

高原冻土地区公路边坡稳定性及加固施工技术

苗祥达^{1,2}, 陈泽盟², 王豪^{1,2}, 李文杰², 梁斌^{2*}

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471013; 2. 河南科技大学 土木工程学院)

摘要:以西藏羊大公路改建工程为依托,研究了高原冻土地区公路边坡稳定性及加固施工技术。采用有限元分析软件 Midas-GTS NX 建立 4 种公路模型,分析了边坡在增设加固措施前后与冻融循环前后的内力变化和结构变形位移等力学指标变化规律,并因地制宜进行施工优化。研究表明:模型经历冻融循环后竖向应力及水平应力值均有效降低;对比分析证明:挡土墙可以有效降低竖向位移值和水平位移值;增设路肩墙后竖向沉降降低 50.79%,水平位移变化值更快趋于稳定且均降低至 20 mm 以下。将建模理论计算值与工程监测值进行对比分析验证了该文方法的正确性。

关键词:高原冻土区;公路;边坡稳定性;施工技术

1 前言

在内陆公路路基施工中常出现的边坡问题一般包括路堑边坡失稳或高边坡失稳,造成这些问题的原因多为土质松散、边坡加固措施不足等。但是在西藏等偏远西部山区,地处高海拔寒区,老旧公路不仅出现上述问题,还会经历每年季节变换、气温变化引起的路基边坡温度场发生改变,造成土体内部水土流失、水相变化引起的冻土冻融循环现象。由于冻土冻融循环致使原本施工完成的路基边坡土层、防护结构层内材料参数发生改变,将直接影响公路使用安全,降低公路使用年限,增加行车安全隐患等。因此,有必要对高原冻土地区公路边坡稳定性及加固施工技术进行研究。

针对冻土地区公路路基、边坡等稳定性问题多采用理论、数值模拟与实际工程相结合的方法进行研究。文献[18]为了研究冻融循环引起膨胀土力学特性的衰减规律,针对南水北调中线的渠道边坡膨胀土试样进行 0~8 次的冻融循环处理,然后对土样开展三轴固结排水剪切试验,对土体冻融劣化效应进行了定量评价。结果表明:不同冻融循环次数下膨胀土的三轴剪切强度与围压保持线性正相关关系;根据摩尔库仑

准则计算了土体的强度指标,对数函数可以对强度指标和循环次数的关系进行有效拟合;根据试验结果提出一个考虑冻融循环次数的强度表达式,由此预测了膨胀土在多次冻融循环后的强度指标;文献[19]考虑温度影响冻土的力学性能,对边坡的稳定性影响较大,提出临界滑动面搜索算法,改进边坡稳定系数计算中的矩心解法。结果表明:解冻土达到最深处的第 10 个月,冻土路基的最小稳定系数没有出现,而是在暖季初期出现,形成了融化塌陷现象;文献[20]以公路边坡工程模型试验为背景设计加筋土挡墙试验及加载装置,模拟施加在路堤边坡挡墙上的不同荷载。采用理论分析方法计算得出加筋带面积,通过试验确定极限荷载大小,应用 FLAC^{3D} 进行数值模拟和优化分析,得到路堤边坡加筋土挡墙优化设计方案。目前中国大部分研究主要针对高原地区路基边坡稳定性进行分析讨论,而针对高原冻土区公路边坡加固措施在经历冻融循环前后力学变化规律及相关边坡加固措施施工技术研究相对较少。

该文以西藏羊八井至大竹卡公路改建项目 K23+110~K23+317 标段为依托,针对公路边坡冻融、水毁坍塌等病害进行力学机理分析。利用 Midas-GTS NX 软件建立 4 种公路边坡摩尔-库仑力学模型,根

收稿日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:U1604135);中交第二公路局有限公司重点科研项目(编号:2017-1-1);河南省科技厅产学研合作项目(编号:2015HNCXY011)

作者简介:苗祥达,男,大学本科,高级工程师。E-mail:1009759817@qq.com

* 通信作者:梁斌,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:liangbin4231@163.com

据模型模拟数据针对冻土环境下公路边坡力学、位移等稳定性发生变化进行分析对比;在保证施工质量和施工安全、工期的前提下,进行边坡加固施工方案优化,并与现场监测数据对比,进而指导路基边坡施工。

2 工程概况

羊大公路改建项目起于拉萨市羊八井镇,与国道 109 相接,在羊八井镇下穿青藏铁路并向西南经过拉萨市当雄县,在 K93+529 处过界进入日喀则市。项目起止桩号为 K0+000~K94+000,全长 94 km,整体式路基宽 7.5 m,路面宽度 6.5 m,设计速度 30 km/h,设计高程 4 500~5 500 m。

由于羊大公路改建项目海拔处于 4 500~5 500 m,斜坡为松散堆积体,易产生泥石流、冻害、路基沉陷等不良地质病害集中地段。根据现场施工环境,改建前路基边坡并未进行加固,多产生泥石流、涎流冰等地质灾害,加之地处季节性冻土与多年冻土共存地段,土层力学性质变化较为复杂。在进行公路改建时需进行边坡加固,并因地制宜进行边坡施工优化,从而降低复

杂地质条件对公路后期使用的不良影响。

3 有限元模型建立

为分析高原冻土公路边坡冻融力学特性及施工技术问题,运用有限元软件 Midas-GTS NX 建立 K23+110~K23+317 标段路基边坡加固措施结构三维力学模型,分别为:公路改建前冻融循环前力学模型、公路改建前冻融循环后力学模型、公路改建后冻融循环前力学模型、公路改建后冻融循环后力学模型。边界选取至路基边坡影响最小处,X 轴长度选为路基基层宽度 3 倍,Z 轴高度选为路基回填高度的 3 倍。根据现场施工图纸建议基层边坡坡比为 1:1.5,在整体结构中取其上下、左右 4 个面均为非自由面,施加位移约束。

以羊大公路改建工程 K23+110~K23+317 标段内土层主要由砂砾层与黏土层组合而成,区内河流大多呈台阶状,斜坡分布。根据地质勘察报告并参考 JTG/T D31-04-2012《多年冻土地区公路设计与施工技术细则》,岩土参数见表 1。

表 1 岩土参数

岩土类型	弹性模量/ MPa	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	泊松比	本构模型
原土	15 000	20.0	23.2	30.0	0.30	摩尔-库仑
天然级配砂砾	25 429	27.2	35.2	35.9	0.16	摩尔-库仑
水泥稳定砂砾	25 000	26.5	34.1	36.0	0.25	摩尔-库仑
粉质黏土	20 000	24.0	32.0	16.0	0.30	摩尔-库仑
中粒式沥青	12 000	25.0	31.2	30.2	0.30	摩尔-库仑
混凝土	27 000	24.0	34.6	32.1	0.27	弹性

4 计算结果与分析

由于该项目公路所处地区为高海拔寒区,每年路基、边坡等结构层都要经历多次冻融现象,土层力学参数改变将直接影响公路使用年限等,通过建立 4 种公路边坡模型,分析高原冻土路基边坡加固工程在经历冻融循环后发生的力学性能变化,并为多年冻土区公路边坡加固施工方案选择提供参考。

4.1 竖向应力

根据路基边坡有限元模型模拟得到表 2 冻融循环前后路基边坡 3 个结构点应力值。由表 2 可以看出:

① 在增加边坡加固措施后模拟 3 个结构点的竖向应力值均比无加固措施时小,表明进行路基边坡加固更能有效降低冻融循环对路基边坡等的影响;② 公路改建后增设路基加固措施,挡土墙、路肩墙等可以有效降低冻融循环后竖向应力增长率,路肩墙坡脚从 19.362%增长率降至 17.773%、挡土墙顶从 30.826%降至 4.386%、挡土墙底从 27.356%降至 18.788%,侧面印证了边坡加固措施的有效性。在增加边坡加固措施后,经历冻融循环后的边坡坡脚和挡土墙的竖向应力变化率较大,会直接产生竖向沉降,造成挡土墙下沉、边坡发生滑塌等事故,需要施工时严格控制其施工质量,保证施工、使用安全。

表2 竖向应力变化

模拟位置	无加固措施			增加加固措施		
	冻融前/kPa	冻融后/kPa	变化率/%	冻融前/kPa	冻融后/kPa	变化率/%
路肩墙坡脚	76.54	91.36	19.362	50.92	59.97	17.773
挡土墙顶	296.05	387.31	30.826	99.19	103.54	4.386
挡土墙底	72.78	92.69	27.356	23.26	27.63	18.788

4.2 水平应力

表3为边坡路肩墙水平应力值。由表3可以看出:①在增加边坡加固措施后路肩墙顶部和底部水平应力增大,路肩墙起到围挡作用,用以抵挡路基产生的水平作用力。在经历冻融循环后路肩墙坡顶水平应力增加23.88%、坡底增加7.54%,相较改建之前未增设路肩墙时该结构点坡顶水平应力增加42.77%、坡底增加24.84%有了很大改善,进一步表明设立路肩墙对降低土层冻融循环后的影响是有效的;②挡土墙顶

水平应力值发生较大变化,在无加固措施并且未经历冻融循环时挡土墙顶结构点水平应力值为337.615 kPa,经历冻融循环后增加32.91%至448.74 kPa,水平应力绝对值较大,对该结构点产生水平推力,易发生边坡滑坡等安全事故。在增设挡土墙后水平应力值有效降低,并且经历冻融循环后水平应力值只增加5.97%,表明挡土墙不仅起到了对路基高边坡的支护围挡作用,而且在冻融循环后可有效阻止水平应力值发生较大改变。

表3 水平应力变化

模拟位置	无加固措施			增加加固措施		
	冻融前/kPa	冻融后/kPa	变化率/%	冻融前/kPa	冻融后/kPa	变化率/%
路肩墙坡顶	-12.005	-17.140	+42.77	-42.970	-53.233	+23.88
路肩墙坡脚	-58.601	-73.156	+24.84	-130.682	-140.541	+7.54
挡土墙顶	-337.615	-448.74	+32.91	-57.332	-60.754	+5.97

4.3 竖向沉降

通过公路边坡模型得到图1、2挡土墙顶部和底部的沉降模拟值,相较未增设路基边坡加固措施得到的模拟沉降值分别降低16.82、21.736 mm,同时在增加挡土墙后边坡经历多次冻融循环更快趋于稳定,侧面印证挡土墙对路基高边坡加固、支挡起到有效的作用。图3为路肩墙坡脚沉降值折线图。由图3可以看出:在经历冻融循环15次后,边坡坡脚处无增设路肩墙时沉降持续增加,并未出现稳定趋势,但是在增设路肩墙

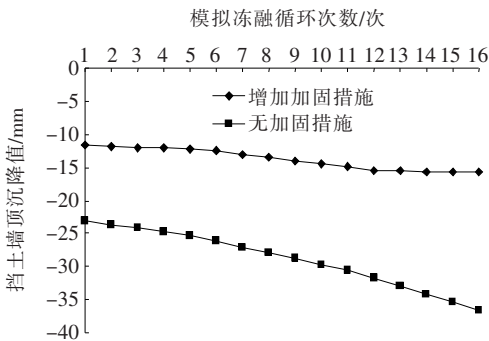


图1 挡土墙顶沉降值

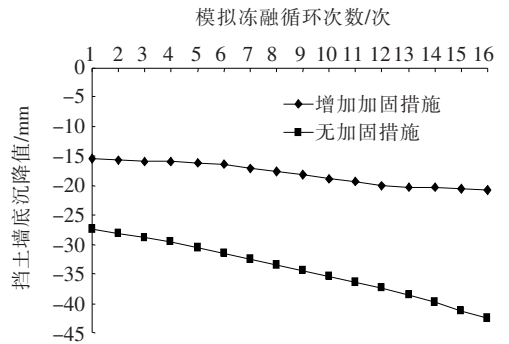


图2 挡土墙底沉降值

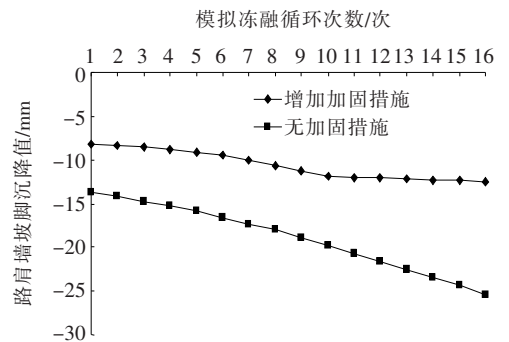


图3 路肩墙坡脚沉降值

后得到模拟值从 25.4 mm 降低至 12.5 mm,降低了 50.79%,效果显著。

4.4 水平位移

由模型计算得到路肩坡顶、坡脚、挡土墙顶有无加固措施时水平位移值如图 4~6 所示。

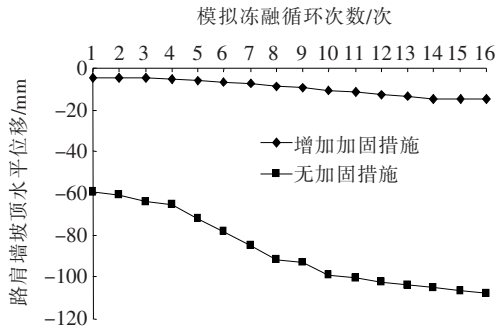


图 4 路肩墙坡顶水平位移值

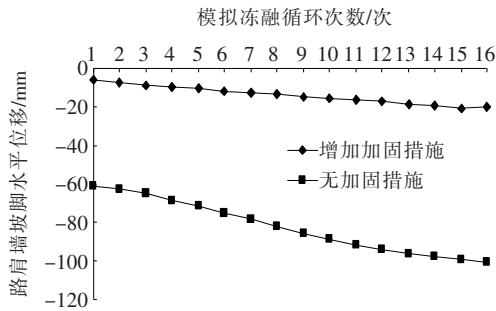


图 5 路肩墙坡脚水平位移值

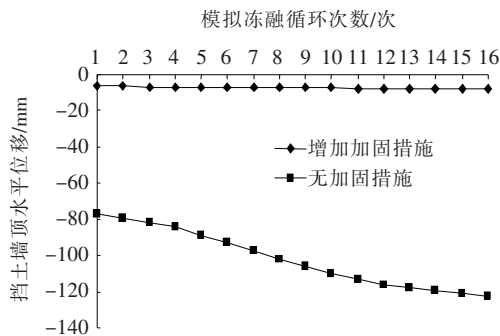


图 6 挡土墙顶水平位移值

由图 4~6 可以看出:在增设边坡加固结构层后路基水平位移出现较大变化。无加固措施时水平位移值逐渐增加,虽有趋于稳定的趋势但是在模拟 15 次冻融循环后路肩墙坡顶水平位移值增加至 108.02 mm,坡底增加至 100.68 mm,挡土墙坡顶水平位移值增加至 122.54 mm。水平位移值出现较大变化,高边坡处易产生滑塌等安全事故,同时由于水平位移的影响,路基产生塌陷等路面下沉现象。在增设边坡加固措施后水平位移均降低至 20 mm 以下,效果明显且在施工安全

范围内。同时在模拟冻融循环后水平位移从 4.7 mm 变化到 19.61 mm,变化趋势不大且一直趋于稳定。

5 加固施工措施

根据有限元边坡模型在进行冻土冻融循环后得到的模拟内力、位移变化结果分析比较,证明在高原冻土区公路路基边坡增设边坡加固措施可以有效降低因冻土冻融循环后内力变化而引起的路基边坡水平、竖直位移。所以针对以上数值模拟分析后,再进行因地制宜的路基边坡施工优化,更能有效地实施路基边坡加固施工,增加改建公路的安全性,提高公路的使用年限,提高施工效率等。

5.1 片石混凝土挡土墙

针对高边坡路段设置片石混凝土挡土墙在条基施工完毕后布置土工格栅可以使挡土墙整体稳定性提高,可以有效降低边坡土石滑动对路基的影响,减少土层因冻融循环后边坡稳定性降低对路基路面的影响。

5.2 浆砌片石路肩墙

路肩处因路基土层在经历冻融循环后易产生顺坡面的水平位移和竖向沉降,进而造成路面塌陷等施工事故,施工时因地制宜采用浆砌片石路肩墙以减小路基土层不同程度的位移和沉降,同时在路肩墙施工时铺设土工格栅使其整体性提高,有效降低土层冻融力学变化对公路路面使用安全的影响。

5.3 聚冰坑

由于该工程所处地段地下水流动活跃,在冬季易产生涎流冰等自然灾害,存在路面行车安全隐患等,可以采用聚冰坑针对涎流冰较多的地段加以解决。聚冰池在涎流冰量较小时可以有效续冰;涎流冰量较大时多采用挡土墙与聚冰池相结合的方法降低其对路面的影响。

6 检测结果对比与实施效果

根据项目冻融循环时检测报告得到土层冻融深度与改建增加路基边坡加固措施后的有限元模型进行对比可以看出,模拟值与检测值变化趋势相似(图 7),同时结合项目施工现场边坡加固措施的实施,证明有限元模型的可行性。通过该文 4 种有限元模型的分析比较,证明在高原寒区冻土土层进行路基改建施工必须进行路面边坡加固措施施工,并且因为地质条件等的不同,需要因地制宜选择合适该地区的施工方案,在保

证施工质量的前提下进行施工优化,以达到提高施工效率,节省施工经费,缩短施工工期等效果。

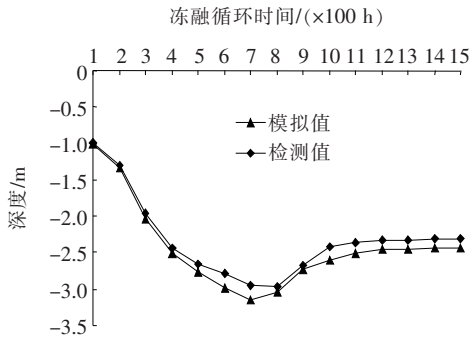


图7 模拟值与检测值对比

7 结论

(1) 对比4种路基边坡有限元模型可知,相对无边坡支护时在经历冻融循环后边坡加固措施结构点竖向应力值均降低;水平应力值在挡土墙顶降低,路肩墙处应力值增大率小于无边坡支护时,进一步表明路肩墙对降低冻融循环后路基边坡水平应力有效可行。

(2) 运用有限元软件模拟改建前后公路路基边坡冻融循环前后位移值,通过对比分析证明挡土墙可以有效降低竖向位移值和水平位移值;增加路肩墙后竖向沉降降低50.79%,水平位移变化值更快趋于稳定且均降低至20 mm以下。

(3) 根据模拟值与实际检测值对比印证了该文方法的可行性,比较4种路基边坡有限元模型计算结果可以看出在改建后增设边坡加固措施可以有效降低冻土冻融后的力学影响。同时因地制宜根据模型对比优化改建公路边坡加固措施的施工步骤,在保证施工质量的前提下提高施工效率。

参考文献:

[1] 窦明健,胡长顺,何子文,等. 青藏公路多年冻土段路基病害分布规律[J]. 冰川冻土,2002(6).

[2] 张旭东. 多年冻土地区冻融循环下路基变形规律研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016(3).

[3] 赵立财. 西藏冻土地区加筋土路基护坡设计与试验分析[J]. 施工技术,2015(17).

[4] 姜迪颖. 高原冻土区路基边坡加固措施探讨[J]. 交通标准化,2014(6).

[5] 何乃武,张卫勇,杨献波. 藏北高寒多年冻土区公路路基技术探讨[J]. 路基工程,2009(5).

[6] 许健,牛富俊,李爱敏,等. 季节冻土区保温法抑制铁路路基冻胀效果研究[J]. 铁道学报,2010(6).

[7] 陈佳宇,田亚护,池秀静. 多年冻土区宽幅公路路基的温度特性模拟分析[J]. 路基工程,2015(3).

[8] Chen. Ji, Zhang. Bo, Rui Fang. Song, et al. Observation Study on the Stability of Frozen Soil Roadbed Equipped with Thermosyphon in Chaidaeer—Muli Railway[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1 279 (515): 4 003—4 007.

[9] 熊治文,廖小平,徐兵魁,等. 青藏铁路多年冻土边坡与斜坡路基研究综述[J]. 铁道学报,2010(4).

[10] 卢博,陈群,陈秀强,等. 压实度对高液限黏土路堤稳定性的影响[J]. 中外公路,2018(1).

[11] 梁树,谢强,赵文,等. 川藏铁路季节性粗颗粒冻土边坡水热过程模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2019(6).

[12] 丑亚玲,盛煜,马巍. 多年冻土区道路边坡热状况差异对多年冻土融化形态的影响[J]. 冰川冻土,2007(6).

[13] 董建华,孙国栋. 框架通风锚管多年冻土边坡支护结构的降温效果研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019(6).

[14] 何鹏飞,马巍,穆彦虎,等. 冻土—混凝土界面冻结强度特征与形成机理研究[J]. 农业工程学报,2018(23).

[15] 许颖,丁春林,吴科亮,等. 基于温度—应力耦合效应的冻土高边坡稳定特性分析[J]. 华东交通大学学报,2015(5).

[16] 王珂,李顺群,李珊珊. Midas/GTS在边坡稳定性与地基沉降分析中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012(3).

[17] Zi Jian, Wang, Sheng Xie, Xiao. Rockfall on the Slope of the Embankment of Finite Element Analysis of the Impact of the Impact[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1 278(524): 1 119—1 123.

[18] 张遂见. 不同冻融循环次数对膨胀土三轴剪切强度的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2020(2).

[19] Zhi Yun, Liu, Jian Bing. Chen, Long. Jin, et al. Development of Slope Stability Evaluation Process of Frozen Soil in Coupling Temperature Field[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1 615(895): 1 948—1 956.

[20] 张亮,时伟,周国帅,等. 公路路堤边坡条带式加筋土挡墙模型试验及优化设计研究[J]. 青岛理工大学学报,2018(4).

[21] JTG/T D31—04—2012 多年冻土地区公路设计与施工技术细则[S].