

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0058-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.010

改良滨海盐渍土物理性质及水稳定性试验研究

李方^{1, 2}, 孙树林^{1, 3}, 张德恒⁴

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省南京工程高等职业学校 地质工程系, 江苏 南京 211135; 3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 4. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 通过室内试验研究了滨海盐渍土及改良滨海盐渍土的比重、塑限、液限、塑性指数、最大干密度、最优含水量等物理性质指标; 以无侧限抗压强度试验为依据研究改良盐渍土在养护龄期7、14、28、60 d的无侧限抗压强度; 并以养护龄期14 d改良盐渍土试样为例, 研究不同浸水时间(1、4、7、14 d)下改良盐渍土的浸水稳定性。试验结果表明: 比重、液限、塑性指数和最大干密度随着掺合料总掺量增大基本呈线性减小。塑限和最优含水量随着掺合料总掺量增大基本呈线性增大。改良盐渍土无侧限抗压强度随养护龄期和掺合料总掺量增长都呈增长趋势。随着浸水时间的增长, 改良盐渍土的无侧限抗压强度减小; 随着掺合料总量的增加, 改良盐渍土无侧限抗压强度基本呈线性增加; 各配比水稳系数随着养护龄期的增长而增长; 随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土无侧限抗压水稳系数基本都是呈线性增加; 随着浸水时间增加, 质量损失率范围越来越大; 随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土质量损失率基本都是呈幂函数减小。

关键词: 滨海盐渍土; 无侧限抗压强度; 水稳系数; 质量损失率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Experimental Study on Improving Physical Properties and Water Stability of Coastal Saline Soil

LI Fang^{1, 2}, SUN Shulin^{1, 3}, ZHANG Deheng⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Department of Geologic Engineering, Jiangsu Province Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing, Jiangsu 211135, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China; 4. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

Abstract: Physical property indexes of coastal saline soil and improved coastal saline soil such as specific gravity, plastic limit, liquid limit, plastic index, maximum dry density, optimal water content were studied through laboratory experiments in this paper. Based on unconfined compressive strength test, the unconfined compressive strength of improved saline soils at the curing age of 7 d, 14 d, 28 d and 60 d were studied. Taking the improved saline soil samples at the curing age of 14d as an example, the stability of the improved saline soil under different soaking time (1 d, 4 d, 7 d, 14 d) was studied. The test results show that some indexes such as specific gravity, liquid limit, plasticity index and maximum dry density decrease linearly with the increase of the total content of the admixture; other indexes such as plastic limit and optimal water content increase linearly with the increase of the total amount of admixture. The unconfined compressive strength of improved saline soil increases with the increase of curing age and total admixture content. The unconfined compressive strength of improved saline soil decreases with the increases of immersion time. The unconfined compressive strength of

收稿日期: 2019-08-01

基金项目: 国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005408911); 留学回国人员科研基金资助项目(20071108)

作者简介: 李方(1982-), 女, 江苏连云港人, 博士生, 讲师, 从事特殊土改良方面的研究。

improved saline soil increases linearly with the increase of the total amount of admixture. The water stability coefficient of each ratio increases with the increase of curing age. With the increase of the total amount of admixture, the stability coefficient of unconfined compressive water of improved saline soil basically increases linearly. With the increase of soaking time, the range of mass loss rate becomes larger and larger. With the increase of the total amount of admixture, the loss rate of modified saline soil basically decreases as a power function.

Key words: coastal saline soil; unconfined compressive strength; water stability coefficient; quality loss rate

盐渍土作为一种特殊土在我国分布广泛^[1], 具有溶陷性、腐蚀性、盐胀性等特点, 对于工程建设和经济发展有着很大的制约作用^[2-5]。对于盐渍土最常用的处理方式就是通过加入不同的改良剂进行物理化学性质的改良^[6-7]。国内外目前对于盐渍土改良方面的研究主要针对不同环境条件下物理性质^[8-10]、力学性质^[11-13]及耐久性^[14-15]进行, 很少涉及到浸水稳定性的研究。本文以连云港徐圩新区盐渍土为研究对象, 采用沸石粉、电石灰、脱硫石膏三者组成的改良剂对滨海盐渍土进行改良, 通过室内试验得到素盐渍土及改良盐渍土的物理性质, 并着重研究改良盐渍土在浸水条件下的强度稳定特性。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

盐渍土取自江苏连云港市徐圩新区东北方向, 其物理性质指标如表1所示^[16], 根据标准^[17]定义为低液限黏土; 含盐量指标如表2所示, 根据规范定义为^[18]中氯盐渍土。

试验用沸石粉 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量高达 83%。电

表1 盐渍土物理性质指标表

Tab.1 Table of physical property index of saline soil

物理性质指标	数值	
比重	2.633	
塑限 /%	24.601	
液限 /%	48.512	
塑性指数	23.911	
最优含水量 /%	27.48	
最大干密度 /(g·cm ⁻³)	1.575	
粒径分布 /%	0.05 ~ 2 mm	8.7
	0.002 ~ 0.05 mm	57.5
	< 0.002 mm	33.8
分类	GB/T 50145-2007	CL

石渣主要成分以 CaO 计为 93.655%。脱硫石膏主要成分为 CaSO₄·2H₂O, 以 SO₃ 计含量为 46.136%。

1.2 掺合料掺量

将盐渍土土样、沸石粉、电石渣、脱硫石膏在合适温度下烘干, 后通过碎土器碾散, 根据规程要求的土样数量, 物理性试验土样过 0.5 mm 筛, 力学性试验过 2 mm 筛, 击实试验过 5 mm 筛, 后用四分对角法, 取出足够数量的代表性土样, 分别装入容器内加标签备用。根据掺合料脱硫石膏、电石渣沸石粉的配比(质量百分比)不同可分为 6 个试验组, 各组试验配比: 试验 1 为 10 : 4 : 4, 试验 2 为 10 : 6 : 6, 试验 3 为 10 : 8 : 8, 试验 4 为 15 : 4 : 4, 试验 5 为 15 : 6 : 6, 试验 6 为 15 : 8 : 8。

1.3 试验方案

1.3.1 物理性质指标试验

本文按《土工试验规程》(SL237-1999), 对 6 组不同配比的土样进行比重试验、界限含水量试验、击实试验等测试, 得到不同改良盐渍土试样的比重、液限、塑限、塑性指数、最大干密度和最优含水量等物理性质指标。采用应变控制式无侧限压缩仪, 得到各改良盐渍土试样的无侧限抗压强度。

1.3.2 浸水试验

制备常温条件下改良盐渍土无侧限抗压强度试

表2 盐渍土含盐量

Tab.2 Analysis of soluble salts in saline soil^[19]

指标名称	数值	指标名称	数值
Na ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	12 834.19	CO ₃ ²⁻ /(mg·kg ⁻¹)	15.21
K ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	260.74	Cl ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	25 948.17
Ca ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	733.71	SO ₄ ²⁻ /(mg·kg ⁻¹)	3 391.82
Mg ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	42.45	pH	8.51
HCO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	36.38	含盐量 /%	4.6

样, 在标准养生环境下分别养护 14 d 后, 将达到养护龄期的改良盐渍土试样, 直接放入水中浸泡, 测试改良土试样在浸水 1、4、7、14 d 过程中的质量和强度变化, 得到抗压强度和重量随浸水天数的变化关系规律, 分析各种改良方案的水稳定性。采用水稳系数表示改良盐渍土的水稳定性, 计算见式 (1)。试样水稳系数越大, 说明试样遇水后强度降低程度越低, 强度受水影响越小。

$$\delta_R = \frac{R_{Cn}}{R_{C0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_R 为水稳系数, %; R_{C0} 为试样不泡水 n 天无侧限抗压强度, MPa; R_{Cn} 为试样泡水 n 天后无侧限抗压强度, MPa。

采用质量损失率定量描述不同浸水时间后改良盐渍土样质量的变化, 用式 (2) 计算。试样质量损失越大, 说明其遇水后稳定性越差。

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_n 为浸水 n 天后质量损失率, %; m_0 为未浸水 n 天试件的干质量, g; m_n 为浸水 n 天试件的干质量, g。

2 试验结果与分析

2.1 物理性质指标试验

素土及各改良盐渍土试样的物理性质指标如表 3 所示。可知: 改良剂的参加对盐渍土的比重、液塑限、塑性指数、最优含水量和最大干密度都有影响。且随着掺合料总掺量的变化呈有规律的变化。

掺合料总掺量对改良土比重的影响如图 1 所示。可知随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土的比重减小。素盐渍土的比重为 2.633。掺合料总掺量从

18% 增加到 31% 时, 比重由 2.568 减小到 2.546。

改良盐渍土的界限含水量随掺合料总掺量的变化如图 2 至图 4 所示。可看出: 随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土塑限呈线性增加趋势。掺合料的参加使得土体中粘性土颗粒占比减小, 导致塑限

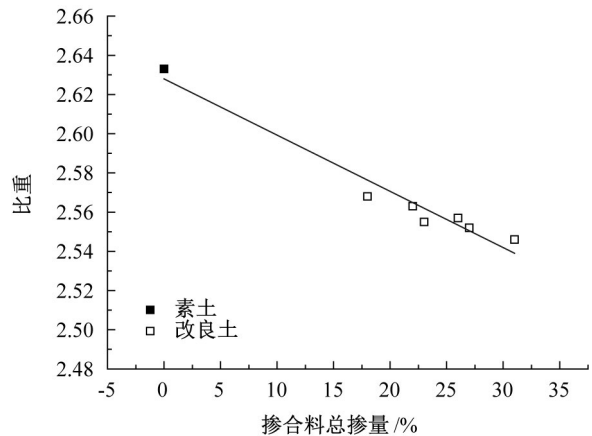


图 1 改良盐渍土比重与掺合料总掺量的关系
Fig.1 Relationship between specific gravity of improved saline soil and total admixture content

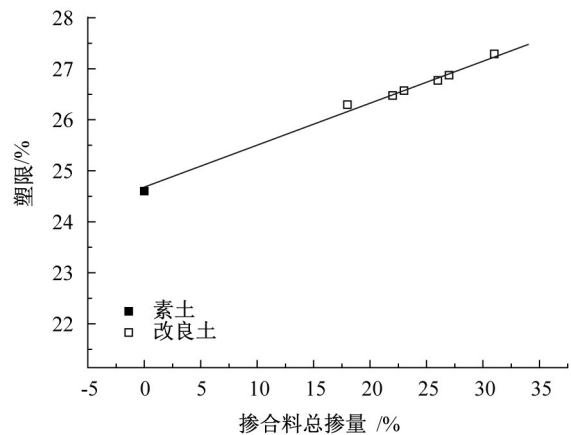


图 2 改良盐渍土塑限与掺合料总掺量的关系
Fig.2 Relationship between plastic limit of improved saline soil and total admixture content

表 3 改良盐渍土物理性质指标

Tab.3 Physical property indexes of improved saline soil

试验编号	掺合料总掺量/%	比重 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	最优含水量 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$
素土	0	2.633	24.601	48.512	23.911	27.480	1.575
试验 1	18	2.568	26.296	45.474	19.178	31.997	1.487
试验 2	22	2.563	26.474	45.082	18.609	32.457	1.459
试验 3	26	2.557	26.773	44.391	17.618	33.637	1.426
试验 4	23	2.555	26.573	44.788	18.215	32.897	1.451
试验 5	27	2.552	26.873	44.261	17.388	33.787	1.409
试验 6	31	2.546	27.292	43.217	15.926	35.226	1.392

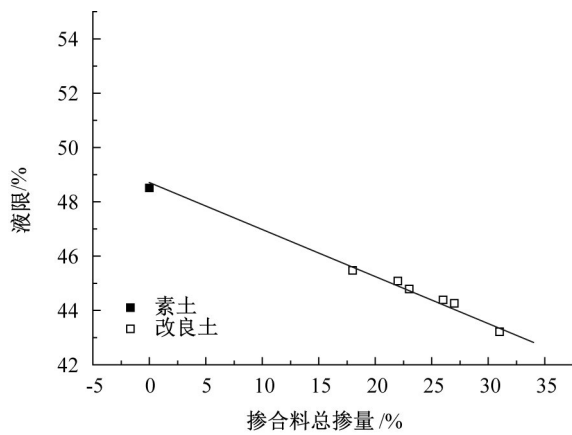


图3 改良盐渍土液限与掺合料总掺量的关系

Fig.3 Relationship between liquid limit of improved saline soil and total admixture content

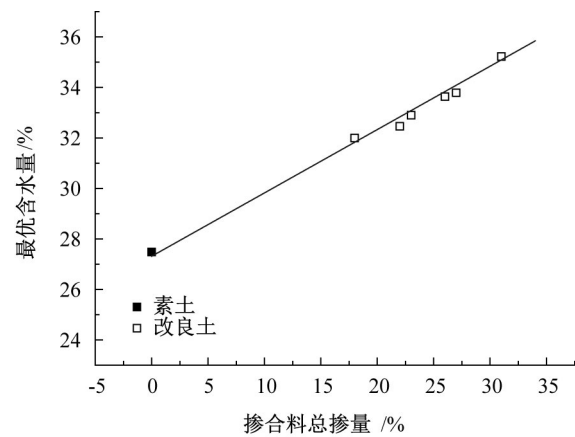


图5 改良盐渍土最优含水量与掺合料总掺量关系

Fig.5 Relation between optimal water content of improved saline soil and total admixture content

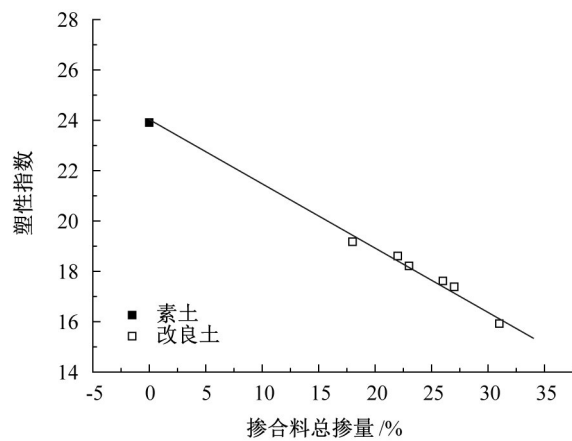


图4 改良盐渍土塑性指数与掺合料总掺量的关系

Fig.4 Relationship between plasticity index of improved saline soil and total admixture content

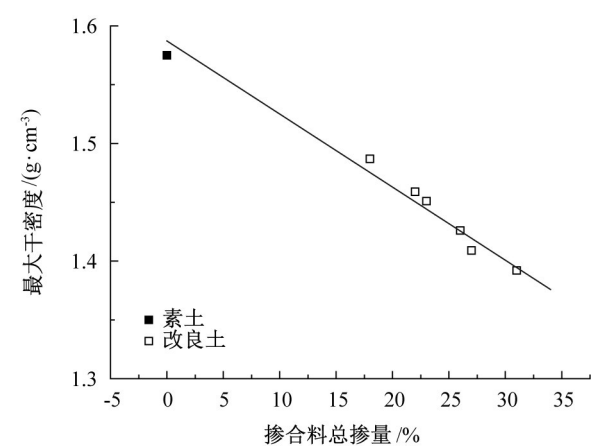


图6 改良盐渍土最大干密度与掺合料总掺量关系

Fig.6 Relation between maximum dry density of improved saline soil and total admixture content

的减小, 掺合料总掺量越多, 塑限越小。随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土液限基本呈线性减小趋势。说明改良剂能降低盐渍土体的液限, 对于盐渍土有着较好的改良效果。随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土塑性指数呈线性减小趋势。掺合料的掺加使得土体中粘性土颗粒占比减小, 塑性指数减小。

改良盐渍土最优含水量和最大干密度与掺合料总掺量的关系如图5和图6所示。随着掺合料总掺量的增加, 各改良盐渍土的最优含水量基本呈线性增加, 主要因为掺合料的粒径较小, 比表面积较大, 改良土样达到最大干密度需要的水量增多。这点会使得在现场应用过程中拌和用水量增加。随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土最大干密度基本呈线性减小趋势。因为掺合料的比重比土小, 掺合料可以更好地充填土颗粒; 或者是生成了其他物质, 使

得改良土体的击实性更好, 干密度减小。

2.2 无侧限抗压强度

2.2.1 养护龄期与无侧限抗压强度

素土及改良盐渍土不同养护龄期下的无侧限抗压强度如图7所示。素土的无侧限抗压强度, 随着养护龄期的增长是减小的。这和盐渍土本身是氯盐渍土有关, 滨海盐渍土中含盐种类以氯化物为主, 而氯化物在潮湿环境吸湿严重, 因此养护过程中试样的不断吸水引起强度逐渐下降。其他改良剂组合的无侧限抗压强度都比素盐渍土的大, 且都是随着养护龄期增长而增长, 且增长的速度为7d和14d增长较快, 从28d开始到60d增长速度缓慢。

2.2.2 掺合料总掺量与无侧限抗压强度

无侧限抗压强度与掺合料总掺量的关系如图8所示。随着掺合料总掺量的增加, 各不同养护龄期

下的无侧限抗压强度随着掺合料总掺量增加而增加, 养护龄期越长, 增长率越大。

2.3 浸水稳定性

2.3.1 浸水时间与无侧限抗压强度

从图9中可以看出各组改良盐渍土试样浸水后的无侧限抗压强度大致分布在0.5 MPa到0.905 MPa之间。改良盐渍土试样的无侧限抗压强度浸水1 d后有较小幅度地增加(曲线起始段上倾斜率较小), 到浸水4 d时, 强度还存在持续小幅增加(曲线第二段斜率变小), 浸水7 d时强度才出现减小的现象(曲线第三段开始向下倾斜), 到浸水14 d时无侧限抗压强度出现小幅减小(曲线最后段向下倾斜角度变大)。这可能与改良盐渍土土样强度增加的趋势

有关, 改良盐渍土养护14 d后, 改良盐渍土的强度还属于不断发展阶段, 浸水初期强度的增长超过了浸水带来强度的损失, 出现浸水强度小幅增长, 随着浸水时间的增长, 水浸入到改良盐渍土试样内部, 导致土样内部结构变化, 改良盐渍土试样强度的增长比起浸水损失小, 在浸水7 d后出现了强度的大幅减小。

养护龄期为14 d条件下掺合料总掺量对于改良盐渍土试样浸水后强度的影响, 如图10所示。从图中可以看出随着掺合料总掺量的增加, 改良盐渍土无侧限抗压强度基本都呈线性增加趋势, 说明掺合料总掺量对于无侧限抗压强度的影响, 无论浸水时间多久都是随着掺合料总掺量增加而增加。这说明掺合料总量对于改良盐渍土性质的影响比较明显。

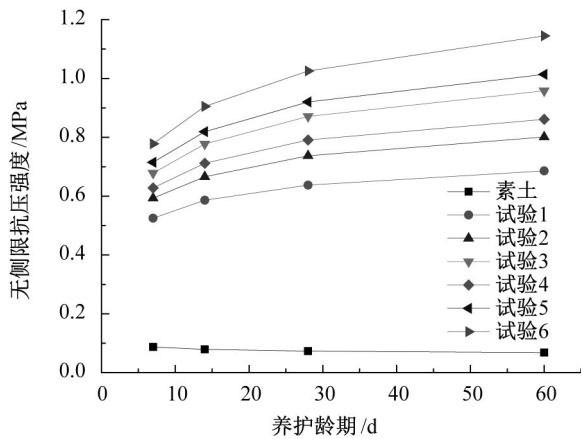


图7 养护龄期与改良盐渍土无侧限抗压强度的关系
Fig.7 Relationship between curing age and unconfined compressive strength of improved saline soil

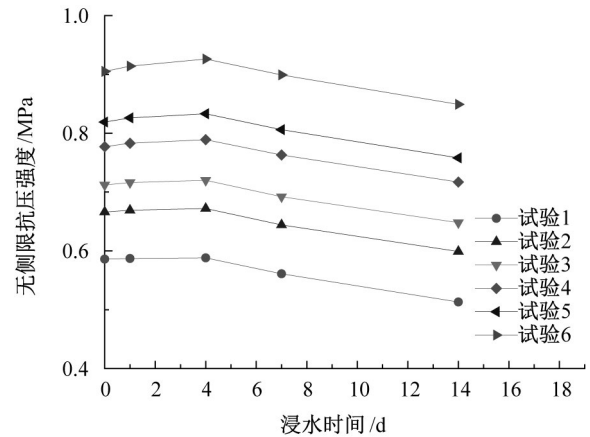


图9 改良盐渍土不同浸水时间的无侧限抗压强度
Fig.9 Unconfined compressive strength of improved saline soil with different soaking time

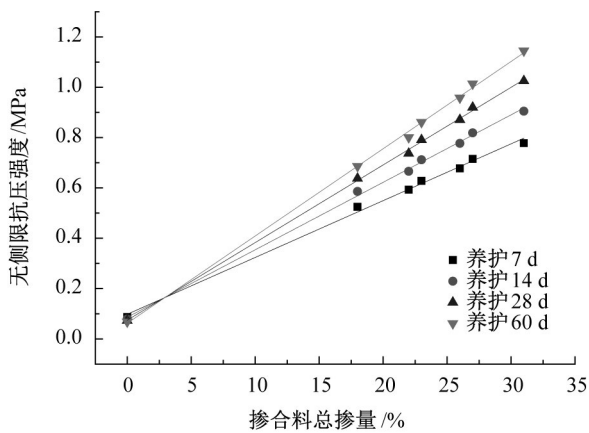


图8 不同养护龄期下改良盐渍土掺合料总掺量和无侧限抗压强度关系
Fig.8 Relationship between total admixture content and unconfined compressive strength at different curing ages of improved saline soil

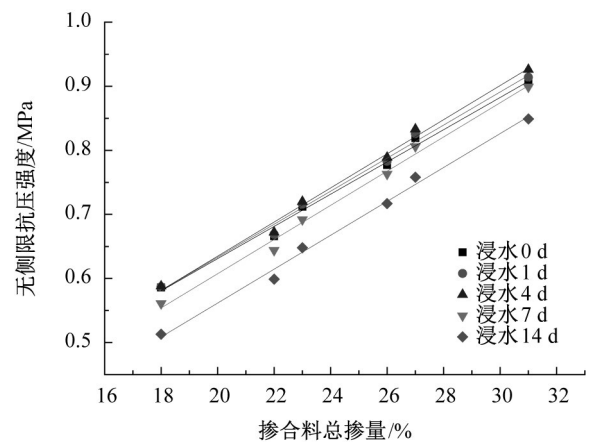


图10 不同浸水时间下改良盐渍土掺合料总掺量和无侧限抗压强度关系
Fig.10 Relationship between total admixture content of improved saline soil and unconfined compressive strength under different soaking time

2.3.2 水稳系数

图 11 给出了不同浸水时间后改良盐渍土的水稳系数。从图中可以看出，所有改良土样在浸水初期水稳系数都是在 100% 到 105% 之间，也就是说浸水 1 d 到 4 d 时间内，改良土样的稳定性是增加的。而后曲线出现了向下倾斜的现象，即水稳系数开始下降，曲线第三段下降趋势更明显，到浸水 14 d 时，各组水稳系数都有很大下降，尤其是试验 1，直接下降到了 85.000%，说明浸水 14 d 后改良盐渍土样稳定性降低很大。

养护龄期为 14 d 条件下掺合料总量对于浸水后强度的影响，如图 12 所示。可以看出浸水时间为 1 d 时，掺合料的掺加量对于水稳系数影响为随着掺合料总掺量增加水稳系数增大，曲线表现为小角

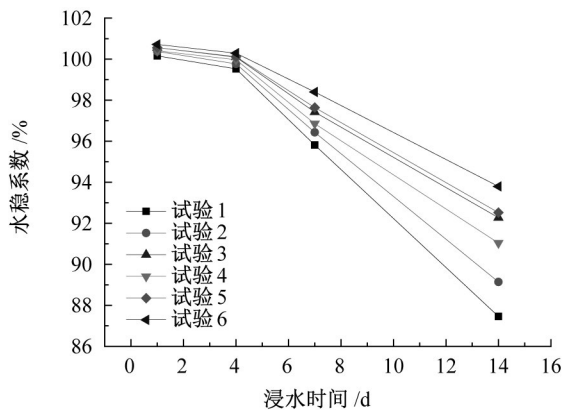


图 11 不同浸水时间下改良盐渍土的水稳系数

Fig.11 Water stability coefficient of improved saline soil under different soaking time

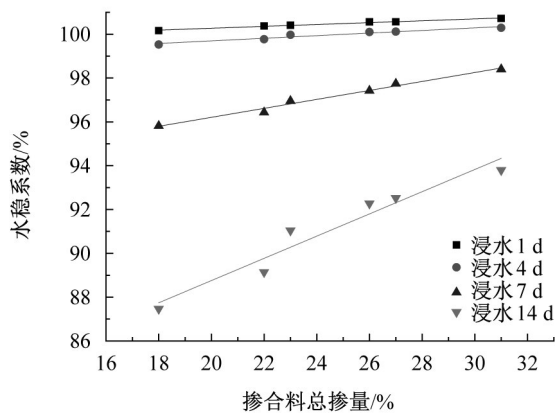


图 12 不同浸水时间下改良盐渍土掺合料总掺量和水稳系数关系

Fig.12 Relation between total admixture content and water stability coefficient of improved saline soil under different soaking time

度上倾；随着浸水时间增加到 4 d，掺合料总掺量对于水稳系数的影响明显增加，曲线表现为比浸水 1 d 大些角度的上倾；随着浸水时间增加到 7 d，掺合料总掺量对于水稳系数的影响明显增加，曲线表现为较大的上倾趋势，到浸水 14 d 时掺合料总掺量对于水稳系数的影响最大，曲线上倾最大。说明掺合料总掺量对于水稳系数的影响随浸水时间越长越明显。

2.3.3 质量损失率

浸水时间对质量损失率的影响如图 13 所示。可以看出随着浸水时间增加，质量损失率范围越来越大。大多数组别的改良盐渍土都符合浸水第一段 (1 d 到 4 d) 期间质量损失率增大，第二段 (4 d 到 7 d) 数值继续增大，而第三段 (7 d 到 14 d) 质量损失率更大的趋势。说明随着浸水时间增长，土体孔隙中的盐分溶解越多，土体结构改变越多，质量损失就变得越大。

掺合料总量对于浸水后质量损失的影响，如图 14 所示。从图上可以看出随着掺合料总掺量的增加，改良盐渍土质量损失率基本呈幂函数减小趋势。浸水时间越短，质量损失率越小，浸水时间越长，随着掺合料总掺量的增加质量损失率呈下降趋势。

3 结论

1) 掺合料掺量对于盐渍土的物理性质指标有影响，表现为比重、液限、塑性指数和最大干密度随着掺合料总掺量增大基本呈线性减小趋势。塑限和最优含水量随着掺合料总掺量增大基本呈线性增大趋势。

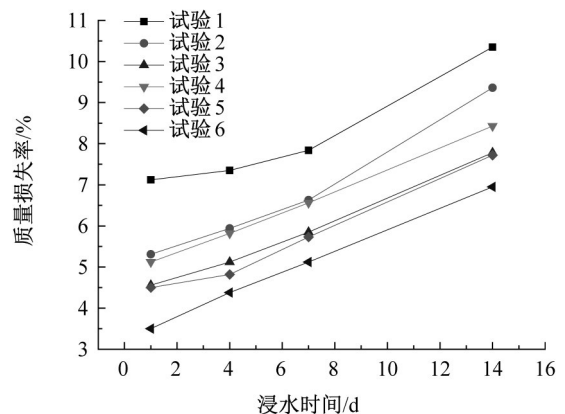


图 13 不同浸水时间下改良盐渍土的质量损失率

Fig.13 Quality loss rate of improved saline soil under different soaking time

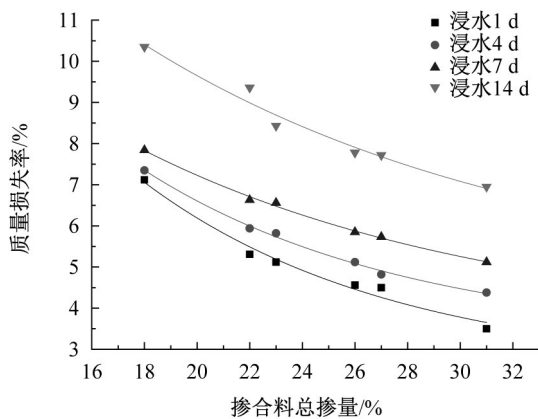


图 14 不同浸水时间下改良盐渍土掺合料总掺量和质量损失率关系

Fig.14 Relationship between the total admixture content and quality loss rate of improved saline soil under different soaking time

2) 改良盐渍土的无侧限抗压强度与养护龄期的关系表现为: 改良盐渍土的无侧限抗压强度随养护龄期增加而增加。与掺合料总掺量的关系为: 在同一养护龄期下, 随掺合料总掺量增长而呈线性增长。

3) 改良盐渍土浸水后强度出现了明显变化。随着浸水时间的增长, 改良盐渍土的无侧限抗压强度减小, 随着掺合料总量的增加, 改良盐渍土无侧限抗压强度基本呈线性增加; 各配比水稳系数随着养护龄期的增长而增长; 随着掺合料总量的增加, 改良盐渍土无侧限抗压水稳系数基本都是呈线性增加趋势; 随着浸水时间增加, 质量损失率范围越来越大; 随着掺合料总量的增加, 改良盐渍土质量损失率基本都呈幂函数减小。

参考文献:

[1] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策 [J]. 山东农业科学, 2015(4): 125-130.

[2] 高冬冬, 袁雅贤. 兰新铁路第二双线盐渍土地基溶陷病害治理研究 [J]. 价值工程, 2017(21): 112-113.

[3] 乔 頔. 滨海盐渍土环境中结构物耐久性分析与对策 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

[4] 周忠勤, 叶景艳, 董军林, 等. 南通某沿海地区盐渍土分布特征及其腐蚀特性研究 [J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(4): 42-45.

[5] 陈天镭. 西宁工会大厦岩石地基溶陷事故分析与诊治建议 [J]. 建筑结构, 2005(2): 48-50.

[6] 虎啸天, 余冬梅, 付江涛, 等. 盐渍土改良方法研究现状及其展望 [J]. 盐湖研究, 2014, 22(2): 68-72.

[7] 梁俊怡. 滨海地区公路盐渍土改良技术试验 [J]. 广东公路交通, 2018, 44(5): 59-63.

[8] 覃小纲, 杜延军, 刘松玉, 等. 电石渣改良过湿黏土的物理力学试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 175-180.

[9] 柳艳华, 张 宏, 齐文廷. 石灰改良滨海氯盐渍土的室内试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2011(2): 217-221.

[10] SELDA ORS U S R K. Reclamation of Saline Sodic Soils with the Use of Mixed Fly Ash and Sewage Sludge [J]. Arid Land Research and Management, 2015, 29 : 41-54.

[11] 张莹莹, 程志豪, 周沛延, 等. 电石渣改良土的无侧限抗压强度预测方法 [J]. 中外公路, 2017, 37(3): 234-237.

[12] 张 健. 改良盐渍土物理力学性质试验研究 [J]. 路基工程, 2017(2): 126-129.

[13] AJALLOEIAN R, MANSOURI H, SADEGHPOUR A H. Effect of Saline Water on Geotechnical Properties of Fine-grained Soil [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18 : 1419-1435.

[14] 马 冰. 冻融循环条件下石灰固化盐渍土物理力学性质研究及机理分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[15] 许 健, 任建威, 程东幸, 等. 水泥改良粗颗粒盐渍土溶陷特性试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2018, 50(6): 794-801.

[16] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准 [S].

[17] GB/T 50145 -2007, 土的工程分类标准 [S].

[18] GB50021-2001, 岩土工程勘察规范: 2009 年版 [S].

[19] 王 兢, 倪 文. 几种工业固体废弃物加固氯盐渍土的试验研究 [J]. 中外公路, 2011(4): 278-283.

(责任编辑 王利君)