

三峡水库岸坡崩坡堆积物力学特性数值试验研究*

唐红梅, 延兆奇, 陈洪凯

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:基于三峡水库崩坡堆积物岸坡变形破坏问题,采用三维离散元软件 PFC3D,建立了崩坡堆积层土石混合体大型三轴剪切试验模型,并对含石量分别为 0%,20%,40%,60%,80%和 100%以及截面尺寸分别为 60 cm×30 cm,65 cm×32.5 cm,70 cm×35 cm,75 cm×37.5 cm 和 80 cm×40 cm 的试样进行剪切破坏模拟。结果表明:土石混合体粘聚力随着含石量的增加而减小,近似呈线性关系。内摩擦角在含石量小于 40%时,几乎不变;当含石量大于 40%且小于 60%时,内摩擦角处于过渡阶段,开始增大,且增大程度越来越快;当含石量大于 60%时,内摩擦角急剧增加。同一含石量试样的粘聚力随着试样尺寸的增大而逐渐减小,且减小程度在含石量 40%左右达到最大。随着试样尺寸的增大,含石量为 0%的试样内摩擦角几乎不变;20%,40%和 60%含石量的试样内摩擦角减小;80%,100%含石量的试样内摩擦角增大。崩坡堆积物试样破坏在“低含高围”情况下时出现“剪胀”现象,在“高含低围”情况下出现“剪缩”现象。研究认为 PFC3D 程序可以较好地研究水库崩坡堆积层的力学特性。

关键词:崩坡堆积物;三轴剪切试验;离散元 PFC3D;含石量;试样尺寸;力学特性;三峡水库

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)05-0042-08

崩坡堆积物是西部山区常见的滑坡堆积形式,是由土和石构成的复杂岩土体,它的力学性质不同于单纯的土体和岩体,具有强烈的不均匀性和各向异性。随着三峡水库的运行蓄水,水库内大量崩坡堆积物滑坡在库水位周期循环升降的作用下,原有平衡状态被打破,发生垮塌。封三彩图 1 为巫山神女溪青石滑坡在水库试验性蓄水达到 156 m 时,发生滑动破坏的全貌。封三彩图 2 为青石滑坡崩坡堆积物局部放大图,从中可以看出,滑坡上部滑体近似全由堆积物组成。因此,对水库崩坡土石堆积物的力学性质进行详细研究很有必要。

目前,国内外学者对土石混合体的力学性质进行过大量研究。Miller 等人^[1]最早展开不同石块含量对土石混合体力学特性的影响研究,由于直剪试验中法向应力较高,摩尔库伦破坏准则的适用性有待讨论。Irfab 等人^[2]通过实施直剪试验发现土石混合体的强度随着含石量的增加而增加。曹光栩等人^[3]利用大型侧限固结仪对机场土石混合填料的压缩、蠕变和湿化特性进行了研究。李维树等人^[4]在大量试验的基础上,建立了水库土石混合体粘聚力、内摩擦角和含水率之间的公式,为评价水库岸坡的稳定性提供了量化依据。在数值模拟方面,离散元程序 PFC2D/3D 在模拟土石混合体方面有着天然的优势,丁秀丽等人^[5-6]编制程序实现了由数字图像直接转换成数值模型的方法,为离散元模拟提供了便利。周剑等人^[7]基于数字图像转化技术,采用 PFC2D 程序建立直剪模型分析了溪洛渡水电站旁土石混合体的力学性质,结果与室内试验得出的结果一致。贾学明等人^[8]基于 PFC3D(Particle flow code in 3D dimensions)建立了土石混合料的离散元数值模型,并对不同含石量、不同岩性的混合料进行了模拟剪切试验,结果发现石块很大程度上控制着混合料的抗剪强度特性。徐文杰等人^[9]借助离散元程序 YADE 对工程中使用的土石混合料进行数值模拟研究,发现含石量以及试样尺寸对混合料的力学特性影响很大。赵金凤等人^[10]采用球形单元和非规则组合颗粒模拟土石混合体,进一步揭示了混合体的抗剪强度特性。刘萌成等人^[11]实施了大型三轴固结排水剪切试验,分析了堆石料应力应变与体积应变的关系。除此之外,还有很多学者对土石混合体力学特性进行了研究^[12-15]。

由于崩坡堆积物的空间特性,本研究先采用三维离散元程序 PFC3D 建立土石混合体大型三轴剪切模型,然

* 收稿日期:2015-11-04 修回日期:2016-06-30 网络出版时间:2016-07-13 14:00

资助项目:重庆市自然科学基金重点项目(No. cstc2013JJB30001);2013 年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. KJTD201305);重庆市“两江学者”计划专项资金(No. 201309)

作者简介:唐红梅,女,研究员,博士,研究方向为岩土与地质工程,E-mail:hmtang6778@sina.com

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160713.1400.014.html>

后对不同含石量、不同尺寸的试样进行剪切破坏模拟。研究表明,含石量以及试样尺寸对于试样粘聚力、内摩擦角的影响显著,且含石量和围压共同影响着试样在破坏时的体应变大小。采用该离散元程序模拟土石混合体的大型三轴剪切试验,可为室内三轴试验结果提供一定的参考和验证作用,如精度在允许情况下也可近似代替室内试验,并节省大量的时间和费用成本。

1 PFC3D 三轴试验建立

PFC3D 是离散元数值分析方法中的一种,即三维颗粒流程序。该软件由美国 ITASCA 公司研发,通过赋予颗粒集合体刚度模型、滑动模型以及粘结模型共 3 个本构模型,然后施加边界条件,使得颗粒之间发生相互作用来表征被模拟对象的力学行为。

1.1 三轴压缩仪模型

压缩仪模型参考 YS-30 型大型三轴剪切试验机^[16],试样取 3 组不同尺寸: $H=60\text{ cm}, D=30\text{ cm}$; $H=70\text{ cm}, D=35\text{ cm}$; $H=80\text{ cm}, D=40\text{ cm}$ 。根据试验要求,模型在恒定围压下,顶部加载板以一定速度加载,直至试样破坏为止。模型中以 wall 单元代替压力室以及加载板,刚度应远大于土石混合体试样刚度。

1.2 土石混合试样模型

土石混合体用球单元集合体来代替,根据武明^[17]的研究,将颗粒粒径小于 10 mm 的归为土颗粒,粒径大于或等于 10 mm 的归为石块,根据粒径大小建立含石量分别为 0%, 20%, 40%, 60%, 80% 和 100% 的试样模型,各试样级配情况见表 1。

首先算出不同含石量下各粒径组颗粒数目,具体计算公式如下:

$$N_i = \frac{V_{\text{总}} \times (1-n) \times \varphi_i}{\frac{1}{2} \times (D_i^{\text{max}} + D_i^{\text{min}})}$$

式中, N_i 为第 i 粒径组颗粒数目, $V_{\text{总}}$ 为三轴压缩仪压力室总体积, n 为孔隙率, φ_i 为第 i 组粒径组含量, D_i^{max} 和 D_i^{min} 分别为第 i 组粒径组最大、最小粒径。

然后,利用 FISH 语言中 Generate 命令在三轴压缩模型内生成颗粒互不重叠的小球集合体。由于颗粒之间无法切实排列,导致颗粒生成后期计算机效率急剧下降或出现卡死情况,故先将颗粒半径缩小 1.6 倍,在三轴模型内生成颗粒集合体后,再逐级扩大颗粒半径,每次扩大半径 1.05 倍后,循环一定时步,遍历小球集合体,算出此时孔隙率大小,直至达到预定孔隙率 0.36,这样可以提高计算效率。

生成颗粒集合体后,需要对各个集合体赋予初始应力,此处需要用到软件内置的初始应力生成程序,通过伺服机制分别保持集合体 100, 300, 500 和 1 000 kPa 的围压,然后在围压下达到平衡状态。由于土颗粒之间具有粘结作用,石块之间无粘结,但摩擦作用明显;经过反复试验标定,将土颗粒之间的粘结参数设为 50 N,摩擦系数设为 0.5,石块之间粘结参数为 0,摩擦系数设为 5。摩擦系数越大,表明石块越粗糙,具体细观参数见表 2。生成的三轴压缩试验模型如封三彩图 3 所示(以截面尺寸 60 cm × 30 cm 试样为例),其中黄色颗粒为粒径小于 10 mm 的土颗粒,红色颗粒为粒径大于或等于 10 mm 的石块。

2 模拟结果及分析

2.1 三轴压缩过程模拟

试样在伺服机制的作用下,围压保持恒定,内部应力分布趋于均匀。此时上下边界墙以 $15\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的平

表 1 不同含石量试样级配情况

Tab. 1 The gradation of sample with different rock contents

含石量/%	各粒径组颗粒含量/%				孔隙率
	<10 mm	10~20 mm	>20~40 mm	>40~60 mm	
0	100	0	0	0	0.36
20	80	10	5	5	0.36
40	60	15	15	10	0.36
60	40	20	30	10	0.36
80	20	20	30	20	0.36
100	0	50	20	30	0.36

均速度相向运动,给试样施加压力,直至破坏。在模型加载至破坏过程中,需要对模型的体应变、轴向应变以及偏应力进行监测。图 4 以 60 cm×30 cm 含石量 60% 的试样为例,给出了试样在不同围压下加载后典型应力应变曲线,并据此求出该试样的粘聚力、内摩擦角分别为 23.7 kPa,35.4°。可以看出,崩坡堆积物模拟试验的结果与实验室内大型三轴剪切试验结果基本一致^[11],说明采用 PFC3D 对崩坡堆积物进行模拟三轴压缩试验是可行的。

表 2 试样颗粒材料微观参数

Tab. 2 Microscopic parameters corresponding to different size particles

类别	颗粒 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒法 向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	颗粒切 向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	颗粒法向 粘结力/ N	颗粒切向 粘结力/ N	摩擦 系数	墙体法向 刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	墙体切向 刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	墙体 摩擦 系数
细颗粒(粒径小于 10 mm)	2 100	2×10^6	2×10^6	50	50	0.5	1×10^8	0	0.0
粗颗粒(粒径在 10 mm 及以上)	2 450	1.2×10^7	1.2×10^7	0	0	5	1×10^8	0	0.0

2.2 不同尺寸以及不同含石量试样三轴压缩模拟结果

试样在上下加载板的过程中,围压在伺服作用下波动不大于预设值的 1%,并在监测轴向偏应力达到最大值时记录该时刻的体应变。此时试样破坏,体应变为正值表示破坏时体积增大,出现剪胀现象,负值表示体积减小,为剪缩。表 3 分别给出了 60 cm×30 cm,65 cm×32.5 cm,70 cm×35 cm,75 cm×37.5 cm 以及 80 cm×40 cm 试样在含石量分别为 0%,20%,40%,60%,80%和 100%情况下的力学参数以及破坏时的体应变。

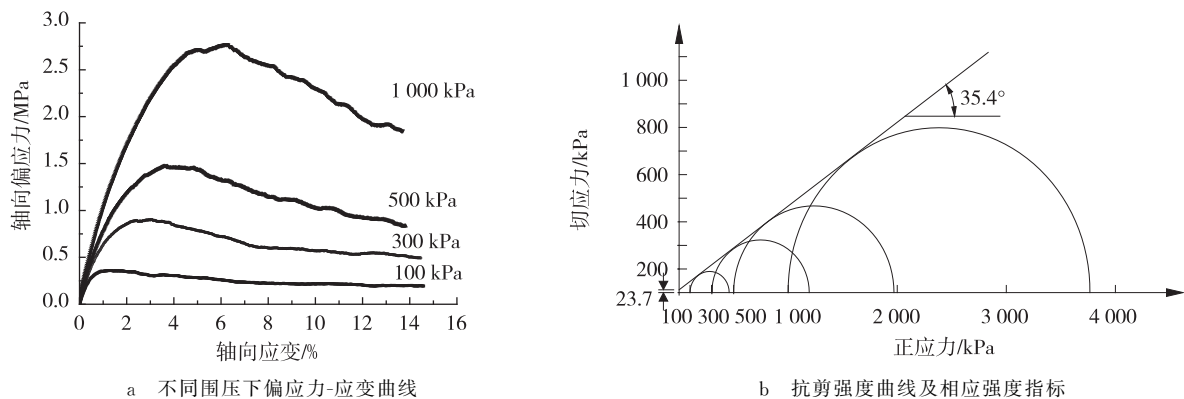


图 4 60 cm×30 cm 试样不同围压下加载破坏结果

Fig. 4 The calculation results of 60 cm×30 cm sample under different confining pressure

2.3 含石量对粘聚力和内摩擦角的影响

试样中以大于等于 10 mm 的颗粒体积占总体积的百分数表示含石量的多少。图 5 给出了 5 种不同尺寸试样在不同含石量下粘聚力的变化情况。从图中可以看出,随着试样含石量的增加,不同尺寸试样粘聚力均逐渐减小,整个减小过程较连续,且当含石量每增加 20%,粘聚力降低的程度近似相等。通过拟合可知,一元一次函数能较好的表示粘聚力随含石量的变化情况。这是因为当含石量增加时,试样内大于等于 10 mm 的颗粒数目增加,而这些大颗粒刚度较小颗粒大,颗粒之间粘结力为 0(表 2),导致试样整体粘聚力减小,刚度变大,粘结力最大可从 48.12~51.3 kPa 减小至 6.15~11.58 kPa。

图 6 为 3 种不同尺寸的试样在不同含石量下内摩擦角的变化情况。从图中可以看出随着含石量的增加,3 种尺寸试样的内摩擦角均逐渐增大,整个增大过程呈现不均匀性。当含石量小于 60% 时,内摩擦角随着含石量的增加缓慢变化,增大幅度不明显;当含石量小于 60% 时,内摩擦角基本不变,增大幅度较小,试样偏“土”性;当含石量在 60%~80% 区间内时,内摩擦角增大趋势开始明显变化,逐渐增大;当含石量大于 80% 时,内摩擦角随着含石量的增加急剧变大,试样偏“石”性。整个变化区间可从最小 30.0°~31.9°增大至最大 43.5°~46.7°。造成这种现象的原因可以归结为:当石块含量较少时,剪切破坏过程中石块彼此之间不产生接触,“悬浮”在土中,试样整体偏“土”性,内摩擦角较小;当石块含量较大时,在剪切过程中,石块之间产生摩擦咬合作用,试样整体偏“石”性,内摩擦角较大。通过拟合发现,一元三次方程能较好的表示该组数据的变化情况。

表 3 不同尺寸试样试验结果汇总
Tab.3 The test results samples with different sizes

试样尺寸	含石量/%	粘聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)	不同围压破坏时体应变/%			
				100 kPa	300 kPa	500 kPa	1 000 kPa
60 cm×30 cm	0	51.3	31.9	0.54	0.24	0.20	2.06
	20	45.8	33.5	0.78	1.35	2.32	4.63
	40	36.83	34.3	0.55	0.59	1.61	3.85
	60	23.7	35.4	0.12	0.44	1.29	2.28
	80	18.23	35.2	-0.50	0.31	0.99	1.71
	100	9.67	43.5	-2.41	-0.97	-1.27	0.28
65 cm×32.5 cm	0	51.3	31.9	0.49	0.29	0.81	2.09
	20	45.8	33.5	0.85	1.11	1.99	4.40
	40	36.83	34.3	0.49	0.82	1.34	3.06
	60	23.7	35.4	0.003	0.44	0.84	2.43
	80	18.23	35.2	-1.35	-0.85	0.48	1.29
	100	9.67	43.5	-0.24	-0.064	0.60	0.22
70 cm×35 cm	0	50.00	31.8	0.59	0.46	0.74	2.05
	20	37.58	34.3	0.09	-0.23	-0.84	-0.54
	40	33.1	35.0	0.08	-0.51	-0.64	-0.53
	60	25.71	33.1	-0.91	-1.69	-0.64	-0.74
	80	19.43	38.0	-0.35	-0.52	-1.01	-0.06
	100	11.58	46.0	-0.21	-0.02	-0.29	0.74
75 cm×37.5 cm	0	51.06	30.6	0.49	0.49	0.51	2.08
	20	36.34	33.6	0.67	1.13	1.99	4.05
	40	30.35	29.8	0.08	-0.15	-0.13	-0.17
	60	27.84	32.9	0.28	-0.27	1.17	2.14
	80	19.88	37.6	-0.26	-0.09	-0.60	1.86
	100	9.02	47.6	-2.89	-0.07	-0.36	0.98
80 cm×40 cm	0	48.9	31.8	0.45	0.58	0.75	1.89
	20	35.11	30.0	0.10	-0.57	-0.36	-0.62
	40	28.18	31.5	0.08	-0.79	-0.57	0.66
	60	25.47	32.7	-0.73	-0.46	-0.33	-0.06
	80	12.26	36.7	-1.03	-0.69	-0.57	-0.24
	100	8.78	46.7	-0.37	-0.05	0.31	1.37

将徐文杰等人^[18]取金沙江河段右岸土石堆积体进行大型直剪试验得出的结果与上述 PFC3D 离散元三轴数值试验结果对比,可以发现三轴数值试验结果粘聚力与含石量线性关系与现场大型直剪试验相同。随着含石量的增加,两者粘聚力皆呈线性减小,但现场直剪试验粘聚力在含石量 30% 的前后斜率发生变化,而三轴数值试验斜率一致。三轴数值试验结果中内摩擦角与含石量拟合呈一元三次关系,而现场大型直剪试验采用线性关系来处理不同含石量下内摩擦角之间的过渡。随着含石量的增大,两者内摩擦角起初均无明显变化,随着含石量达到一定程度,内摩擦角开始逐渐增大,现场直剪试验在含石量为 30% 时发生变化,三轴数值试验在 60% 时发生变化。

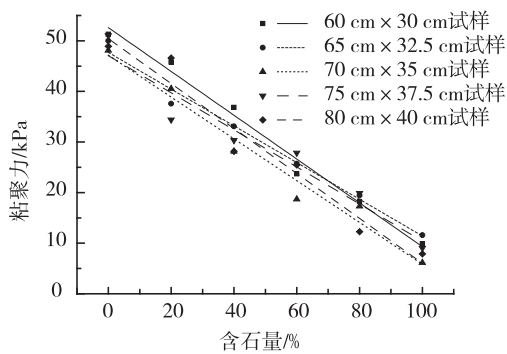


图 5 不同含石量试样粘聚力的变化情况
Fig. 5 The cohesive force of sample with different rock contents

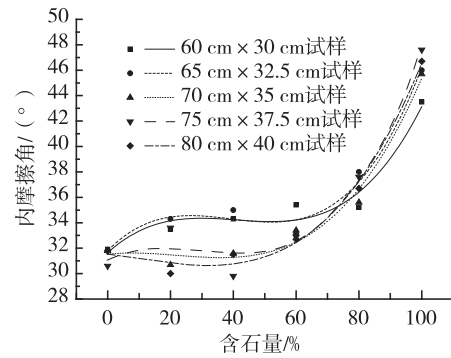


图 6 不同含石量试样内摩擦角的变化情况
Fig. 6 The internal friction angle of sample with different rock contents

从上述两者试验结果的对比可以看出,力学参数粘聚力、内摩擦角与含石量的变化情况大体一致。造成两者区别的原因在于三轴数值试验石块颗粒为规则的圆形,当含石量达到 30%左右时,石块不再互相无接触,圆形颗粒无法模拟石块之间互相嵌固作用,导致三轴数值实验粘聚力减小斜率在含石量较大时仍然无变化。且相同含石量情况下圆形颗粒相比棱角分明的多边形块体颗粒之间距离更大,这也解释了三轴数值试验内摩擦角发生变化时含石量比现场直剪试验大。

本次模拟对堆积体中的石块采用圆形刚体颗粒进行模拟,不考虑块石之间的相互嵌固、破碎,这就造成与实际情况的一点区别,但模拟结果整体变化情况与现场直剪试验结果大体一致,下一步研究可以考虑将三轴试验中石块颗粒用 cluster 颗粒进行处理。

2.4 试样尺寸对粘聚力和内摩擦角的影响

三轴剪切试验试样截面尺寸对试验结果也有着重要的影响^[19]。图 7 为相同级配颗粒的情况下 60 cm×30 cm, 65 cm×32.5 cm, 70 cm×35 cm, 75 cm×37.5 cm, 80 cm×40 cm 等 5 种截面尺寸试样粘聚力的变化情况。可以看出,当试样高度从 60 cm 逐渐增大至 80 cm,试样直径从 30 cm 逐渐增大至 40 cm 时(高度/半径始终为 2),不同含石量试样粘聚力均呈现减小趋势,但不同的含石量试样粘聚力值减小程度不同。当含石量为 0%~40% 时,含石量越大,试样粘聚力的减小程度随着试样高度以及直径的变大而越大;其中减小程度最大的是 40% 含石量的试样,达到 23.5%;减小程度最小的为 0% 含石量的试样,为 4.7%。随着含石量从 40% 继续增大至 100%,试样的粘聚力随着尺寸的增加减小程度发生转折,逐渐降低(75 cm×37.5 cm 的 60% 含石量试样除外,不计入统计)。在试样含石量达到 100% 的时候,试样尺寸的增加对粘聚力的影响降到最低,减小程度为 9.2%。经拟合发现,粘聚力随着试样高度的增加符合抛物线的变化规律。

图 8 给出了相同级配情况下上述 5 种尺寸试样内摩擦角的变化情况。图中用抛物线进行曲线拟合,可以看出,当含石量为 0% 时,随着试样高度以及直径尺寸的增加,内摩擦角几乎不变。当含石量为 20%, 40% 和 60% 时,试样内摩擦角随着高度以及直径的增加逐渐减小;其中减小幅度最大的试样为含石量 20% 的试样,减小幅度达 10.4%;减小幅度最小的试样为含石量 60% 的试样,减小幅度为 7.6%。当含石量为 80% 和 100% 时,试样内摩擦角随着尺寸的增加逐渐增大,80% 含石量的试样内摩擦角从 35.2° 增大至 36.7°,增加幅度 4.3%。100% 含石量试样内摩擦角从 43.5° 增加至 46.7°,增加幅度 7.41%。可以看出当含石量较小时,试样随着尺寸的增大;内摩擦角逐渐减小,当含石量较大时,内摩擦角随着尺寸的增加逐渐增大。

朱俊高等人^[19]对某粗粒土堆进行了试样直径分别为 10.1 cm, 30 cm 的尺寸效应研究,发现此粗粒土堆大尺寸试样(直径 30 cm)试验结果粘聚力比小尺寸试样(直径 10.1 cm)小了 2.8 kPa,约减小了 23.1%。在本研究里,上述不同含石量下三轴数值试验中大尺寸试样(直径 40 cm)的结果粘聚力较小尺寸试样(直径 30 cm)减小了 4.7%~23.5%,两者虽然减小程度不同,但整体变化趋势皆随着试样尺寸增加,粘聚力逐渐减小。

此外,朱俊高等人^[19]研究中粗粒土堆大尺寸试样结果内摩擦角比小尺寸试样减小了 0.6°,约减小了 1.4%;李翀等人^[20]对双江口高土石坝砂岩过渡料的试验结果也表明大尺寸试样(直径 50 cm)试验结果内摩擦角比小尺寸试样(直径 30 cm)减小了约 5.0%。在本研究里,含石量 20%~60% 的三轴数值剪切试验中大尺寸试样(直

径 40 cm)结果内摩擦角较小尺寸试样(直径 30 cm)减小 7.6%~10.4%。两者皆随着试样尺寸的增加,内摩擦角减小;含石量为 0%的三轴数值试样随着尺寸的增加,内摩擦角基本不变化;含石量 80%~100%的试样随着尺寸的增加,内摩擦角反而增大。

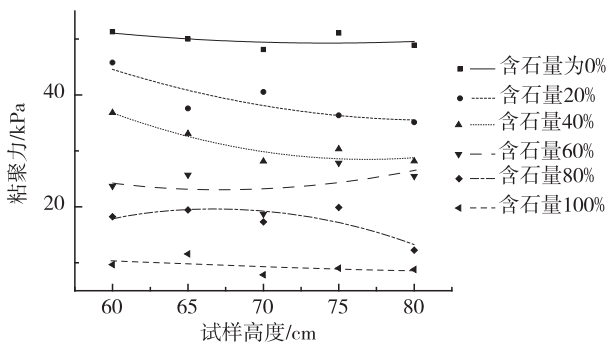


图 7 不同尺寸试样粘聚力的变化情况

Fig. 7 The cohesive force of sample with different size

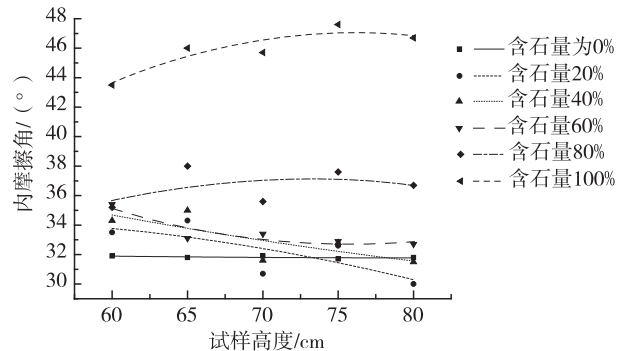


图 8 不同尺寸试样内摩擦角的变化情况

Fig. 8 The internal friction angle of sample with different size

造成含石量 0%以及含石量 80%~100%的试样内摩擦角随着试样尺寸增加的变化趋势与试验结果不同的原因在于试样内摩擦角主要取决于石块之间的摩擦,含石量低的试样剪切破坏为小粒径土颗粒之间的错动,含石量高的试样剪切破坏取决于大粒径石块刚体颗粒之间的错动。由于含石量为 0%的试样无石块,故试样内摩擦角的大小基本不会变化。大尺寸试样最大颗粒直径与试样直径比值较小尺寸试样小,在相同级配条件下,同等围压下大尺寸试样石块颗粒之间排列更加紧凑,含石量 80%~100%由于含石量高,故含石量高的试样随着试样尺寸的增加,内摩擦角更大。

2.5 含石量以及围压对破坏时体应变的影响

封三彩图 9 以 60 cm×30 cm 尺寸试样为例,给出了试样在不同含石量以及围压情况下剪切破坏时刻体应变变化三维曲面图。其中 XY 平面上的两轴分别为含石量以及围压,Z 轴代表破坏时试样的体应变大小。从图中可以看出,整个曲面呈现前低后高的趋势,即在“高含低围”情况下,试样破坏时表现出“剪缩”现象;在“低含高围”情况下,试样表现出“剪胀”现象。其中 100%含石量试样在 100 kPa 围压下,破坏时体应变数值最小,体积减小了 2.41%;20%含石量试样在 1 000 kPa 围压下,破坏时体应变数值最大,体积增大了 4.63%。这是因为低含石量的试样在剪切过程中,土颗粒在剪应力的作用下重新排列,相互位置发生变动占主导因素,造成孔隙率增大,产生“剪胀”现象;围压越大,参与重排的土颗粒越多,则“剪胀”现象越明显。而在高含石量的试样中,剪切过程石块的重新排列占主导因素,与土颗粒的翻转重排不同;石块之间本身空隙较大,在剪切应力的作用下,石块的重新排列会使得原本的空隙逐渐相互契合减小;围压越小,石块相互之间越容易翻转契合;围压越大,石块之间会产生“咬合”,摩擦力过大,“剪缩”现象就越不明显。

3 结论

采用 PFC3D 离散元程序对三峡水库崩坡堆积物进行数值三轴剪切试验,发现堆积物中石块含量以及试样的尺寸会对试样的力学参数产生影响,且试样在剪切破坏时的体应变大小由含石量和围压共同影响:

1) 崩坡堆积物试样的粘聚力随着含石量的增加而减小,且近似呈现出线性关系;内摩擦角随着含石量的增加而增大;当含石量小于 40%时,内摩擦角几乎不变;当含石量大于 40%且小于 60%时,内摩擦角增大程度越来越快;当含石量大于 60%时,内摩擦角急剧增大。

2) 崩坡堆积物试样随着尺寸的增大,粘聚力的试验结果逐渐减小,且减小程度随着含石量的增加呈现先增大后减小的趋势,在 40%含石量左右减小程度达到最大。随着试样尺寸的增加,含石量 0%的试样内摩擦角几乎不变,20%,40%和 60%含石量的试样内摩擦角减小,80%、100%含石量的试样内摩擦角增大。

3) 以崩坡堆积物尺寸 60 cm×30 cm 大小的试样为例,在“低含高围”情况下,试样破坏时出现“剪胀”现象,在“高含低围”情况下,试样破坏时出现“剪缩”现象。

参考文献:

- [1] Medley E. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. California: University of California, 1994.
- [2] Irfan T Y, Tang K Y. Effect of the coarse fraction on the shear strength of colluvium in Hong Kong [M]. Hongkong: Hong Kong Geotechnical Engineering Office, 1993.
- [3] 曹光栩, 徐明, 宋二祥. 土石混合料的力学特性 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 32-39.
Cao G X, Xu M, Song E X. Mechanical properties of broken rock-soil mixture [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(11): 32-39.
- [4] 李维树, 丁秀丽, 邹爱清, 等. 蓄水对三峡水库土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1338-1342.
Li W S, Ding X L, Wu A Q, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges reservoir bank slopes under influence of impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1338-1342.
- [5] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477-484.
Ding X L, Li Y X, Wang X. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477-484.
- [6] 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.
Ding X L, Zhang H M, Huang S L, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1553-1566.
- [7] 周剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2650-2659.
Zhou J, Zhang L Q, Dai F C, et al. Numerical simulation of direct shear tests for rock and soil mixture in a landslide based on bonded-particle model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2650-2659.
- [8] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2695-2703.
Jia X M, Chai H J, Zheng Y R. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2695-2703.
- [9] 徐文杰, 张海洋, 许强, 等. 土石混合体直剪离散元数值试验研究 [J]. 计算力学学报, 2014, 31(2): 228-234.
Xu W J, Zhang H Y, Xu Q, et al. Numerical simulation of direct shear test with soil-rock mixture using discrete element method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(2): 228-234.
- [10] 赵金凤, 严颖, 季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析 [J]. 固体力学学报, 2014, 35(2): 124-134.
Zhao J F, Yan Y, Ji S Y. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model [J]. Chinese journal of solid mechanics, 2014, 35(2): 124-134.
- [11] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 205-211.
Liu M C, Gao Y F, Liu H L. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 205-211.
- [12] 王宇, 李晓. 土石混合体损伤开裂计算细观力学探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4020-4031.
Wang Y, Li X. Research on damage cracking for rock and soil aggregate using calculation meso-mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4020-4031.
- [13] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 4065-4072.
Deng H F, Yuan X F, Li J L, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4065-4072.
- [14] 舒志乐, 刘新荣, 刘保县, 等. 基于分形理论的土石混合体强度特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2651-2656.
Shu Z L, Liu X R, Liu B X, et al. Study of strength properties of earth-rock aggregate based on fractals [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2651-2656.
- [15] 王新, 丁秀丽. 含石量对土石混合体力学特性影响的数值模拟 [J]. 水运工程, 2010(446): 93-99.
Wang X, Ding X L. Numerical tests on impact of stone content to mechanical parameters of soil-rock mixture [J]. Port and Waterway Engineering, 2010(446): 93-99.
- [16] 四川大学华西岩土仪器研究所. YS-30 型应力路径大型三轴剪切试验机使用说明书 [Z]. 成都: 四川大学华西岩土仪器研究所, 2000.
Huaxi Research Institute of Geotechnical Engineering of

- Sichuan University. Application specific ratio of YS-30 large-scale triaxial test apparatus[Z]. Chengdu: Huaxi Research Institute of Geotechnical Engineering, Sichuan University, 2000.
- [17] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. 公路, 1997, 41(1): 40-42.
- Wu M. Experimental study on mechanical features of the heterogeneous filling of rock and soil aggregate[J]. Highway, 1997, 41(1): 40-42.
- [18] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996-1007.
- Xu W J, Hu R L, Yue Z Q, et al. Research of relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996-1007.
- [19] 朱俊高, 刘忠, 翁厚洋, 等. 试样尺寸对粗粒料强度及变形试验影响研究[J]. 四川大学学报: 工程科学报, 2012, 44(6): 92-96.
- Zhu, J G, Liu Z, Weng H Y, et al. Study on effect of specimen size upon strength and deformation behaviour of coarse-grained soil in triaxial test[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6): 92-96.
- [20] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 563-566.
- Li C, He C R, Wang C, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 563-566.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Numerical Test of Colluvium's Mechanical Properties in Three Gorges Reservoir Based on Discrete Element Method

TANG Hongmei, YAN Zhaoqi, CHEN Hongkai

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Due to the deformation and failure of colluvium in Three Gorges reservoir, a large numerical triaxial shear test was established to simulation the colluvium's mechanical properties based on discrete element method PFC3D. The sample's rock contents included 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. In addition, the sample's size included 60 cm×30 cm, 65 cm×32.5 cm, 70 cm×35 cm, 75 cm×37.5 cm and 80 cm×40 cm. The simulation results showed that the colluvium's cohesive force decreased along with the increase of rock contents as a approximately linear relation. The internal friction angle didn't change when rock contents less than 40%, increased when rock contents more than 40% less than 60%, increased rapidly when rock contents more than 60%; The sample's cohesive force with same rock contents decreased along with the increase of sample's size and the degree of decrease reached the maximum when the rock contents was 40%. The sample's internal friction angle didn't change when rock contents was 40%, decreased when rock contents was 20%, 40% and 60%, increased when rock contents was 80% and 100% along with the increase of the sample's size; The colluvium samples' volume would increase under "low rock contents and high confining pressure" and decrease under "high rock contents and confining pressure" when destroyed. It is proved that colluvium's mechanical properties in the three gorges can be simulated accurately by PFC3D.

Key words: colluvium; triaxial shear test; discrete element method PFC3D; rock contents; sample size; mechanical properties; Three Gorges reservoir

(责任编辑 方 兴)