

Cl⁻环境下锚杆腐蚀过程及锚固边坡稳定性分析

付宏渊¹, 陈长睿^{2*}, 陈昌富³, 刘晓明³, 林宇亮⁴, 刘镇⁵, 卢自立⁶

吴定略⁶, 胡红波⁷, 张红日⁸, 骆俊晖⁹, 张静波¹⁰

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 土木工程学院; 3.湖南大学 土木工程学院; 4.中南大学 土木工程学院; 5.中山大学 土木工程学院; 6.保利长大工程有限公司; 7.长沙市公路桥梁建设有限责任公司; 8.广西交投集团有限公司; 9.广西北投交通养护科技集团有限公司; 10.中交第二公路勘察设计研究院有限公司)

摘要:为探究 Cl⁻ 环境下锚杆的腐蚀行为对锚固边坡稳定性的影响,对锚杆进行腐蚀试验和拉伸试验,研究不同腐蚀时间和 Cl⁻ 浓度对锚杆腐蚀过程和锚固边坡稳定性的影响。结果表明:不同腐蚀时间及 Cl⁻ 浓度与锚筋单位质量腐蚀率呈正相关。腐蚀时间对锚筋腐蚀速率的影响大于 Cl⁻ 浓度,不同腐蚀时间及 Cl⁻ 浓度与锚筋的力学性能呈反相关。锚筋的屈服强度、极限强度均随腐蚀时间和 Cl⁻ 浓度的增加而逐渐降低,腐蚀时间为锚杆腐蚀过程的主要影响因素。通过 Geo-Studio 软件模拟不同腐蚀程度锚杆的力学性能变化对锚固边坡稳定性的影响,得出不同腐蚀时间及 Cl⁻ 浓度与锚固边坡稳定性系数呈反相关。

关键词: 锚杆; 质量腐蚀率; 钢筋拉伸试验; 名义应力-应变曲线; 边坡稳定性

锚固边坡内部孔隙水中存在大量的 Cl⁻、OH⁻、Al³⁺、H⁺ 等游离态离子。这些游离态离子可通过锚杆周围水泥浆体中的毛细孔隙渗入到锚杆表层,使锚杆产生腐蚀,削弱其锚固效果,甚至会导致锚杆失效,最终诱发锚固边坡失稳。因此,开展不同腐蚀条件下锚杆的腐蚀行为研究对锚固边坡稳定性分析和寿命预测具有重要意义。

针对锚杆的腐蚀行为,国内外学者开展了大量研究。余波等对混凝土试件中的钢筋进行了加速腐蚀试验,研究了均匀和非均匀腐蚀下钢筋的应力应变关系,指出力学性能随腐蚀程度的增加而逐渐降低;Wenjun Zhu 等采用圆锥和铣刀对钢筋进行打孔破坏模拟腐蚀产生的点蚀和均匀腐蚀,指出腐蚀形貌和腐蚀程度对钢筋的力学性能有着显著的影响;Y. G. Du 等研究了腐蚀导致钢筋延展性降低的机理和程度,指出钢筋的延展性随着腐蚀程度的加深而降低。研究表明钢筋的腐蚀极易导致其力学性能降低,但这些研究多讨论单一影响因素下钢筋的腐蚀行为,尚未涉及多因素作用下锚杆的腐蚀行为。

实践表明:锚杆在服役过程中所处环境复杂,影响因素众多。为探究多因素作用下锚杆的腐蚀行为,李

富民等采用锚杆试件模拟围岩约束条件下锚杆的腐蚀,发现化学腐蚀为锚杆的主要腐蚀方式;Bo Wang 等利用自行研制的锚杆应力腐蚀试验装置,研究了不同工作应力、腐蚀环境和腐蚀时间下锚杆的性能,发现腐蚀时间对锚杆的腐蚀作用最为显著;王金超结合室内试验和现场调查,研究了锚杆的腐蚀影响因素,结果表明弱腐蚀环境下,氧含量为主要的腐蚀影响因素。但这些研究主要通过室内模拟试验来研究锚筋的力学性能损伤、腐蚀行为、腐蚀影响因素等多个方面,关于不同腐蚀时间和 Cl⁻ 浓度下锚筋的力学性能损失规律及锚固边坡稳定性研究尚处于起步阶段。

该文通过开展离子腐蚀试验和拉伸试验,定量研究不同 Cl⁻ 浓度和腐蚀时间作用下锚筋的腐蚀速率与力学性能演化规律,并通过 Geo-Studio 进行不同腐蚀程度下锚固边坡稳定性分析,得到腐蚀时间和离子浓度对锚固边坡稳定性的影响规律。

1 试验步骤

1.1 材料选取

试验采用 $\phi 10$ mm 的 HRB400 钢筋模拟锚杆试

收稿日期:2021-05-19(修改稿)

基金项目:长沙理工大学研究生科研创新项目(编号:CX2020SS34)

作者简介:付宏渊,男,博士,教授。E-mail: fuhy001@163.com

* 通信作者:陈长睿,男,硕士研究生。E-mail: cecrgt3@163.com

件,共设计 5 组。根据试验标准,确定钢筋的原始标距为 50 mm,采用切割机将钢筋切割成长度为 10 cm 的试件。钢筋酸洗液采用 HFT-828 除锈剂,pH 值为 2~3。梁新亚等指出碳钢的腐蚀随 Cl^- 浓度的增加而呈增加的趋势,在 Cl^- 浓度为 3.2% 时达到最大腐蚀速率,所以该文采用分析纯 NaCl 和去离子水配置的腐蚀溶液 Cl^- 浓度为 1.0%、2.0%、3.0%,依此来探究锚杆在 Cl^- 环境中由腐蚀导致的强度退化规律。清洗溶液采用乙醇和去离子水。

1.2 腐蚀试验

沿海地区土体中的主要腐蚀性离子为 Cl^- ,该文采用 Cl^- 溶液模拟锚固边坡的腐蚀环境。首先采用除锈剂对钢筋样品进行酸洗,乙醇、去离子水冲洗后烘干称重,得到腐蚀前重量 m_0 ,采用尼龙自锁扣带将钢筋标记并吊入 Cl^- 浓度分别为 1.0%、2.0%、3.0% 腐蚀溶液中,腐蚀时间为 1~5 个月,每隔一个月将钢筋取出,采用乙醇、去离子水冲洗除去表面锈蚀产物,烘干后称重,得到腐蚀后的质量 m_f ,根据式(1)计算钢筋单位质量腐蚀率:

$$\eta = \frac{m_f - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中: η 为单位质量腐蚀率; m_f 为腐蚀后钢筋质量(g); m_0 为腐蚀前钢筋质量(g)。

1.3 拉伸试验

为精确描述钢筋腐蚀后的应力损失规律,采用微机控制电子万能试验机 WDW-100C 对腐蚀后的钢筋进行拉伸试验,拉伸试样的原始标距 $L_0 = 50$ mm,横截面积 $A_0 = 78.5$ mm²,将试验得到的荷载-位移曲线按式(2)、(3)转换为名义应力-应变曲线:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

式中: σ 为钢筋的名义应力(MPa); F 为拉伸试样受到的荷载(kN); A_0 为拉伸试样的横截面面积(mm²); ΔL 为试验测得的位移(mm); L_0 为拉伸试样的原始标距(mm)。

1.4 锚固边坡稳定性分析

锚杆在边坡支护前期由于土壤中游离态的离子通过水泥浆体的毛细孔隙接触到锚筋使锚筋产生腐蚀,腐蚀产物不断在锚筋周围积累,在锈胀力和岩土体蠕变等因素的作用下,杆体周围的水泥砂浆会产生膨胀甚至开裂,使锚筋完全暴露在腐蚀环境中。因水泥浆

体开裂前锚筋的腐蚀速率较小,该文主要研究锚杆周围水泥砂浆开裂后锚固边坡的稳定性。锚杆依靠锚固段在稳定地层中提供的摩擦力作为边坡的抗滑力,该文在此基础上假定锚固段的摩擦力远大于钢筋的强度,优先考虑锚杆的张拉破坏,采用 Geo-Studio 软件中的 Slope/W 模块对锚固边坡进行稳定性分析,计算模型长 30 m,高 20 m,坡脚为 55°,计算条块数量为 30 块,边坡土体为盐渍土,土体材料定义为弹塑性体,满足摩尔库仑强度准则。稳定性分析方法为 Bishop 法,采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋对该边坡进行支护。建立如图 1 所示边坡模型。

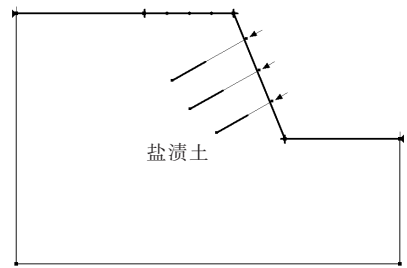


图 1 边坡模型

2 试验结果分析

2.1 不同腐蚀条件对锚杆单位质量腐蚀率的影响

2.1.1 腐蚀时间与单位质量腐蚀率的关系

图 2 为不同 Cl^- 浓度下单位腐蚀率随腐蚀时间的变化关系,拟合曲线的相关系数分别为 0.992、0.992、0.996,说明不同 Cl^- 浓度下锚杆的腐蚀速率呈线性变化,可以采用一次函数进行表示。

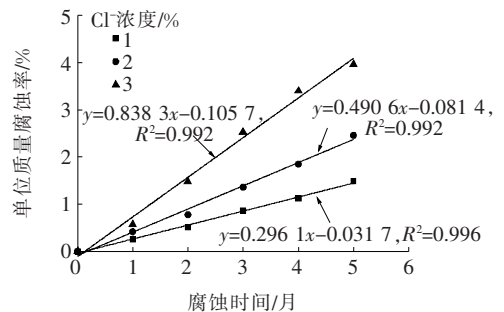


图 2 锚杆单位质量腐蚀率与腐蚀时间的关系

由图 2 可知:随着腐蚀时间的增长单位腐蚀率逐渐升高。腐蚀时间为 5 个月, Cl^- 浓度为 3.0% 时,单位质量腐蚀率增幅为 3.96%;腐蚀时间为 1 个月, Cl^- 浓度为 3.0% 时,单位质量腐蚀率增幅为 0.57%,可见腐蚀时间对锚杆单位质量腐蚀率的影响较为明显。造成上述现象的原因是 Cl^- 在腐蚀过程中会不断破坏锚

筋表面的钝化膜,促使腐蚀过程持续进行,导致腐蚀速率随腐蚀时间的增加而逐渐增加。同时随着Cl⁻浓度的增加,单位质量腐蚀率的增幅也逐渐增大,因此Cl⁻浓度也是锚杆腐蚀过程的重要影响因素之一。

2.1.2 氯离子浓度与单位质量腐蚀率的关系

Cl⁻浓度是锚杆腐蚀过程的重要影响因素之一,图3为不同腐蚀时间下Cl⁻浓度与单位质量腐蚀率之间的关系。

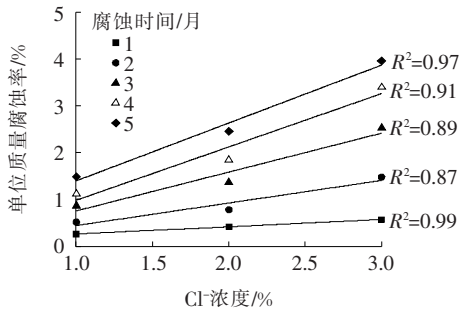


图3 不同腐蚀时间下Cl⁻浓度与单位质量腐蚀率的关系

由图3可知:腐蚀5个月,Cl⁻浓度为3.0%时,单位质量腐蚀率为3.96%,而Cl⁻浓度为1.0%时,单位质量腐蚀率为1.48%。随着Cl⁻浓度的增加会加剧Cl⁻对钝化膜的侵蚀过程,加速腐蚀反应的发生,因此随着氯离子浓度的增加,腐蚀速率也逐渐增加。由数据对比可知Cl⁻浓度对单位质量腐蚀率的影响小于腐蚀时间的影响。

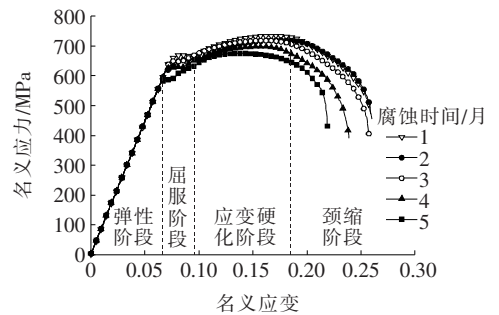
2.2 不同腐蚀条件对锚杆力学性能的影响

2.2.1 腐蚀时间与力学性能的关系

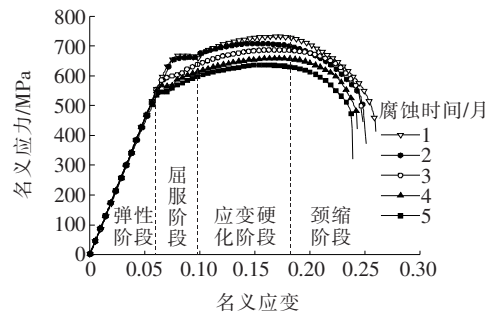
图4为不同Cl⁻浓度时钢筋腐蚀的名义应力—应变曲线。

由图4可知:随着腐蚀时间的延长,锚筋的名义应力—应变曲线依旧保持4个阶段。弹性阶段:弹性模量保持不变,钢筋的弹性模量只与其材料类型有关,其受腐蚀的影响较小。屈服阶段:屈服强度逐渐降低,屈服平台逐渐缩短,如图5所示,腐蚀时间为1~5个月:Cl⁻浓度为3.0%时,屈服强度降幅为24.0%;Cl⁻浓度为2.0%时,屈服强度降幅为15.7%;Cl⁻浓度为1.0%时,屈服强度降幅为11.3%,可见屈服强度受腐蚀时间的影响较大。应变硬化阶段:应变硬化阶段对应的应变逐渐减少,极限强度逐渐降低,如图6所示,腐蚀时间为1~5个月:Cl⁻浓度为3.0%时,极限强度下降了22.4%;Cl⁻浓度为2.0%,极限强度下降了14.8%;Cl⁻浓度为1.0%,极限强度下降了8.7%,腐蚀时间对极限强度的影响较为明显。颈缩阶段:断裂应变逐渐减小,钢筋延性逐渐降低。产生上述现象的

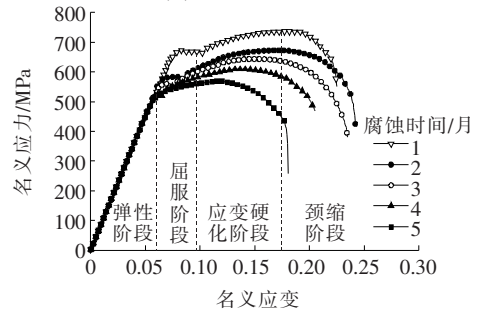
原因是由于腐蚀时间的延长,单位质量腐蚀率逐渐增加,锚筋产生孔蚀导致锚筋的有效截面积减小,且在有效截面上由于孔蚀的发生易产生锐边角导致应力集中,使锚筋由塑性变形转变为脆性破坏,强度降低。



(a) Cl⁻浓度1.0%



(b) Cl⁻浓度2.0%



(c) Cl⁻浓度3.0%

图4 不同Cl⁻浓度环境中钢筋腐蚀的名义应力—应变曲线

2.2.2 Cl⁻浓度与锚杆力学性能的关系

由前文分析可知:Cl⁻浓度作为锚杆腐蚀行为的重要影响因素,其对锚筋力学性能的具体影响如图7、8所示。

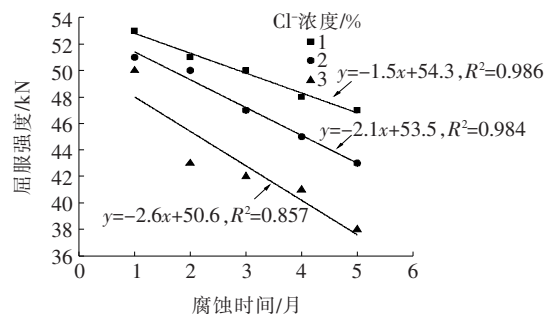


图5 不同Cl⁻浓度下锚杆屈服强度与腐蚀时间的关系

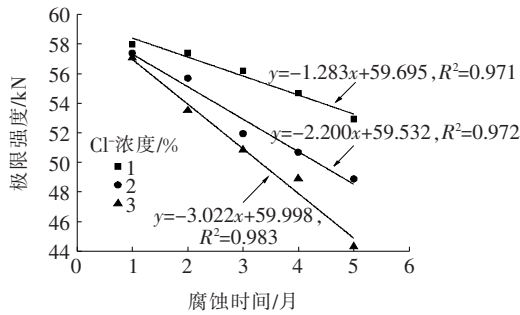


图 6 不同 Cl^- 浓度下钢筋极限强度与腐蚀时间的关系

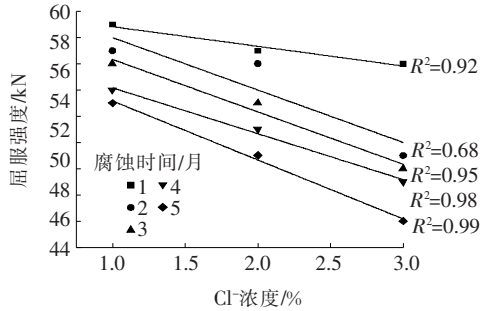


图 7 不同腐蚀时间下锚杆屈服强度与 Cl^- 浓度的关系

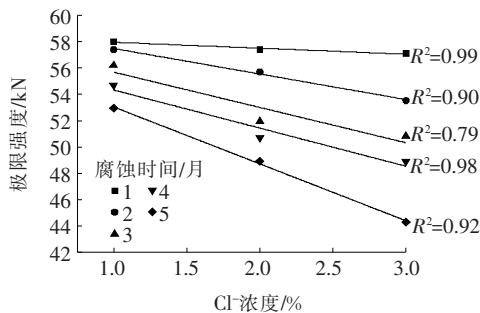


图 8 不同腐蚀时间下锚杆极限强度与 Cl^- 浓度的关系

由图 7 可知:同一腐蚀时间下锚筋的屈服强度随着 Cl^- 浓度的增加而逐渐减小;腐蚀时间为 5 个月,随 Cl^- 浓度的增加,锚筋的屈服强度降幅为 19.1%,腐蚀时间为 1 个月,随 Cl^- 浓度的增加,锚筋屈服强度的降幅为 5.7%。由图 8 可知:相同腐蚀时间下锚杆极限强度随 Cl^- 浓度的升高而降低;腐蚀 5 个月,随着 Cl^- 浓度的增加,锚筋极限强度降幅为 16.3%,腐蚀 1 个月,随着 Cl^- 浓度的增加,锚筋极限强度降幅为 1.5%。可见 Cl^- 浓度对锚筋力学性能的影响要小于腐蚀时间的影响。造成上述现象的原因是, Cl^- 浓度增加,锚筋的腐蚀程度增加,锚筋的有效截面减小,且易产生应力集中导致锚杆力学性能下降。

3 边坡稳定性分析

根据该文假定,锚杆的锚固力由锚筋的抗拉强度

表示。锚杆在边坡支护中,通过锚固力为边坡土体提供抗滑力。锚筋由于腐蚀导致其力学性能降低,锚杆提供的锚固力下降,由于土体本身提供的抗滑力和下滑力保持不变,而此时锚固力提供的抗滑力下降所以导致边坡稳定性系数下降。通过软件模拟确定的边坡最危险滑动面如图 9 所示,稳定性系数为 0.978。锚杆支护后的边坡稳定性系数为 1.119。

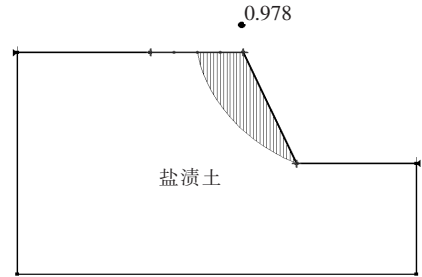


图 9 最危险滑动面位置

该文已通过试验得出钢筋在不同 Cl^- 环境下腐蚀不同时间的极限强度,根据试验结果依次模拟出不同 Cl^- 环境下腐蚀不同时间的边坡稳定性系数。

3.1 腐蚀时间对边坡稳定性系数的影响

不同 Cl^- 环境下锚固边坡稳定性系数与钢筋腐蚀时间的关系如图 10 所示,两者的关系符合线性变化,可以采用一次函数进行表示。锚固边坡稳定性系数随腐蚀时间的增长呈线性降低,腐蚀 1~5 个月: Cl^- 浓度为 3.0%,由锚杆提高的稳定性系数下降了 19.1%, Cl^- 浓度为 1.0%,由锚杆提高的稳定系数降幅为 6.4%。

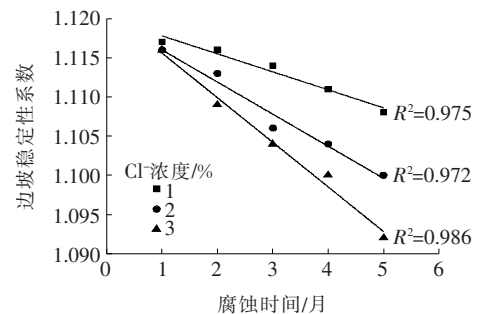


图 10 不同 Cl^- 浓度下锚固边坡稳定性系数与腐蚀时间的关系

3.2 Cl^- 浓度对边坡稳定性系数的影响

不同腐蚀时间下锚固边坡稳定性系数随 Cl^- 浓度的变化关系如图 11 所示,相同腐蚀时间下锚固边坡稳定性系数随 Cl^- 浓度的升高呈线性降低,但腐蚀初期锚固边坡稳定性系数变化不大,且存在一定的离散性,但随着腐蚀时间的增长,离散性逐渐降低。腐蚀时间

为1个月:随Cl⁻浓度的增大,锚杆提高的稳定性系数降幅为11.3%,腐蚀时间为5个月,随Cl⁻浓度的增大,锚杆提高的稳定性系数降幅为0.7%。

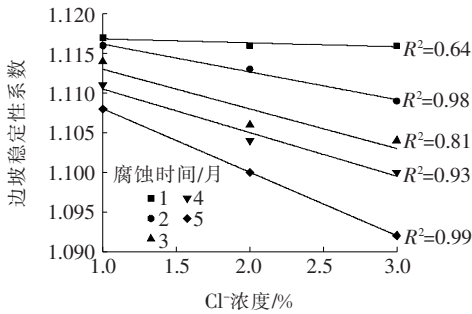


图 11 不同腐蚀时间下锚固边坡稳定性系数与Cl⁻浓度的关系

4 结论

将钢筋作为研究对象,研究其在不同腐蚀环境和不同腐蚀时间下的腐蚀规律,并将其应用到锚固边坡稳定性分析过程中,得出以下结论:

(1) 不同腐蚀时间及Cl⁻浓度与锚筋单位质量腐蚀率呈正相关。腐蚀时间对锚筋腐蚀速率的影响大于Cl⁻浓度。

(2) 不同腐蚀时间及Cl⁻浓度与锚筋的力学性能呈反相关。锚筋的屈服强度、极限强度均随腐蚀时间和Cl⁻浓度的增加而逐渐降低。腐蚀时间对力学性能的影响大于Cl⁻浓度。腐蚀时间为锚杆腐蚀主要的影响因素。

(3) 通过Geo-Studio软件模拟了不同腐蚀程度锚杆的力学性能变化对锚固边坡稳定性的影响,得出不同腐蚀时间及Cl⁻浓度与锚固边坡稳定性系数呈反相关。

参考文献:

[1] Gadala I M, Alfantazi A. Electrochemical Behavior of API-X100 Pipeline Steel in NS4, Near-Neutral, and Mildly Alkaline pH Simulated Soil Solutions[J]. Corrosion Science, 2014, 82: 45-57.

[2] 张成琳,刘清风. 钢筋混凝土中氯盐和硫酸盐耦合侵蚀研究进展[J]. 材料导报, 2021(1).

[3] 朱杰兵,王小伟. 高边坡预应力锚固结构腐蚀损伤与诊断研究进展[J]. 长江科学院院报, 2018(11).

[4] 冯兴国,卢萧,汪彦,等. 海水拌制珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的腐蚀速率[J/OL]. 建筑材料学报;1-11[2021-03-18].

[5] 邓东平,李亮,赵炼恒,等. 基于锈胀开裂的预应力锚杆(索)使用寿命预测研究[J]. 岩土工程学报, 2014(8).

[6] 王军. 水化学腐蚀下锚杆的承载特性[J]. 煤炭技术, 2016(4).

[7] 余波,丁自豪,刘阳,等. 考虑均匀/非均匀锈蚀特征参数的钢筋力学与变形性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019(6).

[8] Zhu W, Zhang K, Wang Z, et al. Effect of Artificial Corrosion on the Postyielding Performance of Steel Reinforcement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(1).

[9] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Effect of Corrosion on Ductility of Reinforcing Bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(7): 407-419.

[10] 陆秋生,郭志安,何东林,等. 地铁杂散电流对锚杆的腐蚀影响实验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019(1).

[11] 赵健,冀文政,曾宪明,等. 应力腐蚀对锚杆使用寿命影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S1).

[12] 唐荣茂,朱亦晨,刘光明,等. Q235钢/导电混凝土在3种典型土壤环境中腐蚀的灰色关联度分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021(1).

[13] 李富民,刘贞国,陆荣,等. 硫酸盐腐蚀锚索结构锚固性能退化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(8).

[14] Wang B, Guo X, Jin H, et al. Experimental Study on Degradation Behaviors of Rock Bolt under the Coupled Effect of Stress and Corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 37-48.

[15] 王金超. 预应力锚固系统长期耐久性及其影响因素研究[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2013.

[16] GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法[S].

[17] 梁新亚. 氯盐环境中碳钢腐蚀速率与力学性能的试验研究[D]. 河南工业大学硕士学位论文, 2020.

[18] 丁万涛,刘金慧,张乐文. 加筋锈蚀对氯离子侵蚀海底隧道锚固支护结构影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014(6).

[19] 李志强,杨涛,王亚平,等. 边坡稳定性动态辨识及工程应用[J]. 中外公路, 2018(5).

[20] 李建宇,耿文林,潘家奇,等. 路堑高边坡稳定性分析与支护参数优化设计研究[J]. 中外公路, 2018(5).

[21] 冯建伟,刘靖. 基于AHP-FUZZY与数值仿真计算的公路边坡稳定性分析[J]. 中外公路, 2015(2).

[22] 李聪,朱杰兵,汪斌,等. 腐蚀环境下锚固顺层边坡时效演化行为模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(S1).