

岩质高边坡预应力锚固问题研究

张发明

邵蔚侠

(河海大学土木工程学院 南京 210098) (南京水利科学研究院 南京 210024)

摘 要 在阐述预应力锚索结构及其作用的基础上,分析了影响预应力锚索锚固效果的主要因素,根据现场实测数据,对内锚固段应力分布特征进行了系统的分析.针对预应力锚固效应的三个方面,提出了群锚第一效应和群锚第二效应的概念.对预应力锚固边坡的非线性有限元分析作了较为合理的假设,并提出裂隙岩体锚根效应在数值模拟中的应用方法,得到的结论为准确的地质参数是数值模拟成功的关键.

关键词 岩质高边坡 预应力 锚固 锚根效应 非线性分析

中图分类号 U416.14

预应力锚固技术通过特殊的手段将高强钢材、钢丝、钢绞线变成长期处于高应力状态下的受拉结构,从而增强被加固岩体的强度,改善岩体的应力状态,提高岩体的稳定性.因该技术具有先进性、经济性、可靠性等诸多优点,在水利水电工程建设中应用广泛,它不仅用于大坝坝基加固(如梅山大坝,施加 110 束预应力锚索),也常作为地下工程加固(如小浪底地下工程,十三陵抽水蓄能电站等)及边坡工程(如三峡永久船闸高边坡加固中采用 2 200 余束锚索)加固的重要手段.由于预应力锚固作用机理复杂,影响预应力锚固效果的因素众多,因此需要深入研究锚索的作用机理.研究锚索的受力过程指导锚索的合理化施工,对提高我国岩土工程中的预应力锚固理论及实际应用技术具有十分重要的意义.根据现场试验的结论,对岩质边坡预应力锚固问题作一分析,以利岩质高边坡中锚固的优化设计和提高锚固效果.

1 预应力锚索结构及其作用

预应力锚索由内锚头、外锚头和锚索体三部分组成,内锚头又称为内锚固段,置于稳定岩体中,通过水泥砂浆与岩体联结而提供锚固力.锚索体一般由钢绞线组成,而外锚头主要由锚具和夹具组成,通过外锚头可以实现对岩体施加预应力.

1.1 内锚固段

目前,我国通用的内锚头具有两种基本形式即机械式和胶结式.胶结材料多采用纯水泥浆和树脂材料,水泥胶结材料的性质直接关系到内锚固段的强度.为了提高浆材的早期强度,也可掺入合适的外加剂,如早强型高效减水剂和膨胀剂.

1.2 外锚头

外锚头的作用是将预应力传递到被加固岩体上的永久性锚固装置,根据形式可分为螺杆式、夹片式、锥锚式和墩头式四种.目前,在水工预应力锚固中多采用墩头式和夹片式,如长江三峡永久船闸高边坡锚索加固、黄河小浪底进出口边坡锚索加固等均采用了墩头式外锚头.墩头式外锚头混凝土的强度,必须与水泥浆材料 3 d、7 d 龄期强度相同.

1.3 锚索体

锚索体一般采用高强度、低松弛、耐腐蚀的钢丝形成的钢绞线.在水利工程边坡加固中多采用 7 ϕ 5 钢绞线,视锚固力的大小,常用 1 000 kN、2 000 kN、3 000 kN 级预应力加固工程.预应力钢丝材质性能是影响预应力损失的重要因素之一.

2 影响预应力锚固效果的因素分析

2.1 锚固时机

锚固时机系指边坡开挖后与加锚时的时间间隔,由于边坡工程通常采用自上而下的分步开挖措施,因此,加锚过程亦需与之对应地采用边挖边锚.边坡开挖,改变了岩体原有的应力状态,在临空面产生的同时,岩体产生卸荷松动,不稳定岩体即有可能产生滑动,而岩体一旦产生滑动即具滑动能,所需的锚固力必须克服滑动能而有所增加,因此,选择合适的施锚时机对锚固效果作用甚大.

2.2 岩体类型及其结构

岩体蠕变是引起预应力损失的主要原因之一,不同的岩体类型造成的预应力损失不同,如坚硬完整的岩体,结构面分布少,由结构面引起的蠕变小,岩体本身的蠕变也小,如某花岗岩岩体中施作的锚索锁定后,一星期内由于锚具和岩体的变形,导致的预应力损失较小且速率较快(见图1),究其因是锚索布设间距3.0m,即在9.0m²面积上作用3000多kN的荷载,对于高强度的花岗岩作用并不明显,在软弱岩石(如层状结构岩体)中,因预应力压缩岩层产生的变形巨大,变形减小的速度比较缓慢,因此岩体蠕变引起的预应力损失值就大,如麻石大坝坝基岩体为绿泥石白云母石英岩,根据试验观测,3000kN级锚索一天预应力损失为2.72%,一个月为7.3%,两个月为8.7%.

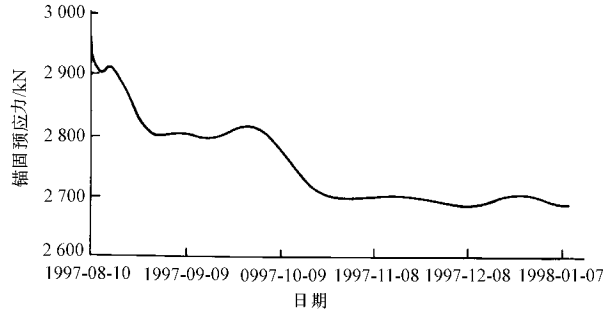


图 1 锚索预应力变化过程曲线

Fig.1 Curve of prestress change with time

2.3 锚杆体材料松弛对预应力损失的影响

在选择锚索材料时,一般选用高强度、低松弛的钢绞线,但由于钢丝在长度不变时,随时间增加将引起内部应力的损失,根据三峡工程中预应力锚索的试验,可以得出如下结论:(a)钢绞线松弛值的大小与张拉应力大小有关,张拉荷载越大,应力松弛损失也越大;(b)钢绞线松弛损失一般在张拉后短时间内完成,尤其是锁定损失约占总松弛损失的80%左右;(c)超张拉对改善应力损失具有一定的作用,如对于1000kN级预应力锚索超张拉15%时,锁定损失占7.3%,后期损失占1.8%左右.

2.4 外锚段封孔灌浆对预应力的影响

在外锚段封孔灌浆过程中,由于水化热温度使钢索膨胀,导致预应力减小,一般为3000kN级锚索,损失值为33.7~48.8kN;1000kN级锚索,损失值为15.6~27.6kN.可见,预应力减小与锚索吨位有关.同时,尚与岩体的裂隙率有关,若岩体裂隙发育,灌浆充填了岩体裂隙,使岩体结构产生相对膨胀变形,此时,预应力增加.若岩体裂隙不发育,则封孔灌浆对锚固预应力的影响较小.

2.5 恶劣环境因素对预应力的影响

震动、降雨、温度等变化对锚索预应力损失均有一定的影响.

a. 降雨对预应力的影响

降雨对锚固预应力的影响主要表现为锚固力的增加,这主要是由于岩体中的裂隙被渗水充填后产生湿胀,从而使钢索拉伸,锚固预应力增加,但降雨对预应力的影响总是与降水过程有一滞后现象,且随着裂隙水的消散,增加的锚固力也会消失.

b. 温度变化

自然环境温度的变化导致岩体温度的变化而影响锚固预应力的变化,夏季温度升高会导致预应力增加,而降温则使预应力减小,在温度和锚索预应力变化之间有一时间间隔.

另外,锚索预应力损失尚与锚孔偏斜率有关,如孔斜率为2%时,3000kN级锚索预应力沿程损失可达9.7%.

3 预应力锚索内锚固段应力分布特征

内锚固段的应力分布直接关系到锚固的优化设计,由于在锚固段设计中一般采用剪应力沿锚固段全长

均匀分布的假定,与实际工程中的应力分布存在较大的差距.根据已有工程的资料分析可知,无论是水泥浆,还是水泥砂浆作为锚固材料的预应力锚索,剪应力的分布都具有指数分布的特点.

3.1 预应力锚索内锚固段轴力分布

根据室内外试验可知,预应力锚索轴向力沿内锚固段的分布特征如图 2 所示,由图中可知,内锚固段轴力分布主要集中在锚固段的外部,在 2.0 m 以内的一段轴力占总轴力的 80% 左右,而内部锚固段几乎不承担荷载,而且不论张拉荷载的大小,分布形式几乎相同,所不同的只是最大轴向力位置略有差异.因此,可以根据所呈现的规律减少锚固段的长度,达到优化设计的目的.

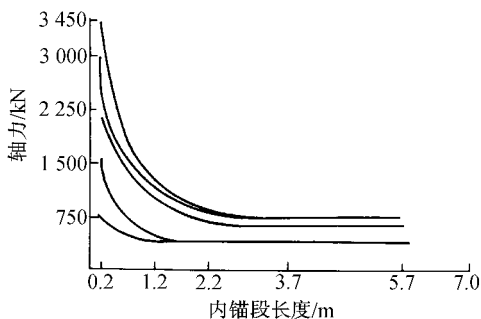


图 2 3000 kN 级锚索轴力沿锚固段分布

3.2 内锚固段剪应力分布特征

试验结果表明,剪应力沿内锚固段的分布特征和轴力分布具有相似之处,主要集中在锚固段的外部,剪应力峰值点离锚固段口 0.5 m 处(图 3).另外,锚固注浆材料对剪应力分布具有一定的影响,水泥砂浆的最大剪应力值比纯水泥浆材料的最大剪应力值,所在位置离锚固段口的距离小^[1].注浆体与钢绞线之间的剪应力分布与轴力分布形式相同,均呈现似抛物线状.

Fig.2 Axial force along anchor length(3000 kN)

4 锚固效应及加固效果的研究

4.1 锚固效应

锚固效应通过锚固岩土体的物理效应、力学效应和结构效应来体现.锚固主要有两种作用,即对围岩表面提供反力以约束岩体向临空方向的变形,以及使岩体一体化的加固作用,提高岩体的整体稳定性.

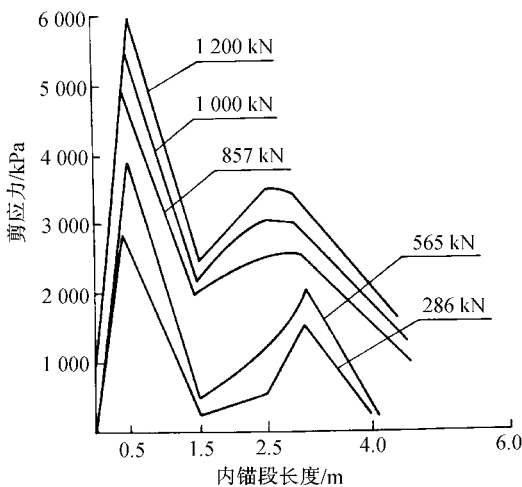


图 3 剪应力沿锚固段分布

Fig.3 Shear stress distribution along anchor length

4.1.1 锚固的物理效应

锚固的物理效应通过加锚岩土体一系列参数的改变来表征.朱维申等通过模型试验提出了提高锚固岩土体强度指标的经验公式^[2].根据三峡、小浪底加锚前后岩体的测试结果,对于多裂隙岩体,弹模增加较大,而对于整体块状结构的岩体则影响较小,岩体的渗透系数 K 同样具有上述规律,具体的增大指数,还有待分析研究.

4.1.2 锚固的力学效应

岩土锚固的力学效应反映在施加预应力之后,可引起围岩应力的二次分布,从而提高了岩体的刚度.根据对多点位移的观测,锚索在张拉锁定后,岩体的压缩效应有延时和继续增强的现象.岩质边坡的开挖将使岩体中的应力产生重分布,引起岩坡表层的松弛张裂,而预应力的施加部分恢复了原有的应力,从而使岩体的完善性增加,强度提高.

4.1.3 锚固结构效应分析

预应力锚索的加固,从整体上相当于空间杆结构体,因此群锚加固引起的群锚效应可以从两方面来研究.其一是,锚固段底在剖面上由于预应力作用会产生拉张裂隙,从而可能产生新的滑裂面(称为群锚第二效应).此时可以间隔布置,长短结合的方法避免该现象的发生;其一为岩体表面受预应力群锚加固使岩体表层形成一定压缩区(此为群锚第一效应).对于坚硬完整的岩体,3000 kN 级单根锚索的压缩影响范围为 1.5 ~ 2.5 m,而 1000 kN 级则仅为 1.5 m,若采用梅花型布置,则合理的采用锚索间距宜为 3.0 ~ 4.0 m,如此可以避免群锚第二效应的产生.

4.2 岩锚加固效果分析

岩土体锚索加固效果可以从两方面来分析:其一是通过锚固,调整岩土体的差异变形而成为同步变形,尤其是系统锚固,该现象尤为突出,如果预应力沿程损失较小,说明锚固力已由岩体与锚固体共同承担.其次是锚索的承载能力,由锚索极值破坏试验得知,锚索的承载力与锚索张拉荷载有关,但均具有足够的安全储

备,说明锚索加固具有一定的安全度。

5 锚固效应非线性有限元分析的几点认识

针对锚固效应的三个方面,在进行非线性有限元分析时,拟采用以下方法:

a. 锚固物理效应通过改变加锚后岩体的性质的改善,如弹模的提高,节理面强度 c, φ 的提高等,尤其是内锚固段节理面考虑高压灌浆效应,使节理面上的 c, φ 值根据节理填充物的厚度分别采用等效厚度法,将水泥浆的 c, φ 值按厚度权值给予提高,这种效应在以往的数值模拟中常被忽略,而裂隙的灌浆结果使内锚固段增加了握裹力,称之为锚根效应。因此,准确的地质参数是进行数值模拟的基础。

b. 锚固力学效应通过布置不同锚索密度时所增加预应力,模拟实际施锚时机和过程,以改变岩体单元的初始屈服函数值来实现。

c. 锚索的结构效应通过单根锚索、多根锚索和群锚(按不同间距)进行模拟,锚索采用 20 结点柱单元,岩体按弹塑性介质考虑,强度准则采用 Drucker-Prager 准则。

根据以上方法,采用弹塑性有限元程序对某工程高边坡锚索加固进行了非线性有限元模拟,得到锚固剪应力分布与实测结果基本相同,加固效果与边坡实测数据基本吻合。

6 结 论

a. 预应力损失是制约岩土锚固技术的重要因素之一,通过实测资料的分析,认为影响预应力锚索锚固效应的主要因素有锚固时机、岩体类型、外锚墩性质及环境条件。

b. 预应力锚索的加固效应由物理效应、力学效应和结构效应三方面体现。

c. 在加固效应的非线性有限元模拟中,应重视物理效应尤其是锚根效应的作用。

成文过程得到长江三峡开发总公司吴海斌高工、冯兴常高工、向俊英高工及西北勘测设计院傅金筑高工的帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 顾金才,明治清,沈俊等.预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究.岩石力学与工程学报,1998,17(增):788~792
- 2 朱维申,何满潮.复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学.北京:科学出版社,1995,408~411

Prestressed Anchor Cables Used in High Rock Slopes

Zhang Famin

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Shao Weixia

(Nanjing Hydraulic Institute, Nanjing 210024)

Abstract The structure and mechanism of prestressed anchor cables are discussed, and the factors affecting prestressed anchors are put forward in this paper. Then, the performance of prestressed anchorage is also discussed, and finally, the condition for non-linear FEM analysis of prestress anchored slope is presumed.

Key words rock slope; prestressed anchor; anchorage effect; non-linear analysis