

引文格式:杨理贵,王玉银,刘发起,等. 梯形波纹钢明渠抗冻胀性能有限元模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 65-75.

YANG Ligui, WANG Yuyin, LIU Faqi, et al. Finite-element simulation of anti-frost behavior of trapezoidal corrugated-steel water channel [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 65-75.

DOI: 10.19815/j.jace.2022.04003

梯形波纹钢明渠抗冻胀性能有限元模拟

杨理贵¹, 王玉银², 刘发起², 千玉锦³, 李宣毅³

(1. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 黑龙江大环环保科技有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:为研究冻土环境中的梯形波纹钢明渠抗冻胀性能,建立了可精细模拟土-渠相互作用的实体-壳体三维空间有限元分析模型,提出了同时考虑含水率与温度的冻土弹性模量计算公式。通过考虑土体在不同月份的温度场变化,采用瞬态热传导模拟了实际升温、降温过程中的土-渠相互作用。合理考虑了含水率与温度对冻土弹性模量、冻胀系数、内摩擦角、黏聚力等本构参数的影响,研究了波纹钢明渠变形与应力的变化规律,分析对比了不同的土体类型与初始含水率、地下水埋深、横撑间距与截面尺寸、波纹钢壁厚与卷边宽度对变形和应力的影响。结果表明:波纹钢明渠可承受一定的水平冻胀作用;渠周土体初始含水率及地下水埋深对波纹钢明渠变形与应力的影响显著,当地下水位在波纹钢侧壁埋深的下半部分时尤为明显;为减小渠体变形,可采取在渠顶设置横向支撑、减小侧壁坡度、增大波纹钢壁厚或加宽卷边的措施,相比之下,前两种更为经济且有效,不过横撑规格需满足受压稳定性要求;设置横撑后,卷边可提供一定的侧向刚度;虽然加宽渠顶卷边对减小渠顶的横向变形有一定贡献,但在10~100 mm宽度范围内贡献不大;未设支撑的波纹钢明渠 Mises 应力整体低于钢材屈服强度,应力较大的部位多见于底边角部和底部位置,侧壁应力水平不高;设置横撑后,波纹钢渠体应力较大的部位由底部转移至侧壁及卷边,尤其在卷边与横撑的连接处,钢材可达到屈服状态。

关键词:波纹钢明渠;抗冻胀性能;冻土;变形;应力

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)03-0065-11

Finite-element simulation of anti-frost behavior of trapezoidal corrugated-steel water channel

YANG Ligui¹, WANG Yuyin², LIU Faqi², QIAN Yujin³, LI Xuanyi³

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Daqian Environment Protection & Science Technology Co., Ltd., Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the anti-frost behavior of trapezoidal corrugated-steel water channel in frozen soil environment, the three-dimensional solid-shell finite element model was established, which could precisely simulate the interaction between the channel and soil. The prediction

收稿日期: 2023-04-01

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078167)

作者简介: 杨理贵(1991-), 男, 工学博士, 讲师, E-mail: yangligui@cqjtu.edu.cn.

通信作者: 王玉银(1975-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: wangyuyin@hit.edu.cn.

formula of elastic modulus of frozen soil was proposed considering the influence of water content and temperature. By considering the change of temperature field in different months, the soil-channel interaction in the actual warming and cooling process was simulated by using transient heat transferring. The deformation and stress of corrugated steel water channel were analyzed by considering the impact of water content and temperature on the constitutive parameters, such as elastic modulus, frost-heaving coefficient, internal friction angle and cohesive force. The influences of water content, groundwater depth, space and geometry of transverse brace, width of flange slab and thickness of corrugated steel were investigated for the deformation and stress. The results show that the corrugated-steel water channel can be employed to resist horizontal frost-heaving action. The initial water content and depth of groundwater have significant influence on the deformation and stress, especially when the groundwater level locates in the lower part of the side wall of channel. The deformation can be reduced by setting several transverse braces, decreasing the slope of side wall, increasing the thickness, and widening the flange slab, among which the former two approaches are more economic and effective. Yet, the profile of brace should meet the stability requirement. The flange slab can provide some stiffness only when there are braces. Although widening the flange slab can reduce the top transverse deformation, it is minor within 10-100 mm of the width. The Mises stress in the channel is general lower than the yield strength value for the channel without brace, which is remarkable in the corner and bottom, while insignificant in the side wall. By setting the braces, the location of great stress has changed to the connections of flange slab and braces, where the steel can yield.

Key words: corrugated-steel water channel; anti-frost behavior; frozen soil; deformation; stress

Author resumes: YANG Ligui(1991-), male, PhD, assistant professor, E-mail: yangligui@cqjtu.edu.cn; WANG Yuyin(1975-), male, PhD, professor, E-mail: wangyuyin@hit.edu.cn.

0 引言

目前,中国在季节性冻土区域修建了大量引水渠、运河等水工建筑物,衬砌形式多为素混凝土和钢筋混凝土,其施工方便,既可现浇也可预制,且具有良好的防渗能力^[1]。然而,季冻区土体经过季节性的冻融作用,容易导致严重的冻害问题,例如:混凝土衬砌发生严重的隆起、滑塌、断裂等多种形式的破坏,防水防冻材料发生老化破坏,导致渠内水在长距离输送中渗入渠基土^[2],造成水资源的巨大浪费,同时增加了维修与管理的难度与费用。

波纹钢水渠是一种具有高耐腐蚀性的轻型钢结构^[3],其连接形式可采用螺栓连接,易于施工和维护(图1)。此外,由于表面褶皱而具有较大的局部刚度^[4],可避免由于土体局部膨胀而导致的钢材局部屈曲破坏。更为重要的是,其表面的波纹使其能够很好地适应土体冻融导致的轴向变形与侧向弯曲,从而避免了因土体冻胀导致渠道水渗漏的问题。

然而,由于波纹钢壁厚较薄,侧壁抗弯刚度较小,波纹钢明渠顶部在土体水平冻胀力作用下将产

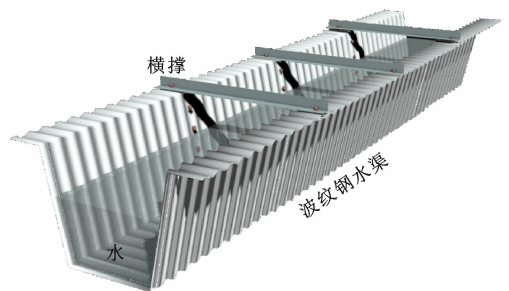


图1 波纹钢水渠效果图

Fig. 1 Sketch of corrugated-steel water channel

生较大位移,这可能导致波纹钢渠体产生塑性变形,侧壁土体发生滑塌并受到二次冻胀,进而导致水渠输水量减小。目前波纹钢水渠在国内的应用与研究尚处起步阶段,其在土体冻胀作用下的变形与承载能力问题尚未得到解决。虽然加拿大与美国已率先采用波纹钢水渠,但尚无针对其抗冻胀性能的研究,可借鉴的经验有限。为此,本文针对梯形波纹钢水渠的抗冻胀性能进行精细化有限元模拟分析,合理考虑土体温度场、位移场、应力场对波纹钢渠体的影响,研究在土体冻胀作用下的波纹钢应力与变形,为处于冻土地区的波纹钢水渠的强度与稳定性设计提

供理论依据。

1 有限元模型

传统的数值计算方法难以模拟三维空间中波纹钢渠体与土体之间的相互作用,并且波纹钢结构本身的应力和应变发展规律极为复杂,因此采用 ABAQUS 有限元分析模型对其进行精细化分析。

1.1 材料本构模型

1.1.1 冻土

土体的应力-应变关系较为复杂,通常具有非线性、弹塑性、剪胀性和各向异性等^[5]。迄今为止尚无一种本构模型能全面且精准描述任何加载条件下各类土体的力学特性,以往的土体本构模型往往只能模拟某种加载条件下某类土的主要特性。另一方面,虽然一些模型理论严密,但往往参数取值不当,导致模拟结果出现较大偏差;相反,有些模型尽管形式简单,但常由于参数物理意义明确,容易确定,计算结果反而较为合理。因此,在本构模型的选择上,既要能反映所关心的土体某方面的特征,又要便于测定参数。

考虑到土体参数确定的难度及本构模型的适用性,本文采用 Mohr-Coulomb 塑性模型对冻土进行模拟,其参数容易确定,且参数的理论值与试验结果的差异较小,因此应用较为简便,在对水渠、堤坝、边坡等结构的稳定性问题分析中应用广泛^[6]。一般 Mohr-Coulomb 屈服面存在尖角,若采用相关联的流动法则(即塑性势面与屈服面重合),则该处的塑性流动方向不唯一,导致数值计算收敛缓慢。为避免该问题,ABAQUS 采用了连续光滑的椭圆函数作为塑性势面^[6]。冻土的其余参数如下:

(1) 物理力学指标

冻土的变形模量(或近似称弹性模量)与土的种类、含水程度、荷载大小、加载速率以及土的负温度等都有密切关系^[7]。本文讨论冻胀性土的冻胀力问题,因此土质和含水率选择了冻胀性的黏性土。当温度 T 处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,随着温度降低,冻土弹性模量 E 将逐渐增大。结合以往研究^[8-9],在《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)规定的基础上^[10]考虑初始含水率对弹性模量的影响,如图 2 所示,提出冻胀性的黏性土体在单轴状态下的弹性模量 E 计算公式(1)。对于同一土质,土体在冻结状态下的泊松比变化不明显,可假设为常数 0.35 ^[11]。当土体冻结后,其黏聚力 c 随着温度降低而成倍增长,内摩擦角 φ 也有一定程度的增加,但随

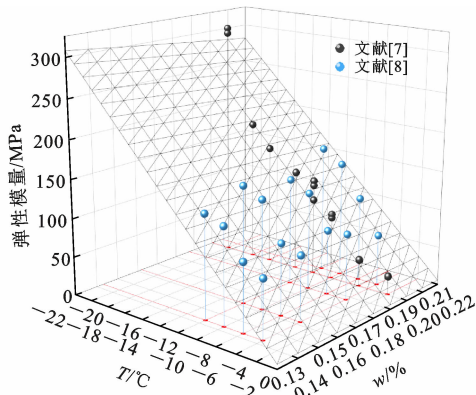


图2 含水率与温度对冻土弹性模量的影响

Fig. 2 Impact of water content and temperature on elastic modulus of frozen soil

着冻融次数增加,二者逐渐趋于稳定^[12]。因此,结合以往研究结果^[7-9],在合理范围内假设土体冻结后黏聚力 c 与内摩擦角 φ 随温度 T 线性变化,如式(2)、(3)所示。

$$E = 4 + (0.77 - 5.75T)e^{1-w} \quad (1)$$

$$c = 4 - 13T \quad (2)$$

$$\varphi = 10 - 4T \leq 30^{\circ} \quad (3)$$

式中: w 为初始含水率。

(2) 冻胀率与冻胀系数

在 ABAQUS 有限元模拟中,除了直接采用热传导、热辐射及热对流的方式实现土体的温度场模拟,还可采用负的热膨胀系数定义冻土的冻胀系数 α 来实现土体的冻胀。 α 可由冻胀率 η 与温度 T 的比值计算^[10,13],即

$$\alpha = \frac{\eta}{T} \quad (4)$$

若冻胀量已知,可根据《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)^[10]计算冻土冻胀率 η ,见公式(5);在模拟分析中,冻胀量事先未知,因此 η 按公式(6)^[10]计算。

$$\eta = \frac{\Delta z}{h' - \Delta z} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1.09\rho_d}{2\rho_w}(w - w_p) \quad (6)$$

$$w_p = 1.25w_0 - 6.25 \quad (7)$$

式中: Δz 和 h' 分别为地表冻胀量和冻土厚度; w_p 和 w_0 分别为塑限含水率和起始融沉含水率(按表 1 取值); ρ_d 为土的干密度; ρ_w 为水的密度($1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

虽然通过上述公式可得到平均冻胀率,但为了模拟不同温度下的土体冻胀,可以在平均冻胀率的基础上,采用王贺等^[13]根据弹性力学推导出冻土冻胀系数 α 与冻胀率 η 之间的关系式(8)。该公式考

表1 不同土质的起始融沉含水率

Table 1 Initial water content of melt deposition of different soils

土质	砾石、碎石土	砂类土	粉土、粉质黏土	黏土
$\omega_0/\%$	11.0	14.0	18.0	23.0

考虑了不同土质在冻结状态下的冰水相变过程,反映出了不同温度下冻胀系数 α 的变化规律。

$$\alpha(T_i) = \frac{i_{0i} - i_{0,i-1}}{i_{0i}} \eta \frac{1-\mu}{1+\mu} / (T_i - T_{i-1}) \quad (8)$$

$$i_{0i} = 1 - \omega \quad (9)$$

$$i_{0i} = 1 - K_i \quad (10)$$

式中: i_0 、 i_{0i} 、 μ 、 i 分别为冻土完全冻结时的相对含冰率、在 T_i 温度下冻土的相对含冰率、泊松比、温度序

号; K 为温度修正系数。

根据不同土体的温度修正系数 K ^[10],并假定土体含水率,则可由公式(8)计算出不同温度下不同土体的相应冻胀系数 α ,结果如表2所示。其中非饱和砂土和粉土含水率较小,一般不发生冻胀,因此计算得出的冻胀系数为正值,在此不予考虑。对于处于地下水水位以下的饱和砂土和粉土,此时冻胀系数按公式(6)~(10)计算。对于黏土,在相变温度 $-0.2\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 之间仍然遵循热胀冷缩的规律,该区间的冻胀系数应为正值,不过由于土体的热膨胀系数较小,可假设为0。此外,当温度低于 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (冻胀停止温度)后,相对含冰率趋于稳定,冻胀量不再增加^[14],低于 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 的冻胀系数也可取为0。

表2 不同温度下的相对含冰率及冻胀系数

Table 2 Relative ice content and frost heaving coefficient at different temperature

土的种类	塑性指数 I_p	$\omega/\%$	$\eta/\%$	不同温度下的相对含冰率 i_{0i}						
				$-0.2\text{ }^\circ\text{C}$	$-0.5\text{ }^\circ\text{C}$	$-1.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-2.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-3.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-5.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-10.0\text{ }^\circ\text{C}$
砂土		10		0.65	0.78	0.85	0.92	0.95	0.98	0.93
粉土	$I_p \leq 10$	15		0.30	0.50	0.70	0.80	0.85	0.90	0.85
粉质黏土	$10 < I_p \leq 13$	18	1.335	0.10	0.35	0.50	0.60	0.70	0.75	0.65
	$13 < I_p \leq 17$	22	4.387	0.00	0.20	0.30	0.40	0.55	0.60	0.50
黏土	$17 < I_p$	30	4.905	0.00	0.10	0.20	0.30	0.45	0.50	0.40
草炭粉质黏土	$15 \leq I_p \leq 17$	40	8.584	0.50	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.75
土的种类	塑性指数 I_p	$\omega/\%$	$\eta/\%$	不同温度下的冻胀系数 $\alpha/10^{-3}$						
				$-0.2\text{ }^\circ\text{C}$	$-0.5\text{ }^\circ\text{C}$	$-1.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-2.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-3.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-5.0\text{ }^\circ\text{C}$	$-10.0\text{ }^\circ\text{C}$
砂土		10								
粉土	$I_p \leq 10$	15								
粉质黏土	$10 < I_p \leq 13$	18	1.335	-3.92	-6.53	-2.35	-0.78	-0.39	-0.20	0.00
	$13 < I_p \leq 17$	22	4.387	0.00	-18.05	-5.42	-2.71	-2.71	-0.68	-0.27
黏土	$17 < I_p$	30	4.905	0.00	-11.25	-6.75	-3.37	-3.37	-0.84	-0.34
草炭粉质黏土	$15 \leq I_p \leq 17$	40	8.584	-172.20	-22.96	-6.89	-3.44	-3.44	0.00	-0.69

1.1.2 钢材与混凝土

冷弯强化后的波纹钢材强度得到提高,但塑性降低,其应力-应变曲线无明显屈服点^[4],可采用 Abdel-Rahman 等^[15]提出的四段式函数近似描述其特征,如公式(11)所示。

$$\sigma_{cs} = \begin{cases} E_s \epsilon & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_e \\ 0.75 f_y + 0.5 E_s (\epsilon - \epsilon_e) & \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_{e1} \\ f_{ym} + 0.1 E_s (\epsilon - \epsilon_{e1}) & \epsilon_{e1} < \epsilon \leq \epsilon_{e2} \\ f_y + 0.005 E_s (\epsilon - \epsilon_{e2}) & \epsilon > \epsilon_{e2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_{cs} 、 f_y 、 E_s 、 ϵ 和 ϵ_e 分别为波纹钢的钢材应力、名义屈服强度、弹性模量($E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$)、应变和比例极限, $\epsilon_e = 0.75 f_y / E_s$, $\epsilon_{e1} = 0.812 5 f_y / E_s$, $\epsilon_{e2} = 2.062 5 f_y / E_s$, $f_{ym} = 0.875 f_y$ 。

对于本文角钢支撑采用的普通热轧钢材,其单

轴应力-应变曲线具有明显屈服台阶^[16],表达式如公式(12)所示。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_{uy} \\ f_y + k(\epsilon - \epsilon_{uy}) & \epsilon > \epsilon_{uy} \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_s 、 ϵ_y 、 ϵ_{uy} 和 k 分别为热轧钢材应力、屈服应变($\epsilon_y = f_y / E_s$)、硬化起点应变(本文取 $\epsilon_{uy} = 10 \epsilon_y$)和热轧钢材硬化段斜率(取 $k = 0.03$)^[17]。

水渠结构物常采用混凝土作为衬砌,其单轴受拉与受压应力-应变本构关系参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录C.2^[16];在ABAQUS塑性损伤模型中,混凝土膨胀角、流动势偏度、初始等效双轴与单轴抗压屈服应力比、拉压子午线常应力比和黏滞系数分别设置为 36° 、0.1、1.16、2/3和

0。各材料热工参数如表3所示^[18-19]。

1.2 模型建立

为验证上述参数的合理性,建立如图3所示的混凝土水渠模型。根据标准的冻胀等级,验证模拟

表3 材料物理参数

Table 3 Material physical parameters

材料	混凝土	钢材	粉质黏土		黏土	草炭粉质黏土
初始含水率 $\omega/\%$			18	30	30	40
导热系数/ $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	1.74	58.20	0.95	1.68	1.04	0.46
比热容/ $(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	0.92	0.48	1.87	2.22	1.78	1.34
干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	2.50	7.85	1.40	1.40	1.20	0.90

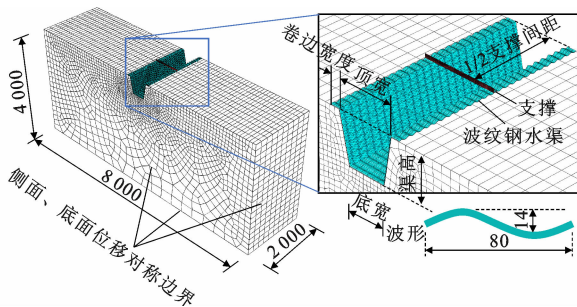


图3 梯形断面波纹钢水渠模型(单位:mm)

Fig. 3 Model of trapezoidal corrugated-steel water channel (unit:mm)

由于波纹钢水渠表面起伏,其截面大小沿纵向呈现周期性变化,并且实际工程中的波纹钢水渠还附带横向支撑,传统的二维平面模型已无法满足对渠体抗冻胀性能的分析,因此本文采用三维实体-壳体有限元分析模型对其开展研究。分析模型考虑了土-结构物相互作用,由土体、水渠及框架支撑组成,其宽度为节段长度(即支撑间距);长度和深度均超过3 m,以覆盖负温变化范围^[21-22]。模型土体四周及底面采用对称边界条件,以限制法向平动自由度。水渠结构物与土体之间采用面-面接触,波纹钢表面与土体的界面切向为摩擦接触(摩擦因数可取0.3)^[23-25],法向为硬接触。对于波纹钢水渠,一般波纹钢与土体之间的接触部位通常集中在波谷区域,因此仅将模型中的波谷区域与土体建立接触。

模拟计算共分3步开展,依次为温度场模拟、初始地应力场模拟,以及冻胀下的应力场模拟。模型温度场采用瞬态热传导(Heat Transfer)模拟,模型底部设定为恒温,渠顶及土体顶部温度设为环境温度,随后对土体在各个月份的温度场进行模拟,冻融循环周期为5年,以达到循环稳定状态。根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)规定及以往研究^[19],土体、钢材及混凝土的热工系数如表3所

结果的合理性。将其模拟结果与《水工建筑物抗冰冻设计规范》(GB/T 50662—2011)^[20]的相关规定进行对比校核,并在此基础上对图3所示的波纹钢水渠进行冻胀分析。

示;水渠、周围土体与大气之间的换热系数取 $23.0 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 。基于上述模拟,可得到波纹钢水渠在土体冻胀过程中的位移场和应力场。

1.3 模型验证

目前尚无波纹钢水渠的实测冻胀数据,因此以传统混凝土衬砌灌溉水渠实测数据验证本文有限元建模方法的可靠性。本文选取阿勒泰灌区农十师梯形干渠实测冻胀数据^[26]。该地区气温随月份变化的规律可简化为正弦函数,年最低与最高气温分别为 $-22^\circ C$ 和 $30^\circ C$,最低温所处月份渠道阴坡、渠底、阳坡最低气温分别为 -22 、 -19 、 $-17^\circ C$,根据实测冻胀数据计算得到平均冻胀率为 0.322% 、 0.367% 和 0.430% 。土体表面换热系数取 $23 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ^[19];渠基土为粉质黏土,渠坡与渠底含水率分别为 18% 和 32% ,热工参数见表3。水渠衬砌顶宽、底宽、厚度分别为920、200、10 cm,土体模型高度、宽度和长度分别为10、16、2 m,单元类型选取实体单元。衬砌与土体采用面-面接触,法向为硬接触,切向为库仑摩擦接触,摩擦因数为0.5^[27-28];考虑自重及地应力影响。模型底部温度设为常年保持在 $8^\circ C$ ^[29],土体单元初始温度为 $8^\circ C$ 。最低气温所在月份的模拟结果与水渠实测数据的对比见表4与图4,结果表明,该模型可较合理地模拟土体冻胀作用。

表4 原型渠道实测冻胀数据

Table 4 Monitored frost heave data of prototype channel

部位	最大冻深实测值/cm	最大冻深模拟值/cm	冻胀量实测值/cm	冻胀量模拟值/cm
阴坡	82	108	5.8	7.3
渠底	96	98	6.7	7.4
阳坡	67	84	4.9	4.7

2 算例分析

实际工程所处的地质环境往往是复杂多变的,

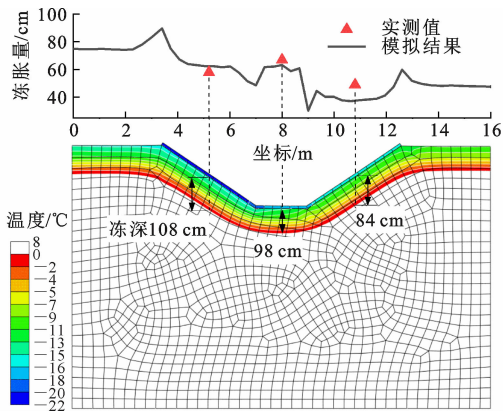


图4 模拟结果验证

Fig. 4 Validation of simulation results

表5 波纹钢水渠模型参数

Table 5 Parameters of corrugated steel water channel model

分析参数	参数范围		
	粉质黏土(18%)	黏土(30%)	草炭粉质黏土(40%)
土质(初始含水率)	粉质黏土(18%)	黏土(30%)	草炭粉质黏土(40%)
地下水埋深/m	0.50	0.25	0
波纹钢尺寸	600 mm×400 mm×500 mm	1 000 mm×400 mm×500 mm	1 400 mm×400 mm×500 mm
渠顶卷边宽度/mm	10	100	200
波纹钢壁厚/mm	2	4	6
角钢支撑规格	20 mm×20 mm×3 mm	30 mm×30 mm×3 mm	40 mm×40 mm×3 mm
支撑间距/mm	1 000	1 500	2 000

完全冻结后的相对含冰率 i_0 分别为 0.82、0.70 和 0.60。平均冻胀率按照《冻土地区建筑地基设计规范》(JGJ 118—2011)^[10] 的公式(6)计算,根据该规范给出的黏性土起始融沉含水率 ω_0 ,计算得到本文分析的 3 种土体对应的平均冻胀率分别为 1.335%、4.905% 和 8.584%。不同类型冻土的冻胀系数见表 2。

2.1 模拟结果

波纹钢水渠属于一种柔性结构,其壁厚较薄,整体刚度较小。在土体冻胀作用下,波纹钢水渠顶部水平变形远超混凝土水渠,可达混凝土水渠的 2 倍以上。因此,除了减轻冻胀的措施外,一般还需要在其顶部每隔一定间距加设横向支撑,以避免侧壁土体塌陷导致发生二次冻胀,甚至因侧壁向内变形过大而发生失稳破坏。

波纹钢水渠有限元模拟结果如图 5 所示,其水渠断面尺寸为 600 mm×400 mm×500 mm,波纹钢壁厚为 2 mm,土体(黏土)初始含水率为 30%。可见,温度沿埋深的分布规律呈非线性分布,越靠近地表冻胀作用越明显。在冻胀过程中,冻土除整体向上产生冻胀外,还在靠近水渠的局部区域发生隆起[(图 5(b));波纹钢渠侧壁受冻土侧推作用发生弯

渠基土多为成层状,其物理力学性质较难统一,为方便分析,仅对冻结粉质黏土中的波纹钢水渠进行模拟分析。基于前文所述的建模方法建立波纹钢水渠有限元模型,将校验的模型土体参数导入该模型中,如表 5 所示。模型的基准参数如下:土体为黏土,初始含水率 $\omega=30\%$;波纹钢断面尺寸为 600 mm×400 mm×500 mm,波形采用 80 mm×14 mm 壁厚为 2 mm,强度等级为 Q345;横撑规格为 40 mm×40 mm×3 mm,强度等级为 Q235。

由于砂土和粉土不发生冻胀,本文选取冻胀性的黏性土体作为分析对象,以初始含水率作为区分标准,并且计算得出粉质黏土、黏土及草炭粉质黏土

曲变形,渠体底部受弯导致底部钢材应力水平明显高于渠侧和渠顶卷边;渠侧上半部分主要发生刚体转动,其钢材处于弹性工作状态,最大应力出现在渠底波谷位置,其应力值对应钢材屈服强度的 57%。

2.2 参数分析

2.2.1 土体类型及地下水位的影响

根据塑性指数及含水率,对表 2 中的 3 种黏性土环境下的波纹钢水渠进行了抗冻胀性能分析(图 6),其中粉质黏土、黏土、草炭粉质黏土对应的含水率分别为 18%、30%、40%。可以看出,土体类型的影响主要反映为含水率对土体本构关系的影响。随着含水率增加,竖向冻胀量显著增加,水平冻胀作用加剧,导致波纹钢水渠顶部的水平变形扩大,渠底应力也有所增加。

由于地下水位线上线下的土体之间含水率存在显著差异,造成冻土本构参数发生变化,其冻胀程度也有所不同。地下水位以上的非饱和土体冻胀作用较弱,地下水位以下的饱和土体冻胀作用较强,这种差异导致地下水埋深对水渠受到的冻胀作用影响显著。如图 7 所示,当地下水埋深处于水渠上半部分时,由土体冻胀作用引起的渠顶水平变形和渠底应力均较大,且随埋深的变化不明显;当地下水位线处于水渠侧壁的下半部分时,土体对波纹钢水渠的水

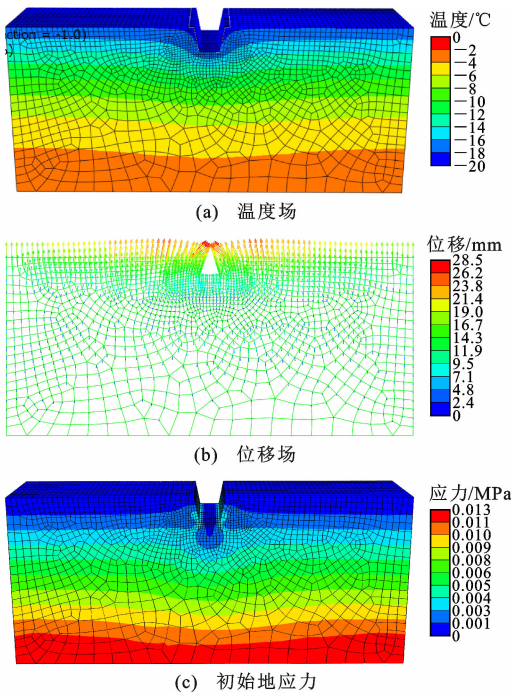


图 5 波纹钢水渠位移场与应力场

Fig. 5 Displacement and stress fields of corrugated-steel water channel

平冻胀作用影响显著,渠顶水平变形和钢材应力水平随着地下水埋深增加而显著减小。

2.2.2 支撑间距及规格的影响

当地下水位越过渠底且冻胀等级较高时,波纹钢水渠可能产生塑性变形并发生严重的冻胀破坏,其顶部横向变形较大,波纹钢发生塑性变形,导致水渠断面无法恢复原有尺寸,侧壁土体一旦发生滑塌,将导致二次冻胀的发生,使来年水渠断面面积及水体流量继续减小。为避免上述问题的产生,在实际应用中通常采用顶部施加横向支撑的措施。

假设土体为初始含水率 $w=30\%$ 的黏土,地表最低温度达到 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,在此条件下对支撑的影响进行分析。每隔一定间距采用 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 角钢架设在水渠顶部形成横撑,用于限制波纹钢水渠顶部的变形。与无支撑时对比,当采用横撑

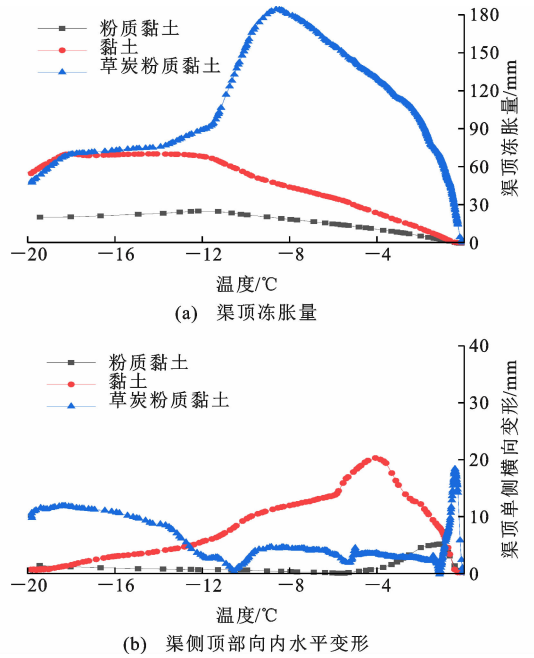


图 6 土体类型的影响

Fig. 6 Influence of soil type

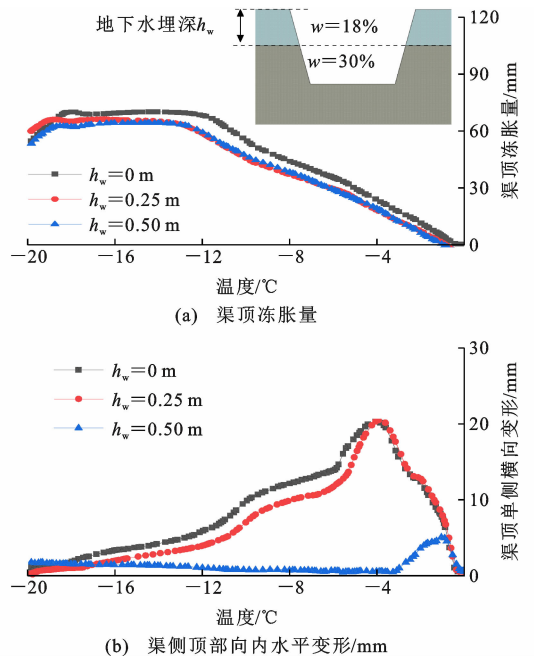


图 7 地下水水位的影响

Fig. 7 Influence of groundwater depth

且横撑间距 $l=1.5\sim 2.0\text{ m}$ 时,渠顶最大变形有略微减小;若进一步缩小横撑间距至 1.0 m ,节段承担的水平冻胀力合力减小,渠顶变形显著降低,如图 8 所示,此时渠顶横向变形最大值仅为 9.1 mm 。对于 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 角钢支撑的波纹钢水渠,其横撑截面平均应力为 103.5 MPa ,达到钢材屈服强度的 60% ,侧壁平均水平冻胀应力最大为 45.2 kPa (对应 $-4\text{ }^\circ\text{C}$),计算得到 79.6% 的水平冻胀荷

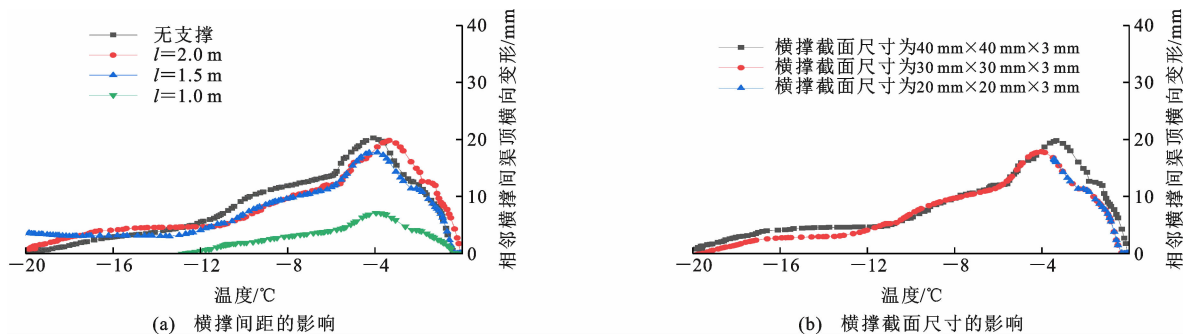


图 8 横撑对渠顶单侧横向变形的影响

Fig. 8 Influence of transverse brace on transverse deformation on single side

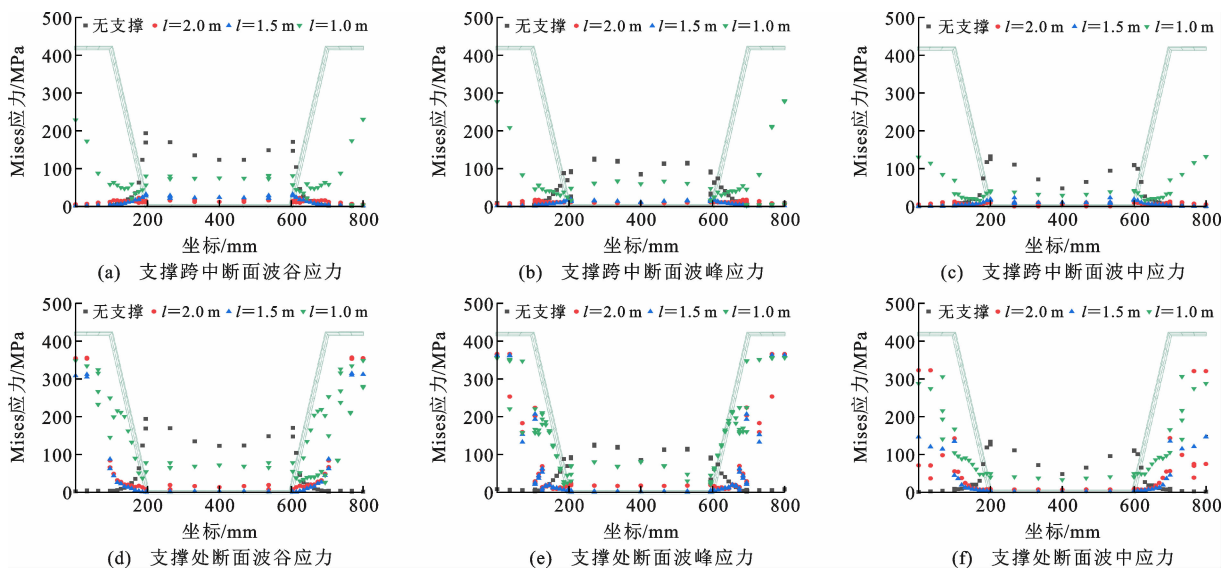


图 9 横撑对应力的影响

Fig. 9 Influence of transverse brace on stress

载由卷边传递,并最终由横撑承担,剩余 20.4% 则由支撑之间的波纹侧壁依靠抗弯作用承担。随着横撑截面的缩小,其对渠顶横向变形的影响不显著,但在同样的水平冻胀力作用下,横撑自身的应力值显著增加,并在规格变化至 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 时,产生明显的受压失稳破坏。因此,在实际应用时,需按侧壁水平冻胀力对横撑进行稳定性验算。

虽然横撑极大地限制了渠顶横向变形,但是在波纹卷边与横撑的连接部位出现明显局部应力集中。如图 9(b) 所示,加设横撑后,波纹水渠应力较大的部位由渠底转移至渠顶的卷边,包括其与横撑的连接处与相邻横撑的中间部位。尤其在靠近横撑的局部位置处,波纹应力可达到钢材屈服强度值,其余位置钢材仍处于弹性工作状态。当横撑间距从 2 m 减小至 1 m,其应力达到钢材屈服强度值的区域明显扩大。

2.2.3 水渠几何尺寸的影响

减小水渠侧壁坡度或拓宽渠顶可显著减小水渠

横向变形,并降低最大应力水平。如图 10(a) 所示,当波纹水渠顶宽由 600 mm 增加至 1 400 mm,渠顶单侧横向最大变形量可由 20.2 mm 减小至 4.6 mm;渠底最大应力更是从 $0.57f_y$ 降至 $0.09f_y$ 。

增加壁厚也可一定程度上增大渠体刚度并减小其变形与应力水平,但与上一种措施对比效果不佳。如图 10(b) 所示,当壁厚 t 由 2 mm 增加至 6 mm,渠顶单侧最大变形仅从 20.2 mm 减小至 16.6 mm,渠底最大应力由 $0.57f_y$ 降至 $0.43f_y$ 。虽然在具有横撑的前提下,渠顶卷边可发挥出一定的水平冻胀抵抗能力,然而在 100 mm 范围内加宽卷边对于减小渠顶最大横向变形的效果并不突出。如图 10(c) 所示,卷边宽度 B 达到 200 mm 后,即便渠顶横向变形显著减小,但对于顶宽、底宽、高分别为 600、400、500 mm 断面的波纹水渠而言过于浪费钢材。这是由于波纹弯折效应导致卷边无法有效限制其弯曲变形^[4],对相邻横撑之间的渠顶横向变形的限制作

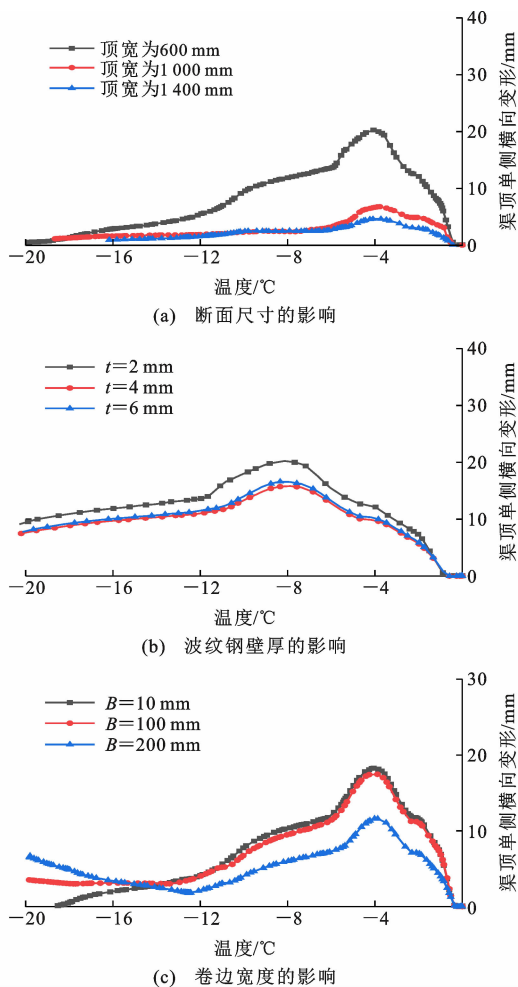


图10 几何尺寸的影响

Fig. 10 Influence of geometry dimension

用不显著。

由此可见,减小侧壁坡度可有效减小波纹钢水渠冻胀变形;通过增加壁厚或加宽卷边提高波纹钢水渠抗冻胀性能的措施不经济,卷边宽度设计仅需满足连接构造和施工稳定性要求即可。

3 结语

(1)波纹钢水渠可抵抗一定的水平冻胀作用;含水率的增加可显著增大渠顶横向变形;地下水埋深对波纹钢水渠横向变形的影响同样明显,尤其当地下水位处于侧壁下半部分时,地下水位的上升可显著增加渠顶横向冻胀变形。

(2)为限制渠顶横向变形,进而避免二次冻胀的发生,行之有效的方式是加设横向支撑或减小水渠侧壁坡度;虽然增加壁厚和加宽卷边也可一定程度上减小水渠冻胀变形,但相比之下并不经济,这是因为波纹的轴向刚度较小,使得变化波纹钢局部尺寸对控制变形的意义不大。

(3)在土体冻胀作用下,未设横撑的波纹钢水渠整体应力不高,应力较大的部位多见于底边角部和底部中心位置,侧壁应力水平不高;当设置横向支撑时,由于渠顶卷边受到约束,将在横撑附近的卷边处出现应力集中,幅值可达到钢材屈服强度。

参考文献:

References:

- [1] 申向东,张玉佩,王丽萍. 混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 80-85.
SHEN Xiangdong, ZHANG Yupei, WANG Liping. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 80-85.
- [2] 李甲林. 渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
LI Jialin. Mechanics models of frost-heaving and the research of anti-frost heave structure for lining canal [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [3] National Corrugated Steel Pipe Association. Corrugated Steel Pipe Design Manual[M], 2nd ed. Dallas: NC-SPA, 2008.
- [4] YANG L G, WANG Y Y, ELCHALAKANI M, et al. Experimental behavior of concrete-filled corrugated steel tubular short columns under eccentric compression and non-uniform confinement [J]. Engineering Structures, 2020, 220: 111009.
- [5] YAMADA S, NODA T, NAKANO M, et al. Combined-loading elastoplastic constitutive model for a unified description of the mechanical behavior of the soil skeleton [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104521.
- [6] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
SONG Guang, SONG Erxiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86-94.
- [7] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动力学特性及本构模型研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
MA Dongdong. Study on dynamic mechanical property and constitutive model of artificial frozen soil under coupled static and dynamic load [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [8] 孙义强. 基于温度精准测控的季节冻土力学特性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.

- SUN Yiqiang. Research on the mechanical properties of seasonally frozen soil based on accurate temperature measurement and control[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021.
- [9] 吴志琴. 冻融循环作用对粉质粘土抗剪强度指标影响的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2012.
WU Zhiqin. Study on the influence of freeze-thaw cycle on shear strength index of silty clay[D]. Harbin: Helongjiang University, 2012.
- [10] 冻土地区建筑地基基础设计规范: JGJ 118—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Code for design of soil and foundation of buildings in frozen soil region: JGJ 118—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [11] 李双洋, 赖远明, 张明义, 等. 高温冻土弹性模量及强度分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4299-4305.
LI Shuangyang, LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, et al. Study on distribution laws of elastic modulus and strength of warm frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4299-4305.
- [12] 刘寒冰, 张互助, 王 静. 冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 158-164.
LIU Hanbing, ZHANG Huzhu, WANG Jing. Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158-164.
- [13] 王 贺, 郭春香, 吴亚平, 等. 基于弹性力学考虑冰水相变过程下多年冻土冻胀系数与冻胀率之间的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2839-2845.
WANG He, GUO Chunxiang, WU Yaping, et al. Relationship between the frost-heaving coefficient and the frost-heaving rate of permafrost soils considering the ice water phase transformation based on elastic mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2839-2845.
- [14] 郑文锦, 林 琳. U形断面抗冻胀能力优越性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(1): 51-53, 57.
ZHENG Wenjin, LIN Lin. Advantages of U-shaped section for frost heaving resistance[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(1): 51-53, 57.
- [15] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(9): 1135-1143.
- [16] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [17] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [18] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [19] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Code for thermal design of civil building: GB 50176—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [20] 水工建筑物抗冰冻设计规范: GB/T 50662—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Code for design of hydraulic structures against ice and freezing action: GB/T 50662—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [21] ZHAO R, YAO M X, YANG L C, et al. Using geographically weighted regression to predict the spatial distribution of frozen ground temperature: a case in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(2): 024003.
- [22] 孙 哲, 赵 林, 胡国杰, 等. 下边界条件对多年冻土温度场变化数值模拟的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 357-369.
SUN Zhe, ZHAO Lin, HU Guojie, et al. Influence of lower boundary conditions on the numerical simulation of permafrost temperature field changes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 357-369.
- [23] 冯加伟, 周立臣, 梁思颖. 钻井船插桩对海洋平台桩基影响的数值研究[J]. 中国海洋平台, 2022, 37(1): 43-47, 83.
FENG Jiawei, ZHOU Lichen, LIANG Siying. Numerical study on influence of drilling ship piling on offshore platform pile foundation [J]. China Offshore Platform, 2022, 37(1): 43-47, 83.
- [24] 石 旷. 考虑桩土相互作用的钢管桩静力及动力拔桩分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
SHI Kuang. Analysis of static and dynamic pile pul-

- ling of steel pipe pile considering pile-soil interaction [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [25] 代云云. 复杂荷载作用下海洋立管触地段的损伤分析和安全评价[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
DAI Yunyun. Damage analysis and safety evaluation of subsea riser in touchdown zone under complicated loadings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [26] 郭 瑞,王正中,牛永红,等. 基于 TCR 传热原理的混凝土复合保温衬砌渠道防冻胀效果研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 101-106.
GUO Rui, WANG Zhengzhong, NIU Yonghong, et al. Anti-frost heave effect of lining channel with concrete composite insulation based on TCR principle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 101-106.
- [27] 于 源. 高寒冻融区强风化围岩隧道多场耦合与冻害分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
YU Yuan. Multi-field coupling and freezing damage analysis for the tunnel in the cold region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [28] MO T F, LOU Z K. Numerical simulation of frost heave of concrete lining trapezoidal channel under an open system[J]. Water, 2020, 12(2): 335.
- [29] 石 娇. 考虑渠基土水热力三场耦合的衬砌渠道冻胀数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
SHI Jiao. Numerical simulation research on frost heaving of lining cannal with considering heat-moisture-stress coupling [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.