

文章编号:1672-3031(2020)01-0062-08

双层堤基异常渗漏对堤防温度场分布的影响研究

张启义¹, 孙东亚¹, 刘昌军¹, 张顺福¹, 赵伟明²

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038;

2. 湖南水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007)

摘要:通过对双层堤基异常渗漏险情作用下的温度场进行分析计算,结果表明,渗流场对堤防内部的温度场分布具有重要影响,当覆盖层中薄弱环节的渗透系数超过粉砂以后,即可在渗漏通道出口观测到明显的低温区,并且该低温区受气温变化的影响较小,因此,通过监测堤防背水侧地面温度的异常变化进而探测出异常渗漏险情在技术上具有一定的可行性,并且在异常渗漏险情发生和发展的早期即可成功探测到,有利于实现“抢早抢小”的目标。研究成果可以为堤防渗漏险情快速遥感探测技术的进一步研发提供一定的理论支撑。

关键词:堤防;异常渗漏;渗流场;温度场;耦合计算;遥感探测

中图分类号:TV871.3

文献标识码:A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.01.008

1 研究背景

管涌和接触冲刷等异常渗漏是汛期堤防的主要险情,多数堤防溃决事件均由此类问题引发^[1]。1998年长江大洪水导致的较大险情中,管涌占51.2%^[2];2013年黑龙江大洪水期间也出现了大量的管涌、渗水等险情^[3]。及时准确地探测管涌和接触冲刷等异常渗漏险情的位置,是有效控制险情进一步发展的前提,对于提高堤防抢险成功率和防止堤坝溃决事故发生具有十分重要作用。

目前我国汛期堤防险情巡查主要以人工为主,每逢发生特大型全流域洪水时,往往需要动员大量的专业技术人员上堤巡查,如在2016年长江流域大洪水中,仅武汉就出动2.4万人巡堤查险,而两湖流域巡堤查险的人数更是达到了40多万人,如此多的人力动员给各级政府的财力、物力和后勤保障提出了很高的要求。同时,基层抢险经验不足、技术人员缺乏,加之初期管涌、散浸等异常渗漏险情隐蔽性很强,极难准确识别判断,不利于“抢早抢小”。因此,迫切需要研发堤坝异常渗漏险情现代化快速探测技术,解决“万人巡堤查险”的问题,提高堤坝异常渗漏险情的精准辨识能力,提升灾害防御的自动化和智能化水平。

随着科技的进步,堤坝渗漏监测技术逐渐从传统的测压管、渗压计等发展到电容、电位、电磁等监测,继而发展到地质雷达、微波遥感、红外测温等监测^[4]。堤坝渗漏隐患探测技术如电阻率法、自然电场法、瞬变电磁法、探地雷达法、拟流场法、弹性波法、温度场法、同位素示踪法等也在堤坝渗漏探测中得到应用^[5-10]。尽管如此,市场上仍然缺少针对汛期堤防异常渗漏险情快速探测的成套自动化设备,主要是因为堤防异常渗漏险情的快速探测理论尚需深入研究,险情自动智能辨识技术尚待进一步开发,相关专业设备尚需研发集成。

本文主要基于异常渗漏将显著改变堤防内部温度场分布的认识,通过渗流场-温度场耦合数值计算研究异常渗漏条件下堤防内部温度场的变化规律,进而分析通过温度场探测堤防异常渗漏险情的可行性和适用条件,从而为堤防异常渗漏险情快速遥感探测技术的进一步研发提供基础理论支撑。

收稿日期:2019-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405004);湖南省水利科技项目(湘水科计[2017]230-35)

作者简介:张启义(1981-),硕士,主要从事防灾减灾及数值模拟技术研究。E-mail: zhangqy@iwhr.com

2 堤防渗流与温度场耦合计算模型

2.1 地下水运动方程^[11-12] 考虑流经土壤中的水为不可压缩流体, 忽略常温条件下温度变化对土壤渗透系数的影响, 则计算地下水运动的二维饱和-非饱和 Richards 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_w = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数; H 为水头; Q_w 为渗流源汇项; θ 为土壤含水量, t 为时间。

2.2 热传导方程^[13] 根据能量守恒定律和傅立叶导热定律, 土体热传导的二维微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_T = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: λ_x 、 λ_y 分别为 x 、 y 方向的导热系数; T 为温度; Q_T 为热力学源汇项; ρ_s 为土体密度; c_s 为土体比热容; t 为时间。

2.3 渗流场-温度场耦合计算方程 渗流作用下的土体温度场计算方程, 同样可基于能量守恒定律和傅立叶导热定律推导出, 只是在推导过程中, 需要考虑渗流作用下地下水流经一个土体微单元所带入或带出的能量 ΔQ_T , 则式(2)变为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \Delta Q_T + Q_T = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

考虑图 1 所示的土体微元体, 在稳定渗流场和固定热边界条件下, 土体的温度和地下水的温度将趋于一致, 但由于地下水不断将热量从土体中带出, 所以, 热量传输将永不停止。地下水从微元体中带出的热量取决于渗透速度及温度的变化大小, 图 1 中假定地下水沿 x 方向的渗透速度为 u , 沿 y 方向的渗透速度为 v , 则地下水沿 x 方向在单位时间内带出微元体的热量计算方程为:

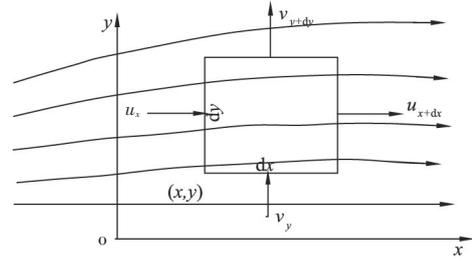


图 1 渗流条件下的微元体

$$\Delta \Delta_{T_x} = \rho_w c_w \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) dy - \rho_w c_w u T dy \quad (4)$$

上式中略去高阶无穷小, 且在稳定渗流场条件下, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, 则式(4)变为:

$$\Delta \Delta_{T_x} = \rho_w c_w u \frac{\partial T}{\partial x} dx dy \quad (5)$$

同理, 地下水沿 y 方向在单位时间内带出微元体的热量计算方程为:

$$\Delta \Delta_{T_y} = \rho_w c_w v \frac{\partial T}{\partial y} dx dy \quad (6)$$

式(5)、式(6)的热量换算为单位体积, 则可得:

$$\Delta Q_T = \frac{(\Delta \Delta_{T_x} + \Delta \Delta_{T_y})}{dxdy} = \rho_w c_w u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_w c_w v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (7)$$

渗流场中任意一点的渗透速度计算式为:

$$u = k_x \frac{\partial H}{\partial x}; \quad v = k_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(3)即可得:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_w c_w \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_T \quad (9)$$

式中： ρ_w 为水密度； c_w 为水的比热容，其余符号同前。

式(9)为稳定渗流状态下的渗流场-温度场耦合计算方程，该式左侧反映了土体温度随时间的变化过程，因此，也可以用于计算变温度边界条件下的非稳定温度场。

3 异常渗漏对堤防温度场分布影响的数值模拟

3.1 典型堤防剖面渗流场的数值分析

(1)正常情况下的渗流场。堤基管涌发生的实际情况表明，管涌险情大多发生在双层堤基^[14]，因此，本文采用文献[15]勘测的澧阳垸澧水城关堤段的堤防剖面作为研究的典型堤防剖面，如图2所示。从图中可以看出，堤基表面弱透水的粉质黏土层大约厚度为6 m，其下为厚约20 m的强透水砂卵石层，最大渗透系数达 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。

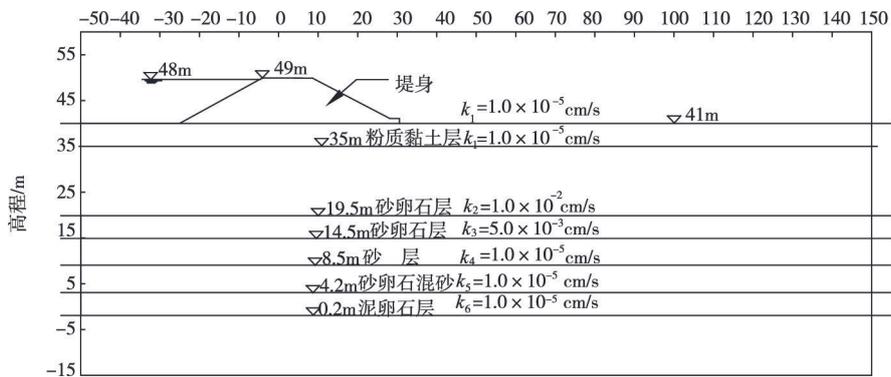


图2 澧水城关堤段典型堤防剖面

采用二维饱和-非饱和渗流计算模型求得澧水城关堤段堤防剖面的渗流场如图3所示，从图中可以看出，水头等值线大多集中于黏土覆盖层内，说明在黏土覆盖层保持完整的情况下，该土层起主要防渗作用，土层内的平均渗透比降超过0.5，局部达到0.8，下游坡脚处的渗透比降介于0.35~0.65之间。

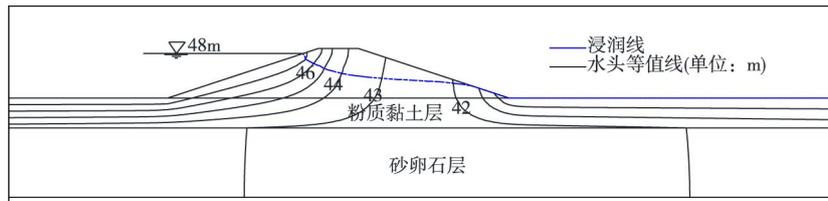


图3 正常条件下的渗流场

(2)异常渗漏情况下的渗流场。由上文的分析可知，在强透水层存在的情况下，堤防背水侧堤脚处的最大渗透比降最大可达0.65，粘土覆盖层的平均渗透比降约为0.5，根据有关研究成果^[14]，堤脚发生管涌的可能性较大。本文假定在堤脚处存在宽为2 m的集中渗漏通道，用以模拟黏土覆盖层中的薄弱环节，渗漏通道内渗透系数取为与砂卵石层一致，计算得到渗流场如图4所示。

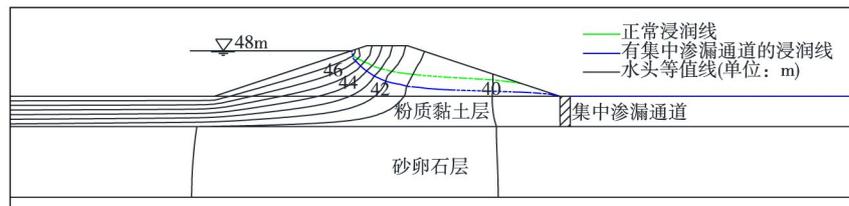


图4 有集中渗漏通道的渗流场

从图4可知,集中渗漏通道有类似减压井的效果,使堤防内部的浸润线大幅降低。集中渗透通道的渗漏水量约为 $1.68\text{ m}^3/\text{d}$,约合 19 mL/s ,通道内平均渗透速度约为 $9.7\times 10^{-4}\text{ cm/s}$,平均渗透比降低于0.1,由此可见,集中渗漏通道的渗漏量和渗透速度均不大,且低渗透比降将限制堤基的进一步破坏。

3.2 渗流场-温度场耦合数值计算

(1)不考虑渗流作用的温度场。观测资料显示,长江江水夏季和冬季水温的日波动变化均较小,夏季平均江水温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$,比月平均气温 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 低约 $5\text{ }^\circ\text{C}$,冬季平均江水温度为 $12\text{ }^\circ\text{C}$,比月平均气温 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 高约 $2\sim 3\text{ }^\circ\text{C}$ ^[16]。由于堤防险情主要发生在夏季,故本文在计算堤防剖面温度场时,取江水温度 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、气温 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 作为边界条件,其余模型参数如表1所示,表中各材料的导热系数为干燥条件下的数值,具体计算时将随含水量变化而变化。经计算,不考虑渗流场的堤防内部温度场分布如图5所示,从图中可以看出,由于砂卵石层、粉质黏土层和堤身的热力学性能相当,所以,温度场几乎呈现均匀分布的特征。

表1 各种材料热力学参数表

	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	比热容/ ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	最大含水量
砂卵石	2.31	1.53	0.35
粉质黏土	1.62	1.94	0.40
黏土(堤身)	1.39	1.88	0.50

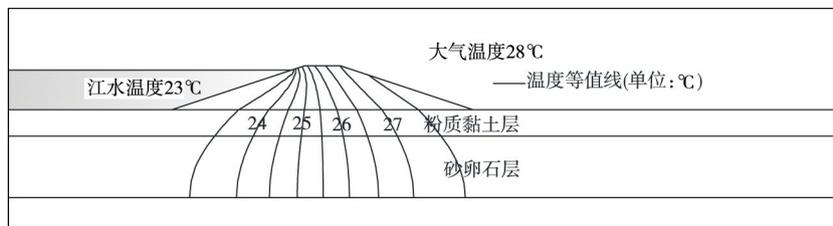


图5 不考虑渗流场的温度等值线分布

(2)渗流场影响下的温度场。耦合图3所示渗流场的温度场分布如图6所示,与图5对比可以发现,温度等值线受渗流作用大幅向下游偏移,且砂卵石层因为渗透系数较大而偏移较多,温度等值线多集中于粉质黏土层中。由于粉质黏土层中尚不存在薄弱环节,故温度场在该土层中的分布仍比较均匀,在地表也观测不到温度异常区。

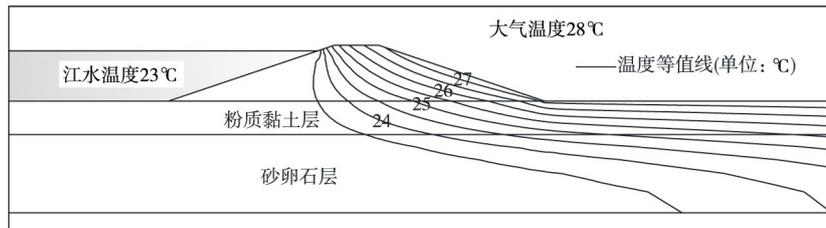


图6 考虑正常渗流场的温度等值线分布

(3)异常渗漏影响下的温度场分布。考虑粉质粘土覆盖层存在集中渗漏通道的温度场分布如图7所示,从图中可以看出,由于集中渗漏通道里的渗透速度较大,导致大量热量被地下水带离土层,使得温度等值线沿渗漏通道集中,此时,集中渗漏通道出口的温度约为 $24.8\text{ }^\circ\text{C}$,比大气温度低 $3.2\text{ }^\circ\text{C}$,且堤脚处温度低于 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域大概有 6 m 宽(图中红线标识区域),也即是说,在集中渗漏通道附近将观测到明显的低温区。

3.3 变气温条件下的堤防内部温度场 根据文献[16]的实测资料,长江夏季典型水温和空气温度日变化如图8所示,从图中可知,江水温度维持在 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,但气温则在 $24\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化,并在早上6—7点间录得一日最低气温(约 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 左右),在16—18点录得一日最高气温(约 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 左右)。由上文的分析可知,在黏土覆盖层中存在薄弱环节的情况下,渗漏通道出口的温度与江水温度密切相关,且在通道出口附近能观测到明显的低温区,然而,由于日最低气温接近江水温度,这是否会对

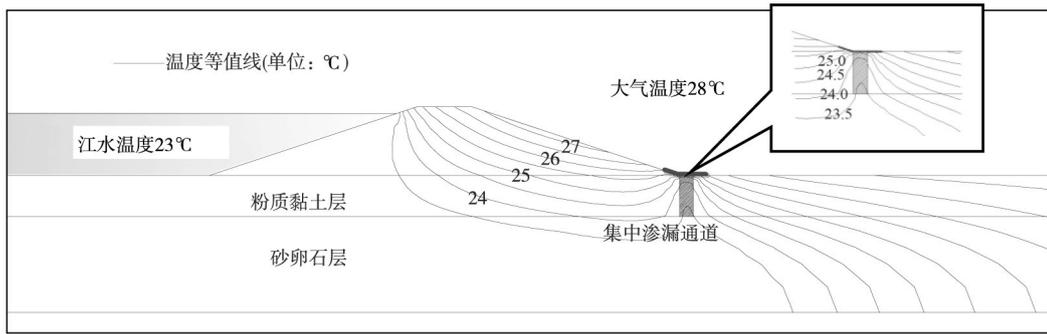


图7 异常渗漏险情下的温度等值线分布

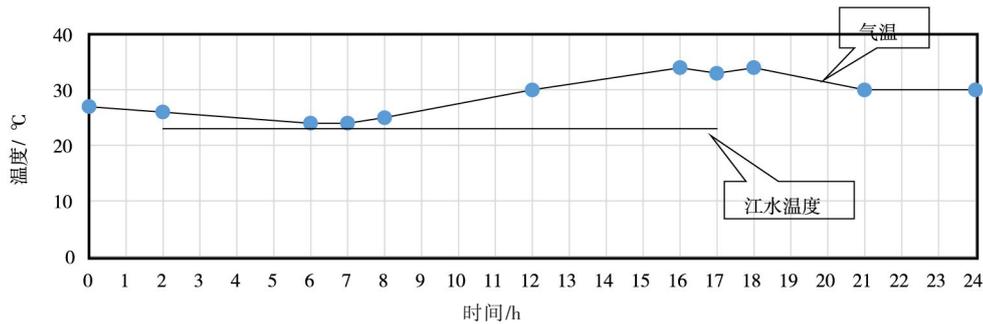


图8 长江夏季水温和气温实测值

低温区的观测造成影响？同时，日最高气温比江水温度高出约11℃，扩大的温差是否能提升低温区的观测效果？这些问题，均需要设置变气温边界条件作进一步的研究。

将一日气温的变化设置为模型边界条件，计算得到日最低气温和最高气温下堤防内部的温度场如图9所示，渗漏通道出口处的温度变化如图10所示。从图中可以看出，最低气温和最高气温下堤防内部的温度场与平均气温条件下的温度场几乎完全相同，集中渗漏通道出口处的温度几乎不受气温变化的影响，即便是在气温与江水温度接近的6—7点间也仍能在渗漏通道出口观察到明显的低温

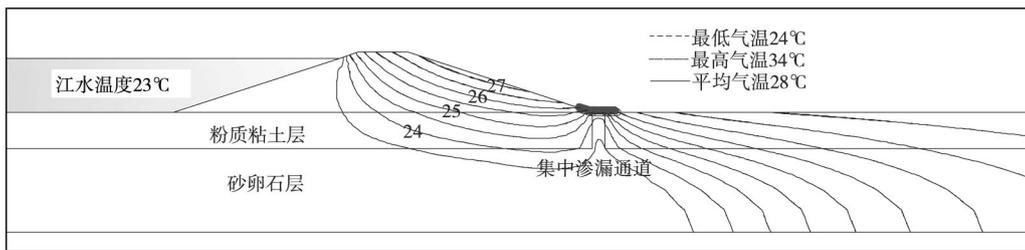


图9 堤防内部温度等值线对比

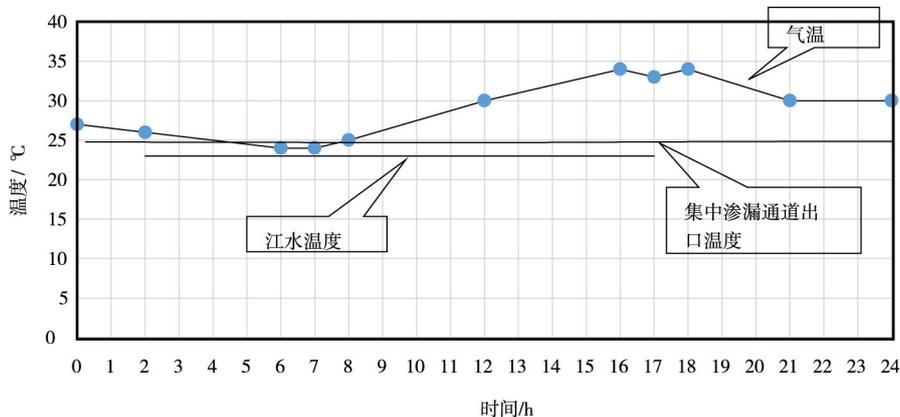


图10 江水-渗漏通道出口-大气温度对比

区,说明堤防内部温度场分布主要受长期平均气温的影响,外界短期气温变化则影响较小。同时,气温的升高并不能显著提高渗漏通道周围土体的温度,因此,气温与江水温度差值的扩大并不能显著提升渗漏通道出口低温区的观测效果。

4 通过温度场探测堤防异常渗漏险情的可行性分析

由上文的分析可知,当双层堤基顶部的粘土覆盖层保持完整时,在地表是观测不到温度异常区的,只有当粘土覆盖层中存在明显的薄弱环节,即存在集中渗漏通道时,方能在地表观察到明显的低温区,并且这个低温区与江水连通性比较好,几乎不受气温变化的影响,因此,通过监测堤防背水侧的低温区进而探测出堤防可能的出险点,在技术上有一定的可行性。

进一步研究集中渗漏通道处不同渗透系数下的渗流场和温度场,成果如表2所示,结果表明:(1)堤防背水侧地面平均温度受集中渗漏通道渗透系数变化的影响较小,基本维持在27.5℃左右;(2)不管集中渗漏通道渗透系数处于什么量值,通道出口的温度始终低于堤防背水侧地面平均温度;(3)渗透系数低于 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 时,通道出口处的低温区与周围地面温度的梯度不明显,不利于辨识,但当渗透系数超过 $6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 后,通道出口的低温区即明显存在,易于探测,本文以26.0℃(比地表平均温度低1.5℃)为界,统计了各种渗透系数下低温区的范围宽度,结果如表2所示。

图11给出了集中渗漏通道出口温度与通道渗透系数的关系,从图中可能看出,通道出口处的温度随通道渗透系数的增大呈现明显的下降趋势,若以26.0℃为界,当集中渗漏通道的渗透系数超过

表2 集中渗漏通道渗透系数敏感性分析

渗透系数		集中渗漏通道指标			地面平均温度/℃	低于26℃范围宽度/m
cm/s	m/d	平均渗透速度/(cm/s)	渗漏流量/(m ³ /d)	出口温度/℃		
1.0×10^{-5}	0.01	9.8×10^{-6}	0.017	27.17	27.5	0
5.8×10^{-5}	0.05	3.2×10^{-5}	0.055	27.17	27.5	0
1.2×10^{-4}	0.1	6.2×10^{-5}	0.107	27.00	27.5	0
2.3×10^{-4}	0.2	1.2×10^{-4}	0.207	26.79	27.5	0
5.8×10^{-4}	0.5	2.6×10^{-4}	0.447	26.28	27.5	0
1.2×10^{-3}	1.0	4.3×10^{-4}	0.735	25.78	27.5	2.3
2.3×10^{-3}	2.0	6.3×10^{-4}	1.085	25.32	27.5	4.5
4.6×10^{-3}	4.0	8.2×10^{-4}	1.422	24.99	27.5	5.4
1.0×10^{-2}	8.6	9.8×10^{-4}	1.686	24.76	27.5	6.0

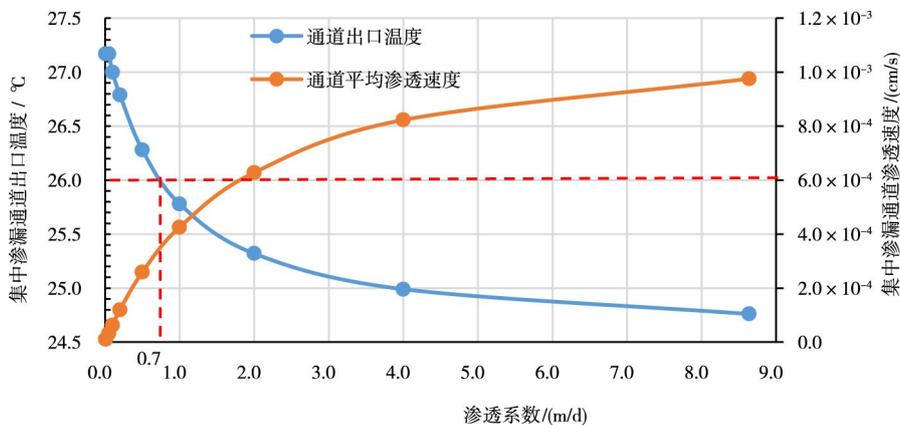


图11 集中渗漏通道出口温度与通道渗透系数的关系

0.7m/d, 即约 8.1×10^{-4} cm/s(相当于粉砂), 即可在渗漏通道出口观察到明显的低温区。

因此, 基于上述分析可以得出结论, 只要是渗透性超过粉砂的集中渗漏通道, 均可以通过监测地表温度的异常区而迅速地探测出来, 而实际真正出险的异常渗漏险情的堤防薄弱带的渗透系数则明显超过粉砂, 因此, 通过监测地面温度异常变化区, 可以在异常渗漏险情发生和发展的早期即可成功探测到。

5 结论与展望

针对当前汛期“万人巡堤查险”的问题, 本文通过渗流场-温度场耦合计算分析了基于温度场探测堤防异常渗漏险情的可行性, 结果表明:

(1) 渗流场对堤防内部的温度场分布具有重要影响, 在双层堤基中未存在渗漏缺陷的情况下, 堤防内部存在低温区明显向下游偏移, 但此时在堤防背水侧地面没有渗漏逸出点, 所以并无低温区;

(2) 当覆盖层中存在明显渗漏缺陷如管涌通道时, 通道出口存在明显低温区, 且堤防内部温度场分布主要受长期平均气温的影响, 外界短期气温变化则影响较小, 因此, 通过监测堤防背水侧集中渗漏通道地面存在低温区。该位置就是堤防的出险点;

(3) 温度场对渗流场的变化是非常敏感的, 当双层堤基覆盖层中薄弱环节的渗透系数超过粉砂以后, 渗漏通道出口存在低温区, 故在异常渗漏险情发生和发展的早期即可通过温度场变化成功探测到, 有利于实现“抢早抢小”的目标。

本文仅从数值分析的角度研究了通过温度场探测堤防异常渗漏险情的可行性, 后期尚须研究地表条件如植被覆盖、池塘等对温度场探测的影响, 并展开相关的试验研究和示范应用, 在进一步研究各种遥感技术的适用条件和局限性的基础上, 研发基于温度场的堤防异常渗漏险情的成套自动化快速探测设备。

参 考 文 献:

- [1] 姚秋玲, 丁留谦, 孙东亚, 等. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 13-18.
- [2] 丁留谦, 张启义, 姚秋玲. 1998年长江流域管涌险情特点分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 44-46.
- [3] 刘昌军, 张顺福, 祖雷鸣, 等. 2013年黑龙江干流特大洪水灾情简述[J]. 中国防汛抗旱, 2013, 23(5): 5-7.
- [4] 冷元宝, 朱文仲, 何剑, 等. 我国堤防隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 59-62.
- [5] 葛双成, 梁国钱, 陈夷, 等. 探地雷达和高密度电阻率法在坝体渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(5): 55-57.
- [6] 董延朋, 万海. 瞬变电磁法在地下隐蔽工程质量检测中的应用[J]. 质量论坛, 2006(1): 39-40.
- [7] 葛双成, 章晓桦, 刘超英, 等. 堤坝隐患物理探测方法及其应用[J]. 浙江水利科技, 2005(5): 36-39.
- [8] 陈建生, 董海洲, 陈亮. 采用环境同位素方法研究北江大堤石角段基岩渗漏通道[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 57-61.
- [9] 孙东亚, Markus Aufleger. 基于光纤温度测量的土石坝渗漏监测技术[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(4): 29-31.
- [10] 吴志伟, 宋汉周. 基于Lu模型的浅部地温场与渗流场耦合研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 326-333.
- [11] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [12] 崔皓东, 朱岳明. 蓄水初期的坝体非稳定渗流场与温度场耦合的理论模型及数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 238-243.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

- [14] 丁留谦, 孙东亚, 姚秋玲, 等. 关于双层堤基上盖重设计准则的建议[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 30-35.
- [15] 丁留谦, 李春华, 杨凯虹, 等. 澧阳垸澧水城关堤段除险加固方案咨询[C]. 堤防加固技术研讨会论文集(上册), 1999: 24-31.
- [16] 孙大明, 田慧峰, 张欢, 等. 长江上游水温监测及水温和气温关系研究[J]. 建筑节能, 2010, 28(238): 74-77.

Study on the effect of abnormal seepage on temperature field distribution of embankment

ZHANG Qiyi¹, SUN Dongya¹, LIU Changjun¹, ZHANG Shunfu¹, ZHAO Weiming²

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research,*

Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, Beijing 100038, China;

2. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China)

Abstract: Temperature fields affected by abnormal seepage in a typical cross section with two-stratum dike foundations are studied and the results show that seepage field has an important influence on the distribution of temperature field in embankment and an obvious low temperature zone can be observed at the outlet of the concentrated seepage passage when its permeability coefficient exceeds that of silt sand. The study also finds that the low temperature zone is scarcely affected by the change of air temperature. The conclusions are that detecting destruction risk of embankment due to abnormal seepage by monitoring the low temperature zone at the back of dike is technically feasible, and this kind of risks can be detected in their very early stages so that the goal of “early risk-elimination” can be achieved. The research results can provide some theoretical support for the further development of fast remote sensing detection technology for abnormal seepage risk in embankment.

Keywords: embankment; abnormal seepage; seepage field; temperature field; coupling calculation; remote sensing detection

(责任编辑: 耿庆斋)