

DOI:10.12171/j.1000-1522.20180235

## 掺砂对崩岗土壤无侧限抗压强度的影响

黄倩楠<sup>1</sup> 张晓明<sup>2</sup> 卫杰<sup>2</sup> 张紫优<sup>1</sup> 胡节<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**【目的】为了探索混合的砂土崩积堆发生二次崩塌时的力学特性, 进行不同类型崩积堆室内模拟试验, 探究其无侧限抗压强度变化规律及崩塌特性。【方法】本文采用无侧限抗压强度指标实验, 设计 2 种掺砂方式(分层掺砂和混合掺砂)和 5 种掺砂水平(0%、25%、50%、75%、100%), 模拟不同掺砂方式和掺砂量对崩积堆力学特性的影响。【结果】掺砂量越大, 无侧限抗压强度越小, 掺砂量从 0% 增加至 100%, 强度从 71.1 kPa 下降为 14.6 kPa; 分层掺砂的试样, 下层极不稳定, 试样的强度小且破坏严重, 同一掺砂量, 混合掺砂试样的无侧限抗压强度大, 掺砂量为 25%、50%、75% 时, 混合掺砂的无侧限抗压强度值比分层掺砂分别提高了 53.28%、106.33%、21.13%; 掺砂量低且混合掺砂时土体的无侧限抗压强度值大, 上下层混合均匀的试样发生二次崩塌的可能性小。【结论】掺砂量显著降低了崩岗岩土无侧限抗压强度, 掺砂量低时试样呈块状塌落, 掺砂量高时呈碎屑状。同一掺砂量, 混合掺砂较分层掺砂提高了无侧限抗压强度。

**关键词:** 掺砂方式; 掺砂量; 崩岗; 无侧限抗压强度; 二次崩塌

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)01-0114-07

引文格式: 黄倩楠, 张晓明, 卫杰, 等. 掺砂对崩岗土壤无侧限抗压强度的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1):114-120. Huang Qiannan, Zhang Xiaoming, Wei Jie, et al. Effects of mixing sand on unconfined compressive strength of soil in collapsing gully [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 114-120.

## Effects of mixing sand on unconfined compressive strength of soil in collapsing gully

Huang Qiannan<sup>1</sup> Zhang Xiaoming<sup>2</sup> Wei Jie<sup>2</sup> Zhang Ziyou<sup>1</sup> Hu Jie<sup>2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** [Objective] In order to study the mechanics characteristic of colluvial deposits of collapsing gully, soil simulation of the collapsing had been made and the unconfined compressive strength was measured. [Method] Two methods to mix the sand and soil and different sand content were taken. [Result] The results showed that unconfined compressive strength reduced along with the reduction of sand content because of the lesser axial stress. From 0% to 100% of sand content, unconfined compressive strength reduction from 71.1 kPa to 14.6 kPa. The specimen mixed sand to soil with separated layer destroyed seriously and the strength was smaller result to the unstable substratum. The highest strength occurred to the specimen which was low sand content and mixed uniformly. [Conclusion] Mixing sand dramatically reduces the unconfined compressive strength of soil in collapsing gully. Under the same sand content circumstances, specimen mixed uniformly has a high strength and brittle failure at the end of test.

**Key words:** mode of mix sand; sand content; collapsing gully; unconfined compressive strength; the second collapse

收稿日期: 2018-07-19 修回日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771307、41201271), 华中农业大学“大学生科技创新基金(SRF)”(No.79)。

第一作者: 黄倩楠。主要研究方向: 崩岗稳定性。Email: qnhuang05@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 张晓明, 副教授。主要研究方向: 土壤侵蚀和森林水文。Email: zxm\_huanong@mail.hzau.edu.cn 地址: 430070 湖北省武汉市洪山区狮子山街 1 号华中农业大学资源与环境学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

崩岗是指山坡土体或岩石体风化壳在重力和水力作用下分解、崩塌和堆积的侵蚀现象<sup>[1]</sup>,分布在长江以南的多个省(自治区),总面积约1220 km<sup>2</sup>,严重制约当地经济与生态环境的可持续发展<sup>[2]</sup>。因此,对崩岗侵蚀机制和防治措施的研究十分必要。

随着崩岗的发育,深厚的花岗岩风化壳崩塌形成陡峭的崩壁,下部因崩塌堆积大量崩积物形成崩积堆。崩积堆的再侵蚀被认为是整个崩岗系统泥沙流失的主要来源<sup>[1,3]</sup>。阮伏水经过野外考察认为,崩岗的形式崩塌主要存在错断崩坍、滑移崩坍、拉裂崩坍3种重力崩坍和剥落<sup>[4]</sup>。错断崩坍等重力崩塌发生时,柱状、块状或板状的崩塌体多整块沿裂隙崩塌或滑移,由此产生的崩积堆也上下层次分明。崩壁通过剥落方式发生侵蚀时,土体是分裂成小块散落,由此产生的崩积堆土壤层次被打乱,土层混合形成没有层次的堆积物。因此,崩积堆土层存在形式应有两种情况,层次未被打乱的分层混合和层次被打乱的完全混合。

崩壁存在风化节理和裂隙,且一侧常处于临空面,崩积堆由斑纹层和碎屑层土壤构成,堆积在各种应力集中的坡脚位置,易遭到破坏且坡度较大。由于崩壁和崩积堆都处在近似于无侧向压力的情况,因此采用无侧限抗压强度试验来模拟崩壁土壤崩塌形成崩积堆的稳定程度。无侧限抗压强度是指试样在无侧向压力条件下,抵抗轴向压力的极限强度。

以往的掺砂研究多集中在掺砂量对岩土抗剪强度的影响<sup>[5-7]</sup>,且多集中在工程方面<sup>[8-10]</sup>,而掺砂方式和掺砂量对崩岗土壤无侧限抗压强度的影响研究较少<sup>[11-12]</sup>。因此,本试验以湖北省咸宁市通城县崩岗崩壁土壤为研究对象,将第4层碎屑层土壤作为砂样,

以不同掺砂方式和掺砂量掺入淋溶层制作标准模拟试样,分别模拟分层混合和完全混合的崩积堆,探究其无侧限抗压强度的变化规律,研究结果可为崩岗岩土改良和治理、预防崩积堆发生二次崩塌提供一定科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况与土样采集

研究区位于湖北省咸宁市通城县五里镇五里社区(116°46'26"E, 29°12'39"N, 海拔142 m)。该区年均降水量为1512.8 mm,多年平均径流深795 mm,年均气温为16.7 °C,无霜期为260 d,四季分明,属于亚热带季风性湿润气候。土壤类型为棕红壤,结构松散。植物种类有铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)以及其他杂草,植被覆盖度35%。

试验样品取自通城县五里镇五里社区一处典型瓢形崩岗,该崩岗有侵蚀沟1条,崩岗后壁高9 m,平均深度5 m,沟口宽2.9 m,沟道最大宽度5.7 m,崩岗面积126 m<sup>2</sup>,沟道长17 m,边壁高3.4 m。取样时首先清理崩壁浮土,露出新鲜土壤剖面,根据剖面特征在0~17 cm(淋溶层,含根)、17~49 cm(黏化层,少或无根)、49~350 cm(斑纹层,第2层与第4层的过渡层,呈红白混杂条带状)、350~390 cm(碎屑层,白色,较多风化颗粒)土层采集样品,依次标记为h<sub>01</sub>、h<sub>02</sub>、h<sub>03</sub>和s<sub>04</sub>,采样过程由崩壁向内开挖。另外,用环刀取原状土测其含水率、干密度。将采集的土壤带回室内风干,拣去其中杂质后过2 mm筛备用。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)制备土壤样品<sup>[13]</sup>,并测定颗粒组成和土粒相对密度。土壤基本性质见表1。

表1 土壤基本性质

Tab. 1 Physical property of test soil

层次 Layer	粒度组成 Mechanical composition/%			质量含水率 Mass moisture content/%	土粒相对密度 Specific density of solid particle/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度 Dry density/(g·cm <sup>-3</sup> )
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand			
淋溶层 Eluvial layer (h <sub>01</sub> )	30.58	33.14	36.28	20.2	2.58	1.37
黏化层 Argic layer (h <sub>02</sub> )	40.73	20.96	38.31	24.3	2.65	1.36
斑纹层 Deposition layer (h <sub>03</sub> )	16.53	27.15	56.32	27.6	2.63	1.39
碎屑层 Parent material layer (s <sub>04</sub> )	3.68	19.06	77.26	26.1	2.63	1.44

### 1.2 试验仪器

采用YYW-2应变控制式无侧限压力仪,仪器的主要标准指数是:最大测力0.6 kN,速率2.4 mm/min,量力环系数2.4 N/0.01 mm。

### 1.3 试验设计与试样制备

由于崩岗发生的内在原因是花岗岩母质发育的

深厚土层,尤其是碎屑层受力易坍塌,因此选用淋溶层(h<sub>01</sub>)和碎屑层(s<sub>04</sub>)土壤进行模拟,将碎屑层土壤作为砂样掺入<sup>[14]</sup>。掺砂方式分为分层掺砂和混合掺砂,分别模拟错断崩塌、滑移崩塌等形成土壤层次分明的和剥落等形成层次混合的两种崩积堆再次发生崩塌的难易程度。同一个处理试验4个重复试样。

根据实测土壤的基本性质指数,设定试样的干密度  $\rho = 1.35 \text{ g/cm}^3$ , 含水率  $\omega = 20\%$ , 此干密度和含水率时较接近自然情况, 且能保证制样的完整和难易程度。

**分层掺砂:** 土柱按质量均匀4层制样, 每一层2 cm, 每一层击实, 将淋溶层  $h_{01}$  和碎屑层  $s_{04}$  分别按处理预设值制样。试样的处理分别为: 1-1(全部为  $h_{01}$ )、1-2(1、2、3层为  $h_{01}$ , 第4层  $s_{04}$ )、1-3(1、2层为  $h_{01}$ , 3、4层为  $s_{04}$ )、1-4(第1层  $h_{01}$ , 2、3、4层为  $s_{04}$ )、1-5(全部为  $s_{04}$ ), 共5个处理, 处理示意如图1。

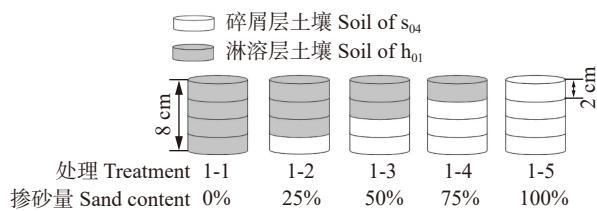


图1 分层掺砂处理示意图

Fig. 1 Diagram of mixing sand hierarchy

**混合掺砂:** 整体制样, 将淋溶层  $h_{01}$  土样和碎屑层  $s_{04}$  按预设值均匀混合, 分4次击实制样, 掺砂量分别为0%、25%、50%、75%、100% 5个处理, 分别记为2-1、2-2、2-3、2-4、2-5。处理示意如图2。

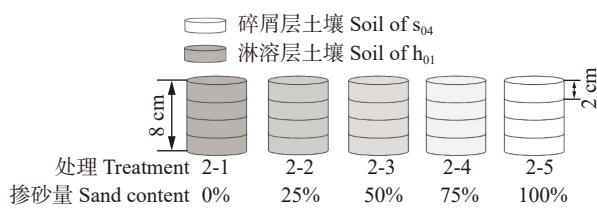
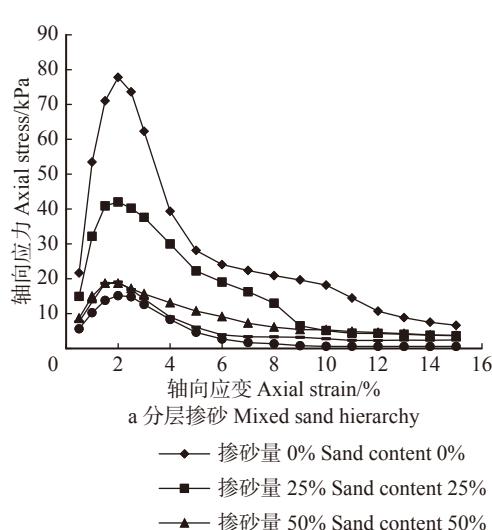


图2 混合掺砂处理示意图

Fig. 2 Diagram of mixing sand uniformly



a 分层掺砂 Mixed sand hierarchy

试样制备采用直径39.1 mm, 高度80 mm的三瓣筒制作标准圆柱形试样。制样时, 可在三轴仪饱和器筒壁周围涂抹凡士林薄层, 减少土壤颗粒与筒壁的摩擦力, 以防试样粘在筒壁造成取样困难。根据预先设置的含水率和干密度, 以及试验方案, 按质量称量每个试样的土样, 均匀分4层采用静压力法等高度压实制成试样, 加入每一层时将上一层表面刨毛, 使层与层间结合更紧密。然后将成型的试样脱模, 放置在无侧限压力仪上进行测试。

#### 1.4 指标测定与数据分析

指标的测定依据 GB/T 50123—1999 土工试验方法标准。试样所受的轴向应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (1)$$

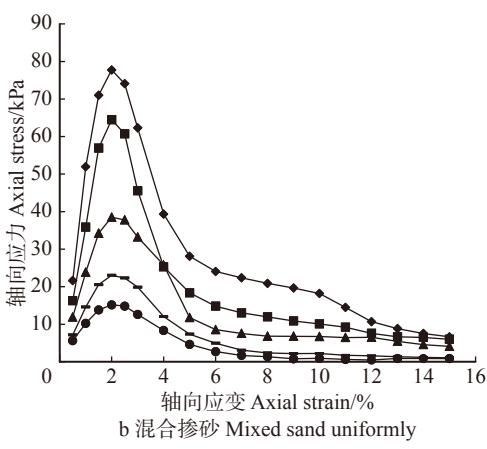
式中:  $\sigma$  为轴向应力 (kPa),  $C$  为测力计率定系数 (2.4 N/0.01 mm),  $R$  为测力计读数 (0.01 mm),  $A_a$  为校正后试样面积 ( $\text{cm}^2$ ), 10 为单位换算因数。

根据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》, 最高的轴向应力值认为是试样的无侧限抗压强度值; 当没有出现峰值时, 认为轴向应变是1%时应力为无侧限抗压强度值<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 掺砂量对崩岗岩土应力-应变特征的影响

图3为不同掺砂量崩岗岩土无侧限抗压强度试验应力应变曲线。曲线大致可以分为3个阶段, 即塑性屈服阶段、应变软化阶段、破坏阶段<sup>[15-16]</sup>。在塑性屈服阶段, 轴向应变从0%增加到2%, 轴向应力迅速增大到峰值, 在  $\varepsilon = 2.0\%$  左右到达最大值, 即试样的无侧限抗压强度值。到达峰值后快速变小, 主



b 混合掺砂 Mixed sand uniformly

—●— 掺砂量 0% Sand content 0%  
—■— 掺砂量 25% Sand content 25%  
—▲— 掺砂量 50% Sand content 50%

图3 不同掺砂量应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves with different sand contents

要集中在轴向应变为2%~5%，应变软化阶段由于试样受力后变形，进一步变形所需的应力比原来的要小，相互间黏聚力迅速变小，因此轴向应力减小。同时由于无侧向压力，试样向侧向变形导致轴向应力快速下降。最后，轴向应力缓慢减小，集中在轴向应变5%至试验结束，试样不再产生大的裂隙，土粒间的作用力基本已经达到最小，轴向应力的下降变缓。

随着掺砂量的上升，应力应变曲线变得更加平缓，轴向应力变化率变小。掺砂量为100%即全部土样均由碎屑层构成时曲线最平稳，变化幅度最小；掺砂量0%时，应力应变曲线变化幅度最大。从图中也可看出，应力应变曲线按掺砂量依次分布，基本随掺砂量升高而降低，在缓慢变小阶段接近平行。随着掺砂量的增加，制样过程也更困难，土样易散，试验过程中更容易崩坏，塑性变形较小，呈现明显的脆性破坏<sup>[17]</sup>，结束时试样的破坏程度也更加严重<sup>[18]</sup>。随着掺砂量的增加，试验结束时试样的破坏程度越严重，塌落越厉害。掺砂量低时，破坏呈块状，随着掺砂量的升高，破坏越松散，呈小块或碎屑状滚落，散落下来的土粒也越多。掺砂量到75%以上时会出现塌落成三角锥型以至无法继续进行读数而试验结束。

这主要是由于砂粒含量高时，土壤颗粒间的黏聚力差，颗粒间运动时受到的摩擦力小，产生的轴向应力也小，试样破坏时松散，呈碎屑状。黏粒多时，

土壤黏粒与黏粒的联结力大，能够紧密结合在一起，因此能够产生更大的轴向应力。另外，表面粗糙度、孔隙大小、颗粒大小也影响轴向应力的大小。当掺砂量增加，试样塑性屈服能够抵抗的应力较小，试样内部开始产生裂隙，随后转入应变软化阶段，试样产生的应力开始降低，应力应变曲线较平缓。

## 2.2 摻砂量对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响

表2为不同掺砂条件下崩岗岩土无侧限抗压强度值及显著性差异分析，图4表示不同掺砂条件下崩岗岩土的无侧限抗压强度柱状图，从图中可以看出，各掺砂量的强度值差异较大，掺砂效果明显。与分层掺砂相比，混合掺砂条件下无侧限抗压强度值随掺砂量增高逐渐递减的趋势更加明显。从图中能够发现，随着掺砂量的提高，崩岗岩土的无侧限抗压强度值快速下降，掺砂量从0%增加到100%，无侧限抗压强度值从77.8 kPa下降到15.2 kPa，下降了80.5%。主要是因为随着掺砂量的增加，团粒化作用增强，形成结构性较差的大团粒，没有联结力的砂粒掺入导致了土粒之间联结力的降低，导致在轴向压力的作用下迅速垮塌<sup>[19]</sup>。形成的崩积堆含碎屑层越多，土体强度越差，在承受同样的土压力时越可能再次出现崩坏，造成2次危害的风险越大<sup>[20]</sup>。综合应力应变曲线、试验过程观察到的现象和强度值，掺砂量越大，其土体强度越小，受力时破坏越快，程度越严重，造成的危害也越小。

表2 不同掺砂条件下崩岗岩土的无侧限抗压强度

Tab. 2 Unconfined compressive strength of collapsing gully rock soil under varied sand mix contents

掺砂量 Sand content	0%	25%	50%	75%	100%
分层掺砂 Mixed sand hierarchy	77.76 a	42.04 b	18.67 c	19.26 c	15.16 c
混合掺砂 Mixed sand uniformly	77.76 a	64.48 ab	38.51 b	23.03 c	15.16 c

注: 不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Note: different lowercase letters indicate significant differences between treatments at  $P < 0.05$  level.

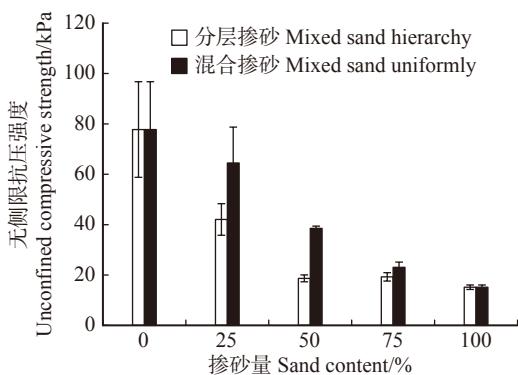


图4 分层掺砂和混合掺砂随掺砂量变化的无侧限抗压强度值

Fig. 4 Unconfined compressive strength with the change of sand content for mixed sand hierarchy and mixed sand uniformly

另外可以看出，在掺砂量低时，掺砂量增加，强度值下降迅速。分层掺砂条件下，掺砂量从0到

50%，无侧限抗压强度下降了94.3%，而掺砂量从50%提高到100%，仅减小了5.7%；混合掺砂条件下，掺砂量从0到50%，无侧限抗压强度下降了62.7%，掺砂量从50%增加到100%，抗压强度值下降了37.3%。由于掺砂量低时，砂粒填充在黏粒周围，颗粒排列定向性增加，颗粒滚动容易，削减颗粒间摩擦力，结构稳定性迅速变差，抗压强度值的迅速减小。随着掺砂量提高，颗粒间的联结力和内摩擦力已经很小，再掺入砂粒联结力的下降也较缓，无侧向抗压强度值随着掺砂量的增加减小的速度也变小。

## 2.3 摻砂方式对崩岗岩土应力-应变特征的影响

图5为两种掺砂方式下掺砂量为25%、50%、75%的应力应变曲线。对比可以发现，两种掺砂方

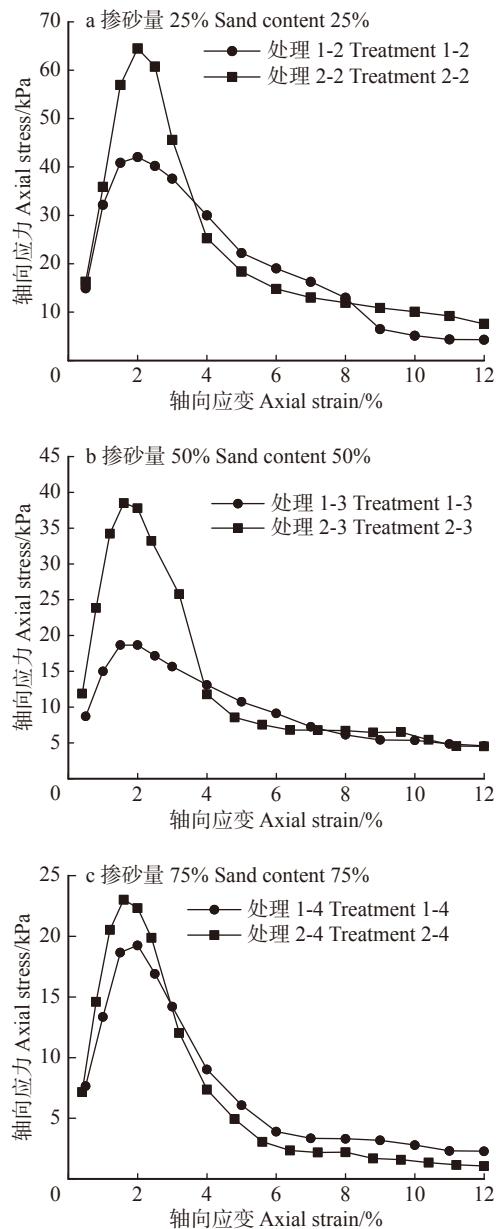


图 5 不同掺砂方式应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of different sand contents

式的应力应变曲线均在轴向应变  $\varepsilon = 2\%$  左右达到最大值。在起始时, 混合掺砂轴向应力增加迅速, 分层掺砂缓慢一些; 到达峰值后, 混合掺砂比分层掺砂下降迅速。在轴向应变  $3\% \sim 4\%$  左右进入破坏阶段, 两者均较平稳, 此时混合掺砂的残余应力比分层掺砂的残余应力小, 破坏后的残余强度也较分层掺砂降低。对同一掺砂量不同掺砂方式根据同一轴向应变进行配对样本  $t$  检验, 掺砂量为 25%、50% 和 75% 时  $P$  值分别为 0.029、0.004 和 0.137, 结果表明在掺砂量在 50% 以下时, 处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著, 说明掺砂方式对崩岗岩土无侧限抗压条件下应力应变曲线影响显著, 随着掺砂量变大, 掺砂方式对其影响降低。

混合掺砂时砂粒和黏粒混合, 相对于分层掺砂

是砂粒与砂粒之间接触, 比表面积大, 摩擦力大, 因此能承受的轴向压力较大, 而分层掺砂由于下层都是由砂粒构成, 土壤颗粒间的联结力差, 且砂粒排列的定向性大, 在受到压力时下层容易发生错动因此能够达到的峰值小。在轴向应力下降的后半阶段, 分层掺砂首先崩坏的主要原因是碎屑层土壤构成的部分, 而红土层还具有一定的黏结力, 试样没有完全崩坏, 仍能承受一定的轴向压力; 最后到达稳定减小的阶段时, 两种掺砂方式都是产生大量裂隙导致承受的轴向压力很小, 甚至掺砂量大时土样坍塌上表面与测力仪不接触, 最后的轴向应力都很小。

在试验结束时土样的形态上, 掺砂量 0% 时土样呈块状塌落, 产生碎屑少, 试验结束时整体性较好, 能看到产生的大裂隙。随着掺砂量的增加, 土样块状塌落减少, 碎屑状坍塌增多, 最后坍塌成三角锥型。无论是分层掺砂还是混合掺砂, 试样崩坏产生大裂隙或者出现散落碎屑都是从中下部开始, 这从一方面表明, 崩积堆易从下层崩塌, 尤其是下层掺砂量高时, 发生崩塌的危险更大。分层掺砂时, 从掺砂层开始出现裂隙且崩塌严重, 结束时未掺砂层形状保持良好, 或者出现大裂隙但是土壤能够成块状, 而掺砂层崩坏严重, 多呈碎屑状; 混合掺砂从中部 2、3 层开始崩坏, 随着掺砂量的增加崩坏的程度越严重, 基本上塌落的土样呈碎屑状, 而非大裂隙状成块塌落。主要是因为混合掺砂时黏粒与砂粒结合, 有一定的联结力, 在崩坏时碎块沿着缝隙裂开, 形成块状。分层掺砂试样下层砂粒与砂粒结合, 颗粒间摩擦力与联结力均较低, 没有使砂粒形成团块的内应力而呈碎屑状。试验结束时试样状态如图 6。

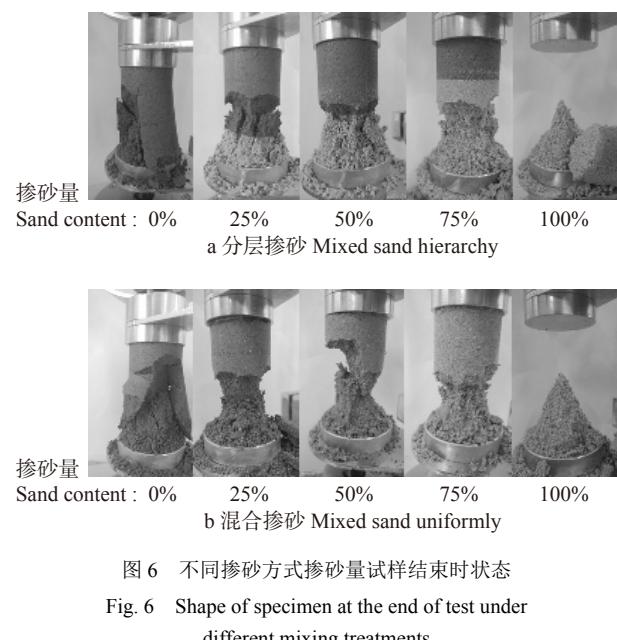


图 6 不同掺砂方式掺砂量试样结束时状态

Fig. 6 Shape of specimen at the end of test under different mixing treatments

#### 2.4 掺砂方式对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响

从图4中可以看出,同一掺砂量混合掺砂的无侧限抗压强度值比分层掺砂的无侧限抗压强度值大。将两种掺砂方式的掺砂量与无侧限抗压强度进行拟合,回归方程分别为:

$$\text{分层掺砂: } y = -40.11 \ln x + 72.984, R^2 = 0.933$$

$$\text{混合掺砂: } y = -41.05 \ln x + 83.093, R^2 = 0.9514$$

掺砂量为25%时混合掺砂的无侧限抗压强度值比分层掺砂高52.4%,50%时高105.9%,75%时高21.1%。对掺砂方式进行配对样本t检验,结果表明掺砂方式对崩岗岩土无侧限抗压强度影响显著( $P < 0.01$ )。掺砂量较低时,分层掺砂强度值的下降较混合掺砂下降快,掺砂量较高时则相反,但无侧限抗压强度值混合掺砂仍比分层掺砂的要大,更能够抵抗崩塌。若发生崩塌时,上下层土壤散落后混合程度高,反而不易再次发生崩塌。这是因为完全混合后,土壤砂粒、黏粒均匀分布,黏粒能够产生一定的联结力和黏聚力,增加土体强度,而分层掺砂时,只含砂土层土壤结构性差,土体强度低,容易产生横向位移而从砂层发生崩坏。

### 3 讨 论

掺砂通过增加土粒排列的定向性、降低土粒的联结力,降低黏聚力,显著降低了试样的抗压强度。试样的应力应变曲线分为塑性屈服、应变软化和破坏3个阶段,随着掺砂量的增加,土壤颗粒间的黏聚力减小,团粒化作用增强导致试样结构性较差,且砂粒间的联结力低,使得应力应变曲线更加平缓,试样的无侧限抗压强度降低,试样的崩塌程度越严重。石崇喜等对掺砂红土的无侧限抗压强度研究中,掺砂量大于20%的红土也表现出这一规律。但掺砂在一定程度上提高了土壤团粒含量,增大了内摩擦角,因此在掺砂量低时,石崇喜等发现存在最佳掺砂量20%,该掺砂量提高了试样的无侧限抗压强度<sup>[19]</sup>,杨俊等对风化砂改良膨胀土的试验中最佳掺砂量为10%<sup>[21]</sup>,而在本试验中随掺砂量的升高无侧限抗压强度一直降低,并未出现最佳掺砂量。这主要是因为本试验采用的土样为崩壁淋溶层 $h_{01}$ 的土壤,该层土壤的砂粒含量为36.28%,远高于石崇喜等<sup>[19]</sup>试验最佳掺砂量时的砂粒含量。

混合掺砂时黏粒与砂粒分布较均匀,摩擦力和联结力较大;分层掺砂下层砂粒高,联结力差,砂粒定向排列易滑动,并且试验中发现试样一般从下部开始崩塌,更容易坍塌。分层掺砂的无侧限抗压强度较混合掺砂低,且试样破坏更为严重,分层掺砂产生大裂缝和大碎块而混合掺砂产生散落碎屑。

一般认为崩塌崩塌时,重力侵蚀形成的倒石堆的颗粒组成呈上细下粗的分异规律。因此本试验分层掺砂模拟了上层为红土层而下层掺砂的情况,证明掺砂下层更容易崩坏。在刘希林对广东五华县的崩积堆调查发现,由于崩积堆土壤经过一段时间的化学风化和流水搬运,冲刷带走了崩积堆顶部的细粒,造成了老崩积堆颗粒上粗下细的现象<sup>[22]</sup>,且在利用可移动便携式人工模拟降雨器对崩积体野外模拟降雨时也发现,新崩积堆与老崩积堆的失稳深度不同<sup>[23]</sup>。因此,在继续模拟掺砂对崩积堆无侧限抗压强度的试验中,应该增加低掺砂量的梯度和上层掺砂下层未掺砂的情况,更详细地模拟掺砂的情况。

### 4 结 论

掺砂方式和掺砂量对崩岗岩土的无侧限抗压强度影响明显,具体表现如下:

(1)同样的掺砂方式,不同掺砂量的无侧限抗压强度值差异大,掺砂效果明显。随着掺砂量的增加,崩岗岩土土体强度快速下降:掺砂量从0%上升至100%,无侧限抗压强度值下降了62.6 kPa,下降了80.5%;应力应变曲线变化幅度减小;试验结束时土样的破坏程度更严重,掺砂量低时呈块状塌落,高时呈碎屑状。

(2)同样的掺砂量,混合掺砂比分层掺砂的土体强度大,土样稳定性高;两种掺砂方式最后到达稳定时的轴向应力大小相近;试验结束时,分层掺砂从碎屑层开始破坏且破坏最严重,混合掺砂从第2、3层开始破坏且试样整块破裂,脆性破坏明显。

(3)发生崩塌后形成的崩积堆,若上下层次被打乱、土壤充分混合,发生二次崩塌的可能性比层次没有打乱的情况要小;下层土壤尤其是碎屑层的土壤越少,发生二次崩塌的可能性越小。

### 参 考 文 献

- [1] 丘世均. 红土坡地崩塌侵蚀过程与机理[J]. 水土保持通报, 1996, 14(6): 31-40.  
Qiu S J. The process and mechanism of red earth slope disintegration erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 14(6): 31-40.
- [2] 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩塌侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 66-68.  
Feng M H, Liao C Y, Li S X, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China[J]. Yangtze River, 2009, 40(8): 66-68.
- [3] 林江, 黄永, 王明, 等. 评估崩塌沟系沉积物来源的方法:以东南沿海为例[J]. Catena, 2015, 129: 9-17.  
Lin J, Huang Y, Wang M, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: an example from southeast China[J]. Catena, 2015, 129: 9-17.
- [4] 阮伏水. 福建崩塌沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1996, 12(增刊): 24-31.

- Ruan F S. Study on erosion mechanism of collapse gully in Fujian[J]. *Journal of Fujian Teachers University (Natural Science)*, 1996, 12(Suppl.): 24–31.
- [5] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 241–245.
- Zhang X M, Ding S W, Cai C F. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(5): 241–245.
- [6] 黄辉. 红粘土无侧限抗压强度试验影响因素研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2010, 24(4): 23–26.
- Huang H. Study on influencing factors of unconfined compressive strength of red clay[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2010, 24(4): 23–26.
- [7] Fei T, Jian-Hua Y. Nonlinear creep and swelling behavior of bentonite mixed with different sand contents under oedometric condition[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2011, 29(4): 346–363.
- [8] 蔡正银, 吴志强, 黄英豪, 等. 含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(9): 1581–1586.
- Cai Z Y, Wu Z Q, Huang Y H, et al. Influence of water and salt contents on strength of frozen soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1581–1586.
- [9] 杨俊, 杨志, 张国栋, 等. 初始干密度及掺砂比对膨胀土抗剪强度指标影响[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(1): 77–83.
- Yang J, Yang Z, Zhang G D, et al. The influence of initial dry density and doped sand proportion on expansive soil shear strength[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(1): 77–83.
- [10] Huang R Q. Deformation mechanism and stability of a rocky slope[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2007, 18(1): 77–84.
- [11] 卫杰, 张晓明, 丁树文, 等. 黄麻纤维加筋条件对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 59–63.
- Wei J, Zhang X M, Ding S W, et al. Effect of reinforcement conditions of jute fiber on unconfined compressive strength of soil in collapsing hill[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 59–63.
- [12] 杨彩迪, 卫杰, 张晓明, 等. 黄麻纤维加筋崩岗岩土的无侧限抗压强度研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 143–152.
- Yang C D, Wei J, Zhang X M, et al. Unconfined compressive strength of jute-fiber-fortified collapsing hill soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 143–152.
- [13] GB/T 50123-1999. 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- GB/T 50123-1999. Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [14] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 175–180.
- Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Soil particle size distribution and fractal dimensions of colluvial deposits in granite benggang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 175–180.
- [15] 刘霖, 魏中曹, 范振祥. 水泥固话煤化工废水污染土的应力: 变特性及空隙结构研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(5): 51–56.
- Liu L, Wei Z C, Fan Z X. Study on stress-strain characteristics and pore structure of polluted soil in cement, cured coal chemical waste water[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(5): 51–56.
- [16] 杨俊, 刘子豪, 张国栋, 等. 复合方法改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1069–1076.
- Yang J, Liu Z H, Zhang G D, et al. Experimental research on unconfined compressive strength of expansive soil improved by composite method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1069–1076.
- [17] Hucka V, Das B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(10): 389–392.
- [18] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力: 应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1114–1122.
- Zhou H, Meng F Z, Zhang C Q, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1114–1122.
- [19] 石崇喜, 黄英, 杨玉婷, 等. 掺砂红土的力学特性及掺砂机理研究[J]. *工程勘察*, 2011(4): 1–8.
- Shi C X, Hang Y, Yang Y T, et al. Research on mechanical properties and sand-doped mechanism of the laterite improved with sand[J]. *Journal of Investigation & Surveying*, 2011(4): 1–8.
- [20] 詹振芝, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 85–95.
- Zhan Z Z, Huang Y H, Jiang F S, et al. Effects of content and size of gravel on soil permeability of the colluvial deposit in benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 85–95.
- [21] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47(4): 532–536, 556.
- Yang J, Tong L, Zhang G D, et al. Wet and dry cycle effects on unconfined compressive strength of weathered sand improved expansive soil[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2014, 47(4): 532–536, 556.
- [22] 刘希林, 张大林, 贾璐璐. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义: 以广东五华县莲塘崩岗为例[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 802–811.
- Liu X L, Zhang D L, Jia Y Y. Soil physical properties of collapsing hill and gully and their indications for soil erosion: an example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua County of Guangdong[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 802–811.
- [23] 刘希林, 唐川, 张大林. 野外模拟崩岗崩积体坡面产流过程及水分分布[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 179–185.
- Liu X L, Tang C, Zhang D L. Simulated runoff processes on colluvial deposits of Liantanggang Benggang and their water distributions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 179–185.

(责任编辑 范娟  
责任编辑 杨晓晖)