

泥浆介质饱和下松散堆积体抗剪强度特性试验研究

王家辉¹, 江泊洧², 孙逸飞³, 王培清⁴, 王保田¹, 陈亮¹, 周钺⁴, 李超⁴

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210003; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;
3. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024; 4. 西藏农牧大学 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏 林芝 860000)

摘要: 松散堆积体在自然界中广泛存在, 具有结构松散、孔隙大、透水性强等特点, 在降雨作用下容易失稳破坏, 诱发泥石流等灾害。雨水入渗后与堆积体中的细颗粒物质结合, 形成不同含水率泥浆, 而不仅仅是水这种液相介质。为了深入了解松散堆积体在不同含水率泥浆饱和下抗剪强度变化规律, 以崩滑松散堆积体为研究对象, 通过自主研发的可进行饱和条件下剪切的大型剪切试验仪, 首次开展不同泥水介质饱和下松散堆积体大型剪切试验, 得出以下主要结论: (1) 该试验研究松散堆积体在保证自身稳定存在前提下且能够体现其松散特性的相对密实度 D_r 区间为 0.35~0.45。 $D_r < 0.35$, 则其在自重作用下重新固结产生较大沉降而导致相对密实度增加, 不再是原来的相对密实度; $D_r > 0.45$, 则无法体现其松散特性。(2) 泥浆的性质与含水率密切相关, 随着泥浆含水率的增加, 泥浆胶结作用变弱, 润滑作用变强。泥浆含水率小于 66.6%, 无法形成流动性泥浆, 若泥浆含水率大于 90.9%, 其流动性接近于水。(3) 泥浆对松散堆积的抗剪强度具有弱化作用, 内摩擦角 φ 和黏聚力 c 随着泥浆含水率的增加都降低, 越是松散的堆积体, 泥浆的弱化作用越显著, 越容易发生失稳破坏。泥浆的弱化作用可以初步揭示松散堆积体在短时强降雨后发生失稳破坏的机制。

关键词: 松散堆积体; 剪切试验; 抗剪强度; 相对密实度; 泥浆介质; 降雨

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2026) 04—1313—11

Experiment study on shear strength characteristics of loose deposits saturated with mud

WANG Jia-hui¹, JIANG Ji-wei², SUN Yi-fei³, WANG Pei-qing⁴, WANG Bao-tian¹,
CHEN Liang¹, ZHOU Yue⁴, LI Chao⁴

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

4. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Xizang, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: Loose deposits are extensively distributed in natural environments and are frequently destabilized by external disturbances such as rainfall, which can trigger debris flow disasters. During rainfall, fine particles in the loose deposits combines with rainwater, forming a mud that induces instability. In order to investigation the change of shear strength, large-scale shear tests of loose deposits saturated with different water contents of mud are conducted for the first time by a self-developed large-scale shear testing apparatus capable of conducting shear tests under saturated conditions. There are some findings. (1) Relative density range of loose deposits is 0.35–0.45. Below a relative density of 0.35, loose deposits tend to settle under gravity, leading to an increase in relative density. Conversely, above 0.45, the deposits no longer exhibit loose characteristics. (2) Mud properties correlate with water content. As mud water content increases, cementation weakens and lubrication strengthens. The minimum water content required to form mobile mud is 66.6%. Below this threshold, the mud loses its fluidity. At 90.9% water content, the mud's fluidity approaches that of water. (3) Mud weakens the shear strength of loose deposits. As mud water content increases, the internal friction angle (φ) and cohesion (c) of loose deposits decrease. The looser the deposits, the greater the weakening effect of the mud, and the more prone they are to instability. The variation in shear strength of loose deposits saturated with different water contents of mud explains the mechanism of debris flow

收稿日期: 2025-04-13

录用日期: 2025-07-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51979009)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979009).

第一作者简介: 王家辉, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事松散土石体的试验及数值仿真研究。E-mail: h130719203@163.com

after short-term heavy rainfall.

Keywords: loose deposit; shear test; shear strength; relative density; mud medium; rainfall

1 引言

堆积体是指第四系堆积作用形成的地质体,属于斜坡变形破坏后继续运动阶段的产物^[1]。高陡斜坡上的破裂岩体在地震或者风化作用下发生破碎,向下坠落从而发生重力堆积形成松散堆积体,其中松散堆积体主要由强度较高的粗颗粒如块石、细颗粒以及较大的孔隙构成,是一种在空间分布上极度不均匀且孔隙比较大的散粒体岩土材料。松散堆积体在自然界中广泛存在,包括崩塌堆积体、泥石流堆积体、排(渣)土场、尾矿坝体等^[2]。松散堆积体受重力堆积影响其颗粒分选性较差导致其级配范围较宽而且级配容易间断。此外,松散堆积体不论自然形成还是人工堆积,都具有结构松散、孔隙大、透水性强等特性,在降雨、地震、开挖等外界扰动下,极易发生失稳破坏,严重危害人民生命和财产安全,影响工程建设和安全运行。

当前国内外学者^[3-6]通过现场大型直剪试验、室内大型直剪、大型三轴试验等试验方法和数值模拟方法对堆积体进行了深入研究。主要集中于堆积体物质组成如含石量^[7-10]、块石形状^[11]、块石强度^[12-13]、块石级配^[14]等内在因素对其力学特性的影响。江强强等^[8]研究了不同含石量对堆积体剪切变形特性的影响,结果表明含石量对堆积体的强度和变形特性具有明显的控制作用。金磊等^[11]则聚焦于块石含量及形状对胶结松散堆积体力学性能的影响。杨忠平等^[13]利用室内大型直剪试验仪研究了块石强度对堆积体剪切特性的影响,并提出了考虑块石强度的堆积体抗剪强度预测模型。朱颖彦等^[14]以宽级配堆积体为研究对象,通过大型三轴试验获得其抗剪强度参数,并探讨了宽级配堆积体边坡失稳机制。张振平等^[15]以密实状态堆积体为研究对象,参考广义 Hoek-Brown 非线性强度准则,以块石含量、土石接触面强度和组分力学特性为影响因素,建立了堆积体力学特征的非线性强度准则。对于外界影响则聚焦于含水率因素^[16-17],即降雨入渗和水位波动造成的堆积体含水率变化对堆积体抗剪强度的影响。刘龙旗^[16]、江强强^[17]等以滑坡松散堆积体为研究对象,研究含水率对堆积体强度和变形特性的影响,研究表明:水对堆积体具有明显的软化作用,随着含水率增加,黏聚力和内摩擦角呈线性降低,且黏聚力的劣化效应大于内摩擦角,并提出了一种适用

于堆积体的抗剪强度的取值方法。江泊涓等^[18]采用大型叠环式剪切试验仪对不同相对密实度及不同干湿状态的松散土石体开展剪切力学试验,初步揭示了松散状态土石体强度及变形特性,其显著的水敏感性可定量解释松散堆积体、松散滑坡等受水的影响而发生大变形或失稳的机制。

上述研究成果多侧重于堆积体的物质组成如堆积体中块石含量、形状和强度等特性对堆积体宏观强度的影响,而忽略了密实状态对堆积体强度的影响,尤其对堆积体“松散”特性关注较少。根据学者们对于砂土等散粒体材料的研究,初始孔隙即密实状态对其抗剪强度有很大的影响,级配良好的砂土松散状态和最密实状态内摩擦角相差 $4^{\circ} \sim 8^{\circ}$ ^[19-20]。堆积体和砂土都属于散粒体材料,因此其抗剪强度也会受到密实程度的影响。松散堆积体分布于近地表,法向应力较小,颗粒约束效应较弱,相比密实状态堆积体,其处于一种临界稳定状态,在外界扰动下如地震和降雨作用下极易发生破坏。降雨后,雨水随着孔隙入渗会与堆积体中细颗粒物质混合,从而形成泥水介质,这些泥水介质如果无法及时排出,则会引发堆积体的失稳破坏,若这种失稳发生在坡度较大的区域,极易引发整体性的流化,从而引发泥石流灾变^[21-22]。目前绝大多数试验研究都将泥浆介质简化为水,这与实际情况存在较大差异。因此,有必要针对松散堆积体,开展不同泥浆介质饱和下的相关试验研究,探究泥浆介质饱和下松散堆积体抗剪强度变化规律。

基于此,本文设计了 4 组不同泥浆介质饱和下的松散堆积体大型剪切试验,模拟松散堆积体实际破坏环境,探究不同泥浆介质饱和下松散堆积体抗剪强度变化规律,为降雨入渗诱发松散堆积体滑坡机制和泥石流启动机制提供试验依据。

2 研究对象

2.1 松散堆积体物理性质

天然堆积体多赋存于坡脚缓坡近地表,选取代表性较强的崩滑松散堆积体为研究对象,岩性为砂岩,颗粒形状多为棱角形。基本物理性质试验测得其天然含水率为 $2.1\% \sim 4.5\%$ 。颗粒级配曲线如图 1 所示,不均匀系数 $C_u=2.71$,曲率系数 $C_c=1.37$,属于级配不良土。由表面振动压实仪得到该试样的最大干密度 $\rho_{\max}=2.04 \text{ g/cm}^3$,另外由倾注松填法得出其

最小干密度 $\rho_{\min}=1.34 \text{ g/cm}^3$ 。

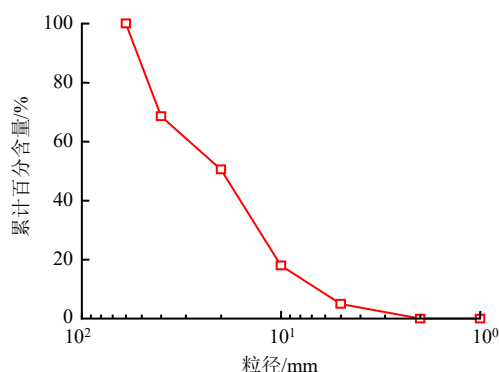


图1 松散堆积体颗粒级配曲线
Fig.1 Grading curve of loose deposit

2.2 泥浆物理性质

强降雨是激发泥石流启动的重要因素之一^[22], 雨水入渗后与松散堆积体中的细颗粒物质相结合, 形成具有一定黏滞性的泥浆介质。泥浆性质和含水率有很大的关系, 泥浆黏度是泥浆流变性的主要指标, 其定义为作用于牛顿流体单位面积上的剪应力与产生的形变的比例常数。一般用马氏漏斗测量固定体积泥浆流出漏斗的时间来表征泥浆流变性能, 其时间单位为秒。泥浆黏度测试仪如图2所示。为了探究泥浆的性质, 本文以泥浆含水率 ω 为控制指标。

$$\omega = \frac{G_w}{G_w + G_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G_w 为泥浆中水的质量; G_s 为泥浆中土粒的质量。为了更好地了解泥浆性能, 配置泥浆含水率 ω 从60.0%~100.0%的14种不同泥浆。记录这14种泥浆通过马氏漏斗的时间, 绘制曲线图如图3所示。

需要指出的是, 泥浆含水率 $\omega=66.6\%$ 是能配置出的具有流动性泥浆的最小含水率, 小于该含水率, 泥浆不具备流动性, 泥浆含水率 $\omega=90.9\%$ 时其流动性接近于水。从图3可以看出, 随着含水率的增大, 泥浆逐渐由流动性差的流体状态转变为流动性强的流体状态。所以从流动性差到流动性强选取3种代表性泥浆, 泥浆含水率分别为66.6%、83.3%、90.9%, 另外以纯水介质也就是泥浆含水率100%作为对照组, 共4种液相介质进行试验研究。

上述3种不同含水率泥浆性质如表1所示, 3种含水率的泥浆如图4所示。由图可以看出, 当泥浆含水率为66.6%时, 泥浆为具有较强黏滞性和较

小流动性的流塑状态, 插入一个小钢棍, 可以保持直立。而泥浆含水率为83.3%和90.9%时都为黏滞性差、流动性强的流体, 小钢棍无法保持直立。

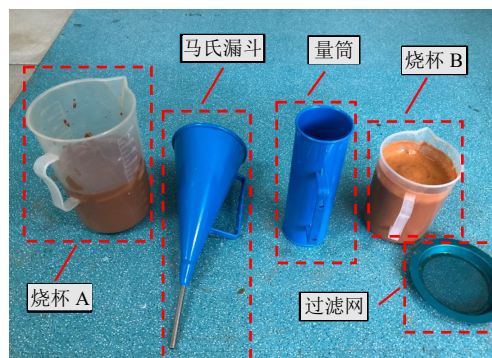


图2 泥浆黏度测量仪
Fig.2 Mud viscosity measuring instrument

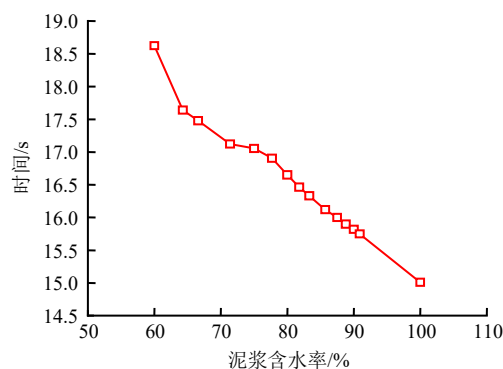


图3 不同含水率泥浆通过马氏漏斗时间
Fig.3 Time for mud with different water contents to pass through the Morse funnel

表1 4种液相介质的性质

Table 1 Physical parameters table of mud with different water contents

泥浆含水率 ω /%	风干黏土/g	水/mL	通过马氏漏斗时间/s	泥浆密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
66.6	400	800	17.64	1.26
83.3	160	800	16.43	1.11
90.9	80	800	15.62	1.06
100.0	0	800	15.01	1.00

3 试验设备及试验方案设计

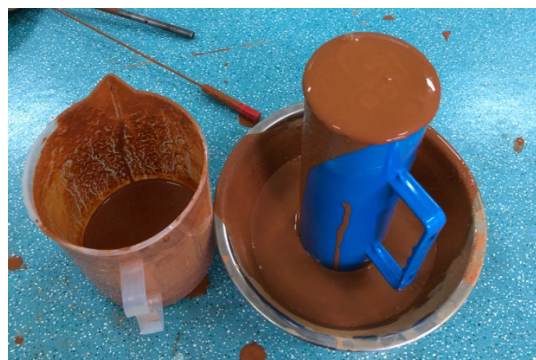
3.1 试验设备

本试验采用长江科学院自主设计并研发的可进行饱和状态下剪切的大型叠环剪切试验仪, 详见图5, 该试验仪尺寸为长2.5 m, 宽1.2 m, 高2.0 m。剪切试验仪旁边有一个半径为0.6 m、高为1.2 m的泥浆桶, 可以进行不同含水率泥浆的制备, 试验时泥浆可通过设计管路自上而下同步流入到堆积体试样和剪切盒外侧水箱中, 试验完成后可以通过水泵



(a) 含水率 66.6%泥浆

(b) 含水率 83.3%泥浆



(c) 含水率 90.9%泥浆

图 4 不同含水率泥浆

Fig.4 Mud with different water contents

将泥浆回收至泥浆桶中。大型叠环剪切试验仪的核心部件为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ (长×宽×高) 的大型剪切盒, 包括上剪切盒、中间剪切盒和下剪切盒 3 部分, 其简要示意图如图 6 所示。上剪切盒高度为 20 cm , 下剪切盒高度为 19 cm , 中间剪切盒包含 7 个剪切环, 每环高度为 3 cm 。在剪切过程中, 上剪切盒被固定, 下剪切盒在力作用下移动, 中间 7 个剪切环可以自由移动。剪切环之间以及剪切环与上下剪切盒之间采用滚轴减摩装置, 剪切环与侧壁导板之间设置有滚珠减摩装置, 这些装置最大程度地降低了剪切力的损耗。大型剪切盒外有一个水箱, 水箱底部和下剪切盒连接, 一起移动, 水箱外部与水平液压伺服压力机连接。水箱可以保证堆积体试样在泥水介质饱和条件下进行剪切试验, 剪切试验过程中的力和位移等数据均由计算机自动记录。剪切盒水平方向上的力和位移由 LC-X 和 LVDT-X 传感器自动测量, 垂直方向上的力和位移由 LC-Y 和 LVDT-Y 传感器自动测量, 中间剪切盒的每个剪切环均设有独立的位移传感器, 可以记录其在剪切过程中的位移。剪切过程中水平和垂直方向的荷载由液压伺服压力机分别施加, 液压伺服压力机可提供的最大法向荷载和水平荷载均为 100 kN , 最大法向和水平向行程均为 120 mm 。



图 5 大型叠环剪切试验仪

Fig.5 Large sized shear test device

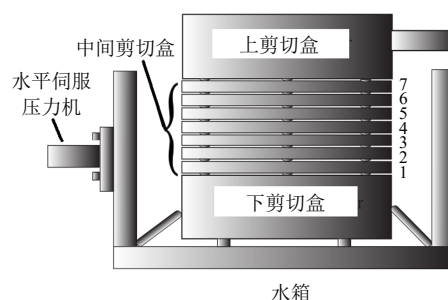


图 6 大型剪切盒及外置水箱

Fig.6 Large sized shear box and water tank

3.2 试验设计及流程

3.2.1 松散堆积体相对密度区间的确定

密实程度一般可以用初始孔隙比或初始干密度来反映, 在实际工程中一般用相对密实度 D_r 来衡量无黏性土的密实程度, 其定义为

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2)$$

式中: e_0 为无黏性土的天然孔隙比; $e_{\max}$ 为无黏性土的最大孔隙比; $e_{\min}$ 为无黏性土的最小孔隙比。由于孔隙比不好获得, 其可通过物理指标之间的换算用 3 种干密度表示, 即

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min})\rho_{d\max}}{\rho_{d\max} - \rho_{d\min}} \quad (3)$$

当 $D_r=0$, 处于最松散状态; 当 $D_r=1$, 处于最密实状态。无黏性土按相对密实度分为疏松、中密以及密实 3 种状态, $0 < D_r \leq 1/3$ 为疏松; $1/3 < D_r \leq 2/3$ 为中密; $2/3 < D_r \leq 1$ 为密实。松散堆积体基本存在于浅层地表, 在没有外界因素影响下, 能够处于稳定状态。因此, 需要通过试验确定松散堆积体在自然条件下处于稳定状态时的最小相对密实度。本试验研究针对浅层地表即 10 m 深以内的松散堆积体, 其自重压力在 200 kPa 以内。

确定松散堆积体稳定状态最小相对密实度 D_{rmin} 的方法为：由于 $D_r = 1/3$ 为松散和中密界限，所以选择 $D_r = 0.3$ 为基础相对密实度，向内递减和向外递增，即制备 $D_r = 0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50$ 共 6 组相对密实度的松散堆积体，采用大型固结压缩仪，施加 200 kPa 法向固结压力直至其沉降稳定，测量试样法向位移增量并计算试样稳定后的相对密实度 D_r' ，以 $D_r' - D_r = 0.05$ 作为控制条件，将满足条件的最小 D_r 确定为试样的最小相对密实度 D_{rmin} ，固结试验结果表明，该松散堆积体的最小相对密实度 $D_{rmin} = 0.35$ 。

松散堆积体的最大相对密实度 D_r 选取 0.45，过大无法体现松散堆积体的松散特性。过小则在自重作用下固结，产生较大沉降导致相对密实度增加，不再是原来的相对密实度。所以该松散堆积体相对密实度区间为 0.35~0.45。最后选取 0.35、0.40、0.45 共 3 种相对密实度来开展松散堆积体的抗剪强度特性试验研究。3 种 D_r 下松散堆积体干密度如表 2 所示。

表 2 松散土石体试验密度表 (单位: g/cm³)
Table 2 Test density table of loose deposit (unit: g/cm³)

ρ_{max}	ρ_{min}	不同 D_r 的干密度		
		$D_r = 0.35$	$D_r = 0.40$	$D_r = 0.45$
2.04	1.34	1.52	1.55	1.58

3.2.2 试验方案和流程

剪切试验方案如表 3 所示，即 1 个试样级配、3 个泥浆含水率 (66.6%、83.3%、90.9%) 和纯水介质，3 个相对密实度 ($D_r = 0.35、0.40、0.45$)、3 个竖向荷载 (50、100、150 kPa)，一共 36 个试样。

剪切试验流程如下：

(1) 依据不同相对密实度 D_r (0.35、0.40、0.45) 对应堆积体的密度进行称重，采用重力抛落和人工钢钎插实的方法在大型剪切盒内完成制样，如图 7(a) 所示，确保试样无显著分层，也不存在内部结构不均匀的问题，满足松散堆积体基本存在于浅层地表的天然状态。

(2) 在泥浆桶配置不同含水率的泥浆。在泥浆桶内充分搅拌使泥浆混合均匀，如图 7(b) 所示。通过两个管路同时流到剪切试样表面和剪切盒外部水槽，以保证泥浆自上而下充满整个试样，如图 8 所示。在泥浆入渗的过程中持续搅拌泥浆，以保证泥浆的均匀性。另外，为了保证泥浆在试验过程中不发生分层离析或沉淀等显著变化，在泥浆内添加少量膨润土和碳酸钙分散性外加剂，这些外加剂不会影响泥浆的流动性。

表 3 松散土石体剪切试验方案
Table 3 Shear test scheme of loose deposit

泥浆含水率 ω %	相对密实度 D_r	法向应力 P /kPa
66.6	0.35	50, 100, 150
	0.40	
	0.45	
83.3	0.35	50, 100, 150
	0.40	
	0.45	
90.9	0.35	50, 100, 150
	0.40	
	0.45	
100.0	0.35	50, 100, 150
	0.40	
	0.45	



(a) 制备好的试样 (b) 制备好的泥浆

图 7 松散土石体试样及泥浆制备

Fig.7 Loose deposit samples saturated with mud



图 8 泥浆入渗试样

Fig.8 Test sample saturated with mud

(3) 待泥浆充满试样和整个剪切盒外部水槽后，放置钢板并整平表面，最后放置施加荷载钢板，施加相应法向应力随后进行剪切。剪切速率控制在 1 mm/min，试验终止条件为剪切位移达到试样尺寸的 15%，即 90 mm，试验剪切过程为 90 min。

4 松散堆积体剪切试验结果

4.1 剪应力-剪切位移关系

不同含水率泥浆饱和下松散堆积体剪应力-剪切位移曲线如图 9 所示。由图可以看出，松散堆积

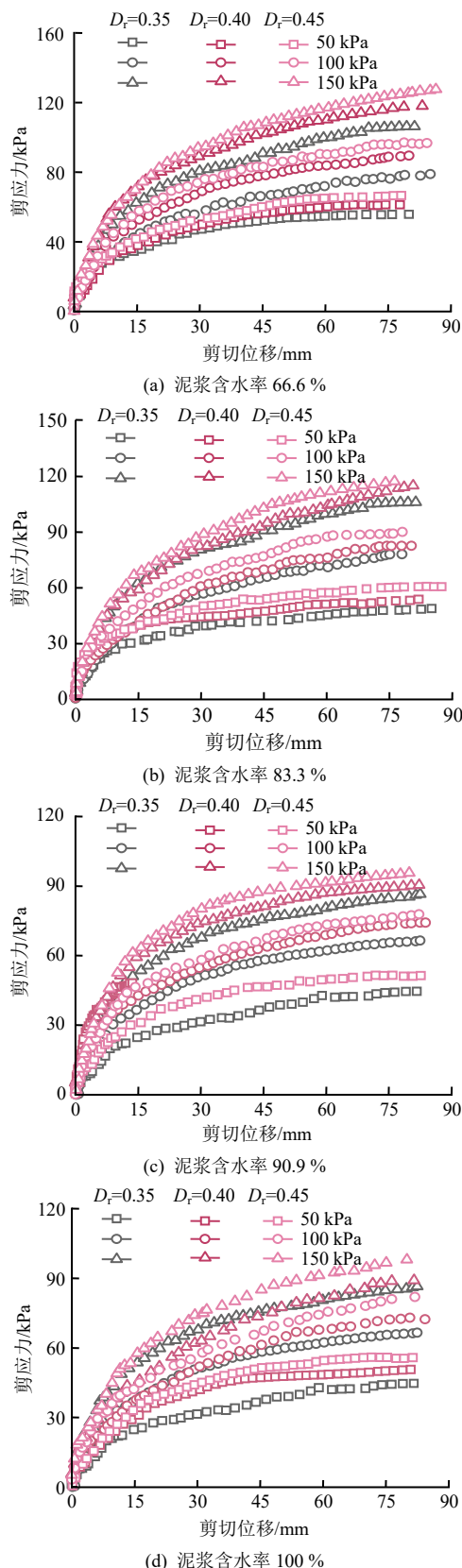


图9 不同泥浆含水率下剪应力-剪切位移关系曲线

Fig.9 Shear stress-shear displacement relationship curves of loose deposit saturated with different water contents of mud

体在整个剪切过程中, 呈现剪切硬化特性, 没有显著的峰值剪应力, 也没有残余剪应力。剪应力随剪切位移的增加一直增大, 表现出屈服破坏特性。这

与密实状态下堆积体剪切软化特性有显著不同^[15], 密实堆积体剪切曲线在达到峰值剪应力后逐渐减小到某一稳定值, 即残余剪应力。

剪应力-剪切位移关系曲线呈现弹塑性破坏特征, 剪切曲线大致可以分为两部分: ①弹性变形阶段, 该阶段曲线斜率较大, 近似直线, 对应于剪切位移 5~10 mm 之间, 在该阶段, 堆积体中的粗颗粒在剪切荷载作用下相互接触, 产生相互咬合; ②屈服变形阶段, 该阶段剪应力随剪切位移呈非线性增长, 曲线斜率即剪切模量逐渐减小, 在剪切后期斜率趋于 0, 剪应力随剪切位移一直增加, 具有塑性破坏特征。试验结束后发现颗粒级配基本没变化, 可以排除颗粒破碎情况, 表明颗粒挤压破碎效应远不及密实堆积体。由于松散堆积体法向约束不高, 颗粒之间产生的互锁效应小, 所以推测出该阶段产生的剪切位移是由剪切带内颗粒的翻滚错动和滑移产生。

选取两种典型堆积体剪应力和剪切位移曲线, 即 $D_r=0.35$ 、法向应力为 50 kPa 和 $D_r=0.45$ 、法向应力为 150 kPa 曲线, 如图 10 所示。由图可以看出, 不同含水率泥浆饱和下松散堆积体抗剪强度有较大差异, 泥浆含水率越大, 抗剪强度越小。 $D_r=0.35$ 、法向应力为 50 kPa 曲线, 泥浆含水率为 66.6% 和 90.9% 时堆积体抗剪强度相差 20.6 kPa; $D_r=0.45$ 、法向应力为 150 kPa 曲线, 泥浆含水率为 66.6% 和 90.9% 时堆积体抗剪强度相差 30.5 kPa。另外, 值得关注的是, 泥浆含水率为 83.3% 时堆积体抗剪强度高于纯水介质时堆积体抗剪强度, 而泥浆含水率 90.9% 时其抗剪强度低于纯水介质时堆积体抗剪强度。

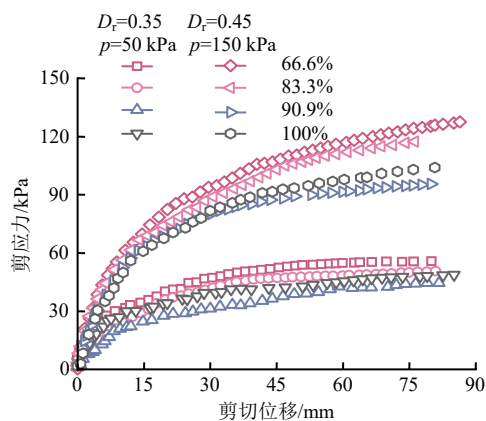


图10 典型松散堆积体剪应力和剪切位移曲线

Fig.10 Typical shear stress and shear displacement curves of loose deposit

4.2 松散堆积体抗剪强度分析

《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[23]

规定粗粒土的抗剪强度取值原则为取剪应力-剪切位移关系曲线上峰值或稳定值作为抗剪强度, 如无明显峰值, 则取剪切位移达到 $1/15 \sim 1/10$ 试样直径或长度时的剪应力作为抗剪强度。第 4.1 节表明, 松散堆积体剪应力-剪切位移曲线无显著的峰值, 且由于堆积体在屈服后其强度并未降低, 仍能承受较大变形即剪切变形具有大变形特性。所以选取位移较大值即 $1/10$ 试样直径剪切位移对应的剪应力作为抗剪强度。以法向应力为横坐标, 抗剪强度为纵坐标绘制法向应力与抗剪强度关系散点图, 并用直线拟合出其抗剪强度曲线, 如图 11 所示。

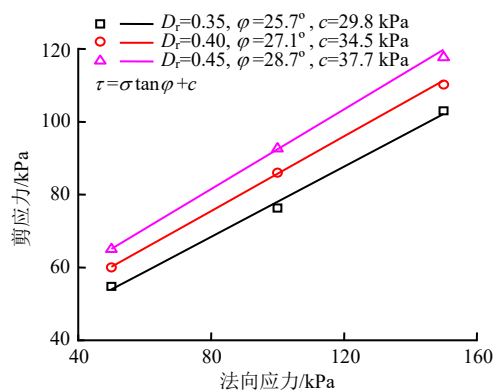
从图可以看出: 无论泥浆介质还是纯水介质, 松散堆积体抗剪强度关系均满足线性关系, 随着正应力的增加, 抗剪强度线性增大, 符合摩尔-库仑破坏准则。对于同一泥浆介质, 随着相对密度 D_r 的增大, 松散堆积体直线斜率越大, 表明内摩擦角越大, 其与纵坐标的交点也越大, 表明黏聚力也随着相对密度的增加而增加。

绘制抗剪强度参数内摩擦角和黏聚力随着不同泥浆含水率的变化曲线如图 12 所示。我们可以发现:

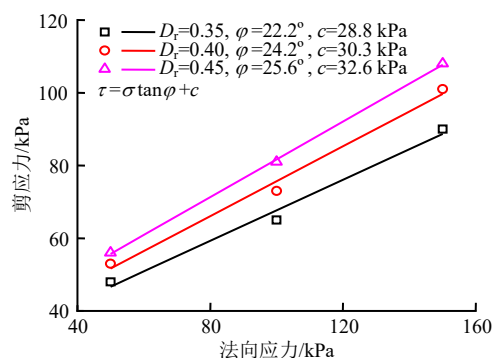
相对密度 D_r 为 0.35 时, 泥浆含水率从 66.6% 增加至 83.3%, 内摩擦角 φ 下降了 3.5° , 降幅为 13.6%, 黏聚力 c 下降了 1 kPa, 降幅为 3%; 泥浆含水率从 66.6% 增加至 90.9%, 内摩擦角 φ 下降了 6.1° , 降幅为 23.7%, 黏聚力 c 下降了 5.2 kPa, 降幅为 19.1%。相对密度 D_r 为 0.40 时, 泥浆含水率从 66.6% 增加至 83.3%, 内摩擦角 φ 下降了 2.9° , 降幅达 10.7%, 黏聚力 c 下降了 4.2 kPa, 降幅达 12.1%; 泥浆含水率从 66.6% 增加至 90.9%, 内摩擦角 φ 下降了 4.6° , 降幅达 16.9%, 黏聚力 c 下降了 7.9 kPa, 降幅达 22.8%。相对密度 D_r 为 0.45 时, 泥浆含水率从 66.6% 增加至 83.3%, 内摩擦角 φ 下降了 3.1° , 降幅达 10.8%, 黏聚力 c 下降了 5.1 kPa, 降幅达 13.5%; 泥浆含水率从 66.6% 增加至 90.9%, 内摩擦角 φ 下降了 4.7° , 降幅达 16.3%, 黏聚力 c 下降了 5.4 kPa, 降幅达 14.3%。据此可以得出以下结论:

(1) 随着泥浆含水率的增加松散堆积体的抗剪强度参数内摩擦角 φ 和黏聚力 c 都有不同程度的下降。这一特性表明, 泥浆介质对松散堆积体抗剪强度具有弱化作用, 该结果可以定量解释松散堆积体在降雨入渗后发生失稳破坏和泥石流产生的机制。

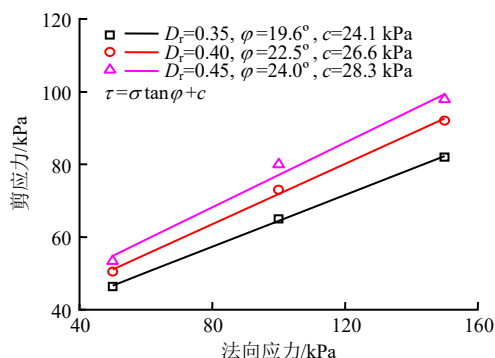
(2) 随着泥浆含水率的增大, 相对密度为 0.35 的松散堆积体内摩擦角 φ 的减小值大于相对密度为 0.40 和 0.45 的松散堆积体, 这表明越是松散的堆积体受降雨的影响越大, 越容易失稳破坏。



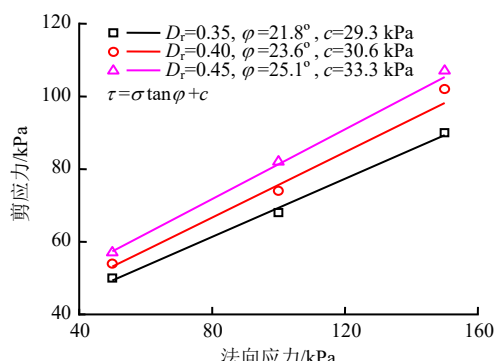
(a) 泥浆含水率 66.6%



(b) 泥浆含水率 83.3%



(c) 泥浆含水率 90.9%

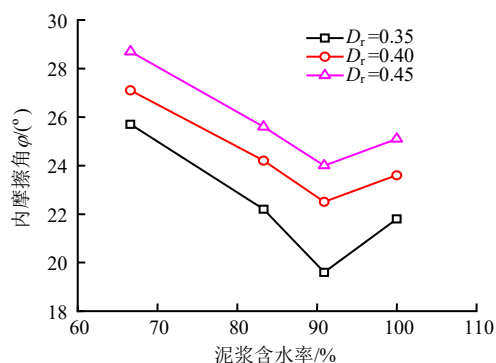


(d) 泥浆含水率 100%

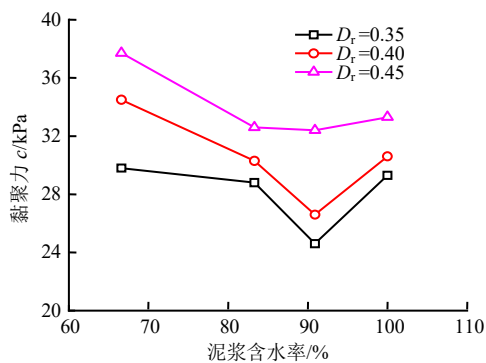
图 11 不同泥浆含水率下剪应力与法向应力关系
Fig.11 Relationship between shear stress and normal stress of loose deposit

(3) 松散堆积体在不同液相介质下抗剪强度参数具有明显差异。纯水介质下其内摩擦角 φ 低于泥浆含水率 66.6% 和 83.3% 时堆积体内摩擦角 φ , 但

是高于泥浆含水率 90.9% 时的堆积体内摩擦角 φ 。纯水介质下其黏聚力 c 也是高于泥浆含水率 90.9% 时的堆积体黏聚力。



(a) 内摩擦角随泥浆含水率变化



(b) 黏聚力随泥浆含水率变化

图 12 抗剪强度参数随泥浆含水率的变化

Fig.12 Variation of shear strength parameters with mud water content

4.3 松散堆积体内摩擦角验证

为了验证上述剪切试验结果的准确性,设计滑槽模型试验验证,滑槽试验仪如图 13 所示。首先按不同的相对密度 D_r 完成堆积体制样并修坡,修好后的边坡坡角控制在 15° 左右。将配置好的不同含水率泥浆流入堆积体,保证泥浆自上而下充满堆积体,如图 14 所示。

参照不同 D_r 和泥浆含水率下堆积体剪切试验测得的内摩擦角,通过旋转滑槽盒使堆积体的坡角调整至略低于该内摩擦角。然后微调增加坡脚度数,待试样出现溜滑趋势,记录倾斜角度,打开滑槽盒左侧后闭闸门,记录松散堆积体从失稳一休止全过程。

通过滑槽试验得到的不同含水率泥浆饱和下堆积体失稳的内摩擦角如表 4 所示。通过与 4.2 节结果对比,可以看出,堆积体失稳时的倾斜角度和剪切试验较为吻合,误差在 1° 范围内。通过滑槽试验验证了剪切试验结果的准确性。



图 13 滑槽试验仪

Fig.13 Chute tester

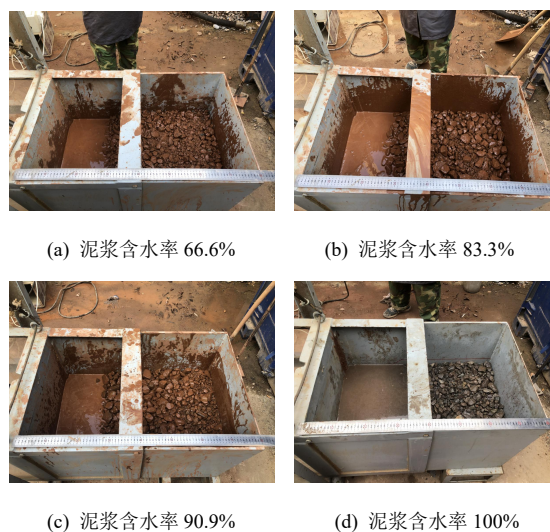


图 14 不同含水率泥浆饱和滑槽试样

Fig.14 Saturated chute samples with mud at varying water contents

表 4 滑槽试验堆积体内摩擦角

Table 4 Internal friction angle of loose deposit at sliding test

泥浆含水率/%	$\varphi / (^\circ)$		
	$D_r=0.35$	$D_r=0.40$	$D_r=0.45$
66.6	25.1	26.6	28.9
83.3	21.2	23.4	24.7
90.9	19.0	21.1	22.4
100.0	20.6	23.8	24.8

滑槽试验结束后颗粒分布如图 15 所示,滑槽试验结束后,测量颗粒分布最远处到坡脚处的距离。从图可以看出,当泥浆含水率为 66.6% 时,由于泥浆的黏滞性,其滑动距离仅为 2.3 m;当泥浆含水率为 83.3% 时,滑动距离为 2.5 m;当泥浆含水率为 90.9% 时,滑动距离为 3.2 m。但当液相介质为水时,滑动距离仅为 2.8 m。可以看出,随着泥浆含水率的增加,滑动距离在增大,这从侧面印证了颗粒之间的摩擦系数在不同含水率泥浆作用下是不一样的。低含水率泥浆时,由于泥浆的胶结作用,颗粒之间摩擦系

数大, 导致滑动距离小; 颗粒之间摩擦系数大, 堆积体则有较高抗剪强度。随着泥浆含水率的增加, 胶结性减弱, 润滑性增强, 颗粒之间的摩擦系数变小, 滑动距离变长, 抗剪强度也随之降低。

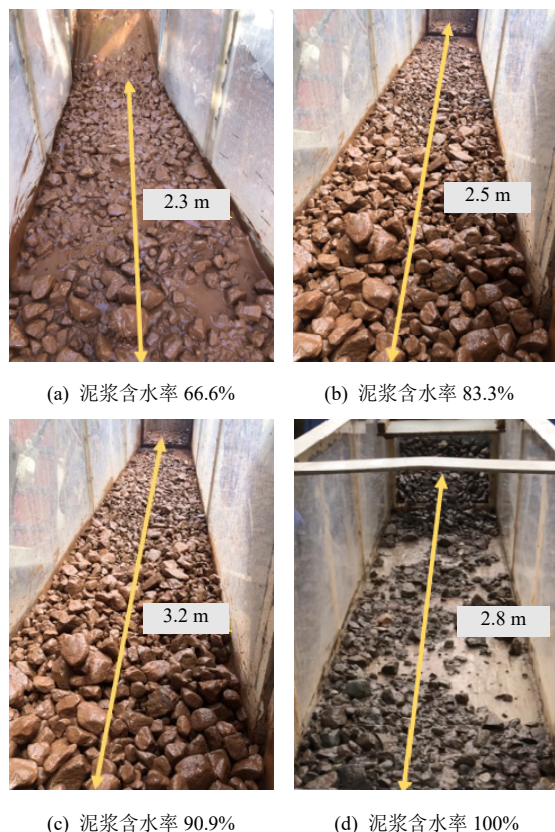


图 15 堆积体休止后滑槽轨道颗粒分布

Fig.15 Particle distribution in chute track after rest

5 结 论

本文选取具有代表性的崩滑松散堆积体为研究对象, 以相对密度为控制指标, 研究松散堆积体在不同含水率泥浆和纯水介质饱和下抗剪强度演化规律, 得到以下结论:

(1) 本文通过大型固结试验仪确定了本研究松散堆积体自身稳定存在前提下且能够体现其松散特性的最小相对密度 $D_r=0.35$, 最大相对密度 $D_r=0.45$, 过小则其在自重作用下重新固结产生较大沉降导致相对密度增加, 过大则无法体现松散堆积体的松散特性。

(2) 泥浆的性质与含水率密切相关, 随着泥浆含水率的增加, 泥浆胶结作用变弱, 润滑作用变强。若泥浆含水率小于 66.6%, 无法形成具有流动性的泥浆; 若泥浆含水率大于 90.9%, 其流动性接近于水。

(3) 泥浆介质对松散堆积抗剪强度具有弱化作

用。内摩擦角 φ 和黏聚力 c 会随着泥浆含水率的增加都降低, 这可以定量地解释松散堆积体在降雨入渗后发生失稳破坏机制和泥石流启动的原因。越是松散的堆积体受降雨影响越大, 泥浆的弱化作用越显著, 越容易发生失稳破坏。

(4) 松散堆积体在泥浆介质和纯水介质饱和下抗剪强度具有一定差异。低泥浆含水率时, 泥浆的胶结作用使得堆积体的抗剪强度大于纯水介质时堆积体抗剪强度。高含水率泥浆时, 泥浆的润滑作用导致堆积体抗剪强度小于纯水介质时堆积体抗剪强度。所以降雨条件下形成的泥浆介质不能被简化为纯水介质。

本文基于大型剪切试验, 初步揭示了松散堆积体在不同含水率泥浆和纯水饱和下的强度和变形特性差异, 泥浆的弱化作用初步解释了松散堆积体在强降雨条件下发生失稳破坏以及诱发泥石流的原因。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 王兰生, 王士天, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
ZHANG Zhuo-yuan, WANG Lan-sheng, WANG Shi-tian, et al. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Geological Press, 1997.
- [2] 江泊洧, 潘家军, 程展林, 等. 考虑垂直分布因素的松散弃渣土力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 631-639.
JIANG Ji-wei, PAN Jia-jun, CHENG Zhan-lin, et al. Experimental study on mechanical properties of loose spoil considering vertical distribution factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 631-639.
- [3] DONG H, PENG B C, GAO Q F, et al. Study of hidden factors affecting the mechanical behavior of soil-rock mixtures based on abstraction idea[J]. Acta Geotechnica, 2020, 16: 595-611.
- [4] 陶庆东, 何兆益, 贾颖. 基于大三轴试验的松散堆积体强度特性与影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 310-318.
TAO Qing-dong, HE Zhao-yi, JIA Ying. Strength characteristics and influencing factors of soil-rock mixture based on large triaxial test[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 310-318.
- [5] SUN Z L, KONG L W, GUO A G, et al. Experimental and numerical investigations of the seismic response of a rock-soil mixture deposit slope[J]. Environmental Earth

- Sciences**, 2019, 78(24): 1-14.
- [6] 胡瑞林, 李晓, 王宇, 等. 松散堆积体工程地质力学特性及其结构效应研究[J]. **工程地质学报**, 2020, 28(2): 255-281.
- HU Rui-lin, LI Xiao, WANG Yu, et al. Research on engineering structural effect of soil-rock mixture[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(2): 255-281.
- [7] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对松散堆积体剪切特性的影响[J]. **岩土力学**, 2018, 39(1): 93-102.
- TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 93-102.
- [8] 江强强, 徐杨青, 王浩. 不同含石量条件下松散堆积体剪切变形特征的试验研究[J]. **工程地质学报**, 2020, 28(5): 951-958.
- JIANG Qiang-qiang, XU Yang-qing, WANG Hao. Research on the shear deformation characteristics of soil-rock aggregate under different stone contents[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(5): 951-958.
- [9] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. **岩土力学**, 2008, 29(1): 48-51, 57.
- WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiang jia gou Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48-51, 57.
- [10] ZHANG C, MA C K, CHEN Q L, et al. Influence of rock percentage on strength and permeability of tailing-waste rock mixtures[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80(1): 399-411.
- [11] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结松散堆积体力学性能影响的大型三轴试验[J]. **岩土力学**, 2017, 38(1): 141-149.
- JIN Lei, ZENG Ya-wu, ZHANG Sen. Large scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 141-149.
- [12] 李晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 松散堆积体力学特性的原位试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(12): 2377-2384.
- LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HAO Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2377-2384.
- [13] 杨忠平, 赵亚龙, 胡元鑫, 等. 块石强度对土石混合料剪切特性的影响[J]. **岩石力学与工程学报**, 2021, 40(4): 814-827.
- YANG Zhong-ping, ZHAO Ya-long, HU Yuan-xin, et al. Effect of the strength of rock blocks on the shear characteristics of soil-rock mixtures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(4): 814-827.
- [14] 朱颖彦, 崔鹏, 陈晓晴. 泥石流堆积体边坡失稳机理的试验与稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(21): 129-136.
- ZHU Ying-yan, CUI Peng, CHEN Xiao-qing. Experiment on mechanism of slope failure of debris flow fan and stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(21): 129-136.
- [15] 张振平, 付晓东, 盛谦, 等. 基于含石量指标的松散堆积体非线性破坏强度准则[J]. **岩石力学与工程学报**, 2021, 40(8): 1672-1686.
- ZHANG Zhen-ping, FU Xiao-dong, SHENG Qian, et al. A non-linear ultimate strength criterion for soil-rock mixture based on rock block proportion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(8): 1672-1686.
- [16] 刘龙旗, 毛雪松, 肖亚军, 等. 含水率对坡积体路基填料剪切特性影响试验研究[J]. **中国公路学报**, 2020, 33(9): 126-135.
- LIU Long-qi, MAO Xue-song, XIAO Ya-jun, et al. Effect of content on shear characteristics of landslide deposit subgrade fillers[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(9): 126-135.
- [17] 江强强, 徐杨青, 王浩, 等. 松散堆积体大型直剪试验及强度取值方法研究[J]. **煤炭科学技术**, 2023, 51(增刊 2): 25-35.
- JIANG Qiang-qiang, XU Yang-qing, WANG Hao, et al. Research on the mechanical behaviour and determination method for shear strength of colluvial deposit in large-scale direct shear tests[J]. **Coal Science and Technology**, 2023, 51(Suppl.2): 25-35.
- [18] 江泊洵, 程展林, 潘家军, 等. 基于大型叠环剪切试验的松散堆积体强度及变形特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(增刊 1): 3636-3643.
- JIANG Ji-wei, CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, et al. Experimental study on the stress-strain and strength characteristics of loose rock-soil aggregates based on large-size stacked ring shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(Suppl.1): 3636-3643.