

反复直剪作用下不同含水率对尾砂抗剪强度影响规律

刘午龙, 潘建平

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:尾砂是尾矿库筑坝的关键材料,其抗剪强度是保障尾矿坝稳定性的核心力学参数。含水率作为关键变量,直接影响尾砂的力学性能。为揭示含水率对抗剪强度的影响规律,本文采用室内反复直剪试验与 PFC 颗粒流数值模拟相结合的方法,针对含水率分别为 5.131%、15.000%、26.324% 的尾砂开展抗剪性能研究。结果表明:1) 含水率对尾砂强度具有控制作用,其峰值强度随含水率升高呈“先增后减”趋势,于 15.000% 时达最大值;2) 反复剪切致强度显著劣化,试样抗剪强度在第四次剪切后趋于稳定状态,内摩擦角与黏聚力均呈衰减趋势;3) 宏观分析揭示,高法向应力下颗粒间咬合增强,使剪应力-位移曲线上升段更陡、峰值强度更快出现;低法向应力下颗粒易滚动滑移,剪应力发展则较平缓。基于上述规律,建立考虑含水率与法向应力双重影响的尾砂峰值抗剪强度经验公式,为尾矿坝稳定性评估提供关键参数支持。

关键词:尾矿砂; 含水率; 抗剪强度; 抗剪强度模型; 反复直剪实验; PFC 数值模拟

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)05-0008-08

doi:10.13402/j.gcjs.2026.05.048

Influence of different moisture content on shear strength of tailings under repeated direct shear

LIU Wulong, PAN Jianping

(School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Tailings are a key material for damming tailings ponds, and their shear strength is the core mechanical parameter for ensuring the stability of tailings dams. As a key variable, moisture content directly affects the mechanical properties of tailings. In order to reveal the influence of moisture content on shear strength, the shear performance of tailings with moisture contents of 5.131%, 15.000% and 26.324% is studied by combining repeated indoor direct shear experiments and numerical simulation of PFC particle flow, respectively. The results show that: 1) The moisture content has a controlling effect on tailings strength, and the peak strength shows a trend of “first increasing and then decreasing” with the increase of moisture content, reaching the maximum value at 15.000%; 2) Repeated shear causes significant deterioration of strength. The strength of the sample tends to be stable after the fourth shear, and the internal friction angle and cohesion show a decreasing trend; 3) Macro-meso analysis reveals that, under high normal stress, the interparticle occlusion is enhanced, which makes the rising section of the shear stress-displacement curve steeper and the peak strength appear faster; under low normal stress, the particles are prone to rolling slippage, while the development of shear stress is relatively gentle. Based on the above laws, an empirical formula for peak shear strength of tailings considering the dual effects of moisture content and normal stress is established to provide key parameter support for the stability evaluation of tailings dams.

收稿日期: 2025-10-30

基金项目: 刘午龙(2000—),男,助理工程师,从事尾矿库稳定性分析方面的研究。

Key words: tailings; moisture content; shear strength; shear strength model; repeated direct shear experiments; PFC numerical simulation

在矿山资源开发与环境保护协同发展的背景下,尾砂的资源化利用已成为推动矿业可持续发展的关键途径^[1-3],其力学稳定性直接关系到充填采空区、构筑尾矿坝等工程的安全^[4-5]。尾砂抗剪强度是其稳定性的关键控制因素,然而在工程实践中,尾砂含水率易受降雨、地下水等环境因素影响而动态变化,导致其力学性能显著变化。因此,系统揭示含水率对尾砂抗剪强度的影响规律与内在宏细观影响机理,对矿山灾害防控具有重要的工程意义。

围绕含水率对土体抗剪强度的影响规律,国内外学者已取得系列成果。在试验方法上,夏才初等^[6]通过反复直剪试验,揭示了节理岩体抗剪强度随剪切次数呈“先骤降、后渐稳”的衰减特征;田丽霞等^[7]进一步证实,排水反复直剪试验所得残余强度与工程反演值误差小于3%,方法可靠性高。在含水率影响机制方面,林斌等^[8]指出重塑红黏土的黏聚力随含水率呈“先增后减”规律;李云鹏等^[9]在强膨胀土中定义了“含水率临界值”,超过该阈值后黏聚力损失可达76.9%;在研究含水率对下蜀土不同剪切方式的试验中,施威等^[10]发现快剪条件下含水率对黏聚力的影响最为显著。数值模拟方面,谭捍华等^[11]通过颗粒流模拟验证了击实土样可替代原状土进行强度测试的可行性;李晓丽等^[12]则从剪应力-位移响应中解析了颗粒级配与剪胀特性的内在关联。然而,现有研究仍存在明显不足:一是多聚焦于红黏土、膨胀土等黏性土,对尾砂这类“弱黏性/无黏性”散体材料的系统研究较少;二是对其在各含水率状态下的细观剪切机制尚不明确,未能揭示“含水率-宏微观力学特性演化”之间的内在关联。

为此,本文以赣州某矿山尾砂为研究对象,通过室内试验与颗粒流数值模拟相结合的手段,系统

开展以下研究:制备5.131%、15.000%、26.324%(饱和)3种含水率尾砂试样,通过开展反复直剪试验,获取其峰值与残余抗剪强度指标;构建各含水率条件下的PFC数值模型,揭示剪切过程中颗粒运动规律;最终通过宏细观结果对比,建立尾砂抗剪强度与含水率的定量关系,揭示其力学响应机制,为尾砂工程稳定性控制提供理论依据。

1 尾砂基本物理性质与试验方案

1.1 尾砂基本物理性质

试验所用试样取自江西赣州某尾矿库中,经室内筛分法^[13]测试获取颗粒的级配曲线如图1所示,该尾砂颗粒基本物理参数如表1所示。

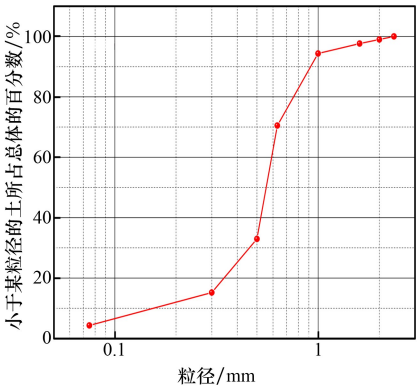


图1 尾砂粒径分布

1.2 室内反复直剪试验方案

试验通过反复剪切测定尾砂土体的残余抗剪强度,采用直剪仪开展排水反复直接剪切试验^[13]。试验时以恒定剪切速度为0.02 mm/min施加荷载,每剪切位移增量达0.4 mm(约需20 min)时,同步记录测力计及位移传感器读数。当剪应力达到峰值强度后继续剪切,直至累积位移达8~10 mm,以确保充分进入残余强度阶段。剪切完成后,将剪切盒缓慢退回至初始位置,插入固定插

表1 颗粒基本参数

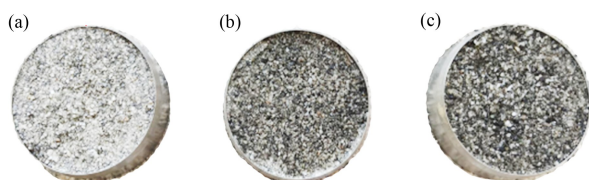
基本物理指标				粒度组成/%			
天然密度/ (×10 ³ kg·m ⁻³)	饱和密度/ (×10 ³ kg·m ⁻³)	干密度/ (×10 ³ kg·m ⁻³)	天然含 水率/%	饱和含 水率/%	>1.000 mm	[0.075,1.000 mm]	<0.075 mm
0.922	1.151	0.836	5.131	26.324	5.67	90.01	4.32

销固定试样。复位后静置 30 min, 使残余应力得以释放。随后, 按照相同参数重复剪切操作。此过程循环进行, 直至相邻两次剪切的测力计读数差异 $< 10\%$, 此时视为残余强度已趋于稳定^[14]。稳定状态下的剪应力计算公式:

$$\tau = CR \quad (1)$$

式中: τ 为试样所受的剪应力, kPa; R 为测力计读数; C 为测力环的率定系数, kN/mm。

试验采用“含水率梯度+法向应力梯度”的双变量设计。为考察含水率对残余强度的影响, 设置 3 种含水率状态的尾砂试样: 根据室内实测结果, 尾砂天然含水率为 5.131%, 饱和含水率为 26.324%, 另取一中间值 15.000% 作为第三个含水率水平。尾砂试样示意如图 2 所示。



含水率/%: (a) 5.131; (b) 15.000; (c) 26.324

图 2 不同含水率尾砂样本示意

1.3 PFC 颗粒流数值模拟方案

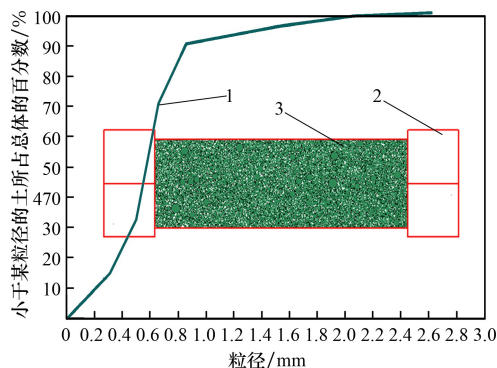
采用颗粒流离散元方法的 PFC2D 软件建立颗粒材料直剪试验的数值模型, 通过数值模拟分析颗粒材料在剪切荷载作用下的力学响应和变形特性, 其中数值模型与物理试验模型保持一致。尾砂的弹性模量为 1.0×10^7 Pa, 泊松比为 0.25^[15]。采用线性接触模型, 尾砂的法向刚度 K_n 可依据线性弹簧接触模型中法向刚度的计算公式确定。

$$K_n = \frac{4}{3} \sqrt{R_{eq} \delta_{max}} E_{eq} \quad (2)$$

$$E_{eq} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \quad (3)$$

式中: δ_{max} 为颗粒最大重叠量(取颗粒最大直径), mm; R_{eq} 为颗粒等效半径(取中值粒径), mm; E_{eq} 为颗粒等效杨氏模量。 $K_n = 6.5 \times 10^6$ Pa (K_n 为法向刚度), $K_s = 0.75K_n = 4.875 \times 10^6$ Pa (K_s 为切向刚度)。局部阻尼系数取 0.2, 采用线性接触模型模拟弱黏性颗粒材料(如砂土)的颗粒间黏聚力相互作用, 通过法向刚度、切向刚度和摩擦系数表征接触特性(不含黏结强度成分)。

基于物理模型的颗粒级配曲线, 采用 7 个粒径区间生成颗粒, 共生成颗粒 15 290 个, 模型示意如图 3 所示。



1—PFC 模拟颗粒级配曲线; 2—PFC 模拟剪切盒; 3—PFC 模拟尾砂。

图 3 剪切数值模型

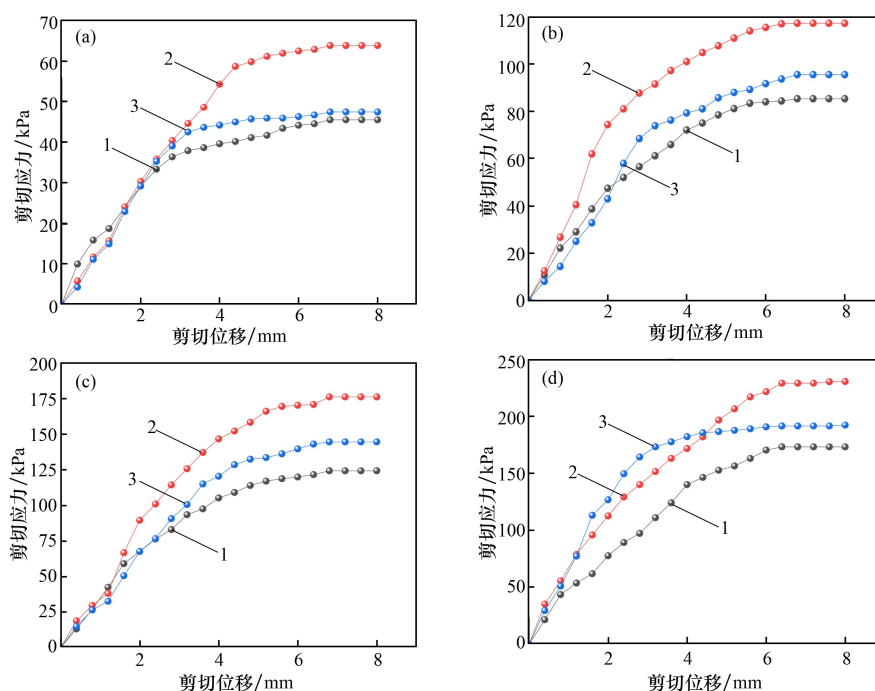
采用 PFC2D 模拟不同含水率下尾砂反复直剪试验, 模拟过程分为 3 个阶段: 1) 固结阶段: 采用伺服控制算法施加法向应力, 其设置与室内试验一致(100、200、300、400 kPa); 实时监测上、下加载板的接触力, 计算当前实际应力状态, 并基于应力偏差自动调整加载板速度, 以实现目标围压的精确控制。2) 剪切阶段: 记录剪应力与剪切位移关系; 待剪应力稳定时, 视为达到强度稳定。3) 监测与数据采集阶段: 剪切位移以上加载板的水平位移为测量基准, 剪应力通过计算下加载板及两侧约束墙所受水平接触力的合力确定。

2 宏观试验结果与分析

2.1 宏观直剪试验结果

为探究含水率对尾砂抗剪强度的宏观影响规律, 对 3 种不同含水率(5.131%、15.000%、26.324%)的尾砂试样进行不同法向应力水平的直剪试验。不同含水率尾砂的剪切应力结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 在相同法向应力下, 尾砂试样的峰值剪切强度随含水率升高呈“先升后降”的变化趋势。以 100 kPa 法向应力下的直剪试验数据为例, 5.131% 含水率尾砂因颗粒间黏聚力较弱、孔隙水作用不明显, 仅在约 3 mm 剪切位移时发生突发性剪切破坏, 体现出细粒散体典型的脆性失



法向应力/kPa: (a) 100; (b) 200; (c) 300; (d) 400

含水率/%: 1—5.131; 2—15.000; 3—26.324。

图 4 不同含水率下剪应力与剪切位移关系曲线

稳特征; 15.000% 含水率尾砂的颗粒间形成适度胶结作用, 剪切破坏位移延长至约 5 mm, 破坏过程更平缓, 不仅体现了含水率对尾砂抗剪强度的提升作用, 更揭示了水分通过改变颗粒间作用状态对尾砂剪切变形模式的显著影响。

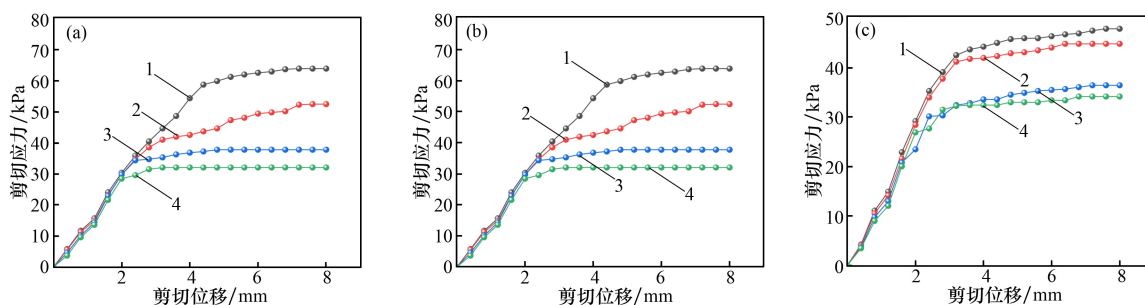
不同含水率尾砂样本在 100 kPa 法向应力下的剪应力—位移关系试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知: 在反复剪切过程中, 尾砂剪切强度随剪切次数的增加呈递减趋势, 最终趋于稳定。具体表现: 含水率为 5.131% 的尾砂, 首次剪切强度为 45.51 kPa, 随后依次降至 42.08、39.41 kPa,

第四次剪切后稳定在 38.46 kPa。含水率为 15.000% 的尾砂首次剪切强度最高, 达 63.85 kPa, 后续快速降至 52.42、37.74 kPa, 第四次剪切后为 32.02 kPa。26.324% 含水率尾砂: 首次剪切强度为 47.84 kPa, 之后逐步降至 44.79、36.40 kPa, 第四次剪切后稳定在 34.12 kPa; 所有含水率尾砂均在第四次剪切后残余强度均基本稳定。

绘制不同含水率尾砂反复直剪后的剪应力与正应力关系曲线, 如图 6 所示。

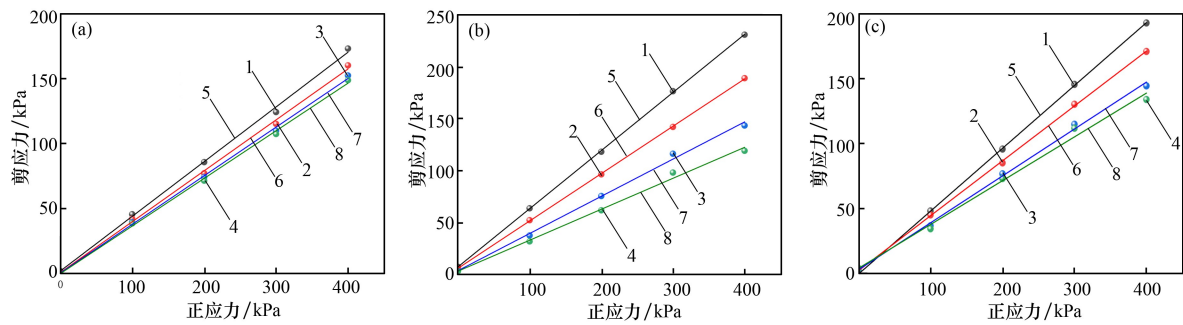
由图 6 可知: 黏聚力随含水率增加呈“先升后降”趋势, 5.131% 含水率时 1.7 kPa, 15.000%



含水率/%: (a) 5.131; (b) 15.000; (c) 26.324

1—第一次剪切; 2—第二次剪切; 3—第三次剪切; 4—第四次剪切。

图 5 剪应力与剪切位移关系曲线



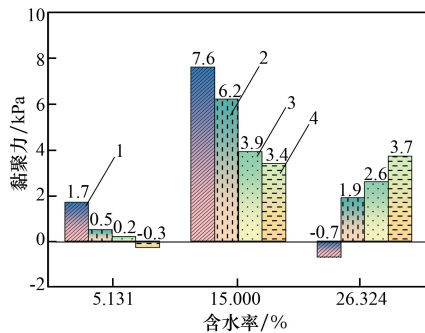
含水率/%: (a) 5.131; (b) 15.000; (c) 26.324

1—第一次剪切; 2—第二次剪切; 3—第三次剪切; 4—第四次剪切;

5—第一次剪切拟合; 6—第二次剪切拟合; 7—第三次剪切拟合; 8—第四次剪切拟合。

图 6 不同含水率下反复直剪内摩擦角拟合曲线

含水率时达最大值 7.6 kPa, 26.324% 含水率时降至 -0.7 kPa(此时黏聚力出现微小负号, 本质是“黏聚力趋近于 0”的数学体现^[11]), 这与既有研究黏聚力先增后减的规律一致^[8]。不同含水率样本在反复直剪作用下的黏聚力变化情况如图 7 所示。



1—第一次剪切; 2—第二次剪切;

3—第三次剪切; 4—第四次剪切。

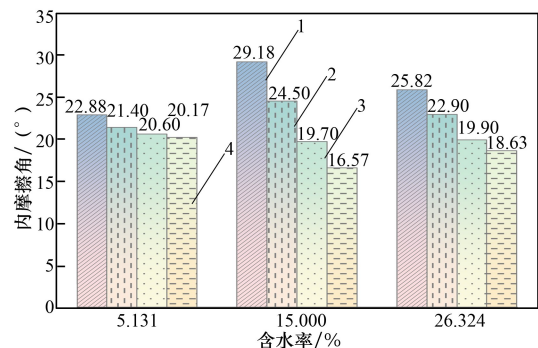
图 7 不同含水率样本反复直剪黏聚力

试验所用尾砂依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)划分为粗砂。其在干燥状态下几乎无黏聚力, 但因颗粒咬合紧密, 剪切初期颗粒间摩擦与咬合作用对强度起主导作用。随着含水率升高, 尾砂孔隙间形成毛细压力; 在此作用下, 颗粒间黏结力显著增强, 内摩擦角也随之增大。当含水率接近饱和时, 孔隙中充满自由水, 尾砂颗粒间水膜润滑作用增强, 咬合作用减弱, 黏结力逐渐减小直至消失。含水率饱和的尾砂剪切过程以颗粒滑动为主, 无明显结构破坏(图 8)。

不同含水率样本在反复直剪作用下的内摩擦角变化情况如图 9 所示。由图 9 可知: 尾砂抗剪



图 8 反复直剪作用下 26.324% (饱和) 含水率尾砂直剪破坏



1—第一次剪切; 2—第二次剪切;

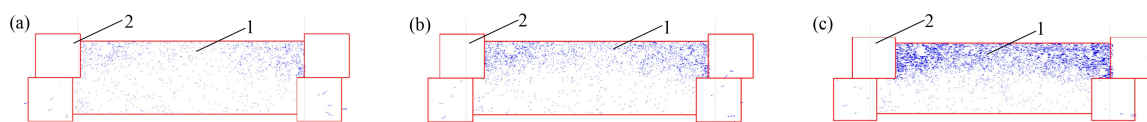
3—第三次剪切; 4—第四次剪切。

图 9 不同含水率样本反复直剪内摩擦角

强度与内摩擦角随含水率变化呈现“先增大、后减小”的规律^[16]。经反复直剪后, 5.131% 含水率尾砂内摩擦角较初始值下降约 11.8%, 15.000% 含水率尾砂内摩擦角较初始值下降约 43.2%, 26.324% 含水率尾砂内摩擦角较初始值下降约 27.8%。

2.2 基于 PFC 模拟的细观机制分析

以 15.000% 含水率尾砂在 100 kPa 正应力下的直剪试验为例, 剪切过程中尾砂颗粒的位移矢量如图 10 所示。



位移/mm: (a) 2.0; (b) 4.5; (c) 7.0

1—PFC 模拟颗粒矢量方向; 2—PFC 模拟剪切盒。

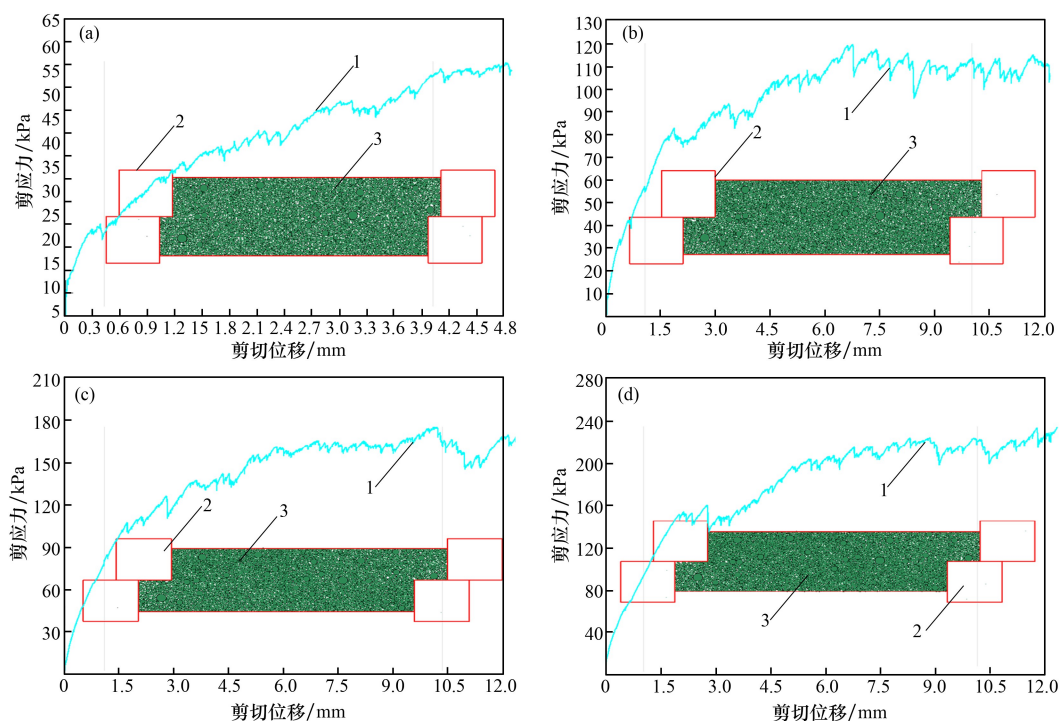
图 10 颗粒运动位移矢量

剪切初期(位移 < 2.0 mm), 颗粒位移呈均匀分布, 未形成明显剪切面; 剪切中期(位移 $2.0 \sim 5.5$ mm), 颗粒位移沿水平方向逐渐集中, 初步剪切位移带开始显现; 剪切后期(位移 > 5.5 mm), 剪切位移带完全发育成型, 带宽约为 10 mm, 颗粒运动以“滚动 + 滑动”复合模式为主。该特征进一步证实了既有研究^[12]的结论, 即尾砂因“弱黏性”形成以颗粒位移为核心的剪切破坏模式。

以 15.000% 含水率尾砂不同正应力下的直剪为例, 模拟不同法向应力下尾砂直剪试验, 其剪应力 - 位移关系模拟如图 11 所示。

宏观直剪试验中, 剪应力大小与正应力呈现显著正相关。这一现象的本质: 正应力增大时, 颗粒间摩擦作用增强, 咬合作用同步加剧, 最终

直接推动剪应力提升。由图 11 可知: 在 PFC 数值模拟中, 上述颗粒间细观力学行为得到较为真实地还原, 因此模拟结果同样呈现“正应力越大, 剪应力越大”的规律, 其力学特征与宏观直剪试验完全契合。此外, 不同正应力水平下, 剪应力达峰值的过程存在明显差异: 高正应力(如 400 kPa)时, 过程相对更短, 曲线上升段更陡峭; 低正应力(如 100 kPa)时, 过程相对更缓, 上升段斜率更小。产生该差异的原因: 高正应力下, 颗粒体系内部需经历更“漫长”的调整过程才能达到极限剪切状态。具体表现: 颗粒间咬合、错动等细观作用的演化更为缓慢(非快速集中发生), 最终导致剪应力上升速率放缓。



法向应力/kPa: (a) 100; (b) 200; (c) 300; (d) 400

1—PFC 模拟 $T-u$ 曲线; 2—PFC 模拟剪切盒; 3—PFC 模拟尾砂。

图 11 不同法向应力下 15.000% 含水率尾砂剪切数值模拟

3 抗剪强度经验模型的建立与验证

不同含水率下的直剪试验与 PFC 数值模拟直剪试验数据如表 2 所示。

表 2 不同含水率下直剪试验与 PFC 数值模拟结果对比

含水率/%	试验类型	法向压力/kPa			
		100	200	300	400
5.131	物理实验	45.51	85.68	124.33	173.26
	PFC 模拟	41.69	78.34	111.21	159.84
15.000	物理实验	63.85	118.17	176.31	230.63
	PFC 模拟	57.66	113.58	168.26	223.72
26.324	物理实验	47.84	95.49	145.24	192.51
	PFC 模拟	43.16	83.63	128.95	179.67

基于室内试验,引入含水率与法向应力双变

$$T = \frac{(23.09 + 92.46 \varpi + 55.82\sigma - 0.17\sigma^2 - 19 \varpi\sigma)}{(1 - 4.75 \varpi - 0.7\sigma - 1.03 \varpi^2 + 5.55\sigma^2 - 0.002 \varpi\sigma)}, R^2 = 0.998 \quad (4)$$

式中: ϖ 为含水率,%; σ 为法向应力, kPa; T 为抗剪强度, kPa。

该公式可用于工程中尾砂抗剪强度的快速估算。

4 结 论

(1) 尾砂峰值抗剪强度随含水率增加呈非单调变化。在 15.000% 含水率时达到极大值。含水率通过改变颗粒间毛细力与润滑效应的平衡关系,显著影响其变形破坏特征。

(2) 不同含水率尾砂的抗剪强度随剪切循环次数增加均呈明显衰减趋势,在第四次剪切后基本稳定。内摩擦角随剪切循环次数增加持续衰减,表观黏聚力随含水率升高呈先增后减规律,这一规律符合细粒散体材料在反复荷载下的力学响应特征。

(3) 剪切位移带的形成经历“分散变形—局部化—完全发展”的渐进演化过程,最终形成以颗粒滚动与滑动为主导机制的宏观剪切位移带。高法向应力条件下,剪应力—位移曲线上升段斜率减小,反映了颗粒体系为实现极限平衡状态所经历的重新排列过程。

(4) 直剪过程可划分为剪切力强化与残余强度波动两个典型阶段。大位移剪切条件下,颗粒

量,拟合尾砂峰值抗剪强度与双变量的关系曲线如图 12 所示,并建立尾砂峰值抗剪强度经验公式。

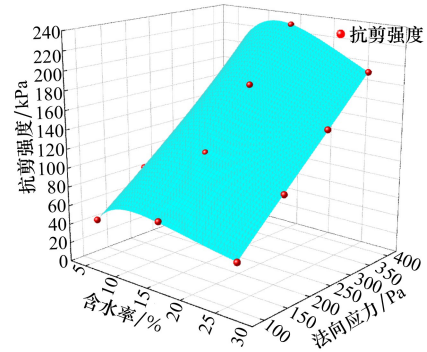


图 12 峰值抗剪强度拟合
尾砂峰值抗剪强度经验公式:

体系达到“破坏—重组”动态平衡,宏观上表现为剪应力围绕残余强度值波动,体现了散体材料趋近临界状态的典型特征。

(5) 基于试验数据,构建了含水率与法向应力双控型尾砂峰值抗剪强度经验公式,该公式可准确表征尾砂强度参数随环境条件的演化规律,为尾矿工程稳定性评估提供理论依据。

参考文献:

- [1] 袁平,刘石桥. 尾矿库工程设计与低碳概念[J]. 工程建设,2010,42(4):24-28.
- [2] 施灿海,刘明生,程立家,等. 尾矿综合利用研究进展及工程实践[J]. 中国矿业,2024,33(2):107-114.
- [3] 吴浩. 我国尾矿资源综合利用研究进展与展望[J]. 资源信息与工程,2022,37(3):102-104.
- [4] 辛保泉,万露,赵海燕,等. 尾矿砂物理力学性能测试及坝体稳定性分析[J]. 中国测试,2019,45(6):35-41.
- [5] 张鹏羽,喻明军,赵强,等. 某矿山尾砂配比粉煤灰制备充填材料试验研究[J]. 工程建设,2023,55(3):1-5.
- [6] 夏才初,宋英龙,唐志成,等. 反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3589-3594.
- [7] 田丽霞,周黎月,张丁宁. 红黏土滑坡治理工程中排水反复直接剪切试验研究[J]. 工程勘察,2024,52(7):9-14.

-
- [8] 林斌, 田竹华, 陈雨漫. 含水率对重塑红黏土反复抗剪强度影响试验研究[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(5): 680-689.
- [9] 李云鹏, 林一芄, 张晶旭. 基于反复直剪试验的强膨胀土强度特性研究[J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(1): 86-91.
- [10] 施威, 魏继红, 宋京雷, 等. 含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 97-101.
- [11] 谭捍华, 孟庆山. 千枚岩残坡积土大型直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 360-363; 668.
- [12] 李晓丽, 翟涛, 张强. 反复剪切作用下砒砂岩土壤力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 154-159.
- [13] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [14] 章健. 黄土滑坡运动模式及滑距预测方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [15] 顾晓鲁. 地基与基础(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [16] 霍焕臣. 渗透破坏作用下尾矿库溃坝机理试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.