

块石含量对土石混合体抗剪强度特性的影响

詹永祥, 姚海林

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉市 430071)

摘 要: 土石混合体是中巴友谊公路建设堆积体滑坡的主要组成部分,其宏观力学性质与其块石含量密切相关。为得到此类滑坡合理计算参数,基于颗粒流理论及程序,对不同含石量土石混合体进行大型直剪试验研究,揭示土石混合料的强度指标随各主要影响因素的变化规律。研究结果表明,土石混合体剪切特性与相应的土体有很大的差别,均质土剪切过程中表现为剪胀特性并产生应变软化现象,剪切破坏面基本与直剪仪剪切滑动方向相一致;而土石混合体在达到强度极限之前经历一段较长的屈服和应力硬化阶段,剪胀特性不仅与法向应力有关,还与含石量有关,由于块石的存在使得土石混合体的剪切破坏带极不规则,具有分叉及多滑面现象。土石混合体力学特性明显区别于土体的含石量阈值大致为 40%,当块石含量小于 40%时,土石混合体的内摩擦角及黏聚力随含石量变化不大,且与相应土体强度参数相近;当含石量大于 40%时,土石混合体的内摩擦角随含石量的增加近线性增大,黏聚力较相应土体有很大程度上降低;但当块石含量大于 60%时黏聚力随着块石含量的增加变化较小。

关键词: 土石混合体; 细观力学; PFC; 直剪试验; 抗剪强度

土石混合体在土石坝、矿山开采产生的尾矿坝、排土场、碎石土地基、软岩路基等岩土工程中大量存在,同时也是中巴友谊公路沿线经常遇到而又必须妥善处理的地质体。但由于钻孔取样、原位测试困难,对土石混合体强度与变形问题的研究较为困难,堆积物计算模型及参数选取一直是困扰岩土工程界的难题^[1]。近年来,许多学者围绕块石在土石混合体中的作用进行了一系列室内外力学试验研究。Lindquist 等^[2]通过室内三轴试验对含有块石的混杂岩土体抗剪强度与块石含量的关系进行了大量的试验研究。油新华等^[3]通过野外及室内试验对三峡库区广泛分布的土石混合体的抗剪强度特征进行了研究。徐文杰等^[4]对金沙江虎跳峡地区分布的土石混合体在天然及饱和状态下的抗剪强度特征进行了相应的野外大尺度水平推剪试验研究。

由于室内外试验成本高,可重复性差,为更好了解土石混合料的抗剪强度特征,还需要借助理论分析的手段。李世海等^[5]和赫建明^[6]利用三维离散元方法研究了土石混合体单轴压缩试验、现场大剪试验,并指出土石混合体的结构效应导致了其应变强

化的出现及弹性模量与强度的增加。丁秀丽^[7]采用基于图像分析的有限元和 PFC^{2D} 颗粒离散元,对土石混合体的力学特性进行了分析。井国庆^[8]在 PFC^{2D} 中,利用连接杆将 7 个二维圆盘组合成颗粒团来模拟道砟在循环荷载作用下的破碎机理。

纵观前人研究表明,块石强度及其含量、级配组成以及细粒物质组成等特征在很大程度上影响着土石混合料的物理力学性质,尤其是抗剪强度特征。故本文以中巴友谊公路典型滑坡的土石混合体为例,采用 PFC^{2D} 程序,根据现场原位直剪试验结果调整和确定土石混合体数值模型中的微观力学参数,进而进行不同含石量下土石混合料剪切试验数值模拟,探讨含石量对土石混合料的强度特性、剪切变形破坏特征及裂纹扩展等的影响。

1 剪切试验数值模拟

1.1 模拟系统的建立

中巴友谊公路沿线活动断裂发育、新构造运动强烈,岩体破碎,加之地形起伏大,受降雨、降雪的影响,河、沟水流冲刷严重,致使沿线边坡危岩落石、崩

基金项目:国家自然科学基金项目,项目编号 41402317、41472290;中国科学院科技服务网络计划(STS 计划),项目编号 KFJ-STIS-ZDTP-015;中国科学院青年创新促进会资助;湖北省杰出青年基金资助,项目编号 2017CFA056

收稿日期:2017-05-18

塌、滑坡、错落等重力不良地质发育,进而形成大量的地质堆积体。由于这些堆积体颗粒粒径大小不一,颗粒排列基本无规律,含石量不等,块石孔隙之间充填少量风化岩屑、黏性土。本次选取沿线某滑坡体前缘次级滑坡体的碎石土体作为研究对象,建立土石混合体随机试验模型。本模型模拟的上、下剪切盒尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 50 cm \times 50 cm \times 30 cm,采用与实际剪切试验相同的方法,在整个试验过程中保持下剪切盒始终不动,在设定的法向正应力下持续推动上剪切盒。以应变控制的加载方式在上剪切盒侧面施加剪切力,为达到静态加载的要求,设置水平剪切速率 $v=0.02\text{ mm}/(10^6\text{ step})$ 。鉴于剪切盒的尺寸及现场颗粒粒径分布情况,本次模拟最大颗粒粒径为 4.0 cm,采用 1.0 cm 作为土石分界线,混合料的孔隙率为 0.15,根据现场级配情况生成不同含石量下的土石混合体。材料颗粒使用圆颗粒来近似,通过不断调整圆颗粒的摩擦系数来近似模拟土石混合料颗粒粗糙程度,使圆形颗粒的接触模式

逼近真实的土石混合料颗粒。颗粒黏结采用平行黏结模型,本模型根据现场直剪试验结果反算,得到摩擦系数为 2.0。

1.2 细观参数的确定

目前还没有建立模型微观力学特征与宏观力学特征之间相关关系的通用公式,在颗粒模型试验中,必须要通过一系列的微观参数分析,标定出一组能够与宏观力学特征相吻合的微观力学参数。结合现场直剪试验(图 1),经过大量试算,对不同颗粒参数分析比对,最终确定的颗粒参数见表 1。



图 1 土石混合体压剪试验现场照片

表 1 土石颗粒细观参数

墙体		颗粒									
接触刚度/(N·m ⁻¹)		颗粒接触					平行黏结				
法向	切向	土体刚度 系数/(N·m ⁻¹)		块石刚度 系数/(N·m ⁻¹)		摩擦 系数	半径 系数	刚度系数/(Pa·m ⁻¹)		强度/Pa	
		法向	切向	法向	切向			法向	切向	法向	切向
1×10 ⁹	1×10 ⁹	4×10 ⁷	4×10 ⁷	5×10 ⁸	5×10 ⁸	2.0	0.5	1×10 ⁷	1×10 ⁷	4.3×10 ⁴	4.3×10 ⁴

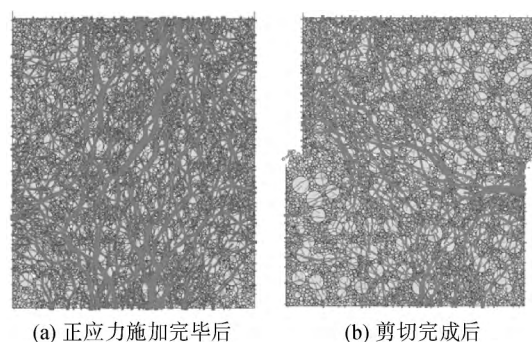
2 数值模拟结果分析

从图 2 可以看出,法向正应力施加完毕后,颗粒体受力比较均匀,颗粒接触力主要用于平衡施加的法向正应力。保持整个剪切过程中法向正应力不变,随着剪切的进行,在剪切缝宽度范围内的颗粒出现了明显错动,剪切带处的颗粒位移较大并在缝口两侧有部分颗粒被挤出剪切盒。剪切过程中,应力方向由上下方向逐渐发生明显的偏转,在达到最大剪应力时应力方向几乎平行于上剪切盒左侧与下剪切盒右侧的连线方向;同时明显可见上剪切盒右上角、下剪切盒左下角作用力较小。

2.1 剪应力与剪切位移关系

绘制均质土与土石混合体在不同法向正应力作用下剪应力与剪切位移之间的关系曲线,见图 3。

由图 3 可知,均质土(含石量为 0%)在剪切开始阶段,剪应力随剪切位移增大不断上升直至达到



(a) 正应力施加完毕后 (b) 剪切完成后

图 2 接触力分布情况

峰值剪切强度;当达到峰值强度之后,会出现明显的应变软化现象,并迅速下降至残余强度。法向正应力越大,其峰值剪切强度也越高,高正应力下土体达到峰值强度所需要位移量比低正应力条件下大,模拟得到的剪应力—剪切位移关系曲线符合现场直剪试验的一般规律。

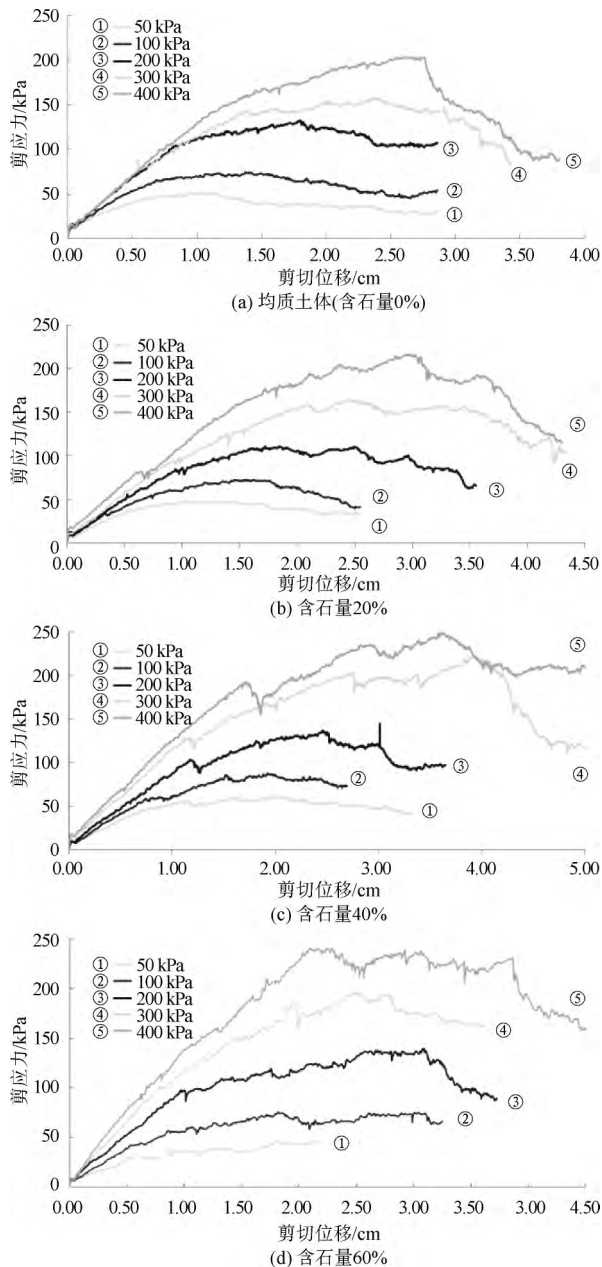


图3 不同恒定法向应力下剪应力—剪切位移曲线

低含石量时土石混合体的剪应力—剪切位移曲线特征类似于均质土体,但相同法向应力下土石混合体剪应力—剪切位移关系曲线要陡于均质土体,即峰值剪切强度高于均质土体,而峰值强度所对应的位移量要小于均质土体。这说明块石的存在提高了土石混合体的剪切刚度和剪切强度。中等含石量的土石混合体在剪切破坏时表现出应变硬化特性,达到峰值后剪应力开始随剪切位移的增长迅速下降,进入残余强度后剪应力波动比较大。高含石量时剪切破坏过程很短,剪切开始时剪应力迅速累积,很快达到峰值,这时的剪切位移很小,但剪应力

由峰值剪切强度过渡到残余强度是一个缓慢的过程,需要一定的剪切位移量。

2.2 法向位移与剪切位移关系

图4记录了剪切过程中法向加载墙的位移,它表征了土石混合体的剪胀(或剪缩)特性。对均质土而言,由于土体密实度高,直剪过程中主要表现为剪胀特性,而且正应力越大,剪胀量越小。对于土石混合体,其剪胀特性除与正压力有关外,还与含石量有关。对较低含石量土石混合体,低正应力时剪切过程中表现为剪胀特性,中等正应力时剪切开始阶段出现较小的剪缩,紧接着出现剪胀,剪胀位移远大于剪缩位移;随着正应力的增加,剪缩量逐渐增大,剪胀量逐渐减小。随着含石量的增加,在低正应力时的剪胀量在增大,高正应力时的剪缩量趋于减小;当处于高含石量时,整个剪切阶段只出现剪胀不出现剪缩现象。究其原因,认为低至中等含石量的土石混合体,低正应力情况下,没有充足的能量促使细颗粒填充剪切过程中产生的新孔隙,因而剪切过程只出现剪胀现象;在中等正应力作用下,开始阶段正应力能够促使细颗粒填充由剪切产生的孔隙而出现剪缩,但填充到一定程度后,需要提供更大能量才能进一步填充,在没有额外动力情况下混合体便开始出现剪胀;对于高正压应力情形,在整个剪切过程中,正压应力能不断填充由于剪切出现的新孔隙,随剪切面扩大,剪缩量也相应提高。对于高含石量混合体颗粒,较多块石之间相互接触咬合,块石之间摩擦能较大,不易变形,加上没有足够的细颗粒土体填充剪切孔隙,因而剪切过程中只呈现剪胀特性。

2.3 含石量对抗剪强度参数的影响

图5为不同含石量下土石混合体试样剪应力与正应力关系图。从图5可以看出,不同含石量下土石混合体剪应力和正应力均具有较好的线性相关性,相关系数均在0.96以上,土石混合料的内摩擦角及黏聚力可通过不同压应力下正应力与剪切应力的关系图而确定。

为了进一步研究土石混合体的抗剪强度参数与块石含量关系,图6显示了土石混合体的内摩擦角及黏聚力随块石含量的变化曲线。图6表明,当块石含量小于40%时,土石混合体的内摩擦角随块石含量增加的变化不大,而黏聚力稍有降低,总体而言接近相应土体的内摩擦角和黏聚力;当块石含量大于40%时,内摩擦角随块石含量增加近似呈线性增大,而黏聚力有很大程度的降低,但当块石含量大于

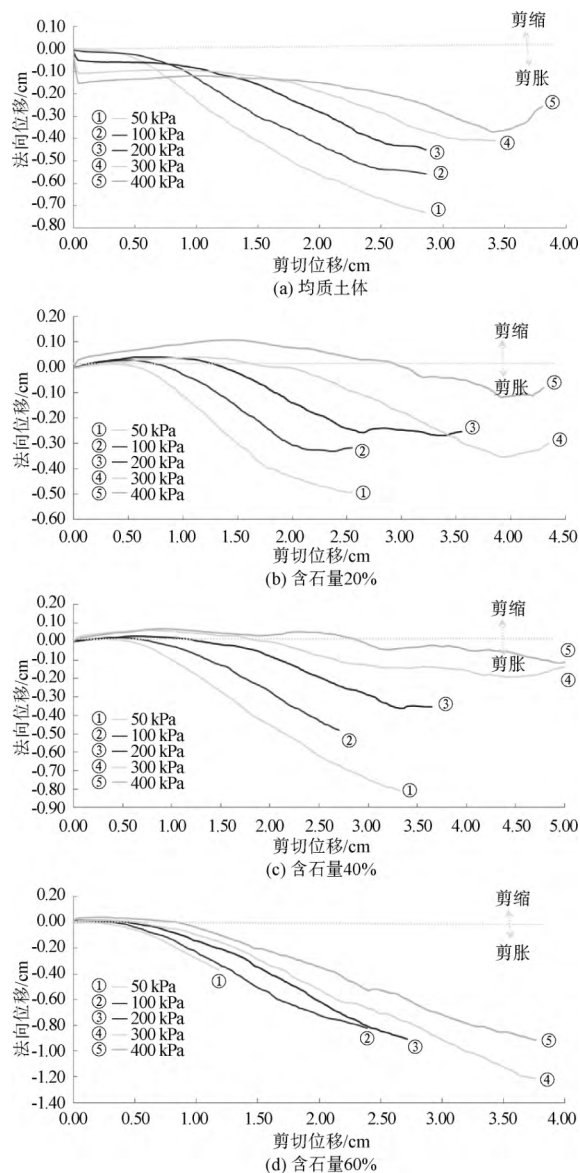


图 4 不同恒定法向应力下法向位移—剪切位移曲线

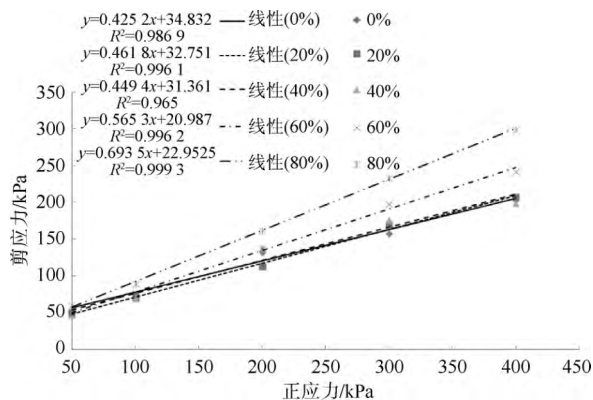


图 5 不同含石量下剪应力—正应力曲线

60%时,黏聚力随着块石含量的增加变化较小。由此可见,当试样的含石量较低时,块石之间几乎不直

接接触,块石被土颗粒包裹,因此土石混合体的变形特性主要由土的性质控制。当试样含石量较大时,多数块体已直接接触,土只是作为块石之间的填充物存在,这时土石混合体的变形与强度特性受块石和土体的共同控制,块石之间接触咬合并形成骨架,使得内摩擦角不断增大,强度显著提高。因此,土石混合体的强度与含石量关系并不是线性递增的,而是存在一个含石量的阈值,当含石量超过此值时,土石混合体的强度参数将显著变化。本次试验结果表明,土石混合体力学特性明显区别于土体的含石量阈值大致为 40%。

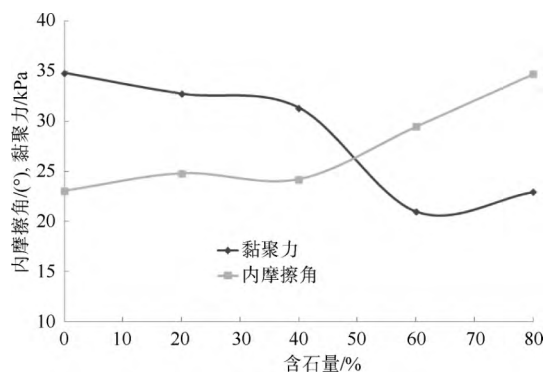


图 6 土石混合料抗剪强度随含石量的变化规律

2.4 破坏后试样的裂纹扩展情况分析

在 PFC 中可以通过监测颗粒之间的裂纹分布分析颗粒的破坏特征。分别选取均质土体和土石混合体在法向正应力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 条件下剪切破坏后裂纹分布信息进行比较分析,结果如图 7、图 8 所示。

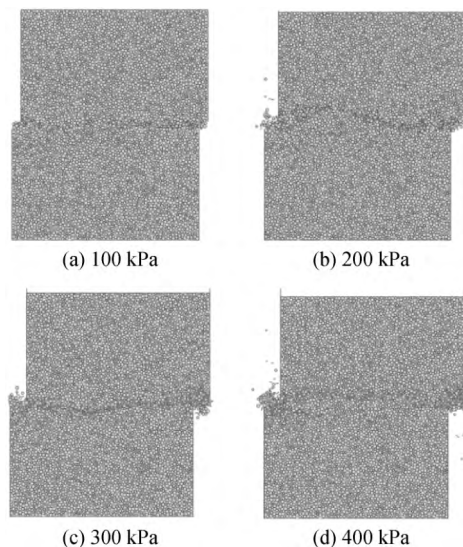


图 7 均质土体剪切破坏后裂缝分布

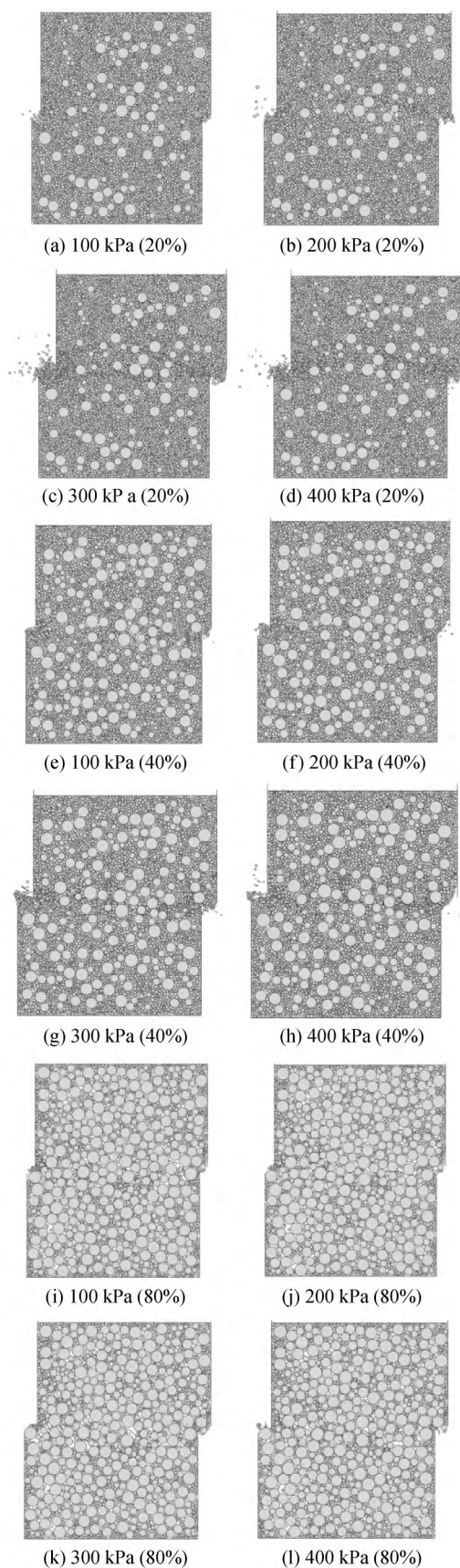


图 8 土石混合物剪切破坏后裂缝分布

均质土与土石混合物裂缝分布有较大差异,均质土体在较低正应力作用下剪切破坏后形成的裂纹集中于剪切缝所在的平面,剪切破坏面基本与直剪仪剪切滑动方向相一致。随着正应力增大,预定剪切面两侧的裂纹增多,同时出现压剪破坏特征。

而土石混合体的剪切破坏不仅受控于直剪盒的剪切滑动方向,而且还受到其内部块石的分布及含量的控制。土石混合物中的块石相对于土而言表现出刚性,剪切过程中不会破坏且产生转动和平动,剪切带并不像土体那样规则,出现明显的分叉及多滑面现象。剪切带位于上下剪切盒交界面附近范围内的一个薄层区域,宽度显著大于均质土体剪切带宽度,该区域内的颗粒的位移较大,区内的块石发生明显的转动。土石混合物在剪切过程中首先在上下剪切盒的剪切缝周围的土体进入塑性状态,随后在土石界面出现张开分离现象,破坏区逐渐由外向内扩展。由于土石界面裂缝的扩展、块石转动、平动及土体的破坏随着变形的增大相互影响,最终在试样内部形成贯通的剪切带。高含石量下剪切带的剪胀裂缝张开非常明显。

3 结语

通过对不同含石量下土石混合物大型直剪试验离散元模拟分析,主要得出了以下结论。

(1)均质土的剪切应力有峰值出现,并产生应变软化现象。土石混合物由于块石的影响,初始剪切刚度较均质土稍有增大,其达到峰值抗剪强度所需的剪切位移较少。土石混合物在达到强度极限之前经历一段较长的屈服和应力硬化阶段,且随着含石量和法向应力的不同,该段的历时长短会有较大的差别。

(2)土石混合物直剪过程中的剪胀特性不仅与法向应力有关,还与含石量有关。低含石量土石混合物与土相似,直剪过程中表现为剪胀特性;中含石量的土石混合物在低正应力下表现为剪胀特性,在高正应力下,先经历一段剪缩状态后,随着剪切位移的不断增大将由剪缩状态转变为剪胀状态;而高含石量土石混合物在直剪过程中只表现剪胀特性。

(3)土石混合体的剪切带发育特征与其内部块石分布及块石含量有着密切的关系,随着块石含量的增加其剪切带逐渐变宽。由于块石的存在使得土石混合体的剪切破坏带极不规则,具有分叉及多滑面现象。

(4)土石混合体力学特性明显区别于土体的含石量阈值大致为 40%。当块石含量为小于 40%时,土石混合体的内摩擦角及黏聚力随含石量变化不大,与相应土体强度参数相近;当含石量大于 40%时,土石混合体的内摩擦角随含石量的增加近线性增大,黏聚力较相应土体有很大程度的降低,但当块石含量大于 60%时,黏聚力随着块石含量的增加变化较小。本文仅对平面问题进行了分析,而三维问题需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐峻岭,马惠民,郑静,等. 滑坡的规律研究与防治[J]. 铁道工程学报,2005,12(增刊):333—339.
- [2] Lindquist E S, Goodman R E. Strength and deformation properties of a physical model[C]// Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Conference (NARMS), Rotterdam; A. A. Balkema, 1994:843—850.
- [3] 油新华,汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1537—1540.
- [4] 徐文杰,胡瑞林,谭儒蛟,等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(6):1270—1277.
- [5] 李世海,汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报,2004,26(2):172—177.
- [6] 赫建明,李晓,吴剑波,等. 土石混合体材料的模型构建及其数值试验[J]. 矿冶工程,2009,29(3):1—5.
- [7] 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.
- [8] 井国庆,高亮,邵磊. 吹砂车维修机理离散元仿真与应用[J]. 铁道工程学报,2011,11(158):58—62.

Influence of Rock Content on Shear Strength Characteristics of Soil-rock Mixtures

ZHAN Yong-xiang, YAO Hai-lin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Soil-rock mixture (SRM) is the main component of accumulation landslide on Karakoram highway, and the mechanical characteristics of SRM are closely related to rock content. In order to get the reasonable calculation parameters for such landslide, based on particle flow theory, the numerical simulations of the large direct shear test for SRM are conducted under serious rock contents by using PFC2D, the change tendency of SRM strength parameters affected by factors is revealed. The results show that the shear properties of SRM are different from the corresponding soil. In the shear process, the soil exhibits dilatancy characteristics and strain softening, and the shear failure surface is basically consistent with the sliding direction of shear apparatus. While for SRM, before reaching the ultimate strength, a long period of long yield and stress hardening stage will be experienced, dilatancy characteristics is related with not only normal stress, but also rock content. The shear band of SRM is irregular with bifurcation and multi slip surface phenomena due to rock block. The mechanical characteristics of SRM which is significantly different from the soil is approximately at 40% rock content. When rock content is less than 40%, the internal friction angle and cohesion little change with the increase of rock content, and they are similar to the strength parameters of the corresponding soil. When rock content is more than 40%, the internal friction angle of SRM increases linearly with the increase of rock content, and the cohesion of the SRM decreases significantly compared to the corresponding soil. When the rock content is larger than 60%, however, there is only a little change in the cohesion with the increase of the rock content.

Key words: soil-rock mixture (SRM); meso-mechanics; particle flow code (PFC); direct shear test; shear strength