

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.003

环青海湖铁路路基水热迁移与稳定性研究

唐先习¹, 栾恩铭¹, 董添春², 李文龙¹, 夏迪¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国铁路青藏集团有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要: 为探究环青海湖铁路路基病害发生的机理, 通过在湖边及铁路路基两处附近安置不同深度的水热传感器, 实时对临湖区域的土体水热迁移情况进行监测, 基于监测数据, 应用 COMSOL Multiphysics 有限元平台对铁路路基内部水压力分布及稳定性进行模拟分析。结果表明: 浅层土体温度变化响应较快, 土体越深其温度变化越慢; 冻结出现时间随土体深度的增加而延后; 路基下部土体一直保持负压状态, 土体孔隙体积占比随外界水源的作用增大; 青海湖水中含有大量的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 利用注盐法注入 NaCl 后在水分的作用下阳离子 Na^+ 会与 CO_3^{2-} 反应生成 Na_2CO_3 , 致使 NaCl 注入过量后土体盐胀反应加剧。路基失稳破坏发生从路轨面开始, 路轨面从中间开裂并沿着两侧坡面剪切滑移, 在路轨面下沉压力作用下土颗粒向下滑移填充底部土层孔隙, 孔隙填满后多余的自由状态土颗粒会从坡角处被挤出。故应充分考虑提高路基土抗剪强度。

关键词: 青海湖地区; 冻胀病害; 现场试验; 水热迁移

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0015-08

Water and Heat Migration and Stability Analysis of Subgrade Railway Around the Qinghai Lake

TANG Xianxi¹, LUAN Enming¹, DONG Tianchun², LI Wenlong¹, XIA Di¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: The intensification of global warming and humidification has exacerbated frost heave damage in seasonally frozen climate environments, which has significant impacts on the operational safety of the Qinghai Tibet Railway around the Qinghai Lake region. To explore the mechanism of disease occurrence, water and heat sensors of different depths were installed near the lake and railway subgrade to detect the real-time water and heat migration of the soil in the lake area. Based on monitoring data, the COMSOL Multiphysics finite element platform is applied to simulate and analyze the water pressure distribution and stability inside the railway subgrade. The research results are as follows. Shallow soil responds quickly to temperature changes, while the deeper the soil, the slower the temperature changes; The freezing time is delayed due to the increase in soil depth. The lower soil of the roadbed always maintains a negative pressure state, and the proportion of soil pore volume increases with the action of external water sources; Due to the high content of CO_3^{2-} and HCO_3^- in Qinghai Lake water, the salt injection method, after injecting NaCl, will react with cationic Na^+ and CO_3^{2-} to form Na_2CO_3 under the action of water, resulting in the intensification of soil salt swelling reaction after excessive NaCl injection. The stability simulation results indicate that the instability and failure of the roadbed begin from the track surface, which cracks in the middle and slides along the slopes on both sides. Under the squeezing effect, soil particles slide downwards to fill the bottom soil layer pores. After the pores are filled, excess free state soil particles will be squeezed out from the slope corners.

Keywords: Qinghai Lake region; frost heave disease; on site testing; hydrothermal migration

收稿日期: 2024-08-26

修稿日期: 2024-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(11962016); 中国铁路青藏集团有限公司科技研究开发计划项目(QZ2022-G07)

作者简介: 唐先习(1972—), 男, 副教授, 主要从事路基冻害机理及控制措施方面的研究工作。E-mail: 695913483@qq.com

通讯作者: 栾恩铭(1998—), 男, 硕士, 研究方向为路基冻害机理及控制措施。E-mail: emluan98@163.com

季节冻土指地壳表层冬季冻结、夏季全部融化的岩土层,主要分布于我国西北、华北及东北地区。作为新世纪四大工程之一的青藏铁路,其大部分线路位于季节性冻土区,对于其环青海湖区段的线路,面临的自然问题独特性在于临线的青海湖,近年来全球气候暖湿化影响下青海湖地区降雨量增大致使湖水位逐年升高^[1-3],临湖区域地下水位也随之上升。另外较为特殊的一点是青海湖属于咸水湖,根据已有研究得出的“盐随水走”的结论^[4-5],湖水内所含的盐分也会随地下水迁移渗入湖岸内部改变环湖地带水盐分布状态,直接现象就是导致临湖区域内部毛细水上升高度增加,进而带动盐分和水分共同向上不断迁移积聚,在温度高低交替变化时产生盐冻胀与融陷危害,对铁路路基及沿线建筑物安全及稳定性影响极大。在此环境作用下亦可引发环湖周围土体盐渍化,腐蚀周围植被并改变周围生物性状,长此以往会使环湖地区荒漠化等一系列地质环境问题加剧^[6]。

众多专家学者对于季冻区铁路路基冻融问题提出了大量方案与见解。从路基冻胀产生的机理角度,吴道勇等^[7]采用封闭系统研究硫酸盐渍土变形特性,结果表明,当盐渍土含盐量较低时冻胀和融沉是土体变形的主要因素。Shefique 等^[8]通过对间歇式供水体系中定向冷冻,探究冷冻过程中体系内各项离子的重新分布,证明了土中盐分在冻结过程中向暖端未冻水迁移的规律。包卫星等^[9]通过室内冻融循环试验研究发现,土壤的盐-冻胀变形受含盐量的影响较大,含盐量越大,盐-冻胀变形越大。肖泽岸等^[10]通过单向冻结试验,表明盐分的存在会减弱土体在冻结过程中的水分迁移并抑制土体的冻胀变形;干湿循环是土体发生盐胀破坏的主要原因,其远比冻结过程中的盐分迁移来的剧烈。Zhang 等^[11]在无压补水条件下进行单向冻结试验,发现水分不断向冻结锋面迁移,冻结锋面位置水分、盐分出现峰值。Xu 等^[12]、Zhou 等^[13]采用封闭系统的单向冻结试验研究不同冻结温度梯度下水盐迁移规律,结果表明,温度梯度为外部诱导因素,冷端温度越低冻结深度越大,并且冻结区水分盐分均增大。Liu 等^[14]对具有不同盐含量的饱和黏土进行了单向开放系统单向冻结试验,通过核磁共振弛豫测试法捕捉水分子的迁移情况。陈伟志等^[15]开展了温度循环下压实粗粒盐渍土水盐迁移试验研究,结果表明,每次温度循环后温度波幅值由土层浅表向深层土体衰减传递。张建勋等^[16]针对开放体系和封闭体系进行了单向冻结条件下的水分迁移试验,结果发现

无论是封闭体系还是开放体系,土柱都会在冻结区中形成两处水分聚集区。考虑其他影响因素的研究,路建国等^[17]通过室内试验建立降温过程盐渍土中水-热-盐相互作用计算模型。认为高盐分土样在正温区间盐分结晶质量分数较大,低盐分土样在温度区间 $-4^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 时盐分运移明显。

上述众多研究中可以看出,由于季节冻土区气候独特的变化特点,域内土体水热分布状态极易受其影响而发生非线性运动。大多关于季节冻土区土体的水热迁移研究都是室内试验,通过人为设定试验条件来揭示迁移规律,鲜有关于实际自然状态下的水热迁移规律的研究。故此,本文拟通过在原位点设置气象站并埋置温湿盐传感器,对自然状态下环湖带实时监测,分析水热迁移宏微观规律,揭示青藏铁路环青海湖段路基内部水热迁移规律,并应用 COMSOL Multiphysics 有限元分析平台基于迁移规律探究路基变形特征,以期后续路基冻胀控制研究提供参考。

1 监测点及试验设备概述

1.1 测点布置

经前期现场调研和资料整理发现,青藏铁路环青海湖区段 K222 段路基地下水受临近的青海湖湖水上涨影响较大,在降雨过后可观察到地表坑洼处存在明显积水。此区段受季节性气候变化影响明显,导致冻结破坏现象也较为严重,全年冻结期长达 200 d,最大冻深超 1.55 m。故在此区段内设点埋置土壤温湿传感器。传感器布设共计埋置 2 组,一组距离路基中心水平距离 10 m,定名为点位 A;另一组为离湖面距离 5 m,距离路基中心水平距离 20 m 处埋置,定名为点位 B。湖水边界至路轨居中点布设 PC-4 型式气象站对自然环境实时监测,在气象站接口处连接 TDR-3A 土壤温湿度传感器测量土壤温湿度,所有数据由 TRM-ZS1 气象生态环境检测仪对数据记录,试验设备如图 1 所示,设备测量范围与精度等数据详见表 1。



图 1 试验设备与采集系统

表 1 TDR-3A 土壤温湿度传感器测量范围与精度

测量要素	土体温度/°C	土体湿度/%
测量范围	-40~80	0~100
测量精度	0.1	0.1
误差	±0.2	±2

1.2 测点岩性

整体布设工作于 2023 年 7 月完成,经过 1 个月的设备调试,2023 年 8 月监测系统正式运行。监测数据从 2023 年 8 月开始至 2024 年 6 月止,时间历时 11 个月。两监测点位土体构造由表层至基层依次为混以碎石夹砂类土、黄色黏性土和黑色黏性土、弱风化泥岩。现场通过钻探取得表层无扰动原状土样进行室内土工试验,测得表层土样的液限和塑限分别为 24.1% 和 16%,天然稠度 1.73,有机质含量 14.1%,天然含水率 10.1%。土体易溶盐含量见表 2。

表 2 易溶盐离子含量表 单位:mg/kg

Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
47	352	740	79	99	56	227	108

1.3 测点气象

试验监测点大体位于青海省海北藏族自治州刚察县西南方向的青藏铁路刚察至鸟岛段 K222+500 处,位于东经 99°47',北纬 37°11',地处青海湖盆地西北部,海拔 3 196 m,气候条件属于高原大陆性气候。每年高温时段多集中于 7 月份,平均气温约 18℃,低温多集中于 1 月份,平均气温约 -19℃,年平均高温为 8℃,平均低温 -4℃,极端高温 21℃,极端低温 -25℃,平均风速 3.6 m/s,年均日照时长 2 908.8 h。该位置受亚洲季风裹挟的潮湿气流影响,每年雨季多集中在 7 月—9 月,占全年降雨量的 85% 以上;秋冬季冷干的西风导致降雨量较少甚至无降水。综合来看年降水量约 499.4 mm,蒸发量约 1546.4 mm。

2 水热迁移情况及路基冻胀原因分析

2.1 土体热迁移情况分析

图 2 展示了距离路基中心较近的点位 A 和距离湖面近但距离路基中心较远的点位 B 的温度变化曲线。从宏观来看,两处点位整体温度变化趋势相同,大部分时间温度最高值都出现在距地表 60 cm 深处,而最低值出现在距地表 20 cm 深处;监测点严寒期从当年 12 月份开始,至次年 3 月份春季到

来结束,由曲线可以看出这段时间两处土体温度处于负温区段,此期间不同深度测点中距地表 60 cm 深处温度最高;A、B 两点处最高温相近,最低温离湖面较近的 B 点较 A 点高 1.4℃。

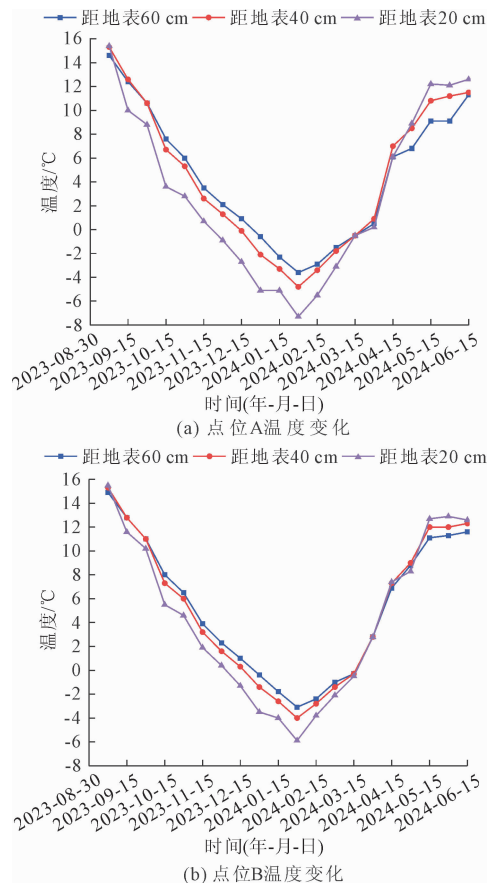


图 2 土体内部温度迁移情况

根据曲线走势可以发现,距离湖面较近的 B 点不同深度的温度曲线互相差异较小,A 点在 2023 年 10 月至次年 2 月这段时间,距地表 20 cm 处温度低于 B 点,且与距地表 40 cm 和 60 cm 两处差异较大。分析认为:① 这段时间外界环境温度的变化相同,且都处于降水较少甚至无降水状态,两点处水源补给都来源于降雪及地下水上升作用,降雪堆积后在冻结期融化量极少甚至不融化,主要的差异在于地下水的入渗量的不同。离湖较近的 B 点地下水入渗量较大,而且青海湖水中 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 含量较高^[18],两种离子被水分运移到土体内部后,在水分作用下与土中的阳离子 Na⁺ 和 K⁺ 发生化学反应生成 Na₂CO₃ 时会放出热量,同时 HCO₃⁻ 与水经酸碱反应生成碳酸和水,在酸碱平衡前放热反应会持续发生,导致离湖较近的 B 点不同深度温度差异性较小;离路基近的 A 点受到青海湖引起的地下水入渗

量较小,此反应所需的水分来源不足,故而冻结期距地表 20 cm 的浅表层温度低于 B 点的 20 cm 处。②不同深度的土体导热系数与热扩散系数也影响着温度分布,当土体含水率不高时,导热系数随着含水率的增高而增大^[19],近湖点 B 含水率高于 A 点,相应地导热系数较高,热扩散系数也随之增高,土体颗粒对温度的响应更灵敏,故其温度分布较均匀。在温度下降阶段,A、B 两点曲线都表现为土层越浅温度变化越快,说明温度变化存在的土层有深度滞后效应,土层越深,温度变化越慢。

2.2 水分变化与迁移情况分析

图 3 展示的是 2023 年 8 月至 2024 年 6 月共计 11 个月份的水分变化总体情况。

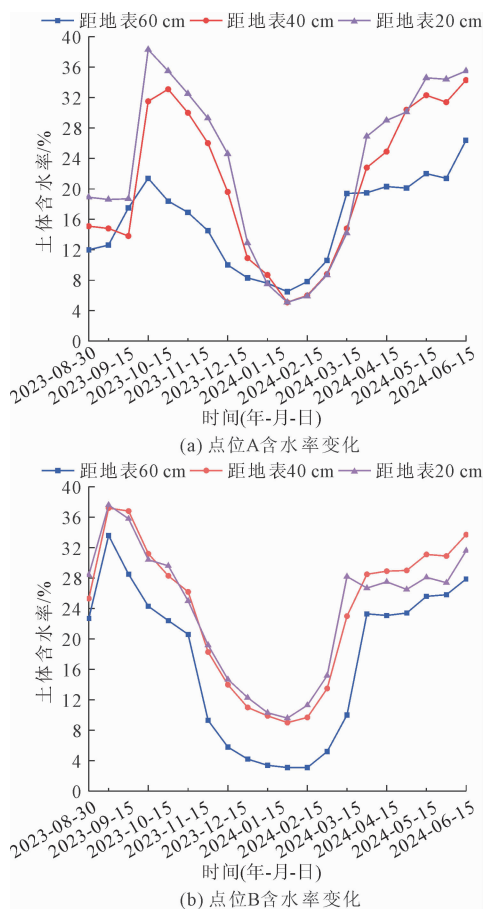


图 3 土体水分迁移情况

离湖面较近的土体水分含量在 9 月份为全年最大值,湿度达到 37.2%;1 月—2 月份为全年最小值,湿度降低至 3.1%。离路基较近的土体 10 月份达到湿度最大值 31.5%,1 月—2 月份达到湿度最小值为 5.1%。因为图 3 展示的是整体水分含量变化,所以由之前的气象资料调研可知,这种趋势的表现受外部降水影响较大。无论是离湖近还是离路基近,整

体水分含量的变化趋势是相同的,从 10 月份开始降低,1 月—2 月份为全年最低值并且保持较为稳定,从 3 月份开始逐月升高直至 9 月—10 月份达到峰值。

上述分析水文的变化与当地降水情况联系密切,雨季从 3 月份开始出现,9 月份降水达到峰值,10 月份开始减弱其后甚至无降水,在进入 12 月份严寒期后,土体内部水分冻结并在 3 月份春季前维持冻结状态,即自由水含量降低进而表现为含水量数值的滑落。在温度最高的 8 月—9 月份,离湖较近的 A 点表层水分受蒸发作用流失较快,从 12 月份开始到次年 3 月份的冻结期期间,土体表层降雪堆积可以起到水源补给的作用,而中深部的水分冻结成冰,冰晶与土颗粒相互联结,阻碍了地下水中的未冻水的流动,土体中深部得不到未冻水源补给;另外,环湖地带土体主要为黏土,其透水性较差,故而当外界水源补给量较小时,水分很难穿透土层进行运移。离湖面较远的 A 点距离路基较近,由于列车通行荷载振动及施工作业影响,表层砂土颗粒之间排列较松散,在外界水源作用后无法快速渗流到中部黏土层中,出现表层含水率较高现象。路基填料土透水性较强,在外界降水后水分可以很快入渗至路基底部,在渗透压差驱动下水分从路基底部流入监测点处深部,表现为深部含水率高于中部含水率。当处于无外界降水的冻结期时,表层土体受低温影响其所含水分冻结,当温度波动时极少量的积雪融化入渗,使得其含水率高于深部含水率。深部未冻结的自由水含量降低后无法得到外界水源补充,而中部土体因为黏土透水性较差,故而总体曲线趋势并无明显骤变。

3 路基稳定性模拟分析

应用 COMSOL Multiphysics 有限元分析平台,以原位实测数据所得出的水热变化规律作为边界条件,针对当年 8 月份至次年 8 月份铁路路基内部水压力变化及稳定性进行模拟,探究路基在水热变化作用下发生滑移失稳时的特征点位移突变量。

3.1 模型的建立

路基计算模型如图 4、图 5,划分细度为极细化,土体为服从 Mohr-Coulomb 强度准则与非关联流动法则的理想弹塑性材料。左右边界为限制沿边界水平位移的辊轴约束,底边为固定约束。模型初始条件考虑到路基内原有水分含量,但此处路基及附近土体初始天然含水率较低,定义初始含水率为 0 以保证结果分析时的准确性。

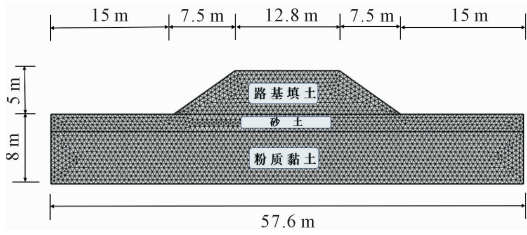


图4 路基水压力计算模型及网格划分

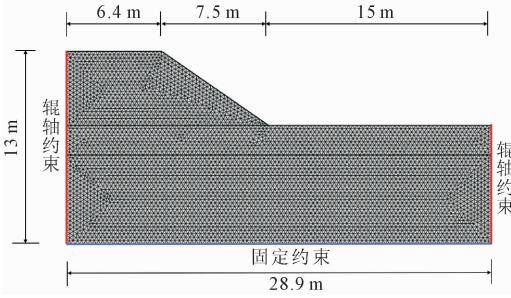


图5 路基稳定性计算模型及网格划分

3.2 水热与渗流场控制方程

3.2.1 未冻水含量控制方程

由于土体自身性质,其内部水分在达到冻结温度时不会全部冻结,而是以冻结水和未冻水的形式共同存在。在此引入未冻水体积分数^[20]计算公式:

$$\theta = \left[1 + 3\lambda \left(\frac{T_m}{\Delta T} \right)^{1/3} \cdot \ln \left(\frac{1 + e^{-\frac{\Delta T}{W}}}{2} \right) \right] \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta T}{W}}) \quad (1)$$

$$\theta_1 = e^{-\frac{\Delta T}{W}} \quad (2)$$

$$\theta_2 = 3\lambda \left(\frac{T_m}{\Delta T} \right)^{1/3} \cdot \ln \left(\frac{1 + e^{-\frac{\Delta T}{W}}}{2} \right) \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta T}{W}}) \quad (3)$$

式中: θ_1 为未冻水含量; θ_2 为冻结水含量; T_m 为常压下自由水冻结温度; $\Delta T = T_m - T_f$, T_f 为土体冻结温度。

式(1)中相关参数 λ 、 W 计算方程如下:

$$\lambda = - \left[\frac{A}{6\pi\rho_w\psi} \right] \quad (4)$$

$$W = 2 \frac{\gamma_{iw} T_m}{\rho_i \psi} \quad (5)$$

式中: A 为 Hamaker 常量; ψ 为各土层相变潜热; γ_{iw} 为水冰分界面自由能; ρ_w 、 ρ_i 分别为水密度、冰密度。

3.2.2 温度场方程

由图2可以看出环境温度变化整体呈正弦函数曲线形式,不同深度土层曲线相应的相位、幅值近乎相同。拟合后的环境温度边界条件为:

$$T = 5.67 + 8.13 \sin \left(\pi \cdot \frac{t + 5.13}{10.58} \right) \quad (6)$$

式中: T 为环境温度; t 为时间,d。

针对环湖地带内部温度变化的特殊性,基于热传导条件,考虑环境温度为变量的控制方程为:

$$\left(C_v - \frac{\partial S_i}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \psi \rho_i S_i = \nabla \varepsilon \cdot \nabla T \quad (7)$$

式中: C_v 为各土层体积热容; ε 为各土层导热系数^[21]; S_i 为孔隙冰饱和度。

3.2.3 渗流场控制方程

考虑到自然状态下的土体结构内部随着降雨、冻融等外界环境的变化,时刻处于动态饱和、动态均匀的非线性状态。基于此原因,针对内部渗流的研究采用考虑未冻水迁移和温度变化修正的 Richards 定律^[22],建立以温度为变量的渗流方程如下:

$$\frac{\rho_w (1 - S_i) + \rho_i S_i}{\rho_w} + \frac{(\rho_i - \rho_w)}{\rho_w} \frac{\partial S_i}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (-v_w) \quad (8)$$

式中: v_w 为未冻水迁移速度。

S_i 、 v_w 的计算公式^[23]为:

$$S_i = \begin{cases} 1 - [1 - (T - T_f)]^\alpha & (T \leq T_f) \\ 0 & (T > T_f) \end{cases} \quad (9)$$

$$v_w = -kT \quad (10)$$

式中: k 为非饱和土渗透系数, m^2/s , 计算方程如下:

$$k = k_s S_l^l (1 - (1 - S_l^m)^m)^2 \quad (11)$$

式中: k_s 为饱和土渗透系数; l 、 m 为相关计算参数。

模拟应用 COMSOL Multiphysics 有限元平台中的偏微分方程模块(PDE)进行运算,将式(7)、式(8)代入平台提供的基础方程中,得到研究方程为:

$$\left(C_v - \frac{\partial S_i}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \varepsilon \cdot \nabla T = \psi \rho_i S_i \quad (12)$$

$$\left(\frac{(\rho_i - \rho_w)}{\rho_w} \frac{\partial S_i}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (-v_w) = \frac{-\rho_w (1 - S_i) + \rho_i S_i}{\rho_w} \quad (13)$$

3.2.4 边坡稳定性方程

目前关于边坡的稳定性计算方法主要有强度折减法、极限平衡法等。其中强度折减法考虑了地质非均质性、复杂边界条件和材料强度损耗,另外还可以弥补极限平衡法计算繁琐且不能考虑失稳过程中无法考虑应力应变的缺陷^[24-25],故以有限元强度折减法作为稳定系数研究方法。

经前人的研究证实边坡是受剪破坏的结构,稳定性主要取决于材料抗剪强度^[26],故不考虑抗拉强度对稳定性的影响,折减方程如下:

$$c' = \frac{c}{F} \quad (14)$$

$$\tan\varphi' = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (15)$$

式中: c' 为折减后的黏聚力; c 为土体黏聚力; F 为折减系数; φ' 为折减后的内摩擦角。

非饱和状态下水压力持水模型取自文献[27]。路基填土及其底部基层土体构造较为复杂,模型将其划分为路基填料圆砾土、砂土、粉质黏土三层,计算参数见表3、表4。

表3 方程计算参数

水冻结温度 $T_f/^\circ\text{C}$	常压下水冻结 温度 $T_m/^\circ\text{C}$	Hamaker 常量 A/J	水冰界面自由能 $\gamma_{iw}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-2})$	水密度 ρ_w $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	冰密度 ρ_i $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	α	l	m
-5	0	-1.705×10^{-20}	40.9×10^{-3}	1000	917	-5	0.5	0.25

表4 不同土质土体计算参数表

土层	相变潜热 ψ $/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	体积热容 C_v $/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	饱和渗透系数 k_s $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	密度 ρ $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数 ε $/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	杨氏模量 /MPa	泊松比	黏聚力 c /kPa	内摩擦角/ $^\circ$
圆砾土	334.56 ^[22]	2284	1×10^{-4}	2263	3.08	50	0.40	13.5	31.6
砂土	334.56	2073	1×10^{-6}	1784	2.56	40	0.33	17.6	22.7
黏土	334.56	1986	1×10^{-9}	1600	2.97	20	0.30	42.7	18.6

注:液态水相变潜热 $2.416 \times 10^6 \text{ J/kg}$,冰相变潜热 $3.345 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。

3.3 模拟结果与分析

因为土体含水率随时间的变化反映出了外界水源的作用,故此模拟所涉及的外界水源不再额外进行设定。首先计算不同时间节点路基内孔隙水压力

分布情况,根据孔隙水压力计算等效塑性应变,根据等效塑性应变云图表示边坡稳定性状况。路基内孔隙水压力分布云图如图6所示,模拟详情为2023年8月份至2024年8月份铁路路基内水压力变化。

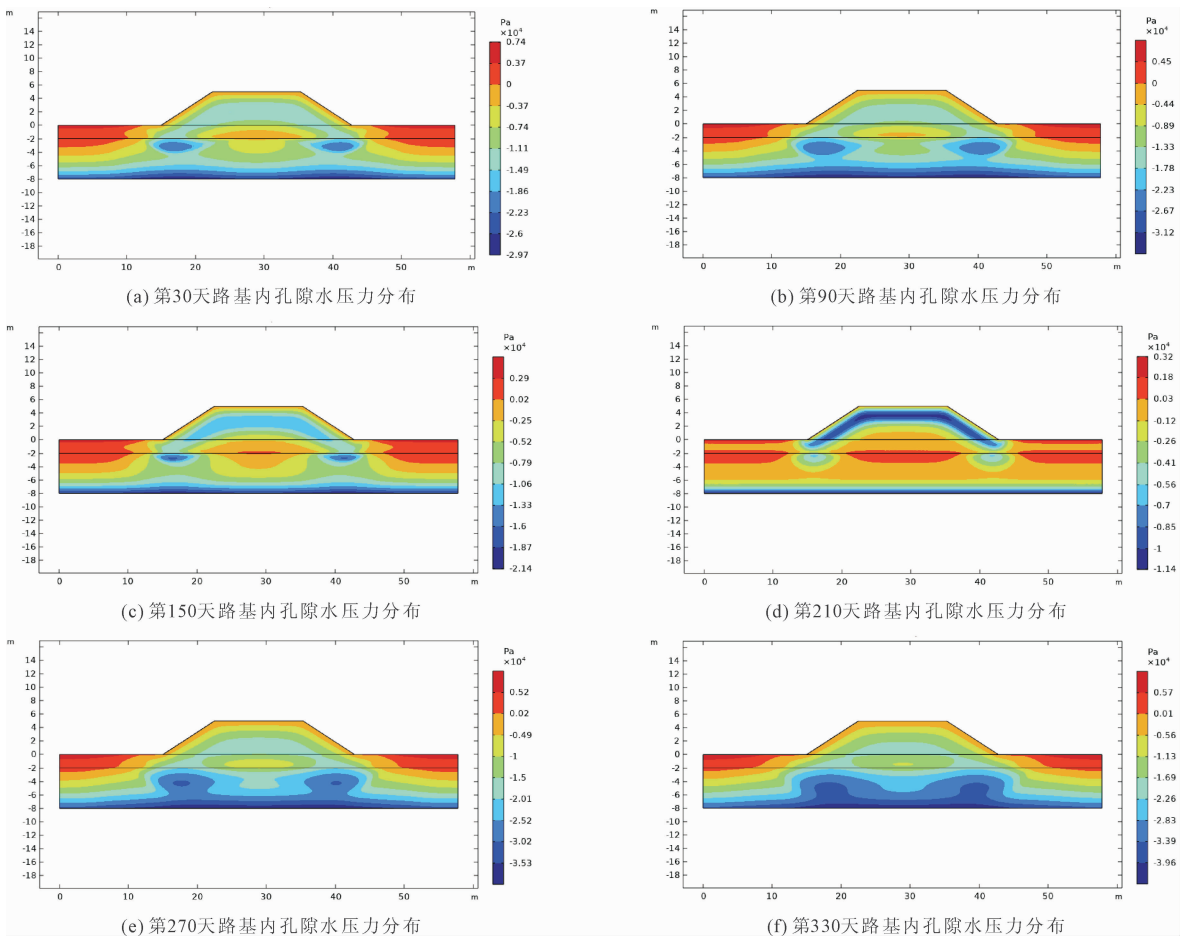


图6 路基内水压力分布云图

由图6可知,路基浅层土体及边坡表层土体易达到饱水状态,中层土体在整个时间跨度内都处于临近饱水状态,底层土体则时刻处于负压吸水状态。由分布云图可以看出,对于路基本础构造而言,中层土体及浅层土体直接受降水及堆积雪融化的影响,表层在第30天前后即8—9月份受降水影响土体含水量较高。由于中层土体主要为粉质黏土,透水性差且易于与水分结合黏结成块,水分很难从此处渗透至底层;而地下水的入渗量随时间持续加大导致毛细作用强烈,故而底层土体一直维持在负压状态。铁路路基不断地承受列车通行带来的振动冲击,导致路基土体松散,无列车通行时土颗粒由于自重向下沉积排列,但由于之前的振动导致斜坡有部分土体振出,很难达到初始时刻的排列状态,进而改变了土体结构,致使水分无规则流动,这种较大的孔隙水压力会破坏土体原有的抗剪强度,若一直保持而未降低会导致路基塌陷滑移。

针对上述病害可能发生的位置及发生时间,基于强度折减法的边坡稳定性模拟计算结果见图7。

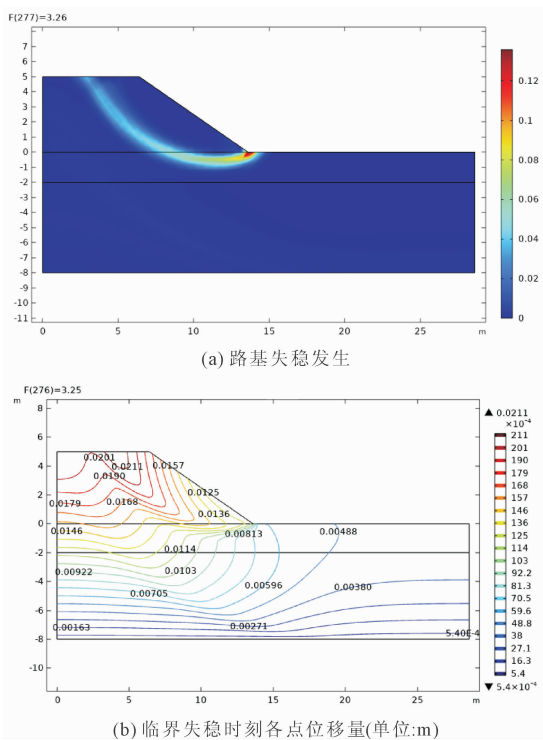


图7 路基失稳前后状态图

由图7(b)可以看出,失稳破坏发生前的临界状态下,滑移主要发生在路基轨道面,并且发生趋势是沿坡面向下运动。相对应的坡角处位移量并不明显。这种现象表明铁路路基由于承受列车的荷载和冲击振动,路轨面记忆极易产生下沉现象,由图6

的水压力分布图可知,路基下部的土层几乎一直处于非饱水负压状态,孔隙占比量高,当时上部轨道受压力作用下沉时,土颗粒被挤压迁移至下部土层填充其孔隙,带动路基坡面向横向垮塌。根据图7(b)所示位移的迁移路径,路轨面的下沉形式是路轨从中间开裂,左右两侧分别沿着相对应的坡面斜向下沉,当路基下部土体孔隙被几乎完全填充后,开始从路基坡脚处横向挤压致使坡脚处发生剪切滑动,土体从坡角处被挤出。

4 结论

通过在现场原位点布设水热监测系统,对湖面及路基两处开展实时监测。基于监测数据,应用COMSOL Multiphysics有限元平台模拟路基内部水压力分布及失稳破坏现象。结论如下:

(1) 环青海湖地带土壤水分迁移受外界水源影响较大,受温度梯度影响较小;底部土层几乎一直维持着负压状态,甚至随外界水源的补充有增大迹象,这种现象导致的土体孔隙比增大极易引起土体收缩,在列车反复荷载作用下容易发生塌陷,对铁路安全造成巨大危害。

(2) 无论是离湖近还是离路基近,土体内部温度分布都保持随深度增加温度越高的现象。结合水分含量变化来看,表明冻结期表层土体冻结出现较早,深层土体冻结出现较晚。在采取冻胀防治措施时,应当聚焦于表层土体冻胀控制,对于深层土体可以采取布设热棒、改变土体构造等方式减缓冻结速率。

(3) 目前路基冻胀防止中采用注盐法多为NaCl的注入,由于青海湖水质中含有较多的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- ,还存在由于地下水入渗带来的水分,注入NaCl后在水分的作用下阳离子 Na^+ 会与 CO_3^{2-} 反应生成 Na_2CO_3 ,致使NaCl注入过量后土体盐胀反应加剧,所以在进行注盐法防治时应当注意所注入盐分的粒子构成,并提前计算出注入量及点位,避免离子之间发生混合反应产生新化合物致使盐胀情况变复杂。

(4) 由失稳破坏模拟可知,保证路基稳定性措施应当考虑提高路基填土抗剪强度,防止路基出现中间开裂沿两侧坡面剪切滑移发生;试验及模拟是以我国西北季冻区铁路路基稳定性提升为基础,其他相似地区的气候条件和行车状况可能略有不同,但主要问题的发生原因基本一致,在不考虑地下水上升的情况下,本文研究内容及结论对相似地区路基冻胀及稳定性治理具有参考意义。

参考文献:

- [1] 祝存兄,史飞飞,乔 斌,等. 基于高分 1 号卫星数据的青海扩张及湖滨砂地变化特征分析 [J]. 干旱区研究,2022,39(4):1076-1089.
- [2] 周 丹,张 娟,罗 静,等. 青海湖水位变化成因分析及其未来趋势预估研究[J]. 生态环境学报,2021,30(7):1482-1491.
- [3] Fan Chenyu, Song Chunqiao, Li Wenkai, et al. What drives the rapid water-level recovery of the largest lake (Qinghai Lake) of China over the past half century [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,593:125921.
- [4] Luo Chongliang, Yu Yunyan, Zhang Jing, et al. Thermal-water-salt coupling process of unsaturated saline soil under unidirectional freezing [J]. *Journal of Mountain Science*, 2023,20(2):557-569.
- [5] Bear J, Gilman A. Migration of salts in the unsaturated zone caused by heating [J]. *Transport in Porous Media*, 1995,19(2):139-156.
- [6] Brouckov A. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000,11(2):153-160.
- [7] 吴道勇,赖远明,马勤国,等. 季节冻土区水盐迁移及土体变形特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(2):465-476.
- [8] Shefique U, Anwar J, Ali Munawar M, et al. Chemistry of ice: Migration of ions and gases by directional freezing of water [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2016,9(S1):47-53.
- [9] 包卫星,张莎莎. 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):734-739.
- [10] 肖泽岸,赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩土力学与工程学报,2018,37(S1):3738-3746.
- [11] Zhang Jing, Lai Yuanming, Li Jifeng, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,146:118868.
- [12] Xu Jian, Lan Wei, Ren Chang, et al. Modeling of coupled transfer of water, heat and solute in saline loess considering sodium sulfate crystallization[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021,189:103335.
- [13] Zhou Lizeng, Zhou Fengxi, Ying Sai, et al. Study on water and salt migration and deformation properties of unsaturated saline soil under a temperature gradient considering salt adsorption: Numerical simulation and experimental verification [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021,134:104094.
- [14] Liu Jianpeng, Yang Ping, Yang Zhaohui. Water and salt migration mechanisms of saturated chloride clay during freeze-thaw in an open system [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021,186:103277.
- [15] 陈伟志,张莎莎,李安洪. 温度循环下压实粗粒盐渍土水盐迁移与变形响应[J]. 岩土力学,2022,43(2):74-85.
- [16] 张建勋,毛雪松,刘飞飞,等. 单向冻结条件下非饱和土水分迁移规律研究[J]. 冰川冻土,2023,45(3):1080-1091.
- [17] 路建国,万旭升,刘 力,等. 降温过程硫酸钠盐渍土水-热-盐相互作用过程 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(2):126-134.
- [18] 战 楠,黄 毅,饶 竹,等. 双电极法现场快速检测地下水和湖水中碳酸氢根和碳酸根[J]. 分析化学,2016,44(3):355-360.
- [19] 刘凤云,罗怀瑞,万旭升,等. 冻结过程土体导热系数影响因素及预测模型研究[J]. 冰川冻土,2024,46(1):221-234.
- [20] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等. 低温饱和和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩土力学与工程学报,2016,35(10):2001-2012.
- [21] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [22] 王自力,李金峰,滕继东,等. 基于未冻水膜压力判据的冻土水热力耦合冻胀模型研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(5):997-1007.
- [23] Tice A R, Anderson D M, Banin A. The prediction of unfrozen water contents in frozen soils from liquid limit determinations [C]//Symposium on Frost Action on Roads, Paris, 1973, State of Washington: Transportation Research Board, 1973:329-344.
- [24] 白清波,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(2):132-136.
- [25] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学与工程学报,2014,33(2):243-256.
- [26] 靳晓光,陈力华,张永兴. 考虑张拉及剪切破坏的强度折减法在岩土工程中的应用[J]. 重庆大学学报,2013,36(8):97-104.
- [27] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(5):892-898.