

Research on Permeability Variation of Red Sandstone under Different Stress Levels

Renfeng Wan¹ Ruichuan Tian¹ Xiaolong Wang¹ Fei Gan^{2*}

1. Chongqing Shutong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401120, China
2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

In this paper, the porosity, stress-strain curve and permeability of the same red sandstone subjected to 10%, 30% and 50% yield strength were tested by triaxial testing machine and permeameter. The results show that the porosity of red sandstone increases with the increase of loading stress. Due to the action of water softening and fatigue load, the slope of stress-strain curve of sandstone in the compaction stage decreases significantly, while the slope of stress-strain curve in the compaction stage increases under different stress level loads (there is hardening phenomenon). Meanwhile, the slope of stress-strain curve in the loading stage is significantly greater than that in the unloading stage. In addition, the permeability and stress level presented a quadratic function (the fit is 0.9497), which first decreased and then increased, and the minimum change was found at 10%.

Keywords

stress level; permeability; porosity; red sandstone

不同应力水平下红砂岩渗透率变化规律的研究

万仁锋¹ 田瑞川¹ 王小龙¹ 干飞^{2*}

1. 重庆蜀通岩土工程有限公司, 中国·重庆 401120
2. 贵州大学土木工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要

论文采用三轴试验机和渗透仪测试了经受10%、30%、50%屈服强度的同一红砂岩孔隙率、应力应变曲线、渗透率, 并进行深入分析。研究结果表明: 红砂岩孔隙率随加载应力增加而呈增大趋势, 由于水软化及疲劳荷载作用, 砂岩在压密阶段的应力应变曲线斜率显著降低, 而不同应力水平荷载作用下压密阶段应力应变曲线斜率增大(存在硬化现象), 同时, 加载阶段的应力应变曲线斜率均大于卸载阶段。另外, 渗透率与应力水平呈二次函数(拟合度为0.9497)先减小后增大变化, 在10%时最小。

关键词

应力水平; 渗透率; 孔隙率; 红砂岩

1 引言

岩石是由多种矿物组成的复杂集合体, 内部各种晶粒和微观裂隙随机分布^[1]。在施工乃至建构物正常使用过程中, 岩石各方面性能关乎工程安全以及建筑物的正常使用。隧道开挖中围岩扰动以及运营同样受荷载影响, 而岩石孔隙状态及外部荷载控制器渗透率变化趋势和幅度^[2]。因此, 研究岩石在不同应力水平下的渗透率演化规律有重要意义。

岩石在较高应力状态下多次扰动会快速破坏, 而较低

荷载下则会产生类似疲劳破坏的时效破坏^[3], 红砂岩的渗透率受内部损伤以及应力状态影响^[4]。孙强等^[5]基于统计分布原理探究了岩石渗透率与变形的联系; 马超等^[6]研究发现随着加载应力增加, 渗透率变现为稳定下降和急速上升的两阶段特征; 张培森等^[4,7,8]探究了温度-渗透压以及温度-应力-渗流耦合作用下红砂岩的渗流特性, 并获得了红砂岩围压、渗透率、损伤度三者间的联系; 刘付海^[9]研究了水力耦合作用下红砂岩的蠕变及渗透性演化特征, 而梁劲等^[10]研究发现红砂岩力学参数随渗透压增大而减小, 但随围压呈正相关。可见, 红砂岩渗透性受力学、孔隙结构以及损伤程度等多重因素影响。

论文采用瞬态压力脉冲法(又称瞬态法)测试红砂岩经受屈服强度的10%、30%和50%荷载作用后的渗透率, 并深入分析了红砂岩在不同应力水平下的孔隙率以及加载

【作者简介】万仁锋(1987-), 男, 中国河南信阳人, 硕士, 副高级工程师, 从事岩土工程研究。

【通讯作者】干飞(1987-), 男, 中国贵州贵阳人, 博士, 副教授, 从事岩土力学教学与研究。

和卸载压密阶段应力应变曲线变化特征。探究了渗透率与应力水平之间关系，孔隙率和压密阶段应力应变曲线斜率随应力水平的变化趋势。以期为隧道开挖、桩基工程等评估岩体安全提供有用指导。

2 试验

2.1 试样及实验设备

本试验所用岩样为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的红砂岩，取自山东省沂南县。采用 DSZ-1000 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪（下文简称三轴试验机）进行加卸载，该试验机最大轴力为 1000 kN，最大加载行程和围压分别为 50mm 和 60MPa。并采用 BRS- II 型脉冲孔渗透测定仪测试不同应力水平加载后红砂岩的渗透率；试样及实验设备如图 1 所示。



图 1 实验设备及路径图

2.2 实验过程

为研究不同应力水平下红砂岩渗透率变化规律，进行了以下实验：

①以 0.1mm/min 的速率测得该红砂岩单轴抗压强度为 107.4MPa；②采用 BRS- II 型脉冲孔渗透测定仪测试试样初始渗透率；③用三轴试验机以 0.1mm/min 的速率加载到预定值，保持 5min 后再以 0.1mm/min 的速率卸载；④依次测试试样加载到屈服强度的 10%、30%、50%（既应力水平）情况下的渗透率；试验过程如图 1 所示。

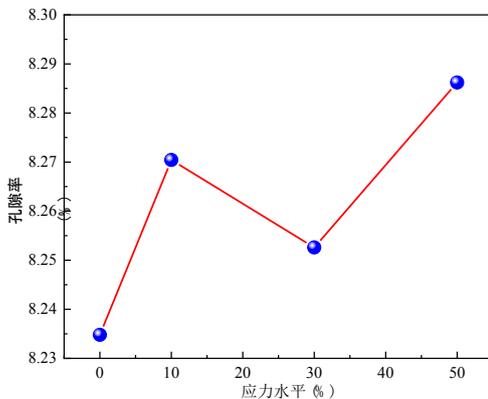


图 2 不同应力水平下应力应变曲线

3 实验结果及分析

3.1 孔隙率变化

论文中假设红砂岩在真空加压饱水下孔隙全部被水充满，则不同应力状态下的孔隙率为：

$$n = \frac{m_w - m_d}{\rho_w V_d} \quad (1)$$

其中， n 为红砂岩孔隙率； m_w 和 m_d 分别为红砂岩完全饱水及烘干状态下质量； ρ_w 为水密度，取 1.0g/cm^3 ； V_d 为试样体积， $V_d=196.35\text{cm}^3$ 。

不同水平应力作用下试样孔隙率变化如图 2 所示，孔隙率总体上随应力增加呈增加趋势，但应力水平为 30% 时相较于 10% 时孔隙率减小，试样在单轴压缩过程中首先经历了孔隙压密阶段，随后才是弹性阶段。当应力水平为 10% 时，试样进入了压密阶段，尽管卸荷后部分微孔隙恢复，但在该阶段已存在不可逆的微损伤，从而导致孔隙率比初始阶段大。当应力为 30% 时，试样已经完全处于弹性阶段，部分微裂隙或者孔隙在力作用下闭合，试样变得更加密实，但试样本身已经存在一定损伤，因而出现孔隙率大于初始状态而小于 10% 应力水平现象。随着应力增加，试样内部损伤劣化更严重，内部萌生更多微裂纹，从而导致了应力水平为 50% 的孔隙率快速增大。总之，随着应力水平增加，孔隙率总体呈增加趋势，10% 和 30% 之间因孔隙压密、闭合而出现孔隙率减小现象。

3.2 应力应变曲线

图 3 为同一试件在不同应力水平下的单轴压缩应力应变曲线，试样每次加载之后都进行强制饱水称重、烘干测试孔隙度。众所周知，水对岩石矿物具有软化作用，加载期间，还受不同比例荷载的疲劳作用，从而出现相同应变对应的应力由大到小为：单轴压缩、50%、30%、10%。我们选取应力水平为 5%-10% 部分的应力应变曲线的斜率，参照割线模量定义进行定量分析不同应力阶段加卸载过程中应力应变变化：

$$\Delta E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

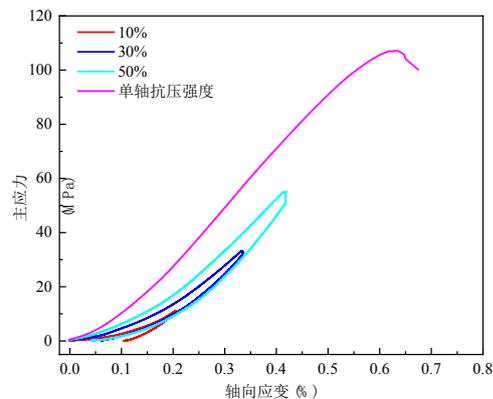


图 3 不同应力水平下应力应变曲线

其中, σ 为应力, 论文中选取加卸载中 5.4MPa~10.7MPa 区域进行计算; ε 为应变; ΔE 为该段斜率, 用来表示不同加载应力水平下对应应力应变曲线变化, 为排除数据的偶然性, 我们选择区域内应力与应变比值的平均值。

加卸载阶段的值如表 1 所示, 单轴压缩试样的应力应变斜率远大于不同水平应力加载后的斜率。可认为在较低应力水平下, 所选择的区域主要位于孔隙压密阶段, 该阶段在水软化作用下, 黏土颗粒之间的粘结性降低, 更容易压缩。在加载阶段, 随着加载次数增加, 压密阶段应力应变曲线斜率不断增大, 而卸载阶段应力应变曲线斜率均小于加载阶段。本实验采用同一个试件进行多级加载, 期间反复饱水烘干, 在一定程度上受疲劳荷载和软化作用, 这样使试样颗粒间更容易变得密实, 加载时在压密阶段出现硬化现象而导致随着加载次数增多应力应变曲线斜率逐渐增大。

表 1 加载及卸载阶段值

| 应力水平 | 值 (GPa) | |
|------|---------|-------|
| | 加载阶段 | 卸载阶段 |
| 单轴压缩 | 23.826 | |
| 10% | 4.478 | 4.159 |
| 30% | 5.506 | 4.308 |
| 50% | 6.653 | 4.181 |

3.3 渗透率

我们采用瞬态法来测量试件渗透率, 并按照公式 (3) 和 (4) 进行计算^[11]:

$$K = \frac{\alpha\mu\beta L}{\left(\frac{1}{V_u} + \frac{1}{V_d}\right)A} \quad (3)$$

其中, K 为岩石渗透率 (渗透系数); μ 为流体动力粘度; β 为流体压缩系数; L 为试样长度; V_u 和 V_d 分别为上下游气室体积, 分别为 $2.199 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 和 $2.102 \times 10^{-5} \text{m}^3$; A 为流体通过试样端面面积; α 为衰减系数, 其可通过上下游压差计算:

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \frac{P_u(t) - P_d(t)}{P_u(0) - P_d(0)} = -\frac{1}{t} \ln \frac{\Delta P(t)}{\Delta P(0)} \quad (4)$$

其中, t 为流体渗透时间; $P_u(t)$ 和 $P_d(t)$ 分别对应时刻上游和下游压力值 ($t=0$ 对应初始时刻), 不同时刻上下游压力差分别为 $\Delta P(t)$ 和 $\Delta P(0)$ 。

试样渗透率由公式 (3) 计算结果如图 4 所示, 试样渗透率随加载应力水平增加呈 U 形变化, 即先减小后增大。进行拟合发现渗透率与应力水平呈二次函数变化 (拟合度为 0.9497), 在 10% 应力水平最小, 随后随应力水平增加而增大。可认为 10% 应力水平下试样颗粒间压密, 试样变得更加密实, 故渗透率比未经加载低。随着加载应力增加, 试样内部产生更多微裂纹, 渗流通道增加, 渗透率快速增大, 并在 30% 应力水平大于初始状态。

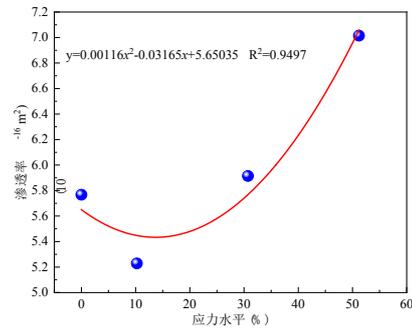


图 4 不同应力水平下应力应变曲线

4 结论

通过对同一红砂岩试件经不同应力水平作用后孔隙率、渗透率并结合应力应变曲线特征进行分析研究, 得出以下结论: ①红砂岩孔隙率随着应力水平增加总体上呈增加趋势。②由于饱水软化及疲劳作用, 不同应力作用下红砂岩应力应变曲线斜率显著降低。但不同应力水平荷载加载过程中的压密阶段出现硬化现象, 即压密阶段应力应变曲线斜率随应力水平增加而增大; 卸载阶段的斜率均小于加载阶段。③渗透率随应力水平增加呈二次函数变化 (拟合度为 0.9497), 先减小后增大, 在 10% 时最小。

参考文献

- [1] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433-450.
- [2] 张金才, 张玉卓. 应力对裂隙岩体渗流影响的研究[J]. 岩土工程学报, 1998(2): 19-22.
- [3] 刘国龙, 陈士海, 石伟民, 等. 多次动态扰动下红砂岩时效变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1917-1924.
- [4] 张培森, 侯季群, 赵成业, 等. 不同围压不同损伤程度红砂岩渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2405-2415.
- [5] 孙强, 朱术云, 张蕊, 等. 岩石应力—应变过程中渗透率变化分析[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(1): 60-63.
- [6] 马超, 邓金根, 蔚宝华, 等. 不同应力水平下煤的渗透率演化规律研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(24): 25-29.
- [7] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1117-1128.
- [8] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 温度—应力—渗流耦合条件下红砂岩渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1957-1974.
- [9] 刘付海. 水压耦合下红砂岩蠕变力学行为及渗透性演化特征研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(6): 17-23.
- [10] 梁劲, 王强, 胡新丽, 等. 渗流—应力耦合下侏罗系红砂岩力学及渗透特性试验研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 52-61.
- [11] Feng R. An optimized transient technique and flow modeling for laboratory permeability measurements of unconventional gas reservoirs with tight structure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017(46): 603-614.