

类岩堆体剪切力学特性试验及数值模拟研究

易银莲¹, 张少强², 张子新¹

¹同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

²中电建路桥集团有限公司, 北京

收稿日期: 2022年2月15日; 录用日期: 2022年3月8日; 发布日期: 2022年3月16日

摘要

本文针对云南红土高原地区存在的特殊岩土混合物一类岩堆体, 通过室内直剪试验研究了其抗剪强度, 发现含石率为100%的类岩堆体呈现应变硬化的剪切特性。基于随机生成不规则块石理论, 采用PFC数值模拟直剪试验过程, 在保证级配、细观参数相同的情况下, 研究不同孔隙率的类岩堆体抗剪强度, 结果表明: 开始剪切阶段, 孔隙率越小, 剪应力越大, 不同孔隙率的试样剪应力差值较大, 随着块石压密、剪碎、剪应力差值缩小, 研究成果对红土高原地区隧道施工参数选取具有指导意义。

关键词

类岩堆体, 直剪试验, 数值模拟, 含石率

Research on Shear Properties and Numerical Simulation of Talus-Like Rock Mass

Yinlian Yi¹, Shaoqiang Zhang², Zixin Zhang¹

¹Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²POWERCHINA Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 15th, 2022; accepted: Mar. 8th, 2022; published: Mar. 16th, 2022

Abstract

In this study, the shear strength of the special soil-rock mixture-talus-like rock mass in the Late-rite Plateau area of Yunnan was studied through direct shear test, and it was found that the talus-like rock mass with volume block porosity of 100% showed strain-hardened shear characteristics. Based on the theory of random generation of irregular blocks, the PFC simulation of the straight

shear test process, under the condition of ensuring the same gradation and mesoscopic parameters, the shear strength of talus-like rock mass with different porosity is studied, and the results show that the smaller the porosity at the beginning of the shear stage, the greater the shear stress, the larger the shear stress difference of the specimens of different porosity, and the shear stress difference of the specimen is reduced with the compaction and shearing of the block. This study has guiding significance for the selection of tunnel construction parameters in the laterite plateau area.

Keywords

Talus-Like Rock Mass, Direct Shear Test, Numerical Simulation, Content Ratio of Rock

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩堆体是指松散岩石堆积体,广泛分布于第四系坡积层、崩积层、残积层等地层中[1]。在我国红土高原的云南地区存在一种岩土混合体,组成物质复杂,粒径跨度大,呈碎裂、松散状,节理、裂隙极其发育,自稳能力差,属于特殊软弱围岩体,为区别于一般岩堆体,将其命名为“类岩堆体”。类岩堆体既不属于岩体,也不属于土体,且不同的类岩堆体物理力学性质差异较大。现有研究多针对于普通土石混合体,对于类岩堆体这样特殊的岩土体材料深入研究较少。

在国内,油新华等[2]在对三峡库区蓄水边坡进行工程地质调查的基础上,提出了土石混合体的概念,并根据含石量、土体性质和颗粒级配对其进行了分类。对于土石混合体,国外常称“bimrocks”,最早由 Medley [3] [4]提出,他将其定义为“岩石的混合物,由具有良好质地的胶结基质内的岩土工程上重要的块体组成”。表述中“岩土工程上重要的块体”是指在块体与基质之间存在力学性质差异,并且块体的体积和大小会在工程尺度上影响岩体性质。

研究土石混合体,需明确土和石粒径界限,目前国内外主要存在3种土石阈值取值方法,常用的土石阈值为2 mm和5 mm [5],除此之外, Medley [3]对美国 Franciscan 地区分布的 melange (bimrocks 的一种)进行统计分析,发现其粒度分维曲线在 $0.05\sqrt{A}$ 处出现明显转折点,因而定义土石阈值为 $0.05\sqrt{A}$ 。针对土石混合体的力学性质,国内外学者开展了大量研究, Lindquist [6]通过物理模型试验发现,在 bimrocks 变形模量相对于含石率的图中,几乎所有的数据点都落在基质的平均模量(下限)和基质、块体加权(根据体积比例)模量(上限)之间。Lin [7]等对多组不同特征的高含石率(65%以上)胶结型 bimrocks 试件进行测试,结果显示动态弹性模量是含石率(VBP)和基质强度的函数。bimrocks 的变形模量主要受基质变形模量的影响,强度受基质内聚力的影响更大[8]。大量研究表明,控制 bimrocks 强度特性的参数有体积含石率(VBP)、基质和块体强度、块体形状和空间分布[7] [8] [9] [10] [11]。使用不同方法的研究都表明,影响土石混合体物理力学性质最显著的参数是含石率,不同含石率下土石混合体受力之后的力学反应差别很大。

在土石混合体的剪切特性方面,景宏君等[12]对土石混合比为3:7的土石混合填料进行大型三轴剪切试验,发现在低围压下,应力应变曲线为应变硬化型,在高围压下,试样表现为弱应变软化。江强强等[13]开展了不同含石量条件下的土石混合体剪切变形特性试验研究,结果表明:在低含石率下,试样呈应

变硬化特性；在高含石率下，试样呈应变软化特性。金磊等[14]对含石量为 50%的土石混合物三维离散元模型进行三轴试验数值模拟，发现试样微裂纹最初在土-石界面处产生，随后绕过块石在土体中扩展，最后联通形成剪切带。胡瑞林等[15]对土石混合物细观损伤开裂过程进行研究，发现在低含石率下(30%以下)，土体强度是决定抗压强度最主要因素，界面强度对其影响不大；在高含石量下，界面胶结强度增大会使块石间的接触咬合变强，从而造成试样的抗压强度有所提高。严颖等[16]采用离散元模型对土石混合体的直剪过程进行了数值模拟，结果表明，在低含石量下，土石混合体的抗剪强度随含石量增加而增加；在中含石量下，抗剪强度波动性较大；在高含石量下，抗剪强度显著增强。无论是直剪试验还是数值模拟，都表明土石混合物剪切特性受含石率影响较大，在剪切过程中裂纹产生有明显的绕石效应。

前述研究对象为土石混合物，而类岩堆体作为红土高原地区特有的地质材料，其剪切力学特性尚未被研究过，综上所述，参照土石混合体的研究，对于类岩堆体，含石率对其影响较大。研究不同含石率的类岩堆体物理力学特性，对于指导实际工程施工具有重要意义。本文通过直剪试验，研究了含石率为 100%的类岩堆体在竖向压力为 200 kPa 下的抗剪强度，并应用 PFC 对其进行数值仿真模拟，以期对红土高原地区隧道开挖过程中参数的合理选取提供一定参考。

2. 类岩堆体直剪试验

2.1 试验设备

试验设备采用同济大学自主研制的大型接触面剪切仪，如图 1 所示。该设备由上下剪切盒、油压控制系统、计算机控制系统组成。剪切盒净空尺寸为 600 mm × 400 mm × 200 mm (长 × 宽 × 高)。水平和竖向荷载均通过油压控制，最大可达 100 kN，试验过程中，上剪切盒固定，切向最大位移达 75 mm。

测定材料级配采用新标准方孔试验筛(JGJ52-2006)和顶击式标准振筛机(ZBSX-92A 型)，如图 2 所示。振筛机震幅为 8 mm，震击次数为 147 次/分。

2.2 试验材料

试验材料取自云南建(个)元高速公路他依隧道左洞 Z5K64+575.4 桩号附近。考虑试验筛孔径，选取 5 mm 作为土石阈值，同时，为了消除尺寸效应，根据剪切盒尺寸以及材料装填高度确定材料最大粒径，一般取(1/6) H，(1/7~1/5) H 和(1/8~1/4) H 等(H 为剪切盒的高度) [5]。本试验所用设备的剪切盒净空高度为 200 mm，根据上述标准，考虑试验筛孔径，选定 31.5 mm (约(1/6.35) H)为本试验材料的最大粒径。利用振筛机将类岩堆体按照粒径大小筛分成 5~10 mm，10~16 mm，16~20 mm，20~25 mm，25~31.5 mm 共 5 个粒组，部分粒组如图 3 所示，试样级配如图 4 所示。



Figure 1. Large-scale interface shearing apparatus
图 1. 大型接触面剪切仪图



Figure 2. Top strike type standard vibrating sieving machine and new standard square hole test sieves
图 2. 顶击式标准振筛机和新标准方孔试验筛

2.3 试验方案

根据试验方案设计，试验基本过程与操作步骤如下所述：

1、配料：试验材料质量恒定为 76.2 kg，根据设定的级配曲线计算出不同粒径颗粒的质量，称重之后将准备好的粗集料混合搅拌均匀；

2、装填：为使试验材料分布相对均匀，采用分层装样的方法，分 4 层进行装样，每层高度控制在 50 mm 左右，将材料摊铺均匀，静置 20 分钟，使其在重力作用下沉降；

3、剪切：装样后检查平整度和密实度，随后进行竖向加载固结，在达到预定竖向压力后，持续加压 20 min。达到预定压力 200 kPa 后，持续加压 20 分钟，然后以 1.6 mm/min 的速度开始剪切，达到 70~90 mm 的剪切位移后停止剪切进行卸载；

4、筛分：剪切完成后，将材料小心取出，再次通过标准筛进行筛分，记录各粒径颗粒质量，获得剪切后材料的级配曲线。



Figure 3. Part of the grain group of talus-like rock mass
图 3. 类岩堆体部分粒组

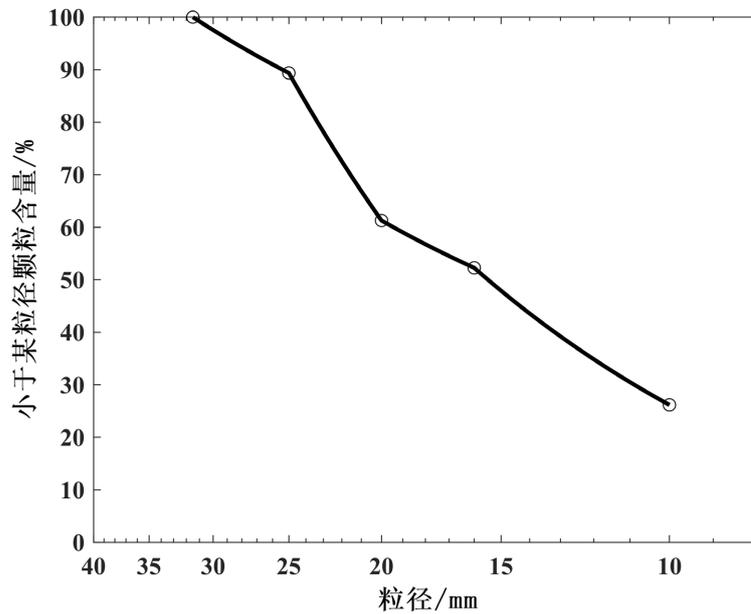


Figure 4. Grading curve of sample
图 4. 试样级配曲线

3. 试验结果及分析

通过室内直剪试验得到的类岩堆体剪应力-位移曲线如图 5 所示。由图 5 可知，试样在 200 kPa 下随着剪切位移的增大，剪应力不断增大，表现为应变硬化，达到塑性屈服移后，应力基本保持不变，应力位移曲线趋势与文献[17]基本一致。整个曲线可划分为三个阶段：① 剪密段，类岩堆体内部空隙被挤压，材料逐渐密实，剪应力快速增加，曲线近似为线性；② 硬化段，随着剪切位移的增加，剪应力增长速率逐渐变小，慢慢达到峰值强度，材料继续被压密，同时伴随材料内部块石翻转、摩擦等作用导致曲线出现明显的波动；③ 塑性流动段，剪应力达到峰值强度后，曲线基本保持平稳状态，材料内部出现明显剪切破坏面。

4. 数值模拟

4.1 数值模型

为了观察块石破碎情况，本文选用离散元软件 PFC2D 作为数值模拟工具。采用 PFC2D 中的 Wall 单元作为剪切盒边界，参照直剪试验条件，剪切盒尺寸设置为 600 mm × 200 mm (长 × 高)。在 PFC2D 中用重力沉降法生成均匀颗粒体系，颗粒半径为 0.6~0.9 mm，采用文献[18]中所述方法在 CAD 中生成随机不规则多边形，导入 PFC2D 中，对 ball 进行分组，生成 cluster，数值模型如图 6 所示，颗粒密度为 2900 kg/m³。块石之间采用线性模型，块石内部颗粒之间则采用平行黏结模型，相比于线性模型，平行黏结模型可以传递力矩，一旦应力超过设定的黏结强度，颗粒之间的黏结会破坏，因而可以模拟块石的破碎情况。

4.2 模拟参数分析

宏观参数与细观参数之间缺乏相互转换的成熟理论，一般通过试错尽量使模拟结果接近真实试验结果，本文通过多次尝试得到颗粒细观参数如表 1 所示。由图 7 数值模拟和直剪试验的对比结果可知，数值试验获得的剪应力-剪切位移曲线与室内试验的吻合度较好。

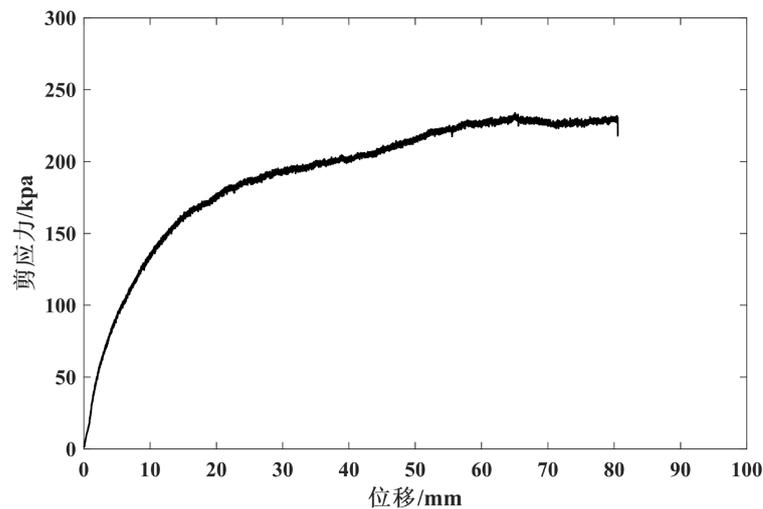


Figure 5. Shear-displacement relations for talus-like rock mass
图 5. 类岩堆体剪应力 - 位移曲线

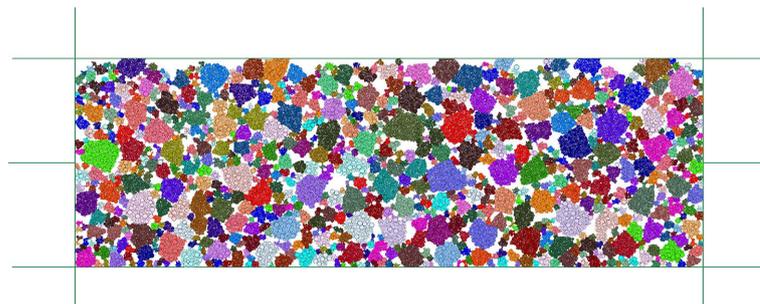


Figure 6. Model diagram
图 6. 模型示意图

含石率为 100% 的类岩堆体内部充满较大的空隙，块石相互搭接形成骨架，在剪切过程中骨架承担传力的作用，一般来说，孔隙率越小，形成的骨架越稳定。在保证级配、微观参数相同的情况下，比较孔隙率为 0.17、0.2 的数值模型获得的剪应力 - 位移曲线，如图 8 所示，曲线整体趋势一致，开始剪切阶段，孔隙率越小，剪应力越大，随着块石破碎、压密，剪应力得到强化，两者剪应力差值缩小。

Table 1. Mesoscopic parameter
表 1. 细观参数表

细观参数	接触类型	
	块石内部(parallel bond model)	块石之间(linear model)
线性法向刚度(Pa)	2e8	2e8
平行黏结变形模量(Pa)	5e7	—
平行黏结抗拉强度(Pa)	5e7	—
平行黏结抗剪强度(Pa)	6e6	—
平行黏结摩擦角(°)	35	—
摩擦系数	0.7	—
刚度比	1.5	1.5

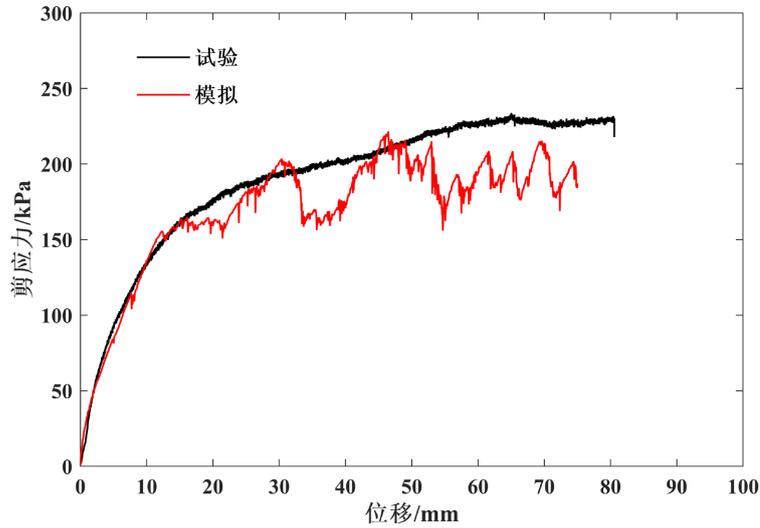


Figure 7. Stress-displacement curves of numerical simulation and direct shear test

图 7. 数值模拟与直剪试验的剪应力 - 位移曲线

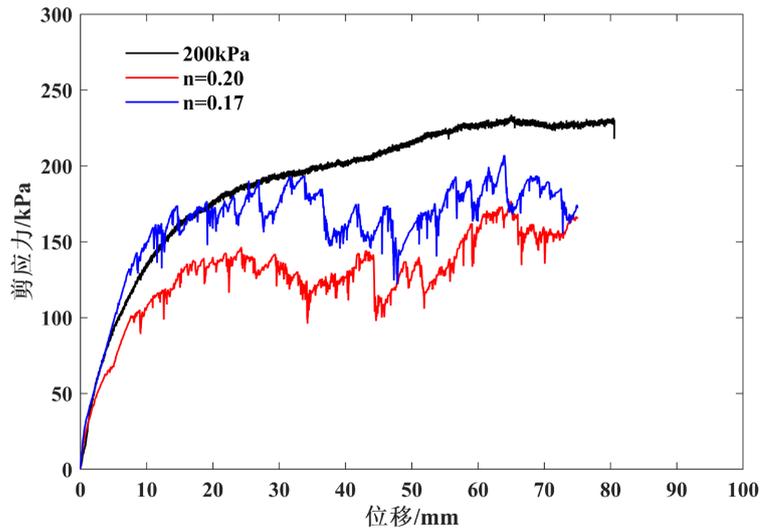


Figure 8. Stress-displacement curves of talus-like rock mass with different porosity

图 8. 不同孔隙率的类岩堆体剪应力 - 位移曲线

5. 结论

本文以红土高原的云南地区存在的特殊岩土混合体 - 类岩堆体为研究对象, 通过大型室内直剪试验和数值模拟, 研究类岩堆体的剪切特性, 得到如下结论:

- 1) 含石率为 100% 的类岩堆体在 200 kPa 竖向压力下剪切时呈现应变硬化特性, 整个应力位移曲线可划分为剪密段、硬化段和塑性流动段;
- 2) 通过 PFC 离散元软件建立起数值模型, 采用 cluster 模拟块石破碎特性, 多次尝试确定了类岩堆体中块石的细观参数;
- 3) 在保证级配、含石率、细观参数相同的情况下, 比较不同孔隙率的类岩堆体数值模型获得的剪应

力-位移曲线, 揭示了孔隙率对类岩堆体剪切强度的影响。

参考文献

- [1] Huang, M.K. (2011) Study on Classification of Rock Pile. *Applied Mechanics and Materials*, **52-54**: 777-781. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.777>
- [2] 油新华, 何刚, 李晓. 土石混合体的分类建议[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2002年中国西北部重大工程地质问题论坛论文集. 北京: 科学出版社, 2002: 466-470.
- [3] Medley, E. (1994) The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- [4] Medley, E.W. (2008) Engineering the Geological Chaos of Franciscan and Other Bimrocks. *The 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium (USRMS)*, San Francisco, California, June 2008, 1-11.
- [5] Cen, D., Huang, D. and Ren, F. (2017) Shear Deformation and Strength of the Interphase between the Soil-Rock Mixture and the Benched Bedrock Slope Surface. *Acta Geotechnica*, **12**, 391-413. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0468-2>
- [6] Lindquist, E.S. (1994) The Strength and Deformation Properties of Melange. ProQuest Dissertations Publishing, Narms Balkema.
- [7] Lin, Y., Peng, L., Lei, M., et al. (2019) Mechanical properties of bimrocks with high rock block proportion. *Journal of Central South University*, **26**, 3397-3409. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4262-9>
- [8] Mahdevari, S., Moarefvand, P. and Mohammadzamani, D. (2020) Considering the Effect of Block-to-Matrix Strength Ratio on Geomechanical Parameters of Bimrocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, **38**, 4501-4520. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01304-7>
- [9] Mahdevari, S. and Maarefvand, P. (2016) An Investigation into the Effects of Block Size Distribution Function on the Strength of Bimrocks Based on Large-Scale Laboratory Tests. *Arabian Journal of Geosciences*, **9**, Article No. 509. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2499-2>
- [10] Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., et al. (2014) An Approach to Predicting the Overall Strengths of Unwelded Bimrocks and Bimsoils. *Engineering Geology*, **183**, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.007>
- [11] Coli, N., Berry, P. and Boldini, D. (2011) *In Situ* Non-Conventional Shear Tests for the Mechanical Characterisation of a Bimrock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.09.012>
- [12] 景宏君, 张延青, 顾行文, 等. 土石混合填料大型三轴剪切试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(2): 270-275.
- [13] 江强强, 徐杨青, 王浩. 不同含石量条件下土石混合体剪切变形特征的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 951-958.
- [14] 金磊, 曾亚武, 叶建华. 土石混合体细观力学参数对宏观力学特性影响研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(5): 409-417.
- [15] 胡瑞林, 李晓, 王宇, 等. 土石混合体工程地质力学特性及其结构效应研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 255-281.
- [16] 严颖, 赵金凤, 季顺迎. 块石含量和空间分布对土石混合体抗剪强度影响的离散元分析[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 146-156.
- [17] 杨忠平, 李进, 蒋源文, 等. 含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1443-1452.
- [18] 徐文杰. 土石混合体细观结构力学及其边坡稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008.