

碾压混凝土坝防渗结构型式的工程实践

朱岳明¹, 储小钊²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 国家电力公司北京勘测设计研究院, 北京 100024)

摘要 针对碾压混凝土坝的渗流特性及其渗控设计的复杂性, 在多年理论研究工作的基础上对国内外多座已建大坝工程所用的防渗结构型式和运行情况进行介绍, 并对不同典型防渗结构型式的主要优缺点作了分析, 推荐了既有较好防渗功能又能充分发挥碾压混凝土施工优点的优选防渗结构型式。

关键词 碾压混凝土坝; 防渗结构型式; 二级配碾压混凝土; 渗透各向异性

中图分类号 TV642.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2003)01-0016-05

1 碾压混凝土及碾压混凝土坝的渗流特性

自 20 世纪 70 年代碾压混凝土坝问世以来, 筑坝技术取得了长足的发展, 并逐渐从初期的中小型重力坝向高大型重力坝和中高型拱坝发展。从目前的理论研究和工程实践情况来看, 由于碾压混凝土坝具有薄层碾压上升的施工特点, 上下层混凝土在施工过程中存在时间间隙, 影响了层间混凝土的胶结, 形成了具有一定水力隙宽的交界薄弱面——层面或缝面(以下统称层面)。

碾压混凝土坝中层面的存在使得大坝的渗流特性与常态混凝土坝的大不相同, 理论分析和工程实践都表明 (a) 大坝碾压混凝土本体的透水性很弱, 渗透系数通常在 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ cm/s 数量级, 而层面的渗透能力与其水力等效隙宽的立方成正比, 比本体要强很多, 坝中渗透水流主要沿层面流动。笔者经研究认为, 在当今的施工方法和工艺水平条件下, 宏观上碾压混凝土坝体是不可避免地成为渗透各向异性比达到 2 个数量级以上的渗透强各向异性体^[1], 在早期已建的大坝中这种异性比可能会达到 6~7 个数量级, 甚至更大。(b) 施工时骨料分离现象的存在, 使碾压混凝土本体及层面的抗渗性能均具有较大的离散性, 由于层面的渗透性还受层面间歇时间、层面处理方式等因素的影响, 离散程度更大, 这种层面渗透的不均匀性使得碾压混凝土坝的渗流特性变得更为复杂, 在已建工程的运行中常会观察到大坝局部点或区有集中渗漏的现象。(c) 碾压混凝土坝具有一定的渗流自愈性, 工程投入运行后, 随着时间的推移, 坝体渗流量会逐渐降低至一个相对稳定的低值, 这主要是混凝土中未水化水泥和粉煤灰逐步水化以及水流中夹杂的细小颗粒沉积和淤堵混凝土中渗漏通道的缘故。这种现象虽然有利于减少渗流量, 但它能改变层面上水头的再分布, 要注意的是, 这种再分布未必总是对坝体的安全有利。(d) 从近年来已建工程的施工质量及运行情况来看, 坝体总的渗透水量较小, 整个坝体为弱透水体, 这是好事, 但坝体对防渗结构的抗渗能力要求却由此反而更高, 对坝体横缝及周边缝的止水结构的要求也更高, 否则不利于大坝的安全。

对于碾压混凝土坝而言, 防止渗漏只是一个方面, 还必须考虑防止坝体出现沿层面上扬压力过大的现象, 以及渗漏会使层面及混凝土的抗融能力和耐久性降低等不利影响, 也会影响大坝的观瞻性。因此, 合理的防渗结构型式的选取、设计和施工是碾压混凝土坝筑坝技术中的主要内容之一。

2 渗流控制的目的与原则

在早期的碾压混凝土坝实践中由于对坝体渗流特性缺乏足够的了解, 有的没有采取专门的渗控措施或没有给予足够的重视, 大坝运行后出现沿层面严重渗漏的现象。比如美国的柳溪(Willow Creek)坝, 平均渗透

系数高达 $3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 水库高水位时坝下游面甚至有渗水进射现象, 经水泥灌浆处理后, 平均渗透系数仍有 $9 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

针对碾压混凝土坝渗流的特点及早期实践经验, 后建工程均进行专门的坝体防渗设计, 并出现了多种防渗结构型式, 目的在于: 一是降低坝体层面上的扬压力; 二是减少渗流量; 三是降低排水幕上游面碾压混凝土中的水力比降, 防止发生水力击穿等渗透破坏现象; 四是降低坝下游面上渗流逸出点(线)的位置过高或避免逸出点(线)的出现, 提高大坝的耐久性。据此, 碾压混凝土坝的渗控方案设计仍应以“前堵后排”为基本原则, 其中防渗结构的型式是多样化的。

结合碾压混凝土坝的自身特点, 笔者认为碾压混凝土坝防渗结构型式的要求应是: 能最大限度地满足自身稳定、防渗效果好、适应变形能力强、不易开裂, 工程量小、经济、易施工、对坝体碾压混凝土的施工干扰小, 以及耐久性好、对水质无污染等。

3 碾压混凝土坝防渗结构型式分析

3.1 常态混凝土“金包银”防渗结构

“金包银”是最早被采用的一种防渗结构型式, 又称 RCD 法, 是源于日本并被日本工程界广泛采用的一种型式。我国早期修建的一些碾压混凝土坝中也采用过这种型式。通常是在碾压混凝土坝体与坝基之间浇筑一层常态混凝土垫层, 在坝体上下游面设置一定厚度的常态混凝土作为防渗体, 有时在坝块横缝间也有常态混凝土防渗层。坝上游面防渗体的厚度常根据水头的大小作出调整, 一般在 $1.5 \sim 3.5 \text{ m}$, 上下游面防渗体与坝体碾压混凝土同步搭接浇筑上升, 在坝体层间铺设厚约 1.5 cm 的水泥砂浆, 提高层面结合程度。从工程实践情况看, 这种防渗结构防渗效果良好, 可靠性高, 在日本的岛地川、玉川和中国的铜街子、岩滩等工程中均无明显渗漏。我国北方严寒地区的工程, 如观音阁、白石、桃林口等, 从坝址处的气候条件和提高抗冻性能等因素考虑, 也采用了这种防渗结构。但“金包银”防渗结构的缺点也很明显, 常态混凝土所占的比例过大, 施工工艺复杂, 施工工序甚至超过了常态混凝土坝, 特别是对碾压混凝土的施工干扰大, 不能充分发挥碾压混凝土快速施工的主要优点。此外, 常态混凝土与碾压混凝土的结合情况往往不佳, 防渗体易产生的贯穿性温度裂缝会严重影响防渗效果和诱导坝体开裂, 坝段长度受到限制。观音阁大坝施工期间, 在越冬面附近出现了较严重的水平裂缝。

3.2 常态混凝土薄层防渗结构

常态混凝土薄层结构是欧美国家较常用的一种防渗结构型式。在坝的上游面浇筑厚 $0.3 \sim 1.0 \text{ m}$ 与碾压混凝土铺筑层相同厚度的常态混凝土, 而在其后约 $1 \sim 3 \text{ m}$ 范围的碾压混凝土层面上铺设 $2.5 \sim 7.0 \text{ cm}$ 厚的垫层, 垫层为细骨料常态混凝土或水泥砂浆, 下游面不设常态混凝土。这一防渗结构的主体不仅是常态混凝土层, 还包括铺设垫层的碾压混凝土区。由于薄层混凝土抗裂性能较差, 易出现贯穿性裂缝, 而碾压混凝土层面胶结质量不易控制, 库水容易经裂缝渗透到坝体层面中去, 层面扬压力较大, 因此防渗效果不是十分理想。采用这一结构的铜田(Copper Field)坝、中叉(Middle Fork)坝、盖尔斯威(Galesville)坝、萨科(Saco)坝在施工期上游面均出现不同程度的裂缝。铜田坝蓄水初期渗流量为 24 L/s , 稳定后仍有 5.5 L/s ; 中叉坝初期渗流量为 6.9 L/s , 运行 18 个月后降至 3 L/s ; 盖尔斯威坝有 7 条垂直温度裂缝, 运行 16 个月后渗流量仍有 20 L/s ; 萨科坝比较成功, 29 m 库水头下的总渗量为 0.2 L/s 。

3.3 钢筋混凝土面板防渗结构

钢筋混凝土面板防渗结构类似于面板堆石坝的防渗结构, 是用埋在碾压混凝土中的锚筋将钢筋混凝土面板固定于坝上游面, 通过面板的分缝来避免防渗体产生过大的温度应力, 采用布设钢筋来限制裂缝的扩展, 所以防渗效果较好。面板的施工既可以先于碾压混凝土的铺筑, 达到一定强度后作为碾压混凝土施工时的模板, 也可以滞后于坝体铺筑, 选择适宜的条件单独施工, 充分发挥坝体碾压混凝土的施工优势。目前使用此种结构的工程不多, 具有代表性的有斯苔西(Stacy)坝、小索特(Petit-Saut)坝、赛葡(Sep)坝、龙门滩坝等。从应用的情况看, 小索特坝因面板收缩引起裂缝产生较大的渗漏现象, 龙门滩坝采用补偿收缩钢筋混凝土面板, 但也出现了裂缝, 防渗效果仍然不是很理想。可见温度应力直接危及面板的防渗功能, 同时坝体与面板之间的变形和受力条件较复杂, 也要影响面板防渗结构的可靠性。经研究, 当面板后有充分畅通的排水设施时, 这种防渗结构的防渗效果是能得到保证的, 即使面板局部地方有贯穿性裂缝出现时, 防渗效果仍能得到保证。

基于此,面板后于坝体施工更有利于面板的防渗作用^[2].鉴于钢筋混凝土面板分缝较多以及坝体实为弱透水体,对坝体中的横缝和周边缝都必须布置严格的止水措施.

3.4 碾压混凝土自身防渗

在坝上游面一定范围内使用小骨料、高胶凝材料含量(为防止过大温度应力,通常采用多粉煤灰、少水泥的配合比)的二级配碾压混凝土作为大坝的防渗结构.运用此种方法能基本实现坝体的全断面碾压施工,充分发挥碾压混凝土的各种优势.早期的柳溪坝就采用了这种方法,上游防渗区用水泥含量为 104 kg/m^3 的富浆混凝土,内部混凝土胶凝材料含量只有 66 kg/m^3 ,但由于当时施工水平的局限和对坝体渗流特性认识不足,加上胶凝材料含量过低,层面结合不良,骨料分离严重,导致蓄水后坝体渗漏量过大.后建的上静水(Upper Stillwater)坝吸取了柳溪坝的教训,大大增加了胶凝材料含量,坝体内部为 254 kg/m^3 、上游防渗区更是高达 303 kg/m^3 ,高含量的胶凝材料(坝上游面有一定厚度的常态混凝土面层,作为滑模挡墙及护面用,不作防渗用)使碾压混凝土层面的抗渗能力有所提高,但也产生了巨大的水化热,形成12条竖直向贯穿性劈头缝,渗流量高达 155 L/s ,主要为集中渗流.因此,这种防渗结构型式的关键在于确定合适的混凝土配合比,在保持层面结合良好的同时,又能不产生过大的温度应力,避免形成贯穿性裂缝.从工程实践的情况看,这种型式在西班牙运用广泛,国内的许多工程如已建和在建的荣地、普定、连江山仔、汾河二库等都运用了这种方案.

研究表明,就目前的施工方法和水平而言,虽然二级配碾压混凝土的层面结合质量已得到大大提高,能使坝体层面方向的主渗透系数降至 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 数量级,但仍无法改变层面仍然是坝体主渗流通道的事实,大坝仍为渗透强各向异性体.因此这种防渗结构只能相对降低渗流量,单独无法有效地降低层面扬压力,而且二级配碾压混凝土(层面)几乎得承受全部的库水压力.此外,二级配碾压混凝土结构防渗能力主要取决于层面的抗渗处理效果,而层面的结合质量具有不确定性、施工现场不易检测和控制的特点.笔者认为不宜单独采用这种结构型式的防渗体,采用以此为基础的联合防渗结构应是较好的选择.比如在坝上游面再辅以变态混凝土、PVC薄膜、沥青混合料、防渗涂层等.我国几乎所有的拱坝都运用了这种防渗结构,普定拱坝上游面采用 $2.0 \sim 6.5 \text{ m}$ 的二级配变厚度碾压混凝土,温泉堡拱坝采用 2.0 m 厚二级配混凝土,外加在死水位以下的土工膜,溪柄溪工程采用了二级配碾压混凝土加防渗涂层的结构.在建的世界最高的沙牌碾压混凝土拱坝(最大坝高 132 m)采用的是迎水面二级配碾压混凝土加死水位以下 LJP 型合成高分子防水涂料的联合防渗结构.存在的主要问题是坝上游面采用过多的胶凝质材料易产生贯穿性劈头缝,以及单独使用时无法有效地降低坝体层面上的扬压力.

3.5 变态混凝土防渗

变态混凝土是在我国荣地坝的施工实践中创造出来的,在施工现场,给碾压混凝土中加入适量水泥浆,待混凝土转化为具有塌落度的准常态混凝土后,用人工插入式振捣器进行密实.最初为解决缺少混凝土搅拌设备问题,在各个结合部位和坝体与岸坡、模板边缘、洞室周边等碾压混凝土难以摊铺的地方用常态混凝土代替.由于其各方面性能与常态混凝土相比并无多大差异,而且施工比常态混凝土方便快捷,得到了广泛的应用.在已建的石漫滩、江垭、棉花滩和在建的大朝山、百色、周宁、龙滩等工程中均将此作为坝上游面的主防渗体.目前在工程实践中,常在变态混凝土的后面还设置二级配碾压混凝土,起辅助性防渗作用.笔者认为可取消这种辅助防渗体,而换为在坝上游面三级配碾压混凝土的层面上铺设垫层.

用变态混凝土取代常态混凝土作为防渗结构能确保两种混凝土施工时同步上升,避免由于不能及时变换混凝土品种而使层面间隔时间过长、形成交界薄弱面甚至冷缝面,同时大大减小了施工干扰,提高了施工速度.

从石漫滩和江垭大坝施工场所钻取的混凝土芯样试验结果表明,变态混凝土的强度及抗渗能力均大于碾压混凝土的,基本消除了层面的影响,具有芯样致密、表面光滑、骨料分布均匀以及坝面混凝土光滑的优点.从已建的工程来看,变态混凝土与二级配碾压混凝土之间的结合面只能从混凝土的颜色来判别.据江垭大坝芯样的室内渗透实验结果,变态混凝土层面方向的渗透系数均值仅为 $7.72 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$,说明变态混凝土不仅能减小渗流量,而且其渗透各向异性也已基本消除.变态混凝土在坝体层面切向已成为很好的防渗体,确保了库水头几乎全部消耗在防渗体中,坝体混凝土层面上的扬压力很小.从江垭大坝 1999~2000 年 11 次渗流观测的坝体排水量来看,最大渗流量接近 0.481 L/s ,与上静水坝初期渗流量 107 L/s 和坑口坝渗流量

4.427 L/s 相比,江垭大坝的防渗结构已取得了成功。

需要注意的是,用变态混凝土时水泥砂浆或水泥浆的配合比必须通过试验测定,同时要加强现场施工质量控制,尽可能做到掺浆的均匀性。由于变态混凝土水泥含量相对较大,在已建工程中也时有过大的温度应力导致大坝浅层甚至贯穿于整个防渗体的裂缝的发生,因此须事先专门进行大坝防渗体的防裂和限裂的研究,必要时对坝体多设几道结构缝,比如增加坝上游面的诱导缝等。

3.6 沥青混合料防渗结构

沥青混合料防渗结构源于土石坝的沥青混合料防渗心墙。防渗结构由沥青砂浆或沥青混凝土与上游面防护板组成。沥青混合料透水性小,且透水性随水头增大有减小的趋势,对裂缝有自愈能力,适应变形能力大,适用于任何高度的碾压混凝土坝,而且对高坝更为有利。早在 20 世纪 50 年代,我国就将沥青混合料应用于常态混凝土坝的防渗,如上犹江、凤滩、湖南镇大坝等,均取得了良好的防渗效果。我国第一座碾压混凝土坝——坑口重力坝,就是采用这种防渗结构型式,在钢筋混凝土面板后加 6 cm 厚的沥青砂浆。水库自 1986 年 7 月蓄水以来,经历两次高水位,最大渗流量近 4.427 L/s,正常挡水位运行条件下的渗流量小于 1.5 L/s,并呈逐年减小的趋势。检查表明沥青砂浆防渗层基本不透水,渗漏主要发生在坝体结合部位及绕坝渗流。

沥青混合料的缺点是亲水性差,影响到与边坡和坝基的结合;其次是防渗体的施工工艺复杂,需高温拌和、高温浇筑,机械化程度较低;另外沥青混合料的老化问题尚未得到充分论证,因此防渗结构的耐久性尚无定论。

3.7 薄膜薄层防渗结构

薄膜薄层防渗结构有多种,既包括人工无纺布、土工膜等织物,也有现场喷制的合成材料,或是由几种材料贴合成的复合薄膜等。按所处位置的不同,一般分为两种型式:(a)内贴薄膜防渗,采用预制混凝土或其他面板来固定,使薄膜贴于面板与坝体之间,外侧面板对防渗结构有一定的保护作用;(b)外贴薄膜防渗,将防渗薄膜用金属肋和锚筋或螺栓与板条等直接固定于大坝表面或通过喷涂、刷涂、刮涂等方式将合成树脂或合成橡胶等涂敷于坝体上游面,固化后形成防渗层。

美国的温彻斯特(Winchester)坝采用 1.6 mm 厚的 PVC(聚氯乙烯)薄膜,外加 0.5 m 厚的预制混凝土板保护;法国的里欧(Riou)坝采用无保护的 PVC 加土工膜防渗;阿根廷的多拉圭—I 坝采用 PVC 薄膜加 0.5 ~ 0.9 m 厚常规混凝土薄层的联合防渗结构。我国的温泉堡及山仔坝分别采用 PVC 复合土工膜、丙乳水泥砂浆作为辅助防渗层。

从应用的情况来说,除多拉圭—I 坝由于薄膜有缝,渗流量达 38.325 L/s 外,薄膜薄层防渗能达到几乎不漏水的程度,防渗效果在所有的防渗结构中是最好的,而且薄膜具有良好的拉伸性能,能适应坝体的正常变形,即使坝体开裂也不影响防渗,对碾压混凝土的施工影响也不大。但这种结构的可靠性和耐久性等问题尚未得到完全解决,将其作为主防渗体的温彻斯特坝和里欧坝都只是 20 余米高的小坝,在中高型坝中一般只作辅助防渗体。

4 结语与建议

碾压混凝土坝是典型的成层结构挡水建筑物,在渗流特性上呈强各向异性,其渗控设计的基本原则仍为“前堵后排”。具体的防渗结构型式多种多样,各有利弊,实际工程中多采用两种或两种以上的联合防渗体。

从实践情况看,“金包银”防渗结构和以二级配碾压混凝土防渗结构为基础的联合防渗结构应用得最多,渗控效果也不错。但从碾压混凝土坝的全断面碾压施工的发展方向和目前的工程应用情况来看,以变态混凝土加二级配碾压混凝土或加层面垫层的组合防渗方案应为优选方案。同时,为了在大坝长期的运行中确保层面上只有很小的扬压力,坝内必须有长效的排水系统。

参考文献:

- [1] 朱岳明,黄文雄.碾压混凝土及碾压混凝土坝渗流特性研究[J].水利水电技术,1995(12):49—57.
- [2] 朱岳明,张燎军,周建平,等.龙滩高碾压混凝土重力坝渗控设计方案研究[J].水利学报,1997(3):1—7.

Practice in seepage prevention structures of roller-compacted concrete dams

ZHU Yue-ming¹, CHU Xiao-zhao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Beijing Investigation and Design Institute, State Power Corporation, Beijing 100024, China)

Abstract : In consideration of the seepage properties of roller-compacted concrete dams (RCCDs) and the complicity of seepage-control design , an introduction is given to the practice in seepage prevention structures and their performances in projects of some existing dams at home and abroad. The main advantages and disadvantages of some typical seepage prevention structures are analyzed through comparison. Finally , an optimum seepage prevention structure for RCCDs is recommended , which can bring the main advantages of roller-compacted concrete construction into full play.

Key words : roller-compacted concrete dam ; types of seepage prevention structure ; two-graded roller compacted concrete ; anisotropy of permeability

· 简讯 ·

国际大坝委员会学术简讯

国际大坝委员会大坝设计计算分析专委会第七届 Benchmark workshop 学术会议将于 2003 年 9 月 24 ~ 26 日在罗马尼亚的布加勒斯特举行. 会议议题有 3 个 : 一是常态混凝土坝 , 研究在轴线上有一定曲率的重力坝的极限抗滑稳定性问题 ; 二是碾压混凝土坝 , 研究碾压混凝土坝在施工与运行期的温度仿真分析问题 ; 三是土石坝 , 研究在复杂地基上土石坝的渗流问题。

国际大坝委员会 Benchmark workshop 会议的特色是 : 由专委会拟定 3 个左右的具有观测或实验资料的工程 , 委员会在网上提供基本分析资料(有限元网格、计算参数、施工运行情况等) , 供有兴趣的研究者利用自己的程序进行分析 , 写出论文 , 提交委员会。会议期间 , 通过交流讨论 , 委员会作出总结报告 , 与相关论文一并出版。

有关会议的基本信息可从 www.Rocold.ro 网址找到。有关会议注册和安排、论文提交与论文集出版等事项可直接联系 : General Technical Secretariat : Technical University of Civil Engineering of Bucharest , Attn : Prof. Adrian Popovici , 124 Lacul Tei Bd. , 72302-Bucharest Romania. Phone : + 40-21-2421870 or 2421202/169 285. Fax : + 40-21-2421870. E-mail : popovici@hidro.utcb.ro

(朱岳明供稿)