

路基水盐迁移特性及对路基路用性能影响的试验研究

张明亮¹, 李彬², 田亮¹, 王云峰¹, 袁友强², 刘军勇²

(1. 呼和浩特市公路工程局, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司)

摘要: 为了探明公路路基水盐迁移特性及对路基路用性能的影响, 依托青海察(尔汗盐湖)格(尔木)高速公路察尔汗盐湖区段路基工程, 以察尔汗盐湖区段沿线的含砂低液限粉土、粉土质砂、砾类土为研究对象, 开展毛细势作用下非饱和土路基水盐迁移及路用性能室内试验研究, 揭示在毛细势作用下强盐渍土地区公路路基水盐迁移规律, 明确不同填料路基毛细水的上升高度与盐渍化程度, 以及次生盐渍化对路基路用性能的影响。研究表明: 含砂低液限粉土(非盐渍土)、含砂低液限粉土(弱盐渍土)与砾类土路堤毛细水最大上升高度分别为 85、75 和 55 cm, 有害毛细水上升高度分别为 60、40 和 45 cm, 次生盐渍化高度分别为 50、30 和 45 cm; 随含盐量的增加, 粉土填料 CBR 值整体上呈减小趋势, 而砾类土路堤填料 CBR 值呈现出先增大后减小的趋势, 验证了水盐迁移造成粉土和砾类土路基路用性能的降低, 但次生盐渍化对粉土路基路用性能的影响更甚。

关键词: 公路路基; 水盐迁移; 路用性能; 毛细势作用; 强盐渍土地区; 次生盐渍化

在中国强盐渍土地区, 路基一般为低路堤, 高度一般为 2 m 左右, 由于地基土及地下水的高矿化度且强蒸发的区域环境, 更易造成低路基的次生盐渍化, 最终导致路基产生盐胀、溶蚀等病害。根据对察尔汗盐湖和西北部其他强盐渍土地区的调查, 由于公路早期建设对路基次生盐渍化危害重视不够或技术局限, 再加上当时经济水平、建设条件等因素的限制, 采取的路基阻盐措施技术水平滞后, 没有发挥有效的作用, 路基均出现了不同程度的次生盐渍化和相应的病害。因此, 揭示在毛细势作用下公路路基水盐迁移规律, 并提出次生盐渍化对路基路用性能影响量值是保证强盐渍土地区公路路基稳定性亟需解决的技术问题。

盐渍土地区路基水盐迁移研究始于 20 世纪 70 年代, 中国相关科研院所针对盐渍土中的毛细水上升高度、冻结深度和治理措施等进行了相关的试验和理论研究, 取得了一定的研究成果。董斌等对盐渍土进行了室内毛细水和盐分上升高度试验, 得到毛细水、盐分上升高度与时间的关系曲线, 并分析了影响因素和变化规律; 包卫星等以新疆喀什地区 10 余处天然盐渍土为研究对象, 进行室内冻融循环试验, 揭示了天然盐渍土在冻融循环过程中水分和盐分迁移规律及抗剪强度的变化情况, 提出了经过多次冻融循环, 低液限黏土试

样水分和盐分自下而上迁移, 试样黏聚力自下而上线性减小, 内摩擦角呈 S 形分布; 郝慧等通过不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的室内试验, 分析了季节性冻土区冻融循环条件对普通土或盐渍土盐分迁移的影响。

从研究现状来看, 多集中在室内模拟毛细水和盐分迁移规律, 已有研究成果呈现碎片化的特点, 鲜有针对水盐迁移对路基路用性能影响的试验研究。鉴于此, 该文依托青海省察格高速公路察尔汗盐湖区段路基工程, 基于竖管法试验原理, 通过自主设计制作的试验设备进行室内试验, 以含砂低液限粉土、粉土质砂、砾类土为研究对象, 揭示水分、盐分在不同土类路基中的上升规律, 确定毛细水在不同土样中的上升高度与盐渍化程度以及次生盐渍化对路基路用性能的影响量值。

1 试验方案设计

1.1 试验土样

试验所用土样、卤水等均取自察格高速公路察尔汗盐湖区段, 根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对其各项基本工程性质指标进行测定, 结果见表 1、2。

收稿日期: 2020-01-10(修改稿)

基金名称: 国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0802203); 中国交建科技研发项目(编号: 2014-ZJKJ-PTJS07)

作者简介: 张明亮, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 1253630713@qq.com

根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》，由表 1 可知：桩号 K619+000、K624+000 的盐渍土土样，不均匀系数 $C_u < 5$ ，前者曲率系数 $C_c < 1$ ，后者曲率系

数 $C_c > 1$ ，均属于级配不良含砂粉土的范畴；另一方面，在黎明山料场取的土样，不均匀系数 $C_u = 27.81 > 5$ ，曲率系数 $C_c = 1.7 > 1$ ，属于级配良好砾的范畴。

表 1 水盐迁移试验土样物理性质

取样地点	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	初始含 水率/%	初始含 盐量/%	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	土分类	盐渍化程度
K619+000	21.3	15.0	6.3	12.1	0.54	2.33	0.63	粉土质砂	弱氯盐渍土
K624+000	22.0	13.8	8.2	11.3	0.07	4.13	1.64	含砂低液限粉土	非盐渍土
黎明山料场	—	—	—	0.4	1.32	27.81	1.70	级配良好砾类土	非盐渍土

表 2 路用性能试验土样物理性质

土样	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含 水率/%	初始含 盐量/%	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	土分类	盐渍化程度
粉土	1.82	11.0	1.98	4.13	1.64	含砂粉土	中氯盐渍土
砂类土	2.13	8.5	0.54	17.53	0.43	级配不良砾类土	弱氯盐渍土

同理，由表 2 可知：路用性能试验所采用的粉土和砂类土，前者不均匀系数 $C_u < 5$ ，曲率系数 $C_c = 1.64 > 1$ ，属于级配不良含砂粉土；后者不均匀系数 $C_u > 5$ ，曲率系数 $C_c = 0.43 < 1$ ，属于级配良好砾类土的范畴。

1.2 试验仪器

为尽量与现场路基水盐迁移实际情况一致，减少试验设备尺寸效应对结果的影响，基于竖管法试验原理，对水盐迁移试验仪器进行了设计，如图 1 所示。

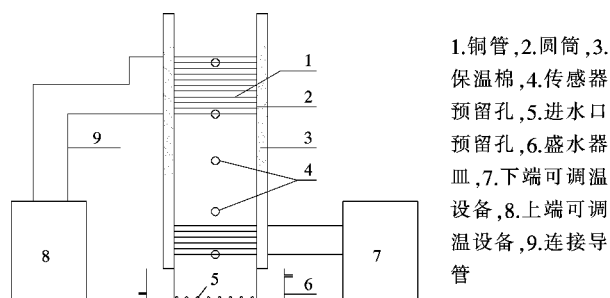


图 1 试验仪器设计示意图

试验筒采用透明亚克力材料制作，在圆筒下端每隔 2 cm 设置一系列圆孔（直径 0.5 cm），卤水通过圆孔注入底座中；另一方面，为了保持供应水位高度，注入卤水时应从底座进水口进入、出水口排出并循环利用，其供应水量约为 1.5 L/d，并采用止水夹控制供应导管，保证试验过程中地下水水位恒定。

1.3 试验步骤

根据察格高速公路察尔汗盐湖区路基基底温度监测，温度在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 范围内的盐分溶解度最大，其水分迁移引起的盐分迁移量最大，对路基造成的次生盐

渍化最为严重。为分析最不利工况对路基次生盐渍化的影响，试验温度控制在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ；室内毛细水迁移试验地下水位拟定为最不利水位——零水位，饱和卤水供应，采用能保持恒定水位的盛水器皿控制。水盐迁移试验具体试验步骤如下：

(1) 将土样烘干、磨细、筛分，进行易溶盐含量测定试验，按每层 0.05 m 厚装填土样，采用重锤击实（压实度为 93%），计算每层土样质量。

(2) 注入卤水，其水面应高于土样 0.02 m，并启动止水夹保证水位不变。

(3) 进行毛细水上升高度观测，观测时间为 90 d，第 1 d 每间隔 2 h 观测 1 次，之后每天观测 1 次，做好相关记录。

(4) 建立毛细水上升高度 h 随时间 t 的变化曲线。

(5) 毛细水上升稳定后，测定每层土的含水率、含盐量，共做两组平行试验求其平均值，并绘制含盐量随高度变化的曲线。

另一方面，该文路用性能的测定指标为 CBR，其试验方法主要按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行。

2 试验结果与分析

2.1 含砂低液限粉土水盐迁移试验结果与分析

桩号 K624+000 处的土样为含砂低液限粉土（非盐渍土），属于细粒土的范畴，其细粒含量高达

57.67%,初始含水率为11.3%,初始含盐量为0.07%。观测时间为90 d,毛细水上升稳定后,测定各层土样含水率与含盐量,试验结果如图2所示。

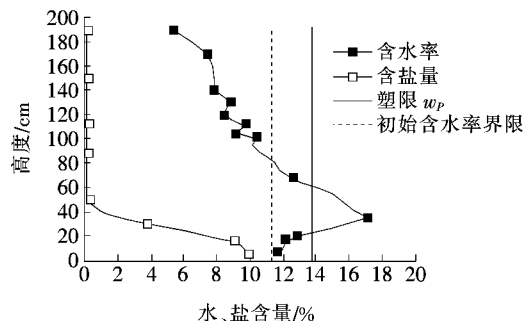


图2 含砂低液限粉土水分和盐分迁移高度曲线

从图2可以看出:

(1) 粉土水分沿试样高度重分布情况为:以试样高度35 cm为拐点,5~35 cm高度范围含水率随高度逐渐变大,在35~190 cm高度范围含水率随高度逐渐降低;在85 cm高度处,水分蒸发量与毛细水上升补给量相平衡,含水率与初始含水率基本持平,为11.0%,表明该土样毛细水最大上升高度为85 cm。此外,试样高度60~65 cm范围含水率为14.1%~13.0%,试样的塑限为13.8%,可以判定该土样有害毛细水上升高度约为60 cm。

(2) 粉土盐分沿试样高度重分布情况为:从含盐量最大值10.03%逐渐降低,50 cm高度处降低至最低值,其含盐量为0.38%,略大于弱氯盐渍土含盐量标准,结果表明试样的次生盐渍化高度为50 cm;试样高度50~190 cm范围内,含盐量为0.1%~0.07%,按含盐量分类,50 cm以上高度试样属于非盐渍土。盐渍化界限以上高度试样含盐量略大于初始含盐量的原因是:有害毛细水以上那部分无害毛细水上升和蒸发,造成“盐随水迁,水去盐留”,试样含盐量略有增加。

对比该土样的水、盐迁移高度可知,试样的次生盐渍化高度与有害毛细水上升高度相当(后者略高)。在有害毛细水上升高度范围内,存在自由水参与毛细运动,携带盐分向上迁移,从而导致卤水面以上试样的次生盐渍化。由于盐渍土含盐量测定试验比较繁琐和费时,而有害毛细水上升高度试验方法简单,可通过室内试验或原位测试得出。因此,可以从有害毛细水上升高度来判定路基发生次生盐渍化的高度。

2.2 粉土质砂水盐迁移试验结果与分析

桩号K619+000处的弱氯盐渍土为粉土质砂,其细粒含量为43.71%,也属于细粒土的范畴,初始含水

率为12.1%,初始含盐量为0.54%。同理,观测时间为90 d,毛细水上升稳定后,测定各层土样含水率与含盐量,试验结果如图3所示。

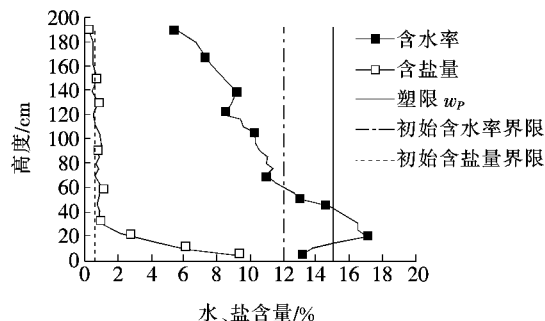


图3 粉土质砂水分和盐分迁移高度曲线

从图3可以看出:

(1) 粉土质砂(弱氯盐渍土)试样的含水率、含盐量沿高度重分布情况与低液限粉土试样含水率、含盐量的重分布情况相似:其含水率沿高度方向先从低至高,20 cm高度处含水率达到最大值16.9%,之后沿高度逐渐变低。试样在0.75 m高度处的含水率为11.3%,其值大致和初始含水率相同;此外,在该高度上下0.25 m范围内的含盐量平均值为0.82%,其值大于初始含盐量,故可确定0.75 m为该土样毛细水最大的上升高度。

(2) 该土样含盐量沿高度的变化曲线是由大逐渐变小,0.30 m高度为转折点,0.30 m以上高度含盐量基本趋于稳定。在0.30 m高度处的试样,其含盐量为1.0%,其值与界限含盐量基本相同,已属于中盐渍土的范畴,可判断在卤水供应条件下盐渍土盐渍化程度变化的最大临界高度为0.3 m。高度40 cm处试样含水率约等于塑限(15%),有害毛细水上升高度为40 cm,这与盐渍土盐渍化程度变化的最大临界高度相当。

2.3 砾类土水盐迁移试验结果与分析

砾类土属于粗粒土的范畴,其粗粒含量高达98.7%,初始含水率为0.4%,初始含盐量为1.32%。观测时间同样为90 d,毛细水上升稳定后,测定各层土样含水率与含盐量,试验结果如图4所示。

从图4可以看出:① 砾类土含水率沿高度从大至小变化,高度55 cm处为明显的拐点,含水率为0.3%,其以上高度含水率稳定在初始含水率附近。从初始含水率界限与含水率曲线的交点判断,毛细水最大上升高度为55 cm;② 砾类土含盐量沿高度的变化曲线与含水率曲线类似,在高度55 cm处含盐量与初

始含盐量基本相等,其上高度含盐量稳定在初始含盐量附近,盐分迁移高度为 55 cm,与毛细水最大上升高度一致。

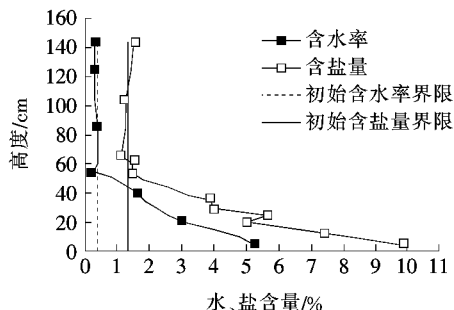


图 4 砾类土水分和盐分迁移高度曲线

根据 JTJ D30—2015《公路路基设计规范》关于粗粒盐渍土盐渍化程度分类的标准:在 0.45 m 处的试样,其含盐量为 2.49%,略超过 2%的界限含盐量,属于弱盐渍土的范畴;可知在卤水供应条件下,0.45 m 为砾类土的次生盐渍化临界高度。

2.4 路用性能试验结果与分析

为了分析水盐迁移作用对公路下路堤路用性能的影响,以依托工程路基填料砾类土和粉土为研究对象,基于水盐迁移试验结果,采用在原样土中掺拌适量卤水的方法制备预先拟定的含水率和含盐量试样,试件分别采用压实度 93% 压实成型,进行加州承载比 (CBR) 测定试验,试验结果如图 5、6 所示。

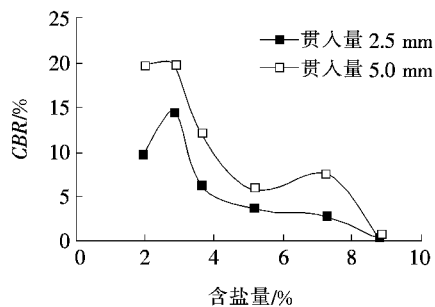


图 5 粉土路堤 CBR 随含盐量的变化曲线

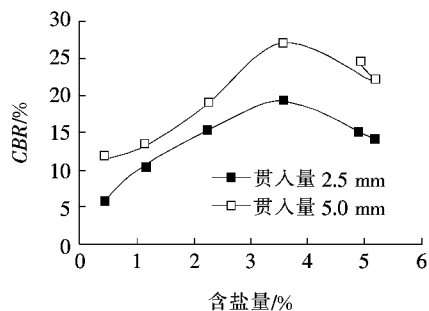


图 6 砾类土路堤 CBR 随含盐量的变化曲线

从图 5 可以看出:随含盐量的增加,粉土填料 CBR 值整体上呈减小趋势,次生盐渍化引起路堤土体含水率和含盐量的增加,导致其强度降低,当含盐量超过 5.189% 后,其贯入量 2.5 mm 的 CBR 值将逐渐小于 3%,强度值已不能满足 JTJ D30—2015《公路路基设计规范》对下路堤最小承载比的要求,此时,次生盐渍土路堤盐渍化程度为强盐渍土。

从图 6 可以看出:砾类土路堤填料 CBR 值随含盐量的变化规律与粉土路堤填料不同。砾类土路堤填料 CBR 随含盐量的增加逐渐增大至峰值,其后,随含盐量的增加,其 CBR 值逐渐减小,CBR 峰值对应含盐量为 3.58%。

对比图 5、6 可以得知:在路堤发生次生盐渍化后,对于粉土(细粒土)路堤,受次生盐渍化程度影响较大,当次生盐渍化程度达到强盐渍土后,其强度将不再满足规范与设计要求;对于砾类土(粗粒土)路堤,其强度同样受次生盐渍化的影响,但影响较粉土弱,路堤次生盐渍化后,其强度仍能满足规范要求。从满足路堤强度角度考虑,对于细粒土填料填筑的路堤,应采取有效措施防止或降低其次生盐渍化的影响。

3 结论

(1) 基于自主研发的水盐迁移试验装置,揭示了水分和盐分迁移规律:在毛细水上升过程中,水分携盐分上升,毛细作用降低,造成试样含水率随试样高度的增加先从小到大变化,达到最大值后又逐渐降低;而含盐量随试样高度的增加从高至低逐渐变化,最后趋于稳定。

(2) 毛细势作用下非饱和土路基水盐迁移试验结果表明,含砂低液限粉土(非盐渍土)、含砂低液限粉土(弱盐渍土)与砾类土路堤毛细水最大上升高度分别为 85、75 和 55 cm,有害毛细水上升高度分别为 60、40 和 45 cm,次生盐渍化高度分别为 50、30 和 45 cm。

(3) 水盐迁移作用均造成了粉土路基和砾类土路基路用性能的降低,粉土填料 CBR 值整体上随含盐量的增加呈减小趋势,而砾类土路堤填料 CBR 值呈现出先增大后减小的趋势,相比而言,次生盐渍化对粉土路基路用性能的影响更甚。

(4) 通过盐分在不同土类路基填料中的迁移规律研究,为之后分析隔断层位置及其阻盐效果奠定了基础,为进一步完善有效的隔断层设置技术提供了指导。

曼大公路 NK—SG4 标段路基工程生态修复与保护技术实践

王波¹, 李虎², 叶建军^{1*}, 王冠海², 朱兆华³

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 中铁十六局集团第一工程有限公司;
3. 深圳市万信达生态环境股份有限公司)

摘要: 随着越来越多的公路建设在青藏高原地区这种典型生态脆弱区的开展,要求建设者十分注意路域生态修复和保护。该文基于公路沿线生态环境特点,对穿越青藏高原门源仙米自然保护区的国道 569 曼德拉至大通高速公路 NK—SG4 标段路基工程开展了生态修复与保护技术实践。具体措施为:根据不同施工创面,采用排水沟和急流槽等水保措施及客土绿化和客土喷播等生态修复技术,使用冷地早熟禾、披碱草及星星草等植物搭配。施工后 1 年的效果表明:截水沟和急流槽等排水效果良好,坡面保持完整且无水土流失,创面植被覆盖率达到 70% 以上,综合路基工程的生态修复与保护技术实践取得了良好的效果。

关键词: 青藏高原;公路建设;施工创面;生态修复;植被覆盖率

随着西部大开发战略的推进,青藏高原地区高速公路建设逐年增长,这也带来一系列生态环境问题。如公路路基工程中,取土场开挖、弃土场的堆积及路基填筑等施工活动造成地表植被破坏、水土流失;公路路堤的堆积分隔了沿线野生动物栖息地,严重威胁野生动物的穿行,对其生存与繁衍造成有害影响。需要采取相应措施,尽最大可能减轻影响。

已有一些相关报道涉及路基工程生态修复与保

护。黄湛军以广梧高速公路为研究对象,探讨了山区高速公路绿色公路设计中路基工程的生态环保问题;周勇以潮(州)—惠(州)高速公路 A3 合同段为例,介绍了兼顾景观的石质边坡生态恢复设计;付海燕等依托安徽黄祁高速公路,对取土场及弃土场运用截排水沟水保工程措施及挂网喷播等生态修复措施恢复生态环境;王栋等针对京昆高速公路秦岭段沿线边坡裸露、弃渣场水土流失等生态环境破坏问题,采用覆土植草、

参考文献:

- [1] 新疆公路学会. 盐渍土地区公路设计与施工指南[M]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 张洪亮,王黎,赵金东. 盐渍土地区混凝土结构的耐硫酸盐腐蚀研究[J]. 中外公路,2016(3).
- [3] 房建宏,徐安花,黄世静. 柴达木盆地盐渍土对公路建设的影响[J]. 公路交通技术,2004(3).
- [4] 胡世凯. 察尔汗盐湖地区盐渍土工程特性及其与环境互馈机理研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2011.
- [5] 刘军勇,张留俊,王晓谋. 高速公路岩盐路堤填筑技术与病害防治技术[J]. 地下空间与工程学报,2013(S1).
- [6] 董斌,张喜发,李欣,等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报,2008(10).
- [7] 包卫星,谢永利,杨晓华. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报,2006(3).
- [8] 邵慧,何平. 不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试验研究[J]. 岩土力学,2011(8).
- [9] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [10] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0502208);中铁十六局横向科研项目(编号:4201/00324);深圳市科技计划项目(编号:GCZX2015051514435234)

作者简介:王波,男,硕士研究生, E-mail:1299172349@qq.com

* 通信作者:叶建军,男,博士,教授, E-mail:715470323@qq.com