

无胶结粗粒土初始结构强度研究

张晨曦, 王洋, 魏玉峰, 梁彭, 贺琮栖

Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil

ZHANG Chenxi, WANG Yang, WEI Yufeng, LIANG Peng, and HE Congxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏婕, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133

基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil

彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 171-180

人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay

杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107008

张晨曦, 王洋, 魏玉峰, 等. 无胶结粗粒土初始结构强度研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 54-63.
ZHANG Chenxi, WANG Yang, WEI Yufeng, *et al.* Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 54-63.

无胶结粗粒土初始结构强度研究

张晨曦, 王洋, 魏玉峰, 梁彭, 贺琮栖

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 无论是原状土还是重塑土均存在初始结构性, 土体初始结构所抵抗的剪应力为土体结构强度。为了研究无胶结粗粒土初始结构强度, 定义了粗粒土剪切过程中初始结构变化点特征, 并根据大于 20 mm 粗颗粒含量将粗粒土划分为 4 种结构类型, 采用可视化直剪仪对不同结构特征的粗粒土进行直剪试验, 通过剪切过程中粗粒土平面孔隙比、配位数、概率熵等 3 种初始结构指标的数值大小及变化趋势, 来确定不同初始结构的粗粒土结构临界强度。结果表明: 不同初始结构类型粗粒土在相同正应力、相同颗粒种类的情况下, 其抗剪强度大小与结构强度占比大小的排序一致, 表明了颗粒结构强度在抵抗剪应力的整个过程中起到了重要作用。4 种初始结构类型粗粒土平均结构强度占比为 36.27%, 即结构强度占峰值抗剪强度的 36.27%, 其中排列接触结构的结构强度占比最高, 为 36.62%, 其次为镶嵌结构 36.61%, 悬浮密实结构 35.99%, 叠置结构的结构强度占比最低, 为 35.87%。

关键词: 粗粒土; 抗剪强度; 初始结构; 结构强度; 结构类型

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0054-10

Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil

ZHANG Chenxi, WANG Yang, WEI Yufeng, LIANG Peng, HE Congxi

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Both the undisturbed soil and remolded soil have initial structural properties, and the shear stress resisted by the initial structure of the soil is the structural strength of the soil. In order to study the initial structural strength of the uncemented coarse-grained soil, this paper defines the characteristics of the initial structural change points of the coarse-grained soil during the shearing process, and divides the coarse-grained soil into four structural types according to the content of the coarse-grained soils greater than 20 mm. Visual direct shear instrument direct shear tests are carried out on the coarse-grained soils with different structural characteristics, and the critical strength of the coarse-grained soils with different initial structures is determined through the numerical value and the change trend of the initial structure indexes of the coarse-grained soils during the shearing process. The results show that the shear strength of the coarse-grained soils with different initial structure types under the same normal stress and the same particle type are in the same order as the proportion of the structural strength,

收稿日期: 2021-07-02; 修订日期: 2021-09-23

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072303)

第一作者: 张晨曦 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方向研究。E-mail: 1193824777@qq.com

通讯作者: 王洋 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方向研究。E-mail: 544256280@qq.com

indicating that the particle structure strength plays a role in the whole process of the resisting shear stress. The average structural strength of the four initial structure types of the coarse-grained soils accounts for 36.27%, that is, the structural strength accounts for 36.27% of the peak shear strength. The arranged contact structure has the highest structural strength at 36.62%, followed by the mosaic structure 36.61%. The suspended dense structure is 35.99%, and the superimposed structure has the lowest proportion of the structural strength, which is 35.87%.

Keywords: coarse-grained soil; shear strength; initial structure; structural strength; structure type

粗粒土由于其抗剪强度高、不易液化、压实性和透水性好等优良特性,被广泛用于工程建设中。抗剪强度是粗粒土主要的力学指标,是评价天然土坡、填方路基或挖方边坡、堆石坝坝基以及人工填筑坝体稳定性的依据,直接决定工程设计是否可靠和经济。

土体结构反映土体骨架效应的颗粒形状、颗粒分布及相互间的作用,是决定土体物理力学属性的内在因素^[1],在粗粒土或散粒体材料结构性本构研究中,Oda等^[2]提出用组构张量表达颗粒群应力应变的概念,建立了离散的接触力与应力应变的联系。Christoffersen等^[3]假定颗粒为圆球或椭球形状,通过分析颗粒的力平衡或能量平衡,建立了组构和宏观力学特性之间的数学方程。Satake^[4]用图论研究了散体材料的本构关系。Elia等^[5]建立了结构性土的多面弹塑性本构模型。刘恩龙等^[6]在广义塑性理论的基础上建立了考虑颗粒破碎的粗粒土本构。Manouchehrian^[7]建立了描述不同围压下剪切缝发展机制的颗粒粘结模型。王占军等^[8]建立了考虑塑性流动方向和荷载方向的弹塑性本构模型。高政国^[9]通过描述单元颗粒排列,建立了考虑颗粒密集度、排列和摩擦特性的力学模型。蒋明镜等^[10]引入结构破损参数,建立了反映土体结构损伤过程的本构模型。李吴刚等^[11]通过结构性因子表征土的结构性,并利用修正剑桥模型建立了考虑土体结构性的本构模型。

现有关于土结构性对强度特性影响的研究成果主要集中在黏性土方面,如谢定义等^[12]建立了一个反映土结构性的指标。张宁宁等^[13]提出黄土的结构强度势参数,探究了非饱和黄土结构强度势参数与抗剪强度力学参数的内在关联,建立了比摩尔库伦更适合于工程实际的强度模型。王勇^[14]探究了黄土的结构性与抗剪强度之间的关系。而在无胶结粗粒土对抗剪强度特性的影响方面,大量学者以三轴剪切试验为基础,分析无黏性土应力应变及压缩特性等变化规律^[15-16]。魏婕等^[17]采用离散元方法研究了颗粒形状对粗粒土剪切变形的影响。王晓帅等^[18]采用可视化大直剪仪研究了粗粒土剪切试验过程中宏观力学特

性与颗粒细观运动规律。屈智炯^[19]在大量试验的基础上,系统分析和总结了3种类型粗粒土的力学特性,提出了粗粒土作为筑坝材料的非线性变形模型计算参数值的范围。王家全等^[20]研制了大尺寸可视化直剪仪,开展不同土工合成材料与土体作用的直剪试验,分析了加筋土较素土的土体参数变化。何亮等^[21]基于能量耗散机制对粗粒土圆度损伤进行分析,建立圆度损伤模型,阐述了剪切过程中的圆度损伤。王冠等^[22]探讨了粗粒土的粗细颗粒比例、颗粒本身的性质、应力状态、含水率、剪切速率以及粒径大小等因素对抗剪强度的影响机理。

随着工程范围和规模的日益扩大,对粗粒土の利用也更为广泛,如果在强度性质的评价中仍忽略初始结构,是不够精细和准确的,通过查阅现有文献报道,尚未见有考虑粗粒土初始组构对抗剪强度影响的研究。但是,已有学者开始关注到初始结构,刘汉龙等^[23]在综述文章的展望中提出,“粗粒料初始结构性”是土力学未来需要深入研究的内容,王光进等^[24]认为土体初始结构是一个困难但值得深入研究的科学问题。总体而言,粗粒土初始结构研究尚有待于深度开展。

本文对无胶结粗粒土初始结构进行分析研究,建立了平面孔隙率、配位数、概率熵3种初始结构指标,通过可视化直剪试验,对不同初始结构类型粗粒土初始结构进行分析研究,并利用Image-Pro Plus(IPP)图像处理软件及PCAS分析系统来获取剪切全过程的初始结构指标信息。通过结构指标信息变化趋势定量描述出结构强度,并探讨了初始结构类型对其结构强度以及结构强度占比的影响。分析了粗粒土初始结构量化指标的演化过程,该过程反映了粗粒土结构在剪切过程中的变化和重构,揭示了初始结构强度对宏观抗剪强度的影响。为构建真实的粗粒土初始结构模型提供了思路。

1 粗粒土初始结构及结构强度评价

1.1 初始结构强度定性描述

当土体在荷载作用下被剪切时,其内部结构的变

化可分为 2 个阶段。第一阶段,荷载施加初期,颗粒间的间隙变小,颗粒间接触更加紧密,但初始结构并未破坏,在抵抗荷载过程中发挥着结构强度,结构的变化主要表现为初始结构的自适应调整;第二阶段,当荷载达到或超过土体原有的结构强度时,部分颗粒间的连接会受到破坏,颗粒间的相对位置发生变化,初始结构破坏,颗粒发生位移或错动,形成新的结构并最终趋于稳定。其中第一阶段的剪切强度是土体的初始结构在发挥作用,第一阶段所抵抗的剪应力称为土体的结构强度,将颗粒结构强度与峰值强度的比值定义为结构强度占比,土体剪切阶段如图 1 所示。

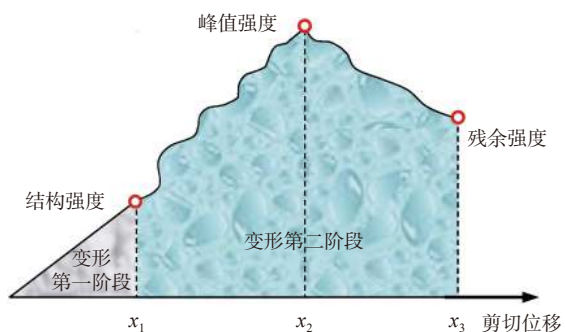


图 1 土体剪切阶段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the soil shear stage

结构强度是指颗粒初始结构有本质的变化时所对应的强度,即在该时刻之前颗粒之间的接触方式、排列方式、颗粒的相对位置保持原有状态不变,当其中任意一个结构性指标发生变化时即结构发生破坏,颗粒结构强度出现。粗粒土受剪过程中,当剪应力小于结构强度时,颗粒之间随着剪应力的增加逐渐紧密,空隙率减小,土体发生剪缩现象;当剪应力大于结构强度时,随着剪应力的继续增加,颗粒将会发生明显的偏转及错动,颗粒的初始结构发生变化,形成新的结构并逐渐趋于稳定,直至颗粒失稳破碎。因此在粗粒土受剪过程中,结构强度是一个很重要的临界值,它影响着颗粒的变形以及错动,并制约着第二阶段剪切过程中的结构演化,进而影响土体抗剪强度。

在剪切过程中考虑颗粒的初始结构临界点是渐变的,而不是突变。因此对颗粒结构强度定义有如下 2 种情况:一是在剪切过程中只要出现颗粒连接破坏,即颗粒破碎或者偏转则达到临界点;二是考虑颗粒的连接变形,即使在连接变形很大的时候颗粒连接并不破坏或偏转,但是其变形量发生了很大变化,因此这时以颗粒连接变形的某一变形量作为其临界限值。颗粒初始结构变动点如图 2 所示。

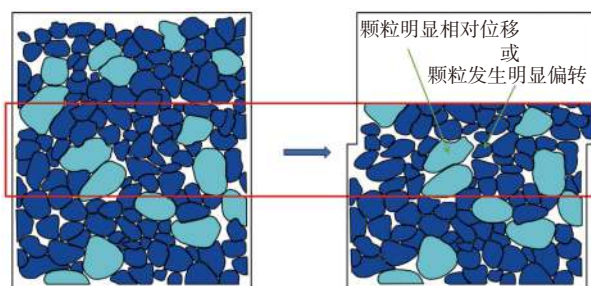


图 2 颗粒初始结构变动点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the change point of the initial structure of the particle

1.2 初始结构分类

粗颗粒含量对粗粒土强度特征有重大影响,是控制其强度特性的重要依据。郭庆国^[25]通过研究水电站的粗粒土试验数据,提出了用 5 mm 粒径来代表粗细颗粒的分界线,并认为粗颗粒含量 $P_5=30%$ 和 $P_5=70%$ 时是控制其强度特性的 2 个重要分界点。陈坚^[26]通过总结分析粗粒土压实后的结构变化所对应的粗粒含量,按较大颗粒含量将粗粒土结构划分为 3 种结构类型:骨架孔隙结构、骨架密实结构和悬浮密实结构。本文为区别初始结构类型,更好观察初始结构指标信息及结构强度,所研究的粗粒土对象主要为 10 ~ 40 mm 粒径颗粒。采用 P_{20} 来表征粒径大于 20 mm 的颗粒质量占总质量的比值。不同初始结构类型的粗粒土其结构强度可能会有所差异,为了准确定量地去描述粗粒土初始结构强度,文章把初始结构类型分为 4 类:

①叠置结构:如图 3(a)所示, $P_{20} \geq 70%$, 颗粒成分组成中粒径小于 20 mm 的颗粒含量很少,大颗粒之间缺少小颗粒的有效填充,结构的孔隙大,颗粒间的接触形式由大颗粒间的相互接触特点决定,小颗粒对土体的力学性质影响相对较弱。

②镶嵌结构:如图 3(b)所示, $P_{20}=50% \sim 70%$, 颗粒组成仍以粒径大于 20 mm 的粗颗粒为主,小于 20 mm 的颗粒填充在粗颗粒形成的孔隙中,颗粒之间的接触形式受到颗粒粒径和形状的影响,体现出多样性。

③排列接触结构:如图 3(c)所示, $P_{20}=30% \sim 50%$, 颗粒中粒径小于 20 mm 的颗粒较多,大颗粒在土体中所占比例不超过一半,部分大颗粒之间仍然可以通过紧密接触形成局部性的颗粒骨架,结构稳定性是颗粒间综合作用的体现。

④悬浮密实结构:如图 3(d)所示, $P_{20} \leq 30%$, 颗粒组成以粒径小于 20 mm 的颗粒为主,粒径大于 20 mm 的粗颗粒随机分布于小颗粒中,大颗粒之间难以接触

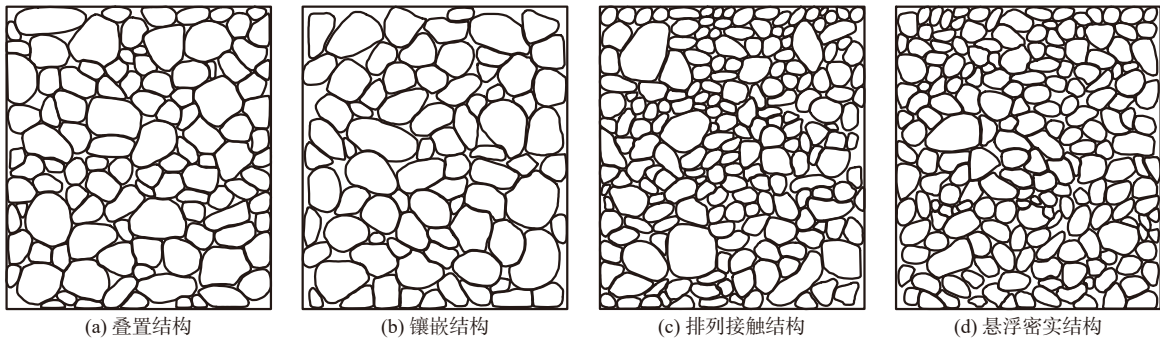


图 3 初始结构类型

Fig. 3 Initial structure type

形成骨架, 结构稳定性和强度等力学性能主要受粒径小于 20 mm 的颗粒控制。

2 不同初始结构类型的直剪试验

2.1 试验方案设计

采用可视化直剪仪进行试验(图 4), 根据前文对结构强度的定性表述来探究不同初始结构类型的粗粒土在剪切过程中的结构强度。试验所用试样为 10~40 mm 颗粒(图 5), 试验方案设计和试样配比如表 1 所示。为了确保配置出不同类型的初始结构, 采用孔径为 10, 16, 20, 31.5, 40 mm 的国标石子筛, 将试样按照方案设计内容进行筛分, 配置出 4 种不同的

初始结构类型试验颗粒, 颗粒级配曲线如图 6 所示。

2.2 试验结果分析

将不同初始结构类型的粗粒土在各级正应力下的剪切试验结果进行记录分析, 并绘制出应力-位移曲线如图 7 所示。

在应力-位移曲线图中, 悬浮密实结构和排列接触结构由于小于 20 mm 的颗粒较多, 试样的力学性质主要受其控制, 随着正应力的逐级递增, 峰值应力也近乎均匀增加; 而镶嵌结构和叠置结构由于大于 20 mm 的颗粒占比较大, 当正应力逐渐增加时, 大颗粒之间的接触增强, 峰值应力迅速提高, 骨架效应明显提升。粗粒土初始结构对抗剪强度的影响较大, 从图 7(a)(b)中可以看出 50 kPa 和 100 kPa 下不同初始结构类型粗粒土的峰值应力相差不多, 较为平均。但是在 150 kPa(图 7c)和 200 kPa(图 7d)下的不同初始结构类型粗粒土的峰值应力具有明显的规律性, 即不同初始结构下峰值应力的顺序为排列接触结构最大, 其次为镶嵌结构、悬浮密实结构, 叠置结构最小。这是由于在 4 种结构中排列接触结构、镶嵌结构的颗粒较为不均匀, 级配良好, 小颗粒填充在较大颗粒孔隙之中。悬浮密实结构中 P_{20} 含量较低, 叠置结构 P_{20} 含量较高, 颗粒没有形成很好的嵌固作用, 级配性差。因为颗粒级配对抗剪强度的影响随着正应力的增加而加强的原因, 所以在 150 kPa 和 200 kPa 下的不同初始

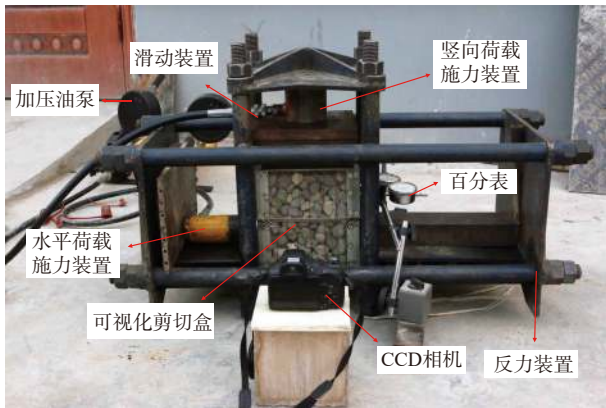


图 4 可视化直剪仪结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the visual direct shear instrument structure



图 5 试验试样

Fig. 5 Experimental samples

表 1 试样配比信息

Table 1 Sample ratio information

法向荷载/kPa	$P_{20}/\%$			
	叠置结构	镶嵌结构	排列接触结构	悬浮密实结构
50	80	60	40	15
100	80	60	40	15
150	80	60	40	15
200	80	60	40	15

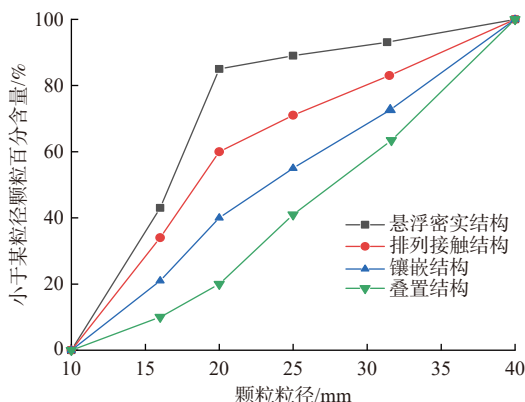


图 6 不同初始结构类型颗粒级配曲线

Fig. 6 Gradation curve of different initial structure types

结构类型粗粒土的峰值应力呈现出明显的规律性。

3 初始结构强度定量评价

粗粒土在第一阶段剪切过程中, 颗粒的结构强度在发挥着作用, 颗粒之间相互压密, 接触力增大, 此时应力-位移并非线性关系, 初始结构的变化并非突变的, 在应力-位移曲线图中结构变化点难以直接确定。而为了对粗粒土结构强度以及结构强度占比进行定量描述, 引入初始结构变化监测指标, 利用可视化直剪试验, 描述出指标在剪切过程中的变化。记录下指标数值在初始阶段发生突变的位置, 再通过应力-位移曲线来确定出粗粒土结构强度以及结构强度占比。

3.1 初始结构描述指标及量化方法

选取的初始结构变化监测指标如下:

①平面孔隙率: 指平面孔隙面积与总面积之比, 计算公式如下:

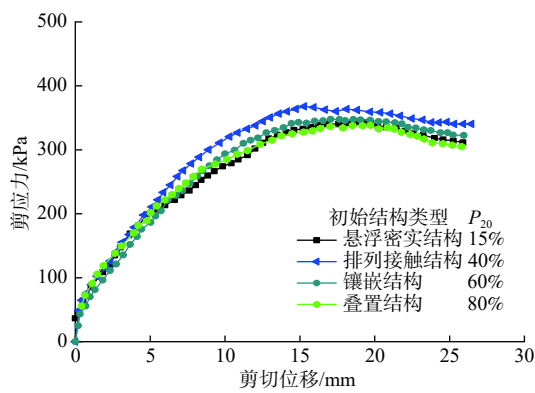
$$n = \frac{S_v}{S} \quad (1)$$

式中: n ——平面孔隙率;

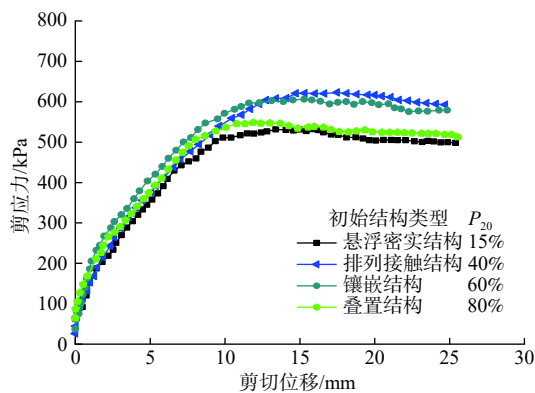
S_v ——平面孔隙总面积;

S ——总面积。

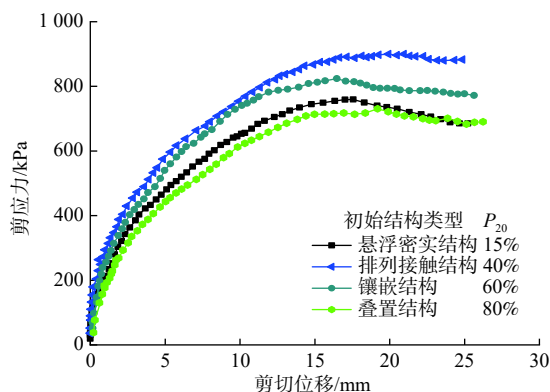
②概率熵: 反映颗粒定向排列有序性的指标, 计算公式如下:



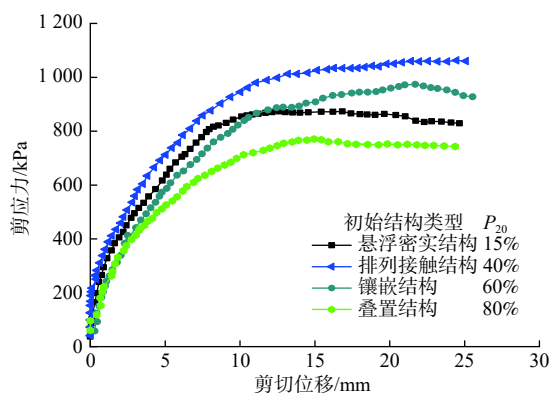
(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



(c) 150 kPa



(d) 200 kPa

图 7 不同正应力下应力-位移曲线

Fig. 7 Stress-displacement curves under different normal stress

$$H_m = - \sum_{i=1}^n P_i \log_n P_i \quad (2)$$

式中: H_m ——颗粒单元体排列的概率熵;

P_i ——颗粒在某一方位区间中呈现概率;

n ——颗粒排列方向的方位区数, $n=18$ 。

其中 P_i 用颗粒定向角来表征, 定向角即颗粒间距离最远的两点的连线与坐标轴横向的夹角为主定向角, 示意图如图 8 所示。

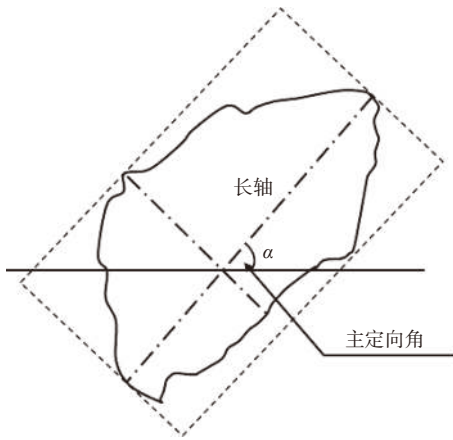


图 8 颗粒主定向角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the particle orientation angle

③配位数: 通常用来表征颗粒体系中的平均接触数量, 是颗粒接触特征的一个重要量化指标, 计算公式如下:

$$Cn = \frac{\sum N_d n_c^{(d)}}{N_d} \quad (3)$$

式中: N_d ——颗粒总数目;

n_c ——d 颗粒的接触数目。

试验过程中用高清数码像机记录下每加压 1 次颗粒状态的图像, 直至剪切过程完成。通过图像处理技术处理后, 经 Image-Pro Plus (IPP) 图像处理软件来获取颗粒概率熵和配位数信息, 经颗粒与裂隙图像识别与分析系统 (PCAS) 来获取平面孔隙率信息。图像处理过程如图 9 所示。

3.2 不同初始结构类型各指标变化对比

在进行的 16 组试验中, 通过图像处理技术及软件计算得到施加正应力之后但未加剪应力之前各组试验的初始结构指标, 如表 2 所示。

由初始结构信息可知平面孔隙率受正应力的影响较为明显, 随着正应力的增加平面孔隙率呈现减小的趋势, 且 P_{20} 含量的增加在一定程度上使得平面孔隙率降低, 这是由于随着正应力的增加颗粒直剪接触

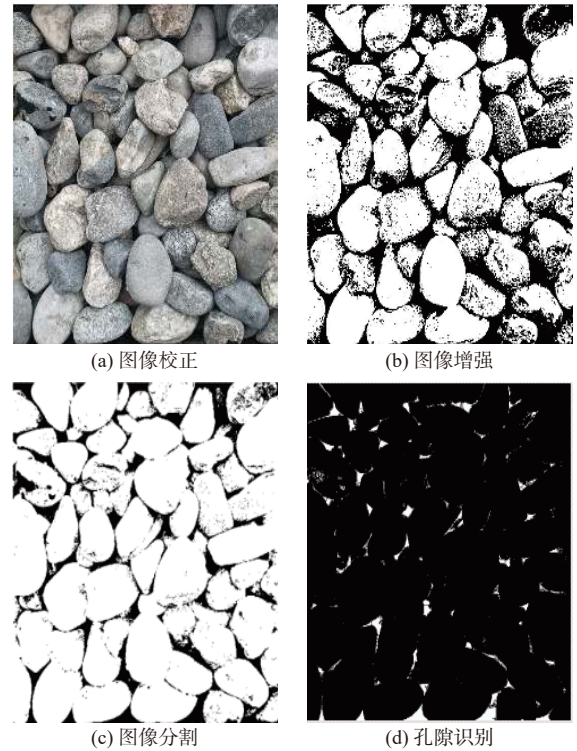


图 9 图像处理技术过程

Fig. 9 Image processing technology process

表 2 初始结构信息提取结果

正应力/kPa	$P_{20}/\%$	平面孔隙率/%	概率熵	配位数
50	15	20.16	0.975	4.67
50	40	17.72	0.958	4.12
50	60	18.36	0.953	4.26
50	80	16.92	0.941	4.06
100	15	19.52	0.969	4.71
100	40	17.58	0.951	4.29
100	60	15.96	0.952	4.19
100	80	17.93	0.943	4.03
150	15	18.39	0.972	4.82
150	40	16.56	0.961	4.32
150	60	15.77	0.958	4.31
150	80	15.60	0.946	4.05
200	15	16.72	0.970	4.72
200	40	14.60	0.953	4.34
200	60	14.97	0.959	4.29
200	80	15.52	0.947	4.07

更加紧密, P_{20} 的增加使得一些直径较小的颗粒填充在较粗颗粒之间。而概率熵数值的随机性较大, 具有不规则形性, 但整体随着 P_{20} 含量的增加呈现降低的趋势。配位数的大小主要跟 P_{20} 含量有关, 主要是由于 P_{20} 含量影响颗粒级配进而影响颗粒配位数, 当级配较好时, 小颗粒镶嵌在大颗粒形成的孔隙中, 其配

位数便会呈现增大的趋势。

根据前文对初始结构强度的定性描述,颗粒在剪切过程中,平面孔隙率、概率熵、配位数的数值变化能够很好地反映出颗粒结构的变化情况,根据在整个剪切过程中指标在最初具有较大突变的时刻为粗粒土初始结构变化点,此时记录下剪切位移,对照应力-位移曲线的剪应力来确定粗粒土结构强度。故通过 Image-Pro Plus(IPP)图像处理软件及 PCAS 分析系统将 3 种指标在剪切全过程的数值计算出来,考虑到正应力对该 3 种指标都有一定的影响,为了减小这种影响,以在不同正应力下的各个指标平均值为基础,绘制出不同 P_{20} 含量(即不同初始结构类型)粗粒土结构性指标与剪切位移关系曲线,如图 10 所示,其中各指

标数值为不同正应力下的各组数据平均值。图 10 直观展示了各类型粗粒土结构描述指标的变化趋势,根据对粗粒土初始结构强度的定性描述,可由粗粒土结构描述指标的突变来确定不同类型初始结构的变化位置,图 10 中结构描述指标的突变对应的剪切位移对照图 7 的应力-位移曲线图剪切位移来确定结构强度。即不同初始结构变动点剪切位移为均在 2~4 mm 区间内。通过可视化直剪仪采用加压方式来控制并加载剪应力,通过数码相机拍照并利用软件处理获取结构描述指标信息,故各个类型初始结构剪应力细化详细区间如表 3 所示。表 3 能够详细确定不同初始结构粗粒土结构描述指标的变化趋势,其中各指标数值为不同正应力下的各组数据平均值。

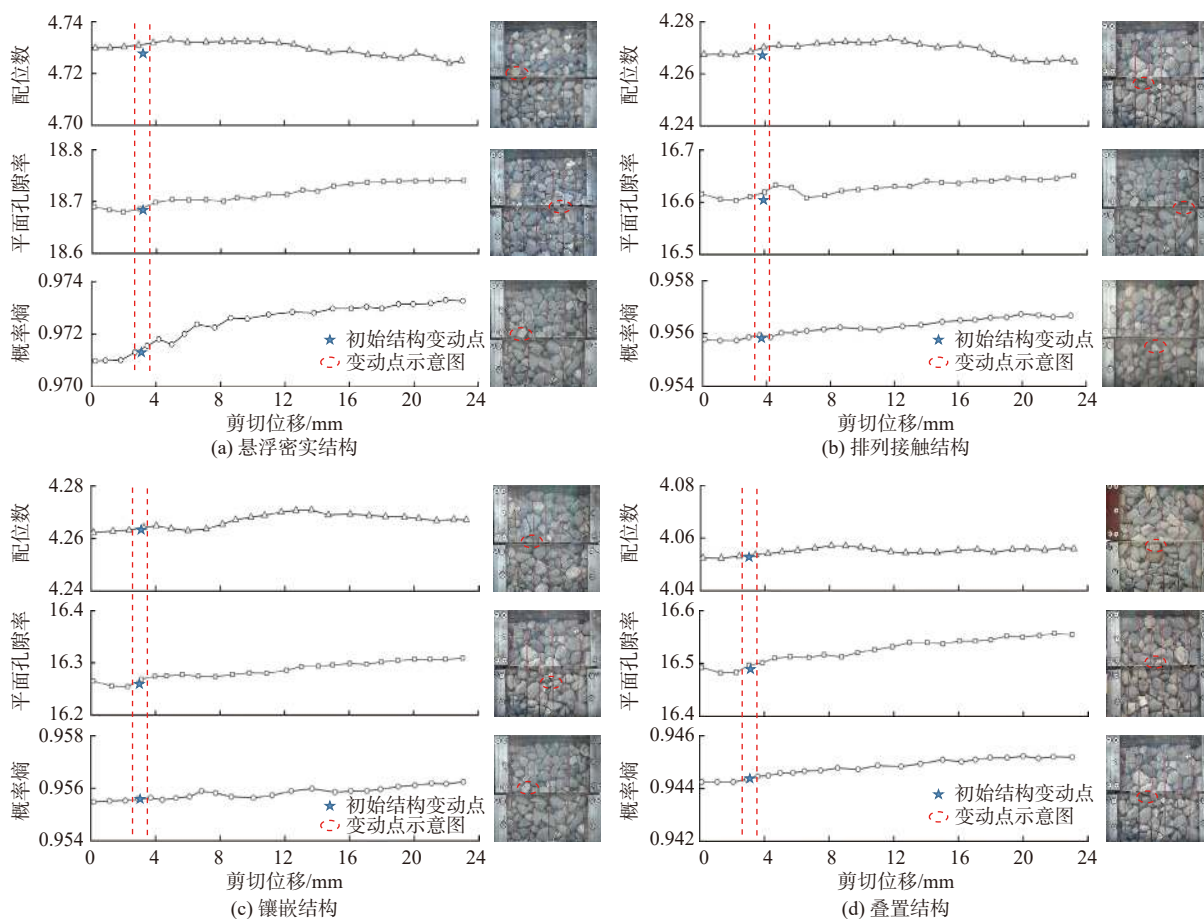


图 10 不同初始结构类型指标变化与剪应变图像

Fig. 10 Index changes and shear strain images of different initial structure types

3.3 指标变化分析及结构强度占比确定

通过对初始结构指标在剪切全过程中的变化趋势(图 10)以及在初始结构变化区间各指标数值(表 3)分析可以发现,在剪切过程中配位数的变化趋势,即

在剪切段有增大的趋势,随后会恢复在初始值左右。这是由于在剪切初期颗粒之间逐渐挤密的过程中,颗粒接触并不会改变,而在剪切中期,由于细颗粒的错动使其填充到大颗粒之间的孔隙之中致使配位数增

表 3 区间细化的各类型初始结构指标信息

Table 3 Initial structure index information for each type of interval refinement

剪切位移/mm		2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8
悬浮密实结构	配位数	4.731	4.731	4.735	4.736	4.736	4.736	4.737	4.737	4.737	4.738
	孔隙比	18.673	18.674	18.686	18.689	18.689	18.690	18.690	18.691	18.691	18.692
	概率熵	0.971 3	0.971 4	0.971 5	0.971 7	0.971 7	0.971 6	0.971 8	0.971 8	0.971 9	0.971 9
排列接触结构	配位数	4.268	4.268	4.268	4.268	4.269	4.269	4.271	4.270	4.271	4.272
	孔隙比	16.611	16.612	16.612	16.613	16.613	16.614	16.618	16.622	16.623	16.624
	概率熵	0.955 7	0.955 7	0.955 7	0.955 7	0.955 8	0.955 9	0.956 0	0.956 0	0.956 0	0.956 0
镶嵌结构	配位数	4.263	4.263	4.263	4.264	4.264	4.264	4.265	4.266	4.266	4.267
	孔隙比	16.255	16.256	16.258	16.258	16.260	16.260	16.269	16.271	16.272	16.273
	概率熵	0.955 6	0.955 6	0.955 7	0.955 7	0.955 9	0.956 0	0.956 4	0.956 7	0.956 8	0.957 0
叠置结构	配位数	4.052	4.053	4.053	4.053	4.054	4.055	4.055	4.056	4.056	4.056
	孔隙比	16.482	16.483	16.484	16.485	16.489	16.490	16.492	16.493	16.495	16.498
	概率熵	0.944 3	0.944 3	0.944 4	0.944 4	0.944 6	0.944 8	0.944 8	0.944 8	0.944 9	0.945 0

加。当达到剪切后期中部颗粒形成剪切带, 配位数会相应降低并稳定。平面孔隙比在整个剪切过程中则呈现先减小后增大的趋势, 并在剪切中期相对稳定直至剪切结束。原因是剪切初期颗粒会相互挤密, 剪切带附近颗粒孔隙比降低, 当经过颗粒初始结构转变点即颗粒发生错动后, 平面孔隙比增加, 直到达到峰值剪应力之后平面孔隙比会稳定下来。概率熵是颗粒排列有序性的表明, 剪切过程中概率熵在剪切每个阶段均有变大的趋势, 在初始结构变化点处尤为显著。由于颗粒在剪切过程中受剪应力的作用颗粒发生偏转错动, 剪切带附近颗粒长轴方向向水平偏转, 有序性变差, 从而使概率熵增加。

对不同结构类型的结构转变点进一步分析可知, 在该试验条件下悬浮密实结构粗粒土的初始结构转变点位于剪切位移为 2.2~2.4 mm 区间内时, 此时配位数有了较大的突变, 平面孔隙比和概率熵也在变化。排列接触结构和镶嵌结构的粗粒土初始结构转变点位于剪切位移为 3.0~3.2 mm 区间内时, 3 种指标的变化相对较大, 其中平面孔隙比变化最为突出。叠置结构的粗粒土初始结构转变点位于剪切位移为 2.6~2.8 mm 区间内时, 此时平面孔隙比发生突变, 配位数和概率熵的变化也较为显著。

在结构指标发生显著变化时所对应的剪应力为结构强度, 为准确描述出不同初始结构类型中强度的变化, 将结构强度与峰值强度之比定义为结构强度占比, 其能够清晰地表述出不同条件下的结构强度。并根据不同条件下得出的粗粒土结构强度与 4 种初始结构类型在不同正应力下的应力-应变数据对应, 计算出各类型初始结构强度及结构强度占比如表 4 所示。

不同条件下颗粒结构强度的差异较为显著, 因此采用结构强度占比来描述颗粒结构强度的强弱更为合理。如表 4 所示, 排列接触结构的结构强度占比最大, 为 36.62%, 叠置结构最低, 为 35.87%。其中 4 种结构类型粗粒土平均结构占比为 36.27%。在排列接触结构中, 因为其 P_{20} 含量为 20%~30%, 颗粒之间以紧密接触形成局部性的颗粒骨架, 较小颗粒填充在骨架之间形成的孔隙之中, 形成较为稳定的结构, 结构强度占比相对较高。叠置结构中大颗粒占 70% 以上, 颗粒多为堆叠在一起, 存在较多的孔隙, 结构不稳定性较高, 结构强度占比相对较低。通过对比图 7 的应力-位移曲线发现, 不同初始结构类型在相同正应力、相

表 4 各类型初始结构强度及结构强度占比

Table 4 Initial structural strength of each type and the proportion of structural strength

初始结构类型	法向应力/kPa	结构强度/kPa	峰值抗剪强度/kPa	结构强度占比/%	结构强度占比平均值/%
悬浮密实结构	50	124.73	342.95	36.37	35.99
	100	192.97	531.75	36.29	
	150	273.46	759.39	36.01	
	200	308.10	873.55	35.27	
排列接触结构	50	135.96	367.86	36.96	36.62
	100	231.33	623.20	37.12	
	150	326.55	899.83	36.29	
	200	383.91	1 063.16	36.11	
镶嵌结构	50	130.22	347.91	37.43	36.61
	100	225.58	606.23	37.21	
	150	297.11	823.94	36.06	
	200	348.41	974.03	35.77	
叠置结构	50	122.46	338.57	36.17	35.87
	100	196.80	548.95	35.85	
	150	255.85	730.36	35.03	
	200	280.93	771.14	36.43	

同颗粒种类的情况下,其抗剪强度大小与结构强度占比大小的排序一致,首先为排列接触结构,其次为镶嵌结构、悬浮密实结构,叠置结构最小。表明了颗粒结构强度在抵抗剪应力的整个过程中起到了重要的作用。

4 结论

(1)将土体受剪过程分为 2 个阶段,土体自身结构强度所抵抗的剪切过程为第一阶段,并定义了土体第一阶段所抵抗的剪应力为结构强度,初始结构强度与峰值抗剪强度比值为结构强度占比。

(2)根据颗粒 P_{20} 含量,将颗粒初始结构类型分为悬浮密实结构、排列接触结构、镶嵌结构、叠置结构,并通过配位数、平面孔隙比及概率熵 3 种指标数据在剪切全过程的变化趋势,定量分析出不同初始结构类型粗粒土的结构强度以及结构强度占比,其中 4 种结构类型粗粒土平均结构强度占比为 36.27%。

(3)不同初始结构类型粗粒土在相同正应力、相同颗粒种类的情况下,其抗剪强度大小与结构强度占比大小的排序一致,依次为排列接触结构、镶嵌结构和悬浮密实结构及叠置结构。表明了颗粒结构强度在抵抗剪应力的整个过程中起到了重要作用。

(4)分析了粗粒土初始结构量化指标的演化过程,该过程反映了粗粒土结构在剪切过程中的变化和重构,揭示了初始结构强度对宏观抗剪强度的影响,对于构建真实的粗粒土初始结构模型提供了思路。

参考文献 (References):

- [1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. [GUO Qingguo. Engineering properties of coarse soil and its application[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998. (in Chinese)]
- [2] ODA M, NEMAT-NASSER S, MEHRABADI M M. A statistical study of fabric in a random assembly of spherical granules[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1982, 6(1): 77 - 94.
- [3] CHRISTOFFERSEN J, MEHRABADI M M, NEMAT-NASSER S. A micromechanical description of granular material behavior[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1981, 48(2): 339 - 344.
- [4] SATAKE M. A discrete-mechanical approach to granular materials[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1992, 30(10): 1525 - 1533.
- [5] ELIA G, AMOROSI A, CHAN A H C, et al. Fully coupled dynamic analysis of an earth dam[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(7): 549 - 563.
- [6] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 循环荷载作用下考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 1972 - 1978. [LIU Enlong, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. A constitutive model for rockfill materials incorporating grain crushing under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 1972 - 1978. (in Chinese with English abstract)]
- [7] MANOUCHEHRAN A, SHARIFZADEH M, MARJI M F, et al. A bonded particle model for analysis of the flaw orientation effect on crack propagation mechanism in brittle materials under compression[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, 14(1): 40 - 52.
- [8] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1931 - 1938. [WANG Zhanjun, CHEN Shengshui, FU Zhongzhi. Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1931 - 1938. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 高政国, HAYLEY H SHEN. 基于颗粒组构特性的散体材料本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊1): 93-98. [GAO Zhengguo, HAYLEY H SHEN. A study of constitutive model for granular material based on characters of discrete particles arranged[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup 1): 93-98. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 蒋明镜, 刘静德, 孙渝刚. 基于微观破损规律的结构性土本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(6): 1134 - 1139. [JIANG Mingjing, LIU Jingde, SUN Yugang. Constitutive model for structured soils based on microscopic damage law[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1134 - 1139. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李吴刚, 杨钢, 刘文化, 等. 基于结构性参数的土本构模型研究[J]. *大连理工大学学报*, 2021, 61(1): 84 - 91. [LI Wugang, YANG Gang, LIU Wenhua, et al. Study of constitutive model for soils based on structural parameter[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2021, 61(1): 84 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 651 - 656. [XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651 – 656. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张宁宁, 骆亚生. 非饱和黄土的结构性与强度特性的关系 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1838 – 1844. [ZHANG Ningning, LUO Yasheng. Relationship between structure and strength property of unsaturated loess[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1838 – 1844. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王勇. 黄土结构性特征及其对土体抗剪强度的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2019. [WANG Yong. Structural characteristics of loess and its effect on soil shear strength[D]. Xi'an: Northwest University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郭庆国. 粗粒土的抗剪强度特性及其参数[J]. 陕西水力发电, 1990, 6(3): 29 – 36. [GUO Qingguo. Shear strength characteristics and parameters of coarse-grained soil[J]. Shaanxi Hydropower Journal, 1990, 6(3): 29 – 36. (in Chinese)]
- [16] 马露. 无黏性土的压缩特性及模型[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 72 – 77. [MA Lu. Compression characteristics and models of cohesionless soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 72 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 魏婕, 魏玉峰, 黄鑫. 颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 114 – 122. [WEI Jie, WEI Yufeng, HUANG Xin. A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 114 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王晓帅, 王子寒, 景晓昆, 等. 粗粒土大型直剪试验宏细观研究与离散元模拟[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(3): 279 – 286. [WANG Xiaoshuai, WANG Zihan, JING Xiaokun, et al. A macro-micro study and distinct element simulation on large-scale shear test of coarse-grained soil[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(3): 279 – 286. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 屈智炯. 粗粒土在高土石坝的应用研究[J]. 水电站设计, 1998, 14(1): 83 – 88. [QU Zhijiong. Research on Application of Coarse Grained Soil in High Earth-rock Dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998, 14(1): 83 – 88. (in Chinese)]
- [20] 王家全, 周岳富, 唐咸远, 等. 可视大模型加筋土直剪数采仪的研发与应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1533 – 1540. [WANG Jiaquan, ZHOU Yuefu, TANG Xianyuan, et al. Development and application of large size direct shear test apparatus with visual and digital collection functions for reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1533 – 1540. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 等. 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 120 – 126. [HE Liang, WEI Yufeng, PAN Yuanyang, et al. Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 120 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王冠, 陈坚. 路基粗粒土抗剪强度影响因素分析[J]. 路基工程, 2015(3): 154 – 157. [WANG Guan, CHEN Jian. Analysis on factors affecting shear strength of coarse-grained soil of subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2015 (3): 154 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 361 – 369. [LIU Hanlong, SUN Yifei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4): 361 – 369. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒土三轴试验数值模拟与试样颗粒初始架构初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 585 – 592. [WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Numerical simulation triaxial tests for coarse-grained soil and preliminary study of initial fabric of sample grain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 585 – 592. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郭庆国. 关于粗粒土工程特性及其分类的探讨[J]. 水利水电技术, 1979, 10(6): 53 – 57. [GUO Qingguo. Discussion on engineering characteristics and classification of coarse-grained soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1979, 10(6): 53 – 57. (in Chinese)]
- [26] 陈坚. 颗粒堆积结构对高速铁路路基粗粒土填料工程性质影响机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. [CHEN Jian. Study on mechanism of effect of particle packing structure on engineering properties of coarse-grained soil filling high-speed railway embankment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]