

文章编号:1673-9469(2026)02-0028-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.004

冻融循环条件下覆盖型边坡破坏形式机理分析 及冻融界面与滑动面位置关系研究

裴子豪¹, 谢勇², 沙琳川², 李彦伟³, 袁维^{4*}

(1. 中国铁路北京局集团有限公司 邯郸工务段, 河北 邯郸 056001; 2. 贵州省质安交通工程监控检测中心
有限责任公司, 贵州 贵阳 550014; 3. 河北交通投资集团有限公司, 河北 石家庄 050011;
4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为缓解高海拔冻土边坡病害对交通工程的威胁, 揭示高海拔冻土边坡在冻融循环作用下的失稳机理, 以川西地区6个覆盖型边坡为研究对象, 基于水热耦合理论, 利用COMSOL Multiphysics数值模拟计算软件, 对这6个边坡进行考虑冬季昼夜温差的冻融循环模拟, 分析边坡水热场时空变化规律, 总结边坡破坏形式, 找出边坡冻融界面与滑动面的位置关系。结果表明: 冻融循环主要影响冻土边坡浅层土体; 边坡经过数次冻融循环后, 土体在某一深度范围内的含水率高于其他深度, 坡体内形成聚水区; 所研究的6个覆盖型边坡共总结出5种破坏形式, 分别是边坡浅层融土滑塌、边坡浅层融土蠕移、边坡浅层融土挤胀、凸形坡浅层融土滑塌、凹形坡浅层融土滑塌; 在冻融循环作用下, 覆盖型边坡冻融界面位置要深于滑动面。

关键词: 冻土边坡; 水热耦合模型; 冻融界面; 边坡滑动面; COMSOL Multiphysics

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Failure Mechanism Analysis of Covered Slopes Under Freeze-Thaw Cycles and Relationship Between Freeze-Thaw Interface and Sliding Surface

PEI Zihao¹, XIE Yong², SHA Linchuan², LI Yanwei³, YUAN Wei^{4*}

(1. Handan Gongwuduan, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056001, China;
2. Guizhou Province Quality and Safety Traffic Engineering Monitoring and Inspection Center Co., Ltd., Guiyang,
Guizhou 550014, China; 3. Hebei Transportation Investment Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050011, China;
4. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: To mitigate the threat of permafrost slope hazards to transportation engineering in high-altitude regions, and reveal the slope instability mechanisms under freeze-thaw cycles, six covered slopes in western Sichuan are taken as research objects. Based on the hydrothermal coupling theory, freeze-thaw cycle simulation considering diurnal temperature variation in winter is carried out for the six slopes using COMSOL Multiphysics numerical simulation software, and the spatio-temporal variation of hydrothermal field is analyzed. The failure modes of slope are summarized, and the positional relationship between the freeze-thaw interface and the sliding surface is found. The results show that the freeze-thaw cycles mainly affect the soil in the shallow layer of frozen soil slopes. After the slopes are subjected to several freeze-thaw cycles, the moisture content of the soil in a certain depth range is higher than those in other depths, and a water-gathering zone is formed in the slope. Five kinds of slope failure modes are identified from the six covered slopes, which are slope shallow melt soil collapse, slope shallow melt soil creep, slope shallow melt soil extrusion, convex slope shallow melt soil collapse and concave slope shallow melt soil collapse. Under freeze-thaw cycles,

收稿日期:2024-05-14 修回日期:2024-06-06

基金项目:河北省自然科学基金优秀青年基金资助项目(E2021210041);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2024](一般145))

第一作者:裴子豪(2000—),男,河北邯郸人,硕士,助理工程师,从事岩土工程方面的研究。

*通信作者:袁维(1986—),男,湖南常宁人,博士,副教授,从事工程地质灾害安全防控方面的研究。

the freeze-thaw interface of covered slope is located deeper than the sliding surface.

Key words: frozen soil slope; hydrothermal coupling model; freeze-thaw interface; sliding surface; COMSOL Multiphysics

高海拔交通工程所在区域地质条件复杂,气候环境恶劣,冻融作用引发的边坡失稳问题已成为严峻挑战。冻融循环会显著改变土体结构及其物理力学性质,导致土地抗剪强度下降,严重威胁工程安全。目前,针对冻土边坡失稳破坏类型和冻融界面的研究已取得诸多进展。研究基于不同区域案例,将破坏类型划分为泥石流、滑塌、热融滑塌等多种形式,但由于地质与环境条件存在差异,其分类与机理尚未统一^[1-4]。与此同时,许多研究指出,春融期的破坏多集中在冻融界面附近^[5-8]。对此,学者从不同角度展开了深入研究:葛琪^[9]通过试验证实冻融界面为薄弱面;程永春等^[10]发现含水率与冻融次数会显著影响滑动面深度;杨让宏等^[11-12]分别探讨了冻融界面形态与强度参数变化对边坡稳定性的影响;王威等^[13-14]则从水分迁移与积聚的角度揭示了界面附近的失稳机制。

综上所述,冻融界面作为力学性质特殊的软弱带,对边坡稳定性影响重大,但实际滑动面与冻融界面的位置关系尚未完全明晰。因此,探究两者间的规律对灾害防治具有重要意义。本文以川西地区6个覆盖型边坡为研究对象,基于水热耦合理论,通过考虑昼夜温差的冻融循环数值模拟,分析边坡温度场与水分场的演变规律,总结其破坏形式并阐明机理,进而揭示冻融界面与潜在滑动面之间的位置关系。

1 冻融循环计算模型

为揭示冻融循环作用下覆盖型边坡的失稳机理,本节首先阐述本研究采用的数值建模理论体系。以川西地区6个覆盖型边坡为对象,基于水热耦合理论,利用COMSOL Multiphysics数值模拟软件,开展考虑冬季昼夜温差的瞬态冻融循环模拟。通过求解耦合的水-热控制方程,获取边坡内部的温度场与水分场的时空演化规律。在此基础上,依据土体强度参数与含水率的经验关系,将水热场结果导入力学模块,分析边坡的稳定性与破坏形式。以下将分别详述所依据的冻土水热耦合理论与固体力学理论。

1.1 冻土水热耦合理论

(1) 温度场控制方程

根据傅里叶定律,将相变潜热作为热源处理,

得到冻土热传导微分方程^[15],见式(1)。

$$\rho C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(\theta) \nabla^2 T + L \cdot \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ∇ 为微分算子,对于二维问题时, ∇ 设置为 $[\partial/\partial x, \partial/\partial y]$; T 为土体的瞬态温度,℃; t 为时间,s; θ 为体积含水率,%; θ_i 为孔隙冰体积含量; x, y 为水平和深度方向坐标,m; ρ 和 ρ_i 为土的密度和冰的密度,kg/m³; L 为相变潜热,取值为334.5 kJ/kg; $\lambda(\theta)$ 为导热系数,W/(m·℃); $C(\theta)$ 为体积热容,J/(kg·℃)。

(2) 水分场控制方程

非饱和冻土中的未冻水迁移微分方程为^[16]

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \nabla [D(\theta_u) \nabla \theta_u + k_g(\theta_u)] \quad (2)$$

式中: θ_u 为冻土中未冻水的体积含量; k_g 为重力加速度方向的非饱和土体渗透系数。冻土中水的扩散率计算式为^[16]

$$D(\theta_u) = \frac{k(\theta_u)}{c(\theta_u)} \cdot I \quad (3)$$

式中: $k(\theta_u)$ 为非饱和土的渗透率,m/s; $c(\theta_u)$ 为比水容量,1/m,由滞水模型确定^[17]; I 为阻抗因子^[18],表示孔隙冰对未冻水迁移的阻滞作用,由下式计算: $I = 10^{-10\theta_i}$ 。

(3) 水热耦合联系方程

在确定了冻土的温度场控制方程与水分场控制方程后,还需建立季节冻土水热耦合联系方程,引入固液比 $B_1(T)$ ^[16]对水热方程进行耦合, B_1 表示冻土中孔隙冰体积与未冻水体积之比,其表达式为

$$B_1 = \frac{\theta_i}{\theta_u} = \begin{cases} 1.1 \left(\frac{T}{T_f} \right)^B - 1 & (T < T_f) \\ 0 & (T \geq T_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_f 为土体冻结温度,℃; B 为常数与土类和含盐量有关,可按砂土0.61,粉土0.47,粘土0.56选取经验值;系数1.1为 ρ_w/ρ_i ,即水与冰的密度之比。

1.2 受水分场和温度场控制的固体力学理论

将水热耦合计算理论公式代入COMSOL Multiphysics软件进行瞬态计算,可以得到不同时间点土体受冻融循环影响后的水分分布与温度分布。再将土体含水率与黏聚力、内摩擦角的经验公式代入COMSOL Multiphysics软件中的固体力学模块进行稳态计算,可以得到边坡在受到冻融循环后

不同时间点的破坏形式,其经验公式见式(5)。

$$\begin{aligned} c &= f_1(\theta_u) \\ \varphi &= f_2(\theta_u) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: c 为土体的黏聚力,kPa; φ 为内摩擦角,(°); $f_1(\theta_u)$ 和 $f_2(\theta_u)$ 分别是由土体含水率控制与土体黏聚力、内摩擦角的关系式。

2 边坡冻融循环数值模拟

选取川西地区6个覆盖型边坡作为研究对象,编号为1#—6#。其中,1#边坡位于A地,2#—5#边坡位于B地,6#边坡位于C地。本文根据文献[16]中的冻土水热耦合方程,对边坡模型开展温度场与水分场的水热耦合瞬态数值模拟,再将模拟结果通过经验公式导入稳态固体力学模块中,完成冻融循环的数值模拟。

2.1 计算模型的建立

2.1.1 A地1#边坡

A地1#边坡所处区域海拔较高,地势平缓,自然山体坡度一般在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间,谷底处地面近乎水平。1#边坡二维模型高为448 m,长为2 237 m。对该模型进行网格划分后,共包含9 025个节点和10 288个单元。本构关系基于摩尔-库伦准则,二维边坡模型示意图如图1所示。

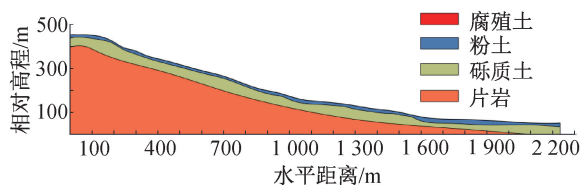


图1 1#边坡二维示意图

Fig. 1 Two-dimensional diagram of slope 1#

通过现场勘察和查阅相关资料,确定本次边坡冻融循环数值模拟分析所需的各岩土层物理力学参数,如表1所示。

表1 A地1#边坡岩土体参数表

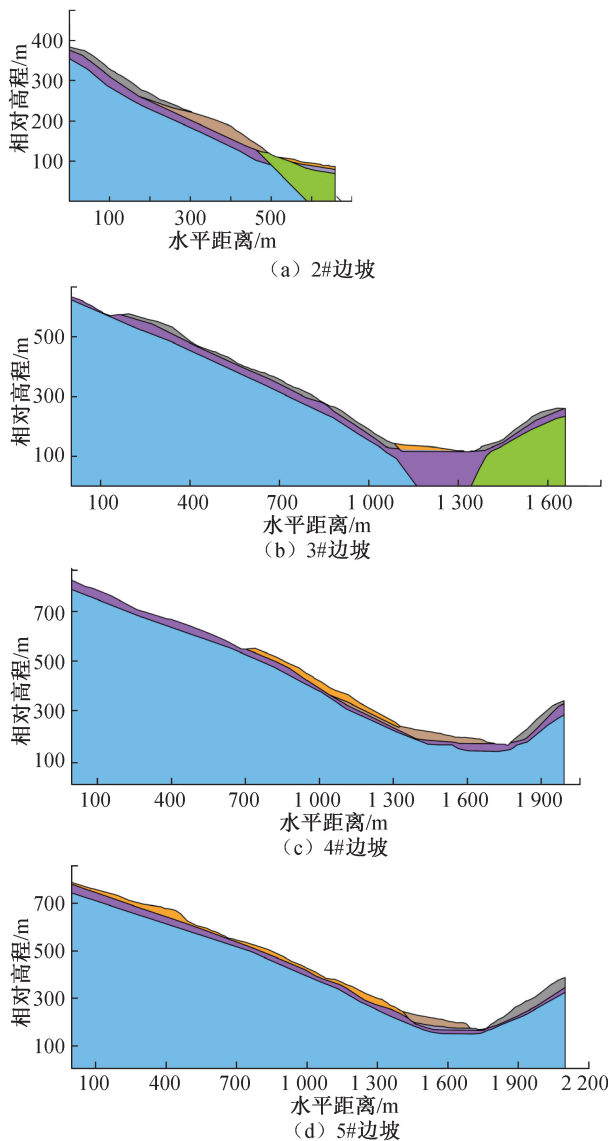
Tab. 1 Parameters of rock and soil mass for slope 1# at Ground A

岩土类型	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	泊松比	弹性模量 /kPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^\circ$)
腐殖土	15	22	0.28	20 000	22	25
粉土	17	20	0.24	25 000	27	33
砾质土	18	18	0.23	40 000	30	28
片岩	25	18	0.27	50 000	45	38

2.1.2 B地2#—5#边坡

2#—5#边坡位于B地同一工点,2#—5#边坡

的二维几何模型如图2所示。4个边坡的覆盖体均为坡残积细角砾土,本构关系均基于摩尔-库伦准则。各边坡的主要特征与模型参数如下:



注: 坡洪积细角砾土 残坡积细角砾土
冰水堆积物碎石土 冲洪积卵石土
绢云母板岩、千枚岩、杏仁状玄武岩
绢云母板岩夹变质砂岩(弱风化)
绢云母板岩夹变质砂岩(强风化)

图2 2#—5#边坡二维示意图

Fig. 2 Two-dimensional diagrams of slopes 2# to 5#

由图2(a)可见,2#边坡平均自然坡度为 24° ,坡脚局部陡至 35° 。覆盖层厚度约20~25 m,体积约 $104 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。建立的二维模型尺寸高为382 m、长为663 m,共划分6 046个节点和8 723个单元。

由图2(b)可见,3#边坡平均自然坡度为 27° ,坡脚局部陡至 35° ,坡顶至坡脚平面长约740 m。覆盖层厚度为3~35 m,体积约 $316 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。二维模型高为628 m、长为1 663 m,共划分11 238个节点和13 455个单元。

由图 2(c)可见,4#边坡平均自然坡度为 23°,坡脚局部陡至 34°,坡顶至坡脚平面长约 380 m。覆盖层厚度为 17~30 m,体积约 97×10⁴ m³。二维模型高为 821 m、长为 1 989 m,共划分 10 533 个节点和 12 390 个单元。

由图 2(d)可见,5#边坡平均自然坡度为 24°,坡顶至坡脚平面长约 550 m。覆盖层厚度为 20~35 m,体积约 286×10⁴ m³。二维模型尺寸为高 792 m、长 2 101 m,共划分 9 443 个节点和 11 206 个单元。

基于上述参数建立了各边坡的水热耦合数值模型,并用于后续的冻融循环瞬态模拟。通过现场勘察和查阅相关资料,确定本次数值分析所需的各岩土层物理力学参数,如表 2 所示。

2.1.3 C 地 6#边坡

C 地 6#边坡所处区域属高山原河谷地貌,地形起伏较大,地面绝对高程为 3 340~3 900 m,自然坡度为 36°~42°,覆盖第四系坡残积层中砾土,厚度为 8~18 m。6#边坡二维模型高为 409 m,长为 646 m,模型经过网格划分后包括 7 566 个节点和 9 239 个单元,本构关系基于摩尔-库伦准则。二维边坡模型示意图如图 3 所示,各岩土层物理力学参数,如表 3 所示。

2.2 模型边界条件

模型不考虑外部雨雪与水分蒸发等因素,因此将水分场中模型四周边界设置为零通量;温度场中设置模型两侧边界与底部边界为零通量,模型上边界采用 Dirichlet 温度边界条件。根据模型

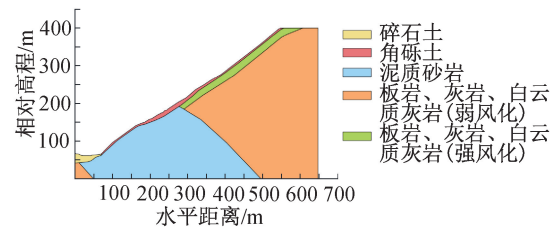


图 3 6#边坡二维示意图

Fig. 3 Two-dimensional diagram of slope 6#

所在地的气温情况,设置以 24 h 为周期的温度循环曲线。1#边坡工点处多年平均气温为 4.2 °C,冬季平均气温为 -3.7 °C,温度曲线: $T = 16\sin[(\pi/12)t] - 4$; 2#—5#边坡工点处多年平均气温为 6.6 °C,冬季平均气温为 -1.2 °C,温度曲线: $T = 8\sin[(\pi/12)t] + 3$; 6#边坡工点处多年平均气温为 7.6 °C,冬季平均气温为 -0.3 °C,温度曲线: $T = 8\sin[(\pi/12)t] - 1$ 。固体力学模块中底部边界设为固定约束,两侧边界为辊支撑(约束边界法向位移为 0),定义地表边界条件为自由边界。

2.3 经验公式的选取

在冻融循环过程中,冻土边坡弹性模量与泊松比变化幅度较小,对坡体稳定性影响不大^[19]。通过对模型进行预模拟确定受冻融循环影响导致含水率发生变化的地层,选取与该地层相似的土体,选用该土体黏聚力和内摩擦角与其含水率关系的经验公式进行数值模拟,见表 4。

上述经验公式均通过标准室内直剪试验获得,试验过程中严格控制土体含水率变化。由于

表 2 B 地 2#—5#边坡岩土体参数表

Tab. 2 Parameters of rock and soil mass for slopes 2# to 5# at Ground B

岩土类型	重度 /(kN·m ⁻³)	含水率 /%	泊松比	弹性模量 /kPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
弱风化绢云母板岩夹变质细粒石英杂砂岩	24.0	14	0.28	50 000	50	55
强风化绢云母板岩夹变质细粒石英杂砂岩	22.0	14	0.27	50 000	55	59
残坡积粗角砾土	20.5	17	0.25	35 000	34	35
坡洪积细角砾土	20.5	17	0.25	35 000	35	35
冲洪积卵石土	21.0	16	0.23	40 000	41	30
冰水堆积物碎石土	20.5	17	0.25	39 000	41	29
绢云母板岩、千枚岩、杏仁状玄武岩	25.0	14	0.27	52 000	50	57

表 3 C 地 6#边坡岩土体参数表

Tab. 3 Parameters of rock and soil mass for slope 6# at Ground C

岩土类型	重度 /(kN·m ⁻³)	含水率 /%	泊松比	弹性模量 /kPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
弱风化板岩灰岩白云质灰岩	25.0	14	0.28	55 000	45	55
强风化板岩灰岩白云质灰岩	23.0	16	0.27	50 000	51	59
碎石土	22.0	18	0.26	40 000	28	28
泥质砂岩	23.0	17	0.25	35 000	47	58
角砾土	20.5	18	0.25	35 000	31	34

表4 土体经验公式

Tab. 4 Empirical formulas of soil mass

岩土类型	经验公式	文献来源	
腐殖土	$c = 75.816 - 2.4583\omega$	$\varphi = 36.489 - 1.255\omega$	文献[20]
粉土	$c = 0.0021\omega^3 - 0.2112\omega^2 + 5.7385\omega - 20.538$	$\varphi = 99.573e^{-0.0742\omega}$	文献[21]
板岩	$c = -0.8206\omega^2 + 16.489\omega - 16.821$	$\varphi = -0.0143\omega^2 + 0.299\omega - 58.042$	文献[22]
角砾土	$c = -0.22\omega^2 + 4.64\omega + 0.17$	$\varphi = -0.35\omega + 31.15$	文献[23]
碎石土	$c = -0.15\omega^2 + 2.51\omega + 77.32$	$\varphi = -1.28\omega + 41.96$	文献[24]

注: ω 表示土体含水率,%; c 与 φ 分别代表土体的黏聚力,kPa和内摩擦角,(°)

这些经验公式对应的土体与边坡土体类型相同、参数相近,且黏聚力和内摩擦角仅由含水率控制,因此可以较好地适配本文的边坡工况。利用表4经验公式,将模型的水分场与温度场的计算结果耦合至COMSOL Multiphysics中自带的固体力学物理场,完成对1#—6#边坡的冻融循环模拟。

3 模拟结果与分析

3.1 边坡水热特征变化分析

利用COMSOL Multiphysics中系数型偏微分方程模块建立冻土边坡的水热耦合模型,按照对应边坡的温度曲线开展30次(720h)冻融循环瞬态模拟,得到水分场与温度场模型,观察6个覆盖型边坡的水分场与温度场,发现其变化规律相似。因此,以2#边坡为例,选取坡面中间位置一点作为特征点,并在该点沿坡面法线方向,每0.5m设置一个提取点,记录各提取点对应的温度与含水率,据此对冻融循环下边坡的温度场和水分场进行分析研究。

图4为不同深度下坡体温度变化曲线图,其中,以冻融循环的前48h为观测时间段,每6h进行一次坡体温度变化记录。在1~6h时间段,环境温度上升,土体温度升高,温度变化幅度由表面至深处逐渐减小。在6~18h时间段,环境温度逐渐下降。随着坡体深度的增加,土体温度先增大后减小,这是由于夜晚温度降低时,环境温度低于土体温度,热量由高温区向低温区传递需要时间。当坡体浅层温度降低时,坡体内部温度仍高于浅层温度,因此,土体温度随深度增加呈现先增加后减小的趋势。30~42h时间段与6~18h时间段土体温度变化规律类似。在18~30h时间段,环境温度由温度最低点逐渐上升。随着坡体深度的增加,土体温度先减小后增大。由于温度传递有滞后性,当环境温度升高至高于土体温度时,坡体浅层土体温度上升;而坡体内部还受到前几小时低

环境温度的影响。42~48h时间段与18~30h时间段土体温度变化规律类似。土体的温度曲线拐点在-2.25m深度附近,深度大于2.5m的土体相较于深度小于2.5m的土体温度变化幅度较小。因此,冻融循环对于坡体的浅层土体影响较大,对于深层土体影响较小。

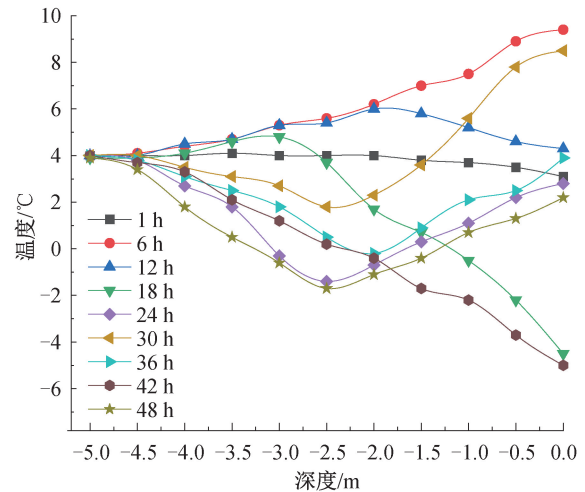


图4 不同深度下坡体温度变化图

Fig. 4 Temperature variation for slope mass at different depths

图5为不同冻融循环次数(1次、5次、10次、20次、30次)后坡体含水率在不同深度的分布图。通过分析可以发现,冻融循环作用导致土体含水率随深度的增加呈现先增加后减少的非线性分布特征。随着冻融循环次数的增加,浅层土体含水率整体呈上升趋势,但在冻融循环20次至冻融循环30次时,仅浅层特定深度区间(1~2m)的含水率持续增加,而其他深度区间的含水率则呈现下降趋势。这种现象的产生主要源于冻融循环过程中的水分迁移机制:当土体浅层受低温影响发生冻结时,冻结层下方的未冻结水分在温度梯度和孔隙压力作用下向低温区迁移。随着冻融循环次数的增加,这种水分迁移过程在1~2m深度区间

形成稳定的聚水区。具体而言,在 20~30 次冻融循环阶段,由于前期多次循环已在该深度区间形成相对稳定的水分富集带,后续冻融循环主要强化了这一区域的水分聚集效应,而其他深度区间则因水分持续向聚水区迁移而导致含水率降低。因此,随着冻融循环次数的增加,坡体内部水分聚集形成聚水区。

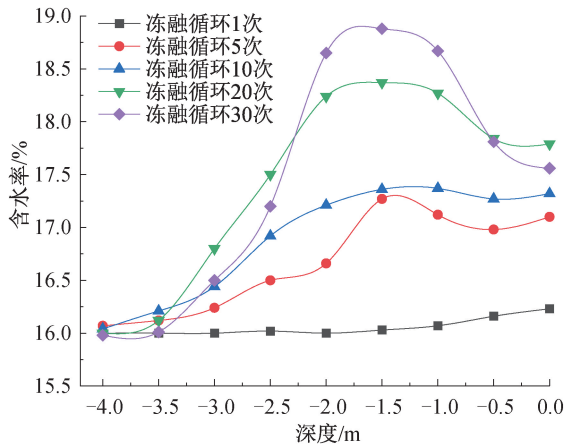


图 5 不同深度下坡体含水率变化图

Fig. 5 Moisture content change map for slope mass at different depths

3.2 边坡破坏形式划分与机理阐述

通过土体含水率与黏聚力、内摩擦角的经验公式,将模型的水分场与温度场继承至 COMSOL Multiphysics 中自带的固体力学物理场,完成 1#—6#边坡的冻融循环力学模拟。通过对冻融循环 30 次后边坡的温度场、水分场、位移场进行分析,将

15 处边坡破坏总结成为 5 种不同的边坡破坏形式:边坡浅层融土滑塌、边坡浅层融土蠕移、边坡浅层融土挤胀、凸形坡浅层融土滑塌、凹形坡浅层融土滑塌,1#—6#边坡的位移云图与破坏形式如图 6 所示。

图 6 总结 5 种破坏形式,根据 3.1 中对坡体温度场与水分场的分析得出:夜晚边坡上层土壤开始冻结时,冻结层与下部较高地温构成温度差,下部土中水分向上层低温处转移,产生水分重分布,即聚流现象,水分聚集在聚水区;白天温度上升,边坡冻土融化,土基重新湿润,融冻层含水率超过冻前原始含水率,黏聚力和内摩擦角随土体含水率的增加而减小,经过多次冻融循环后,边坡土体强度降低,稳定性降低。基于上述分析阐述以下 5 种破坏形式的机理:(1) 边坡浅层融土滑塌:较陡砾土边坡处于昼夜温差较大的环境下,融化后的土体发生滑塌;(2) 边坡浅层融土蠕移:较为平缓的砾土边坡,在冻融循环条件下并不会发生剧烈的破坏,由于坡度较缓,在重力的作用下,部分融化土体沿边坡走向向下发生蠕移;(3) 边坡浅层融土挤胀:边坡接近坡底处坡度趋近于平缓,此区域土体强度降低,自身不会发生较大的位移,而是受上方蠕移的土体挤压而发生挤胀;(4) 凸形坡浅层融土滑塌:在冻融循环过程中,温度对凸形坡土体影响的深度要深于边坡其他区域,因此含水率的变化大于边坡其他区域,因此在经过多次冻融循环后,土体强度降低,易发生滑塌;(5) 凹形坡浅层融土滑塌:在二维剖面上凹形坡局部呈现坡度从上

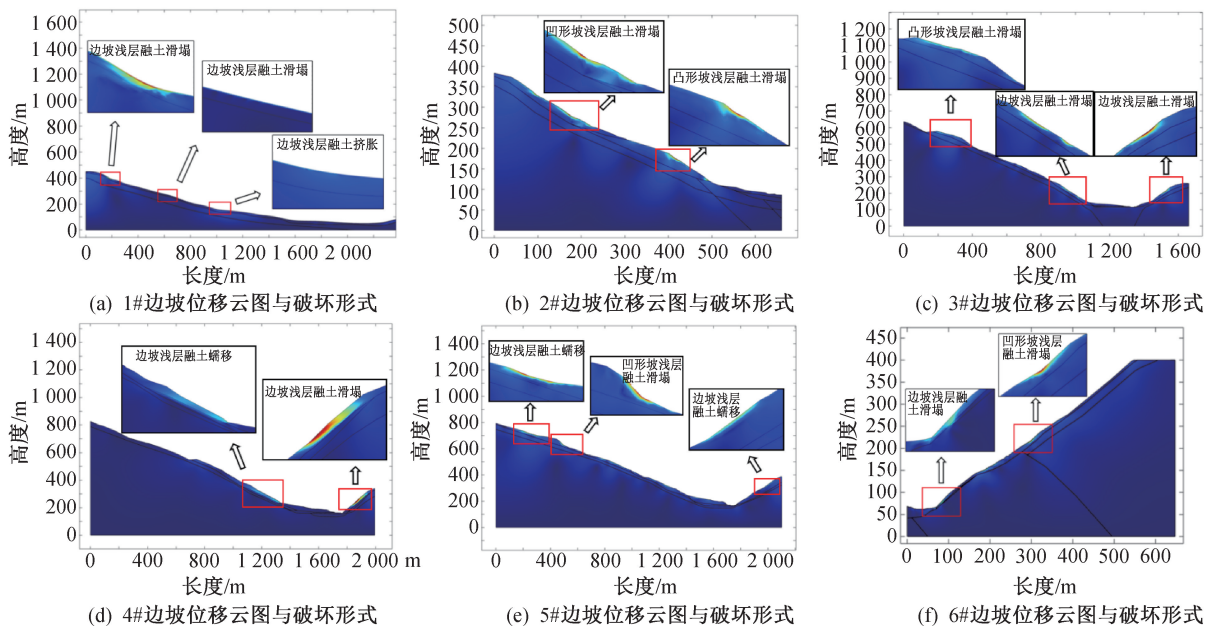


图 6 1#—6#边坡的位移云图与破坏形式

Fig. 6 Displacement cloud maps and failure modes of slopes 1# to 6#

往下逐渐降低的趋势,在坡度较大处,土体强度降低后极易发生滑塌破坏。

3.3 边坡破坏处滑动面与冻融面位置关系分析

为了探究冻融循环后覆盖型边坡的滑动面与冻融界面的位置关系,分别选取1#、5#、6#边坡中的一个边坡破坏处进行分析,在破坏区域设置由边坡表面垂直向下的数据提取线,线长6 m,间距2 m,选取数据提取线上含水率最大的位置点作为冻融界面所在位置^[14],选取数据提取线上等效塑性应变最大的位置点作为滑动面所在位置^[25],如图7所示,以5#边坡中凹形坡浅层融土滑塌破坏处为例,红点表示数据提取线上等效塑性应变的最大点,蓝点表示数据提取线上含水率的最大点。将每条数据提取线上的含水率最大点依次连接,并经样条拟合处理,得到边坡的冻融界面;同理,将每条数据提取线上的等效塑性应变最大点依次连接,并经样条拟合处理,得到边坡的滑动面。结果如图8所示,图8(a)为经样条拟合处理后的5#边坡凹形坡浅层融土滑塌处、图8(b)为1#边坡浅层融土滑塌处、图8(c)为6#边坡凹形坡浅层融土滑塌处的滑动面与冻融界面位置关系图,其中红

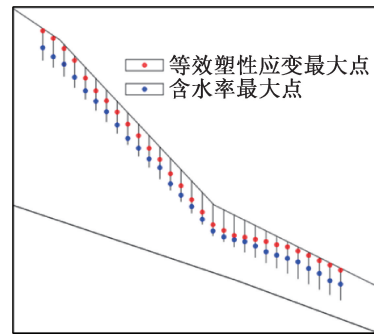


图7 数据提取线与数据最大点示意图

Fig. 7 Schematic diagram of data extraction line and maximum data points

色线条表示滑动面,蓝色线条表示冻融界面。

从图8可以看出,覆盖型边坡在冻融循环作用下,冻融界面位于滑动面下方,这是由于冻融界面处于土体含水率最大的位置,其附近存在聚水区。当环境温度上升时,聚水区中冻结土体融化后,聚水区顶部含水率高于其上方土体,且由于含水率的增加,聚水区顶部强度降低,边坡浅层土体在重力等作用下发生破坏,产生滑动面。由于数值模拟样本数量较少,此结论目前仅在覆盖型边坡考虑昼夜温差的冻融循环条件下适用。

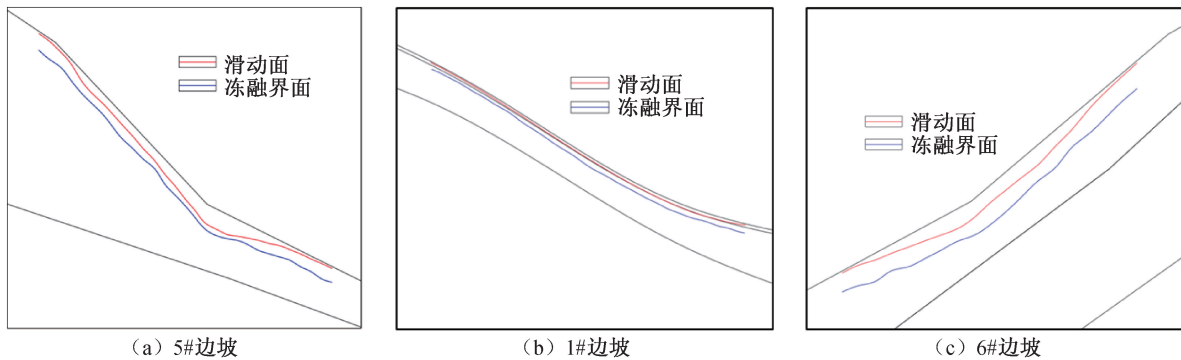


图8 各边坡破坏处滑动面与冻融界面位置关系图

Fig. 8 Positional relationship between sliding surfaces and freeze-thaw interfaces at the failure of each slope

4 结论

1) 冻融循环对边坡温度场的影响具有浅表性。受温度传递滞后效应影响,土体温度-深度曲线存在明显拐点:拐点以上浅层土体温度变化剧烈,为冻融作用主要影响区;拐点以下温度变幅微弱。

2) 冻融循环引起边坡水分场重分布与土体强度劣化。土体含水率随深度先增后减,浅层以下形成“聚水区”,源于冻结期水分向冻结锋面迁移聚集。随冻融次数增加,聚水区含水率上升,土体

黏聚力与内摩擦角降低,浅层强度持续衰退。

3) 边坡失稳模式受坡型与水分重分布共同控制。浅层强度劣化土体在重力作用下表现为五种破坏形式:浅层融土滑塌、蠕移、挤胀、凸形坡滑塌、凹形坡滑塌。破坏面多位于含水率剧增的聚水区顶部,故实际滑动面深度通常小于冻融界面深度。

参考文献:

- [1] MCROBERTS E C, MORGENSTERN N R. The stability of thawing slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4): 447-469.

- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.
ZHOU Y W, GUO D X, QIU G Q, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press,2000.
- [3] NIU F, CHENG G, XIE Q. Study on instability of slopes in permafrost regions of Qinghai-Tibet High Plateau[C]. Proceedings of the 5th International Symposium on Permafrost Engineering Yakutsk; Permafrost Inst. SB RAS Press,2002:192-197.
- [4] 朱磊. 川藏线季节性粗颗粒冻土工程特性研究及边坡稳定性分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.
ZHU L. Study on engineering characteristics and analysis of slope stability on seasonal coarse grain frozen soil in Sichuan-Tibet railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018.
- [5] 王超. 季冻区哈大高铁边坡冻融滑塌机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG C. Research on freeze-thaw slumping mechanism of Harbin-Dalian high-speed railway slope in seasonally frozen soil region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2014.
- [6] 张程程. 季冻区土质路堑边坡浅层稳定性分析与防护研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
ZHANG C C. Study on shallow stability analysis and protection of soil cutting slope in seasonal frozen area[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2012.
- [7] SIVA SUBRAMANIAN S, ISHIKAWA T, TOKORO T. Stability assessment approach for soil slopes in seasonal cold regions[J]. Engineering Geology,2017,221:154-169.
- [8] SIVA SUBRAMANIAN S, ISHIKAWA T, TOKORO T. An early warning criterion for the prediction of snowmelt-induced soil slope failures in seasonally cold regions[J]. Soils and Foundations,2018,58(3):582-601.
- [9] 葛琪. 基于冻融界面强度损伤的季冻区土质边坡稳定性研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
GE Q. Research on the soil slope stability in seasonal frozen areas based on strength deterioration of the freeze-thaw surface[D]. Changchun: Jilin University,2010.
- [10] 程永春,葛琪,何锋. 季冻区土质边坡滑动界面临界深度的试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(4):1042-1046.
CHENG Y C, GE Q, HE F. Experimental research on critical depth of slip surface of soil slope in seasonal frozen area[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(4):1042-1046.
- [11] 杨让宏,朱本珍. 冻融交界面变化对于多年冻土区斜坡路堤稳定性的影响分析[J]. 兰州交通大学学报,2010,29(3):1-6.
YANG R H, ZHU B Z. A freeze-thaw interface analysis of the influence of the slope embankment stability in permafrost regions[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2010,29(3):1-6.
- [12] 张永顺,常明军,科文萍,等. 冻融作用下多年冻土区路堑边坡稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):89-94.
ZHANG Y S, CHANG M J, KE W P, et al. Evaluation of the stability of cutting slope in permafrost region with the consideration of freezing and thawing cycles [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2022,20(3):89-94.
- [13] 王威,刘顺青,杨正玉,等. 大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(4):19-24.
WANG W, LIU S Q, YANG Z Y, et al. Stability analysis of Xiashu soil slope under the moisture content change of atmospheric influence layer [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2019,36(4):19-24.
- [14] 赵刚,陶夏新,刘兵. 重塑土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):519-525.
ZHAO G, TAO X X, LIU B. Experimental research on water migration in remoulded soil during freezing and thawing process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2009,40(2):519-525.
- [15] 田静. 积雪融化过程中水、热、溶质运移规律的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2004.
TIAN J. Study on the migration law of water, heat and solute in the process of snow melting [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2004.
- [16] 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(S2):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(S2):131-136.
- [17] 卢宁, WILLIAM J. 非饱和土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2012:269-287.
LU N, WILLIAM J. Unsaturated soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press,2012:269-287.
- [18] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal,1978,15(4):548-555.
- [19] 李智明. 冻土水热力学耦合机理研究与工程应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LI Z M. Study on mechanism of moisture-heat-stress coupling for frozen soil and engineering application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2017.

- [16] 陈晨,黄冬梅,章向宇,等.不同天然胶乳含量乳胶海绵材料的热空气老化行为[J].合成橡胶工业,2021,44(6):495-500.
CHEN C, HUANG D M, ZHANG X Y, et al. Hot air aging behavior of rubber latex foams materials with different natural rubber latex content[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(6):495-500.
- [17] 张稳军,丁超,张成平,等.不同错台量对复合型密封垫影响及长期防水预测[J].隧道建设(中英文),2020,40(3):337-345.
ZHANG W J, DING C, ZHANG C P, et al. Influence of different dislocation amount on composite sealing gasket and long-term waterproofing performance prediction [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(3):337-345.
- [18] 郑洪龙,魏然然,聂中华,等.管道离心式压缩机叶轮
的流固耦合数值模拟及可靠性评估[J].油气与新能源,2024,36(5):57-67+74.
ZHENG H L, WEI R R, NIE Z H, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation and reliability study of pipeline centrifugal compressor impeller [J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(5):57-67+74.
- [19] 刘巧斌,史文库,陈志勇,等.基于插值和时温叠加原理的橡胶老化寿命预测方法[J].工程科学与技术,2019,51(4):217-221.
LIU Q B, SHI W K, CHEN Z Y, et al. Rubber aging life prediction method based on time-temperature superposition principle and interpolation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4):217-221.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第35页)
- [20] 芮圣洁,陈晓岚,刘清华,等.基于含水率及干湿循环膨胀土强度研究[J].科学技术与工程,2017,17(25):284-289.
RUI S J, CHEN X L, LIU Q H, et al. Study on the strength of expansive soil based on water content and dry wet cycle [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25):284-289.
- [21] 王军,宗全利,岳红艳,等.干湿交替对长江荆江段典型断面岸滩土体力学性能的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):144-152.
WANG J, ZONG Q L, YUE H Y, et al. Influence of dry-wet alternation condition on mechanical properties of riverbank soil for typical sections in Jingjiang Reach of Yangtze River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2):144-152.
- [22] 常五岳.易崩解红砂岩在不同含水率下的剪切性质分析[D].兰州:兰州大学,2022.
CHANG W Y. Analysis of shear properties of collapsible red sandstone under different water content [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [23] 李映波,张存良,黎洪江,等.基于初始含水率的非饱和土抗剪强度模型[J].中国水运,2022,22(3):29-31.
LI Y B, ZHANG C L, LI H J, et al. Shear strength model of unsaturated soil based on initial moisture content [J]. China Water Transport, 2022, 22(3):29-31.
- [24] 刘子豪,张建成,张波,等.含水率对土钉锚固土体抗剪性能影响[J].山东大学学报(工学版),2023,53(3):14-22.
LIU Z H, ZHANG J C, ZHANG B, et al. Influence of moisture content on shear performance of soil nailed anchored soil [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(3):14-22.
- [25] 孙冠华,郑宏,李春光.基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J].岩土力学,2008,29(5):1159-1163.
SUN G H, ZHENG H, LI C G. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1159-1163.
- (责任编辑 周雪梅)