

文章编号: 1672-3031 (2005) 01-0050-05

盘石头水库混凝土面板堆石坝次堆石区坝料设计

孔青

(河南省水利勘测设计院, 河南 郑州 450008)

摘要: 本文根据大型室内坝料试验、计算和监测成果, 分析了盘石头混凝土面板堆石坝在下游次堆石区利用工程开挖的软弱页岩堆石料和含泥灰岩堆石料的可行性。研究表明, 该页岩坝料虽然力学性质软弱, 但仍适于坝体下游干燥区筑坝之用; 含泥量在 10% 以下的灰岩坝料无论是强度、变形和渗透性, 均和不含泥的灰岩堆石料接近, 硬岩堆石料含泥量标准适当放宽是合理的。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 页岩堆石料; 含泥灰岩堆石料

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

在坝体分区和坝料设计中, 充分利用当地筑坝材料和工程开挖料是土石坝包括混凝土面板堆石坝设计的基本原则之一。对劣质堆石料特别是软岩料的利用, 也是混凝土面板堆石坝设计中普遍重视的问题^[1-3]。在国内外混凝土面板堆石坝建设中, 萨尔瓦兴娜 (Salvajina)、红树溪 (Mangrove Creek)、袋鼠溪 (Kangaroo Creek) 等以及国内的十三陵坝、株树桥、大坳、鱼跳等工程都使用了粉砂岩、泥岩、片岩、板岩和风华安山岩等软岩坝料^[3,4], 为软岩坝料的利用积累了经验, 但还未见在百米级高混凝土面板堆石坝建设中大量使用软弱泥质页岩的报道。灰岩坝料是良好的硬岩堆石料, 混凝土面板堆石坝设计规范^[5,6]要求主堆石区硬岩堆石料的含泥量 (小于 0.075mm 颗粒含量) 不宜超过 5%, 次堆石区水位以上要求可放宽, 但在含泥量对灰岩堆石料物理力学性质影响方面没有可借鉴的资料。

本文根据设计研究和监测成果^[7-10], 对盘石头混凝土面板堆石坝中软弱页岩和含泥灰岩堆石料的利用作简要的介绍。

1 工程概况

盘石头水库位于鹤壁市西南约 15km 的淇河上, 水库总库容为 6.08 亿 m^3 , 是以防洪、工业及城市生活供水为主, 兼顾农田灌溉、发电、养殖等综合利用的大型水利枢纽工程。

盘石头混凝土面板堆石坝坝顶高程 275.7m, 最大坝高 102.2m, 上游坝坡 1: 1.4, 下游综合坝坡约 1: 1.5。坝体用灰岩和部分工程开挖软弱页岩料填筑。坝体总填筑工程量 548 万 m^3 。

坝体剖面分区从上游向下游依次为面板上游黏性土铺盖及其盖重区、垫层区、过渡层区、主堆石区 (上游灰岩堆石区)、页岩堆石区、下游灰岩堆石区。

次堆石区包括页岩堆石区和下游灰岩堆石区。页岩堆石区的布置主要考虑了工程开挖页岩料物料平衡、坝坡稳定及施工期坝面过流等因素。在施工过程中, 根据溢洪道和花尖脑补充灰岩料场含泥量大于 5% 的灰岩料较多的实际情况, 为充分利用这部分含泥灰岩料, 减少弃料和堆存, 结合坝体过流方案的调整, 将含泥灰岩料用于页岩次堆石区和下游灰岩堆石区。另外, 为减少页岩堆石区变形对上游坝体和面板的影响, 页岩堆石区和上游灰岩主堆石区分界面坡度由 1: 0.1 放缓至 1: 0.25, 下游灰岩堆石区分界面坡度亦相应由 1: 1.2 放缓至 1: 1.35。

收稿日期: 2004-10-08

作者简介: 孔青 (1957-), 男, 河南光山人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工结构和岩土工程的设计研究。

2 次堆石区坝料设计

盘石头水库坝址区广泛分布有寒武系中统灰岩、豹皮灰岩和鲕状灰岩，其单轴饱和抗压强度为 87.12~103.1MPa，软化系数 0.92~0.94，为优质硬岩材料。垫层及小区料均采用新鲜或微风化灰岩料，由工地砂石料加工系统生产；过渡料采用微风化~新鲜灰岩爆破级配料；上、下游灰岩堆石料均采用弱风化~新鲜灰岩爆破级配料。上述灰岩坝料首先利用溢洪道等工程开挖料，不足部分由灰岩料场开采。其中垫层料及小区料、过滤料和灰岩主堆石料均按常规设计。

大量利用工程开挖的页岩堆石料和含泥灰岩料是盘石头混凝土面板堆石坝设计的主要特点之一。盘石头水库在高混凝土面板堆石坝中首先使用了软弱页岩堆石料，并对含泥灰岩堆石料的含泥量影响进行了研究。

2.1 次堆石区页岩堆石料 页岩堆石料为泄洪洞和溢洪道等工程的下寒武统弱风化~新鲜页岩、页岩夹灰岩开挖石渣。页岩岩块单轴饱和抗压强度为 17.8~35.6MPa，软化系数 0.73~0.85，该页岩页理发育，易沿层面开裂，在干湿交替 2~10 次条件下，弱风化页岩的饱和抗压强度为 6.9~12.0MPa。当岩块试样的主压应力方向与层面呈 45° 和 60° 角度时，弱风化~微风化试样抗压强度分别为 2.5~7.0MPa 和 1.5~5.0MPa。上述试验结果^[11]说明了该页岩的软弱特性。

为了解软弱页岩堆石料的工程特性并验证利用该页岩料的设计分区的合理性，以坝址区工程开挖数量最大也最有代表性的下寒武统第 14 层（厚 42m）和第 17 层页岩（厚 20m）为研究对象，进行了比较详细的页岩坝料室内物理力学性质试验^[8]，并进行了三维应力变形有限元计算^[9]。试样材料主要取自弱风化带上部页岩，为了解页岩堆存后性质的变化，还安排了少量干湿循环交替后的页岩坝料的试验。

根据大型室内压缩试验结果，在 0~3.2MPa 垂直压力范围内，第 17 层页岩干料的压缩模量为 41.7~142.1MPa，遇水（饱和试样）软化后岩块强度明显降低，压缩模量仅为 13.8~42.2MPa。第 14 层页岩饱和试样的压缩模量仅为 13.8~51.3MPa。相同条件下，饱和灰岩堆石料的压缩模量为 56.9~337.0MPa，两者变形特性相差较大。

页岩坝料三轴剪切强度试验结果见表 1。三轴剪切试验表明，页岩和灰岩堆石强度相比差别虽比较明显，但非线性强度指标不低。

坝体三维应力变形有限元分析参数见表 2。

表 1 页岩坝料强度指标试验成果

材料名称	制样干密度		非线性抗剪强度		线性抗剪强度	
	$\gamma_d / (\text{kN/m}^3)$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta \varphi / (^\circ)$	$\Phi / (^\circ)$	C / MPa	
第 14 层弱风化页岩料	19.6	41.0	9.9	29.0	0.08	
第 14 层弱风化页岩料	20.4	43.4	11.2	29.5	0.10	
第 14 层弱风化页岩 (干湿循环 5 次)	19.6	42.6	11.1	28.8	0.10	
第 17 层弱风化页岩料	19.4	44.0	11.4	29.8	0.11	
第 17 层弱风化页岩料	20.2	43.9	10.0	31.0	0.11	
第 17 层弱风化页岩 (干湿循环 5 次)	19.4	40.7	8.5	30.5	0.07	

虽然页岩料的力学性质较差，但置于坝体下游次堆石区，经坝体应力变形有限元分析和坝坡稳定计算，按设计坝体分区，其强度和变形性质均能满足要求。

大坝典型断面施工期和蓄水期的垂直位移及大主应力分布见图 1。

由图 1 可见，坝体应力变形有限元分析结果表明，采用第 17 层和第 14 层页岩料参数计算时，虽然施工期页岩区变形较大，坝体最大垂直位移分别为 1.0m 和 1.4m，但蓄水后变形增量很小，坝体最大垂直位移分别为 1.02m 和 1.41m。周边缝的位移绝对值也不大，均在 1~2cm 量级；面板的法向位移为 31.4~33.9cm，其中约 10cm 在蓄水期产生。坝体大主应力在页岩和灰岩堆石区之间有“突变”

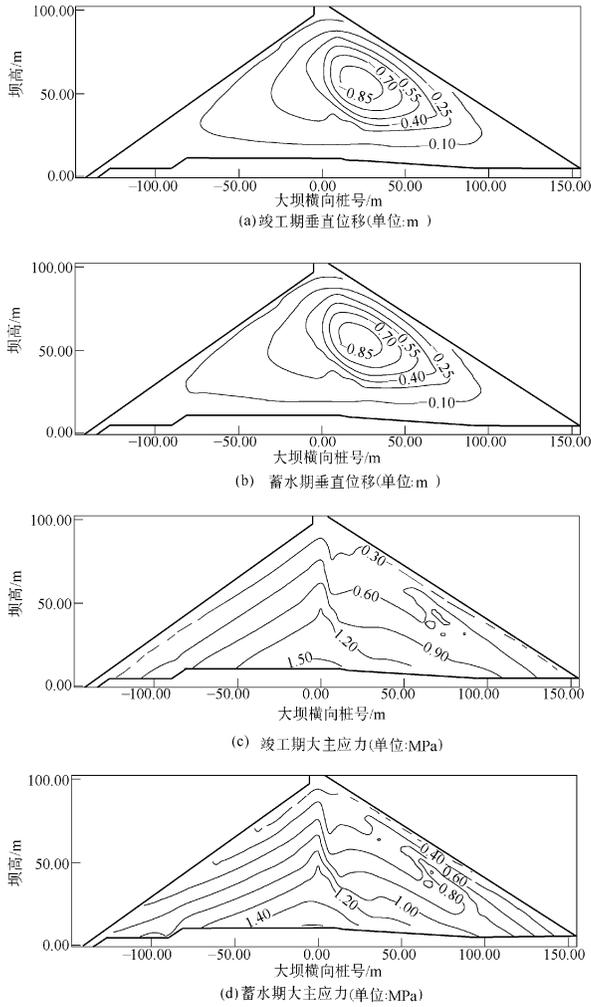


图1 典型剖面坝体应力变形有限元分析

现象，但由于强度较高，坝体内应力水平数值并不大，亦无明显的剪切破坏区。通过提高页岩堆石料的压实质量、调整页岩区上游界面坡度、待坝体充分沉降变形后再浇筑坝体上三分之一面板等措施，可以有效地减少软弱页岩区变形的不利影响。

表2 坝体三维应力变形有限元分析采用参数

材料名称	干密度		邓肯 E-B 模型参数					非线性抗剪强度参数	
	$\gamma_d / (\text{kN/m}^3)$	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
混凝土	23.5	20×10^4							
垫层料	21.5	1050	2100	0.44	0.871	465	0.13	52.8	11.7
过滤层	21.5	755	1510	0.46	0.901	406	0.00	52.9	10.2
灰岩堆石料	21.0	1050	2100	0.27	0.886	590	0.25	54.2	12.4
第17层页岩料	20.2	255	510	0.37	0.739	97	0.19	43.9	10.0
第14层页岩料	19.6	182	364	0.28	0.701	36	0.37	42.6	11.1

因页岩软弱堆石料在碾压过程中较易破碎，细料明显增多，实际上对其级配无法做严格控制，但含泥量较高，加水碾压后弹簧陷车的页岩料不允许使用。

页岩堆石料的渗透系数较低，但其实际填筑高程约在 206.0m 高程以上，远高于下游最高尾水位 189.60m，完全置于干燥区内，所以软弱页岩堆石的渗透系数只需满足施工碾压过程中自由排水要求即可。

2.2 次堆石区含泥灰岩堆石料 下游水位以下的灰岩堆石和主堆石区要求相同，为最大粒径 600mm、小于 5mm 含量小于 15%、小于 0.075mm 含量小于 5% 的连续级配料。其碾压参数亦和主堆石区相同，铺筑层厚为 80cm，18t 振动碾碾压 8 遍，加水 20%。下游堆石区水位以上的灰岩堆石料则使用了较高含泥量的灰岩料。

由于规范对下游次堆石区水位以上堆石料的含泥量没有明确的要求,这方面的研究成果也非常少,为论证使用含泥灰岩料的可行性,盘石头工程根据灰岩料场因溶蚀裂隙夹泥导致部分灰岩坝料含泥量较高的情况,专门进行了不同含泥量的灰岩堆石料室内对比试验^[10],试验结果见表3,其中压缩模量为垂直压力0、0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2MPa各级压力下的范围值。

表3 不同含泥量灰岩堆石料强度指标试验成果

灰岩料 含泥量 (%)	制样干密度 $\gamma_d / (\text{kN/m}^3)$	非线性抗剪强度		线性抗剪强度		压缩模量 E / MPa	渗透系数 $k / (\text{cm/s})$
		$\Phi / (^\circ)$	$\Delta\Phi / (^\circ)$	$\Phi / (^\circ)$	C / MPa		
0	21.0	54.2	12.4	37.9	0.19	57.8~265.8	4.0×10^{-1}
8		50.1	10.5	36.9	0.13	44.3~120.8	4.09×10^{-1}
10		49.9	11.0	36.2	0.13	33.2~132.9	6.34×10^{-2}
0	2.15	55.8	13.4	38.4	0.21	64.9~432.7	3.83×10^{-1}
8		50.2	9.8	37.4	0.14	43.0~216.3	5.53×10^{-2}
10		49.9	10.0	37.2	0.13	26.0~162.3	1.96×10^{-2}

由表3可知,含泥量在10%以下的含泥灰岩坝料无论是强度、变形还是透水性均与不含泥的灰岩料接近。

含泥灰岩堆石料室内制样干密度为21.0和21.5kN/m³,相应孔隙率为23.4%和21.5%;现场灰岩堆石的压实干密度平均值为22.2kN/m³,相应孔隙率为19%。上述试验含泥量均小于灰岩孔隙率,夹泥仅充填孔隙,不承担骨架间的有效应力,其影响仅限于局部降低堆石颗粒间的摩擦咬合力,这是几组含泥灰岩堆石料力学性质差别不大的根本原因。含泥量远小于堆石孔隙率时,少量含泥对堆石的渗透性能也不会有大的影响。所以,试验结果和理论分析均表明,堆石料含泥量标准适当放宽是合理的。

根据料物平衡和工地料源情况,盘石头大坝在次堆石区仅在192~206m高程间就使用了40余万立方米含泥量5%~8%的灰岩料,减少了弃料和堆存。按上述补充含泥灰岩坝料试验结果,考虑到含泥量8%~10%的灰岩堆石料强度和正常级配灰岩料相差有限,根据开采料源情况,将页岩区灰岩含泥量标准放宽到了10%,下游坡灰岩堆石区在干燥区含泥量标准放宽到了8%。

对页岩堆石区底部高程由202.0m降低至192.0m,增加利用10.0m厚含泥灰岩堆石料的情况,也进行了补充有限元应力变形计算。计算结果表明,由于该坝料和常规灰岩料的压缩模量很接近,增加该区域含泥灰岩料的使用仅使坝体垂直位移增加2.13cm,对坝体变形的影响极小。

3 次堆石坝料使用效果评价

软岩料的低压缩性和高抗剪强度是通过提高压实干密度获得的。为了获得较大的干密度,页岩堆石铺筑厚度比灰岩堆石薄,为60cm,设计干密度要求大于22.0kg/m³,相应孔隙率小于20.0%。现场检测页岩堆石料压实干密度平均22.5kN/cm³,相应孔隙率18.2%,压实度指标满足设计要求,且大于室内试验制样干密度。

至2004年10月,盘石头大坝已填筑到防浪墙底高程,根据现场监测结果坝体中部最大垂直位移为1.05m,和计算结果吻合;根据234.0m高程以下已浇筑的两期面板脱空观测,面板和堆石体之间的最大相对位移量仅为0.7~1.0cm。上述坝体沉降及面板堆石体之间的相对位移均已趋于稳定。监测结果说明,虽然使用了软弱页岩堆石料,但坝体和面板状况良好,坝体分区设计和坝料设计是合理的。

4 结论

盘石头水库在高混凝土面板堆石坝中首先使用了工程开挖的软弱页岩堆石料,将其用于大坝下游次堆石区水位以上的干燥区,经试验研究和分析计算,其力学性质满足坝体强度和变形要求,为混

土面板堆石坝软岩坝料的利用积累了经验。

经过对不同含泥量灰岩堆石料的室内试验研究, 含泥量在 10% 以下的含泥灰岩坝料无论是强度、变形还是渗透性均与含泥量小于 5% 的常规灰岩料接近。试验结果和理论分析均表明, 硬岩堆石料(包括主堆石区)含泥量标准适当放宽是合理的。在大坝下游次堆石区水位以上的干燥区大量使用页岩堆石料和含泥灰岩堆石料, 节省了数千万元的工程投资, 经济效益十分显著。

参 考 文 献:

- [1] Cooke J B. Progress in Rockfill Dams [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110, (10).
- [2] Sherard J L, Cooke J B. The concrete face rockfill dam: II Design [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113 (10).
- [3] 蒋国澄, 傅志安, 风家骥. 混凝土面板堆石坝工程 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [4] 柏树田, 周晓光, 等. 软岩堆石料的物理力学性质 [J]. 水利发电学报, 2002, (4): 34- 43.
- [5] SL228-1998. 混凝土面板堆石坝设计规范 [S].
- [6] DL/T5016-1999. 混凝土面板堆石坝设计规范 [S].
- [7] 孔青, 王芳, 等. 盘石头水库初步设计报告 [R]. 郑州: 河南省水利勘测设计院, 1999.
- [8] 晁华怡, 周晓光, 崔亦昊, 等. 盘石头面板堆石坝坝基砂卵石及坝料试验研究报告 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001.
- [9] 徐泽平, 邵宇, 孔青, 等. 河南淇河盘石头水库面板堆石坝应力变形分析 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002.
- [10] 晁华怡, 周晓光, 崔亦昊, 等. 盘石头面板堆石坝坝料试验报告 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002.
- [11] 余志冲, 孔海龙, 许海望, 等. 盘石头水库初步设计阶段工程地质勘察报告 [R]. 郑州: 河南省水利勘测总队, 1999.

Selection of materials for 3C zone of the Panshitou concrete faced rockfill dam

KONG Qing

(Henan Provincial Institute of Water Resources and Hydropower Investigation Design, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Based on a large scale tri-axial test, numerical analysis and field monitoring, the feasibility of using excavated soft shale and limestone with clay to construct 3C zone of the Panshitou concrete faced rockfill dam (CFRD) was studied. The research result showed that shale rockfill material could be used in the dry area of 3C zone, although the material property was weak. The strength and deformation properties of limestone rockfill with clay content less than 10% were almost the same as that of ordinary limestone rockfill without clay content. It is reasonable to properly lower the standard of clay content of limestone for rockfill.

Key words: concrete faced rockfill dam (CFRD); shale rockfill; limestone rockfill with clay

(责任编辑: 王冰伟)