

# 无机胶植筋构件粘结滑移性能研究

谢 群, 赵永强, 唐仕霖

(济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 无机胶以其耐高温、粘结性能好在植筋领域得到广泛应用, 为深入了解该类植筋构件的粘结滑移受力性能, 采用试验方法对其粘结应力进行了研究, 考察了不同埋深情况下的粘结性能, 埋深为 10d 和 15d 情况下植入钢筋均先达到屈服, 而后发生拉断破坏。粘结应力沿埋深分布是不均匀的, 最大粘结应力出现在距离加载端 0.25~0.3l (l 为植筋埋深) 位置处。根据试验研究结果建立了基于位置函数的无机胶粘结滑移本构模型, 并将该模型用于有限元分析, 采用非线性弹簧单元模拟无机胶的粘结作用, 通过与试验结果比较可知, 该模型可以较好地反映无机胶植筋构件的受力性能, 可用于今后的分析设计。

**关键词:** 无机胶; 粘结滑移; 埋深; 数值分析

**中图分类号:** TU582

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)06-0838-05

## Bond-slip behavior of post-installed reinforcement in concrete with inorganic adhesive

XIE Qun, ZHAO Yongqiang, TANG Shilin

(School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** Inorganic adhesive is a kind of adhesion material widely used in bonded-in reinforcement projects with the advantage of good heat resistance and bond behavior. To better understand the bond performance for post-installed reinforcement with inorganic adhesive, a series of static loading tests have been carried out with two kinds of embedment depth, 10 d and 15 d. The experimental results show that the bonded-in rebar could reach the yield strength under monotonic tension loading for both situations after which a fracture failure will appear. The distribution of bond stress length is not uniform along the anchorage and the peak value occurs at the position with the distance 0.25l~0.3l (l as embedment depth) away from loaded end. A bond-slip model with consideration of position function has been provided based on the experiment results. An FE model has been employed with the model mentioned above and nonlinear spring element has been adopted in the FE model for bond simulation. Numerical analysis shows satisfactory agreement compared with the test data which approves that the bond-slip model is suitable for structural design and engineering application.

**Key words:** inorganic adhesive; bond-slip; embedment depth; numerical analysis

植筋是目前广泛应用于结构加固改造的技术, 该技术采用的粘结剂通常分为无机胶和有机胶两种, 后者以环氧树脂为主要成分, 具有施工便捷、粘结可靠等优势, 但其正常工作温度范围仅限于 -10℃~40℃, 在超出该温度范围的使用环境下粘结性能会显著下降而导致连接失效<sup>[1]</sup>。为解决上述问题, 近年来以水泥基材料为主要成分的无机胶以耐火(高温)、耐久性好受到了较多关注, 我国已有无机胶植筋构件的标准规范《混凝土结构工程无机材料后锚固技术规程》(JGJ/T271-2012)。目前无机胶已应用在植筋加固和碳纤维加固等领域, 且郑州大学刘立新、湖南大学赵洪波、山东建筑大学李安起等诸位学者先后对水泥基无机胶植筋构件进行静力拉伸试验等研究, 研究结果表明水泥基无机胶植筋构件的平均粘结强度和拉拔力均较高, 可以满足建筑物的加固改造要求<sup>[2-5]</sup>。山东建筑大学张鑫教授采用无机胶粘贴碳纤维加固梁, 并对其受弯和受剪

性能进行研究, 结果表明无机胶的粘结性能能够满足使用要求<sup>[6]</sup>。王欣进一步研究了无机胶植筋柱的高温性能<sup>[7-8]</sup>。目前的研究成果为无机胶植筋技术提供了有力的理论支持, 但对于无机胶粘结应力分布特别是粘结滑移本构模型尚缺乏深入分析, 而且粘结应力沿锚固长度是不均匀分布的, 若要准确掌握粘结性能, 上述模型至关重要, 而且粘结滑移是进行其它理论分析的基础, 因此本文将通过一系列静力拉伸试验, 并结合有限元数值模拟, 建立无机胶粘结滑移模型, 为更加安全有效地使用该材料提供技术支持。

## 1 实验研究

用于拉伸试验的混凝土设计强度等级为 C40, 实测混凝土抗压强度为 46.4 MPa。无机胶采用氯氧镁水泥基材料(MOC), 植入钢筋采用 HRB400 级钢筋, 直径 12 mm, 分为两种具有代表性的锚固长度

10 d 和 15 d(120 mm 和 180 mm), 按照埋深不同将试件分为 2 组, 每组试件 2 个. 为防止局部挤压的影响, 在混凝土基材制作时加载端放置 50 mm 长 PVC 管以形成无粘结区. 试件尺寸见图 1.

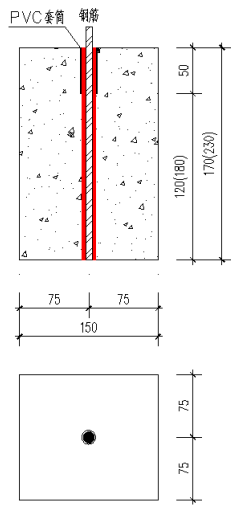


图 1 试件的尺寸  
Fig.1 Specimen information

为掌握沿埋深不同位置的粘结应力分布情况, 预先将钢筋沿轴线一分为二, 将劈开的钢筋开槽, 每部分钢筋凹槽尺寸为 3 mm×6 mm, 合拢后成为 6 mm×6 mm 空腔, 在槽内粘贴箔式电阻应变片, 见图 2(a), 每根钢筋内设置 5 个应变片, 10 d 试件应变片间距 30mm, 15d 试件应变片间距 45 mm, 钢筋应变片从加载端到自由端编号依次为 1、2、3、4、5, 将导线引出后采用环氧树脂胶将两部分钢筋粘接合拢并用钢丝箍紧以保证两部分钢筋可靠连接, 如图 2(b)所示. 钢筋应变片布置见图 3.

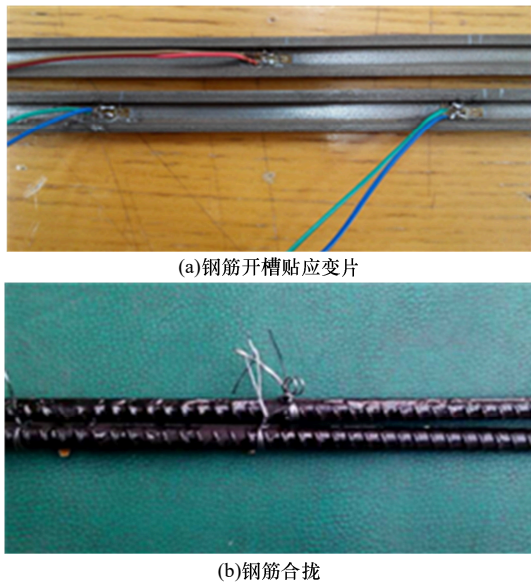


图 2 钢筋加工贴片  
Fig.2 Reinforcement processing

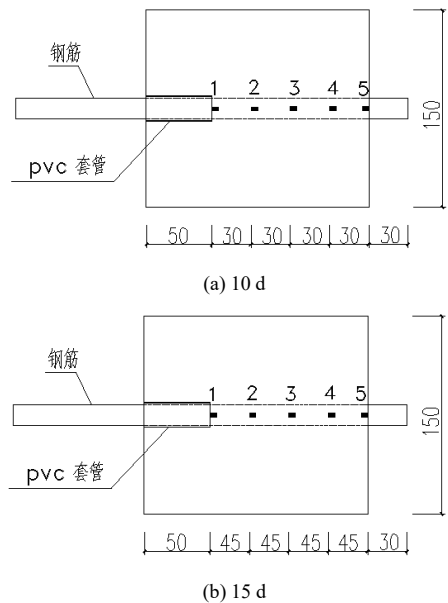


图 3 应变片布置图  
Fig.3 Strain gauges layout

试件植筋养护完成后, 在电液伺服试验机上进行拉伸试验, 如图 4 所示. 采用分级加载, 以 2KN 为一级, 每级荷载保持 5min. 加载初期临近加载端的钢筋应变基本呈比例发展, 加载端位移很小, 随着荷载的增加, 加载端的钢筋应变较其它位置增长明显要快, 两种埋深情况下均是加载端钢筋先达到屈服, 此时的加载端位移仍很小, 继续加载, 直到临近破坏前试件表面均未发现开裂, 钢筋出现屈服后承载力还可增加, 此时钢筋其它位置处的应变逐渐加大, 加载端位移发展较快, 至极限荷载时发生钢筋拉断, 最终破坏照片见图 5. 主要试验结果见表 1.

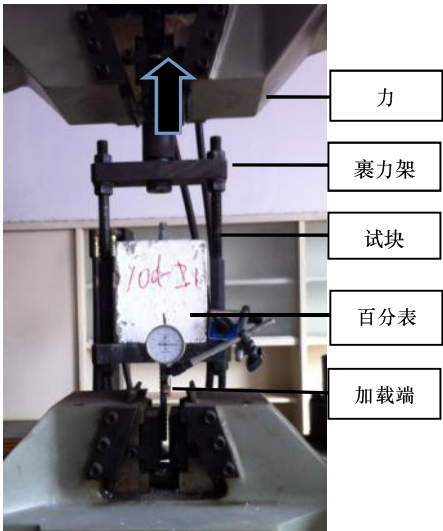


图 4 加载装置图  
Fig.4 Loading setup

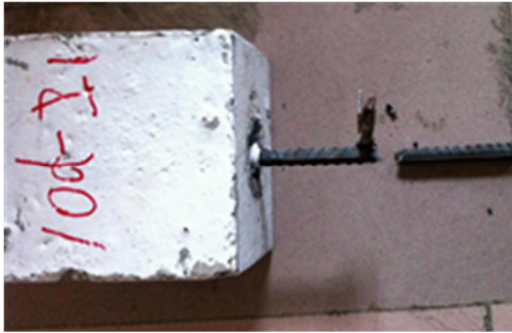
表 1 主要试验结果  
Tab.1 Experimental results

试件	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	屈服滑移/mm
10d-Z1	46.2	61.5	1.78
10d-Z2	48.3	60.5	1.56
15d-Z1	50.6	61	1.60
15d-Z2	49.8	60	1.51

图 6 为两种埋深下拉力-加载端位移曲线,可以看出各曲线的发展规律较为接近,在荷载达到 50kN 前基本呈线性发展,此时加载端钢筋先达到屈服,随后承载力增长明显放缓,而位移发展加快,两种埋深情况下最终均由钢筋拉伸破坏控制,粘结性能能够满足设计要求。



(a)10d



(b)15d

图 5 试件破坏照片  
Fig.5 Failure pictures

两种埋深下钢筋应变沿埋深的变化情况见图 7,距离加载端越近,钢筋应变越大,随着荷载的加大,应变沿埋深方向的分布也由直线变为曲线,10 d 埋深下曲线化分布特性更为明显.通过量测的钢筋应变差值可得到粘结应力分布如图 8 所示,无机胶粘结应力并非均匀分布,表现为中间部位粘结应力较高,而两端相对较小,最大值出现在距离加载端 0.25l~0.3l 处(l 为钢筋埋深).10 d 时最大粘结应力较 15 d 要大,因为承载力由钢筋强度控制,10 d 时埋深相对较小,相同拉力情况下必然要增大粘结强度.而且随着埋深的增加,最大粘结应力的位置也逐渐向钢筋中部转移。

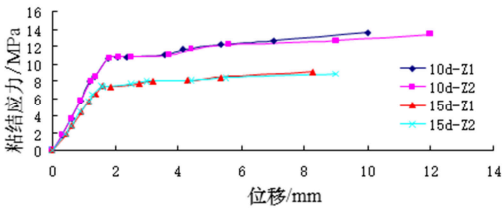
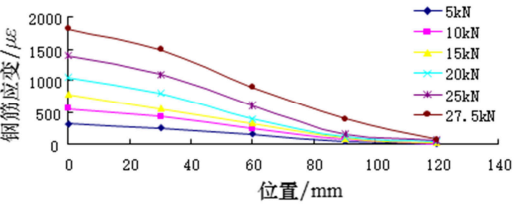
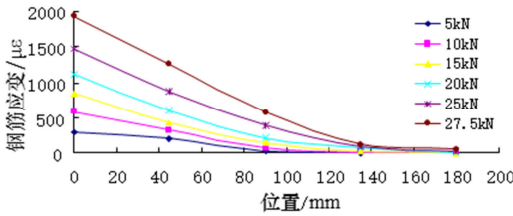


图 6 力-加载端位移曲线  
Fig.6 Force-loaded-end displacement curves

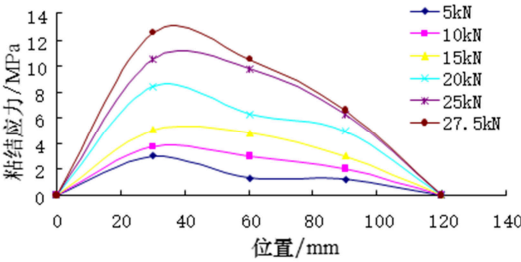


(a) 10 d

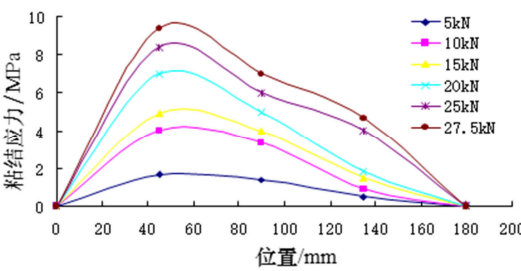


(b) 15 d

图 7 钢筋应变沿锚固长度分布  
Fig.7 Rebar strains distribution along embedment depth



(a) 10 d



(b) 15 d

图 8 粘结应力分布图  
Fig.8 Bond stress distribution

## 2 理论分析

通过上述试验发现,无机胶粘结应力沿埋深并非均匀分布,如要准确掌握某滑移量下任一位置的粘结应力 $\tau$ ,需要综合考虑位置函数和粘结滑移模型,其通用表达如下式所示<sup>[9-12]</sup>:

$$\tau = f_1(s)f_2(x) \tag{1}$$

式中:  $f_1(s)$  为粘结应力-滑移关系;  $f_2(x)$  为位置

函数, 同济大学张建荣提出了有机胶植筋构件的位置函数表达式如下<sup>[13]</sup>:

$$f_2(x)=\begin{cases}1.37\sqrt{1-[(10x/3L_a)-1]} & (0 < x \leq \frac{3}{10}L_a) \\ 1.625-0.917\frac{x}{L_a} & (\frac{3}{10}L_a \leq x \leq \frac{9}{10}L_a) \\ 0.8\sqrt{1-[(10x/L_a)-9]^2} & (\frac{9}{10}L_a < x \leq L_a)\end{cases}\quad (2)$$

在上述研究成果基础上结合本次试验数据对其进行修正, 得到无机胶粘结滑移模型如式(3)所示, 位置函数仍采用式(2).

$$f_1(s)=\begin{cases}15s & (0 \leq s < 0.5) \\ 2s+7 & (0.5 < s < 1.9)\end{cases}\quad (3)$$

3 有限元分析

为进一步了解无机胶植筋构件的粘结性能, 采用 ABAQUS 软件对植筋试件进行了粘结性能模拟分析, 采用实体单元模拟混凝土基材和植入钢筋, 无机胶的粘结作用采用非线性弹簧单元模拟<sup>[14-16]</sup>, 材料性能与模型尺寸与试验相同, 有限元模型见图 9, 采用位移控制加载. 试验和数值模拟得到的承载力和破坏形式对比如下表 2, 表中试验承载力取两个试件的平均值.

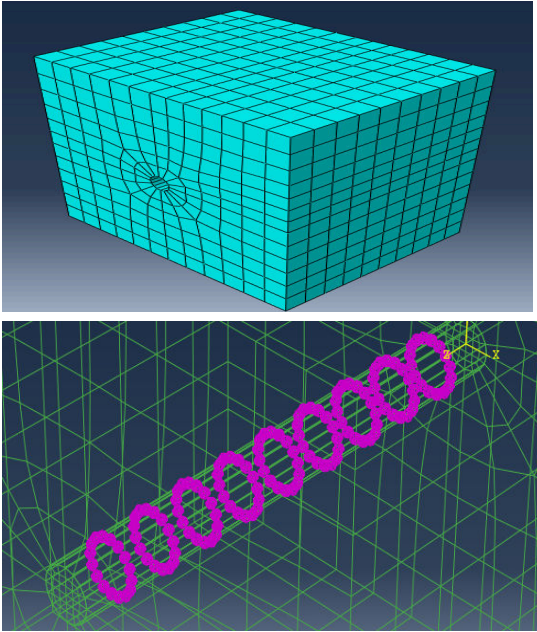


图 9 有限元模型  
Fig.9 FE model

两种埋深下的力-滑移曲线如图 10 所示, 10 d 时峰值承载力为 52 kN, 峰值位移为 2.0 mm; 15 d 时峰值承载力为 57.5 kN, 峰值位移 2.3 mm, 两种情况下钢筋均能达到屈服, 表现为钢筋延性破坏,

与试验结果吻合, 说明有限元模型具有良好适用性.

图 11 所示为不同滑移量下钢筋应力沿埋深的分布, 与试验结果相似, 钢筋最大应力出现在加载端临近混凝土基材表面, 由加载端到自由端逐渐减小, 而且随着滑移量加大, 加载端钢筋应力增长明显快于其它位置, 钢筋应力曲线斜率逐渐增大, 靠近自由端的钢筋应力变化很小. 两种埋深下钢筋均可达到屈服, 属于钢材延性破坏. 在数值模型中采用修正后的粘结本构关系式(3), 以荷载为 25kN 时得到的粘结应力分布为例, 将有限元模拟结果与试验数据对比见图 12, 两种埋深下有限元模拟结果与试验较为吻合, 而且模拟结果低于试验值, 具有较好的安全储备.

表 2 试验结果和数值模拟对比  
Tab.2 Comparisons of experimental data and numerical results

试件	承载力/kN	误差	破坏形式
10d-试验	61.0	14%	钢筋拉断破坏
10d-模拟	52.0		钢筋破坏
15d-试验	60.5	4.2%	钢筋拉断破坏
15d-模拟	57.5		钢筋破坏

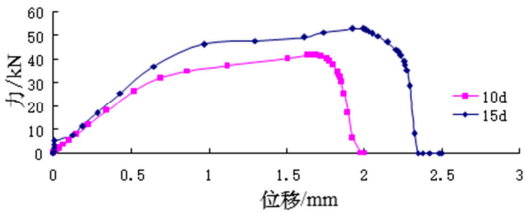


图 10 不同埋深下的力-位移曲线  
Fig.10 Force-displacement curves under different embedment depth

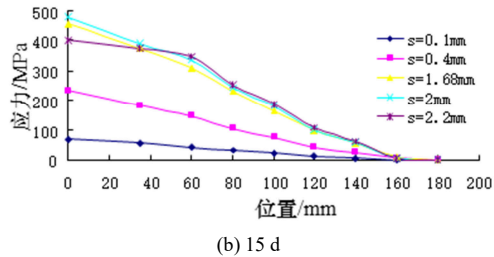
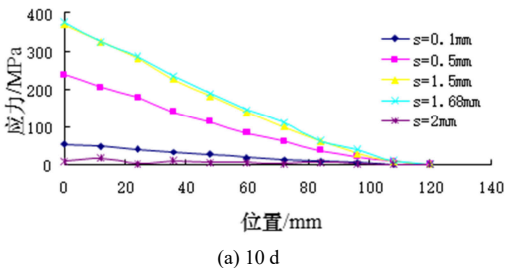


图 11 钢筋应力沿埋深分布  
Fig.11 Rebar stress distribution along embedment depth



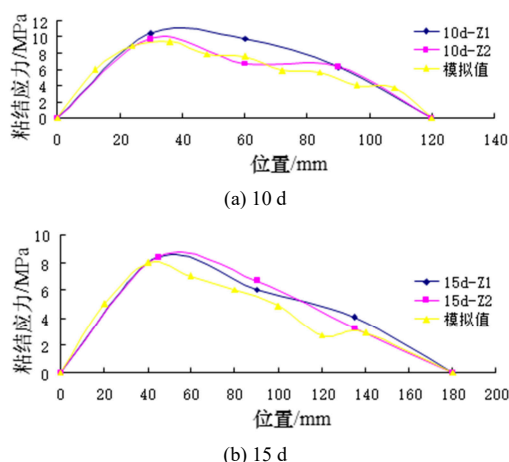


图 12 粘结应力分布对比  
Fig.12 Comparison of bond stress

## 4 结论

本文对无机胶植筋构件的粘结性能进行研究,通过试验和数值模拟相结合的方式,重点分析了不同埋深情况下粘结应力沿埋深的变化规律,在现有的研究成果基础上,提出了基于位置函数的无机胶植筋构件粘结滑移本构模型,最后通过有限元分析进一步完善验证了理论模型的可行性,结论如下:

(1)粘结应力沿埋深的分布是不均匀的,最大粘结应力出现在距离加载端 0.25~0.31 位置处。

(2)10 d 和 15 d 两种埋深情况下破坏过程相似,均为钢筋先达到屈服,最终破坏形态为钢筋拉断,同时出现较大的钢筋滑移。

(3)在现有粘结滑移本构理论的基础上,依据试验结果进行修正,考虑了粘结应力与滑移的关系以及位置函数的影响,经有限元模拟对比该修正后的模型可作为无机胶粘结分析的依据。

## 参考文献 References

- [1] SALIH Yilmaz, MUHAMMET Ali Ozen, YAVUZ Yardim. Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013,47: 861-866.
- [2] 刘立新,许化彬,甘元初,等.水泥基无机黏结材料植筋承载力的试验研究[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(1): 5-8.  
LIU Lixin, XU Huabin, GAN Yuanchu, et al. Experimental investigation of the bonded rebar bearing capacity of cement based inorganic anchoring material[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006,27(1):5-8.
- [3] 赵洪波. 无机植筋技术研究[D].长沙:湖南大学,2006.  
ZHAO Hongbo. Study on bonded-in reinforcement with inorganic adhesive[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [4] 张世涛.混凝土结构水泥基(MOC)无机胶植筋试验研究[D].济南:山东建筑大学,2013.  
ZHANG Shitao. Experimental study on bonded-in rebar in concrete with cement-based (MOC) adhesive[D]. Jinan:

- Shandong Jianzhu University, 2013.
- [5] QIAN Jueshi, YOU Chao, WANG Qingshen. A methods for assessing bond performance of cement-based repair materials. Construction and Building Materials, 2014 (68):307-313.
- [6] 张婷婷.无机胶粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁高温性能的试验研究[D].济南:山东建筑大学,2011.  
ZHANG Tingting. Experimental study on high temperature behavior of RC beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011.
- [7] 姜长玖.无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究[D].济南:山东建筑大学,2013.  
JIANG Changjiu. Experimental study on fire behavior of the post-installed rebar anchorage with inorganic adhesive[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013.
- [8] 王欣.无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45(4):27-33.  
WANG Xin, JIANG Changjiu, HUI Shoujiang, et al. Fire resistance behavior of the inorganically post-installed rebar connection[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013,45(4):27-33.
- [9] 徐有邻,沈文都,汪洪.钢筋混凝土黏结锚固性能的试验研究[J].建筑结构学报,1994,15(3): 45-47.  
XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 45-47.
- [10] 赵羽习,金伟良.钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J].建筑结构学报,2002(2): 32-37.  
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Experimental study on bond-slip performance of concrete and steel bar[J]. Journal of Building Structures, 2002(2): 32-37.
- [11] 王玉新.反复荷载作用下锈蚀钢筋与混凝土粘结滑移研究[D].郑州:华北水利水电大学,2014.  
WANG Yuxin. Bond-slip behavior of corrosion reinforcement in concrete under cyclic loading[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014.
- [12] 肖小琼.锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验研究[D].长沙:中南大学,2011.  
XIAO Xiaoqiong. Experimental study on the bond performance of corroded reinforcement in concrete[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [13] 张建荣.混凝土化学植筋锚固性能的试验研究[J].建筑结构,2006,36(3):17-21.  
ZHANG Jianrong, SHI Lizhong, YANG Jianhua, et al. Experimental research on the behavior of chemical adhesive steel bar in concrete under tensile load[J]. Building Structure, 2006,36(3):17-21.
- [14] GERARDO M.Verderame, PAOLO Ricci, GIOVANNI De Carlo, et al. Cyclid bond behavior of plain.Part I:Experimental investigation. Construction and Building Materials, 2009 (23):3499-3511.
- [15] LUIS A.M.Mendes, LUIS M.S.S.Castro. A new RC bond model suitable for three-dimensional cyclic analyses. Computers and Structures, 2013,12:47-64.
- [16] 张川,谭璐.锚固钢筋粘结-滑移性能的滞回模型[J].建筑科学与工程学报,2011,28(3):93-100.  
ZHANG Chuan, TAN Lu. Bond-slip hysteretic model of rebar[J]. Journal of Architecture Science and Engineering, 2011,28(3): 93-100.

(编辑 吴海西)