

川藏寒区道路边坡涎流冰防治措施试验研究

赵文, 刘亚雄, 吉安娜, 高文杰, 王国生

Experimental study on prevention measures of extruded ice on highway subgrade slope in Sichuan-Tibet cold region

ZHAO Wen, LIU Yaxiong, JI Anna, GAO Wenjie, and WANG Guosheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119-128

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology

刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203034

赵文, 刘亚雄, 吉安娜, 等. 川藏寒区道路边坡涎流冰防治措施试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 122-131.
ZHAO Wen, LIU Yaxiong, JI Anna, *et al.* Experimental study on prevention measures of extruded ice on highway subgrade slope in Sichuan-Tibet cold region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 122-131.

川藏寒区道路边坡涎流冰防治措施试验研究

赵文, 刘亚雄, 吉安娜, 高文杰, 王国生

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 涎流冰是川藏寒区道路工程常见病害, 严重威胁道路建设及运营安全。防止地下水出露地表或者地下水位过高可减缓或消除涎流冰病害。野外调查和卫图判识表明川藏寒区涎流冰以溢流型为主。通过室内物理模拟试验研究采用含砾粗砂或卵石换填疏导地下水以及铺设防水土工布隔水对涎流冰的防治效果。试验表明: 当冻结深度大于地下水位埋深时会逐渐形成涎流冰; 采用含砾粗砂或卵石作为换填渗流层, 加快地下水排泄, 可有效减少孔隙水压力, 相对于未处治边坡, 涎流冰体积分别减少 85.4% 和 93.9%, 孔隙水压力分别减少 46.2% 和 58.1%; 采用防水土工布阻隔地下水, 涎流冰面积减少 97.5%, 但孔隙压力会增加。考虑到川藏交通廊道区卵(碎)石材料充足, 推荐采用渗透性良好的卵(碎)石作为换填层, 加强地下水疏导, 并在换填层上铺设防水土工布隔水。研究成果可为川藏地区交通道路涎流冰防治提供参考。

关键词: 涎流冰; 防治措施; 换填层; 冻深; 模型试验

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0122-10

Experimental study on prevention measures of extruded ice on highway subgrade slope in Sichuan-Tibet cold region

ZHAO Wen, LIU Yaxiong, JI Anna, GAO Wenjie, WANG Guosheng

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Extruded ice is a common disease in road engineering in Sichuan-Tibet cold region, which seriously threatens the safety of road construction and operation. Preventing groundwater from being exposed to the surface or the groundwater level being too high can slow down or eliminate the formation of extruded ice. Field investigation and satellite map identification show that extruded ice in Sichuan-Tibet cold region is mainly overflow type. The prevention effects on extruded ice of backfilling with gravelly coarse sand or pebbles to dredge groundwater and laying waterproof geotextiles are analyzed by indoor physical simulation experiments. The results show that extruded ice will gradually form when the frozen depth is lower than the depth of groundwater level. Backfilling seepage layer with gravelly coarse sand or pebbles can accelerate the discharge of groundwater and reduce the pore water pressure effectively. Compared with the untreated slope, the volume of extruded ice is reduced by 85.4% and 93.9% respectively, and the pore water pressure is reduced by 46.2% and 58.1% respectively. By blocking groundwater with waterproof geotextile, the volume of extruded ice is reduced by

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-05-26

投稿网址: www.swdzgdz.com

第一作者: 赵文(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事边坡工程研究。E-mail: wenzhao@swjtu.cn

通讯作者: 吉安娜(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事边坡工程研究。E-mail: 2580151406@qq.com

97.5%, but the pore pressure will increase. Considering the sufficient pebble (or gravel) materials in Sichuan-Tibet alpine region, it is recommended to use permeable pebble (or gravel) as backfill layer to accelerate groundwater drainage and control extruded ice disease in subgrade slope. And waterproof geotextile is recommended to be laid on backfill layer. The research results can provide reference for the prevention of extruded ice in Sichuan-Tibet traffic roads.

Keywords: extruded ice; prevention measures; backfill layer; frozen depth; model test

在寒冷气候条件下,地表水或地下水露头,并沿斜坡表层一直渗漏到路面,由下至上在短时间内凝结成冰状,这样的冰体在道路工程中称为涎流冰。涎流冰是高寒地区普遍存在的一种地质病害现象^[1]。我国东北、西北及青藏高原,北美、北欧等地区均存在不同程度的涎流冰病害问题^[2-3]。涎流冰于路面形成冰面,在反复冻融过程中,诱发众多工程灾害^[4-6]。融水渗流至路基内导致路基破坏、道路翻浆等破坏。冻结成固体冰锥体,还将对路基支挡结构产生冻胀破坏^[7],影响车道行人正常运作和安全。涎流冰融化渗水还将影响斜坡稳定性,加速边坡破坏。青藏高原地区因其特殊的地质环境和气候条件,尤其利于涎流冰的形成。

国内外很早就对涎流冰的形成机理、影响因素及工程防治开展了研究^[8-11]。王泽浩等^[12]认为涎流冰是地下水下堵、露头结冰、解冻融化、消失以及再孕育结冰的连续过程。王影等^[13]研究了公路涎流冰形成特征、条件及分类,认为形成公路涎流冰最关键的是扰动三层体的存在与密闭水体的冻结-压力作用,其他因素则决定了涎流冰的规模和持续的时间。张雪华^[14]研究了高寒林区道路涎流冰的防治措施,提出涎流冰的防治关键在于查明病害段的水文地质条件。刘宏伟等^[15]提出采用塑料防水板、软式透水管、保温层等方法治理路基边坡渗水形成的涎流冰。马磊^[16]总结新疆公路涎流冰的治理经验,提出在注重防治设计的同时,还应加强病害点的调查和预测。朱银桥等^[1]以西藏那曲至嘉黎公路为例,有针对性地提出绕避、阻挡、排导、加高路堤等治理措施。李海亮等^[17]针对西藏羊八井至大竹卡段公路涎流冰问题,提出采用挡冰墙和聚冰坑等综合措施防治边坡涎流冰。张浩^[18]针对铜川—黄陵公路涎流冰问题,提出积雪法、挡冰法、含水层侧移分流法、保温渗沟法、含水层延续法等方法进行防治。Saarelainen等^[19]提出保持地下水流动温度恒温性的涎流冰防治措施。Varlamov等^[20]指出地表水的增温效应降低导致坡下冻土区的形成,保温绝缘材料对坡体具有轻微冷冻作用,提出需采取降

低地面温度的防治措施。

川藏寒区由于地形地质条件恶劣,交通建设落后,道路等级较低,在道路建设中对涎流冰的防治重视程度不高,涎流冰病害问题突出。在未来藏区高速公路及铁路建设中,涎流冰病害问题是影响工程建设及安全运营的重要因素。而上述涎流冰防治方法有些具有明显地域性特征,并不能完全适应川藏高寒区路基边坡涎流冰防治。青藏高原环境恶劣,材料运输困难,涎流冰防治宜就地取材,方便施工。本文基于川藏交通廊道涎流冰野外调查和卫图判识,分析该区涎流冰分布特征。利用实际涎流冰路基边坡土体建立溢流型涎流冰物理模拟试验模型,基于防排水原则,进行不同措施涎流冰防治效果对比试验,为川藏寒区道路路基边坡涎流冰防治提供参考。

1 川藏交通廊道涎流冰发育特征

川藏交通廊道区冬季最低气温约 -30°C ,从每年10月底到次年的2月份平均气温均在零下。该区年平均降水量 896mm ^[21]。由于雪层覆盖和地表植被使水分蒸发受到影响,丰富的地下水被储存在地表浅层中,为涎流冰的发育提供了有利条件。通过卫星图像识别和现场调查,对川藏交通廊道东段(G318、G319、G215、G248国道等)涎流冰进行调查。共调查涎流冰2369处,其中现场调查387处,卫图判识1982处,调查点分布如图1所示。涎流冰类型主要有坡面溢流型、坡脚渗流型、沟谷型、土石界面型、基岩裂隙型等,各类涎流冰如图2所示。

对川藏交通廊道区调查获取的2369处涎流冰分布特征进行统计,结果如图3所示。统计表明,涎流冰以坡面溢流型为主,占71.7%。涎流冰出露部位集中于缓坡,占比54.8%。涎流冰发育区边坡坡度集中于 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$,合计占72.0%(特别是 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,占30.4%)。涎流冰发育区集中于海拔 $3500\sim 4500\text{m}$ 区域,占89.3%。针对广泛发育的对道路路基边坡影响较大的坡面溢流型涎流冰,本文采用模型试验的方法研究其防治措施。

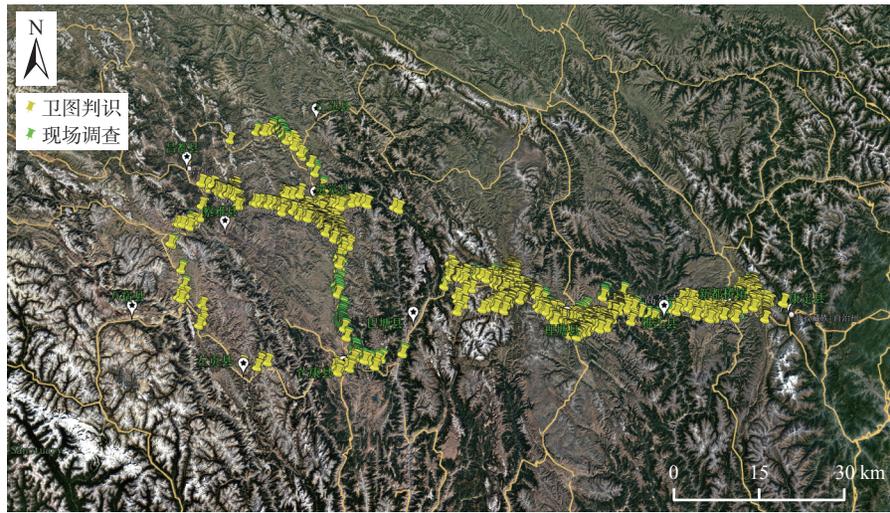


图 1 川藏交通廊道涎流冰调查点分布图

Fig. 1 Distribution of extruded ice along Sichuan—Tibet Traffic Corridor

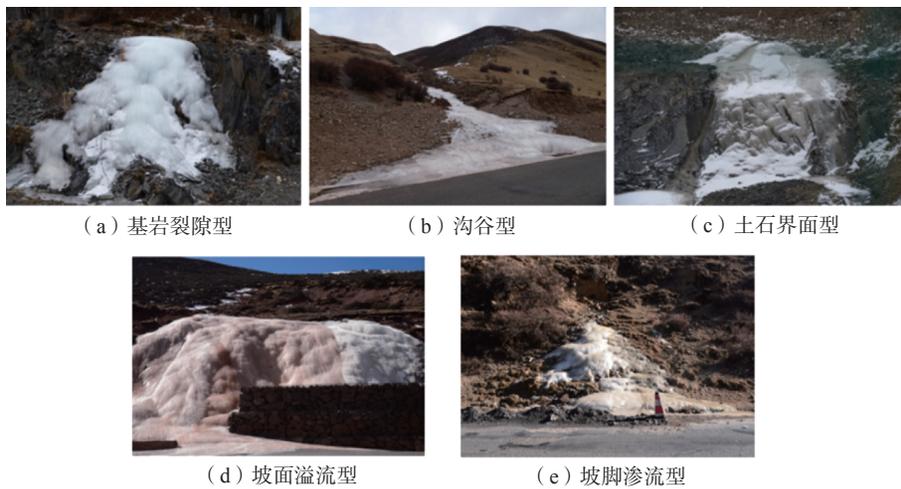


图 2 涎流冰主要类型

Fig. 2 Main types of extruded ice

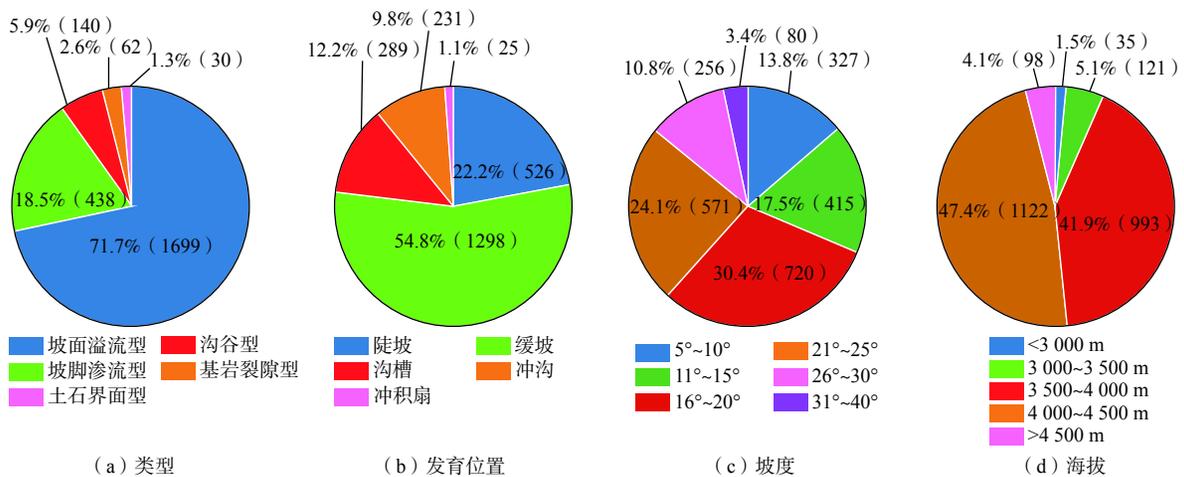


图 3 涎流冰分布统计

Fig. 3 Statistics of extruded ice

2 路基边坡涎流冰防治模型试验设计

涎流冰形成的关键因素是负温和地下水。路基涎流冰病害防治关键在于及时疏导地下水或阻隔地下水。通过室内模型模拟试验,对比研究渗水材料换填和铺设防水土工布等措施对坡面溢流型涎流冰防治的效果。

2.1 模型设计

调查统计表明,溢流型涎流冰的边坡覆盖层厚度多小于3 m(占73%),地下水埋深也多小于3 m(占56%),含水层厚度多小于5 m(占59%),坡度集中于 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ (占72%)。因此以边坡土层厚4 m、地下水位0.5 m为原型设计试验模型。模型几何相似比取1:10,即模型土层厚40 cm,地下水位埋深5 cm,边坡坡度 15° 。考虑边界效应,并对比边坡宽度,试验模型左右两侧各取40 cm,设计模型总宽度为80 cm,模型框架底长150 cm、坡高100 cm。模型剖面如图4所示,模型实物如图5所示。

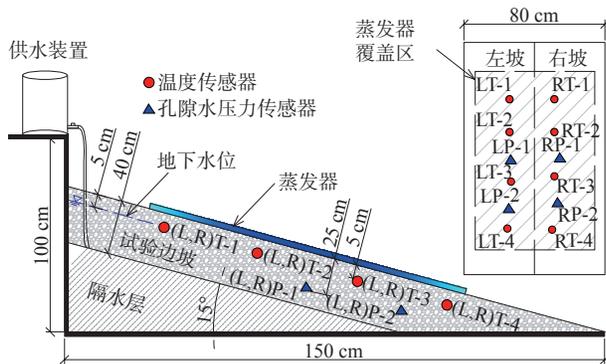


图4 试验模型及传感器布置剖面

Fig. 4 Model and sensor layout section of the experiment



图5 试验装置

Fig. 5 Test apparatus

试验土样取自邦达地区某涎流冰路基边坡工点,土体为角砾土,天然密度为 1.78 g/cm^3 ,渗透系数为 0.013 cm/s 。试验使用的含砾粗砂渗透系数为 0.056 cm/s (角砾土的4.3倍),卵石渗透系数为 0.142 cm/s (角砾土的10.9倍)。

2.2 试验装置

模型框架采用镀锌槽钢及不锈钢螺丝固定。侧面采用高强植筋胶粘接1 cm厚有机玻璃,便于观察模型边坡涎流冰形成过程。框架搭接完成后,在内部铺设防水卷材防止渗漏。随后,在模型内部堆建高约30 cm的楔形土体斜坡,并用防水卷材覆盖,模拟隔水层。供水装置为带流量控制开关的20 L储水桶,采用调节式输水滴管控制流量,确保试验过程渗流稳定。

试验制冷装置由压缩机、蒸发器和冷凝器组成,蒸发器由导热性好的铜管组成,经试验测试,制冷时其表面温度可达 -20°C 。坡面上铺防水布,防止铜管制冷过程中与土体表面冻结在一起。铜管上部覆盖保温棉,提高制冷效果。

试验过程中对孔隙水压力及土体温度进行监测,监测点如图4所示。左侧试验组(左坡)按一定间距埋设孔隙水压力传感器LP-1、LP-2,温度传感器LT1—LT4;右侧实验组(右坡)相应位置埋设孔隙水压力传感器RP-1、RP-2,温度传感器RT-1—RT-4。考虑到设计冻深达到地下水位,因此温度传感器埋深5 cm;而孔隙水压力传感器应布置在非冻结土层中,设计其埋深为25 cm。后文在分析左、右坡孔隙水压力时,取两个孔隙水压力的平均值,并分别记为LP、RP。温度传感器采用PT100热电阻感温探头,测量范围为 $-50 \sim 200^{\circ}\text{C}$,测量精度为 0.15°C ,预期温度范围是 $-10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 。孔隙水压力传感器由CM-1A-10静态电阻应变仪连接微型渗压计组合而成,压力测量范围为 $-10 \sim 200 \text{ kPa}$,测量精度为 0.1 kPa 。

2.3 试验方案

设计3组涎流冰防治模型试验,分别采用含砾粗砂换填(试验1)、卵石换填(试验2)和防水土工布隔水(试验3)。模型左坡为采取措施试验边坡,右坡为自然无处理(未处治)边坡,中间用防水土工布隔开,各组试验左、右坡剖面如图6所示。考虑到含砾粗砂及卵石层的渗透系数为原土层的4.3~10.9倍,设计换填层厚度为总土层的 $1/4$,即10 cm。左右对照组边坡以相同水头压力渗水,渗流稳定后,开启制冷装置。

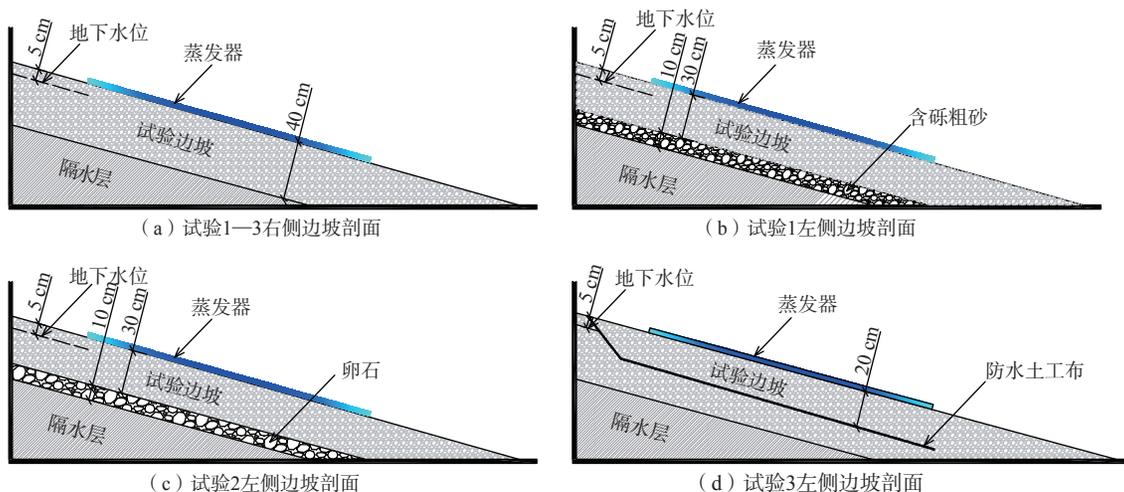


图 6 试验方案
Fig. 6 Test scheme

3 涎流冰防治效果试验对比

3.1 含砾粗砂换填

右坡采用角砾土分层铺设;左坡换填层铺设完成后,在含砾粗砂表面铺填与右坡相同的角砾土作为覆盖层。边坡模型填筑过程如图 7 所示。



图 7 边坡模型填筑
Fig. 7 Slope model construction

(1) 渗流及冻结特征

试验开始后,打开供水装置使左右坡同时渗水。左右坡内部冻结前的渗流特征有所不同。1.2 h 后左坡坡脚地下水渗出,而右坡坡脚在 5 h 后出现渗水,且左坡坡脚渗流量明显大于右坡,说明含砾粗砂换填后,有利于地下水疏导。如图 8 所示,90 h 持续制冷后,左坡坡脚局部形成涎流冰,地下水自然溢出,右坡坡脚形成较大规模的涎流冰,而左坡坡体中涎流冰面积明显小于右坡。与右坡相比,左坡地下水流速更

大,在相同的制冷环境下涎流冰更难形成,说明地下水流速增大可抑制或减缓涎流冰的形成。

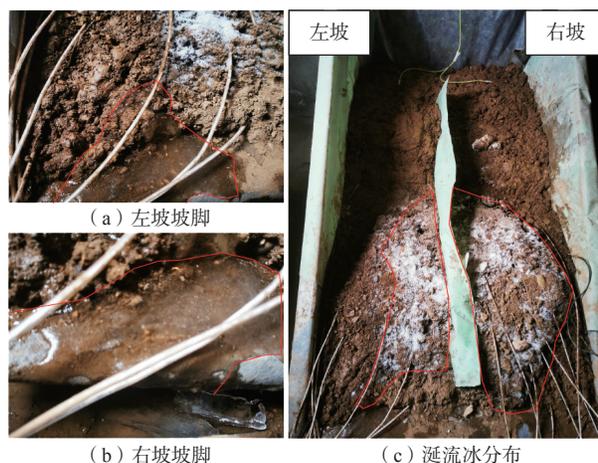


图 8 含砾粗砂换填试验边坡涎流冰分布
Fig. 8 Distribution of extruded ice in gravel-bearing coarse sand backfill slope experiment

(2) 坡体温度

试验过程中边坡温度变化特征如图 9 所示。右坡内部温度在制冷 15 h 后降到 0 °C 以下,而左坡在制冷 40 h 后降到 0 °C 以下。制冷 70 h 后,两侧边坡 10 cm 深度处均降到 0 °C 以下。右坡温度整体上低于左坡,左坡冻结温度最低约 -2 °C,右坡最低约 -4 °C。其原因在于含砾粗砂换填边坡地下水渗流速度更快,流出水量更多。

(3) 孔隙水压力

试验过程中边坡孔隙水压力平均值变化如图 10 所示。两侧边坡含水层孔隙水压力整体变化趋势基

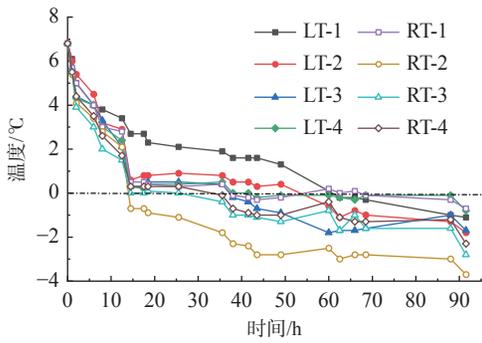


图 9 含砾粗砂换填试验坡体温度

Fig. 9 Temperature in gravel-bearing coarse sand backfill slope experiment

本一致, 均为初期呈负压减小, 中期开始正压增大, 后期正压减小并趋于平稳。两侧边坡初始阶段均呈现负压是由于坡面冻结时, 水分向冻结面迁移造成的^[22]。右坡出现两次峰值压力, 分别是制冷 16 h 后上升到 7 kPa 和制冷 58 h 后上升到 17 kPa。这是由于右坡在制冷 16 h 后, 坡脚地下水渗出形成涎流冰, 地下水受阻, 孔隙水压力增大; 地下水从边坡侧面溢出后孔隙水压力减小, 坡面溢出的地下水再次冻结形成涎流冰, 造成地下水继续受阻, 地下水位抬升, 孔隙水压力继续增大。制冷约 70 h 后, 地下水在模型边界蒸发器未覆盖区域溢出, 孔隙水压力基本稳定。而左坡孔隙水压逐渐上升达到峰值后, 稍有减小并趋于稳定。左坡在制冷过程中, 覆盖层及部分含水层冻结, 压缩了含水层过水断面, 孔隙水压力稍有增加。

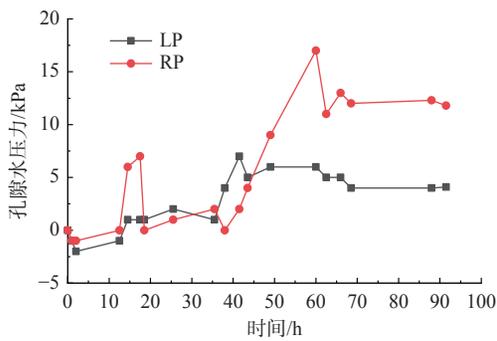


图 10 含砾粗砂换填试验孔隙水压力

Fig. 10 Pore water pressure in gravel-bearing coarse sand backfill slope experiment

3.2 卵石换填

(1) 渗流及冻结特征

开启供水装置后边坡土体由干燥状态转变为湿润状态。0.5 h 后左坡坡脚地下水沿模型边缘滴落, 6 h 后右坡出现渗水, 可见卵石换填层对坡内地下水的排导更有效。经过 16 h 连续制冷, 左坡坡脚处未发

现冰体, 地下水疏排正常, 而右坡坡脚及较低的坡面出现了涎流冰体, 如图 11(a)(b)所示。经过 88 h 的制冷后, 左坡在相同的制冷条件下形成的冻结区域面积明显更小, 如图 11(c)所示, 说明卵石换填材料对抑制涎流冰形成作用明显。

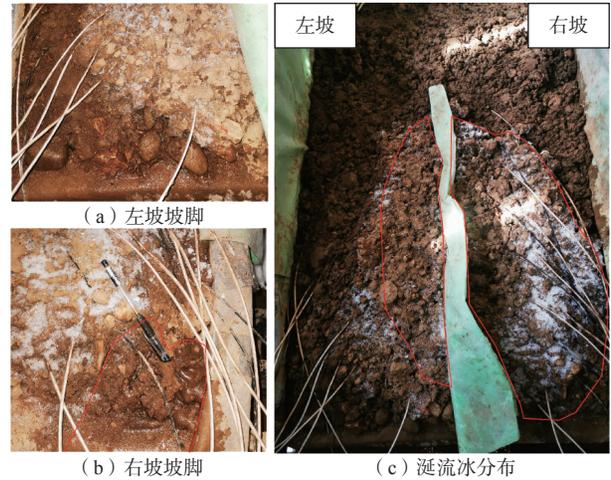


图 11 卵石换填试验边坡涎流冰分布

Fig. 11 Distribution of extruded ice in pebble backfill slope experiment

(2) 坡体温度

试验过程中边坡温度变化如图 12 所示。冻结 16 h 后, 右坡水位线附近率先达到冻结临界值 0 °C; 边坡内部温度随制冷时间缓慢降低, 试验结束时达到最低值, 接近 -3 °C。而进行了卵石换填处理的右坡在冻结 19 h 后边坡内部温度才达到 0 °C, 随后内部温度降低到最低值 -2 °C 附近, 而后温度缓慢升高, 最后趋于稳定; 试验结束时温度稳定于 -1 ~ 0 °C 内, 温度明显高于右坡。

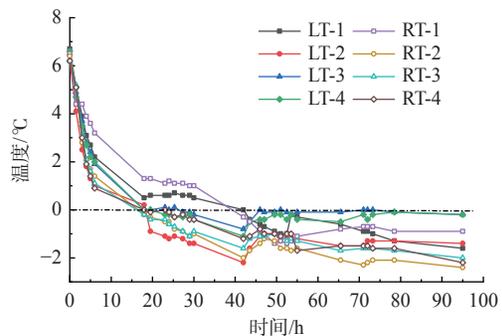


图 12 卵石换填试验坡体温度

Fig. 12 Temperature in pebble backfill slope experiment model

(3) 孔隙水压力

试验过程中边坡孔隙水压力平均值变化如图 13 所示。制冷开始后, 两侧边坡孔隙水压力变化趋势基

本一致。右坡在试验初始阶段为负压,在 4 h 左右水压为正值,说明 4 h 后地下水已渗流至坡中部。地下水渗流至坡脚溢出冻结形成涎流冰,地下水受阻,地下水位和孔隙水压持续上升,其稳定压力与上一试验中的右坡类似。而左坡孔隙水压力在冻结过程中增加幅度更小。

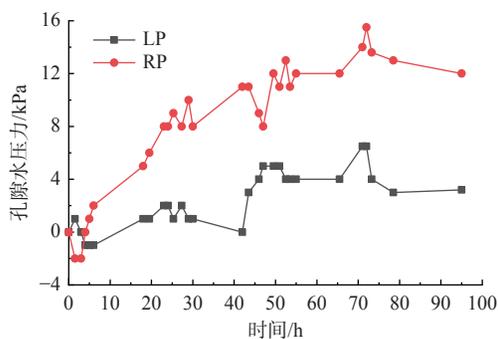


图 13 卵石换填试验孔隙水压力
Fig. 13 Pore water pressure in pebble backfill slope experiment model

3.3 铺设隔水层

涎流冰防治措施除了采用透水材料换填加强疏排水外,还可以考虑进行坡内地下水的阻隔处理。试验采用防水土工布覆盖含水层形成隔水层,阻隔地下水。左右两侧边坡采用同级配的角砾土填筑。

(1) 渗流及冻结特征

开启渗水装置 5 h 后,左坡坡脚有地下水渗出,而边坡坡面土体较干燥。8 h 后,右坡坡脚有地下水流出,而坡面土体湿润,说明左坡防水层起到了阻隔地下水浸润的作用,右坡坡面土体在毛细作用下含水量增加。开启制冷装置数小时后,左坡坡脚渗流量明显大于右坡坡脚,右坡部分地下水已冻结形成涎流冰。模型边坡经过 93 h 制冷后,左坡坡脚未形成涎流冰,右坡坡脚及较低的坡面形成涎流冰,如图 14(a)(b)所示。左坡坡面在相同的制冷条件下形成的冻胀区分布面积较小,如图 14(c)所示。

(2) 坡体温度

试验过程中边坡温度变化如图 15 所示。在制冷 46.5 h 后右坡内部测温点达到 0 °C,试验结束时最低接近 -6 °C。左坡在制冷 20 h 后,测温点降至 0 °C 以下,试验结束时最低温度为 -4 °C 左右,温度明显高于右坡。相同条件下,左坡温度下降更快。隔水层下地下水流动速度较快,因此温度降低幅度小于右侧未处治边坡。

(3) 孔隙水压力

试验过程中边坡孔隙水压力平均值变化如图 16

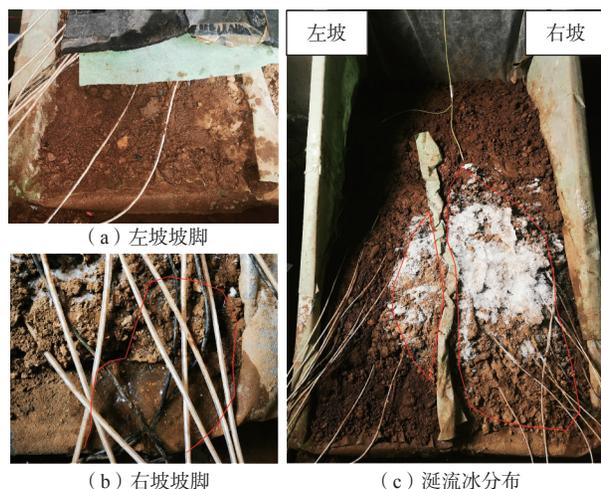


图 14 铺设隔水层试验边坡涎流冰分布

Fig. 14 Distribution of extruded ice in the experiment model with waterproof layer

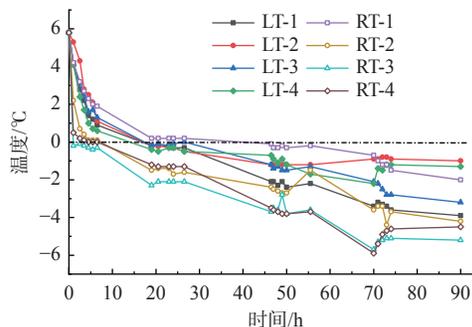


图 15 铺设隔水层坡体温度

Fig. 15 Temperature in the experiment model with waterproof layer

所示。右坡孔隙水压力整体变化趋势与前两组试验基本一致,而左坡孔隙水压力在试验过程中开始阶段持续增大,45 h 后基本保持稳定,且孔隙水压力值高于右坡。原因在于铺设隔水层后,过水断面面积减小,且由于隔水层的存在,地下水位被自然抬高。

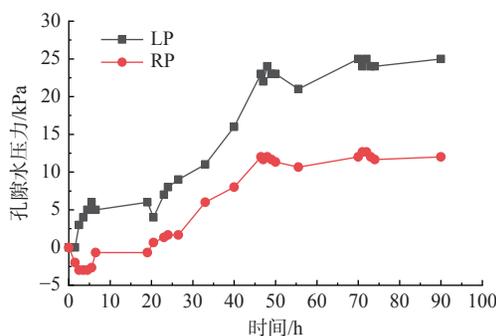


图 16 铺设隔水层孔隙水压力

Fig. 16 Pore water pressure in the experiment model with waterproof layer

4 防治效果对比

不同措施下边坡坡体温度、孔隙水压力、涎流冰形成部位及规模等均存在差异,这种差异是防排水措施对地下水疏导或阻隔造成的。

未处治边坡在冻结过程中孔隙水压力主要经历增压-减压-增压-稳定的变化过程,其原因在于随着冻结时间的增加,地表土体冻结,压缩过水断面,地下水压力增大。地下水流受阻后寻找薄弱部位溢出,如坡面负地形处或坡脚,地下水压力随之减小;溢出水又缓慢冻结,地下水压力继续上升,达到动态平衡之后,

地下水压力趋于稳定;采用渗水材料换填加强地下水疏排之后,在冻结过程中冻结深度达到地下水位以下时,地下水压力也会增加。由于渗水材料利于排水,地下水压力增加幅度不大,换填层渗透性越好,水压力增加幅度越小。而铺设隔水层阻隔地下水时,在冻结过程中,反而可能造成地下水压力上升。相同条件下,各措施引起地下水压力变化如表 1 所示。可见,采用渗水材料换填疏导地下水,可以减小冻结过程中的地下水压力,本次试验中减少 46.2%~58.1%。而铺设隔水层,反而会增加地下水压力,本次试验中增加了 97.6%。

表 1 涎流冰防治效果对比

Table 1 Comparison of prevention effect of extruded ice

模型试验	最大孔隙水压力			冻结体体积			涎流冰体积		
	未处治边坡/kPa	处治边坡/kPa	变化率/%	未处治边坡/cm ³	处治边坡/cm ³	变化率/%	未处治边坡/cm ³	处治边坡/cm ³	变化率/%
含砾粗砂换填	13.00	7.00	-46.20	14 645.16	6 423.04	-56.10	4 393.50	642.30	-85.40
卵石换填	15.50	6.50	-58.10	15 494.41	3 334.30	-78.50	4 338.40	266.70	-93.90
铺设隔水层	12.70	25.10	97.60	16 310.49	2 013.88	-87.70	4 077.60	100.70	-97.50

试验结束后取出冻结土体测量体积。在未处治边坡冻结土体中,可见一层 4~5 cm 厚纯冰体(图 17)。而在含砾粗砂换填和卵石换填边坡冻结体中,仅见零星冰碴。各措施下冻结土体面积、厚度均小于未处理边坡的冻结土体。将冻结土体融化,测量融水体积,即涎流冰体积。各措施下冻结土体和涎流冰体积如表 1 所示。从表 1 可知,通过含砾粗砂换填导水后,冻结体和涎流冰体积分别减少 56.1% 和 85.4%。通过卵

石换填导水后,冻结体和涎流冰体积分别减少 78.5% 和 93.9%。采用铺设土工布隔水后,冻结体和涎流冰体积分别减少 87.7% 和 97.5%。因此,粗砂换填、卵石换填、铺设防水土工布隔水均可有效减少冻结体体积,特别是有效减少涎流冰体积,达到治理涎流冰病害的目的。但铺设防水土工布可能引起地下水压力的上升,导致地下水在其它地方溢出形成涎流冰。

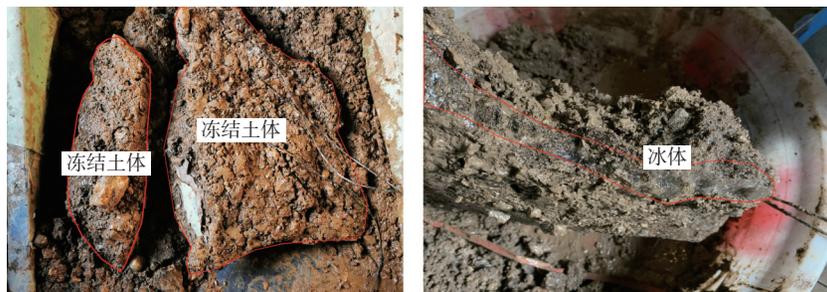


图 17 未处治边坡中的冻结土体

Fig. 17 Frozen soil in the untreated slope

综合各种措施的优点,而且川藏交通廊道区卵石(碎)石材料充足,推荐采用渗透性良好的卵石(或碎石)作为换填层加强地下水疏导治理路基涎流冰病害,并在换填层上铺设防水土工布加强浅地表隔水,防治措施设计示意图如图 18 所示。换填层厚度、埋深等应根据当地冻结深度、水文条件等综合确定,建

议换填层埋深(d_1)大于当地冻深的 1.5 倍,换填层厚度(d_2)大于 1 m。

5 结论

(1) 川藏交通廊道区涎流冰以坡面溢流型为主,主要出露于坡度 10°~20°之间的缓坡,集中发育在

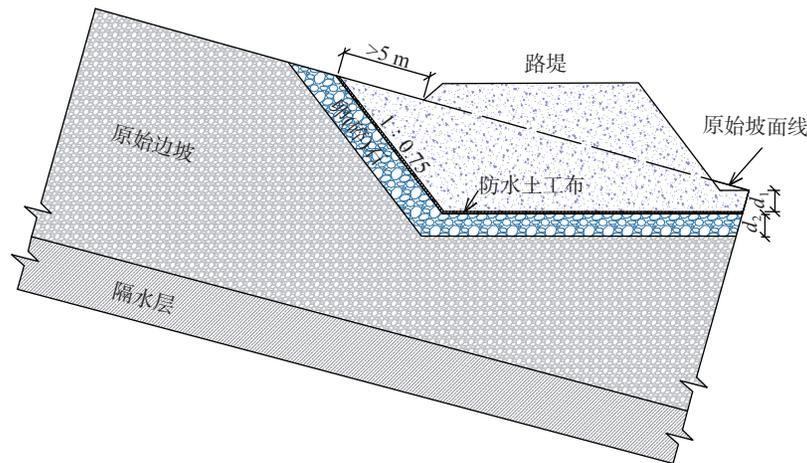


图 18 防治措施示意图

Fig. 18 Schematic diagram of prevention measures

3 500 ~ 4 500 m 海拔高程地带。

(2) 通过强透水材料换填可有效抑制或减缓涎流冰的形成。换填层渗透性越好, 处治效果越佳。含砾粗砂换填边坡冻结体和涎流冰体积分别减少 56.1% 和 85.4%, 孔隙水压力减少 46.2%。卵石换填边坡冻结体和涎流冰体积分别减少 78.5% 和 93.9%, 孔隙水压力减少 58.1%。

(3) 铺设土工布隔水措施也可以有效抑制涎流冰的形成, 冻结体和涎流冰体积分别减少 87.7% 和 97.5%, 但会导致地下水孔隙水压力增加。

(4) 考虑到川藏交通廊道区卵(碎)石材料充足, 推荐采用渗透性良好的卵石(或碎石)作为换填层加强地下水疏导治理路基边坡涎流冰病害, 并在换填层上铺设防水土工布加强浅地表隔水。

参考文献 (References) :

- [1] 朱根桥, 李霞. 西藏那嘉路涎流冰病害分析与防治 [J]. 公路交通技术, 2013, 29(1): 21 - 23. [ZHU Genqiao, LI Xia. Analysis and control for disease of salivary flow ice on Tibetan Naqu—Jiali Road techniques [J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 29(1): 21 - 23. (in Chinese)]
- [2] 张维建, 刘昆赞. 羌塘高原冻土区公路山坡涎流冰形成与对策分析 [J]. 林业建设, 2020(1): 57 - 61. [ZHANG Weijian, LIU Kunyun. Analysis on the formation and countermeasures of salivary flow ice on the hillside of highway in the northern Tibet region [J]. Forestry Construction, 2020(1): 57 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈安, 彭振斌, 杜长学, 等. 高寒地区公路涎流冰灾害

及防治 [J]. 现代地质, 2006, 20(1): 181 - 184. [CHEN An, PENG Zhenbin, DU Changxue, et al. Drift ices along the road located in the tableland chilliness mountain area and method to deal with them [J]. Geoscience, 2006, 20(1): 181 - 184. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60(1): 14 - 19. [SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(1): 14 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445 - 468. [XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445 - 468. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果 [J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 1 - 12. [GUO Changbao, WANG Baodi, LIU Jiankang, et al. Main progress and achievements of the geological survey project of Sichuan-Tibet Railway traffic corridor [J]. Geological Survey of China, 2020, 7(6): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 肖阳. 高寒地区潜水型涎流冰路基施工与效益分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2011(12): 115 - 116. [XIAO Yang. Construction and benefit analysis of roadbed with diving saliva ice in alpine area [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2011(12): 115 -

116. (in Chinese)]
- [8] 刘鑫,赵振国.公路涎流冰成因类型、发育机理及防治措施[J].西南公路,2014(4):33-36. [LIU Xin, ZHAO Zhenguo. Formation type, development mechanism and prevention measures of highway saliva ice[J]. Southwest Highway, 2014(4):33-36. (in Chinese)]
- [9] 武鹤,王莉,赵逵.高寒山区高等级公路涎流冰的形成与防治[J].黑龙江交通科技,2003,26(4):32-33. [WU He, WANG Li, ZHAO Kui. Formation and prevention of saliva ice of high-grade highway in alpine mountain area[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2003, 26(4):32-33. (in Chinese)]
- [10] 赵梦怡,谢强,朱磊,等.高原季节性粗颗粒冻土边坡破坏的现场观测试验[J].铁道科学与工程学报,2019,16(7):1666-1672. [ZHAO Mengyi, XIE Qiang, ZHU Lei, et al. Field observation of slope failure of seasonal coarse grained frozen soil in plateau[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7):1666-1672. (in Chinese with English abstract)]
- [11] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(4):473-486.
- [12] 王泽浩,张明发.涎流冰病害的防治[J].公路,1980(11):28-31. [WANG Zehao, ZHANG Mingfa. Prevention of salivary flow ice diseases[J]. Highway, 1980(11):28-31. (in Chinese)]
- [13] 王影,刘轶平.公路涎流冰形成特征、条件及分类[J].黑龙江交通科技,2006,29(6):47-48. [WANG Ying, LIU Yiping. Formation characteristics, conditions and classification of salivary flow ice on highway[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2006, 29(6):47-48. (in Chinese)]
- [14] 张雪华.无管式保温渗沟治理林区公路涎流冰[J].东北林业大学学报,1987(4):79-84. [ZHANG Xuehua. Heat preservation sewer of non-pipe form to harness forestry highway saliva-ice[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1987(4):79-84. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘宏伟,刘磊.塑料防水板保温墙治理路基边坡渗水根治路基涎流冰[J].黑龙江交通科技,2013,33(6):55-56. [LIU Hongwei, LIU Lei. Plastic waterproof board insulation wall to govern the roadbed slope seepage eradication of roadbed saliva ice[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 33(6):55-56. (in Chinese)]
- [16] 马磊.新疆公路涎流冰的成因分析与防治方法[J].广东公路交通,2006(增刊1):207-208. [MA Lei. Analysis and prevention method of salivary ice ice for highway in Xinjiang[J]. Guangdong Highway Communications, 2006(Sup1):207-208. (in Chinese)]
- [17] 李海亮,丁姣月,段德峰,等.高原冻土地区公路涎流冰的成因分析及防治[J].河南科技大学学报(自然科学版),2021,42(1):61-67. [LI Hailiang, DING Jiaoyue, DUAN Defeng, et al. Cause analysis and prevention of salivary ice on highways in plateau permafrost regions[J]. Journal of He'nan University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 42(1):61-67. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张浩.公路涎流冰形成机理与防治技术研究[D].西安:长安大学,2016. [ZHANG Hao. Study on formation mechanism and control techniques of extruded ice for highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [19] SAARELAINEN S, VASKLAINEN J. Problems of arctic road construction and maintenance in Finland[C]//KAARE SENNESET. Proceedings of 5th International Conference on Permafrost. Trondheim: Tapir Publishers, 1988:1466-1491.
- [20] VARLAMOV S. Temperature study of railway embankments on ice-rich permafrost in Yakutia[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2014, 5(3):90-99. [VARLAMOV S. 雅库特铁路路堤富冰冻土的温度研究[J].黑龙江大学工程学报,2014,5(3):90-99. (in English with Chinese abstract)]
- [21] 王崇良,赵文,王国生,等.涎流冰对西部某铁路的影响研究[J].高速铁路技术,2021,12(1):17-21. [WANG Chonggen, ZHAO Wen, WANG Guosheng, et al. Study on impact of salivary flowice on a railway in Western China[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):17-21. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 高玉佳,王清,陈慧娥,等.温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J].工程地质学报,2010,18(5):698-702. [GAO Yujia, WANG Qing, CHEN Huie, et al. Effect of temperature on migration of water in seasonal frozen soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5):698-702. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华

实习编辑:刘真真