

基于3D打印技术的软弱夹层干湿循环作用强度劣化试验研究

刘浩, 张文, 芦磊

Strength degradation of soft interlayer under dry-wet cycles based on 3D printing technology

LIU Hao, ZHANG Wen, and LU Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征

On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles

张立 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 74-80

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100

三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究

A study of the deterioration effect of limestone bank slope rock mass at the Wuxia section of the Three Gorges Reservoir area

闫国强, 黄波林, 代贞伟, 秦臻 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 62-72

干湿循环下新近系黏土杂岩裂隙演化研究

A study of fissures evolution of the Neogene clay complexes under wetting and drying cycles

任旺, 王家鼎, 卞小芮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 161-167

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406031

刘浩, 张文, 芦磊. 基于 3D 打印技术的软弱夹层干湿循环作用强度劣化试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 125-133.
LIU Hao, ZHANG Wen, LU Lei. Strength degradation of soft interlayer under dry-wet cycles based on 3D printing technology[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 125-133.

基于 3D 打印技术的软弱夹层干湿循环作用 强度劣化试验研究

刘浩¹, 张文^{2,3}, 芦磊⁴

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 3. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川成都 611730; 4. 中国华西企业股份有限公司第十二建筑工程公司, 四川成都 610036)

摘要: 软弱夹层是一类较为特殊敏感的地质体, 其存在对水电工程边坡的稳定性起控制性作用。为了深入探讨库岸边坡中软弱夹层在干湿循环条件下的剪切力学特性及破坏机制, 以菜籽坝抽水蓄能电站下水库坝址左岸坝肩边坡为研究对象, 利用 3D 打印技术制备具有真实岩石形貌特征的结构面, 并计算出结构面的粗糙度系数 JRC , 然后开展干湿循环作用下含人工节理面的软弱夹层剪切试验。研究表明, 经过不同次数干湿循环, 抗剪强度随循环次数增加呈负指数型降低, 最终会趋于一个极低的稳定值, 为初始强度的 5%, 且抗剪强度与结构面粗糙度呈正相关。软弱夹层的剪切应力-应变曲线在破坏阶段会呈阶梯式降低, 结构面粗糙度越大, 残余曲线阶梯式降低次数越多, 且结构面粗糙度大的试样会在更短的剪切位移到达残余强度阶段, 残余强度也随干湿循环次数的增加而降低。研究成果对抽水蓄能电站岸坡的稳定性评价具有较大的参考意义。

关键词: 软弱夹层; 干湿循环; 3D 打印; 强度劣化; 粗糙度; 残余强度

中图分类号: TV223.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0125-09

Strength degradation of soft interlayer under dry-wet cycles based on 3D printing technology

LIU Hao¹, ZHANG Wen^{2,3}, LU Lei⁴

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 611730, China;
4. 12th Construction Engineering Company, China Huashi Enterprises Company Limited, Chengdu, Sichuan 610036 China)

Abstract: Soft interlayers are critical geological formations that significantly impact the stability of slopes in water and hydropower engineering projects. This study investigated the shear mechanical characteristics and failure

收稿日期: 2024-06-17; 修订日期: 2024-09-20

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42293353); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(SKLGP2020Z008)

第一作者: 刘浩(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 2242395954@qq.com

通讯作者: 张文(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环调查评价研究工作。E-mail: 3463287@qq.com

mechanism of the soft interlayer under dry-wet cycle conditions with a focus on the left bank shoulder slope of the Caizi Dam pumped storage power station's lower reservoir. Real rock morphology characteristics were replicated using 3D printing technology to create structural surfaces, and the roughness coefficient JRC of different structural surfaces was then calculated. Subsequently, shear tests were conducted on soft interlayers containing artificial joint surfaces subjected to dry-wet cycles. The results indicate that, after multiple dry-wet cycles, the shear strength decreases exponentially as the number of cycles increases, and eventually approaches a very low stable value, which is approximately 5% of the initial strength. Moreover, the shear strength is positively correlated with the roughness of the structural plane. The shear stress-strain curve of the soft interlayer exhibits a stepwise decrease during the failure stage, with the magnitude of this decrease in the residual curve proportional to structural surface roughness. Samples with higher roughness on the structural surface reach the residual strength stage at a shorter shear displacement, and the residual strength decreases as the number of dry-wet cycles increases. This study provides valuable insights for slope stability assessments in energy dissipation and water storage projects.

Keywords: soft interlayer; dry-wet cycle; 3D printing; strength deterioration; roughness; residual strength

抽水蓄能电站在运行时库水位会频繁升降,导致坝肩边坡稳定性降低。软弱夹层作为坝肩边坡岩体中强度相对较低的不连续面^[1-2],往往对边坡的失稳破坏起着控制性作用。在周期性的水位变动作用下,软弱夹层会吸水发生泥化^[3-6],水流还会带走夹层内的物质,导致软弱夹层抗剪强度降低,进一步造成边坡稳定性降低^[6-8]。

针对软弱夹层在干湿循环作用下的强度劣化问题,何天军^[9]指出干湿循环作用会使泥质夹层裂隙度增加和抗剪强度降低;胡旭辉等^[10]认为,随着干湿循环次数增加,膨胀土的黏聚力会逐渐降低最终趋于稳定,但内摩擦角的变化没有规律性,只是呈现小幅波动;Pineda等^[11]针对黏土岩建立了其与干湿循环次数相关的强度劣化模型。但以上研究都忽略了结构面粗糙度的影响,孙辅庭等^[12]与She等^[13]的研究指出,夹层与结构面的接触面极可能成为含夹层岩体强度最薄弱的位置;修占国等^[14]通过研究夹层与节理岩壁接触面的剪切强度,发现某些条件下夹层与含节理结构面接触面的抗剪强度明显低于夹层本身。

为研究结构面粗糙度对岩体强度的影响^[15],部分学者采用3D打印技术制作复杂节理试样。Wei等^[16]以砂粉为打印材料制备了与天然砂岩试件物理力学性质相近的试件,研究其力学特性与节理倾角的关系;王文海等^[17]利用3D打印技术制作不同节理密度的岩体试件,研究其强度变化及不同的破坏模式;肖维民等^[18]基于3D打印技术研究了节理表面粗糙度和填充度对含充填岩石剪切破坏特征的综合影响;蒋力帅等^[19]研究了动静组合荷载下,砂岩试件的破坏特征,验证了3D打印技术应用于岩体力学试验的可行性。

以上学者虽考虑了结构面粗糙度的影响,也验证了3D打印技术的可行性,但对结构面的粗糙程度基本靠定性判断,不能准确表达其粗糙度。早在这些研究之前,Barton等^[20-21]就提出了用粗糙度系数 JRC 来量化结构面粗糙度,并通过研究大量不规则岩体结构面,建立了十条标准结构面剖面线作为判断 JRC 的经验标准,在此基础上有大量学者上对 JRC 进行深入研究,如Abolfazli等^[22]通过对不同 JRC 岩石节理进行直剪试验,研究了 JRC 与评估粗糙度的各种参数之间的相关性;严豪等^[23]从八组结构面中各取十条剖面线,从中获取各种参数,将其组合并拟合出计算 JRC 的公式,同时用Barton提出的剪切公式反算八组结构面的 JRC ,两种方法得到的 JRC 基本相同。

从以上研究可以发现,利用 JRC 量化结构面粗糙度对干湿循环作用下软弱夹层强度影响的研究较少,因此本文使用3D打印技术制备含不同粗糙度结构面的试件,通过开展干湿循环试验和室内剪切试验,揭示干湿循环作用和结构面粗糙度对软弱夹层强度的影响规律,以期对抽水蓄能电站边坡的灾害预防和保护设计提供理论依据。

1 工程概况

1.1 岸坡地质背景

研究区地处重庆市奉节县境内兴隆镇与青龙镇交界处,坝肩边坡地形较陡,坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$,坡面整体倾向约 135° ,边坡工程地质剖面图见图1。坡内发育有一处明堂向斜,坝肩边坡上部的基岩主要是三叠系下统嘉陵江组第四段(T_3^4)的泥质白云岩、灰质白云岩和角砾状灰岩夹白云质灰岩,下部基岩主要为三叠

系下统嘉陵江组第三段(T_j^3)的灰岩和白云质灰岩。由图1可知, 坝肩边坡内部的软弱夹层主要出露在PD01的0~20 m和50~90 m 洞段与PD09的0~40 m

洞段, 且多为缓倾坡外结构面, 若遇水强度大幅降低, 极易形成贯通的底滑面导致边坡失稳。

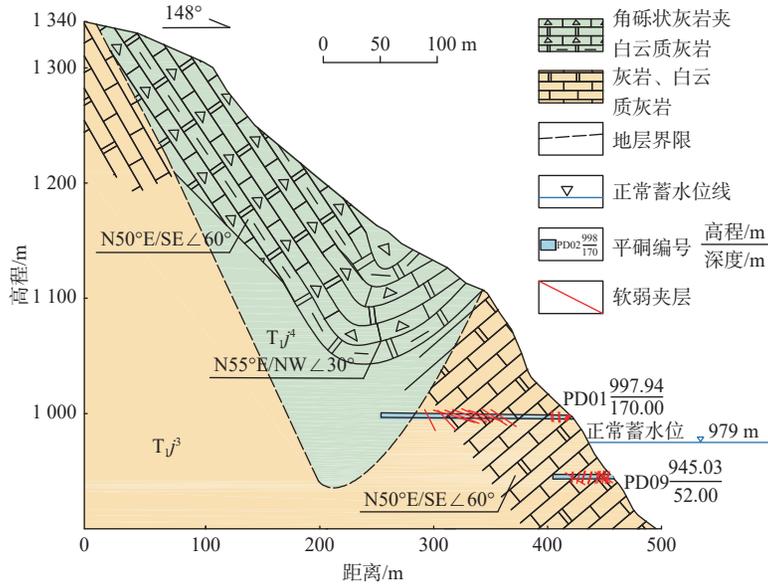


图1 边坡工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile of slope

1.2 软弱夹层特征

现场调查发现左岸坝肩边坡内部发育有较多三壁贯通缓倾坡外软弱夹层(图2), 主要分布在坡体中部, 软弱夹层整体产状为 $N60^\circ \sim 70^\circ E/SE \angle 5^\circ \sim 25^\circ$, 厚2~3 cm, 有渗水现象。软弱夹层呈黄褐色, 天然含水率26.3%, 密度为 1.8 g/cm^3 , 其余物理参数见表1。

含量为35.3%。在潮湿环境下, 伊利石将向吸水性极强、吸水后体积会迅速膨胀的蒙脱石转化^[24], 形成蒙脱石和伊利石的混合物, 导致软弱夹层强度降低, 影响坡体稳定性。

表1 试验用软弱夹层物理参数

Table 1 Physical parameters of soft interlayer for testing

参数	天然密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)	抗拉强度 /MPa
取值	1.8	1.81	0.4	19	0.4

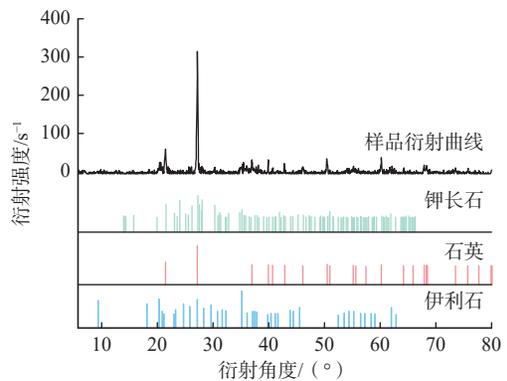


图3 样品衍射曲线与标准卡片对比图

Fig. 3 Sample diffraction curve compared with standard card

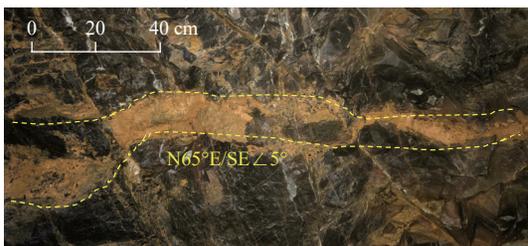


图2 平硐内揭露软弱夹层

Fig. 2 Adit exposing the soft interlayer

对现场取回的软弱夹层开展X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)试验, 获得其衍射图与矿物标准卡片对比(图3), 可以得到软弱夹层的主要物质成分是石英和伊利石, 其中伊利石含量最高, 可达61.1%, 石英

2 试样制备及试验方案设计

2.1 基于3D打印技术制备试样

为了研究结构面的真实形貌特征对软弱夹层强度的影响, 作者利用3D打印技术制作结构面模具。采用的仪器是SL3D600光固化激光3D打印机, 选取光敏树脂作为打印材料, 打印机外观如图4所示。

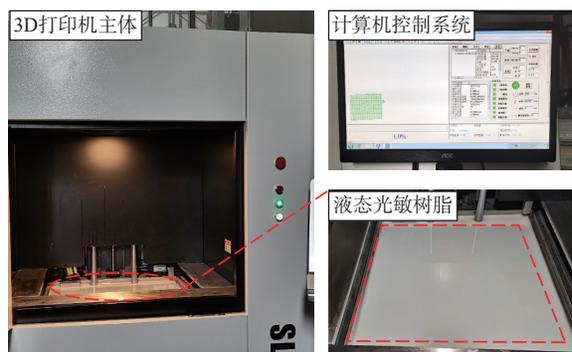


图 4 SL3D600 打印机
Fig. 4 SL3D600 printer

为研究含不同粗糙度结构面夹层的岩体在干湿循环作用下的抗剪强度变化趋势,选取 3 个形态差异较大的结构面用于试验进一步总结规律。模具备制过程为先用三维激光扫描真实结构面,获得从结构面的点云数据,进一步建立三维模型,再对三维模型进行切片分层生成打印路径,生成的数据会精准控制 3D 打印机的紫外线激光和升降台来制作三维工件原型。成型后的结构面模具见图 5,跟真实结构面的形貌特征一致。

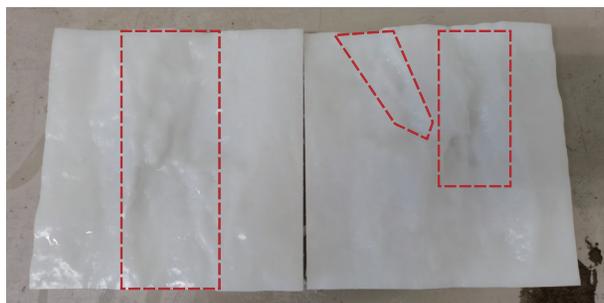


图 5 成型结构面模具
Fig. 5 Structural surface mold

打印好的结构面模具放入试件制样盒中,进行混凝土浇筑制样,得到 3 组含不同粗糙度结构面的混凝土围岩。把现场取回的软弱夹层调整至天然含水率,再将其抹至混凝土围岩上,软弱夹层的厚度为 2 cm,如图 6 所示,在制备试样时就标注了剪切方向。



图 6 制备完成的试件
Fig. 6 Preparing the specimen

2.2 结构面粗糙度系数计算

为量化结构面的粗糙度,引入结构面粗糙度系数 JRC ,采用严豪等^[23]提出的岩体结构面粗糙度计算公式来计算 JRC 。

$$JRC = \frac{0.574x_1}{1 + 71.022x_2 - 21.617x_3} + 1.209x_4 + 3.212 \quad (1)$$

$$x_1 = S/S_0, x_2 = \tan(\bar{i}), x_3 = \tan(\bar{i}_{\max}), x_4 = \sum \bar{h}/L_0 \quad (2)$$

式中: S ——结构面曲面面积/ mm^2 ;

S_0 ——结构面曲面在水平方向上的投影面积/ mm^2 ;

\bar{i} ——平均爬坡角/ rad ;

\bar{i}_{\max} ——平均最大爬坡角/ rad ;

\bar{h} ——爬坡高度/ mm ;

L_0 ——剖面线曲线长度在水平面上的投影/ mm 。

观察式(1)(2)可以发现结构面的粗糙度系数由爬坡角等多个参数共同决定,即使结构面形貌特征不同,最后计算得到的 JRC 也有可能相同,所以本文选择了 3 个形态差异显著的结构面,能明显观察到计算 JRC 的几个主要参数都有明显差异,从而避免了 JRC 相同的情况,同时不同结构面试件的试验结果也有明显差异,便于总结规律。

式(1)中参数 x_1 的 S 和 S_0 可以从三维图中得到。通过三维激光扫描获得点云数据,将点云数据导入等值线图可以获得结构面三维图,如图 7 所示,三维图呈红色的部分代表高程较高处,即结构面起伏处,而蓝绿色的部分则代表高程较低处。图中 1 号结构面两侧较高,中间较低,低洼处范围较宽;2 号结构面中间有 2 束“横峰”但高程相差不大;3 号结构面较为平滑,左处有一凸起高程较高,右上部高程较低,整体高差较小。

另外 3 个参数只能从剖面线中获取,每个结构面沿剪切方向等距 1.3 cm 提取 10 条剖面线,然后提取每条剖面线的 \bar{i} 、 \bar{i}_{\max} 和爬坡总高度 $\sum \bar{h}$,并求平均,各数据的平均值就代表该结构面的这 3 项数据,将这些数据处理为式(1)所需参数,具体见表 2。

利用式(1)计算出 1—3 号结构面的 JRC 分别是 7.748、5.904 和 4.200。1 号结构面 x_1 最小,而最大爬坡角、爬升高度和平均爬坡角最大,这说明 1 号结构面“沟槽”少,起伏大、爬升坡度高。2 号结构面 x_1 虽然最大,但平均爬坡角、平均最大爬坡角与总爬坡高度都小于 1 号结构面,说明结构面虽然凹凸不平,但高差不大,所以 JRC 小于 1 号结构面。而 3 号结构面的平均最大爬坡角的正切值仅为 0.148,平均总爬坡高

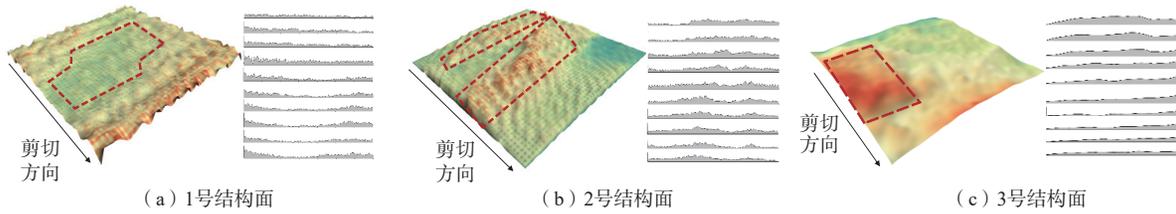


图 7 结构面三维图和剖面线

Fig. 7 Three-dimensional diagram and section line of structural plane

表 2 式 (1) 所需数据统计表

Table 2 Statistical values in the formula (1)

结构面	公式所需数据				
	x_1	x_2	x_3	x_4	JRC
1号	1.362	0.620	2.439	3.836	7.748
2号	1.728	0.409	1.769	2.327	5.904
3号	1.499	0.054	0.148	0.383	4.200

度与平均爬坡角也都远远小于另外两个结构面, 但 x_1 却大于 1 号结构面, 是因为 3 号结构面起伏的面积很大, 但起伏程度很小, 所以 3 号结构面 JRC 最小。

2.3 试验方案设计

2.3.1 干湿循环试验方案

对已有的岩土体干湿循环试验结果^[25-26]分析可知, 通常会对岩土体进行 4~6 次干湿循环, 且在 3 次循环后, 岩土体的抗剪强度会大幅下降, 然后缓慢下降, 最终趋于稳定, 因此本文将干湿循环最大次数设定为 4 次。

考虑到水位升降引起软弱夹层含水率的变化是在天然含水率到饱和含水率之间, 选择含水率最大限度变化的循环方式, 每次循环都是从天然含水率到饱和和状态, 这种方案一定程度上能反映真实的含水率变化。具体的方案是将所有试件放入水池中浸泡 3 d, 保证软弱夹层处于饱和含水率状态, 3 d 后将所有试件取出, 3 种粗糙度的试件各取 1 个进行剪切, 作为第 1 次干湿循环作用下的剪切试验, 然后将其余试件放置在雨棚中, 待试件中的软弱夹层达到天然含水率后, 把试件全部放入水池中再次进行浸泡, 如此反复, 做完 4 组干湿循环试验。为避免水流冲刷作用造成结构面中的夹层过度流失, 在浸泡过程中将试件用透明膜包裹并打孔, 保证软弱夹层得到完全浸泡的同时, 降低水流的侵蚀作用。

2.3.2 剪切试验方案

本次剪切试验采用应力控制法与位移控制法对试件进行剪切, 如图 8 将试件盒放置于剪切台上, 先将应力片下降, 对试件施加法向应力, 当其达到预定的 2 MPa 时, 保持法向应力不变, 调整剪切盘的位置

使其在接近试件盒时对其施加剪切应力, 剪切加载速率为 0.5 mm/min, 设定位移为 10 mm, 保证试样破坏或出现残余抗剪强度。

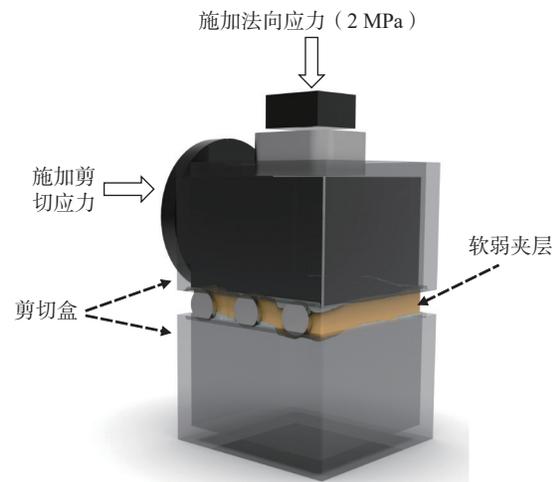


图 8 试件剪切示意图

Fig. 8 Specimen shear model diagram

3 试验结果分析

3.1 剪切应力-应变曲线图特征分析

开展 1~4 次干湿循环作用下的剪切试验, 得到 3 组不同粗糙度试件的应力-应变曲线, 见图 9。

从图 9 可以观察到, 含软弱夹层试件在加载过程中, 应力到达峰值后会出现软化现象, 这时轴向应变增大而轴向应力降低, 剪切应力-应变曲线为应变软化型。对图 9 综合分析可知其剪切过程主要分为三个阶段: 剪切应力到峰值强度之前是第一个阶段, 为线弹性阶段, 该阶段试样剪切位移在 1 mm 以内, 应力-应变曲线近似于一条直线, 剪应力随剪切位移的增加迅速增大; 第二个阶段是破坏阶段, 剪切位移在 2~3 mm, 该阶段剪应力随着位移的增加会以较快的速率衰减到稳定的残余强度; 最后一个阶段就是残余强度阶段, 该阶段应力保持在某一稳定值。

干湿循环次数的增加, 应力-应变曲线整体逐渐下移, 第一个阶段的斜率逐渐减小, 达到峰值强度的剪

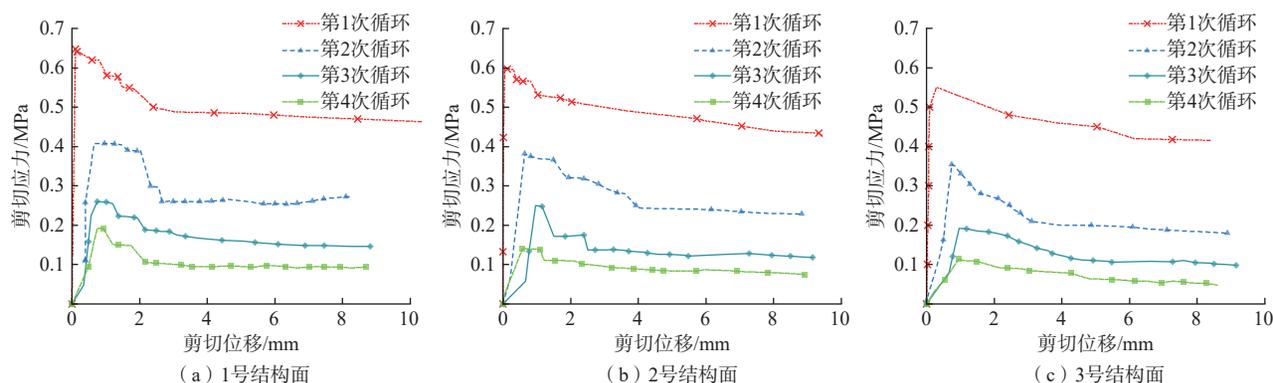


图 9 软弱夹层剪切应力-应变曲线图

Fig. 9 Shear stress-displacement of soft sandwich

切位移逐渐增加,抗剪强度逐渐降低,说明干湿循环作用对软弱夹层的剪切力学特性劣化效应明显。

在相同次数的干湿循环作用下,随着粗糙度的增加,应力-应变曲线会整体逐渐上移,但不同粗糙度试样的曲线形态在第二个阶段有所不同,该阶段曲线会出现阶梯式下降,且粗糙度越大出现阶梯式下降的次数越多,出现这种现象的原因是破坏阶段的受力方式与线弹性阶段的不同,具体如图 10 所示。

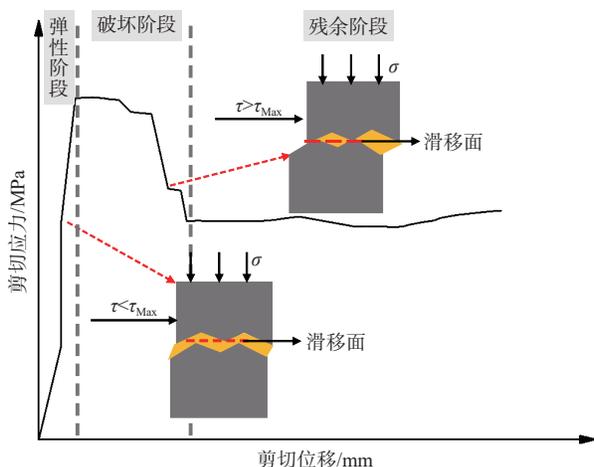


图 10 不同阶段剪切模式示意图

Fig. 10 Shear modes at different stages

注: τ 为剪切应力; τ_{Max} 为峰值剪切应力; σ 为法向应力。

线弹性阶段的剪切位移都在 1 mm 以内,且都发生在软弱夹层内部,如图 10 弹性阶段的剪切模式,所以应力-应变曲线基本呈线性增长,不会出现阶梯状变化。

剪切试验的破坏阶段,含软弱夹层试件的剪切应力-应变曲线会呈现阶梯式下降,如图 10 破坏阶段的剪切模式,剪切位移不只发生在夹层内,剪切过程中结构面中的“谷”与“峰”会相互接触;随剪切位移的增加,这种接触重复出现,应力-应变曲线就会出现阶梯

状。1号结构面 4 组试验阶梯式下降都出现了 3~4 次,而 2号结构面只有 1~3 次,粗糙度越大这种“谷”与“峰”出现的次数就越多,所以粗糙度越大阶梯式降低的次数就越多。由图 9 可知,3号结构面没有出现阶梯状下降,因为其平均爬坡角是 0.054 rad、最大爬坡角是 0.147 rad,大幅度低于 1、2号结构面,结构面的起伏较缓,不会有 1、2号结构面那种“谷”与“峰”的接触,所以曲线里不会出现阶梯式下降。

3.2 干湿作用下软弱夹层抗剪强度分析

如图 9 所示,在粗糙度和法向应力相同的条件下,随着干湿循环次数的增加,试件的抗剪强度会逐渐降低,以 1号结构面为例,1~4 次干湿循环作用下的抗剪强度分别是 0.638, 0.408, 0.260, 0.192 MPa。

从软弱夹层的物质组成来分析抗剪强度劣化的原因,在循环试验开始前对软弱夹层开展了 XRD 试验,得到夹层的主要组成物质是伊利石和石英,其中以伊利石为主,含量高达 61%。从化学性质和物理性质两个方面来看,石英是相对稳定的,而伊利石比较容易与水发生水-岩物理化学作用。在饱水条件下,水会渗入软弱夹层内部,导致伊利石发生水-岩化学作用^[27],生成蒙脱石等次生矿物,形成伊/蒙混层矿物,而次生矿物在夹层中占据空间体积的不同,会造成夹层矿物颗粒在受力过程中的不均匀张拉;另一方面,水对软弱夹层有明显的润滑和软化等作用,从而使得夹层抗剪强度降低。

为进一步研究抗剪强度劣化与干湿循环作用之间的联系,将每次剪切试验的结果进行统计并绘制出拟合曲线,如图 11 所示,可以看到含软弱夹层试样的抗剪强度与干湿循环次数呈负指数型关系,以 3号试样为例,夹层抗剪强度在前 4 次干湿循环作用下的衰减幅度分别是 29%、23%、18% 和 10%,说明干湿循环

次数对夹层抗剪强度的影响在逐渐减弱,对已有的试验数据进行拟合,根据该衰减曲线可以预测3号结构面抗剪强度会在多次循环后趋于0.04 MPa,衰减幅度达95%。通过同样的方式可以预测得到1、2号试样抗剪强度最终趋于0.08 MPa和0.05 MPa,都是夹层初始强度的5%左右。

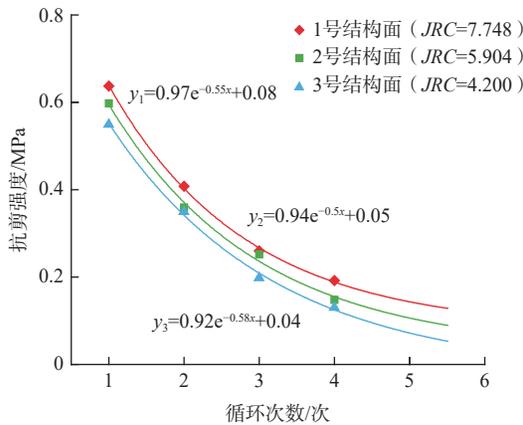


图 11 抗剪强度拟合曲线图
Fig. 11 Shear strength fitting curve

从图 11 中也能观察到在干湿循环次数相同和法向应力相同的情况下,结构面粗糙度越大其抗剪强度越大。以第 1 次干湿循环剪切试验结果为例,1—3 号试件软弱夹层抗剪强度分别为 0.638, 0.598, 0.550 MPa,另外 3 次循环试验的剪切结果与第 1 次一致,均是 1 号试样抗剪强度最大,3 号试样最小。主要原因是结构面中的最大爬坡角决定抗剪强度的初始值,结构面 1—3 号结构面的最大爬坡角度分别是 1.182, 1.056, 0.147 rad, 1 号结构面的最大爬坡角最大,在刚开始剪切时所受“阻力”最大,结构面“爬升”难度最大,其抗剪强度初始值也越大。

3.3 干湿循环后软弱夹层残余强度分析

对每次剪切试验的残余强度进行统计分析(图 12),以 1 号结构面为例,1~4 次循环的残余强度分别是 0.462, 0.273, 0.152, 0.100 MPa,可知残余强度随干湿循环次数增加而降低。

残余强度随循环次数的变化与抗剪强度劣化规律相似,干湿循环次数对残余强度的影响也逐渐减弱。1—3 号试件在第 1 次干湿循环作用下的残余强度分别是 0.462, 0.428, 0.412 MPa,另外 3 次循环也是 1 号结构面残余强度最大、3 号结构面最小,可知结构面的粗糙度越大,试件的残余强度也越大。

从图 13 可以观察到,干湿循环次数相同的条件下,不同粗糙度试件到达残余强度时的最终剪切位移

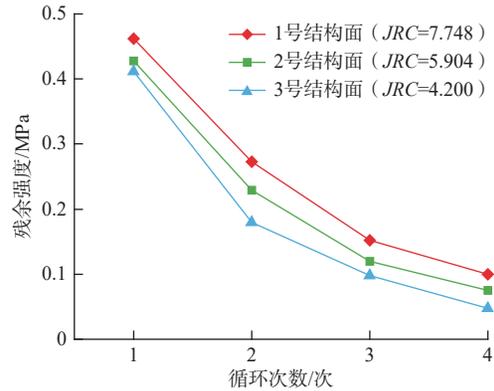


图 12 残余强度与干湿循环次数的关系

Fig. 12 Relationship between residual strength and number of dry-wet cycles

不一致,以第 2 次循环为例,1—3 号结构面达到稳定残余强度时的剪切位移分别是 3.3, 4.2, 4.6 mm,其余见图 13,可知相同次数的干湿循环作用下,粗糙系数越大,到达残余强度的速度就越快。具有相同结构面粗糙度的试件,其到达残余强度时的最终剪切位移随循环次数增加而增加,以 1 号结构面为例,1~4 次循环的最终剪切位移分别是 2.3, 2.6, 3.3, 3.5 mm。

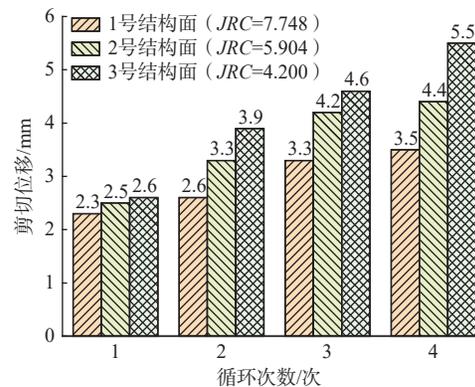


图 13 最终剪切位移与粗糙度和循环次数的关系

Fig. 13 Relationship between the final shear displacement and roughness and the number of cycles

4 结论

(1) 本文研究结果证明,利用 3D 打印技术研究结构面粗糙度对软弱夹层力学特性的影响是可行的,通过计算 3 种结构面的 JRC 来建立结构面粗糙度与软弱夹层强度的联系,1—3 号结构面的 JRC 分别是 7.748, 5.904, 4.200。

(2) 具有相同结构面粗糙度的试件在干湿循环过程中,曲线形态基本一致,随着干湿循环次数的增加曲线会整体逐渐下移,第一个阶段的斜率逐渐减小,

达到峰值强度的剪切位移逐渐增加, 结构面粗糙度不同的试件在相同次数干湿循环作用下, 其剪切曲线形态在第二个阶段会有所不同, 该阶段会出现阶梯式下降, 粗糙度越大的试件出现阶梯式下降的次数越多。

(3) 结构面粗糙度越大, 软弱夹层的抗剪强度越大; 软弱夹层抗剪强度随干湿循环次数的增加而降低, 且干湿循环次数对夹层强度的影响是逐渐减弱的, 随着循环次数增加, 抗剪强度会逐渐趋于一个极小值, 该值为初始强度的 5%。

(4) 干湿循环次数相同的条件下, 结构面粗糙度越大, 软弱夹层残余强度越大, 且试件趋近残余强度的速度也越快; 相同结构面粗糙度的试件, 干湿循环的次数越多, 残余强度越低, 趋近残余强度的速度也越慢。

参考文献 (References) :

- [1] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3077 - 3081. [XU Baotian, YAN Changhong, CHEN Hanyong, et al. Experimental study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3077 - 3081. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 穆成林, 裴向军, 王睿, 等. 基于物理模型试验的含多层软弱夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 61 - 67. [MU Chenglin, PEI Xiangjun, WANG Rui, et al. Analysis on deformation characteristics of a cutting high bedding rock slope with multiple weak layers based on physical model tests[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 61 - 67. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姚云琦, 曾润强, 马建花, 等. 考虑优势流作用的降雨入渗边坡可靠度分析 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2305 - 2316. [YAO Yunqi, ZENG Runqiang, MA Jianhua, et al. Reliability analysis of slope under rainfall infiltration considering preferential flow model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2305 - 2316. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 曾胜, 李振存, 韦慧, 等. 降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1536 - 1540. [ZENG Sheng, LI Zhencun, WEI Hui, et al. Stability analysis of red sandstone bedding slope under rainfall infiltration and dry-wet cycling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1536 - 1540. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 龙建辉, 任杰, 曾凡桂, 等. 双软弱夹层岩质滑坡的滑动模式及变形规律 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 3031 - 3040. [LONG Jianhui, REN Jie, ZENG Fangui, et al. Sliding mode and deformation law of double weak interlayer rock landslide[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 3031 - 3040. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 邓威, 肖世国. 含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(1): 57 - 68. [DENG Wei, XIAO Shiguo. Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 57 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李晋鹏, 汪磊, 王俊, 等. 考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 29 - 36. [LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, et al. Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 29 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 魏占玺, 谢东武, 毋远召, 等. 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 126 - 136. [WEI Zhanxi, XIE Dongwu, WU Yuanzhao, et al. Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 126 - 136. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 何天军. 干湿循环条件下泥化夹层裂隙发展规律及强度变化规律研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [HE Tianjun. Study on fracture development and strength variation of argillated interlayer under dry-wet cycle [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡旭辉, 张坤勇, 聂美军, 等. 干湿循环条件对膨胀土强度指标的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 269 - 279. [HU Xuhui, ZHANG Kunyong, NIE Meijun, et al. Effect of experimental conditions on strength indexes of expansive soil during wet-dry cycles[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 269 - 279. (in Chinese with English abstract)]
- [11] PINEDA J A, ROMERO E, DE GRACIA M, et al. Shear strength degradation in claystones due to environmental effects[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(6): 493 - 501.
- [12] 孙辅庭, 余成学, 万利台. 充填水泥浆岩石节理峰值剪切强度模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2481 - 2489. [SUN Futing, SHE Chengxue, WAN Litai. A peak shear strength model for cement filled rock

- joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2481 – 2489. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SHE C X, SUN F T. Study of the peak shear strength of a cement-filled hard rock joint[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(3): 713 – 728.
- [14] 修占国,王述红,王斐笠,等. 充填体和围岩-充填体界面剪切特性对比试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1628 – 1642. [XIU Zhanguo, WANG Shuhong, WANG Feili, et al. Comparative experimental study on the shear behavior of cemented paste backfill and surrounding rock-backfill interface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1628 – 1642. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郭朋瑜,吉锋,何双,等. 节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 81 – 87. [GUO Pengyu, JI Feng, HE Shuang, et al. An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 81 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [16] WEI Tian, HAN N V. Mechanical properties of rock specimens containing pre-existing flaws with 3D printed materials[J]. *Strain*, 2017, 53(6): e12240.
- [17] 王文海,蒋力帅,何鑫,等. 基于砂型3D打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 754 – 767. [WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 754 – 767. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 肖维民,余欢,朱占元,等. 薄层充填岩石节理剪胀特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(8): 1499 – 1508. [XIAO Weimin, YU Huan, ZHU Zhanyuan, et al. Experimental study on shear dilatancy characteristics of thinly-infilled rock joints[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(8): 1499 – 1508. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 蒋力帅,吴星宇,王庆伟,等. 砂型3D打印类煤试样动静组合加载力学特性 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1196 – 1207. [JIANG Lishuai, WU Xingyu, WANG Qingwei, et al. Dynamic mechanical behaviors of sand-powder 3D printing rock-like specimens under coupled static and dynamic loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1196 – 1207. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. *Engineering Geology*, 1973, 7(4): 287 – 332.
- [21] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. *Rock Mechanics*, 1977, 10(1): 1 – 54.
- [22] ABOLFAZLI M, FAHIMIFAR A. An investigation on the correlation between the joint roughness coefficient (JRC) and joint roughness parameters[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 120415.
- [23] 严豪,宋彦辉,陈子玉,等. 基于多元拟合方程的结构面粗糙度系数 JRC 估算 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(2): 114 – 119. [YAN Hao, SONG Yanhui, CHEN Ziyu, et al. Estimation of structure surface roughness coefficient JRC based on multivariate fitting equation[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 114 – 119. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 金银富,张爱军,尹振宇,等. 矿物成分相关的黏土一维压缩特性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(1): 131 – 136. [JIN Yinfu, ZHANG Aijun, YIN Zhenyu, et al. One-dimensional compressibility of soft clay related to clay minerals[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(1): 131 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 1936 – 1941. [YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1936 – 1941. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 曾召田,吕海波,赵艳林,等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响 [J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6): 934 – 939. [ZENG Zhaotian, LV Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Wetting-drying effect of expansive soils and its influence on slope stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(6): 934 – 939. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘梅全,蒲晓林,张谦,等. 无机盐作用下伊利石水化特性的分子模拟 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(4): 81 – 89. [LIU Meiquan, PU Xiaolin, ZHANG Qian, et al. Molecular simulation for inorganic salts inhibition mechanism on illite hydration[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021, 43(4): 81 – 89. (in Chinese with English abstract)]