

基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析

王正中^{1,2}, 芦琴¹, 郭利霞³, 杨成有⁴, 杨富元⁴

(1. 西北农林科技大学水工程安全与病害防治研究中心, 杨凌 712100; 2. 中国科学院冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000;
3. 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098; 4. 甘肃省疏勒河流域水资源管理局, 玉门 735211)

摘要: 为了掌握衬砌渠道冻胀量及冻胀力随昼夜气温变化的发展规律及冻胀破坏极限状态, 根据冻土力学及冻土物理学理论, 利用有限元软件 ANSYS 按瞬态温变模式加载温度, 对衬砌渠道冻胀过程进行数值模拟, 研究了其温度场和冻胀变形及法向冻胀力与切向冻胀力随时间的变化规律。结果表明: 渠道冻融破坏除因渠基土冻胀外, 阴阳两坡的温度、冻胀变形、冻胀力既不均匀不对称变化又不同步, 也是渠道冻胀破坏的重要原因; 阳坡滞后阴坡约 15 d 冻结, 最大冻胀量及最大冻胀力滞后日平均最低气温约 4 d, 日内最大冻胀量及最大冻胀力滞后日最低气温约 1 h; 模拟结果与野外观测资料基本吻合, 但比稳态数值模拟结果偏大, 表明了运用瞬态数值模拟进行渠道抗冻胀设计的正确性和合理性。

关键词: 渠道衬砌, 冻融, 有限元, 冻胀

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.001

中图分类号: S277, TV315

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0001-07

王正中, 芦琴, 郭利霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1-7.

Wang Zhengzhong, Lu Qin, Guo Lixia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole day[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 1-7. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在广大北方季节性冻土地区, 基土冻胀是引起衬砌渠道破坏的根本原因。特别是刚性衬砌渠道, 在衬砌约束作用下冻胀力往往很大, 当衬砌结构体不能适应基土冻胀变形或不能抵抗基土冻胀力时就会产生裂缝甚至断裂的冻胀破坏, 造成渠道渗漏及水资源的大量浪费。近年来, 针对渠道冻胀防治和抗冻胀设计问题许多学者进行了大量的研究: 李安国^[1]进行了大 U 形渠道的试验研究; 王正中^[2-3]、余书超^[4]等通过适当的假设, 给出刚性衬砌受冻胀时的内力计算模型, 王正中^[5]经过试验研究指出冻土属于横观各向同性材料, 李学军^[6]依据温度梯度理论, 论述了大型 U 形混凝土衬砌渠道冻胀机理; 运用原型观测成果, 建立了大型 U 形混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合二维模型, 建立了冻深、冻胀预测模型。安维东^[7]、刘雄等^[8]以渠基冻土为研究对象进行三场耦合数值分析, 将衬砌板自重作为均布荷载直接加在冻土上, 忽略了冻土与衬砌板的相互作用, 也无法得到衬砌板上的冻胀力和冻胀力, 而且应用上复杂, 难以在渠道衬砌工程设计上广泛应用; 郭利霞等^[9]也用有限元法对渠道冻胀进行分析, 表明渠道冻胀数值模拟能够为季节冻土区

渠道工程设计及力学计算提供参考和科学依据。但是以上成果都是将冻胀的动态过程看成稳态传热过程, 虽然和野外定时试验结果基本吻合, 但无法反映昼夜温度变化及冻胀的动态过程, 因而无法掌握冻胀过程中冻胀量和冻胀力的动态发展规律及冻胀破坏控制状态。

本文利用有限元软件 ANSYS, 以陕西省冯家山水库总干闫家务退水的 U 形渠观测段为研究对象, 对一个冻融周期内衬砌渠道的温度场、应力场进行仿真计算, 以期寻求动态温度场引起渠道冻胀破坏的控制状态, 分析和预测在冻融过程中基土温度场、应力场及其位移特别是衬砌板上冻胀力和冻胀变形的变化规律, 为渠道抗冻胀设计提供更加科学的理论依据。

应用结构分析通用软件 ANSYS 之前, 必须确定各种介质的本构模型及瞬态温度函数和冻土的基本力学和热学参数, 根据文献^[1-3, 5-6]建立如下物理力学模型。

1 物理力学模型

1.1 基本假设

1) 冻土和未冻土为均质各向同性线弹性固体。

2) 由于土的冻胀主要影响因素为温度、水分、土质, 对于水分及土壤条件给定情况下的具体工程, 主要取决于温度。本文主要分析冻土温度、应力两场耦合作用, 故假设土冻结过程中, 主要取决于负温。

3) 土壤水相变温度在同一种土壤中和在衬砌板约束下为常值, 即相变温度为 0℃^[10]。

4) 渠道属细长结构, 忽略沿渠长方向的温度差异, 分析过程中把衬砌渠道冻胀作为平面应变问题处理。

收稿日期: 2008-10-31 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 国家“863”计划(2002AA62Z3191); 国家冻土工程重点实验室基金资助项目(9901)

作者简介: 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程及冻土工程学科教学与科研工作。杨凌 西北农林科技大学水工程安全与病害防治研究中心, 712100。

Email: wangzz0910@yahoo.com.cn

1.2 伴有相变的渠基非稳态温度场的控制方程

随着自然界四季温度交替变化,渠基土体经历着从不冻结状态到冻结状态以及再次融化的循环过程,因此也必然存在着热传导问题,按平面非稳态热传导微分方程^[11]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (1)$$

式中: ρ ——土体密度, kg/m^3 ; C ——土体比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t ——时间, s ; λ ——土体热导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

求解含相变的热传导问题时,其控制微分方程的热参数强烈地依赖于温度,计算区域内存在着一个随时间变化的冻融两相分界面,在此界面上吸收和放出热量。这类问题在数学上是一个强非线性问题,解的迭加原理不成立,至今只有很简单情况才能获得解析解^[12],目前只能进行数值求解,为求解含相变的热传导问题方便,在计算中引入了一个新的变量——焓,焓为土体密度与比热的乘积对温度的积分

$$H = \int \rho C(T) dT \quad (2)$$

式中: $C(T)$ ——土体比热; H ——焓, J/m^3 ,把焓和温度同时作为待求函数,而且焓随时间的变化是连续的。因此用数值方法求解焓的分布时不需要跟踪两相界面^[13-14]。

1.3 本构方程

冻胀是由于土壤中水分在低温下冻结而引起的。土体冻胀会受到衬砌板的约束,并且冻土各部分之间也会相互制约,从而产生应力,根据文献^[15],可将衬砌渠道的冻胀视为“热胀冷缩”温度应力的特例。上面给出了在温度影响下的热传导方程,再加上外力边界条件和应力场的各种方程,则可以进行温度影响下的应力计算,即热、力耦合计算。

渠道静力平衡方程为

$$L\sigma = 0 \quad (3)$$

几何方程为

$$\varepsilon = Lu \quad (4)$$

其中

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

与温度相关的应力-应变方程(本构方程)为^[16]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} \times \Delta t \quad (6)$$

式中: ε_x 、 ε_y ——正应变; γ_{xy} ——剪应变; σ_x 、 σ_y ——正应力; τ_{xy} ——剪应力; E ——弹性模量; α ——混凝土或冻土自由冻胀时的热膨胀系数; t ——温度; μ ——泊松比。

2 原型概况

本文所做仿真计算原型为陕西省冯家山水库总干闫家务退水的 U 形渠观测段,文献^[1]通过 3 个寒季的观测,获得关于渠道冻深、冻胀量的数据,并测出渠道冻胀力随时间变化过程线。文献^[17]曾对该渠道进行模拟试验,测出了冻胀量在渠道断面的分布规律为渠底最大、两渠顶最小。该原型渠道如图 1,基本情况见表 1。

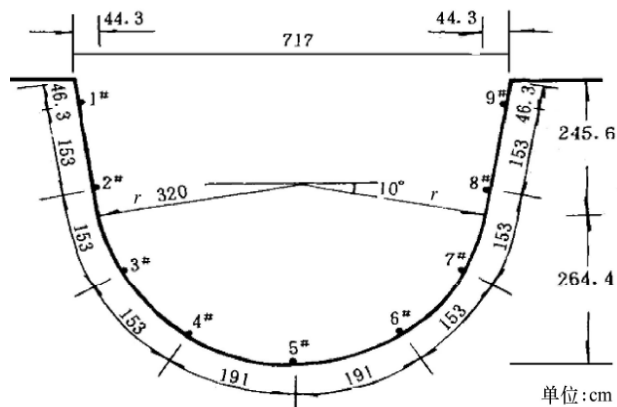


图 1 衬砌大 U 形渠道断面

Fig.1 Section of U-shape channel with lining

表 1 原型渠道基本情况

Table 1 Prototype channel basic situation

部位	渠床土质	冻深 h /cm	冻胀量 Δh /cm	冻前含水率 /%	冻胀率 η /%
阴坡		26	0.71	19.4	2.73
渠底	粉质黏土	28	0.78	24.1	2.64
阳坡		8.5	0	23.1	0

其各部位的表面温度和冻结期见表 2。

表 2 渠道各部位的表面温度和冻结期

Table 2 Surface temperature and the freezing period of the various parts of the channel

部位	月平均表面温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	12 月	1 月	2 月	冻结期
阴坡	-4.50	-6.06	-3.27	12-13-03-08
渠底	-1.80	-3.20	-0.95	11-29-02-22

3 计算模型

几何模型的建立需要考虑边界条件等因素,根据工程实际及温度水分情况,下边界条件从底板向下取 150 cm,左右边界取 75 cm,有限元模型见图 2。由于实测参数有限,在初始温度场是不均匀且又是未知的情况下,必须首先做稳态热分析建立初始条件。本次计算参考冯家山灌区 1984 年 1 月份实测冻胀的冻深值和瞬态初始表面温度进行稳态计算,瞬态计算的初始时刻是该冻深测量日 1 月 6 日 7 时。

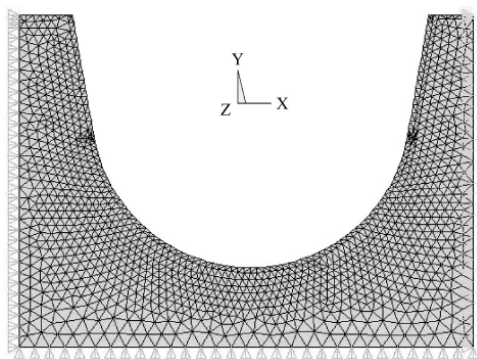


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

3.1 边界条件

上表面边界温度根据年环境温度变化简化为正弦曲线形式, 考虑到地温增温率可以表示成如下形式^[18]

$$f(t) = T_0 + R_0 t + A_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{8640} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

式中: T_0 ——年平均气温, 参考文献[17], 同时根据负积温不同分阴坡、渠低和阳坡分别取 7.089°C , 9.95°C , 11.049°C 作为上表面边界温度; R_0 ——气候变暖引起的下附面层底地温增温率, 文献[19]指出未来 50 a 西北地区气温可能上升 $1.9\sim 2.3^\circ\text{C}$, 但是本文计算时间仅 3 个月, 相对很小, 所以取为 0; A_0 ——气温的幅值, 依据文献[20], 取值为 13.15°C ; t ——时间, h; $\frac{\pi}{2}$ ——初相, 鉴于日温度的变化, 参考文献[21]取平均日变幅 12°C , 初始时刻是 1 月 6 日 7 时, 故上边界温度表示为

$$f(t) = T_0 + R_0 t + A_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{8640} - \frac{\pi}{2}\right) + 6 \sin\left(\frac{2\pi t}{24} + \frac{\pi}{12}\right) \quad (8)$$

下边界深度足够达到稳定温度, 取值为 10°C , 左右边界视为绝热条件, 位移边界条件为渠基左右边界水平方向位移为 0, 下边界竖直方向位移为 0。

3.2 参数选取

参考该灌区相关试验数据^[21], 计算过程中土体热力学参数相关参数见表 3。

表 3 土体热力学参数
Table 3 Thermal parameters of soil

土体	干密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	导热系数 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	比热 / $\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
融土	1600	1.21	2610
冻土	1600	1.26	2100

作为各向同性的弹性材料, 在含水率确定的情况下冻土的弹性模量随着温度的变化发生改变, 参考文献[15]选取, 结果见表 4。而进行热应力计算时, 将冻土冻胀系数作为负的热膨胀系数, 取冻土统一冻胀系数为 η/T , 其中 η 为冻胀率, 本文取为 2.73%, T 为温度。

衬砌混凝土看成各向同性材料, 弹性模量为 $24\,000\text{ MPa}$, 泊松比 0.167, 密度 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。

表 4 冻土力学参数

Table 4 Mechanical parameters of frozen soil

土温/ $^\circ\text{C}$	弹模/ MPa	泊松比
1	30	0.4
0	30	0.4
-0.3	13	0.3
-1	19	0.3
-2	26	0.3
-3	33	0.3
-5	46	0.3

4 计算结果及分析

为了更直观地显示衬砌板的冻胀变形、应力及温度分布, 结合原型试验监测点在衬砌板上选取 9 个监测点作为对比对象, 比较各点的变化, 各点布置见图 1。

1) 为了分析冻融过程中的温度变化情况, 对比阴阳坡温度场的不同, 按瞬态模式每 2 h 施加边界温度, 模拟从 1 月 6 日开始到 4 月 6 日 90 d 共 2 160 h 的渠道温度场的分布, 并分别绘制出阴坡测点 2 和阳坡测点 8 温度随时间的变化曲线, 为清晰起见只绘出 2 个月见图 3 及每日 7 时地温与环境温度对比曲线图 4。

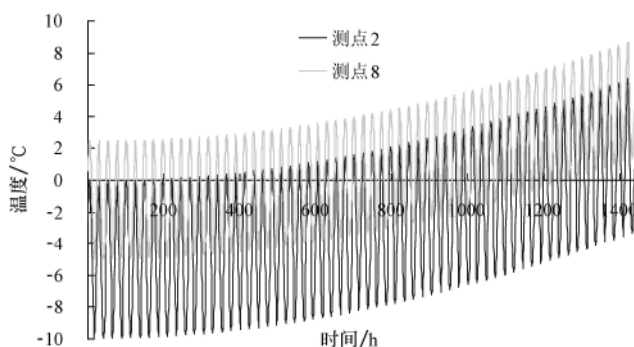


图 3 监测点温度变化过程曲线

Fig.3 Temperature changes of monitoring points

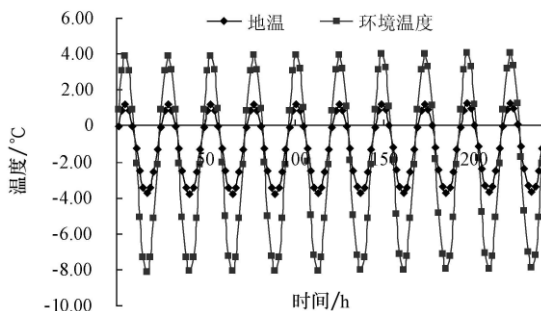


图 4 地温和环境温度变化曲线

Fig.4 Changes of ground temperature and ambient temperature

由图 3 可以看出, 阴坡点 2 到 3 月初日平均温度才达到 0°C 而融化; 阳坡点 8 到 2 月中旬日平均温度达到 0°C 而融化; 阴坡滞后阳坡解冻约 15 d。这和渠道实测的冻结期相符的, 处于左冻右消和夜冻昼消状态的基土对衬砌板的破坏是很严重的, 对渠坡稳定影响也很大。一旦因冻胀产生裂缝的衬砌板将在渗漏和冻融交替作用下加

剧冻胀破坏。因此,温度场的不对称不同步现象将会引起衬砌不均匀的冻胀及融沉病害,甚至滑塌。针对渠道的这种阴阳两坡温度变化既不均匀不对称又不同步的特点,设计不对称结构或选择不对称保温措施以减少冻胀融沉破坏。

同时从图 4 可以看出渠底原冻深处地温变化滞后于环境温度约 4 d 左右,并且地温变幅比环境温度变幅小 4℃。

2) 为便于与文献[10]大 U 形渠道稳态冻胀仿真模拟比较,本文重点考察冬季昼夜温度变化对衬砌板冻胀变形及冻胀应力(切向和法向)的影响规律,图 5 绘出本文瞬态方法计算的衬砌监测点 1、2、5、8、9 每日冻胀量随时间变化的曲线。图 6、7 绘出对应衬砌监测点 1、2、5、8 每日衬砌板下表面法向及切向冻胀应力随时间的变化曲线。

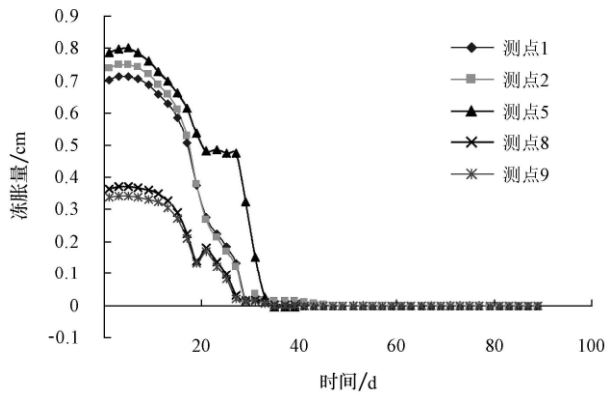


图 5 监测点冻胀量变化曲线

Fig.5 Changes of frost heaving amount of monitoring points

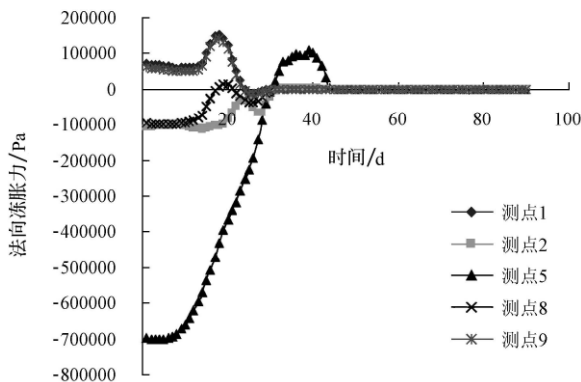


图 6 监测点法向应力变化曲线

Fig.6 Changes of normal frost heaving pressure of monitoring points

从图 5 中可知,渠道最大冻胀量发生在渠底监测点 5,最大值为 8.002 mm,其次是阴坡上点 2 和点 1,最大值为 7.42 mm;相对应的阳坡点 9,点 8 冻胀量则很小,最大值只有 3.67 mm,而 1982 年实际测量的点 5、2、1 最大冻胀量^[1]分别为 7.41、7.08、6.4 mm;点 8、9 位移很小难以测出,由此可见实测值和模拟值的最大误差只有 7.41%,计算结果基本满足精度要求,并且位移分布规律是一致的。

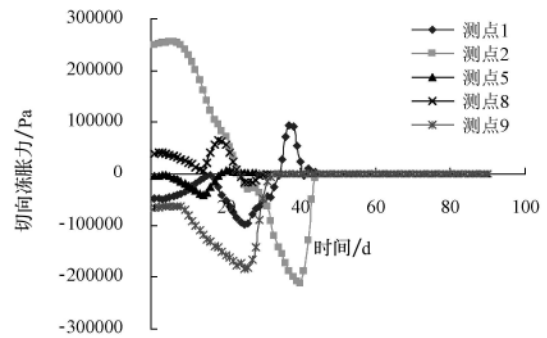


图 7 监测点切向应力变化曲线

Fig.7 Changes of tangential frost heaving pressure of monitoring points

纵观图 3、4、5 得知,冻胀量的发展对于环境温度变化来讲存在一定的滞后效应,各点都在 1 月 10 日左右达到最大值,并且在发展过程中有一定的增长停滞,只是时间不同,阳坡最早约 2 月 23 日,渠底其次,并且持续时间最长,阴坡不是很明显;之后冻胀量减小迅速,很快就减小到 0。实际上冻胀期结束渠道各部位会存在有一定的残余冻胀量,比如文献[1] 3 a 平均残余冻胀量接近 3 mm,模拟结果不产生残余冻胀量是由于把冻土及融土和衬砌板均假设为弹性体。

从图 6 中可知,初始法向冻胀力的顺序依次是渠底、阴坡、阳坡,这样的分布结果和文献[10]稳态模拟结果一致,证明了本文力学模型的合理性。同时可得阴坡顶部 1 月 27 日冻结力达到最大值,随后减小变为冻胀压力;而阳坡一开始就是冻胀压力,这是阳坡冻胀滞后加之衬砌向侧向位移的结果;渠底冻胀力最大而且持续时间最长。这样的发展规律和文献[1]实测规律是完全一样的,只是数值大小稍不一致,原因可能是本文对冻土及融土按弹性体假设的出入。

所有点的切向冻胀力发展规律表现不是很明显,但是各点大小分布与文献[10]的模拟结果一致,点 2、8 最大,点 1、9 其次,点 5 开始时刻是较小的,几乎接近于 0,从图中可以看出,阴坡的切向冻胀力最大且持续时间比阳坡和渠底长。

纵观图 6、7 可知:同一监测点不同时间切向冻结力大小方向不同,同一时刻不同监测点切向冻结力大小方向不同。正是这种温度场、应力场在时间上的不同步和空间上的不均匀及其交替变化,更加剧了衬砌体的冻融破坏。

3) 为了考察日温度变化对渠道冻胀应力的影响,绘制出 1 月 6 日 7 时至 1 月 7 日 7 时阳坡 8 点日法向和切向应力变化曲线,见图 8。

从开始 24 小时法向和切向冻胀力变化曲线可以看出,随着日温度的变化白天冻胀力几乎为 0,最大值出现在晚上 24 点多;由此可知,以前稳态计算的结果尽管与实测结果基本相符,但实测数据由于受时间不连续的局限没能测到最危险时刻(晚上 24 点)的结果。因此考虑昼夜温度变化的衬砌渠道冻胀数值模拟能更好的反映冻胀过程及破坏的极限状态,用其进行渠道抗冻胀设计更

合理, 以最危险时刻作为渠道抗冻胀设计依据才是科学的。

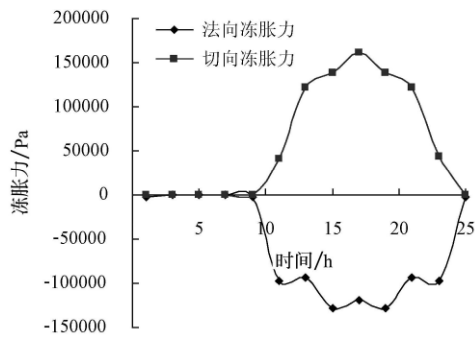


图8 冻胀力日变化曲线

Fig.8 Daily changes of frost heaving pressure

总之, 对比图 5、6、7 可知, 渠道最低环境温度出现在 1 月 6 日, 而冻胀力和冻胀量最大值都出现在约 1 月 11 日左右, 说明了渠道冻胀滞后于环境温度的变化, 法向冻胀力、切向冻胀力和冻胀量都存在一定的滞后现象, 其各自大小分布变化都与试验吻合^[17], 证明了采用有限元瞬态数值模拟进行衬砌渠道抗冻胀设计才是更加合理的。

5 结 论

1) 对渠道融化过程渠基温度变化进行仿真分析, 可知阴坡冻胀期明显长于阳坡, 得到的渠道各边坡的冻融日与实测情况一致, 阳坡滞后阴坡冻结约 15 d, 而提前于阴坡 15 d 解冻; 正是这种温度场的不对称不均匀不同步现象才引起衬砌上冻胀力的不均匀不同步及其交替变化导致了冻胀与融沉破坏。

2) 基于瞬态温变运用 ANSYS 对渠道冻融过程的数值模拟可知: 随着冬季日温度的变化与冻胀量变化规律基本一致; 但最大值出现在大约 1 月 11 日左右, 最大冻胀量及最大冻胀力滞后日平均最低气温约 4 d; 衬砌板上法向、切向冻胀力发展虽然不同, 但是与冻胀量同步, 都显现出滞后现象, 滞后时间与实测资料一致, 说明瞬态数值模拟进行渠道抗冻胀设计是可行的。

3) 日内冻胀力随气温变化但是滞后日气温, 进行渠道抗冻胀设计要以最危险时刻的冻胀力作为依据, 这是稳态数值模拟无法反映出来的, 运用瞬态结果进行渠道抗冻胀设计能更合理地反映冻胀破坏的极限状态。

本文是在参考其他相关工程的基础上进行计算的, 难免有一定的误差。如果能测得土壤冻胀参数、力学参数及气象资料等, 或者进行渠道温度场现场试验来计算结果更加精确。

[参 考 文 献]

[1] 李安国. 大U形渠道冻胀研究[A]. 第五届国际冻土会议论文集[C]. 1110—1115.
Li Anguo. Study on frost heaving of U type channel[A]. The fifth international conference of freezing soil[C]. 1110—1115. (in Chinese)

[2] 王正中. 梯形渠道混凝土衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 24—29.
Wang Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 24—29. (in Chinese with English abstract)

[3] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 18—24
Wang Zhengzhong, Li Jialin, Chen Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 18—24. (in Chinese with English abstract)

[4] 余书超, 宋玲, 欧阳辉, 等. 刚性衬砌渠道受冻胀时衬砌层受力的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2001, (9): 32—33.
Yu Shuchao, Song Ling, Ouyang Hui, et al. Experimental research on stressing status of rigid lining of canals under frost upheaval[J]. China Rural Nater and Hydropower, 2001, (9): 32—33. (in Chinese with English abstract)

[5] 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—1219
Wang Zhengzhong, Yuan Si, Chen Tao, et al. Study on the constitutive model of transversely isotropic frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1215—1219. (in Chinese with English abstract)

[6] 李学军, 费良军, 李改琴. 大U型混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 13—17.
Li Xuejun, Fei Liangjun, Li Gaiqing. Model of coupled heat-fluid transport of U-shape canal lining with concrete during seasonal freezing and thawing stage[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 29(8): 13—17. (in Chinese with English abstract)

[7] 安维东, 陈肖柏, 吴紫汪. 渠道冻结时热质迁移的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1987, 1(9): 35—46.
An Weidong, Chen Xiaobai, Wu Zhiwang. Numerical simulation analysis of heat and mass transfer under a cannell in freezing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 1(9): 35—46. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘雄, 宁建国, 马巍. 冻土地区水渠的温度场和应力场数值分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 932—938.
Liu Xiong, Ning Jianguo, Ma Wei. Numerical analyses of the temperature and stress fields of channel in frozen soil regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 932—938. (in Chinese with English abstract)

[9] 郭利霞, 王正中, 李甲林, 等. 梯形与准梯形渠道冻胀有限元分析[J]. 节水灌溉, 2007, (4): 44—50
Guo Lixia, Wang Zhengzhong, Li Jialin, et al. Finite element analysis on frost-heaving of channel with trapezoidal or quasi-trapezoidal cross section based on ANSYS software[J]. Water Saving Irrigation, 2007, (4): 44—50. (in Chinese with English abstract)

- [10] 张茹. 大U形混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型及数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007: 36—41.
Zhang Ru. Establishment of Mechanics Models and Numerical Stimulation of Frost Heaving Damage of U-Shape Canal with Concrete Lining[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech university of Agriculture and Forestry, 2007: 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张朝晖. ANSYS8.0 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 45—70.
Zhang Zhaohui. Thermal analysis and example ansysis of ANSYS 8.0[M]. Beijing: China Railway Press, 2005: 45—70. (in Chinese)
- [12] 李祝龙, 章金钊, 武懋民. 冻土路基热学计算研究[J]. 公路, 2000, (2): 9—12.
Li Zhulong, Zhang Jinzhao, Wu Jingmin. Thermal calculation of roadbed[J]. Highway, 2000, (2): 9—12. (in Chinese with English abstract)
- [13] 臧恩穆, 吴紫汪. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999.
Zang Enmu, Wu Ziwan. Degradation Permafrost and Road Engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999. (in Chinese)
- [14] 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Kong Xiangqian. Application of Finite Element in Heat Transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 王正中, 沙际德, 蒋允静, 等. 正交各向异性冻土与建筑物相互作用的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 55—60.
Wang Zhengzhong, Sha Jide, Jiang Yunjing, et al. Nonlinear finite element analysis of interaction of orthotropic frozen ground and construction[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 55—60.
- [16] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限元法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982: 20—227.
Conservancy College of East China. Finite Element Method of Elasticity[M]. Beijing: Water-Power Press, 1982: 20—227. (in Chinese)
- [17] 李安国, 陈瑞杰, 杜应吉, 等. 渠道冻胀模拟试验及衬砌结构受力分析[J]. 防渗技术, 2000, 6(1): 5—16.
Li Anguo, Chen Ruijie, Du Yingji, et al. Simulation experiment of channel frost heaving and force analysis of lining structure[J]. Technique of Seepage Control, 2000, 6(1): 5—16. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孙增奎, 王连俊, 白明洲, 等. 青藏铁路多年冻土路堤温度场的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3454—3459.
Sun Zengkui, Wang Lianjun, Bai Mingzhou, et al. Finite element analysis on temperature field of Qing-tibet railway embankment on permafrost[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3454—3459. (in Chinese with English abstract)
- [19] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 57—58.
Qin Dahe. Environment Develop Report of West China[M]. Beijing: Science Press, 2002: 57—58. (in Chinese)
- [20] 范兴科, 吴普特, 汪有科, 等. 渠灌类型区农业高效用水项目区(杨陵)调查报告[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 9—13.
Fan Xingke, Wu Pute, Wang Youke, et al. The findings report of project area of using water efficiently in canal irrigation region in Yangling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(2): 9—13. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李学军, 费良军, 任之忠. 大型U型渠道渠基季节性冻融水分运移特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1383—1387.
Li Xuejun, Fei Liangjun, Ren Zhizhong. Soil moisture transfer in the base of U-shape canal with concrete lining in the process of seasonal freezing and thawing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1383—1387. (in Chinese with English abstract)

Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole day

Wang Zhengzhong^{1,2}, Lu Qin¹, Guo Lixia³, Yang Chengyou⁴, Yang Fuyuan⁴

(1. Research Center of Engineering Safety and Disease Prevention, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Shule River Basin Water Resources Administration of Gansu Province, Yumen 735211, China)

Abstract: In order to find out the developing regularity of frost heaving pressure and frost heaving deformation of concrete lining changed with temperature in the daytime and at night, basing on the mechanics and the theory of physics

of the frozen soil, using ANSYS to do numerical simulation of the frost heaving process of the concrete lining, loading the temperature by the transient temperature change mode, this paper researches the temperature field and frost heaving distortion and changing rule of the normal frost heaving pressure and the tangential frost heaving pressure with the time. The results showed that the causes of the frozen and thawing destruction of the canal included not only the frost heaving of basic soil of the canal, but also the uneven, asymmetric, asynchrony changes of temperature, frost heaving deformation and frost heaving pressure at the two slopes of the canal. Soil of shady slope was frozen about 15 days earlier than that of sunny slope, the maximum frost heaving pressure and frost heaving amount appeared about 4 days later than the daily average lowest temperature, the maximum frost heaving pressure and frost heaving amount in one day appeared no more than 1 hour later than the daily lowest temperature. The results agree well with those of local test, but were bigger than those of the firm form numerical simulation, which indicates that using transient numerical simulation to design the canal preventing frost heaving is correct and rational.

Key words: canal linings, freezing and thawing, finite element method, frost heaving