

DOI:10.11918/202110111

改良碳酸盐渍土路基填料的力学性质

周纯秀^{1,2}, 崔洪海³, 张中丽^{1,2}, 迟公乐^{1,2}, 陈爽^{1,2}

(1.大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026;2.辽宁省近海桥隧工程重点实验室(大连海事大学),辽宁 大连 116026;3.吉林省交通规划设计院,长春 130021)

摘要:针对吉林省西部地区的碳酸盐渍土,基于不同石灰、石灰+粉煤灰改良土的方法,通过界限含水率试验、击实试验、三轴剪切试验研究了石灰、石灰+粉煤灰改良碳酸盐渍土的工程特性和强度特征,并结合土的固结压缩试验分析探讨了改良盐渍土的变形特性。结果表明:掺加石灰和石灰+粉煤灰改良剂可以有效改善碳酸盐渍土的塑性和击实特性;碳酸盐渍土掺加改良剂后,使得石灰和石灰+粉煤灰改良土的抗剪强度有效提升,石灰改良土在掺量达到9%时强度有所降低,而石灰+粉煤灰改良土则随着不同土层不同含盐量的变化,使得改良效果有所不同;改良后的盐渍土由中压缩性土转为低压缩性土,随着养护龄期的增加土的压缩变形降低,采用合理的改良剂掺量能使得改良后的盐渍土压缩性达到最优。

关键词:石灰+粉煤灰改良剂;碳酸盐渍土;公路路基;抗剪强度;压缩系数

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)09-0093-08

Mechanical properties of improved carbonate soil roadbed filler

ZHOU Chunxiu^{1,2}, CUI Honghai³, ZHANG Zhongli^{1,2}, CHI Gongle^{1,2}, CHEN Shuang^{1,2}

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Marine Environmental Bridge and Tunnel Engineering (Dalian Maritime University), Dalian 116026, Liaoning, China; 3. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: For the carbonate soil in the western part of Jilin province, considering different methods of modifying soil using lime and lime + fly ash, the engineering and strength characteristics of carbonate soil improved by lime and lime + fly ash were studied via limit moisture content test, compaction test, and triaxial shear test. Combined with the analysis of consolidation compression test, the deformation characteristics of the improved saline soil were discussed. Results show that the lime and lime + fly ash modifiers could effectively improve the plasticity and compaction characteristics of the carbonate soil. With the addition of lime and lime + fly ash modifiers to the carbonate soil, the shear strength of the improved soil was increased. When the dosage reached 9%, the strength of lime-modified soil decreased, while the strength of the soil modified by lime + fly ash varied with different salt contents, resulting in different improvement effects. The improved saline soil transformed from medium compressive soil into low compressive soil. With the increase in the maintenance age, the compressive deformation of the soil decreased. The compressibility of the saline soil could reach the best by adding a reasonable amount of modifier.

Keywords: lime + fly ash modifier; carbonate soil; highway roadbed; shear strength; compression coefficient

盐渍土指的是盐土和碱土的统称。公路工程中将地表以下1 m深度范围内的土层,当其易溶盐的平均含量大于0.3%,具有溶陷、盐胀等特性时,判定为盐渍土^[1]。近年来,由于气候、水文、地质、地貌和认为活动等因素影响,使得吉林省西部地区盐渍土的分布不断扩大,大大制约着工程基础设施的建设。由于该地区盐渍土阴离子以 HCO_3^- 占主导地位,阳离子以 Na^+ 为主,即易溶盐中主要为碳酸氢

钠,从而使得该地区公路发生盐胀、溶蚀、路面翻浆、边坡流失和腐蚀等现象。因此,采用合理的碳酸盐渍土改良措施尤为重要。

化学改良法对盐渍土进行改性处理是减弱其工程危害的有效方法之一。盐渍土化学改良法是指向土中加入化学物质,以满足公路工程对地基强度、水稳定性和耐久性的要求。文献[2]采用石灰和微硅粉改良盐质粉砂,通过承载比试验和无侧限抗压强度试验得到掺加2%石灰和3%微硅粉改良粉砂可以满足柔性路面底基层的强度变形要求;文献[3]采用矿渣固化氯盐渍土,认为矿渣中铝酸钙与氯化钠反应生成水化铝酸钙填充孔隙及氢氧化钠碱激发使得固化土强度提高,并采用曲线拟合分析得到固化土强度与含氯量关系式;文献[4]利用有机固化剂丙烯酰胺

收稿日期: 2021-10-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(3132014326);

大连海事大学“双一流建设专项”项目(BSCXXM021);

吉林省交通运输科技项目(20170119)

作者简介: 周纯秀(1977—),女,副教授,硕士生导师

通信作者: 张中丽, itsme12@163.com

(AM)原位聚合对盐渍土进行改良,探讨固化条件对其力学性能与耐水性能的影响;文献[5]采用石灰、粉煤灰和水玻璃联合改良硫酸盐渍土,认为随着水玻璃浓度的增加,改良土的强度几乎呈线性增长,而且改良土的物理化学作用大幅度降低了盐渍土中 SO_4^{2-} 含量,有效地抑制了硫酸盐渍土的盐胀特性。文献[6]研究了粉煤灰固化超盐渍土的抗剪强度及耐久性,粉煤灰在一定掺量下,盐渍土的黏聚力和内摩擦角有所提升,并且随着龄期的增加抗剪强度的有增加的趋势。文献[7]完成了冻融前后盐渍土、石灰固化盐渍土、石灰+SH 固化盐渍土的抗压试验。指出石灰+SH 固化土具有更好的抗冻融性能,含水率是影响冻融后土抗压性能的首要因素。从研究的现状可以看出,工程上的改良主要以硫酸盐渍土和氯盐渍土为对象,对于碳酸盐渍土的改良研究相对较少。

针对于碳酸盐渍土主要集中在盐渍土的影响因素及基本性质的研究,文献[8]认为土壤含盐量随深度增加呈现先增加后减小的趋势,土体膨胀量和抗剪强度都与碳酸盐渍土的含盐量有密切关系;文献[9]通过对碳酸盐渍土物理力学性质和含盐特征进行试验研究,发现碳酸盐渍土在潮湿时的亲水性、塑性、膨胀性、压缩性都很大,稳定性差。而对于碳酸盐渍土工程性质的改良还存在很大的研究空间,

有部分学者采用石灰改良剂来改善碳酸盐渍土的工程特性,其中文献[10-14]认为石灰改良剂可以有效提高盐渍土的抗剪强度和抗压强度,水稳定性增强,在冻融循环的条件下也能达到改善盐渍土工程性质的效果。本着工业废弃物合理利用的原则,对于吉林省西部地区不同土层的碳酸盐渍土,本文进行了不同配比的石灰、石灰和粉煤灰联合改良碳酸盐渍土的物理、强度试验,探讨了石灰、石灰和粉煤灰改良碳酸盐渍土的合理配比,研究了不同土层碳酸盐渍土改良后的物理、力学性能,从而为类似碳酸盐渍土用于公路路基填料提供技术参考。

1 试验材料性质及试验方案设计

1.1 试验土样性质

试验用土取自吉林省西部地区,为更好地进行不同土层土样的研究,在取土过程中采用分层取土的方式,对 K59+920 路段的不同土层进行了一定的试验研究。但由于土样未能及时封存,使得试验中的土样均为重塑土。盐渍土的基本性质见表 1。结合土的颗粒成分分类,该碳酸盐渍土主要为粉质黏土,含盐量(质量分数)大于 0.3%,其中粉粒含量越多毛细作用越强,土体的冻胀性也越强,从而不利于道路工程的应用。

表 1 盐渍土的基本性质

Tab.1 Basic properties of saline soil

土层深度/cm	易溶盐质量分数/%	土的比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
0~30	0.716 5	2.73	40.70	16.60	24.10
30~80	0.400 1	2.70	29.20	18.50	10.70
80~140	0.250 0	2.67	28.50	17.50	11.00

1.2 改良材料的基本性质

改良材料选取石灰和粉煤灰两种无机材料。石灰是普遍的筑路材料,选自常见的生石灰,主要化学组成为氧化钙,接触到水时产生水解作用,形成的水解产物为氢氧化钙,同时放出较多的热。试验所用粉煤灰的主要化学成分有 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ,其各化学成分含量分别在 1.30%~65.80%、1.40%~16.80%、1.20%~3.70%、1.60%~6.20%、1.50%~40.10% 之间,烧失量在 1.60%~30.00% 之间。

1.3 试验方案及样品制备

采用石灰、石灰+粉煤灰(简称二灰)两种方案固化盐渍土,因此在 0~30 cm、30~80 cm、80~140 cm 3 个土层中,单掺加石灰改良剂时,石灰掺量分别设为 5%、9%、13%、17%;双掺加石灰+粉煤灰

(简称二灰)改良剂时,根据 JTJ034—2000《公路路面基层施工技术规范》,采用石灰与粉煤灰复合改良粉土类土质时石灰与粉煤灰的掺合比确定为 1:2,二灰掺量分别设为 3%、8%、13%、18%,本文采用了高掺量的同时改良剂采用外掺的形式进行添加,以研究碳酸盐渍土在石灰和二灰掺量高的情况下物理力学性能变化情况,并得到石灰和二灰的最佳掺量值。通过界限含水率试验得到碳酸盐渍土改良后的液塑限指标,在此基础上制备击实试验所需的试样,在得到改良后的击实试验指标后,为研究改良后碳酸盐渍土的强度变化,按照混合料的最优含水率和最大干密度制样。

试样制备以二灰土为例先称量 600 g 盐渍土、一定比例石灰、粉煤灰和水,先将石灰与粉煤灰放入拌合盆内顺时针搅拌 2 min 使其均分布。随后加

入盐渍土中顺时针拌合 3 min 使盐渍土与石灰粉煤灰拌合均匀,最后将称量好的蒸馏水加入混合料中顺时针拌合 5 min 直到拌合盆底不在有干土粒为止,拌和均匀后放置密封袋内静置 24 h,第 2 天再进行试样的制备。此方法可以使试件中的水分均匀分布并充分与固化材料接触反应。液塑限试验中制备含水率不同的 3 个试样,每个试样的含水率要分别控制在液限、略大于塑限和二者的中间状态,圆锥仪采用的质量为 100 g。击实试验中采用干土法制备含水率不同的 5 个试样,根据路基工程要求选择重型击实试验方法。三轴试验中试件为圆柱体,直径为 39.1 mm,高为 80 mm,按照压实度在 96%以上进行制样,试样用密封薄膜包裹在标准条件下进行养护,利用 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切试验仪分别测定 7 d 和 28 d 龄期各组试样的抗剪强度指标。

2 改良盐渍土的工程特性分析

2.1 界限含水率指标变化

土的界限含水率是土体颗粒特性的宏观表现,土体颗粒的界限含水率受粒度成分、矿物成分等因素影响。因此可通过研究不同改良剂掺量下界限含水率的变化规律,以便于更深入地了解改良土的改良机制。通过实验发现掺入石灰和二灰后,土的塑性指标变化明显,不同土层盐渍土改良后的界限含水率变化见表 2 和表 3。

表 2 石灰改良土的界限含水率指标变化

Tab.2 Variation of limit moisture content index of lime-modified soil

土层深度/cm	石灰掺量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
0~30	0	40.70	16.60	24.10
	5	28.10	17.90	10.20
	9	29.00	19.20	9.80
	13	29.70	20.30	9.40
	17	30.50	21.20	9.30
30~80	0	29.20	18.50	10.70
	5	30.40	19.50	10.90
	9	32.10	22.80	9.30
	13	31.60	23.00	8.60
	17	31.80	23.40	8.40
80~140	0	28.50	17.50	11.00
	5	32.90	22.00	10.90
	9	33.00	22.70	10.30
	13	32.60	23.10	9.50
	17	33.20	23.90	9.30

表 3 二灰改良土的界限含水率指标变化

Tab.3 Variation of limit moisture content index of lime-flyash modified soil

土层深度/cm	二灰掺量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
0~30	0	40.70	16.60	24.10
	3	27.80	18.00	9.80
	8	28.90	19.40	9.50
	13	27.10	19.00	8.10
	18	28.20	20.20	8.00
30~80	0	29.20	18.50	10.70
	3	29.80	19.30	10.50
	8	32.40	22.90	9.50
	13	31.60	23.60	8.00
	18	31.80	24.00	7.80
80~140	0	28.50	17.50	11.00
	3	31.00	20.50	10.50
	8	0.40	21.20	9.20
	13	32.20	24.90	7.30
	18	31.60	24.60	7.00

两种改良土的界限含水率相较素土有一定的变化,可以看出:1)石灰改良土和二灰改良土中,液限在第二、第三土层波动幅度不大,在第一土层中液限下降幅度较大;2)整体看来,塑限随着石灰和二灰掺入比的增大而升高,塑性指数则随着石灰和二灰掺入比的增加逐渐降低,二者呈现相反的趋势。

研究表明,不同土层下改良盐渍土的界限含水率变化不同,是由于吉林省西部地区在不同季节、不同深度土层盐分含量不同,钠离子含量、土分散性及黏粒含量不同^[15],使得改良盐渍土的界限含水率在不同土层有所差别,由于第一土层含盐量和黏粒含量较高,导致石灰与二灰改良土的土体颗粒表面亲水基活性下降。随着改良剂掺量的增加,由于改良剂与土体颗粒发生化学反应导致土粒比表面积减小,但土体此时毛细现象仍然比较明显,加之土体与改良剂发生化学反应增强了毛细水弯液面力和土粒表面张力,在其作用下使得土体凝聚,从而表现出一种潜在的塑性特征^[16]。

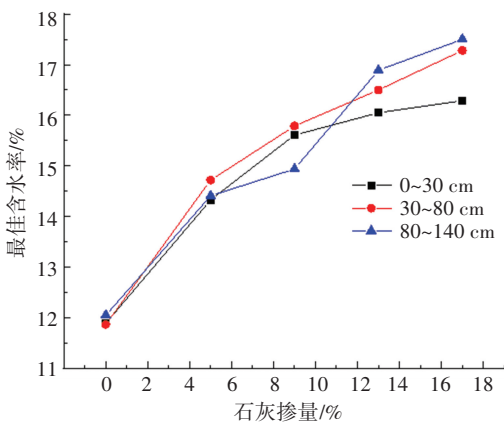
2.2 改良盐渍土击实特性分析

明确改良盐渍土的击实特性,为公路路基施工提供合理的技术指标,也更好地为抗剪强度试验提供准确的试验标准数据,结合界限含水率试验得到的界限含水率指标对 K59+920 路段的不同土层和不同配比情况下的改良盐渍土开展重型击实试验,试验结果如图 1 所示。

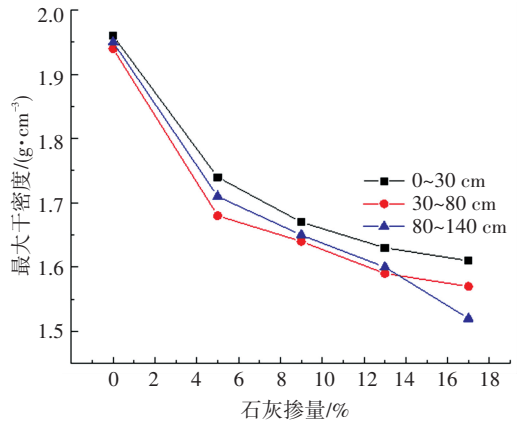
通过分析图 1 改良土最优含水率和最大干密度的变化趋势可知:1)随着石灰掺量的增加,盐渍土

样变得不容易被击实,最大干密度呈现明显的下降趋势,达到最大干密度的含水量则逐渐增大。研究^[16]表明,相较于土颗粒,石灰颗粒对水分子具有更强的吸附作用,盐渍土掺加石灰改良剂后,一部分自由水转变为结合水,为提高石灰改良土的可压实性,此时需要大量的自由水起到润滑的作用,因此石灰掺加量增大使得最优含水率增大;石灰掺入盐渍土中,土颗粒凝聚为团粒结构,石灰改良土团粒结构的可压实性变差,最大干密度随着石灰掺加量的增大会减小。2) 随着石灰+粉煤灰掺加量的不断增

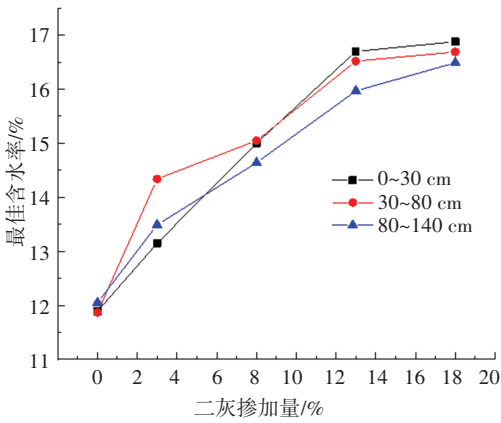
大,盐渍土的最大干密度逐渐减小,击实后改良盐渍土的最优含水率明显增大。通过分析二灰改良土的击实变化趋势可知,一方面石灰、粉煤灰颗粒对水分子具有明显的吸附作用,另一方面石灰和粉煤灰发生化学反应时需要充足的水分,从而使其最优含水率增大。由于石灰+粉煤灰掺加量的提高,在石灰水化反应生成的碱性环境中,粉煤灰受碱性激发其活性明显增强,生成大量的胶凝性产物,使得土体结构发生明显变化,二灰改良土的可压实性降低,最大干密度随着石灰+粉煤灰掺量的增加不断减小。



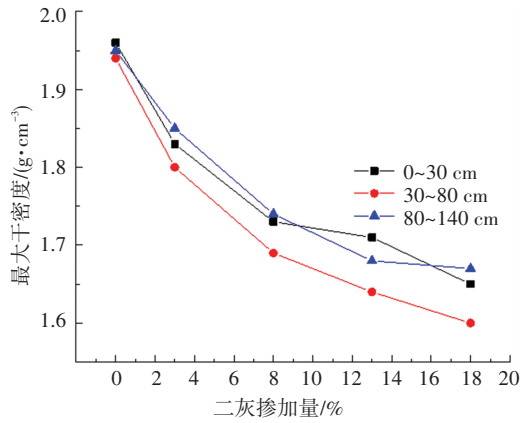
(a) 石灰土最佳含水率



(b) 石灰土最大干密度



(c) 二灰最佳含水率



(d) 二灰最大干密度

图 1 不同配比、不同土层下的改良土击实特性

Fig.1 Compaction characteristics of modified soil with different proportions and soil layers

3 改良盐渍土的强度特征

3.1 改良盐渍土不同围压下的应力-应变关系

在上述试验的基础上,选取盐渍土含量较高的 0~30 cm 土层,养护龄期为 28 d,具有代表性的石灰掺量为 5%和二灰掺量为 13%的改良土应力-应变曲线,如图 2 所示。分析图 2 可知,图 2(a)原样土为显著的塑性破坏,呈应变硬化型。图 2(b)、2(c)中改良土的破坏形式随着掺加剂的加入由塑性破坏

向脆性破坏转化,应力-应变形式为应变软化型^[17]。对于应变软化型土,围压越小,峰值越小且越明显,由于在围压较低时土样的侧向压力较小,当土样破坏后在继续增加的轴向压力下会产生侧向膨胀。

石灰改良土和二灰改良土的极限强度如图 3 所示,对于改良剂掺量的增加,改良土的极限强度也出现不同的变化,并不是掺量越高极限强度越高,路基填土中应选取最合适的改良剂掺量。图 3(b)中二灰改良土相较于石灰改良土极限强度较高一些,说

明二灰改良土中石灰对粉煤灰的活性激发更显著,石灰和粉煤灰与盐渍土生成的固化胶结物大大增加,形成的交织骨架更明显,其对土颗粒产生的空间约束力越强,改良效果越明显。

要在更大的轴向变形下达到最大值。图 2(a) 原样土的偏应力均在 0~5% 的轴向应变下迅速增长,这一阶段本文称压密阶段,而后缓慢增长。图 2(b)、2(c) 的改良土偏应力均在 0~3% 的轴向应变下迅速增长,而后缓慢增长。相比于原样土,掺加改良剂后土样的压密阶段缩短,使得土样达到强度极限时产生的应变减小,盐渍土的结构性变强,抗变形性能增强^[18]。

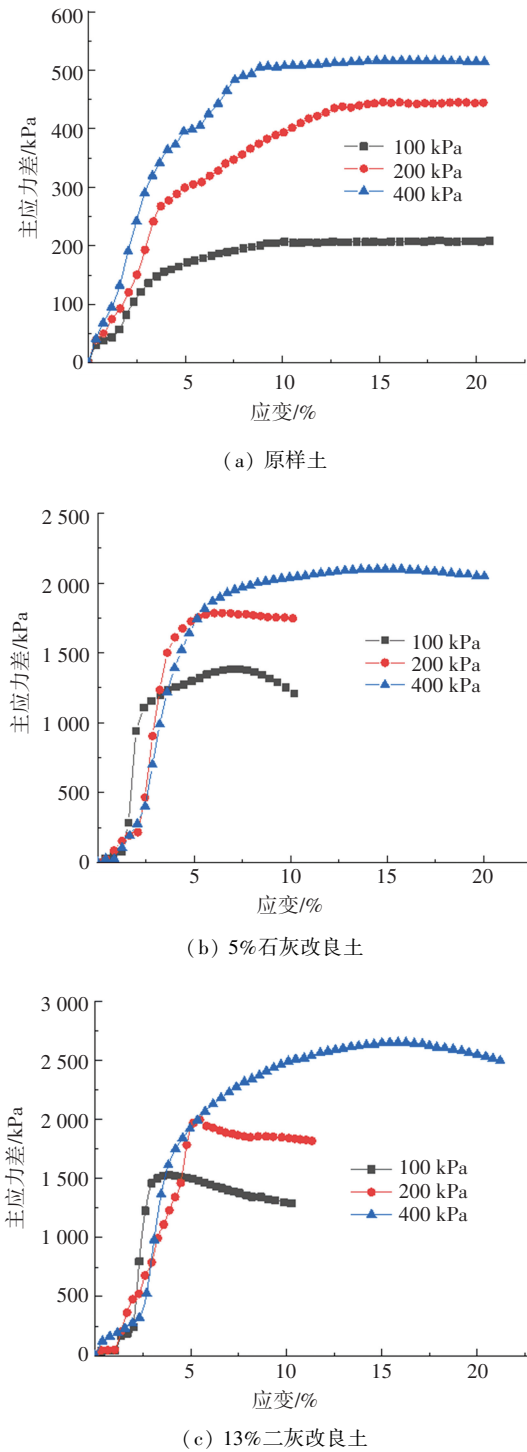


图 2 28 d 龄期下改良土应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of improved soil under maintenance age of 28 d

不同围压下各掺量改良土的极限强度变化如图 3 所示。由图 3 可知,随着围压的增大,图 2(a) 原样土的极限强度逐渐增加,但增长速度远小于图 2(b)、2(c) 改良土的增长速度,此时极限强度需

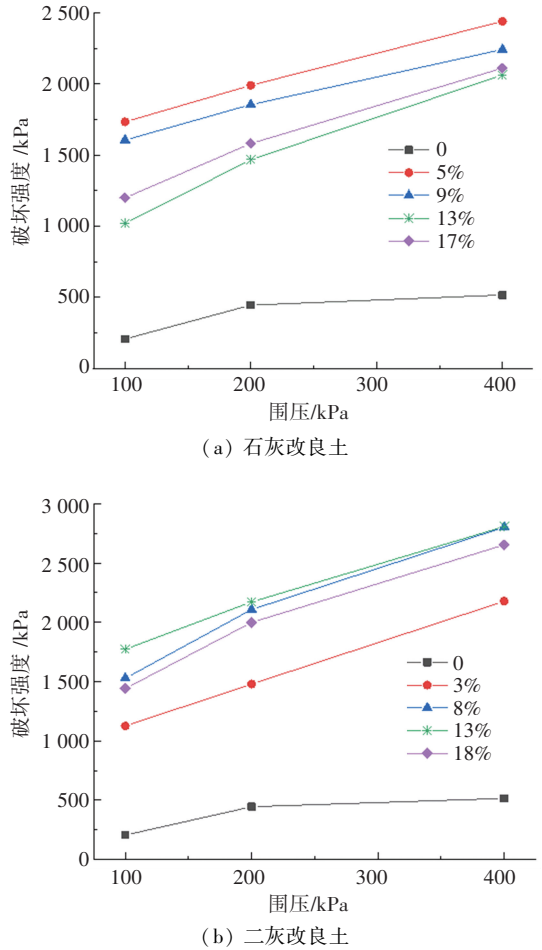


图 3 不同围压下各掺量改良土的极限强度

Fig.3 Ultimate strength of different modified soils under different confining pressures

3.2 改良盐渍土的抗剪强度指标分析

改良后盐渍土的内摩擦角和黏聚力随着掺量增加的变化如图 4 所示,图中也表示出随着龄期增长,内摩擦角和黏聚力的变化。分析抗剪指标的变化趋势可知:1) 石灰改良土中,随着掺灰量的增加内摩擦角先增大后减小,峰值点位于石灰掺量为 5% 时,而石灰掺量过高时又有所上升,但远小于 5% 石灰掺量;2) 二灰改良土中,随着掺灰量的增加,内摩擦角逐渐增大,但掺灰量过高时,增长速率变得缓慢;3) 随着龄期的增长,石灰改良土的内摩擦角有所下降,但二灰改良土的内摩擦角随着龄期的增长而增长。

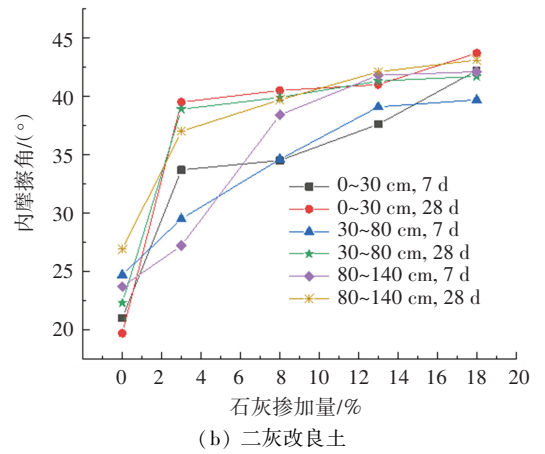
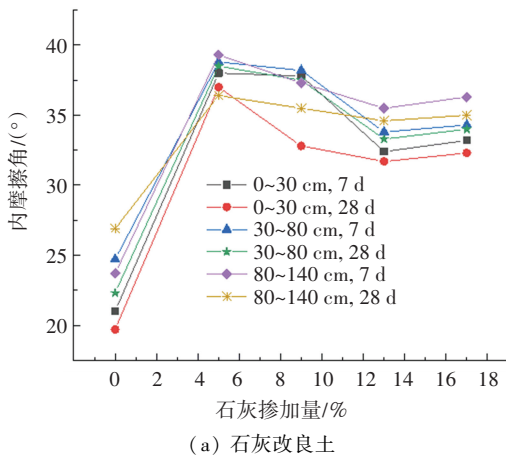


图 4 改良土内摩擦角变化

Fig.4 Internal friction angle of improved soil

分析图 5 改良土的黏聚力变化趋势可知:1) 石灰改良土中,随着掺灰量的增加黏聚力先增大后减小,峰值点位于石灰掺量为 5% 时,而石灰掺量过高时又有所上升,但远小于 5% 石灰掺量时;2) 二灰改良土中,随着掺灰量的增加,黏聚力先增大后减小,0~30 cm 土层黏聚力峰值点位于二灰掺量为 13%

时,30~80 cm 和 80~140 cm 土层黏聚力峰值点在二灰掺量为 8% 时,不同土层的含盐量不同,针对不同土层的土,需要采用合理的二灰掺量进行路基填筑;3) 随着龄期的增长,石灰改良土和二灰改良土的黏聚力都呈现增大的现象,且二者黏聚力的提升相差不大。

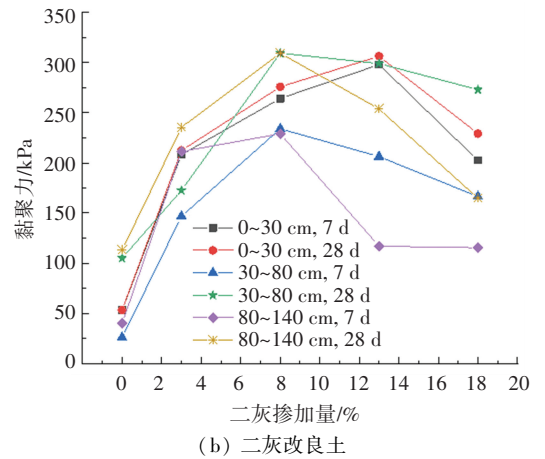
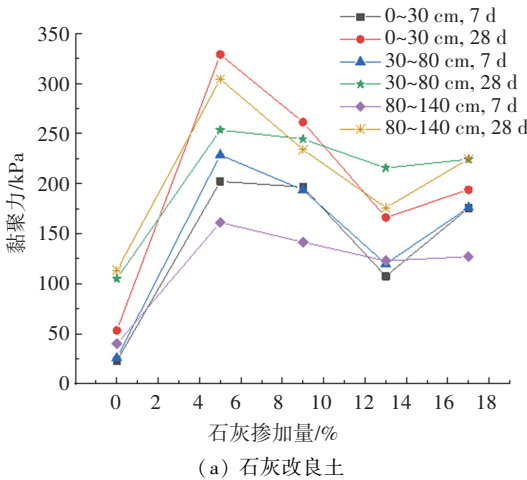


图 5 改良土的黏聚力变化

Fig.5 Cohesion change in improved soil

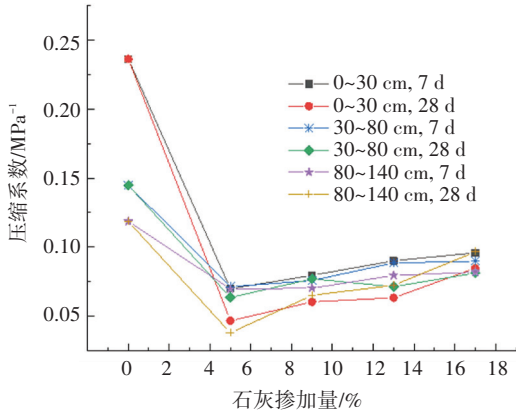
究其原因,文献[13]认为石灰的掺入使得产生一定的胶体包裹土颗粒,从而形成更大粒径的团粒,土颗粒之间的粗糙程度加大,内摩擦角逐渐增大。石灰掺量为 17% 时,内摩擦角虽略有上升,但相较于 5% 石灰掺量仍有减小,这是因为多余的石灰颗粒会填充在土颗粒间的空隙里,从而减小摩擦,使得内摩擦角减小。黏聚力也因为石灰仅填充在土颗粒中无法起到改良的作用,使得其呈下降趋势。随着龄期的增长,前期改良土中离子交换作用完成后,后期的硬化作用和碳化作用比较缓慢,加之土体中的易溶盐溶解在水中,使得土中颗粒物减少,土颗粒表面摩擦力减小,内摩擦角也随之变小。但由于胶体

的生成使得土颗粒更加牢固地连结在一起,使得黏聚力增加,抗剪强度提高。文献[19]研究表明二灰改良土中,随着龄期的增长,碱性环境中粉煤灰玻璃体与可溶性溶液发生硅酸化反应,称为硅酸盐和硅酸盐晶体,这些晶体形成了二灰改良盐渍土中的网状骨架结构,土体结构紧密,其摩擦角越大,二灰改良土随龄期的增加结晶凝胶体逐渐脱水而形成固体板结,黏聚力增加从而提高了改良土强度。

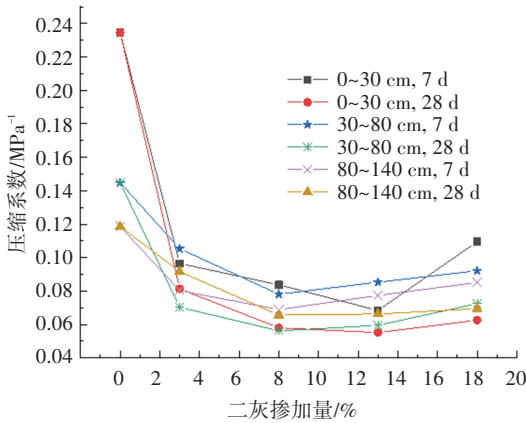
4 改良盐渍土的压缩特性

分析图 6 改良盐渍土的压缩系数的变化趋势可知:1) 石灰改良土和二灰改良土均由中压缩性土转

为低压缩性土,即土的压缩性降低,压缩效果得到了很好的改善;2)石灰掺量在5%时,压缩系数最低,二灰改良土由于不同土层含盐量的不同,使得0~30 cm土层中掺量为13%时,30~80 cm与80~140 cm土层中掺量为8%时压缩系数最低;3)改良剂一定的情况下,随着养护龄期的增加,改良盐渍土的压缩系数大大减小。



(a) 石灰改良土



(b) 二灰改良土

图6 改良盐渍土的压缩系数

Fig.6 Compression coefficient of improved soil

由于改良剂与土颗粒之间发生一系列的化学反应^[20],生成的胶结物包裹着土颗粒,使得颗粒之间聚拢、镶嵌幅度增大,造成大孔隙逐渐被分裂,形成数量较多的小孔隙,排列更加紧密,土体也变得更加密实,从而使得土体压缩性降低。但改良剂掺量过高时,改良土的变形量会有所增加,因为当改良剂含量过多时,石灰、石灰+粉煤灰不会参与反应,反而自身产生结晶体,由于这些结晶体的孔隙较大,所以使得改良土极易产生压缩变形,故在实际使用过程中应采用合理的改良剂掺量;在改良剂一定的情况下,随着养护龄期的增加,改良盐渍土的变形量大大减小。随着龄期增加,改良剂与土颗粒中的物质反应逐渐充分,生成的胶结物逐渐由凝胶状态转向晶体状态,使得改良土体内部的孔隙减小,压缩量降

低,石灰+粉煤灰改良后土体的压缩性能达到石灰改良土的良好压缩性能,说明粉煤灰的掺入对改良盐渍土的压缩性起到了一定的作用。

5 结论

1)改良后的碳酸盐渍土界限含水率指标符合路基设计规范的要求,其最优含水率逐渐增大且变化明显,石灰土最优含水率最大增幅为24.01%,二灰土最优含水率增幅为20.81%,最大干密度变化逐渐减小,石灰土最大干密度下降了13.40%,二灰土最大干密度下降了7.22%。改良碳酸盐渍土由塑性破坏转向脆性破坏,伴随着围压增大,其极限破坏强度不断增大,相较于原土,石灰土极限强度增幅7倍而二灰土极限强度增幅7.6倍。说明在实际施工过程中不能盲目地增大改良剂掺量,合理的改良剂掺量使得改良盐渍土的结构性能增强,抗变形性能增强,极限强度达到最大,工程使用效果明显提高。

2)在使用石灰改良土时,任意土层均在石灰掺量5%时,抗剪强度、黏聚力得到大幅提升,因此单掺石灰时最优掺量为5%。使用二灰土时二灰掺量在第一土层为13%,在第二、第三土层为8%时,改良土的抗剪强度较原样土有很大提升,随着龄期的增长,抗剪强度也不断提高,说明石灰和二灰作为改良剂能很好地改善盐渍土的强度。二灰改良土与石灰改良土抗剪强度相差较小,合理运用粉煤灰改良盐渍土,在工程中可以起到经济环保的作用。二灰改良土在不同土层所需剂量也不同,说明不同土层含盐量对改良剂的掺量有一定影响,在路基填筑时需要合理使用。

3)改良碳酸盐渍土随着养护龄期的增加压缩性降低,石灰土最大下降82.6%,二灰土最大下降66.1%,当使用最优掺量时改良土均为低压缩性土。合理的改良剂掺量使得改良土压缩性达到最优,有利于减小由于土体压缩变形引起的路基沉降。

4)石灰改良土与二灰改良土的强度形成机理具有相同之处,主要依靠改良后土颗粒团聚形成大团粒起到骨架作用和石灰粉煤灰产生胶凝性水化产物起到填充作用。其中粉煤灰含有充足的活性物质即 SiO_2 与 Al_2O_3 ,在石灰碱激发作用下生成大量的水化硅酸钙与水化铝酸钙,从而具有较高的强度与稳定性。与石灰土相比,二灰土的强度形成更多依赖于火山灰反应。粉煤灰表面能很低,难溶于水导致二灰土的强度在前期不高,但随着养护龄期的增加二灰土强度的增幅不断增大。

参考文献

[1] 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版

- 社,2015
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press,2015
- [2] MOAYED R Z, IZADI E, HEIDARI S. Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica[J]. Journal of Central South University,2012,19(10):3006
- [3] CHENG Yin, YU Hao, ZHU Baolin, et al. Laboratory investigation of the strength development of alkali-activated slag-stabilized chloride saline soil [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2016,17(5):389
- [4] 廖晓兰,杨久俊,张磊,等.丙烯酰胺聚合固化盐渍土试验研究[J].岩土力学,2015,36(8):2216
LIAO Xiaolan, YANG Jiujun, ZHANG Lei, et al. An experimental study of acrylamide polymerized solidification of saline soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(8):2216
- [5] 吕擎峰,申贝,王生新,等.水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J].岩土力学,2016,37(3):687
LÜ Qingfeng, SHEN Bei, WANG Shengxin, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(3):687
- [6] 李宏波,沈晖,沈杰.粉煤灰固化超盐渍土的抗剪强度及耐久性[J].兰州理工大学学报,2015,41(3):140
LI Hongbo, SHEN Hui, SHEN Jie. Shearing strength and durability of hypersaline soil solidified with fly ash [J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2015,41(3):140
- [7] 方秋阳,柴寿喜,李敏,等.冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J].岩石力学与工程学报,2016,35(5):1041
FANG Qiuyang, CHAI Shouxi, LI Min, et al. Influence of freezing-thawing cycles on compressive strength and deformation of solidified saline soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5):1041
- [8] 张宁霞,宁殿晶,刘彦辉.松嫩平原碳酸盐渍土的工程特性[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):130
ZHANG Ningxia, NING Dianjing, LIU Yanhui. Characteristics of carbonate saline soil in the Songnen Plain [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology,2011,9(4):130
- [9] 冷冠军,陈慧娥,符锐,等.松嫩平原盐渍土物理力学性质及含盐特征分析[J].铁道建筑,2016(6):104
LENG Guanjun, CHEN Huie, FU Rui, et al. Analysis on physical-mechanical properties and saliniferous feature of saline soil in Songhuajiang-Nenjiang Plain [J]. Railway Engineering,2016(6):104
- [10] 王文玲.松嫩平原碳酸盐渍土工程改性研究[D].北京:中国地质大学,2007
WANG Wenling. Study on engineering modification of carbonated soil in Songnen Plain [D]. Beijing: China University of Geosciences,2007
- [11] 孙东彦.冻融循环下镇赉地区非饱和盐渍土及石灰固化土的力学特性及机理研究[D].长春:吉林大学,2017
SUN Dongyan. Study on mechanical properties and mechanism of unsaturated saline soil and lime-cured soil in Dalai Area under freeze-thaw cycle [D]. Changchun: Jilin University,2017
- [12] 张明俊.石灰改良碳酸盐渍土路用性能试验研究[D].长春:长春工程学院,2017
ZHANG Mingjun. Experimental study on the performance of carbonate soil road improved by lime [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology,2017
- [13] 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
MA Bing. Study on the physical and mechanical properties and mechanism analysis of lime-solidified saline soil under freeze-thaw cycles [D]. Changchun: Jilin University, 2018
- [14] LIU Yaowu, WANG Qing, LIU Shouwei, et al. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019,161:32
- [15] 王文华,王清,张静,等.吉林省西部碳酸盐渍土基本性质试验研究[J].北京工业大学学报,2011,37(2):217
WANG Wenhua, WANG Qing, ZHANG Jing, et al. An experiment study of the fundamental property of the carbonate-saline soil in west of Jilin province [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011,37(2):217
- [16] 朱福.松嫩平原季冻区低路堤石灰土加固机理及应用研究[D].长春:吉林大学,2016
ZHU Fu. Study on lime soil reinforcement mechanism and application of low embankment in seasonal frozen area of Songnen Plain [D]. Changchun: Jilin University,2016
- [17] 王沛,王晓燕,柴寿喜.滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变[J].岩土力学,2010,31(12):3939
WANG Pei, WANG Xiaoyan, CHAI Shouxi. Solidifying methods for inshore saline soil and its deviator stress-strain [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(12):3939
- [18] 张莎莎,谢山杰,杨晓华,等.火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(3):588
ZHANG Shasha, XIE Shanjie, YANG Xiaohua, et al. Action mechanism of coarse particle sulfate soil subgrade modified by volcanic ash [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3):588
- [19] 吴廷荣,贾锦绣,王都兴.石灰粉煤灰改良盐渍土填料力学特性研究[J].路基工程,2010(1):57
WU Tingrong, JIA Jinxiu, WANG Duxing. Study on mechanics characteristics of saline soil filling improved with lime-flyash [J]. Subgrade Engineering,2010(1):57
- [20] 杨晓松,刘井强,党进谦.粉煤灰改良氯盐渍土工程特性试验研究[J].长江科学院院报,2012,29(11):82
YANG Xiaosong, LIU Jingqiang, DANG Jinqian. Experimental research on the engineering property of chlorine saline soil improved by fly ash [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(11):82

(编辑 魏希柱)