

不同岩性条件下预应力锚索 锚固力损失规律研究

王清标^{1,2,3} 王以功² 孙彦庆³ 齐银山³

(1 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430007

2 山东科技大学资源与土木工程系 泰安 271019 3 山东华联矿业股份有限公司 沂源 256119)

摘要:影响预应力锚索锚固效果的因素多而复杂,并且各因素之间又相互影响。锚固力损失与岩土体性质密切相关,通过理论分析、试验研究、数值模拟等方法,研究岩土体的蠕变变形和压缩变形对锚固力损失的影响机理,对坚硬岩体、软弱岩体、破碎岩体以及土体所造成的预应力锚索锚固力损失规律进行研究,研究表明:岩土体性质不同,引起的预应力锚索锚固力损失也不相同:岩土体质量越好,在相同初始锚固力条件下其锚固力损失就越小。该研究成果可指导锚固工程的设计、施工和运行管理,有利于提高锚固工程的经济效益和社会效益。

关键词:岩土体性质 锚固力损失 规律 预应力锚索

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.05.002

1 引言

预应力锚索锚固技术因具有诸多优点而广泛应用岩土工程锚固领域,影响锚固效果的因素多而复杂,并且各因素之间又相互影响。不同岩土体性质条件下,预应力锚索锚固力损失规律不同,其锚固效果亦差异较大^[1-3]。

岩土体的变形既表现为弹性变形和塑性变形,又具有流变特征^[4]。岩土体具有不连续性和各向异性,在外力作用下,岩土体内部结构和各个组成单元会发生塑性变形或相对变位,岩土体将发生蠕变现象,根据荷载大小及蠕变变形的最后稳定值或极限值,又分为稳定蠕变和不稳定蠕变。岩土体的流变包括蠕变、松弛和弹性后效,不同的岩性条件,岩土体的流变特性也不同,其对锚固力损失的影响规律亦不同,研究不同岩性条件下锚索锚固力损失机理,对锚固工程的设计、施工和运行管理,提高工程的经济效益和社会效益,具有重要意义。

2 岩土体性质对锚索锚固力损失的影响机理

预应力锚索加固其实质就是预应力锚索将结构与岩土体紧密连接在一起,形成共同作用的工作体系,锚索的张拉力使岩体受压,此外加荷载

在沿锚索孔的深度方向扩展的同时向四周扩散,使得锚索张拉力影响范围内的岩土体处于受压状态,岩土体的抗剪强度和保持坡体开挖面的自身稳定性的能力得以提高,从而起到了主动加固岩体的作用。

从预应力锚索工作原理来看,锚索变形与被加固岩土体的蠕变变形是一致的,即岩土体发生蠕变,锚固力必将发生变化,二者之间的变化具有一定的对应关系并且相互影响,岩土体蠕变使预应力锚索锚固力发生变化,反之,如果预应力锚索锚固力发生变化,岩土体的蠕变量也会发生改变,亦即在岩土体蠕变和预应力锚索锚固力变化之间存在耦合效应。

从预应力锚索结构及其加固机理来看,岩土体的变形影响主要体现在应力集中区域:锚根段和锚固头等部位。因此,锚索锚固力损失与岩土体性质(强度及结构特性)有关,岩土体性质不同,引起的锚固力损失也不同,岩土体性质对锚索锚固力损失的影响通常表现为3个方面^[5]:

(1) 蠕变变形影响:岩土体具有流变特征,在锚索长期剪力作用下会产生蠕变变形,造成锚索松弛,导致锚固力损失。岩土体力学性能越差,所受剪力越大,其蠕变变形也就越大,由岩土体蠕变导致的锚索锚固力损失也就越大。

转自《工程地质学报》2012年05期

(2) 压缩变形影响: 锚索穿过天然的断层、裂隙时, 锚固力使得岩土体中的结构面和裂隙被压密, 在施加预应力初期, 岩土体的结构面和裂隙的闭合作用明显, 锚索锚固力减小迅速, 这种压密过程需要持续一段较长时间, 而随着时间的增长, 岩土体的压缩变形趋于稳定, 这种影响效应会明显减小。如果挤压荷载反复作用几次, 岩土体的结构面和裂隙经历反复加载与卸载, 这种反复挤压与松弛的作用使得压密过程大大缩短; 同时, 压密过程与效果还与岩土体质量有关, 岩土体质量好, 产生的压缩变形小并且很快达到稳定状态。

(3) 环境效应影响: 制约岩土体变形的主要因素是其结构与完整性, 如果岩土体完整、裂隙不发育, 地表径流显著, 强降雨的过程形成的地表水对锚固力变化的影响较小; 如果岩土体结构破碎、裂隙发育, 那么地表水的渗流将对锚固力影响较大会导致其发生明显变化。

3 坚硬完整岩体条件下锚索锚固力损失规律

坚硬完整岩体的结构面、裂隙分布少, 由结构面和岩体本身的蠕变也小, 因此岩体在长期剪力作用下发生的蠕变量很小, 因此整体结构坚硬完整的岩体引起的锚固力损失值很小, 锚固力的损失主要是由锚索索体的松弛造成的。对于坚硬完整的岩体, 其弹性压缩变形也小, 外界环境温度、地下水位变化的影响也小, 相应地锚索锚固力的损失也小。工程实践资料表明^[6]: 在坚硬的花岗岩中安装 $120 \times \phi 5\text{mm}$ 的预应力锚索, 初始锁定荷载为 2400kN , 稳定后永存荷载为 2160kN , 实测锚固力损失值为 10.0% , 主要是由于锚索松弛和混凝土的徐变造成的, 岩体徐变及其他因素引起的锚固力损失所占比例很小, 仅 2% 左右。

美国预应力混凝土协会的监测资料也表明, 坚硬完整岩体的锚固力的损失主要是由钢绞线松弛和混凝土徐变影响造成的, 基岩的蠕变影响不是主要因素。

4 软弱岩体条件下锚索锚固力损失规律

对于泥岩、页岩、粉砂岩和泥质矿岩等软弱岩体, 在长期外力作用下岩体会发生显著的蠕变变形^[7], 其特征是: 锚固力压缩岩层产生的变形大但变形减小的速度比较缓慢。软弱岩体蠕变变形引起的预应力损失值较大, 例如在基岩为绿泥石的白云母石英岩中, 安装珍; $\phi 5\text{mm}$ 的预应力锚索, 监测资料表明^[8]: 一天内预应力损失为 2.72% , 1个月内为 7.3% , 两个月内为 8.7% , 半年后达到 9.8% 。

苏学贵等所做的蠕变试验表明, 当所施加的荷载小于某一荷载值时, 岩体处于稳定变形状态, 蠕变曲线趋于某一稳定值, 随时间增加不再发生变化; 如果荷载大于某一数值时, 会产生不稳定变形, 此荷载数值即为软岩的软化临界荷载, 它由岩石单轴抗压强度决定。软化临界荷载计算的的经验公式为:

$$\sigma_{cs} = KR_c \quad (1)$$

式中, R_c 为岩石单轴抗压强度(MPa); K 为有岩体条件决定的系数。

表1为某工程不同地层岩性资料和锚索锚固力损失资料^[9], 锚固力小于软化临界荷载, 岩体趋于稳定, 锚固力损失较小。

图1为该工程中锚索在不同岩体质量条件下的预应力损失值曲线, 由图可以看出: (1)在岩体性质相同条件下, 初始锁定值越大, 锚索锚固力的损失就越大; (2)在初始锚固力相同条件下, 岩体质量越好, 锚索锚固力损失就越小。

表1 某工程不同地层岩性资料和锚固力损失实测资料

| 岩体条件 | 锚固力/kN | 抗压强度/MPa | 临界荷载/MPa | 损失率(%) | 平均损失率(%) |
|-------|--------|----------|----------|--|----------|
| 块状花岗岩 | 3000 | 86 | 52 | 7.3, 10.7, 8.4, 8, 11.4, 8.5, 6.4 | 8.7 |
| 块状花岗岩 | 1200 | 86 | 52 | 4.1, 1.9, 3.9, 1.9, 2.5, 2.2, 2.1 | 2.7 |
| Si质砂岩 | 2200 | 96 | 58 | 2.3, 3.4, 2.9, 2.8, 2.87, 3.06, 2.9 | 2.47 |
| Si质砂岩 | 1200 | 96 | 58 | 0.97, 1.09, 0.99, 0.70, 0.78, 0.70, 0.89 | 0.88 |
| 粉质砂岩 | 1200 | 25 | 14.5 | 3.16, 2.69, 5.84, 3.82, 2.69, 3.99, 3.63 | 3.69 |

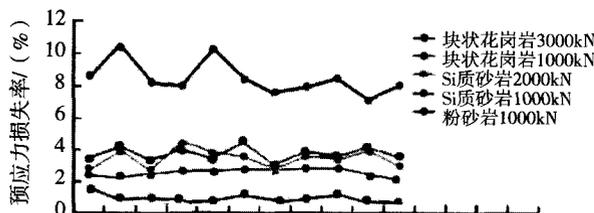


图1 岩体质量不同条件下锚索锚固力损失

5 松散破碎岩体条件下锚索锚固力损失规律

大多数岩石都是依靠其造岩矿物颗粒之间的黏结力和内摩擦力来抵抗外界破坏力的,因此,可以把岩体介质看作黏性松散介质,黏性松散介质的特点是:颗粒间有胶结物充填具有黏结力,能承受一定的拉应力,因此能保持一定的几何形状^[10-11]。预应力锚索加固松散层与加固岩层的区别主要表现在:

(1) 松散体强度低,内锚固段岩体质量差,保证锚索不被拔出是关键;(2) 松散体变形模量小,受荷后变形大,因此导致锚固力的损失比较大;(3) 松散体结构力弱,群锚效应问题比较严重。

对于次块状或断层破碎带岩体区,岩体裂隙发育,岩体间空隙大,因锚索锚固力压缩岩体而产生的变形相对较大,相应地因岩体压缩变形而引起的锚固损失值就大。锚索作用区自由段岩体跨度较大,容易受到风化等地质作用变得松散破碎,并且岩体本身具有不连续性和各向异性,在长期锚固应力作用下,受荷区域的岩体内部各个组成单元将产生塑性压缩或相对错位,变形除了瞬时变形外,还有一部分变形将随着时间变化而变化造成锚固力损失^[12]。

对于松散层的加固,压缩徐变导致的锚固力损失比较大。数值模拟表明,松散体的变形模量越小,受力后的位移量则越大,锚固力损失也就越大。实践表明,锚索锁定后,锚固力随时间而衰减的速度由快变慢,随着时间的推移而变化趋于缓慢,锚固力就趋于稳定,最终达到平衡状态。因此,松散体的压缩和锚固力损失是有限的,其原因是松散岩体的变形随着时间的推移而趋于稳定^[13-16]。

6 土体条件下锚索锚固力损失规律

6.1 蠕变变形影响

土体的特性是颗粒松散、黏聚力低、天然强度低、压缩性高,特别是黏土和均匀粒状砂,压缩变形不但明显而且持续时间长,锚固段蠕变位移加大,锚索作用区域的土体会产生流动,导致锚索承载力的急剧下降。图2和图3分别是某工程淤泥地层中锚杆蠕变曲线和锚固力曲线^[17]。

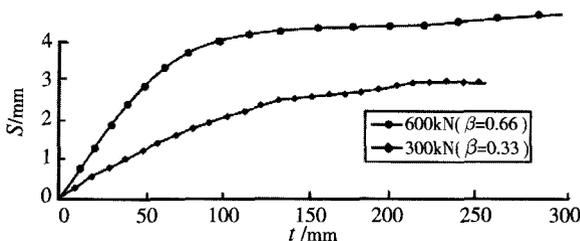


图2 饱和淤泥地层中锚索的蠕变曲线

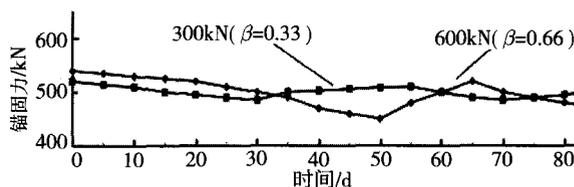


图3 锚固力变化情况

图2反映了饱和淤泥地层中锚索的蠕变特性。

图2表明:(1) 锚固力施加初期蠕变变形影响显著:300kN初始锁定值时最初1h的蠕变量占5h总蠕变量的85.7%;600kN初始锁定时前4h的蠕变量占16h总蠕变量的75.7%。

(2) 初始锚固力锁定值大小与锚索蠕变量的大小基本上呈正相关。

图3表明:(1) 设置在土层中的锚索锁定初期锚固力损失明显,30d后出现波动但逐渐趋于稳定,这和图2中土层的稳定蠕变趋势比较一致,说明锚固力损失主要是土层蠕变变形引起的。

(2) 初始锁定值与锚固力损失值也呈正相关,初始锁定值越大锚固力损失的绝对值也就越大,反之亦然。我们可以通过控制锚索的蠕变或对锚索进行补偿张拉措施,实现对锚索锚固力损失的控制。

6.2 压缩变形影响规律

在预应力锚索锚固力作用下,受荷影响区域内的土体会产生塑性压缩变形,压缩量的大小与土体条件有关,紧密土层压缩量较小,松散土层的压缩量相对较大。梁旭辉和范伟等所做的地层压缩试验发现^[18]:松散土层的压缩量约为26mm~32mm,最大可达到100mm以上。由于土层压缩情况十分复杂,有待进一步深入研究。表2为不同土层压缩引起的锚固力损失率,可类似供工程参考。

表2 土层压缩引起的锚固力损失

| 土层 | 应力损失 (%) |
|---------------|----------|
| 坚石 | 5 |
| 次坚石 | 6 |
| 未风化软石 | 7 |
| 碎裂石、硬土 | 7 |
| 松散体岩、风化软岩、普通土 | 8 |
| 松软上层 | > 10 |

7 内锚固段岩体质量对锚固力损失影响

内锚固段岩体质量对预应力锚索的锚固力的损失有比较大的影响。对于BQ值较低的岩体,内锚固段与围岩的结合程度较差,在锚固力的长期作用下,内锚固段与围岩之间会产生一定的相对位移,会使锚固力不断下降,甚至丧失锚固作用。

图4为某水电工程中预应力锚索的锚固力损失测试曲线^[19],2根锚索所施加的初始锚固力相同,7-2#锚索内锚头围岩为完整性较好的块状闪长岩,其BQ值为570,其锁定后锚固力值的变化不大,50h后的锚固力损失仅为8%;9-1#锚索内锚固段处于岩体较为软弱,其BQ值仅为340,50h后锚固力损失高达47%,60h后的锚固力损失到了达55%。

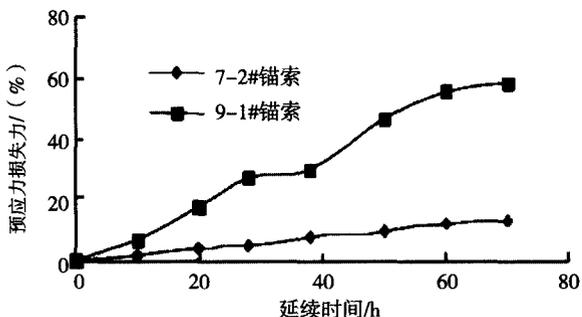


图4 锚固段不同岩体质量与锚固力损失关系

大量预应力锚索锚固工程表明^[19]:内锚固段岩体质量对锚固力损失的影响较大,其影响主要集中在锚索张拉、锁定阶段;内锚固段岩体完整、结构面良好,岩体BQ值大,锚固力损失就小,反之就大。

8 结论

在影响预应力锚索锚固力损失的众多因素中,岩土体性质是最为重要的因素。工程实践和理论分析表明:不同的岩土体性质,引起的预应力锚索锚固力损失亦不同;岩土体质量与锚固力损失呈负相关,岩土体质量条件越好,BQ值越高,则锚固力损失率就越小。

参考文献

- [1] 何思明,王全才. 预应力锚索作用机理研究中的几个问题[J]. 地下空间工程学报, 2006, 2(1): 160~165. He Siming, Wang Quancai. Problems of the study on mechanism of anchor cable. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 160~165.
- [2] 朱哈达,尚岳全,陆锡铭等. 锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 464~468. Zhu Hanya, Shang Yuequan, Lu Ximing et al. Coupling analysis of long-term prestress loss and slope creep. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 464~468.
- [3] 杨苏杭,梁斌,顾金才等. 锚固洞室抗爆模型试验锚索预应力变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3750~3756. Yang Suhang, Liang Bin, Gu Jincai, et al. Research on characteristics of prestress change of anchorage cable in anti-explosion model test of anchored cavern. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp. 2): 3750~3756.
- [4] 薛亚东,张世平,康天合. 回采巷道锚杆动载响应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1903~1906. Xue Yadong, Zhang Shiping, Kang Tianhe. Numerical analysis of dynamic response of rock bolts in mining roadways. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1903~1906.
- [5] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 200~220. Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2002, 200~220.
- [6] 张宏博,黄茂松,宋修广等. 预应力锚索在滑坡体加固中的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 324~326. Zhang Hongbo, Huang Maosong, Song Xiuguang, et al. Analysis of influencing factors of prestressed cables in reinforcing landslide mass. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 324~326.
- [7] 陈安敏,顾金才等. 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 Anmin, Gu Jincai, et al. Model testing research on the variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rocks. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 251~256.
- [8] 李树忱,钱七虎,张敦福,李术才. 深埋隧道开挖过程动态及破裂形态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2104~2112.

- Li Shuchen, Qian Qihu, Zhang Dunfu, Li Shucui. Analysis of dynamic and fractured phenomena for excavation process of deep tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10):2104~2112.
- [9] 朱晗达. 破碎岩质边坡锚固技术研究[D]. 浙江大学, 2005, 113~120.
- Zhu Hanya. Research on Prestressed Anchoring Technique in Cracked Rock Slope. Zhejiang University, 2005, 113~120.
- [10] 叶惠飞. 锚索预应力损失变化规律分析[J]. 浙江大学, 2004, 38~51.
- Ye Huifei. Analysis on Prestress Loss of Anchorage Cable. Zhejiang University, 2005, 113~120.
- [11] 丁多文, 罗国焜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报, 1995, 65~69.
- Ding Duowen Luo Guoyu. Analysis of loss of prestressing about prestressed anchorage. Journal Of Engineering Geology, 1995, 65~69.
- [12] 王清标. 孔道成孔工艺对锚固力损失的分析与控制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, (4): 145~148.
- Wang Qingbiao. Analysis and control of prestressing loss about construction technics of anchoreye. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2009, (4): 145~148.
- [13] 李双一, 王艳琴, 张一玉. 浅谈后张法预应力施工过程中应力损失分析及控制[J]. 辽宁交通科技, 2005, (9): 52~56.
- Li Shuangyi, Wang Yanqin, Zhang Yiyu. Analysis and control of stressloss in the process of prestressed construction by post-tensioningmethod. Liaoning Communnication Science and Technology, 2005, (9): 52~56.
- [14] 蒋斌松, 韩立军, 贺永年. 深部岩体变形的混沌预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2934~2940.
- Jiang Binsong, Han Lijun, He Yongnian. Chaotic prediction method of rock massdeformation in depth. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2934~2940.
- [15] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11) : 1892~1897.
- Zeng Xianming, Du Yunhe, Li Shimin. Testing study of prototype andmodel comparison on resisting dynamical load with soil nailssupporting. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1892~1897.
- [16] 李树忱, 冯现大, 李术才等. 深部岩体分区破裂化现象数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1337~1344.
- Li Shuchen, Feng Xianda, Li Shucui, et al. Numerical simulation of zonal disintegration for deep rock mass[J]. 2011, 30(7): 1337~1344.
- [17] 杨辉, 陈晨. 浅析锚杆预应力的影响因素[J]. 西部探矿工程, 2006, (4): 57~59.
- Yang Hui, Chen Chen. Research on the influencing factors of anchor rod. West-China Exploration Engineering, 2006, (4) 57~59.
- [18] 梁旭辉, 范伟. 岩土锚固的预应力损失[J]. 公路, 2004, (8): 114~115.
- Liang Xuhui, Fan Wei. Processing loss of rock-soil anchoring. Highway, 2004, (8): 114~115.
- [19] 张发明, 刘宁. 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, (4): 194~197.
- Zhang Faming, Liu Ning, Chen Zuyu, Zhao Weibing. Analysis of factors affected on load losses of high capacity and long rock anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, (4): 194~197.
- [20] 顾金才, 沈俊, 陈安敏等. 锚固洞室受力反应特征物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增): 1113~1117.
- Gu Jincai, Shen Jun, Chen Anmin, et al. Physical model testsresearch on force response characteristics of underground openings reinforced by anchor cables. Chinese Journal of Rock Mechanicsand Engineering, 1999, 18(Supp.) : 1113~1117.

信息视窗

国家标准《核电厂混凝土结构技术标准》 编制工作正式启动

2016年4月7日,随着国家标准《核电厂混凝土结构技术标准》编制组在深圳成立,该标准的编制工作正式启动。本次标准编制主编部门为中国核工业建设集团公司,主编单位为中广核工程有限公司、中国核工业华兴建设有限公司。柳州欧维姆机械股份有限公司作为预应力行业唯一一家参编单位参与了编制工作。

核电厂的安全是核安全的重要组成部分,核电厂混凝土结构在设计、施工及验收方面都有别于普通民用建筑,世界上其他核电强国均有一套完整的核电标准。我国核电发展相对较晚,通过引进、消化、吸收和再创新,经过近30年的发展,逐步建立起了核电技术体系,但在规范标准

方面尚未形成独立的体系,目前我国还没有关于核电厂混凝土结构设计、施工及验收的国家标准,不利于我国核电技术走出国门。

为了尽快制订属于我国自己的核电标准,以满足我国核电建设以及核电技术走出国门的需要,住房城乡建设部在《2016年工程建设标准规范制订、修订计划》文件中,将《核电厂混凝土结构技术标准》列为2016年工程建设标准制订项目计划。

欧维姆公司自2008年进入核电领域以来,已为多个核电项目提供预应力产品,目前是国内唯一进入核电领域的预应力产品供应商,该公司在核电领域具有一定的知名度。(李军)