小湾电站堆积体边坡锚固响应规律数值模拟实验

张德圣¹林 舸² 黄海峰³

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 广东 广州 510640;

3. 三峡大学地质灾害防治研究院 湖北 宜昌 443002)

摘 要:为探讨堆积体边坡的锚固响应规律,运用数值模拟方法来分析群锚作用下堆积体边坡的压、拉应力分布规律。模拟 结果显示,群锚作用下,在锚墩周边的岩体中形成的压应力集中区相互叠加,自由段末端、内锚段始端部位的压、拉应力区域 也互相叠加,这种拉应力区的联合可能对锚固不利。此外,锚索间、排距以4~5m较为合适,堆积体边坡的岩体变形主要集中 在锚索周边2m范围内。

关键词:小湾电站;堆积体边坡;压应力;拉应力;FLAC^{3D}数值模拟;锚固响应

中图分类号:TU457 文献标识码:A 文章编号:1008-1933(2011)06-121-05

Anchorage response law experiment of deposit slope in Xiao-wan Hydropower Station using numerical simulation

ZHANG Desheng¹ LIN Ge² HUANG Haifeng³

(1. School of Architecture and Civil Engineering , Anhui University of Science and Technology , Huainan 232001 , China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510640 China;

3. Geological Disaster Prevention Research Institute China Three Gorges University , Yichang 443002 China)

Abstract: For the sake of probing into anchorage response law, this article researches on distributed law of compressive stress and tensile stress in deposit slope under group anchor cables by numerical simulation. The simulation result indicates that under the action of group anchorage cables , compressive stress region overlaps one another around anchorage pier in rock mass , at the same time the compressive stress and tensile region superposes along free-sect's bottom and anchorage-sect's top too. However , the tensile stress region's superposition is disadvantage to anchorage. Moreover , the space between of anchor cables is fitting as $4.0 \sim 5.0$ m , and the strain of deposit slope is mainly concentrated about 2 m range around anchor cable.

Key words: Xiao-wan Hydropower Station; deposit slope; compressive stress; tensile stress; FLAC^{3D} numerical simulation; anchorage response

0 引 言

边坡在开挖过程中,岩体的结构面将产生开裂、 滑移,坡体的应力将重新调整,坡体会出现大面积的 松动区,坡体密实度减弱^[1-2]。锚固将使结构面产 生闭合、压密,从而使岩体的压缩量和弹性模量增 加。预应力锚索的施加则增加了松动区的密实度, 改善了坡体内部的应力状态,抑止和调整了边坡岩 体的变形,岩锚的加固效应主要集中体现在卸荷区 表现的特征。

收稿日期:2010-04-29

作者简介:张德圣(1974 -) ,男 ,安徽肥西人 ,博士 ,讲师 ,主要从事 锚固与注浆方面的研究。 锚索作用下的边坡响应是锚固效果的直接反 映,也是人们直接关注的问题。锚固的目的就是要 达到人们所预想的效果,满足人们的需求。研究锚 索作用下的边坡响应规律时,人们对于一般性的边 坡锚固效应问题研究较多,而对于软弱岩土质边坡 的研究相对较少,尤其是一些特殊地质边坡(如松 散岩土质边坡、堆积体边坡等)。本文主要以小湾 水电站堆积体边坡为研究对象,运用 FLAC^{3D}数值模 拟软件,着重研究堆积体边坡在群锚作用下的堆积 体的响应规律。

1 堆积体边坡结构特点

小湾电站堆积体边坡由表及里大致包括堆积 体、接触面夹层以及下伏基岩^[3-5](图1)。堆积体主 要由块石、特大孤石夹碎石质粉土或砂壤土组成。

基金项目:安徽理工大学博士科研启动基金资助项目(11050)

E - mail: zhangdesheng7412@ tom. com

总体上,堆积体物质相对较为密实,局部地段较为疏松,并存在架空现象。堆积体下部基岩岩质坚硬,岩 性为弱风化至微风化黑云母花岗片麻岩夹角闪片 岩。在堆积体底部与基岩接触带,普遍分布一薄层 颗粒相对较细、厚度不均的坡积层或洪积层,接触带 土体在空间分布上成层性相对较差。



图1 堆积体边坡纵剖面示意^[3]

Fig. 1 Profile sketch map of deposit slope^[3]

2 数值模型的建立

2.1 地质建摸

如图 2 选取堆积体左岸某高程边坡作为研究体 建立地质模型:以边坡走向指向右(河流方向)为 *X* 轴正方向,以水平面内垂直 *X* 轴指向山体内部方向 为 *Y* 轴正方向,以铅直方向指向上为 *Z* 轴正方向; 在 *X* 正方向上选取 20 m;在 *Y* 轴正方向选取 70 m (其中包括基岩至少为 10 m,堆积体 40 m),负方向 上选取 5 m;在 Z 轴正方向上选取 20 m,负方向上选 取 10 m,建立地质模型。建立的地质模型共划分为 17600 个区块,有 19992 个节点。模型计算采用摩 尔一库仑准则计算模式。模拟设计开挖边坡倾角为 45°. 堆积体与基岩接触面倾角与边坡倾角一致。



图 2 堆积件边圾地顶候空

Fig. 2 Geological model of deposit slope

2.2 参数选取

模型所用的参数主要是参考小湾堆积体边坡有

关文献^[6-8],并参考其他相关资料。最后,所确定的 参数见表1。

表1 岩土体物理力学参数

Table 1 Mechanics parameters of rock and soil mass

材料名称	E/MPa	μ	γ /(kN • m ³)	C /MPa	φ /°	au/MPa
堆积体	500	0.34	21.8	0.05	36	0
基岩	20000	0.25	26.5	1.75	54	1.3

本次模拟的锚索长度为 48 m,锚固段深入完整 基岩内,内锚段长度为 8 m,模拟多束锚索时其间排 距设计为 5 m × 5 m。锚索单元所用的参数根据实 际施工中所使用的锚索钢绞线所提供的参数,并参 考有关文章取值^[940],具体数值见表 2。

表2 锚索材料性能参数

Table 2 Characteristic parameter of anchorage cable

材料名称	钢绞线 弹性模量	钢绞线 杨氏模量	钢绞线 截面积	锚固浆体 刚度模量	锚固浆体 切变模量
	/GPa	/MPa	$/ m^2$	/GPa	/MPa
锚索	191	1860	1. 69 $\times 10^{-3}$	5.35	0.42

2.3 边界条件和约束条件

X 轴方向上,边界限制在 0~20 m 之间; Y 轴方 向上,对界面 y = -5 m 和 y = 70 m 两边界进行约 束; Z 轴方向只对 z = -10 m 边界进行约束; 边坡顶 面和斜坡面不进行约束,为自然状态。在模型顶面 加一均布力以模拟上覆岩体重力。设置重力加速度 为 10 m/sec²。

3 模拟结果分析

在模拟群锚作用下坡体的锚固效应时,笔者主 要对2根、3根和5根锚索作用下坡体的响应规律 进行了研究。其中,群锚在坡面上的分布按照图3 给出的方式布置,群锚的间、排距为5m×5m。



图 3 群锚布置示意

Fig. 3 Layout sketch map of group anchorage cables

3.1 应力分析

锚索施加预应力后,相应地坡体会产生附加应 力和变形;而变形是应力的外在表现。施工经验和 模拟研究表明,群锚作用下的边坡会产生两种附加 主应力,即压缩应力和拉伸应力,压应力占据着主导 地位,而拉伸应力主要分布在锚索锚固段部位围岩 中(图4)。这种压缩应力有利于边坡的稳定,它几 乎遍布于整个坡体,尤其在边坡面上该压应力迹线 最为明显,数值也达到最大;拉伸应力迹线局部分布 在锚固段基岩中,一般地这种拉伸应力较小,但如果 这种拉伸应力过于集中,会对锚固效应产生不利影 响,实际施工中,通常采取避开锚固段位置处于相同 深度等办法来减少这种不利影响。以下主要针对边 坡施加3根锚索后,坡体的受力情况进行分析,分析 结果如下(图5):

1) 群锚作用下,在锚墩周边的岩体中形成的压 应力集中区域相互叠加,并且此叠加的压应力由边 坡表面向坡体内部扩散衰减,经向上压应力值也会 从锚索中心向周围逐渐减小。边坡开挖会引起岩体 的松动卸荷,群锚施工形成的压应力集中区域的叠 加或联合有利于改善边坡岩体的力学性能。另外, 远离锚墩周边表面岩体因挤压而形成的拉张应力也 互相叠加。

2) 群锚使得自由段末端、内锚段始端部位的 压、拉应力区域也互相叠加。这种拉应力区的联合 可能使锚根附近的岩体形成拉应力带,岩体受整体 拉力作用可能会导致岩体内部张裂破坏,因而十分 不利。但是,同时内锚段前部压应力区域的联合也 将有助于改善锚索根部的拉应力区分布^[11-13]。

3) 改变群锚之间的间距发现(图 5):3 m 间距 的群锚施工 不仅在锚墩周围岩体部位产生压应力 集中区域叠加 同时 这种压应力极大值区域也相互 叠加在一起,从而使得压应力过大可能产生负面影 响(如坡面岩体局部受压破坏)。另外,在内锚段部 位的岩体中,由于较小间距锚索施工,也会带来压、 拉应力极大值区域的联合。这种极大值区域的叠加 同样可能产生不利影响,尤其是拉应力极大值的联 合很大可能会导致锚根部位的岩体发生破坏 从而 影响锚固效果甚至可能发生锚固失效。4 m 间距 时,上述各应力叠加仍然明显; 5 m 间距时,只在坡 面岩体中出现压应力联合,而在锚固段却没有极大 拉应力值区域的叠加;当锚索间距为6m时不管在 坡面岩体还是在锚固段附近岩体 ,各应力区域叠加 不明显,尤其是坡面岩体压应力集中区域出现跌落 现象 不能在坡体表层形成一个完整的压缩带。比 较3 m A m 5 m 和6 m 等各种锚索间距的模拟结果 (图5),笔者认为,锚索间距一般不宜小于3m,尤 其是大吨位锚索;同时,锚索间距也不宜大于6m。 建议锚索设计间、排距宜在4~5m较为合适。

4) 进一步模拟还发现,群锚引起的应力集中区 域的叠加与张拉荷载的大小,即锚索张拉吨位级别

Center. X:1.369e+001 Y:2.891e+001 Z:5.000e+000 Dist:1.210e+002	Rotation: X:0.000 Y:0.000 Z:40.000 Mag.: 0.64 Ang.: 22.500	
Ang: 22.300 Principal Stresses Magfac=5.000e+000 Exaggerated Grid Distortion Local face system Compression Linestyle Tension Linestyle		

图 4 群锚作用下边坡附加主应力迹线

Fig. 4 Supplementary principal stress trajectory in deposit slope under the action of group anchorage cables

3.2 应变分析

3.2.1 沿坡面走向上变形

沿坡面走向上,坡体的变形行为如下(图6):1 号锚索加固后 坡体的压缩变形主要集中于锚墩周 围的岩体 远离1号锚索锚墩坡体几乎全部处于拉 伸变形当中。1 号和2 号锚索锚固后,坡体变形量 有所变化,尤其是靠近12号锚索附近的岩体压缩 变形较大 其他部分的坡体仍然呈现拉伸变形趋势。 在施工完123号3根锚索后 除了边坡两侧的堆 积体外 坡面走向上的坡体几乎全部处在压缩变形 中。随着5根锚索施工完毕,坡体基本完全被压应 力和压应变区域所笼罩之下,这种压缩变形,尤其是 联成整体的压缩变形对于边坡的稳定性十分有利; 然而,由于锚墩周边的岩体受到的压应力较为集中, 且这种压应力量值随着锚索数量的增加有增大的趋 势 相应地锚墩周边岩体的压缩变形也会加大。如 果压缩变形过大 坡面岩体特别是像堆积体这种软 弱岩土,可能经受不起过大的压力而发生局部的压 缩破坏 这将对于锚索的锚固效应产生不利的影响。 如何解决坡面上压应力过大所带来的不利影响,也 是锚索施工中的重要问题。在小湾水电站堆积体边 坡锚索施工中 结合采用格构梁和混凝土网板梁等 施工措施来分散这种局部过大的压应力。这种压应 力通过锚墩传递到格构梁或混凝土网板梁中,由于 格构梁或混凝土网板梁的作用面积较大 ,会把压应 力向周边坡体中扩散衰减,并对周围的岩土体能起 到一定的加固作用,起到对坡体表层和深层同时加 固的效果。

3.2.2 沿锚索深度方向上变形

沿锚索深度方向上 随着锚索数量的增加 坡体





Fig. 5 Syy section cloud map under the action of group anchorage cables (unit: Pa)



图 6 群锚(1000 kN)作用下坡体沿坡面走向上的 变形曲线

Fig. 6 Deformation curve along slope strike under the action of group anchorage cables(1000 kN)

表层的压缩变形整体呈现相应增大的趋势,堆积体 内部拉伸变形呈现相应减小趋势(图7)。群锚作用 下的变形曲线大体上是一致的。然而,锚索数量的 增加,不仅在坡面岩体产生的压缩变形量有所增大, 而且此压缩变形的影响深度范围也跟着增加;在坡 体内部仍然有一定的位移滑动趋势,导致坡体发生 拉伸变形,特别是在坡体内部越10~16 m 深度范围 内,拉伸变形量较大者约1 mm 左右。堆积体内部 的这种拉伸变形随着锚索数量的增加而减小,变形 量从单索时的约 1.2 mm 减小到 5 根锚索时的约 0.8 mm,可见锚索数量的加大在一定程度上有利于 边坡的稳定。另外 根据上文可知 堆积体内部的拉 伸变形与张拉荷载也有一定关系 在一定范围内,荷 载越大,拉伸变形越小,也越利于坡体的稳定。



- 图 7 群锚(1000 kN)作用下坡体沿锚索深度方向上的 变形曲线
- Fig. 7 Deformation curve along anchoring cable depth direction under the action of group anchorage cables(1000 kN)

堆积体内部存在的拉伸变形是坡体滑动的一种 潜在表现,如果条件(如雨水季节)成熟,就可能发 生坡体滑动或局部塌方等工程失稳问题。出现上述问题的主要原因是与堆积体的本身性质有关:堆积体的弹性模量较小,抗拉强度几乎为零,且内聚力也很小。边坡支护时,适当增加锚索数量、加大锚索张拉吨位并结合其他边坡治理方案(如抗滑桩、格构梁等) 整个堆积体边坡将处于压应力之中,坡体会在一定条件下达到稳定状态。

锚索作用下距张拉锚索的孔口越近时,岩体所 产生的变形量越大。一般情况下,锚固作用力的影 响范围为4~5 m;而对于堆积体边坡,由于土体性 质原因导致应力在坡体内传递的深度有限,岩体变 形主要集中在锚索周边2m半径范围内。针对堆积 体边坡的特殊性,在采用预应力锚固措施加固边坡 时,一方面要注意群锚施工时堆积体边坡的稳定 性,另一方面不能忽视坡面浅层防护。

一般而言,压缩变形尤其是联合成片的压缩变 形,对于边坡的稳定性十分有利;然而,由于锚墩周 边的岩体受到的压应力较为集中,且这种压应力值 随着锚索数量的增加有增大的趋势,相应地锚墩周 边岩体的压缩变形也会加大。如果压缩变形过大, 坡面岩体特别是像堆积体这类软弱岩土,可能经受 不起过大的压力而发生局部的压缩破坏,这将对于 锚索的锚固效应产生不利的影响。如何解决坡面上 压应力过大所带来的负面影响,也是锚索施工中的 重要问题。在小湾水电站堆积体边坡锚索施工中, 结合采用格构梁和混凝土网板梁等施工措施来分散 这种局部过大的压应力,起到同时加固堆积体边坡 表层和深层的效果。

4 结 论

 1) 群锚作用下,在锚墩周边的岩体中形成的压 应力集中区相互叠加,并且此叠加的压应力由坡面 向坡体内部扩散衰减,经向上压应力值也会从锚索 中心向周围逐渐减小。同时,在自由段末端和内锚 段始端部位的压、拉应力区域也互相叠加。这种拉 应力区的联合,可能使锚根附近的岩体形成拉应力 带,岩体受整体拉力作用可能会导致岩体内部张裂 破坏。 2) 改变群锚之间的间距发现,锚索间、排距一 般不宜小于3m,也不宜大于6m,以4~5m较为合 适。

3) 堆积体边坡岩体变形:沿边坡面走向上,主要集中在锚索周边2m半径范围内;沿锚索深度方向上,其影响深度主要为2m。

 4)根据模拟结果可知,适当增加锚索数量、加 大锚索张拉吨位并结合其他边坡护坡技术,能有效 地增加堆积体边坡的稳定性。

参考文献:

- [1] 李 军,卞 鹏,张宏博. 滑坡体预应力锚固效应及变化规律 研究[J]. 济南大学学报: 自然科学版 2003,17(1):21-24.
- [2] 徐湘涛,汪家林,王运生.紫坪铺水利枢纽引水发电洞进水口
 边坡预应力锚索锚固效应分析[J].水土保持研究,2006,13
 (1):200-203.
- [3] 潘亨永 杜建成 胡小明 等.小湾左岸坝前堆积体高边坡稳定 性分析[J].人民珠江 2000(4):24-26 29.
- [4] 束小龙 梅明荣 任青文 等.小湾左岸堆积体高边坡锚固硐加 固处理方案研究[J].云南水力发电 2003,19(4):9-12.
- [5] 李海民, 钟瑞辉, 刘 成. 云南省小湾水电站引水沟堆积体锚 索施工技术与改进设计探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005,16(增刊):7-11.
- [6] 朱继良,黄润秋.某水电站坝前堆积体稳定性的三维数值模拟 分析[J]. 岩土力学 2005 26(8):1318-1322.
- [7] 丁秀美,黄润秋,严 明,等.澜沧江中游某崩塌堆积体变形空
 间效应研究[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(3): 38-42.
- [8] 李晓春 陈剑平. 小湾电站边坡卸荷三维有限元模拟[J]. 吉林 大学学报: 地球科学版 2005 35(2): 195-200.
- [9] 李国良, 贺 毅, 易汉荣. 大朝山水电站泄洪排砂底孔闸墩预 应力锚索施工[J]. 云南水力发电 2001, 17(4):57-60.
- [10] 王树仁,何满潮,金永军.拉力集中型与压力分散型预应力锚 索锚固机理[J].北京科技大学学报 2005 27(3):278-282.
- [11] 丁秀丽 盛 谦 韩 军 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2002 21(7):980-988.
- [12] 徐前卫,尤春安,朱合华. 预应力锚索的三维数值模拟及其锚 固机理分析[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(2):214-218,222.
- [13] 张思峰,周 健,宋修广,等.预应力锚索锚固效应的三维数值 模拟及其工程应用研究[J].地质力学学报,2006,12(2): 166-173.