

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.018

# 堆积体骨料比及土壤含水率对其稳定性影响的 试验研究\*

林泽雨, 何卓名, 张巍, 刘爱华

(华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 堆积体失稳是较常见的滑坡灾害之一。以鹅卵石、碎石、南方红土为材料组成的堆积体为研究对象, 通过测量堆积体临界坡度, 分析了堆积材料组成比例及土壤含水率对其稳定性的影响。结果表明: (1) 就堆积坡度而言, 不同堆积坡度材料之间存在最不利组合 (在单独堆积坡度较低的材料占比为 80% 时堆积体的临界坡度最低); (2) 堆积体中含土率对堆积体临界坡度存在先减后增的影响, 当含土率为 20% 时堆积体坡度最小; (3) 堆积体中土壤的含水率对堆积体临界坡度存在先增后减的影响, 当土壤含水率超过 30% 时负面影响明显; (4) 混凝土流变仪测试得到的堆积材料的流动屈服应力与试验材料堆积稳定性存在正相关规律。

**关键词:** 边坡稳定性; 堆积体; 临界坡度; 土壤含水率; 流变仪

**中图分类号:** P642   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0984-08

## Experimental Study on Effects of Aggregate Ratio and Soil Moisture Content on Stability of Accumulation Body

LIN Zeyu, HE Zhuoming, ZHANG Wei, LIU Aihua

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The failure of accumulation bodies is one of the common landslide disasters. An accumulation body comprising pebbles, gravels and southern red soil was taken as the research object. By measuring the critical slope of the accumulation body, the effect of the composition proportion and soil moisture content on the stability of the accumulation body was analyzed. The results show that: 1) In terms of accumulation slope, there is a most unfavorable deposit material constitution (the critical slope of the accumulation body is the lowest when the proportion of materials with lower deposit slope is 80%); 2) The critical slope of the accumulation body first decreases and then increases with the increase of soil content, reaching a minimum value at a soil content of 20%; 3) The critical slope of the accumulation body first increases and then decreases with the increase of moisture content, and the negative effect is obvious when the moisture content exceeds 30%; 4) There is a positive correlation

\* 收稿日期: 2018-11-03; 修回日期: 2019-01-23

基金项目: 广东省水利厅科技创新重点项目(2017-30)、广东省自然科学基金项目(2018A030310346)资助

作者简介: 林泽雨(1994-), 女, 硕士研究生。主要从事雨水在坡体滑坡中的作用机理及其安全稳定性计算分析。

Email: 498442162@qq.com

通讯作者: 刘爱华(1963-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程加固机理与灾害防治研究。

Email: alexliu@163.com

between the flow yield stress and the deposit stability of the test material according to the test results of RHEOCAD.

**Keywords:** slope stability; accumulation body; critical slope; soil moisture content; RHEOCAD

## 引言

滑坡灾害作为我国重点防治的灾害之一,正越来越受到人们的重视。在地形多为山地、丘陵等的地区,各类堆积体形成的滑坡灾害更为常见。在山地丘陵地区,碎石土堆积体边坡广泛分布于高速公路及铁路沿线,随着我国道路的兴建与发展,碎石土堆积体高边坡的治理、防护已逐渐成为山区高等级公路建设与养护工作中的重大工程问题之一<sup>[1]</sup>。

堆石坝和淤泥堤在我国防洪体系中占相当大的比例,被广泛应用在河道整治、和渠道建设、护岸、防洪保护、堤防等方面,无论是黏性还是非黏性堆积物组成的堆石坝和淤泥堤都可作为颗粒堆积体问题进行分析,其稳定性的研究对工程安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。

有研究表明<sup>[3-6]</sup>,许多滑坡发生的岩土介质都为堆积体。不同的岩土材料在自重作用下降落堆积,因岩土材料的几何特征(如形态、尺寸等)、岩土材料间的摩擦力、堆积方式、含水率等影响,将形成不同的堆积形态,所反映的岩土材料自然堆积的坡度亦各不相同。目前对堆积体边坡稳定性的研究<sup>[7-11]</sup>大多从降雨、地震、地形地貌等因素入手,Z. Zhou等<sup>[12]</sup>从渗透率、径流、变形程度方面研究了降雨入渗对堆积体滑坡的影响;刘娟等<sup>[13]</sup>依据堆积体的颗粒级配和细粒质量分数来判断库区堆积体的水下稳定坡角;何娜<sup>[14]</sup>研究了砂颗粒粒径和均匀度对溜砂坡坡度的影响;G. Held等<sup>[15]</sup>研发了堆模型物理实验装置,用以研究不同粒径的沙粒对堆积体崩塌的影响情况;V. Frette等<sup>[16]</sup>对不同纵横比大米的稳定堆积坡度进行了试验,研究发现纵横比大的米粒能达到自组织临界;L. E. V. Zamri Chik<sup>[17]</sup>探究了粗砂和细砂混合堆积体的休止角,还研究了放置混合物的基底的粗糙度对休止角的影响;I. Zuriguel等<sup>[18]</sup>用弹性聚合物材料进行了不同颗粒形状的堆积试验,结果表明颗粒形状对桩内的应力传递起着重要作用,试验得出了不同颗粒形状的堆积体力链分布情况。还有一些学者用数值模拟的方法对堆积体问题进行了相关研究<sup>[19-21]</sup>,其中多为模拟形状不同的

砂土颗粒的堆积情况。

总体来说,国内外对堆积体稳定性的研究还不够充分,多为单一堆积体组分,采用均质组分如砂、土、大米等,考虑单因素影响如粒径大小、降雨、地震等,多以非岩土材料来描述组分形态,而对堆积体的骨料组成比例及土壤含水率因素的研究较少,用岩土材料来描述组分形态的研究也较少,较难应用于工程实际中。

本文从堆积体骨料的组成比例及土壤含水率等堆积特性出发,结合ICAR混凝土流变仪测试,探究岩土材料自然堆积坡度在不同因素影响下的变化规律等。堆积稳定性问题涉及堤坝、边坡、道路等工程,因此研究堆积体的稳定性不仅对已有滑坡体的隐患排查、防治与预警工作有重要意义,也对如何施工以获得更稳定的堆积体具有重要的工程应用指导价值。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

本试验的主要仪器有:Φ160 mm塑料圆筒、角度仪、直尺、ICAR混凝土流变仪等。

本试验的主要材料包括以下三类。棱角多面体:小碎石(粒径为5~10 mm)、大碎石(粒径为20~40 mm);圆滑扁状骨料:卵石(粒径为30~55 mm,长宽比:1.0~1.94);南方红土(天然含水率为3%)等。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验原理

参考许连坡等<sup>[22]</sup>、刘维甫等<sup>[23]</sup>关于堆积试验的结果可知,以散体材料为主的材料在自重的作用下堆积成坡体,其临界面多为直线面。故本试验验证坡体稳定性的试验原理采用直线破裂面法<sup>[24]</sup>,直线破裂面法的安全系数计算公式如下:

$$F_s = \frac{T'}{T} = \frac{W \cos\alpha \cdot \tan\varphi + c \cdot L}{W \sin\alpha} \quad (1)$$

式中, $F_s$ 为稳定系数, $F_s > 1$ 时坡体稳定, $F_s = 1$ 时为临界坡体; $T'$ 为抗滑力(N); $T$ 为下滑力(N); $W$ 为

滑体重力(N); $\alpha$ 为坡体坡度( $^{\circ}$ ); $L$ 为坡体长度(m);  
 $\varphi$ 为土体内摩擦角( $^{\circ}$ ); $c$ 为土体黏聚力(Pa)。

本试验使材料在其自重的作用下自然堆积,堆积测出的坡体坡度为 $F_s = 1$ 时的临界坡度,当实际倾斜角小于临界倾斜角时,颗粒堆积是稳定的,反之亦然。通过改变坡体材料的组成比例及土壤含水率,来改变堆积体的 $c$ 、 $\varphi$ 值,则可测出不同组合下堆积体的临界坡度。

### 1.2.2 试验原理

本试验要利用圆筒把材料堆高,然后使材料在其重力作用下形成堆积坡体。试验方法综合参考《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2016)<sup>[25]</sup>中混凝土坍落度测量的堆积方法,以及S. Chen等<sup>[2]</sup>对不同颗粒特性条件下砂的稳定堆积坡角的试验方法。

实验步骤如下:(1)按照试验方案配置好试验材料,将不符合规格的材料剔除;(2)将混合好后的材料装填入竖立在水平地面的塑料圆筒中,其中圆筒固定不移地不侧漏;(3)每次试验用相同且较缓慢的速度将圆筒提升,使得圆筒中的材料能够在自重的作用下形成堆积坡体;(4)待物料全部降落,堆积体稳定不再变化时,在整个坡体取间隔相同的五条坡线,用角度仪在此对应的五个点测其角度,并将数据填入表格中;(5)每组组合重复以上步骤三次,测得数值后取其平均值为此组合材料的堆积坡度与高度;(6)整理试验数据,将试验数据绘制成曲线图。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 无土条件下,骨料组合比例对坡体临界坡度的影响

保持其它条件相同情况下,完成骨料总重量分别为10 kg和20 kg时,不同骨料组成对堆积体临界坡度的影响。设定的组合形式为:鹅卵石+大碎石、鹅卵石+小碎石、大碎石+小碎石。设定的组合比例为:0:10、1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1、10:0。按照1.2.2节的试验步骤进行试验。试验结果如图1和图2所示。

由图1~2所示的试验结果可见:(1)堆积材料的总重量对堆积坡度的变化规律无明显影响;(2)两种骨料组合在一起时,存在一个堆积坡度最低的组合比:较低单独堆积坡度材料与较高单独堆积坡

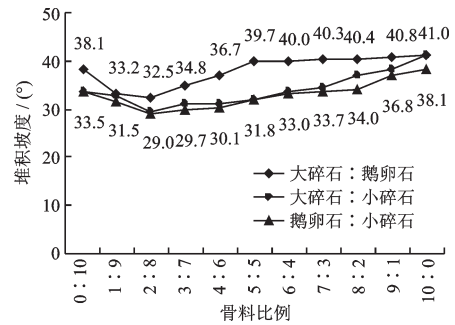


图1 总重量为10 kg时骨料组成比例对堆积体临界坡度的影响试验

Fig.1 Effect of aggregate constitution on critical slope of accumulation body when total weight is 10 kg

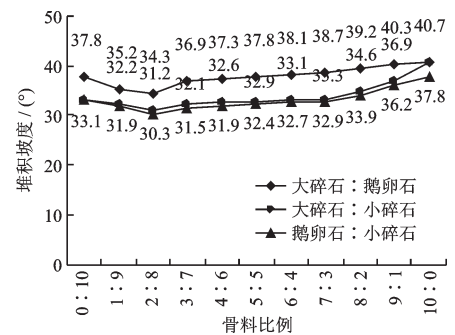


图2 总重量为20 kg时骨料组成比例对堆积体临界坡度的影响试验

Fig.2 Effect of aggregate constitution on critical slope of accumulation body when total weight is 20 kg

度材料之比为8:2;(3)不同粒径的骨料混合试验同样存在第二条规律。

因此,在实际的边坡滑坡防治及预警中,在较低单独堆积坡度材料与较高单独堆积坡度材料之比为8:2时较为危险,同时二元骨料堆积材料的粒径相似时的堆积坡体较为稳定。

### 2.2 含土率对坡体临界坡度的影响

实际工程中,堆积体中土的含量,以及土中的含水率对坡体稳定性影响明显。为了研究含土率的影响,设计了以下两类试验。

①取含土率0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%,分别测定在不同含土量下坡体堆积坡度,从而得出含土率对坡体临界坡度的影响规律。为了方便测定试验数据和细化组合比例,试验骨料总量选定在20 kg。再由土重量=骨料总重量×含土率来计算出每一组的加土重量。设定土壤含水率为自然风干含水率,即将土放在试验场地风干后,再烘干测得其含水率,等于3%。分别取3个不同的骨

料组合比例来做对比试验,以验证含土率对坡体临界坡度规律的普遍性。取鹅卵石:大碎石=2:8、8:2、7:3,按照1.2.2节试验步骤进行试验。

②由试验①得到的结论中,选择最不利堆积坡度的含土率,并保证其含土率和土壤含水率不变,按照2.1节的骨料配比试验进行。在试验①的基础上,选定含土率为20%,改变骨料组合比例,按照1.2.2节试验步骤进行试验。

按照方案①进行试验,结果如图3所示。由图可知,3个不同骨料组合比例在“含土率-临界坡度”曲线上都有相同规律。在加土量少于骨料总重量的20%时,临界坡度有下降的趋势,但超过20%之后,临界坡度对比于不加土的情况下有所上升,最不利含土率为骨料总量的20%。

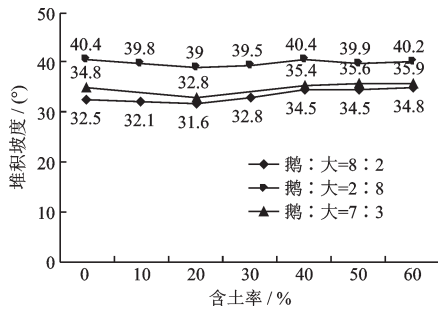


图3 不同含土率对堆积体临界坡度的影响试验  
Fig.3 Effect of soil content on critical slope of accumulation body

证明加土对于材料的堆积是有帮助的,但对含土率有一定要求,即不得少于20%。在含土率小于20%坡度出现下降的原因可能是含土率在比较少的情况下,较干燥的土未曾起到填充空隙和支撑作用,反而对骨料间有润滑作用。而土量超过骨料的40%之后,堆积坡度变化随土量的增加变得趋于平缓。

按照方案②进行试验,结果如图4所示。底部横线为20 kg红土单独堆积的临界坡度值为31.7°。

由图4可知,不论何种骨料组合比例,20%含土率的坡体其临界坡度都要比不含土坡体的要低,与试验①所得结论一致。不加土和加20%土的两条曲线呈现出类似的趋势,验证了2.1节试验中最不利组合比例的存在。

故在滑坡防治与预警工作中,堆积体材料的含土率为20%时,堆积体临界坡度较低,坡体稳定性较差,是滑坡防治与预警的重点对象。

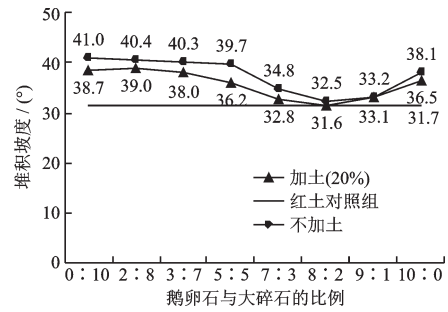


图4 加土(20%)与不加土对堆积体临界坡度的影响试验  
Fig.4 Effect of 20% mixed soil and without soil on the critical slope of the accumulation body

### 2.3 土壤含水率变化对坡体临界坡度的影响

为了进一步弄清土壤含水率对堆积体稳定性的影响,设计了以下两组试验。

①将土壤含水率设定为10%~40%,按5%的梯度变化。对照组的含水率为土壤自然风干含水率(3%)。试验骨料总重量为20 kg,设定含土率为20%,选取的3组骨料比(鹅卵石:大碎石):8:2;7:3;2:8。按照1.2.2节试验步骤进行试验。

②保持骨料比(鹅卵石:大碎石=8:2)不变,增加含土率为40%,重复上述试验步骤。

按方案①和②进行试验,结果分别如图5和图6所示。

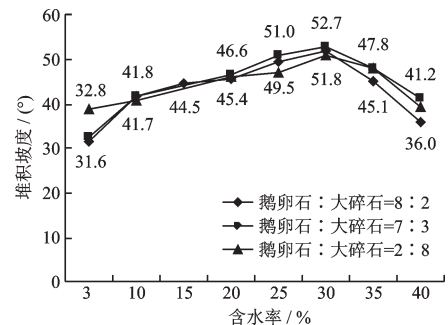


图5 3种骨料组合条件下(加20%土)不同土壤含水率对堆积体临界坡度的影响试验

Fig.5 Effect of moisture content on the critical slope of the accumulation body with three aggregates

试验表明,在3种不同骨料配比下,堆积坡度随着土壤含水率的增大都出现了先增大后减小的趋势,究其原因是在试验中所用的红土经过筛分过滤已经成为松散状,加入一定量的水分时会使其粘结性增强,同时也说明少量的水分通过增加土的粘性而一定程度上有利于坡体的稳定,但一旦当土壤中的含水率达到并超过某一临界值(比如30%),坡体稳

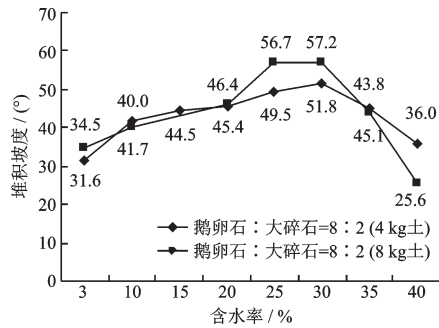


图6 两种含土率条件下不同土壤含水率对堆积体临界坡度的影响试验

Fig.6 Effect of moisture content on the critical slope of the accumulation body with two soil contents

定性则会急速下降。这一结论也间接验证了降雨导致滑坡时,总是存在着一定的滞后时间的现象。因此,及时疏排干坡体中的水对坡体稳定性而言至关重要。

### 3 流变仪试验

#### 3.1 流变仪介绍

半固态流体常用宾汉姆模型来描述。它用屈服应力和塑性黏度两个参数来表征材料的流变性质,宾汉姆模型只是在牛顿流体黏度的表达式里面加了一个屈服应力的值,符合宾汉姆模型的物体在屈服应力值下是固态的,仅表现一定的弹性变形,当应力值大于屈服应力,物体就表现为牛顿流体连续流动,而这时的应力值与剪切速率的比例,称为塑性黏度,它和表观粘度是不一样的,表观黏度就是黏度<sup>[26]</sup>。

据许永和<sup>[27]</sup>的研究 ICAR 流变仪能够进行应力生长测试和流动曲线测试。应力增长或流动曲线测试可用于表征触变性:应力生长测试用于确定静态(静止)屈服应力;流动曲线测试用于测量剪切应力和剪切速率之间的关系以此得到材料的塑性黏度。

试验采用流变仪的应力生长测试,空桶调零后,将骨料均匀倒进流变桶内,插入叶片,叶片以低而恒定的速度旋转,在计算机中可得到“时间-扭矩”曲线,曲线的最高点对应的扭矩值为最大扭矩,按照公式可算出屈服应力。静态屈服应力可以作为稳定性的一个指标,静态屈服应力越大的材料组合,流动之初的内摩擦力就越大,也就是越难流动,

反映到坡体稳定性上就是说越稳定,即材料的抗剪应力越大,抗剪切能力越强。

流变仪的计算公式为:

$$\tau_0 = \frac{2T}{\pi D^3 \left( \frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (2)$$

式中, $\tau_0$ 为屈服应力(Pa); $T$ 为最大扭矩(N·m); $D$ 为叶片旋转直径(m); $H$ 为叶片高度(m)。

在这个等式中,假设剪切应力均匀分布在叶片的侧面和末端,如图7所示。

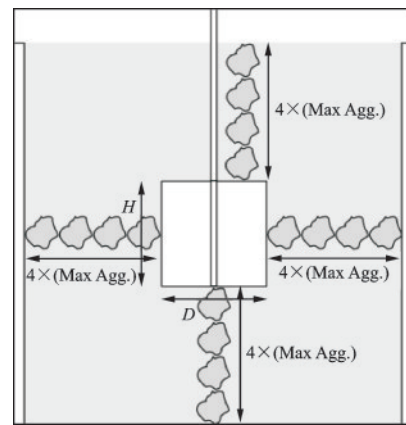


图7 流变仪叶片

Fig.7 Blades of rheometer

抗滑力  $T'$  是抗剪应力  $\tau$  的宏观表现,抗滑力的计算如式(3)所示,剪应力的计算如式(4)所示,抗剪应力越大的材料抗滑力就越大。综上讨论可得流变仪应力增长测试所得扭矩越大,静态屈服应力,材料的抗剪应力越大,抗滑力也相应越大。

$$T' = W \cos \alpha \cdot \tan \phi + c \cdot L \quad (3)$$

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi + c \quad (4)$$

#### 3.2 流变仪试验方案与结果

##### 3.2.1 相同加土率下不同骨料组合比例的流变仪测试

在第2节试验的基础上,本节试验选取了鹅卵石:大碎石=0:10、5:5、7:3、8:2、10:0五个点进行流变仪应力增长测试。将流变仪应力生长试验结果与2.1节中鹅卵石:大碎石按不同比例组合的物理堆积试验结果进行比较结果如图8所示。

由图8可知,用物理试验得出的临界坡度较低的组合,其流变仪应力生长试验得出的扭矩也应较低。临界坡度是材料抗剪切能力的外观表现,在其它条件相同的情况下,抗剪切力越小的堆积体稳定

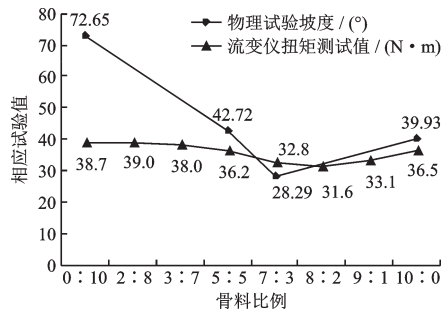


图8 相同加土率(20%)下不同骨料组合比例的流变仪测试

Fig.8 Rheometer test result for different aggregate constitution with the same mixed soil ratio (20%)

性越差,对应的临界坡度也越小。抗剪切力越小,用流变仪的应力生长试验得出的扭矩峰值也相对较低,扭矩峰值越低,其屈服应力也就越低,即越容易流动,对应的临界坡度也越低,从而验证到流变仪应力生长试验得出的扭矩与临界坡度呈正相关关系的。

### 3.2.2 不同含水率的材料流变仪测试试验

在2.3节试验得到的数据及结论的基础上,本节探究了土壤含水率对坡体材料的屈服应力的影响,设计了两个试验。

①纯土试验中,设定纯红土质量为20 kg,利用流变仪进行应力增长试验,不同含水率对其屈服应力影响如图9所示。

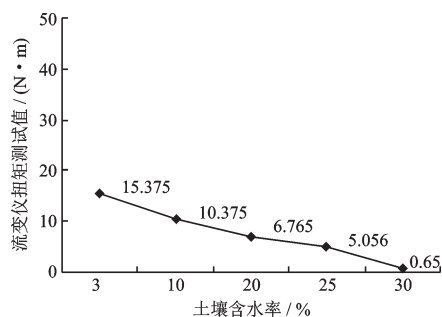


图9 纯红土条件下不同土壤含水率的流变仪测试

Fig.9 Rheometer test result for pure red soil with different moisture contents

由图9可知,纯土条件下,含水率越高,土与水组合成的半流动浆体的屈服应力就越小,也就是就越接近流动状态。

②在有骨料的试验中,本节试验选取了骨料最不利组合(鹅卵石:大碎石=8:2),最不利含土率20%来进行流变仪应力生长试验。设定骨料总重

量为20 kg,土壤含水率为3%、10%、20%、25%、30%、35%、40%。将流变仪应力生长试验结果与2.3节中鹅卵石:大碎石=8:2的组合在不同含水率下物理堆积试验结果进行比较,结果如图10所示。

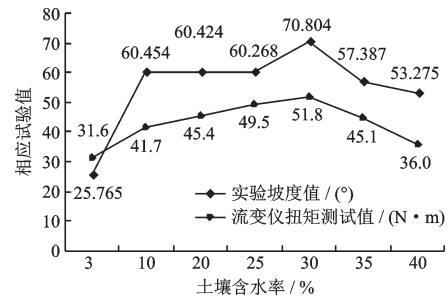


图10 不同土壤含水率的流变仪测试与物理试验对比

Fig.10 Comparison diagram of rheometer test result and physical test result for specimens with different soil moisture contents

由图10可知,应力生长试验得出的扭矩随含水率的变化规律基本上还是和物理试验所得的临界坡度随含水率的变化规律一致。在土壤含水率超过30%后,堆积材料的流动性明显增强,应力生长试验得出的扭矩明显下降,临界坡度也急剧下降,故而验证了2.3节所获试验结果。

## 4 结论

(1)堆积体组成材料的堆积特性,如大小、形状、组成比率、含土率及土壤含水率等对其稳定性存在明显影响。小粒径、较圆滑的骨料在坡体组成中占比较多的边坡是相对危险的,含土量及土壤含水率达到或超过一定的值时,堆积体稳定性会急剧下降。

(2)散体堆积过程中,含土量对堆积坡度存在某种最不利的影响值:临界坡度在含土率为20%时是最低的,当含土率超过40%后趋于平缓。

(3)土壤中少量的水分能通过增加土的粘性而一定程度上提高坡体的稳定性,但一旦当土壤中的含水率达到并超过某一临界值(比如30%),坡体稳定性则会急速下降,及时疏排干坡体中的水对坡体稳定性而言至关重要。

(4)ICAR流变仪测得的材料屈服应力与材料堆积体的稳定性成正相关关系,测试结果与试验得到的“含土率-临界坡度”以及“土壤含水率-临界坡度”变化规律保持一致。

## 参考文献:

- [1] 曾胜,胡甜,赵健,等.基于Fuzzy-AHP的堆积体边坡稳定性评价研究[J].工程地质学报,2012,20(6):926-933.  
Zeng Sh, Hu T, Zhao J, et al. Fuzzy-AHP method based evaluation of accumulation slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 926-933. (in Chinese)
- [2] Chen S, Chen L, Zhou M, et al. Experimental investigation on factors influencing stable slope angle of granular accumulation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 438-439: 1 238-1 243.
- [3] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.  
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese)
- [4] 江文才,巫锡勇,孙春卫,等.堆积体边坡及危岩体稳定性分析[J].铁道建筑,2018(1):121-124.  
Jiang W C, Wu X Y, Sun Ch W, et al. Stability analysis of accumulation slope and dangerous rock mass [J]. Railway Engineering, 2018(1): 121-124. (in Chinese)
- [5] 石振明,赵思奕,苏越.降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):135-140.  
Shi Zh M, Zhao S Y, Su Y. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 135-140. (in Chinese)
- [6] 李家春,黄丽珍,田伟平,等.公路自然灾害类型划分[J].长安大学学报(自然科学版),2011,31(2):33-37.  
Li J Ch, Huang L Zh, Tian W P, et al. Type classification on natural disasters of highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(2): 33-37. (in Chinese)
- [7] 李广平,常中华.马河崩塌堆积体结构特征与稳定性评价[J].工程地质学报,2011,19(4):588-593.  
Lin G P, Chang Zh H. The strural characyeristic and the stability analysis of Mahe Collapse Body [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 588-593. (in Chinese)
- [8] 杨继红,董金玉,陈亚鹏,等.某水电站库区堆积体边坡的成因机制分析及稳定性评价[J].工程地质学报,2008,16(3):311-318.  
Yang J H, Dong J Y, Chen Y P, et al. Formation mechanism and stability assessment of deposit slope located in reservoir region [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 311-318. (in Chinese)
- [9] 许建聪,尚岳全.碎石土滑坡的因素敏感性计算分析[J].岩土力学,2007,28(10):2 046-2 051.  
Xu J C, Shang Y Q. Sensitivity analysis of influencing factors of debris landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2 046-2 051. (in Chinese)
- [10] 赵建军,巨能攀,涂国祥.松散堆积体工程边坡变形机理分析及支护对策研究[J].工程地质学报,2008,16(5):611-615.  
Zhao J J, Ju N P, Tu G X. Deformation mechanism and supporting measures of manmade slopes in loose deposits [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 611-615. (in Chinese)
- [11] Li Z, Liang X J. Stability generalized analysis of a large-scale accumulation body slope [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 170-173: 1 124-1 129.
- [12] Zhou Z, Wang H G, Fu H L, et al. Influences of rainfall infiltration on stability of accumulation slope by in-situ monitoring test [J]. Journal of Central South University, 2009, 16(2): 297-302.
- [13] 刘娟,胡卸文,王军桥,等.松散堆积体水下稳定坡角与粒度成分的关系[J].水利水电科技进展,2010,30(4):71-75.  
Liu J, Hu X W, Wang J Q, et al. Relationship between underwater stable slope angle and granularity composition of loose deposits [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4): 71-75. (in Chinese)
- [14] 何娜.撒落型散粒体斜坡变形破坏机制试验研究[D].成都:成都理工大学,2013.  
He N. Deformation failure mechanism test studying on the scattered sand-sliding slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] Held G, Solina D, Solina H, et al. Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile [J]. Physical Review Letters, 1990, 65(9): 1 120-1 123.
- [16] Frette V, Christensen K, Malthe-S Renssen A, et al. Avalanche dynamics in a pile of rice [J]. Nature (London), 1996, 379(6560): 49-52.
- [17] Zamri Chik L E V. Characterization of the angle of repose of binary granular materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(42): 683-692.
- [18] Zuriguel I, Mullin T. The role of particle shape on the stress distribution in a sandpile [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2008, 464

- (2089):99-116.
- [19] 李艳洁, 徐泳. 用离散元模拟颗粒堆积问题[J]. 农机化研究, 2005(2):57-59.  
Li Y J, Xu Y. Discrete element simulation on particle piling [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(2):57-59.
- [20] Xiao Y J, Mao X, Li A J. The slope shape of loose accumulation body effect analysis of subgrade slope stability [C]//International Conference on Frontiers of Manufacturing Science & Measuring Technology, Paris: Atlantis Press, 2017:4.
- [21] Dai B B, Yang J, Zhou C Y, et al. Effect of Particle Shape on the Formation of Sandpile [C]//Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Discrete Element Methods, [S.l.]: Springer Singapore, 2017.
- [22] 许连坡, 刘以钢, 李金华. 散体滑落与堆积规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1):65-76.  
Xu L P, Liu Y G, Li J H. Experimental studies for the sliding fall of dividual bodies and its pile law [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1):65-76. (in Chinese)
- [23] 刘维甫, 李世海. 模拟岩质边坡的堆积模型实验与数值分析 [C]//第四届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 北京:中国力学学会, 2008:7.  
Liu W F, Li Sh H. The Experiment and numerical analysis of rock slope models [C]//China CAE Annual Conference, Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008:7. (in Chinese)
- [24] 李培. 滑坡稳定性分析方法综述 [J]. 长江工程职业技术学院学报, 2009, 26(3):24-27.  
Li P. Summary of analysis methods to landslide stability [J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2009, 26(3):24-27. (in Chinese)
- [25] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T50080—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.  
Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T50080—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [26] 元强, 李白云, 史才军, 等. 混凝土泵送性能的流变学表征及预测综述 [J]. 材料导报, 2018, 32(17):2 976-2 985.  
Yuan Q, Li B Y, Shi C J, et al. An overview on the prediction and rheological characterization of pumping concrete [J]. Materials Review, 2018, 32(17):2 976-2 985. (in Chinese)
- [27] 许永和. 混凝土流变学参数演变特性研究 [J]. 建筑施工, 2018(6):955-956, 969.  
Xu Y H. Research on evolution characteristics of concrete rheological parameters [J]. Building Material, 2018 (6):955-956, 969. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)