

加固滑坡的预应力锚索技术

蒋 忠 信

(铁道部第二勘测设计院岩土工程公司 成都 610031)

提 要 预应力锚索是加固滑坡的新一代技术. 根据设计、施工实践经验,论述预应力锚索的结构和原理、设计和施工原则、应用效果和优越性,并对有关理论、工艺问题进行探讨,供推广应用这一新技术之参考.

关键词 预应力锚索 滑坡 设计 施工

预应力锚索是加固滑坡的一项新技术. 由于预应力锚索的长度大,锚索体的强度高,施加的预应力吨位大,设有自由段的结构合理,技术比既有的锚杆技术更为先进. 预应力锚索技术自 80 年代引进国内后,应用日趋广泛,尤其是在滑坡、边坡和危岩体的加固以及深基坑护壁等方面展现了常规技术无法比拟的优越性. 但是,由于该项技术引进时间不长,对其理论原理、设计原则和施工工艺还来不及深入开展研究,妨碍了对其应用和推广. 根据设计、施工实践经验,论述预应力锚索技术,探讨有关问题,有其理论和实际意义.

1 预应力锚索的结构和原理

预应力锚索主要由锚固段、自由段和紧固头三部分构成,紧固头又由垫墩、钢垫板和锚具组成. 结构示意图(图 1).

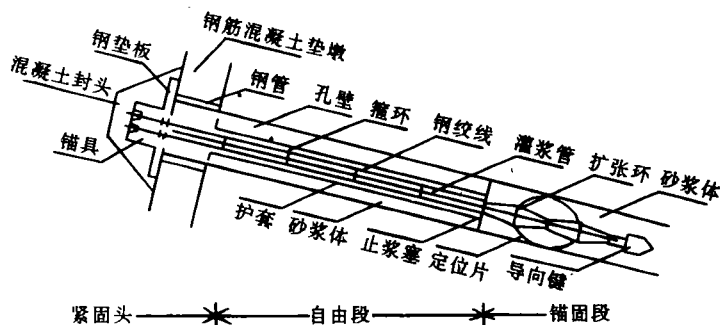


图 1 预应力锚索结构示意图

Fig. 1 Sketch map of structure of pretress anchoring rope

1.1 锚固段

锚固段为锚索伸入稳定岩土体内的孔段,加固滑坡时为滑动面以下的锚索段. 锚固段通过灌浆形成同心状结构,锚索居中,四周为砂浆裹护,砂浆与孔壁浇筑. 通过砂浆,锚索与孔壁结成整体,从而使孔周稳固岩土体成为承受预应力的载体.

本文收稿日期,1995-09-07,改回日期,1995-11-07.

1.2 自由段

自由段为锚索穿过被加固岩土体的孔段,加固滑坡时为滑坡体中的锚索段. 自由段的锚索被钢管或塑料管所套护,灌浆只使护套与孔壁连结,而锚索可在护套中自由伸缩,因此预应力可从地表通过自由段而传递到锚固段,并将锚固段的反力传递回紧固头,从而使自由段通过的岩土体或滑坡体双面受压而得以加固.

1.3 紧固头

紧固头的底层为钢筋混凝土垫墩,呈厚板状结构,是锚固段反力的承载体. 垫墩之上设置较厚的钢垫板,先承受锚固段反力再传递给垫墩. 钢垫板之上设锚具,构成锚索的钢绞线分股穿过锚具中的若干小孔,对钢绞线施加预应力后用钢楔在小孔中将锚索锁定.

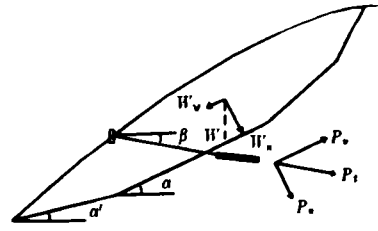


图 2 预应力锚索的力系图

Fig. 2 Mechanics of prestress anchoring rope

预应力锚索的力系(图 2). 通过锚固段传递回的预应力的反力 P_t , 可分解为平行于滑动面并与滑动方向相反的抗滑分力 P_s , 和垂直于滑动面的正应力分量 P_n . 由此,预应力锚索所提供的抗滑增量 P 为抗滑分力 P_s 与滑动面的摩阻力增量 $(P_n \cdot \tan\phi)$ 之和. 即

$$P = P_s \cdot \tan\phi + P_n = P_t [\sin(\alpha + \beta) \tan\phi + \cos(\alpha + \beta)] \tag{1}$$

式中 P_t 为锚索设计预应力值; α 为滑动面倾角; β 为锚索与水平面夹角, 向下为正; ϕ 为滑动面的内摩擦角.

同时,预应力锚索以多排多列呈群锚式布置,由于锚固段和锚墩的应力扩散,滑坡体全处于双向受压状态,整体性得以加强,变形受到约束. 岩土体的力学性质也相应得到部分改善,软弱面的抗剪强度有所提高. 据介绍,某预应力锚索工点软弱结构面上的 C, ϕ 值分别提高了 16% 和 11%^[1]. 与抗滑挡土墙、抗滑桩等一般抗滑建筑物被动承受土压力或下滑力相比,预应力锚索的主动受力结构有明显优越性.

2 预应力锚索的设计原则

对于滑坡加固,预应力锚索的设计步骤(图 3). 各步的设计计算原则如下.

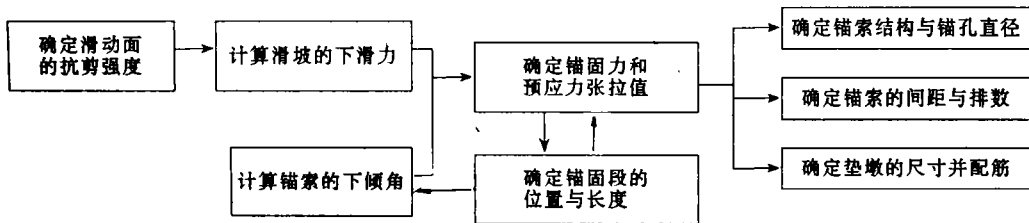


图 3 预应力锚索的设计步骤

Fig. 3 Designing procedure of prestress anchoring rope

2.1 确定滑动面的抗剪强度

对计算滑坡下滑力所需的滑动面抗剪强度值,碍于经费、设备等条件而往往不能通过现场的滑动面大剪试验来获得.室内滑坡岩土体的剪切试验结果,难以代表现场滑动面的剪切强度.因此设计中多采用反算法推求滑动面的粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ ,或直接推求综合内摩擦角 ϕ .反算法的关键是根据滑坡目前稳定状态,假设其安全系数 K 值.对此,实践经验是重要的.

2.2 计算滑坡的下滑力

选定滑坡的主轴断面和其它代表性断面,按下式计算滑坡的下滑力 F

$$F = KW \sin \alpha - W \cos \alpha \tan \phi - cl \quad (2)$$

式中 K 为安全系数; W 为滑体重量; l 为滑动面长度. K 值一般不小于 1.1.

当滑动面为折线或圆弧形时,将滑体竖分为若干块,逐块计算并向下传递下滑力.

2.3 确定锚固力和预应力张拉值

按下式计算一米宽滑坡所需锚固力 P_t

$$P_t = F / [\sin(\alpha + \beta) \tan \phi + \cos(\alpha + \beta)] \quad (3)$$

由于预应力的衰减,张拉吨位要超过 P_t 值以弥补预应力的损失.预应力损失比例视滑体性质和施工工艺而异,一般不超过 25%(土体)或 15%(岩体).

2.4 计算锚索的下倾角

在施工工艺可行的前提下,单位长度锚索提供最大的抗滑增量时,锚索下倾角 β 为^[2]

$$\beta = 45^\circ / (A + 1) + [(2A + 1) / 2(A + 1)] \phi - \alpha \quad (4)$$

式中 A 为锚索的锚固段长度与自由段长度之比; ϕ, α 分别为设锚索段滑动面的内摩擦角和倾角.一般经验, β 角取 $10^\circ - 30^\circ$.

2.5 确定锚固段的位置与长度

锚索的锚固段全置于滑动面之下的稳定岩土体中.考虑应力扩散角,锚固段的起点应下离滑动面一段距离,以使两锚索间的滑动面都能处于受压状态.锚固段的长度视预应力张拉吨位、锚索与砂浆的粘结力、砂浆与孔壁的粘结力而定.锚索与砂浆间的粘结力一般较充裕,故锚固段长度 L 据预应力张拉值 T 、砂浆与孔壁的抗剪力 τ 来计算

$$L = KT / \pi D \tau \quad (5)$$

式中 D 为锚孔直径; K 为安全系数.

2.6 确定锚索的结构和锚孔的孔径

锚索由若干股钢绞线组成.根据预应力张拉值和钢绞线的极限抗拉强度,加以一定的安全储备,来计算组成锚索所需钢绞线的股数.钢绞线按同心状环列.根据钢绞线的股数和单股直径,再考虑灌浆管和砂浆体的空间,来确定锚孔的直径,一般不小于 110mm.

2.7 确定锚索的间距和排数

作为群锚体,锚索的间距不宜过大.因打锚孔会扰动岩土体,孔距也不要过小,认为在岩石中孔距宜大于 1.5m 或 5 倍的孔径.一般经验孔距在 5.0m 左右.根据单宽滑体所需锚固力和锚索的列距以及单根锚索的设计锚固力,即可算得所需锚索的排数和总根数.

2.8 确定垫墩的尺寸并配筋

根据预应力张拉值和锚墩处岩土体允许承载力,确定垫墩的平面尺寸,并按厚板状结构考虑垫墩的厚度。垫墩为钢筋混凝土,小吨位锚索的垫墩布筋按构造筋考虑即可。

3 预应力锚索的施工工艺

预应力锚索的施工工艺流程(图4),包括造孔、制锚索、下锚索、灌浆、制垫墩、张拉、锁定与封头等工序。造孔与制锚索为平行作业,造价高且工艺复杂。后续工序依次进行。控制工期的工序是造孔与垫墩养生。

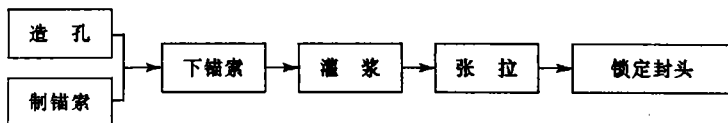


图4 预应力锚索施工工艺流程

Fig. 4 Technological process of construction of prestress anchoring rope

3.1 造孔

造锚孔的要求是保证孔深、孔径和孔的倾角。一般采用专门的锚杆钻机施工。国产钻机较轻便,价格低,加固陡峭坍塌体易于就位。但尚未解决跟管钻进问题,在松散体中钻进要用其它方式护壁,易坍孔,效率低。进口钻机可自动跟进套管,对松散堆积体、断层破碎带中的滑坡加固很适用。钻进均用风动凿岩,需配备大型空压机。钻机油压系统,需用发电机或内燃机驱动。跟进的套管用拔管机拔出。施钻作业,要求定位准确,保持倾角稳定。钻进中采用高压风清孔,并适当超钻。孔口安装吸尘装置。

3.2 锚索的制作与安装

预应力锚索中心为灌浆管,四周环列若干股钢绞线,结构(图5)。钢绞线采用高强度、低松弛型。常规钢绞线单股直径15.24mm,抗拉强度达247kN。为增大锚固段与砂浆的结合力,对锚索采用束张工艺,在锚固段间隔加设内扩张环与外箍环,使之呈节状。锚索外套上加定位片以便入孔后居中,锚索头焊上导向锥。自由段锚索之外加塑料护套以

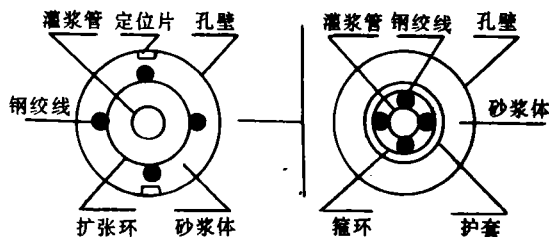


图5 预应力锚索横截面图(a. 锚固段; b. 自由段)

Fig. 5 Transverse section of prestress anchoring rope (a. anchor part; b. free part)

与砂浆隔离。永久性锚索的自由段的防腐是重要问题。为此对钢绞线先作除锈处理,再混合涂刷各种防腐剂,再以护套和砂浆隔水。自由段末端设注浆塞以防砂浆进入护套内。

整根锚索要稍长于设计长度,以伸出锚具供张拉。锚索用人力插入锚孔中。当无坍孔卡塞时,一般仅用数分钟即可将锚索下入孔底。

3.3 灌浆

为使砂浆灌注饱满,将灌浆管置于锚索中心并与锚索等长。采用一定压力自孔底向

上一次性灌注,不宜采用孔口自流式灌浆方法。工期紧迫时可在砂浆中添加早强剂。为保证浆体强度,可采用525号普通硅酸盐水泥配制350号水泥砂浆。砂浆收缩后,在孔口补灌满盈。

3.4 制垫墩

垫墩为200号钢筋混凝土的方形墩,在孔口立模现浇。垫墩中部留孔供锚索穿过。垫墩要养生到一定强度后方能承受预应力张拉。

3.5 张 拉

锚索从垫墩伸出后套入钢垫板和锚具,用张拉机对锚索实施预应力张拉。一般采用两次多级张拉工艺。每级张拉要稳定一段时间以便锚索中预应力的传递和调整。两次张拉间的时间间隔较长,第二次张拉在第一次张拉的预应力基本稳定后进行,以弥补预应力的损失。两次张拉的总吨位不小于设计的超张拉值。为检验锚固段设计,可先对一根锚索作拉拔试验。试验值达不到设计要求则要修改设计。

3.6 锁定与封头

第二次张拉后,立即用钢楔将锚索锁定于锚具上。用150号混凝土封锚头以免锈蚀。

4 预应力锚索几个技术问题的探讨

4.1 安全系数问题

在预应力锚索设计中,计算滑坡下滑力时安全系数 K 的选取最为困难和敏感。由式(2)可知, K 是加在滑块重量的下滑分量($W\sin\alpha$)上的。由于($W\sin\alpha$)相当大,增大1%的 K 值也将增加不少锚索。因此在众多加固滑坡的预应力锚索设计中, K 值都取得甚低,甚至不到1.1,但加固效果都很好,尚无一例失败。这些实践说明,设计所取较低安全系数只是表观的,因为计算中采用的滑动面抗剪强度是未施加预应力之前的。由于施加预应力后软弱面的力学性质会有所改善,如果用改善后的强度指标参与计算,则安全系数会大得多。因此设计中所取(表观)安全系数不宜偏大,以免工程量过大。

4.2 预应力损失问题

预应力损失由钢绞线松弛、地层压缩徐变和锚具楔滑三部分组成。由于采用低松弛钢绞线,垫墩尺寸较大,故前两部分预应力损失不大。测试表明,预应力损失的90%发生在张拉至锁定的瞬间,锁定至封孔的损失较小,封孔后损失更小,至封孔28天后预应力已趋于稳定(图6)。例如,宝成铁路观音山危岩预应力锚索加固^[3],总预应力损失率为19.9%,其中张拉至锁定占90.3%,锁定至封头占6.0%,封孔至28天时占3.7%。因此认为预应力会随时间而持续损失故难以稳定和弥补,是缺乏依据的。

4.3 锚固段长度问题

锚固段长度的计算,以砂浆与孔壁的剪应力沿长度均布为前提。试验表明,这种剪应

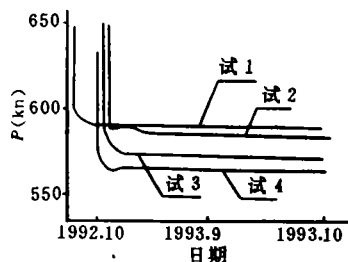


图6 预应力 P 随时间变化曲线^[4]

Fig. 6 Changing curve of prestress force P with time

力分布(图7),在锚固段的首段集中并形成峰值,然后逐渐向端部减小并最终趋近于0,与计算的假定不符.因此锚固段设计可从两方面改进.1.加大水泥砂浆标号,增大砂浆与孔壁的抗剪强度,以免因剪应力集中而破坏锚固段.2.确定锚固段的有效长度.如果剪应力峰区已使砂浆体与孔壁间松动,则剪应力会再向下传递而渐次引起破坏.因此锚固段的有效长度是有限的.过大增长锚固段并不能明显增大锚固力和安全系数,是无效的.

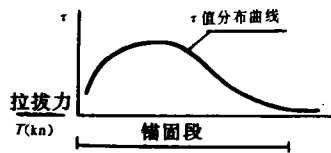
图7 砂浆与孔壁间剪应力 τ 分布图

Fig.7 Distributing curve of shear stress

 τ between mortar and pore wall

5 预应力锚索技术的优越性和应用

预应力锚索是继抗滑桩之后加固滑坡的更新一代技术.比抗滑桩有多方面优点.

1.设计上 预应力锚索加固滑坡是主动施加预应力,并分解为抗滑分力和正应力,使滑体处于双向受压状态,滑体的整体性和软弱面强度都得以加强.这是被动承受滑坡下滑力的抗滑桩所不能比拟的.

2.施工上 预应力锚索系地面机械化作业,工艺灵巧,进度快,安全高效.尤其是当滑体深厚、含水量高时,预应力锚索可克服抗滑桩施工的困难而更显优越.

3.经济上 预应力锚索可比抗滑桩节省投资20—30%.例如,焦柳铁路马颈坳站北顺层路堑滑坡加固,抗滑桩方案为200余万元,后采用预应力锚索,工程费仅120万元^[4].四川草坡水电厂马岭山输水隧洞进口滑坡,用预应力锚索加固,工程费为127万元,仅相当于抗滑桩的74%^[5].

预应力锚索相对于既有技术的明显优越性,使之在铁路、公路、水电、基坑的边坡、滑坡加固中得到日益广泛的应用.国内用预应力锚索加固滑坡的数十项工程中,除云南漫湾水电站坝肩滑坡加固的首批预应力锚索因未穿过滑动面而失效外,均获成功.施加预应力后,滑坡变形终止(图8).在结构上,抗滑桩与预应力锚索结合而成的锚索桩或锚索桩板墙也开始应用.由于在桩顶增加锚索支点,使桩的埋深和截面都大幅度减小,经济效益明显.

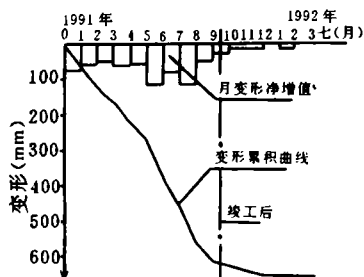
图8 马岭山滑坡后缘的变形曲线^[5]

Fig.8 Deformation curve of the landslide's posterior border in Malinshan mountain

电站坝肩滑坡加固的首批预应力锚索因未穿过滑动面而失效外,均获成功.施加预应力后,滑坡变形终止(图8).在结构上,抗滑桩与预应力锚索结合而成的锚索桩或锚索桩板墙也开始应用.由于在桩顶增加锚索支点,使桩的埋深和截面都大幅度减小,经济效益明显.

铁二院自80年代末,由瑞典阿特拉斯公司引进全套锚索施工机具并开展工艺试验研究,获得铁道部科技进步二等奖以来,完成加固滑坡的预应力锚索工程设计与施工计6项,正在进行3项.加固效果良好,滑坡至今稳定,节省了大量资金和时间,经验值得借鉴(表1).

表1 铁道部第二勘测设计院实施的预应力锚索加固滑坡的工点表

Table 1 The Landslides reinforced with prestress anchoring rope by our institute

序号	工程名称	地点	滑坡概况	工程数量	施工时间
1	马岭山输水隧洞进口段滑坡加固	四川汶川草坡水电厂	断层破碎带滑坡,厚40m	72根3700m,最长53m	1991年4—9月
2	磨刀石铁路边坡加固	黑龙江省牡丹江市	岩质路堑边坡开裂	约600m	1992年
3	外福铁路绿水车站K9路堑滑坡加固	福建省南平市	砂页岩质滑坡	85根,1698m	1993年下半年
4	外福铁路K8边坡加固	福建省南平市	砂页岩边坡开裂	16根,264m	1993年下半年
5	南昆铁路宜耐车站顺层边坡加固	云南省路南县	石灰岩顺层陡伏滑坡	约3000m	1994年上半年
6	青城后山索道房滑坡加固	四川省都江堰市	堆积层滑坡,约2.7万m ³	30根,长23—27m	1994年6—9月
7	达成铁路悦来场滑坡加固	四川省金堂县	堆积层滑坡	132根,2340m	1995年2—6月
8	宝成二线老鸡岩隧道进口段滑坡加固	四川省广元市	堆积层滑坡,堆积层厚30m	132根,5280m,最长43m	1995年4—10月
9	宝成二线明月峡隧道进口段滑坡加固	四川省广元市	断层破碎带滑坡	54根,1917m	1995年7—11月

参 考 文 献

- [1] 顾湘生,邹燕妮,黄金武. 预应力锚索在整治铁路病害高边坡中的应用. 路基工程,1992,(6),9—13.
- [2] 蒋忠信. 预应力锚索最佳角度的技术经济分析. 路基工程,1995,(5),10—12.
- [3] 铁道部第一勘测设计院. 宝成铁路观音山车站岩石边坡开裂预应力锚索加固与测试. 国内外岩土工程实例和实录选编. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1992. 380—400.
- [4] 熊林敦,黄晓晖. 预应力锚索在铁路路基边坡工程中的应用. 工程地质及岩土工程新技术新方法论文集. 北京:中国地质大学出版社,1994. 351—354.
- [5] 李聚金,蒋楚生. 预应力锚索在滑坡中的应用. 路基工程,1992,(6),18—24.

THE TECHNOLOGY OF PRESTRESS ANCHORING ROPE REINFORCING LANDSLIDE

Jiang Zhongxin

(The Geotechnique Company, the 2nd Survey and Design Institute, Ministry of
Railways Chengdu 610031)

Abstract

The technology of prestress anchoring rope is an up-to-date technology reinforcing landslide. On the basis of many practices of design and construction, in the paper, the structures, theories, and the principles of design and construction of the prestress anchoring rope are expounded. The effect of apply and the advantage of the technology are also explained. The concerned principles and some technical problems are discussed too. They may be a reference when the new technology be spreaded.

Key words prestress anchoring rope, landslide, design, construction