

土石混合体的剪应力波动和跌落行为机制

胡峰, 李志清, 刘琪, 胡瑞林

Mechanism of shear stress fluctuation and dropping of the soil-rock mixture

HU Feng, LI Zhiqing, LIU Qi, and HU Ruilin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究

A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport

马昊, 黄达, 肖衡林, 王俊杰, 马文浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 88-88

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏婕, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008024

土石混合体的剪应力波动和跌落行为机制

胡 峰^{1,2,3}, 李志清^{1,2,3}, 刘 琪^{1,2,3}, 胡瑞林^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029)

摘要: 土石混合体在剪切过程中存在剪应力跌落的现象, 基于该现象, 本文采用大型直剪试验的方式, 考虑不同含石量(0%、30%、50%、70%)、上覆垂直压力(50, 200, 300, 400 kPa)、块石尺寸(9.5~19.0 mm、19.0~31.5 mm、31.5~53.0 mm) 3个主要控制因素, 进行室内剪切变形试验, 研究直剪过程中发生的剪应力跌落现象。同时, 通过在试样内部钻孔、埋置细铝丝与干灰的方法获取剪切带变形厚度, 结合其大小理解剪应力的脆性跌落特征和剪切带块石变形特征。基于试验分析表明, 具备骨架结构且所含块石尺寸大于剪切带厚度的土石混合体试样在高垂直应力下的剪切过程中易出现块石应力集中, 形成锁固体块石, 该类块石往往控制着试样一定时空下的整体剪切强度, 其受剪切作用翻滚、滑移甚至咬合棱角破碎是导致剪应力瞬间大幅度跌落的直接原因。高含石量、大尺寸块石、高垂直应力是形成块石应力锁固体的必要条件。低含石量状态(<50%), 剪切带块石多顺剪切方向翻滚, 越靠近剪切面边缘, 变形越明显, 块石相对空间位置变化较小。高含石量状态(>70%), 剪切带块石可见相互滑移、攀爬, 块石相对空间位置变化明显。块石尺寸小于剪切带厚度时, 剪应力多呈现波动特征, 而块石尺寸接近剪切带厚度时, 剪应力波动加剧, 出现明显的应力跌落, 对应垂直位移出现突变。满足含石量高于70%、块石尺寸大于剪切带厚度的试样在相对较大的上覆垂直应力作用下易形成块石应力锁固体。

关键词: 土石混合体; 大型直剪试验; 应力跌落; 剪切带; 应力锁固体

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0090-12

Mechanism of shear stress fluctuation and dropping of the soil-rock mixture

HU Feng^{1,2,3}, LI Zhiqing^{1,2,3}, LIU Qi^{1,2,3}, HU Ruilin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The shear stress-dropping (jump) of the soil-rock mixture (S-RM) exists under direct shear conditions. In this paper the main factors affecting the stress-dropping are explored with the large scale direct shear test. Artificial soil-rock mixture specimens are prepared for different rock block proportions (0%, 30%, 50% and 70%), normal pressures (50, 200, 300 and 400 kPa), and rock sizes ranging from 9.5 to 19.0 mm, from 19.0 to 31.5 mm and from 31.5 to 53.0 mm. Meanwhile, the thickness of the shear band is monitored by putting the aluminum wires and dry ash into the hole inside the specimens. The thickness of the shear band will contribute to further understand the stress jump and rock blocks deformation. The experimental results show that the soil-rock mixture

收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0904); 国家自然科学基金面上项目(41672316); 中科院重点部署项目(KFZD-SW-422); 中科院青年创新促进会项目(2017092)

第一作者: 胡峰(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土力学研究。E-mail: 18810550150@163.com

通讯作者: 李志清(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土力学研究。E-mail: lizhiq-2002@163.com

sample with skeleton structure and larger rock blocks is inclined to form the interlocking rock block. Furthermore, the shear strength of the sample is dominated by interlocking rock blocks until the breakage of the rock block. The rotation, slippage, and breakage of interlocking rock block are the direct causes of the stress-dropping. The high content of the rock blocks, rock blocks of oversize, and high normal pressure are the necessary conditions for the formation of the stress locked patch. When the sample rock content is 50%, the rotation of shear band rock blocks in the shear direction is observed, and the deformation of rock blocks are more obvious close to the sidewall. However, the change of relative spatial arrangement of rock blocks is not more obvious, when the rock content of the sample is 70%, the behaviors of sliding, climbing, and the change of relative spatial arrangement of rock blocks are more notable than those of the sample with rock content of 50%. When the rock block size is less than the shear band thickness, the shear stress curve shows a wave shape. However, when the rock block size is close to the shear band thickness, the shear stress curve shows obvious brittle stress-dropping, and the vertical displacement will change sharply accordingly. Under the large-scale direct shear test of soil-rock mixture with high-level normal stress, the specimen with the rock content of above 70% and the size of rock block larger than the thickness of shear band will be apt to form the stress locked patch.

Keywords: soil-rock mixture; large-scale direct shear test; stress-dropping; shear band; stress locked patch

土石混合物(S-RM)作为一种由不同粒径粗粒块石和细颗粒土组成的复杂混合多相岩土介质,广泛分布于自然边坡、滑坡以及工程建设中,例如公路路基等,进一步理解土石混合物材料及土石混合物滑坡的物理力学、变形性质现实意义巨大。前期对土石混合物的现场试验、室内试验和数值模拟试验积累了大量的珍贵数据和经验。总结前人研究表明,土石混合物物理力学性质极为复杂,其力学强度和变形破坏过程受控于内部组成结构,包括细粒土的成分、块石含量、块石尺寸、强度和形状等。随着对土石混合物研究的不断加深,近年来关于土石混合物内部细观结构的受力变形特征,其对土石混合物宏观力学性质的影响逐渐成为研究的焦点和必要^[1],例如直剪试验中剪切带的变形特征、其与强度的相互关系以及内部控制块体如“超径块石”和“咬合应力锁固体”等的特征研究。关于剪切带的研究,刘新荣等^[2]通过三维激光扫描土石混合物大型直剪试验后的剪切面,并利用 Matlab 绘制剪切面的三维形貌图,获取土石混合物剪切面的变形和剪切强度特征,认为剪切带内部粗颗粒块石处应力集中明显; Xu 等^[3]基于有限元软件探讨了土石混合物大型直剪过程中块石对其破坏模式和剪切带应力分布的影响,认为内部块石是影响剪切带应力场和破坏模式的主要成分。

关于土石混合物内部块石行为的研究, Guo 等^[4]研究了粗粒土剪切过程中剪切带块石的棱角咬合锁固作用; Zhang 等^[5]采用大型三轴试验结合 CT 扫描成

像技术研究了含有超径块石土石混合体的块石破碎特征及其对强度的影响; 绍忠瑞等^[6]利用筛分试验研究了土石混合物内部块石的破碎特征,认为块石咬合程度越大,块石破碎越明显; 徐文杰等^[7]通过大型直剪试验研究土石混合体的剪切行为,认为出现应力跳跃主要是由块石颗粒的破碎、释放因咬合而积聚的应变能造成的; Gao 等^[8]采用 PFC^{2D} 分析了孤立块石对土石混合物滑坡体稳定性的影响,认为其存在和空间分布能有效地提高土石混合物滑坡的稳定性; Seminsky^[9]采用大型直剪试验和数值模型研究了土石混合物剪切带内部超径块石对试样强度、剪切带应力的影响,认为内部大块石是控制整体剪切强度的重要因素; 马昊等^[10]采用 PFC 模拟土石混合物的大型剪切过程,认为临近峰值及峰后阶段的剪应力主要由块石承担。

综上所述,目前还较少对土石混合物剪切带区域的结构、内部颗粒的变形特征进行深入系统的研究,而多将其作为试验现象进行概述性解释,并未对导致应力跳跃的块石含量、尺寸进行具体定量研究,且物理试验的内部不可视性、数值模拟试验的块石模型,尤其是高含石量下的块石接触、破坏模型的构建依然无法完全刻画实际情况。作为组成土石混合物重要成分的块石,系统认识其在变形带中的运动特征,才能更好地揭示土石混合物材料的力学机制。

砂卵石混合物作为一种无胶结、结构松散的广义土石混合物广泛分布于冲击平原地区和河床、河岸边坡,在城市地下交通、大坝坝基施工建设中极易导致

地层失稳坍塌,给施工带来很大的困难,同时其块石强度大,块石效应明显。故本文采用砂卵石混合体的大型直剪试验,根据获得的剪应力-剪切位移曲线反映内部结构变形特征,同时结合剪切带变形监测、块石染色标记的方法获取剪切带变形区域厚度和块石变形特征,探讨剪切带中导致剪应力脆性跌落的条件,块石应力锁固体的形成、应力转移、演化变形规律及影响,并借鉴秦四清等^[11]提出的孕震断层的锁固段破坏理论,对比讨论发生应力集中、破坏的剪切带块石特征及相应的演变模型。

1 土石混合体的室内大型直剪试验

1.1 试验材料

试验将粒径小于 5 mm 的砂土作为细颗粒组^[12],采用磨圆度较好的卵石为粗粒组制备砂卵石混合体。制样材料如图 1 和图 2(a)(b)所示,块石尺寸采用新标准方孔石子筛(标准 JGJ 52—2006)筛选,其密度为 2.52 g/cm³,点荷载强度为 14.3 MPa。块石的形态特征对土石混合体试样的宏观力学性能影响较大,因此,有必要对制样块石的形态特征进行描述,文中采用 Image-pro plus 软件计算的 3 种尺寸块石 L1(9.5~19.0 mm)粒组、L2(19.0~31.5 mm)粒组、L3(31.5~53.0 mm)粒组的扁平度平均值分别为 0.69, 0.74, 0.76,圆度平均值分别为 1.12, 1.10, 1.08,轮廓分形维数平均值分别为 1.05, 1.06, 1.03。

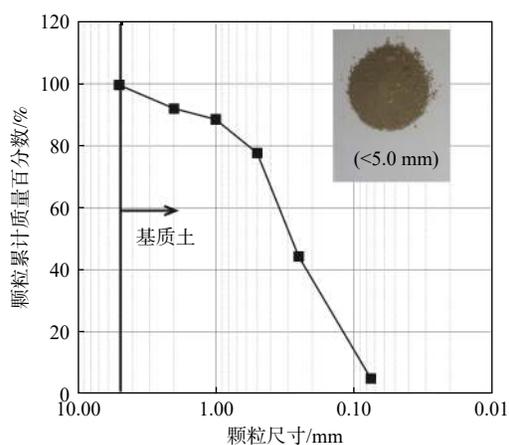


图 1 细粒土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution of fine-grained soil

1.2 试验设备

试验采用中国科学院地质与地球物理研究所研发的 RSM-1000 型大型直剪仪,如图 3 所示。该设备主要由吊装系统、伺服系统、加载系统、剪切装置、测

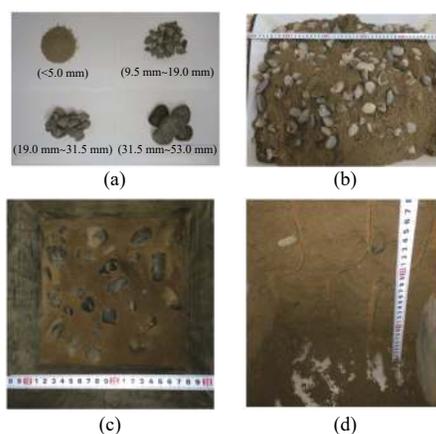


图 2 试验材料和试样

Fig. 2 Testing materials and samples



(a) 剪切仪

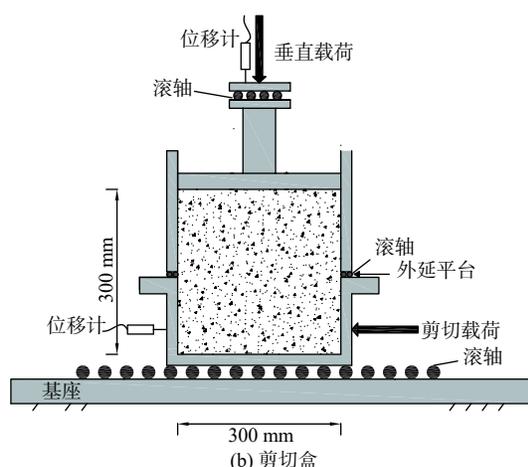


图 3 RSM-1000 型大型直剪仪

Fig. 3 Large-scale RSM-1000 direct shear apparatus

量系统与控制系统 6 部分组成,其中剪切盒设计为上盒承压不动,下盒移动剪切方式。加载系统(垂直、水平方向)最大输出荷载均为 1 000 kN,分辨率 0.1 kN,

最大位移 200 mm, 分辨率 0.05 mm。剪切盒尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm。

1.3 试样制备和试验步骤

为便于讨论块石尺寸对结果的影响, 试验将 3 种尺寸的块石 L1、L2、L3 单独与含水量为 5% 的砂土混合, 充分搅拌, 分别配制成含单一尺寸块石、质量含石量为 0%、30%、50%、70% 的土石混合物试样。根据剪切盒容积和设计的制样密度 (1.8 g/cm^3), 将所需土石混合物分为 3 等份, 依次倒入剪切盒分层压实至预定体积, 层间进行拉毛处理。其中 9.5, 19.0, 31.5, 53.0 mm 为相邻筛筛孔边长值, 筛后块石尺寸介于 2 种筛筛孔尺寸之间。按块石尺寸分为 L1 组、L2 组、L3 组 3 大组开展试验。物理试验中由于剪切盒的不可视性, 导致基本无法获取剪切带内部的变形数据。根据 Xu 等^[13] 针对土石混合物直剪试验的数值模拟研究, 剪切带区域在剪切后往往呈现“S”形状, 如图 4(a) 所示, 故为获取剪切带变形参数, 采用沿剪切方向中轴线布置, 由试样顶部打入孔径 8.0 mm、间距为 100 mm 的竖向孔 3 个, 在孔中插入直径为 1.5 mm 的柔软细铝丝, 为减小铝丝与周围颗粒的摩擦加筋作用, 同时在孔中倒入过 0.075 mm 孔径的干灰填充。通过剪切过程中干灰和铝丝的变形反映剪切带的变形, 其制样过程和原理如图 2(c)(d) 和图 4 所示。其中针对 50%、70% 含石量试样打孔过程容易遇到块石的问题, 试验采用预先埋置打孔钢棒, 再进行分层填料的方式。

装样结束后调整仪器, 按照《水电水利工程粗粒土试验规程》(DL/T 5356—2006)^[14] 中粗粒土直剪试验的操作步骤进行固结和剪切试验, 垂直加载应力分别取 50, 200, 300, 400 kPa。当固结速率小于 0.1 mm/h 后, 拔去上下剪切盒间的销钉, 开始剪切, 其中剪切速率为 0.4 mm/min, 剪切位移达到 60 mm 后停止剪切, 开挖铝丝所在的竖直剖面, 观察、测量干灰和铝丝的变形情况。

2 试验结果及分析

2.1 剪切带变形厚度特征

剪切带区域是内部颗粒变形、相对运移的主要场所, 其内部与外部存在明显的相对变形, 是应力分布的主要区域, 获取剪切带变形区域厚度有助于认识内部块石的变形特征, 故在剪切完成后, 沿布置铝丝所在方向开挖竖向剖面, 获取干灰和铝丝的变形特征, 如图 5 所示, 结合孔中干灰和铝丝的变形, 以剪切完成后铝丝呈反 S 形状的上下起弯点 A、B 之间的垂直

间距 D 为剪切带变形厚度, 试验获取不同工况下剪切带变形区域范围如表 1 所示。

本试验中剪切带变形区域在 3.5~7.7 cm 之间, 占试样高度 (300 mm) 的 11.7%~25.7%。L1 粒组、L2 粒组、L3 粒组剪切带变形区域厚度范围依次为 4.5~6.8 cm、4.3~7.2 cm、4.3~7.7 cm, 分别是剪切带内部最大块石粒径的 2.4~3.6 倍、1.4~2.3 倍、0.8~1.5 倍。

剪切带厚度是剪切过程中块石特征、垂直应力、含石量三因素的综合反映, 片面考虑单因素对其影响易导致错误的认识, 例如同一含石量, 块石越大, 则块石孤立性越明显, 越不易发生相互间的咬合, “齿轮带

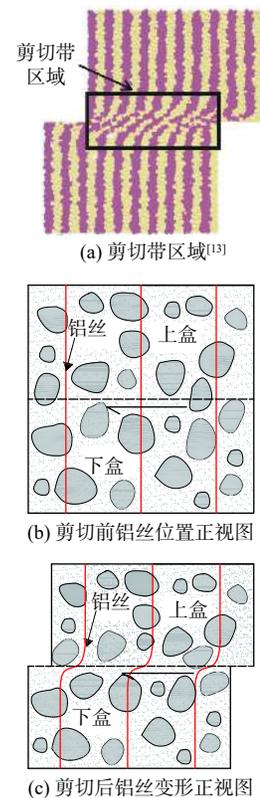


图 4 剪切过程示意图

Fig. 4 Sketch map of the shearing process

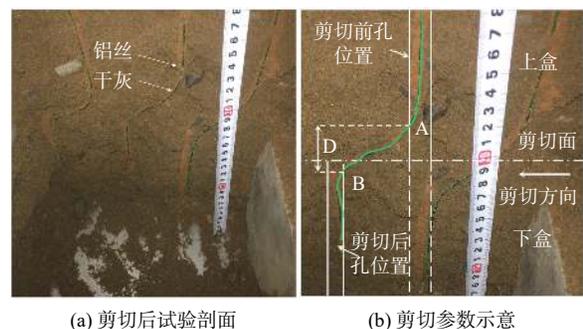


图 5 剪切带变形特征

Fig. 5 Deformation characteristics of the shear band

表 1 剪切带厚度值 D
Table 1 Shear band thickness D

块石尺寸/mm	含石量/%	垂直应力/kPa			
		50	200	300	400
		D/cm	D/cm	D/cm	D/cm
L1(9.5 ~ 19.0)	0	3.9	4.3	3.5	3.7
	30	4.7	5.4	5.6	4.5
	50	6.1	6.4	6.8	5.2
	70	5.5	6.4	5.2	6.1
L2(19.0 ~ 31.5)	30	4.3	5.7	5.3	5.5
	50	6.3	7.2	6.5	6.9
	70	6.1	6.7	6.1	6.6
	30	4.7	4.9	5.0	4.3
L3(31.5 ~ 53.0)	50	5.3	6.6	6.8	6.5
	70	7.2	6.5	7.3	7.7

动效应”不明显。同一块石含量、尺寸条件,垂直应力越大,块石咬合越容易,翻滚、滑移却越难,剪切带厚度未必大。关于剪切带厚度的分析见文献 [15] 中的研究讨论,可以得出以下结论,基于相同的剪切盒条件,剪切带厚度受控于含石量、块石大小、垂直应力的大小。剪切带中块石发生咬合、滑移变形与剪切带

厚度和块石尺寸有关,后文将结合剪切带厚度讨论块石的变形特征及其对剪应力的影响。

2.2 剪应力-剪切位移曲线特征及剪应力跳跃现象

试验土石混合体的剪应力-剪切位移曲线如图 6 所示,由图 6 可知土石混合体的剪应力-剪切位移曲线多呈现波动特征,主要分为应变软化、塑性变形和应变硬化三种类型。含石量是影响土石混合体剪切类型的重要因素,当含石量为 0% 时,各垂直应力下剪应力-剪切位移曲线均表现出相对明显的峰值应变软化特征;当含石量为 30% 时,高垂直应力(>200 kPa)、大尺寸块石粒组 L3 试样出现相对微弱的峰值特性,且峰值应变大于前者;当含石量为 50% 时,剪应力-剪切位移曲线多表现出应变硬化特征,L1、L2 粒组后期强度增加较小,L3 粒组后期强度增大明显。分析认为,块石还未相互接触的含石量状态(<30%),试样随剪切作用较易形成贯通的、稳定的剪切面,其强度随贯通剪切面的形成而达到峰值,随后进入残余强度阶段,强度大小稳定在一定范围,且块石越小越易形成贯通的剪切面。而块石普遍接触的高含石量骨架结构状态(>70%),剪切带块石的转动、翻爬、滑移导致无法

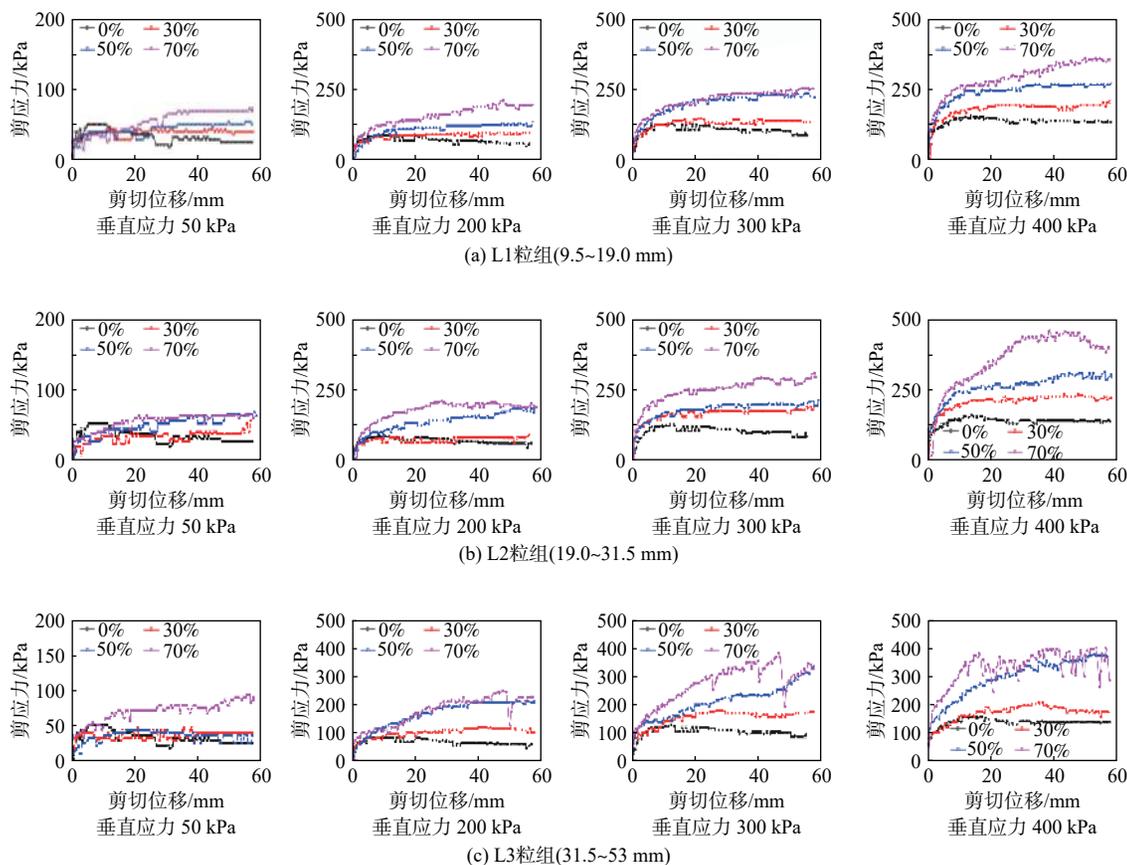


图 6 L1、L2、L3 粒组土石混合体剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Curves of shear stress-shear displacement of soil-rock mixture of L1, L2 and L3 rock sizes

形成稳定的贯通面。当块石以滚动、滑移的形式运动时则出现塑性变形。当内部大块石出现块石咬合强化作用,形成应力集中体时则容易导致应变硬化。当块石发生破碎(多以咬合处的棱角啃断滑移为主)或滑移时,应力通过骨架结构体瞬间消散,导致剪应力脆性释放,曲线出现突降。

试样内部铝丝的变形程度反映了剪切带内部块石的运动特征,图7为L3粒组30%和70%含石量试样试验后内部细铝丝的变形特征。30%含石量试样内部的铝丝变形相对平滑,图6(c)中对应的剪应力-剪切位移曲线较平滑,未出现明显的剪应力跌落。而70%含石量试样内部的铝丝变形程度相对较大,图6(c)中对应的剪应力-剪切位移曲线不再平滑,出现了明显的剪应力跳跃。说明含石量越大剪切带内部应力越复杂,越易发生块石的咬合滑移甚至破碎,导致应力跌落。

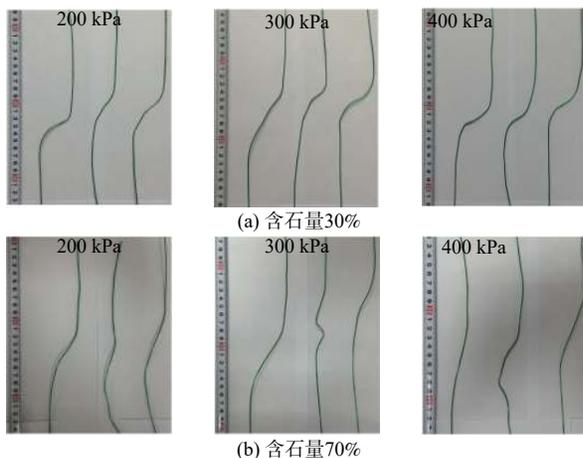


图7 L3 (31.5~53.0 mm)粒组剪切完成后试样铝丝变形特征对比

Fig. 7 Comparisons of deformation characteristics of aluminum wires after shear test of L3 (31.5-53.0 mm)

以往研究结果显示,高含石量土石混合体在大型直剪试验中常出现剪应力波动、跳跃的现象,徐文杰等^[16]在含石灰岩为粗颗粒骨料的土石混合体现场大型剪切过程中观察到70%含石量条件试样的剪应力曲线出现V型应力跳跃,跌落量达21.4%,通常认为该现象是由于试样内部块石随剪切作用发生咬合翻滚、嵌固滑移甚至破碎导致^[16-18]。三轴剪切试验中同样存在该现象,夏加国等^[19]在含有超径块石土石混合体的大型三轴试验中观察到了明显的应力骤降现象,其中最大粒径为压力室直径(300 mm)的0.6倍,应力跌落量最大达35%,并随含石量和围压的增加而加剧。试验

后发现超径块石存在破碎现象,分析认为超径块石的咬合滑移和破碎均可能导致应力突降,块石破碎引起的应力突降量要大于咬合滑移。然而在未考虑块石破碎的数值模拟直剪试验中较少出现类似明显的试验现象^[20-22],而以波动为主。严颖等^[23]在土石混合体的大型直剪数值模拟试验中,设置的块石密度(2.65 g/cm³)、尺寸(37~54 mm)、形态和剪切盒尺寸均与本试验L3粒组相似,在未考虑块石破碎时获取的剪应力-剪切位移曲线并未出现较大的应力跌落特征,高含石量条件下以应力波动为主。

综上所述分析认为,高含石量土石混合体内部块石咬合部位瞬间滑移和棱角啃断破碎均可导致应力跌落,其中块石滑移多表现为剪应力波动,幅值相对小于块石破碎导致的骤降幅值。针对波动与跌落骤降可以理解为结构稳定与否的区别,在《滑坡防治规范设计》(GB/T 38509—2020)^[24]中,考虑基本荷载与降雨荷载的滑坡防治设计的安全系数为1.15,故在本文将相邻位移加载步出现大于15%的应力降视为跌落。块石的滑移和破碎均基于相同的力学条件,即块石所受应力大于咬合摩擦强度或块石本身强度,导致力学平衡被破坏发生失稳,释放应力,而块石的大小与强度是决定所释放应力大小的关键因素。剪切带中的特殊“大块石或大块体”是出现应力跌落的物质基础,该类块石具备较大的尺寸和强度,其前期随剪切发生应力集中,积聚了很大部分的剪应力,一定时空上控制了试样的宏观力学性质。当剪应力超过咬合摩擦强度或块石强度时即发生块石滑移或破碎,应力瞬间消散,导致应力跌落。

该类块石可以归为引言中所提“控制块体”范畴。秦四清等^[11]在孕震断层多锁固段脆性破裂理论中称该类块体为“锁固段”。关键块体或锁固段均对岩土体的稳定起控制作用,在土石混合体直剪试验中该类型的特殊“块石”一定程度上控制了其特定时空上的强度分布及变化,起到了应力锁固作用,同样可称为锁固段或锁固体。土石混合体内部的锁固体与断层锁固段存在一定的力学相似性,但土石混合体材料的离散特征使其锁固体的作用模式存在自身的属性。试验剪应力大幅度跌落现象为何仅出现在高含石量、大块石、高垂直应力的条件下,内部锁固部位如何演变。下文就剪切过程中块石锁固体的特征、形成、失稳破坏进行探讨。

2.3 土石混合体直剪试验的应力锁固变形特征

锁固段被定义为断层面上具有较高强度且在地

震中释放较大地震矩的结构部位,例如断层面上不同类型、尺寸不一的凸起体,不连续断层之间的未破裂区段或蠕滑受阻区域^[11,25]。本文将土石混体材料剪切带内部易引起应力集中的块石称为锁固段。

针对剪应力-剪切位移曲线中应力大幅度快速跌落特征,结合剪切过程中垂直位移(剪缩为正)的变化进行讨论。图 8 给出了图 6(c)中出现较明显应力跳跃的含 L3 粒组尺寸块石、70% 含石量试样的剪应力和垂直位移随剪切位移变化的曲线。为便于分析,将剪应力出现大幅跌落事件按时间顺序依次称为事件 1, 2, 3, …, 对应垂直位移为 $S_{(1)}$, $S_{(2)}$, $S_{(3)}$, …。由图 8 可见剪应力数值随垂直应力的增大而增大,其跳跃处对应明显的垂直位移跳跃且均向压缩方向骤变,但部分较小的剪应力波动事件并未见明显的垂直位移跳跃。由图 8(a)可知,剪切位移到 48.39 mm 时发生较大的应力跌落,应力降达 48.6%,垂直位移变化幅度为 0.56 mm,即刚性传力板中心瞬间下沉 0.56 mm。由图 8(b)可以看出,土石混体剪切试验中出现 3 次明显的应力跌落事件且均发生在剪胀过程中,3 次事件单剪切位移加载步(剪切位移分别为 0.69, 0.66, 1.44 mm)应力值跌落幅度分别为 16.6%、20.6%、47.0%,对应的垂直位移值变化幅度分别为 0.14, 0.32, 0.67 mm。高含石量土石混合体的剪切强度主要由剪切带内部所有块石颗粒的咬合、滑移摩擦组成^[2],材料分布的随机性以及块石颗粒的形状差异都将导致各块石在不同的剪切阶段受力变形情况不断变化,Vallejo^[26]在含大块石的土石混体直剪模拟试验中,对同一试样在不同剪切位移下力链的分析结果与上述观点一致。试验中较明显的应力跌落多发生在剪切后期的剪胀阶段。粗颗粒土的剪胀特征常归因于内部粗颗粒的滑移翻越、咬合滚动。试样在垂直方向上因前期剪缩阶段积累了较大的能量,开始对外做功,属于内部能量释放过程。图 8(a)中单次剪应力损失量达到 48.6%,且对应试样整体垂直位移的突变,可见整体剪应力在一定时空上易受控于个别剪应力集中块体,直至其发生失稳。

2.4 土石混体剪切带应力锁固体形成条件

根据前文对剪应力-剪切位移曲线的分析,可以推测应力锁固体块石失稳直接导致了应力脆性跌落,且该现象在本试验中均发生在高含石量(含石量 70%)、大块石(L3)和高垂直应力条件下,即需同时满足含石量、垂直应力和块石大小 3 个条件。

为了进一步理解剪切带中大块石的运移特征,试

验采用在剪切面附近布置单排完全贯穿剪切面的染色块石试样,其块石尺寸均为 L3 粒组,含量分别为 50% 和 70%,如图 9 所示。随后在 300 kPa 的垂直压力下 进行剪切试验。为避免剪切前的固结过程导致剪切带外侧的块石挤入剪切带内部,从而造成染色块石提前变形,干扰试验结果,单排块石两侧采用砂土填充。试验结果如图 10 所示,试验后 2 种含石量状态的土石混体均发生了一定程度的压缩,块石在竖直方向发

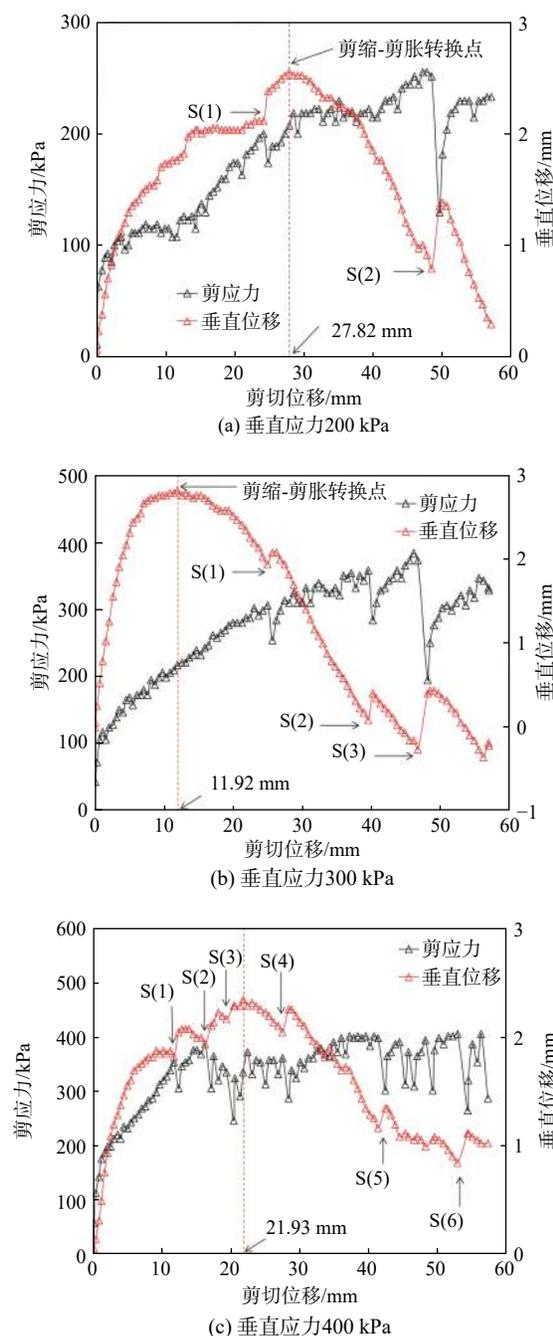


图 8 L3 粒组、70% 含石量条件剪应力、垂直位移-剪切位移曲线
Fig. 8 Curves of shear stress and vertical displacement versus shear displacement of L3 with rock content of 70%

生了顺剪切方向的旋转, 越靠近剪切面块石旋转越明显, 这与文献 [27] 中数值模拟的研究结果一致, 其中 50% 含石量试样受到剪切压缩之后块石旋转的程度较大, 但块石之间依然处于相对疏松状态, 70% 含石量试样受剪切之后块石还在水平方向发生了逆时针转动, 块石的排列方位发生了明显的转动, 局部块石发生堆叠、咬合, 而 50% 含石量试样内部块石排列多数保持试样前的状态。土石混合物受剪切压缩, 增大了块石的聚集程度, 而块石的转动加大了接触咬合的概率, 但块石在竖直面顺剪切方向的旋转却有利于剪切面的形成, 不利于强度的提高。

由前述可知, 不同尺寸块石剪应力-剪切位移曲线中仅 L3 粒组试样出现明显的应力跳跃, 说明块石大小同样是导致剪应力跌落的因素。为了充分对比块

石大小对应力锁固的影响, 试验对 L2 和 L3 粒组 100% 含石量、不同上覆垂直应力条件的试样进行相同剪切速率下的直剪试验, 对比块石充分接触情况下的块石效应。如图 11 中 L1 和 L2 粒组的剪切位移-剪应力、垂直位移曲线, 2 种工况试样的垂直位移均随剪切开始后经历短暂的剪缩阶段, 随即进入剪胀阶段, 且垂直应力越大, 剪缩-剪胀转换点处对应的剪切位移越小。粗粒土的剪胀特性通常可归因于相互接触的粗颗粒间的翻越和滑移攀爬, 前期的剪缩促进了粗颗粒

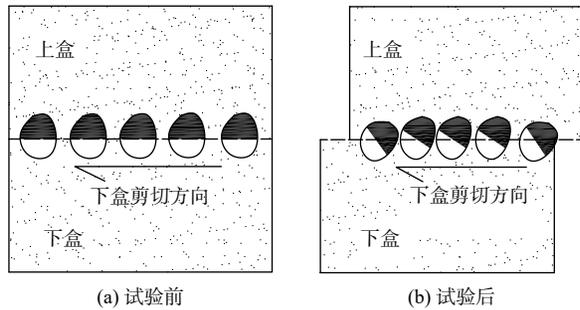


图 9 贯穿剪切面块石侧视图

Fig. 9 Side-view image of rocks throughout the shear surface

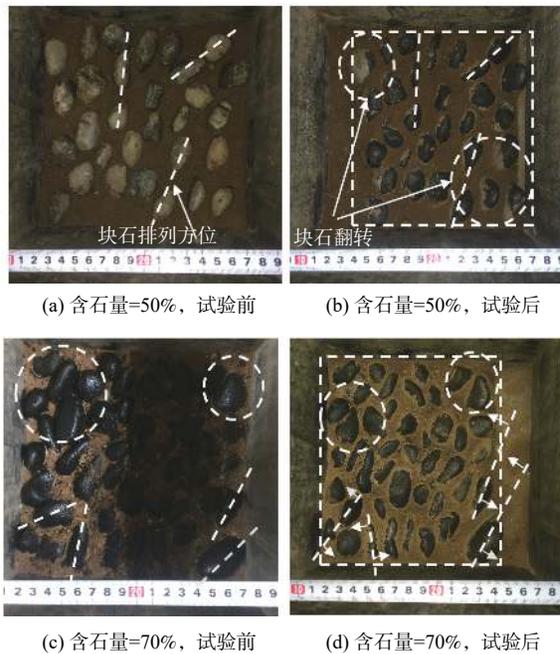
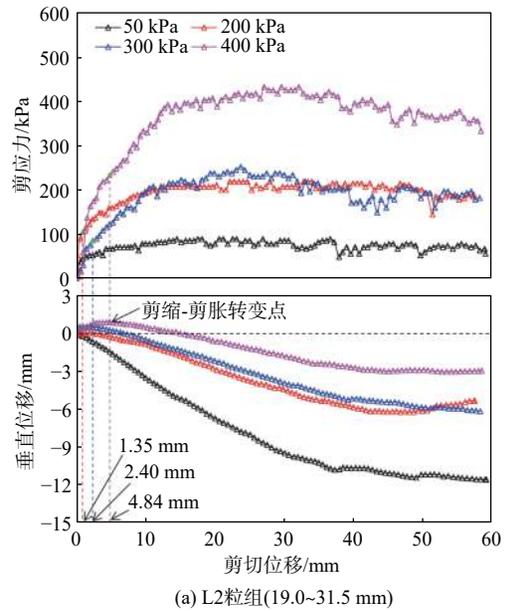
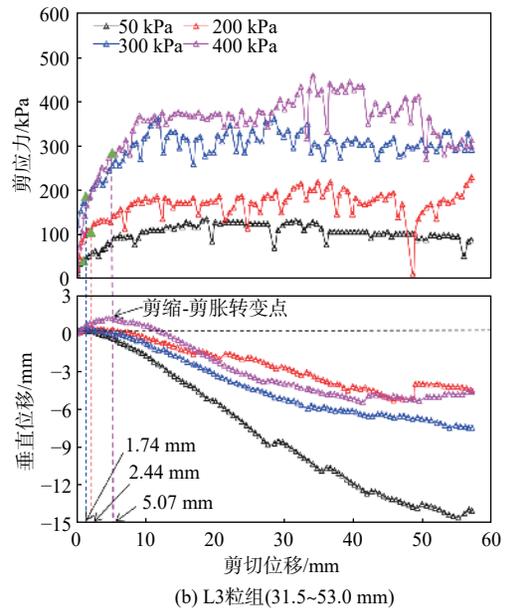


图 10 剪切面块石变化特征俯视图

Fig. 10 Top view image of variation of rocks throughout the shear surface with rock content of 50% and 70%



(a) L2粒组(19.0~31.5 mm)



(b) L3粒组(31.5~53.0 mm)

图 11 100% 含石量土石混合物剪切位移-剪应力、垂直位移曲线

Fig. 11 Curves of shear displacement versus shear stress, vertical displacement of soil-rock mixture with rock content of 100%

的接触。而 100% 的含石量条件, 块石处于高接触状态, 粗颗粒间初始接触咬合明显, 故其剪缩量较小而剪胀明显, 与试验现象相符。图中块石尺寸较小的 L2 粒组剪应力-剪切位移曲线相对平滑, 未出现较明显的剪应力脆性跌落现象, 以波动为主; 而块石尺寸较大的 L3 粒组剪应力-剪切位移曲线不再平滑, 出现了明显的 V 形跳跃现象, 且随垂直应力的增加跳跃的频率和幅度均有所加剧。即块石尺寸和垂直应力越大, 越容易导致块石应力锁固体的形成。块石越大, 咬合嵌固或变形储存的能量越大, 滑移或破坏后释放的能量也越大, 而高垂直应力为块石的能量聚集提供了外在动力和应力约束条件, 同时高应力条件也提供了内部裂隙向块石发展的可能^[28]。从剪切带厚度角度讨论, 两者内部块石均充分接触, 但 L2 块体尺寸均在 19.0~31.5 mm 之内, 小于前文中所测各工况剪切带区域厚度, 块石易在剪切带内部运动、接触后发生短暂的咬合随即便翻越, 无法形成有效的应力集中, 而 L3 块体尺寸较大, 易贯穿整个剪切带, 相互翻越较难, 更易发生接触咬合。

针对上述导致剪应力跌落出现的试验条件以及对剪切带内部块石变形特征的讨论, 将本试验中导致土石混合物试样出现剪应力脆性跌落现象的含石量、垂直应力和块石尺寸要素按数值大小划分为如图 12 所示的 4 个阈值区域。A 区域块石尺寸小于剪切带最小厚度 3.5 cm 且含石量较小, 块石在剪切带内部运动, 较难形成锁固体; 斜红实线左侧整个 B 区域为低垂直应力区, 试样固结压实度较小, 同时剪切过程中无法形成有效的约束状态, 大块石以翻滚、旋转变形为主, 块石较难发生明显的应力集中及破碎, 同样很

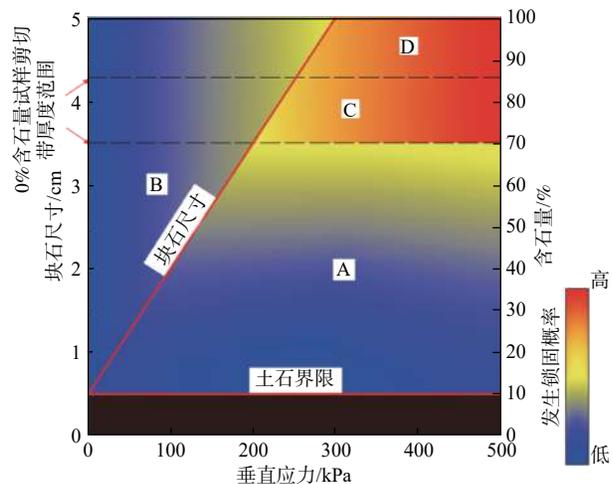


图 12 锁固体块石的形成因素划分

Fig. 12 A categorization of the locked rocks formative elements

难出现锁固效应, 剪应力以波动为主; C 区域基本达到了块石应力锁固体的形成条件, 试样内部逐渐形成稳定的骨架结构, 荷载主要由骨架块石承担, 高应力块石的滑移或破碎易通过骨架消散, 引起整体的应力跌落; D 区域试样成分逐渐趋近碎石状态, 最易形成锁固体。A、B 两个区域的块石主要以翻滚、滑移为主, 较难发生互锁行为, C、D 区域的块石受约束较大, 以咬合、嵌固互锁为主, 块石可以快速发生应力集中, 储存较大的应变能^[29-30], 形成锁固体, 且高含石量土石混合物内部细颗粒基质不易压密实, 为块石的瞬间滑移和破碎提供了变形空间。当应力集中超过块石摩擦强度或块石强度, 随之发生锁固体失稳破坏, 应力瞬间跌落, 属于典型的岩石脆性破坏。块石尺寸的影响必须针对对应的试样尺寸而言, 上述划分仅限于本次试验试样尺寸(300 mm×300 mm×300 mm)。

2.5 土石混合物锁固体形成及演化讨论

2.5.1 土石混合物锁固体的破坏机理

锁固体破坏具有明显的岩石破坏特征, 剪切的全过程类似于秦四清等^[11]提出的孕震断层的多锁固段脆性破裂理论。两者形成的机制均基于材料的非均匀性。该理论首先肯定了断层的运动模式和相关的地震活动受断层中一个或多个锁固段所控制^[11, 26]。从锁固段的破坏机理上, 秦四清等^[31]根据典型的岩石三轴压缩条件下的应力-应变曲线认为, 岩石的体积由收缩转向膨胀的临界点为岩石膨胀的起点, 即锁固段的膨胀起点, 对应图 13 岩石压缩破坏曲线的稳定破裂和非稳定破裂的界线点。理论上滑坡、崩塌与地震一样, 遵循着统一的失稳演化规律以及基本的力学规律^[11]。总结土石混合物剪切过程中锁固体的破坏过

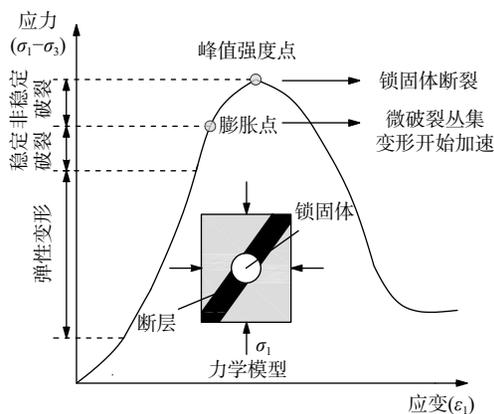


图 13 三轴压缩下单锁固体变形破坏过程^[31]

Fig. 13 Sketch map illustrating the deformation and failure process of the single locked patch in a fault under triaxial compression^[31]

程,归纳出相应的简化破坏模式,如图14所示,剪切开始后试样发生水平向压密,随即为短暂的弹性变形阶段,之后进入块石发生相对运动、调整的塑性变形阶段,剪应力可能向某个别咬合块石集中,锁固体逐渐形成,发生应力集中,块石进入典型的岩石破坏模式,最后破坏导致应力转移消散,曲线发生跌落,土石混合物归于下一次锁固体形成的开始。即两者均可归纳为“前期的变形—应力集中—锁固体破坏”的模式。

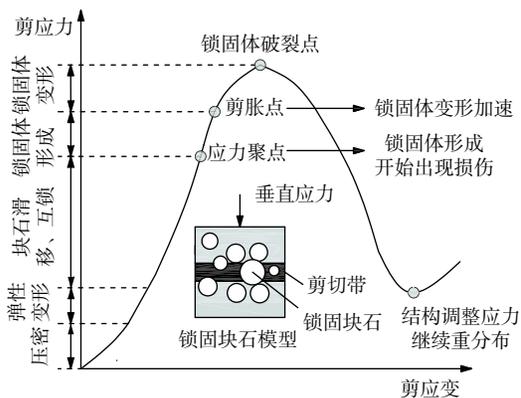


图14 直剪过程中锁固块石变形破坏过程

Fig. 14 Deformation and failure process of locked rock under direct shear test

2.5.2 土石混合物锁固体形成的物质基础

土石混合物由于自身材料的非均匀和离散性质,其锁固体与断层锁固段有相同的破裂性质,但也存在自身的特性。土石混合物直剪试验中仅有大块石并不能形成类似地震断层锁固段破裂的力学效应。土石混合物剪切带两侧为土、石形成的强弱混杂介质且土石界面常为薄弱点,而断层两侧多为强度较高的岩体介质,同时发震断层所在区域往往存在较大的构造应力。土石混合物剪切过程中的关键块体为了达到应力锁固效果,势必具备形成骨架结构的高含石量以及较高的应力约束条件,以此来构建类似断层的地质环境。试验中仅有70%含石量和较高的垂直应力下才发生锁固体的破坏现象印证了上述讨论。大块石贯穿剪切面的情况是锁固体形成的前提条件,唯有高含石量形成的咬合嵌固、高垂直应力形成的周围约束、较大尺寸块石及块石强度形成的应力聚集储存空间四个条件同时满足,块石才具备应力锁固能力。其中块石强度作为材料的内在属性,其值大小是导致剪应力跳跃的重要因素,文献[17]采用砂岩、泥岩块石的土石混合物大型直剪试验中剪应力均以小范围波动为主,而在文献[16]中以石灰岩为粗粒块石的土石

混合体现场大型直剪、文献[19]以河卵石为粗粒块石的土石混合物三轴剪切中亦可见明显的剪应力跳跃现象。

3 结论

(1)块石还未接触的低含石量条件($<30\%$),剪应力曲线易出现有峰值的应变软化特征,且曲线相对光滑。块石相互接触的含石量条件,剪应力曲线易出现应变硬化特征,且曲线相对波动。

(2)高含石量(大于70%)和尺寸大于砂土剪切带厚度的块石组成的土石混合物在较大垂直应力(大于200 kPa)作用下易出现剪应力跌落。内部块石的咬合嵌固易形成应力锁固体,锁固体的失稳破坏,包括滑移和咬合部位啃断破碎导致剪应力的脆性跌落。

(3)通过对比不同含石量下贯穿剪切面大块石的剪切运动特征表明,由于剪切作用,各块石存在水平方向的聚拢和块石旋转特征,越靠近剪切面旋转越明显,块石越密其运动越复杂,相互影响程度越大;结合不同块石尺寸、100%含石量试样的直剪试验,说明应力锁固体的形成必须同时具备块石相互接触的高含石量、尺寸接近砂土剪切带厚度的块石以及相对较大的上覆垂直应力。

(4)形成明显应力跌落的土石混合物试样的剪切过程可简化为压密阶段—弹性阶段—块石滑移和互锁阶段—锁固体形成阶段—锁固体变形阶段—锁固体破裂阶段—应力重分布,块石继续咬合嵌固,形成新的锁固体。

参考文献 (References) :

- [1] 油新华,何刚,李晓.土石混合物边坡的细观处理技术[J].水文地质工程地质,2003,30(1):18-21. [YOU Xinhua, HE Gang, LI Xiao. Meso-handling technology of earth-rock aggregate slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(1): 18-21. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘新荣,涂义亮,王林枫,等.土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J].岩石力学与工程学报,2017,36(9):2260-2274. [LIU Xinrong, TU Yiliang, WANG Linfeng, et al. Fractal characteristics of shear failure surface and mechanism of strength generation of soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2260-2274. (in Chinese with English abstract)]
- [3] XU W J, YUE Z Q, HU R L. Study on the mesostructure

- and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 749 – 762.
- [4] GUO P J, SU X B. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(5): 579 – 591.
- [5] ZHANG H Y, XU W J, YU Y Z. Triaxial tests of soil-rock mixtures with different rock block distributions[J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(1): 44 – 56.
- [6] 邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜. 含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 111 – 115. [SHAO Zhonrui, LUO Xuegui, GUO Nana. A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 111 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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 Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Research on 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 & Engineering*, 2008, 27(5): 996 – 1007. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GAO W W, GAO W, HU R L, et al. Microtremor survey and stability analysis of a soil-rock mixture landslide: a case study in Baidian town, China[J]. *Landslides*, 2018, 15(10): 1951 – 1961.
- [9] SEMINSKY L. The shear strength of granular materials with dispersed and non-dispersed oversized particles[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2013.
- [10] 马昊, 黄达, 肖衡林, 等. 江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 88 – 94. [MA Hao, HUANG Da, XIAO Henglin, et al. A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 88 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 秦四清, 徐锡伟, 胡平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 1001 – 1014. [QIN Siqing, XU Xiwei, HU Ping, et al. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 1001 – 1014. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4): 50 – 56. [XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 50 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [13] XU W J, LI C Q, ZHANG H Y. DEM analyses of the mechanical behavior of soil and soil-rock mixture via the 3D direct shear test[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 9(6): 815 – 827.
- [14] 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. [Code for coarse - grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering: DL/T 5356—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese)]
- [15] 胡峰, 李志清, 胡瑞林, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 766 – 778. [HU Feng, LI Zhiqing, HU Ruilin, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 766 – 778. (in Chinese with English abstract)]
- [16] XU W J, XU Q, HU R L. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(8): 1235 – 1247.
- [17] 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(增刊2): 4065 – 4072. [DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, 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(Sup2): 4065 – 4072. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(2): 235 – 238. [DONG Yun, CHAI Hejun, YANG Huili. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 235 – 238. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 夏加国,胡瑞林,祁生文,等.含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):2031-2039. [XIA Jiaguo, HU Ruilin, QI Shengwen, et al. Large-scale triaxial shear testing of soil rock mixtures containing oversized particles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2031-2039. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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 Jinfeng, YAN Ying, JI Shunying. 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. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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(增刊1):2650-2659. [ZHOU Jian, ZHANG Luqing, DAI Fuchu, 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(Sup1): 2650-2659. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张强,汪小刚,赵宇飞,等.土石混合体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,2019,41(1):60-69. [ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. 3D random reconstruction of meso-structure for soil-rock mixture and numerical simulation of its mechanical characteristics by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 60-69. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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. [YAN Ying, ZHAO Jinfeng, JI Shunying. Discrete element analysis of the influence of rock content and rock spatial distribution on shear strength of rock-soil mixtures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 146-156. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.滑坡防治设计规范:GB/T 38509—2020[S].北京:中国标准出版社,2020. [State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)]
- [25] LEI X L. How do asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(3/4): 347-359.
- [26] VALLEJO L, LOBO-GUERRERO S. The shear strength of granular materials containing dispersed oversized particles: DEM analysis[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 6(3): 371-380.
- [27] 徐文杰,王识.基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):2152-2160. [XU Wenjie, WANG Shi. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2152-2160. (in Chinese with English abstract)]
- [28] MEDLEY E W, ZEKOS D. Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges[C]//*Mélanges: Processes of Formation and Societal Significance*. Geological Society of America, 2011: 261-277.
- [29] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1994.
- [30] 郭庆国.关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J].水利学报,1987(5):59-65. [GUO Qingguo. Experimental research on shear strength characteristics of coarse grained soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987(5): 59-65. (in Chinese)]
- [31] 秦四清,熊巨华,薛雷,等.强震的孕育规律与孕震模式[J].地球科学与环境学报,2011,33(3):311-316. [QIN Siqing, XIONG Juhua, XUE Lei, et al. Seismogenic law and mode of strong earthquakes[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3): 311-316. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张明霞