

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430049

湿干冻融耦合循环下加高渠道不协调变形特性*

郭万里, 沈鑫, 赵宇宸, 黄涵

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024)

摘要: 根据高寒区渠道季节性供水和温度周期性变化的特点,以一年为一个周期,可以将渠道的外部条件简化为“湿干冻融”耦合循环。利用考虑水-热耦合及土体损伤的冻胀模型,对高寒区加高渠道在“湿干冻融”耦合循环作用下的变形过程进行了有限元模拟,并重点针对新老渠坡的不协调变形特性进行了分析。结果表明,湿干冻融耦合循环下加高渠道的不协调变形区域集中在加高分界面附近,主要来源于“冻”和“融”阶段中产生的渠坡冻胀和融沉变形不协调;随着“湿干冻融”循环次数的增加,渠坡渗漏点以下的饱和区域逐渐加深、扩大,渠顶土体饱和度降低,会导致渠顶与渠坡间的冻胀不协调加剧。渠坡的不协调变形使得渠道土体与衬砌之间产生了漏空区域,根据漏空区域的特点,可以将高寒区加高渠道不协调变形形态分为“加高层漏空”、“结合面漏空”和“渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空”这三种典型形态。在进行高寒区加高渠道不协调变形分析时,建议以渠坡顶点、加高分界点、渠坡中点以及渠坡渗漏点为变形控制点,在此基础上进行加高渠道漏空形态和最大漏空变形的分析。

关键词: 湿干冻融; 加高渠道; 水-热耦合; 不协调变形; 冻胀

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1444-11

Uncoordinated Deformation Characteristics of Heightened Canals under Wet-dry-freeze-thaw Coupling Cycles

GUO Wanli, SHEN Xin, ZHAO Yuchen, HUANG Han

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: According to the characteristics of seasonal water supply and periodic temperature variations of canals in alpine regions, the external conditions of canals can be simplified as wet-dry-freeze-thaw coupling cycles by taking one year as a full cycle. A frost-heave model considering water-heat coupling and soil damage was employed to simulate the deformation process of heightened canals in alpine regions under wet-dry-freeze-thaw coupling cycles using the finite element method, with particular emphasis on the uncoordinated deformation characteristics between the new and old canal slopes. The results showed that uncoordinated deformation zones of the heightened canal under the wet-dry-freeze-thaw coupling cycles were concentrated near the heightening interface, mainly resulting from the uncoordinated frost-heave and thaw-settlement deformations of the canal slope during the freezing and thawing stages. With increasing wet-dry-freeze-thaw cycles, the saturated area below the seepage point of the canal slope gradually deepened and expanded, while the saturation of the canal top soil decreased, which intensified the uncoordinated frost heave between the canal top and slope. The uncoor-

* 收稿日期:2025-04-30;修回日期:2025-09-16

基金项目:国家自然科学基金(51909170)资助

作者简介:郭万里(1990—),男,高级工程师,博士。主要从事土体基本性质与堤坝工程研究。E-mail:wlguo@nhri.cn

dinated deformation of the canal slope led to the formation of voids between the canal soil and lining. Based on the characteristics of these voids, the uncoordinated deformation patterns of heightened canals in alpine regions can be divided into three typical types: voids in the heightening layer, voids at the interface, and slope-lining bulging accompanied by voids in the heightening layer. When analyzing the uncoordinated deformation of the heightened canal in the alpine regions, it is recommended to adopt four points—the slope crest, the heightening interface, the slope midpoint, and the seepage point—as deformation control points, on the basis of which the void configuration and maximum void deformation of the heightened canal can be assessed.

Keywords: wet-dry-freeze-thaw; heightened canals; water-heat coupling; uncoordinated deformation; frost heave

0 引言

长距离调水工程是实现国家水资源优化配置的重大战略举措^[1],对西北高寒缺水地区而言更是名副其实的生命线工程,其建设与管理一直以来都是学术界和工程界关注的重点。高寒区渠道一般是季节性通水,时间主要集中在春夏季;冬季地表温度很低,可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据高寒区渠道季节性供水和温度周期性变化的规律,可以将渠道所处的外部环境概括为“湿干冻融”耦合循环。此前关于高寒区渠道的研究大多都是关于渠道冻害方面^[2-5],包括冻胀破坏及衬砌的影响等^[6-10]。近年来,随着经济的发展,原有渠道供水能力渐显不足,渠道加高改造工程逐步实施,一方面提高了渠道供水能力、缓解了供水压力,另一方面渠道加高之后将会导致新的工程问题。其中,如何有效控制“湿干冻融”耦合循环作用下新老渠道的不协调变形是工程界需要面对和解决的难题之一。

加高渠道不协调变形问题在此前并未被重点关注,主要原因在于普通地区的输水渠道无需考虑“冻融”循环或者“冻融”循环的影响较小;且基本能够保证全年供水,“干湿”循环的影响也较小。因此,普通加高渠道的不协调变形量较小,对坡面安全及渠道运行未造成严重影响。但是,在高寒区“湿干冻融”耦合循环作用下,土体劣化明显^[11-12],加高渠道的不协调变形可能会持续增大,对坡面衬砌产生危害,甚至导致衬砌的架空、断裂及剥落等,严重影响渠道的正常运行。

本文将以北疆高寒区输水渠道加高改造工程为背景,结合水-热耦合计算理论,提出考虑冻融劣化的渠基土耦合冻融模型,分析“湿干冻融”耦合循

环作用下加高渠道不协调变形特性,为工程设计、施工、运行维护以及相关研究提供科学依据。

1 模型建立

1.1 渠道工程概况

以北疆输水渠道为例,北疆属于典型的高寒区,其“湿干冻融”耦合循环环境具有代表性。渠道一般每年4月~9月通水,如图1(a)所示。

11月至次年3月地表气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图1(b)所示。渠道土体经历了“干”中有“冻”,“融”中有“湿”,“湿”、“干”、“冻”、“融”四个过程相互耦合的过程。从本质来讲,土体冻结本身也是未冻水向冻结锋面迁移的过程,类似土体干燥过程。因此,可以将渠道所处的状态简化为“湿干冻融”耦合循环,如图1(c)所示。

北疆供水渠道改扩建工程中,老渠道为挖方工程,主要土料为膨胀土,渠顶高度为 5.6 m ,边坡坡度 $1:2$,如图2所示;渠道加高改造是填方工程,采用就近取材的原则,主要填筑料为戈壁料,采用贴坡加高的方法,加高之后的渠顶高度为 7.5 m ,如图2所示。

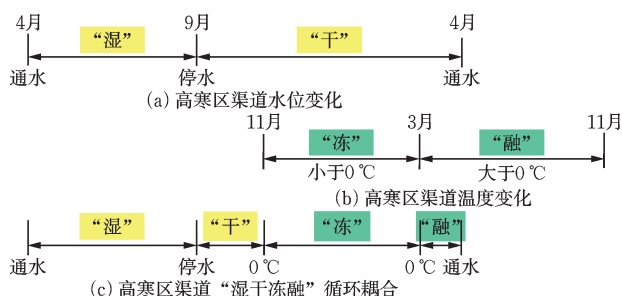


图1 高寒区渠道“湿干冻融”耦合循环过程简化示意

Fig.1 Simplified schematic diagram of wet-dry-freeze-thaw coupling cycles of canals in alpine regions

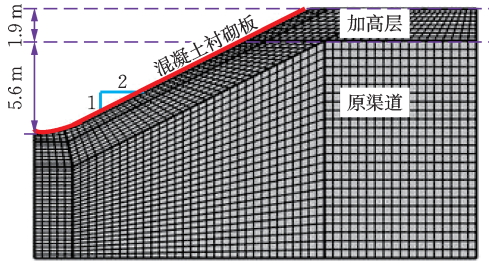


图2 渠道加高改造及有限元网格示意

Fig.2 Schematic diagram of canal heightening modification and finite element mesh

1.2 渠道建模的几点假设

为分析衬砌渠道冻胀过程,基于以上物理过程进行适当假设如下:

(1) 渠道顺水流方向较长,假设该方向上土体物理参数相同,以渠道横断面为研究对象进行冻胀分析时,满足二维平面应变问题。

(2) 在渠道加高改造过程中,先将老渠道衬砌挖开,再进行加高层填筑、碾压,最后统一对新老渠道坡面进行找平、衬砌板施工,如图2所示。因此,老渠道在前期运行多年所积累的冻胀、融沉变形都不复存在,新老渠坡的初始变形都为0。

(3) 渠道混凝土衬砌板与土体并未直接接触,中间设置有“两布一膜”的防渗体,因此,混凝土衬砌的存在对于渠道土体的变形几乎没有直接影响;相反,渠道土体的变形会使得衬砌产生漏空、隆起变形甚至破坏。因此,为了更直观研究加高土层对渠道不协调变形的影响,本文在进行有限元建模时并没有考虑衬砌与土体的共同作用,而是将衬砌作为模量很大的弹性材料,纯粹研究土体本身的变形特性,相当于衬砌放置在土体上随着土体的变形而被动变化,衬砌会被渠道冻胀最大的部位顶起,衬砌与渠坡之间会出现漏空区域。

1.3 边界条件

该问题涉及到的主要边界条件为温度和水分的周期性变化,以1年为周期,将开始供水作为周期的起点,如图3所示,主要设置如下:

(1) 水位从起点开始,线性增大,经过6 d上升到最大水位,根据渠道实际运行情况,最大水位为5.5 m。

(2) 从第6 d运行到第150 d,水位都维持在最高水位。

(3) 第150~160 d,水位从最高水位线性降低到0水位。

(4) 温度从起点开始为10℃,到第60 d达到最高温度25℃,第180 d下降到0℃,第240 d下降到最低温度-20℃,然后到第360 d回升至10℃。

(5) 根据室内试验结果,渠道土体的性质在第5次“湿干冻融”之后逐渐趋于稳定^[11],因此,本次模拟5个“湿干冻融”周期,共1 800 d。

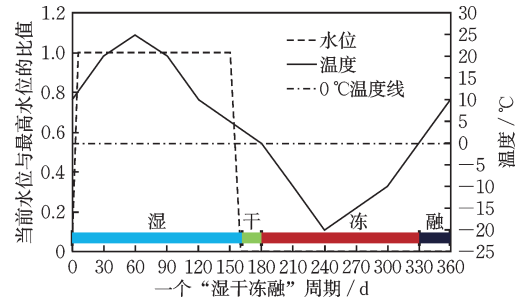


图3 一个“湿干冻融”周期内水位和温度的变化

Fig.3 Variations in water level and temperature within one wet-dry-freeze-thaw cycle

此外,北疆输水渠道在实际运行过程中的一大难题是渗漏问题。根据2017年、2018年渠道沿线水位观测管测得通水运行期防渗膜后水位数据,整个运行期内大多数断面存在膜后水赋存,占观测管总数的90%以上,并且半数以上的观测管在运行期内始终有水。这说明,渠道存在严重的渗漏问题。因此,本文将模拟渗漏最严重断面,即渠道渗漏点与最高水位齐平,高度都为5.5 m。

1.4 数学模型

通过理论分析,渠道周围环境包括温度、水分、风场及太阳辐射的作用,引起了渠基土内部温度、水分的分布变化。土中水分的含量及形态变化,引起多孔介质土体结构变形,造成土体的冻融损伤和力学性质劣化。土体冻胀-融沉作用于渠道衬砌结构,累积的残余变形引起结构隆起、错动和断裂,而土体的融沉和塑性破坏使结构失去支撑从而逐渐发生脱落和滑塌。总之,一系列渠道冻融灾害的发生是诸多环境因素与渠道内部因素交互作用,效应累积的结果。为定量描述渠道灾害的演变过程,本文基于冻土水-热耦合模型,结合土体冻融劣化的本构模型和冻土-衬砌接触模型,建立高寒区渠道“湿干冻融”耦合循环劣化演变模型。

1.4.1 土体冻融的温度传导模型

土体作为多相多孔介质,其中包含土颗粒及填充于孔隙中的水与空气等三相材料,在负温下孔隙水相变为孔隙冰或分凝冰,土体成为四相材料。热

传导过程中因水、冰、空气相的体积分数变化,导致土体热参数变化;同时土体孔隙水与冰之间相变潜热的加入,导致土体热传导过程呈现显著的非线性特征。描述土体冻融过程的温度传导模型由基本的能量守恒方程推导。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (-\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial y}) + L_f \rho_i \frac{d\theta_i}{dt} \quad (1)$$

式中, ρ, ρ_i 分别为土体与冰密度, kg/m^3 ; C_p 为土体等效定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ_{eq} 为土体等效导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; L_f 为水冰相变潜热,取常量 $333 \text{ kJ}/\text{kg}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_i 为孔隙水结冰量, $T > 0^{\circ}\text{C}$ 时为0。

1.4.2 土体冻融过程水分迁移模型

土体渗流过程是孔隙自由水在势能梯度作用下运移,常温下土体孔隙自由水主要受土水势和重力势主导。在负温下自由水相变为冰后,冰水界面上自由水势能降低引起冻结锋面下方土体内水分迁移。采用变饱和度孔隙介质渗流的理查德方程,对土体干湿过程及冻融过程的水分迁移规律进行描述。

$$\rho \left(\frac{C_m}{\rho g} + SeS \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \quad (2)$$

$$\left(-\frac{k_s}{\mu} k_r k_i (\nabla p + \rho g \nabla D) \right) = \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}$$

$$k_r = \begin{cases} Se^m \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$k_i = \begin{cases} \alpha \times T^\beta & T < 0^{\circ}\text{C} \\ 1 & T \geq 0^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ 为土体密度, kg/m^3 ; p 为孔隙水压力,作为方程的求解变量, Pa ; C_m 为土体滞水系数, pa^{-1} ; Se 为土体饱和度; S 为土体储水系数, Pa^{-1} ; k_i 为饱和度相关的相对渗透率,由式(3)确定; k_r 为负温下渗透率折减系数(≤ 1),是土体温度及含冰量的函数,而含冰量是温度的函数,因此最终还是温度的函数,可由式(4)给出; k_s 为饱和渗透率, m^2 ; μ 为水的动力粘滞系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; α 和 β 分别是试验常数。

式(2)左边用以描述非冻土区域变饱和和土体的水分迁移规律,而通过引入右边结冰速率项,实现对正冻土冻结缘区域孔隙水结冰或孔隙冰消融带来源项改变的描述。

1.4.3 土体冻融过程的水热耦合联系方程

土体冻融过程的水热耦合表现为两方面,一方面是土体水热参数如导热系数、比热容、渗透系数

等与含水量或土体温度密切相关,这类耦合关系已在前两节的控制方程中体现。另一方面也是重要的一方面是通过水相变为冰,冰含量的增加来进行来联系,因为冰的增加改变了土体的组成,产生的相变潜热对温度场影响非常显著,同时也是水分迁移的诱发因素。因此式(5)联系方程的目的在于描述冻土中冰相的生长与消融速率。正冻土区冰生长速率的表达式为:

$$\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = - \left(\rho \frac{a \cdot b}{T_f} \left| \frac{T}{T_f} \right|^{b-1} + \rho_w C_m \frac{\rho_w L_f}{T_f} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial t} \leq 0 \right) \quad (5)$$

式中, a, b 为土壤冻结曲线的试验参数; T_f 为冰点温度, K 。

冻土融化时,冰含量的变化速率与冻结时不同,水结冰过程受到热力学平衡关系的制约,而融化过程则较为迅速,即冻结曲线要滞后于融化曲线,融化曲线可以近似表示为直线,如式(6)所示。

$$\theta_u = \theta_{imax} - \frac{\theta_{imax} - \theta_r}{T_r} T \quad \left(\frac{\partial T}{\partial t} > 0 \right) \quad (6)$$

$$\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = -\rho_w \frac{\partial \theta_u}{\partial t} = \rho_w \frac{\theta_i - \theta_r}{T_r} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial t} > 0 \right) \quad (7)$$

式中, θ_{imax} 为冻结期结束后土体最大含冰量; θ_u 为冻土内未冻水体积含量; θ_r 为土体残余含水量; T_r 为冰点温度, K 。

式(5)和式(7)所组成的冻融条件下冰生长速率表达式,即为水热耦合的联系方程,通过该方程可以将含冰量这一未知量与温度建立联系,从而使方程(1)和(2)可联合求解土体温度场和水分场。通过水热耦合的链式模型,求解在外部负温下,渠基温度场的变化以及相应的冰含量 θ_i 。从而得到土体自由冻胀率如下。

$$\epsilon = \int_t \frac{\partial \theta_i}{\partial t} dt - n \quad (8)$$

式中, ϵ 为无上覆荷载时土体自由冻胀率; n 为土体孔隙率。

由于渠道衬砌结构单薄且质量小,基土表层冻胀时可以忽略上覆荷载,因此常用水热耦合的主控制方程(1)、(2)、(5)、(7)和(8)便可以预测薄板结构衬砌的渠道渠基的冻融温度场、渗流水分场以及冻融变形情况。

1.4.4 考虑土体损伤的本构方程

计算中涉及的弹性力学平衡方程、几何方程和本构方程三个基本方程此处不再赘述。土体的模

量由土颗粒模量 E_s 和冰模量 E_i 根据体积分数进行等效计算, 本文不再赘述。其中, 笔者认为, 土颗粒模量 E_s 在多次“湿干冻融”后会逐渐损伤衰减, 可用式(9)来描述。

$$E_s = E_{s0} [1 - \eta(1 - \exp(-\chi N))] \quad (9)$$

式中, E_{s0} 分别为土体未经历“湿干冻融”耦合作用时的杨氏模量; η 、 χ 为 E 随“湿干冻融”耦合次数的折减参数, 由试验获得。

以白砂岩为例, 笔者对“湿干冻融”条件下养护的土样开展了三轴排水剪切试验, 以围压 50 kPa 时的结果为例, 土样的杨氏模量损伤衰减规律如图 4 所示, 参数 η 、 χ 分别为 0.18 和 1.12。

相应材料热参数定义如表 1 所示, 适用于渠道全部土体。

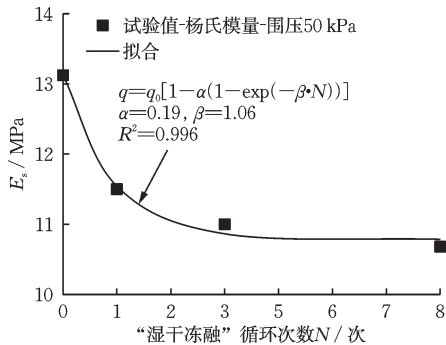


图 4 白砂岩弹性模量的衰减规律

Fig.4 Attenuation pattern of elastic modulus of white sandstone

表 1 材料热参数

Table 1 Thermal parameters of material

材料	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	比热容/ $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
混凝土	1.58	0.97
冰	2.2	2.1
土颗粒	1.5	0.95
水	0.6	4.2
空气	0.03	1.003

由于原渠道和加高层渠道土料为两种不同土料, 在主要参数方面存在明显差异, 因此表 2 列出了原渠道土体与加高层土体不相同的主要参数。

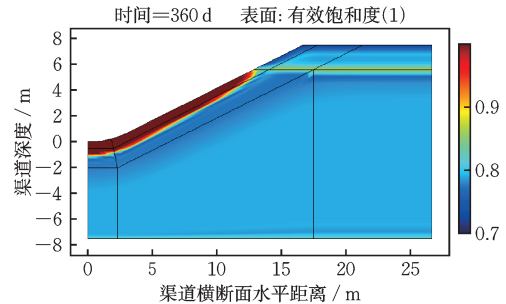
1.5 模型的初步验证

为了验证数学计算模型和边界条件设置的合理性, 本文首先采用多物理场耦合有限元分析软件对以上耦合方程组进行二次开发求解。软件针对偏微分方程进行积分后转化为相应的弱形式方程,

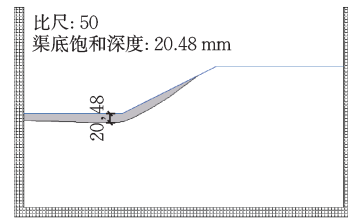
表 2 原渠道土体与加高层土体不相同的主要参数
Table 2 Main differing parameters between original canal soil and heightened layer soil

参数	参数名	原渠道土体	加高层土体	单位
θ_s	土体饱和含水量	0.45	0.50	—
θ_r	土体残余含水量	0.05	0.05	—
Se	(初始)土体饱和度	0.75	0.70	—
k	饱和渗透系数	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-7}	m/s
C_p	常压热容	750	800	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
E_s	杨氏模量	8.0×10^6	12×10^6	Pa
ρ	干密度	1 500	1 600	kg/m^3

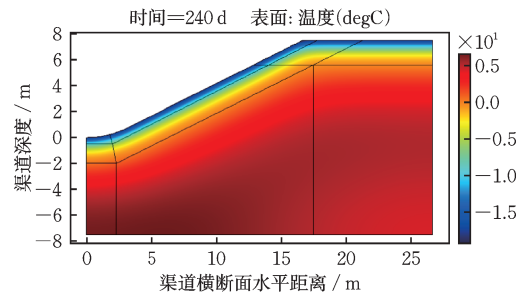
并进行离散求解。对于耦合联系方程(5)~(8)采用自定义 PDE 模块进行积分计算得到含冰量, 对于导热系数 λ_{eq} 、定压热容 C_p 以及渗透率折减系数 k_i 等场变量计算结果为自变量的物理量的调用则通过模型前处理的定义变量进行操作, 如图 5(a) 所示。



(a) 有限元计算饱和区域(360 d)



(b) 离心模型试验饱和区域



(c) 有限元计算温度场(温度最低时, 240 d)

图 5 第 1 个周期内的饱和区域及温度场

Fig.5 Saturated region and temperature field in first cycle

随后将有限元计算结果与离心模型试验结果进行对比。笔者开展了干湿循环下青色泥岩渠道的离心模型试验,青色泥岩按压实度90%(即干密度 1.5 g/cm^3)最优含水率18%和来铺设土样,离心试验比尺为50,模拟的实际通水时间为140 d,停水时间为215 d,共进行了5次干湿循环作用。其中第1次干湿循环结束后模型饱和区域如图5(b)所示。

本文有限元计算原渠道干密度也取为 1.5 g/cm^3 ,初始饱和度取为0.75,模拟的通水时间为160 d,停水时间为200 d,共经历了5次湿干冻融耦合循环。有限元计算的第1次“湿干冻融”耦合作用结束后渠道的饱和区域如图5(a)所示,温度达到最低时(240 d)的温度场如图5(c)所示。

将离心模型试验的饱和深度根据50倍比尺换算为实际深度,如表3所示,并与有限元计算结果进行了对比。由于冻融作用也会改变渠道的饱和区域,因此“湿干冻融”耦合作用下的饱和区域变化规律用来与“干湿”循环下的结果进行对比,是一种近似的对比。

由表3可见,第1个循环周期结束后,有限元计算的渠底饱和深度为0.98 m,离心模型试验得到的渠底饱和深度为1.024 m,两者吻合的较好,说明计算模型和计算参数的选择是较为合理的。但是,第2次循环结束后,有限元计算值比离心模型试验值小0.54 m;第5次循环结束后,有限元计算值比离心模型试验值小0.86 m。可见,第2次和第5次循环周期结束后,有限元计算的渠底饱和深度小于离心试验结果,且差值随着循环次数的增大而增大。

表3 有限元计算渠底饱和深度与离心模型试验对比
Table 3 Comparison of saturated depth at canal bottom between finite element calculation and centrifugal model test

循环周期	有限元计算的渠底饱和深度/m	离心模型试验得到的渠底饱和深度/m(模型尺寸 \times 50倍比尺)
第1次	0.98	$20.48\text{ (mm)} \times 50 = 1.024$
第2次	1.92	$49.21\text{ (mm)} \times 50 = 2.46$
第5次	2.65	$70.16\text{ (mm)} \times 50 = 3.51$

笔者分析原因,有限元计算是“湿干冻融”耦合循环,而离心模型试验是“干湿循环”,除了“冻融”循环对有限元计算的饱和区域产生了影响以外,更主要的原因在于有限元计算时没有考虑膨胀性渠基土裂隙的发育对土体渗透性的影响。实际上,离

心模型试验中膨胀性渠基土每经历一次干湿循环,裂隙会向内部发育,裂隙的发育会增大土体的渗透性,因此,每次循环周期结束后,渠水入渗的深度会大于有限元计算值。尽管如此,有限元计算的饱和区域的发展规律和入渗深度都与离心模型试验差异不大,可以说明,在关于水分场的计算模型、参数选择和边界条件设置是合理的。

至于冻胀和融沉的变形规律,离心模型试验的变形包含了50倍重力作用下的固结沉降,这部分沉降能够部分抵消甚至完全掩盖冻胀产生的变形,使得位移计监测到的总位移是向下的。而实际渠道经过多年运行之后,重力引起的变形已经基本稳定,渠坡的变形主要是由“湿干冻融”作用引起的冻胀和融沉。因此,对于温度场和力学场的合理性检验,本文并未与离心模型试验结果进行对比。其中,一个周期内温度最低的时间是第240 d,冻深约在2.0 m左右,如图4(c)所示,这与该地区冻深实测值较为接近;此外,查阅中国季节性冻土标准冻深线图显示该地区标准冻深为1.6 m,略小于本文计算冻深,说明关于温度场的计算与参数选择是合理的。

综上所述,通过与离心模型试验等数据的对比,本文采用的有限元计算模型与方法对“湿干冻融”耦合循环下加高渠道的计算是较为合理的,在此基础上将重点分析加高渠坡的不协调变形特性。

2 加高渠道不协调变形特性

2.1 坡面研究范围的选择

加高渠道的不协调变形,主要是考察加高层的坡面法向变形与原渠道坡面法向变形是否协调。根据渠道管理部分的监测结果,温度达到最低的阶段时,部分断面坡面衬砌会发生肉眼可见的鼓胀现象。现以第1个“湿干冻融”周期里温度达到最低值的时间点为例,即第240 d(温度 $-20\text{ }^\circ\text{C}$)时渠道变形云图,如图6所示。

图6中的坡面法向变形根据特征可以分为两大不均匀变形渠坡段:

(1) 第一个不均匀变形渠坡段是图6中的DE段,在DE段出现了显著的不均匀变形,其特征为两端的D点附近和E点附近的冻胀变形最大,中部B点附近的变形最小。其中,B为坡面加高分界点,E为渠顶,D为坡面上冻胀位移最大的点。D点的位置位于加高后渠坡的中部,大概与E点关于B点对

称,因此,为了简化问题,将D点确定为与E点关于B点对称的点,即DB与BE渠坡的竖向高度都是1.9 m。

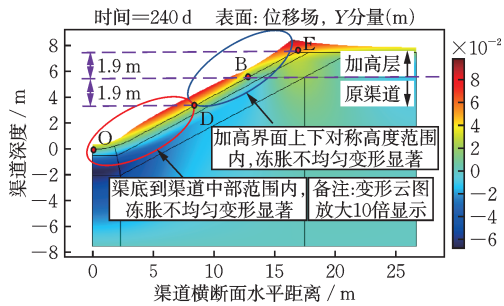


图6 渠道冻胀不均匀变形示意

Fig.6 Schematic diagram of uneven frost-heave deformation in canal

(2) 第二个不均匀变形渠坡段是图6中的DO段,其中O为渠底中心点。DO段是渠道中部以下及渠底部分,该渠坡段的不协调变形在渠道加高之前就存在,与渠道是否加高无关。至于渠道加高之后是否会导致渠底部分的不协调变形加剧或减弱,则是另外一个研究问题,需进行渠道加高前后的对比研究。本文主要研究加高层附近渠坡的不协调变形,因此选择了以加高分界面的上部和下部土层作为研究对象,即DE段,如图7所示。值得注意的是,渠道运行水位高度(渠坡渗漏点)几乎与B点重合。

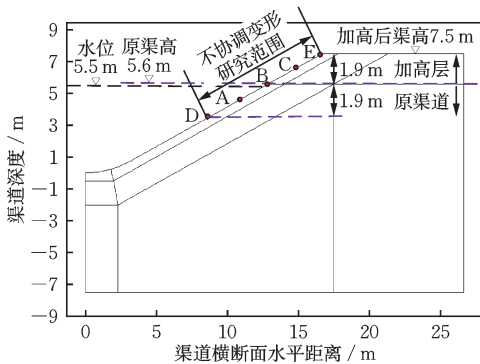


图7 不协调变形的研究范围

Fig.7 Research scope of uncoordinated deformation

注:B为加高层与原渠道分界点,高度5.6 m;运行水位5.5 m,略低于B点;DE段之间平均选取20个点作为研究对象;A为DB中点,C为BE中点

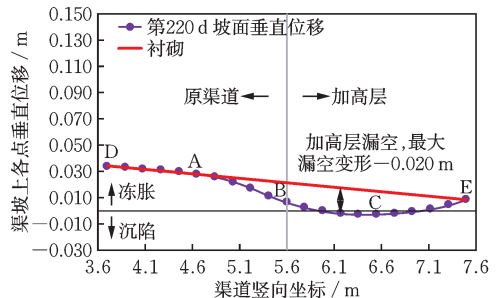
在研究范围DE坡段内平均选取21个点为研究点,其中,B点为加高分界点,也是DE段的中点;A为DB段的中点,C为BE段的中点。下面根据所选择的21个研究点的变形特性,研究BE段的变形是否与DB段协调。

2.2 新老渠坡不协调变形形态分类

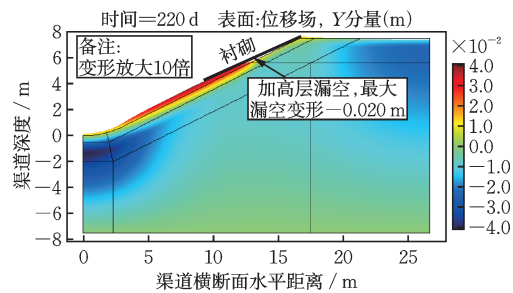
根据现场监测资料,高寒区加高渠道不协调变形主要来源于法向冻胀变形不协调。渠坡法向位移若不协调,会导致渠基土与衬砌之间出现漏空区域,漏空区域的出现可能导致衬砌变形甚至破坏。根据漏空区域出现的主要位置,加高渠道不协调变形可以分为如下3种类型。

2.2.1 加高层漏空

图8(a)给出了第220 d时(温度已接近最低温度,约为 -18°C)DE段渠坡表面法向位移图,原渠道的DA段冻胀变形高于加高层BE段,假设DE段衬砌是刚性的,此时衬砌将主要与DA段接触,并使得加高层BE段出现漏空区域,如图8所示。漏空区域的最大漏空变形出现在BC段(加高层),渠基土与衬砌之间的最大漏空变形为 -0.020 m ;漏空的区域也主要集中在BC段(加高层),该漏空区域在变形云图中更能直观展示,如图8(b)所示,将变形云图放大10倍显示,加高层与衬砌之间出现漏空区域。因此,将这种形态的不协调变形称之为“加高层漏空”。



(a) 最大漏空变形示意



(b) 最大漏空变形云图

图8 第1个周期内220 d时最大漏空变形

Fig.8 Maximum void deformation at 220 d in first cycle

“加高层漏空”出现的原因主要在于DA段位于渠坡渗漏点以下,基本都为饱和区域,而加高层位于渗漏点和渠水位以上,处于非饱和状态。因此,在“冻”的前期,DA段冻胀变形增长较快,将衬砌顶起,使得加高层BE段出现漏空区域。

2.2.2 结合面漏空

图9和图10分别给出了第1个周期内第280 d和第320 d时DE段渠坡表面法向位移图。第280 d和第320 d时的漏空区域与第220 d时不同,是出现在整个DE段,而不仅仅是加高段;而且,最大漏空变形靠近加高结合面处的B点附近,因此,这种不协调变形称之为“结合面漏空”。

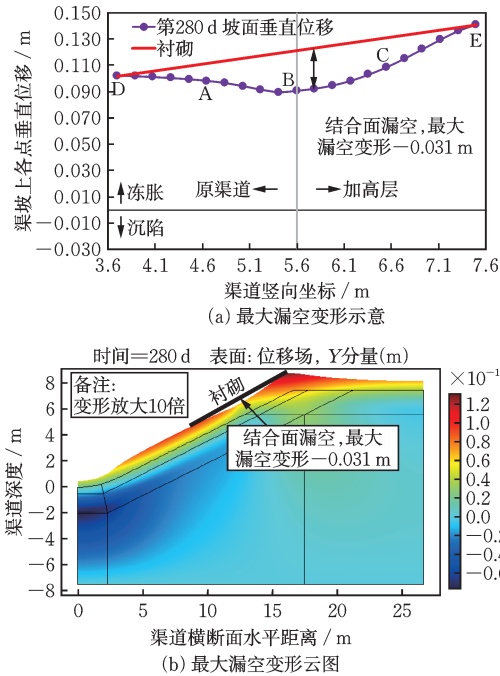


图9 第1个周期内280 d时最大漏空变形
Fig.9 Maximum void deformation at 280 d in first cycle

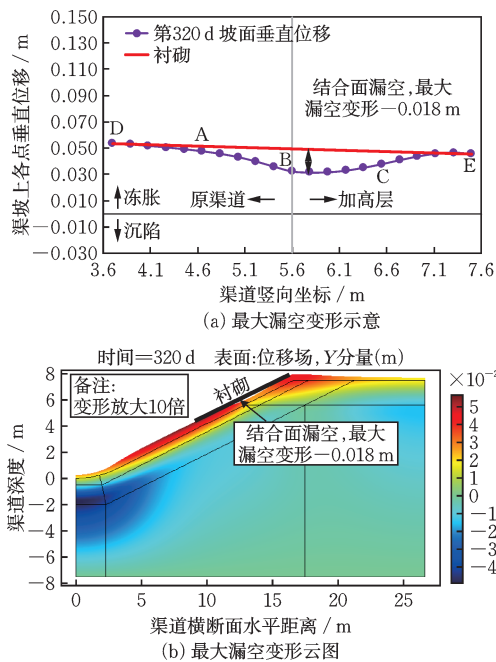


图10 第1个周期内320 d时最大漏空变形
Fig.10 Maximum void deformation at 320 d in first cycle

第280 d时最大漏空变形为 -0.031 m,该时间点出现“结合面漏空”的主要原因在于,从第220 d~第280 d,温度都处于较低的水平,随着冻胀时间的持续,渠坡上的冻胀位移都增大。位于老渠坡中点附近的D点处于渠道渗漏点以下,为饱和区域;位于渠顶的E点是双向冻结,两点都是易产生冻胀变形的点。因此,DE两个端点在该冻胀时间段内分别成为老渠道和加高层冻胀位移最大的点,刚性衬砌被DE两点顶起,使得整个DE段都出现漏空,如图9所示。

第320 d时的漏空变形为 -0.018 m,如图10所示,相对于第280 d时漏空变形已显著降低,这是由于320 d时温度已逐渐回升,接近 0°C (330 d),各点的法向位移相对于280 d时已是下降的,但D和E两点依然是老渠坡和加高层冻胀最大的点,结合面附近的冻胀最小,出现漏空区域,如图10所示。

2.2.3 渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空

以第5个周期内的第220 d为例,即总时间节点分别1660 d(5T-220 d)时的法向位移图,如图11所示。图11中,刚性衬砌下出现两个漏空区域:第一个漏空区域主要集中在加高层;第二个漏空区域则出现在D点附近。D点附近出现漏空的直观原因,由图11可以看出,老渠坡靠近分界面的冻胀较大,而加高层冻胀较小甚至为负,此时,衬砌往靠近加高层的方向塌陷,使得D点附近的衬砌隆起,D点附

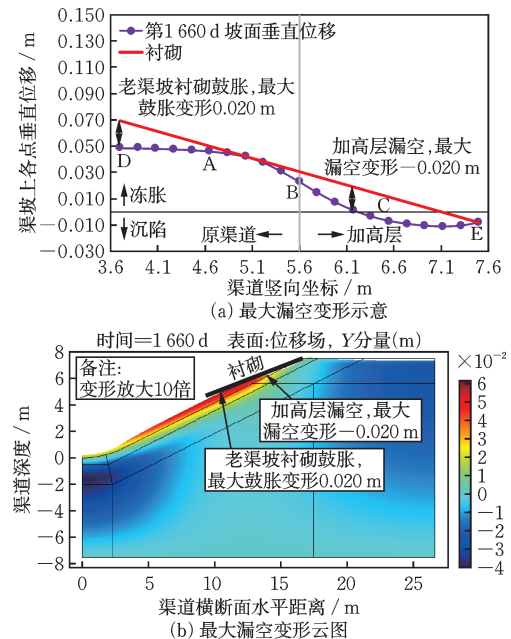


图11 第5个周期内220 d(总时间1660 d)时最大漏空变形
Fig.11 Maximum void deformation at 220 d (total 1660 d) of fifth cycle

近与衬砌之间产生了漏空区。因此,这种不协调变形称之为“渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空”。

至于E点在第1个周期的220 d时法向冻胀为0.015 m(图8(a)),而到,到第5个周期的220 d时,E点的法向变形为负数(图11(a)),发生了沉陷,主要原因是水分迁移导致含水率和饱和度下降所致。

以第1个周期和第5个周期的第220 d为例,如图12所示,在第1个周期220 d时渠顶土体的饱和度对比初始值0.7稍有降低,因此在冻胀阶段的初期,E点的冻胀作用虽然较弱,但依然表现为向上冻胀,法向位移为0.015 m。而在第5个周期220 d时,渠顶表层土体水分持续向下迁移,饱和度已明显低于初始值0.7,此时冻胀作用很弱,冻胀变形不足以抵消固结沉降的变形,因此E点在第5个周期的第220 d时(总时间1 660 d)法向位移为负,表现为沉陷。同理可以解释E点在第2个周期的220 d时法向位移相对于第1周期时减小的原因。

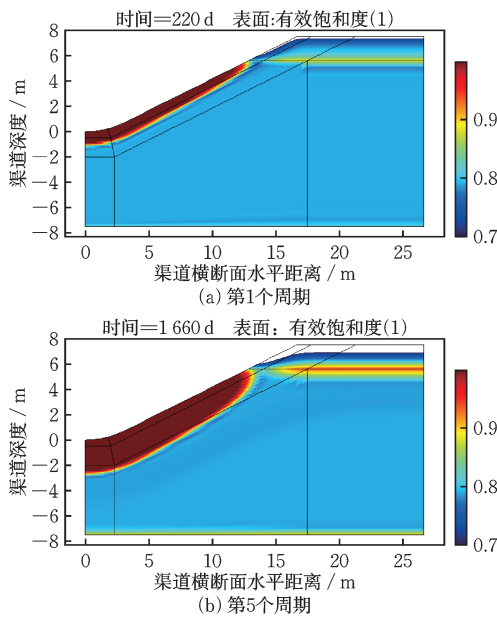


图12 第1个和第5个周期内220 d时的土体饱和度对比
Fig.12 Comparison of soil saturation at 220 d in first and fifth cycles

注:图例中的数值“1”表示完全饱和;最小值固定为0.7,白色区域表示小于0.7

2.3 新老渠坡不协调变形形态的判定方法

根据以上总结的三类不协调变形形态,对第1/2/5个周期内新老渠道的不协调变形形态和最大漏空变形进行了汇总,如表4所示。

若D点出现衬砌鼓胀,则不协调变形形态可判定为“渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空”;若D点衬砌无

鼓胀,则不协调变形形态可能为加高层漏空或结合面漏空,其判定需要根据最大漏空变形出现的位置而定。最大漏空值出现在分界点B点附近时,为结合面漏空;最大漏空值出现在加高层中部的C点附近,则为加高层漏空。

综上可得,渠坡的不协调变形使得渠道土体与衬砌之间产生了漏空区域,根据漏空区域的特点,可以将加高渠道不协调变形的形态分为“加高层漏空”、“结合面漏空”和“渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空”这3种典型形态。这3种不协调变形的特征如表5所示。

表4 第1/2/5个周期内新老渠道最大漏空变形

Table 4 Maximum void deformation of new and old channels in 1st, 2nd, 5th cycles

周期 时间/d	总时间/ d	最大漏空 变形/m	D点衬砌 鼓胀/m	不协调变形形态
1T-220	220	-0.020	-	加高层漏空
1T-280	280	-0.031	-	结合面漏空
1T-320	320	0.018	-	结合面漏空
2T-220	580	-0.020	0.008	渠坡衬砌鼓胀+ 加高层漏空
2T-280	640	-0.030	-	结合面漏空
2T-320	680	-0.018	-	结合面漏空
5T-220	1 660	-0.020	0.020	渠坡衬砌鼓胀+ 加高层漏空
5T-280	1 720	-0.025	0.005	渠坡衬砌鼓胀+ 加高层漏空
5T-320	1 760	-0.018	0.011	渠坡衬砌鼓胀+ 加高层漏空

注:1T-220表示的是第1个“湿干冻融”耦合周期内的第220 d,以此类推

表5 加高渠道3种典型不协调变形形态及其特征

Table 5 Three typical uncoordinated deformation patterns of heightened canals and their characteristics

漏空形态	特征
加高层漏空	主要漏空区域和最大漏空变形都在加高层
结合面漏空	结合面附近的老新渠道都有漏空区域,最大漏空变形在结合面附近
渠坡衬砌鼓胀+ 加高层漏空	主要漏空区域出现在加高层,同时老渠坡中部衬砌隆起

2.4 高寒区加高渠道不协调变形的评价指标

分析显示,高寒区加高渠道的不协调变形主要

在于“冻”和“融”过程中产生的冻胀和融沉变形不协调,如表4中列出的不协调变形较为显著的时间节点基本都是出于“冻”的阶段。“湿”和“干”这两个过程则会影响水分场的分布,从而直接影响“冻”和“融”的过程,间接影响了渠道的不协调变形。因此,本文针对高寒区加高渠道不协调变形的控制指标,进行如下建议:

(1) 渠坡变形控制点。加高层渠坡冻胀最大点基本在渠坡顶点,老渠坡冻胀最大点在渠坡中部,而加高分界点的冻胀较小,其附近易出现漏空区域。同时,渠坡渗漏点附近也是变形不协调的主要区域,本案例中由于所依托的实际工程渠道渗漏严重,渠坡渗漏点的高度设计为等于渠水位高度,为5.5 m,几乎与加高分界点(5.6 m)重合,因此未作单独分析。事实上,渠坡渗漏点上下土层的饱和度差异会导致冻胀差异,产生不协调变形。在进行高寒区加高渠道不协调变形分析时,建议以加高层渠坡顶点、加高分界点、渠坡中点以及渠坡渗漏点这四个点为变形控制点。

(2) 最大漏空变形。即以渠坡中点到渠坡顶点为研究范围,该范围内渠坡土体与衬砌板之间的最大漏空距离即为最大漏空变形,通常发生在加高分界点附近。

(3) 渠坡衬砌鼓胀变形。渠坡中部衬砌鼓胀隆起,其危害远大于加高层漏空,原因在于加高层通常在渠道运行水位之上,衬砌漏空甚至产生裂缝,至少不会造成渠水的渗漏。而渠坡中部衬砌隆起,易造成衬砌裂缝或折断,损坏部位位于渠道运行水位以下,将造成严重的渠水渗漏问题。

3 结 论

本文利用水-热耦合计算方法,对高寒区加高渠道在“湿干冻融”耦合循环作用下的变形过程进行了有限元模拟,并重点针对新老渠坡的不协调变形特性进行了分析,得出几点结论和建议:

(1) 本文提出的考虑“湿干冻融”劣化本构的渠基土水-热耦合模型,实现了对“湿干冻融”耦合循环作用下渠道长期变形的有限元模拟,结合离心模型试验结果和渠道现场观测规律,验证了该模型是适用的。

(2) 渠坡的不协调变形使得渠道土体与衬砌之间产生了漏空区域,根据漏空区域的特点,可以将高寒区加高渠道不协调变形的形态分为“加高层漏

空”、“结合面漏空”和“渠坡衬砌鼓胀+加高层漏空”三种典型形态。

(3) 高寒区加高渠道的不协调变形主要在于“冻”和“融”过程中产生的冻胀和融沉变形不协调;随着“湿干冻融”循环次数的增加,渠坡渗漏点以下的饱和区域逐渐加深、扩大,渠顶土体饱和度降低,会导致渠顶与渠坡间的冻胀不协调加剧。

(4) 在进行高寒区加高渠道不协调变形分析时,建议以加高层渠坡顶点、加高分界点、渠坡中点以及渠坡渗漏点这四个点为变形控制点,在此基础上进行漏空形态和最大漏空变形的分析。

参考文献:

- [1] 王浩,游进军.中国水资源配置30年[J].水利学报,2016,47(3):265-271.
Wang H, You J J. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265-271. (in Chinese)
- [2] Tan X J, Chen W Z. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(7): 74-84.
- [3] Liu Q, Wang Z, Li Z, et al. Transversely isotropic frost heave modeling with heat-moisture-deformation coupling [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15: 1273-1287.
- [4] Zhou J, Li D. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil [J]. Cold Regions Science & Technology, 2012, 72(72):43-49.
- [5] 刘月,王正中,王羿,等.考虑水分迁移及相变对温度场影响的渠道冻胀模型[J].农业工程学报,2016,32(17):83-88.
Liu Y, Wang Z Z, Wang Y, et al. Frost heave model of canal considering influence of moisture migration and phase transformation on temperature field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17):83-88. (in Chinese)
- [6] 王羿,王正中,刘铨鸿,等.寒区输水渠道衬砌与冻土相互作用的冻胀破坏试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(10):1799-1808.
Wang Y, Wang Z Z, Liu Q H, et al. Experimental investigations on frost damage of canals caused by interaction between frozen soils and linings in cold regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10):1799-1808. (in Chinese)
- [7] 王正中,刘少军,王羿,等.寒区弧底梯形衬砌渠道冻

- 胀破坏的尺寸效应研究[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 803-813.
- Wang Z Z, Liu S J, Wang Y, et al. Size effect on frost heave damage for lining trapezoidal canal with arc-bottom in cold regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7):803-813. (in Chinese)
- [8] 江浩源, 王正中, 王羿, 等. 大型弧底梯形渠道“适缝”防冻胀机理及应用研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 947-959.
- Jiang H Y, Wang Z Z, Wang Y, et al. Study on anti-frost heave mechanism and application of “reasonable joints” for large-size trapezoidal canal with arc-bottom [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 947-959. (in Chinese)
- [9] 白青波, 李旭, 田亚护, 等. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增2):131-136.
- Bai Q B, Li X, Tian Y H, et al. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup2): 131-136. (in Chinese)
- [10] 李爽, 王正中, 高兰兰, 等. 考虑混凝土衬砌板与冻土接触非线性的渠道冻胀数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 497-503.
- Li S, Wang Z Z, Gao L L, et al. Numerical simulation of canal frost heaving considering nonlinear contact between concrete lining board and soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 497-503. (in Chinese)
- [11] 朱洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6):1233-1241.
- Zhu X, Cai Z Y, Huang Y H, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1233-1241. (in Chinese)
- [12] 张晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 109-117.
- Zhang C, Cai Z Y, Huang Y H, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 109-116. (in Chinese)
- (本文编辑: 苏泽云)



(上接第 1443 页)

- [15] Wang Y C, Jing H W, Su H J, et al. Effect of a fault fracture zone on the stability of tunnel-surrounding rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(6): 04016135.
- [16] Liang J W, Xu A Q, Ba Z N, et al. Shaking table test and numerical simulation on ultra-large diameter shield tunnel passing through soft-hard stratum[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 147: 106790.
- [17] 刘云, 赖杰, 辛建平, 等. 穿越断层隧道地震响应规律动力对比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4693-4702.
- Liu Y, Lai J, Xin J P, et al. Comparison test of dynamic response characteristics of the tunnels through fault [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4693-4702. (in Chinese)
- [18] 刘礼标, 王永甫, 刘方, 等. 断层走向对隧道地震响应影响的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 196-202.
- Liu L B, Wang Y F, Liu F, et al. Shaking table model tests on the influence of fault strike on the seismic responses of tunnels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21): 196-202. (in Chinese)
- [19] Li R H, Zhao X, Bilotta E, et al. Shaking table tests on deformation pattern and failure mechanism of fault-crossing tunnels in non-rupture scenario[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 180: 108621.
- [20] Chen Z Y, Huang P F, Chen W. Seismic response characteristics of multi-story subway station through shaking table test [J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(10): 2185-2200.
- [21] Wang Z Z, Jiang Y J, Zhu C A, et al. Shaking table tests of tunnel linings in progressive states of damage [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 109-117.