

# 锚杆腐蚀与防腐保护

黄育 郭志昆 向晓峰

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007)

**【摘要】** 实际工程中, 锚杆腐蚀引起结构严重的破坏屡见不鲜。概述了锚杆发生腐蚀的条件和腐蚀类型, 分析了影响锚杆腐蚀的主要因素, 提出了防腐保护的基本要求及防腐保护的相关措施。

**【关键词】** 锚杆; 腐蚀; 防腐

**【中图分类号】** TU 74

## Corrosion of Anchor Bar and Its Resistance

Huang Yu Guo Zhikun Xiang Xiaofeng

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech, Jiangsu Nanjing 210007 China)

**【Abstract】** In practical engineering, serious damage resulting from the corrosion of anchor bar occurred frequently. The conditions of corrosion and the types of corrosion are summarized, and the main factors influencing corrosion are analysed. At last, the basic requests and measures of corrosion resistance are presented.

**【Key words】** anchor bar; corrosion; corrosion resistance

### 0 引言

岩土锚固技术产生于 20 世纪初的英国, 其巧妙利用了预应力钢材的高抗拉强度, 调用并提高了岩土体自身的强度及自稳能力, 充分挖掘了岩土体的潜能, 有效地节省了工程费用并有利于施工安全, 因而成为提高岩土工程稳定性及解决复杂困难岩土工程问题最经济最有效的方法之一, 在实际工程中有着广泛的应用<sup>[1, 2]</sup>。埋置在岩层与土体中的锚杆的使用寿命取决于锚杆的耐久性。影响锚杆的耐久性的因素有预应力吨位过大、材质、施工工艺不当和环境腐蚀, 而最大威胁来自腐蚀。因此, 锚杆的耐久性与锚性的腐蚀破坏程度有直接的关系。

至今, 国内外锚杆腐蚀破坏现象时有发生<sup>[3]</sup>。国内, 安徽梅山水库的预应力锚杆使用 8 年后, 发现 3 个孔内部分钢丝因应力腐蚀(兼有氢脆)而断裂。西南地区某边坡的预应力锚杆使用 10 年后也发现部分锚杆的锚头处预应力筋出现锈迹, 据分析锚头保护层太薄(仅 10 mm 左右)是引起腐蚀的主要原因。国外, 法国朱克斯坝有几根承载力为 1 300 kN 的锚杆预应力钢丝仅使用几个月就发生断裂。经多次试验, 结论是: 处于高拉伸应力状态下的腐蚀是破坏的主要原因。英国泰晤士河畔的一个码头, 采

用预应力锚杆背拉的钢板桩工程, 在使用 21 年后发生预应力筋断裂并导致钢板桩向外倾斜 30 m 的严重事故。经分析, 主要是由锚杆的钢绞线锈蚀引起的。因此, 解决好锚杆腐蚀问题对于锚固技术的应用和发展有着重要的作用。

### 1 锚杆腐蚀条件

锚杆杆体或预应力筋的腐蚀是一种电解现象。钢材发生腐蚀, 应在其阴极和阳极同时发生反应。引起这种反应的力就是在两极区的电位差。下列条件会导致金属出现电位差<sup>[3]</sup>: 1) 如果两种金属以化学方式接触, 那么电化学电池因各个金属的电位上的差值而形成, 组成一个电化学原电池。活性差的金属起阴极作用, 另一个起阳极作用。2) 金属表面存在不均匀的地方, 例如成分变化的局部区域, 产生了不同电位差, 于是就可能形成微型原电池。3) 金属表面形成一层防护氧化膜的地方, 在防护膜间断处也可能出现原电池。这些缺陷起因于金属内部的不均一性或由于金属加荷引起膜的破裂, 在破裂处出现的锈蚀较轻, 除非有氧气供给。供氧对埋入地下的金属腐蚀有重要影响。金属被高浓度氧包围的地方变成阴极, 而在低浓度包围的那部分就是阳极, 这样就形成一个差动电池, 其锈蚀速度取决于供氧

量。4) 如果金属处于离子浓度有变化的环境中, 那么就能形成差动电池, 其腐蚀速度受氧气所控制。氢离子浓度(pH 值)的变化也可以产生差动电池。金属埋入不同类型的土中, 从透气层变到不透气地层, 也可以大量产生这种电池。

可以看出, 引起锚杆腐蚀的主要原因是地层和地下水中的腐蚀介质作用, 锚杆通过性状差异的地层、双金属作用以及地层中存在的杂散电流。

## 2 锚杆腐蚀类型

锚杆腐蚀问题实际上就是金属材料的腐蚀问题。其腐蚀类型一般可分为全面腐蚀、局部腐蚀及由于氢脆或加荷引起的应力腐蚀。

全面腐蚀是在金属上的阴极区和阳极区大到相等出现较均匀的锈蚀, 金属表面产生一种大致连续的膜, 从而阻抑金属面上的进一步侵蚀。

局部腐蚀出现在独立的腐蚀电池的地方。它是由金属表面形成的各个双金属电池的电位差引起的。金属面上的防护涂料和防护氧化膜出现局部破损则易出现局部腐蚀。这种腐蚀在诸如氯化物侵蚀性离子的地方往往是较严重的。

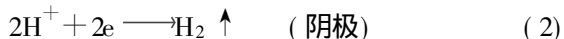
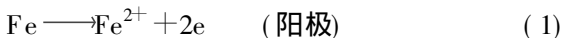
应力腐蚀是材料加荷和局部腐蚀结合的结果, 这两个因素的联合作用可以引起比它们分别作用产生的影响总和大得多的破坏。局部破坏导致金属表面产生孔穴或凹槽, 当这些杆件受到拉伸或弯曲荷载, 在杆件孔穴和凹槽的尖端处就形成较高的集中应力, 从而导致裂缝的开展, 直到金属杆件断面的削弱甚至导致金属的破坏。此外, 当周围介质有大量氯化物时, 钢材则可能受到应力腐蚀。在腐蚀过程中形成了一个氢电池引起的阴极反应。氢渗入金属并形成产生内应力的分子, 这种应力和外荷载均能使裂缝开展和腐蚀的发展。

## 3 锚杆腐蚀机理

锚杆主要由锚头夹具、锚筋和握裹体组成, 以下对其腐蚀原理作简要的阐述。

### 3.1 锚头夹具和锚筋的腐蚀

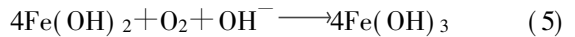
在一定的环境条件下(如氧和水的存在), 钢表面不同部位出现较大的电位差, 从而形成局部微电池而发生电化学反应, 导致锚杆开始腐蚀。其阴、阳极反应式为<sup>[4]</sup>:



阴阳极产生的离子生成初步腐蚀物如下:



进而氧化转变成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (即铁锈), 即



$\text{Fe}(\text{OH})_3$  溶解度较低, 呈疏松的薄膜覆盖于钢表面, 有一定的保护作用, 但抗渗能力很弱, 遇到有充足氧气的溶液时, 电化腐蚀过程可持续至钢材成为铁锈为止。

### 3.2 锚固握裹体与锚筋的相互影响

一般情况下, 握裹体形成的耐久性和高碱性环境对锚筋具有良好的保护作用, 特别是高碱性环境可使锚筋金属表面形成稳定且致密的氧化膜而处于钝化状态, 但受某些因素影响可导致活化<sup>[5]</sup>。

1) 握裹体与酸性气体发生中和反应后, 碱性会逐渐下降, 当  $\text{pH} \approx 10$  时, 就使锚筋具备了腐蚀反应条件。

2) 某些卤离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{Br}^-$ )浓度  $> 0.02 \text{ mol/L}$ , 对钢筋钝化膜有特殊破坏作用, 使锚筋腐蚀。

3) 握裹体内外因材料与环境不均匀性而形成局部电位差, 使锚筋因电化学反应而破坏。

4) 以上反应导致的锚筋锈蚀产物(一般为  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等) 腐蚀溶出, 其体积膨胀至原金属体积的 1.5~4 倍, 且对握裹体产生巨大辐射压力(可高达 30 MPa), 使握裹体沿锈蚀的锚筋产生顺筋裂缝, 另外锚杆自身在拉应力作用下, 握裹体也会产生垂直于锚筋的环状裂缝, 并进一步成为腐蚀介质渗入到锚筋的通道从而加剧锚筋腐蚀, 而在裂缝中的锚筋锈蚀速度往往比裸露时更快, 达到一定程度时握裹体剥落并使锚固粘结力急剧丧失。

## 4 影响锚杆腐蚀的主要因素

由于锚杆所处的地下环境相当复杂, 因此其腐蚀的诱发因素也很多, 其中最关键和最直接的主要因素有以下 3 个方面<sup>[5]</sup>。

### 4.1 环境因素

锚杆在土体中直接与空气、水和土(岩)接触, 这三相介质的酸碱度、侵蚀性离子和气体浓度及补给交换的速度等将直接影响腐蚀速度。但锚杆埋置于土中, 基本上处于相对封闭的环境, 侵蚀性离子和气体的浓度交换循环缓慢, 故其腐蚀速度相对锚头位置要慢得多。

地下水对锚固握裹体和金属锚筋的腐蚀程度仅属弱级。但季节性富贫水引起的干湿交替环境对锚杆腐蚀速度影响极大, 因为地下水以一定流速长期作用于锚杆, 一方面腐蚀介质补给充分, 另一方面水流会不断剥蚀带走腐蚀产物, 加剧腐蚀速度。

## 4.2 材料因素

这主要涉及锚筋和锚固握裹体的选材问题,锚筋钢材应优先选用质量稳定、材质均匀、杂质少的产品。尤其是杂质在电化学反应中电位高,对金属本体来讲易形成微电池,加速腐蚀速度。锚固握裹体的材料主要是水泥、砂、水和外加剂等,水泥因品种不同其化学成分和制成构件后的性能不同,对各种介质的耐腐蚀程度也不同。硅酸盐水泥熟料含量高,掺合料含量不超过 15%,碱度相对较高,水化后易获得较高的碱性储备,故中性化速度相对较慢;矿渣水泥因掺有活性氧化硅,与水泥熟料中水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  结合后使碱性减弱;铝酸盐水泥水化产物呈弱碱性,不能使钢筋表面产生钝化膜。因此从防腐角度考虑,应首选硅酸盐水泥,且不宜选用对钝化有破坏作用的卤离子外加剂。

## 4.3 施工因素

锚固握裹体的均匀程度对锚筋的腐蚀有决定性的影响。因此,施工中必须做好对中支架,使保护层均匀,形成完整的握裹体,以免出现不均匀特别是不连续的现象。灌浆时应注意满浆和补浆,严格控制水灰比和水泥用量,以免收缩性过大而引起裂缝,若条件允许最好采用二次注浆。此外,锚固握裹体的密实度也很关键,较高的密实度可提高其抗渗性能,减少与外界介质交换的可能性使其不易中性化,并提高锚杆的防腐性能。

## 5 锚杆防腐措施<sup>[2]</sup>

### 5.1 锚杆防护的基本要求

锚杆的防护应满足以下基本要求:

- 1) 应按锚杆的使用年限,锚杆所处环境的腐蚀程度及锚杆破坏后果等因素确定防护类型与标准;
- 2) 锚杆防护的有效期应当等于锚杆的有效期;
- 3) 锚杆在其全部自由长度上必须能自由移动,在锚杆试验与加荷时,所有荷载都能由自由段传递到锚固段;
- 4) 锚杆的防护设施必须具有足够的强度和韧性,在锚杆加荷时不致破坏;
- 5) 锚杆及其防护系统在制作、运输、安装过程中不应受到损坏;
- 6) 用作防护系统的材料在预料的工作温度范围内保持不开裂、不变脆或成为流体,具有化学稳定性,不与相邻材料发生反应,并保持其抗渗性。

### 5.2 锚杆防护的类型

根据国内外的有关标准,一般按锚杆的服务年限及所处地层有无腐蚀性来确定锚杆的防护等级,锚杆的防护等级分两极。

I 级:双层防腐蚀保护,预应力筋全长均有套管;

II 级:单层防腐蚀保护,锚固段内的预应力筋仅用灌浆防腐。

不同防护等级不同类型锚杆的防腐蚀保护要求见表 1。

表 1 防腐蚀保护要求

防护等级	锚杆类型	锚 头	自 由 张 拉 段	锚 固 段
I	拉力型	1. 过度管 2. 如暴露在空气中,需用锚具罩	1. 注入油脂的护套 2. 无粘结钢绞线外套注入水泥浆的光滑塑料管	注入水泥浆的波形管
	压力分散型	1. 过度管 2. 如暴露在空气中,需用锚具罩	1. 无粘结钢绞线 2. 外套注入水泥浆的光滑塑料管	无粘结钢绞线与灌浆
II	拉力型	1. 过度管 2. 如暴露在空气中,需用锚具罩	注入油脂的护套	灌浆

## 5.3 锚杆构造防护的措施

### 5.3.1 锚头防护

大多数锚杆的腐蚀破坏都出现在锚具附近未予保护的预应力筋,因此对锚头附近的保护极为重要。永久暴露在空气中的所有预应力锚头,均应设置防护钢罩,其内充填防腐油膏或水泥浆,对于重复张拉型锚头,必须采用防腐油膏。埋入混凝土内的锚头,如混凝土保护层在 50 mm 以上,则不需要防护罩。

应将过度管与支承板密封,并使过度管与自由张拉段的防腐保护部位搭接至少 100 mm。过度管

应有足够的长度,以便在试验和张拉时能适应结构和预应力筋的位移。

过度管内完全充满防腐油膏或水泥浆。重复张拉型锚头必须采用防腐油膏。该防腐油膏可在施工期内注入。

### 5.3.2 自由张拉段的防护

永久性预应力锚杆的自由段处在侵蚀性地层中,是仅次于锚头附近区域易受腐蚀的最薄弱环节。对于拉力型锚杆,套在自由张拉段的防腐蚀保护护套应足以延伸至过度管段,但在试验时不得与锚具

接触。此外,自由段与锚固段防腐蚀保护过度部位的设计和施工,应保证其连续性而免遭侵蚀。

### 5.3.3 预应力筋锚固段的防护

#### 1) I 级防护

对于侵蚀性地层或其侵蚀性未知的地带,均应采用I级防护。I级防护可采用压力分散型锚杆,也可采用套管作为拉力型锚杆锚固段的附加及可控制性的防腐蚀保护层,具体方式为采用注浆的波纹管或波纹管。在预应力筋插入锚孔前或将预应力筋安装后,可对预应力筋灌浆(水泥浆注入套管内)。对中支架或灌浆工艺应保证套管的水泥浆保护层在12 mm以上。

#### 2) II级防护

当预应力筋的安装方法能保证水泥浆完全裹住预应力筋时,在无侵蚀性地层中可采用水泥浆来保护预应力筋的锚固段,但水泥浆与自由张拉段的护套搭接至少应为0.3 m。同样,对中支架及灌浆工艺应保证锚固段的水泥浆保护层在12 mm以上。

### 5.4 克服锚杆腐蚀因素防护

既然锚杆腐蚀是由环境、材料和施工等因素造成,其处理也就应从这几方面入手<sup>[5]</sup>。

1) 对于临时支护结构,设置锚杆时应尽可能避免锚杆处于干湿交替环境中,若无法避免则应对水流采取有效措施如疏、排、引、堵等,以降低锚杆的腐蚀速度。

2) 在材料选用上,应优先选用质量可靠的钢材和硅酸盐水泥,避免使用含卤离子( $Cl^-$ 、 $I^-$ 、 $Br^-$ 等)的早强剂或其它添加剂。

3) 施工过程中应注意锚杆的对中,控制水灰比

或浆液浓度,注浆时注意采取有效措施使握裹体均匀、连续和密实,并尽可能采用二次注浆,或在浆液中添加适量减水剂,提高锚固体的密实度和抗渗性。

4) 对于有特定要求或永久性支护的锚杆,可采用丙烯酸树脂、沥青、改性环氧沥青涂料或防锈漆等进行防腐处理,特别是锚头夹具等易腐蚀部位更应予以重视,条件允许的可考虑直接用防腐材料或(聚合物水泥)砂浆封闭,在锚固体中还可在锚筋与成孔孔壁之间预埋镀锌钢质波纹管来增强锚杆的防腐能力。

## 6 结论

本文分析了锚杆腐蚀条件、腐蚀类型、腐蚀机理及影响腐蚀的因素,阐述了防腐蚀保护的基本要求,提出了相应的防腐保护措施,可供实际工程参考。然而,研究锚杆腐蚀与防护,必须了解工程地质状况和地层的性质,综合各个方面因素,采取科学有效的措施,锚杆的腐蚀问题可得到有效地控制或成功地解决。

### 参 考 文 献

- 1 苗国航. 我国预应力岩土锚固技术的现状与发展. 地质与勘探, 2003, 39(3): 91~94
- 2 程良奎. 岩土锚固的现状与发展. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7~12
- 3 程良奎. 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. 142~150
- 4 曹楚南. 腐蚀电化学原理. 北京: 化学工业出版社, 1985. 45~50
- 5 吕军. 支护锚杆腐蚀性问题的分析和处理. 广东土木与建筑, 2001(11): 65~67

收稿日期: 2004-06-23

(上接第257页)

## 5 结论

本文从Bayes的基本原理出发,结合复合地基承载力分布的已有信息,以及现场载荷试验的数据,得到了复合地基承载力后验分布统计量的计算公式,从而对复合地基承载力的先验分布进行修正,为Bayes原理在该领域的应用进行了探讨。这将对利用可靠性原理,按照概率极限状态设计复合地基,起到极为重要的作用,并具有较高的实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 龚晓南. 复合地基. 杭州: 浙江大学出版社, 1992 2~5

- 2 叶军, 吴世伟. 单桩承载力可靠度分析中试桩信息的应用. 工程力学, 1993, 10(4): 62~69
- 3 Alfredo H S, Ang and Wilson H. Tang. Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 1984, II, 23~28
- 4 刘宁, 郭志川, 罗伯明. 地基沉降的概率分析方法和可靠度计算. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 143~149
- 5 黄克中, 毛善培编著. 随机方法与模糊数学应用. 上海: 同济大学出版社. 1987. 151~161
- 6 S James Press 著. 贝叶斯统计学(原理、模型及应用). 廖文, 等译. 北京: 中国统计出版社, 1992 120~135
- 7 郑建国, 张苏民, 吴世明. 桩基承载力概率分析的贝叶斯方法. 岩土工程技术, 1999(2): 34~38

收稿日期: 2004-07-08