

渗流作用下均质土坝温度场变化规律试验 与数值模拟研究

杨志轩

(四川隆祥工程咨询有限公司, 四川 成都 610299)

摘要: 土质堤坝是保障中国经济和社会发展的重要基础设施, 而渗透破坏是导致堤坝失事的主要原因。监测渗流尤为关键, 渗流热监测技术无污染, 价格低廉, 测量精度高, 近年来发展迅速。笔者采用物理模型试验与数值模拟的方法, 对渗流作用条件下有无渗漏通道情况的堤坝温度场的变化规律进行了研究, 证实了坝体渗漏对温度场分布的影响。通过试验实测数据验证堤坝渗流场与温度场耦合模型的准确性, 为渗流热监测技术的进一步研发提供理论支撑。

关键词: 均质土坝; 渗流场; 温度场; 坝体渗漏

中图分类号: TV641.2; TV698.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2024)01-0103-04

Experimental and Numerical Simulation Study on the Change Law of Temperature Field of Homogeneous Earth Dams under the Action of Seepage

YANG Zhixuan

(Sichuan Longzuo Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610299)

Abstract: Earth dams are an important material basis facilities for safeguarding our economic and social development, and infiltration damage is the main cause of dam failures. Therefore, monitoring seepage is especially critical. Seepage thermal monitoring technology is pollution-free, inexpensive, and highly accurate in measurement, and has been developing rapidly in recent years. In this study, physical model tests and numerical simulations are used to investigate the variation of the temperature field of a dam with and without seepage channels under seepage conditions, and the effect of dam leakage on the temperature field distribution is confirmed. At the same time, the accuracy of the coupled model of seepage field and temperature field of the earth dam is verified by the experimental measured data, which provides theoretical support for the further development of seepage thermal monitoring technology.

Keywords: Homogeneous earth dam; Seepage field; Temperature field; Leakage field

0 引言

土体内温度场与渗流场是一种耦合关系: 一方面, 温度变化会改变流体的黏度与密度、土体的孔隙率和渗透率等参数, 进而影响渗流场分布; 另一方面, 流体具有一定的温度, 随渗流进入土体内部进行热量交换, 加速坝体内温度传递从而改变温度场的分布, 土质堤坝内渗流场和温度场是相互影响的^[1]。因此, 堤坝内出现集中渗漏时温度场会发生异常变化, 通过渗流热监测技术观测堤坝温度场的分布及变化过程, 可以判断出堤坝内是否存在集中渗漏^[2,3], 从而达到监测堤坝渗流的目的。

目前, 对土体温度场和渗流场的研究大多基

于数值模拟方法, 而模拟往往对材料参数和边界条件进行了简化, 不能完全反映实际情况^[4]。为了研究实际情况下堤坝内渗流温度场的变化规律, 该研究以水槽内均质土坝模型为研究对象, 受试验场地和试验时间限制, 堤坝模型采用中细砂堆筑, 进行堤坝的集中渗漏试验, 并建立相应的数值模型, 对两种方法的结果进行对比验证, 并分析误差产生的原因, 同时探讨利用温度场监测渗流的可行性。

1 试验研究

1.1 试验装置

试验装置由有机玻璃水槽、土质堤坝、温控加热棒、温度传感器、温度采集模块组成。均质土坝

模型堆建在有机玻璃水槽中,水槽长 1.60 m、宽 0.40 m、高 0.50 m,试验设计的坝高 0.35 m,上下游坝坡比为 1:1.6,坝顶宽 0.08 m,坝体横断面总长 1.20 m。均质土坝采用中细砂土分层堆积,坝体分层夯实,每 5.00 cm 夯实一次,并随即取三个点用灌水法测定砂土密度,以保证整个坝体夯实均匀,试验中所采用的土质材料通过筛分试验测得细度模数为 2.3,为中细砂土,其堆积密

度为 1.55 g/cm^3 。在坝体中部铺设碎石模拟渗漏通道,渗漏通道高度为 20.00 cm,碎石厚度 3.00 cm(图 1 中虚线位置)。坝体下游设置有贴坡排水。有机玻璃水槽底部用泡沫板包裹,以模拟绝热边界。水槽两侧中间位置均设有排水口,上游排水口用于调节上游水头,下游排水口排泄渗流量。试验装置示意图见图 1,试验装置图见图 2。

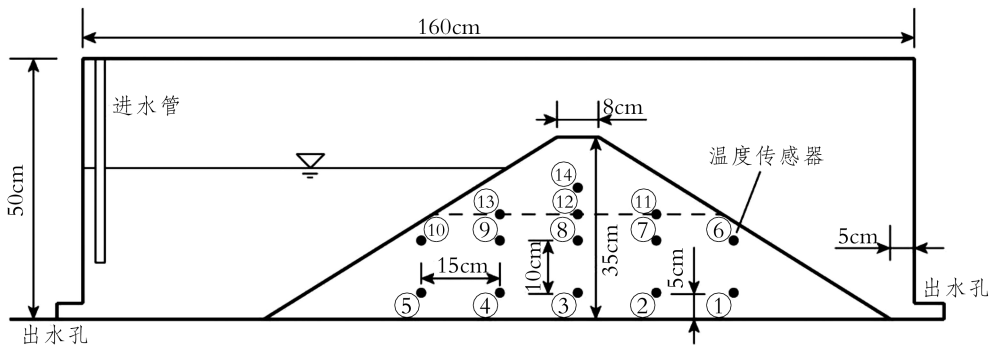


图 1 试验装置示意图

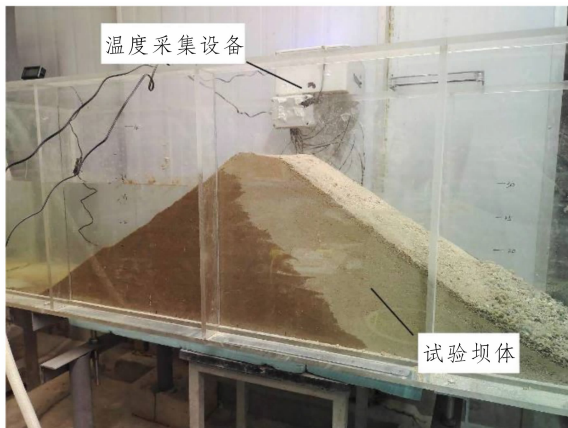


图 2 试验装置图

使用 NTC 高精度温度传感器进行温度采集,温度传感器感应灵敏,精度高,具有良好的绝缘密封性。探头布置于坝体内部,横向间隔 15 cm,纵向分别布置在距离坝底 5 cm、15 cm、20 cm、25 cm 处,共布置 14 个(图 1)。坝前水中另布置一个温度传感器以监测入渗水温,以坝前坡脚处为原点,温度测点位置见表 1。

1.2 试验方法

在每组试验开始前将所有的温度传感器都连接到单片机,记录坝体的初始温度。注水前将水预热,水温控制在试验所需的入渗水温,随后向坝体上游注水,在达到试验工况所需的水位后,打开上游出水口,排出多余的水,试验时由于水不断下

渗,上游进水管保持一定流量进行注水,以维持水位稳定。试验中将加热棒设置在试验所需温度对水进行加热,在坝前水中另设置一个温度传感器用以监测入渗水温,保证水温满足试验要求。试验开始后,打开下游出水口,每五分钟用量筒测量一次坝体渗水量并记录各个温度传感器数据。试验分别设置不同入渗水头、不同入渗水温以及是否存在渗漏通道进行,6 组试验工况见表 2。

2 模拟研究

数值模拟可以快速获得计算结果,是一种经济高效的研究手段,该研究使用有限元软件建立堤坝渗流场与温度场耦合有限元数值模型,研究渗流作用下温度场的变化规律。

模拟中,采用以达西定律为基础的渗流连续

表 1 温度测点位置

测点编号	坐标 (x,y) /cm	测点编号	坐标 (x,y) /cm
1	30, 5	8	60, 15
2	45, 5	9	75, 15
3	60, 5	10	90, 15
4	75, 5	11	45, 20
5	90, 5	12	60, 20
6	30, 15	13	75, 20
7	45, 15	14	60, 25

表 2 6 组试验工况

工况 序号	变 量		
	水头 /cm	水温 /℃	渗漏通道位置 /cm
1	20	20	20
2	25	20	20
3	30	20	20
4	25	25	20
5	25	30	20
6	25	20	无

性方程作为坝体内渗流过程的控制方程^[5],其表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot \rho \left[-\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D) \right] = Q_m \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度(kg/m^3); ϵ 为土体的孔隙率; κ 为土壤渗透率(m^2); μ 为流体动力黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$); p 为压力(N); D 为位置水头(m); Q_m 表示源汇项。其中,坝体考虑多孔介质的饱和-非饱和和流动^[6],这里采用理查德方程描述非饱和区的土壤渗透能力,采用的经验模型为 Van-Genuchten 模型^[7]。

而模拟中的温度场采用多孔介质传热方程作为控制方程^[8],其表达式为:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \tau \cdot \nabla u + Q \quad (2)$$

式中: C_p 为应力恒定条件下的比热容; u 为流速(m/s); q 为导热通量(W/m^2); q_r 为辐射热通量(W); α_p 为热膨胀系数($1/^\circ\text{C}$); Q 为热量源汇项。

根据相关研究^[9],均质土坝的渗流场和温度场可以利用如下多孔介质渗流和传热方程进行研究,依靠达西速度场进行耦合过程:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (3)$$

式中: $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为恒定压力下的有效体积热容。

计算模型采用与试验相同的等腰梯形断面,同样设置上述 14 个观测点位。根据试验所选材料,坝体为中细砂堆筑,渗漏通道采用碎石模拟,部分参数由试验测得,另有部分计算参数结合前人研究成果^[10]进行取值,数值模拟参数设置见表 3。

表 3 数值模拟参数设置

参数	材料	
	坝体	渗漏通道
密度(kg/m^3)	1 550	2 600
孔隙率	0.42	0.450
导热系数($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$)	1.09	3.00
比热容($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	840	800
渗透系数(m/s)	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}
饱和液体体积分数	0.35	0.43
残余液体体积分数	0.023	0.021
VG 模型参数 $\alpha(\text{m}^{-1})$	1.9	4.2
VG 模型参数 n	1.31	1.09

3 试验与模拟结果

3.1 温度场结果对比

选取室内试验中水头 25 cm,水温 20 °C 的工况进行数值模拟并与试验时的实测温度数据进行对比。通过渗流场与温度场耦合模型计算所选工况 14 组传感器所在位置的温度数据。数值模拟与试验温度分布对比图见图 3。

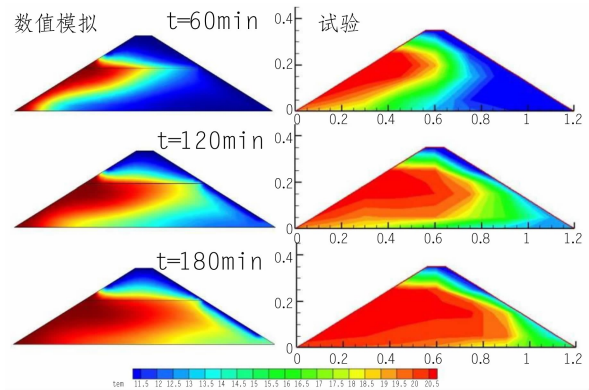


图 3 数值模拟与试验温度分布对比图

可以看出实测值与数值模拟结果基本吻合。高温区域由上游逐渐向下游扩散,1 h 时,高温区域主要存在于坝体中部,高温区域沿渗漏通道扩散至坝轴线附近,坝体底部不存在渗漏通道,温度扩散较慢。2 h 时,高温区域扩散至坝体大部,3 h 时,高温区域进一步扩散。数值模拟与实测相比,二者的区别主要在于渗漏通道上部非饱和土体区域,坝体底部以及坝体下游部分。试验测得的高温区域与数值模拟结果相比,更加偏上。14 号点处数值模拟值较实测值明显偏低,而坝体底

部数值计算设置为热绝缘,试验中使用泡沫板保温作用有限,因此实测大坝底部温度偏低。

各测点误差值见表4,各测点的流热耦合模型均方根误差(RMSE),决定系数(R^2)和相对误差(Re)。

表4 各测点误差值

测点编号	RSME / $^{\circ}\text{C}$	R^2	Re /%
1	1.580	0.792	10.685
2	1.294	0.874	8.451
3	0.569	0.975	3.447
4	0.470	0.980	2.777
5	1.345	0.646	7.560
6	1.646	0.723	11.702
7	1.567	0.827	9.511
8	0.992	0.918	5.554
9	0.761	0.927	4.003
10	0.689	0.809	3.443
11	1.684	0.767	10.616
12	1.479	0.787	8.141
13	1.253	0.689	6.352
14	5.085	-1.963	27.810

除误差较大的14号点外,其余13个测点的RMSE在 $0.470\sim 1.684\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相对误差Re在 $2.777\%\sim 11.702\%$ 范围内,决定系数 R^2 均大于0.6,变化范围在 $0.646\sim 0.980$,表明数值计算的测点模拟值与实测值之间的偏差比较小,模拟结果与室内试验结果较为接近。越接近上游的测点,数值模拟值与实测值越接近,而越向下游,误差越大。靠近下游的点实测值的温度上升时间较数值模拟值更晚,但其最终达到稳定时的温度较模拟值高,渗漏通道处的3个测点误差比位于渗漏通道下部的各测点误差更大。14号点的误差最为明显,说明数值模型在非饱和土体部分误差较大。整体来看,数值模型基本可以反应实际情况的土体温度场分布。

3.2 渗漏通道影响

为了研究坝体内渗漏通道对温度场的影响情况,设置水头25 cm,水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,坝体内无渗漏通道与设置渗漏通道进行对比。试验时长200 min。

根据14个温度传感器测得的试验数据,绘制

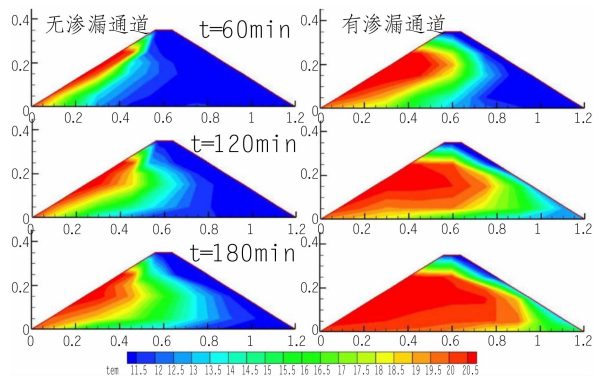


图4 有无渗漏通道坝体温度场分布对比图

各时刻温度场云图。有无渗漏通道坝体温度场分布对比图见图4,两种情况下温度场差异十分明显,无渗漏通道时,高温区域扩散速度较慢,高温区域主要集中在坝体上游部分;存在渗漏通道时,由于渗漏通道的出现导致集中渗漏的发生,渗漏通道附近渗流速度明显升高,加速堤坝内部的热量交换,180 min时,坝体大部分已接近上游水温。由于试验模型尺寸较小,坝体所用中细砂渗透系数较大,与碎石模拟的渗漏通道渗透系数差异不大,高温区域向坝体下部扩散较快,因此温度场云图中渗漏通道的位置较模糊。

4 结论

该研究以水槽内均质土坝模型为研究对象,在6组不同的工况下进行了试验,记录了坝体断面的温度数据,分析了堤坝渗流温度场变化规律,并与数值模拟结果进行对比。结果表明,除14号点外,各测点模拟值与实测值误差较小,模拟结果与试验结果较为接近,验证了土质堤坝渗流场温度场耦合模型的准确性,并分析了误差产生的原因。

无渗漏通道与存在渗漏通道二者温度场差异十分明显,无渗漏通道时高温区域扩散速度较慢,高温区域主要集中在坝体上游部分;存在渗漏通道时,由于渗漏通道的出现导致集中渗漏的发生,渗漏通道附近渗流速度明显升高,加速堤坝内部的热量交换,高温水体传递至坝体下游,坝体温度整体升高。因此,利用温度场监测渗流具有可行性。该研究为进一步研究渗流热监测提供参考。

参考文献:

- [1] 吴志伟,宋汉周. 坝址温度场与变物性渗流场全耦合分析[J]. 水利学报, 2010, 41(6):703-710.

(下转第110页)

不足,讨论原“PDCA循环”中各环节的执行流程和执行标准是否需要完善,根据实际情况进行修订,消除制度和流程上的漏洞。

(4)对新修编内容进行意见征集、公示、组织宣贯,投入生产工作。

3 “PDCA+PFPI双循环”构建全过程管控

利用“PDCA循环”可以实现每日检修作业的全过程管控,确保所有工作都能按照“周密策划—开展实施—质量核查—总结提升”的流程有序推进。但“PDCA循环”只是一套工作方法,在省能心理的支配下,操作者往往会做出违反规程规章的行为^[5]。同时,检修现场随时可能出现新情况需要对原有流程进行补充完善和优化,要解决以上问题,还需有一套管理监督层面的闭环系统来加以保障。

利用“PFPI循环”可以实现监督管理层面的全过程管控,通过“确立目标—建立流程—过程实施—持续改进”流程不断发现和解决在“PDCA循环”执行中出现的各类问题,不断丰富和完善“PDCA循环”,控制和消除人为不安全因素,确保管理环节履职到位,保证“PDCA循环”的正确执行和良性发展。

经过两个年度检修的实践应用,检修作业现场不安全事件起数下降50%,检修进度控制更加精准,检修期人员减少约21.2%,检修工期缩短约17.6%,检修工作效率和人员技能水平得到稳步提升,人员配合更加规范、顺畅,表明“PDCA+PFPI双循环”构建的全过程管控机制能够实现作业和管理双闭环,能够提高管理成效,改良工作方

法,改善工作习惯,提升检修效率,使水电站年度检修工作的组织开展更加安全平稳。此外,该套体系通过双循环系统的互相补位和改进,能够实现安全管理体系上的自提升、自完善、自发展,不断促进安全管理体系更加健全完善。最后,此成果具备良好的推广适用性,在安全管理方面可以大量推广。

4 结语

随着中国安全管控力度不断升级,对于安全生产主体责任落实情况的考核逐年增强,全过程管控不应当只停留在作业执行环节,更应当包括管理监督环节。“PDCA+PFPI双循环”构成的全过程管控机制通过流程的建立和完善,控制和消除人为不稳定因素,有效落实规章制度,在保障安全基础之上,能够实现安全管理的自修正、自发展、自提升,进而全面、自主保障安全生产。

参考文献:

- [1] 张炯,蔡建辉.大型检修现场全过程管控方式研究[J].科技视界,2016(9):345.
- [2] 李志平.浅谈水电站机组检修安全管理[J].水电站机电技术,2017(2):51-53.
- [3] 刘锦铭,孙凯峰.作业条件危险评价方法的修正及在吉林油田的应用[J].中国安全科学学报,2003(12):78-80.
- [4] 熊伟.发电企业如何做好机组检修过程中运行管理的标准化[J].标准科学,2015(12):88-90.
- [5] 周煜明.探索科学2016年6月学术研讨:肇事者不安全感心理分析与对策[C].湖南长沙,2016(6):339.

作者简介:

刘 强(1991-),男,山西朔州人,工学学士,工程师,从事水电站运行管理工作;

王 志(1985-),男,湖北黄梅人,高级工程师,学士,主要从事水电站运行管理工作。 (编辑:廖益斌)

(上接第106页)

- [2] 何宁,丁勇,吴玉龙,等.基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测[J].水利水运工程学报,2015(1):20-27.
- [3] 甘孝清,肖庆,宁晶.土石坝渗流热监测理论研究进展[J].长江科学院院报,2014,31(7):119-124.
- [4] 姜帆,宓永宁,张茹.土石坝渗流研究发展综述[J].水利与建筑工程学报,2006,4(4):94-97.
- [5] 蒋锦良.渗流的连续介质模型和基本方程的分析[J].上海电力学院学报,2005,21(1):85-89.
- [6] 刘洁,毛昶熙.堤坝饱和与非饱和渗流计算的有限单元法[J].水利水运科学研究,1997(3):242-252.
- [7] 韩波,廖红建,肖正华,等.非饱和渗流下土石坝坝坡可靠性

分析[J].应用力学学报,2010,27(2):406-411+450.

- [8] 杜冬青,杜香寒,徐敏,等.连续性方程在多孔介质中相变传热中的数值模拟[J].科技展望,2016,26(14):188.
- [9] 陈璐.基于天然示踪法的土石坝渗漏模型研究[D].西安理工大学,2020.
- [10] 吴志伟,宋汉周.基于流-热耦合模型的土石坝渗流热监测研究[J].岩土力学,2015,36(2):584-590.

作者简介:

杨志轩(1996-),男,湖南长沙人,助理工程师,学士学位,从事水利水电工程设计与咨询工作。

(编辑:廖益斌)