

# 锈蚀锚杆与砂浆黏结机理试验研究

夏 宁, 任青文, 曹茂森

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 锚杆通常工作于软弱破碎的不良地质环境中, 岩土介质及地下水中的腐蚀性介质、干湿交替、永久浸泡、密闭潮湿、杂散电流、双金属作用等各种因素, 都会引发锚杆锈蚀。锈蚀使锚杆表面性状改变, 从而影响杆体与砂浆之间的有效黏结, 导致锚杆极限抗拔力下降。基于拉拔试验, 研究了锈蚀及锈蚀部位对锚杆极限抗拔力和黏结性能的影响机理。结果表明: 锚固段无锈蚀试件的极限抗拔力明显高于锚固段发生锈蚀的试件, 并且锚固段前段锈蚀对锚杆极限抗拔力的不利影响最大, 因此, 锚固段前段是锚杆与砂浆黏结的关键部位。试验数据证实锈蚀在锚杆与砂浆界面间起“润滑”的不利作用, 破坏了应力由锚杆到砂浆的有效传递路径, 是导致锈蚀锚杆极限抗拔力下降, 锚固端滑移量增大的主要原因。

**关键词:** 锚杆; 锈蚀; 抗拔力; 黏结应力; 机理

**中图分类号:** TV554

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2007)08-1240-04

**作者简介:** 夏 宁(1977-), 女, 江苏南通人, 讲师, 主要从事水工结构安全度方面的研究。E-mail: shirleyhhu@163.com。

## Experimental study on bonding mechanism between corroded bolts and grout

XIA Ning, REN Qing-wen, CAO Mao-sen

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Bolts are always subjected to corrosion due to complicated and unfavorable environmental factors such as aggressive medium, alternation of wetting and drying, permanent immersion, stray earth and bimetallic corrosion. Corrosion might make the bonding mechanical behavior inferior, and even make bolts disabled. Pullout tests were carried out to investigate the mechanism of influence on the bond property and uplift resistance of bolts in terms of corrosion and its position. It was demonstrated that the ultimate uplift resistance of non-corroded bolts was evidently greater than that of corroded bolts, and that of the corroded bolts in the front part along the anchor was obviously smaller than that in the middle and rear parts. Therefore, the front part along the anchor was the key region to the bonding mechanical behavior between bolts and grout. It was also shown that corrosion products acted as lubricant, resulting in the degradation of bonding mechanical behavior by breaking the effective transfer of stress from bolts to grout.

**Key words:** bolt; corrosion; uplift resistance; bond stress; mechanism

## 0 引 言

近年来我国一直致力于西部大开发和大力兴建基础设施, 项目的建设中有大量边坡和隧洞的加固及支护工程, 给锚固技术带来了广阔的应用前景。锚固技术的先进性毋庸置疑, 但是锚杆的工作环境对其锚固性能的不利影响不容忽视。世界各地均发生过由于腐蚀而导致锚固失效的工程案例。国际后张预应力协会(FIP)的地锚工作小组曾收集到 35 例预应力锚杆(索)腐蚀破坏的实例, 其中永久锚杆占 69%, 临时锚杆占 31%, 断裂部位包括了锚头、自由段和黏结段。实际上, 锚杆通常工作于软弱破碎的不良地质环境中, 岩土介质及地下水中的腐蚀性介质、干湿交替、

永久浸泡、密闭潮湿、杂散电流、双金属作用等各种因素, 都会引发锚杆锈蚀。锈蚀使锚杆表面性状改变, 从而影响杆体与灌浆体间的有效黏结, 导致锚固力下降。国内外学者就锈蚀对钢筋与混凝土黏结性能的影响进行了广泛深入的研究<sup>[1-8]</sup>, 但是关于锈蚀对锚杆工作性能影响的研究还不多见。而锚杆的锚固段较长, 大都在 2~15 m 之间, 一般来说, 较少发生全锚固段锈蚀, 较为常见的是锚固段某一部分发生了锈蚀, 为

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金资助项目(50539030); 江苏省博士后科研资助计划项目(0601037B)  
**收稿日期:** 2006-09-25

此需要针对锚杆的锈蚀特点进行专门研究。因此,本文进行了内贴应变片钢筋的拔出试验,揭示了锈蚀以及锚固段锈蚀部位对锚杆极限抗拔力和锚杆与砂浆黏结性能的影响机理,为锈蚀锚杆锚固力的评估提供了参考依据,对解决锚固类结构安全性、耐久性、使用寿命预测等问题具有重要科学意义。

## 1 试验

试验采用的试件见图1,2,采用光圆钢筋来模拟锚杆,钢筋的屈服强度为559.4 MPa,抗拉强度为615.6 MPa,弹性模量为 $1.96 \times 10^5$  MPa,伸长率为21.5%。由于围压一般为锈胀力的2~6倍,在此种情况下,砂浆保护层锈蚀胀裂的可能性较小,本次试验主要研究锈蚀及锚固段锈蚀部位对锚杆与砂浆黏结性能的影响。采用在自然环境下喷洒盐水的方法先使钢筋锈蚀,然后将钢筋放入预留孔洞的混凝土试块,对中并灌浆。根据钢筋表面锈蚀形态的不同,试件分为4组,每组5个(图3):①锚固段无锈蚀试件;②锚固段前段锈蚀试件;③锚固段中段锈蚀试件;④锚固段后段锈蚀试件。经检测,锈蚀部位钢筋截面平均损失率为10.2%。钢筋内部沿锚固长度贴箔式电阻应变片,采集钢筋拔出过程中的试验数据。外围混凝土用来模拟岩土体对锚固体的约束作用。砂浆的抗压强度为44.55 MPa,弹性模量为32 GPa,轴心抗拉强度为2.81 MPa。为模拟围压作用,在砂浆中掺入了适量膨胀剂。

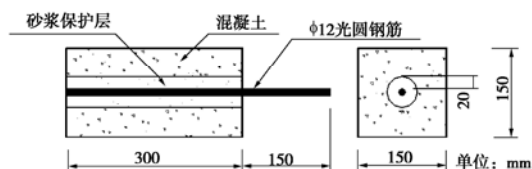


图1 拔出试件几何尺寸图

Fig. 1 The geometry of the specimens



图2 拔出试件实物图

Fig. 2 The pullout specimen

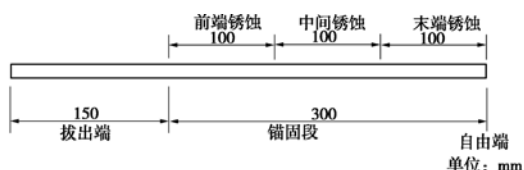


图3 钢筋锈蚀部位示意图

Fig. 3 The position of corrosion on the surface of bars

采用反力架装置在20 t万能试验机上进行拉拔试验。将钢筋两端引出的应变片导线接电阻应变箱,由计算机自动采集钢筋应变数据。钢筋的加载端和自由端各安装一个位移计,分别测量加载端和自由端钢筋与混凝土的相对滑移,如图4所示。



图4 试验加载装置

Fig. 4 Pullout test system

## 2 拔出试验结果分析

### 2.1 荷载滑移试验曲线

在极限荷载以前,加荷端和自由端滑移与拉拔力近乎为直线关系。由于光圆钢筋的化学胶着强度较小,因此,在加荷初期,即可在加荷端测得钢筋与试块的相对位移,表明加荷端附近的胶着力已经破坏,发生了局部滑动。随着荷载增大,相对滑移逐渐向自由端发展,胶着长度减小。当自由端出现滑移时,表明整个锚固长度上的化学胶着力全部失效,这之后,钢筋与砂浆间的黏结力主要是两者间的摩擦力。由于锚固段黏结作用,钢筋自由端滑移量小于加荷端,并且两端滑移量差值大小表示锚固段黏结效果的优劣。所有试件的破坏形态,均为钢筋自试件中拔出的剪切破坏。试件的荷载滑移曲线及曲线特征参数见图5,6和表1。可见,锚固段无锈蚀试件的极限抗拔力明显高于其余各组试件,锚固段不同部位锈蚀试件的极限抗拔力虽然差别不大,但还是呈现出一定规律。三者中,锚固段前段锈蚀试件的极限抗拔力最小,锚固段后段锈蚀试件的极限抗拔力最大。拉拔力相同时,无论是在加荷端还是自由端,锚固段无锈蚀试件的钢筋端部滑移量最小,锚固段前段锈蚀试件的钢筋端部滑移量最大。

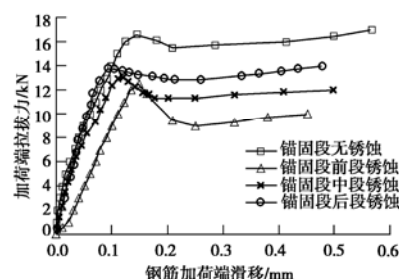


图5 加荷端荷载-滑移曲线

Fig. 5 The load-slide curves at loading end

表 1 各组试件荷载滑移曲线特征参数的比较

Table 1 Characteristic parameters of load-slide curves for different groups of specimens

| 试件      | 极限抗拔力/kN | 加荷端钢筋滑移量/mm | 自由端钢筋滑移量/mm | 两端滑移量之差/mm |
|---------|----------|-------------|-------------|------------|
| 锚固段无锈蚀  | 16.6     | 0.144       | 0.037       | 0.107      |
| 锚固段前段锈蚀 | 12.5     | 0.148       | 0.110       | 0.038      |
| 锚固段中段锈蚀 | 12.9     | 0.110       | 0.070       | 0.040      |
| 锚固段后段锈蚀 | 13.8     | 0.103       | 0.045       | 0.058      |

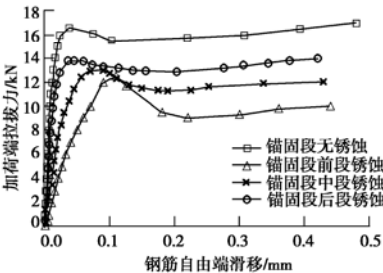


图 6 自由端荷载 - 滑移曲线

Fig. 6 The load-slide curves at free end

各组试件荷载滑移曲线存在差异的原因在于钢筋表面锈蚀及锈蚀部位的不同对钢筋与砂浆之间力的传递过程产生了影响。锈蚀破坏了钢筋与砂浆间的化学胶着力，在钢筋和砂浆发生相对滑移后，锈蚀在两者间起“润滑”作用，减小了钢筋与砂浆的摩擦力，钢筋自身拉应力不能有效地通过黏结锚固作用传递给砂浆，导致锚固段锈蚀试件的极限抗拔力低于锚固段无锈蚀试件。就三组锚固段锈蚀试件的试验结果可知，不同锈蚀部位对钢筋与砂浆之间黏结锚固的破坏程度也不同。通常，在加荷过程中钢筋的应力通过其与砂浆的黏结逐渐由锚固端传向自由端，随着荷载增大，黏结应力峰值逐渐由锚固段前段，经由中段移至后段。本次试验，在荷载较小时，锚固段前段锈蚀试件钢筋加荷端和自由端就出现了明显大于其它各组试件的滑移，破坏程度最为严重。由此可见，锚固段前段是黏结应力首先到达的部位，这个部位的黏结应力对于锚固效果来说至关重要。锚固段后段锈蚀试件的荷载滑移曲线在加荷初期与锚固段无锈蚀试件十分接近，但在加荷末期即临近极限抗拔力时，变形开始明显大于同等荷载作用下的锚固段无锈蚀试件。而锚固段中段锈蚀破坏了钢筋与砂浆传力途径的连续性，它对黏结锚固作用的不利影响介于前段锈蚀和后段锈蚀之间。

由此可见，对于应用于岩土体中的锚杆来说，当锚固段前段发生锈蚀后，其与砂浆保护层的黏结锚固作用被破坏，因此，不能将锚头部位传来的张拉力有效地传递至周围岩土体，并且会产生较大变形，导致极限抗拔力下降，影响锚固效果和锚固结构的正常使用。锚杆的较大变形，一定程度上还会导致张拉力损失，从而不能达到预期锚固效果。锚固段后段锈蚀锚杆，在锚固力较小且低于极限抗拔力时，锈蚀对锚固

效果的不利影响并不明显；但是当锚固力接近并达到极限抗拔力时，锚杆会产生较大滑移，极限抗拔力明显低于杆体完好的锚杆。锚固段中段锈蚀锚杆的极限抗拔力介于前段锈蚀锚杆和后段锈蚀锚杆之间。

2.2 黏结应力分布曲线

由锚固长度内钢筋各点应变的实测值求出钢筋应力后，可由相邻两截面的应力差计算钢筋与砂浆间的黏结应力，各组试件锚固长度上的黏结应力分布如图 7~10 所示。由图 7 可见，在锚固段无锈蚀试件的黏结应力分布图中，随着荷载增大，黏结应力峰值自加荷端逐渐移向自由端，其在锚固段前段、中段和后段均先后出现。这说明无锈蚀钢筋在锚固段内与砂浆黏结良好，钢筋应力首先传递给锚固段前段砂浆，随着荷载增大，前段黏结失效，钢筋应力逐渐传递入锚固段中、后段砂浆。而由图 8~10 可见，当锚固段内钢筋某个部位发生锈蚀后，黏结应力峰值便不会出现在此部位，而是越过锈蚀部位，直接“漂移”到没有锈蚀的锚固段。可见锈蚀阻碍了应力由钢筋至砂浆的传递过程，因而减小了有效黏结长度，影响了锚固效果，导致锚杆极限抗拔力下降。

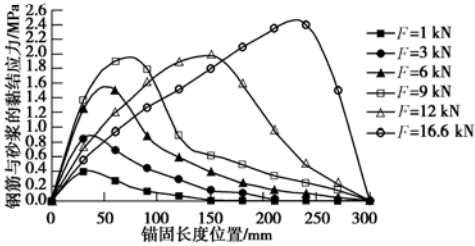


图 7 锚固段无锈蚀试件的黏结应力

Fig. 7 Bond stress at the interface between the grout and non-corroded bar

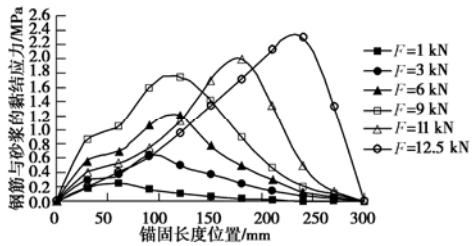


图 8 锚固段前段锈蚀试件的黏结应力

Fig. 8 Bond stress at the interface between the grout and corroded bar in the front part along anchor

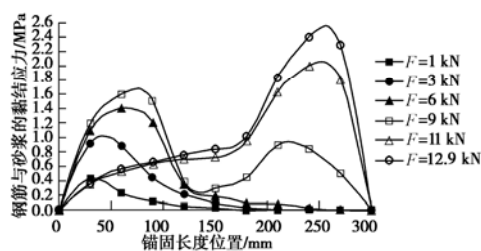


图9 锚固段中段锈蚀试件的黏结应力

Fig. 9 Bond stress at the interface between the grout and corroded bar in the middle part along anchor

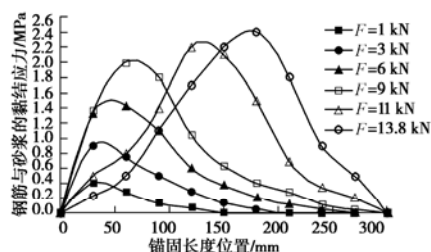


图10 锚固段后段锈蚀试件的黏结应力

Fig. 10 Bond stress at the interface between the grout and corroded bar in the rear part along anchor

### 3 结 语

(1) 采用拉拔试验,研究了锈蚀以及锚固段锈蚀部位对锚杆极限抗拔力和黏结性能的影响机理。试验结果表明:①锚固段无锈蚀试件的极限抗拔力明显高于其余各组试件,锚固段不同部位锈蚀试件的极限抗拔力差别不大,但是还是呈现出一定规律:锚固段前段锈蚀试件的极限抗拔力最小,后段锈蚀试件的极限抗拔力最大;②在相同拉拔力作用下,无论是在加荷端还是自由端,锚固段无锈蚀试件的钢筋端部滑移量最小,前段锈蚀试件的钢筋端部滑移量最大。说明了杆体锈蚀减小了锚杆的极限抗拔力,而锚固段前段锈蚀对于锚杆极限抗拔力的不利影响最大,因此锚固段前段是锚杆与砂浆黏结的关键部位。

(2) 由锚固段黏结应力分布曲线可知:当锚固段某个部位发生锈蚀后,黏结应力峰值便不会出现在此部位,而是越过锈蚀部位,直接“漂移”到没有锈蚀的锚固段,证实了锈蚀在钢筋与砂浆界面间起“润滑”的不利作用,它是导致锈蚀锚杆极限抗拔力下降,锚固端滑移量增大的主要原因。

(3) 本次试验采用的锚固体试件尺度较小,与实际工程中的锚固体相比,存在一定差异。因此还需进一步搜集锈蚀锚固现场实测数据,对本次试验结果加以验证。

(4) 由于锚固类工程的隐蔽性和影响因素的模糊性,锈蚀锚固体力学性能研究具有较大难度。由于试验条件和时间等原因限制,本文试验考虑的因素还不够全面,只是一个初步尝试和探讨。根据锚固类

工程特点进一步深入研究锈蚀对其力学性能的影响是作者目前正在继续开展的工作。

### 参考文献:

- [1] 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(4): 352 - 356. (ZHAO Yu-xi, JIN Wei-liang. Test study on bond behavior of corroded steel bars and concrete[J]. Chinese Journal of Zhejiang University Engineering Science, 2002, 36(4): 352 - 356. (in Chinese))
- [2] 范颖芳, 黄振国, 李健美, 等. 受腐蚀钢筋混凝土构件中钢筋与混凝土粘结性能研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(8): 49 - 51. (FAN Ying-fang, HUANG Zhen-guo, LI Jian-mei, et al. Research on cohesive property between reinforcement and concrete of corroded RC member[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 1999, 29(8): 49 - 51. (in Chinese))
- [3] 李 斌, 何鲜峰, 罗志敏. 锈蚀对钢筋混凝土黏结应力的影响[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 12 - 13. (LI Bin, HE Xian-feng, LUO Zhi-min. Effect of corrosion on cohesive force of reinforced concrete[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 2001, 31(5): 12 - 13. (in Chinese))
- [4] 袁迎曙, 余 索, 贾福萍. 锈蚀钢筋混凝土的粘结性能退化的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(11): 47 - 50. (YUAN Ying-shu, YU Suo, JIA Fu-ping. Deterioration of bond behavior of corroded reinforced concrete[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 1999, 29(11): 47 - 50. (in Chinese))
- [5] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀率与极限粘结强度关系的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(5): 10 - 12. (PAN Zhen-hua, NIU Di-tao, WANG Qing-lin. Experimental study on relation between corrosion rate and ultimate bond strength[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 2000, 30(5): 10 - 12. (in Chinese))
- [6] 王林科, 陶 峰, 王庆霖, 等. 锈后钢筋混凝土粘结锚固的试验研究[J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 14 - 16. (WANG Lin-ke, TAO Feng, WANG Qing-lin, et al. Experimental study on bond and anchorage of corroded reinforcement in concrete[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 1996, 26(4): 14 - 16. (in Chinese))
- [7] AL-SULAIMANI G L, KALEEMULLAH M, BASUNBUL L A, Rasheeduzzafar. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2): 220 - 231.
- [8] ALMUSALLAM A A, AL-GAHTANI A S Rasheeduzzafar. Effect of reinforcement corrosion on bond strength[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(2): 123 - 129.