

堤坝渗漏瞬态温度场模型

曾明明,陈建生,王 婷,何海清,何文政

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为研究堤坝渗漏初期渗漏通道周围的温度场分布,结合集中渗漏通道自身特点假定渗漏通道为圆柱状,考虑到渗漏通道周围岩土体介质同时存在热对流与热传导两种热量交换形式,建立渗流流体流动的瞬态温度场模型。根据确定的边界条件和初始条件,用分离变量推导出渗漏通道中的温度分布公式。将该模型应用于北江大堤石角段管涌地区,将实测的温度数据代入模型,反演出渗漏流速。计算结果表明:采用温度场模型反演得到的渗漏流速与同位素示踪法得到的渗透流速结果相近,验证了所建立的模型是可行的。

关键词:堤坝渗漏;瞬态温度场;传热;渗透流速

中图分类号:TV223.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0010-04

Transient temperature field model for dam seepage//ZENG Mingming, CHEN Jiansheng, WANG Ting, HE Haiqing, HE Wenzheng (*Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the distribution of temperature fields around the leakage passage in the early period of dam seepage, the concentrated leakage passage can be regarded as a circular column based on its own characteristics. Based on two heat exchange patterns, heat conduction and heat convection in rock and soil media around the leakage passage, a transient temperature field model for dam seepage is established. According to the determined boundary and initial conditions, an equation for the temperature distribution in the leakage passage is derived by the separation of variables. The model is applied to the piping area of Shijiao reach of Beijiang Levee. The measured temperature data are substituted into the model, and the seepage velocity is obtained. The calculated results show that the seepage velocity obtained from the temperature field model is close to that gained from the isotope tracer method, and the feasibility of the proposed model is validated.

Key words: dam seepage; transient temperature field; heat transmission; seepage velocity

与其他建筑物不同,堤坝的建设除了要考虑地基的强度和变形等问题以外,还要特别考虑堤坝渗漏问题。渗漏是危害堤坝安全的最主要隐患之一,对堤防、土石坝破坏实例的调查结果表明,由于渗漏造成的破坏与失事占该类事故的40%以上^[1]。在实施抗渗措施之前,应对堤坝中渗漏通道的位置、流量大小、渗漏范围等有比较准确的探测。

利用温度场探测堤坝渗漏技术是物探技术检测堤坝安全的发展和延伸,20世纪50年代起,国外较早地把地温监控用于堤坝渗漏研究中^[2]。存在于地质体中的温度场是一种天然物理场,温度场的变化不但与地下水对流有关,而且还与热传导有关。地下水位与流速的变化仅依赖于岩土体中的连续介质,对于各向异性的非连续介质而言,温度场测定渗流的优势更加明显。温度场探测不需要人工形成特

定的物理场及相应的设备,减少了探测工序的环节,相比于人工示踪技术,运用温度场对渗漏通道探测具有成本低、效率高、无污染等优点。

董海洲等^[3-7]在传热十分充分、时间对温度影响不大的假设下,运用稳定热传导理论,把集中渗漏通道简化为圆管状并作为模型边界条件,建立了堤坝管状渗漏温度场示踪模型。当岩土体热传导系数比较大时,传热较快,很容易达到稳态;但对于岩土体热传导系数较小、堤坝渗漏时间较短的情况,利用瞬态模型分析渗漏通道的性质更为合适。本文以多孔介质能量方程为依据建立了渗漏温度场模型,得到了渗流流体流动的瞬态温度场公式,能准确地反映渗漏通道在渗漏初期的温度场分布,及时探测出堤坝中的集中渗漏,可为整治堤坝集中渗漏提供科学的依据。

1 模型建立

在渗漏通道形成后,把周围岩土体和渗漏通道看作两种截然不同的导热介质,因此所研究的对象包括渗漏通道和周围的岩土体。由于渗漏通道内的流体与岩土体的温度不同,因而会发生热量交换。热量的交换过程与土体的导热性有关。对于岩土体传热不充分的情况,利用瞬态温度场模型分析渗漏通道比较合适,这也是准确探测集中渗漏通道的必然要求。

1.1 模型假设

a. 渗漏通道中岩土体和水的热物性参数不随时间和温度的变化而变化。由于各种矿物成分的热物性参数是常数,而且各种矿物热物性参数的差别较小,最大只有几倍,所以只要知道岩土体中各种矿物成分的含量与含水量,理论上就可以准确地得到它们的热物性参数。

b. 渗漏通道内同一截面温度均匀,其温度值沿轴向变化。由于渗漏通道长度远大于渗漏通道直径,所以忽略渗漏通道中同一剖面上的温度差异。

1.2 模型推导

不考虑热源,多孔介质中能量平衡方程^[8]为

ρc ∂T/∂t + ρ_wc_w(u · ∇T) = λ(∇²T) (1)

其中 ρc = (1 - e)ρ_rc_r + eρ_wc_w
式中:T 为多孔介质混合物的温度;u 为流速矢量;e 为多孔介质的孔隙比;ρ_w 为渗漏水的密度;c_w 为渗漏水的比热容;ρ_r 为通道中固体颗粒的密度,c_r 为固体颗粒的比热容;λ 为混合物的有效热导率,λ = eλ_F + (1 - e)λ_S,其中 λ_F 和 λ_S 分别为渗漏通道中流体和固体的热导率。水流以恒定流速 u 从左端通过渗漏通道,如图 1 所示。只考虑沿 x 轴方向的流速,在此过程中,水流对周围岩土体放热。渗漏通道入水口处水温为 T₀,出水口处水温为 T_L,原始地层温度为 T_R,渗漏通道半径为 r₀,截面积 A = πr₀²。

流体在岩土体中的能量微分方程为

∂²T/∂x² - u/a ∂T/∂x + q_v/λ = ρc/λ ∂T/∂t (2)

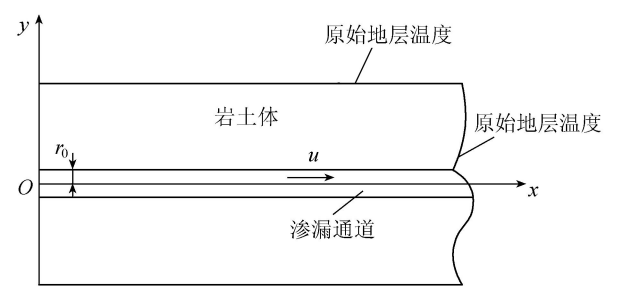


图 1 渗漏通道示意图

边界条件和初始条件为

T = { T_0 x = 0, t > 0; T_L x = L, t > 0; g(x) 0 < x < L, t = 0 } (3)

式中:a 为热扩散率;q_v 为水流对周围岩土体放热的热源发热率;L 为渗漏通道长度。微元段的散热量 Q = 2πr₀α(T - T_R) dx,α 为传热系数,由于假设通道内截面温度均匀,故散热量 Q 由微元段 Adx 的各部分均匀提供。根据热源发热率的定义,有

q_v = - Q / Adx = - 2πr₀α(T - T_R) / A

令 θ(x, t) = T - T_R

代入式(2)和式(3)得

∂²θ(x, t) / ∂x² - u/a ∂θ(x, t) / ∂x - 2αθ(x, t) / (r₀λ) = ρc/λ ∂θ(x, t) / ∂t (4)

θ = { T_0 - T_R x = 0, t > 0; T_L - T_R x = L, t > 0; g(x) - T_R 0 < x < L, t = 0 } (5)

将式(4)用两个函数代表,令

θ(x, t) = T_s(x) + T_q(x, t) (6)

T_s(x) 满足

∂²T_s(x) / ∂x² - u/a ∂T_s(x) / ∂x - 2α/λr_{0} = 0 (0 < x < L) (7)}

T_s(x) = { T_0 - T_R x = 0; T_L - T_R x = L } (8)

则 T_s(x) = ((T_L - T_R) - (T_0 - T_R)e^{BL}) / (e^{AL} - e^{BL}) e^{Ax} + ((T_0 - T_R)e^{AL} - (T_L - T_R)) / (e^{AL} - e^{BL}) e^{Bx} (9)

其中 A = u/2a + √((u/2a)² + 2α/λr₀); B = u/2a - √((u/2a)² + 2α/λr₀)

T_q(x, t) 满足

∂²T_q(x, t) / ∂x² - u/a ∂T_q(x, t) / ∂x - 2αT_q(x, t) / (r₀λ) = ρc/λ ∂T_q(x, t) / ∂t (10)

T_q(x, t) = { 0 x = 0, t > 0; 0 x = L, t > 0; g(x) - T_R - T_s(x) 0 < x < L, t = 0 } (11)

用分离变量法解方程(10)(11)得

$$T_q(x,t) = \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\lambda}{\rho c} (\frac{n\pi}{L})^2 t} \sin \frac{n\pi x}{L} \int_0^L [g(\varepsilon) - T_s(\varepsilon) - T_R] e^{-\frac{u(\varepsilon-x)}{2a}} \sin \frac{n\pi \varepsilon}{L} d\varepsilon \quad (12)$$

将式(9)和式(12)代入式(6),有

$$\theta(x,t) = T_s(x) + T_q(x,t) = \frac{(T_L - T_R) - (T_0 - T_R)e^{BL}}{e^{AL} - e^{BL}} e^{Ax} + \frac{(T_0 - T_R)e^{AL} - (T_L - T_R)}{e^{AL} - e^{BL}} e^{Bx} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\lambda}{\rho c} (\frac{n\pi}{L})^2 t} \sin \frac{n\pi x}{L} \int_0^L [g(\varepsilon) - T_s(\varepsilon) - T_R] e^{-\frac{u(\varepsilon-x)}{2a}} \sin \frac{n\pi \varepsilon}{L} d\varepsilon \quad (13)$$

则根据公式 $T(x,t) = \theta(x,t) + T_R$ 可得出最后表达式,由式(13)可知,当 t 趋于无穷大时,渗漏温度场为稳态。

2 算例验证

2.1 工程概况

广东北江大堤石角堤段历史上曾发生过多次严重的管涌,甚至溃堤。石角段全长 16.28 km,位于北江中下游,河谷开阔,在下伏基岩之上堆积了约 30 m 厚的第四系覆盖层,表层为黏土层(厚 2.9~8.0 m),往下颗粒逐渐变粗,分别为细中砂层(厚 6~15 m)、中粗砂及砾质粗砂层(厚 2~8 m)及连续分布的砂卵石砾石层(厚 7~8 m,局部超过 10 m)。下伏基岩以棕红色粉质细砂岩为主,间夹灰白色的砂砾岩和砾岩,泥质和钙质胶结,含灰岩砾岩。

在 1991—1993 年间,曾进行了 5.3 km 的防渗墙加固,采用了高压旋喷桩加固技术,防渗帷幕深度达到了基岩,距离坝顶 40 m 左右。项目实施后,1994 年和 1997 年两次洪水期均在同一位置出现了严重的管涌。文献[9]已经证实石角段的管涌来自于基岩断裂渗漏通道,该通道的平面图和剖面图见图 2 和图 3。

2.2 渗漏温度场分布及反演

江水位为 5.9 m 时,基岩渗漏通道(孔深 44~70 m)中平均渗透流速较小,经同位素示踪方法探测^[10-11],19 号孔的最大渗透流速为 0.75 m/d,当江水位迅速上涨到 6.39 m 时,石角段发生集中渗漏,通过对石角段钻孔中地下水温度场的探测,发现 19、18、26 号孔在孔深 44~70 m 的温度迅速降低。这是由于渗漏通道直接与江水相通,江水位上升造成大量江水直接补给渗漏通道。该渗漏通道的倾角较小,且刚发生集中渗漏,因此可用本文集中渗漏温

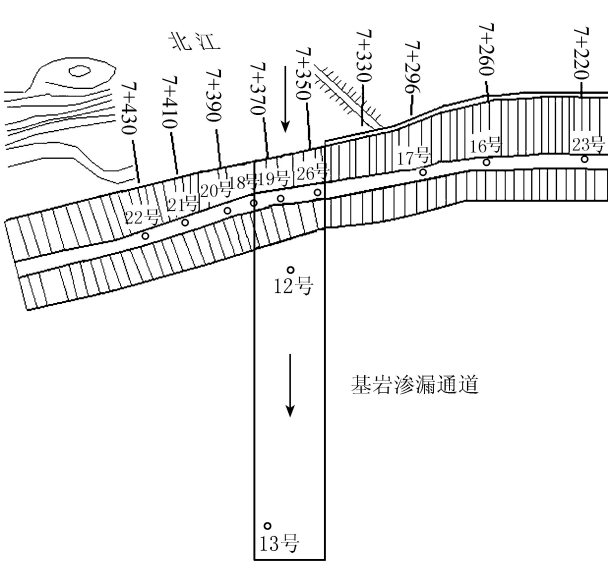


图 2 石角段基岩强渗漏通道平面示意图

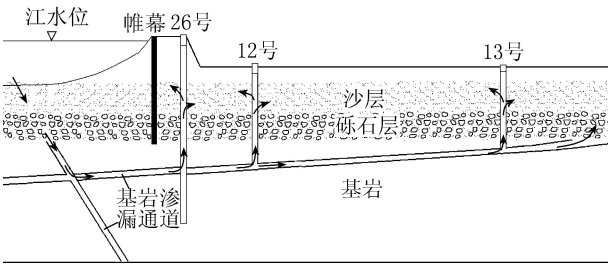


图 3 石角段基岩强渗漏通道剖面示意图

度场模型进行分析。

以 12、13、26 号孔处存在的典型渗漏为研究对象,江水发生集中渗漏 4 d 后江水位变化不明显,为避免气温变化的影响,每天同一时刻对各孔的温度进行了测量,各孔在孔深 44~70 m 的平均温度见表 1,可以发现靠近北江的 26 号孔中平均温度几乎不变,可以此温度代表江水温度 T_w ;13 号孔的初始温度为 23.4℃,与距离渗漏通道很远的 23 号孔的温度近似,这是因为渗漏时间比较短且深部通道的滞后作用,可将 13 号孔的初始温度作为地层原始温度;12 号孔的温度在发生集中渗漏 1 d 后开始持续变化,说明渗漏水已流过 12 号孔。

表 1 渗漏前后各孔的温度值

时间/d	温度/℃		
	12 号孔	13 号孔	26 号孔
渗漏前	23.3	23.4	22.4
1	23.1	23.4	22.3
2	22.9	23.3	22.4
3	22.7	23.0	22.4
4	22.6	22.8	22.3

经现场探测,集中渗漏通道长度为 400 m,位于孔深 44~70 m 处,通道中心在孔深 52 m 处,渗漏半径为 13 m。26 号孔靠近北江,其温度可作为渗漏水温度,初始水温 $T_w = 22.4℃$;13 号孔的初始温度可作为地

层原始温度, $T_R = 23.4^{\circ}\text{C}$ 。计算深度内的岩性为砂岩,根据文献[12]取其热扩散率 $a = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$,砂岩的热导率 $\lambda_s = 1.63 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$,水的热导率 $\lambda_F = 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$,传热系数 $\alpha = 8.314 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

将 $t = 1 \text{ d}, 2 \text{ d}, 3 \text{ d}, 4 \text{ d}$ 时 12 号孔温度代入式(13)分别进行计算,得到流速分别为 $2.67 \text{ m/d}, 2.90 \text{ m/d}, 2.86 \text{ m/d}, 2.97 \text{ m/d}$,平均流速为 2.85 m/d 。每个时间段计算得到的渗漏流速与均值相差不大,由于各测量时间江水温度及水位的变化,流速存在差异,这点也是符合实际情况的。在钻孔破碎带取芯测定的孔隙率在 $3\% \sim 7\%$ 之间,考虑到破碎岩石的比表面积较小,有效孔隙率与孔隙率相差不大,则取平均值 5% 作为有效孔隙率,则日渗漏水量为 $5\% \times \pi \times (13 \text{ m})^2 \times 2.85 \text{ m/d} = 75.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。经同位素示踪方法探测,19 号孔中的渗透流速随孔深的分布如图 4 所示,19 号孔在孔深 56 m 处揭露到了 1.3 m 的溶洞,溶洞正好在渗漏通道上,对应的渗透流速达到最大 (6.88 m/d),渗漏通道中的平均渗透流速为 2.63 m/d ,与计算得到的日渗漏流速相近。可见,通过实测温度场数据验证了所建立的模型是可靠的。

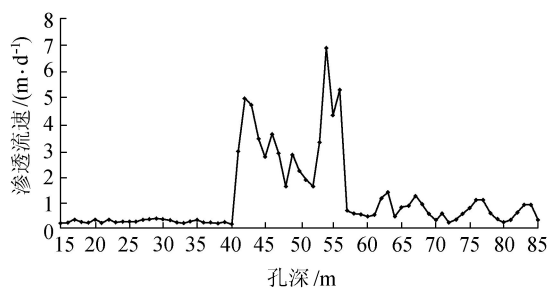


图 4 同位素探测 19 号孔渗透流速分布

3 结 语

温度是地下水渗流场良好的“天然示踪剂”,地层中的温度异常提供了有关地下水渗流场的特定信息,通过温度场可以准确地探测出地下水的补给渗漏通道。本文在集中渗漏形成时间较短的情况,根据能量平衡方程与热传导方程建立了堤坝渗漏瞬态温度场模型,在确定的初始条件和边界条件下,用分离变量法推导出渗漏水温度的解析表达式。结合北江大堤工程实例,将现场所测数据对流速进行反演分析,所得到的理论值与实测值吻合较好,从而验证了模型的准确性,也在一定程度上反映渗漏初期的温度场分布,可为及时探测出集中渗漏及隐患提供科学的依据。本文在模型的推导中,对于边界处理做了简化,这些简化有的并不完全符合实际情况,这也导致了模型与实际的误差,需要在模型的数学描述、边界条件等方面进一步研究,使所建立传热模型

更接近堤坝渗漏的实际情况。

参考文献:

- [1] 太沙基·泼克. 工程实用土力学[M]. 蒋彭年,译. 北京: 水利电力出版社,1960.
- [2] KAPPELMEYER O. The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths [J]. Geophysical Prospecting, 1957, 5 (3): 239-258.
- [3] 王新建,陈建生,陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25 (6): 67-71. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (6): 67-71. (in Chinese))
- [4] 董海洲,罗日洪,张令. 岩石单裂隙渗流-传热模型及其参数敏感性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41 (1): 42-47. (DONG Haizhou, LUO Rihong, ZHANG Ling. Seepage and heat transfer model of a single fracture of rock and relevant parameter sensitivity analysis [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41 (1): 42-47. (in Chinese))
- [5] 董海洲,罗日洪,张令,等. 坝基双集中渗漏通道传热模型及流速反演研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44 (3): 36-41. (DONG Haizhou, LUO Rihong, ZHANG Ling, et al. Study on double-concentrated-leakage passage heat conduction model and retrieval of velocity in dam basement [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Sciences Edition, 2012, 44 (3): 36-41. (in Chinese))
- [6] 陆艳梅,陈建生,董海洲,等. 大坝渗漏传热模型及拉氏变换解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (2): 274-278. (LU Yanmei, CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, et al. Laplace solution for heat transfer model of dam leakage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (2): 274-278. (in Chinese))
- [7] 王新建. 堤坝集中渗漏温度场探测模型及数值实验[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] NAIREN Diao, QIN Yunli, ZHAO Hongfang. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43 (12): 1203-1211.
- [9] 樊哲超. 堤坝渗漏的线热源模型研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (7): 119-123. (FAN Zhechao. A study of line heat source model for dyke's leakage [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (7): 119-123. (in Chinese))
- [10] 刘光尧,陈建生. 同位素示踪测井[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999: 41-44.
- [11] 李樟苏. 同位素技术在水利工程中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 23-38.
- [12] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 11-12.

(收稿日期: 2012-09-06 编辑: 熊水斌)