

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.05.007

孔隙度与 NaCl 对纤维加筋土强度的影响

汪骏沣, 璩继立

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究石灰、NaCl、纤维、干密度对黏土的影响, 制备不同石灰含量、不同种类纤维、不同干密度以及是否添加 NaCl 的试样, 进行无侧限抗压试验。结果显示: 单独加入纤维比单独加入 NaCl 更有效地提高无侧限抗压强度, NaCl 与纤维共同添加提高抗压强度幅度最大。不同成分的纤维加筋土混合物无侧限抗压强度均与孔隙度/石灰含量指数成非线性关系, 无侧限抗压强度随着孔隙度/石灰含量指数的减小而呈指数增加, 通过回归曲线拟合了无侧限抗压强度与孔隙度/石灰含量指数的公式。比对不同组分纤维加筋土公式, 与实际情况符合, R^2 在允许范围之类, 回归性较好。孔隙度/石灰含量指数的应用表明, 它可以在一定范围之内有效地预测纤维加筋土的力学性能。

关键词: 氯化钠; 石灰; 纤维加筋土; 孔隙度; 无侧限抗压强度试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0034-06

Effect of Porosity and NaCl on Strength of Fiber-reinforced Soil

WANG Junfeng, QU Jili

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the engineering characteristics of low clay strength in Shanghai area, lime, fiber and other reinforcement materials are commonly used, but there is lack of quantitative evaluation of the improvement results. To analyze the effects of lime, NaCl, fiber and dry density on clay, samples with different lime content, different types of fiber, different dry density and with and without NaCl were prepared, unconfined compressive tests were conducted. The results show that adding fiber alone can improve the unconfined compressive strength more effectively than adding NaCl alone, and adding NaCl together with fiber can improve the unconfined compressive strength the most. The unconfined compressive strength of fiber reinforced soil mixtures of different composition has a nonlinear relationship with the porosity/lime content index (η/Liv), and the unconfined compressive strength increases exponentially as the η/Liv decreases. The formula of unconfined compressive strength and η/Liv is fitted by the regression curve, and the formula of fiber reinforced soil of different components is compared with the actual situation. R^2 is within the allowable range, and the regression is good. The application of η/Liv shows that it can effectively predict the mechanical properties of fiber reinforced soil within a certain range.

Keywords: sodium chloride; lime; fiber reinforced soil; porosity; unconfined compressive strength test

上海市是中国的国际经济、金融、贸易、航运、科技创新中心, 随着经济的发展, 上海地区土地供应愈发紧张。上海市位于长江三角洲冲积平原, 是江、湖、海动力作用条件下形成的广袤堆积平原, 地质情况复杂。上海黏土具有含水量高, 孔隙比大, 压缩性高等地质性质^[1-2]。因此需要采用有效措施加固以

满足实际工程需求。

纤维加筋具有取材广泛, 经济可行, 作用效果优良等特点。不少学者做了关于纤维加固黏土的研究。何钰龙^[3]研究发现纤维加筋可以显著提高黏性土的抗剪强度, 并增加其塑性和韧性。王艳芳等^[4]指出纤维是通过与土颗粒接触面间的摩擦力

收稿日期: 2021-06-25

修稿日期: 2021-07-23

作者简介: 汪骏沣(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: yzsyzymk@163.com

通讯作者: 璩继立(1964—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程科研工作。E-mail: qujiliqiwq@163.com

来增加土体的黏聚力,限制土体变形的,因此纤维影响土体抗剪强度的主要因素是黏聚力。张军^[5]在三轴试验中发现,纤维掺量并不是越多越好,单从提高抗剪强度方面考虑,确定最佳的纤维掺量为0.2%。Akbulut等^[6]基于无侧限抗压强度结果,指出纤维长度对强度的影响无明显规律,黄麻、棕榈丝、椰丝是较为常见的天然纤维,不少学者做了相关工作。黄麻纤维是最廉价的纤维之一,种植量和用途都广泛,仅次于棉花。陆韬等^[7]研究指出,黄麻纤维加筋上海黏土能够提高其无侧限抗压强度,黄麻纤维加筋率为0.35%时,黏土的抗压强度最高。黄晓如等^[8]研究发现无侧限抗压强度随棕榈纤维的长度或含量的增加而增加。当棕榈纤维长为20 mm,加筋率为0.50%时,土样无侧限抗压强度达到最大。自然界中的椰丝木质素含量较高,抗腐蚀性更强,常志璐等^[9]采用椰丝作为加筋材料,发现粉砂土中加入双聚材料和植物纤维,增强了土体的无侧限抗压强度,降低了土体的渗透性。

在土中加入粉煤灰、石灰等可改善土体级配,减小孔隙度,因而在实际工程中得到大量运用。固化土的强度随干密度的增加而增大,在一定范围内随固化材料掺量的增加而增强,这些结论已达成共识^[10-14]。

Drake等^[15]研究发现 NaCl 可以加速土体固化,减少养护试件从而使土体早期强度更高。Saldanha等^[16]指出 NaCl 是提高无侧限抗压强度最有效的盐种。张少龙等^[17]研究发现当 NaCl 浓度低于0.5%时,无侧限抗压强度及弹性模量均随溶液浓度的增加而增加。魏丽等^[18]研究发现随含盐量的增加,固化土及纤维加筋固化土的抗压强度先减小后增大,存在一个临界含盐量,为7%左右,盐渍土存在盐胀与吸湿软化现象,纤维加筋作用可抵消高含盐量引起的对固化土抗压性能的破坏。

尽管国内外对加固不良地质条件土体的研究很多,但缺乏对加固土体的工程力学性质的数据评估。Consoli等^[19]考虑孔隙度、石灰含量作为评估硅酸盐水泥处理过的土壤无侧向抗压强度的参数,指出压实石灰土与孔隙度、石灰含量之间存在直接关系。Consoli等^[20]做了大量关于此的研究,发现石灰土混合物的无侧限抗压强度与孔隙度/石灰指数之间存在非线性关系。本文通过以纤维和 NaCl 加固纤维加筋土的无侧限抗压试验,研究了不同石灰含量(0%、3%、5%、7%),不同纤维种类(黄麻、棕榈丝、椰丝),不同干密度(1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6

g/cm³),是否添加 NaCl 对纤维加筋土强度的影响,探寻土体强度与孔隙度、石灰含量的关系,在此基础上研究土体强度与孔隙度/石灰含量(η/Liv)指数的关系。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用土取自上海市郊区在建项目,取自地下2 m处,按《土工试验方法标准》^[21](GB/T 50123—2019)进行试验,试验结果见表1。试件胶结剂Ca(OH)₂是一种成熟的工业产品,产自河南万源,密度为2.24 g/cm³;添加的NaCl为试验级用品,纯度超过99.5%,密度为2.165 g/cm³;本实验所添加的各种纤维(黄麻、棕榈丝、椰丝)的物理力学性质如表2所示。

表1 上海黏土的物理性质

最优含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	塑性指数 /%	土的相对 密度
20.70	42.32	20.37	1.65	21.95	2.73

表2 纤维物理性能指标

种类	直径 /μm	拉伸强度 /MPa	密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	自然伸长率 /%
黄麻	50~280	393.00~773.00	1.30	1300~2500	1.5~18.0
棕榈丝	202~412	87.00~166.00	1.24	800~1900	5.0~21.0
椰丝	100~500	28.88~197.87	1.25	>2000	2.7~24.2

1.2 试验仪器

国家电力公司南京电力自动化设备总厂南京水利电力仪器工程有限责任公司生产的PY-3应变控制式无侧限压缩仪。仪器主要指标:位移测量范围为0 mm~30 mm;测力计量范围为0 N~600 N;升降速率为2.3 mm/min~2.7 mm/min;外形尺寸为235 mm×150 mm×476 mm。

1.3 试样制备

按不同干密度(1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6 g/cm³)、材料(黄麻、棕榈丝、椰丝)共制备9组,每组试样配合比如表3所示。每个配合比试样制作3个平行样品,以确保测试结果的可重复性。为下文表述方便,按添加材料不同分为4类:不添加NaCl和纤维(NSNF)、单独添加NaCl(WSNF)、单独添纤维(NSWF)、同时添加NaCl和纤维(WSWF)。

(1) 土块经过烘干、锤击、2 mm土工筛筛选备用。

(2) 为控制变量,统一用剪刀将天然纤维剪成

10 mm 小段,将纤维分 3 次加入土中,搅拌与土混合均匀。

(3) 将土和石灰混合,轻轻搅拌直至得到均匀的颜色。

(4) 试样的含水率为最优含水率,NaCl 先加入水中充分溶解,再加入土样中,将溶液与土混合均匀。

(5) 其配制好土样装入聚乙烯袋中,粘贴标签并密闭养护 24 h。

(6) 将按配合比配好并养护后的土样分三次放入三瓣膜中,用击实锤击实,通过控制锤击次数控制试件质量得到所需干密度,制备好的试件高 80 mm,直径 39.1 mm。

(7) 将制备好的试件用聚乙烯袋包裹,用标签标记,放置在养护箱中养护等待其固化,养护天数均为 7 d。

表 3 试件的组成成分(质量百分数)

试块编名	土 /%	石灰 /%	NaCl /%	纤维 /%	干密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	100.0	0.0	0.0	0.0	1.4
2	99.5	0.0	0.5	0.0	1.4
3	99.5	0.0	0.0	0.5	1.4
4	99.0	0.0	0.5	0.5	1.4
5	97.0	3.0	0.0	0.0	1.4
6	96.5	3.0	0.5	0.0	1.4
7	96.5	3.0	0.0	0.5	1.4
8	96.0	3.0	0.5	0.5	1.4
9	95.0	5.0	0.0	0.0	1.4
10	94.5	5.0	0.5	0.0	1.4
11	94.5	5.0	0.0	0.5	1.4
12	94.0	5.0	0.5	0.5	1.4
13	93.0	7.0	0.0	0.0	1.4
14	92.5	7.0	0.5	0.0	1.4
15	92.5	7.0	0.0	0.5	1.4
16	92.0	7.0	0.5	0.5	1.4

1.4 试样方法

依照《土工试验方法标准》^[21](GB/T 50123—2019)测定试样无侧限抗压强度。

2 数据分析

2.1 不同纤维加筋土作用效果比较

图 1 为不同种类纤维和石灰含量对黏土无侧限抗压强度的影响规律。由图 1 可以看出,在不添加任何添加剂的情况下,素土试样的抗压强度最低,随

着石灰的加入,土体强度不断增高,添加 7% 的石灰含量,土体抗压强度提高了 3.5 倍。三种纤维加筋土,也呈现相同的规律,显然,三种纤维均能提高土体抗压强度,其中黄麻纤维提高 2.3 倍,棕榈丝提高 1.4 倍,椰丝提高 1.3 倍,黄麻纤维提高抗压强度幅度最大,棕榈丝次之,椰丝最小。这可能的原因是,纤维在固化土中形成空间网格结构,同时纤维与土壤颗粒之间产生摩擦力,限制土体的横向变形。而黄麻的抗拉强度与弹性模量均大于棕榈丝和椰丝,可以更加有效限制土体裂缝的产生;棕榈丝呈圆柱状,与土体的接触面积小,且柔韧性差,不易形成空间网状结构;而添加椰丝的试样在破坏时破坏面与水平面夹角为 60°左右,呈现剪切破坏,这可能是对于椰丝加筋土而言,纤维加筋率在一定范围内是合适的,实验中 0.5% 的掺量过高,纤维与土体不能充分接触发挥纤维的加筋作用,同时由于纤维之间相互错动,纤维网的横向约束能力对土体的约束作用不仅没有增强,反而减弱,导致椰丝纤维的加筋效果并不理想。

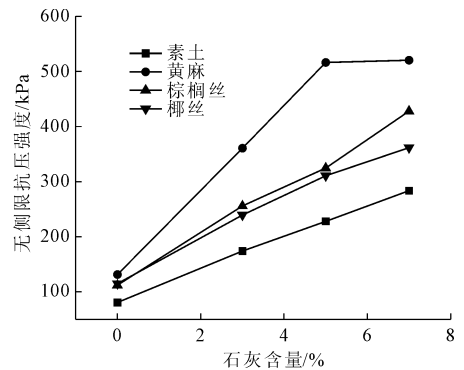


图 1 不同种类纤维加筋土抗压强度对比

2.2 NaCl 对纤维加筋土的影响

NaCl 对纤维加筋土的影响见图 2—图 5。

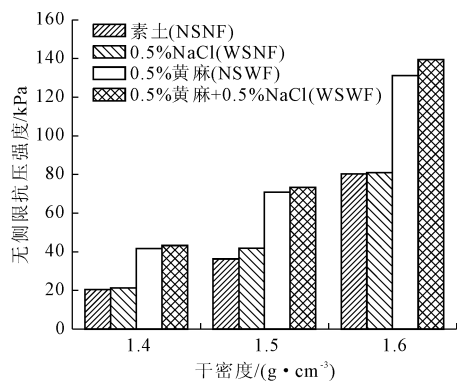


图 2 NaCl 加固纤维加筋土抗压强度对比 (无石灰)

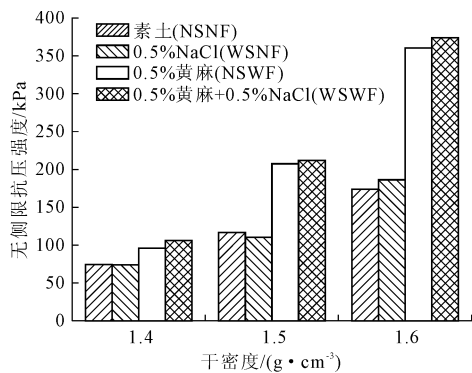


图 3 NaCl 加固纤维加筋土抗压强度对比 (3% 石灰含量)

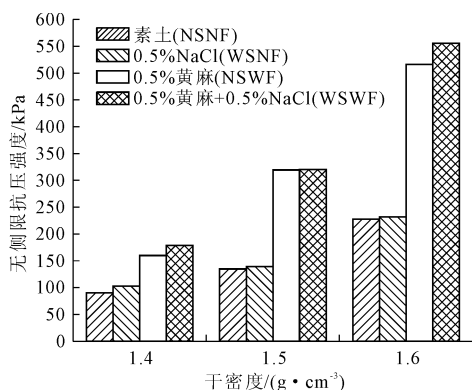


图 4 NaCl 加固纤维加筋土抗压强度对比 (5% 石灰含量)

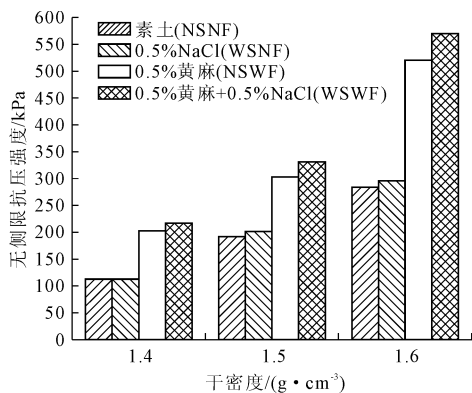


图 5 NaCl 加固纤维加筋土抗压强度对比 (7% 石灰含量)

从图 2—图 5 中可以看出,NSNF 组与 WSNF 组无侧限抗压强度差距并不明显,可见在单独添加 NaCl 的情况下,NaCl 加固黏土作用并不显著。这是由于 NaCl 虽然能加速土体固结,但同时也会造成盐胀和吸湿软化,降低土体强度。

WSWF 组抗压强度最大,可见黄麻纤维和 NaCl 二者可以协调作用,纤维加筋土可以抵消含盐量引起的盐胀与吸湿软化对固化土抗压性能的影响。

在干密度较小时,NaCl 对土体的早期抗压强度

影响不大,这是由于干密度较小时,土体中间存在大量空隙,NaCl 并不能与土体颗粒充分接触。在干密度 1.6 g/cm³ 的条件下,不添加石灰,WSWF 组比 NSWF 组强度提高 8.2 kPa;3% 石灰,WSWF 组比 NSWF 组强度提高 13.2 kPa;5% 石灰,WSWF 组比 NSWF 组强度提高 39.1 kPa;7% 石灰,WSWF 组比 NSWF 组强度提高 49.6 kPa;可见 NaCl 对土体的加固作用随着石灰含量的提高而增强。

2.3 孔隙度对纤维加筋土抗压强度的影响

孔隙度对纤维加筋土抗压强度的影响见图 6。

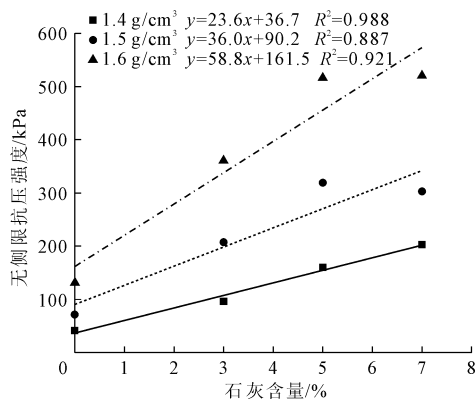


图 6 黄麻纤维加筋土 Q_u 和石灰含量的关系曲线

孔隙度 η 的计算方法如公式(1)所示,是关于干密度的函数 ρ_d 的函数。试件的目标干密度计算方法如下:将试件中所含烘干黏土、石灰、NaCl、纤维的质量之和,除以试件的体积;公式(1)中符号 S 、 L 、 C 、 F 分别代表试件中黏土、石灰、NaCl、纤维的质量百分数; ρ_s 、 ρ_L 、 ρ_C 、 ρ_F 分别代表黏土、石灰、NaCl、纤维的密度。

$$\eta = 100 - \left\{ \frac{\rho_d}{S + L + C + F} \right\} \times \left\{ \frac{S}{\rho_s} + \frac{L}{\rho_L} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{F}{\rho_F} \right\} \quad (1)$$

从图 6 中可以看出不同干密度纤维加筋土的无侧限抗压强度与石灰含量之间呈线性关系,无侧限抗压强度随着石灰含量的增加而提高。

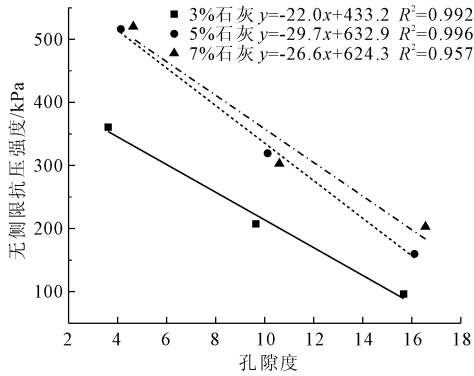
2.4 石灰含量对纤维加筋土抗压强度的影响

石灰含量对纤维加筋土抗压强度的影响见图 7。

L_{iv} 是石灰的体积含量,计算过程如公式(2)所示, V_L 、 V 分别代表石灰、试样体积。

$$L_{iv} = \frac{V_L}{V} = \frac{m_L / \rho_L}{V} \quad (2)$$

从图 7 中可以发现土体无侧限抗压强度与孔隙度也呈线性关系,无侧限抗压强度随着孔隙度的增加而降低。

图7 黄麻纤维加筋土 Q_u 和孔隙度的关系曲线

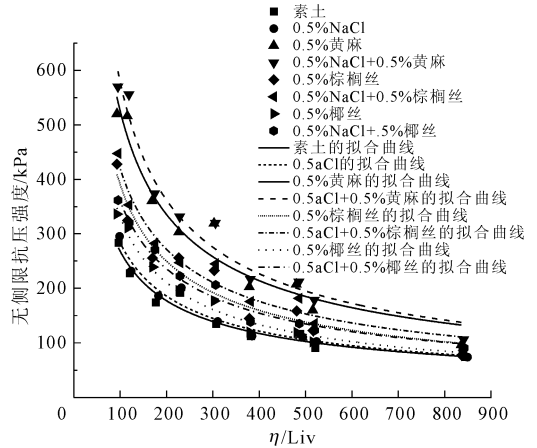
2.5 η/Liv 与纤维加筋土抗压强度的关系分析

对于上海黏土而言,土体抗压强度与石灰含量正相关,与孔隙度负相关,可以猜想土体抗压强度与 η/Liv 有关。为研究纤维加筋土无侧限抗压强度与 η/Liv 的关系,通过 Origin 软件回归曲线分析,拟合了添加黄麻、棕榈丝、椰丝等纤维加筋石灰土混合物的无侧限抗压强度和 η/Liv 关系曲线,如图 8 所示。总结了 8 个不同配合比试样的无侧限抗压强度与孔隙度/石灰含量指数相关的公式,通用公式如公式 (3) 所示。

$$Q_u = C \cdot (\eta/Liv)^D \quad (3)$$

式中: C 、 D 为无量纲常数, C 、 D 的取值详见表 4。

从图 8 中可以看出所有试样的抗压强度随着孔隙度的减小呈指数型增长,这是由于石灰颗粒粒径较素土颗粒小,可以均匀分布于土体结构中,使混合土颗粒排布更为紧密,使其孔隙度减小。同时石灰的胶结作用使土体颗粒凝聚在一起。孔隙度越小,土体密实度越大,使得纤维与土体颗粒之间的接触

图8 纤维加筋土 Q_u 和 η/Liv 的关系对比曲线

面积增大,同时提高了土颗粒对于纤维的压力。

加入黄麻纤维的回归曲线高于棕榈丝,加入棕榈丝的回归曲线高于椰丝,这与 2.1 中“黄麻纤维提高抗压强度幅度最大,棕榈丝次之,椰丝对土体强度的增加贡献最小”的结论一致,可见 C 、 D 是与添加纤维种类有关的无量纲常数。

添加 NaCl 的四组回归曲线均分别高于不添加 NaCl 的四组曲线,这与 2.2 中“NaCl 可以增强土体抗压强度”的结论一致。

故而 C 、 D 是与 NaCl、添加纤维种类相关的系数。综上所述, C 、 D 是与土中添加的材料相关的系数。虽然添加材料不同,8 个回归曲线的与试验数值的误差均在允许范围之类, R^2 为 0.94 ~ 0.99,相关性较好,说明此方程可以在一定范围内预测纤维加筋土的无侧限抗压强度。

表 4 不同组分纤维加筋土强度公式系数值

参数	素土	0.5% NaCl	0.5% 黄麻	0.5% NaCl + 0.5% 黄麻	0.5% 棕榈丝	0.5% NaCl + 0.5% 棕榈丝	0.5% 椰丝	0.5% NaCl + 0.5% 椰丝
C	4192.82	4744.52	10388.79	12993.02	7622.66	7487.35	6844.82	6010.98
D	0.60	0.61	0.65	0.68	0.65	0.63	0.66	0.61
R^2	0.96	0.96	0.95	0.97	0.94	0.96	0.99	0.98

3 结论

本研究分析了不同石灰含量,不同干密度,不同种类的纤维加筋土混合物无侧限抗压强度,得到以下结论:

(1) 纤维加筋土的无侧限抗压强度与所添加纤维种类为有关,黄麻纤维对土体的改良效果最优,椰丝对土体抗压强度的增加贡献最少。

(2) NaCl 可以提高黏土的早期无侧限抗压强度,单独掺加纤维提升黏土抗压强度的幅度大于单独掺加 NaCl;同时加入 NaCl 和纤维,对黏土抗压强度增益效果优于单独添加纤维和 NaCl。

(3) 纤维加筋土无侧限抗压强度与孔隙度/石灰含量指数 (η/Liv) 呈非线性关系, η/Liv 减小,无侧限抗压强度指数增加;拟合了纤维加筋土的无侧限抗压强度与 η/Liv 的公式, R^2 为 0.94 ~ 0.99,相

关性较好,该公式可以在一定范围内预测纤维加筋土的无侧限抗压强度。

参考文献:

- [1] 周学明,袁良英,蔡坚强,等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质,2005(4):6-9,61.
- [2] 严学新,史玉金. 上海市工程地质结构特征[J]. 上海地质,2006(4):19-24.
- [3] 何钰龙. 纤维增强土体抗剪强度及路堤边坡稳定性研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [4] 王艳芳,周治刚. 纤维加筋土在交通工程中的应用研究综述[J]. 现代交通技术,2016,13(6):17-21.
- [5] 张 军. 纤维加筋土的强度试验研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [6] Akbulut S, Arasan S, Kalkan E. Modification of clay soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. Applied Clay Science,2007,38(1):23-32.
- [7] 陆 韬,璩继立. 黄原胶和黄麻纤维对上海黏土无侧限抗压强度的影响[J]. 公路交通科技,2020,37(3):9-16,23.
- [8] 黄晓如,璩继立. 含水率和加筋条件对棕榈加筋土的影响[J]. 上海理工大学学报,2019,41(4):395-402.
- [9] 常志璐,裴向军,吴梦秋,等. 植物纤维加筋固化土抗压强度和渗透试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(4):912-919.
- [10] 璩继立,孙中明. 纤维素纤维和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):211-215.
- [11] Kumar S, Dutta R K. Unconfined compressive strength of bentonite-lime-phosphogypsum mixture reinforced with sisal fibers [J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2014,8(3):239-250.
- [12] 庄心善,余晓彦. 石灰-玄武岩纤维改性膨胀土强度特性的试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(S1):166-170.
- [13] 崔玉萍,高安荣,孙立强,等. 环向加筋灰土墩极限承载力计算方法[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):106-112.
- [14] 李自立,陈志波,胡 屏,等. 粉煤灰与石灰改良花岗岩残积土压缩特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):82-86.
- [15] Drake J A, Haliburton T A. Accelerated curing of salt-treated and lime-treated cohesive soils[J]. Highway Research Record, 1972,381:10-19.
- [16] Saldanha R B, Mallmann J E C, Consoli N C. Salts accelerating strength increase of coal fly ash-carbide lime compacted blends [J]. Géotechnique Letters, 2016, 6(1): 23-27.
- [17] 张少龙,高建恩,李兴华,等. 含盐量对MBER土壤固化剂加固土性能的影响试验[J]. 水电能源科学,2015,33(11):133-135,139.
- [18] 魏 丽,柴寿喜,姜宇波. 含盐量与布筋方式对纤维加筋土抗压性能的影响[J]. 岩土力学,2017,38(S2):210-216.
- [19] Consoli N C, Samaniego R A Q, Villalba N M K. Durability, strength, and stiffness of dispersive clay-lime blends[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016,28(11):04016124.
- [20] Consoli N C, Godoy V B, Tomasi L F, et al. Fibre-reinforced sand-coal fly ash-lime-NaCl blends under severe environmental conditions[J]. Geosynthetics International, 2019,26(5):525-538.
- [21] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.