

文章编号:1004-4116(2021)02-0059-07

湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性与 改善措施研究

郭红东^{1,2},白 杨³,畅才源^{1,2}

(1. 甘肃省地矿局第二地质队,甘肃 兰州 730020;2. 甘肃水文地质工程地质勘察院,甘肃 兰州 730020;
3. 甘肃第七建设集团股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘 要:随着预应力锚索在湿陷性黄土边坡加固工程中的广泛应用,其耐久性问题就变得日益突出,湿陷性黄土边坡预应力锚索出现了较多因预应力损失而引起的失效事故。基于湿陷性黄土边坡预应力锚索运行现状进行研究,研究表明:黄土腐蚀性对边坡预应力锚索耐久性影响微弱,黄土湿陷性和地质条件变化对边坡预应力锚索耐久性影响显著;通过采用加强排水措施、提升浅部注浆工艺和注重运行维护等措施可以改善湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性;改善后的预应力锚索在监测期内处于平稳波动的服役状态,运行效果良好。本研究以期为湿陷性黄土边坡预应力锚索的设计、施工和运行维护等提供借鉴。

关键词:黄土边坡;预应力锚索;耐久性研究;改善措施

中图分类号:TU475+.3

文献标志码:A

随着“西部大开发”战略的推进,高等级公路、铁路和水利等基础工程于辽阔的黄土地区快速发展,进而产生了诸多湿陷性黄土边坡工程^[1-4],黄土边坡具有结构疏松、垂直节理发育、湿陷性厚度大、湿陷性等级高和湿陷性敏感等特征^[5],在地表水或地下水作用下黄土边坡稳定性降低,黄土边坡问题已构成黄土地区基础工程建设的瓶颈^[6]。

预应力锚索因锚固力大、主动受力和施工灵活等众多优点^[7-9],被广泛应用于防护湿陷性黄土边坡工程^[10-12]。朱彦鹏等^[13-15]基于室内模型试验,探索了黄土地区框架预应力锚杆支护边坡的土压力分布规律,发现边坡应力状态主要受锚索预应力大小、位置和施加次序等影响;白明洲等^[16]进行了黄土边坡稳定性现场监测试验,基于突变理论,建立了黄土边坡锚索预应力监测预警的突变模型,验证了预警模型的可靠性。预应力锚索应用于湿陷性黄土边坡加固工程的研究较为丰富,但湿陷性黄土边坡预应力锚索的耐久性研究还很鲜见。而湿陷性黄土边坡在持续降雨条件下极易受冲蚀、潜蚀和湿陷而形成黄土

陷穴^[5],引起预应力锚索反力装置产生位移而造成应力失效问题,预应力锚索因耐久性不足而失效导致黄土边坡失稳破坏。

鉴于此,基于湿陷性黄土边坡预应力锚索运行现状定性研究,探索了湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性影响因素,初步提出了增强湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性的改善措施,利用监测试验考察了改善措施的效果,以期为湿陷性黄土边坡预应力锚索的设计、施工和运行维护等提供借鉴。

1 湿陷性黄土边坡预应力锚索运行现状定性研究

预应力锚索作为一种以岩土锚固技术为特点的新型支护结构,在黄土边坡加固工程中发挥了极大的作用。然而,因设计、施工和维护不周等原因而引起的黄土边坡预应力锚索失效事故常有发生,锚索预应力一旦失效将在短时间内造成严重破坏,并且事前可能毫无征兆^[17]。

收稿日期:2021-03-01

基金项目:甘肃省地矿局科研基金资助(201502)

作者简介:郭红东(1984~),男,汉族,甘肃会宁人,高级工程师、注册岩土工程师,长期从事岩土工程、地质灾害防治、水文地质勘查工作。E-mail:275249318@qq.com

兰州市于 2017 年发生了一起因锚索预应力失效,导致治理后的黄土边坡失稳产生滑塌的事故,因事前没有对锚索预应力进行监测,滑坡在 8 月底连续 13 d 降雨后突然发生,下滑岩土体方量约 7 000 m³,阻断市内重要交通干线北环路半幅路长达 1 a 时间,造成了很大的社会影响(图 1)。



图 1 兰州市北环路边坡锚索预应力失效产生滑坡图
(2017年)
Fig. 1 Landslide due to prestress failure of anchor cable on North Ring Road Slope in Lanzhou (2017)

同时,经过对已经实施工程的大量调查,发现许多预应力锚索框架周围土体已被冲蚀殆尽,甚至被掏空,例如兰州市孙家台小区边坡预应力锚索框架治理 10 a 后,大部分框架梁已悬空,局部坡面产生了落水洞(图 2)。

另外,根据对兰州市北环路高边坡 2017 年发生滑坡后裸露钢绞线的调查发现,因为黄土边坡预应力锚索孔口封堵困难,浅部压力无法达到要求,导致



图 2 黄土表层湿陷致预应力锚索框架悬空图
Fig. 2 Prestressed anchor cable frame suspended due to collapsible loess surface

包裹钢绞线的砂浆不够密实,该工程在实施 5 a 后,锚索自由段浅部 2 ~ 3 m 范围内产生了大量因入渗地表水和空气而引起的锈迹,具有明显的腐蚀特征(图 3)。



图 3 黄土层预应力锚索浅部钢绞线锈蚀情况图
Fig. 3 Corrosion of steel strand at the shallow part of prestressed anchor cable in loess layer

综上所述,湿陷性黄土边坡预应力锚索出现不少因其耐久性不足而引起的失效事故,对社会产生了许多不良影响。因此,研究湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性的影响因素,提出具有针对性地改善措施,进而考察改善措施的效果显得极为必要。

2 湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性影响因素拾取

岩质边坡预应力锚索耐久性的影响因素主要包括地下水对预应力锚索钢筋的化学腐蚀和锚索锁定荷载大于其抗拉强度标准的 60%对钢绞线的应力腐蚀^[18]。相较于岩质边坡,湿陷性黄土边坡因受自身特性的限制,黄土与锚索极限粘结强度标准不超过 100kPa,锚固段长不一般不超过 10 m,锚索锚固体抗拔安全系数处于 2.2 ~ 2.6^[19]。归纳整理现有预应力锚索治理的黄土边坡工程,发现预应力锚索多数由 3 束钢绞线组成,预应力设计值处于 180 ~ 220 kN 间,约占钢绞线抗拉标准值的 23 ~ 28%,因此,湿陷性黄土边坡预应力锚索产生应力腐蚀的可能性较小,应力腐蚀对黄土边坡预应力锚索耐久性影响也相对较小。根据调查研究,除施工质量不符合规范要求的主观因素外,初步推断影响湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性的主要因素包括黄土腐蚀性、黄土湿陷性和工程治理前后的区域地质

表 1 陇西和兰州地区湿陷性黄土(马兰黄土)地层参数表

Table 1 Stratum parameters of collapsible loess (Malan loess) in Longxi and Lanzhou area

地 区	含水率(%)	渗透系数(cm/s)	SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	Cl ⁻ (mg/kg)
陇 西	3.4 ~ 19.6	$2.07 \times 10^{-5} \sim 9.43 \times 10^{-4}$	946 ~ 1 360	220 ~ 460
兰 州	2.9 ~ 17.9	$1.91 \times 10^{-4} \sim 2.79 \times 10^{-4}$	300 ~ 1 000	90 ~ 240

注:渗透系数均由现场渗水试验测得,以垂直渗透为主

环境变化。

2.1 腐蚀性对支护结构的影响

归纳总结国内外预应力锚固工程产生失效事故的原因,腐蚀是造成预应力锚索失效的主要因素。因此,学者们对腐蚀影响预应力锚索耐久性开展了较为深入地研究,主要从锚头、索体、保护浆体的腐蚀特征、腐蚀进程、力学性能退化等方面综合考察了预应力锚索耐久性,获得了诸多非常有价值的研究成果,如发现岩质边坡富水情况为索体遭受腐蚀的主要诱因,预应力锚固结构最易受到腐蚀的部位为锚头与自由段浅部 1 m 范围以内,其中,锚头部位的腐蚀与施工时保护层厚度有关^[20-21]。相较于岩质边坡地下水丰富、节理裂隙发育等特征,陇西地区湿陷性黄土边坡含水量介于 2.9% ~ 19.6%,平均含水量介于 8.0% ~ 10.0%,湿陷性黄土渗透系数(垂直)约 $2.07 \times 10^{-5} \sim 9.43 \times 10^{-4}$ cm/s,SO₄²⁻离子含量介于 300 ~ 1 400 mg/kg,Cl⁻离子含量介于 90 ~ 460 mg/kg (表 1)。黄土边坡含水形式主要为包气带水(上层滞水),含水量及易溶盐含量均处于相对稳定状态,含水量、SO₄²⁻、Cl⁻离子含量及易溶盐总量自地面以下逐渐增加,如图 4 所示。观察试验数据发现,

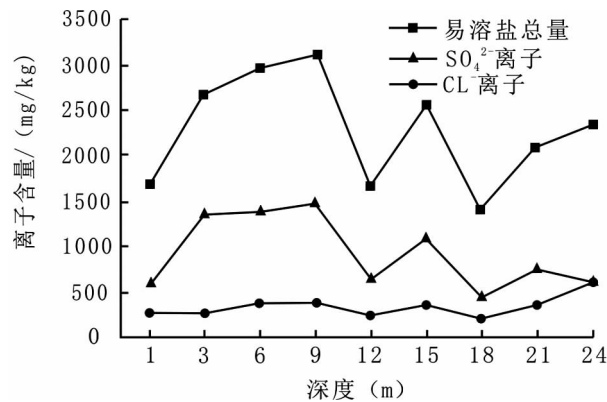


图 4 兰州市区高阶地SO₄²⁻、Cl⁻离子含量及易溶盐总量随深度变化情况图

Fig. 4 Change curves of SO₄²⁻, Cl⁻ ion and total soluble salts with depth in high terrace of Lanzhou City

湿陷性黄土边坡对混凝土结构及混凝土内部钢筋均具有微—弱腐蚀性,因此,在排水条件良好的边坡区域,湿陷性黄土地层的腐蚀性对锚索结构的耐久性影响有限。

2.2 黄土湿陷对支护结构的影响

陇西地区马兰黄土具有Ⅲ—Ⅳ级自重湿陷性,湿陷深度可达 25 m,自重湿陷量ΔZS 大于 700 mm,局部地段甚至达到 1 600 mm,黄土颗粒成分以粉粒为主,黏粒含量一般小于 10%,具粒状架空接触式结构,孔隙比为 1.0 左右,最大可达 1.5,具有结构疏松、大孔隙发育、垂直节理发育等特征,为湿陷的发生提供了一定的空间,且湿陷敏感,水敏性强^[22]。黄土在干燥状态下具有一定的强度,但地表水入渗后使大量的易溶盐被溶解带走,从而使黄土颗粒间的连接关系遭到破坏,加上垂直节理裂隙为地表水沿裂隙入渗提供了通道,发生强烈的机械潜蚀作用,水楔作用迫使黄土结构破坏,为土颗粒的运移提供了方便,从而使黄土边坡内部的裂隙不断扩大,最终形成陷穴、陷坑、塌陷等灾害。

在陇西地区边坡支护过程中,充分考虑了地表水对支护工程的影响,防排水工程为治理边坡工程考虑的首要措施,在坡顶及坡面均设置了截排水渠。根据调查发现,在边坡坡顶排水良好,不存在积水的情况,湿陷性黄土边坡无法形成落水洞,地表水对深部预应力锚索锚固段没有形成危害。李维朝^[23]和丁勇^[24]等对黄土层降雨入渗的研究中发现,人工降雨试验确定的黄土最大入渗深度只有 4 m,根据对已实施的大量工程的调查发现,调查结果与研究结论基本相符。但同时发现,对预应力锚索反力装置,如框架格的排水往往疏于考虑,使得黄土边坡表层发生湿陷,从而造成框架位移,进而造成锚索预应力损失。

2.3 地质环境变化对支护结构的影响

黄土边坡治理后,局部地质环境变化对预应力锚索结构产生的影响不容小觑。根据对已治理黄土

边坡工程的影响因素剖析,发现地质环境变化对预应力锚索耐久性影响集中表现:(1)局部地形改变后,部分分散排水变为集中排水,使边坡内部易溶盐运移后形成聚集,增强了局部土体的腐蚀性,从设计时的微—弱腐蚀性变为中—强腐蚀性,对支护结构的耐久性产生了影响;(2)部分边坡治理后,坡顶成为居住区,居民产生的生活用水长期对坡面进行冲刷,进而形成冲沟,造成框架梁悬空,引起锚索预应力损失甚至消失;(3)坡面局部存在凹腔,在施工过程中,为整平坡面,对其进行了回填,回填土的固结使锚索预应力损失甚至消失,造成反力装置如框架梁、竖肋等失去约束,其重力作用反对坡面起到加载作用,如文中提到的 2017 年北环路滑坡,在锚索预应力失效后,坡面框架及框架内的填充物受重力作用下滑,致使坡面局部产生滑坡。

综上所述,黄土腐蚀性对黄土边坡预应力锚索耐久性影响微弱,而黄土湿陷性和地质条件变化对黄土边坡预应力锚索耐久性影响显著。

3 改善措施与效果验证

针对湿陷性黄土边坡预应力锚索因黄土腐蚀、湿陷和地质环境变化而引起耐久性不足的现状,首先提出加强排水措施、提升浅部注浆工艺和注重运行维护的改善措施以增强湿陷性黄土边坡预应力锚索的耐久性,然后利用监测试验验证改善措施的效果。

3.1 改善措施

3.1.1 加强排水措施

黄土边坡在自重荷载或者外荷载作用下,地表水潜蚀产生的黄土湿陷,雨水冲刷造成预应力反力装置架空、甚至滑移,致使锚索预应力损失,严重影响黄土边坡预应力锚索的耐久性。因此,在按照规范施工和保证工程质量的基础上,重点加强顶和坡面的排水措施,特别是加强以往容易忽视的坡面框架格内排水措施,以减少地表水入渗以降低黄土湿陷来增强黄土边坡预应力锚索的耐久性。

3.1.2 提升浅部注浆工艺

因为黄土边坡预应力锚索孔口封堵困难,浅部压力无法达到要求致使钢绞线外部砂浆不够密实,锚索自由段浅部容易因地表水和空气入渗而受到腐蚀,影响黄土边坡预应力锚索的耐久性。因此,要对黄土边坡预应力锚索浅部注浆工艺给予高度重视,

根据腐蚀因素及工程防护等级,通过提高钢绞线外部砂浆密实度、加单层波纹套管防腐、加双层波纹套管、采用高抗硫酸盐水泥等有效措施,加强阻隔入渗地表水和空气以降低自由段浅部腐蚀,增强黄土边坡预应力锚索的耐久性。

3.1.3 注重运行维护

黄土边坡周围的地质环境非常脆弱,水土流失现象非常严重,影响黄土边坡预应力锚索的耐久性。因此,提出高度重视边坡治理以后的运行维护工作,即加强运行维护以减小锚索预应力损失来增强黄土边坡预应力锚索的耐久性。

3.2 效果验证

试验研究地点为兰州市北环路九安隧道西侧,边坡总体高为 86 m,上部黄土边坡高为 26 m,下部岩质边坡高为 60 m,坡顶为兰州市 330 kV 输电线路铁塔。黄土边坡地层岩性为上更新世马兰黄土,具有Ⅳ级自重湿陷性,土层对混凝土及混凝土中的钢筋均具有微腐蚀性。坡面采用 150 束预应力锚索进行支护,反力装置为 400 × 400 mm 框架梁,框架梁全截面嵌入坡面土层中。预应力锚索长度为 22 ~ 30 m,锚固段长度均为 10 m,下倾角为 20° ~ 25°,钻孔孔径为 φ 150,内注 M 30 水泥砂浆,注浆压力为 0.4 MPa,进行二次劈裂注浆,索材采用 3 φ 1 × 7-15.20-1860-GB/T 5224-2014 高强度、低松弛钢绞线,设计荷载为 210 kN,锁定荷载为 190 kN。在预应力锚索上安装了 2 孔(M1、M2)BDWX-MS-052 锚索测力计,采用 BDWX-CJ 一体化数据采集仪进行自动监测(图 5)。

王振刚^[25]在对基坑工程黄土地层中锚索预应力监测时发现,在张拉锁定后一周内,预应力由初始锁定的 100 kN 减小至 89.94 kN,周勇等^[26]对兰永一级公路白垩系砂泥岩互层高边坡预应力进行了分析,预应力施加结束后的一个月,经历了初期预应力速损、中期波动稳定、后期缓慢抬升,末期平稳变化 4 个重要阶段。本次边坡监测于 2018 年 11 月 6 日锚索预应力施加完成后开始,监测周期历时 24 个月,锚索锚固力与时间关系曲线图,如图 6 和图 7 所示。监测结果表明,锚索预应力一直处于平稳波动状态,年变化幅度为 $\pm 0.006\%$,单日变化为 ± 0.7 kN,锚索预应力未见明显损失,较以往认识规律完全不同,预应力没有经过前 3 个阶段的变化过程,也说明边坡经过治理后一直处于良好的稳定状态。究其原因:根据湿陷性黄土框架格内汇水后易产生湿

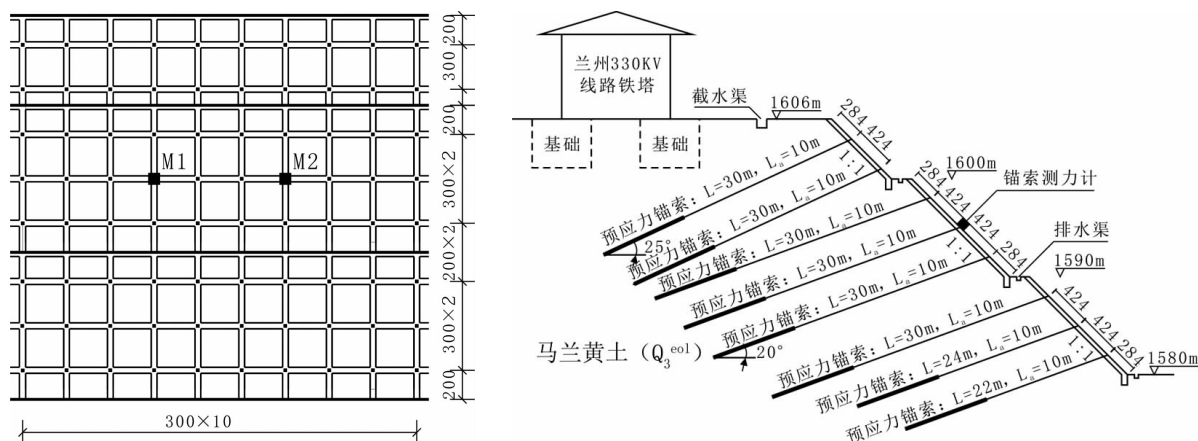


图 5 锚索测力计布置立面图及剖面图

Fig. 5 Arrangement of dynamometers for anchor cable

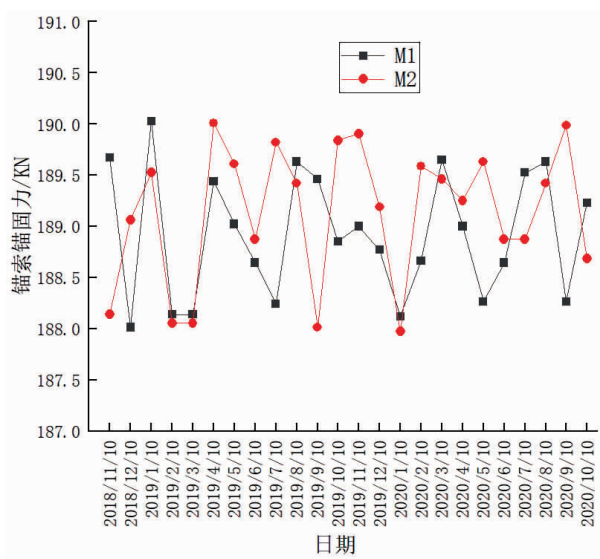


图 6 监测期锚索锚固力变化曲线图

Fig. 6 Change curve of anchor force during monitoring period

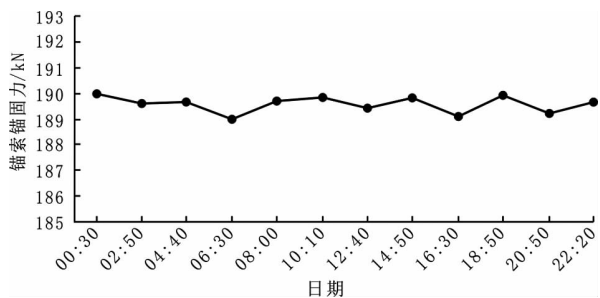


图 7 单日锚索锚固力变化曲线图

Fig. 7 Change curve of anchoring force in the period of single day

了水流渗入,减缓了表层土体湿陷及冲刷进程;边坡坡顶排水良好,不存在积水等情况,湿陷性黄土地层受水的影响小,无法形成落水洞等,对深部预应力锚索锚固段没有形成危害;预应力锚索设计合理确定了荷载和自由张拉段。采用的预应力钢绞线的极限荷载为 780 kN,锁定值为 190 kN,杆体的抗拔安全系数达到了 4.1,避免了筋体在高拉应力状态下的应力腐蚀。

4 结论

(1) 湿陷性黄土地地区边坡,出现了多起预应力锚索失效致使边坡防治工程产生滑塌的事故,因此,需要采取具有针对性地改善措施增强预应力锚索的耐久性;

(2) 与岩质边坡地层对预应力锚索腐蚀性影响大的特点不同,黄土中易溶盐(主要为 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子)造成的钢绞线腐蚀,对边坡预应力锚索耐久性影响微弱;而黄土湿陷性造成的预应力损失,地质条件变化加剧的钢绞线腐蚀、预应力损失作用对边坡预应力锚索耐久性影响显著;

(3) 针对湿陷性黄土地区预应力锚索工程的应用,在进行现场试验验证的基础上,提出了加强排水措施以降低黄土边坡表层湿陷,提升浅部注浆工艺以阻隔或削弱锚索浅部段腐蚀,注重运行维护等3条措施,能够有效地增强湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性。

特别说明, 目前湿陷性黄土边坡预应力锚索耐久性研究程度普遍较低, 笔者本次对黄土边坡预应力锚索的监测时间较短, 对黄土边坡预应力锚索浅

陷及易风化剥蚀的特征,本次治理工程将框架梁全部嵌入土体中,并对框架格内进行了封闭处理,减少

部段的腐蚀性研究亦较浅,因此,预应力锚索耐久问题仍有待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 高建勇,邢义川,陈艳霞. 黄土高边坡稳定性预测模型研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S1):170-176
- [2] 陈昌禄,邵生俊,郑万坤,等. 黄土高边坡的三维动力稳定性分析——以固原九龙山边坡为例 [J]. 岩土力学,2010,31(01):229-232 + 252
- [3] 于慧丽,龙建辉,刘海松,等. 吕梁山区黄土边坡工程地质分区及强度参数选取[J]. 工程地质学报,2014,22(01):152-159
- [4] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(05):141-161
- [5] 胡永占. 陇西地区黄土陷穴成因分析及形成机理[J]. 铁道工程学报,20013,30(03):1-4
- [6] 祝珣. 黄土特高边坡垮塌原因分析及综合整治措施 [J]. 铁道工程学报,2018,35(06):31-35
- [7] 林兴超,汪小刚,陈文强,等. 边坡锚固与加固协调作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3123-3128
- [8] 徐毅青,邓绍玉,葛琦. 锚索预应力初期与长期损失的预测模型研究[J]. 岩土力学,2020,41(05):1663-1669
- [9] 李英勇. 岩土预应力锚固系统长期稳定性研究[D]. 北京:北京交通大学,2008
- [10] 李忠,朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构稳定性计算方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21):124-128
- [11] 朱彦鹏,郑善义,张鸿,等. 黄土边坡框架预应力锚杆支护结构的设计研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1582-1585
- [12] 周勇,朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25 (S1):3115-3122
- [13] 朱彦鹏,谷玉朝,李忠. 框架预应力锚杆支护黄土边坡土压力分布模型试验[J]. 兰州理工大学学报,2008,34(03):108-112
- [14] 朱彦鹏,罗晓辉,周勇. 支护结构设计[M]. 北京:高等教育出版社,2008
- [15] 叶帅华,赵壮福,朱彦鹏. 框架锚杆支护黄土边坡大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(11):4240-4248
- [16] 白明洲,颜宇森,雷海英,等. 黄土区工程边坡锚索应力监测预警的突变模型[J]. 土木工程学报,2011,44(S1):166-170
- [17] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京:中国铁道出版社,1998
- [18] 程良奎,韩军,张培文. 岩土锚固工程的长期性能与安全评价[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):865-872
- [19] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/50330—2013. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013
- [20] 李富民. 预应力锚索结构耐久性研究综述 [J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2018,33(2):18-24
- [21] 李富民,刘贞国. 索体腐蚀对锚索结构锚固性能的影响[J]. 中国公路学报,2016,29(2):23-31
- [22] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312
- [23] 李维朝,戴福初,闵弘,等. 基于降雨滑坡机理的水文过程监测系统[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(4):22-25
- [24] 丁勇. 人工降雨模拟作用下的黄土高边坡稳定性研究[D]. 西安:西北大学,2011
- [25] 王振刚,陈文玲,李琦瑛. 黄土层中锚索预应力的影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):30-33
- [26] 周勇,王旭日,朱彦鹏,等. 泥岩砂岩互层高边坡监测与数值模拟对比分析[J]. 兰州理工大学学报,2018,44(1):109-115

DURABILITY AND IMPROVEMENT MEASURES OF PRESTRESSED ANCHOR CABLE FOR COLLAPSIBLE LOESS SLOPE

GUO Hong-dong^{1,2}, BAI Yang³, CHANG Caiyuan^{1,2}

(1. *The Second Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral
Exploration and Development, Lanzhou 730020, China;*

2. Gansu Hydrogeology and Engineering Geology Investigation Institute, Lanzhou 730020, China;

3. Gansu NO.7 Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: With the extensive application of prestressed anchor cable in the treatment of collapsible loess slope, the durability problem of prestressed anchor cable has become increasingly prominent. Based on the qualitative research on the operation status of prestressed anchor cable for collapsible loess slope, the influence factors of the durability of prestressed anchor cable for collapsible loess slope are investigated. The improvement measures that enhance the durability of prestressed anchor cable of collapsible loess slope are proposed preliminarily. The effect of improvement measures is examined by monitoring test. The results show that there are many failure accidents of prestressed anchor cable for collapsible loess slope due to the lack of durability. The influence of loess corrosivity on the durability of prestressed anchor cable is weak, and the influence of loess collapsibility and geological conditions on the durability of prestressed anchor cable is significant. The improvement measures that strengthen drainage measures, improve shallow grouting technology, and pay attention to operation and maintenance to improve the durability of prestressed anchor cable for collapsible loess slope are recommended. The improved prestressed anchor cable is in stable fluctuating service state during the monitoring period, and the improvement effect is good. The purpose of this paper is to provide reference for the design, construction, operation maintenance of prestressed anchor cable for collapsible loess slope.

Key words: loess slope; prestressed anchor cable; durability research; improvement measure