

高混凝土面板堆石坝设计新理念

郦能惠

(南京水利科学研究院,南京 210024)

[摘要] 在分析混凝土面板堆石坝 40 多年经验设计及其不完全性的基础上,提出了高混凝土面板堆石坝设计新理念,即针对坝址的地形地质条件与料源情况,进行稳定安全设计、渗流安全设计和变形安全设计,阐述了稳定、渗流、变形安全设计的原则和要点,强调了变形协调原则和理论指导设计的重要性。

[关键词] 混凝土面板堆石坝;设计新理念;稳定安全;渗流安全;变形安全

[中图分类号] TV641.43 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0012-07

1 前言

以薄层填筑、用振动碾分层压实的堆石(或砂砾石)作为坝体的现代混凝土面板堆石坝只有 40 多年历史,全世界已建和在建的混凝土面板堆石坝就达到 500 多座。我国自 1985 年开始建造,至今已建和在建有 250 多座混凝土面板堆石坝,其中坝高等于或高于 100 m 的高混凝土面板堆石坝有 56 座,我国混凝土面板堆石坝的总数和高混凝土面板堆石坝的数量都约占全世界的 50%,已竣工的水布垭面板堆石坝坝高 233 m,居世界第一;坝高 156 m 的紫坪铺面板堆石坝抵御了汶川 8 级大地震。由于这种坝型的安全性和经济性良好,能适应不良的气候条件、地形条件和地质条件,软岩、特硬岩和砂砾石都可用作面板堆石坝的筑坝材料,可以充分利用枢纽各建筑物的开挖料来填筑坝体,尽量做到挖填平衡,既节省投资,又利于环境保护。在强地震区、深覆盖层、深厚强风化岩和高陡岸坡的坝址,混凝土面板堆石坝往往成为最有竞争力的坝型。

纵观历史数百座混凝土面板堆石坝,其建造一直都采用经验设计的方法,正如面板堆石坝专家 J. B. Cooke 指出:自首批混凝土面板堆石坝以来,设计混凝土面板堆石坝的基本做法是以先例——类似工

程的样例为基础的经验设计。“经验”一词是“以实际经验作指导而非由理论指导”的意思^[1]。

2 经验设计内涵

现代混凝土面板堆石坝的经验设计可以概括为以下要点^[2,3]。

1) 经验确定坝体分区,规定了用硬岩堆石和砂砾石填筑的坝体分区、各区筑坝材料和填筑标准。强调堆石坝体上游部分应具有低压缩性,下游部分不要求低压缩性。我国的面板堆石坝设计规范还建议了各区坝料填筑标准:垫层区、过渡区、主堆石区和下游堆石区的填筑标准分别是孔隙率 15% ~ 20%、18% ~ 22%、20% ~ 25% 和 23% ~ 28%。

2) 经验确定垫层料的颗粒级配,典型的是 J. L. Sherard 在 1985 年建议的颗粒级配。

3) 经验确定坝坡,筑坝材料为硬岩堆石料时,上下游坝坡为 1:1.3 ~ 1:1.4,筑坝材料为软岩堆石料或砂砾石料时,上下游坝坡一般为 1:1.5 ~ 1:1.6。

4) 经验确定面板厚度,经验公式 $t = 0.3 + \alpha H$, 式中, t 为面板厚度, m; 经验系数 α 为 0.002 ~ 0.003 5, 大多数面板堆石坝选取 0.003; H 为计算断面至面板顶部的垂直距离或该点水头, m。

[收稿日期] 2009-12-31

[基金项目] 中国水电顾问集团公司科技项目(CHC-KJ-2006-09)

[作者简介] 郦能惠(1940—),男,浙江诸暨市人,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事水工结构和岩土力学的研究工作;
E-mail:nhli@nhri.cn

5) 经验确定面板混凝土强度和抗渗等级, 分别要求不低于 C25 和 W8。

6) 经验确定面板分缝, 垂直缝间距一般取 12 ~ 18 m, 两岸坝肩附近部位面板垂直缝间距取其一半左右。

7) 经验确定面板配筋率, 垂直向(顺坡向)配筋率通常为 0.35% ~ 0.40%, 水平向(坝轴向)配筋率通常为 0.30% ~ 0.35%, 周边缝附近配筋率为 0.5%。

8) 经验确定趾板宽度, 1983 年建成的萨尔瓦琴娜坝依据趾板岩石地基的容许水力梯度来确定趾板宽度, 成为后续建造的混凝土面板堆石坝工程仿效的实例。

9) 经验确定接缝止水结构和止水材料, 自 1980 年阿里亚坝采用三道止水的周边缝止水结构以后, 国内外高混凝土面板堆石坝周边缝都采用这种形式的止水结构, 即顶部玛王帝脂嵌缝材料, 中部 PVC 止水, 底部铜片止水。

数十年经验设计主要是基于下列观点^[1~4]: 绝大部分库水荷载通过上游堆石体作用在坝轴线上游的坝基; 不需要进行坝坡抗滑稳定计算分析; 碾压堆石体对渗流是稳定的。

根据以往经验, J. B. Cooke 在 1984 年提出了高 244 m 的混凝土面板堆石坝的坝体分区^[1], 如图 1 所示。

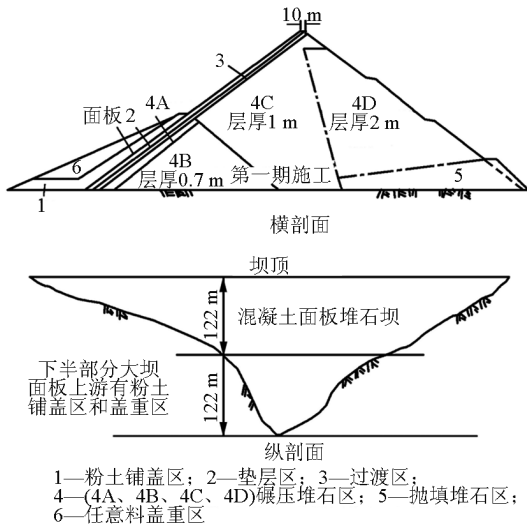


图 1 设想的高 244 m 的混凝土面板堆石坝分区设计

Fig. 1 Dam zoning of 244 m high concrete face rockfill dams conceived

3 混凝土面板堆石坝工程实践的启迪

20 世纪 90 年代以来国内外相继建造了一批高混凝土面板堆石坝, 这些高混凝土面板堆石坝出现了问题, 概括为以下内容^[5~9]。

3.1 垫层区裂缝

天生桥一级坝(坝高 178 m)、辛戈坝(坝高 140 m)垫层区都产生斜向裂缝, 天生桥一级坝斜向裂缝长 5 ~ 40 m, 最大缝宽 27 mm; 辛戈坝斜向裂缝最大缝宽 56 mm, 错位 16 mm, 天生桥一级坝垫层区还产生水平裂缝, 最大缝长 60 m, 最大缝宽 180 mm。

3.2 面板脱空

天生桥一级坝一期、二期和三期面板顶部都存在严重脱空, 一、二期面板有 85% 面板脱空, 三期面板有 52% 面板脱空, 最大脱空深度(沿面板斜长) 10 m, 最大脱空高度 15 cm。

3.3 面板裂缝

天生桥一级坝 1997 — 2000 年 7 次检查面板裂缝, 共发现水平状裂缝 1 296 条, 最大缝宽 4 mm, 裂缝深度 10 ~ 34 cm; 2002 年检查三期面板裂缝, 又发现水平状裂缝 4 537 条, 缝宽大于 0.3 mm 的裂缝有 80 条, 裂缝最大深度 41.7 cm, 已贯穿面板厚度。面板裂缝发生部位与面板脱空部位基本一致。阿瓜密尔帕坝(坝高 187 m)1997 年在高程 198 ~ 202 m、高程 180、145、120、94 m 和 70 m 的面板上都发现水平状裂缝和斜向裂缝, 其中 180 m 高程水平裂缝贯穿了 14 块面板, 最大缝宽 15 mm, 导致出现严重渗漏。伊塔坝(坝高 125 m)2000 年在周边缝上方 8 ~ 15 m 的 15 块面板都发现水平状裂缝, 缝宽 7 mm, 渗流量从 160 L/s 增加到 1 700 L/s。

3.4 面板垂直缝两侧混凝土挤压破坏

2003 年 7 月天生桥一级坝河谷中央垂直缝两侧 L3 面板和 L4 面板混凝土挤压破坏, 挤压破坏区域是从三期面板顶部延伸到底部, 长约 55 m, 宽约 3.5 m, 最大深度 30 cm。修补后 2004 年 5 月该区域面板又挤压破坏, 挤压破坏区向下又延伸了 38 m, 宽度达到 6 m, 部分可见止水铜片翼片外露。

莫海尔坝(坝高 145 m)2006 年 2 月首次蓄水时河谷中央面板垂直缝两侧 L17 和 L18 面板混凝土挤压破坏, 两侧面板超叠 120 mm, 错台 75 mm, 渗流量达 600 L/s。

巴拉·格兰特坝(坝高 185 m)2005 年 9 月河谷中央面板垂直缝两侧第 19 块与第 20 块面板混凝土

土挤压破坏,挤压破坏区域从二期面板顶部延伸到其底部,使渗漏量增至 428 L/s。修复后 2005 年 11 月至 2006 年 1 月再次蓄水,渗漏量从 830 L/s 增至 1 284 L/s,两次在破坏区铺洒粉砂处理渗漏,但渗漏量仍达到 1 000 L/s。

坎普斯·诺沃斯坝(坝高 202 m)2005 年 10 月首次蓄水时发现河谷中央垂直缝两侧第 16 块和第 17 块面板混凝土挤压破坏,挤压破坏区域从三期面板顶部延伸到水下,渗漏量 450 L/s。2006 年 2 月

渗漏量增至 1 300 L/s,在破坏区铺洒粉砂处理渗漏,渗漏量减小至 848 L/s,4 月 4 日库水位上升,渗漏量又达到 1 294 L/s,2006 年 6 月放空水库,对面板混凝土挤压破坏区进行修复。

3.5 严重渗漏

除上述巴拉·格兰特坝和坎普斯·诺沃斯坝因垂直缝两侧混凝土挤压破坏造成严重渗漏以外,还有多座面板堆石坝出现严重渗漏,如表 1 所示。

表 1 面板堆石坝严重渗漏

Table 1 Serious seepage of concrete face rockfill dams

坝名	坝高 /m	最大渗漏量 / (L·s ⁻¹)	处理措施	处理后渗漏量 / (L·s ⁻¹)	根治措施	根治后渗漏量 / (L·s ⁻¹)	渗漏原因
杜利米奎	115	5 400	铺撒粉质细砂	1 600 ~ 6 400	面板上铺土工膜	600	周边缝渗漏—垫层料冲蚀—面板开裂
伊塔	125	1 700	铺撒粘土、砂土	380	—	—	右坝肩周边缝上方 8 ~ 15 m 面板裂缝张开 7 mm
希罗罗	125	1 900	铺撒粉质砂土	500	不详	100	周边缝附近面板裂缝
考兰	130	980	抛填砂砾石	340 ~ 2 200	充填砾石和砂,然后水泥砂浆灌浆	50	面板支撑差—面板裂缝—垫层料冲蚀—面板坍塌
株树桥	78	2 500	—	—	回填垫层料、灌浆、修复面板与止水、铺土工膜	10	接缝位移过大—止水损坏—垫层料冲蚀—面板坍塌

3.6 溃坝

500 多座混凝土面板堆石坝只有沟后混凝土面板砂砾石坝一座溃决,该坝高 70 m,1990 年 10 月建成,1993 年 8 月 27 日约 22 时 40 分溃决。现场调查发现:1993 年 7 月下旬库水位从 3 261 m 逐渐上升至 8 月 27 日 12 时的 3 277 m,下游坝坡多处出渗和流水,13 时 30 分库水位超过防浪墙底面约 20 mm,坝底和坝顶处大面积流水。20 时下游坝坡大面积出渗与流水。下游坝坡出渗和流水示意图见图 2^[10]。

笔者自 2002 年以来一直关注这些问题,分析概括其产生原因如下^[5~8]:

1) 主堆石区变形模量高、下游堆石区变形模量低、坝体变形不协调是导致垫层区裂缝、面板脱空和面板裂缝的主要原因。从原型观测资料得出阿瓜密尔帕坝主堆石区和下游堆石区的变形模量分别为 260 MPa 和 47 MPa,两者相差 5.5 倍。天生桥一级坝筑坝材料室内试验值和从原型观测资料反演分析得到的坝体各分区模量系数 K 值分别是:主堆石区

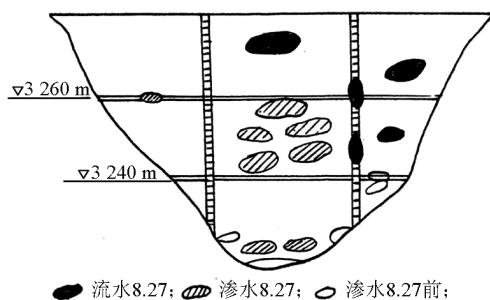


图 2 沟后坝下游坝坡出渗和流水情况示意图
Fig. 2 Outward seepage zones and water running zones on downstream slope of Gouhou Dam

(灰岩料)940(试验值)和 369(反演分析值),下游堆石区(灰岩料)720(试验值)和 269(反演分析值),下游堆石区(砂泥岩料)500(试验值)和 246(反演分析值)。两者相差 1.9 倍。

阿瓜密尔帕坝填筑竣工后实测的 9 个月坝体沉降增量等值线见图 3。从图 3 可以看出下游坝体沉降明显大于上游坝体,上游坝体向下游位移,导致面

板发生严重挠曲,正如实测的面板法向位移所示(见图4),从而面板产生水平状挠曲应力裂缝。

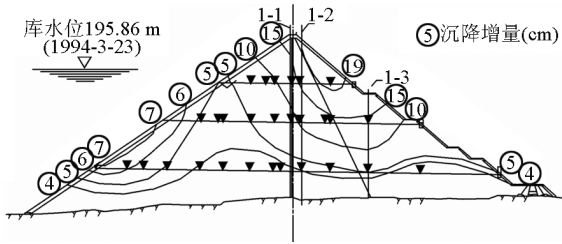


图3 阿瓜密尔帕坝 1993 年 6 月 26 日至 1994 年 3 月 23 日坝体沉降增量等值线
Fig. 3 Isolines of settlement increment of Aguamilpa Dam from June 26, 1993 to March 23, 1994

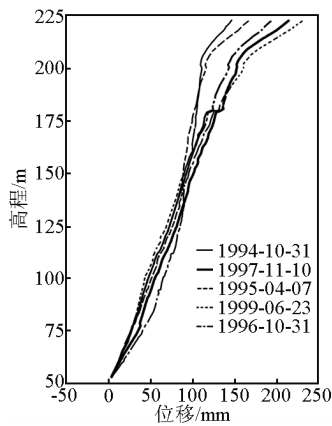


图4 阿瓜密尔帕坝第 18 块面板法向位移
Fig. 4 Normal displacement of face slab No. 18 of Aguamilpa Dam

天生桥一级坝 0 + 438 m、0 + 630 m 和 0 + 918 m 3 个断面垫层区测点测得的 1999 年全年(或半年)的沉降增量为 10 ~ 36 cm,向下游水平位移增量为 4 ~ 15 cm,说明垫层区已脱开面板,面板发生严重挠曲,导致面板产生数千条水平状挠曲应力裂缝。

从两座高混凝土面板堆石坝的性状分析可以看出;以往经验设计的观点——“绝大部分水荷载是通过坝轴线以上坝体传到地基中去的。……而愈往下游堆石体对面板变形的影响则愈小,故坝料的变形模量可以从上游到下游递减”是不全面的,这也是造成垫层裂缝、面板脱空和面板裂缝的原因。为此笔者提出坝体分区设计必须遵循变形协调原则,要做到坝体各区的变形协调以及坝体变形与面板变形之间的同步协调^[8]。

图 1 为 J. B. Cooke 提出的高 244 m 的混凝土面板堆石坝分区,从上游到下游坝体各区的筑坝材料、填筑层厚和变形模量的要求是越来越低,第 5 区(下游底部堆石区)甚至可以采用抛填堆石^[1]。假若他分析了 20 世纪 90 年代后建造的高混凝土面板堆石坝产生垫层裂缝、面板脱空和面板裂缝的原因,他也会认为以前提出的高坝坝体分区是不合理的。

2) 坝体变形对面板的作用是导致河谷中央垂直缝两侧面板混凝土挤压破坏的主要原因。堆石坝体某点的变形取决于该点代表的可变形坝体的几何尺寸和变形特性及其该点上作用的荷载——上覆坝体自重和面板传递来的水荷载。因此在填筑施工期坝体在坝轴线方向的变形是朝着河谷中央;蓄水期在水荷载作用下、坝体朝着河谷中央坝轴线方向的变形继续增加。

面板是位于坝体上一块刚度高几个数量级的混凝土板,坝体朝着河谷中央的变形(莫海尔坝实测坝顶朝向河谷中央的位移达 100 mm),必然在两者之间的接触面产生相当大的朝着河谷中央的摩擦力,从而使得靠近两岸坝肩面板的坝轴向方向应力为拉应力、而河谷中央面板的坝轴向应力为压应力,莫海尔坝实测挤压破坏区面板压应变 650×10^{-6} ,压应力 24 MPa,当压应力超过面板混凝土的强度(C25 和 C30 混凝土抗压强度是 17 MPa 和 20 MPa),则使其破坏。因此坝体变形对面板的作用是导致河谷中央垂直缝两侧面板混凝土挤压破坏的主要原因。

3) 面板挤压破坏、面板裂缝、垫层料冲蚀甚至面板坍塌以及接缝止水损坏是导致严重渗漏的主要原因。采用 J. L. Shnard 建议的经验级配垫层料、单纯依靠在面板上铺撒粉质砂土,期望着用淤堵方法来根本解决渗漏问题几乎不成功,渗流作用下经验设计垫层料并非都是稳定,而且不能完全自愈。

4) 库水进入坝体,坝体浸润线抬高,砂砾石坝体饱和、产生湿陷变形并且抗剪强度降低,坝顶部分坝体失去稳定,最终导致沟后面板砂砾石坝溃决。溃坝后在筑坝材料的强度与渗流试验的基础上,下游坝坡稳定性可靠度分析表明:在下游坝坡渗流逸点在 3 243 m 高程时失稳概率接近 100%;当渗流量大于 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时失稳概率接近 100%。这说明在较严重的渗流作用下堆石坝体或砂砾石坝体可能失去稳定。

4 高混凝土面板堆石坝设计新理念

综上所述可以看出,数十年积累形成的混凝土面板堆石坝的经验设计及其观念是不全面的,导致面板裂缝、混凝土挤压破坏、接缝止水损坏、严重渗漏乃至溃坝等严重后果。基于对混凝土面板堆石坝性状的分析,笔者提出了高混凝土面板堆石坝设计新理念,设计新理念包括稳定安全设计、渗流安全设计和变形安全设计3个方面。分述如下。

4.1 稳定安全设计

从沟后坝溃决的实例可以看出,砂砾石坝体在饱和状态下,抗剪强度降低,会导致部分坝体失去稳定。显然“经验确定坝坡,不需要进行坝坡抗滑稳定计算分析”是不合理的。笔者认为混凝土面板堆石坝依然需要进行稳定安全设计,稳定安全设计包括下列内容:

1) 进行坝址区工程地质和水文地质勘测,包括河床覆盖层工程特性的确定,若采用趾板建在覆盖层上的混凝土面板堆石坝,宜采用现场取原状样进行室内试验、现场进行旁压试验或荷载试验进行反演分析等多种手段来确定覆盖层的工程特性。

2) 进行筑坝材料料场的勘测和试验及建筑物开挖料的试验,坝料试验宜考虑缩尺效应,宜进行坝料长期变形(流变)试验,在地震区建坝,应进行坝料动力特性试验。

3) 基于变形协调原则和水力过渡原则,充分利用建筑物开挖料,通过技术经济比较,进行坝体分区设计。

4) 针对不同的坝体分区设计方案,依据设计规范,进行抗滑稳定计算分析,地震区建坝,应进行抗震稳定计算分析,宜采用极限平衡法与有限元法相结合的计算方法,通过计算分析来确定坝坡与坝体分区设计。猴子岩水电站和文登抽水蓄能电站上库两座混凝土面板堆石坝就是进行稳定安全设计的实例。

坝高 223.5 m 的猴子岩混凝土面板堆石坝坝轴线下游部分覆盖层不挖除,下游坝体 3C1 区采用建筑物开挖的弱风化白云质及变质灰岩料,经抗滑稳定计算分析(见图 5),下游坝坡分别采用 1:1.5 和 1:1.6。

坝高 101 m 的文登抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝,采用库区开挖的石英二长岩料筑坝,为充分利用强风化和全风化料,经抗滑稳定计算分析

(见图 6),马道间下游坝坡确定为 1:2.0。

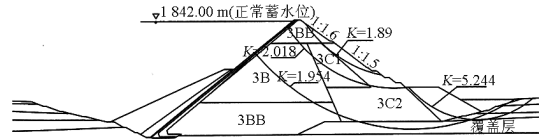


图 5 猴子岩坝抗滑稳定计算

Fig. 5 Calculation of stability against sliding for Houziyan Dam

注:计算工况(正常蓄水位 1 842 m + 地震 0.297 g)

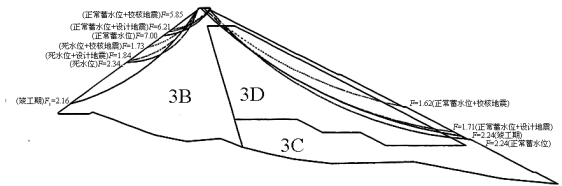


图 6 文登抽水蓄能电站上水库抗滑稳定计算

Fig. 6 Calculation of stability against sliding for head reservoir of Wendeng Pumped Storage Station

4.2 渗流安全设计

无论趾板建在基岩上的面板堆石坝防渗体系(由趾板—面板—防浪墙及接缝止水组成),还是趾板建在覆盖层上的面板堆石坝防渗体系(由混凝土防渗墙—连接板—趾板—面板—防浪墙及接缝止水组成),在正常情况下都相对不透水,同时硬岩堆石料的面板堆石坝的坝体为自由排水,砂砾石和软岩堆石料的面板堆石坝设置了自由排水的 L 形排水体。因而混凝土面板堆石坝的渗流安全设计内涵与土质防渗体堆石坝的渗流安全设计不同。

混凝土面板堆石坝产生渗漏或严重渗漏甚至导致溃坝的主要渗漏途径分别是接缝止水损坏和面板裂缝、挤压破坏甚至坍塌,混凝土面板堆石坝渗漏影响到渗流变形稳定安全和抗滑稳定安全两方面。因此混凝土面板堆石坝的渗流安全设计应包括下列主要内容。

1) 减小与控制接缝位移,特别是垂直缝张开位移和周边缝三向位移。a. 优化坝体分区设计,特别是在狭窄河谷中建坝,增大两岸附近坝体的变形模量,减小岸坡岩体与堆石坝体之间模量差别,尽量减小因堆石坝体变形而产生的周边缝位移。例如位于狭窄河谷的坝高 223.5 m 猴子岩坝在两岸附近与坝体底部设置主堆石特别碾压区,如图 7 所示。b. 修

正趾板建基面的地形和趾板下游的地形,避免不良的地形条件引起堆石坝体的不均匀变形,从而导致周边缝过大的位移。c. 提高周边缝附近特殊垫层区与垫层区的填筑标准,同时应使得周边缝附近的垫层区、过渡区和堆石区的填筑标准和变形模量彼此相近,避免各分区变形不协调而导致面板产生挠曲应力裂缝。

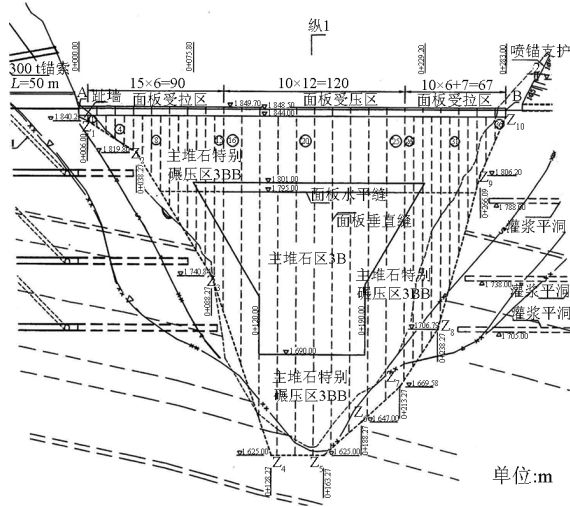


图7 猴子岩混凝土面板堆石坝坝轴线剖面图

Fig. 7 Longitudinal section along dam axis of Houziyan CFRD

变形安全设计新理念。变形安全设计包括如下内容。

1) 坝体分区设计应遵循4条原则:料源决定原则、水力过渡原则、开挖料利用原则和变形协调原则。重点是变形协调原则,既要做到坝体各区的变形协调,又要做到坝体变形和面板变形之间的同步协调。测定筑坝材料变形特性包括流变特性,采用合理的本构模型和数值分析方法来比较不同分区方案的坝体变形和面板应力变形性状,以变形协调、改善面板工作性状,面板不产生脱空和裂缝为原则来合理确定坝体分区。

2) 针对不同地形地质条件采用新的坝体分区设计。猴子岩面板堆石坝是一实例。建在倾斜地形条件的宜兴抽水蓄能电站上库面板堆石混合坝又是一例,为了增加坝体抗滑稳定性、减小对坝趾高挡墙的土压力,并改善427 m高程以上坝体和面板的工作条件,提高了427 m高程以下坝体变形模量,提高其填筑标准,称为增模区(见图8)。

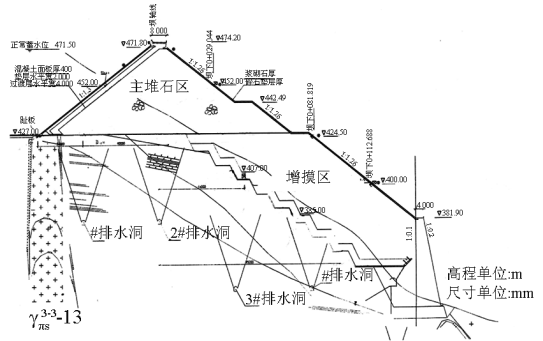


图8 宜兴抽水蓄能电站上库混凝土面板堆石混合坝的0+381.02 m断面

Fig. 8 0 + 381.02 m cross section of dam for head reservoir of Yixing Pumped Storage Station

2) 减小甚至避免面板裂缝。详见文献[7]和变形安全设计。

3) 适应大变形的接缝止水结构和止水材料,详见文献[7]。

4) 垫层料内部渗透变形稳定的研究和设计。多座混凝土面板堆石坝垫层料被冲蚀以及用粉质砂土淤堵的方法不能根本解决严重渗漏的现象说明目前经验设计确定的垫层料是不够完善的。应进行垫层料渗透变形试验,仿真模拟垫层区在面板裂缝或接缝止水损坏情况下,研究在不同水头、不同渗流速度条件下的垫层料的渗透变形特性,研究和确定满足垫层料渗透变形稳定要求的垫层料和过渡料的设计。

5) 坝体各分区之间渗透变形稳定的研究和设计。应进行大尺寸的垫层料与过渡料、过渡料与堆石料之间的渗透变形试验,仿真模拟渗流乃至止水损坏时的水流冲刷条件,研究和确定坝体各分区坝料满足渗透变形稳定的设计。

4.3 变形安全设计

高混凝土面板堆石坝设计新理念中最重要的是

3) 适当提高下游堆石区的填筑标准,即使下游堆石料或建筑物开挖料的岩性、风化程度和颗粒级配较差,提高其填筑标准,使坝体各区的变形模量相近,达到坝体变形协调,避免或减小面板脱空和裂缝。三板溪坝主堆石区的垂直压缩模量110~120 MPa,下游堆石区80~90 MPa,没有出现面板脱空和挠曲应力裂缝。

4) 合理确定在纵剖面 and 横剖面上坝体填筑形象进度,合理组织筑坝材料开挖、储存和填筑,尽量做到坝体填筑全断面均衡上升,在施工期坝体变形协调,垫层区不产生裂缝。

5)合理确定面板分期浇筑时间以及面板浇筑时已填筑坝体顶面与该期面板顶面之间的高差,在测定筑坝材料流变特性的基础上采用数值计算方法分析不同浇筑时间和不同高差情况下堆石坝体与面板的应力变形性状,优化面板浇筑施工设计,使堆石坝体变形与面板变形同步协调,不产生面板脱空和挠曲应力裂缝。

6)减小堆石坝体在坝轴线方向的位移,减小面板与垫层之间的约束,从而减小堆石坝体向河谷中央的变形产生的对面板的摩擦力,以改善面板应力状态。减小两岸坝肩附近面板的拉应力以及河谷中央面板的压应力,避免两岸坝肩附近面板产生拉裂缝以及河谷中央面板挤压破坏。使得堆石坝体与面板在坝轴线方向的变形协调方法包括:提高堆石坝体的变形模量,特别是上半部分的坝体的变形模量,图7所示的猴子岩坝在顶部1/4坝体采用主堆石特别碾压区3BB,除了提高该坝抗震能力以外,也是为了堆石坝体与面板在坝轴线方向变形协调,避免面板拉裂缝和挤压破坏的设计措施。

5 结语

水电是可再生的清洁能源,我国水电资源的蕴藏量居世界第一,但是已开发的仅占总量的20%,2020年我国水电装机容量将达到3.8亿kW,在我国西部金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河、怒江和黄河(上游)等河流有许多地方适宜建设水电站,若选用混凝土坝,在地势险要、交通闭塞的西部地区,道路建设困难、建筑材料运输成本很高;若选用土质防渗体堆石坝,征用深山峡谷本已少有的耕地,对于当地民生和环境会造成严重影响,因此混凝土面板堆石坝往往成为最有竞争力的坝型。我国坝工界专家为建设300m级高混凝土面板堆石坝提出了许多真知灼见^[11-14]。笔者在系统地分析了混凝土面板堆石坝40多年经验设计的成功及其不完全性的基础上,指出简单地采用经验设计的方法是不够的,提出了高混凝土面板堆石坝设计新理念,即针对坝址的地形地质条件与料源情况进行稳定安全设计、渗流安全设计和变形安全设计,强调了变形协调原则的重要性,阐述了稳定、渗流和变形安全设计的原则和要

点。期望我国水利水电行业共同努力,沿着实践—认识—再实践的道路,在不远的将来完成一批高坝和超高坝建设的同时,形成我国自己的高混凝土面板堆石坝的设计理论。

参考文献

- [1] Cooke J B. Progress in Rockfill Dams[J]. The Eighteenth Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(10):1383-1414.
- [2] 库克. 混凝土面板堆石坝的经验设计[J]. 水利水电快报, 1999, 20(5):7-11.
- [3] Sherard J L, Cooke J B. The concrete face Rockfill Dams; I assessment[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113(10):1096-1112.
- [4] Cooke J B, Sherard J L. The concrete face Rockfill Dams; II design[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113(10):1113-1132.
- [5] 郇能惠, 胡庆余, 张兴栋, 等. 高面板堆石坝施工关键技术[C]//2002年水工专委会学术交流会议学术论文集. 北京: 中国水利学会水工结构专业委员会, 2002.
- [6] 郇能惠, 张建新, 熊国文, 等. 中国面板坝运行情况 & 监测资料分析[C]//中国混凝土面板堆石坝20年——综合·设计·施工·运行·科研. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [7] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [8] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8):1143-1150.
- [9] 国际大坝委员会. 混凝土面板堆石坝设计与施工新概念——国际大坝委员会技术公报[M]. 王兴会, 胡苏萍, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 国家防汛抗旱总指挥部办公室、水利部科学技术司. 沟后水库砂砾面板坝——设计施工运行与实施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [11] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题. [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007:52-62.
- [12] 蒋国澄. 特高混凝土面板堆石坝建设的思考[C]//土石坝技术——2008年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008:11-17.
- [13] 杨艳泽, 周建平. 我国特高面板堆石坝的建设与技术展望. [C]//见土石坝技术——2008年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008:18-25.
- [14] 赵增凯. 高混凝土面板堆石坝防止面板脱空及结构性裂缝的探讨[C]//混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2005:38-44.

(下转 28 页)