

浅谈严寒地区铁路桥涵的设计特点

周文杰

中铁第六勘察设计院集团有限公司

摘要:我国高纬度严寒地区修建的一条客货共线铁路——北黑线(龙镇至黑河段)升级改造工(以下简称北黑铁路)。针对严寒地区的气候环境和地形地貌,对桥涵结构设计提出更高的要求,桥涵设计时须充分考虑温差大、极端气温低、冬季严寒漫长等问题,确定合理可行的设计原则和技术措施。结合北黑铁路的设计和施工过程,介绍桥涵设计采用的技术措施,为严寒地区铁路桥涵设计提供实践经验。

关键词:北黑铁路;严寒地区;桥涵;设计特点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.13.091

一、概述

北黑铁路沿线所经区域位于黑龙江省北部小兴安岭山地地区,属平原微丘区地形和低山区地形;沿线山丘起伏连绵,森林茂密,河流纵横交错。北黑铁路沿途经过途径五大连池市、孙吴县两个县级行政区,历年极端最低气温均在 -41°C 以下,历年最冷月平均气温均在 -23°C 以下,属于高纬度严寒地区铁路。北黑铁路线路全长203.778km,其中新建线路152.296km,利用既有线51.482km。区间铺设砟轨道,设计时速160km/h。全线新建桥梁24座,总长9.568km,框构33座,涵洞257座。桥梁长度占线路总长约4.70%,扣除桥梁、隧道长度,平均每公里路基涵洞1.21座。

北黑铁路桥涵设计时,根据沿线区域属严寒地区地质特征和地形地貌,合理布置桥梁孔跨,合理确定涵洞布置和支座类型,然后考虑结构安全和环境作用等级,采用合理的墩台及涵洞基础的抗冻融措施。冬季严寒漫长,桥涵工程工期较长,对现场配合施工制定合理的冬季施工保温措施和过冬保护措施。

二、桥梁设计

黑河市位于严寒地区,温差较大,冬季严寒漫长,夏季温和短促,春季干旱且风大。北黑铁路位于北纬 $47^{\circ}42' - 51^{\circ}03'$,北安历年极端最低气温达 -41°C ,孙吴历年极端最低气温达 -48.1°C ,黑河历年极端最低气温达 -44.5°C ,桥梁结构设计应结合沿线气候特征。

(一) 梁型选择

北黑铁路采用有砟轨道,铺设无缝线路,在温差较大的严寒地区梁轨的相互作用较为明显。为减少桥梁病害的发生,降低维修养护工作量,梁部结构预制后张法简支T梁,以32m、24m跨度简支梁为主,有利于全线桥梁预制架设。结合总体工期和施工技术条件,设置梁场集中预制,工厂化生产,降低制梁成本。

严寒地区不宜采用钢梁桥,钢梁的收缩膨胀受温度变化影响较大,同时养护维修成本高、行车噪音大。

(二) 支座设计

目前我国铁路使用的支座主要是盆式橡胶支座和球型支座。北黑铁路沿线区域历年极端最低气温可达 -48.1°C ,已超过了《通桥(2007)8160》钢支座的适用范围,需特殊设计耐寒支座。

对比盆式橡胶支座和球型支座优缺点,北黑铁路简支梁采用耐寒型球型支座,采用倒置球型结构,球腔衬板底部的凹球面与球冠顶部的凸球面适配并实现滑动装配的结构,可有效的防止支座内水存积的现象,减少了支座内部锈蚀和磨损的危险,提高了支座的性能安全指数,可以更好应用于承接梁体和墩台之间,更好的实现桥梁本身的伸缩和转角工况。耐寒型支座取消了橡胶件等易老化的结构,并使支座的滑动与转动分离,降低了各滑板的磨耗,延长了支座寿命。支座依据《铁路桥梁球型支座》中相关规定,对支座材料的选取做出了抗寒性能的要求。耐寒型支座主要钢结构材料采用ZG20Mn或Q355NE,具有良好的抗寒性能。

耐寒型球型支座适用温度范围为 $-50^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$,比普通球型支座耐低温 25°C ,更能满足北黑铁路对低温环境的特殊需求,有效保障结构安全。

(三) 墩台设计

严寒地区的混凝土墩台易发生冻胀耐久性和冻融侵蚀,影响结构安全。桥梁墩台身采用混凝土等级不低于C35,且根据环境侵蚀等级提高强度等级,尤其是位于水中的桥墩采用的混凝土强度等级需满足耐久性要求。

桥台锥体采用渗水土填筑,并进行锥体坡面铺砌,锥体护坡设泄水孔,并用PVC管材预埋,其间距不大于1.5m。桥台锥体坡面铺砌基础的埋置深度应位于冻结线以下不小于0.25m。当地基的季节融化层为冻胀土或强冻胀土时,基础及买入地面以下的坡面铺砌两侧宜换填粗颗粒非冻胀性土壤。

三、基础设计

(一) 桥梁基础设计

黑河市位于严寒地区,历年极端最低气温 -48.1°C ,地表普遍存在季节性冻土,一般每年10月下旬开始冻结,3月中达到最大冻结深度,土壤最大冻结深度2.39~2.98m。测区地下水位较高,地表土多为含水量较大的黏性土、淤泥质黏性土、砂类土、碎石类土等冻胀土,其中淤泥质黏性土为V级特强冻胀。根据黑龙江和内蒙古地区等严寒地区运营线桥梁冻害调查资料,冻害桥梁的冻起高度50~150mm不等,桥梁病害多为基础冻胀拔起或因受力不均而使桥墩产生倾斜,甚至有的墩身拔段,直接影响行车安全。

根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093-2017)1.0.9条和6.1.3条承台底面高程应位于冻结线以下不少于0.25m,可有效避免产生此类病害。当

桥梁基础位于冻胀或强冻胀土中时，因承台底面受切向冻胀力的作用，可能导致基础冻胀变形或断裂，因此需进行冻胀稳定性验算。

桥梁基础底部位于季节性冻土最大冻结深度以下是，冻胀计算：

$$N+C+Q_t \geq m^m T$$

式中 N ——基项上的荷重 (kN)；

C ——基础重及襟边上土重 (kN)；

Q_t ——基础位于融化土层的摩擦力 (kN)，

$$Q_t = S_t \times A_t;$$

其中

S_t ——基础侧面与融化土的单位摩擦力 (kPa)，在无实测资料时，对黏性土采用20kPa，对砂土及碎石土采用20kPa；

A_t ——在融化土层中基础侧面积 (m²)；

m^m ——安全系数，未架梁时用1.1，架梁后对静定结构用1.2；

T ——基础的切向冻胀力 (kN)， $T = A_u \tau + A'_u \tau'$ ；

A_u ——70%冻深范围内基础和墩身侧面积 (m²)；

τ ——70%冻深范围内基础和墩身侧面积的单位切向冻胀力 (kPa)；

A'_u ——河底以上冰层中墩身侧面积 (m²)，当冬龄期间无结冰时 $A'_u = 0$ ；

τ' ——水结冰后对墩身侧面的单位切向冻胀力 (kPa)，可用190 kPa。

北黑铁路桥梁多采用钻孔灌注桩基础，以避免因冻胀力导致基础冻胀变形或断裂，按规范要求将承台底面高程置于冻结线以下不少于0.25m。设计时检算冻胀力作用下承台与桩的连接强度。基础设计计算预留一定的安全度。

(二) 多年冻土区以桥代路

黑河市位于严寒地区，地下形成多年冻土，多呈岛状分布，零星分布于沼泽、山地沟谷等地。

路基施工破坏了对冻土起到保护作用的地表植被，改变了地表层的水热交换条件，导致冻土融化而使路基下沉。根据以往经验，采用桩基础桥梁能有效控制沉降变形，受多年冻土影响较小。在线路纵断合理的情况下，多年冻土区采用桥梁形式穿过，可有效消除路基病害，且较为经济合理。例如北黑铁路DK215+345-DK215+750范围在岛状多年冻土，主要类型为富冰冻土，融化后成流塑~软塑状态，融沉等级为III级，融沉类别为融沉。因融沉等级高，融后产生的融沉和变形大，路基有可能引起变形失稳。经经济技术比较，取消该段路基设计，采用桥梁方案跨越多年冻土区。

结合多年冻土区的工程地质条件和工程实践，桥梁基础首先考虑深基础，即桩基础。桩基础施工采用保持冻结原则设计，桩基础分为钻孔打入桩、钻孔插入桩和钻孔灌注桩等三种类型。

钻孔打入桩是将预制桩打入孔径小于桩径（孔径小于桩径50~100mm）的钻孔内而成，适用于黏性土和砂性土的多年冻土层。

钻孔插入桩是将预制桩插入孔径大于桩径（孔径大于桩径50~100mm）的钻孔内，并在桩与钻孔的空隙间填入黏性砂浆或饱和砂浆而成。该法适用于各类冻土地基，钻孔要求不高。但灌入砂浆施工工艺不成熟，容易出现质量问题。

钻孔灌注桩在桥梁工程中使用范围广，适用于各类地质条件，理论和施工均成熟，而且钻孔灌注桩承载力大、安全度高。但钻孔灌注桩的混凝土水化热对冻土影响较大。

结合工程地质条件和工艺技术，多年冻土地基的桥梁基础选用钻孔灌注桩基础，钻孔灌注桩基础地基温度挠度较大，回冻时间较长，回冻前不应承载，钻孔灌注桩可用于各类多年冻土地基。多年冻土地区的桥梁基础按保持冻结原则设计，即保持基础底部多年冻土在施工和运营过程中保持冻结状态。

桥梁设计采用以下防冻胀措施：

(1) 多年冻土地区的墩台基础均增加护面钢筋防裂措施，承台侧面、顶面均设置护面钢筋。

(2) 桥墩基础地面埋深按不少于土壤最大冻结深度以下0.25m考虑，所有墩台地面以下墩台身及基础顶面、侧面涂抹一层沥青渣油，使其表面光滑。

(3) 多年冻土区桩基施工设置永久钢护筒，在护筒外涂渣油，护筒底应进入到冰冻线以下未冻土层中不少于0.5m。

(4) 将基础和墩台身周围的冻胀性土用三七灰土或砂夹碎石换填。

(5) 钻孔灌注桩宜采用低温、早强、耐久混凝土，具有良好的抗冻融性能。

(6) 当地基的季节融化层为冻胀土或强冻胀土时，混凝土桥墩底截面应配置短钢筋，承台与桩的连接钢筋应加强，以增加抗拉强度。

四、涵洞设计

(一) 涵洞冻害特征

对北黑铁路既有涵洞进行调查，在季节性冻土区较多涵洞结构损害严重，存在较为严重的冻害，主要由于地基土的冻融破坏而遭到破坏。

(1) 冻胀隆起

既有北黑铁路涵洞多为排洪而设，涵内常有水流。为防止不均匀沉降和涵身断裂，涵身常分为数节涵节涵洞基础较浅或沉降缝漏水，基底土层在冬季产生冻胀，涵洞不同涵节产生不同程度的隆起。常见出入口涵节冻胀隆起较高，中间涵节冻胀隆起高度小。融化期冻胀土层融化，涵洞又因融化下沉。

(2) 涵节接缝错位、脱离

北黑铁路位于严寒地区，地下水位较高，涵洞基础易产生冻胀。在多年的冻胀和融沉的重复作用下，出入口和中间涵节产生不同程度的冻融破坏，使相邻涵节接缝位置产生错位，进而涵节在接缝位置脱离，相邻涵节接缝宽度较大，涵洞的防水功能遭到破坏。当涵洞涵节较长或采用刚性接头时，沿涵轴方向因冻融作用产生不均匀沉降，盖板涵侧墙产生裂缝，框架涵产生环向裂

缝。

(3) 挡墙开裂

涵洞挡墙为半掩埋体,各部受气温影响不同,产生不均匀冻胀。因季节性冻土冻融破坏的重复作用,致使端翼墙隆起,挡墙因受力不均而开裂。

(二) 冻害破坏原因

涵洞的冻害破坏主要是涵洞出入口和中间涵节受外界环境影响程度不同,出入口和中间涵节受铁路荷载也有很大差异,导致涵洞沿涵轴方向产生不均匀冻胀或融沉变形。

涵洞出入口受外界气温影响较大,出入口地基的冻结深度和基础底部的法向冻胀力均较中间涵节偏大。涵洞出入口的填土高低于中间涵节的填土高。因此涵洞出入口位置的冻害破坏较中间涵节更为严重。对于不同的涵洞,当冻胀量大于融沉量,涵节逐年增高,无法恢复原位,涵节受推举而隆起。当冻胀量小于融沉量,涵节逐年下沉而产生病害。

(三) 涵洞冻害破坏的防治措施

当涵洞位于冻胀及强冻胀土地基上时,结合以往法向冻胀力与冻深、冻胀量关系的试验结果,基底受法向冻胀力作用,法向冻胀力很大,仅靠涵洞的自重是无法克服的。根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093-2017) 9.3.9条,基础底面必须置于人为上限以下,避免基底产生法向冻胀力。选择合适的基础类型与合理的基础埋深,对防止涵洞冻胀融沉变形有重要作用,涵洞基础应根据涵洞轴向的融深变化,分段采用不同的基础埋深。除基础埋置深度外,还可以采取以下措施:

(1) 换填

换填法是采用最为广泛的防冻害措施中的一种。在含水率相似的情况下,黏性土的切向冻胀力最大,砂类土次之,碎石土最小。因此涵洞采用换填砂卵石置换天然地基的冻胀性土,以减少地基土的冻胀影响。这种方法简便易做,而且效果明显。但应控制砂卵石中粒径小于0.1mm的颗粒含量,将粉黏粒含量控制在10%以内,才能起到较好的换填效果。

(2) 物理化学法

物理化学法有多种,主要为采用物理、化学方法进行防冻胀处理,常用的主要有用憎水物质改良土、人工盐渍化改良土和使土颗粒聚集或分散改良土等。为减少涵洞侧面切向冻胀力,可以采用阳离子表面活性剂改良土或在基础侧面涂渣油。

(3) 保温法

保温法是指在建筑物基础底或四周设置隔热层,增大热阻,以推迟地基土的冻胀,提高土中温度,减少冻结深度,进而起到防治冻胀的一种方法。对于不良冻土路基,涵洞基底可设置聚氨酯或聚苯乙烯材料的保温层,厚度5~10cm,保温层宽度与基础宽度相同。

五、桥涵工程过冬保护措施

北黑铁路地处严寒地区,地表普遍存在季节冻土,

一般每年10月下旬开始冻结,3月中达到最大冻结深度,冬休时间较长,桥梁工程一般较长。因此需要对施工期间的桥涵工程做好冬季保护措施。根据现场配合施工经验,总结如下注意事项:

(一) 梁部保护措施

对已经预制完成的简支梁,应及时完成保护层和防水层等。黑河地区冬季降雪较多,梁场应设置应设专人看守,负责清理梁顶积雪。

(二) 墩台保护措施

对已施工的墩台,应及时临时封闭墩顶支座预留孔或防落梁支架预留孔;对已完成架梁的墩台,预留支座螺栓孔须及时完成灌浆,以避免雨雪进入螺栓孔造成冻胀破坏。

(三) 基坑保护措施

黑河地处严寒地区,冬天时间较长,冬季基坑土壤产生冻结,影响施工进度和工程质量,不宜在冬季开挖基坑。对于已经开挖的桥涵基坑,须及时完成基础施工,并按设计要求回填。如未能及时施工,需采用原状土回填基坑,防止基坑积水产生冻胀等影响地基承载力。

(四) 其他保护措施

(1) 冬休期间应采取相应保护措施防止桥涵预埋件生锈变形,做好保护工作。

(2) 已经施工完成的涵洞应及时顺沟,使涵内水流及时排走,防止冬季期间涵内积水,以免发生冻胀冻害。如涵洞底板较低,涵内应按设计及时回填,避免涵内积水冻胀。

结语

北黑铁路作为黑河乃至黑龙江重要的交通通道,桥涵工程的设计安全至关重要。结合沿线的气候环境,针对不同情况采用有效经济的解决措施,处理好严寒地区及多年冻土的问题。针对不同的气候环境,采取有效的处理措施,才能做到因地制宜。目前北黑铁路桥涵工程基本已经完成,对桥涵工程的设计施工进行总结,对以后严寒地区铁路工程起到参考作用。

参考文献

- [1] 尚海涛. 严寒地区铁路客运专线桥梁设计特点. 铁道标准设计. 2012(12): 32-34.
- [2] TB/T 3320-2013 铁路桥梁球型支座[S].
- [3] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].
- [4] TB 10093-2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
- [5] Q/CR 9207-2017 铁路混凝土工程施工技术规程[S].
- [6] TB 10005-2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [7] 吴少海. 青藏铁路多年冻土区桥梁设计特点. 中国铁路. 2002(9): 35-37.
- [8] 章金钊. 高原多年冻土地区桥涵设计与施工研究[J]. 中国铁道科学, 2001(04): 40-45.