

钢筋混凝土界面问题分析模型

杜培荣¹ 卓家寿² 孟闻远¹

(1. 华北水利水电学院土木系, 河南 郑州 450011; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 钢筋与混凝土主要通过界面黏结作用来共同承受荷载, 在界面上的受力属于不连续介质的力学问题. 应用解决不连续介质力学问题的界面应力元法建立交界面的分析模型, 对拔出试验和拉伸试验进行了数值模拟, 数值模拟计算结果与试验结果接近.

关键词 钢筋混凝土; 界面; 不连续介质; 界面应力元法

中图分类号 :TU375 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)03-0312-03

钢筋与混凝土能够共同承受荷载, 主要依赖于两者交界面的黏结作用, 因此在钢筋混凝土结构有限元分析对结构进行离散化时, 需要考虑钢筋与混凝土交界面问题. 文献 [1~4] 在考虑钢筋与混凝土间的黏结作用时, 专门设置了反映黏结作用的单元. 文献 [5] 对钢筋混凝土简支梁的有限元分析结果表明, 黏结单元对混凝土的开裂荷载影响不大, 但对极限荷载影响较大. 本文应用不连续介质力学问题的界面应力元法, 对钢筋和混凝土界面的力学行为进行了模拟.

1 界面元法的基本方程

1.1 界面元法的位移模式

界面元法采用的模型是基于单元累积变形于界面层的假定而建立的有限多块体元-界面元组合的离散体^[6]. 单元变形累积于界面层, 块体元只有刚体位移, 对于空间块体元平动位移有 3 个分量, 转动位移也有 3 个分量, 只要知道块体元中任何一点(通常选形心点)的 6 个刚体位移分量, 其余各点的位移也随之可以完全确定.

$$\boldsymbol{u} = N\boldsymbol{u}_g \tag{1}$$

其中任一点位移

$$\boldsymbol{u} = [u \quad v \quad w]$$

单元形心位移

$$\boldsymbol{u}_g = [u_g \quad v_g \quad w_g \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z]$$

形函数

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_g & y_g - y \\ 0 & 1 & 0 & z_g - z & 0 & x - x_g \\ 0 & 0 & 1 & y - y_g & x_g - x & 0 \end{bmatrix}$$

式(1)中选用笛卡尔直角坐标系, 任意一点的坐标变量为 x, y, z , 沿各坐标轴正向任意一点的位移分量为 u, v, w , 块体元形心坐标为 x_g, y_g, z_g , 平移和转动位移分量为 u_g, v_g, w_g 和 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, 形函数 N 为一次不完整多项式, 块体元的位移模式为线性式.

1.2 界面元法的应力模式

界面上点对的位移是不协调的, 由相邻两块体元形心点的位移决定. 首先由界面上点对的位移求得界面的应变, 然后再由材料的本构关系和界面上力的平衡关系求得界面上的应力, 即相邻两块体单元的相互作用力.

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{E_1 E_2}{E_1 h_2 + E_2 h_1} (\delta_n^{(1)} + \delta_n^{(2)}) \\ \tau_s = \frac{E_1 E_2}{2E_1 h_2 (1 + \mu_2) + 2E_2 h_1 (1 + \mu_1)} (\delta_s^{(1)} + \delta_s^{(2)}) \end{cases} \tag{2}$$

式中： E_i, μ_i —— i 块体元的弹性模量和泊松比； $\delta_n^{(i)}, \delta_s^{(i)}$ —— i 块体元界面上点的法向和切向位移，其中 i 表示相连块体元为第 i 块（ $i = 1, 2$ ）。

式（2）为平面应力状态下的界面应力公式，详细推导见文献 [6]。

1.3 界面元法的支配方程

利用虚功原理可得界面元的支配方程为

$$KU = R$$

(3)

式中： K ——整体刚度矩阵，由各块体单元界面刚度矩阵 K_e 集合而成， R ——整体荷载列阵，由各块体单元的 R_e 集合而成，界面元模型选择的基本未知量是各块体的形心位移，因而 R_e 是作用于块体元形心的荷载，这与有限元 R_e 视为集中作用于单元节点上的荷载求解处理方法类似； U ——整体位移列阵，由各块体形心广义位移形成。

2 界面问题模拟

利用界面元法建立钢筋混凝土界面问题的分析模型中，把钢筋与混凝土各自划分为独立的单元，该模型与钢筋混凝土有限元模型的分离式模型有相似之处，即把钢筋和混凝土分离开，所不同的是界面元模型不需要在交界面上布置黏结单元来反映黏结滑移，界面上点对切向的相对位移就可以直接反映相对滑移。图 1 所示的是混凝土单元与钢筋单元。



图 1 钢筋与混凝土界面问题分析模型

Fig.1 Analysis model for problem of reinforced and concrete interface

2.1 拔出试验模拟

将钢筋混凝土结构看作是由两种材料通过界面的黏结作用组合而成的构件，以此为模型进行计算，对黏结试验进行模拟（图 2）。在采用界面元法的数值模拟过程中，根据加载端附近的滑移达到 0.1~0.15 mm 时的界面黏结应力来确定黏结强度，选用不同强度等级的混凝土进行计算。计算结果表明，混凝土强度等级较高时，黏结强度也较高，当混凝土强度等级增大到一定程度后，黏结强度变化不大（图 3）。

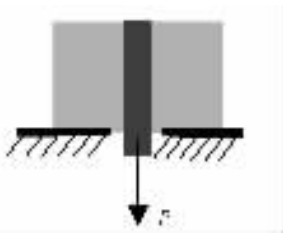


图 2 拔出试验

Fig.2 Sketch of pull-out test

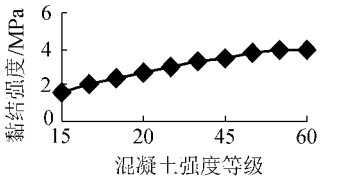


图 3 黏结强度随混凝土强度的变化关系

Fig.3 Variation of bond strength with concrete strength

根据文献 [7] 中提供的黏结力参数来选取界面参数。文献 [7] 采用平钢板模拟钢筋进行黏结参数的试验，给出了光圆钢筋拔出试验的一些黏结力参数，根据钢筋的锈蚀情况不同，平均黏结强度与混凝土强度的比值范围大约在 0.04~0.14 之间。本文的计算成果在此范围内。

2.2 轴拉试验模拟

轴拉试验主要用于量测裂缝间区段的黏结应力、钢筋应力和混凝土应力。拉伸试件如图 4 所示，荷载 $P = 10\text{ kN}$ ，试件长度 $l = 1.5\text{ m}$ ，宽度 $b = 1\text{ m}$ ，高度 $h = 100\text{ mm}$ ，钢筋直径 $d = 20\text{ mm}$ 。本文计算得到的裂缝间区段混凝土拉应力、钢筋应力和黏结应力分布如图 5 所示。



图 4 拉伸试验

Fig.4 Sketch of tensile test

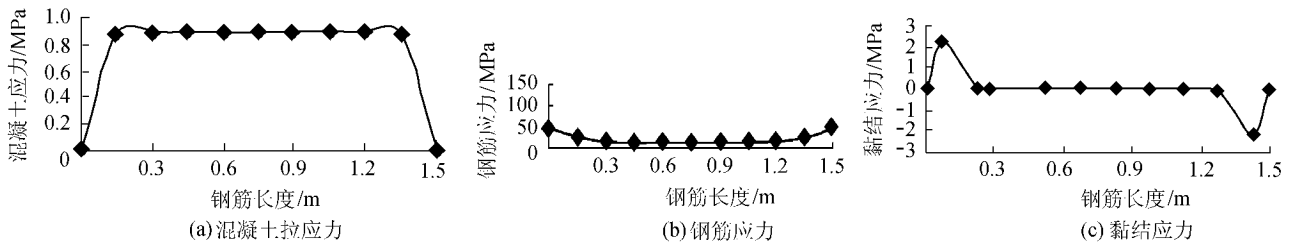


图 5 轴拉试验中裂缝间区段的应力分布

Fig.5 Stress distribution in reinforced concrete between adjoining cracks in axial tensile test

计算结果表明:钢筋应力在裂缝截面有最大值,离裂缝截面越远处的应力越小;在中间截面上,由于拉伸劲化效应的影响,钢筋承担的拉力约为总拉力的60%,剩余的拉力由附近混凝土承担。在钢筋应力变化较大的地方,黏结应力较大。出现裂缝后,裂缝处的拉力全部由钢筋承担。钢筋受力后,通过钢筋与混凝土的接触面将部分拉力传给混凝土,从而导致混凝土的拉应力从接触面处向内逐渐增加,而钢筋的拉应力由两端向内逐渐减小,与文献[8]得到应力分布规律基本一致。

3 结 语

本文应用界面元法模拟黏结试验,得到的结果与文献[8]试验结果接近。由于钢筋与混凝土黏结性能比较复杂,在模拟过程中选取界面参数时,根据已有试验成果作出调整,初步定性地描述了界面黏结作用机理。

参考文献:

- [1] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996:10-15.
- [2] 董哲仁. 钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002:60-70.
- [3] 吕西林,金国芳. 钢筋混凝土非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997:63-72.
- [4] 宋启根,单炳梓. 钢筋混凝土力学[M]. 南京:南京工学院出版社,1986:116-121.
- [5] 宋玉普. 钢筋混凝土构件非线性有限单元法分析[J]. 大连工学院学报,1984,23(4):93-103.
- [6] 卓家寿,章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京:科学出版社,2000:8-15.
- [7] 徐有邻. 变形钢筋混凝土黏结锚固性能的试验研究[D]. 北京:清华大学,1990.
- [8] 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,2003:244-246.

Analysis model for reinforced concrete interface problem

DU Pei-rong¹, ZHUO Jia-shou², MENG Wen-yuan¹

(1. Department of Civil Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Reinforcement and concrete bear loads together by bonding on their interfaces, and interface stress is a discontinuous medium-related mechanical problem. An interface analysis model was established based on the interface stress element method for discontinuous medium mechanical problem to simulate the pull-out tests and tensile tests, and the calculated results are in good agreement with those of experiments.

Key words: reinforced concrete; interface; discontinuous medium; interface stress element method