

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221395

考虑太阳热辐射的梯形渠道温度场动态数值模拟和衬砌冻胀分析

王建有¹, 石鹏超¹, 禄林方², 王 娟¹, 梁太利¹

(1. 郑州大学黄河实验室, 河南 郑州 450001; 2. 赵口引黄灌区二期工程建设管理局, 河南 开封 475008)

摘要: 针对因缺乏渠道表面实测温度而难以准确模拟渠道温度场的问题, 考虑太阳热辐射对渠道阴坡、阳坡和底板温度的影响, 建立渠道表面增温计算模型, 采用有限元软件 ABAQUS, 对经历三次降温情况下渠道的温度场变化过程进行数值模拟并分析渠道衬砌冻胀情况。结果表明, 在太阳热辐射影响下渠道阴坡冻深显著大于阳坡和底板冻深, 计算冻深和衬砌破坏规律也与实际情况吻合较好, 在降温过程中阴坡的混凝土衬砌相较于阳坡和底板更容易发生冻胀破坏, 按照多年最大冻深利用规范计算时也有相同规律, 研究成果可为渠道混凝土衬砌温控防裂设计提供新思路。

关键词: 渠道; 混凝土衬砌; 太阳热辐射; 数值模拟

中图分类号: [TV91]; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0109-04

1 引言

混凝土衬砌冻胀问题是渠道工程中亟待解决的问题。目前, 关于渠道冻胀问题的研究成果较丰富, 但现有研究大多将冻胀的动态过程看作稳态传热过程, 无法准确反映温度波动下的冻胀问题; 另外, 在温度边界条件的取值上, 由于缺乏长时段渠表温度数据, 通常直接利用气温数据预测渠道冻胀破坏, 误差较大。因此, 合理设定温度场的温度边界条件成为渠道温度场数值模拟难题。对此, 根据混凝土水平表面太阳辐射的增温计算方法^[1], 从太阳热辐射角度出发, 结合气象学知识, 对渠道阴坡、底板和阳坡赋予不同太阳热辐射增温, 建立渠道表面增温计算模型。在此基础上, 基于有限元软件 ABAQUS 对赵口引黄灌区的梯形渠道进行 85 d 温度场仿真计算, 模拟渠道冻深演化过程, 以期掌握外界温度变化过程中渠道冻胀的动态变化规律, 为渠道抗冻胀设计提供理论依据。

2 太阳热辐射增温模型

太阳辐射能量中, 一部分到达地表前被大气吸收; 另一部分到达地表后, 又有一部分被吸收,

余下部分则被反射, 其中被地表吸收的能量引起了地表温度的升高^[2]。设在单位时间内单位面积上, 水平混凝土板表面太阳辐射热均值为 S , 其中被混凝土吸收的部分为 R 。水平混凝土板表面的太阳辐射增温公式^[1]为:

$$\Delta T = R/\beta \quad (1)$$

$$R = \alpha_s S \quad (2)$$

$$S = S_0(1 - bn) \quad (3)$$

$$\beta = 21.8 + 13.5v_a \quad (4)$$

式中, ΔT 为混凝土表面温度与大气温度的差值, $^{\circ}\text{C}$; R 为混凝土表面吸收的太阳辐射能, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; β 为混凝土表面放热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; α_s 为吸收系数, 混凝土表面为 0.65; S 为太阳辐射热均值, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; S_0 为晴天太阳辐射热, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; b 为云度系数; n 为云量; v_a 为风速, m/s 。

式(1)~(4)为理想情况下的太阳辐射增温计算, 即无遮挡物的理想水平面。对于渠道工程, 尤其是东西走向渠道, 阴坡和渠底会遮蔽一部分阳光, 使得阴坡和渠底的太阳辐射增温比阳坡小。不同渠道断面形状不同, 渠道边坡板坡度越大, 渠道所在地纬度越高, 这一差异越显著。为考虑这部分增温差异, 提出太阳辐射增温系数 k , 定义

收稿日期: 2022-07-09, 修回日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179145); 河南省 2021 年水利科技攻关项目(ZKEQ-QDCQMNFK)

作者简介: 王建有(1977-), 男, 博士、教授级高级工程师, 研究方向为水工建筑物的安全性检测与评价, E-mail:

wangjianyou@zzu.edu.cn

为任意坡面任意坡比的太阳辐射增温与理想水平平面太阳辐射增温的比值。不同坡面的太阳辐射增温计算公式为：

$$k = \eta k' \tag{5}$$

$$\eta = \sin \alpha_i \tag{6}$$

$$k' = (\theta_{\max} - \theta_i) / \theta_{\max} \tag{7}$$

$$\Delta T' = k \Delta T \tag{8}$$

式中, η 为太阳光照效率, 与太阳光线和受光面夹角的正弦值成正比; k' 为角度系数, 理论意义为实际可曝晒角度与理论可曝晒角度的比值; α_i 为太阳光线和受光面的夹角; θ_{\max} 为正午太阳高度角; θ_i 为不同坡面开始接收太阳辐射的角度(图 1), 由于阴坡坡顶的遮挡, 当太阳光线与地面夹角大于 θ_1 时阳面中部开始接收太阳光辐射, 当太阳光线与地面夹角大于 θ_2 时底板中部开始接收太阳光辐射, 当太阳光线与地面夹角大于 θ_3 时阴面整体开始接收太阳光辐射; $\Delta T'$ 为渠道混凝土衬砌不同坡面的太阳辐射增温值。

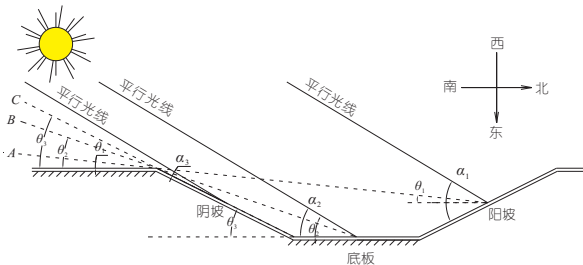


图 1 太阳辐射规律

Fig. 1 Solar radiation patterns

3 计算模型

3.1 基本假定

(1) 冻土和未冻土均为各向同性材料, 在不同方向上热传导性能相同。

(2) 由于渠道断面在渠长方向基本无变化, 因此采用二维模型进行模拟研究。

3.2 热力学温度场方程

由于计算区域内存在一个随时间变化的冻融两相分界面, 在考虑水冰相变释放潜热时, 需在冻土材料属性中设置潜热参数, 张玉芝等^[3]认为水冰相变区间为 $[0, -1]$ 。因此本研究中考考虑土骨架、介质传导及水冰相变 3 个主要因素的影响, 渠道基土中的温度分布满足方程:

$$\rho c \partial T / \partial t = \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + L \partial V_i / \partial t \tag{9}$$

式中, ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为材料质量比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; t 为计算时间, s ; ∇ 为哈密顿算子; λ 为材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

L 为水冰相变潜热, kJ/kg ; V_i 为体积含冰率。

4 有限元数值模拟

4.1 原型渠道基本情况

以赵口灌区石岗分干桩号 1+050 断面渠道为模拟对象, 渠道为东西走向, 渠道断面尺寸见图 2, 边坡系数 1:2, 衬砌板厚度为 10 cm。工程位于河南省开封市, 在 2021 年 1 月出现了大范围渠道衬砌开裂现象, 据气象资料显示, 该工程在 2020-12-14 ~ 2020-12-17、2020-12-29 ~ 2020-12-31、2021-01-06 ~ 2021-01-08 先后经历 3 次强冷空气, 开封通许县具体气温变化过程见图 3。

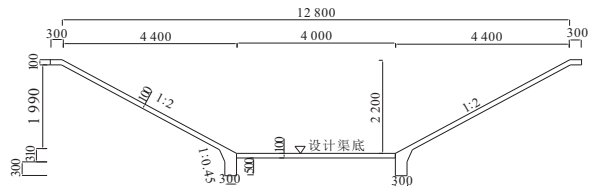


图 2 石岗分干 1+050 断面图(单位: mm)

Fig. 2 Shigang sub-stem 1+050 cross-sectional view

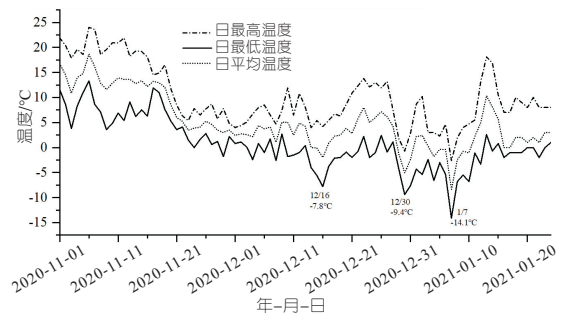


图 3 通许县 2020-11-01 ~ 2021-01-24 气温变化过程

Fig. 3 Temperature change process of Tongxu County from 2020-11-01 to 2021-01-24

4.2 有限元模型

4.2.1 有限元几何建模及单元网格划分

在有限元建模时, 取渠底衬砌中点为整体坐标原点, 渠道断面向两侧沿伸 3 m 作为模型左右边界, 渠底向下取 5 m 作为模型下边界。有限元模型采用四边形网格划分单元, 各部分单元保证连续。渠道左右边界和下边界在空间上无限延伸, 认为其边界热通量为零。渠道上边界采用温度边界条件。阳坡、底板和阴坡考虑太阳辐射增温折算后的日最低温度作为其温度边界条件。梯形渠道有限元网格见图 4。

4.2.2 材料参数选择与分析步设定

分析步选择瞬态热传导进行计算, 根据原型渠道气象资料确定瞬态求解总时间为 85 d (2020/11/1 ~ 2021/1/24)。在参数选取方面, 参考王正中等^[4,5]关于混凝土和土体材料的取值, 见表 1。

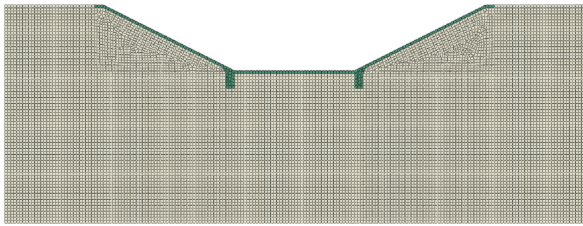


图 4 石岗分干 1+050 梯形渠道网格划分

Fig. 4 Trapezoidal channel grid division of Shigang sub-stem 1+050 section

表 1 材料参数表

Tab. 1 Table of material parameters

材料类别	密度 / (kg · m ⁻³)	导热系数 / (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	比热容 / (J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	热膨胀系数 / °C ⁻¹
混凝土	2 400	1.28	970	1.1 × 10 ⁻⁵
未冻土	1 300	1.54	1 780	0
冻土	1 300	2.40	1 780	-1.46 × 10 ⁻³

4.2.3 阳坡、底坡与阴坡的温度边界条件设定

理想水平混凝土平面的太阳辐射升温值可根据式(1)~(4)得出。根据气象资料,计算周期内平均晴天太阳辐射热 S_0 为 611.37 kJ/(m² · h),云度系数 b 为 0.68,平均云量 n 为 0.2,平均风速 V_a 为 2.39 m/s。由此可计算出赵口灌区所在地水平混凝土表面吸收的太阳辐射能 R 为 528.22 kJ/(m² · h), ΔT 为 6.34 °C,该值即为理想水平混凝土平面下太阳辐射的升温值。

考虑到该工程为东西走向渠道,存在与太阳光线夹角不同的阳坡、底板和阴坡,因此根据式(6),阳坡的太阳光照效率 $\eta_{\text{阳}}$ 为 0.843,底板的太阳光照效率 $\eta_{\text{底}}$ 为 0.515,阴坡的太阳光照效率 $\eta_{\text{阴}}$ 为 0.178。赵口灌区冬季正午太阳高度角即 θ_{max} 为 31°,根据式(7), $k'_{\text{阴}}$ 为 0.145, $k'_{\text{底}}$ 为 0.387, $k'_{\text{阳}}$ 为 0.808,因此根据式(5)得到太阳辐射升温系数 $k_{\text{阴}}$ 为 0.011, $k_{\text{底}}$ 为 0.2, $k_{\text{阳}}$ 为 0.681。结合式(9)可得阴坡增温为 0.07 °C,底板增温为 1.27 °C,阳坡增温为 4.32 °C。

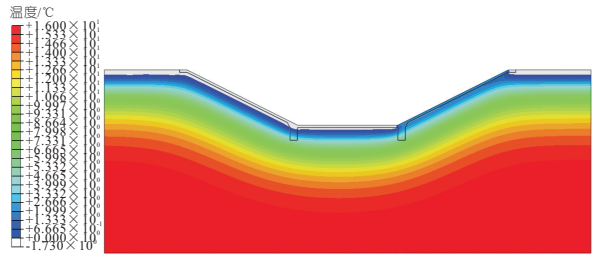
4.3 结果与分析

4.3.1 温度场分析

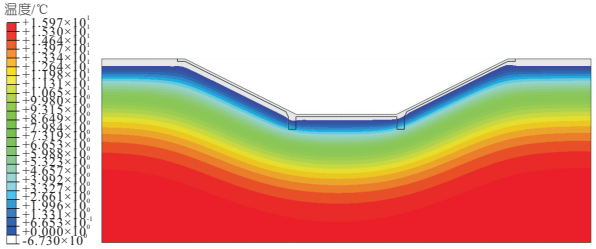
从气温变化图(图 3)可知,在 2020-11-01~2021-01-24 日渠道所在地一共经历了三次强冷空气。温度场随时间的变化过程见图 5,为方便观察测量冻深,温度场云图中将冻土区域处理为白色显示。

在第一次强冷空气影响下,最大冻深出现在 2020-12-22 日,见图 5(a),其中左岸为阴坡,右岸为阳坡。此时阴坡冻深为 14 cm,渠底冻深为 7 cm,阳坡未出现冻深。

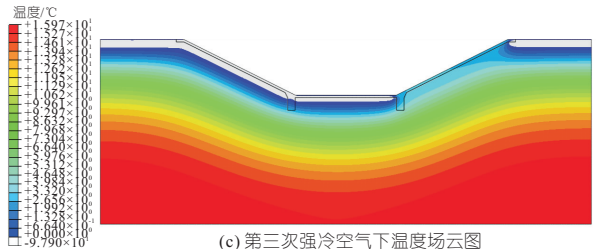
在第二次强冷空气影响下,最大冻深出现在



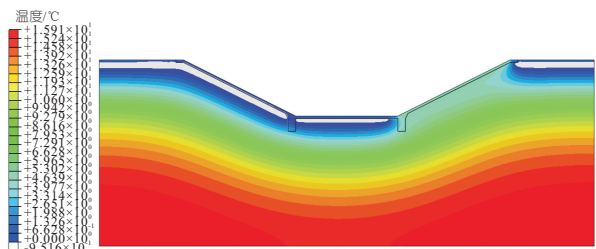
(a) 第一次强冷空气下温度场云图



(b) 第二次强冷空气下温度场云图



(c) 第三次强冷空气下温度场云图



(d) 三次强冷空气结束时温度场云图

图 5 三次冷空气下温度场云图

Fig. 5 Temperature field clouds under three cold spells

2021-01-10 日,见图 5(b),此时阴坡冻深为 23 cm,渠底冻深为 14 cm,阳坡冻深为 7.5 cm。

在第三次强冷空气影响下,最大冻深出现在 2021-01-19 日,见图 5(c),此时阴坡冻深为 30 cm,渠底冻深为 16 cm,阳坡未出现冻深。

在 2021-01-20~2021-01-24,此时渠道冻深趋于稳定状态,在 2021-01-24 日,见图 5(d),此时阴坡冻深为 30 cm,渠底冻深为 17 cm,阳坡未出现冻深。在渠道阴坡出现冻胀裂缝后,地质人员于 2021-01-24 日在石岗分干测得实地冻深结果,在渠道阴坡有约 27 cm 冻深,阳坡未见冻结层,与温度场模拟结果吻合较好。

温度场计算结果表明,在渠道走向影响下,温度场呈不对称分布,阳坡温度明显大于阴坡,温度场的分布规律决定了冻深情况,这与现场检测中阴坡冻深大于阳坡冻深的规律相吻合。主要原因在于该渠道为东西走向渠道,不同坡面太阳热辐射升温的不同导致阳坡接受的太阳热辐射大于底

板与阴坡,结合现场检测结果可知,数值结果与实际结果冻深最大差异为 3 cm 且分布规律基本吻合。这表明此模型可较好模拟太阳辐射作用下的渠道温度场。

4.3.2 数值模拟结果分析

此工程所在地地下水位埋深约 200 cm。依据《渠系工程抗冻胀设计规范》^[6] 3.2.2.1 中冻深与冻胀量的关系曲线中查得冻深为 10 cm 时冻胀量约为 0.2 cm,冻深 25 cm 时冻胀量约为 0.5 cm,冻深 40 cm 时冻胀量约为 1 cm。规范^[6]规定对于梯形混凝土衬砌渠道,当衬砌板单块长边尺寸 ≥ 5 m 时允许冻胀量为 0.5 cm。说明当冻深大于 25 cm 时产生的冻胀量大于规范^[6]允许冻胀量。

温度场模拟结果显示,渠道阴坡在第一、二、三次强冷空气后最大冻深分别为 14、23、30 cm,若不采取防冻胀措施,阴坡渠道衬砌板易发生冻胀破坏。

渠道阳坡经历三次冷空气降温后最大冻深不超过 7.5 cm,远小于规范^[6]允许冻深值,因此阳坡衬砌板不会冻胀破坏。渠道底板最大冻深出现在第三次强冷空气后,达到了 16 cm,也未达到规范^[6]允许冻深值,因此渠道阳坡和底板均不会发生冻胀破坏。

综上,此次强冷空气作用下,阴坡混凝土衬砌板相较于阳坡和底板更容易发生冻胀破坏。在赵口引灌灌区石岗分干桩号 1+050 断面渠道现场勘察中,发现阳坡和底板部位的混凝土衬砌未出现冻胀开裂现象,在阴坡的混凝土衬砌出现了长距离沿渠长方向的冻胀开裂现象。这与数值模拟结果的冻胀破坏规律吻合较好,验证了数值模拟分析方法的合理性。

4.3.3 依据 30 年最大冻深参考规范计算

依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[7]对中国各大城市最大冻深的汇总可知,河南开封历史记录 1971~2000 年最大冻深为 26 mm。将其作为历史最大冻深,按照《渠系工程抗冻胀设计规范》^[6]计算渠道各部位的冻深和冻胀量,与本次极端强冷空气下的数值模拟结果具体对比见表 2。由表 2 可知,当按照历史最大冻深参照《渠系工程抗冻胀设计规范》^[6]推算冻胀破坏结果时,渠道阴坡混凝土衬砌会发生冻胀破坏,渠道阳坡和底板混凝土衬砌均不会发生冻胀破坏,这与本次数值模拟分析结果一致。即在面临极端强冷空气或历史记录多年最大冻深时,阴坡混凝土衬砌相较于底板和阳坡的混凝土衬砌,更容易产生冻胀破坏。

表 2 石岗分干桩号 1+050 冻胀量计算表

Tab. 2 Calculation table for frost heave for Stone

		Gang Sub-dry 1+050			cm
数值模拟结果与 规范计算结果对比	计算值	阳坡	阴坡	底板	
规范计算结果	渠道各部位计算冻深	8.51	30.77	23.75	
	冻胀量	0.17	0.69	0.48	
数值模拟结果	冷空气作用下最大冻深	7.50	30.00	16.00	
	冻胀量	0.15	0.67	0.32	
是否破坏依据	规范允许冻胀量	0.50			

5 结论

a. 通过引入太阳辐射增温系数对渠道阴坡、底板和阳坡赋予了不同的太阳热辐射增温,在此理论上,基于 ABAQUS 瞬态热传导分析数值模拟渠道温度场,得到的渠基土冻深变化规律符合实际冻深结果,计算合理。

b. 渠道衬砌冻胀情况表明,在本次强冷空气作用下,渠道阴坡的冻土冻胀量已超过规范允许值,较好解释了本工程渠道阴坡混凝土衬砌板的裂缝成因,按照历史最大冻深依据规范计算的结果也验证了本次数值模拟规律的合理性。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [2] THORN P E, HASENAUER H, WHITE M A. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: An application over complex terrain in Austria [J]. Agricultural and forest meteorology, 2000, 104(4):255-271.
- [3] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣, 等. 季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12):2546-2553.
- [4] 王正中, 袁驹, 陈涛. 冻土横观各向同性非线性本构模型的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8):1215-1218.
- [5] 温彤, 王红雨. 整体式小 U 形渠道混凝土衬砌结构冻胀破坏数值模拟研究[J]. 陕西水利, 2018(3): 231-233.
- [6] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范:SL 23-2006[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

的布设。

4 结 论

a. 随着降雨重现期的增大,GI 最优空间布局方案对径流量和污染物负荷量的综合削减效果减弱,其可选择范围亦在减小。

b. SL 的成本效益最好,GR 最差。当资金投入较低时,可优先布设 SL,在资金允许条件下再考虑布设 GR。

参 考 文 献:

[1] 朱培元,傅春,肖存艳. 基于 SWMM 的住宅区多 LID 措施雨水系统径流控制[J]. 水电能源科学, 2018,36(3):10-13.

[2] 李旦,叶长青. 基于耦合 SWMM 模型和 NSGA-II 算法的多目标低影响开发措施优化设计方法及应用[J]. 水电能源科学,2019,37(6):58-61.

[3] YU Y, ZHOU Y, GUO Z, et al. A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale: Integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform[J]. The science of the total environment, 2022, 831: 154843.

[4] 曾家俊. 基于解析概率方程与模型模拟的 LID 措施径流控制效应综合评价[D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[5] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.1[M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2015.

[6] 广州市水务局. 广州市中心城区暴雨公式及计算图表[M]. 2014

[7] 麦叶鹏. 基于多尺度试验、监测和模型模拟的低影响开发措施雨水径流控制效应研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[8] 吴海春. 低影响开发雨水利用技术及其评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 2014.

[10] MEI C, LIU J, WANG H, et al. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed[J]. The science of the total environment, 2018, 639: 1394-1407.

Optimization of Spatial Allocation of Green Infrastructure Based on SPEA2

LIAO Xiang-hua^{1a}, CHEN Wen-jie², ZHENG Jia-xuan^{1a}, HUANG Guo-ru^{1a,1b}

(1a. School of Civil Engineering and Transportation; 1b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To maximize the cost-effectiveness of green infrastructure (GI) implementation, a pilot project in Guangzhou Tianhe Smart City was selected to conduct the study. Setting runoff volume reduction rate, suspended solids load reduction rate, and life cycle cost of GI as optimization objectives, SPEA2 was coupled with SWMM to obtain a series of GI optimal spatial allocation schemes with land utilization as the constraint condition. The results show that with the increase of the rainfall recurrence period, the integrated reduction rate and the range of the GI optimal spatial allocation scheme set gradually reduce. The sunken lawn (SL) is the most cost-effective GI while the green roof (GR) is the least. When the investment is low, the area of SL can be planned to the maximum before planning other GI. If the integrated reduction rate is high with sufficient funds, GR can be considered based on the large allocation area of other GI. The results can provide theoretical support for the implementation of the sponge city program.

Key words: cost-effectiveness; SPEA2; spatial allocation optimization; green infrastructure; SWMM

(上接第 112 页)

Numerical Simulation of Trapezoidal Channel Temperature Field and Lining Frost Heave Analysis Considering Solar Thermal Radiation

WANG Jian-you¹, SHI Peng-chao¹, LU Lin-fang², WANG Juan¹, LIANG Tai-li¹

(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District Phase II Project Construction Administration, Kaifeng 475008, China)

Abstract: Due to the lack of measured temperature on the channel surface, it is difficult to accurately simulate the channel temperature field. Considering the effect of solar thermal radiation on the temperature of the shady slope, sunny slope and bottom slab of the channel, a calculation model of channel surface temperature increase was established. The finite element software ABAQUS was used to simulate the temperature field change process of the channel and analyze the frost heave of the channel lining under the condition of three times of cooling. The results show that under the influence of solar thermal radiation, the freezing depth of the shady slope of the channel is significantly greater than that of the sunny slope and the bottom slab, the calculated freezing depth and the damage law of the lining are also in good agreement with the actual situation. During the cooling process, the concrete lining of the shady slope is more prone to frost damage than that of the sunny slope and the bottom slab, the same rule applies when calculated according to the multi-year maximum freeze depth utilization specification. The research results can provide new ideas for the temperature control and crack prevention design of channel concrete lining.

Key words: channel; concrete lining; solar thermal radiation; numerical simulation