

现代混凝土面板堆石坝的进展

朱 晟

徐 胜

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098) (湖北清江水电开发公司 宜昌 443000)

摘要 回顾了现代混凝土面板堆石坝的发展历程,分析不同时期在结构设计方面具有代表性的已建成同类坝的特点,介绍世界上拟建的两座 200 m 级混凝土面板堆石坝,认为现阶段建 200 m 以上的高混凝土面板堆石坝在技术上是可行的。

关键词 堆石坝;混凝土面板;碾压堆石;高坝

面板堆石坝具有工期短、造价低、安全性好等优点,因而得以不断发展。但是真正导致它飞速发展的原因是 60 年代末重型振动碾分层碾压堆石方法的采用,使得经过良好碾压的堆石具有较高抗剪强度和较小变形,解决了因堆石变形过大而导致挡水面板开裂,造成严重漏水及一系列危及坝身的问题,满足了面板及坝体正常运行的要求。迄今为止,全世界高于 50 m 的混凝土面板堆石坝中建成的为 152 座,在建的为 34 座,仍在可行性研究阶段且以混凝土面板堆石坝为首选坝型的为 32 座。本文结合几座典型工程介绍现代碾压混凝土面板堆石坝实践的现状和发展情况,结合拟建中的 234 m 高的水布垭工程,讨论建混凝土面板堆石坝技术上的可行性。

1 阿利亚坝(Areia CFRD)

阿利亚坝^[1,2]位于巴西依瓜苏(Iguacu)河上,坝高 160 m,于 1980 年竣工,为当时世界上最高的混凝土面板堆石坝。该坝上游坝坡为 1:1.4,下游坝坡为 1:1.25,坝体断面及堆石料分区见图 1,分区材料说明见表 1。

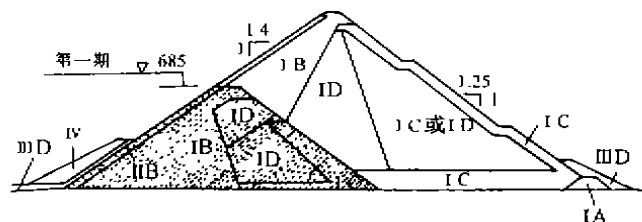


图 1 Areia 坝横断面

阿利亚坝堆石分两期填筑,在堆石体的过渡区表面用沥青层保护,以免坝坡冲刷,并在一期坝体施工期拦洪渡汛时形成半透水层挡水;面板分两期施

工,其间设一道水平施工缝,钢筋穿过接缝,使得一期面板和二期堆石可同时进行施工,大大缩短了工期,为高混凝土面板坝的实践积累了极有价值的经验。

表 1 Areia 坝材料说明

材料	分 类	压实方法
堆石 I	IA 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 25%	抛填。
	IB 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 25%	层厚 0.8 m, 振动碾压 4 遍。
	IC 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 25%	层厚 0.8 m, 振动碾压 4 遍。
	ID 厚层玄武岩及玄武角砾岩互层	层厚 0.8 m, 振动碾压 4 遍。
过渡层 II	II B 人工破碎坚硬玄武岩	层厚 0.4 m, 振动碾压水平压 4 遍, 上游面振动碾压 6 遍。
	II BB 级配良好人工碎石, $d < 38\text{mm}$	层厚 0.4 m, 振动碾压 6 遍或层厚 0.2 m, 用振动板压实。
填土 III	III D 不透水土料	层厚 0.3 m, 气胎碾压几遍。
任意料 IV	IV 任意料	层厚 0.5 m, 施工机械行走几遍。

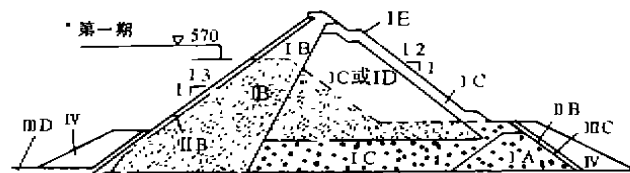


图 2 Segredo 坝横断面

2 塞格雷多坝(Segredo CFRD)

塞格雷多坝^[3]同样位于巴西的依瓜苏河上,在阿利亚坝的下游。该坝于 1992 年完工,坝高 145 m,上游坝坡 1:1.3,下游坝坡 1:1.25,坝体断面见图 2,堆石体分区说明见表 2。

表2 Segredo 坝材料说明

材料	分 类	压实方法
堆石 I	I A 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 25%	抛填
	I B 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 25%	层厚 0.8 m, 振动碾压 6 遍.
	I C 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 40%	层厚 1.6 m, 振动碾压 4 遍.
	I D 厚层玄武岩,玄武角砾岩最大含量 40%	层厚 0.8 m, 振动碾压 4 遍.
过渡层 II B	II B 级配良好人工碎石, $d < 100 \text{ mm}$	层厚 0.4 m, 振动碾压水平碾压 6 遍, 上游面振动碾压 6 遍.
	II BB 级配良好人工碎石, $d < 38 \text{ mm}$	层厚 0.2 m, 用振动板压实.
填土 III	III C 含石块的粉质粘土, $d \leq 19 \text{ mm}$	层厚 0.25 m, 羊足碾压几遍.
	III D 含石块的粉砂, $d \leq 19 \text{ mm}$	层厚 0.6 m, 施工机械行走几遍.
任意料 IV	IV 任意料	层厚 0.25 m, 羊足碾压几遍, 层厚 0.6 m, 施工机械行走几遍.

塞格雷多坝的实践代表现代碾压混凝土面板堆石坝目前的发展水平.塞格雷多坝在设计上有三个特点是其后的混凝土面板堆石坝一直借鉴的:

a. 趾板 3 m 范围内有一细料反滤层,以平板振动器压实.细料反滤层可以控制已经出现漏水部位的渗流,并可采用粉细砂淤堵止水,装于反铲上的平板振动器在水平或倾斜面上,可对邻近趾板的料进行有效的压实.该部位是振动平碾无法碾压的.趾板四周的有效压实,减小了接缝的错动变形量和面板的弯曲应力.平板振动器压实方法使用之前,趾板周围料不能充分压实,可能发生渗流,因而安奇卡亚坝(Alto Anchicaya CFRD)、考兰坝(Khao Laem CFRD)和其它许多坝的周边缝均出现问题.

b. 混凝土面板中心区配筋 0.3%、在面板受压区,水平筋宜减少,面板上经常出现横向微裂缝,但从未出现纵向裂缝.0.3%的温度钢筋用量是适宜的.

c. 趾板连续配筋.连续配筋取消了趾板的周边缝间的不必要又易出现问题的接缝.冷缝可根据需要随意布置.此施工法由萨尔瓦琴娜坝(Salvajina CFRD)在坝施工中首先提出采用的.出现的微裂缝都会自愈.

3 阿瓜密尔帕坝(Aguamilpa CFRD)

阿瓜密尔帕坝^[4]位于墨西哥的圣地亚哥(Santiago)河上.该坝 1993 年竣工,坝高 187 m,为当今世界上已建最高的混凝土面板堆石坝.上游坝坡 1:1.5,下游坝坡 1:1.4,堆石采用熔灰岩和河床砂砾石混合筑坝,坝体横断面及各分区材料分别见图 3 和表 3.

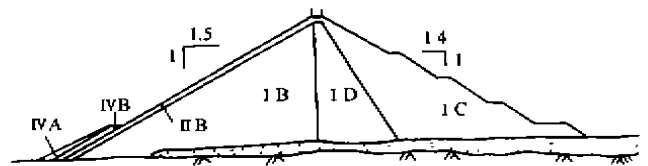


图3 Aguamilpa 坝横断面

表3 Aguamilpa 坝材料说明

材料	分 类	压实方法
堆石 I	I B 河床砂砾石	层厚 0.6 m, 振动碾压 4 遍.
	I C 熔灰岩堆石	层厚 1.2 m, 振动碾压 4 遍.
	I D 熔灰岩堆石	层厚 0.6 m, 振动碾压 4 遍.
过渡层 II	II B 破碎砂砾石, $d < 100 \text{ mm}$, 含砂 40%	层厚 0.3 m, 水平振动碾压 4 遍, 上游坡面平板压实器压 6 遍.
	II BB	
填土 IV	IV A 任意料粉细砂	填筑后不压实.
	IV B	

阿瓜密尔帕坝除周边缝采用表面“止水”(使用粉煤灰,不采用含橡胶沥青 IGAS)外,其余均属常规设计.该坝采用塞格雷多坝的经验,水平配筋 0.3%,至今运行良好.

4 巴昆坝(Bakum CFRD)

巴昆坝位于马来西亚拉尚河上游支流巴吕河上.该坝主体工程在 1996 年公开招标,由瑞典 ABB 公司、巴西 CBPO 公司为主,联合韩国和墨西哥各一家公司中标,原计划 1996 年内开工,2003 年完工,后因生态环境问题使得开工时间有所拖后.坝高为 205 m,为目前在建的世界最高的混凝土面板堆石坝,坝体主堆石料采用开挖的新鲜硬砂岩,冲积层材料经筛分并与硬砂岩加工料掺混后作反滤层及过渡层,混有泥岩的开挖料用于次堆石区.其坝体横断面见图 4.

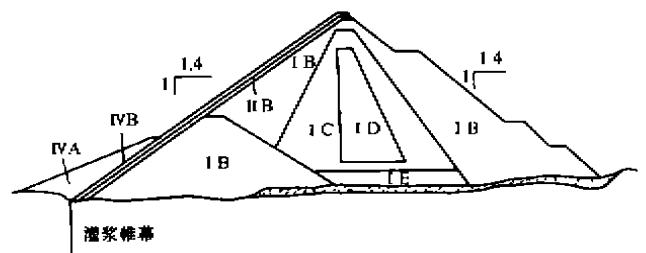


图4 Bakum 坝横断面

I B: 硬砂岩; I C: 硬砂岩超过 70%, 泥岩小于 30%; I D: 硬砂岩超过 50%, 泥岩小于 30%; II B: 过渡层区; IV A: 任意料; IV B: 不透水土料

巴昆坝采用常规设计,在坝址地基方面有 3 个特点:①有一段趾板地基下为页岩或硬砂岩和页岩互层,设计要求用混凝土防渗墙处理,墙厚 0.8 m,末端伸入硬砂岩层 1~2 m,最大深度约 35~40 m,最后处理方案在开挖后根据实际情况由业主代表确定;②右岸上部设 6 m 高的混凝土挡墙与面板连接,以

纠正右岸的地形缺陷;③基础灌浆孔河床部位最深处达 140 m。

5 水布垭坝

水布垭水利枢纽位于湖北省巴东县,为恩施市以下清江干流三级梯级开发方案的龙头枢纽,拟建中的混凝土面板堆石坝方案,坝高 234 m,为目前世界上同类坝型中的最高坝,坝顶宽 12 m,上游坝坡 1:1.4,下游坝坡 1:1.3,设有 5 m 宽的之字型马道。坝体典型横断面见图 5。

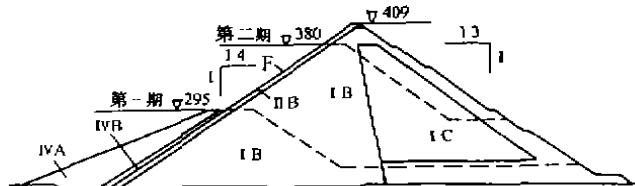


图 5 水布垭坝横断面

I B:主堆石区;I C:次堆石区;II B:垫层过渡层区;IV A:任意料;IV B:不透水土料;F:面板

水布垭坝很高,可借鉴的经验少,为控制堆石体合理变形,为面板创造良好的工作条件,需对坝料分区及选料设计进行控制和论证。在敏感性分析阶段,利用平面有限元计算手段,坝体主堆石采用天生桥两组坝料及洪家渡坝料试验参数,次堆石采用天生桥坝料参数进行分析,认为:①不同筑坝材料对坝体变形影响较大。如满蓄时坝体沉降,按天生桥第一组坝料计算为 4.91 m,占坝高的 2.1%,而洪家渡参数计算为 1.99 m,占坝高的 0.85%。②不同筑坝材料对面板变形和应力有显著影响。图 6 为各组坝料计算得到的面板挠度。满蓄时,洪家渡组参数计算得到的面板挠度为 0.83 m,天生桥第一组坝料参数计算的面板挠度为 2.30 m,两者相差近 3 倍。面板的变形差别导致面板应力特别是拉应力差别较大,如同为满蓄时,用天生桥第一组参数计算的面板顺坡向拉应力极值为 9.19 MPa,而洪家渡参数计算相应值为

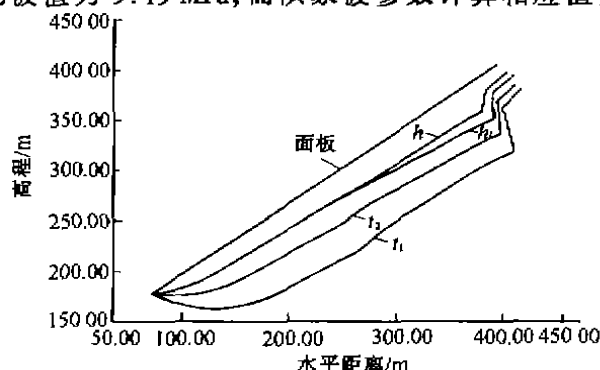


图 6 满蓄时面板挠度

h_1 :天生桥第一组参数; h_2 :天生桥第二组参数; h :洪家渡参数; h_1 :主堆石洪家渡参数,次堆石天生桥参数

2.54 MPa。③根据平面有限元力学分析,水布垭坝若能合理设计坝体分区,选用低压缩性、高变形模量的筑坝材料,确定良好坝料级配和压实标准,减小堆石坝体变形,改善面板工作条件,混凝土面板堆石坝方案在技术上是能够成立的,对 200 m 级高混凝土面板堆石坝的建设起到较大的促进作用。

6 结 语

迄今为止,已建的现代混凝土面板堆石坝基本上在正常地运行,对于低于 200 m 的混凝土面板堆石坝已有较为完善的设计施工经验,结合施工及运行中出现的问题,以下几个方面值得关注。

6.1 不同岩基上趾板的宽度

对于坚硬可灌地基上趾板宽度一般取 $1/20 \sim 1/25$ 水头,存在断层或强风化夹层的岩基,可在趾板下游的地基表面喷混凝土,使渗径延长到不小于 $1/4$ 水头,再在其下游一定距离内铺设反滤层,同时在喷混凝土面上也铺反滤料以防止可能开裂。

6.2 面板混凝土的防裂措施

碾压密实的堆石使面板在水荷载作用下变形较小,一般情况下较少开裂,但也发现面板开裂漏水情况。

125 m 高的希罗罗坝 (Shiroro CFRD) 在 1.0 ~ 6.5 m 高趾墙的背后面板底部有不规则的“S”型裂缝,分析原因可能是高趾墙后堆石体压缩引起不均匀沉降和高趾墙在水压力作用下转动引起。

我国西北口面板坝面板出现严重裂缝,分析其原因主要是由于温度和干缩等环境因素引起。应在水泥品种、混凝土配比和保证施工质量方面提高混凝土抗裂能力,并注意浇筑后的养护。

6.3 周边缝的止水结构设计

周边缝被破坏是已建面板坝常见的漏水原因。在施工时,需用平板振动器将趾板周围堆石充分压实,有效减小周边缝的变形;同时需做好周边缝的止水结构和材料设计研究。

周边缝渗流控制设施一般设五道防线,即上游粘土铺盖或粉细砂铺盖、缝面塑性填料、PVC 止水、铜片止水、下游反滤料水区。缝面塑性填料国外以 I-GAS 居多,我国也研究出相似产品,如 GB 和 SR 等,其性能优于 I-GAS,例如 GB 材料在常温下断裂伸长率为 800%, -30°C 时也达 600%,在水中浸泡 5 年后与混凝土仍粘结完好。

参考文献

- 1 Nelson L. de, Pinto S, Marques Filho, Pedro L, et al. Foz do Areia dam-design, construction and behaviour. In: ASCE. Symposium on CFRD, Detroit, 1985. 173 ~ 191

(下转第 31 页)

压水头值.1989 ~ 1994 年的五年中实测次数为 69 次,超设计值次数有 3 次,占总次数的 4.35%.

从渗流场三维分析看出,41 号和 80—8 号孔水位受诸多因素影响.而闸基下游冲刷槽附近是否在承压水头作用下发生顶托破坏,主要取决于闸下游河水位与对应位置承压含水层水头值之差值,即取决于井损水头差值 ΔH_3 ,这个值实质上就等于闸基下游在减压井减压作用下真正的剩余承压水头值.从表 3 中看出,它与 41 号和 80—8 号孔水位绝对值之差 ΔH 的大小关系不大.所以建议采用井损水头差值 ΔH_3 ,即真正的闸下承压含水层的剩余水头值,作为判别是否会发生顶托破坏的依据,具体的临界标准可根据承压含水层顶板相对隔水层厚度及力学参数计算确定.

表 3 井损水头差 ΔH_3 与 ΔH 比较 m

时 间	井损水头差 ΔH_3	41 孔与 80—8 孔水位差 ΔH
901025	3.14	0.78
911125	3.56	0.89
940425	2.32	1.43
940829	4.15	2.52
941125	3.16	1.58

2.3 减压井效果不理想原因分析

根据调查分析,减压井效果不理想主要有以下几个方面的原因:

a. 成井质量问题.由于施工工艺上的缺陷,泥浆钻井后井孔内的泥浆泥皮不一定能够全部冲洗干净,导致成井后渗水受阻.

b. 减压井淤井.蚌埠闸减压井全部淹没在闸下游水下,不便于检查、管理和维护,井内有不同程度的淤积.根据淤积物的来源可分为内淤和外淤两类,内淤系反滤层有缺陷或井管结构破损基沙涌入井内所致.外淤系河流携沙沉入井中所致.从井内淤积物中夹有碎石、碎砖、煤渣和煤块等杂物看,以外淤为主.

c. 井口及出水箱设计不合理.向上敞开的井口,当井口涌水流速小于某种泥沙颗粒的临界流速时,泥沙颗粒即下沉入井,造成减压井外淤.

d. 河水回流减速,泥沙沉积.就一般规律,河床

两岸流速较小,易落淤.南岸由于电站未放水,形成回流,流速很小,泥沙大量沉积,致使电站两井和南岸三井井口严重淤积.

e. 逆止阀损坏失效.当闸下游河水位高出承压含水层地下水头时,若井口逆止阀失效,河水将携带大量泥沙倒灌入井,淤堵井管及井的反滤层.

3 结论与建议

a. 随着有效减压系数的增大,天然水头差呈指数增长,即随着天然承压水头与闸下游河水位差值的急剧增加,减压井的减压效果呈现缓慢增长,表明减压井虽有减压作用,但减压效果远没有充分发挥.值得注意的是,当有效减压系数 $\alpha = 0$,即减压井完全失效时,在闸上下游水位差为 5.00 m 的情况下,损耗在减压井内的水头损失达 3.40 m.即只有当承压水头与闸下游河水位差值大于 3.40 m 时,减压井才能开始起到减压作用.所以目前减压井可以说已严重淤堵,减压效果不佳.但在较高天然水头差下,减压井仍具有减压作用,但减压效果远没有达到设计要求.

b. 闸基下游冲刷槽附近是否在承压水头作用下发生顶托破坏,主要取决于井损水头差值 ΔH_3 ,它与 41 号和 80—8 号孔水位相对下游河水位的大小有关,而与两孔绝对值之差 ΔH 的关系不密切.

c. 建议采用修复、改造减压井方案或在两岸打抽水井与减压井抽水井相结合方案,有效地降低闸基下伏承压含水层的承压水头对闸基下游冲刷槽及隔水顶板的顶托破坏作用,保证蚌埠闸安全与稳定.同时建议加强长观,密切关注承压含水层中地下水位的动态变化,遇有异常现象及时分析原因.

参考文献

- 1 周志芳,钱孝星,顾长存.三峡工程坝基扬压力三维有限元分析.河海大学学报,1993,21(5): 94 ~ 99
- 2 周志芳,朱学愚.新安江水电站三坝段扬压力异常机理分析.岩土工程学报,1998,20(4):54 ~ 57
(收稿日期:1998-03-10 编辑:熊水斌)
- 3 Bayardo Materon, Construction of Foz do Areia Dam. In: ASCE. Symposium on CFRD, Detroit, 1985. 192 ~ 207
- 4 Pinto N L de S, Blinder S, Toniatti N B, et al. Foz do Areia and Segredo CFRDS—12 years evolution, In: CSHEE, ICOLD, eds, International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, Beijing, VolI, 1993. 381 ~ 398
- 5 Montanez-Cartaxo L E, Hacelas J E, Carstro-Ahonce J. Design of Aguamilpa dam. In: CSHEE, ICOLD, eds. International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, Beijing, VolI, 1993. 337 ~ 364
(收稿日期:1997-09-01 编辑:张志琴)

(上接第 21 页)