

碾压混凝土重力坝的渗流控制^①

⑥
27-30

任旭华

苏守坤

TV6P8.233

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098) (辽宁省水利电力勘测设计院 沈阳 110006)

摘要 分析国内外现有碾压混凝土重力坝的渗控结构型式及运行效果并进行了综合评判。用渗流有限元法对不同渗控结构渗流场进行了分析比较,指出在碾压混凝土坝渗流控制中,防止渗漏仅仅是一个方面,更重要的是降低坝体的渗透压力。提出应将面板堆石坝的设计思想引入碾压混凝土坝的设计中。

关键词 碾压混凝土 重力坝 渗漏 渗透压力 渗流控制 RCC

碾压混凝土(RCC)重力坝是由分层碾压而成的,坝体中存在众多施工层面。目前对碾压混凝土层面的良好结合尚无完全成熟的经验。坝体中水平施工层面的存在,有可能成为大坝渗流集中通道和抗滑稳定的薄弱面。尤其是早期兴建的碾压混凝土坝,大多出现严重的渗漏,其渗漏主要来自层面。因此,探讨研究碾压混凝土坝的渗透特性,寻求合理的渗控措施,解决碾压混凝土坝的渗流问题已成为坝工设计中需要高度重视的问题。

1 已建 RCC 重力坝典型渗控结构分析

1.1 国内外已建 RCC 重力坝的主要渗控结构

早期修建的碾压混凝土坝,坝身都不设排水孔,如美国的柳溪坝,中国的坑口坝,日本的碾压混凝土坝,此时坝的渗流控制主要是由防渗结构来完成的。目前国内外已建碾压混凝土坝的防渗结构主要分为两大类:混凝土防渗(刚性结构)和高分子材料防渗(柔性结构)。

混凝土防渗结构是以水泥混凝土为主构成的防渗结构,它包含常态混凝土防渗和碾

压混凝土自身防渗。其中常态混凝土防渗又可分为常态素混凝土防渗和钢筋混凝土防渗,此外还有坝面挂网喷微膨胀水泥砂浆等型式。

柔性防渗结构是以防渗性能好,变形能力大的柔性防渗材料为主构成的防渗结构。它包括沥青混合料防渗和 PVC 薄膜防渗。

上述防渗结构中的两种或多种所构成的联合防渗结构形式,也是碾压混凝土坝设计中广泛采用的,如:防渗膜+薄常态混凝土;防渗组合膜+二级配碾压混凝土等。

1.2 已建 RCC 重力坝防渗结构运行效果分析

上游坝面采用不同的防渗结构,在运行过程中的效果是不同的,从国内外已建 RCC 重力坝的统计资料^[1,2]可对已有的坝面防渗结构型式作如下评价:

a. 厚常态混凝土防渗结构作用显著,效果良好,而且可靠性和耐久性也高,几乎所有采用这种防渗结构的坝(如岛地川、玉川、岩滩和铜街子)都未见明显的渗漏。但常态碾压混凝土的施工将干扰 RCC 的施工,难以发挥 RCC 快速施工的优势;另外,这种结构也

^①河海大学青年科学基金资助项目(3537)的部分研究成果。

第一作者简介:任旭华,男,博士,副教授,从事坝工及地下结构工程研究,曾发表《碾压混凝土坝渗流特性》等论文。

使温控措施复杂化。对高坝和一些特别重要的工程,这种防渗结构不失为一种安全可靠的方式。

b. 常态混凝土薄面层结构广泛流行于欧美国家,该结构施工干扰较小,温控可以简化,造价比较低廉,但它的防渗效果不够理想。其主要原因是薄面层混凝土的抗裂能力较差而影响结构的防渗效果。整体式的结构常产生垂直裂缝,目前改进的措施是增设横缝,这样开裂虽然有所减少,但未能彻底解决裂缝问题。因此这种防渗结构在应用上受到了一定的限制。

c. 钢筋混凝土面板防渗结构保留了常态混凝土薄面层结构的优点,施工更加灵活,可提前或滞后于坝体 RCC 的施工,也可用滑模快速施工。由于面板配置了钢筋,可以限制面板裂缝的开展,改善坝体的应力状态,改善防渗效果,是一种值得推广应用的防渗型式。

d. RCC 自身防渗,是在坝体上游面一定范围内铺设胶结料含量高的碾压混凝土防渗层。该结构简单,利于充分发挥碾压混凝土快速施工的优势,是一种比较经济的防渗结构。这种防渗结构依然存在碾压混凝土层面渗漏问题。如美国的柳溪坝采用的这种防渗结构,由于上游防渗体及坝体 RCC 胶凝材料用量过低(分别为 104 kg/m^3 和 66 kg/m^3)导致层面结合不良,造成较大的渗漏。美国另一工程,上静水坝也采用了这种防渗结构,由于胶凝材料用量在上游迎水面一定范围内达 300 kg/m^3 ,层间结合得到改善,层间渗漏基本得以控制。但因坝顶长 815 m 而未分缝,造成 12 条上下游贯穿的裂缝,成为渗水的主要通道。因此,根据实际情况,设置必要的横缝、诱导缝或表面缝,并布置完善的止水系统,方能达到较好的防渗效果。我国的荣地坝和普定拱坝采用这种方式取得了满意的效果。RCC 自身防渗的经验尚不丰富,在材料、结构、施工等领域都有待进一步深入研究和探讨。这是今后碾压混凝土坝的一个发展方向。

e. PVC 薄膜防渗就其防渗效果而言是

相当不错的。有的工程如温切斯特坝、概念坝,坝体基本不漏水。但是,目前人们对薄膜的耐久性问题的认识颇有争议,信心不足。因此,在高坝建设中应在充分论证其可靠性、耐久性的基础上加以研究选用。

f. 沥青混合料防渗结构是在碾压混凝土坝上游面设置一定厚度的沥青混合料防渗层,外加一定厚度钢筋混凝土护面板,护面板通过锚筋锚固在坝体上。这种防渗,结构稳定,防渗效果好,工程量小,施工速度快,可充分发挥碾压混凝土快速施工的优点;而且其防渗的可靠性也是可以保证的,因此在今后的高碾压混凝土坝设计中将占有一席之地。我国 1986 年建成的第一座碾压混凝土坝——坑口坝即采用这种防渗结构形式,取得了令人满意的防渗效果。

2 RCC 重力坝不同渗控结构比较研究

以长江三峡工程厂房 13 号坝段为例,探讨碾压混凝土坝的渗流行为及其控制技术。

如图 1 所示,在高程 $30.0 \sim 60.0 \text{ m}$ 之间设置了两个碾压混凝土区。坝体碾压混凝土等效水力隙宽 $d_f = 1.3 \times 10^{-2} \text{ mm}$ (平均值),其渗透张量为

$$K = \begin{bmatrix} 4.61 \times 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 4.61 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & 0 & 1.29 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

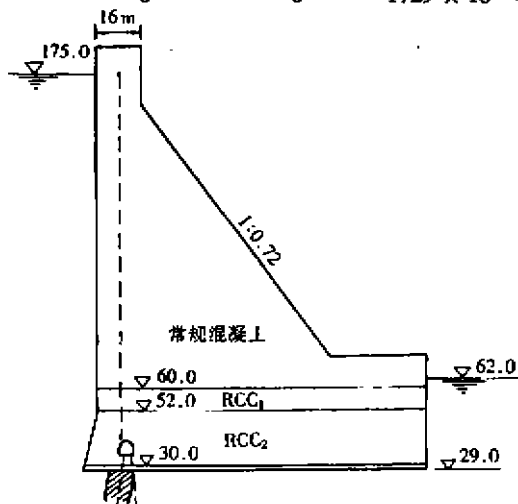


图 1 13 号坝段材料分区示意图

坝体常态混凝土的渗透系数取 $K = 4.19 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 防渗体取 $K = 1.0 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 。计算时利用对称性, 计算域在坝轴线方向的厚度为坝排水孔中心距的一半。

2.1 上游防渗面板的作用分析

如果防渗面板在厚度(4.0 m)不变的情况下, 其渗透系数增大或减小1个数量级, 即面板的渗透系数分别为 $9.95 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 和 $1.0 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$, 面板系数增大, 坝体浸润区扩大, 坝体 RCC 层面上的扬压力上升; 面板渗透系数减小, 坝体浸润区大大缩小。渗流场的水头分布随面板 K 值变化非常敏感。我们曾做过面板厚度对渗流场的影响分析, 发现厚度影响并不敏感。可见面板的防渗效果主要取决于面板相对坝体的不透水性。施工中应注意防裂, 保证其完整性。选择合适的配合比, 尽可能提高其不透水性。

2.2 上游二级配富胶 RCC 的防渗作用

假设 RCC 坝体上游面设有宽为 4.0 m 的二级配富胶碾压混凝土作为防渗体, 其切向渗透系数为 $4.61 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 比其后的三级配 RCC 小 1 个数量级, 法向渗透系数 K_n 不变。二级配 RCC 具有一定的防渗作用, 渗流通过二级配 RCC 后水头损失约 35 m。但水平面上的扬压力仍较大, 单独使用效果不明显, 可作为防渗面板后的辅助防渗体。

2.3 坝体竖向排水作用

为说明碾压混凝土坝体中竖向排水孔的渗控作用, 在 4.0 m 厚常态碾压混凝土防渗体后设有孔径为 15 cm、孔距 3.0 m 的坝体竖向排水管, 此时坝体浸润线如图 2 中的 a, a' 线所示(a 线表示排水孔断面, a' 为两排水孔中间的剖面)。从图中可以看出, 几乎所有通过坝体的渗水都被排水孔集中, 坝的浸润线已非常低, 由此可见排水孔的作用对降低浸润线, 释放扬压力是十分有效的。比较 a, a' 两条线几乎完全重合, 说明排水孔间距很近, 排水作用影响范围大于其间距, 使得坝体三维渗流场接近了二维渗流情况。

排水孔间距分别为 4.0 m 和 6.0 m 时, 坝

体浸润线如图 2 中的 b, b' 和 c, c' 所示。孔距为 4.0 m 时, 其影响范围仍大于孔距, b, b' 与 a, a' 几乎重合; 当孔距为 6.0 m 时, 情况发生变化。排水孔不能将渗过防渗体的渗水完全排出, 排水孔以后仍有一定的压力水头。比较 c 和 c' (两相邻排水孔中的剖面值), c' 更为明显。

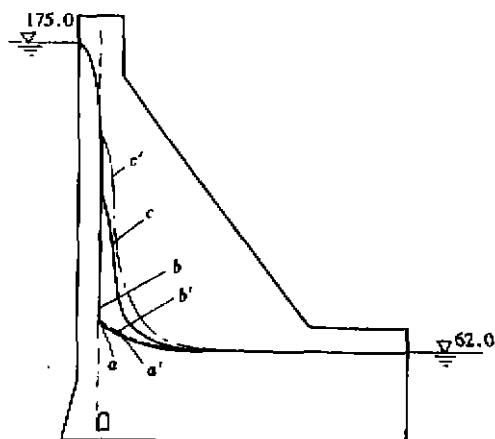


图2 有排水孔时的坝体浸润线

以上结果表明, 排水孔对降低坝体扬压力的作用是非常显著的。

2.4 上游二级配 RCC 与坝体排水孔联合作用时的渗流场

以二级配 RCC 作为上游防渗体并辅以坝体排水孔(孔距 3.0 m), 其渗流场如图 3 所示。与无坝体排水孔时的流场相比, 浸润线大大降低, 且此时下游水也渗向排水孔, 使自由面下凹, 等势线的分布也发生很大变化。

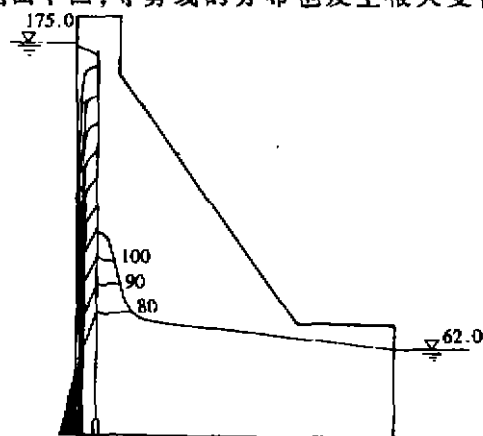


图3 二级配 RCC 与坝体排水孔联合作用时的坝体渗流场

由此可见,只要坝体排水孔通畅,用二级配 RCC 作防渗体从降低扬压力的角度考虑也能达到令人满意的效果。

2.5 上游面板与多孔无沙混凝土联合作用时的渗流场

设想在上游 1.0 m 厚的防渗面板后设置 50 cm 厚的多孔无沙混凝土。据已有的室内试验结果,其渗透系数可达 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。取 $K = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。由于多孔无沙混凝土的渗透系数与防渗面板相比在 6~7 个数量级,是一个强透水体,此时坝体浸润线大大降低,底部 RCC 层面上的扬压力很小,见图 4。当然这种情况下也绝对不允许面板开裂。

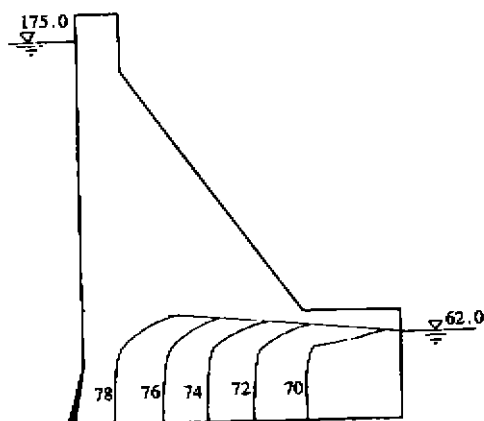


图 4 防渗面板与多孔无沙混凝土联合作用时坝体渗流场

3 RCC 重力坝渗控设计对策

碾压混凝土坝渗流对大坝的影响,一方面会造成水库的渗漏,另一方面会在层面上形成渗透压力。渗漏主要受上游迎水面的影响,而且很大程度上还受到季节变化、RCC 龄期、RCC 经历渗漏历时等因素的影响。当然库水位也是一个重要因素。实际上,不论常规混凝土坝还是 RCC 坝,其渗漏量一般会随时间的增长而自然减小。RCC 坝的渗漏主要是在层面接缝处。国内外观测资料表明,水泥含量低的 RCC 坝,渗漏量下降特别快,在 1~2 年内渗漏量可减小 85%~95%。这种现

象可以解释为 RCC 的自愈性。因此,在 RCC 坝渗控设计中,不应只注意坝的渗漏,更应把注意力放在降低坝的渗透压力上,这样才能真正达到保证大坝安全的目的。对高碾压混凝土坝,渗流控制的关键是降低坝体的渗透压力。

综上所述,在保证防渗的前提下,排水(包括坝体排水孔,防渗体后透水层)对降低扬压力的效果是非常显著的。因此,建议在渗控设计中要重视排水设计。渗漏和渗透压力是相辅相承的,对 RCC 坝的漏水,也必须给予足够的重视。为了减少渗漏量,更为了降低扬压力,最为有效的措施是采取坝面防渗措施。各种防渗结构形式各有利弊,应根据工程的规模、重要性以及对建筑物的具体需求加以选择。在整个防渗面板后面铺一道连续的人工材料透水层或透水混凝土层,再用锚杆将面板和大坝锚在一起。这将是一种非常有效的方法,预计在今后的工程中会得到广泛应用。利用面板堆石坝渗控设计思想,放松对其后 RCC 强度和防渗性的要求,从而加快施工进度、降低造价^[3],这是碾压混凝土坝的发展趋势。

参考文献

- 1 能源部水利部碾压混凝土筑坝推广领导小组. 碾压混凝土坝——设计与施工. 北京: 电子工业出版社, 1990. 215~252
- 2 王宏硕. 论 RCC 筑坝技术中的几个关键问题. 水力发电学报, 1995(1): 77~85
- 3 Londe P, Lin M. 带面板的对称干硬填筑坝——RCC 的新概念. 河海科技进展, 1993(1): 96~103

(收稿日期: 1996-08-02 编辑: 张志琴)

