

宜兴抽水蓄能电站上库主坝堆石料的特殊研究

肖贡元

(上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要 针对宜兴抽水蓄能电站上库主坝建在倾斜基础面上的实际情况, 对坝体堆石料特性进行了两项特殊研究. 现场试验研究表明各种堆石料与基岩面之间的抗剪强度均小于该种堆石料本身的抗剪强度, 加大基岩面的粗糙度有利于提高该项抗剪强度. 对砂岩夹泥岩堆石料浸水后变形特性的室内试验研究表明其湿陷特性指标处于一般堆石料常见值范围内, 评价堆石料浸水饱和后的表现, 不能只看堆石料软化系数的大小, 还要考察堆石料饱和抗压强度等力学性能指标. 研究成果为充分利用上库库盆开挖料筑坝并降低工程投资提供了科学依据.

关键词 混凝土面板堆石坝; 堆石料; 倾斜基础面; 抗剪强度; 湿陷变形; 宜兴抽水蓄能电站

中图分类号: TV641; TU521

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2005)06-0049-03

Study on characteristics of rockfill materials for main dam of upper reservoir of Yixing Pumped Storage Power Station//
XIAO Gong-yuan(Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract : Two special issues were studied on rockfill materials for the main dam, which was built on an inclined bedrock surface. The result of in-situ tests indicates that the shear strength along the interface of tested rockfill materials and bedrocks is lower than that between rockfill materials themselves, and that the shear strength would be higher if the roughness of the bedrock surface is increased. Laboratory tests on the sandstone rockfill materials intercalated with mudstones show that the indexes of wetting-induced settlement are within the range of common rockfill materials, and that the evaluation of behaviors of rockfill materials after wetting saturation should depend not only on their softening coefficient, but also on their saturation compressive strength, and etc. The research result provides a scientific basis for dam construction by full use of rock materials excavated from the upper reservoir basin. Furthermore, the investment in the project can be reduced.

Key words : concrete face rockfill dam; rockfill material; inclined bedrock surface; shear strength; wetting-induced settlement; Yixing Pumped Storage Power Station

1 概述

江苏宜兴抽水蓄能电站位于宜兴市西南约 10 km 的铜官山区, 装机容量 1 000 MW. 该站址靠近江苏省负荷中心, 交通便利, 水源补给条件好, 尤为难得的是可以获得 370 m 的平均发电水头, 是江苏省特别是苏南地区不可多得的优越的抽水蓄能站点. 目前电站正在建设中.

上水库位于铜官山主峰北侧沟谷, 由主坝、副坝和库周山岭围成. 上水库地形、地质条件不理想. 主坝位于水库东侧, 横跨铜官山北侧沟谷, 坝址区地形复杂, 冲沟发育, 沟梁相间. 上水库沟谷西高东低, 纵向坡降较大, 且陡缓不一, 冲沟纵坡一般为 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 局部更陡. 沟谷内台地狭窄, 水库天然库容只有 100 多万 m^3 . 为了获得 500 余万 m^3 的工作库容必须对库盆作大量开挖.

主坝坝型经比较后选用混凝土面板混合堆石坝方案. 主坝上游面最大坝高约 55 m, 由于受地形条件限制, 坝轴线下游的坝体坐落在倾斜山坡面上. 为避免堆石坝体延伸过长, 在下游堆石体中部平行于坝轴线建了一道混凝土重力挡墙, 截去了墙后的堆石体, 从而组成了上部面板堆石坝加下游混凝土挡墙的混合堆石坝坝型. 坝轴线至挡墙轴线水平距离 135.5 m, 挡墙建基面至堆石坝坝顶的最大高差约 140 m^[1].

上水库库盆和坝基的岩石主要是泥盆系五通组石英岩状砂岩夹粉砂质泥岩和茅山组岩屑石英砂岩夹粉砂质泥岩, 呈弱风化. 此外还有多条花岗岩岩脉侵入, 岩脉风化很深, 在建基面出露的仍为全风化岩. 弱风化五通组石英岩状砂岩干抗压强度 187 MPa, 饱和抗压强度 83 MPa, 软化系数 0.44. 弱风化茅山组岩屑石英砂岩干抗压强度 142 MPa, 饱和抗压强度 54 MPa, 软化系数 0.38. 虽然软化系数低, 但

饱和抗压强度并不低,仍属硬岩.弱风化粉砂质泥岩干抗压强度 63 MPa,饱和抗压强度 22 MPa,软化系数 0.35,属于软岩,但经试验不具浸水崩解性.上水库主坝的坝体堆石料源即为上水库库盆开挖获得的上述两类砂岩夹泥岩料,其中泥岩在上坝料中含量控制为 10%~15%.

在倾斜建基面上建混凝土面板混合堆石坝,设计时研究了一系列问题.本文仅叙述其堆石料特性试验研究中专门针对倾斜基础面的两项特殊研究,即堆石料与基岩面间的抗剪强度研究及堆石料在浸水后的湿陷变形特性研究.常规混凝土面板堆石坝通常不进行这两项研究.

2 堆石料与基岩面间的抗剪强度研究

通常建在岩基上的混凝土面板堆石坝,不必核算坝体沿基岩表面的抗滑稳定性.而当受地形条件的限制,堆石坝不得不建在倾向下流的倾斜建基面上时,坝体沿基岩面的抗滑稳定性就显得突出.决定其稳定性的关键因素之一是堆石体与基岩面间的抗剪强度.

关于堆石体与岩石面间的抗剪强度,已有过一些工程实例可供定性参考.一般认为,当基岩的抗剪强度大于堆石料的抗剪强度时,堆石料沿基岩面的抗剪强度将取决于堆石料自身的抗剪强度和堆石与基岩界面的粗糙程度.文献[2]引用奥地利芬斯特托尔坝的试验资料:堆石沿光滑岩面的摩擦角比堆石内摩擦角低 8°,随着基岩面凿毛程度的加大,摩擦角逐步提高;在凿毛程度为 50%时,摩擦角与堆石内摩擦角的差别不到 2°.十三陵抽水蓄能电站上水库曾做过试验,认为:除非坝基岩体中存在软弱破碎带或断层带,否则岩体的抗剪强度不会低于同类岩石堆石料的抗剪强度.一般情况下,堆石料沿基岩抗剪强度应为堆石料的抗剪强度,为安全起见,亦可取为堆石料抗剪强度的 90%~95%^[3].

为了研究主坝堆石料与基岩面间的抗剪强度,在现场进行了堆石料与原状岩石面间的大型直剪试验.试验用的堆石料除了库盆的五通组砂岩夹泥岩外,作为对照,还有从库外灰岩料场开采的软化系数高、不含泥岩的灰岩料.现场试验由建设单位委托南京水利科学研究院进行,先后做过两次.第一次现场试验的基岩面偏光滑(起伏差 1~3 cm),岩面凿毛比例较小.第二次又在较为粗糙的基岩面上,再进行了现场试验,其基岩面起伏差控制在 4~8 cm.第二次试验还研究了因暴雨和施工加水引起堆石料中的细颗粒淋滤沉积到基岩面上时,对堆石与基岩面间抗剪强度的影响.

在现场试验时观测到,岩体没有发生剪切破坏,

堆石料与基岩面间的剪切破坏均在其接触面间发生.试验结果见表 1 和表 2.作为对照,在表 3 中列出了相应的坝体堆石料抗剪强度室内试验成果的代表值.

表 1 堆石料与光滑基岩面抗剪强度指标

试验项目		抗剪强度(试验值)	
堆石料	基岩面	c/kPa	φ/(°)
五通组砂岩夹泥岩	茅山组弱风化砂岩	20	37.5
五通组砂岩夹泥岩	五通组弱风化砂岩	60	35.0
五通组砂岩夹泥岩	强风化花岗岩斑岩	因故未做	因故未做
灰岩	茅山组弱风化砂岩	25	34.8
灰岩	五通组弱风化砂岩	48	33.1
灰岩	强风化花岗岩斑岩	55	33.1

表 2 堆石料与粗糙基岩面抗剪强度指标

试验项目		抗剪强度(试验值)	
堆石料	基岩面	c/kPa	φ/(°)
五通组砂岩夹泥岩	茅山组弱风化砂岩	84.2	40.5
五通组砂岩夹泥岩	弱风化粉砂质泥岩	23.7	38.1
五通组砂岩夹泥岩	强风化花岗岩斑岩	46.0	39.0
玉山-南坝灰岩	茅山组弱风化砂岩	49.1	39.7
玉山-南坝灰岩	弱风化粉砂质泥岩	20.1	37.6
玉山-南坝灰岩	强风化花岗岩斑岩	28.1	38.6
五通组砂岩夹泥岩 ^①	茅山组弱风化砂岩	74.1	38.5
玉山-南坝灰岩 ^①	茅山组弱风化砂岩	25.3	37.2

注 ①模拟暴雨淋滤工况.

表 3 坝体堆石料抗剪强度试验成果(饱和状态)

堆石料类型	c/kPa	φ/(°)
五通组石英岩状砂岩夹泥岩主堆石区料	92	41.52
茅山组岩屑石英砂岩夹泥岩主堆石Ⅱ区料	76	42.32
玉山-南坝灰岩主堆石区料	70	42.67

从以上各表可以看出:

a. 各种堆石料与基岩面间的抗剪强度均小于该种堆石料本身的抗剪强度.这一结论与前述文献[3]的说法有些差别.基岩面经过加糙处理后,两者间的抗剪强度比岩面光滑时明显提高,但仍小于堆石料本身.

b. 从库外料场开采的灰岩料与基岩面的抗剪强度接近或略小于库内五通组砂岩夹泥岩与基岩面的抗剪强度.从坝体稳定的角度看,可以采用上水库库盆开挖的砂岩夹泥岩料筑坝,不需要专门开采远离工程区域的灰岩料场.

c. 模拟暴雨试验成果表明,粗糙基岩面上有细颗粒沉积时,堆石料与基岩面的抗剪强度略有降低,但降低值并不大,不会构成对倾斜建基面上坝体稳定的控制因素.细颗粒淋滤沉积在基岩面上,不会形成连通的滑动面;承受剪切力的主要仍是粗颗粒组成的骨架.

3 堆石料湿陷试验研究

宜兴抽水蓄能电站上水库主坝坝体堆石填筑料软化系数偏小,且夹有 10%~15%的泥岩,在上游防

渗面板施工后以及水库运行期 如果因降水或渗漏使堆石体湿化甚至饱和 ,有可能产生较大的湿陷变形 . 由于下游堆石体建于倾斜建基面上 ,主坝设计时担心下游堆石体的后期湿陷沉降可能加大上、下游堆石体的沉降差 ,从而导致上游防渗面板开裂 . 因此有必要进行筑坝堆石料的湿陷试验研究 ,为合理预测坝体未来的应力变形、完善工程设计提供科学依据 .

堆石料的湿陷试验也是委托南京水利科学研究院完成的 . 试验在大型固结仪上进行 ,试样直径 450 mm ,高 300 mm . 五通组石英砂岩夹 10% 泥岩或 15% 泥岩的湿陷试验分 3 种形式 :① 风干样逐级加载至垂直压力 0.8 MPa ,变形稳定后浸水饱和 ,然后逐级加载到最大垂直压力 1.6 MPa ;② 风干样逐级加载至最大垂直压力 1.6 MPa ,变形稳定后浸水饱和 ; ③ 饱和样逐级加载到最大垂直压力 1.6 MPa . 茅山组砂岩夹 10% 泥岩只进行了上述①和③两种试验 . 以上试验参照黄土湿陷试验的方法分别用单线法或双线法计算湿陷系数^[4] . 试验最大垂直压力取 1.6 MPa 是考虑主坝轴线下游堆石体最大垂直厚度不超过 80 m . 表 4 至表 6 是其中几项代表性的试验成果 .

表 4 五通组石英砂岩夹 10% 泥岩湿陷试验成果

试验形式	试样状态	垂直压力 P/kPa	变形量 $S/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa	湿陷系数 $\delta_s/\%$
①	干样	0.00	0		
	干样	218.29	1.932	112.9	
	干样	419.46	3.421	135.0	
	干样	804.68	6.289	134.3	
	浸水	804.68	8.894		0.26
	饱和	1198.47	13.451	86.4	
②	饱和	1643.42	17.803	102.2	
	干样	0.00	0		
	干样	209.73	1.751	119.7	
	干样	428.02	3.386	133.4	
	干样	856.05	6.455	139.4	
	干样	1198.47	9.069	130.9	
③	干样	1643.61	12.502	129.5	
	浸水	1643.61	17.393		0.48
	饱和	0.00	0		
	饱和	201.17	2.033	98.9	0.03
	饱和	393.78	3.900	103.1	0.08
	饱和	791.84	9.044	77.3	0.30
	饱和	1202.75	13.858	85.3	0.47
	饱和	1600.81	18.043	95.1	0.62

表 5 五通组石英砂岩夹 15% 泥岩湿陷试验成果

试样状态	垂直压力 P/kPa	变形量 $S/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa	湿陷系数 $\delta_s/\%$
饱和	0.00	0		
饱和	196.89	2.110	93.3	0.028
饱和	393.78	4.000	104.1	0.078
饱和	791.84	9.001	79.5	0.300
饱和	1177.04	13.564	84.4	0.480
饱和	1583.64	18.280	86.2	0.630

表 6 茅山组岩屑石英砂岩夹 10% 泥岩湿陷试验成果

试样状态	垂直压力 P/kPa	变形量 $S/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa	湿陷系数 $\delta_s/\%$
饱和	0.00	0		
饱和	194.75	2.041	95.4	0.049
饱和	393.78	3.897	107.2	0.150
饱和	791.84	9.623	74.1	0.520
饱和	1177.07	15.907	57.9	0.870
饱和	1596.53	22.732	61.4	1.140

根据试验结果 ,可以有以下认识 :

a. 在固定垂直压力下 ,从干样到饱和的“浸水附加变形”量值以及相应的湿陷系数值不大 . 以五通组砂岩夹 10% 泥岩为例 ,在 0.8 MPa 和 1.6 MPa 压力下单线法湿陷系数只有 0.26% 及 0.48% ,双线法湿陷系数只有 0.30% 和 0.62% . 目前堆石允许湿陷程度尚无规范的判别标准 ,文献 [5] 对湿陷性黄土是否具有湿陷性的判别标准为湿陷系数是否超过 1.5% ,如借用此标准 ,则本工程堆石料可以说是不具明显的湿陷性 .

b. 从压缩模量和湿陷系数来看 ,五通组砂岩夹 10% 泥岩或 15% 泥岩 ,其湿陷特性指标差别很小 . 这一现象提示在这两种组合中 ,堆石料的骨架基本上由砂岩组成 ,泥岩主要起填充作用 ,加上泥岩不具崩解性 ,故泥岩含量的少量增加基本不影响组合堆石料的湿陷性能 .

c. 茅山组砂岩夹泥岩的湿陷特性指标不如五通组砂岩夹泥岩的好 ,可能与茅山组砂岩的饱和抗压强度小于五通组砂岩有关 ,说明饱和抗压强度与堆石湿陷特性有密切关系 . 但本工程茅山组砂岩夹泥岩的湿陷系数值仍在可接受范围内 .

d. 尽管坝体堆石料中砂岩和泥岩的软化系数较小 ,但砂岩饱和后仍属硬岩 ,砂岩夹泥岩堆石料在各级垂直压力下的饱和压缩模量也不小 ,从而湿陷特性指标不算差 . 故评价堆石料浸水饱和后的表现 ,不能只看堆石料软化系数的大小 ,还要考察堆石料饱和后的抗压强度等力学性能指标 .

e. 综合评价 :本工程上水库主坝堆石料的湿陷特性指标处于一般堆石料常见值范围内 . 考虑到湿陷系数反映的是从风干料到饱和料全过程的湿陷变形 ,而实际上坝体施工填筑过程中要洒水 ,堆石料的初始状态不是风干料 ,建成后运行期间坝体堆石发生较大范围饱和的可能性也很小 ,预计坝体运行期实际湿陷变形将远小于用试验所得湿陷系数计算出的变形值 .

4 结 语

作为一座建在倾斜基础面上的高混凝土面板堆石坝 ,宜兴抽水蓄能电站上水库主坝(下转第 59 页)

即可结束注浆。

f. 锚墩施工.按设计要求进行钢筋网片、插筋、钢垫板安装,架立模板,垫座钢筋与插筋焊接牢固,孔口管轴线与钻孔轴线重合,钢垫板承压面与孔口管轴线垂直.经验收合格后,开仓浇筑混凝土。

g. 锚索张拉.浆体达到配比强度的 70% ~ 80%,即可进行张拉.张拉过程中,当达到每一级控制力后稳压 5 min 即可进行下一级张拉,同时量测伸长值.达最后一级张拉后,稳压 10 min 即可锁定。

3.3 其他措施

a. 削坡减载、覆盖层明挖.采用挖掘机进行清理开挖,土方开挖从上至下分层分段依次进行,施工中按设计边坡要求削坡并及时修挖排水沟和集水坑,确保集水及时排出.石方开挖在建基面以上留 20 cm 厚保护层,采用人工开挖,平整。

b. 地表排水、地表防渗.地表排水工程主要为沿滑坡边线外设置的周边排水沟和在滑坡体表面设置的纵、横向排水沟,拦截滑坡外围和坡面汇水.排水沟一般设置在表土层,采用人工开挖,岩石部位采用手风钻钻孔,火炮爆破开挖.排水沟砌筑材料由汽车运至滑坡施工区,人工搬运至现场.地表防渗混凝土喷护工艺为:清理松动块石→锚杆施工→钢筋网制作→喷护→混凝土养护.混凝土喷护由专门拌和及喷护设备进行,先喷 1 层(厚 5 cm),再逐层喷护至

(上接第 51 页)在设计时对用作坝体堆石料的库盆开挖料的特性既进行了常规试验,也进行了多项专门研究.其中专项研究除上述两个特殊问题外,还有泥岩的耐崩解性试验、堆石料现场碾压试验、模拟施工过程的堆石料新型现场大型直剪试验^[6],以及带探索性的堆石料流变特性的室内试验研究,等等.这些试验的成果表明,在采取了适当的结构和施工措施后,上库库盆开挖料的性能可以满足主坝坝体稳定和应力变形要求.主坝坝体堆石料可以不必另行开辟库外料场,从而可以节约大量工程投资。

由于选址等原因,抽水蓄能电站上水库(有时还有下水库)的堆石坝建在倾斜建基面上的情况并不罕见.本工程对坝体堆石料研究的成果,特别是其中揭示的某些带有规律性的认识,对今后同类工程的设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] 肖贡元,傅方明.江苏宜兴抽水蓄能电站上水库工程的设计创新[A].上海勘测设计研究院.工程实践回顾与总结——院庆 50 周年论文集[C].北京:中国水利水电出版社,2004.27—33.

设计厚度。

c. 地下排水.地下排水主要根据现场情况布设纵向和横向排水洞.排水洞一般断面较小,采用全断面一次开挖,周边光面爆破.开挖过程中,根据地质情况,及时进行支护。

4 结 语

水布垭水电站坐落于山区狭谷型河谷地区,地质条件非常复杂,坝区滑坡分布集中,而且受场地狭窄影响,工程布置和施工往往会对滑坡体产生不同程度的扰动,加剧了滑坡体的变形和破坏.从目前的情况看,针对这些滑坡体所采取的处理措施起到了相应的作用,提高了滑坡体的安全系数.但由于滑坡成因复杂,不同的工况下滑坡体的稳定也会发生变化,因此在工程治理完成后还必须加强监测,以便对滑坡体的长期稳定性做出正确评价。

参考文献:

- [1] 荣海北.三河闸下游北岸滑坡原因分析及处理[J].水利水电科技进展,2003,23(5):54—55.
[2] 李爱荣,张劲松,郭中华.丰都楠竹滑坡体稳定性分析及治理[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(增1):228—230.

(收稿日期:2005-03-22 编辑:骆超)

- [2] 陈明致,金来卿.堆石坝设计[M].北京:水利出版社,1982.491—493.
[3] 史立山.堆石料与基岩之间抗剪强度研究[J].土石坝工程,1995(4):21—25.
[4] SL237-1999 土工试验规程[S].
[5] GBJ25-90 湿陷性黄土地区建筑规范[S].
[6] 刘斯宏,肖贡元,杨建州,等.宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J].岩土工程学报,2004,26(6):772—776.

(收稿日期:2005-03-11 编辑:马敏峰)

