

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221808

土石混合体的三轴数值模拟及宏观变形分析

张润涵^{1,2}, 张凌凯^{1,2}, 崔熙灿^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 筑坝料的力学特性能够直接影响心墙坝的沉降变形及结构稳定性,为究其根本原因,采用宏观相结合的手段探究土石混合体的力学性能及内部变形破坏机制。以西藏澜沧江如美水电站工程为例,基于离散元颗粒流法开展大型三轴数值模拟试验,结果表明,随块石形态的不规则度提高,应力峰值出现节点提前、峰值强度明显增大并伴有显著软化特征,剪缩性不明显,剪胀性突出;剪切带由单一“工”字型向复杂“工”字型破坏形态演化,厚度由45 mm增至105 mm,最终鼓胀破坏面积成倍递增至35 000 mm²;力链强度极值增大且数目增多。增大含石量也是提高试样峰值强度的关键;含石量较低时试样剪缩特性突出,剪胀特性不明显;随含石量增大,块石“齿轮”效应增强,剪切带破坏形态由光滑反“S”型向多条不规则剪切带过渡,厚度由47.5 mm增至105 mm,鼓胀破坏区面积从12 800 mm²演化至35 000 mm²,强力链数目增长,力链强度极值由10.49 kN提高至164.30 kN。可选择不规则度高的块石并提高含石量以增强结构强度稳定性,研究结果可为工程后期稳定性评价及拟建大坝工作提供参考。

关键词: 三轴试验; 土石混合体; 离散元; 宏观变形; 细观结构

中图分类号: TU431;TV41

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0171-04

1 引言

土石混合体是一种土体和块石混合的地质体,因其强度高、稳定性好等优点常见于水利等基础建设中。但其表现出的非均质、非连续等力学特性常给水利大坝建设工程带来一些工程问题,如心墙坝中心墙与坝壳料之间的不均匀沉降导致的坝体沉降变形等。故探究土石混合体的宏观变形机制对维护坝体安全稳定运行有重要意义。目前,对土石混合体的影响因素研究主要集中在含石量及块石空间分布等,常用手段有物理试验^[1,2]和数值模拟^[3-8]。物理试验能够反映其力学特性,但只能从连续、均匀性角度出发,难以揭示细观变形机制。数值模拟方面,大多利用离散元法通过剪切带、力链等细观组织在分析材料变形机制上取得了一定突破,但多以程序自带的圆球或圆盘形作为块石模型,缺乏块石形态对力学特

性影响的深入研究^[3-8]。为此,本文以西藏澜沧江如美水电站工程为例,基于离散元颗粒流法开展大型三轴数值模拟试验,并从块石形态和含石量对土石混合体的宏观变形破坏规律和细观特征影响入手展开分析。研究结果可为坝体结构安全提供试验依据。

2 试验方案

2.1 试验基本情况

以西藏澜沧江如美水电站工程为例^[9],模拟墙体尺寸应与室内试验保持一致,设直径×高度为300 mm×700 mm,目标围压与室内试验相同为400、800、1 200 kPa;受室内大型三轴仪尺寸限制,试样最大粒径为60 mm,图1为土石混合体试验级配曲线;定义conf函数计算参数变量,并用history命令监测。

2.2 土石阈值的确定

定义土石阈值 $d_{S/RT}$ ^[1]为:

收稿日期: 2022-08-31, **修回日期:** 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52109136);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020492211);中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-KF201908)

作者简介: 张润涵(2000-),女,硕士研究生,研究方向为岩土材料多尺度数值模拟, E-mail:1482053743@qq.com

通讯作者: 张凌凯(1987-),男,博士、副教授,研究方向为环境岩土工程, E-mail:xjau_zlk@163.com

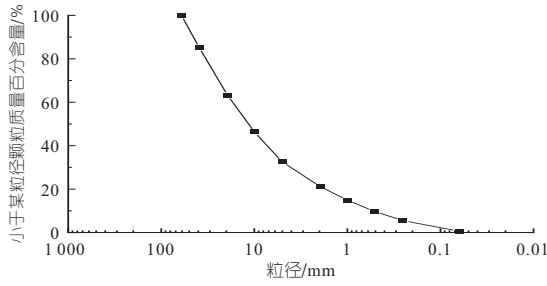


图 1 土石混合物试验级配曲线

Fig. 1 Test grading curve of soil-rock mixture

$$d_{S/RT} = 0.05L_c \quad (1)$$

$$L_c = \sqrt{A} \quad (2)$$

式中, L_c 为工程特征尺度; A 为研究区断面面积。

根据室内试验允许的最大粒径及试样尺寸, 建议选取 20 mm 为土石阈值, 程序中利用 rlo, rhi 命令设定小于 20 mm 的颗粒为土体, 20~60 mm 的颗粒为块石。

2.3 块石模型的建立

为探究块石形态对土石混合体的强度影响, 利用 clump 机制对 ball 颗粒进行二次开发, 土颗粒利用 ball distribute 命令建立圆球形模型, 块石颗粒用 clump template 及 distribute 命令创建由单个 pebble 构成的圆球形块石单元、两个 pebble 构成粒径比为 1:1 的哑铃形块石单元及三个 pebble 构成 1.0:1.4:1.0 粒径比的椭圆形块石单元^[10], 见图 2。

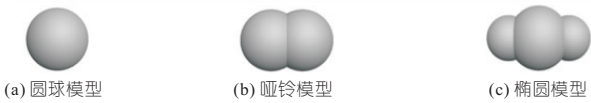


图 2 不同形态的块石模型

Fig. 2 Models of block stones in different forms

2.4 不同含石量模型的建立

根据现场工程报告, 设定含石量 R 分别为 0%、20%、40%、60% 的试样模型。通过 clump porosity 命令控制 R 值, 得到图 3 所示不同含石量的试样模型。

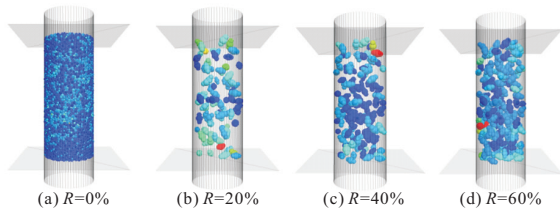


图 3 不同含石量的试样模型

Fig. 3 Sample models with different amounts

3 参数反演

3.1 本构模型的确定及宏-细观参数的选取

PFC5.0 中接触黏结模型具有黏结和滑移两

种接触面: 黏结时, 剪切力受摩擦系数和法向力约束; 当剪切力超过黏结强度, 黏结键断开, 滑移行为由摩擦系数对剪切力施加库伦准则来调节。较符合土石混合物中土颗粒与块石的黏结行为, 故试验选用接触黏结模型。

为较好描述和响应试样宏观力学特性, 选取对其影响较大的模型参数, 并设定基本参数令颗粒在时步内达稳定状态; 同时选取宏观参数作为校核细观参数合理性的指标, 见表 1。

表 1 宏细观参数选取

Tab. 1 Macro and mesoscopic parameter selection

宏观参数	细观参数	
	基本参数	模型参数
割线模量 E_{50}	法向阻尼 dp_nratio	颗粒刚度比 k^*
泊松比 ν	切向阻尼 dp_sratio	颗粒摩擦系数 μ
峰值强度 S_p	wall 移动速度 v^w	法向黏结强度 $\bar{\sigma}$
最大压缩量 ϵ_{vmax}	wall 摩擦系数 μ^w	接触模量 E^*

注: 设定基本参数 dp_nratio 为 0.5, dp_sratio 为 0.1, v^w 为 300 mm/s, μ^w 为 0.15, 模型参数取值通过正交试验确定。

3.2 正交试验方案设计及结果分析

本次正交试验涉及 4 个因素, 设定每个因素 3 水平, 选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行模拟试验, 影响因素与水平见表 2。

表 2 影响因素与水平

Tab. 2 Influencing factors and levels

编号	影响因素与水平			
	k^*	μ	$\bar{\sigma}/10^7 \text{ Pa}$	$E^*/10^9 \text{ Pa}$
1	1.0	0.2	5.0	3.0
2	2.0	0.4	5.5	3.5
3	3.0	0.6	6.0	4.0

将正交试验结果导入 SPSS 分析软件进行极差分析, 得到各细观参数对宏观指标的敏感性排序 $E_{50}: k^* > \mu > E^* > \bar{\sigma}; \nu: k^* > \bar{\sigma} > \mu > E^*; S_p: k^* > \bar{\sigma} > E^* > \mu; \epsilon_{vmax}: E^* > k^* > \bar{\sigma} > \mu$ 。调整参数时, 尽量避免 k^* 水平的变动, 针对 E_{50} , 应以 μ 、 E^* 为主, 对 ν 以 $\bar{\sigma}$ 、 μ 为主, S_p 受 $\bar{\sigma}$ 影响较大, E^* 、 $\bar{\sigma}$ 对 ϵ_{vmax} 影响显著。最终标定结果为 $k^* = 2.70$ 、 $\mu = 0.40$ 、 $\bar{\sigma} = 5.49 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、 $E^* = 3.20 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

图 4 为室内试验与数值模拟结果对比图, 目标围压分别为 400、800、1 200 kPa 时的拟合优度 R^2 分别为 0.984 5、0.993 1、0.993 4, 证明参数标定结果可行, 可为后续宏细观分析奠定基础。

4 三轴数值模拟试验结果与分析

4.1 宏观结果分析

分析不同形态块石试样在围压 400、800、

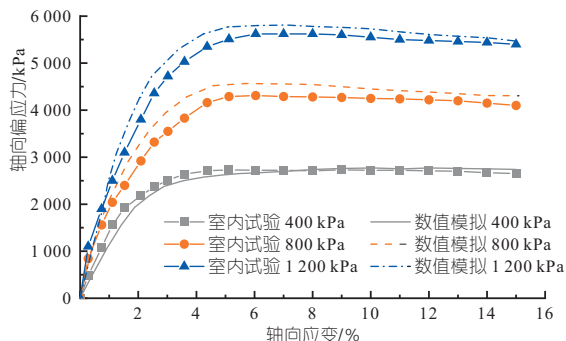


图 4 室内试验与数值模拟结果对比图

Fig. 4 Comparison between laboratory test and numerical simulation results

1 200 kPa, $R = 60\%$ 下的应力—应变—体应变曲线,发现围压一定时,随块石形态的不规则度提高,应力峰值增大,进入硬化阶段的节点提前,软化趋势逐渐显著;此外,随围压的增加,块石骨架结构作用逐渐显现,峰值强度随之提高,但增大围压对颗粒运动的限制越强,到达峰值强度的节点延后;围压一定,椭圆形块石试样较其他试样于外荷下翻滚抬起所需空间量大,剪胀性突出。工程中可选取不规则块石、增大围压来提高试样结构稳定性。

分析不同含石量的椭圆形块石试样在围压 800 kPa 下的应力—应变—体应变曲线,发现增大含石量也是提高峰值强度的关键,软化趋势随之显著; R 较小时 ($0 \sim 20\%$), $R = 20\%$ 的峰值强度较 $R = 0\%$ 的提高了 0.18 倍,软化特征不明显; R 增大 ($40\% \sim 60\%$), 试样刚度和承压性提升,峰值强度较 $R = 0\%$ 分别增大了 0.82、1.12 倍,软化趋势显著; R 较小时试样依赖土的性质,受外荷作用被压实紧密,整体呈现剪缩特性;随块石含量的提高,外荷下块石翻滚错动造成试样体积不断增大,剪胀性愈加显著。工程中可提高 R 值以增强试样抗剪切变形的能力。

4.2 细观结果分析

4.2.1 欧拉角

从细观上看,试样失稳是随颗粒间的相对滑动演化出变形集中区和剪切带而引起的局部破坏,研究欧拉角对探究试样破坏机制至关重要。图 5、6 分别为不同形态块石试样在 $R = 60\%$ 、围压 800 kPa 下及不同含石量的椭圆形块石试样在围压 800 kPa 下的欧拉角演变云图(虚线代表剪切带作用处)。由图 5、6 可知,外荷下块石与土体差异性转动致变形集中区承载力薄弱,于应变 5% 剪切带初步形成,试样结构开始破损,随应变增加剪切带逐渐扩展,最终贯通剪切面,试样失稳破坏;块石形态和含石量直接影响剪切带破坏形

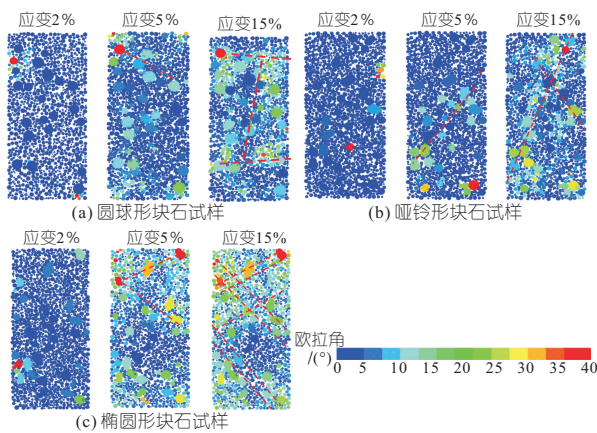


图 5 不同形态块石试样的欧拉角演变云图 ($R = 60\%$ 、围压 800 kPa)

Fig. 5 Euler angle evolution cloud diagram of block rock samples with different morphology ($R = 60\%$, confining pressure 800 kPa)

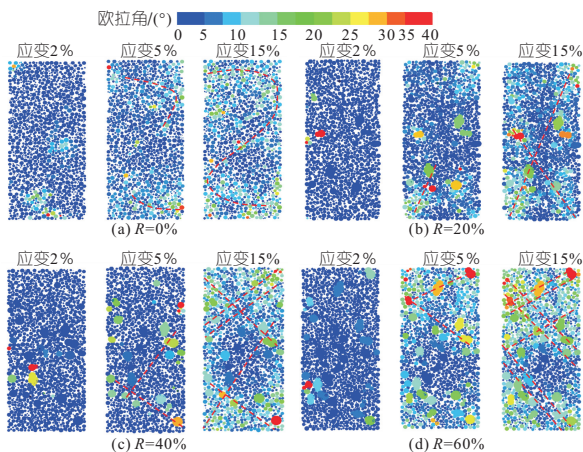


图 6 不同含石量下的欧拉角演变云图 (椭圆形块石试样、800 kPa)

Fig. 6 Euler angle evolution cloud images under different stone content (oval block stone sample, confining pressure 800 kPa)

式与厚度:随块石形态的复杂度提高,剪切带破坏形态由单一“工”字型向复杂的非对称“X”型和“工”字型演化,厚度由 45 mm 分别增大到 52、105 mm; $R = 0\%$, 形成一条厚度约为 47.5 mm 的光滑反“S”型剪切带。随 R 值的增加,块石“齿轮”效应逐渐增强,伴随“绕石”现象^[6],发育出多条不规则剪切带,厚度明显增大 ($75 \sim 105$ mm), 试样呈现出多处随机破坏特征。

4.2.2 剪切位移场

图 7、8 分别为不同形态块石试样在 $R = 60\%$ 、围压 800 kPa 下及不同含石量的椭圆形块石试样在围压 800 kPa 下的颗粒位移分布云图。图 7、8 中箭头代表颗粒运动方向,试样中部鼓胀区大小表示剪胀程度。由图 7、8 可知,块石形态的复杂度提高能明显增强剪胀作用,椭圆形块石试样凹凸性强,剪切过程中翻滚绕石行为较复杂,最终鼓胀破坏区面积达 $35\ 000\ \text{mm}^2$, 分别为哑铃、圆球形试样的 1.49、2.43 倍;随块石含量的提

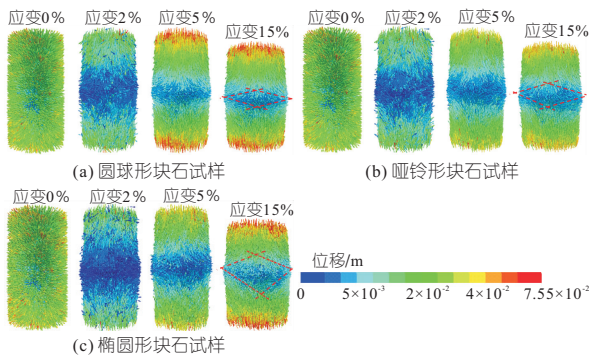


图7 不同块石试样的位移分布云图
($R=60\%$ 、围压 800 kPa)

Fig. 7 Displacement distribution cloud diagram of different block rock samples ($R=60\%$, confining pressure 800 kPa)

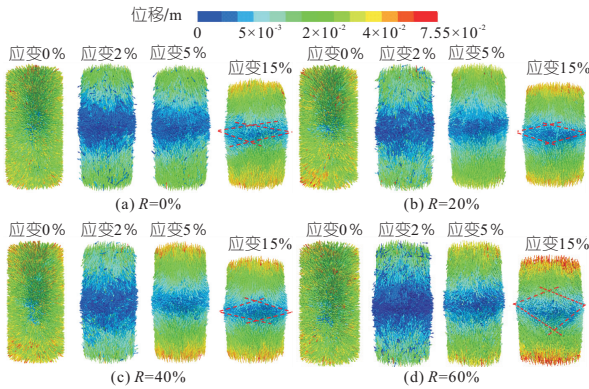


图8 不同含石量下的位移分布云图
(椭圆形块石试样、800 kPa)

Fig. 8 Cloud map of displacement distribution under different stone content (oval block stone sample, confining pressure 800 kPa)

高,“齿轮”效应所需位移空间量增大,鼓胀破坏区面积大致从 12 800 mm² 演化至 35 000 mm²,剪胀特性逐渐显著。可解释块石形态和含石量与剪胀程度的内在联系。

4.2.3 力链网络

为表示外荷作用下颗粒间的接触行为,图 9、10 分别为不同形态块石试样在 $R=60\%$ 、围压

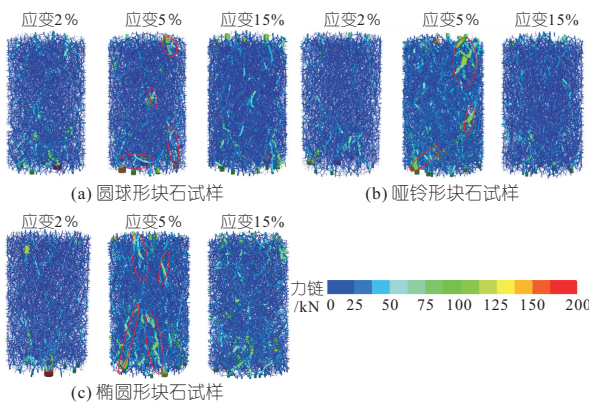


图9 不同形态块石试样的接触力链云图
($R=60\%$ 、围压 800 kPa)

Fig. 9 Contact force chain cloud diagram of different shape block stone samples ($R=60\%$, confining pressure 800 kPa)

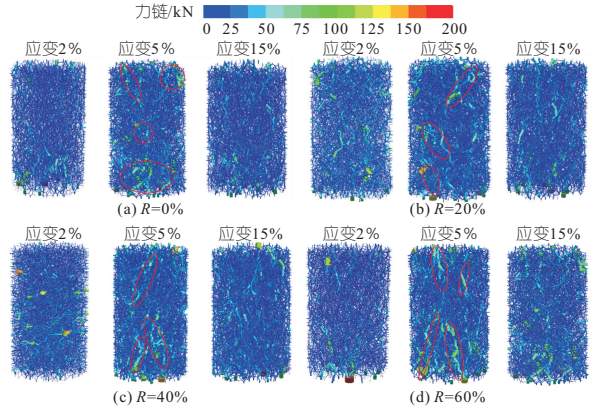


图10 不同含石量下的接触力链云图
(椭圆形块石试样、800 kPa)

Fig. 10 Cloud diagram of contact force chain under different stone content (oval block stone sample, confining pressure 800 kPa)

800 kPa 下及不同含石量的椭圆形块石试样在围压 800 kPa 下的接触力链云图。由图 9、10 可知,对比应变 5% 下的力链分布,随块石形态的复杂程度提高和 R 值的增大强力链数目及强度极值随之增多、增强;圆球形块石试样强力链数目最少,力链强度极值仅达 65.30 kN,哑铃形和椭圆形块石试样较前者强力链数目有所增长,强度极值分别提高至 112.49、164.30 kN,试样整体表现出更强的稳定性;随含石量增大,试样性质由土体控制转为块石作用,强力链数目增长,力链强度极值增强(10.49~164.30 kN),抗剪切破坏能力大幅度提高。揭示了块石形态的不规则度和含石量的增大能提高试样抗剪强度的细观机制。

5 结论

a. 随块石形态的不规则度提高,应力峰值逐渐增大,进入硬化阶段节点提前,软化趋势愈加显著;剪切带破坏形态最终演化为复杂“工”字型,厚度增至 105 mm;椭圆形试样鼓胀破坏区面积分别为哑铃、圆球形试样膨胀破坏区面积的 1.49、2.43 倍,剪胀性突出;强力链数目及强度极值增多、增强,宏观上表现出更高的抗剪强度。

b. 随含石量的增大,峰值强度显著提高,剪胀特性逐渐显著;试样由土体控制转为块石作用,逐渐发育出多条不规则剪切带,厚度增加至 105 mm;鼓胀破坏区面积可达 35 000 mm²;强力链数目增多,力链强度极值提高至 164.30 kN,宏观上试样抗剪切破坏能力得到增强。

参考文献:

[1] MEDLEY E W. The engineering characterization of melages and similar block-in-matrix rocks (bim-rocks) [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.

