

高原冻土地区柱式桥墩病害分析及防护施工措施

刘润喜^{1,2}, 陈泽盟², 王豪¹, 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:以中国“一带一路”大发展重点项目西藏 109 线那曲至拉萨公路改建工程第二标段三分部曲果大桥为依托,研究了高原冻土地区柱式桥墩病害产生原因及防护施工措施。采用有限元分析软件 Midas-GTS NX 建立 3 种工况桥梁实体模型,分析冻土复杂病害影响下桥梁立柱、桥台、灌注桩等结构面的内力、位移变化、结构变形等力学特性的变化规律,并优化防护施工措施。研究表明:采用 C30、C40 水下防冻混凝土并增设钢护筒后工况 3 的灌注桩桩侧受到土体水平应力病害影响降低 29.78%;桥梁基础构件水平应力值仅增加 6.11%;立柱沉降病害量仅增加 7.96%;灌注桩沉降增加 7.98%,证明钢护筒及水下防冻混凝土对基础构件抵抗冻土病害影响效果显著,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;柱式桥墩;病害分析;防护施工措施

1 前言

伴随着“一带一路”倡议的实施,中国在西南边疆等高海拔偏远地区的公路桥梁等项目相继建成并投入使用。随着这些公路桥梁项目的增加,难免会遇到各种地质病害问题,如季节性冻土、常年冻土、冻胀丘、涎流冰等。由于西藏地区地处高海拔寒区,冻土分布较广泛,土层在经历季节变换后产生冻土冻融病害现象。为保证桥梁使用安全,需要针对施工现场地质问题进行病害治理与详细的地质勘查,结合相关设计研究因地制宜地提出施工改进方案,优化施工方法等。目前大部分研究主要针对桥梁抗震、桥台冻胀力等进行有限元分析,而鲜有针对高原地区柱式桥墩因土层经历冻融循环后产生力学变化进而影响桥墩稳定性的病害分析及防护施工措施研究。因此有必要针对高原冻土地区柱式桥墩病害分析及防护施工措施进行研究。

目前国内外学者主要采用理论与数值分析相结合的方法研究此类问题。中国针对土层冻融力学特性的数值模拟方法主要采用摩尔-库仑准则,用来描述土层材料的力学特性及变化规律等。文献[12]根据天津

滨海新区地铁规划现状针对粉质黏土、粉土进行室内冻结试验,对人工冻土的物理性能进行研究。分析得出了三轴强度指标与冻结温度之间大致呈线性关系;通过试验得出了各个物理参数的变化规律,模拟了冻结温度场扩散,分析对比了数值分析与理论计算的冻结时间结果,验证了模拟分析具有一定的合理性;文献[13]根据格尔木-拉萨直流输电线路工程第 2 标段施工的土层病害,不良冻土现象如冰椎、冻胀丘、热融湖塘等发育,热稳定性差,容易受到扰动等情况,对多年冻土地基灌注桩基础施工方法进行研究;文献[14]基于 Ansys 有限元软件平台建立了多年冻土地区单桩桩土空间体系的有限元模型,结合工程实例系统地分析了桩长、桩径以及桩的长径比变化对钻孔灌注桩承载性能的影响。研究表明:对于多年冻土地区的钻孔灌注桩,桩径的增加不仅能提高桩的极限承载力,而且能有效地控制桩顶的沉降;文献[15]根据混凝土桩和冻土的 3D 导热功能,基于热传导理论和绝热温升的指数定律,结合连续和初始条件下的结果,建立了寒冷地区实际现场条件下干桥的 CIP 桩-冻土地面系统的有限元模型。结果表明:该过程可以有效地模拟 CIP 桩基础的放热过程,CIP 桩的浇筑温度和水化

收稿日期:2020-03-12

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:刘润喜,男,大学本科,高级工程师。E-mail:243754290@qq.com

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

热对长干桥下冻土的热扰动是持久的;文献[16]通过建立多年冻土区混凝土桥灌注桩水化放热的传热模型,计算由于混凝土水化放热引起的冻土温度场变化。结果表明:混凝土水化热在浇筑后半年内对多年冻土的温度场影响很大,回冻时间长达 2 年以上,而用粉煤灰和硅灰取代一定质量的水泥可以减少混凝土水化热对冻土热状况的影响。目前,有关高原冻土地区柱式桥墩病害分析及防护施工措施研究还相对较少。

该文以西藏 109 国道那曲至羊八井段改建工程曲果大桥 K3 680+300~K3 680+640 为依托,利用 Midas—GTS NX 数值计算软件分别建立 3 种工况的柱式桥墩三维分析实体模型,针对高原地区柱式桥墩在经历冻融循环前后桥梁立柱、桥台、灌注桩等结构面的内力、位移、结构变形等力学变化进行分析比较,研究高原冻土地区柱式桥墩各结构面因土层冻融、病害等影响对其力学特性的改变,提出针对性的施工措施,分析优化前后桥梁立柱、承台、桩等结构内力变化规律,进而指导工程施工。

2 工程概况

2.1 工程概况

“一带一路”重要项目西藏国道 109 线那曲至拉萨公路那曲至羊八井段改建工程曲果大桥,位于当雄县乌玛塘乡附近,路线斜跨河流。大桥桩号为 K3 680+300~K3 680+640,桥梁中心桩号为 K3 680+470,桥梁总长为 340 m。上部结构形式为装配式 PC 简支箱梁,下部为柱式墩桩基础,桥梁路面设计高程为 4 397~4 387 m。土层平均海拔为 4 389 m,处于高山缺氧环境。

2.2 地质病害

曲果大桥项目处地表水水位埋深为 0.0~8.5 m,变幅为±1.0 m,分布于第四系松散堆积层,补给源为大气降水及地下水侧向渗补。桥址区内主要为季节性冻土,标准冻结深度为 1.4 m,主要岩性为圆砾、腐殖

土、粉土。

在全球气候整体变暖的背景下,冻土区随着气温上升,地温也随之升高,季节性冻土上限下降,产生退化、融沉等地质灾害,引起地基不均匀沉降。随着时间推移,沉降值逐年增加,影响桥墩等基础构件稳定性,后期桥梁使用安全性降低。根据地质勘察报告、当地施工特点以及内陆施工经验,拟针对基础土层冻融侵蚀、融沉对桥墩的影响,在桥墩土层 0~4 m 深度内拟采用钢护筒进行保护以增加基础构件整体稳定性,桥墩基础构件均采用水下防冻混凝土浇筑施工,亦可采用气泡混合轻质土用于基础构件保温隔热,针对高原地区特殊施工环境选择寒季施工以降低冻土冻融对桥墩基础构件的影响。

根据地质勘查及对岩石物理力学性质统计后,得到有关各岩土设计参数建议值如表 1 所示。

表 1 岩土设计参数

岩土名称	状态	承载力基本容许值/kPa	摩阻力标准值/kPa
粉土	稍密	100	—
圆砾	稍密	260	80
圆砾	中密	400	110
圆砾	密实	550	130

3 有限元模型建立

3.1 有限元模型

为了分析高原地区柱式桥墩冻融病害,以桩号 K3 680+560,地面标高为 4 382.4 m,桥面设计高程为 4 391.259 m,编号 QZK5 柱式桥墩为例,分别建立柱式桥墩 3 种工况三维力学实体模型,其中:立柱与灌注桩纵筋采用 HRB235、箍筋采用 Q235、盖梁与箱梁均采用 C30 混凝土浇筑,桥面采用沥青铺装,具体模型材料如表 2 所示。

表 2 柱式桥墩实体模型材料

工况	冻融循环	钢护筒	灌注桩	承台	立柱
1	无	无	C30 混凝土	C30 混凝土	C30 混凝土
2	有	无	C30 混凝土	C30 混凝土	C30 混凝土
3	有	Q235 钢板—4 m 埋深	C30 混凝土(水下防冻)	C30 混凝土(水下防冻)	C40 混凝土(水下防冻)

建模分析时,计算模型边界建立至桩基坑开挖影响最小的地方。根据桥址附近土层特性和部分边界影响,X 轴方向取 100 m,Z 轴向下取灌注桩长 3 倍距离

60 m,Y 轴取两个相邻立柱距离 20 m,水平面取地下 4.25 m 深度。根据工程地质勘察报告得到每年 10 月 1 日至第二年 2 月 27 日共计 150 d 温度变化曲线设置

温度变化函数,模拟冻融循环。

3.2 桥墩、土层材料参数选取

根据 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》,并参照该项目每年 10 月份全线的经验参数范围,综合确定土层和构件的有限元参数如表 3 所示。

4 病害对比分析

由于该公路大桥工程地处海拔 4 380~4 495 m 高原季节性冻土区,施工所处位置环境条件恶劣。每年季节变化,土层经历多次冻融循环后土颗粒间相对位置发生改变,塑性指数减小,渗透性增大,同时土层体积进一步增大影响施工完成后的桥梁桩基础等结构

构件附近土层的稳定性,产生塌陷、隆起等土质病害问题,进而引起桩、承台等结构构件不均匀沉降、位移等,影响桥梁整体结构稳定性,间接造成安全事故等。

通过建立 3 种工况下桥梁—基础—地层三维分析实体模型,分析高原季节性冻土区桥墩结构面、基础土层在经历多次冻融循环后,地基土体内部分水相变化引起的地层融沉、软弱地层等病害对桩基础、承台、立柱等桥梁基础构件力学性能的影响,进而引起桥墩基础构件的沉降、水平位移等变化。

4.1 土层水平应力

采用 Midas—GTS NX,模拟通用桥墩施工完成后桥梁基础部分经历冻融循环前后,得到如图 1 所示不同工况下地基土层水平应力变化云图。

表 3 岩土和构件的有限元参数

岩土及构件	弹性模量/ MPa	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	泊松比	本构模型	单元类型
粉土	25	20.0	3.2	30	0.25	Hoek—Brown	实体
圆砾土层	16	20.0	10.0	30	0.23	Hoek—Brown	实体
Q235 钢护筒	206 000	78.5			0.30	线弹性	板
HRB235	200 000	78.0			0.30	线弹性	植入式桁架
Q235	200 000	78.5			0.30	线弹性	植入式桁架
C30 混凝土	30 000	24.0			0.27	线弹性	实体
中粒式沥青	1 200	25.0			0.30	线弹性	实体
C30 混凝土(水下防冻)	31 500	24.1			0.30	线弹性	实体
C40 混凝土(水下防冻)	32 500	25.0			0.20	线弹性	实体

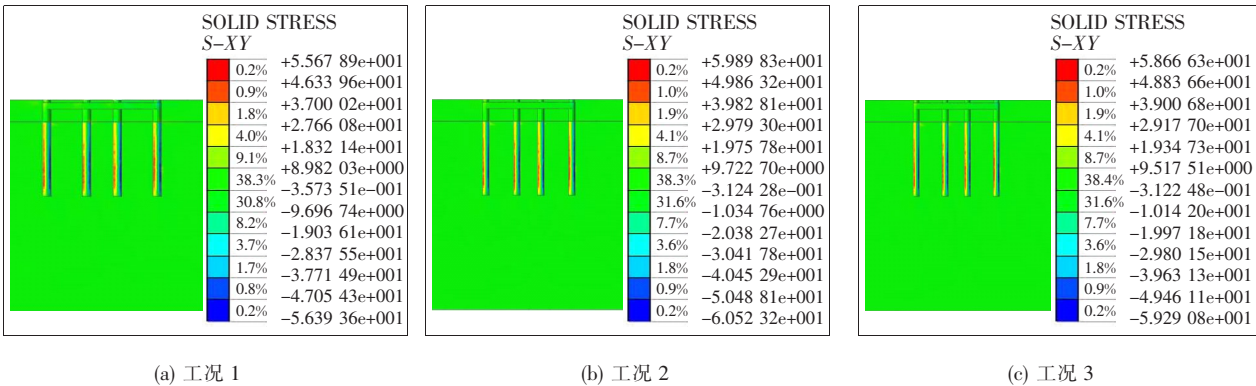


图 1 土层水平应力云图(单位:kPa)

对比图 1(a)、(b)可以看出:土层经历冻融循环后体积膨胀,孔隙比略有增大,对灌注桩桩侧均产生水平应力,同时在经历冻融循环后桩侧受到土体水平应力最大值从 56.39 kPa 增加至 60.52 kPa,增加了 7.32%;对比图 1(a)、(c),桩侧受到土体水平应力最大值从 56.39 kPa 增加至 59.29 kPa,增加了 5.14%。可见,采用 C30 水下防冻混凝土灌注桩并增加 4 m 埋

深的桩头钢护筒的工况 3,相比仅采用 C30 防冻水下混凝土不加钢护筒的工况 2,灌注桩桩侧受到的土体水平应力进一步降低,有效降低土体对桩头产生的水平力作用而引起的灌注桩侧移病害的产生,保证了灌注桩的整体稳定性。

4.2 桥梁基础构件内力变化

通过模拟桥梁实体模型,计算得到基础构件水平

应力值随构件埋置深度的变化曲线如图 2 所示,0~ -2.1 m 为立柱下端埋置土层深度、-2.1~-20 m 为灌注桩埋深。冻融循环前后基础部分构件水平应力在土层深度逐渐增加至粉土层与圆砾土层交界处产生最大值,土层变界面埋深 5 m 处构件为灌注桩。在进行施工优化前,土层冻融循环影响后基础构件最大水平应力值增加至 25.93 kPa,相较于冻融循环前水平应力值 23.08 kPa 增加了 12.35%,桥梁基础构件容易产生水平膨胀力,混凝土的抗压强度与抗折、抗拉强度损失较大,容易引起立柱、灌注桩、承台等构件开裂、错位等严重安全隐患。在增设钢护筒保护桩头与立柱底部,采用水下防冻混凝土灌注桩和立柱等构件,在经历冻融循环后水平应力值仅增加 6.11%,为 24.49 kPa,可以有效降低桥梁基础构件内部产生的水平应力对其本身的破坏作用,证明在施工优化中必要的施工防护措施非常重要。

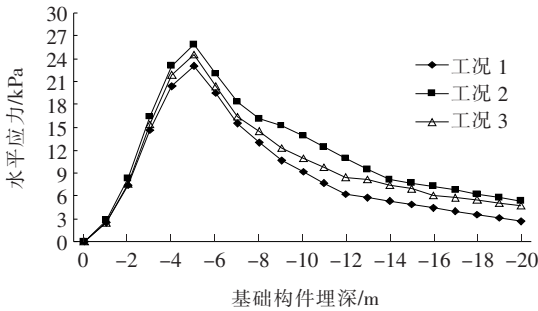


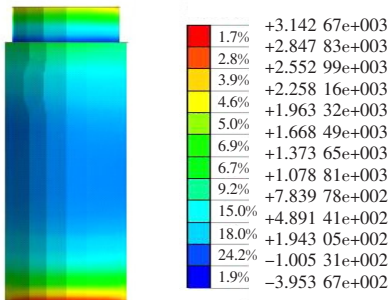
图 2 桥梁基础构件水平应力值

4.3 钢护筒内力分析

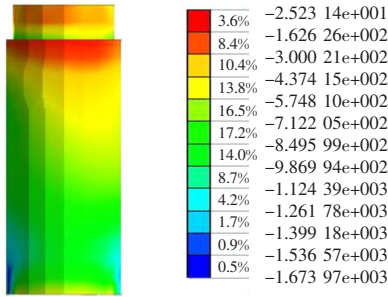
根据 4.1 节土层内力变化和 4.2 节构件内力对比分析可以看出:增加相应施工措施后工况 3 的桥梁构件水平应力明显降低,说明钢护筒在应对土层水平冻胀应力时对立柱下端、承台、灌注桩上段有一定保护作用,有效降低了土层水平应力对构件的剪力影响效果,提高了构件的安全性与稳定性。由图 3(a)、(b)可以看出:钢护筒所受最大主应力为 3 142.67 kPa,最小主应力为 1 673.94 kPa,满足设计要求。钢护筒采用 Q235 钢材,由于钢护筒和灌注桩、立柱分别是嵌固于一体的,可认为其两者为协同变形。从图 3(c)可以看出:钢护筒所受最大水平剪力为 211.94 kN/m,图 3 显示在增设钢护筒后桥梁基础构件经历冻融循环后水平应力值明显降低,钢护筒提高了混凝土界面的抗剪强度,分担了大部分剪切力,用以遏制土层、桥梁基础构件如立柱、承台等病害的产生。

4.4 立柱沉降病害

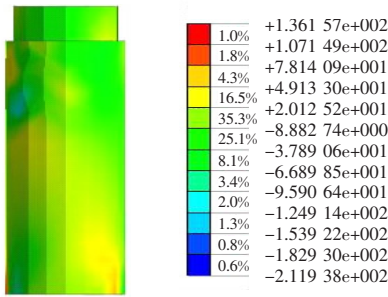
立柱直径为 1.4 m,土层埋深长度为 -2.1 m,通



(a) 最大主应力(单位:kPa)



(b) 最小主应力(单位:kPa)



(c) 水平剪力(单位:kN/m)

图 3 钢护筒内力云图

过有限元模型模拟计算,得到如图 4 所示立柱沿高度方向沉降值。原设计施工采用普通 C30 混凝土进行立柱浇筑施工后产生 10.17~11.18 mm 竖向沉降,由于桥墩基础土层经历冻融循环后,土颗粒相对位置发生改变,塑性值降低,体积增大等影响使其力学性能改变,土层产生融沉等病害影响基础部分构件的稳定性,使立柱产生不均匀沉降,引起桥墩上部结构如盖梁、箱梁等产生较大变形,从而引起路面开裂直至产生较大裂缝,影响行车安全等严重桥梁事故。工况 2 中立柱竖向沉降值为 13.00~13.52 mm,最大沉降量超过冻融循环前 27.82%,产生失稳现象,影响盖梁等桥面结构稳定性进而对之后的桥面使用、车辆行驶安全造成隐患。工况 3 通过施工优化增加立柱土层埋置段处钢护筒,改用水下防冻 C40 混凝土进行立柱浇筑施工,模拟得到冻融循环后立柱沉降为 10.98~11.50 mm,

最大沉降量超过施工优化前、冻融循环前 7.96%,有效降低了因土层冻融循环后产生力学变化、降低地基土层融沉、隆起等病害的产生对立柱竖向位移、变形的影响,提高了桥面结构稳定性。

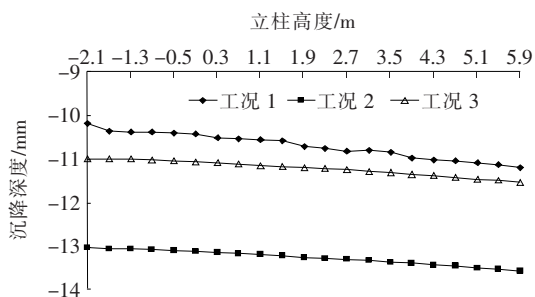


图4 立柱沉降值

4.5 桩沉降病害

曲果大桥采用直径为 1.8 m、桩长为 20 m 的钻孔灌注桩,根据桥梁实体模型计算得到图 5 所示灌注桩沿桩长方向产生的竖向沉降值。原设计施工采用 C30 混凝土灌注桩,对比冻融循环前后可以看出:灌注桩在桩顶位置 -2.1 m 处产生较大沉降,冻融循环前为 -10.15 mm,冻融循环后为 -12.99 mm,增加了 27.98%,灌注桩产生较大沉降,影响上部结构使承台发生剪切破坏产生裂纹,立柱由于不均匀沉降产生裂纹等现象,影响桥梁整体稳定性。工况 3 通过施工优化后改用 C30 水下防冻混凝土灌注桩,并在桩头增设钢护筒后,冻融循环后灌注桩产生的沉降为 10.96~9.24 mm。相比施工优化前未经历冻融循环时灌注桩沉降值增加了 7.98%;与经历冻融循环后相比降低 15.63%,证明钢护筒与水下防冻混凝土抵抗土层冻融循环影响效果显著,有效提高了灌注桩的抗沉降性能,进而提高桥梁基础构件整体稳定性,降低病害的产生。

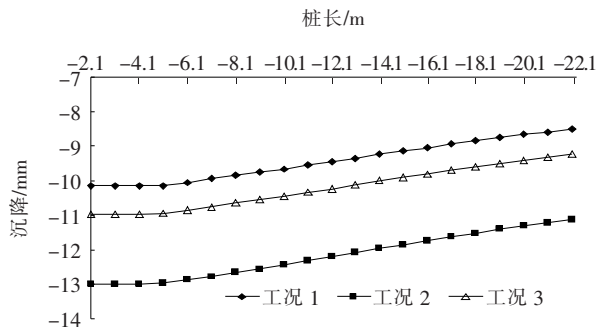


图5 桩沉降值(桩长负值指桩埋入土中长度)

5 防护施工措施

通过建立桥梁有限元实体模型计算分析得到土层

内力,桥墩构件内力、位移变化等,证明在高原冻土地区进行柱式桥梁墩柱等基础构件施工时,有必要针对构件材料,墩柱结构设计等进行因地制宜的施工优化,可以有效降低冻土冻融循环影响,引起桥梁基础内力变换,产生水平或竖向位移等病害。由上分析可知,采用优化桥梁墩柱施工措施,不仅能有效提升桥梁后期使用稳定性,行车安全性,也可以提高桥梁使用年限,提高施工整体效率等。

5.1 Q235 钢护筒

在灌注桩施工完成后及时调放钢护筒,使钢管桩与钢护筒嵌固在一体共同承担土层内力,充分利用钢护筒富余的承载力应对土层水平应力等变形影响,增加上部承台及立柱等桥梁结构构件的稳定性,有效提高桥梁施工、后期使用的经济效益。

5.2 C30、C40 水下防冻混凝土

桥梁立柱采用 C30、C40 水下防冻混凝土以充分发挥混凝土超高抗压强度的优势,通过掺入防冻剂等提高混凝土的保水性,使其基本不会出现混凝土泌水现象。采用无氯、低碱等高效防冻剂,提高混凝土水下防冻性能,有效降低在季节性冻土区因土层冻融循环产生体积变形等变化进而影响灌注桩的稳定性等。

5.3 气泡混合轻质土

高原季节性冻土区桥墩基础构件可采用轻质气泡土材料用于隔热、保温和承重。气泡混合轻质土用作人工地基或桥墩基础结构部分,其隔热保温功能可延缓基底冻层融化,保证其具有高强度和高承载力。同时轻质气泡土具有施工简单、方便、工场化和快捷的特点,在节约成本的同时可加快施工进度。

5.4 择期施工

根据有限元实体模型分析可以看出,地基土层在经历冻融循环后易产生较大力学变化,影响已施工完成的结构构件,因此在进行桩基等桥墩基础部分施工时,需要尽量减少对季节性冻土区土层热施工扰动,降低冻土消融退化等病害影响。需要因地制宜,根据当地气温变化,尽量选择寒季施工,以减少冻土在施工后期产生的融沉等现象。

6 检测结果对比与实施效果

6.1 检测结果对比

根据建立的桥梁有限元实体模型,计算得到桥梁基础构件、地基土层等内力变化,通过对比分析,更深入了解柱式桥墩构件在经历冻融循环前后各项力学性

能变化规律等。相较于内力分析,沉降位移变化更为直观地反映在实际工程施工中。有限元实体模型模拟结果与现场实测数据分析对比如表 4 所示。

表 4 承台测点竖向沉降值 mm

测点位置	模拟值	监测值	测点位置	模拟值	监测值
立柱 1	-10.91	-11.12	桩 1	-10.92	-11.15
立柱 2	-11.03	-11.35	桩 2	-11.02	-11.39
立柱 3	-11.09	-11.30	桩 3	-11.05	-11.36
立柱 4	-10.92	-11.09	桩 4	-10.96	-11.11

由表 4 可知:模拟结果与监测结果变化趋势相似,证明了有限元模型的可行性。

6.2 实施效果

在高原季节性冻土地区进行柱式桥墩施工时需要在保证施工质量,降低冻土病害产生的前提下对灌注桩、承台、立柱等桥梁基础结构进行施工优化,采用增设钢护筒、改用水下防冻混凝土等施工措施,以达到提高施工效率,节省施工经费,缩短施工工期等效果。

7 结论

(1) 通过对 3 种工况下高原季节性冻土区桥梁实体有限元模型力学变化对比可以看出:相比于工况 1,采用 C30 水下防冻混凝土并增设钢护筒后,灌注桩桩侧受到土体水平冻胀应力降低 29.78%;桥梁基础构件水平应力值仅增加 6.11%,抵抗冻土病害影响效果显著,但仍需要在施工中着重注意,以保证施工质量。

(2) 根据土层内力与基础构件内力对比分析,增设钢护筒施工措施可以有效降低土层及构件病害影响,保护基础构件的稳定性。模型计算得到钢护筒所受最大剪力为 211.94 kN/m,最大主应力为 3 142.67 kPa,最小主应力为 1 673.94 kPa,有效提高了混凝土界面的抗剪强度,降低了土层对构件的剪力影响。

(3) 运用有限元软件模拟柱式桥墩基础构件在经历冻融循环前后,增设钢护筒并采用 C30、C40 水下防冻混凝土后,立柱沉降量仅增加 7.96%,灌注桩沉降增加 7.98%,有效提高了灌注桩的抗沉降病害性能与稳定性。

(4) 对比模拟值与实际监测值,印证了该文方法的可行性,对比 3 种工况的柱式桥梁实体模型可以看出,在增设钢护筒、采用水下防冻混凝土等施工措施

后,可以有效降低季节性冻土冻融循环产生病害的影响。同时根据模型分析对比可知,在保证施工质量的前提下,因地制宜地改进施工方法,可以提高施工效率。

参考文献:

[1] 吴建忠. 青藏公路病害浅析[C]. 中国公路学会养护与管理分会成立大会论文集, 2009.

[2] 赵立廷, 许林新, 戈普塔. 青藏高原多年冻土区高速公路选线研究[J]. 路基工程, 2020(1).

[3] 权董杰. 青藏铁路多年冻土区桥梁桩基沉降原因分析[J]. 铁道建筑, 2017(1).

[4] 李学峰. 桥梁病害综合整治在青藏铁路施工中的应用[J]. 中国科技纵横, 2019(13).

[5] 刘广波, 李晋, 王昕, 等. 复杂施工环境下新型钢管—混凝土组合桩设计关键参数优化研究[J]. 中外公路, 2019(5).

[6] 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(2).

[7] 田群山. 多年冻土区桥台台后水平冻胀力的分析研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2017.

[8] 王培山. 水平荷载作用下高桩承台桩基础桥墩拟静力模型试验研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2016.

[9] 马丁红. 多年冻土退化对铁路混凝土梁桥承载能力的影响分析与安全性研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2012.

[10] 孙钦杰, 李栋伟, 王伸远. 人工冻结含盐砂土三轴剪切试验研究[J]. 煤炭技术, 2015(4).

[11] 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).

[12] 李康. 天津滨海新区典型地层人工冻土的试验特性研究[D]. 天津大学硕士学位论文, 2016.

[13] 张春文. 多年冻土地基灌注桩基础施工探索[C]. 甘肃省电机工程学会 2012 年学术年会论文集, 2012.

[14] 刘东升, 王欣南. 多年冻土地区钻孔灌注桩承载性能分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006(8).

[15] Ya—ping WU, Jian GUO, Chun—xiang GUO, et al. Exothermic Process of Cast—in—Place Pile Foundation and its Thermal Agitation of the Frozen Ground under a Long Dry Bridge on the Qinghai—Tibet Railway[J]. 浙江大学学报(英文版)(A 辑: 应用物理和工程), 2010(2).

[16] 李文利, 张鹤, 赵炜璇, 等. 有限元计算在多年冻土区混凝土灌注桩温度场分布[J]. 混凝土, 2010(7).

[17] JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S].