

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0062-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.014

## 石墨烯改性粘土的剪切强度特性研究

任可意<sup>1,2</sup>, 高磊<sup>1,2</sup>, 余湘娟<sup>1,2</sup>, 王春<sup>3</sup>

(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. 山东正元地质勘查院, 山东济南 250014)

**摘要:** 为了研究石墨烯改性粘土的强度特性, 将石墨烯均匀地掺入土中, 在控制干密度条件下, 进行直剪试验, 并用扫描电镜(SEM)对样品的剪切面结构进行了观察。将石墨烯按干土质量百分比分别为0%、1%、2%、3%和4%的掺量分别掺入到含水率为14%、16%、18%的素土中进行试验, 结果表明, 石墨烯能有效提高粘土的破坏强度, 且在本试验中未发现最佳掺量。粘聚力随着掺量的增加而增大, 随含水率的增加而减小, 但内摩擦角基本不变。借助SEM从微观上对石墨烯改性作用机理进行分析, 石墨烯的掺入可以填充土中孔隙, 提升土颗粒间的摩擦力, 从而增强土体的抗剪强度。

**关键词:** 石墨烯; 土; 直剪试验; 抗剪强度; 扫描电镜

**中图分类号:** TU447

**文献标志码:** A

## Study on the shear property of graphene modified soil

REN Keyi<sup>1,2</sup>, GAO Lei<sup>1,2</sup>, YU Xiangjuan<sup>1,2</sup>, WANG Chun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 3. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** In order to study the strength property of graphene modified soil, the graphene is uniformly mixed in the soil for direct shear tests under the control of dry density, and the scanning electron microscopy(SEM) is used to observe the structure of shearing surface of soil samples. Graphene was put into soil samples with the dosage of 0%, 1%, 2%, 3% and 4%, the water contents are 14%, 16% and 18%. The results show that the graphene can improve the failure strength of the soil, and no optimum dosage is found in this test. The cohesion increases with the increase of the graphene dosage, and decreases with the increase of water content, but the internal friction angle is almost constant. With the help of SEM, the mechanism of the modification of graphene in soil is analyzed from the micro level. The incorporation of graphene can fill the soil pores and improve the friction between the soil particles, it can enhance the shear strength of the soil.

**Key words:** graphene; soil; direct shear test; shear strength; SEM

土体改性剂是根据土体自身的性质, 采用其它材料的优势对土体进行改性, 从而提高土体稳定性和强度的复合型材料。石墨烯抗拉强度、剪切强度等力学性能非常优异, 是已知材料中强度和硬度最高的晶体结构之一<sup>[1-4]</sup>。目前, 石墨烯已逐步转入工业化生产, 大量废弃石墨烯被释放到环境中。为了

使石墨烯这一新材料能得到合理使用、排放与后期处理, 开展石墨烯改性土的研究具有十分重要的意义。本文选择工业级多层石墨烯材料, 进行了直接剪切试验, 分析了石墨烯掺量对粘土抗剪强度指标的影响。为实现石墨烯改性土技术在工程中的应用提供参考。

收稿日期: 2017-12-01

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课题(20120094120015)

作者简介: 任可意(1993-), 女, 浙江台州人, 硕士, 主要从事土的基本性质试验研究。

## 1 试验材料

试验选用南京某工程场地粘土，物理性质指标见表1。选用工业级多层石墨烯(苏州碳丰石墨烯科技有限公司制造)，形态为黑色粉末，具有疏水性，其物理性质指标见表2。

## 2 试验内容

### 2.1 试验方案

在控制干密度( $1.50 \text{ g/cm}^3$ )的条件下开展直剪试验。将石墨烯按干土质量百分比分别为0%、1%、2%、3%和4%的掺量分别掺入到含水率为14%、16%、18%的素土中，制备了15组试样(C1~C15)进行直接剪切试验，各组试样的相关参数如表3所列，每组制备4个试样，分别施加100、200、300、400 kPa四个竖向压力。由于直剪试验结果的离散性较大，所以该试验总共重复3次取平均值，作为试验结果。

### 2.2 试样制备

采用将风干土加水调至所需含水率，再与石墨烯粉末拌合的方法，避免由于石墨烯粉末易扬而产生的掺量误差。将制备好的定量石墨烯土倒入预先

装好环刀的压样器内，拂平土样表面，采用静压力将石墨烯土压入环刀内。同一组试验的三个平行试样同批进行制备，减少制样差异带来的试验结果误差。

### 2.3 试验过程

在剪切盒中安放好试样，依据设定的竖向压力放置好砝码后立即拔除销钉，以 $1.2 \text{ mm/min}$ 的速率剪切。剪破标准为：测力计读数达到稳定或出现显著后退。一般试验进行至剪切变形为4 mm时停止剪切，当没有破坏现象出现时则至剪切变形为6 mm时停止剪切。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 石墨烯改性土的应力-应变关系特征

取同一组试验的三个平行试样所得数据的平均值作为改性土的强度值。图1为14%含水率的试样组(C1-C5)的应力-应变关系曲线，其它两种含水率下的曲线规律与其相似。

由图1可知，在低竖向压力(100 kPa)下，试样均表现为软化型，加载初期，随着位移增大，应力迅速上升，且应力在位移为1.2 mm左右时达到峰值，后逐渐趋于残余强度；但在高竖向压力下(200、300及400 kPa)，试样的硬化性质显著，且初始刚度随

表1 粘土的物理性质指标

Tab.1 Physical properties of clay soil

液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	D60 /mm	D30 /mm	D10 /mm	$C_u$	$C_c$
32.4	13	18.5	1.63	0.22	0.05	0.009	4.5	1.7

表2 石墨烯的物理参数

Tab.2 Physical properties of graphene

类型	纯度	厚度 /nm	片层大小 / $\mu\text{m}$	层数	比表面积 / $(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	重度 / $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
多层石墨烯	>95%	3.4-8	10~50	6~10	100~300	20

表3 土样的试验参数

Tab.3 Test parameters of soil samples

试样组编号	石墨烯含量 /%	含水率 $w/\%$	试样组编号	石墨烯含量 /%	含水率 $w/\%$	试样组编号	石墨烯含量 /%	含水率 $w/\%$
C1	0	14	C6	0	16	C11	0	18
C2	1	14	C7	1	16	C12	1	18
C3	2	14	C8	2	16	C13	2	18
C4	3	14	C9	3	16	C14	3	18
C5	4	14	C10	4	16	C15	4	18

着竖向压力的增大而增大。

### 3.2 石墨烯对试样抗剪强度指标的影响

表4为各组试样的抗剪强度指标随石墨烯掺量的变化情况。可以看出,石墨烯的掺入可有效提高土的粘聚力,最大增幅达到了175%。

基于表4中的结果,得到各组试样的抗剪强度指标随石墨烯掺量的变化情况如图2所示。同一含水率条件下,改性土的粘聚力 $c$ 随石墨烯掺量的增加而持续增大。说明石墨烯的掺入能显著提高粘土的粘聚力。改性土的内摩擦角 $\phi$ 几乎没有变化,说

明石墨烯的掺入对内摩擦角的影响较小。

## 4 扫描电镜结果与分析

为了研究不同石墨烯掺量对土体微观结构的影响,先取素土与纯石墨烯在扫描电镜下观察形貌,然后取不同石墨烯掺量的试样剪破面进行制样,开展试验。

### 4.1 扫描电镜试验结果

在扫描电镜下,如图3(a)所示,素土呈颗粒状,如图3(b)所示,纯石墨烯呈片状。

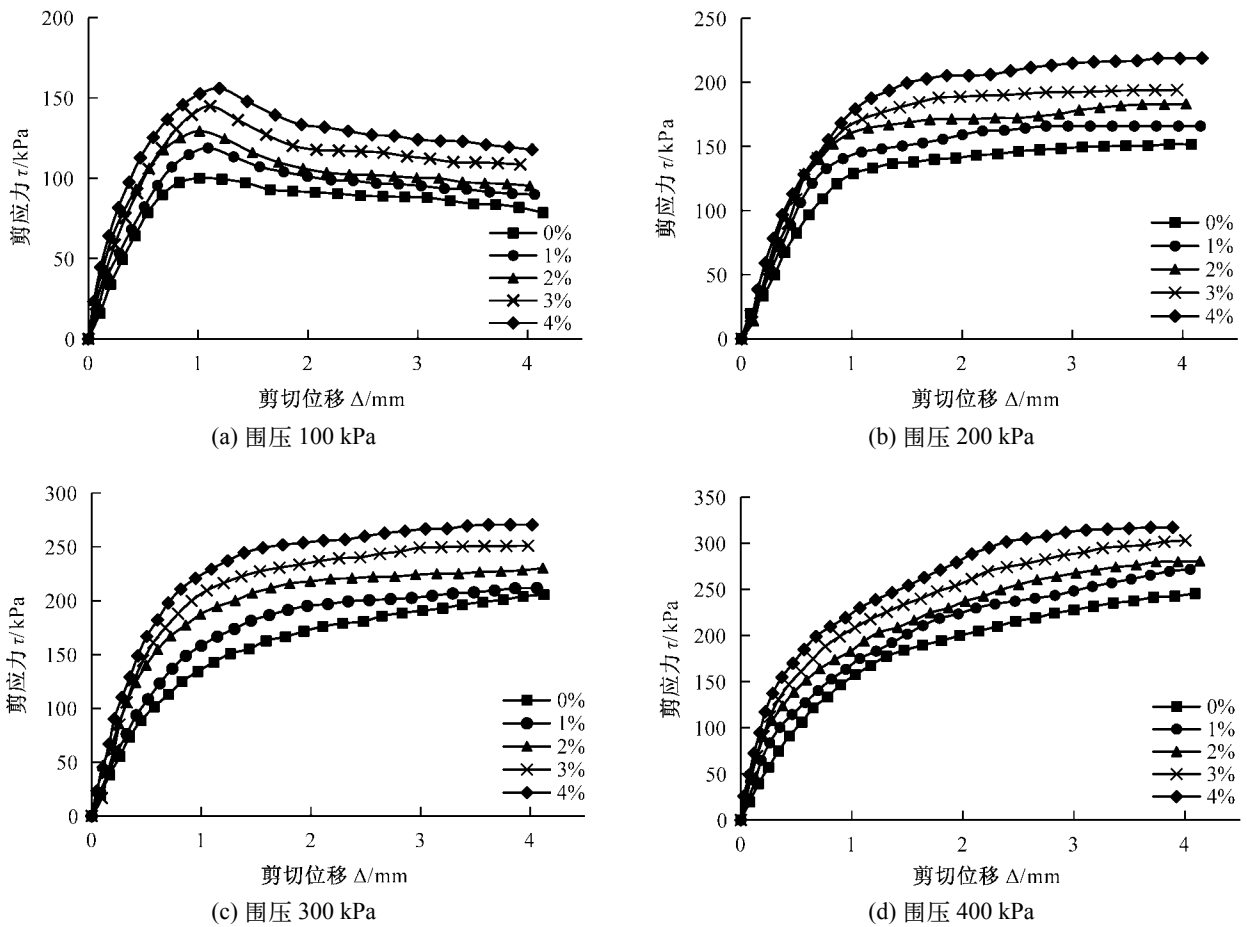


图1 剪应力与剪切位移关系曲线  
Fig.1 Curves of shear stress and shear displacement

表4 试样的抗剪强度指标

Tab.4 Results of shear strength parameters for soil samples

试样编号	粘聚力 $c/kPa$	增幅 /%	内摩擦角 $\phi/^\circ$	试样编号	粘聚力 $c/kPa$	增幅 /%	内摩擦角 $\phi/^\circ$	试样编号	粘聚力 $c/kPa$	增幅 /%	内摩擦角 $\phi/^\circ$
C1	53.1	—	26.0	C6	44.9	—	25.4	C11	31.8	—	24.7
C2	65.9	24.1	26.8	C7	55.7	24.1	25.9	C12	42.6	34.0	25.8
C3	80.9	52.4	26.4	C8	67.2	49.7	26.5	C13	52.7	65.7	26.8
C4	90.4	70.2	28.0	C9	79.6	77.3	27.0	C14	67.2	111.3	27.3
C5	106.6	100.8	28.2	C10	97.2	116.5	27.7	C15	87.5	175.2	27.3

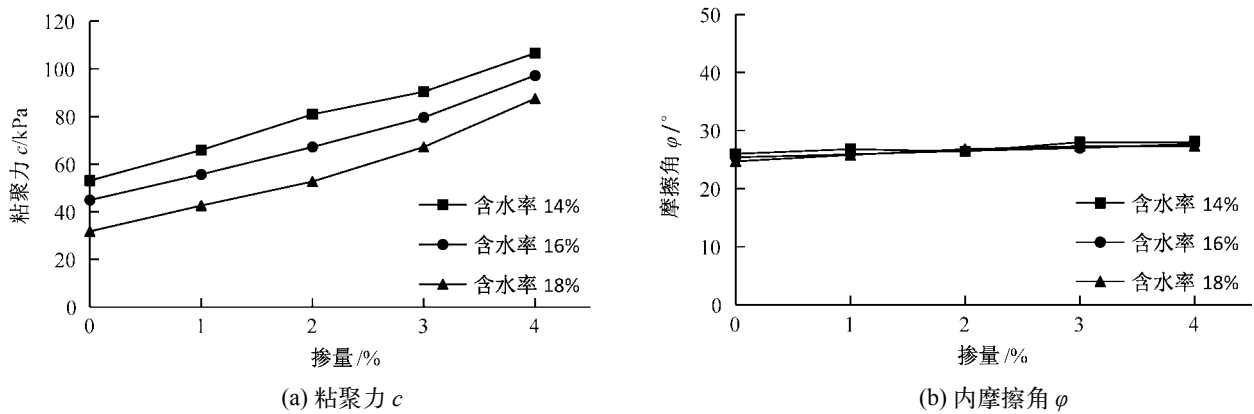


图 2 抗剪强度指标随石墨烯掺量的变化  
Fig.2 The change of shear strength parameters with the dosage of graphene

选取孔隙分布均匀的扫描电镜照片。如图 4 所示，放大倍数为 500 倍的扫描电镜照片可以清晰地显示石墨烯在土中的分布。由图 4(a) 可以看出，素土的颗粒比较松散，有较多的肉眼可见的大孔隙，土颗粒多以角一面接触，因而孔隙连通性较好。掺入 2% 石墨烯后，如图 4(b)，可以看出土骨架颗粒细节清晰，石墨烯主要附着于土颗粒表面，少量填充进孔隙，因而土颗粒之间连接增强，但仍存在肉眼可见的粒间孔隙，结构性不佳。当掺量继续增大到 4% 时，如图 4(c)，石墨烯含量的增加导致土体内出现较多团粒结构，土颗粒被隔离，土粒之间的

接触和摩擦主要发生在土颗粒与石墨烯之间，此时土的整体结构较为紧密。

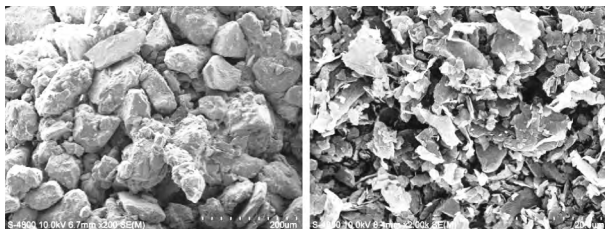
SEM 照片经过数字图像处理<sup>[5]</sup>后能够得到该观测范围内土样的孔隙率。图 4 的二值化处理结果如图 5 所示，黑色区域为孔隙部分。可见石墨烯的掺入填充了土颗粒间的孔隙。

将多个样品的 SEM 图像进行分析，得到孔隙率的平均值随石墨烯掺量的变化情况，如图 6 所示，从图中可以看出，随着石墨烯掺量的增加，孔隙率的平均值在逐渐减小。

#### 4.2 石墨烯增强机理

石墨烯对孔隙的填充作用。土体中孔隙的形态对土的工程性质有着重要的影响。对比素土和石墨烯改性土的剪破面形态，素土结构形貌粗糙、疏松，但掺入石墨烯的土样剖面断面均匀，形貌密实，如图 7 所示。石墨烯的掺入降低了土体的孔隙率，而孔隙率的降低有利于土体粘聚力的提高<sup>[6]</sup>。

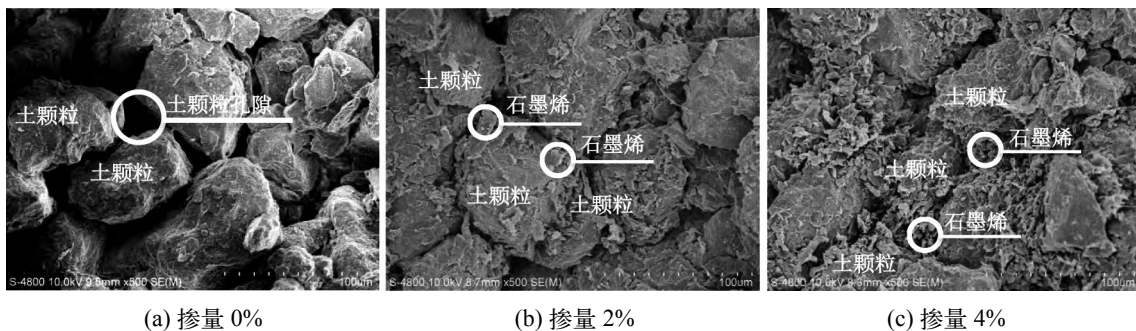
石墨烯对土颗粒的咬合作用。图 8 为石墨烯与土颗粒的接触示意图。由于石墨烯具有空间网状形态，且颗粒小、比表面积大、强度高、刚度大，与



(a) 放大倍数为 200 倍的素土  
(b) 放大倍数为 2 000 倍的纯石墨烯

图 3 素土与纯石墨烯在 SEM 下的形貌

Fig.3 Morphology of plain soil and pure graphene under SEM



(a) 掺量 0% (b) 掺量 2% (c) 掺量 4%

图 4 放大倍数为 500 倍的改性土的 SEM 试验结果

Fig.4 SEM test results of modified soil with magnification of 500 times

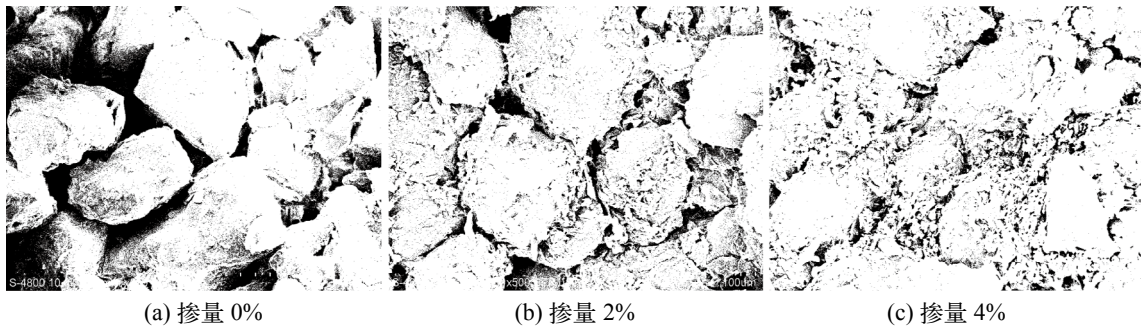


图 5 改性土 SEM 照片的二值化处理结果

Fig.5 Binary conversion results of SEM pictures of modified soil

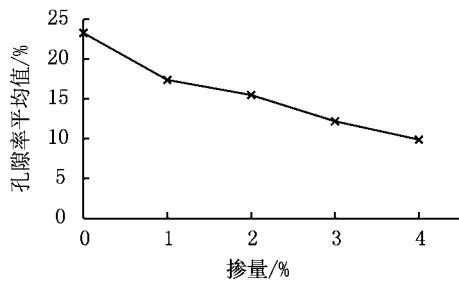
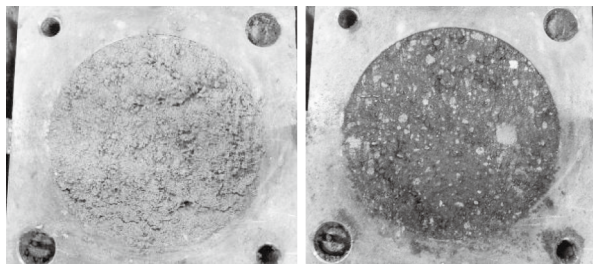


图 6 不同石墨烯掺量下有限平面内孔隙度平均值

Fig.6 Average values of porosity in finite plane with different dosage of graphene



(a) 掺量 0% (b) 掺量 2%

图 7 不同石墨烯掺量的土样剪破面形态对比

Fig.7 Morphological comparison of soil shear failure surface with different graphene dosage

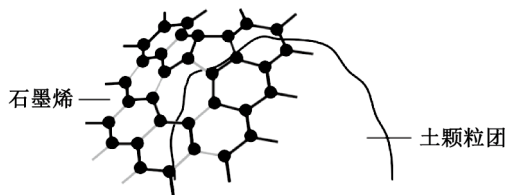


图 8 石墨烯与土颗粒的接触

Fig.8 Contact between graphene and soil particles

土颗粒接触时，能与土颗粒较好地咬合，从而限制土颗粒的运动及变形。当石墨烯掺量增加后，石墨烯填充在土体孔隙中形成空间受力结构。当土体受力时，土颗粒能有效地将力传到该受力结构上，且该受力结构可根据土颗粒的变形及运动进行调整，形成一个新的受力结构来更好的约束土颗粒，使得改性土的抗剪强度提高。

### 5 结论

1) 在粘性土中加入石墨烯，能有效提高土体的粘聚力，但对内摩擦角的影响较小。掺量增大，抗剪强度随之增大。相同掺量下，含水率的增长会使抗剪强度降低。

2) SEM 试验结果显示，在石墨烯掺量较小的情况下，石墨烯主要附着于土颗粒表面，而当掺量增大后，石墨烯填充进了土颗粒间的孔隙。与素土相比，改性土的整体结构较为紧密，抗剪强度增大。

3) 石墨烯能够通过填充土中孔隙、与土颗粒咬合来起到增强土体抗剪强度的作用，其作用效果显著。

### 参考文献:

[1] 朱宏伟, 徐志平, 谢丹. 石墨烯-结构、制备方法与性能表征 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[2] NOVOSELOV K S, FAL'KO V I, COLOMBO L, et al. A roadmap for graphene[J]. Nature, 2012, 490(7419): 192.

[3] LEE C G, WEI X D, KY SAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science(New York, N.Y.), 2008, 321(5887): 385-388.

[4] RAMANATHAN T, ABDALA A A, STANKOVICH S, et al. Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(6): 327-331.

[5] 石崇, 王盛年, 刘琳, 等. 基于数字图像分析的冰水堆积体结构建模与力学参数研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3393-3399.

[6] 龙玉民. 重塑粘性土、值影响因素研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

(责任编辑 王利君)