

文章编号:1001-5485(2009)10-0118-04

高面板堆石坝渗流控制关键技术问题探讨

谢定松, 刘杰, 魏迎奇

(中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要:国内外面板坝的建设发展迅速,但要兴建300 m级左右的高面板堆石坝,有些技术问题尚需研究。根据国内3座坝和巴西的坎波斯诺沃斯及其他几座坝的运行性状,从渗流控制的角度提出了高面板堆石坝当前需要研究的面板与垫层的脱开问题、垫层料的优化设计问题以及砂砾石面板坝的排水设计问题,并提出了相应的研究途径。

关键词:高面板堆石坝;面板脱空;垫层设计;坝体排水

中图分类号:TV641 **文献标识码:**A

1 概述

截止2005年底,我国已建和在建的混凝土面板堆石坝已超过150座,其中坝高超过100 m的有37座,超过150 m有14座。我国混凝土面板堆石坝无论在数量、坝高、规模或难度等方面均居世界前列。这些混凝土面板堆石坝遍布全国,覆盖了各种不利的气候、地形、地质条件,由此积累了应对各种困难情况下兴建混凝土面板堆石坝的经验和教训,使该类建坝技术有了一定的发展。

随着我国西部水电开发进程的加快,需要在交通运输不便、经济不发达地区,如金沙江、澜沧江、怒江、雅砻江、大渡河和黄河上游等河段,修建高度在300 m左右的高坝(如古水、马吉等水电站),但目前因尚未掌握300 m级高面板堆石坝的工程特性、关键技术和运行特点,致使有些工程不能选用比较经济的面板堆石坝方案,因此工程建设各方迫切希望在300 m级高面板堆石坝的修筑技术上有所突破。

分析现有的筑坝技术,目前高面板堆石坝需要研究的关键技术问题,仍然是稳定、变形及渗流控制3大问题。从面板坝多年的运行情况分析,变形和渗流控制甚为重要。研究变形的目的,除选择低压缩性材料,合理的压实功能外,更重要的是研究不同的坝体结构在变形相互协调方面的能力,包括上游防渗面板、垫层及坝体的其他部分在施工及运行过程中相互良好的依存性。渗流控制方面,除直接研究面板接缝和周边缝止水外,垫层料的设计和施工

也是很重要的课题。分析运行过程中失事及出现渗流破坏的几座面板坝存在的问题,可以看出,当前高面板坝在渗流控制方面需要研究的问题主要有3个方面:①大坝在施工和运行过程中坝体、面板及垫层三者的变形协调,即如何防止上游面板与垫层的脱开问题;②上游垫层材料及结构的设计原则问题;③砂砾石面板坝的排水设计问题。本文对研究上述3个问题的必要性作一粗浅探讨。

2 面板与垫层脱开问题

2.1 面板与垫层之间的脱开问题

面板堆石坝的面板与垫层之间出现脱开现象,在实际工程中时有发生。如1990年建成的高70 m的青海沟后面板堆石坝在溃坝后实际勘察结果表明,溃坝的主要原因之一是面板顶部与坝体相脱离,脱离深度约8~10 m,顶部最大脱空高度达10 cm^[1]。

1999年建成的高178 m的天生桥一级面板堆石坝,一、二、三期面板均出现了垫层与面板脱空问题,脱空面板数分别占各期面板数的85%、85%和52%,最大脱空高度15 cm,可探深度10 m。大坝建成3年后于2002年6月再次用物探方法对高程760 m以上面板脱空问题进行探测,结果表明,在34块面板中有64个脱空区,脱空面积占勘探面积的30%,脱空高度1~5 cm^[2]。

高78 m的株树桥混凝土面板坝于1990年竣工投入运行不久,出现严重漏水。1992年7月渗流量

收稿日期:2009-07-28

基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639060);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC14B04)

作者简介:谢定松(1977-),男,福建永定人,工程师,主要从事岩土工程渗流控制及安全评价方面研究,(电话)010-68786270(电子信箱)xieds@iwahr.com。

仅为 30 ~ 40 L/s, 到 1999 年 7 月渗漏量高达 2 500 L/s。放空水库进行检查, 发现有些面板塌陷、断裂。开挖后进一步观察, 发现面板已破坏处与垫层之间都存在脱空问题, 且位于河谷右侧的 L8 面板, 距坝顶 61 m 高度处面板与垫层脱离最为严重^[3,4]。

2.2 面板与垫层脱开的危害性

目前掌握的资料表明, 面板脱开后将会出现两大危害: 一是导致溃坝, 二是面板断裂。溃坝的工程实例有青海沟后砂砾石面板坝, 面板断裂的实例则有株树桥、天生桥一级及巴西的坎波斯诺沃斯 (Campos Novos) 3 座堆石面板坝。

70 m 高的沟后砂砾石面板坝, 面板顶部与垫层料向下脱开长度达 8 ~ 10 m, 造成面板顶部与防浪墙底板接缝橡皮止水拉开从而止水失效。水库首次高水位运行时, 当库水位超过防浪墙底板后, 库水由防浪墙与底板的接缝拉开处畅通地进入面板脱开的缝隙中, 使面板失效, 垫层上游面直接与水库水位相连通。模型试验结果表明, 如果只有顶部接缝漏水, 漏水量有限, 漏水进入坝体后在重力作用下将垂直向下直接进入河床砂砾石层, 不会从坝顶的下游坝坡逸出。由于面板的脱空, 防渗性能失效, 大坝的渗流不仅仅来自接缝漏水, 上游进水面积变为整个脱开部分的面积, 进水面积扩大, 使渗流通过坝顶多层强透水的施工分离层, 近水平向直达下游坝坡, 坝顶出现管涌, 渗流冲刷坝坡, 坝坡失稳, 防浪墙倒塌, 库水漫顶而溃决^[1]。

株树桥面板坝放空水库后检查结果表明, 面板断裂塌陷之处都存在面板与垫层的脱空问题。有些学者认为过渡料未按反滤原则来设计, 是一种未加控制的任意料, 导致垫层料的渗透破坏造成了面板破裂。图 1 是从桩号 0 + 105 附近的面板 L8 及 L9, 高程 110 m 及 108 m, 距河床岩面 8 ~ 10 m 高度处垫层中取得的 4 个样品的颗粒级配曲线, 曲线中 < 5 mm 的颗粒含量与施工时垫层料的质检结果相一致。施工记录表明, 垫层料中 < 5 mm 的颗粒含量占 10% ~ 37.3%, 平均 25%, < 0.1 mm 的颗粒含量占 0.7% ~ 10.4%, 平均 3.75%。就渗透系数而言, 距坝顶 21 m 以下渗透系数为 $3.2 \times 10^{-2} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ cm/s, 21 m 以上渗透系数为 $2.9 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2}$ cm/s。分析渗透系数及垫层中 < 5 mm 的颗粒含量的变化范围, 二者是相一致的, 表明施工中有一些垫层料 < 5 mm 的颗粒含量只有 10% ~ 15%。图中曲线 4 中 < 5 mm 的颗粒含量只有 10.3%, 远小于曲线 1。因此判断 L8、L9 面板的断裂塌陷是由于面板与垫层相脱空而造成的。

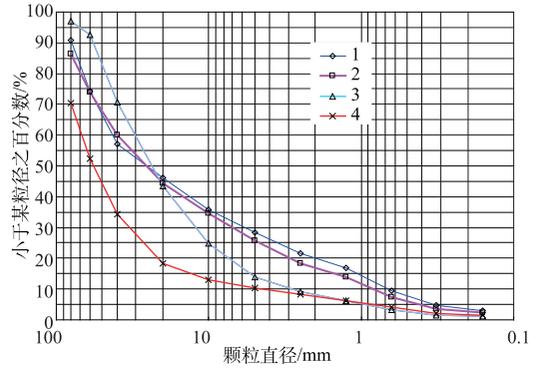


图 1 株树桥水库垫层料级配曲线

Fig. 1 Granular material composition of bedding layer in Zhushuqiao Reservoir

巴西高 202 m 的坎波斯诺沃斯面板坝建成后于 2005 年 10 月开始蓄水, 水库很快升至 653 m 高程, 低于正常高水位 7 m。当库水位升至 642 m 高程时, 沿位于河床中部的 16, 17 号面板的纵缝位置 (垂直向) 发生了挤压破坏, 挤压破坏的位置直达面板顶部, 其上缘止于 660 m 高程 (防浪墙底), 下缘延伸至水下, 达 535 m 高程, 破坏高度 125 m。此外在 656 m 高程还观测到了水平向的面板裂缝。面板破碎后大坝渗流量高达 1 400 L/s。分析大坝的施工质量, 水库蓄水后坝顶的最大沉降量为 40 cm, 只占坝高的 0.2%, 表明坝体的填筑质量较好^[5]。根据青海沟后面板坝溃坝模型试验结果, 笔者认为, 巴西坎波斯诺沃斯面板坝 16, 17 号面板挤压破碎后出现较大的渗流量, 与面板和垫层的脱离有直接关系。

2.3 垫层料颗粒级配对防渗效果的影响

设计和施工者的首要任务是对坝的结构分区、填筑质量及运行方式等方面进一步优化, 确保面板与垫层不脱开; 但根据现在掌握的资料, 要绝对保证高面板坝面板不脱开恐怕具有一定难度。因此, 合理的设计思路, 应是多种途径的, 即应同时研究面板和垫层一旦脱开后同样可以保证大坝的防渗系统不遭破坏的措施。现在看来, 垫层料的设计与施工质量也是关系整个防渗体系安全运行极其重要的因素。

高 178 m 的天生桥面板坝, 1999 年 3 月完成大坝填筑。2000 年 7 月水库水位达高程 779.96 m, 接近正常蓄水位 780 m。观测结果大坝最大渗流量仅 165 L/s, 并在逐年减小, 2002 年减小为 70 ~ 80 L/s。尽管面板有脱开, 接缝有挤压破碎, 横向裂缝达 4 537 条, 裂缝开度 ≥ 0.3 mm 约 80 条, 最大深度达 41.7 cm, 大坝仍有良好的防渗效果。分析原因, 主要是大坝的垫层料较细, 与面板共同组成了防渗体。图 2 是天生桥垫层料的颗粒级配曲线, 材料为石灰岩碎石料, 曲线 1 是垫层料的平均级配曲线^[6]。从

图中可知,天生桥垫层料 <5 mm 粒径的颗粒含量平均曲线中占 45%,上包线占 55%,下包线 35%。室内试验结果:上包线的渗透系数 $k = 7.6 \times 10^{-4}$ cm/s,下包线的渗透系数 $k = 4.83 \times 10^{-3}$ cm/s,表明平均曲线的渗透系数 $k = n \times 10^{-3}$ cm/s^[7]。

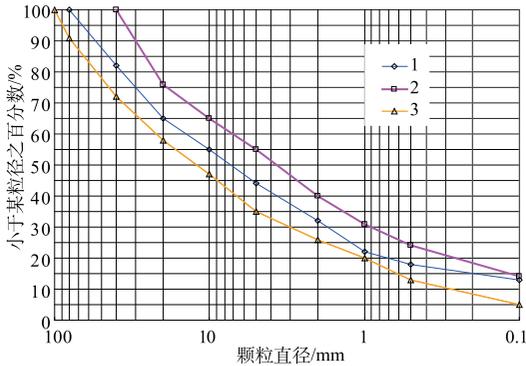


图2 天生桥面板坝垫层料颗粒组成曲线

Fig.2 Granular material composition of bedding layer in Tianshengqiao CFRD

进一步分析图 1 株树桥面板的垫层料颗粒组成曲线, <5 mm 的颗粒含量变化于 10% ~ 37% 之间,平均值只有 25%,渗透系数变化于 2.9×10^{-1} ~ 3.5×10^{-3} cm/s 之间,表明垫层料过粗,不能起到第二道防滤防线的的作用。图 3 是巴西坎波斯诺沃斯坝垫层料的颗粒组成曲线, <5 mm 的颗粒组成变化于 10% ~ 37% 之间, D_{20} 的粒径变化于 0.75 ~ 10 mm 之间,显然渗透系数较大,面板一旦脱开且出现破裂,垫层料同样不可能起到第二道防滤防线的的作用,因而两座大坝均出现较大的渗漏水。

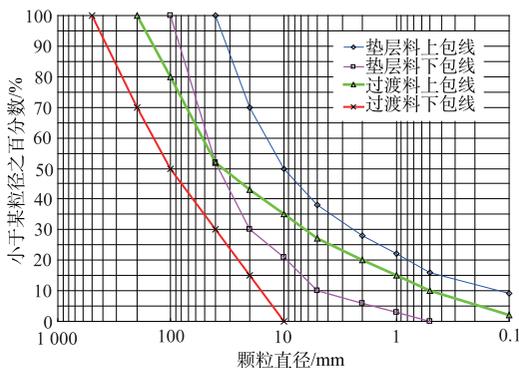


图3 坎波斯诺沃斯坝垫层和过渡层颗粒级配曲线

Fig.3 Granular material composition of bedding layer and transition layer in Campos Novos CFRD

上述 3 个工程实例表明,垫层料的设计同样是高面板坝的关键技术之一。

3 垫层料设计原则

早期的面板坝设置垫层料的目的纯粹是为了应

力的过渡,因而颗粒组成主要变化于 25 ~ 300 mm 之间,颗粒很粗。20 世纪 60 年代施工的大坝垫层料的组成虽然较前变细,但 <5 mm 的颗粒含量仍然小于 30%,如哥伦比亚的安奇卡亚坝, <5 mm 颗粒含量只有 5% ~ 20%,高 125 m 的格里拉斯坝, <5 mm 颗粒含量为 15% ~ 35%,渗透系数较大,周边缝止水失效后,渗漏水骤增。如安奇卡亚坝的最大渗漏水达 1 800 L/s,格里拉斯 1 080 L/s。80 年代 Sherard 总结了世界面板坝建坝经验,建议垫层料应选用低渗透性的砂砾石料,渗透系数应 $\leq 1 \times 10^{-4}$ cm/s,面板接缝一旦漏水,可起到第二道防滤防线的的作用。根据这一理念, Sherard 认为 <5 mm 的粒径若变化于 35% ~ 55% 之间,就可保证垫层料具有 1×10^{-4} cm/s 的渗透系数,并相应地给出了垫层料颗粒组成允许的变化范围,如图 4 所示。

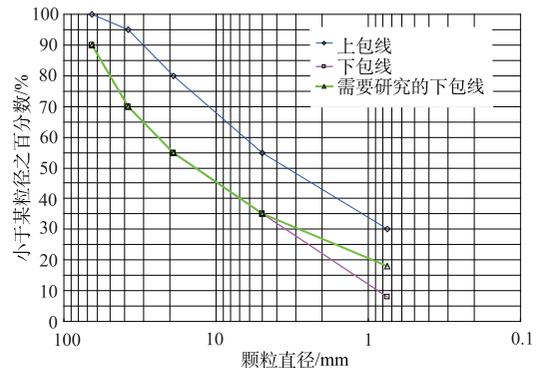


图4 谢拉德建议垫层料的设计级配曲线

Fig.4 Granular material composition of bedding layer provided by Sherard

Sherard 的建议对面板坝防渗结构的优化是一次重大突破,进一步完善了面板坝的防渗结构,提高了大坝的安全度,是面板坝设计理念的一大飞跃,有利于面板坝向更高的高度发展,得到国内外大多数工程师的认可,并得到一些工程实践的验证。

工程实践表明, Sherard 的建议在渗流控制理念上是正确的,但在具体落实中仍存在一些值得商榷的问题,如垫层料的渗透系数应取何值,才能既起到第二道防滤防线的的作用,又能保证所选材料具有高的抗剪强度和低的压缩性。渗透系数愈小,表明防渗性能愈好,但存在的问题是所选材料中 <0.1 mm 的颗粒含量过多,相应地也带来新的问题,如抗剪强度降低,压缩模量减小,这些都不利于面板的稳定性。另外根据已有室内外试验资料,就 Sherard 的颗粒组成曲线,渗透系数本身就无法达到 1×10^{-4} cm/s 的要求,特别是外包线 <0.075 mm 的颗粒含量只有 8%,颗粒级配曲线偏粗,这种材料在最紧密状态下也只能达到 10^{-2} cm/s 的数量级。

天生桥经验表明,垫层料的渗透系数若能满足 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的要求,垫层料就可以起到第二道防线的作用。为此,建议今后对垫层料最优渗透系数的要求及相应的颗粒级配曲线作进一步的研究,还应正确研究垫层料的反滤层设计准则,为进一步选择过渡料的颗粒级配提供理论依据。

4 砂砾石面板堆石坝排水设计问题

砂砾石料遍布于江河大地,是一种很好的筑坝材料。在高坝中应用现存在两大问题:一是渗透破坏问题;二是施工中易粗细分离的问题。

砂砾石料的最大特点是不均匀系数 C_u 很大, C_u 至少在 50 以上,因而在施工中容易产生粗细分离问题,导致坝体出现强透水夹层。沟后大坝溃坝后现场调查结果表明,坝顶铺土层厚达 100 cm 以上,坝料出现了明显的分层现象, < 5 mm 粒径含量小于 30% 时分离最为严重, 100 cm 的铺土厚度将分为 30 cm 的粗层和 70 cm 的细层,导致上部坝顶坝体中的水平向的渗透系数与垂直向渗透系数比高达 100 以上^[1]。在大规模的机械化施工中,分离问题是难免的,加之坝料本身往往是粗细不均,在坝体中极易出现强透水的夹层。粗细分离后出现的另一危害是有些土料中 < 2 mm 的颗粒含量减少,非管涌土变为管涌土,坝体一旦出现渗流,容易产生渗透破坏。

解决砂砾石料上述弱点行之有效的方法是在坝内设垂直排水,尽早将渗流排到坝体以外,确保下游坝体处于无渗流状态,在这方面成功的工程实例有哥伦比亚的格里拉斯面板坝^[9]。

格里拉斯坝建成于 1978 年,坝高 125m。坝料料场有 2 个区,一个料区 < 5 mm 的颗粒含量较多,高达 30%, < 0.075 mm 颗粒含量平均 12%, 不均匀系数达 190,颗粒较细;另一个料区颗粒组成较粗, < 5 mm 的颗粒含量很少,平均只有 10% 左右。为了解决坝料的压缩及强度问题,并保证雨季能够很好施工,大坝坝体采用了分层填筑的方法,即一层粗料和一层细料混合填筑,保证了坝料有小的压缩性和较高的强度。但这种施工方法会使坝体出现水平向的强透水区,面板一旦漏水,不仅坝体浸润线很高,而且会出现水平向的集中渗流通道,无法保证大坝的安全运行,为此,在垫层后又设置了一层 < 5 mm 颗粒含量为 10% ~ 30%, < 0.1 mm 的颗粒含量小于 5% 的过渡层,然后设置了一道粒径为 5 ~ 300 mm 的砾卵石排水体。

格里拉斯大坝 1982 年第一次蓄水, 1983 年库

水位接近最高水位,大坝漏渗量高达 1 080 L/s。放空水库后检查,证实主要的渗漏源是周边墙与坝头岩石的接触面。尽管渗流量高达 1 080 L/s,但砂砾石坝壳未出现渗流稳定问题,水平排水带中的水位,略高于排水体的上表面,下游坝壳一直是干燥的。这一工程实例表明,尽管坝壳填料分层严重,甚至有强透水区,砂砾石的渗透稳定性差,但因在垫层后专门设置了排水体,使渗流由排水体全部引向了下游,保证坝壳中不会出现渗流,因而保证了大坝的渗透稳定性。工程实例表明,只要垫层后设置了排水体,任何砂砾石都可以用作面板坝的坝体材料。

当前排水体的设计需要研究 2 个问题:一是排水体的合理位置及顶高度;二是排水体反滤层的设计。关于排水体的位置,一种意见认为若在垫层后设有过渡层,过渡层本身具有足够的透水性,可以不设专门的排水体,以墨西哥高度 185.5 m 的阿瓜密尔坝为典型;另一类意见是将排水体夹在砂砾石坝体内,距垫层料较远,以哥伦比亚的萨尔为兴娜坝为典型。青海省的黑泉坝,排水体紧靠过渡层之后,但在过渡层与排水体之间又专门设置了反滤层^[9]。总之排水体设置形式多样,今后应从坝体应力、变形、渗流控制几个方面综合研究最优位置问题。

关于排水体的结构形式,主要研究强透水体外是否还需设置反滤层,何种情况下应设置反滤层等问题。

5 结 语

(1) 高面板坝的突出问题之一是面板与垫层的脱开问题,处理不好将会影响大坝安全运行,解决的途径除从大坝的应力、变形、施工程序等方面进行研究外,还应加强渗流控制措施方面的研究。

(2) 应进行面板坝无面板情况下的渗流分析,确定垫层料的合理渗透系数,初步估计垫层料采用渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的弱透水材料,不仅材料容易选择,而且可使面板坝具有第二道防渗防线的作用,高坝的安全度将有进一步保证。这一准则在实践中通常控制 < 5 mm 的颗粒含量为 35% ~ 55% 来实现。室内外试验表明,仅仅控制 < 5 mm 颗粒的含量还不能完全保证垫层料具有小于 $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 的渗透系数,还应研究第二个控制粒径,确保垫层料具有弱透水的性质。

(3) 应研究垫层料渗流方向成水平向时反滤层设计准则,为选择过渡层提供理论依据。

(下转第 125 页)