

水泥含量对“椰糠-黏土”与边坡界面间的粘结力的影响研究

安振楠 黄小琴 蒋必凤

三亚学院, 中国·海南 三亚 572000

摘要: 在边坡生态修复工程中, 基材与边坡界面粘结力对稳定性起关键作用。本研究通过自制模拟边坡设备, 固定边坡粗糙度为 0.42, 研究水泥含量与含水率对椰糠-黏土基材粘结性能的影响。结果表明, 随着水泥含量增加显著提升椰糠-黏土基材湿润度与黏稠度; 粘结性能随含水率呈非线性变化, 当含水率 $\leq 64\%$ 时, 水泥含量越高, 最大滑坡坡度越大、粘结力越强, 而含水率达 76% 时规律反转; 当含水率 40%-64%、水泥含量 5%-11%, 边坡粘结稳定性最高。低含水率下土体破坏以局部剪切滑移为主, 高含水率时呈整体溃散。研究成果为边坡生态修复工程基材配比优化的粘结力问题提供理论依据和实践指导。

关键词: 椰糠-黏土基材; 粘结力; 含水率; 水泥

Study on the Influence of Cement Content on the Bonding Force between "Coconut Coir-Clay" and Slope Interface

An Zhennan, Huang Xiaoqin, Jiang Bifeng

University of Sanya, China Hainan Sanya 572000

Abstract: In slope ecological restoration engineering, the bonding force between the substrate and the slope interface plays a key role in stability. This study used a self-made simulated slope device to fix the slope roughness at 0.42 and investigated the effects of cement content and moisture content on the bonding performance of coconut coir-clay substrates. The results show that increasing the cement content significantly improves the moisture and viscosity of the coconut coir-clay substrate; the bonding performance exhibits a nonlinear change with moisture content. When the moisture content is $\leq 64\%$, the higher the cement content, the larger the maximum landslide slope and the stronger the bonding force, while the law reverses when the moisture content reaches 76%. When the moisture content is 40%-64% and the cement content is 5%-11%, the slope bonding stability is the highest. The soil failure under low moisture content is mainly local shear slip, and the overall collapse occurs under high moisture content. The research results provide a theoretical basis and practical guidance for the bonding force problem of substrate ratio optimization in slope ecological restoration engineering.

Keywords: Coconut coir-clay substrate; Bonding force; Moisture content; Cement

0 引言

在各类土木工程与生态修复工程中, 边坡稳定性至关重要, 而黏土与边坡界面间的粘结力是影响边坡稳定性的关键因素之一。一旦边坡失稳, 可能引发滑坡、泥石流等地质灾害, 造成严重的经济损失与人员伤亡。

椰糠-黏土^[1]复合基材凭借其低成本、高孔隙率及植物根系适配性强等优势, 在生态护坡工程中展现出巨大潜力^[2], 但基材与边坡界面的粘结力不足仍是制约其广泛应用的关键瓶颈。水泥作为常用固化剂^[3], 对提升土体粘结性能具有显著作用。水泥水化产物可通过离子交换与胶

结作用增强黏土颗粒间的连接, 使基材内聚力提高 30%-50%; 椰糠纤维的掺入虽能改善基材透气性, 但会削弱水泥的胶结效果, 导致界面粘结力下降^[4]。膨胀土改良研究中证实, 水泥遇水发生水化反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 土中 Ca^{2+} 含量增加, 从而增强土体黏结力^[5]。现有研究多聚焦于单一因素对基材性能的影响^[6], 对水泥含量与含水率耦合作用机制的研究仍存在明显空白。特别是在高含水率工况下, 部分工程实践中出现“水泥含量越高, 边坡稳定性反而降低”的反常现象。本研究通过分析水泥含量与含水率耦合作用下椰糠-黏土与边坡粘结力之间的关系, 为降低边坡

失稳风险,推动边坡的稳定性与生态修复领域的可持续发展提供参考依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

黏土:三亚学院校内某山坡表层以下的黏土,用直径 2 mm 筛进行筛分后用鼓风干燥机连续烘干 24 h。

椰糠:三亚三力源椰糠生产基地生产。将椰糠进行自然风干后,过 2mm 土壤筛,取过筛后的部分进行本试验,本试验中椰糠含量取干黏土质量的 25%,为固定值。

水泥:42.5 普通硅酸盐水泥。

1.2 试验配合比设计

本试验采取正交设计方法,设计水泥含量和初始含水率两个变量,每个变量设计不同的水平进行正交试验,设计水泥含量分别为 0%、5%、8%、11% 含水率为 40 %、52 %、64 %、76 % 的正交试验数据。

1.3 试验设备

人工自制岩质边坡模拟设备。该设备框架及底板采用铸铁,底板上平铺一层水泥砂浆形成一定的粗糙表面,约 2cm 左右,用以模拟有一定粗糙度的边坡坡面。

设备底板一端可以通过人力抬起模拟边坡,使得模拟边坡与地面形成一定角度即坡角,

并可利用支撑将模拟边坡固定。坡度可调整范围为 0-90° 内。

边坡界面的粗糙度是一个重要的影响因素,对粘土与岩质边坡的粘结能力起到一定性的作用。本试验模拟岩质边坡粗糙度值为 0.42,不考虑粗糙度对边坡粘结力的影响,仅选取水泥含量和含水率两个因素进行正交试验设计。

1.4 试验步骤

(1) 按设计配合比称量拌合材料,加水进行充分搅拌。

(2) 将模拟坡面水平放置,模具摆放在模拟坡面上,再将搅拌好的基材倒入模具中,然后表面抹平,脱模。

(3) 脱模后,手工抬起坡面,从 0° 开始,依次递增,坡度变化区间设置为 0° ~15°、15° ~30°、30° ~40°、40° ~50°、50° ~60°,完成一个变化区间暂停 20 秒,观察基材在坡面滑坡情况的变化,坡面裂缝等情况。

(4) 每次试验完成后,及时清理模拟岩质界面坡面,确保进行下一组试验不会受到上一组试验残留基材的影响,产生误差。

2 试验结果与分析

2.1 不同配比拌和土体状态分析

当水泥含量为 0% 时,当不含水泥时,含水率 40% 的

拌和土体相对较干燥,特别是 40% 含水率的拌和土体,土颗粒间非常松散,如图 1 所示。当含水率达到 64% 时,拌和土体比前两者相对湿润,无明显的松散土颗粒。当含水率达到 76% 时,拌和土体呈现明显的湿润状态,表面能见少量水渗出,如图 2 所示。



图1 含水率40%的土体



图2 含水率76%的土体

当水泥含量为 5% 时,随着含水率增加,拌和土体明显从相对干松状态变为湿润黏稠状态。但与不含水泥的拌和土体相比,5% 水泥含量的下各含水率土体均相对湿润。当含水率为 40% 时,还有部分松散颗粒,但比不含水泥时的松散颗粒明显减少。当含水率增加至 52% 时,松散颗粒较少,当含水率达到 64% 时,土体处于湿润状态,当含水率继续增加至 76% 时,呈现干稠的水泥浆状。由此可见,随着水泥的添加,拌和土体显得较为湿润和黏稠。

当水泥含量为 11% 时,当继续增加水泥用量,各含水率拌和土体明显较为湿润。当水泥含量为 11% 时,含水率 40% 的拌和土体相对较湿润,如图 3 所示。含水率为 64% 时,拌和物呈现湿润和泥土状态。含水率 76% 时呈现浆体状态,大量水分泌出,如图 4 所示。



图3 含水率40%的土体



图4 含水率76%的土体

从上述各种配比的土体状态可以看出,添加水泥后,一方面由于水泥颗粒很细,与土壤拌和后,能填充土壤颗粒间的空隙,使原本分散在大孔隙中的水分被挤压到土壤颗粒表面和较小的孔隙中,从而让土壤表面的水分含量相对增加,看起来更加湿润;另一方面,水泥水化生成的凝胶体具有一定的黏性和保水性,它可以将土壤中的水分吸附并保留在其周围,减少水分的蒸发,使得土壤在拌和水泥后能较长时间保持湿润的状态。基于这些原因,添加水泥的拌和土体比不添加水泥的拌和土体明显湿润。

添加水泥后,水泥与水发生水化反应,生成一系列水

化产物, 这些产物具有胶凝性, 能够将土壤颗粒粘结在一起, 从而增加了拌和物的黏性和塑性, 使其变得更加黏稠。同时, 水泥的添加还能改善土壤的颗粒级配, 填充土壤颗粒之间的空隙, 进一步提高拌和土壤的黏稠度和整体性能。

2.2 不同含水率下各水泥含量土体在坡面的滑落情况分析

2.2.1 40% 含水率下不同水泥含量土体滑落分析

当水泥含量为 0% 时, 即不添加水泥的基材, 当坡度抬起至 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间, 土体表面出现了裂缝, 裂缝长度 6.3cm、宽小于 0.1cm; 当底板抬至 30° 时, 土体下方边缘掉落, 如图 5 所示; 抬起角度为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 区间, 裂缝变化至长 10.4cm, 宽 0.1cm; 抬至 40° , 土体出现松动与边坡界面出现分离、滑落迹象; 抬至 41° , 土体完全滑落。



图5 0%水泥含量土体下方边缘掉落



图6 0%水泥含量土体整体下滑

当水泥含量为 5% 时, 当底板抬起坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 坡度在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间时, 土体右下角有土体掉落; 抬至 45° , 土体完全滑落, 如图 6 所示。

当水泥含量为 8% 时, 抬起坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 坡度在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间, 土体正下方边缘土体掉落; 坡度在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 区间, 土体开始松动, 四周边缘散落小土粒; 抬至 47° , 土体完全滑落。

当水泥含量为 11% 时, 抬起坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间时, 土体左边居中位置和左下角出现两条裂缝, 其中一条裂缝长 7.3cm、宽 0.1cm, 另一条裂缝长 4.2cm、宽 0.1cm; 当抬至 37° 时, 长度为 4.2cm 裂缝以下土体滑落; 抬起至 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 区间, 7.3cm 长的裂缝宽度变化至 0.2cm; 抬至 50° 时, 土体以 7.3cm 的裂缝为分割线分批滑落。

综合上述分析, 当含水率为 40% 时, 不同水泥含量的土体最终滑落的角度如表 1 所示。

表1 含水率40%时不同水泥含量土体最大滑坡坡度

水泥含量	0%	5%	8%	11%
最大滑坡坡度	41°	45°	47°	50°

根据表 1 可知, 在 40% 含水率条件下, 不同含水泥量基材发生滑落坡度不一致, 随着水泥含量增加, 最大滑坡坡度增大。水泥含量 11% 的土体的最大滑坡坡度明显大于不含水泥的土体; 水泥含量 8% 和水泥含量 5% 土体的最大滑坡坡度比较相近。从上述分析还可知, 随着坡度不断增加, 边坡土体发生局部掉落, 当水泥为 0% 和 11% 时出现了较为明显的裂缝。

2.2.2 52% 含水率下不同水泥含量土体滑落分析。

当水泥含量为 0% 时, 当坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 区间, 土体左下角长 2.3cm, 宽 5.5cm 土体掉落; 抬至 43° 时, 土体完全滑落。

当水泥含量为 5% 时, 当坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间, 土体也没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 31° 时, 土体左下角长 16.7cm、宽 5.6cm 土体掉落; 抬至 41° 时, 土体右下角长 4.5cm、宽 1.2cm 土体掉落, 抬至 47° , 土体完全掉落。

当水泥含量为 8% 时, 坡度抬至 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 20° 时, 土体左下角掉落; 抬至 31° 时, 土体中间出现裂缝, 长 3.4cm、宽 0.1cm, 且土体右下角土体掉落。抬至 40° 时, 中间裂缝为分割线的下部分土掉落; 抬至 42° 时, 土体中间掉落一块; 抬至 48° , 剩余土体全部掉落。

当水泥含量为 11% 时, 当坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 区间, 土体均没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 42° 时, 土体左右下角土体掉落, 其中一块土体长 7.8cm、宽 4.4cm, 另一块土体长 15.3cm、宽 3.7cm; 抬至 49° 时, 土体完全掉落。

当含水率为 52% 时, 不同水泥含量的土体最终滑落的角度如表 2 所示。

表2 含水率52%时不同水泥含量土体最大滑坡坡度

水泥含量	0%	5%	8%	11%
最大滑坡坡度	43°	47°	48°	49°

根据表 2 可知, 当含水率为 52% 时, 土体的最大滑坡坡度随水泥含量增加而增加。与含水率 40% 的滑坡规律一致。而且水泥含量 5%、8%、11% 土体的最大滑坡坡度差异较小, 由此可见, 少量水泥就能提高土体的粘结力, 使得边坡土体下滑坡度提高。

2.2.3 64% 含水率下不同水泥含量土体滑落分析

当水泥含量为 0% 时, 当坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、

15° ~30°、30° ~40° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 46° 时, 土体与边坡分离滑落。

当水泥含量为 5% 时, 坡度在 0° ~15° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 26° 时, 土体右下角长 20.1cm、宽 2.1cm 土体掉落, 如图 7 所示; 抬至 48° , 土体全部滑落。



图7 5%水泥含量土体局部掉落 图8 11%水泥含量土体局部掉落

当水泥含量为 8% 时, 坡度在 0° ~15°、15° ~30°、30° ~40° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 48° 时, 土体全部滑落。

当水泥含量为 11% 时, 坡度在 0° ~15°、15° ~30°、30° ~40° 区间, 土体没有出现裂缝和土体掉落情况; 抬至 45° 时, 土体右下角长 9.4cm、宽 1.3cm 土体掉落, 如图 8 所示; 抬至 49° , 土体全部滑落。

当含水率为 64% 时, 不同水泥含量的土体最终滑落的角度如表 3 所示。

表3 含水率64%时不同水泥含量土体最大滑坡坡度

水泥含量	0%	5%	8%	11%
最大滑坡坡度	46°	48°	48°	48°

根据表 3 可知, 64% 含水率下, 四个水泥含量的不同土体的最大滑坡坡度相差较小, 且 5%、8%、11% 水泥含量土体的最大滑坡坡度均为 48°。与前述含水率为 40% 和 52% 的土体相比, 当含水率增加至 64% 时, 土体滑落过程中的裂缝显现减少, 土体主要呈现的是整体下落, 由此可见, 土体自身颗粒之间的粘结力相对较强, 而土体与边坡界面间的粘结力由于含水率增加而变得较弱, 容易导致整体下滑。

2.2.4 76% 含水率下不同水泥含量土体滑落分析

当水泥含量为 0% 时, 坡度在 0° ~15°、15° ~30° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 35° 时, 土体左下角长 14.5cm, 宽 6.5cm 土体掉落; 抬至 45° , 土体完全滑落,

当水泥含量为 5% 时, 坡度在 0° ~15° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 30° 时, 土体整体有向下滑落迹象但没滑落; 抬至 42° , 土体整体缓慢滑落至全部滑落。

当水泥含量为 8% 时, 坡度在 0° ~15°、15° ~30° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况; 抬至 34° , 土体有向下滑落迹象; 抬至 35° , 土体左边下滑 2.7cm、右边下滑 5.6cm 停止滑落; 抬至 40° , 土体向下滑落至完全滑落。

当水泥含量为 11% 时, 当坡度在 0° ~15°、15° ~30° 区间, 土体没有出现裂缝和掉落情况。抬至 35° , 土体向下滑落至完全滑落。

含水率 76% 时, 不同水泥含量的土体最终滑落的角度如表 4 所示。

表4 含水率76%时不同水泥含量土体最大滑坡坡度

水泥含量	0%	5%	8%	11%
最大滑坡坡度	45°	42°	40°	35°

根据表 4 可知, 当含水率增加至 76% 时, 土体的最大滑坡坡度随水泥增加而减少, 与前面三个含水率土体的规律刚好相反。含水率 76% 下各个水泥含量土体在下滑过程中均没有出现裂缝的现象, 只有水泥含量 0% 的土体出现了局部滑落, 其他三个水泥含量的土体均呈现整体下滑的现象。结合四种水泥含量土体的拌和状态来看, 0% 水泥含量土体相对干湿, 而其他水泥的土体相对湿滑, 因此, 当坡度增加时, 有水泥含量的土体有整体下滑的趋势, 并且水泥含量越大, 土体越湿滑, 因此导致最大滑坡坡度大幅度下降。水泥含量 11% 土体的最大下滑坡度与不含水泥的土体减少了 10°。由此可知, 当拌和土体的含水率达到一定程度时, 由于含水率过大, 拌和土体与边坡界面之间的摩擦力明显降低, 导致各配比土体的最大滑坡坡度减小。此时, 含水率对土体与边坡界面之间粘结力的影响较大。

通过上述综合分析可知, 不同水泥含量土体的最大滑坡坡度与含水率的关系曲线如图 9 所示。

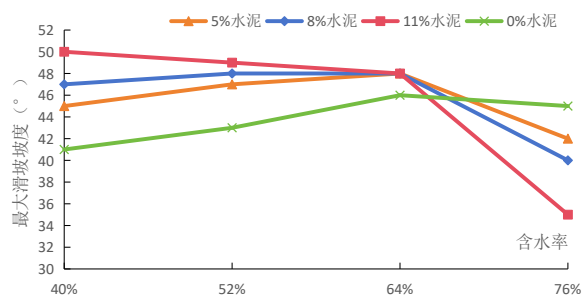


图9 不同水泥含量土体的最大滑落坡度与含水率的关系曲线

根据图 9 可知, 不同水泥含量的土体的最大滑落坡度随着含水率增加呈现先增加后降低的规律, 当含水率小于 64% 时, 水泥含量 11% 的土体的最大滑坡坡度曲线居于最上方, 往下依次为水泥含量 8%、5%、0%, 提高水泥添加

量,可以提高土体与边坡界面的粘结能力。但当含水率超过 64% 时,所有水泥含量的土体的最大滑坡角度均表现降低的趋势,曲线从上到下的水泥含量依次为 0%、5%、8%、11%。

从土体滑落过程中的状态来看,当含水率较高时,土体在滑落的过程中没有出现裂缝,表示土体内部的粘结力较强,而土体与边坡界面间的粘结力较弱,从而整体下滑。可以看出,水在土体下滑的过程中起着关键作用。如果拌制的土体放置一段时间后,土体中水分会逐渐蒸发,土体之间的粘结力会进一步提高,此时再增加坡度,可能会提高最大滑坡坡度。

3 结语

本研究通过正交试验方法,探究了不同水泥含量和初始含水率对黏土-椰糠混合土体与岩质边坡界面粘结能力的影响,水泥的掺入显著改善了拌和土体的湿润度与黏稠度,且水泥含量越高,土体湿润黏稠状态越明显,当含水率 $\leq 64\%$ 时的促进作用在此区间内,土体最大滑坡坡度随含水率增加呈上升趋势。含水率 $> 64\%$ 时的起抑制作用,当含水率达到 76% 时,土体最大滑坡坡度随水泥含量增加反而降低。此时含水率对粘结力的负面影响超过水泥的增强作用。

含水率比较低时土体滑落前常出现裂缝,且水泥含量越低,裂缝越明显。低水泥含量土体颗粒间粘结力弱,水分分布不均。高含水率时使土体多呈现整体下滑,无明显裂缝,表明高含水率下土体内部粘结力较强,但与边坡界面的摩擦阻力显著降低,导致“整体滑移”现象。当含水

率控制在 40%~64% 时,水泥含量采用 8%~11%,可兼顾土体粘结力与施工可行性;若含水率超过 64%,需减少水泥用量或降低含水率,避免因湿滑导致边坡失稳。

本研究仅考虑了粗糙度 0.42 的近似光滑边坡,未探究不同边坡粗糙度对粘结力的影响。后续可结合实际工程中多样化的边坡条件,进一步优化配比设计,为岩质边坡生态防护提供更精准的理论依据。

参考文献:

- [1] 蒋必凤,晏超,李淑敏等.椰糠-黏土植生基材崩解特性试验[J].东北林业大学学报,2024,52(03):132-140.
- [2] 叶建军,陈阳阳,黄涛.湿喷植被混凝土生态护坡技术在水渠边坡工程中的应用[J].水土保持通报,2020,40(3):228-234.
- [3] 肖衡林,马强,叶建军等.水泥泥炭与纤维基干喷生态护坡基材 配方优化及现场试验[J].农业工程学报,2015,31(2):221-227.
- [4] 吕宋,魏少伟,刘越然等.铁路路基边坡浅层稳定性分析与坡面防护现状[J].铁道建筑,2023,63(6):12-18.
- [5] 肖衡林,马强,叶建军等.水泥泥炭与纤维基干喷生态护坡基材 配方优化及现场试验[J].农业工程学报,2015,31(2):221-227.
- [6] 崔宏环,赵嘉,胡峻晖等.水泥粉煤灰改良粗粒土路基填料力学与收缩特性[J].铁道建筑,2023,63(3):137-142.

作者简介:安振楠(1986-),男,锡伯,辽宁沈阳人,硕士,讲师,研究方向:建筑材料力学性能。