

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.018

基于可视化试验的风积沙宏观细观力学特性分析

薛嘉麟^{1,2}, 杜强^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 为了研究库布齐沙漠风积沙的宏观细观力学特性,采用自行设计的可视化试验仪器对风积沙进行直剪试验和压缩试验,使用数码相机对试验过程进行拍摄,利用数字图像分析软件 PhotoInfor 对试验照片进行分析,得到土样位移场和应变场云图,并通过数值模拟软件(Particle Follow Code, PFC)对风积沙直剪试验、压缩试验和三轴试验进行数值模拟,对颗粒的细观变化进行分析。通过试验发现剪切初期风积沙颗粒较为分散,随着剪切的进行,大颗粒产生位移并形成剪切带,最终剪切带贯通、稳定,在直剪过程中剪切带以上土颗粒向上竖直运动。由于压缩试验是在侧限条件下进行的,变形过程中颗粒体水平方向的速度较小,而竖直方向速度基本等同于压缩速度,越靠近荷载施加位置的颗粒体竖向位移越明显。

关键词: 风积沙; 可视化试验; 位移场云图; 细观分析

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)02-0287-08

Macro-meso mechanical characteristics analysis of aeolian sand in visual test

XUE Jialin^{1,2}, DU Qiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Lab. of University of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions, Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to study the macroscopic and microscopic mechanical properties of aeolian sand in Kubqi Desert, the direct shear test and compression test of aeolian sand are carried out by using a self-designed visual test instrument, with the digital camera used to photograph the test process. The test photos are analyzed by using the digital image analysis software PhotoInfor to obtain the displacement field and strain field cloud map of soil sample. The direct shear test, compression test and triaxial test of aeolian sand are simulated by the numerical simulation software (Particle Follow Code, PFC) to analyze the meso-scale change of particles. Through the test, it is found that the aeolian sand particles are dispersed in the early shearing stage. With the progress of shear, the large particles produce displacement and formed shear band. Finally, the shear band is connected and stable. In the process of direct shear, the soil particles above the shear band move upward and vertically. Because the compression test is carried out under the condition of lateral confinement, the horizontal velocity of the particles is small during the deformation process. The velocity in the vertical direction is basically equal to the compression velocity. The closer the load is applied, the more obvious the vertical displacement of particle is.

Key words: aeolian sand; visualization testing; displacement field cloud map; micro analysis

内蒙古自治区存在规模较大的沙漠,如库布齐沙漠、毛乌素沙漠、腾格里沙漠等。沙漠地区矿藏资

源丰富,却因为交通不便,影响其开发和利用。近年来,关于沙漠地区风积沙的研究是个热点问题。张

收稿日期: 2021-04-06; 网络出版日期: 2021-08-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210826.1135.002.html>

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2018BS05015); 内蒙古工业大学博士基金(BS2020044)

第一作者: 薛嘉麟,男,硕士生,研究方向为土体宏观细观力学机理。E-mail: 20201800396@imut.edu.cn

通信作者: 杜强,男,博士,副教授,硕导,研究方向为土体宏观细观力学机理及离散元数值模拟。E-mail: dq410@imut.edu.cn

俊^[1]通过对风积沙颗粒分析和含水率等方面研究,验证了公路换填风积沙垫层的可行性。张宏等^[2]对风积沙进行了矿物成分、化学成分、酸碱度、含盐量与级配特征等方面的研究。王丽英等^[3]研究了风积沙改性土基坑填料力学性质和结构受盐-冻作用的影响规律。阮波等^[4]通过对低温养护条件下水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验进行研究,提出低温条件下,不同掺量水泥风积沙的刚度损失率。张飞阳^[5]对低含水率下风积沙地基的抗拔承载特性做出研究,并得出风积沙地基的上拔承载力随着基础底板尺寸及含水率的增加而增加,风积沙地基加载前中期开始是受到张拉破坏,最后的破坏是由于张拉破坏和剪切破坏联合作用导致的。吴克雄等^[6]对西北地区高性能风积沙固化剂的研制及工程应用做出研究。董瑞鑫等^[7]对于湿循环与风沙吹蚀作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性进行了研究。上述文献大多对风积沙的物理化学性质和风积沙土性改良等方面进行研究,对风积沙的力学特性研究较少。此外,风积沙级配特殊,如果从细观角度进行研究可能有助于进一步解释其力学机理。

为了探明风积沙的细观力学特性,研究受力过程中土颗粒的运动情况,本论文对现有的直剪仪、压缩仪进行可视化改进,并结合数字照相变形量测技术,对各密实度下直剪试验和压缩试验中试样的变形进行分析,得出土样位移场和应变场云图。结合离散元数值模拟程序,建立风积沙的细观数值模型,对风积沙的室内直剪试验、压缩试验和三轴试验进行数值模拟,研究风积沙的细观力学特性。

1 风积沙的颗粒分析试验

试验所用风积沙取自库布齐沙漠,风积沙呈浅红棕色,颗粒粒径均匀,内部掺杂黑色或白色细小颗粒,见图 1。



图 1 风积沙样本
Fig.1 Aeoliansand sample

对风积沙进行颗粒分析试验,得到颗粒级配曲线,并与标准砂进行对比分析,见图 2。由风积沙级配曲线可知风积沙粒径分布集中在 0.075 ~

0.25 mm,以颗粒较大的砂粒为主,其不均匀系数 $C_u=2.30$,曲率系数 $C_c=0.709$,级配不良。

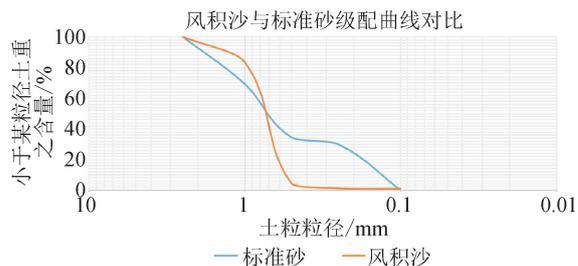
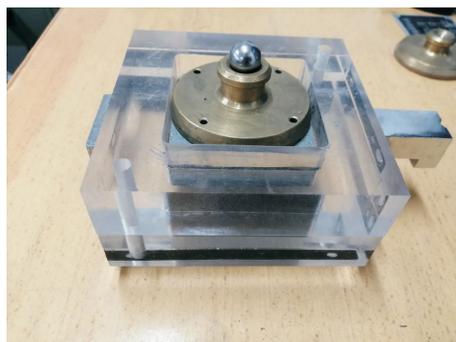


图 2 级配曲线
Fig.2 Classification curve

2 可视化试验

为了更好地观察剪切和压缩试验过程中土颗粒的位移及试样的变形情况,对直剪仪和压缩仪进行了可视化改进,改进后的试样盒见图 3。利用对比试验的方法,验证新型可视化试样盒的可靠性,并为后续分析提供图像和基本力学参数。



(a) 改进后的可视化直剪盒



(b) 改进后的可视化压缩盒

图 3 改进后的试验器材
Fig.3 Improved test equipment

2.1 直剪试验

利用改进后的直剪仪对风积沙进行直剪试验,并与常规直剪试验进行对比,试验曲线见图 4。由试验可得:改进后的可视化直剪盒所得结果与常规直剪试验结果基本一致,风积沙内摩擦角大约为 26° ,黏聚力在 1~3 kPa 范围内,风积沙的抗剪强度

主要靠其内摩擦力构成,黏聚力可以忽略不计。

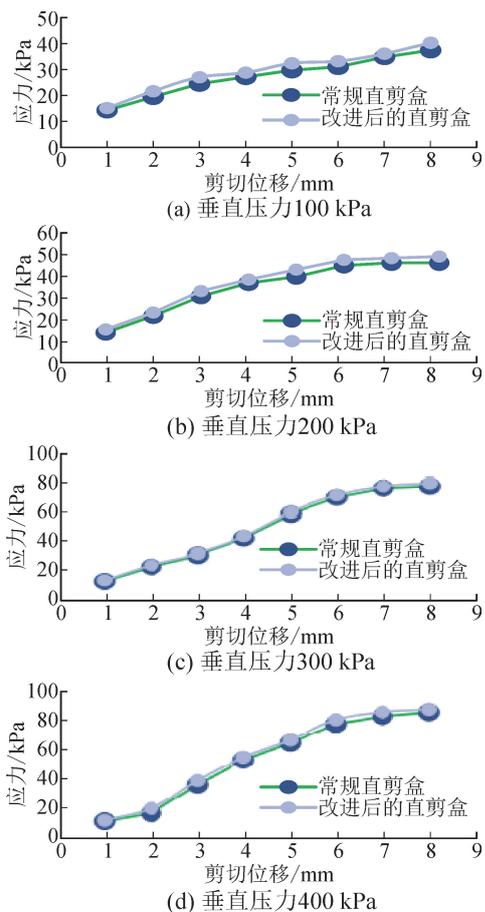


图4 不同垂直压力下的剪应力-位移曲线
Fig. 4 Stress-strain curve under different vertical pressures

将库布齐沙漠风积沙的抗剪强度指标与文献[8]中级配较好的砂土进行对比,见表1。可知砂土的内摩擦角不仅受不均匀系数影响,还与曲率系数有关,风积沙的不均匀系数较低,曲率系数小于1,与级配良好的砂土相比,内摩擦角小于级配良好的砂土。但随着土体密实度的增加,其抗剪强度有所提高。

表1 风积沙与级配良好砂土的对比

Tab.1 Comparison between aeolian sand and well graded sand

名称	不均匀系数	曲率系数	内摩擦角/°
砂1	5.5	1.44	28.09
砂2	7.07	1.19	30.57
风积沙	2.30	0.709	26.00

2.2 压缩试验

利用改进后的压缩仪对风积沙进行压缩试验,并与常规压缩试验进行对比,试验曲线见图5。由试验结果可知,改进后的可视化压缩盒所得结果与常规压缩试验结果基本一致。本次试验所使用的风积沙初始孔隙比在0.615左右,压缩系数为 0.25 MPa^{-1} 。

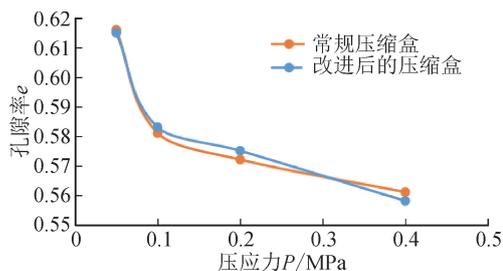


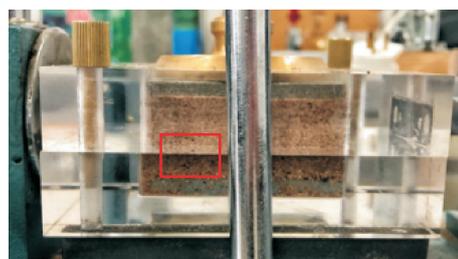
图5 改进前后压缩试验对比
Fig. 5 Comparison of improved front and rear compression tests

对比文献[9]中的结果可知,颗粒粗细越悬殊,试样压缩性越高,而细粒含量越多,压缩性越低。粒径的增大、粒径变化范围的拓宽、颗粒形态的不规则均会导致压缩性的升高。库布齐风积沙的颗粒粒径均匀,颗粒较细,因此压缩性较低。

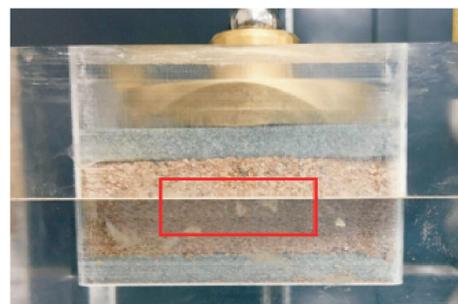
通过上述试验结果可知,改进后的可视化直剪仪与压缩仪,所得结果与常规土工试验仪器所得结果基本一致,证明了改进后仪器的可行性。

3 可视化数字图像分析研究

在可视化直剪与压缩试验过程中,采用高清数码相机对试验过程进行拍摄,并利用 PhotoInfor 软件对所采集照片进行数字图像分析。得到各级垂直荷载作用下风积沙剪切和压缩过程中研究区域内土体的位移和应变变化过程。图6中红色方框为 PhotoInfor 分析区域。



(a) 直剪试验分析区域



(b) 压缩试验分析区域

图6 可视化分析区域

Fig. 6 Visual analysis area

3.1 直剪试验

由于在施加不同法向应力的情况下得到的剪切

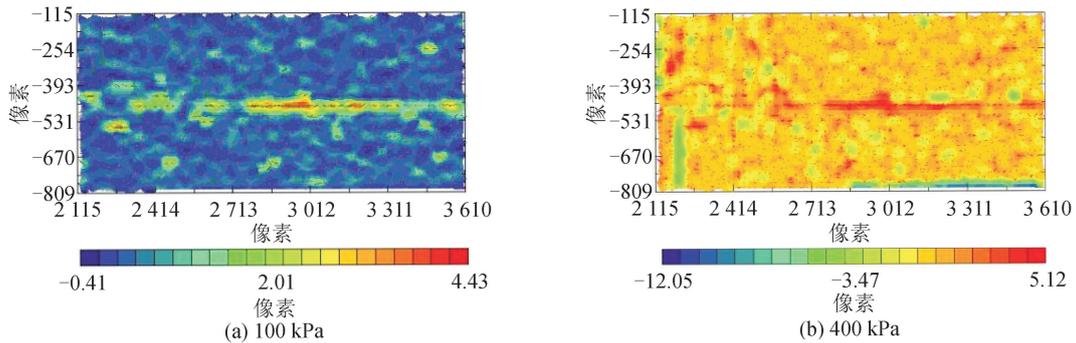


图7 直剪试验分析区域位移场云图

Fig. 7 Cloud map of regional displacement field analyzed by direct shear test

通过对最大剪位移云图分析发现,风积沙的剪切变形不均匀,表现为剪切接触处位移较大,上部和下部位移较小,且越远离接触面位移越小。在剪切接触面两边位移较小,中央位移较大。说明直剪破坏由剪切面中心开始,沿剪切面延申,最终形成一条贯穿的剪切带。试验还表明在不同法向荷载下试样

变形规律大致相同,此处以法向压力为 100 kPa 和 400 kPa 的试验结果为例进行分析,见图 7。

剪切变形的方向变化和剪切带的形成过程大致相同,这进一步验证了可视化仪器结果的可靠性。

3.2 压缩试验

图 8 为不同压力下压缩试验中的位移场云图。由图 8 可知分析区域内压缩变形由上透水石中间附近位置开始。

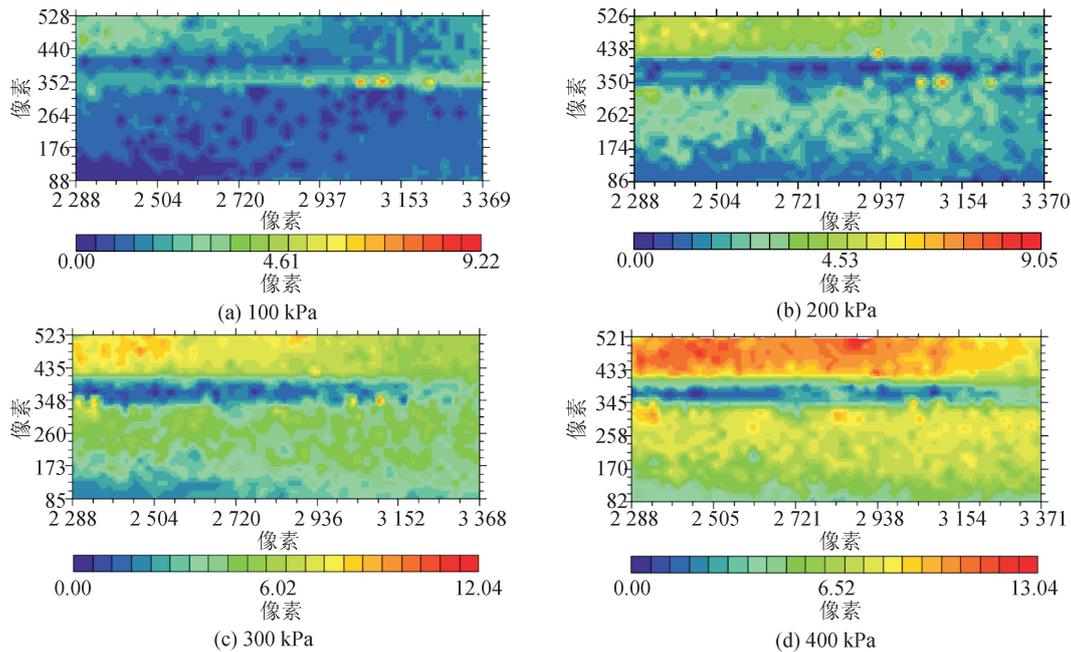


图8 不同压力下压缩试验分析区域位移场云图

Fig. 8 Regional displacement field cloud map of the compression test analysis at different pressures

中间蓝色区域位移量为 0 是由于上下盒之间的亚克力板反光造成,为不可避免误差,在任意荷载等级下此位置位移均为 0,因此可忽略此影响。由于风积沙颗粒均匀细小且无粘聚力,故土体颗粒均匀压缩,无论在何种荷载作用下,各个水平面的土体颗粒位移都大致相同。在任意一级荷载作用下,都是试样上部的位移变化最大,且中间位移相比边缘较大。随着荷载等级

的增大,风积沙颗粒间的变形带逐渐形成,试样上部位移场云图出现明显的弧形分布。且随着荷载的增加,位移变化也逐渐增大且变化范围逐渐向周围进行扩伸,整体位移呈规律性的增大。到了加荷后期,可以看出变形范围已经基本保持稳定,位移最大增量仍主要集中在试样整体上部的中间区域,向外拓展延伸的趋势减小,此时风积沙基本已压缩稳定。

4 细观数值模拟研究

为从细观方面进一步分析风积沙的力学特性,基于可视化力学试验结果,采用数值模拟软件 Particle Follow Code,简称 PFC,对直剪试验、压缩试验和三轴试验进行数值模拟。

由筛分试验结果可知,风积沙实际粒径范围为 0.075~0.25 mm,故数值模拟试验中拟生成风积沙颗粒粒径同样在 0.08~0.25 mm 范围内,赋予风积沙颗粒为黄色,赋予墙体为黑色,赋予坐标轴为棕色。给墙体赋予 10^8 N/m 的强度和刚度,设定风积沙的重度为 2650 N/m³,重力加速度为 9.8 m/s²,通过不断运行模型得出相应试验结果,使之与实际可视化直接剪切试验的结果进行对比,经过多次试算校核,得出较为准确的风积沙细观参数,最后确定风积沙强度、刚度均为 2×10^7 N/m,摩擦系数为 1.2。

4.1 直剪试验

建立七面墙作为约束的试验范围,模拟上下剪切盒生成两个封闭的区域。以应变控制式直剪仪的实际尺寸确定墙体长度,即整个剪切盒长度为 6.18 cm,高度为 4 cm,模拟二维平面内的直剪试验。上下两个剪切盒内各生成 3600 个风积沙颗粒。直剪试验数值模拟模型如见图 9。

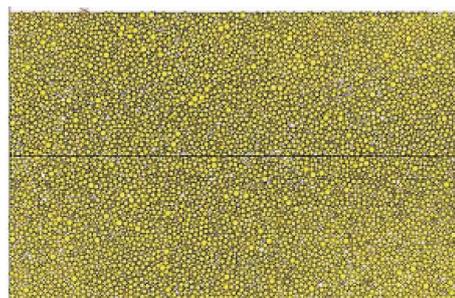


图 9 直剪试验数值模拟模型图
Fig. 9 Numerical simulation model diagram of direct shear test

由于 PFC2D 中无法通过命令流直接给墙体施加荷载,所以在模拟过程中,首先对顶部墙体施加竖直向下 1×10^{-7} m/s 的速度,使风积沙试样发生竖向压缩,从而土颗粒对墙体产生反力,经公式转化后的法向应力分别达到 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 时停止压缩,与之相对应的压缩量依次为 1.68 mm、2.32 mm、2.93 mm、3.50 mm。

控制剪切位移最大为 6 mm,记录垂直压力在 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 下风积沙颗粒间的接触力变化情况以及剪切应力与剪切位移的数值关系曲线,共进行四次模拟试验,得到如图 10 所示的试验数据。

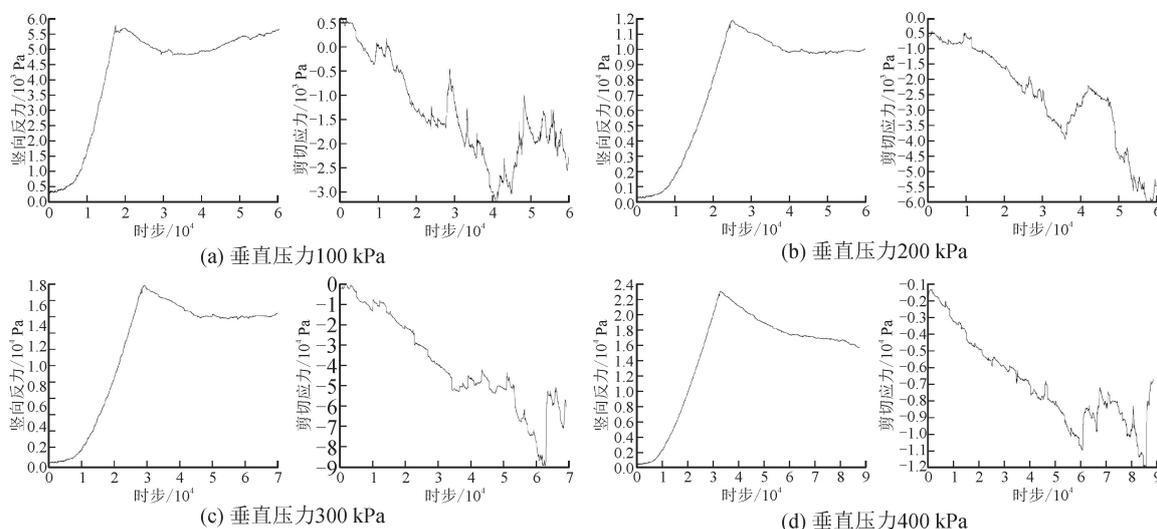


图 10 不同垂直压力下竖向反力和切应力变化曲线

Fig. 10 Change curves of vertical reverse force and shear stress under different vertical pressure

根据以上数据可以得出风积沙在进行数值模拟时,当垂直压力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 时对应的抗剪强度分别为 48 kPa、105 kPa、142 kPa、196 kPa,由此便可以绘制风积沙 PFC2D 数值模拟的剪切包线,见图 11。

由抗剪强度的库仑定律可以得出风积沙的黏聚

力为 2.5 kPa,内摩擦角为 25° 。由 PFC2D 数值模拟得出的试验结果与室内可视化直接剪切试验的试验结果很接近。与室内直接剪切试验相比,在数值模拟的过程中,为避免颗粒散落,在剪切面上增设了水平方向的两个墙体,可能是导致数值模拟试验结果中内摩擦角偏小、黏聚力偏大的主要原因。

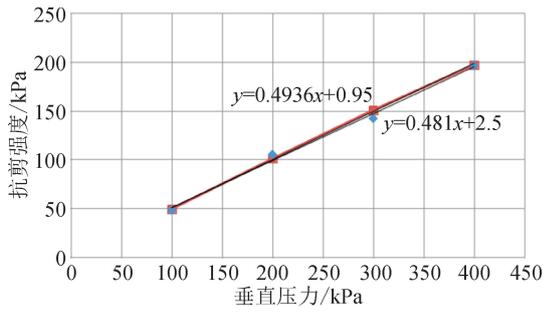


图 11 室内可视化直接剪切试验与 PFC2D 数值模拟抗剪强度包线对比

Fig. 11 Indoor visualization direct shear test being compared with PFC2D numerical simulated shear strength envelope

图 12 是直剪试验颗粒间的接触力链。由图 12 可知,剪切试验刚开始进行时,土样中颗粒分布分散,只有部分颗粒产生一定的位移。继续施加水平剪切力,上下盒发生错动开始产生剪切带,剪切带位于上下盒交界处。

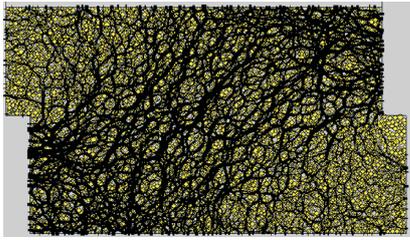


图 12 直剪试验的接触力链

Fig. 12 Contact force chain for the direct shear test

另外,剪切带随着接触面上的风积沙不断的平移、错动,最终稳定、贯通。在剪切过程中剪切带以上土颗粒向上竖直运动。推测土颗粒的移动是由于

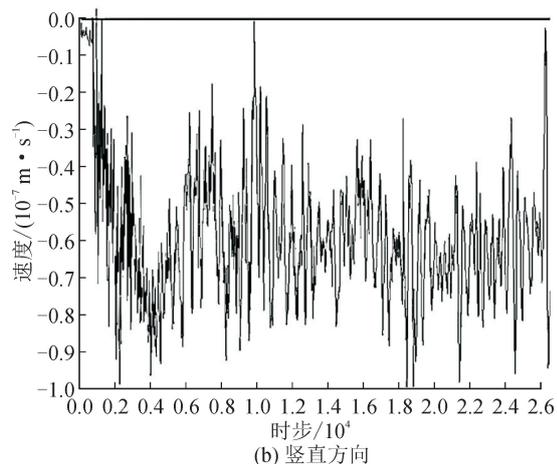
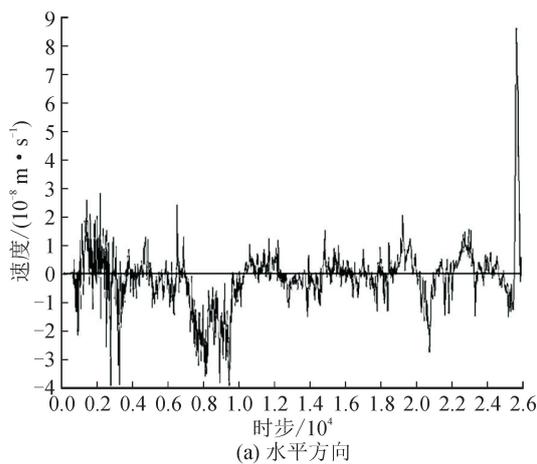


图 14 Ball 1 水平方向和竖直方向速度曲线

Fig. 14 Velocity curves of in horizontal and vertical direction of Ball 1

在模拟压缩过程中发现颗粒体水平方向的速度均比较小,少数颗粒会突变,而竖直方向速度基本等

在剪切过程中,土颗粒之间相互挤压造成,表现为剪胀性。直剪试验完成后可以观察到接触力链呈对角分布,角度大致为 45° 。颗粒细观运动结果与可视化直剪试验得到的宏观力学现象相一致。

4.2 压缩试验

建立四面墙作为约束的试验范围,以压缩仪的实际尺寸确定墙体长度,即长度为 6.18 cm,高度为 2 cm,模拟二维平面内的压缩试验。由于不能直接对边界墙施加荷载,故对顶面墙体施加 y 轴负方向 $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 的速度,将速度等效替代垂直压力,便可以模拟压缩试验,并监控测量墙体随试验进行在竖直方向的反力,即压缩试验的荷载,控制最大压缩量为 4 mm。在试样范围内设置三个测量圆,测定压缩过程中土体孔隙率的变化。得出压缩荷载、孔隙率随压缩进程的变化曲线,经过公式转换,达到孔隙比与荷载之间的关系曲线,即 $e-p$ 曲线,得出风积沙的压缩特性。压缩试验数值模拟模型见图 13。

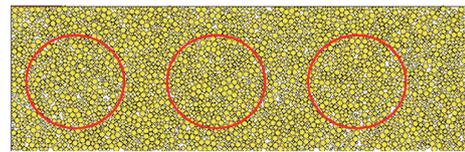


图 13 压缩试验颗粒模型图

Fig. 13 Model of compression test

对三个代表颗粒 Ball 1($x=0.01, y=-0.01$)、Ball 2($x=0.02, y=-0.01$)、Ball 3($x=0.03, y=-0.01$)的水平速度、竖直速度进行监控。限于篇幅,此处只列出 Ball 1 图,见图 14。

同于压缩速度。见图 15。

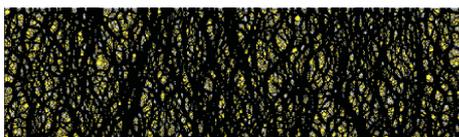


图 15 压缩后颗粒接触力链

Fig. 15 Grain contact force chain after compression

同一高度上的颗粒体水平方向的位置变化很小,而高度越靠上的颗粒体竖直方向位置下降情况越明显。颗粒细观运动结果反映了宏观变化的内在机理。压缩结束后模型应力链呈倾斜的散乱分布,倾角与水平面小于 45° ,中部较为密集,两边稍疏。

由于 PFC2D 是二维平面范围内的数值模拟,其生成的所有颗粒形心全部处于同一平面内。相反,PFC3D 模型生成的颗粒情况并不是这样,而是更接近于室内可视化试验实测的孔隙率,因此 PFC3D 模型中生成的颗粒间孔隙率要远大于 PFC2D 模型生成的颗粒间孔隙率。研究表明,用相同的球体填充 PFC 墙体范围时,在球与球之间接触十分紧密的情况下,PFC3D 生成的颗粒间孔隙率是 0.259 5,PFC2D 模型生成的颗粒间孔隙率是 0.093 1。即室内可视化试验的实测孔隙率是 PFC2D 模型生成的颗粒间孔隙率的 2.787 倍,本论文中采用该系数进行孔隙率转换,再进行两者的对比分析, $e-p$ 曲线见图 16。

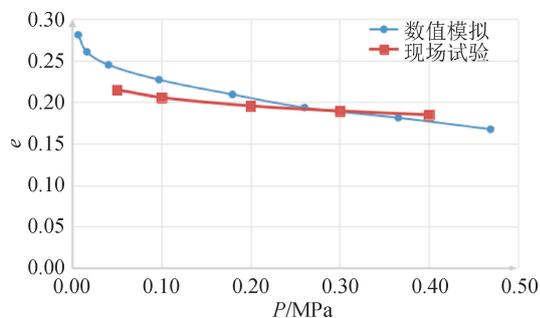


图 16 现场试验与模拟试验 $e-p$ 曲线对比

Fig. 16 Comparison of $e-p$ curve of field test and simulation test

从整体上讲,数值模拟得出的试验结果与室内可视化压缩试验的试验结果比较接近。室内试验的 $e-p$ 曲线变化幅度较小,而数值模拟试验的 $e-p$ 曲线变化幅度较大,造成这种现象的主要原因是风积沙的初始孔隙率不同以及压缩速率不同。

4.3 三轴试验

为更好地了解风积沙在剪切过程中的细观变化,使用 PFC3D 进行了三轴试验的离散元数值模拟研究。三轴试样的高度和横截面的直径的长度比为 2 : 1,因此模拟三轴试样的高度也应该是横截面直径的二倍。又因为要考虑进行模拟验算时计算机

所能承担的最大计算量,最终假定的三轴试样尺寸为直径 15 mm,高 30 mm,见图 17。

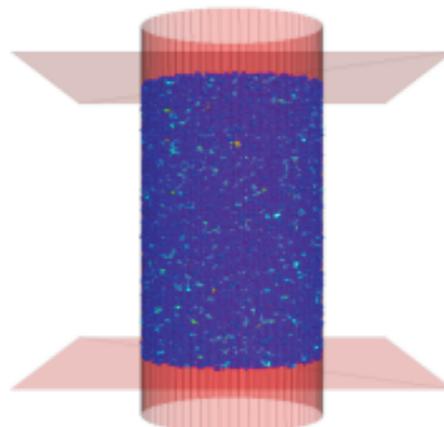


图 17 三轴试验数值模拟建模图

Fig. 17 Numerical simulation and modeling diagram of the triaxial test

PFC3D 在运行结束之后会获得有关土颗粒的多组图像,如颗粒的速度矢量图、位移矢量图、接触力分布图等。这些图像对试验结果处理有着很重要的作用。图 18~20 为围压 100 kPa 下各应力的变化曲线。

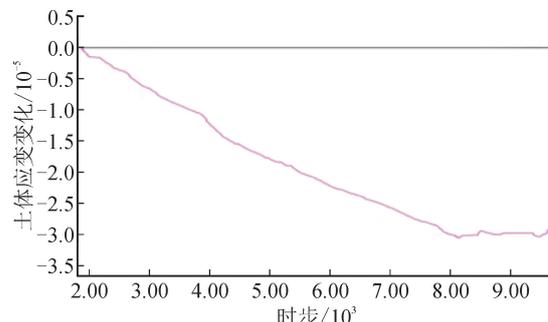


图 18 土体应变变化

Fig. 18 change of soil strain

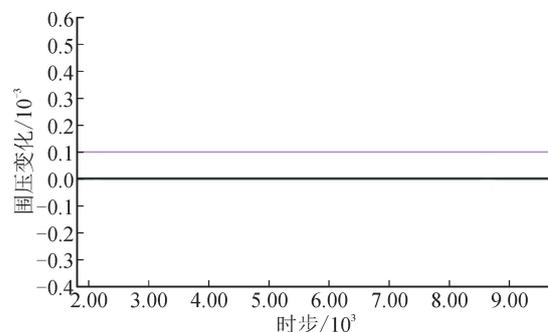


图 19 围压变化

Fig. 19 Surrounding pressure changes

本试验以围压为 50 kPa,100 kPa,200 kPa 下的轴向应力应变情况的观测为主,发现其对应的最大剪应力分别为 142 kPa,252 kPa,366 kPa,且各围

压下风积沙轴向应力应变情况趋势相同,只是大小有所不同。

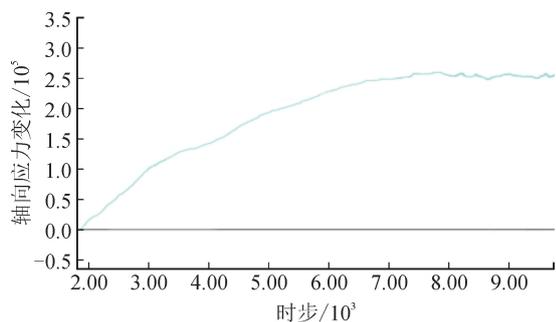


图20 轴向应力变化

Fig. 20 Changes in axial stress

5 结论

1) 在误差允许范围内,经过改进的方形可视仪器具有可行性,且在试验观测上具有其独特的优势。

2) 由宏观试验可知,库布齐沙漠的风积沙存在着结构松散、级配不良、孔隙率大、透水性强、保水性较差、水稳性好、粘聚力小甚至无粘聚力、抗剪强度低的特点。

3) 在剪切过程中,风积沙颗粒初期分布散乱,大粒径颗粒先发生运动,逐步形成稳定、贯通的剪切带,且具有剪胀性。

4) 压缩过程中,颗粒体水平方向的速度均比较小,少数颗粒会突变,而垂直方向速度基本等同于压缩速度。同一高度上的颗粒水平方向的位置变化很小,土体的压缩主要发生在土样的上部。

由风积沙微观力学试验可知,风积沙的抗剪强度会随着土体密实度的提高而提高。风积沙的压缩性较低,且压缩变形主要集中在土体上部。因此在工程实践中,可以通过压实浅部土体的方法,来提高强度,减小变形,满足工程对强度和变形的要求。

参考文献:

[1] 张俊. 临河过境高速公路利用风积沙处理不良路基技术研究[D]. 西安:长安大学,2012.
ZHANG Jun. The beltway highway use of aeolian sand processing bad subgrade technology research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[2] 张宏,王智远,刘润星. 科尔沁沙漠区风积沙动力压实特性研究[J]. 岩土力学,2013,25(增刊2):45-49.
ZHANG Hong, WANG Zhiyuan, LIU Runxing. Research on dynamic compaction characteristics of aeolian sand in desert region of Keerqin[J]. Rock and Soil Me-

chanics, 2013, 25(S2): 45-49.

- [3] 王丽英,骆文进,王红梅,等. 盐-冻耦合作用下水泥基风积沙改性土基坑填料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020,39(9):2912-2918.
WANG Liying, LUO Wenjin, WANG Hongmei, et al. Performance of foundation pit filler with cement-based drift-sand modified soil under salt-freeze coupling effects [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39 (9): 2912-2918.
- [4] 阮波,郑世龙,丁苗,等. 低温养护条件下水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020,17(10):2540-2548.
RUAN Bo, ZHENG Shilong, DING Hui, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of cement-stabilized aeolian sand cured at low temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2540-2548.
- [5] 张飞阳. 低含水率下风积沙地基的抗拔承载特性[J]. 科学技术创新,2020(30):154-155.
- [6] 吴克雄,宋向荣,李顺凯,等. 西北地区高性能风积沙固化剂的研制及工程应用[J]. 新型建筑材料,2020,47(10):60-64.
WU Kexiong, SONG Xiangrong, LI Shunkai, et al. Development of high performance curing agent of aeolian sand in northwest China and its engineering application[J]. New Building Materials,2020,47(10):60-64.
- [7] 董瑞鑫,申向东,薛慧君,等. 干湿循环与风沙吹蚀作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性[J]. 材料导报, 2020,34(20):20053-20060.
DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Sulfate durability of aeolian sand concrete under dry-wet cycles and sand blowing[J]. Materials Review, 2020,34 (20): 20053-20060.
- [8] 郭鸿,陈茜. 颗粒级配对砂土剪切特性的影响及微观机理研究[J]. 人民长江, 2017,48(11):86-91.
GUO Hong, CHEN Xi. Effect of particle gradation on shear prosperities of sandy soil and its microscopic mechanism[J]. Yangtze River. 2017.48(11):86-91.
- [9] 乐天呈,顾颖凡,刘春,等. 级配与颗粒形态对砂土压缩性影响的试验和离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2018,26(增刊1):539-546.
LE Tiancheng, GU Yingfan, LIU Chun, et al. Experiment and DEM numerical simulation for influence of particle size distribution and shape on compressibility of sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26 (S1): 539-546.

(责任编辑 王绪迪)