

利用软岩构筑面板堆石坝应重视的几个问题

王占军¹, 陈生水^{1,2}, 傅中志^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:针对利用软岩料构筑面板堆石坝存在的特殊性问题,根据已有工程的现场和室内试验结果,分析软岩料的级配及强度变形、渗透、流变等工程力学特性,并提出利用软岩料构筑面板堆石坝时应注意几个问题:应以软岩料的现场碾压和渗透试验结果作为设计依据,需高度重视大坝的变形和稳定控制,加强坝体排水设计,高度重视大坝长期强度变形特性对其安全性的影响,在浇筑混凝土面板前应留足坝体预沉降时间,并采取措施防止软岩料进一步风化和遇水崩解。

关键词:面板堆石坝;软岩料;级配;工程力学特性

中图分类号:TV641.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2014)04-0066-04

Some important aspects of construction of concrete-faced rock-fill dam with soft rocks//WANG Zhanjun¹, CHEN Shenshui^{1,2}, FU Zhongzhi^{1,2} (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Concrete-faced rock-fill dams (CFRDs) compared with hard rocks the CFRDs with soft rocks have the particularity because of its engineering mechanics properties. According to the field and laboratory experiments of several projects, the particle gradation and the engineering mechanics properties of strength and deformation, the permeability and the creep for soft rock materials were analyzed. Several problems of construction CFRDs with soft rocks were pointed out such as: the dam design should be based on field compaction and permeability experimentation of soft rock materials; special attention should be given to the dam deformation and stabilization control; the drainage of dam body should be reinforced; special attention needs paying to the effect of long-term strength and deformation on dam safety; the appropriate time of dam pre-settlement should be left before constructing concrete face slab; and required controls should also be conducted to prevent the further weathering and water-destruction of soft rocks.

Key words: CFRD; soft rock materials; particle gradation; engineering mechanics properties

地球表面的岩石有50%以上是软岩^[1],为保护生态环境,节省工程投资,越来越多的面板堆石坝将使用软岩料。软岩通常是指单轴饱和抗压强度小于30MPa的岩石^[2],代表性岩石有泥岩、页岩、泥质砂岩和千枚岩等。与硬岩相比,软岩具有风化强烈、含泥量高、抗压强度低和软化系数小等特点。利用软岩料构筑面板堆石坝,因其特殊的工程力学特性,坝体的应力变形、渗透规律、坝体分区和坝料填筑要求等均与硬岩面板堆石坝存在明显不同^[1,3]。天生桥一级面板坝产生面板裂缝的原因之一是下游软岩堆石体变形大,导致上游主堆石区向下游位移过大,而造成面板脱空^[4];大坝坝施工期和蓄水期最大沉降分别占坝高的1.01%和1.23%^[5],董管坝施工期最大沉降占坝高的1.19%^[6],沉降变形均偏大。其

中,大坝坝还曾因软岩填筑坝面积水严重^[7],被迫停工,若改换料场,不仅增加工程投资,工期也将延长一年。因此利用软岩料作面板坝堆石料,应高度重视软岩料工程力学特性研究和筑坝技术创新。

国外利用软岩料构筑面板堆石坝起步较早,如1967年美国建成的卡宾溪坝和1968年澳大利亚建成的袋鼠溪坝^[8]。我国利用软岩料构筑面板堆石坝起步较晚,但发展很快^[9-11]。迄今为止,软岩面板堆石坝的设计和施工仍以经验为主,建成的数量也不多^[12-13],国内外对利用软岩料构筑面板坝的相关理论和技术研究较少,尚不适应软岩面板堆石坝工程的快速发展。随着高面板堆石坝的建设和对生态环境更高的要求,软岩料的使用范围和利用量将加大,该类坝的安全也越来越受到重视。本文基于对

软岩料的级配、强度变形、渗透、流变等工程力学特性的总结分析,对利用软岩料构筑面板堆石坝应重视的几个问题提出了相应的建议。

1 国内外软岩面板堆石坝的发展

本文收集了国内外 17 座典型的软岩料构筑的面板堆石坝工程资料^[9-11,14],见表 1。从表 1 可看出,美国是最早(1967 年)利用软岩料构筑高面板坝的国家,澳大利亚是最早(1968 年)坝主体利用软岩料构筑面板坝的国家;我国是利用软岩料构筑面板堆石坝最多的国家;大部分坝将软岩料的使用范围限定在坝轴线下游干燥区,且坝高可以达到 200 m 级,但对于 200 m 级高面板堆石坝应慎重使用软岩料^[14];有 5 座面板坝坝主体使用软岩料,坝主体使用软岩料最大坝高为 150 m 的董箐面板坝,其采用软硬相间的砂泥岩(泥岩占 30%)筑坝,上、下游坝坡适当放缓,已良好运行了 3 a。

2 软岩料的级配特性

软岩料压实前后的级配相差很大,碾压后颗粒破碎明显,如水布垭两种级配的风化砂页岩料击实后细颗粒(粒径小于 5 mm)质量分数分别由 11.7% 和 2% 增加到 34.9% 和 23.1%^[15],贝雷坝软岩料最大粒径由开挖时的 813 mm 变为碾压后的 229 mm,细颗粒(粒径小于 5 mm)质量分数增加约 45%^[16]。大坳和鱼跳两座面板堆石坝软岩料的干湿循环试验结果表明,岩块崩解程度、细颗粒含量与干湿循环次数成正比^[15]。董箐坝的泥岩料在自然条件下干湿循环(露天阳光和雨水交替作用)后岩体也发生崩解,崩解后呈颗粒状,级配变化明显^[17]。由于现代

面板堆石坝的软岩料均先洒水后用重型碾压机机械压实,颗粒破碎细化现象相当明显,且软岩料的级配对其强度和变形特性具有重要影响,因此建议筑坝前对软岩料进行现场碾压试验,并以压实后软岩料的实测级配曲线以及该级配下软岩料的试验结果为准,由试验成果及相关工程经验取用合适的设计和计算指标。

3 软岩料的强度变形特性

软岩料的压实密度受含水率影响^[1,15,17],存在最优含水率和最大干密度。虽然软岩压实后具有较大的干密度,但软岩料的强度低于硬岩料,大坳、鱼跳和盘石头等坝的试验结果表明,软岩料的抗剪强度指标内摩擦角值较硬岩低 8°以上^[15]。因此,利用软岩筑坝时宜适当放缓坝坡。如董箐坝^[10]上游坝坡 1 : 1.4,下游坝坡设 3 层坝后公路,综合坝坡 1 : 1.5。此外,软岩的强度受环境变化影响明显,经日晒雨淋后,强度衰减很快,故开采后应尽快上坝碾压,尽可能做到边开挖边上坝及早封闭,以保持岩块新鲜,确保软岩料物理力学性质改变较小。

表 2 中列出了几座软岩面板堆石坝的压实参数和压缩模量^[1,10,15,17]。从表 2 可以看出,绝大多数软岩料具有低压缩性,少数软岩料表现为中等压缩性。室内压缩试验结果^[15,17]表明,软岩的压缩模量受含水量的影响明显,如盘石头坝风化页岩干料的压缩模量为 41.7 ~ 142.1 MPa,而饱和后压缩模量降低为 13.8 ~ 40.1 MPa,仅为干料的 1/3 左右,饱和状态软岩料的压缩性高于非饱和状态。表 3 列出了若干座软岩与硬岩面板堆石坝的实测沉降量^[5,9-10,18-20]。从表 3 中可以看出,软岩面板堆石坝的实测沉降率(沉降与坝高之比)都在 1% 以上,明

表 1 软岩面板堆石坝工程实例

坝 名	国 家	坝高/m	建成年份	上游坝坡	下游坝坡	岩 性	范 围
卡宾溪	美 国	76	1967			土、风化岩	
威内克	澳大利亚	85	1979			砂岩、页岩	
萨尔瓦琴娜	哥伦比亚	148	1985	1 : 1.5	1 : 1.3 ~ 1 : 1.4	半风化砂岩、粉砂岩	
红鼠溪	澳大利亚	80	1981	1 : 1.5	1 : 1.6	风化砂岩、粉砂岩	
株树桥	中 国	78	1990	1 : 1.4	1 : 1.7	风化板岩	坝轴线下游干燥区
十三陵(上池)	中 国	75	1994	1 : 1.5	1 : 1.75	风化安山岩	
天生桥	中 国	178	1999	1 : 1.4	1 : 1.25	砂泥岩、灰泥岩(软硬掺用)	
鱼 跳	中 国	106	2003	1 : 1.4	1 : 1.4	泥质粉砂岩、泥岩(软硬掺用)	
盘石头	中 国	102.2	2004	1 : 1.4	1 : 1.5	风化页岩	
寺 坪	中 国	91	2006	1 : 1.6	1 : 1.7	页 岩	
水布垭	中 国	233	2006	1 : 1.4	1 : 1.4	泥质灰岩	
袋鼠溪	澳大利亚	60	1968	1 : 1.3	1 : 1.4	页岩片岩	
希拉塔	印度尼西亚	125	1987	1 : 1.5	1 : 1.5	凝灰角砾岩、灿烁凝灰岩	
茄子山	中 国	106.1	1999	1 : 1.4	1 : 1.4 ~ 1 : 1.6	强风化花岗岩(软硬掺用)	坝主体
大 坳	中 国	90.2	2001	1 : 1.4	1 : 1.3 ~ 1 : 1.4	砂 岩	
董 箐	中 国	150	2010	1 : 1.4	1 : 1.5	砂泥岩(软硬掺用)	
贝 雷	美 国	95	1979	1 : 2.0	1 : 2.0	薄层砂岩、页岩	坝体中间部位

显高于硬岩面板堆石坝的沉降率,这显然是软岩料具有高压缩性的必然结果。因此,利用软岩料筑坝时应适当提高压实标准,如减小铺层厚度、提高碾压机吨位和碾压遍数等。如董箐坝的主堆石碾压层厚 80 cm,采用 25 t 振动碾碾压 10 遍,实测孔隙率达到 19.41%,对减少后期坝体流变、确保三期面板工期起了很好的作用,坝体已良好运行了 3 a;盘石头面板坝页岩次堆石料铺层厚度 60 cm,18 t 拖式振动碾压实,实测孔隙率为 18.2%。

表 2 软岩料压实参数和压缩模量

坝 名	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙率/%	饱和状态压缩 模量/MPa
萨尔瓦琴娜	2.26	17	54
鱼 跳	2.28	14	6.5~54.8
盘石头	2.06	24	13.8~40.1
大 坳	2.16	19.40	21~62
十三陵(上池)	2.08		18.6~52.1
董 箐	2.16~2.32	17.38~17.60	43.6
天生桥	2.20~2.26		25.2~51.3

表 3 软岩和硬岩面板堆石坝实测最大沉降比较

坝 名	坝高/ m	沉降量/cm		沉降率/%		岩 性
		施工期	蓄水期	施工期	蓄水期	
大 坳	90.2	91.7	111.1	1.01	1.23	砂岩(软岩)
董 箐	150	178		1.19		砂泥岩(软岩)
盘石头	102.2	105		1.03		风化页岩(软岩)
十三陵 (上池)	75	86.9		1.16		风化安山岩 (软岩)
白 溪	124.4	77.8	88.6	0.63	0.71	砂砾石(硬岩)
滩 坑	162	86.8		0.54		火山集块岩、 砂砾石(硬岩)

4 软岩料的渗透特性

软岩料碾压过程中颗粒破碎明显,压实后渗透系数较小^[1,15]。如鱼跳坝软岩料压实后渗透系数为 10⁻⁵cm/s 量级,袋鼠溪坝软岩料压实后渗透系数更小,为 10⁻⁷cm/s 量级,属相对不透水。此外,分层碾压的软岩料渗透系数呈现明显的各向异性,垂直渗透系数远小于水平渗透系数^[15](表 4),这是因为各碾压层上部软岩料的颗粒破碎严重,细粒含量增加较为明显,细粒充填粗颗粒间的孔隙,形成板结层。大坳、鱼跳和茄子山 3 个大坝现场碾压施工时都曾出现坝面积水现象^[9]。从表 4 还可看出,软岩料现场试验测得的渗透系数小于室内试验值,特别是垂直方向渗透系数,两者差异更为显著,达到两个数量级。因此,对于软岩料的渗透系数值,建议由现场碾压试验确定,并以此作为设计依据。

需要指出的是,软岩料压实后具有较小的渗透系数,特别是其明显的各向异性对大坝运行期的安

表 4 软岩料室内与现场渗透试验结果

坝名	岩性	干密度/ (g·cm ⁻³)	水平渗透系数/ (10 ⁻² cm·s ⁻¹)		垂直渗透系数/ (10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	
			室内试验	现场试验	室内试验	现场试验
鱼跳	泥岩	2.00	6.00	3.19~3.68	25.90	3.29~6.52
		2.11	2.11	1.26~1.30	1.49	4.90~7.41
大坳	砂岩	2.04	7.36		6.76	
		2.10	2.07		4.39	

全将产生不利的影响。因此,对于软岩面板堆石坝必须高度重视坝体内部排水设计,建议在坝体内设置“L”型排水(坝体底部铺设透水性较好的堆石料与过渡层相联接),以保证大坝一旦漏水后能迅速降低坝体内浸润面,确保大坝安全。

5 软岩料的流变特性

软岩料易受干湿循环、温度循环等环境因素的影响,流变特性十分明显。大坳坝在蓄水期(2000 年 4 月至 2001 年 3 月)水库水位下降约 16 m 情况下,坝体沉降仍增大约 5 cm,水平位移增大约 10 cm^[5]。持续增加的坝体流变变形易造成面板顶部脱空,应力状态恶化,使周边缝剪切位移和沉陷增加,影响大坝的长期安全性。天生桥坝面板脱空及产生大量裂缝的一个很重要原因就是坝料的流变^[4]。因此,利用软岩构筑面板坝有两点需特别注意:①应控制好预沉降时间,董箐坝竣工期沉降率达到 1.19%,但每一期面板施工前都预留了数月的预沉降时间,大坝运行后面板未出现拉压破损;②应防止软岩料进一步风化崩解,如只在下游水位以上部位使用软岩,或对下游水位以下使用的软岩及时封闭以保持其相对新鲜状态,下游坝坡设置一定厚度的硬岩保护层并加强坝坡排水等。

6 结 论

- a. 软岩料压实后易破碎,遇水崩解,级配变化明显。因此,利用软岩料筑坝前,应进行现场碾压试验,并以压实后软岩料的实测级配曲线以及该级配下软岩料的试验结果作为设计和计算分析依据。
- b. 软岩料经碾压后压实度可以满足筑坝要求,但与硬岩料相比,其抗剪强度低,压缩模量小,坝体变形大,需高度重视大坝的变形和稳定控制。对于软岩面板堆石坝,建议尽可能提高碾压标准并适当放缓坝坡。
- c. 软岩料压实后颗粒破碎明显,渗透系数较小,特别是铺层上部颗粒破碎更为明显,易形成板结层,垂直渗透系数远小于水平渗透系数,不利于大坝运行期安全。建议加强坝体排水设计,避免大坝发生渗透破坏。

d. 软岩料具有明显的流变性,导致坝体竣工后持续产生后期变形,对坝体和防渗系统长期应力变形特性将产生不利的影响。利用软岩料构筑面板堆石坝,建议在浇筑混凝土面板前,应留足坝体预沉降时间,并采取措施防止软岩料进一步风化和遇水崩解。

参考文献:

[1] XING Haofeng, GONG Xiaonan, ZHOU Xiaoguang, et al. Construction of concrete-faced rockfill dams with weak rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 778-785.

[2] GB50287—1999 水利水电工程地质勘察规范[S].

[3] 付军, 周小文. 面板坝软岩料的工程特性[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 67-72. (FU Jun, ZHOU Xiaowen. Engineering properties of soft rock materials used in concrete face dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4): 67-72. (in Chinese))

[4] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143-1150. (LI Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143-1150. (in Chinese))

[5] 王东生, 王芳. 大壩面板堆石坝坝体沉陷及水平位移观测资料分析[J]. 贵州水力发电, 2008, 22(1): 76-79. (WANG Dongsheng, WANG Fang. Analysis on observation data of body settlement and horizontal displacement of Da'ao face rockfill dam [J]. Guizhou Water Power, 2008, 22(1): 76-79. (in Chinese))

[6] 郇能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 165-173. (LI Nenghui. Performance of high concrete face rockfill dams in China and its inspiration [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 165-173. (in Chinese))

[7] 侯文理. 面板堆石坝利用软岩填筑的几点认识[J]. 湖北水力发电, 2003(2): 1-2. (HOU Wenli. Views on using soft rock to build CFRD [J]. Hubei Water Power, 2003(2): 1-2. (in Chinese))

[8] 国际大坝委员会. 混凝土面板堆石坝设计与施工概念[M]. 王兴会, 胡苏萍, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[9] 蒋涛, 付军, 周小文. 软岩筑面板堆石坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[10] 湛正刚, 慕洪友, 蔡大咏, 等. 董箐水电站面板堆石坝设计[J]. 贵州水力发电, 2009, 23(5): 17-21. (ZHAN Zhenggang, MU Hongyou, CAI Dayong, et al. Design of face rockfill dam for Dongqing hydropower station [J]. Guizhou Water Power, 2009, 23(5): 17-21. (in Chinese))

[11] 敖大华, 曾正宾. 砂泥岩筑坝材料在董箐水电站的试验研究[C]//贵州省岩石力学与工程学会. 贵州省岩石

力学与工程学会 2010 年度学术交流论文集. 贵阳: 贵州省岩石力学与工程学会, 2010: 307-311.

[12] 邢皓枫, 龚晓南, 傅海峰, 等. 混凝土面板堆石坝软岩坝料填筑技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 234-238. (XING Haofeng, GONG Xiaonan, FU Haifeng, et al. Study on the technique of soft-rock placement for CFRD [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 234-238. (in Chinese))

[13] 马兆荣, 李维文, 陆晓琴. 软岩筑面板堆石坝的工程实践与探讨[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 35-37. (MA Zhaorong, LI Weiwen, LU Xiaoqin. Practice and discussion of concrete face rockfill dam built with soft rock [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 35-37. (in Chinese))

[14] 朱晟. 水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3689-3695. (ZHU Sheng. Back analysis on construction and operation properties of Shuibuya concrete face rockfill dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup2): 3689-3695. (in Chinese))

[15] 柏树田, 周晓光, 晁华怡. 软岩堆石料的物理力学性质[J]. 水力发电学报, 2002(4): 34-44. (BAI Shutian, ZHOU Xiaoguang, CHAO Huayi. Physico-mechanical properties of soft rock materials [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(4): 34-44. (in Chinese))

[16] BEENE R R W, PRITCHETT, E C. The R. D. Bailey Dam, a concrete-faced earth rockfill [C]//COOKE J B, SHERARED J L. Proceedings of concrete face rockfill dams-design, construction and performance. New York: ASCE, 1985: 163-172.

[17] 吴哲, 杨世源. 软岩作混凝土面板堆石坝筑坝材料的试验研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 新世纪岩石力学与工程的开拓和发展: 中国岩石力学与工程学会第六次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 186-189.

[18] 傅世平. 白溪混凝土面板堆石坝坝体变形观测分析[J]. 中国农村水利水电, 2007(8): 72-47. (FU Shiping. Analysis on observation data of dam deformation of Baixi concrete-faced rockfill dam [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(8): 72-47. (in Chinese))

[19] 冯毅军. 滩坑水电站面板堆石坝施工期沉降分析[J]. 西北水电, 2011(4): 95-98. (FENG Yijun. Analysis of CFRD settlement of Tankeng hydropower project during construction [J]. Northwest Water Power, 2011(4): 95-98. (in Chinese))

[20] 张亦昭, 赵家旺. 十三陵抽水蓄能电站上池面板堆石坝体的沉降变形[J]. 水利水电技术, 1997, 28(10): 27-31. (ZHANG Yizhao, ZHAO Jiawang. On settlement and deformation of concrete face rockfill dam in upper pool of Shisanling pumped storage power station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28(10): 27-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-05-27 编辑: 周红梅)