

天山北麓黄土区受易溶盐影响的变形模式

程文瑜, 肖翔毅

(新疆大学地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830017)

摘要:针对新疆天山北麓冲积平原广泛分布的湿陷性黄土变形模式,开展易溶盐对黄土湿陷、溶陷作用效应的区分特性试验研究。对5种易溶盐含量下原状黄土样的原含水率、浸饱和 Na_2SO_4 溶液和浸纯水的“三线法”压缩试验,获取易溶盐含量及其赋存状态对黄土湿陷、溶陷特性的影响规律,构建不同含盐量的黄土湿陷及溶陷变形量计算模型。研究表明:含盐量变化对提高颗粒间的骨架作用存在临界值,在小于8‰和大于23‰时湿陷为变形主要模式,而在8‰~23‰时溶陷为变形主要模式;采用Giddings和Extreme模型函数对逐级压力下的各盐含量与变形系数进行数学关系拟合,基于FreundlichEXT回归模型构建研究区域土样不同含盐量的起始压力函数方程。研究成果为该区黄土易溶盐的湿陷与溶陷共同作用机理研究、结构荷载设计和变形计算提供了科学依据。

关键词:天山北麓平原黄土;易溶盐;湿陷特性;溶陷特性;计算模型

中图分类号: P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)13-0100-10

黄土广泛分布于新疆各地,主要在山前洪积扇中下部及山间洼地区分布。湿陷性是黄土区别于其他土类的显著特征,也是引发黄土地质灾害和黄土地基失稳的主要原因。由于黄土湿陷受众多因素的影响极为复杂,黄土湿陷机理的研究一直是黄土力学的重点和难点。易溶盐是黄土的重要组成部分,其对胶结土体颗粒、维持黄土结构起着重要作用,是影响黄土强度和湿溶陷特性的重要原因。乌鲁木齐地区作为“一带一路”核心发展区,广泛分布的黄土位于天山北麓冲积平原上,黄土场地工程性质研究成为该区岩土工程建设的迫切需要。已有研究关于易溶盐对黄土湿、溶陷作用机理的区分较少,在该地区开展易溶盐对黄土湿陷作用和溶陷作用效应区分研究十分必要。

易溶盐含量较高的黄土,在上覆压力和浸水作用下产生湿陷变形,黄土浸水变形可以分为由结构破坏引起的湿陷和由易溶盐溶解引起的溶陷两部分,两者同时发生,两者之和构成传统意义上的湿陷量。秦建平^[1]将黄土湿陷变形分成湿陷变形和溶陷变形两部分,大大促进黄土湿陷研究向精细化、机理化发展,是黄土力学发展的需要。赵天宇等^[2]指出黄土遇水时 Na_2SO_4 的溶解与结晶均有可能发生,当强硫酸根离子含量高时,极易吸附水分子结

晶形成芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)晶体,体积膨大4.18倍,故含硫酸盐的黄土浸水时可能造成溶陷也可能造成浸水膨胀。许健等^[3]通过硫酸盐渍土溶陷试验指出硫酸盐渍土的溶陷系数随含盐量增大而增大,土体中硫酸钠浓度大于该温度下的溶解度且过饱和程度很高时,较高温下即可析出芒硝晶体,体积会急剧增大。高远和郑建国^[4]指出黄土湿陷机理假说主要有溶盐假说、毛细管凝聚力假说、水膜楔入假说、欠压密理论等。国内外学者基于各种理论假设,通过现场浸水试验和室内固结试验从土力学、数理统计及黄土微观结构3方面开展了对黄土湿陷机理的大量研究工作。目前,黄土含盐量对其溶陷特性的影响是土力学研究领域的热点问题,研究及理论不断发展完善。张爱军等^[5]、赵庆玉等^[6]、牛丽思和张爱军^[7-8]提出盐分对胶结黄土颗粒、增强土骨架强度有着重要的作用,在湿陷过程中盐分的作用不容忽视。程文瑜和储春妹^[9]针对天山北麓湿陷性黄土收缩性规律,提出干湿循环次数与收缩系数关系的线性回归方程,收缩系数随循环次数的增加而减小,且呈较好的指数关系。任文博等^[10]利用基本物性指标预测湿陷性黄土的湿陷性系数,提出组合预测模型精度整体高于单一预测模型,且提出的离散型二项式系数组合模型各精度指

收稿日期: 2025-02-02

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01C111)

作者简介: 程文瑜(1977—),女,重庆人,硕士,讲师,研究方向为地质工程;肖翔毅(2004—),男,河南周口人,研究方向为地质工程。

标均为最优。高英等^[11]针对季节冻土区黄土湿陷性规律,指出冻融循环效应导致黄土的结构和物理性质发生变化,从而影响黄土的湿陷变形特性,土体内部团粒、孔隙结构的变化规律印证了冻结温度的降低与黄土表现的宏观湿陷变形量逐渐减小的变化规律具有相关性。蔺广花等^[12]采用双线法分析不同含水率、压力、易溶盐种类和易溶盐含量对黄土湿陷性的影响,指出与无盐黄土相比,易溶盐黄土湿陷系数有一定下降,不同种类易溶盐对黄土湿陷变形影响不同。张琦等^[13]采用“双线法”溶陷试验研究盐渍土地基溶陷性,主要分析了含盐量对溶陷系数的影响,指出随含盐量增高溶陷系数增大。张婉等^[14]指出伊犁黄土压缩变形在高压(400 kPa 以上)时逐渐增大,是变形的主导因素,在低含水率(6.6%)和低压(200 kPa 以下)条件下,湿陷系数随着干密度的增加而减小。张严等^[15]指出地表沉降过程可按其沉降速率变化分为加速沉降段、减速沉降段和匀速沉降段,其中减速沉降段是水分入渗和场地黄土发生湿陷的主要阶段,占浸水时间的 81%,完成了最终地表沉降量的 87.14%。Niu 等^[16]通过伊犁黄土湿陷试验,指出随含水率的增加,湿陷变形占总变形的比例逐渐降低。Ling 等^[17]从黄土的微观结构方面论证结构强度与湿陷的关系。Xing 和 Liu^[18]通过塌陷黄土地区桩基负表皮摩擦力影响因素现场试验说明垂直荷载对湿陷变形的影响规律。Garey 和 Fox^[19]通过浅水位植被过滤带的受控实验与建模说明水盐运移对黄土湿陷的影响。Rui 和 Yin^[20]、Li 等^[21]通过荷载作用下桩在黄土地基随时间的变化说明垂直荷载对湿陷性黄土作用的时间效应。

通过上述研究成果看出,文献中独立研究黄土湿陷性或溶陷性的较多,多数未将由土粒结构改变引发的湿陷变形和由易溶盐溶解引起的溶陷变形进行划分。而且含盐量的赋存状态对黄土湿陷溶陷规律的影响具有地域性的差别,原有的研究结果

不具有针对性。新疆黄土区研究多集中在强度及其影响参数相关性上,对黄土变形规律的研究资料很少。针对以上问题,本文采用天山北麓冲洪积平原黄土为研究对象,开展不同易溶盐含量下原状黄土样的原含水率、浸盐溶液和浸纯水“三线法”压缩试验,通过易溶盐含量及其赋存状态对黄土湿陷特性和溶陷特性的影响规律,拟合考虑含盐量的黄土湿陷及溶陷变形量的计算模式,提出一种简单可行的黄土湿陷和溶陷区分方法,以期为当地易溶盐影响下黄土湿陷与溶陷共同作用机制提供研究数据,也为干旱区工程建设中黄土湿陷和溶陷变形分析提供参考。

1 试验材料

天山北麓冲洪积平原区黄土广泛分布在昌吉市中部,海拔 400~1 000 m,试验中所用原状土样取自昌吉乌-伊公路以北山前平原区, Q₃ 黄土,厚 3~23 m,下层为浅灰色的砂砾石,根据浅基础埋置深度确定取样深度 4~5 m。通过室内土工试验获得其各项基本物理性质指标和易溶盐离子含量,见表 1、表 2(本文的含水率是指含水质量分数)。

2 试验方法

2.1 制备试样

按照《土工实验规程》(GB/T 50123—2019)用环刀法制样,环刀内部直径为(61.8±0.2)mm,高为(20.0±0.2)mm。盐溶液根据易溶盐离子检测结果采用 Na₂SO₄、NaCl、NaHCO₃ 摩尔质量进行配置,盐的组分 Na₂SO₄ 占比 66.4%,NaCl 占比 20.4%,NaHCO₃ 占比 13.2%,盐溶液总含量为 3.035 g/kg。

采用水膜转移法制备含易溶盐黄土试样,向制备完成的原状试样滴加盐溶液,制备不同含盐量的黄土试样。基于同地区黄土的易溶盐含量为 3.5~28 g/kg^[5],设定土样所含最多易溶盐的浓度梯度为 5、8、14、20、26 g/kg 共 5 种开展研究,控制土样含水率为天然含水率。5 组含盐量试件,每组做 9 个试件。

表 1 土样基本物理指标

物理指标	含水率/%	天然密度/ (g·cm ⁻³)	饱和度/%	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数 I _p
指标取值	7.62	1.52	12.77~26.00	0.79~1.16	15.81	23.37	7.56

表 2 土样中的易溶盐离子含量

离子类型 元素类型	阳离子				阴离子			
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
元素含量/(g·kg ⁻¹)	0.446	0	0.075	0.193	0.000	0.331	0.431	1.559

注:取样深度为 4~5 m;总含量为 3.035 g/kg。

试样制备完成后用保鲜膜包裹,放入保湿缸中养护 72 h,确保试样中盐分扩散均匀。然后放置于阴凉通风处 72 h 以上再进行试验,如图 1 所示。



图 1 试样制备

2.2 压缩试验

对易溶盐含量为 5、8、14、20、26 g/kg 的 5 组试样分别开展湿陷试验(图 2)。试验在新疆大学地质与矿业工程学院土力学实验室进行,使用 WG-1B 型三联高压固结仪。每组相同含盐量的 9 个试样均分别进行原含水率压缩试验(3 组)、浸饱和 Na_2SO_4 溶液(3 组)及浸纯水湿陷试验(3 组)3 种试验,相同含盐量的同种试验结果取 3 组的均值。具体试验操作为:垂直压力施加等级为 50、100、200、400、800、1 200、1 600 kPa,各级压力稳定标准为:连续 2 h 内,每小时变形量不超过 0.01 mm,试样初始厚度(或沉降仪初始值)记为 h_0 。

(1)原含水率压缩试验。用保鲜膜密封包裹固结仪的容器底座,保持含水率不变,进行黄土试样压缩试验,将各级垂直压力作用下的变形量记为 h_1 。

(2)浸盐溶液压缩试验。50 kPa 垂直压力稳定后,在容器底座中加入全离子平衡盐溶液,使试样完全淹没,继续压缩过程,各级垂直压力作用下的变形量记为 h_2 。同级压力下浸饱和盐溶液所测得变形量(h_2)与压缩试验变形量(h_1)之差即为湿陷量,用 h_s 表示。

(3)浸纯水湿陷试验。50 kPa 垂直压力稳定后,在容器底座中加入纯水至淹没试样,继续压缩并不断换水,保证试样内的盐分充分溶解,各级垂

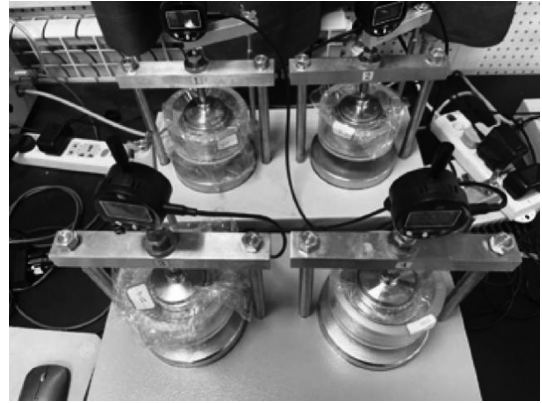


图 2 压缩试验装置

直压力作用下的变形量记为 h_3 。此时所测变形量(h_3)与同级压力下浸饱和盐溶液的变形量(h_2)之差即为溶陷量,用 h_r 表示。

3 试验结果及讨论

3.1 各系数随垂直压力的变化规律

为了讨论不同易溶盐含量对研究区黄土随荷载的变形规律,对 5 种不同盐含量的试样各 3 组分别进行原含水率、浸饱和 Na_2SO_4 溶液及浸纯水的压缩试验,即可得到各级垂直压力作用下的湿陷量、溶陷量及总的变形量,用湿陷系数 δ_s 、溶陷系数 δ_r 、变形系数 δ 表示。其计算公式分别为

$$\delta_s = h_s/h_0 \quad (1)$$

$$\delta_r = h_r/h_0 \quad (2)$$

$$\delta = \delta_s + \delta_r \quad (3)$$

试验过程如 2.2 节所述,得到各系数随垂直压力的变化曲线,如图 3 所示。

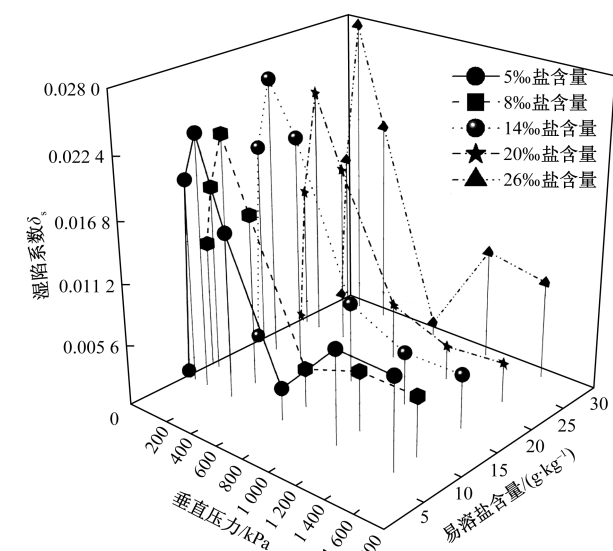
由图 3 可知,在不同易溶盐含量下,各系数在达到峰值之前均会随着垂直压力 P 的增长而迅速增长。当垂直压力增至 200~400 kPa 时,无论易溶盐含量为何值,系数 δ_s 、 δ_r 和 δ 都将达到峰值,此时的峰值系数分别对应湿陷峰值系数、溶陷峰值系数,以及变形峰值系数。

图 3 进一步显示,当垂直压力超过峰值压应力后,系数 δ_s 、 δ_r 和 δ 都将开始逐渐减小,并在 1 000~1 200 kPa 的压力范围内趋于稳定状态。

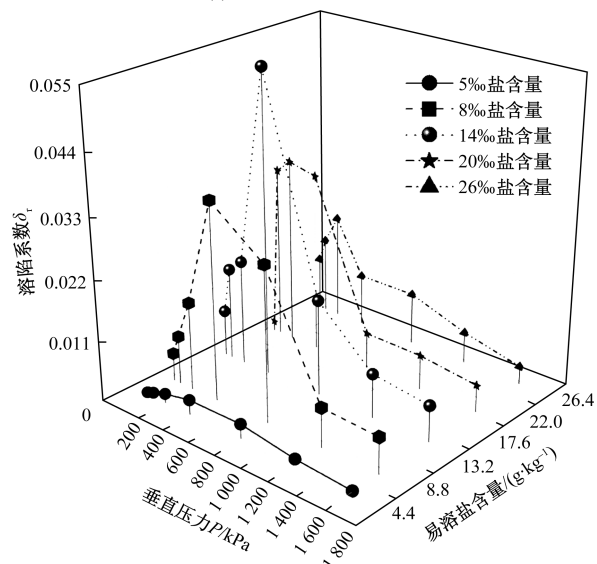
3.2 各系数随含盐量的变化规律

由 3 种不同的收缩试验数据可知试样的湿陷系数 δ_s 、溶陷系数 δ_r 、变形系数 δ 随盐含量不断增加的变化规律,如图 4 所示。

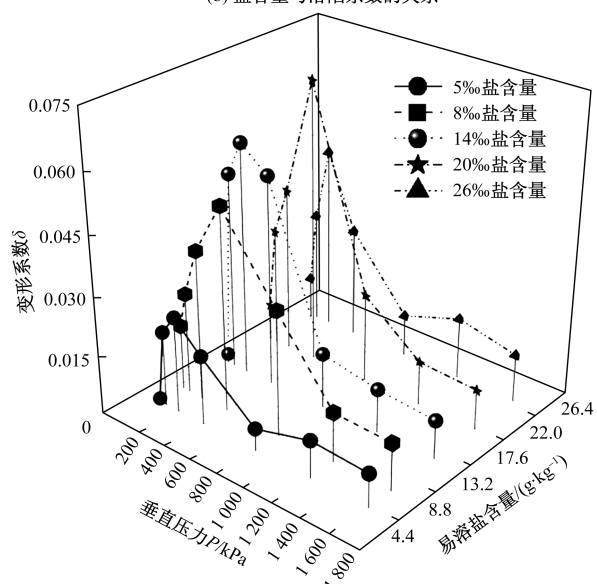
由图 4 可知,湿陷系数曲线介于 5‰~20‰ 呈现随含盐量的增大而减小的趋势。溶陷系数大致随含盐量先增大后减小,14‰ 盐含量时,溶陷系数峰值最大。变形系数大致随含盐量先增大后减小,20‰



(a) 盐含量与湿陷系数的关系



(b) 盐含量与溶陷系数的关系



(c) 盐含量与变形系数的关系

图3 盐含量与各系数的关系曲线

盐含量时,变形系数达到峰值。由于盐含量较低时,溶解量低,溶陷量小,随着盐含量增加到14%以后,芒硝晶体不断析出,骨架作用增强,土样越来越致密,溶解量变少,故溶陷量变小。为了探讨图4所示结果产生的原因,对5种盐含量的土样做SEM(scanning electron microscope,扫描电镜),寻找从微观角度的解释。

通过盐含量5%~26%的土样在垂直压力达600 kPa时,放大800倍数的电镜扫描图片(图5)可以看出,随盐含量的提高土样孔隙率逐渐被充填而减小。由于土样中的易溶盐主要是硫酸盐,故主要析出的为芒硝晶体,随盐含量升高,土样导电性逐渐增强,电镜扫描面照片呈现逐渐增多的光痕。

将倍数进一步放大至4500倍(图6),可以看到芒硝晶体对空隙的填充。盐含量14%时芒硝晶体呈片架型结构,颗粒间为弱联结,盐含量20%时芒硝晶体呈片堆型结构,颗粒间为强联结。以上分析说明当含盐量处于较低水平时,绝大部分易溶盐处于溶解状态,此时土样中析出的芒硝晶体能起到的胶结作用小,反而因体积增大导致孔隙结构疏松,利于土样湿陷;随着含盐量的提高,芒硝晶体析出量增加,其骨架作用增强,结构愈发致密,故湿陷量逐渐减少,与赵天宇等^[2]和许健等^[3]文章中的观点相同。

在同级压力下,5%含盐量时,湿陷和溶陷系数差距最大,随含盐量的提高,二者差距逐渐缩小,展现出相似的变化趋势,在14%含盐量时,实现和溶陷系数在1000 kPa压力下数值逐渐逼近,在20%和26%含盐量时相交并发生位置交换,说明湿陷和溶陷作用相持的临界含盐量为14%~20%。

试样各系数曲线随垂直压力的变化趋势如图7~图9所示。可以清楚看出,随着易溶盐含量增加,溶陷作用不断增强,且盐含量为14%~20%时溶陷变形量增幅最大,含盐量高于20%以后,溶陷曲线增幅变缓。说明易溶盐含量为14%~20%时土颗粒被压密的同时,盐分恰好能被充分溶解,此时溶陷作用强烈;接着随着盐含量的继续增加,溶陷曲线增幅较小,说明过量的盐分会堵塞土体内部孔隙,使土孔隙变小,盐溶解受限。综上,含盐量的变化对提高颗粒间的骨架作用存在临界值。在天山北麓冲洪积平原黄土区这个临界含盐量为14%~20%。

用单峰模型函数拟合逐级压力下各盐含量与

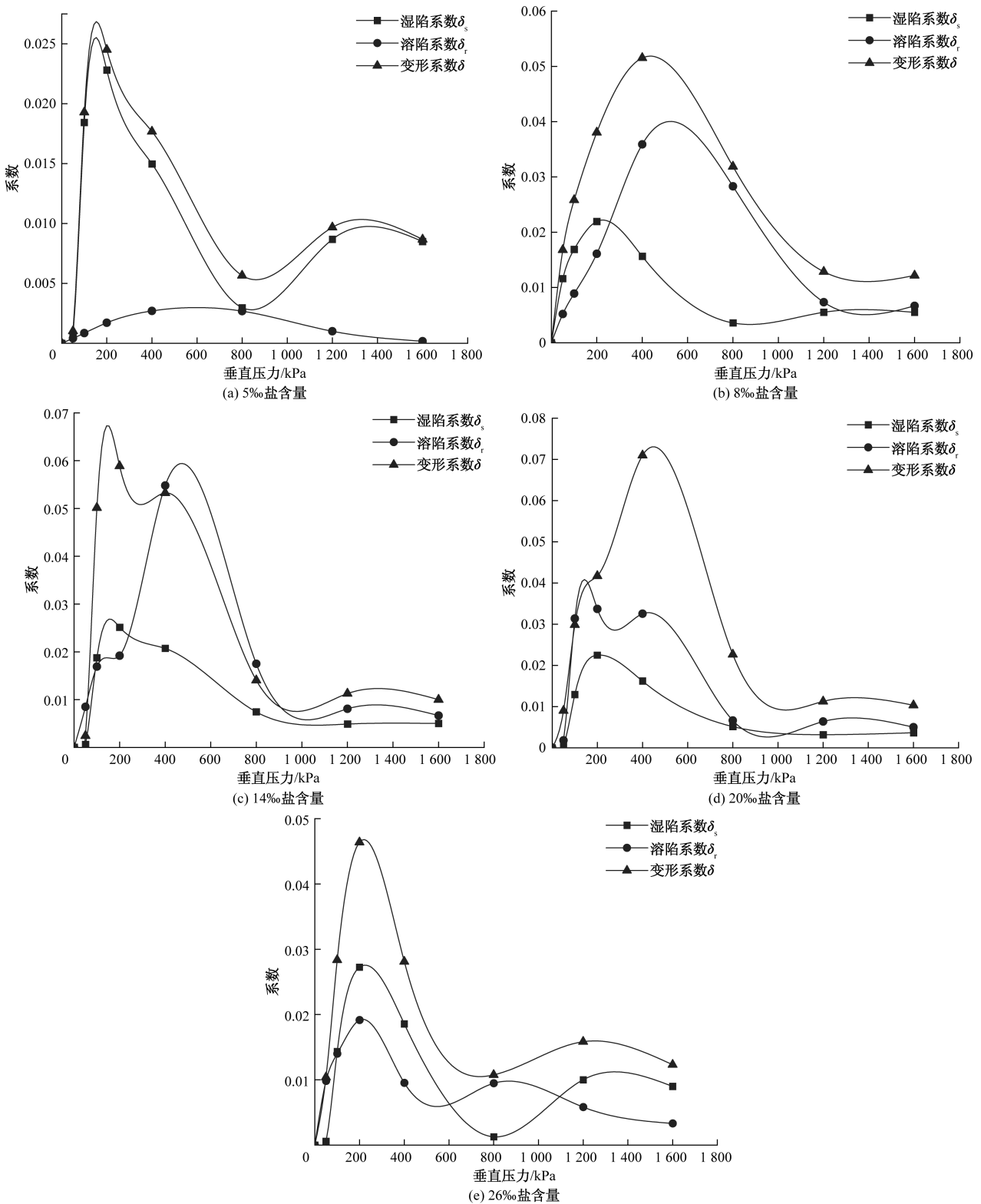


图 4 不同含盐量与各系数的关系曲线

变形系数的关系曲线,可以得到不同含盐量的变形曲线方程,发现含盐量为 5% 的变形曲线满足 Giddings 方程(一种峰值函数,其概率密度函数服从吉丁斯分布),其余 4 种含盐量的变形曲线均满足 Extreme 方程(单峰模型函数的一种极值型分布函

数,服从耿贝尔概率分布)。

Giddings 方程表达式为

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega} \sqrt{\frac{x_c}{x}} I_1 \left(\frac{2\sqrt{x_c x}}{\omega} \right) e^{-\frac{x-x_c}{\omega}} \quad (4)$$

式中: x 为自变量,代表垂直压力; y 为应变量,代

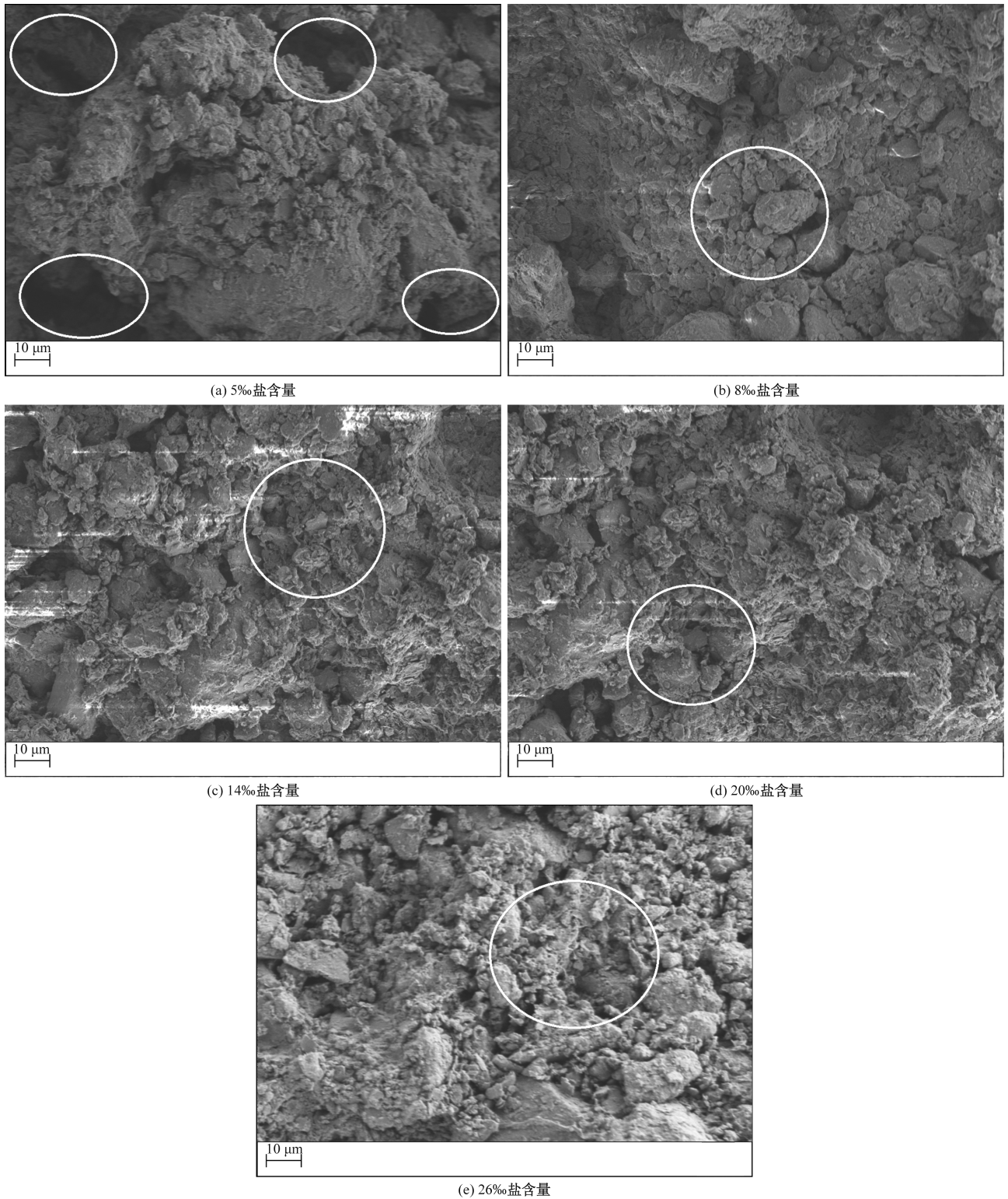


图5 不同盐含量土样 800 倍电镜扫描照片

表变形系数; x_c 为单峰概率密度分布函数的中心, 吉丁斯分布的 $x_c = 1$; y_0 为偏移吉丁斯分布函数中心的量; 吉丁斯分布的 $y_0 = 0$; ω 为宽度参数, 吉丁斯分布的 $\omega = 1$; A 为振幅参数, 吉丁斯分布的 $A = 1$ 。

Extreme 方程表达式为

$$y = y_0 + Ae^{[-e^{-(z-x_c)/\omega}]^{-z+1}}, z = (x - x_c)/\omega \quad (5)$$

不同盐含量的变形曲线参数及调整后的相关系数见表 3, 各曲线方程相关性除盐含量 5‰ 时为 0.815 3 外均高于 0.85, 说明曲线拟合合理。

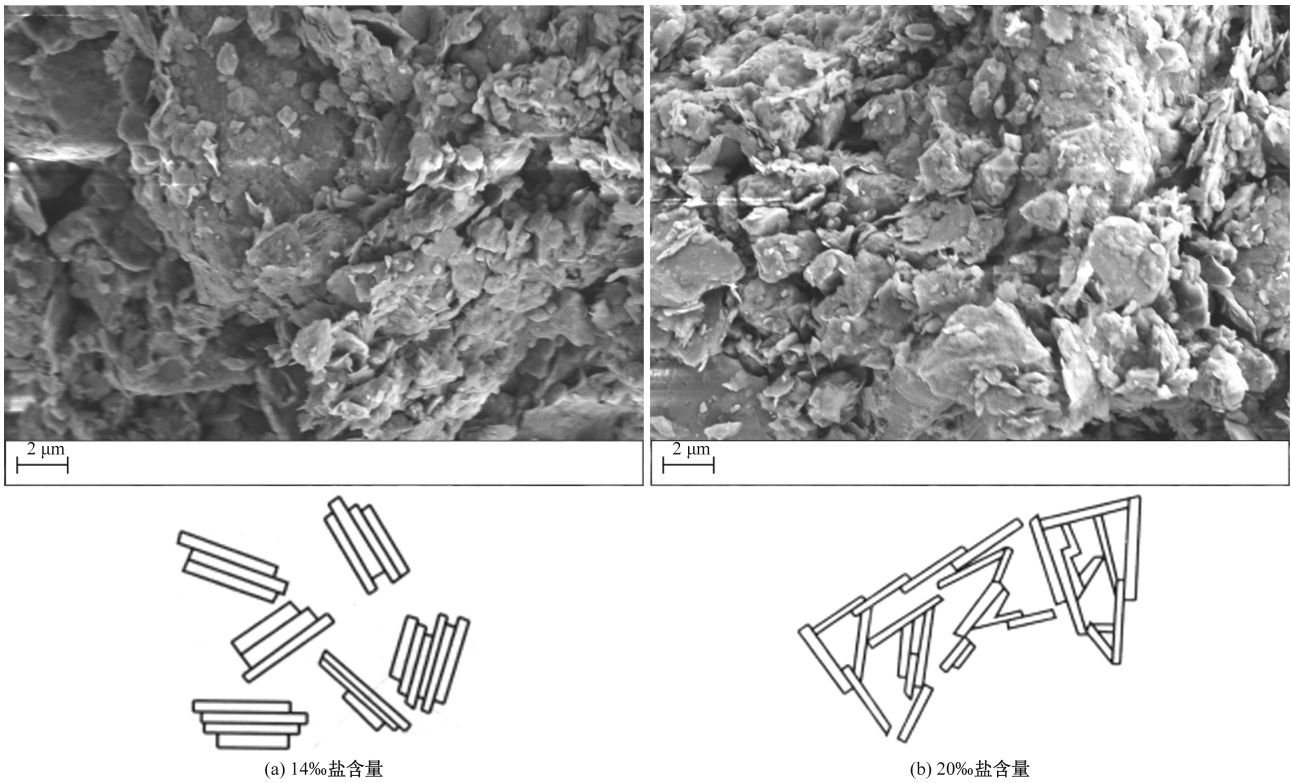


图 6 2 种盐含量土样 4 500 倍电镜扫描结果及片架结构

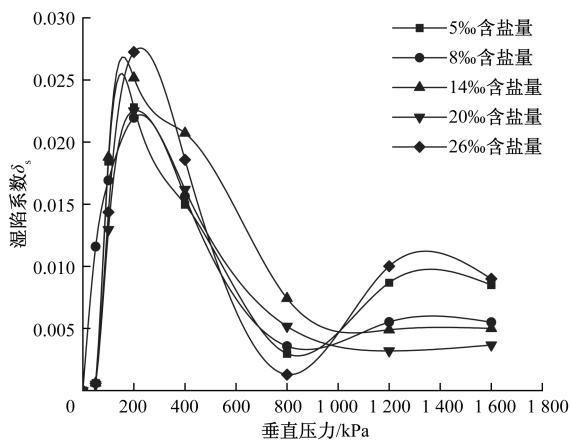


图 7 各盐含量与湿陷系数的关系

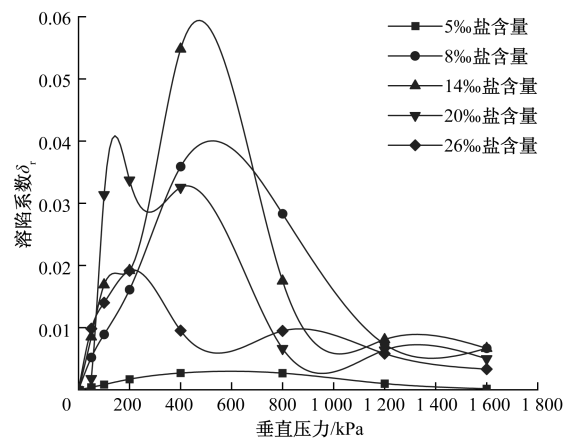


图 8 各盐含量与溶陷系数的关系

表 3 不同含盐量下土体变形曲线方程

易溶盐含量	5‰	8‰	14‰	20‰	26‰
函数	Giddings	Extreme	Extreme	Extreme	Extreme
y_0	0.0067 ± 0.0033	0.0055 ± 0.0069	0.0063 ± 0.0081	0.0058 ± 0.0054	0.0094 ± 0.0035
x_c	283.0742 ± 48.5409	423.2871 ± 41.7476	259.3495 ± 35.9948	371.0104 ± 32.5653	223.5383 ± 24.1416
ω	27.4372 ± 18.3944	272.2948 ± 62.2506	146.7323 ± 44.6702	203.4437 ± 39.9212	111.1217 ± 23.9123
A	6.1393 ± 2.6682	0.0484 ± 0.0083	0.0641 ± 0.0144	0.0644 ± 0.0079	0.0393 ± 0.0073
残差	3.4126×10^{-5}	4.2798×10^{-5}	1.7318×10^{-4}	5.0959×10^{-5}	4.3272×10^{-5}
$R^2(\text{COD})$	0.8153	0.9104	0.8669	0.9449	0.8829

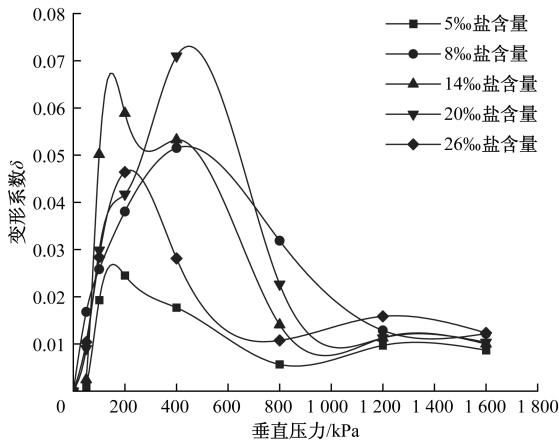


图9 各盐含量与变形系数的关系

3.3 湿、溶陷峰值系数与易溶盐含量的关系

为了解不同盐含量下试样的湿陷量和溶陷量在总变形中的作用,取各自的峰值系数的变化进行观察可直接观测到结果,如图10、图11所示。

由图10可知,湿陷系数峰值在含盐量5‰时最

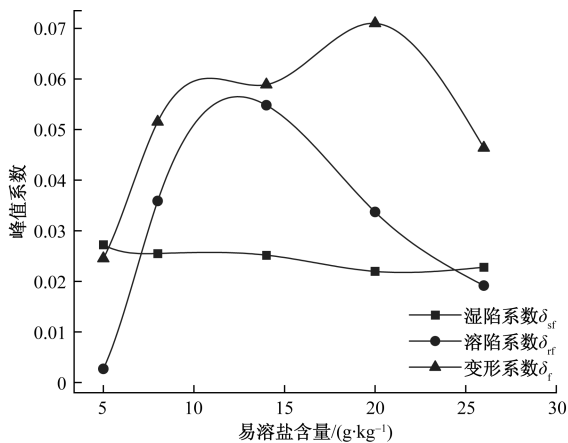


图10 各含盐量下峰值系数关系

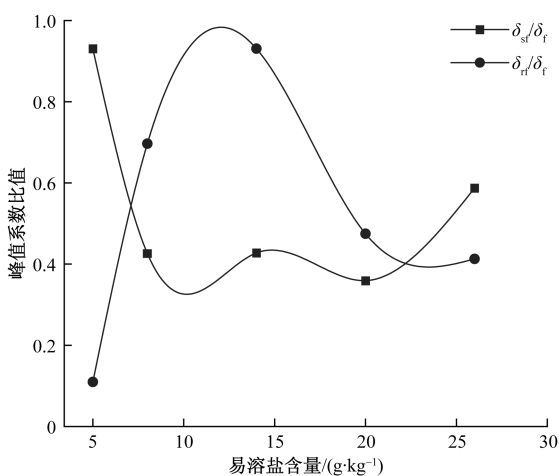


图11 各含盐量下峰值系数比值关系

大,约为0.028,随含盐量的增大缓慢减小,于26‰盐含量时再升高。溶陷系数峰值随含盐量增大先增大后减小,分界点为含盐量14‰。变形系数峰值随含盐量成阶段性上升,达到含盐量20‰后开始陡降。说明试样的浸水变形由溶陷性决定。

由图11可知,两条曲线分别代表湿、溶陷变形占总变形量的比值。在易溶盐含量为8‰和23‰相交,说明在这两个含盐量时,湿陷与溶陷对总变形的影响持平,此两点是湿陷作用与溶陷作用主导地位的交换分界。黄土试样含盐量在小于8‰和大于23‰时湿陷是变形的主要作用,而含盐量为8‰~23‰时溶陷是变形的主要作用。

3.4 起始压力与易溶盐含量的关系

起始压力指的是黄土区地基变形的起始压力,是黄土区工程建设荷载设计和施工的重要依据,土中含盐量对起始压力的影响如图12所示。

由图12可知,随含盐量的上升湿陷起始压力 P_{S1} 呈逐渐增大趋势,其最小值约为70 kPa。溶陷和变形起始压力 P_{S2} 及 P_S 随盐含量增加陡降,然后趋于平稳,溶陷起始压力 P_{S2} 在26‰盐含量时达到最小值,约为50 kPa。变形起始压力 P_S 在达到14‰盐含量以后趋于稳定值,约为75 kPa。可以看出随含盐量的增加,土样的湿陷敏感性增强,压力要求越来越低。

用弗罗因德利希回归模型拟合起始压力和含盐量的关系曲线,可以得到不同含盐量的起始压力函数方程。FreundlichEXT方程(既是一种指数函数又是一种幂函数)表达式为

$$y = ax^{bx^{-c}} \quad (6)$$

式中: x 为自变量,代表易溶盐含量; y 为应变量,代表起始压力; a 、 b 为系数; c 为幂。方程各参数及调整后的相关系数见表4,变形起始压力、溶陷起始压力

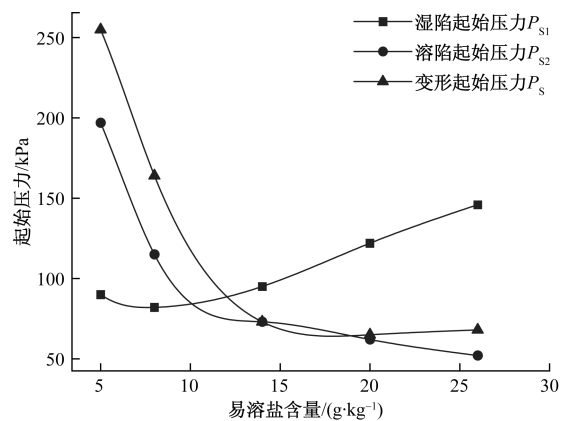


图12 起始压力与盐含量关系

表 4 不同含盐量下变形起始压力曲线方程

起始压力 y	P_S	P_{S1}	P_{S2}
函数	FreundlichEXT	FreundlichEXT	FreundlichEXT
a	24.706 9±22.877 4	45.473 0±43.157 8	38.435 8±3.054 4
b	8.051 5±1.520 7	-6.333 6±0.371 4	9.477 0±0.754 9
c	1.063 1±0.324 9	0.495 2±0.006 2	1.388 0±0.076 1
残差均方	2.482 8	3.230 7	3.793 9
R^2 (COD)	0.982 3	0.997 7	0.999 5

及湿陷起始压力曲线方程相关性分别为 0.982 3、0.999 5 和 0.997 7,说明曲线拟合合理。

4 结论

通过对新疆天山北麓冲洪积平原广泛分布的湿陷性黄土开展的易溶盐对黄土湿陷、溶陷作用效应的区分特性试验研究,获取了易溶盐含量及其赋存状态对黄土湿陷、溶陷特性的影响规律,构建了不同含盐量的黄土湿陷及溶陷变形量计算模型,总结天山北麓黄土区受易溶盐影响的变形特征主要有如下几点。

(1)在不同易溶盐含量下,黄土的湿陷和溶陷变形与垂直压力正相关,达到峰值(200~400 kPa)后变形逐渐减小,并在 1 000~1 200 kPa 的压力范围内趋于稳定状态。

(2)试验区黄土的临界含盐量在 14%~20% 时,湿陷作用与溶陷作用相持;试样含盐量在小于 8%和大于 23%时湿陷为变形主要模式,而在 8%~23%时溶陷为变形主要模式。

(3)逐级压力下各盐含量与各变形系数的关系可用 Giddings 和 Extreme 模型函数进行较好地拟合;用 FreundlichEXT 回归模型可以很好地拟合研究区土样不同含盐量下的起始压力函数方程。

研究结果可为同类地区黄土地基的结构荷载设计和变形计算提供参考。在今后研究中可考虑当地冻融作用,进一步探讨新疆地区温度场和盐水迁移耦合下的黄土变形的模式。

参考文献

- [1] 秦建平. 西安地区黄土湿陷系数相关性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, 3(9): 47-51.
- [2] 赵天宇, 张虎元, 王志硕. 含氯硫酸盐渍土中硫酸钠结晶量理论分析研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1340-1347.
- [3] 许健, 张明辉, 李彦锋. Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1642-1650.
- [4] 高远, 郑建国. 压实黄土(Q_2)溶滤变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 180-191.
- [5] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 117-122.
- [6] 赵庆玉, 张爱军, 王毓国, 等. 易溶盐含量对原状非饱和伊犁黄土强度的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 146-154.
- [7] 牛丽思, 张爱军. 高易溶盐非饱和伊犁原状黄土的临界状态特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2647-2658.
- [8] 牛丽思, 张爱军. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1705-1714.
- [9] 程文瑜, 储春妹. 干湿循环对滑坡区黄土收缩性的影响规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 933-940.
- [10] 任文博, 刘云龙, 李佳佳, 等. 基于离散型二项式系数组合模型的黄土湿陷性评估[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4945-4953.
- [11] 高英, 马艳霞, 杨丰华, 等. 季节冻土区黄土湿陷变形及微观机理[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(34): 14778-14786.
- [12] 蔺广花, 刘百来, 张爱军. 易溶盐对伊犁黄土湿陷性的影响[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(2): 167-171.
- [13] 张琦, 顾强康, 张俐. 含盐量对硫酸盐渍土溶陷性的影响研究[J]. 路基工程, 2010(6): 152-154.
- [14] 张婉, 张爱军, 陈佳玫. 含水率和密度对伊犁黄土湿陷系数的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 211-220.
- [15] 张严, 刘德仁, 王旭, 等. 中兰铁路深厚黄土场地浸水地表变形规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2461-2469.
- [16] NIU L S, ZHANG A J, ZHAO J M, et al. Study on soil-water characteristics of expansive soil under the dry-wet cycle and freeze-thaw cycle considering volumetric strain[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 21: 108-120.
- [17] LING X Z, TIAN S, TANG L, et al. A damage-softening and dilatancy prediction model of Coarse-grained materials considering freeze-thaw effects[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22(1): 1003-1017.
- [18] XING H F, LIU L L. Field tests on influencing factors of negative skin friction for pile foundations in collapsible loess regions. international[J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1413-1422.
- [19] GAREY A, FOX R A. Controlled laboratory experiments and modeling of vegetative filter strips with shallow water tables[J]. Purvis Journal of Hydrology,

- 2018, 556: 1-9.
- [20] RUI Y, YIN M. Investigations of pile-soil interaction under thermo-mechanical loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 55(7): 1016-1028.
- [21] LI L, LI J P, GONG W B, et al. Semi-analytical approach for time-dependent load-settlement response of a jacked pile in clay strata [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(12): 1682-1692.

Deformation Patterns in the Loess Area of the Northern Foothills of the Tianshan Mountains as Affected by Labile Salts

CHENG Wenyu, XIAO Xiangyi

(Geology and Mining Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: To study the deformation patterns of wet-sinking loess widely distributed in the alluvial plains of the northern Tianshan Mountains in Xinjiang, experimental studies were carried out to differentiate the effects of soluble salts on the wet-sinking and dissolving effects of loess. Through the ‘three-line method’ compression test of original water content saturated with Na_2SO_4 salt solution and pure water on the original loess samples with five kinds of soluble salt contents, the influence of soluble salt content and its state of existence on the characteristics of loess wet subsidence and subsidence was obtained, and the calculation model of the amount of loess wet subsidence and subsidence deformation with different salt contents was constructed. The results show that there is a critical value for the salt content change to improve the skeleton effect between particles, and wet subsidence is the main mode of deformation when it is less than 8‰ and more than 23‰, while dissolution subsidence is the main mode of deformation when it is between 8‰~23‰; mathematical relationship between each salt content and deformation coefficients under the step-by-step pressure has been fitted by using the Giddings and Extreme model function. The FreundlichEXT regression model was used to construct the starting pressure function equation for different salt contents of soil samples in the study area. The research results can provide scientific basis for the study of the mechanism of joint action of wet subsidence and dissolution subsidence of eolian salt in the region, the design of structural loads and the calculation of deformation.

Keywords: plain loess in the northern foothills of Tianshan Mountain; soluble salt; wet subsidence property; dissolution subsidence property; computational modelling