

公路工程粗粒盐渍土易溶盐试验方法研究

包卫星^{1,2}, 李志农³, 罗炳芳³

(1. 干旱荒漠区公路工程交通行业重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830001; 2. 新疆交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830049;
3. 新疆交通厅, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 为了研究公路工程盐渍土易溶盐合理的测定方法, 对典型区域的盐渍土进行了颗粒组成统计分析、粗粒盐渍土试样制备粒径研究以及土水比与含盐量关系的分析。结果表明: 砾类土易溶盐试验采用通过 5 mm 筛孔的烘干土样 300 g, 砂类土易溶盐试验采用通过 1 mm 筛孔的烘干土样 300 g, 细粒土易溶盐试验采用通过 1 mm 筛孔的烘干土样 100 g, 土水比 1:5 进行易溶盐离子试验, 测定的易溶盐含量具有较好的代表性, 符合工程实际。

关键词: 道路工程; 易溶盐试验; 统计分析; 盐渍土; 粗粒土

中图分类号: TU448; U416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)05-0792-06

作者简介: 包卫星(1979-), 男, 新疆乌市人, 高级工程师, 博士, 主要从事软黏土力学及地基处理方面的研究。E-mail: baowx@163.com。

Test method for soluble salt in saline soil in highway engineering

BAO Wei-xing^{1,2}, LI Zhi-nong³, LUO Bing-fang³

(1. Key Laboratory of Highway Engineering Technology of Arid Desert Area for Transport Industry, Urumqi 830001, China; 2. Xinjiang Traffic Construction Management Bureau, Urumqi 830049, China; 3. Communications Department of Xinjiang, Urumqi 830001, China)

Abstract: In order to study reasonable test methods for soluble salt in saline soil in highway engineering, the statistical analysis of particle composition in the typical region, the research on preparation particle diameter of coarse grained saline soil and the analysis on relation between soil-water ratio and salt content are performed. The results show that the test method for soluble salt in gravel saline soil using drying soil samples of 300 g which pass 5 mm mesh, the test method for soluble salt in sand saline soil using drying soil samples of 300 g which pass 1 mm mesh as well as the test method for soluble salt in fine grained saline soil using drying soil samples of 100 g which pass 1 mm mesh are representative, and they agree with the actual situations.

Key words: road engineering; test method for soluble salt; statistic analysis; saline soil; coarse grained soil

0 引言

土的易溶盐含量是分界盐渍土与非盐渍土的主要物理指标, 是评价土的盐渍化程度的依据。现行《公路土工试验规程》(JTJ051—93)对易溶盐测定有较成熟的试验方法。易溶盐试样制备是通过 1 mm 筛孔以下的土进行测试分析的。采用土水比 1:5, 浸提时间 3 min 制待测液。过滤后的浸出液采用质量法对易溶盐总量测定, 硫酸滴定法对碳酸根及碳酸氢根测定, 硝酸银滴定法对氯根测定。在测定硫酸根时, 用 EDTA 间接配位滴定法滴定硫酸根离子, 土的易溶盐含量的多少以质量百分比表示^[1]。

根据盐渍土地区公路工程多年来的实践检验, 这种方法对细粒盐渍土是适用的, 但对粗粒土特别是砾类土的易溶盐测定并不适用。通过对新疆国道 312 线、314 线和土—乌—大等高等级公路砂砾土料场的调查

分析表明, 料场主要以砾类土为主, 砂类土次之, 含细粒土砾和含细粒土砂较少。砾类土平均粒径为 5.49 mm, 通过 1 mm 筛孔的通过率平均为 26.75%; 砂类土平均粒径为 0.685 mm, 通过 1 mm 筛孔的通过率平均为 64.75%。由此可见, 对粗粒土采用 1 mm 筛孔以下的土作为测试含盐量的标准是不合理的。现行易溶盐测定方法中, 未充分考虑粗粒土的不同颗粒组成差异对易溶盐含量测试的影响。

粗粒土在山前洪积、冲积平原分布很广^[2], 是良好的筑路材料, 在公路工程中已广泛应用。由于受地质及气候的作用, 在冲积扇中下游及沙漠边缘地带的砂砾材料中含有不同程度的盐分^[3], 如何确定砂砾土

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200331879750)

收稿日期: 2008-08-29

的含盐量, 如何评价砂砾土中含盐量的允许界限, 在现行的土工试验中都未得到合理的解决。随着高等级公路在盐渍土地区的迅猛发展又使粗颗粒盐渍土的试验方法、工程特性、路基填料的可用性及分类评判标准等问题随之出现^[4]。

现行易溶盐试验方法是工程界的经典方法, 在测试易溶盐成分方面精确度较高, 操作较方便^[5], 所以, 粗粒土易溶盐试验方法研究的重点是在粗粒土试样制备的合理粒径上。通过统计分析, 室内试验研究, 提出了合理的易溶盐试样制备粒径及土水比, 以便真实地反映粗粒土含盐状况, 确保工程质量的前提下充分地利用粗粒土。

1 粗粒盐渍土颗粒组成特征研究

1.1 典型区域粗粒土颗粒组成概况

粗粒土分为砾类土和砂类土, 按其中含细粒土含量的多少又可分为砾 (GW、GP) 和砂 (SW、SP)、含细粒土砾 (GF) 和含细粒土砂 (SF)、细粒土质砾 (GM) 和细粒土质砂 (SM)。通过对新疆国道 312 线、314 线和土一乌一大等公路 11 个路段的砂砾土料

场调查, 收集了 491 份砂砾土颗粒分析试验成果资料 (见表 1)。

从表 1 可以看出, 天山南北山前的洪积、冲积扇上砂砾土料场主要以砾的含量居多, 砂次之, 含细粒土砾和含细粒土砂相对较少。其中东疆 G312 线梯子泉以东的地区以砾为多, 砂次之, 以西的地区主要为砾, 砂类土很少。吐一乌一大高等级公路均为砾类土。北疆 G217 线克拉玛依至独山子段以砂居多, 砾类土次之。南疆 G314 线库米什以南路段以砾为多, 砂次之。南疆 G314 线阿图什过境路及以西路段基本为砾。

1.2 粗颗粒盐渍土颗粒组成特性

土颗粒的组成特征是以土的级配指标不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 表示, 其中不均匀系数 C_u 反映粒径分布曲线上的土粒分布范围。曲率系数 C_c 反映粒径分布曲线上的土粒分布形状。一般认为, 砾类土或砂类土同时满足 $C_u > 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时, 则定名为良好级配砾或良好级配砂。在所调查的 11 个路段 491 个样本中, 对其中代表性路段的 365 个样本筛分资料进行归纳分析, 得出粗粒土的颗粒组成平均值 (见表 2) 以及相应的颗粒组范围 (见表 3), 粗粒土粒径分配曲线见图 1 所示。

表 1 新疆南、北疆粗粒土分类统计表

Table 1 Classification statistics of coarse grained soil in north and south regions of Xinjiang

序号	路线名称	计算土样			砾类土			砂类土					
		合计	Sicb	G+S	小计	GW	GP	GF	小计	SW	SP	SF	SM SC
1	G312 线骆驼圈子至三道岭	28		28	18	17	12	6	10		6	4	
2	G312 线梯子泉至鄯善	40		40	39	31	22		1		1		
3	吐一乌一大高等级公路	83	24	59	59	6	16	12					
4	G217 线克拉玛依至独山子	29	1	28	9	6	3		19		4	5	10
5	G314 线群巴克至库车	28	2	26	26	6	13	7					
6	G314 线库车至阿克苏	18		18	14	1	13		4	1	3		
7	G314 线库车至阿克苏	134	26	108	65	29	35	1	43	10	23	10	
8	G314 线阿克苏过境路(一段)	20		20	3		3		17		5	6	6
9	G314 线阿克苏过境路(南线)	47		47	22	11	10	1	25		4	9	12
10	G314 线阿图什过境路	40		40	39	11	28		1	1			
11	中巴公路(K0-K23+800)	24	8	16	16	4	12						
	合计	491	61	430	430	116	167	27	120	12	46	34	28

表 2 新疆南、北疆粗颗粒组成平均值表

Table 2 Average values of coarse particle composition in north and south regions of Xinjiang

土类名称	通过下列筛孔的重量百分比/%										C_u	C_c	
	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.074 mm			
砾类土	级配良好砾	97.2	88.6	73.4	54.3	41.8	25.8	19.4	12.0	6.2	1.6	30.75	1.31
	级配不良砾	96.0	90.6	77.0	65.8	52.3	35.6	29.5	17.1	8.8	1.5	26.50	0.54
	含细粒土砾	98.6	93.7	83.3	71.1	59.0	38.6	31.6	24.7	17.4	10.1		
砂类土	级配良好砂	98.1	95.5	90.6	85.3	78.1	66.6	47.0	26.7	18.0	2.3	12.15	1.53
	级配不良砂	100.0	97.2	91.9	85.5	76.0	65.0	54.6	37.9	15.5	1.8	9.53	0.45
	含细粒土砂	100.0	99.0	97.0	94.0	89.0	84.0	81.0	74.0	52.0	10.0		
	细粒土质砂					100.0	98.9	96.1	92.2	76.8	28.3		

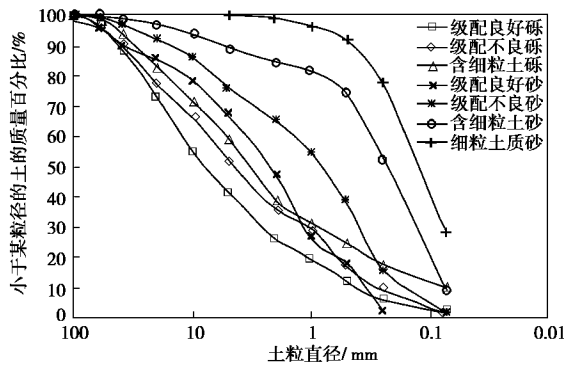


图 1 粗粒土粒径分配曲线

Fig. 1 Size distribution curves of coarse grained soil

从表2、3可以看出，砾类土中，砾粒的质量平均占总质量的65.9%，砂粒的质量为29.2%，粉、黏土的含量很少；含细粒土砾中，砂粒的质量平均占总质量为28.5%，粉、黏土的含量为10.1%；砂类土中，砂粒的质量平均占总质量的63.8%，粉、黏土的含量为2.1%；含细粒土砂中，砂粒的质量平均占总质量的74%，粉、黏土的含量为10%；细粒土砂中，砂粒的质量平均占总质量为70.6%，但粉、黏粒含量多，平均为28.3%。

表 4 砾类土颗粒组成范围代表值

Table 4 Representative values of gravel particle composition

土类名称	通过下列筛孔的重量百分比/%										C _u	C _c	
	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.074 mm			
级配良好砾	细值	100	100	96	80	65	45	32	22	15	5	28.4	1.4
	中值	94	88	73	53	40	26	19	12	7	2	32.7	1.4
	粗值	88	76	57	39	26	17	13	8	5	0	33.8	2.6
级配不良砾	细值	100	100	100	89	69	48	42	34	25	4	33.8	0.4
	中值	93	86	72	57	46	33	24	16	9	1	39.6	0.8
	粗值	86	68	51	41	32	20	12	8	5	0	40.7	0.9
含细粒土砾	细值	100	100	98	86	72	50	40	30	23	14		
	中值	97	93	84	72	59	41	32	23	18	10		
	粗值	86	75	60	45	35	25	19	15	12	7		
细粒土质砾	细值	100	100	98	88	74	50	40	33	27	20		
	中值	98	95	87	76	64	45	35	29	24	17		
	粗值	95	90	79	66	55	40	32	25	20	15		

表 5 砂类土颗粒组成范围代表值

Table 5 Representative values of sand particle composition

土类名称	通过下列筛孔的重量百分比/%										C _u	C _c	
	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.074 mm			
级配良好砂	细值	100	100	96	91	87	78	56	34	23	4	12.1	1.5
	中值	98	96	91	85	78	67	47	27	18	2	10.3	1.2
	粗值	88	88	83	78	68	54	36	17	11	2	13.5	1.0
级配不良砂	细值	100	99	98	96	94	91	80	61	28	5	12.2	0.7
	中值	100	97	91	84	76	65	54	39	21	3	4.9	1.4
	粗值	100	86	77	69	60	51	33	15	7	1	15.6	0.5
含细粒土砂	细值	100	100	100	100	100	100	98	95	80	13		
	中值	100	100	100	99	97	94	90	85	67	9		
	粗值	100	100	100	98	94	90	84	75	52	6		
细粒土质砂	细值	100	100	100	100	100	100	99	95	86	39		
	中值	100	100	100	100	100	97	94	89	75	52		
	粗值	95	90	79	66	55	40	32	25	20	15		

表 3 新疆南、北疆粗粒土组成平均值范围表

Table 3 Average values of coarse particle composition

土类名称	粗粒组		细粒组 (粉、黏粒, <0.074 mm)	
	砾 (<60~2 mm)	砂 (<2~0.074 mm)		
砾类土	级配良好砾	71.4	24.2	1.6
	级配不良砾	60.4	34.1	1.5
	含细粒土砾	60.0	28.5	10.1
砂类土	级配良好砂	31.5	64.3	2.3
	级配不良砂	35.0	63.2	1.8
	含细粒土砂	16.0	74.0	10.0
细粒土质砂	1.1	70.6	28.3	

1.3 粗颗粒盐渍土颗粒组成范围代表值的确定

通过对新疆代表性路段的 365 个样本筛分资料分类可知，即使是同一类土其颗粒组成也相差很大^[6]，为了便于对粗粒土的物理、力学性质及含盐特性进行定量分析，在对粗粒土定名的基础上，通过图示法和归纳统计确定出粗粒土颗粒组成范围的粗、中、细代表值。砾类土颗粒组成范围代表值见表 4，砂类土颗粒组成范围代表值见表 5 所示。

从表4、5可以看出, 砂砾土的颗粒组成的粗、中、细代表值代表了各粗粒土颗粒的组成曲线基本范围, 中值曲线间隔位置较均匀。中值曲线与各料场土类的平均分布曲线基本吻合且较圆滑。其中, 砾类土的不良级配代表值曲线组粒径偏粗, 含细粒土砂代表值曲线较料场平均分布曲线偏细。各代表值粒径分布较均匀, 表现为各土类同一粒径尺寸通过率的差值较均匀。砾类土颗粒组成范围代表值粒径分配曲线见图2所示, 砂类土颗粒组成范围代表值粒径分配曲线见图3所示。

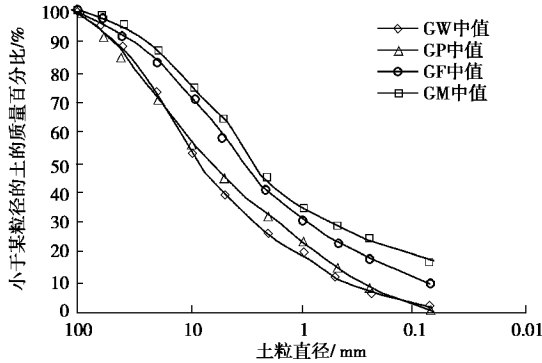


图2 砾类土颗粒组成范围代表值粒径分配曲线

Fig. 2 Representative curves of gravel

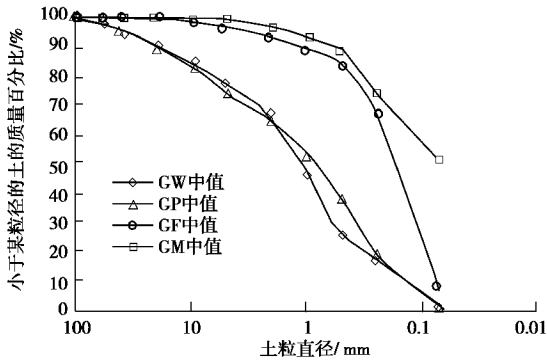


图3 砂类土颗粒组成范围代表值粒径分配曲线

Fig. 3 Representative curves of sand

2 粗粒土易溶盐含量试验方法研究

2.1 粗粒土易溶盐测定试样制备粒径的选择

通过粗粒土盐渍土颗粒组成范围代表值的分析可知, 砾类土通过1 mm筛孔土的通过率平均为26.75%, 砂类土通过1 mm筛孔土的通过率平均为64.75%, 显然砾类土的主要颗粒粒径以砾粒和砂粒为主, 所以, 粗粒土盐渍土易溶盐试样制备粒径全部为1 mm是不合理的。

通过对粗粒土盐渍土颗粒组成范围代表值分析表明, 砾类土的平均粒径为5.49 mm, 砂类土的平均粒径为0.685 mm, 砾类土与砂类土在5 mm和1 mm筛孔的通过率比较, 如表6所示。

由表6可知, 砾类土通过5 mm筛孔的试样相对于1 mm筛孔试样有较好的代表性, 砂类土通过1 mm筛孔的试样量有较好的代表性, 也有足够的安全度。考虑到粗粒土易溶盐溶液搅拌及滤液提取, 若选取粒径范围过大, 虽然试样会有更好的代表性, 但粗粒土易溶盐溶液的搅拌及滤液提取存在困难, 影响易溶盐测试的准确性。所以, 砾类盐渍土易溶盐试样制备粒径选择为5 mm具有较好代表性, 砂类盐渍土易溶盐试样制备粒径选择为1 mm具有较好代表性。

表6 粗粒土5 mm和1 mm筛孔通过率对比表

Table 6 Contrast table of mesh passing rates for coarse grained soil

粒径	砾类土				砂类土			
	GW	GP	GF	GM	SW	SP	SF	SM
通过5 mm筛孔量/%	40	46	59	64	78	76	83	100
通过1 mm筛孔量/%	19	24	32	32	47	54	63	95

为了从易溶盐含量试验角度验证粗粒土盐渍土易溶盐试样制备粒径, 选用南北疆代表性路段的盐渍土进行了颗粒级配与含盐量关系的试验研究^[7]。通过对同一料场的砂砾土筛分为小于60, 10, 5, 2, 1 mm五种粒径级配范围, 分别进行颗粒级配与总盐含量关系试验研究。针对不同类型的粗粒土以及粒径级配范围, 试验采用3~8组试验数值取平均值, 以保证试验结果的准确性。粗粒土中不同粒径级配范围总盐含量的平均值见表7所示, 粒径级配范围与总含盐量关系曲线见图4所示。

表7 粗粒土中不同粒径级配范围总含盐量表

Table 7 Total salt content table of different gradation ranges

土类名称	通过下列筛孔的总盐 平均含量质量百分比/%				
	60 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm
级配不良砾	0.823	1.178	1.406	1.808	2.071
含细粒土砾	2.319	3.133	3.557	4.614	4.863
粉土质砾	0.706		1.201		1.448
级配不良砂	0.492		1.162	1.482	1.532
含细粒土砂	2.484	2.728	2.761	3.157	3.452
粉土质砂	0.983	1.025	1.063	1.137	1.230

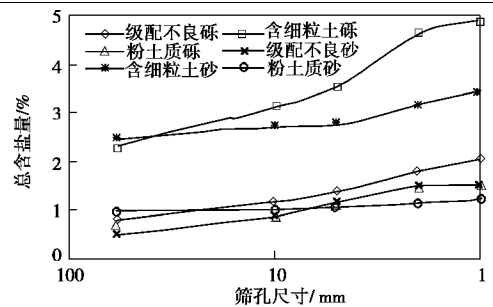


图4 粒径级配范围与总含盐量关系曲线

Fig. 4 Relation between particle distribution and salt content

表8 不同质量试样总含盐量表

Table 8 Total salt content of samples with different qualities

试验质量/g	小于 5 mm 筛孔试样总盐含量/%							
	SM 试样 (试样 1)	SM 试样 (试样 2)	SF 试样 (试样 3)	SF 试样 (试样 4)	GF 试样 (试样 5)	GF 试样 (试样 6)	GP 试样 (试样 7)	GP 试样 (试样 8)
500	0.3193	1.9273	0.7293	2.1548	2.5723	0.9270		4.5905
400		1.8180	0.8785	2.3108	2.6433	0.9195		4.4410
300	0.4090	2.0915	0.8535	2.6730	2.3570	1.0065	0.1720	4.2195
200	0.2605	1.5295	0.6570	2.1075	2.5155	0.7175	0.1700	4.3940
100	0.3135	1.5865	0.6655	2.3030	2.2700	0.7985	0.2030	4.6045
平均值	0.3255	1.7905	0.7567	2.3098	2.4716	0.8738	0.1816	4.4499
均方差	0.0615	0.2344	0.1039	0.2218	0.1543	0.1147	0.0185	0.1580

从图4可以看出,粗粒土的总盐含量随试样粒径范围的不同而变化,粒径范围越小,测定值就越大,土的实际总盐含量越大变化更突出。砾类土1 mm粒径范围的含盐量大于其他粒径范围的含盐量,对其他粒径范围的平均大于25%~55%。砾类土5 mm粒径范围的测定值变化最明显,基本为砾类土各不同粒径级配范围总盐含量变化曲线的拐点,同时,5 mm粒径范围的含盐量最接近各粒径范围的平均含盐量。砂类土1 mm粒径范围的含盐量大于其它粒径范围的含盐量,但变化幅度不大,具有代表性。所以,选用5 mm筛孔作为砾类盐渍土易溶盐测定试样制备粒径,选用1 mm筛孔作为砂类盐渍土易溶盐测定试样制备粒径具有较好的代表性和试验易操作性。

2.2 粗粒土易溶盐测定试样质量与土水比的确定

(1) 易溶盐测定试样质量确定

为研究试样质量对粗粒土总盐含量的影响,通过对同一砂砾土样分别采500 g等5种不同质量进行易溶盐试验,分析了试样质量对粗颗粒盐渍土易溶盐总量的影响,试验结果见表8所示。

从表2~8可以看出,在小于5 mm筛孔条件下,试验样品质量对总盐含量的影响没有较明显的规律,但用300 g试样测得的总盐含量多数是峰值,并与100 g试样测得的总盐含量平均相差14%。因此,用通过5 mm筛孔和1 mm筛孔的烘干土作为粗颗粒土易溶盐试验样品时,其试样质量采用300 g更具代表性。

(2) 易溶盐测定试样质量确定

试样浸出液土水比对总盐含量有较大的影响,针对通过5 mm筛孔的300 g烘干土样,进行了不同土水比易溶盐试验,试验结果见表9所示。

从表9分析可知,即使是同一类土,采用不同土水比易溶盐含量相差10%左右。为保证粗粒盐渍土易溶盐的充分溶解性以及试验可操作性^[8],同时保持与细粒盐渍土易溶盐试验检测方法的一致性,粗粒土试

样土水比仍采用1:5的比例。

表9 不同土水比试样总含盐量表

Table 9 Total salt content with different soil-water ratios

土类	试样质量/g	土水比	易溶盐含量/%
级配不良砾	300	1:2.5	4.4410
	300	1:50	4.2195
含细粒土砾	300	1:2.5	0.9195
	300	1:50	1.0065
粉黏土质砂	300	1:2.5	2.0915
	300	1:50	1.8180

3 结 论

通过对粗粒土易溶盐测定试样制备粒径的分析以及粗粒土易溶盐测定试样质量与土水比的论证,得出如下结论:

(1) 砾类土易溶盐试验采用通过5 mm筛孔的烘干土样300 g,采用土水比1:5,浸提时间3 min制待测液。过滤后的浸出液按《公路土工试验规程》(JTJ051—93)采用质量法对易溶盐总量测定,硫酸滴定法对碳酸根及碳酸氢根测定,硝酸银滴定法对氯根测定。在测定硫酸根时,用EDTA间接配位滴定法测定硫酸根离子。

(2) 砂类土易溶盐试验采用通过1 mm筛孔的烘干土样300 g,采用土水比1:5,浸提时间3 min制待测液。过滤后的浸出液按《公路土工试验规程》(JTJ051—93)采用质量法对易溶盐总量测定,硫酸滴定法对碳酸根及碳酸氢根测定,硝酸银滴定法对氯根测定。在测定硫酸根时,用EDTA间接配位滴定法测定硫酸根离子。

(3) 细粒土易溶盐含量按《公路土工试验规程》(JTJ051—93)测试,经盐渍土地区公路工程实践经验证实是可行的,采用通过1 mm筛孔的烘干土样100 g,采用土水比1:5,浸提时间3 min制待测液,采

用质量法对易溶盐总量测定, 硫酸滴定法对碳酸根及碳酸氢根测定, 硝酸银滴定法对氯根测定。在测定硫酸根时, 用 EDTA 间接配位滴定法滴定硫酸根离子。

参考文献:

- [1] JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993: 128 - 135. (JTJ051—93 The methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1993: 128 - 135. (in Chinese))
- [2] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 7 - 10. (XU You-zai. Saline soil ground[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993: 7 - 10. (in Chinese))
- [3] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 100 - 107. (XU Xue-zu. Mechanism of frost heave and salt expansion of soil[M]. Beijing: Science Press, 1995: 100 - 107. (in Chinese))
- [4] 高江平, 吴家惠, 杨荣尚. 盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报, 1997, **10**(1): 10 - 15. (GAO Jiang-ping, WU Jia-hui, YANG Rong-shang. Analysis of the interaction laws of all influencing factors upon salt heaving properties of the sulphate salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, **10**(1): 10 - 15. (in Chinese))
- [5] 高树森, 师永坤. 碎石类土盐渍化评价初探[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 96 - 99. (GAO Shu-sen, SHI Yong-kun. Research on the properties for saline soil of sand angular gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 96 - 99. (in Chinese))
- [6] 李芳, 李斌, 陈建. 中国公路盐渍土的分区方案[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, **26**(6): 12 - 14. (LI Fang, LI Bin, CHEN Jian. Highway-related dividing scheme of salty soil[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, **26**(6): 12 - 14. (in Chinese))
- [7] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (BAO Wei-xing, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (in Chinese))
- [8] 褚彩萍, 李斌. 硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(2): 89 - 91. (CHU Cai-ping, LI Bin. Salt expansion accumulation of sulphate salty soil under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(2): 89 - 91. (in Chinese))