

蔡国军, 陈世豪, 周扬, 等. P_5 含量对砾类土强度与变形特性影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 187-195.
CAI Guojun, CHEN Shihao, ZHOU Yang, et al. Experimental study on influence of coarse grain content on strength and deformation characteristics of gravel soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 187-195.

P_5 含量对砾类土强度与变形特性影响的试验研究

蔡国军^{1,2}, 陈世豪^{1,2}, 周扬^{1,2}, 赵大安^{1,2}, 冯伟强^{1,2}, 程宇航^{1,2}

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 地质工程国家级实验教学示范中心, 四川 成都 610059)

摘要: 为了研究粗粒含量对砾类土的强度与变形特性的影响, 本文对 5 种不同粗粒含量的强风化灰岩土石混合体开展了室内大型直剪试验与数值模拟研究, 并获取相关的强度与变形参数。室内试验结果表明: 随粗粒含量增加, 抗剪强度参数先增大后减小, 粗粒含量 70% 时试样内摩擦角达到最大, 黏聚力变化无明显规律。对实验数据进行统计分析表明, 用径径比可以很好地体现试样级配、粒径大小、含量、试样尺寸的关系, 最终得到抗剪强度与径径比关系的经验公式, 可以初步预测粗粒土的抗剪强度。数值模拟结果表明: 使用 Clump “聚粒”模型模拟砾石能较好地拟合剪应力与剪位移曲线; 剪切过程中剪切带附近颗粒运动表现为上凸的弧线, 这个现象持续至剪切结束; 力链表现为倾斜的珊瑚状, 随剪切进行力链不断发展增强, 至剪切完成力链稍有衰减。

关键词: 砾类土; 大型直剪; PFC^{3D}; 微观力学特征

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)22-0187-09



Experimental study on influence of coarse grain content on strength and deformation characteristics of gravel soil

CAI Guojun^{1,2}, CHEN Shihao^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}, ZHAO Daan^{1,2}, FENG Weiqiang^{1,2}, CHENG Yuhang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. National Geological Engineering Experimental Teaching Demonstration Center of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the influence of coarse grain content on the strength and deformation characteristics of the gravel soil, a large scale direct shear test and numerical simulation of 5 highly weathered limestone soil-rock mixtures with different coarse grain content are carried out in this paper, and the relevant strength and deformation parameters are obtained. The results of laboratory tests show that the shear strength parameters first increase and then decrease with the rise of coarse grain content. When the coarse grain content is 70%, the internal friction angle of the sample reaches the maximum, and there is no obvious rule of

收稿日期: 2019-01-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41202209); 国家自然科学基金面上项目(No. 41977255); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20190714)

作者简介: 蔡国军(1982—), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事地质工程和岩土工程方面教学与科研工作。E-mail: caiguojun@cdu.edu.cn

通信作者: 陈世豪(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程和岩土工程方面研究工作。E-mail: 2875620811@qq.com

cohesion change. The statistical analysis of the experimental data shows that the relationship between the grading, particle size and content, sample size can be well reflected by the diameter ratio, and the empirical formula of the relationship between the shear strength and the diameter ratio can be obtained, and the shear strength of coarse grained soil can be preliminarily predicted. The results of numerical simulation show that the shear stress and shear displacement curves can be well fitted by using Clump "aggregate" model to simulate gravel. In the process of shear, the movement of particles near the shear zone appears as an arc of convex, which continues until the end of shear. The force chain is inclined and coral-like. It develops and strengthens with shear, and then decreases slightly after shear.

Keywords: soil-rock mixture; large direct shear; PFC^{3D}; micromechanical characteristics

0 引言

粗粒土在自然界分布广泛、储量丰富。由于它具有压实性能好、透水性强、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性,因此在工程建设中得到了广泛的应用。

郭庆国^[1]对大量粗粒土室内试验结果进行归纳总结,认为随粗粒含量增加粗粒土的抗剪强度先增加后减小,抗剪强度参数在粗粒含量为70%左右时达到最大。褚福永、朱俊高^[2]基于粗粒土大三轴试验认为密度相同条件下,围压越小,粗粒土剪胀性越强。杜俊、侯克鹏^[3]采用室内中型直剪仪研究了粗粒含量对粗粒土的强度影响,指出摩擦角随粗粒含量增大而增大。王光进^[4]开展室内大直剪试验,结果表明随粗粒含量增加,土体内摩擦角不断增大。凌华、刘建坤^[5-6]通过室内三轴三轴试验,研究了细粒含量及其不均匀分布对粗粒土的变形和强度特性的影响,指出细颗粒含量的大小,是否含泥是粗粒土力学特性的重要影响因素。谭彩^[7]通过室内大型直剪试验研究了无黏性粗粒土直接剪切试验的强度尺寸效应,认为黏聚力和内摩擦角随试样高度与最大粒径比值的增大而减小,且与其对数呈明显的线性关系。

随着计算机技术的发展,数值试验成为了与传统的现场试验和室内试验同等重要的试验手段。颗粒流数值方法^[8]假设物体由颗粒组成来研究物体的宏观与微观力学特征,其在分析非连续、各向异性物体力学特征方面具有一定优势。丁秀丽等^[9]利用PFC^{2D}程序详细分析了土石混合体建模过程。徐肖峰等^[10]利用PFC^{2D}研究了粗粒含量对砾类土的强度和变形的影响,指出粗粒含量越多,土体强度越大。朱俊高^[11]等用离散元方法研究了级配和密实度对粗粒土力学性质的影响,认为相对密实度是影响粗粒土力学行为的重要因素,剪切峰值强度和内摩擦角与相对密实度成正相关。

综上所述,前人的研究在室内试验方面:P₅含量对粗粒土性质确有影响,但是粗粒内部各粒径组的含

量、粒径大小、仪器尺寸影响未考虑,本文在研究P₅含量的基础上,还探究了P₅内部级配、粒径大小、含量、试样尺寸的影响。最终拟合了抗剪强度参数与径径比的关系。数值模拟方面,前人多用PFC^{2D}进行研究且生成颗粒较少,砾石多用圆球来进行模拟,这并不能贴合实际;本文基于PFC^{3D}利用大型计算机(每次计算生成颗粒20万左右),对于砾石采用Clump“聚粒”模型进行模拟,分析了P₅含量对粗粒土在剪切过程中细观力学特性的影响。

1 室内大型直剪试验设备与方案

1.1 试验设备

试验所用的大型粗粒土直剪试验系统由成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室蔡国军等人研发(见图1)。主机架采用板式框架结构。法向荷载及切向荷载均由液压油缸加载。系统有两种控制方式:即手动气液平衡控制和变频式液压推力油源自动控制方式控制水平、垂直荷载。自动测定,垂直、水平的荷载及位移量。设备配套有计算机自动数据采集处理系统。完成载荷、位移的采集存储和垂直载荷、水平载荷、剪切速度的自动控制。



图1 大型粗粒土直剪试验系统

1.2 实验方案

试验所用的土样为强风化灰岩土石混合体,试样取回后,经天然风干后,测其含水率为3%。风干后

对试样过 5 mm 筛, 分出粗粒料和细粒料。然后对粗粒料、细粒料再进行筛分, 测其各粒径组百分含量。然后对试样进行重塑, 试样分为五组, 粗粒含量分别为 10%、30%、50%、70%、90%, 试样级配曲线如图 2 所示。试样尺寸 $\phi 618 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 试样分 5 层填装, 每层质量控制为 54 kg, 每层击实至预设高度(100 mm)后, 将表面刮毛再装填下层, 保证试样干密度为 1.800 kg/m^3 不变。选用 100、200、300、400 kPa 为法向应力, 控制剪切速率为 2 mm/min , 剪位移达到 100 mm 后停止试验。

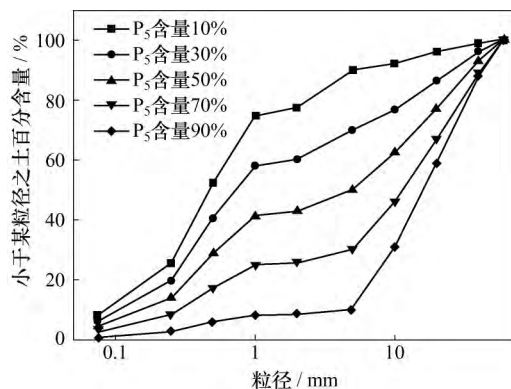


图 2 级配曲线

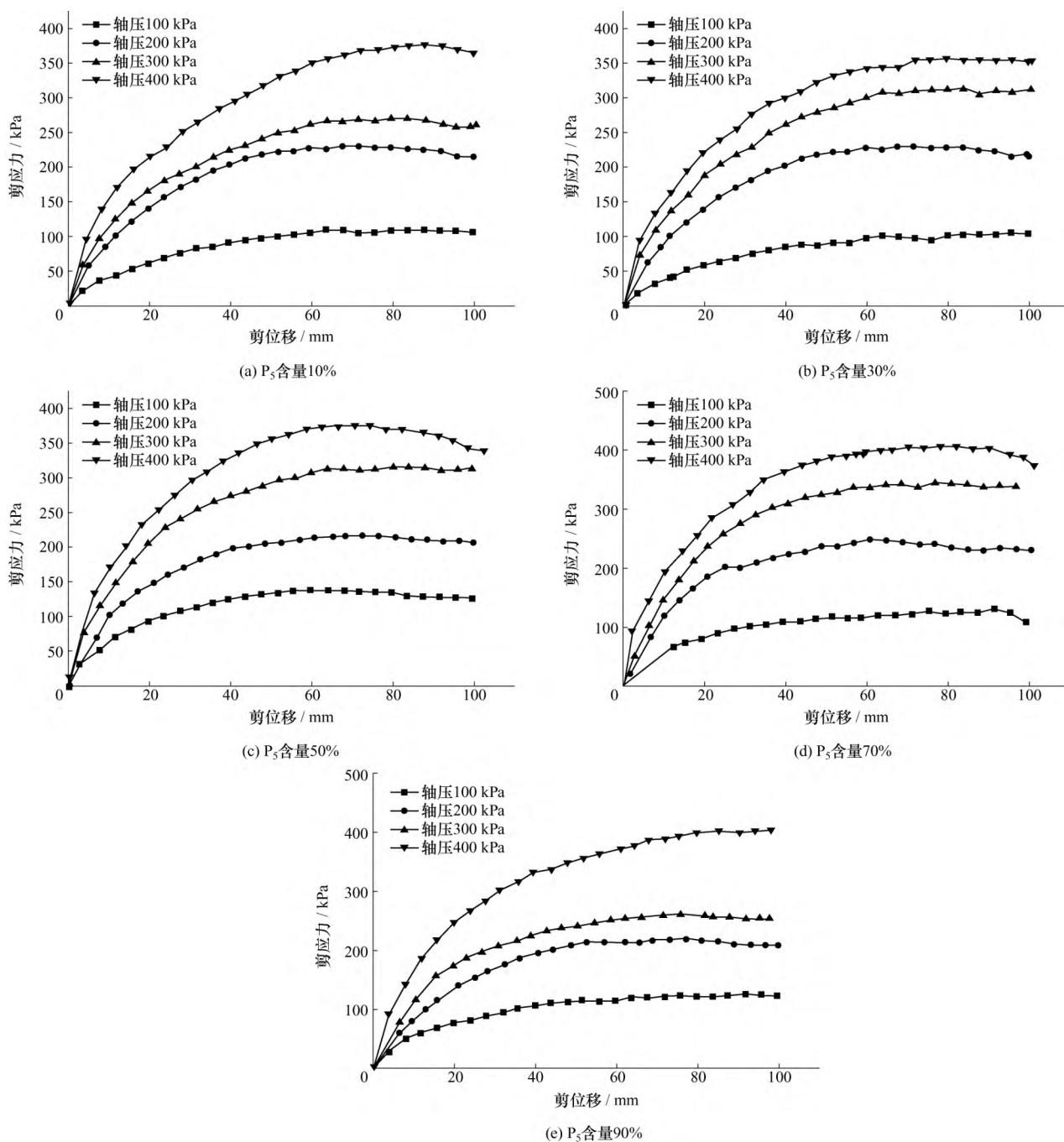


图 3 不同 P₅ 含量试样剪应力与剪位移关系

2 试验成果与分析

2.1 不同粗粒含量试样剪应力与剪位移关系

图 3 为不同 P_5 含量不同正应力条件下试样的剪应力与剪位移关系曲线。图 3 表明相同 P_5 含量条件下, 轴压越大剪切破坏的剪应力越大。此外, 剪切初期剪应力随着剪位移的增加而急剧增大, 剪切中期剪应力随剪位移的增加而缓慢增长, 并逐渐趋于平缓, 至剪切后期剪应力基本不变甚至有减小的趋势。这是因为试验初始阶段, 试样被挤密后, 粒径较大的颗粒发生挤压、翻越和破碎现象, 颗粒间的相互咬合作用使得试验中剪应力急剧增加; 随剪位移增加, 颗粒逐渐稳定下来, 试样内初始剪切面逐渐形成, 试样沿此剪切面破坏, 剪应力增长趋势放缓, 最终维持在一稳定水平。试验大部分曲线无明显峰值, 只有粗粒含量为 50% 的试样在轴压 400 kPa 的条件下有峰值并表现出明显的应变软化现象, 这是因为峰点后, 因剪胀变形的增大, 结构变松, 剪胀变形引起的咬合力逐渐降

低以至于消失, 形成应力减小现象。

2.2 体变与剪位移的关系曲线

图 4 是相同密度条件下不同 P_5 含量不同正应力条件下各试样体变与剪位移的关系曲线。图 4 表明同等正应力条件下 P_5 含量越多体变越小, 相同 P_5 含量条件下, 正应力越大, 最终体变越大。大部分试验曲线表现为剪缩, 只有轴压 100 kPa, P_5 含量为 90% 的试样表现出剪胀。这是因为粗粒土是由大小不等、性质不一的颗粒相互充填成粒状结构的散粒体。在剪切过程中由于外力的作用, 引起颗粒在剪切面沿着剪力的方向移动和滚动, 从而出现体变, 当颗粒充填邻近颗粒间的孔隙时, 呈体缩, 当颗粒翻越邻近颗粒时, 为剪胀变形。本试验试样的密度较小, 故大都表现出剪缩。当粗粒含量增多, 细粒不能包裹粗粒, 粗粒间表现为点点接触或点面接触, 在较小的正应力条件下, 剪应力也较小, 粗粒在剪切过程中基本不会发生破碎, 也基本不相互充填, 颗粒以翻越的形式运动, 所以轴压 100 kPa, P_5 含量为 90% 的试样表现出剪胀。

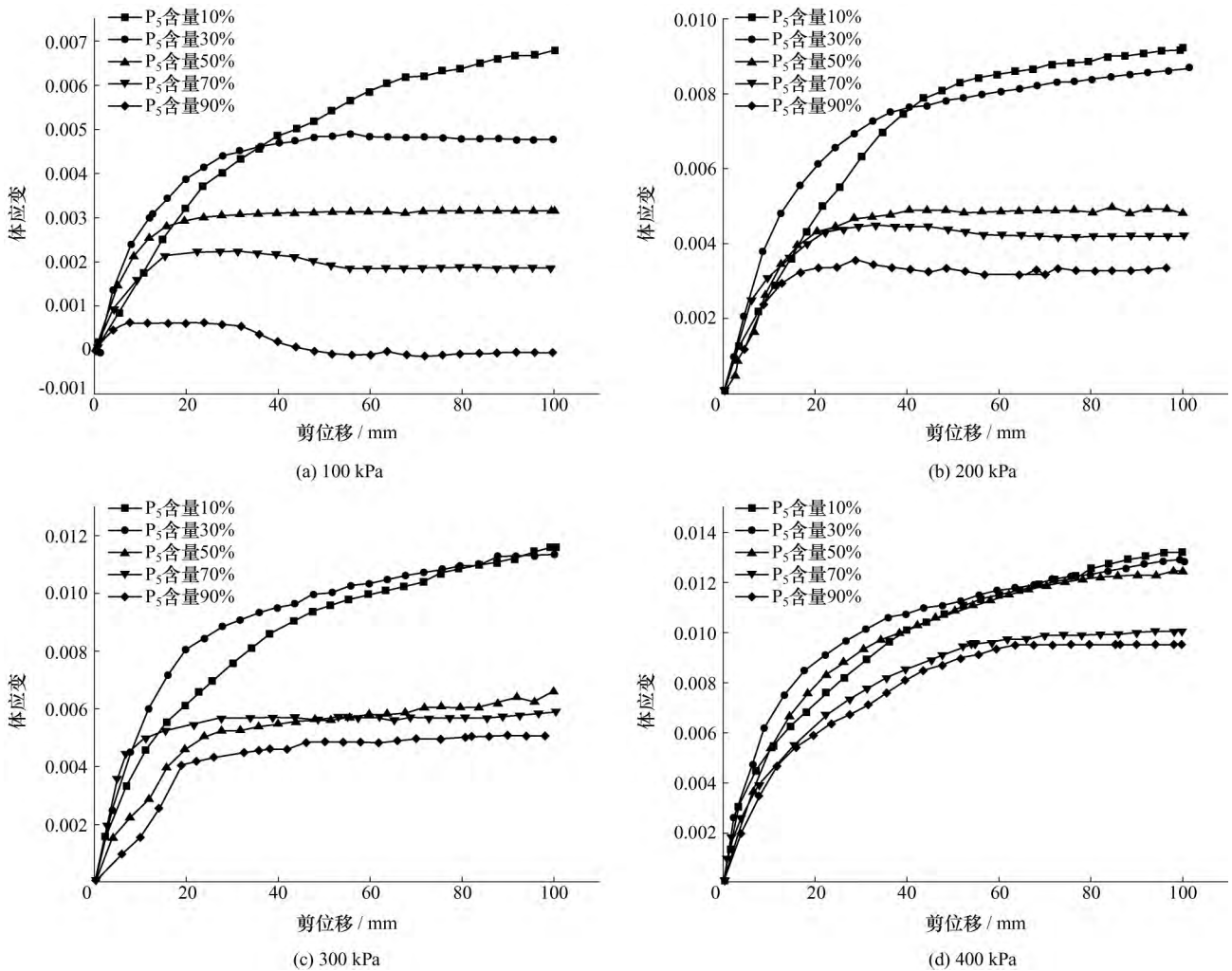


图 4 体变与剪位移关系曲线

2.3 P₅含量与粗粒土抗剪强度参数的关系

根据剪应力与剪位移关系曲线，选取各试样在剪位移为 60 mm 时对应的剪应力作为试样的破坏剪应力。将不同 P₅ 含量的试样在各个正应力下对应的破坏剪应力绘制在一张图上，如图 5 所示。结合摩尔库

仑准则得到不同 P₅ 含量的粗粒土抗剪强度参数。内摩擦角与 P₅ 含量的关系如图 6 所示，黏聚力与 P₅ 含量的关系如图 7 所示。

图 6 表明随着 P₅ 含量增加，内摩擦角先增大再减小，在 P₅ 含量为 70% 时达到最大值。这是因为粗

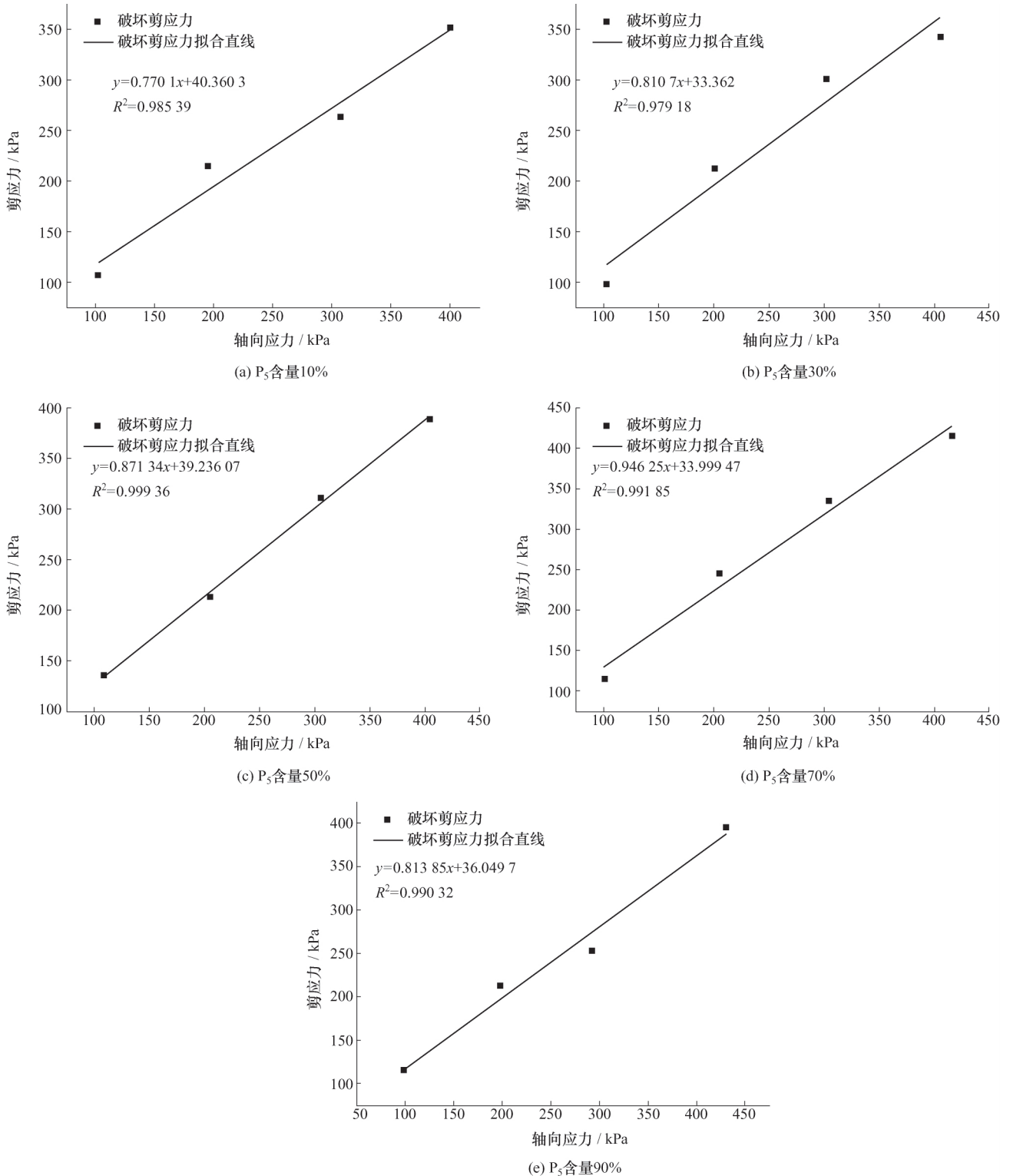


图 5 不同 P₅ 含量试样破坏剪应力与正应力关系

粒土的抗剪强度由三部分组成，即细料本身的强度、粗料的强度、粗料和细料之间的强度。当 P₅ 含量小于 30% 时，粗料被细料包裹，抗剪强度取决于细料，抗剪强度随粗料含量的增加而增加，但增加幅度较小。当粗料含量为 30% ~ 70% 时，粗料和细料相互充填的最密实，孔隙最少，抗剪强度取决于粗料和细料之间强度，其随着粗料的增加而显著增大。当粗料含量超过 70% 时，一方面因细料填不满粗料孔隙，粗粒土的密度减小；另一方面在同一正应力作用下，作用力由粗料骨架承担，处于孔隙中的细料得不到压实。故抗剪强度不但不增加反而减小。这与文献 [1] 结论相一致。

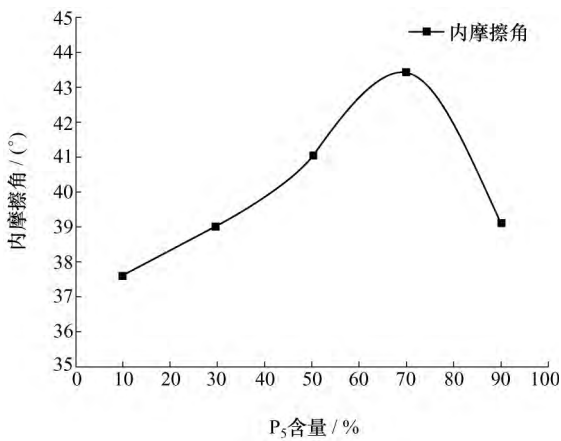


图 6 内摩擦角与 P₅ 含量的关系

图 7 表明黏聚力与 P₅ 含量之间的关系不明显，黏聚力数值较分散。这是因为粗粒料颗粒的堆积与排列是随机的、杂乱无章的、颗粒间的接触方式，相互咬合的角度都是不确定的，颗粒间相互嵌入与连锁的作用效果也是随机的。因此黏聚力的变化特性不能简单用粗粒含量来描述，这与文献 [3] [4] 结论一致。

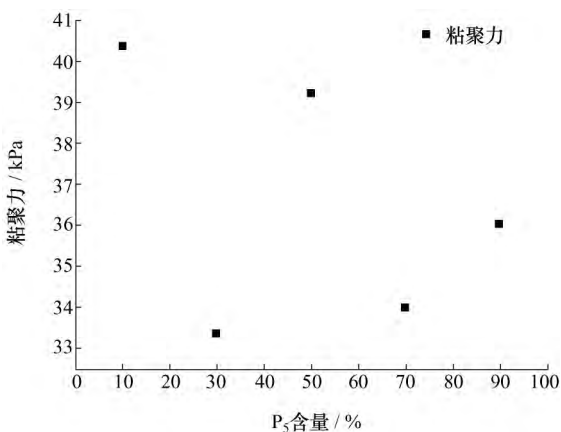


图 7 黏聚力与 P₅ 含量关系

2.4 粗粒土内摩擦角与径径比的关系

粗粒土的抗剪强度不仅和 P₅ 含量有关，还与细料含量、粒径大小的上限、粗粒内部各个粒径组的百分含量以及试样的尺寸有关。径径比能很好的反应它们之间的关系。

径径比的计算公式为

$$\eta = D/d_B \quad (1)$$

式中， η 为试样直径与试样几何平均粒径之比； D 为试样直径 (mm)； d_B 为几何平均粒径 (mm)。

几何平均粒径的计算公式为

$$d_B = \sqrt[3]{d_{\max} d_{cp} d_{85}} \quad (2)$$

式中， d_{\max} 为最大粒径 (mm)； d_{cp} 为加权平均粒径 (mm)； d_{85} 为颗粒组成累计含量 85% 时的粒径 (mm)。

加权平均粒径的计算公式为

$$d_{cp} = \frac{\sum_i d_i p_i}{\sum_i p_i} \quad (3)$$

式中， d_i 为某粒级颗粒的平均粒径 (mm)； p_i 为某粒级颗粒含量 (%)。

不同粗粒含量的特性粒径和径径比如表 1 所列。将内摩擦角与径径比表示在双对数坐标上，如图 8 所示，用直线拟合，其线性关系良好。因此内摩擦角与径径比的关系为

$$\lg \varphi - \lg \varphi_0 = k(\lg \eta - \lg \eta_0) \quad (4)$$

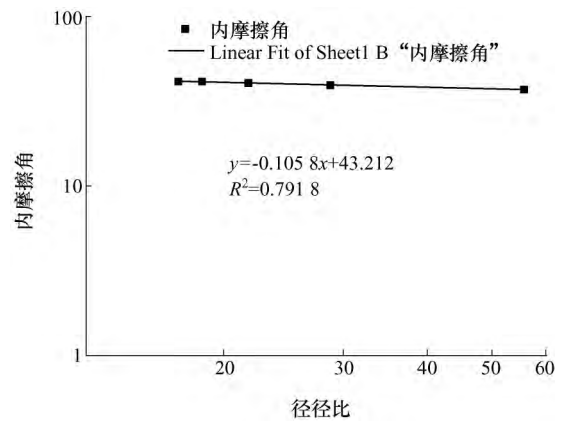


图 8 双对数坐标中内摩擦角与径径比的关系

经过简单的数学变换式 (4) 可化简为

$$\varphi = \eta^k \eta_0^{-k} \varphi_0 \quad (5)$$

式中， φ 为内摩擦角； η 为径径比； k 为直线的斜率；为参考径径比可取 55.67； η_0 为参考径径比； η_0 所对应的内摩擦角可取 37.6°。若令，则式 (5) 可化简为

$$\varphi = \eta^k B \quad (6)$$

本拟合公式只含两个参数， k 值为 -0.1058， B 值为 57.5274。

表1 不同粗粒含量的特性粒径和径径比

粗粒含量/%	加权平均粒径 d_{cp}/mm	最大粒径 d_{\max}/mm	d_{85}/mm	几何平均粒径 d_B/mm	径径比
10	4.56	60	5	11.10	55.67
30	8.68	60	19	21.47	28.79
50	12.80	60	30	28.46	21.72
70	16.92	60	36.5	33.34	18.54
90	21.04	60	38	36.34	17.07

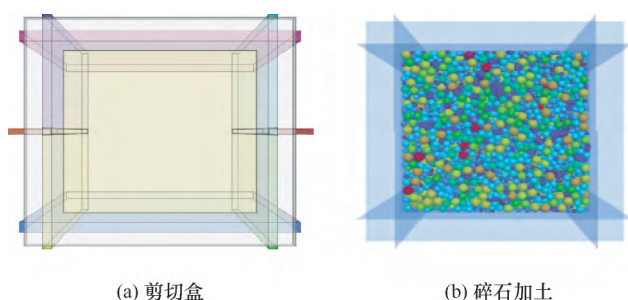
3 大直剪离散元模拟

3.1 剪切盒模型

本次颗粒离散元模拟的剪切盒尺寸(长×宽×高)为50 cm×50 cm×50 cm。共由10个墙体生成,在试验过程中保持上剪切盒不动,推动下剪切盒,使用伺服加载机制保持设定的正应力恒定。剪切试验中认为外盒是刚性体,设置墙体的刚度远比土石混合料的刚度大。

3.2 生成土石混合料

本数值试验土石混合料小于5 mm的颗粒用圆球来代替,大于5 mm的颗粒一般是不规则的,均存在一定的棱角,因此用clump“聚粒”模型来模拟。鉴于剪切盒的尺寸,考虑到相同体积下颗粒数量随颗粒粒径增长成几何指数减少,故将小于1 mm的颗粒按1 mm生成。由PFC^{3D}内置fish语言编写颗粒生成程序,得到与图2相对应的土石混合体。生成粗粒含量为10%的直剪模型如图9所示。

图9 PFC^{3D}数值模型

3.3 细观参数标定

吴东旭^[12]分析了颗粒流细观参数对粗粒土强度的影响,认为抗剪曲线的峰值段主要受接触刚度和摩擦系数的影响,上升段主要受接触刚度的影响。本文参考了其标定方法及耿丽^[13]、孔亮^[14]等标定细观参数的方法。首先调节摩擦系数,通过与实验曲线比较,确定剪应力与剪位移曲线的峰值;然后通过调整法向刚度与切向刚度比,使曲线上升段与室内试验相

吻合。通过反复调试,最终得到一组最能成功与室内大直剪试验结果相对应的细观参数如表2所列。图10是P₅含量为70%时,数值模拟曲线与室内试验曲线对比,相同轴压下,两条曲线走势一致,基本吻合,数值模型的有效性和细观参数的可靠性得到验证。

表2 大直剪数值模拟细观参数

$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/MPa	k_n/k_s	μ	n
1800	60	2.0	0.4	0.36

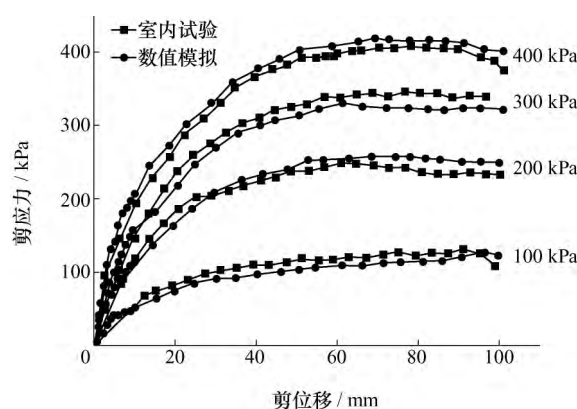


图10 粗粒含量70%时模拟的剪应力与剪位移曲线

3.4 不同粗粒含量下,粗粒土微观力学特性的颗粒流模拟分析

图11是P₅含量70%轴压300 kPa时剪切过程中位移场变化图。由图可知,剪切初期下盒颗粒沿剪切方向移动,上盒颗粒向下运动宏观表现为压缩固结,这与室内试验相吻合,剪切缝附近颗粒运动杂乱无章,表明颗粒在不断调整位置但剪切带未形成。至剪切中期剪切带附近颗粒位置调整完毕,下盒颗粒运动带动下盒颗粒运动,剪切带形成,剪切带附近颗粒运动表现为上凸的弧线,上部剪切盒左右两端颗粒位移场矢量表现为旋涡状,均为逆时针旋转。这种现象一直持续至剪切完成。图12是轴压400 kPa条件下不同粗粒含量的数值模型剪切完成后的力链分布。图13是P₅含量10%的数值模型在不同轴压下剪切完成后的力链分布。可以看出力链网络沿对角线方向分布,但分布宽度不同,基本表现为:相同轴压下随P₅含量增多力链网络分布越宽,相同P₅含量条件下,随轴压增加力链网络分布越窄。图14是P₅含量70%轴压300 kPa时剪切过程中力链变化图。可以看出力链起源于下盒左侧边界处,剪切中期力链沿对角线方向向上盒延伸,表现为倾斜的珊瑚状,伴随着剪切进行力链逐渐发散形成力链网络。至剪切后期力链

网络持续发展未表现出衰减趋势，这与室内试验剪应力与剪位移曲线无明显峰值，剪应力随剪位移增加无明显减小相吻合，至剪切完成力链网络稍有衰减。

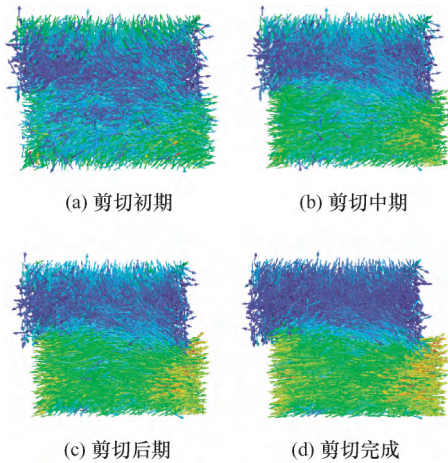


图 11 剪切过程中位移场变化

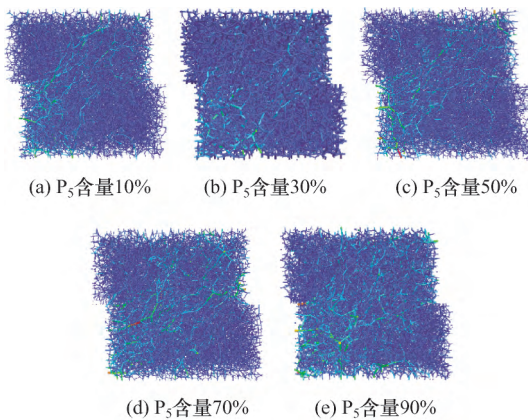


图 12 轴压 400 kPa、不同 P_5 含量的数值模型剪切完成后力链分布

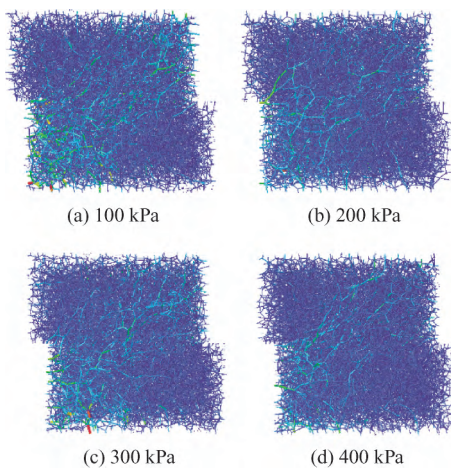


图 13 P_5 含量 10%、不同轴压数值模型剪切完成后力链分布

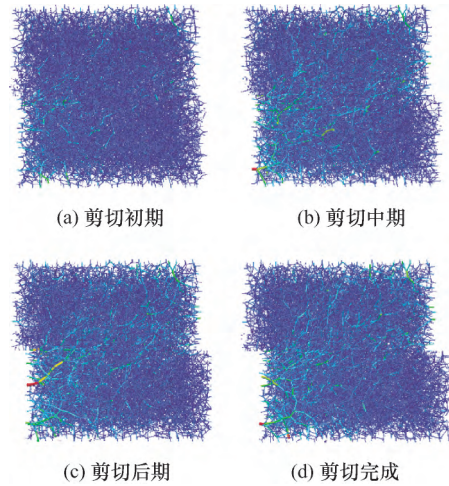


图 14 剪切过程中力链变化

4 结 论

本文开展了 5 种不同 P_5 含量的大型室内直剪试验和相应的数值模拟，研究表明：

(1) 随 P_5 含量的增加粗粒土内摩擦角先增大后减小，当粗料含量小于 30% 时，内摩擦角增加幅度较小。当粗料含量为 30% 至 70% 时，内摩擦角随着 P_5 的增加而显著增大。当 P_5 含量超过 70% 时，抗剪强度不但不增加反而减小。黏聚力与 P_5 含量之间的关系不明显。

(2) 将内摩擦角与径径比表示在双对数坐标上用直线拟合，其线性关系良好。故内摩擦角和径径比的关系可用幂函数来拟合， k 值为 -0.1058 ， B 值为 57.5274 。

(3) 剪切带附近颗粒运动表现为上凸的弧线，这种现象一直持续至剪切完成。力链起源于下盒左侧边界处，沿对角线方向向上盒延伸，表现为倾斜的珊瑚状，随剪切进行力链发散变粗形成力链网络。剪切后期力链网络未表现出衰减趋势，至剪切完成力链网络稍有衰减。

本文的研究只是针对一种粗粒料进行，不同母岩性质及含水率的大型直剪试验研究有待逐步展开，以便为深入了解不同类型粗粒土剪切过程中强度及变形的普遍规律提供试验依据。

参考文献：

[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, 1999.
 [2] 褚福永, 朱俊高, 殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2249-2254.
 [3] 杜俊, 侯克鹏. 粗粒含量对排土场堆石体剪切变形和强度的影

- 响研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1): 14-17.
- [4] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3649-365.
- [5] 刘建坤, 于钱米, 刘景宇, 等. 细粒土不均匀分布对粗粒土力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 562-572.
- [6] 凌华, 傅华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 12-16.
- [7] 谭彩, 王琛, 吴勇, 等. 无黏性粗粒土直接剪切试验的强度尺寸效应[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S1): 94-99.
- [8] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D(particle flow code in 2 dimensions) [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 1999.
- [9] 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1553-1566.
- [10] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 粗粒含量对砾类土直剪过程中强度与变形特性影响的离散元模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 311-316.
- [11] 朱俊高, 郭万里, 徐佳成, 等. 级配和密实度对粗粒土三轴试验影响离散元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 70-74.
- [12] 吴东旭, 姚勇, 梅军, 等. 砂卵石土直剪试验颗粒离散元细观力学模拟[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 79-84.
- [13] 耿丽, 黄志强, 苗雨. 粗粒土三轴试验的细观模拟[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(4): 24-29.
- [14] 孔亮, 陈凡秀, 李杰. 基于数字图像相关法的砂土细观直剪试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2971-2978.

(责任编辑 康健)