

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.012

任真, 余湘娟, 高磊. 纳米氧化镁改性黏土强度特性试验[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 85-90. (REN Zhen, YU Xiangjuan, GAO Lei. Experimental research on strength characteristics of nano-MgO modified soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 85-90.)

纳米氧化镁改性黏土强度特性试验

任 真^{1,2,3}, 余湘娟^{1,2,3}, 高 磊^{1,2,3}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究纳米氧化镁对黏性土强度的影响情况, 将纳米氧化镁均匀地掺入到黏性土中进行直接剪切试验, 并通过扫描电镜试验对剪切面上的微观颗粒进行观察。在含水率分别为 10%、16% 和 22% 的情况下, 将纳米氧化镁按照 0.2%、4% 和 6% 的掺量(质量分数)加入到黏性土试样中进行试验。直剪试验结果表明: 当含水率相同时, 随纳米氧化镁掺量的增加, 纳米氧化镁改性黏土的黏聚力逐渐增大, 但是掺量对改性土内摩擦角的影响并不明显; 当纳米氧化镁掺量相同时, 随含水率增加, 改性土的黏聚力呈现出先增后减的趋势, 而内摩擦角则逐渐减小。扫描电镜试验结果表明: 纳米氧化镁的掺入会降低土体孔隙比, 增强颗粒间胶结作用, 从而达到改变黏性土剪切强度的目的。

关 键 词: 纳米氧化镁; 纳米改性黏土; 抗剪强度; 扫描电镜

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0085-06

随着经济建设快速发展, 研发新型材料对软弱土层进行加固处理, 提高土体的抗剪强度和承载力成为岩土工程研究的热点^[1-6]。

纳米材料是指特征尺寸介于 1~100 nm 间的固体材料, 由于晶粒的超细化, 在化学、光学、电磁学和力学等方面显示出不同于传统材料的性能, 被称为 21 世纪社会经济发展的三大支柱之一^[7]。目前国内外以纳米材料作为外掺剂对水泥基材料改性的研究较多, 并在改善材料性能与作用机理方面取得进展, 而将纳米材料掺入天然黏性土中的研究较少, 作用机理尚不清晰^[8-17]。宋杰等^[18]探讨了各种纳米材料对土体无侧限抗压强度的影响, 通过试验得出纳米 SiO₂ 掺量存在一定范围, 在范围内土的无侧限抗压强度随掺量的增大而增大, 超过范围则会随之减小。M. R. Taha 等^[19]通过试验研究纳米材料对土膨胀和收缩行为的影响, 试验发现合理掺量的纳米材料可以减少膨胀应变和收缩变形, 在保证渗透系数的基础上抑制土样干燥裂缝的发展。其中, 纳米铜对土膨胀收缩行为的影响比纳米铝更大。周斌等^[20]开展了一系列无侧限抗压强度试验研究纳米 Al₂O₃ 对黏性土强度的影响, 试验结果表明, 土样强度随着纳米 Al₂O₃ 掺量的增大而增大, 当纳米掺量达到 4% 时能显著提高黏土强度。

本文选用表面效应显著、环境友好的纳米氧化镁(nano-MgO, 简称: NM)作为外掺剂, 通过改变纳米氧化镁掺量和土样含水率, 进行直剪试验来研究纳米氧化镁对黏性土抗剪强度的影响。并借助扫描电镜, 观察剪切面上纳米氧化镁颗粒在土中的分布情况, 对其作用机理进行初步探讨, 以期对纳米氧化物的改性应用提供参考。

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508159); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130832); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助项目(20120094120015)

作者简介: 任 真(1993—), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事土力学性质研究。E-mail: renzhenhhu@163.com

1 试验简介

1.1 试验材料

纳米氧化镁为白色粉末状固体,具有高硬度、高纯度、高熔点等特性,且具有一定的黏结性和活性。本次试验采用安徽宣城晶瑞新材料有限公司生产的 VK-Mg30 型纳米氧化镁,其平均粒径为 30~40 nm,表面积为 16 m²/g, pH 值为 7.5, 质量分数大于 99.99%。

试验用土为分布较为广泛的低液限黏土,取自南京市河西某工地,其基本物理力学性质见表 1。

表 1 土的基本物理力学性质
Tab. 1 Physical properties of clay soil

土样名称	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	体积质量 G_s	最优含水率 w_{op} /%	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$
低液限黏土	43.6	23.3	20.3	2.64	20.69	1.64

1.2 试验内容

为了研究掺量和含水率对黏性土抗剪强度的影响,在控制干密度不变情况下进行了一系列快剪试验。将纳米氧化镁按照 0.2%、4% 和 6% 的掺量分别加入到含水率为 10%、16%、22% 的黏性土中,各相关参数见表 2。考虑到直剪试验数据的离散性较大,每组配比制备了 2 个平行试样,分别施加 100、200、300 和 400 kPa 的垂直压力,共 144 个试样。

表 2 直剪试验试样参数
Tab. 2 Parameters of soil samples for direct shear tests

试样编号	含水率/%	NM 掺量/%	试样编号	含水率/%	NM 掺量/%	试样编号	含水率/%	NM 掺量/%
Sq1	10	0	Sq5	16	0	Sq9	22	0
Sq2	10	2	Sq6	16	2	Sq10	22	2
Sq3	10	4	Sq7	16	4	Sq11	22	4
Sq4	10	6	Sq8	16	6	Sq12	22	6

1.3 试验方法

直剪试样的制备依据《土工试验规程》(SL 237—1999)进行,由于纳米氧化镁颗粒表面活性高,颗粒间存在较强的相互作用力,遇水易发生团聚现象,试样制备时需要关注纳米粒子的分散性。为此,试验设计了两种搅拌方案:一是分层向目标含水率的黏性土中掺入纳米材料,各层搅拌均匀后再集中拌合;二是先将黏性土与纳米材料分层搅拌,均匀分散后再集中掺水配制目标含水率的试样。考虑到在不同纳米氧化镁掺量下需要控制土的含水率,按照方法 2 拌合难以确保该情况下含水率相同,所以本文采用先掺水的方案,并通过搅拌机增强搅拌来提高纳米材料的分散性。土样配制完成后,将其装入密封袋中养护 24 h,保证纳米氧化镁与黏性土充分接触。养护完成后,用击样法将土样装入内径 6.18 cm,高 2 cm 的环刀中,控制干密度为 1.5 g/cm³,成型试样用干净的玻璃片阻隔环刀两端放入保湿器内待用。以含水率为 22% 的土样为例,Sq9~Sq12 的 NM 掺量从 0.2%、4% 到 6% 依次增大,如图 1 所示。随着

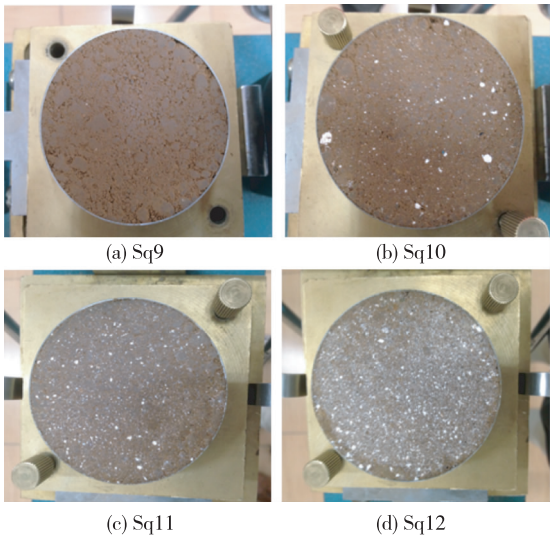


图 1 不同纳米氧化镁掺量的直剪试样(含水率为 22%)
Fig. 1 Different nanomaterials content of soil samples (water content 22%)

NM 掺量的增大, 可以看见零星的白色分布其中, 当掺量达到 6% 时白色纳米材料则布满了整个土样表面。

直剪试验仪器采用南京泰克奥科技有限公司生产的 TKA-2 型应变式直剪仪, 以 1.2 mm/min 的速率剪切使试样在 3~5 min 内减损。小心选取剪破面上的多个特征块作为扫描电镜的样本, 采用低温烘干法成样, 观察纳米氧化镁颗粒在土中的分布特征。

2 直剪试验结果分析

2.1 不同掺量对土快剪强度的影响

黏性土的抗剪强度指标包括黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 试验中各试样的快剪强度指标分别见表 3。

表 3 直剪试验中土的黏聚力和内摩擦角

Tab. 3 Results of cohesion and internal friction angles for soil samples

试样编号	c / kPa	c 的增幅 / %	φ / (°)	φ 的增幅 / %	试样编号	c / kPa	c 的增幅 / %	φ / (°)	φ 的增幅 / %
Sq1	54.94	—	30.41	—	Sq7	77.91	10.75	27.99	2.94
Sq2	56.48	2.80	30.74	1.09	Sq8	83.33	18.45	27.14	-0.18
Sq3	62.43	13.63	31.05	2.10	Sq9	61.73	—	17.92	—
Sq4	66.28	20.64	31.95	5.06	Sq10	67.87	9.95	20.66	15.29
Sq5	70.35	—	27.19	—	Sq11	74.36	20.46	20.8	16.07
Sq6	73.03	3.81	26.38	-2.98	Sq12	81.3	31.70	24.63	37.44

结合表 2~3 中相同含水率试样的抗剪强度指标, 可以分别得出 NM 掺量与黏聚力和内摩擦角的关系曲线(见图 2)。

由图 2 可见, 在含水率相同的情况下, 纳米氧化镁的掺入对土黏聚力有明显的增强作用, 随着纳米氧化镁掺量的增加土的黏聚力会逐渐增大。这种增强作用在 NM 掺量为 2% 和 4% 时较小, 在 6% 的掺量下黏聚力大小的相对增幅能达到 30% 左右。以含水率为 22% 的情况为例, 掺量为 0 时黏聚力为 61.73 kPa, 2%, 4% 和 6% 掺量下分别为 67.87, 74.36 和 81.3 kPa, 增幅分别达 9.95%, 20.46% 和 31.70%。可见, 含水率较低时, 内摩擦角 φ 随纳米氧化镁掺量的变化无明显变化, 含水率较高时内摩擦角 φ 会随纳米氧化镁掺量的增加而变大。

2.2 含水率对土快剪强度的影响

结合表 2~3 中相同 NM 掺量试样的抗剪强度指标, 可以分别得出含水率与黏聚力和内摩擦角的关系曲线, 如图 3 和 4 所示。

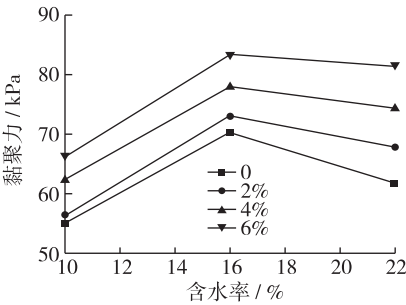


图 3 含水率对土黏聚力的影响
Fig. 3 Effects of water content on cohesion for soil samples

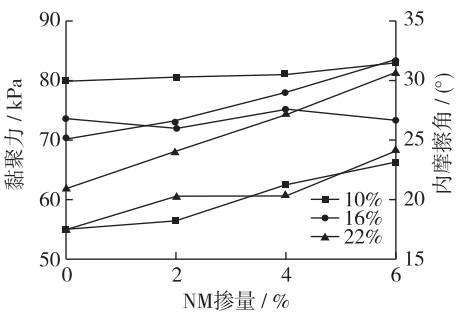


图 2 NM 掺量对土黏聚力及内摩擦角的影响
Fig. 2 Effects of NM content on cohesion and internal friction angle for soil samples

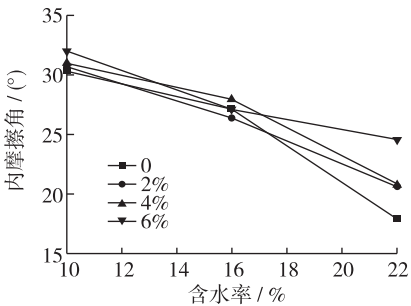


图 4 含水率对土内摩擦角的影响
Fig. 4 Effects of water content on internal friction angle for soil samples

图 3 为黏聚力与含水率关系曲线,从图中可以看出对于同一 NM 掺量的试样,土黏聚力随含水率的变化是非线性关系的,当含水率从 10% 增大到 16%,土的黏聚力随含水率的增大而增大;当含水率从 16% 增至 22% 时,土黏聚力则随其增大而降低。内摩擦角随含水率变化的关系曲线如图 4 所示,对于同一 NM 掺量的试样,土的内摩擦角随含水率的增加大致呈线性递减的趋势。

3 纳米氧化镁与土作用机理分析

试验结果表明,纳米氧化镁能够提高土的抗剪强度,改善土的工程性质,但是纳米颗粒与土之间的作用十分复杂,尚未有明确的作用机理。本文从孔隙比和胶结强度等角度对纳米氧化镁作用机理进行初步探讨。

3.1 纳米氧化镁对孔隙比的影响

土是由固体颗粒、水和空气组成的三相系,土体颗粒相互联结叠架构成了土的骨架。对于黏性土,抗剪强度由黏聚分量和摩擦分量组成,主要决定于土的孔隙比、密度和含水率等因素,其中孔隙比越小黏聚力越大,并且这种影响会随着孔隙比的减小而增大。

图 5 为各掺量下纳米氧化镁改性土的 SEM 试验结果。图 5(a) 为放大 10 000 倍后未掺入纳米氧化镁时试验用土的 SEM 结果,可以看出本次试验用土为分散结构,土粒主要以深色片状形态呈现,片状土粒间存在孔隙;图 5(b) 为放大 30 000 倍后 NM 掺量为 2% 时改性土的 SEM 结果,在增加放大倍数后可以看出纳米氧化镁颗粒在形态和颜色上不同于片状土粒,呈现为浅色团状物,边缘光滑。图 5(b) 表明纳米颗粒及其团聚物减少了土颗粒间孔隙的数量和尺寸,提高了土的密实度。图 5(c) 和 (d) 分别为 10 000 倍放大倍数下 NM 掺量为 2% 和 4% 时的 SEM 试验结果。当 NM 掺量为 2% 时,纳米氧化镁较少,多为颗粒状分布于土体中,如图 5(c) 所示;当 NM 掺量为 4% 时,纳米氧化镁较多,颗粒的团聚现象明显,对土体孔隙的物理填充作用也较为明显,如图 5(d) 所示。另外,由于试验采用的是黏性土,土颗粒较细,颗粒间咬合力和滑动摩擦力较小,故内摩擦角随 NM 掺量的增加无明显规律可循。

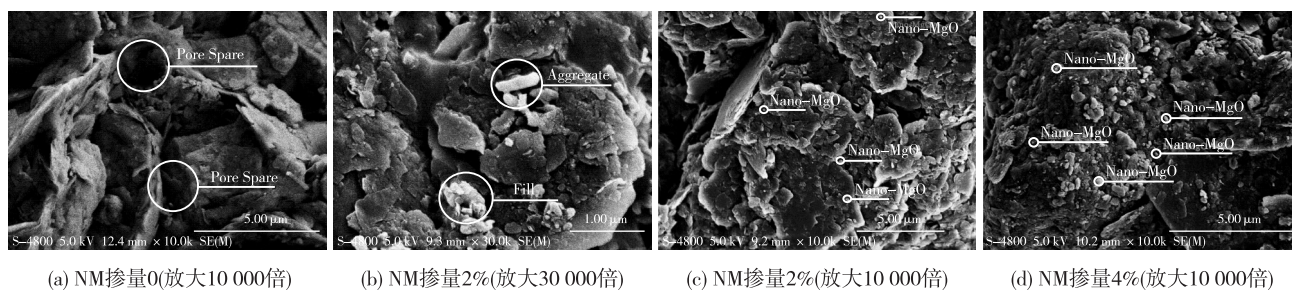


图 5 各掺量下 NM 改性土 SEM 试验结果

Fig. 5 SEM test results of modified soil with different admixtures of NM

3.2 纳米氧化镁对胶结强度的影响

黏聚分量与化学键有关,诸多化学键的共同作用构成了土的胶结强度,包括结合水与土颗粒的作用,土颗粒之间的作用等。依据纳米氧化镁的特性,其对结合水和土颗粒之间的胶结作用都有一定影响。

纳米氧化镁微粒呈立方晶体,形貌为椭球体,由于直径小、比表面积大,具有纳米材料的特性——表面效应,即表面原子数增多,原子配位不足,具有大量悬空键和不饱和键,有一定的化学活性。纳米氧化镁的不饱和和残键与土颗粒通过表面电分子作用相结合,这种结合增强了土颗粒间的黏结力,从而提高了土的力学性能。

纳米氧化镁具有很高的亲水性,其带电表面可以吸附土中的自由水使其位于土与纳米颗粒的表面,将其改变为黏滞性更大的吸着水,从而提高土体的黏聚力,如图 6 所示。但是当含水率逐渐增大时,吸着水的厚度增大,水分子和颗粒的间距增大,土颗粒间的距离也在增大,吸引力降低,从而导致了土体黏聚力下降。另

一方面,当含水率增加,土颗粒表面的吸着水增厚,起到了一定的润滑作用,使得摩擦角越来越小。

4 结 语

纳米氧化镁能显著提高土的工程性质,可作为黏性土中的添加剂,在工程实践中具有广阔应用前景。

(1)纳米氧化镁可提高土黏聚力,改善土的工程特性。含水率相同时黏聚力随纳米氧化镁掺量的增加而增大,当掺量达到6%时,强度提高幅度十分明显。纳米氧化镁掺量相同时,土内摩擦角随含水率的提高而降低;土黏聚力随含水率的增加先增后减。

(2)纳米氧化镁对土的作用机理主要体现在对孔隙比和胶结强度的影响。SEM 试验结果显示纳米氧化镁的掺入减少了土颗粒间孔隙的数量和尺寸,提高了土的黏聚力;纳米氧化镁的表面效应加强了土颗粒间的胶结作用,其带电表面吸附自由水加强了水分子与土颗粒的胶结强度,从而提高土体黏聚力。

参 考 文 献:

- [1] GAO Lei, REN Zhen, YU Xiang-juan. Experimental study of nanometer Magnesium Oxide-modified clay[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015, 52(4): 218-224.
- [2] ZENG Qing-jun, MO Hai-hong, LIAO Jian-chun, et al. Study on corrosion resistance of soil- cement mixed with nanometer silica powder[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 7(2): 1671-1815.
- [3] 王立峰, 夏建中, 朱向荣. 纳米硅水泥土破坏准则研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1767-1771. (WANG Li-feng, XIA Jian-zhong, ZHU Xiang-rong. Research on failure criterion of nanometer silicon and cement-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1767-1771. (in Chinese))
- [4] 王立峰, 黄洪勉. 纳米硅水泥土弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 143-146. (WANG Li-feng, HUANG Hong-mian. Elastoplastic finite element analysis of nanometer silicon and cement-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 143-146. (in Chinese))
- [5] BAHMANI S H, HUAT B B K, ASADI A, et al. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 350-359.
- [6] KONG D Y, DU X F, WEI S, et al. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 707-715.
- [7] 朱世东, 周根树, 蔡锐, 等. 纳米材料国内外研究进展 I—纳米材料的结构、特异效应与性能[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(3): 1-5. (ZHU Shi-dong, ZHOU Gen-shu, CAI Rui, et al. Research of the nano-materials at home and abroad I—the structure, specific effects and performance of the nano-materials[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(3): 1-5. (in Chinese))
- [8] LEE B Y, JAVAPALAN A R, KURTIS K E. Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(21): 1293-1302.
- [9] FENG D C, XIE N, GONG C W, et al. Portland cement paste modified by TiO₂ nanoparticles: A microstructure perspective[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11575-11582.
- [10] MORADPOUR R, TAHERI-NASSAJ E, PARHIZKAR T, et al. The effects of nanoscale expansive agents on the mechanical properties of non-shrink cement-based composites: The influence of nano-MgO addition[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 55: 193-202.
- [11] SHAKHMENKO G, JUHNEVICA I, KORJAKINS A. Influence of sol-gel nanosilica on hardening processes and physically-mechanical properties of cement paste[J]. Procedia Engineering, 2013, 57(1): 1013-1021.
- [12] BAHADORI H, HOSSEINI P. Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties)[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 18(3): 416-425.
- [13] KHANZADI M, KHAZAENI G, SEPEHRI H. Microstructural features of concrete containing nano silica in relation to cement

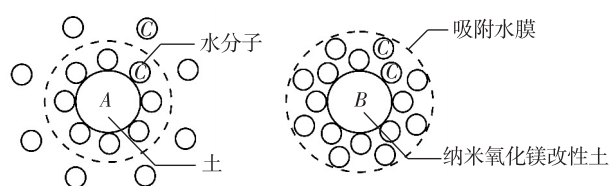


图6 NM 改性土与水分子作用示意

Fig. 6 Interaction diagram of NM modified soil and water molecules

- content-corrosion properties[J]. *Technics Technologies Education Management-Item*, 2012, 7(3): 1168-1175.
- [14] ZHANG M H, ISLAM J. Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 573-580.
- [15] NAZARI A. The effects of curing medium on flexural strength and water permeability of concrete incorporating TiO_2 nanoparticles [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(4): 773-786.
- [16] NAZARI A, RIAHI S. Effects of Al_2O_3 nanoparticles on properties of self compacting concrete with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as binder[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2011, 54(9): 2327-2338.
- [17] FARZADNIA N, ABANG Ali A A, DEMIRBOGA R, et al. Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 43: 469-479.
- [18] 宋杰, 陈凯, 倪茂光. 不同纳米材料对土无侧限抗压强度的影响研究[J]. *中国科技博览*, 2010(36): 29-30. (SONG Jie, CHEN Kai, NI Mao-guang. Influence of different nano-materials on unconfined compressive strength of soil [J]. *China Science and Technology Review*, 2010(36): 29-30. (in Chinese))
- [19] 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): 13.
- [20] 周斌, 高磊, 余湘娟. 纳米 Al_2O_3 改性黏土试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(2): 74-77. (ZHOU Bin, GAO Lei, YU Xiang-juan. Experimental research on nanometer alumina modified clay [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(2): 74-77. (in Chinese))

Experimental research on strength characteristics of nano-MgO modified soil

REN Zhen^{1, 2, 3}, YU Xiang-juan^{1, 2, 3}, GAO Lei^{1, 2, 3}

(1. *Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the effects of nano-MgO on clayey soil strength, the nano-MgO was evenly mixed in the clayey soil for direct shear tests, and microscopic particles on the shearing surface were observed by use of the scanning electron microscope tests. Given the conditions that the soil water contents were 10%, 16% and 22%, nano-MgO was put into soil samples to carry out experiments with the dosages of 0, 2%, 4% and 6%. The results from direct shear tests show that when the soil water content was the same, with the increase in nano-MgO admixture, the cohesive force of the soil samples increased, but the influences of the nano-MgO admixture on the internal friction angle were not significant; when the nano-MgO admixture was the same, with the increase of soil water content, the cohesive force showed a tendency to increase and then to decrease, while the internal friction angle decreased gradually. The results of SEM show that the nano-MgO admixture can reduce the void ratios of the clayey soil and reinforce the cementation between soil particles, which leads to the changes in the shear strength of the clayey soil.

Key words: nano-MgO; nanometer modified soil; shear strength; SEM