

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.018

含水率单次递减条件下粗颗粒硫酸盐渍土盐胀的室内模拟试验

杨鹏^{1,2}, 朱彦鹏¹, 曹亚鹏¹, 米海珍¹

(1. 兰州理工大学 岩土工程研究所, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州石化职业技术学院 土木工程系, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 为探究粗颗粒硫酸盐渍土含水率单次递减条件下的盐胀特性, 利用自主设计的多功能盐胀试验装置, 开展了粗颗粒硫酸盐渍土盐胀率随4因素(孔隙比、含盐量、温度、初始含水率)变化规律的试验研究。试验结果表明, 硫酸盐渍土的体积变化受两种效应的影响: 含水率递减引起的干缩效应以及土体中硫酸钠相态变化引起的盐胀效应。含水率单次递减过程中硫酸盐渍土的失水速率与硫酸盐渍土的孔隙比、试样温度、初始含水率呈正相关关系; 而与硫酸盐渍土的含盐量呈负相关关系。试验结果中部分试样的盐胀率达到了9%, 这表明粗颗粒硫酸盐渍土在含水率单次递减条件下引发的盐胀不容忽视。其研究结果可为西北地区高含盐量的残余型硫酸盐渍土的盐胀性评价提供参考依据。

关键词: 粗颗粒; 硫酸盐渍土; 含水率; 递减; 盐胀率

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)10-2909-07

Experiment of salt expansion behavior for coarse saline soil containing sulphate due to drying

YANG Peng^{1,2}, ZHU Yan-peng¹, CAO Ya-peng¹, MI Hai-zhen¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou, Gansu 730060, China)

Abstract: To explore the salt expansion behavior of coarse saline soils containing sulphate under drying, sets of laboratory experiments were conducted to investigate the impact of void ratio, salt content, initial water content and temperature on salt expansion rate. The deformation behavior as water content decreases are the compete of two types of soil-water interactions: shrinkage of soil due to drying, and the swelling of crystallized salts dissolved in pore water. The decreasing rate of water content shows positive correlation with void ratio, temperature and initial water content but negative correlation with the salt content. The test results show that the salt expansion rate of some sample reaches 9%, suggesting that the salt expansion of sulphate saline soil with decreasing water content should not be ignored. It is expected to provide guidance for evaluation on the salt expansion of foundations of residual sulphate saline soil with high salt content in the northwest region.

Keywords: coarse particles; sulphate saline soil; water content; descending; salt expansion rate

1 引言

粗颗粒硫酸盐渍土主要分布于我国西北内陆盐渍土地区, 其土体孔隙内含有大量不稳定易溶硫酸钠。当土体孔隙中的硫酸钠发生液态与固态间的相变时, 土体在盐胀力的作用下颗粒重组, 宏观上表现为地基土的盐胀变形。随着我国西北内陆地区工程建设的持续推进, 今后将面临更多的盐胀病害

问题。因此, 对粗颗粒硫酸盐渍土的盐胀特性进行研究尤为重要。目前对粗颗粒盐渍土盐胀特性的研究已经取得了一定进展: 徐学祖等^[1]针对粗颗粒土展开了单向冻结试验, 揭示了粗颗粒土的热胀效应及水盐迁移规律, 盐分除随水迁移外也产生以浓度梯度为驱动的迁移效应; 吴青柏等^[2]讨论了恒温条件下粗颗粒盐渍土盐胀特性, 获知粗颗粒盐渍土本身不具有强烈盐胀性, 但形成硫酸钠盐分聚集层后,

收稿日期: 2017-03-28

第一作者简介: 杨鹏, 男, 1986年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: y491016333@163.com

通讯作者: 曹亚鹏, 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: caoyapenglut@163.com

遇水会发生突发性的盐胀破坏;王俊臣等^[3]探讨了硫酸(亚硫酸)盐渍土在单次冻结条件下的盐胀和冻胀发育规律,明确了盐渍土盐胀的温度敏感区间是 0~-2.5 °C, -5 °C 后试样只发生微小的盐胀变形;张莎莎^[4]、包卫星^[5]等针对天然粗颗粒硫酸盐渍土开展了多次冻融循环条件下的盐胀特性研究,证明粗颗粒盐渍土在开放系统下经多次冻融循环后的盐胀-冻胀变形要远小于细颗粒土,其盐胀变形除与土体初始干密度、含水率和上覆压力有关外,还与细颗粒填料的含量有关等。

通过整理已有研究成果后发现,目前对粗颗粒硫酸盐渍土盐胀特性所做的研究大多是基于变温条件(单次降温、多次冻融循环)下的盐胀特性试验研究^[6-7],较少涉及试样含水率变化引起盐胀变形的研究。然而,在盐渍土地区,实际的水文地质往往呈现较为复杂的特征,由于降雨、地表水分蒸发、地下水位升降等引发的土体中含水率反复升降变化,亦是导致粗颗粒硫酸盐渍土盐胀发生的重要因素。以河西走廊为例,该地区地处天山以南,祁连山以北,强对流天气极少,蒸发量远大于降雨量,地表水分极易蒸发,且该地区的盐渍土多为残余型盐渍土,已失去了地下水的补水作用。在此种气候条件影响下,盐渍土中会发生含水率递减的进程,进而产生盐胀病害。目前,国内学者开始关注粗颗粒硫酸盐渍土在含水率单次递减条件下的盐胀特

性,但尚缺乏系统的构架以及理论的充实。因此,笔者所在课题组自主设计了一整套盐胀试验装置,通过仿制天然粗颗粒硫酸盐渍土,进行了一系列室内模拟试验研究,以探究粗颗粒硫酸盐渍土在含水率单次递减条件下的盐胀特性。

2 试验概况

2.1 土样制备

试验用土取自敦煌地区典型的粗颗粒硫酸盐渍土地带,按不同深度共采集了 8 份土样,现场天然土样的物理性质指标如表 1 所示。本试验采用重塑土样,根据现场天然土样的孔隙比范围,人工配制了不同含盐量、含水率,且孔隙比在 0.37~0.63 之间的试样,各试样的具体试验参数见表 2。

根据现场采集土样的筛分结果,制作了重塑土试样。试验旨在研究孔隙比、含盐量、温度和初始含水率 4 个指标,在试样含水率单次递减条件下对盐胀率的影响规律。特别值得说明的是,孔隙比指标是采用蒸馏水溢水称重差值法测定的,试验选择了表 1 中的 5 种典型级配情况,分别测定了其孔隙比。具体试验指标取值范围以及孔隙比对应的级配情况如表 2 所示。

2.2 试验方案

通过仿制天然粗颗粒硫酸盐渍土,进行含水率单次递减条件下的室内模拟试验研究试验方案如下:

表 1 土样物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil samples

取样深度 /m	土样数量	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	孔隙比	不同粒径 (mm) 的颗粒含量/%					
					<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0
0.1~0.5	1	9.62	1.66	0.48	13.2	9.1	4.6	21.6	37.5	14.0
0.5~1.0	1	6.02	1.64	0.47	9.3	8.5	31.8	18.4	19.9	12.1
1.0~1.5	1	5.88	1.72	0.52	3.1	14.8	21.3	15.6	11.3	33.9
1.5~2.0	1	6.7	1.78	0.55	5.3	3.3	48.1	19.6	11.7	12.0
2.0~3.0	1	5.76	1.88	0.59	1.9	6.8	2.2	24.8	31.1	33.2
3.0~4.5	1	7.63	1.83	0.57	6.9	20.1	8.5	19.5	23.1	21.9
4.5~6.0	1	5.47	1.87	0.65	1.1	10.2	4.3	44.3	38.1	2.00
6.0~7.5	1	5.32	1.94	0.62	0.5	1.8	9.1	39.1	28.9	20.6

表 2 各试样的试验参数取值范围

Table 2 Soil properties of test soil samples

含盐量 /%	温度 /°C	初始含水率 /%	孔隙比 <i>e</i>	不同粒径 (mm) 的颗粒级配/%					
				<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0
0.5	5	5	0.37	15	15	15	15	20	20
1.0	10	7	0.43	0	20	0	40	0	40
3.0	15	10	0.48	0	30	10	10	30	20
5.0	20	13	0.52	0	10	10	10	30	40
	30	16	0.62	0	0	0	40	40	20

注:配土过程中采用蒸馏水溢水称重差值法来测量土样的孔隙比,具体为先取一个 500 mL 的烧杯装满蒸馏水,称其质量为 m_1 ,然后将称好的待测风干试样 m_2 倒入烧杯中,迅速称其质量 m_3 ,最后通过 $(m_1 + m_2 - m_3)$ 的差值来计算试样土颗粒密度,以此来测定土样的孔隙比。天平精度为 0.01 g,试样质量 200 g,取 3 个平行样,当 3 个平行试样所测孔隙比的误差小于 1% 时,取其平均值作为试验结果值。

(1) 在含盐量 5%、初始含水率 7%、温度 15 °C 条件下分别测试了孔隙比 0.37、0.43、0.48、0.53、0.63 试样的盐胀率。

(2) 在孔隙比 0.37、初始含水率 7%、温度 15 °C 条件下分别测试了含盐量 0.5%、1.0%、3.0%、5.0% 试样的盐胀率。

(3) 在孔隙比 0.37、含盐量 5%、初始含水率 7% 条件下测试了温度 5、10、15、20、30 °C 试样的盐胀率。

(4) 在孔隙比 0.37、含盐量 5%、温度 15 °C 条件下测试了初始含水率 7%、10%、13% 和 16% 试样的盐胀率。

2.3 室内模拟装置简介

此套装置进行含水率调控的基本原理为恒温风干。由空压机产生的气流经过控温箱（如图 1(a) 中所示的气体温控箱进行控温）并调至适宜的压强后，由试样桶的进气管通入另一侧的出气管流出，从而带走试样中水分，实现试样含水率随时间连续变化。

整套装置（见图 1）由以下几部分组成：① 调控试样含水率及温度的试样桶；② 监测试样含水率、变形量以及温度的传感系统；③ 调控通入试样中气流温度的气体温控箱。

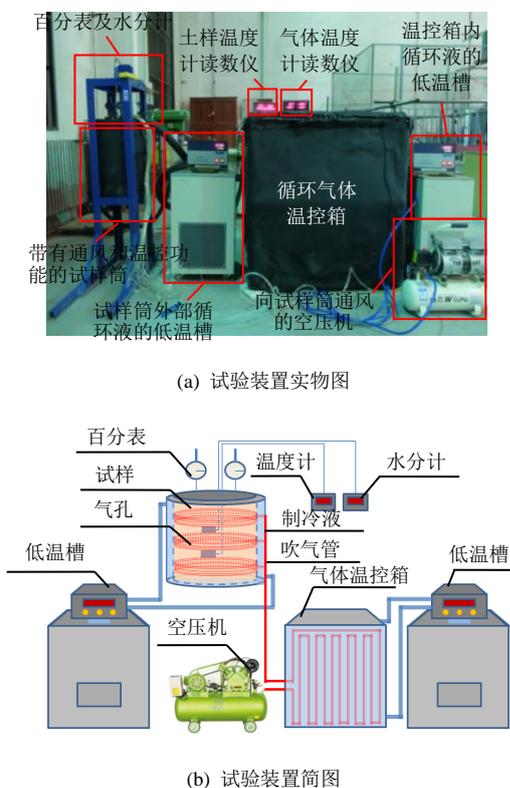


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2.4 试验过程

(1) 对采集来的粗颗粒土料使用蒸馏水洗盐若干次，至其洗液滴定显示无色，将土料放入烘箱烘干。

(2) 对烘干土料进行筛分，并依据粒径分盒存放。

(3) 根据试验方案配制土样，并依据《土工试验方法标准》^[8]，硫酸盐渍土采用干法配置。将无水硫酸钠完全溶解于水后拌入干土料中，拌合均匀，并将拌好的硫酸盐渍土土料在室温下置于塑料箱内闷料 24 h。

(4) 将土料填入试样桶，并埋置温度传感器和水分传感器，使用千斤顶将土料压至设计密实度，测算土样的初始干密度并记录。

(5) 安装百分表以及水分计。将低温槽调至试验温度。静置 4 h 后，将百分表调零，水分计调至试样的设计含水率，打开空压机，通过气压控制器将气流压强控制在 10 kPa 左右（精度 ±5 kPa），将含水率由 ω_0 连续递减至 3% 左右后停止工作。试验开始后首先间隔 15 min 读数，连续读取 4 个数据；然后间隔 60 min 读数，连续读取 4 个数据；对于初始含水率较大、干燥所需时间较长的试样，在试验开始 5 h 之后每隔 120 min 读 1 次数，连续读取 2 个数据，此后每隔 240 min 读 1 次数，直至试验结束。

3 试验结果与分析

3.1 孔隙比因素

图 2 绘出了含盐率 5%、初始含水率 7%、温度 15 °C 条件下，孔隙比分别为 0.37、0.43、0.48、0.53、0.63 的硫酸盐渍土试样的盐胀率曲线。从图 2 (b) 可以看出，孔隙比与试样试验结束后的盐胀率呈负相关关系。其中，孔隙比为 0.37 的硫酸盐渍土试样，试验后的盐胀率超过 9%，而孔隙比为 0.63 的试样，盐胀率仅为 2.4%。试样在含水率单次递减试验结束后的最终盐胀率变化，根据孔隙比可以分为两个阶段，即盐胀率剧烈变化阶段及盐胀率基本稳定阶段。其中，孔隙比在 0.48~0.63 之间为盐胀率基本稳定阶段，试样含水率单次递减后的最终盐胀率，随着孔隙比的减小而缓慢的增长。究其原因，在这一阶段，土体中孔隙体积较多，可以容纳大部分硫酸钠相态转变造成的体积增加，宏观上表现为试样的最终盐胀率随孔隙比的减少缓慢增长。孔隙比在 0.37~0.48 之间为盐胀率剧烈变化阶段，因为土体中孔隙体积较少，硫酸钠相态转变造成的体积增加只有很少部分被孔隙容纳，绝大部分充斥在土颗粒之间形成骨架，宏观上表现为试样盐胀率的剧烈增长。

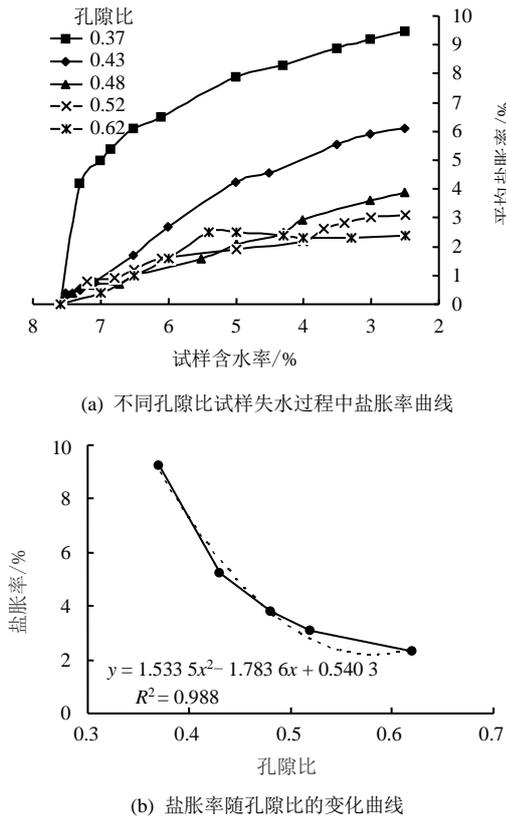


图2 不同孔隙比试样失水过程中的盐胀率曲线
Fig.2 Salt expansion rate curves of different void ratio samples during dehydration

3.2 含盐量因素

图3绘出了孔隙比0.37、初始含水率7%、温度15℃条件下，含盐量0.5%、1.0%、3.0%、5.0%的硫酸盐渍土在含水率单次递减下的盐胀变形曲线。其中，0.5%含盐量的试样在试验后发生了干缩现象，随着含盐量的升高，试样表现出盐胀剧烈趋势，且盐胀率随含盐量的升高而增大。究其原因，在含水率递减过程中，试样的体积变化受两种效应的影响：①含水率递减过程增大了土体中的基质吸力，在此作用下，土颗粒聚拢，孔径减小，宏观上表现为土体干缩；②在失水的过程中土中的硫酸钠会发生硫酸钠溶液(Na⁺, SO₄²⁻)、十水硫酸钠(Na₂SO₄·10H₂O)、无水硫酸钠(Na₂SO₄)这3种状态的依次转变，液态硫酸钠结晶为十水硫酸钠时，其体积会增大3.18倍，导致土体产生膨胀；而十水硫酸钠脱水为无水硫酸钠时，硫酸钠体积又会小幅减小。当含盐量为0.5%时，此时含盐量较低，试样的干缩效应强于盐胀效应，试样在试验过程中表现出体缩现象；而当含盐量较高(>0.5%)时，在含水率单次递减的过程中，盐胀效应强于干缩效应，试样表现出盐胀现象。如图3所示，在盐胀变化曲线的末期，曲线趋于平缓，这是因为在含水率递减的

进程中，当含水率较小时，虽然试样孔隙中十水硫酸钠转变为无水硫酸钠，使得硫酸钠体积减小，但由于此时盐胀对土体结构的破坏较强，导致试样的变形不可恢复，因此，表现为盐胀曲线最终趋于平缓。

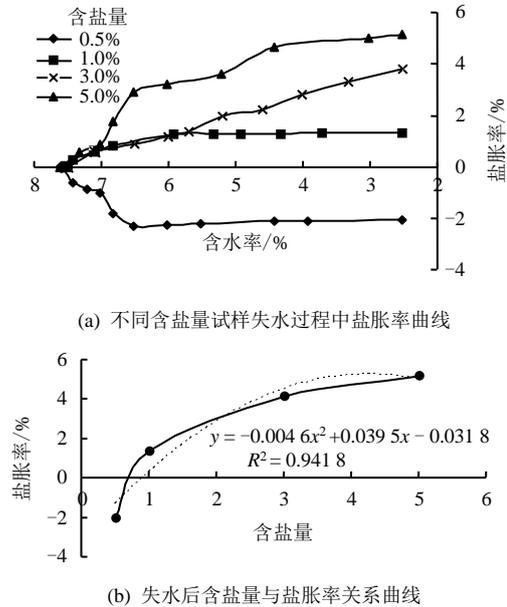


图3 不同含盐量下试样失水过程中的盐胀率曲线
Fig.3 Salt expansion rate curves of different void ratio samples during dehydration

3.3 温度因素

从图4中可以看出，随着温度从5℃上升到30℃，试样的盐胀率呈现出逐渐增长的趋势。其中，在5℃时试样呈干缩状态。而30℃时试样的盐胀率达到近8%。究其原因，在制作试样的过程中，干土料总重2500g，Na₂SO₄晶体质量为75g，蒸馏水质量为175g。作极限状况考虑，即试样中水分完全以自由水状态存在(Na₂SO₄溶解度按标准溶解度曲线计算)，则30℃时Na₂SO₄溶解度为37.48g/100gH₂O，自由水中最多可溶解65.6gNa₂SO₄晶体，仅有9.4gNa₂SO₄以无水Na₂SO₄晶体状态赋存。在试样失水过程中，65.5gNa₂SO₄共消耗自由水为83.16g，且体积增加2.1倍，仅有91.84g自由水损失。Na₂SO₄·H₂O晶体体积增加量大于自由水损失体积的减小量，宏观上表现为试样体积的增大；而在5℃时Na₂SO₄溶解度为6.95g/100gH₂O，自由水中最多可溶解12.25gNa₂SO₄晶体，试样失水过程中，仅有12.25gNa₂SO₄结晶形成Na₂SO₄·H₂O，消耗自由水15.48g，而有159.52g自由水损失。其Na₂SO₄·H₂O晶体体积增加量小于自由水损失体积的减小量，故宏观上表现为体积的减小。

由于 Na_2SO_4 晶体的溶解度曲线在温度高于 $32.4\text{ }^\circ\text{C}$ 以后，呈现近似水平趋势发展，故当温度高于 $32.4\text{ }^\circ\text{C}$ 时，该试验条件下的试样最大盐胀率将维持在 8% 左右。

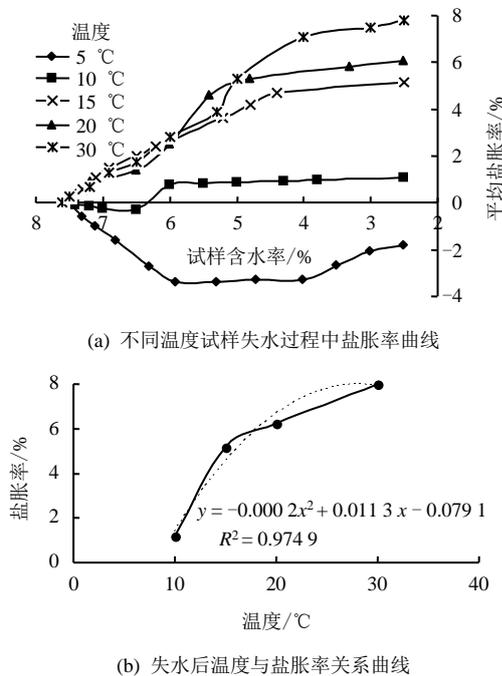


图 4 不同温度下试样失水过程中的盐胀率曲线
Fig.4 Salt expansion rate curves of different temperature samples during dehydration

3.4 初始含水率因素

将试样的初始含水率设定为 7%、10%、13%、16% 进行本组试验。由图 5 可以看出，试样在试验后的盐胀率随初始含水率的增大而减小。随着初始含水率的变化，盐胀呈现出明显不同的变化形态。这主要是由于初始含水率直接影响 Na_2SO_4 在土体中的赋存形态。在孔隙比为 0.37、含盐量为 5%、温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下，试样的初始含水率为 16% 时，试样会随着含水率递减逐渐体缩，这是由于 Na_2SO_4 在试样中大部分以溶液状态存在，随着含水率的单次递减，试样在基质吸力的作用下表现为干缩；当初始含水率为 13% 时，试样在含水率递减的前段表现为盐胀，随后出现体缩现象。这是因为在开始阶段，试样中的液态 Na_2SO_4 结晶析出导致试样体积膨胀，随着含水率进一步递减，基质吸力提高，抵消了部分盐胀力，宏观上表现为试样体积的收缩。由于试样中 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 转变为 Na_2SO_4 需在 $24.4\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的条件下进行，故在 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 试验条件下，随着初始含水率的进一步减小，液态 Na_2SO_4 快速失水结晶膨胀，致使盐胀性呈现增强的趋势。

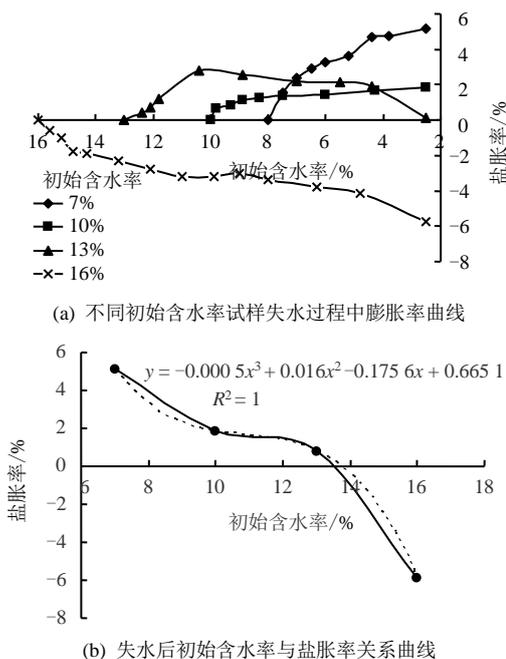


图 5 不同初始含水率下试样失水过程中的盐胀率曲线
Fig.5 Salt expansion rate curves of different initial moisture content samples during dehydration

3.5 盐胀率随各因素的变化率分析

图 2(b)、3(b)、4(b)、5(b) 为各影响因素与试样试验后盐胀率的关系曲线，对曲线添加线性趋势线，则趋势线的斜率直接反映了盐胀率随各因素的变化率。由图可知，含盐量和温度与盐胀率呈现正相关性；而孔隙比和初始含水率与盐胀率呈现负相关性。从斜率的绝对值分析，孔隙比因素的斜率绝对值最大，为 $|0.2596|$ ；其次为含盐量和初始含水率，分别为 $|0.0143|$ 和 $|0.0113|$ ；温度因素的斜率绝对值最小，为 $|0.0038|$ 。由此可知，孔隙比对试样在含水率单次降低过程中盐胀率的影响最为显著，其次为含盐量和初始含水率；温度在含水率单次递减过程中对盐胀率的影响最不显著。

3.6 失水条件下基于 SPSS 的盐胀率计算模型

运用 SPSS 软件，通过逐步多元非线性回归分析，得出试样的盐胀率受 4 个因素影响的经验公式为

$$\eta = 3.95 - 28.878x_1^3 + 43.546x_1^2 + 21.712x_1 + 0.27\ln(x_2) + 0.008x_3 + 0.013x_4^2 - 0.1354 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.954$$

式中： η 为硫酸盐渍土含水率单次递减条件下测得的盐胀率 (%)； x_1 为孔隙比； x_2 含盐量 (%)； x_3 温度 ($^\circ\text{C}$)； x_4 初始含水率 (%)； R 为相关系数。

4 失水速率

各影响因素条件下试样的干燥时长曲线如图 6

所示。取试样的失水速率为

$$V = \Delta w / \Delta t = \Delta m_w / (m_s t) \times 100\% \quad (2)$$

式中： V 为试样的失水速率； Δw 为含水率变化值； m_w 为土中水质量； m_s 为土粒质量。

由式(2)求得的试样失水速率曲线如图7所示。

从图7可以看出，试样在含水率单次递减条件下的失水速率与孔隙比、试验温度、初始含水率呈正相关关系，而与含盐量呈负相关关系。试样的风干过程是土体中水分不断蒸发的过程，通过分析后发现，试样的失水速率主要受以下几方面的影响：

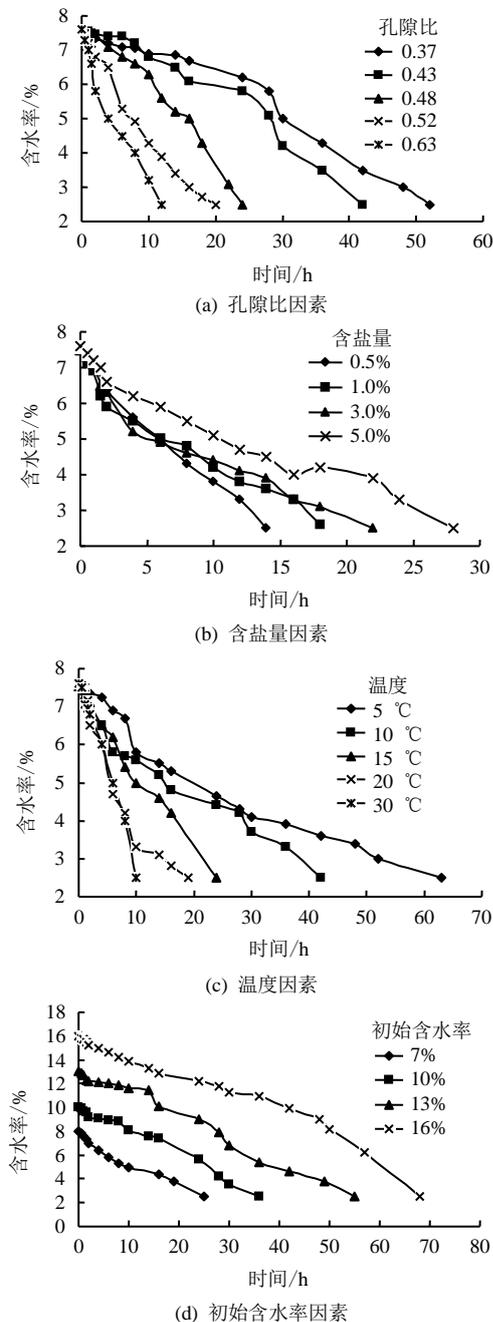


图6 试样的干燥时长曲线
Fig.6 Drying time curves of samples

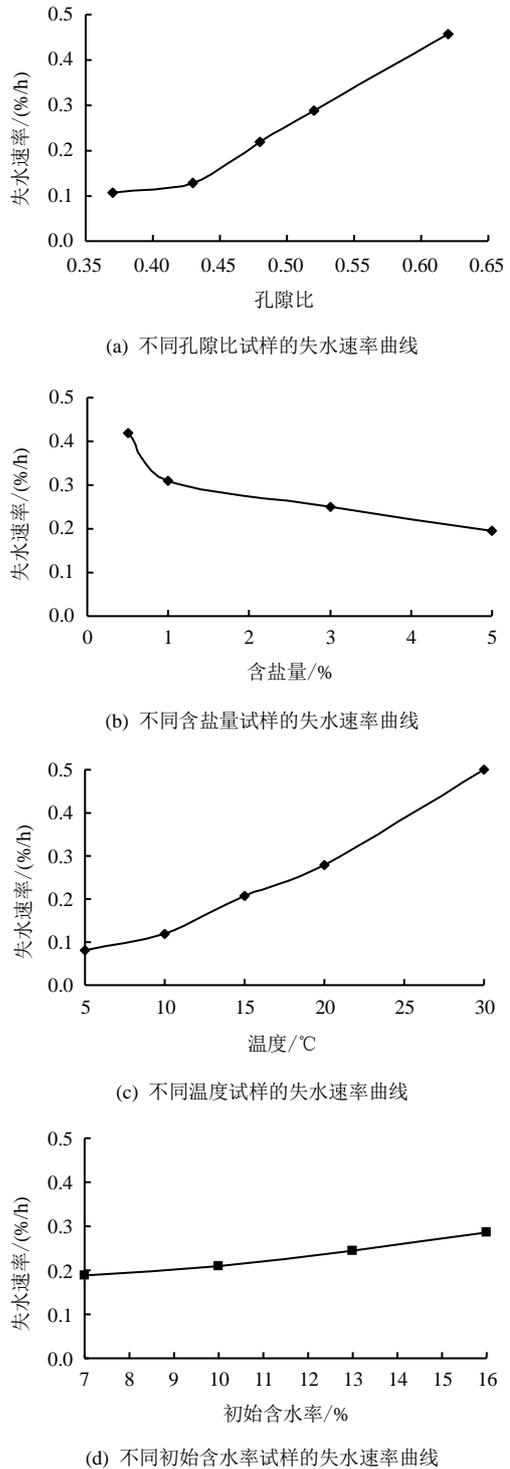


图7 试样的失水速率曲线
Fig.7 Dehydration velocity curves of samples

① 孔隙比越大，土体通风面积增大，这使得蒸发速率提高^[8]；② 温度越高，水分子动能越大，这使得土水势增大，进而蒸发速率提高^[9]；③ 含盐量越高，溶质势越低，这导致蒸发速率降低^[10]；④ 初始含水率越低，溶液中离子的浓度相对越高，其溶质势越低，蒸发速率越低；本次试样表明，初始含水率对试样的失水速率存在影响，但影响相对较小。

5 结 论

(1) 粗颗粒硫酸盐渍土的盐胀率受孔隙比、含盐量、温度、初始含水率 4 个因素影响, 盐胀过程受基质吸力以及盐胀力的影响显著。本文基于 SPSS 软件, 对盐胀率随 4 个因素变化的经验公式进行了拟合, 可为今后盐渍土地区的盐胀性评价提供理论参考。

(2) 试验表明, 粗颗粒硫酸盐渍土在含水率单次递减条件下的盐胀率较高。含盐量 5% 的粗颗粒硫酸盐渍土试样, 当初始含水率为 7%、温度 15 °C 时, 盐胀率接近 9%。这表明在进行盐胀性分析时, 由含水率递减引发的盐胀不容忽视。

(3) 粗颗粒硫酸盐渍土含水率单次递减的过程是土体水分不断蒸发的过程, 失水速率与硫酸盐渍土的孔隙比、温度呈正相关关系; 而与硫酸盐渍土的含盐量呈负相关关系。初始含水率对土样的失水速率的影响则相对较小。

参 考 文 献

- [1] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of frost heave and salt expansion of soils[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [2] 吴青柏, 孙涛, 陶兆祥, 等. 恒温下含硫酸钠盐粗颗粒土盐胀特征及过程研究[J]. 冰川冻土, 2001, 3(23): 239—243.
WU Qing-bai, SUN Tao, TAO Zhao-xiang, et al. Experimental studies on the salt expansion of coarse grain saline soils under constant temperature[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2001, 3(23): 239—243.
- [3] 王俊臣, 李劲松, 王常明. 硫酸(亚硫酸)盐渍土单次盐胀和冻胀发育规律研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 26(3): 410—416.
WANG Jun-chen, LI Jin-song, WANG Chang-ming. A study on single cycle salt and frost heaving of sulfate(sulfurous) saline soil[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 26(3): 410—416.
- [4] 张莎莎, 杨晓华, 谢永利, 等. 路用粗粒盐渍土盐胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1): 20—25.
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2009, 29(1): 20—25.
- [5] 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.
- [6] 邴慧, 何平. 不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2307—2312.
BING Hui, HE Ping. Experimental study of water and salt redistributions of saline soil with different freezing modes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2307—2312.
- [7] 耿鹤良, 杨成斌. 盐渍土化学潜蚀溶陷过程阶段化模型分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 232—234.
GENG He-liang, YANG Cheng-bin. Stage model analysis of progress of saline soil' chemical subsurface erosion dissolve settlement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 232—234.
- [8] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [9] 徐学祖, OLIPHANT J L, TICE A R. 土水势、未冻水含量和温度[J]. 冰川冻土, 1985, 7(1): 1—11.
XU Xue-zu, OLIPHANT J L, TICE A R. Soil-water potential and unfrozen water content and temperature[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 1985, 7(1): 1—11.
- [10] HARUYUKI FUJIMAKI, TAKAHIRO SHIMANO, MITSUHIRO INOUE, et al. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, (5): 1246—1256.