

# 基于离散元法的边坡填土剪切性能分析

匡俊<sup>1,2</sup>, 陈芋如<sup>3</sup>, 朱仁民<sup>1,2</sup>, 曹建林<sup>1,2</sup>, 周俊<sup>1,2</sup>, 唐强<sup>3\*</sup>, 孙俊芳<sup>3</sup>

(1. 江苏苏州地质工程勘察院, 江苏 苏州 215011; 2. 江苏地质矿产局第四地质大队, 江苏 苏州 215004;  
3. 苏州大学, 江苏 苏州 215131)

**摘要:** 为了从微观角度分析边坡填土剪切性能的影响规律, 以苏州市科技城凤凰山弃土场为研究对象, 从现场取得的样品中将试样大体分为4种级配, 利用颗粒流离散元软件构建直剪试验模型, 研究关于剪切位移、剪切带以及接触网络的微观特征演化规律。研究表明, 试样在剪切过程中表现出应变软化和屈服的特点。当试样进入剪切后期, 剪应力达到峰值, 其中中值粒径最大的杂填土试样的抗剪强度最高, 峰值剪切应力达到327.74 kPa; 颗粒位移呈水平带状分布, 形成剪切带, 宽度为1.52 cm左右; 同时, 力链网络中强力链显著聚集, 与水平方向大约呈60°夹角, 最大接触力达到1 578.5 kN; 随着中值半径的减小, 剪切带的宽度以及最大接触力不断减小。在级配不良的样品内部, 颗粒之间的嵌挤作用较弱, 使得颗粒之间容易形成相对剧烈的相互错动。因此, 黏性土中值粒径最小, 剪切带宽度最小, 最大的接触力最小, 最容易发生剪切破坏。

**关键词:** 边坡; 直剪试验; 离散元方法; 级配; 中值粒径; 剪切带; 力链网络; 最大接触力

中图分类号: TU413

文章标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0380-07

## Analysis of shear performance of slope fill based on discrete element method

KUANG Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-ru<sup>3</sup>, ZHU Ren-min<sup>1,2</sup>, CAO Jian-lin<sup>1,2</sup>, ZHOU Jun<sup>1,2</sup>, TANG Qiang<sup>3\*</sup>,  
SUN Jun-fang<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Suzhou Geological Engineering Survey Institute, Suzhou 215011, Jiangsu, China;

2. The Fourth Geological Brigade of Jiangsu Geological and Mineral Bureau, Suzhou 215004, Jiangsu, China;

3. Soochow University, Suzhou 215131, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of the shear behavior of the slope fill from micro-level, this paper takes Fenghuangshan abandoned soil site in Suzhou Science and Technology City as the research object. The samples obtained from the field were roughly divided into four gradations. The direct shear test model was constructed by using particle flow discrete element software to study the evolution of the microscopic characteristics of shear displacement, shear band and contact network. The results show that the specimens exhibit strain softening and yield characteristics during shearing. When the samples entered the later stage of shearing, the shear stress reached the peak value. Among them, the hybrid fill sample with the largest median particle size has the highest shear strength, and the peak shear stress reached 327.74 kPa. The particle displacement is distributed in a horizontal band, forming a shear band with a width of about 1.52 cm. At the same time, the strong chain in the force chain network is significantly gathered, forming an angle of about 60° with the horizontal direction, and the maximum contact force reached 1 578.5 kN. The width of the shear band and the maximum contact force decrease with the decrease of the median radius. In the sample with poor gradation, the entrapment effect between particles is weak, which makes it easy to form relatively violent mutual dislocation between particles. Therefore, the cohesive soil has the smallest median particle size, the smallest shear band width, the smallest maximum contact force, and the most prone to shear failure.

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078317); 江苏省自然科学基金(优秀青年基金项目)(BK20211597); 苏州市建设系统科研项目(2021-25, 2021ZD02, 2021ZD30); 江苏省地质矿产勘查局科技项目(2021KY06)。

作者简介: 匡俊(1976—), 男, 湖南祁东人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质工程三维信息系统工作。E-mail: 85236715@qq.com。

\*通信作者: 唐强(1985—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程工作。E-mail: tangqiang@suda.edu.cn。

**Key words:** slopes; direct shear test; discrete element method; gradation; median size; shear band; force chain network; maximum contact force

## 0 引言

边坡土因其在工程上的特殊性,如常见的不均匀、欠固结以及湿陷等问题,对工程安全存在较大威胁<sup>[1]</sup>。室内直剪试验以其仪器构造简单、操作便捷等优点成为广大学者分析土体抗剪强度及力学性能的重要方法。然而考虑到土体颗粒的相对位移和旋转以及土体内部微观机理的研究,室内直剪试验还存在较大的局限性<sup>[2-3]</sup>。

近年来,随着计算机技术不断发展,颗粒流离散元等数值软件在研究颗粒间接触应力和应变问题中发挥了重要作用,并且广泛应用于模拟室内及原位土工试验<sup>[4-6]</sup>。颗粒流离散元模拟区别于传统基于连续介质力学理论的有限单元法,以其更能真实表达土体的几何特点以及处理土体非线性变形和破坏问题而受到岩土工程行业的推广<sup>[7-9]</sup>。

不同级配对边坡填土的抗剪性能的影响程度不同。魏明鉴等<sup>[10]</sup>、饶为国等<sup>[11]</sup>、杨升等<sup>[12]</sup>的研究表明,级配对土体的工程力学特性具有重要影响,土体的变形破坏发展受其内部含石量控制,进而影响填土的宏观物理力学性质。因此,如何将颗粒级配对土体抗剪性能的影响与研究颗粒间接触应力应变问题相结合是亟待研究的课题。

本文利用颗粒流离散元软件模拟室内直剪试验,观察土体剪切破坏的变化过程,探究级配对边坡不同土层的抗剪性能的影响程度。同时,从细观层面对剪切过程中试样的剪切带以及接触应力力链网络的变化进行了分析,有助于更好地理解土的宏细观力学机理。

## 1 工程概况

苏州市科技城凤凰山弃土场位于高新区元方路和逢春路交叉口西侧,原凤凰山采石宕口,具体交通位置图如图1所示。该宕口在填满过程中缺乏专业性设计,基本处于半无序堆填状态,且填土成分非常复杂,有建筑垃圾、装修废弃材料、素填土和少量生活垃圾,缺乏压实度控制。经现场勘察发现,堆场局部存在经雨水冲刷、下渗等作用而发生的小范围坍塌破坏现象,边坡多处出现明显的蠕滑破裂缝隙(缝隙宽度在5~20 mm左右),表明土体已开始变形向下推移。坡顶蠕动变形情况如图2

所示。鉴于上述情况,科技城凤凰山宕口边坡区域存在一定量的不良地质作用(滑坡)现象。



图1 弃土场交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of spoil yard



图2 边坡坡顶蠕动变形

Fig. 2 Creep deformation of slope top

经现场勘察,拟建场地的土体主要分为人工填土、残坡积形成的含砾、碎石的黏性土以及早期的石英斑岩。场地内土体按其工程特性的差异性,自上而下可划分为6个工程地质层,分别为:①<sub>1</sub>杂填土,①<sub>2</sub>素填土,②含砾粉质黏土,③含碎石粉质黏土,④全风化石英斑岩,⑤强风化石英斑岩以及⑥中等风化石英斑岩。

为充分考虑弃土场边坡特征,明确治理目标,保证坡脚城市道路及拟建工程的安全,本文利用颗粒流离散元软件模拟直剪试验研究不同级配对边坡不同土层的剪切性能的影响。选用的样品分别来自边坡自上而下的4种土层。这4种土层由于处于滑裂面上方,因而极易受外界影响而发生扰动。在现场取样过程中,在坡顶、坡中、坡脚等多处进行取点,取样范围广,每处点钻5个孔,将样品收集在一起,样品数量大,从而使样品具有代表性。边坡断面图如图3所示,试样的颗粒级配曲线如图4所示。

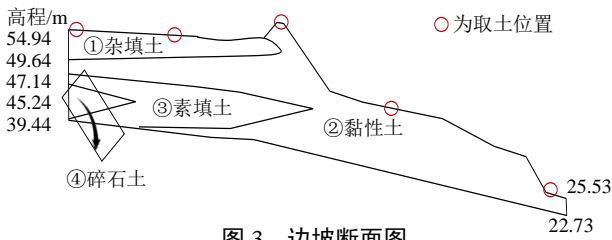


图3 边坡断面图

Fig. 3 Diagram of the slope section

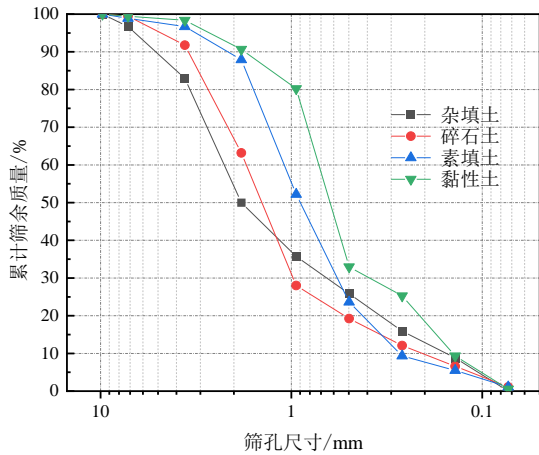


图4 不同试样的颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle grading curves of different specimens

## 2 直剪试验的离散元模拟

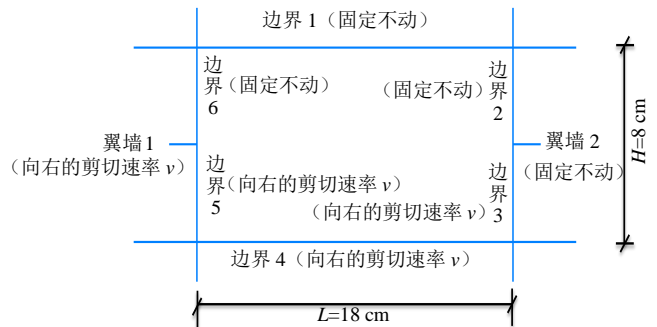
利用颗粒流离散元软件 PFC2D 5.0 中模拟室内直剪试验的二维剪切模型。参考苏永华等<sup>[13]</sup>的研究,在建模过程中,ball-ball 接触与 ball-facet 接触会贯穿始终,因此接触采用线性弹性模型进行模拟,基于室内直剪试验数据对边坡土层的细观接触参数进行标定,模拟过程中不断调整颗粒细观力学参数,当标定后的参数值所表现的级配碎石宏观力学特征(如抗剪强度、剪切位移与剪切应力关系等)与室内试验研究成果基本吻合时完成标定。标定后的细观力学参数如表 1 所示。

表 1 模型的细观力学参数

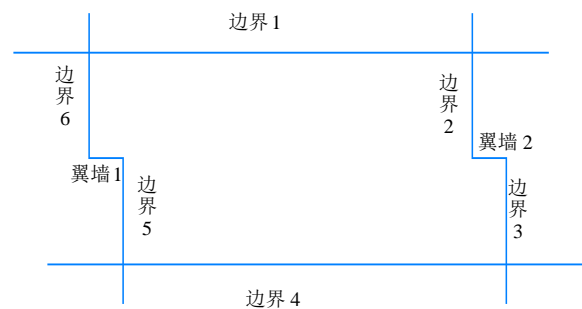
Table 1 Micro-parameters of the model

细观参数	填土
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 650
颗粒直径/mm	0.1~10
颗粒法向接触刚度/MPa	2
颗粒切向接触刚度/MPa	2
墙体法向接触刚度/MPa	5
墙体切向接触刚度/MPa	5
摩擦系数	0.3
阻尼系数	0.7

为了使得颗粒流离散元模拟的颗粒级配与填土抗剪强度的影响与实际级配匹配度更高,软件中采用的颗粒粒径范围与室内试验相同。通过生成 6 个墙体单元和 2 个翼墙单元模拟实际的剪切盒,圆柱形剪切盒的模型尺寸为 18 cm×8 cm (直径×高度),剪切盒模型如图 5 (a) 所示,共生成 27 730 个颗粒。引入软件中的伺服机制控制墙体的运动,模拟 500 kPa 法向应力的加载。在固结过程中不断调整顶部墙体约束速度,使由于重叠量造成的颗粒过大的内部应力达到平衡状态。随后沿直径方向对上下八面墙体以及左右两面翼墙施加恒定的剪切速率,保持上盒不动,对下盒施加剪切速率  $v$ ,大小为 0.01 mm/min,当剪应力大小无显著变化时可认为试样已受到破坏,此时剪切停止。剪切后模型图如图 5 (b) 所示。



(a) 剪切盒模型图



(b) 剪切后模型图

图 5 剪切前后模型图

Fig. 5 Model diagram before and after shearing

通过分析直剪过程中的剪应力可评价试样的剪切力学性能。试样的剪切应变由墙体的切向位移确定,由式 (1) 所示,剪切面上的切向力  $F_s$  为:

$$F_s = \sum_{i=1}^n F_{xi} \quad (1)$$

式中:  $F_{xi}$  为填土颗粒与上剪切盒内壁的接触力沿剪切方向的分量;  $n$  为上剪切盒的墙数。

则剪切应力 $\tau^{[14]}$ 为:

$$\tau = \frac{F_s}{L(L-v_s t)} \quad (2)$$

式中:  $L$  为剪切盒直径;  $v_s$  为剪切速率;  $t$  为剪切经历的时间。

### 3 结果与分析

#### 3.1 剪切位移分析

对参数标定后的离散元模型在 500 kPa 法向应力作用下的 4 种不同土层级配的边坡填土试样进行模拟, 得到剪切应力-剪切位移曲线。如图 6 所示。

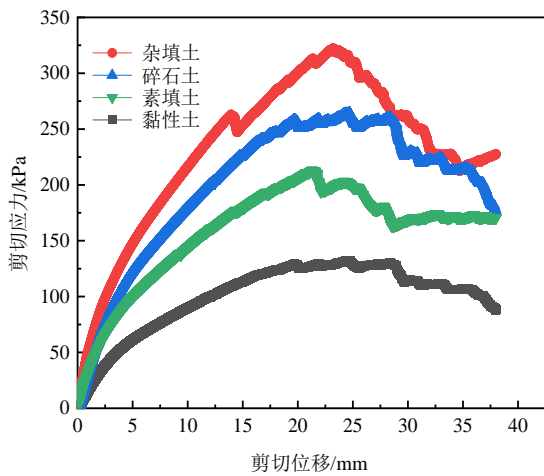


图 6 剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves

由图 6 可知, 随着时间的推移, 试验的剪切应力随剪切位移呈线性增长; 当剪切位移为 23 mm 左右时, 试样达到应力峰值, 随后出现应变软化现象, 说明试样剪切过程中在达到一定的剪切位移后将表现出屈服的特征; 同时, 杂填土的抗剪强度最高, 峰值剪切应力达到 327.74 kPa。由图 4 颗粒级配曲线可知, 杂填土级配曲线最缓, 中值粒径最大, 试样的抗剪强度与中值粒径的大小呈正相关。这是由于较高的细颗粒含量在剪切过程中因相互错动并且不断排列更新而形成较大的孔隙, 对填土的抗剪强度有明显的削弱, 反之, 中值粒径大的级配填土拥有更强的抵抗剪切变形能力。

以杂填土为研究对象, 监测并记录试样剪应力与剪切位移的变化情况并与实际值进行对比, 模拟值与实际值对比曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, 在整个剪切阶段, 模拟值与实际

值曲线在剪切位移达到 15 mm 前趋势相同。到剪切后期, 由于模拟试样和实验试样松散剪切应力-剪切的曲线模拟值略大于实际值, 容易形成相对运动, 颗粒沿直径方向出现位移和变形加大, 周围墙体对于内部颗粒应力变化更加敏感, 颗粒相互之间微小的触碰或摩擦都会造成剪应力的瞬时增大, 最终导致试样的模拟应力峰值要比实际应力峰值大。

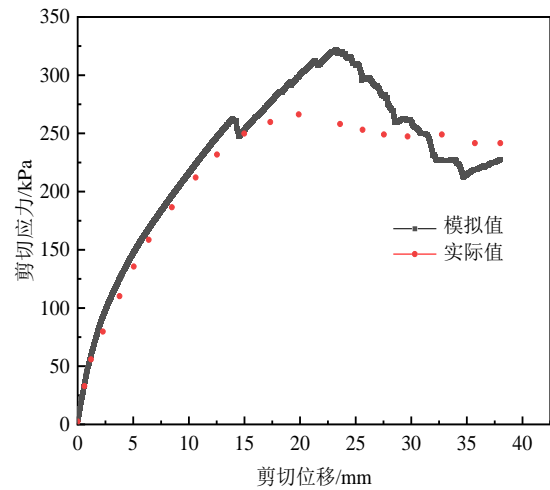


图 7 模拟值与实际值对比曲线

Fig. 7 Simulated curve versus real curve

#### 3.2 剪切带分析

剪切带的形成发展是土体局部变形特性的重要体现<sup>[15]</sup>。采用杂填土的级配试样, 在 500 kPa 的恒定法向应力下进行剪切模拟, 观察剪切过程中颗粒的位移以及剪切带的形成与发展。在整个剪切过程中, 上盒固定速度为零, 对下盒施加向右的速率  $v$ , 上盒中的颗粒在与下盒发生相对运动的过程中发生了一些错动, 但相对下剪切盒中颗粒的位移可忽略不计。颗粒位移图如图 8 所示, 在剪切前期 (图 8 (a)) 试样内部颗粒均匀分布, 未出现较大的位移和变形; 当进入剪切中期时 (图 8 (b)), 剪应力上升, 上下剪切盒之间发生相对位移, 颗粒沿剪切盒径向出现位移和变形, 且由试样中心向两端逐渐增大; 当进入剪切后期 (图 8 (c)), 达到峰值剪应力, 颗粒位移主要在下盒, 中部绿黄色水平带状区域为上下盒颗粒相互错动形成的运动界面, 即为该试样的剪切带, 取剪切盒两侧以及中部三处剪切带位置, 最上部与最下部颗粒的纵坐标之差即为剪切带厚度, 最终计算得到的平均厚度为 1.52 mm 左右。

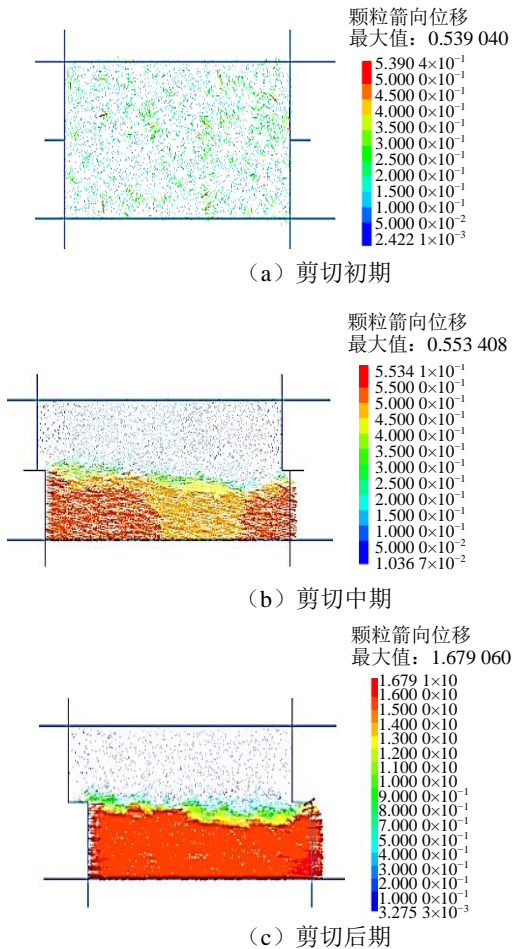


图8 剪切过程中颗粒位移图

Fig. 8 Particle displacement during shearing

### 3.3 力链网络分析

土体具有非连续和接触耗散等特点,土体颗粒内部的接触应力互相错综复杂地交织连接逐渐形成能够传递荷载的通道,即力链网络<sup>[6]</sup>。利用颗粒流离散元软件观察剪切过程中的颗粒力链网络,进而研究土体的微观力学机理。

图9为剪切过程中杂填土的级配试样在500 kPa法向应力下力链网络发展过程,力链的粗细程度代表接触应力的大小。剪切开始时(图9(a)),在恒定的剪切速率之下,剪切盒开始移动试样内部的强弱力链错综交织形成完整的力链网络;当进入剪切中期时(图9(b)),剪应力上升,力链网络开始重组,强弱力链沿着剪切盒对角线的方向发展;当进入剪切后期时(图9(c)),强力链减少并显著聚集成更加完整的一条,分布方向与水平方向大约呈60°,最大接触力达到1 578.5 kN。这是因为大部分强力链由于剪切导致的试样破坏而断裂消失,其余较弱的力链横向分布于试样的剪切带附近。

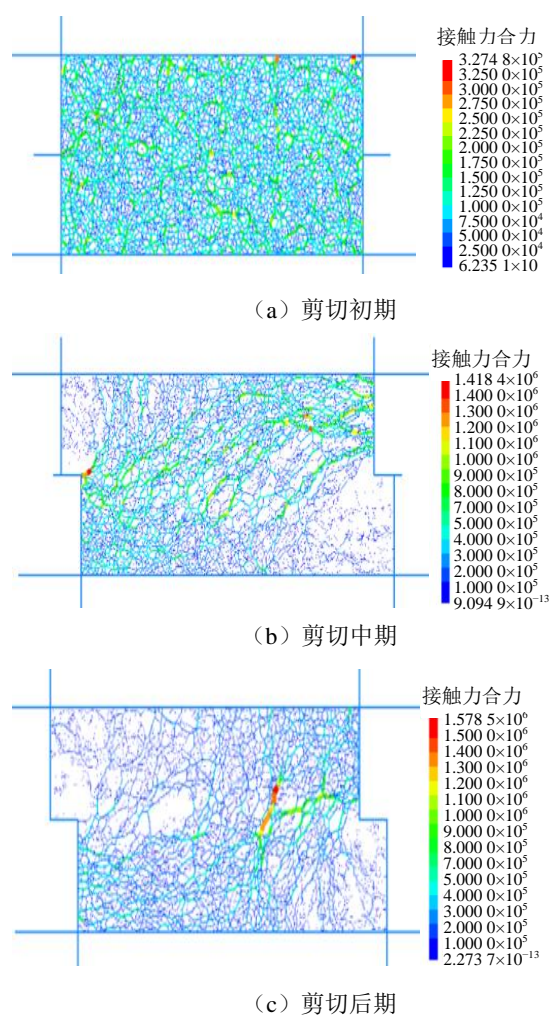


图9 剪切过程力链网络图

Fig. 9 Force chain network diagram of shearing process

### 3.4 讨论

利用离散元对直剪试验模拟研究发现,其余3种土层的级配试样在剪切过程中的剪切带与力链网络的演变规律大致相同。图10为4种不同级配情况下的剪切带宽度和力链网络最大接触力结果的对比关系。

由图10(a)所示,4种不同级配下的试样随着中值粒径的减小,本质上是整体粒径逐渐减小的过程。粒径减小后,剪切带范围内颗粒相对滑动的影响范围相应缩小,因此剪切带的宽度是逐渐减小的。图10(b)中,随着样品中值粒径的减小,粒间最大接触力不断减小。说明在粗颗粒含量高且粒径分布均匀的样品内部,颗粒之间具有较强的相互作用,颗粒间的最大接触力也更大。同时在级配不良的样品内部,颗粒之间的嵌挤作用较弱,颗粒之间容易形成相对剧烈的相互错动,样品更容易发生整体剪切破坏。

综上所述,黏性土中值粒径最小,剪切带宽度最小,最大的接触力最小,最容易发生剪切破坏。

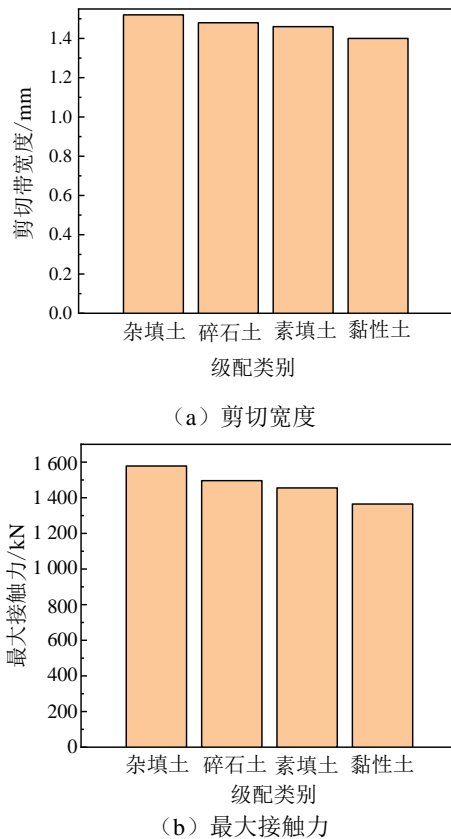


图 10 4 种级配情况下的剪切带宽度和力链网络最大接触力结果的对比关系

Fig. 10 Comparison between shear band width and maximum contact force of force chain network under four gradation conditions

## 4 结 论

本文以苏州市科技城凤凰山弃土场为研究对象,利用颗粒流离散元软件构建直剪试验的模型,研究颗粒运动、剪切带、接触网络等宏微观特征的演化规律,得出以下结论:

(1) 当剪切位移为 23 mm 左右时,试样达到应力峰值。杂填土的抗剪强度最高,峰值剪切应力达到 327.74 kPa,试样的抗剪强度与中值粒径的大小呈正相关。

(2) 在直剪初期阶段,剪应力随着剪切位移线性增长,试样内部颗粒分布均匀,无较大位移和变形。同时,强弱力链错综交织形成完整的力链网络。

(3) 当进入剪切后期时,试样达到应力峰值后表现出应变软化和屈服的特点。剪切带主要集中在试样中心的水平带状范围内,宽度为 1.52 cm 左

右。同时力链网络发生重构,颗粒力链网络中强力链显著聚集,分布方向与水平方向大约呈 60°。

(4) 随着中值半径的减小,剪切带的宽度以及最大接触力不断减小。黏性土中值粒径最小,剪切带宽度最小,最大的接触力最小,最容易发生剪切破坏。

## 参考文献

[1] 王琪琪, 黄娟, 杨建军. 雨水浸润后黄土边坡稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 1-9.  
WANG Qi-qi, HUANG Juan, YANG Jian-jun. Stability analysis of loess slopes after rainfall infiltration[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 1-9.

[2] 张军, 崔会宁. 邻近边坡偏压深基坑开挖效应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 34-41.  
ZHANG Jun, CUI Hui-ning. Analysis of the effect of deep foundation excavation by adjacent slope deflection[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 34-41.

[3] 蒋茂林, 陈文胜, 戴嘉宁, 等. 考虑边坡渐进破坏的分区计算模型[J]. 交通科学与工程, 2021, 36(4): 54-60, 68.  
JIANG Mao-lin, CHEN Wen-sheng, DAI Jia-ning, et al. Calculation model for zoning considering progressive slope failure[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 36(4): 54-60, 68.

[4] 向延虎, 江威. 降雨条件下含裂隙坡积土边坡的渗流特性研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 29-34, 39.  
XIANG Yan-hu, JIANG Wei. Study of seepage characteristics of slopes containing fissured slope deposits under rainfall conditions[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 29-34, 39.

[5] SUN J, TIAN A, FENG Z, et al. Evaluation of zero-valent iron for pb (ii) contaminated soil remediation: from the analysis of experimental mechanism hybrid with carbon emission assessment[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 452.

[6] SUN J, CHEN J, LIAO X, et al. The workability and crack resistance of natural and recycled aggregate mortar based on expansion agent through an environmental study[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 491.

[7] WANG W, ZHANG C, LI N, et al. Characterisation of nano magnesia-cement-reinforced seashore soft soil by direct-shear test[J]. Marine Georesources &

- Geotechnology, 2019, 8(37): 351.
- [8] FAN H, SUN S, LE H, et al. An experimental and numerical study of diorite-porphyrites with different weathered degree in the direct shear test[J]. Original Research Article, 2020, 24(1): 352.
- [9] 戴继光. 基于 PFC3D 的玉米籽粒离散元参数研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(16): 22-26.  
DAI Ji-guang. Discrete meta-parameter study of maize seeds based on PFC3D[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(16): 22-26.
- [10] 魏明鉴, 许平, 周陶勇, 等. 基于离散元法的道砟胶固化道床力学特性模拟[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 92-97.  
WEI Ming-jian, XU Ping, ZHOU Tao-yong, et al. Simulation of mechanical properties of ballast adhesive cured roadbed based on discrete element method[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 92-97.
- [11] 饶为国, 张丰尧, 杨迪. 基于 PFC2D 的密砂直剪试验数值模拟[J]. 河南科技, 2018, 6(35): 113-115.  
RAO Wei-guo, ZHANG Feng-yao, YANG Di. Numerical simulation of dense sand direct shear test based on PFC2D[J]. Henan Science and Technology, 2018, 6(35): 113-115.
- [12] 杨升, 李晓庆. 基于3维离散元颗粒流的土石混合体大型直剪试验模拟分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 78-85.  
YANG Sheng, LI Xiao-qing. Large-scale direct shear test simulations of soil-rock mixtures based on 3-dimensional discrete element particle flow[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 78-85.
- [13] 苏永华, 王栋. 基于离散元法的砂石混合体直剪试验结果分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 97-104.  
SU Yong-hua, WANG Dong. Analysis of the results of direct shear tests on sand and gravel mixes based on the discrete element method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 97-104.
- [14] 华文俊, 肖源杰, 王萌, 等. 级配与颗粒形状对复杂堆积体路基填料剪切性能影响的离散元模拟研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(7): 2332-2348.  
HUA Wen-jun, XIAO Yuan-jie, WANG Meng, et al. Discrete element modeling (DEM) study on effect of gradation and morphology on shear strength behavior of rock debris as embankment fill materials[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(7): 2332-2348.
- [15] 汤保新, 徐亮, 李琪. 颗粒流 PFC3D 数值模拟中标定细观参数的方法——拟合直剪试验法[J]. 安徽建筑, 2016, 23(2): 250-251, 255.  
TANG Bao-xin, XU Liang, Li Qi. Method for calibrating fine-scale parameters in numerical simulations of granular flow PFC3D-Fitted straight shear test method[J]. Anhui Architecture, 2016, 23(2): 250-251, 255.
- [16] 刘新荣, 许彬, 周小涵, 等. 软硬互层岩体结构面宏观剪切力学特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2895-2909.  
LIU Xin-rong, XU Bin, ZHOU Xiao-han, et al. Macroscopic shear mechanical properties of structural surfaces in soft and hard interbedded rock masses[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2895-2909.