

不同纳米黏土改良黄土试验结果对比分析

赵丹妮¹,曹宝花^{1,2},许江波^{1*},南亚林^{3,4},陈能远^{3,4},张鹏^{3,4},王和平⁵

(1.长安大学公路学院,陕西西安710064;2.西安长大公路工程检测中心有限公司,陕西西安710064;

3.电信综合勘察设计研究院有限公司,陕西西安710054;4.陕西省土体工程技术研究中心,

陕西西安710054;5.陕西交建公路工程试验检测有限公司,陕西西安710117)

摘要:应用正交法设计试验,定量地分析了改良黄土抗压强度、抗剪强度指标以及渗透系数的影响因素和影响大小,得到了改良黄土的最优掺量。另外,通过扫描电镜试验探究纳米黏土材料对黄土的改良机理。研究表明:①影响改良黄土抗压强度因素有纳米黏土掺量、含水率和养护龄期,影响黏聚力、内摩擦角、渗透系数的因素有掺量、干密度、围压;②在不同影响因素下,纳米蒙脱土比凹凸棒土更能有效提高黄土的抗压强度;③当材料掺量小于等于1%时,凹凸棒土改良黄土的抗剪强度指标总体高于纳米蒙脱土抗剪强度指标,渗透系数则相反,而当掺量大于等于2%时,则相反;④当凹凸棒土材料掺量为1%、纳米蒙脱土材料掺量为2%时,改良黄土表面最为致密,孔隙最少。

关键词:正交试验;凹凸棒土;纳米蒙脱土;三轴试验对比;SEM扫描电镜试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

Comparative Analysis of Test Results of Different Nano-Clay Improved Loess

ZHAO Danni¹, CAO Baohua^{1,2}, XU Jiangbo^{1*}, NAN Yalin^{3,4},

CHEN Nengyuan^{3,4}, ZHANG Peng^{3,4}, WANG Heping⁵

(1.School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Xi'an Changda Highway Engineering Inspection Center Co.,

Ltd., Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3.China DK Comprehensive Investigate and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 4.Soil Engineering Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

5.Shaanxi Provincial Communication Construction Testing & Measuring Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710117, China)

Abstract: The orthogonal design test was used to quantitatively analyze the influencing factors and influence degree of compressive strength, shear strength index, and permeability coefficient of improved loess, and the optimal content of improved loess was obtained. In addition, the improvement mechanism of nano-clay materials on loess was explored by scanning electron microscopy. The results show that: ① The factors affecting the compressive strength of improved loess are the content of nano-clay, water content, and curing age, and the factors affecting cohesion, internal friction angle, and permeability coefficient are the content, dry density, and confining pressure. ② Under different influencing factors, nano-montmorillonite can effectively improve the compressive strength of loess than attapulgite. ③ When the material content is less than or equal to 1%, the shear strength index of improved loess by attapulgite is generally higher than that by nano-montmorillonite, and the permeability coefficient is opposite. However, when the material content is greater than or equal to 2%, the situation is different. ④ When the attapulgite content is 1%, and the nano-montmorillonite content is 2%, the surface of the improved loess is the densest, and the porosity is the smallest.

Keywords: orthogonal test; attapulgite; nano-montmorillonite; triaxial test comparison; SEM test

收稿日期:2022-09-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:11972374,41790443)

作者简介:赵丹妮,女,硕士研究生.E-mail:2020221188@chd.edu.cn

*通信作者:许江波,男,博士,副教授,博士生导师.E-mail:xujiangbo@yeah.net.

0 引言

黄土作为中国广泛分布的特殊土,是西北地区常用的建筑材料。由于黄土具有多孔隙、颗粒间胶结性差等不良工程特性,故单纯的压实黄土不能很好满足工程对于承载力与渗透性的要求。因此对黄土进行改良,提高其物理力学性质和水理性质,对于黄土在工程中的应用具有重要意义。

张豫川等^[1]针对长龄期条件下石灰和粉煤灰对黄土的改良作用,开展室内试验研究各因素对改良黄土抗剪强度和渗透性的影响及长龄期效应;刘钊钊等^[2]基于土-水特征曲线试验和湿化崩解试验,研究不同掺量木质素改良黄土的持水性和水稳性,并结合扫描电镜测试探讨掺入木质素导致黄土水稳性改善的内在机制;王天亮等^[3]在大量动静三轴试验的基础上,研究了水泥改良土试样的应力-应变关系、掺和比及围压等影响因素;张虎元等^[4]利用抗疏力土壤固化剂对黄土进行化学改性试验,对不同配比的抗疏力固化黄土击实试验、单轴抗压试验,探讨抗疏力固化剂在黄土地区运用的可行性;王任杰^[5]采用水泥对黄土进行改良,通过室内试验手段,综合研究了水泥改良黄土物理力学性质、水理性质及改良机理;李振^[6]采用生石灰对黄土进行改良,研究生石灰改良黄土的水分变化、击实特性、稠度特征、崩解特性和水化学性质,分析生石灰含量和养护周期对黄土物理化学性质的影响。

纳米材料是一门在近几十年兴起,并在近 20 年得到迅速发展的材料分支学科。由于纳米材料表征尺度小,比表面积大,使其在陶瓷材料、传感器、功能材料、复合材料等诸多科学、工业领域内得到非常广泛的应用。因此,将纳米材料应用于土体改良中是一种新的土体改良思路。

Taha 等^[7]研究了纳米黏土、纳米氧化铝和纳米铜等纳米材料对压实土体表面干燥裂纹发展的影响;Mauter 等^[8]发现添加了 3% 碳纳米管的土的抗压强度比原始黏质土提高约 1.2 倍;Tomar 等^[9]测试纳米二氧化硅和聚丙烯纤维复合处理的黏土的强度性能和耐久性,发现随着两种添加物含量的增加,单轴抗压强度也随之增加;Ren 等^[10]对粉质黏土的比重、液塑限、单轴抗压强度等力学强度进行了研究;周斌等^[11]将纳米 Al_2O_3 作为外掺剂应用于黏土改性研究,

研究了不同含水量和不同纳米 Al_2O_3 掺量下淤泥质黏土的无侧限抗压强度变化规律;肖继强^[12]采用不同纳米材料 SiO_2 和 Al_2O_3 对淤泥质黏土进行改良,此研究为纳米材料能更好地在工程中的应用提供了基础;王文军等^[13]通过研究纳米硅粉改性水泥土在不同龄期下无侧限试验发现,纳米硅粉掺量和龄期的不同,强度改性也不同。

目前,纳米材料常被用于水泥基材料的改良剂,并且已取得了丰硕的研究成果。但在黄土中的应用较少^[14],且其改良机理也不明确。因此开展纳米材料改性黄土的研究显得尤为重要。本文采用两种不同纳米黏土改良黄土,通过室内力学试验探讨不同纳米黏土及掺量对黄土各种性能的影响,在室内试验分析结果的基础上,探讨纳米黏土改良黄土的微观机理,为纳米材料应用于黄土及更多土体中提供了工程基础。

1 正交试验设计及结果分析

1.1 试验材料

本文所采用的凹凸棒土及纳米蒙脱土物理性质指标见表 1,试验用黄土为陕西省延安市黄土(图 1、表 2、图 2)。

表 1 凹凸棒土、纳米蒙脱土物理性质指标
Table 1 Physical properties of attapulgite and nano-montmorillonite

材料	颗粒直径/nm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	含水率/%	性状	pH 值
凹凸棒土	5~20	142.63	≤ 3	米白色粉末	7.0~8.0
纳米蒙脱土	10~50	3.36	≤ 3	白色粉末	7.0~8.0

1.2 无侧限抗压强度正交试验设计

1.2.1 试验方案设计

试样在无侧限抗压强度试验过程不受侧向力,只受法向作用力,相当于周围压力为 0 的三轴试验。本次试验选取两种纳米黏土材料掺量分别为 1%、2%、4%、6%,控制改良土干密度为 1.55 g/cm^3 ,土含水率为 5%、10%、15%、20%,养护龄期为 1 d、7 d、14 d、28 d,加载速率为 0.5 mm/min ,共制作 96 个试样。

1.2.2 正交试验设计

凹凸棒土改良黄土抗压强度试验的影响因素有凹凸棒土掺量、含水率和养护龄期;纳米蒙脱土



图1 原状样取土现场图片

Figure 1 Pictures of on-site extraction of soil in its original state

表2 黄土基本物理性质参数

Table 2 Basic physical properties of loess

天然含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	土粒相对密度	液限/%	塑限/%
14.97	1.557	2.71	32.68	16.74

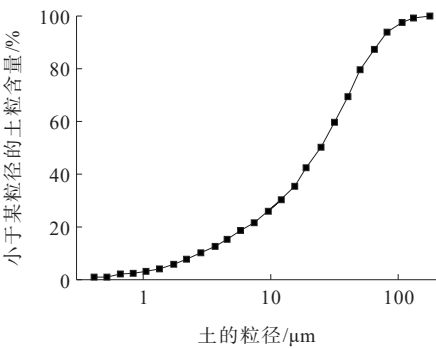


图2 黄土的颗粒级配曲线

Figure 2 Particle gradation curve of loess

改良黄土抗压强度试验的影响因素有纳米蒙脱土掺量、含水率及养护龄期,通过三因素四水平的正交试验设计,对两种纳米黏土改良黄土的抗压强度开展因素敏感性分析。假设显著性水平为0.05,用“A”“B”“C”分别表示“凹凸棒土掺量”“含水率”“养护龄期”3种因素;“A'”“B'”“C'”分别表示“纳米蒙脱土掺量”“含水率”“养护龄期”3种因素,表3为因素水平设计,正交试验设计如表4所示,分别进行16组试验。

表3 三因素四水平设计

Table 3 Four horizontal design of three factors

水平	纳米黏土掺量/%	含水率/%	养护龄期/d
1	1	5	1
2	2	10	7
3	4	15	14
4	6	20	28

表4 正交试验设计

Table 4 Orthogonal test design

试验编号	A&A'	B&B'	C&C'	无侧限抗压强度/kPa	
				凹凸棒土	纳米蒙脱土
1	1(1)	1(5%)	1(1)	169.3	165.7
2	1	2(10%)	2(7)	152.6	132.4
3	1	3(15%)	3(14)	138.5	113.7
4	1	4(20%)	4(28)	117.4	86.2
5	2(2)	1	2	150.6	202.2
6	2	2	1	130.5	154.3
7	2	3	4	136.8	160.8
8	2	4	3	88.1	102.3
9	3(4)	1	3	160.4	174.2
10	3	2	4	152.3	171.5
11	3	3	1	95.5	108.4
12	3	4	2	57.8	72.8
13	4(6)	1	4	171.7	182.6
14	4	2	3	126.8	132.6
15	4	3	2	90.1	94.6
16	4	4	1	47.3	50.7

1.3 无侧限抗压强度正交试验结果对比

1.3.1 正交试验极差结果对比

两种纳米黏土改良黄土各影响因素与试验指标关系见图3。

由图3可得:

(1) 对于凹凸棒土,改良黄土抗压强度对3种因素的敏感程度为B>A>C。各因素的最优水平分别为A₁、B₁、C₁,最优组合为A₁B₁C₁,说明当凹凸棒土掺量为1%、含水率为5%、养护龄期为1 d时,改良黄土的抗压强度达到最大值169.3 kPa。

(2) 对于纳米蒙脱土,3种因素对改良黄土抗压强度影响的主次顺序为B'>A'>C'。从各因素对应水平的指标均值可以得出各因素的最优水平分别为A'₂、B'₁、C'₃,即最优组合为A'₂B'₁C'₃,说明当纳米蒙脱土掺量为2%、含水率为5%、养护龄期为14 d时,改良黄土的抗压强度达到最大值202 kPa。

(3) 纳米蒙脱土改良黄土的折线总体位于凹凸棒土改良黄土折线的上方,且两者对黄土抗压强度的影响随着材料掺量的增大均呈现先增大后减小的趋势,因此可以说明纳米黏土材料的掺量并非越多越好。主要原因是适量的纳米黏土可以有效胶结颗粒和填充孔隙,并增强土体双电层吸附作用从而提

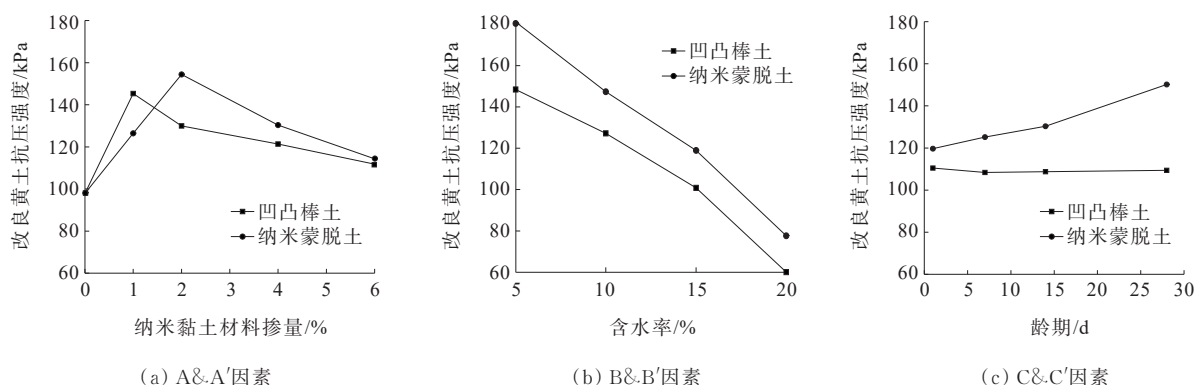


图3 两种纳米黏土改良黄土各影响因素与试验指标关系

Figure 3 Relationship between influencing factors of two nano-clay improved loess and test indexes

升黏聚力,增强抗压强度。但当掺量较大时纳米黏土本身黏结性和整合性会促使纳米黏土优先与自身结合,而非先进行胶结颗粒和填充孔隙,导致无法有效加固土体;同时土颗粒间的纳米黏土颗粒增多,会加大土颗粒间的距离,导致颗粒间的吸引力降低,使纳米黏土在土体中起“润滑作用”,最终导致土体抗压强度减小^[15]。当试样含水率增加时,两种纳米黏土改良黄土抗压强度均呈现减小趋势,其中含水率比纳米黏土材料掺量对改良土抗压强度影响更为显著。原因主要是含水率的增大加厚了黄土颗粒间的水化膜,增加了颗粒间的润滑作用,且当试样总体含水率提高时,试样密实度会降低,所以改良黄土抗压

强度减小,C因素对凹凸棒土改良黄土抗压强度影响,极差值仅为2.3 kPa,而纳米蒙脱土改良黄土抗压强度极差值为30.5 kPa,说明养护龄期对纳米蒙脱土改良黄土的影响比凹凸棒土改良黄土更为显著。

1.3.2 正交试验方差结果对比

以抗压强度为试验指标,正交试验方差分析原理是F检验,通过计算各因素的显著性 p 值,并将其与显著性水平进行数值比较,便可确定该因素的显著性。

正交设计试验方差分析采用IBM SPSS Statistic 25统计分析软件,表5为凹凸棒土、纳米蒙脱土改良黄土正交试验方差分析结果。

表5 正交试验方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of orthogonal test

源	凹凸棒土改良黄土					纳米蒙脱土改良黄土				
	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F值	显著性	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F值	显著性
校正模型	21 891.486	9	2 432.387	207.236	0.000	26 416.125	6	4 402.688	17.549	0.000
截距	246 437.781	1	246 437.781	20 996.137	0.000	276 939.062	1	276 939.062	1 103.874	0.000
凹凸棒土掺量	2 825.632	3	941.877	80.247	0.000	3 458.943	3	1 152.981	72.061	0.004
含水率	16 080.722	3	5 360.241	456.685	0.000	20 936.559	3	6 978.853	465.257	0.000
养护龄期	2 985.132	3	995.044	84.776	0.040	4 728.538	3	1 426.179	95.079	0.033
误差	70.424	6	11.737			2 257.913	9	250.879		
总计	268 399.690	16				305 613.100	16			
校正总计	21 961.909	15				28 674.038	15			

方差分析的因变量为改良黄土抗压强度,主效应的固定因子为A、B、C 3个因素。由表5中各因素显著性 p 值可以看出:纳米黏土掺量、含水率、养护龄期对改良黄土抗压强度的影响都较显著。

1.4 三轴试验结果对比

对试样进行固结不排水试验,图4、5分别为改良黄土的 $p \sim q$ 与 $p' \sim q$ 曲线,图中 K'_f 与 K_f 分别表示有效应力路径的破坏主应力线与总应力路径的破坏主应力线。

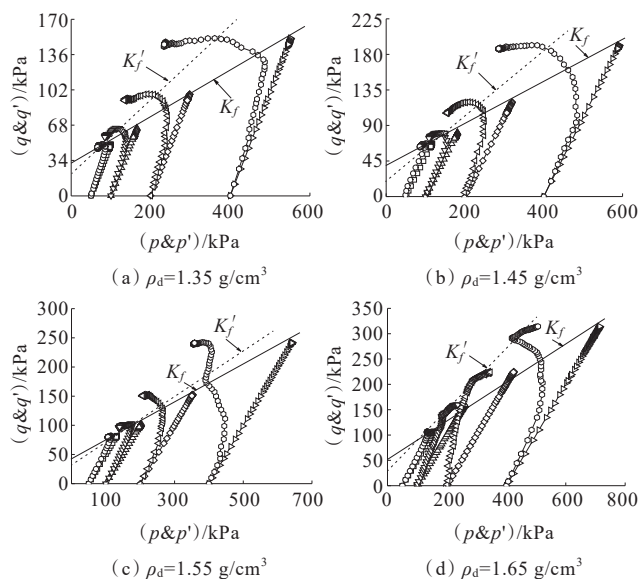


图4 1%凹凸棒土改良黄土的应力路径

Figure 4 Stress path of improved loess by 1% attapulgite

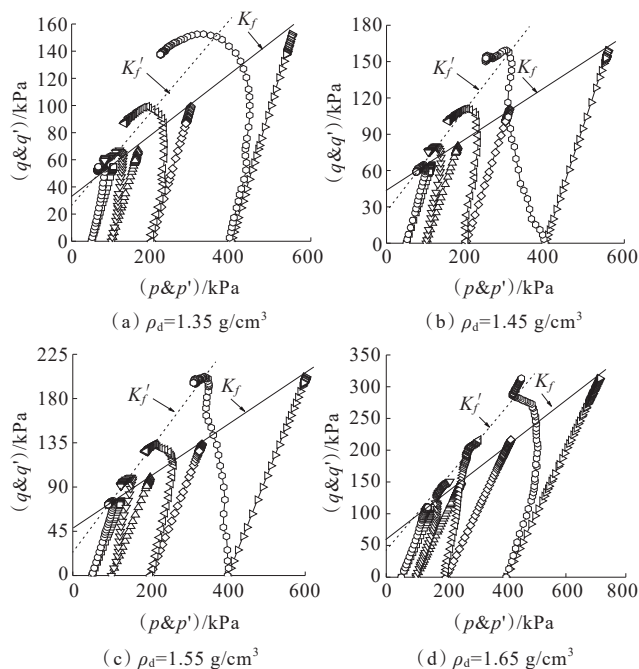


图5 2%纳米蒙脱土改良黄土的应力路径

Figure 5 Stress path of improved loess by 2% nano-montmorillonite

抗剪强度主要受抗剪强度指标 c 和 φ 影响,所以可由抗剪强度指标来反映出抗剪强度的变化,两种纳米材料改良黄土抗剪强度指标对比关系见图6。

由图6可得:同一干密度情况下,两种纳米黏土的掺加对于黄土抗剪强度指标有明显的影 响,两种纳米黏土对于改良后黄土的抗剪强度指标的影响是先增大后减小的关系,当掺量为2%时,纳米蒙脱土

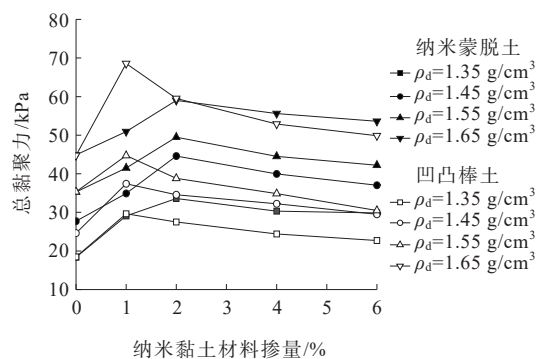
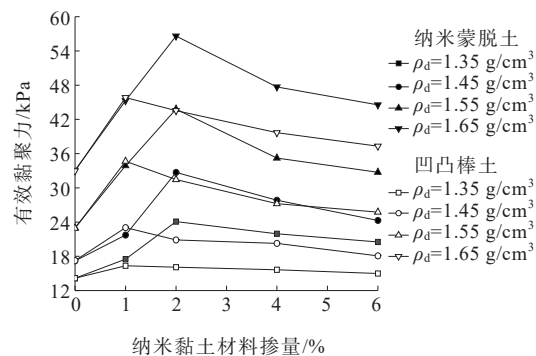
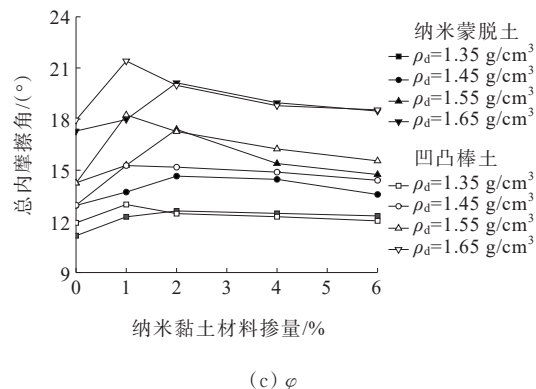
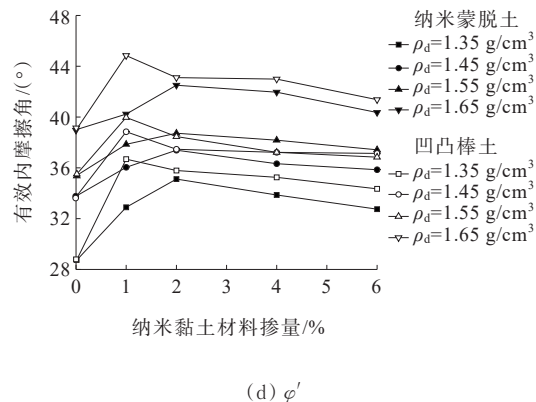
(a) c (b) c' (c) φ (d) φ'

图6 两种纳米材料改良黄土抗剪强度指标对比关系

Figure 6 Comparative relationship between shear strength indexes of improved loess by two nanomaterials

对于改良黄土的影响最大。产生如此差别的原因可能为:纳米黏土的掺量过大,导致在黄土中的分散性差,而凹凸棒土的比表面积大,更容易发生团聚,从而影响改良效果。而纳米蒙脱土比表面积相对较小,所以相同掺量下团聚效果小,因此纳米黏土的掺量并不是越多越好^[16]。

对凹凸棒土和蒙脱土改良黄土的内摩擦角 φ 关于纳米材料掺量和干密度 ρ_d 进行函数拟合,如式(1)、(2)所示:

凹凸棒土拟合公式为:

$$f(c_A, \rho_d) = -883.128 - 13.706c_A + 1814.509\rho_d - 0.439\omega^2 + 20.133c_A\rho_d - 1233.922\rho_d^2 + 0.103c_A^3 - 0.433c_A^2\rho_d - 5.991c_A\rho_d^2 + 282\rho_d^3 \quad (1)$$

纳米蒙脱土拟合公式:

$$f(c_M, \rho_d) = -1440.199 + 10.06c_M + 2909.602\rho_d - 0.659\omega^2 - 9.718c_M\rho_d - 1950.951\rho_d^2 + 0.053c_M^3 - 0.024c_M^2\rho_d + 3.121c_M\rho_d^2 + 438.059\rho_d^3 \quad (2)$$

式中: c_A 和 c_M 分别表示纳米黏土和凹凸棒土掺量。

式(1)、(2)中拟合度分别为0.9613和0.9644。说明拟合结果良好。

2 纳米黏土改良黄土渗透试验对比

2.1 常水头渗透正交试验方案设计

2.1.1 试验方案

两种纳米黏土改良黄土渗透试验材料掺量分别为1%、2%、4%、8%,设定常水头渗透试验试样的干密度分别为 $\rho_d = 1.35 \text{ g/cm}^3$ 、 1.45 g/cm^3 、 1.55 g/cm^3 、 1.65 g/cm^3 ,围压为0、100 kPa、200 kPa、300 kPa。

2.1.2 正交试验结果分析

以渗透系数为试验指标,通过各因素对改良黄土渗透系数的影响程度进行敏感性分析。假设显著性水平为0.05,用A、B、C分别表示凹凸棒土改良黄土渗透系数的影响因素“掺量”“干密度”“围压”,用A'、B'、C'分别表示纳米蒙脱土改良黄土渗透系数的影响因素“掺量”“干密度”“围压”,3种因素的4种影响水平如表6所示,正交试验设计如表7所示。

2.2 常水头渗透正交试验结果对比

2.2.1 正交试验极差结果对比

图7为两种纳米黏土改良黄土常水头渗透系数随各因素变化的关系曲线。

表6 三因素四水平设计

Table 6 Four horizontal designs of three factors

水平	掺量/%	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	围压/kPa
1	1	1.35	0
2	2	1.45	100
3	4	1.55	200
4	8	1.65	300

表7 正交试验设计

Table 7 Orthogonal test design

试验编号	A&A'	B&B'	C&C'	渗透系数/($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	
				凹凸棒土	纳米蒙脱土
1	1(1)	1(1.35)	1(0)	27.54	28.99
2	1	2(1.45)	2(100)	15.36	18.22
3	1	3(1.55)	3(200)	8.31	8.31
4	1	4(1.65)	4(300)	4.37	3.75
5	2(2)	1	2	22.52	22.47
6	2	2	1	15.74	16.87
7	2	3	4	2.94	3.96
8	2	4	3	3.41	4.31
9	3(4)	1	3	13.69	13.78
10	3	2	4	4.91	3.72
11	3	3	1	6.36	5.92
12	3	4	2	2.68	2.21
13	4(8)	1	4	6.23	4.55
14	4	2	3	1.54	0.93
15	4	3	2	1.09	0.74
16	4	4	1	1.92	1.28

渗透系数值越小,对黄土改良效果越好。其中对两种纳米黏土改良黄土渗透系数影响最大的因素是干密度,材料掺量次之,围压最小。从各因素对应水平的试验指标均值可以得出各因素的最优组合为 $A_4B_4C_4$ 、 $A'_4B'_4C'_4$ 。

凹凸棒土改良黄土与纳米蒙脱土改良黄土的各因素与试验性能指标趋势线总体相差不大,说明两种纳米黏土材料对黄土的渗透性能改良效果相近。由图7(a)可知:两种纳米黏土的渗透系数均会随着材料掺量的增加而减小,当纳米黏土掺量小于等于2%时,凹凸棒土改良黄土的渗透系数比纳米蒙脱土改良黄土的渗透系数小,说明凹凸棒土对黄土的改良效果更好。原因是:纳米黏土颗粒较细,平均粒径一般为30 nm,黄土试样中加入两种纳米黏土后,都可以增强改良黄土抗渗性,一方面细小的纳米黏土

颗粒可以有效填充黄土大颗粒之间孔隙,在一定程度上能降低黄土的渗透系数;另一方面,由于纳米黏土中 SiO_2 和 CaO 可以和黄土中的矿物成分发生化学作用,产生胶结物质,从而使黄土颗粒胶结成团,堵塞了黄土中的大孔隙,阻碍土体中水分流动,达到抗渗作用。凹凸棒土作为一维纳米材料,当掺量增多时颗粒间由于容易凝结成块,其性能反而下降,所以当掺量大于2%时其改良黄土的渗透系数较纳米蒙脱土改良黄土大;由图7(b)可知:随着试样干密度的

增大,两种纳米黏土材料的渗透系数均会减小,并且相差甚微;由图7(c)可知:围压的增大能使两种材料改良黄土渗透系数都呈现减小趋势。

2.2.2 正交试验方差结果对比

设定正交设计试验方差分析的显著性水平 p 为0.05,通过计算各因素的显著性值,并将其与显著性水平进行数值比较,便可确定该因素的显著性。

表8为凹凸棒土、纳米蒙脱土改良黄土正交试验方差分析结果。

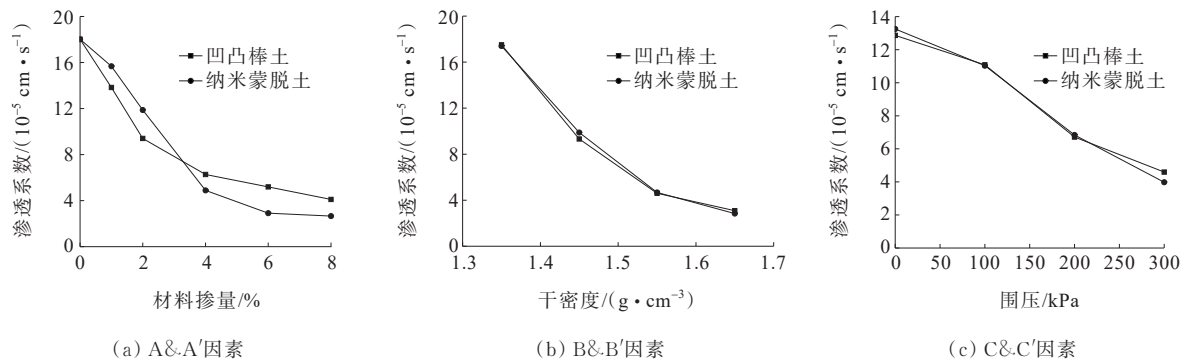


图7 两种纳米黏土改良黄土各影响因素与试验指标关系

Figure 7 Relationship between influencing factors of two nano-clay improved loess and test indexes

表8 凹凸棒土、纳米蒙脱土改良黄土正交设计方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of orthogonal design of improved loess by attapulgite and nano-montmorillonite

源	凹凸棒土					纳米蒙脱土				
	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F值	显著性	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F值	显著性
校正模型	954.959	9	106.107	88.862	0.000	1 113.613	9	123.735	94.155	0.000
截距	1 200.796	1	1 200.796	1 005.637	0.000	1 225.175	1	1 225.175	932.290	0.000
掺量	289.046	3	96.349	80.690	0.000	398.023	3	132.674	100.958	0.000
干密度	501.744	3	167.248	140.066	0.000	510.240	3	170.080	129.421	0.000
围压	164.170	3	54.723	45.829	0.000	205.351	3	68.450	52.087	0.000
误差	7.164	6	1.194			7.885	6	1.314		
总计	2 162.919	16				2 346.673	16			
校正总计	962.123	15				1 121.498	15			

方差分析的因变量为改良黄土的渗透系数,主效应的固定因子为A、B、C和A'、B'、C'6个因素。由表8可知:6种因素改良黄土的 p 值都为0,均小于显著性水平0.05,说明两种纳米黏土材料、干密度、围压对改良黄土的抗压强度的影响都较显著。

2.3 变水头渗透正交试验结果对比

2.3.1 试验方案

设变水头渗透试验试样的干密度分别为 1.45 g/cm^3 、 1.55 g/cm^3 。分别按照 $61.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 和

$39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 制作试件,养护龄期均为1 d,共制作160个试样。

2.3.2 正交试验结果对比

图8中 ρ_{dA} 、 ρ_{dM} 分别表示凹凸棒土、纳米蒙脱土改良黄土的干密度。

由图8可知:当材料掺量小于等于1%时,凹凸棒土改良黄土渗透系数小于纳米蒙脱土改良黄土的渗透系数,说明1%凹凸棒土比1%纳米蒙脱土更有效改良黄土的渗透性;当材料掺量大于2%时,相

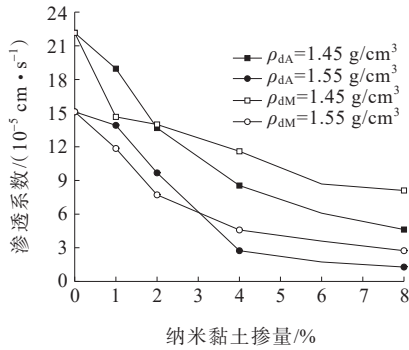


图8 纳米黏土改良黄土变水头渗透系数对比

Figure 8 Comparison of permeability coefficients of nano-clay improved water head

同干密度情况下,纳米蒙脱土改良黄土的渗透系数小于凹凸棒土改良黄土,说明大于2%掺量的纳米蒙脱土更能有效改善黄土的渗透性。

3 纳米黏土改良黄土微观机理分析

3.1 扫描电镜试验原理

扫描电镜是目前室内试验常用的试样微观分析软件,其成像原理为:首先以电子枪不断发射高能电子束,通过聚光镜和物镜把电子束转换为光栅状使其垂直入射到试样表面,入射电子束的能量一部分被样品表面反射,而其余能量电子束则穿透样品,投射至荧光屏上,将所有荧光屏上的亮点集合起来得到SEM图像信息^[17-18]。

3.2 试验方案

将改良黄土三轴试件从中部掰开,露出新鲜较为平整的断面,然后使用小刀及凿具加工成 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ 左右的小试样,并置于 105°C 烘箱烘干,然后用导电胶带将试样粘贴在圆盘上,为了提高图像的质量和分辨率,进行喷金处理后装样,如图9所示。

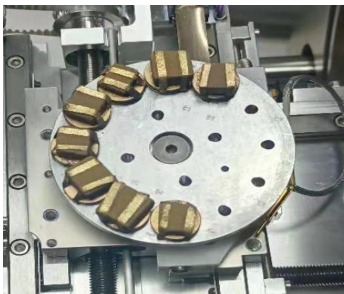


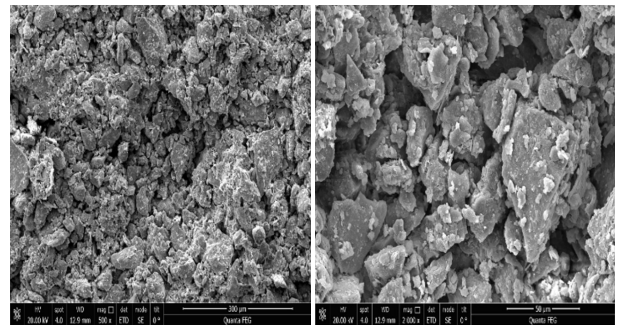
图9 喷金后改良黄土试样装样

Figure 9 Improved loess specimen loading after metal spraying

3.3 两种纳米黏土改良黄土微观机理分析

扫描电镜试样选取养护时间为1 d、干密度为 1.55 g/cm^3 条件下材料掺量为0、1%、2%、4%的纳米黏土改良黄土。

图10表示素黄土放大500倍、2 000倍的SEM图像,观察图像可以发现:素黄土孔隙较大,颗粒间胶结不够紧密,500倍率下可以清楚观察到土样的整体结构是以颗粒为基本单元体的单粒结构,小部分出现团聚状结构,孔隙比较明显,颗粒间主要是通过相互接触连接。从2 000倍的SEM图像中发现,颗粒间的连接方式主要是以面一面、点一面、边一边为主,且较为分散,黏粒局部附着在粉粒表面,胶结作用不明显。



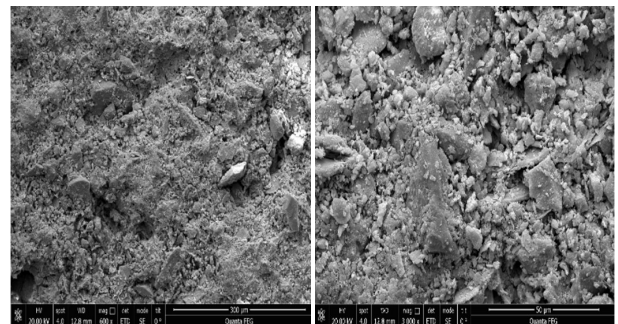
(a) 500倍

(b) 2 000倍

图10 素黄土放大不同倍数SEM图

Figure 10 SEM images of plain loess after magnification at different multiples

图11~13为凹凸棒土掺量为1%、2%、4%的改良黄土分别在600倍、3 000倍率下的SEM图像。600倍的放大倍数只能从整体形貌角度分析材料掺入对黄土试样的影响,并不能定性分析改良后土样的颗粒骨架结构、排列形式和连接方式,所以选择将试样放大至3 000倍率做SEM扫描图像。

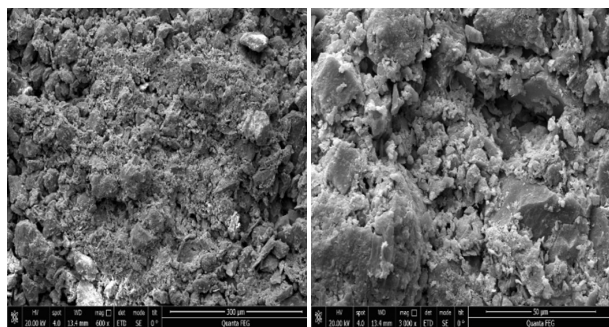


(a) 600倍

(b) 3 000倍

图11 1%掺量凹凸棒土改良黄土放大不同倍数SEM图

Figure 11 SEM images of improved loess by 1% attapulgite after magnification at different multiples

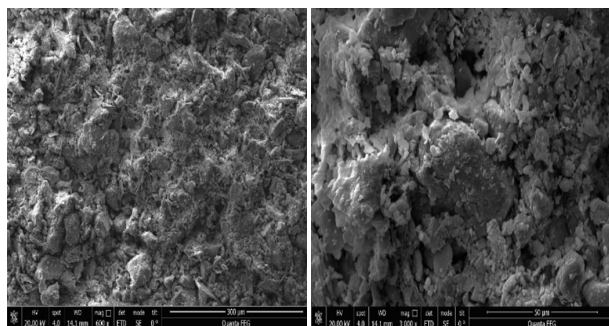


(a) 600倍

(b) 3 000倍

图12 2%掺量凹凸棒土改良黄土放大不同倍数SEM图

Figure 12 SEM images of improved loess by 2% attapulgite after magnification at different multiples



(a) 600倍

(b) 3 000倍

图13 4%掺量凹凸棒土改良黄土放大不同倍数SEM图

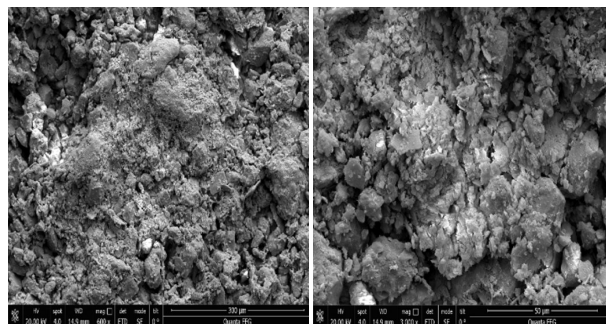
Figure 13 SEM images of improved loess by 4% attapulgite after magnification at different multiples

由图11(a)可观察到:加入纳米黏土材料后试样表面孔隙面积显著减少,颗粒间胶结物显著增多,试样表面的孔隙被填满;图12(a)、13(a)中,随着纳米黏土掺量的增大,土体内部孔隙面积有增加趋势,试样表面结构变得较为疏松。对凹凸棒土改良黄土试样进行力学试验,结果表明:1%掺量的凹凸棒土对黄土的力学性能影响最大,而掺量为2%和4%的凹凸棒土改良黄土力学性能较差。

由图11(b)可知:凹凸棒土的掺入使黄土试样颗粒之间圆球状或絮状增加,同时,凹凸棒土材料与黄土中化学物质产生的胶结物能填充黄土孔隙,并有效胶结黄土颗粒,加固黄土颗粒骨架,使土样总孔隙面积显著减少,从而增强土体强度。凹凸棒土使黄土结构类型从镶嵌结构逐步转变为凝块状胶结结构,并且土颗粒间由点接触转变为面接触去;由图12(b)、13(b)可知:随着凹凸棒土掺量的持续增多,颗粒之间孔隙内充填的细小凹凸棒土颗粒有所增加,但形成的团絮状胶结物并未明显增多,总孔隙面

积也没有明显减小,土颗粒之间的接触形式依然是面接触,并且颗粒边界不明显。

图14~16表示纳米蒙脱土掺量为1%、2%、4%的改良黄土分别在600倍、3 000倍率下的SEM图像。

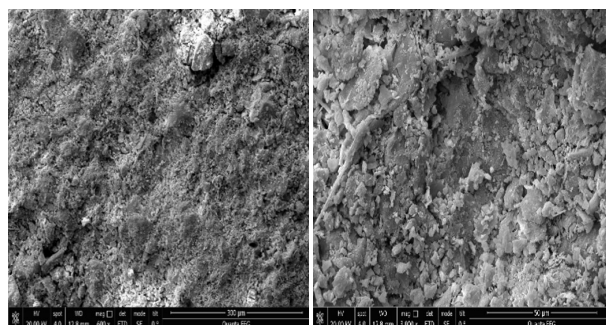


(a) 600倍

(b) 3 000倍

图14 1%掺量纳米蒙脱土改良黄土不同放大倍数SEM图

Figure 14 SEM images of improved loess by 1% nanomontmorillonite after magnification at different multiples

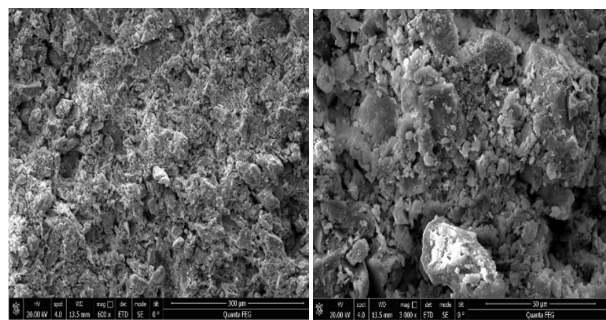


(a) 600倍

(b) 3 000倍

图15 2%掺量纳米蒙脱土改良黄土不同放大倍数SEM图

Figure 15 SEM images of improved loess by 2% nanomontmorillonite after magnification at different multiples



(a) 600倍

(b) 3 000倍

图16 4%掺量纳米蒙脱土改良黄土不同放大倍数SEM图

Figure 16 SEM images of improved loess by 4% nanomontmorillonite after magnification at different multiples

由图14(a)、15(a)、16(a)可知:当纳米蒙脱土掺量从1%增加到4%时,改良黄土试样表面空隙率随

着纳米蒙脱土掺量的增大呈现出先增大后减小的趋势,试验表面变得更为致密,而当掺量为4%时,试验表面孔隙反而增多,说明纳米蒙脱土的掺入在一定程度能有效填充试样中的大孔隙和胶结颗粒,掺量越大胶结填充作用反而减弱。这一结果与前文中所述的静力学试验结果相吻合,即2%的纳米蒙脱土改良黄土具有最优的力学性能。

4 结论

本文通过正交设计极差分析和方差分析的方法对凹凸棒土和纳米蒙脱土两种纳米黏土材料改良黄土的力学性能和渗透性能进行对比分析,并利用扫描电镜试验从微观角度分析纳米黏土材料对黄土的改良作用机理,得出以下结论:

(1) 凹凸棒土和纳米蒙脱土掺量分别为1%和2%时,改良黄土抗压强度达到峰值,继续增加掺量,抗压强度的增强效果逐渐降低。

(2) 凹凸棒土和纳米蒙脱土的最优掺量分别为1%和2%。当材料掺量小于等于1%时,凹凸棒土改良黄土的抗剪强度指标总体大于纳米蒙脱土抗剪强度指标,当掺量大于等于2%时,则相反。

(3) 常水头渗透试验结果表明:两种纳米黏土对黄土渗透性能改良效果相近。改良黄土的渗透系数均随着材料掺量的增加而减小,当纳米黏土掺量小于等于1%时,凹凸棒土对黄土的改良效果更好,当纳米黏土掺量大于2%时,则相反。变水头渗透试验结果表明:1%凹凸棒土比1%纳米蒙脱土更能有效改良黄土的渗透性,当材料掺量大于2%时,纳米蒙脱土更能有效改善黄土的渗透性。

(4) SEM扫描电镜试验结果表明:素黄土整体结构主要是由颗粒、团聚体和孔隙组成,黄土孔隙较大,颗粒间胶结不够紧密,掺加纳米黏土后的黄土试样表面孔隙面积明显减少,其中当凹凸棒土材料掺加量为1%、纳米蒙脱土材料掺量为2%时,改良黄土表面最为致密,孔隙最少,随着纳米黏土掺量的增加,改良效果反而减弱,此微观结构分析与宏观力学试验结果对应。

参考文献:

References:

[1] 张豫川,姚永国,周泓.长龄期改良黄土抗剪强度与渗透

性试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):170-176.

ZHANG Yuchuan, YAO Yongguo, ZHOU Hong. Experimental study on shear strength and permeability of long-term improved loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(S2):170-176.

[2] 刘钊钊,王谦,钟秀梅,等.木质素改良黄土的持水性和水稳性[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2582-2592.

LIU Zhaozhao, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(12):2582-2592.

[3] 王天亮,刘建坤,田亚护,等.水泥改良土力学特性试验研究[J].北京交通大学学报,2010,34(1):64-67.

WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu, et al. Experiment research on mechanical properties of cement modified soil[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010,34(1):64-67.

[4] 张虎元,林澄斌,生雨萌.抗疏力固化剂改性黄土工程性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3574-3580.

ZHANG Huyuan, LIN Chengbin, SHENG Yumeng. Experimental study on engineering properties of loess modified by hydrophobic curing agent[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3574-3580.

[5] 王任杰.水泥改良黄土的工程特性研究[D].兰州:兰州大学,2021.

WANG Renjie. Study on engineering characteristics of loess improved by cement[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.

[6] 李振.生石灰改良黄土物理化学性质的研究[D].兰州:兰州大学,2017.

LI Zhen. Improving physical and chemical properties of lime-treated loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.

[7] TAHA M R, TAHA O M E. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(10): 1190.

[8] MAUTER M S, ELIMELECH M. Environmental applications of carbon-based nanomaterials[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5843-5859.

[9] TOMAR A, SHARMA T, SINGH S. Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and polypropylene fiber[J]. Materials Today: Proceedings,

- 2020,26:3449-3457.
- [10] REN X C, HU K. Effect of nanosilica on the physical and mechanical properties of silty clay[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2014, 6(11):1010-1013.
- [11] 周斌,高磊,余湘娟. 纳米 Al_2O_3 改性粘土试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(2):74-78.
- ZHOU Bin, GAO Lei, YU Xiangjuan. Experimental research on nanometer alumina modified clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(2):74-78.
- [12] 肖继强. 公路路基纳米复合材料固化土试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- XIAO Jiqiang. Highway subgrade nano composites solidified soil experimental study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [13] 王文军,朱向荣. 纳米硅粉水泥土的强度特性及固化机理研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(6):922-926.
- WANG Wenjun, ZHU Xiangrong. Study on strength property of nanometer silica fume reinforced cemented soil and reinforcement mechanism[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6):922-926.
- [14] TABARSA A, LATIFI N, MEEHAN C L, et al. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay: A sustainable material for construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158:454-463.
- [15] 张建伟,亢飞翔,边汉亮,等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S2):1-6.
- ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S2):1-6.
- [16] 高英力,何倍,邹超. 纳米颗粒对道路粉煤灰混凝土耐磨性能的影响及作用机理[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(2):441-448.
- GAO Yingli, HE Bei, ZOU Chao. Effect and mechanism of nano-particles on wear resistance of road fly ash concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(2):441-448.
- [17] 孙嘉兴,谷天峰,孔嘉旭,等. 滑带土与原状土的显微结构对比分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(3):126-133.
- SUN Jiaying, GU Tianfeng, KONG Jiaxu et al. Comparative analysis of microstructure of slip zone soil and undisturbed soil[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(3):126-133.
- [18] 陆海通,许乾慰. 环境扫描电镜工作原理及应用[J]. *上海塑料*, 2019(3):1-7.
- LU Haitong, XU Qianwei. Working principle and application of environmental scanning electron microscope [J]. *Shanghai Plastics*, 2019(3):1-7.

(上接第54页)

- XI Yao. Study on unsaturated strength characteristics of Hefei expansive soil under controlled suction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [18] 阮波,张向京,彭意. Excel规划求解三轴试验抗剪强度指标[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(5):57-60.
- RUAN Bo, ZHANG Xiangjing, PENG Yi. Programming solver tools of Excel evaluate shear strength parameters from results of triaxial tests[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(5):57-60.
- [19] 程展林,李青云,郭熙灵,等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(10):102-111.
- CHENG Zhanlin, LI Qingyun, GUO Xiling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(10):102-111.
- [20] 郭爱国,茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. *岩土力学*, 2002, 23(4):442-445.
- GUO Aiguo, QIAN Pingyi. Corrections for influence of membrane restraint in triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(4):442-445.
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [22] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(3):429-439.
- [23] MAKSIMOVIC M. A family of nonlinear failure envelopes for non-cemented soils and rock discontinuities [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1996.