

纳米黏土对湿陷性黄土的改良效果研究

殷瑶

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 湿陷性黄土作为西北地区常见的问题土壤,给西北地区的土木工程建设带来了巨大的挑战,如何低成本地降低黄土的湿陷性是工程界亟需解决的问题。以陕西某灌溉水渠为工程背景,通过室内外试验相结合的研究方法,研究了纳米黏土对湿陷性黄土的改良效果。室内试验结果表明:随着纳米黏土含量的增大,改性黄土的液限、塑限及塑性指数均增大,改性黄土的最佳含水率随纳米黏土的增大而增大,这对于湿陷性黄土地区的施工具有重要的工程意义;两类强度试验均表明纳米黏土在一定程度上提高了改性黄土的强度;纳米黏土的添加降低了改性黄土的分散性和湿陷性。另外在水渠现场开展了室外试验,试验结果表明添加2.0%纳米黏土后,黄土的稳定性有明显改善。室外试验结果与室内试验结果基本一致。此研究为黄土地区消除湿陷性提供了一种新方法,可为之后类似工程提供有益的参考。

关键词: 纳米黏土;湿陷性黄土;室内外试验;土壤改良;水渠工程

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0110-06

Improvement Effects of Nano Clay on Collapsible Loess

YIN Yao

(CCCC First Highway Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shannxi, 710075, China)

Abstract: Collapsible loess, as a common problem soil in Northwest China, has brought great challenges to civil engineering construction in Northwest China. How to reduce the collapsibility of loess at low cost is an urgent problem to be solved by the engineering community. Taking an irrigation canal in Shaanxi Province as the engineering background, the improvement effect of nano clay on collapsible loess was analyzed by combining indoor and outdoor tests. The indoor test results show that with the increase of nano clay content, the liquid limit, plastic limit and plastic index of the modified loess increase, and the optimum moisture content of the modified loess increases with the increase of nano clay content, which has important engineering significance for the construction of collapsible loess areas. Two kinds of strength tests show that nano clay can improve the strength of modified loess to a certain extent. The dispersity and collapsibility of modified loess were decreased by adding nano clay. In addition, an outdoor test was carried out in the canal site. The test results showed that the stability of loess was significantly improved after adding 2.0% nano clay. The outdoor test results are basically consistent with the indoor test results. This study provides a new method for eliminating collapsibility in loess area, and provides a useful reference for similar projects in the future.

Keywords: nano clay; collapsible loess; indoor and outdoor test; soil improvement; canal works

黄土分布广泛,约占全国6%的土地面积^[1]。中国西北部的黄土高原拥有世界上最厚的黄土中层。由于固有的亚稳结构,黄土通常具有较差的工程性质,如较强的水敏性和严重的湿陷性^[2]。这些特性导致地面沉降、地裂缝、滑坡、泥石流等地质灾害和工程问题的频繁发生,不仅给人们的生命财产

带来了极大的危害,也影响了黄土地基上土木工程结构物的稳定性与安全性^[3-5]。因此,工程实践中经常采用各种方法对黄土进行加固以消除湿陷性或降低压缩性。

在黄土地区,物理方法(如强夯法、石柱法)和化学方法(如向土中添加稳定剂)被广泛应用于地

基加固^[6-9]。物理方法作为工程实践中的首选方法,也存在一些不足。例如,强夯法会产生难以忍受的噪音,影响附近的居民。它还会引起巨大的振动,可能会导致边坡的破坏和附近建筑物的破坏。化学方法的本质是添加稳定剂^[10],稳定剂可以与土壤中的矿物质或水发生反应,或直接填充土壤孔隙,然后水固化土壤颗粒,使土壤结构更致密。化学方法具有速度快、施工方便、处理后性能稳定等优点,受到越来越多的研究人员和工程师的关注^[11-12]。化学法也存在一些不足。例如,石灰处理的黄土强度相对较低,耐水性较差。水泥处理过的黄土虽然具有高强度和优良的耐水性,但易发生收缩和开裂。此外,水泥生产成本高,会污染环境。针对传统固化剂存在的缺陷,寻找环保型、高性价比的黄土固化剂,系统研究固化剂的加固机理和加固效果具有重要意义。

近年来,纳米技术的应用以及纳米尺度颗粒的生产和使用显著增加,引领了许多学科的进步,包括医学、材料科学和工程。与此同时,纳米技术和纳米材料的应用也引起了土木、岩土和岩土环境工程各学科研究者的关注。诸如纳米二氧化硅、纳米碳酸钙、纳米氧化铝、碳纳米管和纳米黏土等材料在土木工程领域得到了广泛的应用。其中纳米黏土是由普通土体原矿通过粉碎、煅烧和气流超细粉碎等一系列技术精制而成的纳米级土体材料,纳米黏土材料来源广泛且生产成本低,且不同土体原矿含有的化学成分不同,可以产生不同的化学反应进而对土体进行改良。从岩土工程和岩土环境工程的角度来看,纳米黏土作为环境友好添加剂在各种土壤改良应用中具有广阔的潜力。

本研究探讨了纳米黏土在改善黄土工程性质方面的应用。以陕西某地基黄土为研究对象,采用纳米黏土进行改良,并检验纳米黏土改良湿陷性黄土的有效性。对黄土-纳米黏土-水混合物(改性黄土)试样进行了多种传统的岩土工程试验,包括界限含水率试验、击实试验、无侧限抗压强度试验、不固结不排水试验、湿陷性系数试验和针孔试验。研究结果可为湿陷性黄土地基的加固提供新的思路。

1 室内试验

1.1 工程概况及材料

试验用土取自陕西省某灌溉水渠,水渠下方地基处于湿陷性黄土地区。图 1(a) 为湿陷性黄土导致的地表不均匀沉降,图 1(b) 为不均匀沉降对水渠

混凝土衬砌造成的损坏。图 1(c) 显示了研究区域周围观察到的开裂、沉降等破坏特征。

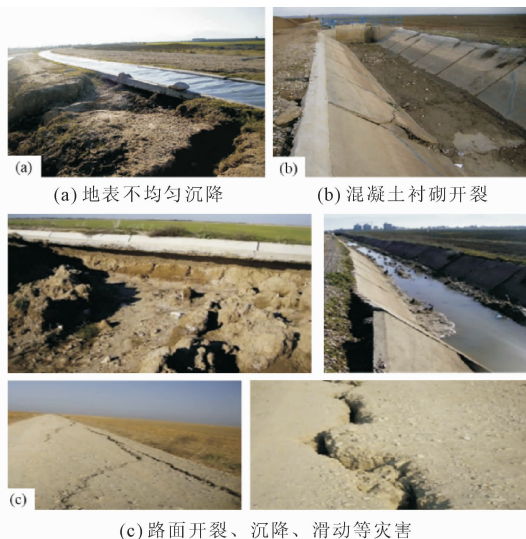


图 1 项目现场

陕西省的黄土厚度从 30 m ~ 180 m 不等,覆盖了该省 70% 以上的面积。这些土壤通常易碎,颜色为浅黄褐色或浅黄色,稍有黏性,非常轻且干燥。在研究地点,从 10 个勘探钻孔中提取了扰动和未扰动样品,每个钻孔的深度为 10 m。现场土样如图 2(a) 所示,样品的天然含水率在 8% ~ 12% 之间。施工人员在现场开展了标准贯入试验,标准贯入击数位于 6 ~ 8 之间。表 1 为土壤的基本性质,该研究中使用的稳定添加剂是浙江丰虹新材料股份有限公司生产的纳米黏土,产品名称为“DK 蒙脱土聚合物”。这种粉末状纳米黏土的图片如图 2(b) 所示。图 2(c) 所示为典型的黄土-纳米黏土-水混合物,其中纳米黏土含量为 0.5% (质量百分比)。表 2 列出了制造商报告的纳米黏土稳定剂的物理和化学性质。

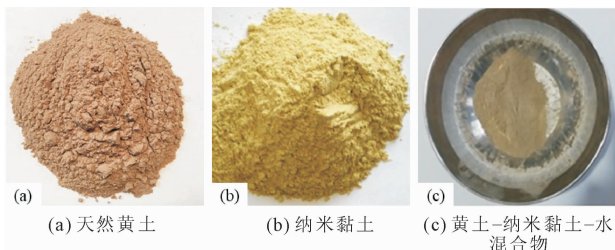


图 2 试验所用材料

表 1 土的物理指标

比重	塑限 /%	液限 /%	塑性指数	最佳含水率	最大干重度 / (kN · m ⁻³)
2.74	16.0	22.0	6.0	15.0	15.26

表 2 纳米黏土物理化学指标

密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒大 小/nm	比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%
0.35	1~2	220~270	52.95	20.31	8.67

1.2 试样制备及试验内容

首先对现场取样的黄土进行烘干,然后分别添加不同数量的纳米黏土,纳米黏土的含量分别为 0.0%、0.5%、1.0%、2.0% 和 3.0% (质量百分比),使用搅拌机确保其彻底混合。在搅拌过程中同时加入适量的蒸馏水以达到最佳含水率。根据 Baziar 等^[13]的研究,将改性黄土储存在密封容器中 16 h,有助于确保整个样品中的水分分布更加均匀。

为了评估纳米黏土对湿陷性黄土的改良效果进行了多项土工试验,包括界限含水率试验、击实试验、无侧限抗压强度试验、不固结不排水三轴试验、湿陷性系数试验和针孔试验。

2 试验结果与分析

2.1 界限含水率

界限含水率可以通过计算天然稠度以及塑性指数等指标来对土类进行划分,是土木工程设计和施工的重要参考指标。本次界限含水率的确定方法严格遵守《公路土工试验规程》^[14](JTJ E40—2007)。图 3 为不同纳米黏土含量下改性黄土的界限含水率,由图 3 可知,即使在黄土中添加极少量的纳米黏土(即 0.5%~3.0%),也会显著提高稳定土的液限、塑限和塑性指数。例如,当纳米黏土含量为 3.0% 时,液限增加 36%,塑限增加 25%,塑性指数增加 66%。这一行为归因于纳米黏土颗粒相对于天然黄土土壤颗粒比表面积较大。表面积的增加对保水特性和微观尺度上颗粒与水分之间的化学相互作用有着显著的影响。观察到的纳米黏土稳定黄土的液限和塑限增加,这与王艳等^[15]在粉煤灰砂浆中添加纳米黏土的研究结果相似。

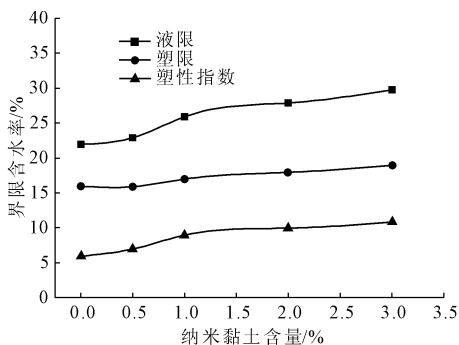


图 3 改性黄土的界限含水率

2.2 击实试验

纳米黏土含量对改性黄土击实特性的影响规律如图 4 所示,在黄土中添加少量纳米黏土(0.5%~3.0%)会显著影响黄土的击实曲线。随着纳米黏土含量的增加,干重度持续显著下降,随着纳米黏土含量从 0.0% 增加到 3.0%,最大干重度从 15.20 kN/m^3 下降到 13.43 kN/m^3 。添加 0.5% 纳米黏土后,最佳含水率降低了约 0.6%,之后随着纳米黏土含量从 0.5% 增加到 3.0%,最佳含水率增加了约 1.3%。由此可以得出适当添加纳米黏土的含量可以提高改性黄土的最佳含水率,这对于湿陷性黄土的处理有着重要的工程意义,纳米黏土的添加可以使得黄土的最佳含水率接近湿陷时的高含水率,进而降低湿陷性黄土地基加固处理的施工成本。另外值得注意的是纳米黏土含量在含水率较低时对压实曲线形状有着显著的影响。

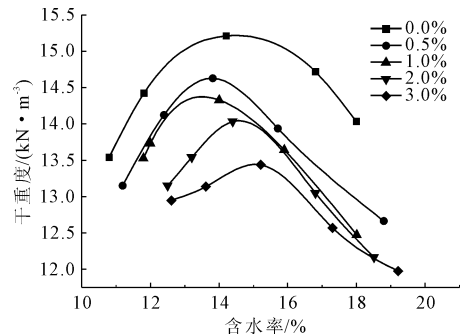


图 4 改性黄土压实曲线

2.3 无侧限抗压强度试验

图 5 为纳米黏土含量对改性黄土无侧限抗压强度特性的影响规律。如图 5 所示,随着纳米黏土含量的增加,改性黄土的无侧限抗压强度显著增加,2.0% 纳米黏土试样的强度(61.84 kPa)比天然黄土土的强度(34.18 kPa)增加了约两倍。对于纳米黏土含量较高的改性黄土,观察到破坏时的应变显著增加,试样破坏前则表现为压硬性,且试样的压硬性与纳米黏土的含量成正相关。这种行为归因于纳米黏土颗粒的高比表面积,这使得它们比黄土颗粒更具活性,作用在土壤基质中的黏土颗粒和纳米黏土之间的颗粒间力会导致更大的黏聚力和抗压强度。

2.4 不固结不排水试验

由于无侧限抗压强度试验的围压为 0 kPa,无法直接得到改性黄土的抗剪强度指标,因此在围压为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 的条件下分别对含有和不含有纳米黏土的样品进行了不固结不排水试验。如图 6 所示,添加了 1.0%、2.0% 和 3.0% 的纳米黏

土后,黏聚力显著增加,内摩擦角略有减小。黏聚力和摩擦角变化的最终结果是提高混合物的抗剪强度。这些结果与无侧限抗压强度结果基本一致。

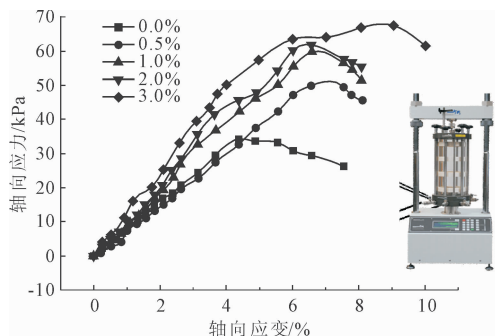


图5 改性黄土无侧限抗压强度

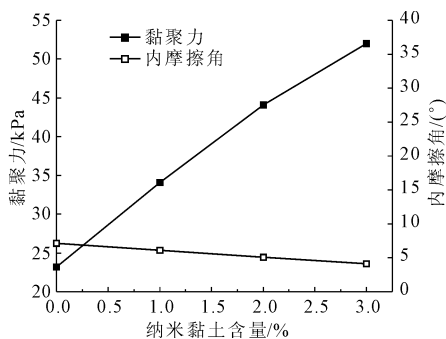


图6 改性黄土 UU 试验结果

2.5 湿陷性系数试验

由于湿陷性引起的不均匀沉降是引起灌溉水渠开裂的根本原因之一,因此对未发生扰动的原状黄土开展了湿陷性系数试验。为了更好的反应试验过程如下:在室内借助单轴固结仪,对原状黄土进行逐级加载使试样加载到其自然状态(即部分饱和状态),该阶段试样会发生轻微沉降,待试样压缩变形稳定后,从试样顶面加水,该阶段试样沉降值发生突变,加载更高的荷载以诱发进一步沉降直至试样趋于稳定,最后结束试验。作为测试过程的最后一步。据下式计算黄土的湿陷性系数:

$$\delta_s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (1)$$

式中: δ_s 为湿陷性系数; Δe 为润湿引起的孔隙比变化; e_0 为天然孔隙比。

图7给出了浸水前后黄土的孔隙比变化图。如图所示,在浸水后黄土的孔隙比发生了突降,呈现了明显的湿陷性。此外,浸水后,孔隙比的变化斜率比试样浸水前记录的斜率更陡。根据 ASTM 标准^[16],使用式(1)计算湿陷性系数为 0.0518,对应中等湿陷性黄土。

另外开展了一系列改性黄土的湿陷性系数试验,试验方法与前述相同。图8为不同纳米黏土含量的改性黄土浸水试验结果。结果表明,在黄土中加入少量纳米黏土可以显著降低湿陷性黄土的湿陷性。随着纳米黏土含量的增加,改性黄土因湿陷导致的沉降值逐渐减小,湿陷性由中等湿陷性降为轻微湿陷性。

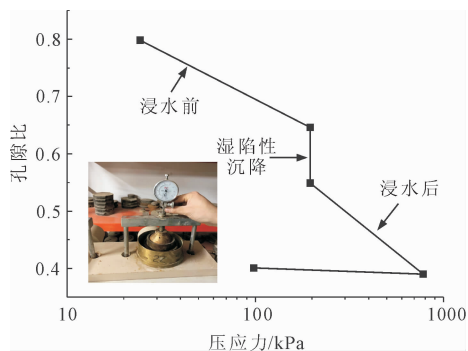


图7 天然黄土浸水试验

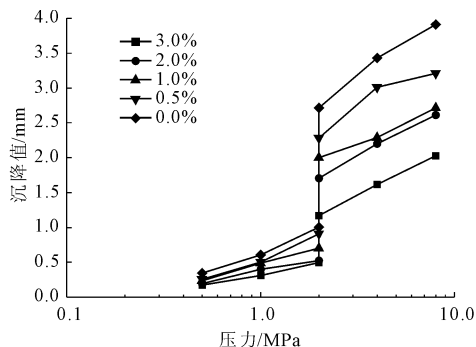


图8 改性黄土浸水试验

2.6 针孔试验

水渠开裂处的地基土为天然黄土,在水渠衬砌开裂后,地表处的黄土经历了河水的严重侵蚀和冲刷。黄土作为细粒土,遇水后往往会发生分散流失的现象,进而发生管涌、冲蚀等破坏现象,对土木工程构筑物的安全造成极大的威胁。为了评估天然黄土与改性黄土的分散性,分别对天然黄土和纳米黏土含量为 0.5%、1.0% 和 2.0% 的改性黄土进行了针孔实验。具体实验流程参照 ASTM 规定^[16],试验参数和相关结果如表3所示。试验结束后记录水流颜色、针孔尺寸以及流速,用以评估土壤分散性潜力。

图9显示了天然黄土和纳米黏土含量为 2.0% 的改性黄土在针孔试验过程出水的相对透明度的代表性图像,图9(a)为天然黄土在 380 mm 水头下析出水流颜色,图9(b)为 2.0% 纳米含量的改性黄土

在 380 mm 水头下析出水流颜色。可以观察到添加相对少量的纳米黏土显著降低了黄土的分散性,从而在相同水头下产生更清晰的出水。这与表 4 所示的分散性分类结果相一致。随着纳米黏土含量的增加,分散性分类从分散转换为非分散。

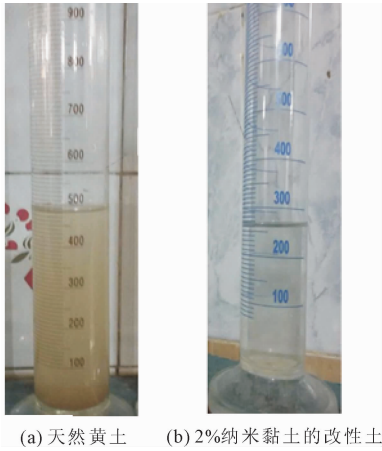


图 9 针孔试验水流颜色

表 3 纳米黏土分散性的分类

	天然黄土	0.5% 含量改性黄土	1.0% 含量改性黄土	2.0% 含量改性黄土
水头/mm	50	180	380	1020
流速/(ml · s ⁻¹)	1.37	2.1	2.9	3.3
浑浊度	中度浑浊	中度浑浊	轻度浑浊	清澈
针孔尺寸/mm	3.0	2.0	3.1	1.4
分散性	分散	中度分散	中度分散	非分散

3 纳米黏土对黄土的现场改性

为了更好的评估纳米黏土的改良效果,除了室内试验外,还开展了现场试验,以评估纳米黏土在施工现场常规尺度下的适用性。研究对象为衬砌开裂后暴露在河道中黄土。现场试验场地如图 10 所示,试验场地纵向长度为 6 m。

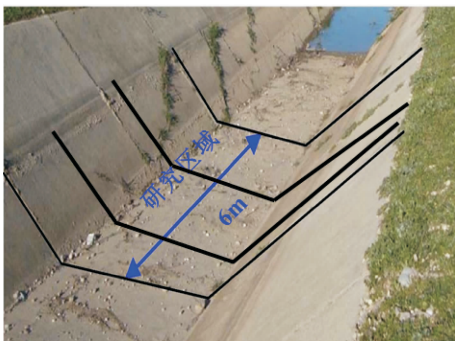


图 10 试验现场

为了更好的模拟衬砌开裂下的湿陷性黄土在河水冲蚀下的破坏过程,借助挖掘机移除了试验段的混凝土衬砌,将试验段划分为 3 部分,取地表 0.5 m 处的现场黄土,与含量分别为 1.0%、1.5% 和 2.0% 的纳米黏土(质量百分比)混合,制备了三种改性黄土。最后通过压路机,对改性黄土进行压实。

将三个分段压实至所需水平后,打开上游水闸,模拟自然条件的水流冲刷效果,试验时间为两个月,两个月关闭上游水闸,并将水渠晾干。

图 11 为河道破坏图,整体而言河道发生了一定的侵蚀破坏,改性黄土在裸露的状况下具有一定的抗侵蚀能力,并保持了河道的整体稳定性。沿裸露地面和混凝土之间的连接边缘观察到更深的侵蚀。这是因为混凝土衬砌的标高略高于该位置的裸露地面。另外由图 11 可知,1.0% 和 1.5% 含量的纳米黏土坡面较比 2.0% 含量的剖面发生了更严重的冲刷和侵蚀。

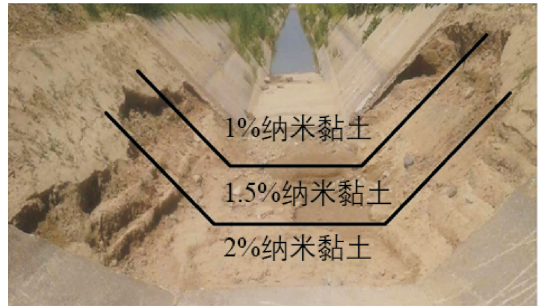


图 11 河道破坏图

进行现场观察后,采集了一些样本,以便在现场条件下对经过纳米黏土改良的现场土壤进行后续测试。对于这些试样,在实验室进行了界限含水率和湿陷性系数试验。与之前进行的室内试验结果类似,现场添加纳米黏土增加了提高了黄土的塑性(见图 12),降低了黄土的湿陷性(见图 13)。

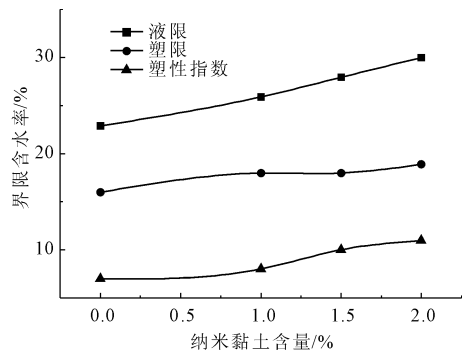


图 12 现场改性黄土的界限含水率

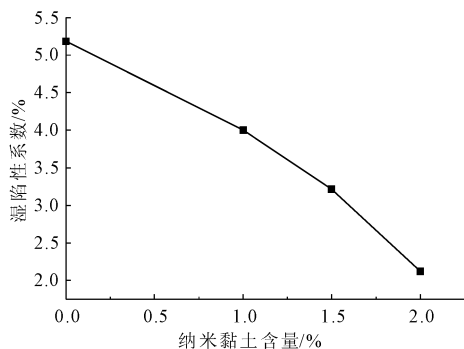


图13 现场改性黄土湿陷性系数

4 结 论

(1) 纳米黏土会显著影响湿陷性黄土的力学行为。主要表现为增加其塑性指数,增加其最佳含水量,降低其最大干密度,增加其黏聚力,降低其内摩擦角。

(2) 内摩擦角减小和内聚力增加导致试样的抗剪强度增大,这与观察到的无侧限抗压强度增加一致。此外,天然黄土与纳米黏土混合后,土壤的相对湿陷性和分散性显著降低。

(3) 在现场试验中,纳米黏土的比例越大,河道发生的侵蚀和冲刷越少。纳米黏土作为一种环保型材料能够显著提升湿陷性黄土的力学性能。

参考文献:

[1] 方祥位,欧益希,申春妮,等. Q2 黄土湿陷性影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):49-54.
 [2] 周 剑,刘 洋. 湿陷性黄土地区建筑隔水措施研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):78-81.
 [3] 李 潇. 湿陷性黄土路基改良成套施工技术应用[J]. 交通世界,2022(14):74-76.

[4] 刘柏林. 不同成因砂质黄土物理力学特性和湿陷性评价研究[J]. 铁道建筑技术,2022(6):9-13.
 [5] 金 鑫,王铁行,郝延周,等. 桩间黄土卸荷湿陷过程中卸荷量计算方法初探[J]. 岩土力学,2022(9):1-11.
 [6] 王立新,邵 帅,邵生俊,等. 西安洪庆地铁车站地基湿陷性研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(3):1006-1014.
 [7] 赵子锋,韩伟学,曾东洋,等. 湿陷性黄土隧道进洞时机及高仰坡稳定性案例分析[J]. 公路,2022,67(5):247-250.
 [8] 樊 微. 水泥改良湿陷性黄土技术研究[J]. 价值工程,2022,41(18):64-66.
 [9] 王生宽,黄福成,刘晓银,等. 不同固化剂掺量对湿陷性黄土强度和渗透性的影响[J]. 建材发展导向,2022,20(12):4-7.
 [10] 马琰裕. MICP 技术加固黄土力学特性及其机理试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
 [11] 张晓光,余航飞,高 强,等. 地铁穿越湿陷性黄土地层浸水破坏机制试验[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):91-96.
 [12] 柳 旻,姚晨辉,张国敬,等. 强夯法处理湿陷性风积砂土地基评价[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):31-35.
 [13] Baziari M H, Ghazi H, Mirkazemi S M. Effect of nanoclay on engineering properties of soil[J]. Fourth Int. Con. of Geotec. Eng. and Soil Mech, Tehran, Iran, 2010.
 [14] 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
 [15] 王 艳,同月苹,张少辉,等. 纳米黏土对大掺量粉煤灰砂浆性能的影响[J]. 工业建筑,2020,50(2):119-123.
 [16] Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort: D1557—12[S]. ASTM:USA, 2012.

(上接第 109 页)

[18] 姜 静,江晓霞. 广清高速公路煤系土路堑边坡设计[J]. 中外公路,2005,25(5):29-31.
 [19] 靳玉琪. 山西省煤系地层软岩控制滑坡成因机制研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.
 [20] 王万昌. 广西炭质泥岩边坡防治技术研究——以六寨至水任二级公路为例[D]. 南宁:广西大学,2006.
 [21] 陈 良. 炭质泥岩路堑边坡湿化变形特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
 [22] 华 勇. 炭质页岩水软化微结构损伤机理研究[D].

长沙:长沙理工大学,2017.
 [23] 魏丽梅,刘 辉,刘翰辞. 炭质页岩边坡失稳破坏机制及处治技术研究[J]. 公路与汽运,2014(5):119-122.
 [24] 谭毓清. 冻融循环下石灰改良粉质黏土力学特性试验研究及数值模拟[D]. 衡阳:南华大学,2020.
 [25] 王 超. 干湿循环作用下红砂岩风化土强度和固结变形特性试验研究[D]. 赣州:江西理工大学,2020.