

高寒高海拔地区高速公路路基防冻融施工技术研究

王俊华

中交北疆工程咨询有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要: 高寒高海拔地区气候恶劣、冻融频繁,高速公路路基易发生冻胀、融沉、翻浆等病害,严重影响道路正常使用及寿命。基于该区域特点,对路基冻融病害成因及其机理进行研究,分析温度场、水分场和应力场三者相互影响下病害发展变化规律,在此基础上从填料改良、排水与保温结构、施工方法改进、工程质量控制四个方面提出防冻融施工技术措施。主要介绍了填料中粗粒土级配及细粒含量要求、水泥与石灰改良效果、聚苯乙烯泡沫(EPS)、聚氨酯等保温材料使用位置、碎石层气冷和热棒主动降温手段、防排水设施特别注意事项和冬季施工温控措施。认为高寒高海拔地区路基防冻融需采取以“切断水源、改善填料、调节温度、综合防治”为原则的方法来预防所有类型冻融病害的发生。

关键词: 高寒高海拔;高速公路;路基工程;冻融循环;防冻融施工

引言

我国西部及东北部广泛分布多年冻土与季节性冻土区,生态环境脆弱,冻融频繁。高速公路对路基强度、平整度和耐久性要求高,但在高寒高海拔地区易出现冻胀、翻浆、边坡滑塌等问题,危及安全并增加养护成本。传统施工方法难以适用,如黏性土填料易冻胀、排水设施冬季失效、压实度不足等。亟需研发专门的抗冻融施工技术,在路基材料、结构形式、施工工艺及质量管理等方面实现系统性突破。

1 高寒高海拔地区冻融环境与路基病害机理

1.1 环境特征

高寒高海拔地区一般指海拔在3000m以上、年平均温度低于零摄氏度、最低气温达-40℃以下的地区。工程环境特点有:①气温年较差及日较差较大,昼夜温差往往超过20℃,在反复冻融过程中,有时一个周期内就会出现多次表面冻融现象。②日照强烈,紫外线辐射强度是平原地区的数倍,加速沥青路面的老化,影响地面热平衡。③降水量少而蒸发量小,土壤湿度大,在多年冻土地带活动层夏季融化时常常处于饱水状态^[1]。④风蚀显著以及雪害严重,吹雪造成路边大量积雪,融化后流入路基内部。

1.2 冻融循环的力学效应

冻融循环对路基土体物理力学性质有不利影响。在冻结过程中,水向冻结前沿移动形成冰透镜体,体积增大而产生冻胀压力;而在融化时,冰体融化,含水量大幅上升,有效应力减少,强度下降。反复冻融使颗粒之间连接破坏,孔隙率增大,渗透性改变。从宏观上看,抗剪强度降低到原状土的60%-80%,压缩模量增大,弹

性模量降低。细粒土可能发生“翻浆”,即从固态或者硬塑变成软塑甚至是流塑。冻融累积作用明显,在最初的几次冻融中损失最大,之后逐渐趋于平稳,但是仍然小于未受冻融的影响。

1.3 温度-水分-应力耦合作用

路基冻融病害是温度场、水分场以及应力场三场耦合作用造成的。在冬季低温情况下,由于土体温差引起未冻区水分向冻结区流动,造成冻结带含水量大大增加,从而产生严重冻胀;而在春季升温过程中,地面以上冰层由上至下消融,但是深部仍然冻结成为隔水层,融水不能下渗,使得路基表面含水量迅速增大并降低其强度,同时汽车荷载产生的附加应力进一步加大这种差异性沉降程度。而这三者之间的相互影响又存在一定的时滞性及非线性特点,因此给病害的预报及防治带来很大困难。

1.4 主要病害类型及成因

高寒高海拔地区高速公路路基冻融病害分为四种类型:(1)冻胀:土体冻结体积增大造成路面出现横、纵方向凸起甚至形成冻胀丘或者裂缝等现象,主要由于土体具有较强冻胀性(粉质粘土或者粉土较多)、地下水位较高或者排水不良使水分得到充分补充而造成的;(2)融沉:春季冰雪融化后土壤收缩,路基下沉,在路面上出现波浪形或者凹陷等现象,融沉量一般大于冻胀量并且会进一步下沉;(3)翻浆:融沉同时伴有大量水分存在,在车轮作用下泥土从路面上裂缝处或者路肩向外冒出使得道路损坏,主要出现在粘性土填筑段落上;(4)边坡冻融失稳:路堤边坡表层土体经过冻融之后其抗剪强度下降再加上融雪水下渗容易产生边坡浅层滑移或者溜塌。

2 防冻融施工技术体系总论

针对以上病害原因,高寒高海拔地区高速公路路基防冻融施工技术应以“积极调节温度、有效隔绝水分、选择适当材料、优化施工方法”为原则。技术路线可分为四个方面。一是填料改善及选择技术。从源头减少土体冻胀敏感性,在一定范围内限制土中小颗粒比例,加入适量改良剂使得路基填料在冻融过程中具有良好的抗压强度。二是保温及主动降温设施。在路基内部设置保温隔热层或者主动降温设备,人为干预地温场变化,降低结冰深度或者加快融化速度。三是排水及防水措施。阻止外界水源进入路基内部并且保证融化后自由水能够及时排出路基以免积水。四是施工工艺及温控方法。根据高寒地区特点做好冬季施工、及时碾压、成品防护等工作保证工程质量不受寒冷天气影响。下面进行详细介绍。

3 路基填料改良与选用技术

3.1 粗粒土填料优先原则

高寒高海拔地区路基应以粗粒土(碎石、砾石、砂砾石等)为主。由于粗粒土冻胀敏感性较低,因为颗粒粒径较大、比表面积较小、毛细作用较弱,不易吸水而造成孔隙冰大量膨胀。但是要注意的是,如果粒径小于0.075mm的细粒所占比例大于5%-10%,这些细粒将会占据孔隙从而形成连续毛细通道,这时就会使该种粗粒土的冻胀敏感性大大提高^[2]。所以在施工之前要进行颗粒分析并严格控制其中细粒的比例;对于含有较多细粒的天然粗粒土可以通过筛分、水洗或者加粗骨料的方法改善其级配。

3.2 细粒土的改良方法

当缺少足够的粗粒土而不得不采用细粒土(低液限粉土或黏土)时,则需要进行处理。处理方法有物理法和化学法两种方式。物理法:掺入砂砾、碎石等较大颗粒的集料(建议比例为20%-40%),以改善级配、减少细粒含量、增强可压实性等,其用量可通过击实及冻胀试验来决定。化学法:掺入水泥、石灰或粉煤灰等具有一定活性的胶凝材料,在水中发生水化作用形成胶结体从而减小空隙比、增加强度以及水稳定性等。其中,用水泥的效果更好,早期强度发展较快,适用于工期较紧工程;水泥的用量一般为干土重的4%-8%,根据冻融前后无侧限抗压强度来确定。但应注意的是,由于水泥稳定土在较低温度下不易水化,故施工气温不应低于5℃。

3.3 抗冻融耐久性评价指标

改良填料需进行室内试验对其抗冻融性进行评价。一般选用下列指标:冻胀率(冻胀量与冻结深度之比,不应大于1%-3%);融沉系数(融化后体积变化率,

不应大于2%);冻融循环后强度降低率(一般不大于25%)。试验宜采用《公路土工试验规程》中开放式冻融试验法(更能反映实际情况下的水分补给情况)。对于高速公路等较高等级道路,应至少完成5~10次冻融循环试验以便考虑累积影响。

4 保温与主动降温结构技术

4.1 保温材料类型与选用

铺设保温层能够增加热阻,减缓冬季负温下热量传递速度,降低冻结深度。常用的材料有挤塑聚苯乙烯板(XPS)一闭孔率高、吸水率低、抗压强度250-500kPa,是首选;膨胀聚苯乙烯板(EPS)一保温性能相近但是强度较低,用于路肩等非承重部分;聚氨酯硬泡一保温效果最好但是价格较贵,需要外加一层防护层防止紫外线照射^[3]。保温层的位置根据地温场模拟结果决定,在路床顶面以下0.5-1.0m处设置厚度为5-15cm左右;在多年冻土地区位于路基底部以防止冻土融化。施工中保温板之间留有一定的空隙并且用聚氨酯发泡胶填实,在上面及下面各铺设一层不少于10cm厚的碎石或砾石作为保护层。

4.2 碎石层气冷技术

碎石层利用多孔介质冬季自然对流(冷空气下沉、暖空气上升的“烟囱效应”)带走路基热量,从而降低地温。碎石层位于路堤中部或底部,厚度1.0-1.5m,使用粒径为8-15cm干净碎石,含泥量小于3%,分层摊铺,松铺厚度不大于30cm,用重锤式振动压路机碾压,不得过度压实,在其上面铺设土工格栅与反滤层以防止细粒土进入孔隙造成阻塞。

4.3 热棒与通风管主动降温

热棒是封闭的两相热虹吸管,内部填充氨或者二氧化碳工质,在气温低于地温情况下,蒸发端吸热使工质气化上升到冷凝端放热后冷凝回落,不需要外加能量即可使地温降低1~3℃。施工时热棒以一定角度倾斜(相对于垂直方向的角度为15°)进行钻孔安装,蒸发端位于多年冻土层内而冷凝端突出地面外;其位置间隔一般在3~5m之间,呈行列式或者梅花状分布。通风管通过利用风压使空气流通带走热量。这两种方法都需要配合保温层以及碎石层共同作用才能达到较好的效果。

5 排水与防渗技术

5.1 地表水拦截与疏排

排水系统是否良好对防治冻融病害至关重要,在路基上方设置截水沟,距离路堑坡顶不应小于5m,沟底纵坡不应小于0.5%,用浆砌片石或者混凝土现浇防止冻胀破坏;在路堤边坡两侧设置边沟或者排水沟,将地面水排出路基以外,在沟的出口处设置消力池。挖方路段的

路堑侧沟底部铺设碎石盲沟并与仰斜排水孔相连通,降低地下水位。

5.2 地下水位控制与毛细阻断

当地下水位埋深小于1.5倍冻结深度时,应降低水位或者阻止毛细水上升,一般做法是:在路基底面设置一层厚30~50cm、粒径大于20mm碎石或卵石作为毛细阻断层,在较大孔隙中切断毛细上升路径;设置深式边沟或者集水井并配合管井排水使地下水位低于冻结深度^[4]。毛细阻断层下面应设土工布反滤层以免细粒土进入孔隙中。

5.3 防冻胀排水管

传统的PVC或者混凝土排水管在冬季由于存有积水容易发生结冰而导致其功能失效。防冻胀排水管主要有两种方法:一种是增大管径并且设置一定的纵坡(不少于1%),使得水能够迅速流出从而降低滞留水量;另一种就是在管内铺设电伴热带或者是循环热水管来保持温度。高等级公路建议使用双层排水管(内管输水,内外管之间填充保温材料)。检查井及集水井要加保温井盖,井周围回填大颗粒的土壤进行保温。

6 施工工艺优化与冬季施工措施

6.1 填筑与压实工艺特殊要求

低温下土体难以被压实,尽量不在负温条件下填筑细粒土。如需施工时注意:利用一天中温度较高时间(11:00~15:00)进行集中施工;填料预热到不低于5℃;松铺厚度为20~25cm并增加压实遍数;压实完成后及时用保温材料(如保温棉、草帘等)遮盖防止夜晚气温过低造成结冰。对于粗粒土负温的影响较小,但是要保证冻块最大尺寸不大于层厚三分之一且比例小于5%。

6.2 保温层施工工艺

保温板下承层应平整、坚实、无尖锐凸起,板块接缝搭接,相邻高差不大于3mm,铺好后及时铺一层厚度为5-10cm的砂砾作为保护层,用小型压路机进行压实,

不得使用大型机械设备直接在保温板上进行碾压,板缝用电热熔或者专用胶带封严实,在铺设碎石时,不得使运输车辆直接在保温板上行驶,应采取倒退方式卸料。

6.3 低温下水泥稳定土施工

水泥水化在5℃以下显著降低,在0℃以下几乎完全停止,整个过程应保证温度不低于5℃。做法:用水加热拌合(水温不超过60℃);运输车用保温帆布覆盖;尽量减少从摊铺到碾压时间;蒸汽养生或者覆盖电热毯、保温被等。气温极低(低于-10℃)情况下禁止进行水泥稳定土施工,而应用无水水泥纯碎石填筑。

7 结语

高寒高海拔地区高速公路路基冻融病害由温度、水分与应力交互作用引发,具复杂性、周期性与隐蔽性。综合防治需系统施策:优选粗粒土填料,细粒土须经水泥/石灰处理并通过冻融试验;采用XPS/EPS保温层结合碎石气冷或热棒,实现“保温+散热”;构建地表截排、地下导流、毛细阻断及防冻胀排水管的立体排水体系;低温施工严禁负温作业,对关键部位采取加热、覆盖、快干等措施;提高压实度并建立地温与沉降监测制度。未来可融合气凝胶、分布式光纤传感与互联网技术,推动智能防控,并加快制定专项技术标准。

参考文献

- [1]芦文文,李西.冻融作用下路基水泥混凝土力学特性及演化规律研究[J].工程质量,2026,44(3):44-50.
- [2]吕小兵.高海拔地区公路路基冻融病害防治与养护技术[J].山西建筑,2025,51(16):146-149.
- [3]王振华,王泽成,李栋伟,等.基于冻融循环作用下寒区路基土特性与力学响应[J].科学技术与工程,2025,25(20):8666-8673.
- [4]马涛,张永刚,黄世光.季冻区高铁路基冻融变形特征与影响因素分析[J].土工基础,2025,39(2):333-337.