

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.006

预应力锚索张拉方式对预应力损失影响探究

王建松¹, 俞强山², 刘庆元¹, 高和斌¹, 林灿阳¹

(1. 中铁科学研究院有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000; 2. 中国铁道科学研究院 研究生部, 北京 100081)

摘要: 预应力锚索结构的预应力损失问题已成为锚固工程界广泛关注的课题, 为了研究张拉方式对岩土锚索结构预应力损失的影响, 在总结影响预应力损失因素、机理的基础上, 通过预应力锚索现场张拉试验, 对比分析了预应力锚索在多循环加卸载和单循环加卸载两种加卸载方式下的荷载-位移曲线, 得出了两种张拉方式下锚固段岩土体产生的弹性位移和塑性位移。基于塑性位移量计算出了相应的预应力损失值, 在此基础上, 评价了张拉方式对预应力锚索结构预应力损失的影响。研究表明: 两种加卸载方式产生的平均弹性位移量基本一致, 但多循环试验产生的塑性位移比单循环试验产生的塑性位移大 9.1 mm, 占单循环加卸载试验平均塑性位移量的 36.1%, 说明经过多循环张拉, 锚索锚固段岩土体中存在的大量节理、裂隙, 在反复循环荷载作用下在短时间被不断压密, 起到加速蠕变作用, 提前消除了 11.3% 的由于锚固段岩土体蠕变造成的预应力损失。建议对于地质情况较复杂、节理较发育的工程, 在锚索张拉锁定时尽量采用多循环张拉方式, 将有助于减小预应力损失, 获得更好的长期锚固效果, 降低预应力锚索工程安全风险, 提高锚索工程的技术经济和社会效益。

关键词: 道路工程; 预应力损失; 试验研究; 锚索; 循环张拉

中图分类号: TU757

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 09-0037-06

Study on Influence of Prestressed Anchor Cable Tensioning Mode on Prestress Loss

WANG Jian-song¹, YU Qiang-shan², LIU Qing-yuan¹, GAO He-bin¹, LIN Can-yang¹

(1. Shenzhen Branch, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China;

2. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Prestress loss of prestressed anchor cable structure has become a widespread concerned topic in the field of anchorage engineering. To study the influence of tensioning mode on the prestress loss of geotechnical anchor cable structure, based on summarizing the factors and mechanism that influence the prestress loss, through the in-situ tension test of the prestressing anchor cable, the load-displacement curves of the prestressing anchor cable under the modes of multi-cycle loading and unloading and single-cycle loading and unloading are compared and analyzed, and the elastic displacement and plastic displacements of rock and soil in anchorage section under 2 tensioning modes are obtained. The corresponding prestress loss values are calculated based on the plastic displacement. On this basis, the influence of tension mode on the prestress loss of the prestressed anchor cable structure is evaluated. The result shows that the average elastic displacements produced by the 2 loading and unloading modes are basically the same. However, the plastic displacement of multi-cycle test is 9.1 mm larger than that of single-cycle test, accounting for 36.1% of the average plastic displacement of single-cycle loading and unloading test. It indicates that after multi-cycle tension, many joints and cracks exist in the rock and soil body of the anchor cable anchorage section, which are continuously compacted in a short time under the repeated cyclic loads, and play a role of accelerating creep, eliminating 11.3% of the prestress loss caused by the creep of the rock and soil body of the anchorage

收稿日期: 2018-11-01

作者简介: 王建松 (1973-), 男, 河南新郑人, 硕士, 教授级高级工程师. (13602667276@163.com)

section in advance. It is suggested that the multi-cycle tension mode should be adopted as much as possible when the anchor cable is tensioned and locked in the project with complex geological conditions and developed joints, which will help to reduce the loss of prestressing force, obtain better long-term anchorage effect, reduce the safety risk of the prestressing anchor cable project and improve the technical and economic benefits of the project.

Key words: road engineering; prestress loss; experimental study; anchor cable; circular tension

0 引言

预应力锚固技术具有对岩土体扰动小、提前预加固、施工快、安全、经济等优点,在边坡加固工程中得到广泛应用,并取得了显著的经济和社会效益^[1-3],锚索锚固力大,可长距离穿越岩土体,已成为大型工程预应力锚固技术的首选,在水电、市政、山区大型高边坡工程进行了大量的运用,但现场应用和监测表明,很多预应力锚索工程受各种因素影响存在长期预应力损失,往往导致工后一定时期,锚固性能降低,达不到预期的锚固效果,随着我国锚索预应力吨位的不断加大,锚索应力损失问题已成为越来越多学者关注的前沿性课题^[4-5]。

锚索预应力损失的很大一部分是预应力锚索在长期荷载作用下,由于钢绞线松弛、锚固段岩体蠕变等造成的预应力损失^[6-7]。国内外诸多学者对影响锚索预应力损失的因素进行了研究^[8-11],总结出了一些锚索预应力变化规律^[12-15],对锚索的预应力损失机制有了一定的认识^[16-18],但对于张拉方式对预应力损失的影响则少有研究,本研究通过现场试验探究了多循环张拉方式和单循环张拉方式下锚固段岩体的塑性位移,进而分析其对预应力锚索预应力损失的影响。

1 工程概况

本试验工点位于福建省永泰县境内葛丹公路K0+280~+400左侧山坡一处滑坡体,2017年5月下旬~6月上旬当地出现连续强降雨,原边坡左侧K0+280~K0+400段出现滑塌变形,形成长约60~120 m,厚约4~18 m,高约30~50 m的滑塌体。

本滑坡段为剥蚀丘陵地貌区,天然坡度约40~55°,坡体由东北至西南向逐渐增高。场地上覆残坡积土(Q^{dl+el}),下伏基岩为(K_1Z^2)晶屑熔结凝灰岩及其风化层,凝灰熔岩及其风化层。现场地质调绘、钻孔资料表明,坡体表层土体较松散,受两条构造影响,附近岩层发育多组节理裂隙。本滑坡位

处丘陵山地,场区地表水系不发育。地下水主要为基岩风化带中的孔隙裂隙水,主要赋存于强-中风化层中,透水性一般,富水程度一般。

治理工程措施如下:1级边坡采用预应力锚索地梁,坡率1:0.5,锚索总长16 m,锚固长度10 m,设计拉力700 kN;2级边坡采用预应力索框架,坡率1:0.75,锚索总长25 m,锚固长度10 m,设计拉力700 kN;3~6级边坡采用预应力锚索框架,坡率1:1,锚索长度20~36 m不等,设计拉力700 kN。

2 试验方案

试验选取两组工程锚索,共计6孔,每组3孔,分别采用多循环加卸载和单循环加卸载方式进行对比张拉试验,绘制出荷载-位移曲线进行对比分析。

2.1 试验孔位布置及有关参数

选取二级坡同一地层处相邻的6孔工程锚索进行试验,两组锚索相间布置,锚索编号2-2-14~2-1-19,因考虑到对比分析,根据地勘资料选择地层岩性相同区域的预应力锚索进行试验。多循环与单循环相间布置,依次记为“多1#”、“单1#”、“多2#”、“单2#”、“多3#”、“单3#”。试验锚索为6束1860 MPa级 $\phi 15.24$ 钢绞线制作,锚索长度25 m,锚固段长度10 m,设计荷载700 kN,最大试验荷载取设计值的1.2倍,即840 kN。沿钻孔掘进方向地层岩性分别为:0~3.5 m坡积含碎石黏土,3.5~15.6 m碎块状强风化凝灰岩,15.6~25 m中风化晶屑熔结凝灰岩。试验锚索位置如图1所示。

2.2 试验设备

加载设备采用YCW150G-200型千斤顶和OVMZB4-500型电动油泵,位移观测设备采用精度为0.1 mm的电子位移计,示意图如图2所示。

2.3 试验方法

2.3.1 试验步骤

(1) 预张拉:将锚索(杆)张拉至最大试验荷载的15%,荷载施加完成后,持荷5 min后卸载。

(2) 差异荷载补偿张拉:根据设计荷载和锚索

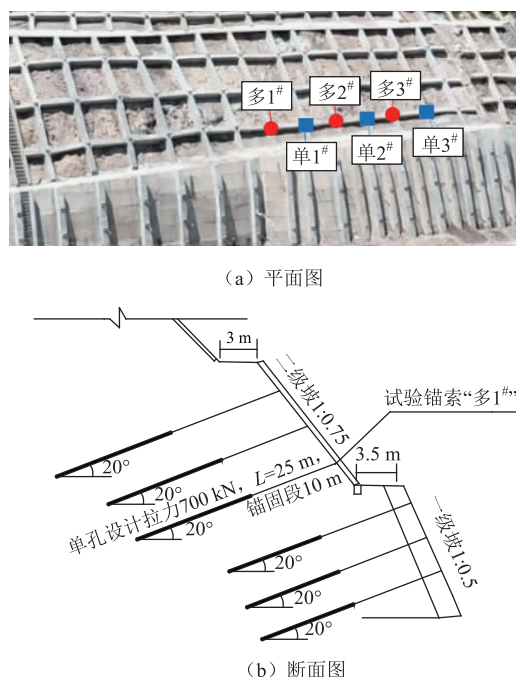


图1 试验锚索位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anchor cable position in test

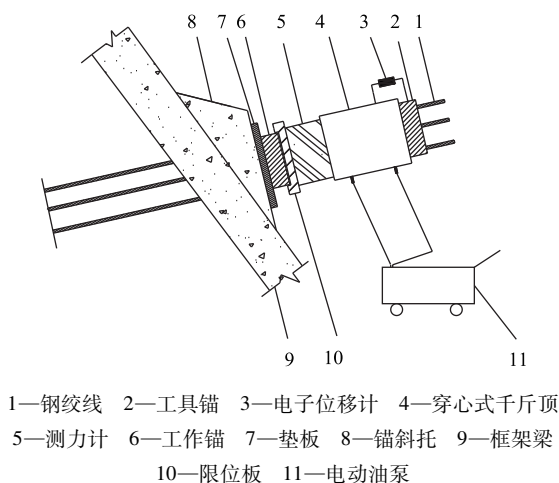


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

长度计算确定差异荷载,并根据计算的差异荷载进行分单元补偿张拉,然后张拉至初始荷载,初始荷载取最大试验荷载的30%。

(3) 按照表 1 多循环加卸载法的荷载分级和锚头位移观测时间进行多循环加卸荷载法张拉, 按照表 2 单循环加卸载法的荷载分级和锚头位移观测时间进行单循环法加卸载法张拉。

(4) 在每一循环的非最大荷载作用下, 每级荷载加载或卸载完成后持荷 5 min, 再施加下一级荷载, 同时分别记录每级荷载对应的锚头位移读数。

(5) 在每一循环的最大荷载作用下, 加载完成后每间隔 5 min 测读一次锚头位移, 当锚头位移达到相对稳定时进行卸载。

多循环加卸载法、单循环加卸载法锚头位移相对稳定的标准为：在 0 ~ 30 min 观测时间内，相邻两次锚头位移增量不大于 0.05 mm 时，可视为相对稳定；当 30 min 内锚头位移仍不稳定时，则应延长观测时间，当出现 1 h 内锚头位移增量不大于 0.50 mm 时，可视为稳定。

2.3.2 加载方式

试验分别按表 1 和表 2 的分级荷载值和加载方式进行循环加卸载, 多循环加卸载法为多次循环加卸载, 最终达到最大试验荷载, 单循环加卸载法为一次逐级加载到最大荷载再逐级卸载到初始荷载, 与多循环加卸载相比无重复加载。每级荷载分别为最大试验荷载的 30% (252 kN), 50% (420 kN), 60% (504 kN), 70% (588 kN), 80% (672 kN), 90% (756 kN), 100% (840 kN)。

3 试验结果及其分析

本次试验中,多循环加卸载试验按照表 1 所示的张拉卸载过程及荷载分级进行加卸载,所得的荷载-位移($Q-S$)曲线见图 3。由多循环试验荷载-位移曲线(图 3)可计算出每级循环荷载下的弹性位移和塑性位移,做出荷载-弹性位移-塑性位移($Q-S_e-S_p$)曲线,见图 4。单循环加卸载试验按照表 2 进行加卸载,荷载-位移($Q-S$)曲线见图 5。由图 3、图 5 可以看出,加载曲线与卸载曲线并不重合,有塑性位移产生。由图 3 可看出,弹性位移和塑性位移都随循环次数的增加而增加。

表3反映了试验锚索在最大试验荷载作用下的弹性位移与塑性位移,表4反映了两类不同加、卸载方式作用下的平均弹性位移与平均塑性位移。可以看出,多循环试验产生的平均弹性位移为55.07 mm,单循环试验产生的平均弹性位移为53.7 mm,与理论值53.8 mm接近。弹性位移主要来自于钢绞线产生的弹性变形。平均塑性位移有较大差异,多循环试验产生的平均塑性位移比单循环试验的平均塑性位移大9.1 mm,占单循环试验平均塑性位移量的36.1%。塑性位移产生主要原因为锚固段岩体在锚索锚固力作用下,内部原来具有的天然裂隙、节理、结构面等被压密,孔隙减小甚至闭合,产生一定的压缩变形,即蠕变,其结果必然造成预应力松弛,应力降低。而多循环反复张拉会加快蠕变速率,使

表 1 多循环加卸载法的张拉卸载过程及荷载分级
Tab. 1 Tension unloading process and load grading of multi – cycle loading and unloading method

循环 次数	试验荷载值/kN												
	初始荷载	加载过程						卸载过程					
1	252	—	—	—	—	—	420	—	—	—	—	—	252
2	252	420	—	—	—	—	504	—	—	—	—	420	252
3	252	420	—	—	—	504	588	—	—	—	504	420	252
4	252	420	—	—	504	588	672	—	—	588	504	420	252
5	252	420	—	504	588	672	756	—	672	588	504	420	252
6	252	420	504	588	672	756	840	756	672	588	504	420	252
观测时间/min	5	5	5	5	5	5	≥10	5	5	5	5	5	5

表 2 单循环加卸载法的张拉卸过程及载荷载分级
Tab. 2 Tension unloading process and load grading of single-cycle loading and unloading method

试验荷载值/kN													
初始荷载		加载过程						卸载过程					
252		420	504	588	672	756	840	756	672	588	504	420	252
观测时间/min		每级 ≥10						每级 = 5					

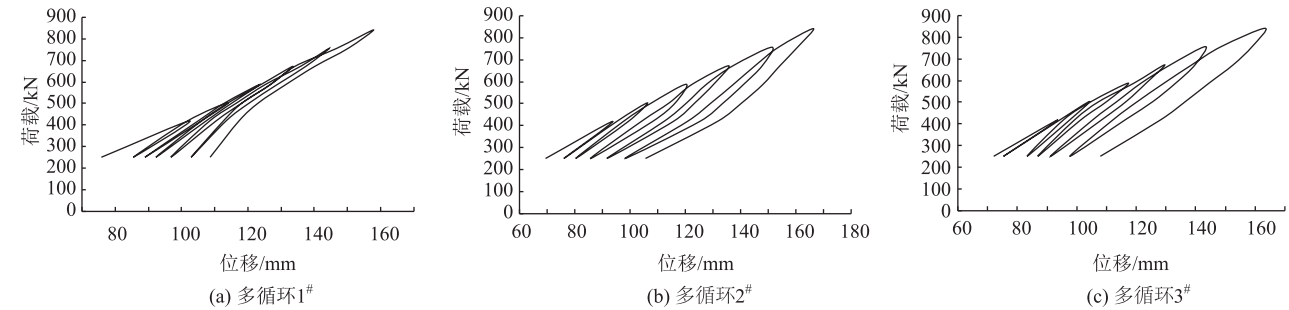


图 3 多循环试验荷载 - 总位移曲线
Fig. 3 Curves of load vs. total displacement of multi-cycle test

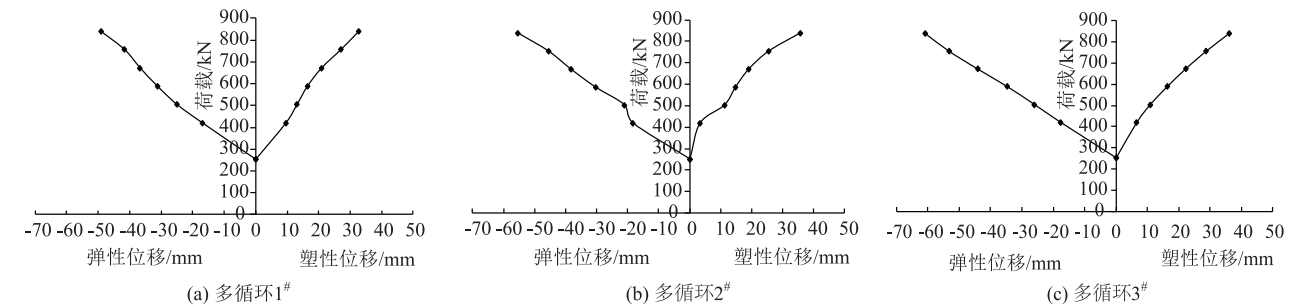


图 4 多循环试验荷载 - 弹塑性位移曲线
Fig. 4 Curves of load vs. elastoplastic displacement of multi-cycle test

锚固段岩体在短时间内产生较大的塑性位移，最终减少了后期的岩土体蠕变产生的永久塑性位移，提前消除部分由于蠕变而导致的预应力损失。

假设塑性位移全部由岩体蠕变产生，根据变形量可反算出预应力损失值，多循环加卸载试验平均塑性位移 34.3 mm，单循环加卸载试验平均塑性位

移 25.2 mm，差值为 9.1 mm，可算出其应力差异损失量为 99.4 kN，占最大试验荷载的 11.83%，可见多循环加载可以提前消除部分由岩体蠕变和钢绞线松弛导致的预应力损失。因此，在实际工程中对预应力锚索进行多循环张拉是十分必要的，对减小预应力损失是有利的。

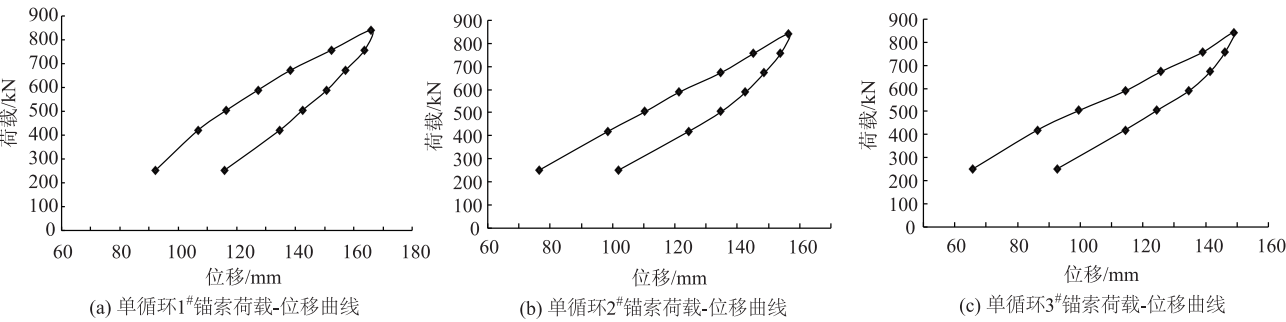


图 5 单循环试验荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Single cycle test load-displacement curve

表 3 最大试验荷载作用下锚索弹、塑性位移统计

Tab. 3 Statistics of elastic and plastic displacements of anchor cable under maximum test load

试验 锚索 编号	最大试 验载/ kN	最小卸 载值/ kN	自由 段长 度/m	锚固 段长 度/m	理论弹 性位移/ mm	弹性 位移/ mm	塑性位 移/mm
多循环 1#	840	252	15	10	53.8	49.1	32.7
多循环 2#	840	252	15	10	53.8	55.3	35.8
多循环 3#	840	252	15	10	53.8	60.8	36.2
单循环 1#	840	252	15	10	53.8	50.2	23.5
单循环 2#	840	252	15	10	53.8	54.6	25.4
单循环 3#	840	252	15	10	53.8	56.3	26.8

表 4 最大试验荷载作用下弹、塑性位移平均值

Tab. 4 Average elastic and plastic displacements under maximum test load

加卸载方式	平均弹性位移/mm	平均塑性位移/mm
多循环试验	55.07	34.3
单循环试验	53.7	25.2

4 结论

(1) 多循环加卸载试验与单循环加卸载试验产生的平均弹性位移量基本一致, 但多循环试验产生的平均塑性位移量比单循环试验产生的平均塑性位移量大, 本试验中两者相差达到 9.1 mm, 占单循环试验平均塑性位移量的 36.1%。

(2) 经过多循环加载, 锚固段岩土体存在的大量节理、裂隙, 在反复循环荷载作用下短时间内被不断压密, 提前消除了部分蠕变变形, 相当于消除了该部分蠕变导致的预应力损失。本试验中多循环张拉消除的预应力损失占最大试验荷载的 11.3%, 效果显著。

(3) 根据以上试验和分析, 多循环张拉方式能够有效降低锚索后期的预应力损失, 建议对于

地质情况较复杂、节理较发育的工程, 在锁定时尽量采用多循环张拉方式, 以获得更好的长期锚固效果。

参考文献:

References:

[1] 程良奎, 刘启琛. 岩土锚固工程技术的应用与发展 [M]. 北京: 万国学术出版社, 1996.
CHENG Liang-kui, LIU Qi-chen. Application and Development of Rock and Soil Anchoring Engineering Technology [D]. Beijing: Internal Academic Publishers, 1996.

[2] 程良奎. 岩土锚固技术的现状与发展 [J]. 土木工程学报, 2001, 34 (3): 7-12, 34.
CHENG Liang-kui. Present Status and Development of Ground Anchorages [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 34 (3): 7-12, 34.

[3] 何思明. 预应力锚索作用机理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
HE Si-ming. Study on Mechanism of Prestressed Anchor Cable [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.

[4] 陈沅江, 尹进, 胡毅夫. 软沿边坡锚索预应力定量损失规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (8): 1685-1691.
CHEN Yuan-jiang, YI Jin, HU Yi-fu. Research on Prestress Quantitative Loss Law of Soft Rock Slope Anchor Cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (8): 1685-1691.

[5] 张思峰, 宋修广, 周健, 等. 预应力锚固结构耐久性及其二次加固技术研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 30-33, 39.
ZHANG Si-feng, SONG Xiu-guang, ZHOU Jian, et al. Study on Durability and Secondary Reinforcement Technique of Prestressed Anchorage Structures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and

- Development, 2008, 25 (2): 30-33, 39.
- [6] 邓建, 肖明, 谢斌斌. 预应力锚索受力特性与初始张拉吨位优化分析 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (8): 2359-2365.
- DENG Jian, XIAO Ming, XIE Bin-bin. Analysis of Mechanical Characteristic and Optimization of Initial Tensile Tonnage of Prestressed Anchor Cable [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (8): 2359-2365.
- [7] 王渭明, 曹正龙, 王刚刚, 等. 厚冲积层锚索预应力损失研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (9): 1607-1613.
- WANG Wei-ming, CAO Zheng-long, WANG Gang-gang, et al. Prestress Loss of Anchor Cables in Thick Alluvial Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (9): 1607-1613.
- [8] 张发明, 刘宁, 陈祖煜, 等. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (2): 194-197.
- ZHANG Fa-ming, LIU Ning, CHEN Zu-yu, et al. Analysis of Factors Affected on Load Losses of High Capacity and Long Rock Anchors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (2): 194-197.
- [9] 余开彪, 程凯兵, 杨明亮, 等. 预应力锚索预应力损失研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (增2): 159-162.
- YU Kai-biao, CHEN Kai-bing, YANG Ming-liang, et al. Study on Prestress Loss of Prestressed Anchor Cable [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (S2): 159-162.
- [10] 周永江, 何思明, 杨雪莲. 预应力锚索的预应力损失机理研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (8): 1353-1356.
- ZHOU Yong-jiang, HE Si-ming, YANG Xue-lian. Study on Prestress Loss of Anchor Cables under Long-term Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (8): 1353-1356.
- [11] 韩光, 朱训国, 王大国. 锚索预应力损失的影响因素分析及补偿措施 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27 (2): 176-179.
- HAN Guang, ZHU Xun-guo, WANG Da-guo. Analysis of Factors Affecting Pre-stressing Loss in Pre-stressing Cable Anchor and Compensative Measures [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2008, 27 (2): 176-179.
- [12] 朱晗迺, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (16): 2756-2760.
- ZHU Han-ya, SUN Hong-yue, WANG Hui-bang, et al. Analysis on Prestress State of Cable Applied to Rock Slope Reinforcement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (16): 2756-2760.
- [13] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (2): 251-256.
- CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Model Testing Research on the Variation of Tension Force of Anchor Cable with Time in Reinforcement of Soft Rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (2): 251-256.
- [14] 李英勇, 王梦恕, 张顶立, 等. 锚索预应力变化影响因素及模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (增1): 3140-3146.
- LI Ying-yong, WANG Meng-shu, ZHANG Ding-li, et al. Study on Influential Factors and Model for Variation of Anchor Cable Prestress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S1): 3140-3146.
- [15] 刘新荣, 刘永权, 康景文, 等. 基坑锚索预应力损失规律及分步张拉控制措施研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (10): 1794-1801.
- LIU Xin-rong, LIU Yong-quan, KANG Jing-wen, et al. Prestress Loss Laws of Anchor Cables in Foundation Pits and Control Measures of Tension by Steps [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (10): 1794-1801.
- [16] 张思峰, 宋修广, 李艳梅, 等. 边坡预应力单锚索耐久性分析及其失效特性研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (9): 22-29.
- ZHANG Si-feng, SONG Xiu-guang, LI Yan-mei, et al. Study on Durability and Failure Characteristics of Single Prestressing Cable for Slope Engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (9): 22-29.
- [17] 李英勇, 张顶立, 张宏博, 等. 边坡加固中预应力锚索失效机制与失效效应研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (1): 144-150, 157.
- LI Ying-yong, ZHANG Ding-li, ZHANG Hong-bo, et al. Research on Failure Mechanism and Effects of Prestressed Anchor Cables for Reinforcing Slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (1): 144-150, 157.
- [18] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (10): 1976-1985.
- YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Analysis of Interfacial Slip Mesomechanics in Anchorage Section of Prestressed Anchor Cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (10): 1976-1985.