

沥青混凝土心墙坝水力劈裂发生机理及分析

邓建伟¹, 凤炜², 何建新²

(1. 吐鲁番地区阿拉沟水库建设管理局, 新疆 吐鲁番 838000;

2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 土质心墙坝的水力劈裂问题对土石坝安全的影响已引起工程界的高度重视。本文分析了沥青混凝土心墙发生水力劈裂的机理, 提出心墙碾压施工“松塔效应”产生的水平缝和沥青混凝土的低透水性是发生水力劈裂的重要物质条件, 而过渡料与心墙相互作用产生的“拱效应”及强大的“水楔”作用是发生水力劈裂的力学条件。通过实例分析证明沥青混凝土防渗心墙与土质心墙一样也存在水力劈裂的风险, 需引起水利界的高度重视, 对于高沥青混凝土心墙坝应审慎研究并评价心墙的防渗安全可靠。分析结果对沥青混凝土心墙坝的设计与施工有一定参考意义。

关键词: 沥青混凝土心墙; 水力劈裂机理; 应力应变分析

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0046-05

Mechanism and analysis of occurrence of hydraulic fracturing for asphalt concrete core dam

DENG Jianwei¹, FENG Wei², HE Jianxin²

(1. Turpan Region Alagou Reservoir Construction Authority, Turpan 838000, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The influence of hydraulic fracturing problem of soil core wall dam on the safety of embankment dam has been paid great attention in engineering field. This paper analyzed the mechanism that hydraulic fracturing occurs in asphalt concrete core wall, and proposed that the horizontal seam produced in construction of compacted core wall's caused by “pine cone effect” and the low permeability of asphalt concrete are the important material conditions of hydraulic fracturing, while the “arch effect” and powerful “water wedge effect” produced by transition material and core wall interactions are the hydraulic fracture mechanics conditions. The analysis of examples proved that the soil core wall and the asphalt concrete core wall all exist the risk of hydraulic fracturing, which need to pay close attention in the field of water conservancy sector. It noted that high asphalt concrete core wall dam should be carefully studied and the core wall's impervious safety and reliability be evaluated. The result has a certain reference value for the design and construction of asphalt concrete core wall dam.

Key words: asphalt concrete core wall; hydraulic fracturing mechanism; stress and strain analysis

1 研究背景

通过对大坝的原型观测, 发现在土质心墙坝中, 心墙的竖向应力往往低于上覆土重, 而坝壳中的竖向压力又高于上覆土重, 这种现象称之为坝壳与心墙间产生了“拱效应”。当“拱效应”作用足够大时, 便可导致土质心墙产生水力劈裂而渗漏, 甚至引起

土石坝失事而导致灾难性后果。表1给出了几座公认的水力劈裂破坏的工程实例^[1]。可以看出不论土石坝高低均有可能发生水力劈裂破坏, 其中有3座是属于薄心墙工程, 表明薄心墙更容易产生水力劈裂破坏。

土石坝的沥青混凝土防渗心墙厚度一般仅为0.5~1.2 m左右, 多数以等厚度或在不同高程段采

用等厚度布置,其迎水面为直立;试验表明沥青心墙的刚度一般均小于坝壳料和过渡料;心墙的渗透系数在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/s 数量级,具有低透水性,所有这些 因素均将导致在防渗心墙中可能产生“拱效应”,甚至发展到水力劈裂。由连续介质力学概念可知:两种介质接触面上产生相对位移,只要有摩擦存在,摩擦力就会以拉应力形式出现,相应的也就会产生拉应变。这极大增加了沥青混凝土心墙上游面产生裂缝的可能性,由于施工等因素也可能造成心墙上游面出现先天裂缝。“拱效应”、先天裂缝和低透水性就构成了沥青混凝土心墙产生水力劈裂的力学条件和物质条件。朱晟等由沥青混凝土材料剪胀性

出发也阐述了心墙产生水力劈裂的可能性^[2]。然而在规范^[3]条文说明中,从多孔介质渗流和沥青混凝土中的沥青胶浆不会被挤出的理念出发,提出在沥青混凝土心墙水力劈裂可不考虑,这一论点还是值得商榷的。随着我国沥青混凝土心墙坝的迅速发展,众多的百米级大坝正在兴建,其最高者已达到 160 余米,坝高的增加使得“拱效应”作用更强烈,产生水力劈裂风险的可能性也更大。本文分析了沥青混凝土心墙发生水力劈裂的条件,结合新疆某工程沥青混凝土心墙坝的计算实例,证明了水力劈裂存在的现实性,以期引起坝工界的关注。

表 1 土石坝典型水力劈裂破坏实例 m

工程名称	坝高	破坏区心墙宽度	坝顶高程	最高水位	流量突增水位	破坏区高程
Balderhead	48	6	334.70	332.30	332.30	305.00 ~ 315.00
Hyttejuvet	90	4	749.00	746.00	738.00 ~ 740.00	718.00 ~ 740.00
Viddalsuatu	70	10	935.00	930.00	929.40	923.00 ~ 925.00
Teton	93	9	1625.50	1622.70	1607.00	1573.00 ~ 1568.00
Yard'sCreek	24	4	475.90	474.00	469.10	457.20 ~ 464.80

2 沥青混凝土心墙发生水力劈裂机理

长期以来,国内外许多学者致力于土石坝水力劈裂问题的研究工作。系统地分析了心墙两侧堆石体对心墙的“拱效应”,认为“拱效应”是发生水力劈裂的必要条件之一。黄文熙指出水力劈裂是指由于水压力的抬高在岩体或土体中引起裂缝发生与扩展的一种物理现象^[4]。殷宗泽从多孔介质的理念出发,论述了心墙堆石坝的水力劈裂分析方法,指出了总应力法和有效应力法的利弊,指出水力劈裂与心墙的渗透性、饱和度及心墙前的上升速度等因素有关,并提出在蓄水初期用心墙外水压力是否超过心墙上游面处土中的中主应力来判别水力劈裂的发生可能^[5]。国内学者对土质心墙坝水力劈裂机理、抗水力劈裂性能及过程模拟分析已有大量的研究成果^[6-8]。作为防渗材料的沥青混凝土与多孔介质不同,其孔隙率小于 3%,孔隙以封闭且非连通形态存在,故沥青混凝土的渗透系数极低。因此,沥青混凝土应属不透水的连续介质材料,应通过非饱和介质不排水剪切试验确定本构模型参数,采用总应力法进行水力劈裂的计算分析。沥青混凝土心墙发生水力劈裂最主要的物质条件有两个,其一是心墙中存在与库水相通的裂缝或缺陷,施工中沥青混凝土心墙的“松塔效应”是产生裂缝的重要因素;其二为沥青

混凝土的低渗透性或不透水性。与土质心墙不同,心墙中的裂缝空腔四周皆可视为不透水边界,库水位所形成的静水压力将以全水头量级作用在裂缝周边,产生对心墙水力劈裂的力源,形成强大的“水楔”作用,进而可能导致水力劈裂的发生。“水楔”作用是心墙发生水力劈裂的力学条件,当采用总应力法分析时,其判别标准为:心墙裂隙内某点的水压力大于或等于总主应力与沥青混凝土抗拉强度之和时,就可发生水力劈裂:

$$p \geq \sigma_T + \sigma_p \tag{1}$$

式中: p 为裂缝中心处的库水压力; σ_T 为裂缝边界上的总应力; σ_p 为沥青混凝土的极限抗拉强度。

若不计沥青混凝土的极限抗拉强度,而将其作为安全储备时,只要该裂缝处的库水压力大于该点的总应力时,该裂缝就会进一步扩展,直至裂缝贯穿整个防渗体而失去防渗功能。当前研究裂缝扩展的理论和方法较多,这里不再赘述。

众所周知:大主应力与正应力在作用方向大体相同,数量级大体相等,其形成主要是结构的自重应力所引起。沥青混凝土的密度比水的密度大一倍以上,通常不会出现在同一点上的水压力大于总应力的情况,只有当心墙发生“拱效应”时才有可能。研究表明:过渡料与沥青混凝土心墙是两种刚度不同的介质,前者的变形模量一般均大于后者。当两者

间产生位移差的趋势时,其间的变形不协调使得界面间可以通过摩擦作用传递应力时,一经受荷产生变形,刚度较低的一方将应力传递到刚度较大的介质中产生“拱效应”。“拱效应”是心墙产生水力劈裂的重要力学条件。当墙体中该点的总应力小于水压力,就有可能产生水力劈裂,这里所指的总应力应当包括大主应力和中主应力。当大主应力低于水压力时,心墙将产生水平裂缝,当中主应力小于水压力时,心墙将产生由上游向下游扩展的竖向裂缝。

3 发生水力劈裂可能性的实例分析

3.1 工程概况

新疆某水库总库容 4 450 万 m³,兴利库容 3 050

万 m³,死库容 850 万 m³,为Ⅲ等中型水利工程。水库正常蓄水位 944.5 m,对应库容 3 900 万 m³,防洪高水位 944.5 m,设计洪水位 944.5 m,校核洪水位 947.9 m。水库枢纽由沥青混凝土心墙堆石坝、右岸岸边开敞式正槽溢洪道、右岸导流兼冲沙放空洞、左岸输水隧洞组成。水库具有防洪、供水、灌溉等综合利用效益。拦河坝为碾压式沥青混凝土心墙坝,坝体结构如图 1。

坝高 105.26 m,坝顶宽度 9.0 m,坝体分区为:上游围堰(坝体的组成部分)、上游砂砾石坝体、上游过渡层、沥青混凝土心墙、下游过渡层和下游砂砾石坝体。上游边坡为 1:2.2;下游边坡为 1:2,并设有上坝的“之”公路。

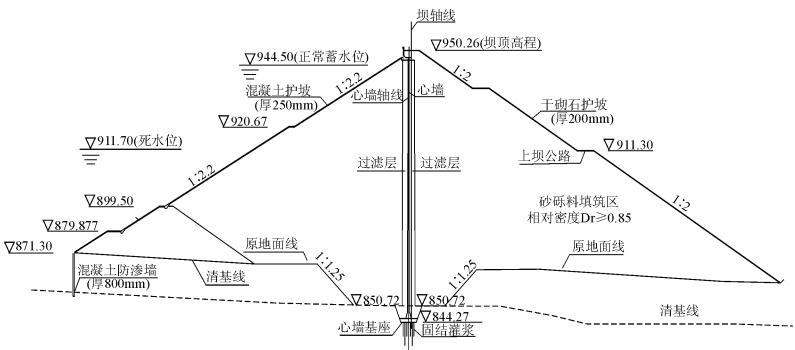


图 1 坝体结构图

3.2 计算模型

砂砾石坝料、沥青混凝土是大坝的主体,其应力应变关系的合理模拟直接关系到对坝体工作性状评估的准确性。大量的研究表明心墙沥青混凝土和砂砾石坝料的变形,不仅随剪应力水平而变化,也与加载应力路径密切相关,应力-应变关系表现出明显的非线性特征,目前国内外均通过坝料三轴试验的剪应力与轴应变的关系来反映材料的非线性,比较多的选用邓肯-张模型,也有一些工程采用南水模型。研究发现邓肯-张模型计算的变形数值较南水模型偏大。为安全起见,大多数沥青混凝土心墙坝较为普遍的采用邓肯-张的 $E-\mu$ 模型进行有限元分析,以切线变形模量 E_t 和切线泊松比 μ_t 为计算参数,其中切线变形模量 E_t 的表达式为:

$$E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \left[1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \tag{2}$$

破坏比 R_f :

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \tag{3}$$

根据摩尔库仑强度准则,得到

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \tag{4}$$

得到切线模量的表达式:

$$E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \tag{5}$$

切线变形模量 E_t 的公式中共包括 5 个材料常数 K 、 n 、 φ 、 c 、 R_f ,式(5) 将变形与坝料的强度统一到一起,充分反映了材料的本构关系。

邓肯等人根据大量三轴试验中的轴应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 之间也存在双曲线关系,提出了切线泊松比的数学表达式:

$$\mu_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3/p_a)}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2} \right\}^2} \tag{6}$$

式中: μ_t 为切向泊松比,它不是常量,而是应力的函数,由 3 个材料参数 G 、 F 、 D 来确定。

式(5)、式(6) 就构成邓肯-张的 $E-\mu$ 模型,其 8 个参数完全可以通过常规的三轴常规试验来获

取。由于该模型及其参数具有明确的物理意义,工程技术人员容易接受,且已应用了多年,积累了较为丰富的经验和资料,可获得较满意的应力应变分析结果,能够反映出坝体的工作性状。混凝土基座采用线弹性模型计算。

沥青混凝土心墙与坝体和坝基砂砾石料的刚度有一定的差异,两种材料的界面上的变形可能存在着不连续现象,导致不能真实的反映接触面上的应力应变性状。为模拟两种不同材料间的相互作用,在有限元分析中经常采用不同的接触模型来解决界面上变形不协调问题,常用薄层单元、Mohr – Coulomb 模型(又称线性摩擦模型)、Goodman(古德曼) 非线性摩擦模型等。本工程选用了薄层单元来描述过渡料与沥青混凝土心墙间的接触关系。坝体各种材料的计算参数汇总于表 2。

表 2 坝体材料邓肯 $E - \mu$ 模型力学参数 kPa, (°)										
材料名	c	φ	K	n	R_f	G	F	D	K_{ur}	n_{ur}
坝壳料	170	42.8	870	0.52	0.70	0.28	0.13	8.80	2000	0.52
沥青混凝土心墙	580	27.2	680	0.11	0.78	0.56	0.09	0.66	1500	0.11
过渡料	90	41.7	1150	0.42	0.76	0.36	0.09	4.00	2600	0.42
薄层单元	335	34.5	815	0.28	0.77	0.46	0.09	2.33	1600	0.28
接触单元	20									

选用河床最大剖面进行坝体单元剖分,有限元网格采用四边形单元,为了解沥青混凝土心墙和混凝土防渗墙的应力变形情况,在心墙和过渡料及防渗墙和坝基砂砾石交界面之间均设置薄层单元。大坝的有限元网格共有单元 664 个。采用邓肯 $E - \mu$ 模型进行平面有限元模拟坝体填筑及蓄水过程,计算分为竣工期和满蓄期两种工况。坝基砂砾石作为已存在部分(只具有初始应力)。加载过程:大坝填筑分为 6 级,蓄水分 5 级。蓄水时上游水下部分施加浮托力,同时,水压力以面荷载作用在沥青混凝土心墙上游面上。

3.3 沥青混凝土心墙应力 – 应变分析

应力 – 应变分析成果见表 3。所有成果均在类似工程的经验范围内,可以作为工程性状评价的依据。当前水力劈裂的分析方法常用的有总应力法和有效应力法两大类。作为防渗体的沥青混凝土心墙,其渗透性极低,达到设计标准的沥青混凝土孔隙率仅小于 3%,可以视其为不透水的,无孔隙水应力存在。因此,应当采用总应力法进行分析。该法是计算沥青混凝土心墙的总应力,与心墙前的水压力

比较来判断发生水力劈裂的可能性。当墙体中该点的大主应力或中主应力小于水压力,就有可能产生水力劈裂,当大主应力小于水压力时,心墙将产生水平裂缝,当中主应力小于水压力时,心墙将产生由上游向下游扩展的竖向裂缝。

表 3 沥青混凝土心墙坝应力应变分析成果汇总表
cm, MPa, %

项 目	沥青混凝土心墙		上游砂砾石坝体		下游砂砾石坝体	
	竣工期	满蓄期	竣工期	满蓄期	竣工期	满蓄期
水平向上游	0.8	0.03	5.03	3.50	2.59	0.20
变形向下游	0.3	9.80	2.20	10.00	4.86	9.89
垂直变形	37.56	36.75	41.66	42.69	42.65	41.77
大主应力	2.01	2.06	1.70	1.89	1.66	1.75
小主应力	1.03	1.17	0.52	0.42	0.53	0.63
正应力	2.01	1.90	1.81	1.68	1.66	1.67
大主应变	3.30	3.67	1.66	1.68	3.39	3.39
小主应变	0.57	0.89	0.43	0.90	0.48	0.47
剪应力水平	0.31	0.26	0.75	0.98	0.68	0.37

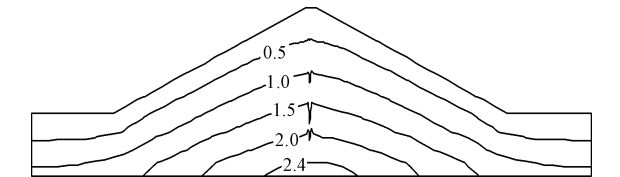


图 2 计算剖面大主应力等值线图

图 2 给出了计算剖面大主应力等值线分布,不难看出在沥青混凝土心墙部位的大主应力低于两侧坝壳料大主应力,出现了“拱效应”。通过对几座百米级沥青混凝土心墙坝的应力应变研究,心墙中均有“拱效应”发生,茅坪溪沥青混凝土心墙等坝的研究也有“拱效应”发生,这表明“拱效应”在沥青混凝土心墙坝中是普遍存在的。

图 3 给出了正应力、中主应力和水压力沿坝高的分布。可知在距坝顶向下 15 m 和 60 m 两处的水压力均大于大主应力和中主应力,可能产生水力劈裂而发生集中渗漏。考虑到邓肯 – 张 $E - \mu$ 的本构的公认度,上述分析未计及沥青混凝土的抗拉强度,将其作为安全储备。土石坝越高产生的“拱效应”作用越强烈,水力劈裂发生的可能性也就越大。

为探讨过渡料刚度对沥青混凝土心墙产生水力劈裂的影响,将过渡料的填筑相对紧密度降低到 0.80,此时过渡料的模量数 $K = 950$ (约降低 17%),相应的 $n = 0.45$ (约增加 7%),其他各参数基本不变。按此参数进行应力应变分析,所得成果见图 4。

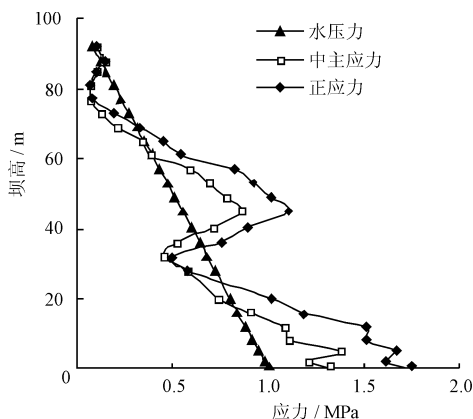


图3 沥青混凝土心墙各应力沿坝高分布

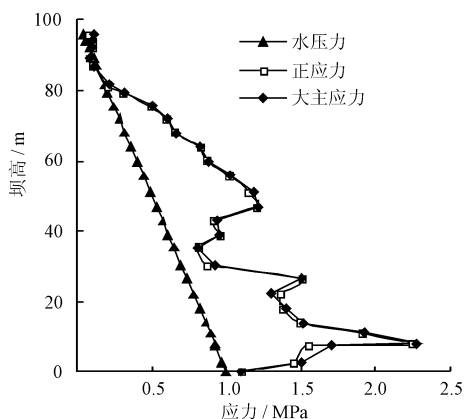


图4 沥青混凝土心墙水力劈裂与拱效应判别 ($K=950$)

可以看出随着过渡料刚度的降低,沥青混凝土心墙的“拱效应”也随之减小,发生水力劈裂风险也随着降低。

4 结 语

(1)过渡料与沥青混凝土心墙刚度的差异将产生“拱效应”,“拱效应”的作用强弱随坝高的增加而变强,也与过渡料的级配和压实度以及沥青混凝土配合比密切相关,它是产生水力劈裂的力学条件。而碾压施工中沥青混凝土心墙上下游两侧的“松塔效应”易引起水平裂缝及沥青混凝土的低透水性又为产生水力劈裂提供了物质基础。

(2)通过对某沥青混凝土心墙坝的应力应变分析计算,可以看出沥青混凝土心墙坝存在水力劈裂的风险,但通过适当调整过渡料和沥青混凝土材料的刚度可有效降低水力劈裂风险。

(3)沥青混凝土虽然具有良好的抗渗能力,但其心墙防渗结构很薄,厚度一般仅为 $0.5 \sim 1.2\text{m}$ 左右,一旦发生水力劈裂,将会造成严重事故,需引起水利界的高度重视,尤其对于高沥青混凝土心墙坝应审慎研究并评价心墙的防渗安全可靠性。

参考文献:

- [1] 张宗亮. 200 m 级以上高心墙堆石坝关键技术研究及工程应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 朱 晟,魏国民,饶锡保. 土石坝沥青混凝土心墙水力劈裂研究[J]. 水力发电学报,2013,32(1):218-222.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5411-2009. 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 中华人民共和国电力行业标准. 北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 黄文熙. 对土石坝科研工作的几点看法[J]. 水利水电技术. 1982(4):23-28.
- [5] 殷宗泽,朱俊高,袁俊平,等. 心墙堆石坝的水力劈裂分析[J]. 水利学报,2006,37(11):1348-1353.
- [6] 冯晓莹,栾茂田,徐泽平,等. 黏土心墙坝水力劈裂发生机理及判别方法[J]. 北京工业大学学报, 2009,35(4):470-475.
- [7] 王俊杰,朱俊高. 堆石坝心墙抗水力劈裂性能研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2007,26(z1):2880-2886.
- [8] 李全明,张丙印,于玉贞,等. 土石坝水力劈裂发生过程的有限元数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007,29(2):212-217.