

无机聚合物混凝土-钢筋拉拔有限元分析

袁晓辉¹, 卢哲安¹, 任志刚², 张传银¹

(1: 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要:通过制作强度等级为 IPC40 的 3 个无机聚合物混凝土(IPC)-钢筋拉拔试件, 钢筋类型为光圆钢, 锚固深度分别为 100 mm、120 mm 和 150 mm, 对其进行拔出试验, 获得拉拔荷载位移曲线, 并通过试验获得 IPC 的弹性模量及应力-应变关系曲线, 在此基础上利用弹簧单元模拟粘结滑移关系建立钢筋与混凝土分离模型, 对整个拉拔过程进行模拟. 分析结果: 荷载位移曲线试验数据和模型数据上升段吻合良好, 下降段存在一定差距, 但总体变化趋势一致; 模型分析最大极限拉拔荷载值与试验值误差为 1.2%, 极限位移误差为 0.8%; 有限元计算钢筋应力与实测值吻合良好. 结果表明: 采用弹簧单元能够真实有效的模拟无机聚合物混凝土与钢筋之间的粘结滑移关系.

关键词:无机聚合物混凝土; 拔出试验; 弹簧单元; 粘结滑移

中图分类号: TU5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0209-07

无机聚合物混凝土是通过碱激发剂激活磨细的粉煤灰、矿渣, 并配以相应的组分制备而得, 具有快硬、早强的特点. 无机聚合物混凝土绿色环保, 是一种具有广泛发展前景的材料^[1]. 在钢筋混凝土结构中, 钢筋和混凝土两种性质完全不同的材料能共同工作, 主要是依靠钢筋与混凝土间的粘结应力, 也就是两者接触面上的剪应力^[2]. 粘结滑移是钢筋与混凝土之间一种十分复杂的相互作用的结果, 目前数值模拟此类问题常用的单元主要有: 界面单元和联结单元, 前者主要是通过建立接触单元生成接触对来模拟钢筋与混凝土之间粘结滑移关系^[3], 后者常采用三向弹簧单元代替联结单元来模拟钢筋与混凝土之间粘结滑移关系^[4].

钢筋混凝土有限元分析中粘结滑移关系是其分析的关键, 一般粘结滑移关系表达式主要是从试验数据归纳拟合出: 1968 年, Nilsson A. H.^[5]采用预埋电阻片的方法量测拉伸试件中钢筋和界面附近混凝土的应变值并由此通过积分计算得到 τ - s 关系; Houde 和 Mirza^[6]认为粘结力与混凝土标号有关系, 他们依据 62 个变形钢筋模拟缝间粘结强度的试件和 6 个模拟锚固粘结强度的梁端试验结果, 通过回归得出 τ - s 关系; 宋玉普^[7]等采用配有月牙纹钢筋的梁式试件进行了缝间粘结试验研究, 并根据试验结果, 建立了同时考虑了混凝土保护层厚度、混凝土和钢筋弹性模量、裂缝间距等因素影响的 τ - s 关系; 徐有邻^[8]等人做了一系列试验, 系统地研究了混凝土强度、保护层厚度、锚固长度、配箍率、钢筋直径对粘结锚固性能的影响, 并用一个位置函数同时考虑不同锚固深度处的变化建立了相关 τ - s 关系.

以上粘结滑移关系的建立为钢筋混凝土有限元分析提供了便利, Lutz L. A.^[9]用有限元法分析了握裹层混凝土的应力状态及相应变形, 论证了张拉端混凝土脱开和内部裂缝的形成以及局部范围内环向应力的显著增大; Reinhardt^[10]等采用更加精细的单元分割, 并应用非线性本构关系和 Drucker-Prager 强度准则, 对握裹层混凝土的变形、裂缝和破坏过程进行了更为精细的描述; Rabczuk T.^[11]等对钢混结构受不断增大的静荷载条件下的粘结作用进行了有限元分析, 建立了相应的数值模型.

但以上分析都是基于普通混凝土与钢筋之间的粘结滑移关系进行的, 对于以碱激发为基础的无机聚合物混凝土粘结滑移关系至今还未见相关研究, 本文通过试验得出相应的钢筋与无机聚合物混凝土

收稿日期: 2012-10-16 修改稿日期: 2013-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078298)

作者简介: 袁晓辉(1986-), 男, 河南灵宝人, 博士研究生, 主要从事桥梁与隧道工程及混凝土材料研究.

之间的粘结滑移关系曲线,在此基础上建立钢筋与混凝土分离模型,利用弹簧单元模拟钢筋与混凝土之间的粘结性能,对整个试验过程进行模拟。

2 拉拔试验

由于目前无机聚合物混凝土与钢筋间的粘结性能还未见相关研究,本试验参照文献[12]共制作3个试件对其进行了探索性研究,混凝土强度等级为IPC40,混凝土试件尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,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。试验中钢筋应变采用在钢筋内部贴应变片的方法进行测量,测点编号(1#、2#...)由锚固端到自由端逐渐增大。

试验结果:光圆钢试件钢筋全部被拔出,试验过程中试件3由于钢筋端部凸起造成混凝土发生劈裂破坏,其他试件均未出现劈裂破坏。图1、2、3分别为三个试件破坏图,图4为光圆钢试件拉拔过程 P - S 曲线。



图1 试件1破坏

Fig. 1 The damage of specimen 1



图2 试件2破坏

Fig. 2 The damage of specimen 2



图3 试件3破坏

Fig. 3 The damage of specimen 3

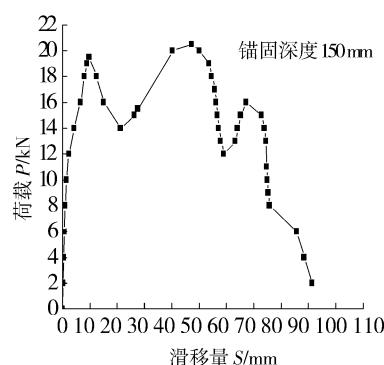
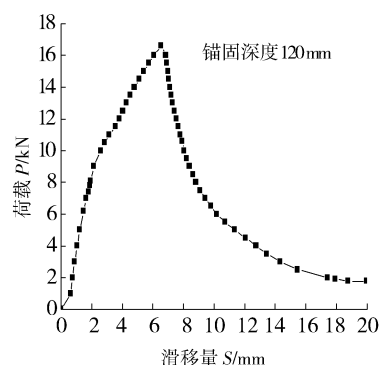
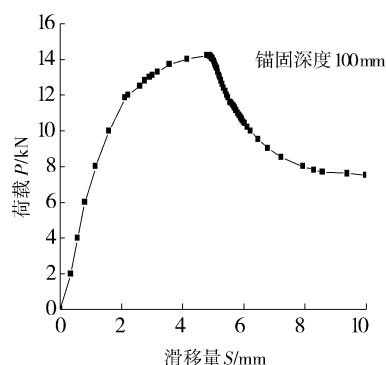


图4 光圆钢试件拉拔过程 P - S 曲线

Fig. 4 The P - S curve of light round steel specimen in drawing process

由图1—3可以看出:圆钢试件均为拔出破坏,三个试件混凝土表面均有不同程度的轻微损坏,且试件3混凝土出现劈裂裂缝,试件破坏后取出观察钢筋,试件3钢筋埋置端有不规则凸起,这样起到了类似带肋钢筋的“机械咬合”效应,且在拔出过程中不断单向对混凝土产生剪应力从而导致拔出的过程中混凝土劈裂破坏。由图4可以看出:试件3由于钢筋端部的凸起,致使拉拔过程中粘结力和拉拔力不断建立一种平衡,直至最终钢筋被拔出。

3 有限元建模

3.1 单元选取

混凝土单元采用SOLID65实体单元,钢筋采用SOLID186单元,SOLID186可以具有任意的空间各向异性,单元支持塑性,超弹性,蠕变,应力钢化,大变形和大应变能力。考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移时,通常在钢筋和混凝土的相应结点之间设置联结单元,为准确地反映混凝土构件的受力特性,采

用三维非线性弹簧单元 Combin39 作为钢筋与混凝土之间的粘结单元,通过定义此单元广义的力-变形曲线($F-D$ 曲线)以定义它的非线性行为来模拟钢筋-混凝土的粘结滑移关系。

3.2 有限元模型

目前对于钢筋混凝土结构有限元分析所采用的模型主要有三类:分离模型、整体模型和组合模型^[13]。分离式模型将钢筋和混凝土作为不同的单元来处理,这样可大大减少单元数目,并且可以避免因为钢筋单元划分过细而在钢筋和混凝土的交界处采用过多的过渡单元;整体式模型主要是通过一次求得综合的单元刚度矩阵,把弹性矩阵改为由钢筋和混凝土两部分组成,一般适用于配有箍筋的混凝土;组合式模型一般假定钢筋和混凝土两者之间相互粘结很好,不会有相对滑移。为了能较好的模拟钢筋拉拔过程以及钢筋和混凝土之间粘结性能退化演变机理,有限元模型采用分离式钢筋混凝土单元模型,即分别考虑钢筋、混凝土以及钢筋和混凝土之间的粘结。钢筋和混凝土之间的粘结性能,通过位移不协调的特有联结单元模型将特定位置的钢筋单元与混凝土单元进行联结,通过定义联结单元的非线性力学性能来模拟钢筋和混凝土之间的粘结-滑移本构关系,本文联结单元采用非线性弹簧单元 Combin39 来模拟钢筋和混凝土之间粘结行为,因界面单元主要是通过给定摩擦系数来模拟,但实际的粘结并不单纯的只有摩擦,还有胶着力和机械咬合力,采用弹簧单元理论上要比采用界面单元更为精确。钢筋混凝土分离模型如图 5 所示。

钢筋和混凝土的接触面间的相对滑动有法向、纵向切向和横向切向三个方向,为全面考虑钢筋混凝土连接面上的相互作用,划分网格时尽量使钢筋与混凝土接触面共节点,从而便于在钢筋和混凝土连接面上,在每一对对应节点之间分别建立三个非线性零长度弹簧单元来模拟钢筋与混凝土之间三个方向的相互作用。对于法向和横向切向联结弹簧单元,通过定义常数给其适当的刚度以限制其法向和横向位移,对于切向联结弹簧单元,通过试验确定其粘结滑移关系。由于试件 3 钢筋端部凸起造成荷载位移曲线多变,用有限元分析存在一定困难,故对试件 1、2 建立有限元模型进行分析。图 6 为有限元整体模型,图 7 为钢筋与混凝土间弹簧联结单元,有限元模型中钢筋轴线方向与整体坐标 Z 轴方向一致。

有限元模型边界条件为,在混凝土底部施加全固结位移约束,在钢筋拉拔端施加拉拔荷载。采用荷载增量法,通过设定多个荷载步,将全部荷载转变为节点荷载施加在对应位置的节点上。

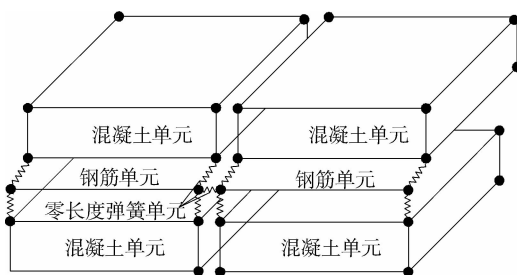


图 5 钢筋混凝土分离模型

Fig. 5 Reinforced concrete separation model

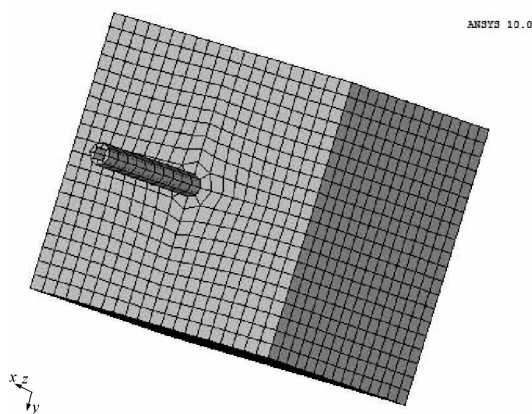


图 6 有限元整体模型

Fig. 6 Holistic model of finite element

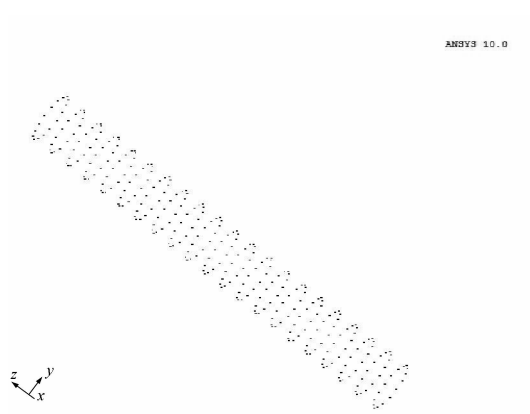


图 7 弹簧联结单元

Fig. 7 Spring unit

3.3 模型参数

混凝土弹性模量及应力-应变关系通过试验获得,表 1 为无机聚合物混凝土弹性模量值,图 8 为实

测应力-应变关系曲线与拟合应力应变关系曲线图。

根据表1试验结果,应变片测得弹性模量为 $3.2115 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,无机聚合物混凝土弹性模量值取应变片和千分表测得平均值为 $3.1746 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.257 2。

从图8可以看出,数值拟合曲线与实测单轴受压应力-应变曲线的吻合较好,基本上能够真实地再现无机聚合物混凝土应力-应变关系,因此其本构关系可用来进行有限元分析。

3.4 粘结-滑移关系

研究发现粘结-滑移本构关系沿锚固长度是变化的^[14-15],文献[16-17]采用数值解给出了粘结应力随锚固深度变化的拟合方法。因混凝土的各项参数不同其粘结效应也会有所变化,且对于无机聚合物混凝土和钢筋之间的粘结目前还没有统一的粘结滑移-本构关系可供参考,为简化计算本文采用平均粘结强度来表述钢筋与混凝土的粘结关系,即在埋置深度范围内粘结应力的平均值,大小等于拉拔荷载与钢筋埋置深度范围内钢筋面积之比。

$$\tau = \frac{P}{\pi d(l-s)} \quad (1)$$

式中: P 为试验拉拔荷载; d 为埋置钢筋直径; l 为钢筋埋置深度; s 为钢筋位移。根据试验结果,每一级荷载都会对应一个平均粘结应力和一个相对位移,由此便构成拉拔过程中总的平均粘结应力和位移的本构关系。要将总的粘结滑移关系分配给钢筋和混凝土之间的弹簧,还要根据有限元网格划分的大小确定其中弹簧单元的个数,如果将划分网格后每一圈弹簧看成一组,那么每一组弹簧对应的平均粘结力可以用式2表示。

$$\tau' = \frac{Pa}{(l-s)} \quad (2)$$

式中: a 为弹簧单元间的距离,由此可以确定每一组弹簧的 $F-D$ 曲线。相应的试件1、试件2有限元模型对应弹簧 $F-D$ 曲线如下图9、图10所示。

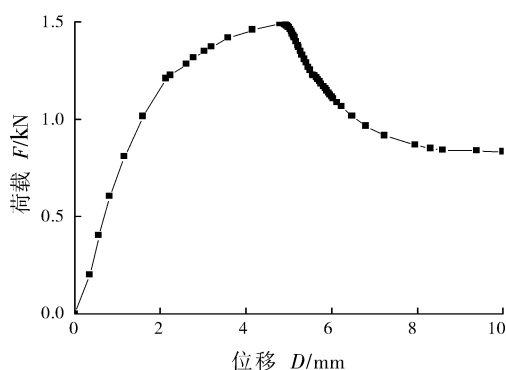


图9 试件1弹簧 $F-D$ 曲线

Fig. 9 $F-D$ curve of specimen 1

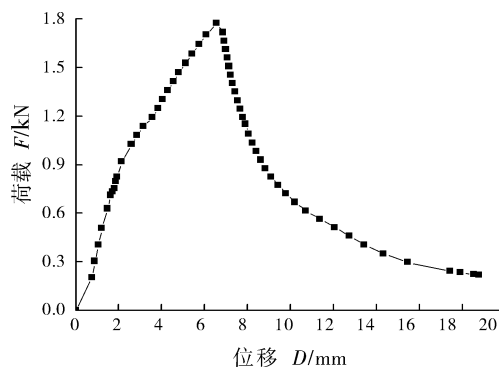


图10 试件2弹簧 $F-D$ 曲线

Fig. 10 $F-D$ curve of specimen 2

表1 无机聚合物混凝土弹性模量值 $E / \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

Tab. 1 The elastic modulus value of inorganic polymer concrete $E / \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

试件	应变片测得弹模 E	千分表测得弹模 E	泊松比 λ
1	3.029 6	2.993 3	0.341 5
1	2.685 9	—	0.275 7
2	3.095 3	3.070 1	0.208 0
2	3.188 2	3.070 1	0.280 5
3	3.761 6	3.277 5	0.231 1
3	3.508 6	3.277 5	0.206 3
平均值	3.211 5	3.137 7	0.257 2

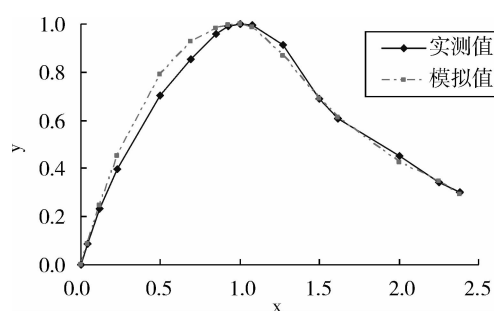


图8 无机聚合物混凝土数值拟合和实测应力-应变曲线

Fig. 8 Numerical fitting and measured stress-strain curve of inorganic polymer concrete

4 结果分析

4.1 拉拔力与位移关系

由图 10 和图 11 可知,试件 1、2 在曲线上升阶段有限元拟合所得 P - S 曲线与试验值吻合良好,曲线下降段试验数据和模型数据有一定差距,但总体变化趋势一致。

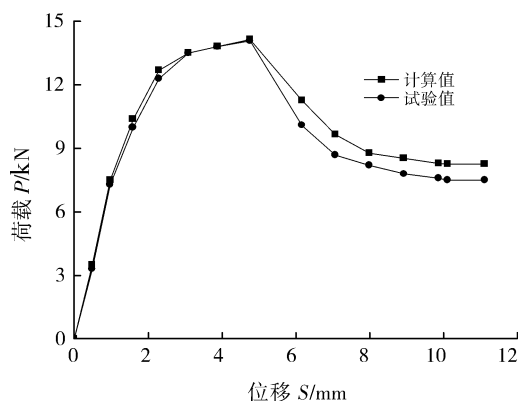


图 11 试件 1 P - S 曲线

Fig. 11 P - S curve of specimen 1

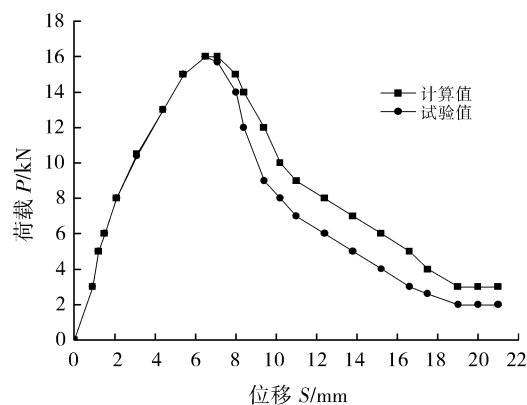


图 12 试件 2 P - S 曲线

Fig. 12 P - S curve of specimen 2

4.2 钢筋应力分布

有限元计算混凝土及钢筋应力云图如下图 13~图 16 所示,表 2 为极限荷载、位移计算值与实测值对比,图 17、图 18 为各级荷载作用下钢筋应力计算值与测试值曲线图,(图中 T 代表测试值,C 代表计算值,字母前数字代表拉拔荷载,单位 kN)。

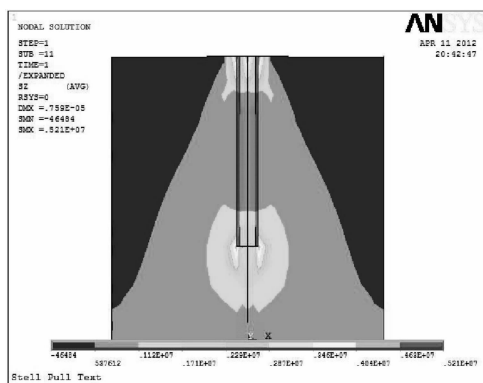


图 13 试件 1 混凝土 Z 向应力云图

Fig. 13 Stress nephogram of concrete along Z axes of specimen 1

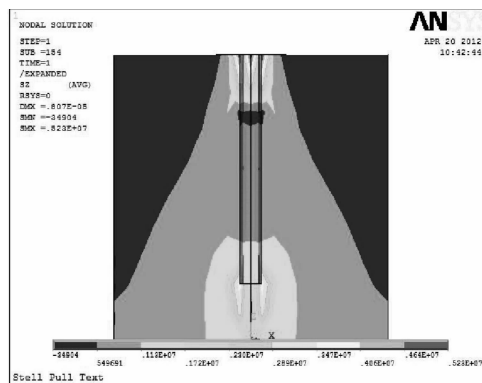


图 14 试件 2 混凝土 Z 向应力云图

Fig. 14 Stress nephogram of concrete along Z axes of specimen 2

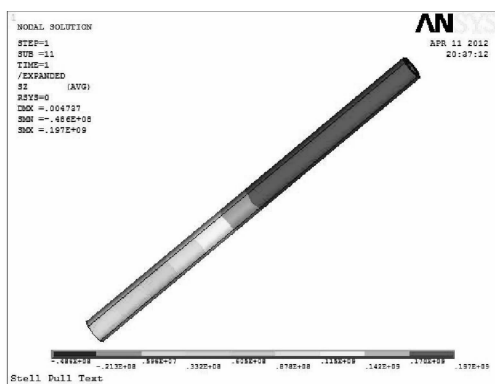


图 15 试件 1 钢筋 Z 向应力云图

Fig. 15 Stress nephogram of steel along Z axes of Specimen 1

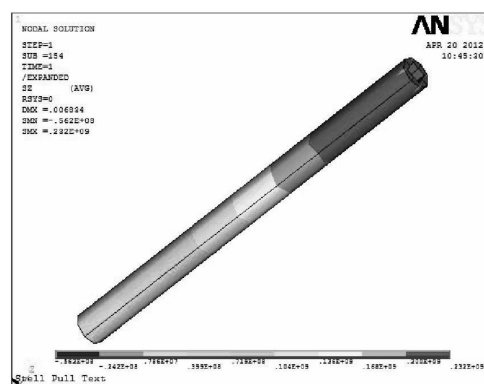


图 16 试件 2 钢筋 Z 向应力云图

Fig. 16 Stress nephogram of steel along Z axes of Specimen 2

由图13~图16及表2可知,锚固深度为100 mm和120 mm的试件,有限元计算值与试验结果误差分别为0.3%、1.2%,极限位移误差分别为0.8%、0.6%,从混凝土的应力状态看,其和最终拔出后混凝土的破坏状态也较为吻合,表明有限元分析结果和试验较为接近。

由图17、图18可见荷载较小时有限元计算所得测点应力值与实测值相当接近,当荷载增大时,计算误差有所增大,但总体结果有限元计算钢筋应力与实测值吻合良好。

表2 极限荷载、位移计算值与实测值对比

Tab. 2 Comparison of ultimate load and displacement between calculated and measured values

试件编号	锚深/mm	项目	极限荷载/kN	极限位移/mm	极限拉拔应力/MPa
1	100	试验值	14.2	4.79	183.5
		计算值	14.1	4.75	197.0
2	120	试验值	16.6	6.56	214.5
		计算值	16.4	6.52	232.0

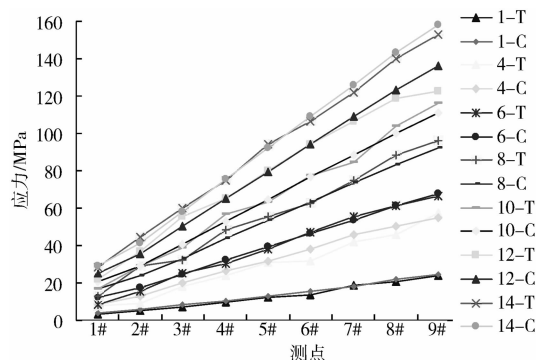


图17 试件1钢筋应力计算值与实测值

Fig. 17 Calculated and measured reinforcement stress values of specimen 1

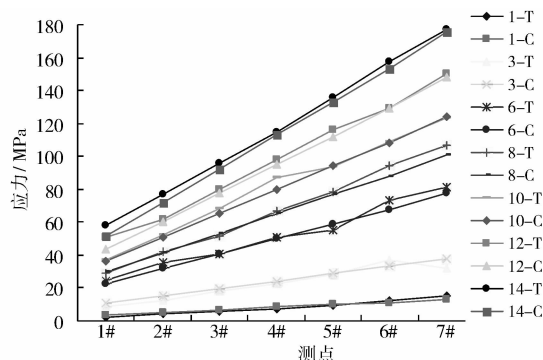


图18 试件2钢筋应力计算值与实测值

Fig. 18 Calculated and measured reinforcement stress values of specimen 2

5 结论

采用弹簧单元模拟钢筋与混凝土之间的粘结滑移关系,通过建立分离模型对拉拔过程进行模拟,最终分析所得 $P-S$ 曲线,上升段吻合良好,下降段存在一定偏差,但总体变化趋势一致,最终混凝土应力状态和混凝土的破坏模式也极为相近,拉拔极限荷载、极限位移计算值和实测值偏差较小,钢筋应力也吻合良好,表明采用弹簧单元能够真实有效的模拟钢筋与无机聚合物混凝土之间的粘结滑移关系。

参考文献 References

- [1] 张亚梅,秦鸿根. 再生混凝土配合比设计初探[J]. 混凝土与水泥制品,2002(1):7-9.
ZHANG Ya-yin, QIN Hong-gen. Primary proportion design of recycled concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2002(1):7-9.
- [2] 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 Agriculture University: Natural Science, 2007, 38(1):125-130.
- [3] 刘云平,包华,洪俊青等. ANSYS 的接触分析在钢筋混凝土滑移中的应用[J]. 南通大学学报:自然科学版,2009,8(2):70-73.
LIU Yun-ping, BAO Hua, HONG Jun-qing et al. Application of ANSYS-Based Contact Analysis in Reinforced Concrete Sliding [J]. Journal of Nantong University: Natural Science Edition, 2009, 8(2):70-73.
- [4] 宋锦虎,贺瑞霞,马欢. 纵向非均匀锈蚀钢筋拉拔过程的有限元分析[J]. 四川建筑科学研究,2011,37(1):70-74.
SONG Jin-hu, HE Rui-xia, MA Huan. Finite element analysis of pull-out tests on longitudinally and non-uniformly corroded steel bar [J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(1):70-74.
- [5] NILSSON A H. Internal measurement of bond-slip [J]. ACI Journal, 1972(7): 242-245.
- [6] MIRZA S M, Houde J. Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete [J]. ACI Journal, 1979(1): 462-466.
- [7] 宋玉普,赵国藩. 钢筋与混凝土之间的粘结滑移性能研究[J]. 大连工学院学报,1987(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(2):93-100.
- [8] 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. Experimental study on deformation of bond anchorage performance of reinforced-concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [9] LUTZ L A. Analysis of stresses in concrete near a reinforcing bar due to bond and transverse cracking [J]. ACI Journal, 1970(10): 276-287.
- [10] REINHARDT H W, BLAAUWENDRAAD, J Vos E. Prediction of bond between steel and concrete by numerical analysis [J]. Materials and Structures, 1984(7/8): 1245-1256.
- [11] RABCZUK T. AKKERMANN J. EIBL J. A numerical model for reinforced concrete structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005(42): 1327-1354.
- [12] 王艺霖. 钢筋与混凝土粘结性能的若干问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
WANG Yi-lin. Research on Some Issues of Bond Performance between Steel bar and Concrete. [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [13] 沈聚敏,王传志,江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
SHEN Ju-min, WANG Chuan-zhi, JIANG Jian-qiong. Theanalysis of reinforced concrete finite element and Shell limit [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [14] 张伟平,张 誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 40-44.
ZHANG Wei-ing, ZHANG Yu. Bond-slip Constitutive Relation's Research of Corrosive Reinforced Concrete after Cracking [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 40-44.
- [15] 向 伟. 钢筋混凝土梁锈蚀主筋与混凝土粘结性能退化规律与预计模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.
XIANG Wei. Corrosion of reinforced concrete beam main reinforcement and concrete bonding property degradation rules and prediction model research [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.
- [16] 洪小健,张 誉. 粘结滑移试验中的粘结应力的拟合方法[J]. 实验研究,2000(3):44-48.
HONG Xiao-jian, ZHANG Yu. The Fitting Method of the SmoothBond stress in the Bond-Slip Test [J]. Structural Engineers, 2000(3):44-48.
- [17] 卫 军,王艺霖,罗晓辉. 钢筋拉拔试验中粘结应力分布的曲线拟合[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(2):22-24.
WEI Jun, WANGYi-lin, LUO Xiao-hui. Curve fitting method of bond stress distribution in steel bar pullout test [J]. Journal of Rail Way Science and Engineering, 2005, 2(2):22-24.

Finite element analysis of pullout tests on inorganic polymer concrete-steel bar

YUAN Xiao-hui¹, LU Zhe-an¹, REN Zhi-gang², ZHANG Chuan-yin¹

(1: Wuhan University of Technology; Key Laboratory of Roadway Bridge and Structural Engineering; Wuhan 430070, China;

2: Wuhan University of Technology; School of Civil Engineering and Architecture; Wuhan 430070, China)

Abstract: A pullout load displacement curve is obtained throughs inorganic polymer light-type concret-steel bar pullout test pieces with the concrete strength IPC40 and the anchorage depth respectively of 100 mm, 120 mm, and 150 mm. From the experiment IPS elastic modulus as well as the stress strain are derived. On the basis of this, spring element is also used to stimulate the bond slip relationship in estabbling the steel and conerete separation model, and to stimullate the whole pullout process. The rising segment of the load displacement curve of experimental data is in good agreement with the model data. The descending segment has a certain gap, while the overall trend remains the same. The error between the maximurn limit pullout load and the experincntal value remains at 12%, the limit displacement error at 0.8%, and the steel stress value of finite elcment calculation is good agreement with that of the data measured. The results show that the spring unit can be real and effective in stimulating the bond slip relationship between inorganic polymer concrete and reinforcing bar.

Key words: *inorganic polymer concrete; pullout; spring unit; bond slip*