

中国混凝土 面板堆石坝 30 年

—— 引进 · 发展 · 创新 · 超越

水电水利规划设计总院

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

水利水电土石坝工程信息网

国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心

编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

综 合

我国混凝土面板堆石坝 30 年进展回顾

赵增凯

(水利部水利水电规划设计总院)

【摘 要】 我国自 1985 年起,采用现代技术修建混凝土面板堆石坝,已历经 30 个年头,从引进、吸收到自主研发推广,现已建成高度 30m 以上的面板坝约 230 座,在数量、规模、技术难度方面均位于世界前列。本文对 30 年来的工程实践和建设发展作一简要回顾,以表赞祝。

【关键词】 面板坝 筑坝材料 接缝止水 坝体变形 成就

我国自 1985 年起,采用现代技术修建混凝土面板堆石坝(简称面板坝)已历经 30 年。从试点关门山(58m)和西北口(95m)面板坝起步,到修建天生桥 1 级(178m)、洪家渡(179.5m)、三板溪(185.5m)等一系列高坝和当今世界最高的水布垭(233m)面板坝,至今已建成 30m 以上的面板坝约 230 座,基本上遍及全国各省区;面板坝数量、规模、技术方面位于世界前列;在发电、防洪、供水等方面发挥了显著的效益;出成果,出人才;取得了显著的成就。并继续深化研究茨哈峡、古水等 250~300m 级超高坝有关特性,做好充分准备向前发展。建坝初期的工程中,发生过沟后(71m)溃坝(已重建)、株树桥(78m)大量漏水(已处理,运行正常);天生桥一级高坝(178m)发生过垫层裂缝、面板脱空和部分面板挤压破损,已加固处理,运行正常。有关部门对发生的问题进行了分析总结、多方面改进,效果较好。

30 年面板坝筑坝技术成果非常丰富,我仅列出工程实践中几项改进和创新内容为例,以示回顾和赞扬之情:

(1) 筑坝材料广泛应用。硬岩、软岩、砂砾石、硬岩软岩混合料,深入试验,合理安排。

(2) 坝体分区改善。坝体上堵下排分区,控制好垫层和过渡层渗流稳定。

(3) 面板、趾板防裂。做好混凝土配合比,优选掺合料与外加剂。

(4) 接缝止水材料与构造不断优化创新,近期有个别坝在止水防渗安全条件下,取消死水位以上垂直缝和坝顶缝的三复合橡胶板,首用增设由聚脲复合胎基布组成的手刮涂层,与混凝土粘接成一体,并取消了传统采用压板的膨胀螺丝,正在蓄水运行中检验效果,进行总结。

(5) 高坝坝基深覆盖层采用混凝土防渗墙防渗,将趾板抬高建基在覆盖层顶部。

(6) 1、2 级高坝采用有线元法进行应力和变形分析,重要工程有效应用离心模型试验了解坝体渗流稳定和变形性状等。



(7) 大坝防震抗震机理深化试验研究, 强震区大坝抗震措施效果良好并总结分析与改进。

(8) 筑坝工程中, 大型采、运设备、重型振动碾及冲碾压实机的应用 (并可用附加质量法快速检测坝体密实度对比试坑灌水法, 以利总结改进), 并采用 GPS 施工监控法等, 提高了筑坝质量和效率。

(9) 基于面板坝的坝料分区特点, 坝体承受反向渗水 (压) 的能力十分有限, 对于趾板建基面高程低于坝体基础高程或下游水位高出趾板建基面高程, 事先就做好坝体施工期反渗排水措施, 必要时对已浇面板进行压重支护, 免遭反渗水压推动或开裂。

(10) 我国施工期坝体或采用临时断面挡水安全度汛, 以及坝面与导流隧洞联合过流, 已有丰富的实践经验和多项高坝实例借鉴。对于发展中的西部高坝枢纽工程区, 自然条件更为复杂, 正在更深入做好前期试验研究勘测设计等工作。

(11) 高坝混凝土面板浇筑时机。目前国内共识的掌握标准是: 已填筑的坝体经过了 3~6 个月预沉降固结期; 垫层附近设置的沉降仪月沉降率已降至 5mm; 已填筑的坝体顶部上游边临时观测标点月沉降率也相当时, 综合判定面板浇筑时机。

(12) 关于水库放空 (水) 设施。经过多年的运行实践总结, 认为“应结合泄洪、排沙、供水、后期导流、应急和检修的需要, 研究设置用于降低库水位的放空设施的必要性”, 并已编入面板坝设计规范。

我国面板坝 30 年建设发展进程中, 受到国家的重视和学会的支持, 面板堆石坝专业委员会大力策划目标与进程、安排专题攻关、推进实践创新发展、组织工程总结等, 科研、勘测、设计、施工、监理、运行各方协力奋进, 克难攻坚, 努力创新, 取得了举世瞩目的业绩, 我就此致敬与祝贺; 并祝愿前程广阔, 取得更多新的成就。

混凝土面板堆石坝设计经验法

曹克明 徐建军 曹希卓

(中国电建华东勘测设计研究院有限公司)

【摘要】 本文所提出的经验公式,采用限制面板蓄水引起的稳定挠度及其要求的堆石压缩模量,限制面板压应力,以达到防止垂直缝面板发生挤压破坏的目的。我们还利用这些公式,探讨了使用石灰岩坝料建造 300m 高面板坝的可能性。

【关键词】 经验公式 稳定挠度经验公式及临界挠度公式 抗挤压破坏的安全度

自 1985 年引进现代混凝土面板堆石坝筑坝技术以来,我国面板堆石坝筑坝建设发展得很快,当前我国的面板堆石坝在数量、规模和科学技术上均居世界前列。但是,一些 200m 级面板堆石坝发生了河谷部位垂直缝面板挤压破坏。为探讨此问题,我们已进行过讨论。本文中将对此问题进行深入讨论,并对一些基本资料做进一步的说明与补充,进而探讨建造 300m 高面板坝的可能性。

混凝土面板堆石坝是以混凝土面板作为防渗体的。混凝土是一种非线性弹性脆性材料,其割线弹性模量随压应变值而定。混凝土瞬时荷载下的极限压应变值为 1000×10^{-6} (1000 微应变),长期持久荷载作用下的极限压应变值为 3000×10^{-6} 。因此,混凝土面板如何适应堆石体的变形一直是面板堆石坝设计中的重大课题。实践证明,抛填堆石坝在坝高大于 70m 以后,面板就不能适应堆石体变形,产生面板压损破坏,导致大量漏水。“抛填式混凝土面板堆石坝的坝高不能大于 70m”的极限坝高论就此形成,其在更大坝高的推广使用也就遭到停顿,被土石坝取代,直到碾压式堆石面板坝的出现。碾压式堆石混凝土面板堆石坝,因其造价低、施工工期快、坝宽短,很快成为土石坝中首先考虑的坝型,其坝高很快到达了 160m。工程界称抛填式堆石面板坝为老式面板堆石坝,碾压式堆石面板坝为现代面板坝。现代面板坝的杰出代表首先是塞沙纳坝,坝高为 110m,1970 年建成。其次是阿里埃坝,坝高 160m,1980 年建成。这两座坝为现代面板坝的样板坝。其结构的基本特点是:采用连续面板;面板宽度 12~16m;压性缝采用硬平缝;面板顶部厚度采用 0.3m,底部厚度限制以水力梯度不超过 200;配单层双向温度钢筋,配置在面板中心部位,含钢率 0.3%~0.5%;允许裂缝出现,但设法将裂缝宽度控制在 0.3mm 以下,也就是所谓的限裂设计。现代面板坝的另一个特点是增加了内部观测设备,面板内布置有双向(水平向与坡向)或三向(再增加 45°方向)应变计组与无应力应变计,可以根据这些观测值计算出面板应力值。塞沙纳坝是由澳大利亚塔斯马尼亚水电局(HEC)设计的,该局十分重视面板应力观测。根据塞沙纳面板压应变观测值,他们认为如果建造的面板坝比塞沙纳坝更高而堆石压缩模量更低,将导致面板挤压破坏。此外,HEC 还认为,面板过



大的压应变还会引起周边缝产生不可接受的过大开度。HEC 还特别重视面板应变值的观测,塞沙纳采用了 2m 长应变计(通常长度为 25cm)以消除钢筋与裂缝造成的局部应力的影响。塞沙纳面板最大压应变值出现在蓄水许多年以后,其水平向坡向均为 400×10^{-6} 。巴西阿里埃面板坝最大压应变值也发生在蓄水许多年以后,其水平向及坡向压应变值为 665×10^{-6} 。令我们感到可惜是,阿里埃坝与塞沙纳坝成为了成功面板坝中有压应变观测值发表的仅有的两座坝。阿里埃坝取得成功以后,按阿里埃模式又建成许多更高的坝,有的成功,有的失败,失败的主要原因都是垂直缝面板挤压破坏。

巴西专家说:“巴西面板坝,其设计决策都不以数学模型计算成果为依据。实际上,这种技术没有被认为是必需的。总体尺寸,堆石分区,面板厚度与配筋,以及接缝设计都是根据与现有经验进行比较而作出决策的,数学仿真只是用来验证施工期和蓄水期条件下的堆石变形。数学模型的结果虽然是客观的,但是模型通常需要根据事后实际测量位移进行多次调整后才能合理地模拟大坝实际变形。对于接缝微小的位移,不论进行何种精度级别的计算都有困难”。文献提供了很多宝贵的供决策的经验资料。

面板在施工期应力变化比较复杂,此期间产生面板应力的贡献因素比较多,除堆石变形以外,还有周边缝对面板位移限制产生的作用力。堆石的谷向位移对面板产生的摩擦力所引起的面板应力,是代表堆石变形的贡献。但这类贡献在施工期不是主要的,因为面板自重产生的对垫层料的压力是很小的。主要贡献因素是周边缝对面板的作用力。水库蓄水后周边缝将全部张开,此时的面板变成为浮在堆石上的“薄膜”,巨大的水压力使垫层料与面板之间产生了很大的摩擦力,并且是作用在面板上的唯一作用力。塞格里多坝为了监测面板弯曲应力,将应变计布置在钢筋上方及下方埋设了 8 对应变计组。观测数据表明上方与下方的应变值的差值可以忽略,说明面板工作犹如薄膜。只有靠近岸壁的一条面板的两对应变计观测到水平拉应变值与水平压应变值。这是因岸壁部位堆石厚度增加过快所引起的。在河谷中心部位的面板的高程 563m 处(坝顶高程 630m)埋设的一对应变计组观测到坡向上方的压应变为 60×10^{-6} ,下方的压应变值为 45×10^{-6} ,但其水平向压应变值基本相等。面板的弯曲变形受控于堆石体的变形,河谷部位堆石厚度最大,并且基本相等,堆石体又有很高的抗剪强度,河谷部位堆石体表面的弯曲变形将是很小的,因此面板上下边都受压,面板垂直缝处的面板水平方向压应力也应该如此,这就是采用硬平缝的基本根据。垂直缝面板的挤压破坏主要原因是止水设置减小了接缝部位的面板厚度引起应力集中,设置挤压钢筋也是为了缓和这个矛盾。水库开始蓄水以后的面板挠度与面板压应变都是由堆石变形产生的,因此面板挠度与面板水平压应变也存在内在的联系,可以通过控制面板挠度防止垂直缝面板挤压破坏的发生。下面对有关问题进行讨论。

1 面板蓄水引起的挠度

施工期堆石压缩模量是由埋设在堆石体内的水管式沉降仪的沉降量计算得来的,作用在沉降仪的压力来自沉降仪上覆堆石体的自重,压缩值为沉降仪实测沉降量,沉降仪以下堆石的压应变值为沉降仪的沉降量除以沉降仪以下堆石厚度,设基岩无沉降量。其计算公式见公式(1):

$$E_{\pi} = \frac{0.01\gamma H}{\delta/d} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

式中： γ 为堆石密度， t/m^3 ； H 为沉降仪上覆堆石厚度， m ； d 为沉降仪下卧堆石厚度， m 。如在不同高程埋设沉降仪，可以进行分层压缩模量计算。施工期堆石模量要求在水库蓄水前计算，代表蓄水前堆石压缩模量。

面板蓄水引起的挠度一直是工程界的研究对象，但是过去研究的都是首次蓄水期间的挠度，而不是长期蓄水的稳定挠度，而研究面板挤压破坏需要的长期蓄水的稳定挠度。首次蓄水期间面板挠度有两种计算方法，HEC 是采用 E_{rf} 法， E_{π} 法是目前普遍采用的。

1.1 首次蓄水期间面板挠度计算 E_{rf} 法

此法是实测挠度反算法，公式如下：

$$E_{rf} = \frac{0.01\gamma H}{\delta_1/d} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

式中： H 为作用于面板最大挠度处的压力水头， m ； γ 为水的密度， t/m^3 ； δ_1 为首次蓄水期间实测面板挠度， m ； d 为面板挠度处法线到地基距离， m 。

E_{rf} 值一般约为 E_{π} 值的 2 倍。塞沙纳坝 $E_{\pi} = 145\text{MPa}$ ， $E_{rf} = 310\text{MPa}$ ，其倍数为 2.14。利斯坝各为 85MPa ， 170MPa ，其倍数为 2。

1.2 首次蓄水期间面板挠度计算 E_{π} 法

此法是 W. H. Schumann 在 1987 年提出经验公式，见公式 (3)。既然 E_{rf} 约为 E_{π} 的两倍，为什么不直接采用 E_{π} 法呢？于是 E_{π} 法的出现就不足为奇了，即所谓水到渠成。此公式计算出来的挠度与实际观测值能很好符合。

水库首次蓄水期间由水压力产生的公式见方程式 (1)。

$$\Delta_1 = \frac{H^2}{E_{\pi}} \text{ (mm)} \quad (3)$$

式中： H 为坝高， m ； E_{π} 为蓄水前的主堆石压缩模量， MPa 。

1.3 长期蓄水面板挠度计算的 E_{π} 法

此法为研究面板挤压破坏，是由我们 2008 年 8 月提出的，公式如本文公式 (4a)。本文此次补充了 (4b)。公式 (4a) 计算的挠度与实测挠度的比较见表 1。此法计算的挠度值与阿里埃、水布垭的实测值相同，但与塞沙纳实测值不同。这是由于阿里埃与水布垭首次蓄水前已完成堆石自重作用下的徐变（含拱效应），而塞沙纳坝尚未完成。由长期蓄水实测挠度公式 (4a) 反算的塞沙纳的 $E_{\pi} = 92\text{MPa}$ 。因此，我们认为如果塞沙纳基于宽河谷，其蓄水前的堆石压缩模量应该为 92MPa 。

长期蓄水产生面板挠度，面板长期蓄水由水压力引起的挠度公式如下：

$$\Delta_n = \frac{1.44H^2}{E_{\pi}} \text{ (mm)} \quad (4a)$$

$$E_{\pi} = \frac{1.44H^2}{\Delta_n} \text{ (MPa)} \quad (4b)$$

式中： H 为坝高， m 。



表 1

混凝土面板堆石坝面板挤压破坏可能性评价

序号	坝名	国家	坝高 /m	建成年	A/H^2	实测 E_{π} /MPa	计算稳定 挠度 Δ_n /mm	实测面板 压应变 $\epsilon/10^{-6}$	计算临界 挠度 Δ_{cr} /mm	挤压破坏 安全系数 $n=\Delta_{cr}/\Delta_n$
1	阿里埃	巴西	160	1980	5.4	47.5 (47.5)	780 (780)	665	1008	1.29
2	塞沙纳	澳大利亚	110	1970	2.0	145 (92)	120 (190)	400	427	2.25 (2.25)
3	利斯	澳大利亚	122	1985	2.4	85 (82)	250 (265)		597	2.25
4	天生桥一级	中国	178	1999	5.5	45	1014	900	1014	1.00
5	阿瓜密尔帕	墨西哥	187	1993	3.9	260	194		892	4.60
6	辛戈	巴西	151	1994	5.9	32	1026		1033	1.01
7	塞格雷多	巴西	145	1993	4.4	62.5	484		941	1.94
8	肯柏诺沃	巴西	202	2006	2.6	65	904		660	0.73
9	巴拉格兰德	巴西	185	2006	3.2	55	896			0.88
10	默霍尔	莱索托	145	2006	3.8	40	757		880	1.16
11	洪家渡	中国	179.5	2005	2.24	148				
12	紫坪铺	中国	156	2006	5.2	180	194		997	5.14
13	三板溪	中国	186	2007	2.7	145	344		687	2.00
14	水布垭	中国	233	2008	2.6	120 (120)	660 (660)		660	1.00
15	滩坑	中国	162	2008	2.6	135	280		660	2.36
16	董箐	中国	150	2009	4.4	55	590		941	1.50
17	穆奇松	澳大利亚	94	1982	1.92	150	(85)		382	(2.55)

注 1. 括号中为实测挠度。洪家渡 E_{π} 值为蓄水前观测值。

2. 洪家渡为河谷系数小于 2.4 的河谷，其 E_{π} 值需由长期蓄水引起的挠度反算。

面板坝如有实测挠度值，可由公式 (4b) 反算 E_{π} 值，这是最好的方法。面板坝如无实测稳定挠度值的，建议：河谷系数大于 2.6 的工程，其挠度计算可以采用蓄水前的 E_{π} ；河谷系数小于为 2.6 时，不能采用蓄水前 E_{π} 值计算挠度，其 E_{π} 值只能由公式 (4b) 反算。因此，实质上都由实测稳定挠度值反算 E_{π} 。河谷系数大于 2.6 的可称宽河谷，小于 2.6 的称窄河谷。这是河谷系数过小时，堆石体在蓄水前堆石在自重压力作用下未完成徐变的缘故。

我们采用了穆奇松 (94m 高) 蓄水 16 年后由蓄水引起面板挠度值 85mm，由公式 (4b) 反算的 E_{π} 值为 150MPa，也有报道的 225MPa。225MPa 值是 HEC 根据公式 (2) 反算法计算出来的。

2 面板挠度与面板水平压应变的关系

我们也假定面板在长期水压力下由水压力产生的最大压应变值 $\xi_{\max}$ (坡向或水平向)

与其相应的 Δ_n 值成正比。这样就可以将临界挠度 Δ_{cr} 与产生垂直缝面板破坏时的面板水平最大压应变关系建立起来。我们采用塞沙纳（河谷系数=2）、水布垭（2.6）、天生桥（5.5）的临界挠度建立起临界挠度与河谷系数的二次曲线见图 1。相对于临界挠度的临界压应变值采用 900×10^{-6} ，这是天生桥发生垂直缝挤压前一个月的实测由水压力产生最大压应变值。实际测定值为 948×10^{-6} ，我们采用值为 900×10^{-6} 。天生桥垂直缝面板挤压破坏发生在蓄水 4 年以后，那时面板挠度相当于 Δ_n 值，天生桥根据实测 E_n 计算的 Δ_n 值为 1014mm。这样天生桥在图 1 曲线上坐标为（5.5，1014）。塞沙纳的临界挠度值是采用 ξ_{max} 与 Δ_n 值成正比的假定，由实测压应变值 $400 \mu\epsilon$ 、实测 Δ_n 值=190mm，计算得到 Δ_n 值=427mm，这样其坐标为（2，427）。水布垭垂直缝面板挤压破坏的最大压应变我们假定也为 900×10^{-6} 值，因此可以直接将实测最大挠度值 Δ_n =660mm，视同 Δ_{cr} 。其坐标为（2.6，660）。根据这三点坐标可以建立下列公式（5），由公式（4b）可进一步建立公式（6）。

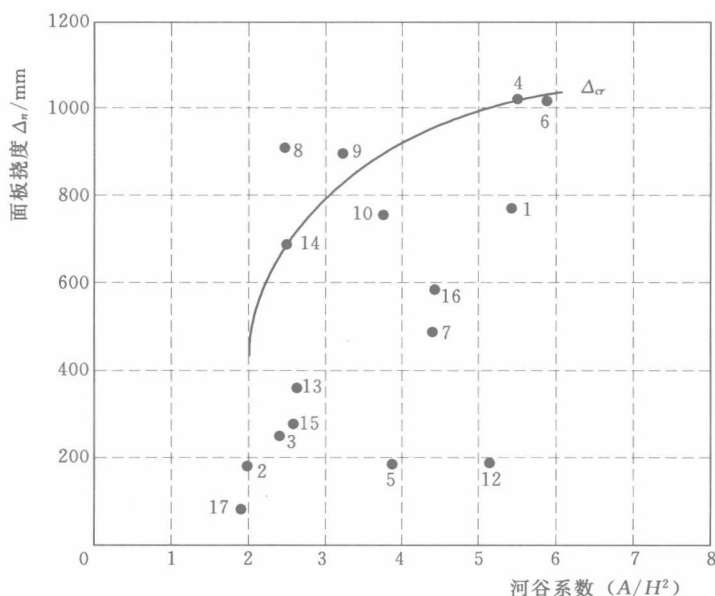


图 1 长期蓄水产生的面板挠度与河谷系数关系曲线
(图中曲线为面板临界挠度曲线)

$$\Delta_{cr} = 1271 - \frac{1258}{X} - \frac{861}{X^2} \text{ (mm)} \quad (5)$$

$$(E_{rc})_{cr} = \frac{1.44H^2}{1271 - \frac{1258}{X} - \frac{861}{X^2}} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

水布垭垂直缝面板挤压破坏也在蓄水后 4 年发生，发生时的挠度可视为 Δ_n 值。光纤维陀螺仪的观测值 Δ_n =680mm。我们用设置在垫层料的水平引张仪与水管式沉降仪的观测值计算的挠度值为 660mm。我们认为采用水管式沉降仪与水平观测成果计算面板挠度是最正确的方案，因此采用 660mm 值。光纤维陀螺仪观测有能够直接给出挠度值的优



点, 同时与计算值十分接近, 因此是值得推荐的观测仪器。

天生桥垂直缝面板挤压破坏表明, 接近垂直缝的顶部面板钢筋也发生屈曲, 因此建议在挤压钢筋上再设置箍筋, 并建议缝顶不设置 V 形槽、底部铜止水砂浆条不占据面板厚度。这些措施花费不大, 而对提高面板抗挤压能力是有好处的。

面板抗挤压安全系数可以规定为

$$F.S = \frac{\Delta_{\sigma}}{\Delta_n} = \frac{900 \times 10^{-6}}{\xi} \quad (7)$$

式中: ξ 为面板实测最大水平压应变值。

由公式 (7) 可以从阿里埃坝的实测面板水平压应变值、面板实测挠度值计算面板临界挠度值 $\Delta_{\sigma} = 780 \times (900/665) = 1055(\text{mm})$ 。公式 (5) 的计算值为 1008mm, 误差为 4.7%, 不超过 5%。按实测压应变值计算的阿里埃坝面板抗挤压破坏的安全系数 $F.S = 1.35$, 按实测挠度的 $F.S = 1.29$, 我们取 $F.S = 1.29$, 其误差也为 4.7%。除此 4 工程外, 我们都以挠度作为计算 $F.S$ 的标准。

表 1 中唯有滩坑工程采用在压性垂直缝中采用软缝, 采用 12mm 厚的三元乙丙橡胶, 其效果有待得到面板压应变观测值后评价, 如果该工程采用硬平缝其面板水平压应变值根据本文计算将为 380×10^{-6} 。我们主张, 如果按硬平缝设计面板压应变安全系数能满足要求的尽量采用硬平缝结构。软平缝会增加河谷部位周边缝止水的切向位移和河岸部位周边缝的拉伸位移。止水铜片承受切向位移能力较差。

安全系数设计取值建议大于 1.1。这是因为辛戈坝的安全系数只有 1.01。除阿里埃坝外, 辛戈坝的存在也可以证明了面板的水压力产生的最大压应变与面板长蓄水产生的挠度成正比。

3 堆石压缩模量与堆石孔隙率的关系

我国新近建成的超高面板坝, 其堆石坝填筑都采用 80cm 压实层厚, 加水 15%~20% 体积, 25t 自行式振动平碾 (线静压 7.92t/m) 压实 8~10 遍。这已成为我国超高坝的新标准压实功能了。其堆石的性质见表 2 序号 1~5。我们认为还可以减小层厚来减小堆石孔隙率来提高堆石的压缩模量。宜兴上库坝在相同的碾压参数下, 增模区采用 0.6m 层厚的其堆石平均孔隙率为 16.2%, 主堆石区采用 0.8m 层厚的堆石平均孔隙率为 19.8%, 可惜没有水管式沉降仪观测资料来计算模量。溧阳上库坝增模区压实层厚也采用 0.6m, 采用 CA702-27 自行式振动碾碾压 8 遍, 加水 10% 体积, 堆石岩石主要为饱和抗压强度为 54~66MPa 凝灰岩, 256 组平均孔隙率 $n = 16.8\%$ 。表 2 中还列有其他坝的有关资料。澳大利亚坝的资料只有堆石的干容重, 没有孔隙率。我们在 2013 年 3 月对水布垭大坝主堆石区的堆石压缩模量进行分层计算。其结果表明: 石灰岩堆石的压缩模量为 100MPa, 河床砾石留为坝基的为 164MPa, 综合为 120MPa。表中采用的压缩模量值为 100MPa。紫坪铺河床砾石留为坝基, 小部分主堆石也采用砾石料, 堆石的压缩模量需通过分层计算才能得出, 由于资料的限制, 我们未能完成计算。因此, 只能根据天生桥坝与水布垭资料建立如下一次方程, 如公式 (8)。在图 2 中还示有 Casinader 室内试验曲线以供参考 [9]。 E_c 与 n 关系曲线应为二次曲线。

$$E_{rc}=638.4-2895n$$

(8)

式中： n 为孔隙率，以小数表示。

表 2 按堆石压缩模量要求选定堆石孔隙率的参考表

序号	坝名	岩石类型	饱和抗压强度 /MPa	堆石压缩模量 E_{rc} /MPa	孔隙率 n /%	平均细料含量/%	
						<5mm	<0.075mm
1	紫坪铺	石灰岩、砾石	63~72	180	18.0	2~16	0~4
2	三板溪	火山灰砂岩	200~300	145	18.8	3~17	0~2
3	水布垭	石灰岩	70~80	100	18.6	2.1~8.9	0.2~1.4
4	滩坑	火山集块岩	80~100	135	18.6	6.8	2.05
5	董箐	砂岩、泥岩	60~22	55	17.38	7.1	1.69
6	天生桥	石灰岩	71~87	45	20.5	9	0
7	塞沙纳	石英岩		92	20.6		
8	利斯	流纹岩		82	19.4		
9	穆奇松	流纹岩		150	18.7		
10	阿里埃	玄武岩	193	47.5	24.8		
11	塞格里多	玄武岩		62.5	27.5		
12	辛戈	花岗片麻岩	116	32	21.3		
13	肯柏诺沃	玄武岩		65	22.0		
14	巴拉格兰德	玄武岩		55			
15	默霍尔	玄武岩		40			

由图 2 可知，公式（8）的曲线与 Casinader 曲线基本平行，因此按公式（8）的计算结果的误差可能不大。

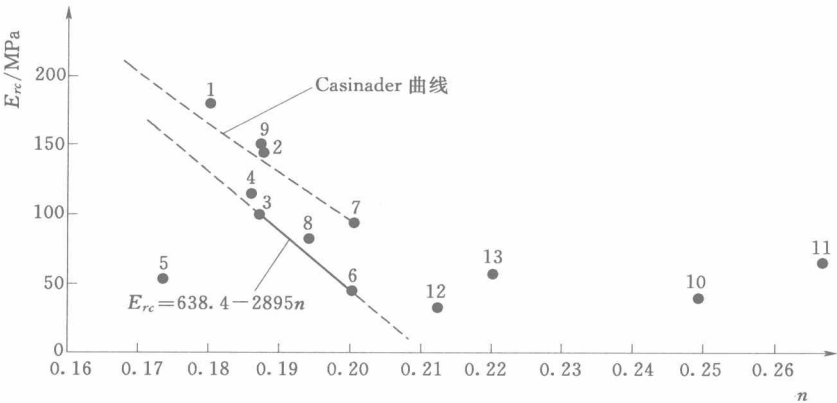


图 2 堆石压缩模量与孔隙率关系
(图中虚线为 Casinader 室内试验曲线)



4 300m 坝高可能性研究

库克先生说面板坝是经验坝,靠经验外延的坝高不能超过 30%,233m 的水布垭外延的坝高正好是 300m,因此我们探讨 300m 面板坝的设计与施工问题。假定坝址的河谷系数为 3,坝料为天生桥、水布垭主堆石区采用的石灰岩,石灰岩的力学性质见表 2。

采用本文的经验公式、通过计算,很快可以得出如下结果:由公式 (5),得临界挠度 $\Delta_{cr}=756\text{mm}$;由公式 (6),得临界堆石压缩模量 $(E_{rc})_{cr}=171\text{MPa}$;取安全系数为 1.1,得出需要的压缩模量 $E_{rc}=190\text{MPa}$;在由公式 (8),可以估计需要的堆石孔隙率 $n=0.155$ 。紫坪铺面板坝工程的过度料实测孔隙率 $n=0.151$,可以满足要求。

紫坪铺面板坝过渡料宽 5m,采用尖尖山石灰岩料场爆破料,铺层厚 45cm,加水 10% 体积,26t 自行式振动碾 (YZ26C) 碾压 6 遍。166 组试验的孔隙率平均值 $n=0.151$ 。27 组颗分试验:粒径小于 5mm 平均颗粒含量 14.27%,粒径小于 0.075mm 平均颗粒含量 2.63%。23 组渗透系数试验, $K=(0.24-0.71)\text{cm/s}$ 。其堆石可以满足自由排水的要求,并且细料、细粒含量都满足要求。

塞沙纳坝左岸无闸门控制自流式溢洪道溢流堰部分布置在石英岩堆石体上,作为溢流堰基础的堆石体采用增模区,其压实层厚为 45cm (其垫层料、过渡料的压实层厚也采用 45cm)。看来 300m 高坝如采用石灰岩为坝料,其主堆石可能需要采用压实层厚为 40~45cm,压实层厚 60cm 还不能满足要求。

因此,由于施工设备的发展,现在采用石灰岩为坝料的建造 300m 高坝已成可能。如采用比石灰岩抗压强度更高岩石坝料,要求堆石孔隙率要小一些,更容易满足要求。采用石灰岩坝料还可以在紫坪铺过度料基础上进一步优化碾压参数。

5 结论

堆石是面板的基础,它具有徐变时间长、徐变量大的特点。徐变时间在理论上是无限长的,实际上宽河床蓄水后 4~6 年就基本稳定,窄河床则要等 8~10 年。面板应力随堆石变形量增加而增加,因此面板最大应力是发生在堆石变形稳定以后。面板在水压力作用下周边缝都要张开,因此面板的应力唯一的来源是堆石的变形。我们采用了面板由蓄水引起的稳定挠度与其应力成正比的这一假定,这样就可以在堆石三维变形中只研究面板挠度变形了。因此研究的课题就可以简化为测定面板的挠度。观测面板挠度的仪器已有很大的发展,目前都采用埋于垫层料的水管式沉降仪和引张式水平位移观测仪的观测值来计算面板挠度。其计算值精度最高,费用却不高,值得推广。这样就可以通过控制面板由蓄水引起的面板稳定挠度来控制面板应力,达到避免面板挤压破坏的目的了。

为此目的,我们已建立起蓄水引起的面板稳定挠度的经验公式,并根据天生桥面板发生挤压破坏前的实测面板应力建立起与河谷系数有关的面板临界挠度。此临界挠度与此稳定挠度的比值,可以得出面板挤压破坏的安全系数。我们已对 17 座世界主要高坝的安全系数打了分。在本文中,还进一步证明了蓄水引起的面板稳定挠度与其应力成正比的这一假定。堆石压缩模量需由稳定挠度反算。我们的研究证明了河谷系数大于 2.6 的工程可以采用蓄水前实测堆石压缩模量值。

我们设法建立堆石压缩模量与堆石孔隙率的关系公式,但是没有完全获得成功。这是因为堆石岩石的抗压强度对堆石压缩模量有重大的影响,只建立了石灰岩堆石压缩模量与其孔隙率的关系公式,并且还由于资料不足只能建立一次方程。我们利用此关系式,对采用石灰岩堆石建造 300m 高的面板坝一例进行了探讨。通过本文的经验公式计算表明:堆石压缩模量 $E_{\pi}=190\text{MPa}$,堆石孔隙率 $n=0.155$ 。我国紫坪铺面板坝的过度料的堆石孔隙率仅为 0.151,说明采用石灰岩爆破料,减小层厚,采用重型碾,增加碾压遍数,增加加水量等,此孔隙率是可以达到的,修建 300m 高的面板坝现在已经具备条件。

参考文献

- [1] 曹克明,汪易森,徐建军,刘斯宏. 混凝土面板堆石坝 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 曹克明,徐建军,曹希卓. 超高面板堆石坝设计原则探讨 [C]. //: 堆石坝建设和水电开发和技术进展. 郑州:黄河水利出版社,2003.
- [3] Fitzpatrick M D, et al. "The Design of Concrete Faced Rockfill Dams", ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams, Detroit, USA; 1985.
- [4] Fitzpatrick M D, Liggins T B, Barnett R H H. Ten Years Surveillance of Cethna dam, ICOLD, Q. 52 - R. 51, Rio de Janeiro, 1982.
- [5] Pinto N L S, Blinder N S and Toniatti B. "Foz do Areia and Segredo Dams - 12 years' evolution", International Symposium on High Earth - Rockfill Dams, Beijing, China; October 1993.
- [6] Schumann W H, Discussion. "A study of Deformation in Concrete Faced Rockfill Dams", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113 No. 10 Oct. 1987.
- [7] HEC, Interim Performance Design Report On Reece Dam, 22 July, 1986.
- [8] 水布垭工程国际咨询汇编. 巴西巴拉那电力公司-COPEL 咨询报告. 1997 年 12 月.
- [9] Casinader R and Watt R E. "Concrete Face Rockfill Dams of the Winneke Project", ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams, Detroit, 1985.
- [10] Segio Giudeici, Richard Herweynen, Peter Quinlan, "HEC Experience in Concrete Faced Rockfill Dams - Past, Present and Future, Proceedings Internal Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, Beijing, 2000
- [11] 李洪,宋彦刚,邓良胜. 紫坪铺面板堆石坝关键技术问题的处理. 四川水力发电, 2006.

中国混凝土面板堆石坝 30 年

杨泽艳¹ 周建平² 王富强¹ 吴毅瑾¹ 孙永娟¹

(1. 水电水利规划设计总院; 2. 中国电力建设集团有限公司)

【摘 要】 2015 年是中国引进现代筑坝技术建设混凝土面板堆石坝的第 30 年。30 年来, 中国混凝土面板堆石坝技术稳步、快速发展, 走过了一条“引进、发展、创新、超越”之路。中国面板堆石坝数量最多, 几乎遍布全国, 最大坝高、工程规模和技术难度都处于世界前列。在设计、施工、科研、监测和恶劣自然条件建坝等方面积累了丰富的经验, 坝体变形控制、渗流控制、面板防裂等方面也取得了瞩目的成就, 筑坝技术走向成熟, 并正在向超高面板堆石坝方向发展。本文从建设成就、技术进展、经验教训、发展趋势等方面进行简要总结。

【关键词】 面板堆石坝 建设成就 技术进展 经验教训 发展方向

1 建设成就

1.1 数量和分布

从 1985 年引进现代面板堆石坝技术以来, 中国面板堆石坝筑坝技术稳步、快速发展, 走过了一条“引进、发展、创新、超越”之路。据 2016 年中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会统计, 截至 2015 年年底, 中国坝高 30m 以上面板堆石坝已建约 270 座, 在建约 60 座, 拟建约 80 座, 总数超过 400 座。

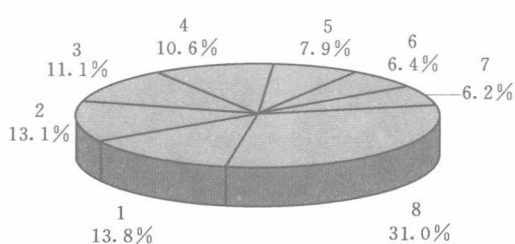


图 1 中国面板堆石坝分主要分布情况

1—新疆; 2—浙江; 3—贵州; 4—云南;
5—湖北; 6—四川; 7—重庆; 8—其他

中国已建、在建和拟建的面板堆石坝(坝高不低于 30m)分布在 29 个省(自治区、直辖市), 主要分布情况见图 1。其中, 新疆、浙江面板堆石坝超过 50 座, 贵州、云南超过 40 座, 湖北、四川超过 30 座, 重庆超过 20 座, 其他省(自治区、直辖市)约占 30%。

水布垭坝是中国已建最高的面板堆石坝, 也是目前世界上最高的面板堆石坝; 天生桥一级坝是规模最大的坝, 坝顶长

1104m, 填筑量约 1800 万 m^3 , 面板面积约 17.7 万 m^2 , 总库容 102.57 亿 m^3 , 最大泄洪流量 21750 m^3/s 。九旬峡坝是已建趾板置于深厚覆盖层上最高的坝, 铜街子左副坝覆盖层防渗处理深度超过 70m。龙首二级坝(也称西流水)是已建河谷最狭窄的 100m 以上高坝, 大坝长高比仅 1.3。洪家渡坝是已建河谷极不对称且趾板边坡高陡的坝, 趾板边坡最

高约 310m。吉林台一级坝是已建抗震设计烈度最高的坝，抗震设计烈度达 9 度。紫坪铺坝是已经受高地震烈度考验的坝，地震烈度达 9~10 度。莲花坝是已建位于气温最低及温差最大地区的坝，极端最低气温为 -45.2℃；查龙坝是海拔最高的坝，坝顶高程为 4388m；吉勒布拉克坝是纬度最高的坝，高于北纬 48°。

中国面板堆石坝几乎遍布全国，涉及各种不利的地形地质条件和气候条件，因其安全性、经济性和适应性良好得到较普遍的推广应用，总体而言，工程设计和建设是成功的，也积累了应对各种困难情况的经验和教训。中国面板堆石坝数量占全球面板堆石坝总数的一半以上，最大坝高、工程规模和技术难度等方面均处于世界前列。

1.2 发展阶段

1985 年，中国启动西北口面板堆石坝设计和施工国家科技攻关试点工程。以此为标志，一般认为中国现代面板堆石坝技术起步于 1985 年。中国的现代面板堆石坝，按技术发展，大致可分为“引进消化、自主创新 and 突破发展”等三个阶段（图 2）。

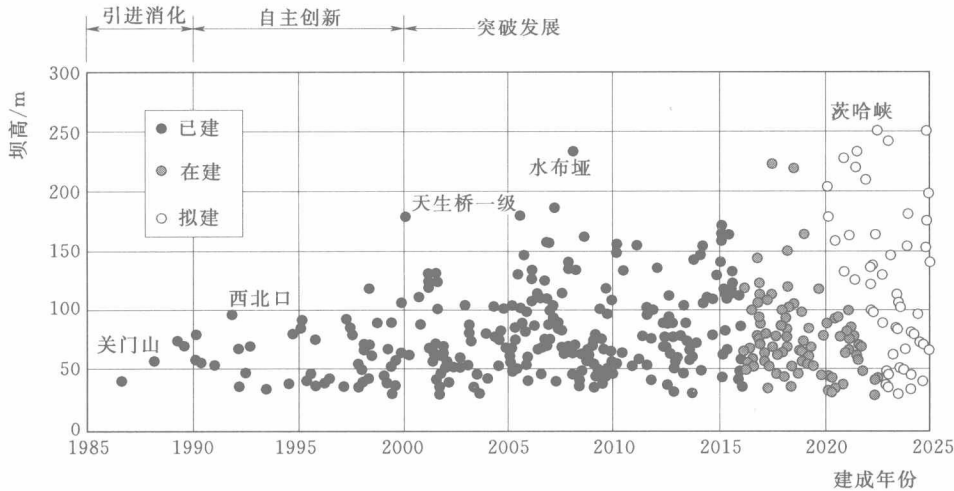


图 2 中国面板堆石坝发展示意图

2 主要技术新进展

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 2010 年完成的综述性论文《中国混凝土面板堆石坝 25 年》，对坝址选择和坝体布置、坝体断面分区及筑坝材料、坝体防渗结构、坝基处理、导流与度汛、主体工程施工、试验及计算、安全监测、坝身溢流及坝体加高、恶劣自然条件筑坝等方面坝的主要技术进展进行了较为系统的总结。近年来，面板堆石坝筑坝技术又有了新进展。

2.1 按照变形控制要求选择填筑密实度

面板堆石坝设计的技术难题之一就是选择与坝址地形地质条件和筑坝材料特性相适应的堆石料设计指标。《混凝土面板堆石坝设计规范》（DL/T 5016—2011）明确提出按坝高选择设计孔隙率或相对密度（表 1）。



表 1

筑坝材料设计孔隙率或相对密度选择表

坝 料		垫层料	砂砾石料	过渡料	上游堆石料		下游堆石料	
					硬质岩	软质岩	硬质岩	软质岩
坝高<150m	孔隙率/%	15~20		18~22	20~24	18~22	20~25	18~23
	相对密度		0.75~0.85					
200m>坝高 ≥150m	孔隙率/%	15~18		18~20	19~22		19~23	17~20
	相对密度		0.85~0.90					

根据已有经验,对于狭窄河谷面板堆石坝、陡坝肩边坡附近的堆石增模区一般选择下限值。正在建设的猴子岩面板堆石坝(高 223.5m)、江坪河面板堆石坝(高 219m)均位于狭窄河谷地区,上下游硬岩-超硬岩堆石料区设计孔隙率要求均小于 19%。

根据茨哈峡筑坝料现场碾压试验分析,并参考已有 200m 级高面板堆石坝实践经验,研究提出了 300m 级高面板坝料碾压参数及施工控制指标的建议:堆石料孔隙率宜按 17%~19% 控制;砂砾石料相对密度应大于 0.90,按照 0.92~0.95 控制。现场原级配试验的最大、最小干密度均大于室内试验值,计算得到的相对密度均小于 1,不会出现基于室内试验成果计算得到相对密度大于 1.0 的不合理现象。

2.2 超高面板堆石坝安全性评价方法

通过对高面板堆石坝技术进展的回顾和调研分析^[5],200m 级面板堆石坝筑坝技术是成功和可靠的,其坝体布置、坝体分区及筑坝材料、防渗结构、坝基处理、导流度汛与填筑分期、堆石填筑和面板混凝土浇筑、试验研究与计算分析、安全监测等实践成果及经验,可以在 300m 级高面板坝的建设中参考和借鉴。

高面板堆石坝安全性评价需从整体安全、稳定安全、结构安全等三个层次进行评价。整体安全为第一层次,主要包括洪水设计和抗震设计标准、坝顶超高等方面,稳定安全为第二层次,主要包括变形稳定、渗透稳定和抗滑稳定,核心是变形稳定,结构安全为第三层次,主要包括对筑坝材料和坝体结构的相关要求。

研究表明,高面板堆石坝的主要风险因素包括不利地形、地质条件,坝顶漫流,蓄水后坝体变形过大,面板结构性裂缝和挤压破坏,坝体和坝基渗漏及渗流破坏,地震引起的面板破坏、止水失效,计算和分析理论不足等。坝坡安全系数和可靠度都呈现随坝高增加而降低的趋势,对 250m 级以上的面板堆石坝需要适当放缓坝坡,增加坝坡稳定的可靠度。

正常工况坝坡抗滑稳定目标可靠指标取 4.45~4.7,对应坝坡抗滑稳定最小安全系数可按 1.6 和 1.7 控制。变形可靠指标在竣工期和蓄水期分别为 2.22 和 2.02,蓄水期面板挠度可靠度指标为 1.766,大于欧洲结构设计规范 Eurocode 0 的指标 1.5。坝体渗透稳定可靠度指标为 9.91,说明大坝渗透稳定具有足够的安全裕度。

2.3 超高面板堆石坝设计安全标准和工程措施

根据古水、茨哈峡、马吉和如美等超高面板堆石坝的工程特点,文献^[5]开展了面板坝坝体布置、材料设计、坝料分区、防渗结构、基础处理等方面的设计研究。在筑坝料选