

文章编号: 1007-2993(2024)03-0365-09

PFC3D 颗粒流模拟纳米黏土改良黄土三轴试验

张子萱¹ 曹宝花^{1,2} 韩泽敏¹ 许江波¹ 程芳卉³ 陈绍华³ 侯鑫敏^{1,3} 詹皓辰³

(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有限公司, 陕西西安 710064;

3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西西安 710043)

【摘要】 基于 PFC3D 软件研究不同纳米材料、掺量、围压、干密度对改良黄土力学性能的影响, 确定改良黄土宏观之间的参数关系, 通过建立改良黄土数值模型、三轴试验, 获得了改良黄土的应力-应变曲线。将数值模拟的结果与室内试验的结果相比较, 通过数值模拟和室内三轴试验, 得出的改良黄土抗剪强度指标基本吻合。试验结果表明: (1) 围压一定时, 改良黄土试样偏应力随纳米黏土掺量的增加而增大; 改良黄土的应力与应变正相关, 不同围压时, 表现为软化型和硬化型; (2) 当凹凸棒土掺量小于 2% 时, 数值模拟得到的抗剪强度总体小于室内试验得到的抗剪强度, 材料大于 2% 时则相反; (3) 纳米蒙脱土改良黄土数值试样材料掺量小于等于 4% 时, 数值模拟得到的抗剪强度大于室内试验的抗剪强度, 大于 4% 则相反。

【关键词】 凹凸棒土; 纳米蒙脱土; 改良黄土; 三轴试验; PFC3D 颗粒流模拟试验

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.016

PFC3D Particle Flow Simulation of Nano-Clay Modified Loess Triaxial Test

Zhang Zixuan¹ Cao Baohua^{1,2} Han Zemin¹ Xu Jiangbo¹ Cheng Fanghui³ Chen Shaohua³

Hou Xinmin^{1,3} Zhan Haochen³

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xi'an Changda Highway Engineering Inspection Center Co., Ltd., Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd.,

Xi'an 710043, Shaanxi, China)

【Abstract】 PFC3D software was used to study the influence of different nanomaterials, dosage, confining pressure, and dry density on the mechanical properties of improved loess, and determine the parameter relationship between macro and meso of improved loess. Through a numerical model of improved loess and a three-axis experiment, the stress-strain curve of improved loess was obtained. The results of the numerical simulation were compared with the results of indoor experiments, and the shear strength index of improved loess was consistent. The experimental results showed that: (1) When the confining pressure is constant, the deviatoric stress of the improved loess sample increases with the increase of nano-clay content. The stress and strain of the improved loess are positively correlated. When the confining pressure is different, it shows a softening type and a strong hardening type. (2) When the content of attapulgite is less than 2%, the shear strength obtained by numerical simulation is generally lower than that derived from laboratory tests; conversely, when the content exceeds 2%, the situation is reversed. (3) When the content of nano-montmorillonite modified loess in numerical test samples is less than or equal to 4%, the shear strength obtained through numerical simulation is higher than that measured in laboratory tests; conversely, when the content exceeds 4%, the situation is reversed.

【Key words】 attapulgite; nano-montmorillonite; improved loess; triaxial test; PFC3D particle flow simulation test

0 引言

抗剪强度是判断黄土力学性能的重要指标, 黄土应力-应变特征是黄土抗剪强度的重要基础, 因此, 研究黄土的应力-应变特征, 对解决黄土地区的工程地质问题有重大意义。

颗粒流是模拟验证室内试验的重要途径之一,

周健等^[1]、刘文白等^[2]开展了砂土双轴模拟试验和扩底桩上拔试验, 结果表明试验所得数据与颗粒流方法模拟数据较为吻合, 得到土体变形的宏观和微观性能关系; 苑伟娜等^[3]利用 PFC2D 软件对黄土进行了轴剪切模型试验, 研究了黄土的颗粒大小、形态及排列方式等特征对其剪切特性的影响; 王颖等^[4]依托

作者简介: 张子萱, 女, 1999 年生, 汉族, 天津人, 在读硕士研究生, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: zxx_999_tj@163.com

通讯作者: 许江波, 男, 1985 年生, 汉族, 河南林州人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: xujiangbo@yeah.net

黄土斜坡现场实际,结合室内三轴试验数据,数值模拟分析三维地震作用下斜坡失稳破坏和运动过程;同霄等^[5]基于室内试验,结合 PFC 软件对黄土的强度参数进行了标定,此外,分别探究了重力条件、颗粒密度、刚度和模型尺寸效应对强度曲线的影响;李涛等^[6]充分考虑黄土颗粒间范德华力和毛细力作用,采用 PFC3D 软件对非饱和黄土进行了侧限压缩及湿陷模拟试验,并对其在垂直加载及增湿条件下的宏微观力学特性进行了研究;蒋明镜等^[7]采用双线法和单线法进行双轴湿陷数值模拟试验,研究水分、加载顺序等因素对黄土湿陷变形的影响,探索双轴剪切、浸泡条件下黄土颗粒间胶结破裂规律。周杰^[8]分别运用 PFC2D 和 PFC3D 软件从宏观力学和剪切带演化的角度模拟了三轴试验,并将模拟维数对模拟结果的影响进行分析;周剑等^[9]采用数字图象处理技术对其进行建模,采用 PFC2D 软件对其力学性质进行了分析,并对其进行了均值土体的数值模拟,并与试验数据进行了比较;周喻等^[10]比较全面地构建了岩体节理 PFC 数值直剪模拟试验,并对其在直剪过程中的力学性质变化及破坏机制进行了进一步的探究,并将模拟计算结果与试验结果比较分析,证实了这种方法的正确性;You 等^[11]采用离散单元法对原状黄土试样的抗拉强度和内应力分布进行研究,通过离散元模型,研究试件的内应力分布、破坏模式以及内部裂纹变化规律;Sueng 等^[12]基于废弃矿藏废料的试验结果进行研究分析,使用 PFC2D 建立数值模型,通过环状剪切模拟试验,研究了滑坡体的排水、法向应力及滑坡体材料的剪切速率等剪切特征;Jiang 等^[13]基于二维离散元法,通过数值模拟研究了结构黄土的侧限压缩、湿陷等宏观力学特性;Park 和 Song^[14]基于颗粒流动理论,利用 PFC3D 软件,建立了表征节理单元强度减弱的三维模型,并进行了节理直剪模拟试验。

综上,目前国内外的研究多基于离散元和有限差分法对原状黄土的三轴试验进行数值仿真模拟,而对于高黏结力的粉土、黏土的三轴剪切试验的数值仿真模拟尚不完善。因此,本课题拟利用 PFC3D 数值模拟技术,通过调节黄土材料微观参数,获得不同微观尺度下的宏观应力-应变关系曲线,揭示宏观变形特征和变化规律,并对比分析室内试验结果和数值模拟试验结果,课题的研究成果将有助于完善黄土力学性能和剪切力学性能的研究,具有重要的学术价值和应用价值。

1 离散元理论

1.1 颗粒流模拟力学原理

颗粒流动的基本特征是颗粒可以进行有限地移动、旋转,颗粒之间可以完全分离,而且可以在计算时自动识别新的接触点。

将三轴剪切试验中颗粒之间的相互作用力转化为颗粒之间的接触压力与位移的动态变化,并将牛顿第二定律与之相结合,使得颗粒之间的受力达到平衡。即每个颗粒的受力为 0,否则,使其在后续计算中,即使在施加外力的情况下,颗粒也不会重力作用下发生运动。颗粒假设为刚性体,为实现颗粒区域局用均匀孔隙率和应力,需要在 wall 边界施加应力伺服。

1.2 颗粒流本构模型

在 PFC3D 中,通过将粒子之间的每个接触点结合起来建立一个简单的本构模型,从而模拟整个材料的本构模型。对于每个具体的接触面,可以将其划分为刚性、滑移性和连接性三种模型。由于黄土具有松散和孔隙大的特点,故选择接触连接模型对黄土进行研究。

2 改良黄土宏观力学影响因素

2.1 颗粒流数值模拟及微观结构

本文改良黄土的数值模型采用接触连接模型,为约束颗粒体,通过设置圆筒模型来实现,在此基础上设置颗粒体试样。实际微观颗粒分布如图 1 所示,实际试样颗粒较多,故数值模型采用半径放大法以减少颗粒数量,从而提高计算效率。改良黄土颗粒粒径范围设置为 $6e^{-4} \sim 17e^{-4}$,凹凸棒土颗粒粒径为 $20e^{-5} \sim 35e^{-5}$,纳米蒙脱土颗粒粒径范围为 $10e^{-5} \sim 55e^{-5}$,两者均匀分布。在图 2 的具体计算模型中,颗粒高度 80 mm,直径 39.1 mm,圆柱体的高度 112 mm。

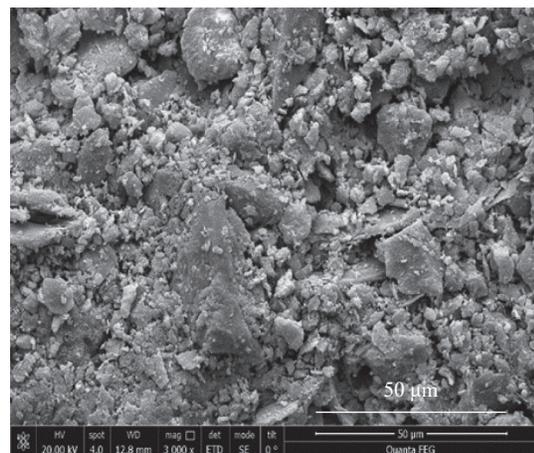


图 1 纳米黏土改良黄土 SEM 图

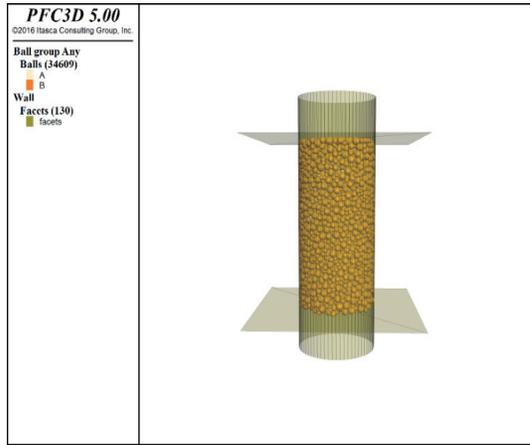


图2 颗粒流模型图

2.2 三轴数值模型基本参数的选取

根据颗粒流离散元理论,两个相互接触的实体是可以看作同一根弹性梁,其模型的微观参数与宏观参数之间的关系是通过对这两个相互接触的实体之间的连接行为、自身接触行为和力学行为进行对比来建立的,并对其不断地修正,最终得到了与实际土体相吻合的细观参数。 E_c 代表两个接触颗粒球体之间的接触模量,假定球体 A 和球体 B 组成一个弹性梁,则该梁的长度 L 为:

$$L = 2R = R^{[A]} + R^{[B]} \quad (1)$$

根据室内无侧限抗压强度试验得到改良黄土样的单轴抗压强度 UCS,代入公式:

$$E_c = 429.56(\text{UCS})^{0.9122} \quad (2)$$

$$k_n = k_s = LE_c \quad (3)$$

$$f = \tan \varphi \quad (4)$$

式中: E_c 为颗粒间的接触模量; k_n 、 k_s 分别为颗粒切向刚度和法向刚度, N/m; L 为弹性梁的长度, m; f 为颗粒的摩擦系数; φ 为土体总内摩擦角。

以 2% 纳米黏土掺量为例,按式(2)计算土体的接触模量,代入公式(3)求解得颗粒切向刚度和法向刚度 k_n 、 k_s ,根据表 1 和表 2 的室内三轴试验结果,结合式(4)计算改良黄土的颗粒摩擦系数。此模型试验颗粒基本计算参数见表 3。

2.3 掺量对改良黄土宏观力学的影响

图 3 为 200 kPa 围压下凹凸棒土改良黄土试样变形时程曲线,图 4 为四种凹凸棒土掺量改良黄土在不同围压下的应力-应变曲线。图 5 为 200 kPa 围压下纳米蒙脱土改良黄土试样变形时程曲线,图 6 为四种纳米蒙脱土掺量改良黄土在不同围压下的应力-应变曲线。

表 1 凸棒土改良黄土抗剪强度指标

质量掺量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	c/kPa	φ (°)	c'/kPa	φ' (°)
0	1.35	18.47	11.95	14.23	28.55
	1.45	24.80	13.00	17.41	33.78
	1.55	31.39	14.36	23.03	35.38
	1.65	44.98	17.94	33.06	39.05
1	1.35	29.74	13.06	16.41	36.58
	1.45	37.58	15.37	23.30	38.83
	1.55	44.78	18.36	34.69	40.02
	1.65	68.65	21.41	45.92	44.99
2	1.35	27.62	12.53	16.10	35.66
	1.45	34.70	15.25	21.06	37.44
	1.55	38.86	17.30	31.53	38.46
	1.65	59.55	20.06	43.64	43.12
4	1.35	24.46	12.30	15.66	35.24
	1.45	32.48	15.01	20.43	37.24
	1.55	36.94	16.28	27.36	37.27
	1.65	53.01	18.88	39.77	42.94
6	1.35	22.79	12.12	15.12	34.26
	1.45	29.74	14.42	18.24	37.16
	1.55	35.57	15.56	25.80	36.83
	1.65	49.84	18.56	37.41	41.39

表 2 纳米蒙脱土掺量改良黄土抗剪强度指标

质量掺量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	c/kPa	φ (°)	c'/kPa	φ' (°)
0	1.35	18.47	11.15	14.23	28.55
	1.45	27.80	13.00	17.41	33.78
	1.55	35.39	14.36	23.03	35.38
	1.65	44.98	17.34	33.06	38.05
1	1.35	29.12	12.30	17.55	32.96
	1.45	35.15	13.86	21.90	36.09
	1.55	41.45	15.36	33.86	37.88
	1.65	51.02	18.06	45.31	40.39
2	1.35	33.56	12.65	24.11	35.10
	1.45	44.75	14.77	32.83	37.44
	1.55	49.43	17.42	43.75	38.61
	1.65	59.15	20.18	56.76	42.69
4	1.35	30.31	12.49	22.04	33.85
	1.45	40.05	15.47	27.94	36.37
	1.55	44.43	15.43	35.23	38.17
	1.65	55.67	19.03	47.67	41.92
6	1.35	29.89	12.30	20.58	32.75
	1.45	37.18	13.76	24.51	35.94
	1.55	42.24	14.95	32.69	37.45
	1.65	53.72	18.54	44.71	40.42

表3 基本计算参数

参数	颗粒切向 刚度/(N·m ⁻¹)	颗粒法向 刚度/(N·m ⁻¹)	粘结强度 /kPa	土颗粒密度 /(kg·m ⁻³)	颗粒最小 半径/(×10 ⁻³ m)	颗粒最大 半径/(×10 ⁻³ m)	摩擦系数 <i>f</i>	上下墙刚度 /(N·m ⁻¹)	圆柱墙刚度 /(N·m ⁻¹)	孔隙率
素黄土	1×10 ⁵	1×10 ⁵	31.39	2710	0.6	1.7	0.26			0.55
凹凸棒土	2.4×10 ⁴	2.4×10 ⁴	38.86	2740	0.2	0.35	0.31	1×10 ⁷	1×10 ⁵	0.93, 0.95 0.96, 0.98
纳米蒙脱土	1.4×10 ⁴	1.4×10 ⁴	49.43	2740	0.15	0.55	0.32			0.93, 0.95 0.96, 0.98

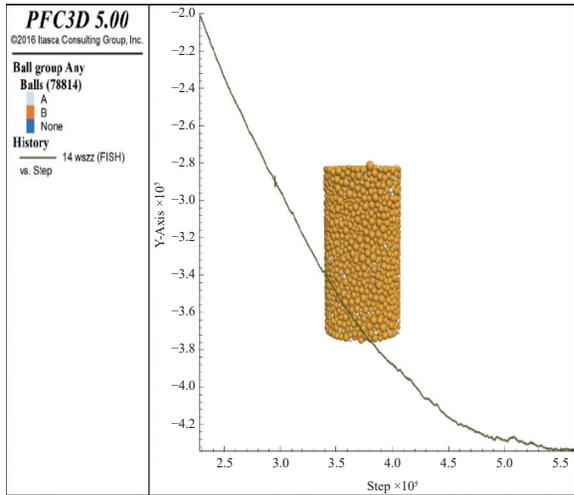


图3 凹凸棒土掺量1%改良黄土试样变形时程曲线(200 kPa)

由图4可知,在较小的围压下(50 kPa, 100 kPa)力先会达到峰值,然后呈现出下降的趋势,其属于软化型应力应变曲线;在较大的围压下,其试样的应力-应变曲线属于硬化型。添加不同配比的凹凸棒土可使改良黄土在应力-应变曲线中的每一点处的斜率均有增加。说明纳米材料的加入对黄土的抗剪强度有提升作用,黄土的抗剪强度随凹凸棒土掺量增加呈增加趋势,凹凸棒土掺量为6%时抗剪强度最高。

如图7所示,随着凹凸棒土掺量的增加,抗剪强度随之增加,根据四个微观图看出,掺量越大,改良黄土空隙越小,凹凸棒土对改良黄土有良好的塞缝作用,增大粗颗粒间的咬合力以及黏土矿物间的分子作用力,从而增加抗剪强度。

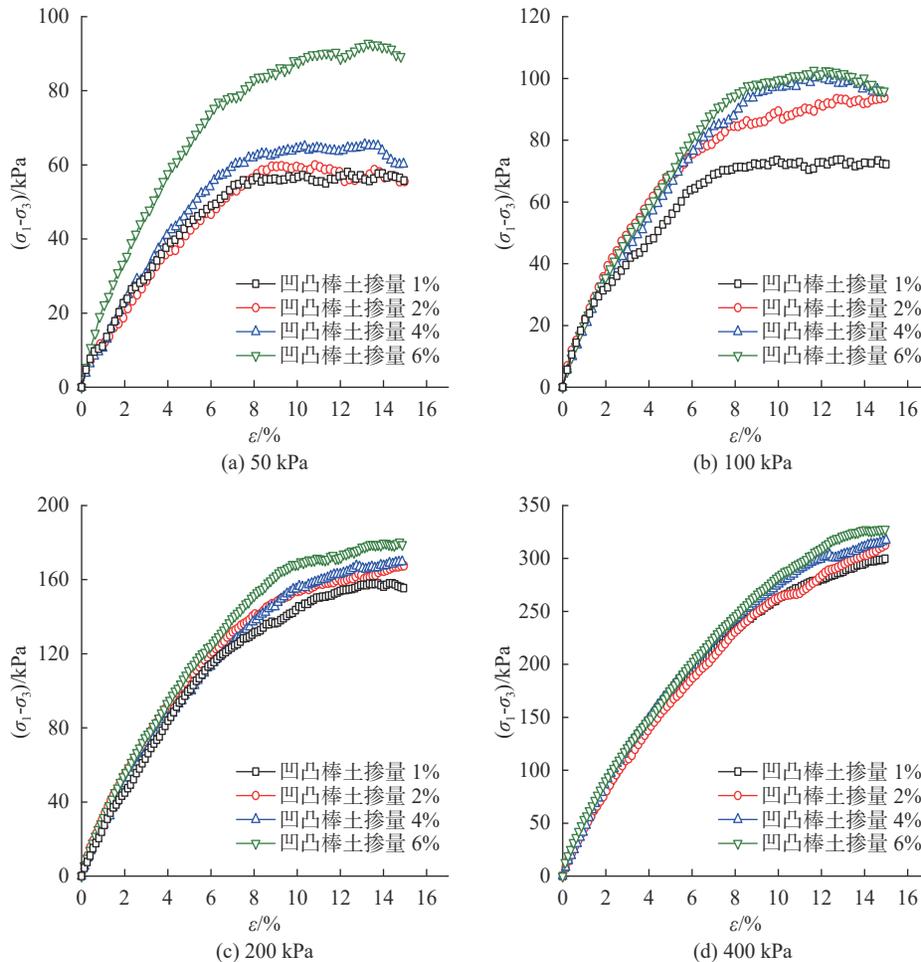


图4 不同围压下凹凸棒土掺量对改良黄土应力-应变影响

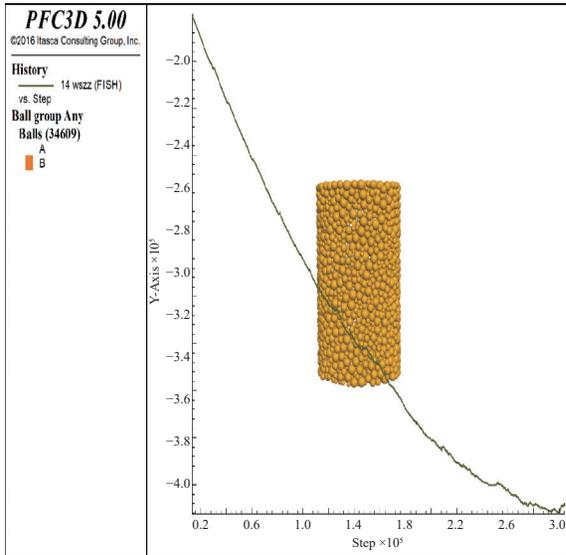


图5 纳米蒙脱土掺量 2% 改良黄土试样变形时程曲线(200 kPa)

初步判断其原因是添加凹凸棒土材料后的试样, 具有大孔隙结构的黄土被颗粒粒径较小的凹凸棒土填充变密实, 凹凸棒土发挥良好的填充作用, 另一方面, 凹凸棒土中的化学成分 SiO_2 、 Fe_2O_3 通过水溶液与黄土中氧化物、水溶盐结晶等物质产生胶结作用,

进而对土颗粒产生胶结作用, 使改良土强度提高。

由图 6 可知, 在较小的围压下(50 kPa, 100 kPa), 试样的应力-应变曲线表现为软化型; 而在较大的围压下, 试样的应力-应变曲线表现为硬化型。黄土的抗剪强度随纳米蒙脱土掺量增加呈增加趋势, 且纳米蒙脱土掺量为 6% 时抗剪强度最高。原因为: 添加纳米蒙脱土材料后的试样, 粒径更小的纳米蒙脱土发挥了良好的填充作用, 另一方面, 纳米蒙脱土的掺入增加了黄土颗粒间的黏结力和颗粒界面间的有效接触面积, 导致界面作用力提高而增大试样的抗剪强度。

由图 4、图 6 知, 当围压一定时, 两种纳米黏土改良黄土应力-应变曲线趋势相近, 即纳米材料种类对应力应变曲线趋势的影响并不明显。在围压较小时, 材料掺量对应力应变曲线的抬升效果较为显著; 当围压为 400 kPa 时, 纳米材料掺量对应力-应变曲线变化程度的贡献不大, 整体趋于一致。分析此种现象的原因为, 纳米材料掺量越高, 其填充效果越好, 纳米材料与黄土发生化学作用产生的胶结效果越显著, 改良黄土的抗剪强度也随之提高, 在应力应变曲线上的反映为各点斜率的提高。对于 400 kPa 围压下掺量改

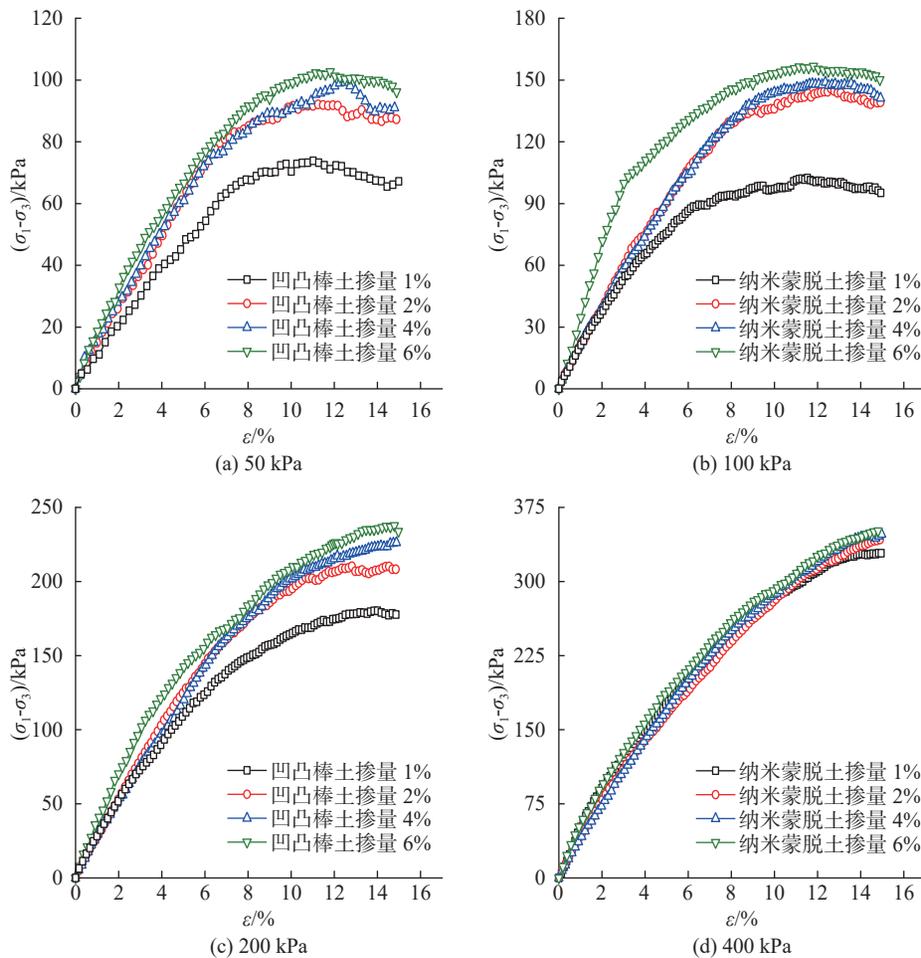


图 6 不同围压下纳米蒙脱土掺量对改良黄土应力应变影响

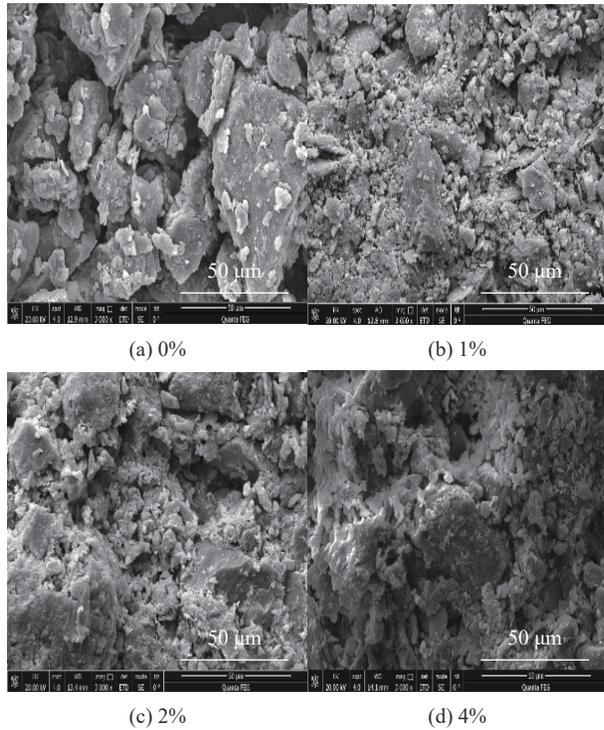


图7 不同凹凸棒土掺量改良黄土 SEM 图像

变对曲线影响不大的原因判断为,围压增大使松散的黄土颗粒挤压变密实,相较而言填充作用及胶结作用的贡献稍逊一筹。显然,围压对改良黄土的应力-应变曲线的变化也有一定的影响,需进一步展开围压对改良黄土宏观力学性能的影响研究。

2.4 围压对改良黄土宏观力学性能的影响

图8、图9分别反映了不同纳米材料改良黄土在不同掺量时,围压对应力-应变曲线的影响。由两图可知,当纳米黏土掺量一定时,两种纳米黏土改良黄土应力-应变曲线趋势相近,对于相同掺量下的同种纳米材料,围压增大会引起应力-应变曲线斜率增大,变化程度显著,即改良黄土试样的轴向偏应力随材料围压的增大而增大。在试样剪切过程中,随着试样周边压力的增加,试验所受的约束力也会增大,这就使得在剪应力作用下,改良黄土的试样颗粒在发生错动所需要克服的阻力也会增大。

图10和图11分别表示两种纳米黏土改良黄土三轴数值试样在不同纳米黏土材料掺量下偏应力与围压的关系,可以发现,随着围压的增大,偏应力逐渐

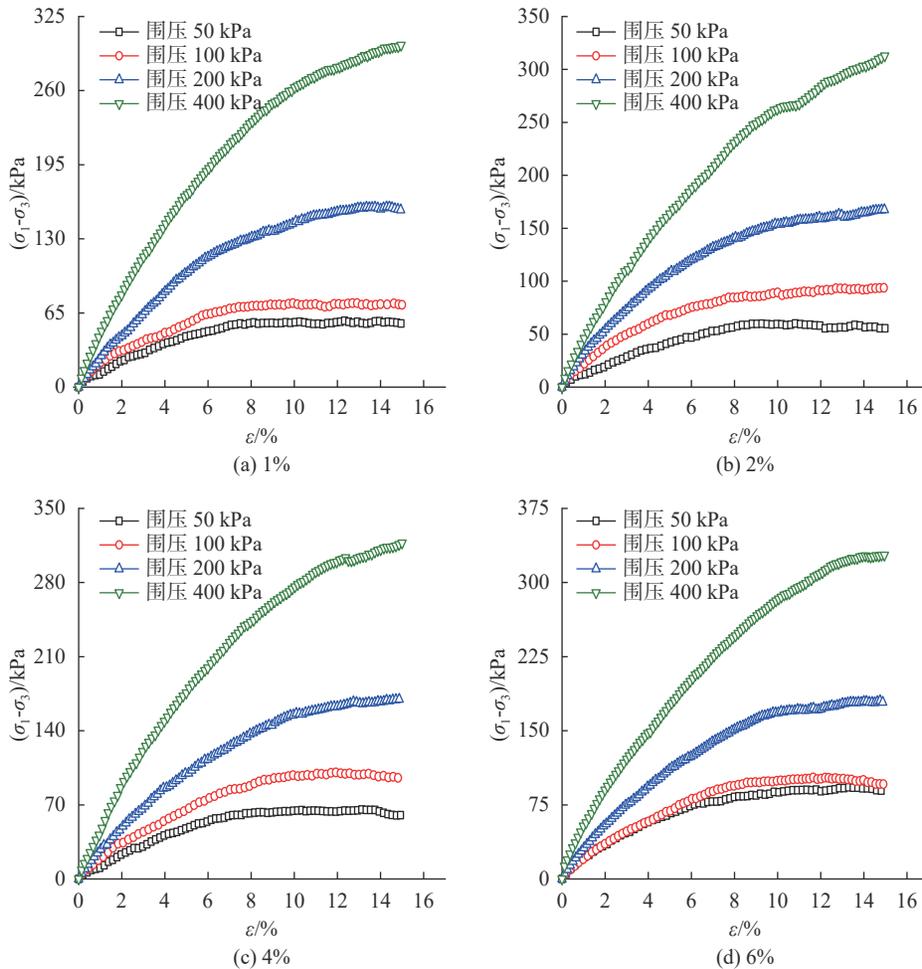


图8 不同凹凸棒土掺量下围压对改良黄土应力-应变影响

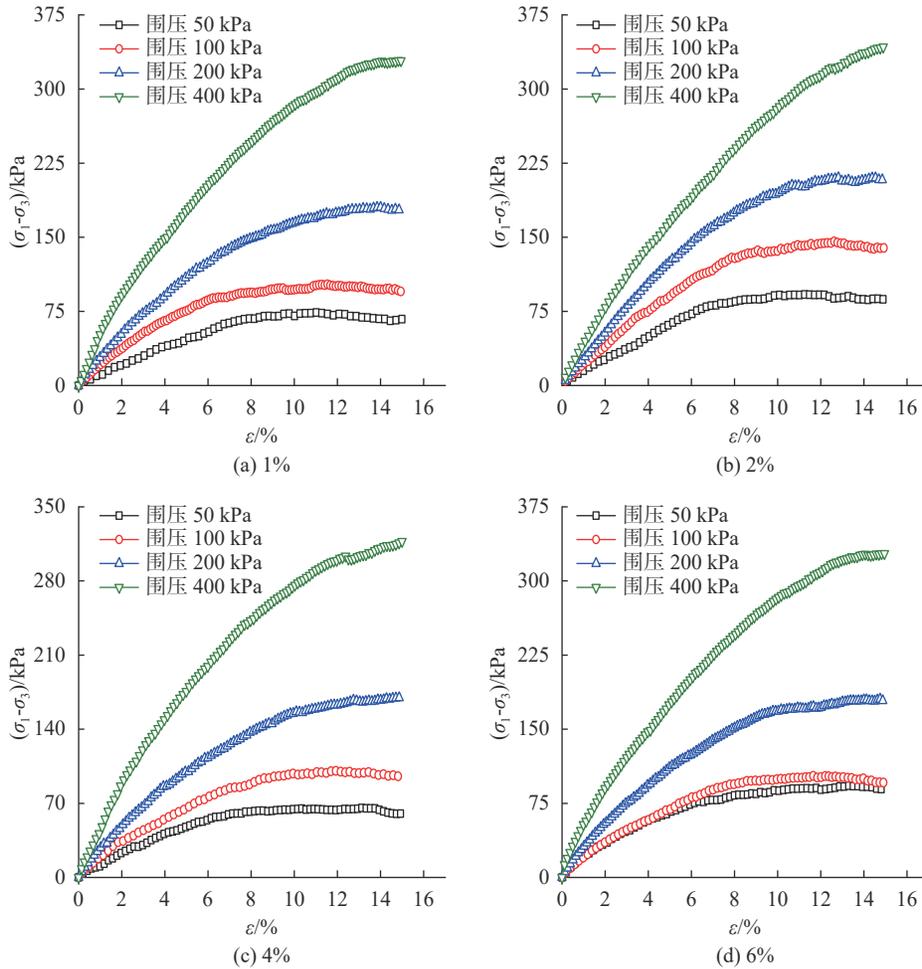


图 9 不同纳米蒙脱土掺量下围压对改良黄土应力-应变影响

增大,二者关系呈现出一次函数关系,具体拟合曲线方程及拟合度如图 10、图 11 所示。

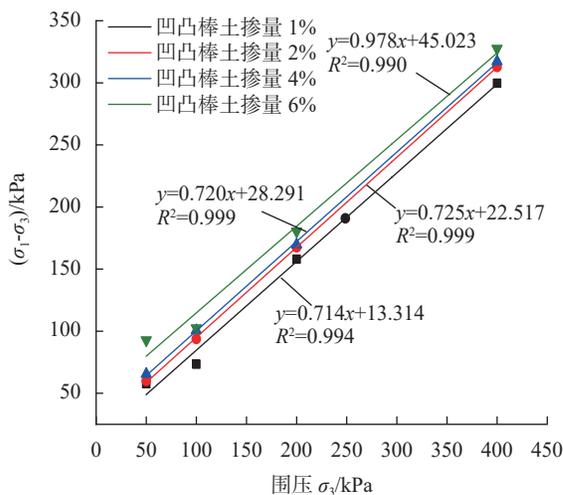


图 10 凹凸棒土改良黄土围压与应力关系

3 数值模拟试验与室内试验对比分析

表 4 和表 5 分别为两种纳米材料改良黄土抗剪强度指标数值模拟结果,分析两表可知两种纳米黏土改良黄土的抗剪强度指标均随着材料掺量的增加有

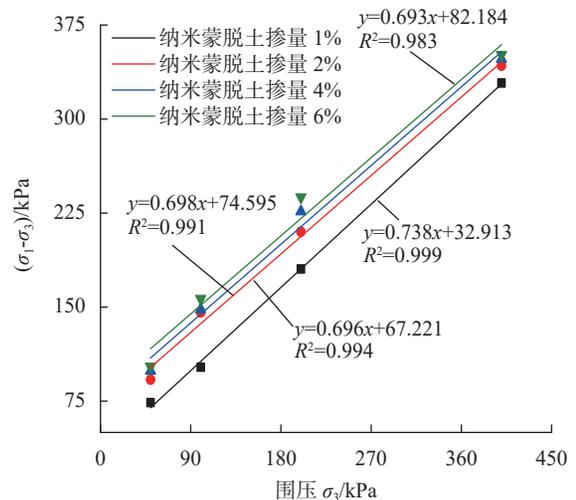


图 11 纳米蒙脱土改良黄土围压与应力关系

缓慢增大的趋势,即纳米黏土对黄土试样的力学性能有明显的改善作用。图 12 和图 13 分别为两种纳米材料改良黄土抗剪强度指标对比关系图,由两图可知,数值模拟得到的抗剪强度指标值与室内试验所得抗剪强度指标数值较为接近,证明该模型能较好地模拟室内试验情况,计算结果的准确性接近实际。进一步

分析发现,当凹凸棒土改良黄土掺量小于2%时,数值试样的内摩擦角和黏聚力总体小于室内试验的内摩擦角和黏聚力,掺量大于2%时则呈相反的现象,纳米蒙脱土改良黄土同样有此种现象,数值试样材料掺量在4%时,得到的抗剪强度指标大于室内试验的抗剪强度指标,大于4%时则相反。分析室内试验和数值模拟试验产生区别的原因可能为:三轴数值模型试验过程中,设置的细观参数和颗粒粒径范围都比较理想化,而实际试验过程中材料掺量产生的误差、养护环境的变化以及纳米材料的分散不彻底造成颗粒团聚现象都无法彻底避免,数值模拟试验则不仅充分考虑了改良剂本身的性能及准确控制材料掺量,而且全面考虑了颗粒本身的粘结作用,以上所述均有可导致试验结果出现一定程度的偏差。

表4 凹凸棒土改良黄土抗剪强度指标

凹凸棒土掺量(质量)/%	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{°})$
1	32.16	13.25	21.44	30.57
2	33.45	15.13	24.59	34.22
4	35.74	17.85	28.18	36.19
6	39.62	18.59	30.72	40.52

表5 纳米蒙脱土改良黄土抗剪强度指标

纳米蒙脱土掺量(质量)/%	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{°})$
1	32.33	11.86	18.29	30.17
2	36.42	13.05	24.48	32.53
4	38.10	15.27	28.06	35.61
6	42.18	19.25	34.96	38.75

4 总结

利用颗粒流程序 PFC3D 对两种纳米黏土改良黄土进行三轴试验模拟,研究不同围压和纳米黏土用量对其抗剪强度的影响,并将其与室内试验结果进行对比分析。

(1)围压一定时,两种不同类型的纳米黏土改良黄土的应力-应变曲线均呈现出相同的变化规律,即在不同掺量纳米黏土的作用下,改良后的黄土的偏应力发生了不同程度的变化,且偏应力随着纳米黏土的增加而增大,其应力-应变曲线特征由“弱软化型”向“强硬化型”转变。

(2)改良黄土的偏应力线随着围压的增大而逐渐增大,且二者呈现出一次函数关系。

(3)两种纳米黏土改良黄土的抗剪强度指标均随着材料掺量的增加缓慢上升,当凹凸棒土掺量小于2%时,改良黄土数值试样得到的抗剪强度指标总体

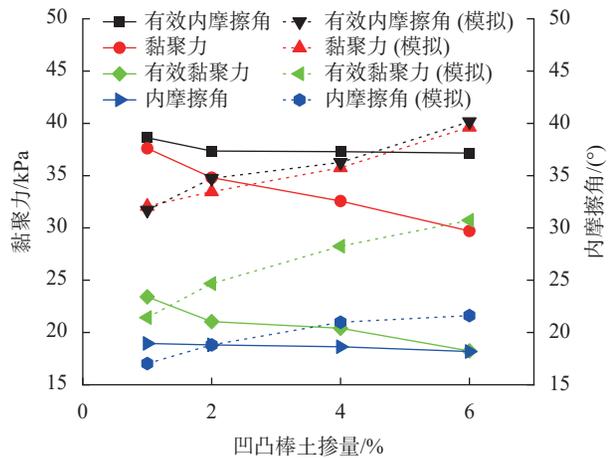


图12 凹凸棒土改良黄土抗剪强度指标对比关系

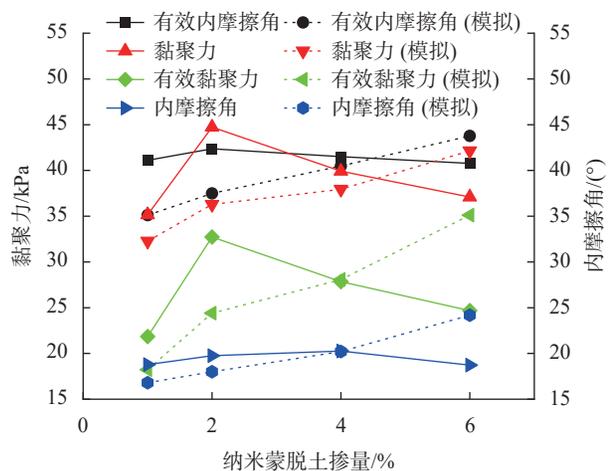


图13 纳米蒙脱土改良黄土抗剪强度指标对比关系

小于室内试验得到抗剪强度指标,材料大于2%时则相反。纳米蒙脱土改良黄土数值试样材料掺量小于等于4%时,得到的抗剪强度指标大于室内试验的抗剪强度指标,大于4%则相反。

参考文献

- [1] 周健,池毓蔚,池永,等.砂土双轴试验的颗粒流模拟[J].岩土工程学报,2000(6):701-704.
- [2] 刘文白,周健.扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟[J].岩土力学,2004(S2):201-206.
- [3] 苑伟娜,范文,邓龙胜,等.黄土颗粒结构特征及其对剪切行为的影响[J].工程地质学报,2021,29(3):871-878.
- [4] 王颖,庄建琦,李威,等.地震作用下黄土斜坡失稳及运动过程的离散元模拟[J].工程地质学报,2018,26(5):1139-1154.
- [5] 同霄,朱兴华,马鹏辉,等.颗粒离散元方法中黄土强度参数研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):435-442.
- [6] 李涛,蒋明镜,张鹏.非饱和结构性黄土侧限压缩和湿陷试验三维离散元分析[J].岩土工程学报,2018,

- 40(S1): 39-44.
- [7] 蒋明镜, 胡海军, 李 涛. 非饱和结构性黄土双轴湿陷试验的离散元分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1110-1116.
- [8] 周 杰. 模型维数对岩土离散元试验影响的宏-微观研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 84-88,97.
- [9] 周 剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2650-2659.
- [10] 周 喻, MISRA A, 吴顺川, 等. 岩石节理直剪试验颗粒流宏细观分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1245-1256.
- [11] YOU Z, ZHANG M, LIU F, et al. Numerical investigation of the tensile strength of loess using discrete element method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 247:107610.
- [12] SUENG WON J, KABUYAYA K, DONG EUN L, et al. Numerical analysis of shear and particle crushing characteristics in ring shear system using the PFC2D[J]. Materials, 2021, 14(1): 229.
- [13] JIANG M, LI T, HU H, et al. DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 60: 47-60.
- [14] PARK J, SONG J. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(8): 1315-1328.

收稿日期: 2023-08-21