

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300354



本刊网刊

固-液相变含水率区间松散土石体中细粒组分 抗剪特性试验

江泊洧¹, 王汉武¹, 黄玲², 张静波³

(1.长江水利委员会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; 2.长江水利委员会长江科学院信息中心, 湖北武汉430010; 3.中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北武汉430056)

摘要: 松散土石体在泥水作用下易引发地质灾害, 其中细粒组分在高含水率下的抗剪性能骤然劣化是触发相变失稳的重要因素之一。基于环剪试验, 对三峡库区某滑坡松散土石体试样设计试验方案, 研究细组构由软塑~流塑发展的固-液相变全过程抗剪特性演化规律。结果表明: 松散土石体试样为粗细组分二元特征较强的级配不良土体介质, 其中, 细粒组分在原状干密度条件下的饱和含水率为23.6%, 液塑限分别为27.2和18.1, 据此选定含水率23.6%~29.0%范围中的5个取值制定试验方案, 可完整覆盖细粒组分的软塑~流塑相变; 含水率为25.0%、26.0%和27.0%时, 试样处软塑状态, 在低法向压力下均可顺利开展环剪试验; 其中, 含水率25.0%试样恰进入软塑态, 较含水率23.6%试样的峰值和残余内摩擦角分别降低23.5%和18.6%, 峰值和残余黏聚力均降低超过80%。含水率为28.0%和29.0%时, 试样已处于流塑状态, 仅在无法向压力时可顺利开展环剪试验, 且抗剪强度极低, 其物理意义贴近于高黏稠泥浆的黏滞性; 根据试样的黏聚力 c 在进入软塑状态时基本丧失, 而内摩擦角 φ 表现为在软塑区间随含水率增加而逐步降低, 进而触及液限骤然丧失的特性分析, c 和 φ 劣化过程异步; 经单元体受力模式和概化分析认为, 相变前软塑状态试样静止侧压力系数 K_0 的激增缓解了 φ 值的大幅骤降。

关键词: 松散土石体; 细粒组分; 固-液相变; 环剪试验; 抗剪特性

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)01-0160-09

随着西部山区基础设施建设的不断深入, 大量水利水电、交通铁路、管线等重大工程存在着穿越松散滑坡泥石流堆积体的情况。由松散土石体变形或失稳破坏导致的滑坡泥石流灾害事件会对人民群众的生命财产安全构成重大威胁^[1-3]。

滑坡-泥石流相变破坏异常复杂, 无论是实验室手段还是野外观测手段, 在获取相变特性指标上都对实时采样和测量技术提出极高要求^[4]。松散堆积体往往以弱固结、不良级配、高渗透性土石混合体的形式存在, 且形成过程伴随着较剧烈的动力和裹挟过程(崩塌、滑坡、大变形等)^[5]; 另外, 从细观层面, 降雨、侵蚀、液化和冲击等作用下的扰动可能引发松散土石体结构破坏^[6-7]。对于其灾变变化, 不同学者考虑底床坡度、土体饱和度、黏粒含量、土体液化、降雨

强度和持时、土体内部震动和摩擦等因素^[8-10], 采用野外或室内模型试验进行研究。

滑坡泥石流松散土石体颗粒的二元特征较为显著, 粗粒组分主要为块石、砾石等, 而细粒组分主要为粉粒与黏粒构成的细粒土。由于物质来源、地形地貌、运动过程与含水状态等条件不同, 粗粒与细粒组分相对含量也存在较大差异^[11-12], 但大多情况下, 两者均达不到自主主导土石混合体物理力学特性的相对含量^[13-14]。在此复杂条件下, 松散体的稳定性受细粒组分的含水率变化影响显著^[15-18]。

现有不少研究表明: 细粒组分对松散土石体的结构状态、渗透性、流变性、屈服应力、运动形态和稳定性均具有显著的影响^[19-21]。Jiang等^[22]通过运动浆体物理参数(如容重、固体体积分数)等指标判断滑

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979009); 中央级科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019191/YT)

作者简介: 江泊洧(1984—), 男, 正高级工程师, 博士。研究方向: 粗粒土力学特性试验及岩土工程数值计算。E-mail: jiangjw1023@163.com

网络出版时间: 2024-01-11 00:00:00 网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20240110.0942.001>

坡是否转化为泥石流;Chen等^[23]认为相较于整体滑动的滑体,碎屑流与水掺混的概率更大,即使在较小的降雨和沟道径流下,也可能快速提高混合体的含水率;Guo等^[24]研究发现少量的降雨便可将沟道的松散堆积物启动并迅速形成泥石流;Cui等^[25]发现当降雨入渗至宽级配土中时,孔隙间流体的水动力作用会引起孔隙内的细颗粒迁移,若迁移的细颗粒持续地从坡体内部流失,土体内部的局部失稳将逐渐诱发整体失稳,而若存在大面积孔隙堵塞将形成滞水面,为泥石流启动提供破坏面和充足水源^[26]。归纳以上不难看出:一方面,细粒土在土石混合物中渗透性相对较低,在降雨、动力荷载作用或快速变形条件下,孔隙水排出缓慢,易形成超孔隙水压力,大幅降低土体的有效应力与抗剪强度;另一方面,堆积体中细小黏土颗粒可与水发生水合作用,在粗颗粒之间形成泥膜和高黏滞层,起到润滑和黏滞作用,进一步降低了土体的强度^[27]。

张明等^[28]利用环剪试验模拟了青宁乡滑坡转化泥石流的长距离滑动剪切过程,得出滑体在滑动剪切过程中孔隙水压力上升,底部形成粉土液化层,大大降低了滑体的整体稳定性,并将该效应称为软弱基座效应。吴和秋等^[29]通过现场调查与室内试验研究了滑坡型泥石流转化机理,结果表明滑坡体快速运移过程中细颗粒物质发生剪缩,产生超孔隙水压力,土体抗剪强度急剧下降甚至发生液化,最终发生灾变;并提出松散堆积体灾变过程中细粒土部分临界初始含水率约为20%的经验判断,其本质是一个含水率不断增大直至发生相变破坏的过程。

综上所述,在松散土石体与水耦合过程中,细粒组分在高含水率和大位移状态下的力学特性,特别是抗剪特性演化规律,直接影响松散土石体发生相变,进而易引发整体失稳^[30-31]。

本文以三峡库区某滑坡松散堆积体为研究对象,以环剪试验为主要技术手段,以含水率为主要控制指标,对土石体中细粒组分在固-液相变过程中抗剪强度的演化规律进行研究,以期为进一步研究松散土石体的变形破坏机制提供参考。

1 松散土石体采样及其基本性质

研究试样取自三峡库区万州某滑坡松散土石堆积体,如图1所示。该堆积体在新近降雨后发生了较大变形,并在接近冲沟底部通过应力重分布达到新的平衡状态。在采集该松散土石体全组构试样的同时,对其中细粒组分较为富集处采用环刀取样,测定新近变形后松散土石体细粒组分的物理特性,用于开展室内环剪试验时备样参考。



图1 现场试样采集

Fig. 1 Sample collection in site

据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对松散土石体全组分与细粒组分颗粒级配及界线含水率进行测试,颗粒级配曲线如图2所示。

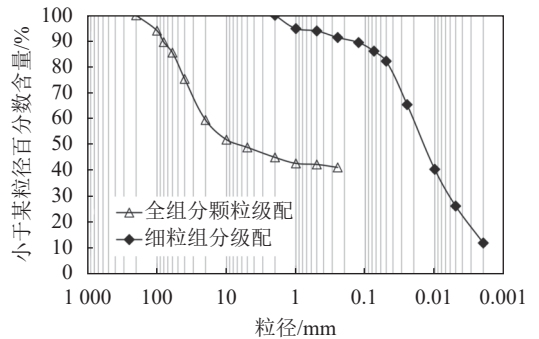


图2 试样颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves for the sample

分析图2可知:

1)该新近变形堆积形成的松散土石体动力裹挟成因显著,粗粒、细粒组分二元特征典型;级配不良,粒径大于1 cm和小于2 mm颗粒的质量百分比分别为约50%和45%,2 mm~1 cm之间的颗粒含量很少。这种粗、细粒组分含量相差不大的情况下,细粒组分对试样整体力学特性,尤其是泥水耦合后相变过程的影响较大,这也是本文针对细粒组分研究其在固-液相变含水率区抗剪特性的主要原因;另外,对粒径2 mm以下细粒组分也可直接开展环剪试验,无需缩尺或做颗粒剔除,确保了研究成果的可靠性。将粒径小于2 mm的颗粒视为细粒组分,并绘制了细粒组分的颗粒级配曲线(图2)。

2)对于细粒组分,黏粒(<5 μm)含量约占26.27%,粉粒(5~75 μm)含量约占59.87%。按照规范中的液塑限联合测定法,对细粒组分的界限含水率进行了测定,其塑限和液限分别为18.1和27.2。

环刀采集的松散土石体细粒组分天然含水率为22.1%,对其充分饱和后的含水率为23.6%,液性指数 $I_L=0.60$,处于可塑状态。

2 细粒组分的环剪试验方案

环剪试验兼具精确化快速加载和定向大剪切应

变等优势条件,非常适用于测试高含水率、近地表低法向压力环境土样的抗剪特性。

2.1 试验设备

采用英国VJ Tech环剪仪开展试验(图3)。该环剪仪主要由剪切控制系统、数据采集系统和法向应力加载系统组成。试样形态为外径10 cm、内径7 cm、高5 mm的土环,体积为 20 cm^3 。

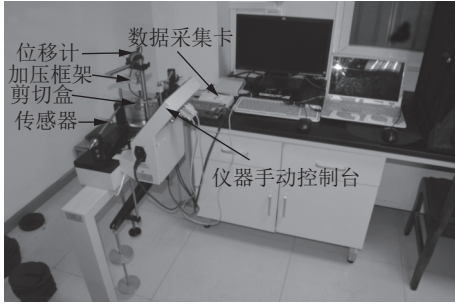


图3 VJ Tech环剪仪

Fig. 3 VJ Tech ring-shear test apparatus

2.2 试验方案及流程

以环刀测定获取的原状干密度条件下饱和含水率23.6%为最低含水率,结合其界限含水率,依照软塑~流塑相变过程全覆盖的试验思路,设计开展6组环剪试验,见表1。

表1 环剪试验方案

Tab. 1 Schemes of ring-shear test

编号	法向应力/kPa	含水率/%	液性指数(状态)	试样干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	0, 25, 50	23.6	0.604 (可塑)	1.642
2	0, 25, 50	25.0	0.758 (软塑)	1.605
3	0, 25, 50	26.0	0.868 (软塑)	1.579
4	0, 25, 50	27.0	0.978 (软塑)	1.555
5	0, 25, 50	28.0	1.088 (流塑)	1.531
6	0, 25, 50	29.0	1.198 (流塑)	1.508

鉴于研究针对相变前后高含水率区间试样,加之松散土石体自身赋存于近地表,因此从突出“松散”特征和避免法向压力过大而将软塑~流塑状试样挤出的角度,选取了0、25、50 kPa的法向应力,这也符合实际条件下松散土石体的实际赋存条件。结合实际松散土石体相变过程迅速的不排水剪切实际情况和避免剪切速率过高而造成高含水率试样挤出的因素,经尝试后,确定剪切速率为 0.8 mm/min 。试验流程如下:

1) 试样批量化制备。鉴于试验工况较多,为降低人为因素造成的试验误差,采用批量制备试样的方式,即:按表1中相应干密度称取适量烘干土样,量取对应含水率的水并均匀喷洒于干土样上,充分拌匀后装入盛土容器内盖紧静置过夜,润湿一昼夜后供环剪试验备用(图4)。

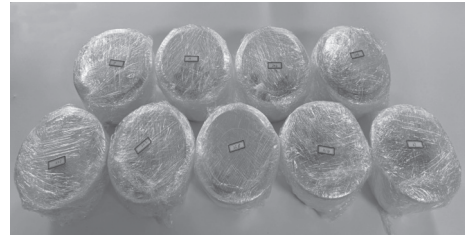


图4 环剪试验备样

Fig. 4 Sample preparation for ring-shear tests

2) 装样。将装有土样的剪切盒置于剪切台上,旋入插销固定剪切盒;在无法向压力条件下,放置上盖后待剪;其他条件下,放置上盖并加载相应法向应力待剪。

3) 试验方案可靠性验证。对于每个含水率条件,在无法向应力条件下各进行3个对比试验。主要原因是无法向压力对试样均匀性要求最高,没有施加法向应力后的二次调整过程;经检验,试验结果的一致性非常好,其原因除试样批量制备均匀性良好之外,还与环剪试验不存在人为设定破坏面的特点有关,加之试样的边界和排水条件均准确量化控制,最大程度地降低了试验的偶然误差。

4) 剪切过程与数据采集。按既定的剪切速率 0.8 mm/min 开展试验,并采集应力变形数据;完成剪切过程,对破坏试样状态进行拍照。

3 试验成果分析

3.1 液限以下试样抗剪特性

液限含水率以下的4组试验均可按设定方案顺利完成环剪试验,各试样剪切破坏情况如图5所示;图6为4个含水率条件下试样剪应力-位移曲线;图7为各试样峰值和残余抗剪强度。

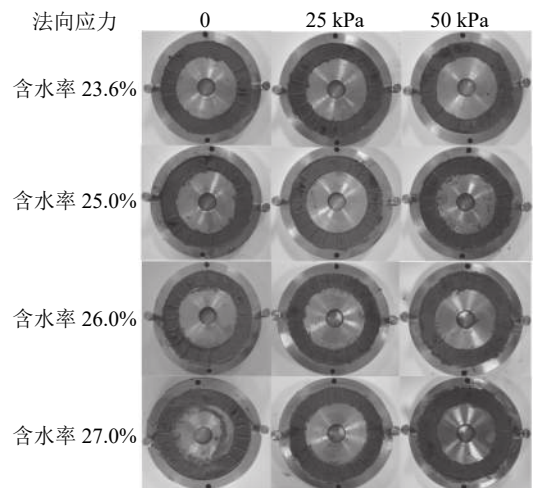


图5 含水率低于液限的试样环剪破坏图

Fig. 5 Failure photos of ring sheared samples when water content below liquid limit

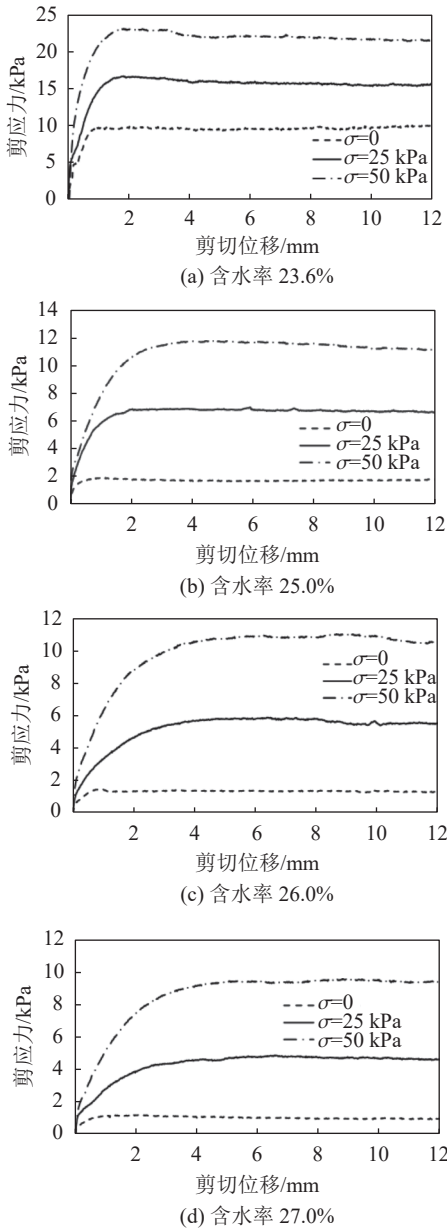


图 6 含水率低于液限的试样剪应力-位移曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curves when water content below liquid limit

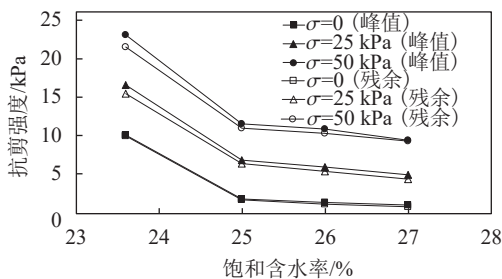


图 7 抗剪强度与饱和含水率关系曲线

Fig. 7 Relation curves of shear strength-saturated water content

试验结果分析如下:

1) 试样在原状干密度条件下的饱和含水率为

23.6%, 该状态下的抗剪强度显著大于其他试样; 在该含水率下, 试样处于可塑状态, 与其余3个含水率下软塑状态试样呈现显著差异。由图6(a)可以看出, 该含水率下试样剪切刚度显著高于其他试样, 在 $\sigma=25、50$ kPa法向压力作用下, 剪应力具有峰值特征, 各试样的应力-位移曲线无明显的在峰值后软化的现象, 而是呈缓慢下降趋势, 此处将峰值后的残余应力定义为峰值后至12 mm剪切位移的最小值剪应力。

2) 由表1可知, 25.0%、26.0%和27.0%含水率下的试样已进入软塑状态。其中, 25.0%含水率试样的液性指数为0.758, 恰刚进入软塑状态。软塑区间试样的抗剪强度随含水率增加缓慢下降, 这与软塑状态下试样结构已趋于不稳定相关; 从曲线形态来看, 峰值及残余抗剪强度差异较小。

3) 对比4个含水率条件下试样在无法向压力时的抗剪强度可以看出, 可塑状态含水率23.6%下的抗剪强度远高于软塑状态3个含水率下相应的抗剪强度, 且软塑状态3个含水率下试样的抗剪强度量值及曲线形态非常接近, 反映了贴近地表极低法向压力下的松散土石体在过饱和过程中抗剪强度的骤减特性。

图8进一步绘制了4个含水率下, 试样抗剪强度与法向应力的拟合关系曲线; 图9为内摩擦角和黏聚力与饱和含水率的关系曲线。

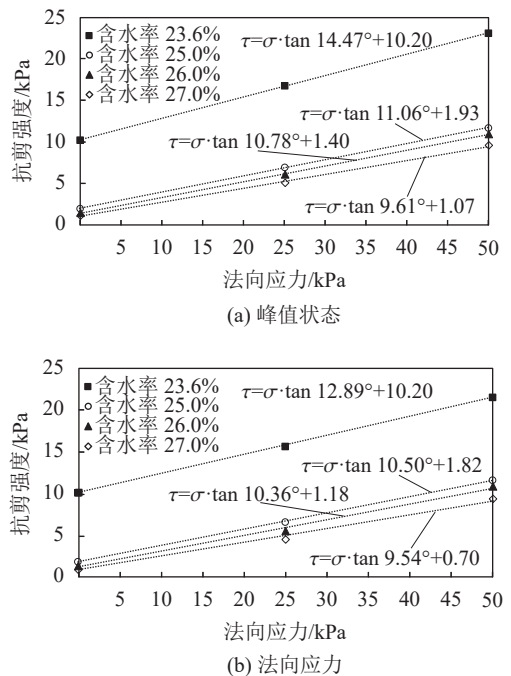


图 8 各饱和含水率下抗剪强度与法向应力拟合曲线
Fig. 8 Fitting curves of shear strength-normal stress under each saturated water content

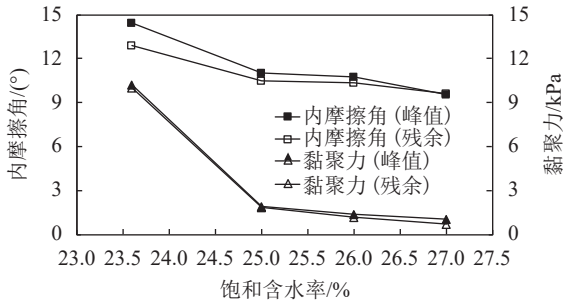


图 9 抗剪强度指标与饱和含水率关系

Fig. 9 Relationship curves of shear strength parameters - saturated water content

分析图8、9可知:

1) 在天然干密度下饱和后, 试样峰值抗剪强度参数为内摩擦角 14.47° , 黏聚力 10.20 kPa ; 残余抗剪强度参数为内摩擦角 12.89° , 黏聚力 10.02 kPa , 劣化幅度约为11%。

2) 在25.0%、26.0%和27.0%含水率下, 试样峰值抗剪强度参数为内摩擦角 $9.61^\circ\sim 11.06^\circ$, 黏聚力 $1.07\sim 1.93\text{ kPa}$, 残余抗剪强度参数为内摩擦角 $9.54^\circ\sim 10.50^\circ$, 黏聚力 $0.70\sim 1.82\text{ kPa}$ 。软塑区间试样抗剪强度衰减速度较缓, 且由于试样已经呈现半流体状态, 其峰值和残余抗剪强度的差异性较小, 这有助于解释松散土石体在灾变前的大变形特征。

3) 含水率为25%的试样恰进入软塑区间, 与可塑状含水率23.6%试样相比, 峰值和残余内摩擦角分别降低19.8%和18.6%, 峰值和残余黏聚力均降低超过80%。该特征揭示了可塑~软塑区间试样内摩擦角和黏聚力参数劣化过程的异步特性, 黏聚力的劣化呈突发性丧失, 而内摩擦角的劣化过程相对缓和。

从土力学原理不难解释以上结论: 在土发生固-液相变前, 内摩擦角从细观上仍由剪切带上颗粒的摩擦作用形成, 含水率上升引起的润滑效应会逐步降低摩擦系数, 但不存在突变的理论基础。黏聚力表现为黏性土颗粒间的黏结力, 试样均为重塑样, 不存在结构性破坏问题, 当其由可塑过渡到软塑后, 试样已具有一定的流动性, 土颗粒间的相互作用发生质变。以上分析与图6(b)~(d)中同属软塑状态下无法向压力时的剪应力发展过程基本相同的测试结果吻合。

3.2 液限以上试样抗剪特性

为研究固-液相变过程, 本文选取的含水率区间还覆盖了28.0%和29.0%两个高于液限的含水率状态。

从试验情况来看, 这两种含水率条件下, 试样状态已发生质变, 具体表现为: 仅能在无法向压力时可开展环剪试验; 一旦施加法向应力, 即便尝试性地施加 10 kPa 法向应力, 试样即从剪切盒缝隙挤出, 无法

在稳定加载条件下开展试验, 不具有科学测试的意义, 试样的流态特征显著。

图10为无法向压力时, 液限以上两个含水率条件下试样的环剪破坏状态。图11为对应的剪应力-剪切位移曲线。



(a) 含水率 28.0%

(b) 含水率 29.0%

图 10 含水率高于液限的试样环剪破坏图

Fig. 10 Failure photos of ring sheared samples when water content above liquid limit

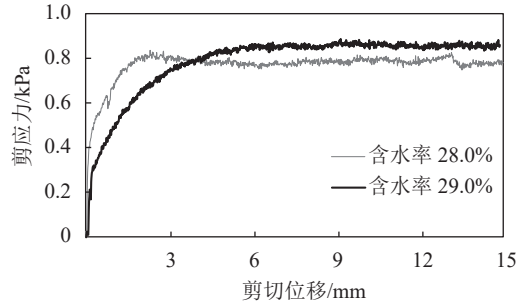


图 11 含水率高于液限试样剪应力-剪切位移曲线

Fig. 11 Shear stress-displacement curves when water content above liquid limit

分析图10、11可知:

1) 由图10可知, 含水率为28.0%和29.0%时, 试样已呈显著的流态泥状, 与图5中含水率27.0%的试样差异显著, 这也验证了液限含水率的科学意义。

2) 由图11可知: 无法向压力时, 虽可开展环剪试验, 但其抗剪强度最大值仅 0.8 kPa , 稍加法向应力后, 流塑态试样即可挤出, 表明其无抗剪强度; 由此来看, 一旦含水率触及液限, 抗剪强度骤然丧失, 这与流体无抗剪强度的理论基础吻合。另一方面, 试样呈现的极低抗剪强度仍可视作流塑状态试样的黏聚力, 但其物理意义应理解为黏稠泥浆的黏滞性。对比图6(b)~(d)中软塑状态下无法向压力时的剪应力曲线不难发现, 半流态的软塑状态和刚进入流态的流塑状态试样, 其黏聚力绝对量值的劣化呈渐变特征, 这与黏土颗粒受含水率逐步增加而关联性逐步减弱的理论逻辑一致。

综合分析研究选取的23.6%~29.0%含水率区间试样, 经历了可塑—软塑—流塑的固-液相变过程, 内摩擦角和黏聚力作为抗剪强度参数的两个组成部分, 在其中的作用机制存在很大差异。黏聚力在含水率达到软塑时表现出超80%的骤降, 而后随含水率的

提升而逐渐劣化,液限这个关键节点未干扰黏聚力的劣化趋势;内摩擦角的演化更受相变因素控制,可塑—软塑过程中,试样内摩擦角随含水率增加而缓慢下降,但当触及液限而发生相变时,内摩擦角骤然丧失。黏聚力的劣化突变性先于内摩擦角,两者具有异步性。

3.3 抗剪强度参数劣化异步过程机制

相变前试样黏聚力 c 和内摩擦角 φ 劣化异步过程机制复杂,以往研究中提及很少。通过查阅文献发现,在开展土力学试验过程中,不同含水率下试样静止侧压力系数 K_0 存在差异,而该因素往往容易被忽略。对于黏性土的相变过程,结合经典土力学原理分析,抗剪强度参数的劣化异步机制源于可塑—软塑—临近流塑过程中 K_0 的大幅提升。

在快速剪切状态下,细粒组分试样的低渗透性使其排水效应可忽略。对此,测得6个含水率下试样不排水状态下的 K_0 系数,结果见表2。由表2可知:23.6%含水率下可塑状试样 $K_0=0.56$;当试样恰达到软塑时, K_0 迅速激增至0.87,并缓慢增至临近流塑时的0.92;试样进入流塑状态时, $K_0=0.97$,与理论值1.0接近。

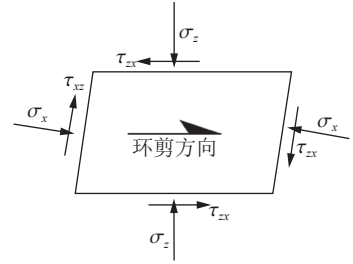
表 2 6种含水率下试样的 K_0 值

含水率/%	23.6	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0
K_0	0.56	0.87	0.91	0.92	0.97	0.97

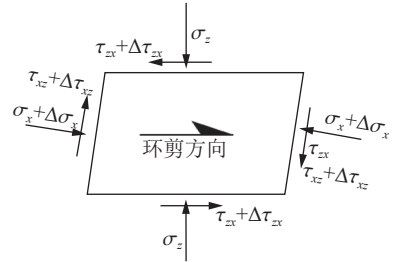
结合环剪试验的应力状态,其应力路径与单剪应力非常相似,单元体受力分析如图12所示。图12(a)为23.6%含水率可塑状试样, $K_0=0.56$ 。当含水率分别达到25.0%、26.0%和27.0%时,试样进入软塑状态。以图12(a)为基准, K_0 分别有0.31、0.35和0.36的激增,在相同竖向应力作用下,存在一个沿剪切方向的法向力增量 $\Delta\sigma_x$,其对试样抗剪强度的提升有直接作用,即增量 $\Delta\tau_x$,单元受力如图12(b)所示。

分析对环剪试验采集的数据发现,软塑状态试样在剪切破坏过程中的体积应变可忽略,表明试样在剪切过程中没有摩擦大变形,细观颗粒咬合效应可忽略,细观法向应力平稳。

在软塑状态的3个含水率(25.0%、26.0%和27.0%)条件下,客观上是不存在 $K_0=0.56$ 这种状态,其测得的剪应力(图6(b)~图6(d))系 K_0 激增后所反馈的抗剪强度。限于客观和理论机制分析上存在的矛盾,按照简单的数学加权思路进行初步定量概化,将测得的抗剪强度以含水率23.6%试样的 $K_0=0.56$ 为基准折减,力求从机制上揭示因水平向的法向力增量 $\Delta\sigma_x$ 而引起的剪应力增量 $\Delta\tau_x$,初步简单地剔除因 K_0 激增引起的抗剪强度参数提升。绘制剔除 K_0 激增影响因素后抗剪强度与法向应力的关系如图13所示。



(a) 可塑状态(基准)



(b) 软塑状态 K_0 激增后

图 12 环剪试验单元体受力图

Fig. 12 Unit force state in ring-shear test

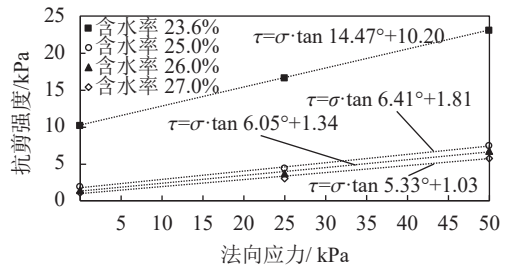


图 13 剔除 K_0 激增影响因素的抗剪强度与法向应力关系
Fig. 13 Relationship of shear strength-normal stress excluding the surge factor of K_0

结合图13与图8(a)没有考虑 K_0 因素的结果分析如下:

1) 概化剔除 K_0 激增对抗剪强度提升的正向因素后,恰进入软塑状态的25%含水率试样与23.6%含水率可塑状试样相比,峰值内摩擦角 φ 降低约55.8%,较图8(a)对应的19.8%降幅显著扩大,且软塑状态下3个含水率条件下的内摩擦角 φ 为5.33°~6.41°,基本保持稳定,未随含水率的增加而出现进一步骤降。

2) 黏聚力 c 实质上是无法向压力时的抗剪强度,与 K_0 无关;在不考虑拟合误差的前提下,图8(a)与图13无差别。

3) 在剔除 K_0 激增对 φ 值的提升效应后,黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的劣化趋于同步。因此可认为, K_0 激增在一定程度上缓解了试样由可塑进入软塑状态后内摩擦角 φ 的骤降。

4 结 论

选取三峡库区某滑坡松散土石体中的细粒组分

为研究对象,在完成现场取样和常规土工测试后,设计并开展了覆盖可塑—软塑—流塑含水率区间的环剪试验,研究了固—液相变过程中其抗剪强度及其演化特性,得到以下结论:

1)该松散土石体呈显著二元结构特征,对细粒组分单独开展试验研究物理意义明确。相比天然干密度对应的23.6%含水率条件,含水率25.0%时试样恰进入软塑状态,其峰值和残余内摩擦角降幅分别为21.2%和17.2%;而峰值和残余黏聚力降幅均超过80%,可视为基本丧失;在软塑区间25.0%、26.0%、27.0%这3个含水率下,内摩擦角随含水率提高呈缓慢下降趋势,且峰值和残余抗剪强度的差异性较小,这有助于解释松散土石体在灾变前的大变形特征。

2)根据对28.0%和29.0%两个高于液限含水率下的测试结果可知,仅在无法向压力的条件下可顺利完成环剪试验。这表明触及液限后,内摩擦角骤然丧失,这与流体无抗剪强度的理论基础吻合;与此同时,试样所呈现的极低抗剪强度可视为黏稠泥浆的黏滞性。

3)内摩擦角 φ 和黏聚力 c 在固—液相变过程中的劣化机制迥异。 c 在含水率触及软塑时出现超80%骤降,而后随含水率提升而逐渐劣化,液限前后 c 劣化趋势无改变; φ 的劣化过程受控于相变因素,可塑~软塑过程不涉相变, φ 随含水率增加而逐渐下降,但当触及液限时, φ 骤然丧失。黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的劣化过程异步。

4)对相变过程抗剪强度参数 c 和 φ 劣化过程异步机制进行深入分析,认为试样由可塑进入软塑后,静止侧压力系数 K_0 的激增在一定程度上缓解了试样由可塑进入软塑状态后内摩擦角 φ 的骤降;而在剔除 K_0 激增对 φ 值的提升效应后,黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的劣化基本同步。

研究采用动态呈现的方式揭示了松散土石体中细组构部分相变失稳过程,其中,对于内摩擦角 φ 和黏聚力 c 劣化异步机制的分析有助于诠释松散土石体失稳的内在机制。

参考文献:

[1] Yang Qiang, Wang Gaofeng, Li Jinzhu, et al. Formation conditions and the disaster modes of debris flows along middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 70–79. [杨强, 王高峰, 李金柱, 等. 白龙江中上游泥石流形成条件与成灾模式探讨[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 70–79.]

[2] Zhang Nan, Fang Zhiwei, Han Xiao, et al. The study on temporal and spatial distribution law and cause of debris flow

disaster in China in recent years[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 299–308. [张楠, 方志伟, 韩笑, 等. 近年来我国泥石流灾害时空分布规律及成因分析[J]. *地质前缘*, 2018, 25(2): 299–308.]

[3] He Songtang, Wang Daojie, Zhao Peng, et al. A review and prospects of debris flow waste-shoal land use in typical debris flow areas, China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105064.

[4] Chmiel M, Walter F, Wenner M, et al. Machine learning improves debris flow warning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 48(3): e2020GL090874.

[5] Xia Jianguo, Hu Ruilin, Qi Shengwen, et al. Large-scale triaxial shear test of soil-rock mixture with extra-diameter particles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(8): 2031–2039. [夏加国, 胡瑞林, 祁生文, 等. 含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(8): 2031–2039.]

[6] Sassa K. Mechanism of fluidized landslides[C]// *Proceedings of Symposium on Initiation, Motion and Prediction of Fluidized Landslides*. Tokyo: Japan Landslide Society, 2000: 1–26.

[7] Zhang Ming, Yin Yueping, Hu Ruilin, et al. Ring shear test for transform mechanism of slide–debris flow[J]. *Engineering Geology*, 2011, 118(3/4): 55–62.

[8] Banihabib M E, Tanhapour M. An empirical equation to determine the threshold for rainfall-induced landslides developing to debris flows[J]. *Landslides*, 2020, 17(9): 2055–2065.

[9] Hungr O, McDougall S, Bovis M. Entrainment of material by debris flows[M]// *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 135–158.

[10] Iverson R M, Reid M E, Logan M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 116–121.

[11] Zhang Zhenping, Fu Xiaodong, 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. [张振平, 付晓东, 盛谦, 等. 基于含石量指标的土石混合物非线性破坏强度准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1672–1686.]

[12] Jiang Qiangqiang, Xu Yangqing, Wang Hao. Research on shear deformation characteristics of soil-rock mixtures under different stone contents[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 951–958. [江强强, 徐杨青, 王浩. 不同含石量条件下土石混合物剪切变形特征的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 951–958.]

[13] Tang Jianyi, Xu Dongsheng, Liu Huabei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 93–102. [唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合物剪切特性的影响[J]. *岩土力学*,

- 2018,39(1):93-102.]
- [14] Yang Zhongping, Tian Xin, Lei Xiaodan, et al. Particle discrete element numerical study on factors of shear strength characteristics for soil-rock mixture[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 39-50. [杨忠平, 田鑫, 雷晓丹, 等. 土石混合料剪切特性影响因素的离散元数值研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 39-50.]
- [15] Wei Hong, Zhang Minquan, Wang Lansheng. Depositing characteristics of the debris flow and valuing to its slope stability[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(5): 456-459. [卫宏, 张民权, 王兰生. 泥石流堆积特征及其斜坡稳定性评价[J]. *山地学报*, 2001, 19(5): 456-459.]
- [16] Zhu Yingyan, Cui Peng, Chen Xiaoqing. Experiment on mechanism of slope failure of debris flow fan and stability analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(21): 3927-3934. [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): 3927-3934.]
- [17] Li Gao, Tan Jianmin, Wang Shimei, et al. Multi-index monitoring and comprehensive early warning of landslides in response to rainfall: An example of the Luo ao landslide in southern Jiangxi Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(6): 283-294. [李高, 谭建民, 王世梅, 等. 滑坡对降雨响应的多指标监测及综合预警探析: 以赣南罗坳滑坡为例[J]. *地质前缘*, 2021, 28(6): 283-294.]
- [18] Tang Hongmei, Weng Qineng, Wang Kai, et al. Research on substances startup types and mechanisms of debris flows in impact-deposit debris flow valleys (II) [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2001, 20(2): 65-68. [唐红梅, 翁其能, 王凯, 等. 冲淤变动型泥石流沟中物质启动类型及机理研究(II) [J]. *重庆交通学院学报*, 2001, 20(2): 65-68.]
- [19] Yang Jinbing, Chen Xingzhang, Wang Hui, et al. An experimental study of relationship between fine grain content and permeability coefficient of debris flow deposits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(11): 3184-3190. [杨进兵, 陈兴长, 汪惠, 等. 泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3184-3190.]
- [20] Hu Yanxiang, Zhu Houying, Chen Hao, et al. Model test of debris flow source initiation mechanism in Suyu valley of Helan Mountain[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 44-52. [胡艳香, 朱厚影, 陈昊, 等. 贺兰山苏峪口泥石流物源启动模型试验分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 44-52.]
- [21] Wang Zhibing, Mai Tangkun, Qi Cheng. Effect of fines of soil in the process of debris flow preparation and initiation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(Supp): 357-364. [王志兵, 麦棠坤, 齐程. 泥石流孕育-启动过程的细粒作用[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(增刊): 357-364.]
- [22] Jiang Ruochen, Zhang Limin, Peng Dalei, et al. The landslide hazard chain in the tapovan of the Himalayas on 7 February 2021[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(17): e2021GL093723.
- [23] Chen Xingzhang, Cui Yifei. The formation of the Wulipo landslide and the resulting debris flow in Dujiangyan City, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(6): 1100-1112.
- [24] Guo Jian, Yi Shujian, Yin Yanzhou, et al. The effect of topography on landslide kinematics: A case study of the Jichang town landslide in Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 959-973.
- [25] Cui Peng, Guo Chaoxu, Zhou Jiawen, et al. The mechanisms behind shallow failures in slopes comprised of landslide deposits[J]. *Engineering Geology*, 2014, 180: 34-44.
- [26] Yin Yanzhou, Cui Yifei, Tang Yao, et al. Solid-fluid sequentially coupled simulation of internal erosion of soils due to seepage[J]. *Granular Matter*, 2021, 23(2): 1-14.
- [27] Uchida T, Nishiguchi Y, Mc Ardell B W, et al. The role of the phase shift of fine particles on debris flow behavior: An numerical simulation for a debris flow in Illgraben, Switzerland[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(1): 23-34.
- [28] Zhang Ming, Hu Ruilin, Yin Yueping, et al. Study of transform mechanism of landslide-debris flow with ring shear test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 822-832. [张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 滑坡型泥石流转化机制环剪试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 822-832.]
- [29] Wu Heqiu, Yang Long, Jin Gangxiong. Transformation mechanism of landslide debris flow[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(5): 17-23. [吴和秋, 杨龙, 金钢雄. 滑坡型泥石流的转化机理研究[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(5): 17-23.]
- [30] Hu Ruilin, Li Xiao, Wang Yu, et al. Research on engineering geomechanics and structural effect of soil-rock mixture[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 255-281. [胡瑞林, 李晓, 王宇, 等. 土石混合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.]
- [31] Zhang Minchao, Liu Xinrong, Wang Peng, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 17-26. [张敏超, 刘新荣, 王鹏, 等. 不同含石量下泥岩土石混合体剪切特性及细观破坏机制[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6): 17-26.]

Experimental Study on Shear Characteristics of Fines Component in Loose Deposits with the Water Content Range of Solid-Liquid Phase Change

JIANG Jiwei¹, WANG Hanwu¹, HUANG Ling², ZHANG Jingbo³

(1.Key Lab. of Geotechnical Mechanics and Eng. of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Inst., Wuhan 430010, China;

2.Info. Center, Changjiang River Scientific Research Inst., Wuhan 430010, China;

3.CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The coupling of loose deposits and slurry is easy to trigger geological disasters. The shear strength deterioration of fine components under high water content is one of the most important factors. Based on the ring-shear test, the experimental study on fine components that are taken from a loose deposits in Three Gorges Reservoir area is carried out in the water content range of solid-liquid phase change. The following conclusions can be obtained: The coarse and fine component binary characteristics is significant. The saturated water content ω_{sr} of fine component in undisturbed condition is 23.6%, ω_L and ω_p are 27.2 and 18.1 respectively, and the tests conducted in range of $\omega=23.6\%\sim 29.0\%$ could cover the whole phase transformation process; Ring-shear test could be successfully carried out in water content conditions of 25.0%, 26.0% and 27.0%, which are all in soft plastic status. When $\omega=25.0\%$, the sample just enters soft plastic state. Compared with $\omega_{sr}=23.6\%$, the peak and residual internal friction angle are reduced by 23.5% and 18.6% respectively, while cohesion is reduced by more than 80%, which can be regarded as basic loss; When ω exceeds ω_L and achieves 28.0% and 29.0%, ring-shear test can only be carried out at $\sigma=0$ kPa, and the shear strength is extremely low, while the physical meaning of this shear strength is closer to viscosity of very viscous mud; Referencing to the water content range involved in this study, cohesion c is basically lost when samples enters soft plastic state, while internal friction angle is characterized by gradual decrease with the increase of ω in soft plastic status, but suddenly loses when ω achieves to ω_L . The deterioration process of both shear strength parameters are asynchronous. The stress analysis and generalized calculation show that before phase transition, rapidly increase of K_0 for samples in soft plastic status effectively alleviates the significant drop of ϕ .

Key words: loose deposits; fines component; solid-liquid phase change; ring shear test; shear strength characteristics

(编辑 李轶楠)

引用格式:Jiang Jiwei,Wang Hanwu,Huang Ling,et al.Experimental study on shear characteristics of fines component in loose deposits with the water content range of solid-liquid phase change[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(1):160–168.[江涓涓,王汉武,黄玲,等.固-液相变含水率区间松散土石体中细粒组分抗剪特性试验[J].工程科学与技术,2024,56(1):160–168.]