中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

杨　栋，王全成，姜昭群

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

YANG Dong, WANG Quancheng, and JIANG Zhaoqun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-10

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan—Tibet Railway based on contributing weights model

边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 王栋　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 84-93

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8

基于PFC^{3D}的鱼鳅坡滑坡运动过程分析

Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC^{3D}

张家勇, 邹银先, 杨大山　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 33-39

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-10

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

杨　栋, 王全成, 姜昭群
（中国地质科学院探矿工艺研究所，四川 成都　611734）

摘要: 川藏铁路规划线路穿越青藏高原东缘高寒带岛状山地冻土区，冻融环境相对复杂。文章通过对川西地区及藏东昌都地区 G317、G318 沿线滑坡防治工程 25 处典型案例进行调查，总结冻融条件下滑坡防治工程的破坏形式及受力机理，探讨了水平冻胀力、法向冻胀力的计算方法及其对挡墙、桩间板、排水沟等的影响，计算结果表明水平冻胀力远大于主动土压力，认为开放式冻胀较封闭式冻胀对防治工程的影响更大；阐明了冻胀融沉对锚索工程的影响，提出使用基于蓄能消能系统的锚索结构；探讨了季节性冻土区滑坡防治材料抗冻等级选择方法及减缓冻融效应的措施及建议，为川藏铁路沿线滑坡治理工程及拟建施工便道的边坡支护提供参考。

关键词: 冻融作用；川藏铁路；季节性冻土；滑坡；锚索
中图分类号: P642.22; X43　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2021)06-0082-08

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

YANG Dong，WANG Quancheng，JIANG Zhaoqun
（*The Institute of Exploration Technology*, *GAGS*, *Chengdu*, *Sichuan*　611734, *China*）

Abstract: The planned route of the Sichuan-Tibet railway passes through the frozen soil on the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau. The freezing-thawing environment is relatively complicated. More than 25 typical cases of landslide control projects along G317 and G318 in western Sichuan and Qamdo areas were investigated. The failure modes and force mechanisms of the projects under freeze-thaw conditions were summarized. The calculation method of horizontal frost heave force was discussed. The effects of horizontal frost heave retaining walls and drainage ditches were explored. The calculation results show that the horizontal frost heave force is much larger than the active earth pressure. The effects of frost heave and thawing on anchor cable engineering are clarified. It is considered that the effect of open frost heave on control engineering is greater than that of closed frost heave. Methods of material antifreeze grade and measures to reduce freeze-thaw effect were proposed. It can be used as a reference for landslide management projects along the Sichuan-Tibet railway.

Keywords: freeze-thaw；Sichuan-Tibet railway；seasonal frozen region；landslide；anchor

0　引言

由于西藏的特殊地理位置，为支撑西部社会经济发展、保障国防安全，近年来国家加大了对西藏的建设力度，其中标志性的重大建设工程即为川藏铁路。川藏铁路规划线路穿越青藏高原东缘高寒带岛状山地冻土区，除山峰为多年冻土外，大多段为季节性冻土区，冻融环境相对复杂[1]，反复冻融循环势必对滑坡治理工程产生损伤，进而影响滑坡治理工程的有效性。

目前滑坡治理工程冻融效应主要集中在挡墙及锚索的冻融效应。挡墙的冻融效应方面，国内的研究工作比较多，梁波等[2－3]对青藏铁路 L 型挡土墙的土压力进

收稿日期: 2021-02-04; **修订日期:** 2021-06-19
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“藏东昌都地区城镇灾害地质调查”(DD20190644); 国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡和工程边坡防护工程健康诊断和快速修复”(2019YFC1509904)
第一作者: 杨　栋 (1985-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土体稳定性及防治技术方面的研究。 E-mail: 271062514@qq.com

行了一个冻融循环的实测；汪恩良等[4]通过模拟野外实测降温过程,进行加筋挡土墙在开敞条件下的冻融试验研究；赵坚等[5]根据我国近年来挡土墙抗冻技术研究成果，阐述了季节冻土区挡土墙抗冻结构设计的要求、荷载组合、冻胀力的设计取值及墙体强度和稳定的验算方法。季节性冻土冻融对锚索的影响方面，国内主要集中于对北方地区越冬基坑支护锚杆的监测及分析（ZHANG 等[6]、赵延凯等[7]），认为冻季锚杆内力增加，暖季土体融化松散，容易出现裂缝坍塌，郭红仙等[8]在文献分析的基础上论述了土钉内力的冻融效应。国外研究边坡锚索工程冻融效应相对较早，如德国[9]、美国[10]、法国[11]均对边坡锚索工程进行越冬内力、位移监测，结果表明冻期锚杆内力可达到初始预应力的 2 ~ 4 倍，解冻后，锚杆内力将减少。

上述滑坡治理工程冻融效应研究主要集中在青藏线及北方地区，极少涉及青藏高原东南部地区，针对川藏铁路规划线路季节性冻土地区的滑坡防治工程冻融效应分析及其对策的研究也未见报道。文章在对川西地区、昌都地区 G317、G318 沿线滑坡防治工程进行调查的基础上，分析总结季节性冻土区滑坡防治工程可能存在的问题及设计时所需注意的要点，为川藏铁路沿线滑坡治理工程及拟修建施工便道的边坡支护提供参考。

1　川藏铁路沿线地区冻融环境概述

川藏铁路规划线路穿越青藏高原东缘高寒带岛状山地冻土区，依次经过四川盆地、川西高山峡谷区、川西山地区、藏东南横断山高山峡谷区、藏南谷地区等 5 个地貌单元。从东向西依次跨越岷江、大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等 7 条大江大河，沿途地形跌宕起伏，岭谷高差可达5 000 m。除山峰为多年冻土外，大多段为季节性冻土区，该区季节性冻土区下限约为海拔 3 000 ~ 3 300 m，属于稳定型、南方型和亚热带型季节性冻土[12]。

徐敦祖、郭东信 (1982 年) 编制了 1∶400 万中国冻土分布图；李树德、程国栋（1996 年）编制了 1∶300 万青藏高原冻土图，为文中的研究提供了基础。川藏铁路沿线地区冻土分布、标准冻深等值线及本次案例点位置见图 1，地形变化及重要站点季节性冻土厚度见图 2。与滑坡防治工程直接相关的冻融环境因素除海拔、季节性冻土深度以外，还有冻结指数、冻结时间及混凝土年有害循环次数。以昌都地区为例，根据气象站点多年资料，冻期从 10 月开始，11 月冻土深度为 17 cm，12 月冻土深度为 62 cm，1—2 月冻结深度达到最大，3—4 月开始解冻，5 月消失。昌都冻结指数（年内日平均温度中的负温累计绝对值）为 232，为轻冻区；其混凝土年有害循环次数为 131 次[13]，年有害循环次数相对较多，因此混凝土的冻害环境也相对复杂。

2　滑坡防治工程冻融破坏方式及影响因素分析

本次选取川西、昌都季节性冻土区为研究对象，重点沿国道 G317、G318 线进行调查。案例调查共涉及滑坡防治工程 25 处，共发现 37 处分项工程产生不同程度的冻融破坏。根据现场调查情况初步将冻融效应划分为四类情形：A、微弱：防治工程结构无明显冻伤或冻胀

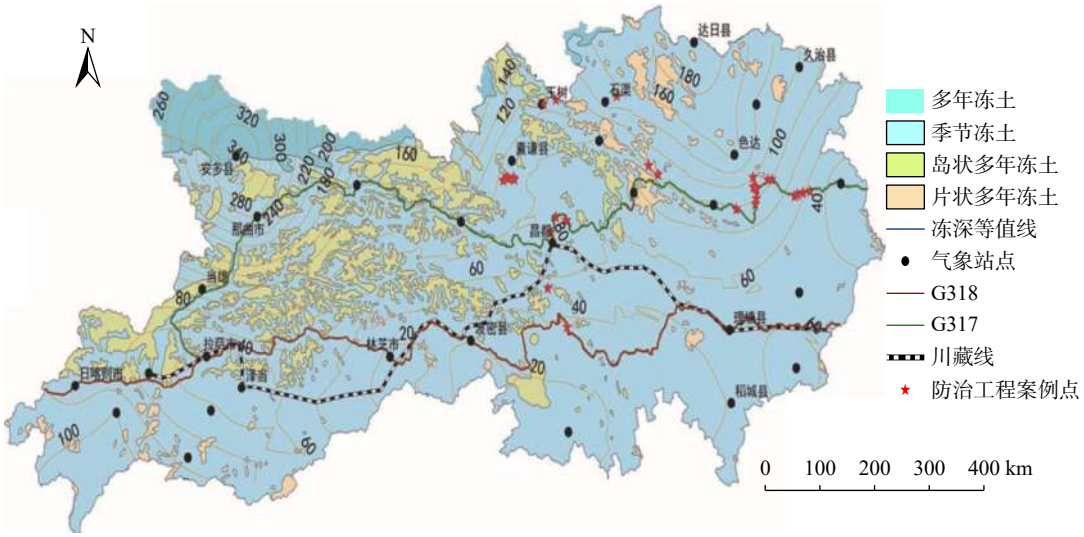

图 1　研究区冻土分布图

Fig. 1　Distribution of frozen soil in the study area

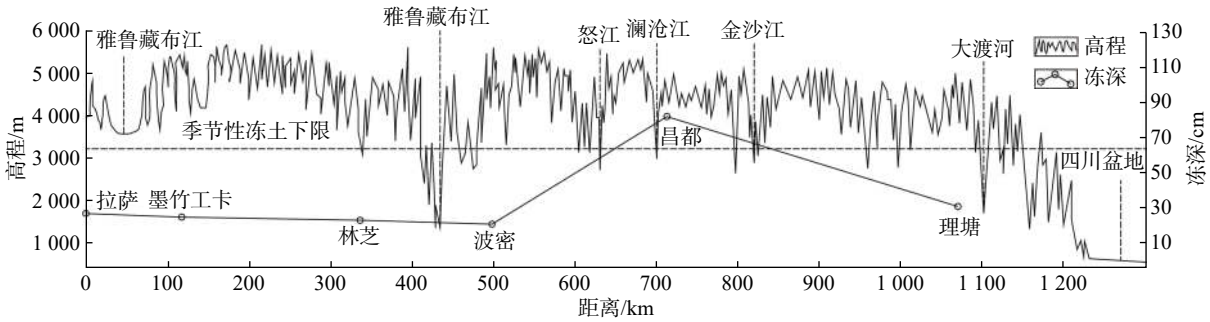

图 2　川藏铁路沿线季节性冻土分布图

Fig. 2　Seasonal frozen soil distribution along the Sichuan-Tibet railway

沉融变形；B、一般：防治工程结构完整，仅浅表层冻伤或产生微小裂隙及形变，不影响工程结构强度；C、中等：由于冻胀作用使得防治工程结构出现不可逆的较小结构性变形，损伤面较为局限，结构受力满足强度设计安全标准，且无恶化趋势，但进一步扩展将影响工程结构；D、严重：由于冻胀融沉循环作用使得防治工程结构出现不可逆的整体冻胀形变或是大面积严重直接冻害，并有加速劣化的趋势。

对 37 处分项工程分析，滑坡防治工程冻融破坏方式及影响因素见图 3，具体表现为：

①挡墙冻融效应及破坏主要表现为：挡墙直接冻害，挡墙中下部出水口处最为严重，主要分布于海拔 4 000 ~

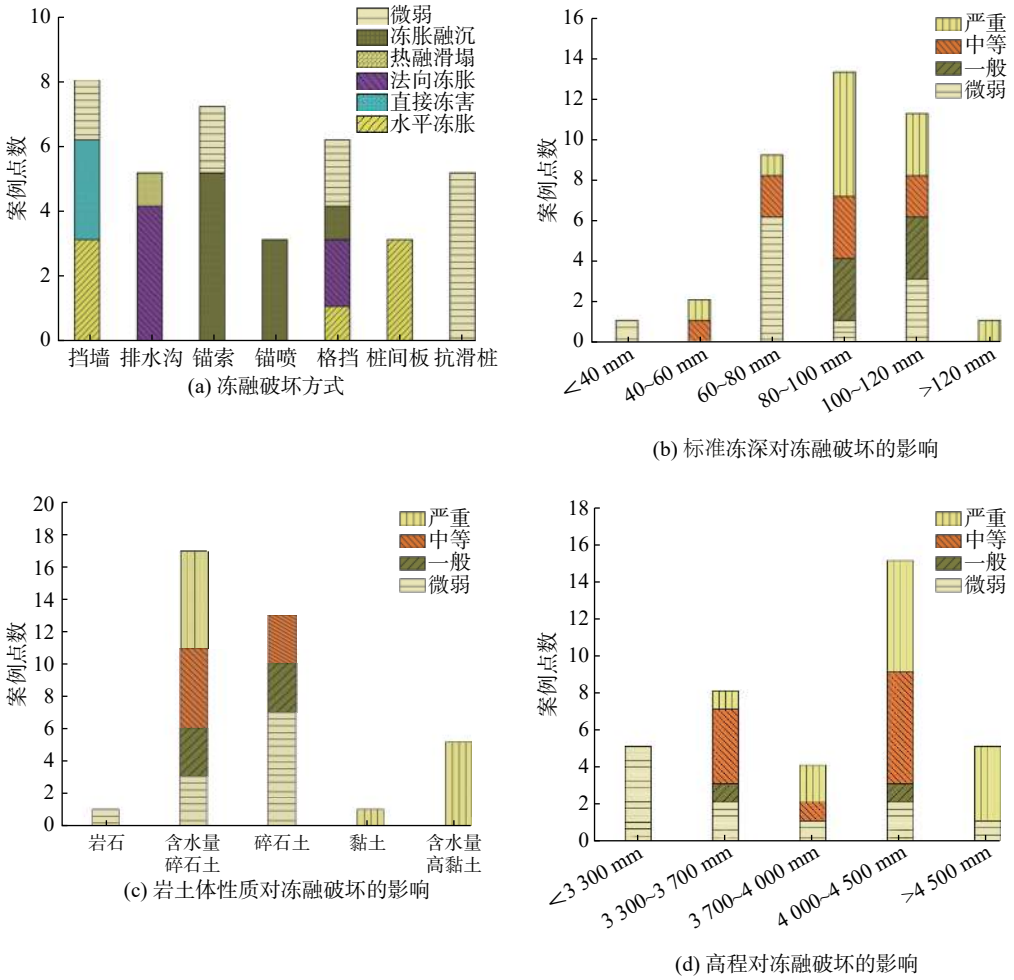

图 3　滑坡防治工程冻融破坏方式及影响因素

Fig. 3　Freeze damage and influencing factors of landslide control projects

4 400 m；由于冻胀力远大于土压力使得挡墙产生贯通裂缝而失效，以竖向张拉裂缝为主。

②排水工程冻融效应及破坏主要表现为：高海拔（4 200 ~ 4 500 m）高寒、地下水埋深浅、细粒较多（黏土）的滑坡排水工程冻融效应明显。由于不均匀冻胀融沉，使得排水沟多沿横断面产生贯通裂缝，在地形转折处变形更为严重；由于冻土产生的侧胀力，使得排水沟侧壁垮塌。

③锚索冻融效应及破坏主要表现为：锚索内力因冻胀变形将增大，从而破坏锚头及格构；由于原始坡面或格构与挡墙相交处填土的自身沉降及融沉效应，或是融雪时对格构基础的破坏，使得锚索或锚杆的预应力损失；在海拔较高地区（3 500 ~ 4 400 m），存在格构直接冻害及冻土冻胀开裂的情形。

④锚喷工程冻融效应及破坏较为普遍，主要原因是锚喷层太薄、未加钢筋，且阻碍了坡体水的排泄，在坡面含水率较高、细粒物质较多的局部，容易冻裂，垮塌。

⑤桩板冻融效应及破坏冻融效应微弱，而桩间板的冻害与挡墙类似，且外挂板的受力模式更容易被破坏。损坏形式为受水平冻胀作用产生拉裂纹；混凝土致密性差，冻融作用破坏表层。主要原因：桩间土回填不密实，没有反滤层或土体饱水等，见图 3（a）。

⑥标准冻深的影响：在冻胀率能相近的情况下，显然季节性冻土标准冻深越深，其冻胀融沉变形量越大。反复作用下，其对防治工程的劣化效应越明显。从图 3（b）可见，产生冻融损伤的滑坡防治工程多分布于冻深大于 60 cm 的地区，冻深越深则防治工程冻融破坏程度越严重。

⑦岩土体性质的影响：川西地区、昌都地区 G317、G318 沿线除高原面上发育大面积黏土外，其余地区以粗粒碎石土为主，碎石土虽为弱冻胀土，但其含水量高、汇水面积大，地下水埋深较浅时，其对滑坡防治工程的冻融效应是不可忽视的，见图 3（c）。

⑧高程的影响：从图 3（d）可见，冻融破坏程度为“中等”及以上的案例多分布于海拔 3 700 ~ 4 500 m。总体而言，海拔越高，气温越低，冻结指数越大，直接冻害越严重。

3　滑坡防治工程冻融效应

3.1　混凝土构件直接冻害

调查中发现大量的混凝土结构产生严重的直接冻害，冻融循环作用对混凝土造成的不利影响主要体现在两个方面:表面剥落以及冻胀开裂，会出现混凝土质量损失和对相对动弹性模量产生影响，而对混凝土强度的影响则更大。

混凝土冻害机理十分复杂，目前并没有公认的能解释全部冻害现象的理论。混凝土是由水泥、水和粗、细骨料组成的毛细孔多孔体，包括气孔、毛细孔、凝胶孔等。当环境温度降低到−1 ~ −1.9℃ 时，混凝土孔隙中的水由大孔开始结冰，逐渐扩展到较小的孔，当温度在−12℃ 时，毛细孔中的水开始结冰，而凝胶孔中的水一般不结冰。根据静水压假说[14 − 17]，水转化为冰时体积膨胀 9%，迫使未结冰的孔溶液从结冰区向外迁移，因而产生静水压力，静水压力随孔隙水流程长度增加而增加，当孔隙水的流程长度大于某极限长度时，静水压力将超过混凝土的抗拉强度，从而造成破坏。

季节性冻土地区滑坡防治工程应考虑采用抗冻水泥混凝土和抗冻水泥砂浆，其抗冻等级可参考《JTG/T D31-06—2017 季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》[13]，根据其所处地区的有害冻融次数、饱水状态、有盐/无盐条件及设计年限来确定，抗冻等级可分为 F100、F150、F200、F250、F300、F350、F400 及 F450。对于 C60 以下混凝土可考虑适量的引气措施来提高混凝土的抗冻性能。

3.2　挡墙的冻融效应

3.2.1　封闭系统下水平冻胀力对挡墙的影响

封闭系统冻胀是指冻胀过程中，没有外部水补给，仅由土体中原驻水引起的冻胀。挡墙墙后的土体冻胀属于双向冻结，当挡墙基础埋深足够时，垂直于地面的冻胀力只能抬高墙后土体，对墙无害，但垂直墙身的水平向冻胀力是直接造成挡土墙断裂、位移过大等主要因素。特别是翼墙拐角处，由于应力集中的原故，破坏更为严重。

关于水平冻胀力的研究，前人已取得大量的成果，认为水平冻胀力远大于主动土压力，在特定条件下可达到 10 倍以上，《GBT 50662—2011 水工建筑物抗冰冻设计规范》[18]中对挡墙水平冻胀力大小及分布计算也作了相关规定。

文中拟进行一个简单算例，以直观比较挡墙水平冻胀力与主动土压力大小。某挡土墙墙高 5 m，墙背竖直，墙后填土为黏土，内摩擦角 20°，黏聚力 10 kPa，重度 18 kN/m^3，墙后填土冻胀级别为Ⅲ级，冻胀量 12 cm。

按照相关规范条例，其主动土压力与水平冻胀力分布见图 4，其中 H_t 为填土高度，β 为与冻胀量相关的系数，Z_d 为挡墙基础埋深。多边形 DEFG 为水平冻胀力分布，其合力为 169.3 kN/m；三角形 ABC 为主动土压力

分布，其合力为 51.4 kN/m。可见，该挡墙水平冻胀力大于主动土压力，数值上约为 3.3 倍。如果重力式挡墙进行抗滑、抗倾覆设计及墙身强度校核时未充分考虑水平冻胀力的影响，则挡墙势必造成整体稳定性问题或者墙身强度问题，挡墙可能产生倾斜、墙顶位移过大，或是墙身负弯矩过大，产生贯通的竖向裂纹等，影响挡土墙支挡功能的正常发挥。

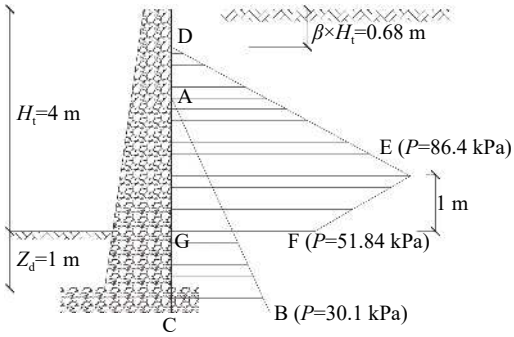

图 4 挡墙土压力及水平冻胀力分布图

Fig. 4 Distribution of horizontal frost-heaving force

3.2.2 开放系统下水平冻胀力对挡墙的影响

开放系统冻胀是指冻胀过程中，除土体中有原驻水外，还有外部水源源不断地迁移、聚集至冻结面处，进而发生的更严重的冻胀。公路修建时，往往会破坏原有含水层，形成透水层、含水层及相对不透水层的三层体结构，挡墙排水孔多设置于排水层中，由于负温的影响，冬季泄水孔常被堵塞，透水层也开始冻结，在含水层顶部形成一个冰盖，而含水层中的水分不断向泄水孔周围迁移，使得冻胀相比较封闭系统而言显得更为剧烈，从而破坏挡墙工程（图 5）。

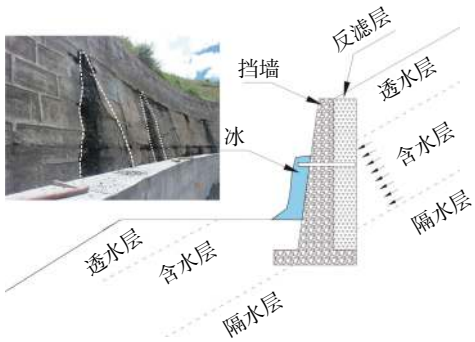

图 5 挡墙开敞式冻胀示意图

Fig. 5 Freezing damage to retaining walls

3.3 排水沟的冻融效应

3.3.1 排水沟冻胀破坏

调查中发现，高海拔高寒、地下水埋深较浅、细粒较多的滑坡排水工程冻融效应较为明显，应当引起岩土工程师的重视。季节性冻土区排水沟冻胀破坏主要表现为侧壁垮塌及沿排水沟横剖面产生贯通裂缝，往往在地形转折处变形更为严重。一般需设置地表排水工程的滑坡其地面径流条件较好，土体常处于潮湿状态，含水量较高，因此其冻胀变形较大，故排水沟侧壁直接受水平冻胀力作用也较大，当冻胀荷载大于排水沟侧壁强度时，容易引起垮塌（图 6）。

图 6 排水沟冻胀破坏示意图

Fig. 6 Freezing damage of drainage ditch

排水沟基底主要受法向冻胀力，其方向垂直于等温面的，也近似垂直于排水沟基底。由于滑坡物质空间分布、含水率分布等不均，因此可能产生差异较大的法向冻胀力，使得排水沟整体上抬，造成排水沟内部产生内力集中，其基础底板可能产生较大的负弯矩，当超过其极限值时便开始开裂。在春季冻土融沉时，由于排水沟设置部位的地形突变、地基土性质及含水率的差异等，使得排水沟基础底板靠自重不能与融化的地基土同步下沉、复位，进一步扩展裂缝，造成下渗流量大，冲刷地基，在反复冻胀融沉作用下，排水沟可能产生破坏，进而影响滑坡的整体稳定性。

3.3.2 热融滑塌对排水沟的破坏

热融滑塌是季节性冻土区边坡失稳的常见形式。季节性冻土区水文地质条件不良的粉质或黏性土滑坡，秋末多雨，结冻前土体原始含水量大，土层冻结具备开放系统条件，地下水位接近或位于冻层，汇水条件好，大量地表水向边坡渗透聚集，使得冻融层湿度较高。春季时冻融层土体开始解冻，融化后土体的抗剪强度参数会有大幅度的折减。根据《JTG/T D31-06-2017 季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》[13]，抗融滑稳定性计算公式为：

$$F_s = \frac{(G - u_w + qL)\cos\alpha\tan\varphi + cL}{(G + qL)\sin\alpha} \quad (1)$$

式中：F_s——抗融滑稳定性系数；

G——土体自重；

u_w——水的扬压力；

q——坡面砌体荷载；

L——滑面长；

α——滑面倾角；

c、φ——折减后的土体抗剪强度系数。

黏性土的黏聚力折减系数为 0.3 ~ 0.6，内摩擦角折减系数为 0.15 ~ 0.16，同时受未及时排出的溶解水的影响，易在冻融层附近产生平直滑面型的滑移破坏，融滑深度为冻结线深度的 1/3 ~ 2/3，多为 0.1 ~ 0.5 m。

由于排水沟的设计并未考虑支挡功能，热融滑塌的产生会对排水沟产生严重的影响。由于热融滑塌，会使得设置于相对稳定坡体上部的排水沟基础脱空，逐渐产生破坏，设置于坡脚处的排水沟将受到浅层融滑的剩余下滑力，因而产生挤压变形（图 7、图 8）。

图 7　热融滑塌对排水沟的破坏照片

Fig. 7　Damage caused by hot melt slump

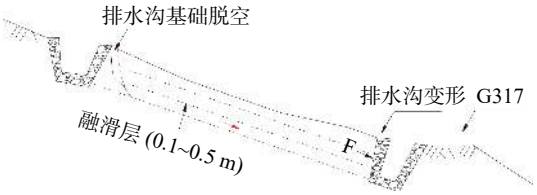

图 8　热融滑塌对排水沟的破坏示意图

Fig. 8　Destruction of drainage ditch by hot melt slump

3.4　锚索冻融效应

以左贡县田妥镇斜马通村 G318 公路 K3663+750 处滑坡为例[19]，该滑坡位于西藏昌都地区左贡县田妥镇，海拔高度4 100 m。冬春季气候干燥寒冷。年平均气温为 6.2℃，1 月份平均气温为−6.7℃，年最大冻土深度 1 m。滑坡及周围坡体地层岩性主要为第四系全新统崩坡积物、第四系全新统冲洪积砂、卵石，以及下伏的三叠系上统巴贡群砂岩夹页岩及泥灰岩。该滑坡防治工程对锚索进行了为期 2 年的长期监测，数据见表 1。可见由于滑坡变形或冻胀影响，最大锚固力相对于锁定锚固力分别增长了 25.52%、41.38%、46.03 % 及 37.89%，最大者增长了 300 kN，则锚索（杆）很可能被拉断或者锚头破坏，滑坡有失稳的可能。而当温度变暖时，由于土体融沉作用，锚索预应力相对于最大锚固力均有较大程度的降低，最低者降低 320 kN，小于初始锚固力。

表 1　锚索监测数据[19]

Table 1　Monitoring data of anchor cables[19]

编号	锁定锚固力 /kN	最大锚固力 /kN	最大增长率 /%	稳定值 /kN
339#	482	605	25.52	600
345#	638	902	41.38	620
357#	630	920	46.03	600
358#	805	1 110	37.89	950

根据典型案例调查，季节性冻土区锚索工程的冻融效应主要体现在以下方面：①土体冻胀时，会产生指向坡外的变形，而锚索框格约束这种变形，势必在框格基底产生较大的法向应力，关于法向应力大小，规范中认为在基础不变形的情况下，最大可达到 210 kPa。法向应力增强使得框格梁负弯矩过大，产生贯通裂缝。②锚索约束并不能完全消除冻胀变形，锚索也会产生指向坡外的变形，因而使得内力增大，由于锚索的弹模较大，即使产生很小的位移，也会引起内力大幅度增加，主要表现为破坏锚索外锚头。③由于土体融缩变形，锚索也随之回缩，同时地基土融化时，其地基承载力也相应降低，因此锚索预应力将产生较大的预应力损失，甚至存在锚具脱空预应力完全丧失的情况。

4　季节性冻土区滑坡防治工程建议

4.1　季节性冻土区滑坡防治工程优化建议

为减缓季节性冻土区滑坡防治工程冻融效应，可采取以下措施：

（1）框格锚索工程可采用耗能结构及应力保持装置，对框格梁适当提高标号，并采取保温措施。

（2）排水沟减少地表裸露的方式，改用渗水盲沟、保温沟、冷暖沟的形式；排水沟基础采取保温措施，地

形转折处应加强截面强度；泉水出露处采用集水井。

(3)抗滑挡墙及桩间板适当提高混凝土标号应做好疏干、排水工作。桩间板应采取内挂的方式。

(4)锚喷工程应与主动网联合使用。

4.2 双向调节预应力锚索

针对季节性冻土针对冻融条件下岩土体冻胀、热融将造成锚固工程预应力陡增、损失的问题，除控制填土细粒含量及对锚索(杆)及框格梁采取一定的安全系数外，项目组提出一种可以抵抗冻土冻胀、融缩变形的锚索结构(图 9)，最小化其预应力损失，使其满足冻融环境下的深层滑坡的防治要求：

(1)利用屈服锚具调节较大的由冻胀变形或滑坡滑动变形预应力增加，可兼顾抗震设计。

(2)利用碟簧蓄能系统，抵消部分预应力损失，也可抵抗较小的由变形引起的预应力增加。

(3)行程指标：50 mm。吨位要求：50 t，4 根钢绞线。

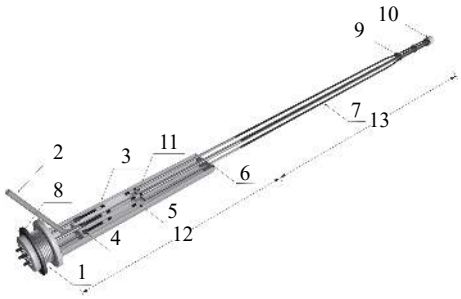

图 9 双向调节预应力锚索结构图

Fig. 9 Structure of bi-directional adjusting prestressed anchor cable

1—碟簧耗能系统；2—注浆管；3—保护套筒；4—退位卡套；5—安全卡套；6—封底板；7—钢绞线；8—锚具；9—架线环；10—导向帽；11—承力转换板；12—自由段；13—锚固段

50 t 级双向自动调节式预应力锚索额定工作锚固力为 400 kN，在冻结期冻胀作用下，当锚固力小于设计屈服力 500 kN 时，应力保持装置发挥作用，大大降低由于冻胀产生的预应力增量，当锚固力大于设计屈服力 500 kN 时，屈服装置发挥作用，可维持 500 kN 锚固力；在融化期融沉作用下，应力保持装置发挥作用，能补偿大部分由于融沉作用产生的预应力损失；在地震或者大变形作用下，屈服装置发挥作用。

5 结论

(1)川藏铁路规划线路穿越青藏高原东缘高寒带岛状山地冻土区，除山峰为多年冻土外，大多段为季节性冻土区，冻融环境相对复杂，滑坡治理中应关注冻融对工程的影响。

(2)通过对已建工程 G317、G318 滑坡及边坡治理工程运行现状的实地调研，总结了冻融条件下各常用工程的破坏形式及受力机理，认为开放式冻胀较封闭式冻胀对防治工程的影响更大；并指出季节性冻土区滑坡防治应注意的水平冻胀力、材料抗冻等级等问题。

(3)根据冻融条件下滑坡防治工程破坏形式，针对性提出对锚索采用耗能结构，对锚喷工程提出锚喷与主动网联合使用，对排水工程应当采取保温措施且在地形转折处应加强等。

(4)文中以案例调查为基础来探讨滑坡防治工程的冻融效应，以期引起岩土工程师对这一问题的关注，但冻融效应涉及到冻胀理论、土体冻胀性能、与结构协调变形以及防治工程劣化机理等，尚需更多实测数据来支撑。

参考文献（References）：

[1] 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)]

[2] 梁波，王家东，严松宏，等. 多年冻土地区L型挡土墙土压力(冻胀力)的分析与试验[J]. 冰川冻土，2002，24(5)：628－633. [LIANG Bo, WANG Jiadong, YAN Songhong, et al. Experiment and analysis of the earth pressure (frost heaving forces) on L-type retaining wall in permafrost regions[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 2002, 24(5)：628－633.(in Chinese with English abstract)]

[3] 梁波，王家东，葛建军，等. 青藏铁路L型挡土墙的土压力实测与分析[J]. 岩土工程学报，2004，26(5)：627－631. [LIANG Bo, WANG Jiadong, GE Jianjun, et al. Testing and analysis of earth pressure about L type retaining wall in Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5)：627－631.(in Chinese with English abstract)]

[4] 汪恩良，钟华，孙景路，等. 加筋土挡墙冻融试验研究[J]. 岩土工程学报，2010，32(2)：265－270. [WANG Enliang, ZHONG Hua, SUN Jinglu, et al. Experimental study on reinforced retaining walls suffering freeze-thaw cycling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2)：265－270.(in Chinese with English abstract)]

[5] 赵坚，那文杰，曹顺星. 季节冻土区挡土墙抗冻结构设计方法[J]. 黑龙江交通科技，2001，24(5)：14－16. [ZHAO Jian, NA Wenjie, CAO Shunxing. Design of

antifreezing structure for retaining walls in seasonal frost regions［J］. Communicatios Science and Technology Heilongjiang, 2001, 24(5): 14－16. (in Chinese with English abstract)］

［6］ ZHANG Y, DONG J H, DONG X G, et al. Analysis of freezing and thawing of slope improved by soil nailing structure in seasonal frozen soil region［J］. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 574－582.

［7］ 赵延凯，彭然，周加伟，等. 季节性冻土深基坑支护技术研究［J］. 建筑结构，2011, 41(7): 119－122. ［ZHAO Yankai, PENG Ran, ZHOU Jiawei, et al. Investigation on technology of retaining and protection for seasonal frozen soil deep foundation pit［J］. Building Structure, 2011, 41(7): 119－122. (in Chinese with English abstract)］

［8］ 郭红仙，宋二祥，陈肇元. 季节冻土对土钉支护的影响［J］. 工程勘察，2006, 34(2): 1－6. ［GUO Hongxian, SONG Erxiang, CHEN Zhaoyuan. Soil nailing under the influence of the seasonal frozen soil［J］. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(2): 1－6. (in Chinese with English abstract)］

［9］ STOCKER M F, RIEDINGER G. The bearing behavior of nailed retaining structures[C]// Design and Performance of Earth Retaining Structures: Proceedings of a Conference Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. New York, June 18-21, 1990, edited by Philip C. Lambe and Lawrence A. Hansen: 612-628.

［10］ KINGSBURY D W, SANDFORD T C, HUMPHREY D N. Soil nail forces caused by frost［J］. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1808(1): 38－46.

［11］ LONG N T, T LIVET M, BOUTONNCT, et al. Repair of a reinforced earth wall[C]//Proc. Interactional Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, University of Missouri-Rolla, 1984: 335-346.

［12］ 李宗龙. 川西高原川藏交通廊道季节性冻土分布规律及处置措施[D]. 成都：西南交通大学，2013. ［LI Zonglong. Distribution regularity and disposal measures of seasonal frozen soil of Sichuan-Tibet transportation corridor in west Sichuan plateau[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)］

［13］ 中华人民共和国交通运输部. 季节性冻土地区公路设计与施工技术规范：JTG/T D31-06—2017[S]. 北京：人民交通出版社，2017. ［Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Design and Construction of Highway in seasonal Frozen Soil Region: JTG_T D31-06-2017[S]. Beijing: People's Communications Publishing Co. Ltd., 2017. (in Chinese)］

［14］ 张誉，蒋利学，等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海：上海科学技术出版社，2003:105-117. ［ZHANG Yu,JIANG Lixue, et al. Durability of concrete structure [M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 2003: 105−117. (in Chinese)］

［15］ 董旭光，董建华，何天虎，等. 多年冻土边坡的水热力耦合分析及软件开发［J］. 中国地质灾害与防治学报，2020, 31(4): 77－84. ［DONG Xuguang, DONG Jianhua, HE Tianhu,et al. Coupling analysis and software development of moisture-heat-stressfields of permafrost slope［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 77－84. (in Chinese with English abstract)］

［16］ 张遂，匡航，靳占英，等. 高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究［J］. 水文地质工程地质，2020, 47(5): 116－124. ［ZHANG Sui, KUANG Hang, JIN Zhanying, et al. An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 116－124. (in Chinese with English abstract)］

［17］ 齐子萱，周金龙，季彦桢，等. 西北内陆盆地降水入渗补给季节性变化——以新疆昌吉地下水均衡试验场为例［J］. 水文地质工程地质，2020, 47(5): 12－20. ［QI Zixuan, ZHOU Jinlong, JI Yanzhen,et al. Seasonal variationin recharge of infiltration from precipitation for the inland basins of northwestern China: taking the Changji groundwater balance test station in Xinjiang as an example［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 12－20. (in Chinese with English abstract)］

［18］ 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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，2012. ［Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of hydraulic structures against ice and freezing action: GB/T 50662—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)］

［19］ 何伟. 西藏自治区国道318线田妥镇滑坡机理及防治技术研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2012. ［HE Wei. Research of the Tibet autonomous region national Highway 318 Line of the landslide mechanism and the field prevention and control technology[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese with English abstract)］