

黄土盐渍土湿陷与溶陷特性研究 ——以 G1816 高速景泰至中川机场段为例

罗建波¹, 李源², 彭文泰¹, 万岑³

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410219;

2. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 以 G1816 乌海至玛沁国家高速公路景泰至中川机场段项目地基土为研究对象, 分析黄土盐渍土的湿陷、溶陷变形特性, 通过湿陷试验、溶滤变形试验、溶陷试验揭示其变形机理, 并结合含盐量-变形机制关系提出分区域针对性地基处理措施建议。研究结果表明, 黄土盐渍土遇水变形由湿陷变形和溶陷变形共同构成; 采用浸泡饱和盐溶液可测得试样湿陷变形系数, 通过溶滤试验可测得试样溶陷系数; 当含盐量 $< 0.4\%$ 时土体变形以湿陷变形为主, 含盐量 $> 0.7\%$ 时溶陷变形占比显著提升; 本项目区域黄土盐渍土含盐量大多 $< 0.4\%$, 以湿陷变形为主, 地基处理分区域采用强夯、挖除、换填等方式, 并做好路床、路基两侧的排水以及基础防腐蚀措施。

关键词: 黄土盐渍土; 湿陷; 溶陷; 地基处理

中图分类号: TU448

文献标识码: A

Study on Collapsibility and Dissolution Settlement Characteristics of Loess Saline Soil ——A Case Study of Jingtai to Zhongchuan Airport Section of G1816 Expressway

LUO Jianbo¹, LI Yuan², PENG Wentai¹, WAN Cen³

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410219, Hunan, China;

2. Henan Zhonggong Design & Research Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China;

3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Taking the foundation soil of G1816 Wuhai-Maqin National Expressway from Jingtai to Zhongchuan Airport as the research object, the collapsibility and dissolution settlement characteristics of loess saline soil were analyzed, and the deformation mechanism was revealed through the collapsibility test, filtration test and dissolution test. Targeted zonal treatment strategies were proposed combined with the salt content-deformation mechanism revealed in this paper. The results show that the water-induced deformation of saline loess soil consists of both collapsibility and dissolution settlement. The collapsibility coefficient of the sample can be measured by soaking the saturated salt solution, and the dissolution coefficient can be measured by leaching test. When the salt content is less than 0.4% , the sample is mainly dominated by collapse deformation, and when the salt content is more than 0.7% , the proportion of dissolution deformation increases significantly. The loess saline soil in the project area has a salt content of mostly less than 0.4% , which is mainly characterized by collapse. The foundation treatment adopts dynamic compaction, excavation and replacement filling in different zones, and the drainage of roadbed, both sides of the subgrade and foundation anti-corrosion measures should be well done.

Key words: loess saline soil; collapsibility; dissolution settlement; foundation treatment

收稿日期: 2025-07-24

作者简介: 罗建波, 工程师, 硕士, 研究方向为工程勘察、地质 BIM

1 引言

我国西北部地区地处内陆,气候以干旱、半干旱为主,年降水量极少,这为盐渍土的形成提供了条件,同时该地区也是我国黄土的主要分布区域。因此,在部分区域,如陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、内蒙古等地,既分布有湿陷性黄土,又分布有大量盐渍土^[1]。湿陷性黄土是指在一定压力下受水浸湿后,土的结构被迅速破坏,并产生显著附加下沉的黄土^[2];盐渍土是指易溶盐含量介于0.3%~20%之间,并具有溶陷或盐胀等工程特性的土^[3]。盐渍湿陷性黄土既具有湿陷特性,又具有溶陷特性,属于双重特殊性岩土。近年来,随着国家“一带一路”倡议的实施,西部地区基础建设项目越来越多,许多项目不可避免需在这类岩土上施工。现行相关规范尚未对这类特殊土作出明确规定,因此在工程实践中,该土体究竟应按湿陷性黄土、盐渍土处理,还是采用其他处置方式,已成为行业面临的一大难题。

一直以来,相关研究多单独探讨黄土的湿陷性与盐渍土的溶陷性。苏联地质学家波波夫研究了黄土中易溶盐对于湿陷的影响,提出当含盐量较低时,易溶盐可充当黄土颗粒间的胶结介质;遇水渗透后,结晶盐溶解会引发湿陷^[4]。蔡正银等认为,黄土中的盐分起到了维持黄土结构的重要作用,其浸水溶解是黄土湿陷的重要诱因^[5]。高树森等针对碎石类盐渍土开展溶陷试验,证实溶陷变形本质上是土颗粒间结晶盐的溶解造成的^[6]。有学者通过离心模型试验,得出了氯化物是诱发盐渍土溶陷变形的的主要盐分^[7]。

以上研究揭示了黄土湿陷与盐渍土溶陷的基本规律,但关于湿陷与溶陷定量区分及含盐量影响的系统研究仍较少^[8]。本文在上述研究的基础上,以G1816乌海至玛沁国家高速公路甘肃景泰至中川机场段湿陷性黄土盐渍土为研究对象,分析其湿陷与溶陷特性的作用机制及规律,并针对

性地提出对该类特殊性土在工程实践中的处理建议。

2 工程概况

G1816乌海至玛沁国家高速公路景泰至中川机场段位于甘肃秦王川盆地及黄土丘陵地区,地属温带大陆性气候,干旱少雨,年平均气温为8.2℃,年平均降水量为184~261 mm,年平均蒸发量为1 880~3 085 mm。测区内地层自上而下依次为:素填土(厚0.5~2.0 m)、马兰黄土(厚3~8 m)、黄土状粉土(厚2~6 m),下伏新近系泥岩。测区地层整体分布较平缓;地下水位埋深15~25 m,地下水类型为潜水,含水层主要为黄土状粉土,渗透系数取值范围为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-6}$ cm/s;地下水矿化度为2.5~3.8 g/L,属微咸水。测区无常年径流河道,区域盐渍土主要由常年灌溉作用使土体盐分富集、含盐量升高而形成。土体盐渍化呈条带状沿灌溉渠系两侧分布:渠系附近为中盐渍土(易溶盐含量0.5%~1.0%),远离渠系区域为弱盐渍土(易溶盐含量0.3%~0.5%),整体盐渍化程度由南向北逐步递减。据调查,场地路基范围内地层主要为马兰黄土、黄土状粉土,土体存在Ⅱ~Ⅲ级自重湿陷;盐渍土以氯盐渍土、亚氯盐渍土为主,局部发育为亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土;盐渍化等级整体为弱盐渍土为主,局部为中盐渍土。场地硫酸钠含量在0.1%~0.25%之间,可忽略其盐胀性。区内黄土状盐渍土厚度为1~2 m。

3 试验方案

3.1 试验材料

本次研究共选取25组细粒土土样开展试验分析,易溶盐试验测试结果表明,研究区盐渍土的阴离子主要为 Cl^- 、 SO_4^{2-} ,阳离子以 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 为主,易溶盐成分主要为 NaCl 、 Na_2SO_4 。试验统计成果详见表1。

表1 地基土易溶盐试验统计结果表

取值	单位	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH
最小值	mg/kg	337	961	226	0	930.6	80.2	12.2	7.86
最大值	mg/kg	2 748	10 807	366	120	3 291.8	3 056	273	8.75
统计值	mg/kg	1 462	3 637.8	292.2	37	1 936.9	683.3	56.596	8.344

3.2 试样制备

本试验每组土样采用环刀法制备 $50 \text{ cm}^2 \times$

2 cm原状试样4份,同组含盐试样密度差应小于 0.03 g/cm^3 ,试样底部放置PE半透明膜,利用

PE 膜的憎水性与低渗透特性,阻断试样与试验装置之间的盐分渗透通道,防止试验过程中土样内部结晶盐随水分流失,保证试验数据准确性。

3.3 试验原理

本研究需区分的两种变形为:

(1) 湿陷变形:黄土骨架遇水后结构迅速破坏产生的下沉^[9];

(2) 溶陷变形:土中结晶盐遇水溶解,被渗流带走导致的下沉^[10]。

二者的根本区别在于结晶盐是否溶解。基于此,本文设计了三种对比试验,分别采用不同的浸泡液体来控制盐的溶解状态:

①湿陷试验:采用饱和 NaCl + Na₂SO₄ 溶液浸泡。该溶液中盐浓度达到常温下最大溶解度,土中结晶盐几乎不溶解,因此测得的变形仅为湿陷变形,对应系数 δ_s 。

②溶滤变形试验:在湿陷试验完成后,将饱和盐溶液更换为纯水继续渗透。此时结晶盐开始溶解并被渗流带走,产生的附加变形即为溶陷变形,对应系数 δ_w 。

③溶陷试验:直接采用纯水浸泡,分级加荷。在该条件下湿陷与溶陷同时发生,测得的变形为两者之和,对应系数 δ_{rx} 。

上述三种试验均采用双线法,参考已有研究^[10],双线法较单线法更适用于该类土体。通过对比 δ_s 、 δ_w 、 δ_{rx} 三者之间的关系,即可定量区分湿陷与溶陷对总变形的贡献。

3.4 试验方法

3.4.1 湿陷试验

本试验采用双线法测定湿陷系数,流程与稳定标准依据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)。取 2 个环刀原状试样(同组密度差 $\leq 0.03 \text{ g/cm}^3$),分别施加相同压力等级(0 ~ 200 kPa, 每级 50 kPa),稳定标准为每级下沉量 $\leq 0.01 \text{ mm/h}$ 。两个试样的处理路径及测定参数如下:

(1) 试样 A (天然湿度加荷→浸盐溶液):在天然湿度下分级加荷至最后一级压力,下沉稳定后,记录试样高度 h_p ;然后将试样浸入饱和 NaCl 溶液(360 g/L, 25℃)和饱和 Na₂SO₄ 溶液(28 g/100 mL, 25℃)中 h'_p ,保证土中结晶盐不溶解,待附加下沉稳定后记录试样高度 h'_p 。由此测得天然湿度压缩稳定后再浸盐溶液产生的附加下沉量。

(2) 试样 B (先浸盐溶液→分级加荷):先

浸入上述饱和盐溶液,待附加下沉稳定后,在浸水饱和状态下分级加荷至最后一级压力,记录每级压力下的稳定高度 h'_p 。由此,测得的是浸盐饱和状态下的压缩变形曲线。

试样 A 在最后一级压力下浸水饱和后,附加下沉稳定高度与试样 B 在最后一级压力下下沉稳定后的高度不一致且相对差值不大于 20% 时,以试样 A 的结果为准,对试样 B 的试验结果进行修正,相对差值大于 20% 时,重新试验。

湿陷系数按式(1)计算:

$$\delta_s = (h_p - h'_p)/h_0 \quad (1)$$

式中, δ_s 为湿陷系数,无量纲;式中 h_0 为试样原始高度(mm)。两个试样共同测得的 $h_p - h'_p$ 即为剔除盐溶解影响后的纯湿陷变形量。

本次试验采用浸泡饱和 NaCl 溶液和饱和 Na₂SO₄ 溶液处理,可避免土中结晶盐大量溶解引起土体变形,防止最终试验结果偏大。

3.4.2 溶滤变形试验

溶滤变形试验是湿陷变形的继续,其目的是在测定湿陷系数后,提高判别稳定标准,测定土体内盐分在水中长期溶滤后引起的剩余湿陷变形量,实则可认为溶陷量。本试验稳定标准依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)规定执行,在湿陷试验完成后,将饱和 NaCl、Na₂SO₄ 溶液更换为纯水,继续渗透,根据标准中溶滤变形试验要求,每隔 2 h 记录 1 次变形读数,24 h 后每天记录 1 ~ 3 次,直至变形稳定^[11]。

溶滤变形系数按式(2)计算:

$$\delta_w = (h'_p - h_s)/h_0 \quad (2)$$

式中, δ_w 为溶滤变形系数(即实际溶陷系数),无量纲; h_s 为在某级压力下长期渗透引起的溶滤变形稳定后的试样高度(mm)。

3.4.3 溶陷试验

根据《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014),采用双线法测定土样溶陷系数,变形稳定标准执行规范要求:每级荷载下每小时变形量不大于 0.01 mm。取两个相同的原状土样,一个不加水,逐级加荷做压缩试验,一个在浸水(纯水)溶滤条件下逐级加荷做压缩试验,加荷范围为 0 ~ 200 kPa,变形稳定标准为每级荷载下每小时变形量不大于 0.01 mm^[3]。

溶陷系数(变形系数)按式(3)计算:

$$\delta_{rx} = (h_p - h'_p)/h_0 \quad (3)$$

式中, δ_{rx} 为溶陷系数(湿陷 + 溶陷耦合系数),无量纲; h_p 为在压力 P 作用下,变形稳定

后的试样高度 (mm); h'_p 为在压力 P 作用下, 浸水溶滤变形稳定后的试样高度; h_0 为试样的原始高度 (mm)。

需要说明的是: 本试验采用纯水浸泡, 与 3.4.1 节中采用饱和盐溶液 (抑制盐溶解) 的条件不同。在纯水浸泡下, 土体中的结晶盐会发生溶解, 因此试样的总变形由两部分构成——黄土的湿陷变形与盐渍土的溶陷变形。由式 (3) 计算得到的系数实际上是湿陷系数与溶陷系数之和, 并非单纯的溶陷系数。为便于后文分析与表述, 本文将 δ_{rx} 统称为变形系数。

4 试验结果分析

基于研究内容, 对试样试验数据进行了统计分析, 得出了不同条件下湿陷系数 δ_s 、溶滤变形系数 δ_w 、变形系数 δ_{rx} 与压力和含盐量之间的关系, 并对其特点及成因进行了分析。

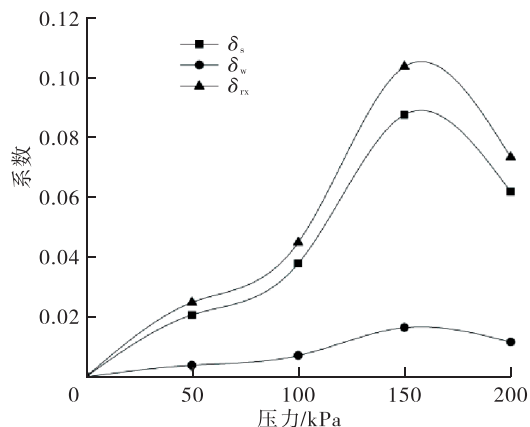
4.1 湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数与压力的关系

盐渍黄土的变形系数随压力增大呈非线性变化规律^[12]。由图 1 可以看出, 两种类型盐渍土的湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数随压力增大, 其变化规律相同。初始系数随压力增大而增大, 压力由 100 kPa 增加到 150 kPa 时, 系数增幅变大; 超过 150 kPa 以后系数逐渐减小, 即存在峰值压力, 峰值压力对应的系数为峰值系数。本次试验硫酸盐盐渍土、氯盐盐渍土试样的湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数对应的峰值压力都为 150 kPa。图 1 中溶滤变形系数 (δ_w) 曲线斜率绝对值为 0.000 1 ~ 0.000 2, 远小于湿陷系数 (δ_s , 斜率绝对值为 0.000 3 ~ 0.001) 和变形系数 (δ_{rx} , 斜率绝对值为 0.000 4 ~ 0.001 4), 说明溶滤变形系数受压力影响最小。试验采用饱和盐溶液浸泡试样, 过程中虽有少量结晶盐溶解, 但该部分盐分含量极低, 对试验结果影响有限。综上, 试样变形以湿陷为主要形式, 后续试验可针对此结论开展进一步验证。

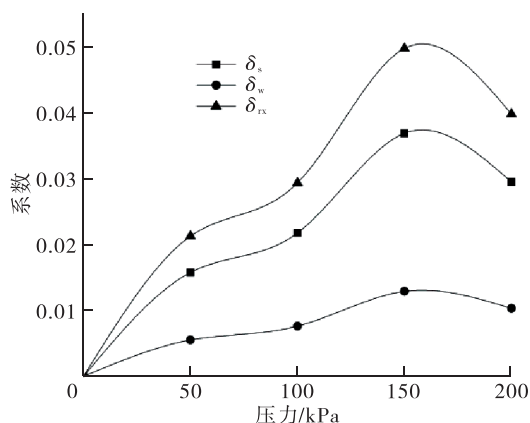
4.2 湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数与含盐量的关系

图 2 为试样湿陷系数 δ_s 、溶滤变形系数 δ_w 、变形系数 δ_{rx} 与含盐量的关系曲线, 从图中可发现溶滤变形系数随含盐量增加而增加。这是因为溶滤变形系数是在湿陷试验结束后浸泡纯水进行的, 此时试样的变形主要是由结晶盐溶解引起

的, 试样含盐量越大, 结晶盐溶解量越大, 变形系数也随之增大。



(a) 硫酸盐盐渍土



(b) 氯盐盐渍土

图 1 不同类型盐渍土湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数与压力的关系曲线

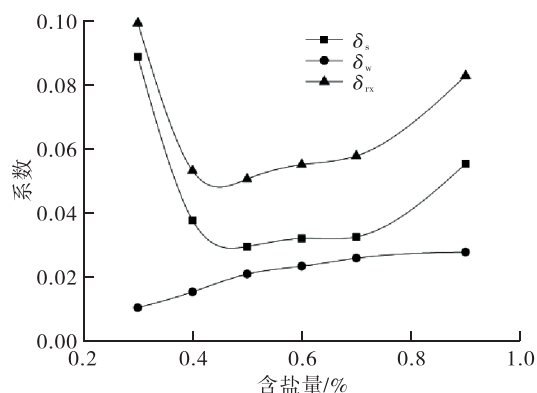


图 2 δ_s 、 δ_w 、 δ_{rx} 与含盐量的关系曲线

对于湿陷系数, 湿陷试验采用饱和盐溶液浸泡, 土中结晶盐基本不发生溶解, 湿陷变形仅由黄土原生骨架结构浸水溃散产生, 因此湿陷系数无随含盐量升高或降低的单调变化趋势; 曲线出现小幅波动主要是由原状土孔隙、颗粒组成天然

不均匀导致,二者不存在显著相关关系。对于变形系数,当含盐量小于 0.4% 时,系数随含盐量增加而减小;当含盐量超过 0.4% 以后,系数随含盐量增加而增大;在含盐量超过 0.7% 以后增幅变大,但该系数曲线走势主要与湿陷系数曲线相同,说明本次试验试样的变形总体以湿陷变形为主。受条件限制,本次研究未进行更大含盐量对比试验,预测含盐量在 0.7% ~ 1.0% 范围内某一值时,湿陷系数与溶滤变形系数相等,试样湿陷变形与溶陷变形处于相持状态;超过一定值时,湿陷变形作用相对减弱,溶滤变形作用将处于主导地位,试样变形以结晶盐溶解为主。

4.3 湿陷系数、溶滤变形系数、变形系数之间的关系

本次研究设置了三组不同浸泡条件的对比试验,分别得到纯湿陷系数 δ_s 、纯溶滤变形系数 δ_w 以及耦合总变形系数 δ_{rx} 。其中,采用饱和盐溶液浸泡仅能得到黄土骨架溃散带来的纯湿陷变形;在湿陷试验完成后更换纯水持续渗流,盐分溶解流失产生的附加沉降为纯溶陷变形;而规范溶陷试验直接使用纯水浸泡,土体骨架湿陷与盐分溶陷会同步发生,测得的 δ_{rx} 是两类变形叠加后的总变形。

从变形物理机理来看,同一荷载作用下,湿陷变形与溶滤变形相互独立、不存在抵消作用,总变形理论上等于两类单一变形之和,即 $\delta_s + \delta_w$ 应与 δ_{rx} 数值接近。图 3 统计结果显示, δ_s 与 δ_w 相加后的曲线和 δ_{rx} 曲线基本重合,验证了该叠加规律成立,也说明本研究通过分段浸泡分离湿陷、溶陷变形的试验方案合理有效。由此可知按照溶陷试验方法测得的变形系数 δ_{rx} 并非溶陷系数,溶滤变形系数 δ_w 才是由溶陷变形引起的真正的溶陷系数。

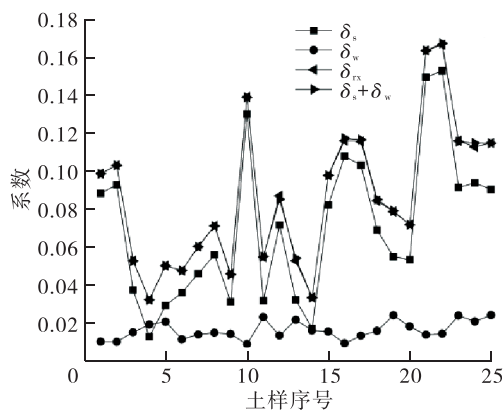


图3 δ_s 、 δ_w 、 δ_{rx} 的相互关系

根据《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)规定,如将变形系数 δ_{rx} 定为溶陷

系数,则试样基本为中等~强溶陷性,溶陷等级为Ⅱ~Ⅲ级,按照规范需对地基土的溶陷性进行处理。如将溶滤变形系数 δ_w 定为溶陷系数,则试样皆为轻微溶陷性,溶陷性等级为Ⅰ级,此时无需对盐渍土的溶陷性进行处理。

根据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018),试样湿陷性等级为Ⅱ~Ⅲ级,需对地基土的湿陷性进行处理。

5 地基处理方法

针对湿陷性黄土地基,工程处理以地基土体改良为主,同时结合防水、结构防护等手段,综合治理并消除土体湿陷性。地基土的处理方法包括换土垫层、预浸水、复合地基、强夯、挤密等。对于以溶陷性为主的盐渍土地基,其地基处理主要目的是减小地基的溶陷性,可采取换土垫层、强夯、预浸水、浸水预溶+强夯、浸水预溶+预压、振冲、物理化学处理等方法^[13]。综上,对于黄土盐渍土地基需验证地基土变形的主导因素,当湿陷性强、溶陷性弱时,可考虑以降低湿陷性为主的地基处理方法;当湿陷性弱、溶陷性强时,可考虑以降低溶陷性为主的地基处理方法;当湿陷性、溶陷性都较强时,需同时解决地基湿陷性及溶陷性,具体可采用换土垫层、预浸水、强夯、浸水预溶+强夯等处理方法。

5.1 主要处理方法的适用情况与工程效果

(1) 预浸水法:适用于大面积、厚层(>5 m)湿陷性黄土盐渍土,含盐量<0.4%且地下水位较低的区域。该法通过在场内地内设置浸水坑,使水缓慢渗透入地基土,提前完成湿陷变形。实施后,工程效果为消除80%以上的自重湿陷性,处理后地基湿陷等级降至Ⅰ级,但处理周期较长(30~60 d),且需做好排水防盐渍化扩散措施。

(2) 强夯法:适用于浅层(<6 m)黄土盐渍土,含盐量0.3%~0.7%且湿陷性为主、轻微溶陷性的区域。该法采用80~200 kN夯锤进行点夯+满夯。实施后,工程效果为提高地基承载力(增幅30%~50%),消除浅层湿陷性,处理后溶滤变形系数<0.015,施工速度快、经济性好,为本项目主要采用的方法。

(3) 浸水预溶+强夯法:适用于含盐量0.7%~1.0%且湿陷与溶陷相持状态的黄土盐渍土区域。该法先采用低水量浸水预溶,使土中结晶盐部分溶解并完成初期溶陷变形,再进行强夯处理。实施后,工程效果为同时消除60%以上湿陷性和70%以上溶陷性,处理后地基整体变形系数<0.05,能够解决单一方法处理不彻底的问题。

5.2 本项目分区针对性地基处理策略

针对 G1816 乌海至玛沁国家高速公路景泰至中川机场段项目,结合盐渍化空间分布、含盐量-变形机制关系及地层分布特征,按“分区域、分等级、针对性”原则制定地基处理策略,具体如下:

(1) 弱盐渍土区(含盐量 $<0.4\%$):为项目主要分布区域(占比85%以上),地基变形以湿陷为主($\delta_s=0.04\sim0.17$, $\delta_w=0.01\sim0.015$),采用强夯法处理,点夯能级 $1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$,满夯能级 $600\text{ kN}\cdot\text{m}$,处理深度 $4\sim6\text{ m}$,消除浅层Ⅱ~Ⅲ级自重湿陷性。

(2) 中盐渍土区(含盐量 $0.4\%\sim0.7\%$):沿灌溉渠系两侧呈条带状分布,湿陷为主、溶陷占比略有提升($\delta_w=0.015\sim0.02$),采用强夯+换填复合处理,强夯处理后换填 50 cm 厚级配砂石垫层,阻断盐分向上迁移,同时提高路基整体稳定性。

(3) 盐渍化过渡区(含盐量 $0.7\%\sim1.0\%$):局部小范围分布,湿陷与溶陷相持,采用浸水预溶+强夯法处理,预浸水水头 0.5 m ,浸水时间 $7\sim10\text{ d}$,预溶完成后进行强夯,同时设置防渗隔离层,防止地下水入渗再次引发溶陷。

(4) 全区域配套措施:所有处理区域均做好路床及路基两侧的排水系统(设置盲沟、边沟,采用防渗混凝土衬砌),防止雨水、灌溉水入渗;对桥梁、涵洞等基础采用防腐涂层+级配砂石垫层处理,防止氯盐、硫酸盐腐蚀基础结构。

6 结论

(1) 对于不同类型的黄土盐渍土,其湿陷变形随压力的变化规律相同,初始变形随压力增大而增加,在达到峰值压力后,变形随压力增大而减小,本项目试样峰值压力均为 150 kPa ,该结论适用于含盐量 $0.3\%\sim1.0\%$ 、浅层($1\sim2\text{ m}$)黄土状盐渍土,加压范围为 $0\sim200\text{ kPa}$ 的工程条件。

(2) 通过浸泡饱和盐溶液($\text{NaCl } 360\text{ g/L}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 28\text{ g/100 mL}$ 水, 25°C)、纯水分别进行湿陷试验、溶滤变形试验、溶陷试验,很好地区分了三种试验系数,验证了湿陷试验、溶滤变形试验试样变形量之和与溶陷变形试验试样变形量相等,从而得出溶滤变形系数为试样真正的溶陷系数的结论。

(3) 溶滤变形系数随试样含盐量增大而增大,含盐量与变形主导的关系可分为三个区间:

含盐量 $<0.4\%$ 时,以湿陷变形为主,含盐量为 $0.4\%\sim0.7\%$ 时,湿陷与溶陷处于相持状态;含盐量 $>0.7\%$ 时,溶陷变形占比显著提升(含盐量 $0.7\%\sim1.0\%$ 时两者相等后溶陷继续主导)。据此提出分区地基处理策略:含盐量 $<0.4\%$ 的区域以消除湿陷性为主(采用强夯、挖除、换填);含盐量 $0.4\%\sim0.7\%$ 的区域需兼顾湿陷与溶陷处理(采用强夯+换填或浸水预溶+强夯);含盐量 $>0.7\%$ 的区域以消除溶陷性为主(采用浸水预溶+强夯)。本项目主要分布区含盐量 $<0.4\%$,采取强夯、挖除、换填等处理方式消除地基土湿陷性,局部中盐渍土区采用复合处理,全区域配套排水及基础防腐蚀措施,处理后地基湿陷等级降至Ⅰ级,溶陷性为轻微,满足高速公路工程建设要求。

参考文献:

- [1] 辛明静,白雪晓. 湿陷性黄土盐渍土在工程实践中的探讨[J]. 山西建筑,2019,45(12):62-63.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 湿陷性黄土地区建筑标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 盐渍土地区建筑技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [4] 孙德安,张谨绎,宋国森. 氯盐渍土土一水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(4):955-960.
- [5] 蔡正银,吴志强,黄英豪,等. 含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1580-1586.
- [6] 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.
- [7] 杨晓华,张志萍,张莎莎. 高速公路盐渍土地基溶陷特性离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2010,30(2):5-9.
- [8] 牛丽思,张爱军,王毓国,等. NaCl 含量对伊犁原状黄土湿陷和溶陷特性的影响[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):67-71.
- [9] 陈素萍. 黄土的湿陷系数试验分析[J]. 内蒙古科技与经济,2009(17):76,78.
- [10] 张洪萍,杨晓华. 盐渍土溶陷特性的试验研究与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):95-100.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [12] 拓文鑫,倪万魁,聂永鹏. 干湿循环下盐渍压实黄土湿陷性劣化机理研究[J]. 工程地质学报,2024,32(2):420-429.
- [13] 范恩让,张伟,李凯,等. 黄土状盐渍土的工程特点及地基处理方法[J]. 岩土工程技术,2001(1):27-30.