

福建砌石拱坝施工技术与经济分析

曾金水

(福建省水利水电工程局, 福建 泉州 362000)

摘要:福建省的砌石拱坝设计体型日趋多样化,并向新颖、轻、高和薄的方向发展。对石料的强度要求从严,形状要求从宽;混凝土普遍采用“双掺”技术。施工机械有国产的,也有进口的。大坝面石砌筑,多数采用粗料石丁砌,砂浆深勾缝防渗;腹石砌筑,从卧砌发展为竖砌,不求单块自稳,石料之间允许点接触,层高为0.8~1.0m,强调砌体密实性及埋石率,大坝每升高3~5m进行一次压水试验检查砌体透水率,并进行补强灌浆,大大提高了坝体自身的防渗能力。实践证明,随着砌石拱坝施工工艺水平的提高,近百米级的高、薄砌石拱坝,不设混凝土防渗面板或心墙,只靠坝体自身防渗是可行的,是一种比较经济的坝型。

关键词:砌石拱坝;坝体防渗;施工技术;福建省

中图分类号:TV642.4

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2002)02-0014-04

福建省位于我国东南沿海,石料丰富,民间石料加工工艺和砌筑工艺历史悠久。目前,福建省已建和在建的坝高大于15m的砌石拱坝总数约400座。据中国砌石坝信息网统计,其数量居全国首位。随着设计的不断创新,施工技术及砌筑工艺水平的不断提高,在体型设计方面日趋多样化和优化,水平拱趋向采用扁平化非圆拱,有单心圆、三心圆、椭圆、抛物线、对数螺旋线等曲线,并向新颖、轻、高和薄的方向发展。

近十几年来,福建省建成的各类砌石拱坝,均不设混凝土防渗面板或心墙,只靠迎水面的深勾缝及砌石体自身防渗。1995年以来建成的坝高大于80m的砌石拱坝有5座,已全部蓄水投入使用,且基本做到不渗不漏,运行良好。砌石拱坝施工技术要求比较简单,造价较低;对施工机械设备要求比较灵活、简

便,可减少设备投入费用;雨季对砌石拱坝施工影响较小,坝面允许过水,施工导流和施工期间度汛措施较简便,全年有效施工期较长;砌石拱坝还可以断续修建,适应地方投资的工程资金不易集中到位的情况;还可以提前蓄水发电,提前受益。所以,目前砌石拱坝在福建山区的中小型水利水电工程建设中已处于主导地位,在今后一段时间内仍有生命力。近10年来建成的部分砌石拱坝工程特性见表1^[1]。

1 筑坝原材料的选择

1.1 石料

砌石拱坝所用石料的质量要求是强度从严、形状从宽,石料的强度等级不应低于MU40,面石通常采用粗料石,按设计要求做到棱角分明,6个面基本平行,

表1 各类有代表性的砌石拱坝工程特性

工程名称	河 系	工程所在地	坝高/m	坝 型	库容/亿 m ³	装机容量/MW	建成年份
东 固	大樟溪、梓溪	德化县	86.5	抛物线变厚双曲薄拱坝	0.52	11.00	2001
雷公口	建 溪	建阳市	86.3	三心圆变厚双曲拱坝	0.47	12.00	1998
桑 园	赤 溪	福鼎市	84.2	三心圆变厚双曲拱坝	0.80	37.50	1995
村 美	九龙江、溪柄溪	龙岩市	81.0	三心圆变厚双曲薄拱坝	0.11	25.00	1995
六角宫	尤溪、仙峰溪	大田县	81.0	三心圆变厚双曲拱坝	0.71	25.00	2001
麻竹坪	膳 溪	寿宁县	68.6	三心圆变厚双曲拱坝	0.29		1990
高 坊	大石溪	浦城县	68.3	抛物线变厚双曲拱坝	0.29	8.60	1991
安仁溪	闽江、安仁溪	闽清县	66.5	抛物线变厚双曲拱坝	0.26	16	1996
九仙溪	木兰溪、九仙溪	仙游县	66	三心圆变厚双曲拱坝	0.11	25	1998
东牙溪	砂溪、东牙溪	三明市	63	单心圆双曲拱坝	0.22	3.13	1995
桥 头	七都溪	宁德市	53	对数螺旋线双曲拱坝	0.20		1993
平 坑	李墩溪	松溪县	50	椭圆形变厚双曲拱坝	0.06	5.29	1992

注:表中所示拱坝均为坝体自身防渗;东固和村美均为双曲薄拱坝,厚高比分别为0.150和0.146。

作者简介:曾金水(1964—),男,福建永春人,高级工程师,主要从事水利水电工程施工工作。

长度应大于 50 cm, 宽度及厚度不小于 25 cm, 长厚比不宜大于 3。腹石多数采用块石或毛石, 毛石为一般爆破产物, 不需加工, 为确保水平缝混凝土振捣密实, 长边最大尺寸不宜大于 1 m; 块石一般由成层岩石爆破而得, 上下两面大致平整, 上坝前人工修除尖角、薄边, 长边最大尺寸亦不宜大于 1 m。根据现场实际情况, 粗料石与块石的规格、形状可适当放宽。

1.2 胶结材料

a. 水泥砂浆。砌石拱坝面石砌筑及迎水面深勾缝所用的水泥砂浆强度等级一般不低于 M10, 深勾缝所用的水泥砂浆采用细砂拌制。

b. 混凝土。腹石砌筑及基础垫层所用的混凝土, 一般为一级配或二级配混凝土, 常用的混凝土强度等级有 C10 和 C15 两种。

2 筑坝材料的运输

福建适合兴建砌石拱坝的山区河谷较狭窄地段, 中小型工程筑坝强度一般不高, 月强度多在 2000 ~ 5000 m³, 普遍采用形式多样的简易空中索道运输筑坝材料。简易空中索道有横向、纵向和斜拉等型式, 简单、灵活、经济、实用。如宁德市桥头水库采用长度为 700 多 m 的斜拉空中索道, 把块石从料场直接吊到坝面, 从而提高了工效, 降低劳动强度。一般跨度在 300 m 左右, 吊重 30 kN 的简易空中索道。每套设备投资与安装费用约为 8 ~ 12 万元, 索道的卷扬设备可以回收重复使用, 与形成同样生产能力的其他临时设施相比成本较低。为缩短工期, 有些工程除坝面砌筑采用人工外, 从原材料生产到筑坝材料运输全部采用机械化施工, 如德化的东固工程, 坝高 86.5 m, 坝体工程量 8.1 万 m³, 24 个月完成砌筑任务。也有些工程的运输机械采用“土洋结合”方式。福建部分砌石拱坝施工机械与施工强度的工程实例见表 2。

表 2 砌石拱坝施工机械与施工强度的工程实例

工程名称	坝高 /m	坝体工程量/万 m ³	施工运输机械		最高砌筑强度/万 m ³		
			水平	垂直	日	月	年
东 固	86.5	8.1	汽车、1 台大型塔机、农用车	1 条索道	0.025	0.58	4.1
桑 园	84.2	10.45	农用车	4 条索道	0.030	0.65	
六角宫	81.0	12.4	农用车	1 台小型塔机、2 条索道	0.028	0.72	2.5
安仁溪	66.5	4.94	农用车	3 台 30 kN 缆式起重机	0.012		
东牙溪	63	5	农用车	2 条索道	0.015	0.4	1.8

3 坝体的砌筑工艺

3.1 面石砌筑

大坝面石的砌筑主要以外形美观和防渗为主, 一般采用粗料石及强度等级为 M10 的砂浆砌筑。福建的砌石拱坝曲线形式多样、体型单薄, 厚高比小

(如村美薄拱坝厚高比为 0.146, 东固为 0.150), 坝面的倒悬度大(一般在 1:0.3 ~ 1:0.55 之间), 因此, 大坝面石砌筑工艺要求较高, 主要难度是坝面倒悬坡的砌筑。

3.1.1 施工程序

面石砌筑一般先于腹石, 一方面先砌面石可控制坝面外部轮廓, 同时为腹石砌筑起模板作用, 所以其砌筑高度一般为腹石的层高, 即 1.0 m 左右, 多数采用粗料石丁砌, 铺浆厚度应为设计灰缝宽度(1.5 ~ 2 cm)的 1.5 倍左右, 使石料安砌后有一定下沉, 并应用铁锤敲击、摇动, 使座浆溢出, 确保密实, 还应撬翻检查。竖缝砂浆多数采用人工捣插, 常用工具有钢筋捣插棒、竹片捣插棒或捣插钢板。

3.1.2 坝面倒悬坡砌筑

坝面倒悬坡砌筑常用的方法有两种, 其一是“水平安砌法”, 即将不同部位的面石加工成不同坡度并进行编号, 砌筑时“对号入座”, 这种方法速度慢, 成本较高; 其二是“倾斜安砌法”^[2], 即面石采用统一规格, 砌筑时按设计坝面不同坡度采用挑出或缩进, 并调整面石靠坝腹一侧的缝宽(但同一砌缝两端宽度不宜超过 1 cm), 面石层面将向上游或下游倾斜, 因此称“倾斜安砌法”, 此法安砌简便, 速度快, 应用较为广泛。

3.2 腹石砌筑

以前砌石拱坝砌筑提倡石料以单块自稳为主的卧砌, 即石料大面朝下(但凹面不得朝下)的方法。砌体的层厚控制在 0.3 ~ 0.5 m, 砌石体中混凝土的比例较大, 埋石率较低。近十几年来, 福建提倡毛、块石采用梯缝竖砌的方法, 石料竖摆立砌, 不求单块自稳, 石料之间允许点接触, 形成三角缝, 再用混凝土分层填缝振实, 层厚控制在 1.0 m 左右, 砌筑质量大大改善。每砌筑层自下而上分成 2 至 3 次摆石砌筑, 第一次摆石完毕后, 填缝用混凝土分两次进行, 第一次填缝高度为摆石高度的 2/3, 并边振捣边埋小片石; 第二次填缝用混凝土灌满剩下的 1/3 高度, 进行第二次振捣; 接着进行第二次摆石, 大块石之间较大的缝由小块石填砌, 较小的缝用片石填砌, 直至达到 1 m 层高, 然后进行第三次振捣。

3.3 砌体自身防渗措施

3.3.1 保证迎水面的深勾缝质量

上游坝面的深勾缝是防止大坝漏水的第一道防线, 一般用强度等级不低于 M10 的水泥砂浆, 为保证坝面深勾缝质量, 采用以下施工措施:

a. 清缝宜在石料砌筑后 24 h 进行, 砌缝以人工刻、凿, 深度不小于 2 倍缝宽(下游无防渗要求的勾缝, 清缝深度控制在 2 cm 左右); 深勾缝不得一次填

满浆,应分多次填浆分层压实,避免鼓包或脱落。

b. 勾缝后 12 h 开始进行洒水养护至 21 d,且经常保持湿润;勾缝砂浆单独拌制,严禁与砌石砂浆混用,勾缝砂浆使用细砂拌制。

3.3.2 提高砌石体混凝土的密实性

砌石体混凝土的密实性直接关系到大坝的抗渗能力,而砌石拱坝施工程序较多,包括水平缝铺混凝土、摆石、竖缝填灌混凝土及竖缝混凝土振捣,混凝土间歇时间长,因此,混凝土的和易性、凝结时间、坍落度等,直接影响到坝体砌筑的质量。为改善混凝土性能,方便施工,提高混凝土的密实度及抗渗能力,普遍采用“双掺”技术,即混凝土配合比设计时一般掺适量的减水剂并掺入 20%~30% 的粉煤灰(但必须通过试验确定其最优掺量)。

3.3.3 做好施工缝处理

施工缝是造成大坝漏水的薄弱环节,施工缝的处理是大坝防渗的关键。砌石体水平缝一般不必特殊处理,只要采用高压水冲洗干净即可砌筑上一层。由于竖直缝临空面的混凝土在没有立模板的情况下,很难振捣密实,是漏水的薄弱环节,因此坝体应尽量均衡上升,避免预留竖缝。当竖直缝高度超过 2 m 时,应采取特殊处理措施,如预留宽缝采用补偿收缩混凝土回填,并局部钻孔进行补强灌浆处理等。有些工程为使砌石体与岸坡岩基之间结合良好,提高大坝抗渗能力,基础垫层采用补偿收缩混凝土回填,如桑园砌石拱坝夏季施工采用分缝砌筑并预留宽缝,冬季低温季节采用微膨胀混凝土封拱,防渗效果良好;永泰县三宝溪砌石拱坝,其坝肩基础垫层混凝土采用补偿收缩混凝土回填,也起到很好的防渗效果。

3.3.4 增加砌体的埋石率

充分利用石料本身具有较大密实性的优点,增

加砌体的埋石率,有利于大坝的自身防渗性能。1986 年从麻竹坪砌石拱坝开始采用梯缝竖砌、加大厚层的方法取得成功,并逐步向全省推广。由于层厚从以前 0.3~0.5 m 改为 0.8~1.0 m,便于砌筑大块石,若吊装设备允许,底层的大块石长边可达 0.8~1.0 m,大大提高埋石率,提高砌体密度(一般设计砌体密度为 2300 kg/m³),减少大坝水平缝数量,同时大大提高工效。福建部分砌石拱坝采用卧砌与竖砌的埋石率、密度、工效对比情况见表 3^[3]。

3.3.5 对砌体进行补强灌浆

砌体每升高 3~5 m 进行一次压水试验,对砌体密实性、透水率进行检查。一般孔距 2.5~3 m 孔深 3~5 m,试验压力为 0.2~0.4 MPa,对不符合设计密实性、透水率要求的孔应进行补强灌浆,补强灌浆压力一般与压水试验一样。砌体进行补强灌浆处理后,在其周边(孔距 1 m)再钻 2 个孔进行压水试验检查,直至满足设计要求才进行上一层砌筑。福建部分砌石拱坝压水试验实例见表 4^[4]。表 4 的压水试验结果表明,多数工程砌石体的透水率 q 值基本能满足或接近设计值,经补强灌浆处理后,可全部满足设计的抗渗要求。

4 经济分析

4.1 砌石拱坝的经济性

砌石拱坝属当地材料坝,其所需的筑坝材料如石料、砂砾料,可以就地取材,钢材、水泥和木材的消耗量较混凝土拱坝小,可简化对外交通运输及其他临时设施;大坝埋石率为 50% 左右,单位体积砌体水泥用量约 100~150 kg,较混凝土拱坝少 50% 左右,且砌筑层厚为 1 m,上升速度慢,散热条件好,大多数砌石拱坝不分缝,温度控制比较容易,可减少施工过程中的温控措施费用。经综合分析比较,砌石拱

表 3 采用卧砌与竖砌的埋石率、密度、工效对比

工程名称	石料类别	单块重量/kg	石块砌筑方式	使用胶结材料	砌体埋石率/%	砌体密度/(kg·m ⁻³)	砌筑工效/(m ³ ·工日 ⁻¹)
南溪	条块石		卧砌	100 号二级配混凝土	40~46		0.5~0.7
东溪	块石	180~278	卧砌	100 号二级配混凝土	51		0.6~0.8
麻竹坪	毛石	≥75	竖砌	100 号二级配混凝土	55.6~59.3	2450~2470	0.9~1.0
桥头	毛石	≤700	竖砌	100 号二级配混凝土	53.8~57.3	2490~2500	1.1
东固	块石	≤2000	竖砌	C15、S ₈ 二级配混凝土	46.0~54.3	2397~2456	2.0~3.0

表 4 砌石拱坝压水试验情况实例

工程名称	工程所在地	坝高/m	设计透水率 q /Lu	试验压力/MPa	试验段长/m	试验结果
东固	德化县	86.5	≤1	0.2	3~5	共 286 孔, $q < 1$ Lu 占 93.4%
			≤3	0.2	3~5	共 321 孔, $q < 3$ Lu 占 97.5%
桑园	福鼎市	84.2	≤3	0.2~0.4	3	共 977 孔, $q < 1$ Lu 占 100%
麻竹坪	寿宁县	68.6	≤3	0.2~0.4	4	共 537 孔, $0.23 \text{ Lu} < q < 2.72 \text{ Lu}$
东牙溪	三明市	63	≤3	0.3	3~5	共 9 孔, $0.08 \text{ Lu} < q < 0.2 \text{ Lu}$
平坑	松溪县	50	≤3	0.3	5	共 239 孔, $0.20 \text{ Lu} < q < 1.76 \text{ Lu}$

注:东固工程坝体不同高度的设计透水率 q 值也不同,与坝前水头 H 有关:① $H \geq 50 \text{ m}$, $q \leq 1 \text{ Lu}$;② $H < 50 \text{ m}$, $q \leq 3 \text{ Lu}$ 。

坝较混凝土拱坝可节省土建工程投资 15% ~ 25% 的费用。

4.2 采用自身防渗的优越性

砌石拱坝采用坝体自身防渗,较采用混凝土防渗面板或心墙防渗方案有许多优越性:①面石用水泥砂浆丁砌料石,厚度为 0.6 m 左右,先超前上升一层约 1 m,为腹石砌筑起模板作用,操作安全,又可省去混凝土防渗面板或心墙的分缝处理及温控措施;②减少工序,减少干扰,坝体可均衡上升,加快施工进度;③较采用混凝土防渗面板或心墙的工程投资费用略有节省。

4.3 砌石拱坝主要项目的单价水平

近年来,据调查统计分析,福建省砌石拱坝工程招投标的主要工程项目的预算单价为:C10 ~ C15 混凝土砌毛、块石的单价为 170 ~ 200 元/ m^3 ;M10 砂浆砌粗料石的单价为 260 ~ 280 元/ m^3 ;C10 ~ C15 混凝土垫层或堰体单价为 260 ~ 280 元/ m^3 。(预算单价由人工费、材料费、机械使用费、其他直接费、间接费、计划利润、税金、临时建筑分摊费及其他费用分摊费组成。)

工程实例:2001 年 6 月开始蓄水发电的德化东固砌石双曲拱坝,坝高 86.5 m,坝体工程量 8.1 万 m^3 ,大坝土建工程造价为 2 250 万元,总工期 27 个月,其中大坝砌筑时间 24 个月。其预算单价为:水泥预算价为 265 元/t(由业主保价提供),人工费 21.65 元/工日,除粗料石从 20 km 外采购成品料(160 元/ m^3)外,所有砌坝石料、碎石、人工砂均在大坝 2 km 范围内就地开采、

加工。大坝主要项目的中标单价为:C10 ~ C15 混凝土砌毛、块石的单价为 188.64 元/ m^3 ;M10 砂浆砌粗料石的单价为 279.91 元/ m^3 ;C10 ~ C15 混凝土垫层或堰体单价为 255.37 元/ m^3 。

总之,在石料丰富的福建省山区,砌石拱坝是一种比较经济的坝型。

5 结 论

近十几年来,福建省砌石拱坝的特色是一律不设混凝土防渗面板或心墙,全靠砌石体自身防渗,既简化设计、方便施工、加快进度,又不渗不漏。实践证明,近百米级的高、薄砌石拱坝不设混凝土防渗面板或心墙,靠坝体自身防渗,不但可以满足抗渗要求,而且工程造价较低,是一种比较经济的坝型。福建砌石拱坝的施工技术,在我国山区中小型水电工程项目中,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 徐在民. 福建坝工特色[J]. 福建水力发电, 1999(增刊): 26 ~ 34.
- [2] 曾金水. 水利水电施工技术综述[J]. 水利科技, 2001(增刊): 7 ~ 11.
- [3] 方依强. 麻竹坪拱坝混凝土梯缝立砌工艺[J]. 砌石坝技术, 1992(1): 48 ~ 54.
- [4] 黎展眉. 中国水力发电工程(施工卷)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. 537 ~ 550.

(收稿日期: 2001-12-05 编辑: 熊水斌)

·简讯·



黄河小浪底水利枢纽主体工程完工

2001 年 12 月,小浪底第 6 台机组投产发电,标志着小浪底水利枢纽主体工程完工。小浪底水利枢纽位于河南省孟津县境内的黄河干流上,是治理和开发黄河的关键性工程,以防洪、防凌、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电。在防洪上可使下游花园口的防洪标准从不足 60 年一遇提高到 1000 年一遇;在防凌方面由于有 30 亿 m^3 的防凌库容,与已建成的三门峡、故县和陆浑等水库配合运用,可基本解除黄河下游的凌汛威胁;在减淤方面由于有淤沙库容 75 亿 m^3 ,可减少下游河道淤积,还可通过水库调节运用将部分淤沙冲向下游。在发电方面装机 6 台共 180 万 kW,是河南省第一大水电站,不仅可获得 51 亿 kW·h 的年电量,对河南电网的调峰也可起着显著的作用。

小浪底大坝为粘土斜墙堆石坝,坝高 154 m,坝身体积 5 185 万 m^3 ,是我国体积最大的土石坝。库容 126.5 亿 m^3 ,调节库容 51 亿 m^3 ,在黄河干流上是仅次于龙羊峡的第二大库容。正因为库容大,所以能在防洪、防凌和淤沙等方面发挥重大作用。

该工程 1991 年就开始前期工程施工,1994 年主体工程开工,1997 年截流,2000 年 1 月首台机组发电,2001 年 12 月最后一台机组发电,前后共用了 10 年时间,动态投资 327 亿元。主体工程完工后,余下尾工将在 2002 年内完成。

(吴冀高供稿)