

察尔汗盐湖地区盐渍土工程地质特征及地基处理

代红娟¹,付玉涛^{2*}

1. 山东公路技师学院, 山东 济南 250104; 2. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250102

摘要:为减小盐渍土对地基的溶陷性、盐胀性、腐蚀性等危害,通过调查、钻探、原位测试、室内试验等方式研究、分析、评价察尔汗盐湖地区盐渍土物理力学性质。以察尔汗-格尔木高速(简称察格高速)地基处理为例,对盐渍土地基处理方法及地基处理新工艺进行比较分析,并采用载荷试验、标准贯入试验、动力触探试验检测察格高速地基处理段的地基承载力。结果表明:盐湖区主要分布为盐渍软弱土,具有盐渍土与软土的双重特性,采用换填、冲击碾压、强夯、强夯置换、砾石桩、裹体砾石桩、裹体混凝土灌注桩、引孔裹体预制桩等均可进行地基处理,处理效果良好;裹体砾石桩解决了散体材料成桩的质量问题,采用裹体施工工艺提高了桩体质量及地基的承载能力,裹体混凝土灌注桩可防止盐渍土与桩体接触,桩体不受腐蚀。裹体砾石桩的沉降明显减小,采用裹体砾石桩法加固地基效果明显提高。

关键词:盐渍土;工程地质特性;地基处理;检测方法

中图分类号:U416.1⁺66;TU448

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0108-10

引用格式:代红娟,付玉涛. 察尔汗盐湖地区盐渍土工程地质特征及地基处理[J]. 山东交通学院学报,2022,30(2):108-117.

DAI Hongjuan, FU Yutao. Engineering geological characteristics of saline soil and foundation treatment technology in Qarhan Salt Lake area[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2022,30(2):108-117.

0 引言

盐渍土是一种含有大量易溶盐的特殊岩土,是气体、液体、土体、易溶盐体的四相体,有溶陷性、盐胀性、腐蚀性等工程特性^[1-2],与普通土的三相体不同,盐渍土严重影响工程的质量,对工程建设造成较大危害。研究盐渍土的工程地质特性,分析盐渍土地基的有效处理方法,对降低工程建设成本,延长公路使用寿命具有重要的实践意义^[3-6]。盐湖区地基主要采用换填、抛石挤淤、预压、冲击碾压、强夯、强夯置换、砾石桩等方法进行处理,取得了较好的处理效果,而沉管桩、预制桩、钻孔灌注桩、水泥粉煤灰碎石桩、夯实水泥土桩、水泥土搅拌法因未解决水泥、钢筋和混凝土的耐腐蚀性而被淘汰。

为解决盐渍土对路基的溶陷性、盐胀性、腐蚀性问题,本文在分析盐渍土物理力学性质的基础上,探讨处理盐湖地区盐渍土地基的裹体桩、袋装混凝土灌注桩、引孔防腐预制桩等地基处理方法和新工艺,并通过多种试验方法检验采用新技术处理盐渍土地基的效果。

1 盐湖区地形地貌及水文地质条件

察尔汗盐湖是我国西北部最大的天然盐湖,位于青海省柴达木盆地中南部格尔木市和都兰县,由达

收稿日期:2021-05-24

第一作者简介:代红娟(1986—),女,河南安阳人,工学硕士,主要研究方向为道路建筑材料、公路工程检测等,E-mail:414098221@qq.com。

*通信作者简介:付玉涛(1986—),男,济南商河人,高级工程师,工学硕士,主要研究方向为工程勘察、水工环地质调查、生态修复等,E-mail:372842581@qq.com。

布逊湖及南霍布逊、北霍布逊、涩聂等盐池汇聚而成,总面积为 5856 km²[1],盐湖区地表盐壳易溶盐的质量分数超过 90%。察尔汗盐湖是柴达木盆地内最低洼、最核心的盐盆地,汇水区面积为 13.2 万 km²,海拔 2675 m 以上,南北两侧山系海拔均在 4500~5000 m 以上,南部为昆仑山脉,北部为锡铁山,东西两侧为海拔较高的缓坡地形[6]。盐湖区为北西西走向盐积平原,主要以干盐滩为主,上部形成盐壳,地势较平坦。盐湖区地貌可划分为盐漠、盐壳、盐沼泽、盐溶、湖泊、雅丹、沙丘、戈壁、沙漠等形式,地貌类型较丰富,察尔汗-格尔木高速(简称察格高速)穿越湖区地貌类型主要为盐沼泽、盐壳、盐溶等[7]。

湖区内部地表主要为第四系沉积物,自湖中心向外缘依次为全新统盐类沉积、上更新统-全新统湖相砂质黏土和上更新统洪积砂砾石,局部还有全新统风积砂分布,在山前地带出露中更新统湖积砂质泥岩、下更新统湖积砂质泥岩、砂岩及第三系红色泥岩、砂砾岩等,在盐湖中部为新生代强烈沉降区,堆积巨厚状碎屑沉积物,湖区第四系厚约 2500 m 左右。

湖区盐层内赋存卤水,为孔隙性潜水,水位埋深 0.3~1.0 m,距地表 2~5 m 为承压卤水,项目区矿化度为 316~410 g/L,水化学类型为氯化物型水,盐层中盐晶体间有孔隙,孔隙间连通性较好,岩心中有蜂窝状孔隙,孔隙度为 15%~35%。盐层晶间卤水的主要补给来源是大气降水渗入、外围松散层孔隙水的侧向补给、来自下部的越流补给及湖泊间湖水补给,天然条件下晶间卤水的主要排泄方式为蒸发和流向湖泊[8]。

2 盐渍土工程特性评价

2.1 盐渍土分类及腐蚀性评价

察格高速穿越的盐湖区表层为盐壳,易溶盐的质量分数为 40%~90%,随着距地表深度的增加,易溶盐质量分数递减,距地表 10~15 m 易溶盐的质量分数减小为 5%~15%,深层土体易溶盐的质量分数一般为 1%~6%[9]。20 m 钻孔深度范围内易溶盐质量分数的试验结果如表 1 所示。

表 1 20 m 钻孔深度范围内易溶盐质量分数的试验结果

指标	质量分数/%							易溶盐的质量分数/%	Cl ⁻ 与 SO ₄ ²⁻ 的质量分数比	盐渍土类别
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ 和 Na ⁺			
最大	0.043	0.027	52.930	1.920	2.204	5.970	52.230	89.66	27.57	氯盐型过盐渍土
最小	0.003	0.000	6.030	0.035	0.109	0.103	2.093	7.10	172.29	氯盐型强盐渍土
平均	0.013	0.006	25.290	0.692	1.741	2.169	22.084	47.59	36.55	氯盐型过盐渍土

由表 1 可知:盐湖区距地表 20 m 深度内,易溶盐质量分数为 7.10%~89.66%,Cl⁻与 SO₄²⁻的质量分数比为 27.57~172.29,根据文献[10]判定盐湖区为氯盐型强盐渍土—过盐渍土。

根据文献[11-12]分别评价混凝土结构及钢结构的腐蚀性,根据地基处理深度范围及基础埋深,仅统计 10 m 内的腐蚀性评价结果,如表 2、3 所示。盐渍土的 pH=4.8~6.2,根据 pH 值可判定盐渍土对混凝土结构、钢结构、钢筋混凝土、素混凝土、砖砌体的腐蚀性。

表 2 离子对混凝土结构及钢筋的腐蚀性评价

腐蚀对象	腐蚀介质	质量分数/%	标准质量分数/%	评判环境分类	腐蚀性等级
混凝土结构	SO ₄ ²⁻	0.034~0.093	0.045~0.225	按环境类型对混凝土结构的腐蚀性	弱
	Mg ²⁺	0.007~0.036	<0.3		微
混凝土结构中的钢筋	Cl ⁻	0.168~2.132	0.050~0.500	按地层渗透性对混凝土结构的腐蚀性(B类)	中
			>0.500	按地层渗透性对混凝土结构的腐蚀性(B类)	强

表3 不同离子对不同结构的腐蚀性评价

离子种类	埋置条件	质量分数/%	对不同结构的腐蚀性		
			钢筋混凝土	素混凝土	砖砌体
SO ₄ ²⁻	干燥	0.343~0.926	无	无	无
	潮湿	0.343~0.926	无~弱	无~弱	无~弱
Cl ⁻	干燥	0.168~2.132	无~强	无~强	无~强
	潮湿	0.168~2.132	中~强	弱~中	弱~中

由表2结果可知:盐渍土对混凝土结构有微—弱腐蚀性,对混凝土结构中的钢筋有中—强腐蚀性,对钢结构具有弱腐蚀性。

由表3可知:盐渍土对钢筋混凝土、素混凝土及砖砌体在不同环境状态下具有弱、中、强的腐蚀性,盐渍土对砖、水泥、石灰的腐蚀性为微腐蚀性—强腐蚀性^[10],故在地基处理中根据腐蚀等级不同,合理选用地基处理方法,对钢筋采取相应的防护措施。

2.2 盐渍土物理力学性质

盐湖区地层主要为第四系全新统和更新统地层,岩性主要以低液限粉质黏土、黏土、含砂粉土及砂类土组成^[13]。粉质黏土、含砂粉土的主要物理性质指标如表4、5所示。含砂粉土中的颗粒粒径为0.075~2.000 mm、>0.075~0.002 mm、<0.002 mm的质量分数分别为40.80%、52.89%、6.31%。

表4 粉质黏土的主要物理性质

项 目	水的 质量 分数 $\omega/\%$	天然 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙 比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 $I_p/\%$	液性 指数 $I_L/\%$	黏聚 力 $c/$ kPa	内摩 擦角 $\varphi/(^\circ)$	压缩 系数 $a_{1-2}/$ MPa ⁻¹	压缩 模量 $E_s/$ MPa	无侧 限抗 压强 度 $q_u/$ kPa	灵敏 度 S_t
平 均	28.4	1.99	2720	0.821	34.2	23.1	12.9	0.38	26.7	10.5	0.41	4.88	43.1	3.6

表5 含砂粉土的主要物理性质

项目	C_u	C_c	$\omega/\%$	密度/ $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	e	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$I_L/\%$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_s/MPa	
试验	3.86	2.70	9.8~ 41.0	1.41~ 2.08	2700~ 2710	0.61~ 1.05	23.1~ 37.1	15.6~ 24.1	7.2~ 9.4	0.06~ 1.21	4.5~ 15.1	17.5~ 35.4	0.23~ 0.48	4.21~ 7.05
平均			22.1	2.01	2710	0.80	24.4	15.8	8.6	0.73	9.8	26.1	0.31	5.51

注: C_u 、 C_c 分别为不均匀系数、曲率系数。

由表4、5可知:低液限粉质黏土为流塑—硬塑状态,有中—高压缩性,是中等灵敏—灵敏土,有触变性,水的质量分数和孔隙比均较大,场区部分土判定为饱和软黏土。根据文献[14]可判定为含砂粉土,有中压缩性,压缩模量较黏性土高,承载力也相应较高。

2.2.1 盐渍土溶陷性

进行现场浸水载荷试验或室内压缩试验后计算溶陷系数^[15]。通过试验段发现,溶陷系数 $\delta=0.001\sim 0.038$,存在非溶陷性土和溶陷性土,非溶陷性土主要分布在软塑至流塑的饱和软黏土场区内,

场区最大溶陷为 38.9 cm,地基的溶陷等级为 II 级,盐湖区存在溶陷性土并应考虑地基的溶陷性。

2.2.2 盐渍土盐胀性

发生盐胀的主要原因是盐渍土中 Na_2SO_4 在环境温度、湿度发生变化时结晶,导致盐渍土体积膨胀^[16-18]。由表 1 可知, SO_4^{2-} 平均质量分数为 0.692%,因地下水较浅, Na_2SO_4 没有结晶状态,故盐湖区盐渍土可不考虑盐胀性。

3 地基处理方法

3.1 地基处理方法对比

处理盐湖盐渍土地基主要考虑减少盐渍土造成的溶陷性和腐蚀性损坏。盐湖地区地基承载力为 60~122 kPa,地基承载力较低,属于软弱土,但其物理力学性质有别于一般软土,需对地基采用特殊处理方法。

处理盐湖地区地基主要有换填、抛石挤淤、预压、冲击碾压、强夯、强夯置换、砾石桩等方法,以前采用的沉管桩、预制桩、钻孔灌注桩等方法因存在钢筋和混凝土的防腐问题而淘汰^[19];按文献[20]要求,盐渍土地基不宜采用水泥粉煤灰碎石(cement fly-ash gravel,CFG)桩、夯实水泥土桩及水泥土搅拌法等方法,但若选用的水泥具备抗腐蚀性则可以考虑采用水泥土桩;若盐湖地区水位较浅,盐化法、浸水预溶法均不适用于盐湖地层;换填法应采用砾石、碎石及砂石等,不宜采用灰土、非盐渍土,可以采用隔断层法,阻断毛细水上升。为解决盐渍土腐蚀性问题,近年来盐湖地区相继试验裹体桩、袋装混凝土灌注桩、引孔防腐预制桩、CFG 桩-网复合地基等地基处理方法。盐湖地区地基处理方法对比如表 6 所示。

表 6 盐湖地区常用地基处理方法对比

施工方法	适用性	施工作用原理	抗腐蚀性	液化处理	方法特点	处理效果检测方法
换土垫层	浅层盐渍土地基(地下水位较深)及不均匀盐渍土地基	开挖软弱土,回填抗剪强度大、压缩性小的非盐渍化的级配砂砾石、中粗砂、碎石、矿渣、粉煤灰等,并分层夯实	抗腐蚀	效果差,换填深度较浅	施工简单,速度较快,造价偏高,处理效果好	载荷试验、标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验
抛石挤淤	厚度较小的盐渍土淤泥地基	抛石或夯击回填碎石置换淤泥,加固地基	抗腐蚀	效果差,可消除置换深度内土层	施工简单,着重点处理,造价一般,处理效果好	载荷试验
预压	盐渍土中的淤泥质土、淤泥和吹填土等饱和软土地基	在预压荷载作用下,天然地基压密、固结,地基变形,土强度提高,在地基中设置竖向排水体加速排水固结	抗腐蚀	效果较好,深度有限制	施工复杂,处理量大,成本较低,处理效果较好	载荷试验、十字板剪切试验、土工试验
冲击碾压	低饱和度的粉土、黏性土	采用冲击压路机对地基土进行冲击碾压,冲击轮为多边形非圆凸轮,通过轮胎式牵引车牵引作业	抗腐蚀	效果差,地基处理影响深度小	施工简单,速度快,造价低,处理深度较浅	载荷试验、标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验、土工试验
强夯	非饱和盐渍土、低塑性土、粉土、粉细砂	通过强夯排出土体中的微小气泡,减小孔隙,使土体密实	抗腐蚀	效果较好,可减小液化性	施工简便,施工期短,提高地基强度、减少溶陷性	载荷试验、标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验、土工试验、波速测试

表6(续)

施工方法	适用性	施工作用原理	抗腐蚀性	液化处理	方法特点	处理效果检测方法
强夯置换	饱和盐渍土、 淤泥、淤泥质 土地基	边填碎石边强夯,在地基 中形成碎石墩体	抗腐蚀	效果较 好,能减小 液化性	施工简便,施工 期短,兼顾振动沉 管挤密碎石桩与强 夯法共同作用	载荷试验、动力 触探试验、桩间测 试(标准贯入、静力 触探试验)
砾石桩	软黏土地基	采用沉管法或其他方法 设置密实的砾石桩,置换同 体积的黏性土形成砾石桩 复合地基	抗腐蚀	深度为 5 m内效果 较好	施工复杂,处理 效果好,成本较高	载荷试验、动力 触探试验、桩间测 试(标准贯入、静力 触探试验)
CFG桩	饱和黏性土 地基	采用机械或人工成孔,通 过振动、泵送、人工灌注等 方式在地基中形成 CFG 桩体	加防腐 剂后抗腐 蚀 10~15 a	效果差	施工复杂,处理 效果较好,因采用 抗腐蚀性水泥,成 本较高	载荷试验、低应 变动力试验
裹体桩	饱和强腐蚀 性软黏土地基	成孔后把碎石装入土工 聚合物制成桩体,形成抗腐 蚀性强的碎石桩	抗腐蚀 50~70 a	深度为 5 m内效果 较好	施工复杂,处理 效果好,工期较长, 成本较高	载荷试验、桩间 测试(标准贯入、静 力触探试验)

3.2 不同地基处理方法中的地基土质分析

根据不同路段地基土的物理力学性质、盐的质量分数、地下水水位高度及填土高度等条件,综合经济、技术条件及地基处理所需砾石料的来源确定地基处理方法,察格高速公路饱和软黏性土地段主要地基处理方法有:冲击碾压、强夯置换、强夯、砾石桩和片块石、砾石换填等^[21-23],本地区为强一过盐渍土,未采用 CFG 桩或水泥土搅拌桩,这 2 种处理方法未能有效解决腐蚀性,从经济成本考虑,在试验段进行裹体砾石桩、引孔裹体预制桩、裹体混凝土灌注桩的试验施工。各地基处理方法路段地基土的物理力学性质及地下水情况如表 7 所示。

表7 不同地基处理方法路段地基土的物理力学性质及地下水情况

处理方法	$\omega/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	e	饱和度 S_r	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$I_L/\%$	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_s/MPa	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	地下水类型	地下水位/m
冲击碾压	24.09	1.49	1.24	52.7	27.1	19.3	8.28	0.61	0.44	5.56	7.00	12.41	孔隙性潜水	0.2~3.5
砾石桩(裹 体砾石桩)	22.86	1.59	1.09	57.8	27.9	19.9	8.01	0.38	0.36	6.43	11.8	15.73	表层潜水	1.4~2.8
													承压卤水	2.0~5.0
强夯	25.13	1.40	1.40	47.5	26.3	19.8	6.56	0.84	0.52	5.50	8.16	12.94	孔隙性潜水	0.8~1.0
强夯置换	22.11	1.59	1.07	56.3	25.9	19.8	8.18	0.43	0.33	6.86	10.5	17.65	孔隙性潜水	0.8~2.4
													承压卤水	2.0~5.0
片石换填	23.15	1.58	1.10	57.8	27.9	19.6	8.38	0.43	0.39	6.05	11.8	16.45	孔隙性潜水	0.2~0.3
													承压卤水	2.0~5.0
砾石换填	23.60	1.58	1.26	50.3	24.6	18.3	6.30	0.84	0.51	4.4	9.5	16.9	孔隙性潜水	0.2~0.5
													承压卤水	2.0~5.0

由表 7 可知:处理路段表层主要以软黏土和粉土为主,路段密度较小,孔隙比较高,粉土密实度为稍密状态,为中等—高压缩性土,盐渍土的物理力学性质情况较差,水位较高。

4 盐渍土地基处理新工艺

在试验段进行裹体砾石桩、引孔裹体预制桩、裹体混凝土灌注桩的施工,并检测加固地基承载能力及成桩质量,同时开展路基工后沉降观测工作。

4.1 裹体砾石桩

裹体砾石桩可形成裹体桩复合地基,是针对盐渍土的腐蚀性、成桩困难等问题而采取的改进型砾石桩^[24],其施工工艺为:采用螺旋钻成孔,在孔中放入高强度、耐腐蚀的土工布袋,布袋应稳定性好、透水性强、耐久性强等,将桩体材料放入土工布袋中,限制桩体材料的侧向移动,并在桩顶上部铺设一定厚度的褥垫层。

本地区针对饱和强—过盐渍土宜采用螺旋钻机成孔,对软弱、触变性弱的土层也可采用挤密沉管或振动沉管,本地区成孔易缩孔、坍孔,故在注入桩体材料时宜采用跟管钻进至桩底设计标高,提出钻具在套管中放入土工布袋,再注入桩体材料,待桩体材料注满后,最后拔起套管成桩。桩体填充材料宜选用当地砾石、卵石等性能稳定的硬质材料,石料材质宜为抗腐蚀性能好的石灰岩、石英岩、玄武岩等,砾石粒径为2~50 mm,泥的质量分数小于5%。

4.2 裹体混凝土灌注桩

裹体混凝土灌注桩是把钢筋笼下放到既防腐又防水的土工布袋中,同时将混凝土灌注到土工布袋中形成桩基,即用土工布袋包裹桩体,防止地层中腐蚀物质、卤水侵入桩体内,使桩体不受腐蚀,可延长桩基的使用寿命。可以根据地下水位埋深情况择优选择成孔,可采用泥浆护壁钻机成孔,旋挖钻、螺旋钻干作业法成孔,振动、振动冲击、静压沉管或螺旋跟管钻进成孔等工艺,宜用注水排浆法^[25]下放土工布袋,再向土工布袋中下放钢筋笼,注入混凝土成桩。

4.3 引孔裹体预制桩

先在工厂制作满足设计要求的水泥桩或预应力管桩,在桩体外侧包裹土工布,并将土工布牢固固定于桩体上,使土工布与预制桩形成一个整体,采用螺旋钻或旋挖钻成孔作引孔,再将预制桩静压入孔,引孔可减小静压过程中桩端与桩侧阻力,防止桩体土工布在静压过程中受侧阻力影响而遭到破坏,以提高裹体预制桩成桩质量。

4.4 裹体材料质量要求

裹体材料可选用具有耐久性和抗腐蚀性的高强机织长丝土工织物,如聚丙烯土工布或高密度聚乙烯膜等^[26],可采用一次加工成型或二次缝合成型土工布袋,裹体砾石桩也可采用土工网袋。土工布袋有效解决散体桩破坏原状土结构及不易在软土中成桩等问题,在处理饱和和软黏性土地基及消除液化地层等方面起关键作用;裹体混凝土灌注桩、孔引裹体预制桩可防止盐渍土与桩体接触,使桩体不受腐蚀,延长桩体的使用寿命^[25]。复合土工布的技术指标如表8所示。

表8 复合土工布主要技术指标

施工方法	面密度/ (g·m ⁻²)	厚度/mm	抗拉强度/(kN·m ⁻¹)		梯形撕 裂强度/ kN	延伸率/%		顶破强 度/kN	等效孔径/ mm	垂直渗透 系数/(cm·s ⁻¹)
			纵向	横向		纵向	横向			
裹体砾石桩	200~400	0.60~0.89	30~60	25~40	0.7~1.4	30	28	4.3~1.0	0.05~0.25	0.001~0.010
裹体混凝土灌注桩	≥900	1.29~2.13	80	65	2.0	30	30	4.0	1×10 ⁻¹¹	≤2.3×10 ⁻¹¹

注:裹体砾石桩标准复合地基承载力不大于300 kPa。

由表8可知:裹体砾石桩土工布的物理力学强度明显低于裹体混凝土灌注桩所使用的土工布,2种桩型土工布的渗透系数差距较大,这是因为它们的成桩作用机理不同,采用裹体砾石桩可解决砾石桩的

鼓胀变形,使之达到承载力要求;裹体混凝土灌注桩可解决混凝土和钢筋的抗腐蚀性问题。

5 地基处理

5.1 地基检测

采用载荷试验、标准贯入试验、动力触探试验检测察格高速地基处理段的地基承载力^[27],裹体砾石桩采用探井检查桩体形状和桩体质量,对裹体桩进行动力触探破坏性试验,与砾石桩桩体动力触探试验进行对比;裹体钢筋混凝土采用载荷试验、高应变、低应变及混凝土抗压强度等试验检测桩基的性能。不同方法处理地基的载荷-沉降试验曲线($p-s$ 曲线)如图1所示,动力触探曲线如图2所示。

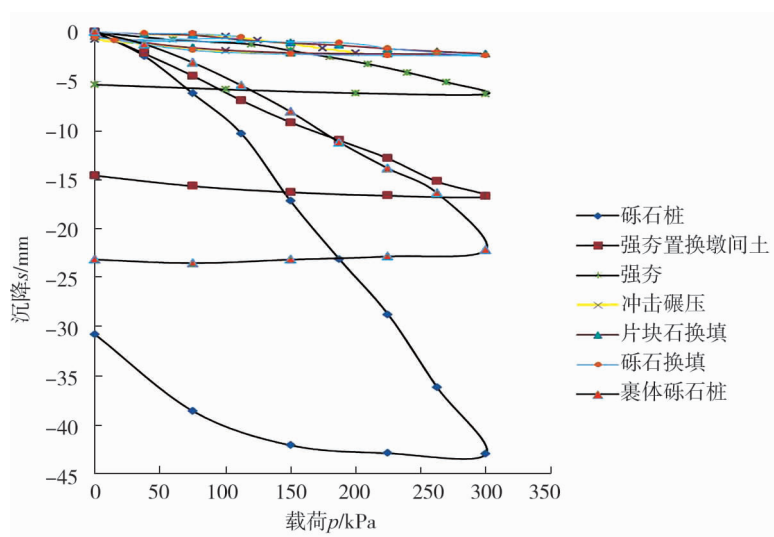


图1 不同方法处理地基的 $p-s$ 曲线

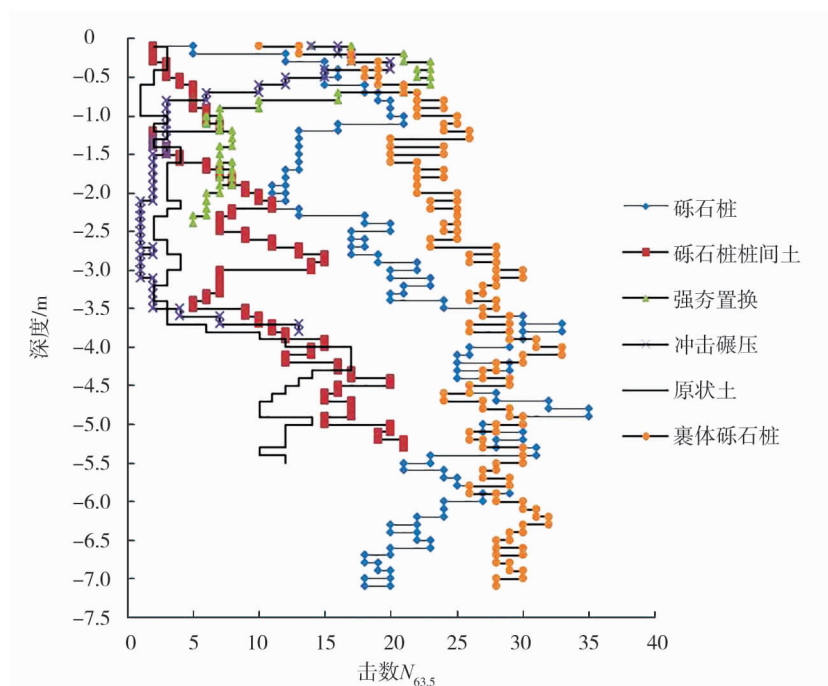


图2 不同方法处理地基后的动力触探曲线

由图1可知:采用各种处理方法后的地基承载力均有较大提高,裹体砾石桩的地基承载力提高幅度大,沉降明显减小。

由图2可知:强夯置换、砾石桩、裹体砾石桩在表层受到施工影响,距地表0.5 m内密实度较小,可在表层铺设一定厚度的砂石垫层,形成桩体与垫层共同作用的复合地基;裹体砾石桩的桩体强度比砾石桩明显提高,桩体密实度均为密实,而砾石桩为中密—密实;加固后砾石桩桩体对周围土体有挤密作用,随着深度的增加,桩间土的锤击数不断增大,但砾石桩在加固深度达到3 m以后,桩间土的动探击数接近原状土,此时砾石桩桩间土的挤密效果不明显,而裹体砾石桩的挤密效果明显优于砾石桩,自上而下均对土体有一定的挤密效果。裹体砾石桩采用特定施工机械和工艺,既能保证成桩质量,又能有效地提高桩的竖向支承力,提高桩基的承载能力。

不同地基处理方法的有效加固深度及承载力如表9所示。

表9 不同地基处理方法的有效加固深度及承载力

加固方法	冲击碾压	强夯	强夯置换	换填	砾石桩	裹体砾石桩
有效加固深度/m	0.8~0.9	3.0	6.0~7.0	0.5~1.5	5.0~8.0	5.0~12.0
承载力	大于120 kPa	复合地基承载力大于120 kPa	单墩、复合地基承载力分别大于300、150 kPa	大于150 kPa	单桩、复合地基承载力分别大于300、150 kPa	单桩、复合地基承载力分别大于300、180 kPa

5.2 地基工后沉降观测

地基沉降监测是验证地基处理方案设计、指导施工的重要手段^[28],沉降观测仪器由刚性沉降板、沉降杆、PVC护筒组成,分别埋设在路中线及左右路肩处。按照文献[29]要求观测,选取试验段强夯置换、砾石桩、裹体砾石桩试验段,在路基填土施工期、停工期进行沉降观测,在路基及路面施工过程中终止观测。察格高速公路沉降观测结果如表10所示。

表10 察格高速公路沉降观测结果

处理方法	沉降板位置	施工期			停工期(冬季、雨季影响施工)		
		填土厚/m	沉降/mm	日平均沉降/(mm·d ⁻¹)	填土厚/m	沉降/mm	日平均沉降/(mm·d ⁻¹)
强夯置换	左		116	1.706		31	0.145
	中	5.9	114	1.676		43	0.201
	右		150	2.206		13	0.061
砾石桩	左		28	0.424		13	0.061
	中	2.8	29	0.439	0	19	0.089
	右		45	0.682		12	0.056
裹体砾石桩	左		15	0.227		5	0.023
	中	5.1	25	0.379		11	0.051
	右		31	0.469		9	0.042

注:施工期强夯置换为68 d,砾石桩和裹体砾石桩均为66 d;停工期3种处理方法均为214 d。

由表10可知:路基主要填筑时间内,地基沉降增加较快,裹体砾石桩的沉降明显减小,说明裹体砾石桩的加固效果明显优于强夯置换、砾石桩法,而裹体砾石桩总沉降为20~40 mm,日沉降速率最小,故采用裹体砾石桩法加固地基效果明显提高。

6 结论

1)察尔汗盐湖地区主要以强腐蚀性的氯盐型盐渍土为主,腐蚀性以化学腐蚀混凝土中的钢筋为主。地基处理时需着重对混凝土及钢筋进行防腐蚀性处理。

2)盐湖区主要分布为盐渍软弱土,具有盐渍土与软土的双重特性,采用换填、冲击碾压、强夯、强夯置换、砾石桩、裹体砾石桩、裹体混凝土灌注桩、引孔裹体预制桩等均可进行地基处理,处理效果良好。

3)裹体砾石桩解决了散体材料成桩的质量问题,采用裹体施工工艺提高了桩体质量及地基的承载力,裹体混凝土灌注桩可防止盐渍土与桩体接触,保护桩体不受腐蚀,桩体的使用寿命延长。

参考文献:

- [1]付玉涛.察格高速公路强盐渍土地基处理技术研究[D].西安:长安大学,2011.
- [2]温利强,杨成斌,李士奎.中国西北地区盐渍土分布及危害[J].工程与建设,2010,24(5):585-587.
- [3]朱振学,章晓晖,李倩,等.盐渍土地基工程处理技术研究综述[J].吉林水利,2019(9):1-5.
ZHU Zhenxue, ZHANG Xiaohui, LI Qian, et al. Review on engineering treatment technology of saline soil foundation[J]. Jilin Water Resource, 2019(9):1-5.
- [4]隆威,刘永球,曹增国.盐渍土工程特征分析及地基处理方法探讨[J].岩土工程界,2002,5(4)43-45.
- [5]刘军勇,赵爱莉,寇博.饱和强盐渍土地区地基处理技术的应用研究[J].公路工程,2011,36(5):149-152.
LIU Junyong, ZHAO Aili, KOU Bo. Appliance research of saturate high-saline soil ground treatment[J]. High Engineering, 2011,36(5):149-152.
- [6]熊增华,张建伟,王石军.察尔汗盐湖资源开发的生态环境保护对策[J].中国矿业,2021,30(3):113-117.
XIONG Zenghua, ZHANG Jianwei, WANG Shijun. Countermeasures of ecological and environmental protection for Qarhan Salt Lake resource exploitation[J]. China Mining Magazine, 2021,30(3):113-117.
- [7]胡东生.察尔汗盐湖区地貌[J].湖泊科学,1990,2(1):37-43.
HU Dongsheng. Geomorphology of Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Lake Science, 1990,2(1)37-43.
- [8]胡燕,补海义,俞丽.青海察尔汗盐湖霍布逊区段北矿段钾镁盐矿矿区水文地质条件探讨[J].智能城市,2019,5(16),74-75.
- [9]代红娟.察格高速公路盐渍土填料特性试验研究[D].西安:长安大学,2011.
DAI Hongjuan. Experimental study on subgrade filling characteristics of saline soil for Chaerhan-Geermu Expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10]盐渍土地地区建筑技术规范:GB/T 50942—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [11]岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [12]《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [13]付玉涛.易溶盐与盐渍土层微观结构及竖向分布关系[J].山东交通学院学报,2020,28(2):58-64.
FU Yutao. Relationship between microstructure and vertical distribution of soluble salt and saline soil[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2020,28(2):58-64.
- [14]公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2021.
- [15]程东幸,刘志伟,伍艳丽,等.一种用于粗颗粒盐渍土溶陷性的初步判定方法[J].工程勘察,2021,49(2):25-30.
CHENG Dongxing, LIU Zhiwei, WU Yanli, et al. A preliminary determination method for collapsibility of coarse particle saline soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2021,49(2):25-30.
- [16]尤苏南.察尔汗盐渍土工程特性与地基处理方法研究[J].工业建筑,2013,3(增刊1):450-454.
YOU Sunan. Engineering properties of Qarham soil and study on foundation treatment methods[J]. Industrial Construction, 2013,3(Suppl. 1):450-454.
- [17]建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [18]招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [19]罗友弟.盐渍土特性及其地基处理方法探讨[J].矿产勘查,2019,10(5):1214-1218.
LUO Youdi. Saline soil engineering properties and ground treatment method[J]. Mineral Exploration, 2019,10(5):1214-1218.
- [20]工业建筑防腐蚀设计标准:GB/T 50046—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [21]新疆公路学会.盐渍土地地区公路设计与施工指南[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [22]戴荣里.盐渍土地基处理施工技术[J].建筑技术,2017,48(11):1224-1226.

- DAI Rongli. Treatment and construction of saline soil foundation[J]. *Architecture Technology*, 2017,48(11):1224-1226.
- [23] 赵爱莉,段康进,刘军勇. 强夯置换法处理盐渍化软土地基的应用研究[J]. *公路工程*,2012,37(1):133-135.
- ZHAO Aili, DUAN Kangjin, LIU Junyong. Research of dynamic displacement treating salinization weak ground[J]. *Highway Engineering*, 2012,37(1):133-135.
- [24] 青海省住房和城乡建设厅. 裹体碎石桩法处理地基技术规程:DB63/T885—2010[S]. 青海:青海科技出版社,2010.
- [25] 苏文财,黄明. 在察尔汗盐湖地区应用防腐混凝土裹体桩作用机理的分析[J]. *勘察科学技术*, 2011(4):30-33.
- SU Wencai, HUANG Ming. Analysis on action mechanism of anticorrosion concrete packed piles applied in Cha Er Han Salt Lake[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2011(4):30-33.
- [26] 龚雨,王雪梅. 盐渍土地基处理方法的研究现状与思考[J]. *科学技术创新*, 2020(27):114-115.
- [27] 张留俊,王福胜,刘建都. 高速公路软土地基处理技术:试验研究与工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [28] 司维兵,付玉涛,王翰强. 阿博高速公路软土地基沉降监测分析[J]. *山东国土资源*,2012,28(12):37-39.
- SI Weibing, FU Yutao, WANG Hanqiang. Monitoring and analysis on soft clay ground settlement of Abo Highway[J]. *Shandong Land and Resources*, 2012,28(12):37-39.
- [29] 公路软土地基路堤设计与施工技术细则:JTG/T D31-02—2013[S]. 北京:人民交通出版社,2013.

Engineering geological characteristics of saline soil and foundation treatment technology in Qarhan Salt Lake area

DAI Hongjuan¹, FU Yutao^{2*}

1. Shandong College of Highway Technician, Jinan 250104, China;

2. No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250102, China

Abstract: To reduce the hazards of saline soil to subgrade such as collapsibility, salt swelling and corrosiveness, the physical and mechanical properties of saline soil in Qarhan Salt Lake area are analyzed and evaluated through investigation, drilling, in-situ test and indoor test. Taking the foundation treatment of Qarhan-Golmud Expressway as an example, the methods of saline soil foundation treatment and new foundation treatment processes are compared and analyzed, and load test standard penetration test and dynamic penetration test are used to detect the foundation bearing capacity of the foundation treatment section of Qarhan-Golmud Expressway. The results show that the saline soft soil is mainly distributed in the Salt Lake area, which has the dual characteristics of saline soil and soft soil. The foundation treatment can be carried out by using replacement, impact rolling, dynamic compaction, dynamic compaction replacement, gravel pile, wrapped gravel pile, wrapped reinforced concrete pile and pilot hole wrapped precast pile, and the treatment effect is good; the wrapped gravel pile solves the quality problem of granular material pile composite foundation. The wrapped construction technology improves the pile quality and the bearing capacity of the foundation. The wrapped reinforced concrete pile can prevent the contact between saline soil and the pile so that the pile will not be corroded. The settlement of wrapped gravel pile is obviously reduced, and the effect of foundation reinforcement by wrapped gravel pile method is obviously improved.

Keywords: saline soil; engineering geological characteristics; foundation treatment; test method

(责任编辑:郭守真)