

# 不同含水状态下的桂林临桂区滑坡页岩剪切蠕变特性试验研究

杨箫纤<sup>1</sup>, 高元明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

<sup>2</sup>浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月19日

## 摘要

本文以桂林临桂区滑坡页岩为研究对象, 开展干燥、天然、饱和三种含水状态下的分级剪切蠕变试验, 系统分析了含水状态与剪切荷载对页岩剪切力学特性及蠕变规律的影响。结果表明: 含水率显著弱化页岩抗剪强度, 干燥、天然、饱和状态峰值剪切强度依次为3.19 MPa、2.80 MPa、2.33 MPa, 饱和状态较干燥状态降低约27%; 各级剪切荷载下, 页岩均表现为“瞬时变形-减速蠕变-稳态蠕变”的三阶段蠕变特征, 剪切荷载越大, 初始瞬时应变与稳态应变越大, 进入稳态蠕变的时间越短; 含水率放大了蠕变变形并加速了蠕变进程, 同一荷载下饱和试样的稳态蠕变应变为干燥试样的1.8~2.3倍, 水岩耦合作用是边坡蠕变失稳的关键诱因。研究成果可为桂林地区页岩边坡长期稳定性评价及滑坡防治提供试验依据与理论支撑。

## 关键词

页岩边坡, 含水状态, 剪切蠕变, 剪切强度

## Experimental Study on Shear Creep Properties of Landslide Shale in Lingui District, Guilin under Different Water-Containing State

Zhixian Yang<sup>1</sup>, Yuanming Gao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

<sup>2</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

Received: March 16, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 19, 2026

文章引用: 杨箫纤, 高元明. 不同含水状态下的桂林临桂区滑坡页岩剪切蠕变特性试验研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(5): 691-698. DOI: 10.12677/ag.2026.165063

## Abstract

This paper investigates the shear creep behavior of landslide shale from Lingui District, Guilin. Graded shear creep tests were conducted under dry, natural, and saturated conditions to systematically analyze the effects of water-containing state and shear load on the shear mechanical properties and creep characteristics of shale. The results show that water content significantly weakens the shear strength of shale: the peak shear strengths of dry, natural, and saturated states are 3.19 MPa, 2.80 MPa, and 2.33 MPa, respectively, with the saturated state reducing by about 27% compared with the dry state. Under all shear loads, the shale exhibits a three-stage creep characteristic of “instantaneous deformation-decelerated creep-steady creep”. The higher the shear load, the larger the initial instantaneous strain and steady-state strain, and the shorter the time to enter the steady-state creep. Water content amplifies creep deformation and accelerates the creep process: under the same load, the steady-state creep strain of saturated samples is 1.8~2.3 times that of dry samples, and the water-rock interaction is the key inducement for slope creep instability. The research results can provide an experimental basis and theoretical support for the long-term stability evaluation and landslide prevention of shale slopes in Guilin area.

## Keywords

Shale Slope, Water-Containing State, Shear Creep, Shear Strength

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

桂林作为典型的喀斯特地貌集中区域, 广泛分布的页岩地层因古沉积环境塑造的层理结构和黏土矿物富集特性, 在边坡工程中呈现显著的水敏感性与蠕变特性。桂林地区年均降雨量达 1800~2000 mm, 雨季集中且短时暴雨频发, 降雨入渗引发的页岩软化、孔隙水压力变化与长期蠕变变形的耦合作用, 已成为区域边坡滑坡灾害的主要诱因, 雨季时节页岩质边坡失稳事故频发, 例如桂林平乐县凤凰岭山体滑坡[1]、临桂新区旅游园页岩边坡失稳[2]。

页岩的蠕变特性是影响页岩边坡长期稳定性的核心因素之一, 其流变行为与含水程度密切相关, 长期饱水状态会通过水岩的耦合作用显著劣化页岩的力学性能与变形特征[3]-[7]。水侵入页岩内部后, 一方面会填充孔隙并提升瞬时承载能力[7], 另一方面会通过黏土矿物膨胀、胶结物溶蚀及结构面润滑等机制, 削弱颗粒间联结与摩擦阻力, 加速内部应力重分布, 最终表现为初始瞬时弹性模量升高、蠕变稳态形成时间缩短、剪切蠕变应变显著增大, 同时抗剪强度大幅下降[8] [9]。此外, 剪应力水平作为外部荷载条件, 也与页岩蠕变特性存在显著耦合效应, 在长期强度范围内, 剪应力越大, 页岩进入蠕变稳态的速度越快, 剪切蠕变变形也越剧烈, 进一步提高了边坡的长期变形风险[10] [11]。

本文以桂林临桂某边坡页岩为研究对象, 开展了不同含水状态与剪切荷载水平下的剪切蠕变试验, 系统探讨了含水率与剪应力对页岩流变破坏特性的影响, 试验结果揭示了含水程度与剪应力水平对页岩流变及力学性能的影响规律, 可为不同降雨工况下桂林页岩滑坡的长期稳定性评估提供科学依据。

## 2. 试验介绍

### 2.1. 矿物成分分析

为明确页岩的矿物组成及其水敏感性, 采用 X 射线衍射(XRD)对试样进行了全岩矿物分析。结果表明, 试样中黏土矿物总含量为 41.2%, 其中蒙脱石含量为 12.6%, 伊利石含量为 24.3%, 高岭石含量为 4.3%。非黏土矿物以石英(32.5%)、长石(15.8%)和方解石(10.5%)为主。蒙脱石与伊利石等亲水矿物的存在是页岩水敏感性的内在原因, 遇水后易发生晶层膨胀与颗粒间联结弱化, 为水-岩相互作用提供了微观基础。

### 2.2. 试样制备与基本物理力学性质

试验所用页岩边坡试样取自广西桂林市临桂区某滑坡页岩, 边坡岩体以寒武系~奥陶系页岩、砂质页岩为主, 岩性软硬相间, 层理发育, 为典型的页岩岩质边坡。试样被加工成直径 61.8 mm, 高 20 mm 的圆柱体, 为保证试样的均一性, 试样选用同一组岩芯制成, 且层理面与剪切面平行。

采用环刀法测得页岩试样天然密度为 2.34~2.48 g/cm<sup>3</sup>。干燥试样通过 105℃ 恒温烘干至恒重制得, 饱和试样通过真空饱和法制备; 天然及饱和状态下页岩试样的含水率测得为 8.2%~9.40%、15.6%~16.3%。每种工况制备 3 个平行试样, 试验结果取均值进行曲线绘制。

通过非蠕变直剪试验(剪切速率 0.5 mm/min, 以峰值后强度下降 15%作为破坏标准)测得: 干燥状态下黏聚力为 3.38 MPa, 内摩擦角为 36°; 天然状态下黏聚力为 3.01 MPa, 内摩擦角为 31°; 饱和状态下黏聚力为 2.59 MPa, 内摩擦角为 26°。

### 2.3. 试验设备与方案

本次试验采用 ZLB-1 型三联流变直剪试验仪进行加载与测量, 仪器荷载控制精度  $\pm 1\%$ , 变形测量精度  $\pm 0.1\%$ , 连续工作时间大于等于 1000 h, 可满足本次试验需求, 试验装置见图 1。

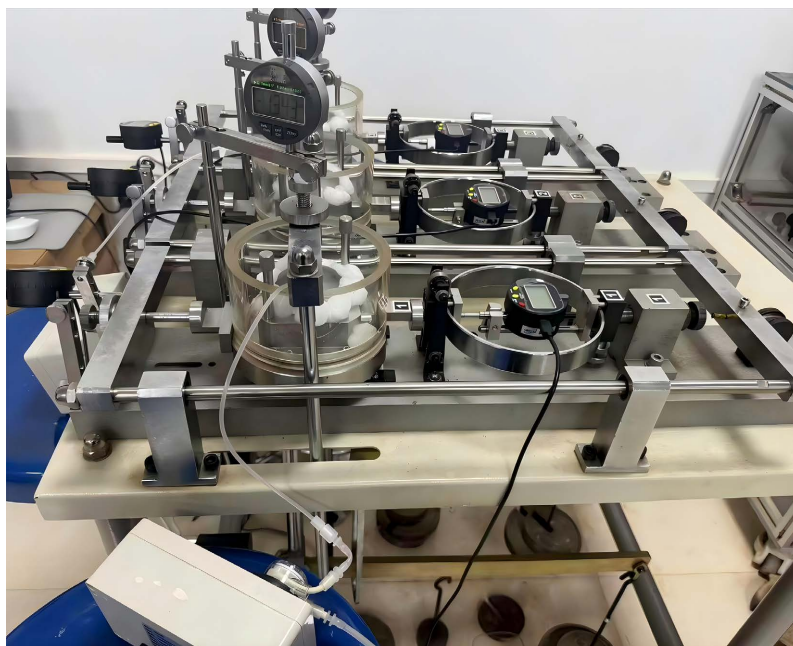


Figure 1. Schematic diagram of ZLB-type triple-rheometer direct shear tester  
图 1. ZLB 型三联流变直剪试验仪示意图

试验中, 恒定法向应力设置为 2.0 MPa (按预估抗剪强度的 60%~80% 设定), 以模拟边坡实际应力状态。每种含水状态(干燥、天然、饱和)均采用 3 个平行试样。试验方案见表 1, 分别对干燥、天然、饱和三种状态的页岩试样进行直剪蠕变试验, 剪切荷载采用分级施加的方式, 每级荷载增量为 0.5 MPa, 依次为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa。加载速率控制为 100 kPa/s, 每级荷载下持续时间不小于 200 h, 分级荷载施加完毕后, 继续加载至试样破坏。

**Table 1.** Shear creep test scheme

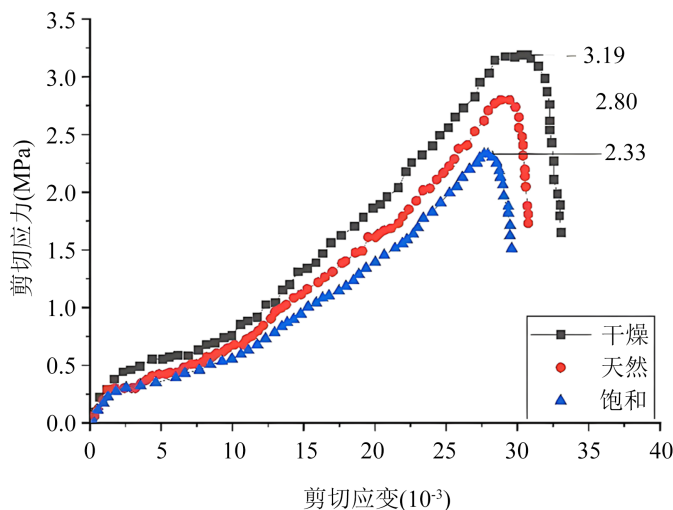
**表 1.** 剪切蠕变试验方案

试样状态	分级剪切荷载(MPa)	加载速率(kPa/s)	每级持续时间(h)	恒定法向应力(MPa)
干燥状态	0.5、1.0、1.5、2.0	100	200	2.0
天然状态	0.5、1.0、1.5、2.0	100	200	2.0
饱和状态	0.5、1.0、1.5、2.0	100	200	2.0

### 3. 不同含水程度下页岩的剪切蠕变规律

#### 3.1. 对剪切强度的影响

试验测得的直剪蠕变试验的应力-应变曲线见图 2。由图 2 剪切应力-应变曲线可知, 干燥状态抗剪强度最高(3.19 MPa), 天然状态次之(2.80 MPa), 饱和状态最低(2.33 MPa), 即抗剪强度随含水率升高而降低, 相较于干燥状态, 天然状态强度降低约 12%, 饱和状态强度降低约 27%。



**Figure 2.** Shear stress-strain curves under different water contents

**图 2.** 不同含水状态下的剪切应力 - 应变曲线

与非蠕变直剪试验结果相比, 蠕变条件下试样的黏聚力与内摩擦角均出现一定程度衰减, 其中非蠕变条件下干燥、天然、饱和状态黏聚力分别为 3.38 MPa、3.01 MPa、2.59 MPa, 蠕变条件下黏聚力衰减幅度为 5.96%、7.50%、11.16%。蠕变条件下长期剪切荷载会进一步促进微裂隙扩展与颗粒间黏结力的持续损耗, 加剧强度劣化。水渗透至微裂隙与结构面, 一方面润滑颗粒接触面, 降低内摩擦角; 另一方面溶蚀钙质、硅质等胶结物, 削弱颗粒间黏聚力。黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\phi$  同步衰减, 最终导致抗剪强度显著下降。

### 3.2. 对进入稳态蠕变所需时间的影响

试验测得的各级剪切荷载下不同含水状态的页岩蠕变曲线见图3。对比图3中(a)~(d)子图可见,在相同剪应力水平下,饱和状态试样进入稳态的时间最短,天然状态次之,干燥状态最长。在0.5 MPa剪应力下,干燥、天然、饱和状态分别约在75 h、50 h、25 h后进入稳态蠕变;当剪应力升至2.0 MPa时,三者进入稳态的时间分别缩短至约30 h、20 h、10 h,均随剪应力增大而显著缩短,且不同含水状态间的时间差随荷载升高而收窄。

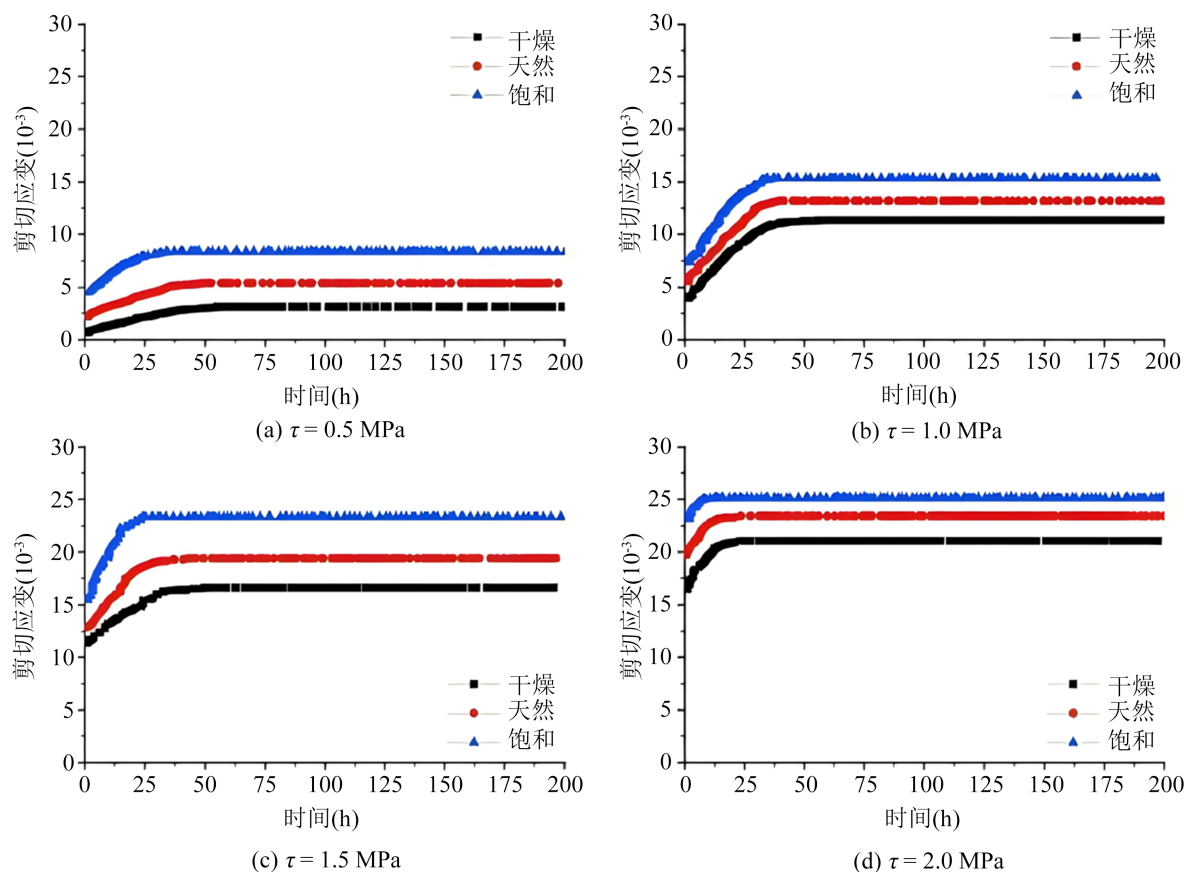


Figure 3. Creep curves of shale with different water contents under various shear stresses

图3. 各级剪应力下不同含水状态的页岩蠕变曲线

水侵入页岩内部后,页岩内部黏土矿物吸水软化、层理面与微裂隙被润滑,颗粒间联结与结构刚度显著下降,变形阻力减小,内部应力重新分布的速度加快,衰减蠕变阶段被大幅压缩。因此含水率越高,蠕变曲线越早趋于平稳,进入稳态蠕变的时间越短。

### 3.3. 对剪切变形的影响

从图2和图3都可以看出,在各级剪应力(0.5~2.0 MPa)作用下,均呈现含水率越高,剪切蠕变应变越大的规律。以200 h时的稳态剪切应变为基准,在0.5 MPa剪应力下,干燥、天然、饱和状态的剪切应变分别约为 $3.5 \times 10^{-3}$ 、 $5.2 \times 10^{-3}$ 、 $8.1 \times 10^{-3}$ ;当剪应力升至2.0 MPa时,三者稳态剪切应变分别增至约 $22.0 \times 10^{-3}$ 、 $24.5 \times 10^{-3}$ 、 $26.0 \times 10^{-3}$ ,且同一荷载下饱和状态应变始终为干燥状态的1.8~2.3倍,体现出含水率对剪切变形的显著放大效应。

这是由于页岩中蒙脱石、伊利石等亲水黏土矿物(XRD 分析显示总含量达 41.2%)遇水后晶层膨胀、颗粒间胶结弱化, 同时水润滑结构面降低了摩擦阻力, 导致岩石整体刚度下降, 在相同剪应力下更易发生剪切变形, 最终表现为蠕变应变随含水率升高而显著增大。

#### 4. 不同剪切荷载下的页岩蠕变规律

不同含水率下的分级剪切蠕变曲线见图 4。各级剪切荷载作用下, 页岩均呈现瞬时变形 - 减速蠕变 - 稳态蠕变典型三阶段蠕变特征, 无含水状态差异。同一含水率下, 随着剪切荷载增大, 页岩初始瞬时剪切应变呈显著增长趋势, 稳态蠕变阶段的最终剪切应变也同步升高, 0.5~2.0 MPa 分级荷载下, 干燥、天然、饱和状态的稳态剪切应变均随荷载提升呈现明显增幅, 其中 2.0 MPa 荷载下干燥、天然、饱和状态稳态剪切应变分别达约  $22.0 \times 10^{-3}$ 、 $24.5 \times 10^{-3}$ 、 $26.0 \times 10^{-3}$ , 表明剪切荷载是控制页岩蠕变变形程度的核心因素, 荷载水平越高, 试样内部微裂隙扩展与剪切滑移越剧烈, 蠕变变形累积效应越显著。

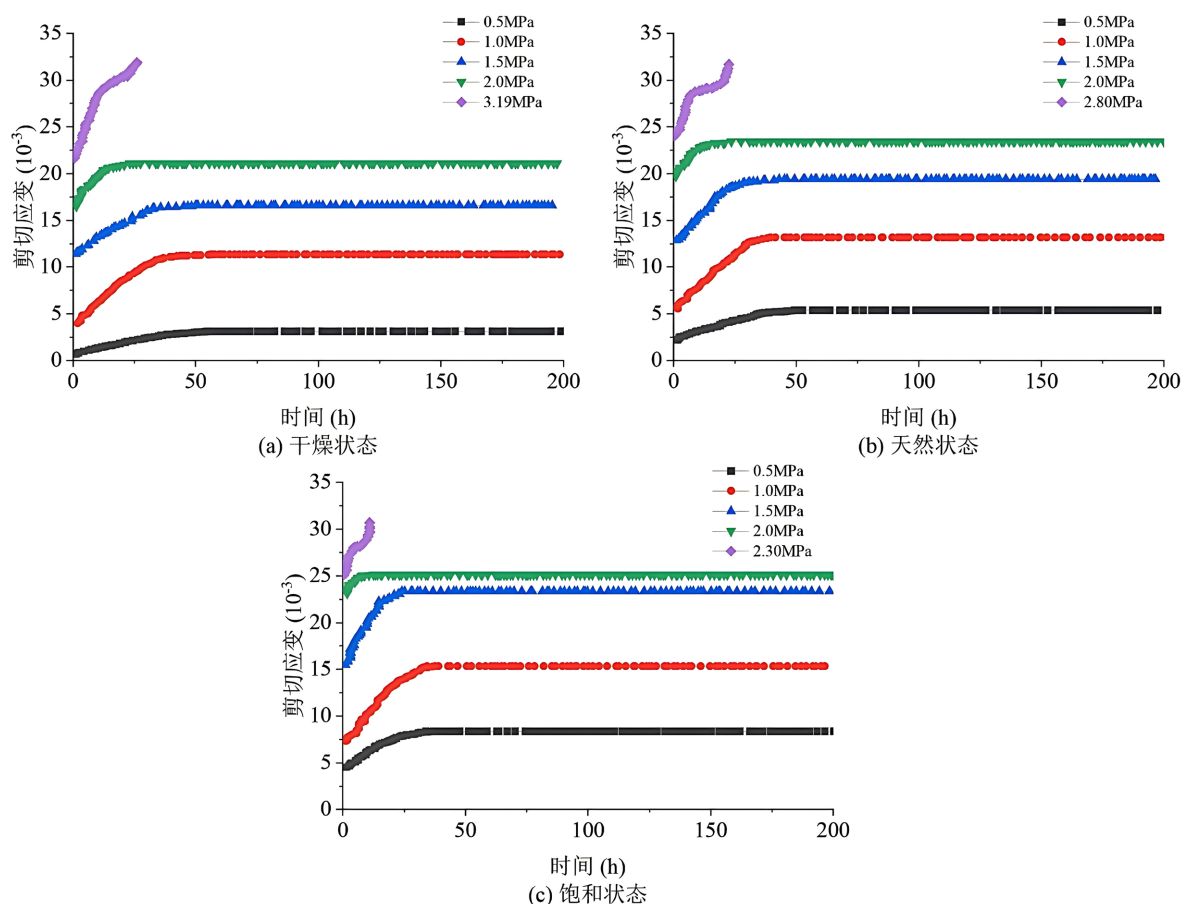


Figure 4. Graded shear creep curves under different water contents

图 4. 不同含水率下的分级剪切蠕变曲线

同时, 不同含水率下页岩分级剪切蠕变曲线形态保持一致, 说明分级加载模式下, 页岩蠕变阶段的演化规律不受含水率变化的本质影响, 含水率仅改变蠕变变形的量级, 未改变其蠕变演化特征。

#### 5. 蠕变本构模型拟合

为定量描述页岩的剪切蠕变特性, 采用 Burgers 模型对各级荷载下的蠕变曲线进行拟合。Burgers 模

型由 Maxwell 单元与 Kelvin 单元串联构成, 其本构方程可表达为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right)$$

式中,  $E_1$  为瞬时弹性模量,  $\eta_1$  为 Maxwell 单元的黏性系数, 控制稳态蠕变速率;  $E_2$  为延迟弹性模量,  $\eta_2$  为 Kelvin 单元的黏性系数, 控制衰减蠕变阶段的变形特征。采用最小二乘法对各级荷载下的蠕变曲线进行参数拟合, 以 1.0 MPa 荷载为例, 拟合得到的 Burgers 模型参数见表 2。

**Table 2.** Burgers model parameters under different water contents (Shear load = 1.0 MPa)

**表 2.** 不同含水状态下的 Burgers 模型参数(剪切荷载 1.0 MPa)

试样状态	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\eta_1$ (GPa·h)	$\eta_2$ (GPa·h)	拟合优度 $R^2$
干燥状态	1.52	0.89	18.6	4.2	0.976
天然状态	1.21	0.64	12.3	2.8	0.983
饱和状态	0.93	0.41	7.8	1.6	0.979

由表 2 可知, 随着含水率升高, 瞬时弹性模量  $E_1$  与延迟弹性模量  $E_2$  均呈下降趋势, 饱和状态较干燥状态分别降低 38.8% 和 53.9%, 表明含水率显著削弱了页岩的瞬时刚度与延迟弹性响应。黏性系数  $\eta_1$  和  $\eta_2$  也随含水率升高而减小, 饱和状态较干燥状态分别降低 58.1% 和 61.9%, 说明含水率的增加降低了页岩抵抗蠕变变形的能力, 加速了蠕变进程。

## 6. 讨论

### 6.1. 与已有研究对比

本文获得的页岩抗剪强度随含水率变化规律与已有研究结果具有一致性。Lu 等(2017)对煤系泥岩的研究表明, 饱和状态较干燥状态抗剪强度降低约 23% [8]; HUANG 等(2021)对含黏土红砂岩的研究表明, 强度降低幅度为 18%~31% [9]。本文饱和状态较干燥状态强度降低约 27%, 处于上述研究结果的区间内, 但略高于煤系泥岩的降低幅度, 可能与页岩中较高的黏土矿物含量(41.2%)有关。针对桂林临桂层理发育滑坡页岩, 给出剪切蠕变三阶段量化特征; 明确稳态应变放大倍率(1.8~2.3 倍)与稳态时间量化差值, 为工程提供直接参数; 用 Burgers 模型获得流变参数, 揭示水-岩作用的流变机制。与严珊等(2023)、胡斌等(2024)针对炭质泥岩、泥页岩的研究相比[10] [11], 本文页岩蒙脱石、伊利石含量更高, 水敏性更强, 相同含水率下蠕变变形更大、稳态时间更短, 体现区域岩性差异。

### 6.2. 水-岩作用微观机理

XRD 矿物成分分析显示, 试样中蒙脱石含量为 12.6%, 伊利石含量为 24.3%。蒙脱石遇水后晶层间距可增大至原体积的 1.5~2 倍, 产生显著的膨胀压力; 伊利石虽膨胀性较弱, 但其颗粒间联结遇水后易发生滑移。两种矿物的协同作用导致页岩遇水后结构刚度下降、颗粒间摩擦阻力减小, 宏观上表现为抗剪强度降低、蠕变变形增大。

此外, 水的渗入还会溶解页岩中的钙质、硅质胶结物(方解石含量为 10.5%), 进一步削弱颗粒间的黏结强度。水-岩相互作用的上述微观机制共同构成了页岩蠕变行为的水敏感性基础。

## 7. 结论

本文以桂林临桂区滑坡页岩为研究对象, 开展了干燥、天然、饱和和三种含水状态下的分级剪切蠕变

试验, 结合 Burgers 模型拟合与 XRD 矿物成分分析, 得到以下结论:

1) 含水率与剪切荷载是控制页岩蠕变行为的关键因素。饱和状态较干燥状态峰值剪切强度降低约 27%, 稳态蠕变应变增大 1.8~2.3 倍, 进入稳态蠕变的时间缩短 50%~70%。剪切荷载越大, 蠕变变形越显著, 二者呈正相关关系。

2) 页岩中蒙脱石(12.6%)、伊利石(24.3%)等亲水矿物的存在是水敏性的内在原因。水侵入后通过黏土矿物膨胀、胶结物溶蚀及结构面润滑等机制, 削弱了颗粒间联结与摩擦阻力。Burgers 模型参数拟合显示, 饱和状态较干燥状态瞬时弹性模量降低 38.8%, 黏性系数降低 58.1%~61.9%, 从本构层面量化了水对页岩蠕变能力的放大效应。

3) 不同含水状态对应不同降雨工况下页岩边坡的长期稳定性。天然状态可作为常规工况参考, 饱和状态可用于极端降雨条件下的稳定性评估。研究结果为桂林地区页岩边坡滑坡防治提供了试验依据。

4) 本研究存在以下局限性: ① 试样直径 61.8 mm, 存在一定尺寸效应, 大尺寸试样的蠕变特性有待进一步验证; ② 试样取自单一滑坡点, 结论的普适性需通过多点取样加以验证; ③ 试验持续时间为 200 h/级, 与实际工程数十年的长期蠕变存在时间尺度差异, 长期蠕变特性需进一步外推研究。

## 参考文献

- [1] 马江敏. 桂林市平乐县凤凰岭山体滑坡稳定性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [2] 周洁军, 郑小东, 唐名富. 桂林罗山湖体育旅游园地质灾害分析及其防治措施[J]. 安徽建筑, 2014, 20(1): 70-71.
- [3] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6): 1081-1106.
- [4] Zhang, L., Huang, C., Li, Z., Han, Z., Weng, X. and Wang, L. (2023) Uniaxial Creep Test Analysis on Creep Characteristics of Fully Weathered Sandy Shale. *Processes*, **11**, Article 610. <https://doi.org/10.3390/pr11020610>
- [5] Chen, Y., Hao, X., Teng, J. and Wen, Z. (2023) Creep Behavior of Water-Containing Bedded Shale. *Journal of Central South University*, **30**, 975-991. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5279-7>
- [6] Luo, A., He, J., Li, J., Gong, X., Cao, W. and Wu, Y. (2025) Experimental Study on the Influence of Water-Rock Interaction on the Mechanical Characteristics and Creep Behavior of Shale. *Journal of Geo-Energy and Environment*, **1**, 61-69. <https://doi.org/10.62762/jgee.2025.256463>
- [7] Kim, J., Ferrari, A., Ewy, R., Duranti, L. and Laloui, L. (2025) Impact of Water Saturation on the Anisotropic Elastic Moduli of a Gas Shale. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **58**, 4645-4659. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04397-9>
- [8] Lu, Y. and Wang, L. (2017) Effect of Water and Temperature on Short-Term and Creep Mechanical Behaviors of Coal Measures Mudstone. *Environmental Earth Sciences*, **76**, Article No. 597. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6941-x>
- [9] Huang, S., He, Y., Liu, G., Lu, Z. and Xin, Z. (2021) Effect of Water Content on the Mechanical Properties and Deformation Characteristics of the Clay-Bearing Red Sandstone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 1767-1790. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01994-6>
- [10] 严珊, 胡斌, 魏二剑, 等. 渗透压作用下黄山石灰石矿区炭质泥页岩剪切蠕变特性分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 245-252.
- [11] 胡斌, 曹建军, 王泽祺, 等. 冲击扰动下泥页岩剪切蠕变试验及蠕变损伤模型研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 900-910.