

# 预应力锚索摩阻力试验研究及危害性探讨

朱 安 龙,徐 建 强,张 萍

(中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 310014)

**摘要:**预应力锚索是目前高边坡工程和洞室围岩支护的重要手段,由于锚索摩阻力的存在,导致锚固力不能有效传递,在岩体发生变形时,极易在张拉端形成应力集中从而导致锚索破坏。提出一种新型的让压锚索,通过现场试验,对摩阻力进行测试并对其形成机理和存在的危害进行了探讨。分析认为,目前锚索居中和绑扎方式是影响摩阻力的重要因素,摩阻力的存在是削弱锚索变形能力和产生预应力损失的重要原因。

**关 键 词:**预应力锚索;让压锚索;摩阻力;预应力损失

**中图法分类号:**TV52      **文献标志码:**A      **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.023

## 1 问题的提出

目前,预应力锚索普遍用于高边坡和地下洞室的稳定性加固,并取得了良好的效果。但在工程实践中锚索因受力过大而导致破坏的情况也时有发生,这主要是由于锚索支护后边坡或围岩因卸荷作用使变形持续发生,导致锚索应力增加所致。

锦屏二级水电站地下厂房预应力锚索就曾经发生过应力超标甚至拉断现象。从锚索破坏的情况来看,在锚墩部位被拉断破坏的现象较为普遍,甚至出现锚墩被弹出的现象。这一现象说明,锚索在破坏时沿程的应力分布并非均匀,索体受力最大的部位在锚墩附近,即岩体的表层。锚索沿程应该存在某种阻力,消散了张拉力,从而使锚索的性能不能得到充分发挥。关于锚索所受的沿程阻力的研究,在预应力混凝土结构中研究较多,称之为孔摩阻力,并在公路、铁路桥梁规范中有所体现<sup>[1-4]</sup>。而对于边坡、洞室支护的预应力锚索尚无系统性的研究成果。因此,有必要对其进行试验研究,探索摩阻力形成的主要影响因素,并分析其对支护效果的影响大小和危害,以进一步促进预应力锚索的结构的改进,加强支护效果。

## 2 现场试验

### 2.1 试验所用锚索力学特性简介

要测试锚索的摩阻力,需要同时测量锚固端和张拉端的拉力,但是锚索锚固端置于岩体内,难以有效测试。本次试验采用一种新型的让压锚索,该锚索通过设置于锚固段的一种让压构件,达到在设定拉力作用下让压滑移的目的,即保持锚固段锚固力不变,位移持续增加。该新型让压锚索构造如图 1 所示,通过室内试验测试,让压构件受拉时的力学性能如图 2 所示。

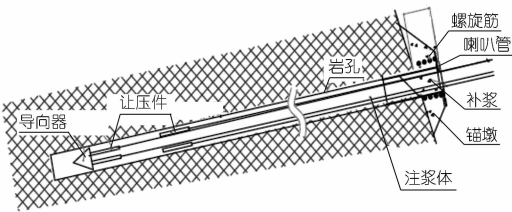


图 1 让压锚索构造示意

本次试验即利用该新型让压锚索的横阻滑移特性,借助张拉过程中孔口拉力和位移的变化情况对锚固端的受力大小进行间接测试。

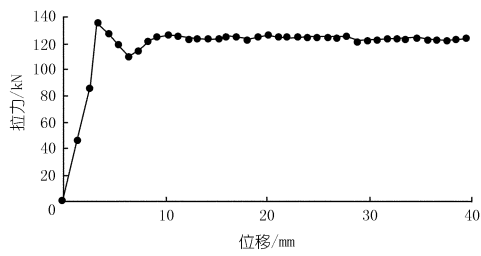


图 2 让压构件室内试验滑移曲线

2.2 现场试验依托工程及边坡概况

本次现场试验主要依托洪屏抽水蓄能电站,该工程为大(Ⅰ)型工程,下水库大坝为坝高 74.5 m 的碾压混凝土重力坝。试验点选择在下水库大坝左岸边坡。该处施工期人工坡高达 130~140 m,坝顶以上边坡高 60 m。该处边坡水平强-弱卸荷带深度 26.0 m,发育一组顺坡向的中倾角节理  $L_{c56}$ ,产状  $N40^{\circ}W\ SW\ \angle 50^{\circ}$ ,其倾角小于开挖边坡坡角,边坡稳定性较差。设计采用系统预应力锚索加固处理。本次试验结合该处锚索施工进行现场试验。

2.3 现场试验方案拟定

由于锚索的各根钢绞线在孔内都是相对独立的,摩阻力主要是钢绞线在保护套中滑移时摩擦所形成。为了消除施工工艺、岩体条件对摩阻力测试的影响,试验中采用压力分散型让压锚索,可以通过同根锚索对不同的自由段进行测试。摩阻力现场测试试验设计见表 1。每根锚索试验 3 束钢绞线,其余钢绞线作为数据异常时补充试验。

表 1 现场设计方案

锚索 编号	锚索总长度/ m	自由段长度/ m	让压量/ cm	设计让压值/ kN
1	45	36.0	30	150
2	35	35.0	30	120
3	35	30.0	30	120
4	35	27.5	30	120
5	10	9.0	30	10

注:1~4 号锚索为 7 束,5 号锚索为单束。

2.4 现场试验成果整理与分析

2.4.1 孔口位移与拉力曲线

(1) 设计让压值 150 kN 的锚索孔口拉力与位移曲线见图 3。该组锚索钢绞线在试验过程中孔口拉力与孔口位移之间一直呈线性增长关系。该现象说明在试验的拉力状态下,锚固端受力小于设计的让压值 150 kN,未发生滑移。由于摩阻力大小超出原试验设计之初的预想值,考虑其它可能存在的风险,两束钢绞线孔口拉力达到 220 kN 后终止试验,第 3 束未进行试验。

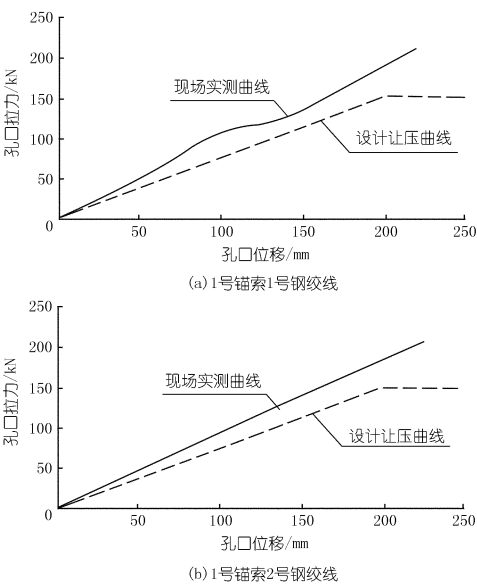


图 3 让压值 150 kN 锚索试验曲线

(2) 设计让压值 120 kN 的锚索孔口拉力与位移曲线,根据自由段长度不同分别见图 4 的(a)、(b)、(c)。为了便于分析总体趋势,对每根锚索的 3 束钢绞线试验数据进行合理化处理:剔除摩阻力极差超过 30% 的试验数据,取极差在 30% 以内的 3 组试验中的中间值进行分析。

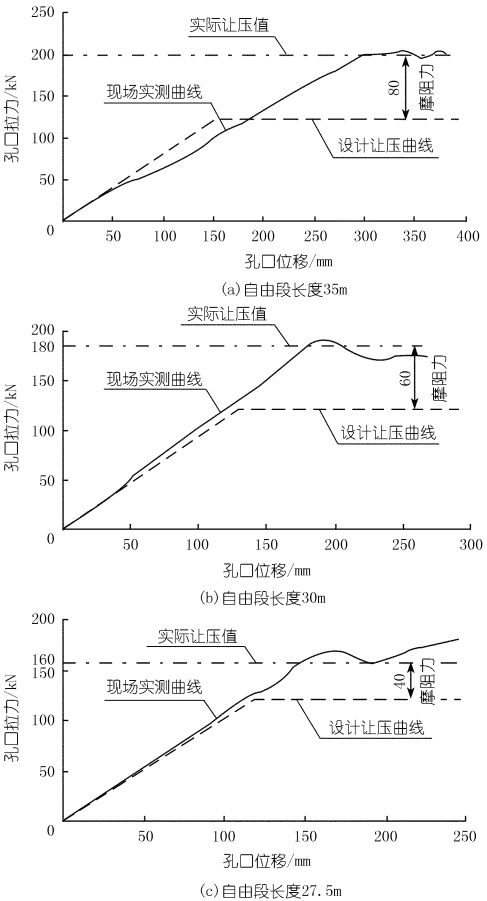


图 4 让压值 120 kN 锚索试验曲线

该组锚索在试验中均出现了让压现象。出现让压现象的孔口拉力明显大于设计的让压值,说明摩阻力现象明显。摩阻力大小与自由段长度呈现正向关系。自由段长度分别为 27.5、30 m 和 35 m 的钢绞线对应的摩阻力分别为 40、60 kN 和 80 kN。

(3) 单束锚索试验成果分析。根据目前对摩阻力的认识,认为摩阻力与锚索的孔斜有关。然而对比锚索孔斜与锚索结构居中绑扎对钢绞线顺直度的影响,孔斜显然不是主要因素。因此为了探索锚索结构的影响程度,进行了单束钢绞线的拉伸试验。孔口拉力 - 位移曲线见图 5。

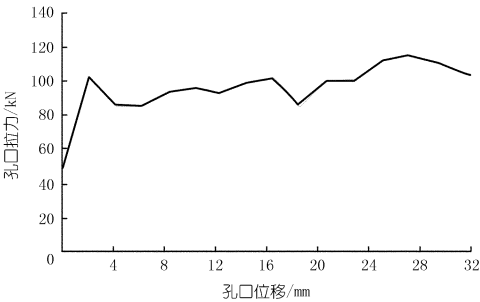


图 5 单束试验曲线

单束让压锚索试验中让压起始荷载与设计让压值基本相当,让压滑移过程中,拉力基本稳定。受试验误差和仪器精度的影响,张拉力甚至低于设计让压值。说明锚索张拉过程中摩阻力影响较小。

2.4.2 试验成果分析

(1) 锚索设计吨位对摩阻力的影响。从设计让压值 10 kN 的单根钢绞线、设计让压力 120 kN 和 150 kN 的锚索试验整体可以看出,让压值对锚索的摩阻力存在一定的影响。但是由于本次试验在试验结果预测上存在偏差,部分试验未能成功实现,导致这方面的规律尚未探明,还有待进一步试验研究。

(2) 锚索自由段长度对摩阻力的影响。试验成果显示,锚索的摩阻力随着锚索自由段长度的增加而增加,但增加不是线性的,而是随着自由段长度的增加,摩阻力加速趋势有所减缓。二者相互关系见图 6。

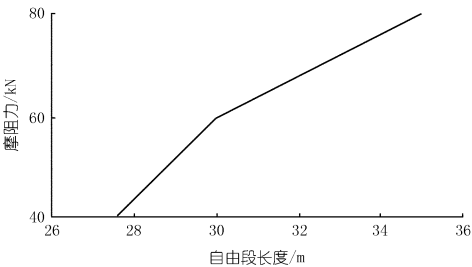


图 6 摩阻力与自由段长度关系

从增量变化角度分析摩阻力和自由段长度的关

系,自由段长度 30 m 和 35 m 相比 27.5 m 时,增幅分别为 9% 和 27.3%,而摩阻力增幅达到 50% 和 100%。摩阻力增幅明显大于自由段长度的增幅。

(3) 锚索实测变形性状分析。实测曲线和设计理论曲线相比,除个别情况外均出现实测曲线斜率陡于理论曲线的情况。这一现象与摩阻力存在是一致的。由于摩阻力的存在,导致锚索变形范围受到影响,锚索的变形自孔口向孔底呈现逐渐降低的趋势,在相同的孔口拉力下,实测曲线的拉伸量比理论的要小。

(4) 锚索结构的影响。从单束试验的结果来看,锚索的结构对摩阻力影响较大。这一现象从侧面可以解释摩阻力与自由段长度之间的关系,即自由段长度对摩阻力的影响不仅在于长度增加,还有一部分结构原因,而这种结构原因同时与锚索的自由段长度相关,两种因素相互叠加。

3 摩阻力的形成机理及危害性分析

3.1 摩阻力影响因素及产生机理

通过本次现场试验,在锚索让压试验张拉过程中,很大一部分孔口拉力将用于克服锚索与锚索孔之间的摩阻力。根据对 2~4 号锚索试验成果的分析,自由段长度越长,总摩阻力和单位长度摩阻力均呈现增大趋势(见表 2)。

表 2 锚索摩阻力统计

锚索 编号	自由段长度/ m	总摩阻力/ kN	单位长度 摩阻力/(kN·m <sup>-1</sup> )
2	35.0	80	2.29
3	30.0	60	2.00
4	27.5	40	1.45

摩阻力主要因锚索钢绞线与孔道之间的摩擦所致,根据摩擦力计算公式,摩阻力为

$$\Delta F = \mu \sigma u l \tag{1}$$

式中,μ 为摩擦系数;σ 为钢绞线所受围压,kPa;u 为钢绞线周长,m;l 为钢绞线自由段长度,m。

一般而言 μ、u 为材料固有参数,对于同厂家、同规格的锚索基本为一定值。因此摩阻力与自由段长度的非线性关系反映钢绞线所受围压为非定值,随着钢绞线自由段长度的增加而增加。

从本次对比试验成果来看,单束锚索张拉过程中阻力明显小于多束锚索。目前,多束锚索经过绑扎后形成纺锤状(见图 7)。锚索沿程呈波浪形,在预应力作用下锚索有拉直伸长的趋势,增加了锚索与套管之间的接触应力,尤其是在居中装置和绑扎部位形成局部应力集中,导致锚索与套管之间的摩擦力增加,受力简图见图 8(图中 σ' 为 σ 与 σ + Δσ 加权平均值)。对

钢绞线的受力进行定性分析可知,当钢绞线所受拉力增加时,拉直伸长值越大,所形成的  $\Delta\sigma$  也越大。因此,  $\Delta\sigma$  是一个由锚固端至张拉端逐渐递增的变值。当锚索自由段长度增加时,增加的这一段中  $\Delta\sigma$  必然随之增大,该段单位长度的摩阻力也将增大,从而导致整个锚索随着自由段长度的增加,单位长度摩阻力增加。这一分析与表 2 中所显示的单位长度阻力变化趋势是一致的。

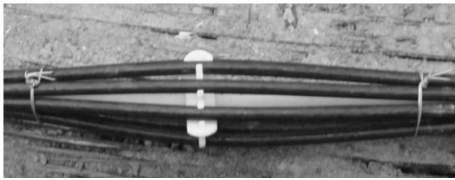


图 7 自由段居中器

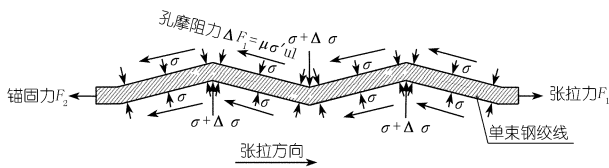


图 8 单束钢绞线受力示意

### 3.2 锚索摩阻力的危害性

摩阻力的存在,造成锚索张拉锁定后从孔口至锚固段锚索的实际受力呈现递减趋势。设计预应力无法有效传递至锚固段,对预应力锚索的支护效果产生实质性的影响。主要表现在以下 4 个方面。

(1) 引起预应力锚索的应力损失。目前研究认为,影响锚索预应力损失的主要原因为岩土体性质、锚索施工工艺、锚索结构以及外界环境因素等<sup>[5-6]</sup>。其中针对锚索结构影响,主要认为由钻孔偏斜、锚固力锁定时锚具回放、钢绞线松弛等原因造成。根据本次试验,所施加的能量很大一部分蓄积在孔口附近的锚索体内,并没有完全传递到锚固段,应力损失达到 1.45 ~ 2.29 kN/m 甚至更大。由于施工过程中张拉时间较短,以 100 t 级预应力锚索为例,一般设计张拉时间为 2 h 左右,而应力的传递需要更长的时间。随着时间的推移,孔口应力不断向孔内传递,从而造成运行期预应力损失,达不到设计所要求的加固力,影响边坡安全。因此摩阻力的存在也是预应力损失的一个重要原因。根据三峡永久船闸边坡预应力锚索监测成果,预应力锚索在张拉后半年内损失速率较快,但整个应力损失持续时间可长达数年<sup>[7]</sup>。

(2) 降低锚索支护效果。锚索的规格和布置是根据边坡不稳定力来计算确定的,因锚索摩阻力的存在,沿程的摩阻力将一部分锚固力转换为岩体的内力,锚

索实际作用在边坡破坏面上的力为施加的锚固力减去滑坡体内总摩阻力,并非设计的支护力,支护效果被削弱。当设计的安全裕度不足以抵消摩阻力影响时,将出现边坡锚索破坏直至发生边坡失稳的情况。

(3) 降低锚索抵抗边坡变形的能力。当边坡或洞室因岩体开挖而其应力释放后,岩体向凌空面变形,造成对预应力锚索形成再一次张拉。因摩阻力的存在,边坡变形引起的锚索拉伸变形并非沿程均匀分布,而是在局部区段集中分布,形成应力集中现象。从测试结果来看,锚索实测拉力与位移曲线斜率陡于理论值。这也是传统预应力锚索破坏时出现孔口附近拉断破坏的原因之一。

(4) 影响预应力锚索监测成果分析的可靠性。由于预应力监测只能测量孔口锚具部位的应力<sup>[7]</sup>,无法获得锚固段应力,如果在数据分析时忽视这一影响,或估计不足,则可能直接影响分析结论的可靠性。通过本次试验,摩阻力已达到设计让压值(锚固力)30% 以上,其大小不容忽视。

## 4 结论与建议

本次现场试验揭示,预应力锚索孔摩阻力达到设计锚固力的 30% 以上,严重影响锚索的支护效果和抵抗边坡或围岩的变形能力,引起锚索预应力损失,影响预应力锚索监测成果的可靠性。因此有必要对预应力锚索的结构和施工工艺进行改进,以减小摩阻力的影响。试验所揭示的摩阻力规律为预应力锚索结构改进提供了指导方向。

本次试验采用一种新型的让压锚索,利用锚固端让压构件横阻让压的特性,通过对比出现让压现象时张拉力与设计让压值之间的差异,计算锚索张拉过程中的摩阻力,该试验方法在研究锚索摩阻力方面具有一定的创新和推广价值。

由于造成预应力锚索孔摩阻力因素复杂,锚索材料的摩擦系数、弯曲程度、钢绞线所受围压、自由段长度等均是影响因素。本次试验是第一次对边坡锚索的摩阻力进行测试,部分情况超出试验设计时的预想,导致部分试验未能成功完成,试验设计本身还存在一些待改进之处。因此,各因素的影响程度、相互关系以及影响因素的消除方法等还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 邓娟红. 后张法预应力混凝土箱梁摩阻试验研究[J]. 公路工程, 2012, 37(4): 210 - 214.
- [2] 孙中洋, 程伟. 施工阶段钢绞线摩阻损失变化规律探索[J]. 公路交通技术, 2013, 38(6): 52 - 56.
- [3] JTG D62 - 2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].

[4] TB10002.3-2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S].

[5] 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(3):195-197.

[6] 陈沅江,尹进,胡毅夫. 软岩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.

[7] 高大水,曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(5):653-656.

(编辑:徐诗银)

Test research on frictional resistance of prestressed anchor cable and discussion on harm of frictional resistance

ZHU Anlong, XU Jianqiang, ZHANG Ping

(PowerChina Hudong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Prestressed anchor cable is an important means to support the high rock slope and the surrounding rock of cave at present. However, the anchoring force can not be transferred due to the existence of frictional resistance of prestressed anchor cable. The stress can be easily concentrated in the tensioning section and damages the prestressed anchor cable when rock mass deforms. The pre-tension yield anchor cable, a new kind of anchor cable, is put forward. The test on the frictional resistance is performed and the forming mechanism of frictional resistance and harm are discussed. The result showed that the centering layout and the binding form of cable are the influential factors of the frictional resistance, and the frictional resistance is an important cause for the wakening of the anchor cable's deformability and the prestress loss.

**Key words:** prestressed anchor cable; pre-tension yield anchor; frictional resistance; prestress loss



(上接第 70 页)

Anti-seepage design and construction of Shankouyan RCC dam in Jiangxi Province

LIANG Huilan, ZHAN Qingwen

(Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** Most RCC dams have seepage problems that would threaten the dam safety under long period of high water impoundment. The largest height of Shankouyan RCC double-curvature dam, Jiangxi Province, is 99.1m, and there were severe pervious problems at roller layers in initial impoundment process. By analyzing the seepage causes and in combination with demands of anti-seepage construction as well as the reservoir operation, we decided to carry out water-proof coating on the water-above dam surface with new environment-friendly material of polyurea, and to adopt overlapping curtain grouting to reinforce the underwater dam body. After the anti-seepage reinforcement, the monitoring shows that the seepage volume meets the related requirements. The construction process is presented, which could provide reference for similar anti-seepage reinforcements.

**Key words:** anti-seepage solution; anti-seepage coating of polyurea; curtain grouting

