

高寒地区公路路基防冻排水设计对策探析

苟 伟

中测工程勘察设计院有限公司 四川 成都 610031

【摘 要】：高寒地区公路路基病害的主要核心诱因是水和温度共同作用，冻胀和翻浆是季节性冻土区最典型的两种路基病害形式。本文从高寒地区公路路基工程特性入手，系统分析冻胀和翻浆发生机理以及对路基稳定性的危害机制，揭示温度场、水分场和应力场三场耦合作用下路基病害的内在联系。在此基础上，从防冻设计和排水设计两方面入手，对高寒地区公路路基防冻排水的系统化设计进行研究。研究发现，在高寒地区路基设计中，防冻和排水并不是相互独立的两套措施，而是相互依存、协同增效的有机整体，排水是防冻的前提，防冻是排水的目的，两者协同才能达到路基长期稳定的最终目的。本文认为应该从路基填料的抗冻性选择、路基高度和冻结深度匹配、防排水设施的系统化布置、边坡防护和保温一体化设计等几个方面入手，形成“防冻与排水协同、保温与导水并举”的设计思路，可为高寒地区公路路基设计提供一定的技术参考。

【关键词】：高寒地区；公路路基；防冻设计；排水设计；冻胀；翻浆

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.084

1 引言

高寒地区气候特点就是冬季长且寒冷，负温持续时间长，冻结深度大，季节冻融循环频繁。该气候条件下公路路基的稳定性受到了很大的影响^[1]。路基土体在冻结时水分迁移、冰晶生长引起的体积膨胀（冻胀）造成路基不均匀抬升，春融期土体强度突然下降又引发翻浆沉陷^[2]。两种病害常常交替出现、互相影响，成为造成高寒地区公路路面破坏、结构失稳的主要原因。

高寒地区公路路基病害的本质就是水和温度的共同作用，没有水，单纯的冻结不会产生大的冻胀；没有冻结，水分的存在也不会引起翻浆。因此解决该问题的关键就是同时切断水的补给通道和削弱冻的作用效应，即通过合理的排水措施降低路基土体含水量，通过防冻设计控制冻结深度和冻胀量^[3]。防冻排水设计不是防冻措施和排水措施的简单叠加，而应该从路基结构整体出发，建立二者协同作用的设计体系。

2 高寒地区路基冻胀与翻浆的机理分析

2.1 路基土体冻胀的发生条件与影响因素

路基土体冻胀是由水分在冻结锋面前沿迁移聚集，形成冰透镜体而产生的。冻胀发生需要满足三个基本条件，其一，土体具有冻胀敏感性，粉质土、黏质土由于毛细作用强、水分迁移通道发育，冻胀敏感性最高，粗粒土由于颗粒间隙大、毛细作用弱，冻胀敏感性低；其二，土体含水量达到或者超过塑限，有足够的水分可以被冻结时迁移；其三，负温持续时间足够长，使冻结锋面可以在土体内持续推进^[4]。

在具备以上三个条件的路基段，冻胀的发生几乎

是不可避免的。季节性冻土冻胀率同土体类型、含水量、冻结速率、上覆荷载有关。粉质黏土在塑限含水量附近冻胀率可达到5%~10%，含水量增大时冻胀率可达15%。高寒地区公路路基冻胀变形存在明显的空间不均匀性，各个断面、各个深度、各个位置的冻胀程度相差很大，不均匀冻胀是造成路面开裂、平整度变差的主要因素^[5]。

2.2 春融期翻浆的形成过程

春融翻浆属于冻胀的延续效应，是冻结土体在融化时强度急剧下降、承载力消失的现象。其形成过程分为三个阶段。融化初期表层土体先解冻，但下层土体仍然冻结，融化水不能向下渗透，形成上融下冻的封闭含水层。融化中期土体含水量急剧上升，强度明显下降，在行车荷载反复作用下，土体结构被破坏，泥浆上涌。在融化后期，如果排水条件不好，翻浆就会越来越严重，最后造成路面结构破坏。

翻浆的严重程度是由融化速度和排水情况所决定的。融化速率过快会造成强度丧失的集中，排水不畅会使土体一直处在高含水状态。高寒地区春季气温回升一般具有突然性，在快速融化和不良排水条件共同作用下，翻浆成了该地区公路最常见的春季病害之一。所以春融期排水能力的保证属于防冻排水设计的重要内容。

2.3 温度场、水分场与应力场的耦合作用

高寒地区公路路基的冻胀和翻浆是温度场、水分场、应力场三者耦合所造成的。温度场控制着冻结锋面的推进、融化锋面的后退，决定着冻胀和翻浆发生的时间、空间范围；水分场给冻胀提供物质来源、给

翻浆提供介质基础,含水量分布影响冻胀敏感性、融化后强度;应力场决定路基土体变形、破坏特点,行车荷载是翻浆发生的触发条件。

三场之间存在复杂的耦合关系,并且具有互馈的特点,即温度梯度导致水分迁移,水分迁移又会影响到土体的热学参数,而这些参数的变化又会改变温度场的分布;冻胀造成的体积变化改变土体的应力状态,应力状态又会影响到土体的渗透性。由于防冻排水设计要考虑到三场之间的相互作用,所以不能采取头痛医头的局部措施,而应该从系统角度出发,对三场之间的相互影响进行综合考虑,通过切断水分补给、控制温度效应来达到路基长期稳定的目的。

3 高寒地区公路路基防冻设计对策

3.1 路基填料的抗冻性选择与改良

路基填料的抗冻性属于决定冻胀程度的内在要素。不同土质的冻胀敏感性差别很大,粗粒土由于孔隙大、毛细作用弱,冻胀量一般小于总冻胀量的1%,粉质土和黏质土的冻胀量一般为总冻胀量的3%~8%。因此,在高寒地区公路的设计中,首先选择粗粒土作为路基填料是防冻最直接有效的办法。当优质粗粒土料源缺乏的时候,可以加入砂砾、碎石等粗颗粒材料来改善细粒土的冻胀敏感性。

填料改良的另一个方向就是用土工合成材料做加筋处理。土工格栅、土工织物等在路基中起到加筋的作用,可以提高土体整体性,并且改变土体孔隙结构来抑制冻胀。防冻措施的使用有其适用条件,设计人员应根据具体工程的冻深、土质、地下水位等综合确定填料方案,不能盲目套用。

3.2 路基最小填土高度的确定

路基填土高度属于决定路基冻结深度的重要设计参数。当路基填土高度足够时,路床范围内土体可以不受季节冻融的影响,不会产生冻胀、翻浆。路基最小填土高度的确定要综合考虑设计冻深、填料种类、地下水位及路床容许冻胀量等各方面因素。高寒地区公路路基填土高度不小于最大冻深的1.2倍。当受地形或者其他条件所限不能达到该高度的时候,应当采用保温材料置换或者设置防冻隔离层等方式进行补偿。

3.3 保温层的设置与保温材料的选用

高寒地区,路基填土高度不够或者不能通过提高填土高度来满足防冻要求时,设置保温层是有效的、经济的防冻措施。保温层的作用是增大路基的热阻,减缓热量传递速度,使冻结锋面停留在保温层以上或

者保温层范围内,从而保护下部土体不被冻结。

保温材料的选择要兼顾导热系数、抗压强度、耐久性以及经济性等各个方面。聚苯乙烯泡沫板、挤塑聚苯乙烯泡沫板等有机保温材料由于导热系数小、重量轻,被用在高寒地区路基保温上。但是这些材料在长期荷载的作用下会发生蠕变变形,并且施工质量要求高。无机保温材料如泡沫混凝土、玻化微珠保温砂浆等虽然导热系数稍高,但是耐久性好,适合于对承载力要求较高的路段使用。

3.4 防冻隔离层的设置

防冻隔离层位于路床与路基下部之间,它的作用就是阻止下部土体中的毛细水向上流动,减小进入冻结区的可冻水量。防冻隔离层一般用级配好的砂砾料或者碎石填筑,其厚度应根据地下水位、冻深综合来定。隔离层和路床之间要设反滤层,防止路床细颗粒土向下流失。防冻隔离层既是防冻措施又是排水措施,它既可以阻断毛细水上升的通道,又可以为春融期融水提供横向排出的通道。

4 高寒地区公路路基排水设计对策

4.1 地表排水系统的优化布局

地表水是路基水害的另一主要补给来源。高寒地区春季积雪融化、夏季降雨集中,地表排水系统如果不能及时有效地排除地面径流,大量的水分就会渗入路基,给冻胀和翻浆创造了条件。地表排水系统优化要遵循“截、引、排、降”的原则,用边沟、截水沟、排水沟、急流槽等设施的合理组合来形成一个完整的排水网络。

边沟的断面形式、纵坡设计要满足高寒地区的要求。土质边沟在冻融循环的作用下容易发生坍塌、淤积,应采取浆砌或者现浇混凝土等防护措施。边沟纵坡不宜过缓,以防泥沙堆积、排水不畅。挖方路段截水沟设在路堑边坡顶部适当位置,拦截坡面径流。填方路段应接通排水沟和边沟。

4.2 地下排水设施的设计要点

地下水处理属于高寒地区路基排水的难点和重点。当地下水位较高或者有层间滞水的时候,只依靠地表排水不能解决问题,必须设置地下排水设施。常用的地下排水设施有渗沟、盲沟、排水垫层、横向排水管等。

渗沟、盲沟的设计要考虑到冻胀的影响。排水管的埋置深度要低于冻结线,管材要有足够的抗冻能力。反滤层的级配设计要满足透水性要求,又不能造成细

颗粒土流失。春融期间,盲沟、排水垫层的排水作用更加重要,给融化水提供水平排出的途径,防止融水滞留在路基内。

4.3 路面结构内部排水设计

路面边缘排水系统是在路肩边缘设纵向集水沟、横向排水管,将路面结构层内水分排出。纵向集水沟一般设在面层和基层之间或者基层底部,它的作用就是截获沿路面结构层界面渗流的水分,然后汇集到横向排水管中排出路基之外。集水沟应采用透水性好的材料(开级配碎石、砂砾料)填筑,保证其有足够大的储水、导水能力。沟底应设纵坡,坡度不小于0.5%以利重力排水。横向排水管间距应根据当地降雨量、路面宽度综合确定,一般控制在20m~50m之间,管材抗压强度及抗冻性应满足要求,管口设反滤设施,防止细颗粒物流失堵塞管道。

路面结构层排水系统用排水基层或者排水垫层来达到排水目的。排水基层一般设在面层之下、基层之上,或直接用作基层,主要作用是迅速排除通过面层渗入的雨水和春融期融化的冰晶水。排水基层应采用开级配材料,如开级配沥青稳定碎石或开级配水泥稳定碎石,其孔隙率一般不小于15%,渗透系数应大于100m/d,能迅速排出渗入路面结构的水分。由于开级配材料强度一般小于密级配材料,设计时需要在排水能力和结构承载能力之间取得平衡,必要时可在排水基层上设置封层,防止面层施工时水泥浆或者沥青渗入堵塞排水孔隙。透水基层和不透水基层之间应设隔离层,一般采用土工织物或者沥青砂胶,防止水分在界面处积聚形成滑动层或者软弱层。隔离层除了防水作用外,还要有较好的强度及变形协调性,以满足不同结构层之间变形的差异。通过以上两个系统共同作用,路面结构内部积水可以及时有效地排出,从根本上降低春融期翻浆发生的概率,提高路面结构使用寿命。

参考文献:

- [1] 李红霞.公路路基排水设计以及施工问题研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(6):325-328.
- [2] 张晓东.公路路基排水设计及施工问题研究[J].交通科技与管理,2024(19):130-132.
- [3] 赵大山.公路路基排水设计及排水设施施工探讨[J].越野世界,2025(2):84-86.
- [4] 麻春亭.公路路基排水设计分析[J].交通世界,2025(7):94-96.
- [5] 李彪.黄土地区公路路基排水设计研究[J].甘肃科技,2024,40(11):16-19.

4.4 路基防冻排水的协同设计

防冻和排水在设计时不能被看作是两个独立的系统。排水系统是否完善会直接决定防冻措施的效果,排水不畅的路基即使使用了保温材料,高含水量也容易造成冻胀超标;排水良好的路基,即使填料防冻性能较差,冻胀风险也会因为含水量的降低而大大降低。

防冻排水的协同设计要从这几个方面入手来统筹考虑。第一,排水设施的设置要与防冻层的布置在竖向空间上相互配合,用排水垫层做防冻隔离层。第二,边坡防护设计要兼顾保温和排水两个方面的作用,不能只顾着防止坡面热交换过快造成横向冻结,也不能让坡面水无法排出。第三,春融期排水能力保障应该成为设计控制条件之一,即使冬季防冻措施做好了,春融期排水不畅也会造成翻浆。

5 结语

高寒地区公路路基冻胀、翻浆是由温度场、水分场、应力场三者耦合作用产生的综合表现,其防治要从防冻、排水两方面共同实施。防冻设计的主要目的就是控制冻结深度和冻胀量,具体措施有选择抗冻性填料、确定合理的填土高度、设置保温层和防冻隔离层等;排水设计的核心是降低路基土体含水量,具体措施有地表排水系统优化、地下排水设施设置和路面内部排水设计等。

防冻和排水不是彼此孤立的两个措施体系,而是互相依托、互相促进的有机整体。合理设计出的排水系统减少了土体含水率,使防冻措施在土体含水率低时也能发挥作用,有效的防冻措施又保证了排水设施不会出现冻胀破坏。在具体的工程设计过程中,要将防冻排水当作一个系统工程来对待,树立起“防冻和排水协同、保温和导水并重”的设计观念。随着高寒地区公路建设规模的扩大以及运行要求的提高,防冻排水设计还要继续在新材料的应用、数值模拟分析、长期性能监测等各方面进行研究,给公路路基的长期稳定提供更可靠的保障。