的 3 倍钢筋直径粘结长度相差较大。

(3) 600°C 、 800°C 温度经历试件发生了刮出式破坏, 在真实的试验过程中, 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,本文中有限元模型未加考虑。

3.2 单元应力分布规律

以 200 ℃ 温度经历试件为例,研究单元应力分布。图 10、11 分别为在拔出过程中 Conta174 单元的最大摩擦应力和最大压应力。

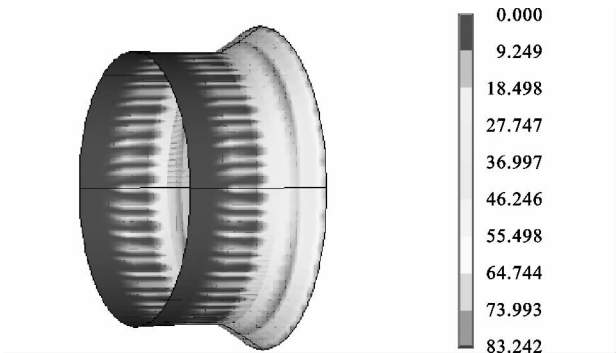


图 10 最大摩擦应力(单位:MPa)

Fig. 10 Maximum Friction Stresses (Unit:MPa)

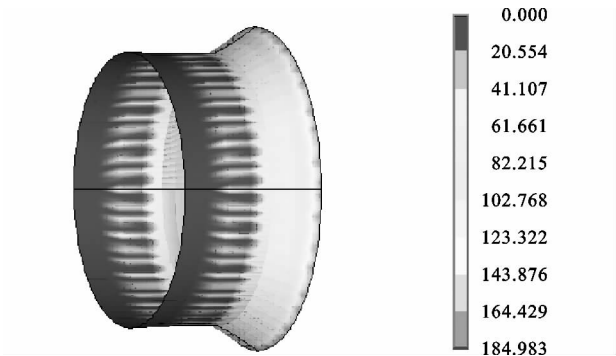


图 11 最大压应力(单位:MPa)

Fig. 11 Maximum Compressive Stresses (Unit:MPa)

由图 10、11 可以看出:

(1)最大摩擦应力和最大压应力存在于钢筋肋上,随着钢筋肋距离的增大而减小,在模型的最左端几乎没有压应力存在。

(2)拔出过程中钢筋和混凝土界面的压应力远大于 C80 混凝土的单轴极限抗压强度,主要原因是钢筋拔出时的锥楔作用激发了混凝土的被动约束,在钢筋和混凝土接触界面上存在较高的围压。

(3)最大摩擦应力在数值上等于最大压应力乘以摩擦因数($\mu=0.45$),摩擦因数的取值有待研究。

图 12、13 分别为 200 ℃ 温度经历试件达到峰值粘结应力时接触状态和实体单元沿钢筋纵向的应力云图。

由图 12、13 可以看出:

(1)在拔出过程中钢筋肋始终与混凝土紧密接触,而靠近加载端的钢筋与混凝土脱离。

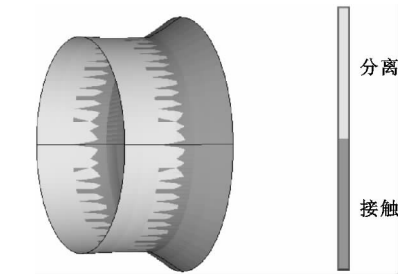


图 12 接触状态

Fig. 12 Contact State

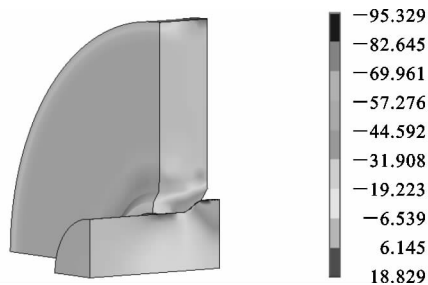


图 13 实体单元应力(单位:MPa)

Fig. 13 Stresses of Solid Elements (Unit:MPa)

(2)钢筋受力后在两者的接触界面上发生了挤压和滑移,通过几何建模生成的隆起肋可有效地模拟咬合力,而且咬合力提供了大部分的粘结力。

(3)拔出过程中混凝土径向应力分布极其复杂,由界面附近的压应力迅速转为拉应力,在较远处趋于 0。

图 14 为钢筋实体单元横截面的网格划分,图 15 为钢筋横截面上节点反力 F 随滑移量 S 的变化曲线。由图 15 可以看出,钢筋横截面上的节点反力并非均匀分布,在钢筋和混凝土的接触界面上节点反力取得最大值,钢筋中心处取得最小值。

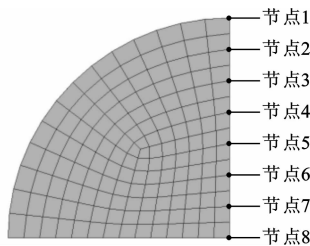


图 14 实体单元的网格划分

Fig. 14 Solid Element Mesh Division

图 16 为钢筋横截面应力分布,其中, σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为最大拉应力和最小拉应力, σ_{av} 为拉应力平均值。由图 16 可以看出:钢筋拔出时钢筋横截面轴向拉应力与界面的粘结应力平衡,钢筋与混凝土的粘结应力与钢筋最外侧拉应力 σ_{\max} 直接相关;另一方面,试验研究把作用于钢筋上的拉力除以粘结面积

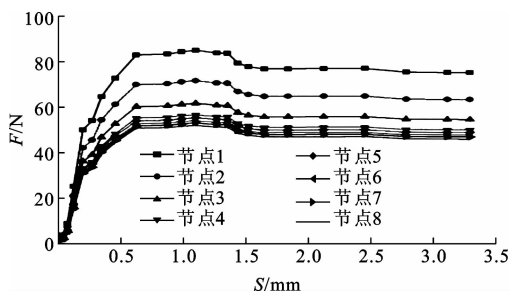


图 15 节点反力

Fig. 15 Nodal Forces

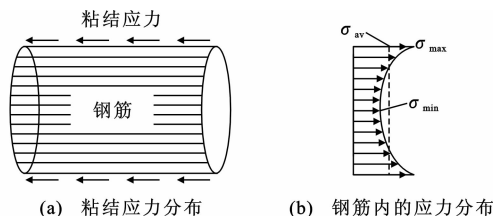


图 16 粘结剪力滞

Fig. 16 Bond Shear Lag

所得粘结应力作为“真实”的粘结应力,此应力与钢筋横截面的平均应力成正比。基于对图 15、16 的分析可得到如下推论:

(1)当钢筋的直径增大时, σ_{max} 和 σ_{av} 的差别增大,出现图 16 所示的“剪切滞后”现象,最终导致试验所得粘结强度降低。

(2)对于纤维增强复合材料(FRP)筋,轴向抗剪刚度相对较小^[20]，“剪切滞后”现象相对于钢筋更明显^[21-24]。

(3)提高混凝土强度或增大粘结长度,拔出过程中钢筋轴向拉应力增大, σ_{max} 和 σ_{av} 的差别增大,“剪切滞后”明显。

4 结 语

基于 ANSYS 10.0 的接触分析功能对不同温度经历的混凝土拔出试件进行了数值模拟,通过合理地选择单元类型、材料模型以及各单元实常数并设置关键选项,可以取得比较理想的结果。该方法为位移不连续问题的数值模拟技术开辟了新思路,是对传统有限元仿真技术的传承和延伸,然而接触滑移面的确定需要大量的试算,并结合相应的试验结果来反推定之。这样的反推过程,实际上是把分析和评价的过程结合在一起,对于所试算的模型及试验,无疑是可以做到很好的吻合,但方法的通用性和可移植性仍需变化更多的试验参数(混凝土强度等级、钢筋直径等)加以证明。

参考文献:

References:

- [1] NGO D, SCORDELIS A C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of ACI, 1967, 64(3): 152-163.
- [2] BRESLER B, BERTERO V V. Behavior of Reinforced Concrete Under Repeated Load[J]. Journal of Structural Division, 1968, 94(S6): 1567-1590.
- [3] NILSON A H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method[J]. Journal of ACI, 1968, 65(9): 757-766.
- [4] REINHARDT H W, BLAAUWENDRAAD J, VOS E. Prediction of Bond Between Steel and Concrete by Numerical Analysis [J]. Materials and Structures, 1984, 17(4): 311-320.
- [5] COX J V, HERRMANN L R. Confinement-stress Dependent Bond Behavior, Part II: a Two-degree of Freedom Plasticity Model[C]//CEB. Proceedings of International Conference on Bond in Concrete. Riga: CEB, 1992: 11-20.
- [6] VAN MIER J G M, VERVUURT A. Lattice Model for Analyzing Steel-concrete Interface Behavior[J]. Mechanics of Geometrical Interfaces, 1995, 42(1): 201-225.
- [7] 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.
- [8] 高陈燕, 尹冠生, 马 超. 基于有限变形理论 ANSYS 几何非线性算法缺陷分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 106-110.
GAO Chen-yan, YIN Guan-sheng, MA Chao. Analysis of Deficiency of ANSYS Geometric Nonlinear Arithmetic Based on Finite Deformation Theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 106-110.
- [9] 许 强, 李湘沅, 陈 庆, 等. 基于 ANSYS 平台的连续体渐进结构优化设计及其应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 23-31.
XU Qiang, LI Xiang-yuan, CHEN Qing, et al. Evolutionary Structural Optimization Design of Continuum Based on ANSYS Platform and Its Application[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 23-31.
- [10] HAMMATY Y, DE ROECK G, VANDEWALLE L. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Tak-

- ing into Consideration Bond-slip[C]//DIETRICH D E. 1991 ANSYS Conference Proceedings. Houston: SASI, 1991: 1-10.
- [11] 王依群, 王福智. 钢筋与混凝土间的黏结-滑移在 ANSYS 中的模拟[J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 209-213.
WANG Yi-qun, WANG Fu-zhi. Simulation of Bond-slip Relationship Between Concrete and Reinforcing Bar in ANSYS[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(2): 209-213.
- [12] 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, 2007, 38(1): 125-130.
- [13] 肖建庄, 黄均亮, 赵勇. 高温后高性能混凝土和细晶粒钢筋间粘结性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1296-1301.
XIAO Jian-zhuang, HUANG Jun-liang, ZHAO Yong. On Bond Behavior Between HPC and Fine Grain Steel Bar After Elevated Temperatures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(10): 1296-1301.
- [14] 肖建庄, 王平, 谢猛, 等. 矿渣高性能混凝土高温后受压本构关系试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 186-190.
XIAO Jian-zhuang, WANG Ping, XIE Meng, et al. Experimental Study on Compressive Relationship of HPC at Elevated Temperature[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(2): 186-190.
- [15] 朱伯龙, 陆洲导, 胡克旭. 高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系[J]. 四川建筑科学研究, 1990(1): 37-43.
ZHU Bo-long, LU Zhou-dao, HU Ke-xu. Constitutive Relationship of Concrete and Steel Bar Subject to High Temperature (Fire)[J]. Building Science Research of Sichuan, 1990(1): 37-43.
- [16] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
JIANG Jian-jing, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Finite Element Analysis of Concrete Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [17] GB 1499.2—2007, 钢筋混凝土用钢第2部分: 热轧带肋钢筋[S].
GB 1499.2—2007, Steel for the Reinforcement of Concrete—Part 2: Hot Rolled Ribbed Bars[S].
- [18] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
XU You-lin. An Experimental Study of Bond-anchorage Properties of Bars in Concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [19] GAMBAROVA P G, ROSATI G P. Bond and Splitting in Reinforced Concrete: Test Results on Bar Pull-out[J]. Materials and Structures, 1996, 29(5): 267-276.
- [20] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K, WALDRON P. Bond Behavior of FRP Rebar Splices[C]//TAERWE L. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. London: Spon Press, 1997: 405-412.
- [21] 任伟, 贺拴海, 栾好发. 片材-混凝土界面粘贴性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 60-64.
REN Wei, HE Shuan-hai, LUAN Hao-fa. Test on Bonding Performance of Sheet-concrete Interface[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 60-64.
- [22] 尧云涛, 肖汝诚. 考虑空间效应的钢-混凝土组合梁单元研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 53-56, 90.
YAO Yun-tao, XIAO Ru-cheng. Research on Segment Element of Steel-concrete Composite Slab Beam Considering Spatial Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 53-56, 90.
- [23] 刘寒冰, 马辉, 刘天明, 等. 竖向集中荷载作用下钢-混凝土组合梁的解析解[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 39-44.
LIU Han-bing, MA Hui, LIU Tian-ming, et al. Analytical Solution of Steel-concrete Composite Beam Under Vertical Loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 39-44.
- [24] 聂建国, 张晓光, 樊健生. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 35-43.
NIE Jian-guo, ZHANG Xiao-guang, FAN Jian-sheng. Experiment on Old Concrete Bridge Widened with Steel-concrete Composite Beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 35-43.