

# 含水排土场蠕变特性及长期强度研究

常 剑, 郭 霖, 苏 强, 王浩然, 孙鸿昌

(中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:** 为揭示排土场岩土体蠕变特性及长期强度, 采用 ZLB-1 型三联蠕变直剪蠕变仪, 以分级加载形式开展一系列试验, 研究不同含水率和固结压力下, 岩土体蠕变特性及长期强度变化规律。试验结果表明: 15%~39.2% (饱和) 含水率范围内, 排土场岩土体显示为非线性蠕变, 且随着剪应力增加, 蠕变曲线分别呈现衰减蠕变、非稳定蠕变及加速蠕变, 直至试样发生破坏; 施加剪应力瞬间发生较大瞬时应变, 并随剪应力增加而变大; 长期强度指标与含水率呈现指数递减趋势; 对比 15% 含水率试样, 饱和含水率下排土场岩土体长期强度指标中黏聚力降低 66%, 内摩擦角降低 69%, 其变化规律满足指数拟合公式。研究成果可为同类型含水排土场稳定性计算提供基础数据。

**关键词:** 富水排土场; 分级加载; 含水率; 蠕变; 长期强度

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)05-0280-06

据不完全统计, 截至 2022 年末, 我国有露天矿 357 座, 煤矿产能 11.62 亿 t, 约为井工煤矿的 3 倍<sup>[1]</sup>。随着露天开采的高速发展, 排土场规模也随之扩大。排土场本身是由生产剥离的无用土岩堆砌构成, 因其松散、胶结程度较差, 易发生剪切失稳破坏<sup>[2]</sup>。同时排土场随着形成时间的推移, 受荷载、地下水、地应力等因素影响, 岩土体结构进一步破坏, 孔隙率降低、渗透性降低、孔隙水压上升, 特别是其强度指标降低。因此研究其蠕变特性和长期强度对维护排土场稳定有重要意义。

近年来, 许多学者针对蠕变特性和长期强度开展一系列研究。Wang 等<sup>[3]</sup>对含单裂隙砂岩试样进行蠕变试验, 明确裂隙角度对长期强度的影响及蠕变状态下石灰岩、砂岩、泥岩内部裂缝发育程度规律; Li 和 Yin<sup>[4]</sup>在添加扰动因素基础上, 分析砂岩在扰动状态下蠕变变形模式, 探究扰动荷载对砂岩的力学特性影响, 建立砂岩在扰动荷载作用下的蠕变本构模型; 王游等<sup>[5]</sup>基于非线性函数、Kelvin 模型, 得到一个非线性损伤西原体模型, 反映岩石稳定蠕变阶段力学参数变化和加速蠕变变形特性; 徐刚等<sup>[6]</sup>通过不同含水率煤样蠕变试验, 研究分析不同含水率煤样的蠕变特征, 进而改进传统 Burgers 模型; 李昂等<sup>[7]</sup>通过不同应力状态和含水率下的单轴

剪蠕变试验, 建立时间、含水率和应力状态的 3 因素经验蠕变模型, 提高了对黄土蠕变特性的表达; 王新刚等<sup>[8]</sup>开展不同含水率滑坡滑带土三轴蠕变试验, 明确含水率对黄土蠕变特性影响, 并基于等时曲线法得出其长期强度; 周瑞鹤等<sup>[9]</sup>基于巷道围岩开挖实际应力调整路径, 开展粉砂岩分级卸载蠕变试验, 分析不同围压下蠕变特性, 并引入黏塑性蠕变启动元件, 建立粉砂岩卸荷蠕变模型。

综上所述, 众多学者针对蠕变特性及长期强度已进行多方面研究, 但是在露天矿排土场岩土体方面研究较少。本文以内蒙古某矿内排土场为例, 着重研究其在不同含水率下岩土体蠕变特性及长期强度变化规律, 以期同类型排土场工程活动奠定基础。

## 1 蠕变试验

### 1.1 试验仪器

试验仪器包括 ZLB-1 型三联蠕变直剪蠕变仪、天平、电烘箱、颚式破碎机、真空泵。

ZLB-1 型三联蠕变直剪蠕变仪是目前国内先进的直剪蠕变仪之一, 主要由杠杆、剪切盒、量力环、测竖向蠕变应变及剪切蠕变应变的仪表及有机玻璃保湿盒组成, 杠杆提供加载所需的竖向荷载及剪切荷载。仪器竖向最大荷载为 600 kPa, 其控制精

**收稿日期:** 2023-12-19

**作者简介:** 常剑(1994—), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为露天煤矿安全; 郭霖(1993—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为露天煤矿安全; 苏强(1992—), 男, 辽宁盘锦人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为露天煤矿安全; 王浩然(1995—), 男, 辽宁辽阳人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为露天煤矿安全; 孙鸿昌(1997—), 男, 河北承德人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为露天煤矿安全。

度为 $\pm 1\%$ ,剪切最大荷载亦为 600 kPa,其控制精度亦为 $\pm 1\%$ 。ZLB-1 型三联蠕变直剪蠕变仪及试样如图 1 所示。



图 1 ZLB-1 型三联蠕变直剪蠕变仪及试样

## 1.2 试样制备

试验选取内排土场下部松散泥岩物料(矿区主要剥离松散物为泥岩),采用颚式破碎机将大块泥岩击碎,然后对破碎的物料进行筛分,剔除较大的颗粒,筛分出 10、5、2 mm 颗粒,基于现有颗粒比例,采用分层压实配置试验试样。采用烘干法测量试样天然含水率为 7.23%。采用抽气饱和法,利用真空泵制备饱和试样,测量饱和泥岩含水率为 39.2%,同时烘干剩余试样。根据测出的天然含水率和饱和含水率范围制备不同含水率试样,含水率取 15%、25%、35%、39.2%,配置出的不同含水率试样,放置在保湿器里预存。

## 1.3 试验流程

### 1.3.1 剪应力等级设计

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)从保湿器中取出岩样进行快剪试验,测定快剪抗剪强度指标,求得不同法向力级的剪应力破坏值  $\tau_p$ 。不同含水率试样快剪结果见表 1。

计算蠕变试验剪应力等级按式(1)计算相对应正应力和剪应力等级梯度,则每级的剪切应力增量为

$$\tau_{\sigma_i} = k\tau_p/n \quad (1)$$

式中: $\tau_p$  为不同法向力级的剪应力破坏值,kPa; $k$  为岩土介质常数,一般情况下  $k=0.5\sim 0.85$ ; $\tau_{\sigma_i}$  为每级加载的剪切应力,kPa; $n$  为直剪蠕变试验剪切荷载的加载级数, $n=4\sim 6$ 。

表 1 不同含水率试样快剪应力破坏值  $\tau_p$

含水率/%	$\tau_p$ /kPa			
	正压力=100 kPa	正压力=200 kPa	正压力=300 kPa	正压力=400 kPa
15	74.8	146.8	188.4	243.6
25	66.4	121.4	153.7	199.4
35	41.8	67.2	82.5	104.2
饱和(39.2)	23.0	37.5	42.0	47.0

### 1.3.2 试验方案

本次蠕变试验测量不同含水率及固结压力下泥岩蠕变特性,基于含水率及固结压力不同,共需做 16 组试验。试验根据表 1 直剪试验结果,采用分级加载方式,从第 1 级到第  $n$  级加载荷载分别是快剪强度的 60%、70%、80%、90%、100%,加载直至试件破坏。

### 1.3.3 蠕变试验过程

(1)调整剪切荷载施加装置,安设剪切变形测表,记录初始读数,拔去剪切盒上的固定销,按第一级剪力施加剪切荷载砝码,开始蠕变试验。

(2)试验加载第 1 天,按 1/6、1/2、1、2、4、8、24 h 记录剪切蠕变变形,第 2 天后,每 24 h 读一次,维持 7 d 并测取每天的变形量,可得每一级剪应力下的剪切蠕变变形和时间  $t$  的数据。

(3)7 d 后,施加第 2 级剪切荷载,重复上述操作测取蠕变变形,第  $n$  周以后测得  $i$  组关系数据。

(4)试验加载试样直至破坏后,撤去剪切荷载和垂压,取出试样直到试样被破坏。

## 2 试验结果与分析

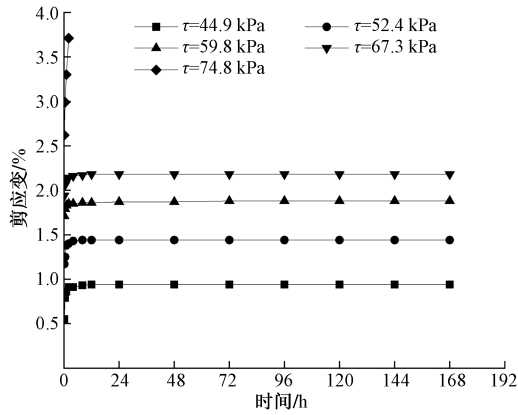
### 2.1 蠕变曲线

蠕变指的是在保证应力恒定时,其变形随时间增加变形量增大的现象,可划分为稳定蠕变和不稳定蠕变两种类型。稳定蠕变即蠕变变形存在极限值,且随时间变形速率逐步降低最终趋于 0;不稳定蠕变变形不受时间影响,逐步增加直至试样破坏。

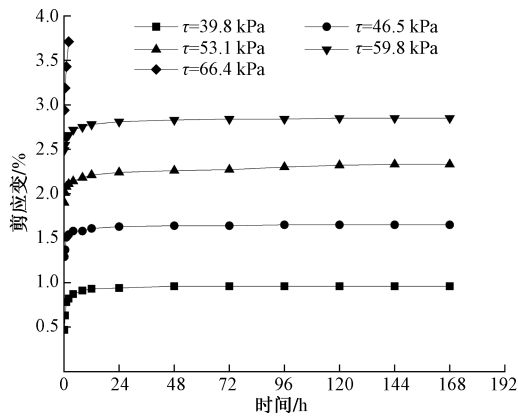
本次试验根据上述试验方案得到 16 组试验结果,采用 Boltzmann 应变叠加原理进行计算,绘制剪应变-时间  $\gamma-t$  变化曲线。受篇幅所限,选取典型蠕变曲线进行分析。①保持 100 kPa 正压力不变,不同含水率下的蠕变曲线(图 2);②保持 39.2% 饱和含水率不变,不同固结压力下的蠕变曲线(图 3)。

由图 2 和图 3 可知,蠕变特性变化规律如下。

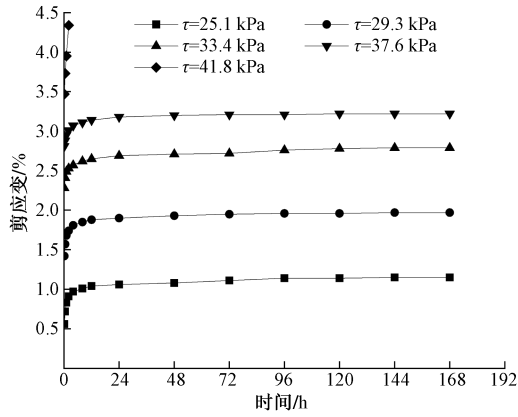
(1)除破坏阶段外,试样加载后均会产生较大变形,随时间流逝变形速率逐步降低,并趋于平缓,并且随着剪切荷载降低,其蠕变曲线趋于水平时间越短。根据曲线规律分析,剪应力较小时,蠕变曲线表现为衰减稳定蠕变,如图 2(a) $\tau=44.9$  kPa;当剪应力逐步增大时,则蠕变曲线表现为衰减稳定和非稳定等速蠕变并存状态,如图 2(a) $52.4$  kPa $\leq\tau\leq 67.3$  kPa;剪应力较大时,蠕变曲线表现为加速蠕变,如图 2(a) $\tau=74.8$  kPa,此时试样变形速率不受时间影响,将迅速发生变形破坏。且瞬时剪应变与



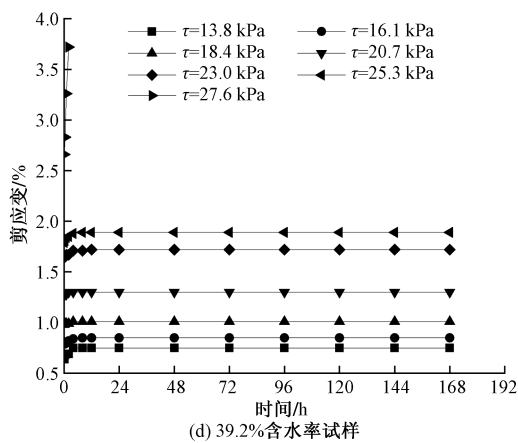
(a) 15%含水率试样



(b) 25%含水率试样

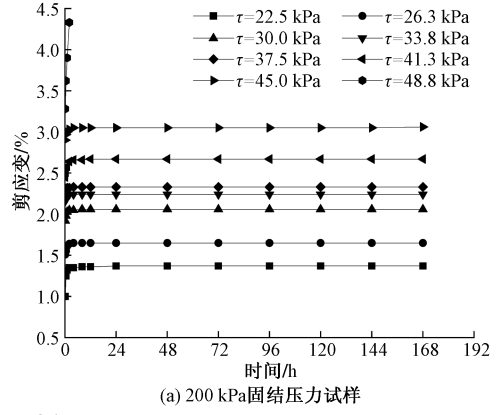


(c) 35%含水率试样

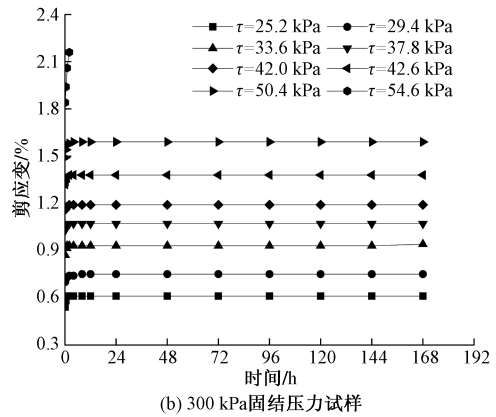


(d) 39.2%含水率试样

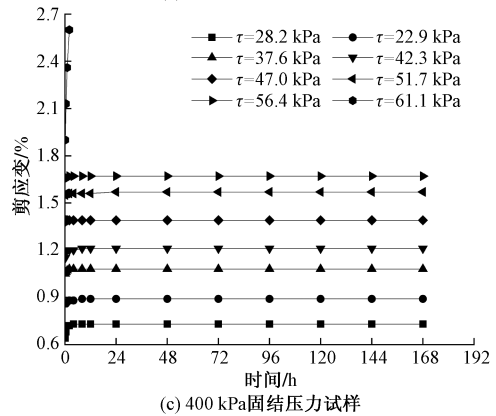
图 2 100 kPa 正应力作用下剪应变与时间关系曲线



(a) 200 kPa 固结压力试样



(b) 300 kPa 固结压力试样



(c) 400 kPa 固结压力试样

图 3 饱和含水率(39.2%)下剪应变与时间关系曲线

剪应力和含水率均呈现正相关。这是因为试样在加载瞬间排出多余水分,使试样出现多孔隙,受荷载作用发生变形;随着岩土体失水,颗粒间含水分少,土体孔隙降低,密实程度提高,胶结程度提高,黏聚力变大,抗剪能力变大。

(2)随含水率增加其破坏所需剪应力降低,剪应变增大,且除饱和试样外,其余试样破坏所需剪应力小于等于快剪试验结果。饱和试样破坏剪应力为快剪试验结果的 120%~130%,正压力 100 kPa 破坏为快剪时 120%,200、300、400 kPa 均为 130%,表明存在随固结程度增加,破坏所需剪力增幅程度越大,当固结达到一定程度,破坏所需剪

力增幅将不变。

(3)由图 3 和图 2(d)进一步分析其蠕变特性。相同含水率,随固结压力越大,岩土体密实程度增加,孔隙降低,其破坏所需的剪应力越大。相同等级加载对应的剪应变变化如下:200 kPa 固结压力时,剪应变最大;100 kPa 固结压力时,剪应变最小;300、400 kPa 固结压力时,剪应变基本一致。表明剪应变随时间呈现先增大再降低趋势,最终趋势逐步趋近于 0,蠕变特性与稳定蠕变基本一致。

## 2.2 蠕变模型

蠕变模型理论主要探讨的是应力、应变和时间三者的关系,可分经验法和蠕变模型理论法两大类。经验法与蠕变模型理论法相比较,缺乏内部机理特性,但其表现形式简洁直观,且在现场实际工程中应用较为广泛,现阶段经验蠕变模型公式有指数函数、幂函数、对数函数形式<sup>[10-11]</sup>。采用指数函数经验模型[式(2)]对上述蠕变曲线进行拟合,以 100 kPa 固结压力 15% 含水率为例,其拟合结果见表 2。根据相关系数  $R^2$  可知,蠕变曲线拟合度在 95% 以上,表明指数经验模型能很好地描述排土场岩土体蠕变特性。

$$\gamma(t) = Ae^{-t/t_0} + \gamma_0 \quad (2)$$

式中: $\gamma(t)$  为  $t$  时刻剪应变; $\gamma_0$  为瞬时应变; $A$  为时间影响系数; $t_0$  瞬时应变时间。

表 2 蠕变模型拟合结果

荷载/kPa	拟合公式	$R^2$
44.9	$\gamma(t) = -0.54e^{-t/0.42} + 0.93$	0.98
52.4	$\gamma(t) = -0.34e^{-t/0.72} + 1.44$	0.98
59.8	$\gamma(t) = -0.20e^{-t/0.61} + 1.87$	0.95
67.3	$\gamma(t) = -0.29e^{-t/0.65} + 2.18$	0.99

## 2.3 长期强度

长期强度是指岩土体在长期荷载作用下,强度参数随时间增长而降低(增长),是计算边坡稳定性分析的重要指标<sup>[12]</sup>。现阶段长期强度确定方法主要有直接法和间接法。直接法是通过大量试验测定岩土体破坏的临界阈值,具有试验组数多且时间长特点。间接法目前常用的有:①等时曲线法,主要依据曲线拐点确定,是应用最广的方法;②过渡蠕变法,认为不发生稳态蠕变时所需的最大荷载,即为岩石的长期强度,且得到的长期强度与蠕变试验的应力等级差有关;同时依据过渡蠕变理论引申出“稳态蠕变速率法”,由稳态蠕变速率与非稳态蠕变速率间的突变值确定长期强度<sup>[13-15]</sup>。

依据岩石力学试验规范,选取等时曲线法求取

其长期强度。以 100 kPa 正压力下不同含水率蠕变曲线为例,选取 1、24、126 h 数据,绘制其相应的剪应力-剪应变的等时曲线(图 4)。

由图 4 可知,不同时刻剪应力-应变关系曲线皆不是直线,表明试样剪切蠕变呈现非线性变化,剪应

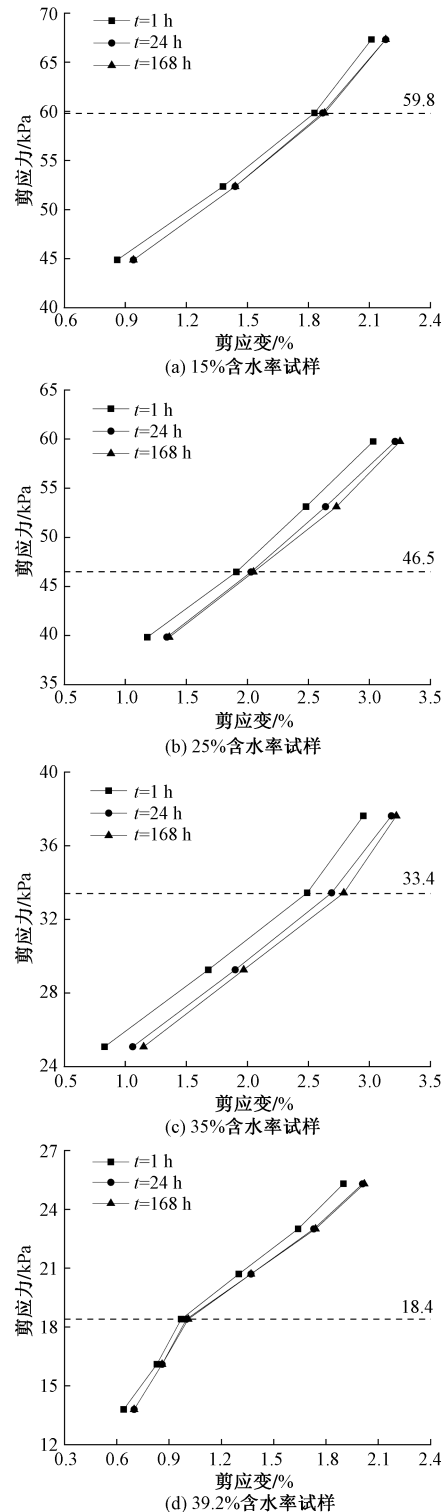


图 4 100 kPa 正压力作用下剪应变与剪应力关系曲线

力与剪应变呈现正比关系;同一级别荷载下,随含水率增加,剪应力与剪应变逐步降低;不同时段变化规律基本吻合,且随时间增加曲线逐渐聚拢。

剪应力随剪应变增加而增加,且关系曲线存在明显拐点,根据等时曲线变化拐点可知,在100 kPa正压力作用下,不同含水率试样对应的剪应力为59.8、46.5、33.4、18.4 kPa。同理可得出200、300、400 kPa正压力对应的剪应力值。根据各正应力对应的剪应力绘制不同正压力下剪应力变化曲线,如图5所示。

根据图5可知,在相同含水率情况下剪应力随正应力增加呈现线性增长趋势,并随含水率升高而降低。这是因为当前含水率范围内,随着固结压力的升高会提高试样的固结度,进一步提高了颗粒间的接触力,促使破坏所需剪应力增加;在相同正应力下,剪应力随含水率增加呈现降低趋势。这是因为随着含水率持续增加,颗粒间存在大量的自由水,引起颗粒间连接力降低进而导致破坏所需剪应力降低。通过对比16组数据可知,含水率由15%增加到39.2%过程中,其抗剪强度平均降低约70%,这表明试样受水体侵蚀后,其强度指标将发生弱化。

基于摩尔-库仑准则,  $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ , 对图5进行线性拟合,得到不同含水率下岩土体长期强度指标如下:15%含水率下拟合公式  $\tau = 33.25 + 0.3645\sigma$  ( $R^2 = 0.95$ ),即黏聚力  $c = 33.25$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 20.1^\circ$ ;25%含水率拟合公式  $\tau = 18.7 + 0.3034\sigma$  ( $R^2 = 0.99$ ),即黏聚力  $c = 18.7$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 16.9^\circ$ ;35%含水率拟合公式  $\tau = 15.2 + 0.169\sigma$  ( $R^2 = 0.99$ ),即黏聚力  $c = 15.2$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 9.6^\circ$ ;饱和含水率(39.2%)拟合公式  $\tau = 11.3 + 0.1086\sigma$  ( $R^2 = 0.93$ ),即黏聚力  $c = 11.3$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 6.2^\circ$ 。不同含水率下拟合曲线相关系数较高,表明试验得出的内排土

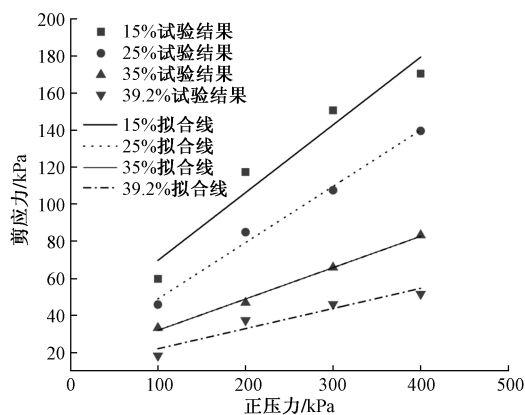


图5 不同含水率下正应力与剪应力变化曲线

场岩土体长期强度指标较为合理。

为了进一步分析排土场岩土体长期强度指标与含水率的变化规律,根据试验得出的长期强度指标绘制不同含水率下强度指标变化曲线,并进行拟合,如图6所示。

由图6曲线分析变化规律如下。

(1) 15%~39.2%含水率范围内,根据拟合结果可知,排土场岩土体黏聚力满足  $y = -2.13054e^{(-x/-17.83008)} + 25.19248$  指数函数变化规律。黏聚力随含水率增长呈现指数递减趋势,且存在明显梯度分布,随含水率降低梯度先增大后降低,达到饱和状态黏聚力最终降低约66%。含水率由15%提升到25%黏聚力降低14.55 kPa,约降低43.76%;含水率由25%提升到35%黏聚力降低3.5 kPa,约降低18.72%。分析其原因是颗粒间存在大量的自由水,随含水率增加,诱发岩土体颗粒间连接力降低,黏聚力下降。

(2) 15%~39.2%含水率范围内,根据曲线拟合结果可知,岩土体内摩擦角满足  $y = 92.18419e^{(-x/-10.89063)} + 9.92162$  指数函数变化规律。内摩擦角随含水率增加呈现指数降趋势,达到饱和状态内摩擦角最终降低约69%。内摩擦角反映土体间颗粒的摩擦力,本地区泥岩含有大量的伊利石,属于强亲水性矿物,在充水条件下,具有较强的吸附水分子于颗粒表面的能力,进而在颗粒周围形成水化膜,随含水率的增加导致颗粒周围水膜增厚,颗粒间的摩擦力减小,所以会出现内摩擦角降低现象。

综上所述可知,水体对内排土场岩土体危害巨大。为确保边坡安全,排土场排弃过程中应做好疏干排水工程。同时含水率、内摩擦角及黏聚力满足上述指数经验公式,通过经验公式可以明确得到不同含水率下  $c$ 、 $\varphi$  值,进而借助极限平衡法可以

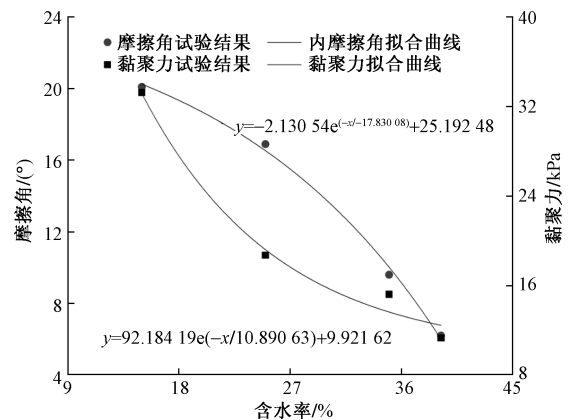


图6 含水率与长期强度变化曲线

更加精准地计算该地区或同类型含水条件下内排土场稳定性,缩短计算周期,提高工程效率,具有一定的实用性。

### 3 结论

(1)排土场岩土体具有明显蠕变特性,蠕变曲线满足指数经验公式。剪应力较低时呈现衰减蠕变趋势,随剪应力增加呈现衰减蠕变、非稳定蠕变趋势,最终呈现加速蠕变趋势,直至试样破坏。

(2)水体对排土场岩土体具有弱化作用,随含水率增加其抗剪强度呈现降低趋势,含水率由 15% 增加到 39.2%,其抗剪强度平均降低约 70%,与固结程度关系不大。

(3)相对 15% 含水率,饱和含水率状态下排土场岩土体长期强度指标发生大幅度降低,黏聚力降低 66%,内摩擦角降低 69%。饱和含水率下,黏聚力  $c=11.3$  kPa,内摩擦角  $\varphi=6.2^\circ$ 。

(4)在 15%~39.2% 含水率范围内,长期强度指标均呈现指数降低趋势,但降低梯度存在不同。黏聚力在 25% 含水率前降低梯度逐步大,25% 含水率后降低梯度逐步减小;内摩擦角降低梯度呈现增大趋势。

### 参考文献

- [1] 丁怡婷. 去年我国露天煤矿产量首次突破 10 亿吨[N]. 人民日报, 2023-08-11(011).
- [2] 王来贵, 张鹏, 李喜林. 含水率及压实度对排土场岩土抗剪强度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 699-703.
- [3] WANG B, LI T, LI C, et al. Study on the creep properties and fracture behavior of three different rock types

- with a single preexisting fissure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(7): 03283-4.
- [4] LI X, YIN Z. Study of creep mechanical properties and a rheological model of sandstone under disturbance loads [J]. Processes, 2021, 9(8): 908129.
- [5] 王游, 卢小雨, 翟国良. 基于西原体模型的非正常岩石蠕变模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 676-682.
- [6] 徐刚, 彭来栋, 金洪伟. 含水煤体蠕变损伤特性及本构模型研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(9): 152-157.
- [7] 李昂, 陈建博, 孙兴华, 等. 原状黄土一维蠕变试验及蠕变模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8789-8796.
- [8] 王新刚, 刘凯, 王友林, 等. 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 137-143.
- [9] 周瑞鹤, 程桦, 蔡海兵, 等. 三轴压缩分级卸荷条件下粉砂岩蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1136-1147.
- [10] 张院成. 干燥和饱水状态下红砂岩蠕变本构模型的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [11] 乔卓, 崔德山, 陈琼, 等. 三峡库区黄土坡滑坡滑带土卸荷状态下的直剪蠕变特性研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 156-163.
- [12] 董金玉, 景茂, 赵亚文. 花花岩组滑坡堆积体蠕变特性研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 1-7 [2024-01-17] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230512.0859.002.html>.
- [13] 史为政, 许晓亮, 黄天柱, 等. 不同初始应力下软岩卸荷蠕变试验及长期强度[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11577-11584.
- [14] 李祖勇, 杨更社. 基于蠕变试验的冻结红砂岩长期强度研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9976-9982.
- [15] 赵骏, 江梦飞, 范晨, 等. 真三轴应力下锦屏大理岩长期强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S1): 3324-3330.

## Research on Creep Characteristics and Long Term Strength of Water Containing Waste Dump

CHANG Jian, GUO Ji, SU Qiang, WANG Haoran, SUN Hongchang

(China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute,  
State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to reveal the creep characteristics and long-term strength of rock and soil mass in waste dump, a series of tests were conducted using ZLB-1 type triple creep direct shear creep apparatus in a graded loading form to study the creep characteristics and long-term strength variation laws of rock and soil mass under different water contents and consolidation pressures. The test results show that within the range of 15% to 39.2% (saturated) water content, the rock and soil mass in the waste dump show nonlinear creep, and with the increase of shear stress, the creep curve showed attenuation creep, unstable creep, and accelerated creep, until the sample is damaged. A large instantaneous strain occurred immediately after the application of shear stress, and it increased with the increase of shear stress. The long-term strength index showed an exponential decreasing trend with water content; compared with the 15% water content sample, the long-term strength index of the rock and soil mass in the waste dump under saturated water content; cohesion decreased by 66%, internal friction angle decreased by 69%; its variation law meets the exponential fitting formula. The research results which can provide basic data for stability calculation of the same type of water-bearing waste dump.

**Keywords:** water-rich waste dump; step loading; moisture content; creep; long-term strength