

文章编号:1673-2049(2015)05-0104-07

硫酸盐环境下灰土压缩性指标变化的室内试验

文 桃¹, 杨涵宇², 马 溪³, 米海珍¹, 王月礼¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 合肥工业大学 建筑与艺术学院, 安徽 合肥 230009;
3. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:通过一系列室内固结压缩试验,分析了养护龄期及含盐量对灰土压缩性的影响,并从微观结构上给出了合理的解释。试验结果表明:2种灰土的工程性能均随着养护龄期的增加而改善,尤其在40 d内改善较为明显;二八灰土的压缩系数随着硫酸盐含量的增加而不断增大,含盐量在2%内较为明显,水泥灰土的压缩系数随着含盐量的增加呈现先减小后增大的趋势,其含盐量界限在7%左右。所得结果对灰土在硫酸盐盐渍土地地区工程施工检测及质量控制具有一定的实际意义,可为2种灰土处理硫酸盐盐渍土地基的工程实践提供借鉴和参考。

关键词:二八灰土;水泥灰土;硫酸盐盐渍土;压缩系数;压缩模量

中图分类号:TU448

文献标志码:A

Indoor Test on Compressibility Index Changes of Lime-soil in Sulfate Environment

WEN Tao¹, YANG Han-yu², MA Xi³, MI Hai-zhen¹, WANG Yue-li¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
3. School of Electronic Control & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Through a series of consolidated compression tests of lime-soil, the effects of the curing age and salinity of lime-soil on its compressibility were investigated, and the reasonable explanation on the microstructure was given. The test results show that the engineering properties of the two kinds of lime-soil are increased when the curing age is increased, which is changed obvious especially in 40 d. 2 : 8 lime-soil compression coefficient increases with its increasing sulphate content, which is more obvious when sulphate content is 2%. However, Cement lime-loess compression coefficient first decreases and then increases with its increasing salinity at a limit of about 7%. The obtained results have a certain practical significance on the engineering construction detecting and quality control in sulphate saline soil areas, and can provide references for the engineering practice of the two kinds of lime-soil treated sulfate salty foundation.

Key words: 2 : 8 lime-soil; cement lime-soil; sulfate saline-soil; compression coefficient; compression modulus

收稿日期:2015-04-21

基金项目:甘肃省电力设计院与兰州理工大学合作研究项目(2011620111000485)

作者简介:文 桃(1986-),男,四川泸州人,工学博士研究生,E-mail:wtrm722@126.com。

0 引 言

石灰是一种资源极为丰富的廉价建筑材料,用其改善和增强土的性能早已被人们所熟知,并取得了许多工程技术成果和良好的经济效益。目前灰土除大量用于处理湿陷性黄土地基以外,还被广泛用来处理其他非饱和土及杂填土地基,是用于改良软土地区地基最常用的一种材料。目前各国学者对灰土的影响因素和本构模型做了研究,认识到灰土的性质受含水率、围压、龄期、干密度、浸水等因素的影响^[1-6]。然而,灰土在中国西北地区硫酸盐盐渍土的应用和研究很欠缺,并且硫酸盐盐渍土具有腐蚀、盐胀、溶陷等工程病害,会对建筑物和地面设施造成严重的破坏^[7-9],从而当采用灰土换填处理硫酸盐盐渍土地基时,随着时间的推移,难免会有盐分侵入灰土中,对灰土的性质和结构造成影响,引起灰土的孔隙率、强度等工程性质发生改变^[10-11],以致其处理硫酸盐盐渍土后的工程质量难以评价。因此研究硫酸盐含盐量对灰土压缩性指标的影响,对灰土处理硫酸盐盐渍土地基的工程应用、工程设计及安全运行评估等方面均有着十分重要的现实意义。

1 试样制备及试验方法

1.1 试验目的

本文试验是探求在不同含盐量、不同养护龄期和不同浸泡时间下 2 种灰土压缩性指标的变化规律,为灰土处理硫酸盐土地地区的地基提供试验参数和指导。

1.2 试验材料

本文试验所用土样为二八灰土和水泥灰土(黄土、石灰、水泥的体积比为 7:2:1),其中黄土采用的是兰州兰工坪扰动黄土,其物理性质指标见表 1。水泥标号为 42.5,石灰为消解石灰,CaO 质量分数为 74.6%,MgO 质量分数为 7.9%。

表 1 土的物理性质指标

Tab. 1 Physical Property Indexes of Soil			
土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.69	25.4	16.1	9.3

1.3 试样制备与试验

(1)跟据现行《土工试验规程》(SL 237—1999),先将土料在烘箱恒温 105 ℃下烘干,再把烘干后的土料碾碎后过粒径为 5 mm 的筛,然后将制备二八灰土和水泥灰土所需的石灰和水泥掺入土料中,并拌和均匀。

(2)取拌和均匀的二八灰土和水泥灰土混合料各 5 份,分别向其中加水制备 5 个设计含水量的击实试验用试样,然后拌和均匀。二八灰土试样闷料 24 h 后进行击实试验,而水泥灰土试样拌和均匀后直接进行击实试验,2 种灰土均采用轻型击实试验(击实功为 592.2 kJ·m⁻³)。表 2 为灰土的击实试验结果。

表 2 灰土的击实试验结果

Tab. 2 Dust Compaction Test Results of Lime-soil		
土样类型	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水量/%
二八灰土	1.56	23.5
水泥灰土	1.61	25.0

(3)根据击实试验结果,在最优含水量下制备 2 种灰土的固结试验试样,并将制备好的试样密封在塑料袋内,在室温下养护至设计养护龄期。二八灰土养护龄期设计为 20,40,60 d,浸泡时间设计为 4,7,10,14 d,共 144 件;水泥灰土养护龄期设计为 10,20,40 d,浸泡时间设计为 4,7,10,14 d,共 144 件。

(4)在 2 种灰土试样达到设计养护龄期后,用环刀取固结试验的试样,并将环刀取好的试样放入设计含盐量的硫酸钠溶液中浸泡,硫酸钠溶液含盐量设计为 0%,2%,7%,12%。

(5)将达到设计浸泡时间后的试样进行固结试验,固结试验的荷载设计为 50,100,200,300,400,600 kPa。

为了尽量减小试验误差,在配制二八灰土和水泥灰土时,将石灰和水泥的体积比换算成质量比;考虑到水泥的凝固时间短,所以在击实试样时水泥灰土没有闷料,拌和好后直接击实;本文试验采用荷载 $P_1=100$ kPa 和荷载 $P_2=200$ kPa 所得到的压缩系数 a_{1-2} (2 个荷载下试验值的斜率)作为评价灰土压缩性高低的指标。每一单项固结试验做 2 组平行试验,并取其平均值。

2 试验结果与分析

2.1 硫酸盐环境下养护龄期对灰土压缩性指标的影响

2.1.1 养护龄期对二八灰土压缩系数的影响

图 1 为不同含盐量的硫酸盐环境下二八灰土的压缩系数与养护龄期间的关系曲线。从图 1 可以看出,在不同含盐量的硫酸盐环境下,养护龄期对二八灰土压缩系数的影响都比较显著。二八灰土的压缩系数随着养护龄期的增加而逐渐减小。当养护龄期大于 40 d 后,浸泡于淡水(含盐量为 0%)中的二八

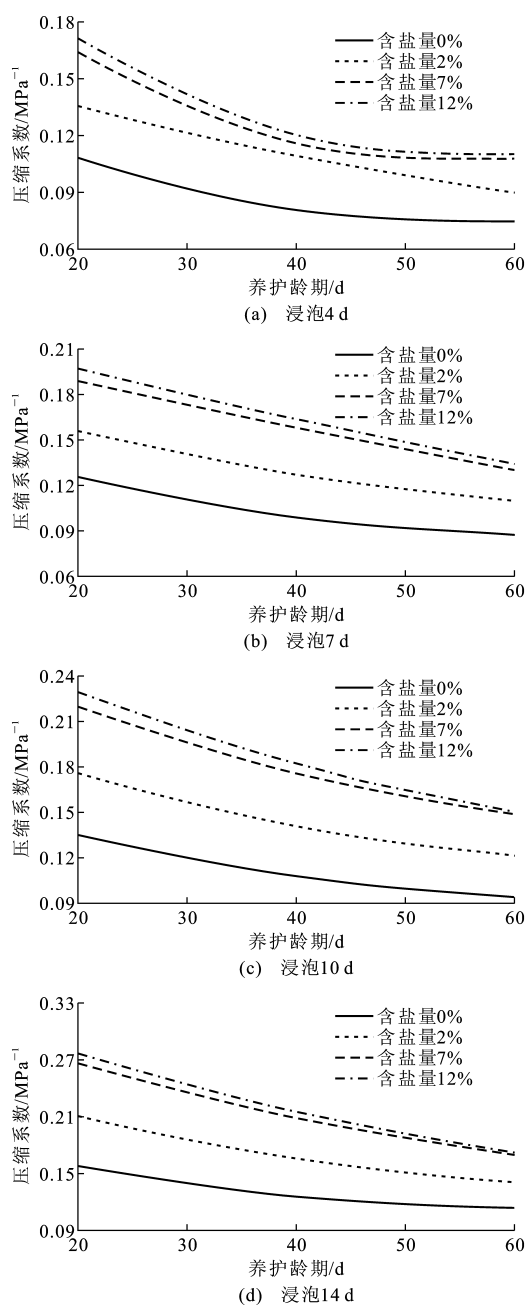


图 1 二八灰土的压缩系数与龄期的关系
Fig.1 Relations Between 2 : 8 Lime-soil Compression Coefficient and Curing Age

灰土,其压缩系数较浸泡于硫酸盐溶液中的二八灰土压缩系数减小的速率明显减缓,即龄期大于 40 d 后,二八灰土浸泡于淡水中时,其压缩系数已经趋于稳定;浸泡于不同含盐量的硫酸盐溶液中时,其压缩系数并不稳定,还有较大减小的空间。

出现这些规律的主要机理是:在养护期间,石灰与土混合后发生一系列反应,产生的水化产物与粘土颗粒粘结在一起形成网状结构,增强了颗粒间的联结作用。熟石灰可以使硬凝产物在土粒的孔隙中沉积^[12-15],使灰土孔隙减小,从而使土的压缩系数显

著降低。随着养护龄期的增长(超过 40 d),灰土中的熟石灰越来越少,并且在硫酸盐溶液中浸泡时,硫酸钠与土中氢氧化钙发生反应,从而导致石灰与土之间火山灰反应减慢,因此压缩系数随着养护龄期的增长而减小得越来越缓慢。该规律与养护龄期对灰土压缩系数影响的研究相吻合^[16]。

2.1.2 养护龄期对水泥灰土压缩系数的影响

图 2 为水泥灰土的压缩系数与龄期的关系。从图 2 可以看出,水泥灰土的压缩系数均随着养护龄期的增加而逐渐减小。当养护龄期达到 20 d 后,浸泡于淡水(含盐量为 0%)中的水泥灰土压缩系数较浸泡于硫酸盐溶液中的水泥灰土压缩系数减小的速率明显趋于缓慢;另外,在硫酸盐溶液中浸泡的水泥灰土,其压缩系数整体上在龄期达到 20 d 后基本趋于稳定。

出现这样规律的主要机理是:

(1)在养护期间,水泥灰土中的水泥和石灰能与土中的各类矿物反应并生成大量的胶凝体,这些胶凝体会将水泥灰土颗粒胶结起来,并形成不断扩展、相互交接的纤维,从而使水泥灰土的孔隙减小,导致土体的压缩性减小,这与二八灰土相似。因此水泥灰土的压缩系数在养护期间随着养护龄期的增加而逐渐减小。

(2)在硫酸盐溶液浸泡期间,当水泥灰土浸泡于硫酸盐溶液中时,水泥灰土中的水泥和石灰会与硫酸钠反应生成钙矾石等物质,从而也会加剧水泥灰土的水硬化反应,使水泥灰土的压缩性进一步提前趋于稳定。同时由于水泥灰土早期强度较高,占总体强度的比例较大,从而使得其强度随着早期强度的完成而趋于稳定。随着水泥灰土强度的增加,硫酸盐溶液中析出的芒硝晶体产生的膨胀力对水泥灰土的破坏逐渐减小,因此水泥灰土在强度趋于稳定后,其压缩系数也逐渐稳定。

2.2 硫酸盐环境下含盐量对灰土的压缩性指标的影响

2.2.1 含盐量对二八灰土压缩系数的影响

图 3 为二八灰土压缩系数与含盐量间的关系曲线。由图 3 可知,整体表现为二八灰土压缩系数随含盐量的增加而增大,但当含盐量超过 2%后,压缩系数增加速率有所减缓。

产生这一规律的主要机理为:二八灰土早期强度较低^[17],当含盐量达到 2%时,由硫酸钠结晶膨胀所产生的膨胀力就已经足以破坏二八灰土的结构,使得二八灰土的孔隙增大,压缩系数增大。因此,浸

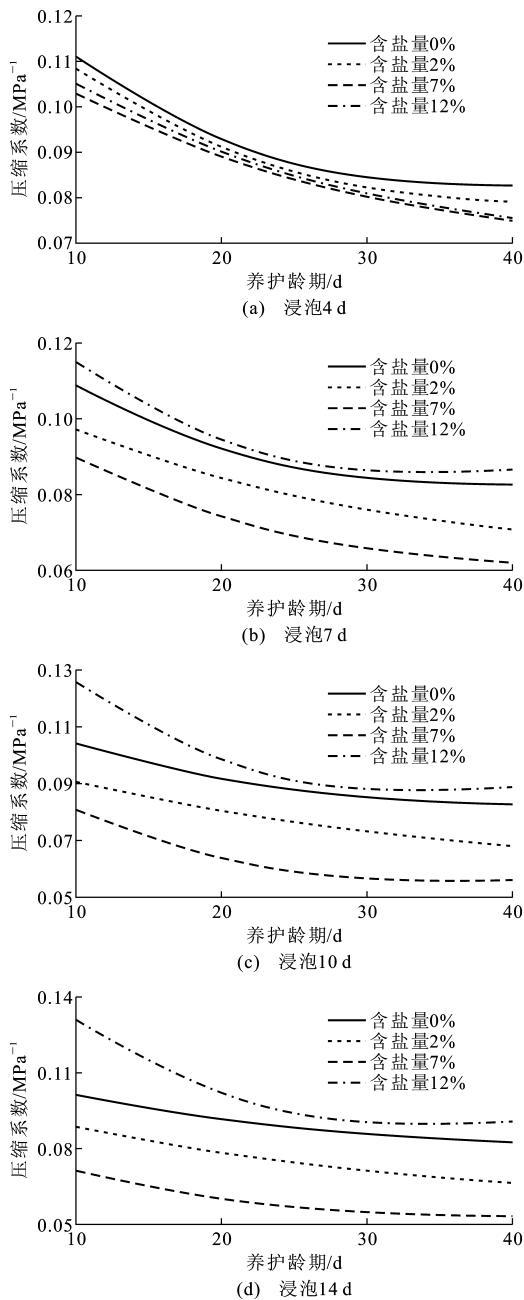


图 2 水泥灰土的压缩系数与龄期的关系
Fig. 2 Relations Between Cement Lime-soil Compression Coefficient and Curing Age

泡于含盐量为 2% 的硫酸盐溶液中的二八灰土表现出较浸泡于淡水时更大的压缩系数;随着含盐量的继续增加,二八灰土中析出的芒硝晶体就越多,导致灰土的结构破坏越严重,孔隙率增大越多,因而二八灰土的压缩系数也就越大。

2.2.2 含盐量对水泥灰土压缩系数的影响

图 4 为水泥灰土的压缩系数与含盐量的关系。从图 4 可以看出,水泥灰土的压缩系数随着含盐量的增加而呈现出明显的先减小后增大的变化趋势。水泥灰土压缩模量与含盐量间关系明显,利用最小

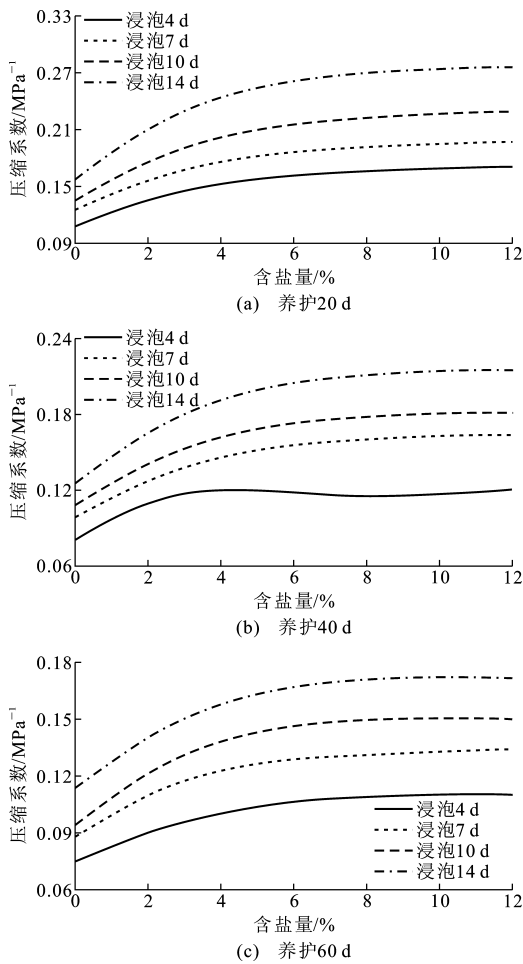


图 3 二八灰土的压缩系数与含盐量的关系
Fig. 3 Relations Between 2:8 Lime-soil Compression Coefficient and Salinity

二乘法将上述数据多次拟合后得到水泥灰土压缩系数与含盐量 S (百分含量)间大致呈二次曲线(浸泡 4 d 除外)关系,可表示为

$$a_{1-2} = A + B_1 S + B_2 S^2, R^2 = 0.996 \quad (1)$$

式中: A_1, B_1, B_2 均匀系数; R^2 为判定系数。

结合试验结果对式(1)进行数学求解。结果表明:含盐量 S 在 7% 左右时水泥灰土的压缩系数 a_{1-2} 达到最小值。

产生以上规律的机理为:

(1)当硫酸钠溶液的浓度(质量分数)较低(试验中为小于 7%)时,析出的芒硝晶体还不足以破坏水泥灰土的结构,所以水泥灰土的密实度、压缩系数受结晶析出的芒硝晶体的影响不大。此时影响水泥灰土压缩系数的主要因素是硫酸钠与水泥和石灰反应生成的凝胶体,凝胶体越多,水泥灰土的压缩系数越小,而在相同的浸泡时间条件下,硫酸钠溶液的浓度越大,生成的凝胶体也会越多,从而导致水泥灰土的压缩系数会随着含盐量的增加而减小。

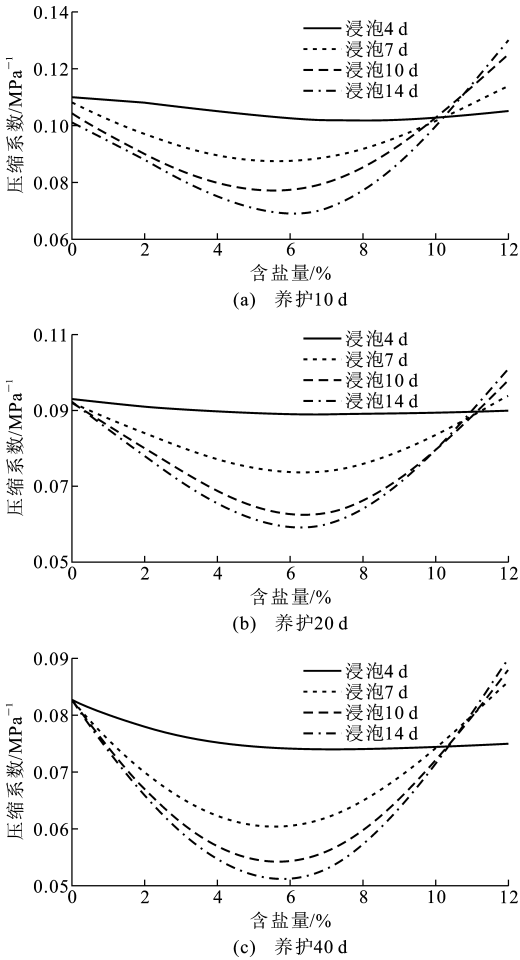


图 4 水泥灰土的压缩系数与含盐量的关系
Fig. 4 Relations Between Cement Lime-soil
Compression Coefficient and Salinity

(2)当含盐量较高(试验中大于 7%)时,水泥灰土的孔隙率、压缩系数变化主要由硫酸钠溶液结晶析出的芒硝晶体引起的试样膨胀破坏作用决定,此时硫酸钠溶液的浓度越高,水泥灰土结构破坏就越严重,孔隙率越大,压缩系数也越大,直至试件破坏。

2.3 硫酸盐溶液中浸泡时间对灰土压缩性指标的影响

2.3.1 浸泡时间对二八灰土压缩系数的影响

图 5 为二八灰土的压缩系数与浸泡时间的关系。从图 5 可看出,在 4 种浓度的硫酸钠溶液中浸泡时,各养护龄期的二八灰土其压缩系数都随着浸泡时间的增加而不断增大。此外,在淡水和含盐量较小(2%)的硫酸钠溶液浸泡下,二八灰土压缩系数随着浸泡时间的增加而增大的速率比在含盐量高(7%,12%)的硫酸钠溶液浸泡下的速率明显低;在硫酸钠溶液的含盐量达到或高于 7%(如 7%,12%)后,二八灰土的压缩系数随浸泡时间的增加而增大的幅度非常接近。

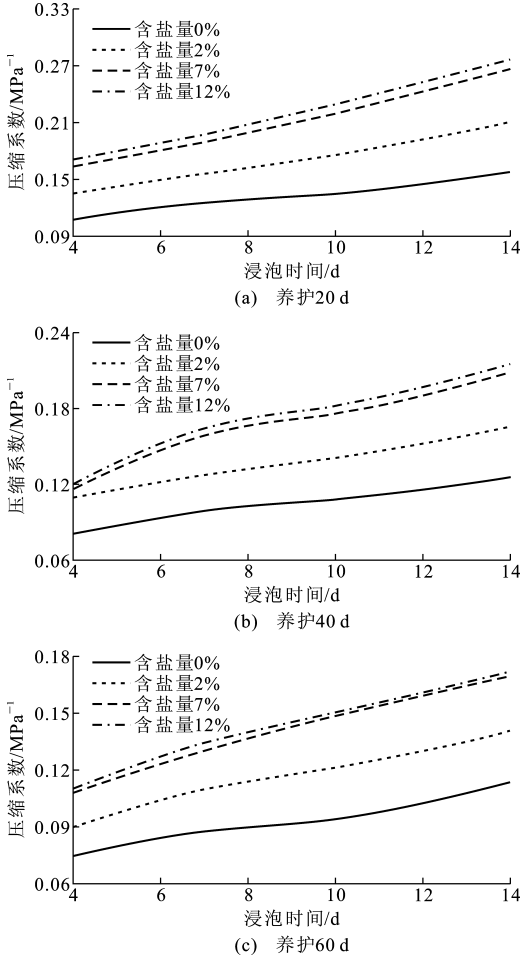


图 5 二八灰土的压缩系数与浸泡时间的关系
Fig. 5 Relations Between 2 : 8 Lime-soil Compression
Coefficient and Steeping Time

产生这一规律的主要机理为:前文提到二八灰土浸泡于含盐量为 2%的硫酸盐溶液中时,表现出较浸泡于淡水时更大的压缩系数,随着浸泡时间的增加,浸入到二八灰土内的硫酸钠溶液也就越多,因此其浸入二八灰土时所析出的芒硝晶体也就越多,导致二八灰土的结构破坏越严重,孔隙率增大也越多,因而二八灰土的压缩系数也就越大,并在整体上表现出随着浸泡时间的增加而迅速增大的规律。此外,当含盐量达到 7%时,二八灰土的结构就基本破坏了,从而当含盐量进一步增加时,其结构进一步破坏的程度大幅减小,所以在含盐量达到或超过 7%后,其压缩系数随浸泡时间的增加而增大的幅度非常接近。

2.3.2 浸泡时间对水泥灰土压缩系数的影响

图 6 为水泥灰土的压缩系数与浸泡时间的关系。从图 6 可以看出:各养护龄期的水泥灰土在含盐量低于 7%的硫酸钠溶液中浸泡时,其压缩系数随着浸泡时间的增加而不断减小,且减小的速率越

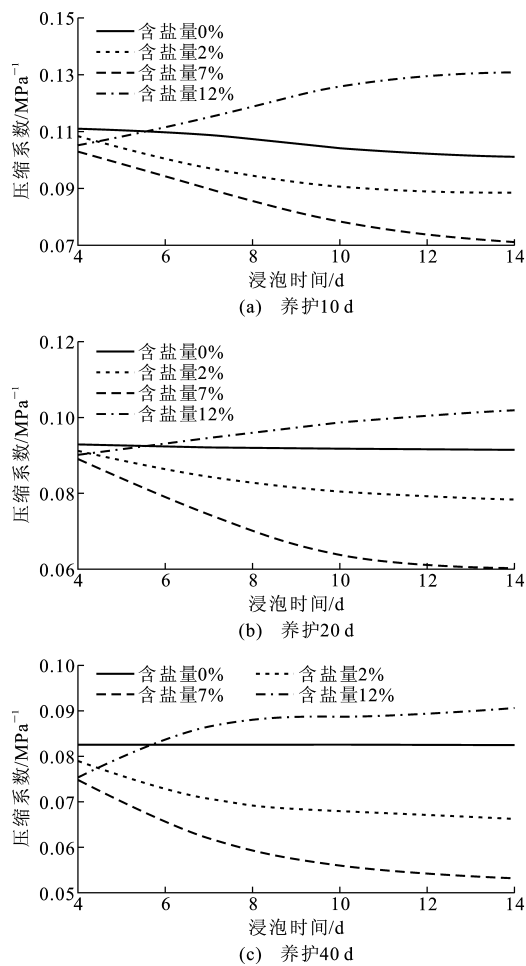


图 6 水泥灰土的压缩系数与浸泡时间的关系

Fig. 6 Relations Between Cement Lime-soil Compression Coefficient and Steeping Time

来越缓慢;当在含盐量高于 7% 的硫酸钠溶液中浸泡时,其压缩系数随着浸泡时间的增加而不断增大,增大的速率也越来越缓慢。水泥灰土在硫酸钠溶液中浸泡 4 d 时,其在 4 种浓度下的压缩系数较为接近,但是随着浸泡时间的增加,彼此间的差值逐渐加大,尤其是含盐量为 7% 和 12% 浸泡下的压缩系数,两者之间的差由 0.003 增大为 0.06,扩大了 20 倍。因此浸泡时间对水泥灰土的压缩系数影响很大,对于这一点,以往的研究还未有过报道,应予以充分的重视。

产生以上规律的机理为:浸泡时间为 4 d 时,由于浸泡时间很短,浸入水泥灰土试样的硫酸钠溶液还比较少,因此不论含盐量的高低,其压缩系数均大致相同。然而随着浸泡时间的增加,浸入到水泥灰土中的硫酸钠溶液逐渐增多,浸入到水泥灰土中的硫酸盐含量也越来越大。当浸泡时间达到 7 d 或 7 d 以上时,硫酸钠溶液已基本浸透整个水泥灰土,此时影响水泥灰土压缩系数的主要因素有 2 个:一是

硫酸钠与水泥和石灰反应生成的凝胶体,二是硫酸钠引起的试样膨胀破坏作用。因此在硫酸钠溶液含盐量较低(试验中为小于 7%)时,硫酸钠引起的盐胀还不足以显著地破坏试样的结构,硫酸钠与水泥和石灰反应生成的凝胶体多少成为影响水泥灰土压缩系数的主导因素,浸泡时间越长,凝胶体越多,水泥灰土的压缩系数越小。当含盐量较高(12%)时,水泥灰土的孔隙率、压缩系数的变化主要由硫酸钠引起的膨胀破坏作用决定,从而浸泡时间越长,水泥灰土结构破坏越严重,孔隙率、压缩系数增加越大。因此,水泥灰土在含盐量较低(小于 7%)溶液浸泡下的压缩系数与含盐量较高(12%)溶液浸泡下的压缩系数之间的差值会随着浸泡时间的增加而不断增大。

3 结 语

(1)掺入少量水泥(水泥掺入体积分数为 10%)的水泥灰土在一定含盐量溶液的浸泡后较之纯二八灰土其压缩系数明显小。

(2)在各含盐量硫酸钠溶液中浸泡任一时间后的二八灰土、水泥灰土其压缩系数均随着养护龄期的增加而减小并逐渐趋于稳定。

(3)二八灰土的压缩系数均随着浸泡溶液中硫酸盐含量的增加而迅速增加,并在含盐量超过 2% 后,增加速率减缓。

(4)水泥灰土压缩系数随着含盐量的增加而呈现出明显的先减小后增大的变化规律,并且其含盐量临界值在 6% 左右。

(5)在含盐量 0%~12% 的硫酸钠溶液中浸泡时,二八灰土的压缩系数都随着浸泡时间的增加而不断增大,当含盐量达到或高于 7% 后,不同含盐量二八灰土的压缩系数随着浸泡时间的增加其增大幅度非常接近。

(6)各养护龄期的水泥灰土在含盐量小于 7% 的硫酸钠溶液中浸泡时,其压缩系数随着浸泡时间的增加而不断减小,而含盐量较高(12%)时,其压缩系数随着浸泡时间的增加而不断增大。随着浸泡时间的增加,在不同浓度硫酸钠溶液中浸泡的试样其压缩系数间的差值会迅速增大,对于这一点,应予以充分的重视。

参考文献:

References:

[1] 韩晓雷,郅彬,郭志勇.灰土强度影响因素研究[J].

- 岩土工程学报, 2002, 24(5): 667-669.
- HAN Xiao-lei, ZHI Bin, GUO Zhi-yong. Research on the Principal Factors in Strength of the Lime-loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 667-669.
- [2] 刘有科. 灰土强度影响因素及其本构关系的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- LIU You-ke. Research on the Influence Factors in Strength and the Constitutive Relationship of the Lime-loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [3] 王希玲. 灰土击实试验及其应用 [J]. 西北建筑工程学院学报: 自然科学版, 2002, 19(3): 18-21.
- WANG Xi-ling. Study of Compaction Test of Lime-soil and Its Use [J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering: Natural Science, 2002, 19(3): 18-21.
- [4] 董玉文, 张伯平, 唐林. 黄土灰土的击实性与抗剪性试验研究 [J]. 西北水资源与水工程, 2001, 12(1): 62-64.
- DONG Yu-wen, ZHANG Bo-ping, TANG Lin. Test About Compaction and Shearing Properties of Lime-loess [J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2001, 12(1): 62-64.
- [5] 米海珍, 王昊, 高春, 等. 灰土的浸水强度及残余强度的试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2781-2785.
- MI Hai-zhen, WANG Hao, GAO Chun, et al. Study of Immersion Strength and Residual Strength of Lime-loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2781-2785.
- [6] 米海珍, 朱浩稳, 王昊. 三轴试验下二八灰土强度的变化规律 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 117-120.
- MI Hai-zhen, ZHU Hao-wen, WANG Hao. Variation Pattern of Strength of 2:8 Lime-soil Based on Its Triaxial Test [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4): 117-120.
- [7] ATZENI C, CABIDDU M G, MASSIDDA L, et al. Crystallization of Sodium Sulphate in Polymer Impregnated Plasters [J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(1): 3-8.
- [8] ABELEV M Y. Problems of Construction on Saline Silts [C]//ARC. Proceedings of the Fourth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Bangkok: ARC, 1971: 243-247.
- [9] MOKNI N, OLIVELLA S, ALONSO E E. Swelling in Clayey Soils Induced by the Presence of Salt Crystals [J]. Applied Clay Science, 2010, 47(1/2): 105-112.
- [10] DASH S K, HUSSAIN M. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(6): 707-714.
- [11] SINISTSYN A O, LOSET S. Equivalent Cohesion of Frozen Saline Sandy Loams at Temperatures Close to Their Freezing Point [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, 47(2): 68-73.
- [12] 米海珍, 杨泽平. 三种改良土的渗透性试验研究 [J]. 建筑科学, 2011, 27(11): 41-43.
- MI Hai-zhen, YANG Ze-ping. Experimental Study on Permeability of Three Kinds of Improved Loess [J]. Building Science, 2011, 27(11): 41-43.
- [13] 文桃, 米海珍, 马连生, 等. 石灰改良黄土状硫酸盐渍土强度的影响因素研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 104-120.
- WEN Tao, MI Hai-zhen, MA Lian-sheng, et al. Research on Effect Factors of Strength of Lime-treated Loessial Sulfate Salty Soil [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 104-120.
- [14] 米海珍, 黄建明, 胡燕妮. 三七灰土本构关系及强度性质试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 112-118.
- MI Hai-zhen, HUANG Jian-ming, HU Yan-ni. Experiment on Constitutive Relation and Strength Properties of Three-to-seven Lime-loess [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 112-118.
- [15] 刘鑫红, 吴其华. 二灰土施工质量控制浅析 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(5): 20-22.
- LIU Zhan-hong, WU Qi-hua. Construction Quality Control of Fly Ash and Lime Soil [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(5): 20-22.
- [16] 董玉文, 张伯平. 养护龄期对灰土工程性能的影响试验研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(3): 38-42.
- DONG Yu-wen, ZHANG Bo-ping. Test About the Influence of Curing Age on the Engineering Properties of Lime-soil [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(3): 38-42.
- [17] 赵寿刚, 常向前, 杨小平. 石灰土的工程特性试验研究 [J]. 工程勘察, 2007(2): 10-13.
- ZHAO Shou-gang, CHANG Xiang-qian, YANG Xiaoping. Test and Study on Feature of Lime-soil Project [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(2): 10-13.