

马爱华, 王怀义, 何建村, 等. 高寒区长距离供水渠道冻胀破坏预警模型构建方法研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 71-76.
 MA Aihua, WANG Huaiyi, HE Jiancun, et al. Study on method of establishing frost-heaving damage early warning model for long distance water supply channel in alpine region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(5): 71-76.

高寒区长距离供水渠道冻胀破坏预警模型构建方法研究

马爱华^{1,2}, 王怀义^{1,2}, 何建村^{1,2}, 李卓³

(1. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 新疆水利水电材料工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对高寒区长距离供水渠道工程冻胀破坏预警问题, 提出了一种新的预警模型构建方法。通过分析渠道冻胀信息提取的主要影响因素之间的相互关系, 比对人工监测和仪器自动监测渠道冻胀信息的识别路径, 采用统一的量化识别尺度, 探索构建预警指标体系和判定阈值, 为渠道冻胀信息采集及预警预报系统软件研发创建数据模型。工程实践运用表明, 该方法在监测渠道断面冻胀信息时, 具有预警信息全数字化、预警过程全自动化、数据路径可追踪、数据来源可追溯、数据结果可反馈等优点, 可以有效提高冻胀破坏预警预报的精准度, 为高寒区供水渠道风险识别与渠道全寿命期有关安全评价提供有效的手段。

关键词: 高寒区; 供水渠道; 冻胀; 量化识别; 预警指标; 阈值

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)05-0071-06



Study on method of establishing frost-heaving damage early warning model for long distance water supply channel in alpine region

MA Aihua^{1,2}, WANG Huaiyi^{1,2}, HE Jiancun^{1,2}, LI Zhuo³

(1. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Material Engineering Technology Research Center, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the early-warning of the frost-heaving damage of the long distance water supply channel in alpine region, a new method for establishing the early-warning model is proposed herein. Through analyzing the correlations among the main factors extracted from the channel frost-heaving information, comparing the recognition paths of the frost-heaving information from manual monitoring and automatic monitoring and exploring the constructions of both the early-warning index system and the judging threshold with unified the quantified recognition scale, a data model is built up for the development of the frost-heaving information acquisition and the software for the early-warning and forecasting system. The relevant engineering practice shows that this method has the merits of full digitalization of the early-warning information, the complete automation of the early-warning process,

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405104)

作者简介: 马爱华(1976—), 男, 高级工程师, 注册土木(岩土)工程师, 学士, 主要从事岩土工程与水利水电工程勘察、设计与研究工作。
 E-mail: 386252935@qq.com

通信作者: 王怀义(1973—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程勘察、设计与研究工作。E-mail: 510995732@qq.com

the traceability of data path, the traceability of data source and the feedback-ability of the data result, thus can not only effectively enhance the accuracy of the early-warning forecast, but can also provide an effective means to both the risk identification and the related safety assessment of the full life of the water supply channel in alpine region.

Keywords: high cold region; water supply channel; frost-heave; quantified recognize; early warning index; threshold

0 引言

土的冻胀是由于土体温度降至起始冻结温度时,土体部分水开始发生相变、结晶、膨胀,在水势温度梯度作用下土体中未冻结的水分向冻结缘迁移、聚集,并冻结膨胀^[1]。自然状况下地基土、土工构筑物本身土质、水文及冻结条件的不均一性,是导致建筑物的不均匀冻胀变形的必要条件,是造成冻土区建筑物破坏的主要原因^[2]。冻胀是冻土冻融作用的力学表现之一,影响土的物理力学性质,土的冻胀破坏给水利工程造成巨大的损失,尤其在高寒区的恶劣工作条件下,渠道冻胀破坏给长距离跨区域安全供水的正常运营,带来了很大隐患,一旦工程失事会产生巨大的社会影响。冻胀破坏的监测对于分析其变化规律,渠道整体稳定性评价、预警预报,防灾减灾有着重要意义。关于冻胀信息室内或野外监测的技术方面,科研人员做了很多探索和研究,张熙胤等^[3]研究了冻土中水的形态、能态及其表征参数测试技术。王永涛等^[4]利用图像技术在试验室对土的冻胀变形等过程实时采集和定量分析研究。李顺群等^[5]结合冻土工程项目研制了具有温度场测试、三维应力和三维应变测试功能的试验室测试系统,并取得了指导实际应用的重要成果。汪恩良等^[6]利用常规冻胀监测试验仪器对低液限粘土的灌区进行了野外监测。张玉清等^[7]采用锚杆拉力计、结合全站仪、南方灵锐S82GPS系统对河道护坡进行了冻胀野外监测。吴艳等^[8]探讨了岩土渠道冻胀融沉量的监测方法,研制了岩土冻胀融沉监测仪器。同时,随着技术的发展,耐低温传感器在冻土测量方面的应用^[9-10],时域反射法(TDR)^[11-12]、量热法^[13]、核磁共振法(NMR)^[14-15]和超声法^[16]等冻土未冻含水量测量技术的应用,为冻胀信息监测提供了更加全面的技术手段,这些研究都凸显了一定技术优势和相对局限性,对于冻胀破坏预警指标和量化阈值等方面研究更是鲜有报道。因此,本项目团队充分吸收了前人的研究成果,在高寒区渠道上建立冻胀监测系统,深入研究土-水-热-力参数对冻胀的影响规律,量化识别各参数的影响程度,初步构建了高寒区长距离渠道工程冻胀

破坏预警模型,量化了相应预警阈值,本文通过介绍高寒区长距离供水渠道的冻胀破坏预警指标体系和预警阈值的构建方法,可为渠道冻胀信息采集及预警系统计算机软件开发创建了基本的数据模型,对同类工程防灾减灾,提供科学的参考。

1 高寒区长距离供水渠道冻胀特征

1.1 空间环境特征

渠道的空间环境特征是渠道冻胀产生的自然环境条件总称,包括地质条件、气象条件、人类活动影响等。粘性土、粉砂、砂砾石等多种典型岩土类型构成某北疆高寒区长距离供水工程复杂的地质条件。场区的气象条件是典型的欧亚大陆腹地高纬度温带大陆性寒冷气候,具有冬寒夏热、降水少、蒸发大、昼夜温差大等特点。渠道修建、输水运营、工程周边的农业灌溉等动态的人类工程活动影响其原有空间环境特征变化。渠道工程基础和环境土处于冻结状态持续时间小于1年的季节冻土中,性质变化较大、冻土空间环境变化较大、冻土现象强烈发育、含冰特征为少冰冻土,弱冻胀、冻胀、强冻胀、特强冻胀等各种冻胀性土层无规律的广泛分布,坚硬冻土、塑性冻土、松散冻土在渠线空间上呈区域块状分布。尤其是严寒冬季渠道输水过流的复杂工况下,渠道的温度场、渗流场、应力场等特征参数发生较大变化,急剧改变了原有土-水-热的平衡,给冻胀产生和发展提供了适宜的空间环境条件。

1.2 物理表象特征

北疆某供水工程属典型高寒区长距离供水工程,已运行近二十年,通过现场多次实地调研,其渠道普遍存在冻胀破坏现象,破坏程度的大小不一,主要表象特征:①混凝土衬砌剥落及酥松、②鼓胀及裂缝[见图1(a)]、③隆起架空、④错位坍塌、⑤整体上抬、⑥滑坡[见图1(b)]。在局部或整体渠坡渠边上存在一种或多种破坏形态,这些破坏形态必然引起渠床的力学性质劣化,不当运行可能会诱发更大规模灾害。

2 影响渠道冻胀信息提取的主要因素

土体中水、热交换与变化是冻胀产生的物质基

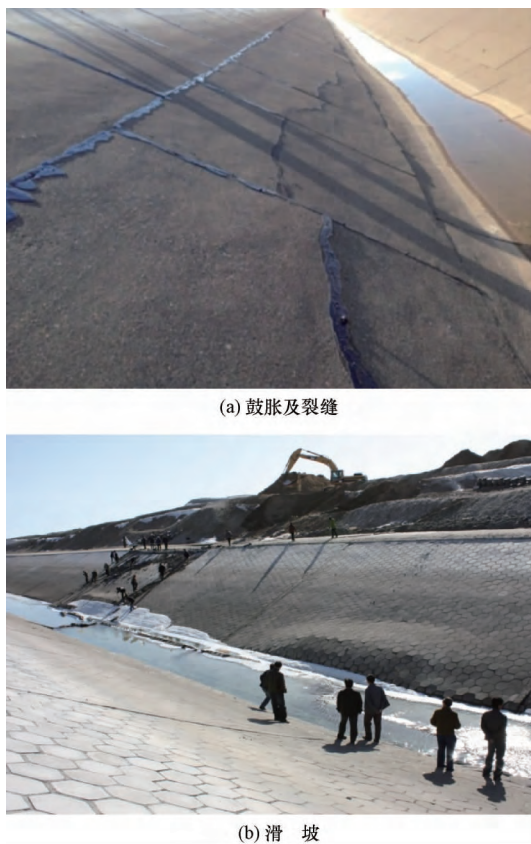


图1 北疆某供水渠道冻胀破坏特征

础,张国军等^[17]研究分析了土质、土体密度、冻土深度、基土水分、地下水位、气温、地温等因素与衬砌渠道冻胀破坏的初步关系,阐述了土、水、温基本信息是影响冻胀信息提取的主要因素,这些数据信息是构成冻胀破坏预警指标的最底层数据。

土是渠道基础的基本骨架,也是影响冻胀信息提取的最重要因素,不同类型的岩土细观结构参数、宏观物理力学热学参数也各有差别。合理匹配初始宏观与细观参数的一致性,为预警模型提供初始信息,对于整个冻胀信息提取和判别起到至关重要的作用。本次研究在前期课题研究的基础上,初步选定黏土、粉土及砂土三类典型岩土作为预警系统的基本数据类型。

水是影响冻胀信息提取的最复杂因素,其广泛赋存于岩土体孔隙之中,岩土体内部的孔隙水、毛细水是产生宏观冻胀的介质。运营渠道的水位水量工况受到工程调度影响较大,与渠道结构构造形式一起共同控制和影响渠道岩土体的导水性和富水性特征,直接改变渠道结构和环境土体内部孔隙水、毛细水的分布状态。土体中水分的存在和流动状态是影响土体物理力学性质的关键因素,土体中水的特征参数是热力参数变动的基础。

温度是渠道岩土体产生冻胀的必要条件,也是影响冻胀信息提取的决定性因素,它是土体中热力参数的直接指标之一,准确测量土体急剧温变情况与水分特征参数变化之间的相互数量关系需要可靠的测试方法,其测试手段在极端负温气候条件下的稳定性制约了冻胀信息的判断与预警。

3 基于关系冻胀数据的破坏预警模型构建及预警阈值确定

本文提出一种基于关系数据样本集提取识别渠道冻胀信息以及冻胀破坏预警模型构建的方法,该方法采用人工监测和仪器自动监测获取信息样本数据,冻胀信息提取路径与预警模型建立采用统一的量化尺度。其关键核心流程为:三级识别→二层判别→四序预警→二类警报,最终做出工程的冻胀预警。冻胀信息提取的具体流程如图2所示。为了简化识别与预警模型,在进行冻胀信息提取过程中设置如下条件:(1)对某一具体选定断面多点冻胀信息的识别,多断面跨区域的冻胀预警综合判断不在本研究范畴;(2)冻胀信息判别的阈值为确定值,根据各个测点土的类型选定不同的参数;(3)断面结构形式如坡比、结构层的尺寸均为确定值;(4)忽略混凝土衬砌层冻胀影响。运用理论和实践相结合的原则,将土、水、温的监测数据成果,进行理论计算与分析研究,模拟出符合真实情况的冻胀模型,准确地提供预报预警信息。

3.1 冻胀信息数据获取

多源数据样本获取的路径方法构造了冻胀信息数据库,时间序列变化前提下的冻胀信息是冻胀破坏预警指标体系的基本数据系列。笔者团队在项目工程研究中搭建了无安全监测设施(人工监测)和有安全监测设施(自动监测仪器监测)双源数据采集通道,为整个预警模型构建基本数据样本。自动监测仪器监测数据精度高、硬件成本相对较高,能够快速获取监测信息,时效性好。传统的人工监测作为自动监测的补充校验,具有机动、灵活、交互性强的特点,是整个系统中不可缺少的数据来源。

自动监测仪器的布设,充分考虑了渠道的断面形式及空间环境特点,各物理、力学、热学传感器,均在前期试验中做了校核性试验,灵敏度、精确度和可靠度都能满足监测数据的精度,及时获取关键信息,同时在复杂的监测环境下满足不间断工作要求。项目主要采用以下监测仪器:型号TDC220D含水率仪,使用温度范围为 $-10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,含水率测量精度优于

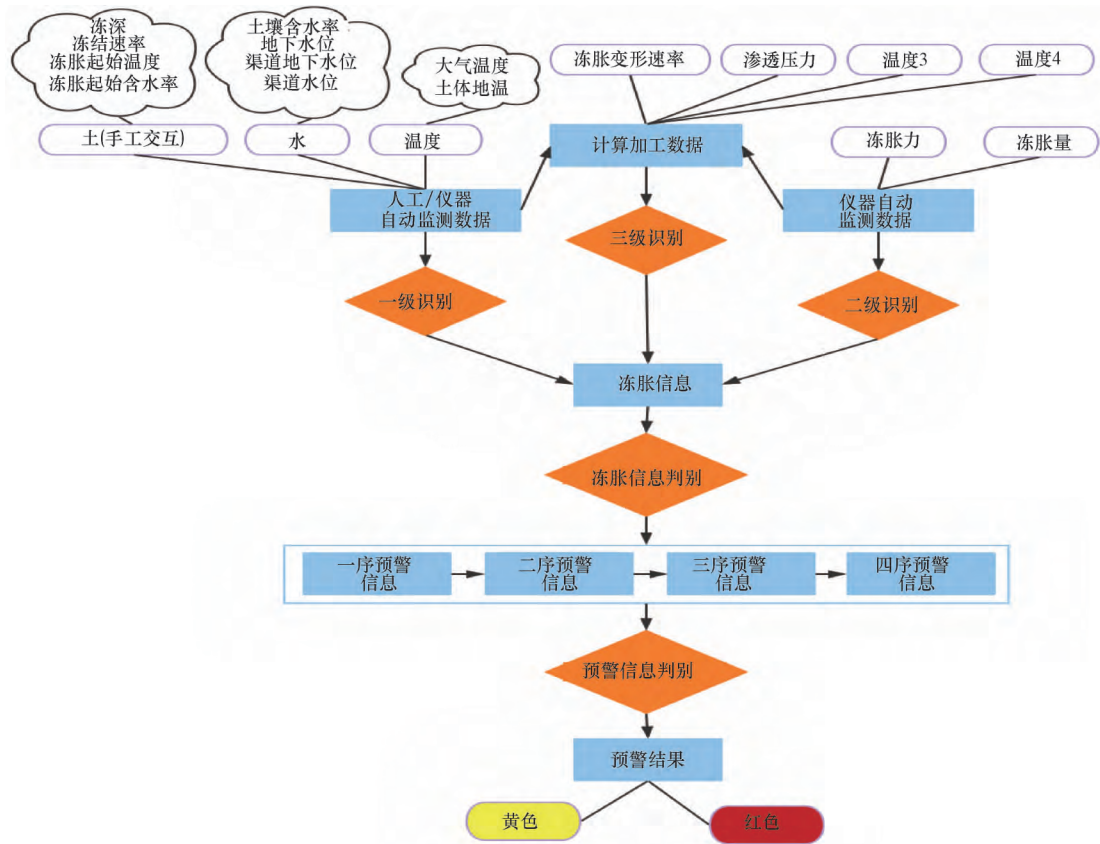


图2 冻胀信息提取流程

1%; RT-1 型电阻温度计, 测温范围-40~80 ℃, 精度±0.3 ℃, 耐水压>1 MPa; VWP-G 型水位计, 测量范围 0~20 m, 测量精度<0.1%F. S, 测量时自动进行温度修正和气压补偿; VWP 型振弦式渗压计, 测量范围 0~350 kPa, 测量精度 0.1%~0.5%F. S; 监测土体冻胀力的 VWE 型振弦式土压力计, 测量范围 0~1000 kPa, 测量精度 0.1%~0.5%F. S; 监测土体冻胀变形的 VWD-200C 型振弦式土体位移计, 测量范围 0~200 mm, 测量精度 0.1%~0.5%F. S, 灵敏度<0.08 mm。为了实现对监测数据的自动采集, 安装了 MCU-32 型分布式模块化自动测量单元, 可自动测量各类传感器的频率、电压、电流、电阻、电容、格雷码、开关量、脉冲量、数字量等测量数据。这些仪器设备都具有防水、防雷、抗电磁干扰等能力, 采集周期设定方便, 自身存储功能强大, 适应岩土工程气候环境变化并能正常工作。仪器设备当前数据的查看、设定采用公共移动网络(GPRS/CDMA)进行传输, 可提取至本地数据库中。

人工监测的时间、频次, 根据工程运营调度安排及监测计划进行。人工监测主要采用设备有 RT-1 型电阻温度计、VWP-G 型水位计(技术参数与上相

同), 同时采用 VW-102 A 振弦读数仪作为人工读数仪表, 测温范围-40~80 ℃, 温度最小读数±0.1 ℃, 频率测量范围 400~6 000 Hz, 频率最小读数±0.1 Hz。人工监测条件采集的温度和水位数据是冻胀信息数据库重要数据样本。

3.2 冻胀指标识别

冻结深度、冻胀力、冻胀量等土的冻胀指标的计算与应用, 在《水工建筑物抗冰冻设计规范》(GB/T 50662—2011)^[18]、《渠系工程抗冻胀设计规范》(SL 23—2006)^[19]中有全面的理论分析和计算。为了便于更加直观地进行冻胀信息的判别, 采用冻胀信息识别分级方法, 将渠道土、水、热、力参数数据样本进行分级识别。人工监测数据、既能人工监测又能仪器自动监测的数据列为一级识别指标; 自动监测的数据列为二级识别指标; 相互关系计算数据为三级识别指标(见图2)。一级识别指标包括: 土(冻深、冻结速冻、冻胀起始温度、冻胀起始含水率)、水(土壤含水率、地下水位、渠道地下水位、渠道水位)、温度(温度1——外界大气温度、温度2——土体地温)。二级识别指标包括: 冻胀力、冻胀量。三级识别指标包括: 冻胀变形速率、渗透压力、温度(温

表 1 冻胀指标逻辑判据

逻辑判断项目	阈值	True	False
温度 1, 日大气最低温度/℃	-2.0	≤	>
温度 2, 土体温度/℃	-1.0	≤	>
温度 3, 连续 Dd 天日大气最低温度平均值/℃	冻结起始温度	≤	>
温度 4, 连续 Dd 土体温度天平均值/℃	冻结起始温度	≤	>
冻结速率/mm · d ⁻¹	临界速率	≥	<
含水率/%	起始冻胀含水率	≥	<
冻胀量/cm	1, 3.5	≥3.5	1 ≤ p < 3.5
冻胀力/kPa	20, 50	≥50	20 ≤ p < 50
渗透压力/m	0.5, 0.9	≥0.9	0.5 ≤ p < 0.9

度 3——日大气最低温度连续 Dd 天平均值、温度 4——土体温度连续 Dd 天平均值)。

3.3 冻胀指标阈值确定

根据《水工建筑物抗冰冻设计规范》(GB/T 50662—2011)^[18]、《渠系工程抗冻胀设计规范》(SL 23—2006)^[19]等相关规范和前人的研究成果,结合本项目的研究分析,选取了温度 1——外界大气温度、温度 2——土体地温、温度 3——日大气最低温度连续 Dd 天平均值、温度 4——土体温度连续 Dd 天平均值、冻结速率、含水率、冻胀量、冻胀力、渗透压力等 9 个技术参数综合构建冻胀预警的指标体系,并对其进行相应的逻辑判断,判断结果为预警指标提供样本参数,其阈值的选取是根据测试点位土的类型选定,在系统中人工设定。冻胀指标的逻辑判据如表 1 所列。

3.4 预警指标影响排序

土的冻胀量、冻胀力最能直观反应冻胀破坏的特征,温度(温度 1——外界大气温度、温度 2——土体地温、温度 3——连续 Dd 天日大气最低温度平均值、温度 4——连续 Dd 天土体温度平均值)和地下水的信息可间接反应存在潜在冻胀破坏的特征。冻胀指标逻辑判断结果是预警指标的样本库,预警指标的判断流程根据预警信息的优先级先后顺序进行。冻胀量逻辑参数优于冻胀力逻辑参数,冻胀力逻辑参数优于温度逻辑值 AND 地下水位逻辑值计算参数。预警指标先后序列如表 2 所列。

表 2 预警指标序列

预警信息序列	冻胀信息逻辑值
1 序预警指标	冻胀量. 逻辑值
2 序预警指标	冻胀力. 逻辑值
3 序预警指标	(温度 3. 逻辑值 or 温度 4. 逻辑值) AND 地下水位. 逻辑值
4 序预警指标	(温度 1. 逻辑值 or 温度 2. 逻辑值) AND 地下水位. 逻辑值

3.5 预警等级判断

预警指标体系的建立,解决了单一冻胀信息的特征样本难以建立准确的预警结果、存在多解性等问题,而多维度冻胀信息逻辑判断构成的预警指标体系,提高了预警可靠度。本体系在消除了渠道周围环境复杂,减少仪器工作干扰,减轻人工监测缺陷的信息处理流程上,增加冗余,预警信息经排序后,再次进行顺序逻辑判断,可实现对全部冻胀信息数据的识别和判断,并按先后顺序,满足逻辑判据即提取出预警识别信息,可在程序设计上避免了漏判、误判的可能。预警指标逻辑判据如表 3 所列。

表 3 预警指标逻辑判据

预警信息序列 预警信息逻辑	FALSE(黄色)	TRUE(红色)
1 序预警指标	冻胀量. False	冻胀量. True
2 序预警指标	冻胀力. False	冻胀力. True
3 序预警指标	温度 3. True AND 地下水位. True	温度 4. True AND 地下水位. True
4 序预警指标	温度 1. True AND 地下水位. True	温度 2. True AND 地下水位. True

经过上述一系列数据处理后获得预警结果,预警结果红色提示为危险状态,预警结果黄色提示为警戒状态,为工程运营调度、渠道稳定性评价和工程险情预警预报提供及时准确的技术支持。

4 应用实例

本模型构建方法已应用在某高寒区长距离供水工程预警预报系统的一个子系统开发中,软件集成系统研发完成,并在工程上部署使用。通过项目的建成,形成冻胀破坏预警管理子平台,实现了冻胀信息实时采集、实时上传、智能分析及远程报警,现场监测设备或人工监测仪器采集到的冻胀信息数据通过数据采集网关传输至云平台,手机 APP 或计算机浏览器通过子系统的远程管理软件在云平台获取、分析计算、

存储冻胀数据信息。各相关人员可在统一的时间空间基准上进行查询、分析和统计等需求应用。这一子系统提高了渠道冻胀破坏预警的能力,为决策部门提供了可靠、适用、及时的信息服务,做到了监测断面冻胀信息全数字化、预警过程全自动化、数据路径可追踪、数据来源可追溯、数据结果可反馈。

随着课题研究的不断拓展与深入,量化识别的冻胀信息广泛应用于更多方面,对冻胀信息数据的深度挖掘与二次开发,可满足后期研究与应用需要。联合使用识别信息数据,充分利用上述子系统前后处理的数据,能为高寒区供水渠道风险识别与其他指标体系安全监测提供信息数据转换接口,也为渠道全寿命期有关安全评价提供更全面的评价数据样本。

5 结 语

(1) 本文提出一种基于关系数据样本集的渠道冻胀信息量化识别方法,采用人工监测和自动监测情况下,提取冻胀信息路径与预警指标采用统一的量化尺度。

(2) 结合高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术研究项目,基于本文所述的构建方法,为高寒区长距离供水渠道冻胀破坏预警系统计算机软件研发创建了基本的预警数据模型。

(3) 通过实现长距离供水工程渠道冻胀信息的量化并进行综合预警,在渠道监测、稳定性评价、预警预报及防灾减灾中有着重要的应用前景。

参考文献:

[1] 郭利娜. 冻土理论研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 145-154.
 [2] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143.
 [3] 张熙胤, 张明义, 路建国, 等. 土体冻融特征研究现状与展望

[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1644-1657.
 [4] 王永涛, 王大雁, 马巍, 等. 基于数字图像技术的土冻胀试验系统研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1047-1056.
 [5] 李顺群, 张少峰, 柴寿喜, 等. 具有多物理场测试功能的冻土模型试验系统[J]. 工业建筑, 2017, 47(9): 81-89.
 [6] 汪恩良, 刘风波, 刘兴超, 等. 考虑温控模式对非饱和土冻结规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1247-1258.
 [7] 张玉清, 宓永宁, 赵荣飞, 等. 铰接式混凝土砌块护坡冻胀监测技术[J]. 施工技术, 2011, 40(11): 40-42.
 [8] 吴艳, 周富强, 戴灿伟, 等. 岩土渠道冻胀融沉量监测方法研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(6): 8-10.
 [9] 薛珂, 温智, 张明礼, 等. 基于 pF meter 传感器的土体冻融过程中基质势与未冻水量关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 155-160.
 [10] 温智, 马巍, 薛珂, 等. 基于 pF meter 基质势传感器的冻土水分迁移研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 370-375.
 [11] 王绍令, 杨梅学, 小池俊雄, 等. 时域反射仪在监测青藏高原活动层水分变化过程中的应用[J]. 冰川冻土, 2000(1): 78-84.
 [12] 王国尚, 金会军, 林清. 时域反射仪在寒区冻融土参数测试中的应用[J]. 冰川冻土, 1998(1): 89-93.
 [13] 冷毅飞, 张喜发, 杨风学, 等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3758-3764.
 [14] 李东阳, 刘波, 刘念, 等. 缩短核磁共振测定冻土未冻水含量实验时间的方法[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1502-1507.
 [15] 田慧会, 韦昌富. 基于核磁共振技术的土体吸附水含量测试与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(3): 295-305.
 [16] 盛煜, 彭万巍, 福田正己. 超声波技术在冻土物性测试中的应用探讨[J]. 冰川冻土, 2001(4): 432-435.
 [17] 张国军, 陆立国. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 105-108.
 [18] 中华人民共和国水利部. 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, 2011.
 [19] 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: 水利电力出版社, 2006.

(责任编辑 陈小敏)