



考虑含水率的红砂岩蠕变力学特性试验研究*

王晓峰^{1,2}, 史忠毓^{1,2}

(1. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵州 铜仁 554300;
2. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇三地质大队, 贵州 铜仁 554300)

摘要: 为揭示不同含水状态下红砂岩的蠕变力学特性, 以0%、1.25%、3.16%和5.38% 4种含水率为控制条件, 开展三轴压缩蠕变试验。分析蠕变试验结果, 探究不同含水条件下红砂岩应变特征、蠕变速率和长期强度的变化规律。研究发现: 1) 红砂岩在水和应力的作用下表现出3阶段蠕变行为, 高含水率岩石在更少加载等级下发生蠕变破坏; 2) 红砂岩蠕变应变远大于瞬时应变, 水的作用促进瞬时和蠕变应变的增长; 3) 含水率的升高对初始和极限加速蠕变速率的增大起到促进作用; 4) 红砂岩在4种含水率下的长期强度分别为22.86、21.91、16.27和10.74 MPa, 长期强度随含水率的升高而逐渐降低。研究成果可为红砂岩蠕变特性研究及港口地基长期稳定性分析提供参考。

关键词: 港口地基工程; 含水率; 红砂岩; 蠕变; 长期强度

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0209-06

Experimental study on creep mechanical properties of red sandstone considering water content

WANG Xiao-feng^{1,2}, SHI Zhong-yu^{1,2}

(1. Technology Innovation Center of Bedrock Mineral Resources Exploration Engineering, Ministry of Natural Resources, Tongren 554300, China;
2. 103 Geological Brigade of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, China)

Abstract: In order to reveal the creep mechanical properties of red sandstone under different water content conditions, we carry out triaxial compression creep tests under the control conditions of 0%, 1.25%, 3.16% and 5.38% water content, and analyze the creep test results to explore the strain characteristics, creep rate and long-term strength of red sandstone under different water bearing conditions. It is found that: 1) Red sandstone shows three-stage creep behavior under the action of water and stress, and creep failure occurs in rocks with high water content under less loading levels; 2) The creep strain of red sandstone is much larger than the instantaneous strain, and the action of water promotes the growth of instantaneous and creep strain; 3) The increase of moisture content promotes the increase of initial and ultimate accelerated creep rate; 4) The long-term strength of red sandstone under four water contents is 22.86, 21.91, 16.27 and 10.74 MPa respectively. The long-term strength decreases gradually with the increase of water content. The research results may serve as reference for the study of creep characteristics of red sandstone and the long-term stability analysis of port foundation.

Keywords: port foundation project; moisture content; red sandstone; creep; long-term strength

红砂岩在我国西南地区广泛分布, 受赋存环境和人为活动影响, 具有较强的蠕变效应^[1-2]。水

是影响岩石蠕变的重要因素之一, 内陆港口地基工程建设中, 岩石地基在地下以及地表水径流的

收稿日期: 2021-10-10

*基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合 20162902)

作者简介: 王晓峰(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地基工程及工程地质研究工作。

作用下, 易发生蠕变变形, 威胁港口地基工程长期稳定性^[3], 由此开展红砂岩在不同含水条件下的蠕变力学特性研究。

对于不同含水条件下的岩石蠕变特性试验研究已有一定成果: 张春阳等^[4]开展斜长角闪岩在干燥和饱和状态下的单轴压缩蠕变试验, 发现饱和状态下岩石瞬时及长期强度低于干燥状态, 蠕变量高于干燥状态; 巨能攀等^[5]进行了3种含水率下的红层泥岩三轴蠕变试验, 试验表明含水率的升高促进蠕变速率的提升, 非线性蠕变程度随含水率升高而愈得到体现; 秦哲等^[6]以花岗质碎裂岩为研究对象, 开展不同饱水-失水循环次数下的三轴蠕变试验, 发现随着饱水-失水循环次数的增加, 瞬时及蠕变应变速增, 蠕变速率递增; 于超云等^[7]完成红砂岩在不同含水状态下的单轴压缩蠕变试验, 认为随着含水率的提升, 稳态蠕变速率呈指数形式递增, 蠕变应变和破坏时间递减; 姚强岭等^[8]以细粒长石岩屑砂岩为试验对象, 进行不同含水率下的三轴压缩蠕变试验, 指出岩石长期强度随着含水率增大呈指数降低趋势, 长期强度与瞬时强度比值为0.3~0.5。

本文研究对象为贵州地区某内陆港口地基工程红砂岩, 开展4种含水条件下的三轴压缩蠕变试验, 分析蠕变试验结果, 探究不同含水条件下红砂岩应变特征、蠕变速率和长期强度的变化规律, 并对比长期强度和瞬时强度关系。研究成果可为红砂岩蠕变特性研究及港口地基长期稳定性分析提供参考。

1 试验方案设计

研究对象为贵州地区某内陆港口地基工程红砂岩, 其在水的作用下蠕变现象较为明显。在基坑内凿取新鲜岩样, 密封后运回实验室制备直径50 mm、高100 mm的圆柱体试样, 将两端打磨削平。经X衍射可知, 红砂岩由碎屑物(74%)和胶结物(26%)组成, 碎屑物主要由石英(61%)、长

石(12%)、岩屑(1%)等组成, 胶结物主要由方解石(16%)、蒙脱石(7%)、高岭石(2%)、伊利石(1%)等组成, 岩样天然状态下基本物理力学参数见表1。

表1 红砂岩基本物理力学参数

密度/ (t·m ⁻³)	孔隙率/ %	含水率/ %	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
2.104	0.61	1.25	20.09	38.55

试验设置4种含水状态, 采用烘干和自然浸水的方式制备含水率为0%(干燥状态)、1.25%(天然状态)、3.16%和5.38%的试样。试验仪器采用RLW-2000型岩石三轴蠕变仪, 将围压设置为1 MPa, 在进行三轴压缩蠕变之前, 先进行常规三轴压缩试验, 试验结果如图1所示。

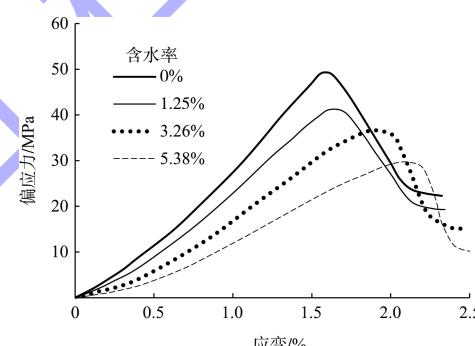


图1 常规三轴压缩试验结果

蠕变试验中每级加载应力 $\Delta q = Kq_f/n$, 其中 K 为材料的强度降低系数, 通常取 0.65~0.85; q_f 为破坏偏应力; n 为加载级数^[9]。结合图1中常规三轴压缩试验结果, 设置蠕变试验加载方案(表2)。

表2 蠕变试验加载方案

含水率/ %	围压/ MPa	破坏偏应 力 q_f /MPa	K	偏应力加 载/MPa
0	1	49.33	0.7	6、12、18、24、30
1.25	1	41.19	0.7	6、12、18、24、30
3.16	1	36.62	0.7	6、12、18、24
5.38	1	29.67	0.7	6、12、18

2 红砂岩蠕变特性分析

2.1 蠕变试验结果

通过试验系统数据采集, 得到不同含水条件下的蠕变试验曲线(图2)。

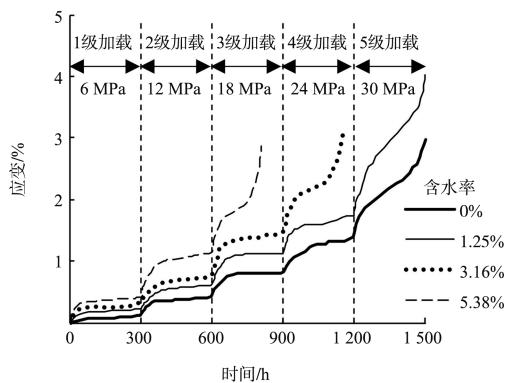
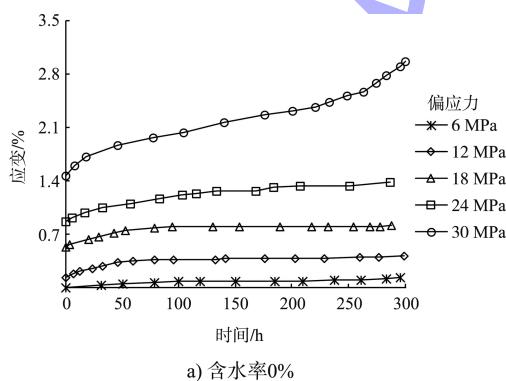


图 2 蠕变试验曲线

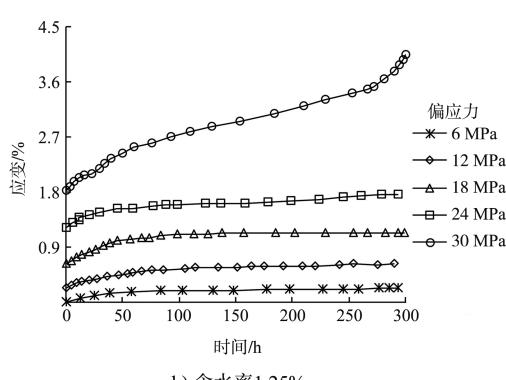
由图 2 可知, 不同含水条件下的蠕变曲线随着时间增加均呈逐渐累积趋势。蠕变曲线的衰减、稳态蠕变行为显著, 在最后一级加载下还表现出明显的加速蠕变行为, 岩样发生宏观破坏。在含水率为 0% 和 1.25% 时, 岩样均在第 5 级加载下发生加速蠕变, 含水率 3.16% 时为第 4 级, 含水率 5.38% 时为第 3 级, 高含水率时岩样在更小的加载等级下发生蠕变破坏, 且在同一加载等级下, 应变随着含水率的提升而递增, 说明水的作用促进红砂岩的蠕变变形。

2.2 分别加载蠕变曲线

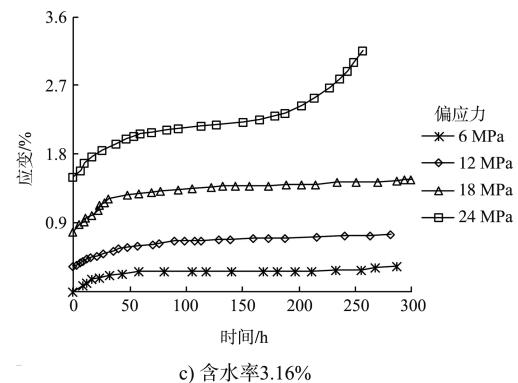
对图 2 进行 Boltzmann 线性叠加^[10-11], 得到不同含水条件下的分别加载蠕变曲线(图 3)。



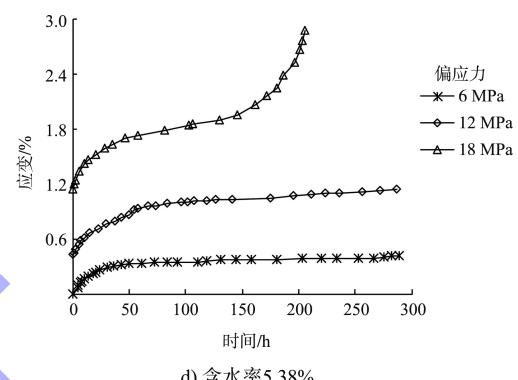
a) 含水率 0%



b) 含水率 1.25%



c) 含水率 3.16%



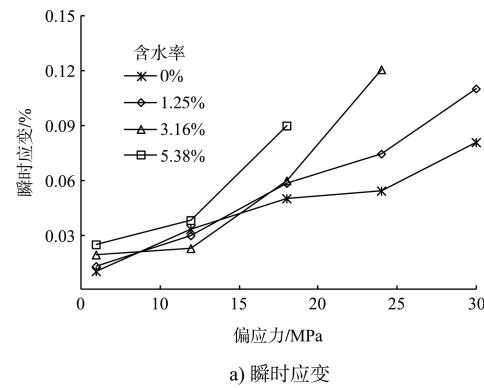
d) 含水率 5.38%

图 3 分别加载蠕变曲线

由图 3 可知: 在每一级加载的瞬间, 红砂岩均表现出瞬时的弹性变形; 接着进入衰减蠕变阶段, 该阶段应变率递减; 当减小到某一值附近时趋于稳定, 进入稳定蠕变阶段, 该阶段应变率基本保持恒定; 当加载等级达到最后一级时, 岩石表现出加速蠕变行为, 此时应变率急剧增加, 岩石随即屈服破坏。

2.3 应变特征

为反映岩石应变特征, 绘制不同含水条件下岩石的瞬时应变和蠕变应变曲线(图 4)。



a) 瞬时应变

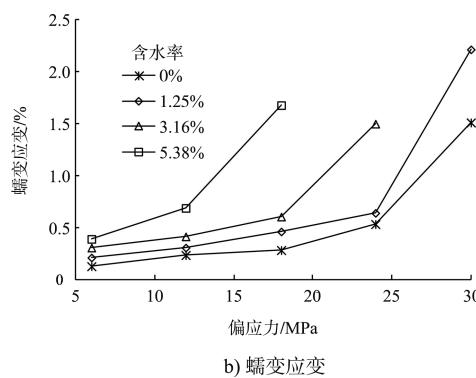


图 4 瞬时及蠕变应变曲线

由图 4a) 可看出, 在同一含水率下, 瞬时应变随着偏应力的增加逐渐增大。瞬时应变在含水率 3.16% 第 4 级加载下有最大值, 达 0.12%。含水率 5.38% 下第 3 级加载的瞬时应变远大于另外 3 种含水率, 含水率 3.16% 第 4 级加载下的瞬时应变远大于含水率 0% 和 1.25% 时, 含水率 1.25% 第 5 级加载下的瞬时应变远大于含水率 0% 时, 说明水的作用对岩石瞬时应变累积起到促进作用。

由图 4b) 可看出, 在同一含水率下, 蠕变应变随着偏应力的增加逐渐增大, 最后一级加载下蠕变应变显著增大。在同一加载等级下, 蠕变应变随着含水率的提高而递增, 说明水的作用促进岩石蠕变变形发展。蠕变应变在含水率 1.25% 第 5 级加载下最大, 达 2.21%。

综合图 4 可得, 红砂岩蠕变应变远大于瞬时应变, 表明红砂岩在水岩耦合作用下蠕变效应显著。在港口地基工程中, 岩石地基在水的持续性作用下, 蠕变变形累积, 威胁港口地基工程的长期稳定性, 在地基基础设计中应充分考虑水作用的影响。

2.4 蠕变速率

对图 3 中试验点数据进行一阶求导, 得到蠕变速率曲线(图 5)。

由图 5 可看出, 岩石蠕变速率曲线与蠕变 3 阶段相对应, 首先是蠕变速率递减, 对应衰减蠕变阶段, 接着是蠕变速率在某一值附近小幅度波动, 对应稳定蠕变阶段, 在最后一级加载下, 蠕变速率剧增, 对应加速蠕变阶段。总体上, 在同一含水条件下, 蠕变速率随着加载等级的提升而递

增。衰减蠕变阶段中速率初始值为初始蠕变速率, 加速蠕变阶段中速率最大值为极限加速蠕变速率, 含水率 5.38% 第 3 级加载下的初始蠕变速率和极限加速蠕变速率均最大, 分别达到 $3.01 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $4.92 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 。

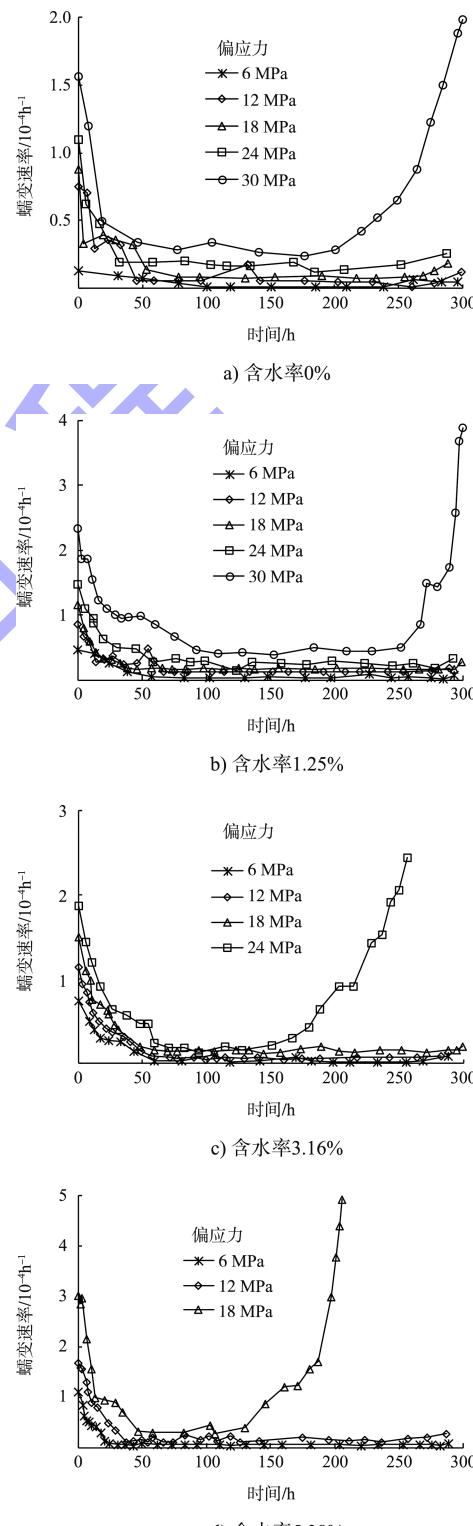
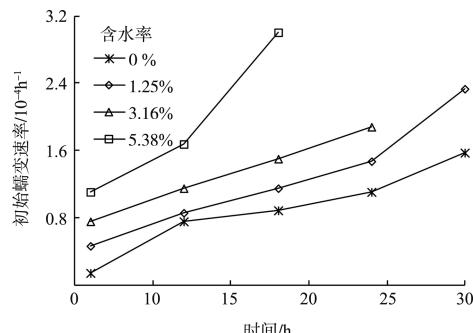
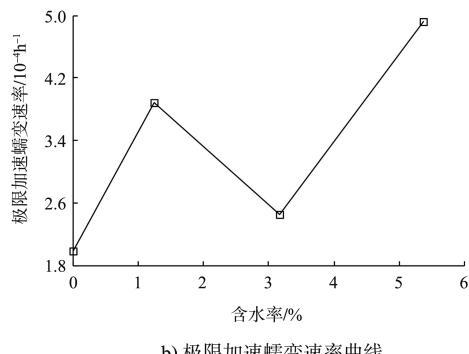


图 5 蠕变速率曲线

统计图 5 中不同含水条件下的初始蠕变速率和极限加速蠕变速率, 绘制对比曲线(图 6)。



a) 初始蠕变速率曲线



b) 极限加速蠕变速率曲线

图 6 不同含水条件下的初始蠕变速率曲线

和极限加速蠕变速率曲线

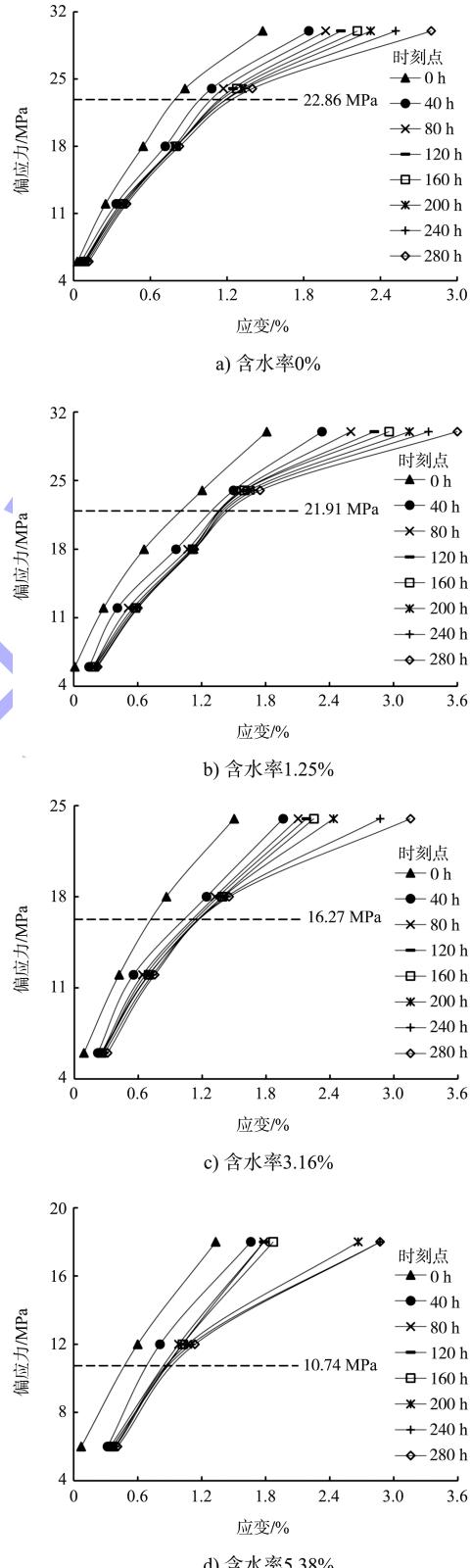
由图 6a) 可看出, 在同一含水条件下, 初始蠕变速率随着偏应力加载等级提升而递增。在同一偏应力加载等级下, 含水率的升高促进初始蠕变速率的增长。

结合图 5 和图 6b) 可知, 极限加速蠕变速率远大于衰减和稳定蠕变阶段的蠕变速率, 最高可达 2 个数量级的差异。含水率 1.25% 下的极限加速蠕变速率大于含水率 3.16% 时, 这是由于前者加载等级为 5 级, 后者仅有 4 级, 除了水的作用, 应力也是影响蠕变速率的重要因素之一。总体上, 含水率的升高对初始和极限加速蠕变速率的增大起到促进作用。

2.5 长期强度

长期强度是地基工程中衡量长期稳定性以及评价强度损失程度的重要指标, 工程建设中须予以重视^[12]。等时偏应力-应变曲线法是求取岩土体材料长期强度的常用方法, 该方法通过择取一定数量的蠕变时刻点的偏应力-应变数据, 绘制曲线

簇并取拐点从而得到长期强度^[13]。择取 0~280 h 共 8 个蠕变时刻点的偏应力-应变数据, 绘制等时偏应力-应变曲线(图 7)。



注: 0 h 时刻点为趋近于 0 h 的某一时刻点。

图 7 等时偏应力-应变曲线

由图 7 可看出, 等时偏应力-应变曲线具有明显的非线性特征, 随着应变的增大, 曲线表现出逐渐靠近应变横轴的趋势。红砂岩在含水率 0%、1.25%、3.16% 和 5.38% 下的长期强度分别为 22.86、21.91、16.27 和 10.74 MPa, 随着含水率的升高, 长期强度随之逐渐降低。在红砂岩常规三轴压缩试验中, 瞬时强度(即破坏偏应力)同样表现出随含水率升高而逐渐递减的规律。含水率从 0% → 1.25%, 1.25% → 3.16% 和 3.16% → 5.38%, 长期和瞬时强度经历了 3 次降低, 为探明红砂岩长期和瞬时强度随含水率升高的降低幅度规律, 计算每一次含水率增高后的强度降幅, 并绘制曲线(图 8)。

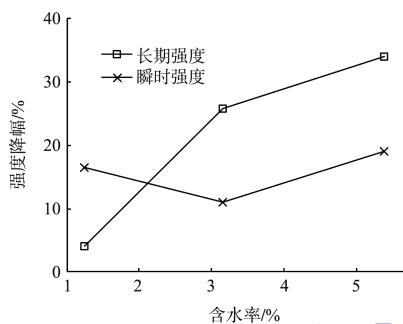


图 8 长期及瞬时强度降幅曲线

由图 8 可看出, 长期强度随含水率升高的降幅呈递增趋势, 而瞬时强度的降幅先减小再增大, 总体上长期强度的降幅更大, 说明水对岩石强度的影响不仅是瞬时的, 更是一种随时间累积的长期作用。水的作用影响岩石瞬时和长期强度, 且长期强度相比瞬时强度存在一定的折减, 长期强度与瞬时强度比值范围为 0.36~0.53。在港口地基工程中, 往往忽略水对岩石的长期作用影响, 设计时应充分考虑参数合理性, 以保证港口地基工程的长期安全及稳定性。

3 结论

1) 红砂岩在水的作用下蠕变效应显著。在同一含水率下, 瞬时和蠕变应变均随着偏应力的提升而

递增, 同一应力条件下, 蠕变应变随着含水率的升高而递增, 水的作用促进岩石蠕变变形发展。

2) 除了水的作用以外, 应力也是影响蠕变速率的重要因素之一。红砂岩在同一含水条件下, 蠕变速率随着加载等级的提升而递增, 初始蠕变速率和极限加速蠕变速率最大分别可达 $3.01 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $4.92 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 。总体上, 含水率的升高对初始和极限加速蠕变速率的增大起到促进作用。

3) 水对岩石强度的影响不仅是瞬时的, 更是一种随时间累积的长期作用。红砂岩在含水率 0%、1.25%、3.16% 和 5.38% 下的长期强度分别为 22.86、21.91、16.27 和 10.74 MPa, 长期强度随含水率的升高而逐渐降低。长期强度相比瞬时强度存在一定的折减, 长期强度与瞬时强度比值范围为 0.36~0.53。

参考文献:

- [1] 王志俭, 殷坤龙, 简文星, 等. 三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 840-847.
- [2] YU C, TANG S, TANG C, et al. The effect of water on the creep behavior of red sandstone[J]. Engineering geology, 2019, 253: 64-74.
- [3] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] 张春阳, 曹平, 汪亦显, 等. 自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1587-1595.
- [5] 巨能攀, 黄海峰, 郑达, 等. 考虑含水率的红层泥岩蠕变特性及改进伯格斯模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 67-74.
- [6] 秦哲, 付厚利, 程卫民, 等. 水岩作用下露天坑边坡岩石蠕变试验分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 85-89.
- [7] 于超云, 唐世斌, 唐春安. 含水率对红砂岩瞬时和蠕变力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 473-481.

(下转第 231 页)