

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.038

高原冻土地区公路涵洞冻融力学特性分析

李真¹,陈泽盟^{2*}

(1.洛阳市人防工程管理处,河南 洛阳 471000;2.中交二公局第四工程有限公司,河南 洛阳 471013)

摘要:该文以“一带一路”国家重要项目西藏羊大公路改建工程为依托,研究高原冻土地区涵洞冻融力学特性,采用Midas GTS NX有限元软件建立钢波纹管涵洞与水下防冻钢筋混凝土管涵4种工况下力学模型,通过设置土层温度变化函数,分析两种高原地区常用涵洞管道材料在经历冻融循环前后土层内力变化,管涵等结构层内力、位移变化以及铺设双向HDPE高密度聚乙烯土工格栅内力变化规律。研究表明:在经历冻融循环后两种材质管涵塑性区均增加,但是采用水下防冻钢筋混凝土管具有更好的协调变形能力;钢波纹管涵经过冻融循环后中点与两端主应力、剪应力变化率、不同路基边坡测点位移量均比水下防冻钢筋混凝土管涵小,更适宜在高原寒区使用;铺设双向HDPE高密度聚乙烯土工格栅后可以有效降低路面结构层不均匀变形;将建模理论计算值和施工现场检测数据进行比较分析,验证了该文方法的正确性。

关键词:公路涵洞;高原冻土地区;冻融循环;力学特性

中图分类号:U449

文献标志码:A

0 引言

随着“一带一路”倡议的实施,中国在西藏高海拔偏远地区改建、扩建各等级公路项目也越来越多,涵洞又是特殊地区公路的重要组成部分。涵洞通过管体与周围的回填土形成管土效应,互相作用、一起受力,目前被广泛应用于公路桥涵工程中。青藏公路项目鉴于所在地区具有地理位置特殊、冬季时间长、昼夜温差大、气候寒冷等特点,涵洞施工结束后易产生开裂、下沉等病害^[1-3]。相比传统施工工艺,针对特殊气候、环境等因素大多采用钢波纹管进行涵洞主体结构施工,施工效率更高,后期也不易产生较大变形等^[4-7],但是成本提升,并且不适宜就地取材或根据施工材料进行选取。

针对多年冻土地区公路涵洞施工特点,国内外许多学者多采用有限元模拟与实际工程监测相结合的方法进行相关病害分析研究^[8-14]。王月^[15]采用有限元方法对深季节冻土区涵洞温度场分布规律进行

研究,得到以下结论:涵洞侧壁土体温度场以涵洞中心为轴线呈“倒钟”形分布,涵洞中心附近土体温度变化较剧烈;涵顶路基处填土温度沿涵顶到路基顶面先逐渐增大后逐渐减小,沿洞口向路基中心方向逐渐增大;风速对涵洞中心一定范围内土体的温度场影响较为显著;保温板外置铺设改善了涵顶路基土体的双向冻结效应,8 cm厚保温板外置铺设的保温效果与10 cm厚保温板内置铺设的保温效果相差不大,建议深季节冻土区涵洞温度场保温设计采用8 cm厚保温板外置铺设方法较为经济合理;聂骁隼等^[16]基于214国道不同路段的钢波纹管涵洞的实际勘测资料,对沿线的钢波纹管涵洞的实际应用状况以及部分钢波纹管涵洞的温度变化状况进行了分析。结果表明钢波纹管涵洞在使用中随地表环境以及气候条件的变化分别出现了弯沉、锈蚀、堵塞以及路基与路面的破损状况等,与此同时由于高原多年冻土地区的气温变化较大较快导致波纹管涵洞对路基土产生较大影响;张学富等^[17]考虑相变和热量生成推导有限元计算公式,通过对青藏铁路正在修建

收稿日期:2022-08-13

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:52104082);中交第二公路局有限公司重点科研项目(编号:2017-1-1)

作者简介:李真,女,大学本科,工程师.E-mail:21444637@qq.com。

*通信作者:陈泽盟,男,硕士,助理工程师.E-mail:13027630327@163.com

涵洞的现浇混凝土基础水化热的影响分析,现浇混凝土水化热在施工后半年内对涵洞周围冻土的热状况影响较大,施工后2年时仍有影响,在涵洞现浇混凝土基础下铺设保温材料可以大大减少现浇混凝土水化热对冻土热状况的影响;孙文等^[18]运用渗流理论、传热学及冻土力学理论,建立温度场、渗流场耦合问题的分析模型及控制方程,采用三维有限元分析计算模式,结合工程实例对暖季涵洞过水情况下渗流对涵洞及路基温度场的影响进行数值计算,研究得到结论:渗流对涵洞及设有涵洞的路基温度场的影响较大,渗流对涵洞中心的影响稍大于对涵洞两侧的影响,并会加深路基土的季节融化深度;在渗流区温度场变化,路基冻胀范围和冻胀程度会变大,在一定程度上会影响路基的安全性。

本文以西藏羊八井至大竹卡公路改建项目K0+000~K94+000标段为依托,采用有限元软件Midas GTS NX建立4种公路涵洞模型,针对公路涵洞因周围土体冻融循环前后力学性质发生改变引起涵洞结构内力、沉降位移等变化进行分析,在保证施工质量、工期等前提下,进行专项施工优化,针对该工况提出特殊处理方法,并为后续类似高原冻土地区公路涵洞施工提供借鉴。

1 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。项目全长94 km,整体式路基宽7.5 m,路面宽度6.5 m,设计速度为30 km/h,设计高程为4 500~5 500 m。全线涵洞通道共202座,其中水下防冻钢筋混凝土管涵107座、钢波纹管涵78座。

羊大公路改建项目海拔4 500~5 500 m,山川地貌复杂,沿线地下水类型分为松散岩类空隙潜水、基岩构造裂隙水。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,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,图1为涵洞边坡产生的冻土等现象。在进行公路改建时需进行边坡加固措施,并因地制宜进行涵洞附近边坡施工优化,从而降低复杂地质条件对公路、涵洞后期使用的不利影响,延长公路使用年限,增加经济效益等。



图1 涵洞边坡产生的冻土

2 有限元计算模型

2.1 模型建立

为了分析高原冻土地区涵洞主体结构、管道结构层以及土体等在经历冻融前后的内力、位移变化等,本文选取羊大公路改建项目K10+460处钢波纹管与K49+785处水下防冻钢筋混凝土管涵,分别建立4种工况进行对比研究,涵洞材料选取如表1、图2所示。

表1 涵洞工况分类

工况	管道主体材料选取	工程环境情况
1	钢波纹管	冻融循环前
2	水下防冻钢筋混凝土管	冻融循环前
3	钢波纹管	冻融循环后
4	水下防冻钢筋混凝土管	冻融循环后

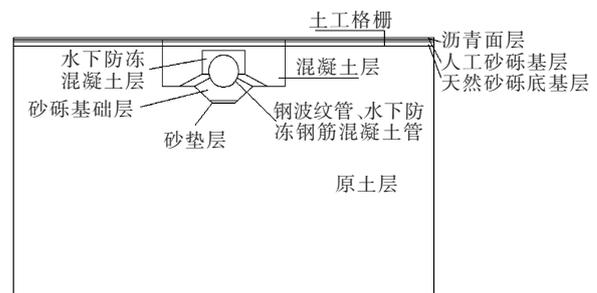


图2 涵洞材料图解

建模分析时,计算模型边界建立至涵洞基坑开挖影响最小的地方。根据附近土层特性和部分边界影响,X轴方向取21 m,Z轴向下取基坑深度3倍距离12 m,Y轴取管道总长9.5 m。根据工程地质勘察报告得到每年10月1日至第2年2月27日共计150 d温度变化曲线设置温度变化函数曲线,模拟冻融循环。以钢波纹管涵工况1实体模型为例,如图3所示。

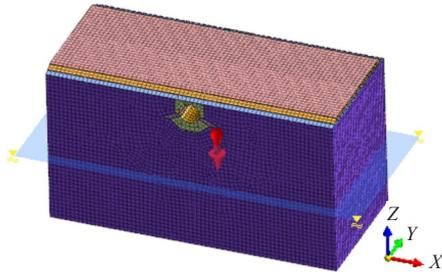


图 3 工况 1 涵洞有限元模型

2.2 涵洞、土层材料参数选取

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019)^[19],并参照本项目每年 10 月全线的经验参数数值范围,综合确定土层和构件的有限元参数,如表 2 所示。

填挖交界路基使用的土工格栅为双向 HDPE 高密度聚乙烯土工格栅,网孔尺寸是 40 mm×36 mm,其极限抗拉强度为 95 kN/m,土工格栅参数见表 3。

表 2 岩土参数

类型	弹性模量 E/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 ν	本构模型	单元类型
原土	15 000	20.0	23.2	30.0	0.30	摩尔-库仑	实体
沥青面层	12 000	25.0	31.2	30.2	0.30	摩尔-库仑	实体
人工砂砾基层	25 000	26.5	34.1	36.0	0.25	摩尔-库仑	实体
天然砂砾底基层	25 429	27.2	35.2	35.9	0.16	摩尔-库仑	实体
砂垫层	20 000	24.0	32.0	16.0	0.30	摩尔-库仑	实体
砂砾基础层	25 429	27.2	35.2	35.9	0.16	摩尔-库仑	实体
HRB235	200 000	78.0			0.30	线弹性	植入式桁架
水下防冻混凝土	27 000	24.0			0.27	弹性	实体
水下防冻混凝土	27 000	24.0			0.27	弹性	板
钢波纹管	206 000	78.5			0.30	线弹性	板

表 3 土工格栅力学性能指标

截面面积/ m^2	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗拉强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	ν	最大拉伸率/%	不同拉伸率时的拉伸强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	
					2%	5%
0.000 15	950	52.3	0.32	22.4	13.4	22.5

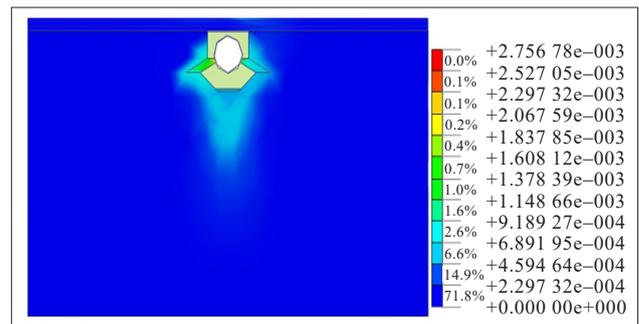
3 涵洞模型结果分析

由于该项目涵洞所处地区为高海拔寒区,每年水下防冻钢筋混凝土管涵、钢波纹管涵洞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其适用年限等。通过建立 4 种涵洞模型,建立温度变化函数曲线模拟冻土土层冻融循环,分析高原冻土地区不同常用涵洞管道材料在经历冻融循环后发生的力学性能变化,并为多年冻土区涵洞施工方案选择提供参考。

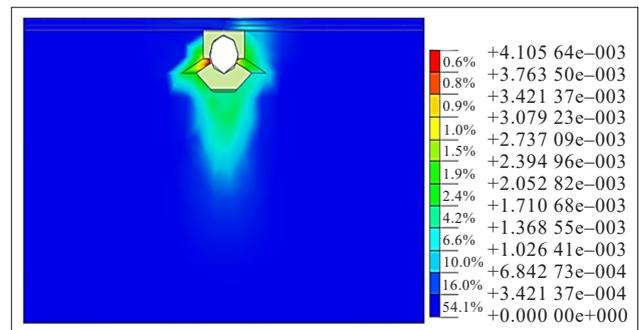
3.1 塑性区变化

根据有限元软件 Midas GTS NX 建立的高原冻土地区钢波纹管涵洞与水下防冻钢筋混凝土管涵力学模型进行冻融模拟前后计算,得到如图 4、5 所示塑

性区分布云图。

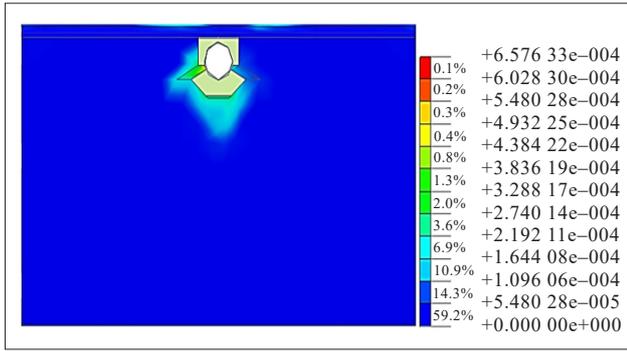


(a) 冻融前

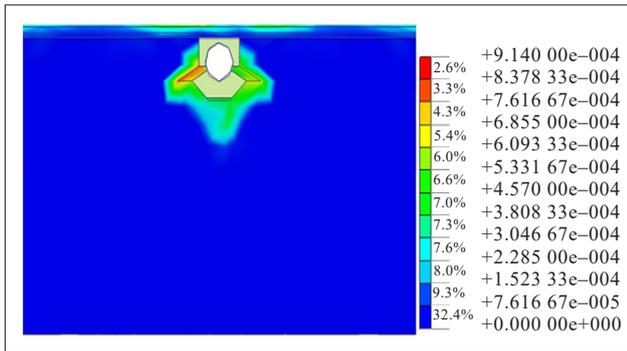


(b) 冻融后

图 4 钢波纹管涵冻融前后塑性区分布



(a) 冻融前



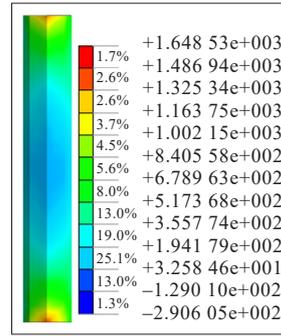
(b) 冻融后

图5 水下防冻钢筋混凝土管涵冻融前后塑性区分布

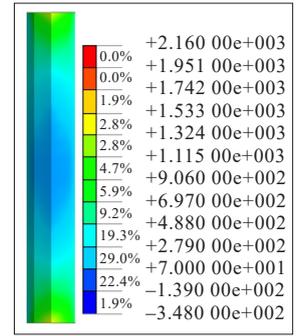
由图4、5可以看出:冻融循环后的涵洞塑性区分布均增大,分布范围均集中在管涵四周至路面结构层附近。其中钢波纹管涵洞周围土层塑性区分布面积增加33.48%,塑性最大值增加了48.91%;水下防冻钢筋混凝土管涵洞周围土层塑性区分布面积增加59.87%,塑性最大值增加了38.91%。采用水下防冻钢筋混凝土管涵洞的工况2、4相比工况1、3下钢波纹管涵洞苏醒值增加较小,证明水下防冻混凝土管与周围水下防冻混凝土层接触良好,协同变形效果较好,但是不易控制其塑性区分布范围,整体塑性区面积增加较多,侧面印证温度场变化范围较大,易在后期使用中产生较大范围内力变化。钢波纹管虽然与整体涵洞结构协同变形较弱,但是在后期使用中比水下防冻混凝土管涵效果更好。

3.2 管涵主应力变化

通过涵洞有限元模型进行计算得到如图6、7所示4个工况下管涵管道的最大主应力俯视云图。钢波纹管涵与水下防冻钢筋混凝土管涵在冻融前后主应力最大值均有所增加,并且4个工况主应力在管道纵向中点范围竖直向下,管道两端竖直向上。

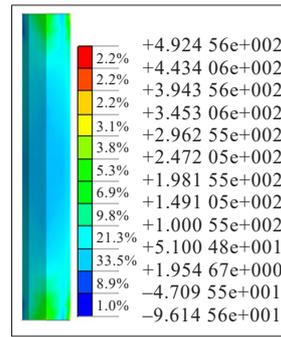


(a) 冻融前

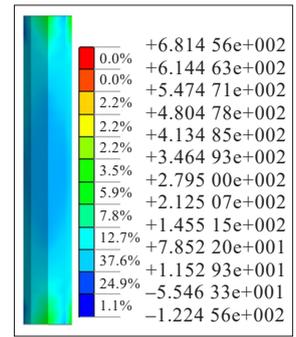


(b) 冻融后

图6 钢波纹管涵冻融前后最大主应力(单位:kPa)



(a) 冻融前



(b) 冻融后

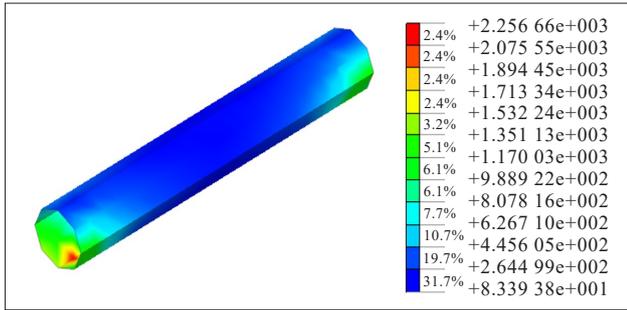
图7 水下防冻钢筋混凝土管涵冻融前后最大主应力(单位:kPa)

对比图6中冻融前与冻融后,钢波纹管管道两端主应力从 1.648×10^3 kPa增加至 2.160×10^3 kPa,增加了31.07%;管道中点附近主应力从 -2.906×10^2 kPa增加至 -3.480×10^2 kPa,增加了19.75%。对比图7中冻融前与冻融后,水下防冻钢筋混凝土管管道两端主应力从 4.925×10^2 kPa增加至 6.815×10^2 kPa,增加了38.38%;管道中点附近主应力从 -96.15 kPa增加至 -122.5 kPa,增加了27.41%。根据主应力云图数值对比可以看出:水下防冻钢筋混凝土管涵相比钢波纹管涵在经历冻融循环后管道中点范围、两端的主应力数值均增加较大,在管道内部拱顶更容易发生沉降,两端进口处出现向上隆起现象,引起上部路面中点下沉与路肩隆起,进而引起路面开裂,不均匀沉降等病害。

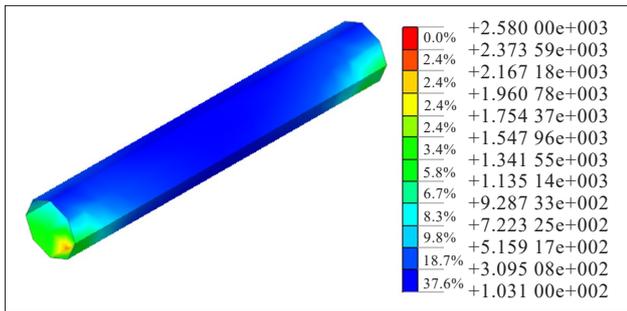
3.3 管涵剪应力变化

钢波纹管涵、水下防冻钢筋混凝土管涵在经历冻融循环前后剪应力变化对比如图8、9所示。

由图8、9可知:剪应力主要分布于管道中点范围,但是在管道两端产生剪应力集中现象。对比图8(a)工况1与图9(a)工况2,在经历冻融循环前后两种

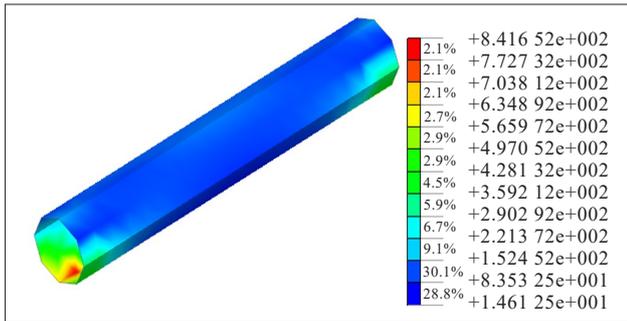


(a) 工况 1: 冻融前

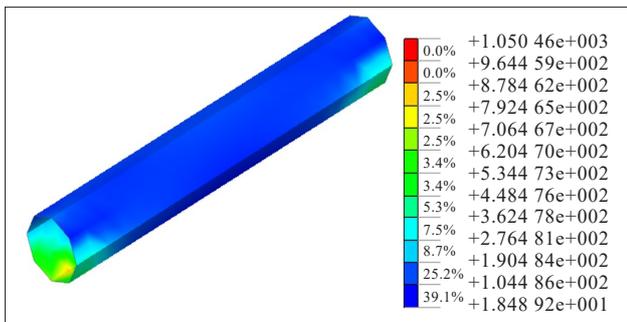


(b) 工况 3: 冻融后

图 8 钢波纹管涵冻融前后剪力值(单位:kPa)



(a) 工况 2: 冻融前



(b) 工况 4: 冻融后

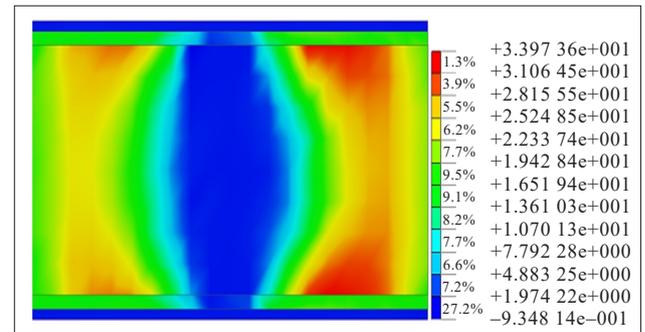
图 9 水下防冻钢筋混凝土管涵冻融前后剪力值(单位:kPa)

不同材质管道所受剪应力有较大差别:钢波纹管、水下防冻混凝土两端部位剪应力最大值分别为 2.257×10^3 kPa、 8.417×10^2 kPa,可见,钢波纹管两

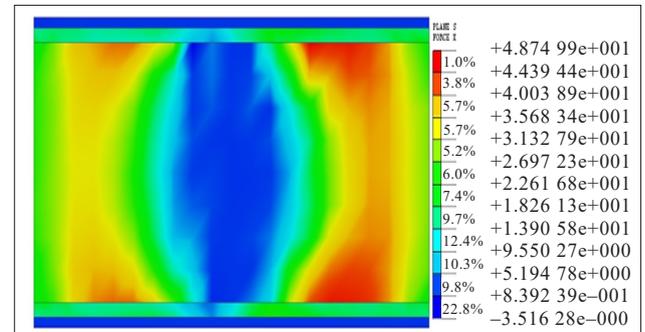
端剪应力较大,易产生劈裂破坏;管道中点范围工况 1、2 剪应力最大值分别为 8.339×10^1 kPa、 1.461×10^1 kPa,证明水下钢筋混凝土管涵结构层间协同变形效果较好。经历冻融循环后工况 3、4 管道两端部位剪应力最大值分别为 2.580×10^3 kPa、 1.050×10^3 kPa,相比冻融循环前分别增加了 14.31%、27.75%;在管道中点范围剪应力最大值分别为 1.031×10^2 kPa、 1.849×10^1 kPa,相比冻融循环前分别增加了 23.64%、26.56%。对比可以看出:采用钢波纹管的涵洞在经历冻融后抗剪能力相比水下防冻钢筋混凝土管涵更好,但是在冻融循环前采用水下防冻钢筋混凝土管的涵洞与周围结构层、土体协同变形能力更好。

3.4 土工格栅纵向应力变化

由于地处高海拔寒区,在经历冻融循环后涵洞上部路面结构常发生不均匀沉降、开裂等现象,为防止该问题的出现,本工程在进行涵洞路面铺装时铺设双向 HDPE 高密度聚乙烯土工格栅,以增强路面结构层纵向抗拉强度,提高路面整体稳定性,降低下部涵洞结构层因冻融循环变化引起的沉降等位移变化。铺设土工格栅后,钢波纹管涵冻融前后纵向应力变化如图 10 所示。



(a) 冻融前



(b) 冻融后

图 10 铺设土工格栅钢波纹管涵冻融前后纵向俯视应力变化(单位:kN/m)

由图10可以看出:涵洞管道正上方产生横向应力值最小,冻融前后分别为 -0.934 kN/m 、 -3.516 kN/m ,均为压应力,满足设计要求。沿路方向纵向逐渐产生拉应力,并在管道直径范围外拉应力达到最大,冻融前后分别为 33.974 kN/m 、 48.750 kN/m ,在经历冻融循环后增加了 43.49% 。由于采用双向HDPE高密度聚乙烯土工格栅,钢波纹管涵洞有限元模拟值纵向有效拉应力均小于其抗拉强度 52.3

kN/m ,极限抗拉强度为 95 kN/m ,满足设计要求。

3.5 位移变化分析

通过建立钢波纹管涵与水下防冻钢筋混凝土管涵有限元模型进行计算,得到内力分布情况。对比力学变化进而分析模型在经历冻融循环前后的位移变化情况,并根据施工现场监测位移变化量进行对比分析。通过模拟计算得到两种管道材质的涵洞冻融前后管涵沉降变化值及位移变化值如表4、5所示。

表4 管涵沉降变化值对比

测点位置	钢波纹管涵			水下防冻钢筋混凝土管涵			钢波纹管涵-实际监测		
	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %
路面中点	6.78	8.65	+27.58	5.89	7.37	+25.13	6.97	8.87	+27.26
路肩	11.68	13.84	+18.49	12.08	17.66	+46.19	10.98	13.01	+18.49
管涵拱顶	7.15	8.79	+22.94	6.11	7.57	+23.90	7.35	9.18	+24.90

由表4可以看出:①在经历冻融循环前后两者竖向沉降变化率相差不大,但是在路肩位置相差较大,说明水下防冻钢筋混凝土管涵在路面与边坡交界处易产生较大沉降,进而会影响下部边坡稳定性,可能形成边坡滑塌等施工风险;②冻融后,采用水下

防冻混凝土管涵时,由于其材质优势,易与水下防冻钢筋混凝土管道形成整体,得到其拱顶部位的竖向沉降累积值小于采用钢波纹管的涵洞,但在路肩部位沉降量与变化率过大,需在施工时注意。

表5 管涵路面横向位移变化值对比

测点位置	钢波纹管涵			水下防冻钢筋混凝土管涵			钢波纹管涵-实际监测		
	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %	冻融前/ mm	冻融后/ mm	变化率/ %
路肩	15.37	20.64	42.11	19.67	31.97	+62.53	14.74	21.01	42.54
边坡坡脚	17.34	21.05	21.40	23.74	30.14	+26.96	16.59	20.01	20.61

由表5可知:采用钢波纹管涵在经历冻融循环后路肩位置水平位移增加 42.11% 、边坡坡脚位置增加 21.40% 。采用水下防冻钢筋混凝土管涵在经历冻融循环后路肩位置水平位移增加 62.53% 、边坡坡脚位置增加 26.96% ,说明相对于水下防冻混凝土管涵、钢波纹管涵横向位移量较小,并且整体变化率不大,更适合在高原地区使用。

通过对表4、5不同监测点位移变化对比分析,可以直观得到钢波纹管涵与水下防冻钢筋混凝土管涵在高原冻土地区因为季节变化所经历冻融循环前后的工程表现差异。根据项目提供的钢波纹管涵实际检测值与模拟值对比,证明该有限元模型的可行性,并可为之后针对性的施工方案提供指导借鉴。

3.6 计算分析

根据有限元软件模拟得到在经历冻融循环前后边坡内力与位移、沉降差异的分析可以看出:在分析高原冻土地区涵洞时需要根据塑性区云图分布对塑性变化较大的结构点(如路肩部位和路面重点、管涵拱顶等位置)着重考虑,进而采取针对性的工程加固措施,以保证高原冻土区路基边坡的安全稳定。

4 治理效果

本文通过分析两种不同管涵管道材质的使用情况,对比分析高原冻土地区公路改建项目涵洞在施工中材料选用的优缺点,并提出针对性的施工方案。

因此,在考虑施工成本、进度以及施工安全等因素前提下进行有效的施工优化,更能提高施工后涵洞的使用年限,提升上部公路路面的安全性。

5 结 论

(1) 通过建立高原冻土地区 4 种工况下钢波纹管涵与水下防冻钢筋混凝土管涵有限元模型,定义温度变化函数,对比分析经历冻融循环前后塑性区变化可知,采用水下防冻钢筋混凝土管涵相比钢波纹管涵整体协调变形效果较好,但是温度变化范围大,易产生较大的内力变化。

(2) 冻融循环前后,钢波纹管涵两端主应力增加 31.07%,剪应力增加 14.31%、中点主应力增加 19.75%,剪应力增加 23.64%;水下防冻钢筋混凝土管涵两端主应力增加 38.38%,剪应力增加 27.75%、中点主应力增加 27.41%,剪应力增加 26.56%。内力对比表明钢波纹管涵在抵抗土层冻融循环前后变形的有效性。

(3) 根据项目实际施工方案铺设双向 HDPE 高密度聚乙烯土工格栅后,可以有效降低下部涵洞结构层因冻融循环变化引起的沉降等位移变化,根据钢波纹管涵有限元模型模拟分析冻融循环前后纵向抗拉强度满足设计要求。

(4) 根据模拟不同路面、边坡测点竖向沉降与水平位移变化可知,钢波纹管涵整体变化量小于水下防冻钢筋混凝土管涵,更适合在高原冻土地区使用。根据钢波纹管涵模拟值与实际检测值对比印证了本文方法的可行性。因地制宜根据模型对比优化改建公路涵洞管道选取,在保证施工质量的前提下可提高施工效率。

参 考 文 献:

- [1] 赵德立.高原多年冻土地区涵洞工程主要病害及防治[J].青海交通科技,2010(4):24-25.
- [2] 石冰.浅谈高原多年冻土地区公路涵洞工程主要病害和

- 防治方法[J].林业科技情报,2017,49(1):89-90,93.
- [3] 王旭.青藏高原冻土地区涵洞病害成因分析及选型建议[J].城市建设理论研究(电子版),2015(22):9117-9118.
- [4] 张建克.钢波纹管涵在西藏国道公路建设中的应用[J].交通世界,2020(27):70-72.
- [5] 顾云发.高原钢波纹管涵洞病害及防治措施[J].商品与质量(建筑与发展),2015(3):256.
- [6] 解卫江,梁凯,胡滨,等.湿陷性黄土地区高填方大口径钢波纹管涵洞受力分析[J].中外公路,2022,42(3):156-160.
- [7] 孙建光,钟明,易达,等.公路高填方路基大口径钢波纹管涵洞径向土压力及效益分析[J].中外公路,2021,41(6):183-186.
- [8] 吴珍汉,王连捷,胡道功,等.青藏高原北部移动冰丘破坏桥墩的数值模拟[J].现代地质,2006,20(2):239-251.
- [9] 邱达志.波纹管涵洞在不稳定岛状冻土地区的应用[J].黑龙江交通科技,2012,35(12):85.
- [10] 王连捷,吴珍汉,胡道功,等.青藏高原移动冰丘引起输油管道拱曲的数值模拟[J].中国地质,2007,34(4):675-681.
- [11] 刘百来,李祝龙,汪双杰.钢波纹管涵洞力学性能的有限元分析[J].西安工业学院学报,2006,26(1):83-86,94.
- [12] 石桂梅,贾艳敏,邓琦.多年冻土地区无基波纹管涵洞冻胀分析[J].重庆交通学院学报,2007,26(1):60-64.
- [13] 石桂梅,贾艳敏.多年冻土地区无基波纹管涵洞融沉分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2007,8(4):5-7,17.
- [14] 聂骁隼.多年冻土地区钢波纹管涵洞温度场及受力分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [15] 王月.深季节冻土区涵洞温度场分析[J].市政技术,2019,37(2):86-91.
- [16] 聂骁隼,赵文科.高温多年冻土地区大口径钢波纹管涵洞温度场分析及钢波纹管涵洞应用效果[J].城市建设理论研究(电子版),2015(10):5218-5220.
- [17] 张学富,赖远明,喻文兵,等.寒区涵洞现浇混凝土基础水化热的影响分析[J].公路,2003,48(2):50-56.
- [18] 孙文,吴亚平,蔺鹏臻.高寒地区涵洞路基多场耦合的非线性分析[J].铁道工程学报,2015,32(7):24-28,50.
- [19] 中交公路规划设计院.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.