

DOI: 10.11779/CJGE202010021

# 土石混合体—基岩界面剪切力学特性试验研究

杨忠平<sup>1, 2, 3</sup>, 蒋源文<sup>1, 2, 3</sup>, 李诗琪<sup>1, 2, 3</sup>, 李进<sup>1, 2, 3</sup>, 胡元鑫<sup>4</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;  
3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045; 4. 渝武机场建设指挥部, 重庆 401120)

**摘要:** 填方体—下伏基岩接触面间的剪切强度是控制高填方体或堆积体边坡稳定性的重要因素, 界面强度参数取值是高填方工程设计的重要参数之一。通过较系统地室内大型直剪试验探讨了接触面粗糙度对土石混合料—基岩接触面剪切力学特性的影响。结果表明: 在低法向应力作用下, 剪应力—剪切位移曲线前期呈现出应变硬化现象, 后期呈现出塑性应变现象, 且接触面粗糙度越大接触面发生剪切破坏时变形越小; 在高法向应力作用下, 曲线呈现出应变硬化现象, 无明显峰值; 相同法向应力水平作用下, 接触面粗糙度越大, 土石混合体—基岩接触面剪切刚度越大。剪切界面上块石的破碎形态可分为完全破碎、部分破碎和表面磨损 3 种, 随着接触面粗糙度的增加, 剪切界面上块石的破碎总数也增加。接触面的抗剪强度、内摩擦角和表观黏聚力随着接触面粗糙度的增加而增大, 相比于内摩擦角, 接触面的表观黏聚力增大较为明显。接触面粗糙度对剪切带宽度有影响作用, 表现为接触面粗糙度越大, 剪切带越宽。

**关键词:** 土石混合体; 基岩界面; 粗糙度; 剪切特性; 块石破碎

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)10-1947-08

**作者简介:** 杨忠平(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与边坡稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: yang-zhp@163.com。

## Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface

YANG Zhong-ping<sup>1, 2, 3</sup>, JIANG Yuan-wen<sup>1, 2, 3</sup>, LI Shi-qi<sup>1, 2, 3</sup>, LI Jin<sup>1, 2, 3</sup>, HU Yuan-xin<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Headquarters of Chongqing Yuwu Airport, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** The shear strength of the interface between the fill and the underlying bedrock is an important factor to control the stability of high fill or accumulation slopes. The value of the interface strength parameter is one of the important parameters for the design of high backfills. The effect of the contact surface roughness on the shear mechanical properties of the soil-rock mixture-bedrock contact surface is explored through the systematic large-scale indoor direct shear tests. The test results show that under the action of low normal stress, the shear stress-shear displacement curve shows strain hardening in the early stage and plastic strain in the later stage, and the greater the roughness of the contact surface, the more the contact surface deforms when shear failure occurs. Under the action of high normal stress, the curve shows strain hardening without obvious peaks. Under the same normal stress level, the greater the contact surface roughness, the greater the shear stiffness of the soil-rock mixture-base rock interface. The crushing morphology of the rock at the shear interface includes three types: complete crushing, partial crushing, and surface abrasion. As the contact surface roughness increases, the total number of rock crushing at the shear interface also increases. The shear strength, internal friction angle and apparent cohesion of the contact surface increase with the increase of the roughness of the contact surface. Compared with the internal friction angle, the apparent cohesion of the contact surfaces increases significantly. The roughness of the contact surface has an effect on the width of the shear band, which shows that the larger the roughness of the contact surface is, the wider the shear band is.

**Key words:** soil-rock mixture; bedrock interface; roughness; shear characteristic; broken stone

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504802); 中央高校基本科研业务经费项目(2019CDXYTM0032); 国家自然科学基金项目(41772306)

收稿日期: 2020-01-08

## 0 引言

土石混合体 (soil-rock mixture, S-RM) 是一种极不均匀的松散材料, 如崩积层、残积层和洪积层, 主要组成成分是碎块石和土<sup>[1]</sup>。在中国西南山区的基础设施建设过程中, 土石混合体被广泛地用作土工材料<sup>[2]</sup>填充到低洼场地, 形成了众多的高填方体边坡。高填方体边坡滑坡破坏制约着中国西南山区基础设施建设的发展, 如攀枝花机场填方体滑坡<sup>[3]</sup>、贵州某高填方体边坡滑坡<sup>[4]</sup>, 其原因之一为土石混合料填筑体与下伏基岩界面间的抗滑阻力不足<sup>[5]</sup>。鉴于此, 为了提供更大抗滑阻力, 基岩坡面常采用台阶式开挖 (如图 1 所示), 形成了长宽比不同的台阶形状基岩界面。尽管如此, 对大多数高填方体边坡来说, 其填方体与下伏基岩接触面仍然是边坡的第一不连续面, 受地震、堆积体重力、降雨作用等因素的影响, 此接触面常常是高填方体边坡失稳不容忽视的潜在滑移面之一。

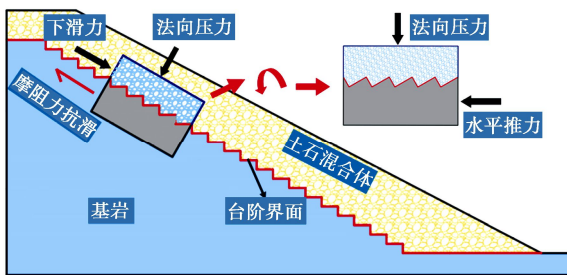


图 1 填方体边坡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fill slope

受施工场地地形条件约束, 不同地形下基岩放坡开挖所采用的坡率亦有所差异, 从宏观上可认为不同坡率开挖所形成的台阶状基岩界面其粗糙度不同。大量研究表明接触面粗糙度对土-基岩界面的剪切强度及变形特征有重要影响。Zhang 等<sup>[5-6]</sup>对颗粒土-钢板接触面进行的大型接触面静力和循环加载试验结果表明, 接触面强度符合莫尔-库仑强度准则; 随着钢板表面粗糙度的增加, 接触面摩擦角呈现增大的趋势。Borana 等<sup>[7-8]</sup>对全风化花岗岩土壤-钢板接触面进行的直剪试验也表明, 钢板表面粗糙度越大, 接触面抗剪强度越高。并指出法向应力变化历史对接触面变形特征和剪切破坏强度参数影响较大。石熊等<sup>[9]</sup>研究揭示了红黏土与混凝土接触面粗糙度对接触面抗剪及残余强度有较大的影响。陈俊桦等<sup>[10]</sup>指出红黏土与混凝土接触面剪切破坏、变形与接触面粗糙度有较大关系, 接触面内摩擦角受其影响较小, 接触面黏聚力随接触面粗糙度增大而增大并趋近红黏土黏聚力。张吉顺等<sup>[11]</sup>重点研究了粗糙度对黏性土与混凝土结构接触面的影响规律, 试验制作了表面为规则的锯齿凹凸混凝土试

块, 指出粗糙度明显影响其力学特性。以上学者在研究接触面粗糙度对颗粒材料和结构物接触面的剪切特性影响机制中, 常常采用砂土、黏土和粗粒土, 几乎很少考虑土石混合体 (填方体) 这种极不均匀、松散的材料。虽然陈静等<sup>[12]</sup>通过土石混体与混凝土桩接触面室内大型直剪研究了含水率和含石率对其接触面力学特性的影响; Cen 等<sup>[13]</sup>对土石混合体-台阶状界面接触面开展了数值模拟剪切试验, 研究了含石率和土石混体最大块石粒径对其接触界面的力学特性的影响。但接触面粗糙度对土石混合体-基岩接触面剪切力学特性的影响尚不多见, 仍需深入研究。鉴于此, 本文通过土石混合体-基岩接触面室内大型直剪试验, 较系统地研究了接触面粗糙度对填方体-下伏基岩界面的剪切强度及变形特征的影响。可为高填方体或堆积体边坡稳定性分析提供参考。

## 1 室内大型直剪试验

### 1.1 试验设备

室内大型直剪试验采用四川大学华西岩土研究所研制的大型粗粒土压缩直剪仪 ZJ50-2G (见图 2), 仪器主要由刚性框架、上下剪切盒、水平加载装置、垂直加载装置和数据采集装置等组成, 直剪试验过程中, 垂直方向加载到法向压力设计值, 固定上剪切盒并水平推动下剪切盒, 使试样均匀受剪。仪器采用数字控制系统, 可以自动化采集数据。试验所用上、下剪切盒长×宽×高为 300 mm×300 mm×200 mm。

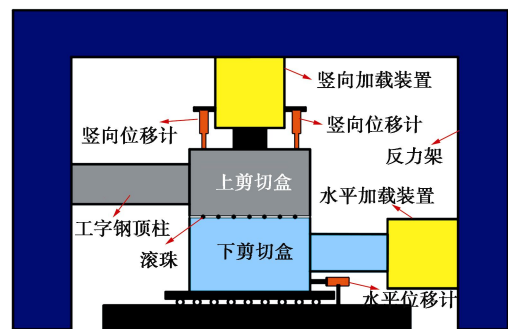


图 2 ZJ50-2G 大型粗粒土压缩直剪仪示意图

Fig. 2 ZJ50-2G large coarse soil compression direct shear apparatus

### 1.2 试样制备

土石混合料试样取自重庆武隆某机场填方区具有代表性的强夯区域, 为粉质黏土、黏土以及灰岩碎块石组成的混合物, 试样基本物理参数指标如表 1 所示。

由于室内试验剪切盒尺寸限制, 将现场原土石混合体级配按相同比例缩小, 根据《水电水利工程粗粒土试验规程》<sup>[14]</sup>用相似级配法可将原样粒径按照几何相似条件等比例缩小, 各粒组的相对比例保持不变。

表 1 土石混合物及灰岩基本物理参数指标

Table 1 Basic physical parameter indexes of soil-rock aggregate

土体类型	物理参数指标							
	干密度/(g·m <sup>-3</sup> )	孔隙比	天然含水率/%	天然密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	c/kPa	φ/(°)	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa
土石混合物	1788	0.24	9.32	2110	23.9	10.54	—	—
灰岩	—	—	—	2730	1433	35.67	29.14	68.09

将场地原土石级配采用相似级配法等比例缩小后, 试验级配中最大块石粒径为 25 mm (如图 3)。试验土石混合物级配选择 5 mm 作为土石阈值<sup>[15]</sup>, 试验级配曲线见图 4 所示。

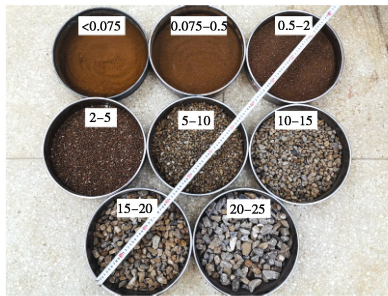


图 3 样本筛分结果

Fig. 3 Sample sieving results

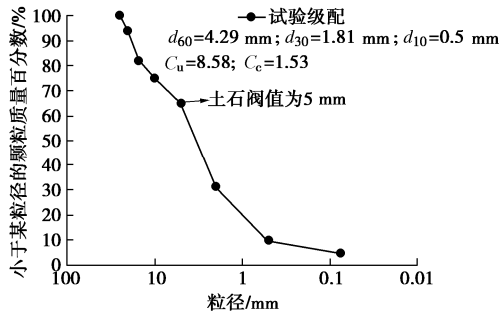


图 4 土石混合物试样级配曲线

Fig. 4 Gradation curve of soil-rock mixture samples

试验所用基岩取自重庆武隆仙女山机场现场, 地层为二叠系 (P) 上统吴家坪组地层, 岩性主要是泥质灰岩。采用 WDAJ-600 型微机控制电液伺服多功能试验机测得岩石试件的单轴抗压强度、抗剪强度指标和弹性模量如表 1 所示。

台阶状灰岩试件设计坡率分别为 1 : 2, 1 : 1.75 和 1 : 1.5。台阶高度  $h$  不变, 台阶长度  $L$  发生变化, 使其满足设计的坡率, 制作了表面粗糙度不同的 3 组试件, 每组试件长×宽×高为 300 mm×300 mm×200 mm。参考张吉顺等<sup>[11]</sup>、赵春风等<sup>[16]</sup>对不同混凝土试件粗糙度的定义, 本试验所用灰岩试件粗糙度定义为 (如图 5):

$$Y=R/S \quad (1)$$

式中,  $R$  为台阶峰谷距离,  $S$  为两峰的距离。

为更好地描述土石混合物—基岩接触面的剪切机理, 定义台阶 J 斜面角度  $\alpha$  为

$$\alpha = \arctan(h/L) \quad (2)$$

式中,  $h$  为台阶高度,  $L$  为台阶长度 (如图 5)。

根据粗糙度与 J 斜面的定义, 3 组试件的粗糙度及台阶斜面 J 的角度如表 2 所示。

表 2 台阶基岩界面力学参数指标

Table 2 Mechanical parameter indexes of step bedrock interface

试件	编号	坡率	台阶高/cm	台阶宽/cm	粗糙度 Y/mm	J 斜面 $\alpha/(^\circ)$
	1	1 : 2	25	50	0.399	26.56
	2	1 : 1.75	25	43.75	0.431	29.74
	3	1 : 1.5	25	37.44	0.462	33.69

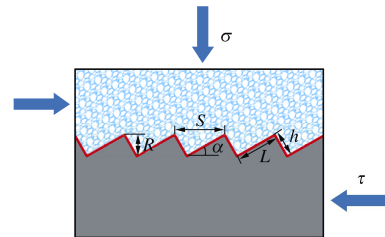


图 5 台阶状灰岩试件界面示意图

Fig. 5 Interface diagram of step limestone test piece

将重庆武隆仙女山机场现场不规则的灰岩试块, 按照表 2 设计方案加工后的试件如图 6 所示。



图 6 加工后的岩石试件

Fig. 6 Processed rock samples

### 1.3 试验方案

将台阶状灰岩试件放入下剪切盒中, 在上剪切盒中放入土石混合物。室内试验所用土石混合物试验级配如图 4 所示, 将筛分好的不同粒径块石与土颗粒先拌和至粗细颗粒分布均匀, 按天然含水率 (9.32%)



分3次加入水,搅拌至试样干湿均匀;称取适量拌和均匀的土样分3次逐层均匀填入上剪切盒内,每层都采用静压法压实<sup>[17]</sup>,按压实系数0.9控制,并对各层接触面凿毛处理,防止层面过于明显,影响剪切效果。考虑到在剪切过程中由于台阶与块石之间的咬合作用,部分块石很难翻越相邻块石或台阶,随着剪切位移的增加,这些块石可能会被剪碎。为了探究剪切面上块石的破碎现象,本文在土样装填完成后,用红色油漆将剪切面块石染色,在试验结束后统计染色块石破碎数量,以此来判断剪切面上块石的破碎情况。

夏红春等<sup>[18]</sup>建议直剪试验剪切速率采用0.02~1.2 mm/min,本文采用0.8 mm/min的剪切速率控制。如表3所示,每组试件在法向应力为200,400,600和800 kPa下进行土石混合物-基岩接触面的剪切试验。根据《水电水利工程粗粒土试验规程》<sup>[14]</sup>当剪切位移为60 mm(试样长度的20%)时终止试验。

表3 室内大型直剪试验方案

Table 3 Indoor large-scale direct shear test schemes

试件编号	粗糙度 C	法向压力/kPa
1	0.399	200, 400, 600, 800
2	0.431	200, 400, 600, 800
3	0.462	200, 400, 600, 800

## 2 试验结果与分析

### 2.1 剪应力-剪切位移曲线分析

不同法向应力水平作用下,土石混合物与不同粗糙度试块接触面的剪应力-剪切位移曲线如图7所示。

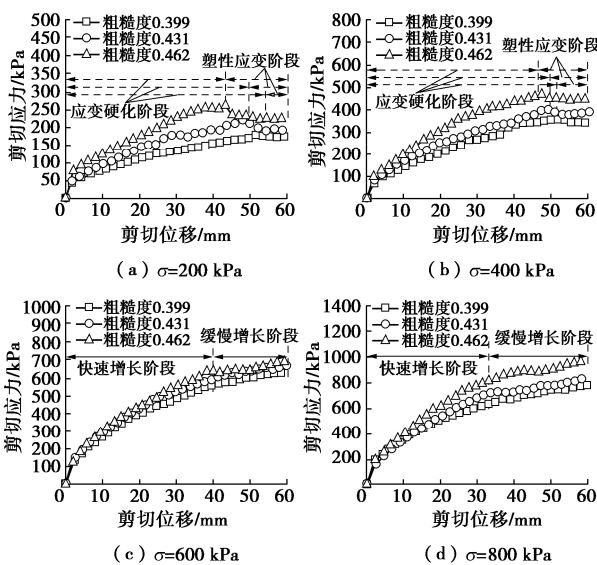


Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves

由图7可知,剪应力-剪切位移曲线在低法向应力(如图7(a),(b))作用下曲线前期呈现出应变硬化

化现象,后期呈现出塑性应变现象。曲线有明显的峰值,并且接触面粗糙度越大,峰值剪应力对应的位移越小。而在高法向应力(如图7(c),(d))作用下,曲线均呈现出应变硬化现象,当剪切位移在35~45 mm之前时,剪应力随剪切位移增长较快,之后剪应力仍持续增长但增长速度开始变缓,整个剪切过程无明显峰值;相同法向应力水平作用下,接触面粗糙度越大,剪应力-剪切位移曲线的斜率越大,土石混合物-基岩接触面剪切刚度<sup>[19]</sup>越大。

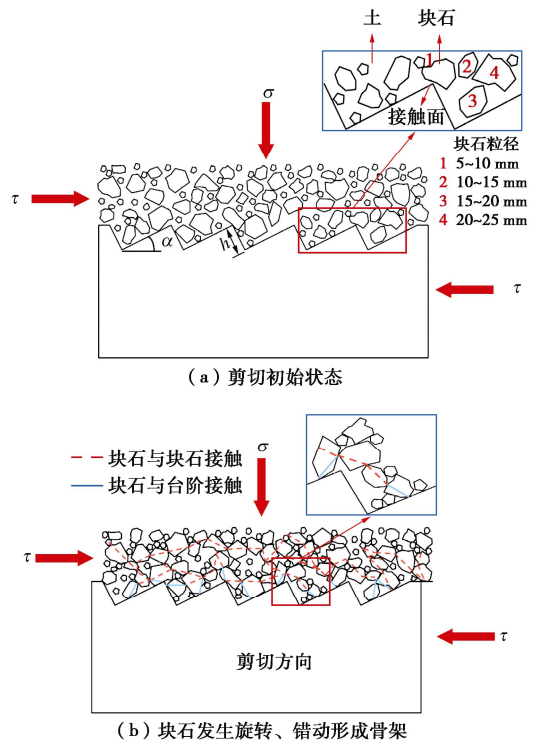


图8 块石骨架形成示意图

Fig. 8 Schematic diagram of block stone skeleton formation

在剪切过程中,随着剪切位移不断增加,台阶凹槽内块石与接触面附近一定范围内块石不断错动和旋转,凹槽内块石与接触面上部一定范围内土石混合物中的块石相互咬合、闭锁形成了块石骨架(如图8),块石骨架又会与台阶产生咬合力,随着剪切位移的增加,咬合作用力逐渐上升,接触面抗剪强度也在逐渐提高。当剪切继续进行,凹槽内块石、上部土石混合物中块石与台阶三者之间的咬合作用逐渐增强到某一值时,块石骨架中部分块石被剪碎,接触面上剪应力发生跌落。在低法向应力作用下,剪应力跌落后剪切面发生塑性流动破坏(如图7(a),(b));而在高法向应力作用下,块石被剪碎,剪切面上的块石数量增加,并能重新发生错动、咬合,形成新的更多的咬合块石骨架(如图9),因此剪切应力-剪切位移曲线表现出剪应力短暂跌落后又上升的现象(如图7(c),(d))。

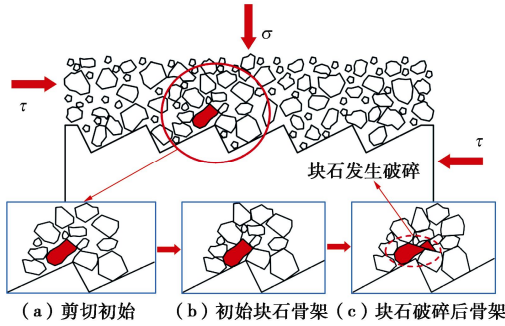


图 9 块石破碎后重新形成骨架示意图

Fig. 9 Schematic diagram of re-formed skeleton after rock is broken

由于台阶状灰岩的弹性模量远大于土石混合体的弹性模量几个数量级, 可将灰岩试件近似看作刚性体<sup>[10]</sup>, 因此接触面剪切区的切向变形主要由灰岩试件剪切面上部土石混体和灰岩试件台阶凹槽内土石混合体产生。凹槽内的土石混体沿着台阶斜面发生爬坡现象, 将凹槽内的土石混体沿斜面的变形分解为竖向变形分量和切向变形分量, 粗糙度大时, 剪切斜面 J 的倾角  $\alpha$  越大, 在产生相同切向变形下, 将产生更大的竖向变形, 需要更大的克服法向应力做功, 因此剪切应力增长更快, 在低法向应力作用下, 能更快地达到峰值。

### 2.2 粗糙度对接触面附近块石破碎的影响

接触面附近的块石破碎量反映了土石混合填方体中块石与基岩接触面相互咬合的紧密程度, 咬合作用越强烈, 则在剪切时块石越容易被剪碎。如图 11 所示, 块石破碎形态可分为完全破碎、部分破碎和表面磨损 3 种。块石发生完全破碎或部分破碎意味着块石所受的咬合作用较大, 不易翻越相邻块石或台阶, 因此块石容易被剪碎 (如图 10 (a))。块石发生表面磨损说明此块石虽然与其它块石或台阶产生了接触, 但是咬合作用很小, 在剪切过程中主要以滑移为主, 所以只在块石表面留下了摩擦的痕迹 (如图 10 (b))。

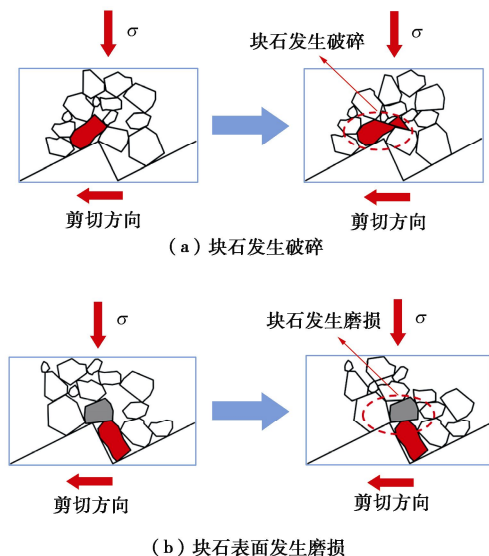


图 10 块石破碎模式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of block crushing mode

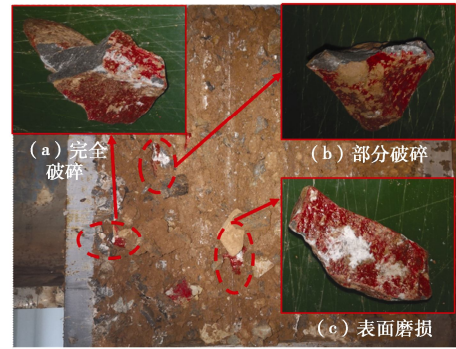


图 11 块石破碎形态

Fig. 11 Broken forms of block stone

染色的块石是随机布设在剪切面上的, 因此在一定程度上染色块石的破碎情况可反映整个剪切面破碎情况。试验结束后挑出事先随机分布于剪切面上的染色块石进行观察, 按照图 11 对块石破碎形态的分类方法, 将不同粗糙度下破碎的染色块石进行分类统计, 结果如图 12 所示。由图 12 可知, 相同法向应力作用下, 接触面粗糙度越大, 完全破碎块石数量越多, 完全破碎和部分破碎块石总数也越多。

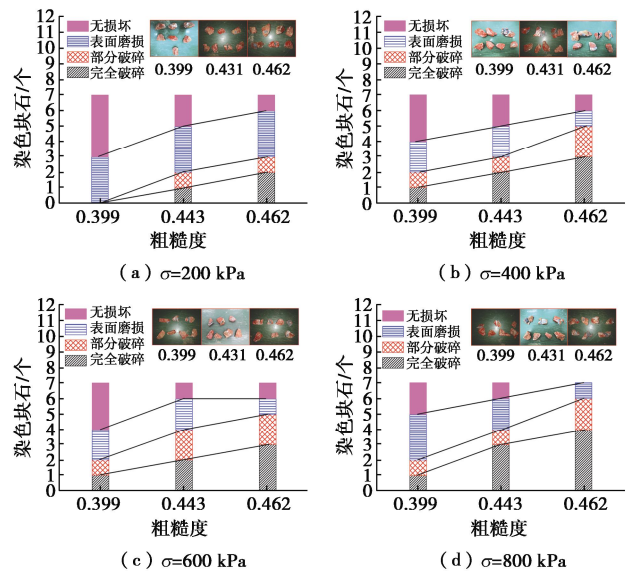


图 12 染色块石破碎与粗糙度关系

Fig. 12 Relationship between broken stone blocks and roughness

由于试件表面粗糙度较大时, 台阶斜面 J 也越陡, 台阶凹槽内土石混体在沿着台阶斜面 J 发生爬坡运动时, 斜面越陡其法向位移分量越大, 剪切破坏区厚度增加, 剪切破坏区内有更多的块石相互接触, 形成强度较高的块石骨架, 随着剪切位移不断增加, 紧密咬合的块石更容易被台阶剪断, 所以试件粗糙度增加时, 块石破碎的现象会加剧。完全破碎或者部分的块石数量可以从侧面体现出剪切面上块石与块石、块石与台阶咬合作用和嵌固作用的强弱程度, 在剪切过程中咬合作用和嵌固作用力越强, 块石越不易翻越相邻块石或台阶, 则块石容易被剪碎。

2.3 粗糙度对接触面抗剪强度的影响

根据《水电水利工程粗粒土试验规程》<sup>[14]</sup>，抗剪强度取剪应力与水平位移关系曲线上峰值或稳定值，如无明显峰值，则取水平位移达到试样直径或长度10%处的剪应力作为抗剪强度。统计不同粗糙度接触面在不同法向压力下的抗剪强度如表4所示，从表中可见，在相同的法向应力作用下，随着接触面粗糙度的增加，接触面抗剪强度显著提高。

在剪切过程中，接触面上的抗剪强度主要来自于两部分：一是克服块石与块石之间、块石与台阶之间的咬合作用力，台阶粗糙度越大，块石与块石之间、块石与台阶之间的咬合作用力越强，在整体上则表现为接触面的抗剪强度越大；二是克服块石与块石、块石与基岩结构面之间的滑移阻力，台阶凹槽内的土石混合体会沿着台阶斜面J发生爬坡现象，爬坡现象增加了剪切破坏区内土石混合体在法向方向上的挤压作用，粗糙度越高，凹槽内土石混合体法向位移分量越大，法向挤压作用越明显，滑移阻力越大，因此需要更大的克服法向应力做功，从而接触面抗剪强度得以提高。同时块石的破碎以及破碎后块石的重新排列需要外力额外做功<sup>[20]</sup>，这些额外做的功也将会使接触面抗剪强度增大。

表4 界面抗剪强度

Table 4 Interface shear strengths

项目	试件编号			
	1	2	3	
抗剪强度	$\sigma_n = 200$ kPa	179.0500	224.2300	264.8700
	$\sigma_n = 400$ kPa	356.9700	401.5600	460.8900
	$\sigma_n = 600$ kPa	490.3700	536.6700	575.6700
	$\sigma_n = 800$ kPa	605.5600	694.8200	794.5600
粗糙度	0.3990	0.4310	0.4620	
相关系数 R	0.9899	0.9975	0.9874	
表观黏聚力/kPa	54.7500	77.6000	98.0400	
内摩擦角/(°)	35.2400	37.7200	40.4300	

2.4 粗糙度对接触面剪切强度参数的影响

不同接触面粗糙度下抗剪强度 - 法向应力关系曲线如图13所示。进行拟合后其线性相关系数 R 均大于 0.98，这表明在本文试验的法向应力范围内，接触面的抗剪强度与法向应力关系具有较好的线性相关。参考已有研究<sup>[10-13]</sup>中研究接触面抗剪强度参数的计算方法，本文采用莫尔-库仑准则对不同粗糙度接触面的抗剪强度与法向应力关系进行描述。

采用莫尔-库仑强度准则对试验数据进行拟合，得到其表观黏聚力<sup>[20-21]</sup>和内摩擦角，表观黏聚力和内摩擦角与粗糙度关系曲线如图14所示。由图14可知，随着粗糙度的增大，内摩擦角和表观黏聚力呈线性增长趋势。粗糙度由 0.399 增加到 0.462 时，接触面的

内摩擦角和表观黏聚力分别提高了 14.72%和 79.07%，表明粗糙度对表观黏聚力的影响更为显著。

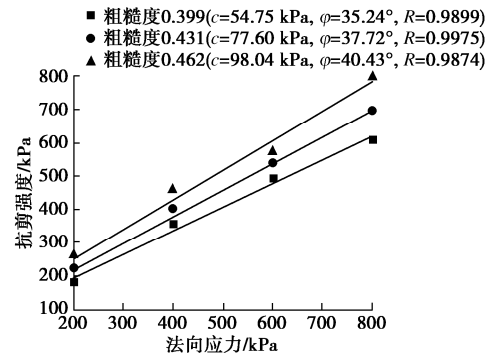


图13 不同接触面粗糙度下抗剪强度与法向应力关系曲线  
Fig. 13 Relationship between shear strength and normal stress under different contact surface roughnesses

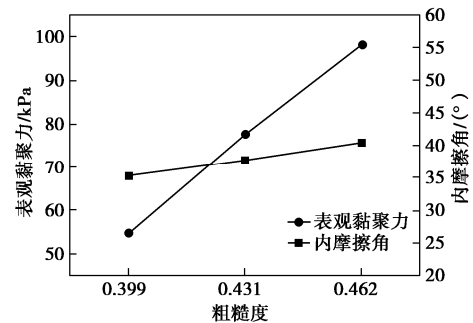


图14 接触面强度参数与粗糙度关系曲线

Fig. 14 Relationship between contact surface strength parameters and roughness

在剪切过程中沿接触面发生剪切破坏主要克服摩擦阻力和表观黏聚力。在本文试验中摩擦阻力可分为两部分，一是台阶凹槽内土石混合体与剪切面上部土石混合体之间的滑动摩擦阻力，二是台阶凹槽内土石混合体与台阶凹槽表面的滑动摩擦阻力。由于试验所用土石混合体级配、含水率均保持一致，不同试件的台阶凹槽表面几乎无任何差异，因此不同试件接触面上的摩擦阻力也应该差别不大，但是随着剪切位移的增加，剪切面上的块石发生错动和破碎使这种理想的状态发了改变。李广信<sup>[20]</sup>认为颗粒的破碎和重排列均需要外力额外做功，这将会增加剪切面上的内摩擦角。随着粗糙度的增加剪切面上块石破碎越严重，正是这种现象导致了接触面的内摩擦角随着粗糙度的增加有轻微的上升。

沿接触面发生剪切变形需要克服的另一种因素是表观黏聚力。马林<sup>[21]</sup>认为表观黏聚力并非来源于颗粒间的胶结和各种化学键，表观黏聚力表现为剪切面上不规则土颗粒之间的咬合力。在本试验中，接触面附近的块石与块石、块石与台阶相互咬合。当剪切不断进行时，剪切面上的块石要么翻越相邻块石或者台阶，要么被剪断，发生剪切破坏。参考前人研究成果<sup>[21]</sup>，本



文认为表观黏聚力产生的原因是块石与块石之间、块石与台阶之间的咬合作用力。随着粗糙度的增加, 块石与块石之间、块石与台阶之间的咬合作用力随之增强, 导致接触面的表观黏聚力显著提高。需要补充的一点是, 接触面上不仅有表观黏聚力, 还有台阶凹槽内土石混合物与剪切面上部土石混合物中土颗粒间的黏聚力, 但由于本试验土石混合物含石率较大, 作为胶结材料的土颗粒之间的接触较少, 所以这部分黏聚力很小, 接触面上主要由表观黏聚力占主导作用。

### 2.5 粗糙度对剪切带的影响

Cen 等<sup>[13]</sup>认为剪切带是接触面附近变形较大的区域, 而变形较小的区域被称为非剪切带。在本试验中, 凹槽内的土石混合物沿着台阶斜面发生爬坡现象, 将凹槽内的土石混合物沿斜面的变形分解为竖向变形分量和切向变形分量, 粗糙度大时, 剪切斜面 J 的倾角  $\alpha$  越大, 在产生相同切向变形下, 将产生更大的竖向变形; 同时接触面粗糙度较大时, 凹槽内土石混合物法向位移分量越大, 法向挤压作用越明显, 这使得凹槽内块石与接触面上部一定范围内块石相互咬合、闭锁形成的块石骨架范围更广, 当块石骨架在剪切过程中被破坏时, 变形较大的区域随之增加。因此接触面粗糙度较大时, 剪切过程中形成的剪切带较宽, 如图 15 所示。

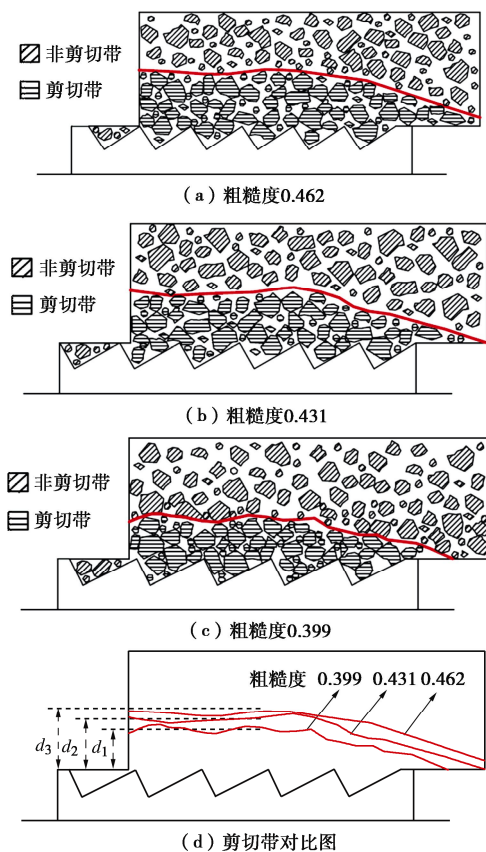


图 15 不同粗糙度下剪切带示意图

Fig. 15 Schematic diagram of shear zone with different roughnesses

## 3 结 论

通过对土石混合物—基岩接触面室内大型直剪试验, 分析了基岩在不同粗糙度下接触面的剪切变形特征。

(1) 在低法向应力作用下, 剪应力 - 剪切位移曲线前期呈现出应变硬化现象, 后期呈现出塑性应变现象, 且接触面粗糙度越大接触面发生剪切破坏时变形越小; 在高法向应力作用下, 剪应力 - 剪切位移曲线呈现出应变硬化现象, 无明显峰值。相同法向应力水平作用下, 接触面粗糙度越大, 剪应力 - 剪切位移曲线的斜率越大, 土石混合物—基岩接触面剪切刚度越大。

(2) 剪切界面上块石的破碎形态可分为完全破碎、部分破碎和表面磨损 3 种。相同法向应力作用下, 接触面粗糙度越大, 完全破碎块石数量越多, 完全破碎和部分破碎块石总数也越多。说明在剪切过程中剪切面上块石与块石、块石与台阶咬合作用和嵌固作用力越强, 块石越不易翻越相邻块石或台阶, 则块石容易被剪碎。

(3) 采用莫尔-库仑强度准则对试验数据进行了线性拟合, 获得了其表观黏聚力和内摩擦角。结果表明: 在相同法向应力作用下, 接触面抗剪强度随着接触面粗糙度增加而增大; 土石混合物—基岩接触面的内摩擦角和表观黏聚力随着接触面粗糙度的增加也都有所增大, 其中接触面的表观黏聚力增大较为明显。

(4) 接触面粗糙度对剪切带宽度有影响作用, 表现为接触面粗糙度越大, 剪切带越宽。

### 参考文献:

[1] 张 强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 土石混合物三维细观结构随机重构及其力学特性颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 41(1): 60 - 69. (ZHANG Qiang, WANG Xiao-gang, ZHAO Yu-fei, et al. Random reconstruction of three-dimensional micro structure of soil rock mixture and numerical simulation of its mechanical properties particle flow[J]. Chinese Journal of geotechnical Engineering, 2017, 41(1): 60 - 69. (in Chinese))

[2] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合物概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50 - 56. (XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 50 - 56. (in Chinese))

[3] 李天斌, 刘 吉, 任 洋, 等. 预加固高填方边坡的滑动机制: 攀枝花机场 12# 滑坡[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 723 - 731. (LI Tian-bin, LIU Ji, REN Yang, et al. Sliding mechanism of pre reinforced high fill slope: Panzhihua airport No. 12 landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 723 - 731. (in Chinese))

[4] 刘桂琴, 王子玉, 高振鲲. 贵州某高填方滑塌变形监测分

- 析[J]. 人民长江, 2007(11): 148 - 149, 158. (LIU Gui-qin, WANG Zi-yu, GAO Zhen-kun. Monitoring and analysis of a high fill landslide in Guizhou[J]. People's Yangtze River, 2007(11): 148 - 149, 158. (in Chinese))
- [5] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 21 - 25. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic mechanical properties of interface between coarse-grained soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [6] ZHANG G, ZHANG J M. Large-scale apparatus for monotonic and cyclic soil-structure interface test[J]. Geotech Test J, 2006, **29**(5): 401 - 408.
- [7] BORANA L, YIN J H, SINGH D N, et al. Interface behavior from suction controlled direct shear test on completely decomposed granitic soil and steel surfaces[J]. Int J Geomech, 2016, **16**(6): 1 - 14.
- [8] BORANA L, YIN J H, SINGH D N, et al. Influence of matric suction and counterface roughness on shearing behavior of completely decomposed granitic soil and steel interface[J]. Indian Geotech J, 2016, **47**(2): 150 - 160.
- [9] 石 熊, 张家生, 刘 蓓, 等. 红黏土土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(5): 1826 - 1831. (SHI Xiong, ZHANG Jia-sheng, LIU Bei, et al. Experimental study on shear characteristics of interface between red clay and concrete[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2015, **46**(5): 1826 - 1831. (in Chinese))
- [10] 陈俊桦, 张家生, 李 键. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016(47): 1682 - 1688. (CHEN Jun-hua, ZHANG Jia-sheng, LI Jian. Effect of interface roughness on mechanical properties of red clay concrete interface[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016(47): 1682 - 688. (in Chinese))
- [11] 张吉顺, 华 斌. 土与不同桩侧表面粗糙度接触面剪切试验研究[J]. 结构工程师, 2011, **27**(3): 118 - 122. (ZHANG Ji-shun, HUA Bin. Shear test research on contact surface between soil and different pile side surface roughness[J]. Structural Engineer, 2011, **27**(3): 118 - 122. (in Chinese))
- [12] 陈 静, 李邵军, 孟凡震, 等. 三峡库区滑坡土石混合物与桩的接触面力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2888 - 2895. (CHEN Jing, LI Shao-jun, MENG Fan-zhen, et al. Experimental study on the mechanical properties of the interface between the landslide soil rock mixture and the pile in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2888 - 2895. (in Chinese))
- [13] CEN D, HUANG D, REN F. Shear deformation and strength of the interphase between the soil-rock mixture and the benched bedrock slope surface[J]. Acta Geotechnica, 2016, **12**(2): 391 - 413.
- [14] 水利水电工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 2006. (Code for Coarse-Grained Soil Test for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5356—2006[S]. 2006. (in Chinese))
- [15] 刘新荣, 涂义亮, 王 鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1425 - 1434. (LIU Xin-rong, TU Yi-liang, WANG Peng, et al. Study on particle breakage characteristics of soil rock mixture based on large-scale direct shear test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1425 - 1434. (in Chinese))
- [16] 赵春风, 龚 辉, 赵 程, 等. 考虑法向应力历史的茹土-混凝土界面弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 848 - 855. (ZHAO Chun-feng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of Ru Tu concrete interface considering normal stress history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 848 - 855. (in Chinese))
- [17] 杨忠平, 李万坤, 胡元鑫, 等. 压实系数对粗粒土剪切特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(2): 348 - 356. (YANG Zhong-ping, LI Wan-kun, HU Yuan-xin, et al. Effect of compaction coefficient on shear properties of coarse-grained soil[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(2): 348 - 356. (in Chinese))
- [18] 陆 勇, 周国庆, 夏红春, 等. 中、高压下粗粒土-结构接触面特性受结构面形貌尺度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3491 - 3499. (LU Yong, ZHOU Cuo-qing, XIA Chun-hong, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3491 - 3499. (in Chinese))
- [19] 张俊峰, 王协群, 邹维列, 等. 土-格栅界面强度参数和剪切刚度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, **31**(3): 77 - 83. (ZHANG Jun-feng, WANG Xie-qun, ZOU Wei-li, et al. Experimental study on strength parameters and shear stiffness of soil grid interface[J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2014, **31**(3): 77 - 83. (in Chinese))
- [20] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [21] 马 林. 钙质土的剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016(增刊 1): 309 - 316. (MA Lin. Experimental study on shear properties of calcareous soil[J]. Geotechnical Mechanics, 2016(S1): 309 - 316. (in Chinese))