DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260617

硫酸盐渍土路基设计
——以哈密市星星峡G30综合停车区项目为例

朱星光,杨青青
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300000)

摘　要: 哈密星星峡镇位于戈壁、荒漠区,其蒸发量远远大于降水量,易形成盐渍土路基。以哈密市星星峡G30综合停车区项目为例,根据项目区域地质条件,地表水、地下水情况以及地勘钻孔数据资料,依据国家及地方相关规范要求,计算该项目的易溶盐总量、氯离子与硫酸根离子比值、Na_2SO_4含量,最终得出该项目的盐渍土类型及盐胀性。根据计算结论,从经济性角度出发,结合当地的筑路材料特点,提出了提升路基高度、换填路基材料以及设置路基隔断层的组合路基处理方案。为保证施工质量,对路基施工时间、填料试验检测、复合土工膜的铺装提出了相应施工建议。

关键词: 盐渍土;易溶盐试验;路基处理;隔断层;复合土工膜
中图分类号: U416.1　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0148-04

Design of Sulfate Saline Soil Subgrade: A Case Study of G30 Comprehensive Parking Area Project in Xingxingxia, Hami City

ZHU Xingguang, YANG Qingqing
(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Xingxingxia Town of Hami is located in gobi and desert areas, where evaporation far exceeds precipitation, resulting in the frequent formation of saline soil subgrade. Taking G30 Comprehensive Parking Area Project at Xingxingxia, Hami City as the research object, based on regional geological conditions, surface water and groundwater data as well as geotechnical investigation borehole data of the project, the total soluble salt content, the ratio of Cl^- to SO_4^{2-} and Na_2SO_4 content are calculated in compliance with relevant national and local specifications. Accordingly, the classification of saline soil and its salt expansion characteristics within the project site are determined. Based on the calculation results, a combined subgrade treatment scheme consisting of raising subgrade elevation, subgrade material replacement and installation of subgrade isolation layer is proposed from an economic perspective combined with the characteristics of local road construction materials. Relevant construction suggestions concerning subgrade construction scheduling, filler test inspection and composite geomembrane laying are put forward to guarantee construction quality.

Keywords: saline soil; soluble salt test; subgrade treatment; isolation layer; composite geomembrane

0　引　言

新疆深居我国内部腹地,受高大山脉和大气环流因素影响,在干旱气候与特殊自然条件的共同作用下,形成了大面积盐渍土。新疆地区盐渍土不仅分布广泛,而且其盐化水平与含盐性质变化较大。盐渍土是一种由气相、液相的盐水溶液(包括难溶和易溶结晶盐)以及固相土颗粒组成的多相体系。土内易溶盐在温度、含盐率和含水率等因素的控制下,不断在固态与液态之间转换。盐分的运移、富集、析晶与溶解等作用,均会引致土体物理力学特性的变化[1],从而导致道路路基出现盐胀、冻胀、溶陷以及翻浆等病害[2-3],因此盐渍土的路基处理结果将影响项目所在地的道路路基稳定性和耐久性。

随着西部交通基础设施建设持续推进,盐渍土路基处治技术研究日益受到重视,相关成果不断丰富。在盐渍土改良方法方面,现有研究主要沿化学改良、物理改良和生物改良3条路径展开;在盐渍土路基处治技术方面,换填法、强夯法、提高路基高度法、设置隔断层法等是工程中应用较为广泛的措施。本文以哈密市星星峡G30综合停车区项目为例予以

收稿日期:2026-06-03
作者简介:朱星光(1989—),男,本科,高级工程师,道路专业注册土木工程师,从事道路设计工作。

论述，根据项目地质条件，因地制宜地采取设置路基隔断层、提升路基高度、换填路基材料等措施以保证路面结构以下 80 cm 范围的路床干湿状态满足设计要求，从而避免路基填料受到盐分、水分的影响。

1 工程概况

1.1 工程位置概述

拟建项目位于新疆哈密市星星峡镇以西约 20 km、G30 连霍高速以南，整体地势较为平坦。拟建场地属于哈密盆地东南部的剥蚀准平原，地貌单一，地表稍有起伏，局部基岩出露地表。现状场地地貌如图 1、图 2 所示。



图 1 春季项目场地地貌

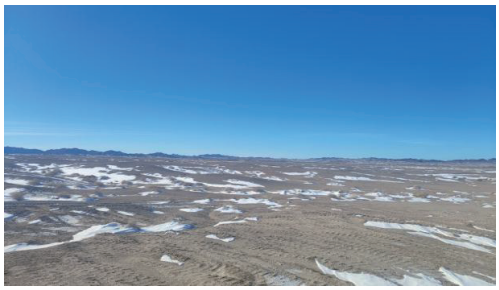


图 2 冬季项目场地地貌

项目途经区域属于典型的戈壁和荒漠环境，年降水量低至 25 ~ 40 mm，年蒸发量却高达 2 750 mm，蒸发损失远远超出降水输入。春季融雪或夏季偶降暴雨时，地表径流得以形成。这些径流在流动过程中溶解了土体内赋存的盐类物质，从而演变为具有较高矿化度的含盐地表水[4]。当地势平缓或地势起伏较大时，这些径流流速减慢形成漫流，同时受当地强烈的地表蒸发影响，地表水仅在较短的流程中就会被蒸发殆尽，使得水中的盐分在地层表面沉积，局部甚至渗入至地表以下一定深度范围内。由此生成的盐渍土，其含盐性质主要取决于地表水所携带并沉淀的盐类成分[5]。

1.2 区域地质条件

第一层：全风化花岗岩，青灰色、灰褐色，较易钻进，岩芯破碎呈砂土状，结构完全破坏，不可辨认，无残余结构强度，属极软岩，揭示厚度 0.60 ~ 0.90 m。

第二层：强风化花岗岩，较易钻进，岩芯破碎呈块状，结构基本破坏，但尚可辨认，有残余结构强度，岩芯无吸水反应，属软岩，岩体完整性较差，呈破碎状态，RQD 值介于 25 至 50 之间，揭露厚度 0.70~6.00 m；该层土石等级为 VIII 级，土石类别为次坚石。

第三层：中风化花岗岩，钻进困难，岩芯较完整，无明显层理，岩芯锤击声清脆，有回弹，小锤不易击碎，指甲刻不出印痕，手不能掰开，无吸水反应，属较软岩，岩体破碎程度中等（较破碎），RQD 值介于 50 至 75 之间，揭露厚度 0~6.10 m；该层土石等级为 XI 级，土石类别为坚石。本次钻探未揭穿该层。

1.3 地表水及地下水情况

项目范围内未发现地表积水，地下水埋深在地下 4.40 m 以下，地下水主要补给来源为大气降水（降雪）和天山雪水。

1.4 易溶盐试验分析及结论

地质勘察共取 12 组扰动土样进行易溶盐试验，取样深度为 0.00 ~ 3.00 m，试验及所得结果分别列于表 1、表 2 及表 3 中。

根据易溶盐试验成果，场地土 2.00 m 以上易溶盐总量最大为 0.837%（＞0.3%），根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）（2009 年版）[6]的规定，判定场地土为盐渍土；根据易溶盐试验成果，场地土氯离子与硫酸根离子的比值范围为 0.113 ~ 0.273，根据《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942—2014）的规定，判定场地土为硫酸盐渍土；根据易溶盐试验成果，场地土易溶盐样品中 Na_2SO_4 含量为 0.430%（＜1%），根据《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942—2014）[7]的规定，可不考虑盐胀性。

根据易溶盐试验成果，场地土 2.00 m 以下（＞2 m）易溶盐总量最大值为 0.264%，小于《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）（2009 年版）第 6.8.1 条规定的 0.3%。结合该土层未表现出溶陷、盐胀、腐蚀等盐渍土特征，综合判定为非盐渍土。

2 盐渍土路基处理方案

根据地勘报告，结合易溶盐分析结果，判断该项目盐渍土类型以硫酸盐为主，按含盐量分类为弱、中盐渍土。基于土体性质、盐渍化程度、冻胀深度、地表与地下水埋深，并综合考虑毛细水上升高度等因素[8]，采取设置路基隔断层、提升路基高度、换填路

表1 易溶盐试验表之阴离子

样品代号	钻孔编号	取样深度/m	阴离子							
			氯 Cl^-		重碳酸根 HCO_3^-		碳酸根 CO_3^{2-}		硫酸根 SO_4^{2-}	
			mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	mg/kg
1	1-1	1	18.65	662	2.57	157	0	0	47.06	4 518
2	2-1	1	18.65	662	2.05	125	0	0	34.22	3 285
3	3-1	1	15.21	540	1.52	93	0	0	30.49	2 927
4	4-1	1	15.96	566	2.28	139	0	0	51.28	4 926
5	1-2	2	8.25	293	2.25	137	0.08	5	35.58	3 416
6	2-2	2	14.48	514	3.51	214	0	0	34.50	3 312
7	3-2	2	17.97	638	1.85	113	0	0	35.02	3 362
8	4-2	2	14.82	526	2.67	163	0	0	50.22	4 821
9	1-3	3	8.01	284	0.99	61	0	0	15.23	1 462
10	2-3	3	3.44	122	0.87	53	0	0	15.17	1 456
11	3-3	3	5.25	186	1.15	70	0	0	14.10	1 354
12	4-3	3	5.30	188	1.15	70	0	0	14.62	1 404

表2 易溶盐试验表之阳离子

样品代号	钻孔编号	取样深度/m	阳离子					
			钙 Ca^{2+}		镁 Mg^{2+}		钾 K^++钠 Na^+	
			mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	mg/kg
1	1-1	1	44.54	1 785	4.73	115	16.81	387
2	2-1	1	23.05	924	5.14	125	32.74	753
3	3-1	1	16.97	680	2.02	49	39.75	914
4	4-1	1	20.00	800	1.07	26	83.22	1 914
5	1-2	2	0.40	16	0.99	24	19.06	438
6	2-2	2	10.60	425	3.95	96	11.88	273
7	3-2	2	18.64	747	6.21	151	40.17	924
8	4-2	2	24.63	987	6.21	151	56.25	1 294
9	1-3	3	3.52	141	2.51	61	27.34	629
10	2-3	3	4.98	199	1.08	26	26.17	602
11	3-3	3	7.18	287	3.00	72	14.35	330
12	4-3	3	7.40	296	1.92	46	17.13	394

表3 易溶盐分析报告结论

样品代号	钻孔编号	取样深度/m	pH值	合计/(mg·kg^{-1})	易溶盐总量/%	$\frac{cl^-}{SO_4^{2-}}$	Na_2SO_4含量/%
1	1-1	1	8.8	7 624	0.762	0.198	0
2	2-1	1	8.1	5 874	0.587	0.273	0.085 6
3	3-1	1	8.1	5 203	0.520	0.249	0.163 3
4	4-1	1	8.2	8 371	0.837	0.156	0.429 0
5	1-2	2	7.6	4 329	0.433	0.116	0.076 8
6	2-2	2	7.8	4 834	0.483	0.210	0
7	3-2	2	7.6	5 935	0.594	0.257	0.144 4
8	4-2	2	8.3	7 942	0.794	0.148	0.275 2
9	1-3	3	7.4	2 638	0.264	0.263	0.130 6
10	2-3	3	7.3	2 458	0.246	0.113	0.129 4
11	3-3	3	7.2	2 299	0.230	0.186	0.055 7
12	4-3	3	7.3	2 398	0.240	0.181	0.075 3

基材料等措施,以保证路面结构以下80 cm范围的路床干湿状态满足设计要求,从而避免路基填料受到盐分、水分的影响。下面阐述具体处理措施。

2.1 提升路基高度

提升路基高度从而降低地下水通过毛细作用进入路基上部的水分和盐分。如果地下水位较高或路

基高度提升不足，毛细作用依旧能到达路基上部，可能会导致处理效果不佳，因此路基提升的高度应结合地下水位，同时还须考虑经济因素。根据设计经验，当冻深大于 1 m 时，盐碱性较弱或在中等程度范围的硫酸盐渍土路基高度至少要高出地下水位 6 m 以上才能有效防治盐胀作用。根据该项目地下水的埋深情况（4.40 ~ 4.50 m），为大幅减少填方工程量、节约占地、避免设计纵断大幅调整，降低工程造价，拟定道路路基高度为 1.5 ~ 2.0 m。

2.2　换填路基材料

盐渍土路段应对道路占地范围内外扩 2 m 的表层聚积的盐层、植被进行清表处理，并换填砂砾或风积砂，同时控制回填料的易溶盐含量，清表厚度 0.5 m[9]。哈密地区砂砾料（戈壁料）资源丰富，风积砂在项目周边也易获取，而其他路基回填料类（黏土/砂性土/素土等）土源有限、运距较远，运输成本可能数倍于材料本身成本，因此建议一般填方路基以及路床压实度难以满足设计指标要求的局部路段或道路标高受控制点限制形成的低填浅挖路段可以采用砂砾、风积砂材料进行填筑及换填。但是，换填之前需要对当地料源材料进行土体试验，在满足《盐渍土地区公路路基设计与施工技术细则》（JTG/T 3331-08—2022）及《公路路基设计规范》（JTG D30—2015）的指标要求后才能作为回填材料。

2.3　设置路基隔断层

在路面结构以下 80 cm 范围的路床的底部设置两布一膜复合土工膜隔断层，从而隔断现状土体中毛细水的上升通道，避免盐渍土中的盐分、水分毛细作用至上路床内[10]。复合土工膜隔断层设置位置如图 3 所示。

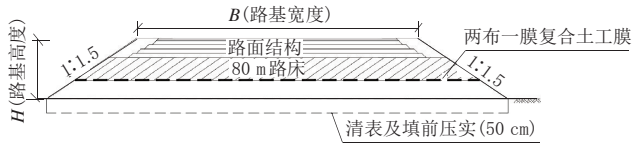


图 3　盐渍土一般路基处理断面图

3　施工注意要点

3.1　施工时间

路基施工时间的选择应结合盐渍土的水分及盐分状态特点，在填料的含水量接近最佳含水量且不冻结、不积水的枯水季节施工[11]。根据该项目的水文、地质条件，建议路基填筑工程在春季和夏初施工为宜。

3.2　回填材料的试验检测

砂砾、风积砂作为路基回填材料使用时，需要对其关键性能进行系统检测，重点关注盐分特性、力学行为、水稳性及腐蚀风险。所有检测应参照现行盐渍土地区公路或铁路工程专用技术标准执行，并根据项目所在气候区、地下水埋深及路基等级，设定相应的合格判定限值。

3.3　复合土工膜的铺设要点

一般填方路段的路床底面（位于路面结构层底面以下 80 cm）设置一道两布一膜复合土工膜，以阻止毛细水向上迁移。复合土工膜须沿道路全线纵向全幅铺设，铺平后应与下层表面密贴，严禁产生褶皱。复合土工膜若有损坏，应在破损位置使用不小于破损面积两倍的膜片予以修复。复合土工膜需要反包至上路床顶面，反包宽度 200 cm。横向接头采用内侧幅片叠压外侧幅片的做法，控制搭接宽度不小于 20 cm，其中最外侧幅片的搭接宽度应超过 30 cm；纵向方向上的搭接宽度不得小于 50 cm[12]。在铺设之前，需要对基底进行整平处理，去除所有尖锐物（如石块），确保底面无尖棱状杂质。同时，距离膜材 8 cm 以内的颗粒材料，其最大粒径须加以限制，一旦有粒径大于 5 cm 的颗粒，应通过人工方式逐一拾除。

复合土工膜铺设完成后，尽快完成路床的回填，避免受到长时间的暴晒，以免老化。复合土工膜上层的填料施工，应采用人工摊铺或轻型推土机，严禁运料车直接驶入，须倒车卸料或由人工转运。摊铺完成后，建议使用 8 t 以上双钢轮压路机进行不少于 2 遍的静压工序，以确保路床填料的高密实度与均匀性[12]。之后，再将后续摊铺的路基填料与第一层填料一并碾压，使其压实度保持一致，且两层填料的压实厚度总和不得超出 40 cm。复合土工膜材料性能要求见表 4。

4　结　语

该文经过分析地勘报告中易溶盐试验数据，提

表 4　复合土工膜性能要求

类型	膜厚度/mm	总厚度/mm	膜单位质量/（g·m^{-2}）	垂直渗透系数/（cm·s^{-1}）	断裂强度/（kN·m^{-1}）	CBR 顶破强度/kN	梯形撕破强度/kN	断裂伸长率/%
两布一膜	≥0.30	≥2.4	≥150	1×10^{-9}~1×10^{-12}	≥17	≥3.0	≥0.42	≥30

（下转第 192 页）