

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.010

察尔汗盐湖地区公路岩盐地层溶陷特性试验分析

刘国田, 雷明轩, 张超

(中交第一公路勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:通过察尔汗盐湖地区岩盐室内溶陷试验和现场溶陷试验,分析岩盐的溶陷特性,以及岩盐地层作为公路地基的可行性。试验结果表明:岩盐试样室内溶陷试验所测得的溶陷系数要远大于现场试验,室内试验和现场试验双线法测得的岩盐溶陷系数比单线法测得的溶陷系数要大。按照 GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》溶陷等级和 JTG D30—2015《公路路基设计规范》溶陷性标准,现场溶陷试验测得的溶陷量小,岩盐地基满足高速公路、一级公路地基溶陷性标准要求。

关键词:岩盐地层; 溶陷性; 溶陷系数; 含盐量

盐渍土的溶陷变形是指在自重应力或附加应力作用下,天然盐渍土被水浸湿后发生的变形。在实际工程中,盐渍土的溶陷变形问题会直接影响路基整体稳定性,是目前其作为地基时存在的主要问题。含盐地层作为一类特殊的工程地质体,其工程性能具有易变性、各向异性以及冻胀性等特点。对于盐渍土而言,其溶陷变形主要分为静水中的溶陷变形及潜蚀变形两种。盐渍土地基的溶陷会造成土体结构强度的丧失,使地基承载力降低,并产生很大的变形而导致上部构筑物的沉降。当沉降不均匀时,则可能导致上部构筑物的开裂。土体发生溶陷时,其变形速度很快,由此对构筑物的稳定性、安全性形成很大的威胁,所以在盐渍土地区工程地质勘察中,溶陷性评价直接关系到后续设计、施工的成败。目前评价盐渍土溶陷性的重要指标是溶陷率 δ ,可通过现场荷载试验或室内压缩试验手段获取,该文以在建察尔汗—格尔木高速公路为依

托,通过室内及现场试验的方式,对岩盐分布地区的溶陷特性展开分析,研究其作为高等级公路路基的可行性。

1 岩盐基本性质及评价标准

1.1 岩盐基本性质

岩盐夹层地基最大的隐患是在降雨情况下地表盐壳层发生溶解、溶滤和溶陷,从而降低地基承载力或复合地基承载力,加剧上部路基沉降和不均匀沉降。该文通过实体工程,对岩盐进行室内溶陷试验和岩盐地基现场浸水载荷试验,分析岩盐的溶陷特性。

室内溶陷试验所用岩盐试样取自察尔汗盐湖,取样地点与现场溶陷试验位于同一地点。取土深度为0.3~0.5 m,土样基本性质见表1~3。由表1~3可知:试坑浅层土样总含盐量为89.1%,天然含水率为5.9%。

表1 土样颗粒分析结果

土样	颗粒组成质量百分比/%			不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
	2~0.075 mm	0.075~0.002 mm	<0.002 mm		
粉土质砂	56.29	40.78	2.92	2.33	0.63

表2 土样易溶盐离子含量

各离子的含量/(mg·L ⁻¹)							溶解性固体/ (mg·L ⁻¹)	总含盐 量/%	盐渍化 程度
CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺			
0	26.84	268 112	599.16	0	23.59	268 714.4	616 500	89.09	氯盐渍土

收稿日期:2021-03-30(修改稿)

作者简介:刘国田,男,大学本科,高级工程师,E-mail:liugt@ccroad.com.cn

表 3 土样界限含水率

土样	天然含水 率/%	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指 数 I_P
粉土质砂	5.9	21.3	15.0	6.3

1.2 岩盐溶陷性评价标准

GB/T 50942—2014《盐渍土地建筑技术规范》将盐渍土的溶陷程度根据溶陷系数(δ_{rx})划分为 3 类;将盐渍土的溶陷等级根据总溶陷量(ΔS)分为 3 级。溶陷程度及溶陷等级见表 4、5。

表 4 盐渍土溶陷程度分类

溶陷程度	溶陷系数(δ_{rx})
溶陷性轻微	$0.01 < \delta_{rx} \leq 0.03$
溶陷性中等	$0.03 < \delta_{rx} \leq 0.05$
溶陷性强	$\delta_{rx} > 0.05$

表 5 盐渍土地基的溶陷等级

溶陷等级	总溶陷量 ΔS /mm
I 级 弱溶陷	$70 < \Delta S \leq 150$
II 级 中溶陷	$150 < \Delta S \leq 400$
III 级 强溶陷	$\Delta S > 400$

JTG D30—2015《公路路基设计规范》规定:地下水埋深小于 3.0 m 或存在经常性地表水侵扰的盐渍土路段,应进行地基溶陷性评价,溶陷性指标见表 6。

表 6 盐渍土地基溶陷性指标

公路等级	溶陷量 ΔS /mm
高速、一级公路	< 70
二级公路	< 150
三、四级公路	< 400

2 室内溶陷试验与结果分析

2.1 试验方法

岩盐室内溶陷试验参照现行 JTG E40—2007《公路土工试验规程》(简称《规程》)黄土湿陷试验进行,采用环刀法现场取样,取样前清除地表松散层,取样深度为 0.3~0.5 m。为尽量减少对试样的扰动与试样的长期搁置,取样与备样后在现场工地试验室及时进行试验。考虑到岩盐试样浸水溶陷量大,为保证岩盐溶陷试验的连续性和试验结果的准确性,试制加高了环刀和水槽,将《规程》规定的环刀高度 20 mm 改为 40 mm,直径不变;水槽高度由 45 mm 加高至 70 mm,以保证溶陷试验过程中试样能完全浸入水中。试验过程

中采用 50 mm 量程百分表测量试样高度值。岩盐溶陷试验采用单线法和双线法进行。

(1) 单线法

采用环刀法制取 5 个试样,依次施加 5 个不同的压力值(50、100、150、200 和 400 kPa),将备好的试样按照要求放置在固结仪内,施加预压荷载后对 5 个试样分级加压至 5 个等级压力沉降稳定后加水溶陷至再度达到沉降,测读该压力下浸水前后的高度值,计算溶陷量与溶陷系数。具体步骤:第一个试样施加 50 kPa 压力,按照规定的时间间隔读数直至沉降稳定,自试样顶面缓慢加水再度达到沉降稳定读数并记录;第二个试样分级加压至 100 kPa,按照规定的时间间隔读数直至沉降稳定,自试样顶面缓慢加水再度达到沉降稳定读数并记录;其他分级压力以此类推。

(2) 双线法

双线法切取 2 个环刀试样,一个试样在天然含水率下分级加压,直至溶陷变形稳定为止;另一个试样在天然含水率下施加第一级压力,变形稳定后加水待再次稳定后分级施加后续分级压力,直至各级压力溶陷变形稳定为止。计算天然状态和浸水状态的沉降差,即溶陷量。

(3) 溶陷系数 δ 计算公式为:

$$\delta = (h_p - h'_p)/h_0 \tag{1}$$

式中: h_0 为原状试样的原始高度(此次试验为 40 mm); h_p 为压力 P 稳定变形后试样的高度(mm); h'_p 为压力 P 浸水溶陷稳定后试样的高度(mm)。

2.2 试验结果与分析

室内溶陷试验结果见表 7、8。

表 7 单线法溶陷试验结果

压力/ kPa	试样 1		试样 2	
	溶陷量/ mm	溶陷系数	溶陷量/ mm	溶陷系数
50	6.558	0.164	8.333	0.208
100	8.358	0.209	8.761	0.219
150	8.575	0.214	8.996	0.225
200	9.043	0.226	9.498	0.238
400	9.304	0.233	9.451	0.239

从表 7、8 可知:施加的压力越大,试样的溶陷量和溶陷系数越大,溶陷量和溶陷系数在压力为 50~100 kPa 时,变化较为显著;其后分级压力加载过程中,变化相对平稳。同级压力条件下,双线法测得的溶陷系数要略大于单线法。两试样单线法测得的溶陷量为

表8 双线法溶陷试验结果

压力/ kPa	试样 1		试样 2	
	溶陷量/ mm	溶陷系数	溶陷量/ mm	溶陷系数
50	6.297	0.157	8.417	0.210
100	8.641	0.216	9.120	0.228
150	8.880	0.222	9.400	0.235
200	9.200	0.230	9.682	0.242
400	9.552	0.239	10.109	0.253

6.558~9.451 mm,溶陷系数为 0.164~0.239;双线法测得的溶陷量为 6.297~10.109 mm,溶陷系数为 0.157~0.253。根据溶陷性评价标准,由溶陷系数判定岩盐试样的溶陷程度为强溶陷。限于室内试验仪器尺寸所限,室内试验测得的溶陷量并不能确定岩盐的溶陷等级,JTG D30—2015《公路路基设计规范》指出盐渍土地基应根据溶陷量对其溶陷性进行评价,鉴于此,以下章节将开展岩盐夹层地基现场溶陷试验,以分析评价岩盐夹层地基的溶陷特性。

3 现场溶陷试验与结果分析

试验段(室内溶陷试验取样段)位于 G30₁₁ 线(青海境)察尔汗—格尔木高速公路察尔汗盐湖互通区发展大道段。该区地貌类型为湖积平原,地形较平坦。工程地质构成为,地基表层为 0~1.0 m 厚氯盐型盐壳层,密实;下层为低液限粉土,软塑,揭示厚度为 10.9 m,厚度未揭穿;地下水为表层潜水,水位为 1.50 m,第二层水为承压卤水,水头为 2~5 m。地下水和土对混凝土均具强腐蚀性。

3.1 试验方案

参照 JTG E40—2017《公路土工试验规程》,现场试验中选取承载板直径为 1.13 m,试坑直径为 3.4 m,通过在工字钢跨度范围内增加支点的方式,减少工字钢的挠度,保证平台的稳定。浸水压力取值不小于基底压力值,分级加荷的等级为 9 级。现场试验同样以单线法及双线法同步开展,具体过程参见相关试验规程。

3.2 计算方法

盐渍土地基试验土层的溶陷系数 δ_m 按下式计算:

$$\delta_m = \frac{s_m}{h_m} = \frac{(s_s - s_n)}{h_m}$$

(2)

式中: δ_m 为溶陷系数; s_m 为浸水压力作用下土层的溶陷量; s_s 为浸水饱和条件下地基的沉降量; s_n 为自然状态条件下地基的沉降量; h_m 为浸润深度。

浸润深度测定方法如下:

- (1) 注水前,通过钻探等手段进行取样,分层取样厚度宜为 0.1 m,取样深度宜为地下水位 0.5 m 处;对各土层的含水率 w_1 进行测定。
- (2) 浸水饱水并逐级加荷试验完成后,将试坑中的水排除。同样采用钻探等手段进行分层取样,并对各土层的含水率 w_2 进行测定。
- (3) $W_2 - W_1 \geq 1\%$ 的最大深度即为浸润深度。

3.3 试验结果分析

按照上述浸润深度的测定方法,经多组检测数据对比分析,试坑平均浸润深度为 100 mm,试验结果见表 9 及图 1~4。

最大加载量 120 kPa 施荷条件下,地基土溶陷系数采用单线法测定为 0.032,采用双线法测定为 0.046。

表9 溶陷系数试验结果(最大加载量 200 kPa)

压力/kPa	溶陷系数	
	单线法	双线法
125	—	0.020
150	—	0.063
175	—	0.194
200	0.020	0.125

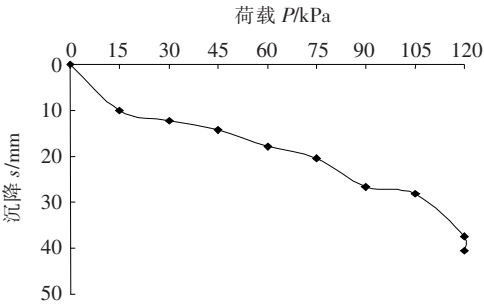


图1 单线法沉降曲线(最大加载量 120 kPa)

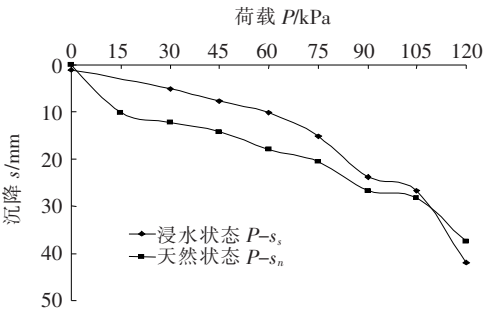


图2 双线法沉降曲线(最大加载量 120 kPa)

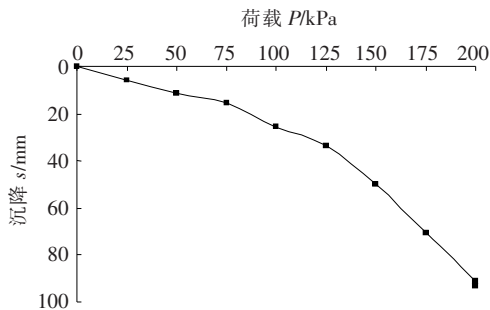


图 3 单线法沉降曲线(最大加载量 200 kPa)

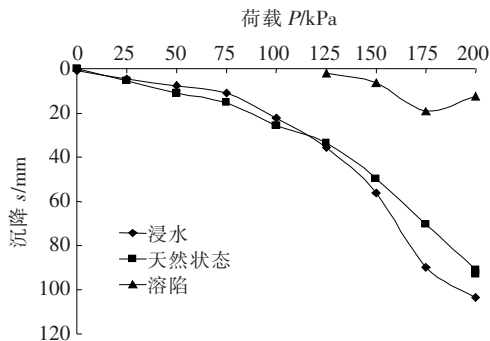


图 4 双线法沉降曲线(最大加载量 200 kPa)

从表 9 及图 1~4 中可以看出:

(1) 当施加荷载超过 75 kPa 时,无论是在天然状态还是浸水饱和状态下,地基沉降曲线均发生急剧下沉现象,沉降曲线斜率较大,沉降速率相对较快。说明现场地基溶陷起始压力为 75 kPa,地基土的沉降主要发生于溶陷起始压力以后。

(2) 双线法试验,荷载为 0~110 kPa 加载过程中,同一级荷载作用下,天然状态地基沉降量较浸水状态地基沉降量要大。分析其原因:浸水饱和后的岩盐地基在荷载压力的作用下产生了超孔隙水压力,排水固结缓慢,盐渍土体浸水饱和后增加的水分无法彻底排出,从而导致天然状态下地基的压缩变形量要大于压缩固结变形量。定义交点处压力(110 kPa)为真溶陷起始压力。在真溶陷起始压力以后,各级荷载作用下浸水状态的地基沉降量大于天然状态的地基沉降量。盐渍土的溶陷主要发生于真溶陷起始压力之后。

(3) 在真溶陷起始压力以后, $P-s_s$ 和 $P-s_n$ 两曲线上各对应压力下的沉降差,即为溶陷曲线 $P-s_m$ 。从图 4 溶陷 $P-s_m$ 曲线可以看出:盐渍土各级荷载下的溶陷量随着浸水压力的增加而增加,当压力增加到一定值时,溶陷曲线有一个明显的拐点,最大的溶陷性在该拐点对应的荷载处产生。溶陷试验过程存在一个峰值溶陷压力和峰值溶陷量(对应地存在峰值溶陷系数,为 0.194),图中溶陷 $P-s_m$ 曲线峰值溶陷压

力为 175 kPa。

(4) 现场溶陷试验压力 120 kPa,单线法溶陷量为 3.2 mm,溶陷系数为 0.032,双线法溶陷量为 4.6 mm,溶陷系数为 0.046;试验压力 200 kPa,单线法溶陷量为 2.0 mm,溶陷系数为 0.020,双线法溶陷量为 12.5 mm,溶陷系数为 0.125。按照 GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》溶陷等级和 JTG D30—2015《公路路基设计规范》溶陷性标准,岩盐夹层地基溶陷量满足高速公路、一级公路地基的技术要求,可作为公路地基。

(5) 无论最大加载量为 120 kPa 还是 200 kPa,采用双线法测得的盐渍土溶陷系数均大于单线法测得的溶陷系数,其原因主要在于两种方法中地基土具有不同的浸水条件。单线法浸水时试样已在上部荷载的作用下挤压,其空隙率、吸水性均逐级减小;而双线法是先浸水饱和再逐级加荷,因此单线法测得的溶陷量一般小于双线法测得的溶陷量。

(6) 对比室内溶陷试验和现场溶陷试验结果可知:针对岩盐试样(地基),室内测得的溶陷系数远大于现场测定值。主要原因是因为两者浸水与受力环境不同,岩盐的溶陷主要是易溶盐的溶解,对于室内试验而言,浸水是在封闭环境下,水中易溶盐的溶解是受压的岩盐试样自身的溶解,溶质来自于岩盐自身;对于现场试验而言,试坑内易溶盐的溶解来自于受压岩盐自身和试坑周围盐分的供应。对于达到相同浓度的饱和卤水,现场试验受压岩盐溶解量要少。再者,室内试验所施加的荷载压力由试样全部承受,且受尺寸效应的影响;而现场试验对象为一完整的、且具有水平面无限大的地基结构层,起到了应力扩散的作用,实际所受压力较小。

4 结论

(1) 对岩盐室内溶陷试验仪器进行改进,试验压力为 50~400 kPa,单线法测得岩盐的溶陷量为 6.558~9.451 mm,溶陷系数为 0.164~0.239;双线法测得的溶陷量为 6.297~10.109 mm,溶陷系数为 0.157~0.253,岩盐试样具有强溶陷的工程特性。限于试验环境条件与仪器尺寸效应等影响,室内溶陷试验并不能真正反映岩盐的实际溶陷性。

(2) 进行了现场溶陷浸水载荷试验。采用双线法测定时,存在一个真溶陷起始压力值,该压力值是指自然状态和浸水饱和状态下地基沉降量的临界点,一般